

ISSN 2096-5915
CN 10-1565/TJ

无人系统技术

UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY

主管：中国航天科工集团有限公司 主办：北京海鹰科技情报研究所



中国学术期刊网数据库(CNKI)收录
万方数据数字化期刊库收录
超星数字期刊数据库收录
维普网数据库收录

ISSN 2096-5915



2019.4
第2卷 NO.

2019第二届中国“AI+”创新创业大赛

——无人系统技术大赛

2019第二届中国“AI+”创新创业大赛——无人系统技术大赛将于2019年8月至11月举行。无人系统是人工智能研究中的重要内容，近年来无人系统技术发展迅速，且其应用领域不断扩展。为了促进无人系统的技术交流和推广，并为从事人工智能及其在无人系统应用研究的科研人员、产业界从业人员以及AI技术爱好者提供一个良好的沟通平台，现将大赛的有关事项通知如下：

◆ 大赛机构 ◆

主办单位

中国人工智能学会

组织单位

清华大学人工智能研究院

中国航天科工集团第三研究院总体部

承办单位

清华大学人工智能研究院智能机器人研究中心

北京海鹰科技情报研究所《无人系统技术》编辑部

复杂系统控制与智能协同技术重点实验室

◆ 参赛办法 ◆

● 参赛对象

本次大赛是面向全国无人系统领域的研究者的赛事，包含高校，科研机构，无人系统研究企业、研究协会和对相关研究有兴趣的研究人员，欢迎社会各界和个人积极申报参赛。

● 参赛组队形式

选手可在网上自行组队报名或个人参赛，选手的地区、年龄、职业不限。

● 报名方式

参赛队伍在大赛网站（<https://aichina.caaicn/>）的报名系统中在线报名，完成相关信息录入，完成报名。

● 比赛任务

（1）飞行仿真组 （2）飞行操作组

● 参赛要求

参赛队赛前需签订科研道德承诺书，保证参赛软件和系统应该是参赛队员独立设计、开发完成的技术成果，严禁抄袭、剽窃等行为。凡发现抄袭、剽窃等行为，将取消参赛队伍的参赛资格。

◆ 奖项设置 ◆

本赛事预选6队进入决赛，最终角逐出冠军1队、亚军2队、季军3队。

◆ 联系方式 ◆

报名网站：<https://aichina.caaicn/>

水下无人系统专栏

被动水下目标识别研究进展综述.....	01
杨宏晖, 徐光辉, 李俊豪, 申 昇, 姚晓辉	
基于最小一致性的自治式水下机器人路径规划.....	08
姚 鹏, 王 琨	
深海 AUV 有动力螺旋下潜技术及试验研究.....	15
冯 朝, 肖 婷	
2018 年水下无人系统发展综述.....	20
王雅琳, 郭 佳, 刘都群	
用于水声目标信号时频特征提取与识别的深度卷积神经网络.....	26
李俊豪, 杨宏晖	

系统综述

智能无人飞行器技术发展趋势综述.....	31
符文星, 郭 行, 闫 杰	

技术研究

基于深度强化学习的行星车路径规划方法研究.....	38
周思雨, 白成超	
基于拓展 CBBA 算法的在轨装配航天器任务分配技术研究.....	46
于晓强, 郑红星	

前沿动态分析

浅析国外人工智能技术发展现状与趋势.....	54
杨卫丽	
2019 年美国空军人工智能附录——响应国防部人工智能战略.....	59
美国《2018 国防部人工智能战略概要》解析.....	62

《无人系统技术》办刊宗旨是刊载无人系统领域新进展、新成果、新技术, 促进学术交流, 推动成果转化, 提高我国在该领域的科研装备水平。

现诚挚地向无人系统技术研究领域的专家学者、学术带头人以及致力于无人系统理论与技术创新研究的科技工作者约稿。稿件内容以综述、研究论文、技术报告、专题研讨和科技评述等形式为主, 广泛报道无人空中系统、无人地面系统、无人水面水下系统、智能机器人等研究领域的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结。主要包括无人系统平台技术、自动控制技术、信息技术以及人工智能、通信、传感器等技术在无人系统领域的新应用。同时, 也包括无人系统自主技术、协同技术、跨域同步技术、智能无人系统伦理及其与有人系统的关系等。



Unmanned Underwater System Column

Summary of Passive Underwater Acoustic Target Recognition	01
YANG Honghui, XU Guanghui, LI Junhao, SHEN Sheng, YAO Xiaohui	
Path Planning of Autonomous Underwater Vehicle via Minimum Consensus	08
YAO Peng, WANG Kun	
Technology and Experimental Study of Powered and Spiral Diving Test on Deepsea AUV.....	15
FENG Zhao, XIAO Ting	
Summary of the Development of Unmanned Undersea Systems in 2018	20
WANG Yalin, GUO Jia, LIU Duqun	
Deep Convolutional Neural Networks for Underwater Acoustic Target Time-frequency Feature Extraction and Recognition.....	26
LI Junhao, YANG Honghui	

Systematic Review

Overview on the Technology Development Trend of Intelligent Unmanned Aerial Vehicle	31
FU Wenxing, GUO Hang, YAN Jie	

Technical Study

Research on Planetary Rover Path Planning Method Based on Deep Reinforcement Learning ...	38
ZHOU Siyu, BAI Chengchao	
The Extended-CBBA-Based Decentralized Auctions Algorithm for On-Orbit Assembly Spacecraft Task Allocation	46
YU Xiaoqiang, ZHENG Hongxing	

Frontier Dynamic Analysis

Initial Analysis on the Status and Development Trend of Foreign Artificial Intelligence	54	
YANG Weili		
2019 The United States Air Force Artificial Intelligence Annex to the Department of Defense Artificial Intelligence Strategy	59	
Summary of the 2018 Department of Defense of Artificial Intelligence Strategy		62

被动水下目标识别研究进展综述

杨宏晖, 徐光辉, 李俊豪, 申 昇, 姚晓辉

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘 要: 由于海洋环境的复杂性和舰船声隐身技术的发展, 被动水下目标识别面临巨大的挑战, 是各国水声信号处理领域研究的焦点。首先在介绍基于机器学习的水下目标识别(UATR)技术的基础上, 重点分析与总结了水下目标特征提取(时域波形结构特征提取、频域谱特征提取、时频分析特征提取、听觉感知特征提取)、特征选择、分类器设计等方面的研究现状, 然后阐述了在人工智能快速发展背景下的UATR技术发展的现状, 最后, 论述了UATR智能化发展中依然存在的问题及未来发展趋势。综述表明, 在水下目标识别领域, 基于舰船辐射噪声的水下目标识别依然面临着诸多困难和挑战, 构建智能水下目标识别系统, 还需要更多的思考和实践。

关键词: 舰船辐射噪声; 被动水下目标识别; 特征提取; 特征选择; 深度学习; 类脑智能

中图分类号: TB56 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2019) 04-0466-07

Summary of Passive Underwater Acoustic Target Recognition

YANG Honghui, XU Guanghui, LI Junhao, SHEN Sheng, YAO Xiaohui

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Passive underwater acoustic target recognition (UATR) faced enormous challenges due to the complexity of ocean environment and development of acoustic stealth technology. Passive UATR has become the research focus in the field of underwater acoustic signal processing. In this paper, on the basis of machine learning, firstly, the feature extraction (time-domain wave structure feature extraction, frequency spectrum feature extraction, time-frequency feature extraction, auditory perception feature extraction), feature selection and classifier design for UATR is analyzed and summarized. Secondly, under the rapid development of artificial intelligence, the present situation of development of UATR is expounded. Finally, the existing problems and future directions of development of intelligent UATR is discussed. Review shows that UATR via ship radiated noise still faces many challenges and it need more thought and practice to building intelligence underwater acoustic target recognition system.

Keywords: Ship Radiated Noise; Passive Underwater Acoustic Target Recognition; Features Extraction; Feature Selection; Deep Learning; Brain-inspired Intelligence

1 引言

“凡物动而有声, 声变而有音”。在海洋中航行的舰船不可避免地向周围海洋环境辐射噪声。被动声呐能安静地监听水下目标辐射噪声, 在发现目标的同时不易被目标察觉, 具有很好的作战

优势。舰船辐射噪声主要由机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声共同组成。利用被动声呐接收的舰船辐射噪声, 分析声源属性, 提取目标的固有属性, 识别水下目标, 是水声信号处理领域的研究焦点。一直以来, 各国被动声呐系统主要利用训练有素的声呐员来识别目标, 但声呐员判断的

收稿日期: 2019-06-03; 修回日期: 2019-07-09

基金项目: 盲信号处理国家级重点实验室基金

准确性受到声呐员自身的经验、身体状况、心理因素等影响较大。因此，各国一直致力于发展被动声呐系统的水下目标自动识别技术，协助并最终代替声呐员完成繁重的识别任务。本文在介绍基于机器学习的水下目标识别(Underwater Acoustic Target Recognition, UATR)技术的基础上，重点分析与总结了水下目标特征提取、特征融合、分类器设计等方面的研究现状，阐述了在人工智能技术快速发展背景下的UATR技术发展的现状，最后论述了UATR智能化发展中依然存在的问题及未来发展趋势。

2 基于机器学习的UATR

2.1 UATR系统的工作原理

以机器学习理论为核心的UATR系统的工作原理如图1所示。系统工作过程分为两个部分：学习过程和测试过程。学习过程主要包括：信号获取及预处理、特征提取、特征选择、样本选择及识别模型设计；测试过程主要包括：信号获取及预处理、特征提取及识别决策。

2.2 舰船辐射噪声的特征提取

在舰船辐射噪声特征提取方面，国内研究人员从不同的角度对舰船辐射噪声信号进行了分析和研究，提取了水中目标的多域特征。

2.2.1 时域波形结构特征提取

文献[1-3]从舰船辐射噪声原始信号中提取了过零点分布、峰间幅值分布、波长差分布及波列面积分布等波形结构特征。时域波形结构特征提取原理简单，易于实现，但需要先验知识来设定其中的参数，而固定的参数会使这类特征在复杂海洋环境条件下的识别泛化性较弱。

2.2.2 频域谱特征提取

研究人员对舰船噪声的频域谱特性分析方法进行了深入的研究。给出了舰船的螺旋桨、轴频、轻重节奏及气缸对舰船噪声调制的数学模型，计算出不同情况下舰船噪声调制包络的功率谱密度和自相关函数，提取了舰船的螺旋桨转速、螺旋桨叶片数、叶片间不均匀性、螺旋桨轴的加工和安装情况、主机类型以及舰船的形状等特征，并利用ECS型噪声的理论模型对舰船辐射噪声的自相关函数和平均功率谱的形状进行了描述，提取

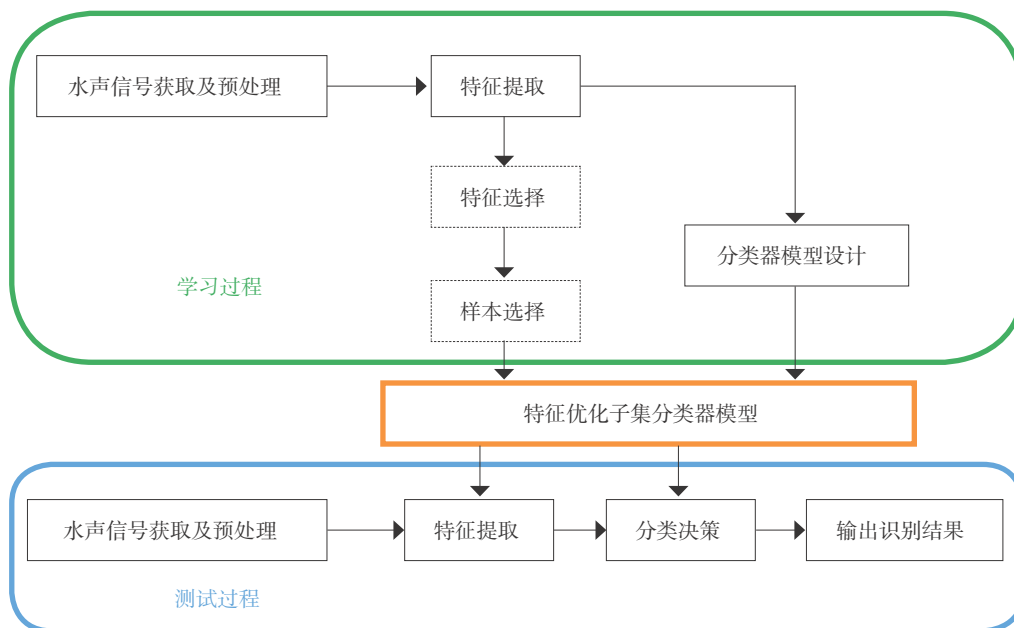


图1 UATR系统的工作原理

Fig.1 The working principle of UATR system

了平均功率谱的最大值位置和归一化平均功率谱级的二阶中心矩作为识别特征,采用分段线性分类器对两种不同型号的舰船目标进行了分类^[4]。研究人员还对舰船噪声和振动谱中的线谱提取方法进行了研究,提出了线谱特征的分析及计算方法^[5]。

2.2.3 时频分析特征提取

在频域分析中,任一频率分量都是对信号在整个定义时间区间上的积分,无法有效地反应信号在窄时间区间上的突变情况。故采用时频分析的方法对舰船辐射噪声进行局部时间区间上的频率分析。文献[6-8]提取时频分析特征的方法主要有小波变换、短时傅立叶变换、高阶统计量、低频分析与记录谱(Low Frequency Analysis Recording, LOFAR)、噪声包络信号检测谱(Detection of Envelope Modulation On Noise, DEMON)、倍频程谱分析、倒谱、Wigner-Ville分布和Gabor展开等。文献[9-10]将小波变换用于舰船辐射噪声的特征分析,提取了各级小波的谱特征和波形结构特征,然后将所提取的特征与原始信号的特征输入同一类型的神经网络分类器,进行分类比较。结果表明,小波变换使信号的谱类别特征和波形结构特征有了明显的增强,且能压缩特征空间的维数。文献[11]利用小波变换方法讨论了四种基于小波变换的特征提取方法:基于小波变换的模极大值特征、基于小波分解的能量特征、基于小波包分解的熵特征以及基于自适应小波网络的特征提取方法,并阐述了各方法的基本原理及实现过程,以及将其用于水声信号的特征提取。通过分类结果比较,分析了各种方法的特点及适用性。文献[12-13]将子波分析用于水下目标的被动识别中,提出了舰船辐射噪声谱子波特征提取和高斯加权特征提取两种特征提取方法,并对子波神经网络分类器的模型进行了研究。文献[14]研究了基于小波分析的被动声纳信号宽带噪声包络调制分析方法。功率谱和相关函数具有二阶统计特性,在随机过程是正态分布时,它们能完全代表过程的特性。但实际的水声信号或噪声往往不是理想的高斯分布,用二阶

统计特性不能全面描述信号特性,高阶谱具有对非高斯、非平稳信号进行有效处理的能力,加之可以抑制高斯和非高斯的有色噪声,因此可以用来实现对舰船噪声信号的特征提取。高阶统计量一般具有高阶累积量、高阶矩和高阶谱,其都具有抑制加性噪声的能力,并保留了相位信息。文献[15]使用高阶谱方法提取了舰船目标的高阶谱特征,对两类信号分别进行了双谱分析和三谱分析,提取了四个高阶谱特征,并使用反向传播(Back Propagation, BP)网络进行了分类,取得了较好的分类效果。LOFAR谱可反映信号的非平稳特性,进而可提取信号中的宽带线谱分布特征。但轴频及其倍频却因为基本上都淹没在低频宽带噪声中而无法直接获取,而舰船宽带噪声高频端存在调制现象,DEMON分析通过对接接收的宽带信号进行解调以获得低频的包络谱,从而获得了诸如目标轴频、叶频等低频端较强的物理特征。文献[16]用LOFAR和DEMON的方法对舰船辐射噪声的谱和频率特性进行分析,通过LOFAR谱分析从时域和频域两个角度提取舰船辐射噪声的特征,通过DEMON谱分析提取舰船辐射噪声的周期调制谱,确定螺旋桨的轴频和叶频,进而确定螺旋桨的叶数。

2.2.4 听觉感知特征提取

一直以来,研究人员都力图借鉴人听觉感知机理来构建被动UATR方法,提出了基于听觉模型的水下目标辐射噪声特征提取方法。听觉模型可以用于提取舰船辐射噪声瞬态信号的音色等特征,结合近邻分类器识别水下目标^[17]。文献[18]讨论了在被动声呐目标识别任务中应用听觉感知模型的可能性,同时,结合声呐目标识别的特点,对听觉感知模型的适用性建模研究提出了建议。文献[19]提出了基于感知线性预测(PLP)的模仿人耳听觉特性来提取水声信号鲁棒特征的方法。运用听觉心理学中临界带谱分析、等响度曲线、强度响度听觉幂率的概念,形成估计听觉谱的方法,获得一个12阶全极点模型的鲁棒特征矢量。文献[20]深入研究了响度类特征和音

调特征的物理含义和计算方法,发现声音的沉杂性、起伏性、快变性、尖锐性和规律性在水声目标主观识别中起着较为重要的作用,并针对声学目标,尤其是UATR进行了改进。文献[21]利用Gammatone滤波器构建人耳听觉模型,提取听觉时频特征和听觉谱特征。文献[22]提出了利用短时能量分析与人的主观听觉相结合的方法进行船舶辐射噪声特征提取。文献[23]利用耳蜗分频、听觉掩蔽等特性,提出了听觉谱特征计算模型,设计了支持向量机(Support Vector Machine, SVM)集成算法进行水下目标分类识别。文献[24]运用听觉心理学的研究成果,模仿人耳的感知辨识机理,提出了基于听觉模型的水下目标特征提取方法。文献[25]提取了舰船辐射噪声的Moore响度和音色特征,并利用海试数据验证了所提出方法的有效性。文献[26-27]采用模拟人耳听觉的梅尔频率倒谱系数方法提取出有效的特征参数进行水下目标的识别。上述研究工作主要集中在听觉外周模型,很少涉及到听觉中枢系统。

2.3 从舰船辐射噪声的特征选择

舰船辐射噪声的特征选择是水声目标识别系统中很重要的组成部分。特征选择的目的是优化学习算法的分类性能。设 X 为训练样本集:

$$X = \{(x_i, y_i) | x_i \in R^d, y_i \in Y, i = 1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

式中, d 是样本的特征数目, Y 是有限的类标集合。

特征选择可以定义为:给定 $m \leq d$,从 d 个原始特征中选出 m 个特征,使得分类器的分类错误率最低;给定错误分类率,从 d 个原始特征中选择出满足预先设定的最小错误分类率的最少的 m 个特征。

特征选择是解决样本数目有限而特征数目高导致分类系统分类性能下降的小样本识别问题的重要方法。西北工业大学杨宏晖^[28]、海军大连潜艇学院章新华、中船重工760研究所彭圆等研究了水下目标特征选择的方法。现有的研究方法有人工免疫算法^[29-30]、遗传算法^[31]、向前向后搜索算

法、最大梯度选择算法^[32]、粗集理论^[33]、动态规划^[34]以及特征选择和支持向量机集成(Support Vector Machine Ensemble, SVME)融合算法^[35]等。在水声目标特征选择方法中,人工免疫算法和遗传算法从理论上可以搜索全局最优解,但运算量大,人工免疫算法相比遗传算法可利用先验知识及免疫算子提高运行速度和收敛速度。粗集理论、向前向后搜索算法及动态规划本质上是顺序搜索算法,不一定得到最优解。最大梯度算法原理简单但会丢失信息。特征选择和SVME融合算法将分类器设计和特征选择融合在一个框架之中,在大幅减少特征数目同时,提高了正确识别率。

2.4 用于舰船辐射噪声识别的分类器设计

在舰船辐射噪声分类决策方法研究工作中,主要的方法有:基于统计分析的方法、神经网络方法和专家系统方法。基于统计分析的方法主要有贝叶斯模式分类方法、聚类分析方法、SVM、决策树、近邻法、隐马尔可夫模型等。文献[36]通过K均值与SVM结合的方法对水下目标进行分类识别。常见的神经网络方法有感知机、BP神经网络、自编码网络等。专家系统识别方法是基于领域专家的经验知识建立的推理识别系统^[37-38]。在这种识别系统中,传感器数据经过特征提取得到的目标特征送入推理机中,推理机按照人的思维进行分析并与知识库中的条件进行对比从而得出识别结果。

2.5 基于深度学习的舰船辐射噪声识别

随着逐层贪婪非监督预训练算法的提出,困扰深度网络的训练问题得以解决,深度学习迅速成为机器学习领域的热点。近几年,国外研究人员深入研究了深度学习在各领域的应用,在计算机视觉、语音识别、声信号处理、字符识别、回归分析等领域取得了初步但令人瞩目的成果。相比深度学习在语音识别、图像识别等领域的研究,在水声目标识别领域国外的研究成果报道较少,但国内相关学者已经开展了有关主动声纳目标识

别和海洋生物识别的研究。目前,国外仍然在深入研究深度学习,并针对具体应用问题,进一步完善深度学习的理论框架和网络框架。

深度学习神经网络是目前最为成功的类脑计算模型,近几年,国内外相关学者研究了基于深度学习^[39-40]的UATR方法。文献[41]提出基于深度置信网络的水下目标多层深度特征提取与识别方法,并利用实测数据进行识别实验验证。文献[42]构建了一个基于卷积神经网络的深度学习识别系统,识别五种海洋哺乳动物的叫声,实验结果表明深度特征的识别性能明显好于梅尔频率倒谱系数特征。西北工业大学、中船重工760研究所、中船系统工程研究院等科研单位开展了基于深度学习的UATR理论和方法的研究工作。文献[43]研究了将深度自编码网络(Stacked Auto-Encoder, SAE)用于UATR方法,实验结果表明SAE的识别性能明显好于SVM和概率神经网络。文献[44]研究了基于深度置信网络(Deep Belief Network, DBN)的水下目标深度特征提取与识别方法,利用互信息实现深度网络隐含单元的分组,利用组稀疏惩罚机制优化网络,提取分类性能强的深度特征。文献[45]提出了混合正则化深度置信网络,利用最大互信息组正则化方法和大量无类标训练样本正则化方法优化深度置信网络,实验结果表明优化后的深度特征的识别性能有所提高。文献[28]专门论述了用于UATR的深度学习网络学习过程监测、调整、可视化以及优化的基本理论和方法。深度学习理论在UATR领域中取得了初步的成果,但是其复杂庞大的参数优化问题、需要大量训练样本、深度特征的物理意义解释性弱等问题还有待于解决。

2.6 基于类脑智能的UATR

类脑智能是指受大脑神经机制和认知机制启发,以计算机建模为手段,通过软硬件协同实现的机器智能。类脑智能是一种面向人工神经网络对低功耗、弱监督、可解释等学习需求,将生物机制与数学原理融合的新型网络模型和学习方法。

美国、欧盟、日本等国先后提出了“脑计划”来推动脑科学以及类脑科学相关领域的科学研究。中国也于2018年启动“脑计划”。

有关类脑智能及应用的研究在中国也得到了水声领域科研工作者的重视。在深度网络的可解释性方面、小样本识别任务方面、精细特征提取方面,类脑智能具有一定优势。文献[46-48]研究了大脑听觉系统的信息处理神经机制,如可塑性机制、时域信号分解机制等,提出了受脑听觉启发的深度神经网络,并用实测数据进行实验验证。针对小样本的识别问题,将迁移学习技术融入受脑听觉启发的深度网络,进一步提升了网络在小样本识别任务中的性能。现阶段类脑智能还处于发展的萌芽阶段,但随着人类对大脑认识的深入和提高,类脑智能的水声目标的建模与识别算法将有显著提高。

3 未来研究方向与展望

目前,人工智能已经成为引领未来的战略性技术之一,世界海洋军事强国已逐步形成以加速发展智能化武器装备为核心的竞争态势。在UATR领域,利用舰船辐射噪声识别水下目标依然面临着诸多困难和挑战。如何将脑科学、类脑智能、深度学习、大数据、超级计算等新理论新方法有针对性地应用到UATR中,构建蕴含新兴人工智能技术的UATR系统,是未来的发展趋势,需要更多的研究和实践。

参考文献

- [1] Meng Q, Yang S. A wave structure based method for recognition of marine acoustic target signals [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137 (4): 2242-2242.
- [2] Meng Q, Yang S, Piao S. The classification of underwater acoustic target signals based on wave structure and support vector machine [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136 (4): 2265-2265.
- [3] 蔡悦斌, 张明之, 史习智, 等. 舰船噪声波形结构特征提

- 取及分类研究 [J]. 电子学报, 1999, 27 (6): 129-130.
- [4] 丁玉薇. 被动声纳目标识别技术的现状与发展 [J]. 声学技术, 2004, 23 (4): 253-257.
- [5] 吴国清, 李靖, 陈耀明, 等. 舰船噪声识别(I)——总体框架、线谱分析和提取 [J]. 声学学报, 1998 (5).
- [6] 程玉胜, 李智忠, 邱家兴, 等. 水声目标识别 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [7] 高伟, 王宁, 陈川. 利用船舶噪声的自相关与倒谱联合估计多径时延 [J]. 声学学报, 2013, 38 (5): 523-532.
- [8] 张绍阳, 许则富. 水下高混响背景下的非平稳时变信号滤波技术研究 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37 (12): 118-121.
- [9] 章新华, 林良骥. 基于小波变换特征的声纳目标分类 [C]. 华东地区自动化学术交流会, 1996.
- [10] 刘俊星, 章新华, 周波, 等. 新阈值及阈值函数的小波去噪研究 [C]. 中国声学学会水声学分会全国水声学学术会议, 2011.
- [11] 张静远, 张冰. 基于小波变换的特征提取方法分析 [J]. 信号处理, 2000, 16 (2): 156-162.
- [12] 张艳宁, 焦李成. 局域自适应子波高斯神经网络综合分类系统 [J]. 电子与信息学报, 1999, 21 (3): 326-331.
- [13] 张艳宁, 靳云姬. 用于船舶噪声分类的局域自适应子波神经网络分类器 [J]. 系统工程与电子技术, 1998 (6): 21-25.
- [14] 高翔, 陈向东, 陆信人. 基于小波分析的被动声纳信号宽带噪声包络调制分析 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 1998, 28 (6): 24-27.
- [15] 樊养余, 孙进才, 李平安, 等. 基于高阶谱的舰船辐射噪声特征提取 [J]. 声学学报, 1999 (6): 611-616.
- [16] 熊紫英, 朱锡清. 基于LOFAR谱和DEMON谱特征的舰船辐射噪声研究 [J]. 船舶力学, 2007, 11 (2).
- [17] Tucker S, Brown G J. Classification of transient sonar sounds using perceptually motivated features [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30 (3): 588-600.
- [18] 李朝晖, 迟惠生. 听觉外周计算模型研究进展 [J]. 声学学报, 2006, 31 (5): 449-465.
- [19] 彭圆, 王晟, 王科俊, 等. 感知线性预测在水下目标分类中的应用研究 [J]. 声学学报, 2006, 31 (2).
- [20] 王娜, 陈克安. 水下噪声音色属性回归模型及其在目标识别中的应用 [J]. 物理学报, 2010, 59 (4).
- [21] 李秀坤, 孟祥夏. 水下目标回波和混响在听觉感知特征空间的分类 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015 (9): 1183-1187.
- [22] 阳雄, 程玉胜. 短时能量分析及人耳的主观听觉在船舶辐射噪声特征提取中的研究 [J]. 声学技术, 2004 (1): 11-13.
- [23] 杨宏晖, 彭圆. 基于声信号人耳听觉谱特征和SVM的水下目标识别 [C]. 中国造船工程学会, 2010.
- [24] 陆振波, 章新华, 胡洪波. 水中目标辐射噪声的听觉特征提取 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26 (12): 1801-1803.
- [25] 曹红丽, 方世良. 舰船辐射噪声的响度和音色特征模型 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43 (2): 241-246.
- [26] Lim T, Bae K, Hwang C, et al. Classification of underwater transient signals using MFCC feature vector [C]. International Symposium on Signal Processing and ITS Applications, 2007.
- [27] Can G, Akbaş C E, Çetin A E. Recognition of vessel acoustic signatures using non-linear teager energy based features [C]. International Workshop on Computational Intelligence for Multimedia Understanding, 2016.
- [28] 杨宏晖, 申昇. 模式识别之特征选择 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [29] 杨宏晖, 戴健, 孙进才, 等. 用于水声目标识别的自适应免疫特征选择算法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45 (12).
- [30] Yang H, Zhou X, Wang Y, et al. A new adaptive immune clonal algorithm for underwater acoustic target sample selection [C]. Tencon IEEE Region 10 Conference, 2014.
- [31] 杨宏晖, 孙进才, 袁骏. 基于支持向量机和遗传算法的水下目标特征选择算法 [J]. 西北工业大学学报, 2005, 23 (4).
- [32] 闫祯. 特征选择方法在目标分类识别中的应用研究 [C]. 水声对抗技术学术交流会, 2014.
- [33] 郭海涛, 田坦, 张春田. 基于粗集理论的声呐图像中值滤波 [J]. 海洋技术学报, 2004, 23 (4): 103-104.
- [34] 柳俊峰, 章新华, 许林周. 动态规划算法在被动声呐目标检测中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2012, 34 (3): 95-98.
- [35] 杨宏晖, 孙进才, 牛奕龙, 等. 支持向量机集成和特征选择联合算法 [J]. 声学技术, 2006, 25 (4): 337-340.
- [36] 戴冬, 卫娟. K-means与SVM结合的水下目标分类方法 [J]. 舰船科学技术, 2015, 37 (2): 204-207.

- [37] Maks, 王云龙. 专家系统在水声中的应用 [J]. 声学与电子工程, 1990 (3): 39-45.
- [38] 徐新洲, 罗昕炜, 方世良, 等. 基于听觉感知机理的水下目标识别研究进展 [J]. 声学技术, 2013 (2): 151-158.
- [39] Lecun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning [J]. Nature, 2015, 521 (7553): 436.
- [40] Schmidhuber J. Deep Learning in neural networks: An overview [J]. Neural Networks the Official Journal of the International Neural Network Society, 2015, 61: 85-117.
- [41] Kamal S, Mohammed S K, Pillai P R S, et al. Deep learning architectures for underwater target recognition [C]. Ocean Electronics (SYMPOL), 2013.
- [42] Mcquay C, Sattar F, Driessen P F. Deep learning for hydrophone big data [C]. Communications, Computers and Signal Processing, 2017.
- [43] Cao X, Zhang X, Yu Y, et al. Deep learning-based recognition of underwater target [C]. IEEE International Conference on Digital Signal Processing, 2017.
- [44] Shen S, Yang H, Sheng M. Compression of a deep competitive network based on mutual information for underwater acoustic targets recognition [J]. Entropy, 2018, 20 (4): 243.
- [45] 杨宏晖, 申昇, 姚晓辉. 用于水声目标特征学习与识别的混合正则化深度置信网络 [J]. 西北工业大学学报, 2017, 35 (2): 220-225.
- [46] Shen S, Yang H, Li J, et al. Auditory inspired convolutional neural networks for ship type classification with raw hydrophone data [J]. Entropy, 2018, 20 (12): 990.
- [47] Shen S, Yang H, Li J, et al. Auditory inspired convolutional neural networks for ship type classification with raw hydrophone data [J]. Entropy, 2018, 20 (12): 990.
- [48] Yang H, Li J, Shen S, et al. A Deep Convolutional Neural Network Inspired by Auditory Perception for Underwater Acoustic Target Recognition [J]. Sensors, 2019, 19 (5): 1104.

作者简介:



杨宏晖 (1971-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器学习、水声信号处理。



徐光辉 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水声信号处理、深度学习等。



李俊豪 (1994-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水下目标识别、深度学习理论与技术等。



申昇 (1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为声信号处理、深度学习、人工智能等。



姚晓辉 (1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为机器学习、模式识别、声信号处理等。

基于最小一致性的自治式水下机器人路径规划

姚鹏, 王琨

(中国海洋大学工程学院, 青岛 266100)

摘要: 鉴于现有路径规划方法难以兼顾路径质量与计算效率, 采用改进的最小一致性算法, 用于解决海洋环境下的自治式水下机器人 (AUV) 路径规划问题。首先, 在传统最小一致性算法的基础上, 引入相邻节点间的连接权重以计算各节点的控制输入, 迭代更新节点状态值并最终到达稳定状态。然后, 根据离散化的栅格空间与多层邻居栅格策略构建节点图, 并基于能量消耗与平滑度指标确定各节点状态值及连接权重, 实现AUV全局路径规划。此外, 由于AUV沿全局路径航行时可能遭遇突发威胁, 因此引入偏离度等指标重新定义节点图, 重规划AUV局部路径。最后, 仿真结果表明了本文方法的有效性。

关键词: 自治式水下机器人 (AUV); 路径规划; 最小一致性; 能量消耗; 偏离度

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2019) 04-0473-07

Path Planning of Autonomous Underwater Vehicle via Minimum Consensus

YAO Peng, WANG Kun

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: As the existing methods have a trade-off between path quality and calculation efficiency, this paper improves the minimum consensus method to solve the path planning problem of autonomous underwater vehicle (AUV) in ocean environment. First, the edge weight is introduced into the standard minimum consensus method to calculate the control inputs and update the states of nodes, and the system will finally converge to stability. Then, in order to achieve the global path planning, the graph is constructed via the discretized grids and multi-layer neighbors, where the node states and edge weights are determined on the basis of the index of energy consumption and smoothness. In the case that AUV encounters pop-up threats when travelling along the global path, the graph is redefined to generate the local path by introducing the path deviation. Finally the simulation results verify the feasibility of our method.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicle (AUV); Path Planning; Minimum Consensus; Energy Consumption; Path Deviation

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-07-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51909252); 山东省自然科学基金 (ZR2018BF016); 中央高校基本科研业务费专项 (201964013); 青岛市博士后应用研究项目

1 引言

作为一种具备自主导航与规划能力、可代替人类执行水下作业任务的无人运载平台, 自治式水下机器人 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 代表了水下航行器的未来发展方向, 已逐渐应用于军用或民用领域^[1-2]。现阶段, 随着水下应用领域与应用需求的不断扩大、任务场景与任务要求的日益复杂, 如何进一步提升AUV的自主航行能力与环境适应性, 成为亟待解决的关键问题。而结合近些年AUV领域的发展趋势可知, 路径规划技术是提升AUV自主性能的关键技术之一, 因此受到越来越多的关注^[3-4]。

AUV路径规划问题^[5]是指依据已知或实时探测的环境信息, 选定优化目标 (如路径长度最短、能量消耗最少、或航行时间最少等), 规划一条从起点到终点的全局路径, 且可躲避各类障碍物或威胁, 确保航行安全; 而当AUV沿全局路径航行时, 如果遭遇突发障碍或威胁, 需在上述基础上对局部路径进行重规划。现有的AUV路径规划方法主要借鉴了地面或空中机器人的相关方法, 并结合水下环境特点与AUV性能约束而不断深入。针对AUV路径规划问题, 国内外学者从不同角度进行了大量的研究, 现有方法主要包括: 路标图法如Voronoi图、通视图等^[5-6], 空间分解法如A*、D*、Dijkstra算法^[7-8], 随机规划法如快速扩展随机树 (Rapidly-exploring Random Tree, RRT)^[9-10], 数学规划法如模型预测控制、混合整数线性规划^[11-12], 基于势场的方法如人工势场法、流体扰动动态系统 (Interfered Fluid Dynamical System, IFDS)^[13-14], 导引法如几何导引法, 行为法如模糊选择左转/右转等机动行为, 以及上述各种方法的组合。

空间分解法可处理航行区域内的不规则障碍物, 使用灵活方便, 受到了国内外学者的广泛关注, 它主要包括空间建模与优化求解两步: 首先对规划空间进行处理, 如构建栅格地图, 从而将路径规划问题建模为典型的优化问题, 然后采用合适的优化搜索算法 (数学优化方法 (如动态规划

法等)、智能优化方法 (如遗传算法、粒子群优化等)、启发式方法 (如A*、D*) 等) 寻找一系列连通的单元组成最优路径^[7-8, 15-18]。例如, Zeng Z等^[16]首先将规划空间离散化为一系列包含控制点的壳状空间, 然后采用量子粒子群优化方法获得最优配置排序, 以规划AUV全局路径。朱大奇等^[17]引入栅格信度函数和环境信息来更新自组织神经网络中的获胜神经元权值, 以引导AUV在向目标航行的过程中安全避障, 并且克服了传统方法中的速度跳变缺陷。Ferguson D等^[18]在D*算法基础上引入线性插值, 获得连续平滑的AUV路径。然而, 现有的空间分解法仍具有路径不平滑、优化时间长等缺陷, 难以兼顾路径质量与计算效率, 需进一步从空间建模或优化求解等角度进行改进。

一致性理论是指系统中不同个体的状态值趋于一致或相等, 目前已广泛应用于多智能体编队等领域^[19]。文献 [20] 在传统最小一致性理论的基础上, 首次提出了一种引入连接权重的分布式最小一致性算法, 用于寻找离散化栅格空间内的最短路径, 该方法创新性地从控制的角度对路径规划问题进行了阐述, 经证明总能获得当前空间精度下的最优路径。但上述方法仅考虑了路径长度指标, 在复杂海洋环境下往往需结合洋流场等因素建立能量消耗或航行时间等指标, 该类指标更加合理, 上述方法仅采用了传统的栅格化空间策略, 路径平滑度较差, 甚至不满足机器人运动约束。因此本文在上述最小一致性算法的基础上, 引入多层邻居栅格策略, 并基于能量消耗与平滑度指标确定各节点状态值及连接权重, 构建节点图, 实现AUV全局路径规划。考虑到AUV沿全局路径航行时可能遭遇突发威胁, 还引入偏离度等指标重新定义节点图, 以重规划AUV局部路径。

2 AUV路径规划问题描述

通常来说, 依据已知的离线环境信息如海底地形障碍、洋流分布等, 需首先离线规划一条从

起点到终点、满足运动约束、可引导AUV安全躲避障碍物的全局最优路径。但当AUV沿该条路径航行时，其搭载的侧扫声呐或水下相机等可能会探测到一些突发威胁如海洋生物、未知地形等，此时需进行局部路径重规划，引导AUV偏离初始路径以避开突发威胁，并迅速回到初始路径。

AUV航行空间通常远远大于AUV自身尺寸，因此路径规划问题仅考虑AUV质点模型。本文将规划空间离散化为二维栅格地图，且每个栅格设定为自由状态($f=0$)或占据状态($f=1$)，用来表示该栅格是否为障碍物/威胁空间，各栅格中心点可表示AUV的备选路径点，路径规划问题可简化为选取一系列的栅格并依次连接组成路径。为降低计算复杂度，传统方法仅将AUV所在栅格的周围8个栅格(即第一层栅格， $L=1$)作为下一时刻可选位置，但会大大降低规划路径的质量如平滑度等。考虑到本文采用的最小一致性方法的计算量较少，本文进一步扩大了备选邻居栅格的层数($L \geq 2$)，即下一时刻AUV不仅可移动至周围8个栅格，还可移动至更远处的栅格，从而提高路径质量。如图1所示，采用四层邻居栅格策略，AUV可由位置 a 直接移动到位置 b ，而传统方法下AUV需经过 c 、 d 、 e 等点才能到达 d ，后者的规划质量明显低于前者。

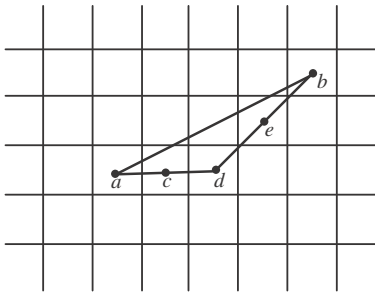


图1 栅格空间下的AUV运动示意图

Fig.1 Illustration of AUV motion in grid-based space

3 基于最小一致性的AUV路径规划

3.1 最小一致性算法

首先，定义 $G=(V,E)$ 为带权重的无向连接图， $V=\{1,2,\dots,N_V\}$ 表示各节点集合， $E=\{(i,j)\},i \in V,j \in V$

表示节点 i 和 j 连接， $a_{i,j}$ 表示连接 (i,j) 的权重，令 s_i 和 u_i 分别表示节点的状态值和控制输入，则节点状态方程可定义为 $\dot{s}_i=u_i$ 。传统的最小一致性算法是指系统内的各节点到达稳定状态 $s_i^*=\min_{i \in V} s_i(0)$ ，其中 $s_i(0)$ 表示节点的初始状态值，通常系统节点可分为Leader节点 V_1 和Follower节点 V_2 ，各节点的控制输入可定义为：

$$u_i = \begin{cases} 0, & i \in V_1 \\ -s_i + \min_{j \in N(i)} \{s_j\}, & i \in V_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中： $N(i)$ 表示节点 i 的邻居节点集合。通过更新各节点状态 $s_i=s_i+u_i$ ，系统最终到达稳定状态。

然后，可改进传统的最小一致性算法，使其能够适用于路径规划问题。AUV规划路径通常由一系列路径点组成，路径指标可定义为相邻路径点间的各路径段指标之和，因此可将所有的备选路径点作为图节点，当前路径点到终点的路径指标作为节点状态值，将相邻路径点间的路径段看作节点连接，路径段指标看作连接权重。各节点的控制输入将不仅取决于邻居节点状态值，还取决于本节点与邻居节点间的连接权重 $a_{i,j}$ ：

$$u_i = \begin{cases} 0, & i \in V_1 \\ -s_i + \min_{j \in N(i)} \{s_j + a_{i,j}\}, & i \in V_2 \end{cases} \quad (2)$$

系统最终将到达如下稳定状态^[20]：

$$s_i^* = \begin{cases} 0, & i \in V_1 \\ \min_{j \in N(i)} \{s_j^* + a_{i,j}\}, & i \in V_2 \end{cases} \quad (3)$$

3.2 基于能量最优的AUV全局路径规划

3.2.1 全局路径优化指标

众所周知，AUV携带能量有限，沿路径航行所需要的能量越少，路径性能越好。本文主要采用能量指标来衡量全局路径的优劣，为使得规划路径易于跟踪，提升路径可行性，引入平滑性指标。AUV航行时必须满足环境约束即躲避障碍物，在计算上述指标之前，需首先判断规划路径是否成功避障，如果不满足环境约束，则直接引入无穷大的惩罚项。

假设全局路径为 $X=\{P_1, \dots, P_m, \dots, P_M\}$ ，其中

P_1, P_M 分别表示AUV起点和终点, 则能量指标可定义如下^[21]:

$$E(X) = \sum_{m=2}^M \left(\frac{k |V_r|^3 |P_m - P_{m-1}|}{|V_a|} \right) \quad (4)$$

其中: k 表示AUV拖动常量, V_r 表示AUV相对于洋流的速度(相对速度), V_a 表示AUV相对于大地的速度(绝对速度), 定义 V_c 为洋流速度, 则三者的矢量关系为:

$$V_r = V_a - V_c \quad (5)$$

本文假设AUV绝对速率 $|V_a|$ 已知并保持恒定, AUV沿着规划路径段航行, 且洋流速度 V_c 已知, 由上式可计算得到 V_r , 进而计算能量指标 $E(X)$ 。

平滑性指标可用全局平滑度来表示:

$$S(X) = \sum_{m=2}^M \langle P_{m-1} P_m, P_m P_{m+1} \rangle \quad (6)$$

其中: $\langle P_{m-1} P_m, P_m P_{m+1} \rangle$ 表示相邻路径段之间的夹角。综上所述, 全局路径的指标为:

$$J(X) = \begin{cases} +\infty, & \exists f(P_m) = 1, m \in \{1, \dots, M\} \\ \lambda_1 E(X) + \lambda_2 S(X), & \text{其他情况} \end{cases} \quad (7)$$

其中: λ_1 和 λ_2 分别表示两类指标的权值。基于上述综合指标, AUV可在避开障碍物的前提下, 尽可能消耗较少的能量并平滑地从起点到达终点。

3.2.2 最小一致性算法用于AUV全局路径规划

为将最小一致性算法用于解决路径规划问题, 首先, 需将AUV航行空间构建为对应的节点图。假设规划空间已离散化为 $N \times N$ 个栅格, 从中可选取未被障碍物占据的栅格点作为图节点 V , 进而根据备选邻居栅格的层数来确定邻居节点, 构建节点图。将任意节点 i 的状态值 s_i 定义为按式(7)计算的从当前节点 i 到终点的路径指标值, 以终点 P_M 为Leader节点且其初始状态值为0, 以其他节点为Follower节点且初始状态值设置为大于0的任意值, 相邻节点间的连接权重 $a_{i,j}$ 可定义为:

$$a_{i,j} = \lambda_1 E(X_{i \rightarrow j}) + \lambda_2 S(X_{i \rightarrow j}) \quad (8)$$

其中: $X_{i \rightarrow j}$ 表示节点 i 和 j 之间的路径段, 能量代价和平滑性代价分别由式(4)和(6)计算获得。

然后, 各节点采用改进的最小一致性算法,

即利用式(2)迭代计算控制输入值 u_i 并更新状态值 $s_i = s_i + u_i$, 最终系统到达稳定状态即式(3)。需要注意的是, 不管节点初始状态取何值(但需大于0), 经过有限步迭代更新后系统总能到达稳定状态, 因此该算法在不同场景下均具有较好的适应性与较高的计算效率。在稳定状态下, 起点的稳定状态值 s_P^* 即表示全局路径的最优指标值, 因此从起点开始, 依次寻找父节点(即从邻居节点集合中选取具有最小 $s_j + a_{i,j}$ 的节点)直至到达终点, 即可获得全局最优路径。

3.3 基于最小偏差的AUV局部路径重规划

AUV沿着规划的全局路径航行时, 可能会遭遇突发障碍或威胁, 因此还需进行局部路径重规划, 使AUV偏离初始路径以避免突发威胁, 并迅速回到初始路径。在确保航行安全的前提下, 本文把AUV偏离初始路径的程度作为主要指标, 并考虑平滑性等指标。

假设全局最优路径为 $X = \{P_1, \dots, P_m, \dots, P_M\}$, AUV在航行到路径点 P_m 时探测到突发威胁, 此时应以 P_m 为新起点, 重规划后续局部路径 $Y = \{\bar{P}_1, \dots, \bar{P}_N\}$, 其中 $\bar{P}_1 = P_m$ 且 $\bar{P}_N = P_M$ 。局部路径 Y 偏离全局路径 X 的程度可量化为:

$$D(Y) = \sum_{n=2}^N \left(|\bar{P}_n - \bar{P}_{n-1}| \cdot (|P_{n^*} - \bar{P}_n| + |P_{(n-1)^*} - \bar{P}_{n-1}| + \varepsilon) \right) \quad (9)$$

其中: ε 为大于0的常数, 引导AUV向目标航行, P_{n^*} 、 $P_{(n-1)^*}$ 分别表示全局路径点集合中距离 \bar{P}_n 或 \bar{P}_{n-1} 最近的点:

$$P_{n^*} = \arg \min_{P_n \in X} |P_n - \bar{P}_n| \quad (10)$$

$$P_{(n-1)^*} = \arg \min_{P_{n-1} \in X} |P_{n-1} - \bar{P}_{n-1}| \quad (11)$$

平滑性指标定义为:

$$S(Y) = \sum_{n=2}^N \langle \bar{P}_{n-1} \bar{P}_n, \bar{P}_n \bar{P}_{n+1} \rangle \quad (12)$$

因此路径指标为:

$$J(Y) = \begin{cases} +\infty, & \exists f(\bar{P}_n) = 1, n \in \{1, \dots, N\} \\ \lambda_3 D(Y) + \lambda_4 S(Y), & \text{其他情况} \end{cases} \quad (13)$$

其中： λ_3 和 λ_4 分别表示两类指标的权值。基于上述指标，AUV可在避开障碍的前提下尽可能靠近初始路径航行。

然后，采用最小一致性算法获得最优局部路径。节点图的构造方式类似于章节3.2.2，但需将节点状态值 s_i 定义为按式(13)计算的从当前节点 i 到终点的指标值，而相邻节点间的连接权重 $a_{i,j}$ 可定义为：

$$a_{i,j} = \lambda_3 D(Y_{i \rightarrow j}) + \lambda_4 S(Y_{i \rightarrow j}) \quad (14)$$

其中： $Y_{i \rightarrow j}$ 表示节点 i 和 j 之间的路径段，偏离度代价和平滑性代价分别由式(9)和(12)计算获得。最终起点的稳定状态值即表示最优路径指标值，可通过迭代寻找父节点，最终获得局部路径。

此外，为减少系统迭代收敛到稳定状态所需的时间，可将全局路径点集合对应的节点的初始状态值均设置为0，并且当起点的状态值到达稳定时即可结束迭代过程。

4 仿真结果及分析

本文通过仿真实验来验证最小一致性算法用于解决路径规划问题的有效性。设定规划空间为 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ ，栅格数为 100×100 ，AUV绝对速率 $|V_a|=2\text{m/s}$ ，洋流场速率恒定 $|V_c|=0.5\text{m/s}$ ，邻居栅格层数 $L=3$ ，AUV起点为 $(0,0)$ ，终点为 $(1000,1000)$ ，AUV拖动常量 $k=1000\text{kg}$ 。

某复杂场景包含多个随机生成的任意形状的障碍物，洋流场为正弦分布且速率恒定，图2表示采用最小一致性算法(MC)以及IFDS、RRT的规划结果，三种方法均能获得安全避障的全局路径。RRT方法规划的路径不平滑，甚至难以跟踪，可行性大打折扣；IFDS方法规划的路径虽然较平滑，但路径走向未沿洋流方向，消耗能量较多；而MC方法规划的路径在一定程度上顺流航行，消耗能量较少，且通过引入多层邻居栅格，使得路径较平滑。经统计，基于MC、IFDS、RRT三种方法的能量消耗分别为4098kJ、5669kJ、5065kJ，说明MC方法可获得能量最优的全局路径。此外，考虑

到RRT等方法的随机特性，本文分别在50种场景下进行了仿真对比，经统计MC方法每次都能获得最优的全局路径，具有较好的环境适应性与鲁棒性。

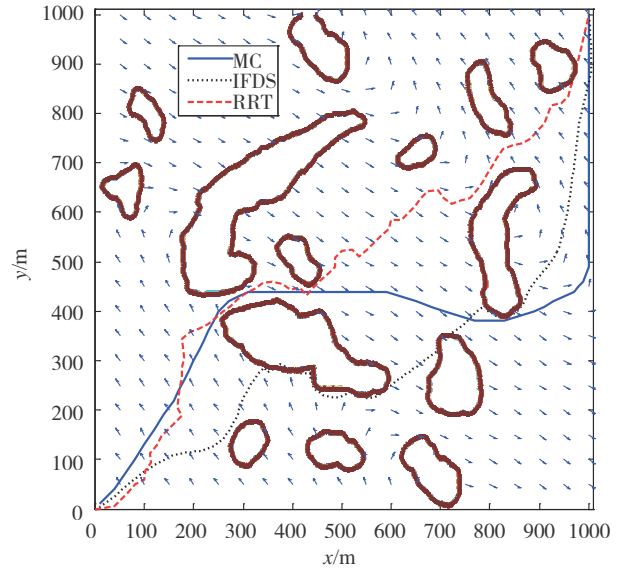


图2 采用不同方法的AUV路径规划结果

Fig.2 AUV path planning results by different methods

图3给出了选取不同的邻居栅格层数 ($L=1,2,3$)时的规划结果，其中 $L=1$ 表示传统的栅格法。显然，通过增加邻居栅格层数，可以大大提高规划路径的平滑度，减少AUV能量消耗(分别为4389kJ、4150kJ、4098kJ)。但随着栅格

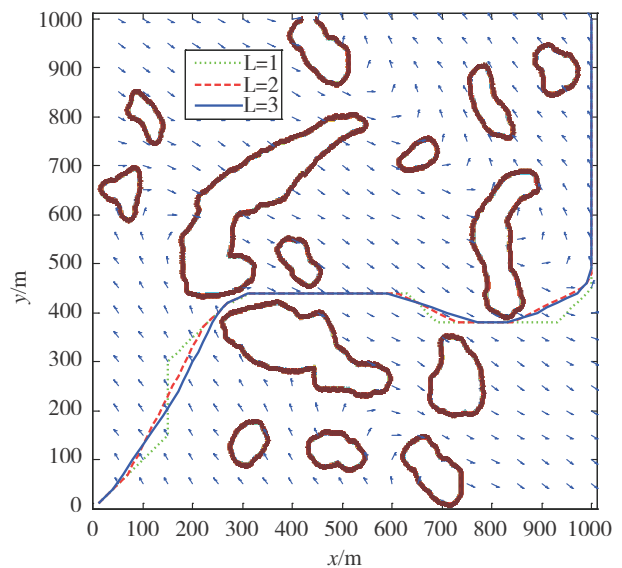


图3 采用不同L的AUV路径规划结果

Fig.3 AUV path planning results with different L

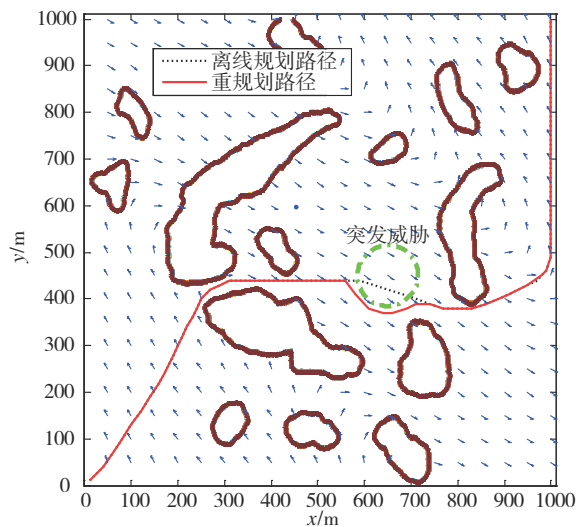


图4 基于最小一致性的 AUV 路径重规划

Fig.4 AUV path re-planning by minimum consensus

层数增多, 算法计算量将大大增加, 而规划性能的提升有限, 因此需选取兼顾计算量与优化性能的层数(本文选取 $L=3$)。

在上述已知场景基础上, 假设还存在一个未知的突发圆形威胁, 如图4所示。当AUV沿初始路径航行到(500,440)时才探测到该威胁, 此时再次采取MC方法进行局部路径重规划。仿真结果表明, AUV会偏离初始路径即离线规划路径, 以躲避该突发威胁, 在避开威胁后AUV迅速回到初始路径, 重规划路径的偏差程度较小、平滑度较好。

5 结论

本文针对海洋环境下的AUV路径规划问题, 采取改进的最小一致性算法, 分别用于规划基于能量最优的全局路径以及基于最小偏差的局部路径, 并通过仿真验证了本文方法在全局能量消耗、路径平滑度、局部偏离程度等方面的优势。主要结论如下:

(1)改进传统的最小一致性算法, 使得各节点的控制输入不仅取决于邻居节点的状态值, 还取决于相邻节点间的连接权重。

(2)根据离散化的栅格空间构建节点图, 基于能量消耗与平滑度指标等确定各节点的状态值及

节点间的连接权重, 进而将最小一致性理论用于求解AUV全局路径规划问题。

(3)基于局部路径偏离度与平滑度指标等, 重新定义各节点的状态值及节点间的连接权重, 利用最小一致性算法进行局部路径重规划。

参考文献

- [1] 徐玉如, 李彭超. 水下机器人发展趋势 [J]. 自然杂志, 2011, 33 (3): 125-132.
- [2] Wynn R B, Huvenne V A I, Le Bas T P, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs): their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience [J]. Marine Geology, 2014, 352: 451-468.
- [3] 姚鹏, 解则晓. 基于修正导航向量场的AUV自主避障方法 [J]. 自动化学报, 2019.
- [4] Zeng Z, Lian L, Sammut K, et al. A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles [J]. Ocean Engineering, 2015, 110: 303-313.
- [5] Garrido S, Moreno L, Blanco D, et al. Path planning for mobile robot navigation using Voronoi diagram and fast marching [J]. International Journal of Robotics and Automation, 2011, 2 (1): 42-64.
- [6] Sgorbissa A, Zaccaria R. Planning and obstacle avoidance in mobile robotics [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60 (4): 628-638.
- [7] Pereira A A, Binney J, Hollinger G A, et al. Risk-aware path planning for autonomous underwater vehicles using predictive ocean models [J]. Journal of Field Robotics, 2013, 30 (5): 741-762.
- [8] 严浙平, 邓超, 赵玉飞, 等. 无人水下航行器近海底空间路径规划方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014 (3): 307-312.
- [9] Kuwata Y, Teo J, Fiore G, et al. Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17 (5): 1105-1118.
- [10] 康亮, 赵春霞, 郭剑辉. 基于模糊滚动RRT算法的移动机器人路径规划 [J]. 南京理工大学学报, 2010, 34 (5): 642-648.
- [11] Liu M, Xu B, Peng X. Cooperative path planning for multi-

- AUV in time-varying ocean flows [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27 (3): 612-618.
- [12] Yilmaz N K, Evangelinos C, Lermusiaux P F J, et al. Path planning of autonomous underwater vehicles for adaptive sampling using mixed integer linear programming [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33 (4): 522-537.
- [13] Braginsky B, Guterman H. Obstacle avoidance approaches for autonomous underwater vehicle: simulation and experimental results [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41 (4): 882-892.
- [14] Yao P, Qi S B. Obstacle-avoiding path planning for multiple autonomous underwater vehicles with simultaneous arrival [J]. Science China Technological Sciences, 2019, 62 (1): 121-132.
- [15] Soullignac M. Feasible and optimal path planning in strong current fields [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 27 (1): 89-98.
- [16] Zeng Z, Lammas A, Sammut K, et al. Shell space decomposition based path planning for AUVs operating in a variable environment [J]. Ocean Engineering, 2014, 91: 181-195.
- [17] 朱大奇, 曹翔. 多个水下机器人动态任务分配和路径规划的信度自组织算法 [J]. 控制理论与应用, 2015, 6: 762-769.
- [18] Ferguson D, Stentz A. Using interpolation to improve path planning: the field D* algorithm [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23 (2): 79-101.
- [19] 陈晔, 张鑫, 金鑫, 等. 一种多智能体协同信息一致性算法 [J]. 航空学报, 2017, 12: 209-221.
- [20] Zhang Y, Li S. Distributed biased min-Consensus with applications to shortest path planning [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62 (10): 5429-5436.
- [21] Garau B, Alvarez A, Oliver G. AUV navigation through turbulent ocean environments supported by onboard H-ADCP [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2006.

作者简介:



姚鹏(1989-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为无人系统路径规划、自主控制与多机协同。



王琨(1983-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为智能优化方法、情景建模与推演。

深海AUV有动力螺旋下潜技术及试验研究

冯朝, 肖婷

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 宜昌 443000)

摘要: 针对深海无人自主水下航行器(AUV)大深度下潜过程中位置姿态可控性差问题, 开展了有动力螺旋下潜技术研究及试验验证。考虑AUV总体方案设计需求, 建立了包括舱体系统、动力系统、通信系统、导航系统、探测系统、控制系统和保障系统等多学科的AUV样机, 通过湖上试验验证功能、流程的可靠性, 针对湖、海水密度的差异、AUV浮力变化、海流以及水下不可预见的风险, 制定应急策略, 并在海上进行大深度螺旋下潜试验, 实现了AUV下潜过程中位置姿态高精度控制。

关键词: 无人自主水下航行器; 有动力螺旋下潜; 自适应控制; 应急策略; 高精度控制

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2019)04-0480-05

Technology and Experimental Study of Powered and Spiral Diving Test on Deepsea AUV

FENG Zhao, XIAO Ting

(The 710 Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Yichang 443000, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor position and attitude control ability of deepsea autonomous underwater vehicle, during deep submergence, the dynamic helical submergence technology is studied and tested. Considering the overall design requirements of AUV, a multi-disciplinary AUV prototype including cabin system, power system, communication system, navigation system, detection system, control system and safeguard system is established. The reliability of functions and processes is verified by lake tests, aiming at the differences of lake and seawater density, AUV buoyancy variation, ocean current and unforeseeable risks, an emergency strategy is formulated and a large-deep helical submergence test is carried out at sea in order to realize the high precision control of AUV position and attitude during submergence.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicle; Powered and Spiral Diving; Adaptive Control; Emergence Strategy; High Precision Control

1 引言

海洋作为人类的蓝色国土, 关系着人类的生存和发展。伴随着人类认识海洋、开发利用海洋资源和保护海洋的进程, 水下机器人这一高新技术进一步发展并完善, 无人自主水下航行器(Autonomous

Underwater Vehicle, AUV)代表着未来水下机器人研究的方向, 已向着更深、更远、功能更强大的方向发展^[1-2]。近年来, 随着AUV技术的不断进步, 国际上深海AUV种类也逐渐增加, 主要有挪威Kongsberg公司的REMUS6000^[3]、美国Hydroid公司的Bluefin 21^[4], 英国南安普顿国家海洋中心研制的

Autosub 6000^[5]等，其在海上作业中发挥了重要作用。其中，REMUS6000和Bluefin 21是世界上比较成熟的商业AUV。中国从20世纪90年代开始深海AUV的研制工作，主要有沈阳自动化研究所的潜龙系列和探索系列深海AUV。

由于深海环境极为复杂，受潜水器自身的非线性、强耦合、有限载荷等影响，深海潜水器研发与应用极具挑战性。为了实现深海潜水器水下作业的可靠有效应用，需要突破深海潜水器的诸多关键技术，如水下环境感知与地图构建技术、水下路径规划与安全避障技术、水声通信与导航定位技术等^[6]。

深海AUV作业的首要环节为下潜，能否到达指定的深度作业成为AUV突破关键技术的首要因素。基于能源方面考虑，国内外大部分AUV选择无动力下潜^[7]。综合AUV的载体配置及水下密度的变化，下潜过程中的姿态、深度的高精度控制，以及受到干扰时的自适应过程及对状态的监测和应急的处理等^[8]，本文基于工程样机的基础，提出并实现深海AUV有动力螺旋下潜，并在湖上和海上开展试验，验证深海AUV有动力螺旋下潜技术的可行性。

2 总体设计

2.1 系统组成

AUV由舱体系统、动力系统、通信系统、导航系统、探测系统、控制系统和保障系统组成，如图1所示。

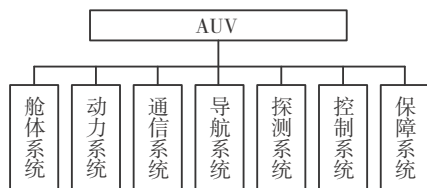


图1 AUV系统组成图

Fig.1 AUV system composition diagram

其中，舱体系统为AUV的机械结构部分，为设备及组部件的布局 and 接口进行统筹规划，动力系统为AUV提供能源与动力，通信系统负责AUV与母船的通信，导航系统负责AUV的导航及定位，

探测系统为AUV提供声光学设备进行水下作业，控制系统负责AUV的状态检测、航行控制和故障应急处理。

在总体设计过程中，通过设计AUV外形，考虑能源、控制及续航力等因素对推进器和舵机进行合理的布局，使AUV的转动惯量和质浮心距处在一个合适的范围。在满足总体技术指标的要求下，尽可能获得最优的总体性能参数，从而提高AUV的稳定性和机动性。综合各因素，采用主推+垂推+水平舵、垂直舵配置，主推提供前行动力，垂推实现快速上浮和辅助下潜，水平舵控制AUV的上浮与下潜，垂直舵控制AUV的航向。AUV总体外形如图2所示。其中，AUV主体部分直径880mm，长7.5m，质量2.5t。



图2 AUV总体外型图

Fig.2 Outline drawing of AUV

2.2 电气设计

AUV深海探测需实时的进行大量数据通信，且在正常航行过程中，核心控制器需实时监测各设备的状态以及对设备进行相应的动作指令，因此，采用控制系统为AUV的控制中心，通过总线接口与各设备进行连接，负责完成AUV的状态监测、运动控制和应急处理等。本文采用网络化系统结构，将所有设备统一到以太网和CAN通信，数据交互量大的设备进行以太网通信，数据交互量较小的设备采用CAN通信，从而实现即时组网通信，灵活的实现设备间数据交互，且方便调试，简化连接，减少了水密线缆及连接器的使用，从而提高了系统可靠性。

3 控制策略及控制方法

通常AUV的基本控制方法为PID控制、滑模控制、自适应控制、神经网络控制和模糊控制

等^[9]。PID控制作为经典的控制策略，对AUV模型的控制精度较高，且在建模过程中，由于AUV高度的非线性和时变的水动力性能、附加质量和运动惯性较大等，模型的建立与实物之间存在一些差异^[10]。结合工程应用及可靠性等多因素的考虑，本文采用传统的PID控制，采用计算机流体力学(Computer Fluid Dynamics, CFD)方法进行流体动力建模，并对控制算法进行仿真，得到初始PID参数，进一步在湖上验证，微调参数，使AUV力学性能变化和所处的环境发生变化时，具有一定的自调节和自适应的鲁棒能力。PID控制图如图3所示。

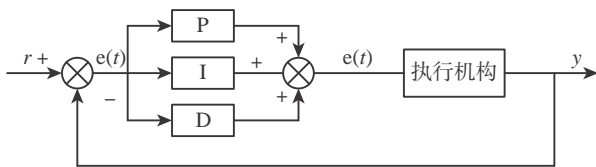


图3 PID控制图

Fig.3 PID control diagram

下潜过程中，AUV由于自身的初始正浮力、海水密度、浮力材料吸水率等因素会导致AUV的浮力变化，同时考虑海流干扰、控制精度、突发情况应急处置以及纯惯性条件下导航误差偏差大等因素的影响，本文采用有动力螺旋下潜控制策略，一方面实现AUV深度区间的自适应控制，另一方面提升AUV的精确定位及应急处置能力。

通常将AUV的初始状态定为：初始正浮力约5~10kg，AUV静态姿态角： $-2^\circ < \text{纵倾角} < 2^\circ$ ， $-2^\circ < \text{横滚角} < 2^\circ$ ，下潜过程中AUV保持固定的纵倾角进行螺旋下潜，同时结合垂直舵角，使AUV在水下进行螺旋下潜。

4 湖上试验

4.1 湖上有动力螺旋试验

AUV完成设计和加工后，首先需验证下潜方案的可行性，其次对AUV的控制流程及功能进行验证，以确保AUV的安全。通常在海上试验之前，先进行湖上验证。

试验地点为清江水布垭试验场地，结合试验水深和水底地形的条件，选取一段500m×2000m的矩形试验区域，平均水深约120m。AUV在岸上进行上电，对初始状态进行确认，纵倾角 1.2° ，横倾角 0.8° ，完成相应的功能检查，将任务文件下达至AUV，主推转速设定为300rpm，垂直舵角 25° ，保持 -9° 纵倾角航行至70m处，到达指定深度后定深航行至80m处，在80m处开展水下自主航行任务。任务确认无误后，AUV布放入水，启动任务进行下潜试验，试验曲线如图4~6所示。

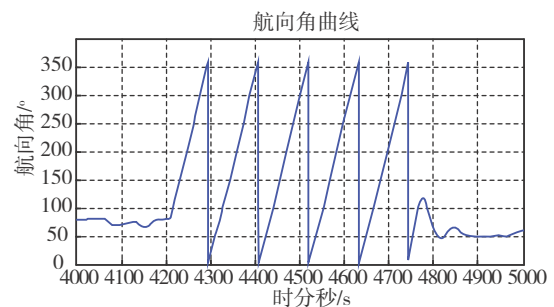


图4 航向角曲线

Fig.4 Course angle curve

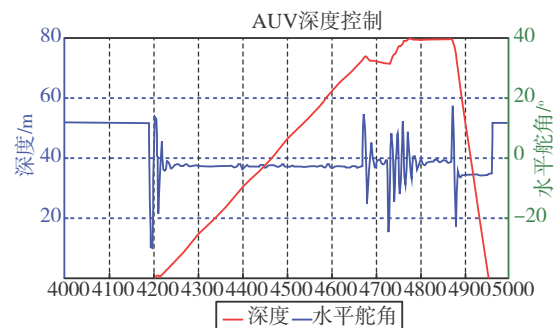


图5 深度和水平舵角曲线

Fig.5 Depth and horizontal rudder curve

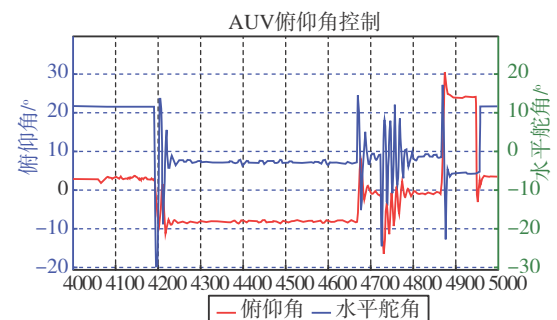


图6 纵倾角和水平舵角曲线

Fig.6 Pitch and horizontal rudder curve

由航向角和纵倾角曲线可知，AUV在整个过程中保持 -9° 的纵倾角螺旋下潜5圈，转弯半径约为15m，时间约450s，垂向速度约0.18m/s。

为了满足海上试验大深度快速下潜的要求，对主推和纵倾角设定不同的值，对AUV进行多次试验验证，数据如表1所示。

表1 试验数据
Table 1 Test data

主推 /rpm	纵倾角 / $^\circ$	下潜深度 /m	时间 /s	垂向速度 / $m \cdot s^{-1}$
300	20	80	208	0.385
350	20	80	180	0.44
350	30	80	122	0.682
400	30	80	107	0.75
450	30	80	95	0.85
500	30	80	86	0.97

分析试验数据，初步推断主推500rpm的转速，纵倾角 30° 下潜时，海上试验螺旋下潜3000m，大约需要3240s。

4.2 数据分析及应急处置

结合海洋环境的复杂性，AUV下潜过程中受海流和其他多因素的影响^[11]，并针对海上与湖上的差异进行分析和研究，对可能出现的异常情况以及不可预见的风险加以预测，以确保海上下潜试验的安全。本文从以下五点进行分析：

(1) AUV初始浮力与姿态。根据CTD测得试验海域水面的海水密度 $1.021g/cm^3$ ，需对AUV进行配重，重新调整正浮力，以确保AUV初始状态：正浮力5kg， $-2^\circ < \text{纵倾角} < 2^\circ$ ， $-2^\circ < \text{横滚角} < 2^\circ$ 。

(2) 浮力材料吸水率。根据浮力材料参数：密度 $0.56g/cm^3$ ，耐压不小于70MPa，吸水率小于2%，同时结合AUV浮力材料质量800kg，可计算得到AUV浮力材料最大吸水量为1.6kg。由于浮力材料吸水率受压力影响较大，而AUV下潜深度约3500m，因此可推断浮力材料吸水量小于1.6kg。

(3) 密度变化。下潜过程中海水密度未知，经网上查阅资料可知，深海3000m范围密度变化区间为 $1.02 \sim 1.04g/cm^3$ ，可推算AUV正浮力约增加25kg。

(4) 海流的干扰。AUV在水下航行时，受到海流等因素的影响，会使AUV的位置和姿态发生变化。

(5) 不可预见性风险。在海上下潜过程中，由于环境的复杂或者AUV自身故障导致的不可预见性风险。

针对浮力材料吸水率和密度变化所引起的浮力变化，将AUV正浮力调整为10kg、15kg、20kg、25kg和30kg，在湖上进行有动力下潜及水下航行试验，验证不同正浮力下AUV下潜和航行的自主可控。

对于海流所导致的姿态影响，由于AUV的控制具有一定的鲁棒性，根据干扰的情况从而自适应控制，使AUV的下潜姿态及位置能达到一个相对可控的值^[12]。

对于不可预见性风险，由于试验过程无法对其进行判断，因此在原有应急策略基础上加上深度超限，AUV进水，长时间未结束下潜过程，长时间处于一个深度区域等应急，同时结合前视声纳的自主避碰，使AUV能够以安全精确可控的状态达到指定深度及位置。

5 海上试验

湖上试验验证完成之后，在三亚东南岸约452km处，位置坐标为(113.7692E, 17.6344N)，(114.5932E, 17.6344N)，(114.5932E, 17.1587N)，(113.7692E, 17.1587N)所围成的矩形区域，水深为3400~3800m进行深海有动力螺旋下潜试验。

AUV在岸上进行上电，对初始状态进行确认，完成相应的功能检查后，将任务文件下达至AUV，布放入水后，启动任务进行有动力螺旋下潜试验。下潜曲线如图7~9所示。

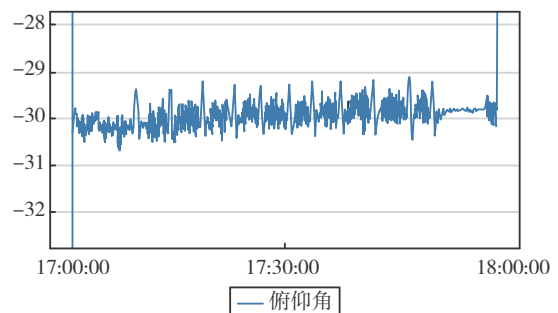


图7 俯仰角曲线

Fig.7 Pitch curve

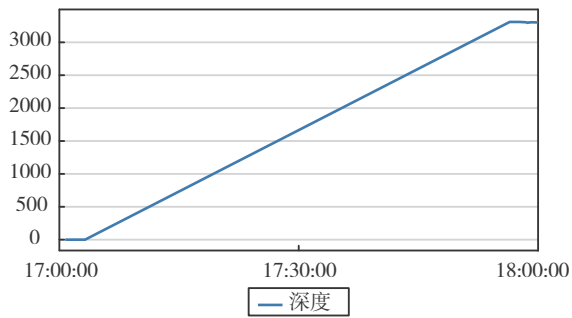


图8 深度曲线

Fig.8 Depth curve

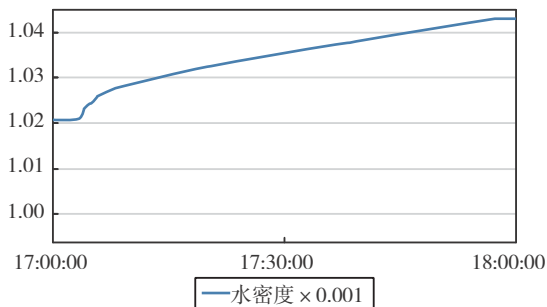


图9 密度曲线

Fig.9 Density curve

由深度和俯仰角曲线可知：AUV下潜深度约3300m，以纵倾角 30° 有动力螺旋下潜，纵倾角变化范围为 $-29^\circ\sim 31^\circ$ ，整个下潜过程中AUV的姿态可控。整个下潜过程约56min，垂向速度约0.98m/s，与湖上试验数据相吻合。通过密度曲线可以得出密度变化范围为 $1.021\sim 1.043\text{g/cm}^3$ 。整个过程验证了深海有动力螺旋下潜技术的可行性。

6 结论

本文从AUV总体设计入手，针对布局 and 系统配置，提出相应控制策略及方法，在湖上进行试验验证，试验结果说明不同主推转速和纵倾角下的垂向速度可控，通过湖上数据分析和对比湖海环境的差异性，制定下潜过程应急策略，实现了大深度下AUV有动力螺旋下潜，解决了下潜过程中AUV姿态不可控问题，对其他类型的AUV深海试验具有指导意义。

参考文献

- [1] 李一平. 水下机器人—过去、现在和未来 [J]. 自动化博览, 2002 (3): 56–58.
- [2] 蒋新松, 封锡盛, 王棣堂. 水下机器人 [M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2000: 294–295.
- [3] Purcell M, Gallo D, Sherrell A, et al. Use of REMUS 6000 AUVs in the search for the Air France Flight 447 [C]. Oceans, 2011.
- [4] Bondaryk J E. Bluefin autonomous underwater vehicles: Programs, systems and acoustic issues [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2001, 115(5): 2615–2615.
- [5] Mcphail S, Furlong M, Huvenne V, et al. Autosub6000: its first deepwater trials and science missions [J]. Underwater Technology, 2009, 28: 91–98.
- [6] 朱大奇, 胡震. 深海潜水器研究现状与展望 [J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2018, 41 (3): 205–216.
- [7] Liu Z Y, Xu Q N, Liu T, et al. Analytical formulation of AUV unpowered diving steady motion [C]. International Symposium on Underwater Technology, 2000.
- [8] 李硕, 燕奎臣, 李一平, 等. 6000米AUV深海试验研究 [J]. 海洋工程, 2007, 4 (5): 585–589.
- [9] 赵笑笑. 基于模糊理论与常规PID控制的模糊PID控制方法研究 [J]. 山东电力技术, 2009 (6): 54–63.
- [10] 王奎民, 秦政, 边信黔. 水下机器人自主控制系统的设计与实现 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (14): 3685–3701.
- [11] 徐玉如, 姚耀中. 考虑海流影响的水下机器人全局路径规划研究 [J]. 中国造船, 2008, 49 (4): 109–114.
- [12] 李凯强. 小型自主水下航行器系统设计与运动分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

作者简介:



冯朝(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为AUV的运动控制与决策。



肖婷(1988-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为AUV的电气总体设计。

2018年水下无人系统发展综述

王雅琳¹, 郭佳², 刘都群¹

(1. 北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074; 2. 航空工业信息技术中心, 北京 100028)

摘要: 水下无人系统是指可在水下完成水文探测、搜救、情报、监视和侦察、反水雷战、反潜战、反水面战以及电子战等多种任务的各类水下航行器、水下无人作战平台及其相关控制设备和网络等。首先研究了世界各主要国家和地区2018年发布的水下无人系统相关战略规划, 然后系统整理了相关装备发展情况, 最后对影响水下无人系统作战效能的关键技术(能源动力技术、水下通信技术、水下导航技术、水下探测技术、无人潜航器毁伤技术)进行了梳理总结。综述表明世界各主要军事强国均高度重视水下无人系统发展, 从战略制定、装备研制和技术研究等维度全面推进水下无人系统发展, 值得持续关注研究。

关键词: 水下无人系统; 无人潜航器; 核动力无人潜航器; 先进海上技术演习; 水下通信; 水下导航

中图分类号: U674.7+03.53; TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2019)04-0485-06

Summary of the Development of Unmanned Undersea Systems in 2018

WANG Yalin¹, GUO Jia², LIU Duqun¹

(1. Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute, Beijing 100074, China;

2. AVIC Tigital Corporation LTD., Beijing 100028, China)

Abstract: Unmanned undersea systems refers to various undersea vehicles, unmanned undersea combat platforms and related control equipment and networks that can complete hydrologic detection, search and rescue, intelligence, surveillance and reconnaissance, anti-mine warfare, anti-submarine warfare, anti-surface warfare, electronic warfare and other tasks. Firstly, the strategic plannings of unmanned undersea systems released by major countries and regions in the world in 2018 is studied. Secondly, the development of related equipment was systematically compiled. Lastly, the key technical conditions affecting the operational effectiveness of unmanned undersea systems are summarized. It shows that all major military powers in the world attach great importance to the development of unmanned undersea systems, comprehensively promote the development of unmanned undersea systems from the perspectives of strategy formulation, equipment development and technological progress which deserves continuous attention.

Keywords: Unmanned Undersea System; Unmanned Undersea Vehicle; Nuclear Powered Unmanned Undersea Vehicle; Advanced Naval Technology Exercise; Undesea Communication; Undersea Navigation

1 引言

目前, 水下无人系统(Unmanned Undersea System, UUS)被美国、俄罗斯、欧洲和日本等国家和地区作为重点发展的一类海洋作战武器, 可执行水文探测、搜救、情报、监视和侦察、反水雷战、反潜战、反水面战以及电子战等任务, 是各军事强国抢占水下作战域和海洋不对称作战优

势的主要抓手。2018年, 以美国和俄罗斯为首的军事强国持续推进UUS发展, 从战略、装备和技术等维度加大投入, 全面提升UUS作战能力。

2 战略制定

2.1 战略及规划文件

2018年8月, 美国国防部正式发布《无人系

统综合路线图(2017—2042)》^[1],这是美国自2001年以来发布的第8版无人系统综合路线图,旨在指导军用无人机、无人潜航器、无人水面艇、无人地面车辆等无人系统的全面发展。文件确定了无人系统未来发展的四个关键技术主题和驱动力,即互操作性、自主性、网络安全以及人机协同。同时,文件还指出,保障政策、技术要求和采办环境必须与时俱进,以跟上无人系统技术与能力的快速进步;为了确保美国的军事优势,重点应放在无人技术的发展、可用性和部署应用上^[2]。

2018年3月,美国海军完成了《海军部无人系统战略路线图》,并于5月发布了执行摘要^[3]。执行摘要中指出,美国海军和海军陆战队将寻求实现无缝集成的有人/无人未来部队,海军部将把无人系统能力集成到全域作战力量中。执行摘要还概述了无人系统运用概念和企业级体系目标等内容。

2018年2月,俄罗斯总统普京签署批准了《2018—2027年国家武备计划》。俄罗斯国家武器装备计划是详细计划俄各种军事武器装备建设发展的顶层规划文件,是基于对国家安全可能受到的威胁的分析和评估制定的。目前该计划内容并未公开公布,但从俄高层和国防部领导层多次讲话可知,俄罗斯2018年最新披露的波塞冬核动力无人潜航器已纳入该计划^[4]。

2018年12月,日本公布了新的《防卫计划大纲》和基于其制定的未来五年内日本国防力量调整计划——《中期防卫力量整備计划》。计划指出,为了建立完善的指挥控制和情报通信能力需要装备UUS,并开发相关技术。据日本共同社报道,日本将在该计划下研制大型无人潜航器以持续监控偏远岛屿^[5]。

2.2 国际合作

2018年4月,由欧盟15个国家共同开展的海洋2020(OCEAN 2020)项目启动会在欧洲防务局举行^[6]。该项目的主要任务是支持海上监视和拦截任务,重点把包括UUS在内的各类无人系统整

合到舰队中。OCEAN 2020项目是目前首个跨欧洲军事研究项目,计划于2019年和2020年分别进行两次演示演习。

2018年10月,美国、英国等13个北约成员国签署了合作意向,将在水面无人系统和UUS的开发和部署方面进行更密切的合作,同时共同开发水雷和反潜技术以应对俄罗斯潜艇威胁^[7]。相关官员表示,为了监测关键水域情况,一定数量的水下无人集群和固定式UUS都十分重要;此外,需要解决水下无人系统的通信、导航和使用时长问题。北约盟国签署的协议将推动相关UUS和技术不断发展。

3 装备研制

3.1 常规无人潜航器

2018年10月,通用动力任务系统公司推出金枪鱼-9新型无人潜航器,可用于近海勘探、水文测绘、快速环境评估、反水雷、港口安全和侦察等任务。金枪鱼-9具有数据分辨率高、导航精度高等特点,能够携带多种标准载荷,可从码头、刚性充气艇等多种平台布放回收,最大航速可达11km/h,能在水中工作8h。通用动力任务系统公司已对金枪鱼-9系列无人潜航器进行了重新设计,提升改进了产品设计、质量、模块化水平、可靠性等,使其效费比更高并能执行更多水下任务。



图1 金枪鱼-9无人潜航器

Fig.1 Unmanned undersea vehicle Bluefin-9

2018年6月,美国海军刀鱼无人潜航器成功

完成海上验收试验，标志着项目进入发展测试和作战评估阶段。刀鱼无人潜航器主要用于探测海底埋藏的水雷，是濒海战斗舰猎雷任务包的重要组成部分。刀鱼无人潜航器采用声呐内置方式，测试试验证明其可在高杂波环境中检测、分类并识别水雷。同时，第一批美海军舰队操作员也完成了首次刀鱼系统训练，以便在后续测试阶段中操作刀鱼系统。

超大型无人潜航器(XLUUV)是一种采用模块化和开放式架构的水下潜航器，可执行反水雷、反潜、反舰和电子战等任务。美国海军在2019财年预算中为XLUUV项目申请了8700万美元经费，国会又为其追加了2500万美元预算，使其2019财年总预算达到了1.12亿美元。2018年12月，XLUUV项目第二阶段原型设计结束，美国海军计划在2019年初授出下一阶段合同，要求承包商在2020—2022年间交付5艘原型机。

2018年2月，法国ECA集团发布了A18-M中型反水雷无人潜航器，能够搭载如合成孔径声呐等高性能声呐载荷，可在水深300m处进行水雷检测和分类。A18-M无人潜航器使用嵌入式处理技术，可利用无人水面艇或无人机充当网关，将实时声呐图像数据通过通信网络传回指挥中心。



图2 A18-M无人潜航器

Fig.2 Unmanned undersea vehicle A18-M

2018年12月，挪威康斯伯格公司推出了新一代休金SUPERIOR水下探测无人潜航器，该潜航器配备了新型合成孔径声呐和侧扫声呐等探测设备，并采用了先进定位与数据传输技术，还在没有改变外形和尺寸的情况下增加了30%的载荷容积，使其能够携带更多载荷或能源。



图3 休金SUPERIOR无人潜航器

Fig.3 Unmanned undersea vehicle HUGIN SUPERIOR

3.2 核动力无人潜航器

2018年3月，俄罗斯总统普京向联邦议会发表年度国情咨文，曝光了六型最新尖端武器，其中包括一型核动力无人潜航器——波塞冬。该无人潜航器直径1.6m，长24m，最高航速180km/h，最大潜深1000m，可携带核弹头。由于携带核反应堆，波塞冬尺寸较传统鱼雷和无人潜航器大幅增加，不能布放于潜艇鱼雷发射管，因此运输和发射方式设计为潜艇背部驮载。



图4 波塞冬无人潜航器

Fig.4 Unmanned undersea vehicle Poseidon

波塞冬无人潜航器已列入俄罗斯《2018—2027年国家武备计划》，将在该计划结束(2027年)前装备部队。2018年7月，俄罗斯首次公布波塞冬无人潜航器相关视频，并表示已在测试范围内对其展开试验。

由于俄罗斯面临西方经济制裁等压力，没有足够的经济实力与美国开展类似“冷战”时期的大规模军备竞赛；加之近年来，美国在水下无人作战领域发展迅猛。这都加强了俄罗斯加大力度进行军事现代化建设的决心，俄罗斯已成立UUS作战编队并参与实战应用。因此，俄罗斯选择发展波塞冬无人潜航器等最新尖端武器，以抢占先机，实现“弯道超车”，弥补其在常规UUS方面的

发展劣势。

4 技术发展

4.1 先进技术演习

2018年8月，美国海军举办了先进海上技术演习(ANTX)，该演习由美国海军水下作战中心举办，旨在展示能在未来应用的先进UUS及其相关技术，自2015年以来每年举办一次。2018年ANTX的主题为“人机交互”，重点展示了多个无人平台跨域协同进行反水雷任务的能力^[8]。

诺斯罗普·格鲁曼公司成功演示了无人潜航器、无人水面艇和无人机间的端到端多域连接。演示中，濒海战斗舰在一片拒止水域布放了各无人系统，波浪滑翔者环境动力型无人潜航器离开水域，直升机在空中待命，并由IVER3 580无人潜航器完成对目标的初步侦察。MQ-8火力侦察兵无人机由直升机布放，作为水面舰船和 underwater 平台间的通信中继和态势感知平台，用于搜寻和传递水雷位置的信息；MQ-8还在两侧加装了4个A型声纳浮标发射管并投放了声纳浮标。所有无人系统均使用先进任务管理控制系统(AMMCS)构建反水雷任务网络，提高了有人/无人协作效率。

通用动力任务系统公司演示验证了无人潜航器、潜艇和陆基任务作战中心之间的跨域、多级实时指挥控制和通信能力。演示中，一座陆基战区规划指挥中心和—个潜艇战术级指挥中心利用模拟无人机、卫星和真实的陆基和海上通信节点，通过无线通信和水声通信实时向金枪鱼-21无人潜航器以及海军水下作战中心拥有的无人潜航器分派任务。该演示验证为水下对抗环境中多个平台间的通信难题提供了技术解决方案，涵盖范围从高级作战规划到战术级任务。

泰莱达公司团队演示了利用跨域无人系统进行反水雷作战的能力。演习开始时，由Power Docks公司的蓝岛无人微电网平台为所有无人系统模拟提供电力。泰莱达公司的Z-Boat 1800 RP无人水面艇使用测深设备和激光雷达搜索一片盆地

水域。普朗克航天系统公司的Shearwater无人机为Z-Boat无人水面艇侦察水面，用于防止碰撞和规避威胁。泰莱达公司的Gavia无人潜航器侧扫水域，进行搜索、分类、测绘和自主目标识别，并将捕捉到疑似水雷目标的坐标发送至海洋先进研究公司的WAM-V无人水面艇。该艇随即移动至坐标位置，并释放装备水雷处理系统的泰莱达SeaBotix vLBV300遥控潜航器。最后，使用绿海系统公司的惯导和受监控的自主导航系统，帮助遥控潜航器到达目标位置。该演示重点展示了无人系统的任务规划、导航、目标识别等技术，还实现了无人系统自主实时数据处理和目标识别。



图5 演习中泰莱达公司团队的水面无人系统

Fig.5 The surface unmanned system of Teledyne Marine in the ANTX

4.2 水下能源动力技术

在2018年4月美国海军举办的海空天博览会上，特利丹能源公司展示了其研制的海底无人潜航器充电站。该充电站采用燃料电池系统，可通过船舶或直升机部署，储电量200kWh，工作深度为3000m。

2018年4月，加拿大授予Cellula机器人公司燃料电池研发合同，以提高无人潜航器水下续航能力。该项目研发的甲醇燃料电池(DMFC)比现有锂电池系统具备更高的能量密度，能使无人潜航器航程达到2000km并持续工作超过两周。

泰莱达能源系统公司在2018年8月的ANTX演习中展示了其水下充电站，该水下充电系统包括燃料泵、燃料站和充电船坞，能同时容纳最多四个无人潜航器。系统利用了泰莱达能源系统公司的质子交换膜燃料电池技术。充电站还支持将数据传输至可选平台和作战中心，并有多种解决方

案，支持向战场空间的其它平台传输信息。

2018年9月，美国海军水下作战中心授予应用物理科学公司相关合同，使其继续为美国国防预先研究计划局(DARPA)的蓝狼项目研发无人潜航器蓄电池样机。该项目旨在试验水下能源、水动力升力和减阻技术，最终研发航速和航程远高于固定尺寸平台的水下平台。应用物理科学公司从2015年开始参与蓝狼项目，负责研发使用热动力、电化学或能量回收中两种及以上动力形式的混合动力系统，提高能量效率。目前应用物理科学公司正在研发类似燃料电池或蓄电池等可装备于水下平台的热动力和电动力系统，以促进水下有人/无人平台更快速、高效地航行。

4.3 水下通信技术

2018年8月，美国麻省理工学院表示正在研究一种名为平移声学-射频通信(TARF)的水下-空中通信系统^[9]。TARF系统利用水下扬声器将数据以声音的方式发送，从而使水面产生振动，飞机的敏感雷达拾取振动并进行解码将其恢复为声学数据。该技术采用的创新方式组合了声音和无线电，使水面从障碍物转变为通信接口。目前该技术仍处于初级研究阶段，麻省理工学院已在深3.5m、模拟部分海洋条件的水池中进行了实验，接下来的实验还将进一步增加水下深度和空中高度，并使技术在大海浪条件下更加稳定。

另外，麻省理工学院还在将太空激光通信技术移植到水下领域，即一个UUS在不确定区域使用采集扫描功能以快速转换窄光束，另一个UUS的终端能够检测到光束并进行锁定，之后两个系统间就能以很高的精度进行定位、追踪和信息收发。目前，麻省理工学院已在实验水池中进行了实验，两个UUS能在1s的时间内定位并锁定在一起，可处理数百吉字节容量的数据。

4.4 水下导航技术

2018年4月，美国伊利诺伊州大学在美国国家科学基金和空军科研办公室的支持下，参照螳

螂眼睛的生理结构，研制出一种偏振敏感成像仪，首次实现水下环境中基于偏振光的导航功能^[10]。这种成像仪集成了多种偏振光学元件，能从水下拍摄水面的偏振光图案，以此估计太阳的方向和仰角，再根据拍摄的日期和时间推算传感器所在的地理坐标。在多个海域地点、不同深度、风况等条件下的实验测试表明，这种传感器的地理定位平均准确度为61km，每行进1km的误差为6m。这项技术虽还处在试验验证阶段，但为水下导航提供了一条仿生新途径，在民用和军事领域均具有巨大的潜在应用前景。

4.5 水下探测技术

2018年9月，美国海军水面战中心向Sonardyne公司授予合同，开发水下目标跟踪技术。Sonardyne公司的高精度Ranger 2超短基线声学跟踪系统，配有先进收发器和转发器，可在深水和浅水范围工作，跟踪到无人潜航器等水下目标的精确位置，能装备到便携式至超大型等各种尺寸的无人潜航器上。

2018年11—12月，DARPA先后授予雷锡恩BBN技术公司和诺斯罗普·格鲁曼公司海洋生物传感器项目(PALS)合同。该项目旨在研究自然生物和改造后的生物，确定哪些生物能支持传感器系统探测潜艇和无人潜航器的活动。PALS将重点考察海洋生物对这些平台存在的反应，并对它们产生的信号或行为变化进行表征，以便被传感器网络捕获、处理和转发。雷锡恩BBN技术公司将与诺斯罗普·格鲁曼公司共同研发硬件、软件和算法，将生物体的行为转化为可操作的信息并进行传送。

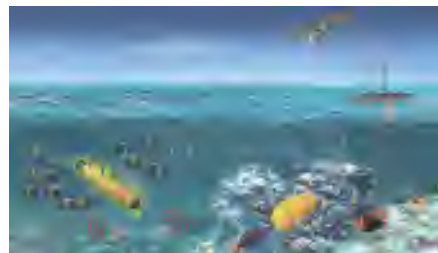


图6 PALS项目

Fig.6 Persistent Aquatic Living Sensors (PALS) concept figure

4.6 无人潜航器毁伤技术

2018年5月,美国海军水下作战中心分部发布一份信息征询书,旨在研究、发现、评估并加速适用于无人潜航器的先进爆炸或非爆炸载荷,为美国海军提供无人潜航器部署在复杂、浅水、凌乱的濒海环境中的不对称作战优势。征询书要求该载荷可使船体长度小于50m的船只停运或失效,并确保无人潜航器拥有速度和导航精度的相关技术,以支撑作战载荷的功能。

5 结束语

以美国、俄罗斯为代表的世界军事强国,均将水下无人力量作为在强对抗环境下谋求不对称优势的主要抓手,通过战略规划、装备新研与技术探索等手段,全面推动UUS快速发展。特别是俄罗斯推出的核动力无人潜航器,将为未来水下作战模式带来巨大变化,需要密切关注。

参 考 文 献

- [1] Unmanned systems integrated roadmap 2017-2042 [EB/OL]. [2018]. http://cdn.defensedaily.com/wp-content/uploads/post_attachment/206477.pdf.
- [2] 李磊,王彤,蒋琪.从美军2042年无人系统路线图看无人系统关键技术发展动向[J].无人系统技术,2018,1(4):79-84.
- [3] Department of the navy strategic roadmap for unmanned systems [EB/OL]. [2018]. <https://assets.documentcloud.org/documents/4486563/Nav-UxS-Roadmap-Summary.pdf>.
- [4] 郭桂友,赵福军,刘都群,等.2018年俄罗斯精确打击武器发展回顾[J].飞航导弹,2019(3):24-27.
- [5] Japan to propose underwater drones to monitor East China Sea [EB/OL]. [2018]. https://www.upi.com/Top_News/World-News/2018/11/05/Japan-to-propose-underwater-drones-to-monitor-East-China-Sea/4101541439140/.
- [6] OCEAN 2020: European defence agency meets partnering consortiums [EB/OL]. [2018]. <https://www.ecagroup.com/en/business/ocean-2020-european-defence-agency-meets-partnering-consortiums>.
- [7] To combat Russian subs, NATO allies are teaming up to develop unmanned systems at sea [EB/OL]. [2018]. <https://www.defensenews.com/naval/2018/10/21/to-combat-russian-subs-nato-allies-are-teaming-up-to-develop-unmanned-systems-at-sea/>.
- [8] Annual naval exercise showcases unmanned underwater vehicle capabilities [EB/OL]. [2018]. <http://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2018/10/25/annual-naval-exercise-showcases-unmanned-underwater-vehicle-capabilities>.
- [9] Wireless communication breaks through water-air barrier [EB/OL]. [2018]. <http://news.mit.edu/2018/wireless-communication-through-water-air-0822>.
- [10] Shrimp-inspired camera may enable underwater navigation [EB/OL]. [2018]. <https://news.illinois.edu/view/6367/635061>.

作者简介:



王雅琳(1991-),女,硕士,工程师,主要研究方向为水下无人系统、精确打击武器及技术发展等方面的情报研究。



郭佳(1989-),女,硕士,工程师,主要研究方向为系统工程及多方案决策等。



刘都群(1989-),女,硕士,工程师,主要研究方向为俄罗斯军事战略、武器装备及技术发展等方面的情报研究。

用于水声目标信号时频特征提取与识别的深度卷积神经网络

李俊豪, 杨宏晖

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 在水下目标识别的军事任务中, 被动声纳系统具有较好的隐蔽性和灵活性。利用舰船辐射噪声进行被动水声目标识别由于海洋环境复杂性以及舰船隐身技术的应用而面临巨大的挑战。根据水声信号特点, 在通用深度卷积神经网络的基础上调整了网络的特征提取方法, 从舰船辐射噪声时频特征的出发设计了用于水下目标识别的深度网络模型, 一定程度上加强了深度网络提取到的特征可解释性, 更有助于提取到具有一定物理意义的特征。实验结果表明, 经过调整的深度卷积神经网络可以提取到具有一定物理意义的谱特征, 在六类分类实验中网络正确识别率达到75.1%, 识别率显著提高。

关键词: 水声目标识别; 深度学习; 深度卷积神经网络; 舰船辐射噪声; 机器学习

中图分类号: TB56 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2019) 04-0491-05

Deep Convolutional Neural Networks for Underwater Acoustic Target Time-frequency Feature Extraction and Recognition

LI Junhao, YANG Honghui

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In the Underwater Acoustic Target Recognition (UATR) task, the passive sonar system has good concealment and flexibility. UATR via ship radiated noise faces big challenges due to complex marine environment and the application of acoustic stealth technology. In this paper, we design a deep model for UATR aiming at the characters of time-frequency feature of ship radiated noise, which increases the interpretability of deep model to some extent. Aiming at the characters of time-frequency feature of ship radiated noise, feature extraction methods are improved based on generalized convolutional neural network (CNN) so that the features extracted by the improved CNN can be understand in a physical sense. And it achieves a classification accuracy of 75.1% in recognition experiment.

Keywords: Underwater Acoustic Target Recognition; Deep Learning; Deep Convolutional Neural Network; Ship Radiated Noise; Machine Learning

收稿日期: 2019-06-05; 修回日期: 2019-07-11

基金项目: 盲信号处理国家级重点实验室基金

1 引言

在水下目标探测、识别的军事任务中,被动声纳系统具有较好的隐蔽性和灵活性。如何利用被动声纳获取的舰船辐射噪声进行水下目标探测与识别成为了亟需解决的问题。但由于各种舰船隐身技术的应用以及海洋环境的复杂多样,基于舰船辐射噪声的水下目标识别任务面临着巨大挑战。目前还是依靠训练有素的声纳员进行水下目标识别,但由于人的生理和心理因素的不稳定性,难以做到稳定的全天候水下目标探测与识别。

有研究者尝试使用传统的机器学习方法构建水下目标自动识别系统。这类传统的机器学习方法大致可以分为三个部分:特征提取^[1]、特征选择^[2]和分类器设计^[3]。这些人工提取的特征过于依赖专家知识,且由于海洋环境复杂多变,这些特征的泛化性有待提升。人工设计的浅层分类器,如支持向量机(Support Vector Mechanism, SVM),在处理小批量数据时效率尚可,但随着处理的数据量增加,SVM的计算效率明显下滑,很难达到对大量数据的高效率判决。所以仅仅依赖传统机器学习的水下目标识别方法难以满足现有的识别任务需求。随着大数据时代来临以及深度学习的发展,基于大数据的深度学习框架在图像识别、语音识别、文本翻译等很多领域都取得了辉煌的成果,在一些特定任务上表现出不亚于人类的水平^[4-5]。其中,卷积神经网络在处理具有二维网格结构的图像方面是最成功的^[6-7]。并且,大部分神经网络模型一定程度上是将特征提取过程、特征选择过程和分类器判决融合为一体。已经训练好的模型在测试阶段的判决效率相比传统的机器学习方法有明显提升,更适用于对大量数据的高效判决。

本文从舰船辐射噪声时频图着手,在通用的卷积网络的基础上改变了特征提取的方式,有助于提取到具有一定物理意义的深度特征。在实验中观察不同频段特征对分类的贡献,并在验证集上对模型的识别性能进行验证。

2 水声目标识别网络构建

2.1 卷积神经网络

卷积神经网络是一种专门处理具有类似网格结构数据的神经网络^[6]。在前向传播时,在第 l 层卷积层中,第 $l-1$ 层的一组特征图 x_i^{l-1} 先与若干可训练的卷积核 k_{ij}^l 相卷积,再通过激活函数得到该层输出的特征图 x_j^l 。通常可以表示为:

$$x_j^l = f\left(\sum_{i \in M_j} x_i^{l-1} * k_{ij}^l + b_j^l\right) \quad (1)$$

其中, b_j^l 是偏置项, M_j 是对前一层特征图的选择。

通过这样层层提取特征,随着网络深度的加深,越深层的卷积层可以观察到更加细致的图像结构,也具有更大的感受野。这样深度的特征往往也包含更多类别属性的信息^[8-9]。

2.2 针对线谱特性的深度卷积神经网络

卷积神经网络在提取特征时具有很好的平移不变性,这得益于权值共享,即同一个卷积核在全局图像上滑动提取特征时权值是一定的。但对于一张二维的舰船辐射噪声时频图,让卷积核在两个维度(频率和时间维度)上都进行平移并共享权值并不利于提取到有物理意义的特征。这是因为当卷积核在频率维度上进行平移并参数共享时相当于打乱了本来具有物理意义的频率位置,提取到的特征难以和之前的频率点有所对应。

舰船辐射噪声时频图可以看作是舰船辐射噪声频率成分在时间轴上有规律分布。本文改变二维卷积核可移动的方式,使其只在时间维度上进行移动和权值共享,如图1所示。通过这样的调整,网络中的卷积核可以提取到在时间轴上具有平移不变性的频率分布特征,即较稳定的线谱特征。舰船辐射噪声主要由螺旋桨噪声、机械噪声和空化噪声构成,螺旋桨噪声和机械噪声多表现为低频的复杂线谱^[10]。当使用本文特殊设计的卷积神经网络时,可以提取到随着时间变化更加稳定的低频线谱特征及其分布规律。这对揭示与舰船类别属性相关的深层特征是有益的。

本文先使用在时间轴上滑动的一组卷积层对舰船辐射噪声时频图的每个频段分别提取谱特征，再对各个频段的谱特征进行联合，通过深度的全连接层进行深度特征的提取，最后使用 softmax 层进行目标类别的预测。

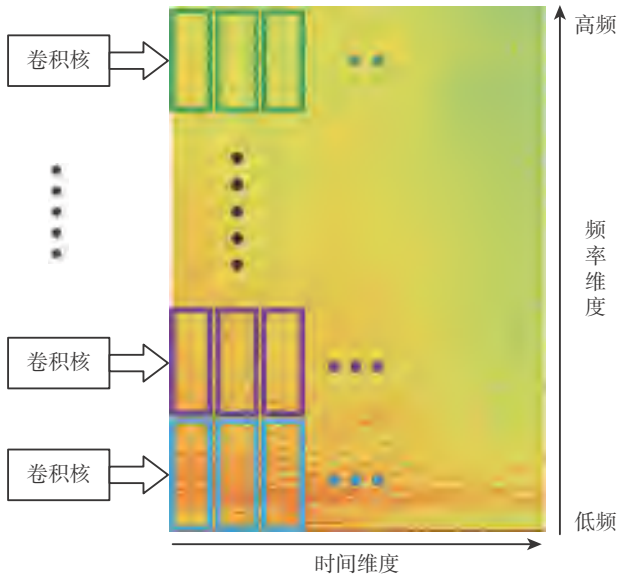


图1 时间维度滑动的二维卷积核

Fig.1 Convolution kernels sliding along the time axis

3 实验数据

本文中所采用的数据来自加拿大海洋观测网 (Ocean Networks Canada Observation)。采集设备是位于北纬 49.080811°，西经 123.3390596°海平面以下 144m 的被动声呐。录音每段时长为 5m/n，采样频率为 32000Hz。结合船舶自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS) 给每段录音添加类标。由于海洋中存在大量船只同时在一定海域内航行，舰船辐射噪声之间会存在不可避免的干扰。因此本文选择训练和验证网络的信号样本是当且仅当距水听器 2km 以内有单目标船只且 3km 以内没有其他船只干扰的情况下录取的。其中，以距水听器 7km 以内没有船只为标准，录取了海洋环境背景噪声。

训练数据以及验证数据共分为六类，分别是：海洋环境噪声、散装货船、集装箱货船、中型客

船、油轮以及拖船。每类目标的训练数据以及验证数据详情如表 1 所示。本文对训练数据和验证数据做了严格的分割，即训练数据和验证数据中的任一同类目标具有完全不同的工况 (不同的航次或者不同的船只)。

表1 数据说明

Table 1 Data description

	类别	船只条数	航次数	样本个数	总时长/h
训练数据	海洋环境噪声	-	-	10497	17.5
	散装货船	146	160	14607	24.3
	集装箱货船	125	186	12979	21.6
	中型客船	18	368	13256	22.1
	油轮	57	92	8933	14.9
	拖船	67	210	14041	23.4
验证数据	海洋环境噪声	-	-	1800	3
	散装货船	76	80	1800	3
	集装箱货船	76	95	1800	3
	中型客船	6	184	1800	3
	油轮	28	43	1800	3
	拖船	45	105	1800	3

4 实验

实验分为两个部分：第一部分是深度卷积神经网络对于水声信号特征提取结果的观察实验；第二部分是深度卷积神经网络深度特征聚类性能以及网络识别性能的评价实验。

4.1 水声信号谱特征提取实验

在大量水声数据驱动下，深度卷积神经网络自适应地对舰船辐射噪声时频图中隐含的目标属性特征进行提取。在低频范围内舰船辐射噪声存在大量线谱特征，这些线谱可以反应出目标舰船的设备特点以及一定的工作状态。

对深度卷积神经网络的卷积核进行可视化，观察其提取到的特征。图 2 展示了对不同频段的时频图进行特征提取的卷积核可视化结果，从左到右卷积核的关注频率范围分别是：0~100Hz；100~200Hz；200~300Hz；300~400Hz；1200~1300Hz；1300~1400Hz；1400~1500Hz；1500~1600Hz。从图 2 中可以发现，一些关注低频区域的卷积核可以提取到低频线谱特征，而

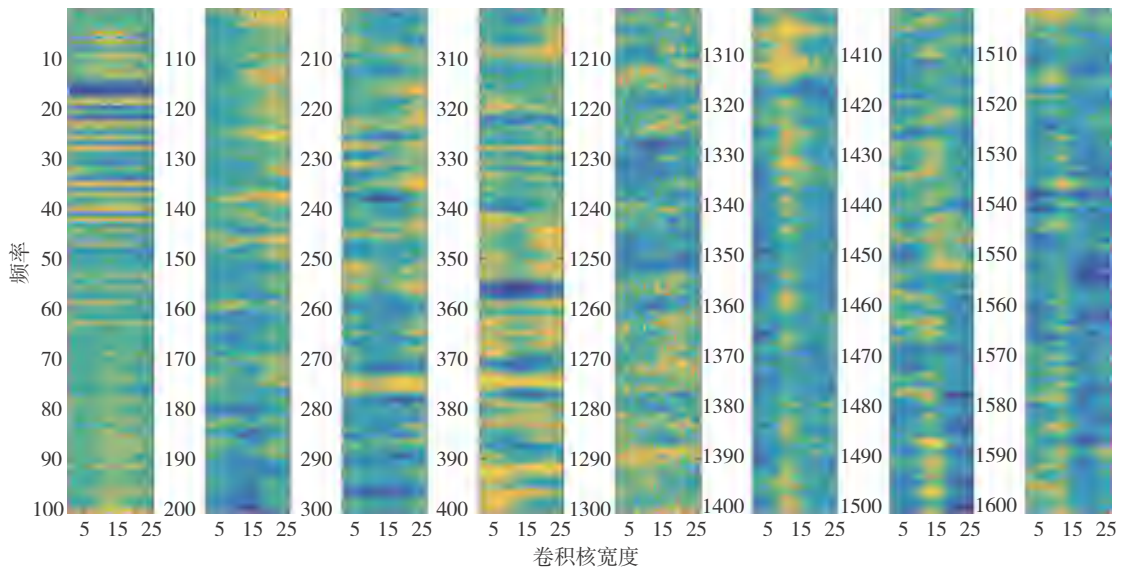


图2 卷积核对不同频段谱特征的提取

Fig.2 Extraction of different frequency scales by convolution kernels

另一些关注高频区域的卷积核提取到的特征更加杂乱。这很可能是由于本身具有舰船类别属性的特征较集中的分布在低频范围内导致的。

4.2 深度卷积神经网络识别性能评价实验

本文在训练集中随机抽取每类 500 条数据作为样本点，通过 t 分布随机近邻嵌入算法 (t -Distributed Stochastic Neighbor Embedding, t -SNE) [11] 对深度卷积神经网络提取到的水声目标深度特征进行降维，得到二维特征点并可视化，如图 3 所示。图中，a 和 b 分别为 0~100Hz 频率范围以及 1500~1600Hz 的卷积核提取到的特征并通过 t -SNE 降维的可视化结果，可以发现，a 中相同类别的舰船之间的聚类程度相比 b 中要更紧凑，但海洋环境噪声也混叠在其中；而 b 中海洋环境噪声与所有舰船类别的分离度更好，但舰船之间几乎完全混叠；c 为联合了所有频段的卷积核的特征通过 t -SNE 降维的可视化结果；d 为网络最深层特征通过 t -SNE 降维的可视化结果。c 和 d 中的特征相比每个频段而言，明显具有更好的同类间聚集性。

表 2 中展示了验证集上实验结果的混淆矩阵，每一类验证样本被识别成各类的样本数如表中所示，第一列是真实的样本类标，第一行是被识别

成的类别。表 3 中展示了各类验证数据的召回率、准确率和 $F1$ 得分。其中，召回率指的是某类样本被正确识别成该类的样本数除以该类别总样本数，准确率指的是某类样本被正确识别成该类的样本数除以所有被识别成该类的样本数， $F1$ 得分是综合召回率和准确率共同得到的指数，用于评价网络的识别性能，具体计算方式如下：

$$F1 = \frac{2 * P * R}{P + R} \quad (2)$$

其中， P 是准确率， R 是召回率。

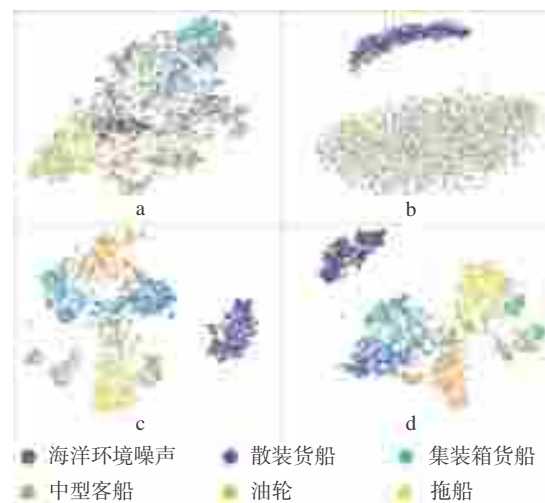
图3 t -SNE散点图Fig.3 Results of t -SNE feature visualization

表2 实验结果混淆矩阵

Table 2 The confusion matrix

预测 \ 真实	海洋环境噪声	散装货船	集装箱货船	中型客船	油轮	拖船
海洋环境噪声	1786	2	0	2	4	6
散装货船	9	1529	64	77	76	45
集装箱货船	3	416	1025	152	195	9
中型客船	8	68	6	1597	19	102
油轮	13	365	166	116	1124	16
拖船	12	278	12	427	20	1051

结合表2和表3可知，海洋环境噪声的召回率和准确率最高，分别达到99.2%和97.5%，在各类舰船中识别结果最好的是中型客船，F1得分达到76.6%。散装货船、集装箱货船和油轮的总体识别结果较差，相互之间混叠比较严重，可能是由于同为货船大类的原由。

表3 网络识别性能评价

Table 3 Evaluation of recognition performance

	召回率 /%	准确率 /%	F1 得分 /%
海洋环境噪声	99.2	97.5	98.3
散装货船	84.9	57.5	68.6
集装箱货船	56.9	80.5	66.7
中型客船	88.7	67.4	76.6
油轮	62.4	78.2	69.4
拖船	58.4	85.5	69.4

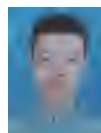
5 结束语

本文针对水声目标时频特性在通用卷积网络的基础上对卷积核特征提取方式进行了改进，使之能提取到具有一定物理意义的特征。通过降维可视化方法观察了深度网络提取到特征聚类性能，发现整合所有频段的最深层特征的聚类性能最优。并且在六类分类实验中验证集总识别率达到了75.1%，海洋环境噪声的识别率达到了99.2%。将深度学习技术用于水声目标识别是一个极具潜力的研究方向，但如何提高深度学习的可解释性是面临的挑战之一。本文从舰船辐射噪声时频特征的物理意义角度进行了一定的讨论和分析，一定程度上加强了深度网络提取到的特征可解释性。

参考文献

- [1] Das A, Kumar A, Bahl R. Marine vessel classification based on passive sonar data: the cepstrum-based approach [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2013, 7 (1): 87-93.
- [2] 杨宏晖, 申昇. 模式识别之特征选择 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [3] Meng Q, Yang S, Piao S. The classification of underwater acoustic target signals based on wave structure and support vector machine [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136 (4): 2265-2265.
- [4] Cireşan D, Meier U, Masci J, et al. Multi-column deep neural network for traffic sign classification. Neural Networks [J], 2012, 32 (22): 333-338.
- [5] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning [J]. Nature, 2015, 518 (7540): 529-533.
- [6] Lecun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning [J]. Nature, 2015, 521 (7553): 436-444.
- [7] 姚晓辉, 杨宏晖, 李益青. 基于卷积神经网络的水声通信调制识别 [J]. 无人系统技术, 2018, 1 (4): 68-74.
- [8] Shen S, Yang H, Li J, et al. Auditory inspired convolutional neural networks for ship type classification with raw hydrophone data [J]. Entropy 2018, 20 (12): 990.
- [9] Yang H, Li J, Shen S, et al. Inspired by auditory perception for underwater acoustic target recognition [J]. Sensors, 2019, 19 (5): 1104.
- [10] Wales S C, Heitmeyer R M. An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111 (3): 1211-1231.
- [11] Laurens V D M, Hinton G E. Visualizing high-dimensional data using t-SNE [J]. Vigilae Christ, 2008, 9 (11): 2579 - 2605.

作者简介:



李俊豪 (1994-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水下目标识别、深度学习理论与技术。



杨宏晖 (1971-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器学习、水声信号处理。

智能无人飞行器技术发展趋势综述

符文星¹, 郭行², 闫杰²

(1.西北工业大学无人系统技术研究院, 西安 710072; 2.西北工业大学无人系统发展战略研究中心, 西安 710072)

摘要: 随着智能无人系统在军事方面的应用日益广泛、技术逐渐进步, 无人作战概念和关键技术也日趋成熟。目前, 基于智能无人飞行器的项目研究稳步开展, 相关技术扎实推进。首先介绍了智能无人飞行器的基本概念, 然后基于典型的智能无人飞行器项目分析了智能飞行器应用于未来战场的发展趋势: 分布式智能协同作战、高度人机融合协同作战和集群化作战。最后, 结合当前智能飞行器的研究热点和发展趋势, 提出了智能态势感知、智能决策、智能控制和人机交互与通信四项亟待解决和完善的关键性技术。

关键词: 智能无人飞行器; 分布式智能协同; 人机融合协同; 集群化作战; 智能态势感知; 智能决策; 智能控制; 人机交互与通信

中图分类号: V279 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915 (2019) 04-0496-07

Overview on the Technology Development Trend of Intelligent Unmanned Aerial Vehicle

FU Wenxing¹, GUO Hang², YAN Jie²

(1. Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Research Center for Unmanned System Strategy Development, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: As the military applications of intelligent unmanned system spread comprehensively and the relevant technologies develop rapidly, the concept of unmanned combat and key technologies has become mature significantly. To this date, a series of research projects on Intelligent Unmanned Aerial Vehicle (IUAV) are undertaken, which promote the technological development simultaneously. To begin with, the basic definition of IUAV is introduced. Next, on the basis of typical projects on IUAV, the development trend of its applications on future battlefield is analyzed, including distributed intelligent collaborative operation, high-level human-machine integrated collaborative operation and cluster operation. Furthermore, combined with the research topics and development trend of current IUAV, the key technologies to be solved and revised in future are concluded, which contain intelligent situation awareness, intelligent decision making, intelligent control as well as human-machine interaction and communication.

Keywords: Intelligent Unmanned Aerial Vehicle (IUAV); Distributed Intelligent Collaboration; Human-machine Integrated Collaboration; Cluster Operation; Intelligent Situation Awareness; Intelligent Decision Making; Intelligent Control; Human-machine Interaction and Communication

1 智能无人飞行器内涵及特征

基于未来战争深度信息化、智能化、无人化的特点，无人作战相关概念和技术迅速发展^[1]。近年来，民用和军用无人机的产业规模和市场价值显著增长，成本和功效的优势不断突出，如何更好的把无人飞行器应用于现代战争成为备受关注的研究热点。结合人工智能、云计算与大数据等新兴前沿热点，无人飞行器未来将向智能化、集群化方向发展。

智能无人飞行器是由无人机、导弹等无人平台及其有关设备组成的有机整体，具有感知、学习、决策等智能特征，是可自主完成预期使命任务的无人飞行装备。智能无人飞行器最重要的两个特征是自主性和智能化，人工智能作为智能无人飞行器的关键技术之一，可显著提升其自主性能力和智能化水平。

2 智能无人飞行器项目研究现状

2.1 智能无人飞行器的智能自主能力评价

美军采用自主控制等级来评价无人飞行器的智能化水平并将其分为10级，其中1~4级描述个体的智能化程度，5~10级描述群体的智能化程

度^[2]。随着智能化水平的提升，无人飞行器由遥控制导向完全自主进化，由个体自主向群体完全自主发展，由模拟人的个体属性向模拟人的社会属性发展^[3]。

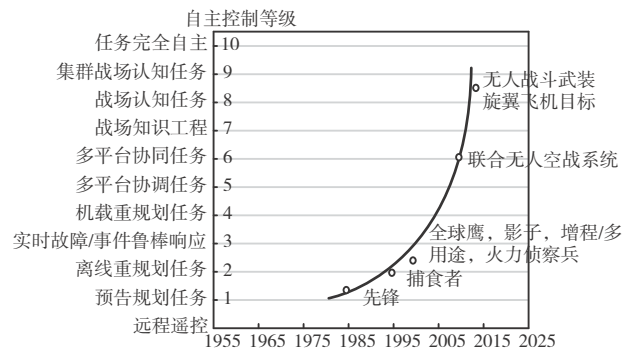


图1 美军无人飞行器自主控制等级

Fig.1 Autonomous control level of US unmanned aerial vehicles

在美国无人军队理念中，新型的自主分析方法把自主性分为三级：第一等级是半自主操作，即人在回路内，目前大多数无人飞行器在执行任务过程中均需要人在回路来完成半自主控制；第二等级是监督式自主操作，即人在回路上，无人飞行器必须具有一定的自主感知、决策和执行能力，人可以监督运行并进行干预；第三等级是全自主操作，即人在回路外，无人飞行器需要进行自主感知、决策和行动，人在回路外对运行质量进行评估并改进^[4]。

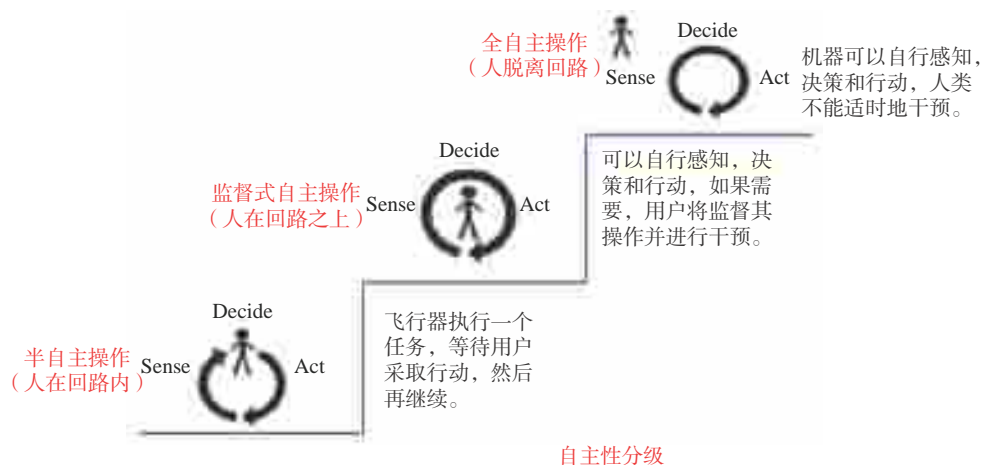


图2 美国无人军队理念的自主性分级

Fig.2 Autonomy classification of the idea of US unmanned army

2.2 美国智能无人飞行器项目研究进展

美国国防预先研究计划局(DARPA)、航空航天局(NASA)等机构从20世纪90年代起一直推进人工智能技术在精确打击武器、智能无人飞行器、集群无人飞行器和有人/无人协同作战等国防相关领域的工程化应用。

在精确打击武器方面,美军正在研发的远程反舰导弹(LRASM)项目是人工智能技术在导弹武器精确制导中的成功应用案例。LRASM具有一定的感知和规划能力,尤其是能够在线进行威胁感知。如果在飞行过程中出现未知威胁,该导弹可以及时感知并在线改变航迹,从而绕过威胁区。此外,在末端攻击时,其不仅能识别目标,还能自主判断出目标的薄弱或关键部位,从而将打击效能最大化。



图3 LRASM远程反舰导弹
Fig.3 Long-range anti-ship missile LRASM

在智能飞行器方面,X-47B无人攻击机作为美国海军空中无人战斗平台的验证机,连续创造了多个世界第一:它是人类历史上第一架无人干预,由电脑独立操控,具备监视、情报收集和战场打击多功能的军用智能无人飞行器;于2011年首飞成功,并于2013年实现了无人机第一次在航母上的自主起降,在人类操作员手指指令的引导下能够精准的完成弹射和着舰任务;于2014年完成了和一架F18大黄蜂有人驾驶战斗机的共同编队飞行测试;于2015年实现了空中自主加油,从对接加油开始,一直到最后脱开整个过程完全是由电脑操作完成。上述几种战术动作对于人类飞行员来说非常困难,但却均被无人机高质量完成。



图4 X-47B无人攻击机
Fig.4 Unmanned combat aerial vehicle X-47B

在微型无人机方面,美军的山鹑无人机,长不到0.3m,质量不到0.5kg,机身由凯芙拉合成纤维和碳纤维通过3D打印制成,并通过锂离子聚合物电池供电。该无人飞行器可在40m/s的飞行速度下正常打开机翼,并在30m/s的风速中保持飞行姿态稳定,并具备数据通信能力,未来将可广泛应用于集群化作战。



图5 山鹑集群无人机
Fig.5 Cluster UAV Perdix

2016年10月26日,美国军方在加利福尼亚州中国湖基地进行了无人机集群飞行试验,用3架F/A-18超级大黄蜂战斗机释放了103架山鹑微型无人机,山鹑无人机并不是按照预设程序行动的个体,而是共享决策、协调行动,以很高的精度快速通过一系列航路点,顺利到达设定位置。

2015年9月,DARPA发布了小精灵项目公告,提出通过载机在防区外发射携带侦察或电子战载荷、具备组网与协同功能的无人机蜂群,执行离岸侦察与电子攻击。并且最重要的功能是飞机可在空中自主的对无人机群进行发射和回收。该项目分三个阶段:2016年3月进入第一阶段——系



图6 小精灵集群无人机
Fig.6 Cluster UAV Gremins

表1 DARPA小精灵无人机技术指标

Table 1 DARPA technical index of Cluster UAV Gremins

作战半径 /km	926
续航时间 /h	3
有效载荷 /kg	54
最大飞行速度 /Ma	0.8+
最大发射高度 /km	12 (根据不同运载平台确定)
载荷功率 /W	1200
载荷类型	射频、光电、红外载荷
设计使用寿命 /次	20
发射载机	B-52、B-1、C-130 (包括攻击机等其它运载平台)
大型载机发射量 /架	≥ 20
回收载机	C-130
回收数量和时间	30min 内回收 ≥ 4 架 总回收数量 ≥ 8 架
成功回收概率 /%	时间窗口内 ≥ 95
载机损失概率 /%	每飞行小时事故概率 < 1×10^{-7}
回收、检修、再次完成装载 时间 /h	< 24
重复使用寿命 /次	> 20

统设计阶段，该阶段经费为1580万美元；第二阶段是为期约一年的技术成熟阶段，只有第一阶段的承包商才有资格进入后两个阶段；第三阶段是为期约一年半的演示验证及飞行试验阶段。最终，DARPA希望在2020年左右实施飞行演示验证，验证空中发射和回收无人机群的可行性及作战潜力。目前，DARPA设定的装备规模是1000架小精灵无人机和25套载机设备。

2.3 智能无人飞行器有人/无人协同作战研究计划

美军近期在有人/无人协同作战方面的典型研

究计划包括：进攻性蜂群战术、拒止环境中的无人协同作战、体系集成技术试验。

进攻性蜂群战术主要针对复杂的、动态的以及不可预测的城市作战环境，无人作战平台在城市作战中能够发挥很好的作用，而无人机蜂群的作战效能将倍增。利用小型无人飞行器构建的250个以上异构自主蜂群系统，能够在6小时之内完成在8个街区的执行任务。但是目前，美军缺乏控制蜂群并与之互动的技术，且缺乏快速开发和共享适合于在多变的城市条件下应用蜂群战术的手段。

拒止环境中的无人协同作战主要应对敌方的强拒止环境，例如，敌方通过电磁干扰对我方系统的导航定位进行拒止，或敌方对来袭的武器有较强的拦截能力。为满足未来作战需求，有人/无人协同作战的研究核心集中在有人/无人编组以及协同算法。该项目的目标是开发新的算法和软件，验证新型无人机在拒止环境中执行作战任务的自主性和协同行为。

体系集成技术试验的项目背景是美军空中的优势正在受到挑战，项目目标是要维持在强对抗性环境下的空中优势，通过有人机/无人机协同配合，试图使有人机在安全距离和安全距离之外操控无人机来完成空中的协同探测以及打击任务。

3 智能无人飞行器作战的发展趋势

通过分析智能无人飞行器的典型作战项目，未来智能飞行器在作战上的应用主要有三个方面：分布式智能协同作战、高度人机融合作战和集群化作战。

3.1 分布式智能协同作战

传统的综合性作战平台注重各项作战功能的集中性，例如，美国在飞机上要求探测制导、武器装备、火力打击等各种能力不断集成，导致平台非常复杂。其中的典型平台是美国第四代战斗机，它集中了指挥控制、电子战、武器系统和探

测系统等，体现集中式综合作战平台的概念，这种庞大且复杂的系统将导致综合作战平台的成本越来越高，复杂性越来越大，对未来作战极为不利，一旦遭到攻击会受到非常大的损失。

而基于智能计算和分布式技术的分布式智能协同作战方式，把不同的功能分散到不同的平台上。以空战为例，下一代空战可能不再以高价值的平台为作战核心，而是把作战功能分布到不同类型无人机上。作战任务由指挥控制无人机、攻击型无人机、探测型无人机、电子战无人机等各种类型无人机紧密协作、共同完成任务。分布式智能协同作战的优势在于各类型平台功能单一，具有显著的成本优势，但同时各无人机之间密切协作，有能力完成原来靠集中作战平台难以完成的一些作战任务，从而提高作战能力。

3.2 高度人机融合作战

美国从2016年开始大力推进忠诚僚机项目和人机融合项目，实现无人F-16战机与有人F-16战机的混合编队。无人战机作为武器载机和探测载机提高了空战过程中分布式探测和预警能力，同时它还可作为高机动的武器载机，本身不需要具有探测能力而只搭载大量武器，形成小型武器库实现武器的协调搭配。预计在未来无人战场上，人机高度融合可以实现更加高级复杂的作战功能和作战方式，降低作战损失和人员伤亡，从而获得战争优势。

3.3 集群化作战

群体智能是人工智能自主性的高级阶段，智能无人飞行器将由智能个体作战向智能集群作战方向发展。无人机蜂群战术可以把数量优势转化为质量优势，整体功能远远超过个体的叠加。同时无人机蜂群抗摧毁能力强，部分损失不影响整体功能。例如，美国山鹑无人机蜂群包含一百多架无人机，如果使用传统方法拦截，成本极高，而且部分损失对它的整体作战行动不会造成破坏性影响，因而其生存能力大大提高。

4 智能无人飞行器关键技术

4.1 智能态势感知技术

未来智能无人飞行器的协同作战需具有全面的感知能力，具体包括智能环境感知、智能目标感知以及智能故障检测等，未来作战环境的复杂程度对战场态势感知的智能化程度提出了更高的要求。

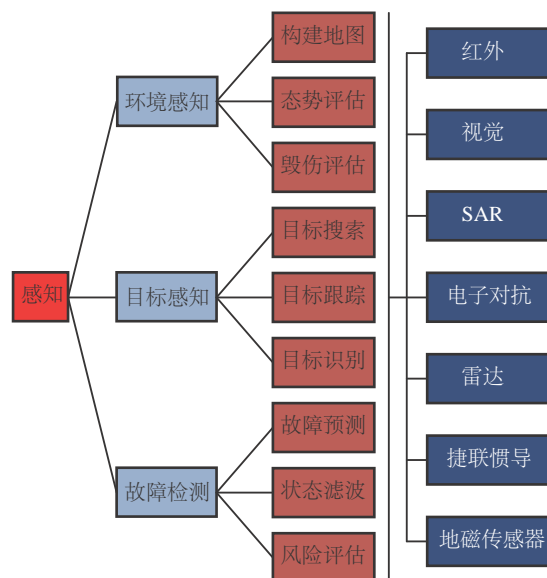


图7 无人飞行器智能感知分类

Fig.7 Classification for intelligent situation awareness of Unmanned Aerial Vehicles

智能环境感知主要包括对自身状态、外部环境和威胁区域的感知，具体又包含战场环境、大气环境、风干扰、拦截威胁等战场信息的全方位感知，通过传感器滤波、多源信息融合等关键技术建立详细的战场环境信息。

智能目标感知主要是指在复杂战场态势下敌方目标的精准识别。目标感知问题相对复杂，采用图像感知的导弹对目标区域可视度、战场环境复杂度要求较高，另外，人工干扰也会显著降低导弹的目标感知能力。面临复杂的干扰环境和大量战场数据的融合处理，合理地将人工智能算法引入至目标识别领域，将有效提升智能目标感知的效率和性能。

智能故障检测技术常常应用于传统的大型战略导弹，主要应对发射后的发动机动力损失。在发动机故障情况下，及时有效的故障感知以及在线制导控制重规划，也可能促成飞行任务。目前，战略导弹在典型动力损失故障下的可靠性研究还处于研究论证阶段，当其中一台发动机动力损失20%~30%，甚至熄火的情况下，仍然要确保它能顺利完成任务。

4.2 智能决策技术

智能决策技术可以与观察-指引-决策-行动(OODA)循环结构相结合，从决策层和行动层两个角度出发，在自主编队、航迹规划、智能突防和目标分配等方面进行智能决策。

实际操作中，预设的自主编队情况和算法往往过于理想化，如何在线进行动态编队是目前需要解决的难题。在航迹规划领域，飞行器和火箭需要克服飞行过程中各种干扰和威胁，通过智能决策系统进行在线轨迹规划，从而实现调整打击目标范围以及实现低弹道突防等。在智能突防领域，由于智能无人飞行器面对的拦截环境极为复杂，需智能感知威胁并在线进行自主轨迹规划，或改变飞行策略等，通过智能突防技术的提升可以有效提高导弹生存能力。在目标分配领域，在导弹集群化打击多个目标的情况下，考虑多目标打击和部分飞行器受损的可能因素，如何进行动态目标分配也是需要重点关注的技术难点。

4.3 智能控制技术

智能控制技术主要应对无人飞行器在大范围跨域飞行、存在参数扰动或者突发的故障等情况下的智能、容错控制等问题，确保无人飞行器稳定完成飞行作战任务。

未来战场环境时空范围增大，无人飞行器需要进行大范围的跨域飞行作战，在这种情况下，飞行器气动特性大范围变化，控制系统的自适应性、持久可靠性、鲁棒稳定性问题等亟需通过智能控制技术予以解决。对于变形无人飞行器，其结构外形所控制的系统参数等可根据现场情况进行变化，结合智能控制技术实现无人机的全域稳定控制和制导参数优化等功能。

4.4 人机交互与通信技术

人机交互与通信技术主要解决无人飞行器集群及人机协同应用时的人与无人飞行器的信息交互和共享等问题，保障飞行器在强电磁对抗、拒止环境下等弱通信条件下仍能够有效组网和协同。

当无人飞行器集群进行自主协同作战时，网络通信技术、虚拟化技术、分布式计算技术及负载均衡技术的综合运用必不可少。人机交互与通信技术将分散部署的作战资源进行有机重组，从而形成的一种弹性、动态的作战交互与通信网络。具备虚拟化、连通性、分布式、易扩展和按需服务等特点的信息网络可为“人机跨域协同作战”等未来作战样式提供有力的信息支撑。

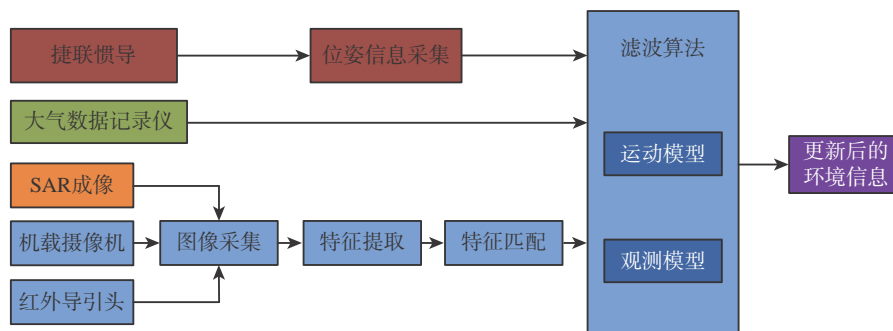


图8 无人飞行器智能感知过程

Fig.8 Intelligent sensing process of Unmanned Aerial Vehicle

5 结束语

将人工智能与无人飞行器相结合将成为提升无人飞行器自主能力和作战效能的重要手段和必经之路,未来的智能无人飞行器将以人工智能技术为基础,能够模仿人类思维,具备态势感知、信息融合、自主决策、自主控制和组网协同能力,进而实现自主、高动态与分布协同作战。

未来军用智能无人飞行器的发展必定要经过分布式智能协同作战、高度人机融合协同作战和集群化作战的发展道路。随着智能态势感知、智能决策、智能控制和人机交互与通信等关键核心技术的不断成熟进步,智能飞行器的自主性能和作战效能将进一步得到质的飞跃。

参考文献

- [1] 李风雷, 卢昊, 宋闯, 等. 智能化战争与无人系统技术的发展[J]. 无人系统技术, 2018, 1(2): 14-23.
- [2] Cambone S A, Krieg K, Pace P, et al. Unmanned aircraft systems (UAS) roadmap 2005-2030 [R]. Washington, USA: Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [3] 黄汉桥, 白俊强, 周欢, 等. 智能空战体系下无人协同作战发展现状及关键技术[J]. 制导与控制, 2019, 18(1): 10-18.
- [4] 高劲松, 陈哨东. 对美国无人系统路线图自主性初步研究[C]. 2014第五届中国无人机大会, 2014.
- [5] 昂海松. 无人机系统概念和关键技术[J]. 无人系统技术, 2018, 1(1): 66-71.
- [6] 李楠, 李晗. 军用地面无人平台现状及发展趋势研究[J]. 无人系统技术, 2018, 1(2): 34-42.
- [7] 陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. 航空学报, 2011, 32(6): 1075-1083.
- [8] 王越超, 刘金国. 无人系统的自主性评价方法[J]. 科学通报, 2012, 57(15): 1290-1299.
- [9] 张涛, 李清, 张长水, 等. 智能无人自主系统的发展趋势[J]. 无人系统技术, 2018, 1(1): 11-22.
- [10] 李磊, 王彤, 蒋琪. 美国CODE项目推进分布式协同作战发展[J]. 无人系统技术, 2018, 1(3): 59-66.
- [11] 樊洁茹, 李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2019, 1(1): 39-47.
- [12] 张思齐, 沈钧戈, 郭行, 等. 智能无人系统改变未来[J]. 无人系统技术, 2018, 1(3): 1-7.
- [13] 李磊, 王彤, 蒋琪. 从美军2042年无人系统路线图看无人系统关键技术发展动向[J]. 无人系统技术, 2018, 1(4): 79-84.
- [14] 高明, 周帆, 陈伟. 地面无人作战系统的发展现状及关键技术[J]. 现代防御技术, 2019, 47(3): 9-14.
- [15] 许彪, 张宇, 王超. 美军无人系统蜂群技术发展现状与趋势分析[J]. 飞航导弹, 2018(3): 36-39.
- [16] 王桂芝, 沈卫. 国外自主地面无人系统发展综述[J]. 机器人技术与应用, 2017(6): 23-25.
- [17] 宋海伟, 田达, 李文魁, 等. 智能无人集群电子战系统技术发展与研究[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(2): 11-13.
- [18] 陈杰, 辛斌. 有人/无人系统自主协同的关键科学问题[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1270-1274.

作者简介:



符文星(1974-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器制导与控制、飞行器先进仿真理论与仿真环境研究。



郭行(1990-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为智能飞行器路径规划、制导控制。本文通讯作者。



闫杰(1960-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器制导控制、智能无人作战等。

基于深度强化学习的行星车 路径规划方法研究

周思雨, 白成超

(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 在传统的路径规划方法中, 行星车的所有行为都是地面人员事先定义好的。但行星车的作业环境不是完全已知的, 这就需要行星车具备一定的对环境变化自适应和自学习能力。为了进一步实现行星车的自主决策, 并解决传统人为规划框架中过于依赖地图信息的问题, 基于深度强化学习理论提出了端到端的路径规划方法, 直接从传感器信息映射出动作指令再发布给行星车。首先使用CNN和LSTM处理雷达和相机的信息, 通过比较DQ、Double DQN、Dueling DQN和PER算法的优点, 采用D3QN PER算法, 训练行星车自动路径规划, 最后在静态障碍环境中进行了仿真验证实验, 试验表明D3QN PER算法对火星车在不同环境均具有适应性。

关键词: 行星车; 深度强化学习; 深度Q学习; 路径规划

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2019) 04-0503-08

Research on Planetary Rover Path Planning Method Based on Deep Reinforcement Learning

ZHOU Siyu, BAI Chengchao

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In traditional planning method, all the behavior of the planetary rover is defined in advance by the ground personnel. However, the operation environment of the planetary rover is not completely known, so it is necessary for the planetary rover to have certain adaptive and self-learning capabilities. In order to further enhance the autonomous decision-making ability of the planetary rover, and solve the problem that traditional artificial planning framework relies too much on map information, and an end-to-end path planning method based on the deep reinforcement learning theory is proposed, which maps the action instructions directly from the sensor information to the planetary rover. Firstly, CNN and LSTM were used to process radar and camera information. By comparing the advantages of DQN, DoubleDQN, Dueling DQN and PER algorithms, the D3QN PER algorithm is used to train the automatic path planning of planetary vehicles. Finally, the simulation verification experiment is carried out in the static obstacle environment. The experiment shows that the D3QN PER algorithm has adaptability to the rover in different environments.

Keywords: Planetary Rover; Deep Reinforcement Learning; DQN; Path Planning

收稿日期: 2019-04-07; 修回日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金 (11702072)

1 引言

近太空技术的不断发展与逐步成熟，掀起了人类不断向深外太空拓展的热潮。近年来，世界主要航天大国都相继制定了宏伟的深空探测长远规划与实施方案，例如美国、欧洲、日本以及俄罗斯^[1-2]。在这些规划中，重返月球 (Return to the moon)、火星 2020 (Mars 2020)、火星外空生物学 (Exobiology on Mars, ExoMars) 等探测任务都将研制最先进的行星车。中国的嫦娥三号探测器携带玉兔号月球车实现了深空测控通信技术的突破；嫦娥四号探测器携带玉兔二号月球车实现了月球背面巡视探测技术的突破；未来计划发射的嫦娥五号探测器将对月面土壤进行采样并返回。2016年由国务院发布的《“十三五”国家科技创新规划》指出，“到2020年发射首颗火星探测器，突破一系列核心关键技术，在一次发射的基础上，实现火星环绕以及着陆巡视探测”。由此可见，行星车在航天领域的深空探测方向具有重大的研究意义。

行星车在星体表面运动时，要求其具备良好的自主能力，按照《新一代人工智能发展规划》中的论述，其关键技术为规划、感知和控制等。其中，路径规划是指在起点和目标点（给定环境）之间搜索出一条最优路径，它是行星车的中枢神经系统，是其能够安全高效地开展科学巡视探测的重要保证^[3]。

按照地图信息获取方式的不同，将行星车的路径规划分为全局路径规划（基于先验地图信息）和局部路径规划（基于传感器信息）。研究方法可以分为传统方法和基于学习的方法。在传统方法中，行星车的所有行为都是预先定义好的。典型代表如美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 为一系列火星车开发的车辆任务序列与可视化系统 (The Rover Sequencing and Visualization Program, RSVP)。地面工作人员可以通过 RSVP 快速复现的精确三维环境信息来制定行星车的任务序列^[4-5]。选用 RSVP 是由于行星表面

地形复杂，容易引起滑移和滚翻，导致任务失败。传统的方法在这种情况下可以增加系统的可靠性。

然而，未来的行星车需要做出战略转变，将以大规模科学探测为主。高价值的科学探测目标往往需要宇航员与多移动机器人协同作业，因此伴随着更为复杂的环境。对于行星车而言，作业环境不是完全已知的，需要其具备一定的对环境变化的自适应能力和自学习能力。因此需要研制出更高级的智能规划模块。此时，基于学习的规划框架就充分发挥了它的优势。在基于学习的方法中，深度学习 (Deep Learning, DL) 可以成功处理高维信息；强化学习 (Reinforcement Learning, RL) 可以在复杂环境下执行连续决策任务。如图 1 所示，将 RL 和 DL 结合在一起的深度增强学习 (Deep Reinforcement Learning, DRL) 可以学习一个端到端 (End-to-end) 的模型，尽可能地简化从感知到决策之间的人为操作，从而避免精密而脆弱的人工设计，进一步提升任务的稳定性和智能性。

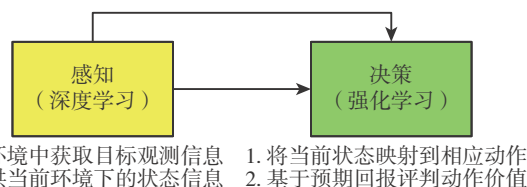


图1 深度强化学习框架

Fig.1 Deep reinforcement learning framework

基于以上需求背景，本文以行星车为应用背景，研究一种在行星探测环境中应用的基于DRL的路径规划方法。首先通过DL处理从环境中获取的多源传感器组成的状态信息，然后利用RL基于预期回报评判动作价值，将当前状态映射到相应动作，并将动态指令分配给行星车。作为算法验证，本文将深入探索较为高效的基于DRL的方法，并将其应用于多传感器行星车的路径规划中，赋予行星车对环境变化的自适应能力和自学习能力，同时在基于机器人操作系统 (Robot Operating System, ROS) 及Gazebo的仿真场景中验证算法的有效性。这种DRL算法具有非常广泛的应用，对

于航天领域以及机器人领域中的自主规划等都有非常重要的意义。

2 DQN及其衍生算法

早期，研究者就尝试将神经网络与RL进行集成，但当把离策略(Off-policy)、函数近似和引导(Bootstapping)结合在一起时，RL会表现出不稳定，甚至开始发散。直到DeepMind团队的Mnih等^[6]创造出DQN，这才点燃了DRL领域。

此后，DQN得到了广泛的发展，图2给出了DQN的发展历程，将其中的DQN、Double DQN和Dueling DQN算法融合在一起，结合PER算法就构成了D3QN PER算法。

2.1 DQN算法

2.1.1 经验回放

在DQN中使用经验回放的动机是：作为有监督学习模型，深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)要求数据满足独立同分布假设；但样本来源于连续帧，这与简单的RL问题(比如走迷宫)相比，样本的关联性大大增加。假如没有经验回放，算法在连续一段时间内基本朝着同一个方向做梯度下降，那么在同样的步长下，这

样直接计算梯度就有可能不收敛。所以经验回放的主要作用是：克服经验数据的相关性，减少参数更新的方差；克服非平稳分布问题。经验回放的做是从以往的状态转移(经验)中随机采样进行训练，提高数据利用率，可以理解为同一个样本被多次使用。

2.1.2 算法原理

神经网络的训练可以理解为通过最优化损失函数使其最小化，这里的损失函数指的是标签和网络输出的偏差。为此，DQN算法利用Q-learning为Q网络提供有标签的样本，再通过反向传播使用梯度下降的方法更新神经网络的参数。

Q值的更新依靠的是目标Q值： $r + \gamma \max_{a'} Q(s', a')$ ，因此，把目标Q值作为标签，即让Q值趋近于目标Q值，具体的步骤如下：

(1) 采用DNN作为Q值的网络：

$$Q(s, a, w) \approx Q_{\pi}(s, a) \quad (1)$$

其中， w 为DNN的参数。

(2) 在Q值中使用均方差(Mean Square Error, MSE)定义损失函数：

$$\mathcal{L}(w) = \mathbb{E} \left[\left(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a', w) - Q(s, a, w) \right)^2 \right] \quad (2)$$

(3) 计算参数 w 关于损失函数的梯度：

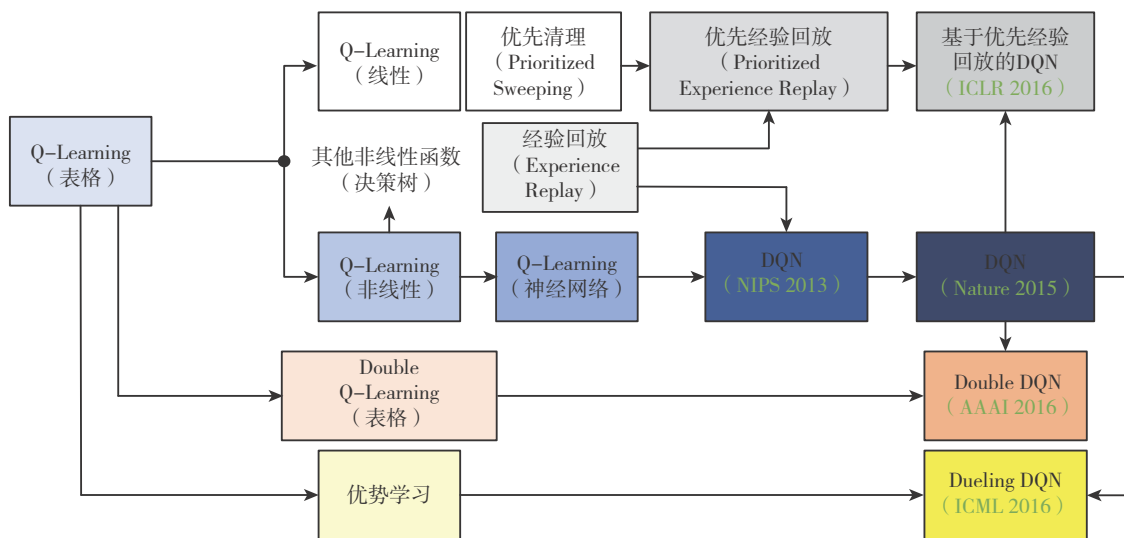


图2 DQN的发展历程

Fig.2 Development of DQN

$$\frac{\partial \mathcal{L}(w)}{\partial w} = \mathbb{E} \left[\left(\frac{\partial Q(s, a, w)}{\partial w} \right) \left((r + \gamma \max_{a'} Q(s', a', w) - Q(s, a, w)) \right) \right] \quad (3)$$

其中, $\partial Q(s, a, w)/\partial w$ 可以从DNN中进行计算。

(4) 使用随机梯度下降法 (Stochastic Gradient Descent, SGD) 更新参数, 从而实现端到端的优化目标。

本文采用的DQN算法还引入了一个与当前值网络结构一致的目标值网络, 负责生成训练过程的目标, 即 $r + \max_{a'} \hat{Q}(s', a'; w)$ 。每训练 C 步, 将当前值网络的参数完全复制给目标值网络, 那么, 接下来 C 步参数更新的目标将由更新后的目标值网络负责提供。

2.2 Double DQN算法

2.2.1 优先经验回放

PER的思路来源于优先清理 (Prioritized Sweeping), 它以更高的频率回放对学习过程更有用的样本, 本文使用TD-error来衡量作用的大小。TD-error的含义是某个动作的估计价值与当前值函数输出的价值之差。TD-error越大, 则说明当前值函数的输出越不准确, 换言之, 能从该样本中“学到更多”。为了保证TD-error暂时未知的新样本至少被回放一次, 将它放在首位, 此后, 每次都回放TD-error最大的样本。

本文结合纯粹的贪婪优先和均匀随机采样。确保样本的优先级正比于TD-error, 与此同时, 确保最低优先级的转移概率也是非零的。

具体的, 定义采样转移 i 的概率为:

$$P(i) = \frac{p_i^\alpha}{\sum_k p_k^\alpha} \quad (4)$$

其中, p_i 是第 i 个经验的优先级; 指数 α 决定使用优先级的多少, 当 $\alpha=0$ 时是均匀随机采样的情况。主要存在两种实践途径, 第一种是成比例的优先 (Proportional Prioritization), 即

$$p_i = |\delta_i| + \varepsilon \quad (5)$$

其中, δ_i 为TD-error; ε 是为了防止经验的TD-error为0后不再被回放。

在实现时采用二叉树结构, 它的每个叶子节点保存了经验的优先级, 父节点存储了叶子节点值的和, 这样, 头节点的值就是所有叶子节点的总和。采样一个大小为 k 的 minibatch 时, 范围 $[0, p_{\text{total}}]$ 被均分为 k 个小范围, 每个小范围均匀采样, 各种经验都有可能被采样到。

第二种是基于排行的优先级 (Rank-Based Prioritization), 即:

$$p_i = \frac{1}{\text{rank}(i)} \quad (6)$$

其中, $\text{rank}(i)$ 是经验池中根据TD-error排行的第 i 个经验的排行。

在概率统计中, 使用某种分布采样样本会引入偏差, 加入重要性采样 (Importance-sampling) 可以消除偏差。这里的重要性采样权重为:

$$\omega_j = \left(\frac{1}{N} \cdot \frac{1}{P(j)} \right)^\beta \quad (7)$$

其中, β 用于调节偏差程度, 因为在学习的初始阶段有偏差是无所谓的, 但在后期就要消除偏差。为了归一化重要性采样权重:

$$\omega_j = \frac{(N \cdot P(j))^{-\beta}}{\max_i \omega_i} \quad (8)$$

2.2.2 算法原理

Q-learning 中存在严重的过估计问题, 这个问题同样被带入到DQN算法中。假设所有动作在当前状态下的实际返回值都是0, 但由于估计必定存在误差, 所以一些动作可能返回正值 (假设为 +0.5), 一些动作可能返回负值 (假设为 -0.5)。在Q函数返回所有动作在当前状态下的估计值后, Q-learning 选择最大Q值的动作。但此时这个最大值是 +0.5, 并且每一步 (在每个状态下) 都存在该问题。随着迭代往前进行, 过估计问题可能导致策略逐渐变为一个次优解。为解决过估计问题, Double DQN 应运而生^[7]。它将目标Q值中动作的选择和动作的评估分开, 让它们使用不同的Q网络。在DQN中的目标Q值为: $r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; w^-)$,

而在Double DQN中的目标Q值为 $r + \gamma Q(s', \arg \max_a Q(s', a; w); w^-)$ ，Double DQN中计算目标Q值使用了两个不同的 w ，分别来自当前值网络以及目标值网络。当前值网络负责选择动作，而带有“延迟效应”的目标值网络来计目标Q值。

2.3 Dueling DQN结构

如图3所示，Dueling DQN^[8]相比于DQN在网络结构上做出了改进，在得到中间特征后，一边预测状态值函数 $v(s; \theta, \beta)$ ，另一边预测相对优势函数 $A(s, a; \theta, \alpha)$ ，两个相加才是最终的动作值函数：

$$Q(s, a; \theta, \alpha, \beta) = v(s; \theta, \beta) + A(s, a; \theta, \alpha) \quad (9)$$

其中， s 、 a 分别为当前状态和动作； θ 为卷积层参数； β 和 α 是两支路全连接层参数。这样做的好处是 $v(s)$ 和 $A(s, a)$ 分别评定远近目标， $v(s)$ 是对当前状态的长远判断，而 $A(s, a)$ 则衡量在当前状态下不同动作的相对好坏。

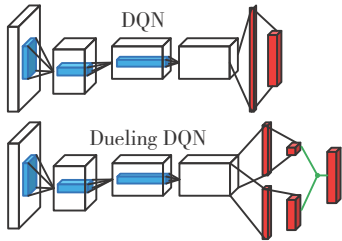


图3 Dueling DQN的网络结构示意图

Fig.3 Network structure diagram of dueling DQN

训练时，如果按照式(9)的做法，给定一个Q值无法得到唯一的 v 和 A ，比如， v 和 A 分别加上和减去一个值能够得到同样的Q值，但反过来显然不行。根据式(9)，最优状态值函数 v_* 来源于使Q值最大的那个贪婪动作 $a_* = \arg \max_{a \in |A|} Q(s, a')$ ，即 $v_*(s) = Q(s, a_*)$ ，此时 $A(s, a_*) = 0$ 。由此，可通过强制使得选择贪婪动作的优势函数为0，来保证分离出来的 v 就是最优策略下的 v_* 。所以取：

$$Q(s, a; \theta, \alpha, \beta) = v(s; \theta, \beta) + \left[A(s, a; \theta, \alpha) - \max_{a' \in |A|} A(s, a'; \theta, \alpha) \right] \quad (10)$$

令 $A(s, a; \theta, \alpha) - \max_{a' \in |A|} A(s, a'; \theta, \alpha)$ 取值为0，所以 $Q(s, a_*; \theta, \alpha, \beta) = v(s; \theta, \beta)$ ，此时 $v(s; \theta, \beta)$ 可理解为一部分估计状态值函数，另外一部分是估计优势函数。为了去除 \max 操作，本文使用了一个“平均”操作，见式(11)。

$$Q(s, a; \theta, \alpha, \beta) = v(s; \theta, \beta) + \left[A(s, a; \theta, \alpha) - \frac{1}{|A|} \sum_{a'} A(s, a'; \theta, \alpha) \right] \quad (11)$$

这个操作会偏离目标函数， A 不再为0，但可以保证该状态下各动作的优势函数相对排序不变，而且可以缩小Q值的范围，去除多余的自由度，提高算法的稳定性。

3 行星车环境特征处理方案

3.1 自身状态信息处理方法

自身状态信息的表示方法参见图4，它可以表示为一个数组 $[v_t, \omega_t, d_t, \theta_t]$ ，其中， v_t 和 ω_t 为 t 时刻行星车的速度和角速度信息， d_t 和 θ_t 为 t 时刻行星车相对终点的距离和角度信息。自身状态信息指引行星车向终点移动。

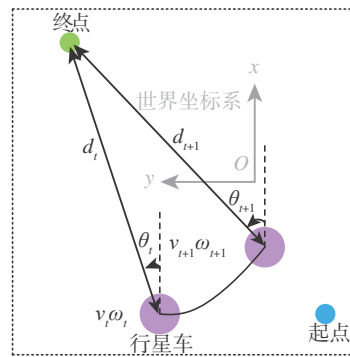


图4 自身信息处理方法示意图

Fig.4 Schematic diagram of its own information processing method

3.2 激光雷达点云信息处理方法

激光雷达(Light Detection And Ranging, LIDAR)能适应不同的光照，同时对环境具有较好

的鲁棒性，因此成为近期行星车发展中最重要传感器之一。

LIDAR产生的点云属于长序列信息，比较难直接拆分成单个独立的样本通过CNN进行训练。本文采用长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)网络处理LIDAR点云信息，其中cell单元为512个，具体的网络结构如图5所示。

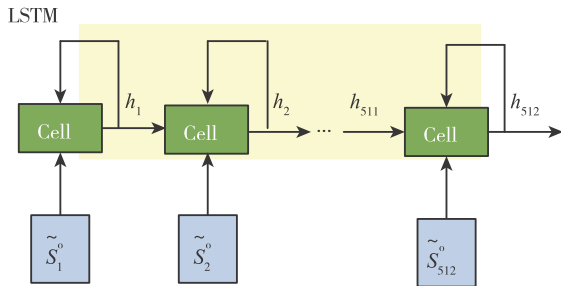


图5 处理LIDAR点云信息的LSTM网络结构示意图
Fig.5 Schematic diagram of LSTM network structure for processing LIDAR point cloud information

为了方便，控制LIDAR输出的点云信息为360维，更新频率是50Hz，探测范围为-90°~90°，探测距离为0.1~10.0m。

3.3 视觉图像信息处理方法

尽管LIDAR擅长测量障碍物的距离和形状，但实际上它并不能用于确定障碍物的类型。计算机视觉可通过分类完成这项任务，即给定相机的图像，可以标记图像中的对象。

本文采用CNN处理视觉图像信息。输入图像(1024 × 728)经过预处理和叠帧(4帧)后变为80 × 80 × 4的单通道灰色图。这里共采用了三个卷积层，它们分别是conv1、conv2和conv3。Conv1、conv2和conv3的具体参数可参见表1。

表1 卷积核参数

Table 1 Convolution kernel parameter

卷积核名称	高度	宽度	输入通道数	输出通道数	步长	是否填充
conv1	8	8	4	32	4	SAME
conv2	4	4	32	64	2	SAME
conv3	3	3	64	64	1	SAME

3.4 环境特征融合方案

结合前面所提出的针对自身状态信息、LIDAR点云信息和视觉图像信息的处理方法，再结合D3QN PER算法，由此可以给出行星车的环境特征融合方案，如图6所示。

4 仿真结果及分析

4.1 行星车的动作空间划分

考虑到大规模行星探测作业环境的复杂性，首先将行星车的动作空间划分为11个单元，如表2所示。

表2 动作划分表

Table 2 Action partition table

动作编号	速度 / (m · s ⁻¹)	角速度 / (rad · s ⁻¹)
0	1	-1
1	1	-0.5
2	1	0
3	1	0.5
4	1	1
5	0.5	-1
6	0.5	0
7	0.5	1
8	0	-1
9	0	0
10	0	+1

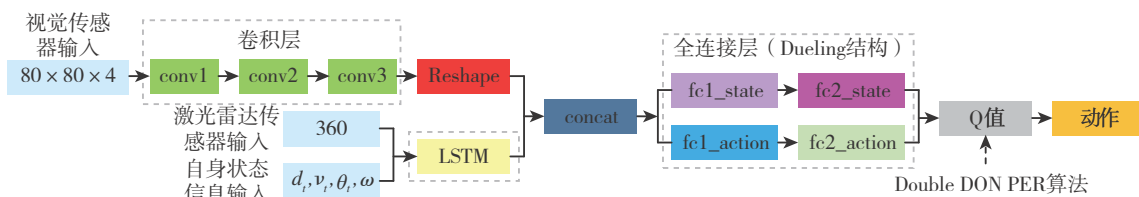


图6 环境特征融合方案示意图

Fig.6 Schematic diagram of environmental feature fusion scheme

4.2 算法参数与奖励函数设置

算法的基础参数设置如表3所示。为了加快收敛速度， ϵ -贪婪法的 ϵ 参数从初始值1.0开始按照训练步数线性下降，如式(12)所示，直到 ϵ 等于 ϵ_{final} 后不再变化。

$$\epsilon = \epsilon - \frac{1.0}{\text{Num_training}} \quad (12)$$

表3 参数设置表

Table 3 Parameter settings table

参数	含义	大小
γ	衰减系数	0.99
Learning_rate	学习率	0.001
ϵ_{final}	贪婪策略终止参数	0.1
Num_action	动作数量	11
Num_max_episodes	最大训练幕数	500
Num_replay_memory	记忆池大小	5000
Num_training	训练步数	50000
Num_update	目标网络更新步数	500
Num_batch	minibatch 大小	32
Num_stackFrame	叠帧数量	4

PER算法的参数设置如表4所示。值得注意的是， β 参数也按照训练步数线性下降：

$$\beta = \beta + \frac{1.0 - \beta_{\text{init}}}{\text{Num_training}} \quad (13)$$

表4 PER算法参数设置表

Table 4 PER algorithm parameter setting table

参数	含义	大小
ϵ	防止经验的TD-error为0后不再被回放	0.00001
α	使用多少优先级	0.6
β_{init}	调节偏差程度	0.4

奖励函数的设置参见表5。其中， v_t 和 v_{t-1} 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻行星车的速度信息； ω_t 和 ω_{t-1} 为 t 时刻和 $t-1$ 时刻行星车的角速度信息； d_t 和 d_{t-1} 为 t 时刻和 $t-1$ 时刻行星车相对终点的距离信息； θ_t 和 θ_{t-1} 为 t 时刻和 $t-1$ 时刻行星车相对终点的角度信息。

表5 奖励函数的设置

Table 5 Setting of reward function

情景	数值
进入障碍物周围1.5m范围内	-1
远离目标	$-0.1 \times (d_t - d_{t-1})$
靠近目标	$0.1 \times (d_{t-1} - d_t)$
速度或角速度发生变化	$-0.01 \times (\omega_t - \omega_{t-1} + v_t - v_{t-1})$
到达目标周围1m范围内	20

4.3 结果与分析

将沙砾和岩石简化为静态障碍，搭建的仿真环境如图7所示。

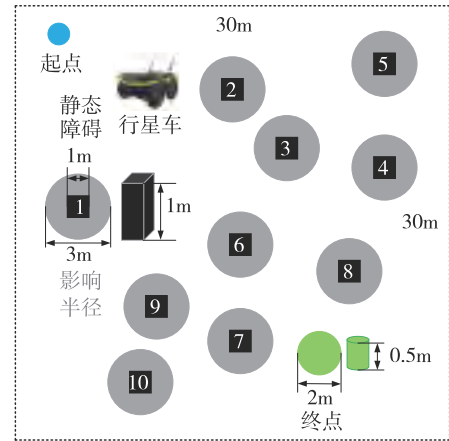


图7 仿真环境示意图

Fig.7 Schematic diagram of simulation environment

其中，静态障碍为边长为1m的黑色正方形，影响半径为1.5m。在每一幕训练时，行星车的起点和终点以及静态障碍的位置都是随机的，为了模拟行星探测环境的复杂程度，它们需要满足以下条件：行星车的起点和终点之间的距离不小于20m；各静态障碍之间的距离不小于5m；各静态障碍与行星车的起点和终点之间的距离不小于5m。

训练过程中奖励随幕数的变化趋势如图8所示，由图可知，网络收敛。

随机生成的500幅地图进行测试，测试过程中奖励随幕数的变化趋势如图9所示。由图可知，500次测试中行星车全部到达了终点。

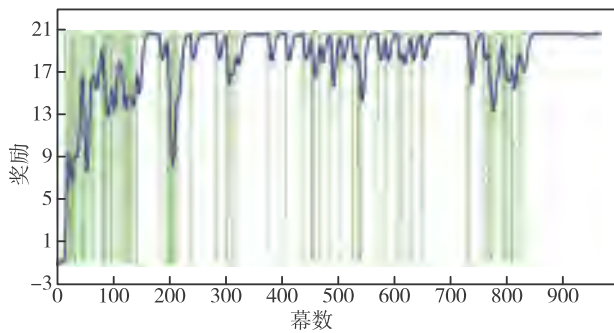


图8 训练过程中奖励随幕数的变化图

Fig.8 Change of reward with episode during training

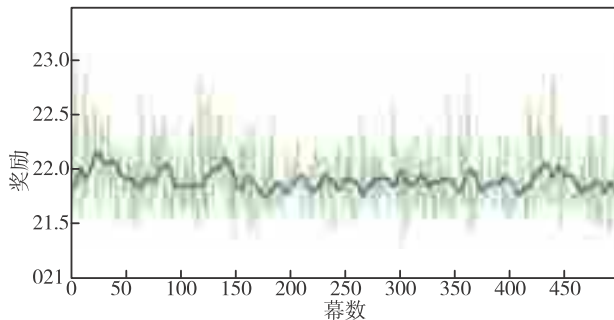


图9 测试过程中奖励随幕数的变化图

Fig.9 Chart of reward change with episode during testing

展示测试中的地图，如图 10 所示，规划的路径不仅能够成功避障，并且较短较直。

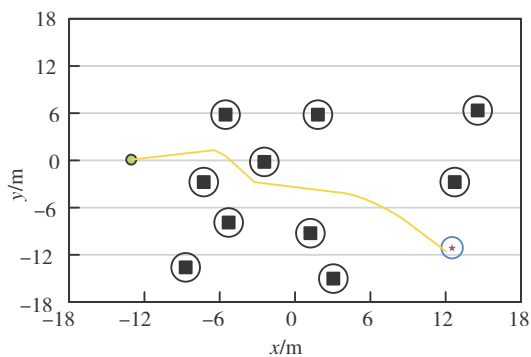


图10 路径规划结果示意图

Fig.10 Schematic diagram of path planning results

5 结论

本文研究了行星车端到端的路径规划问题，将其应用于大规模行星探测背景下宇航员和多机

器人协同作业的复杂环境中。使用CNN和LSTM处理多传感器信息，结合DQN、Double DQN、Dueling DQN和PER算法的优点，采用D3QN PER算法，赋予了行星车自主决策、自主学习以及自适应的能力。在静态障碍环境中进行了一系列实验，验证了该方法对不同环境的适应性，展示了其在航天领域深空探测行星车上的应用价值。

参考文献

- [1] 王雪瑶. 国外在轨服务系统最新发展(上)[J]. 国际太空, 2017(10):24-29.
- [2] 王雪瑶. 国外在轨服务系统最新发展(下)[J]. 国际太空, 2017(11):65-69.
- [3] 郭延宁, 冯振, 马广富, 等. 行星车视觉导航与自主控制进展与展望[J]. 宇航学报, 2018, 39(11):1185-1196.
- [4] Wright J, Hartman F, Cooper B, et al. Driving on mars with RSVP [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(2):37-45.
- [5] Wright J R, Hartman F, Maxwell S, et al. Updates to the rover driving tools for Curiosity [C]. International Conference on System of Systems Engineering, 2013.
- [6] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Playing atari with deep reinforcement learning [J]. Computer Science, 2013.
- [7] Van H H, Guez A, Silver D. Deep reinforcement learning with double Q-learning [J]. Computer Science, 2015.
- [8] Wang Z, Schaul T, Hessel M, et al. Dueling network architectures for deep reinforcement learning [C]. Proceedings of The 33rd International Conference on Machine Learning, 2016.

作者简介:



周思雨(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无人系统自主规划。



白成超(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空间机器人智能感知技术、SLAM。

基于拓展CBBA算法的在轨装配 航天器任务分配技术研究

于晓强, 郑红星

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对大型空间结构的在轨装配任务分配问题, 提出了基于扩展一致性算法的拍卖算法, 在考虑在轨装配过程中运输、安装等任务的时间先后特性以及某些特定复杂任务需要多航天器协同完成的任务约束条件下, 解决将各项任务分配给多个多种类航天器的在轨装配任务分配问题。算法首先针对复杂装配任务的类别约束及时间窗约束设计了新的竞价函数, 然后提出了一种新的一致性算法, 使算法可以处理多智能体任务分配问题。实验结果表明, 提出的任务分配算法可以得出多航天器在轨装配任务分配问题的无冲突解决方案, 可以保证复杂在轨装配任务的成功分配。

关键词: 在轨装配; 任务分配; CBBA; 一致性算法; 多智能体任务

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2019) 04-0511-08

The Extended-CBBA-Based Decentralized Auctions Algorithm for On-Orbit Assembly Spacecraft Task Allocation

YU Xiaoqiang, ZHENG Hongxing

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the task allocation problem of on-orbit assembly of large space structures, an auctioning algorithm based on extended consistency algorithm is proposed in this paper. Considering the time sequence characteristics of transportation, installation and other tasks in on-orbit assembly process, as well as the task constraints of certain complex tasks requiring multi-spacecrafts to cooperate with each other, the problem of on-orbit assembly task assignment that assigns tasks to multiple multi-spacecraft is solved. Firstly, a new bidding function is designed for class constraints and time window constraints of complex assembly tasks. Then, a new consensus algorithm is proposed to deal with multi-agent task assignment problem. The experimental results show that the proposed task allocation algorithm can provide a conflict-free solution to the multi-spacecraft on-orbit assembly task allocation problem and ensure the successful allocation of complex on-orbit assembly tasks.

Keywords: On-Orbit Assembly; Task Assignment; CBBA; Consensus Algorithm; Multi-Agent Task

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-05-20

基金项目: 国家博士后特别资助 (2019T120275)

1 引言

在轨装配技术属于模块化航天器技术的重要组成部分^[1],是可以将受限制的大型空间结构等大质量、大体积的地面装备拆解后分批次地发射到空间中再进行装配的关键技术之一^[2]。随着未来空间科学任务的日益复杂以及人工智能产业的蓬勃发展,对智能化、自主化空间在轨装配任务规划技术的需求也逐步提高^[3-5]。目前的在轨装配任务不再局限于单个航天器独自安装,而需要多个航天器协同完成多类在轨装配任务,从而实现空间资源的高效利用^[6]。面对不同种类的在轨装配任务(如零件运输任务、安装任务、维修任务等),不同任务之间会有一些的时间窗限制,如何统筹分配所有不同种类航天器资源,在最大化满足装配需求和资源充分利用的条件下,制定出最佳的航天器装配任务执行方案,是在轨装配领域中出现的亟待解决的新问题。

本文所研究的问题可描述为:针对大量在轨装配任务需求,在满足装配任务的类别约束及时间窗约束下,解决将各项任务分配给多个多种类航天器的在轨装配任务分配问题,即确定使用哪些航天器在哪段时间内按照什么顺序来执行哪些特定任务,以满足不同任务对不同种类机器人及

各自完成时间的装配需求,最终实现在轨装配任务圆满完成、且综合效益最大的目标。任务描述如图1所示。

常见的任务分配算法主要包括基于合同网的市场拍卖方法、分布式马尔可夫决策方法和模型预测控制方法^[7-10]。其中,基于合同网的拍卖算法面向动态任务的自主分配,并在过程中考虑智能体之间的信息交互和协商,是一种相对容易实现的分布式算法^[11-13]。基于一致性的捆绑拍卖算法(Consensus-Based Bundle Algorithm, CBBA)是一种利用拍卖算法的多任务分配算法,允许智能体对每个任务进行竞价,然后开发一个共识算法来解决智能体之间的分配冲突^[14-15]。本文提出了一种改进的CBBA算法,用于将具有协同任务约束的装配任务分配给具有不同能力的异构在轨装配航天器团队。

本文提出的改进算法包括以下两个方面:

(1)为体现在轨装配中运输、安装等任务的时间先后特性,为每个任务设置完成时间窗及完成任务所需时间。通过设计新的竞价函数,考虑运输及装配航天器运动速度及任务时间窗约束,保证所有任务在规定时间内完成,并使整个航天器团队所花费的时间或路程代价最小。

(2)考虑某些复杂运输/安装任务需要多个运

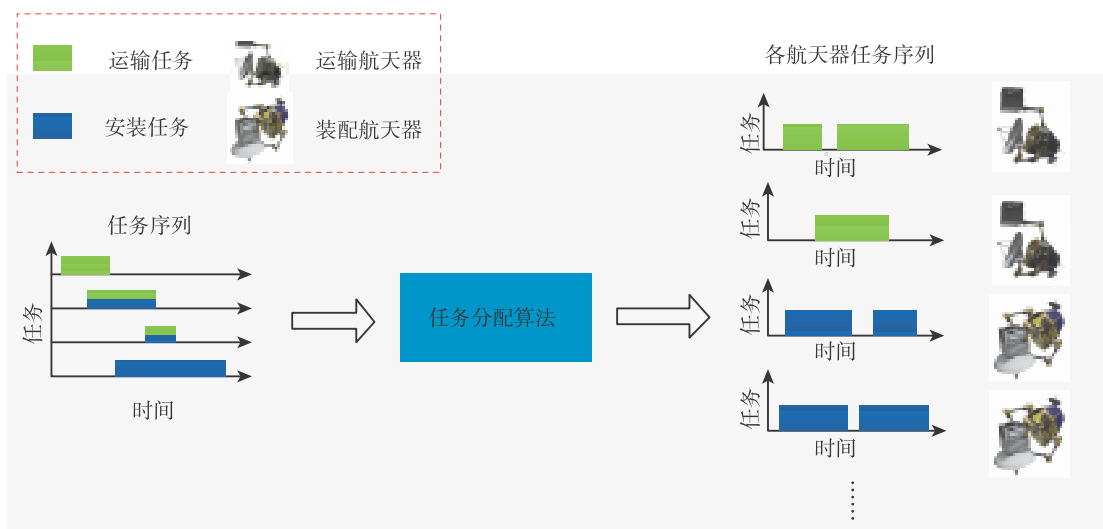


图1 在轨装配任务分配问题描述

Fig.1 Description of on-orbit assembly task assignment problem

输/安装航天器协同完成，这是原算法无法处理的情况。本文提出了一种新的一致性算法，更改了本地拍卖信息的储存方式，并提出了一种新的分配冲突解决规则，使算法可以处理多智能体任务分配问题。

最后，对本文提出的算法进行了仿真实验，证明了该算法能够在不增加额外计算时间情况下收敛到一个无冲突、可行的任务分配解决方案，可解决复杂多约束的在轨装配任务分配问题。

2 算法模型

2.1 CBBA算法原理

CBBA算法是一种分布式拍卖算法，为多智能体多任务分配问题提供了可靠的解决方案。CBBA算法在两个不同的阶段之间迭代进行，分别是拍卖包构建阶段和共识阶段，拍卖包构建阶段每个智能体按一定的顺序生成一个本地的任务包，共识阶段通过相邻智能体之间的通信及一致性算法解决分配冲突。

第一阶段：拍卖包构建阶段。每个智能体在本地构建一个任务包，其中包含它计划在分配过程中完成的所有任务，然后智能体不断地向包中添加任务并进行合理排序，直到达到它所能完成的任务数量上限。每个智能体*i*任务包中含有两个任务相关向量： b_i 和 p_i 。其中 b_i 按添加进包的先后进行排序，而 p_i 按智能体计划完成任务的先后进行排序。 $S_i^{p_i}$ 表示智能体*i*按 p_i 中的任务序列执行任务得到的总奖励，当包内插入了新的任务*j*时， $S_i^{p_i \oplus_n \{j\}}$ 表示将任务*j*插入到任务路径 p_i 的第*n*个位置后得到的总奖励。 $c_{ij} [b_i]$ 表示由于添加任务*j*到任务包而导致的得分增长量。

$$c_{ij} [b_i] = \begin{cases} 0, & \text{if } j \in b_i \\ \max_{n \leq |p_i|} S_i^{p_i \oplus_n \{j\}} - S_i^{p_i}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

每个智能体在当前路径 p_i 中的所有可能位置插入新任务*j*，从而确定使 $c_{ij} [b_i]$ 最大的位置*n*。然

后依次添加所有智能体可完成的任务至任务包内，从而确定出最大化任务奖励的完成路径 p_i 。

每个智能体在构建完成自己的任务包后，需要构建包含竞标信息的量：中标价格列表 y_i 、中标智能体列表 z_i 、更新时间 s_i 。 y_i 表示每个任务的当前出价中出价最高的价格， z_i 表示出价最高的智能体， $z_{ij}=k$ 表示智能体*i*认为任务*j*被分配给智能体*k*。智能体不仅需要知道它选择的任务是否高于最高出价，还要知道每个任务的分配对象。因此，需要更复杂的冲突解决规则来解决多智能体间的分配冲突，实现更好的分配。

第二阶段：共识阶段。CBBA算法的共识阶段是避免太多智能体分配到相同的任务。当智能体*i*收到来自另一个智能体*k*的消息时， y_i 、 z_i 和 s_i 用于产生无冲突的任务分配细节。智能体*i*可以对任务*j*采取三种可能的行动：(1)更新：当 $y_{ij} < y_{kj}$ 时， $y_{ij} = y_{kj}$ ， $z_{ij} = z_{kj}$ ；(2)保留：当 $y_{ij} > y_{kj}$ 时， $y_{ij} = y_{ij}$ ， $z_{ij} = z_{ij}$ ；(3)重置：当路径 p_i 中已经有其它变动， $y_{ij} = 0$ ， $z_{ij} = \emptyset$ 。

如果以上规则更改了智能体的出价列表，每个智能体将检查更新或重置的任务是否在其任务包中，如果是，则在任务包内删除该任务。因为删除该任务会改变所有后续任务的得分，所以也需要删除在 b_m 之后添加到捆绑包中的所有任务，对应的中标价格列表 y_i 以及中标智能体列表 z_i 都会被重置，即： $y_{i,b_m} = 0$ ， $z_{i,b_m} = \emptyset$ ， $\forall n > \bar{n}_i$ ； $b_m = \emptyset$ ， $n > \bar{n}_i$ 。如此依次解决每个任务的分配冲突，然后算法返回到第一阶段并重新添加新任务。算法会一直迭代这两个阶段，直到它们收敛到一个无冲突的解决方案。

2.2 考虑时间约束的竞价函数

考虑在轨装配过程中运输、安装等各子任务的时间先后，需要为每个子任务设置任务时间窗约束。本文设计了一种考虑任务复杂时间约束的竞价函数，考虑每个任务的时间约束，保证所有任务在其规定时间段内完成，并使整个航天器团队所花费的时间及路程代价最小。本文首先定义

了时间分数项 $s_j(t)$ 以及时间窗 $u_j(t)$ 如下:

时间分数项 $s_j(t)$: 表示航天器在时间 t 到达任务时从任务 j 获得的奖励, 是基于任务的奖励值 R_j 和任务时间惩罚及距离惩罚的函数。

$$s_j(t) = e^{-\lambda_j(t-t_{j\text{start}})}(R_j - P_{\text{distance}}) \quad (2)$$

其中, $(t-t_{j\text{start}})$ 是任务开始时间和航天器到达任务时间之间的差异, 而 λ_j 是惩罚航天器迟到的折扣参数, P_{distance} 是惩罚航天器按路径 p 从上一任务到任务 j 所花费的路程项。

时间窗 $u_j(t)$: 任务的有效时间窗口表示允许航天器执行任务的时间。对于任务 j , 此窗口定义为:

$$u_j(t) = \begin{cases} 1, & t_{j\text{start}} \leq t \leq t_{j\text{end}} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

定义航天器对任务 j 的竞价函数 $c_j(t_{ij})$ 为:

$$c_j(t_{ij}) = s_j(t_{ij}) * u_j(t_{ij}) \quad (4)$$

t_{ij} 是其到达任务 j 位置的时间, 是航天器在到达任务 j 之前所采取的路径 p 的函数。给定一个路径 p_i , 和一组对于路径中所有任务 k ($k \in p_i$) 对应的最佳时间 $\tau_{ik}^*(p_i)$, 对于每个任务 $j \notin p_i$, 执行任务 j 的最佳时间定义为:

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^*(p_i) &= \operatorname{argmax}_{\tau_{ij} \in (0, \infty)} c_j(\tau_{ij}(p_i \oplus j)) \\ \tau_{ik}(p_i \oplus j) &= \tau_{ik}^*(p_i), \quad \forall k \in p_i \end{aligned} \quad (5)$$

其中 \oplus 表示将任务 j 插入路径 p_i 而不改变 p_i 中已有任务的顺序。上式约束为, 将新任务 j 插入路径 p_i 不能影响路径中已有任务的当前到达时间。通过将 j 插入最佳位置 $p_i \leftarrow (p_i \oplus j)$ 来更新路径。然后将任务 j 的最佳时间和得分保存为: $\tau_{ij}(p_i) = \tau_{ij}^*$ 和 $c_{ij}(\tau_{ij}(p_i)) = c_j(\tau_{ij}^*)$ 。

2.3 扩展一致性算法

考虑大型空间结构中某些复杂运输/安装任务需要多个运输/安装航天器协同完成, 这是原算法无法处理的情况。本文据此提出了一种新的一致性算法, 更改了本地拍卖信息的储存方式, 并针对多智能体任务分配冲突提出了一种新的分配冲突解决规则。在算法的拍卖包构造阶段, 每个

航天器的任务包 b_i 和路径 p_i 的构造方法与原来的 CBBA 算法相同。在算法的分配冲突解决阶段, 航天器接收来自附近航天器的所有任务分配信息的数据, 然后使用一致性算法协调所有任务的分配冲突, 下面对两部分内容分别进行详细描述。

2.3.1 航天器的信息矩阵构造

首先需要确定一致性算法所需的数据。当开始使用 CBBA 算法时, 任务及航天器信息存储在航天器本地。每个航天器存储两个长度为 N_m 的向量 (其中, N_m 是总任务数), 中标列表 y_i 和中标航天器列表 z_i 。每个航天器可以使用 z_i 确定每个任务的出价最高者, 并使用 y_i 确定最高出价。当使用原始 CBBA 共识算法处理多航天器任务的数据时, 不同的任务可以分配不同数量的航天器, 对于需要多个分配的任务, 向量不能存储每个分配的数据。因此, 为了解决需要多航天器的任务分配问题, 需要改变存储这些值的方式, 必须将这两个向量转换成一个矩阵, 以确定多个获胜者及其出价。

将这两个向量组合成一个包含所有拍卖获胜信息的信息矩阵 B 。矩阵使用行来显示任务, 使用列来显示航天器, B_{ij} 对应于航天器 i 对任务 j 的出价, 如果航天器尚未出价, 则为 0。此外, 矩阵 B 的大小为 $N_n * N_m$, 其中 N_n 是在轨航天器数, 每行中的非零值的数目不应超过任务所需的航天器数 L_j 。除此之外, 还使用 B_{mj}^i 来区分每个航天器的本地数据, $B_{mj}^i > 0$ 表示航天器 i 认为任务 j 分配给航天器 m , 算法 1 给出了如何将 z_i 、 y_i 转换成矩阵集 B_{mj}^i 。

算法 1: 构造航天器 i 的信息矩阵 B

```

for  $j = 1$  to  $N_m$  do
  for  $m = 1$  to  $N_n$  do
    if  $z(i,j) = m$  then
       $B_{mj}^i = y(m,j)$ 
    end
  end
end
end

```

2.3.2 分配冲突解决规则

原 CBBA 算法使用一个查找表来确定是根据发送者的信息更新还是重置接收者的信息。对于需

要多航天器解决的任务，接收者不必重置或更新与自己不同的数据，而更可能合并数据，从而使两个航天器的数据都是正确的和保存的。新的分配冲突解决算法分为两个阶段，以便更好地结合航天器的数据，应对任务的多样性。

第一个阶段是将航天器的时间信息与它接收的所有数据进行比较，并接受更新的数据。通过比较航天器的时间戳信息，可以知道哪个航天器的数据比较新。在算法2中的4-8行， $s_{km} > s_{im}$ 表示 k 有更多的最新通信数据，这些数据可能是更高的出价或更多的最新分配信息，应该保存。

在第二阶段，如果所有发送方和接收方当前都是最新的信息，根据发送方的数据更新接收方的数据。首先检查发送方 k 认为的分配给每个任务 j 的航天器 m （算法2中第10-11行）。如果航天器 i 认为该任务没有分配给航天器 m （ $B_{mj}^i = 0$ ），并且分配给任务 j 的航天器数量还没有达到该任务的需求数量，那么可以通过 $B_{mj}^i = B_{mj}^k$ 直接更新分配矩阵，将任务 j 同时分配给航天器 i 。

另外，当任务 j 的分配完成或有更好的出价时，应该按算法2中第12-14行更新任务 j 的分配矩阵。当接收者认为任务 j 的分配已满时，我们首先在分配给任务 j 的航天器中找到出价最低的航天器。如果发送者 k 认为出价高于此值，应该用发送者的数据替换最低出价，用 $B_{nj}^i = 0, B_{mj}^i = B_{mj}^k$ 更新新的分配矩阵（其中 n 是最低的投标航天器）。这里也可能有一个问题，当最小出价等于发送者的数据时，就可能出现死锁。因此，制定一个简单的规则，当航天器的出价相等时，ID较高的航天器具有优先级（算法2中的第15-19行）。

算法2：航天器 i 的分配冲突解决

```

receive  $B_{ij}^k$  and  $s_k$  from agent  $k$ 
for  $j = 1$  to  $N_m$  do
  for  $m = 1$  to  $N_n$  do
    if  $B_{mj}^i > 0$  and  $m \neq i$  then
      if  $s_{km} > s_{im}$  or  $m = k$  then
         $B_{mj}^i = B_{mj}^k$ 
      end
    end
  end
end

```

```

end
if  $m \neq i$  and  $B_{mj}^i = 0$  and  $B_{mj}^k > 0$  then
  if  $\sum n(B_{nj}^i > 0) < L_j, \forall n$  then
     $B_{mj}^i = B_{mj}^k$ 
  else if  $\min(B_{nj}^i) < B_{mj}^k, \forall n$  then
     $B_{mj}^i = 0$ 
     $B_{mj}^i = B_{mj}^k$ 
  else if  $\min(B_{nj}^i) = B_{mj}^k, \forall n$  then
    if  $m > n$  then
       $B_{nj}^i = 0$ 
       $B_{mj}^i = B_{mj}^k$ 
    end
  end
end
end
end
end
end

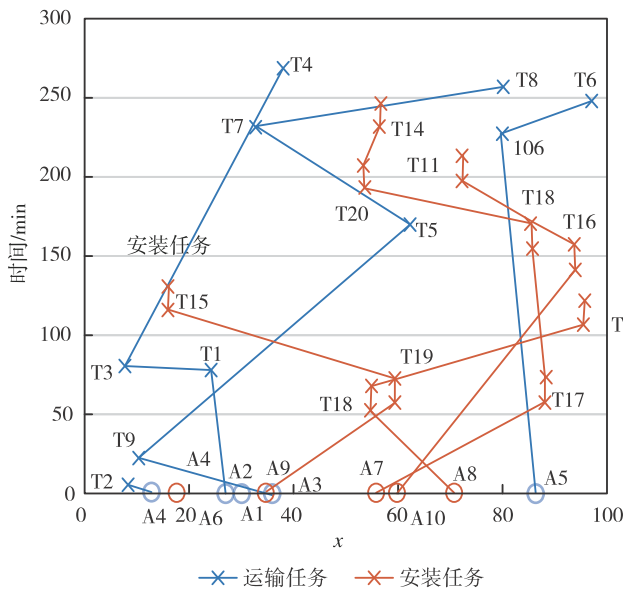
```

3 仿真结果及分析

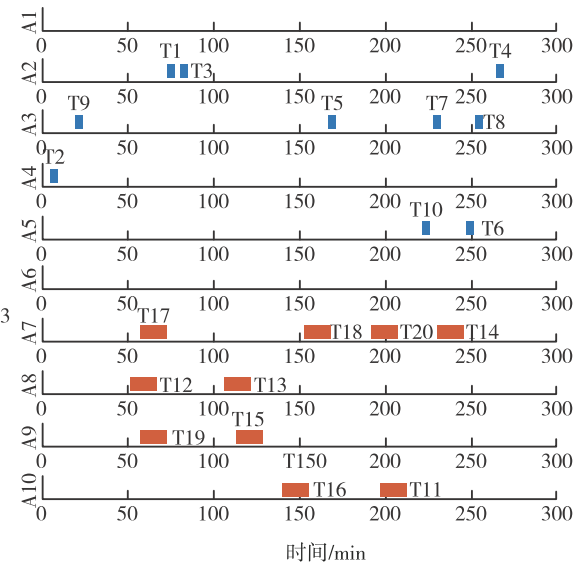
本文中用于测试上述算法的仿真场景包括两种异构航天器（运输航天器和装配航天器），它们负责完成两类任务（运输和安装），每个任务所需的航天器数量可以单独定义。每个任务都有5min的时间窗口，一个随机的开始时间，以及5min或15min的任务执行时间。每个航天器都有自己的速度和特定的燃料消耗。

本文进行了以下仿真实验：每次实验包含20个任务，其中一半是运输任务，一半是装配任务。第一个实验验证了本文设计的竞价函数的有效性，其中每个任务只需要1个航天器完成；第二个实验验证拓展一致性算法，每个任务需要2个航天器完成；第三个实验设置为混合实验，运输任务需要2个运输航天器，装配任务需要1个装配航天器。每个实验的目标是最大化完成任务的所有航天器的奖励总和。多航天器任务将奖励完成任务的每个航天器，显示此类任务的难度和重要性，逐渐增加异构航天器的数量来测试算法性能。每个实验运行100次并记录平均数据。

图2显示了实验1的具体分配细节，图2(a)显示了每个航天器随时间的分配路径(为了更直观显示分配情况，只显示了x方向随时间的位置变化)，图2(b)显示了每个航天器的具体分配时间表。从图中可以看出，含新竞价函数的分配算法可以成功处理具有复杂时间约束的在轨装配任务分配问题。



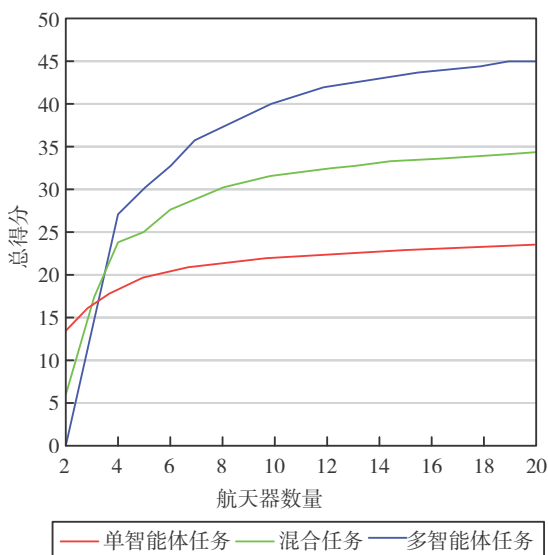
(a) 航天器任务执行路径



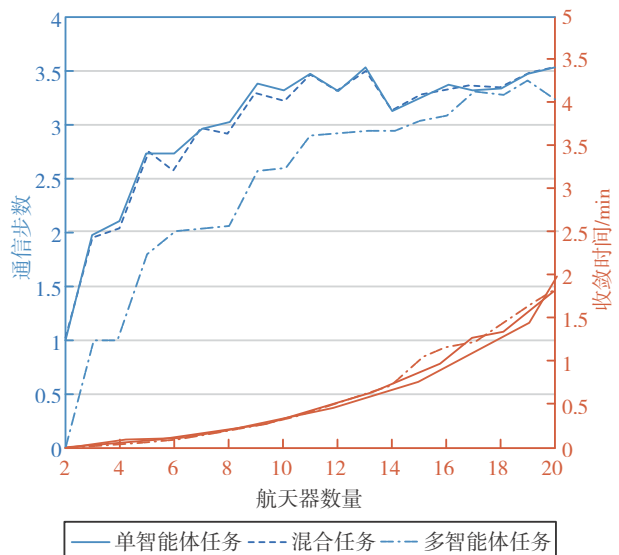
(b) 航天器任务执行时间表

图2 实验一任务分配细节(共10个航天器, 5个运输航天器, 5个安装航天器)

Fig.2 The first experimentation task assignment details (10 spacecrafts, 5 transport spacecrafts, 5 installation spacecrafts)



(a) 各实验总得分情况



(b) 各实验通信步数及收敛时间情况

图3 各实验的实验性能对比

Fig.3 Experimental performance between the Single-Agent, Multi-Agent and Mix experiments

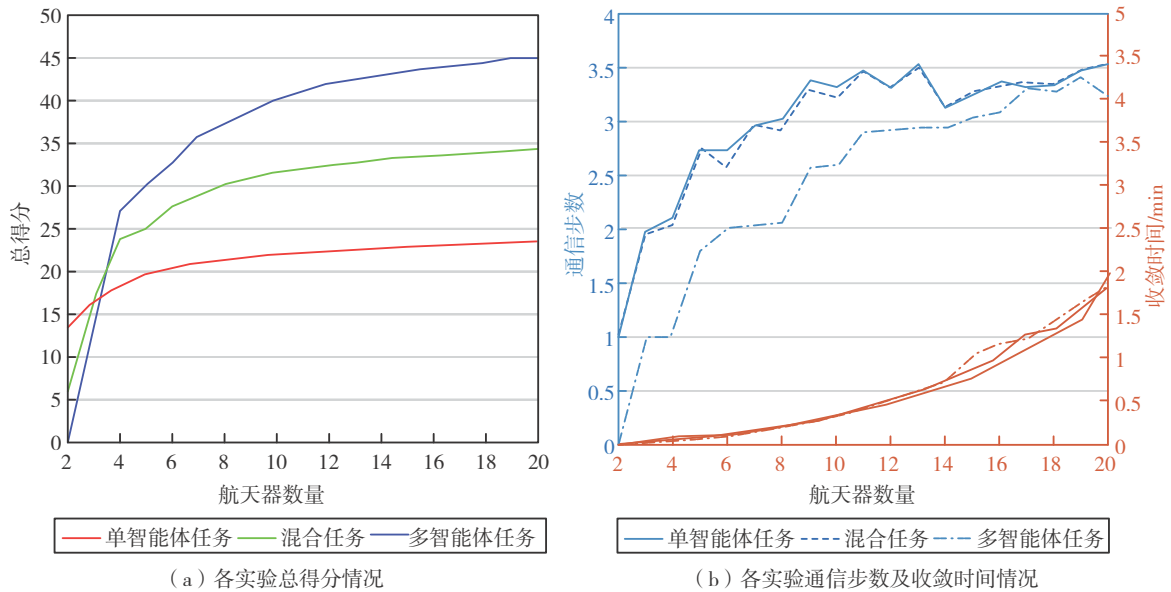


图4 实验二任务分配细节 (共10个航天器, 5个运输航天器, 5个安装航天器)

Fig.4 The second experimentation task assignment details (10 spacecrafts, 5 transport spacecrafts, 5 installation spacecrafts)

化而发生明显变化, 它表明新的一致性算法不会导致计算量的增加。

值得注意的是, 多航天器任务的通信步骤少于单航天器任务, 这可以通过图4中航天器的分配细节解释。图4显示了共10个航天器执行多航天器任务的分配细节。

与单个航天器任务实验中每个任务需要选择最佳航天器相比, 在执行多航天器任务过程中, 当多个航天器组成团队完成第一个任务时, 他们通常会一起执行下一个最近的任务, 从而减少通信和距离成本。当然, 航天器也会通过一致性算法形成一个更佳选择的新团队完成任务。但总的来说, 这种现象减少了航天器之间的分配冲突, 减少了通信步骤的数量。

4 结论

本文提出了一种改进的CBBA算法, 它为大型空间结构的在轨装配任务分配问题提供了一种分布式解决方法。算法的改进包括设计新的竞价函数使CBBA算法能够处理具有复杂时间约束的在轨装配任务, 以及针对某些需要多航天器协同完成

的特定复杂任务提出了扩展一致性算法, 针对多智能体任务的分配冲突, 将原CBBA算法中的中标名单和中标代理名单组合成一个包含所有中标信息的矩阵, 并设计了新的冲突解决规则, 解决了多代理任务引起的分配冲突。

本文通过仿真实验验证了该算法的有效性。实验表明, 本文设计的含新竞价函数的分配算法可以成功处理具有复杂时间约束的在轨装配任务分配问题。同时, 提出的扩展一致性算法成功解决了复杂多智能体任务的分配问题, 且在不增加算法的运行时间情况下显著提高了分配任务总得分。综上所述, 本文提出的分布式任务分配算法可以得出多航天器任务分配问题的无冲突解决方案, 可以保证复杂在轨装配任务的成功分配。

参考文献

[1] 贾平. 模块化可重构航天器将成为航天器发展新方向 [J]. 国际太空, 2019 (5):42-45.
 [2] 郭继峰, 王平, 崔乃刚. 大型空间结构在轨装配技术的发展 [J]. 导弹与航天运载技术, 2006 (3):28-35.
 [3] 张肇聿, 王一琳, 李志. 基于人工智能技术的25个行业

- 发展趋势 [J]. 无人系统技术, 2019, 2 (1):17-22.
- [4] 王飞跃. 从人工智能到智能产业: 迈向第三轴心时代的智慧世界 [J]. 无人系统技术, 2019, 2 (1):1-4.
- [5] 张涛, 李清, 张长水, 等. 智能无人自主系统的发展趋势 [J]. 无人系统技术, 2018, 1 (1):11-22.
- [6] 关英姿, 刘文旭, 焉宁, 等. 空间多机器人协同运动规划研究 [J]. 机械工程学报, 2019.
- [7] Oh G, Kim Y, Ahn J, et al. Market-based task assignment for cooperative timing missions in dynamic environments [J]. Journal of intelligent & robotic systems, 2017, 87 (1): 97-123.
- [8] Kong Y, Zhang M, Ye D. A belief propagation-based method for task allocation in open and dynamic cloud environments [J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 115: 123-132.
- [9] 李月娟, 吕永健, 常迁臻, 等. 基于MMDP的无人作战飞机任务分配模型研究 [J]. 计算机应用与软件, 2013, 30 (7):276-279+286.
- [10] Zheng Y, Song Y, Hill D J, et al. Online distributed mpc-based optimal scheduling for charging stations in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15 (2): 638-649.
- [11] 付光远, 李源, 付文字, 等. 改进合同网在多机器人围捕任务分配中的应用 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40 (3):98-102+216.
- [12] Baliyarasimhuni S, Beard R. Multiple UAV task allocation using distributed auctions [C]. Aiaa Guidance, Navigation & Control Conference & Exhibit. 2013.
- [13] Johnson L B, Choi H L, Ponda S S, et al. Decentralized task allocation using local information consistency assumptions [J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2017, 14 (2):103-122.
- [14] Choi H L, Brunet L, How J P. Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25 (4):912-926.
- [15] Brunet L, Choi H L, How J. Consensus-based auction approaches for decentralized task assignment [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2013.

作者简介:



于晓强 (1994-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无人系统智能任务规划技术。



郑红星 (1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空间无人系统任务规划。

浅析国外人工智能技术发展现状与趋势

杨卫丽

(军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100142)

摘要: 阐述了人工智能的概念内涵, 介绍了人工智能的主要特征, 从机器博弈、模式识别、机器翻译、认知推理、社会计算五个方面对国外人工智能技术发展现状进行了分析, 预测了人工智能未来发展趋势, 并对国外人工智能的发展路径进行了总结。综述表明, 当前人工智能技术还处于依托数据驱动的感知智能发展阶段, 总体技术水平与人类智能水平还有很大差距, 未来的发展趋势将由感知智能向认知智能方向迈进, 由机器智能向群体智能方向转变, 由基础支撑向优化升级方向发展。人工智能将逐步带领人类进入人机协同的新时代。

关键词: 人工智能; 认知智能; 群体智能; 自主; 模式识别

中图分类号: TP **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2019) 04-0519-05

Initial Analysis on the Status and Development Trend of Foreign Artificial Intelligence

YANG Weili

(Academy of Military Science PLA China, National Innovation Institute of Defense Technology, Beijing 100142, China)

Abstract: This paper expounded the connotation of the concept of artificial intelligence, introduced the main characteristics of artificial intelligence, analyzed the development status of foreign artificial intelligence technology from five aspects: machine game, pattern recognition, machine translation, cognitive reasoning and social computing, predicted the future development trend of artificial intelligence and summarized the development path of foreign artificial intelligence. The summary shows that the current artificial intelligence technology is still in the development stage of data-driven perceptual intelligence. There is still a big gap between the overall technology level and human intelligence level, and the overall technical level is still far from the level of human intelligence. The future development trend will be from perceptual intelligence to cognitive intelligence, from machine intelligence to group intelligence, and from basic support to optimization and upgrading. Artificial intelligence will gradually lead human into a new era of human-computer collaboration.

Keywords: Artificial Intelligence; Cognitive Intelligence; Swarm Intelligence; Autonomy; Pattern Recognition

收稿日期: 2019-06-02; 修回日期: 2019-07-20

1 引言

2019年2月11日，美国总统特朗普签署行政命令，启动美国人工智能计划^[1-2]，旨在加强美国人工智能技术发展，强调“维持美国人工智能领导力”。这一动向预示着人工智能作为颠覆性前沿技术，已成为未来科技领域角逐的新战场。

2 人工智能内涵与特征

2.1 人工智能基本内涵

人工智能概念最早出现在1950年英国数学家阿兰·图灵的著名论文《计算机器和智能》中，图灵提出了人工智能的基础问题：机器能够思考吗？

1956年，在达特茅斯学院的会议^[3]上，以约翰·麦卡锡和明斯基为代表的一批科学家共同探讨用机器模拟人类智能问题，首次提出了“人工智能”这一术语，也因此被认为是人工智能诞生的标志。麦卡锡给出了他对人工智能的定义：制造智能机器、特别是智能计算机程序的科学与方法。



图1 达特茅斯学院会议会址
Fig.1 Meeting site of Dartmouth College

在此后的60余年发展进程中，人工智能作为一门前沿交叉学科，一直没有统一的定义。《大英百科全书》对人工智能的解释：数字计算机或者数字计算机控制的机器人在执行智能生物体才有的一些任务上的能力；《维基百科》对人工智能的解释：人工智能就是机器展现出的智能，即只要是某种机器，具有某种或某些智能的特征或表现，

都应该算作人工智能；美国人工智能学会对人工智能的解释：科学地认识人类思想和智能行为，并利用计算机对其进行模仿和体现的学科等。

尽管各种表述不尽一致，但核心思想趋同。即：人工智能的发展不是把人变为机器，也不是把机器变成人，而是“研究、开发用于模拟、延伸和扩展人类智慧能力的理论、方法、技术及应用系统，从而解决复杂问题的技术科学”。人工智能研究的目的是使机器能够胜任一些通常需要人类智能才能完成的复杂工作，如会看、会听、会说、会思考、会学习、会行动。

2.2 人工智能主要特征

与其他技术相比，人工智能技术具有独到的技术特征。一是自主性，这是人工智能的核心属性，意味着随着环境、数据或任务的变化，机器可以自适应调节参数或更新优化模型，甚至不排除演化“自我意识”的可能。二是进化性，人工智能技术具备学习知识、运用知识的能力，能在训练中快速进化升级，通过不断学习、获取各类知识，产生各种洞见，升级、改进原有状态，达到“终身学习”的完美状态。三是可解释性，人工智能技术有一个模糊的特质，即无法给出行为决策推理过程，虽然基于过去积累的大量数据，可自动分析总结，预测未来会发生的事情，但却往往会产生不可预知的结果，这种“黑盒”特性使可预测性问题复杂化，难以获得人类的信任。四是速度与耐力，人工智能技术克服了人的生理机能限制，可连续、长时间执行重复性、机械性、高危性任务，在超算能力的支撑下，人工智能的反应速度是人类的上千倍，工作效率远超人类。

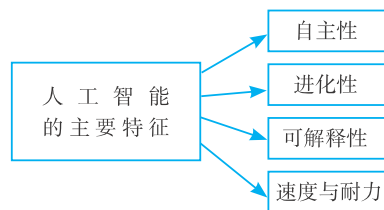


图2 人工智能主要特征
Fig.2 Main characteristics of Artificial Intelligence

3 人工智能发展现状

从人工智能概念诞生至今，已有60余年，先后经历了推理期、知识期和机器学习期。在“两起两落”之后，特别是进入2010年以后，依靠大数据、GPU并行计算、深度学习技术的发展，人工智能迎来了第三次复兴，相关技术领域的研究也取得了实质进展。

(1) 机器博弈。2016年3月，谷歌 AlphaGo 机器人在围棋比赛中以4:1的成绩击败了世界冠军李世石^[5]，下棋招法超出人类对围棋博弈规律的理解，扩展了围棋多年以来积累的知识体系。2017年初，AlphaGo的升级版Master横扫全球60位顶尖高手。2018年，谷歌旗下Deepmind团队发布AlphaGo Zero，该程序能够在无任何人类输入的条件下，三天自我博弈490万盘棋局学会围棋，并以100:0的成绩击败AlphaGo。由于围棋被认为是非常复杂的棋类游戏，因此Alpha Zero被视为人工智能突破性的进展。



图3 AlphaGo与李世石的博弈

Fig.3 Game between AlphaGo and Lee Sedol

(2) 模式识别。作为人工智能最具应用价值的技术之一，识别技术已发展成熟，甚至超出人类水平。在人脸识别方面，运用深度学习进行人证比对（验证证件持有人与证件照片是否一致），在万分之一的误识率下，正确率已经超过98%；在图像识别方面，ImageNet大规模视觉识别挑战（ILSVRC）要求准确地描述每张图片上是什么，结果显示，人类的误差率为5%，而运用深度神经网络的统计学习模型的误差率从2012年的16%降低到2015年的3.5%^[6]。2019年，葡萄牙研究人员

采用卷积神经网络模仿人类和其他哺乳动物大脑理解周围世界，证明了该网络可以自学并识别个体运动。其中，识别斑马鱼和苍蝇的准确率都在99%以上。在语音识别方面，2017年，谷歌大脑和Speech团队联合发布最新端到端自动语音识别系统，将词错率降至5.6%，接近人类水平。2017年，苹果公司推出的智能私人助理Siri和微软公司推出的个人智能助理微软小娜已经能够与人聊天。

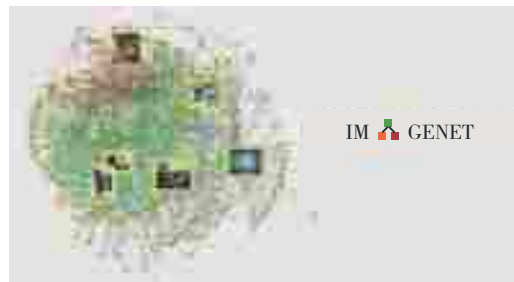


图4 ImageNet 数据库

Fig.4 ImageNet database

(3) 机器翻译。深度学习将机器翻译提升到新的水平。2016年6月，谷歌公司的谷歌神经网络机器翻译（GNMT）系统，采用深度学习技术克服整句翻译难题，使出错率下降70%，在部分应用场景下接近专业人员的翻译水平。同年11月，谷歌多语种神经网络机器翻译系统上线，能在103个语种间互译。2017年4月，谷歌翻译改用基于“注意力”机制的翻译架构，使机器翻译水平再创新高。同年5月，Facebook公司依托先进图形处理器硬件系统，结合卷积神经网络，开发出新的语言翻译系统，处理速度是谷歌翻译的9倍。



图5 谷歌机器翻译系统

Fig.5 Google machine translation system

(4) 认知推理。2011年，IBM研制的深度问答系统（DeepQA）沃森超级计算机在美国知识抢答

竞赛节目《危险边缘》^[7]中，以3倍分数优势战胜了人类顶尖知识问答高手，刷新机器认知极限。2015年，美国马里兰大学研究人员开发出一种新系统，使机器人在“观看”YouTube网站上“如何烹饪”系列视频后，无需人工干预，即可解析视频信息，理解、掌握示范要领，并利用新获取的信息识别、抓取和正确运用厨具进行烹饪，进一步提高机器对场景及事件的认知水平。



图6 沃森超级计算机

Fig.6 Watson supercomputer

(5) 社会计算。机器能够更高效、快速处理海量的数据。从1997年深蓝基于规则的暴力搜索战胜国际象棋冠军，到2016年得益于大数据提供了海量学习素材的AlphaGo攻克围棋，人工智能的计算能力提高了3万倍，远超人类计算能力。

从现阶段人工智能的发展看，计算智能已超越人类水平；面向特定领域的感知智能进步显著，形成了人工智能领域的单点突破，甚至在局部智能水平的单项测试可以超过人类智能，应用条件基本成熟，但不具备通用性；智能认知发展尚处于初级阶段。总之，当前人工智能技术还处于依托数据驱动的感知智能发展阶段，总体技术水平与人类智能水平还有很大差距^[8-9]。

4 人工智能发展趋势

人工智能经过60多年的发展已取得重大进展，但总体上还处于初级阶段。未来，在新一代信息技术发展驱动下，人工智能将进入新一轮创新发展期，呈现以下发展走势。

(1) 感知智能向认知智能方向迈进

现阶段的人工智能依托大数据驱动、以芯片和深度学习算法框架为基础，虽在感知智能方面已取得突破，但存在深度学习算法严重依赖海量数据，泛化能力弱且过程不可解释等问题^[10-11]；同时，随着摩尔定律的失效，支持人工智能发展的硬件性能呈指数增长将不可持续。因此，依托深度学习的人工智能发展将会遭遇瓶颈，以迁移学习、类脑学习等为代表的认知智能研究越发重要，追求人工智能通用性、提升人工智能泛化能力成为未来人工智能发展目标。

(2) 机器智能向群体智能方向转变

随着新一代信息技术的快速应用及普及，深度学习、强化学习等算法的不断优化，人工智能研究焦点已从单纯用计算机模拟人类智能、打造具有感知智能/认知智能的单一智能体，向打造多智能体协同的群体智能转变，这将是未来的主流智能形态。在去中心化条件下，通过“群愚生智”涌现更高水平的群体智能；计算机与人协同，通过融合人类智能在感知、推理、归纳和学习等方面的优势，与机器在搜索、计算、存储、优化等方面的优势，催生人机融合智能，实现更智能地陪伴人类完成复杂多变任务^[12-13]。

(3) 基础支撑向优化升级方向发展

人工智能的发展取决于三要素，即数据、算法、算力。面向未来，万物智联。数据获取将超高速率、超多渠道、超多模态、超大容量和超低延时，数据形态从静态、碎片化转向动态、海量化、体系化；数据处理从大规模并行计算向量子计算、从云端部署向边缘计算扩展，机器运算处理能力高效去中心化^[14]；算法模型将是深度学习算法优化和新算法的探索并行发展。提升可靠性、可解释性以及无监督学习、交互式学习、自主学习成为未来发展的热点方向。

5 人工智能的实现路径

在推动人工智能发展的道路上，国外当前主

要在探索两条途径^[15]。一条途径是围绕人类如何处理感官、感知与认知数据展开研究,通过模拟人类的认知机制,形成以模型学习驱动的机器智能;另一条途径是强调对人脑模型的研究,以工程技术手段模拟人脑神经系统的结构和功能,通过大量的非线性并行处理器来模拟人脑中众多的神经细胞(神经元),用处理器的复杂连接关系来模拟人脑中众多神经元之间的突触行为,形成认知仿生驱动的一类脑智能。现阶段,人工智能发展的主流技术路线仍是机器智能,类脑智能整体还处于实验室研究阶段。

6 结束语

得益于深度学习取得的显著成果,人工智能近年来得到了快速发展,并逐渐在各领域开始应用,但距离“很好用”还有诸多瓶颈,如需要海量数据和高质量的标注;自主学习、自适应能力弱;计算机CPU、GPU消耗量大;可靠性、泛化性、可解释性不足;以及未来发展还有很大不确定性等。然而,人工智能朝着人类智能水平逼近发展的大方向不会改变,并会逐步带领人类进入人机协同的新时代。

参 考 文 献

- [1] Department of defense. Summary of the 2018 department of defense artificial intelligence strategy [P/OL] . <http://www.defense-aerospace.com/articles-view/reports/2/199929/pentagon-releases-artificial-intelligence-strategy.html>
- [2] Executive order on maintaining American leadership in artificial intelligence [P/OL] . <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-maintaining-american-leadership-artificial-intelligence/>
- [3] John M C, Marvin L M, Nathaniel R. A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence [J] . AI Magazine, 1955, 27 (4): 12.
- [4] Gregory C A, Taniel C. Artificial intelligence and national security [P/OL] . <https://thebulletin.org/2018/02/artificial-intelligence-and-national-security/>
- [5] 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): 484-489.
- [6] Executive office of the president. Preparing for the future of artificial intelligence [P/OL] . <http://www.whitehouse.gov/blog/2016/05/03/preparing-future-artificial-intelligence>.
- [7] 徐贲. 没文化的超级人工智能电脑“沃森” [J] . 教师博览, 2013 (7): 48-49.
- [8] 谭铁牛. 人工智能: 天使还是魔鬼? [J] . 科学新闻, 2018, 547 (5): 3.
- [9] 丁圣勇, 樊勇兵, 陈楠. 人工智能现状及展望 [J] . 广东通信技术, 2017 (12): 42-45.
- [10] 百度 AI 产业研究中心. 百度大脑领导力白皮书 [P/OL] . http://www.sohu.com/a/321105065_120128985.
- [11] CBinsights. what is next in AI? [P/OL] . <https://www.pearson.com/corporate/about-pearson/innovation/smarter-digital-tools/what-is-ai-.html>
- [12] National science. The national artificial intelligence research and development strategic plan [P/OL] . https://www.nitrd.gov/news/national_ai_rd_strategic_plan.aspx
- [13] 彭备战, 林德杰, 欧金成. 人工智能在传感器领域的应用 [J] . 传感器技术, 2002, 21 (3): 5-7.
- [14] 杨焱. 人工智能技术的发展趋势研究 [J] . 信息与电脑 (理论版), 2012 (8): 151-152.
- [15] 王冲鹄. 类脑智能: 人工智能发展的另一条路径 [J] . 人工智能学家, 2019.

作者简介:

杨卫丽 (1966-), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为制导与控制。

配图: 李志

2019年美国空军人工智能附录

——响应国防部人工智能战略

摘要：在21世纪，人工智能将改变作战方式。美国空军利用人工智能的方式可能削弱或增强其目前享有的比较优势。人工智能的进步与以往的技术不同，已经超出政府掌控，扩展到了许多商业企业。商业部门急于吸纳人工智能技术，而美国的竞争对手也正在加速人工智能的整合和武器化，目的是有效对抗美国的传统优势并利用美国的弱点。美国空军必须格外注意这一点，因为空军在空、太空和网络域执行任务的能力，依赖于基于数据和信息的洞见。空军现在所做的战略选择——采用或坚决反对人工智能，将决定空军的全球行动能力变化，是受到削弱还是得到加强。美国空军负责为国家提供空中优势，全球打击，快速全球机动，情报、监视和侦察以及指挥控制能力。而人工智能可巩固空军在以上五个领域任务中对抗、威慑和制胜的能力。因此，至关重要，未来的空军应该更快、更智能，以便在高端作战中进行多域行动，应对公开冲突级别以下的威胁，以及与全球盟友合作。

本附录和相关附录为空军的工作提供了一个框架，旨在与国防战略，以及联合人工智能中心（JAIC）所执行的国防部人工智能战略保持一致。本附录详细阐述了在数字时代，有效管理、机动和领导空军所必需的基本原则、职能和目标，最终的效果取决于空军在支援和作战行动中应用人工智能的能力。人工智能不是万能钥匙，必须根据国家的伦理、道德和法律决定是否予以采用。因此，作为这一重大责任的承担者，空军应侧重于使用新兴技术执行指定任务，但同时必须牢记空军所做的一切都要以人为本。在重返大国竞争中，美国空军将使用最具代表性的人工智能技术，以提高执行任务的速度和准确性，并优化每位空军人员的能力。只有这样，空军才能更好地保护和捍卫美国及其重要利益，并始终对美国公众负责。

一、概念、背景和目的

人工智能（AI）是指机器执行通常需要人类智能才能完成的任务的能力。例如，识别模式、吸取经验、得出结论、做出预测或采取行动的能力。这里的机器可能是数字化的，也可能是自主物理系统背后的智能软件。

——《国防部人工智能战略》，2018年

为响应国防战略（NDS），国防部（DoD）于2018年9月成立了联合人工智能中心（JAIC），并发布了人工智能战略。2019年3月，空军首席科学家办公室（AF/ST）和空军研究实验室（AFRL）合作，共同发布了《自主地平线：通向未来之路》报告。该报告就自主系统（AS）的未来提出了深思熟虑的建议。基于上述文件和国防部长办公室

（OSD）指令，国防部要求各军种提供人工智能附录，以便制定综合战略。

空军发布本附录的目的是响应总统行政命令，即“维持美国在人工智能领域的领先地位”。本附录旨在促使空军做出改变，即在制定预算提案和规划资金使用时，将人工智能作为重点。作为实施《空军2030科技战略》的框架，本附录详细阐述了信息技术、数据、算法、人员和伙伴关系等方面的原则；以及机构任务、技术目标，及规划和执行目标。在本附录的指导下，空军将进行一场技术革新。相关附录（包含不同级别的文件）将为人工智能技术的重要性划分和原型设计提供基础指导。

战场上的每名空军、上级总部的工作人员，或与行业伙伴合作的部队，都有责任通过使用人工智能转变空军的五大核心使命。如果不采用人

工智能、不提高空军人员的能力，空军就无法在当今复杂的行动环境中有效执行任务。

二、空军的重点领域

“人们对人工智能及其带来的变化有过很多推断，但尚无最终结论。人类经历过语言、学习、工业和技术革命……但没有哪一场革命能够如此广泛地融入人类生活的方方面面，并如此彻底地改变人类的互动方式。”

——美国空军人工智能跨部门小组，2018年

国防部的人工智能战略涉及四个重点领域：(1)利用人工智能技术执行关键任务；(2)与全球领先的私营技术公司、学术机构和盟友合作；(3)培养人工智能人才；(4)在军事伦理和人工智能安全方面取得领先地位。下文将论述这四个重点领域，通过描述活动、确定相关任务和主要职责办公室，为国防部的战略提供实际支持，并为空军的需求划定范围，从而作为空军发展人工智能技术的指导原则。

重点领域1：降低技术准入门槛

当前商业部门的速度和效率一直高于政府，因此政府是否还应延续自产自销模式值得商榷。根据目前的法定义务，空军应重视吸纳商业产品，并为转移先进技术做好准备。因此，空军将在确保供应链安全、可靠的前提下，创建商业交付模型；以更具成本效益的方式，与政府内外的顶级技术提供商合作；进行原型设计；协调技术开发、运营和质量；并与其他军种分享经验。

任务1：对完全利用商业能力的技术部署模型进行管理(OPR: AF/CIO, AF/AQ)

目标1.1：采用软件即服务、平台即服务和基础设施即服务的混合模型

目标1.2：接受商业标准，并推动采办项目采用开放标准

重点领域2：将数据视为战略资产

数据推动了人工智能的发展。人工智能技术

需要大量不同的代表性数据，包括权威来源的数据，以及数字化日常工作流程生成的数据。为训练人工智能算法以实现持续交付，空军将基于政府使用数据的原则，审查内部流程并改革关键敏感问题，如关键性能参数(KPP)，以确保空军持续生成训练质量数据并用于算法开发。要想利用人工智能影响作战，必须实时地向算法提供数据，并进行实时储存。因此，应优先解决开发和运行之间的最短路径算法方案。然而，只有相信数据的来源、生成和/或训练方式时，这种关键的解决方案才有价值。随着时间的推移，空军将进一步开发方案应对对手的欺骗，以防止对手试图削弱空军的人工智能优势。

任务2：持续生成训练质量数据，并安全地传输给相关硬件、软件和人员(OPR: AF/CDO)

目标2.1：制定“训练质量数据”政策和标准

目标2.2：识别、测量、构建和模拟支持/操作权威数据和信息

目标2.3：数字化日常工作流程并建模

目标2.4：创建可控制和可搜索的数据存储，以便具有资格的人员可以访问大量训练数据

重点领域3：人人都可获得人工智能解决方案

当今社会是数据和信息爆炸的时代。在这场数字革命中，领先的私营部门人工智能开发商认为，公众有权访问存储数据的全球云技术，以及人工智能开发平台。这意味着空军应获得数以百万计的公开算法，有些算法可解决一些长期困扰人们的问题，从而帮助空军完成核心使命，并优化关键作战流程。美国的对手也将获取相同的支持技术，并加以应用以获取竞争优势。为此，空军的战略要务是负责任地使用这些技术，共享内部生成的解决方案，以简化采办流程。

任务3：以适当速度和规模，开发和应用各种算法(OPR: AF/CIO, AF/AQ, AFRL)

目标3.1：利用免费的和公开可用的算法

目标3.2：提供可共享的解决方案

目标3.3：为开发、技术运营和质量保障间的协调(DevOps)和原型算法创建安全的运维环境，

并确保输出结果均能得到合理使用

重点领域4：招募、发展、培训和培养工作人员

在数字和信息时代，空军应不断整合新兴技术。因此，空军必须继续利用计算机和相关技术，生成、获取、交换和分析信息。为快速适应新兴技术以满足不断变化的需求，空军应熟练掌握控制新兴技术的语言，并广泛关注技术发展（如空军计算机语言项目，其目的是在功能和客观性上，将计算机编程语言视为人类的一种外语）。空军目前仍然要克服的最大挑战是掌握相关技能，并培养对新兴技术的文化认同。

为应对上述挑战，空军将继续发展人才队伍。空军将提供非传统的和新兴技术的职业机会，以吸引、培养和管理空军人员。人才将始终是空军最大的财富，人工智能并不能取代人类。在使用得当的情况下，人工智能将自动执行重复性任务、计算复杂方程，并向决策者提供可靠信息，从而解放人力，使人员专注于需要批判性思维的更加复杂的任务。

任务4：培养人才，雇佣有技能、受过良好教育的人员（OPR：AF/A1）

目标4.1：通过计算机语言项目培养技术精湛的人员，并为公众提供多种编程教育机会

目标4.2：妥善使用和安置数字化人才

目标4.3：制定切实可行的政策和激励措施，以改善人才管理，并提高应聘率和入职率

目标4.4：与行业和学术伙伴合作，加强培训和技术交流

重点领域5：提高透明度，加强与各国政府、行业和学术伙伴的合作

人工智能及其涉及的伦理、道德和法律问题是全国公众和整个联邦政府的关注重点。为消除与非传统合作伙伴的分歧，空军在与空军研究实验室、学术界和联盟伙伴合作时，将始终保持参与、知情和负责的态度。美国的对手拥有自上而下的指挥系统，能够获取私营企业的所有数据和

技术。因此，空军必须紧跟最新技术趋势，并寻求与政府、工业和联盟伙伴合作。空军的人工智能开发、采办和共享模式将重视简化内部流程，以便为简化采办流程奠定基础、与国际合作伙伴共享成果，并与世界上最先进的人才交流。

任务5：就空军的人工智能应用，开展伦理、道德和法律对话，以获取公众信任（OPR：AF AI CFT，AFRL）

目标5.1：与联合人工智能中心合作，讨论在军事行动中使用人工智能的伦理、道德和法律影响

三、结束语

人工智能从科幻小说中走进了现实，已经不再是学术推测的专属领域，也不再是在现实世界中没有实际作用的虚幻研究和开发。相反，投入使用的人工智能应用以及不久即将实现的设想和设计，将给人类生活造成翻天覆地的变化。届时，人们处理个人事务的方式，以及管理行业和公共企业的方式都将彻底改变。

未来，积极利用人工智能技术的人，将获取重要的新机遇和优势，从而有助于完成个人和机构目标。领先者将掌握能够分析更多信息、制定更多策略的工具。然而，在发展人工智能的同时，人类也会付出代价。尤其对于落后者而言，有些代价将出乎意料，有些代价将十分沉重。在人工智能时代，第二名的价值会越来越小。随着技术的发展，战争的特征也在不断改变。对于军事人员而言，人工智能相当于隐形飞机和精确制导武器的发展。各国空军都将接纳人工智能技术，以便理解数字时代作战的复杂性。人们在做每件事时，都应有意识地考虑并尝试利用人工智能。技术开发、原型设计和合作对空军的未来至关重要。在数字时代，发展人工智能是国防部的首要任务，而空军将通过应用新兴技术证明自身实力。在数字时代，每个人都能够发挥重要作用。

（翻译整理：刘晓娟，李志，王彤）

美国《2018国防部人工智能战略概要》解析

一、引言

2019年2月11日，美国总统特朗普签署行政令《维护美国人工智能领导地位的行政命令》(Executive Order on Maintaining American Leadership in Artificial Intelligence)，该行政令共十大部分，分别从政策与基本原则、目标、角色与职能、保持美国AI优势的行动计划等方面具体阐述，就美国联邦政府层面人工智能(AI)的研究、推广和培训做出全面部署，以期维持和加强美国在人工智能研发和部署及相关领域的全球领先优势。

在特朗普签署《维护美国人工智能领导地位的行政命令》1天后，2月12日，美国国防部在其网站发布了《2018国防部人工智能战略概要——利用人工智能促进安全与繁荣》(以下简称《战略概要》)。这份长达17页的《战略概要》共分前言、简介、战略举措、重点领域及结论五大部分，分析了美国国防部在人工智能领域面临的战略形势，阐明了美国国防部研发和部署人工智能的战略举措及重点领域，概述了美国国防部计划通过快速交付、增加研发以及有针对性的培训和招聘来提高人工智能能力，旨在应对竞争对手在军用人工智能方面的长足进步，维持美国在军用人工智能领域的战略优势。

二、“以人为中心”应用人工智能，形成打赢未来战争的能力

《战略概要》指出，当前，主要竞争对手正在对军用人工智能技术进行重大投资，这将可能侵蚀美国在人工智能和军事领域的优势，美国及其盟国和伙伴必须采用人工智能来维持战略地位，

通过在训练、维和、人员招募、医疗保健及许多其他军事领域部署和应用人工智能，形成并具备打赢未来战争的能力，提升对美国军人、公民及盟友和伙伴的支持和保护能力。

《战略概要》指出，国防部将以“以人为中心”的方式使用人工智能技术，从而从四个方面使国防部和美国受益。一是保护美国军人和平民。将人工智能融入决策和行动中，减少战场部队的风险，保持军事优势。人工智能可更好地维护设备，降低运营成本，提高战备能力。运用人工智能技术加强对《战争法》的执行力度。通过提高军事评估的准确性和任务的精确性，人工智能可以降低平民伤亡和其他附带损害的风险。二是保护美国国家安全。人工智能可增强预测、识别和应对各种来源的网络和物理威胁的能力，加强对美国本土的防御，阻止企图破坏美国基础设施(如：金融网络、电网、选举程序和医疗系统)的恶意行为。三是有利于创建精简高效的组织。人工智能可大大提升手工的、体力的、以数据为中心任务的执行效率，从而简化工作流程，提高重复任务的速度和准确性。四是将人工智能扩展到各企业和部门。确定并实施新的组织方法，建立关键的人工智能构建模块和标准，培养和吸引人工智能人才，并引入新的运营模式，使国防部能够系统地利用人工智能。

三、实施五项战略举措，发挥人工智能优势

《战略概要》提出，国防部要从以下五方面采取行动，以充分发挥人工智能的优势。一是交付可应对关键任务的人工智能能力。通过推出改进态势感知和决策、提高操作设备的安全性、实现

预测性维护以及简化业务流程等一系列举措，以快速、迭代和负责任的方式整合人工智能技术，加强关键任务领域的军事决策和军事行动。二是通过支持分布式开发和试验的通用基础设施，扩大人工智能在国防部的影响。利用分布式开发和试验的概念，设立关键的组件和平台，包括：创建共享数据、可重用工具、框架和标准，以及云和边缘服务的公共基础设施，以增加试验的速度和交付的速度，扩大人工智能的使用范围。三是培养卓越的人工智能人才。通过提供全面的人工智能培训，培养人工智能领域的人才，同时通过招聘、与世界级人工智能领军人才合作，将关键的人工智能技术引进来。四是与产业界、学术界和国际盟友合作。通过吸引优秀学者投身于与国防相关的长期研究、培养下一代人工智能人才、加强与美国工业界的伙伴关系、在海外发展国际盟友和伙伴关系以及全球开源社区合作等方式，在人工智能领域加强与产业界、学术界和国际盟友的合作。五是引领军事伦理道德和人工智能安全。通过多项举措在军事领域推进人工智能的伦理和安全，具体包括：与来自学术界、私营企业和国际社会的领导人进行磋商，投资研发具有弹性、鲁棒性、可靠性和安全性的人工智能系统，继续资助研发可解释人工智能技术，推进人工智能的测试、评估、试验、验证，增强态势感知和决策支持等。

四、联合人工智能中心是执行战略的核心，发挥四项重要职能

作为执行国防部人工智能战略的核心单位，《战略概要》将新成立的联合人工智能中心（Joint Artificial Intelligence Center, JAIC）推向前台。2018年6月成立的联合人工智能中心，将是对美国国防高级研究计划局（DARPA）、国防部实验室和其他专注于长期技术创造和未来人工智能研发实体的有力补充，旨在加快交付人工智能技术产品的能力、扩大人工智能对国防部的影响、保持并扩大联合部队的军事优势。具体而言，联合人工智能中心将发挥以下职能：一是利用任务需求、作

战成果、用户反馈和数据，实现迅速交付人工智能的能力以应对关键任务，增强当前的军事优势，并加强未来人工智能的研发工作。二是为扩大人工智能在国防部的影响提供通用基础，包括：卓越的战略数据采集，统一的数据存储、可重用工具、框架和标准，以及云和边缘服务。三是推进人工智能规划、政策、治理、伦理、安全、网络安全和多边协调。四是培养一个世界级的人工智能团队，在人工智能能力交付方面提供可信的专业知识，并将人工智能纳入国防部所有级别的专业教育和培训中。此外，联合人工智能中心将与政府、企业界、学术界以及美国的盟友和伙伴加强合作，突出关键需求，解决紧急问题，并促进AI技术与国防部任务的相互适配。

五、聚焦四大重点战略领域，维持军用人工智能战略优势

为维持美国在军用人工智能领域的战略优势，《战略概要》从四大重点战略领域聚焦用力。

（一）提供支持AI的能力，以应对关键任务

一是提高态势感知与决策能力。AI应用于如图像分析的感知任务，可以从原始数据中提取有用的信息，为领导者提供加强的态势感知能力。AI可以产生并帮助指挥官探索新的选项，以便他们选择最能实现任务成果的行动方案，将部署部队和平民面临的风险降至最低。二是提高操作设备的安全性。AI有潜力通过提醒操作员注意潜在危险，提高在复杂、快速变化的环境下操作飞机、船舶和车辆的安全性。三是实施预测性维护和补给。使用AI来预测关键部件的故障，实现诊断自动化，并根据数据和设备状况规划维护。类似的技术将用于指导备件供应和优化库存水平，协助故障排除，并以更低的成本使军队能够更快速地部署和适应。四是简化业务流程。通过AI减少在高度手工、重复和频繁的任务上花费的时间，降低错误的数量和成本，提高吞吐量和灵活性，并促进国防部资源分配到更高价值的活动和新出现的优先任务。

(二)与卓越的私营领域技术企业、学术界、全球盟友和伙伴合作

将采取以下措施：一是形成以全球挑战为重点的开放任务倡议。与学术界和产业界形成开放的AI任务，共享数据、领域专业知识和现实问题，与广泛的参与者共同努力，以帮助应对具有重大社会意义的全球性挑战。二是加强学术合作并培育新的AI创新区。通过DARPA/IARPA和军事研究实验室等现有渠道对AI进行长期而稳定的资助，以吸引最好的学者投身于与国防部关键领域相关的长期研究，并继续致力于培养下一代AI人才。三是加强与美国产业界的合作。与大型产业合作伙伴、小型初创企业和风险投资公司合作，加快关键伙伴关系进程并降低行政壁垒，为潜在合作伙伴建立AI门户，简化合同签订、收购和入职流程，使AI社区成员更容易与国防部接触，增强AI技术产业生态系统。四是发展国际联盟和伙伴关系。加强人员交流、系列产品规划合作以及开发部署AI，加深与盟友和合作伙伴的互操作性和信任，充分利用盟友和合作伙伴提供的资源。五是与开源社区合作。共享数据、挑战、研究和技术，与开源生态系统合作，将其作为媒介，吸引人才、识别和推进能够改变国防的新AI技术。

(三)培养卓越的AI人才队伍

包括以下举措：一是提供产生影响的机会。针对国家最困难和最重要的挑战，国防部提供开发尖端人工智能应用的机会，利用最新技术为美国军队产生积极的现实影响。二是提供全面的AI培训和职业才能培养。面向初级员工、AI工程师、高级领导等，开展多形式、多层次的AI培训项目，加速AI专业知识的实际应用。三是将关键AI技能投入使用。简化用人流程，使世界一流的AI人才投身国防，补充机器学习工程师、数据工程师、数据科学家和AI产品经理等岗位，以形成灵活、具备AI优势的员工队伍。四是建立勇于尝试的文化。通过快速、早期和小规模的“试错”学习和训练，建立并形成勇于尝试的文化。

(四)倡导全球军事AI应用准则，降低AI应用风险

包括以下措施：一是制定AI的国防应用原则。阐明在国防事务中AI伦理和安全的愿景和指导原则，广泛咨询来自学术界、私营部门和国际社会的专家和顾问，尽可能从过去的见解和现有的方法中了解AI伦理和安全，继续研究并采取必要政策，以确保AI系统以负责任与合乎伦理的方式得到使用。二是研究安全、可靠而健壮的国防部AI系统。将开创和分享新的测试、评估、验证和确认方法，增加对软硬件平台防御性网络安全的关注，作为安全使用人工智能的先决条件。三是资助研究“可解释性AI”。继续资助“可解释性AI”的研究和开发，让用户了解人工智能输出的基础，帮助用户理解、适当信任和有效管理AI系统。四是提高人工智能研究的透明度。积极而持续地开展开放对话与国际合作，以减少误解、误判和事故的可能性。五是倡导全球军事人工智能准则。建立强大的军事对话渠道，以及国防部、私营部门、学术界、盟友与合作伙伴以及全球人工智能社区之间的交流渠道，开展对话并向尽可能广泛的受众阐明在道德和军事AI安全使用方面的愿景，在国防部内部继续按照《战争法》行事。六是利用AI降低平民伤亡及其他附带损害的风险。寻求机会利用人工智能来加强对《战争法》的执行力度，并通过增强态势感知和决策支持来保护非战斗人员。

五、结束语

《战略概要》与白宫前一天发布的美国人工智能行政命令相呼应，体现了美国将在政治、军事、经济等多个领域全面发力，从国家战略层面调动更多联邦资金和资源大力发展和应用人工智能技术，以应对来自“战略竞争者和外国对手”的挑战，确保美国在该领域的领先地位。可以预见，人工智能将是世界各国竞争的制高点，随着越来越多的国家发布人工智能战略，其未来竞争也将日趋激烈，人类进入智能社会的进程也将不断加速。

(作者：孙璞，来源：《网信军民融合》2019年第2期)



征稿启事

《无人系统技术》期刊

《无人系统技术》期刊是由中国航天科工集团有限公司主管，北京海鹰科技情报研究所主办，中国无人系统产业联盟（筹）、中国指挥与控制学会无人系统专业委员会、西北工业大学无人系统发展战略研究中心、西北工业大学无人系统技术研究院联合协办的学术期刊。现诚挚地向无人系统技术研究领域的专家学者、学术带头人以及致力于无人系统理论与技术创新研究的科技工作者约稿。

◆ 约稿方向

稿件内容以综述、研究论文、技术报告、专题研讨和科技评述等形式为主，广泛报道无人空中系统、无人地面系统、无人水面水下系统、智能机器人等研究领域的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结。主要包括无人系统平台技术、自动控制技术、信息技术以及人工智能、通信、传感器等技术在无人系统领域的新应用。同时，也包括无人系统自主技术、协同技术、跨域同步技术、智能无人系统伦理及其与有人系统的关系等。

◆ 投稿方式

期刊网络采编系统正在建设中，目前通过互联网邮箱：chinauas310@163.com，进行投稿。

◆ 投稿要求

1. 本刊选录稿件主要视其是否有创新点及其价值大小，并综合考虑：立题的科学/工程意义；对科研进展的了解和引用；方法或其应用的创新性；方法和论证的科学性；结论/结果的合理可信性和写作质量。
2. 投稿时须提交“保密审查表”电子版，稿件正式录用后请将保密审查证明邮寄至：北京 7254 信箱 4 分箱《无人系统技术》编辑部，邮编：100074。

◆ 写作要求

1. 来稿应含中英文题目、中英文摘要（说明研究目的、创新试验方法、研究成果和最终结论等，重点是方法创新和成果结论。中英文摘要对应，英文摘要最好在 150 个实词左右）、关键词（5 ~ 8 个）。引言应说明课题的背景，引述该领域的国内外同行已经取得的进展，以说明本文的选题意义和创新点所在。
2. 量和单位应符合国家规定。外文字符要分清大小写、正斜体，上下角字符的位置高低应区别明显。
3. 图、表应提供中英文图题、表题；图表的设计，一般不超过 8cm 宽。
4. 参考文献引用文献应遵循“最新、关键、必要和亲自阅读过”的原则；在正文中顺次引述；数量以不少于 15 篇为宜，未公开发表的资料一般不宜引用。
5. 建议提供全部作者简介，以便于读者了解和联系。作者简介内容应包括：姓名、出生年、性别、学位、职称、研究方向、电子邮箱、联系电话等。

◆ 关于稿酬

稿件一经录用，将按照字数和文章质量情况，向作者一次性支付稿酬。

顾 问

李德毅 封锡盛 李伯虎 徐德民 刘永才 费爱国 樊邦奎 陈 杰 魏毅寅 王飞跃

第 一 届 编 委 会

主 任

李风雷

副主任

王长青 宋 斌 谷满仓 张 涛 符文星

委 员 (按姓氏拼音排序)

昂海松 蔡顺才 陈 斌 陈家斌 戴江勇 邓宏彬 都基焱 方 浩 符小卫 郭继峰 黄 强
黄长强 李必军 李东光 李贻斌 林 平 刘 莉 刘培志 罗 均 马洪忠 孟 红 孟凡彬
潘 泉 齐俊桐 时兆峰 孙富春 田大新 王宏伦 韦锦峰 吴向阳 夏元清 向锦武 徐 昕
徐海刚 薛建儒 颜国正 杨 宁 杨宏晖 于进勇 于林宇 赵 杰 张 梅 张 宁 张 山
张冬青 张卫平 朱 枫 朱小燕 Simon X.YANG Wei Ren Yang SHI Yantao Shen

无人系统技术 2018 年创刊 (双月刊)

主管单位: 中国航天科工集团有限公司

主办单位: 北京海鹰科技情报研究所

协办单位: 中国无人系统产业联盟 (筹)

中国指挥与控制学会无人系统专业委员会

西北工业大学无人系统发展战略研究中心

西北工业大学无人系统技术研究院

主 编: 张冬青

副 主 编: 蔡顺才 孙柏原 李东光 陈少春

执行主编: 王一琳

编辑出版: 《无人系统技术》编辑部

地 址: 北京 7254 信箱 4 分箱 (100074)

电 话: 010-68191488 (编辑部)

010-68375084 (发行部)

邮 箱: chinauas310@163.com

国内发行: 北京海鹰科技情报研究所

印刷单位: 北京博海升彩色印刷有限公司

Unmanned Systems Technology Started in 2018 (Bimonthly)

Administrated by: China Aerospace Science & Industry Corporation Limited

Sponsored by: Beijing HIWING Scientific and Technological
Information Institute

Co-organized by: Association for Unmanned Vehicle Systems of China

Technical Committee on Unmanned Systems, CICC

Research Center for Unmanned System Strategy

Development, NWPU

Unmanned System Research Institute, NWPU

Editor-in-Chief: ZHANG Dongqing

Associate Editor: CAI Shuncaï SUN Baiyuan LI Dongguang

CHEN Shaochun

Executive Editor: WANG Yilin

Edited & Published by: Editorial Office of Unmanned Systems
Technology

Add: P.O. Box 7254-4, Beijing 100074, China

Tel: (8610) 68191488 (Editorial office)

(8610) 68375084 (Circulation office)

E-mail: chinauas310@163.com

Distributed by: Beijing HIWING Scientific and Technological
Information Institute

Printed by: Beijing BOHS Colour Printing Co., Ltd.

本期责任编辑: 李 志

ISSN 2096-5915

CN 10-1565/TJ

国内定价: 30 元 / 期