



USS 2021

2021年无人系统高峰论坛

主办单位：国防科技大学

承办单位：北京海鹰科技情报研究所

国防科技大学智能科学学院

协办单位：中国自动化学会无人飞行器自主控制专业委员会

中国自动化学会混合智能专业委员会

中国航空学会制导、导航与控制分会

中国航空学会无人机及微型飞行器分会

中国电子学会智能无人系统分会

北京宇航学会

论文集
PROCEEDINGS

9月24日 中国·长沙

2021年无人系统高峰论坛

论文集

主办单位：国防科技大学

承办单位：北京海鹰科技情报研究所
国防科技大学智能科学学院

协办单位：中国自动化学会无人飞行器自主控制专业委员会
中国自动化学会混合智能专业委员会
中国航空学会制导、导航与控制分会
中国航空学会无人机及微型飞行器分会
中国电子学会智能无人系统分会
北京宇航学会

支持单位：《国防科技》编辑部
《国防科技大学学报》编辑部

秘书处：《无人系统技术》编辑部

2021年9月24日 中国·长沙

专家委员会

顾 问

李德毅 封锡盛 徐德民 刘永才 樊邦奎 陈 杰 王耀南
魏毅寅 向锦武 王飞跃 翁志黔 陶征宇 徐忠新

主 任

沈林成

副主任

付梦印 林 扬 吴利荣

2021年论坛主席

吴美平

委员（按姓氏拼音排序）

陈 强	陈卫卫	陈自力	邓宏彬	丁勇飞	段海滨	符文星
傅秉忠	高 遐	谷满仓	韩 玮	何 斌	郭继峰	何 敏
黄大庆	黄国江	姜 梁	雷 菁	冷劲松	李东光	李风雷
李屹东	李 原	林德福	罗云虎	马洪忠	马晓平	牛轶峰
潘 泉	任 章	苏 波	苏玉民	孙智孝	王 伶	王宏伦
王俊彪	王树新	王养柱	王英勋	王长青	吴家锋	谢 平
谢少荣	徐 昕	薛建儒	严浙平	于传强	张才文	张 涛
朱纪洪	朱平云	庄学彬				

目 次

无人系统平台与技术研究

从基于深度学习的目标检测框架分析小目标检测的发展	1
周河轲, 马兆伟, 牛轶峰, 王钟鸣	
基于PID原理的双机链翼无人机姿态控制	11
周 伟, 马培洋, 周睿孙, 赵 媛, 范珂华	
面向低时延业务的无人机自组织网络接入协议研究	18
孙士勇, 归 琳, 朗修璞, 朱世超	
一种自适应构型无人高超声速飞行器布局设计	24
詹 韧, 王 玲, 张 燕	
人-智能体协作系统的信任校准	31
刘 伟, 武 钰	
面向侦察任务的无人机机载感知传感器配置与融合综述	41
王钟鸣, 姚文臣, 马兆伟, 林博森, 牛轶峰	
基于深度卷积生成对抗神经网络的空战态势评估	48
韩 博, 周一鹏, 钱 程, 赵 林, 张国雯	
航天器再入测量无人机集群自组织控制方法	55
刘伯阳, 王 军	
无人机全自动着舰系统及卫星引导架构研究	63
苏大林, 卢元杰, 杨 亮, 葛 俊	
基于强化学习的多无人机任务分配方法研究	76
代 琪, 何 兵, 李 明, 张 杰	
基于最大化公平性的动态无人机圆轨迹优化	82
陈彦成, 周新杰, 冯小康	
基于渗流理论的分布式无人集群作战能力研究	89
常 强, 杨 帅, 杨绍卿, 管绍华, 左 源, 涂 龙, 邓宝松	
动态翱翔综述: 固定翼无人机航时拓展新途径	94
刘多能, 卢风顺, 杨添琦, 郝 瑞, 秦诗牧	
基于DoDAF的蜂群无人机远海作战概念描述	101
张庆杰, 陈 彪	
基于生态公共品博弈的智能化进程中在轨卫星闲置情况演化建模方法	107
詹 俊, 张万鹏, 罗俊仁, 陈诗凯	
球形侦察机器人无线驱动控制及图像传输设计	113
徐达圣, 洪华杰, 侯洋洋, 曾 喆	
挠性航天器姿轨一体化动力学建模	118
朱卫兵, 张宪亮, 吴限德, 宋 婷	

天基ADS-B发展综述	122
房屹光, 张翔	
轮毂电机驱动系统设计研究	127
马亚青, 田德文, 邢彦斌	
基于改进 PointPillars 的快速准确的三维目标检测算法	133
何新卫, 闫阿泽, 陈龙, 侯鹏程, 董丹丹, 马雅婷	
地基雷达无人化系统设计	139
张景东, 汪润生, 赵明旭, 张荣斌	
基于元任务字典的无人集群作战任务分解技术研究	143
邱江芬, 张勇, 李晓琴, 王亚儒, 马汝冰	
靶机加装交叉眼干扰设备方法研究	148
李洪涛	

无人系统应用及教育实践

外军人工智能应用现状及发展前景分析	152
姜广顺, 韩志强, 王芳	
外军地面无人后勤发展现状及趋势研究	156
陈姝, 赵媛媛, 田季红	
激光致盲技术在反无人机中的应用研究	162
马长正, 刘大鹏, 石亮, 谷风强	
无人化农业发展综述	166
刘鑫鑫, 于亚南, 邓军, 张贇	
关于无人潜航器预防人为打捞破坏的思考	170
曾朋朋, 金海波, 袁龙, 董忠亮	
陆军无人作战力量运用研究	175
王瑞	
新工科背景下综合实践型课程建设研究—以“无人车综合实践”课程为例	179
李峻翔, 牛轶峰, 李健, 刘大学	
新时期军事无人机人才培养研究	183
陈伟, 陈蕾, 何昀, 张川	
着眼未来的无人系统综合化运用实践探索	187
王楠, 牛轶峰, 洪华杰, 邢堃盛	

长摘要分享

水下地形匹配导航初始定位研究	191
王汝鹏, 李晔, 陈云赛, 马腾, 丛正, 贡雨森	
基于主动变形蜂窝和形状记忆复合材料的折叠翼尖结构	194
孙健, 杜林喆, Fabrizio Scarpa, 刘彦菊, 冷劲松	
无人机系统发展阶段和智能化趋势	195
喻煌超, 王祥科, 牛轶峰	

从基于深度学习的目标检测框架分析 小目标检测的发展

周河轲, 马兆伟, 牛轶峰, 王钟鸣

(国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 目标检测是计算机视觉领域基础问题, 基于深度学习的目标检测算法极大的提高了目标检测的准确性, 是目前主流的检测算法。小目标检测由于目标占比和像素较少, 是目标检测领域中一个极大的挑战。本文通过图像预处理、特征提取、特征组合、算法设计四个部分分析了基于深度学习的目标检测算法的构成, 从正则化、网络层、损失函数、特征提取网络、特征组合等方面详细介绍了基于深度学习的目标检测算法近年来的发展方向。然后本文根据小目标检测的不同解决思路, 将小目标检测分为多尺度中对小目标的检测和单尺度中对小目标的检测两个部分, 对小目标检测的发展方向进行分析并将其对应到基于深度学习的目标检测框架中, 从全局角度分析了小目标检测的解决思路。本文最后对现有的小目标检测算法进行总结分析并讨论了小目标检测未来的发展方向。

关键词: 目标检测; 深度学习; 小目标检测; 检测框架; 算法设计; 特征提取

Survey on Small Object Detection from the Object Detection Framework Based on Deep learning

ZHOU Helu, MA Zhaowei, NIU Yifeng, WANG Zhongming

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Hunan 410073, China)

Abstract: Object detection is a basic problem in the field of computer vision. Small object detection is a great challenge in the field of object detection due to the small object size. This article introduces the development of small object detection algorithms from the perspective of a deep learning-based object detection framework. This article analyzes the basic framework of the object detection algorithm based on deep learning through image preprocessing, feature extraction, feature combination, and algorithm design. Then, the improvement of detection algorithms based on deep learning is introduced in detail from the regularization, normalization layer, activation layer, loss function, feature extraction network design, feature combination, algorithm design, etc. Small object detection algorithms can be divided into two categories, one is the detection of small objects in multiple scales, and the other is the detection of small objects in single scales. The development direction of small object detection is analyzed and corresponding to the object detection framework based on deep learning. At the end of this article, we summarize and analyze the existing small object detection algorithms and discuss the future development direction of small object detection.

Key words: Object Detection; Deep Learning; Small Object Detection; Detection Framework; Algorithm Design; Feature Extraction

1 引言

随着信息化的发展,目标检测的重要性渐渐突出,可以广泛的应用于视频监控、自主导航、人机交互

互等领域^[1]。目前的目标检测算法大多基于深度学习,通过卷积神经网络来自动学习目标特征并分类。

基于深度学习的目标检测算法分为训练和测

试两个阶段,涉及训练策略、推断策略、目标提取、特征选择等多方面的内容,设计方法较为复杂。经过多年发展,基于深度学习的目标检测算法根据不同的设计理念出现了多种不同类型的算法,如 you only look once (YOLO)^[2]和 region based convolutional neural network (RCNN)^[3]等。检测算法一般都由特定的模块构成,基于这些模块进行改进。

在无人机对地或对空目标检测、遥感图像检测

等领域,由于拍摄距离较远,目标在图像中所占比例较小且像素数较低,属于小目标检测。小目标检测是目前目标检测领域难点,目前针对通用目标检测的算法频出,但是针对小目标检测的研究较少,C. Chen 等人在2016年设计了一个小目标检测数据集并提出相关的评估标准^[4],改进 RCNN 算法进行小目标检测。W. Zhang 等人在2018年使用反卷积 RCNN 算法在遥感图像中检测小目标^[5]。

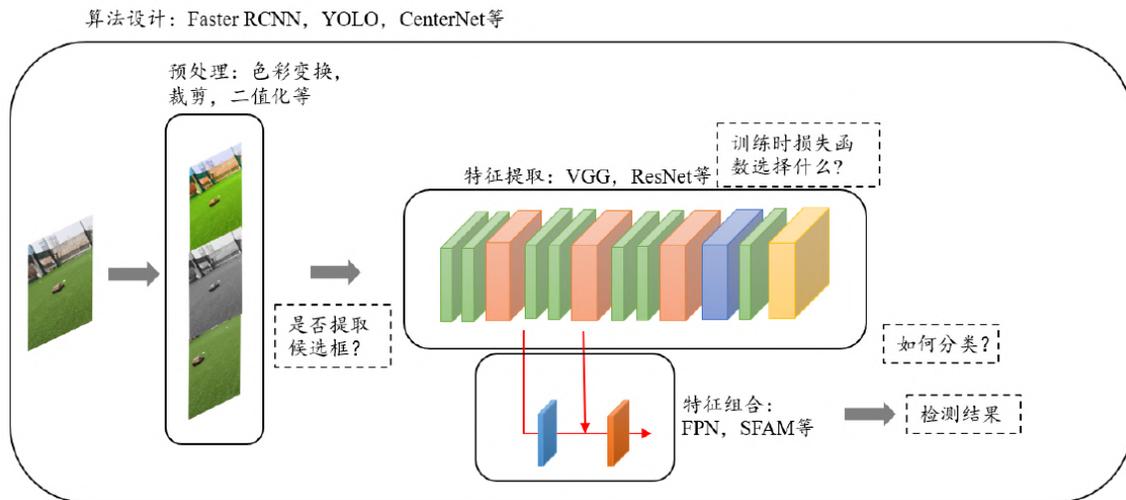


Fig. 1 Framework of object detection algorithm

小目标检测方法主要存在两个难点,一是小目标所含像素点难以准确的表达物体特征。二是小目标容易受到噪声影响,在背景较为复杂或成像条件较差时,容易和背景混为一体,难以识别。目前来看,小目标检测尚不能达到理想的效果,需要得到进一步的关注。

小目标是指在图像中所占像素点较少的目标。小目标检测属于目标检测,两者的检测模块发展具有一定的共性,目标检测模块的性能提升同样会提升小目标检测的效果。小目标检测是在目标检测的基础上根据小目标的特性进行一定的改动。因此本文先分析了基于深度学习的目标检测框架的构成,然后基于目标检测框架讨论小目标检测的主要研究思路并分析发展现状,接下来介绍基于深度学习的目标检测各个模块的算法发展,这些改进同样可用于小目标检测,最后分析了小目标未来的发展方向。

2 目标检测框架

基于深度学习的目标检测算法主要包括四个过程:

一是输入图像的预处理过程,对输入图像进行裁剪、放缩、色彩变换等过程,确定最终进入网络的数据形式,预处理过程的主要目的是扩充数据避免模型过拟合以及增强图像特征或突出特定目标来提高检测效率。

二是特征提取过程,将原始数据输入由卷积层、池化层、激活层等构成的特征提取网络,如 Visual Geometry Group Network (VGGNet)^[6], Residual Neural Network (ResNet)^[7], Darknet53^[8], Squeeze-and-Excitation Networks (SENet)^[9]等网络结构,最终获得从浅到深多层特征数据,特征提取是目标检测中最重要的一个步骤,获得了能准确表示物体的特征,才能有效的识别并定位

物体。

三是特征组合过程,获得特征数据之后,需要利用特征数据进行分类定位,如果只用顶层特征进行分类,浅层特征的信息就会被忽略。底层特征有利于识别,高层特征有利于定位,为了更好的利用特征信息,会在特征提取网络之外增加一些网络层,如特征金字塔网络(feature pyramid networks, FPN)^[10],尺度特征聚合模块(scale-wise feature aggregation module, SFAM)^[11]等,利用不同层次的特征进行检测。

四是检测算法设计过程,基于深度学习的目标检测属于强监督学习,分为训练和推断两个阶段,不同的算法在训练和推断时有不同的设计方法,如分类和定位是分开进行还是同时进行、分类器如何选择、损失函数如何设计、训练网络和测试网络的区别等问题,代表性算法有双步检测器RCNN,单步检测器YOLO,无锚框检测器CenterNet^[12]等。基于深度学习的目标检测算法结构如图1所示。目标检测算法大多从这些方面进行改进,提高检测效果。

3 小目标检测

小目标检测在目标检测领域中一直是一个难题。目标检测大多数方法都是针对多尺度目标来进行检测,在检测算法的训练过程中,模型很容易关注大尺度物体而忽略小尺度物体,因此在目标检测算法中对小目标的检测效果较差。目前小目标检测算法大多是在目标检测算法上继续改进,使检测算法更适用于小目标。

小目标检测的难点主要体现在图像数据质量较低,目标在视野中的面积较小。根据解决思路的不同可将小目标检测问题分为两类。

第一类是在多尺度检测中提高对小目标的检测效率,由于神经网络对尺度的适应性较差且小目标在多尺度图像中样本较少,模型就会较多的关注大尺度物体,忽略了对小目标的检测。这类检测方法的主要目的是同时检测出图像中各个尺度的目标。主要解决思路是使模型更多的关注小尺度物体,解决方法包括多尺度检测、数据扩充、改变训练策略等。

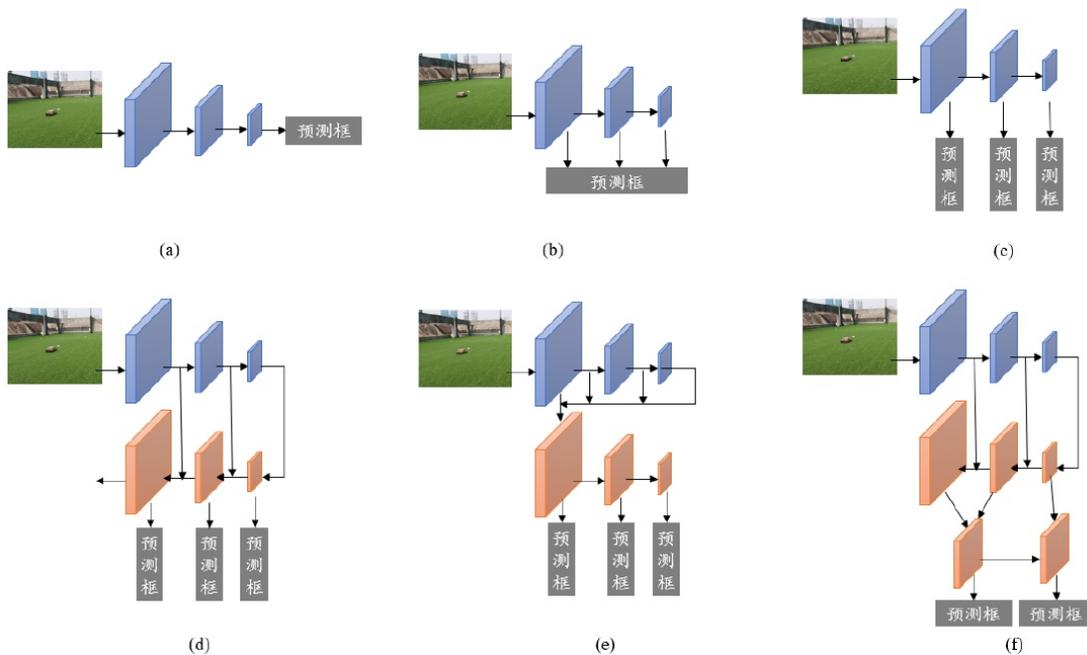


图2 多尺度检测

Fig. 2 Multi-scale detection

第二类是只考虑对小目标尺度物体的检测,由于小目标的像素点极少,很难识别出小目标的特

征,在检测时具有很大的挑战性,这类检测方法主要目的是图像中目标尺寸都较小时进行准确检测。

主要解决思路是增加小目标的有效信息,解决方法包括设计浅层网络、利用上下文信息、生成超分辨率图像等。

3.1 多尺度中对小目标的检测

多尺度中对小目标的检测主要面临的任务对象是在图像中存在汽车,自行车等尺寸较大的目标,也存在铅笔,乒乓球等小型目标的情况。在这种情况下,小目标出现频率较低,适用于通用物体的检测模型对小目标的检测效果不是很理想。目前主要从三个方面进行改进。

3.1.1 多尺度检测

多尺度检测主要目的是提高模型对不同尺寸的目标的适应性,包括基于图像的方法和基于特征的方法。多尺度检测主要在特征组合阶段完成。基于图像的方法是对图片本身进行处理,如先缩放图片,然后在不同尺度的图片上生成不同大小的检测框检测目标,这种方法在目标检测的预处理阶段进行改进。基于特征的方法是在生成的特征网络上进行处理,由于不同层次的特征图具有不同的分辨率,因此可以利用不同层次的特征图检测多尺度物体,通过多个特征图的组合可以实现信息互补,提高对小目标的检测能力。这种方法对各个尺度的目标都有利,发展较为丰富。

在目标检测算法发展初期,认为最后一层获得的特征最具有代表性,因此大多只利用了特征图最顶层的特征,如 Faster RCNN^[13], Spatial Pyramid Pooling(SPPNet)^[14]等。它们在特征图顶层生成不同比例和尺度的检测框来检测不同大小的物体,如图 2(a)所示。

一般来说,特征图底层的信息细节信息比较丰富,有利于分类,特征图高层的语义信息较为丰富,有利于定位。为了充分发挥特征图的作用,可以利用不同深度特征层的特征来检测目标。如图 2(b)所示,可以将多个特征图的信息融合到一起进行检测。2016年,S. Bell等人提出 ION^[15],先提取可能的检测框,然后不同层次的特征集成起来做最终的检测定位。

考虑到不同深度的特征图具有不同的分辨率,也可以在不同特征图分别进行检测,有利于检测不同大小的物体。2016年,W. Liu等人提出 Single Shot MultiBox Detector(SSD)^[16]算法,在不同层次的

特征图上用不同层次的比例和规模的检测框来检测物体,如图 2(c)所示。

2017年,Lin等人提出了一种特征金字塔网络 FPN,如图 2(d)所示。该网络自顶向下融合特征,高层特征通过上采样和底层特征融合,并且生成多个尺度的特征层,在不同尺度的特征层分别进行检测,FPN在不改变其他方法的前提下,显著提高了目标检测的精度。2017年,Z. Li和F. Zhou将 SSD和 FPN算法结合起来提出了 Feature Fusion Single Shot Multibox detector(FSSD)算法^[17],在 SSD的基础上添加了一个特征融合模块生成一个融合的特征层,再通过下采样生成特征金字塔进行检测,如图 2(e)所示。2019年,Q. Zhao等人在 M2Det^[11]网络中对特征金字塔进行修改提出 SFAM,以获得更好的特征。

传统的 FPN 是自上向下融合,S. Liu等人在 2018年设计的 Path Aggregation Network(PAN)^[18]首次提出了双向融合模型,即结合自下而上和自上而下融合,如图 2(f)所示。PAN证明了双向融合的有效性,但它的双向融合较为简单,之后又陆续提出其他的双向融合模型。2019年,S. Liu等人提出了 Adaptively Spatial Feature Fusion(ASFF)^[19]算法,在 YOLO v3的基础上改进 FPN,将 YOLO v3的三个层次的特征图再次融合,并利用注意力机制学习每个通道的权重。2019年,G. Ghiasi等人通过 Neural Architecture Search(NAS)生成一个较为稀疏的连接方式来获得更好的 FPN,命名为 NAS-FPN^[20],这种算法计算量比 PAN低,但效果不如 PAN好。2020年,M. Tan等人在 EfficientDet提出 Weighted Bi-directional Feature Pyramid Network(BiFPN)^[21],BiFPN采纳了 PAN的思想进行改进,在 EfficientDet中相比 FPN提高了4个百分点,但是计算量降低。2020年,S. Qiao等人提出 Recursive-FPN^[22],将 FPN的输出重新输入 backbone进行二次循环,是目前 FPN系列算法中最有效的算法。

3.1.2 数据扩充

数据扩充方法主要通过提高小目标在图像中的出现频率来提高对小目标的检测效果。数据扩充在目标检测的预处理阶段进行改进。2019年,M. Kisantal等人提出了针对小目标的数据增强方法^[23],他们认为小目标检测存在两个问题,一是数

据集中小目标的样本较少,二是小目标覆盖区域小,缺乏多样性,因此他们提出过采样和目标重复粘贴来提高小目标的检测能力。

3.1.3 改变训练策略

改变训练策略主要思路是在训练过程中提高小目标对训练方向的影响。这种思路主要是算法设计时采用的一些设计方法。2018年,B. Singh等人提出了 Scale Normalization for Image Pyramids (SNIP)^[24]算法,选择性的反向传播不同大小物体的梯度,分别训练和测试不同分辨率的图像。B. Singh等人随后对 SNIP 算法进行改进提出了 SNIPER 算法^[25],通过在低分辨率区域抽样来加速网络。2018年,Y. Kim等人提出 Scale Aware Network (SAN)^[26],将不同尺度的特征映射到一个尺度不变的空间,提高了对小目标的检测能力。

3.2 单尺度中对小目标的检测

单尺度中对小目标的检测主要考虑视野中多数都是小目标的情况。如无人机航拍图像和遥感图像中,大多数目标的尺寸都很小。在这种情况下,主要难点是目标像素点很少。如何充分利用像素点的信息来检测小目标是单尺度中对小目标检测的重点。单尺度中对小目标的检测主要采用下面三个方法。

3.2.1 设计浅层网络

小物体更容易被感受野较小的检测器预测。考虑到深层网络容易丢失小目标的细节信息,可以直接设计浅层网络检测小目标,既能节省计算资源,又能获得更有效的小目标的特征信息。Sommer等提出了一种非常浅的网络^[27],只有四个卷积层和三个全连接层,用于检测航拍图像中的目标。设计浅层网络主要从特征提取过程进行改进,更快更好的获得小目标的特征信息。

3.2.2 利用上下文信息

视觉对象一般会出现在特定的场景之中,由于小目标缺乏有效信息,所以可以利用目标的上下文信息来帮助定位小目标。上下文信息包括局部上下文信息,全局上下文信息,上下文交互信息等^[28]。局部上下文学习目标周围的信息,S. Gidaris和N. Komodakis在2015年提出 Multi-region CNN (MRCNN)^[29],从目标区域中提取不同的区域的特征进行集成。全局上下文学习整个图片的全局信

息,S. Bell等人提出 ION,通过空间递归神经网络从四个方向编码上下文信息来提高对小目标的检测能力。上下文交互传递目标的交互信息,2018年,Y. Liu等人提出 Structure Inference Net (SIN)^[30],SIN把目标检测当成一个图结构推断问题,目标被当作图中的一个节点,不同目标的关系被当作边,改善了小目标检测的性能,这种方法一般从特征提取和特征组合两个部分进行改进。

3.2.3 生成超分辨率图像

生成超分辨率图像得方法一般是通过生成对抗网络(Generative Adversarial Networks, GAN)提高小目标的分辨率。基于生成对抗网络得方法是利用生成器用来增强小对象的分辨率,利用判别器判断生成图片的好坏并进行目标分类和回归,最后获得最够优秀的超分辨率图像生成器。2017年,J. Li等人提出一种新型感知 GAN 网络^[31],这种网络把目标分为大小两类,用小目标训练生成器,用大目标训练判别器的感知分支,用所有目标一起训练判别器的对抗分支,最终达到一个最优的检测平衡点。2018年,Y. Bai等人提出 Multi-Task GAN (MTGAN)^[32],这是一种端到端的生成对抗网络,先利用通用的目标检测器生成候选框,然后将小的模糊图像上采样成精细图像,最后优化分类和定位结果。2019年,Y. Chen等人提出 Classification-oriented Super-Resolution GAN (CSRGAN),引入分类损失,提高了无人机对地车辆检测检测效果^[33]。生成超分辨率的方法类似于数据扩充的方法,通过更改检测网络的框架设计来提高小目标的像素数,重新进行检测或分类。

4 目标检测模块发展

近年来,基于深度学习的检测算法的改进都集中在正则化、归一化层、激活层、损失函数、特征提取网络设计、特征组合、算法设计等方面。正则化主要包括两部分,数据扩充和 DropOut^[34],数据扩充属于预处理阶段,DropOut是特征提取阶段在训练过程中使用的方法。归一化层和激活层是特征提取阶段的网络层。损失函数是检测算法训练时的目标函数,不同的检测算法根据不同的设计有不同类型的损失函数。特征提取网络用来进行特征提取,由不同的网络层堆叠而成。特征组合决定最后

用于分类定位的特征,在多尺度检测中已经详细介绍。算法设计整合各个模块决定检测算法的运行流程。

4.1 正则化

正则化的目的是避免模型过拟合。神经网络的常用的正则化主要包括两种,一是数据扩充,在训练集不足时提高输入数据的多样性;二是DropOut系列方法,在训练时随机将神经元置零,提高模型泛化性。

4.1.1 数据扩充

数据扩充在训练阶段对图像进行变换,通过增加不同的图像样本使模型适应目标的各种形态,提高模型的鲁棒性。常见的数据扩充方法包括图片的翻转,旋转,缩放,裁剪,移位,色彩变换等。

2017年,H. Zhang等人在图像分类任务中提出MixUp^[35]方法,将两张样本按照一定的比例混合,最终的分类结果也按照比例分配。2019年,R. Geirhos等人使用GAN改变图像纹理来进行数据增强^[36],使模型更多的关注目标的轮廓信息而不是纹理特征。2019年,S. Yun等人提出CutMix^[37],将图像中的一部分像素随机用训练集中的其他数据填充,最终的分类结果按照一定比例分配。2020年,A. Bochkovskiy提出Mosaic和SAT数据增强方法^[8],Mosaic随机将四张图片合成一张图片送入网络进行检测,SAT利用神经网络改变图像后再进行检测,提高了检测效果。

4.1.2 DropOut

2014年,Srivastava和Hinton对DropOut算法进行了完整的分析,DropOut算法通过随机将神经网络中的神经元置0,可以在每次训练时都训练不同神经元,通过减少参数避免了过拟合。该算法一般在全连接层中引入,但是当模型不稳定时,DropOut可能会使模型发散。2015年,J. Tompson等人在论文中提出了一种被称为SpatialDropOut的方法^[38],该方法随机将特征的某几个维度置0。2018年,G. Ghiasi针对卷积层的特点采用DropBlock^[39]来进行正则化,即随机将卷积神经网络中的某一区域的神经元全部置0,可以在卷积层中引入DropOut。

4.2 归一化层和激活层

4.2.1 归一化层

归一化层是现在的神经网络中经常出现的一

类网络层数。在没有归一化之前,神经网络每次梯度更新都会引起特征分布的变化,使深度网络不得不适应输入分布的变化,使模型收敛变慢,归一化层通过归一化均值和方差加速模型训练过程,并能在一定程度上避免过拟合。

2015年,S. Ioffe和C. Szegedy提出批归一化(batch normalization, BN)方法^[40]来对数据进行规范化,使得每层特征的分布均值为0,方差为1。此外,BN还引入了两个可学习的参数来恢复数据本身的表达能力。由于BN在训练时是对随机选取的一批数据进行归一化,相当于每次训练时的数据都不同,避免了模型的过拟合。2019年,S. Singh和S. Krishnan提出filter response normalization (FRN)算法^[41],FRN在宽和高维度上进行归一化,即对每个样本的通道单独进行归一化,在训练时不依赖于batch。由于BN过于依赖batch,所以当batch过小时模型效果会很差。2020年,Z. Yao等人针对这一问题提出Cross-iteration BN算法^[42],它将前几次迭代的BN参数保存起来,当前的BN参数由当前batch的数据求出的BN参数和前几次的BN参数共同推算得出。

4.2.2 激活层

激活层一般位于卷积层和归一化层之后,由于卷积层和归一化层都是线性运算,多层网络叠加之后输出的依然是线性结果,这种情况下增加网络层数对模型性能的提高没有帮助。引入激活层的目的是引入非线性函数,增强模型的表达能力。

最早用于神经网络的激活函数是sigmoid函数,但是该函数在输入趋近无穷时,梯度变化很小,容易导致神经网络梯度饱和。2010年,Nair和Hinton引入ReLU函数^[43]解决了梯度消失问题并节省计算量,但ReLU的输入不是零均值的,小于0时会进入死区。Ramachandran等人在同年提出Swish激活函数^[44],该函数具有平滑,非单调,无上界,有下界的特点,在深层网络中的表现也优于ReLU函数。2019年,Misra设计了Mish激活函数^[45],相比于其他激活函数更加平滑,在大多数网络中都提高了检测准确率。

4.3 损失函数

损失函数是神经网络训练时的目标,决定了神经网络的收敛方向。损失函数用来估计模型的预

测值和真实值之间的偏差,对于目标检测任务,一般损失值包括目标的位置损失和目标的类别损失。

位置损失函数一般采用均方误差(Mean Square Error, MSE)。在基于矩形先验框的检测方法中,通过计算检测结果的四个坐标(中心点位置和长宽)和真实目标的四个坐标的差的平方和来计算误差。2016年, J. Yu 在论文中首次提出了 intersection over union (IoU) 损失^[46],将目标的四个位置坐标的损失当成一个变量进行处理,更能反映检测框和真实框的重叠程度。IoU 计算检测框和真实框重叠的面积占检测框和真实框总面积的比例,当两者完全重叠时, IoU 为 1。2019年, H. Rezatofighi 提出了 GIoU 损失^[47],在 IOU 的基础上增加了损失项,使其更能反映检测值和真实值的接近程度。2020年, Z. Zheng 等人又提出了 DIoU 和 CIoU^[48],修改了 IoU 的惩罚项,取得更好的效果。

分类损失函数一般采用交叉熵损失(Cross Entropy Loss)。交叉熵衡量分类结果的不确定性,分类结果越好,不确定性越低,熵就越小,反之则越大。2017年, Lin 等人在 RetinaNet 网络中对交叉熵损失函数进行改进提出 Focal Loss^[49],主要思路是降低置信度高的样本的损失值,使模型更多的训练难以分类的样本。

4.4 特征提取网络

损失函数是特征提取网络是神经网络的核心部分,特征提取网络的设计决定了从图像中提取的特征的好坏。在 ImageNet 大赛中,提出过很多优秀的分类网络,如 VGG、Resnet,已成为目前大多数检测算法的基础框架。

2012年, A. Krizhevsky 等人提出 AlexNet^[50] 网络并在 ImageNet 大赛上夺冠,且成绩远超第二名,从此神经网络重新进入人们的视线。AlexNet 包括五个卷积层和三个全连接层,使用 ReLU 作为激活函数并首次采用了 Dropout 抑制过拟合。2014年, M. Lin 设计了一种 Network in Network (NIN) 网络结构^[51],在网络中设计了 Multi Layer Perception (MLP) 卷积层和全局平均池化(global average pooling, GAP),相比于 Alexnet 参数减小了 10 倍。Simonyan 和 Zisserman 提出了 VGG 网络,证明了堆积相同形状的卷积块能取得不错的效果,在 ILSVRC14 排名第二。VGG 网络包括 16 层和 19 层两个结构,它使

用了更小的卷积核和更深的层数,和 AlexNet 相比取得了更好的效果。2017年, J. Hu 等人提出 SENet,引入注意力机制(Squeeze-and-Excitation, SE) 模块,通过平均池化层在空间层面压缩特征图,然后学习每个通道的权重,突出更重要的通道。2018年, Woo 等人提出 Convolutional Block Attention Module (CBAM)^[52],它包括通道注意力模块(Channel Attention Module, CAM)和空间注意力模块(Spatial Attention Module, SAM)两个子模块。CAM 在 SE 的基础上多了一个并行的最大池化层, SAM 的输入是 CAM 的输出,它学习空间层面的权重,突出更重要的位置。

除了顺序堆叠卷积层,池化层等网络结构来设计神经网络,在特征提取网络中,还可以引入跳跃层,将互不相邻的特征层联系起来输入之后的网络层获得更有效的特征。2016年, K. He 等人引入残差模块设计了 ResNet 网络结构。在 ResNet 出现之前,随着网络层数的加深,网络的性能会逐渐下降,因此 ResNet 加入恒等映射,避免了信号在传递过程中失真,在更深的网络中取得了更好的效果。2017年, G. Huang 等人提出了 DenseNet^[53], DenseNet 由 Dense Block 和 Transition Layer 构成, Dense Block 每一层的输入都是前面所有层的输出,通过层和层的直接连接使特征传递更加有效, Transition Layer 用来连接相邻的 Dense Block 模块。2020年, C. Wang 基于 DenseNet 提出了 Cross Stage Partial Network (CSPNet)^[54], CSPNet 将 Dense Block 最浅层的特征一分为二,一半进入 Dense Block,另一半直接与 Dense Block 的输出相连。CSPNet 加强了 CNN 的学习能力,降低了计算成本并提高了检测精度。

4.5 算法设计

利用 R. Girshick 在 2014 年提出 RCNN^[3] 算法,是目标检测领域第一个双步检测器。双步检测器首先提取出可能存在的目标位置,然后再进行分类定位。RCNN 算法首先利用选择性搜索生成候选区域,再利用卷积神经网络提取特征,然后利用 SVM 分类器判断属于哪一类,最后进行坐标修正。K. He 等人提出了 Spatial Pyramid Pooling Networks (SPPNet)^[14] 方法保证传入到全连接层的输入特征尺寸固定。2015年, S. Ren 等人提出了 Faster RCNN 算法^[13],主要包括特征提取网络、RPN 网络、

ROI提取层、分类四个关键模块。

2015年, J. Redmon等人提出了YOLO算法^[2], 是目标检测领域第一个单步检测器。单步检测器同时完成分类和检测。YOLO的结构是卷积层、池化层等最后加了两层全连接, 使输入图片经过神经网络的变换得到一个输出向量, 输出向量包含图片中目标所有可能的位置信息和分类信息以及置信度信息。2018年, YOLO的作者提出了YOLO v3^[55], 借鉴了一些现有的思想提高了检测能力。2020年, A. Bochkovskiy等人提出YOLO v4, 融合了近年来目标检测的最先进的优化手段, 提出Mosaic、SAT、CmBN等改进方法, 在COCO数据集上AP比YOLO v3高了10个百分点。

YOLO最早不需要预先设定检测框的形状, 是Anchor-Free的检测方法, 在YOLO v2之后为了更好的预测检测框的形状引入先验框, 变成了Anchor-Based的检测方法。Anchor-Free类算法不需要设置先验框, 避免了正负样本失衡的问题, 这类算法也衍生出很多的设计思路。L. Hei等人在2018年提出CornerNet^[56], 受关键点估计的启发, 利用左上和右下两个关键点进行预测, 选择Hourglass作为特征提取网络, 后跟两个预测模块分别预测两个关键点。2019年, L. Hei等人在CornerNet的基础上提出CenterNet^[12], 只预测中心点的位置, 使模型利用目标中心位置的特征, 获得了更好的效果。

5 结论

目标检测算法精度的提高必定会使小目标检测算法的精度获得提高, 但小目标检测由于其特殊性, 需要根据其特点对目标检测框架进行修改来获得更加准确的检测结果。本文首先介绍了基于深度学习的目标检测算法的组成结构, 然后分两部分介绍小目标检测的主要发展方向并将相关方法对应到目标检测算法框架中, 最后分析了基于深度学习的目标检测算法主要模块的发展方向。

目前小目标检测在多尺度检测、利用上下文信息和生成超分辨率图像方面发展较多, 也都取得了不错的效果。基于数据增强、浅层网络的小目标检测发展较少, 可进一步关注。目前有算法将Transformer引入目标检测领域, Transformer可以提高模型的注意力, 使模型聚焦于对小目标的检测,

可能会成为下一步的研究热点。

虽然针对小目标检测已经提出了多种检测方法, 但是尚不能满足应用要求。小目标检测的主要发展重点有三个方面: 提高检测精度、缩短检测时间、提高应用价值。

1) 提高检测精度。代表小目标的像素点太少, 不能准确的表示物体信息, 导致小目标检测的精度很难提高。为了提高小目标检测精度就必须需要增加小目标的信息。在算法层面可以利用GAN恢复高分辨率图像, 也可以利用上下文的信息帮助检测。在硬件层面可以利用质量更好的相机生成高分辨率的图片, 也可以利用多种传感器, 如红外相机, 高光谱相机等获得更丰富的物体信息。

2) 缩短检测时间。基于深度学习的目标检测算法计算量原本就比较大, 为了更好的检测小目标, 往往需要更多的图像数据和更多的处理方法, 会进一步增加计算量。为了尽可能减小检测算法的计算量, 可以利用网络层数较浅的特征提取网络, 也可以在模型训练完成后进行网络剪枝。设计算法时尽可能在训练阶段增加计算量, 不要影响测试阶段的检测时间。在训练时可以采用迁移学习的方法减少训练时间。

3) 提高应用价值。小目标检测算法最终目的是落实到实际应用中, 根据不同的应用场景可以设计不同的检测策略。如在群体目标检测中, 由于目标数量很多, 小目标具有一定的群体特征, 可以先将显著性区域提取出来再进行检测, 减少计算量。在无人机对地小目标检测中, 由于特征较少区分较难, 第一步可以只检测目标位置, 然后再根据目标位置获取详细特征进行分类。

参 考 文 献

- [1] 张丹, 单海军, 王哲, 等. 无人系统之“眼”——计算机视觉技术与应用浅析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(02): 1-11.
- [2] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016.
- [3] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2014.
- [4] Chen C, Liu M-Y, Tuzel O, et al. R-cnn for small object detection [C]. Asian conference on computer vision, 2016.

- [5] Zhang W, Wang S, Thachan S, et al. Deconv r-cnn for small object detection on remote sensing images [C]. IGARSS 2018–2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018.
- [6] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [J]. arXiv preprint arXiv:.00960, 2014.
- [7] He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep residual learning for image recognition [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016.
- [8] Bochkovskiy A, Wang C-Y, Liao H-Y M. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection [J]. arXiv preprint arXiv:.10934, 2020.
- [9] Hu J, Shen L, Sun G. Squeeze-and-excitation networks [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2018.
- [10] Lin T-Y, Dollár P, Girshick R, et al. Feature pyramid networks for object detection [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017.
- [11] Zhao Q, Sheng T, Wang Y, et al. M2det: A single-shot object detector based on multi-level feature pyramid network [C]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019.
- [12] Zhou X, Wang D, Krähenbühl P. Objects as points [J]. arXiv preprint arXiv:.07850, 2019.
- [13] Ren S, He K, Girshick R, et al. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE transactions on pattern analysis machine intelligence, 2016, 39 (6): 1137–1149.
- [14] He K, Zhang X, Ren S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition [J]. IEEE transactions on pattern analysis machine intelligence, 2015, 37 (9): 1904–1916.
- [15] Bell S, Lawrence Zitnick C, Bala K, et al. Inside-outside net: Detecting objects in context with skip pooling and recurrent neural networks [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016.
- [16] Liu W, Anguelov D, Erhan D, et al. Ssd: Single shot multibox detector [C]. European conference on computer vision, 2016.
- [17] Li Z, Zhou F. Fssd: Feature fusion single shot multibox detector [J]. arXiv preprint arXiv:.00960, 2017.
- [18] Liu S, Qi L, Qin H, et al. Path aggregation network for instance segmentation [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2018.
- [19] Liu S, Huang D, Wang Y. Learning spatial fusion for single-shot object detection [J]. arXiv preprint arXiv:.09516, 2019.
- [20] Ghiasi G, Lin T-Y, Le Q V. Nas-fpn: Learning scalable feature pyramid architecture for object detection [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2019.
- [21] Tan M, Pang R, Le Q V. Efficientdet: Scalable and efficient object detection [C]. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020.
- [22] Qiao S, Chen L-C, Yuille A. Detectors: Detecting objects with recursive feature pyramid and switchable atrous convolution [J]. arXiv preprint arXiv:.02334, 2020.
- [23] Kisantal M, Wojna Z, Murawski J, et al. Augmentation for small object detection [J]. arXiv preprint arXiv:.07296, 2019.
- [24] Singh B, Davis L S. An analysis of scale invariance in object detection snip [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2018.
- [25] Singh B, Najibi M, Davis L S. Sniper: Efficient multi-scale training [C]. Advances in neural information processing systems, 2018.
- [26] Kim Y, Kang B-N, Kim D. San: Learning relationship between convolutional features for multi-scale object detection [C]. Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018.
- [27] Schumann A, Sommer L, Klatte J, et al. Deep cross-domain flying object classification for robust uav detection [C]. 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), 2017.
- [28] Zou Z, Shi Z, Guo Y, et al. Object detection in 20 years: A survey, 2019.
- [29] Gidaris S, Komodakis N. Object detection via a multi-region and semantic segmentation-aware cnn model [C]. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2015.
- [30] Liu Y, Wang R, Shan S, et al. Structure inference net: Object detection using scene-level context and instance-level relationships [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2018.
- [31] Li J, Liang X, Wei Y, et al. Perceptual generative adversarial networks for small object detection [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017.
- [32] Bai Y, Zhang Y, Ding M, et al. Sod-mtgan: Small object detection via multi-task generative adversarial network [C]. Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018.
- [33] Chen Y, Li J, Niu Y, et al. Small object detection networks based on classification-oriented super-resolution gan for uav aerial imagery [C]. 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2019.
- [34] Srivastava N, Hinton G, Krizhevsky A, et al. Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting [J]. The journal of machine learning research, 2014, 15(1): 1929–1958.
- [35] Zhang H, Cisse M, Dauphin Y N, et al. Mixup: Beyond empirical risk minimization [J]. arXiv preprint arXiv:.09412, 2017.
- [36] Geirhos R, Rubisch P, Michaelis C, et al. Imagenet-trained cnns are biased towards texture; increasing shape bias improves accuracy and robustness [J]. arXiv preprint arXiv:.12231, 2018.
- [37] Yun S, Han D, Oh S J, et al. Cutmix: Regularization strategy to

- train strong classifiers with localizable features [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2019.
- [38] Tompson J, Goroshin R, Jain A, et al. Efficient object localization using convolutional networks [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2015.
- [39] Ghiasi G, Lin T-Y, Le Q V. Dropblock: A regularization method for convolutional networks [C]. Advances in neural information processing systems, 2018.
- [40] Ioffe S, Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift [J]. arXiv preprint arXiv:1603.05016, 2015.
- [41] Singh S, Krishnan S. Filter response normalization layer: Eliminating batch dependence in the training of deep neural networks [C]. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020.
- [42] Yao Z, Cao Y, Zheng S, et al. Cross-iteration batch normalization [J]. 2020.
- [43] Nair V, Hinton G E. Rectified linear units improve restricted boltzmann machines [C]. ICML, 2010.
- [44] Ramachandran P, Zoph B, Le Q V. Searching for activation functions [J]. arXiv preprint arXiv:1710.05941, 2017.
- [45] Diganta M. Mish: A self regularized nonmonotonic neural activation function. Arxiv 2019 [J]. arXiv preprint arXiv:1908.08681.
- [46] Yu J, Jiang Y, Wang Z, et al. Unitbox: An advanced object detection network [C]. Proceedings of the 24th ACM international conference on Multimedia, 2016.
- [47] Rezaatofghi H, Tsoi N, Gwak J, et al. Generalized intersection over union: A metric and a loss for bounding box regression [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019.
- [48] Zheng Z, Wang P, Liu W, et al. Distance-iou loss: Faster and better learning for bounding box regression [C]. AAAI, 2020.
- [49] Lin T-Y, Goyal P, Girshick R, et al. Focal loss for dense object detection [C]. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2017.
- [50] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks [J]. Communications of the ACM, 2012, 60(6): 84-90.
- [51] Lin M, Chen Q, Yan S. Network in network [C]. International Conference on Learning Representations, 2014.
- [52] Woo S, Park J, Lee J-Y, et al. Cbam: Convolutional block attention module [C]. Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV), 2018.
- [53] Huang G, Liu Z, Van Der Maaten L, et al. Densely connected convolutional networks [C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017.
- [54] Wang C-Y, Mark Liao H-Y, Wu Y-H, et al. Cspnet: A new backbone that can enhance learning capability of cnn [C]. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2020.
- [55] Redmon J, Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement [J]. arXiv preprint arXiv:1808.02767, 2018.
- [56] Law H, Deng J. Cornernet: Detecting objects as paired keypoints [C]. Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV), 2018.

作者简介:

周河谔(1997-),女,硕士研究生,主要研究方向为无人系统自主控制。

马兆伟(1989-),男,讲师,主要研究方向为无人系统自主控制,协同控制。

牛轶峰(1979-),男,教授,主要研究方向为无人系统自主控制,协同控制。

王钟鸣(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人系统自主控制。

基于PID原理的双机链翼无人机姿态控制

周伟¹, 马培洋^{1,2}, 周睿孙¹, 赵媛³, 范珂华¹

(1. 火箭军工程大学导弹工程学院, 西安 710025; 2. 中国人民解放军66011部队, 北京 102600; 3. 火箭军工程大学基础部, 西安 710025)

摘要: 针对两架固定翼无人机构成的双机链翼组合平台如何进行姿态控制问题, 在建立的双机链翼组合平台模型基础上, 制定其姿态控制策略。基于PID原理建立双机链翼组合平台姿态控制模型, 提出适用于双机链翼组合平台姿态控制律。进一步对双机链翼组合平台的俯仰、滚转、偏航通道的姿态控制进行仿真, 有效验证了所提出的控制策略的合理性、姿态控制律的可行性, 并通过飞行试验实现了双机链翼组合平台的平稳飞行, 验证了仿真结果的准确性, 为后续功能扩展提供了基础。

关键词: 固定翼无人机; 链翼; 空中分离; 控制策略; 姿态控制率; PID原理

Attitude Control of Two Chained Wing UAVs Based on PID Principle

ZHOU Wei¹, MA Peiyang^{1,2}, ZHOU Ruisun¹, ZHAO Yuan³, FAN Kehua¹

(1. Missile Engineering College, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; 2. The PLA Unit 66011, Beijing 102600, China; 3. Basic Disciplinary Department, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at the problem of how the chained wing combined platform composed of two fixed-wing UAVs performs attitude control, based on the established platform model, its attitude control strategy is formulated. Based on the PID principle, the attitude control model of the platform is established, and the attitude control law suitable for the platform is proposed. Further, the attitude control of the pitch, roll and yaw channels of the platform is simulated, which effectively verifies the rationality of the proposed control strategy and the feasibility of the attitude control law. Through the flight test, the stable flight of the platform is realized, and the accuracy of the simulation results is verified, which provides a basis for the subsequent function expansion.

Key words: Fixed-wing UAV; Chained Wing; Air Separation; Control Strategy; Attitude Control Law; PID Principle

1 引言

无人机技术发展迅猛,但是仍存在航时与多任务难以兼顾的问题。针对航时问题,在能源有限的前提下,提高飞机的展弦比,可有效改善其气动性能,减少能源损失,增加航时^[1]。另一方面,编队飞行^{[2]-[5]}可以有效解决多任务能力不足的问题。

对此,已有学者进行了类似的研究。早在20世纪50年代,为了提高战斗机的航时,Richard Vogt便提出了“翼尖拖拽”^[6]这一概念。美国以此为基础,开展了“Tip-Tow”^[7]和“Tom-Tom”^[8]项目,有效验证

了该方案在提高航时方面的优越特性。在同一时期,Moore和Maddalon提出“多体运输”的概念^[9],将飞机设计成拥有两个机身、三段机翼的大翼展飞机,从而获得大展弦比。21世纪以来,奥罗拉飞行科学公司(Aurora Flight Science)在2008年提出了“Odysseus”的设计构想^[10];德国柏林技术大学开发了一个控制系统来控制翼尖连接组合无人机系统,制造了技术验证机AMBA(Advanced Multi-Body Aircraft)^[11],并开展了基于太阳能动力的多无人机翼尖连接项目—AlphaLink^[12];Carlos Montalvo等^[13]使用自行设计的全构造泡沫飞机进行两机翼尖连

接飞行试验,并在文献[14]对翼尖连接机构进行了力学分析。

但是有人机的试验因飞行事故而停止,无人机在控制、连接机构以及气动耦合上仍存在技术难点。对此,本文基于PID原理设计姿态控制律,重点针对翼尖连接飞行平台制定姿态控制策略,通过仿真和飞行试验验证姿态控制律的可行性,实现了飞行平台的平稳飞行与双机空中分离。

2 模型建立

2.1 相关概念与假设

在此,将通过固定翼无人机翼尖连接起来形成一定构型的大展弦比组合飞行平台称为“组合平台”,组成组合平台的单架无人机称为“单元”,在翼尖用来进行连接和分离的机械结构称为翼尖连接机构。与组合平台相关的系统设计、飞行控制、试验验证等技术统称为链翼技术^[15]。

2.2 单元的相关参数

为方便研究,设计并制作了飞行单元和翼尖连接机构,如图1所示。该单元的具体参数和设备见表1。



(a) 飞行单元



(b) 翼尖连接机构

图1 飞行单元

Fig. 1 Flight unit

表1 单元相关参数

Table 1 Related parameters of the unit

参数	数值	参数	数值
翼展	1.3m	飞行时间	10min
机身长	0.76m	翼载荷	5.92kg/m ²
起飞重量	1.54kg	机翼面积	0.26m ²
电机	3136-1200KV	飞行控制仪	Pixhawk V3x
电调	40A	无线数传	XBEE-Pro
舵机	9g×5	空速计	PT60
桨尺寸	10*6	电流计	XT60 APM2.8
锂电池	3S 1300mAh	GPS	M8N

通过力学实验,得出双机组合平台各个姿态角的姿态偏差阈值(在不破坏连接机构前提下,两单元之间姿态角所允许的最大偏差值),如表2所示。

表2 姿态偏差阈值

Table 2 Threshold of attitude deviation

	俯仰通道	滚转通道	偏航通道
姿态偏差阈值	13.1°	13.4°	11.3°

3 双机组合平台的姿态控制策略

假设左侧为单元1,右侧为单元2。

3.1 双机组合平台姿态控制策略

双机组合平台的姿态控制涉及到两单元的协调控制,对于不同的通道,选用不同姿态控制策略。

协同控制策略:以单元1为基准,当两单元姿态角存在偏差时,单元2根据单元间的姿态角速率偏差进一步调节姿态,从而与单元1保持姿态协调。

俯仰通道控制策略:当接收到控制指令时,组合平台的两单元升降舵同时偏转,根据期望俯仰姿态角调节各自的姿态。

滚转通道控制策略:将整个双机组合平台看作一个飞行器整体,单元1的主翼作为飞行器的左翼,单元2的主翼作为飞行器右翼,区别在于将单元1的左副翼当作整体的左副翼,单元2的右副翼作为整体的右副翼,其他的副翼保持不动。

偏航姿态控制策略:当接收到控制指令时,两单元方向舵同时偏转,根据期望偏航姿态角调节各

自的姿态。

3.2 双机组合平台飞行控制模式

考虑到双机组合平台需要实现空中分离,控制模式需要由链翼模式向单机模式切换,结合姿态控制策略,两种飞行状态下的控制模式如图2所示。

通过图2可知,在链翼飞行时,选择链翼模式,则整个系统在进行链翼飞行时,执行相对应的姿态控制策略;当分离时,切换为单机模式,两架无人飞行平台执行传统无人机姿态控制策略,通过各自的升降舵、副翼、方向舵控制俯仰、滚转、偏航姿态。

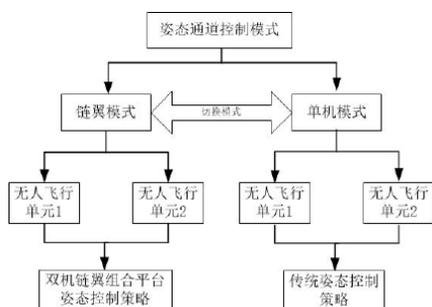


图2 姿态通道控制模式切换

Fig. 2 Switching of the attitude channel control mode

4 双机组合平台姿态控制律

结合无人机控制系统的理论方法,基于传统PID控制方法对双机组合平台的俯仰、滚转和偏航姿态控制律进行改进,提出双机组合平台的姿态控制律。以俯仰通道为例,阐述双机组合平台姿态控制律的基本原理,并进行了仿真模拟。建立双机组合平台俯仰通道控制模型结构图,如图3所示。

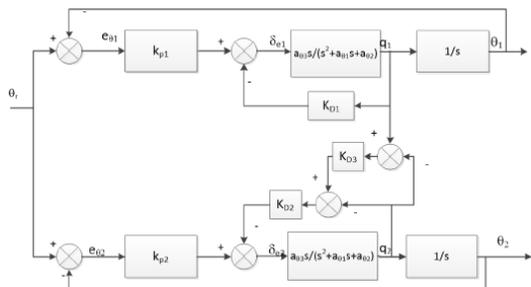


图3 双机组合平台俯仰通道控制模型结构图

Fig. 3 Structure diagram of pitching channel control model of the combined platform

在链翼飞行时,双机组合平台根据期望的俯仰角信号 θ_r 对两单元进行控制。对于单元1来说,通

过传感器检测到当时俯仰角的实时信号 θ_1 ,计算得到期望俯仰角和实时俯仰角的差值 $e_{\theta_1} = \theta_r - \theta_1$,单元的角度偏差一般很小,因此通过比例系数 k_{p1} 对误差信号 e_{θ_1} 进行放大处理,此时的实际角速率 q_1 随着单元1的飞行实时变化,通过微分系数 k_{D1} 的调节,反馈到系统输出的角速率,得到修正后的实际角速率。再经过限幅等处理后,得到单元1的俯仰角控制律。

本文的设计思路是:将单元1的俯仰角速率 q_1 作为控制参考,当单元2的俯仰角速率 $q_2 \neq q_1$,计算两者间的速率差,经微分系数 k_{D3} 放大后与 q_2 求和,再经过微分系数 k_{D2} 修正后反馈到系统,得到单元2的实际角速率,进一步得到单元2的俯仰通道控制律。

由此可得到无人飞行平台1和无人飞行平台2的俯仰通道控制律:

$$\delta_{e1} = k_{p1}(\theta_r - \theta_1) - k_{D1}q_1 \quad (1)$$

$$\delta_{e2} = k_{p2}(\theta_r - \theta_2) - k_{D2}(q_2 + k_{D3}(q_1 - q_2)) \quad (2)$$

值得注意的是角速率的反馈系数 k_{D1} 、 k_{D2} 、 k_{D3} 与系统的阻尼有关,如果控制回路中的 k_{D1} 、 k_{D2} 、 k_{D3} 整定值过大,将会导致动态响应速度变慢,如果整定值过小,可能会发生俯仰姿态角震荡的现象;此外,由于无人飞行平台2以无人飞行平台1为参考, k_{D1} 参数的选定将影响整个系统的性能。

根据图3,使用Simulink建立了双机组合平台俯仰通道PID控制系统图,如图4所示。

图4分别是理想条件、随机扰动和单脉冲扰动情况下,期望俯仰角度为 10° 时双机组合平台的仿真结果。在实际飞行中,单元姿态一般能够保持稳定,与理想条件有区别的是,阵风、操纵舵面响应延迟、飞行器质量特性分布不一致等扰动会对链翼平台的稳定性造成影响。因此,对控制系统做出相应调整,在原有系统基础上,根据扰动的不同情况,加入了不同类型的干扰信号,模拟阵风等扰动因素,并根据俯仰姿态控制策略2,将扰动叠加到单元2上,以此仿真整个系统在受到扰动时动态响应。

图4(a1)表示理想条件俯仰通道控制系统;图4(a2)表示俯仰姿态响应,在期望角度为 10° 时,理想条件下,1.2s完成姿态调整;图4(a3)表示俯仰角度偏差,理想条件下两单元姿态相同;图4(a4)表示升降舵摆动角,0时刻角度为 45° ,后逐渐衰减,0.5s衰减为 0° 。

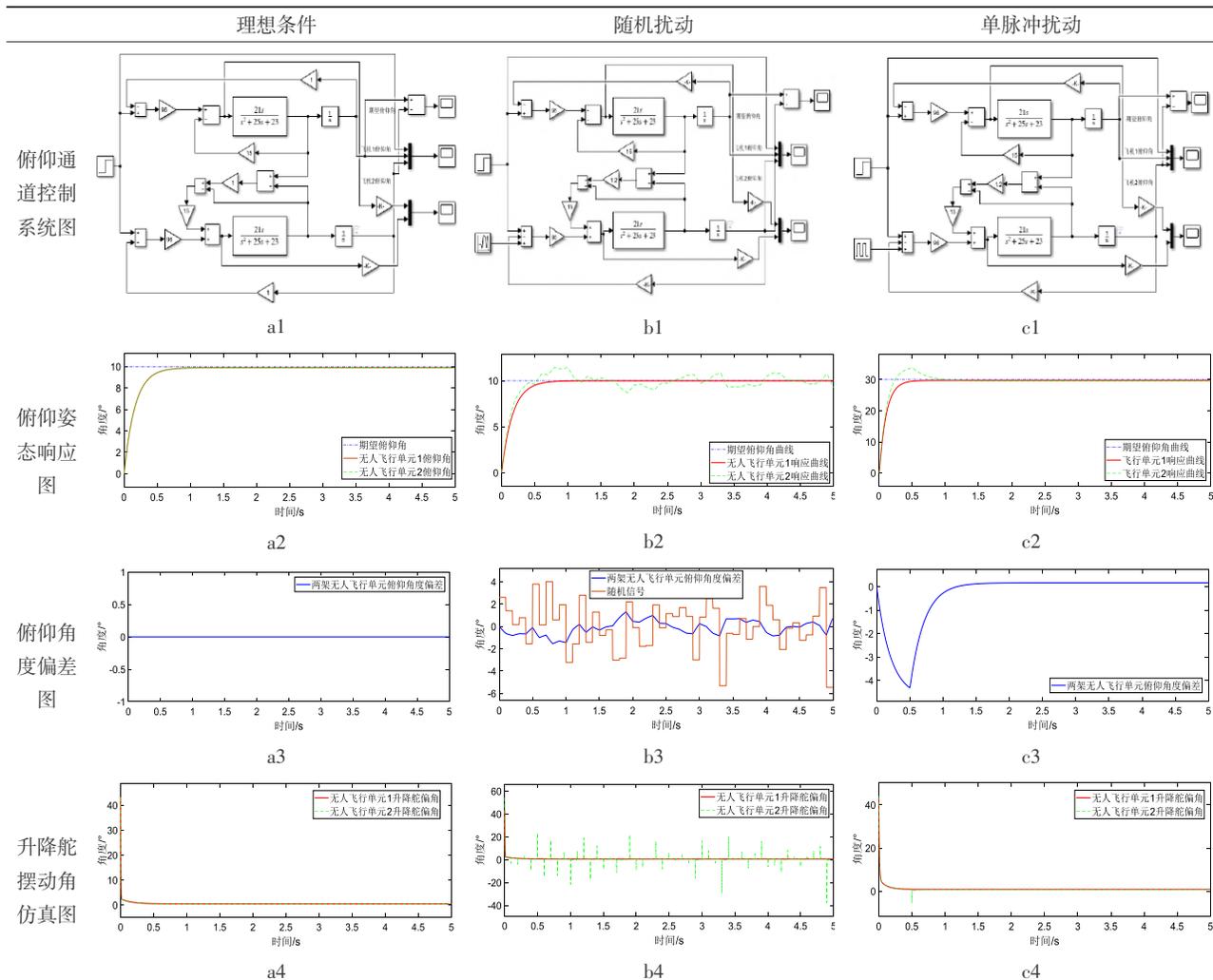


图4 双机组合平台俯仰通道仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of pitching channel of the combined platform

图4(b1)表示受到随机扰动时的俯仰通道控制系统,其中随机干扰信号简化为对俯仰角度带来的震荡,取值范围为 $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}$;由图4(b2)可知,在期望姿态角为 10° 时,单元1的调节时间为1.2s;单元2的调节时间是1.6s;由4(b3)可知两单元俯仰角度偏差波动范围小于随机信号波动范围;由图4(b4)可知,单元1升降舵偏转角在0时刻阶跃到 45° ,随后快速下降,1.2s稳定在 0° ,单元2升降舵偏转角在0时刻阶跃到 45° ,随后快速下降,之后不断调整。

图4(c1)表示受到单脉冲扰动时的俯仰通道控制系统,单脉冲信号幅值为 5° ,脉宽为0.5s;由图4(c2)可知,在期望姿态角为 10° 时,单元1的调节时间为1.2s;单元2的调节时间为2.2s;由4(c3)可

知,在同一时刻,单脉冲干扰造成两单元之间的俯仰角偏差呈尖峰状,0.5s时刻偏差绝对值达到最大,为 3.72° ,之后稳定偏差 0.06° 。由图4(c4)可知,单脉冲干扰时两单元升降舵摆动角度情况趋同,仿真开始时单元1舵偏角阶跃到 43° ,随后下降,0.5s后恢复至 0° ;单元2舵偏角开始时阶跃到 45° ,随后下降,在0.5s时反向偏转 6.24° ,以防止姿态调整过大,后恢复到 0° 。

同理根据滚转姿态控制策略、偏航姿态控制策略,建立滚转和偏航的仿真模型,得到结果如图5、图6所示。

经过仿真得到各通道姿态偏差后,对仿真结果进行处理。综合来看,单脉冲干扰比随机扰动造成的瞬间角度偏差更大,因此在考虑最大偏差

时,以单脉冲干扰偏差为准。对比姿态偏差阈值和仿真最大偏差角,得到表3。由表3可知,仿真

的各个通道最大偏差在许用偏差范围内,满足设计要求。

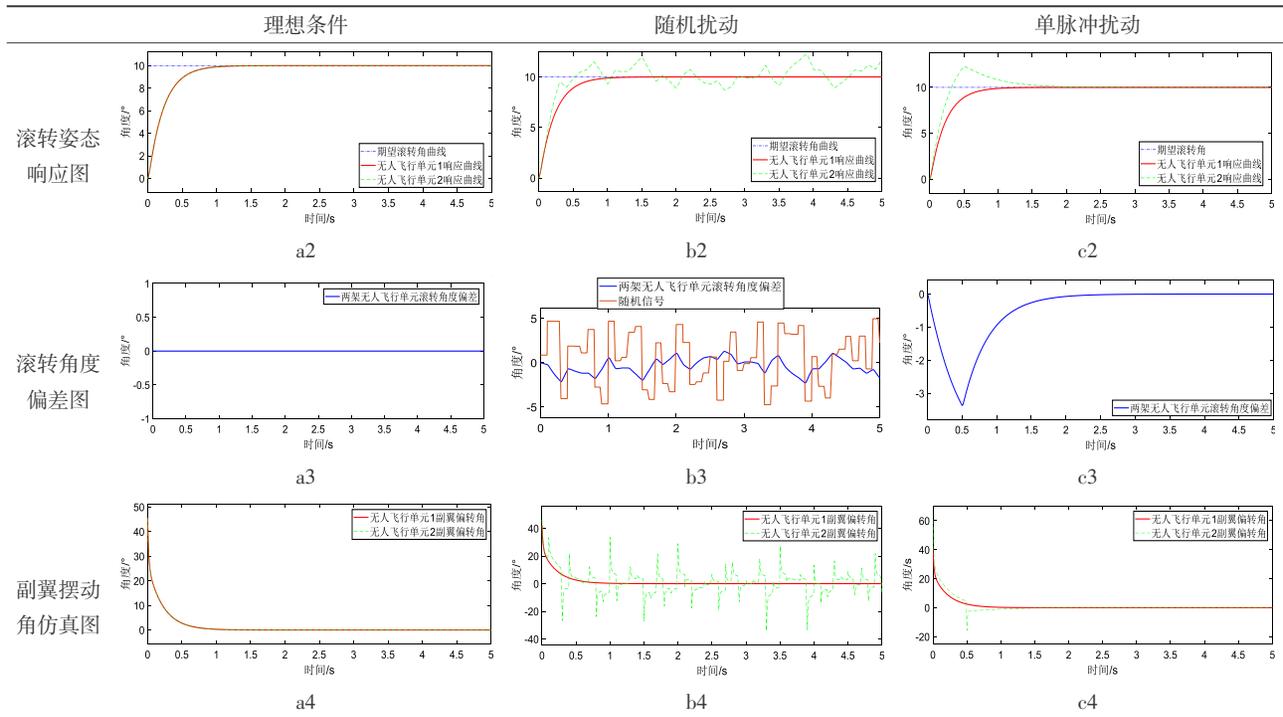


图5 双机组合平台滚转通道仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of rolling channel of the combined platform

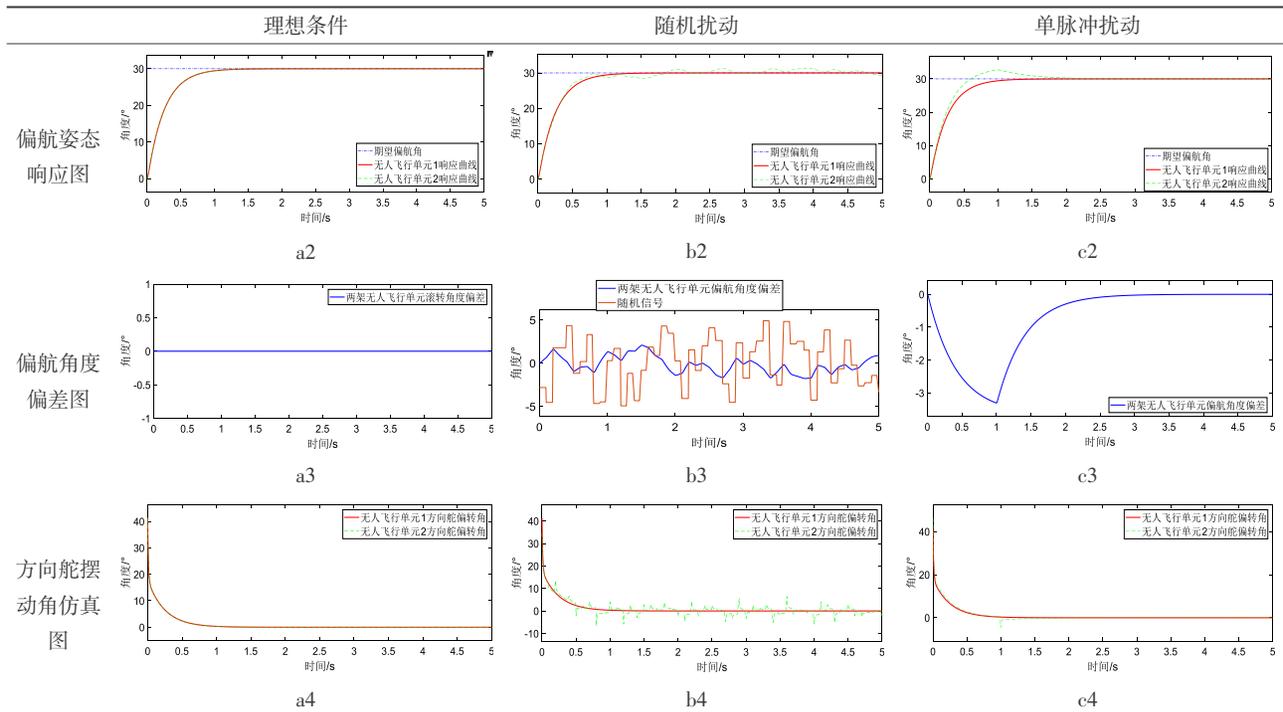


图6 双机组合平台偏航通道仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of yaw channel of the combined platform

5 组合平台姿态控制律试验验证

表3 姿态控制律仿真的角度偏差

Table 3 Angle deviation of attitude control law simulation

姿态通道	姿态偏差阈值	仿真最大偏差角
俯仰通道	13.1°	11.22°
滚转通道	13.4°	9.79°
偏航通道	11.3°	9.17°



(a) 双机组合平台地面起飞



(b) 链翼平台空中链翼飞行



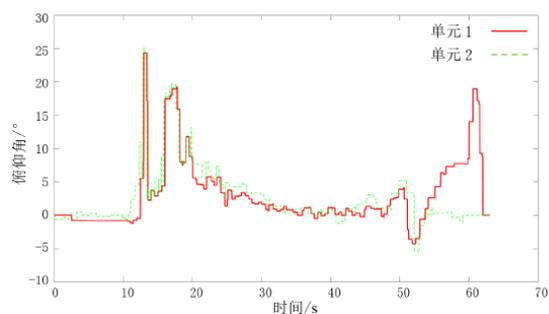
(c) 链翼平台空中分离

图7 双机组合平台试验过程

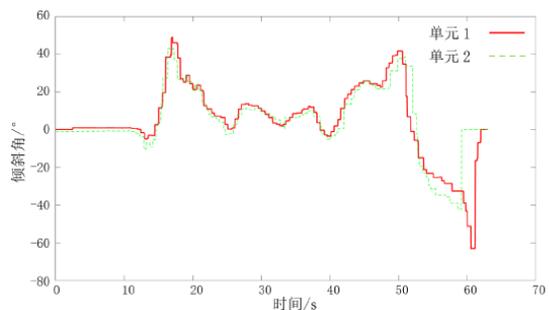
Fig. 7 Test process of the combined platform

进行了飞行试验以验证姿态控制律能够控制两单元的姿态保持稳定。双机链翼飞行试验过程包括三个飞行状态:链翼起飞、链翼飞行和空中分离,如图7所示。

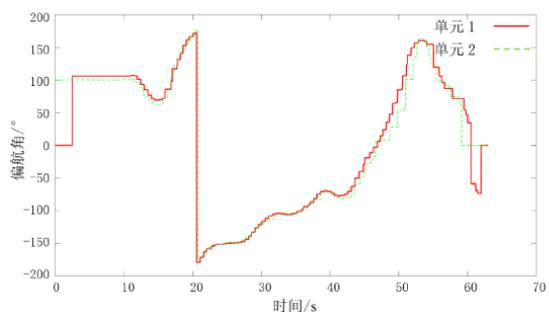
将飞行控制仪记录的各姿态角数据并进行处理,如图8所示。在11s时组合平台离地起飞,11s~22s处于爬升阶段,22s~55s处于链翼飞行阶段,55s时刻组合平台实现空中分离,之后两单元协同飞行。



(a) 俯仰对比曲线



(b) 滚转对比曲线



(c) 偏航对比曲线

图8 两单元各通道姿态曲线对比图

Fig. 8 Comparison of attitude curves of each channel of two units

将飞行试验得到的结果整理,如表4所示。

表4 飞行试验姿态角数据

Table 4 Attitude angle data of flight test

姿态通道	阶段	仿真最大偏差角	飞行试验最大偏差角	差值
俯仰通道	链翼起飞	11.22°	9.61°	1.61°
	链翼飞行		3.87°	8.35°
滚转通道	链翼起飞	9.79°	7.98°	1.81°
	链翼飞行		6.84°	2.95°
偏航通道	链翼起飞	9.17°	8.13°	1.66°
	链翼飞行		5.39°	3.78°

进一步分析可知,在链翼爬升阶段,产生的最大偏差角均在许用偏差角范围内,满足设计要求,但姿态波动较大。链翼飞行阶段姿态偏差较小,飞行稳定。

由上述试验过程和统计的数据可知,双机组合平台能够实现“链翼起飞——链翼飞行——空中分离”的整个过程,姿态控制律有效的控制了两单元的姿态,保证了整个组合平台的平稳飞行。

6 结论

本文基于PID控制原理提出了双机组合平台的俯仰、滚转、偏航通道控制策略与姿态控制律,通过仿真和飞行试验验证了该姿态控制律的可行性,具体结论如下:

(1)仿真表明了双机组合平台姿态控制律能够有效控制其姿态偏差使之保持在姿态偏差阈值范围内。

以单元1为基准,以期望姿态角和单元1姿态角对单元2进行控制,在保持整体向期望姿态角调整的同时,单元2向单元1的姿态调整,两单元的姿态角偏差减小,减轻了连接机构的负担。仿真结果表明,当存在 -5° ~ 5° 的随机或脉动干扰时,三个姿态通道的最大偏差均在偏差阈值范围内,仿真验证了姿态控制律的可行性。

(2)飞行试验表明了双机组合平台飞行的可行性,验证了姿态控制律对双机组合平台进行姿态控制的可行性。

进行了“链翼起飞——链翼飞行——空中分离”的飞行试验,记录了链翼起飞和链翼飞行阶段部分试验数据并进行了分析。由试验可知,链翼飞行过程中俯仰角、滚转角、偏航角的最大偏差皆在仿真结果范围内,试验验证了该控制律在飞行过程中可有效调节双机组合平台的姿态。

参 考 文 献

- [1] 王钢林, 楚亮. 提升通用飞机气动效率的设计策略研究[J]. 航空工程进展, 2015, 6(2): 160-165.
- [2] Slater G. Dynamics of self-spacing in a stream of in-trail aircraft [C]. In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Monterey, CA, USA, August 5 - 8, 2002.
- [3] Gibbs J, Vlachos P, Telionis D. Experimental determination of lift and lift distributions for Wings in formation flight [C]. In Proceedings of the AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, USA, January 10 - 13, 2005.
- [4] Vachon M, Ray R, Walsh K, et al. F/A-18 aircraft performance benefits measured During the Autonomous Formation Flight Project [C]. In Proceedings of the AIAA Flight Mechanics Conference, Monterey, CA, USA, August 5 - 8, 2002.
- [5] Ray R, Cobleigh B, Walsh K, et al. Flight test techniques used to evaluate performance benefits during formation flight [C]. In Proceedings of the AIAA Flight Mechanics Conference, Monterey, CA, USA, August 5 - 8, 2002.
- [6] 樟楠. 并驾三“人”行美国早期翼尖对接/拖带技术[J]. 兵器知识, 2007(7): 57-61.
- [7] Anderson C. Dangerous Experiments: wingtip coupling at 15,000 feet [J]. Flight Journal, 2000(5): 64.
- [8] MILLER J. Project “Tom-Tom” [J]. Aerophile, 1977, (12): 161 - 164.
- [9] Moore J, Maddalon D. Multibody transport concept [C]. 2nd International Very Large Vehicles Conference, Washington, DC, USA, May 17-18, 1982.
- [10] Host P. Aurora indefinitely delays first flight of Odysseus ultralong-endurance UAV[J]. Jane's Defence Weekly. 2019, 56(29): 13.
- [11] Köthe A, Behrens A, Hamann A, et al. Closed-loop flight tests with an unmanned experimental multi-body aircraft [C]// 17th International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics. Como, Italy: 2017.
- [12] Cracau D. The AlphaLink compound aircraft : aviation outside the Box! [EB/OL]. (2020-10-19) [2020-12-28]. <https://www.kickstarter.com/projects/alphalink-aero/take-off-1>.
- [13] Collin C, Montalvo C. Experimental control of two connected fixed wing aircraft [J]. Aerospace, 2018, 5(4): 113.
- [14] Montalvo C, Costello M. Meta aircraft connection dynamics [C]. AIAA guidance, navigation, and control conference. Minneapolis, Minnesota, USA: 2012. 2012 (3): 2177-2198.
- [15] 周睿孙, 周伟, 王道平, 等. 无人机链翼系统技术综述 [C]. 第五届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第41届技术交流会. 南京: 2020: 2336-2344.

作者简介:

周伟(1974-),男,博士,副教授,主要研究方向为飞行器总体设计与动力工程。

马培洋(1991-),男,硕士,助理工程师,主要研究方向飞行器总体设计与作战运用。

周睿孙(1995-),男,硕士,主要研究方向为多无人机飞行控制。

赵媛(1980-),女,硕士,副教授,主要研究方向为电子技术。

范珂华(1997-),男,硕士,研究生,主要研究方向为飞行器噪声。

面向低时延业务的无人机自组织网络接入协议研究

孙士勇¹, 归琳², 朗修璞², 朱世超²

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050086; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 面向低时延业务的自组织网络接入协议是多无人机信息通信网络系统的关键技术之一, 可有效支撑未来有人/无人作战单元间的态势共享和作战协同。本文基于TDMA、CSMA和SPMA的特点和不足, 设计了融合TDMA固定帧长、CSMA载波侦听以及SPMA区分优先级思想的混合接入协议方案, 通过对30个节点的全联通网络进行仿真, 结果表明: 混合接入协议方案在传输成功率、单跳时延、高优先级业务时延等方面的性能相对较优, 能较好满足时敏业务单跳2ms的时延要求。

关键词: 无人机; 自组织网络; 时分多址; 载波侦听多路访问; 基于优先级的多址接入; 时敏业务

Research on UAV ad hoc network access protocol for low delay service

SUN Shiyong¹, GUILin², LANGXiupu², ZHUSHichao²

(1. The 54th Research Institute of China Electronic Technology Corporation, Department of System Design, Shi' JiaZhuang050086, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai200240, China)

Abstract: Ad hoc network access protocol for low delay service is one of the key technologies of multi UAV information communication network system, which can effectively support the situation sharing and combat cooperation between manned / unmanned combat units in the future. Based on the characteristics and shortcomings of TDMA, CSMA and SPMA, a hybrid access protocol scheme integrating TDMA fixed frame length, CSMA carrier sense and SPMA priority is designed in this paper. Through the simulation of a full interconnection network with a scale of 30 nodes, the results show that compared with the pure random competition scheme, the hybrid access protocol scheme has better performance in transmission success rate, single hop delay and delay of high priority services, and can better meet the delay requirements of single hop 2ms of time sensitive services.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); Ad-hoc Networks; TDMA; CSMA; SPMA; Time sensitive service

1 引言

无人机作为近十年兴起并得到迅速发展的空基新型移动平台, 具有部署敏捷、机动性强、维护成本低等特点, 已广泛应用于农业植保、野外巡线、无人物流、应急保障等重要领域^[1]。在军事领域, 随着无人机自主化和网络化技术的快速发展, 无人机在现代战争中起到的作用越来越重要, 纳卡冲突中无人机的突出表现也昭示着未来无人机的广阔军事前景。其中, 利用自组织组网技术构建基于多无人机的信息通信网络系统, 通过搭载信息通信网络

载荷提供用户接入和网络互连能力, 可用于支撑未来高动态环境下有人/无人作战单元间的态势共享和作战协同。在该系统中, 自组织网络接入协议用于定义网络节点共享信道的基本规则, 是解决时敏性低时延业务可靠保障的关键技术^[2-4]。

按照信道资源使用方式的不同, 目前自组织网络接入协议主要有基于预约的时分多址接入技术(TDMA, time division multiple access)^[5]、基于竞争的载波侦听/冲突避免技术(CSMA/CA, carrier sense multiple access/collision avoidance)^[6-9]和基于业务优先级统计的多址接入技术(SPMA, statistical

priority-based multiple access)^[10-13]。其中,TDMA是一种基于时隙的多址接入方式,待传输节点通过RTS/CTS机制协调、预约时隙,确保节点间传输不会发生任何数据包碰撞,但时隙的协调与预约将在传输中引入显著的时延从而极大降低网络的有效带宽。CSMA是一种争用型的信道访问控制协议,采用了退避窗口机制降低了数据包在共享信道上传输时的碰撞,但不能提供优先级控制,无法保证业务的可靠高效传输。SPMA协议基于随机竞争思想,综合使用时分和频分接入策略,可以保证高优先级业务的低时延传输以及网内所有业务的可靠传输,但SPMA在高负载状态下冲突现象仍然突出,且硬件实现难度对协议可行性带来了极大地挑战。综上所述,亟需一种新型的接入协议以实现在尽可能保证其他业务性能传输性能的前提下,保障时敏业务的低时延高可靠传输。本文融合TDMA固定帧长、CSMA载波侦听、以及SPMA区分优先级的思想和各协议优点,设计并实现了可支持时敏业务可靠传输的混合接入协议。

2 指令性时敏业务接入协议设计

参考TTNT数据链系统的指标要求,时敏业务的单跳时延应在2ms以下^[14]。本章将对标该指标要求,设计面向指令性时敏业务的接入协议,确保业务能够在2ms内进行响应。根据实现难度的不同,提出“竞争式”MAC层时帧结构(简称“方案1”)与“竞争+预约式”MAC层时帧结构(简称“方案2”)两种接入协议方案,其区别在于方案1需要抢占时隙的节点广播一个单音信号(高电平)来示意抢占,此时侦听节点仅需要具备解析高电平的能力即可;而方案2需要抢占时隙的节点广播自己的ID号,本帧的簇头节点解析出时隙占用情况,向全网发送预约结果,此时需要节点具备在短时间内解析数据包和收发转换的能力。

2.1 “竞争式”MAC层时帧结构方案

本文以0.5ms作为一个数据时隙长度,将一个2ms的帧分为4个0.5ms的时隙,其中,第二、三、四时隙用于传输数据,第一时隙属于信令开销,将用于节点间的竞争,节点通过在第一时隙中交互信息,来获取对后续时隙的占用情况。进一步,将第一时隙等分为若干个子时隙,子时隙的长度越短越

好,但在实现过程中也需要考虑到硬件的实时性约束。例如:当以50 μ s为一个子时隙单位时,第一时隙可划分10个子时隙;当以100 μ s为一个子时隙单位时,第一时隙可划分5个子时隙,以此类推。图1展示了以60 μ s为子时隙单位时的帧结构划分图。为了便于举例说明,在2.1与2.2小节中,均以60 μ s为子时隙长度进行举例,随后在第3章的仿真中给出了不同子时隙长度对性能的影响。

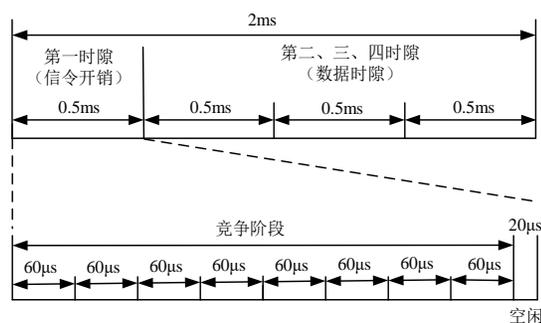


图1 “竞争式”MAC层时帧结构划分

Fig. 1 Frame structure of the “contention”-based MAC

为了保障指令性业务的低时延和高可靠传输,将业务划分优先级,指令性业务为高优先级,其他业务为低优先级。每个节点中都有两个优先级队列(或者一个优先级队列,但高优先级业务可以插队)、一个倒计时计数器和一个可用信道计数器。

协议具体实施过程如下:在每个2ms帧的开始阶段,所有需要发送业务的节点选择其业务队列中优先级最高的,然后随机选择竞争窗口中的一个值进行倒计时。为了保障高优先级业务的性能,令高低优先级的竞争窗口取不同的范围,且不存在交集,例如:高优先级竞争窗口取[1,3],低优先级窗口取[4,8]。假定有A~E共5个节点,其倒计时计数器选择如下:A为2,B、C为3,D为4,E为5。首先所有节点进入侦听模式,经过120 μ s后,A的计数器倒计时结束,发送一个高电平信号来声明时隙占用,其他节点经过60 μ s后,听到该信号,知道有一个时隙被占用,在每个节点中有一个可用信道计数器,业务时隙有3个,所以可用信道计数器初始化为3,每次节点听到有信号后,将可用信道计数器减1,所以此时其他节点的可用信道计数器为2,在180 μ s时,B、C两节点的计数器倒计时均结束,两节点各自发送一个高电平信号,D、E节点听到该信号

后将信道计数器再减1,变为1,之后在 $240\mu\text{s}$,D节点也发送一个信号来对时隙进行竞争,而E节点在 $300\mu\text{s}$ 时听到后将信道计数器减1变为0,此时E知道在本帧当中已无可用时隙,在下一帧重新竞争。

本方案工程实现难度较低,要求节点能够在 $60\mu\text{s}$ 的时间范围内解析高电平即可,但考虑到实际硬件的约束,子时隙长度无法做到足够小,因此竞争窗口长度不会特别大,在竞争窗口中随机取值时的碰撞概率较大。鉴于此,我们进一步提出了竞争+预约的方案来提升传输成功率。

2.2 “竞争+预约式”MAC层时隙结构方案

图2展示了方案2中子时隙长度为 $60\mu\text{s}$ 时的帧结构。相比于方案1,方案2在第一时隙的竞争阶段减少了1个子时隙,将方案1中的最后1个子时隙连同空闲的 $20\mu\text{s}$ 共同构成了预约阶段,预约阶段只有簇头节点才能占用,簇头节点在预约阶段向其他节点广播业务时隙的占用情况,以减小碰撞。

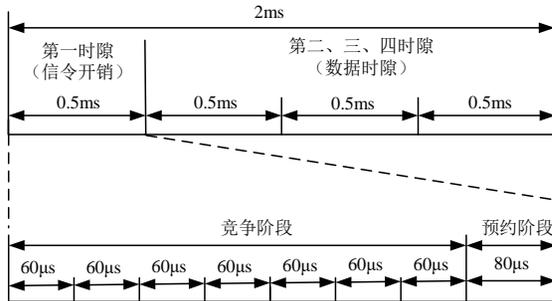


图2 “竞争+预约式”MAC层时隙结构划分

Fig. 2 Frame structure of the “contention plus appointment”-based MAC

在方案2中,令所有节点广播的信令信息由高电平变为节点ID号,并定义本帧的簇头节点为第一个发送信令的节点。以下仍按照方案1的场景设定进行举例说明,假定有A~E共5个节点,其倒计时计数器选择如下:A为2,B、C为3,D为4,E为5,此时A为簇头节点。第二个子时隙中,A节点广播ID号,其他节点能够接收;而在第三个子时隙中,B、C两个节点广播的ID消息发生了碰撞,A、D、E节点无法正确接收,因此这些节点只能通过收到的信号电平判断有节点在竞争时隙,但并不知道是B和C在竞争;接下来,在第四、第五个子时隙中,D和E分别广播各自的ID号,其他节点正确接收。这

样一来,在预约阶段到来前,节点A经过分析可以得出,本帧需要发送数据的节点为A、D、E,因此A、D、E将依次占据三个业务时隙,节点A把这一信息在预约阶段的 $80\mu\text{s}$ 向其他节点广播。当B和C收到这一分配结果时,便知道了它们在本帧将会发生碰撞,因此B和C将不会在本帧发送数据,而会在下一帧重新设定计数器的值,重新竞争。

方案2与方案1相比,将可以用来竞争的时隙数减小了1,换来的好处是可以判断出非第一个子时隙发生的冲突。方案2只有一种情况会出现碰撞,即同时有至少两个节点竞争第一个时隙,此时这两个节点在预约阶段都会认为自己是第一个占据时隙的进行广播,所以信道中会同时有两个广播信号而失效,在这种情况下,网络中的所有节点在业务传输阶段开始的时候都不知道当前帧的时隙预约情况,那么就按照它们自己听到的顺序去发。如果节点A和B都竞争第1个时隙,C、D、E分别竞争2、3、4时隙,那么在业务传输阶段,E节点因为知道自己竞争的时隙不在该帧内,而不发送业务,A、B两节点都在第一个业务时隙发送业务而造成碰撞,C节点在第二个业务时隙发送,D节点在第三个业务时隙发送。这也是方案2唯一会发生碰撞的情况。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数

仿真场景设定为30个节点的全连通网络。数据业务有两种优先级(高、低),业务传输时间为 0.5ms 。业务生成率取50次/s、500次/s、1000次/s、1500次/s进行仿真,其中,高低优先级的比例为1:9。仿真总时间为1s。

子时隙的长度方面,考虑 $50\mu\text{s}$ 、 $60\mu\text{s}$ 、 $100\mu\text{s}$ 三种情况,以提供参考。当子时隙长度为 $50\mu\text{s}$ 时,两种优先级的竞争窗口设为 $[1,3]$ 和 $[4,10]$ (方案1)/ 9 (方案2)];当子时隙长度为 $60\mu\text{s}$ 时,两种优先级的竞争窗口设为 $[1,3]$ 和 $[4,8]$ (方案1)/ 7 (方案2)];当子时隙长度为 $100\mu\text{s}$ 时,两种优先级的竞争窗口设为 $[1,2]$ 和 $[3,5]$ (方案1)/ 4 (方案2)]。方案2由于加入了预约机制,需要占用一个时隙广播预约信息,因此竞争窗口长度减小1。

为了提供性能基准,假设存在一个方案3,仍将

2ms分成前0.5ms与后1.5ms,其中前0.5ms为固定开销,后1.5ms采用纯随机竞争策略。在实际应用中并不会使用方案3,加入方案3只是为了观察引入经设计的竞争机制后,方案1和方案2相比于纯随机竞争的性能提升。

3.2 仿真结果

本小节展示的性能包括业务的传输成功率、时延、以及大于2ms时延的高优先级业务比例。图3~5分别展示了子时隙长度为 $50\mu\text{s}$ 、 $60\mu\text{s}$ 、 $100\mu\text{s}$ 时各种方案的性能。

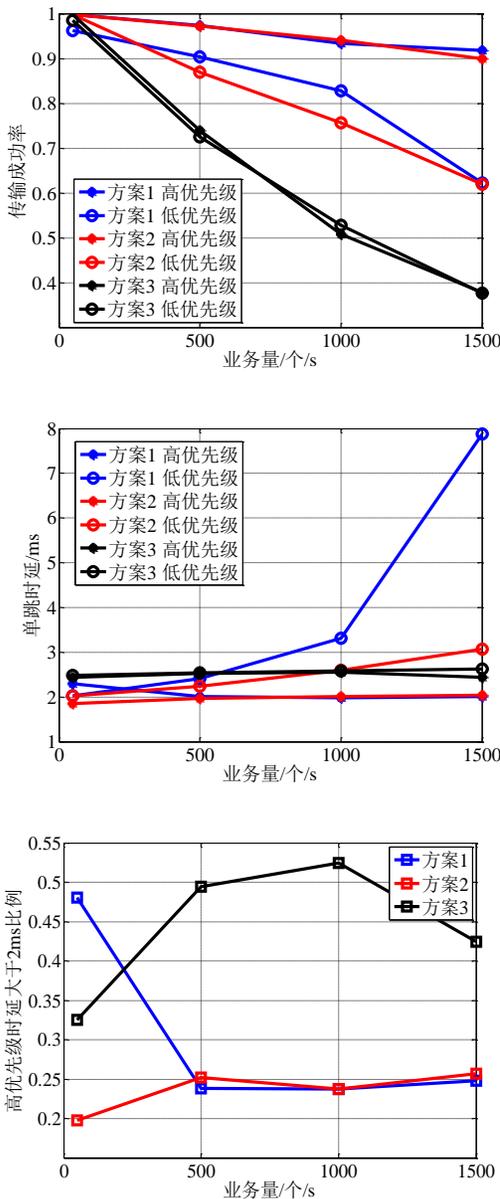


图3 子时隙长度为 $50\mu\text{s}$ 时的性能对比

Fig. 3 Performance comparisons with $50\mu\text{s}$ sub-slot length

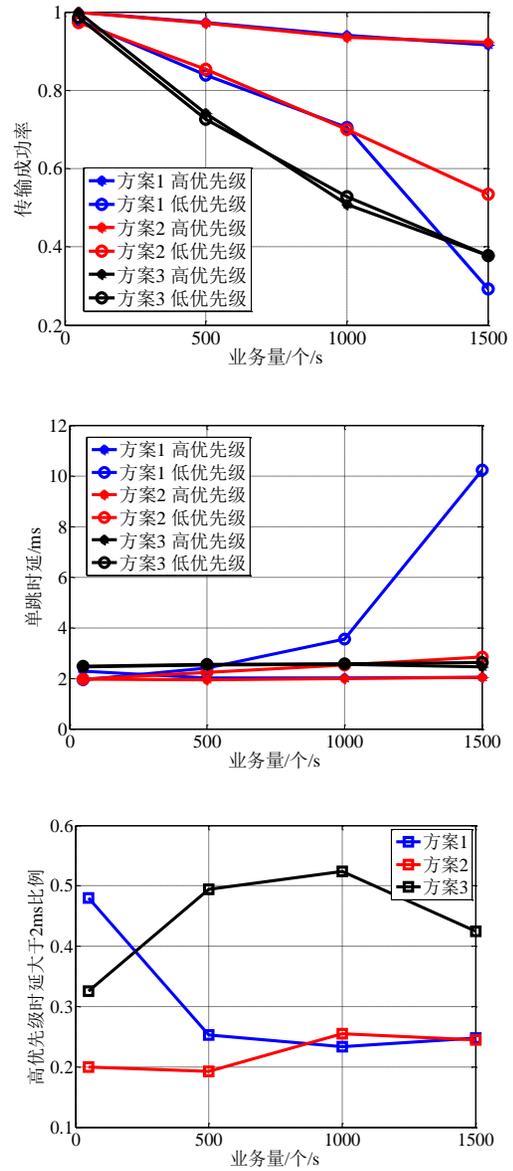


图4 子时隙长度为 $60\mu\text{s}$ 时的性能对比

Fig. 4 Performance comparisons with $60\mu\text{s}$ sub-slot length

传输成功率方面,由于保证了高优先级的竞争窗口始终小于低优先级,方案1与方案2的高优先级传输成功率均较为理想,数值相差不大,区别主要体现在低优先级传输成功率。当子时隙长度较小时,竞争窗口长度比较大,可以通过方案2的预约机制,缓解一部分冲突,使得方案2的性能优于方案1。但方案2并不能完全解决冲突,对于第一个子时隙发生的冲突,方案2也无法克服,且前一个帧的数据顺延到下一个帧,仍有一定概率在第一个子时隙冲突,因此,当子时隙长度较大时,竞争窗

口长度小,此时第一个子时隙冲突的概率本来就比较大,且相比于方案1,方案2进一步减小了竞争窗口的值,因此在这种情况下方案2的性能会不如方案1。当子时隙长度小于 $60\mu\text{s}$ 时,方案2优于方案1;反之,方案1优于方案2。

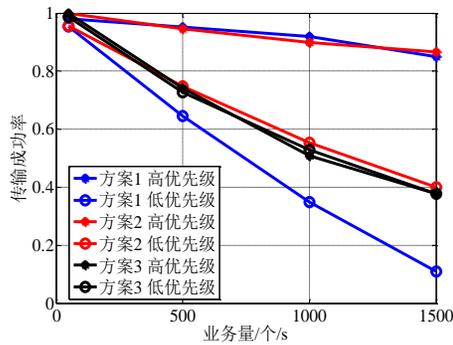


图5 子时隙长度为 $100\mu\text{s}$ 时的性能对比

Fig. 5 Performance comparisons with $100\mu\text{s}$ sub-slot length

在时延方面,方案1与方案2的高优先级时延差别不大,平均单跳时延约为 2ms ,能够达到对标TTNT系统的指标要求。方案1与方案2的区别主要体现在低优先级时延,方案1的时延比方案2低,这是因为方案2增加了预约机制,对于非第一个时

隙的冲突,会在下一个 2ms 再进行竞争,因此会增大时延。

在高优先级超过 2ms 的情况出现的比例方面,方案1与方案2在各种情况下均类似,这是因为高优先级业务较少,可以保证在最近的 2ms 帧发出,时延超出 2ms 的概率等于在前一个 2ms 帧的第一个 0.5ms 产生业务的概率,约为 25% (总业务量为50次时偏离比较远是因为业务过少,统计特性不明显),这种情况无法避免。如图6所示:

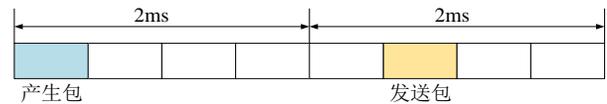


图6 时延大于 2ms 举例

Fig. 6 Case of the delay larger than 2ms

综合以上结果可以得出,在本文提出的两种方案中,高优先级业务的时延均在 2ms 左右,且传输成功率较高,能够达到对标TTNT系统的指标要求。在低优先级业务性能指标方面,对比两种方案的仿真结果可以得出,当可实现的子时隙长度较小时(小于 $60\mu\text{s}$),竞争窗口长度较大,此时能够发挥方案2的优势,令在本帧冲突的业务在下一帧重新竞争,以略微增加时延为代价,提升传输成功率。而当可实现的子时隙长度较大时(大于 $60\mu\text{s}$),竞争窗口长度较小,此时不适宜在第一个 0.5ms 中再预留一部分资源作为预约阶段使用,直接使用方案1反而有利于减小业务冲突。

4 结论

基于自组织网络构建的多无人机信息系统,可以为各种有人/无人作战单元间的态势共享和作战协同提供低时延、强实时的通信网络保障,是无人机军事应用的一个重要领域。本文充分吸收了TDMA、CSMA和SPMA协议的各自优点,提出了面向低时延业务的无人机自组织网络的混合接入协议,设计了两种不同硬件复杂度的实现方案,通过对规模为30个节点的全联通网络的仿真分析,验证该方案在传输成功率、单跳时延等方面性能都相对优于传统接入协议,较好地满足了自组织网络对时敏业务单跳 2ms 的时延要求。针对本文所提出的方案中低优先级业务传输成功率随着业务量增

加发生下降的问题,在后续工作中将进一步优化帧结构,考虑把数据帧进一步缩短,通过跳频和跳时的方式减小碰撞。

参 考 文 献

- [1] Gupta L., Jain R., and Vaszkun G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks [J]. IEEE Communication Surveys and Tutorials, 2016, 18 (2): 1123 - 1152.
- [2] 高思颖,毛中杰,李东,徐鹏杰,赵天鹤,周杰,俞晖. 无人机自组织网络组网与接入技术的仿真设计与实现[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2019, 48(01): 56-63.
- [3] Y. Wang, F. Yang, G. Huang, et al. Media access control protocol with differential service in aeronautical frequency-hopping ad hoc networks [J]. Journal of Software, 2013, 24 (8): 2214 - 2225.
- [4] W. Zhang, N. Lv, S. Du. A Balancing Priority MAC Protocol under High Load for Aviation AdHoc Network [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 4 (5): 656-661.
- [5] 王江斌. 基于动态 TDMA 的跳频电台接入技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2010.
- [6] S. Pourmohammad, R. Soosahabi, D. Perkins and A. Fekih. An analytical QoS model for IEEE 802.11-based single and multihop wireless networks. 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Honolulu, HI, USA, February 3-6, 2014.
- [7] H. Zhai, Y. Kwon, and Y. Fang. Performance analysis of IEEE 802.11 mac protocols in wireless lans [J]. Wireless Communications Mobile Computing, 2004, 4 (8): 917 - 931.
- [8] SITHARAMAN S G. Modeling queues using Poisson approximation in IEEE 802.11 ad-hoc networks [C]. 2005 14th IEEE Workshop on Local & Metropolitan Area Networks, Crete, Greece, September 18, 2005.
- [9] K. Kosek-Szot. Throughput, delay, and frame loss probability analysis of IEEE 802.11 DCF with M/M/1/K queues [C]. 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, UK, September 8-11, 2013.
- [10] Y. Tang, D. Grace, T. Clarke and J. Wei. Multichannel non-persistent CSMA MAC schemes with reinforcement learning for cognitive radio networks [C]. 2011 11th International Symposium on Communications & Information Technologies (ISCIT), Hangzhou, China, October 12-14, 2011.
- [11] S. Gao, M. Yang and H. Yu. Modeling and parameter optimization of statistical priority-based multiple access protocol [J]. China Communications, 2019, 16 (9): 45-61.
- [12] Wang Luman, Li Hai and Liu Zhifeng. Research and pragmatic-improvement of statistical priority-based multiple access protocol [C]. 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, October 14-17, 2016.
- [13] M. Yang, Q. Zhang, Y. Tu and H. Yu. Modeling and Performance Analysis of Statistical Priority-based Multiple Access Protocol [C]. 2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Beijing, China, August 16-18, 2018.
- [14] 周赛. TTNT 数据链的多址接入协议研究[D]. 西安电子科技大学, 2015.
- [15] E. Altman and A. Jean-Marie. The loss process of messages in an M/M/1/K queue [C]. 1994 International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Toronto, ON, Canada, June 12-16, 1994.

作者简介:

孙士勇(1976—),男,硕士研究生,研究员。主要研究方向:信息通信网络总体、无人机自组织网络、通信网络人工智能技术。

归琳(1975—),女,博士,研究员,主要研究方向为无线网络资源管理、网络管控协议、Massive MIMO 物理层通信技术。

朱世超(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为无人机辅助无线网络资源管理、无线自组网技术。

郎修璞(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为星地一体化卫星网络技术、软件定义网络以及卫星网络管控技术。

一种自适应变构型无人高超声速飞行器布局设计

詹 韧¹, 王 玲², 张 燕²

(1. 95791 部队, 甘肃酒泉 735000; 2. 空军预警学院, 湖北武汉 430000)

摘 要: 本文针对未来空战的特点要求, 着眼未来作战体系设计出一种自适应变构型无人高超声速飞行器: 使用可收放鸭翼装置, 飞行器在空中进行低高速飞行状态切换时, 可以打开鸭翼舱门, 将鸭翼收进飞机舱内; 设计了主翼外段变后掠翼结构, 在低速飞行状态下, 主翼具有较大的展弦比和较小的后掠角, 飞行器具有优越的升阻特性及长航时飞行性能, 而在高速飞行状态下, 后掠角显著增大, 机翼面积明显减小, 可以延迟激波的产生、减小激波阻力, 从而改善高速飞行性能; 主机翼采用射流环量控制技术, 翼后缘采用钝后缘设计, 上侧增加射流喷口, 利用 Coanda 效应控制分离位置, 从而通过控制射流速度控制飞机升力。气动仿真结果表明, 低速下飞行器的升力较大, 不稳定性增加, 机动性随之大幅提高; 飞行器以高速形态进行高超声速飞行时, 与低速形态在高速下的飞行相比, 气动阻力降低。

关键词: 自适应; 变构型; 可收放鸭翼; 环量控制; 变后掠翼; 气动仿真

An Unmanned Hypersonic Vehicle of Self-Adaptive Variant Configuration Design

ZHAN Ren¹, WANG Ling², ZHANG Yan²

(1. Company of Postgraduate Management, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China; 2. Department of Space Equipment, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: An unmanned hypersonic vehicle of self-adaptive variant configuration is designed under the environment of future air battlefield according to the features and requirements of future air combat. The retractable canard with cabin is employed which is released or retracted during low or high-speed flight. The variable swept wing structure of the outer segment of the main wing is designed: higher aspect ratio and lower swept angle are obtained during low-speed stage providing prominent lift-drag characteristics and long-flight time performance, while lower aspect ratio and higher swept angle are obtained during high-speed stage that are contributed to delay shock wave occurrence, reduce the shock wave drag, improving high-speed flight performance. Active jet circulation control technology is used on the main wing that is composed of blunt trailing edge and an additional upper jet slit. Coanda effect is adopted to control the separation point to control the jet speed generating lift. The aerodynamic simulation results show that higher lift and instability exist that enhance the agility, and the high-speed configuration is proved to decrease the drag compared to low-speed configuration during high-speed flight.

Key words: Self-adaptive; Variant configuration; Retractable canard; Circulation control; Variable swept wing; Aerodynamic simulation

1 引言

空天一体化力量具有快速反应、全球到达、高效突防、远距离精确打击和使用灵活等独特优势, 很好地满足了高技术条件下信息化战争的需要, 也

必将成为未来打赢的决定性因素。因此, 人们迫切需要一种具有更大的飞行空域和速域, 能够高低空、高低速兼顾, 可以从地面起飞、穿越大气层飞行等, 即可监视侦查敌航天装备又可打击敌航空武器的飞行器; 高速飞行器特别是高超声速飞行器如果

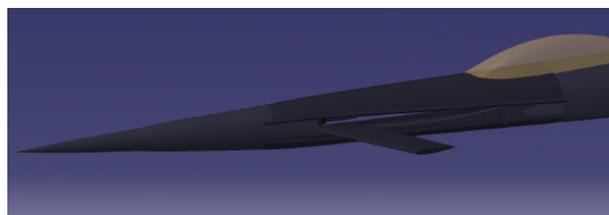
要考虑飞行员进行操纵,则全机在设计上需要为维持飞行员在临近空间恶劣环境下的生命维持而付出较大的重量代价,因此多以无人飞行器的形态出现。国内外目前对变构型飞行器已经展开了部分研究。刘晓斌^[1]提出了变后掠机翼+容积可变构型、机身展开+容积可变构型、翼乘波构型等三种可能的变构型方案,为后续变构型研究提供了一定的指导与借鉴;张登成等^[2]设计了一种宽速域变构型高超声速飞行器,结果表明飞行器在全速域范围内气动特性较好;马洋等^[3]提出一种基于升力体的变构型超声速飞行器布局,通过机翼的伸缩/后掠变形来兼顾高速和低速条件下的气动性能;顾祥玉等^[4]提出了一种基于翼梢变形的自适应高速飞行器布局,包括中心体,机翼,两个可变翼梢小翼等;刘燕斌等^[5]一种基于可变构型空天飞行器的气动布局设计方法,包括:分别确定可变构型空天飞行器的低速基准布局及高速基准布局;黄鸣阳等^[6]设计了包含慢频率扑动、展向折弯、弦向扭转和结构柔性变形的扑翼模型和对应的多段柔性变体扑翼飞行器;沈元^[7]提出了一种大变形柔性扑翼模型,展开了深入研究;李晋先^[8]通过对高超声速客机和变体飞行器的研究,设计了一种采用智能材料驱动的可收放机翼的超声速飞行器;李天桓^[9]设计了一款机翼掠角可调的鸭式布局超音速军用多功能飞行器;李涛等^[10]提出了一种可变机翼外翼后掠角和可倾斜小翼的飞翼式飞机,大大减小了各个速度阶段的阻力;刘双喜等^[11]设计了一种变面积鸭式前掠翼变体飞行器,大幅提高了飞行器飞行灵活性。此外,对各种变形机翼的气动和控制方面的研究也逐渐深入^[12-15]。本文在上述研究的基础上,结合可收放鸭翼、变主翼结构、环量控制技术,设计了一种自适应变构型高超声速无人飞行器,通过各个结构的变化获得对不同速度下气动性能的最优化,具有较好的飞行任务弹性,能够兼顾高、低速飞行的需求。

2 构型设计

2.1 可收放鸭翼布局设计

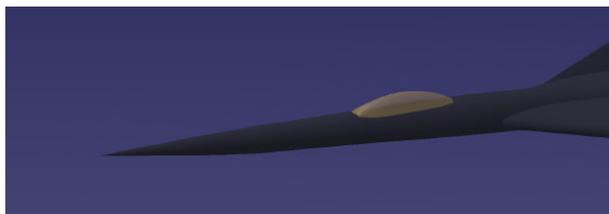
为了兼顾高速和低速性能,本文采用了可收放鸭翼布局设计,根据飞行任务和作战环境,可以切换高低速飞行状态时控制鸭翼的收放。在中低速

时使用鸭翼布局主要有以下考虑:(1)当飞机处在大迎角状态时加强机翼的前缘涡流,改善飞机大迎角角状态的性能,也有利于飞机实现短距起降;(2)用于改善跨音速过程中安定性骤降的问题,同时也可以减少配平阻力、有利于超音速飞行;(3)在降落时,鸭翼还可偏转一个很大的负角,起减速板的作用。但在高马赫数飞行时,产生的激波阻力过大,对流经主翼的空气扰动明显加大,需要将鸭翼收进机舱内。低速和高速状态下的鸭翼形态如图1所示。



(a) 低速状态下的鸭翼(已放出)

(a) Canard at low speed(released)



(b) 高速状态下的鸭翼(已收起)

(b) Canard at high speed(retracted)

图1 低/高速状态下鸭翼收发示意

Fig. 1 Scheme of canard release and retraction

2.2 主机翼变形设计

为了兼顾自适应变构型高超声速飞行器高速巡航与低速作战能力,通过改变飞机的机翼后掠角来改变飞机的飞行特性,加大飞行包线。主机翼变形结构就是将机翼外段骨架设计成一个带有对角作动筒的四边形机构,利用四边形的不稳定性,当作动筒拉动时,可以控制四边形的变形,从而改变机翼外段形状和前缘后掠角,切换到高速状态时后掠角达到最大。外蒙皮采用柔性可变形的“智能蒙皮”,可以跟随主翼变形,保证主翼在变形过程中机翼整体仍具有光滑的气动外形。主翼的变形原理和变形过程分别如图2-3所示。

2.3 环量控制技术

考虑到未来飞行器对结构重量、隐身性能、高

超声速控制效率等的更高要求,自适应变构型高超声速飞行器在主机翼后缘采用射流环量控制技术进行飞行控制^[16]。其原理是在机翼钝后缘上侧布置射流喷口,利用Coanda效应,高速气流带动机翼绕流向下翼面偏转,从而增加机翼环量,获得更高升力。在飞行中,通过控制左右两侧机翼升力大小,可以使飞机进行滚转等机动动作,与副翼控制原理相同。主机翼的设计分别如图4-5所示;图6表明了本文所采用的机翼钝后缘环量控制推迟附面层分离效果。

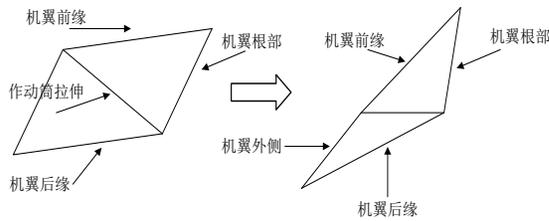
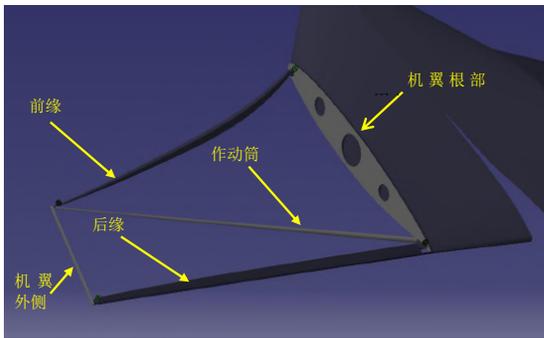
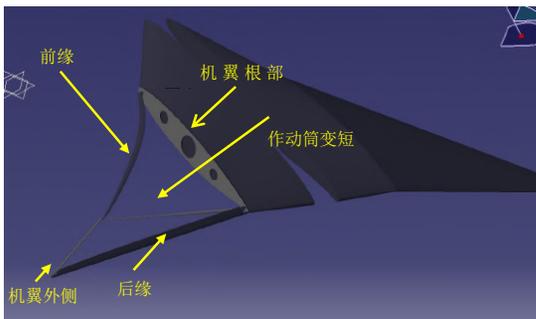


图2 主机翼变形原理示意图
Fig. 2 Scheme of the main wing transformation



(a) 低速状态下的机翼骨架
(a) Structure of the main wing at low speed



(b) 高速状态下的机翼骨架
(b) Structure of the main wing at high speed

图3 主机翼变形过程

Fig. 3 Transformation of the main wing

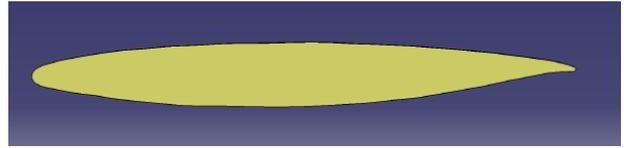


图4 主机翼翼型截面图
Fig. 4 Airfoil of the main wing

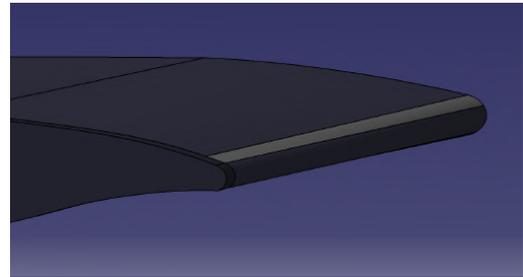


图5 机翼钝后缘及射流喷口设计
Fig. 5 Design of blunt rear edge and jet slot

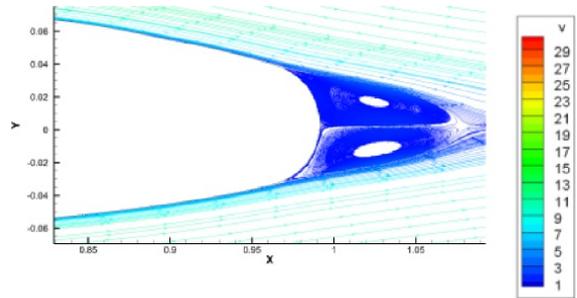


图6 钝后缘环量控制推迟附面层分离效果
Fig. 6 Effect of separation delay via circulation control of blunt rear edge

2.4 翼身融合体设计

自适应变构型高超声速飞行器机身沿展向光滑过渡到机翼,沿飞机纵轴的最大截面处,机身机翼几乎完全融合,如图7所示。采用翼身融合体除可以获得更高升阻比之外,还可以更合理地利用飞机内部空间,特别是便于设备舱和油箱舱的布置。在同样平面投影面积条件下,采用翼身融合体其浸润面积要比翼身分开的飞机小;融合体布局可以控制飞机的横截面面积分布曲线,从而获得附加的可

用空间,而浸润面积增加不多,同时还可保证飞机的最大横截面积最小,亦可增大油箱容量。

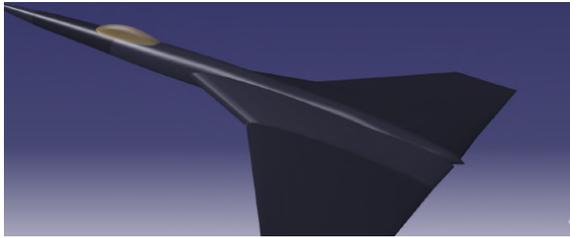


图7 翼身融合设计

Fig. 7 Blended Wing Body design

3 仿真验证

为了说明自适应构型高超声速飞行器在低速和高速状态下的飞行状态和机身压力分布,现对其在低速($Ma=0.6$)和高速($Ma=5$)两种飞行速度下不同飞行形态进行了数值仿真,低速形态以低速 $Ma=0.6$ 飞行仿真结果如图8~10所示。

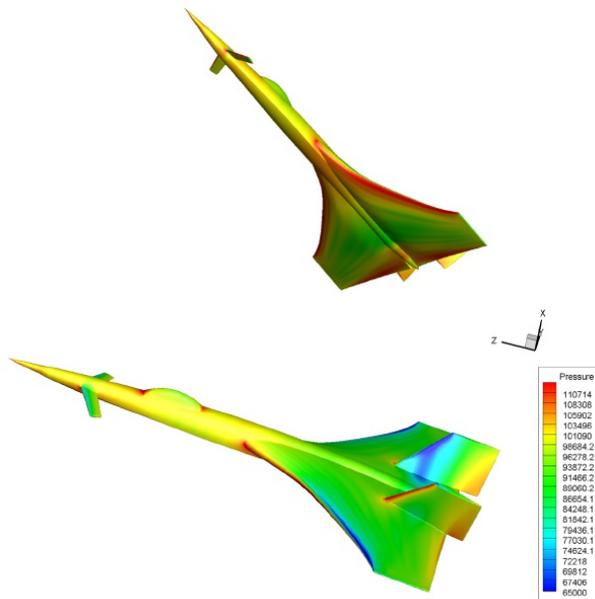


图8 机身压力分布图(低速形态, $Ma=0.6$)

Fig. 8 Static pressure contour (low-speed configuration, $Ma=0.6$)

由上述仿真结果可以看出,自适应构型高超声速飞行器低速形态下,较大面积的主机翼、边条翼和鸭翼共同提供升力,同时前方鸭翼可以为后方主机翼提供一定的涡升力,且鸭翼导致飞机的不稳

定性增加,机动性随之大幅提高,飞机的低速性能较为优越。

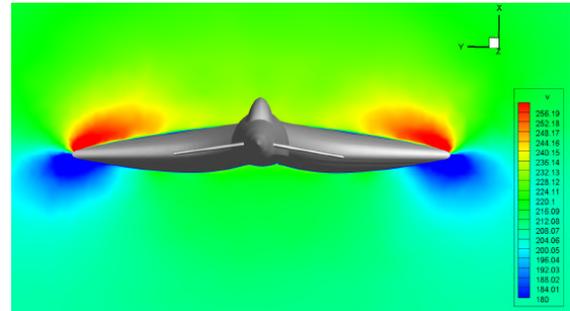
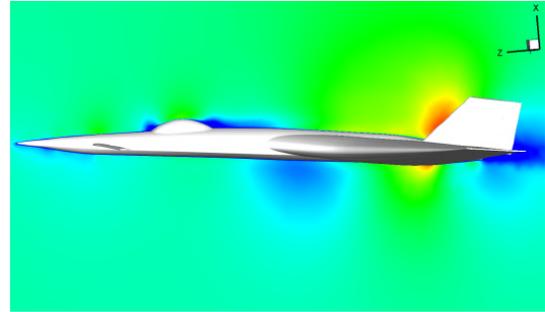


图9 飞机周围速度截面云图(低速形态, $Ma=0.6$)

Fig. 9 Velocity contour (low-speed configuration, $Ma=0.6$)

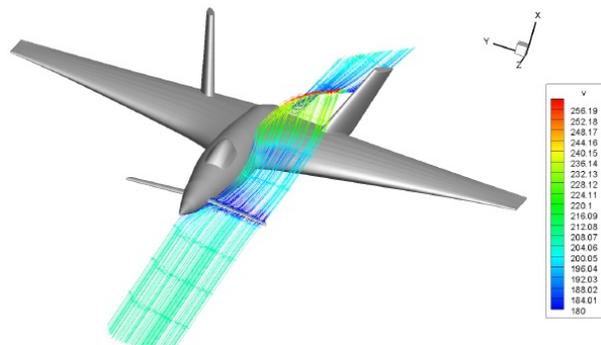


图10 鸭翼和机翼绕流流线图(低速形态, $Ma=0.6$)

Fig. 10 Streamlines near the leading edge of the wing and canard (low-speed configuration, $Ma=0.6$)

低速形态以高速 $Ma=5$ 飞行仿真结果如图11~13所示。

由上述仿真结果可以看出,自适应构型高超声速飞行器以低速形态进行高超声速飞行时,鸭翼前缘存在一个强激波,导致鸭翼前后压力分布差异明显,由此也会产生较大阻力,对鸭翼结构强度要求也有明显提高,而且从鸭翼绕流情况可以看出,该强激波导致鸭翼的操纵性能降低,对飞机的机动性没有明显改善;后方主机翼由于后掠角较小,激波分布不佳,波阻较大。

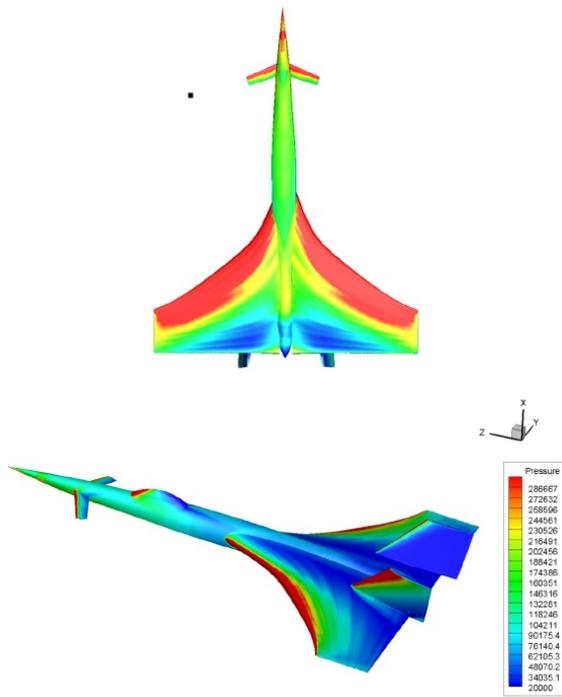


图 11 机身压力分布图(低速形态, $Ma=5$)
 Fig. 11 Static pressure contour (low-speed configuration, $Ma=5$)

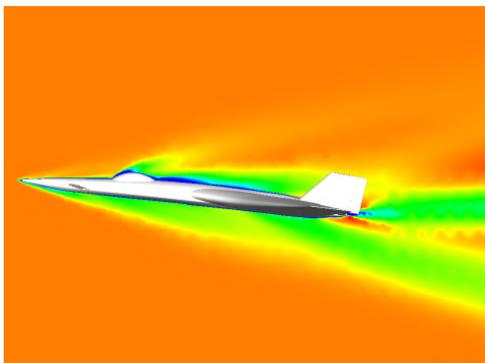


图 12 飞机周围速度截面云图(低速形态, $Ma=5$)
 Fig. 12 Velocity contour (low-speed configuration, $Ma=5$)

高速形态以高速 $Ma=5$ 飞行仿真结果如图 14~16 所示。

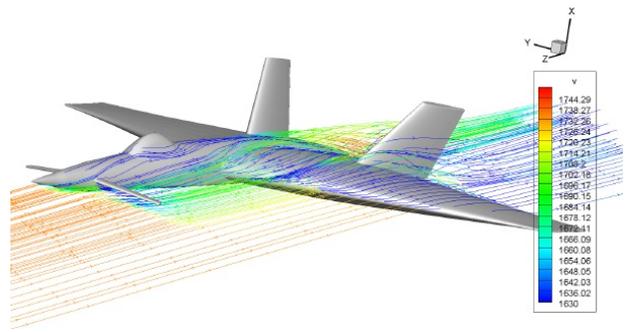


图 13 鸭翼与机翼绕流流线图(低速形态, $Ma=5$)
 Fig. 13 Streamlines near the leading edge of the wing and canard (low-speed configuration, $Ma=5$)

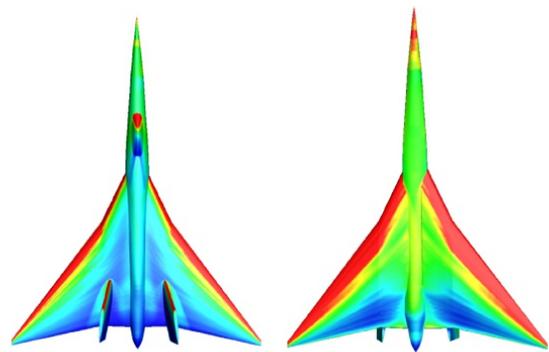
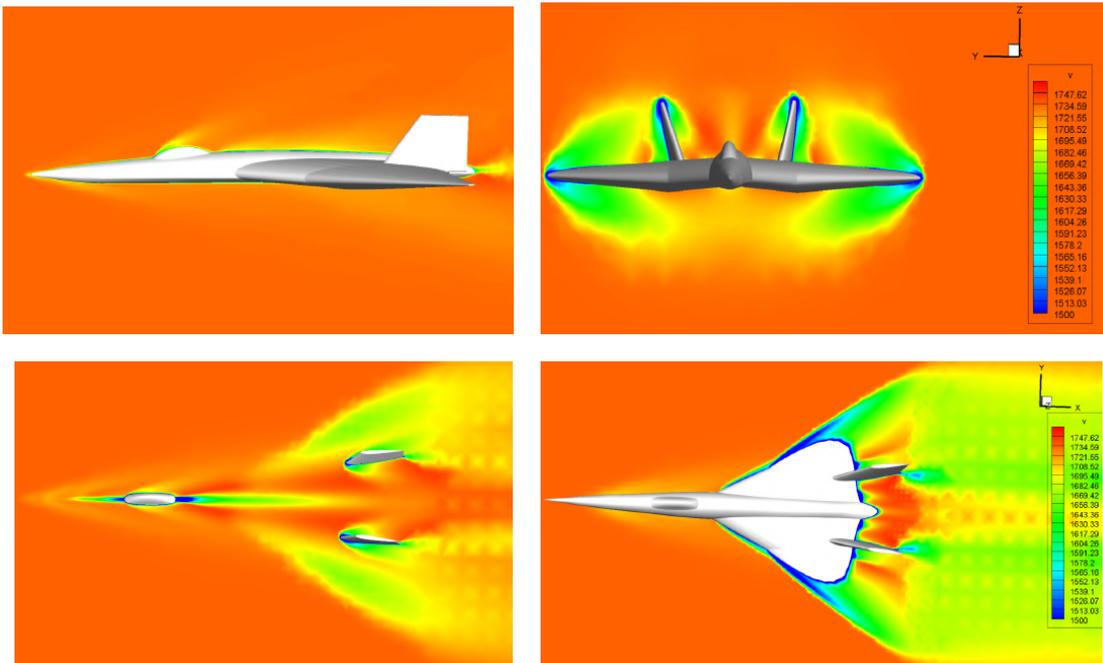
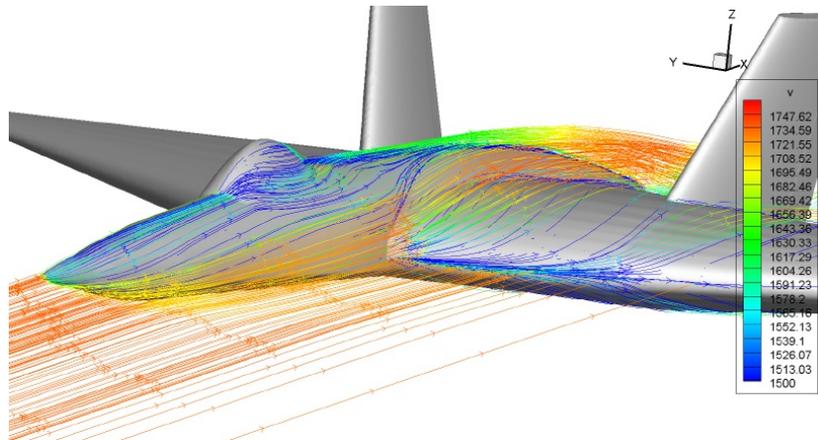


图 14 机身压力分布图(高速形态, $Ma=5$)
 Fig. 14 Static pressure contour (high-speed configuration, $Ma=5$)

由上述仿真结果可以看出,自适应变构型高超声速飞行器以高速形态进行高超声速飞行时,激波与较大后掠角的主机翼前缘契合较好,波阻有所降低。鸭翼收起后,机身呈细长体,根据速度截面图可以看到,机身气动阻力降低。由机翼前缘绕流可以看到,飞行器在高速形态下作高超声速飞行时,机翼前缘存在较强的展向气流,需要进一步考虑优化。除此之外,飞机座舱盖部分在高速飞行时前后方存在较大的压力差,阻力较大,结构强度要求较高,需要进一步优化。

图15 飞机周围速度截面云图(高速形态, $Ma=5$)Fig. 15 Velocity contour (high-speed configuration, $Ma=5$)图16 机翼前缘绕流流线图(高速形态, $Ma=5$)Fig. 16 Streamlines near the leading edge(high-speed configuration, $Ma=5$)

4 结论

本文设计的自适应构型高超声速飞行器主要进行了以下工作:

(1) 提出了采用收放鸭翼结构,大大提高了飞机的飞行性能:该飞行器可以根据巡航速度,改变鸭翼后掠角度,或者将鸭翼收进机身以改善高超声速性能。

(2) 提出了主翼外段变形结构设计:用平行四边形和作动筒组成连杆机构,控制机翼外段区域骨

架形状,配合新型的柔性可变形外蒙皮,改变机翼外段形状,从而改变后掠角和机翼面积。

(3) 主机翼控制采用环量控制技术:缘射流环量控制结构没有活动面,减小了襟副翼等活动机构的结构重量和雷达反射面积,提高了高超声速巡航时的控制效率。

(4) 仿真验证:对飞行器高速和低速下的性能进行了气动仿真,结果表明该设计改善了布局对不同速度下的气动适应性。

参 考 文 献

- [1] 刘晓斌. 高超声速飞行器变构型方式探索研究[J]. 战术导弹技术, 2018, 000(004):1-5.
- [2] 张登成, 罗浩, 张艳华, 等. 宽速域变构型高超声速飞行器气动特性研究[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(01):132-138.
- [3] 马洋, 周伟, 秦伟伟. 基于升力体的变构型超声速飞行器气动特性研究[J]. 四川兵工学报, 2017, 038(012):191-194,226.
- [4] 顾祥玉, 陈培芝, 马梦颖, 等. 一种基于翼梢变形的自适应高速飞行器布局:CN111003160A[P]. 2020.
- [5] 刘燕斌, 陈柏屹, 沈海东, 等. 一种基于可变构型空天飞行器的气动布局设计方法:.
- [6] 黄鸣阳, 肖天航, 昂海松. 多段柔性变体扑翼飞行器设计[J]. 航空动力学报, 2016, 31(008):1838-1844.
- [7] 沈元. 柔性翼变体飞行器设计与特性研究[D]. 南京航空航天大学;
- [8] 李晋先. 一种基于智能材料的可收放变后掠翼飞行器设计[J]. 电子制作, 2018, 000(021):65-67,64.
- [9] 李天恒. 一种鸭式变掠翼超音速飞行器的设计[J]. 通讯世界, 2019, 26(04):310-311.
- [10] 李涛, 田雨, 殷春平, 等. 一种可变机翼外翼后掠角和可倾斜小翼的飞翼式飞机:., CN210235305U[P]. 2020.
- [11] 郝银凤, 王帮峰, 芦吉云, 等. 飞行器变体机翼结构设计与仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(009):36-40.
- [12] 刘双喜, 闫斌斌, 戴沛, 等. 一种变面积鸭式前掠翼变体飞行器:., CN110979682A[P]. 2020.
- [13] 孙祥程, 韩忠华, 柳斐, et al. 高超声速飞行器宽速域翼型/机翼设计与分析[J]. 航空学报, 2018, v.39(06):31-42.
- [14] 胡文华. 可变体飞行器折叠翼复杂动力学特性研究[D]. 北京工业大学.
- [15] 徐文莹. 近空间可变翼飞行器小翼最优伸缩策略研究[D]. 南京航空航天大学.
- [16] 陈廷楠. 应用流体力学[M]. 北京:航空工业出版社, 2000.

作者简介:

詹韧(1994~),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为飞行器设计。

王玲(1982~),女,硕士,讲师,主要研究方向为作战指挥。

张燕(1982~),女,博士,讲师,主要研究方向为训练管理。

人-智能体协作系统的信任校准

刘伟, 武钰

(北京邮电大学人工智能学院, 北京 100876)

摘要: 人工智能技术的发展, 让传统的自动化系统发展为智能体, 形成了新的人-智能体协作关系。信任是影响人类团队协作的重要因素, 团队之间只有形成良好的信任, 并且能够在信任遭到破坏时及时修复, 人类团队才能继续高效的完成任务。对于人-智能体协作系统, 信任同样扮演着重要的作用, 人类对智能体的过信任和不信任都不能实现高效的人-智能体协作。为了研究人-智能体协作系统的信任校准, 首先总结了人-智能体协作系统的特点, 并且将人类团队的信任和信任校准与人-智能体协作系统的信任和信任校准作对比, 回顾基于态势感知透明度模型 (SAT) 解决人-智能体信任校准的方案, 讨论了当前人-智能体信任校准模型的实践意义和其未来发展的方向。

关键词: 人-智能体协作系统; 信任校准; 态势感知; SAT模型

Human-Agent teaming system trust calibration

LIUWei, WUYu

(Beijing University of Posts and Telecommunications, School of Artificial Intelligence, Beijing 100876, China)

Abstract: The development of artificial intelligence makes the conventional automation system become agent which is so intelligent that the agent can complete the task independently and efficiently. Thus, the new human-agent teaming relationship forms. Trust can affect the human team significantly. When the human team builds up appropriate trust and repair the broken trust timely, the human team can complete the task efficiently. Likewise, for the human-agent teaming system, overtrust and distrust will dampen the human-agent teaming performance. To study the human-agent teaming system trust calibration, the characteristics of the human agent teaming are summarized at first. Secondly, on the basis of the comparison of human-agent teaming and human teaming, a trust calibration model of human-agent teaming-situation awareness based transparency (SAT) is reviewed. At last, practical significance of trust calibration and the further study need to be conducted in the future are discussed.

Key words: human-agent teaming system; trust calibration; situation awareness; SAT model

1 引言

随着人工智能技术的发展, 自动化系统的智能程度不断提高, 复杂的自动化系统如智能座舱、空中管制系统、自动驾驶系统的涌现和发展事实上形成了新的人-机协作形式。自动化系统可以帮助甚至代替人类完成特定的控制任务, 具有一定的自主能力, 实现了人与机器的重新分工。自动化系统中的机器已经不仅仅是受到人类控制的工具, 其在某种程度上拥有对特定任务的子任务的控制权, 我们把拥有对部分任务的控制权并且可以独立完成任务的机器或者是软件系统称为智能体。人与智能

体的关系从简单的机器服从人的从属关系变成智能体辅助人的协助关系, 这种关系使得人与机器的关系更为平等, 与人类团队更为相似。在人类团队的协作中, 信任对团队绩效有很大影响, 相似地, 在人-智能体协作系统中建立恰当的人与智能体之间的信任可以显著提升系统完成任务的效率, 因此建立人-智能体之间恰当的信任成为系统设计的一项重要任务。人-智能体协作系统理想的信任状态是人能够根据智能体实际的工作能力去信任智能体, 以期恰当地发挥出人和智能体各自的优势。而在实际情况下, 人类操作者在不同情境下能够赋予智

能体的信任应该是随情境具体变化的,应该建立人-智能体协作系统的动态信任校准体系。

本文总结了近期对于人-智能体协作的研究,提出了人-智能体协作的框架,讨论了人类团队信任校准的过程和影响因素,并且在人类团队的信任校准的基础上提出了人-智能体协作系统动态信任修复的模型。在本文的第一部分,我们讨论信任的定义,并且将人类团队与人-智能体团队之间的信任进行对比;在本文的第二部分,我们先讨论了人类团队的信任校准,随后我们讨论了在人-智能体协作中的信任校准,并且提出了基于SAT模型的动态信任校准方法。在本文的第三部分,讨论了人-智能体信任校准的实践意义和未来的发展方向。

2 人-人团队的信任与人-智能体团队的信任定义

长期以来,信任一直是人类的理解、发展、沟通、人际关系和组织行为的重要组成部分。信任有多种定义方式,很多研究者将信任定义为态度或者期望,Julian B. Rotter将信任定义为“个人或者团体所拥有的对其他个人或者团体的言辞、许诺、口头或者书面表达的依赖程度的期望”^[1],Rempel认为信任是“个体对未来一系列事件发生客观可能性的期望”,Barber^[2]认为信任是“对竞争角色表现的期望”,或者说“是对他人信用义务和责任的期待,即是处在社会关系中的其他个体有道德责任和义务表现出对他人的关切”。以上这些定义均包含信任主体对于被信任主体的行为(承诺,许诺,口头表达)和结果(具体行为表现、承担的责任和道德义务)可依赖程度的期望,上面的定义认为信任是一种期望或者态度。

另一个常用的描述信任的方式是意图或者是行为的意愿,这种定义方式认为信任是一种行为倾向,它会指引在信任关系中的人倾向于“在依赖于另一个体或者团体的同时愿意把自己处在一个被动的地位”^[3]，“愿意依赖对其有信心的交换伙伴”^[4]。

Deutsch, M. 认为信任是“一种持久的状态或者品格”^[5],即认为信任是一个态势变量,信任是指对另一方的期望或信心,其基础是一方依附于另一方的合作或依附于另一方有利行为的可能性^[6]。

早期对于信任的讨论^{[7][8]}主要把信任作为一种人类的本质特征或者是人们所共有的特征(总体信任)讨论而忽略了不同信任关系和信任关系中不同个体(关系信任)的差异。随后的研究聚焦于信任中的特定关系^{[9][10]}如情侣之间的信任关系,将不同的信任关系区分开来有助于了解信任在不同关系不同领域的作用。Couch, L及其同事对于信任概念理解进行了进一步改进^{[11][12]},即用信任目录来描述信任的概念。实际上,信任目录包含信任的三个方面,包括总体的信任(将信任作为人类本质的一部分)、同伴信任(情侣之间的信任)和网络信任(处于个人亲密的社交关系中家人和朋友之间的信任)。Lewicki^[13]及其同事将信任与特定的关系联系起来,将信任归纳为四个类型见表1,微信任(Calculus Based Trust CBT)、基于认同的信任(Identification based trust IBT),对应于CBT和IBT衍生出对应的不信任概念CBD(Calculus Based Distrust)、IBD(Identification Based Distrust)。

Sheridan^[14]将人-智能体团队的信任与人类团队的信任区分开来, LeeJD和MorayN^[15]提出了在自动化环境中信任的三个基本要素:性能、流程、目的。性能元素指的是自动化系统近期和过去的运行情况,包括以下几个基本方面:可靠性、可预测性、机器性能;流程元素指的是自动化辅助决策系统的算法适用于具体情景的程度和自动化系统功能的可解释性;目的元素指的是自动化系统的功能实现与设计者设计意图的符合程度和能够解释该自动化系统设计初衷的程度。上面的信任的三个维度和其他研究者对于信任的定义有重合之处,比如信任的意图因素与Rempel定义信任中的可预测性和可靠性类似,但是流程因素和目的因素是人-智能体协作系统所特有的,流程元素强调了智能系统对于具体场景的可用性和可解释性,这两点对于人-智能体协作系统的信任关系十分重要。当前的人工智能为弱人工智能,即其仅在有限领域的某些方面表现出优于人类智能的一些特质,在使用智能系统时我们必须描述该系统是否能胜任或者合适地承担当前的工作。同时我们必须保证智能系统的可解释性,否则人与智能系统之间的信任就无从谈起。

人-智能体协作系统中的信任有其明确的特

点,人-智能体协作系统的信任与人类在工作关系中形成的信任相似,人-智能体协作系统具有很强的目的性。人-智能体协作系统在大多数情况下需要完成特定的任务并且需要达到特定的效果(满足相应的技术指标),但在民用领域已经出现了具有陪伴功能的智能体,广泛应用于健康护理体系,其实现任务的目的性不强但要求与用户产生真实的

情感交互,这类人-智能体协作系统的信任模型与人类之间亲密关系(如情侣关系)中的信任相似。根据对信任定义的研究,信任的概念框架需要考虑到不同人-智能体的目的特征和用户的不同期望,目的和期望这两个特征决定了人-智能体协作系统所建立的关系性质,有助于设计者根据不同关系中的信任进行个性化的设计。

表1 按关系定义的四种信任
Table 1 Four types of trust defined by relationship

信任类型	含义	信任关系的建立方法
CBT	出于非个人的工作信任,在这种关系中,信任双方拥有相互积极的合作期望	1. 合作中有连续一贯的行为 2. 按时完成工作 3. 信守承诺
IBT	IBT更多依赖于共同的价值观,IBT的形成是一个长期的过程,常见于亲密的关系如情侣、朋友,CBT关系经过长期的磨合可能发展为IBT	1. 共同的价值观 2. 共同的爱好 3. 相似或者相容的性格特征
CBD	对应于CBT,是对于工作合作伙伴的负面期望	相对于信任关系建立的失信行为
IBD	对应于IBT,对于亲密关系的负面期望	相对于信任关系建立的失信行为

3 人-智能体协作系统的信任校准

3.1 人类团队的信任校准

研究人-智能体之间的信任校准,需要在特定的关系中进行讨论。人-智能体之间的信任关系更类似于人与人之间的 Arm Length Relationship (ALR)^[16]关系-工作伙伴关系(商业交易很多都是在一个手臂的范围内达成的,通过握手或者签署协议,这种关系与Lewicki提出的IBT概念相似)。在人类的工作伙伴关系中通常用合同来约束双方的行为,失信者一方违反商量好的计划,如时间推迟,金额损失,则造成其合作伙伴的损失,其合作伙伴在信任关系中便成为了受害者。人-智能体的协作类似于ALR,合作的人机双方有共同的意图和利益关系,如果智能体的行为对任务的进程有不利的影 响,比如错误的结果和建议将使人对智能体的信任下降,这个时候智能体协作系统需要采取措施以修复人与智能体之间的信任。

人与人的合作中信任的修复具有四个阶段的时间周期(如图1,图修改自DirksKT^[17])。在第一阶段,人与人的协作具有初始的信任值,当信任关系因为某种原因遭到破坏时,信任的等级会因违反信任关系的行为或者因素而下降;在阶段二,信任关

系中的人对信任关系的破坏行为进行认知,对信任破坏的产生的后果进行认知上和事实上的评估;阶段3是短期信任修复手段,失信的一方和失信行为的受害者通过交流道歉等多种行为进行互动,以期在短期上进行信任的修复;第四阶段,信任关系中的人为了更好地与对方协作,在交流或者管理上进行更为结构性的改进或者调整,建立起长期信任修复的机制,值得注意的是,尽管信任能够修复,但修复后的信任也很难达到最初的信任水平。在人-智能体协作系统中,由于智能体性能方面的局限性,其可能产生错误的判断或者结果,这时智能体必须采取有效的信任修复措施来保持人-智能体协作系统的高效协作。

EdwardC. Tomlinson^[18]及其同事提出并验证了人与人信任修复的框架如图2,该框架将信任修复的先决条件分为三个方面。第一个方面是失信者采取的和解策略,认为失信者采取承担责任的道歉策略(把任务失败的原因归于失信者本身的失误或者缺陷)更为有效,并且失信者需要及时向被失信的人表现自己和解的意愿。第二个方面是过去信任双方的关系特点,如果在过去的合作中失信者频繁地失信,会使信任关系难以修复,同

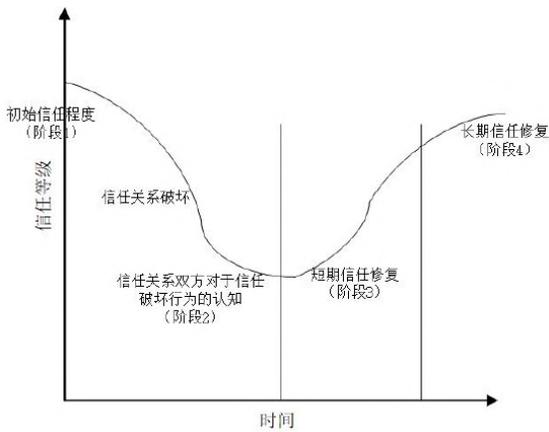


图1 信任修复的生命周期

Fig. 1 Lifecycle of trust repair

时信任破坏的受害者会对未来的合作进行评估,判断失信者在未来失信的可能性,如果失信者再次失信的可能性较小,失信的受害者更愿意达成和解。第三个方面涉及失信者的行为带来的损害的程度,如果失信者的失信行为造成了巨大的损失,那么修复信任关系十分困难甚至使得合作关系立即终止。

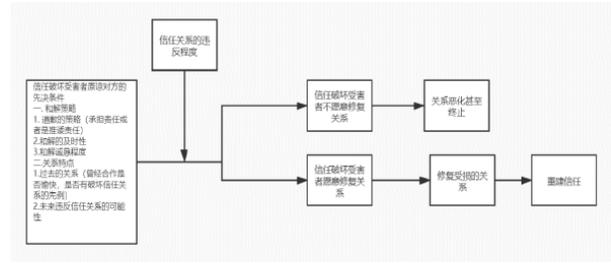


图2 人与人工作关系中的信任修复

Fig. 2 Trust repair in human working relationship

表2总结了人类团队的信任校准策略,人类团队的信任校准策略分为两类,第一类以提升协作效率为目的如解释和提出解决问题的方法,第二类以修复关系为目的如表达遗憾、寻求原谅、进行赔偿等行为。人-智能体协作的信任校准可以向人类团队的信任校准学习,但不能照搬人类团队信任校准的方法,比如智能体在失信时像人类一样寻求原谅,借此方法来校准信任是远远不够的,因为智能体与人类并没有建立强大的情感联系,必须在提升智能体固有能力的基础上进行信任的关系修复。

表2 人类团队的信任的校准策略^[19]

Table 2 Trust calibration of human team

信任校准策略	情景举例
表达遗憾	失信者进行道歉“道歉”
解释	失信者向失信行为受害者解释失信行为的原因,“我迟到了,因为天气不好”
承担责任	失信者向失信行为受害者承担相应的责任,“我没有达成我所承诺的事情,这是我的责任”
表达悔改的意愿	失信者向失信行为受害者承诺不会再次失信,对不起,我不会再次失信“
提出解决问题的方法	失信者向失信行为受害者提供解决的办法,“我会采取新的方法,这样可以达成任务目的”
寻求原谅	失信者向失信行为受害者寻求原谅,“请原谅我的失误”
赔偿 ^{[20][21]}	失信者向失信行为受害者进行赔偿,多为财产赔偿
拒绝	失信者拒绝承担失信的责任,“我失信是因为其他不可控因素,不应该由我来承担失信责任”
沉默	始终保持沉默

人与人信任修复的框架给人-智能体协作系统的信任修复提供了启示。人与人的信任修复策略灵活多变,人进行信任修复采取的策略与信任破坏行为的性质有关。造成人类团队不信任的因素可以分为两类,第一类是能力因素,失信者的能力不能完成其承担的任务,造成信任人的损失;第二类是人格因素,在人类团队的合作中,若有一方隐瞒真实情况或者在某种程度对合作的另一方有欺诈的行为,以上的行为会降低合作者对其的信任程

度。根据这两种不同的失信情况,失信者需要采取不同信任修复策略。

3.2 人-智能体协作系统的信任校准

人类之间的信任程度应该是连续的,人类之间从信任到不信任是渐变的过程,人-智能体之间的协作系统的信任也是连续的。为了简化人-智能体信任关系的描述,通常将人-智能体协作系统的信任描述为两个离散的状态即过于信任(overtrust/complacent)和信任缺失(distrust)。

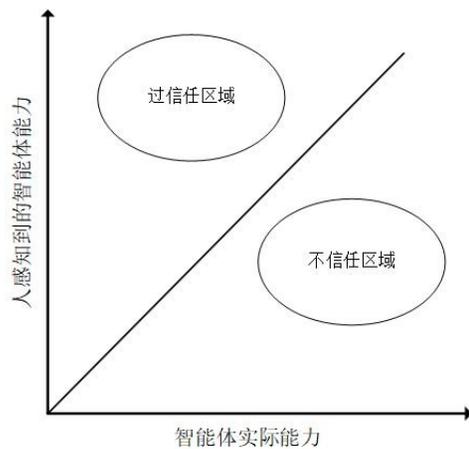
图3 信任校准^[22]

Fig. 3 Trust calibration

在良好的信任校准情境中,操作者对智能体的信任应该随着智能体的可靠性动态变化,如图3所示。操作者对于智能体的信任应该正比于智能体本身的可靠性,理想的信任校准应该落在直线上。如果操作者的信任落在直线的上方即人对智能体的信任超过了智能体本身的工作能力,这种情况下会导致人不在环^[20]的错误。向智能体移交过多的控制权或者对智能体的监管有衰减,则会导致过信任(自满行为),过于信任会带来很大的危害。人对智能体的过度信任导致了1994年俄亥俄州哥伦布市附近的空难,飞行员对自己操作能力的不自信和对自动飞行模式的过度依赖,使飞行员在夜晚低能见度的情况下没有及时监测飞机的速度,导致飞机降落时与跑道相撞(National Transport Safety Board [NTSB], 1994)。如果操作者的信任落在直线的下方即对智能体的信任低于智能体本身的可靠性则表明用户对智能体的不信任,人-智能体协作系统的不信任在辅助决策系统中表现为不采纳智能体合理的建议。早期的飞行员警报系统发生误报的概率很高,因此飞行员很不信任此类报警系统,并且在公司和政府出台不信任此类智能报警系统的规定和政策之后,飞行员们将会主动地无视该类自动警报系统。

人对智能体协作系统的过信任和不信任都会导致人-智能体协作系统的效率下降。在人类团队协作的过程中,人类会不断调整自己与合作伙伴的信任,人类在进行合作任务的时候信任修复是迭代循环进行的,因此人类团队的信任修复进程是一个

闭环。由于人-智能体协作系统中的人和智能体具有各自的优势,并且人-智能体协作系统不断与环境进行交互,人-智能体协作系统的信任校准应该在不同任务、不同场景下进行动态的信任校准。如果在上述因飞行员的过信任产生事故的飞行系统中,飞行员与自动驾驶系统建立起恰当的信任,飞行员在能见度高的情况下给予飞行自动驾驶系统自主驾驶权限,在能见度低时降低对自动驾驶系统的信任,那么就能够避免事故的发生。在上述的人-飞行警报系统中,如果操作员能够在恰当的情景下给予报警器适当的信任,尤其是在报警器出现误判之后,报警器需要主动采取措施去修复人-智能体团队的信任,那么报警器的功能会最大程度地发挥出来,提高人-智能体协作系统的效能。

在人-智能体协作系统中,定义信任的校准为保持人对智能体的信任与智能体本身的性能一致。理想的信任校准落在图3的直线上,人-智能体协作系统在实际环境中会受到扰动,比如操作者的心理状态、性格会在不同情境下发生微妙的变化,智能体在不同的情景下执行任务的性能不同,理想的信任校准使得人对智能体的主观评估与智能体的性能和实时的变化保持一致,可以用公式1表述。根据定义和式(1),信任校准的值为1时(称为标准信任校准),人对智能体系

$$\text{信任校准} = \frac{\text{人对智能体的主观评估}}{\text{智能体实时性能}} \quad (1)$$

统建立起恰当的信任。

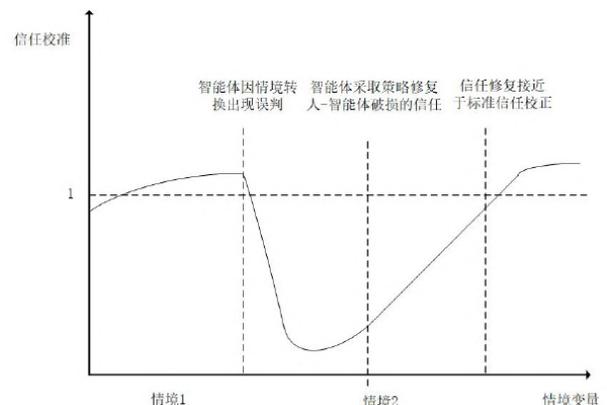


图4 人-智能体协作系统在变化的环境下的信任校准

Fig. 4 Trust calibration of human-agent cooperative system in changing environment

人-智能体协作系统在变化的环境下的信任校准如图4,在情境1下智能体可以高效地工作,人类操作者对智能体的信任逐渐积累,信任校准大于1,由于人-智能体工作情景变化后,智能体协作系统的工作方式和参数并不能很好地适应新的工作情境,智能体实时性能下降,智能体协作系统的错误率提升可靠性下降,在信任关系中的人类操作者由于承担了智能体错误率升高的后果,人对智能体的信任主观评估将断崖式下降。在信任校准值过低时,智能体协作系统应当主动采取信任修复策略,与人类操作者进行交互,在这个过程中智能体协作系统的参数和工作方式应当接收人类操作者的反馈,提升智能体在情景2中的性能,在交互过程中,人类操作者对智能体的失误行为进行认知和理解,人类操作者对智能体的信任相应地提升,最终信任校准值趋于标准信任校准值。值得注意的是,信任的校准过程不会就此停止,人-智能体的信任校准将随环境的变化不断进行循环迭代。

3.3 基于态势感知的透明度模型

在人-智能体协作系统的交互过程中,智能体在出现故障或者失误的情况下,人对智能体的信任程度会迅速下降,造成人对智能体协作系统的信任缺失。因此需要让智能体对自身的失误行为做出反应来修复人类对智能体的信任。采取何种策略进行信任修复是一个关键的问题。

随着人-智能体协作系统的不断发展,其功能已经扩展到了人类生活的方方面面。这个系统能进行的功能也越来越复杂,如自动驾驶系统已经可以代替人类进行部分驾驶任务,推荐算法向人们推荐新闻和商品,人类很难解释智能体输出背后的推理过程。DARPA2016^[23]年启动了“可解释人工智能(Explainable AI)”,的项目,它的目标是让人工智能的推理和决策能让人类用户所理解。美国防务科学委员会(Defense Science Board)发表了“自主系统的夏季研究(Summer Study of Autonomy)”列出了人-智能体协作系统信任建立的六大障碍,“人-智能体协作系统的互相理解水平低”是其中之一。传统的自动化机器处于工作与不工作的两个离散的状态,而当前的人-智能体协作系统往往进行更为复杂的决策,其表现结果仅可以通过出现好的结果的可能性来判断。人-智能体协作系统出现的任

何后果都需要人类承担,人类在与智能体进行协同的时候必须确保机器的推理过程和行为准则是符合人类的行为准则的。人与人之间的信任是建立在意图或者期望一致的基础上,相似地,建立起人-智能体之间的信任也需要协调人-智能体的意图或者期望一致,透明度则是调整人-智能体协作系统信任的桥梁^{[24][25]}。第一方面,透明度的提升有利于人类进行信任校准,人类操作者实时对智能体的状态和推理过程进行监视,来跟踪智能体的能力和意图,不至于产生过信任和信任缺失的情况。第二方面,人与智能体交互的过程是双向的,人对智能体的感知是一个认知过程,智能体对人的理解更多是从人类操作者动态的输入,那么就需要建立一个双向透明的系统,来提升人-智能体协作系统的效能。

Jessie Y. C. Chen^[26]提出了SAT (situation awareness based transparency)模型,如图5所示。态势感知(SA)由 Endsley^[27]提出,态势感知模型作为描述人类认知的模型由三部分组成:态势要素获取、态势理解、态势预测三个阶段。态势要素获取贯穿于整个态势感知的过程之中,态势理解在获取态势要素的基础上进行进一步处理,最终作出态势预测,态势感知模型具有层次之间相互包含逐次递进的特点。参照态势感知模型的三个阶段,SAT模型包含透明度的三个层次:目标行动层、推理层和预测层。目标行动层描述了智能体协作系统的目的、意图和对环境的感知;推理层描述智能体作出决策的推理过程,包括环境和人所带来的一系列约束;预测层描述智能体推理结果的预测,除了包括推理结果所产生的后果之外,也包括推理结果的不确定性和局限性。在人-智能体协作系统中,根据SAT模型的三个层次的透明度向用户展示相应的信息,可以提升人对智能体协作系统的信任^{[28][29][30][31][32]}。

SAT模型的验证通过改变智能体协作系统的界面元素来完成。美国国防部的项目自主防卫小队 (autonomous squad member ASM) 是一个地面运输机器人的监视系统^[30], Selkowitz A R^[28]及其同事操控ASM的界面元素来控制智能系统的透明度。在ASM系统中,系统的电量、信号强度前方障碍物等界面设计呈现了SAT模型第一层次的信息。SAT模型的第二层信息则是通过图形界面向用户展示

ASM系统当前动作的推断机理来实现的,比如规划路径以最短时间为约束条件还是最小能量消耗为约束条件。ASM系统使用基于隐喻的图标使得操作者更容易理解系统传达给他们的信息,如图6左侧。图6右侧的图标加入了三个色块,色块亮起的个数向操作者提供了信号强度判断准确与否的可能性,若只亮起一个色块,则说明ASM对于信号强度的判断的不确定,亮起三个色块则说明ASM对信号强度的判断的准确率是很高的,ASM的界面通过色块多少表示判断的不确定性呈现了SAT模型第三个层次的信息。类似地,ASM通过圈出地图区域的颜色来表示该通过区域的收益,如图7。绿色表示ASM通过该区域有相应收益,比如可以补充燃料等,红色表示该区域有障碍物。圈出区域的大小能够告诉操作者收益的程度。

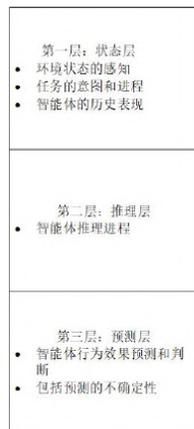


图5 SAT三层模型

Fig. 5 Three level of SAT model



图6 信号强度示例

Fig. 6. An example of signal intensity

通过在ASM上呈现不同SAT层次的信息进行对比实验,实验结果表明,在交互界面上呈现的SAT模型的层次越高,人对智能体的信任程度越高,第二层和第一层共同呈现时,人类对智能体的

信任高于仅呈现第一层的情况。SAT第一层、第二层、第三层同时呈现时,人类对智能体的信任比呈现第一层和第二层高。

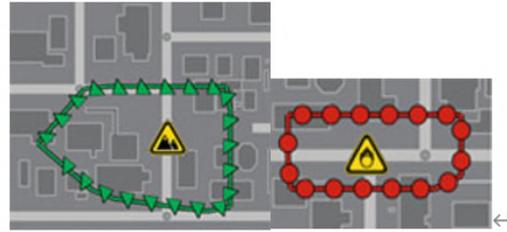


图7 障碍物显示示例

Fig. 7. Example of obstacle display

Roboleader和IMPACT智能体协作系统上SAT^[26]模型的验证成果却并没有指出SAT三层透明度明显优于SAT的两层透明度。上述两个场景下进行的实验出现与ASM实验结果不一致的原因可能是三层的透明度由于向操作者提供的信息过多,加大了操作者的认知负荷,反而损害了操作者对智能体协作系统的态势感知,操作者不能如实地评估智能体的性能。也可能因为Roboleader和IMPACT系统与人类交互的界面安排不合理,虽然增加了SAT透明层级但操作者不能与智能体平台产生高效的交互。根据上述SAT模型的验证实验,高层次的透明度会提升操作者对智能体的信任度,进而提升人-智能体协作的效能,但智能体大量的信息会增加操作者的认知负荷,甚至会干扰人的判断,这种情况会因界面设计的不合理而加剧。SAT模型是人-智能体信任校准的初步模型,它旨在将智能体实时的信息、推理过程、预测准确度展示给操作者,但在复杂的智能体协作系统中,向操作者透露大量信息会加重操作者的认知载荷,反而使人的态势感知水平降低,不能更好地与智能体进行协作。

如果SAT展示的透明度层级能够根据场景的变化做出调整,能够解决人类操作者由于系统展示信息时造成认知负荷过载问题,即在智能体能够很好地完成当前任务的情景下,向用户展示SAT部分层级的信息,有助于在减少人类操作者认知载荷的同时保持对智能体的理解和监视。当智能体进入新情景,智能体向操作者主动提供多层次的SAT透明度,帮助人类操作者根据现实环境对智能体进行

调整。如图8,曲线1是人-智能体协作系统的信任校准,曲线2是采取了根据不同场景向用户展示不同SAT层级方法下的信任校准。

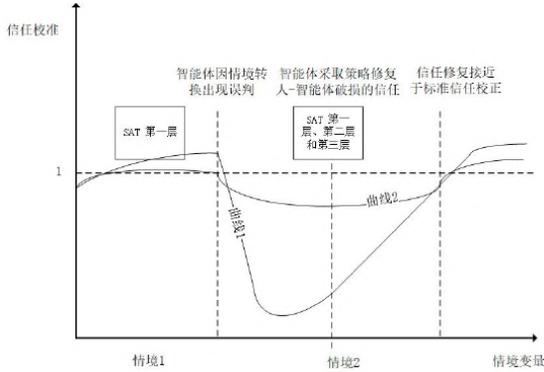


图8 基于动态SAT模型的信任校准

Fig. 8. Trust calibration based on dynamic SAT model

EwartJ^[33]及其同事提出了人-智能体协作系统信任互动的完整框架。该框架能够完整地概括人-智能体之间的信任交互过程,EwartJ并未提出具体的信任校准方案。现在,基于SAT的动态信任校准方案

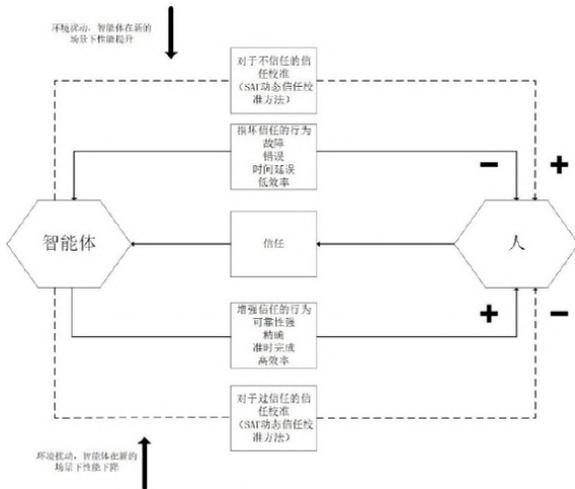


图9 人-智能体信任互动框架(改自EwartJ信任修复框架)

Fig. 9 Human agent trust interaction framework (modified from Ewart J trust repair framework)

被放入原框架中,如图9。该框架的作用机制类似于控制工程的控制流程图,智能体给定的输入值是人类操作者对智能体系统的信任校准值,智能体在当前工作情境具有高可靠性、高精度、高效率等表现,这种表现能够强化人类操作者对智能体

的信任,如果在这种情况下出现环境扰动,智能体在新环境下的性能下降,而人类操作者对智能体的信任评估仍停留在较高的水平,则会出现过信任现象,这时需要通过虚线所示的SAT动态信任校准方法进行调节,降低人对智能体的主观评估从而使信任校准值接近于1。如果智能体在当前情境下性能较低,人对智能体的信任评估也较低,当出现环境扰动,智能体在新环境下性能上升,这时需要SAT动态信任校准方法进行调节,提升人对智能体的主观评估,从而使信任校准值接近于1。该信任校准系统能够使信任校准值稳定于1,从而协调人-智能体的分工。

4 实践意义

过去我们用机器执行任务,现在机器不仅能为我们执行任务而且能在执行任务的同时为我们提供建议。人类与机器的关系发生了变化,机器的自动化程度不断提高,并且机器也越来越人性化,人工智能技术让机器变为智能体,人工智能技术从人操纵机器的机器从属于人的关系发展到人-智能体协作的关系。与人类团队的协作一样,信任在人-智能体的关系中占有重要的作用,信任是沟通人与智能体的桥梁,人对智能体的过信任和缺乏信任都会造成损失,那么信任的校准就成为了一个重要的课题。人类团队的信任给人-智能体协作系统的信任校准提供了启示,在智能体出现工作失误的时候智能体需要主动采取策略进行信任校准。

本文讨论了基于SAT模型的动态信任校准,旨在通过不同的场景下为操作者提供不同程度的透明度,建立起人-智能体的信任校准。但是基于SAT模型的动态信任校准只走出了信任校准的第一步,增强了人对智能体在不同情境下能力的理解,进而建立起对智能体恰当的信任校准。未来的信任校准需要对以下三个方面进行深入的研究。第一点,未来的信任校准研究应该采取综合信任校准策略。人类团队的信任校准可以综合多种策略,比如失信的一方在对自己失信行为做出解释的同时调整自己的行为策略,或者同时对自己的失信造成的损失进行补偿。因为人类合作团队关系的复杂性,人类需要采取多种信任校准方法。随着人-智能体协作系统复杂性的提升,智能体能力的提

升,人-智能体的关系将更为复杂,同样需多种信任校准模型相结合。第二点,在实践中智能体如何感知人类操作者的信任校准,信任校准的计算由两部分组成,第一部分需要评估智能体在当前环境下的实时性能,第二部分需要计算人类对智能体的信任评估,第二部分的计算对智能体提出了极大地挑战,如何在与人类操作者进行流畅协作的同时较为准确地获取人类主观信任评估成为了一大难点,随着机器学习技术的不断发展,智能体能够通过视频、声音分析人类的情感,通过多模态的分析或许会为获取人类对智能体的主观评估提供灵感。第三点,与人类团队的信任相似,人-智能体的信任是双向的,当智能体在新的场景中不能很好地执行任务时,人类需要及时校准自己对智能体的信任,并对智能体协作系统进行调整。相反地,当人类不能很好地执行自己的任务时,智能体应当发现这一点,对人类进行信任校准,向人类发出预警甚至干预人类不利的行为。新的信任校准方案需要进一步的讨论,并且通过实验来验证信任校准模型的有效性。

参 考 文 献

- [1] Rotter J B . A new scale for the measurement of interpersonal trust. [J]. Journal of Personality, 2010, 35(4):651-665.
- [2] Barber B . The Logic and Limits of Trust [J]. Social Forces, 1983, 64(1).
- [3] Jeanne, L, Johns. A concept analysis of trust [J]. Journal of Advanced Nursing, 1996.
- [4] Moorman C., Deshpande R., & Zaltman G. (1993). Factors affecting trust in market-research relationships. Journal of Marketing[J], 57(1), 81 - 10
- [5] Deutsch M . Trust and Suspicion [J]. Journal of Conflict Resolution, 1958, 2(4):265-279.
- [6] Couch L L , Jones W H . Measuring Levels of Trust[J]. Journal of Research in Personality, 1997, 31(3):319-336.
- [7] Wrightsman, Lawrence. (1974). Assumptions About Human Nature: A Social-Psychological Approach[M].
- [8] Rotter J B . A new scale for the measurement of interpersonal trust. [J]. Journal of Personality, 2010, 35(4):651-665.
- [9] Larzelere R E , Huston T L . The Dyadic Trust Scale: Toward Understanding Interpersonal Trust in Close Relationships [J]. Journal of Marriage & Family, 1980, 42(3):595-604.
- [10] Rempel J K , Holmes J G , Zanna M. D. Trust in close relationships [J]. Journal of Personality & Social Psychology, 1985, 49.
- [11] Swan P., McDermott P., Khalfan M. M. A., Cooper R., Rees C., & Woods G. (2005). The development of trust inventory [J]. Journal of Construction Procurement, 11(1), 40-54.
- [12] Couch L L , Adams J M , Jones W H . The assessment of trust orientation.[J]. Journal of Personality Assessment, 1996, 67(2): 305-323.
- [13] Lewicki, Roy & Wiethoff C.. (2000). Trust, trust development, and trust repair [M]. The Handbook of Conflict Resolution: Theory and Practice. 86-107.
- [14] Sheridan T B . Humans and Automation: System Design and Research Issues[M]. A John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [15] Lee J D , Moray N . Trust, self-confidence, and operators' adaptation to automation [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 1994, 40(1):153-184.
- [16] Lewicki, Roy & Bunker, Barbara. (1994). Trust in relationships: A model of development and decline..
- [17] Dirks K T , Lewicki R J , Zaheer A . Repairing Relationships Within and Between Organizations: Building A Conceptual Foundation[J]. The Academy of Management Review, 2009, 34 (1):68-84.
- [18] Tomlinson E C , Dineen B R , Lewicki R J . The Road to Reconciliation: Antecedents of Victim Willingness to Reconcile Following a Broken Promise[J]. Journal of Management, 2004, 30 (2):165-187.
- [19] Lewicki R J , Polin B , Lount R B . An Exploration of the Structure of Effective Apologies [J]. Negotiation and Conflict Management Research, 2016, 9(2).
- [20] Coombs W T , Holladay S J . Comparing apology to equivalent crisis response strategies: Clarifying apology's role and value in crisis communication[J]. Public Relations Review, 2008, 34(3): 252-257.
- [21] A T H , A C R F , B D D C , et al. Money isn't all that matters: The use of financial compensation and apologies to preserve relationships in the aftermath of distributive harm [J]. Journal of Economic Psychology, 2013, 35(1):95-107.
- [22] Endsley, Mica, R. From Here to Autonomy: Lessons Learned From Human-Automation Research [J]. Human factors: The journal of the Human Factors Society, 2017, 59(1):5-27.
- [23] Defense Science Board. 2016. "Defense Science Board Summer Study on Autonomy." Washington, D. C.: Under Secretary of Defense.
- [24] Selkowitz A R , Larios C A , Lakhmani S G , et al. Displaying Information to Support Transparency for Autonomous Platforms [J]. 2017.
- [25] Lee J. D., and SeeK. A.. 2004 Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance [J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society 46 (1): 50-80.
- [26] Chen J Y C , Lakhmani S G , Stowers K , et al. Situation awareness-based agent transparency and human-autonomy teaming effectiveness [J]. Theoretical Issues in Ergonomics ence,

- 2018, 19(3):259-282.
- [27] Endsley M. R. 1995. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems[J]. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 37 (1): 32-64.
- [28] Selkowitz A R , Lakhmani S G , Larios C N , et al. Agent Transparency and the Autonomous Squad Member [J]. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2016, 60(1):1319-1323.
- [29] Mercado J E , Rupp M A , Chen J Y C , et al. Intelligent Agent Transparency in Human-Agent Teaming for Multi-UxV Management.[J]. *Human Factors*, 2016, 58(3):83-93.
- [30] Mercado J E , Rupp M A , Chen J Y C , et al. Intelligent Agent Transparency in Human - Agent Teaming for Multi-UxV Management [J]. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2016.
- [31] Chen J. Y. C., and M. J. Barnes. 2012a. "Supervisory Control of Multiple Robots Effects of Imperfect Automation and Individual Differences." *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 54 (2) : 157-174. doi: 10.1177/0018720811435843.
- [32] Chen J Y C , Barnes M J , Harper-Sciarini M . Supervisory Control of Multiple Robots: Human-Performance Issues and User-Interface Design [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C*, 2011, 41(4):435-454.
- [33] Ewart, J, de, et al. From "automation" to "autonomy": The importance of trust repair in human-machine interaction. [J]. *Ergonomics*, 2018..

作者简介:

武钰(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为人机交互,人因工程。

刘伟(1970-),男,北京邮电大学教授,主要研究方向为人因工程,深度态势感知。

面向侦察任务的无人机机载感知传感器配置与融合综述

王钟鸣, 姚文臣, 马兆伟, 林博森, 牛轶峰

(国防科学技术大学智能科学学院, 湖南长沙410073)

摘要: 由于无人机机动性强、视野范围广的特点, 近年来逐渐被用于执行侦察任务。无人机侦察需要依赖各类机载传感器提供感知信息, 由于机载单一感知传感器在不同环境中使用范围受限, 而多传感器配置融合技术可以利用多源传感器获得的信息进行优势互补, 来克服单一传感器在任务环境、任务需求以及信息类型上存在的局限性, 能有效地优化多源异质信息的利用效率, 提高无人机在未来复杂环境中的机动性和可靠性。本文分析了多感知传感器配置的要害, 设计了传感器配置融合方法, 总结了无人机侦察中常用的传感器配置方案, 包括可见光和红外传感器, 以及可见光相机和激光雷达等, 分析了研究现状和发展难点。

关键词: 无人机侦察; 机载传感器; 传感器配置、传感器融合; 可见光; 红外; 激光雷达

Overview of UAV Airborne Sensing Sensor Configuration and Fusion for Reconnaissance Mission

WANG Zhongming, YAO Wencheng, MA Zhaowei, LIN Bosen, NIU Yifeng

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Due to the characteristics of strong mobility and wide field of vision, UAV has been gradually used in investigation missions in recent years. UAV reconnaissance needs to rely on various airborne sensors to provide sensing information. Due to the limited use range of airborne single sensing sensor in different environments, multi-sensor configuration fusion technology can make use of the information obtained by multi-source sensors to complement each other, so as to overcome the limitations of single sensor in mission environment, mission requirements and information types. It can effectively optimize the utilization efficiency of multi-source information and improve the mobility and reliability of UAV platform in the future complex environment. This paper analyzes the elements of multi sensing sensor configuration, designs the sensor configuration fusion method, and summarizes the current situation and development difficulties of visible camera and infrared imaging sensor configuration scheme commonly used in UAV reconnaissance, as well as the fusion configuration scheme of visible camera and lidar.

Key words: UAV reconnaissance; Airborne sensors; Sensor configuration fusion; Visible light camera; Infrared imaging sensor; Lidar

1 引言

近些年, 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)已应用于各种军事领域, 包括侦察、跟踪定位、边境巡逻、中继通信、特种作战等方面, 在民用领域中的电力巡检、环境探测、农业植保、森林救援

等方面也起到了至关重要的作用。

侦察任务对实时性、精确度、视野范围、机动性及抗干扰性等方面都有要求。在无人机侦察任务中, 需要无人机规避飞行环境中遇到的各种障碍物, 并要求其在特殊任务环境中执行对移动目标的检测和跟踪等^[1]。无人机面临的任务环境复杂多

样,对于不同的任务环境,无人机安全飞行面临的障碍物种类、障碍物大小、气象、电磁干扰等不同,所检测目标的状态以及目标所处位置也不同,需要选择合适的传感器配置方案完成侦察任务。由于单一传感器使用环境受限,因此,在侦察无人机上配置多类传感器,有利于无人机在更复杂,更多变的任务环境中执行侦察工作;将多传感器获取的信息融合,对改善无人机感知能力、检测精度和鲁棒性都有着重要意义。本文面向小型固定翼无人机对侦察任务的需求,分析了机载传感器配置要素及融合方法,并总结了当下小型侦察无人机常用的可见光与红外、可见光与激光雷达配置融合方案的研究现状及未来发展方向。

2 多传感器配置要素分析

无人机面临的侦察任务环境复杂多样,机载传感器配置的目的是依据飞行任务、飞行环境、无人机平台等先验信息选择合适的传感器种类和参数以满足侦察的需求。在对无人机进行传感器配置时,主要考虑的因素来自无人机平台自身属性、传感器属性、飞行环境、任务类型及需求四个方面。

2.1 无人机平台自身属性

无人机通过搭载各类任务载荷完成指定任务,因此在确保飞行安全的前提下,传感器系统所占用的系统资源比例应尽可能小。对于小型无人机而言,需要在无人机自身体积、重量、功耗(Size、Weight and Power, SWaP)等方面,对传感器的配置进行限制,同时还要根据具体任务要求合理部署传感器。

2.2 传感器属性

传感器属性对于传感器配置的影响主要体现在成本、空域覆盖范围、稳定性以及信息质量四个方面。

传感器的成本与无人机平台在对应因素上的限制决定了所允许搭载的传感器种类以及数量上限。空域覆盖包括传感器探测的距离以及视场角大小,探测距离越远,视场角越宽广,越有利于无人机对目标的探测。稳定性主要表现在传感器能否全天候工作以及传感器的抗干扰性,传感器的抗干扰性与环境中存在的干扰因素共同决定了传感器在该场景下的正常工作的能力。感知信息质量包

含信息维度、感知精度、实时性三个方面,信息维度指二维平面或者三维空间信息,感知精度指能否准确检测到飞行环境中的所有目标。低空环境下当前技术较为成熟的机载感知传感器的主要特点及适用场景如表1所示。

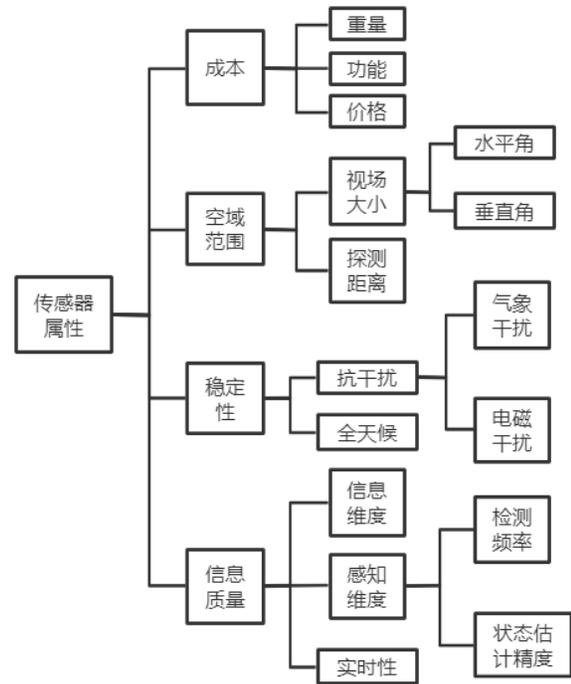


图1 传感器属性

Fig. 1 Sensor properties

表1 各传感器分析

Table 1 Analysis of each sensor

	信息维度	主要优势	主要不足	适用场景
可见光相机	方位角、俯仰角	成像能力强	不能直接测距,易受光照影响	光照良好下的目标检测、识别
红外成像仪	方位角、俯仰角	红外辐射敏感、抗干扰能力强	不能直接测距,纹理模糊	夜间成像、热源目标检测
激光雷达	三维位置	三维位置信息、数据精度高	远处目标点云稀疏,SWaP较差	空中百米内目标检测
毫米波雷达	距离、方位、速度	测距精度高、抗干扰能力强	角精度低	目标有无的粗略检测
深度相机	三维位置	直接获取图像和深度信息	作用距离近	近距离目标检测

此外,传感器的数量、安装方式是进行传感器配置时需要考虑的重要因素。增加同一传感器的数量并进行交错安装能够提升视场覆盖范围,交叠

冗余使用则能够提升无人机系统的鲁棒性。异质传感器在进行几何布局时,一般采用视场重叠的方式以提升共同视场范围内障碍物检测的性能并提高系统的鲁棒性。但小型无人机在载荷和算力方面有严格限制,增加同质或异质传感器数量并进行安装时,应满足相关指标要求并且不能影响无人机其他模块的正常工作。

2.3 飞行环境

典型的飞行环境有城市环境、郊区环境、山地环境、空中环境、室内环境等,不同的飞行环境下障碍物密集程度、种类、尺寸等不同,对传感器的能力提出不同的要求。同时,环境中的气象条件、电磁干扰等会对传感器的正常工作造成干扰,进行传感器配置必须要考虑环境中的先验信息,飞行环境特点如表2所示。

表2 飞行环境特点

Table 2 Flight environment characteristics

	任务目标	环境特点	任务需求	飞行器类型
郊区环境	建筑物、电力线、无人机等	目标较小、环境复杂多变	分辨率高、抗干扰	中小型无人机
城市环境	建筑物、树木、行人、等	障碍物密集、背景复杂、机动时间短	低质量、准确性高	小型无人机
山地环境	山峦、无人机、无人机等	山体体积大、入侵机速度快	距离远、精度高	中大型无人机
空中环境	无人机、无人机	入侵机速度快、飞行高度高	范围广、精度高	中大型无人机
室内环境	墙壁等室内障碍物	障碍物密集	低质量、分辨率高	小型无人机

2.4 任务类型及需求

传感器的配置需要考虑无人机所执行任务的具体需求,如夜间执行的任务要求无人机系统部署的传感器具有全天时工作的能力、目标跟踪任务要求无人机能准确识别目标并规避障碍物等,在保证自身飞行安全的前提下,无人机系统传感器子系统的设计应支撑无人机平台完成预设的各类飞行任务。

机载传感器配置要素复杂多样,要素之间相互影响制约,在设计传感器优化配置算法时,通过选择合理的评价指标设计目标函数,将侦察成本作为约束条件,通过优化求解得到当前先验信息下最优的传感器配置方案,获得传感器的组合形式及传感器参数,以达到无人机飞行任务要求的侦察能力。

3 传感器配置与融合方法

根据上一节中的配置要素分析,本文设计了如图3所示的配置融合方法。

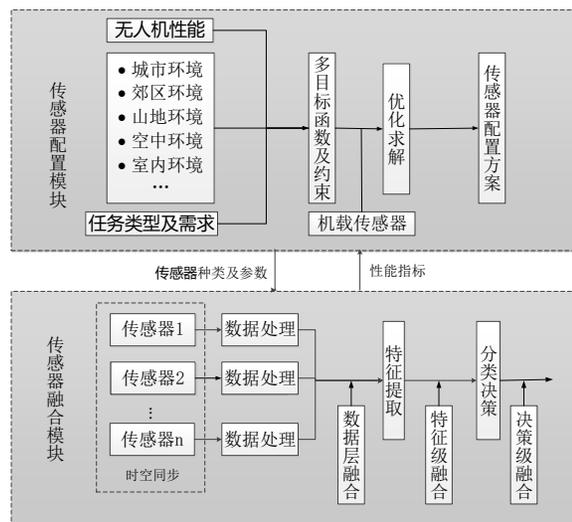


图2 传感器配置融合模块

Fig. 2 Sensor configuration fusion module

传感器配置模块为传感器融合模块提供了传感器种类与参数选择方案,传感器融合的结果为传感器配置模块提供了实际的参考,并验证传感器配置方法的有效性。

在该设计方案中,第一部分基于来自飞行环境、无人机平台以及任务类型及需求的先验信息,将传感器配置问题转化为优化求解问题。一般地,一个最小化的多目标优化问题可以用如下的数学模型来描述:

$$V - \min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$$

$$s.t. x \in X, X \subseteq R^m$$

$V - \min$ 表示向量的极小化, $X \subseteq R^m$ 是多目标优化模型的约束集, $f(x) \subseteq R^m$ 是多目标优化时的向量目标函数。若有解 $x_1, x_2 \in X$,且对任意 $k = 1, 2, 3, \dots$ 都有 $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$,那么 x_1 比 x_2 优越。若 x_1 比 X 中所有其他解都优越,那么 x_1 就是多目标优化模型的最优解。

在侦察任务中,约束条件可能来自无人机载荷能力、视场角与探测范围的取舍、环境约束等。采用多目标优化算法,将难以量化的因素通过构建具体的场景进行综合衡量并提取关键参数,通过关键参数构建合理的多目标函数以及条件约束,通过优

化求解从现有的较为成熟的传感器技术中选择最优的传感器组合形式及传感器参数,设计合理的侦察无人机传感器子系统。

第二部分基于传感器优化配置算法对具体应用场景的分析与求解,选择最优的传感器种类及参数,设计传感器融合子系统并开发融合算法。

多传感器融合算法在结构上按其在融合系统中信息处理的抽象程度,可划分为三个层级:数据层融合(像素级融合)、特征层融合和决策层融合。三种层级融合方法的性能对比如表3所示^[3]。在侦察任务中,可根据任务需求以及机载计算能力设计相应的融合算法。

表3 三种融合的比较

Table 3 Comparison of three fusion methods

性能参数	数据层融合	特征级融合	决策级融合
信息量	较大	中等	较小
信息损失	较小	中等	较大
容错性	较差	中等	较好
鲁棒性	较差	中等	较好
算法难度	较难	中等	较易
性能	较好	中等	较差
实时性	较差	中等	较好

4 小型无人机感知传感器融合现状

侦察任务首先要克服受到所处环境、位置、地形及障碍物对观测范围的限制,又要实时规避任务过程中面对的危险,同时还需兼顾侦察与监视信息的传输时效^[4],并实时检测、跟踪目标。

考虑机载传感器配置要素以及侦察任务需求,可以在侦察无人机上配置深度相机以获取深度信息;配置可见光相机获取目标的纹理颜色等细节,用于光照充足情况下的目标检测;配置红外成像传感器获取目标热辐射信息,用于检测夜间目标及受遮挡目标;配置激光雷达对环境实时建图,以规避障碍物。

考虑多传感器的信息融合模块,当下更多采用可见光相机与红外成像传感器以及可见光相机与激光雷达两种传感器信息融合方案。

4.1 可见光相机与红外成像传感器融合

在小型侦察无人机上配置可见光相机和红外成像传感器,使得其侦察系统能够在夜间及受遮挡

情况下检测到目标。利用红外图像的热辐射原理和可见光图像的光反射原理,得到的融合图像不仅可以保留可见光图像的颜色、轮廓以及边缘特征信息,还具备红外图像的热辐射信息,使目标相对背景亮度突出,能够降低误判率,更容易侦测到目标并对其进行跟踪^[5]。

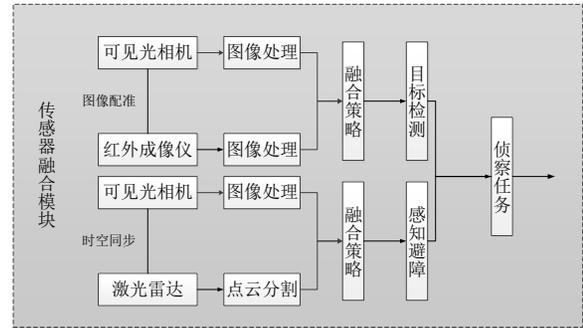


图3 常用配置融合方案

Fig. 3 Common configuration fusion scheme

4.1.1 融合方法现状

多尺度变换是一种基于变换域的融合方法,在可见光与红外图像融合中应用广泛,其核心算法主要分为三个步骤:图像的多尺度分解和重构、融合规则的设计。早期多尺度变换图像融合主要采用金字塔变换的方法,将图像分解成不同尺度且呈金字塔状的子带图像进行融合。1983年,Burt等人提出了Laplace金字塔法;1989年,Toet设计了低通比率金字塔和对比度金字塔,利用塔形分解进行多传感器图像融合;这时期采用的融合规则主要有HIS变换,平均加权法,主成分分析法等,属于比较简单的图像融合方法,效果较差^[6]。

2004年Gonzalo将小波变换应用到图像融合中^[7],与金字塔变换相比,小波变换信噪比更高,图像重构能力更强。2005年,美国的Wilian等人在研究夜间驾驶系统时,利用小波变换将可见光图像和红外图像融合^[8]。2010年,曲锋等人使用小波融合实现了红外双波段图像的快速融合^[9]。

2006年Da等人^[10]提出了非下采样轮廓波变换(Non-subsampled Contourlet Transform, NSCT),由于不存在采样过程,能很好地解决融合过程中频谱混叠问题。此外,NSCT与模糊逻辑相结合能有效增强红外目标对比度并保留可见光图像的细节。Kong等人^[11]进一步在NSCT融合方法中提出快速

非负矩阵分解,最终融合图像在保留源图像全部特征的同时降低了图像的冗余信息。

Yang 和 Li 提出了基于稀疏表示 (Sparse Representation, SR) 图像融合方法^[12]。该方法通过学习多个子字典,利用最大选择策略对图像进行重建。

脉冲耦合神经网络 (Pulse Coupled Neural Network, PCNN) 模型是最早应用于图像融合的神经网络方法。近年来,深度学习迅速发展,基于深度学习的融合方法主要是使用图像的深度特征进行图像的融合重构,该领域目前还处于初步发展阶段。2017年,Yu Liu 等人提出了一种基于卷积神经网络的可见光红外图像融合方法,通过图像金字塔进行多尺度融合,并采用基于局部相似度的策略自适应调整分解系数的融合模式^[13]。2019年,Ma 等人设计了一种基于生成对抗性网络的 IR/VIS 融合方法—FusionGAN 来进行红外和可见光的融合^[14],可以很好保持源图像中的热辐射和纹理细节。随后,他们又提出了一种基于显着目标检测的红外可见光图像融合网络 STDFusionNet^[15]。该算法能以更快的速度获得红外目标更突出显示的融合图像。Li 等人提出了一种基于注意力生成对抗网络的红外和可见光图像融合方法^[16],克服了生成对抗网络融合方法无法突出典型区域的不足。

4.1.2 发展方向

将可见光相机和红外传感器的数据融合应用到小型侦察无人机目标检测跟踪,还存在的问题有:1) 由于无人机机身的抖动和传感器视角偏差,需要对两个传感器获得的图像进行可靠的配准,但由于可见光与红外图像相关性小,其配准相当复杂;2) 目前对于多源动态图像融合算法的研究较少,如果以静态图像融合方法对多传感器获得的序列图像逐帧进行融合处理,则不能利用序列图像在时间轴上的运动信息来指导图像融合过程。并且机载计算能力有限,因此对于连续帧图像(视频)融合存在一定难度^[17]。

4.2 可见光相机与激光雷达融合

激光雷达由于其精确的测距测向能力而在检测障碍物方面有其独特的优势,在地面无人平台检测前方障碍物方面应用较广^[18-20]。而在无人机感知与规避领域,传统的三维激光雷达由于重量较

大、纵向点云密度稀疏的原因而应用较少,2D 激光雷达仅能获得二维平面内的障碍物的距离和方向,其较高的性价比使得它能够与其他传感器相融合用于无人机障碍规避^[21]。随着激光雷达技术的快速发展,采用非重复扫描技术的新型三维激光雷达弥补了纵向点云密度稀疏的缺点,使得将三维激光雷达应用于无人机避障成为可能,三维激光雷达能够直接获得障碍物的空间位置以及部分轮廓信息,将其与包含丰富轮廓信息的可见光图像融合进行障碍物检测有较大的应用前景。

4.2.1 融合方法现状

激光雷达与可见光相机属于异质传感器,一般采用基于决策级的信息融合算法实现障碍物的检测,主要分为两种形式:图像辅助验证激光雷达点云数据以及图像和点云数据的交叉验证^[22]。图像辅助验证点云数据的方式首先利用点云数据对障碍物进行检测,并将点云的检测结果投影到图像中确定感兴趣区域 (Regions of Interest, ROI),对感兴趣区域进行检测并根据检测结果对点云的结果进行验证或补充。Cristiano Premebida^[23]等人通过图像验证点云数据的方式,通过雷达点云数据在图像中确定 ROI 并对 ROI 区域利用级联分类器对目标进行识别,提高了检测效率。视觉与雷达交叉验证的方式中点云检测与图像检测是同时进行的,将点云检测的结果投影到图像中并与图像的检测结果建立联系,根据两者的结果对目标进行综合判定。Kidono^[24]等人采用视觉与激光雷达交叉验证的方式,分别从点云和图像数据中提取目标特征用于训练分类器。Kaempchen N 等人开发出一种可扩展的融合 3D 激光雷达和单目相机数据的特征级融合架构,该方法旨在通过组合低级测量特征来最大化协同效应^[25],同时又保持融合架构尽可能通用。国防科技大学 ATR 国家重点实验室通过制作平面标定物的方法,在使用单个摄像机的情况下实现了可见光图像与激光雷达点云图的融合^[26]。

伴随深度学习的热潮,神经网络也逐步被用于可见光图像与点云融合领域。Kang, H. B 提出了一种基于决策级融合的检测和分类方法。使用 CNN 融合点云和 CCD 传感器图像数据^[27]。Du X 等人提出了 PC-CNN (Point Cloud-CNN) 深度学习框架进行车辆检测的激光雷达和视觉融合系统。该框架

使用点云数据预测图像中潜在的汽车位置,利用网络中的多层信息优化预测框位置,并通过检测网络实现车辆检测^[28]。Park K等人提出了一个用于未校准的激光雷达和双目融合的深度估计的方法,他们设计了由校准、融合、优化三部分组成的网络结构,解决了未校准激光雷达图像3D重建问题^[29]。2020年,清华大学公开了一种基于神经网络的三维点云和二维图像融合的校准方法,该方法通过得到更精确的参数矩阵来指导图像融合过程,使融合更加准确^[30]。

4.2.2 发展方向

将激光雷达与可见光相机的融合用于低空侦察无人机的障碍物检测,一方面能够根据雷达返回的三维点云确定障碍物的有无和距离,另一方面融合雷达与图像信息能够获得障碍物的轮廓信息,准确获取低空环境中的电力线和建筑物等障碍的空间分布信息,为后续的障碍规避提供准确的环境感知结果。与地面无人平台相比,将激光雷达与可见光相机融合用于解决低空环境下的小型无人机障碍物检测问题的挑战有:1)由于载荷限制,激光雷达应尽量轻量化,激光雷达的点云密度相对较小;2)机载计算能力有限,因此对于多数计算量较大的算法难以使用;3)电力线等微小障碍物不仅需要检测障碍物的有无,还需要估计其在空间中的分布信息,检测难度高;4)低空动态障碍物机动更加灵活,引入的运动畸变更大,状态估计难度更高。

5 结语

对小型侦察无人机而言,其低载荷能力决定其只能搭载非合作式传感器以及部分轻量的合作式传感器^[31]。各类传感器由于自身物理特性不同,会具备不同的功能特点,如可见光相机成像信息丰富但易受光照等的影响、激光雷达能够直接获取距离和方位信息但成像能力弱等。

未来,小型侦察无人机必将越来越多地应用到警务、军用等领域,因此需要能够在楼房、树林、山野等复杂地形中进行障碍物规避,并对目标进行实时检测及跟踪。

探索无人机平台的多传感器配置方案,有利于无人机在更复杂,更多样的环境中执行侦察任务。传感器之间获取信息的途径、原理有所差别,所得

信息既存在冗余,也存在互补。在实际应用中,很难只用一种配置方案或者一种算法就能达到融合目的。因此,探索更优的配置方案以及更优的融合算法是当下的研究重点。

参 考 文 献

- [1] Dalamagkidis K, Valavanis K P, Piegel L A. UAS Safety Assessment and Functional Requirements [M]. Springer Netherlands, 2012.
- [2] 何友. 多传感器信息融合及应用(第2版)[M]. 电子工业出版社, 2007.
- [3] 张秋实. 红外和可见光图像的融合分类及红外目标检测[D]. 北京:北京化工大学, 2018.
- [4] 陈转, 刘平, 王超, 陈珍珍, 刘琳. 无人机在侦察与监视领域的研究与展望[J]. 智能处理与应用, 2019, 10(2): 1.
- [5] 王银斌. 无人机红外图像与可见光图像融合算法研究[D]. 辽宁: 辽宁大学, 2012.
- [6] 张卓. Shearlet变换在图像融合中的应用研究[D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2013.
- [7] G. Pajares, J. M. De La Cruz. A wavelet-based image fusion tutorial[J]. Pattern recognition, 2004, 37(9): 1855-1872.
- [8] Y. T. Yu, et al. Pairwise. Three-Dimensional Shape Context for Partial Object Matching and Retrieval on Mobile Laser Scanning Data [J]. IEEE. Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 11(5): 1019-1023.
- [9] 曲锋, 刘英, 王健, et al. 红外双波段图像实时融合系统[J]. 光学精密工程, 2010, 7(2): 238-244.
- [10] Da Cunha A L, Zhou J P, Do M N. The Nonsubsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [11] Kong W, Lei Y, Zhao H. Adaptive Fusion Method of Visible Light and Infrared Images Based on Non-Subsampled Shearlet Transform and Fast Non-Negative Matrix Factorization [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 67(1): 161-172.
- [12] Yang B, Li S T. Multifocus Image Fusion and Restoration with Sparse Representation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(4): 884-892.
- [13] Yu Liu, Xun Chen, Juan Cheng, Hu Peng, Zengfu Wang. Infrared and visible image fusion with convolutional neural networks [J]. International Journal of Wavelets, 2018, 16(3): 1-20.
- [14] Jiayi Ma, Wei Yu, Pengwei Liang, Chang Li, and Junjun Jiang. FusionGAN: A generative adversarial network for infrared and visible image fusion [J], 2019, 10(1), 11-26.
- [15] Ma J, Tang L, Xu M, Zhang H, Xiao G. STDFusionNet: An Infrared and Visible Image Fusion Network Based on Salient Target Detection. [C]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2021, 70: 1-13.

- [16] Li J, Huo H, Li C, et al. AttentionFGAN: Infrared and visible image fusion using attention-based generative adversarial networks [C]. IEEE Transactions on Multimedia, 2020, 23: 1383-1396.
- [17] 沈英, 黄春红, 黄峰, 李杰, 朱梦娇, 王舒. 红外与可见光图像融合技术的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2021, 3(2): 1-6.
- [18] Asvadi A, Garrote L, Premebida C, et al. Multimodal vehicle detection: fusing 3D-LIDAR and color camera data [J]. Pattern Recognition Letters, 2018, 115(1): 20-29.
- [19] Gao H, Bo C, Wang J, et al. Object Classification using CNN-Based Fusion of Vision and LIDAR in Autonomous Vehicle Environment [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 5(1): 4224-4231.
- [20] 李梦洁. 基于激光点云与图像结合的行人检测与跟踪技术研究[D]. 湖南: 国防科技大学, 2017.
- [21] Ahtelik M, Bachrach A, He R, et al. Stereo vision and laser odometry for autonomous helicopters in GPS-denied indoor environments [C]. Unmanned Systems Technology XI. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7332: 733219.
- [22] 张香利. 基于激光雷达和视觉信息融合的水面船只检测与识别研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [23] Premebida C, Monteiro G, Nunes U, et al. A lidar and vision-based approach for pedestrian and vehicle detection and tracking [C]. 2007 IEEE intelligent transportation systems conference. IEEE, 2007: 1044-1049.
- [24] Kidono K, Naito T, Miura J. Reliable pedestrian recognition combining high-definition lidar and vision data [C]. 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2012: 1783-1788.
- [25] Kaempchen N, Buehler M, Dietrnayer K. Feature-level fusion for free-form object tracking using laserscanner and video [C]. IEEE Proceedings. Intelligent Vehicles Symposium. Las Vegas, NV, USA, 2005: X53-458.
- [26] 林鸿生. 成像激光雷达与摄像机的图像融合研究 [D]. 湖南: 国防科技大学, 2007.
- [27] Qh S I, Kang H B. object detection and classification by decision-level fusion fur intelligeatvehiclesystems [J]. Sensors, 2017, 17(1): 207.
- [28] Du X, Ang M H, Rus D. Car detection for autonomous vehicle: LmAR and vision fusion approach through deep learning framework [C]. IEEE IROS. I International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, EC, 2017: 749-754.
- [29] Park K, Kim S, Sohn K. High-Precision Depth Estimation Using Uncalibrated LiDAR and Stereo Fusion [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 1: 1-15.
- [30] 张翠翠, 孙辉, 潘陶嘉诚, 等. 基于神经网络的三维点云和二维图像融合的校准方法: 中国, 202010932749.5 [P]. 2020-09-08.
- [31] 姚文臣. 面向无人机障碍规避的机载传感器配置与融合方法研究[D]. 湖南: 国防科技大学, 2021.

作者简介:

王钟鸣(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人系统自主控制。

姚文臣(1996-),男,硕士,主要研究方向为无人机感知规避。

马兆伟(1989-),男,讲师,主要研究方向为无人系统自主控制,协同控制。

林博森(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人系统自主控制。

牛轶峰(1979-),男,教授,主要研究方向为无人系统自主控制,协同控制。

基于深度卷积生成对抗神经网络的空战态势评估

韩博¹, 周一鹏², 钱程¹, 赵林¹, 张国雯¹

(1. 93525 部队, 西藏日喀则 857000; 2. 空军航空大学, 长春 130000)

摘要: 无人作战飞机 (Unmanned combat aerial vehicle, UCAV) 空战态势评估传统方法以有人机飞行员先验知识为基础, 构建空战态势评估模型, 存在人认知事物的局限性、处理大数据能力弱、特征提取不完整等问题, 论文以空战数据为研究对象, 将空战态势评估问题归类于数据挖掘问题, 提出了基于深度卷积生成对抗神经 (Deep Convolutional Generative Adversarial Networks, DCGAN) 的态势评估模型。基于空战态势数据样本库, 构建 DCGAN 网络构建态势分类模型, 利用态势样本库对网络进行训练, 最终形成态势分类网络。通过实验证明基于数据的态势评估方法具有较好的评估效果, 为空战决策提供有力支撑。

关键词: 态势评估; 大数据; 数据挖掘; DCGAN; 聚类算法

Air Combat Situation Assessment Based on Deep Convolution Generation Against Neural Networks

HAN Bo¹, ZHOU Yipeng², QIAN Cheng¹, ZHAO Lin¹, ZHANG Guowen¹

(1. Unit 93535 of the Chinese People's Liberation Army, Xigaze, Tibet 857000; 2. Department of Space Equipment, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: The traditional method of air combat situation assessment of UCAV is based on the prior knowledge of manned and aircraft pilots to build an air combat situation assessment model. There are problems such as the limitations of human cognition, the weak ability to process big data, and the incomplete feature extraction. The paper uses air combat data as an example. The research object classifies the air combat situation assessment problem as a data mining problem, and proposes a situation assessment model based on DCGAN. Build a situation classification model based on the DCGAN network, use the situation sample library to train the network, and finally form a situation classification network. Experiments have proved that the data-based situation assessment method has a good assessment effect and provides strong support for air combat decision-making.

Key words: Situation Assessment; Big Data; Data Mining; DCGAN; Clustering Algorithm

1 引言

态势评估^[1-3]是在融合 UCAV 所有机载传感器信息的基础上, 根据空战中敌我双方相对状态信息, 对己方受威胁程度或占据优势给出一个定性的判断, 引导 UCAV 下一步机动决策, 因此, 态势评估是整个空战回路中关键一环, 为空战决策提供重要依据^[4], 但依靠人为经验构建模型的方法存在局限性。

随着人工智能技术的飞速发展, 深度学习方法

通过不同架构的多层神经网络实现了数据特征提取、拟合和分类, 其中卷积神经网络具有强大的特征提取能力, 生成对抗网络 (GAN) 在数据增强和分类中具有优异性能^[5-6]。因此本章从飞行员空战飞参数据入手, 基于层级聚类和深度卷积生成对抗神经网络方法, 构建空战态势评估系统。

2 敌我空战态势描述

1V1 空战中, 态势评估是通过敌我相对状态信

息综合进行判断。其中机载传感器所能获取的信息种类繁多,在空战条件下,态势评估主要是基于空空导弹可发射条件进行构建,其中与导弹发射条件密切相关的是角度信息、距离信息、高度信息和速度信息。角度信息中双方的ATA(方位角)和AA(进入角)的影响因素最大,因此选取7个状态信息描述态势,详细参数如下如表1:

表1 态势描述参数
Table 1 Situation description parameters

参数	取值范围
敌我相对距离 ΔR (km)	[0,20]
敌我相对高度 Δh (m)	[0,15000]
我方方位角 φ_t (rad)	[0, π]
我方进入角 φ_i (rad)	[0, π]
敌方方位角 φ_e (rad)	[0, π]
敌方进入角 q_e (rad)	[0, π]
我方速度 v_t	
双方速度差 Δv_u	
我方高度 h (m)	[0,15000]

根据文献[7]可知,空战态势根据受机载武器威胁程度分为四类:我方优势、敌方优势、相互威胁、相互安全。

本文基于空战态势对空战数据进行分类,构建空战态势样本库。

3 基于深度卷积生成对抗网络的态势分类模型

UCAV在空战过程中需要快速、准确的对空战态势进行评估,引导下一步机动。因此,本节基于生成对抗网络和一维卷积神经网络构建空战态势分类网络。利用一维卷积神经网络强大的特征提取能力^[8-9]和生成对抗网络的数据增强作用^[10],结合Softmax分类器构建半监督空战态势分类S-DCGAN模型。

3.1 生成对抗网络

生成对抗网络是Goodfellow et al.提出的一种新型无监督的生成模型^[11],主要结构为生成器(Generator, G)和判别器(Discriminator, D),具有将先验分布 Z 的样本 z 映射另一个分布 χ 的样本 x 的功能。生成对抗网络(Generative Adversarial

Networks, GAN)结构中实行映射的组件为G,其主要任务学习是有效的映射关系,该映射可模拟真实数据分布特征,然后生成与训练集样本相似的新样本。

G学习映射的过程需要与D不断进行对抗训练。在这个不断对抗的过程中,G不断调整自身的参数,使生成的模拟数据高度具有真实样本的分布特性,以使D将G的输出归类为真实。D也会不断提取真实数据的特征,在反向传播中不断调整自身参数,使其鉴别能力不断提高。这种对抗学习过程表述为G和D之间的极小博弈。因此,生成对抗网络的训练过程是一个相互促进的过程,在这个过程中,双方的性能不断提高,最终到达一种相对稳定的状态,如图2所示。

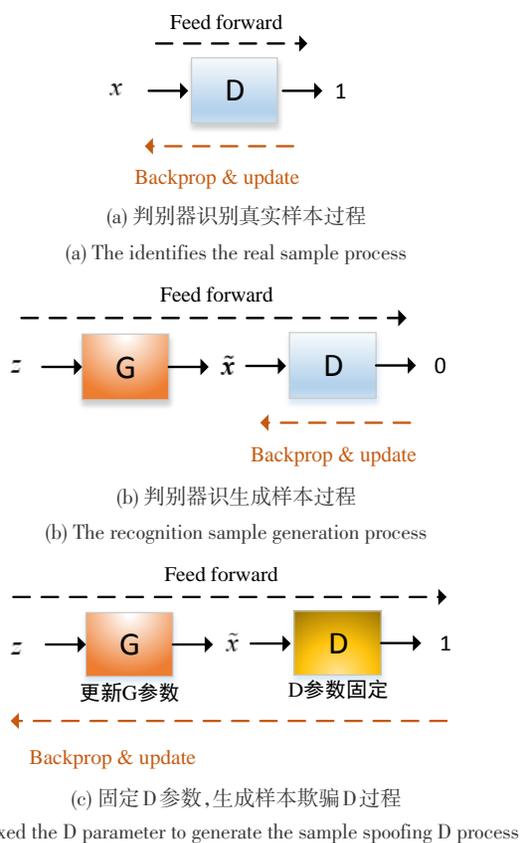


图1 GAN训练过程

Fig. 1 The GAN workout process

3.2 深度一维卷积生成对抗网络

卷积神经网络^[12]具有强大的特征提取能力,同时具有较少的参数。Radford等人将卷积神经网络与生成对抗神经网络结合,提出了深度卷积对抗神

神经网络 (Deep Convolutional Generative Adversarial Networks, DCGAN)^[13],并在网络结构和训练方法上进行了改进,主要如下:

(1) 判别器中将卷积网络中的池化层替换为微步幅卷积层,减少信息损失。生成器中使用转置卷积层替代池化层,模拟真实数据样本。

(2) 使用卷积层代替生成器和判别器中的全连接层,提高网络的稳定性。

(3) 对生成器和判别器上输入和输出层以外,其他层均使用批归一化 (Batch Normalization),确保每一层都满足均值为0,方差为1的高斯分布。

(4) 对输入层和隐藏层采用 ReLU 激活功能,

对生成器的输出采用 Tanh 激活功能,以加快训练过程。判别器所有层使用 LeakyReLU 激活函数。

3.3 S-DCGAN网络

在 DCGAN 的基础上,提出了一种基于 DCGAN 的空战态势分类模型。该模型在 DCGAN 的基础上,对判别器的输出进行改进,将原来的二元判别器用 Softmax 进行替代。由于空战态势是一个四分类问题,因此 S-DEGAN 的 Softmax 扩展到五维,并采用半监督训练方法,对生成器生成的样本和态势库的分类样本进行学习,提高空战态势的分类准确率,S-DCGAN 的结构如下。

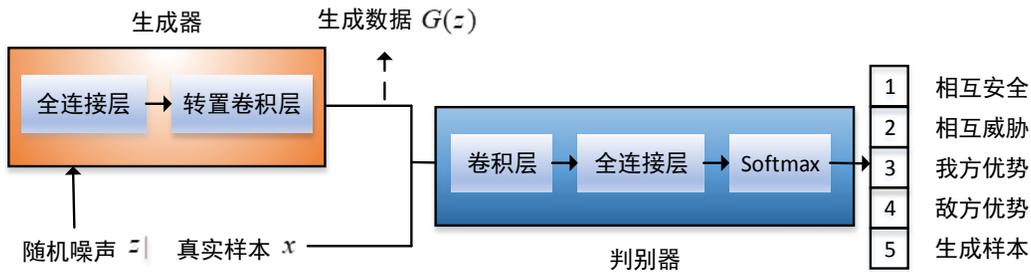


图2 S-DCGAN模型

Fig. 2 The S-DCGAN model

生成器输入符合高斯分布的噪声 z 进行训练,模拟出与真实数据高度相似的生成样本,并将生成样本和真实数据作为输入对判别器进行训练,其中真实样本是已进行分类的态势分类库。判别器通过全连接层连接一个 Softmax 输出类别的相对概率。

由表1得到的空战态势影响参数为 1×9 的维数据,为了反应空战的时序关系,增加空战相邻时刻参数的变化值,则空战态势影响因素为 1×18 维数据。模型设置输入噪声为 50 维高斯随机值,通过 2 个全连接层将 50 维数据重组为 $1 \times 5 \times 60$ 三维张量,连接 1 个步长为 2,卷积核为 3×3 的转置卷积生成一个 $1 \times 9 \times 60$ 的张量,再连接 1 个步长为 2,卷积核为 3×3 的转置卷积生成一个 $1 \times 18 \times 60$ 的张量,最后再连接 1 个步长为 2,卷积核为 3×3 的转置卷积生成一个 $1 \times 9 \times 1$ 的张量,即为当前时刻空战态势影响因子数据集,其中每个卷积层都要进行 BatchNorm 处理。

S-DCGAN 的判别器训练过程与生成器正好相

反,输入是 1×18 的张量,经过 1 层步长为 1,2 层步长为 2 的 3×3 卷积核的处理,后连接一个全连接层和一个 Softmax 层,输出空战态势的分类结果。



图3 生成器网络模型

Fig. 3 Generator network model

本节在网络模型训练完毕后,提取判别器进行空战态势分类。与传统的有监督学习方法比较,由于生成器通过噪声生成与真实数据相似的生成样

本,起到了数据增强的作用,使判别器获取了更多的特征,同时卷积神经网络本身就具有强大的特征提取能力,因此,结合这两个优点的DCGAN网络对小样本数据有更强的特征提取能力。

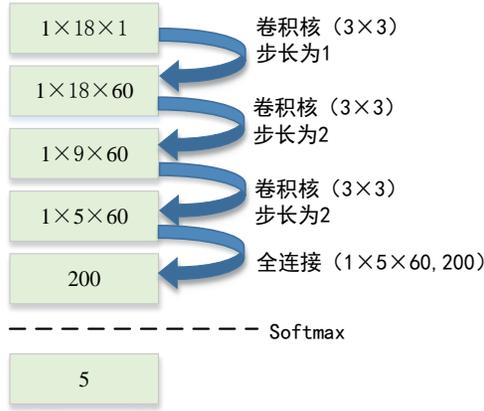


图4 判别器网络模型

Fig. 4 discriminator network model

3.4 S-DCGAN模型训练

在S-DCGAN中,对于真实数据和生成数据的分类问题,判别器的输出为5类 $\{m_1, m_2, m_3, m_4, m_5\}$,其中 (m_1, m_2, m_3, m_4) 为4类空战态势, m_5 为真假数据判别,分类输出由Softmax函数进行求解概率。

$$P_{\text{model}}(y = ix) = \frac{\exp(m_i)}{\sum_{j=1}^5 \exp(m_j)} \quad (1)$$

式(1)中, x 为输入的态势影响因子, P_{model} 输出的最大概率则为对应的类别标签。

在3.1中对GAN的网络训练过程进行介绍,在S-DCGAN模型中,判别器的误差函数主要由两类组成,一类标记数据损失 L_{label} ,一类是生成样本损失 L_g 。

标记样本损失 L_{label} 为态势类别标签与分类结果的交叉熵损失,表达式如下:

$$L_{\text{label}} = E_{x, y \sim P_{\text{data}}} [\log P_{\text{model}}(y|x, y < 5)] = E_{x, y \sim P_{\text{data}}} [\log D(x)] \quad (2)$$

生成样本损失 L_g ,为判别器将生成模拟的生成数据判断为假样本的损失,即 $y = 5$,表达式如下:

$$L_g = E_{x \sim P_{\text{data}}(x)} [\log P_{\text{model}}(y = 5|x)] = E_{x \sim P_{\text{data}}(x)} [\log D(G(x))] \quad (3)$$

式(3)中, $E_{x, y \sim P_{\text{data}}}$ 表示 x 为态势库中的被标记

的真实样本, y 为对应态势标签,其中 $y \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。 $E_{x \sim G}$ 表示 x 样本来自生成器。 $P_{\text{model}}(\cdot|\cdot)$ 为分类结果概率。

在判别器的网络训练过程中,对于态势库中的标记样本损失 L_{label} 是有监督的K分类训练,其目的是最小化标注样本与分类结果概率分布 $P_{\text{model}}(\cdot|\cdot)$ 的交叉熵损失函数 L_{label} ,并对判别器的网络参数进行优化。对于生成样本损失 L_g ,其目的是最大化被判别为生成样本的概率,其中 $P_{\text{model}}(y = 5|x)$ 是生成样本被正确判别的概率。因此,S-DCGAN的损失函数如下所示:

$$\min_G \max_D V(D, G) = E_{x, y \sim P_{\text{data}}} [\log P_{\text{model}}(y|x, y < 5)] + E_{x \sim G} [\log (1 - P_{\text{model}}(y = 5|x))] \quad (4)$$

在训练过程中,生成器和判别器交替进行训练。训练判别器时,固定生成器网络,输入空战态势样本和生成样本,采用有监督和无监督学习方法,通过最小化模型损失函数进行更新判别器网络参数。训练生成器时,固定判别器网络参数,采用无监督学习方法,最大化损失函数更新生成器网络参数。S-DCGAN训练完成后,提取网络判别器进行空战态势分类。网络参数采用Adam优化器进行求解。为了防止网络出现梯度消失的问题,训练中使用批标准化方法^[14]对隐藏层输入进行处理。

S-DCGAN模型训练流程:

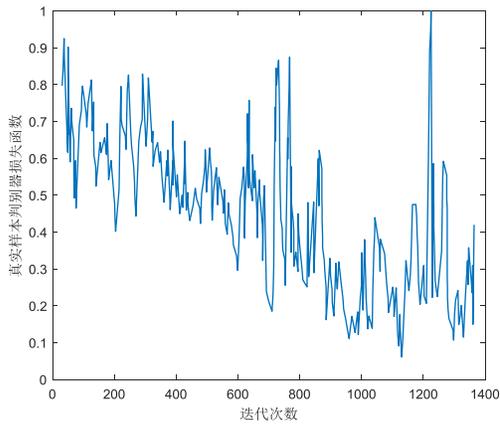
- (1) 给生成器输入随机高斯噪声,生成随机数据;
- (2) 将空战态势分类库数据和生成样本数据按批次输入到判别器中,经过Softmax数据输出应分类的概率值;
- (3) 固定生成器网络参数,利用态势分类库数据和生成样本对判别器进行训练,以极小化 $V(D, G)$ 为目标,优化判别器的网络参数;
- (4) 固定判别器网络参数,给判别器输入生成数据样本数据,通过最大化 $V(D, G)$,调整生成器的网络参数;
- (5) 重复(1)-(4)的步骤,直到达到最大迭代次数;
- (6) 将测试数据输入到判别器中,输出态势类别。

4 空战态势数据分类仿真及分析

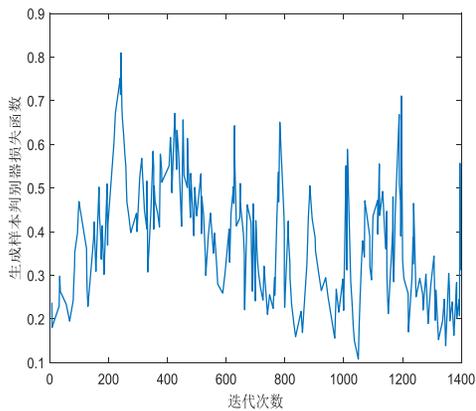
4.1 基于深度卷积神经网络的态势分类仿真分析

S-DCGAN网络的优化采用Adm算法,学习率为0.0002,Dropout为0.9,batch为60,判别器和生成器的更新频率为1:3^[15],网络的迭代次数和损失函数的变化曲线如图6所示。

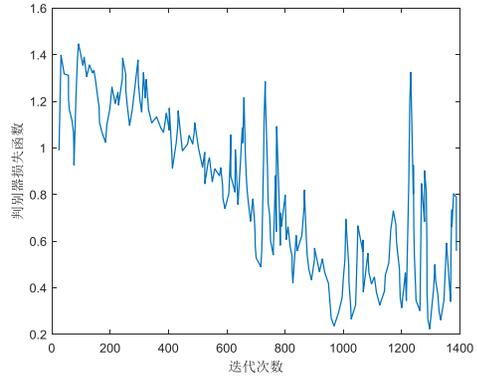
从图6中可以看出,真实样本判别器、生成样本判别器,以及判别器损失函数总体趋势都是逐步下降趋势。生成器损失函数训练刚开始,下降比较迅速,随着迭代次数的增加,后期损失函数有所上升的趋势。同时,生成器损失函数和判别器损失函数刚开始比较平缓,后期逐步发散,这也证明了随着迭代次数的不断增加,双方的对抗性增强。



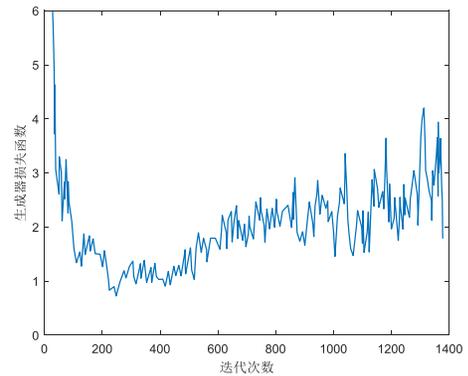
(a) 真实样本判别器损失函数
(a) Real sample discriminator loss function



(b) 生成样本判别器损失函数
(b) Generates the sample discriminator loss function



(c) 判别器损失函数
(c) discriminator loss function



(d) 生成器损失函数
(d) The generator loss function

图5 损失函数曲线图

Fig. 5 Loss function curve diagram

表2中各算法参数设置参考文献一直,可知S-DCGAN识别率最高,这是因此空战态势样本库相对较小,无法提供大规模的数据进行训练,但GAN具有数据增强的功能,CNN又具备强大的特征提取优点。通过实验验证了GAN在小规模数据分类上的有效作用。

表2 态势样本库上各方法分类准确率

Table 2 Classification accuracy of each methods on the situation sample database

算法	准确率(%)
SVM	83.3%
BP	80.2%
CNN	84.7%
S-DCGAN	97.3%

4.2 态势评估对空战决策的影响

为了验证态势评估对空战决策的影响,本节设计了对照试验,其中整个仿真实验中我方UCAV始终具备态势评估功能,敌方UCAV不具备此功能,其他实验条件不变。

根据场景设置,双方初始状态信息如下所示:

表3 敌我对抗初始态势

Table 3 Initial situation

	x(m)	y(m)	z(m)	v(m/s)	$\alpha(^{\circ})$	$\mu(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$
UCAV	12000	12000	12000	250	0	0	0.5	0	45
敌机	0	0	8000	250	0	0	0.5	0	225

从图7中可以看出,初始态势我方具有高度优势,空战开始后,首先向下俯冲,然后向上俯冲,而敌机则相对平缓做盘旋飞行,最终在61s时我方UCAV取得了空战的胜利。图8显示在61s时敌机满足我导弹不可逃逸区发射条件,其攻击区区间为[987.14, 4102.47]。图9-11可以看出,随着敌我双方在空战中态势的不断改变自适应调整态势因子,而敌机的权重因子始终保持不变,无法针对态势改变做出针对性调整,致使空战失败。决策平均时间为每步0.015s。

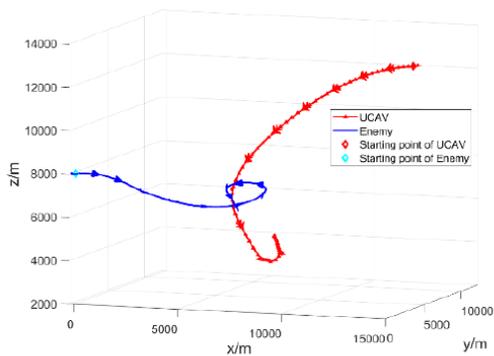


图6 空战对抗轨迹

Fig. 6 Track of air combat confrontation

从试验结果中可以得出,由于我方UCAV具备态势评估能力,可自适应调整调整决策权重功能,使UCAV在空战有重点的调整自身状态,以适应战场环境,这也证明态势评估在空战中的必要性。

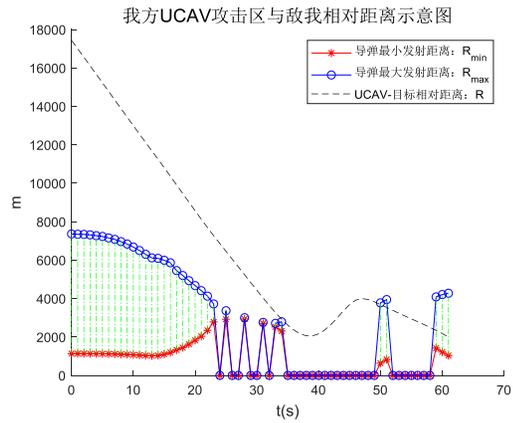


图7 我方攻击区

Fig. 7 Our attack area

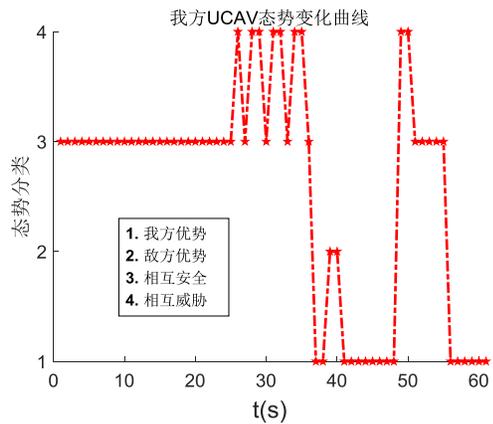


图8 我方UCAV态势变化

Fig. 8 Change of our UCAV situation

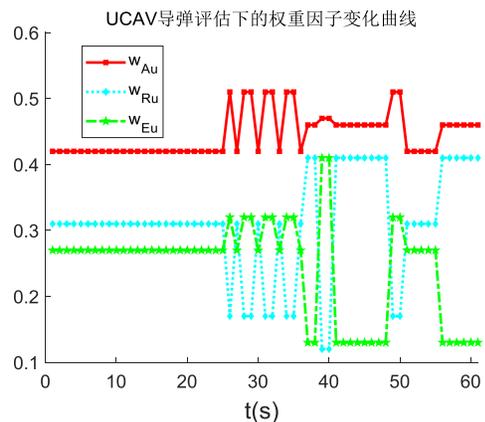


图9 我方决策权重变化

Fig. 9 Our decision weight changes

5 结论

本文利用S-DCGAN构建空战态势分类网络,并进行空战仿真。通过仿真证明此分类模型对小

样本数据分类具有较好的精度和实时性,以及态势评估对空战至关重要。

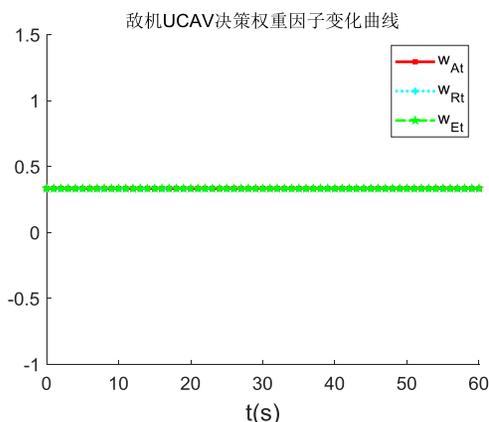


图 10 敌方决策权重变化

Fig. 10 Changes in enemy decision weights

参 考 文 献

- [1] Zhao K , Huang C . Air combat situation assessment for UAV based on improved decision tree[C]. 第30届中国控制与决策会议论文集(2).
- [2] 王光辉, 徐光达, 谢宇鹏, 等. 无人作战飞机一对一超视距空战态势评估[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(05):27-31.
- [3] 姜龙亭, 寇雅楠, 王栋, 等. 动态变权重的近距空战态势评估方法[J]. 电光与控制, 2019, 026(004):1-5.
- [4] 周新民, 吴佳晖, 贾圣德, 等. 无人机空战决策技术研究进展[J]. 国防科技.
- [5] Chen X , Xu C , Yang X , et al. Gated-GAN: Adversarial Gated Networks for Multi-Collection Style Transfer [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(2):546-560.
- [6] 嵇慧明, 于昊, 宋帅, 等. 基于改进粗糙集-云模型理论的空战态势评估[J]. 战术导弹技术, 2019(4):20-27.
- [7] Shi H , Lu W , Ding G , et al. Data Augmentation with

Improved Generative Adversarial Networks [C]// 2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). 2018.

- [8] Gosse L , Toscani G . Lagrangian numerical approximations to one-dimensional convolution-diffusion equations[J]. 2006.
- [9] 李元, 冯成成. 基于一维卷积神经网络深度学习的工业过程故障检测[J]. 测控技术, 2019(9):36-40.
- [10] Mao X , Li Q , Xie H , et al. Least Squares Generative Adversarial Networks[J]. 2016.
- [11] Goodfellow I . NIPS 2016 Tutorial: Generative Adversarial Networks[J]. 2016.
- [12] 张宏鹏, 黄长强, 唐上钦, 等. 基于卷积神经网络的无人作战飞机飞行轨迹实时预测.
- [13] Viola J , Chen Y Q , Wang J . FaultFace: Deep Convolutional Generative Adversarial Network (DCGAN) based Ball-Bearing Failure Detection Method[J]. 2020.
- [14] Ioffe S , Szegedy C . Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift[J]. 2015.
- [15] Arjovsky M , Bottou, Léon. Towards Principled Methods for Training Generative Adversarial Networks[J]. Stat, 2017, 1050.

电话:17791314969 E-mail:happyhanbo@163.com

作者简介:

韩博(1992-),男,博士,工程师,主要研究方向为无人飞行器智能自主空战方向。本文通讯作者。

周一鹏(1992-),男,博士,讲师,主要研究方向为电子对抗方向。

钱程(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向为无人飞行器作战应用方向。

赵林(1990-),男,博士,工程师,主要研究方向为无人飞行器作战应用方向。

张国雯(1995-),男,博士,工程师,主要研究方向为无人飞行器作战应用方向。

航天器再入测量无人机集群自组织控制方法

刘伯阳^{1,2}, 王 军¹

(1. 中国人民解放军63610部队, 库尔勒841001; 2. 再入动力学与目标特性实验室, 库尔勒841001)

摘要: 为提升着陆场系统对航天器再入段的测控能力, 提出了使用固定翼无人机集群接力完成航天器再入段测量的方案, 并设计了用于该集群控制的自组织控制方法。该方法将集群的运动控制分为多种行为规则, 各行为规则下的个体控制通过比例组合多种人工势函数实现。详细介绍了各行为规则下控制力的构成及基础人工势函数的设计方案, 通过仿真计算验证了该集群自组织控制方法的有效性。

关键词: 再入测量; 集群自组织控制; 虚拟势场; 行为规则

Research on UAV Cluster Self-Organizing Control Method for Spacecraft Reentry Measurement

LIU Bo-Yang^{1,2}, WANG Jun¹

(1. PLA Unit 63610, Korla 841001, China; 2. Reentry Dynamics and Target Characteristic Laboratory, Korla 841001, China)

Abstract: In order to improve the measurement and control capability of the reentry spacecraft, designed a UAV measurement cluster for this task, and designed the cluster self-organizing control method. This method is divided into several behavior rules, the individual control under each behavior rule is achieved by proportionally combining multiple artificial potential functions, introduced in detail the composition of the control force under each behavior rule and the design scheme of the basic artificial potential function. Use experiment confirmed the effectiveness of this control method.

Key words: cluster self-organizing control; virtual potential field; behavior rules

1 引言

我国载人航天工程已经全面进入空间站在轨建造阶段, 今后将会有更加频繁的天地往返任务, 再入航天器着陆搜救任务将常态化。然而我国现有测控系统受机动性影响, 对于与理论偏差较大的目标测量效能较差^[1]。设计大型固定翼无人机集群作为航天器再入段的测控设备, 充分发挥其高机动性及无低仰角遮蔽的优势, 通过主动机动、接力跟踪, 可以显著提高测控系统对航天器再入段的整体测控能力; 尤其是在航天器应急返回任务中, 可以大范围快速构建再入测控走廊, 保证再入段测控任务的完成。设计相应的智能集群自组织控制算法是实现无人机集群自主接力完成航天器再入测控任务的基础, 而实现智能集群自组织控制算法则需要对自组织理论及相关算法进行更进一步的研究。

2 集群自组织控制技术

智能集群是由数目众多的结构较为简单的独立个体构成的集群^[2], 集群内个体间通过基于集群自组织理论编写的控制算法实现集群协作, 从而使集群拥有完成复杂任务的能力^[3-4], 从集群整体尺度来看仿佛集群获得了较高层次的智能, 这种智能也可称之为群体智能^[5-7]。

生物学家关于自然界生物群落的研究成果给智能集群控制方法的研究提供了灵感, 为智能集群控制模式的成功实现提供了必要的基础^[8-9]。加利福尼亚大学的 Hackwood、Wang 两位教授在 1989 年发表的有关分子机器人系统的论文中首次提出群智能的概念^[10], 其将群体智能的形成归纳为个体对环境和群体态势所作出的高效反馈。

目前研究较为深入的智能集群个体控制方法主要包括行为规则法^[11]、虚拟势场法^[12]、人工物理

法^[13]等。基于这些基本方法,各国学者们针对智能集群自组织理论的工程化研究做了大量工作^[14-17],但这些理论的实现方式依然较为模糊,并没有提出一种较为通用的理论方法,使复杂集群行为可以有效解构为简单个体行为。因此基于航天器再入段测控需求的集群自组织方式还需要进行针对性的研究。

3 基础控制模型建立

使用无人机集群对再入航天器进行接力测控的过程较为复杂,如果使用单一的势场或虚拟力作为集群内个体的控制方式,集群则无法涌现出足够支持集群高效完成航天器再入段全程的测控任务的群体智能。因此本文设计多种势场及虚拟力,将其依据行为规则进行组合,通过实现集群内个体的控制,使集群具备完成测控任务的智能。

3.1 引力中心牵引势场

控制无人机实现对航天器的跟踪测量,是本文控制模型设计的核心任务。因此需设计一种引力中心势场,位于航天器中心,势场使无人机有向航天器运动的趋势,同时这一虚拟势场力又可以使无人机和航天器保持一定的安全距离。设计引力中心势场如下:

$$U_g(r, R_s, R_e, C_g) = \begin{cases} C_g \ln(R_e) - C_g \ln(R_s) & R_e \leq r \\ C_g \ln(r) - C_g \ln(R_s) & R_c \leq r < R_e \\ C_g \ln(R_s) - C_g \ln(r) & C_g \leq r < R_c \\ C_g \ln(R_s) - C_g \ln(C_a) + C_g - r & r < C_g \end{cases} \quad (1)$$

式中 r 为无人机与航天器的距离, R_s 为期望安全距离, R_e 为作用力距离, C_g 作为比例系数其取值根据实际情况调整。

基于 $U_g(r, R_s, R_e, C_g)$ 的设计, X_i 点的无人机受到 X_T 点航天器的引力中心作用力 F_g 可表示为:

$$F_g(X_i, X_T, R_s, R_e, C_g) = -\Delta U_g(\|X_i - X_T\|, R_s, R_e, C_g) F_{\max} = -k_g(X_i, X_T, R_s, R_e, C_g) \frac{(X_i - X_T)}{\|X_i - X_T\|} F_{\max} \quad (2)$$

作用力系数的表达式可求得如下:

$$k_g(X_i, X_T, R_s, R_e, C_g) = \begin{cases} 0 & R_e \leq \|X_i - X_T\| \\ \frac{C_g}{\|X_i - X_T\|} & R_c \leq \|X_i - X_T\| < R_e \\ -\frac{C_g}{\|X_i - X_T\|} & C_g \leq \|X_i - X_T\| < R_c \\ -1 & \|X_i - X_T\| < C_g \end{cases} \quad (3)$$

3.2 安全控制势场

安全控制势场是为了使无人机具有规避危险区域及防碰撞的能力,该势场可以使受控目标具有保持与危险区域中心的距离大于 R_c 的趋势。设计安全控制势场如下:

$$U_s(r, R_s, C_s) = \begin{cases} 0 & R_s < r \\ \frac{C_s}{r} - \frac{C_s}{R_s} & \sqrt{C_s} < r \leq R_s \\ 2\sqrt{C_s} - \frac{C_s}{R_s} - r & r \leq \sqrt{C_s} \end{cases} \quad (4)$$

式中 r 为无人机与安全控制点的距离, R_c 为期望安全间距, C_s 为作用力常数,控制作用力大小, R_s 为作用力距离;

基于势场设计安全控制力 F_s 如下:

$$F_s(X_i, X_d, R_s, C_s) = -\Delta U_s(\|X_i - X_d\|, R_s, C_s) F_{\max} = -k_s(X_i, X_d, R_s, C_s) \frac{(X_i - X_T)}{\|X_i - X_T\|} F_{\max} \quad (5)$$

X_d 为危险区域中心坐标, k_s 为安全控制力作用系数函数,可知其表达式如下:

$$k_s(X_i, X_d, R_s, C_s) = \begin{cases} 0 & R_s \leq \|X_i - X_d\| \\ -\frac{C_s}{\|X_i - X_d\|^2} & \sqrt{C_s} < \|X_i - X_d\| \leq R_s \\ -1 & \|X_i - X_d\| \leq \sqrt{C_s} \end{cases} \quad (6)$$

3.3 高程控制势场

在无人机对航天器进行跟飞测量时,如果只使用引力中心牵引势场作为控制量,则在航天器下落过程中,无人机无法保证在可用升限进行稳定飞行,因此需要一个强控制量使无人机的飞行高度具有可控性。建立高程控制势场如下:

$$U_H(X_i, H_T) = \begin{cases} \|X_i\| - H_T - 6371 & \|X_i\| > H_T + 6371 \\ H_T + 6371 - \|X_i\| & \|X_i\| \leq H_T + 6371 \end{cases} \quad (7)$$

H_T 为期望巡航高度,势场中无人机受到的高度控制力可表示为:

$$\begin{aligned} F_H(X_i, H_T) = & \\ & -\Delta U_H(X_i, H_T) F_{\max} = \\ & -k_H(X_i, H_T) \cdot \frac{X_i}{\|X_i\|} \cdot F_{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

k_H 为高度控制力作用力系数,其表达式为:

$$k_H(X_i, H_T) = \begin{cases} 1 & \|X_i\| > H_T + 6371 \\ -1 & \|X_i\| \leq H_T + 6371 \end{cases} \quad (9)$$

可知当无人机飞行高度低于 H_T 时,其会受到来自地心的大小为 F_{\max} 的斥力,当无人机飞行高度高于 H_T 时,其会受到指向地心的大小为 F_{\max} 的引力。

3.4 虚拟风力

基于人工物理法,通过引入期望速度构建虚拟风力场,模拟目标在风场中受到风力作用的效果,可以实现无人机对目标的绕飞测量,设计虚拟风力方程如下:

$$F_v(v_i, v_{vw}) = k_v(v_i, v_{vw}) \frac{v_i - v_{vw}}{\|v_i - v_{vw}\|} \cdot F_{\max} \quad (10)$$

$$k_v(v_i, v_{vw}) = -\frac{1}{2} C_v \|v_i - v_{vw}\|^2 \quad (11)$$

式中 v_{vw} 为虚拟风的速度矢量,虚拟风力的作用可以使受控目标的运动速度 v_i 有趋向于 v_{vw} 的变化趋势。

易知,飞行速度的最大改变量为受控目标最高飞行速度的两倍,即在最高速飞行时进行 180° 掉头,此时虚拟风力可以提供的最大作用力为受控节点的最大机动性,所以 C_v 的表达式如下:

$$C_v = 2 \frac{1}{(2v_{\max})^2} \quad (12)$$

k_v 的表达式可写为:

$$k_v(v_i, v_{vw}) = \begin{cases} \frac{1}{4v_{\max}^2} \|v_i - v_{vw}\|^2 & \|v_i - v_{vw}\| < 2v_{\max} \\ 1 & \|v_i - v_{vw}\| \geq 2v_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

4 基于行为规则的控制模型

根据再入航天器与无人机的速度关系及相对位置关系,将虚拟控制力的构成模式按无人机的行为规则分为三类,分别为集群构型行为、接力测量行为、集结回收行为。每一类行为规则都依据控制期望使用虚拟控制力进行比例组合,以期最终实现理想的控制结果。

4.1 集群初构型行为

在这一行为规则下,固定翼无人机受到的作用力为安全控制力、高程控制力、虚拟风场力、引力中心牵引力的组合,完成向待命区域机动的行为,其表达式如下:

$$\begin{aligned} F_f(X_i) = & \\ & \frac{1}{3} \left(\frac{1}{n} \sum_{d \neq i}^n F_s(X_i, X_d, R_d, C_s) + k_{Hf} F_H(X_i, H_T) \right) \\ & + k_{fv} F_v(v_i, v_T) + F_g(X_i, X_{sc-p}, R_s, R_{g\max}, C_g) \end{aligned} \quad (14)$$

F_s 负责控制无人机规避危险区, v_T 为虚拟风场速度,取值为 v_i 在水平方向的分量,这样的虚拟风场设计可以减少无人机在竖直方向产生的震荡,其表达式为:

$$v_T = v_i - \frac{v_i \cdot X_i}{\|X_i\|} \cdot \frac{X_i}{\|X_i\|} \quad (15)$$

F_H 、 F_v 的作用是用来使无人机在期望高程巡航, H_T 在这里为巡航平面的高程; k_{Hf} 及 k_{fv} 分别为高度控制比例系数及速度控制比例系数,其表达式如下:

$$k_{Hf} = \left(\frac{C_{fv}}{\| \|X_i\| - 6371 - H_T \| + C_{fv}} \right)^2 \quad (16)$$

$$k_{fv} = 1 - k_{Hf} \quad (17)$$

C_{fv} 为比例调节因子,调节其大小可以影响高度项在整体控制中的占比。

F_g 负责使无人机向目标等待空域前进, X_T 为无人等待空域的中心坐标,相关设计方法在下文中介绍; R_s 为无人机盘旋等待半径, R_e 、 C_g 根据实际情况取值。

4.2 接力跟踪行为

在航天器开始再入后,无人机转入接力跟踪行为。在接力跟踪行为下,控制量需考虑控制无人机运动状态,使无人机可以获得尽量长的测控弧段。

其虚拟控制力设计如下:

$$\begin{aligned} F_f(X_i) = & \\ & \frac{1}{3} \left(\frac{1}{n} \sum_{d \neq i}^n F_s(X_i, X_d, R_d, C_s) + k_{\text{H}} F_{\text{H}}(X_i, H_T) \right) \\ & + k_{\text{fv}} F_v(v_i, v_T) + k_{\text{em}} k_{\text{ems}} F_s(X_i, X_{\text{sc}}, R_{\text{em}}, C_s) \quad (18) \\ & + k_{\text{em}} k_{\text{emv}} F_v(v_i, v_{\text{em}}) + k_{\text{ep}} k_{\text{epv}} F_v(X_i, v_{\text{sc-p}}) \\ & + k_{\text{ep}} k_{\text{epg}} F_g(X_i, X_{\text{sc-p}}, R_s, R_{\text{gMax}}, C_g) \end{aligned}$$

F_s 、 $k_{\text{H}} F_{\text{H}}$ 、 $k_{\text{fv}} F_v$ 、与上文定义一致,此处不再赘述。 $k_{\text{em}} k_{\text{emv}} F_s$ 与 $k_{\text{em}} k_{\text{emv}} F_v$ 是一组控制力,其作用效果是改善观测仰角及观测方位角,在本文中称观测条件控制力。

$k_{\text{em}} k_{\text{emv}} F_s(X_i, X_{\text{sc}}, R_{\text{em}}, C_s)$ 的作用是通过控制无人机与航天器的距离,使观测仰角保持在可视仰角以下, X_{sc} 为航天器位置坐标, R_{em} 为当满足观测仰角约束条件时的航天器与无人机距离。

当航天器位于 X_{sc} 时,在最大可视仰角 θ 条件下的无人机位置为 X_{ei} , X_{ei} 位于巡航球面,基于上述分析可以建立以下方程:

$$\frac{\|X_{\text{sc}}\|}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)} = \frac{H_T + 6371}{\sin(\beta)} = \frac{R_{\text{em}}}{\sin(\alpha)} \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta - \beta \quad (20)$$

联立上述两方程即可解出 R_{em} 。

$k_{\text{em}} k_{\text{emv}} F_v(v_i, v_{\text{em}})$ 的作用是使无人机有以再入航天器位置矢量为轴进行绕飞的趋势,使航天器趋于无人机的侧向,可以获得最大可视仰角; v_{em} 为期望绕飞速度,其表达式如下:

$$v_{\text{em}} = \begin{cases} -v_{\text{pMax}} \frac{X_{\text{sc}} \times X_i}{\|X_{\text{sc}} \times X_i\|} & X_{\text{sc}} \cdot (v_{\text{sc}} \times (X_i - X_{\text{sc}})) > 0 \\ v_{\text{pMax}} \frac{X_{\text{sc}} \times X_i}{\|X_{\text{sc}} \times X_i\|} & X_{\text{sc}} \cdot (v_{\text{sc}} \times (X_i - X_{\text{sc}})) \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

v_{pMax} 为当前受控无人机最大飞行速度。这样设计 v_{em} 可以确保绕飞运动方向与航天器运动方向保持一致。

$k_{\text{ep}} k_{\text{epv}} F_v$ 与 $k_{\text{ep}} k_{\text{epg}} F_g$ 是一组控制力,其作用效果是使无人机有伴飞(跟飞)再入航天器的趋势,用以延长测控弧段,在本文中称为伴飞控制力。

$k_{\text{ep}} k_{\text{epv}} F_v$ 用于使无人机拥有和航天器同速运动的趋势,可以有效增长测控弧段。 $v_{\text{sc-p}}$ 为航天器飞行速度的水平分量,其表达式如下:

$$v_{\text{sc-p}} = v_{\text{sc}} - \frac{v_{\text{sc}} \cdot X_{\text{sc}}}{\|X_{\text{sc}}\|} \cdot \frac{X_{\text{sc}}}{\|X_{\text{sc}}\|} \quad (22)$$

$k_{\text{ep}} k_{\text{epg}} F_g$ 用于使无人机有向航天器运动的趋势,可以控制无人机和航天器之间的距离。 $X_{\text{sc-p}}$ 为再入航天器 X_{sc} 在无人机巡航高度的投影点。

k_{em} 与 k_{ep} 为一组控制系数, $k_{\text{em}} = 1 - k_{\text{em}}$ 为观测条件控制系数, k_{ep} 为伴飞控制系数,其方程如下:

$$k_{\text{ep}} = \begin{cases} 1 & R_{\text{mMax}} < \|X_{\text{sc}} - X_i\| \\ \frac{\|X_{\text{sc}} - X_i\| - R_{\text{em}}}{R_{\text{mMax}} - R_{\text{em}}} & \|X_{\text{sc}} - X_i\| < R_{\text{mMax}} \\ 0 & \|X_{\text{sc}} - X_i\| \leq R_{\text{em}} \end{cases} \quad (23)$$

$k_i k_{\text{H}} F_{\text{H}}$ 为高程控制力, H_c 为期望高程,其公式定义如下:

k_{emv} 与 k_{ems} 为一组控制系数, $k_{\text{emv}} = 1 - k_{\text{ems}}$ 为观测方位角控制系数, k_{ems} 为观测仰角控制系数,其方程如下:

$$k_{\text{ems}} = \begin{cases} 1 & \theta_i > \pi/6 \\ \frac{6\theta_i}{\pi} & 0 < \theta_i \leq \pi/6 \\ 0 & \theta_i \leq 0 \end{cases} \quad (24)$$

θ_i 为无人机 X_i 对再入航天器 X_{sc} 的观测仰角,其表达式如下:

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left(\frac{(X_{\text{sc}} - X_i) \times X_i}{\|X_{\text{sc}} - X_i\| \|X_i\|} \right) \quad (25)$$

k_{epg} 与 k_{epv} 为一组控制系数, $k_{\text{epg}} = 1 - k_{\text{epv}}$ 为跟飞控制系数, k_{epv} 为伴飞控制系数,其表达式如下:

$$k_{\text{epv}} = \begin{cases} 1 & \|v_{\text{sc-p}}\| \geq v_{\text{pMax}} \\ \frac{\|v_{\text{sc-p}}\| - v_{\text{pMin}}}{v_{\text{pMax}} - v_{\text{pMin}}} & v_{\text{pMin}} \leq \|v_{\text{sc-p}}\| < v_{\text{pMax}} \\ 0 & \|v_{\text{sc-p}}\| < v_{\text{pMin}} \end{cases} \quad (26)$$

v_{pMax} 和 v_{pMin} 分别为受控无人机的最大及最小飞行速度。

4.3 集结回收行为

这一行为规则下,无人机起飞向集结回收点飞行,集群内无人机个体受到的作用力为安全控制力、高程控制力、虚拟风场力、引力中心牵引力的组

合,表达式如下:

$$\begin{aligned} F_f(X_i) = & \\ & \frac{1}{3} \left(\frac{1}{n} \sum_{d \neq i}^n F_s(X_i, X_d, R_d, C_s) \right) \\ & + k_{FH} F_H(X_i, H_T) + k_{FV} F_V(v_i, v_T) \\ & + F_g(X_i, X_{ap}, R_{sap}, \infty, C_g) \end{aligned} \quad (27)$$

可以发现固定翼无人机在当前行为规则下的控制力同集群初构型行为规则下的控制力构成是基本一致的,此处不再赘述。 X_{ap} 为机场坐标, R_{sap} 为待降绕飞半径。

5 集群待命位置设计

无人机测量吊舱通常安装于机头下腹部,测量设备会受到观测仰角及距离的约束,无人机集群规模及待命位置需要基于此约束结合再入弹道的特点进行独立设计。

如图1所示,过航天器某一时刻所在位置 X_i 创建垂直于弹道面且过地心的平面,此平面与无人机巡航球面的交线上存在当前时刻无人机对航天器的四个边界测量点。

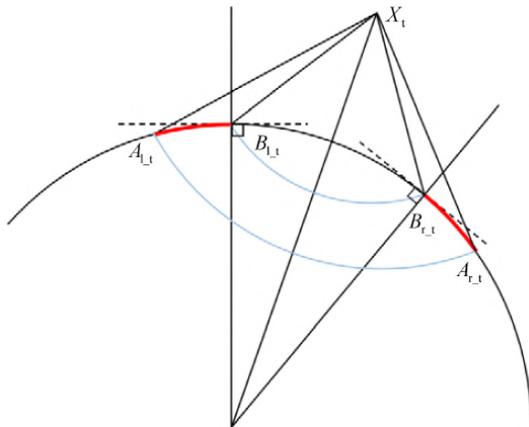


图1 无人机测量边界

Fig. 1 UVA measurement boundary conditions

其中 A_{l1} 、 A_{r1} 为当前时刻最大测量距离约束边界, B_{l1} 、 B_{r1} 为当前时刻最大测量仰角约束边界,将再入弹道上的每一点对应的测量约束边界连接起来,则可包围出符合测量条件的无人机待命区域如下图绿色区域所示,图中蓝色曲线为地心系下再入弹道。可根据测控弧段进一步分析如何在绿色待命区域中合理布设无人机。

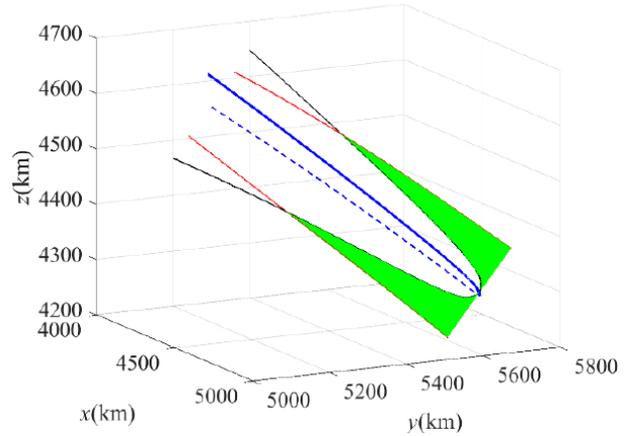


图2 测量约束条件下的可选等待空域

Fig. 2 The standby area based on boundary conditions

如图3所示,再入初始点 X_1 对应的无人机可选等待空域为 $B_1A_{11}A_{12}$ 区域,该区域中测控弧段最短的等待点为 B_1 ,可覆盖测控弧段为 X_1X_2 ; X_2 点对应的无人机可选等待空域为 $B_2A_{21}A_{22}$ 区域,该区域中测控弧段最短的等待点为 B_2 ,可覆盖测控弧段为 X_2X_3 。图中深绿色区域为 $B_1A_{11}A_{12}$ 与 $B_2A_{21}A_{22}$ 的重叠区域,位于该区域的无人机可完成 X_1X_3 弧段的测控任务,因此在实际任务中只需根据弹道从再入点依次求出重叠等待空域,并间隔选取即可确定无人机集群规模及初始构型位置。

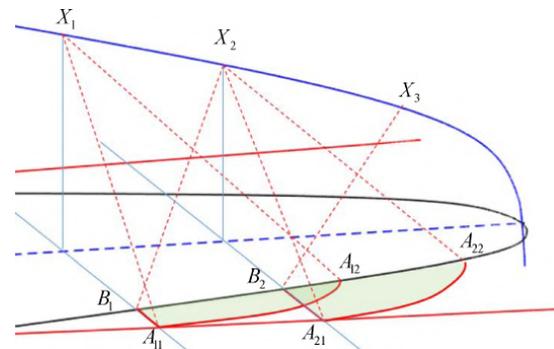


图3 等待空域规划

Fig. 3 The design of standby area

6 仿真计算及算法验证

按任务模式设计,无人机集群需要完成航天器再入全程的测控任务。本节将对整个任务模式的过程进行仿真,并介绍仿真方法。

6.1 无人机运动控制模型

为满足初始初构型需求,根据大型无人机真实

参数,提出以下运动学约束:

表1 无人机运动学约束量

Table 1 UAV kinematics constraints

名称	值
最大速度	0.0722 km/s
最小速度	0.0287 km/s
最大偏航率	0.114 rad/s
最大加速度	0.015 km/s ²
最大爬升率	0.3
最大飞行高度	8 km

根据无人机实际情况,在仿真过程中使用了文献[18]中提出的飞行控制模型,模型输入量为速度 v 、航向角 φ 和高度 η ,其运动学方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos\varphi \\ \dot{y} = v \sin\varphi \\ \dot{z} = \eta \\ \dot{\varphi} = \frac{1}{\tau_\varphi}(\varphi_c - \varphi) \\ \dot{v} = \frac{1}{\tau_v}(v_c - v) \\ \dot{\eta} = -\frac{1}{\tau_\eta}\eta + \frac{1}{\tau_z}(z_c - z) \end{cases} \quad (28)$$

可解出三个输入量与通过上文方法求出的控制力加速度 A_x, A_y, A_z 关系如下:

$$\begin{cases} v_c = \tau_v(A_x \cos\varphi + A_y \sin\varphi) + v \\ \varphi_c = \frac{\tau_\varphi}{v}(A_x \cos\varphi - A_y \sin\varphi) + \varphi \\ z_c = z + \frac{\tau_h}{\tau_\eta}\eta + \tau_z A_z \end{cases} \quad (29)$$

6.2 仿真计算结果

6.2.1 集群初构型行为

为了使仿真显示结果更为直观,在落点中心建立东北天坐标系,用以显示仿真结果。使用上文所述方法,基于仿真再入弹道计算得到图4所示4个深绿色初始待命区域,布设4架无人机接力完成测控任务。

图5展示了集群初构型过程,图中空心圆点为无人机初始位置,实心圆点为无人机最终位置,红色点为待命区域中心,深色渐变线为无人机运动航迹,浅色渐变线为地面投影,蓝色实线为再入弹道,

蓝色虚线为再入弹道的地面投影。可以看到,无人机完成了初构型,并在待命空域盘旋等待。

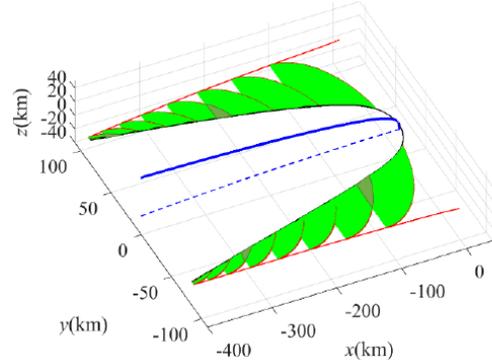


图4 初始待命区域

Fig. 4 Cluster standby area

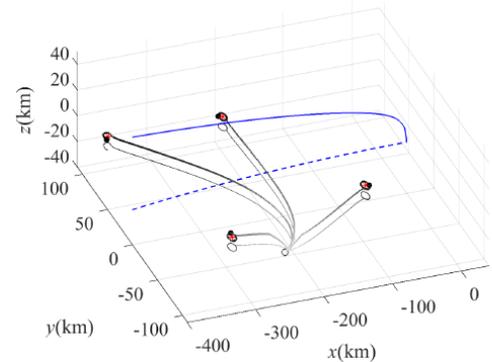


图5 集群初构型过程

Fig. 5 Cluster configuration process

6.2.2 接力测量行为

图6为接力测量行为的仿真结果:

图中红色圆圈为返回舱当前位置,红色三角为待命无人机,绿色三角为正在进行测量的无人机,可以看到在返回舱再入过程中无人机实现了依次接力测量。

图7所示为无人机接力过程的全程运动轨迹,可以看到再入初段的无人机在完成测量任务后继续在待命空域盘旋;对于再入末段的无人机,由于航天器始终未出其势场作用范围,无人机进行了跟飞、绕飞测量。

图8为接力测量过程的落点区域俯视图,可以观察到两架无人机最终抵达落点上空,实现了自主绕飞测控,并在空中进行了自主避障。

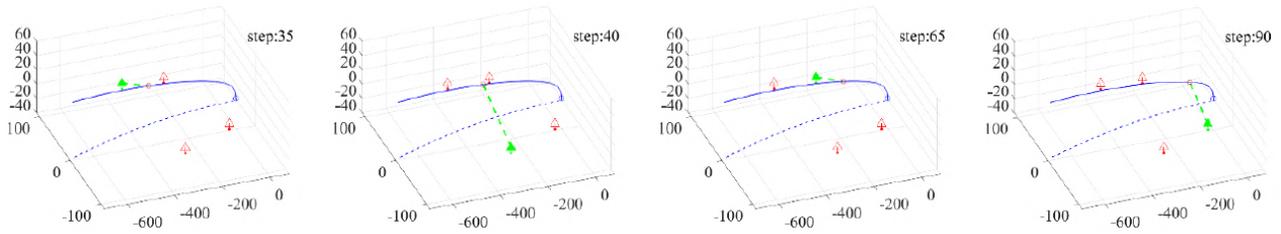


图6 接力测量行为

Fig. 6 The relay measurement behavior

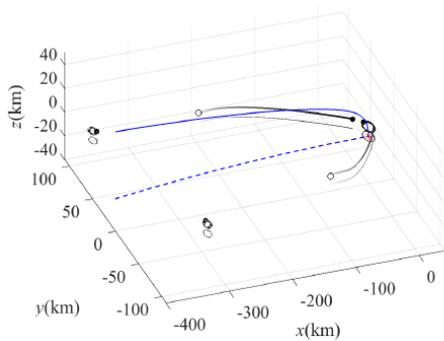


图7 接力测量过程

Fig. 7 The relay measurement process

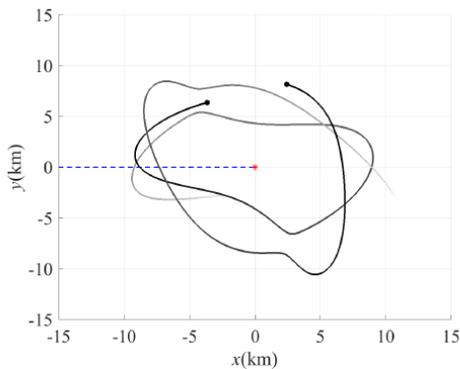


图8 末段测量过程

Fig. 8 The terminal measurement process

6.2.3 集结回收行为

在集结回收行为下,无人机集群完成集结,其过程如图9所示。

图10为集结空域俯视图,可以看到当集结点和绕飞半径设置合适时,无人机会在势场作用下自动组成绕飞编队,在集结点上空绕飞备降。

7 结论

仿真结果证明,本文所提出的控制方法通过简单的个体控制算法组合,使无人机集群涌现出了足

够的群体智能,各行为规则下对无人机集群的控制达到了预期效果,对行为规则的解构是合理且有效的,无人机集群实现了对航天器再入段全程的自组织测量。本文所提出的无人机集群控制方法虽然在仿真验证中实现了设计目的,但还需要将其真正付诸于实践,才能真实检验其可靠性,并进行进一步的优化完善。

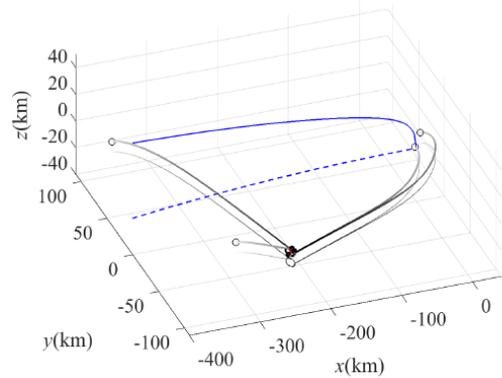


图9 集结回收行为

Fig. 9 The collection and recovery behavior

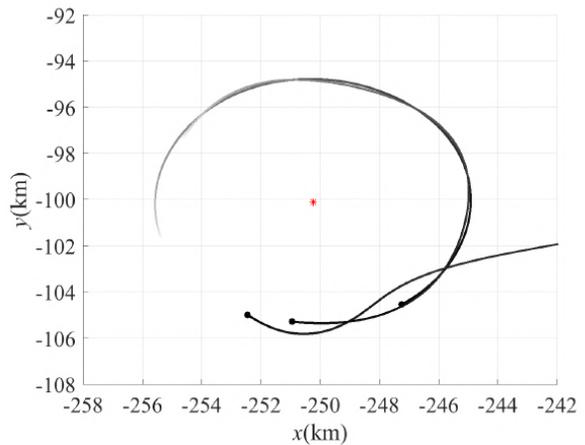


图10 集结回收行为

Fig. 10 The terminal collection and recovery behavior

参 考 文 献

- [1] 于志坚. 我国航天测控系统的现状与发展[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10):42-46. [YU Z J. Status Quo and Development of Spaceflight TT&C Systems [J]. Engineering Science, 2006, 8(10):42-46.]
- [2] Smith A E . Swarm intelligence: from natural to artificial systems [Book Reviews][J]. Connection Science, 2002, 14(2):163-164.
- [3] István Karsai. Decentralized control of construction behavior in paper wasps: An Overview of the Stigmergy Approach [J]. Artificial Life, 1999,5(2):117-136.
- [4] Dipple A , Raymond K , Docherty M . General theory of stigmergy: Modelling stigma semantics [J]. Cognitive Systems Research, 2014, 31-32(4):61-92.
- [5] Wang J , Beni G . Pattern generation in cellular robotic systems [C]// Intelligent Control, 1988. Proceedings. IEEE International Symposium on. IEEE, 1988.
- [6] Koliás G , Kambourakis G , Maragoudakis M . Swarm intelligence in intrusion detection: A survey [J]. Computers & Security, 2011, 30(8):625-642.
- [7] Nedjah N , Mourelle L D M . Swarm Intelligent Systems [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [8] Theraulaz, Guy, Bonabeau, Eric. A Brief History of Stigmergy [J]. Artificial Life, 1999, 5(2):97-116.
- [9] Bayindir L, Sahin E. A review of studies in swarm robotics [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering, 2007, 15 (2) : 115-147.
- [10] S Hackwood, J Wang. The engineering of cellular robotic systems [C]// Intelligent Control, 1988. Proceedings. IEEE International Symposium on. IEEE, 1988.
- [11] Reynolds C W . Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4):25-34.
- [12] Khatib O . Real-Time Obstacle Avoidance System for Manipulators and Mobile Robots [J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1):90-98.
- [13] Spears W M , Spears D F , Hamann J C , et al. Distributed, Physics-Based Control of Swarms of Vehicles [J]. Autonomous Robots, 2004, 17(2):137-162.
- [14] Weijun S , Rui M , Chongchong Y . A Study on Soccer Robot Path Planning with Fuzzy Artificial Potential Field [C]// 2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. IEEE, 2010.
- [15] Balch, T, Arkin, et al. Behavior-based formation control for multirobot teams [J]. Robotics and Automation, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14 (6) : 926-939.
- [16] Shucker B . Control of distributed robotic macrosensors [M]. University of Colorado at Boulder, 2006.
- [17] Pac M R , Erkmen A M , Erkmen I . Control of robotic swarm behaviors based on smoothed particle hydrodynamics [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2007.
- [18] Ren W . On Constrained Nonlinear Tracking Control of a Small Fixed-wing UAV [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems Theory & Applications, 2007, 48(4):525-537.

作者简介:

刘伯阳(1990—),男,硕士,工程师,主要研究方向为航天测控,集群控制。本文通讯作者。

王军(1969—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为航天测控总体。

无人机全自动着舰系统及卫星引导架构研究

苏大林¹, 卢元杰¹, 杨亮¹, 葛俊^{1,2}

(1. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035; 2. 空战系统技术航空科技重点实验室, 辽宁 沈阳 110035)

摘要: 无人舰载机作为航空母舰的海上作战力量, 是确保海军在战场上夺取制空权和对抗敌我力量的关键, 随着现代战争日渐呈现的战场任务变化的变革, 上舰成为一种必然趋势。无人舰载机能够在航母上自主滑跃、弹射起飞和拦阻着舰, 可独立开展复杂作战环境下的作战任务, 本文对于现有无人机全自动着舰引导系统进行分析, 之后对卫星引导全自动着舰技术及系统组成进行分析, 对卫星引导方式的架构展开讨论, 最后对舰载机自动着舰研究成果进行总结, 对未来发展方向进行展望。

关键词: 无人舰载机; 全自动着舰; 卫星; 差分引导; 系统架构

Research on Statelite Guidance System and Architecture of UAV Automatic Landing

SU Dalin¹, LU Yuanjie¹, YANG Liang¹, GE Jun^{1,2}

(1. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, Liaoning; 2. Key Laboratory of aviation science and technology of air combat system technology, Shenyang 110035, Liaoning)

Abstract: As the sea combat power of aircraft carrier, the UAV is the key to ensure the navy to seize the air supremacy and confront the enemy and ourselves in the battlefield. With the change of battlefield task which is increasingly present in modern war, it is an inevitable trend to get on board. Unmanned carrier aircraft can independently slide, launch and block the ship on the carrier, and independently carry out the operation tasks under complex combat environment. This paper analyzes the technology and system composition of the satellite guidance full-automatic landing, discusses the structure of the satellite guidance mode, and summarizes the research results of the automatic landing of the carrier aircraft, and forecasts the future development direction.

Keywords: Unmanned carrier aircraft ; Automatic landing ; satellite ; differential guidance ; system architecture

1 引言

进入20世纪90年代之后,全球定位系统发展逐渐成熟。作为一种卫星导航系统, GPS可以对飞行器的高度速度进行高精度的测量, 取代雷达引导进一步提高 ACLS 的精度, 舰船上的接收机接收到 GPS 信号, 稳定平台可以观测出舰船的运动信息^[1], 将这两个数值通过数据链发送到舰载机上, 飞机接收到来自舰船的 GPS 观测量, 与机载 GPS 接收机进行组合, 经过算法解算出两天线之间的相对距离^[2]。结合舰载机精密惯导系统解算的信息, 将两天线之间的距离转换为舰载机尾钩与甲板中心线之间的距离, 将这个相对位置与理想着舰轨迹进行

对比, 实时修正舰载机的纵向、横向误差, 控制飞机的纠偏^[3]。

国外较成熟的卫星引导系统为美国的 JPALS, 应用场景分为陆地机场(陆地 JPALS)和海上航空母舰(海上 JPALS)。在这两种情况下, JPALS 都实现了三个重要的功能。首先, 该系统处理着舰过程最终段数据, 这些数据定义了进入飞机的参考轨迹^[4]。第二, 系统广播差分 GPS 校正, 通过消除 GPS 信号中的系统误差来提高导航精度。第三, 该系统对 GPS 卫星几何形状差、内部系统故障或危险外部干扰的情况提供导航质量下降的警告。如果有足够的可靠性, 这些功能将允许无人机和有人机的自动航母着陆(图1在恶劣天气条件下)。

在着舰起降技术研究上,我国虽然起步较晚但发展迅速,上世纪九十年代开始,我国相关研究人员开始了对航空母舰及舰载机的动力学分析及模型建立,国内诸多研究所及高校得到了一些研究成果。

南航杨一栋教授和北航屈香菊教授是舰载机起降研究的先驱。杨一栋教授对国外舰载机相关数据完成了大量分析,对国外舰载机进行了仔细研究,编写了大量的相关文献^{[5][6]},为之后的航空母舰-舰载机体系研究提供了理论支撑。屈香菊教授撰写了《舰载机人工控制下LSO仿真模型》,对进场过程中的着舰技术方面做出了突出贡献^{[7][8]}。



图1 JPALS将使载人和无人驾驶飞机都能精确着陆
Fig. 1 JPALS will enable both manned and unmanned aircraft to land accurately

2 全自动着舰引导系统研究

2.1 现有自动着舰引导方案

2.1.1 基于雷达的着舰引导方案

以高精度跟踪雷达进行远距离下滑引导,将舰载机引至菲涅尔透镜助降装置工作范围的窗口区域,是一种成熟而有效的综合手段。这种雷达引导体制的核心部件是航母甲板上的数部能同时实现正交波束角度测量和径向距离测量的精密跟踪雷达。其测得飞机在降落过程中的实际位置、姿态信息和运动情况,将这些参数输入计算机进行计算,运用诸如卡尔曼滤波、神经网络等算法对甲板运动等干扰信号进行实时补偿,计算出舰载机在下滑过程中的正确飞行轨迹,并将舰载机的实测位置同计算出的正确位置在计算机中进行比较,最后将误差结果通过数据链传给舰载机的终端设备,引导飞行员将舰载机准确地驶向菲涅尔透镜助降系统(FLOLS)工作窗口范围,甚至在条件允许的情况

下,将着舰信息直接提供给舰载机飞行控制系统,使其以全自动或是半自动方式直接盲降着舰。理论上,雷达引导体制自动着舰导引系统工作过程是这样的:飞机进场窗口离航母约32km,舰载精密跟踪雷达捕获并跟踪飞机,系统将所测得的飞机空间位置信息与甲板运动信息输入计算机,处理后与预先设定的理想着舰轨迹比较,得出空间位置误差信息,经导引律得到的控制指令以数据链形式发送至飞机,由飞控系统和自动油门系统不断纠正飞行轨迹,以期使飞机按设定的理想轨迹着舰,若实际轨迹超过安全区,复飞决策系统发出复飞指令,迅速停止着舰运动进入逃逸/复飞模式^{[9][10]}。

然而,目前基于雷达技术的舰载机下滑着舰远程引导体制存在以下缺陷:

测控过程复杂;整个着舰引导过程是一个多系统的协同测控过程,需先由空管雷达将舰载机引导到下滑窗口,然后由仪表着舰系统实施进场耦合,再由精密引导雷达做下滑引导,最终在触舰阶段由激光测量等装置做精密测量。

定位精度有限,在着舰引导的触舰阶段,不仅要修正因舰体运动而引起的位移,还需要克服舰尾气流对下滑轨迹所产生的扰动影响,因此触舰阶段的精确测量能力是极为重要的。而且,基于波束扫描技术的下滑引导雷达系统,需配置激光测距仪等精密测量装置,并且由于存在天线本身的扫描运动,对甲板运动补偿及预估相对复杂。更重要的是,基于雷达技术的舰载机下滑着舰远程引导体制,无法实施多机同时测控。现有的舰载雷达引导系统是基于舰面导出数据方式工作的,而在舰面导出方式下,定位测量数据必须通过可靠的编码数据链传送给机载设备。已有的美军研究报告表明,舰船到飞机信号的传输延时会造成稳定度的降低,这就给多机同时测控带来了困难^{[11][12]}。

美国于1948年提出全自动着舰的需求后,研制了AN/SPN-10自动着舰引导系统,名义上是自动着舰系统,但不具备全自动着舰功能。20世纪60年代末,美国成功研制了AN/SPN-42着舰引导雷达,并在1970年至1982年间,进行了4000余次飞行试验,大大提高了舰载机在航母上的着舰成功率。在20世纪80年代初,美国在AN/SPN-42的基础上,又研制了改进型号,即AN/SPN-46,并在1984年由

FA-18 飞机进行了全自动着舰引导 ACLS (Automatic Carrier Landing System) 性能的验证试验,飞行甲板高度变化的峰值为0.9~2.1m时,9次全部成功着舰,着舰误差的标准差为6.7m。1984年进行了第二次飞行试验,完成28次成功着舰,着舰误差的标准4.33m。1984年6月19日,F/A-18A舰载飞机使用的 ACLS 通过了认证,正式装备美国海军。此后,以着舰引导雷达为核心的全自动着舰引导系统在美国航母上广泛装备,是现役舰载机的主要着舰导引方式。

ACLS系统基本原理框图见下图。航空母舰上的跟踪雷达测出舰载飞机的实际位置,同时由甲板运动传感器测量航空母舰飞行甲板的运动情况,将数据传送给补偿计算机对甲板运动进行补偿,然后计算舰载飞机所处的理想位置。将舰载飞机的理想位置和实际位置输入指令计算机,进行比较得到误差信号,根据误差信号经由引导控制律计算得到舰载飞机的控制指令,再由无线电数据链发送给舰载飞机。舰载飞机上的自动驾驶仪根据接收装置收到的误差信号,操纵飞机消除误差,实现预定区域安全着舰。

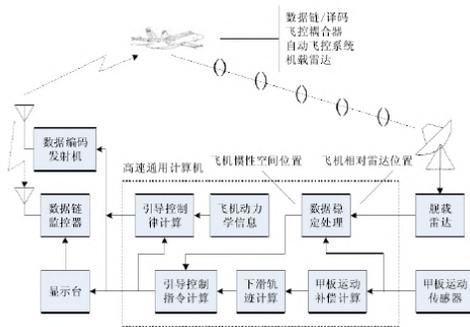


图2 ACLS基本组成及原理

Fig. 2 Basic composition and principle of ACLS

美国的全自动着舰引导系统称为“全天候航母着舰系统(AWCLS All-Weather Carrier Landing System)”,如图2所示。AWCLS中的AN/SPN-46(V)着舰引导雷达采用机械扫描跟踪方式,该雷达同时也是AWCLS的主用系统,并采用双套配置。仪表着舰系统是以微波扫描技术为基础的AN/SPN-41航母仪表着舰系统,该系统的技术体制是基于美国提出的脉冲编码技术体制的微波着陆系统。需要指出的是,为了确保着舰安全,AWCLS中

的数据链是着舰专用数据链Link-4A,并不与航母上其余的数据链共用。光学助降系统也是在着舰引导系统的重要组成部分,有FLOLS和改进的IFLOLS两种^{[13][14]}。

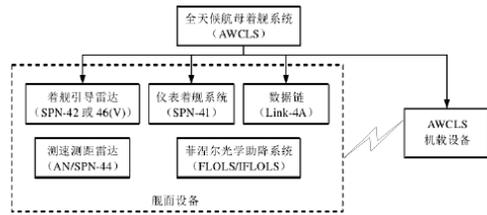


图3 美国航母全自动着舰引导系统框架

Fig. 3 The framework of the full automatic landing guidance system for American aircraft carrier

2.1.2 基于卫星的着舰引导方案

进入20世纪90年代之后,全球定位系统发展逐渐成熟。作为一种卫星导航系统,GPS可以对飞行器的高度速度进行高精度的测量,取代雷达引导进一步提高ACLs的精度,工作的流程如图4所示。

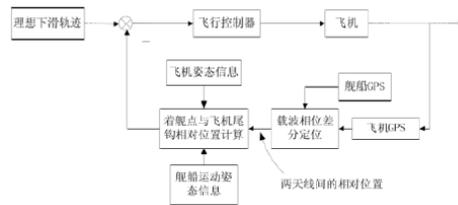


图4 GPS着舰引导系统

Fig. 4 GPS landing guidance system

舰船上的接收机接收到GPS信号,稳定平台可以观测出舰船的运动信息,将这两个数值通过数据链发送到舰载无人机上,无人机接收到来自舰船的GPS观测量,与机载GPS接收机进行组合,经过算法解算出两天线之间的相对距离。结合舰载无人机精密惯导系统解算的信息,将两天线之间的距离转换为无人舰载机尾钩与甲板中心线之间的距离^[15],将这个相对位置与理想着舰轨迹进行对比,实时修正舰载机的纵向、横向误差,控制飞机的纠偏。

美国国防部后续提出联合精密进近着陆系统JPALS (Joint Precision-Approach and Landing System)研究计划,美国海军负责GPS自动着舰引导

系统设计,并于21世纪初期,成功实施GPS引导自动着舰。

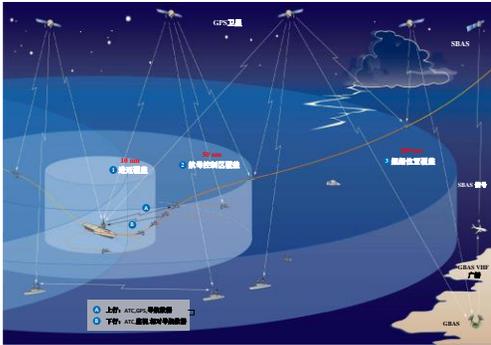


图5 JPALS系统运行概念图

Fig. 5 Operation concept diagram of JPALS system

在舰艇50-200n mile半径范围内为舰艇位置覆盖区,通过单向LPI数据链为飞机提供舰艇的位置信息,JPALS系统在该范围提供5m的水平导引精度在舰艇10至50nmile半径范围内为航母控制覆盖区,通过双通道LPI数据链,利用位置报告方法使航母保持对多达100架飞机的位置进行跟踪。这种方法与民用航空交通管制现代化计划使用的自动化独立监视广播(ADS-B)概念类似。但是军用位置报告只能由舰艇接收到,不像民用ADS-B,可使所有飞机跟踪它们附近的其它飞机,JPALS系统在该范围提供2m的水平导引精度。在舰艇10海里范围内为进近覆盖区,利用GPS相对导航为离场和非精密进近提供导航服务。在舰艇1n mile半径范围内为精密进近着舰覆盖区,JPALS系统将激活基于载波相位差分的相对定位,提供精度达到15cm的精密导航。在舰艇1/4海里半径范围内,JPALS系统为垂直30米(甲板高)内的舰载机提供进近引导。舰载机将下行大量的信息,包括相对位置、速度、加速度和相对于预期下滑道的偏差,以及空速、攻角和侧滑角。为着舰指挥官(LSO)提供的其它信息包括油门和控制杆的位置,重要航空电子设备的状态,以及是否接通自动驾驶仪方式。在着舰前,自动着舰系统发送“跟踪甲板”信号,使舰载机运动与航母着舰时的运动同步。使用较高的发送信号数据率,能够对飞机提供必要的稳定和控制^[16]。

JPALS系统可以支持对飞机降落毗邻区域的所有操作,包括:支持起飞阶段的滑行、起飞和初始

爬升、支持到达阶段的终端区、非精密进近、CAT I/II/III 精密进近和复飞操作。另外,JPALS可取代战术空中导航(TACAN)系统,并扩大目前的自动航舰着舰系统(ACLS)和仪表降落系统(ICLS)。

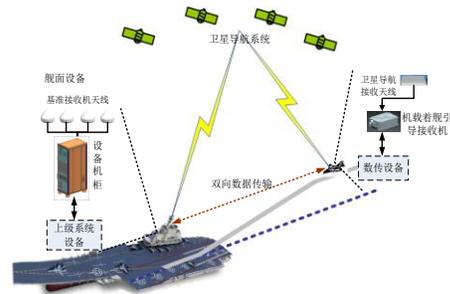


图6 卫星着舰引导系统设备架构图

Fig. 6 Equipment architecture of satellite landing guidance system

除GPS外目前北斗卫星全自动着舰引导系统由舰载卫星着舰引导设备、机载卫星着舰引导设备两部分组成,其中机载卫星着舰引导设备包括机载着舰引导接收机、卫星导航接收天线组成^[17]。

卫星着舰引导系统利用差分完好性增强手段,为舰载机飞控系统提供满足着舰引导精度需求的相对定位结果,并结合辅助信息完成着舰引导信息生成:

(1) 舰载卫星着舰引导设备通过多个基准接收机及天线完成高精度卫星导航信号接收与测量,在差分完好性处理设备中结合多基准接收机输出的数据进行完好性监测处理和观测数据的跟踪评估,形成差分增强信息报文并将报文送给上级系统设备由其通过舰空数据传输链路发送给舰载机;

(2) 机载卫星着舰引导设备通过舰空数据传输链路接收舰载卫星着舰引导设备差分增强信息传输,同时通过机载卫星导航接收模块完成卫星导航信号测量、获得导航电文和观测数据,结合舰面提供的差分完好性增强信息、惯导辅助信息等完成高精度的相对定位解算、完好性判断处理以及运动预报与补偿处理,生成着舰引导信息并将该信息送给飞控设备,支持飞控实现着舰引导,并通过舰空数据传输链路将相对定位结果传送给舰载卫星着舰引导设备,用于舰面监测。

2.1.3 基于视觉的着舰引导方案

近年来,计算机视觉技术得到飞速发展,产生

了一种新的导航方式即视觉导航。视觉导航通过图像处理技术对摄像机图像进行处理,计算得到无人机的位置、姿态等导航信息,引导无人机完成特定的功能。视觉导航有很多优点:抗干扰性能强,视觉导航通过物体完成光线反射成像,因此不受电磁干扰的影响;体积小、重量轻、对环境的适应能力强,只需要摄像机以及其对应的设备即可完成导航工作;获取信息较为丰富,视觉传感器可以对大量信息进行捕获,并且对镜头中的运动信息尤为敏感。随着视觉导航应用范围的不断扩大,利用视觉引导舰载无人机着舰成为国内外的研究重点。目前,国外在利用计算机视觉实现无人机自主着陆的方法主要有以下两种:

(1) 通过提取跑道或跑道附近的已知相对位置的特征点,计算出飞机相对跑道的位置和方向,但是需要在着陆点附近具有多个明显的特征点。

(2) 通过已知机载跑道的三维模型资料库,假设某个观察点,生成期望的跑道合成透视图像,与机载摄像机拍摄到的实际跑道图像对照,逼近到一定的误差范围内,即可得出飞机的位置。

无人机的着舰过程是一个由远及近的过程,舰船目标在机载相机中成像也是一个从无到有、由小到大的过程。当过视线中还未出现舰船时,主要依靠地平线或海天线进行分析,这一成像信息为无人机提供了姿态导航参数,这一阶段对于地平线与海天线的分析尤为重要。

当无人机逐渐离舰船距离接近时,刚开始在机载成像镜头中呈现的舰船可以近似于一个点目标,已知了无人机的姿态参数之后,可以根据舰船目标成像位置信息对舰船实施定位,涉及到机载无源运动目标定位问题。

随着进一步的接近,舰船目标在机载成像设备中逐渐清晰,通过机载视觉分析设备对舰船进行进一步的轮廓详细分析,结合之前在机载计算机中存储的舰船模型进行对比,确定无人机与舰船之间的相对位置,逐渐接近。最后阶段满足着舰要求的时候,通过检测提取出放在舰船目标上的相关标识实现无人机与舰船之间精确位置估计,逐步引导无人机进行精确自动着舰。

这一过程中重点关键技术涉及到:基于基于海天线与地平线的无人机姿态确定技术;基于两运动

目标轨迹交会技术;无人机与舰船之间相对位置、姿态估计技术。这些技术一旦满足着舰精度要求,将会对我国舰载无人机的发展提供有力的理论技术支持,增强无人机着舰的整体适应性,大幅度提升我国的海军作战水平与国防实力。

2.1.4 着舰引导方案对比

综上所述,雷达引导着舰技术优点:技术相对成熟,该技术是将某种远距离半自动导体制与近距离光学助降装置相结合,构成一套完整的着舰引导系统,但是缺点是测控过程复杂,易受电磁干扰;定位精度有限;舰船到飞机信号的传输延时会造成稳定度降低,无法实施多机同时测控,且导航设备价格相对昂贵、技术较复杂。

卫星引导技术精度高,成本较低,是下一代国内首要攻克的、落实到舰载无人机试验的技术,该技术已经通过了初步验证,且满足当前舰载无人机的着舰精度要求。视觉引导着舰优点较多,可以直接给出舰机之间的相对位置,而相对位置正是着舰所需要的。一旦实现将会实现技术上的重大突破,不过当前还有一系列视觉引导技术尚未解决,一些当前已经攻克的技术应用在舰载无人机这种高速着舰的飞机上时,精度、反应时间也还尚未满足要求,因此本文着重对卫星引导无人机着舰系统进行总体分析。

3 无人机全自动着舰控制系统研究

3.1 全自动着舰导引控制系统的结构

在飞行环境比较恶劣的条件下,舰载机如果要安全、准确和迅速地降落在一个空间狭窄、同时又是浮动(有时甚至是剧烈摇晃)的航母甲板上,那么在着舰过程中需要对飞机的速度、姿态和轨迹进行精确的控制^[18]。

舰载机自动着舰导引控制系统由自动飞行控制系统、自动动力补偿系统和导引系统组成,如图7所示。它是由飞机和航空母舰通过无线电数据链构成回路,对飞机的运动实行控制。

图7中,自动飞行控制器主要控制飞机的舵面,来改变飞机的姿态,进而改变飞机的下滑轨迹角,并按预定的轨迹下滑降落。如果是纵向导引控制,自动飞行控制器一般控制升降舵,改变飞机的俯仰姿态;侧向导引控制,则控制副翼和方向舵,改

变飞机的滚转和偏航^{[19][20]}。

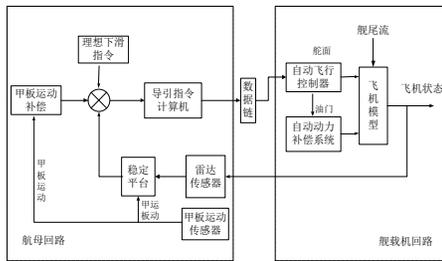


图7 自动着舰导引系统结构图

Fig. 7 Structure diagram of automatic landing guidance system

自动动力补偿系统主要是对发动机推力实施自动控制,发动机推力的变化会直接影响舰载机速度的变化,而舰载机速度的变化又会影响到其姿态角/航迹角的变化,因此自动动力补偿系统与自动飞行控制系统之间有耦合关系,从而导致速度与姿态角、航迹角发生耦合,直接影响控制精度和实现方法。

导引系统^[22]由雷达、导引计算机和无线电发射装置组成。雷达测出的下滑飞机高度与规定高度之差,再加上对舰体运动的补偿共同形成俯仰控制指令,这一指令通过数据链与飞机的飞行控制系统耦合。因此,在着舰系统设计过程中必须要考虑甲板运动和雷达噪声等影响着舰精度的干扰,并提出相应的补偿与抑制策略。

3.2 全自动着舰导引控制系统的设计准则

工程上在对复杂系统进行设计时一般没有通用性方法,同时进行全局设计几乎不可能,只能将每一个功能模块单独实现,再进行耦合、交联。基于舰载机全自动着舰导引控制系统层层嵌套的特点,本文按照“由内而外”的步骤对整个系统进行结构设计和参数的调整;即首先设计自动飞行控制系统的内回路,再设计自动动力补偿系统APCS,最后设计导引系统。

考虑到舰载机全自动着舰的导飞控系统是要应用到全自动着舰系统ACLS之中的,它首先应当满足ACLS的要求。美军颁布了一系列ACLS设计准则,选取其中与导引控制系统相关的内容,整理归纳了7条全自动着舰的导引控制系统设计准则^[21]:

(1)为了确保着舰过程中甲板运动补偿系统能

够有效工作,要求纵向飞行控制系统的内回路在2~30rad/s的频率范围内具有较高的增益和一定的相位超前;

(2)由于舰载雷达和AFCS之间存在耦合关系,AFCS的增益过高会导致雷达高频信号噪声的放大,对舰载机操纵十分不利,故AFCS应当具备一定抗高频噪声能力;

(3)当舰载机结构模态频率与AFCS的频率非常接近时,容易造成舰载机伺服系统的共振,应采取有效措施避免该现象的发生;

(4)考虑到舰载机着舰过程中需穿越舰尾气流场,势必造成舰载机速度、姿态等参数的不稳定,因此要求AFCS的机动性能和抗干扰能力强;

(5)考虑到舰载机位姿传感器和雷达跟踪传感器潜在的失灵可能性,以及数据传输过程中的通信故障等因素会引起AFCS暂时处于非稳定状态,故有必要设置俯仰角指令信号限幅器,确保在极端情况下,舰载机不至于做出极端反应;

(6)全自动着舰的导引控制系统是由多个子系统模块组合而成的,因此在设计子系统模块时应兼顾需要与之交联的系统模块,避免因子系统耦合造成的控制性能降低。

(7)导引控制系统的控制参数不是一成不变的,需要随舰载机的航迹响应情况不断作出调整,因此在实际应用当中,常通过调整导引控制系统的参数来满足不同情况下的飞行要求。上述准则可作为全自动着舰导引控制系统的设计目标和基本要求^[22]。

3.3 全自动着舰导引控制系统的设计方法

将飞机模型小扰动线性化后,分为纵向和侧向模型,然后再分别设计模型的纵向和侧向导引控制系统。

参考美国海军ACLS公开资料中的有关设计准则,在纵向导引控制系统设计时,按照自动着舰导引控制系统的总体结构,采用以经典控制理论中的频域分析为主、以时域仿真分析为辅的方法^{[23][24]},自内而外进行反馈参数选择和不同层级控制系统的设计,将舰载机的理想高度与实际高度之差输入到导引控制器中,解算后得到的高度变化率指令作为纵向导引控制指令。

在侧向导引控制系统设计时,控制舰载机的副

翼通道和方向舵通道两个通道,分别设计副翼通道控制律和方向舵通道控制律,副翼通道主要控制滚转角,方向舵通道主要控制侧滑角,将舰载机与甲板中心线的侧向偏差输入到导引控制器中,解算后得到的滚转姿态角指令作为侧向导引控制指令。

4 载波相位差分引导系统研究

4.1 差分定位技术

为了确定一个用户的位置,我们需要知道两类信息:卫星的位置信息以及用户与卫星之间的距离。接收机与卫星之间的测距受到不同因素的影响,会产生多种测量误差,虽然可以通过估计或建模来降低这些误差对后续距离测量的影响,但是在测量过程中的不确定性会导致这些误差存在一定的残余,降低用户未知的可靠性及精度,下一章中会对差分卫星引导过程中的误差进行详细展开分析。

差分定位则是借助于事先精确已知位置的基准点上的测量值及其相关信息来减弱或消除这些误差的影响。在卫星导航定位中,差分定位通常被定义成一种利用已知位置的参考接收机测量得到的附加信息进行精准位置估计的技术。在参考站误差修正的过程中,需要获得用于误差修正所需相关参数的准确值,并通过一定通信设备发送更新参数信息给用户。在这一过程中,参考站的误差修正信息必须实时发给用户,存储起来以便在后续修正中使用。

在差分定位中,利用来自参考站的附加信息,用户测量的误差可以消除或大幅度削弱,有利于提升位置估计的准确性。在实际应用中,差分定位可以通过不同的技术来实现,因此很有必要对常用差分定位技术进行分类。

(1)位置/距离修正的差分定位

该技术是基于差分修正信息参数来实现的,对用户接收进行修正可以在不同的数据层面上完成。当用户接收机在最终位置估计时进行差分修正,称为“位置差分修正”;当误差修正在测量距离上进行时,称为“距离差分修正”。

位置差分修正仅适用于用户与参考站之间距离很近时,可以减少用户接收机的计算负荷,但是距离差分修正相对于位置差分修正更好,因为距离

差分修正可以将参考站作为一个整体,统一提供给各个用户,或者按照误差来源将其拆分为相应误差分量提供给用户。

参考站上会配备测量大气数据的设备,进而获得大气延迟信息,对于这些修正量的使用,要求参考站与用户测量方法保持一致。对于位置差分修正,推导方法必须相同,对于距离差分修正,参考站与用户必须使用原有的观测数据。

(2)绝对/相对差分定位

对于距离差分修正,有两种不同的实现方法。一种方法是在用户接收机处实现误差修正,其中绝对误差由参考站进行播发。接收机通过这些误差值来对测量距离进行修正获得实际距离。另一种方法是参考站可以把全部观测量传递给用户,用户将其与相应观测值进行差分运算,得到的便是用户相对参考站的差分距离。

对于相对差分定位,用户接收机与参考站之间的矢量差是确定的,称为基线。相对定位中的基线测定可采用基于伪码或载波相位的测量方法,其中存在两种情况,一种是用户静止位置不随时间改变,另一种是用户在参考站附近动态变化,这种动态变化便适用于无人机着舰这种情况。

(3)伪距/载波相位差分定位

根据用户与参考站在差分定位中用的观测量类型不同,差分定位可以分为基于伪距差分定位和基于载波相位的差分定位。伪距差分的误差相对于载波相位差分技术来说,误差相对更大,无人机着舰一般都采用载波相位差分技术来引导,实现成功着舰。伪距差分系统一般由一个基准站和至少一个观测站组成,通常来说基准站坐标为已知,并且基准站与观测站同时观测相同的卫星,接收导航定位信息。基准站将伪距改正值发送给观测站,观测站根据改正值计算出用户的实时位置信息。载波相位差分将来自基准站的载波相位观测值与用户观测得到的观测值作差分,根据相位差计算出用户的具体位置,相对于伪距差分方法,这种方法精度很高,可以达到厘米级别,照比伪距差分提升了好几个数量级。

4.2 基于载波相位的差分定位

卫星导航定位应用中,载波相位差分定位精度较高,得到了广泛的应用,着舰过程中也可以使用

载波相位差分技术进行引导,具体流程如图8所示,虽然基于载波相位的测距值精度更高,但他受未知整周模糊度的限制。整周模糊度是接收机一开始测量输入信号的相位变化时,表现在距离量上的波长数 N ,目前已经有多种方法来求解此类模糊度问题,接下来将对如何利用载波相位进行差分估计问题进行讨论。

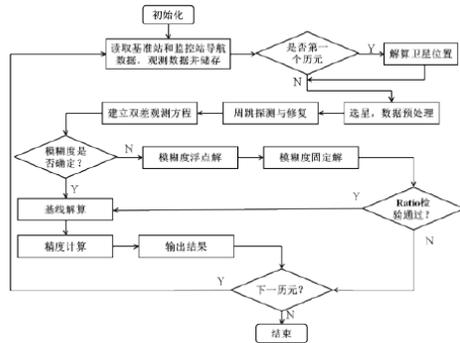


图8 基于载波相位的差分定位流程图

Fig. 8 Flow chart of differential positioning based on carrier phase

当参考站的精确定位,即相对差分定位已经完成时,基于载波相位差分解算的效果会非常显著,与基于伪距差分定位技术一样,基于载波相位差分也需要完成单差和双差甚至三差运算,基本思路是利用用户与参考站之间的共性误差来减少未知数的个数。

在载波相位定位技术中,观测量是载波的相位,在接收机中通过所接收信号中的相位和本地载波信号的相位,得到相位的小数部分 φ ,如果接收机的本地时钟与卫星同步,就变成了信号接收时刻与信号发送时刻之间的相位差。 ρ 是实际距离, N 是整周模糊度,参考站和用户接收机对同一卫星的测量分别为:

$$\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)\varphi_r = \rho_r + N_r\lambda + c\delta t_r - c\delta t_s - \delta r_{ion,r} + \delta r_{trop,r} + n_r \quad (3.1)$$

$$\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)\varphi_u = \rho_u + N_u\lambda + c\delta t_u - c\delta t_s - \delta r_{ion,r} + \delta r_{trop,u} + n_u \quad (3.2)$$

其中,下标 u 和 r 分别为用户与参考站处的相关参数,在上述两个方程中其它参数均采用常用符号表示,但相位和伪距电离层中延迟符号相反,大小相

等。这是因为伪码经过电离层时受到的延迟不同,载波相位经历了等量的相位超前。

假设卫星与接收机之间保持相对静止的状态,并且两者时钟保持严格一致,卫星播发的原始载波相位始终与接收机本身播发的载波信号相同。在接收机时钟 t_u 时刻,接收机播发的载波信号用 φ_u 表示,接收机收到卫星发出的载波信号用 $\varphi(s)$ 表示,那么载波相位的测量值实际上是指接收机播发的载波信号 φ_u 与其接收的卫星信号之间的差值,即

$$\phi = \varphi_u - \varphi^{(s)} \quad (3.3)$$

载波相位相位差用单位“周”来表示,其中一周对应着 360° 的相位,一“周”的距离也就对应着一个载波的波长,和距离的对应关系用相位测量值 Φ 与波长 λ 相乘即可。如果不考虑其他误差影响可以得出两点之间载波相位差与两点间距离的关系为:

$$\phi = \lambda^{-1}r + N \quad (3.4)$$

其中 r 为卫星与接收机之间的距离, N 为整周模糊度,这一过程的困难在于能否求解出整周模糊度 N ,如果可以求解出整周模糊度值,便可以得出两点距离 r ,如果考虑大气延时,时钟本身误差等外界因素,可以计算得出载波相位观测量:

$$\phi = \lambda^{-1}(r + c(\delta t_u - \delta t^{(s)}) - I + T) + N + \varepsilon_\phi \quad (3.5)$$

其中 λ 为载波波长, c 是光速, δt_u 是接收机误差, $\delta t(s)$ 是卫星钟差, I 是电离层延迟, T 是对流层延迟, N 是整周模糊度, ε_ϕ 是测量噪声。载波相位差分是利用观测量之间做差来抵消测量量的共同误差,包括三种做差方法:单差、双差、三差,接下来将对这三种做差方法进行展开分析。

4.3 差分模型

(1)单差模型

基于伪距差分相对定位方法中,已经对如何利用伪距观测测量得到相对伪距观测方程,类似差分方程也可以通过各自载波相位观测量来得到,参考站接收机关于卫星 S 的载波相位观测方程如式3.1所示,用户接收载波相位观测方程如式3.2所示,将两个方程做差,得到式3.6:

$$\frac{\lambda}{2\pi}(\varphi_r - \varphi_u) = \rho_r - \rho_u + N_r\lambda - N_u\lambda + c\Delta\delta t_{ru} - \Delta\delta_{ion,ru} + \Delta\delta r_{trop,ru} + n_{ru} \quad (3.6)$$

其中,共同的卫星钟差得以消除。现在考虑短基线

并只保留一阶项情况,几何距离可写成:

$$\rho_u = \rho_r + \frac{\partial \rho}{\partial x_r} \Big|_{x_r} dx + \frac{\partial \rho}{\partial y_r} \Big|_{x_r} dy + \frac{\partial \rho}{\partial z_r} \Big|_{x_r} dz \quad (3.7)$$

$$\text{即 } \rho_u - \rho_r = + \frac{\partial \rho}{\partial x_r} \Big|_{x_r} dx + \frac{\partial \rho}{\partial y_r} \Big|_{x_r} dy + \frac{\partial \rho}{\partial z_r} \Big|_{x_r} dz \quad (3.8)$$

上面的单差方程变为:

$$\frac{\lambda}{2\pi} \Delta \varphi_{ru} = \frac{\partial \rho}{\partial x_r} \Big|_{x_r} dx + \frac{\partial \rho}{\partial y_r} \Big|_{x_r} dy + \frac{\partial \rho}{\partial z_r} \Big|_{x_r} dz + N_{ru} \lambda + c \Delta \delta t_{ru} - \Delta \delta_{ion, ru} + \Delta \delta r_{trp, ru} + n_{ru} \quad (3.9)$$

当参考站和用户的共同可见卫星数为 n 时,可形成 m 个单差方程。方程的矩阵形式变成:

$$\frac{\lambda}{2\pi} \begin{bmatrix} \Delta \varphi_{ru}^{s1} \\ \Delta \varphi_{ru}^{s2} \\ \vdots \\ \Delta \varphi_{ru}^{sm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_x^1 & e_y^1 & e_z^1 & c \\ e_x^2 & e_y^2 & e_z^2 & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_x^n & e_y^n & e_z^n & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ \delta t_{ru} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{ru}^1 \\ N_{ru}^2 \\ \vdots \\ N_{ru}^m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{ru}^1 \\ \varepsilon_{ru}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{ru}^m \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

或

$$\frac{\lambda}{2\pi} \Delta \phi_{ru}^s = G_1 \cdot dX + N + \varepsilon \quad (3.11)$$

其中,未知量 dX 表示三个相对位置分量和一个相对时间偏差分量,未知量 N 表示 n 个未知整周模糊值。 ε 表示噪声向量,各元素值未知,但其方差可以用于求解 dX 。因为未知量 N 的存在,使用最小二乘法并不能解出结果,但是可以采用载波相位平滑伪距之类的方法消除 N ,继而可以解出 dX 。

此外,还有其他巧妙方法可消除 N 并求出 dX 。比如在相位保持连续测量的情况下,通过对两个不同时刻的载波相位观测量求差,即可确定共同的整周模糊度,该值表现 k_1 和 k_2 两个时间点上:

$$\frac{\lambda}{2\pi} \Delta \phi_{ru}^{si}(k_1) = G_1(k_1) dX + N + \varepsilon(k_1) \quad (3.12)$$

$$\frac{\lambda}{2\pi} \Delta \phi_{ru}^{si}(k_2) = G_1(k_2) dX + N + \varepsilon(k_2) \quad (3.13)$$

进而将两式相减,得到:

$$\frac{\lambda}{2\pi} \delta \Delta \phi_{ru}^{si}(\Delta k) = G_{1\Delta k} dX + \delta \varepsilon(k) \quad (3.14)$$

其中 $G_{1\Delta k} = [G_1(k_1) - G_1(k_2)]$ 。整周模糊度 N 在整个过程中保持不变,将方程做差之后就可以消除它们。

于是, dX 的一般最小二乘解为:

$$dX = \frac{\lambda}{2\pi} [G_{1\Delta k}^T G_{1\Delta k}]^{-1} (G_{1\Delta k})^T \delta \Delta \phi(k) \quad (3.15)$$

此外,如果误差 $\delta \varepsilon$ 的方差对每颗卫星已知且可组成矩阵 M ,则加权最小二乘解为:

$$dX = \frac{\lambda}{2\pi} [G_{1\Delta k}^T M^{-1} G_{1\Delta k}]^{-1} (G_{1\Delta k}^T M^{-1}) \delta \Delta \phi(k) \quad (3.16)$$

其中, $G_i(k_2)$ 和 $G_i(k_1)$ 要求是完全独立的,为了提供一个条件良好的 $G_{1\Delta k}$,它决定了 dX 的估计精度。这就意味着两组观测量之间的时间间隔要适度。所以,该方法通常需要经过一段较长时间的累积。

(2) 双差模型

差分定位技术具备消除共性误差的优势,这在伪距和载波相位单差定位中已经介绍过了,但是在方程中相对钟差参数仍然存在,这在一定程度上影响了 dX 的求解。许多使用相对定位技术的应用场合中,用户通常只对准确获取位置感兴趣,所以相对时钟偏差参数 $\Delta \delta t_{ru}$ 并不一定存在预防城中,而且在求解过程中也可以被去除,可以通过构造载波相位双差方程来实现,可以通过对两颗不同卫星的单差方程求差来构造双差方程,消除接收机钟差参数。

通过构造,用户与参考站两者之间关于卫星 m 和 n 的两个单差方程为:

$$\frac{\lambda}{2\pi} \Delta \phi_{ur}^m = (-e_r^m \cdot b) + N_{ur}^m \lambda + c \Delta \delta t_{ur} + \varepsilon_{ur}^m \quad (3.17)$$

$$\frac{\lambda}{2\pi} \Delta \phi_{ur}^n = (-e_r^n \cdot b) + N_{ur}^n \lambda + c \Delta \delta t_{ur} + \varepsilon_{ur}^n \quad (3.18)$$

将两者相减可以得到双差方程:

$$\frac{\lambda}{2\pi} \nabla \Delta \phi_{ur}^{mn} = (-e_r^{mn} \cdot b) + N_{ur}^{mn} \lambda + \varepsilon_{ur}^{mn} \quad (3.19)$$

这样就构成了传统的双差观测方程。其中,假设电离层、星历和对流层的参与误差都在单差时消除了,而其余所有参与误差都已近很小且随机变化,可当成噪声包含在 ε_{ur}^{mn} 中。对同样的用户和参考站接收机而言,相对时钟偏差 $\Delta \delta t_{ru}$ 相同,在求双差时已经被完全消除,上述方程也可以用基线 b 和单位矢量 e 之间的夹角 θ 来表示,即:

$$(-e_r^{mn} \cdot b) = b(\cos \theta_m - \cos \theta_n) \quad (3.20)$$

其中 θ_m 和 θ_n 分别表示卫星 m 和 n 各自的仰角,将式 3.20 带入 3.17 与 3.18 中,可以得到:

$$\frac{\lambda}{2\pi} \nabla \Delta \phi_{ur}^{mn} = b(\cos \theta_m - \cos \theta_n) + N_{ur}^{mn} \lambda + \varepsilon_{ur}^{mn} \quad (3.21)$$

式 3.17 与 3.18 也可以写成:

$$\frac{\lambda}{2\pi} \nabla \Delta \phi_{ur}^{mn} = b(G_1^m - G_1^n) + N_{ur}^{mn} \lambda + \varepsilon_{ur}^{mn} \quad (3.22)$$

$$= G_2^{mn} \cdot b + N_{ur}^{mn} \lambda + \varepsilon_{ur}^{mn}$$

其中, $G_2^{mn} = G_1^m - G_1^n$ 表示双差几何观测矩阵,除了消除相对接收机钟差之外,位置模糊度 N 仍然存在于方程中。

与单差使用不同时刻的方程进行求解一样,该线性方程也可以用类似的方程来求解,可有效避免整周模糊度 N 的问题,将两个不同时刻的双差方程相减,得到的便是三差方程。

(3) 三差模型

对于一对卫星,可以在较大的时间间隔上得到两组双差方程,将这两组双差伪距方程再求一次差值,即可得到三差伪距方程:

$$\Delta^3 \varphi_{ur}^{mn}(\Delta k) = \nabla \Delta \varphi_{ur}^{mn}(k_2) - \nabla \Delta \varphi_{ur}^{mn}(k_1) \quad (3.23)$$

$$= G_{3r}^{mn}(\Delta k) \cdot b + \varepsilon_{ur}^{mn}(\Delta k)$$

对于每一组卫星而言,三差方程可以在较大时间间隔上得到,此时卫星的位置已发生了改变,得到的是一组新的独立方程,如图 9 所示。

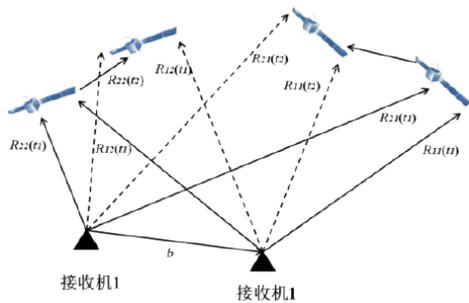


图9 三差方程生成原理图

Fig. 9 Generating principle of three difference equation

载波相位方程也可以写成:

$$\Delta^3 \varphi_{ur}^{mn}(\Delta k) = b[(\cos \theta_{mk1} - \cos \theta_{mk2}) - (\cos \theta_{nk1} - \cos \theta_{nk2})] + \varepsilon_{ur}^{mn}(\Delta k) \quad (3.24)$$

其中, θ_{jk} 表示基线指向卫星 j 的单位矢量在 k 时刻的角度。未了解出三个未知数,需要三个三差方程,因此需要对三对独立的可见卫星在较大时间间隔上进行观测;与单差中提到的一样,当要求结果是近实时获取,这种方法并不适用,需要采取双差的方法,同事利用一些模糊度求解方法来估算 N ,从而可以求解出 dX 的值,模糊度解算就是解出 N 的整数值,是相对定位的关键技术之一,主要是因

为限制 N 必须是整数。

4.4 章节小结

本章基于差分卫星着舰引导技术进行展开分析,首先介绍了差分定位技术,原理及分类,以及基于载波相位差分的定位技术,推导出了如果不考虑其他误差影响两点之间载波相位差与两点间距离的关系,差分模型的分类等,本文研究了当参考站发生移动时,二者之间相对定位的计算,分析了整周模糊度解算与动静相对定位模糊度结算的不同点,通过分析可以发现,移动参考站结算的实数解以及搜索到的实数解,都可以表达为动态相对于静态的形式。

5 无人机全自动着舰架构研究

5.1 系统架构研究

全自动着舰系统是涵盖舰船与舰载机装备体系架构中,可以支撑完成舰载机着舰引导与控制并实施完整全自动着舰流程及其功能的综合系统。系统架构分为两种典型构架形式,分别是引导律舰上解算架构与引导律机上解算架构。

上个世纪,美国基于雷达引导体制全自动着舰系统采用的是引导律在舰上解算的架构形式,而新一代差分卫星引导体制全自动着舰系统采用的则是引导律在机上计算的架构形式。

对于舰上解算架构,美国基于该全自动着舰系统的架构形式,技术相对已经成熟。美国在 1963 年以真空管、模拟计算机为基础研制装备了第一代雷达全自动着舰引导系统(AN/SPN-10),其体积、重量均不适合于布置在舰载机上,因此,引导律在舰上解算的架构形式对于机载系统的负担相对较小。

但是舰上配置的着舰引导计算机需装载多种类型舰载机的着舰引导律,并在多类型舰载机交叉着舰时需进行相对频繁的引导律指令切换操作。当前舰载机的类型较多,包括舰载战斗机、舰载电子战飞机、舰载预警机、舰载无人机等,因此,引导律舰上解算的架构形式不利于对多型舰载机的着舰引导[25][26]。并且引导律基于舰上解算的架构形式不适用于多种着舰引导信息的融合。

相对于舰上解算架构,机上解算架构的优势较为明显,更适合之后着舰技术的发展全自动着舰,

引导律在机上解算架构形式的优势在于:引导律在机上解算,舰上则无需配置着舰引导计算机,也无需在多型舰载机着舰时进行频繁的引导律切换操作。该架构形式适用于多种着舰引导信息的融合。差分卫星、机器视觉的引导体制就是基于引导律机上解算的架构形式,对于雷达引导体制,只要其将机舰数据链发送的引导律指令更改为机舰相对位置信息或舰载机相对理想下滑道的高度偏差/侧向偏差信息,将会使多种引导手段的架构统一为引导律机上解算的形式,并为多种着舰引导信息的机上融合奠定基础。

虽说优势较为明显,但是全自动着舰引导律在机上解算架构也存在一定的不足,机载需配置具备着舰引导律解算功能的设备或在已有的设备上增加该功能。不过由于目前机载计算机的运算速率已非常快,存储单位容量也已足够支撑,在飞控计算机中增加着舰引导律的解算不会造成很大的负担,因此,这一劣势实际上是可以忽略的[27]。

机舰数据链需要传送的信息相对更多一些。引导律基于舰上解算的架构需要通过数据链由舰船发送给飞机的信息主要包括纵向和侧向引导指令以及其他离散量;而机上解算架构需要通过数据链由舰船发送给飞机的则是高度偏差、侧向偏差和其他离散量,以及舰船甲板运动信息和预估信息。不过由于目前数据链传输带宽已经相对足够,因此多传送甲板运动及预估信息等为数不多的几个或者十几个参数已不会造成过重负担,因此,这一劣势也是可以近似忽略的。

通过对两种解算架构的分析,可以绘制出机上解算卫星引导系统架构图,图10中机载系统部分,飞行控制系统在机上解算,负责加入甲板补偿运动、引导率解算以及进场动力补偿控制率计算,地面站部分卫星接收天线收到信号,传给差分站进行差分解算,与地面控制站测控天线相连,完善地面站卫星信息处理后,与机载测控天线之间双向信息沟通。图10中舰载系统部分,包含舰载数据链天线,与机载数据链天线相连,将信息传递到舰载数据链系统,舰载数据链系统包含:卫星定位数据、舰面辅助信息、舰船运动信息、以及甲板运动预估。

同时舰船上也有卫星导航天线,接收数据之后传递给卫星着舰引导设备,卫星着舰引导设备包含

卫星导航信号接收及数据检测,LSO与舰船着舰指挥控制中心收到信息后将信息传递给舰船引导控制设备,完成信息汇总之后与舰载数据链进行信息交流[28]。

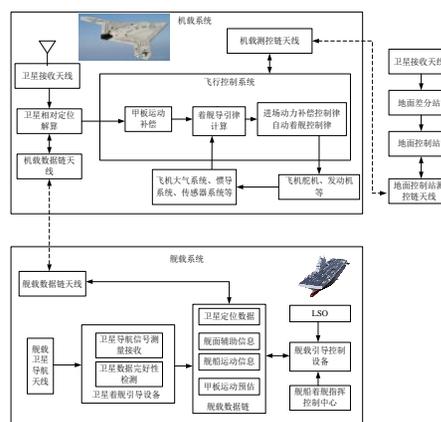


图10 机上解算卫星引导架构图

Fig. 10 Architecture of onboard solution Satellite Guidance

根据卫星引导架构,设计着舰系统逻辑如图11所示。

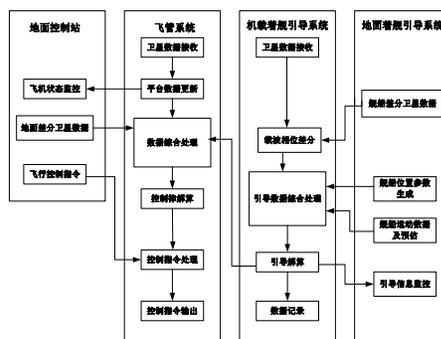


图11 着舰系统逻辑架构

Fig. 11 Logic architecture of landing system

机载系统功能主要分为着舰综合导引和飞行控制两大类功能。地面站和地面着舰引导系统与飞机分别通过测控链路和导引数据链的信息传输功能在进行交互。

飞行员在地面站测控链路发送指控信息完成对飞机进行控制与干预,同时完成飞行数据管理、监控和导航信息传输。地面着舰引导系统通过着舰引导信息传输功能完成对飞机着舰的引导,飞管系统承担飞行数据管理、综合导航、飞行控制和飞行数据传输功能,机载着舰引导系统负责导航数据

综合管理、信息融合及引导解算功能[29]。

机载系统功能主要包括:

(1) 引导数据链传输数据信息:舰船运动信息、位置信息、状态信息,及卫星测量信息,雷达测量信息及LSO指令。

(2) 综合引导处理设备功能:卫星定位解算、机舰相对位置解算、惯性导航和卫星组合解算,导航系统完好性、准确性和连续性监控,雷达导引信息接收。

(3) 机载组合惯导提供数据:纯惯性导航信息、GPS和惯性组合信息。

(4) 飞管计算机功能:航路数据加载、着舰基准航迹加载、航线飞行偏差解算、引导信息比较监控。

(5) 自动飞行控制律解算:舰船甲板运动补偿、进场动力补偿、舰尾流抑制、逃逸复飞决策及控制。

(6) 机载飞行惯导提供数据:纯惯性导航信息、GPS信息、GPS和惯性组合信息。

(7) 飞行测试设备功能:卫星相对导航信息记录、数据链路信息记录、雷达引导信息记录、机器视觉引导信息记录。

综上所述,通过对着舰引导律机上解算和舰上解算两种架构形式各自优劣势的对比分析,可以得出如下结论:随着机载计算机和机舰数据链性能的稳步提高,并考虑雷达与差分卫星、机器视觉等引导体制全自动着舰系统架构的兼容因此,优选出引导律在机上解算的全自动着舰系统架构形式。

5.2 系统架构设计原则

差分卫星引导体制全自动着舰体系架构的设计需要同时考虑无人舰载机着舰的需求,针对差分卫星引导体制全自动着舰使用需求并兼顾无人舰载机着舰演示验证技术成果向无人舰载机上舰型号转化的需要。全自动演示系统架构的核心是对于全自动着舰技术的验证,那么首要问题就在于如何设计一套适用性强、可移植、可扩展的高可靠、高安全的基于差分卫星引导体制全自动着舰系统体系架构。

架构设计原则,也要满足一定要求:

(1) 更高的任务可靠性:由于全自动着舰任务涉及舰载机、航母或两栖舰、以及舰上人员的安

全,因此,要求全自动着舰系统必须具备更高的任务可靠性;

(2) 更高的系统安全性:由于全自动着舰系统的使用要求和环境非常复杂,要求全自动着舰系统应具有较高的系统安全性;

(3) 更好的系统适用性、可移植性:由于全自动着舰系统需适应无人舰载机的着舰需求,且需要考虑无人验证机、以及在研型号和未来无人舰载机型号的需求,因此要求全自动着舰系统体系架构应具有更好的系统适用性和可移植性;

(4) 更好的系统扩展性:针对未来的无人舰载机,应考虑到后续能力逐渐提升,要求系统应具有更高的可扩展性,满足系统升级改造的需求;

(5) 更少的系统改动:在满足全自动着舰功能实现的前提下,新增、改进的设备应尽可能少,一方面可以降低成本费用,另一方面也可以减少系统的复杂性。

6 结论

全自动着舰是一个复杂的过程,如何保障舰载无人机实施安全可靠的全自动着舰将会是未来几年内航母舰机起降技术的一个重点和难点,也是一个必须突破的技术关键点,本文分析了机上及舰上引导律解算系统架构,通过对系统架构进行优化,可以使信息传输更加快捷,减少冗余。

未来舰载无人机着舰系统应该围绕系统可靠性、安全性、着舰智能化以及执行作战能力等方面发展。在着舰数据链技术方面,要加强信息传输的安全性,增强对环境适应的智能化,提升无人舰载机着舰系统的连通性与时效性^[30]。

舰载无人机自动着舰系统架构研究,具有重要的理论研究价值,对我国强大海军力量,迈向海洋强国具有重要实际意义。未来发展的引导架构应该具有触舰定位精度高,进场航线与待机连续引导跟踪等特点,并能够实现导航、通信、进近、着舰、复飞等多功能一体化引导架构,多体制引导方式采用逐段引导还是融合引导有待进一步商榷,多种引导方式互相匹配的着舰引导架构。

参 考 文 献

[1] 高明皓. 固定翼无人机着舰引导律和评估系统设计[D]. 哈尔

- 滨工程大学,2019.
- [2] 武恒州,罗福平,石星辰,刘冰冰,连鑫.全自动着舰技术现状与发展趋势分析[J].飞机设计,2020,40(06):1-5.
- [3] 朱齐丹,邱兵,林圣琳,张智.舰载机全自动着舰纵向控制系统设计[J].计算机仿真,2014,31(11):69-73+78.
- [4] 张放,蒙文巩,杜亮.舰载机着舰舰面效应及其补偿方法研究[J].飞行力学,2016,34(01):77-81.
- [5] 杨一栋主编,张宏军,谭玮副主编.自动着舰系统验证指南.北京:国防工业出版社,2007 11-35.
- [6] 杨一栋,余俊雅.舰载机着舰引导与控制[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [7] 梁天骄,孙立国,屈香菊.F/A-18E/F全自动着舰飞行特性分析[J].飞行力学,2017,35(05):17-21.
- [8] 黄士飞,钟兴泉.全自动着舰引导系统展望[J].现代导航,2014,5(01):70-74.
- [9] H. E. Harschburger, B. Glaser, J. R. Hammel. Backup Models for the F/A-18 Digital Flight Control System. AIAA-84-2622.
- [10] Leonard A. Megee, Clyde H. Paulk Jr, Stanley A. Steck. Evolution of Navigation Performance of Shipboard VTOL Landing Guidance Systems. AIAA-84-2627.
- [11] 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所.一种全自动着舰闭环系统精分配方:CN201910848997.9[P].2019-12-05.
- [12] 杨一栋,姜龙光,许卫宝.舰载机着舰引导控制要素[M].北京:国防工业出版社.
- [13] 杨一栋.飞机综合控制系统[M].南京:南京航空航天大学出版社,2003.
- [14] 刘宪飞,王勇,张代兵.高抗扰高精度无人机着舰纵向飞行控制[J].北京航空航天大学学报,2017,43(9):1891-1899.
- [15] 张勇,张东光.舰载飞机着舰精确轨迹控制研究[J].飞机设计,2006(1):50-55
- [16] 杨柳青,甄子洋,邢冬静,江驹.舰载无人机自动着舰自适应控制系统设计[J].飞行力学,2018,36(06):36-39.
- [17] 梁磊,肖静,邓扬晨.舰载无人机着舰技术现状及发展趋势[J].西安航空学院学报,2020,38(05):23-28.
- [18] 岳智敏,张健.航母舰载无人机的发展与关键技术[N].中国航空报,2017-12-05(005).
- [19] 刘松良.舰载机着舰的自动动力补偿研究[D].东北大学,2011.
- [20] 杨一栋,江驹.保持飞行迎角恒定的飞行/推力综合控制[J].航空学报,1996,17(5):560-565.
- [21] 张玉洁,杨一栋.保持飞行迎角恒定的动力补偿系统性能分析[J].飞行力学,2007,25(5):30-33.
- [22] Urnes J M, Hess R K. Integrated flight control systems development—the F/A 18A automatic carrier landing system, 1983[C].1983.
- [23] 范晔.仪表着舰系统的研究[Z].南京:南京航空航天大学,2008.
- [24] 王敏,张晶,申功璋.基于甲板运动预报的自动着舰系统综合设计[J].系统仿真学报,2010(A01):119-122.
- [25] 余勇,杨一栋.基于卡尔曼滤波理论的甲板运动预估技术研究[J].数据采集与处理,2002,17(5):381-385.
- [26] Mook D J, Swanson D A, Roemer M J, et al. Improved noise rejection in automatic carrier landing systems [J]. Journal of guidance, control, and dynamics, 1992,15(2):509-519.
- [27] 李冀鑫,侯志强,郑小洪.舰载飞机纵向着舰自抗扰导引系统设计[J].飞行力学,2008,26(2):13-15.
- [28] 李冀鑫,侯志强,郑小洪,等.纵向着舰二阶自抗扰导引控制律设计[J].海军航空工程学院学报,2008,23(2):139-152.
- [29] 余勇,杨一栋.侧向甲板运动补偿技术研究[J].航空学报,2003,25(1):69-71.
- [30] 袁锁中,杨一栋.基于 H_{∞} 控制的侧向自动着舰导引系统设计[J].兵工自动化,2002,21(6):1-3.

作者简介:

苏大林(1997-),男,硕士研究生,沈阳飞机设计研究所无人机部,研究方向:飞机系统总体设计。

卢元杰(1982-),男,硕士,高级工程师,沈阳飞机设计研究所无人机部,研究方向:飞机系统总体设计,系统工程。

杨亮(1987-),男,硕士,高级工程师,沈阳飞机设计研究所无人机部,研究方向:飞机系统总体设计。

葛俊(1990-),男,硕士,工程师,沈阳所空战系统技术航空科技重点实验室,研究方向:智能系统设计。

基于强化学习的多无人机任务分配方法研究

代琪, 何兵, 李明, 张杰

(火箭军工程大学, 西安, 710025)

摘要: 针对多无人机集群任务分配问题, 本文采用一种基于强化学习与深度神经网络的动态多无人机任务分配算法。根据多无人机任务分配问题的特点, 在多无人机执行多类任务时考虑了环境不确定性的情况, 有效解决了对于复杂的动态环境, 任务执行的质量差的问题, 从而提高了任务分配的效率。仿真结果表明, 强化学习与深度神经网络的动态多无人机任务分配算法能够稳定快速地找到较优分配方案, 并且与传统的强化学习算法相比, 强化学习与深度神经网络的动态多无人机任务分配算法对多无人机规模的扩展性更强。

关键词: 多无人机; 任务分配; 强化学习; 深度神经网络

Research on Multi UAV Task Allocation Based on Reinforcement Learning

DAI Qi, HE Bing, LI Ming, ZHANG Jie

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shanxi 710025)

Abstract: Aiming at the problem of small size of UAV cluster in the optimal allocation of multi class tasks under unconstrained conditions, the mapping relationship between Markov decision process and multi UAV task allocation model is established, and the algorithm based on reinforcement learning is adopted, which achieves the effect of rapidity and large-scale in the process of dealing with the established targets. In the process of algorithm implementation, the environment can be regarded as the whole system, and all UAVs are regarded as an agent. Assuming that the first target is currently attacked, the agent selects the number of UAVs in each group according to a certain strategy output to obtain the current reward reward from the system feedback, and then the system moves to the next state, that is, to attack the second target; with this push, the state transition of the system occurs in the switching of different targets. Compared with the Q-learning method, dqn algorithm has shorter time and higher efficiency in solving large-scale task allocation problems.

Key words: Multiple UAVs; Task Allocation; Strengthen Learning; Deep Neural Network

1 引言

多无人机任务分配问题是军事运筹学研究中的重要理论问题,也是作战指挥决策中迫切需要解决的现实问题。多无人机任务分配问题研究的主要目的就是针对多个威胁目标,我方的指挥控制系统能够及时有效地分配武器资源对目标进行打击,使打击之后目标总的剩余威胁值最小,或使我方保护资源总的生存概率最大。

目前,对于多无人机任务分配的研究。主要是将多种优化算法应用于解决异构无人机的任务分配问题。在文献[1]中,提出了一种元启发式改进

遗传算法来获得有效解。文献[2-3]用改进的多目标遗传算法解决了复杂任务分配问题。在文献[4]中,提出了一种蚁群优化算法来处理约束任务分配问题。最近,文献[5]提出了一种改进的离散粒子群优化算法,用于复杂约束条件下的无人机协同任务分配。然而,这些算法在计算上对在线计划是不可行的^[1]。为了解决这个问题,文献[6]提出了一种基于自底向上策略的自组织算法。在文献[7]中,采用分布式技术来加速遗传算法的进程。注意到上述关于任务分

配问题的工作是在所有问题要素都是在确定性的

假设下进行的。在实际应用中,如果不考虑不确定性,特别是对于复杂的动态环境,任务执行的质量可能会变得相当糟糕。

综上所述,任务分配问题的主要困难是:(1)实时执行的计算时间不可接受;(2)由于环境不确定而导致任务执行性能较差。因此,这项工作旨在使用一种计算效率高的算法,以解决存在环境不确定性的任务分配问题。

2 问题描述与系统模型

假设战场上有几个固定的敌方目标,每个目标需要一组或多组无人机来执行特定的任务,如监视任务或攻击任务。任务的优先级可以根据目标的紧迫性和重要性进行评估。假设任务之间不存在相互依赖关系,即每个任务可以独立于其他任务执行。由于战场环境的复杂性和不确定性,会影响无人机的性能,进而影响任务的完成质量。本文的目标是为不同优先级的任务分配一组或多组异构的无人机组。

如图1所示,现有 M 组不同类型的无人机, $T = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ 为 N 个任务的集合,其中下标表示它们的优先级。 $\{att(T_k), def(T_k), ele(T_k)\}$ 表示完成 T_k 所需的攻击能力、防御能力、电子干扰能力即环境不确定性因素。 $U = \{U_1^j, U_2^j, \dots, U_M^j\}$ 是多类型无人机集合,其中上标 j 表示无人机类型。假设存在多类型无人机($j \in [1, M_T]$),第 i 组无人机的数量用 m_i 表示,每一个目标物的价值不同,我们用 w_j 表示第 j 个目标物的价值。每架无人机只能攻击一次,但一个目标物可以被多个无人机攻击。由于完成每个目标物所需的攻击能力、防御能力、电子干扰能力不同,致使每一个目标被无人机攻击后受损的程度也不一样,本文用易损性系数 p_{ij} 来描述,即第 i 组无人机对目标 j 的单位毁伤概率。目标是对无人机攻击目标物进行分配,使得系统中目标物总的损伤价值最大。无人机的任务分配结果用矩阵 $X = (x_{ij})_{M \times N}$ 来描述,其中 x_{ij} 是指用于第 j 个目标的第 i 组无人机的数量。用 $f(x)$ 表示无人机对目标物的毁伤期望值,如下:

$$f(x) = \max \sum_{j=1}^N \omega_j \left[1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_{ij})^{x_{ij}} \right] \quad (1)$$

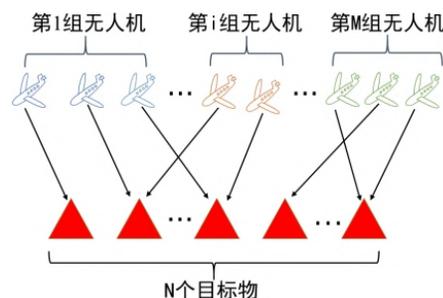


图1 多无人机对多目标物系统图

Fig. 1 System diagram of UAVs to multi target object

3 深度强化学习

强化学习是人工智能领域的重要分支,可以用来解决许多大规模的决策问题,如机器人控制、自动驾驶等。强化学习的核心是通过智能体与环境的交互,观察动作输出后状态的变化和环境反馈的奖励来调整自身的行为,从而使得积累奖励最大化。强化学习的算法可以分为三大类:基于策略梯度的强化学习、基于值函数的强化学习和基于演员——评论家(actor-critic)模型的强化学习。本文所提算法主要利用基于值函数的强化学习和深度神经网络结合的算法架构,下文将着重介绍该架构的相关理论。

3.1 马尔科夫决策过程(MDP)

在强化学习中,智能体与环境的交互过程一般用马尔可夫决策过程(MDP, Markov decision process)描述。一个MDP是一个五元组 $\langle S, A, P, R, \gamma \rangle$ ^[19],其中 S 表示状态空间, A 表示动作空间, $P: S \times A \rightarrow \Delta(S)$ 表示状态转移概率矩阵, $R: S \times A \times S \rightarrow \mathbb{R}$ 表示即时奖励函数, $\gamma \in [0, 1]$ 表示折扣因子。在MDP中的任意时刻 t ,智能体观测到的当前环境状态为 $s_t (s_t \in S)$ 并根据策略 μ 选择动作为 $a_t (a_t \in A)$,环境反馈给智能体相应的奖励为 $r_t (r_t \in R)$,并根据环境的状态转移矩阵 P 进入下一个状态 $s_{t+1} (s_{t+1} \in S)$,反复执行上述操作直至结束。

3.2 DQN算法

Q学习是一种常用的、基于值函数的强化学习算法,但当强化学习场景中的动作和状态空间维度很大时,一般的Q学习很难完成这样复杂的任务。因此,有研究人员提出了采用神经网络估计Q函

数,即DQN(deep Q-network)。DQN算法包含两个神经网络,即估计值网络和目标值网络。DQN学习的目标是保证当前值网络输出的Q估计值和目标值网络输出的目标Q值越相近越好,该过程可以通过损失函数表示为

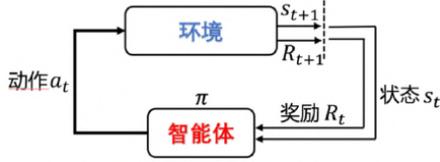


图2 马尔科夫决策过程框图

Fig. 2 Block diagram of Markov decision process

$$Loss(\theta) = \mathbb{E} \left[(Q_{target} - Q(s_t, a_t; \theta))^2 \right] \quad (1)$$

其中, $Q(s_t, a_t; \theta)$ 是当前状态的Q估计值,而 Q_{target} 是目标值,其由当前的奖励 r 加上折扣因子 γ 乘以目标值网络的输出值 $\max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}; \theta)$ 表示,即

$$Q_{target} = r + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}; \theta) \quad (2)$$

估计值网络的参数更新需要通过求损失函数的梯度得到,而目标值网络则通过每 N 步复制一次估计值网络的参数进行更新。为了避免强化学习的状态之间存在的相关性,DQN算法采用回放记忆单元来存放状态,动作和奖励组成的元组为 (s_t, a_t, r, s_{t+1}) 。在训练时,从中随机取一些样本来训练,这样可以打破样本之间的相关性,从而提高学习效率。

4 基于DQN的任务分配算法

4.1 无人机任务分配的MDP模型

在本场景中,利用MDP对无人机任务分配进行建模。环境可以看作是系统,所有的无人机看作是一个智能体。假设当前针对第一个目标物进行攻击,智能体根据一定的策略输出选择每组无人机的个数,获得系统反馈的当前的奖励回报,然后系统转移到下一个状态,即针对第二个目标物进行攻击;以此类推,系统的状态转移发生在不同目标物的切换中。该模型中的智能体、状态、动作及即时奖励等基本要素建模如下。

- 智能体:所有的无人机看做一个智能体

- 状态:用 $S = \{o_j, r_1, \dots, r_i, \dots, r_M\}$ 来表示状态的定义,状态空间的维度为 $M + 1$,其中状态 o_j 表示第 j 个目标物的索引, r_i 表示第 i 组无人机的个数。

- 动作: $A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_M\}$,其中 a_i 表示使用第 i 组无人机个数 $a_i \in \{0, 1, \dots, m_i\}$, m_i 为第 i 组无人机的个数, $i = 1, 2, \dots, M$ 。

- 奖励:即时奖励的建模如下

$$R_t = f(x)$$

$$= \begin{cases} \omega_j \left[1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_{ij})^{x_{ij}} \right], & \text{无人机没有重复使用} \\ -100, & \text{无人机重复使用} \end{cases} \quad (3)$$

4.2 Deep Q-network算法

本文采用DQN算法来解决多无人机任务分配问题,利用DQN算法解决无人机任务分配问题架构如图3所示,将当前状态向量 s 输入到神经网络Q中,该网络由输入层、隐藏层和输出层组成,其中,隐藏层由两个全连接层构成,第一个全连接网络包含1024个神经元,其激活函数采用线性整流函数(ReLU, rectified linear unit),第一层网络的输出可以表示为

$$X_1 = \text{ReLU}(W_1^T s_\xi + b_1) \quad (4)$$

其中, W_1 是第一层神经网络的权重参数, b_1 是其偏差参数。第二层隐藏层的输入是第一层隐藏层的输出,第二层隐藏层由500个神经元构成,其激活函数与上一层相同,也采用ReLU函数,这一层的输出可以表示为

$$X_2 = \text{ReLU}(W_2^T X_1 + b_2) \quad (5)$$

其中, W_2 和 b_2 分别为第二层网络的权重参数和偏差参数。输出层接受第二层网络的输出 X_2 ,并利用softmax激活函数输出 $|\mathcal{O}|$ 维向量 q 为:

$$q = \text{softmax}(W_3^T X_2 + b_3) \quad (6)$$

其中, W_3 和 b_3 分别是输出层的权重参数和偏差参数,softmax是归一化指数函数。从输出的Q值中找到最大的即为对应的输出动作,如下:

$$a = \arg \max_j (q_j). \quad (7)$$

其中 $q = Q(s, a) = (q_1, q_2, \dots, q_N)$ 。

上述用于选择动作的Q函数即为估计值函数网络。

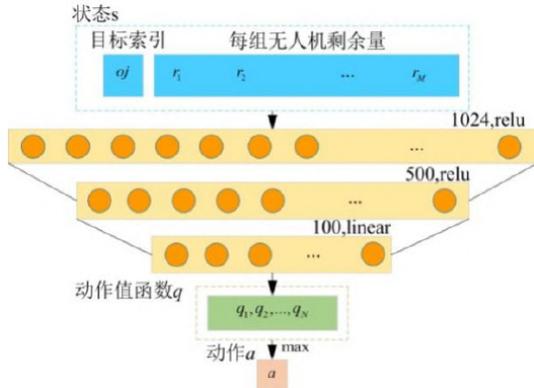


图3 DQN算法框图

Fig. 3 DQN algorithm block diagram

4.3 DQN网络的训练

为了对该神经网络进行监督训练,我们还设置了目标值网络 Q_{target} 作为最优值的近似形成预测真值,即 $Q_{target}(s, a) \approx Q^*(s, a)$ 。在训练 DQN 算法时,设置经验存储器 $\mathcal{D} = \{e_k | k \in D_c\}$,其中 e_k 为第 k 条经验向量,即 $e_k = (\tilde{s}_k, \tilde{o}_k, \tilde{r}_k, \tilde{s}'_k)$, \tilde{s}_k 表示当前状态, \tilde{o}_k 表示根据当前 DQN 算法得到的 option 动作, \tilde{r}_k 为 $(\tilde{s}_k, \tilde{o}_k)$ 得到的总体即时反馈, \tilde{s}'_k 表示经过与环境交互后无人机转移的下一个状态,而 D_c 表示存储器最大存储量。采用经验回放和经验随机抽取的方式训练值函数神经网络 Q_{op} ,可以打破数据之间的关联性,使得数据尽量满足独立同分布的特性,从而增强训练的稳定性。评估网络的损失函数可以表示为

为了对监督神经网络进行训练,我们还将目标值网络 Q_{target} 作为最优近似值,形成预测的真值。即 $Q_{target}(s, a) \approx Q^*(s, a)$ 在训练 DQN 算法时,设置经验存储器 $\mathcal{D} = \{e_k | k \in D_c\}$,其中第 k 条经验向量 e_k 表示当前状态和根据当前 DQN 算法获得的选项动作。对于整体即时反馈,表示无人机与环境交互后所传递的下一个状态,表示存储器的最大存储容量。利用经验回放和经验随机抽取对值函数神经网络 Q_{op} 进行训练,可以打破数据之间的相关性,使数据尽可能独立一致地分布,从而提高训练的稳定性。评价网络的损失函数可以表示为

$$\mathcal{L}(\theta) = \mathbb{E}_{(\tilde{s}_k, \tilde{o}_k, \tilde{r}_k, \tilde{s}'_k) \sim D} \left[\left(\gamma \arg \max Q_{op}^{target}(\tilde{s}'_k) + \tilde{r}_k - Q_{op}(\tilde{s}_k, \tilde{o}_k; \theta) \right)^2 \right] \quad (8)$$

在式(9)中, θ 表示值函数神经网络 Q_{op} 中的所有参数,其更新规则为

$$\theta_{new} = \theta_{old} - \alpha \nabla_{\theta} \mathcal{L}(\theta) \quad (9)$$

其中, α 为学习速率, θ_{new} 和 θ_{old} 分别表示评估网络更新后的参数和更新前的参数,损失函数的梯度 $\nabla_{\theta} \mathcal{L}(\theta)$ 可以表示为

$$\nabla_{\theta} \mathcal{L}(\theta) = \mathbb{E}_{(\tilde{s}_k, \tilde{o}_k, \tilde{r}_k, \tilde{s}'_k) \sim D} \left[2 \left(\arg \max Q_{op}^{target}(\tilde{s}'_k) + \tilde{r}_k - Q_{op}(\tilde{s}_k, \tilde{o}_k; \theta) \right) \times \nabla_{\theta} Q_{op}(\tilde{s}_k, \tilde{o}_k; \theta) \right] \quad (10)$$

采取“软更新”的方式对目标网络进行更新,即每隔一定的周期后,利用原有目标网络和当前估计网络的参数共同对目标网络进行更新,其更新规则为

$$\theta_{target, new} = \beta \theta_{target, old} + (1 - \beta) \theta \quad (11)$$

其中, β 为更新速率,并且 $\beta \in [0, 1]$, $\theta_{target, new}$ 和 $\theta_{target, old}$ 分别表示目标网络 Q_{op}^{target} 更新后的参数和更新前的参数。对目标网络采用“软更新”的方式可以增加神经网络训练的稳健性。

5 仿真实验

DQN 算法是在 windows 10 的 Python 3.7.0 上使用 Facebook 的开源神经网络框架 Pytorch 实现。

仿真了5个目标物,2组无人机,且每组无人机的数量都为4个的情景,针对不确定性环境,设置完成每个目标物所需的攻击能力 $att(T_k)$,目标物的防御能力 $def(T_k)$,目标物的电子干扰能力 $ele(T_k)$ 。

表1 不确定环境参数设置

Target Object	$att(T_k)$	$def(T_k)$	$ele(T_k)$
Object0	0.7	0.3	0.4
Object1	0.3	0.1	0.3
Object2	0.5	0.4	0.2
Object3	0.4	0.3	0.1
Object4	0.9	0.7	0.8

不同优先级的目标物,用目标物的价值系数表示。

表2 目标物的价值系数 w_j
Table 2 Value coefficient of target

Target Object	w_j
Object0	10
Object1	20
Object2	40
Object3	30
Object4	10

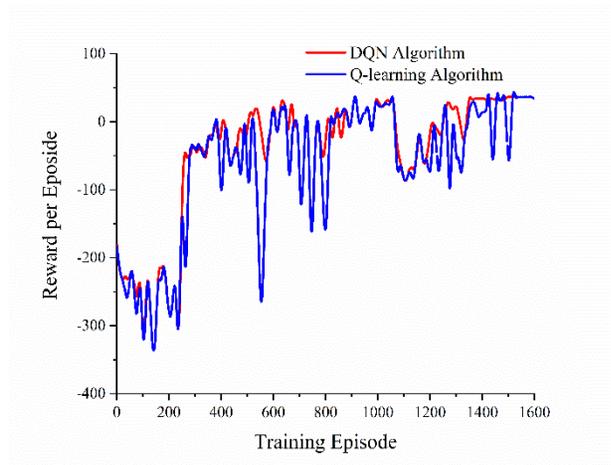


图4 DQN算法和Q learning算法Reward曲线对比图

Fig. 4 Comparison of reward curves between DQN algorithm and Q learning algorithm

5.2 仿真结果分析

图4绘出了DQN算法和Q-learning算法的每个epoch获得的总奖励,从中可以看出总奖励随着时间单调上升。为了验证DQN算法较Q-learning算法实现任务分配的效率,图4还绘制了在相同背景下Q-learning算法奖励曲线图,从图中可以看出DQN算法在进行任务分配方面的优势,DQN算法收敛速度快,可扩展性强。利用神经网络拟合Q函数的DQN算法实现任务分配结果比传统的Q-learning所需的步骤更少。

每组无人机对目标物分配结果如表3所示。

6 结论

本文研究了强化学习(RL)框架在任务分配问题中的应用。(1)通过仿真验证DQN具有处理不确定环境的能力;(2)经过良好训练的网络的DQN是

可实时实现的;(3)能够通过学习分配规则来处理完全不同的任务。

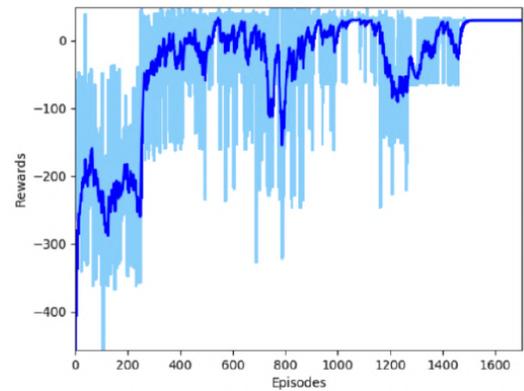
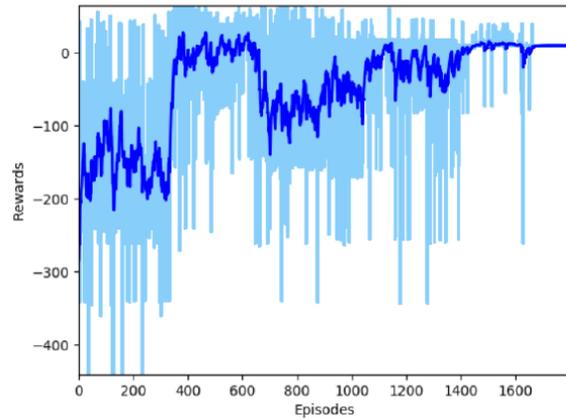


图5 DQN算法Reward曲线

Fig. 5 DQN algorithm reward curve

表3 无人机对目标物分配结果

Table 3 UAV target assignment results

	第0组无人机	第1组无人机
目标物0	1	0
目标物1	2	0
目标物2	1	2
目标物3	1	1
目标物4	0	1

参 考 文 献

- [1] Jia Z, Yu J, Ai X, et al. Cooperative multiple task assignment problem with stochastic velocities and time windows for heterogeneous unmanned aerial vehicles using a genetic algorithm [J]. Aerospace Science & Technology, 2018, 76: 112-125.
- [2] Ramirez-Atencia C, Mostaghim S, Camacho D. A knee point based evolutionary multi-objective optimization for mission

- planning problems [C]// Genetic & Evolutionary Computation Conference. ACM, 2017.
- [3] Ramirez-Atencia C, Bello-Ortiz G, R-Moreno M D, et al. Solving complex multi-uav mission planning problems using multi-objective genetic algorithms [J]. *Soft Computing*, 2017, 21(17): 4883-4900.
- [4] Pendharkar P C. An ant colony optimization heuristic for constrained task allocation problem [J]. *Journal of Computational Science*, 2015, 7: 37-47
- [5] Zong Q, Qin X, Zhang B. Cooperative task assignment of large scale uav based on dpsogt-sa algorithm [J]. *Journal of Tianjin University*, 2018, 51(10): 1005-1014.
- [6] Qun Z, Xinli Q, Boyuan Z, et al. Cooperative Task Allocation of Large-Scale UCAV Based on DPSO-GT-SA Algorithm [J]. *Journal of Tianjin University (ence and Technology)*, 2018.
- [7] Zhen Z, Xing D, Gao C. Cooperative search-attack mission planning for multi-UAV based on intelligent self-organized algorithm [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 76: 402-411.
- [8] Wu W N, Wang X G, Cui N G. Fast and coupled solution for cooperative mission planning of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles [J]. *Aerospace Science & Technology*, 2018, 79: 131-144.
- [9] Yu J Q, Yong B, Yu J. Multi-UAV Task Assignment With Parameter and Time-Sensitive Uncertainties Using Modified Two-Part Wolf Pack Search Algorithm [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(6): 2853-2872.
- [10] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, ET AL. Playing atari with deep reinforcement learning, preprint. arXiv:1312.5602, 2013.
- [11] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning [J]. *Nature*, 2015, 518 (7540): 529-533.
- [12] Silver D, Huang A, Maddison C J, et al. Mastering the game of go with deep neural networks and tree search [J]. *Nature*, 2016, 529 (7587): 484.
- [13] Lillicrap T P, Hunt J J, Pritzel A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning, preprint, arXiv:1509.02971, 2015.
- [14] Hwangbo J, Sa I, Siegwart R, et al. Control of a quadrotor with reinforcement learning [J]. *IEEE Robotics & Automation Letters*, 2017, 2(4): 2096-2103.
- [15] Chen Y F, Liu M, Everett M, et al. How, Decentralized non-communicating multi-agent collision avoidance with deep reinforcement learning [C]// Robotics and Automation (ICRA), 2017 IEEE International Conference on, IEEE, 2017: 285-292.
- [16] Sutton R S, Barto A G. Reinforcement learning: An introduction [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2018.
- [17] Schaul T, Quan J, Antonoglou I, et al. Prioritized experience replay, preprint. arXiv:1511.05952, 2015.
- [18] Tieleman T, Hinton G. Lecture 6.5-rmsprop: divide the gradient by a running average of its recent magnitude, COURSE: Neural Netw [J]. *Machine Learning*, 2012, 4(2): 26-31.

作者简介:

代琪(1996-),男,山西长治,硕士研究生,研究方向是无人机任务分配方法研究。

何兵(1983-),男,陕西西安,副教授/博士,研究方向是控制科学与工程。本文通讯作者。

基于最大化公平性的动态无人机圆轨迹优化

陈彦成, 周新杰, 冯小康

(中国人民解放军63615部队, 新疆若羌 841800)

摘要: 无人机用作空中基站可以在多种情况下协助地面设备进行无线通信, 并且其提供无线覆盖的能力在许多研究领域的得到了广泛关注。本文针对单无人机覆盖区域边缘用户信噪比较低的问题, 研究了动态无人机的圆形轨迹对地面用户信噪比的影响。在无人机盘旋的过程中, 通过用户分时隙接入的方式, 提高区域内所有用户的信噪比, 以用户公平性最大化为目标, 联合优化用户的时隙分配方案和无人机的盘旋半径。根据空地模型构建公平性指标, 并推导出公平性最大化的优化问题, 在联合考虑用户的分配方案和盘旋半径的基础上, 提出了一种基于蚁群算法和遗传算法交替迭代的联合优化算法, 得到用户的时隙分配方案与无人机的最优盘旋半径。

关键词: 无人机; 公平性; 圆形轨迹; 蚁群算法; 遗传算法; 联合优化

Trajectory Optimization of an Unmanned Aerial Vehicle for Maximum Fairness

CEHN Yancheng, ZHOU Xinjie, FENG Xiaokang

(The Unit 63615 of PLA, Xinjiang 841800, China)

Abstract: Recently, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have been widely studied in the communication area to work as aerial base stations due to the high probability of line of sight (LOS) and high flexibility. However, few works consider fairness for the users, which is one of the most important metrics for a network. In this paper, in order to maximize network capacity with the consideration of fairness, trajectory and scheduling of the mobile UAV aerial base station are jointly optimized. Firstly, the problem of maximizing network capacity with the consideration of fairness is formulated. On account of the coupling relationship of trajectory and scheduling, an alternate iteration approach that contains ant colony algorithm and genetic algorithm is then proposed to solve this intractable problem. Finally, the simulation results demonstrate the fairness enhance of the network and the validity and effectiveness of the proposed optimization approach.

Key words: unmanned aerial vehicle; fairness performance; circular trajectory; ant colony algorithm; genetic algorithm; jointly optimization

1 引言

无人机作为空中基站能够为地面用户提供广泛的无线覆盖,既可以用于缓解地面基站由于用户拥塞带来的压力,也可以作为临时基站为由于地面基站出现故障的地面区域提供服务。若无人机以静态的方式在固定位置对地面用户进行覆盖,就会导致在目标区域边缘的用户信噪比总是处于较低的状态。为了保证在无人机覆盖过程中地面用户

的公平性,其中一种可行的方法是利用无人机的机动性来提高网络的性能。

在本文中考虑的是延迟容忍的业务需求,为了使该区域的所有用户都能得到服务,以公平性最大化为目标,研究了无人机基站以圆形轨迹进行盘旋时地面用户的接入顺序和无人机的盘旋半径。并提出了一种优化无人机盘旋半径和用户接入顺序的联合优化算法,在为地面用户提供无线服务的同时最大限度地提高网络吞吐量。

2 物理模型

2.1 信道模型和无人机圆形轨迹模型

本文的系统模型如图1所示,考虑一个包含多个用户的较大区域,且这些用户都为延时容忍的业务需求。由于一些突发事故,地面基站过载或出现故障而无法为用户提供服务。为了解决地面用户的通信问题,使用一架无人机作为空中基站在目标区域上空盘旋,以此为地面用户提供无线服务。无人机以 r 为半径、以 T 为周期进行盘旋。用 u 表示需要被无人机服务的用户组。 (x_i, y_i) 表示用户 i 的位置, (x_o, y_o, h) 为无人机的位置。本节采用空对地(A2G)信道模型,视距(LOS)和非视距(NLOS)的路径损耗分别为^{[6][7]}:

$$L_{LoS} = 20\log\left(\frac{4\pi f d_i}{c}\right) + \eta_{LoS} \quad (1)$$

$$L_{NLoS} = 20\log\left(\frac{4\pi f d_i}{c}\right) + \eta_{NLoS} \quad (2)$$

其中 f 和 c 分别为载波频率和光速,无人机到用户 i 的水平距离为 $d_i = \sqrt{h^2 + r_i^2}$,其中 $r_i = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2}$, η_{LoS} 和 η_{NLoS} 分别为视距(LOS)和非视距(NLOS)的附加路径损失, η_{LoS} 和 η_{NLoS} 是只依赖于环境的常数,且在不同环境中的值在很多文献中已给出。此外,视距(LOS)概率为:

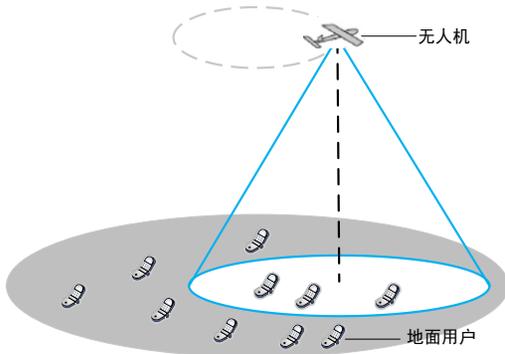


图1 系统模型

Fig. 1 System Model

$$P_{LoS} = \frac{1}{1 + \alpha \exp\left(-\beta\left(\frac{180}{\pi}\theta_i - \alpha\right)\right)} \quad (3)$$

其中 α 和 β 是环境参数, $\theta_i = \arctan\left(\frac{h}{r_i}\right)$ 是用户组 u 中用户 i 的仰角,此外,非视距(NLOS)的概率为。

为了表示方便,假设 $A = \eta_{LoS} - \eta_{NLoS}$, $P_{NLoS} = 1 - P_{LoS}$, $B = 20\log\left(\frac{4\pi f}{c}\right) + \eta_{NLoS}$,则平均概率路径损失为:

$$L = P_{LoS}L_{LoS} + P_{NLoS}L_{NLoS} \quad (4)$$

$$L(h, r_i) = \frac{A}{1 + \alpha \exp\left(-\beta\left(\frac{180}{\pi}\arctan\left(\frac{h}{r_i}\right) - \alpha\right)\right)} + 10\log(h^2 + r_i^2) + B \quad (5)$$

等式(5)可以进一步写成:

$$L(\theta_i, r_i) = \frac{A}{1 + \alpha \exp\left(-\beta\left(\frac{180}{\pi}\theta_i - \alpha\right)\right)} + 20\log\left(\frac{r_i}{\cos\theta_i}\right) + B \quad (6)$$

对于给定的传输功率 p_t ,用户 i 接收到的功率 p_r 为: $p_r = p_t - L(h, r_i)$ 。如果接收到的功率 p_r 超过某个阈值 p_{min} ,则假定用户 i 被无人机覆盖。如果链接的路径丢失小于某个阈值 L_{th} ,则用户 i 将被无人机基站覆盖。对于任意的QoS要求 L_{th} ,最大覆盖半径的最优仰角 θ^* 均为常数,且仅依赖于环境。求解等式(6)可得到城郊、城市、密集城市、高密度城市环境中使得覆盖范围最大的最佳仰角,其分别为 $\theta^* = 20.34^\circ, 42.44^\circ, 54.62^\circ, 75.52^\circ$,最终可通过求解等式(6)可得到无人机基站的最优高度 h^* ^{[11][12]}。

假定无人机基站在高度为 h^* 的圆形轨道上以 r 为半径,以 T 为周期盘旋。并且无人机基站的瞬时位置为 (x, y) 。因此,无人机基站的轨迹为 $x^2 + y^2 = r^2$ 。可以写成参数方程:

$$\begin{aligned} x &= r \cos\theta \\ y &= r \sin\theta \end{aligned} \quad (7)$$

由于无人机基站的运动为圆形轨迹,因此有参数为: $\theta(t) = \frac{2\pi}{T}t$,故等式(7)可进一步写成:

$$\begin{aligned} x(t) &= r \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \\ y(t) &= r \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \end{aligned} \quad (8)$$

所接收到的功率是时间的函数,可以写成:

$$p_{r,i}(t) = p_t - L(h, r_i(t)) \quad (9)$$

其中 $r_i(t) = \sqrt{(x_i - x(t))^2 + (y_i - y(t))^2}$,此外,用户 i

的瞬时信噪比(SNR)为:

$$SNR_i(t) = p_t - L(h, r_i(t)) - p_N \quad (10)$$

其中 p_N 是噪声功率。

2.2 基于最大化公平性的优化目标函数

由于目标区域的面积较大,无人机基站在每一时刻只能覆盖部分的目标区域。为使目标地区的所有用户都能在无人机的一个盘旋周期内得到服务,将无人机的盘旋周期 T 按地面用户的数量 N 划分为 N 个时隙,其中 N 为地面用户的数目。则每个时隙的长度为 $\frac{T}{N}$ 。定义一个二进制变量 $u_i[n]$,当 $u_i[n] = 1$ 时表示用户 i 在时隙 n 与无人机进行通信,当 $u_i[n] = 0$ 时则表示用户 i 在时隙 n 没有与无人机进行通信。这样 $u_i[n]$ 就表示了每个用户在每个时隙内与无人机的连接情况。假设无人机在每个时隙里只服务一个用户,则可得到如下约束条件:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N u_i[n] &= 1, \forall n \\ \sum_{n=1}^N u_i[n] &= 1, \forall i \\ u_i[n] &\in \{0, 1\}, \forall i, n \end{aligned} \quad (11)$$

最小路径损失 L_{\min} 为用户在无人机正下方时的路径损失,其可计算为: $L_{\min} = L(h, r_i)|_{r_i=0}$,则最大信噪比可表示为:

$$SNR_{\max} = p_t - L_{\min} - p_N \quad (12)$$

用户 i 在时隙 n 的平均信噪比 $SNR_i[n]$ 为:

$$SNR_i[n] = \frac{\int_{\frac{T}{N}(n-1)}^{\frac{T}{N}n} SNR_i(t) dt}{T/N} \quad (13)$$

SNR_{\max} 是一个固定值,取每个用户在一个时间段内的平均信噪比 $SNR_i[n]$ 与这个固定值 SNR_{\max} 之差的平方作为衡量公平性的指标。这个指标可以写成 $(SNR_{\max} - SNR_i[n])^2$ 。当无人机在目标区域上空盘旋一个周期后,所有用户依次获得服务。

假设 $A = \{u_i[n], \forall i, n\}$,其代表了用户的接入方案。所讨论问题的目标是通过联合优化无人机盘旋半径和用户接入方案,使平均信噪比与最大信噪比之差的平方和最小。该优化问题可表示为:

$$\begin{aligned} \min_{r, A} \quad & \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N u_i[n] (SNR_{\max} - SNR_i[n])^2 \\ s.t. \quad & \\ a) \quad & \sum_{i=1}^N u_i[n] = 1, \forall n \\ b) \quad & \sum_{n=1}^N u_i[n] = 1, \forall i \\ c) \quad & u_i[n] \in \{0, 1\}, \forall i, n \\ d) \quad & r \leq R_o \end{aligned} \quad (14)$$

该优化问题求解较为复杂,主要原因如下:首先,表示用户接入顺序的优化变量 A 是二进制的,因此约束条件a、b、c均为整数约束。其次,由于变量包含0和1,所以问题(14)是非凸的优化问题^[18]。

表1 蚁群算法

Table 1 Ant Colony Algorithm(ACA)

算法1:蚁群算法

- 1: 初始化: 随机生成 N 个用户,为蚂蚁数量 M_{ACA} 以及ACA的其他参数赋初值。初始化无人机盘旋半径 $r = r_o$ 。
- 2: 根据初始条件计算ACA的距离矩阵 C 。
- 3: Repeat
- 4: For each $i \in [1, M_{ACA}]$
- 5: 随机生成起始节点
- 6: 根据当前节点利用矩阵 C 更新节点间的距离
- 7: 计算节点之间的转移概率并选择下一个节点
- 8: 计算路径的总距离
- 9: End for
- 10: 更新信息素
- 11: 更新最短路径。
- 12: 迭代次数加一。
- 13: Until 迭代次数达到指定值

3 时隙分配与盘旋半径交替迭代算法

问题(14)是一个混合整数非凸问题,为了能够使复杂的求解过程变得简洁,快速准确地得到结果,采用启发式算法来解决该问题。本节将该优化问题的两个变量进行分别优化,首先采用蚁群算法对用户接入顺序进行优化,然后利用遗传算法对无人机的盘旋半径进行优化,两种算法反复交替迭代,最终收敛的结果即为所求。

3.1 蚁群算法优化用户接入顺序

蚁群算法(Ant Colony Algorithm, ACA)是求解组合优化问题常用的一种启发式算法,它的主要思

想来源于蚂蚁在觅食过程中寻找路径的行为。蚁群算法在许多领域得到了广泛的应用,已经解决了许多复杂的非线性组合优化问题。

对于给定的无人机盘旋半径,需要找到最优的用户接入顺序。在ACA的应用中,最为经典的就是旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)。在使用蚁群算法求解TSP时,计算节点之间的距离是一个非常重要的环节,因为节点之间的距离直接影响信息素的更新,从而影响后续蚂蚁的路径选择。在传统的TSP中,节点之间的距离(即目标函数的值)可以在迭代之前计算出来,并且不会随着算法迭代次数的增加而改变。与传统TSP不同,在用ACA求解问题(14)时,节点之间的距离随着迭代次数的增加而改变,因此需要对ACA进行改进。算法过程如表1所示。

首先,根据用户数量 N 构造矩阵 $B_{N \times N}$ 。矩阵中的每个元素表示对应的用户在对应时隙内目标函数的值,矩阵中的元素可以表示为:

$$b_{i,j} = (SNR_{\max} - SNR_j[i])^2 \quad (15)$$

其中, $B_{N \times N}$ 中每一行的元素表示某一时隙内每个用户的目标函数值,每一列的元素表示某一用户在每个时隙内的目标函数值。

接着根据 $B_{N \times N}$ 计算出用于蚁群算法的距离矩阵 C ,矩阵 C 的大小为 $N^2 \times N$,矩阵 C 中的元素可以表示为:

$$c_{i,j} = \begin{cases} \frac{b_{i - \text{mod}(i, N), \text{mod}(i, N)}}{N} & (\text{mod}(i, N) \neq j) \\ 0 & (\text{mod}(i, N) = j) \end{cases} \quad (16)$$

因此,矩阵 C 中第 $1 + N(n-1)$ 行到第 Nn 行表示第 n 个时隙内所有城市之间的距离。

对于给定的无人机盘旋半径 r ,该算法可以计算出最优的选择路径 D , D 对应于用户的接入顺序,也就是说该算法可以得到在给定盘旋半径下用户的最优接入顺序。

3.2 遗传算法优化无人机盘旋半径

遗传算法与传统的优化算法相比具有许多优点,其中最重要的是处理复杂问题的能力和算法求解问题时的并行搜索能力。遗传算法从随机生成的初始解开始,通过选择、交叉和变异生成新的解。然后利用设计的适应度函数计算新解的适应度,通过自然选择得到下一代种群。经过多次迭代,算法收敛到最优的个体。

表2 标准遗传算法

Table 2 Canonical Genetic Algorithm(CGA)

算法2:标准遗传算法
1: 初始化: 为 M_{GA} 、 P_{cr} 和 P_{mut} 赋初值. 初始化用户接入顺序 $A = A_0$.
2: A 根据用户接入顺序 A 计算 $B_{N \times N}$
3: While $n < gen$ do
4: For each $i \in M_{GA}$ do
5: 计算适应度
6: 选择、交叉和变异操作
7: End for
8: 计算新一代个体的适应度值
9: 更新参数 V_m
10: End while

在该优化问题中,遗传算法的目标是为给定的用户接入顺序 A 找到最优的盘旋半径 r 。为此首先要设计适应度函数,通过对蚁群算法的计算,得到用 D 表示的最优选择路径。需要注意的是, D 是一个数字序列,表示每个用户访问的时间间隔并且 D 的大小为 $1 \times N$ 。 D 中的元素为1到 N 且不重复的数字。对于任意的盘旋半径 r ,都可以计算出相应的距离矩阵 $B_{N \times N}$ 。因此,适应度函数可以表示为:

$$f(r) = \sum_{i=1}^N b_{i, d(1, i)} \quad (17)$$

其中 b 是矩阵 $B_{N \times N}$ 中的元素, $d(1, i)$ 表示 D 中第一行、第 i 列的元素。算法过程如表2所示。

4 仿真结果及分析

假设有一个圆形的城市区域并对其进行分析,其具体参数为 $\alpha = 9.61$, $\beta = 0.16$, $\eta_{Los} = 1$, $\eta_{Nlos} = 20$,该圆形区域的半径为 R_0 ,盘旋半径的初值为 r_0 ,载波频率为 $f = 20GHz$,假设路径损耗门限为 $L_{th} = 100dB$ 。首先用蚁群算法优化用户接入顺序,然后用遗传算法优化无人机的盘旋半径。再通过蚁群算法和遗传算法的交替迭代优化,最终得到最大公平性的无人机最优盘旋半径。

4.1 算法收敛性

首先对盘旋半径 r_0 赋初值,然后通过蚁群算法得到当前盘旋半径下的最优用户接入顺序。再将用户接入顺序代入遗传算法,得到当前用户接入顺序下无人机的最优盘旋半径。在下面的仿真图中,纵轴的目标函数是在前文中定义的公平性指标,该指标的数值越小表示公平性能越好。

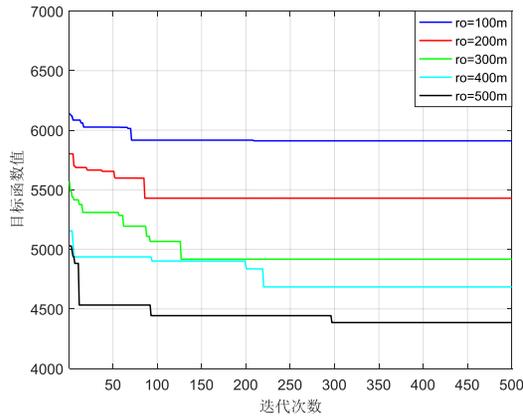


图2 目标函数值随着蚁群算法迭代次数的变化
Fig. 2 The Iterative process of the ACA

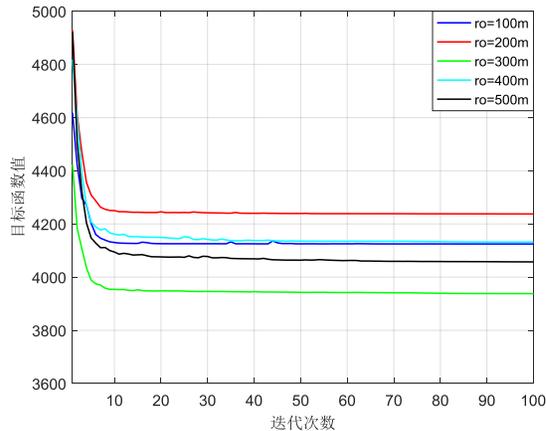


图3 目标函数值随着遗传算法迭代次数的变化
Fig. 3 The Iterative process of the CGA

图2显示了使用ACA优化用户接入顺序时最优解的迭代过程。如图所示,初始半径越大,ACA优化后的目标函数值越小。这是因为最优半径是在目标区域半径中的某一处得到的,且目标函数在最优半径处取得最小值。因此,与最优半径相差较大的初值对应较大的目标函数值。图3给出了用遗传算法优化无人机盘旋半径时最优解的迭代过程。对比图2和图3可知,遗传算法优化无人机盘旋半径所需迭代次数小于ACA优化用户调度所需迭代次数。这是因为无人机盘旋半径的优化问题比用户接入顺序的优化问题复杂得多,因此在优化过程中进行需要多次迭代。

4.2 用户公平性

用户公平性随迭代次数的变化过程如图4和图5所示。图4和图5中目标区域半径分别为1500 m、

2000 m。虽然用户数量不会影响盘旋半径的最终收敛结果,但会影响公平性指标的收敛结果,从图中可以看出,随着用户数量的增加,用户公平性会呈现降低的趋势。这是因为用户数量越多,为每个用户分配使所有用户公平性最大化的最优时隙就会变得更加困难,也就是说公平性最大化用户的接入顺序更难确定。

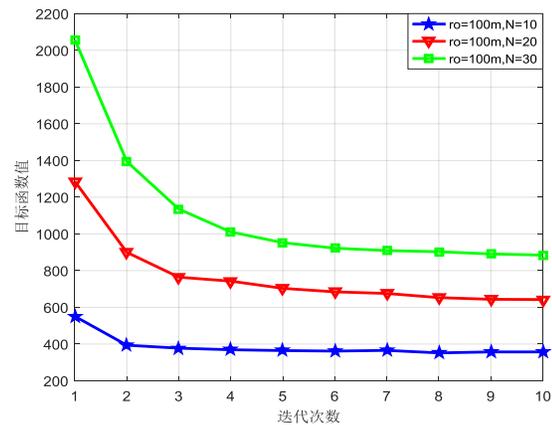


图4 目标函数值随着联合优化迭代次数的变化
($R_o = 1500m$)

Fig. 4 The iterative process of fairness performance in joint optimization($R_o = 1500m$)

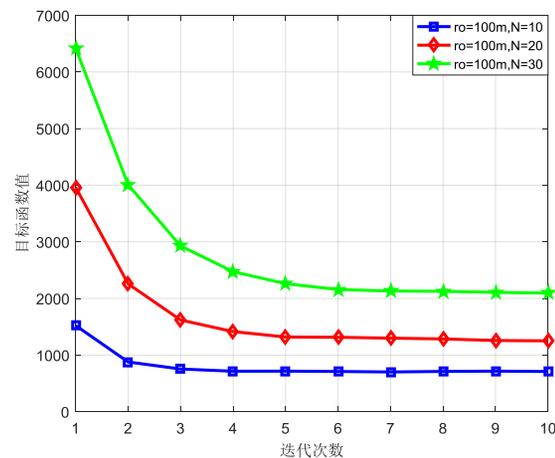


图5 目标函数值随着联合优化迭代次数的变化
($R_o = 2000m$)

Fig. 5 The iterative process of fairness performance in joint optimization($R_o = 2000m$)

目标区域内不同数量用户的情况下,无人机盘旋半径随着联合优化迭代次数的变化如图6和图7所示,其目标区域半径分别为1500 m、2000 m。随

着联合优化迭代次数的增加,无人机的盘旋半径逐渐收敛。如图所示,经过第四次到第五次迭代,算法的最优解不再发生变化,这也说明了联合优化算法的有效性和稳定性。此外,该区域中不同数量的用户会导致迭代过程中每次迭代的结果有所差别,但盘旋半径最终都收敛到同一个值,即本场景中公平性最大化的无人机最优盘旋半径。

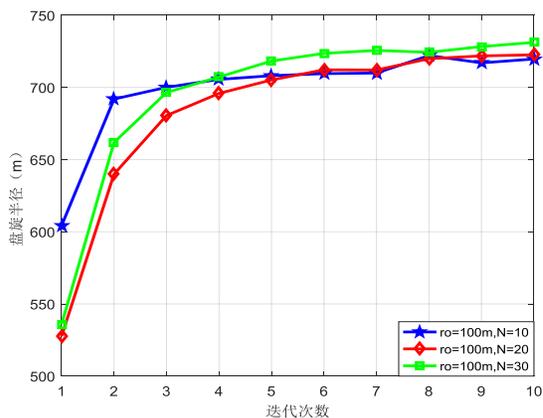


图6 无人机最优盘旋半径随联合优化迭代次数的变化

$$(R_0 = 1500m)$$

Fig. 6 The iterative process of hovering radius in joint optimization($R_0 = 1500m$)

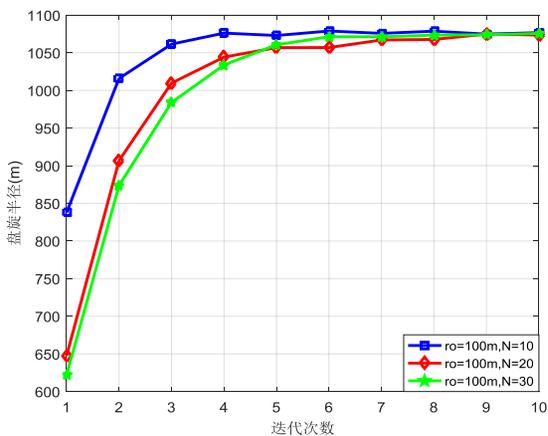


图7 无人机最优盘旋半径随联合优化迭代次数的变化

$$(R_0 = 2000m)$$

Fig. 7 The iterative process of hovering radius in joint optimization($R_0 = 2000m$)

5 结论

本文研究了基于地面用户公平性最大化的动态无人机圆轨迹优化问题。主要考虑的是具有较

多用户的大面积区域,且用户具有延时容忍的业务需求,为了使这些用户都能获得较好的服务,通过单无人机在目标区域上空盘旋的方式,来为地面用户提供覆盖。在现有的信道下建立了系统模型,并给出了公平性指标的表达式。提出了一种基于启发式算法的无人机盘旋半径和用户接入顺序交替迭代联合优化算法,该方法先以蚁群算法优化无人机盘旋半径,再由遗传算法优化用户接入顺序,然后两者交替迭代,从而实现联合优化,最终可得到使地面用户公平性最大化的无人机盘旋半径和用户接入顺序。仿真结果表明通过本文所提出的联合优化算法,可以在兼顾网络吞吐量的同时实现用户公平性最大化,并且该算法能获得较好的收敛性。

参 考 文 献

- [1] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges [J], IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [2] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, Survey of important issues in UAV communication networks [J], IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [3] W. Zafar and B. M. Khan, Flying ad-hoc networks: technological and social applications, IEEE Technology and Society Magazine [J], 2016, 35(6): 67-74.
- [4] 王鹏, 马永青, 汪宏昇, 无人机通信应用设想及关键技术[J], 飞航导弹, 2011.5.
- [5] 彭晖, 吴亚超, 无人机通信技术研究[J], 警察技术, 2019.1.
- [6] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, A. Jamalipour, Modeling air-to-ground path Loss for low altitude platforms in urban environments [C], Proc. 2014 IEEE Global Communications Conf., 2014: 2898-2904.
- [7] Q. Feng, E. K. Tameh, A. R. Nix, and J. McGeehan, Modelling the likelihood of line-of-sight for air-to-ground radio propagation in urban environments [C], in Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference, San Diego, CA, USA, Nov.2006, DOI: 10.1109/GLOCOM.2006.917.
- [8] 罗卫兵, 王永生, 无人机平台的超视距多链路中继[J], 遥测遥控, 2003.4.
- [9] E. Kalantari, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, Backhaul-aware robust 3D drone placement in 5G+ wireless networks [C], IEEE Int. Conf. Commun. Workshop (ICCW), Paris, France, May 2017.
- [10] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, Optimal LAP altitude for maximum coverage [J], IEEE Wireless Communications Letter, 2014, 3(6): 569-572.

- [11] M.M. Azari, Y. Murillo, O. Amin, F. Rosas, M.-S. Alouini, S. Pollin, Coverage maximization for a poisson field of drone cells [C], IEEE PIMRC, 2017.
- [12] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis [C], IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), 2015: 1-6, DOI: 10.1109/GLOCOM.2015.7417609.
- [13] 贺子健, 艾元, 闫实, 无人机通信网络的容量与覆盖性能[J], 电信科学 2017.10.
- [14] Alper Akarsu, Tolga Girici, Fairness aware multiple drone base station deployment [J], Communications IET, 2018, 12 (4) : 425-431.
- [15] Y. Zeng and R. Zhang, "Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 16, no. 6, Jun. 2017, 3747 - 3760.
- [16] Q. Wu, Y. Zeng, R. Zhang, Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks [J], IEEE Transaction on Wireless Communications, 2018 17 (3) : 2109-2121.
- [17] F. Wang, W. Chen, H. Tang, and Q. Wu, "Joint optimization of user association, subchannel allocation, and power allocation in multi-cell multi-association OFDMA heterogeneous networks," IEEE Trans. Commun., vol. 65, no. 6, Jun. 2017.
- [18] Y. E. Nesterov and M. J. Todd, "Self-scaled barriers and interior-point methods for convex programming," Mathematics of Operations research, vol. 22, no. 1, pp. 1 - 42, 1997.
- [19] 王涛, 张明义, 黄克明, 多无人机系统频率干扰问题研究[J], 舰船电子工程, 2016.7.
- [20] 韩亮, 任文, 董希旺, 多无人机协同控制方法及应用研究[J], 导航定位与授时, 2018.7.
- [21] Xiao Zhang, Lingjie Duan, Optimization of emergency UAV deployment for providing wireless coverage [C], GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference, 2017: 1-6.
- [22] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage[J], IEEE Communications Letters, 2016, 20 (8): 1647-1650.

作者简介:

陈彦成(1995-),男,硕士,工程师,主要研究方向为信息感知、处理与对抗。本文通讯作者。

周新杰(1995-),男,硕士,工程师,主要研究方向为测控工程。

冯小康(1991-),男,学士,助理工程师,主要研究方向为卫星通信与导航测控。

基于渗流理论的分布式无人集群作战能力研究

常强¹, 杨帅², 杨绍卿¹, 管绍华¹, 左源¹, 涂龙¹, 邓宝松¹

(1. 军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071; 2. 中国人民解放军78102部队, 四川成都 610000)

摘要: 分布式无人集群突破了有人装备行动受限于人类生理极限的制约, 具有广泛的军事应用前景, 研究分布式无人集群作战能力生成规律具有重要意义。论文基于OODA环理论对无人集群进行形式化建模, 基于代数图论对无人集群作战能力进行量化; 将对抗过程中的无人集群视为非平衡系统, 基于渗流理论, 研究无人集群在不同连边概率和节点生存概率条件下作战能力变化规律。仿真结果显示, 节点生存率大约为40%时发生点渗流临界相变, 连边概率大约为10%时发生边渗流临界相变。研究结果揭示了分布式无人集群作战能力变化规律, 可为无人集群体系设计提供理论依据。

关键词: 无人集群; 分布式作战; OODA; 代数图论; 渗流理论; 相变

Research on the Distributed Unmanned Cluster's Operational Capability using Percolation theory

CHANG Qiang¹, YANG Shuai², YANG Shaoqing¹, GUAN Shaohua¹, ZUO Yuan¹, TU Long¹,
DENG Baosong¹

(1. Defense Innovation Institute, Academy of Military Science, Beijing 100071, China; 2. 78102 Troop, Chinese People's Liberation Army, Cheng Du, 610000, China)

Abstract: The distributed unmanned cluster breaks through the limitation of human physiological limit in manned equipment operation, and has a wide range of military application potential. It is of great significance to study the generation law of distributed unmanned cluster operational capability. The distributed unmanned cluster is formalized using OODA theory, and the operational capability of distributed unmanned cluster is quantified based on the algebraic graph theory. The unmanned cluster in the course of confrontation is regarded as a non-equilibrium system, the change law of operational capability of unmanned cluster under different connection probability and node survival probability is studied. In site percolation, a critical phase transition occurs when the node survival probability is 40%. In bond percolation, a critical phase transition occurs when the connection probability is 10%. The results reveal the change rule of distributed unmanned cluster's operational capability, which provides the basis for designing the architecture of distributed unmanned cluster.

Key words: Unmanned cluster; Distributed operations; OODA; Algebraic graph theory; Percolation theory; Phase transition

1 引言

随着人工智能技术、无人系统技术的发展, 具备一定自主能力的无人装备逐步进入作战体系。无人装备突破了有人装备行动受限于人类生理极限的制约, 展示出了强大的军事应用潜力和广阔的发展前景, 未来战争必将逐步朝着无人化、智能化方向发展。大量低成本无人装备通过广域泛在网

络或分布式通信网络构成的无人集群^[1], 不仅能涌现出单一装备不具备的新属性(-ility)、新性能(performance)和新功能(function), 并且, 相对传统集中式作战体系, 还具备更好的弹性、可扩展性、作战使用灵活性等特点, 分布式无人集群必将在未来智能化战争中发挥越来越重要的作用^[2], 研究分布式无人集群作战能力生成规律, 对于指导智能化作战力量建设和加速战斗力生成具有重要意义。

传统的有人作战体系由于人员和装备组织的复杂性,难以进行准确的理论建模、计算和分析。分布式无人集群作战主体是按照一定规则运行的无人系统,使得针对局部作战行动开展无人集群作战能力分析成为可能。然而,智能化和无人化技术为未来战场带来更多装备和更好算法的同时,也为智能化战争带来新的特点,包括瞬息万变的战场态势、不断扩展的作战域、逐渐加快的作战节奏,以及更加不完整的战场信息等,这些特点使得很难采用传统工程化方法对作战体系进行建模与分析。

为将无法用工程化方法进行研究的不良结构(ill-structured)问题转化为可以进行计算和分析的良好结构(well-structured)问题,本文首先基于OODA环理论,对无人作战体系进行简化和建模,将纷繁复杂的作战体系转变成包含4类节点和6类边的超网络;随后,基于代数图论对分布式无人集群作战能力进行量化;最后,基于渗流理论(Percolation theory)和仿真方法,研究无人集群超网络在不同连边概率和节点生存概率条件下的作战能力,揭示分布式无人集群能力生成和变化规律。

2 无人作战体系建模与量化

2.1 基于OODA环理论的无人作战体系建模

美国空军上校约翰·博伊德在上世纪90年代提出OODA环理论,用不断循环的“观察(Observe)、判断(Orient)、决策(Decide)、行动(Act)”(OODA)过程来描述战场上指挥员的理性指挥过程^[3],如图1所示:

现代战争往往是体系与体系(System of

Systems, SoS)的对抗^[4-5],如果将具象化的体系作为研究对象,其作战过程同样可以表述为体系的观测装备、判断和决策装备、行动装备之间相互配合、密切协同的过程,如图2所示:

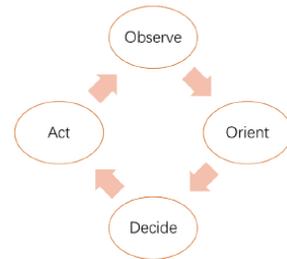


图1 OODA环理论

Fig. 1 The theory of OODA Loop

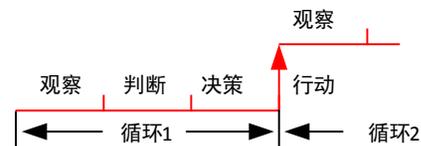


图2 体系OODA环循环过程

Fig. 2 The OODA Loop in SoS

因此,按照OODA环理论,可以将无人作战体系对抗过程分解为“观测-判断-决策-行动”流程的不断重复,基于此,组成作战体系的各种装备按功能可抽象为4类节点,分别为传感节点 V_o (Observer)、判断和决策节点 V_d (Orient & Decide)、行动节点 V_a (Attack)和目标节点 V_t (Target)。表1定义了各类节点功能和装备示例:

表1 作战体系节点定义

Table 1 The definition of the nodes in SoS

类型	功能描述	装备示例
传感节点	侦察、探测、监视类实体,具备战场空间感知能力	雷达、侦察卫星
判断与决策节点	指挥、控制、决策类实体,具备指控、情报融合等能力	指挥所、情报中心
行动节点	行动类实体,具备某种作战行动的执行能力	导弹、干扰设备等
目标节点	敌方传感、判断和决策、行动节点以及其他有价值目标	敌雷达、指挥所等

通过对作战过程的分析,不同类型节点之间的关系可以抽象为4类,分别是:探测关系 E_{to} 、协同关系 E_{od} 、控制关系 E_{da} 、对抗关系 E_{at} ;同类节点内部有2种关系,分别是信息共享关系 E_{oo} 、指挥关系 E_{dd} 。

这6类关系内涵见表2所示:

需要注意的是,行动节点之间的关系不予考虑,因为行动节点之间的协同关系可以转变为指挥关系,目标节点之间的关系也不予考虑,因为目标

节点之间的通信状态通常不可知,另外,同类节点内部不能出现循环指向的关系,一方面,会导致非OODA回路的出现,另一方面,现实中作战指挥控制是自上而下的单向关系,一般不存在互相指挥的关系。按照上述定义,无人作战体系可以建模为一个包含4类节点、6类边的有向超网络G:

表2 作战体系边的定义
Table 2 The definition of the edges in SoS

类型	功能描述
探测关系	表示目标节点能够被感知节点探测到
协同关系	表示传感节点将目标信息发送到判断与决策节点
控制关系	判断与决策节点控制行动节点执行相关指令
对抗关系	对某个目标节点执行特定对抗行动
信息共享关系	传感节点之间的信息共享
指挥关系	判断与指挥节点之间的上下级指挥关系

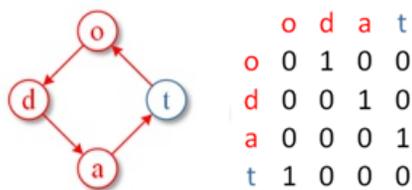
$$G = \{V, E\}$$

$$V = \{V_o, V_d, V_a, V_t\}$$

$$E = \{E_{To}, E_{OD}, E_{DA}, E_{AT}, E_{oo}, E_{DD}\}$$

2.2 基于代数图论的作战能力量化

基于作战体系超网络模型,根据节点能力对6类边进行赋值,获得作战体系超网络邻接矩阵,下图3是对一个简单作战体系的超网络进行赋值得到的邻接矩阵:



(a) OODA回路示例 (b) 邻接矩阵示例

图3 作战体系超网络模型和邻接矩阵示例

Fig. 3 The examples of SoS's hyper networks and Adjacency matrix

图3中,红方观察节点、判断与决策节点、行动节点都只有1个,蓝方只有1个节点,双方不同节点之间形成一个OODA回路,其超网络结构如图3(a)所示;若将各条边都赋值为1,图3(a)是其邻接矩阵,邻接矩阵中元素*i,j*表示第*i*个节点到第*j*个节点存在表2中某类指向关系。

根据代数图论中的Perron-Frobenius定理,非

负矩阵至少存在一个大于其他所有特征值的、非负实数特征值,称为PF特征值 λ_{PF} 。Jeffery Cares首先提出使用PF特征值描述体系的作战能力^[6],沈寿林教授基于该思路,提出使用网络规模N对PF特征值进行归一化后的数值作为体系网络化效能^[7]。张明智教授通过仿真,验证了PF特征值与体系作战效能之间存在密切的关联关系,指出PF特征值在一定程度上反映了体系的整体作战能力^[8]。胡晓峰教授认为基于邻接矩阵的PF特征值对体系能力分析具有一定参考价值,但也存在歧义、无效环境影响等问题^[9],该问题源于这些研究中使用体系建模方法仍是参照Jeffery Cares的思路,存在大量对作战能力没有贡献的回路,这些回路会影响特征值大小。本文体系建模生成的超网络中除OODA环外,不存在其他回路,因此,采用本文体系建模方法生成的超网络邻接矩阵PF特征值反映了OODA环数量,使用该特征值描述体系作战能力具有较好的军事合理性,下面使用体系超网络邻接矩阵PF特征值刻画体系作战能力。

3 分布式无人集群作战能力研究

基于上述无人作战体系建模与量化分析方法,将原本复杂战场转变为可以形式化描述和定量分析的模型,下面研究分布式无人集群能力生成规律,为无人集群体系设计、战法创新提供依据。

分布式无人集群对抗过程中,一方面,需要外界资源、信息持续不断的补充才能维持响应的功能和结构,另一方面,体系单元、连接会不断受到攻击,为了达成作战目标,体系结构需要持续调整以适应新的环境,从统计物理角度考虑,分布式无人集群是典型的非平衡系统。非平衡系统通过调整进入的稳定状态又称为相。渗流理论是研究非平衡系统相变的基础性理论,下面基于渗流理论,研究分布式无人集群演化过程中的相变机理。

分布式无人集群对抗过程中受到的扰动包括两类,分别是破坏关键装备,或者干扰/切断关键通信链路,从复杂网络角度,就是改变节点或者改变连边,在渗流理论中分别对应于点渗流(site percolation)和边渗流(bond percolation)。当前,研究渗流临界相变点有三种方法:一是基于复杂网络理论中的生成函数法推导相变临界点^[10-11],二是基

于统计物理中的重整化群理论推导相变临界点^[12],三是建立相变模型,基于仿真的方法发现相变临界点^[13]。无论生成函数法还是重整化群理论,对作战体系复杂的超网络结构进行分析都存在较大的困难,为此论文使用仿真的方法,探索分布式无人集群作战能力的点渗流和边渗流相变临界点。

3.1 分布式无人集群点渗流分析

渗流理论最早由 S. R. Broadbent 等人于 1957 年首次提出,研究流体在无序多孔介质中的运动规律^[14]。目前,渗流理论主要用于描述系统中某些物理量占用率变化到一定数值时,系统的宏观性质发生实质性的变化,系统状态将在局部连通和全局连通间发生转变,即发生相变。判断渗流是否发生的指标称为序参量(Order Parameter),本节将分布式无人集群的序参量定义为体系作战能力,即超网络邻接矩阵 PF 特征值: $OP = \lambda_{PF}$, 给定任意分布式无人集群,红蓝方节点数量相同,每一方各类节点数量也是相同的,图 4 给出了节点生存概率从 100% 降低到 0 过程中,序参量变化情况:

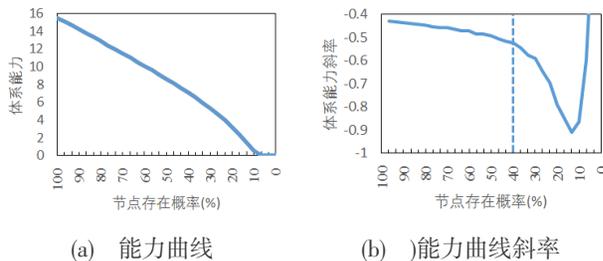


图4 分布式无人集群节点生存概率对体系能力的影响
Fig. 4 The effect of nodes survival probability on system capability

图 4 中,红蓝双方初始都有 30 个节点,且 3 类节点数量相同,图中每个点都是重复 20000 次仿真的平均值。从图 4 (a) 可以看出,随着节点生存概率降低,体系能力逐步降低,且有加速下降的趋势。从图 4 (b) 可以看出,节点生存概率在 40% 后,斜率绝对值快速上升,体系能力急速下降。因此,分布式无人集群在节点生存率约为 40% 时,作战能力变化趋势发生了突变,即分布式无人作战体系在被摧毁 60% 后,体系能力发生相变。根据战争史数据,在冷兵器时代,部队伤亡达到 10%,作战体系濒临崩溃;在机械化战争时代,军队伤亡达到 20%—

30%,大概率会失去战斗力^[15];本研究表明,在智能时代,分布式无人集群伤亡达到 60%,体系能力急剧下降。

3.2 分布式无人集群边渗流分析

给定任意分布式无人集群,红蓝方节点数量相同,每一方各类节点数量也是相同的,图 5 给出了连边概率从 100% 降低到 0 过程中,序参量变化情况。

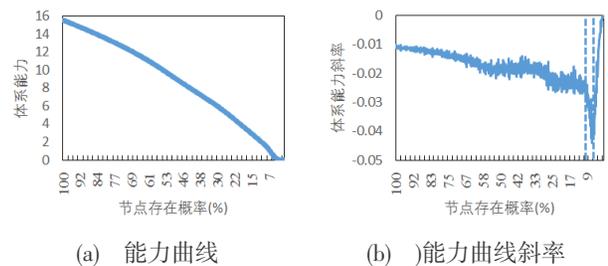


图5 分布式无人集群节点生存概率对体系能力的影响
Fig. 5 The effect of edges survival probability on system capability

图 5 中,红蓝双方初始都有 30 个节点,且三类节点数量相同,所有变边都按照表 2 规则自动生成。图中每个点都是重复 20000 次仿真的平均值,从图 5 (a) 可以看出,随着连边概率降低,体系能力逐步降低。从图 5 (b) 可以看出,无人集群存在边渗流现象,能力曲线斜率在连边概率大于 10% 时稳步下降,小于 10% 时快速下降,小于 3.8% 以后的急速上升可能原因是连边已经极为稀疏,已没有下降空间导致。因此,分布式无人集群连边概率约为 10% 时,作战能力变化趋势发生了突变,即分布式无人作战体系通信被干扰 90% 后,体系能力发生相变。该结论一方面表明分布式无人集群具有较强的抗干扰能力,另一方面为采用通信干扰/压制方式对抗分布式无人集群提供理论支撑。

4 结论

研究分布式无人集群作战能力生成规律具有重要意义,本文首先基于 OODA 环理论,将无人集群建模为包含 4 类节点、6 类边的超网络;随后,基于代数图论对集群作战能力进行量化,使用超网络邻接矩阵最大特征值作为能力指标;最后,从点渗流和边渗流两个角度,研究了分布式无人集群节点

和连边不同生存概率条件下体系能力变化规律。研究发现,节点生存概率大约为40%时发生点渗流临界相变,连边概率大约为10%时发生边渗流临界相变。本研究可为分布式无人集群体系设计、战法探索、制胜机理分析提供理论支撑。后续重点拓展生成函数法和重整化群方法使用范围,从理论上对相变临界点进行计算。

参 考 文 献

- [1] 邹立岩,张明智. 马赛克战视角下的智能无人集群作战概念研究. 战术导弹技术[J]. 2020(6):67-75.
- [2] 李磊,王彤,蒋琪. 美国CODE项目推进分布式协同作战发展. 无人系统技术[J], 2018(3):59-66.
- [3] Boyd J. D discourse on winning and losing. Maxwell Air Force Base [R]. AL, USA: Air University Library Document No.M-43947, 1987.
- [4] 刘忠,刘俊杰,程光权. 基于超网络的作战体系建模方法. 指挥控制与仿真[C], 2013(6):1-5.
- [5] 胡晓峰,贺筱媛,饶德虎,郭圣明. 基于复杂网络的体系作战指挥与协同机理分析方法研究. 指挥与控制学报[J], 2015(12):9-17.
- [6] Jeffrey R. Cares. An information age combat model [C]. The 9th ICCRTS, 2004: 1-27.
- [7] 沈寿林,张国宁,朱江. 作战复杂系统建模及实验[M]. 国防工业出版社, 2012:146-150.
- [8] 张明智,马力. 体系对抗OODA循环鲁棒性建模及仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2017(29): 1968-1975.
- [9] 胡晓峰,杨镜宇,张明智,伍文峰等. 战争复杂体系能力分析与评估研究[M]. 科学出版社, 2019: 147-152.
- [10] Mark Newman. Networks (Second Edition). Oxford University Press. 2018:574-602.
- [11] Ling Fenget al. The simplified self-consistent probabilities method for percolation and its application to interdependent networks [J]. New J. Phys. 17 (2015): 063025.
- [12] Kim Christensen, Nicholas R Moloney. Complexity and Criticality [M]. Imperial College Press, 2005.
- [13] 李明,汪秉宏. 多层网络上的逾渗相变. 科技导报[J]. 2017, 35(14): 50-55.
- [14] S.R. Broadbent, J.M. Hammersly. Percolation processes in Crystal and Mazes [J]. Math Proc Cambridge, 1957, 53(3): 629-641.
- [15] Ming Li, Run-Ran Liu, Linyuan LYu, Mao-Bin Hu, Shuqi Xu, Yi-Cheng Zhang. Percolation on complex networks: Theory and application. 2021. arXiv:2101.11761v.
- [16] D. K. Clark. Casualties as measure of the loss of combat effectiveness of an infantry battalion [R]. Washington D. C.: Operation Research Office. 1954: 7

作者简介:

常强(1985-),男,副研究员,主要研究领域为复杂系统建模与仿真。本文通讯作者。

杨帅(1991-),男,硕士,工程师,主要研究方向为计算机仿真。

杨绍卿(1992-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为无人集群控制。

管绍华(1990-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为统计物理。

左源(1991-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为多智能体强化学习。

涂龙(1986-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为多智能体强化学习。

邓宝松(1978-),男,博士,研究员,主要研究方向为无人系统技术。

动态翱翔综述：固定翼无人机航时拓展新途径

刘多能，卢风顺，杨添琦，郝 瑞，秦诗牧

(北京流体动力科学研究中心，北京 100011)

摘要：提升航时和降低能耗是无人机技术持续追逐的目标，而信天翁凭借动态翱翔的技巧从海面附近梯度风场中获取能量，在很少拍翅膀的情况下进行长时间、远距离飞行，该技巧应用于固定翼无人机潜力巨大。本文主要阐述了动态翱翔的概念内涵与内在机理，对支持自主动态翱翔的三项关键技术，即风场感知、航迹规划与航迹跟踪进行了研究现状与趋势综述。在应用方面，动态翱翔策略可与机载、外部能量使用相结合，可拓展无人机续航能力；无人机利用动态翱翔技巧可在极少消耗机载能量的情况下完成各种长航时、远距离飞行任务。

关键词：动态翱翔；固定翼无人机；长航时；风场感知；航迹规划；航迹跟踪

Reviews of Dynamic Soaring: The Novel Way of Flight Endurance Extension with a Fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle

LIU Duoneng, LU Fengshun, YANG Tianqi, HAO Rui, QIN Shimu

(Beijing Aerohydrodynamic Frontier Research Center, Beijing 100011, China)

Abstract: Extending flight endurance and reducing energy consumption are continued pursuits of research on unmanned aerial vehicle (UAV) technology. Albatrosses use a flight technique called dynamic soaring (DS) to gain energy from wind gradients near the ocean surface to travel for a very long journey and period, almost without flapping their wings. Fixed-wing UAVs therefore have great potential to use DS to achieve long-endurance and broad-coverage flight. In this paper, the concept and mechanism of DS are explained, and the three key technologies supporting autonomous DS, namely wind field sensing, trajectory planning and trajectory tracking, are reviewed in terms of research status and trends. In terms of application, the DS strategy can be combined with on-board and external energy use to extend the endurance of UAVs; UAVs can accomplish various long-endurance and long-distance missions with very little on-board energy consumption by using DS techniques.

Key words: Dynamic Soaring; Fixed-wing UAV; Long Endurance; Wind Sensing; Trajectory Planning; Trajectory Tracking

1 引言

提升无人机长航时性能,拓展其执行任务的持续时间和覆盖范围是无人机领域的主要发展方向。从无人机总体设计角度来看,执行特定任务的航时需求是根本出发点,续航性能最后都归结于机载能量的消耗问题,而机载能量又受限于无人机的载重和空间。因而需要从能量角度出发,探索扩展无人机航时性能的创新途径。提升发动机效率、电池能量

密度等单纯从无人机本体层面进行技术革新的手段很难持续提升续航能力,因为机载能量始终有限,只有利用外部能量或利用外部能量对机载能源进行补充才可以打破当前续航能力提升的困局与瓶颈。

无人机空中加油是外部能源补给的一种形式,但其具有很高的技术难度和危险性^[1]。地面激光功率传输是一种外部能量补给的新概念,但激光功率传输效率仍然较低,且极易受到云层覆盖的影

响,地面站设备复杂,且无人机工作空域局限在地面站附近^[2]。目前最流行的无人机外部能量补给方式是通过在机翼上铺设太阳能电池获取太阳能,如果白天转换存储在储能电池中的太阳能可满足夜间飞行的需要,则太阳能无人机理论上可以实现永久飞行^[3]。此外,太阳能无人机可以通过将白天获取的多余能量用于爬升,被称为重力势能储能^[4],再通过最小下沉率无动力滑翔获得更多滞空时间。

自然界中许多大型鸟类从环境风场中获取能量的现象为我们供了重要参考。比如信天翁在几乎不拍打翅膀的情况下,利用动态翱翔(dynamic soaring, DS)的飞行技巧(周期性地逆风爬升、高空转向、顺风下滑、低空转向,见图1中飞行轨迹1、2、3、4)从海面附近的风梯度中获取能量^[5],实现长航时、远距离、甚至是环球飞行^[6],如图2所示;信天翁拥有“侧翼锁定”系统^[7],使其在动态翱翔过程中轻松地保持翅膀伸展,形态与固定翼无人机极为相似,如图3所示^[8];而且不同尺度的风梯度在自然界中广泛、持续分布^[9,10](图4),因而固定翼无人机运用动态翱翔技巧直接从梯度风场中获取能量,减少机载能量的消耗,实现长航时、远距离、甚至是无动力的持久飞行潜力巨大,图5为无人机模拟信天翁飞行的想象图^[11]。

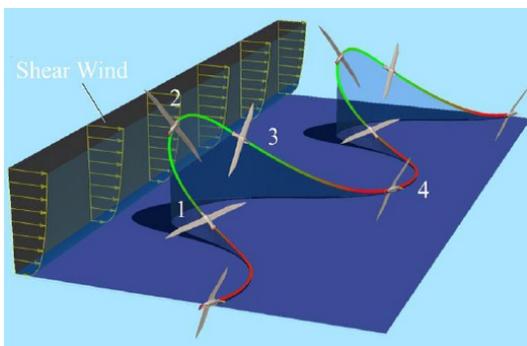


图1 信天翁动态翱翔的技巧
Fig. 1 DS technique of albatrosses

2 概念与机理

2.1 滑翔VS翱翔,静态VS动态

无人机飞行环境中存在各种形式的风速变化,代表了不同形式的空气流动,无人机受到的气动力与经过机身表面的气流相关,空速一定程度上代表了无人机的有效能量,如果无人机在飞行过程中遭

遇到了流动变化的空气,势必造成空速的变化和能量的变化,可见无人机具有从风场中获取能量的潜力。

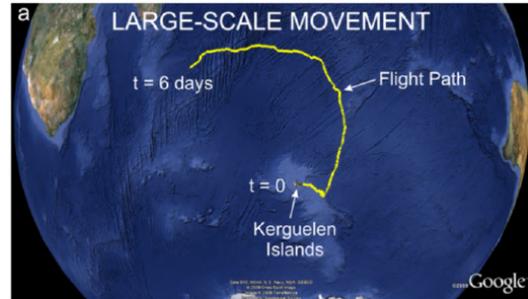
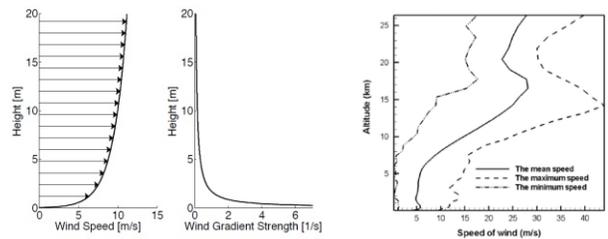


图2 信天翁长航时飞行
Fig. 2 Long endurance flight of albatrosses



图3 信天翁侧翼锁定系统
Fig. 3 Shoulder lock system of albatrosses



(a) 地表附近的风梯度 (b) 20km空域内的风梯度

图4 自然界中的风梯度
Fig. 4 Wind gradient in nature

鸟类是利用风场获取能量的手,第一次对鸟类从环境中获取能量的现象进行准确描述的人是英国物理学家Rayleigh勋爵^[12],在1883年的《Nature》杂志上指出鸟类能够在不拍翅膀的情况下保持飞行状态,需要满足以下三种条件之一:(1)飞行路径不是水平的,代表无动力的滑翔(glide),这与风无关;(2)风不是水平的,代表利用上升气流

(updraft); (3) 风不是均匀的, 代表利用水平风梯度(wind gradient)。第一种情况用降高度的方式用重力势能抵消阻力的耗能, 使信天翁保持下滑状态, 可以认为是如上节所述重力势能的释放过程, 与风场无关; 后两种情况强调从风场中获取能量来保持高度, 才被称作翱翔(soar)。国内研究翱翔的学者(包括笔者)通常也使用“滑翔”一词, 气动专家吴子牛将soar翻译为“翱翔(滑翔)”^[13], 笔者在此为英文单词soar的中文翻译“翱翔”做一个正名, 避免与滑翔概念混淆。



图5 固定翼无人机模拟信天翁飞行的想象图

Fig. 5 Imagery of a fixed-wing UAV simulating the flight of an albatross

上升气流主要有地表辐射加热不均匀造成的上升热气流(thermal)和地形突起造成的迎风气流抬升(lift), 在自然界中是准静止(quasi-static)现象。无人机(包括鸟类)只需在上升气流中保持相对稳定的、平衡(如盘旋)状态, 让上升流动抵消机体下沉率, 从而保持自身高度^[14]。流经机翼表面的气流处于定常状态, 因而利用上升气流的翱翔飞行被称作“静态翱翔(static soaring)”, 如图6所示。

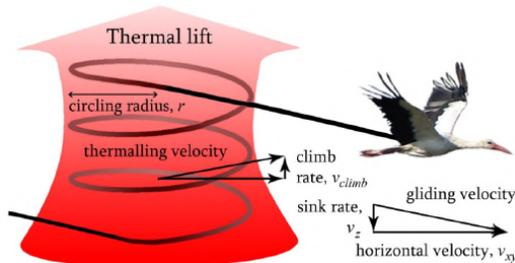


图6 猎鹰利用热流进行静态翱翔的示意图

Fig. 6 A falcon utilize thermal lift for static soaring

因为动态翱翔首先是一种机动飞行策略, 如图1所示; 其次, 无人机需要穿越风速变化的风场, 流经机翼表面的气流和机翼所受气动力处于非定常状态, 因而被冠名“动态”^[15]。动态翱翔所需的风梯度在空间中分布广泛, 持续时间较长且尺度比较稳定, 大量的生物观察、解析分析与数值计算结果都表明, 相比静态翱翔, 动态翱翔策略是无人机提升续航能力的更有效的途径^[11]。

2.2 动态翱翔的获能机理

无人机相对气流的总机械能 E_a 被定义为相对气流的动能和重力势能的总和:

$$E_a = \frac{1}{2} m V_a^2 + mgh \quad (1)$$

能量获取可以通过能量变化率来评判, 对上述总能量公式求关于时间的导数, 得到如下能量变化率或者功率表达式:

$$\dot{E}_a = m V_a \dot{V}_a + m g \dot{h} \quad (2)$$

代入气流系下的运动微分方程, 得到相对气流的总能量变化率:

$$\dot{E}_a = -D V_a - m \frac{dV_w}{dh} \sin\gamma \cos\gamma \sin^2\psi V_a^2 \quad (3)$$

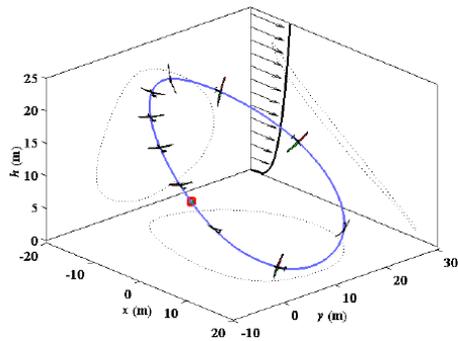
式中, 第一项的负号表明阻力总是造成总能量的损耗; 第二项是代表从风梯度中获取能量的速率, 大于零才能获取能量。假设存在正梯度风场 $dV_w/dh > 0$, 风向与 $\Psi = \pi/2$ 一致, 则无人机必须逆风爬升($0 < \gamma < \pi/2$, $-\pi < \Psi < 0$)或者顺风下滑($-\pi/2 < \gamma < 0$)。

为了将这两种获取能量的飞行模式连接起来, 还需要两个过渡飞行模式, 即高空转向和低空转向, 形成一个动态翱翔周期。不同的转向方向与模式组合可以形成不同的周期模式, 如图7所示。如果从风场中获取的能量足以抵消整个动态翱翔周期内阻力消耗的能量, 即可实现能量闭环(energy-neutral cycle), 飞行过程可以循环往复。

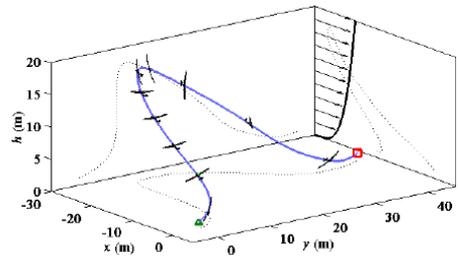
3 自主闭环动态翱翔关键技术

动态翱翔周期是三种不同闭环描述的统一, 前者体现了状态量与能量的周期性约束, 后者体现自主性:

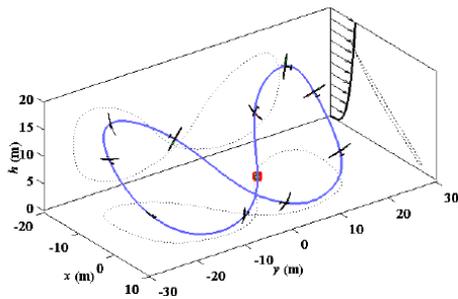
(1) 航迹闭环: 整个动态翱翔航迹呈现闭合的形态, 如图7所示, 理想的周期航迹起点和终点位置(或高度)重合、速度, 甚至姿态保持一致。



(a) O形动态翱翔航迹



(b) Ω形动态翱翔航迹



(c) 8形动态翱翔航迹

图7 动态翱翔的不同周期模式

Fig. 7 Different loop patterns of DS

(2)能量闭环:动态翱翔航迹起点和终点能量状态(高度、速度)一致,等价于周期内从风场中获取的能量抵消阻力消耗的能量。

(3)控制闭环:基于“风场感知-航迹规划-航迹跟踪”的闭环飞行控制,是动态翱翔在固定翼无人机上工程实现的技术途径,如图8所示。

自主性是无人机研究与应用的发展趋势,是无人机智能化的基础。无人机要进行自主动态翱翔,上述风场感知、航迹规划、航迹跟踪的任何一个环节必不可少,但这些环节当前并没有形成完整链条,其实时性、协同性、技术成熟度和应用能力还需不断提升,经过后续自主闭环飞行验证,才能实现无人机基于自主动态翱翔的长航时飞行。

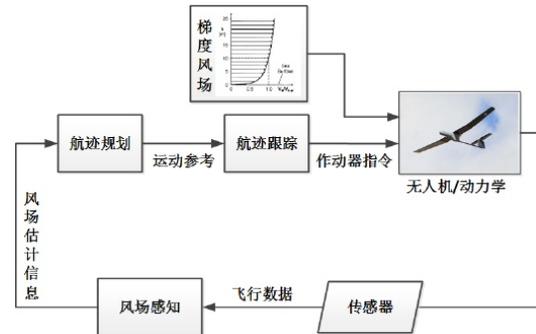


图8 自主闭环动态翱翔飞行控制框架

Fig. 8 Flight control framework for autonomous closed-loop DS

3.1 风场感知

无人机自主动态翱翔的研究大部分还停留在理论分析与仿真验证的层面上,原因是其研究建立在风场已知的假设基础上,而风场感知被大多数研究人员忽略。直到最近几年,研究人员意识到风场环境的实时感知是翱翔航迹规划与控制的前提条件,面向梯度风场利用的风场感知方法开始成为研究热点问题。Langelaan^[16, 17]指出风场估计模块应根据无人机的传感器信息结合动力学模型反推风场的实时信息,为任务决策模块与航迹规划模块提供参考。基于不同传感器配置的无人机风场感知方法和对比分析研究,将为自主翱翔的无人机提供传感器配置方案。

3.2 航迹规划

无人机(或天翁)动态翱翔过程本身是一个动态的机动飞行过程,飞行航迹是三维曲线,各个状态量都是连续变化的,随着计算机和优化算法的性能提升,大量有关动态翱翔航迹规划的研究涌现,将动态翱翔过程当作最优控制问题,而无人机在时域中的飞行最优控制问题又可转换成求解纯参数解的数值最优化问题^[18]。动态翱翔航迹优化的研究相对成熟,实时性逐渐满足机载计算机的计算能力;航迹优化的结果不仅可为航迹跟踪控制提供参考,还可用来分析动态翱翔的可行风场条件^[19],并可通过机载能量配置和关键参数敏感性分析^[20],为面向动态翱翔的无人机设计提供参考。

3.3 航迹跟踪

信天翁能根据当前所处风场环境“计算”最优航迹,并且具有高超的飞行技巧“跟踪”航迹,使其能在小范围、接近海面的狭窄高度区域做大机动飞行。然而,在极小空间内无人机要跟踪动态翱翔航

迹,并避免机身、机翼与海面(地面)发生碰撞,对导航与控制系统是严峻挑战。由于存在能量约束,航迹跟踪不仅仅是位置的跟踪,是全状态量(尤其是高度、速度)的跟踪^[21]。动态翱翔航迹跟踪控制的研究工作尚未达到飞行应用的成熟度,大部分停留在手动操控^[22]和仿真、半实物仿真^[23]验证阶段。

4 动态翱翔应用前景

4.1 技术应用前景:梯度风与其他能量结合使用

风梯度虽然在自然界中广泛分布,但是有时会出现参考风速较小导致整个风剖面梯度不足的情况,另外,高空的梯度虽然垂直范围分布大但是尺度非常小,难以单独依靠动态翱翔支撑能量闭环。这就催生了有关风梯度与其它能量联合利用的研究思路和发展趋势,可进一步拓展无人机的续航性能。其它能量包括自身携带的机载能源,也包括环境中的太阳能、重力势能、上升气流等。例如:

(1)可发电储能动态翱翔无人机:无人机上使用风车(windmill)装置^[24],如图9所示,在动态翱翔过程中,风车可由电机驱动提供推力,也可在不需推力时启动发电模式,快速的气流带动风车转动产生电能并将向储能电池充电,类似的,也可使用冲压涡轮装置给机载储能电池充电^[25],目标是实现发电电量、动态翱翔获取能量满足推进系统和阻力消耗的能量,以实现持久续航。

(2)拓展太阳能无人机的续航性能:太阳能无人机续航性能拓展的思路如图12所示,它可以通过“追日”飞行延长日照时间来增加太阳能的获取^[26],也可将冗余的能量存储在电池中供夜间使用,如果能量还有剩余,可以通过爬升高度将剩余能量“存储”到重力势能中,夜间通过无动力下滑降低高度释放能量^[27]。只需要在爬升和下滑过程中调整航向对准风速方向,满足动态翱翔获取能量姿态角条件,就可以实现顺带从风梯度中获取能量^[28]。也可在夜间有风地点进行自主动态翱翔,节省机载能源消耗,增加夜间的续航能力。

(3)动态翱翔与静态翱翔协同利用:Richardson^[29]分析了信天翁实现环球航行的奥秘就是动态翱翔和静态翱翔的协同利用,前者占主导作用,后者是辅助作用。无人机也可以联合利用水平风梯度和垂直上升气流,实现长航时远距离飞行。

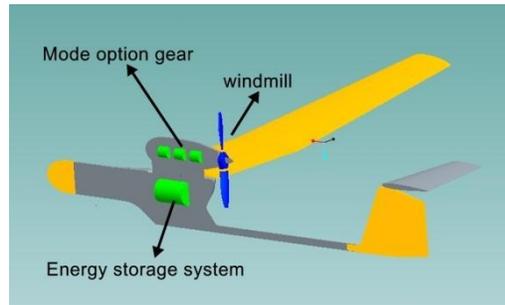
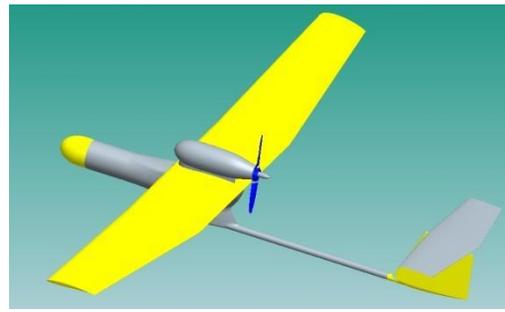


图9 可发电储能动态翱翔无人机

Fig. 9 The concept of regenerative soaring UAV

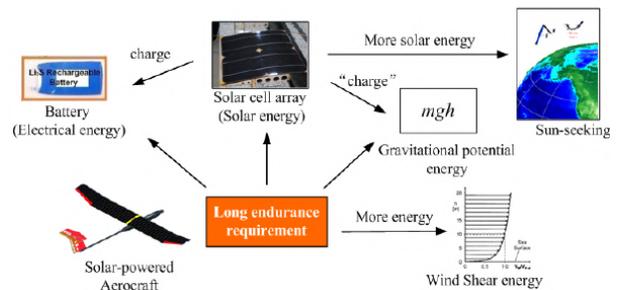


图10 太阳能无人机续航性能拓展示意图

Fig. 10 Flight endurance extension for solar-powered UAV

4.2 行业应用前景:长航时、远距离飞行任务

固定翼无人机运用动态翱翔技巧直接从风场中获取能量,减少机载电池或者燃料的消耗,实现长航时、远距离,甚至是无动力的永久飞行潜力巨大。无人机在存在风场固定地点(如山脊背风面)不断进行环形动态翱翔,可以对山谷及周边形成观测能力或者作为通信中继使用。高空利用风梯度进行长航时飞行的太阳能无人机,也适合执行指定区域驻留、通信中继等任务。当动态翱翔高低空转向作适当调整,无人机可以朝着任意方向进行动态翱翔,如图7中的 Ω 形模式,这样无人机在山脊之间的风场里穿梭机动飞行,可以执行长航时观测监控、警戒巡逻等任务;无人机可以像信天翁一样利用海面上方海浪波峰附近的梯度风场进行长时间

的动态翱翔^[11],如图11所示,可能的应用场景包括:海洋资源勘测、海洋环境监控、海洋气象监测(风、天气)、生物跟踪拍摄、反潜预警作战等等。

另外,动态翱翔无人机将是行星大气探测的一个可行方案^[30],因为许多行星大气层中存在持续的梯度风场,且具有比地球上更高的大气压和密度,

以及更小的重力加速度,这些特征对动态翱翔获取能量非常有利。相比目前的气球、小型飞艇等探测器方案,动态翱翔无人机进行行星大气探测速度快、机动性强,且能尽可能大地节省机载能量,在续航性能上具有明显优势

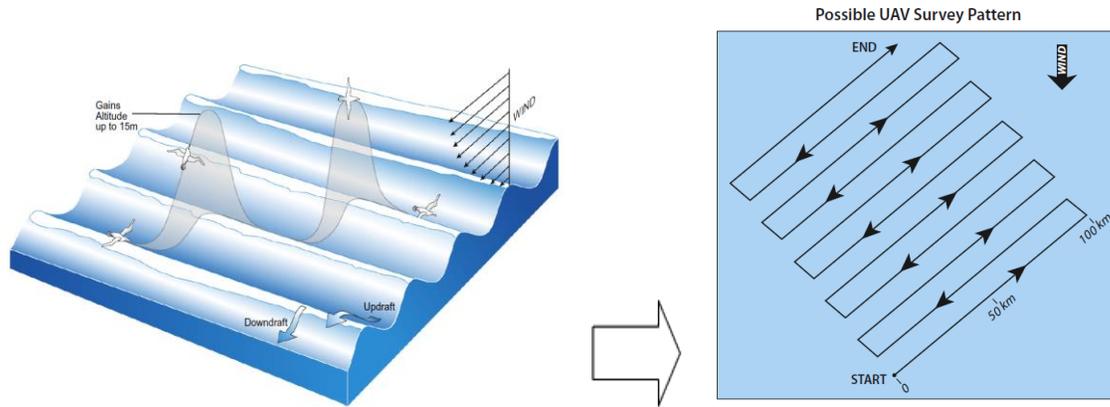


图11 动态翱翔无人机进行海洋勘测示意图

Fig. 11 Inspired by albatrosses, the DS UAV performs sea survey

5 结论

本文提出了从信天翁动态翱翔到固定翼无人长航时飞行的仿生学新愿景,对相关研究现状和应用前景进行了综述。

(1)分析了固定翼无人机从外部获取能量的各种方式,阐述了动态翱翔这一航时拓展新途径的概念内涵、内在机理。阐述了无人机动态翱翔获取的能量主要来自于爬升和俯冲过程中穿越的风梯度。分析了实现自主闭环动态翱翔的三项关键技术:风场感知、航迹规划与航迹跟踪。

(2)固定翼无人机运用动态翱翔技巧直接从风场中获取能量,从而减少机载电池或燃料的消耗;风梯度与太阳能、重力势能等的联合利用,可进一步拓展无人机的续航性能;无人机如果具备动态翱翔的飞行技巧,可在极少消耗自身能量的情况下满足各种长航时、远距离的飞行任务需求。

参 考 文 献

[1] Fravolini M L, Ficola A, Napolitano M R, et al. Development of Modelling and Control Tools for Aerial Refueling for Uavs [C] //

AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas, USA, August, 2003, AIAA Paper 2003-5798.

[2] Nugent T J, Kare J T. Laser Power for Uavs [R]. Laser Motive White Paper, Laser Motive LLC, 2010.

[3] 朱雄峰,郭正,侯中喜等. 太阳能飞行器设计域分析和总体设计方法[J]. 宇航学报, 2014(07): 735~742.

[4] Gao X, Hou Z, Guo Z, et al. Research on Characteristics of Gravitational Gliding for High-Altitude Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicles [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2012, 227 (12): 1911~1923.

[5] Sachs G. Minimum Shear Wind Strength Required for Dynamic Soaring of Albatrosses [J]. IBIS, 2005, 147: 1~10.

[6] Sachs G, Traugott J, Nesterova A P, et al. Flying at No Mechanical Energy Cost: Disclosing the Secret of Wandering Albatrosses [J]. PLoS One, 2012, 7(9): e41449.

[7] Pennycuik C J. The Flight of Petrels and Albatrosses (Procellariiformes), Observed in South Georgia and its Vicinity [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 1982, 300(1098): 75~106.

[8] 卡尔·萨菲纳. 信天翁在世界的尽头展翅翱翔[J]. 华夏地理, 2007(12): 92~101

[9] Bower G C. Boundary Layer Dynamic Soaring for Autonomous Aircraft Design and Validation [D]. Stanford, CA: Stanford University, 2011.

- [10] Gao X Z, Hou Z X, Guo Z, et al. The Influence of Wind Shear to the Performance of High-Altitude Solar-Powered Aircraft [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2013, 228(9): 1562~1573.
- [11] Richardson P L. Upwind Dynamic Soaring of Albatrosses and Uavs [J]. Progress in Oceanography, 2015, 130: 146~156.
- [12] Rayleigh J W S. The Soaring of Birds [J]. Nature, 1883, 27: 534~535.
- [13] 吴子牛. 空气动力学(上册)[M].北京:清华大学出版社, 2007: 79~80.
- [14] Ákos Z, Nagy M, Leven S, et al. Thermal Soaring Flight of Birds and Unmanned Aerial Vehicles [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2010, 5: 45003.
- [15] Gao C, Liu H H T. Dynamic Soaring Surveillance in a Gradient Wind Field [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Boston, MA, USA, 19~22 [August, 2013, AIAA Paper 2013-4863.]
- [16] Langelaan J W. Long Distance / Duration Trajectory Optimization for Small Uavs [C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Hilton Head, South Carolina, August 20~23, 2007, AIAA Paper 2007-6737.
- [17] Langelaan J W, Alley N, Neidhoefer J. Wind Field Estimation for Small Unmanned Aerial Vehicles [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2011, 34(4): 1016~1030.
- [18] Hull D G. Conversion of Optimal Control Problems Into Parameter Optimization Problems [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1997, 20(1): 57~60.
- [19] Liu D-N, Hou Z-X, Guo Z, et al. Permissible Wind Conditions for Optimal Dynamic Soaring with a Small Unmanned Aerial Vehicle [J]. CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2016, 111(6): 531~565.
- [20] 刘多能. 固定翼无人机动态滑翔机理与航迹优化研究[D].长沙: 国防科技大学, 2016.
- [21] Deittert M, Richards A, Toomer C A, et al. Dynamic Soaring Flight in Turbulence [C]// AIAA Guidance Navigation and Control Conference, Chicago Illinois, 10~13 [August, 2009, AIAA Paper 2009-6012.]
- [22] Sukumar P P, Selig M S. Dynamic Soaring of Sailplanes Over Open Fields [J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(5): 1420~1430.
- [23] Bird J J, Langelaan J W, Montella C, et al. Closing the Loop in Dynamic Soaring [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, National Harbor, Maryland, 13~17 [January, 2014, AIAA Paper 2014-0263.]
- [24] Gao X, Hou Z, Guo Z, et al. Energy Extraction From Wind Shear: Reviews of Dynamic Soaring [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2015, 229(12): 2336~2348.
- [25] Grenestedt J L, Spletzer J R. Optimal Energy Extraction During Dynamic Jet Stream Soaring [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Toronto, Ontario Canada, 2~5 [August, 2010, AIAA Paper 2010-8036.]
- [26] Zhu X, Hou Z, Zhang J, Liu Duoneng, Zhu Bingjie. Sun-seeking Eternal-flight of Solar-powered Airplane [J]. ASCE: Journal of Aerospace Engineering, 2014, 27(5): 06014004.
- [27] 朱雄峰. 基于广义能量的太阳能飞行器总体设计研究[D].长沙: 国防科技大学, 2014
- [28] Sachs G. Optimum Trajectory Control for Loiter Time Increase Using Jet Stream Shear Wind [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, California, 15~18 [August, 2005, AIAA Paper 2005-6473.]
- [29] Richardson P L. How Do Albatrosses Fly Around the World without Flapping their Wings? [J]. Progress in Oceanography, 2011, 88: 46~58.
- [30] Lawrence N R J. Autonomous Soaring Flight for Unmanned Aerial Vehicles [D]. Sydney, Australia: The University of Sydney, 2011.

作者简介:

刘多能(1986-),男,博士,工程师,主要研究方向为智能飞行控制。

卢风顺(1982-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为计算流体力学。

杨添琦(1986-),女,博士,助理研究员,主要研究方向为导航制导与控制。

郝瑞(1989-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为飞行器总体设计。

秦诗牧(1995-),男,硕士,研究实习员,主要研究方向为计算流体力学。通信作者:qinshimu@cardc.cn

基于DoDAF的蜂群无人机远海作战概念描述

张庆杰, 陈彪

(空军航空大学, 吉林长春 130022)

摘要: 无人机蜂群作战具有慢打快、多打一、廉打贵等优点,是当前研究热点问题之一。本文以蜂群无人机对海作战为背景,参照DoDAF 2.0体系架构系中作战视角、系统视角和能力视角模型,研究蜂群无人机远海作战概念的客观描述方法。首先,建立高级作战概念图、组织关系图、作战活动分解树和状态转换模型;其次,从系统功能和信息交互角度,建立接口模型和功能描述模型;最后,面向作战活动从需求角度考虑,给出活动-能力映射图和能力-资源映射图。作战概念描述模型能够为后续作战概念科学评估和装备技术发展提供参考依据。

关键词: 蜂群无人机; 作战概念; DoDAF 2.0; 作战视角; 能力视角; 系统视角

Concept Description of Swam UAVs Operation in Open Sea Based on DoDAF

ZHANG Qingjie, CHEN Biao

(Aviation University of Air Force, Changchun Jilin 130022, China)

Abstract: Swam UAVs operation is one of the hot issues in current research, which has the advantages of slow velocity, more scales and low cost. Based on the background of sea combat of swam UAVs, the objective concept description method is discussed using DoDAF 2.0 architecture, including the combat perspective, system perspective and capability perspective. Firstly, the high-level operational concept graphic, organization relationship chart, operational activity decomposition tree and state transition model are established; Secondly, the system interface model and the function description model are established in view of the perspective of system function and information interaction; Finally, the capability to operational activities mapping and the capability to services mapping are given from the perspective of operational requirements. The operational concept description model can provide reference for the scientific evaluation of operational concept and the development of equipment technology.

Key words: Swam UAVs; Operational Concept; DoDAF 2.0; Operational Perspective; Ability Perspective; System Perspective

1 引言

无人机蜂群作战在近来的战争行动中暂露头角:2018年1月,驻叙利亚俄罗斯军事基地遭受多批次13架无人机蜂群攻击。2019年9月,沙特油田遭到10架无人机低空攻击。2020年9月,阿亚战争中使用大量无人机群突防并消灭地面防空火力。上述战例表明,蜂群无人机作战在未来战场中将扮演更重要的角色。

随着战争形态和武器装备的不断发展,需要考虑蜂群无人机作战样式,以应对更为复杂的作战环

境和战场态势。近年来,美国相继开展了拒止环境中协同作战^[1]、小精灵^[2]、蝗虫^[3]、山鹑^[4]等项目,国内的电科院^[5-6]、清华大学^[7-9]、国防科技大学^[10-11]等单位也开展了蜂群无人机应用研究。从目前的研究情况来看,无人机集群技术还属于探索研究阶段,关注的重点集中在导航、规划、控制和通信技术,缺少对抗条件下蜂群无人机应用场景的探讨。

本文将以前述蜂群无人机远海作战为背景,借助DoDAF 2.0工具,从系统作战视角、系统视角和能力视角三个维度对作战概念进行描述,为后续开展

作战概念推演和实验验证提供客观依据,为机制体制、装备建设、技术创新、人才储备等发展规划提供需求牵引。

2 DoDAF 2.0标准简介

DoDAF 是美国国防部制度结构框架 (Department of Defense Architecture Framework) 的缩写,DoDAF 2.0 原文第1卷中给出定义:一个顶层、全方位的框架和概念模型,它可以使管理人员能够突破国防部、联合能力领域、任务、使命、部门或方案等多个层级的界限,实现有序地进行信息资源共享,提升决策能力。DoDAF 架构已经广泛用于作战概念和系统结构建模研究,比如反导作战^[12]、对海作战^[13-14]和有人无人协同作战^[15]等领域。

DoDAF 在系统结构描述、作战活动分析等方面具有一定优势,先后经过1.0、1.5到2.0三个版本阶段的发展。其中,DoDAF 2.0版本通过八个不同视角对系统管理体系和系统结构特征进行描述,共52个模型。表现形式为表格型、结构型、行为型、映射型、本体型、图片型和时间进度型,这些表现形式大致可划分为三类,静态、动态和映射,详见图1。其中,静态体现组成或相互关系,动态反应了作战过程、状态变化和时间序列,映射描述了能力、作战方式、体系间的相互支撑关系。

表现形式 视角	表格型	结构型	行为型	映射型	本体型	图片型	时间进度型
全景视角	AV-1				AV-2		
能力视角	CV-1	CV-4		CV-6 CV-7	CV-2		CY-3 CY-5
作战视角	OV-3	OV-2 OV-4	OV-6a OV-6b OV-6c		OV-5a OV-5b	OV-1	
系统视角	SV-6 SV-7 SV-9	SV-1 SV-2	SV-4 SV-10a SV-10b SV-10c	SV-3 SV-5a SV-5b			SV-8
标准视角	StdV-1 StdV-2						
数据视角		DIV-1 DIV-2 DIV-3					
服务视角	SvcV-6 SvcV-7 SvcV-8	SvcV-1 SvcV-2	SvcV-4 SvcV-10a SvcV-10b SvcV-10c	SvcV-3a SvcV-3b SvcV-5			SvcV-8
项目视角		PV-1		PV-3			PV-2

图1 DoDAF 2.0分类模型

Fig. 1 DoDAF2.0-described models categorized by type

本文选取 DoDAF 2.0 标准中的三个视角,即作战视角、系统视角和能力视角对蜂群无人机作战概

念进行逻辑分组描述,期望从实用性和可理解性的角度更好地展示作战概念。

3 作战视角

作战视角用于指导和实施作战过程中必须考虑到的任务、活动以及其它作战因素,主要描述组织、任务或活动,作战单元间交换的信息以及信息类型、频率等内容。

3.1 OV-1高级作战概念图

OV-1 高级作战概念图可以用来描述作战目标、作战节点和作战行为,有利于建立作战活动关系以及输入输出信息。本文以无人机牵制单航母战斗群作战为背景,描述蜂群无人机远海作战概念。无人机由运输机平台挂载至航母防控火力外圈投放。进入任务区后,组机群通过自组网通信或无线电静默方式,突破敌方中程防御区,对目标实施侦察、干扰、攻击和评估,并将情报数据发送至指挥机构,实现火力引导。根据上述想定背景,图2给出了高级作战概念图。

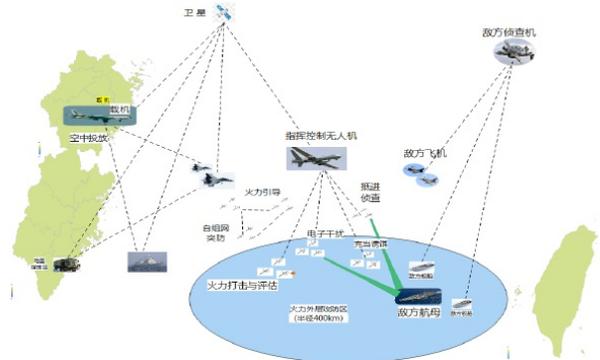


图2 OV-1高级作战概念图

Fig. 2 OV-1 high-level operational concept graphic

任务区内,蜂群无人机以分组形式执行任务,主要包括:

①抵近侦察。携带光电侦察装备和通信侦察设备飞抵指定任务空域,实施抵近式侦察,为后续提供情报支援。

②电子干扰。借助反应式干扰装置,实现对海面防空系统雷达站、火控观瞄装置和精确制导武器干扰、压制和破坏能力,为其它战斗力量提供尽可能的掩护。

③火力打击。携带不同类型设备和弹药,对敌

海上舰船预警雷达和重要指挥单元进行定位和火力打击。

④火力引导。火力打击后,启动光电侦察设备对目标打击效果评估,为有人作战飞机实施火力引导。

3.2 OV-4组织关系图

在高级作战概念图的基础上,可以用OV-4组织关系图用来描述作战行动中指挥机构和作战单元间的指挥关系。

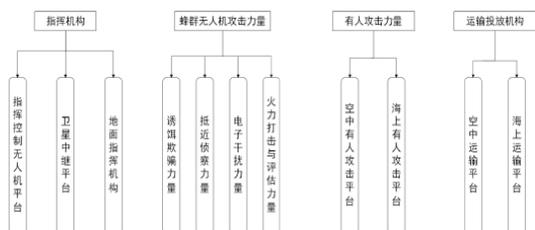


图3 OV-4组织关系图

Fig. 3 OV-4 organizational relationships chart

图3给出了蜂群无人机远海作战概念组织关系图,包含指挥机构、蜂群无人机攻击力量、有人攻击力量和运输投送机构内部组成及其关系。其中,指挥机构包括指挥控制无人机平台、卫星中继平台和地面指挥机构。按照任务想定,指挥机构收集预警信息并通过卫星中继传输,将指挥信息传达给空中运输平台和指挥控制无人机;蜂群无人机攻击力量是作战的主体力量,由诱饵欺骗力量、抵近侦察力量、电子干扰力量和火力打击与评估力量组成,在指挥控制无人机的指挥下,通过自组网方式突防,对敌实施抵近式侦察或攻击;有人攻击力量是辅助作战力量,包括空中和海上作战平台;运输投送机构主要用于投放回收蜂群无人机,包括空中和海上运输平台。按照既定任务和指挥信息,空中运输平台在合适的时间及空间投放蜂群无人机,有人机全程对运输平台护航,直至运输投送机构离开作战区域。

3.3 OV-5a作战活动分解树

从作战活动描述角度来说,蜂群无人机远海作战行动可分解为作战协同行动、无人机蜂群行动和指挥控制行动,见图4。

进一步,可以细化上述三个作战行动。作战协同行动可分解为运输投送行动、作战支援行动和信

息协同行动;蜂群无人机行动是核心,根据作战任务类型不同,可分解为空中诱饵行动、组网突防行动、空中侦察行动、空中攻击行动、空中干扰行动和火力引导行动,行动编组方式由作战目的和任务决定;按照领域区分细化指挥控制行动,包括地面决策指挥、空中决策指挥、海上协同作战和中继平台配合。

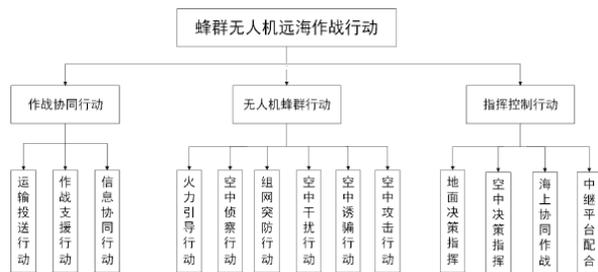


图4 OV-5a作战活动分解树

Fig. 4 OV-5a operational activity decomposition tree

3.4 OV-6b状态转换模型

在明确蜂群无人机指挥层级和作战行动后,可以采用OV-6b作战状态转换模型描述作战动态过程、体现系统运转方式,见图5。

①侦察预警。在战前准备阶段,要通过各种手段收集掌握敌方信息;在实施过程中,密切关注敌方活动情况,为指挥控制协调行动提供依据。

②指挥判断。基于敌方作战意图和态势信息进行判断,为指挥蜂群无人机作战行动提供决策依据。

③决策部署。综合考虑作战任务、主要兵力和指挥协同关系,确定作战决心。在充分酝酿和周密谋划的基础上,拟定作战方案,制定协同计划。

④综合协调。协调控制侦察预警持续掌握敌方活动情况,实时调动其它攻击力量配合。

⑤协同攻击。在实施阶段,指挥员发起联合进攻命令,发起蜂群无人机诱饵、突防、侦察、攻击、干扰和火力引导行动。

⑥战绩评判。对攻击性效果进行综合分析和评判,确定对敌对抗性效果。

若达到目标,或者需要停止对抗行动,则结束作战行动;若没有达成,或需要继续实施,则需要确定下一轮蜂群无人机行动计划。

- [9] 王华鲜,华容,刘华平,赵怀林,孙富春. 无人机群多目标协同主动感知的自组织映射方法[J]. 智能系统学报, 2020, 15(03): 609-614.
- [10] 王祥科,陈浩,陈述龙. 大规模固定翼无人机集群编队控制方法研究[J/OL]. 控制与决策: 1-10. 2021-07-10.
- [11] 王祥科,刘志宏,丛一睿,李杰,陈浩. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. 航空学报, 2020, 41(04): 20-45.
- [12] 李龙跃,刘付显. DoDAF视图下的反导作战军事概念建模与仿真系统设计[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(05): 76-80.
- [13] 彭耿,周少平,刘磊. 基于DoDAF的侦察卫星支援对海打击作战视图研究[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(04): 71-74.
- [14] 刘丽君,涂天佳. 基于DoDAF作战视图的无人直升机协同对海作战建模分析[J]. 电子技术与软件工程, 2018(03): 129-131.
- [15] 周菁,杨鸣坤,王磊,齐飞林. 基于DoDAF的有/无人协同特战系统总体结构设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(01): 3-7.
电话: 18604402895 E-mail: nudtzhang@hotmail.com

作者简介:

张庆杰(1981-),男,博士,副教授,主要研究方向为智能无人机系统技术。

陈彪(1999-),男,学士,助理工程师,主要研究方向为兵棋推演技术。

基于生态公共品博弈的智能化进程中在轨卫星 闲置情况演化建模方法

詹俊, 张万鹏, 罗俊仁, 陈诗凯

(国防科技大学智能科学学院, 长沙410073)

摘要: 针对智能化进程中卫星资源闲置情况如何演化的问题, 开展卫星种群演化动力学建模研究。考虑种群规模的动态变化对个体收益的影响, 将有效利用卫星和闲置卫星之间的交互建模为生态公共品博弈。利用演化博弈理论, 考虑平均收益、增长空间和淘汰速度对演化轨迹的影响, 建立卫星种群演化动力学模型, 展现有效利用个体、闲置个体和剩余增长空间的动态变化。通过仿真试验和理论分析, 得出在该演化动力学模型中低密度的种群更有利于合作产生的结论。同时通过对比实验发现高的淘汰虽然能增大稳态下卫星种群的合作率, 但是也增大了种群灭绝的风险。

关键词: 资源闲置; 卫星种群; 演化博弈理论; 生态公共品博弈; 演化动力学; 合作

The Evolution of Satellite Populations in the Process of Intelligent Based on Ecological Public Goods Games

ZHAN Jun, ZHANG Wanpeng, LUO Junren, CHEN Shikai

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha410073, China)

Abstract: Aiming at the problem of how the idle satellite resources evolve in the process of intelligent, we research the evolutionary dynamics of satellite population. Considering the impact of dynamic in population size on individual income, the interaction between effective used satellites and idle satellites is modeled as an ecological public goods game. Using evolutionary game theory, considering the influence of average income, growth space and elimination speed on the evolution trajectory, a evolution dynamics model is established to show the changes of effective used individuals, idle individuals and remaining space. Through simulation experiments and theoretical analysis, it is concluded that low-density populations in the evolutionary dynamics model are more conducive to cooperation. At the same time, it is found through comparative experiments that although high elimination can increase the cooperation rate of satellite populations under steady state, it also increases the risk of population extinction.

Keywords: Idle Resources; Satellite Population; Evolutionary Game Theory; Ecological Public Goods Game; Evolutionary dynamics; cooperation

1 引言

目前烟囱式的应用服务体系导致天基系统粗放式发展模式, 各子系统独立设计建设导致子系统之间重复设计的问题。并且冗余设计的思想和远景规划思路造成了在轨卫星数量超过当前实际的需要。因此, 虽然目前在轨卫星的总量非常庞大但是不同轨道的卫星资源配备不合理, 有些轨道的卫星数量不足不能满足任务需要, 而有些轨道上的卫星数量超过任务需要出现在轨卫星闲置的情况。

卫星资源的闲置不仅是对国家财政的浪费, 而且增加了系统运行管理的成本, 是天基系统智能化过程中急需解决的问题。

随着技术进步, 能够自主在轨运行的智能化卫星是未来的发展趋势, 借助天地一体化信息系统^[1]完成多星协作实现对任务的实时响应。对此研究人员提出了许多前沿的想法。针对目前卫星功能定制智能化水平低的问题, 文献^[2]提出了一种叫iSAT的智能化卫星, 实现一星多能、组网协同和智能服务。文献^[3]提出了星群的概念, 大量的小卫星

以生物群落的方式运行,提供更加灵活多样的服务能力。毋庸置疑天基系统的硬件架构将经历类似于生物种群交替演化的过程,目前“平台+载荷”式的卫星随着使用寿命的耗尽逐渐被智能化的卫星所取代。

在系统运行过程中,有效利用的卫星付出消耗星上资源的成本获得探测信息的收益,而闲置的卫星虽然没有付出任何成本却依然能从整体任务的完成中分得收益,成为了“搭便车者”。两者的交互其实是一种群体中的合作困境。

演化博弈论^[4]为群体中的合作困境提供了分析和解决问题的框架。合作是一种非常普遍的现象,无论是在病毒^[5]微观活动中还是在人类的生产活动^[6]中,我们都可以看到个体为了集体的收益而做出牺牲。但是根据博弈论个体都是理性的,获得最多的利益是一种很自然的选择,那么合作这种利他的行为是怎么出现的呢?为了解释这个问题,研究人员将生物演化理论和博弈论相结合,提出了演化博弈理论。演化博弈论对于理解和解决现实生活中的问题起到了非常重要的作用,如疾病传播^[7]、资源分配^[8],以及像气候变化^[9-10]这样紧迫的挑战。演化动力学^[11]通过微分方程分析合作演化动态,是演化博弈论中常用的理论分析方法。文献^[12]通过建立疏散过程中人群行为的微分方程研究紧急状态下人群的行为。文献^[13]利用演化动力学研究电力招标市场中的行为决策。文献^[14]将演化动力学应用到网络拓扑结构分析中,解决网络科学中的维数诅咒困境。

研究合作问题的传统方法假定群体规模不变,因此忽略了相互作用个体的数量变化所导致的博弈收益非线性变化给群体合作带来的影响。生态演化动力学^[15]将生态动力学与演化博弈论相结合,研究个体数量动态变化条件下群体中维持合作的机制。文献^[16]将惩罚机制引入生态演化动力学中,研究个体数量动态变化的环境下的合作机制。文献^[17]通过建立生态演化动力学方程,研究收益非线性变化下的社会困境问题。

本文利用演化博弈理论建立卫星种群演化动力学模型,研究在卫星技术迭代过程中有效利用卫星和闲置卫星占比的动态变化,以期望能减少闲置卫星的比例达到提高卫星资源利用率的目的。

2 合作演化动力学建模

2.1 博弈模型

天基系统的运行具有很强的动态性,卫星在特定的轨道上运行,卫星之间的可见性关系动态变化。因此,卫星之间的交互关系处于不断变化之中。假设受通信能力和可见性关系的制约,每颗卫星最多能与其他 $N - 1$ 颗卫星交互,则在运行过程中天基系统不断形成规模为 N 的交互组以完成相应的任务。我们将天基系统中所有的在轨卫星称作卫星种群,其中得到有效利用的卫星称为合作者,闲置的卫星称为背叛者。在完成任务时合作者消耗存储资源、动力资源等星上资源,这会缩减卫星的寿命是完成任务所付出的成本。我们将合作者为完成任务付出的成本记作投资 i 。而背叛者则不付出成本。获得的收益平均分给交互组中所有的个体。此外,天基系统的演化过程中,卫星的数量也将动态变化。为了反映天基系统的动态性特点,我们将这种有效利用的卫星和闲置的卫星之间的交互建模为一个生态公共品博弈,卫星数量的动态变化将对个体收益产生影响。因为卫星之间的协同将产生协同效应,如星间协同在探测时长、跟踪效果和获得的探测信息质量上都远高于单星的效果,所以一个交互组整体的收益是所有合作者投资总和的 r 倍, r 称为增益因子。同时增益因子满足约束关系 $1 < r < N$ 。

○ 空余位置 ● 合作个体 ● 背叛个体

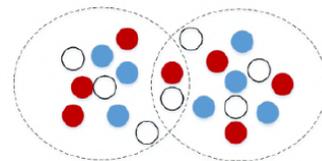


图1 卫星种群示意图

Fig. 1 Schematic diagram of satellite population

随着技术的进步,卫星种群中个体按一定的速度淘汰,这个速度称为死亡速度记为 d 。在该卫星种群中合作者的比例记为 x ,背叛者的比例记为 y 。因为空间碎片和频段干扰等因素的存在,临近空间容纳的卫星规模是有限的。为了反映容纳空间的有限性,我们记种群中空余位置的比例为 z ,新的个

体只能在空余位置上产生。空余位置不付出成本也不分享收益,仅表示剩余的空间容量。并且三种个体比例满足关系 $x + y + z = 1$ 。卫星种群组成示意图如图 1 所示。上述博弈模型中的参数如下所示:

N ——交互组规模大小,表示卫星交互能力的上限;

r ——增益因子;

d ——个体死亡速度,反映旧技术卫星淘汰的速度;

x ——种群中合作者的比例,即有效利用的卫星的比例;

y ——种群中背叛者的比例,即闲置的卫星的比例;

z ——种群中空余位置的比例,即剩余空间容量的比例。

2.2 种群演化动力学

假设卫星种群是一个混合均匀的群体,即选取某类个体的概率等于该类个体在种群中所占的比例。因为产生新的个体只能发生在空余空间,因此种群中的出生率跟空余位置的比例成正比。种群中各个体比例的动力学模型如下所示:

$$\dot{x} = x(zf_c - d) \quad (1)$$

$$\dot{y} = y(zf_b - d) \quad (2)$$

$$\dot{z} = -\dot{x} - \dot{y} = (x + y)d - z(xf_c + yf_b) \quad (3)$$

上述动力学模型中 f_c 和 f_b 分别表示种群中合作者和背叛者的平均收益,收益越高的个体其出生率越高。反映在卫星种群演化更替中,收益越高的轨道上将补充越多的新卫星。平均收益 f_c 和 f_b 由卫星种群中各交互组的公共品博弈情况决定。因为是混合均匀的群体,所以这些交互组有某种类型个体的概率由比例 x, y, z 决定。而空余位置是不参与公共品博弈的,所以博弈个体发现自己处于大小为 S 的公共品博弈中的概率为:

$$\binom{N-1}{S-1} (1-z)^{S-1} z^{N-S} \quad (4)$$

其中 $S \leq N$ 。如果一个博弈个体发现自己在一个 S 大小的生态公共品博弈中,它可能会在与 $S-1$ 个其他个体的博弈中面对 m 个合作者和 $S-1-m$ 个背叛者的概率是:

$$\left(\frac{x}{1-z}\right)^m \left(\frac{y}{1-z}\right)^{S-1-m} \binom{S-1}{m} \quad (5)$$

因此,在一组规模为 S 的公共品博弈中,焦点个体是背叛者和合作者时的平均收益为:

$$P_D(S) = \frac{ri}{S} \sum_{m=0}^{S-1} \left(\frac{x}{1-z}\right)^m \left(\frac{y}{1-z}\right)^{S-1-m} \binom{S-1}{m} m \quad (6)$$

$$= ri \frac{x}{1-z} \left(1 - \frac{1}{S}\right)$$

$$P_C(S) = P_D(S) + \frac{ri}{S} - i \quad (7)$$

用等式(4)描述的概率给出权重,取所有可能的生态公共品博弈规模为 S 的加权平均值,得出背叛者和合作者的平均收益为:

$$f_D = \sum_{S=2}^N \binom{N-1}{S-1} (1-z)^{S-1} z^{N-S} P_D(S) \quad (8)$$

$$f_C = \sum_{S=2}^N \binom{N-1}{S-1} (1-z)^{S-1} z^{N-S} P_C(S) \quad (9)$$

求和计算后得到:

$$f_D = ri \frac{x}{1-z} \left(1 - \frac{1-z^N}{N(1-z)}\right) \quad (10)$$

$$f_C = f_D - F(z) \quad (11)$$

其中 $F(z) = i + (r-1)iz^{N-1} - \frac{ri}{N} \frac{1-z^N}{1-z}$

2.3 种群密度与合作率演化动力学

为了分析闲置卫星在天基系统中的占比变化情况以及整个卫星种群的演化情况,我们引入合作率 q 和种群密度 u 两个变量。具体值如下式所示:

$$q = x/(x+y) \quad (12)$$

$$u = 1-z \quad (13)$$

合作率表示参与生态公共品博弈的个体中合作个体占有所有个体的比例,也就是天基系统中有效利用的卫星占有所有卫星的比值。这个值越大说明闲置的卫星比例越小,对卫星资源的利用率越高。种群密度越大说明剩余的发展空间越小。根据新变量重写等式(1)–(3)得:

$$\dot{q} = \frac{\dot{x}y - y\dot{x}}{(1-z)^2} = -zq(1-q)F(z) \quad (14)$$

$$\dot{u} = -\dot{z} = (1-z)(qz(r-1)(1-z^{N-1}) - d) \quad (15)$$

3 仿真结果与分析

3.1 同构交互组

在分析卫星种群演化动力学时,我们首先分析

交互组里只有合作者和只有背叛者这两种特殊情况。当种群中只有背叛者的时候,因为没有合作者的投入所以交互组的总收益为0,因此背叛者的平均收益 $f_D = 0$ 。根据等式(2)可知此时 $\dot{y} < 0$,所以种群中的个体数量将不断减少直至灭绝。

当种群中只有合作者的时候,种群中个体的平均收益为 $f_C = i(r-1)(1-z^{N-1})$ 。 $\dot{x} = 0$ 的根是此时系统的平衡点,由于博弈参数 N, r, d 的不同,系统中这样的平衡点有1到3个。种群演化的最终结果由死亡速度 d 和出生速度 zf_C 之间的大小关系决定。记 $d_{max} = \max_{z \in [0, 1]} zf_C$, 计算可得 $d_{max} = i(r-1)(N-1)N^{-N(N-1)}$ 。当 $d > d_{max}$ 时,死亡速度 d 一定大于出生速度 zf_C ,那么此时 $\dot{x} < 0$,种群将灭绝。当 $d < d_{max}$ 时,对于足够大的初始种群密度 x_0 合作可以持续。如果 x_0 太小,因为缺少足够的互动公共品博弈互动带来的收益将不足以防止种群灭绝。

3.2 异构交互组

在异构交互组中,种群里既有合作者也有背叛者,其动力学演化在 $q \in [0, 1]$ 和 $u \in [0, 1]$ 形成的二维图表中进行,如图2所示。边界 $q = 0$ 和 $q = 1$ 分别代表上面讨论的两种同构的交互组情况,也就是图2中演化轨迹图的上下边界。边界 $u = 0$ 是种群灭绝的情况,如图2演化轨迹图的左边界所示其上的半圆黑色点表示种群灭绝时的稳定位置。边界 $u = 1$ 表示种群密度最大的情况,如图2演化轨迹图的右边界所示由于此时整个的空间已经饱和和无法生成新的个体,所以 $\dot{u} < 0$,种群的密度将下降。

3.3 仿真结果

取参数值 $N = 9, r = 3$ 在不同死亡速度 $d = 0.3$ 和 $d = 0.9$ 下对卫星种群演化模型进行仿真分析,结果如图2所示。

从演化轨迹中可以看出:

(1)低种群密度有利于合作的产生,而高种群密度不利于合作的产生进而导致种群密度的下降。在图2虚线左边,种群的密度较低,无论在何种初始状态下演化轨迹均向合作率提高的方向演进。而在虚线右边,种群密度较高,无论在何种初始状态下演化轨迹均向合作率降低的方向演进。而且因为合作率降低,合作个体的比例减小,生态公共

品博弈交互中产生的收益减少不足以支持种群的增长,所以不论在何种初始状态下种群密度都将降低。

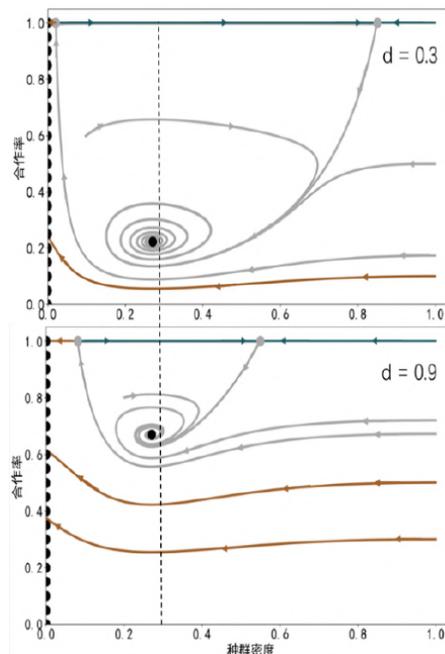


图2 不同死亡速度下的演化轨迹图

Fig. 2 Evolution trajectory diagram under different death speeds

(2)如图2中上下两个黑色实心点所示,高的死亡速度虽然提高了混合均衡下种群的合作率,但是也增加了种群灭绝的风险。图中黄色的演化轨迹表示种群最终将灭绝,上下两张图对比可以看出,下面死亡速度大的图中可能会灭绝的面积明显大于上面的图。

3.4 结果分析

在相互作用的群体中,生态公共产品博弈中合作者和背叛者的动态是由他们在随机形成的包含 M 个个体的相互作用组中各自获得的收益决定的。因此,任何给定的焦点个体发现自己与 $M-1$ 其他个体处于一个群体中。如果 x 是群体中合作者的比例,那么 $M-1$ 个其他个体中有 K 个合作者的概率为:

$$\binom{M-1}{k} x^k (1-x)^{M-1-k} \quad (16)$$

这个概率与焦点个体是合作者还是背叛者无关。因此,每个焦点个体都会遇到相同数量的合作者,因此在博弈互动过程中,焦点个体从其他合作

者的投资中获得的预期收益相同。由此可见,在混合良好的公共产品博弈中,成功的唯一决定因素是焦点个体从自身的投资中获得的回报。如果焦点个体是背叛者,这个收益为0。如果焦点个体是合作者,这个收益等于 $(r/M - 1)i$ 。当 $r > M$ 时,合作者从自身的投资中获得正收益,此时公共产品博弈所带来的困境得到缓解合作占主导地位。这一结论也可以从等式(7)中得到印证。由等式(7)可知:

$$P_c(S) - P_d(S) = \frac{ri}{S} - i \quad (17)$$

当 $r > S$ 时,即公共品博弈的增益因子大于有效群体规模,合作者的平均收益将大于背叛者的平均收益,那么合作将得到支持。

如果生态公共物品博弈是在不同密度的群体中进行的,那么相互作用的有效群体规模 S 也是不同的。种群密度大时有效群体规模 S 也比较大,此时 $r < S$ 合作者的平均收益小于背叛者导致合作者的比例减小。而背叛者多的群体收益很低不足以支持种群密度的增长,因而种群密度开始下降。当种群密度逐渐降低时,有效相互作用群体的规模也降低,直到最终 $r > S$ 成立合作得到支持。因此,种群密度大会有利于背叛者,导致种群密度下降,进而有利于合作。合作的稳定性在这种动态的过程中得以维持。

此外,从等式(1)和等式(2)可以看出死亡率 d 越大,则个体维持正增长所需要收益就越高。所以在死亡率比较大的情况下,只有在合作率和种群密度比较高的初始状态,种群才可能避免灭绝的最终演化结果。

4 结论

本文针对天基系统智能化无人化进程中卫星种群演化问题,建立演化动力学模型,分析在新旧型号卫星替换过程中卫星资源闲置情况的动态演化过程,并得出了下面主要结论:

(1) 建立平均收益、增长空间和死亡速度为核心的演化动力学模型,分析卫星种群中有效利用的卫星和闲置卫星的占比动态演化情况,发现低种群密度有利于提高种群的合作率,即演化轨迹朝着卫星利用率提高的方向发展。

(2) 通过对比不同死亡速度下的演化情况发现高死亡速度虽然使得卫星种群稳态下的合作率得到了提升,但是也导致种群更容易走向灭绝,也就是说淘汰速度过快会增大卫星种群毁灭的风险。

参 考 文 献

- [1] 闵士权. 我国天基综合信息网构想[J]. 航天器工程, 2013, 22(005):1-14.
- [2] 秦浩. 天基网络智能卫星(iSAT)关键技术研究[D]. 国防科技大学, 2017.
- [3] Gill E. Together in space: potentials and challenges of distributed space systems. Delft University of Technology, 2008.
- [4] 胡灵慧. 基于公共品博弈模型的复杂网络演化博弈动力学研究[D]. 电子科技大学, 2020.
- [5] Nee S. Mutualism, parasitism and competition in the evolution ofcoviruses [J]. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences, 2018, 2000年355卷1403期(1403):1607-13页.
- [6] Turney P D. Major Cooperative Transitions and Management Theory in the Game of Life. 2021.
- [7] Perra, Nicola, Bauch, et al. Statistical physics of vaccination[J]. Physics Reports A Review, 2016.
- [8] Shirado H, Iosifidis G, Tassiulas L, et al. Resource sharing in technologically defined social networks [J]. Nature Communications, 2019, 10(1).
- [9] Vasconcelos V V, Santos F C, Pacheco J M. A bottom-up institutional approach to cooperative governance of risky commons [J]. Nature Climate Change, 2013, 3(9):797-801.
- [10] Wang Z, Jusup M, Guo H, et al. Communicating sentiment and outlook reverses inaction against collective risks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(30):201922345.
- [11] Hofbauer J, Sigmund K. Evolutionary game dynamics[J]. Bulletin of the American Mathematical Society, 2003, 40.
- [12] Mason D M, Stella L, Bauso D. Evolutionary Game Dynamics for Crowd Behavior in Emergency Evacuations[J]. IEEE, 2020.
- [13] Zeng K, Cheng L, J Liu, et al. Two-population Asymmetric Evolutionary Game Dynamics-based Decision-making Behavior Analysis for A Supply-side Electric Power Bidding Market [J]. E3S Web of Conferences, 2020, 194(1):03009.
- [14] Shi L, Shen C, Shi Q, et al. Recovering Network Structures Based on Evolutionary Game Dynamics Via Secure Dimensional Reduction [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 7(3):2027-2036.
- [15] J Moyalaráño, Rowntree J, Woodward G, et al. Eco-Evolutionary Dynamics[M]. Academic Press, 2014.

[16] Snc A, Sk A, Jb B, et al. Eco-evolutionary dynamics of cooperation in the presence of policing[J]. Journal of Theoretical Biology, 2021.

[17] Gokhale C S, Park H J. Eco-evolutionary Spatial Dynamics of Nonlinear Social Dilemmas[M]. 2020.

作者简介:

詹俊(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为任务规划技术。

张万鹏(1981-),男,博士,副研究员,主要研究方向为智能决策、人机协同。本文通讯作者。

罗俊仁(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为对手建模、多智能体强化学习。

陈诗凯(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为任务规划技术。

球形侦察机器人无线驱动控制及图像传输设计

徐达圣, 洪华杰, 侯洋洋, 曾 喆

(国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 为降低侦察风险及解决侦察空间受约束的难题, 本文设计了一种球形侦察机器人无线驱动及图像传输控制系统。系统主要由球形机器人和上位机两部分组成, 设计并完成了球形机器人硬件电路及软件部分, 基于UVC类协议实现了视频数据同步传输, 同时开发了上位机控制及显示软件。实验表明, 所提出的控制及传输方案可行, 球形机器人能根据控制指令完成预期动作, 并将侦察图像上传至上位机显示, 可靠率达90%, 刷新率达20 bps。

关键词: 球形机器人; 无线控制; UVC协议

Design of Spherical Reconnaissance Robot in Wireless Drive control and Image Transmission

XU Dasheng, HONG Huajie, HOU Yangyang, ZENG zhe

(National University of Defense Technology, the College of Intelligence Science and Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to reduce the reconnaissance risks and resolve the problem of reconnaissance spaces being constrained, a control system of spherical reconnaissance robot in wireless drive and image transmission is designed in this paper. The system is mainly composed of the spherical robot and the upper computer, and the spherical robot hardware circuit and software part are designed and completed, and video data synchronous transmission is implemented based on the UVC class protocol, and the host computer control and display software are developed. Experiments show that the proposed control and transmission scheme are feasible, the spherical robot can complete the expected action based on the control command with the reliability of 90%, and upload the reconnaissance image to the host computer, the reliability of 90%, displayed with the refresh rate up to 20 bps.

Key words: Spherical Robot; Wireless Control; UVC Protocol

1 引言

地面作战行动中,传统近距离侦察手段存在空间局限性和安全风险。在保证安全的前提下,了解隐蔽空间内实情,减少侦察伤亡,是一种亟待解决的需求^[1]。

自2005年以来,名为“侦察球”的新式装备在国外相继推出,典型的代表有EyeBall、SpyEye等^[2]。士兵利用其就近吸附进行侦察监视,实现隐蔽狙击。目前,国内对侦察机器人的研究主要体现在结构优化,孙章军^[3]等设计了一种变结构球形机器人,能在三种运动形态间自由变换。罗自荣^[4]等设计的可抛掷球形机器人能在遇到障碍或陷于困境

时跳跃前进,大幅提升越障能力。蒋桂林^[5]等通过增设稳定平台及辅助轮的设计改善机器人运行稳定性。

本文则主要基于控制角度设计一种球形侦察机器人无线驱动及图像传输系统,重点论及机器人驱动实现及UVC类主机开发,为工程实践者提供参考价值与借鉴意义。

2 驱动控制设计

2.1 系统总体设计

本系统由球形侦察机器人和上位机端两部分组成(如图1)。其中,球形机器人负责侦察并采集周围环境中的图像信息,并向上位机端反馈;上位

机端负责实时显示球形机器人上传的图像信息,同时下发控制指令驱动球形机器人进行运动。

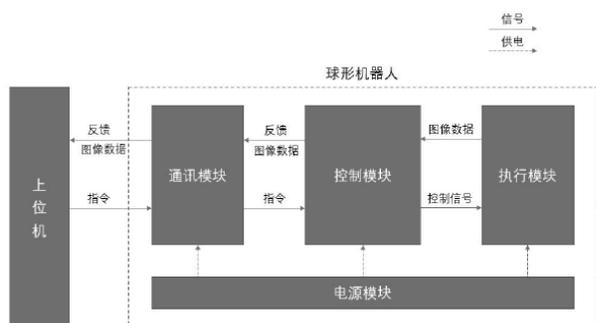


图1 系统总体设计

Fig. 1 System overall design

2.2 硬件设计

硬件系统主体分为控制模块、通信模块、执行模块和电源模块四部分。控制模块以STM32F407芯片作为微处理器,通信模块采用ESP32-S芯片无线收发数据,执行模块包括提供动力的减速电机、通过机械限位实现转向的左右电磁铁,以及图像采集USB摄像头,电源模块为调压电路,为系统各部分提供12v、5v、3.3v等3种不同的直流工作电压。

STM32F407微处理器利用SPI接口与ESP32-S通信,通过Wi-Fi模式接收来自上位机的控制指令,读写速度可达42Mbit/s。微处理器根据控制指令生成控制信号,利用定时器外设生成周期可调的PWM电信号控制桥式芯片MX113L通断实现减速电机的速度调节,并直接利用GPIO输出改变L9110S中电流流向,影响左右电磁铁的伸缩状态驱使机器人转向。同时,STM32F407与USB摄像头间采用USB全速通信方式,以12Mbit/s的速度获取相机所采集的压缩视频帧数据,并通过Wi-Fi模块向上位机显示端反馈。可SPI读写Flash芯片被用于暂存从USB线路获取的图像数据,减少内存占用及匹配速率。硬件设计整体如图2。

2.3 软件设计

驱动控制需要实现侦察机器人的运动速度调节及转向设置,具体包括前进(指令g)、后退(指令b)、停止(指令f)、加速(指令a)、减速(指令d)、左转(指令l)、右转(指令r)、直行(指令s)8种指令状态。

其中,速度调节通过调整减速电机驱动波PWM的占空比实现,以1000为总周期,以250为步长,划分为四种速度等级。转向设置通过左右侧电磁铁的伸出限制辅助轮运动实现。主体设计思想是利用SPI中断不断接收上位机传达的指令信息,在循环中对所获取的指令信息进行判断,更改相应的状态标志位,包括电磁铁伸缩状态,电机转向状态及速度等级。继而,根据标志位输出不同控制电平,实现机器人控制。

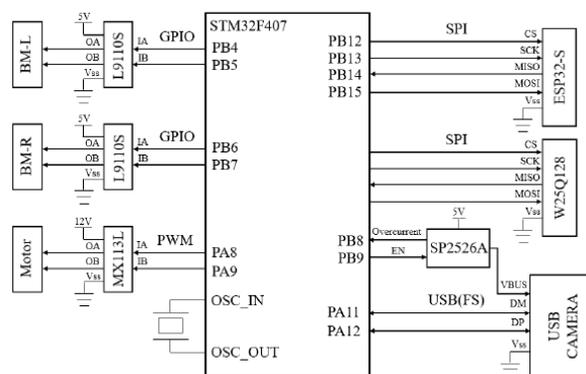


图2 硬件系统设计

Fig. 2 Hardware system design

软件流程图如图3所示,系统运行时,首先对SPI及定时器进行初始化,并对相应的参数及标志位赋值初值;利用Wi-Fi模块不断接收上位机指令,并产生SPI中断;在函数循环体中,判断指令的类型,并更改相应的标志位;判断右转标志位right,值为1则右继电器弹出(右转),值为2则右继电器缩回(停止右转);判断左转标志位left,值为1则左继电器弹出(左转),值为2则左继电器缩回(停止左转);判断起停标志位run,值为0则电机和继电器停止;判断方向标志位direction,值为0则侦察球前进,值为1则侦察球后退;进一步,输出PWM波信号调节电机转速,实现侦察球加减速度;最后循环等待指令,实现完整驱动。

3 图像传输实现

3.1 传输方案

系统以STM32F407作为USB主机,以USB摄像头作为USB从机,微处理器以同步传输的方式从USB总线上获取USB摄像头所采集的视频数据。

在该嵌入式系统中必须遵循UVC子类协议开发主机驱动,以实现主从机的有效通信。关键在于枚举与挂载驱动两过程。

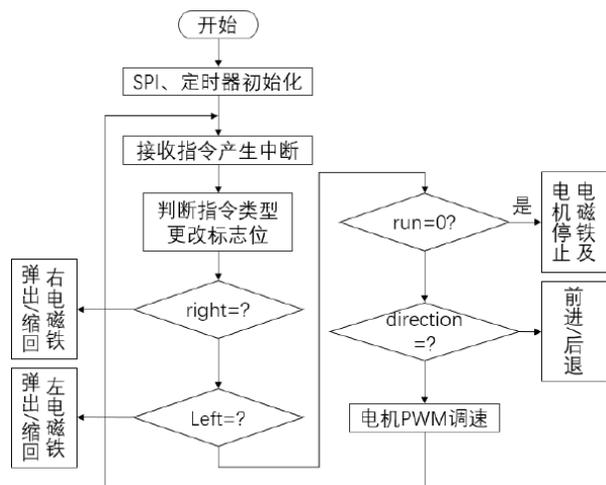


图3 无线指令驱动软件设计

Fig. 3 Wireless instruction drive software design

3.2 设备枚举

设备枚举指主机获取一系列与USB设备全部信息相关的描述符的过程^[6]。USB主机首先检测设备连接,复位接口,分配设备默认地址0,根据设备速度分配通道后开启枚举。

设备枚举基于若干个控制传输实现,完整的控制传输包括建立、数据、状态三个阶段。建立阶段由SETUP事务构成,内容为需设置的“标准设备请求”,用于主机从USB设备中获取或配置信息。数据阶段由多个输入事务或多个输出事务构成,在枚举过程中其数据内容即为对应所获取描述符。状态阶段由单个输入事务或输出事务构成,表明请求的完成状态。

表1 标准设备请求设置

Table 1 Standard request settings

	bmRequestType	bRequest	wValue	wIndex	wLength
1	0x80	0x06	0x0100	0x0000	0x0008
2	0x80	0x06	0x0100	0x0000	0x0012
3	0x00	0x05	0x0001	0x0000	0x0000
4	0x80	0x06	0x0200	0x0000	0x0009
5	0x80	0x06	0x0200	0x0000	0x018f

枚举过程中,标准设备请求设置如表1:

(1)首先获取标准的8个字节长度的不完整“设备描述符”,得到枚举过程最大数据包的大小,以重新分配控制通道的大小。

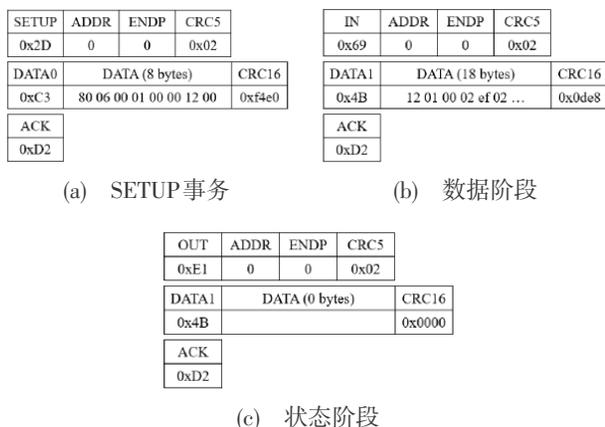
(2)继而重新获取完整的18个字节长度的“设备描述符”。

(3)为设备重新分配地址0x01(默认地址0为所有设备所共用)。

(4)利用新地址开辟通道获取不完整的配置描述符,得到整个配置描述符长度。

(5)获取完整的配置描述符(连同接口、端点描述符)。

典型的一次获取完整18个字节长度“设备描述符”的枚举过程表示如图4。



(a) SETUP事务

(b) 数据阶段

(c) 状态阶段

图4 设备描述符枚举

Fig. 4 Device descriptor enumeration

3.3 挂载驱动

挂载驱动指遵循UVC子类协议为USB摄像头设备进行配置。UVC设备的功能取决于接口层的配置,其内部包含两种类特定的接口。控制接口反映设备内部的拓扑结构,通过更改其内部各实体的控件以调节硬件参数,焦距、对比度、亮度均在该接口进行设置。流接口指定所传输视频数据的格式及其分辨率,同时通过更改备用设置切换带宽以适应传输需求。

配置UVC主机驱动流程如图5,首先对设备中的两种接口进行初始化,继而根据初始化结果及期望需求进行类请求设定功能,最后循环执行UVC状态机,同步传输视频数据流。

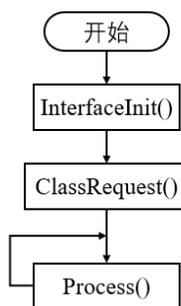


图5 UVC主机驱动流程

Fig. 5 UVC host drive process

初始化接口的作用在于剖析UVC设备的内容并进行相应处理,需要完成以下六个步骤:

(1)从主机已获悉设备的全部描述符中,寻找UVC设备控制接口并记录其索引值。

(2)从描述符中,寻找UVC设备流接口并记录其所有的备用设置内容。

(3)根据主机接收FIFO容量,筛选出所支持最大端点带宽的一组备用设置。

(4)解析控制接口中对应的拓扑结构及流接口所支持视频数据格式和分辨率。记录所有实体(单元、终端)、数据压缩格式(MJPEG、YUY2)及各分辨率大小的索引值及属性。

(5)根据预期数据格式和分辨率筛选其索引。

(6)为所筛选的最适合的数据端点开辟同步传输通道。

类请求是对UVC设备两种接口获取当前状态和设置功能的过程。对控制接口的类请求用于调整硬件功能,包括数据采集来源、曝光时间、编码格式等,为根据用户需求的可选步骤。而最重要的也必需的在于对流接口的类请求设置,在数据传输启动前对流接口的设置如图6,主从机为实现有效通信需要提前协商二者的传输带宽,主机通过probe控件告知从机预采用的带宽信息,并得到从机相应的反馈,获准后通过commit控件确定所协商带宽设置。最后,主机设置接口从默认“零带宽”备用设置切换到对应备用设置开启同步传输状态机。

本系统中,视频数据被设定为基于MJPEG的压缩帧格式,分辨率大小为160×120,将帧间隔设置为200ms,数据压缩质量设为47,对应具体的probe和commit控件属性设置如表2。

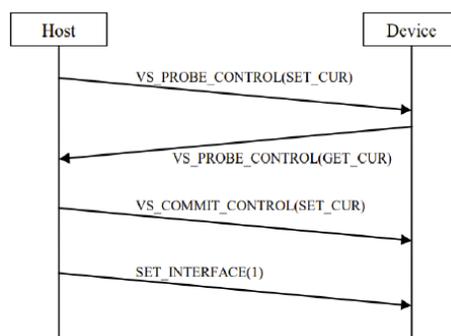
图6 数据传输启动流程^[7]

Fig. 6 Data transfer startup process

表2 probe & commit 控件属性设置

Table 2 Probe & Commit Control Properties Settings

bmHint	bFormatIndex	bFrameIndex	dwFrameInterval	...	wCompQuality	...
0x0009	0x02	0x01	2000000		0x002f	

4 性能测试

4.1 控制性能

球形侦察机器人测试样机如图7,控制性能主要测试其是否能准确无误地响应所接收到的指令。测试条件为通信距离35m,穿透1堵墙,每条指令测试次数为100次。测试的结果如表3所示,每种指令的成功率均在90%以上,结果显示其控制性能可靠。

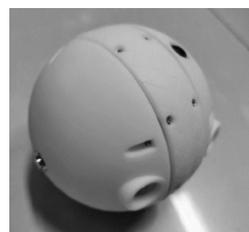


图7 侦察机器人样机

Fig. 7 Reconnaissance robot prototype

4.2 传输性能

传输性能测试枚举过程和同步传输成功性,借助USB分析仪对主从机数据流进行抓包。测试枚举过程抓包结果如图8,完成了一次枚举的控制传输,成功获取了399字节长度的配置、接口、端口描述符的集合。同步传输抓包结果如图9,使用了一个同步传输完成了主机成功获取1020字节长度的MJPEG格式的视频数据流。验证了UVC主机开发的可行性。

表3 控制指令测试结果

Table 3 Control instruction test results

指令	成功	失败	成功率
前进	99	1	99%
后退	97	3	97%
停止	100	0	100%
加速	98	2	98%
减速	96	4	96%
左转	93	7	93%
右转	95	5	95%
直行	97	3	97%

Control In	S	Standard	Req	ADDR	ENDP	DATA (89 bytes)	Success
11s 622'872'167	F	Get	Descriptor	1	0	09 02 8f 01 02 01 ...	
Setup	S	SETUP	ADDR	ENDP	DATA0	DATA (8 bytes)	ACK
11s 622'872'167	F						
Data In	S	IN	ADDR	ENDP	DATA1	DATA (64 bytes)	ACK
11s 623'508'500	F						
Transaction	S	IN	ADDR	ENDP	DATA0	DATA (64 bytes)	ACK
11s 623'831'500	F						
Transaction	S	IN	ADDR	ENDP	DATA1	DATA (64 bytes)	ACK
11s 624'180'917	F						
Data In	S	IN	ADDR	ENDP	DATA0	DATA (64 bytes)	ACK
11s 624'404'583	F						
Data In	S	IN	ADDR	ENDP	DATA1	DATA (64 bytes)	ACK
11s 624'807'500	F						
Data In	S	IN	ADDR	ENDP	DATA0	DATA (64 bytes)	ACK
11s 625'132'583	F						
Data In	S	IN	ADDR	ENDP	DATA1	DATA (15 bytes)	ACK
11s 625'433'000	F						
Status Out	S	OUT	ADDR	ENDP	DATA1	DATA (8 bytes)	ACK
11s 625'664'750	F						

图8 设备枚举测试

Fig. 8 Enumeration test

Video Format	S	Video Format	ADDR	ENDP	DATA (1088 bytes)	Success	
1m 43s 577'205'450	F	MJPEG	11	1	f2 17 59 87 15 ef ...		
Video Stream	S	IN	ADDR	ENDP	DATA0	DATA (1024 bytes)	ISO
1m 43s 577'205'450	F						
Packet: 275523	S	IN	ADDR	ENDP	CRC5		
1m 43s 577'205'450	F						
Packet: 275524	S	DATA0			DATA (1028 bytes)	CRC16	
1m 43s 577'205'907	F						

图9 同步传输测试

Fig. 9 Synchronous transmission test

4.3 总体测试

借助Qtcreator软件设计上位机软件进行总体功能测试。Qtcreator具有优良的跨平台特性,在PC端所开发的软件无需过多修改即可在Andriod端运行。因而,显示终端可以是PC或移动设备,本实验采用PC机为终端。球形机器人所采集的图像信息经Wi-Fi无线传输至上位机,测试效果如图10,系统成功接收指令并显示图像,其最大刷新频率可达20bps。

5 结论

本文所设计的球形侦察机器人无线驱动及图像传输系统,成功完成了依据远程的无线控制指令进行驱动,并通过UVC类主机的开发保证了视频图

像的有效传输和可靠显示,其控制指令可靠率在90%以上,图像显示最大刷新频率达20bps,达到预期设计目标与功能要求。本系统的设计完善了球形侦察机器人的功能控制,并有助于降低开发难度,缩短开发周期。



图10 总体测试结果

Fig. 10 Overall test results

参 考 文 献

- [1] 杨维, 殷希梅, 张运兵, 等. 一种微小型单兵侦察球系统的设计[J]. 电子设计工程, 2013, 21(019):86-89.
- [2] 尤海平. 侦察球——士兵的“第三只眼”[J]. 现代兵器, 2006, 000(005):39-42.
- [3] 孙章军, 颜景龙, 李玉珏, 等. 变结构球形机器人系统设计[J]. 电子测试, 2014, 000(022):7-9.
- [4] 罗自荣, 尚建忠, 丛楠, 等. 可抛掷多运动态球形机器人移动机构[J]. 机械设计, 2009(09):30-33.
- [5] 蔺桂林, 邱鹏展, 何科延. 一种微小球形移动侦察载荷机构设计研究[J]. 机电产品开发与创新, 2020(06):28-03.
- [6] Universal Serial Bus Specification [EB/OL]. 2000[2015]. https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification/usb_20.pdf
- [7] Universal Serial Bus Device Class Definition for Video Devices [EB/OL]. 2012 [2012]. <https://www.usb.org/document-library/video-class-v15-document-set/UVC 1.5 Class specification.pdf>

作者简介:

徐达圣(1997-),男,研究生,主要研究方向为机械臂末端稳定控制。

洪华杰(1976-),男,研究员,主要研究方向为精密传动与控制,机电测控与数控技术,机电一体化等。

侯洋洋(1993-),男,研究生,主要研究方向为基于深度学习的机械运动控制。

曾喆(1995-),男,研究生,主要研究方向为机械柔顺控制及其轨迹规划。

挠性航天器姿轨一体化动力学建模

朱卫兵¹, 张宪亮¹, 吴限德¹, 宋婷²

(1. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001; 2. 西北工业大学, 西安 710072)

摘要: 针对挠性航天器在轨运动过程中的动力学建模问题, 综合考虑航天器在轨运动过程中存在的姿轨运动耦合、挠性振动耦合因素, 利用对偶四元数的方法, 建立挠性航天器姿轨一体化动力学模型, 并对航天器的轨道、姿态与挠性振动之间的耦合关系进行定量分析。挠性航天器姿轨一体化动力学模型可以紧凑描述挠性航天器的姿态-轨道-振动耦合关系, 模型简单、计算高效, 为实现挠性航天器高精度控制奠定基础。通过数学仿真对建立的动力学模型进行验证, 证明了模型的正确性。

关键词: 挠性航天器; 动力学; 一体化建模; 耦合效应; 对偶四元数; 轨道-姿态-振动耦合

Attitude and Orbit Integrated Modeling for Flexible Spacecraft

ZHU Weibing¹, ZHANG Xianliang¹, WU Xiande¹, SONG Ting²

(1. Harbin Engineering University, Harbin, 150001, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xian, 710072, China)

Abstract: A dynamic modeling method of the flexible spacecraft is proposed in this paper. Considering the attitude and orbit coupling and flexible vibration coupling factors, the dual quaternion method is used to establish the dynamic model. On the basis, the coupling relationship among the orbit motion, attitude motion and flexible vibration is analyzed. The integrated dynamics model proposed in this paper can compactly describe the attitude-orbit-vibration coupling relationship of the flexible spacecraft. The model is simple and computationally efficient, which lays the foundation for the realization of high-precision control of the flexible spacecraft. Finally, mathematical simulation is provided to verify the validity of the model.

Key words: Flexible Spacecraft; Dynamics; Integrated Model; Coupling Effects; Dual Quaternion; Orbit-Attitude-Vibration Coupling

1 引言

近年来,随着航天器功率的扩大以及服务精度的提高,部分航天器组件的体积随之增大,如太阳能帆板、雷达天线、光学组件等,其半径或长度可达到几十米量级^[1],这些组件基本上为悬臂外伸薄板结构,具有大挠性、低阻尼、低刚度特性^[2]。在航天器进行太空作业时,受到本体机动及外部干扰因素影响,产生挠性振动,对本体的运动产生耦合作用,进一步影响控制精度,造成航天器无法完成预定的任务或无法达成任务指标。如1958年美国的“探险者-1”星体翻转,1990年哈勃望远镜进出地影区时成像质量下降^[3],其发生原因皆是忽略了挠性附件振动产生的影响。因此,对带有大型挠性附件的

航天器进行动力学研究时,不可忽略挠性振动影响。

对于挠性航天器的动力学建模工作, Meirovitch L. 等学者在上世纪七八十年代提出了混合坐标的动力学建模方法^[4-6]。在此基础上, Likins P. W. 提出了离散坐标法,使用模态坐标方法描述物体的弹性变形^[7]。Silverberg L. M. 引入了浮动坐标系,相对浮动坐标系的运动描述挠性变形,分析了航天器机动过程中刚体运动和挠性体运动之间的相互作用^[8]。但是这些研究或者集中在挠性振动对航天器姿态的影响,或者对于姿态-振动耦合动力学和轨道-振动耦合动力学分开建模,模型复杂且计算效率低。本文针对此问题,开展挠性航天器姿轨一体化动力学建模方法研究,并对姿态、

轨道、挠性振动耦合影响进行分析。

对于航天器的动力学建模方法,可以概括为两大类,一类是航天器姿态和轨道独立—耦合建模方法^[9],即采用不同的代数方法描述航天器的姿态运动和轨道运动,再根据二者之间的耦合关系,将姿态动力学和轨道动力学方程联立。例如 Stansbery 等和 Xin 等人针对单刚体航天器^[10-11], Pan, Wong 等人针对多航天器分别采用牛顿定律和哥氏加速度描述航天器轨道运动^[12-13],而针对姿态部分,为避免产生奇异,采用四元数建立姿态动力学和运动学模型。另一类是建立航天器姿轨一体化动力学模型,将航天器姿态和轨道运动描述统一到一个数学框架中,例如 Ploen 等针对航天器的姿态运动和轨道运动,建立了基于矢矩阵方法的单刚体航天器和多航天器编队的姿轨耦合动力学模型^[14]。上述两种航天器动力学建模方法中,姿轨一体化建模方法简单,运算高效,控制精度也高于独立建模,随着航天器控制精度要求的提高和微型推力器的发展成熟,一体化建模方法的优势更加具有工程实现需求及可行性。但是,对于航天器的姿轨一体化建模研究,目前集中在刚体目标领域,未开展挠性航天器方面的研究。

本文建立的基于对偶四元数的挠性航天器姿轨一体化动力学模型,采用矢量力学分析方法,通过混合坐标建模法进行求解。考虑航天器在轨正常运行及小范围内位置机动,忽略挠性附件刚度矩阵的变化。本文建立的挠性航天器动力学方程优点在于,一是本模型能够紧凑描述航天器姿态—轨道—挠性振动之间的耦合作用,模型简单,计算高效;二是为实现挠性航天器的高精度控制提供支撑。

2 挠性航天器一体化动力学

本章内容为基于对偶四元数的挠性航天器动力学推导过程,利用矢量力学分析方法,计算挠性航天器的对偶动量,利用动量定理,求解得到动力学方程。

挠性附件A的对偶动量可以表示为:

$$\begin{aligned} \hat{H}_A &= m_A v_b - C_A^\times \omega_b + B_{tran} \dot{\eta} + \varepsilon (I_A \omega_b + B_{rot} \dot{\eta}) \\ &= \begin{bmatrix} -C_A^\times & m_A \\ I_A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_b \\ v_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{tran} \dot{\eta} \\ B_{rot} \dot{\eta} \end{bmatrix} \\ &= \hat{M}_A \hat{\omega}_b + \hat{B}_\eta \dot{\eta} \end{aligned} \quad (1)$$

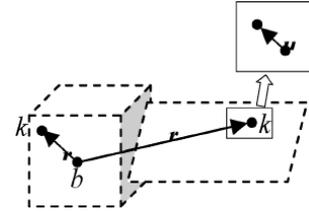


图1 挠性航天器矢量力学分析图

其中, ω_b 为航天器的旋转角速度, v_b 为航天器质心相对于惯性系的运动速度, η 表示挠性附件的广义模态坐标, B_{rot} 表示挠性附件的转动耦合系数, B_{tran} 表示挠性附件的平动耦合系数, $C_A^\times = \sum_n m_k r_{bk}^\times$ 表示挠性附件上有限元点的质量与位移运算矩阵, m_A 表示挠性附件的质量, I_A 表示挠性附件的转动惯量。

中心刚体B的对偶动量表示为:

$$\begin{aligned} \hat{H}_B &= m_B v_b - C_B^\times \omega_b + \varepsilon I_B \omega_b \\ &= \begin{bmatrix} -C_B^\times & m_B \\ I_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_b \\ v_b \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, ω_b 为航天器的旋转角速度, v_b 为航天器质心相对于惯性系的运动速度, m_A 表示中心刚体的质量, I_A 表示中心刚体的转动惯量, $C_B^\times = \sum_n m_k r_{bk}^\times$ 表示中心刚体上质点的质量与位移运算矩阵。

将挠性附件和中心刚体的对偶惯量叠加,得到整个航天器的对偶动量:

$$\begin{aligned} \hat{H} &= \hat{H}_A + \hat{H}_B \\ &= \begin{bmatrix} -C_A^\times & m_A \\ I_A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_b \\ v_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{tran} \dot{\eta} \\ B_{rot} \dot{\eta} \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} -C_B^\times & m_B \\ I_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_b \\ v_b \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & m_A + m_B \\ I_A + I_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_b \\ v_b \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} B_{tran} \dot{\eta} \\ B_{rot} \dot{\eta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

对挠性航天器的对偶动量求一阶导数,得到挠性航天器动力学为

$$\begin{aligned} \hat{F} &= \frac{\partial \hat{H}}{\partial t} + \hat{\omega}_b \times \frac{\partial \hat{H}}{\partial t} \\ &= \hat{M} \dot{\hat{\omega}}_b + \hat{\omega}_b \times \hat{M} \hat{\omega}_b + \hat{\omega}_b \times \hat{B}_\eta \dot{\eta} + \hat{B}_\eta \dot{\eta} \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\hat{B}_\eta = \begin{bmatrix} B_{tran} \dot{\eta} \\ B_{rot} \dot{\eta} \end{bmatrix}, \quad \hat{B}_\eta = \begin{bmatrix} B_{tran} \ddot{\eta} \\ B_{rot} \ddot{\eta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3 挠性航天器耦合影响分析

对式(4)的耦合项进行分析得到:

$$-\hat{M}^{-1}\hat{B}_{\eta} - \hat{M}^{-1}\hat{\omega}_b \times \hat{M}\hat{\omega}_b - \hat{M}^{-1}\hat{\omega}_b \times \hat{B}_{\eta} \left[\begin{array}{c} J^{-1}(\omega_b \times J\omega_b + \omega_b \times B_{rot}\dot{\eta} + B_{rot}\ddot{\eta} + v_b \times B_{tran}\dot{\eta}) \\ \omega_b \times v_b + \frac{1}{m}(B_{tran}\ddot{\eta} + \omega_b \times B_{tran}\dot{\eta}) \end{array} \right] \quad (6)$$

传统挠性航天器姿态动力学模型为^[15-18]:

$$\tau^b = J\dot{\omega}_b + \omega_b \times J\omega_b + \omega_b \times B_{rot}\dot{\eta} + B_{rot}\ddot{\eta} \quad (7)$$

由式(6)、(7)比较可以得出,姿态运动实数部包含 $v_b \times B_{tran}\dot{\eta}$ 项,说明航天器的轨道运动对姿态运动产生耦合影响,其影响结果大小取决于挠性附件的平动耦合系数 B_{tran} ,如果 B_{tran} 不可忽略,那么它对挠性航天器的姿态运动影响比较明显。

轨道运动对偶部包含 $\omega_b \times v_b, B_{tran}\ddot{\eta}, \omega_b \times B_{tran}\dot{\eta}$ 项,说明挠性航天器的姿态运动、挠性振动会对航天器的轨道运动产生耦合影响,挠性振动对航天器轨道运动产生的耦合影响结果取决于挠性附件的平动耦合系数。

4 仿真结果及分析

挠性航天器的整体质量为 3000kg,当挠性附件处于平衡状态时,航天器整体的转动惯量矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} 14033.90, & -49.2, & -85.0 \\ -49.2, & 357053.6, & 2992.5 \\ -85.0, & 2992.5, & 353325.7 \end{bmatrix}$$

初始时刻挠性航天器的速度和角速度在本体系中的表示为:

$$\omega_b = [0 \ 0 \ 0.001167]^T \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_b = [75.484 \ 7679 \ 0]^T \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

初始时刻的地心距离在航天器本体系中表示为:

$$r_b = [6876550 \ 0 \ 0]^T \text{m}$$

初始时刻挠性航天器的姿态四元数为:

$$q_b = [0.8924 \ 0.3696 \ -0.0990 \ 0.2391]^T$$

初始时刻挠性附件振动广义坐标为:

$$\eta = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\dot{\eta} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

设定挠性附件耦合系数如下:

$$B_{tran} = \begin{bmatrix} -0.011, 2.111, 0.001, 1.408, -0.005, -0.109 \\ -0.024, 0.000, -0.005, 0.033, 18.262, 0.070 \\ -0.003, 0.490, -28.450, 7.800, -0.093, -0.001 \end{bmatrix}$$

$$B_{rot} = \begin{bmatrix} -0.059, -0.424, 24.490, -6.680, 19.719, 0.054 \\ -3.348, 579.481, -1.875, -14.392, 0.026, -0.693 \\ 586.433, 5.303, -0.011, 1.171, 0.966, 48.915 \end{bmatrix}$$

数学仿真过程中,挠性航天器受到万有引力及重力梯度力矩作用,受脉冲干扰力 $F = [1, 0, 0]$, $t < 10\text{s}$ 影响,仿真步长为 0.02s,仿真时间为 800s,受到初始赋值的影响,航天器产生挠性振动,得到仿真结果如下:

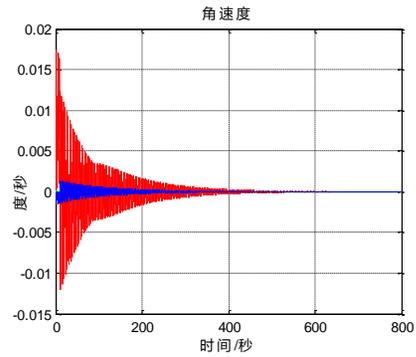


图2 挠性航天器角速度变化曲线

Fig. 2 Angular velocity variation curve

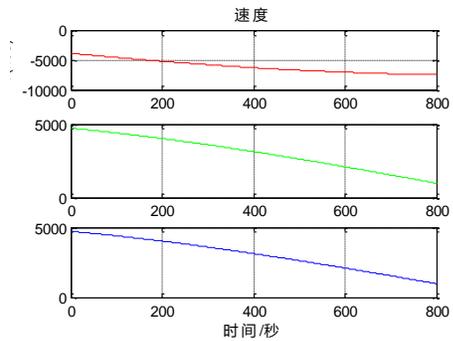


图3 挠性航天器速度变化曲线

Fig. 3 Velocity variation curve

图2表示脉冲干扰作用下挠性航天器的姿态加速度变化曲线,图3表示脉冲力干扰作用下挠性航天器轨道速度变换,图4表示脉冲力干扰作用下挠性航天器角速度受各耦合项影响分析,图5表示脉冲力干扰作用下挠性航天器角度变化曲线。

如图2和图4所示,受单轴的脉冲干扰力影响,挠性航天器三轴角速度均发生变化,柔性振动初始

影响面明显,受阻尼约束,400s后逐渐收敛,但是,受轨道和振动综合影响,航天器的角速度发生了偏移。如图5所示,受振动和轨道运动综合影响,挠性航天器的角度变化达到约 0.1° 。

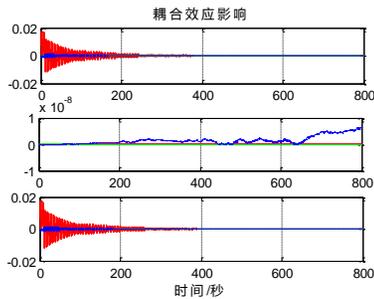


图4 姿态角速度受耦合效应影响曲线

Fig4 Angular velocity affected by the coupling effect

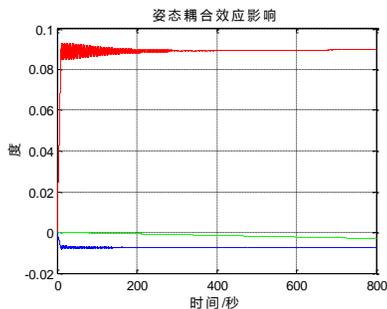


图5 姿态角受耦合效应影响曲线

Fig. 5 Angle velocity affected by the coupling effect

5 结论

本文建立了挠性航天器姿轨一体化动力学模型,并对模型的耦合影响进行了分析,通过数学仿真定量阐述了挠性振动对航天器姿态和轨道运动的影响。挠性航天器姿轨一体化动力学模型能够紧凑描述挠性航天器在轨运行时姿态、轨道与挠性振动三者之间的复杂耦合关系,将挠性航天器的姿态、轨道及挠性振动归纳到同一数学框架中,简化了计算,提高了运算效率。通过动力学耦合分析并与传统单姿态挠性动力学模型进行比较,本模型发现了新的振动耦合项,通过数学仿真,定量阐述了该耦合项对航天器姿态运动的影响。

参 考 文 献

[1] 李崔春. 挠性航天器刚柔耦合动力学建模与姿态控制技术研究[D].北京理工大学博士学位论文.2014.

- [2] 孙宝祥. 大型挠性充液卫星自适应PID智能控制技术研究[J]. 航天控制. 2007, 25(4): 26-30.
- [3] 张志平. 某挠性卫星姿态动力学建模与控制[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2015
- [4] L. Meirovitch and H. D. Nelson. High-Spin Motion of a Satellite Containing Elastic Parts. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1966, 3(11): 1597-1602.
- [5] L. Meirovitch and R. D. Quinn. Equations of Motion for Maneuvering Flexible Spacecraft. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 1987, 10(5): 453-465.
- [6] L. Meirovitch. State Equations for Maneuvering and Control of Flexible Bodies using Quasimomenta. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 1993, 16(5): 882-891.
- [7] Likins P. W. *Dynamics and Control of Flexible Space Vehicles*. N70-19303.
- [8] L. M. Silverberg and S. Park. Interactions between Rigid-Body and Flexible-Body Motions in Maneuvering Spacecraft. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1990, 13: 73-81.
- [9] 张烽. 航天器近距离运动的鲁棒姿轨联合控制[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 2013.
- [10] Stansbery D T, Cloutier J R. Position and Attitude Control of a Spacecraft Using the State-Dependent Riccati Equation [C]. *Proceedings of the 2000 American Control Conference, Chicago, USA: IEEE Press, 2000: 1867 - 1871P.*
- [11] Xin M, Pan H. Nonlinear Optimal Control of Spacecraft Approaching a Tumbling Target [C]. *Proceedings of the 2009 American Control Conference, St Louis, USA: IEEE Press, 2009: 4818 - 4823P.*
- [12] Pan H, Kapila V. Adaptive Nonlinear Control for Spacecraft Formation Flying with Coupled Translation and Attitude Dynamics [C]. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, USA: IEEE Press, 2001: 2057 - 2062P.*
- [13] Wong H, Pan H, Kapila V. Output Feedback Control for Spacecraft Formation Flying with Coupled Translation and Attitude Dynamics [C]. *Proceedings of the 2005 American Control Conference, Portland, USA: IEEE Press, 2005: 2419 - 2426P.*
- [14] Ploen S R, Hadaegh F Y, Scharf D P. Rigid Body Equations of Motion for Modeling and Control of Spacecraft Formations - Part 1: Absolute Equations of Motion [A]. *Proceeding of The 2004 American Control Conference, Boston, USA, 2004, 3646-3653P.*
- [15] 王剑颖. 航天器姿轨一体化动力学建模、控制与导航方法研究[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 2013.
- [16] 周稼康. 挠性卫星动力学建模与姿态控制研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2009.
- [17] 王献忠. 一种挠性动力学模型解耦及局部迭代方法[J]. *系统仿真学报*. 2015, 06-1204-05.
- [18] 章仁为. *卫星轨道姿态动力学与控制*[M], 北京: 北京航空航天大学出版社. 2006.

作者简介:

张宪亮(1991-),男,博士研究生在读,主要研究方向为空间飞行器动力学建模与控制技术。

天基 ADS-B 发展综述

房屹光¹, 张翔²

(1. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068; 2. 中电科航空电子有限公司, 成都 611731)

摘要: ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) 是下一代空中交通管理的核心技术, 传统地基 ADS-B 系统无法实现洋区、沙漠等特殊区域的监视覆盖, 基于低轨道卫星 LEO (Low Earth Orbit Sattelite) 的天基 ADS-B 系统能有效克服地基 ADS-B 系统局限, 实现全球高效无缝监视覆盖。本文结合马航 MH370 事件介绍了天基 ADS-B 系统的特点和优点, 分析了全球天基 ADS-B 的研究发展现状, 重点研究了美国基于铱星和全球星的天基 ADS-B 系统架构及性能, 最后给出相关建议。

关键词: ADS-B; 空中交通管理; 低轨道卫星; 铱星

Review on the Development of Space-based ADS-B of Low Earth Orbit Satellite

FANG YiGuang¹, ZHANG Xiang²

(1. The 20th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, XiAn 710068, China; 2. CETC Avionics CO., LTD, Chengdu 611731, China)

Abstract: ADS-B is the core technology of the next generation of air traffic management, the traditional land-based ADS-B system can not realize the surveillance coverage to the special regional ocean, desert, The space-based ADS-B system of low earth orbit (LEO) satellite can effectively overcome the limitation of land-based ADS-B system, to achieve global seamless surveillance coverage efficiently. This paper, combined with the MH370 event introduces the characteristics and advantages of space-based ADS-B system, analyzes the current research status of space-based ADS-B in the world, focuses on the Iridium and Globalstar 's space-based ADS-B system architecture and performance in USA, finally gives relevant suggestions

Key words: ADS-B; air traffic management; Low earth orbit satellite; Iridium

1 引言

2014年3月8日发生的马航 MH370 失联事件暴露出当前飞机在跨越洋区等特殊区域飞行时缺乏有效监控的不足, 如何开展民用飞机的实时有效追踪和监控成为全球民航界研讨的焦点。在诸多方案中, 基于低轨道 (LEO) 卫星的天基 ADS-B 系统成为其中最受关注的技术。目前欧美等发达国家都加快了对天基 ADS-B 的研究和部署, 本文将对全球天基 ADS-B 的研究发展情况进行论述和分析, 给出相关建议, 希望能对我国开展天基 ADS-B 提供一定的借鉴和参考。

2 天基 ADS-B 概述

2.1 定义

广播式自动相关监视技术 (ADS-B) 是一种基于卫星定位, 实现对空飞行器监视和追踪的空管新技术, 是新一代空管系统的基石。传统地基 ADS-B 系统主要由空中机载发射机和地面接收基站组成, 受制于系统布置限制, 一般沿民航航路航线、机场终端区等陆地区域进行布置, 很难实现对洋区、沙漠、高山峡谷等特殊地区的覆盖, 据统计, 全球 90% 的区域没有实现飞行监视覆盖。

天基 ADS-B 系统可有效克服地基 ADS-B 系统的不足, 用于地基 ADS-B/雷达难以覆盖或无法覆

盖的空域,从而形成一个全球无缝 ADS-B 覆盖。天基 ADS-B 借助于低轨道通信卫星的强大覆盖能力,将 ADS-B 收发信机安装到通信卫星上,通信卫星通过其 ADS-B 设备接收飞机发送的 ADS-B 报告,再通过卫星通信信道下传给卫星地面站,卫星地面站通过地面网络将 ADS-B 报告传递给地面相关实体(如 ATC 中心、航空公司等),从而实现 ADS-B 全球覆盖,实现对飞机的全球飞行追踪和实时监控。

2.2 天基 ADS-B 优点

天基 ADS-B 的优点主要体现在安全、环境/效率、可靠性等方面:

2.2.1 安全方面

- 1) 提供近实时的飞机全球监视和追踪能力。
- 2) 提高态势意识能力,以及冲突检测与反应、处理能力。
- 3) 飞机在紧急情况下将有更高的灵活性。
- 4) 将监视资源与通信资源(CPDLC)隔离。
- 5) 更加完整和精准地报告航空事故,能够更好地管理安全风险。

2.2.2 环境/效率方面

- 1) 在海洋空域中,进行更加高效的“类似陆地”飞行。
- 2) 航空公司成本规划的可预测性更高。
- 3) 飞机能够爬升/下降,改变飞行速度,以追逐风推,避免顶风。
- 4) 改善反方向和交叉飞行状况。
- 5) 通过优选航路和高度明显降低燃油消耗和二氧化碳排放。

2.2.3 可预测性/可靠性方面

- 1) 支持空中交通流量管理排序、航路合并与平衡。
- 2) 支持信息共享和协同处理。
- 3) 满足广域信息管理(SWIM)要求的飞行计划、签派、舱门到舱门的高效管理。
- 4) 能够以相对较低的边际成本扩大监视网络覆盖范围。
- 5) 采用具有极高完整性的 RNAV,操作成本较低。
- 6) 降低了导航和监视的净资产基本值。
- 7) 快速获得其他 ADS-B 项目带来的效率和安全的提高。

2.2.4 支持 ICAO ASBU 实现

天基 ADS-B 支持 ICAO ASBU 相关模块,主要是 BO-FRTO、BO-NOPS、BO-ASUR、BO-SNET、B1-FRTO、B1-SWIM、B1-NOPS、B1-TBO、B1-RPAS。

3 天基 ADS-B 研发进展

目前,欧洲、美国、亚洲均启动了天基 ADS-B 方面的研究和研制工作。

3.1 欧洲进展

欧洲方面主要的推动者是欧洲航天局(ESA)和德国航天局,泰雷兹、SES Astra、ISIS 等知名公司是最重要的参与与实施者。

欧洲航天局(ESA)与德国航天局开展合作,通过在 Proba-V 卫星上配置 ADS-B 接收机,验证其飞机飞行监视功能。该卫星于 2013 年 5 月 7 日发射,运行在 820 km 的轨道高度,试验证明,在不需要升级现有机载设备的条件下,卫星携带的接收机仍然能够在 2 小时内接收到 12000 个 ADS-B 数据。2013 年 10 月,德国航天局、SES Astra 公司和泰雷兹-阿莱尼亚德国公司签订合同,计划利用名为 TRITON 的微卫星平台,对天基 ADS-B 接收系统进行进一步验证。此外,荷兰空间创新方案(ISIS)公司也正在研制 ADS-B 接收机和相关的纳卫星。

同时,欧洲已要求在 2018 年,所有商用飞机都将强制安装 ADS-B 设备。

3.2 美国进展

美国方面主要推动者是铱星公司和全球星公司。

美国铱星公司与 NAV CANADA 公司的合资公司 Aireon 通过与 Harris 公司合作开展基于“下一代铱星”的天基 ADS-B 研发,目标用户是空管、搜救和军方。“下一代铱星”星座包括 66 颗低轨通信卫星,于 2015 年开始发射,并于 2019 年 1 月完成部署。铱星星座将携带 Harris 公司研制的 1090ES 型 ADS-B 接收机。Aireon 公司在 2014 年 9 月 22 日宣布将向全球提供免费的飞机紧急情况追踪系统,首先针对北大西洋区域,计划 2018 年开始监视全球民用客机。

美国全球星公司和 ADS-B 技术公司联合推出了基于全球星卫星的 ADS-B 链路增强系统 ALAS (ADS-B Link Augmentation System)。2012 年在阿

拉斯加州的一座高度1200多米的深山中利用两架飞机完成了ALAS的试验。2014年9月再次进行了为期4天7000英里的双链ADS-B系统的测试飞行如图1所示。



图1 GlobalStar ADS-B(ALAS)测试飞行

Fig. 1 GlobalStar space-based ADS-B (ALAS) flight test

目前,美国已基本实现所有商用飞机都将强制安装ADS-B out设备。

3.3 中国进展

中国在天基ADS-B方面处于起步阶段。

2020年11月6日,我国首颗星基ADS-B卫星—北航空事卫星一号成功发射,该卫星由国家空管新航行系统技术重点实验室牵头,联合四川九洲空管、天仪研究院共同研制,经过在轨试验数据表明,该星基ADS-B系统在繁忙空域内,平均每小时可接收ADS-B消息数超过100万条;最远探测距离达到2000公里以上;半径800公里的设计覆盖范围内,95%位置消息更新间隔低于8秒,目标检测率和报文更新率初步满足空管运行需求,达到国内领先、国际先进水平。北航空事卫星一号目前仅是在国内首次验证了多波束星基ADS-B技术,支撑我国星基ADS-B系统的全面建设,还需要进一步优化设计;此外,要想为全球范围内的航空用户提供通信、导航、监视服务,必须完成几百颗卫星的全球组网,涉及大量的研究与建设工作,需要联合国内相关领域的各个单位,各尽所长,共同完成。

此前,中国清华大学和信威集团合作于2010年启动低轨道通信卫星项目,后续规划搭载ADS-B载荷,其灵巧通信试验卫星于2014年9月发射,已完成在轨测试,主要用于科研教学,但目前发展路线

未知。2021年4月28日,中国卫星网络集团有限公司正式成立,该公司将代表国家牵头实施中国卫星互联网计划,包括星基ADS-B的实施,目前相关工程处于前期论证阶段。

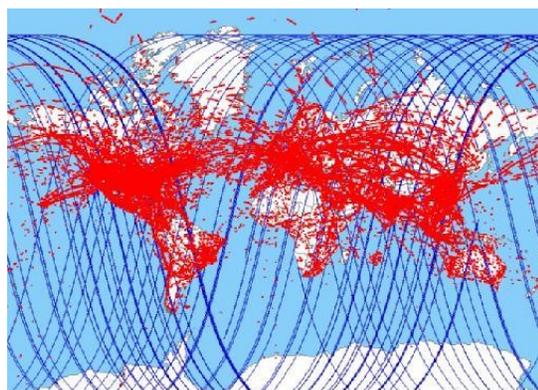


图2 空事一号卫星获取的航空器分布图(天仪研究院)

Fig. 2 Aircraft distribution map acquired by kongshi-1 satellite (Tianyi Research Institute)

4 Aireon天基ADS-B系统

4.1 系统概述

Aireon是一家合资企业,由美国铱星公司、加拿大的Nav Canada、意大利的ENAV、爱尔兰民航当局、丹麦的NaviAir组成。Aireon天基ADS-B是通过在铱星公司的二代铱星上加装ADS-B,实现天基ADS-B应用。

铱星通信公司在2015~2019年发射66颗二代低轨道卫星,所有卫星上全部安装ADS-B接收机(图3中红色圈中物体),使其具备ADS-B信号的接收功能。

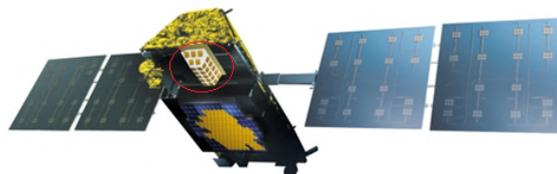


图3 驻留ADS-B接收机的铱星二代卫星

Fig. 3 Iridium satellite-II resident in ADS-B receiver

4.2 体系结构

Aireon的天基ADS-B系统通过在铱星二代卫星上搭载ADS-B接收机来实现,在地球海洋上空、偏远地区上空、以及其他无雷达覆盖区域上空提供

飞机位置报告服务,目前 Aireon 的天基 ADS-B 系统只考虑了在卫星上安装 1090-ES ADS-B 接收机,没有考虑安装 ADS-B 发射机。因此,该系统主要用于飞行监视和追踪,没有 TIS/FIS 上传能力。其总体架构如图 4 所示。

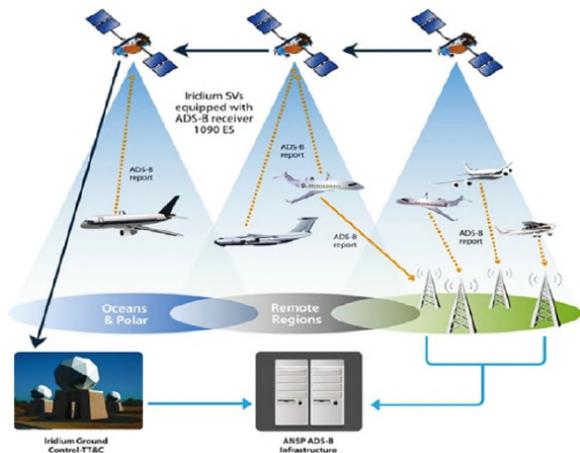


图4 Aireon 基于低轨道(LEO)卫星的 ADS-B

Fig. 4 Aireon space-based ADS-B based on LEO satellite

整个系统运行信息流程如图 5 所示。

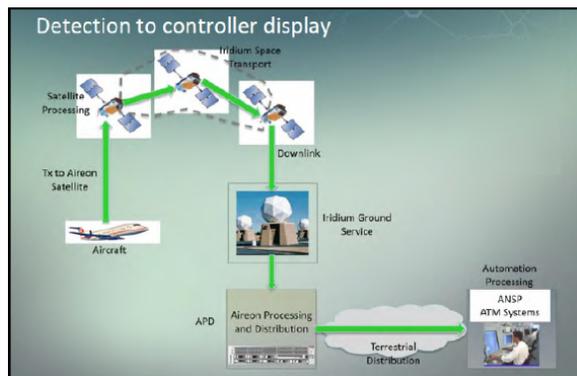


图5 Aireon 天基 ADS-B 信息流程

Fig. 5 The information flow of Aireon space-based ADS-B

Aireon 飞机定位与紧急情况响应追踪服务简称为“**Aireon 告警(Aireon Alert)**”服务,作为一项公众免费服务提供给航空团体。位于紧急呼叫中心的 Aireon 告警服务 24 小时不间断运行,向得到授权的搜寻营救组织提供飞机(安装有 1090-ES ADS-B 应答机)飞越没有任何其他监视手段的空域时的位置信息和最后航迹。这项服务不需要航空公司加装任何新的航空电子设备。

4.3 系统性能

根据目前 Aireon 星基 ADS-B 系统的设计规划,其应满足航班密度每平方海里 0.0042 架(每平方经纬度 15.3 架航空器)的瞬时监视要求,可用性大于 99.9%,容量方面每个点波束 1000 架飞机,在数据更新率方面,97% 的数据更新率不低于 8 秒,99.9% 的数据更新率不低于 30 秒,对于数据延迟应不超过 1.5 秒。

5 全球星 ALAS 系统

5.1 系统概况

ALAS 系统是由美国全球星公司和 ADS-B 技术公司联合推出。ALAS 系统采用全球星的卫星网络和卫星地面站,为下一代空中交通管制提供 ADS-B 监视及通信服务。ALAS 系统是一种简单、低成本外围设备,兼容现有的 ADS-B 航空电子设备,不会干扰飞机正常的 ADS-B 发送。

ALAS 项目于 2010 年 5 月启动以来,到 2012 年,全球星公司先后总共发射了 24 颗二代卫星。2014 年 9 月完成了 7000 英里飞行试验,并对 ALAS 系统进行了全面评估,通过这次试验验证了天基 ADS-B 的可靠性。以该系统的性能计算,一颗“全球星”卫星可以在 1600 km 的覆盖半径内跟踪 3000 架飞机。

5.2 体系结构

ALAS 系统的设计目标就是强化现有 ADS-B 网络,以便在传统地基 ADS-B 网络覆盖范围之外建立良好的越洋及偏远区域位置跟踪服务。系统支持实时回传飞行数据记录器信息、无人飞机系统(UAS)传感器数据、双向气象和话音等数据。

ALAS 系统采用全球星的卫星网络和卫星地面站,兼容任何 978MHz UAT ADS-B 以及 1090-ES ADS-B,卫星上的 ADS-B 设备具备发射和接收功能,可支持 TIS/FIS 信息的传递,架构如下图 6。

ALAS 所采用的 L-波段传输和天线方向图使得飞机的 ADS-B 位置报告极难被截获、干扰、哄骗,因而 ALAS 系统的 ADS-B 信息安全性很高。

5.3 系统性能

1) 适用性:简单、轻重量、低成本外围设备,兼容现有 1090-ES、UAT 航空电子设备。

2) 覆盖范围:到 2015 年美国大陆(CONUS)、GOMEX、加勒比海、北大西洋、北太平洋全覆盖,到

2018年剩余已区域全覆盖。

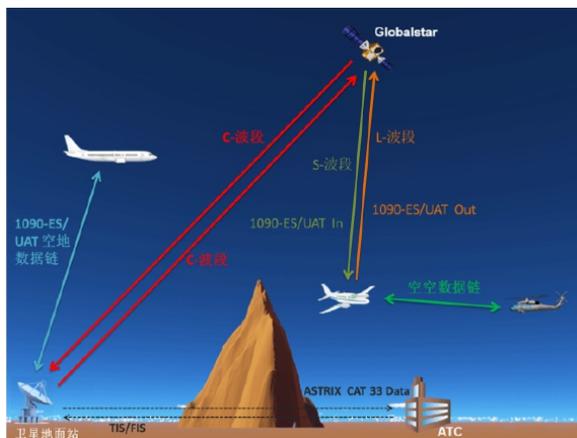


图6 ALAS系统的体系结构

Fig. 6 The architecture of ALAS space-based ADS-B

3) 可用性: 到2014年99.99%, 到2018年99.999%。

4) 容量: 每个点波束>3000架飞机。

5) 时延: 飞机到地面时延<200ms, 端到端时延<300ms。

6) 更新速率: 1s。

7) 完整性: $10E-6$ 。

8) 精度: 在98%的时间内, 位置差小于50英尺。

9) 部署: 已部署完成。已经发射了24颗具有ALAS功能的二代卫星, 到2017年开始提供关键服务。

10) 成本: 低。ALAS系统易于连接现有ADS-B地面基础设施。对于大多数商用飞机, 加装ALSA设备价格低于4万美元, 并且能够很短的时间内完成设备的安装。

11) 能力提升/升级: 极高。ALAS系统的所有ADS-B组件都在地面, 因此ALAS系统模块化程度极高, 易于修改。

12) 可扩展性: 高。ALAS系统体系结构简单且成本相对较低, 因而通过增加较多的卫星和(或者)地面站有可能拓宽覆盖范围, 改善可用性, 提高容量。

6 总结

ADS-B技术是下一代空中交通管理的核心技术, 基于低轨道卫星的天基ADS-B可克服地基ADS-B的覆盖局限, 正在成为ADS-B应用的新方向, 特别是马航MH370事件后, 欧美发达国家加快了在此领域的发展步伐, 相继推出了基于铱星和全球星等通信卫星的天基ADS-B系统, 在技术发展和商业应用方面已经处于领先地位。

我国目前已经在地基ADS-B、通信导航卫星等方面具备较强的技术实力和工程应用能力, 天基ADS-B的研究尚处于起步阶段, 不管是从民航管理、商业应用还是国家安全角度考虑, 我们需要加快我国自主的天基ADS-B的建设, 避免未来受制于人。

参 考 文 献

- [1] 刘韬. 从马航客机失联看卫星在搜索救援中的作用[J]. 国际太空, 2014年, 第3期.
- [2] ADS-B Technologies LLC. What is Space-Based [ADS-B]. <http://www.ads-b.com/space-based.htm>. February 5, 2015.]
- [3] Aireon company An Iridium Innovation. <http://www.aireon.com/AboutAireon/AnIridiumInnovation>. February 5, 2015.]
- [4] 索国伟, 王金锁, 郭荣华, 赵盼. ADS-B数字报文采集与解析系统的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2018年, 第9期.
- [5] 呼延帅斌. ADS-B技术分析和应用[J]. 数字技术与应用, 2019年, 第4期.

作者简介:

房屹光(1966-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究卫星导航、航空电子、空中交通管理。

轮毂电机驱动系统设计研究

马亚青, 田德文, 邢彦斌

(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 本文设计了一种用于6X6轻型无人车辆的轮毂电机驱动系统。文中依据整车提出的性能指标要求, 完成了轮毂电机加减速机构的一体化匹配设计。针对有限的轮毂空间尺寸及整车动力性能要求, 将转矩密度及功率密度较高的永磁同步电机作为设计研究对象, 给出了电机的电磁仿真、损耗分析、结构仿真, 并与台架试验数据对比验证了该方案的可行性。减速机构采用NGW一级行星减速传动方式, 文中进行了轻量化设计及强度校核仿真验证。该轮毂电机驱动系统通过了多轮实车试验验证, 运行稳定、可靠, 满足车辆总体技术要求。

关键词: 轮毂电机; 驱动系统; 永磁同步电机; 减速机构; 多场耦合; 结构设计

Design of an in-Wheel Motor Drive System

MA YaQing, Tian DeWen, Xing YanBin

(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: This paper presents a high efficiency in-wheel motor drive system for six-by-six self-driving light vehicle. According to specified performance indicators of the special light vehicle, this paper made integrated matching design of in-wheel motor and reduction gear. To meet space dimensional of and functional requirements, the PMSM is the preferred research object for its high torque density and high power density. The feasibility is fully verified by electromagnetic simulation analysis and multi-field coupling simulation analysis comparing with laboratory results. The reduction gear is constructed based on one stage NGW planetary reducer transmission, the lightweight optimization is given, which is verified by strength check simulation analysis. The in-wheel motor drive system runs stably and reliably in more real vehicle tests, and its characteristics of operation meet the needs of the overall performance of self-driving light vehicle.

Key words: In-wheel motor; drive system; permanent magnet synchronous motor (PMSM) reduction gear; multi-field coupling; structure design

1 引言

轮式独立电驱动地面无人平台是采用轮毂电机独立驱动,并由电池或混合动力系统作为驱动能源的地面无人平台。它是以电动汽车技术为载体,以无人应用技术为发展方向,面向未来需求的一种新型车辆^[1]。轮毂电机驱动系统摒弃了传统汽车的机械传动系统,是电动车辆的先进驱动方式。轮毂电机驱动系统,不仅能够简化整车结构,使驱动系统和整车结构简洁,有效增大车体利用空间,而且将动力源直接安装在车轮内,减小了机械损失,传动效率大大提高^[2]。这些优势使得轮式独立驱动的地面无人平台传动效率高、空间布置灵活、易

于实现底盘系统的电子化和主动化。本设计应用车型为6x6轻型车,配备有高压动力电池(330VDC)、小功率发电机组。采用轮毂电机作为驱动系统,实现六台轮毂电机独立驱动,增加车辆行驶中的机动性,灵活性,以提高恶劣路面条件下的行驶性能。轮毂电机按照驱动方式可分为减速驱动和直接驱动两大类,与将电机与车轮直接相连的直接驱动方式相比,采用减速驱动方式,即将减速机构放置在电机和车轮之间,通过增加减速机构来提高电机的额定转速,可以有效减小轮毂电机的设计难度,同时提高电机的功率密度^[3]。因此,本文采用了减速驱动轮毂系统。文中对系统各部件

进行了方案设计、仿真分析及样机试制,并对样机进行了台架及实车试验。

2 轮毂电机设计

2.1 轮毂电机电磁方案设计

由于轮毂轴向尺寸有限,首选转矩密度及功率密度比较高的永磁同步电机作为设计研究对象^[4]。考虑电机和减速器的密封结构,设计电机采用内转子结构。一般一级行星减速的减速比不超过10:1,由车轮最高转速为500rpm,可知电机最高转速不超过5000rpm。因电机发热问题,f取小于600Hz,极对数p约为7.2左右。考虑电机槽极搭配关系及减速比的取值范围,取电机极对数p=8。为减少轮毂轴向尺寸,采用了分数槽集中绕组。每个线圈直接在定子齿上缠绕,可有效降低绕组端部长度,同时提高槽满率。合适的多极结构可以提供更为有效的磁通,降低轮毂电机的电流,提高电机效率^[5]。通过多方案对比,确定了16极18槽内转子电机结构,通过仿真数据分析及优化设计,形成最优电磁设计方案^[6]。设计方案主要参数如表1-2所示。

表1 电机主要结构参数

Table 1 main structural parameters of motor

定子槽数	18	转子内径 (mm)	150
定子外径 (mm)	275	转子长度 (mm)	62
定子内径 (mm)	186	硅钢片	B20AT1500
定子长度 (mm)	62	磁钢厚 (mm)	5
硅钢片	B20AT1500	磁钢宽 (mm)	27
气隙 (mm)	0.5	磁钢材料	SmCo28
极数	16		

表2 电机绕组参数

Table 2 motor winding parameters

并联支路数	1	线径 (mm)	0.404
每槽导体数	30	并绕根数	84
绕组	双层叠绕	槽满率 (%)	71
节距	1	半匝长 (mm)	102

2.1.1 轮毂电机电磁方案设计

对轮毂电机的额定点进行有限元分析,其磁场分布如图1所示。从图中可知,定子齿硅钢片中的磁场强度约1.2T,尚未达到饱和,磁场分布仅在磁桥和齿尖处最大,齿尖处饱和对电机性能影响较

小,而磁桥处饱和有利于磁极之间隔磁,起有利作用^[5-6]。

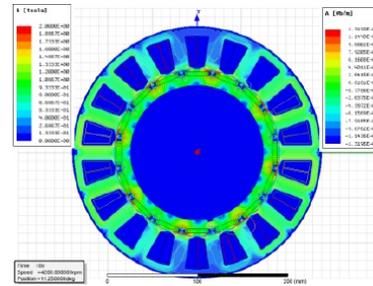


图1 额定点电机磁场分析

Fig. 1 electromagnetic field analysis at rated point

考虑额定工作点阻抗上的电压降,设计绕组的反电势线电压峰值225V,波形如图2所示,满足母线电压约束,保证该点下电机未进入弱磁工作区^[6]。

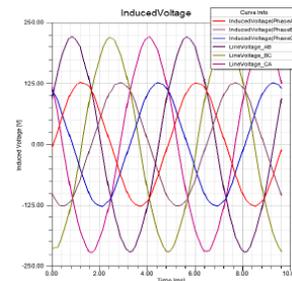


图2 额定点电机的反电动势波形

Fig. 2 BEMF waveform at rated point

对电机的转速-转矩-电流、电压进行分析,得到电机基本外特性如图3所示。从3a中可知,转矩65Nm时的电流有效值达到43Arms;从3b中可知,电机额定工作点时,线电压有效值达到220Vrms,对于母线电压320Vdc而言,其能达到的最大线电压有效值为225Vrms,因此电机此时不需要弱磁。

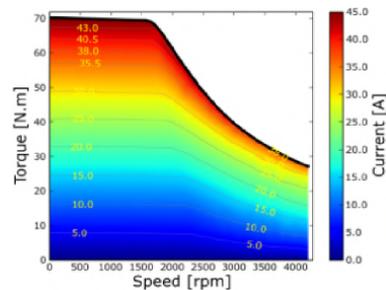


图3a 电机转速-转矩-电流 外特性 map图

Fig. 3a motor speed-torque-current map

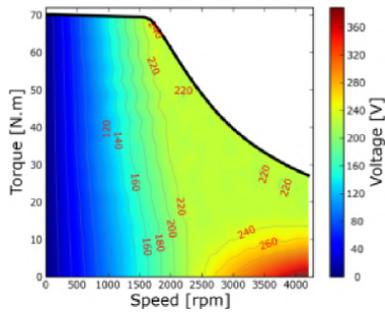


图3b 电机转速-转矩-电压外特性 Map图

Fig. 3b motor speed-torque-voltage map

2.1.2 轮毂电机损耗分析

采用有限元分析方法,计算铁心损耗、绕组铜耗、永磁体涡流损耗和机械损耗,将这四种损耗相加得到总损耗,如图4所示,最终根据输出性能和损耗数据,计算得到电机的效率^[5-7],如图5所示,可见电机在70%以上的运行区域内效率达到94%,在最大弱磁转速下最大负载时损耗最大,达到1.09kW

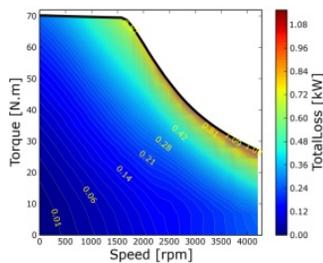


图4 总损耗 Map图

Fig. 4 total loss Map

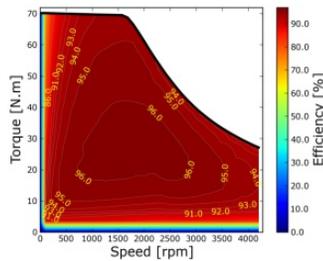


图5 电机效率 Map图

Fig. 5 motor efficiency Map

2.2 轮毂电机结构设计

2.2.1 轮毂电机结构

根据电磁计算方案,通过一体化集成设计,采用如下的轮毂电机总成结构:轮毂电机由定子,转子,前端盖,后端盖,轴承,旋转变压器等部件组成。

定子由机座,定子铁心及定子绕组组成。转子由转轴,支架,转子铁心,永磁体等组成。轮毂电机为封闭式防尘结构,采用自然冷却方式,结构简单可靠。轮毂电机转子两端采用滚动轴承定位,前、后端盖支撑固定。前、后端盖通过止口与定子机座连接,保证转子与定子的同心度要求。轮毂电机转轴与转子铁芯通过支架连接一体,通过集成设计,在保证正常运行情况下为整体布局留出了空间。旋转变压器的转子安装在转轴上,定子安装在后端盖上。

2.2.2 轮毂电机结构强度及温度场分析

电机结构、电磁场、温度场等多个物理场是相互制衡、相互影响具有一定耦合关系的综合物理场,针对上述问题,建立结构-电磁-温度联合仿真分析模型。^[8-10]通过结构仿真分析计算,可得4200rpm电机转子的结构变形量如图6所示。最大变形量只有2.5 μ m,因此电机内嵌式结构符合设计要求,转子在最大转速旋转时不会与定子摩擦。

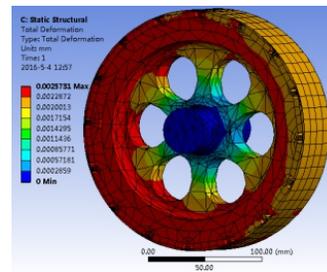


图6 结构-电磁耦合仿真分析

Fig. 6 simulation analysis of structure-EMC

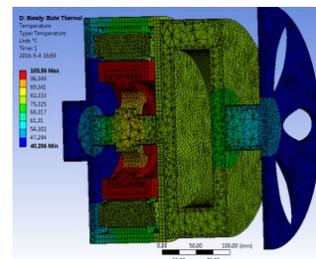


图7 稳态温度场分析(剖视图)

Fig. 7 steady-state analysis of temperature field

考虑到轮毂电机使用环境,将减速器、轮辋外侧面一同考虑进去,真实工况十分复杂,针对其中的主要因素,建立自然冷却条件下的轮毂电机温度场计算模型。整个模型只考虑车辆连续行驶,电机在最大车速电机额定功率下,不考虑减速过程中制

动盘的发热,结果如图7所示。电机的转子温度高于定子温度,最高温度达到103℃。

3 减速机构设计

3.1 减速机构的结构设计

NGW型行星齿轮传动具有体积小和重量较小、结构较为紧凑、传动比范围广、承载能力大、传递效率高等一系列的优点。为充分利用轮毂内部空间,减速机构采用了NGW一级行星减速设计,主要由太阳轮、行星轮、内齿圈、行星架构成。^[11-14]

在本设计中电机与减速机构相互独立,减速机构壳体通过止口与轮毂电机本体连接固定,通过外花键轴与轮毂电机转子内花键套进行传动的连接。驱动电机转子输出扭矩到减速机构的太阳轮,减速机构采用三组行星齿轮一级行星减速通过行星架输出的减速传递结构,减速后的行星架与外部制动及车轮辂连接。润滑采用浸油润滑方式。减速器主要设计参数如表3所示。

表3 主要设计参数

Table 3 main parameters of reduction gear

模数 m	Z1	Z2	Z3	传动比
2	16	47	118	7.8

在维持减速机构对外安装接口及行星减速齿轮系参数不变的基础上,将行星架及输出进行了减重及简化优化,并将原行星架外圈骨架的两侧深沟球轴承,更换为汽车轮毂轴承。同时对行星轮、行星轮轴及相关结构进行了减重等优化设计。结构如图8所示。

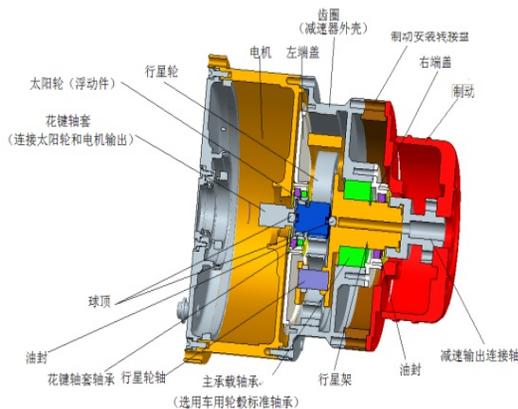


图8 减速机构方案结构示意图

Fig. 8 sketch map of reduction gear structure

3.2 减速机构的强度校核

针对图8轮毂电机减速机构有限元模型进行分析求解,得到强度仿真计算结果如图9~图12所示。

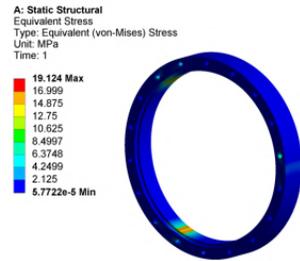


图9 齿圈应力云图

Fig. 9 stress map of ring gear

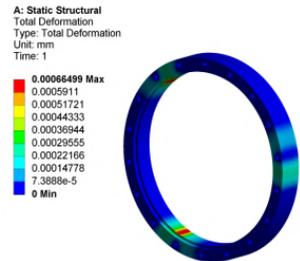


图10 变形量图

Fig. 10 deflection map of ring gear

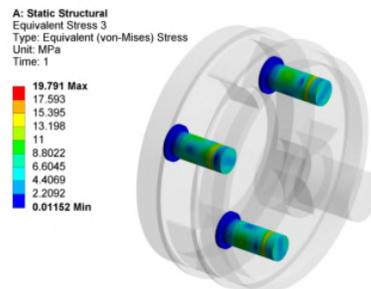


图11 行星架应力云图

Fig. 11 stress map of planet carrier

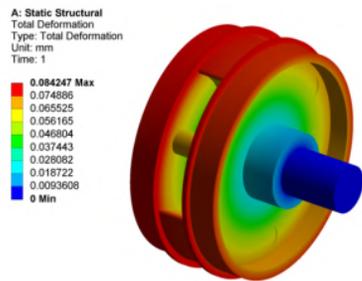


图12 行星架变形量图

Fig. 12 deflection map of planet carrier

从分析结果看出,最大应力为19.79MPa,最大变形量为0.084mm。计算结果表明,减速机构齿圈和行星架的强度及变形都满足要求。

4 试验验证

4.1 空载反电势测试

利用试验台架反拖轮毂电机旋转,记录电机线电压有效值如下表所示:

将电磁场仿真结果与实测值相比较,由表4可知,仿真值与实测值较为接近,仿真误差在6%以内。

4.2 空载损耗测试

空载损耗测试时,铜损忽略不计。从表5可知,机械损耗值较大,主要是由于加工工艺造成的,包括同轴度误差、密封圈和油封等与轴的摩擦等,整体损耗的误差值约-10~10W。

4.3 电机外特性测试

根据轮毂电机性能指标要求,与车辆上相同的

冷却条件下进行试验,进行电机短时过载工作性能试验。测试轮毂电机转速小于额定转速的过载恒转矩特性和大于额定转速的过载恒功率特性。测试结果如下图所示。实测电机峰值扭矩为99Nm,电机最高转速3900rpm。

表4 电机反电势测试表
Table4 motor back EMF test table

转速 (rpm)	测量	仿真	仿真偏差%
	空载反电势 有效值(V)	空载反电势 有效值(V)	
1200	106.0660172	103.3	-2.607826
1580	141.4213562	135.9	-3.9041884
1960	176.7766953	168.7	-4.5688688
2380	212.1320344	204.7	-3.5034946
2500	226.27417	215.1	-4.9383321
2750	247.4873734	236.5	-4.4395693
2920	265.1650429	251.2	-5.2665475
3100	282.8427125	266.7	-5.7073107
3350	300.520382	288	-4.1662339

表5 电机空载损耗测试表
Table5 motor no-load loss test table

转速 rpm	损耗W (实测)	铁心 损耗W (仿真)	永磁体 损耗W (仿真)	机械 损耗W(修正)	偏差W
1200	73.5	37.27	0.81	25.3	10.1
1580	107	51.48	1.28	43.85	10.4
1960	145	66.75	1.78	67.5	9
2380	189	84.88	2.36	99.5	2.3
2500	211.2	90.28	2.53	109.8	8.6
2750	233.45	101.9	2.88	132.8	-4.2
2920	258.75	110.02	3.12	149.8	-4.2
3100	292	118.88	3.37	168.8	1
3350	323	131.57	3.71	197.1	-9.4

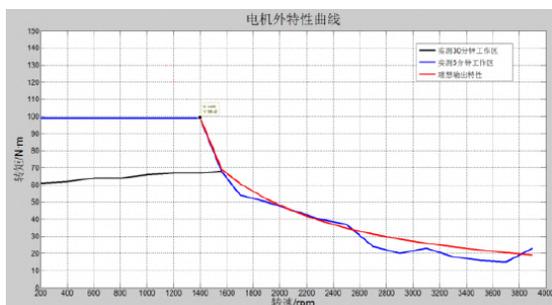


图13 电机外特性曲线

Fig. 13 motor external characteristic curves

4.4 整车试验

轮毂电机驱动系统跟随整车进行了车辆各项测试,包括最高车速测试、加速性能测试、能量回馈测试和过载测试,各项指标满足了车辆的性能需求。整车经历了长期热区试验、浅滩试验,充分验证了轮毂电机驱动系统电气性能、机械性能、制造质量的可靠性。期间的各测试数据也证实了早期仿真实验、台架试验的有效性,避免了车辆由于轮毂驱动系统故障导致功能失效。

5 结束语

文中轮毂电机系统采用驱动电机加减速器的方案,驱动电机和减速器位于车轮轴心处。提高了无人车辆在沙漠、浅滩等地方的工作能力,驱动电机采用密封的总体结构,可防止沙尘对电机转子的影响,电机本体也可以短时置于浅滩等有水的工作环境中。减速机构采用一级行星减速,设计电机与减速器相互独立,驱动电机转子输出扭矩到减速机太阳轮,由行星架输出低转速到轮辋。整个驱动电机的转子浮动在定子内部,整体结构可靠,便于密封,环境适应性好。轮毂电机驱动系统的电气性能、机械性能和制造质量均满足了整车的性能指标要求。

通过本次轮毂电机驱动系统的设计试制、试验可以看出,轮毂电机驱动系统非常适合这种多轮分布式驱动架构的无人车辆,能充分发挥轮毂驱动系统优势,底架结构大为简化,使整车总布置和车身造型设计的自由度增加。为以后研发更有效的系列化平台产品打下基础。

参 考 文 献

[1] 谢强. 六轮独立电驱动地面无人平台能量管理策略研究[D]

北京:北京交通大学,2014

- [2] 王贵明,王金懿. 电动汽车及其性能优化[M].北京:
- [3] 褚文强,辜承林. 电动车用轮毂电机研究现状与发展趋势[J]. 电机与控制应用,2007,34(04): 1-5.
- [4] 宋佑川,金国栋. 电动轮的类型与特点[J]. 城市公共交通, 2004(4): 16-18.
- [5] 褚文强,辜承林. 国内外轮毂电机应用概况和发展趋势[J]. 微电机,2007,40(9) 77-81.
- [6] 许实章. 电机学.北京:机械工业出版社,1981.
- [7] 唐任远. 现代永磁电机理论和设计[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [8] 汤蕴璆,梁艳萍. 电机电磁场的分析与计算[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [9] 王京,永磁同步电机场路耦合仿真设计研究[D] 江苏.浙江大学,2018
- [10] 孔晓光,王凤翔,邢军强. 高速永磁电机的损耗计算与温度场分析. 电工技术学报,2012,27(9): 166-173.
- [11] 饶振纲. 行星齿轮传动设计[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [12] 朱孝录. 齿轮传动设计手册[M].北京:化学工业出版社, 2010:619.
- [13] 伍琼仙. NGW 型行星齿轮减速机构设计自动化系统研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [14] 吕勇刚. NGW 型行星齿轮传动设计及优化技术研究及系统开发[D].成都:山东大学,2017.

作者简介:

马亚青(1975-),女,硕士,研究员,主要研究方向:电机驱动控制。

基于改进 PointPillars 的快速准确的 三维目标检测算法

何新卫, 闫阿泽, 陈 龙, 侯鹏程, 董丹丹, 马雅婷

(湖北三江航天红峰控制有限公司, 武汉 430000)

摘 要: 在自动驾驶以及机器人相关的很多实时应用中, 如何设计一种基于激光雷达的快速、可靠的三维目标检测算法是一项十分关键且充满挑战的问题。以 PointPillars 为代表的目标检测算法通过使用点云柱 (Pillars) 表示点云, 具备实现上述目标的巨大潜力。然而由于缺乏点云柱内部特征学习机制以及多尺度伪图特征提取能力不足等问题, 该算法在三维目标检测上的性能受到一定限制。基于上述观察, 本文旨在增强 PointPillars 检测性能的同时进一步降低其运算复杂度。为实现上述目标, 本文首先提出柱内多尺度特征提取模块以增强 Pointpillars 学习能力, 该模块能够学习到点云局部结构和位置信息; 接着提出基于 Res2Net 的多尺度特征提取模块, 该模块进一步增强其对多尺度伪图特征的学习能力。两者相结合, 能大幅提升 PointPillars 在三维目标检测中的性能。实验结果表明, 和 PointPillars 相比, 本方法最终模型大小从 19MB 降低到 12MB, 但是在 KITTI 数据集上取得更好的检测性能。

关键词: 激光雷达; 点云; 三维目标检测; 特征学习; 深度学习; 人工智能; 机器人学

An Improved PointPillars for Fast and Accurate 3D Object Detection

HE Xinwei, YAN A'ze, CHEN Long, HOU Pengcheng, DONG Dandan, MA Yating

(Hubei Sanjiang Astronautics Hongfeng Control Co., Ltd., Wuhan430000, China)

Abstract: How to design an accurate and fast LIDAR-based 3D object detector is a very critical and challenging issue in autonomous driving and many real-time robotic applications. The influential work-PointPillars, which uses pillars to represent the point cloud, has demonstrated great potential towards this goal. However, due to the lack of intra-pillar feature learning and insufficient multi-scale pseudo-image feature extraction, its performance on 3D objection detection has been limited. Motivated by this observation, in this paper we aim at enhancing the learning capability of PointPillars on 3D objection detection while decreasing the computation complexities at the same time. Specifically, the former issue is addressed with an intra-pillar multi-scale feature extraction module which helps to learn the structure and precise point locations within the pillar. The latter issue is addressed by a novel designed multi-scale feature extraction based on the off-the-shelf Res2Net. The combined modules greatly enhance the capacity of PointPillars on the 3D object detection task. Experimental results demonstrate that the memory footprint of the resulting model can be reduced from 19 MB to 12 MB when compared with PointPillars, but can yield better results on KITTI dataset.

Key words: LIDAR; Point Cloud; 3D Object Detection; Representation Learning; Deep Learning; Artificial Intelligence; Robotics

1 引言

三维目标检测,即定位和识别现实场景中的三维目标,因其在自动驾驶^[1-3]、智能机器人^[4-5]、虚拟/增强现实^[6-7]等诸多领域的广泛应用潜力,受到学

术界和工业界的广泛关注。

对于三维目标检测任务,基于激光雷达的检测是一类有效并被广泛采用的解决方案。然而由于激光雷达生成的点云一般数据量大,且具有稀疏性、无序性等特点,对点云处理算法提出了很大

挑战。

近年来,随着人工智能尤其是深度学习技术的突破性进展,三维目标检测领域取得了长足进步,大量基于激光雷达的三维目标检测算法被相继提出。一些方法尝试将不规则点云转换为规则的体素,然后采用卷积神经网络学习相应特征。其中的先驱工作-VoxelNet^[8],首先将点云转换为体素,然后将其压缩为特征伪图,最后使用二维卷积神经网络学习相应特征。而Second^[9]则直接采用稀疏卷积核直接提取三维特征。尽管这些方法从检测精度上看都取得了不错效果,但是由于体素表示在特征提取阶段消耗庞大的计算量使得其检测速度大幅降低。PointPillars^[10]的提出使得三维目标检测速度得到大幅提升。该算法首先利用竖直列,或称之为点云柱(Pillars),对点云进行重组表示,然后通过最大池化操作从Pillars中提取特征,并将提取的特征压缩为鸟瞰图(Bird Eye View, BEV),最后将其输入到二维卷积神经网络进行特征学习。尽管该算法使得三维目标检测速度大幅提升,但仍存在一定问题制约了其检测精度。比如框架内缺乏内部柱状特征学习导致三维局部点云的几何信息丢失,采用最大池化会丢失三维目标的精确位置信息,另外二维卷积神经网络对于多尺度伪图特征学习效率不高。

为解决上述问题,本文首先采用多尺度特征提取模块增强柱内点云特征聚合能力。该模块在每一个Pillar上计算全局特征,然后将柱内点特征按照和全局特征的距离远近排序,最后通过渐进地扩大感受野聚合全局特征相邻的点云特征,从而能刻画出每个Pillar中点云的多尺度信息。更为重要的是,点云局部几何结构和精准位置信息在该过程中得到保留。接着本文基于现有Res2Net^[11]设计多尺度特征提取模块。不同于以往通过逐层方式学习多尺度特征,该模块能从更丰富粒度上实现对伪图特征的学习。通过使用该模块构建基于U-Net^[12]结构的主干网络,能进一步提升其多尺度特征学习能力。

与Pointpillars比,本算法有如下优势:1)参数效率高。在内部柱状点云特征学习阶段没有增加

额外参数量,用于伪图特征学习的二维卷积网络也相对紧凑;2)精确度高。提出的多尺度特征提取模块强化了Pointpillars模型,并在KITTI数据集^[13]上进行验证,取得了具有竞争力的结果。此外本方法继承了PointPillars的检测速度,在未使用NVIDIA TensorRT加速时本方法可达42.2FPS(Frame Per Second)。

综上所述,本论文主要贡献为:1)提出一种基于PointPillars的改进模型,不仅参数利用率高,而且具有更快的检测速度和更高的检测精度;2)提出内部柱状特征学习和多尺度伪图特征提取模块,提升模型对点云的特征学习能力;3)在KITTI数据集上进行实验,验证方法有效性。

2 三维目标检测模型设计

本系统采用的检测模型的总体结构框图如图1所示。该模型结构图主要可分为点云柱状化、多尺度柱内特征学习模块、多尺度伪图特征学习模块以及检测头等四个部分。这里保留PointPillars模型关于点云的柱状化以及检测头部分的设计,而重点研究借助多尺度特征学习方法增强柱内特征以及伪图特征的学习能力,从而提升其检测性能。

2.1 点云柱状化(Pillarization)

由于点云数据本身具有无序性特点,所以很难直接对其进行特征学习,为解决该问题,本文首先对点云数据 L 进行柱状化转换,将其转换为规则的柱状表示。在 $x-y$ 平面采用大小为 $W \times H$ 栅格进行离散化,然后将落在每个栅格中的点视为一个整体,称之为“点云柱”(Pillar),得到三维点云柱状表示:

$$Pillar(L) = [p_j]_{j=1}^M \quad (1)$$

其中: M 代表点云柱数目, $p_j = \{l_{j_1}, l_{j_2}, \dots, l_{j_Q}\}$ 是包含 Q 个点的点云柱^①。对于每个点 l_j ,我们假设其原始特征为包含 (x_j, y_j, z_j, r_j) 的4维特征向量^②。为了进一步丰富点的特征,我们对每个点进行特征扩增,增加了点到所属点云柱中心的距离,点到 $x-y$ 平面投影中心的偏移量等,得到一个9维特征向量 $g_k \in R^9$,最终点云柱表示为 $p_j = \{g_{j_1}, g_{j_2}, \dots, g_{j_Q}\}$ 。

①不同点云柱可能包含不同数目(Q)的点。

②即三维坐标 (x_j, y_j, z_j) 和反射率 r_j 。

2.2 多尺度柱内特征学习模块

为了提取点云柱内特征, PointPillars将点云柱内的点通过全连接层映射到高维特征向量, 并使用最大池化操作进行特征聚合, 然而其并没有考虑每个点云柱内点的空间几何分布, 导致了在聚合过程中位置等信息的丢失, 为后续目标检测带来一定难度。

本文提出多尺度柱内特征学习模块, 其首先对柱内特征通过最大池化获取全局特征, 然后以全局特征为中心, 通过搜索不同数目的最近邻点, 并用不同尺度的聚合特征来增强柱内特征, 从而提升三维目标检测能力。该模块运算流程如下:

首先利用权重共享的单层全连接层将每个点映射为C维的特征向量:

$$h_{j_k} = f_{MLP1}(g_{j_k}) \quad (2)$$

其中, f_{MLP1} 是单层全连接层网络, $g_{j_k} \in R^9$ 为点扩增后的特征向量, h_{j_k} 代表变换后的特征向量。

然后通过最大池化(记为 $Max-Pool$) 获得每个点云柱 p_j 对应的全局特征:

$$h_{j, gbl} = Max - pool([h_{j_1}; \dots; h_{j_q}]) \quad (3)$$

该全局特征仅考虑了每个点云柱内对应的三

维感受野(或者称之为尺度)下的特征。本文以 $h_{j, gbl}$ 为中心, 计算点云柱内的点到全局特征的欧式距离, 并按照距离远近进行排序, 得到排序后的点云特征 $[h_{j_{q_1}}; \dots; h_{j_{q_k}}]$ 。

通过选取前 \hat{k} 个最近的点对应的特征进行聚合, 作为点云柱在相应尺度下的特征:

$$h_{j, gbl}^{\hat{k}} = Max - pool([h_{j_{q_1}}; \dots; h_{j_{q_{\hat{k}}}]]) \quad (4)$$

通过将 \hat{k} 设为不同数值, 可获得关于该点云柱的多尺度特征表示。这里将其分别设为 1、4、8 和 16 来进行相应实验。最后将不同尺度的特征拼接起来, 输入到单层全连接层网络中提取特征, 作为当前点云柱的多尺度表示:

$$\hat{f}_{j, gbl} = f_{MLP2}([h_{j, gbl}^1; \dots; h_{j, gbl}^{16}]) \quad (5)$$

类似地, 本文通过上述运算步骤获得每个点云柱的特征向量, 并将其按照点云柱的索引将其映射到原始栅格上, 得到特征图 $F_L \in R^{W \times H \times C}$ 。其又被称之为“伪图”(pseudo image)。

2.3 多尺度伪图特征学习

对于伪图 F_L , 我们首先将其输入到单层卷积层中将其分辨率减半, 即从 $W \times H$ 变为 $W/2 \times H/2$ 。然后将其输入到一

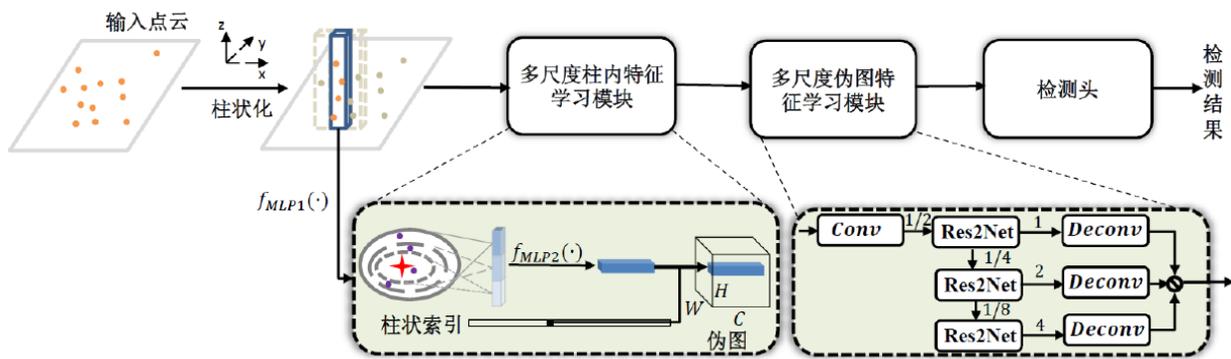


图1 三维目标检测流程框图,其中 Conv 代表卷积层, Deconv 代表反卷积层, Res2Net 代表多尺度特征学习模块

Fig. 1 The overall framework for 3D object detection, where Conv represents convolutional layer, Deconv represents deconvolutional layer, Res2Net represents the module adopted for multi-scale feature learning

个三支的卷积神经网络, 获得分辨率为 $W/2 \times H/2$, $W/4 \times H/4$, $W/8 \times H/8$ 的特征图。和 PointPillars 不同, 本文没有选取传统的逐层多尺度特征提取方法, 而是选择 Res2Net 实现从更多粒度层面获取对原始输入的不同感受野下的特征提取。对于给定输入的特征图, 该模块首先将其切分为一

些特征组, 然后使用一组卷积滤波器提取特征组的多尺度信息。前一组的输出特征将和当前组的特征图一起被送入下一组的滤波器中提取相关尺度信息。该过程重复多次, 直至整个输入特征组均被处理。最后将所有组的输出特征拼接起来, 输入到一组 1×1 的卷积层中进行融合。

Res2Net 在提取多尺度特征上主要有两个优点:1)由于组合效应,每一个特征流通路均可视为相应尺度的特征学习过程,因此具有更强的特征学习能力;2)学习多尺度特征更加灵活,可按照实际需求,实现对多尺度特征学习控制。

给定上述多尺度融合的特征,分别在特征图的每个位置回归出对应的包围盒类别、大小、位置、朝向等信息。

3 实验分析

本实验采用改进 PointPillars 为基本网络框架,在 KITTI 公开数据集进行实验。本文采用平均精度 (Average Precision, AP) 评估指标评估模型性能。

3.1 KITTI 数据集

在 KITTI VAL 数据集中,我们对比了两个代表性模型—PointPillars 和 SA-SSD [14], 如表 1 所示。

表1 在 KITTI VAL 数据集上,在多类训练设置下关于 3D AP 的性能对比(%)

Table1 Performance comparisons against other state-of-the-art methods on the KITTI VAL dataset in terms of 3D AP under multi-class settings

检测模型	小汽车			行人			骑行者		
	易	适中	难	易	适中	难	易	适中	难
PointPillars	86.3	76.9	75.5	53.6	48.2	44.8	81.2	65.5	61.3
SA-SSD	89.7	79.4	78.3	55.8	48.0	41.9	82.8	63.4	61.6
本方案检测模型	88.1	77.8	76.2	57.8	52.5	47.4	85.0	66.4	63.2

表2 在 KITTI TEST 数据集“小汽车”类别性能对比(FPR-CNN 代表 FastPoint R-CNN)

Table2 Performance comparisons on car class of the KITTI TEST dataset

检测模型	BEVAP(%)			3DAP(%)		
	易	适中	难	易	适中	难
PointPillars	90.1	86.6	82.8	82.6	74.3	69.0
FPR-CNN	90.9	87.8	80.5	85.3	77.4	70.2
本方案模型	91.1	87.4	82.3	84.3	77.1	72.0

3.2 模型大小和推理速度分析

本模型在设计上沿用了 Pointpillars 的设计思路,因此具有很高的点云处理速度。如表 3,在配置有 Intel (R) Xeon (R) CPU E5-2678v3, 4 张 GeForce RTX 2080 ti 服务器上,其推理速度最快可

与 PointPillars 比,本方案检测模型在小汽车类别上的检测精度平均领先超过 1%,而在行人和骑行者类别上的检测精度则大幅领先 4% 左右。与 SA-SSD 比,本方案检测模型在小汽车类别上的检测精度低于 SA-SSD,但在行人和骑行者的检测精度平均领先超过 2%。

我们进一步在 KITTI TEST 数据集中进行验证。如表 2 所示,本方案在小汽车类别上同样具有较高的检测精度。与 PointPillars 相比,本方法在 BEV AP 指标上关于易、适中两种设置上领先 1%,在难得设置上也取得了相当的性能;在 3D AP 指标上,本方案模型均大幅领先 PointPillars,在易、难、适中任务中分别领先 1.7%、2.8%、3.0%。与 FastPoint R-CNN [15] 比,各项性能指标相当,但本模型更加轻量化,因此具有一定优势。

达 42.2FPS,因此能够满足实时性运算要求。此外本模型更加轻量化,大小仅有 12.1MB。

表3 模型推理速度、参数量和和大小对比

Table4 Model comparisons in terms of inference speed, parameter size, memory footprint

检测模型	参数量	推理速度	TensorRT 加速	模型大小
PointPillars	4.83M	29.1FPS	42.4	19.4MB
本方案	3.02M	42.2FPS	69.0	12.1MB

3.3 可视化分析

本模型在数据集中的检测结果可视化如图 3 所示。可以看出,本算法在目标框的检测准确性及定位精度上均达到高水平的检测精度。

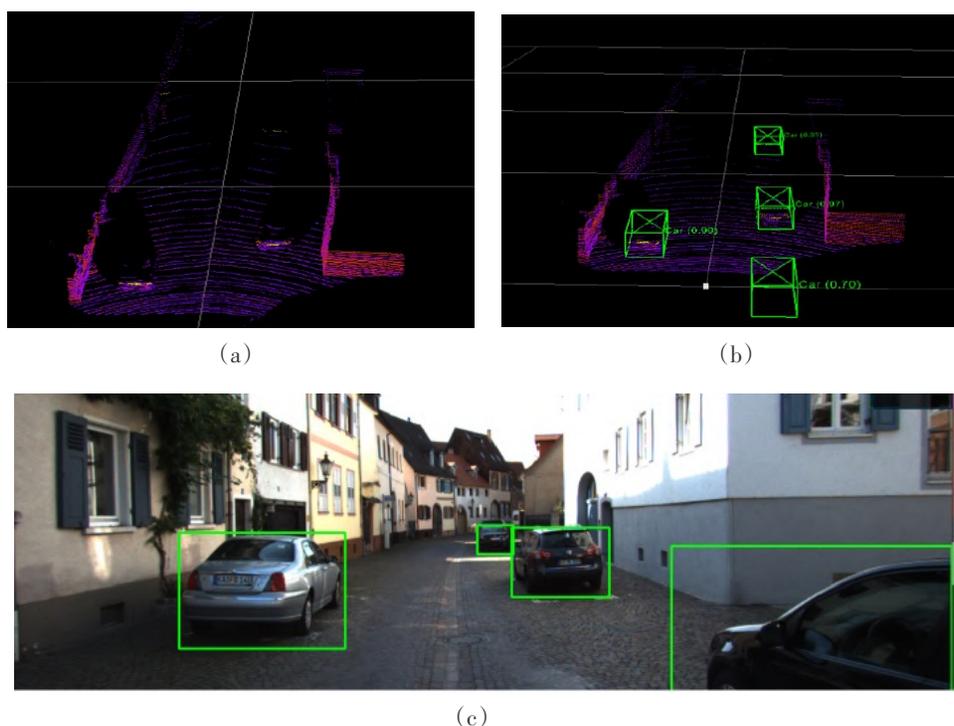


图2 模型检测结果在KITTI数据集上的可视化,其中(a)代表输入点云,(b)代表模型检测结果,(c)代表模型检测结果在2D图像上的投影

Fig. 2 Visualizations of the detection results on KITTI, where (a) represents input point cloud, (b) represents detection results, (c) represents projection results on 2D images for the detected 3D bounding boxes

4 结论

本论文基于PointPillars,分别提出柱内特征和多尺度伪图特征的学习模块,提升其对点云的特征学习能力。在KITTI数据集上展开实验,证明本方法不仅参数利用率高,而且检测性能和速度均领先PointPillars。

参 考 文 献

- [1] Li B, Ouyang W, Sheng L, Zeng X, Wang X. Gs3d: An efficient 3d object detection framework for autonomous driving[C]. InProc. CVPR 2019.
- [2] Arnold E, Al-Jarrah OY, Dianati M, Fallah S, Oxtoby D, Mouzakiti A. A survey on 3d object detection methods for autonomous driving applications [J]. IEEE TITS 2019.
- [3] Wang Y, Chao WL, Garg D, Hariharan B, Campbell M, Weinberger KQ. Pseudo-lidar from visual depth estimation: Bridging the gap in 3d object detection for autonomous driving [C]. In Proc. CVPR 2019.
- [4] Kuo HY, Su HR, Lai SH, Wu CC. August. 3D object detection and pose estimation from depth image for robotic bin picking[C]. InProc. CASE 2014.
- [5] Minemura K, Liao H, Monroy A, Kato S. LMNet: Real-time multiclass object detection on CPU using 3D LiDAR [C]. In 2018 3rd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS), IEEE, July, 2018.
- [6] Talukder A, Goldberg S, Matthies L, Ansar A. Real-time detection of moving objects in a dynamic scene from moving robotic vehicles [C]. In Proc. IROS 2003.
- [7] Kim DI, Sukhatme GS. Semantic labeling of 3d point clouds with object affordance for robot manipulation [C]. In Proc. ICRA 2014.
- [8] Zhou Y, Tuzel O. Voxelnet: End-to-end learning for point cloud based 3d object detection [C]. In Proc. CVPR 2018.
- [9] Yan Y, Mao Y, Li B. Second: Sparsely embedded convolutional detection [J]. Sensors 2018.
- [10] Lang AH, Vora S, Caesar H, Zhou L, Yang J, Beijbom O. Pointpillars: Fast encoders for object detection from point clouds [C]. In Proc. CVPR 2019.
- [11] Gao S, Cheng MM, Zhao K, Zhang XY, Yang MH, Torr PH. Res2net: A new multi-scale backbone architecture [J]. IEEE TPAMI 2019.
- [12] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention, Springer, Cham, October, 2015.
- [13] Geiger A, Lenz P, Stiller C, Urtasun R. Vision meets robotics:

The kitti dataset [J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(11): 1231-1237.

[14] He C, Zeng H, Huang J, Hua XS, Zhang L. Structure aware single-stage 3d object detection from point cloud [C]. In Proc. CVPR 2020.

[15] Chen Y, Liu S, Shen X, Jia J. Fast point r-cnn [C]. In Proc. CVPR 2018.

作者简介:

何新卫(1989-),男,博士,工程师,研究方向包括三维目标检测、三维模型检索以及图像标题生成。

闫阿泽(1989-),男,工程博士在读,高级工程师,研究方向为

三维目标检测。

陈龙(1993-),男,硕士,助理工程师,研究方向为三维目标检测。

侯鹏程(1991-),男,硕士,工程师,研究方向为三维目标检测。

董丹丹(1992-),女,硕士,工程师,主要研究方向为三维目标检测。

马雅婷(1996-),女,硕士,助理工程师,研究方向为三维目标检测。

地基雷达无人化系统设计

张景东, 汪润生, 赵明旭, 张荣斌

(63615部队, 库尔勒 841001)

摘要: 随着无人化技术和太空探索能力的发展, 将无人化应用于太空探索和监视的前景越来越广阔。地基雷达作为太空态势感知的关键装备, 无人化系统必不可少。结合地基雷达系统特点, 从无人化系统设计的要求出发, 提出了基于自动化、智能化、信息化和网络化的无人系统设计方案。首先分析了无人化系统与地基雷达结合的自动化运行流程, 提出“七个自动”; 其次针对地基雷达工作特点, 设计无人操作平台; 最后分析了无人化系统的保障方法, 为无人化技术服务于航空航天提供借鉴和参考。

关键词: 无人化; 自动化; 地基雷达; 无人系统; 太空态势感知; 系统设计

Design of Unmanned System for Ground-based Radar

ZHANG Jingdong, Wang Runsheng, Zhao Mingxu, ZHANG Rongbin

(Unit 63615, Korla 841001, China)

Abstract: With the development of unmanned technology and space exploration capabilities, the prospect of unmanned space exploration and surveillance is more and more broad. As the key equipment of space situational awareness, ground-based radar is indispensable for unmanned system. According to the characteristics of ground-based radar system and the requirements of unmanned system design, a design scheme of unmanned system based on automation, intelligence, information and network is proposed. Firstly, the automatic operation process of unmanned system combined with ground-based radar, and "seven automations" are proposed. Secondly, the unmanned operating platform is designed according to the working characteristics of ground-based radar. Finally, the support methods of unmanned system is analyzed, which is used to provide reference for unmanned technology.

Key words: Unmanned; Automation; Ground-based Radar; Unmanned System; Space Situational Awareness; System Design

1 引言

近年来,大数据、云计算和人工智能技术飞速发展,使无人化技术这一领域取得了前所未有的突破。从无人化智能化装备体系到系统应用平台,无人化系统不但注重与整体作战系统的融合,而且根据不同的作战要求发展出种类丰富的装备和平台^[1-2]。根据无人化技术应用的实际情况看,大多数集中在无人机、无人车、机器人等方面,在地基雷达等大型装备上还应用较少。

近两年,随着航空航天技术的崛起,人类对太空领域的探索有了新的飞越。2019年5月23日,美国SpaceX公司“星链”第一批60颗卫星发射成功;2021年4月23日,SpaceX龙飞船搭载4名宇航员发

射升空;近两年,美国开始计划火星探测与移民……,这些现象说明,人类在继陆地、海洋、大气层之后,已逐步将探索和生存领域扩展深入到太空。由此,也对太空环境和态势发展变化提出了新的感知要求,如卫星发射前的碰撞预警探测、空间目标在轨运行监视、深空探索技术等等。

为有效进行太空态势感知活动,需要依靠雷达、遥测、光电设备等获取数据和信息。地基雷达作为发展最早、最成熟的装备,具有全天时、全天候工作的特点,尤其是大型相控阵雷达,在目标跟踪和空间探索方面有独特的优势^[3]。

然而,随着太空探索的深入,人类发射的卫星和其他各类航天器越来越多,对空间目标监视的需

求也越来越大,由此也生产制造了越来越多的雷达设备,造成目标监视负担越来越重,人手不足的现象也开始凸显且日益加重。

针对这一问题,无人化技术能大大缓解人员配备不足和装备正常运行之间的矛盾。但在大型雷达等结构复杂、分系统多、操作控制多的装备上,还有较大的应用限制。因此,结合无人化技术发展和未来应用趋势,本文针对大型地基雷达无人化运行需求,设计了一套系统方案,希望可以为地基雷达无人化运行提供借鉴。

2 系统设计要求

地面无人装备在机动作战领域发展极为迅速,当今最先进的机械电子、指挥控制、传感探测以及人工智能等技术纷纷得到应用和实战,无人化、机械化、信息化和智能化高度融合^[4]。地基雷达作为地面设备之一,若要应用无人化技术,发挥无人化优势,其系统设计离不开以下几个方面。

2.1 自动化运行

地基雷达的自动化运行是实现无人化系统的关键和基础。针对地基雷达空间目标监视任务,自动化需要实现的主要功能为监视计划自动接收、跟踪方案自动生成、雷达自动开机、方案自动加载、设备自动跟踪、数据自动传输、设备自动关机,概括起来就是“七个自动”。要实现这些自动化,需要根据地基雷达系统特点,设计好流程,使雷达有序执行各项指令,并做好各个分系统的状态监视以及对电源系统的智能管理,确保系统运行流畅。

2.2 智能化交互

无人化系统应能做到“无人胜有人”,即在该系下,人员可以通过指令控制雷达的开机、运行以及关机。与此同时,雷达在该系统下能正常响应这些指令,且具备一定的与执行任务相匹配的智能控制能力。主要表现在一是可以根据预定的规划和指令正常运行,二是可以在任务执行过程中响应人在回路的应变指令^[5],三是可以根据探测目标的空间位置,自主确定最优捕获方案,以实现目标跟踪监视。除此之外,系统在响应指令后,应能进行实时反馈,对于指令执行结果进行交互,如发送状态指示信号等,以确保“指令能下达,执行有反馈”。对于有计划的任务,系统可以事先生成执行

方案,提交人员审定,在方案执行前予以提醒和确认。

2.3 信息化数据

随着计算机技术的发展,装备信息化水平也得到了飞速进步。无人化系统对装备信息化要求更高,一是体现在地基雷达获取数据的信息化,数据记录存储后,可通过软件进行分析处理,形成图片、报告等;二是体现在地基雷达状态采集的信息化,各分系统的关键指标可测量并存储传输,从而实现对雷达的状态监视;三是体现在故障告警的信息化,通过故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)系统实现对雷达的健康管理和保障^[6];四是体现在操作日志的信息化,对于雷达运行信息、关键操作进行记录,做到指令执行可追溯。

2.4 网络化传输

目前无人装备的军事通信传输方式发展较快和应用较多的有两种,一种是基于地面或低空中继连接,另一种是基于卫星传输^[7]。这两种方式主要在机动设备上应用,地基雷达作为相对固定装备,其通信方式可以采用更稳定、安全和可靠的物理线缆方式。在地基雷达上布局相关接口,将控制指令、雷达数据信息、状态采集信息等进行交互传输,从而实现对雷达的控制和有效信息的获取。

3 系统设计方案

根据设计要求,结合地基雷达特点,若要实现无人化运行,首先需要雷达能够按照任务计划和指令自动自主运行,完成目标的探测和跟踪;其次需要将雷达获取的数据和信息送至数据处理人员和作战指挥决策人员,实现有效的价值利用;最后需要利用现代化保障技术,确保整个系统能够稳定可靠的运行。因此,着眼于这三方面,将无人化系统设计如下。

3.1 系统自动运行设计

以典型的大型地基相控阵雷达为例,根据无人化自动运行的要求,设计流程如下图所示。

整个系统包含指挥中心、软件处理、地基雷达以及反馈回路。指挥中心根据空间监视探测需求,制定监视计划和下达任务指令,并通过中心软件和网络传输至地基雷达装备端;无人化系统位于雷达

端的软件接收到指令和计划后,开始进行处理,根据目标在空中的分布情况以及需要搜索监视的区域,设置合理的开机方案和参数配置,并形成执行方案;到达开机时刻后,利用智能电源管控和网络指令传输,实现图1中所示的雷达“五个自动”;信息反馈主要包括两个方面,一是将异常信息及时反馈至指挥中心,进行应急处理;另一方面是将雷达状态和跟踪数据进行实时发送,便于信息的集中处理和分析。

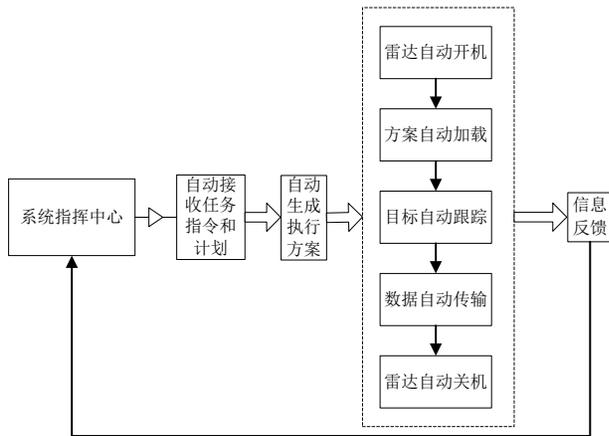


图1 系统自动运行流程图

Fig. 1 Flow chart of automatic operating system

地基雷达作为一个多系统的装备,要实现自动化,需要将内部控制、数据交互、结构搭配协调一致,因此,将地基雷达典型无人控制平台设计如图2所示。

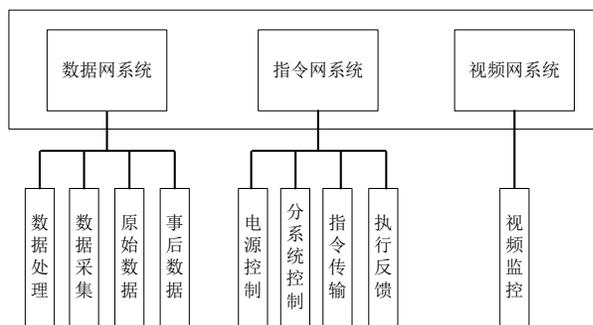


图2 雷达无人化平台组成

Fig. 2 Platform of unmanned radar composition

雷达端主要由数据网、指令网、视频网系统组成。其中,数据网主要进行数据的传输,将雷达采集的原始数据以及经过处理的事后数据传送至指

挥中心;指令网主要进行控制指令的传输,包括电源开关指令、发射机和接收机等分系统的控制指令以及指令执行结果的状态反馈;视频监控主要用于传输雷达端的实时图像。

3.2 系统无人化保障

现代战争和未来战争的复杂性和不确定性给军事装备保障提出了新的更高要求^[8],只有保障到位,才能持续战斗。地基雷达作为战场环境感知和辅助决策装备,能为作战指挥人员提供大量有价值的信息。因此,做好无人化系统的保障异常重要。

一是要利用人工智能等先进技术,提高信息利用的辅助决策水平,通过不断地学习训练积累经验,包括目标自动识别、跟踪方案自动改进等;

二是利用现代化质量管理技术,提升装备质量,或针对特定用途生产相应产品,使之适应各种环境,降低故障率,确保装备运行可靠,数据指令传输畅通;

三是利用信息化技术提高保障效率,做好雷达状态监测,定期进行指标测试和记录,按时完成装备维护工作,备板备件库存根据实际情况做好供应,对线缆线路进行定期检查和维修,利用信息化保障技术,确保无人化系统稳定可靠。

4 结论

随着无人化技术和航空航天技术的深入发展,各国都开始聚焦于太空探索和太空资源利用。地基雷达作为太空探索和航天发射的保障装备,为更好开拓太空领域,我们应当将无人化系统和地基雷达系统有效结合,打造现代化、正规化的无人雷达,切实提高装备的利用效率和辅助作战能力。

参 考 文 献

- [1] 刘海江,李宪港,梁铭.加速无人化装备技术发展的思考[J].国防科技,2020,41(6):28-32.
- [2] 张西山,连光耀,李会杰,等.智能化无人保障装备发展及应用[J].国防科技,2020,41(2):10-14.
- [3] 高梅国,付伦.空间目标监视和测量雷达技术[M].北京:国防工业出版社,2017:4-9.
- [4] 于丽莉,何明利,陶溢.地面无人装备对未来陆战的影响及对策[J].国防科技,2020,41(6):33-37.
- [5] 石章松,左丹.无人作战平台智能指挥控制系统结构[J].指挥信息系统与技术,2012,3(4):12-15.

- [6] 赵明旭,刘志栋,张景东,等. 基于PHM技术的测控装备维修保障模式设计[C]. 航空装备服务保障与维修技术论坛,南昌,2019年12月5-7日.
- [7] 王幸运,陈海. 无人作战系统的应用及关键问题探究[J]. 军事文摘,2021(4):22-27.
- [8] 苗学问,胡杨,钱征文,等. 航空装备智能保障系统论证研究[J]. 测控技术,2020,39(12):22-27.

作者简介:

张景东(1986-),男,硕士,工程师,主要研究方向为雷达

测控。本文通讯作者。

汪润生(1984-),男,硕士,工程师,主要研究方向为雷达数据处理。

赵明旭(1984-),男,本科,工程师,主要研究方向为雷达测控。

张荣斌(1996-),男,本科,助理工程师,主要研究方向为雷达数据处理。

基于元任务字典的无人集群作战任务分解技术研究

邱江芬, 张 勇, 李晓琴, 王亚儒, 马汝冰

(北方自动控制技术研究所, 太原 030006)

摘 要: 目前作战任务生成以人工分解为主, 难以适应无人集群作战对作战任务快速、自动、精准分解分配的需求。本文中首先对作战场景特征要素建模、无人平台任务能力, 建立场景与执行元任务的关联关系, 分析基于元任务字典的无人集群作战任务分解机制; 然后建立任务分解数学问题描述, 提出扩展的HTN算法。

关键词: 无人机群; 作战场景作战任务分解HTN任务字典

Research on Unmanned Cluster Combat Mission Decomposition Method Based on Meta-task Dictionary

DI Jiangfen, ZHANG Yong, LI XiaoQin, WANG Yaru, MA Rubing

(North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006 China)

Abstract: At present, the combat task generation is dominated by manual decomposition, which is difficult to adapt to unmanned cluster combat quickly, automatic, accurate decomposition and distribution demands. The paper first establishes the models of combat characteristic elements, the task capability of unmanned platform, the correlation between the scene and the performance of the meta-function fatigue. Secondly, the task decomposition mechanism of unmanned cluster combat is analyzed based on meta-function multi-dictionary. Finally, a task decomposition mathematical problem description is established and an extended HTN algorithm is proposed.

Key words: combat characteristic elements; unmanned cluster combat; combat task generation; HTN; Task-Dictionary

1 引言

自主无人作战系统逐步走向实战, 在未来战争中发挥不可替代的重要作用^[1]。无人集群任务规划中的任务分解, 是无人集群任务规划和作战使用过程中需重点考虑的问题^{[2][3]}, 是基于对集群任务的理解, 对空、地集群的任务合理分解, 也是集群任务规划^[4]的核心。目前作战任务生成以人工分解为主, 难以适应无人集群作战对作战任务快速、自动、精准分解分配的需求, 因此亟待分析无人装备的作战能力、典型作战场景和作战样式下, 无人集群任务分解的问题建模和自动任务分解算法, 为无人集群自主决策和自主规划^[5]提供支撑。

2 总体设计

2.1 设计思路

不同的作战场景需求不同的作战任务, 不同的作战任务适用于不同的作战场景, 作战场景包括兵力、

时间、空间、战场态势等要素, 而作战任务具备作战时间、作战区域、作战兵力等属性, 且战场环境也是考虑拟定作战任务的重要条件, 因而作战任务和作战场景密切相关。故可探寻作战场景和作战任务的共性要素, 分析两者之间的关联关系, 研究作战场景与作战任务的匹配机理。通过对作战场景要素建模; 对无人集群类型众多无人作战平台的性能参数、载荷种类、作战能力及用途等分析, 形成对作战行为的元任务字典描述及表征; 根据作战场

景去匹配作战样式及元任务字典中的作战任务,设计自动分解算法,对匹配到的作战任务模板进行细化分解和调整,最终生成联合作战任务清单^{[6][7]}。支撑作战任务的合理分配以及调整,确保无人平台能够发挥其最大作战效能。

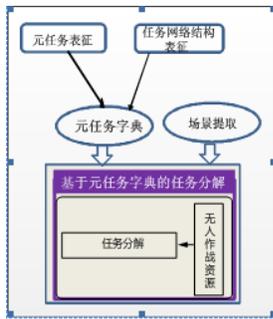


图1 基于元任务字典的无人集群作战任务分解总体思路

2.2 机理分析

基于元任务字典的无人集群作战任务分解机制如图2所示。

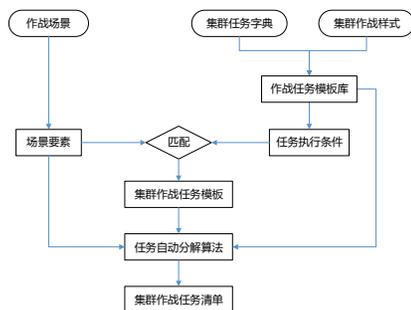


图2 基于元任务字典的无人集群作战任务分解机制

首先,基于集群作战任务的作战场景,提取作战场景中关于兵力、火力、时间、空间、水文、气象、地形、道路、电磁环境、人文等方面^[8]的数据作为特征要素,要求提取的特征要素可以完整的复现作战场景的关键数据。

其次,分析无人集群作战等典型作战样式的作战流程^{[9][10][11]},提取作战任务及其执行条件(包括兵力、时间、空间、气象、地形、道路等),分析无人集群的类型、性能参数、载荷种类、作战能力及用途等因素,建立范式化描述的元任务字典。

再次,对作战场景的特征要素与元任务字典中的任务执行条件进行匹配,当相似度大于给定阈值

时,选择匹配到的作战样式及其作战任务模板作为集群作战任务模板。进而,采用任务分解算法^[12]进行自动分解,得到无人集群作战任务清单。

3 无人集群任务分解方法建模

3.1 集群协同作战任务建模和表征方法

由于无人作战平台类型众多,其性能参数、载荷种类、作战能力及用途等存在差异,对无人集群作战行为进行建模,形成对作战行为的正交完备描述及表征,是无人集群作战行为规划及临机调整的基础。元任务建模理论是实现作战任务范式化描述和表征的重要途径,能够通过对任务类型、任务执行影响因素的抽象与提炼,形成对作战任务的精确化、数字化描述,形成无人作战元任务集。

任务的规范化描述如下图所示。作战任务通过任务清单及任务关系描述,任务清单通过任务描述,任务通过任务内码、任务序号、任务名称、任务类型等描述;任务关系通过任务内码、关系任务内码等属性描述。详见下图3所示。

3.2 元任务字典构建方法

元任务建模能够通过通过对任务类型、任务执行影响因素的抽象与提炼,形成对作战任务的精确化、数字化描述,形成无人作战元任务集。还能够根据无人集群的类型、性能参数、载荷种类、作战能力及用途等因素,建立起无人集群与作战元任务字典之间的映射关系。

3.3 场景特征要素建模

场景特征要素重点考虑兵力特征要素、时间特征要素、空间特征要素、战场环境特征要素及战场目标特征要素^[13]。各类场景要素的主要属性如下表所示:

4 基于元任务字典的集群任务分解算法

扩展HTN(Hierarchical Task Network, HTN)^[14]规划方法的基本思想是不断地将高层复合任务分解为简单的子任务。当所有的任务都是可以直接执行的元任务,分解过程停止。HTN规划中任务规划P定义为一个三元组 $P = \{I, W, D\}$ 。其中I表示战场态势的初始状态;W表示任务网络;D表示规划域知识^[15]。

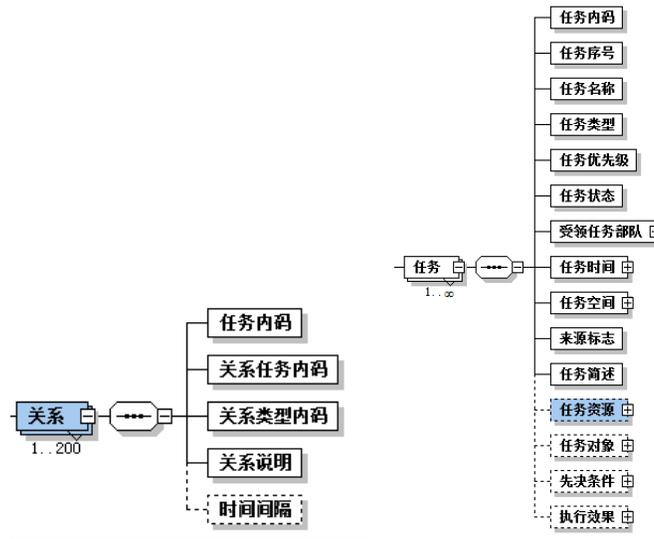


图3 任务网络及任务表征描述

序号	场景特征要素	主要内容
1	兵力特征要素 编组兵力要素	军种、兵种、兵力个类别、部队级别、兵力状态等。其中兵力类别包括指挥机构、车辆、武器装备、单兵等。
2	武器装备要素	战斗装备和保障装备。
3	时间特征要素	某一时间段(点)。
4	空间特征要素	物理空间、信息空间、认知空间等。
5	战场环境特征要素	地理环境 地形、地貌、道路、标志物等要素
	气象环境	温度、湿度、大气压、雨况、云层高度及覆盖情况、不同高度风向及速度等
	电磁环境	干扰源、通信设备、雷达设备等
	水文环境	水系、湖泊
	战场人工环境	障碍、战壕、雷场、阵地、工事等
6	战场目标特征	目标基本属性 敌、我、友、中立方的空中、空间、地面、水面、水下等战场空间目标的位置、状态等
	目标预测属性	敌、我、友、中立方的空中、空间、地面、水面等目标的机动预测、轨迹估计等
	目标关联属性	兵力部署和规划等(作战区域、兵力部署、作战计划、航迹规划等)

4.1 任务分解问题描述

1) 任务集合T

令任务集合T中子任务为 T_{ij} : $T = \{T_{ij} | i = 1, 2, \dots, x, j = 1, 2, \dots, y\}$

i 表示任务层级,该层的任务数量记为 N , j 表示排序后的任务序号,即 T_{ij} 为第 i 层的第 j 个任务。单个子任务定义为一个四元组: $T_{ij} = \{name, ID, plist, dtime\}$ 。其中 $name$ 为任务名称; ID 为任务编号; $plist$ 为任务的属性特征参数列表。 $dtime$ 为子任务的时间集。

2) 任务关系集合R

R 为任务分解问题中复杂相互关系集合,令 $R =$

$\{R_{set}, \phi\}$ 。其中 R_{set} 为逻辑关系集合, ϕ 为约束关系集合。逻辑关系集合 R_{set} :表示任务间的依赖关系,与集群作战任务关系结合,综合得出任务逻辑关系集合。令 $T_{ia} \rightarrow T_{ib}$ 表示源任务 T_{ia} 与目标任务 T_{ib} 之间的关系。取任务 T_{ia} 的关系集为 $R_{setia} \in R_{set}$ 。任务间的逻辑关系如下表。

约束关系集合 ϕ :约束关系集合 ϕ 是对分解方法的选择以及分解过程的约束。令 $\phi = \{\phi_t, \phi_c\}$, ϕ_t 为时间约束, $\phi_t = \{c_{deadline}, c_{Rset}\}$, $c_{deadline}$ 为任务的时长约束; c_{Rset} 为任务间时序关系约束, c_{Rset} 与逻辑关系集合 R_{set} 关联。 ϕ_c 为成本约束。

序号	任务关系名称	符号表示	任务关系含义
1	并发促进关系	Facilitate(T_{ia}, T_{ib})	T_{ia} 任务的执行结果对 T_{ib} 任务存在有利促进影响。
2	并发阻碍关系	Hinder(T_{ia}, T_{ib})	T_{ia} 任务的执行结果对 T_{ib} 任务存在不利阻碍影响。
3	顺序与关系	EnableAnd(T_{ia}, T_{ib})	只有在 T_{ia} 被执行后, T_{ib} 才允许被执行,且 T_{ia} 任务和 T_{ib} 任务都需成功执行,其父任务才可成功执行。
4	顺序选择关系	EnableSelect(T_{ia}, T_{ib})	只有在 T_{ia} 被执行后, T_{ib} 才允许被执行,且 T_{ia} 任务和 T_{ib} 任务仅需成功执行一个,其父任务即可成功执行。

3) 规划域知识D

取任务 T_{ij} ,令 $D=\{M, OP\}$ 。M为任务分解方法集,有 $m(k) \in M_{actij} \in M, M_{actij}$ 为任务 T_{ij} 的子分解方法集。 $m(k)$ 为 M_{actij} 中一个分解方法,k为序号。 $m(k) = \{name', W_{m(k)}\}$, $name'$ 为复合任务的名称, $W_{m(k)}$ 为方法 $m(k)$ 对应的任务网络。

4.2 扩展HTN规划集群作战任务分解算法流程

设定分类标准g,若 $g=1$,任务 T_{ij} 为复合任务;若 $g=0$,任务 T_{ij} 为元任务。依据时间约束 ϕ_i 对第一层待分解任务排序,并分配任务序号j,依据任务序号j顺序选择任务执行分解流程。

依据任务序号取任务 T_{ij} 判断类型为复合任务后,将任务 T_{ij} 的参数列表 $plist=\{function\}$ 作用于任务分解方法集M,得到任务 T_{ij} 的子方法集 M_{actij} 。令子方法集 M_{actij} 中子方法 $m(k)$ 个数为Q,依次调用子方法集 M_{actij} 中Q个方法分解任务 T_{ij} 。并通过判断是否可以将任务 T_{ij} 替换为对应方法 $m(k)$ 的任务网络来完成,判定所选方法 $m(k)$ 是否为有效方法。若替换成功,保留有效方法 $m(k)$,同时将 T_{ij} 及分解后的子任务集存放于任务网络 W_0 中;若替换失败则分解失败,从子方法集 M_{actij} 中移除无效方法 $m(k)$ 。算法流程如下图4所示:

5 结束语

在未来战争中大量不同类型、不同性能的无人装备组成的集群越来越多的运用到多种作战场景执行不同的任务,在对其进行任务规划过程中,针对无人集群作战对作战任务快速、自动、精准分解的需求。本文中首先对作战场景特征要素建模、元任务字典构建,分析基于元任务字典的无人集群作战任务分解机制;并建立任务分解数学问题描述,最后采用扩展的HTN算法流程解决无人集群任务自动分解,为无人集群自主规划、自主决策提供前提。

参考文献

[1] 毛红保,田松,晁爱农. 无人机任务规划[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
 [2] 王然然,魏文领,杨铭超等. 考虑协同航路规划的多无人机任务分配[J]. 航空学报. 2020(41)
 [3] 陆海空应用中心. 多军种战术、技术和程序(MTTP)无人机系统战术应用. 北京:知远战略与防务研究所. 2015
 [4] 万路军,姚佩阳,孙鹏. 有人/无人作战智能体分布式任务分配方法[J]. 系统工程与电子技术. 2013.2, 35(2): 310-317.
 [5] 樊锐,张鑫龙,马磊等. 有人/无人协同作战研究[J]. 中国电子科学研究院学报. 2020.3, 15(3): 230-236.

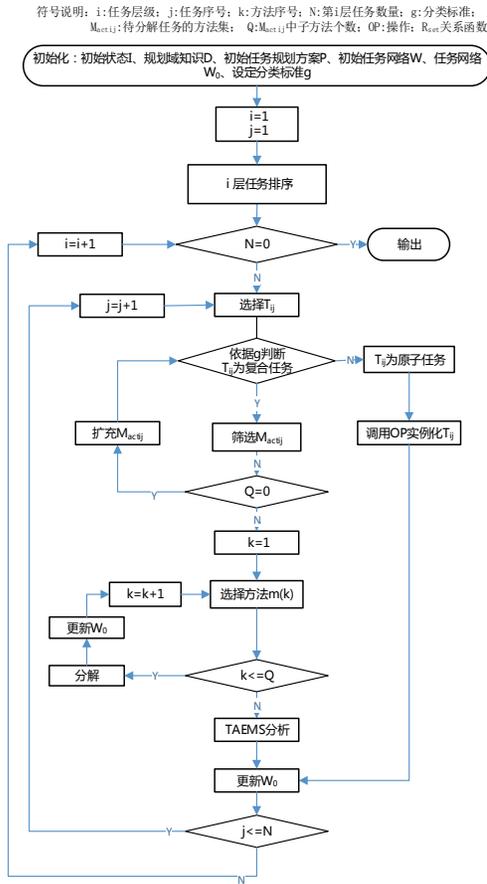


图4 作战任务分解算法流程

- [6] 齐智敏,黄谦,张海林.智能无人集群作战任务规划系统架构设计[J].军事运筹与系统工程.2019.3.
- [7] 李浩,范翔宇,金宏斌等.基于集群智能的无人机集群作战任务规划研究[M].国防工业出版社.2019.9.
- [8] 吕震华,高亢.美国无人集群城市作战应用发展综述[J].中国电子科学研究院学报.2020.8,15(8):738-745.
- [9] 唐嘉钰,李相民,代进进.美军无人机防空压制作战运用分[J].飞航导弹.2020.5.
- [10] 李五洲,胡雷刚,王峰.美军直升机与无人机蜂群协同作战使用分析[J].中国电子科学研究院学报.2020.3,15(3):230-236.
- [11] 董文洪,马培蓓,纪军.攻击型无人机作战过程研究[J].战术导弹技术.2018.1.
- [12] 胡利平,梁晓龙,何吕龙等.基于情景分析的航空集群决策规则库构建方法[J].航空学报.2020.6.
- [13] 马硕,马亚平.异构无人系统群协同作战任务规划方法[J].指挥控制与仿真.2019.4.
- [14] 耿松涛,操新文,李晓宁等.基于扩展层级任务网络的联合作战电子对抗任务分解方法[J].装甲兵工程学院学报.2018.32(5):8-13.
- [15] 李晶晶,王红卫,祁超等.HTN规划中的资源缺项识别方法[J].系统工程理论与实践.2013.33(7):1729-1734.

作者简介:

邸江芬(1976-),女,硕士研究生,正高级工程师,研究方向:无人作战任务规划技术。本文通讯作者。

张勇(1950-),男,硕士研究生,主任/正高级工程师,研究方向:指挥信息系统,系统工程。

靶机加装交叉眼干扰设备方法研究

李洪涛

(中国人民解放军92941部队44分队, 葫芦岛 125000)

摘要: 角跟踪雷达导引头广泛采用单脉冲角跟踪技术, 针对传统靶机在防空导弹武器系统考核鉴定缺少有效的单脉冲雷达干扰手段, 提出一种在靶机上加装自卫式单脉冲雷达干扰技术(即交叉眼干扰技术)。介绍了“交叉眼”干扰的基本原理, 靶机加装交叉眼的方案设计及仿真, 通过论证, 证明靶机加装交叉眼干扰设备具备可行性。

关键词: 靶机; 交叉眼干扰; 方法研究

Study on the Method of Installing Cross Eye Interference Equipment on Target Drone

LI Hongtao

(Unit 44 of PLA 92941, Huludao, 125000)

Abstract: Monopulse Angle tracking technology is widely used in Angle tracking radar seeker. In view of the lack of effective monopulse radar jamming means for traditional target aircraft in the assessment and identification of air defense missile weapon system, a self-defense monopulse radar jamming technology (cross eye jamming technology) is proposed. This paper introduces the basic principle of "cross-eye" interference, the design and simulation of adding cross-eye to target drone, and proves that it is feasible to install cross-eye interference equipment to target drone.

Key words: target drone; Cross eye interference; Methods to study

1 引言

交叉眼干扰技术,是能够有效对抗单脉冲角跟踪系统的干扰技术之一。目前已知美、欧、俄等国已经有部分机型加装了交叉眼干扰设备,具备了对主动雷达制导导弹的角度干扰能力。靶机作为模拟强敌的蓝军装备,迫切需要具备交叉眼干扰能力,实现对主动雷达制导导弹的对抗能力,以期在导弹武器试验鉴定中构设逼近实战的电磁干扰环境,检验导弹导引头单脉冲测角雷达抗干扰能力。

2 靶机加装“交叉眼”干扰理论依据

2.1 “交叉眼”干扰基本原理

交叉眼干扰也被称为两电源干扰,通过在空间上相隔一定距离的两个或多个干扰辐射源,接收并按照满足一定相位和功率参数转发被干扰的雷达

波,各发射信号在雷达天线相位中心所在空间点的局部合成特殊辐射场。辐射场内信号的相位波前的雷达位置局部产生波程差,造成位置假象,以达到角度欺骗的目的。适当的选择交叉眼的干扰参数,能使被干扰雷达的瞄准轴超出两干扰源连线的方向,进而产生角度误差[1]。通常交叉眼干扰机由两路独立的干扰机组成,如图1所示。

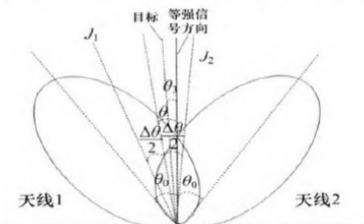


图1 交叉眼干扰原理图

Fig. 1 Schematic diagram of cross-eye interference

如图1所示, J_1 、 J_2 为两个干扰信号, A_r 、 A_{J_1} 、 A_{J_2} 为分别为回波信号和 J_1 、 J_2 的幅度。设 θ_0 为最大增益方向与等强信号方向的夹角, θ_3 为目标回波偏离等强信号方向的张角, θ 为两干扰中心线与等强信号方向的张角, $\Delta\theta$ 为两个干扰源之间的夹角。 ϕ_1 和 ϕ_2 分别为干扰信号 J_2 和目标回波信号相对于干扰信号 J_1 的相位差, 则雷达天线1、2接收到的信号为^[2]:

$$S_1 = (AJ_1 F(\theta_0 - \Delta\theta/2 - \theta) + A_{J_2} F(\theta_0 - \Delta\theta/2 - \theta) e^{j\phi_1} + A_r F(\theta_0 - \theta_3) e^{j\phi_2}) e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$S_2 = (AJ_1 F(\theta_0 - \Delta\theta/2 - \theta) + A_{J_2} F(\theta_0 - \Delta\theta/2 - \theta) e^{j\phi_1} + A_r F(\theta_0 + \theta_3) e^{j\phi_2}) e^{j\omega t} \quad (2)$$

经过和差处理后, 得到 S_1 、 S_2 的和、差信号分别为 S_Σ 、 S_Δ :

$$S_\Sigma = (A_{J_1} (F(\theta_0 - \theta_1) + F(\theta_0 + \theta_1)) + A_{J_2} (F(\theta_0 + \theta_2) + F(\theta_0 - \theta_2)) e^{j\phi_1} + A_r (F(\theta_0 - \theta_3) + F(\theta_0 + \theta_3)) e^{j\phi_2}) e^{j\omega t} \quad (3)$$

$$S_\Delta = (A_{J_1} (F(\theta_0 - \theta_1) - F(\theta_0 + \theta_1)) + A_{J_2} (F(\theta_0 + \theta_2) - F(\theta_0 - \theta_2)) e^{j\phi_1} + A_r (F(\theta_0 - \theta_3) - F(\theta_0 + \theta_3)) e^{j\phi_2}) e^{j\omega t} \quad (4)$$

$$\text{式中, } \theta_1 = \Delta\theta/2 + \theta, \theta_2 = \Delta\theta/2 - \theta \quad (5)$$

根据单脉冲雷达测角原理, 误差信号 $S_e(t) =$

$$\text{Re}((S_\Delta S_\Sigma^*) / (S_\Sigma S_\Sigma^*)) \quad (6)$$

通过以上公式进行迭代, 可以得到:

$$S_e(t) \approx K_d \left(\theta \left(1 + b^2 + 2b \cos \phi_1 + a \cos \phi_2 + ab \cos(\phi_1 + \phi_2) \right) + \Delta\theta/2 (1 - b^2 + a \cos \phi_2 - ab \cos(\phi_1 - \phi_2)) + \theta_3 (a^2 + a \cos \phi_2 + ab \cos(\phi_1 - \phi_2)) \right) \quad (7)$$

$$\text{又有: } F(\theta_0 \pm \theta) = F(\theta_0) \mp |F(\theta_0)| \theta \quad (8)$$

式(7)中采用式(8)对天线方向图进行了近似, 并设目标回波信号与干扰信号 J_1 幅度比为 b , 即:

$$a^2 = A_r^2/A_{J_1}^2, b^2 = A_{J_1}^2/A_{J_2}^2 \quad (9)$$

则当误差信号 $S_e(t) = 0$ 时, 跟踪天线指向角的偏离度 ε 为:

$$\varepsilon \approx \left((\theta_1 - \theta_3) \left(a^2 + a \cos \phi_2 + ab \cos(\phi_1 - \phi_2) \right) - \Delta\theta/2 \left(1 - b^2 + a \cos \phi_2 - ab \cos(\phi_1 - \phi_2) \right) \right) / \left(1 + b^2 + a^2 + 2b \cos \phi_1 + 2a \cos \phi_2 + ab \cos(\phi_1 - \phi_2) \right) \quad (10)$$

2.2 工程应用中的公式简化及效能分析

通过公式(10)可知, 当 $\varepsilon > 0$ 时跟踪天线的指向角向右偏; 当 $\varepsilon < 0$ 时跟踪天线的指向角向左偏。跟踪天线的指向角大小跟两干扰源相对于雷达轴线的夹角 $\Delta\theta$, 三者相位差 ϕ_1 、 ϕ_2 , 回波信号与干扰信号 J_1 的幅度比 a , 干扰源 J_1 与 J_2 幅度比 b , 以及目标偏离两干扰源的角度 $(\theta - \theta_3)$ 有关^[3]。在靶机加装应用中, 采用自卫式干扰时, 即 $\theta = \theta_3$, 干扰辐射源距离天线距离相等, 且回波信号远小于干扰信号幅度, 即 a 趋于0, 公式(10)可以转化为

$$\varepsilon = \Delta\theta/2 (1 - b^2) / (1 + b^2 + 2b \cos \phi_1) \quad (11)$$

如图2所示, 定义两干扰信号源的距离为 L (交叉眼干扰设备两点源在靶机上安装的距离), 导弹与靶机的距离为 R , 导弹跟踪点距离靶机距离为 X , 当 $R \gg L$ 时, 可近似为:

$$X = R \tan \varepsilon \quad (12)$$

$$\Delta\theta = L/R \cos \theta \quad (13)$$

又知, 当 ε 值很小时, $\tan \varepsilon \approx \varepsilon$, 将公式(11)、(13)带入(12)中, 得到:

$$X = L \cos \theta (1 - b^2) / 2 (1 + b^2 + 2b \cos \phi_1) \quad (14)$$

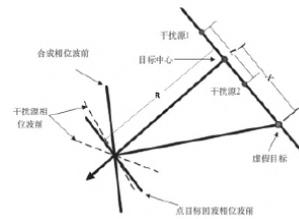


图2 交叉眼干扰效果示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross-eye dry effect

由公式(14)可知, 当幅度比 $b = 1$ 、相位差 $\phi_1 = 180^\circ$ 时, 引偏距离为无穷大, 此时效果最佳。幅度匹配越好, 对相位匹配的要求越严格, 相位失配会导致引偏距离快速下降。相位在一定频率范围内做到严格匹配非常困难, 因此需要通过幅度失配以降低对相位匹配的要求, 其程度需要根据需求折中考虑^[4]。

引偏距离同样与 L 和 θ 有关。 L 越大, 即加装在靶机上的两个干扰源之间的距离越大, 干扰效果越好。 θ 的大小取决于导弹导引头雷达中线与干扰源连线之间的位置关系, 导弹雷达中线垂直于干扰源连线时, $\theta = 0^\circ$, 引偏距离最大; 导弹雷达中线平行

于干扰源连线, $\theta = 90^\circ$ 或 270° , 引偏距离为 $0^{[5]}$ 。

3 靶机加装“交叉眼”方案设计

3.1 技术实现方案

经调研了解, 目前国内已知的关于交叉眼干扰的技术实现方案主要有三种:

(1) 相位补偿方案^[6]。其工作原理是通过提取不同天线接收到的目标信号的相位, 在干扰时进行相位补偿, 保证干扰信号在雷达口面的相位反相。该方案需要有高速的、精度满足要求的相位测量装置和补偿装置, 目前国内还没有实现该类装置的技术能力, 因此本方案目前在工程上还不可用。

(2) 范阿塔矩阵^[7]。该系统由两个转发干扰机构成, 两个干扰机可独立工作完成常规干扰任务, 也可以交联构成交叉眼干扰。在通常情况下, 延迟线的延迟时间小于雷达脉冲宽度, “范阿塔”矩阵是在信号脉冲内连续切割、存储、发射, 存在干扰信号与回波的功率竞争。通过仿真证明在存在回波时实施交叉眼干扰的幅度和相位一致要求是非常高的, 干扰功率也是非常大的, 以目前的工程水平是无法实现的。提高延迟时间, 又无法隐藏回波。同时干扰样式也过于单一。因此直接在工程用“范阿塔”矩阵结构是不可行的。

(3) 双通道 DRFM 结构^[8]。综合方案(1)和方案(2)的特点, 利用 DRFM 替代原方案(2)的延迟线。先实现距离、速度欺骗, 在雷达锁定干扰信号时采用交叉眼。要获得理想干扰效果时, 所需要的欺骗干扰幅度和相位一致要求虽然依然很高, 但以目前的工程技术条件是可实现的, 如图3所示。

由于采用只能工作中频的 DRFM, 使系统结构更加复杂、系统的相位控制变得困难。为了保证两点源的相干性, 排除传输路径带来的相位随机性, 它们都以雷达信号作为样本。为了精确保存雷达脉冲的相位信息, 采用高分辨率 DRFM 是非常必要的。但 DRFM 的工作频率低、带宽窄, 必须采用频率变换。由于两个应答式干扰通道具有复杂的变频结构, 同时要保持相同的功率增益和稳定的相位差 (180 度相位差), 需要对系统进行实时相位校准^[9]。借鉴方案(1)中的相位测量和反馈的方式, 增加实时校准电路。与方案(1)中要求对威胁信号进行实时相位测量的方式不同, 本方案中实时校准

电路是对产生的校准信号进行测量, 被测信号具有很好的信噪比和测量电路最匹配的时序, 因此测量的相位差准确, 而且只是校准通道的相位, 因此相位测量和幅度测量的时间也很充裕, 工程上就比较容易实现。

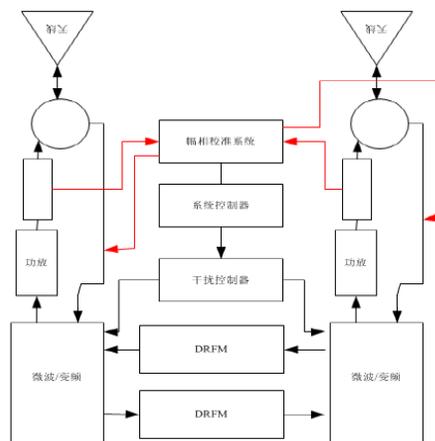


图3 双通道DRFM的交叉眼结构方案

Fig. 3 Cross-eye structure scheme of dual channel DRFM

3.2 机上布局方案

考虑到交叉眼干扰对两点源间距离的要求和交叉眼自身体积、重量等方面对加装载体的需求, 应尽量采用大尺寸、大载荷的靶机平台进行加装。本文以某型靶机为例进行加装设计, 其长度为 8.4 米, 翼展为 7.5 米, 具备充足的加装空间。

通过公式(14)可知, 交叉眼的干扰能力, 与导弹攻击方向与干扰源连线的角度密切相关。单一的两点源加装方案存在很大的干扰盲区。因此考虑采用多组交叉眼进行组合实现交叉眼天线阵^[10]。

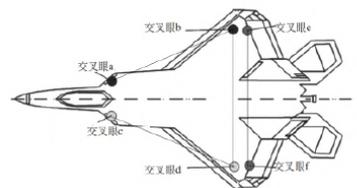


图4 交叉眼干扰天线布局图

Fig. 4 Layout of cross eye interference antenna

如图4所示, 对于靶机两个侧向来袭导弹, 采用(a,b)、(c,d)天线组成交叉眼; 对于靶机前向来袭导弹, 采用(b,d)天线组成交叉眼; 对于后向来袭

导弹,采用(e,f)天线组织成交叉眼。从而实现“交叉眼”对靶机全向覆盖。

3.3 对抗场景数字仿真方案

数字仿真的目的是分析对主动雷达制导导弹实施交叉眼干扰的干扰效果、干扰机理,并按评估方法获取干扰有效率、干扰造成的脱靶量。由于导弹仿真涉及众多复杂的影响因素(如高度、速度和进入角等初始状态参数,以及发动机转速等飞行过程参数),所以仿真系统的建立对评估准确性至关重要。

数字仿真系统的研究目标是建立“背靠背”对主动雷达制导导弹干扰数字仿真系统。系统包括三个部分:

第一部分是“对主动雷达制导导弹干扰电磁环境仿真系统”。该系统包括物理空间模拟、电磁信号模拟两个部分,可按需要构建对主动雷达制导导弹干扰的作战场景。

第二部分是导弹模型。导弹模型包括“导引头雷达模型”和“飞控模型”。导引头雷达模型与电磁环境仿真系统中的“电磁信号输入输出接口”对接,可设定发射信号,接收来自环境的回波、杂波和干扰等信号(这些信号由“电磁信号输入输出接口”提供)。导引头根据接收信号进行目标截获、跟踪解算后驱动“导弹飞控模型”,飞控模型根据计算结果驱动修改“导弹空间特性”,包括位置、速度、加速度等物理量。

第三部分是“交叉眼干扰模型”及“飞机控制模型”。干扰模型与“电磁信号输入输出接口”对接,接收来自环境的模拟信号,并释放干扰信号。“飞机控制模型”控制作战飞机飞行动作,如转弯、直线飞行、下降高度等等。

采用该方案可使对主动雷达制导导弹干扰仿真工作在一个接近真实的使用环境,且导弹模型与干扰模型除共享一个仿真环境外,互相可不照面的情况下实现干扰仿真分析。数字仿真系统的功能和模块组成见图5。

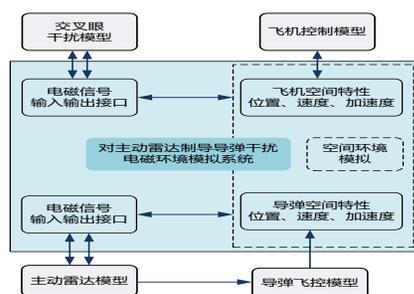


图5 数字仿真功能和模块组成

Fig. 5 Digital simulation function and module composition

4 结束语

本文通过类比分析国内已知的“交叉眼”干扰理论和实际应用,提出了一种靶机加装“交叉眼”干扰的技术实现方案和机上天线布局方案,以期对未来实现靶机加装“交叉眼”干扰设备提供参考。

参 考 文 献

- [1] 刘天鹏,魏玺章,刘振,等.交叉眼干扰研究综述[J].雷达学报,2019,8(2):141-148
- [2] 曹飞,刘庆云,辛增献.“交叉眼干扰数学建模”[J].现代雷达,2013,35(6):69-72
- [3] 石玉彬.交叉眼干扰在反舰导弹突防中的应用[J].电子科技,2013(3):123.
- [4] 司建建,曲志昱,赵忠凯,等.对单脉冲的交叉眼干扰效果分析,舰船电子对抗.2018(2):18-20.
- [5] 周亮,孟进,吴灏,刘永才,刘伟,等.反向交叉眼对单脉冲雷达干扰效果分析及仿真验证[J].航空学报,2019(8):322755-4
- [6] 张伟,莫翠琼,陈秋菊.“交叉眼”技术对角跟踪雷达导引头的干扰效果分析[J].航天电子对抗,2015(3):15.
- [7] 范江涛,胡宝洁,陆洪涛,等.单脉冲雷达角度跟踪干扰的仿真分析[J].舰船电子工程,2010,30(4):313-115
- [8] 刘松杨,董春曦,董阳阳,等.旋转的正交多点源反向交叉眼干扰分析[J].电子与信息学报,2016,38(6):1424-1430
- [9] 王彩云,何志勇,官俊,等.多干扰机反向交叉眼干扰分析[J].系统工程与电子技术,2017,39(7):1457-1463
- [10] 杨沛斌,张娜.基于作战效能评估的交叉眼干扰设备在飞机上的布局[J].战术导弹技术,2015(6):37.

作者简介:

李洪涛:本科,工程师,主要从事靶标技术总体工作。

外军人工智能应用现状及发展前景分析

姜广顺, 韩志强, 王 芳

(空军二十三厂, 北京 102200)

摘要: 人工智能应用于军事领域有提升军队信息优势、提高决策速度和质量、降低作战人员风险和成本的巨大优势,在情报、监视和侦察,军事物流,网络攻防,指挥与控制等领域得到应用。美、俄等军事强国已提前谋划布局,并进行人工智能系统的实战检验。本文梳理了美国和俄罗斯人工智能军事应用的战略部署和应用现状,分析了军用人工智能系统误判以及与系统安全性相关的若干问题,以期为我国人工智能的应用提供参考和借鉴。

关键词: 人工智能; 军事领域; 智能化; 武器和军用技术装备; 自主系统; 误判

Analysis of Current Situation and Development Prospects of Artificial Intelligence Applications in Foreign Armies

JIANG Guangshun, HAN Zhiqiang, WANG Fang

(No. 23 Factory of PLA Air Force, Beijing 102200, China)

Abstract: The application of artificial intelligence in the military field has great advantages in enhancing military information superiority, improving the speed and quality of decision-making, and reducing the risk and cost of combatants. It has been applied in the fields of intelligence, surveillance and reconnaissance, military logistics, network attack and defense, command and control, etc. The United States, Russia and other military powers have planned the layout in advance, and carried out the actual combat tests of artificial intelligence system. This paper reviews the strategic deployment and application status of military application of artificial intelligence in the United States and Russia, analyzes the issues involved in the misjudgment of military artificial intelligence systems, as well as some issues related to system security, with a view to the application of artificial intelligence in China reference.

Key words: artificial intelligence; military field; intelligentization; armament and military equipment; autonomic system; misjudgment

1 引言

对未来战争性质的预测分析显示,军队使用形式和方法的主要变化与其说是由地缘政治条件决定,不如说是由新型武器和军用技术装备制造领域以及部队和武器指挥原则改进完善方面的科技进步决定的^[1]。近年来,随着机器学习、知识图谱、计算机视觉以及虚拟现实、增强现实等关键技术的重大突破,人工智能已渗透至军事应用各个领域,朝着指挥高效化、打击精确化、操作自动化和行为智能化的“智慧武装”方向发展^[2]。美、俄等军事强国把人工智能视为“改变战争游戏规则”的颠覆性技

术,并已提前布局、顶层设计、规划引领^[3],将人工智能技术的新发展用于军事领域,谋求军事革命的主动权,从而抵消对手的战略优势^[4]。

2 人工智能在外军中的应用情况

2.1 防空反导系统

人工智能武器指挥系统广泛应用于防空反导防御综合系统。使用人工智能的目的是加快来自空天态势监控设备和导弹攻击预警系统的数据处理速度,以及对防御兵器进行自动控制,反击来自不同方向、以不同高度和速度飞行的各种类型飞行器的大规模突击。由于高超音速武器可能参与到

突击行列,导致对采取应对措施的时间提出了更加严格的要求。这种情况下,只有人工智能能够考虑不断变化的空情,实时形成信息计算任务,及时帮助指控中心正确识别目标,并下达命令以要求的顺序将其摧毁。

美军具备自主能力的防御性武器有“宙斯盾”弹道导弹防御系统和“密集阵”近程武器系统^[5]。装备宙斯盾系统的舰船能够自主执行某些功能,操作人员可对其配置以应对不同威胁。密集阵系统可设置为自动模式来防御导弹齐射或大量飞机的攻击。美国导弹防御系统多杀伤器(MKV)拦截系统项目,用于对抗带分离弹头的洲际弹道导弹。据报道,2019年,智能拦截弹测试取得积极成果,成功拦截了一枚模拟多弹头洲际弹道导弹的导弹。未来,为解决防空反导问题,美国计划将人工智能系统作为一种通用指挥设备,应用于包括在世界各地分布有系统组成单元的战略级统一信息管理系统中。

俄罗斯人工智能应用是与其军事创新紧密联系在一起的^[6]。俄空天部队的战役-战术指挥自动化系统采用人工智能技术,使S-300、S-400防空导弹系统以及空域监控装备协同动作,实时分析空情,确定目标参数,并提出目标射击方案^[7]。俄防空系统的人工智能设备能够自主发现、跟踪目标,进行敌我识别,按危险程度对目标排序,经操作员确认后发射导弹。在第五代防空反导系统S-500中,人工智能技术实现了突破,具体性能目前高度保密。

2.2 攻击系统

使用人工智能技术的自主战斗或自主保障设备能够独立作战,并在与指控中心失去联系时继续执行任务或返回指定位置。美国克瑞拓斯公司研发的XQ-58“女武神”现代无人攻击机,在2019-2020年进行了相对成功的测试,定位为有人驾驶战斗机的“忠诚僚机”。美国海军正在开发一种大排水量无人水下航行器,该潜航器具有至少70天的自主航行能力,能够独立完成导航任务,绕过各种障碍,识别水下和水面目标。

保证集群的协同动作能力是未来进一步完善自主武器装备的方向。为此,美国国防高级研究计划局(DARPA)正在实施各种计划,以解决无人机群

(一组多达数百架)、水面和水下自主航行器、各种用途的地面移动机器人平台的应用问题。这类自主武器装备应具有以下能力:

(1)确定周围环境特点,包括查明是否有其它小组成员;

(2)自动组织通信通道,确定组长,或前一个组长“伤亡”时选定新组长;

(3)相互配合以完成下达的任务。

俄罗斯也有一系列军用机器人,如用于地面侦察、巡逻、扫雷和火力支援的“天王星-9”和“战友”作战机器人,用于海底探测的“倒角”水下综合体、“猎人”无人攻击机以及“波塞冬”核动力无人水下航行器。“天王星-9”机器人系统经历了叙利亚战争的洗礼,2019年正式列装。“俄技术”公司制造了T-14“阿玛塔”坦克的重型机器人版本,战勤组或人工智能系统都可以操控坦克,但最后由人决定是否开火。

坦克部队在叙利亚的实战经验表明,需要拥有不同类型的机器人系统:轻型、中型和重型,而且机器人坦克应相互密切协同、交换信息,即在统一的网络中稳定工作,相互提供火力掩护。俄陆军总司令萨留科夫大将指出,2025年俄罗斯将成立首支多用途机器人分队,能够遂行各类战斗任务,要求一名操作员能够同时控制5辆战车^[8]。

2.3 规划和决策工具

在指挥系统中,使用人工智能是提高整体态势感知和识别出现的危险所必需的。通过收集和处理从不同信息源获得的各种信息,可以形成一个综合信息源,即所谓的“通用作战图”,在此基础上向各级指挥员提出最有效的行动方案。

目前美军正在开发能够对在空中、太空、海上、陆地、网络和电磁空间实施的,从战术到战略级不同规模军事行动进行集中指挥和协调的人工智能指挥系统,即多域指挥与控制系统(MDC),类似的基于人机共生智能的战役-战略级指挥系统也在研发中。

除了机器人平台,俄罗斯的指控基础设施中也出现了人工智能元素,尤其是规划和决策支持平台。2014年,俄罗斯新建国防管理中心,旨在研发此类系统,为俄国家安全机构创建统一的信息空间。

2.4 情报侦察和电子战系统

2017年以来,美军一直致力于在Maven项目框架下,将人工智能集成到现有目标侦察和识别系统中。这种目标探测和杀伤系统在伊拉克、阿富汗和叙利亚使用过程中,积累了一定的经验。2020年初,雷神公司宣布在英国空军“哨兵”R1战场监视飞机上部署情报、监视、目标获取和侦察(ISTAR)系统,系统的人工智能可确保检测感兴趣的陆地和海上目标,并对其活动情况做出评价。近日,一架使用人工智能机器人驾驶的美军U2侦察机首次作为僚机进行试飞,这项技术测试成熟后将大量装备美国空军。此外,人工智能还被用于综合处理获取的各类情报。美国防情报局开发的“机器辅助分析快速数据库系统(MARS)”,可帮助情报分析人员快速组织和处理数据,发现数据中隐藏的关系。

洛克希德·马丁公司正在为DARPA开发“行为学习自适应电子战(BLADE)”项目,该系统可不断评估对敌方无线电电子设备的压制效能,以反制可能的对抗措施。此外,系统还能够实施无线电电子防护措施。

俄罗斯电子战和航空兵部队均配备了先进的情报分析处理系统,可将各种渠道获取的情报汇总后,用人工智能技术进行整理分析,自动提出战术建议供指挥员决断^[9]。俄军“帕拉丁”和“勇士赞歌”电子战系统具有人工智能要素。其中,电子战旅的RB-109A“勇士赞歌”指挥自动化综合系统能够详细分析复杂的电子态势,采用人工智能算法自动决策,区分出优先进行无线电压制的目标,判断对目标最有效的压制方式^[10]。

2.5 信息战

人工智能技术开始在数字领域起着越来越重要的作用,网络战、信息战及心理战等都出现了人工智能技术的影子。这类系统已经能够生成伪造的图片和视听材料,并在互联网上制作杜撰的或真实人物的虚假简介。该技术可被用于制造“假”新闻,编造当事人的传奇故事,诋毁某些个人或对其实施诽谤、勒索。DARPA开展的“媒体取证(MediFor)”项目,旨在制定应对此类“深度造假”系统的措施。

2.6 军事物流

完成物资-技术保障以及人员输送和部署任务的军事物流是人工智能的重要应用领域。美军列

装的人工智能物流系统通过不断地自动分析由分布在武器装备中的各种传感器发送来的技术参数,确定对军用技术装备进行维护或修理作业的必要性和范围;评估备份器材的潜在需求,确定所需物资的最佳运送方式。

IBM公司研发的“沃森(Watson)”自动化综合设备处理物流信息,保证数据的云存储和智能处理。美国海军利用该设备制定海军编组和单个舰船的最优后勤补给计划,并监控其执行情况^[11]。当前基于人工智能的故障预测和诊断方法已应用在舰船、装甲车和防空导弹系统等多种武器装备系统中^[12-13]。

3 军用人工智能系统的误判及安全性问题

3.1 系统的误判问题

研究结果显示,如果意识到最终能够取得优势,人工智能有可能做出使用精确制导武器或核武器,对敌方目标实施先发制人的全球性或有限打击。美国兰德公司开展的一项研究强调了使用人工智能进行战略军事决策的危险性,因为人工智能系统缺乏有鉴别力的思维,且倾向于竞争。人工智能系统的误判将可能导致敌、我、友、平民的意外伤亡,甚至会导致冲突的意外升级。

(1)人工智能系统参与到人类战争当中,将增加人机理解和协作的复杂度,增加危机/冲突的不可控程度。不同场景人机赋权已成为智能化战争的关键,需要尽早开展基于不同作战场景的人机赋权理论研究,以做出最优的判断和决策,避免不必要的偏差和错误;

(2)为避免在危机/冲突中出现无意的人员伤亡和态势升级,应在国际层面制订战场上使用人工智能与自主系统伦理、道德、行为理解等方面统一的国际标准和行为规范,便于大国在危机和冲突中能够有效地对人工智能和自主系统的行为具有更加一致的理解和判断,从而在适当的环境中作出恰当的决策;

(3)人工智能的可解释性和可信任性成为未来发展重点,信任度取决于系统的性能以及决策中人机协作的性质,需要提高人工智能的透明度,以减少人工智能和自主系统的偏见、歧视、误解、错误以及模糊等问题,增强人和机器之间相互理解,在危

机/冲突中能够作出合理的判断和决策^[14]。

3.2 系统的安全性问题

对人工智能的攻击问题类似于无线电压制问题,两者的解决方案都是“致盲”被攻击的敌方系统。强调军用人工智能系统的安全性问题主要有以下几个原因:

(1)人工智能系统和设备的种类、数量不断增加,大大缩短了部队和武器装备的指挥控制周期;

(2)这类系统和设备的致命弱点在于,可对其实现人工智能功能的软、硬件进行专门攻击;

(3)所用数据及其处理算法遭受破坏时,不可避免地会带来巨大的潜在损失^[15]。

未来局部战争和武装冲突中,为防止潜在对手有效使用军用人工智能系统可能给本方造成的损失,参战方势必会采用专门设备对敌方人工智能系统实施攻击。因此,应及早制定和采取保护人工智能系统的措施,培训相应分队反击对人工智能系统的攻击。

4 结束语

世界主要军事强国正在人工智能领域展开创新之争,将人工智能技术运用于国防军事领域是各国不二的选择。随着新思想及其实施技术的涌现,人工智能正成为提高部队潜力的最重要技术之一,在军事领域的应用方向和方式将不断增加。因此,必须加强战略与技术两方面研究^[16],推动各类人工智能技术快速嵌入国防创新领域,努力实现我军现代化建设跨越式发展。

参 考 文 献

- [1] Герасимов В. В. Развитие военной стратегии в современных условиях [J]. Вестник академии военных наук, 2019(2): 67-78.
- [2] 张清源. 下一场战争,人工智能或将唱主角[J]. 国防科技工业, 2021(5): 53-56.

- [3] 季自力, 王文华. 世界军事强国的人工智能军事应用发展战略规划[J]. 军事文摘, 2020(09): 7-10.
- [4] 李诗华, 张志昌, 曹新虎. 警惕智能化作战新挑战[N]. 解放军报, 2021-05-18(009).
- [5] 徐婧, 吴浩, 唐川. 人工智能在国防领域的应用与进展[J]. 飞航导弹, 2021(3): 87-92.
- [6] 综珊珊. 美俄人工智能军事应用发展分析[J]. 大数据, 2020, 6(4): 125-132.
- [7] Гаврилов А. Д., Лабунский А. Д. Искусственный интеллект для ПВО[J]. Арсенал Отечества, 2018(3): 35-43.
- [8] Юрий Ккнут. "Уран-9", "Штурм" и другие интеллектуалы [N]. Военно-промышленный Курьер, 2021-06-15(06).
- [9] 赵勋. 美俄人工智能军事应用对比研究[J]. 国防科技工业, 2020(1): 55-58.
- [10] Лямин Ю. Обзор современных российских средств РЭБ [J]. Стратегия, 2019(3): 56-66.
- [11] Д. В. ГАЛКИН, П. А. КОЛЯНДРА, А. В. СТЕПАНОВ. Состояние и перспективы использования искусственного интеллекта в военном деле [J]. Военная Мысль, 2021(1): 113-124.
- [12] 蒋燕妮, 陈冰, 刘涛. 舰船装备状态监测与故障诊断综述[J]. 仪表技术, 2017(5): 12-15.
- [13] 张瑞, 樊波, 牛天林, 等. 基于BP神经网络的军用电源智能故障诊断[J]. 测控技术, 2017, 36(5): 25-28.
- [14] 韩雨, 葛悦涛, 赵珈玉, 等. 军事自主系统误判事故回顾与分析[J]. 飞航导弹, 2021(3): 25-30.
- [15] Д. В. Галкин, А. В. Степанов. Вопросы безопасности применения искусственного интеллекта в системах военного назначения [J]. Военная Мысль, 2021(4): 72-79.
- [16] 朱玥, 刘扬, 戴炜. 人工智能在军事国防领域应用分析[J]. 互联网天地, 2019(12): 34-37.

作者简介:

姜广顺(1967-),男,硕士,工程师,主要研究方向为装备维修和保障。

韩志强(1991-),男,本科,助理工程师,主要研究方向为装备精密测试与自动控制。

王芳(1981-),男,本科,工程师,主要研究方向为装备维修保障技术。

外军地面无人后勤发展现状及趋势研究

陈 姝, 赵媛媛, 田季红

(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 尽管无人平台在国防上有多种用途,但在后勤方面可能会有特别的优势。无人地面平台在后勤方面的应用更加现实、直接,发挥的效用也更为显著,已成为当前世界军事强国后勤建设的一个新趋势。本文主要从外军地面无人后勤的现状和特点出发,总结了其未来的发展趋势,为地面无人后勤的应用前景提出了新的方向。

关键词: 无人后勤; 无人地面平台; 无人系统; 自主车队; 引导跟随

Research on the Development Status and Trend of Foreign Military Ground Unmanned Logistics

CHEN Shu, ZHAO Yuanyuan, TIAN Jihong

(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: While unmanned systems have multiple uses in defense. There could be particular advantages in logistics. The application of unmanned ground platform in logistics is more realistic, direct and effective. It has become a new trend in the logistics construction of armed forces in the world. Starting from the current situation and characteristics of foreign military ground unmanned logistics, this paper summarizes its future development trend, and puts forward a new direction for the application prospect of ground unmanned logistics.

Key words: unmanned logistics; unmanned ground platform; unmanned system; autonomous convoy; leader-follower

许多武装部队正在后勤中使用无人平台,并在无人技术的机载和地面应用中看到了安全性、操作性和成本优势。尽管无人平台在国防上有多种用途,但在后勤方面可能会有特别的优势,无人平台在后勤方面的应用更加现实、直接,发挥的效用也更为显著,已成为当前世界军事强国后勤建设的一个新趋势。

1 外军地面无人后勤发展现状

根据美国国防部的设想,陆军正把无人后勤能力用于物资搬运、弹药供应、更换机油和加油、伤员后送和护理、牺牲人员遗体后送等任务。美国军方已经开始研发班组或更高层的后勤型无人地面平台。陆军的班组多用途装备运输(SMET)系统正在除美国以外,英国近年也加大了对后勤无人地

进行研发,2019年10月30日,美国陆军与通用动力公司地面系统分部(GDLS)签署了一份价值1.62亿美元的合同,在SMET项目下采购624辆GDLS公司的MUTT(多用途战术运输)无人车,用于美国陆军步兵旅战斗组(IBCT)。此外,美国陆军近年来致力于发展自主车队技术,该技术预期将最先应用于后勤车辆。美国国防部于2006年开始CAST(主动安全护送技术)项目,2015年开始AGR(自主地面再补给)项目,2017年开始ExLF(应急引导跟随)项目。AGR和ExLF是美国陆军当前正在进行的两项地面无人后勤项目。同时,2012年洛克希德·马丁公司获得一份合同研发、集成和测试自主机动性附加系统(AMAS),该系统经证实是CAST项目的一部分,是一种多传感器附加组件,可以对轮式战术车辆进行改装。

面平台再补给能力的研发力度。英国陆军当前正

在进行的联盟确保自主补给(CAAR)项目是一项英国和美国合作项目,该项目包括地面后勤自动机动(GLAM)项目和“最后一英里”自主补给项目(ALMRS)。GLAM项目主要探索洛克希德·马丁公司提供的运输车队和引导者/跟随者技术。而ALMRS则是为了提高“最后一英里”的后勤效率和补给行动的速度和准确性,为前方军事用户提供有保障的补给能力,以便在复杂的环境中实施更加灵活的作战。ALMRS项目进行了两阶段公开竞赛,5支团队被挑选参加ALMRS第2阶段,并于2018年12月参加了英国陆军的“自主武士(地面)”作战实验。ALMRS项目2019年完成了第2阶段,随后进入被称为“特修斯计划”(Project Theseus)的作战试验竞争新阶段。2020年3月16日,根据“特修斯计划”,英国国防科学技术实验室(Dstl)宣布已订购5辆自主无人车——3辆霍利巴·米拉(HORIBA MIRA)公司“海盗”(Viking)全地形无人车和2辆奎奈蒂克(QinetiQ)公司“泰坦”(Titan)履带式模块化无人车。这些合同表明了英国陆军将继续致力于推进无人系统作为发展未来陆军后勤能力的创新方法^[1]。

以色列和德国也推出了多种后勤无人地面平台。以色列G-NIUS公司(2016年4月停止运转,相关支持服务由埃尔比特系统公司提供)的“守护者”(Guardium)无人车和“前卫”(AvantGuard)无人车都已在以色列国防军服役,可执行后勤任务;以色列汽车机器人工业公司的“阿姆斯特夫”(Amstaf)无人车也已在以色列、韩国服役,主要用于边界巡逻、货物运输和伤员后送等任务。2019-2020年期间,德国联邦国防军一直在测试各种中型无人车,以执行后勤运输任务、减轻徒步士兵的负担。2019年,德国联邦国防军测试了莱茵金属公司“任务大师”(Mission Master)、Roboteam公司和埃尔比特公司的Probot V2以及Hentschel公司(与Diehl防务公司联合)的Ziesel无人车。2020年12月,德国联邦国防军测试的最新装置是Milrem公司的THeMIS和Hentschel公司的Ziesel无人车。2021年继续对其他平台进行测试^[2]。其中,德国莱茵金属公司的“任务大师”货运型无人车可安装各种载荷,执行后勤运输、医疗后送和通信中继等任务。除货运型无人车之外,德国“任务大师”无人车还开发出火力支

援、救援车和侦察车型,都装有莱茵金属公司PATH自主组件和北约兼容的蓝军跟踪系统,目前正在探索“狼群”(WolfPack)作战概念。

2 外军地面无人后勤发展特点

2.1 制定多项规划指明无人后勤发展方向

为了推进无人地面平台的发展,美国陆军系统地制定了多项发展规划,建立了较为完善的组织架构,对于无人地面平台的后勤应用也有着明确的目标。2009年美国坦克机动车辆工程中心(TARDEC)发布《机器人战略白皮书》,对后勤无人地面平台作了详细的分类、分级规划。

2017年3月,美国陆军发布《机器人与自主系统(RAS)战略》^[3],在此战略中,美国陆军提出了机器人与自主系统五大能力目标:增强态势感知能力;减轻士兵体力和认知负担;增加后勤补给分发、吞吐量和效率来支持部队;促进部队运动与机动;保护部队。RAS战略近期现实目标(2017~2020)的优先事项中明确提出了减轻徒步士兵的负重负担;借助自动化地面再补给,提高保障能力。中期可行目标(2021~2030)的优先事项则包括借助人体外骨骼能力,减轻士兵负重负担;借助全自主车队行动,提高保障能力。远期设想目标(2031~2040)的优先事项则包括:通过投资可缩放传感器、可缩放协同、人机通信、以及通过机器学习技术进步而实现共享理解,实现空中和地面机动中的有人-无人协同。

2018年8月,美国国防部公布《无人系统综合路线图(2017-2042)》^[4],新版路线图指出互操作性、自主性、网络安全、人机协同是加速无人系统作战应用的4大主题。其中,在自主性的未来发展中明确指出自主算法、改进的传感器和计算机处理将改善人机编队,从任务级支持演变为作战支持,并允许机器直接辅助人类进行各种操作。例如,无人系统中自主水平的提高将允许引导者-随行者能力,其中随行的半自主车辆跟随后勤车队中的指定引导车辆。

2.2 通过地面无人后勤实践自主性应用

根据美国CCDC(美国陆军作战能力发展司令部)数据分析中心2019年的一份报告可知^[5],美国陆军目前正在进行的自主性研究项目包括AMAS

(自主机动性附加系统)、AGR(自主地面再补给)和 ExLF(应急引导跟随)。其中 AMAS 是一种用于军事后勤平台的自主组件,提供驾驶员告警/驾驶员辅助和引导-跟随能力。AGR 项目和 ExLF 项目则是美国陆军当前正在进行的两项地面无人后勤项目。AGR 项目是一项美国陆军坦克机动车辆研究、开发&工程中心(TARDEC)项目,专注于以一种高效且有效的方式来优化战场后勤的移动、存储、跟踪、模拟和管理供应,减少地面再补给所需的士兵数量。ExLF 计划以 AMAS 联合性能技术演示(JCTD)和 AGR 开发的无人系统进展为基础,该计划使车队能够使用一辆载人的“引领”车辆来操纵多辆无人驾驶的“跟随”车辆。ExLF 项目代表了自主技术发展以及获得该技术的方法的重大进步。美军正在通过地面无人后勤实践其自主性应用。

2.3 新技术新概念不断引入后勤型无人地面平台

在美国和英国,无人地面平台正在经历实质性的跨代变化,体现形式包括操作概念的变化以及效应器、控制装置的能力发展。美军将互操作性协议(IOP)和无人系统联合架构(JAUS)引入无人系统。意味着操作人员能给基型平台安装任何效应器或子系统,摆脱生产厂家对其无人地面平台能安装什么具有决定权的状况。

美国陆军作战能力发展司令部(CCDC)地面车辆系统中心(GVSC)正在将 AMAS 系统所特有的各种能力集成到机器人技术内核(RTK)中,其目标是充分利用每种系统的最佳特性,创建一个兼容能力库,该能力库可用于支持未来无人系统项目,例如 NGCV 和战车机器人(CoVeR)。AMAS 部件与多车辆协同和引导/跟随行为相关,由于一直被用于单车系统,因此,有助于填补 RTK 的能力空白。RTK 的长期目标是帮助定义无人地面平台的开放式架构。通过将新部件集成到 RTK 中,对接口定义进行了重新评估和定义,不但使接口定义更加稳健,而且使架构可容纳更加广泛的部件^[6]。

无人地面平台已具备自动更换工具能力。这在一定程度上缓解了单一无人平台在一次任务期间被赋予多项任务时,需要平台操作人员换出/换入工具和效应器的问题。不仅提高了无人地面平台的工作效率,还能降低更换工具的操作人员遭到攻击的潜在危险。现已出现多种解决方案,可提供

自动更换工具能力,如 Stratom 公司的自动远程工具更换器(ARTC)和抓手远程工具更换系统(GRTCS)。

氢燃料电池已用于后勤型无人地面平台。2017 年 10 月,通用公司推出氢燃料电池通用静音多功能电动平台(SURUS),可充当多用途卡车和货物运输系统。而除了使用氢燃料电池驱动以及无人驾驶技术之外,SURUS 的前桥和后桥的两根轴体都可以独立运转,并且每根轴体都搭载有独立的电动机,采用电动四轮驱动系统和转向系统,从而能更轻松的应对复杂地形,能够使后勤负担最小化,减轻士兵负担。

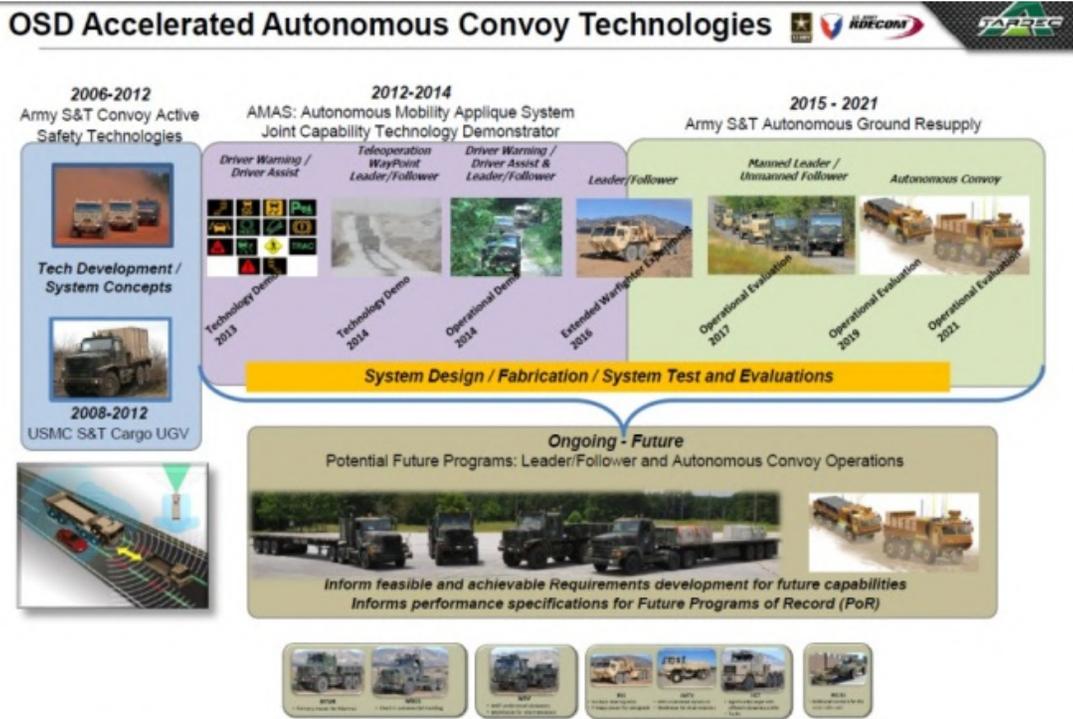
3 未来发展趋势

3.1 通用/开放式架构提升无人系统的互操作性

未来的战争将取决于作战系统之间关键和有效的交互。这些交互将依靠建立和实现数据、通信网络和服务跨作战系统的互操作技术基础。这种互操作基础将在信息收集者、决策者、规划者和作战人员之间及时传递信息。在联合作战的共同愿景指导下发展无人系统的综合方法将提高财政效率和作战效率。互操作性将成为综合利用无人系统技术的联合部队的基础。在有人和无人系统动态组合的部队中,无人系统必须能够跨系统和跨域、与其他无人系统和对应人员进行通信、共享信息和协作。在未来的作战环境中,部队和系统必须能够:在多个指挥级别之间跨部队进行通信;共享信息和任务下达;以及帮助战场实时事件的任务引导。通用架构对于确保系统和跨域之间的协同很关键,可促进目标的成功和实现。开放式设计将可能实现同时控制和集成多个平台,包括跨作战域。

3.2 人工智能发展扩大无人地面平台应用范围

随着人工智能技术的发展和成熟,未来后勤型无人地面平台的自主作战功能将不断拓展、装备数量会大幅增加,有人与无人系统间、无人系统间的协同作战能力将不断增强。人工智能和机器学习将使开发能够自主学习和自主做出高质量决策的系统成为可能。这种学习能力将直接促成更高自主性水平的无人系统的发展,从而将扩展和提高功能度,使无人平台能够执行更多种类的任务,直接提高作战能力。



Beginning with the DARPA Grand Challenges and AMAS JCTD

图1 美国国防部加速自主车队技术发展

Fig. 1 U. S. DOD accelerated autonomous convoy technologies



图2 美国陆军2040年无人自主补给构想

Fig. 2 The concept of unmanned resupply of the U. S. Army in 2040

3.3 动力技术将提高无人地面平台持续作战时间

由于相关的化学电池与燃料电池在近年内展现出不断优异的动力和能源性能,因此未来仍将针对可充电的锂离子电池进行开发。锂离子电池将广泛应用于军事和民用领域;而且随着加工工业的不断成熟,其成本也将大幅降低。目前,已经对可使用JP-8燃料的发动机的实用性进行论证,也推出了使用氢燃料的无人地面平台,未来将通过探索和

开发锂离子电池的可替代型电池来大幅提升目前蓄电池的性能。动力技术的重点发展方向还包括混合能量存储、高功率小型发动机等。无人地面平台动力的发展愿景包括延长续航时间、降低信号特征、更持久的静默观察、延长动力系统服务寿命、增大能量密度等。优化动力技术,将进一步提高无人地面平台全天候、全地域作战能力,减轻单兵负重,提高战场适应能力和作战能力。

4 结语

后勤的对抗已成为现代战争中交战双方较量的一部分。在军事后勤工作中使用无人平台符合非常规作战需求和零伤亡要求,能带来明显的安全优势,并且可以成为士兵的力量倍增器。受益于商用自动驾驶技术的快速发展和军方对无人后勤的重点关注,后勤无人地面平台技术正在加速走向成熟。无人地面平台的后勤应用已展现出明朗的前景。未来将会有多种多样的后勤型无人地面平台投入使用,这必将对未来武器装备发展和作战模式产生深远影响。

表1 美军正在进行的自主性项目
Table 1 Ongoing autonomy programs

项目	领域	描述
“忠诚僚机”(Loyal Wingman)	空	无人机协同有人驾驶飞机,共同完成任务和安全返回。
DARPA CODE	空	安装CODE软件的无人机有望与其他装备有CODE的系统协同,以便发现和打击目标
ACTUV	海	反潜战持续追踪无人艇(ACTUV)是一种无人艇,旨在持续跟踪安静型柴电潜艇。
SAFFiR	海	船用自主消防机器人(SAFFiR)是一种人形机器人,能够发现和抑制舰船上的火灾,并与人类消防员共同工作。
AMAS	地	自主机动性附加系统(AMAS)是一种用于军事后勤平台的自主组件,提供驾驶员告警/驾驶员辅助和引领-跟随能力。
AGR	地	自主地面补给(AGR)项目由陆军用于补给任务的自主补给车辆组成。
ExLF	地	在应急引领跟随(ExLF)项目中,车队中的引领车辆是有人驾驶,车队中的跟随车辆从引领车辆接收数据和命令。

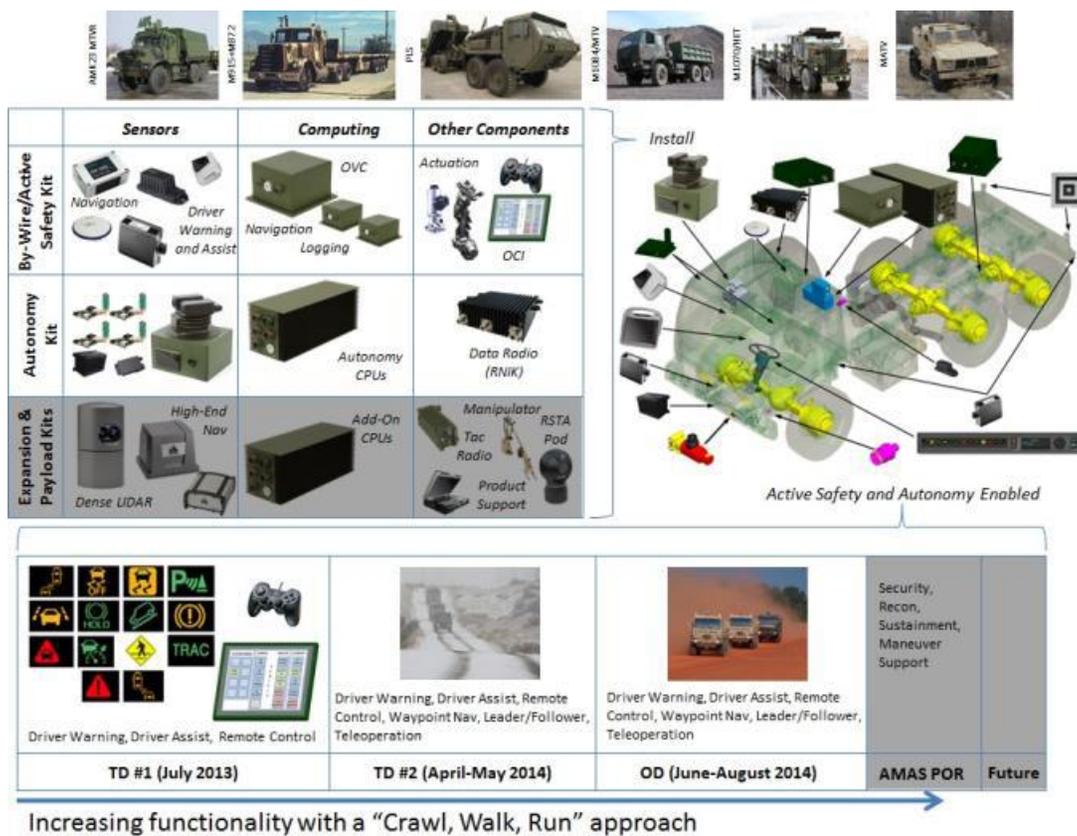


图3 AMAS系统总览^[7]

Fig. 3 AMAS System Overview

参 考 文 献

[1] Gerrard Cowan, Unmanned advantage: Autonomous systems in logistics [J], Jane's International Defence Review, 2020.1
 [2] Nicholas Fiorenza, Rheinmetall unveils Mission Master armed reconnaissance UGV [J], Jane's Defence Weekly, 2020.11
 [3] Robotic and autonomous systems strategy [R], 2017

[4] Unmanned systems integrated roadmap 2017-2042[R], 2018
 [5] Jayashree Harikumar and Philip Chan, Developing Knowledge and Understanding for Autonomous Systems for Analysis and Assessment Events and Campaigns [R], CCDC Data & Analysis Center, 2019
 [6] David Pirozzo, Integration of the Autonomous Mobility Appliqué System into the Robotic Technology Kernel [C]. 2019 NDIA

GROUND VEHICLE SYSTEMS ENGINEERING AND TECHNOLOGY SYMPOSIUM, AUGUST 13-15, 2019, MICHIGAN

- [7] Bernard Theisen, AMAS JCTD OPERATIONAL DEMONSTRATION LESSONS LEARNED [C]. 2015 NDIA GROUND VEHICLE SYSTEMS ENGINEERING AND TECHNOLOGY SYMPOSIUM, AUGUST 4-6, 2015 - NOVI, MICHIGAN

作者简介:

陈姝(1982-),女,硕士,副研究员,主要研究方向为地面无人系统情报研究。

赵媛媛(1979-),女,学士,研究员,主要研究方向为坦克装甲车辆情报研究。

田季红(1977-),女,学士,副研究员,主要研究方向为坦克装甲车辆情报研究。

激光致盲技术在反无人机中的应用研究

马长正, 刘大鹏, 石 亮, 谷风强

(中国航天电子技术研究院, 北京 100103)

摘 要: 电子信息、人工智能技术的快速发展,使得无人机技术得到飞速发展,无人机逐渐成为战场上的主要手段之一,反无人机也成为战场重要作战任务。利用电子干扰实现对无人机的摧毁作为反无人机的重要手段已经得到广泛应用,利用激光干扰实现对无人机光电探测器的致盲和致眩也得到了深入研究。本文首先介绍了激光致盲技术的基本原理,阐述了激光干扰反无人机系统的主要关键技术,仿真计算了激光致盲效能,最后总结了无人机机载激光致盲技术应用于反无人机的可能。

关键词: 激光干扰; 反无人机; 致盲距离

Research on Application of Laser Blinding Technology in Anti-UAV

MA Changzheng, LIU Dapeng, SHI Liang, GU Fengqiang

(China Academy of Aerospace Electronics Technology, Beijing 1000103, China)

Abstract: With the rapid development of electronic information and artificial intelligence technology, the UAV (unmanned aerial vehicle) technology has been rapidly developed. The UAV has gradually become one of the main means on the battlefield, and anti-UAV has also become an important mission on the battlefield. The use of electronic jamming to destroy (UAVs) has been widely used as an important means of anti-UAVs. The use of laser jamming to blind and dazzle UAVs photodetectors has also been deeply studied. This paper first introduces the basic principle of laser blinding technology, expounds the main key technology of laser jamming anti-UAV system, simulates and calculates the effectiveness of laser blinding, and finally summarizes the possibility and effect of UAV airborne laser jamming technology applied to anti-UAV.

Key words: Laser interference; Anti-uav; Blind distance

1 引言

近年来的局部战争和恐怖主义袭击中,无人机大量参与战争实践。2020年9月的纳卡冲突中,包括TB-2查打一体无人机,“哈洛普”自杀式无人机,安-2无人机等大量无人机参战,并取得很好效果。此次冲突中无人机装备按任务定位来看,主要担负侦察监视、察打一体、电子压制、巡飞压制等,几乎所有无人机都挂有红外和光电探测器[1]。

反无人机系统是通过各类技术手段,对无人机进行侦察监视、欺骗干扰、控制摧毁的作战系统。目前常见的反无人机作战手段主要包括防空导弹、电子战武器以及网络黑客攻击等,主要可分为直接实施火力打击的硬杀伤和欺骗干扰的软杀伤两种

方式。其中,利用电子战手段对无人机实施电子侦察、电子干扰、电子欺骗、电子隐身以及电子摧毁等,已经成为反无人机作战的重要内容[2-5]。无人机通常搭有可见光设备、红外设备、微波设备及电子侦察设备等任务载荷,执行监视、侦察和目标截获等任务,采用激光干扰方式实现对无人机探测器的致眩和致盲,从而减弱或丧失其作战能力,成为有效应对无人机威胁的一种手段。

激光致盲和致眩技术属于主动式激光有源干扰,是采用高能激光对目标光电传感器进行精准照射,作用在目标上的强激光束致使光电传感器材料的特性和状态发生变化,造成温升、膨胀、熔融、气化、击穿和破裂等不可逆的破坏,使其一定时间内功能失效甚至永久损伤。该技术因其具有定向精

度高、响应速度快、应用范围广的优点而倍受重视。随着激光技术发展的突飞猛进,激光武器辐照的频谱宽度和能级不断提升,使得压制干扰几乎所有光电传感器设备成为可能。

2 发展现状

经过多年的发展,世界各主要军事强国在激光致盲应用方面都有了一定的进展,尤其是美、俄等国家,美国将激光反传感器技术列为21世纪陆军战略性技术之一。美国激光致盲武器的研制与发展较早,且成熟度较高,种类覆盖便携式、车载、机载、舰载等^[7]。

美陆军从1982年开始研制Stingray“鲑鱼”车载激光武器系统,系统采用板条状Nd:YAG晶体,减少了以往存在的热畸变,改善了光束质量,激光输出能量达0.1J以上,可破坏8km远处光电传感器。“鲑鱼”系统可以以两种方式工作:激光雷达和激光致盲,为完成作战目标,系统能有效地探测、跟踪和干扰(致盲)坦克、战车和其他地面车辆及空中平台上的光学和光电装置。

洛克希德公司为美陆军研制的AN/PLQ-5便携式激光致盲武器,可以配备在M-16步枪上,它能致盲人眼、探测和破坏光电传感器。有效作用距离2km。AN/PLQ-5也可车载、直升机或小型舰载。目前,该装备已经在美军装甲部队、高机动部队和特种部队服役。

美国还研制了机载式激光致盲设备,比较有代表性的是由西屋电气公司制造的美军Coronet Prince“贵冠王子”机载激光系统,该系统装备在直升机和飞机上,主要用于破坏地基光电跟踪系统。它也是采用板条形Nd:YAG激光器,输出功率比“鲑鱼”系统高,作用距离更远。

同时,舰载式激光致盲设备也得到快速发展。俄罗斯海军的基辅级巡洋舰上装备有激光致盲系统,能够破坏10km以内的掠海飞行的复合制导导弹,也可对水下发射,用于反潜。

国内,中国兵器工业第208研究所、中国电科53所、中科院长春光机所等单位研制了不同型号的激光干扰设备,与国外设备相比,国内技术同质化严重,在性能和可靠性上仍有差距。

3 主要关键技术

激光致盲系统主要由大功率激光器、高精度跟踪系统和光束控制系统等组成,完成包含目标指示、目标跟踪与锁定、目标干扰、作战效果评估等基本功能。系统的关键技术主要有:大功率高光束质量激光器技术,精密跟踪瞄准技术,光束发射控制技术。

(1) 大功率高光束质量激光器技术

大功率高光束质量激光器是激光致盲系统的核心。激光干扰系统中应用最多的激光器是波长 $1.06\mu\text{m}$ 的Nd:YAG板条激光器和波长 $10.6\mu\text{m}$ 的CO₂激光器等。近年来光纤激光器,尤其是掺镱高功率光纤激光器在工业领域得到快速发展,其具有散热性好、输出功率高和电光转换效率高、集成度高的特点,同样,光纤激光器作为激光干扰重要光源正逐步得到应用。

(2) 精密跟踪瞄准技术

激光干扰设备是用高能激光束照射目标使其致盲或损坏,这要求设备具有很高的跟踪瞄准精度,对于无人机等运动较快的光电威胁目标,强激光干扰设备的跟踪瞄准系统还应具有较高的跟踪角速度和跟踪角加速度。通常激光干扰设备所要求的跟踪瞄准精度高达微弧度量级,需采用红外跟踪、电视跟踪等综合跟踪措施,来实现精密跟踪瞄准。

(3) 光束控制技术

光束控制技术是实现高能激光发射到目标打击点,并将光束稳定在打击点直到毁伤效果实现。

光束控制通过光束定向器来实现,光束定向器完成两个目的,高精度跟踪目标,并将目标成像,控制并将光束稳定在目标上。如果考虑激光在大气中传输时,大气湍流、热晕等大气效应引起的激光波前畸变,光束控制系统中还要增加自适应光学系统,以校正大气扰动引起的畸变。

4 效能分析

如果激光照射到探测器上的光强足以使探测器损坏且其性能不可恢复,将其对应的最低激光平均功率 I_{th} 称为致盲阈值,要达到激光致盲干扰的效果,必须要求激光器发出的激光进入探测器视场内

的功率大于探测器的致盲阈值功率 I_{th} 。

假设光电传感器表面法线与激光轴线的夹角为 φ , 探测器表面中心与激光轴线的距离为 r , 激光到达目标光电传感器的功率密度 $I(r)$, 则有

$$I(r) = \frac{P\tau}{\pi \times (R^2)} \tau_0 A_0 \cos \varphi \quad (1)$$

式中:

P 为激光器输出功率;

R 为激光到光电传感器距离的光斑半径大小;

τ 为大气的平均透过率;

τ_0 为光学接收系统透过率;

A_0 为探测器接收面积。

为了计算方便, 假设激光光束能量分布均匀, 则根据上述计算, 可以得到激光致盲干扰的干扰方程为:

$$\frac{P\tau}{\pi \times (R^2)} \tau_0 A_0 \cos \varphi = I_{th} \quad (2)$$

根据致盲干扰方程, 可以得到有效实施激光致盲干扰的条件为:

$$\frac{P\tau}{\pi \times (R^2)} \tau_0 A_0 \cos \varphi \geq I_{th} \quad (3)$$

用 Z 表示激光发射器到目标光电传感器表面的距离, 则有:

$$R = Z\theta/2 \quad (4)$$

将上式变换, 可以得到:

$$Z^2 \leq \frac{4P\tau Ext}{\pi \times I_{th} \times \theta^2} \tau_0 A_0 \cos(\varphi) \quad (5)$$

定义致盲距离 Z_{max} 为激光器的发射功率和发散角一定时, 激光器能够有效实施致盲干扰的最大作用距离。

致盲距离描述了激光致盲干扰系统能够在多大的距离上对敌光电探测器实施有效致盲干扰, 若不考虑大气环境影响, 根据致盲干扰方程, 可以得到:

$$Z_{max} = \left(\frac{4P\tau Ext}{\pi \times I_{th} \times \theta^2} \tau_0 A_0 \cos(\varphi) \right)^{1/2} \quad (6)$$

假设光学系统镜面直径为 d , 探测器光敏面积为 S , 则光学系统的接收增益 A 为:

$$A = \frac{\pi d^2}{4S} \quad (7)$$

$$Z_{max} = \left(\frac{4P\tau Ext}{\pi \times I_{th} \times \theta^2} \tau_0 A_0 A \cos \varphi \right)^{1/2} \quad (8)$$

可以看出, Z_{max} 和激光输出功率 P 正相关, 所以提高激光器的致盲距离, 就要增大激光器的输出功率, 且光束发散角越小越好。

下面对激光致盲系统对光电传感器的毁伤能力进行仿真分析。

对于一般 CCD 探测器, 激光到达探测器靶面的破坏阈值约为 10000 W/cm^2 量级以上。假设激光器输出功率为 1000 W , 光电传感器表面法线与激光轴线的夹角为 60° , 发射望远镜口径为 200 mm , 大气能见度为 20 km 时, $Ext = 0.7$, $\theta = 0.1 \text{ mrad}$ 。

以光电探测器光敏元直径为 $D_0 = 2 \text{ mm}$, 光学接收镜头直径为 $\varnothing = 0.1 \text{ m}$ 的无人机光电系统为例,

则光学系统的接收增益 $A = \left(\frac{\phi}{D_0} \right)^2 = 2500$, $A_0 = 7850 \text{ mm}^2$ 。

假设 $\tau_0 = 0.7$, 则计算出最大致盲距离为: $Z_{max} = 780 \text{ m}$ 。

5 结论

对无人机目标光电传感器进行实时瞄准跟踪是进行激光致盲干扰的前提, 地面激光干扰设备对无人机进行激光干扰, 存在侦察距离远、受大气影响大、信号特征弱的问题, 利用机载干扰模式实现空对空强激光致盲干扰无人机光电侦察设备, 作为无人机反制较为有效的一种干扰手段, 能够克服上述问题。针对无人机光电探测器的致盲阈值, 通过仿真计算, 采用 1000 W 的光纤激光器对无人机光电探测器的致盲距离 780 m 。随着光纤激光器技术的发展, 1000 W 光纤激光器的重量已经能做到 15 kg 以下, 这就为中小型无人机机载激光干扰系统武器化应用成为可能, 基于中小型无人机机载激光对抗系统, 能够在对目标无人机伴随飞行, 近距离对无人机光电探测器实施干扰, 弥补了激光功率小和大气湍流等造成的影响, 成为反无人机的可能有效手段。

参 考 文 献

- [1] 吴静, 蔡海锋, 刘俊良. 纳卡地区冲突无人机攻防运用分析及地空反无人对策建议[J]. 现代防御技术. 2021, 49(03).
- [2] 张静, 张科, 王靖宇等. 低空反无人机技术现状与发展趋势[J]. 航空工程进展, 2018, 9(1): 1-8, 34.

- [3] 刘玉文, 廖小兵, 蒋明等. 反无人机技术体系基本框架构建[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(10): 18-20.
- [4] ZHANG Jing, ZHANG Ke, WANG Jing-yu, et al. A Survey on Anti-UAV Technology and Its Future Trend [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(1): 1-8, 34.
- [5] 刘丽, 魏雁飞, 张宇涵. 美军反无人机技术装备发展解析[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(1): 60-64.
- [6] Sun X, Liu X, Tang Z, et al. Real-time visual enhancement for infrared small dim targets in video. Infrared Physics & Technology, 2017(83).
- [7] 吕长水, 刘彦宇. 国外光电对抗技术发展综述[J]. 航天电子对抗. 2006(02).
- [8] 王玺, 聂劲松. 激光致盲技术及其发展现状[J]. 光机电信息. 2007(10).
- [9] 马涛, 赵尚弘, 魏军等. 高功率光纤激光器探测器致盲研究[J]. 激光杂志, 2007, 48(5), 40-42.
- [10] 付伟. 激光致盲武器的工作原理与系统构成[J]. 航天电子对抗, 2000(4): 41-45.
- [11] 陆凤波, 崔东华, 林龙信, 王辉华, 顾晓东. 激光武器致盲光电传感器能力分析[J]. 光电技术应用. 2020(05).
- [12] 朱志武, 张震, 程湘爱, 黄良金, 刘泽金. 单脉冲激光对CCD探测器的硬损伤及损伤概率[J]. 红外与激光工程. 2013(01).
- [13] 陈前荣, 王国玉, 陈永光等. 高功率YAG激光对激光导引头压制干扰的效果评估与理论分析[J]. 激光杂志. 2007(04).
- [14] 吴建萍, 邵昭晖, 徐阳. 激光对导弹光电传感器作战效果的定量评估方法[J]. 舰船电子工程. 2019(10).
- [15] 刘免延, 孙宝东. 光电对抗技术反无人武器作战问题研究[J]. 中国机械, 2020, (6): 104, 106.
- [16] 余旭东, 孙琳. 光电对抗技术在反无人机作战中的应用[J]. 飞航导弹, 2005, (3): 40-42.
- [17] LIU Li, WEI Yan-fei, ZHANG Yu-han. Analysis of the Development of US Anti-UAV Technology and Equipment [J]. Aerospace Electroni Warfare, 2017, 33(1): 60-64.
- [18] LIU Yu-wen, LIAO Xiao-bing, JIANG Ming, et al. Basic Framework Construction of Anti-UAV Technology System [J]. Journal of Sichuan Military Engineering, 2015, 36(10): 18-20.

作者简介:

马长正(1982-),男,博士生,高级工程师,主要研究方向为无人系统反制技术。本文通讯作者。

刘大鹏(1978-),男,博士生,研究员,主要研究方向为无人系统反制技术。

无人化农业发展综述

刘鑫鑫, 于亚南, 邓 军, 张 贇

(95894部队, 北京 102211)

摘 要: 本文在介绍无人化农业的发展现状及相关技术运用的基础上, 综合论述了国内外无人农业的发展情况。本文从无人农机的发展运用和智能化耕种两个方面分析了无人化农业的发展前景。作者根据当前无人农机的使用特点提出了一条无人化耕作系统的构建思路, 即通过对无人技术、5G通讯技术、人工智能技术以及新型能源等方面技术的综合运用来实现无人化耕作系统的基本实现。

关键词: 无人化; 农业; 无人农机; 智能化; 无人机; 5G

Summary of Unmanned Agriculture Development

LIU Xinxin, YU Yanan, DENG Jun, ZHANG Ze

(95894 PLA Unit, Beijing 102211, China)

Abstract: Based on the introduction of the development status of unmanned agriculture and the application of related technologies, the paper discusses the development of unmanned agriculture at home and abroad. The paper analyzes the development prospect of unmanned agriculture from two aspects: the development and application of unmanned agricultural machinery and intelligent farming. According to the applied characteristics of unmanned agricultural machinery, the author puts forward the idea of unmanned farming system. The unmanned farming system is realized through the comprehensive application of unmanned technology, 5G communication technology, artificial intelligence technology and new energy technologies.

Key words: Unmanned; Agriculture; Unmanned agricultural machinery; Intellectualization; UAV; 5G

1 农业无人化发展现状

当前无人机技术的蓬勃发展使得在各个领域都有无人机的影子,从大型无人机到微小型无人机,其应用于航拍、侦察、消防、运输等等领域,不仅局限于无人飞行器,还包括无人农机,为我们的生活带来了更大的便利,也逐渐改变了一些传统工作的样式或模式。我国是农业大国,农业的发展始终是我国经济社会发展的中心任务,推进农业生产的现代化更是重中之重。现在,将一些新技术、新方法用于农业生产是提高农业生产效率,加快农业发展水平的有效手段。将无人机技术应用到农业生产中去是农业发展和无人机应用的一个大的趋势,通过运用无人机技术能够实现节本、高效、精准、绿色,形成类似于无人工厂的农业生产方式。

1.1 国外农业化发展现状

在国外的一些发达国家,依赖于其强大的科技实力,无人化农业发展起步早、发展快,但是由于现有的农业体制运行非常流畅且无人化作业难度大所以在无人化农业的应用上还不够普及。

欧美等国家已经开始将自动化的设备应用于农业生产当中,因为其具备良好的科学技术基础,对无人机技术的研究也走在前列,其对无人机技术在农业生产当中的应用已具备一定的水平和能力。但是当前这类发达国家对无人化农业的发展还没有明显的需求,所以无人机在农业生产中的推广并没有特别广泛。据了解,美国的大中型的农场大部分应用了自动驾驶技术,其系统普及率已经达到90%以上。

在产品创新方面,约翰迪尔、凯斯纽荷兰在2016年分别都推出了无人化概念拖拉机及配套农

具,这种拖拉机配备全方位感应和探测装置,能够侦测并避开障碍物,具备远程配置、监测及操作功能,在生产平台的管理和调度下可实现全天候无人作业,不过目前并未商业化应用。

在日韩及东南亚等耕地面积相对较小的国家和地区,劳动力明显不足,对无人化农业的需求比较迫切,但是其无人化农机设备处于刚刚起步的状态,只是散布式地小规模使用,无法实现大田无人耕作。据了解,日本主要农机企业基于“1个机手、2台机器”设想,推出了带有高精度卫星定位导航功能和遥控功能的自动化农机产品。2018年6月以来,久保田公司先后上市了带有自动驾驶功能的水稻收获机、拖拉机,以减轻机手长时间作业体力负担、提高农机作业精度。井关、洋马等企业也在计划上市类似产品,扩大相关技术推广应用规模。^[1]

1.2 国内农业无人化发展现状

我国在无人化农业领域有相当大的需求,国家始终把“三农”工作摆在首位,特别是在近年来脱贫攻坚的战略指引下,国家对农业发展的投入更大,运用新技术、新科技不断提高农业发展水平。我国无人技术发展迅速,配合物联网等技术的融合运用,无人化农业在我国已经有了很大的发展,已经走在了世界的前列。“东方红”“欧豹”无人驾驶拖拉机、“谷神”无人驾驶联合收割机、“极飞”植保无人机等等无人设备的投入使用已经呈现了一幅无人农业的美好景况,提高了作物产量质量,提高了土地利用效率。

我国农业无人机飞速发展,在农林植保领域加速普及。据中国农机流通协会市场监测,农业无人机年度销量从2017年的不足千架发展到2020年的1.53万架,4年时间增长了17倍;市场规模从2017年的0.55亿元扩张到2020年的7.75亿元,4年时间增长了14倍。由此可见农业无人机的应用价值和巨大的发展潜力。

在2020年10月份在黑龙江建三江举行了一场农机无人驾驶作业演示会,在此次演示会上共展示了几十台无人驾驶农机。这些无人农机都是通过远程指令控制下对玉米、大豆、水稻等作物的耕种管收进行全流程的无人化作业,向我们展示了高新技术在农业生产中的实际应用。^[2]

2 无人化农业发展前景

2.1 无人农机的发展及应用

无人农机是实现无人化农业的基础,无人农机的优点就是能够节省大量的人力,大大提高了投入产出比。研发使用无人农机能够使得大田农业从耕地到收获全流程无人化耕作。当前与大田农业相关的无人农机主要有无人拖拉机、无人播种机、联合收割机、无人运粮车、灌溉无人机、灭虫无人机等等。特别是植保无人机在目前的应用范围最为广泛,其现阶段还处于普及阶段,大部分作为人力的补充用作精准补漏。就目前而言,植保是制约农机发展的一个需要解决的问题,利用无人机可以打破地形限制,无人机能够深入到水田、山地、丘陵等一般的植保机械无法深入的地方开展快速有效的作业。通过运用无人机可以实现“人药分离”效果比人工作业更加安全、可靠、高效。^[3]

有关专家对农业无人化表示,以无人化农场为代表的先进生产方式和新型农业模式,推进农业机械化向农机智能化、无人化,进而推动农业生产向信息化、数字化、无人化发展,代表着我国乃至世界未来农业的发展方向,必将引发农业生产关系的深刻变革,进而显著推动我国农业现代化发展进程。^[4]

2.2 智能化耕种

2015年国务院印发了《“十三五”智能农机装备科技创新专项规划》,在《规划》中明确,下一阶段重点开展智能农机装备与高效设施、农业智能生产和农业智慧经营等技术和产品研发,实现传统精耕细作、现代信息技术与物质装备技术深度融合。2017年国家工信部、农业部和发改委也联合提出,全力推动农机装备产业转型升级、提高现代农业建设装备支撑能力。在2021年的《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》中指出,加强大中型、智能化、复合型农业机械研发应用,农作物耕种收综合机械化率提高到75%。同时完善农业科技创新体系,创新农技推广服务方式,建设智慧农业。

现在的农业生产模式下能够基本实现预期的产出。现在大部分耕地都是由年纪较大的农民在进行生产,其生产力水平较低。如果应用遥感监测技术对作物实施状态监控,就能够更加精准有效地

提高作物产量和质量。^[5]通过对耕地的监控配合无人技术的运用,实现大田智能化的耕种是具备实现基础的。在目前已经由部分农田运用无人机对耕地进行遥感监测,利用任何物体都具有吸收和反射电磁波的特性,作物的不同状态呈现的红外波段的遥感信息也有所不同,以此来实现农作物的识别和农作物长势及灾害监测。^[6]获取了农作物的状态信息便可利用无人农机实现大田的智能化耕种,减少了人力消耗,通过科学技术换取了生产力。无人农机在作业过程中,可以自动记录喷洒农药、施肥、播种的用量、位置、时间等数据,为智能化耕种提供有效的数据支持。在未来通过运用无人飞行器及遥感卫星能够实现更大区域的监测监控,配合无人农机能够实现更大范围的智能化无人耕种。

3 自主无人化耕作系统构想

无人化农业能够通过使用物联网、大数据、人工智能等技术,实现无人化,再融入5G通讯技术等新一代信息技术能够实现各个设备之间的实时互联互通,形成一套无人化耕作的系统对农田实施全天候的监控维护,保证作物的各个阶段都能处于最优状态。如图1。该系统的结构如图2。

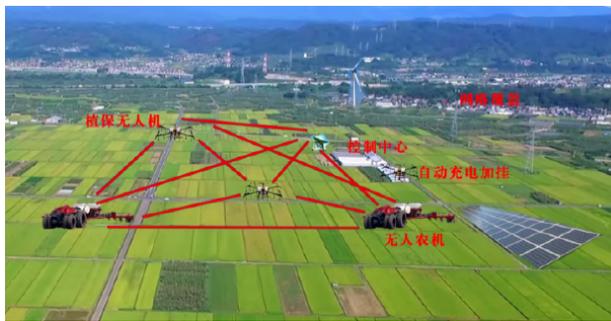


图1 无人化耕作系统

Fig. 1 Vector diameter variation diagram

3.1 无人技术的应用

运用无人技术实现各个农机设备的无人化操作,通过使用无人农机对耕地所需的全部工作均可实现无人化,其限制条件是对作物的植保工作相对繁琐,对个别作物的养殖对农机的大小及性能等方面有比较苛刻的要求。^[7]目前农业用的无人机按能源可分为燃油无人机和电动无人机,按构型又可分为单旋翼无人机、多旋翼无人机和固定翼无人机。

^[8]目前应用较多的同时也是便于农业生产开展的无人机多为电动多旋翼无人机和油动单旋翼无人机。对于构建无人化耕作系统要求无人机拥有以下功能:一是灵活的喷洒技术,无人喷洒技术有方便灵活快捷的优点,能够有效节省水和农药的消耗,人药分离安全性好,现在的喷洒技术主要有变量喷雾和静电喷雾两种;二是高效的撒播技术,通过给无人机安装对应的播撒模块就可以实现无人播种,无人播种的效率能够达到人工的几十倍,极飞植保无人机在这方面已经进行了良好的实践^[9];三是可靠的农业遥感技术,农业遥感技术对于植保非常重要,相比卫星遥感无人机遥感具有效率高,精度高,实时性强等优点。

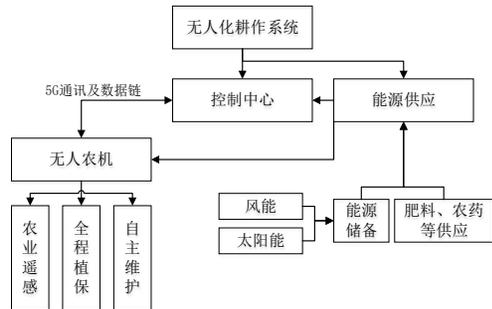


图2 无人化耕作系统结构

Fig. 2 Vector diameter variation diagram

3.2 5G通讯技术的应用

为实现各个农机设备的信息互通及工作协同,需要保证其相互之间能随时进行通讯,通过运用强大的5G通讯技术可以有效实现各农机设备的互联,形成网状拓扑结构提高相互之间信息的准确性,提高了系统的完整性。^[10]利用5G通讯技术实现农田区域的网络覆盖,保证无人农机可以无通讯死角,畅通工作。^[11]将北斗导航技术应用到无人农机上去,可以拓展无人农机的自主导航和自动驾驶能力,按照控制中心规划的路线实施相应的工作。^[12]对于地形地貌复杂的地区,可利用无人机实现网络中继的作用维持整个系统的正常运转。^[13]

3.3 人工智能技术的应用

为提高系统的维护效率,运用人工智能技术使系统具有逻辑判断能力,能够自行根据作物监控状态开展响应的工作,人只起到监控作用,实现全程无人化。系统内的设备可以自行充电、填充等作

业,只有在系统内有故障发生时人才会去实施维修。

3.4 系统的能源及维护

为使系统能够实现自循环,可利用太阳能、风能等绿色能源为系统提供能源,设置储能设备,能够将富余的能源作为应急储备,在绿色能源获取得不到满足时进行补充。在控制中心,由少数人进行系统的监控,其余工作可由中央控制器自行判断进行。对系统的维护工作也仅限于提供肥料、农药、水等消耗品和对系统故障的维修。

4 总结展望

目前,我国无人农业取得了一定的成果,但是整体上还是处于起步阶段,但是其前景非常光明,随着无人化农业的蓬勃发展,在未来可以实现大田的真正的无人化耕作及管理,解放了大量的劳动力,提高作物质量产量,让农业生产成为高精尖技术的集结地。^[14]在未来仍然需要加强基础数据的整合分析,因为无人化农业还处于起步的阶段对作物的基础数据量掌握非常有限,需要大量的时间和人力去收集整理,通过资源共享解决基础性的数据难题。^[15]同时仍要加大科技攻关力度,对重点产业和重点技术仍需要进一步研究,例如智能化无人农机的研发,让农机拥有自己的思想,依托基础数据实现自主学习,对传感器技术、数据链技术加强研究,在大量无人农机设备共处于一个系统下时,云计算和区块链等技术的融入也许能够更好地提高系统运作效率。

参 考 文 献

- [1] 徐峰,朱慧琴,程胜男,彭俊明.大田无人农业发展现状与实现路径[J].农业工程,2021,11(3):12-14
- [2] 刘慧.经济日报[N],2021,5:47.
- [3] 梁盛开,林甄,等.无人机在精准农业中的应用现状分析[J].山西电子技术,2021,2:56-58.
- [4] 宋朱刚,蒋盘林.高空长航时无人机在情报侦察中的军事应用与关键技术[J].通信对抗,2010(03):52-55.
- [5] 哈力旦·太来提,热孜万阿依·台来提.我国农用植保无人机的应用现状及展望[J].中国农业文摘-农业工程,2018,(3):72-73.
- [6] 李欣雨,温晓鑫,葛宜元等.农业植保无人机发展现状及趋势[J].农机使用与维修,2017,(8):1-4.
- [7] 杨丽英.无人机在精准农业中的关键技术及应用[J].高科技与产业化,2015(07):74-79.
- [8] 冷志杰,蒋天宇,刘飞等.植保无人机的农业服务公司推广模式研究[J].农机化研究,2017,(1):6-9.
- [9] 尚春雨,蔡建法,黄思健等.我国农用植保无人机应用现状与前景分析[J].安徽农业科学,2017,(30):193-195.
- [10] 徐小杰,陈盛德,周志艳等.植保无人机主要性能指标测评方法的分析与思考[J].农机化研究,2018,(12):1-10.
- [11] 李道亮.提前布局无人农场加速推进现代农业[J].山东农机化,2020(2):11-12.
- [12] 彭荣君,唐庆刚,呼大明.推进水稻生产全程智能化建设开启北大荒智慧农业崭新时代[J].中国农垦,2020(7):30-31.
- [13] 南农.国内外无人化农业发展现状[J].南方农机,2020,51(21):6.
- [14] 阮晓东.农用无人机,现代农业的助航者[J].新经济导刊,2015(4):66-70.
- [15] 郑大睿.我国智慧农业发展:现状、问题与对策[J].农业经济,2020(1):12-14.

作者简介:

刘鑫鑫(1995-),男,学士,助理工程师,主要研究方向为无人机指挥控制。

于亚南(1991-),男,学士,工程师,主要研究方向为电子通讯导航。

邓军(1988-),男,学士,助理员,主要研究方向无人机运用工程。

张曠(1976-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向无人机运用工程。

关于无人潜航器预防人为打捞破坏的思考

曾朋朋, 金海波, 袁 龙, 董忠亮

(中国人民解放军 32033 部队, 海口 570100)

摘要: 受海洋环境复杂性的影响以及当前装备技术发展水平的限制, 在水下运行的无人潜航器将面临意外丢失、遭人为打捞甚至被破坏等潜在风险。本文通过梳理国内外捞获无人潜航器的典型案例, 并结合事件发生的时空分布特征以及装备研制与使用单位有关经验, 分析总结无人潜航器丢失、遭人为打捞等事件发生的主要原因。在此基础上, 首次提出“以预防丢失为主线, 以数据安全为核心, 以避免争端为底线”的3项基本处置原则, 以及5条具体防打捞破坏措施。最后从装备论证建设、人员岗位培训和配套制度机制等3个方面出发, 对无人潜航器使用部门未来重点工作提出了建议。

关键词: 无人潜航器; 预防丢失; 人为打捞; 破坏; 数据安全; 避免争端

Reflection on Avoiding UUVs Being Artificially Salvaged and Sabotaged

ZENG Pengpeng, JIN Haibo, YUAN Long, DONG Zhongliang

(PLA Troop 32033, Haikou 570100, China)

Abstract: The running UUVs potentially risk accidental loss, being artificially salvaged or even sabotaged causing the complexity of the marine environment and the current limited technical level of the relevant equipment. Several typical cases that UUVs are captured both at home and abroad are presented in this paper, summarizing into three main kinds of reasons for the missing or salvaged UUVs based on the analysis on these cases' temporal and spatial characteristics, along with the experience from the equipment development and using enterprises. Further, three basic disposal principles are first proposed for the same case in this work, that is, the main work is to prevent the loss of UUVs, the central issue is to ensure data security, and avoiding dispute is the bottom line, followed by five specific measures. At last, some advice is particularly raised on the future pivotal work for UUV-using units from three aspects which includes the demonstration and construction of UUVs, job-related training, and the complete systemic mechanisms.

Key words: UUV; prevent loss; artificially salvaged; sabotaged; data security; avoiding dispute

1 引言

近年来,以自主水下航行器(UUV: Unmanned Underwater Vehicle)、水下滑翔机(UG: Underwater Glider)、缆控水下机器人(ROV: Remotely Operated Vehicle)等为代表的新型无人潜航器装备技术发展迅速,受到了美、日等世界海洋强国高度关注与重视^[1]。相比于传统的海洋环境探测手段,无人潜航器具有智能可控、机动组网、维护便捷等综合优势,广泛应用于海洋灾害预警、海洋科学研究和军事活动保障,社会、经济及军事效益愈发显著^[2]。

在无人潜航器应用过程中,一些新问题也随之产生。2020年12月,印度尼西亚渔民在西拉亚尔群岛(Seraya Islands)附近海域意外捕获一台无人潜航器,并将其移交印尼海军舰队司令部^[3]。公开资料显示,此次被渔民捕获的无人潜航器外观与中国科学院沈阳自动化研究所研制的“海翼^[4]”系列水下滑翔机高度相似,由此印尼方面怀疑其来自中国。此次打捞事件发生在龙目海峡附近海域,该海峡为沟通西太平洋与印度洋的咽喉要道,适于大型舰船、潜艇安全航行,位置特殊敏感、战略地位突出^[5]。一旦证实该无人潜航器确为我国布放并控

制,存在进一步引发外交争端和政治摩擦的风险。从确保无人潜航器安全运用的角度出发,以此事件为契机,开展无人潜航器防人为打捞破坏问题研究,对保证水下装备及数据安全^[6],指导装备安全高效运用具有重大现实意义。

2 历史案例梳理分析

2.1 典型案例

2.1.1 我国捞获国外无人潜航器案例

1978年10月,一枚美制“MK-46”鱼雷在南中国海被我渔民打捞上岸,后移交至国内有关单位进行研究。“MK-46”型鱼雷是美海军装备数量最多的轻型反潜鱼雷,集成了先进的主被动联合声导技术,主要设计用于攻击高性能潜艇。鱼雷与UUV平台技术属同源,在水下均面临丢失的风险,一旦为外国打捞,装备核心技术安全难以保证。



图1 美制“MK-46”型鱼雷
Fig 1 MK-46 torpedo

2015年8月,根据央视新闻节目报道,海南一渔民在我某军港外海捕鱼过程中,意外捞起一台外形似鱼雷的无人潜器(如图2所示)。后经鉴定为外国侦察型缆控水下机器人,具备水下光学侦察、光纤传输和卫星通信等功能,能够对我沿岸港口水下环境和舰船动态实施隐蔽抵近侦察,所获情报信息通过机器人艏部脐带缆(内含光纤)实时回传至母船。

2016年12月,“南救510”打捞救生船在监美海军“鲍迪奇号”海洋测量船作业过程中,将其准备回收的1台无人潜航器打捞上船。该无人潜航器是美海军LBS-G(滨海战斗空间感知滑翔机),为美特利丹仪器公司韦伯海事研究所和伍兹霍尔海洋研究所联合研制的浅海型Slocum水下滑翔机^[7](如图

3所示),从2015年开始用于亚太地区执行海洋水文调查任务,主要搜集海洋温度、盐度、海流、重力、水下地形等军事海洋地理信息。



图2 外国侦察型缆控水下机器人
Fig 2 Foreign ROV in reconnaissance



图3 美海军滨海战斗空间感知滑翔机
Fig 3 LBS-G of the US Navy

2021年4月,江苏渔民在近岸捞获一台美国液体机器人公司(Liquid Robotics)研制的波浪能滑翔器。该设备由水面艇、挂缆、水下驱动单元3部分组成,利用波浪起伏提供航行动力(如图4所示),具备自主航行、实时通信与定位等功能,可拖曳Winch150P型声学传感器对潜艇等水下目标实施长时间、连续监测^[8]。



图4 液体机器人公司研制的波浪能滑翔器
Fig 4 Wave glider of Liquid Robotics

2.1.2 国外捞获我方无人潜航器案例

印尼渔民捞获我方无人潜航器的公开报道有另外2例。2019年3月,在印尼廖内群岛(Riau Islands)附近水域发现一台“海翼”水下滑翔机(如图5(a)所示);2020年1月,在西拉亚尔群岛以西约400英里的马萨伦布群岛(Masalembu Islands)附近海域,印尼渔民发现并捕获一架黄色的无人潜航器(如图5(b)所示),根据公开图片基本可判定为“海翼”水下滑翔机。



(a) 2019年3月捞获 (b) 2020年1月捞获

图5 印尼渔民捕获的我方其他无人潜航器

Fig 5 Other UUVs captured by Indonesian fishermen

2.2 案例分析

2.2.1 时空分布特征分析

上述印尼渔民捞获无人潜航器事件,从空间分布的角度分析,均位于我国南海沟通爪哇海一线(如图6所示);在时间上,分别是2019年3月、2020年1月和2020年12月,其分布具有一致性,即基本发生在冬季。根据Wyrki(1961)年绘制的东南亚海域的表层海流分布图可知,南海西海岸附近始终存在一支强海流。冬季,从台湾海峡和吕宋海峡开始,海水南流,经广东近海、中南半岛沿岸和巽他陆架,通过卡里马塔海峡和加斯帕海峡而进入爪哇海,呈一气旋式环流^[9];该环流在进入爪哇海的同时,还分出一小支,经巽他海峡进入印度洋。因此,在南海活动的无人潜航器若发生故障失去动力,极易随着该环流运动漂流至爪哇海周边海域,大大增加了被东南亚国家渔民捞获的概率。

此外,印尼所属岛群间分布的众多战略海上通道(如望加锡海峡、巽他海峡、龙目海峡、新加坡海峡与马六甲海峡等),地处南海、爪哇海、苏拉威西海等海域与印度洋和太平洋相连通,西起马六甲海峡东到丹皮尔海峡^[9],与东南亚基地群(樟宜、苏比克、雅加达、泗水等)共同形成扼控支点态势,经济及军事地位极其重要。若我国无人潜航器在该海

域为外籍渔民或外军所捞获,极易在舆论、外交等方面造成我方被动局面。



图6 印尼渔民先后3次捞获无人潜航器的地点分布

Fig 6 Three locations on which UUVs are captured by Indonesian fishermen

2.2.2 主要原因分析

天津大学、中科院沈阳自动化研究所等相关装备研制及使用单位表示,每年均有无人潜航器(包括UUV、水下滑翔机)在湖上试验和海上科考航次任务中丢失,行业内已“司空见惯”,但丢失的无人潜航器遭他国渔民捞获甚至破坏仅为个例。主要原因可归结为以下3类:

一是不可抗力延误回收时间。无人潜航器处于或临近回收期间,遭遇台风、恶劣海况等极端自然环境,不便开展海上回收作业,在设备电池电量耗尽后自主紧急抛载上浮,并遭人为打捞。

二是复杂环境引发轨迹失控。水下滑翔机、波浪能滑翔器等装备由于循迹控制能力有限,在运行期间遭遇强流等复杂海洋环境,导致大范围偏离预设轨迹,进入敏感海域或他国领海,无法组织回收。

三是平台故障造成失控失联。无人潜航器在运行期间发生系统故障,与岸基监控中心通信异常,将启动自主紧急抛载上浮,被渔民发现并打捞;或是由于通信故障,岸基无法正常定位装备出水位置,直接无法组织回收。

3 应对措施

3.1 基本原则

以UUV、水下滑翔机等为代表的新型无人潜航器,尤其是遭遇他国人员打捞时,核心技术及数据安全均难以保障,且可能引发外交争端。为避免我方无人潜航器在海上运行期间为他人打捞破坏,本

文首次研究提出“以预防丢失为主线,以数据安全为核心,以避免争端为底线”的基本处置原则,主要内容如下:

(1) 预防丢失原则。无人潜航器丢失或失联,无论为外国人员打捞与否,都将对我方造成直接经济损失。因此,日常重点工作首要是要预防装备丢失,坚决排除各类主观因素造成的装备丢失隐患。

(2) 数据安全原则。一旦我方无人潜航器为外国人员捞获,必须把确保装备核心技术和自容数据安全摆在首要位置,不能为其截获或破坏。

(3) 安全合法原则。任何用于科学研究或军事目的的无人潜航器,以及相关人员、船只等,尤其是由国家领海进入专属经济区或者公海海域,应当严格遵守国际海洋法公约,安全合法开展活动。

3.2 具体措施

依据上述3条基本原则,结合历史原因分析,研究制定以下具体措施:

(1) 保持良好工况,减少装备故障。无人潜航器在贮存、运输、转运以及布放回收作业过程中,严格操作规程,避免撞击和磕碰,尤其是通信天线、机身传感器等易损部件;在布放下水前,甲板人员按规程做好装备状态检查和虚拟任务周期测试;在回收上岸后,快速完成航次维护保养工作,并按计划进行修理。

(2) 科学规划任务,提升航行安全。在进行任务规划、航迹设定及参数设置时,综合考虑任务海域水深、地形地貌、洋流、台风、渔民活动等自然及人为因素,避开浅水区、复杂海底地形区、强洋流区、渔民高频活动区、争议海区等不利于无人潜航器运行安全的海域,必要时设置进入特定区域预警;同时,高度关注台风等极端天气与无人潜航器计划回收窗口,及时调整装备回收位置与时间。

(3) 全天监控状态,缩短响应时间。无人潜航器在自主运行期间,岸基或船基建立24小时值班值守制度,对无人潜航器运行状态进行全时监控,重点监控抛载上浮、电机故障、电量异常、偏离预设轨迹等异常状态,确保第一时间发现并处置。

(4) 建立自毁机制,确保整体安全。自毁机制包括核心模块自毁、数据自毁和直接沉底等内容。无人潜航器在电池电量即将耗尽、又不便于回收时,通过岸基远程控制直接沉底;当岸基监控中心

与无人潜航器突发失联时,根据系统最后一次正常通信报告的位置,综合考虑附近流场、风场等因素,安排海上作业分队紧急搜索;失联时间达到设定阈值时,可认为已遭打捞破坏,平台自动启动自毁程序,销毁核心模块和自容数据,确保装备核心技术与探测数据安全。

(5) 依托科考活动,降低涉政风险。海上活动期间,为避免外国武装渔船等力量的蓄意干扰和破坏,在不违反国际海洋法的前提下,尽量通过租赁或共享航次等途径,依托地方海洋科考船开展无人潜航器海上布放与回收作业,执行海洋环境调查任务,降低政治、外交风险,并保证我方在紧急情况下处于主动有利地位。

4 未来工作建议

为提高无人潜航器安全运用水平,做好UUV、水下滑翔机等典型海洋无人装备运行管理和维护保养工作,建议无人潜航器相关研制与使用单位重点做好以下工作:

(1) 科学论证装备建设。在涉及UUV、水下滑翔机等水下装备建设任务中,科学开展装备论证,从严把控各项指标,在装备研制生产的全流程,始终以提升装备稳定性、可靠性和安全性为目标,将自毁机制等关键要求纳入合同范畴,确保水下装备实际安全性能达到预期要求。

(2) 加强人员岗位培训。坚持以提升装备综合运用能力为导向,利用好初级资格培训、专业培训、复训和集成训练等时机,区分岗位类别、等级,强化人员装备操控、维护保养、运行管理等基础能力素质,不断提升人员与装备之间的契合度,在充分发挥无人潜航器探测效能的同时,最大程度降低主观因素引发的安全风险。

(3) 完善配套制度机制。完善各型装备操作规程、流程,避免人员操作不当造成装备丢失;根据不同类型、不同场景下的无人潜航器运行监控需求,分别建立值班值守制度,确保装备运行状态全时可控;完善各类安全风险、突发事故应对和处置预案,建立事故报告与处置机制;与海警执法部门、法理斗争部门等沟通建立应急救援机制,在我方正当权益遭受侵犯时,能快速响应并控制形势,保证人员及装备的安全。

5 结语

无人潜航器作为先进海洋感知技术的代表,防止其在部署运用过程中遭遇人为打捞甚至破坏,关乎装备本身、核心技术、探测数据以及外交政治等多重安全风险问题,在装备规划、论证、建设、运用、维护的全寿命周期,必须紧紧围绕规避上述问题和风险开展工作,尤其是要以预防装备丢失为首要任务,最大程度规避各类安全风险,更好地发挥无人潜航器在海洋环境调查领域效能“倍增器”的作用。

参 考 文 献

- [1] 王雅琳,刘都群,杨依然. 2019年水下无人系统发展综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(1): 55-59.
- [2] 董晓明. 海上无人装备体系概览[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2020: 3-37.
- [3] 六分仪上的地球. 根据印尼捞取的无人水下潜航器分析中国的技术和水下战略[EB/OL]. (2021)[2021]. <http://xw.qq.com/cmsid/20210111A08D0G00>.
- [4] 中国海洋报. “海翼 1000”声学水下滑翔机完成南海联合试验[J]. 海洋与渔业, 2018, 10: 8-8.
- [5] 刘宝银,胡筱敏,于龙. 世界重要海峡通道及其扼控支点态势

[M]. 北京: 海洋出版社, 2018: 84-105.

- [6] Erich C. Frandrup. Embracing Undersea Robots: A US Strategy to Maintain Undersea Superiority in an Age of Unmanned System. [R]. Washington: Scowcroft Center for Strategy and Security, Atlantic Council, November 2020.
- [7] 杨燕,孙秀军,王延辉. 浅海型水下滑翔机技术研究现状分析[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(4): 7-14.
- [8] 孙湘平. 中国近海及毗邻海域水文概况[M]. 北京: 海洋出版社, 2016: 238-240.
- [9] Liquid Robotics. WAVE GLIDER [EB/OL]. (2021) [2021]. <https://www.liquid-robotics.com/>.
- [10] 刘宝银,胡筱敏,于龙. 世界重要海峡通道及其扼控支点态势[M]. 北京: 海洋出版社, 2018: 66-68.

作者简介:

曾朋朋(1993-),男,工学硕士,助理工程师,主要研究方向为海洋环境调查装备及技术应用。

金海波(1984-),男,大专,高级技师,主要研究方向为海洋水文保障。

袁龙(1993-),男,工学学士,助理工程师,主要研究方向为海洋仪器仪表技术应用。

董忠亮(1986-),男,工学硕士,工程师,主要研究方向为摄影测量与遥感制图。

陆军无人作战力量运用研究

王 瑞

(中国人民解放军71352部队, 河北张家口 075100)

摘 要: 随着新型无人机装备和技术的广泛发展, 新型陆军无人作战力量正在大量投入战场, 深刻改变战争形态, 为打赢未来智能化战争提供了新的遵循。本文从新型无人作战力量的发展背景、概念和运用特点展开分析, 介绍了全域作战、立体作战、多能作战、精确作战、持续作战等作战运用样式, 区分“有人设计, 无人自主”、“有人为主, 无人为辅”、“有人设计, 无人自主”三个不同的发展阶段对人机协同编组的模式进行探讨和展望, 形成加强新型陆军无人作战力量建设、遂行“全域作战, 跨域协同”的任务目标的意见建议, 对基于人机混合增强智能的新型陆军部队建设有一定的促进意义。

关键词: 无人作战; 智能化; 作战形态; 编组模式

Research on The Application of Unmanned Combat Force in The Army

WANG Rui

(Unit 71352 of The Chinese People's Liberation Army, ZhangJiaKou, HeBei 075100, China)

Abstract: With the development of new unmanned autonomy equipment and technology, the new army unmanned combat force is investing a lot in the battlefield, profoundly changing the war form, and providing a new basis for winning the future intelligent war. Based on the analysis of the development background, concept and application characteristics of the new unmanned combat force, the paper introduces the operation application modes of global operation, three-dimensional operation, multi-functional operation, precision operation and continuous operation, and distinguishes between "someone designed, no one independent", "someone dominated, no one supplemented" and "someone designed". The mode of man-machine cooperative marshalling is deeply discussed and prospected in three different development stages of "unmanned autonomy". The formation of opinions and suggestions on strengthening the construction of the new army unmanned combat force and carrying out the mission goal of "global operation and cross domain coordination" is significant to promote the construction of the new army force based on man-machine hybrid and enhanced intelligence.

Key words: Unmanned operation; Intelligence; Operation form; Marshalling mode

1 引言

战争形态总是随着武器系统的更新而不断变化。近年来, 几场局部战争显示, 智能无人装备正在大量投入战场, 并深刻改变战争形态, 世界各国也越来越重视智能无人装备的军事化建设和运用。习近平主席指出:“当前, 战争形态正加速向智能化转变, 深入研究智能化战争制胜机理, 是打赢智能化战争的基础工程”。随着无人作战力量逐步渗透到战场空间的各个领域, 传统作战的对抗形态、作战方式、战术战法都产生了极大转变, 面对日益复杂变化的作战模式和战场环境, 需牢牢把握发展机

遇, 积极应对严峻挑战, 深入探索陆军无人作战力量运用模式, 为打赢未来智能化战争未雨绸缪。

2 陆军无人作战力量的概念和运用特点分析

2.1 无人作战系统的概念

无人作战系统是指在无人平台搭载各类任务载荷, 通过遥控或自主控制等方式, 独立或与其他装备协同完成枯燥、高风险和常人难以完成的作战和支援保障任务的系统^[1]。

2.2 陆军无人作战力量运用特点

1. 全域作战。新型陆军无人作战力量通过不

同的无人平台遂行作战任务,在远程投送、情报获取、态势感知、指挥控制、火力打击方面,具备较强的战场适应能力,能够在有效排除战场环境干扰、减少战斗减员的前提下,最大限度发挥作战效能。

2. 立体作战。空中无人作战力量是新型陆军无人作战力量的重要组成部分。对地面部队而言,利用空中无人作战力量形成立体态势感知,对空中作战力量而言,地面的精确战场打击协同配合,掩护侦察、感知,能够有效增强新型陆军立体攻防能力。

3. 多能作战。新型陆军无人作战力量作战领域广泛、装备类型多样、技术创新性强。陆上有用于武器、装卸、执勤、警戒、弹药搬运、布雷排雷的机器人;空中有用于情报侦察、照相、电子战、对地供给和执行试验等任务的机器人^[2]。

4. 精确作战。新型陆军无人作战力量是高科技综合体,随着智能化和工业综合技术的不断发展,无人作战力量精确感知、精确控制、精确打击、精确评估的能力,能够有效提高新型陆军精确作战能力。

5. 持续作战。无人作战力量突破了有人装备设计及战场行动受限于人类生理极限的制约。随着未来无人化战争的不断发展,“侦察袭扰、持续打击”将成为基本作战形式,战争逐渐演变为7×24(7天24小时)无间隙、人员零伤亡的纯技术比拼模式,战争一气呵成,“一口气战争”成为可能^[3]。

3 陆军无人作战力量分级标准

人机协同编组以通过人机互补实现最大优势,具有“高弹性、可重构,柔组网”的特点。打造全新营(连)级有人、无人系统混编部队,打破现有作战编组、编成模式,通过天空地一体组网与智能指挥控制系统,实现弹性、可重构、任务驱动的作战编组模式。根据人机协同的发展阶段不同^[4],区分三个分级标准:

3.1 初级阶段:“有人为主,无人为辅”的临机协同编组模式

无人作战力量除了具有突出的精确火力打击能力,还具备超越人类的打击极限,具有更大范围、更远距离的火力毁伤能力^[5],因此,“无人先导”的

战法样式将成为陆战场突击的主要方式。但是,无人作战力量受智能化程度和载弹量的限制,当前仍处于“半智能化”状态,不能完全实现无人装备的自主决策,无人作战装备必须加强与有人行动的密切配合,才能充分发挥和保持作战效能。此外,受云计算技术发展限制,作战指挥系统产生的大量实时数据,仅仅依靠无人系统尚难以完成自主处理。因此,目前遂行突击作战任务时,仍应突出有人作战系统指挥主导与无人作战力量辅助感知的融和性编组模式,进而相互赋能,形成具备遂行多样化作战任务能力的有机编队^[6]。

3.2 中级阶段:“有人控制,无人为主”的人机协同编组模式

随着无人作战装备的发展和智能化、自主化水平的提高,针对同一作战任务,无人装备相对于有人装备的占比逐步提高,形成“无人为主、有人控制,功能互补、人机并行”的联合编队模式。这种编组模式着眼作战保障任务“要素复杂、协同困难、要求精准、敌情不明、危险性大”等特点,充分发挥了无人作战力量持久性、拓域性、低成本、可损伤等优势,同时,又以有人作战力量弥补了无人作战力量体系不全、规模不大、智能化程度不高、配套建设弱等劣势,极大程度的发挥了现有人机协同编组的作战效能^[7]。

3.3 高级阶段:“有人设计,无人自主”的自主协同编组模式

人机协同编组发展的高级阶段就是“有人设计,无人自主”的自主协同模式,这种模式依托强大的技术支撑,以集群智能技术为核心,具有“去中心,强进攻,难防御”的特点。以美军为代表的各军事强国都把集群智能当做无人作战力量的风向标领域,例如,美国提出的“蜂群”、“母舰”、“复眼”等战术体系^[8]。

基于集群智能的自主协同武器装备体系一旦投入战争,将在战术层面对所有以人类智能为基础的部队形成压倒性优势^[9]。我国陆战情报侦察部门,也越来越突出“无人化、网络化、智能化”的特点,综合运用各种类型无人侦察技术手段,应用尽用各种无人侦察装备,在陆、海、空、天、电、网等多维空间对对手实施多源侦察数据获取,有效提升广域及时、精准隐蔽、开放反馈的智能对抗

能力^[10]。

4 加强陆军无人作战力量建设的几点思考

当前,国内无人作战平台发展建设取得了长足的进步,但与国外军事强国和现实军事作战需求相比,我国无人作战力量的发展尚有一定的差距,还需从以下几个方面着手:

4.1 推动理论创新,以前瞻思维引领无人作战平台和战争设计的深刻变革

无人装备作为未来智能战场的“明星”装备,其优越性和实效性将会愈发凸显,随着无人作战力量的逐渐列装,必然对传统作战思想和理论产生较大冲击,推动无人作战力量理论体系创新刻不容缓。一是丰富联合作战理论的需要。为高效指导军事实践,不断探索无人作战力量的实战运用特点和制胜机理,形成独特的作战理论,融入联合作战理论体系,既有益于丰富联合作战理论,又有益于提升各级指挥员对无人作战系统的深刻认识^[11]。二是推动战法创新发展的需要。无人作战力量的运用必然引起作战方式的极大变革,传统的战法打法将无法未来智能战场的需求,按能力编组,因需要联合,依优势分工,随任务协同,先敌展开战法创新,只有在理论上先谋一步,才能在技能上高敌一招,战场上胜敌一筹^[12]。三是设计未来智能战争的需要。一流的军队设计战争,未来战争首先是设计的博弈,必须牢固树立“设计装备就是设计未来战争”的思想,以理论创新带动设计创新,先敌展开理论创新。立足预测未来智能战争来设计战争,掌握战争主动权,逐步实现从“跟跑”“并跑”向“领跑”跨越^[13]。

4.2 推广实战运用,以实践需求牵引无人作战平台和核心技术的良性发展

当前,陆军现役无人装备未经实战考验,作战训练使用率较低,一体化作战能力较弱。应结合大项演训活动,加强融合编组训练,空陆一体,协同配合,遂行多样化军事任务,通过不断积累作战保障经验,发挥无人作战力量侦察情报、态势感知的强大优势,充分挖掘部队作战潜力,并结合现实任务深入研究和论证基于无人作战力量的作战理念和战法,从而推动无人作战平台和核心技术的良性发展^[14]。

4.3 重视体系建设,以总体规划推动无人作战平台和装备能力的持续提升

当前,重平台轻系统的问题严重制约了陆军无人作战力量的发展。应坚持工程化建设思路,一方面,围绕打赢未来智能化作战任务能力需求,加快制定无人作战力量发展路线图,统一协调无人作战系统建设的发展规划、设计论证、体系集成、技术标准、作战支援和维护保障等;另一方面,注重专业人才培养,采用岗位培训、学习深造、学用结合等方式,建立一批懂无人作战理念、会无人作战平台、通无人作战技术的新型无人作战人才力量^[15]。

5 结束语

伴随着5G、星链、云计算等先进技术的不断突破,人工智能开始全面融入作战各环节,战争形态向智能化演进,未来战争呈现出装备自主化、人机协同化、力量融合化、战场无人化等特征。陆军无人作战力量建设和运用应坚持作战需求的根本牵引,围绕为部队提供真正“好用、管用、实用、耐用”装备的理念,深入研究探索无人作战力量运用,对基于人机混合增强智能的新型陆军部队建设具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 陆军研究院.陆战侦查情报领域先进技术与手段发展应用研究.2020年8月
- [2] 刘大庆,赵志允,李长军.海军无人作战力量作战能力构成研究.指挥控制与仿真.2020年06期.
- [3] 赵先刚.无人作战系统发展对未来战争的影响.国防科技,2015,36(5):55-58.
- [4] 傅好华,单月晖.智能化人机协同作战发展研究.第九届中国指挥控制大会论文集.2021年07月
- [5] 牛轶峰,沈林成,戴斌,徐昕,相晓嘉.无人作战系统发展[J].国防科技,2009,30(5):41-45
- [6] 孙浩惠,钱宇浚,李午申,李学健,王利军.作战无人化对未来战争的影响.中国航天电子技术研究院科学技术委员会2020年学术年会论文集.2020年12月
- [7] 季自力,张申,王文华.联合集群作战力量将成为未来战场的主角.军事文摘.2021年15期
- [8] 袁艺,李志飞,朱丰.无人机与未来作战台议[J].国防:2019.
- [9] 佟京昊.高度关注集群智能发展应对无人作战对现代战争的深刻改变[J].军民两用技术与产品,2020年11月,(003)
- [10] 李洪峰,孙礼明,曹涛.无人化作战力量发展探析.飞航导弹.2020年06期.

- [11] 刘玮琦,徐永楠.战争设计:叩开胜战之门.中国国防报.2018年9月
- [12] 王幸运,陈海.无人作战系统的应用及关键问题探究.军事文摘.2021年07期
- [13] 谭震,马建光,蒋杰峰.美军无人作战的战略战术体系与整体规划.军事文摘.2021年11期
- [14] 谢苏明.无人化智能化装备技术发展及其影响分析.现代军

事.2017年03期

- [15] 戴斌,沈林成.着眼未来,加快我军无人作战力量建设[J].国防科技,2013,(5)

作者简介:

王瑞(1987-),男,硕士,少校,主要研究方向为陆军合成部队作战理论与指挥。

新工科背景下综合实践型课程建设研究 —以“无人车综合实践”课程为例

李峻翔, 牛轶峰, 李 健, 刘大学

(国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410074)

摘要: 综合实践型课程作为新工科专业课程体系中的重要组成部分, 对专业建设质量和人才培养质量具有至关重要的影响。本文以国防科技大学人工智能专业开设的“无人车综合实践”课程为例, 围绕综合实践型的课程理念, 开展了综合实践课程的建设探索与实践, 在课程实用性、综合性和先进性方面取得了一定成效。

关键词: 新工科; 综合实践课程; 课程建设; 无人车

Research on Curriculum Construction for Comprehensive Practice Courses under Emerging Engineering Education Background: a Case Study of the Comprehensive Practice Course on Unmanned Vehicles

LI Junxiang, NIU Yifeng, LI Jian, LIU Daxue

(College of Intelligent Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410074, China)

Abstract: As an important part of the curriculum systems for emerging engineering majors, the comprehensive practical course has a vital influence on the quality of major construction and education. Taking "Comprehensive Practice Course on Unmanned Vehicles" offered by the artificial intelligence major of the National University of Defense Technology as an example, this paper has carried out the research on the curriculum construction. The research attempts to make the course practical, comprehensive and advanced.

Key words: emerging engineering education; comprehensive practical courses; curriculum construction; unmanned vehicles

1 引言

为主动应对新时代世界范围内的产业变革, 支撑“中国制造2025”等一系列国家战略。2017年2月以来, 教育部积极推进“新工科建设”^[1]。现在“新工科建设”已经成为我国教育领域重要的战略方针之一。新工科建设要求我国高校加快建设一批新兴工科专业, 而综合实践型课程作为新兴工科专业课程体系中的重要一环, 对专业建设质量具有至关重要的影响。本文以面向无人系统等新兴专业开设综合实践型课程为背景, 开展课程建设研

究, 为我国高校探索实施工程育人培养新模式, 建设一流工科新专业, 积极探索可行方案。

2 新工科背景下综合实践型课程的理念及作用

2.1 课程理念

综合实践型课程是以全面提升学生综合素质为目标的实训类课程, 是培养高素质人才课程体系中的重要一环^[2]。新工科背景下综合实践型课程的理念主要包括:

1、突出实用性。课程以“知行合一”为宗旨,以“为相关产业发展、升级,培养综合素质强的工程技术人员和科技创新人员”为目标。主动将科研和产业中存在的现实问题导入到课堂,引导学生在实践中发现和解决问题,积累动手实践经验,发展创新能力。

2、强调综合性。在传统的工科应用课程基础上,综合实践课程需要将传统工科基础(如机械、电气、控制课程)与新兴工科课程(如机器学习、人工智能等课程)的专业基础知识和应用成果融合。要求课程的设计和实施要能够提供综合运用已有知识的平台,并注重知识点间的内在联系和延伸应用。

3、体现先进性。一方面,新工科背景下综合实践课程的教学内容以及教学手段需要体现先进性,比如充分利用现代化教学手段,选用能够代表先进技术的实践平台;另一方面,新工科背景下综合实践课程的教学理念也要与时俱进,对不同背景学生的课程目标和评价结果有一定的层次化和差异性,以充分实现因材施教。

2.2 课程作用

从培养体系和课程建设角度来看,综合实践型课程是新工科专业整体课程体系建设质量的重要评价指标。另外,它通常作为本科课程体系的最终收尾课程,能够有效带动相关课程群的建设。

从人才培养角度来看,综合实践型课程关系到学生是否能真正学有所得,以及有效检验学生的协同创新素质和学科融合能力。同时,还能为相关产业的发展、升级,培养一批综合素质强的应届毕业生。

“无人车综合实践”课程是国防科技大学人工智能专业开设的一门综合实践型课程,它是人工智能专业课程体系的最终收尾课程。该课程能够让学员接触到人工智能的应用前沿,并对“数字图像处理与分析”、“控制理论”、“机器学习(导论)”、“智能决策规划”、“智能驾驶车辆技术”等课程中介绍的理论知识进行试验,对相关应用场景、市场现状有一定的理解,是验证学员学习效果的“试金石”。下面就以“无人车综合实践课”为例,对新工科背景下综合实践型课程建设展开研究。

3 “无人车综合实践”课程建设国内外研究现状

目前随着智能驾驶车辆相关技术的发展,以及相关岗位需求量的增加,国内外部分从事智能驾驶技术研究的高校都相继开设了以智能驾驶车辆为主题的相关课程。通常,这些课程可以分为以下两类:

3.1 智能驾驶理论课程

智能驾驶理论课程以纯理论教学或“理论+实践”教学为主要形式。相关的课程包括 MIT 开设的自动驾驶课程(6.S094)、中国大学 MOOC 平台上北京理工大学开设的“无人驾驶车辆”、Coursera 平台上多伦多大学开设的“Self-driving Cars”和“Introduction to Self-driving Cars”及无人驾驶车辆相关技术课程、Udacity 推出的纳米工程师学位(Nanodegree)自动驾驶车辆工程师(self driving car engineer)系列课程,以及国防科技大学面向研究生学员开设的“地面无人系统自主控制”课程。这些课程的主要内容为智能驾驶车辆的相关理论,往往围绕智能驾驶车辆的“感知、规划、控制”等模块涉及的具体技术进行讲述。通常这些课程中,会针对模块中部分算法在 python/matlab/ros 平台上进行验证。类似地,还有清华大学联合深蓝学院推出的“无人驾驶关键技术与实践”在线收费课程和百度公司开设的“Apollo 自动驾驶技术”在线课程。这类课程往往在多节理论课之后,再增设专门的一节课讲述实践平台的基本概述。通常由于课时较少,学生们难以真正对智能驾驶平台开展操作。

3.2 智能驾驶实践课程

由于智能驾驶技术是一门实践性非常强的技术,很多高校开始逐步在开展理论课的同时增设实践课程,以提高学员“学以致用”的效果。现有的智能驾驶实践课程通常需要采用或自建特定的教学平台来开展教学,教学对象通常为以竞赛为目的的大二年级学生或研究生^[3]。部分高校从智能车竞赛的角度出发,采用单片机平台的智能小车作为教学工具,通常这些课程开设在大二,以大学生智能小车竞赛的科目为蓝本,同时可为小车竞赛培养和选拔优秀队员。虽然这种单片机平台能让学生很好地得到实践锻炼。但是这种单片机平台计算能

力有限,应用场景和验证智能驾驶模块能力也有有限,一些热点算法无法在该类平台上运行。自2016年起,MIT就采用开源平台树莓派(Raspberry PI)和一款双轮简易小车,设计了一个实验空间——“鸭子城”来开展研究生智能驾驶课程^[4]。北京理工大学使用V-rep搭建仿真平台,并用基于ROS的实车自动驾驶系统搭建实车平台,并将两者集成于一体开展研究生智能驾驶课程^[5]。南方科技大学则开设了三级课程,其中研究生实践课程中用手机+TurtleBot为实验平台开展实验^[6]。国防科技大学也在研究生课程中开设了“控制系统综合实践”课程,该课程以TurtleBot为实验平台,以任务为驱动,开展研究生教学。



图1 MIT“鸭子城”

Fig. 1 Duckietown of MIT

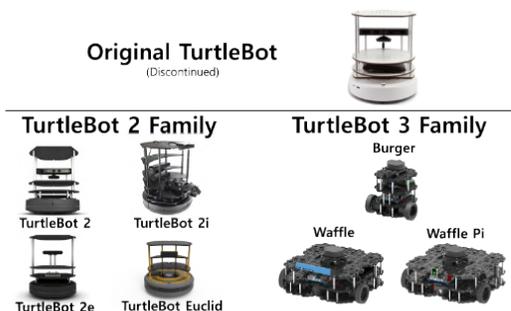


图2 TurtleBot 平台

Fig 2 Turtle Bot Platform

综上所述,目前国内外尚没有面向本科学员,且以综合应用跨学科知识为目的的无人车综合实践课程。考虑到现有课程面对对象和课程任务的不同,对新工科背景下“无人车综合实践”课程的建设研究势在必行。

4 “无人车综合实践”课程建设实践研究

面向新工科背景,“无人车综合实践”课程的建

设需要重点考虑四个方面:课程条件建设、课程内容建设、课程组织设计和教学评价设计。四个方面的关系如图3所示。

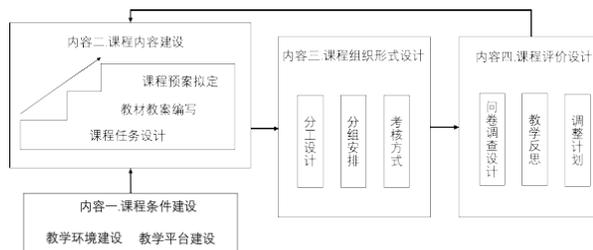


图3. 课程建设内容框架图

Fig 3 Framework of Course Construction

4.1 课程条件建设

课程条件建设是整个研究工作的基础,这项工作包括教学环境及平台建设,需要考虑改造现有的实践教室、购置或开发无人驾驶教学平台。如图4所示,无人驾驶教学平台需要支持课程中所有的教学任务,加载无人车常用传感器(如深度相机、雷达、IMU)和计算平台,满足阿克曼转向机构,充分体现课程实用性和综合性。同时,无人驾驶教学平台需要有较强大的开发功能,以保证课程组织形式的灵活性。



图4. 课程教学平台图

Fig 4 Teaching Platform for the Course

4.2 课程内容建设

在条件建设的基础上,再层层推进课程任务设计,教材教案编写,以及课程预案拟定。

1) 课程任务设计

课程任务设计是课程内容建设的初步环节,其关键是指定实践任务。实践任务需要学生创造性的完成,其情境的创设与无人驾驶应用需求力求完全一致。任务设计以实际无人驾驶应用需求为情境(比如全自动驾小车配送),可以激活和驱动学生的思维,推动学生,激发学生主动学习知识,在完

成任务的过程中获得用知识解决问题的能力。

首先设计一个总任务,再分解为若干个分任务,便于学习者循序渐进地学习知识、获得能力、进而完成任务。为了便于小组学习,可以设计多个任务。比如,选择完成自动驾驶的物流配送为一个任务。该任务过程几乎涉及无人驾驶技术的所有知识点,接着将该任务分解为感知定位、搜索全局路径、局部避障、控制机构响应等模块的具体子任务。目前面向这些任务的技术授课,通过“大学生智能车竞赛”得到了较好的积累和验证,为转化为课程材料提供了基础。

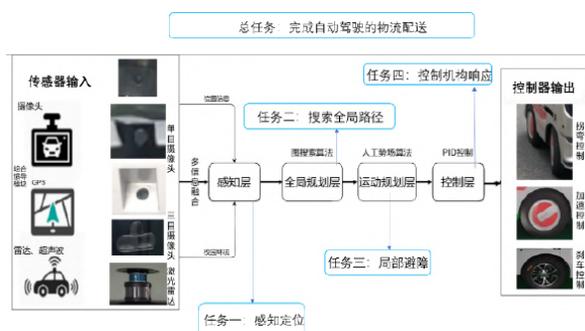


图5 任务设计图

Fig 5 Framework of Task Design

2) 教材建设

按照总任务和分任务梳理知识点,建立以完成任务为核心的课程体系。教材内容编排打破知识体系的条块分割,遵循实际应用规律,用任务驱动学生主动学习。

3) 预案拟定

根据可能出现的平台损耗问题,对平台及相关模块留有备份。同时,针对可能出现的远程教学需求,将这些教学内容建设部分仿真平台中的内容。

4.3 课程组织设计

根据课程体系设计的内容和任务,需要根据具体的教学班次,开展组织形式的设计,如分组分工和考核安排等。课程组织形式设计可采用类似“学员自主,自选点单”式的组织方式,在深入把握学员学业能力阶梯的基础上,灵活组织课程的内容。

4.4 教学评价设计

教学评价设计是课程建设不可或缺的一环,既能够在课前了解学员的特点,又能够为课程教学效果持续改进提供依据。现代化教学评价通常以教

学视频录像为研究重点进行开展^[7],但采用视频分析的方式并非易事,因此也可采用信息化统计工具(如腾讯问卷)的形式开展教学效果分析。调查问卷中包含了学员对课程评价和对课程建议等部分。

5 结束语

综合实践型课程是新工科背景下高校培养高素质人才课程体系中的重要一环。本文以“无人车综合实践课”为例,从课程条件建设、课程内容建设、课程组织设计和教学评价设计等四个方面对课程建设进行了研究和探索,充分体现了新工科背景下综合实践型课程的实用性、综合性和先进性,为带动课程群建设、培养新型高素质人才奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 教育部高教司.“新工科”建设复旦共识[R/OL].2017, http://www.moe.gov.cn/s78/A08/moe_745/201702/t20170223_297122.html.
- [2] 刘莎.翻转课堂模式在综合实践型课程中的运用[J].江苏科技信息,2015(27):34-35.
- [3] 陈慧岩,熊光明,龚建伟.无人驾驶车辆理论与设计[M].北京理工大学出版社,2018.
- [4] Tami J, Paull L, Zuber M T, et al. Duckietown: an innovative way to teach autonomy [C]. International Conference EduRobotics 2016. Springer, Cham, 2016: 104-121.
- [5] 熊光明,康子怡,龚建伟等.智能车辆虚拟与实车教学平台综合研究[J].实验室研究与探索,2019,第38卷(5):72-75.
- [6] Tang J, Shaoshan L, Pei S, et al. Teaching autonomous driving using a modular and integrated approach [C]. 2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC). IEEE, 2018, 1: 361-366.
- [7] 明娟.信息技术支持下的“翻转课堂”教学过程特征分析[D].华中师范大学,2014.

作者简介:

李峻翔(1990-),男,助理研究员,博士,主要研究方向为无人驾驶技术。

牛轶峰(1979-),男,教授,博士,主要研究方向为无人系统自主控制、多机协同控制。

李健(1981-),男,副教授,博士,主要研究方向为智能感知技术。

刘大学(1978-),男,副研究员,博士,主要研究方向为无人驾驶技术。

新时期军事无人机人才培养研究

陈伟, 陈蕾, 何昀, 张川

(空军航空大学航空作战勤务学院, 长春 130022)

摘要: 无人机在未来战争中的地位越来越重要, 是重要的战斗力, 其高素质人才的培养意义重大且十分迫切。本文从军事无人机人才的岗位特殊性和素质要求入手, 研究和分析了军事无人机人才培养目前存在的各类人才培养割裂、教员编制有限、指技发展不均衡、飞行训练时间少、战术战法研练少等问题, 总结了无人机人才培养“着眼发展、超前培养, 注重衔接, 突出专长, 注重指挥、综合培养”的原则, 具体给出开展军事无人机人才培养工作中相关教学条件建设、优化教师队伍、科学教学实施、加强管理评估的意见和建议。

关键词: 教育; 人才培养; 无人机; 素质培养; 队伍建设; 培养建议

Research On Military UAV Personnel Training

CHEN Wei, CHEN Lei, HE Yun, ZHANG Chuan

(Air Force Aviation University, the Combat Service College, Changchun 130022, China)

Abstract: UAV is becoming more and more important in the future war, and it is an important combat effectiveness. The training of high-quality talents is of great significance, and it is very urgent. Starting from the post particularity and quality requirements of military UAV talents, this paper studies and analyzes the existing problems and reasons of military UAV talents training, and gives some suggestions on the education of military UAV talents.

Key words: Education; Personnel Training; UAV; Quality Training; Team Building; Training Suggestions

1 军事无人机人才培养必要性

随着科学技术的快速发展,无人机已经成为气象监测、地质勘测等众多行业采用的技术手段和重要工具^[1],在国防建设方面,无人机也已成为军队建设的重要新质作战力量。随着技术的发展和作战样式的改变,军事无人机人才在国防中的作用越来越突出,其素质的高低直接影响空中力量的建设,如何培养高层次的军事无人机人才对部队战斗力的提升有着重要的作用和深远的意义。

航空兵是高技术兵种,是空军的主体战斗力,无人机是高新技术的集中体现,由于无人机的高灵活性、高安全性、高隐蔽性等优势,目前已经成为未来战争不可或缺的力量。近几年,全球爆发的几场局部战争均使用了大批的无人机,综合信息化航空武器装备大量参战和体系化作战训练已成为现代战争的主要特点^[2],对我军无人机高技术人才提出了客观需求。

2 军事无人机人才培养素质需求分析

军事无人机人才的素质需求是由其特定的岗位确定的,我们一个无人机作战单元为研究对象,其实际包含飞行操控和作战勤务岗位,其中飞行操控人员是核心,属于飞行员岗位;战勤人员是以技术为主;可见,整个作战单元指技结合紧密,军事无人机人才需要多方面的专业知识和素养,我们认为无人机操控人才最基础、最核心的素质应该是飞行素质的培养;无人机战勤人员的核心能力是无人机技术素养和军事应用素养,同时也应该有一定的飞行基本素养。当前开展高层次应用型无人机人才的培养,开展无人机人才培养转型和深化,就是要进一步深入研究飞行素质和军事应用素养的概念、结构与内容,实现飞行素质和军事素养培养的途径与方法、条件与手段。紧紧抓住和围绕这一核心突破口,才能实现军事无人机人才培养转型与深化改革。

2.1 飞行素质的培养

飞行素质应该是指飞行员特有的,先天与后天共同形成的基本品质。特别是通过后天教育训练、环境影响和个体自身的认识与实践,形成的比较稳定且在较长时间内起作用的独特素质。

飞行素质结构包括^[3]:热爱飞行事业、系统的飞行理论知识、扎实的飞行能力、强健的飞行体能、优良的飞行心理品质、现代飞行信息素养以及飞行作战品质的总和。

2.2 军事应用素养的培养

这里的军事应用素养是指无人机人才在军事应用方面应具有的基本知识、能力和素质,也可以广义的理解为无人机军事应用领域的军事素养,主要取决于平时的教育和训练。

军事应用素养结构包括:热爱国防事业、系统的军事基础理论知识、扎实的装备技术保障能力、强健的军事体能、优良的心理品质、信息化作战素养以及无人机作战应用能力的总和。

2.3 本科学历阶段军事无人机人才的培养目标

本科培养是一种高层次人才学历培养,针对军事无人机人才的本科培养目标,我们认为应该是:经高等院校培养,热爱祖国,拥护中国共产党的领导,拥护社会主义建设和国防安全服务的,掌握无人飞行作战领域坚实的基础理论和系统的专业知识,具有创新精神和从事研究、教学、管理或独立担负无人机操控或战勤等作战任务的初级军事无人机专门人才^[4]。由于时间的限制,在本科学历阶段应该对无人机人才的飞行素质和军事的某个方面进行专项培养,提高其一个和几个飞行素质和军事应用素养方面的能力和修养,进而实现因人施教,通用飞行素质基础扎实,且各有所长。重在培养解决实际问题的能力,提高飞行作战遂行任务的能力,形成良好的飞行素质和军事应用素养。

3 军事无人机人才岗位特殊性研究

军事无人机人才主要是指无人机操控员和战勤人员,其岗位特点对人才培养效果有重要影响,对培养的要求有直接作用^[5]。目前军事无人机人才在陆海空和武警部队均有,其岗位主要有以下共同特点:

3.1 岗位能力要求高

无人机属于高技术的装备,信息化程度较高,操控要求高难度大,对人的身体、心理等方面都提出了更高的要求。所以在其学习的过程中必须在多个方面进行培养,既要学习技术,也要学习指挥。

3.2 岗位多重性身份

在遂行任务过程中,无人机就是一个独立的空中作战单元。由于无人机人才在任务的决策和处置上一般时间都十分短暂,除了要求其有高超的驾驶控制技术和作战能力之外,还要求其有较强的独立指挥和决策能力,因此,他也必须是一个指挥员。在无人机人才培养中,应注重培养其军事谋略和战术战法运用。

3.3 岗位协同性强

无人机操控员和无人机战勤人员共同构成作战单元,共同执行相应任务。作战过程中,区别于有人机的飞行员就是战斗员,对无人机装备的操控和运用不全部由操控员一人完成,是几个人组成的一个团队作战,因此要求军事无人机人才能够具有较强的协同作战能力。

3.4 岗位实操训练多

飞行操控是非常复杂的工作,实践要求高,需要不断的实践和巩固,所以飞行操控一般必须进行飞行技术保持,因此,加大实践课程比例,提升实战化教学能力,是无人机人才培养的客观要求^[6]。

除了共性的特点外,各个军种之间由于承担的任务和使命不同,其装备差别较大,又有着各自自身的特点。

4 军事无人机人才培养现状分析

军事无人机人才培养已经有十多年的历史,以空军为例,军事无人机人才的培养主要集中在空军航空大学和空军工程大学。从空军无人机人才培养来看,其飞行操控和战勤人员是分别在不同学校培养的,飞行操控人员的培养主要来源是停飞学员,无人机战勤大多数来自高考生。在2020年习主席的亲切关怀下,无人机人才培养得到了军委大力支持,因此对无人机人才培养从技术到战术和指挥,全方位的提高和培养,取得了较好的效果。

经过调研发现,军事无人机人才培养目前主要存在以下问题:

一是各类人才培养割裂。各种无人机人才培养相互是独立培养的,对人才的协同性培养很少,无论从文化、习惯还是基础都差异较大。

二是教员编制十分有限。无人机涉及的技术面宽,属于多学科交叉融合。从目前编制情况来看,师资力量与教学任务严重不符,存在较大缺口,在一定程度上制约着无人机人才的培养和教学水平的提高。

三是指技发展不均衡。军事无人机人才属于指技复合型人才,既要懂技术,更要懂指挥,对军事应用素养要求较高。但是目前人才培养方面,大多数还是重技术、重装备,轻战术、轻指挥。所以人才的培养从一开始就存在指技不均的问题。

四是飞行训练时间少。受条件和师资队伍所限,无人机飞行操控人才的培养训练时间普遍不足,尤其具有作战经验的飞行教员严重缺乏,对无人机操控技术的研究和提升,仅仅停留在一般水平,有效提高培养飞行技能的针对性和准确性上力量偏弱,训练不足。

五是战术战法研练较少。由于无人机起步较晚,成熟的战术战法很少,缺少实战经验,教员普遍为技术专家,实难进行战术战法研究和研练,从人才培养的起始就存在战术战法底子薄的现象。

5 军事飞行人才专业学位研究生培养意见建议

5.1 基本原则

军事无人机人才的培养,应考虑其参与空中作战的岗位特殊性,建议遵循以下原则:

一是着眼发展,超前培养^[7]。能力的形成既要着眼当前、满足眼前需要,更要针对成才周期的限制着眼未来发展,树立超前培养理念。

二是注重衔接,突出专长^[8]。军事无人机人才培养的严密性是各类人才培养中最为注重体系化和衔接化的,无人机人才能力培养专长要从军事无人机飞行作战专业能力需求链上分解得到,要特别关注知识和能力的联系、前置端口、接续拓展、持续生成的关系。

三是注重指挥,综合培养。培养过程中要重视其岗位要求的多样性,重视技术也要重视指挥能力,兼顾心理、体能等方面以实现全面培养。

5.2 教学条件建设

军事无人机人才的岗位特殊性使得对教学条件要求也比较高,其中,最重要的是装备设施和训练研究条件^[9]。建议在未来以战区为单位,依托空军现有的各类训练资源,每个战区设立1-2个教学实践基地;其中鼎新训练基地和沧州试训基地在空军的训练中占有十分重要的地位,应纳入军事无人机人才培养的实践基地。另外,完善的基地建设,是提高教学的信息化程度是保障军事无人机人才培养的基础和必要条件,应高度重视。

5.3 教师队伍

军事无人机人才培养建议建立双导师制度^[10],即在部队聘请一定的教官队伍,使每个学员都既有理论授课教员,更有部队实践导师。部队导师应该分两大类,一类是飞行操控能力强的,主要辅助训练无人机人才飞行技能的提升,即使是战勤人员,也应体验飞行,对飞行有一个正确的认识;另一类是作战指挥部队导师,主要选择部队优秀的指挥官,为无人机人才培养提供实战理论和经验的传授。

5.4 教学实施

在军事无人机人才的教学实施上,考虑到岗位训练需要,最好以战区或者基地为单位建设相应的教学培养基地,因为同一个战区相对来说主体任务相对一致,且阶段性相近,易找到比较合理和宽松的学习时间,便于统一组织实施教学;另外,可以采用到基层实践或者联教联训的方式,在基层部队,有装备可以辅助研究,有训练可以观摩和研讨,所以可以更加有利于理论的学习和验证,对学员的知识和能力的培养有不可替代的作用。在教学过程中,因为无人机飞行操控人才要求的精准度高,在教学上力争按照培养方向采取小班化教学模式,在教学手段方法上,突出案例式、研讨式、推演式、情景式、模拟式教学,加大研究报告、案例分析、想定作业等在考核中的比重。

5.5 管理评估

军事无人机人才培养建议放在一个学校,飞行操控与战勤人员共同培养,且尽量从停飞学员中选拔,有利于建立空中感知。培养中采取大学与部队共同负责的教学管理模式,到基地实习时可以由分配的部队领导和部队导师负责管理,检查督促落实

学习计划、完成作业,协助指导理论学习和技能学习等。在校学习期间,由大学机关、学员大队和院校教员共同管理,负责制定教学计划、组织教员授课、进行课程考试、组织课题研讨,毕业论文写作和答辩等。对军事无人机人才的考核与评估,建议每年毕业统考方式,保证客观评价教学质量。

综上所述,高层次应用型军事无人机人才部队需求旺盛,人才的培养有其岗位的特殊性,在本科学历阶段,在教学上应主体培养其军事飞行作战基础,对作战指挥、作战的理论进行深入学习和提高,同时兼顾装备技术的深入学习和理解。军事无人机人才的培养适合在教学基地和更多的远程教育、模拟训练、实战化训练等更灵活的组织方式,质量的关键是理论的扎实和技能的掌握。总之,军事无人机人才的培养是极其特殊的人才群体培养,面临的问题和难点比较多,需要更灵活和更切合实际的方式去培养。

参 考 文 献

- [1] 孙健,倪训友.无人机国内外发展态势及前沿技术动向[J].科技导报,2017(9):19-21.
[2] 董志立,徐锦.美国无人战斗机[J].飞航导弹,2006(12):

31-32.

- [3] 全军军事术语管理委员会、空军军语管理委员会.中国人民解放军空军军语[K].第一版.北京:蓝天出版社,2012.
[4] 空军航空大学.《空军航空大学人才培养方案》[Z].2015.
[5] 邢国平,高健青,孙德翔.《现代军校教学模式》[M].北京:蓝天出版社,2011.
[6] 朱清时.如何培养创新人才[J].创新人才教育,2013(3):10-14.
[7] 卢丽亚.人才培养不能“格式化”[J].中国人才,2010(23):77-79.
[8] 李桂莲.高层次人才培养之我见[J].科技·人才·市场,1998(4):46-47
[9] 孟庆伟.克服创新型人才培养五大障碍[J].中国人才,2007(5):29-31
[10] 王峰.飞行人才培养课程体系改革[J].飞行人才培养理论研究动态,2010(1):6-8

作者简介:

陈伟(1972-),男,副教授,主要研究方向为航空兵作战指挥。本文通讯作者。

陈蕾(1967-),女,博士研究生,教授,主要研究方向为航空兵作战指挥。

何昀(1979-),男,博士研究生,副教授,主要研究方向为信息技术。

张川(1986-),男,讲师,主要研究方向为航空兵飞行训练。

着眼未来的无人系统综合化运用实践探索

王楠, 牛轶峰, 洪华杰, 邢堃盛

(国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 以智能无人系统核心任职能力塑造为目标, 结合当前及未来无人系统作战运用需求, 提出了针对无人系统综合化运用高素质军事人才培养的实践教学改革方案: (1) 以岗位需求为牵引, 构建无人系统综合化运用实践教学体系; (2) 打造“战技结合, 教研互促”实践教学新模式; (3) 支持开展“实践导向、学科交叉、学研共融”创新实践活动。希望通过改进实践教学的方法手段, 为向部队输送适应未来智能化战争需求的高素质复合型人才提供有力保障。

Exploration of Unmanned System Integration Application in the Future

WANG Nan, NIU Yifeng, HONG Huajie, XING Kunsheng

(National University of Defense Technology, College of Intelligent Science, Changsha 410073, China)

Abstract: With the goal of shaping the core competence of the intelligent unmanned system and combining the current and future demands of the operation and application of the unmanned system, this paper puts forward a practical teaching reform plan for the training of high-quality military personnel for the comprehensive use of the unmanned system: 1. Building a practical teaching system for the comprehensive use of the unmanned system, guided by the post requirements; 2. Creating a "combination of warfare and technology, promoting teaching and research mutually" New mode of practice teaching; 3. Supporting the innovative practice activities of "practice-oriented, interdisciplinary, academic-research integration". Hopefully, by improving the methods and means of practice teaching, it will provide strong guarantee for the delivery of high-quality compound talents to the army to meet the needs of future intelligent warfare.

1 引言

智能无人系统已成为军事变革和科技革命的引擎, 引领“第二次机器时代”^[1-7]。智能无人系统方向包括无人机^[8]、无人车^[9]、机器人^[10]、人工智能等^[11], 专业方向具有多学科交叉、通专融合、军民通用等特点优势, 军民两地的人才需求巨大。军队院校作为输送高素质军事人才的重要基地, 需要紧密结合使命任务和时代特点, 坚持为战育人导向, 吸收借鉴新工科建设成果以及军民应用领域创新经验, 积极探索符合无人系统相关岗位能力需求的实践教学模式, 以实践牵引促进学科专业交叉融合, 夯实学员专业知识与任职能力, 为实现培养新时代强军人才的目标发挥作用。

2 无人系统方向实践教学现状

目前, 国内无人系统方向实践教学呈两极分化特点^[12-15]。其中一种方式是将其作为专业课程教学的辅助, 将专业课程的实验安排在实践教学过程实施, 实践内容以算法实验为主, 存在与无人系统结合不紧密、军事应用背景不鲜明、综合实践效果弱等问题: 1、专业课程实验主要针对特定理论方法设计, 与具体的无人系统或平台关联较少, 导致面向无人系统的实践教学难以达到预期效果; 2、在实践内容安排上, 常常基于标准化问题或通用数据集展开, 为了实验而实验, 军事应用背景不鲜明, 军队院校的为战育人特色体现不明显; 3、实验步骤与无人系统设计运用及保障相关流程有较大区别, 即用于实验的理论方法及算法有一定前沿性, 也无法

使学员通过实践掌握无人系统的使用、操作与维护方法。第二种方式则是将无人系统或装备的操作使用与运行维护作为实践教学内容,注重对无人系统及平台的机械化操作与维护能力培养,例如对无人机应用实践的目的在于“能飞会用”,缺乏对无人系统原理的理解,对未来智能无人系统密切相关的感知、规划与控制等自主性技术缺乏认知,对无人系统的操作与维护还停留在大量人力需求上,导致“三个面向”的创新性军事人才培养目标难以得到全面贯彻。因此,需要更新无人系统方向实践教学理念,取长补短,立足当前、着眼未来,不断探索与改进无人系统实践教学内容、方法和手段。

3 着眼未来的无人系统综合化运用实践教学设计

以习近平强军思想为引领,贯彻新时代军事教育方针,科学研判2035年前无人系统智能化发展进程,紧贴军/民领域的智能无人系统方向多岗位、多任务、多类型人才培养需求,以智能无人系统核心任职能力塑造为核心,兼顾创新能力和军政素质提升,基于“学员中心、产出导向、持续改进”的理念,吸收借鉴新工科建设成果以及部队训练演习创新经验,提出无人系统综合化运用实践教学改革方案,探索实践条件运行机制。

3.1 以岗位需求为牵引,构建无人系统综合化运用实践教学体系

紧贴智能无人系统方向人才培养需求,结合未来无人系统发展趋势,以岗位能力塑造为驱动,以“三个面向”为目标导向,调研形成智能无人系统专业人才知识需求,建立指挥控制、平台控制、载荷操控、通信运用、情报综合与综合保障等6大类15种39个能力素质标准模型。在此基础上,融合智能无人系统相关专业实践需求,突出实战化、体系化要求,贯通设备资源、实验场地、运行机制等方面规划设计,构建“课程实践环境”、“综合演练环境”、“创新实践环境”、“对抗演练毕业设计环境”、“联教联训/实习基地”五大板块,形成“基础实验+创新实践+综合实训”的无人系统综合化运用实践教学体系,通过“调研-分析-试点-优化”,支撑及验证能力素质模型和实践方案,并探索实践条件的高效运行

机制。

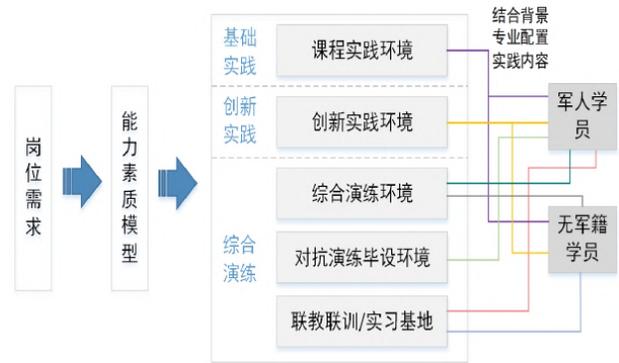


图1 岗位需求牵引的无人系统综合化运用实践教学设计
Fig. 1 Practice Teaching Design of Unmanned Systematic Comprehensive Application Drawn by Job Requirements

1)建立无人系统任职岗位能力模型。任职岗位能力是履行岗位职责应具备的专业能力,是岗位胜任力的指向性需求。本文针对无人系统指挥、控制与保障等关键岗位开展了大量现地调研,分析了相关岗位的职责、工作任务和人才要求,梳理了业务知识要求,包括无人机平台知识、传感器与信息处理知识、网络与通信知识、武器与制导控制知识、任务规划与指挥控制知识、维修保障知识、法规与条令知识等。在此基础上,建立了无人系统任职岗位能力素质模型,主要包括指挥控制能力,平台操控能力、任务载荷操控能力、通信与情报分发能力和维修保障能力等6大类15种39个能力,每个能力包含定义、关键点以及分级的行为描述。该模型为实践内容设计和实践板块划分提供需求指引。

2)构建三位一体的无人系统实践板块。基于任职岗位能力模型,分析智能无人系统领域专业能力实践需求,构建无人系统“基础实验+创新实践+综合实训”的三位一体实践板块,分别由课程实践环境、综合演练环境、创新实践环境、对抗演练毕业设计环境以及联教联训/实习基地组成。以课程实践环境培养学员基础专业素质,以综合演练环境锻造学员专业知识的综合运用能力,以创新实践环境磨炼学员创新实践和解决实际问题的能力,以对抗演练毕业设计环境进一步实现专业核心能力的个人综合实践,并通过联教联训等方式开创了院校与部队/企业的协同育人新模式,支撑面向实战的专业技能与职业素质培养的实践教学。

3)“面向需求,顶层设计,迭代优化”。以岗位需求为牵引,以智能为核心,围绕无人系统运用的“观察-判断-决策-行动”(OODA)回路开展综合实践内容设计和条件建设,并依托实践条件建设进行6类多种能力素质模型的实践验证和实践条件方案迭代优化,探索各个实践条件运行机制,明确各自的建设重点及之间的衔接关系。同时,结合学员特点和背景专业,灵活设置岗位实践内容,实现因材施教。对于军人学员,在综合演练过程中相应安排无人平台操作员、载荷操作员、任务规划员等岗位职责,强化专业知识向任职能力的转变;对于无军籍学员,结合其感兴趣的专业领域,如无人机、无人车、机器人等平台,设计可供选择的多样化实习岗位,提高其创新实践能力。

3.2 打造“战技结合,教研互促”实践教学新模式

当前处在人工智能技术快速发展的时代,智能无人系统新技术更新换代比较快,新平台、新系统不断涌现,倘若实践内容围绕列装/在用平台及系统设计,则很难体现最新技术成果,导致学员无法将所学知识与实践应用联系起来,使实践教学效果大打折扣。针对该问题,需要建立“战术与技术相结合、科研和教学互融互促”的实践教学新模式,加速科研成果进课堂,促进教学与科研相互融合,积极探索无人编队、有人-无人协同、无人集群等无人系统新型作战及应用模式,将其融入综合演练、创新实践环境以及对抗演练毕业设计环境中,实现教学科研环境互补资源共享,形成一套以教学需求为牵引、以科研成果为支撑的无人系统综合运用教学实践环境,通过实践教学进一步完善无人系统方向学员的知识体系和能力结构。

在实施过程中,可根据实践的定位与特点设计相应的想定案例,构建想定案例库,并每年对智能无人系统新技术新应用进行分析,更新与扩充想定案例库,并结合授课内容研究应用新技术的实践教学方法,升级改造配套实践环境,采取虚拟仿真、半实物仿真及实操实练的方式组织实践。在教学实践中积累的无人系统应用经验及数据可反哺科学研究,为无人系统相关技术研究提供支撑数据与验证平台,发掘新技术投入应用过程存在的问题,促进技术研究成果向应用转化,形成教学与科研互融互促的良性循环,助力推动无人系统方向学科专业

建设。

3.3 支持开展“实践导向、学科交叉、学研共融”创新实践活动

创新能力培养是实现创新性军事人才培养目标的关键所在,也是无人系统领域专门人才超前培养的迫切需求。在智能无人系统领域,创新既离不开实践,同时又必须超出既有实践内容的束缚。只有在轻松、自由、民主的氛围中,才能最大限度的激活学员的好奇心和求知欲,才会产生创新的意向和行动。因此,需要以无人系统创新实践环境为基础,建设智能无人系统创客空间,提供可动态布置的实验环境及设施,能够支撑不同学科专业学员开展与无人车、无人机等智能无人系统相关的高水平学科竞赛,如“智胜空天”、“无人争锋”、全国大学生智能汽车竞赛等。在此基础上,成立智能无人系统俱乐部,支撑学员开展与无人车、无人机等智能无人系统相关的课外主题创新实践活动,提高创新实践能力。

1)依托智能无人系统相关优势科研方向,发挥团队与学科优势,打造一支“教员-研究生-本科生”互动式多层次优秀教学团队,充分发挥博士、硕士和高年级本科生在学员自主创新团队中的“传、帮、带”关键作用,师生之间形成了良性互动的协同创新关系,为无人系统综合运用创新实践与人才培养提供全方位、全过程指导。

2)科学规划、统筹建设一流的无人系统创新实践环境,按照“学科交叉、设备一流、配套齐全、管理先进”原则建设智能无人系统创新空间,建立全开放运行管理机制,为各层次学员、各培养阶段、各实践环节的创新思维与实践能力的培养提供有力支撑。

3)以高水平学科竞赛为牵引,催生创新思维,选拔创新团队,实践创新项目,培育创新成果。同时,积极开展延伸教学,鼓励学员针对无人系统实际应用问题攻坚克难,并通过部队日常交流、演习演练等活动安排创新实践成果应用渠道,不断提升学员运用所学知识提升无人系统智能化水平以及解决无人系统实际运用问题的能力。

4 结论

军队院校的宗旨主要为部队输送高素质军事人才,实践教学则是培养学员创新实践能力的重要

途径。本文面向以智能无人系统为代表的无人作战新型作战力量发展,从实践教学体系、实践教学模式以及创新实践活动等方面提出了具有军队院校特色的无人系统综合化运用实践教学改革措施,对新工科条件下智能无人系统人才培养实践教学方法进行研究与探索。期望通过不断完善实践教学机制,满足日益增长的智能无人系统领域人才规模化、体系化超前培养需求。

参 考 文 献

- [1] 辛昕,谢川.人工智能在无人机系统中的应用与发展研究[J]. 飞航导弹,2021(05):48-51.
- [2] Tao ZHANG, Qing LI, Chang-shui ZHANG, et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(01):68-86.
- [3] 邵太华,陈洪辉,舒振,吕翔,蔡飞,张维明.面向无人作战指挥控制的任务智能解析技术[J].指挥与控制学报,2021,7(02):146-152.
- [4] 张涛,李清,张长水,梁华为,李平,王田苗,李硕,朱云龙,吴澄.智能无人自主系统的发展趋势[J].无人系统技术,2018,1(01):11-22.
- [5] Gargalakos M . The role of unmanned aerial vehicles in military communications: application scenarios, current trends, and beyond[J]. The Journal of Defense Modeling & Simulation, 2021: 154851292110316.
- [6] 丁鑫鑫,姜楠,何松泽,章子星.美军无人作战的发展与概况[J].军事文摘,2021(11):12-16.
- [7] 孙毅,宋乐,王桂芝.2019年国外地面无人自主系统发展综述[J].飞航导弹,2020(01):30-34.
- [8] Wang H , Cheng H , Hao H . The Use of Unmanned Aerial Vehicle in Military Operations[M]. 2020.
- [9] Naranjo J E , Jimenez F , Anguita M , et al. Automation Kit for Dual-Mode Military Unmanned Ground Vehicle for Surveillance Missions [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2018:1-1.
- [10] 张文瑶,裘达夫,胡晓棠.水下机器人的发展、军事应用及启示[J].中国修船,2006(06):37-39.
- [11] 陶九阳,吴琳,胡晓峰.AlphaGo技术原理分析及人工智能军事应用展望[J].指挥与控制学报,2016,2(02):114-120.
- [12] Xusheng Lei, Jun Ma. The Course Reform of the Modern Control Theory and Method Based on the Unmanned Aerial Vehicle [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1575(1):012135 [(5pp)].
- [13] 周浩然,俞挺挺,鄧朋,许易冲,徐雁飞,周睿,周庆国.“新工科”模式下无人驾驶教学实验平台实践与探索[J].微纳电子与智能制造,2020,2(01):116-121.
- [14] 崔利杰,任博,张红梅,王坚浩.新工科背景下装备智能化创新人才培养研究[J].高等教育研究学报,2021,44(02):39-44.
- [15] 周浩然,俞挺挺,鄧朋,许易冲,徐雁飞,周睿,周庆国.“新工科”模式下无人驾驶教学实验平台实践与探索[J].微纳电子与智能制造,2020,2(01):116-121.

作者简介:

王楠(1980-),男,硕士生导师,副研究员,主要从事无人系统协同控制(人机协同、空地协同)、作战任务规划等方面研究。本文通讯作者。

牛轶峰(1979-),男,博士生导师,教授,研究方向包括多机协同感知与决策、人机协作混合主动监督控制、单机自主实时重规划与避障等。

洪华杰(1976-),男,博士生导师,研究员,面向未来城市作战装备中侦察、火力和特种作业等智能机电系统,研究伺服机构优化设计、柔性传动与控制、智能控制技术、目标跟踪与火力控制等技术。

邢堃盛(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人系统协同控制。

水下地形匹配导航初始定位研究

王汝鹏¹, 李 晔², 陈云赛³, 马 腾², 丛 正², 贡雨森²

(1. 河海大学 海岸灾害与防护教育部重点实验室, 中国 南京 210098; 2. 哈尔滨工程大学 智能水下机器人技术重点实验室, 中国 哈尔滨 150001; 3. 国家深海中心, 中国 青岛 266237)

摘要: 【研究背景】卫星定位信号无法到达深海, 声学定位存在作用范围受限、延时等问题, 惯性导航误差随时间无限累积^[1]。因此, 具有有界定位误差、无时延等优点的水下地形匹配定位技术成为水下航行器长期、远距离、高精度导航的重要突破口。水下地形匹配导航实质为由主导航系统和地形匹配定位系统构成的组合导航系统。该系统以先验地形信息为定位信息源, 基于地形匹配与融合滤波方法进行定位信息的迭代解算。由于在水下地形匹配导航系统初始点存在较大的主导航定位误差, 加之地形本身的强非线性、自相似、测量误差的非高斯等因素影响, 导致水下地形匹配导航系统运行初始阶段存在滤波不稳定问题, 严重影响系统可靠性^[1]。【研究目标】由于滤波不稳定性主要是由于水下地形匹配导航系统初始时刻存在较大的主导航定位误差, 导致系统初始定位伪波峰和误匹配概率增加, 加之测量误差持续输入和滤波器记忆效应影响引起滤波不稳定^[1]。为此, 本研究拟通过构建高精度地形匹配定位方法, 提高水下地形匹配导航系统初始定位精度, 提高系统初始化精度, 以此提高系统运行初始阶段的滤波稳定性和系统可靠性。【理论与方法】本研究提出了基于多匹配定位点非线性融合的初始定位方法 (NLMTFP, Non-linear Multi-TRP Fusion Positioning), 构建了基于贝叶斯估计模型的NLMTFP方法及该模型的有限网格数值求解方法^[1]。由于地形匹配定位点的误差不具有时间相关性且只与地形特征和测量误差有关, 所以地形匹配定位的误差是时间有界, 而且地形匹配导航规划点的测量地形之间几乎没有相关性 (适配性较高的区域), 所以地形匹配定位误差也可视为相互独立的。考虑到参考导航信息虽然在时间上是发散但在短距离内的相对定位误差小于地形匹配定位误差, 所以其相关性正好可以约束地形匹配定位点的跳变性, 因此NLMTFP方法可以有效的抑制伪波峰和误匹配现象, 获得较高精度和较高稳定性的初始定位结果^[1]。【研究结果】本研究利用船载数据进行验证试验, 分为高适配区域和低适配区域试验^[3]。其中, 低适配区域和高适配区域试验的地形匹配导航起点的地形适应性分别为: 0.0080和0.0107; 试验总航程分别为: 2107.78m和2183.28m; 地形匹配导航起点距离主导航 (推算导航) 起点分别为: 1316.47m和1483.09m, 主导航误差约为航程的5%, 试验中采用15帧多波束数据进行匹配定位, 每帧包含192个测量点, 初始定位搜索区间大小为200m × 200m。对比试验中分别采用TERCOM初始定位^[1]、置信区间约束^{[3][5]}、NLMTFP (3个地形匹配点)^[1]进行水下地形匹配导航系统粒子滤波器初始化。在低适配区, 三种初始化方法得到的导航末端粒子集分布方差和定位偏差分别为: 8.58m、6.85m; 8.60m、6.56m; 8.86m、9.25m。而在高适配区, 三种初始化方法得到的导航末端粒子集分布方差和定位偏差分别为: 6.85m、6.90m; 6.56m、6.92m; 9.25m、6.01m^[1]。【研究结论】高精度的初始定位概率分布函数和PF初始化采样方法对于提高TAN初始阶段PFs的收敛速度和稳定性具有重要意义。NLMTFP初始化PF方法可以提高TAN初始阶段粒子集的收敛速度, 减小PF的分布范围和伪定位点附近粒子的权重, 从而有效地降低了伪点附近的复制速度和粒子数, 有效地提高了PF的稳定性和准确性。此外, PF的初始化精度主要影响TAN系统在初始阶段的稳定性和精度。初始阶段的快速滤波收敛是TAN系统进入跟踪导航阶段并输出有效定位信息的前提, 如果不能提高深海TAN初始位置的稳定性和可靠性, 则TAN的应用风险会很大, 在这种情况下, 它不能被广泛使用, 特别是在深海勘探领域。因此, 需要将TAN系统的初始定位过程 (TAN初始化和滤波器收敛) 作为一个单独的环节进行研究^[1]。

关键词: 水下航行器; 水下导航; 地形匹配导航; 地形匹配定位; 粒子滤波; 初始化

Initial Positioning of Underwater Terrain Matching Navigation

1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing, 210098, China;
2. Science and Technology on Underwater Vehicle Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
3. Chen Yunsai, National deep-sea center, Qingdao, 266237, China

Abstract: Research background Satellite signal cannot reach the deep sea. Acoustic positioning has limited in operation range and time-delay, the error of inertial navigation is accumulated infinitely over time [1]. So, underwater terrain aided navigation (TAN) technology, which has the advantages of bounded positioning errors and no time-delay, has become an important breakthrough for long-term, long-distance and high-precision navigation of underwater vehicles (UVs). Underwater TAN is essentially an integrated navigation system composed of main navigation system and terrain aided positioning (TAP) system. In this system, prior terrain information is used as the source of positioning information, and the iterative solution of positioning is carried out based on terrain matching information, main navigation information and fusion filtering method. Due to the large positioning error at the initial point of the underwater TAN, and the strong nonlinearity, self-similarity and non-Gaussian measurement error of the terrain information cause filtering instability of the underwater TAN at the initial stage of operation that affects the reliability of the TAN system seriously [1]. Research objective the instability of filtering is mainly due to the large primary positioning error at the initial point of the underwater TAN running, which leads to the increase probability of positioning pseudo-peak and mismatch in the positioning likelihood function. In addition, the continuous input of measurement error and the memory effect of the filter cause the instability of filtering [1]. Therefore, this study intends to build a high-precision TAP method to improve the initial positioning accuracy of the underwater TAN system, so as to improve the filtering stability and system reliability. [Theory and method] In this study, we propose an initial positioning method based on Non-linear Multi Terrain Aided Positioning Point Fusion Positioning (NLMTFP), and construct the NLMTFP model based on Bayesian estimation theory [1]. A finite grid numerical solution method is proposed to solve the of NLMTFP model. Though, the error of TAPs is no correlation and are only related to terrain features and measurement errors, the errors of TAPs are bounded, there is almost no correlation between the TAPs. So, the TAPs error can also be regarded as mutually independent. Considering that the main navigation information is divergent in time, but the relative positioning error in a short distance is less than the terrain matching positioning error, so its correlation can constrain the terrain matching positioning points jumps. Therefore, NLMTFP method can effectively suppress the pseudo-peaks and mismatching peaks, and obtain the more accuracy and more stability initial positioning results [1]. Results The replay experiments are carried out by using shipboard data, which was divided into high adaptation area experiment and low adaptation area experiment. Among them, the terrain adaptability of the initial point of TAN in low adapter area and high adaptation area is 0.0080 and 0.0107, respectively; The total distance of the test path is 2107.78m and 2183.28m, respectively; The initial point of TAN is 1316.47m and 1483.09m from the starting point of main navigation (dead reckoning navigation), respectively. And the main navigation error is about 5% of the travel distance. In the experiment, 15 frames of multi beam data are used for TAP, each frame contains 192 measurement points, and the area of search interval initial positioning is $200m \times 200m$. In the contrast test, TERCOM initial positioning [1], confidence interval constraint [5] and NLMTFP (3 TAPs) [1] are used to initialize the particle filter (PF) of TAN. In the low adaptation region, the distribution variance and positioning deviation of the three initialization methods are 8.58m, 6.85m; 8.60m, 6.56m; 8.86m, 9.25m, respectively. In the high adaptation region, the distribution variance and positioning deviation of the three initialization methods are 6.85m, 6.90m; 6.56m, 6.92m; 9.25m, 6.01m, respectively [1]. Conclusion High precision initial positioning probability distribution function and PF initial sampling method are of great significance to improve the convergence speed and stability of PFs in the initial stage of TAN. NLMTFP initialization of PF can reduce the distribution range of PF and the weight of particles near the pseudo peaks, so as to, effectively reducing the copy speed and the number of particles near the pseudo peaks, and improve the convergence speed of particle set in the initial stage of TAN, and effectively improving the stability and accuracy of PF. In

addition, the initialization accuracy of PF mainly affects the stability and accuracy of TAN system in the initial stage. Fast filter convergence in the initial stage is the premise for TAN system to enter the tracking and navigation stage and output effective positioning information. If the stability and reliability of the initial position of deep-sea TAN cannot be improved, the application risk of TAN will be great. In this case, it cannot be widely used, especially in the field of deep-sea exploration. Therefore, it is necessary to study the initial positioning process of TAN system (TAN initialization and filter convergence) in the future research[1].

Key words: underwater vehicle; Underwater navigation; Terrain aided navigation; Terrain aided positioning; Particle filter; initialization

参 考 文 献

- [1] Li Y , Wang R , Chen P , et al. Terrain Matching Positioning Method Based on Node Multi-information Fusion [J]. Journal of Navigation, 2016, -1(01):1-19.
- [2] Wang R , Chen Y , Li Y , et al. High-precision initialization and acceleration of particle filter convergence to improve the accuracy and stability of terrain aided navigation [J]. ISA Transactions, 2020, 110(3).
- [3] Rupeng W., YeL., Teng M., et al. Underwater digital elevation map gridding method based on optimal partition of suitable matching area[J]. Int J Adv Robot Syst, 16(2)(2019).
- [4] W. Rupeng, L. Ye, M. Teng, et al. Improvements to Terrain Aided Navigation Accuracy in Deep-Sea Space by High Precision Particle Filter initialization [J]. in IEEE Access, vol. 8, pp. 13029-13042, 2020.
- [5] Wang R , Li Y , Ma T , et al. A new model and method of terrain-aided positioning confidence interval estimation [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2021(4):1-13.

基于主动变形蜂窝和形状记忆复合材料的 折叠翼尖结构

孙 健¹, 杜林喆¹, Fabrizio Scarpa², 刘彦菊¹, 冷劲松¹

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江省哈尔滨市, 150001, 中国; 2. 布里斯托大学, 布里斯托, BS1 2, 英国)

摘 要: 与固定翼结构相比, 变翼尖结构可以有效降低飞行器飞行过程中的诱导阻力, 燃油消耗以及缩短起降距离。本文提出一种基于主动充气蜂窝以及形状记忆复合材料 (SMPC) 蒙皮的折叠翼尖结构。变形时通过蜂窝充气提供变形驱动力, 而形状记忆蒙皮可以在变形时大幅降低自己的刚度, 跟随机翼一起变形。这两种材料以及结构的耦合使翼尖在折叠的过程中能够保持比较连续的气动外形。基于该结构本文提出并分析了折叠翼尖结构的几何驱动关系以及力学模型, 推导了蜂窝输入气压与翼尖变形角度的关系, 并制作了一个变翼尖结构样件进行了变形实验, 实验结果与理论分析具有很好的一致性。针对折叠过程中蒙皮可能发生褶皱的问题, 本文利用 Fluent 有限元分析软件模拟了褶皱对机翼气动布局的影响, 结果表明, 褶皱对气动性能的影响小于 5%, 甚至可以使升阻比提高 3.57%。为了解决变形过程中蒙皮承载能力不足的问题, 本文探索了在蒙皮结构中加入气动肌肉作为为自适应加强筋方案的可能性, 气动肌肉可以在变形过程中暂时充气, 以调整形状记忆聚合物蒙皮在展开过程中的弯曲刚度。本文利用 Abaqus 对气动肌肉对橡胶态下 SMP 蒙皮的增强效果进行了有限元仿真, 并设计了等效实验测试气动肌肉对蒙皮承载能力的影响。仿真结果与实验结果相吻合, 验证了该方案的可行性。本文所描述的变翼尖结构概念可以用于小型无人机的进一步评估, 也可以用于其他自适应结构的结构设计。

关键词: 变翼尖结构; 充气蜂窝; 气动驱动器; 形状记忆蒙皮; 变刚度蒙皮; 气动肌肉; 变体飞行器

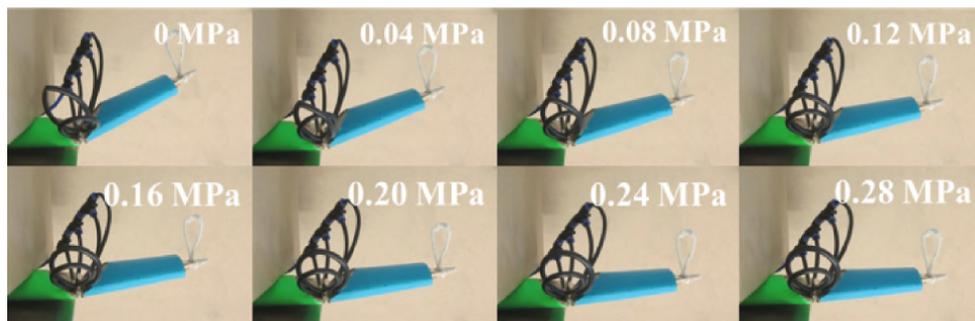


图1 充气蜂窝变形承载实验图

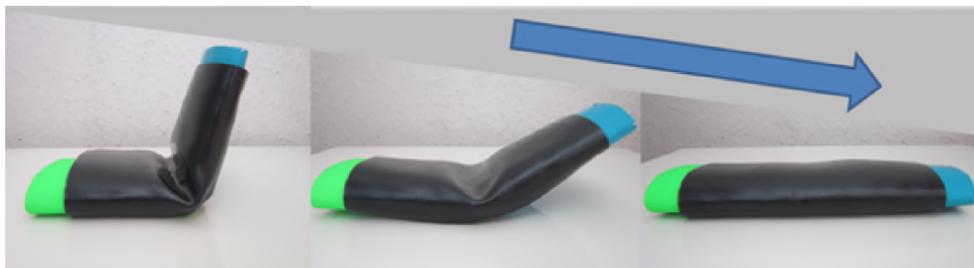


图2 SMP蒙皮折叠展开演示

无人系统发展阶段和智能化趋势

喻煌超, 王祥科, 牛轶峰

(国防科技大学智能科学学院, 长沙, 410073, 中国)

摘要: 本文根据无人系统的主要技术特征对其发展阶段进行了分析概括, 并对其智能化趋势进行了展望。首先, 通过分析无人系统的百余年发展历程和核心特点, 将无人系统的发展划分为萌芽起步阶段、初步发展阶段、崛起发展阶段、蓬勃发展阶段、稳步发展阶段和智能化发展阶段; 其次, 从主要特征、使命任务、任务载荷、导航系统和控制方式等角度对各个阶段特点进行了多维分析和对比; 最后, 从单体无人系统智能化(认知智能)、无人集群系统智能化(群体智能)和有人-无人系统智能化(混合智能)三个方面分析了无人系统发展的智能化趋势。希冀这种从具体技术特征的角度来划分无人系统发展阶段的方法对厘清无人系统发展历程和趋势具有一定借鉴意义。

关键词: 无人机; 发展阶段; 智能化; 控制方式; 有人-无人系统

Stages of Development of Unmanned Aerial Vehicles

YU Huangchao, WANG Xiangke, NIU Yifeng

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper analyzes the stages in the development of Unmanned Aerial Systems (UAS) based on their main technical characteristics. First, the development of UAS is divided into an initial stage, preliminary developmental stage, stage of rising development, stage of vigorous development, stage of steady development, and intelligent development by analyzing its historical development and main characteristics over 100 years. Second, multi-dimensional analyses and comparisons of the characteristics of each stage are provided from the perspectives of the mission task, task load, navigation system, and control method. Finally, the trend of intelligence of UAS is analyzed from three perspectives: the intelligence of single unmanned systems (cognitive intelligence), that of unmanned cluster systems (swarm intelligence), and the intelligence of manned - unmanned systems (hybrid intelligence). This study provides insights into the history and developmental trends of UAS.

Key words: UAS; Development Stage; Intelligence; Control Method; Manned-Unmanned System

注: 本文已发表于《国防科技》: 喻煌超, 牛轶峰*, 王祥科. 无人系统发展阶段和智能化趋势[J]. 国防科技, 2021, 42(3):