

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

本期专栏 智能前沿技术发展年度综述

无人系统技术  
2021年  
第四卷  
第二期

# 无人系统技术

WUREN XITONG JISHU

(双月刊 2018年创刊)

第4卷第2期 2021年3月

UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY

(Bimonthly)

(Started in 2018)

Vol.4 No.2 March 2021

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）

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

网 址：http://umst.cbpt.cnki.net

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

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  
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

Website:http://umst.cbpt.cnki.net

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

ISSN 2096-5915



2021.2  
第4卷 NO.

中国学术期刊网络出版总库（CNKI）收录

万方数据—数字化期刊群收录

超星数字期刊数据库收录

维普网数据库收录

## 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 Yaotao SHEN

## Consultant

|           |              |          |           |             |
|-----------|--------------|----------|-----------|-------------|
| LI Deyi   | FENG Xisheng | LI Bohu  | XU Demin  | LIU Yongcai |
| FEI Aiguo | FAN Bangkui  | CHEN Jie | WEI Yiyin | WANG Feiyue |

## The First Editorial Board for Unmanned Systems Technology

**Director:** LI Fenglei

**Vice-director:** WANG Changqing SONG Bin GU Mancang ZHANG Tao FU Wenxing

**Committee member:**

|               |                  |              |               |                |
|---------------|------------------|--------------|---------------|----------------|
| ANG Haisong   | CAI Shunca       | CHEN Bin     | CHEN Jiabin   | DAI Jiangyong  |
| DENG Hongbin  | DU Jiyan         | FANG Hao     | FU Xiaowei    | GUO Jifeng     |
| HUANG Qiang   | HUANG Changqiang | LI Bijun     | LI Dongguang  | LI Yibin       |
| LIN Ping      | LIU Li           | LIU Peizhi   | LUO Jun       | MA Hongzhong   |
| MENG Hong     | MENG Fanbin      | PAN Quan     | QI Juntong    | SHI Zhaofeng   |
| SUN Fuchun    | TIAN Daxin       | WANG Honglun | WEI Jinfeng   | WU Xiangyang   |
| XIA Yuanqing  | XIANG Jinwu      | XU Xin       | XU Haigang    | XUE Jianru     |
| YAN Guozheng  | YANG Ning        | YANG Honghui | YU Jinyong    | YU Linyu       |
| ZHAO Jie      | ZHANG Mei        | ZHANG Ning   | ZHANG Shan    | ZHANG Dongqing |
| ZHANG Weiping | ZHU Feng         | ZHU Xiaoyan  | Simon X. YANG | Wei REN        |
| Yang SHI      | Yantao SHEN      |              |               |                |



# 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）、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

通过期刊采编系统进行投稿，网址：<http://umst.cbpt.cnki.net/>，或直接搜索“无人系统技术”。

### ◆ 投稿要求

- 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。
- 投稿时须提交电子版“保密审查证明”，稿件正式录用后将“保密审查证明”“版权转让协议”原件邮寄至：北京 7254 信箱 4 分箱《无人系统技术》编辑部，邮编：100074，电话：010-68191488。

### ◆ 写作要求

- 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，英文摘要在 250 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。
- 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。图、表应提供中英文图题、表题。
- 参考文献引用应遵循“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 20 篇为宜，未公开发表的资料一般不宜引用。
- 需提供全部作者简介，内容包括：姓名、出生年、性别、学位、职称、研究方向、照片等。

### ◆ 关于稿酬

暂不收取版面费、审稿费，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。



# 无人系统技术

第4卷第2期 2021年3月

## 目次

### 智能前沿技术发展年度综述

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 2020年深度学习技术发展综述 .....   | 01 |
| 王亚坤                     |    |
| 2020年仿人智能技术发展综述 .....   | 08 |
| 李芳, 祝翠琴                 |    |
| 2020年人工智能芯片技术发展综述 ..... | 14 |
| 葛悦涛, 任彦                 |    |
| 2020年人机混合智能技术发展综述 ..... | 20 |
| 张俊辉, 张欢欢                |    |
| 2020年量子计算技术发展综述 .....   | 26 |
| 朱小伶                     |    |

### 技术研究

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 基于滚动规划框架的多无人机协同轨迹快速生成方法 .....      | 33 |
| 徐广通, 邹汝平, 王祝, 孙景亮, 龙腾              |    |
| 野外无人车路径规划与轨迹规划技术 .....             | 40 |
| 陈智伟, 胡劲文, 赵春晖, 王策, 侯晓磊, 潘泉, 王腾, 徐钊 |    |
| 基于最小磁角的抗干扰水下仿生导航研究 .....           | 49 |
| 张晨, 张涛                             |    |
| 岛礁无人作战体系面临的挑战及关键技术分析 .....         | 56 |
| 赵新路, 李兵, 陈华, 都业宏, 郭继文, 崔金雷         |    |
| 未来有人机/无人机智能协同作战顶层概念思考 .....        | 62 |
| 张旭东, 孙智伟, 吴利荣, 郝明月, 尹航             |    |

智能前沿技术的发展给现代社会带来了深远的影响, 推动了整个社会的发展。作为新一代生产力引领了新一轮科技革命和产业变革, 世界各主要国家都纷纷将智能前沿技术上升为国家级战略, 积极抢占竞争的制高点。在此背景下, 本刊特组织推出“智能前沿技术发展年度综述”专栏。专栏收录文章5篇, 内容涉及深度学习技术、仿人智能技术、人工智能芯片技术、人机混合智能技术、量子计算技术。希望借助本次专栏, 能够为相关专家学者的研究工作、企业和有关部门决策提供学术和技术参考, 推动智能前沿技术进一步发展。



# Unmanned Systems Technology

Vol.4 No.2 2021

## Contents

### Intelligent Frontier Technology Development Annual Review

|  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| Survey of Deep Learning Technology in 2020 .....         | WANG Yashen ( 01 )                  |
| Survey of Simulation-Human Intelligent in 2020.....      | LI Fang, ZHU Cuiqin ( 08 )          |
| Survey of Artificial Intelligence Chip in 2020 .....     | GE Yuetao, REN Yan ( 14 )           |
| Survey of Human-Machine Hybrid Intelligence in 2020..... | ZHANG Junhui, ZHANG Huanhuan ( 20 ) |
| Survey of Quantum Computing Technology in 2020 .....     | ZHU Xiaoling ( 26 )                 |

### Technical Study

|   |  |
|---|--|
| Multiple Unmanned Aerial Vehicle Rapid Cooperative Trajectory Generation Method Using Receding<br>Planning Framework<br>..... | XU Guangtong, ZOU Ruping, WANG Zhu, SUN Jingliang, LONG Teng ( 33 )                                |
| Path Planning and Trajectory Planning Technology of Unmanned Ground Vehicle (UGV) in the Field<br>.....                       | CHEN Zhiwei, HU Jinwen, ZHAO Chunhui, WANG Ce, HOU Xiaolei,<br>PAN Quan, WANG Teng, XU Zhao ( 40 ) |
| Research on Anti-Interference Underwater Bionic Navigation Based on Minimum Magnetic Angle<br>.....                           | ZHANG Chen, ZHANG Tao ( 49 )   |
| Challenges of Island Unmanned Combat SoS and Research on Key Technologies<br>.....  | ZHAO Xinlu, LI Bing, CHEN Hua, DU Yehong, GUO Jiwen, CUI Jinlei ( 56 )                             |
| Research on the Fundamental and Grand Concept of Intelligent Cooperative Combat of Manned/<br>Unmanned Aircraft<br>.....      | ZHANG Xudong, SUN Zhiwei, WU Lirong, HAO Mingyue, YIN Hang ( 62 )                                  |

[引用格式] 王亚坤. 2020年深度学习技术发展综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 1-7.

# 2020年深度学习技术发展综述

王亚坤

(中国电子科技集团公司电子科学研究院, 社会安全风险感知与防控大数据应用国家工程实验室, 北京 100041)

**摘要:** 对深度学习领域的研究进行综合评述, 并对其进一步发展方向进行分析。首先分析围绕注意力机制的深度学习技术最新研究成果, 以及在自然语言处理领域取得突破性进展的巨型预训练模型的特点与发展路径; 随后概述开源深度学习市场的火热局面及其对技术升级的推动作用; 最后分别从香农定律、冯·诺依曼架构、摩尔定律三个角度探讨深度学习技术的未来发展方向。综述表明, 注意力机制和预训练范式在当前计算机视觉和自然语言处理等深度学习重点应用领域中取得长足技术突破, 开源深度学习市场的兴起有效推动产学研用各领域深度学习技术落地, 在今后很长一段时期内, 深度学习依然具有很广阔的发展空间。

**关键词:** 深度学习; 注意力机制; 预训练; 神经网络; 开源; 人工智能

**中图分类号:** TP183      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2021)02-01-07

**DOI:** 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.2.011

## Survey of Deep Learning Technology in 2020

WANG Yashen

(National Engineering Laboratory for Risk Perception and Prevention (RPP),  
China Academy of Electronics and Information Technology of CETC, Beijing 100041, China)

**Abstract:** This paper makes a comprehensive survey of the research in the field of deep learning (DL), and analyzes its further development directions. This paper firstly overviews the latest research achievements of DL technology about attention mechanism, as well as the characteristics and development directions of giant pre-training model which has made a breakthrough in the domain of Natural Language Processing (NLP). Secondly, it summarizes the hot situation of open-source DL market and its role in promoting the corresponding technology upgrading. Finally, this paper discusses the future development directions of DL technology from three aspects: Shannon's Law, Von Neumann's architecture and Moore's Law. The survey shows that, attention mechanism and pre-training paradigm have made great technological breakthroughs in the key application fields of deep learning, such as Computer Vision (CV) and NLP. Besides, the rise of open-source DL market has effectively promoted the implementation of DL technology in various fields of industry, research and applications. For a long time, DL still has a broad development space.

**Key words:** Deep Learning; Attention Mechanism; Pre-Training; Neural Network; Open-Source; Artificial Intelligence

收稿日期: 2021-01-06; 修回日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金 (U19B2026); 中国电科新一代人工智能专项行动计划项目 (AI20191125008); 全国一体化国家大数据中心先导工程 (17111002, 20500908)

## 1 引言

过去十年最流行的深度学习技术，多以大数据、大计算、大模型算法来驱动，其中包括 AlphaGO、AlphaZero 等。深度学习在过去一段时间取得了很好的进展，如生成的对抗网络、迁移学习及 2020 年提出的 GPT-3 等，其算法理论与应用技术需要结合符号逻辑、知识推理、因果关系新范式等。目前对于学术界和产业界而言，未来五至十年深度学习依然是最重要的算法之一，在今后的很长一段时期里，深度学习依然具有很广阔的发展空间。

## 2 围绕注意机制的深度学习技术研究进展

注意力 (Attention) 是认知科学里最大的一个研究领域，每年有超过 1 万篇文章研究注意力现象。人脑注意有两个重要属性：注意力和动态注意机制。其中，注意力图有两种：注意显著图 (Saliency map) 是源于自下而上的注意，注意优先图 (Priority map) 则结合了自上而下和自下而上的活动以及任务相关性。对于动态注意机制，可以直观阐释为：无论是基于空间的注意、基于客体的注意，还是基于特征的注意，都不是静态的过程，而是在不同的空间、客体和特征之间交替。从仿生学角度出发，近年来深度学习不断采纳和融汇认知学中注意力相关研究成果，不断提升深度学习模型效果；同时，注意力机制也被认为是通往“可解释人工智能”的重要途径和抓手<sup>[1]</sup>。近年来，Transformer 模型<sup>[2]</sup>在很多不同的领域都取得了最优基线成绩，包括自然语言处理、计算机视觉等，每个 Transformer 体系结构的核心模块均是注意力模块，它为一个输入序列中的所有位置对计算相似度得分，如图 1 所示。

传统 Transformer 方法在输入序列的长度较长时效果不佳，需要以计算时间呈平方增长来产生所有相似性得分，并以存储空间的平方增长来构造一个矩阵存储这些得分。稀疏注意力机制通过从一个序列而不是所有可能的配对中计算经过

选择的相似性得分来减少注意机制的计算时间和内存需求，从而产生一个稀疏矩阵而不是一个完整的矩阵。2020 年 10 月，美国谷歌公司、DeepMind 公司、艾伦图灵研究院和剑桥大学的联合团队提出了 Performer<sup>[3]</sup>——一种线性扩展的深度学习模型架构，并在蛋白质序列建模等任务中表现良好。Performer 使用了一个有效的、线性的广义注意力框架，是一种允许基于不同相似性度量的注意力机制，有潜力影响生物序列分析的研究，降低计算成本和计算复杂性，减少能源消耗和碳排放。

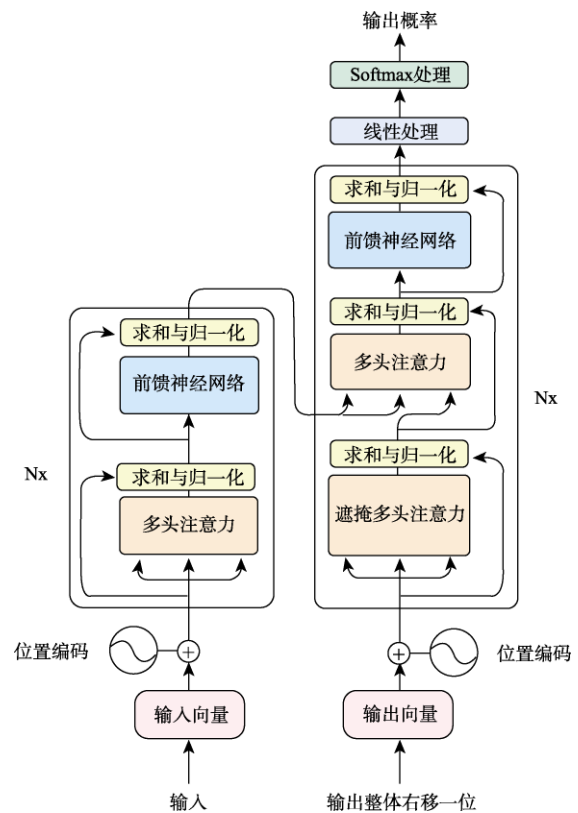


图 1 基于注意力机制的 Transformer 模型架构

Fig. 1 Architecture of Transformer model with attention mechanism

对长程交互进行建模在深度学习中至关重要，注意力已成为捕获长程交互的一种常用范式。但是，自注意力二次方式的内存占用阻碍了其对于长序列或多维输入(例如包含数万个像素的图像)的适用性。因此，近来相关研究正在探求对注意力机制的替代。如 2020 年 10 月，一款类 Transformer 模型——LambdaNetworks 被提出，无须建立昂贵

的注意力图即可捕捉长距离交互,并在计算机视觉任务上取得最佳效果。该研究提出了一种名为 lambda 的层,这些层提供了一种捕获输入和一组结构化上下文元素之间长程交互的通用框架——lambda 层被视为注意力机制的自然替代:注意力定义了输入元素和上下文元素之间的相似性核,而 lambda 层将上下文信息汇总为固定大小的线性函数,从而避免了对内存消耗大的注意力图的需求。鉴于 Transformer 模型在应用计算机视觉研究时经常出现退化现象,2020 年 9 月,美国微软公司提出解耦自注意模型,有效避免了自注意模型中的退化现象,并证明了其在多种视觉识别任务中广泛有效,包括语义分割、物体检测、动作识别等。该成果发表于计算机视觉领域顶级国际会议 ECCV 2020<sup>[4]</sup>。

注意力机制的影响也被当前研究热门方向图神经网络所容纳吸收,并不断演进,形成图注意力网络(Graph Attention Networks, GAT)架构<sup>[5]</sup>,利用遮挡自注意力机制来学习中心节点与邻居节点之间的注意力权重,根据权重大小聚合邻居节点的空间信息来更新中心节点的特征表示,从而解决了基于卷积或者多项式近似卷积核等方法的固有缺陷——传统图卷积神经网络通过图的拉普拉斯矩阵来聚合邻居节点的特征信息,这种方式和本图本身的结构紧密相关,限制了图卷积神经网络在训练时对未见的图结构上的泛化能力。2020 年 6 月,美国 DeepMind 公司公开其基于图注意力机制的图表征学习最新成果,该成果用于支撑并增强算法推理类型的任务。2020 年 10 月,美国康涅狄格大学团队提出一种全新的数据驱动的时空图注意力卷积神经网络,用于交通网络的高空间和时间复杂性下的自行车站级流量预测。同期,美国佛罗里达州立大学团队提出一种新型的图神经网络——GRAPH-BERT<sup>[6]</sup>,该网络完全基于注意力机制而没有任何图卷积或聚合算子,可解决目前图神经网络面临的假死和过平滑问题。

2020 年 12 月,美国 DeepMind 公司的 AlphaFold 系统在生物学领域取得了重要突破:通过蛋白质的氨基酸序列高精度地确定其 3D 结

构,破解了困扰生物学家 50 年之久的蛋白质分子折叠问题,而且能够判断出蛋白质结构中的哪一个部分更重要。该系统将蛋白质的折叠形状看作一个“空间图”,用残基表示它们之间的节点,由此创建了一个注意力神经网络系统,并进行端与端之间的训练,探索出蛋白质的具体结构。AlphaFold 实现了在生物学上的重大突破,成为计算机视觉和机器学习领域的里程碑,被称作“生物界的 ImageNet 时刻”,如图 2 所示。

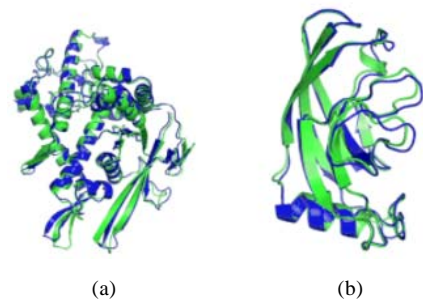


图 2 AlphaFold2 的预测结构(蓝色)与实际结构(绿色)对比基本完全吻合

Fig. 2 The predicted structure (blue) of AlphaFold2 is basically consistent with the actual structure (green)

### 3 面向自然语言处理的巨型预训练技术研究进展

自然语言处理(Natural Language Proceeding, NLP)被誉为“人工智能皇冠上的明珠”。2018 年 10 月,谷歌发布了 BERT (Bidirectional Encoder Representation from Transformers) 模型<sup>[7]</sup>——一种预训练语言模型,该模型被认为是自然语言处理领域“最强模型”,一经发布便引发了深度学习界持续而强烈的关注。预训练语言模型是词向量模型的进化,其本质是有上下文的词向量模型,训练过程概述为:首先给句子中的每个词赋予一个静态向量,然后它会跟句子的上下文词进行交互,最后就得到了这个词在句子中的变化的词向量。

然而,2020 年自然语言处理领域最大的轰动来自 BERT 模型的“后浪”——美国 OpenAI 公司于 2020 年 5 月推出的聚焦通用人工智能的自然语言预训练模型 GPT-3<sup>[8]</sup>(图 3),该模型完全刷新了人类对于认知智能的认识,是迄今为止人类

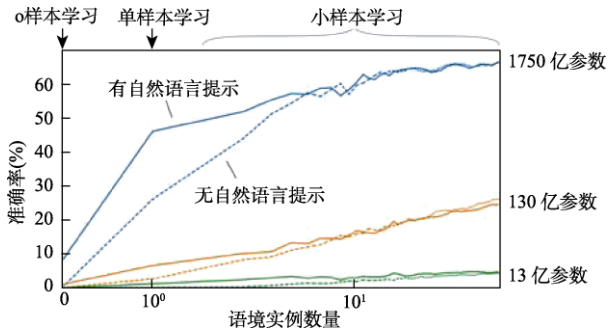


图3 GPT-3 证明更大的模型能够更好地利用上下文信息  
Fig. 3 GPT-3 shows that larger models make increasingly efficient use of in-context information

历史上体量最大的自然语言处理模型，包含 1750 亿参数（比 GPT-2 大 10 倍、比当时世界最大自然语言处理模型 Turing 大 10 倍），调用上万块 GPU、花费 460 万美元的成本进行训练。美国微软公司和 OpenAI 合力开发了一款超级计算机，专门用于 GPT-3 模型训练，这款超级计算机拥有超过 28.5 万个 CPU 内核、1 万个 GPU 和 400Gbit/s 的网络连接。它在世界 TOP500 超级计算机榜单单位列第五名。GPT-3 基于英语语料库进行训练，且并不开源，极高的训练成本使得实际上绝大部分企业和科研机构都无力承担。虽然 GPT-3 的训练成本如此之高，但其效果确实非常令人吃惊：GPT-3 在许多自然语言处理任务和数据集上都取得了很强的性能，包括机器翻译、自动问答等，以及一些需要即时推理或领域适应的任务，如在句子中使用一个新词或执行 3 位数运算，GPT-3 可以生成人类评估人员难以区分的新闻文章样本。针对 GPT-3 不支持中文的弊端，2020 年 11 月，北京智源人工智能研究院和清华大学研究团队合作开展了一项大规模预训练模型开源计划——清源 CPM，开放了第一阶段的 26 亿参数规模的中文语言模型和 217 亿参数规模的结构化知识表示模型下载。该计划致力于开展以中文为核心的超大规模预训练模型研究，包括跨语言学习、文本生成、知识融合、模型并行和压缩等前沿课题，并将相关模型及时通过智源社区开源共享。其他针对跨语言预训练的研究成果还包括微软图灵团队与微软亚洲研究院于 2020 年 11 月联合推出的多语言预训练模型 T-ULRV2，成功登顶

XTREME 公共排行榜（该模型比之前最好的模型 VECO 有了 3.5 的平均分提升），T-ULRV2 可在相同向量空间表示和理解 94 种语言，提升所有语言的产品体验。

目前的大型预训练自然语言模型，不仅训练麻烦、代价昂贵、耗时长，且推理时间也很长<sup>[9]</sup>，因此仅用于云端应用，在设备端应用有明显的局限性。深度学习“教父”LeCun 认为：“试图通过扩大语言模型的规模来建造智能应用，就像建造一架飞往月球的飞机。你可能会打破高度记录，但是登上月球其实需要一种完全不同的方法。”所以训练出更小的模型，实际上具有非常大的应用价值。因此，预训练语言模型形成了两种趋势，各大科研机构在这两方面都在做进一步的探索：一方面，人们把模型越做越大，去探索模型能力的边界<sup>[10]</sup>；另一方面，模型越做越小，使其在各种下游任务中形成生产力，即在手机端等各种小设备上能够单独运行，例如华为的 TinyBERT<sup>[11]</sup>，模型被压缩得非常小（模型大小还不到 BERT 的 1/7，但速度是 BERT 的 9 倍之多）、小到可以在端侧，再如中国依图科技在 2020 年 10 月推出的 ConvBERT<sup>[12]</sup>（仅用 1/10 的训练时间和 1/6 的参数就获得了跟 BERT 模型一样的精度）、美国亚马逊公司同期推出的预训练模型 Bort<sup>[13]</sup>（大小仅为 BERT 的 16%，CPU 上的推理速度却提升到了原来的 8 倍）等。目前，模型压缩方面的研究也非常多，主要包括三大类技术：基于知识蒸馏的预训练语言模型压缩、基于剪枝的预训练语言模型压缩和基于量化的预训练语言模型压缩。

除了在自然语言处理领域，预训练技术在计算机视觉领域也有着广泛而出色的应用效果，通过在大规模数据上进行无监督预训练得到优质的表征向量，通过迁移学习或者直接应用的方式支持下游的具体任务。众所周知，自然语言和视觉是人类认识世界、获取知识的重要途径，自然语言处理和计算机视觉也都是当前人工智能最热门的研究领域，然而任何单一模态（自然语言或者视觉）都无法独立地铺就通过认知智能的阶梯——从 20 世纪 90 年代开始，一些认知科学研



究者不约而同地提出了相似的观点：我们对语言的理解，就是在我们的脑海进行模拟，看看这些句子描述的事物或场景，若换做我们自己亲身去体验会是怎样的。因此，对多模态的研究可能会带来自然语言理解的重大突破，而且自然语言处理领域任务和计算机视觉领域任务很多都相辅相成，所以多模态被认为是人工智能开启常识之门的钥匙。此外，现实当中存在很多处理涉及这两个领域信息的多模态任务，如视觉问答、视觉推理、文书理解等时，需要让不同的模态的信息对齐和交互。预训练技术的热潮已延伸到视觉与文本的交叉领域——多模态预训练技术应运而生，并成为当前研究热点，已涌现出许多探索多模态预训练模型的工作。例如，微软亚洲研究院提出的面向多模态文档理解的预训练系统——LayoutLM 2.0 系统，其主体结构是带有空间感知自注意力机制的多模态 Transformer 编码器网络。其主要有两方面优势：在输入阶段同时接受文本、图像、布局三种模态的信息，利用深层网络的强大建模能力实现多模态深度融合；基于文档智能领域特性的空间感知自注意力机制，通过在传统自注意力机制的基础上显式添加空间相对位置信息，进一步帮助模型在一维文本序列基础上加深对二维版面信息的理解。

#### 4 开源深度学习市场发展态势概况

随着深度学习在计算机视觉、自然语言处理等领域取得的成果越来越显著，研究者对其讨论越来越多。就深度学习和人工智能而言，该领域的大部分创新来自谷歌、微软等公司的大型企业实验室，这些公司不仅在令人印象深刻的研究方面处于领先地位，而且定期开放源代码，以简化人工智能技术的应用。从学术界到工业界，“开源”已成为 2020 年深度学习领域的关键词：一方面，以“授人以渔”的方式为深度学习构建了一个开放共进的生态环境，帮助行业加速深度学习应用落地；另一方面，在解决行业实际问题时实现持续更新和迭代，源源不断地给深度学习领域输送

重要的技术养料和创造力——“开源”已成为深度学习落地和繁荣不可或缺的源动力。

深度学习框架被誉为“智能时代的操作系统”。微软和谷歌多年来积极研究用于训练深度神经网络的新框架，并将各自的成果开源——微软的 PipeDream 和谷歌的 GPipe（图 4）。GPipe 专注于为深度学习项目扩展训练工作量，利用一种称为管道的技术，将数据和模型并行性结合起来；从概念上讲，GPipe 是一个分布式机器学习库，使用同步随机梯度下降和管道并行性进行训练，适用于任何由多个连续层组成的深度神经网络。此外，美国 Facebook 公司开源两个全新深度学习框架：通过自我游戏的方式训练深度学习网络的研究框架 Polygames、帮助人工智能研究人员发现高维数据中的相关性和模式的交互可视化工具 HiPlot。美国谷歌公司一直是深度学习开源道路的先行者。例如，2020 年 2 月，谷歌大脑开源 Trax 代码库，作为一个开源项目，其目的在于帮助研究者挖掘并理解高一阶的深度学习模型；2020 年 9 月，谷歌开源基于 Google Cloud 和 Kubernetes 的开源可扩展系统 Kartta Labs，使用深度学习和众包再现历史街景，可创建带有可探索时间轴的地图，从历史地图和照片中重建过去的城市。

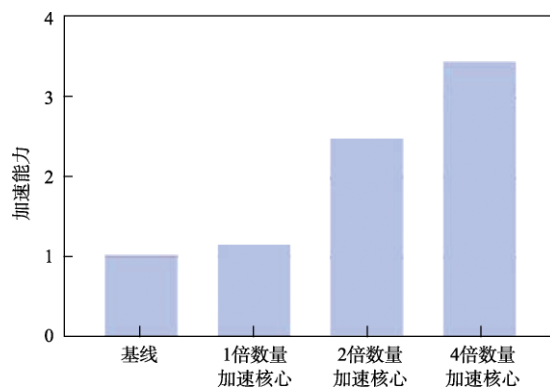


图 4 谷歌 GPipe 将 AmoebaNet-D 模型分配到 4 倍数量的加速核心上，实现了 3.5 倍的加速

Fig. 4 Google's GPipe allocates Amoebanet-D model to 4 times the number of acceleration cores, achieving 3.5 times acceleration

多个开源深度学习优化库公开，助力产学研各领域深度学习技术落地。微软研究院开源了深度学习优化库 DeepSpeed，该库中包括新型并

行优化器 ZeRO。通过提高规模、速度、可用性并降低成本, DeepSpeed 可在当前一代的 GPU 集群上训练具有超过 1000 亿个参数的深度学习模型, 极大促进大型模型的训练。同时, 与最新技术相比, 其系统性能可提高 5 倍以上。美国 Facebook 公司发布了用于 3D 深度学习的开源工具包——PyTorch3D, 带有常用的 3D 运算符和用于 3D 数据的损失函数及模块化可微渲染 API, 旨在通过 PyTorch 简化 3D 深度学习。作为版本的一部分, Facebook 同时还开源了 Mesh R-CNN 神经网络工具包, 能够对照片中的 2D 物体进行 3D 建模, 如图 5 所示。

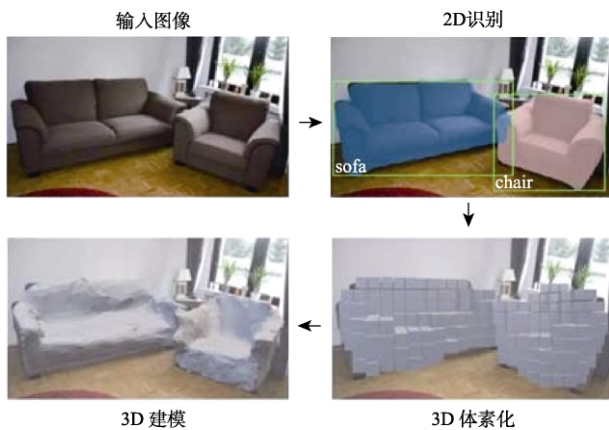


图 5 Facebook 开源 Mesh R-CNN 神经网络工具包  
Fig. 5 Facebook's open-source neural network Toolkit Mesh R-CNN

目前国内开源的深度学习框架系统尚未形成气候。紧随美国科技巨头, 中国的众多高科技公司在 2020 年纷纷发力开源市场。例如, 旷视科技宣布开源重量级深度学习框架天元<sup>[14]</sup> (MegEngine), 从人工智能特定化的方向切入、给开发者提供工具, 期望吸引开发者在此基础上进行大规模深度学习模型训练和部署。同期, 清华大学研究团队开源其深度学习框架 Jittor。腾讯优图实验室宣布正式开源新一代移动端深度学习推理框架 TNN, 通过底层技术优化实现在多个不同平台的轻量级部署落地。阿里云正式开源了深度迁移学习框架 EasyTransfer, 这是业界首个面向自然语言处理场景的深度迁移学习框架。

## 5 深度学习进一步发展方向分析

深度学习的下一步发展绕不开“算力”这个关键问题。过去 60 年间, 传统计算与通信范式有三个重要原理, 分别是香农定律、冯·诺依曼架构和摩尔定律。其中, 香农定律定义了熵、信道容量和失真情况下压缩极限, 目前我们距离这三个极限已比较接近; 冯·诺依曼架构是指五个最基本模块加上程序存储原理, 是图灵意义下最好的一种实现, 但其瓶颈在于数据和计算的分离, 而在深度学习中, 庞大数据量本身就会形成一个瓶颈; 对于摩尔定律, 充足的算力得益于摩尔定律的不断演进发展, 高性能芯片大幅降低了深度学习算法所需的计算时间和成本, 然而摩尔定律正在逐渐放缓。以突破上述这三个瓶颈为出发点, 可从如下三个方面探寻深度学习演进的新思路:

一是重新定义“数据-信息-知识”, 制定全新的计算范式。当前的技术研究与应用中, 香农定律已从点对点通信延伸到了多元异构用户信息论, 但严重缺乏显著的理论层面的进步与突破, 特别是当前众多特定领域人工智能应用技术已达到性能瓶颈, 亟待理论层面的革新, 如引入符号逻辑、知识推理、因果关系等<sup>[15]</sup>。

二是设计实现全新的、通用的计算体系和感知体系。在当前算力充足的前提下, 亟需将机器对不同类型大数据进行关联比对和分析计算的能力发挥到极致, 如何衍生出全新的感知体系来丰富多源异构数据感知与获取能力, 如何衍生全新的计算体系架构来有效治理和应用这些数据, 在深度学习的各类研究与应用中非常重要

三是需要探索全新的芯片模态<sup>[16]</sup>。传统的冯·诺依曼架构已难以支持当前深度学习所需的计算要素。因此, 亟需研发面向 GPU、ASIC 等的加速技术和异构混合计算技术并彻底形成新的芯片架构, 同时配套开发相关适配的算法和模型, 这已成为新老科技巨头(特别是集成电路制造商, 如英特尔、AMD、谷歌等)正在攻关的重点。

## 6 结束语

深度学习是一个广阔的领域, 围绕着一种形态由数百万甚至数十亿个变量决定并不断变化的算法——深度神经网络, 几乎每隔一段时间就有大量的新算法提出来。总体而言, 从算法层面, 未来深度学习算法可以分为三种基本的学习范式: 一是混合学习, 解决深度学习算法如何跨越监督学习和非监督学习之间的边界以适应大量未使用的无标签数据的问题——混合学习试图跨越监督学习和非监督学习的边界; 二是复合学习, 解决如何以创造性的深度学习算法将不同的模型或组件连接起来以生成一个大于各部分之和的复合模型的问题——复合学习意在利用几种模式的知识, 而非一种, 迁移学习就是复合学习的一个明显例子; 三是简化学习, 解决如何减少深度学习算法的规模和信息流同时保持相同或更强的预测能力的问题, 当前嵌入式人工智能时代需要轻量级人工智能——在保持性能的同时使神经网络更小。

## 参 考 文 献

- [1] Cong D, Zhao Y, Qin B, et al. Hierarchical attention based Neural Network for explainable recommendation[C]. The 2019 on International Conference on Multimedia Retrieval (ICMR 2019), June 15-18, 2019.
- [2] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, et al. Attention is all you need[C]. The 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), December 2-5, 2017.
- [3] Choromanski K, Likhoshesterov V, Dohan D, et al. Rethinking attention with performers[J]. ArXiv, 2020, abs/2009.14794: 1-36.
- [4] Yin M, Yao Z, Cao Y, et al. Disentangled Non-Local Neural Networks[C]. The 16th European Conference on Computer Vision (ECCV 2020), August 23-28, 2020.
- [5] Zou H, Yu G, Zhang Z. GCFA: Graph neural networks on collaborative filtering recommendation via attention mechanism[C]. The 5th IEEE International Conference on Big Data Analytics (ICBDA 2020), 2020.
- [6] Zhang J, Zhang H, Sun L, et al. Graph-Bert: Only attention is needed for learning graph representations[J]. ArXiv, 2020, abs/2001.05140: 1-10.
- [7] Devlin J, Chang M W, Lee K, et al. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[C]. NAACL-HLT 2019, Minneapolis, Minnesota, USA, June 2-7, 2019.
- [8] Brown T B, Mann B, Ryder N, et al. Language models are few-shot learners[J]. ArXiv, 2020, abs/2005.14165: 1-75.
- [9] Mao H H. A survey on self-supervised pre-training for sequential transfer learning in Neural Networks[J]. ArXiv, 2020, abs/2007.00800: 1-25.
- [10] 余同瑞, 金冉, 韩晓臻, 等. 自然语言处理预训练模型的研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(23): 12-22.
- [11] Jiao X, Yin Y, Shang L, et al. TinyBERT: Distilling BERT for natural language understanding[C]. The 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP 2020), November 16-20, 2020.
- [12] Jiang Z, Yu W, Zhou D, et al. ConvBERT: Improving BERT with span-based dynamic convolution[J]. ArXiv, 2020, abs/2008.02496:.
- [13] Wynter A D, Perry D J. Optimal subarchitecture extraction for BERT[J]. ArXiv, 2020, abs/2010.10499: 1-23.
- [14] 刘京运. “天元”开源, 旷视抢占人工智能棋局中的天元位置[J]. 机器人产业, 2020, 3:62-67.
- [15] 王柳. 基于深度学习的空间多目标识别方法研究[J]. 无人系统技术, 2019 (3): 49-55.
- [16] 汪鑫. 人工智能芯片的概念和应用分析[J]. 中国新通信, 2020, 22(20): 112-113.

作者简介:



王亚坤(1989-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为自然语言处理、深度学习、知识图谱、人工智能等。

[引用格式] 李 芳, 祝翠琴. 2020年仿人智能技术发展综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 8-13.

## 2020年仿人智能技术发展综述

李 芳<sup>1</sup>, 祝翠琴<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术信息研究所, 北京 100038; 2. 北京理工大学计算机学院, 北京 100081)

**摘要:** 仿人智能的核心在于对人脑的深入研究与不断模仿。对仿人智能领域的研究进行了综合评述, 并对进一步发展方向进行了分析。首先概述了大脑结构及处理机制研究, 大规模突触级别脑结构图问世, 推动对脑结构与功能的深入刻画; 然后讨论了最新的类脑计算模型和算法研究成果, 类脑计算成为通用人工智能的基石, 具有极其广阔的应用前景; 最后介绍了计算与存储一体的计算架构研究进展, 有着低功耗和快速计算特点的神经拟态芯片逐渐成为未来超大规模人工智能应用的基石。基于上述分析, 阐释仿人智能未来发展趋势。综述表明, 通过模仿生物神经网络实现机器智能已经成为一条十分重要的研究路线, 未来它甚至有可能突破人工智能和生物智能的天花板。

**关键词:** 仿人智能; 人工智能; 脑结构图; 类脑计算; 神经拟态芯片; 仿生学

**中图分类号:** TP183      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2021)02-08-06

**DOI:** 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.2.012

## Survey of Simulation-Human Intelligent in 2020

LI Fang<sup>1</sup>, ZHU Cuiqin<sup>2</sup>

(1. Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038, China;

2. School of Computer, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The core of simulation-human intelligence lies in the deep research and imitation of human brain. This paper makes a comprehensive review of the research in the field of simulation-human intelligence, and analyzes the further development directions. This paper firstly summarizes the mechanism of brain structure and processing mechanism, and meanwhile the large-scale synaptic-level brain structure graph is published, which promotes the in-depth description of brain's structure and function. Then this paper discusses the latest research achievements of brain-like computing model and algorithm. Nowadays, brain-like computing has become the cornerstone of general artificial intelligence (GAI) and has extremely broad application prospects. Finally, this paper introduces the research progress of computing architecture integrating computing and storage. In recent years, the neural-mimicry chip with the abilities of low power consumption and fast computing has gradually become the cornerstone of super large-scale AI applications in the future. Based on the aforementioned analysis, the future development trend of simulation-human intelligence is introduced. The proposed survey shows that, it has become a very important research route to realize machine intelligence by imitating biological neural network, and it may even break through the ceiling of artificial intelligence (AI) and biological intelligence (BI) in the future.

**Key words:** Simulation-Human Intelligent; Artificial Intelligence; Brain Structure Graph; Brain-Like Computing; Neural-Mimicry Chip; Bionics

## 1 引 言

当前, 仿人智能研究主要集中在以下三个方面: 一是大脑结构及处理机制研究, 目前人类对大脑的认知还不足 5%, 需要对大脑结构及处理机制深入研究, 建立完整的“脑图”, 以全面认识大脑; 二是类脑计算模型和算法研究, 目前人们对神经元连接的多样多变性、前馈反馈作用机理, 以及多脑区协作机制等认识不够, 需要研究开发精确的类脑计算模型和算法; 三是构建计算与存储一体的计算架构, 实现高密度、低耗能计算系统。2020 年, 仿人智能技术有了长足发展。

## 2 大脑结构及处理机制研究进展

基于类脑智能的仿人智能研究是智能时代的基础与核心, 是理解认知、思维、意识和语言的神经基础的研究。大脑发育过程极其复杂, 而理解大脑皮层的精密发育过程对于研究大脑结构具有重大意义。长期以来, 大脑结构图的结构与工作方式一直是热门研究话题, 近年来主导仿人智能研究的人工神经网络也是受到大脑神经元的启发才创建的。

尝试重建大脑(使用精细的成像技术绘制大脑物理路径)并绘制脑结构图是连接组学的一个方向, 也是神经科学家对揭示大脑工作方式的一种探索, 更是实现仿人智能的必由之路。由于人类大脑过于复杂, 研究人员尝试从果蝇等较为简单的生物入手, 试图重建果蝇大脑的完整神经连接图(人类大脑有 1,000 亿个神经元, 果蝇大脑只有 10 万个左右)。2020 年 1 月, 美国谷歌公司和美国霍华德·休斯医学研究所联合发布一个拥有突触级别连接的果蝇半脑连接图(图 1), 这是迄今为止人类绘制出的最大的突触级别大脑结构图。2020 年 3 月, 瑞典卡罗林斯卡学院研究了人大脑中所有蛋白质的表达图。为了增加对大脑的神经生物学的基本了解, 研究人员使用了转录组学和基于抗体的作图法对人、猪和小鼠大脑的主要区域进行了全面的分子解剖, 确定了区域表达谱, 并观察了这三个哺乳动物物种之间表达水平

的相似性和差异, 相关成果发表于《科学(Science)》期刊<sup>[1]</sup>。2020 年 10 月, 为了应用新型工具加深对仿人智能中大脑回路的理解, 美国国立卫生研究所(NIH)在 Brain Initiative 2.0 计划中将“小鼠全脑连接图”确立为支撑仿人智能的变革性项目。同期, 美国加州大学旧金山分校和美国克利夫兰医学中心分离获取了皮层发育过程中关键细胞种群, 首次绘制了脑细胞类型特异的 3D 表观遗传学信息图, 首次实现了在特异细胞类型中分析脑发育过程相关的基因转录调控行为<sup>[2]</sup>, 克服了传统大脑结构图成果无法在细胞水平解读大脑皮层发育的基因表达调控的缺陷, 为仿人智能后续研究提供了新思路——基于该脑图, 研究人员发现了在细胞命运决定过程中顺式作用元件调控基因表达的新规律, 并为研究人类大脑发育和神经精神疾病的遗传学本质提供了新的参考数据。该研究相关成果发表于《自然(Nature)》期刊, 精准测绘并验证了脑皮层发育过程中细胞特异性的基因调控行为, 被认为为探寻基因组中非编码 DNA 序列与仿人智能关系提供了新的知识。

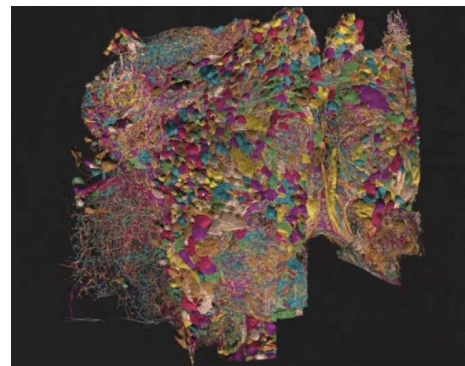


图 1 果蝇大脑结构 3D 展示图

Fig. 1 3D display of brain structure of *Drosophila melanogaster*

神经突触是大脑中众多神经元之间信息传递和存储的最基本的结构与功能单元, 长期以来一直是仿人智能领域的重点研究项目。探寻神经突触的结构与作用机理, 精确解析突触的蛋白分子结构和组织架构, 及其在神经活动或异常过程中的变化, 是解密大脑奥妙的一个关键环节, 对发展仿人智能至关重要, 也是近年来脑科学与仿人智能研究中最基础的核心研究方向之一, 具有众

多重大应用方向，例如突触的异常可能是导致如抑郁症和阿尔茨海默病等精神与神经疾病的起源。2020 年 11 月，美国加州大学洛杉矶分校通过发展前沿冷冻电镜断层三维成像技术（图 2），实现了对中枢神经系统中两类最主要突触——兴奋性与抑制性突触的精确区分以及结构特征的定量化分析，在神经突触的分子组织架构与功能研究方面取得突破，相关成果发表于《自然-神经科学（Nature Neuroscience）》期刊<sup>[3]</sup>。

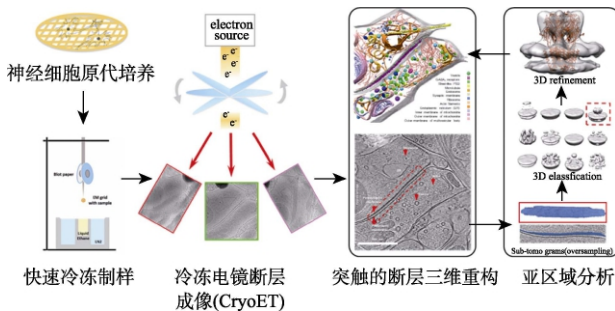


图 2 冷冻电镜断层原位成像技术解析神经突触受体蛋白原位结构与组织分布

Fig. 2 Analysis of in-situ structure and tissue distribution of synaptic receptor protein with CryoEM

### 3 类脑计算技术研究进展

目前，发展通用人工智能（General Artificial Intelligence, GAI）通常有两种方法：神经科学导向和计算机科学导向。类脑计算相关研究重点关注沿着神经科学导向实现仿人智能、探索通用人工智能。随着图像处理、模式识别等一系列以智能为核心的应用加速兴起，传统的计算机越来越“力不从心”，在这种情况下，类脑计算应运而生。所谓“类脑计算”，就是指仿真、模拟和学习借鉴人脑的神经系统结构和信息处理过程，构建出具有学习能力的超低功耗新型计算范式与体系，类脑计算是仿人智能的典型代表<sup>[4-5]</sup>。总体而言，类脑计算是一门综合科学，其与生物学、物理学、数学、计算机科学和电子工程等都有关系。近年来，类脑计算研究受到了越来越多的关注，其重要性正如 2020 年 10 月欧盟人脑旗舰研究计划项目所指出的：“在未来 10 到 20 年内，谁要引领世界，谁就必须在类脑计算领域领先。”美国、

日本、德国、英国、中国、加拿大等先后推出（类）脑科学研究计划，希望抢占未来仿人智能技术的制高点，掌握未来战略的主动权；同时，许多科技巨头企业纷纷推出类脑智能与仿人智能研究计划，在以 IBM、谷歌、微软、科大讯飞等为代表的龙头企业的推动下，类脑计算受到高度关注。

2020 年，类脑计算在理论研究和应用验证等方面均取得突破。美国英特尔公司和美国得克萨斯 A&M 大学在一种固态材料中探索出类似神经元的电气开关机制，更重要的是发现了其是如何按照指令在导电和绝缘行为之间可逆变化的机理。该研究成果揭示了铜离子的运动是导电性变化的关键，这种变化可用于创造电尖峰（类似于大脑神经系统中神经元的工作方式），这代表朝着开发能模仿人脑的电路迈出了重要一步，实现了对负责在人脑内传递信息的神经信号的模仿，为仿人智能开辟了一条新途径。该成果发表在《物质（Matter）》期刊<sup>[6]</sup>。美国麻省理工学院计算机科学与人工智能实验室（CSAIL）、维也纳工业大学、奥地利科技学院的联合团队，受秀丽隐杆线虫等小型动物脑的启发，实现了仅用 19 个类脑神经元来控制自动驾驶汽车（图 3），而实现这一目标的常规深度神经网络则需要数百万量级神经元；此外，实验证明这一类脑神经网络具备模仿学习的能力。相关成果发表在《自然-机器智能（Nature Machine Intelligence）》期刊上<sup>[7]</sup>。

类脑计算与传统计算机架构不同，后者是围绕图灵完备和完善的冯·诺依曼结构，前者目前

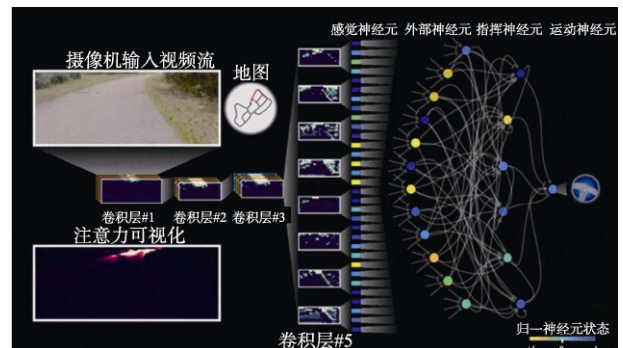


图 3 19 个类脑神经元就实现了控制自动驾驶汽车

Fig. 3 19 Brain-like neurons are able to control the automatic driving vehicle

还没有广义的系统层次结构或对类脑性计算的完整性的理解。这会影 响类脑计算软件和硬件之间的兼容性, 从而阻碍了类脑计算的开 发效率。面对这一挑战, 2020 年 10 月, 清华大学提出了“类脑计算完备性 (Neuromorphic Completeness)” (又称“神经拟态完备性”) 概念, 放宽了对硬件完整性的要求, 并提出了相应的系统层次结构, 其中包括图灵完备的软件抽象模型和通用的抽象神经形态架构。同时, 该研究提出了一种具有高度通用性和普适性的类脑计算系统层次结构, 该结构包括三个层次: 软件、硬件和编译。该研究被认为 会加速类脑计算及通用人工智能等方向的研究, 相关成果发表于《自然 (Nature)》期刊<sup>[8]</sup>。这项研究为处于起步阶段的类脑计算方向填补了 完备性理论与相应系统层次结构方面的空白, 有利于自主掌握新型计算机系统核心技术。

#### 4 神经拟态芯片研究进展

目前的人工智能正在面临着诸多挑战, 其中 一项就是对于能源的大量需求造成的生态污染问 题。有研究表明, 仅仅是训练一个人工智能模型, 所消耗的电力产生的碳排放量相当于 5 台美式轿 车整个生命周期的碳排放量。可以说, 目前的人 工智能模式对生态环境构成了一定的威胁。作为 下一代的人工智能芯片, 面向仿人智能的神经拟 态计算驱动 的类脑芯片——神经拟态芯片, 能够 很好地解决这一问题。神经拟态计算在算法以及 芯片的设计上可以实现以低于 1000 倍的功耗去 完成同样效果的模型训练。因此, 神经拟态芯片 是一种环境友好型的芯片, 其体积小、功耗低的 特点, 符合生物进化最本质的优势。除了能耗低 之外, 神经拟态芯片的其他显著优势还包括神经 元的智能性和自主性, 不是单纯解决一个数据训 练、模式识别的问题, 而是解决多模态感知、非 结构化信息的感知和推理; 神经拟态芯片通过不 同信号相互之间连接, 可以做得更鲁棒, 这对于 外在的攻击或者不友好的操作可以更有效地进行 保护<sup>[9-11]</sup>。

神经拟态芯片模拟的是人脑的神经结构和运

行方式, 其中的计算模块类似于人脑中的神经元, 通过一种全新的模型——脉冲神经网络<sup>[12]</sup> (SNNs) 将计算模块进行重新分布<sup>[13]</sup>。该研究最早起源于 20 世纪 80 年代。1980 年, 超大规模集成电路 (VLSI) 发明者之一、加州理工学院传奇人物 Carver Mead 首次提出神经拟态概念, 并设想用 CMOS 模拟电 路去模仿生物视网膜, 搭建具有生物计算特性的 系统; 2017 年, 美国英特尔公司开发了代号为 Loihi 的第一款自主学习神经拟态芯片, 在神经拟 态硬件的开发上迈出一大步。2020 年 6 月, Gartner 发布报告预测, 到 2025 年神经拟态芯片有望取代 GPU 成为用于人工智能系统的主要芯片之一。

2020 年神经拟态芯片相关研发成果丰硕。美国英特尔公司和康奈尔大学联合团队在英特尔神 经拟态芯片 Loihi 上实现了一套源自大脑嗅觉回 路结构和动力学的神经算法, 并配置了生物嗅觉 的电路图, 使 Loihi 仅需单一样本便可学会识别 每一种气味, 传统解决方案学习每类气味则需要 3000 倍以上的训练样本。相关成果发表于《自然— 机器学习 (Nature Machine Intelligence)》期刊<sup>[14]</sup>。美国马萨诸塞州立大学利用蛋白质纳米线作为生 物导线制造神经拟态忆阻器——“记忆晶体管”。 该项工作实现了微生物地杆菌中提取的蛋白质纳 米线, 促进了记忆电阻器装置在生物电压下工作, 模拟了大脑中的神经组件 (图 4), 这是有史以 来首次一个设备可以在与大脑相同的电压水平下 工作, 使仿人智能研究迈出坚实一步。相关成果 发表于《自然 (Nature)》期刊<sup>[15]</sup>。德国德勒斯登 和霍姆赫兹中心设计了一种能模仿神经单元膜即 有可塑性的神经晶体管。该成果找到了能复制神 经单位膜特性的合适系统, 让神经拟态芯片产生 独特非线性输出动态。相关成果发表在《自然— 电子学 (Nature Electronics)》期刊上<sup>[16]</sup>, 这项研 究最有意义的成就是利用神经元的可塑性获得的 神经晶体管网络的动态学习能力。作为神经拟态 芯片研究的先行者, 英特尔公司创立的英特尔神 经拟态研究社区 (INRC) 一直发挥着引领作用。 例如, 以色列开放大学神经生物拟态工程实验室 公布, 受英特尔神经拟态研究社区支持, 该团队

正在开发一种安装在轮椅上、基于神经拟态技术的机械臂，以帮助脊髓损伤患者完成日常任务。研究人员正在探索在英特尔 Loihi 神经拟态硬件上实施自适应控制，努力满足以显著降低成本解决协作、用户友好、精确的机械臂的需求；此外，由于 Loihi 比通用处理器的能效高出 1000 倍，它还可以让辅助设备在不充电的情况下运行更长时间，使其在日常生活中更为有用。INRC 社区自 2018 年成立以来发展迅速，现已拥有 100 多名成员。

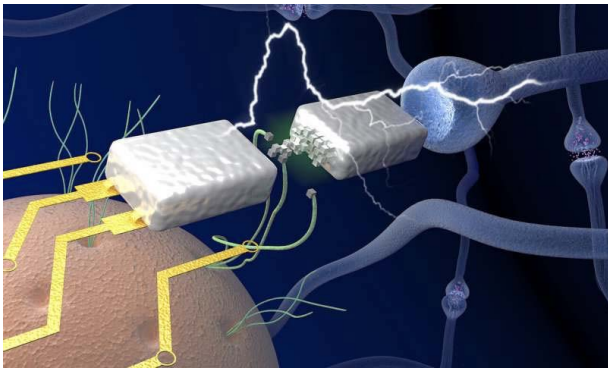


图 4 从微生物地杆菌中提取的蛋白质纳米线(绿色),促进了记忆电阻器装置(银色)在生物电压下工作,模拟了大脑中的神经元组件(蓝色连接)

Fig. 4 The protein nanowires (green) extracted from *Geobacillus* microbe facilitate the memristor device (silver) to work under biological voltage, simulating the neuronal components in the brain (blue connection)

## 5 仿人智能发展趋势分析

仿人智能的未来发展方向如下。

### (1) 时空动态模式识别

计算神经科学在脑科学和人工智能之间起到了桥梁的作用。目前，深度学习在静态物体的识别上已经超过了人类，但仍有很多的工作是深度学习做不好的，其中之一就是时空动态的模式识别——这个问题对人脑来说非常简单，但深度学习并不擅长。仿人智能的目的是模仿大脑处理信息的方式，而大脑处理信息的方式和深度学习截然不同，因为人脑处理的都是动态的时空信息。因此，真正的类脑计算不应该处理静止图像，而应该处理时空连续的信号。虽然深度学习已有很多成功的应用，但如果继续发展，例如在进行视

频分析、动态视觉信息处理的时候，自然就会遇到和人脑一样的任务，需要面临动态时空模式识别任务，这是仿人智能下一步的重要发展方向。

### (2) 属于类脑计算的体系结构与硬件原语

图灵完备性和冯·诺依曼体系结构是通用计算机技术能够飞速发展并持续繁荣的关键因素<sup>[17]</sup>——几乎所有的高级编程语言都是图灵完备的，冯·诺依曼架构通用处理器则可以通过图灵完备的指令集实现图灵完备性，这意味着编程语言编写的任何程序都可以转换为任意图灵完备处理器上的等价指令序列（即“程序编译”）。这样，由软件层、编译层、硬件层组成的计算机层次结构就能够确保应用软件、指令集、硬件设计在独立发展的同时相互兼容（即软硬件去耦合），为整个领域的繁荣发展打下了系统基础。现有仿人智能系统方面的研究多聚焦于具体芯片、工具链、应用和算法的创新实现，而对系统基础性问题，如计算完备性、系统层次结构等思考不足，导致软硬件紧耦合、应用范围不明确等一系列问题。但从现有通用计算机的发展历史与设计方法论来看，完善的计算完备性与软硬件去耦合的层次结构是计算系统蓬勃发展的计算理论与系统结构基础。

### (3) 仿人视觉芯片

人工视觉芯片是用半导体技术模仿人类的系统，成为仿人智能的应用方向，其主要特点是把图像传感器和视觉处理器集成在一个芯片上，其功能是模仿人类视觉系统进行信息的并行获取以及处理。视觉芯片在很多领域都有应用，如盲人导航、自动驾驶、机器人、目标跟踪等，涵盖了工业、消费、科研等诸多领域。这种视觉芯片是一种比较典型的边缘计算系统：在传感器感知以后立即对信息进行处理，因此在实时性方面好于数据集群的处理模式。由于视觉芯片在边缘端处理图像，因此也面临着很多问题，其中最大的问题是如何在功耗、芯片面积受限的条件下设计图像大数据进行实时处理。在视觉芯片方向目前主要有三大技术：一是人工视觉感知技术，视觉芯片不仅仅是简单模仿人类视觉系统的功能，在很



多情况下它还需要具有超越人的视觉感知能力；二是智能化信息处理技术，如何在功耗、体积受限的情况下进行实时化的图像处理；三是集成技术，如何将人工视觉图像传感器和处理器进行集成。

## 6 结束语

仿人智能的核心在于对人脑的深入研究与不断模仿。人脑相对传统计算机而言有三大特性：一是低功耗，人脑的功率大约是 20 W，而当前试图模拟人脑的超级计算机需要几百万瓦；二是容错性，人脑时刻都在失去神经元，而不会影响脑内的信息处理机制，而微处理器失去一个晶体管就能被破坏；三是无须编程，人脑在与外界交互的过程中自发地学习和改变，无须像实现人工智能的程序一样遵循预设算法所限制的路径和分支。

在仿人智能的研究与应用历程中，通过模仿生物神经网络实现机器智能已经成为一条十分重要的研究路线，未来它甚至有可能突破人工智能和生物智能的天花板。尽管生物神经网络是一个慢速系统，每秒钟能产生的神经脉冲数量只有十几个，生物获取和处理的信息量也处于较低水平，但一旦将生物神经网络电子化，其处理信息的能力将被比模拟的生物大脑高出多个数量级。当与人脑类似的“电脑”变为现实时，它对人大脑的幅度超越就发生了：速度上，“电脑”可以比人大脑快多个数量级；规模上，没有颅骨限制，“电脑”可以根据需求扩容；寿命上，电子系统即使有损耗，也可以复制迁移到新系统而永生；精度上，生物大脑的很多缺陷和短板将被“电脑”避免和弥补。

## 参 考 文 献

- [1] Sjöstedt E, Zhong W, Fagerberg L, et al. An atlas of the protein-coding genes in the human, pig, and mouse brain[J]. *Science*, 2020, 367(6482): 5947-5949.
- [2] Song M, Pebworth M P, Yang X, et al. Cell-type-specific 3D epigenomes in the developing human cortex[J]. *Nature*, 2020, 587: 644-649.
- [3] Liu Y, Tao C, Zhang X, et al. Mesophasic organization of GABAA receptors in hippocampal inhibitory synapses[J]. *Nature Neuroscience*, 2020, 23(12): 1589-1596.
- [4] Yamane K, Morita M. Brain-like computing based on distributed representations and neurodynamics[J]. *New Generation Computing*, 2009, 28: 321-338.
- [5] 吴朝晖. 类脑研究: 为人类构建超级大脑[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(3): 425-426.
- [6] Parija A, Handy J V, Andrews J L, et al. Metal-insulator transitions in  $\beta'$ -Cu V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mediated by polaron oscillation and cation shuttling[J]. *Matter*, 2020, 2(5): 1-21.
- [7] Lechner M, Hasani R, Amini A, et al. Neural circuit policies enabling auditable autonomy[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2020, 2: 642-652.
- [8] Zhang Y, Qu P, Ji Y, et al. A system hierarchy for brain-inspired computing[J]. *Nature*, 2020, 586: 378-384.
- [9] 葛悦涛, 尹晓桐. 边缘计算的发展趋势综述[J]. *无人系统技术*, 2019, 2(2): 60-64.
- [10] James A. The why, what and how of artificial general intelligence chip development[J]. *ArXiv*, 2020, abs/2012.06338: 1-14.
- [11] Li B, Gu J, Jiang W. Artificial Intelligence (AI) chip technology review[C]. 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI 2019), Taiyuan, China, November 8-11, 2019.
- [12] Kumarasinghe K, Kasabov N, Taylor D. Brain-inspired spiking neural networks for decoding and understanding muscle activity and kinematics from electroencephalography signals during hand movements[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 2486.
- [13] 任源, 潘俊, 刘京京, 等. 人工智能芯片的研究进展[J]. *微纳电子与智能制造*, 2019, 1(2): 20-34.
- [14] Imam N, Cleland T A. Rapid online learning and robust recall in a neuromorphic olfactory circuit[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2020, 2: 181-191.
- [15] Fu T, Liu X, Gao H, et al. Bioinspired bio-voltage memristors[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1861.
- [16] Baek E, Das N R, Cannistraci C V, et al. Intrinsic plasticity of silicon nanowire neurotransistors for dynamic memory and learning functions[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3: 398-408.
- [17] 黄铁军, 余肇飞, 刘怡俊. 类脑机的思想与体系结构综述[J]. *计算机研究与发展*, 2019, 56(6): 1135-1148.

作者简介:



李 芳 (1986-), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为人工智能政策与伦理。



祝翠琴 (1962-), 女, 本科, 高级实验师, 主要研究方向为人工智能等。

[引用格式] 葛悦涛, 任彦. 2020年人工智能芯片技术发展综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 14-19.

# 2020年人工智能芯片技术发展综述

葛悦涛<sup>1</sup>, 任彦<sup>2</sup>

(1. 中国信息通信研究院安全研究所, 北京 100191; 2. 海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京 100074)

**摘要:** 对人工智能芯片领域的研究进行了综合评述, 并对未来发展趋势进行了分析。首先分析了当前世界主要科技巨头纷纷布局人工智能芯片的现状; 然后重点介绍了边缘侧低功耗人工智能芯片的特点与研发应用现状; 最后讨论人工智能芯片发展趋势。综述表明, 人工智能芯片在越来越多的场景中表现出广阔的应用前景, 低功耗和面向通用人工智能的人工智能芯片研发已成为大趋势, 类脑仿生芯片将持续扮演通用人工智能“探路者”角色, 人工智能芯片将有助于我国在世界范围的科技竞争中实现弯道超车。

**关键词:** 人工智能芯片; 边缘智能; 低功耗; 神经网络; 深度学习; 类脑芯片

**中图分类号:** TP183      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2021)02-14-06

**DOI:** 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.2.013

## Survey of Artificial Intelligence Chip in 2020

GE Yuetao<sup>1</sup>, REN Yan<sup>2</sup>

(1. Institute of Security, China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China;  
2. Hiwing Aviation General Equipment Co., Ltd, Beijing 100074, China)

**Abstract:** In this paper, the research in the field of Artificial Intelligence (AI) chip is overviewed, and then the future development trends are discussed. This paper first analyzes the current situation of AI chip layout by the world's major technology giants. Then this paper focuses on the characteristics and research, development and application status of edge-side low-power AI chip. Finally, the development trend of AI chip is described. The survey shows that, recently AI chips have gained broad application prospects in more and more scenes. The research and development of low-power and General AI (GAI) oriented AI chips have become the widely-recognized trends. Moreover, brain-like bionic chips will continue to play the role of "Pathfinder" of GAI, and AI chips will help China to overtake in the world-wide scientific and technological competition.

**Key words:** Artificial Intelligence Chip; Edge Intelligence; Low-Power; Neural Network; Deep Learning; Brain-Like Chip

## 1 引言

当前人工智能各领域的算法和应用处在高速发展和快速迭代的阶段, 而人工智能芯片已经成为支持人工智能产业的底层基础, 拥有非常广阔

的发展前景<sup>[1]</sup>。关于人工智能芯片的定义, 可以从广义和狭义两个角度来阐释: 首先, 从广义角度, 只要能够运行人工智能算法的芯片, 都可以被视作人工智能芯片; 其次, 从狭义角度, 人工智能芯片指针对人工智能算法做了特殊加速设计

的芯片(现阶段的人工智能算法一般以深度学习算法为主,也可以包括其他机器学习算法),这也被视为通常意义下对人工智能芯片的定义<sup>[2-4]</sup>。此外,可用于人工智能计算任务各类芯片,通常总称为泛人工智能类芯片。因此,人工智能芯片也称为“人工智能加速器”,即专门用于处理人工智能应用中的大量计算任务的模块(其他非计算任务仍由 CPU 负责)。

人工智能芯片目前有两种发展路径。第一种发展路径延续传统计算架构,旨在对硬件计算能力进行加速,主要以 GPU、FPGA、ASIC 等为代表,但 CPU 依旧发挥着不可替代的作用<sup>[5]</sup>。另外一种发展路径是彻底颠覆经典的冯·诺依曼计算架构,采用类脑神经结构来提升计算能力,以美国英特尔公司的 Loihi 芯片、美国 IBM 公司的 TrueNorth 芯片等为代表<sup>[6]</sup>。人工智能芯片发展路线图,可以归纳为如下三个阶段:短期目标,实现以异构计算为主加速各类应用算法的落地;中期目标,发展自重构、自学习、自适应、自组织的异构人工智能芯片来支持人工智能算法的演进和类人智能的升级;长期目标,向设计实现通用人工智能(General Artificial Intelligence, GAI)芯片的终极目标迈进。

虽然当前摩尔定律逐渐放缓,但作为推动人工智能技术不断进步和落地的硬件基础与极优选择,未来十年仍将是人工智能芯片发展的黄金时期——预计到 2021 年,我国的人工智能芯片产值预计将达到 52 亿美元。面对不断增长的市场需求,各类专门针对特定领域人工智能应用的人工智能芯片新颖设计理念和架构创新正在不断涌现、推陈出新。

## 2 人工智能芯片研究与应用现状

环球市场观察发布报告指出,全球人工智能芯片组的全球市场预计将从 2019 年的 80 亿美元增长到 2026 年的 700 亿美元。集成电路设计行业属于技术密集型行业,而人工智能芯片作为集成电路领域新兴的方向,在集成电路和人工智能方

面有着双重技术门槛。目前,泛人工智能类芯片领域中的主要企业分为两类:第一类企业主要包括国际集成电路设计龙头企业以及主要以进行 IP 授权模式经营业务的企业,前者的代表性企业包括英特尔(Intel)、英伟达(Nvidia)、AMD、高通公司(Qualcomm)、NXP、Broadcom、赛灵思(Xilinx)、联发科、华为海思等,后者的代表性企业包括 ARM、Cadence、Synopsys 等。第二类企业主要是专业人工智能芯片设计公司,其代表性企业包括寒武纪、地平线机器人、Graphcore、Wave Computing 等。此外,目前业界重点研发和应用的人工智能芯片,按设计思路主要分为三大类:首先是专用于机器学习和深度学习(以深层神经网络算法为主)的训练和推理用加速芯片;其次是受生物脑启发设计的类脑仿生芯片;最后是高效计算各类人工智能算法的通用人工智能芯片。

2020 年人工智能芯片行业大型并购频发,在短短两个月时间内便达成了总金额达到约 1000 亿美元的收购交易:9 月,美国英伟达公司宣布将以 400 亿美元现金加股票的形式收购美国 ARM 公司;10 月,美国 AMD 公司宣布将以 350 亿美元收购美国赛灵思公司,同期美国 Marvell 公司宣布将通过股票加现金的方式,以总价约 100 亿美元的价格收购模拟芯片制造商 Inphi 公司;美国英特尔公司延续将其主要精力集中在专用人工智能芯片领域的路线,于 11 月收购致力于创建用于建模和仿真的优化平台的美国 SigOpt 公司以加强其人工智能芯片业务,持续强化在人工智能芯片领域的实力。

英伟达在 2020 年依然扮演着人工智能芯片“领跑者”的重要角色。英伟达公布了其用于超级计算任务的 A100 人工智能芯片(图 1),这款基于第八代 Ampere 架构的芯片所采用的弹性计算技术能将每个芯片分割为多达七个独立实例来执行推理任务,人工智能算力提升 20 倍以上,被业界认为是史上最大性能飞跃。这是人类有史以来首次可以在一个平台上实现对横向扩展以及纵向扩展的负载的加速;此外,A100 人工智能芯片将在提高吞吐量的同时,降低数据中心的成本。

全球知名的数据中心解决方案提供商 VMware 宣布，将在 VMware 数据中心管理软件中首次使用英伟达的人工智能芯片，以提升数据中心效率。紧接着，英伟达发布全球唯一的千万亿级工作组服务器 NVIDIA DGX Station A100，配备四个英伟达 A100 人工智能芯片，具有高达 320GB 的 GPU 内存，加速满足位于全球各地的公司办公室、研究机构、实验室或家庭办公室中的办公团队对于机器学习和数据科学工作负载的强烈需求。

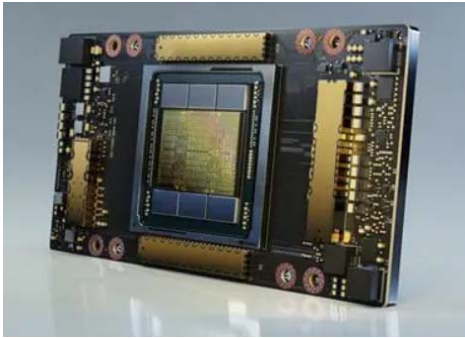


图 1 英伟达 A100 人工智能芯片  
Fig. 1 NVIDIA's A100 AI chip

英特尔则正在成为最贴近军方需求的人工智能硬件供应商。2020 年 10 月，英特尔宣布获批一项与美国军方合作项目的第二阶段合同，旨在帮助美国军方在美国国内生产更先进的人工智能芯片原型，这种封装技术能够将来自不同供应商的“小芯片”集成到一个封装中，从而实现把更多功能整合进一个更小的成品中，同时降低其功耗。

美国谷歌公司持续着力人工智能芯片的硬件优化，使它能更好地支持谷歌的人工智能技术，例如提升谷歌助手的交互体验和长时间保持激活的能力。美国谷歌公司提出通过人工智能程序推进专用人工智能芯片内部开发的设想，旨在建立一种良性循环：人工智能让芯片变得更好，经过改良的人工智能芯片又能增强人工智能算法，依此类推、迭代共进。相关研究已经证明，对于芯片电路布局设计任务，深度神经网络只花了 24 小时就解决了该问题，而人类设计是需要 6~8 周，并且前者的解决方案更好。谷歌宣布联手韩国三星公司共同开发的代号“白教堂”的自研人工智能芯片取得了重大进展，该芯片采用三星的 5 nm

半导体工艺打造、搭载 8 个 ARM 核心，预计 2021 年就可能应用在下一代谷歌手机和笔记本电脑上。

但是“前浪”面临“后浪”的强大挑战与竞争，这些后浪源于以往主营主业不在集成电路与设备制造的科技巨头的“跨界”与“掉转航向”，力求布局人工智能生态全产业链。以美国亚马逊公司为例，其 Alexa 语音助手的计算任务此前是由英伟达的芯片处理，但现在亚马逊 Alexa 语音助手已经在他们自研的 AWS Inferentia 人工智能芯片上运行。Inferentia 人工智能芯片（图 2）由四颗 NeuronCore 组成，每颗 NeuronCore 由以线性独立方式处理数据的大量小型数据处理单元（DPU）组成、实现一个“高性能脉动阵列矩阵乘法引擎”。此外，亚马逊宣布 Alexa 部分计算任务转向自研芯片，预计成本较英伟达 T4 可降低 30%，并降低了 25% 的延迟，更低的延迟有助于 Alexa 的开发人员运行更先进的数据分析输入技术、降低用户的等待时间。

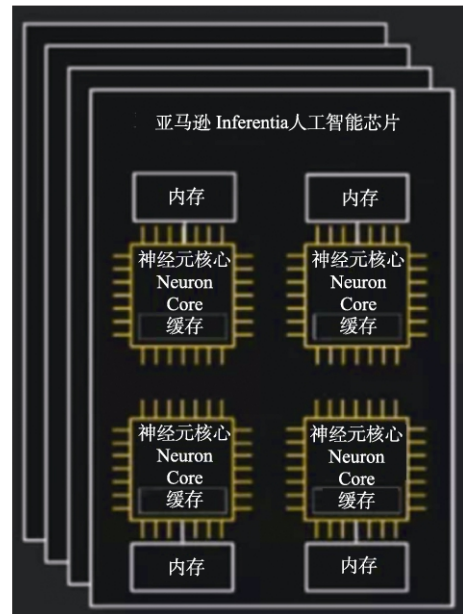


图 2 亚马逊 Inferentia 人工智能芯片  
Fig. 2 Amazon's Inferentia AI chip

### 3 边缘侧低功耗人工智能芯片研究进展

德勤发布《2020 科技、传媒和电信行业预测》报告，指出到 2024 年，边缘人工智能芯片销量预

计将超过 15 亿片;消费级边缘人工智能芯片市场规模远大于企业市场,但其增长速度可能相对较慢,2020 至 2024 年的复合年均增长率预计将为 18%,如图 3 所示。

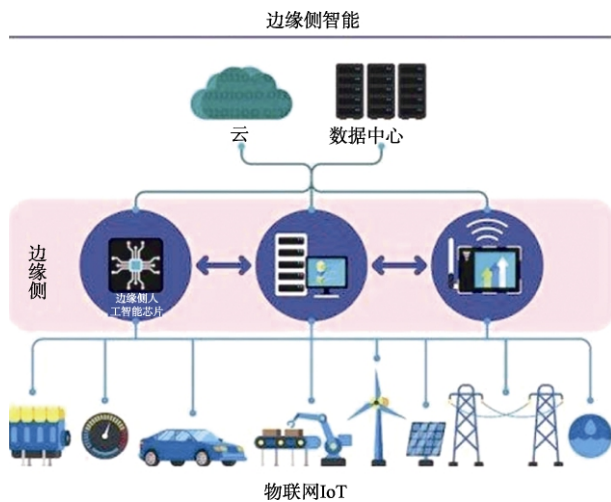


图 3 边缘人工智能芯片应用广泛  
Fig. 3 Edge AI chips are widely used

边缘侧人工智能芯片的最成熟战场是自动驾驶领域<sup>[7-8]</sup>。ABI Research 预计,到 2027 年左右,对先进驾驶辅助系统的需求将增长两倍,但汽车行业已然将目光投向了更长远的全自动驾驶汽车和自动驾驶出租车,从 L2 和 L3 级先进驾驶辅助系统向 L4 和 L5 级全自动驾驶演进的过程中,高性能、低延迟和高能效的结合将是关键所在。目前自动驾驶汽车芯片市场占有领导地位的是英伟达,其在 2015 年就推出了车载计算平台,此后持续迭代,目前在自动驾驶芯片市场已处于优势地位;而以低功耗产品见长的 Imagination 等新兴公司的不断崛起,为边缘人工智能芯片领域注入了新的元素和活力。后者于 2020 年推出的第三代神经网络加速芯片 IMG Series4(其全新的多核架构可提供每秒 600 万亿次操作甚至更高的超高性能)所面向的市场,由其第二代神经网络加速芯片所聚焦的移动设备和汽车市场,进一步拓展到智能相机监控、消费电子(尤其是数字电视)、低功耗物联网(IoT)智能设备领域。由于以自动驾驶为代表的众多人工智能芯片应用场景都是基于三维数据,因此当前在设计人工智能芯片时,无

法回避三维数据的实时高性能计算问题<sup>[9-11]</sup>。尽管目前世界主要科技巨头企业都对人工智能芯片投入了大量的人力物力,由于三维场景的复杂性,目前这些芯片还远远没有达到令人满意的地步。

人工智能芯片的应用发轫于计算机视觉计算与图像处理,在 2020 年,该领域的边缘人工智能芯片尝试依然产生了瞩目的成果。该领域人工智能芯片无须生成实际图像,而是可以分析所看到的视频并仅提供有关其前面内容的元数据,而不是显示器视野中的内容。由于数据依然在边缘侧,没有被发送到远程服务器,因此黑客截获敏感图像或视频的机会大大减少,这将有助于减轻对隐私的担忧,在智能手机、智能相机、视频安防等领域有着广阔的应用前景<sup>[12-13]</sup>。据统计,目前边缘人工智能芯片绝大部分将流向高端智能手机,当前在用的所有消费级边缘人工智能芯片中超过 70%均用于智能手机。苹果公司已经证明了结合人工智能和影像技术以通过 iPhone 定制设计的神经引擎处理器支持的 Face ID 生物识别技术创建更安全的系统的功效;华为技术有限公司和美国谷歌公司还在其智能手机中配备了专用的人工智能芯片,以协助图像处理。这些设备上的人工智能芯片所执行的正是“边缘计算”模式:在网络边缘处理复杂的人工智能和机器学习任务,而不是将数据来回发送给服务器。日本索尼公司与美国微软公司达成微型人工智能芯片交易,合作将人工智能功能嵌入索尼最新的成像人工智能芯片中,该新模块的最大优势在于它内置了处理器和内存,可以使用像微软的 Azure 这样的人工智能技术来分析视频,但是在一个独立的系统中,它比现有方法更快、更简单、更安全地操作。美国初创人工智能芯片公司 Kneron 推出专门为边缘计算设备设计的 KL720 AI SoC,该芯片在小区域内可提供高计算性能且功耗低,可以处理 1080P 的 4K 静止图像和视频,并提供面部识别的 3D 传感功能,还为自然语言处理应用程序提供了新的音频识别工具。

边缘人工智能芯片领域的另一个先行者是美国谷歌公司。谷歌的 Edge TPU 边缘人工智能芯

片是专为在边缘运行 TensorFlow Lite ML 模型而设计的 ASIC 芯片, 可用于越来越多的工业使用场景, 如预测性维护、异常检测、机器视觉、机器人学、语音识别等, 可以应用于制造、本地部署、医疗保健、零售、智能空间、交通运输等各个领域, 具有体型小、功耗低、性能出色的优势, 可以在边缘部署高精度人工智能。2020年2月, 谷歌发布首个基于 Edge TPU 人工智能芯片的全球人工智能模型平台——Model Play, 这是一款面向全球用户的人工智能模型资源交流与交易平台, 为机器学习与深度学习提供丰富多样的功能模型, 兼容多类市场主流的边缘计算人工智能芯片, 包括谷歌 CoralEdge TPU、英特尔 Movidius、英伟达 Jetson Nano 等, 帮助用户快速创建和部署模型, 显著提高模型开发和应用效率, 降低人工智能开发及应用门槛。

#### 4 人工智能芯片发展趋势分析

当前, 随着全球人工智能产业的蓬勃发展和技术产品的广泛落地, 人工智能芯片相较于传统处理器已经成为人工智能算法实现的更优选择, 而且只有将人工智能算法与人工智能芯片充分融合与协同, 才能够真正推动人工智能技术的商用进程。因此, 人工智能芯片被公认为是未来人工智能时代的战略制高点。人工智能芯片未来发展趋势, 可以概述为以下三个方面。

一是低功耗人工智能芯片成为“万物互联万物生”的智能物联网时代的标配。近年来, 随着物联网技术的发展与产品应用, 边缘侧的智能处理所扮演的角色逐渐加码, 因此催生了“人工智能物联网 (AIoT)”概念<sup>[14-15]</sup>。通常而言, 人工智能物联网是人工智能与物联网的结合, 通过将物联网末梢节点 (如传感器) 采集的海量多源异构数据存储于云端或者边缘侧, 并在云端或者边缘侧运行人工智能、大数据、云计算等技术手段形成更高形式的人工智能, 实现万物数据化、泛在智能化<sup>[16-17]</sup>。人工智能物联网应用场景对硬件设备的低功耗要求极高, 需要硬件设备兼顾高性

能、强智能和低功耗等特点——这已经成为人工智能物联网应用场景下智能硬件的设计和实现的主要要求, 而智能硬件的设计过程也必须结合特定物联网场景、从应用需求出发, 有针对性、定制化设计人工智能芯片架构与集成方案, 才能在保障性能的同时降低功耗。

二是面向通用人工智能的人工智能芯片成为大趋势。目前业界尚没有出现一款通用人工智能芯片, 决定了人工智能目前还无法深刻变革人类生活方式, 因此设计实现面向通用人工智能的人工智能芯片成为相关研发的终极目标——通用人工智能芯片是指能够支持和加速通用人工智能计算的芯片。在朝通用人工智能芯片前进的道路上所面临的挑战, 包括适应人工智能和计算架构通用性、适应人工智能技术的复杂性等, 同时需要重点考量摩尔定律的逐渐失效和冯·诺依曼架构的瓶颈所带来的技术挑战与应用难度。

三是类脑仿生芯片将持续扮演通用人工智能“探路者”角色。目前类脑仿生芯片的主流理念是采用神经拟态工程设计的神经拟态芯片。神经拟态芯片采用电子技术模拟已经被证明的生物脑的运作规则, 从而构建类似于生物脑的电子芯片, 即“仿生电子脑”。神经拟态计算在算法以及芯片的设计上可以实现以低于 1000 倍的功耗去完成同样效果的模型训练。因此, 神经拟态芯片是一种环境友好型的芯片, 其体积小、功耗低的特点, 符合生物进化最本质的优势。2020年6月, Gartner 发布报告预测, 到 2025 年神经拟态芯片有望取代 GPU, 成为用于人工智能系统的主要芯片之一。神经拟态研究陆续在全世界范围内开展, 并且受到了各国政府的重视和支持。受脑结构研究的成果启发, 复杂神经网络在计算上具有低功耗、低延迟、高速处理、时空联合等特点。美国苹果公司一直是类脑仿生芯片研发领域的佼佼者: 2020年8月, 美国苹果公司公布其最新 A14 仿生芯片, 该芯片的 CPU 性能相比上一代 A13 仿生芯片提升 40%, GPU 性能相比上一代仿生芯片提升 50%, 领先于目前安卓设备搭载的任何处理器技术, 包括英特尔芯片; A14 仿生芯片还搭载了定制技术,

这些技术可以驱动速度更快的神经引擎, 这将使 iPad Air 在机器学习方面变得更强大。2020 年 11 月, 苹果公布 A14X 仿生芯片的 CPU 和 GPU 性能基准, 与 A12Z 仿生芯片相比, 多核测试的性能提高了 35%。

## 5 结束语

随着信息化和智能化逐渐渗透进入能源、交通、农业、公共事业等更多行业的商业应用场景中, 考虑到智能化任务运算力需求, 以及传输带宽、数据安全、功耗、延时等客观条件限制, 人工智能芯片在越来越多的场景中展现出广阔的应用前景和旺盛的生命力。根据 ABI Research 数据, 人工智能芯片市场规模到 2024 年预计可以达到 100 亿美元。而人工智能芯片市场的持续火热, 为我国在全球人工智能科技竞赛中“弯道超车”提供了有利机遇: 长期以来, 我国在 CPU、GPU、DSP 等处理器设计上一直处于追赶地位, 绝大部分芯片设计企业过度依靠欧美的 IP 核设计芯片, 在自主创新上受到了极大的限制——智能电子设备及集成电路关键技术面临严峻的“卡脖子”挑战和持续的潜在“断供”风险。“危局中开新局”, 人工智能产业的快速兴起与普遍应用, 无疑为中国在以人工智能芯片为代表的新兴处理器领域实现“弯道超车”提供了绝佳的历史机遇——人工智能领域的应用目前还处于面向行业应用阶段, 生态上尚未形成完全竞争垄断和技术壁垒, 因此国产处理器厂商与国外竞争对手在人工智能芯片研发(乃至人工智能)这一全新赛场上处于同一起跑线上。因此, 基于新兴技术和应用市场, 不仅在突围人工智能芯片领域, 中国在建立人工智能生态圈方面也将大有可为。

## 参 考 文 献

- [1] Momose H, Kaneko T, Asai T. Systems and circuits for AI chips and their trends[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2020, 59: 050502.
- [2] James A P. Towards strong AI with analog neural chips[C]. 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2020), Seville, Spain, 2020.
- [3] 汪鑫. 人工智能芯片的概念和应用分析[J]. 中国新通信, 2020, 22(20): 112-113.
- [4] 尹首一. 人工智能芯片概述[J]. 微纳电子与智能制造, 2019, 1(2): 7-11.
- [5] 施羽暇. 人工智能芯片技术体系研究综述[J]. 电信科学, 2019, 35(4): 114-119.
- [6] Mashford B S, Jimeno-Yepes A, Kiral-Kornek I, et al. Neural-network-based analysis of EEG data using the neuromorphic TrueNorth chip for brain-machine interfaces[J]. IBM Journal of Research and Development, 2017, 61: 7.
- [7] 吴昊, 陈虎, 李俊波. 浅析人工智能技术的发展与应用[J]. 信息系统工程, 2020(6): 69-70.
- [8] 冯晓辉, 王哲, 李雅琪. 智能驾驶领域发展态势与展望[J]. 人工智能, 2018(6): 26-36.
- [9] Chen J, Bai T. SAANet: Spatial adaptive alignment network for object detection in automatic driving[J]. Image and Vision Computing, 2020, 94: 103873.
- [10] 黄漫, 黄勃, 高永彬. 引入深度补全与实例分割的三维目标检测[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(01): 129-132.
- [11] 田永林, 沈宇, 李强, 等. 平行点云: 虚实互动的点云生成与三维模型进化方法[J]. 自动化学报, 2020, 46(12): 2572-2582.
- [12] Mazzia V, Khaliq A, Salvetti F, et al. Real-Time apple detection system using embedded systems with hardware accelerators: An edge AI application[J]. IEEE Access, 2020, 8: 9102-9114.
- [13] 李理. 2019 年边缘计算技术发展研究[J]. 无人系统技术, 2020, 3(02): 58-62.
- [14] Wu C, He Y, Tsang K F, et al. The IDex case study on the safety measures of AIoT-based railway infrastructures[C]. 2020 IEEE International Symposium on Product Compliance Engineering- Asia (ISPCE-CN 2020), Chongqing, China, November 6-8, 2020.
- [15] Ma W, Nian C, Xu H. Application of AIoT in wireless image transmission to rotating machinery[C]. The 3rd IEEE International Conference on Knowledge Innovation and Invention (ICKII 2020), Kaohsiung, Taiwan, China, August 21-23, 2020.
- [16] 张辉. 人工智能技术在物联网中的运用探析[J]. 中国设备工程, 2021(1): 28-29.
- [17] 肖明华, 李琳, 卢镭. 人工智能与计算智能在物联网方面的应用分析[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2021(1): 171-173.

作者简介:



葛悦涛(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为人工智能、网络与信息安全。



任彦(1979-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为科研项目、无形资产的管理。

[引用格式] 张俊辉, 张欢欢. 2020年人机混合智能技术发展综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 20-25.

# 2020年人机混合智能技术发展综述

张俊辉<sup>1</sup>, 张欢欢<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044; 2. 中国电子科技集团公司电子科学研究院创新中心, 北京 100041)

**摘要:** 人机混合智能是一种新型智能形式, 是一种跨越物种、属性结合的下一代智能科学体系。对人机混合智能领域的最新研究与应用进展进行了综合评述。首先介绍主要军事强国在智能外骨骼设备方面的研发和列装进度; 然后盘点虚拟现实和增强现实技术在美军各军种的应用现状; 最后讨论脑机结构技术的军事应用与影响。综述表明, 通过人机协作的方式提高人与系统综合的性能, 使得人类智能和人工智能的结合成为最高效的解决复杂任务问题的基本方式, 人机混合智能概念的出现给解决军事智能问题提供了可行的途径, 将会从思想、技术和应用模式上对现代和未来军事作战产生全面影响。

**关键词:** 人机混合智能; 人工智能; 军事应用; 外骨骼设备; 虚拟现实; 增强现实; 脑机接口

**中图分类号:** TP183      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2021)02-20-06

**DOI:** 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.2.014

## Survey of Human-Machine Hybrid Intelligence in 2020

ZHANG Junhui<sup>1</sup>, ZHANG Huanhuan<sup>2</sup>

(1. College of Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Innovation Center, China Academy of Electronics and Information Technology of CETC, Beijing 100041, China)

**Abstract:** Human-machine hybrid intelligence is regarded as a novel form of intelligence, which is the next generation of intelligent science system across the combination of species and attributes. In this paper, the latest research and application of human-machine hybrid intelligence are reviewed. This paper firstly introduces the research development and installation procedure of intelligent exoskeleton equipment in major military powers. Then this paper reviews the applications of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) technology in the U.S. military services. Finally, this paper discusses the influence of brain-computer interface technology on military applications and influence. The survey shows that, the combination of human intelligence and Artificial Intelligence (AI) becomes the most efficient way to solve the problems of complex tasks by improving the performance of human and system integration through human-machine cooperation. The emergence of the concept and application of human-machine hybrid intelligence provides a feasible way to solve military intelligence problems, which will have a deep impact on modern and future military operations in terms of ideas, technologies and application modes.

**Key words:** Human-Machine Hybrid Intelligence; Artificial Intelligence; Military Application; Exoskeleton Equipment; Virtual Reality; Augmented Reality; Brain-Computer Interface

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0820503)



## 1 引言

“人机混合智能”作为一种新型的智能形式,有别于传统意义上的人工智能,是跨物种、跨属性结合的下一代智能科学体系<sup>[1-2]</sup>。在这个体系里,机器擅长的记忆、吸收和关联以及人类的推理、判断和规划优势相结合,会创造出更加智能的世界。人机混合智能作为人工智能 2.0 的重要方向,是一种颠覆性的人工智能技术,它旨在通过人机协作的方式,提高人与系统综合的性能,使得人类智能和人工智能的结合成为最高效的解决复杂任务问题的基本方式。当前的人工智能技术在解决以环境高复杂、边界不确定、博弈强对抗、响应强实时和样本稀疏为主要特征的军事问题上还存在较大挑战,在军事领域的人工智能应用还十分有限,人机混合智能概念的出现给解决军事智能问题提供了可行的途径。当前世界各军事强国都将人工智能作为未来军事中“改变游戏规则”的颠覆性技术,纷纷加快推进智能化作战装备研究。各种军事作战装备或系统始终都是一个“人一机一环境”系统。实际上,无人机、无人车、无人艇等各种无人装备都不可能是完全无人的,只不过是人由前置转为后置、由体力变为智慧、由具体执行变为指挥控制,其中涉及复杂的人机交互及其相互关系的问题,单纯的人工智能与人类智能都不能使其发挥最大效能,人机智能的混合是其重要的发展方向——人机混合智能,是颠覆性技术的一个关键领域<sup>[3-4]</sup>。本文重点从智能外骨骼、VR/AR 人机协作、脑机接口等方面,概述人机混合智能的最新进展。

## 2 智能外骨骼设备研究进展

现代战争已进入高科技时代,这让步兵的地位进一步下降,但是近年来的实战却一再证明:空中力量存在局限性,地面作战部队依然具有决定意义,在许多情况下步兵依然不可缺少,这让各国又开始重视高端步兵装备<sup>[5-6]</sup>。全球各强国部队都在着眼发展智能外骨骼。近年来,俄军已经

展示过多款外骨骼系统,包括 2017 年展示的 K-2 型被动下半身外骨骼和 2018 年展示的 Ratnik-3 型强动力外骨骼,2020 年推出了可以承载 60 kg 负载的 BEC-01 外骨骼装备(图 1)。以 Ratnik 系列外骨骼为例,其属于无动力的外骨骼系统,使用弹簧和智能工程技术减轻了承载者的负担,可以协助士兵轻松进行重体力劳动,而且仅需花费几分钟就可以完成安装与解除。俄罗斯的外骨骼技术试验不断稳步推进,同中国一道成为全球最早军队列装外骨骼的国家。此外,俄军的 K-2 型外骨骼装备、EO-1 型外骨骼装备(Ratnik 系列的早期版本)已经在叙利亚使用,主要供给工兵,在操作扫雷机器人时用于携带指挥和控制控制台。美国在列装方面落后于俄罗斯,美国陆军未来司令部正努力改变这种现状,而且已经取得了一定的成绩。



图 1 俄军 BEC-01 外骨骼装备

Fig. 1 The robot exoskeleton of BEC-01 of Russian Army

美国军方在外骨骼方面探索可以追溯到几十年前,五角大楼曾经启动过多项外骨骼项目,例如美国特种作战司令部的“战术突击轻甲”项目<sup>[7]</sup>。最初的外骨骼的定位是“刀枪不入”的战衣<sup>[8]</sup>,随着时间的推移,外骨骼有了更丰富的功能内涵:外骨骼被认为是一个“系统”,能够为人体的下半身或上半身提供助力;更近一步,它可以是一种混合动力系统,能够组合一切功能,进而为士兵全身服务、能让士兵比现在更轻松地完成日常工作,例如让士兵携带更多弹药、更重的武器,让士兵行动得更快等,帮助士兵更好地战斗、减少疲劳,进而让小型部队的单兵更加高效;结合有多种传感器和电信设备,具备多维态势感知,显著提高特战队员的工作效率。经过数年的研究与测试,美国陆军开始正式推进动力型外骨骼的研

发与部署。

美军的单兵外骨骼的类型很多，而且更新换代的频率也很高：2014年，雷神公司为美军开发了一款名为XOS2的外骨骼装置；随后2017年美国洛克希德·马丁公司又推出HULC外骨骼装置。然而，美军至今都未正式装备一款单兵外骨骼装置。2020年8月，美国海军陆战队开始推进测试一种代号为“守护者XO”的机器人外骨骼单兵穿戴装置（图2）发展计划，一名普通的陆战队士兵在穿戴该外骨骼后，其体力将可能达到普通人的4~10倍，能够在连续8小时内持续反复移动近100 kg重的装备或弹药箱，或持续几小时高强度格斗。这项合作协议由海军陆战队后勤创新办公室和美国Sarcos国防装备公司签署，Sarcos是一家研制高科技套装的公司。此外，这种上半身“守护者XO”外骨骼机器人可以连接到不同的移动底座上，如轮式或履带式车体、叉式升降车、斗式卡车等，以满足海军维护装备、管理后勤物流的需求。外骨骼显然迎合了海军陆战队如今的转型：目前美国海军陆战队正在进行升级改制、精简人员，而搬运工作显然是相对低级的任务，精简后的人员减少，外骨骼的出现能够实现较少的人数完成以往需要多人才能完成的任务。2020年9月，美国陆军第十山地师司令部直属军事情报营测试了Onyx外骨骼系统。这套系统由美国洛克希德·马丁公司研制，计划在一年内通过测试并装备部队。Onyx配有一套综合传感器以及一台人工智能计算机，可根据士兵所处地形或者士兵背负载荷来调整功率，以有效抵消人体背部和腿部的过度应力，进而帮助士兵减轻压力。



图2 美军“守护者XO”的机器人外骨骼单兵穿戴装置  
Fig. 2 The robot exoskeleton of “Guardian XO” of US Army

纵观美国和俄罗斯的外骨骼研发与应用过程，二者存在明显差异：美国起步早、成果早，但是由于预期较高、要求高，一直在改进、没有列装，此外多采用动力式设计思路，过于复杂、对能源依赖高、应用难度大且价格昂贵，因此丧失了先机；俄罗斯起步晚，但是一直在坚持，且多采用无动力系统<sup>[9]</sup>，价格低廉（不到美军外骨骼的1/10）、装卸方便，已经完成大规模列装、发展速度反而更快。中国军用外骨骼的技术路线与俄罗斯类似。

整体而言，对各国军队来说，外骨骼技术具有强大诱惑力：士兵作战时需要背负各类轻重火器、弹药及其他作战装备，由此士兵的负载重量也随之增高，引起士兵疲劳进而影响战斗水平的发挥。集成武器、装具和各种其他配件等的未来数字化步兵单兵外骨骼，正在将普通士兵武装“升级”成为过去科幻故事里描述的超人战士——这种超级士兵将无视赤道、极地、高原或沼泽的气候地形限制，同时还有卓越的数字化、智能化侦察定位瞄准等全方位功能，同时在装备内体力协助系统推动下，其体力也将倍增，甚至可以由此和猛兽角力。未来战争虽然是信息化战争、智能化战争，但是可以预见短兵相接的场面依然频繁，试想一个配备外骨骼的士兵和一个没有配备外骨骼的士兵对垒的结果。因此，外骨骼的研究与应用已经成为一项世界各国都在关注的关键技术。

### 3 虚拟、增强现实技术研究进展

自2016年以来，美国海军将虚拟现实（Virtual Reality, VR）、增强现实（Augmented Reality, AR）技术<sup>[10]</sup>融入战斗训练中，不仅节省了军费开支和大量时间，还有效提高了士兵的作战能力。虚拟现实中有由计算机生成的虚拟内容，用户可以与这些虚拟内容交互（通常通过虚拟现实凸显），而增强现实则能够将数字信息带入用户的视野并覆盖在现实世界中，他们通常通过眼镜或智能手机的摄像头展现在用户眼前。

在过去，进行实战训练都是真人上阵，不仅

危险性极大,而且一旦失事所付出的代价都是无法估量的,包括对飞行员的培养训练、飞机的制造保养等。现在,随着人工智能、VR、AR 的发展与成熟,模拟人机空战已经成为训练飞行员、测试新机型、演练新战法等的重要选择<sup>[11-12]</sup>。2019 年,美国空军的服务部门为其飞行员和支持人员迅速推广了虚拟现实和增强现实解决方案。除了空军,美国对于虚拟现实、增强现实的应用遍布各个军种:混合现实眼镜取代了工作人员通常随身携带的平板电脑或大型手册,可以在机器上叠加说明、显示 PDF 或图像,并获得其他人的远程支持,这些人可以通过戴眼镜来看佩戴者所看到的画面;列装搭载了集成视觉增强系统 (IVAS) 的微软 Hololens 头显具有多种功能和实用信息,包括瞄准镜、夜视仪、具体位置定位等,还可以与无人机配合,实时查看无人机拍摄画面;耗资近一亿美元打造包含城市和关键地形的卫星影像与 3D 模型的全新数据库——One World Terrain (OWT),用于 VR 模拟真实战场;通过 DAQRI 智能头盔,让准备射击的枪手接收到来自联络员的命令以及武器系统数据,能在目标上覆盖图像以识别目标的性质和位置,同时发出诸如“发射”和“停火”之类的书面命令。

2020 年 4 月,美国空军投资了一套成本相对较低的技术解决方案,以确保飞机能够正确飞行和维护:虚拟现实模拟器使飞行员无须在高空中真实操控飞机即可进行培训,从而节省了大量成本;同时,用于维修人员的增强现实眼镜可以节省时间并提高工人的效率。除了使用增强现实进行模拟训练,美国空军的空中教育与培训司令部还正在开发进行飞机维修的 VR/AR 培训项目。2020 年 8 月,美国陆军战斗能力发展司令部 (CCDC) 军队研究实验室的科研人员研发了一套将 AR/VR 用于日常工作的流程,将 AR/VR 技术用于帮助科研人员分析大量数据或工程场景,为科学家和工程师降低 AR/VR 技术的使用门槛。2020 年 9 月,美国军方在加沙边境沿线测试以色列制造的无人机拦截系统。该无人机拦截系统源于美军的一个新项目,该项目正在研究如何使用

虚拟现实和增强现实来控制无人机,将使用小型快速无人机作为控制主体,机身上通过放置织网来打击捕获其他无人机。美军现在已经开始使用新系统进行训练,最终将会在战场上使用该系统,如图 3 所示。



图 3 美国空军正在使用 VR/AR 技术进行培训及设备维护

Fig. 3 The US air force is using VR/AR technology for training and equipment maintenance

将 VR/AR 用于军事,拥有着诸多优势:安全性方面,在虚拟作战中,士兵戴上设备会真实感觉到自己在作战过程中有中弹和受伤,而脱离虚拟现实环境回归现实世界后的士兵,其实和作战之前“毫无二致”;经济性方面,在虚拟作战中,不必受坦克被炸、飞机坠毁、子弹短缺、人员受伤等实战中经常出现的“物资和金钱消耗”的场景约束;此外,能够更加全面地考虑突发状况并且模拟在现实中可能出现的多种战局与场景,通过提前在虚拟场景中“预演”和“演练”可以为现实环境中“实战”降低失误率和死亡率<sup>[13]</sup>。

#### 4 脑机接口技术研究进展

随着世界主要军事强国越来越多地将人工智能和半自主系统纳入其职能,脑机接口 (Brain-Computer Interface, BCI) 可能为扩大和改进人-机协作提供重要手段<sup>[14]</sup>。脑机接口技术大多仍处于研发的早期阶段,美国国防预先研究计划局 (DARPA) 早在 1970 年就开始组建脑机接口研究团队,目前 DARPA、陆军研究实验室、空军研究实验室等机构正在积极研究和资助脑机接口技术。脑机接口技术的军事应用,已经涵盖战场态势感知、信息处理与决策、战场反应与指挥控制等关键和核心的军事功能<sup>[15-16]</sup>。如果

此前的武器系统不过是人类体能、技能和部分智能的拓展与延伸,那么脑机接口的出现,则使得人与武器系统之间呈现出越来越难以区隔的趋势。

2020年9月,美国军事智库兰博公司发布报告《脑机接口:军事应用与影响的初步评估》,研究了未来脑机接口技术可能与未来作战人员相关的关键领域,探索了人-机神经通信在当前和未来的作战价值、相关弱点与风险,以及技术部署之前应制定的政策规范。报告通过测试“脑机接口工具箱”对未来战术城市作战的潜在效用,表明脑机接口技术很可能在未来战场产生实际作战效果,随着人-机交互的发展速度和应用数量的增加,脑机接口能力的实用性将在很大程度上取决于其在战斗中的保真度和可靠性;脑机接口促进的脑对脑直接交流为作战行动提供了最具变革性的应用,但也带来了最显著的作战和制度风险。报告指出,脑机接口在军事作战、道德和法律领域可能产生新漏洞,并对现有的军事组织结构产生深远影响。

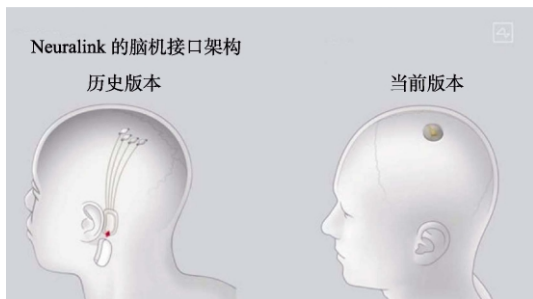


图4 只有硬币大小的脑机接口传感器设备 Link V0.9  
Fig. 4 A coin sized BCI sensor device Link V0.9

2020年1月,美国PARAFROMICS公司公布了一种新型高数据速率植入式脑机接口,采用比现有方法低60倍的功耗处理和传输神经数据,可降低大脑过热带来的风险,同时传输更多数据。2020年8月,美国脑机接口公司Neuralink发布了最新研究的只有硬币大小的脑机接口传感器设备Link V0.9(图4),其直径为23 mm、厚度为8 mm,拥有1024路连接,能够感应温度气压,并读取脑电波、脉搏等生理信号,可以置于人脑

的颅顶部位。2020年10月,美国空军研究实验室(AFRL)宣布,将开发“增强型学习平台”,使大脑在学习过程中更容易吸收信息,积极探索在人脑和计算机之间创建接口,以提高飞行员学习和快速有效决策的能力。该项目名为“个性化神经学习系统”(iNeuraLS)(图5),是一项为期三年的概念验证项目,建立在AFRL对神经调节和大脑学习状态进行中的持续研究之上,并得到了“颠覆性能力种子计划”资助。iNeuraLS系统的目标是为虚拟和增强现实平台以及用于机器学习的人工智能提供帮助,实现通过实时提取脑部信号和其他生理读数来确定人脑学习状态。

未来几十年,作战需求与风险将是推动脑机接口技术发展的关键。为满足该需求,研究人员需评估脑机接口和其他军事技术的潜在作战应用,利用兵棋推演探索脑机接口和其他前瞻性技术对未来战士的实用价值、潜在的新作战漏洞,以及减少这些漏洞的初步想法等;在脑机接口能力引入战斗之前,测试其在非战斗场景中的故障,将有助于加强作战人员对脑机接口技术的信任并减少意外风险;在准备将脑机接口技术纳入未来的军事能力之前,应制定规划确保该技术的顺利推出和执行,以解决从研发到作战应用的伦理和政策问题。

脑机接口技术的未来在军事领域的发展与应用方向,概述如下:远程离岸无线评估将成为从人脑传输数据的一个潜在前沿领域,指挥官借此可从很远的距离对其士兵甚至敌人的状态进行评估,与此相类似,脑机接口也可用于对一个小组的评估进行汇总,但目前没有对该技术进行概念验证;目前脑机接口在修复术方面的工作包括将现有的神经元重新连接到物理系统,要控制从未存在过的假肢及相关神经元则更具挑战性,关于向大脑传输数据,最终目标是直接向大脑提供高保真信息(如孤立的记忆植入等);脑机接口的未来前景是与物联网(IoT)的整合,通过互联网将系统连接起来,物联网具有战术应用前景,包括使作战人员访问传感器和数据,而脑机接口则可以强化这种能力<sup>[17]</sup>。

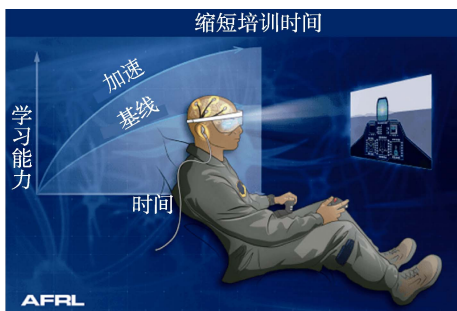


图 5 美军“个性化神经学习系统”(iNeuraLS)项目

Fig. 5 The U.S. Army's iNeuraLS project

## 5 结束语

人机混合智能作为人工智能 2.0 的一个重要方向,是一种新型智能形式,它不同于人类智能,也不同于人工智能,是一种跨越物种、属性结合的下一代智能科学体系。人工智能时代一个最重要的特点是“人和机器共生”:过去人和机器的关系是单向的,机器是“奴隶”,百分之百服从人类;但在人工智能时代,人和机器的关系是双向的,机器是“伙伴”,它具有感知、学习、推理和决策能力,既要服从人类,又会影响人的决策。人机混合智能旨在通过人机交互和协同,提升人工智能系统的性能,使人工智能成为人类自然的延伸和拓展,通过人机协同更加高效地解决复杂问题,具有深刻的科学意义和巨大的产业化前景。

总的来看,军事人机混合智能将会从思想、技术和应用模式上对现代和未来军事作战产生全面影响。目前已在三个方面展现效用:一是智力会超越体力、信息的有效协同成为决定战争胜负的首要因素;二是无形的(不战)监控取代残酷的(激战)摧毁成为征服对手的首选途径;三是在体系作战中,人机融合产生出的集智作用有可能超过集中火力和兵力的作用。对“人”而言,“机”就是延伸自我的一种工具,同时也是认知自我的一种手段,通过机的优点来了解自己的缺点,通过机的缺点来明了自己的优点,然后进行相应的补偿或加强。

## 参 考 文 献

- [1] Guzman A L, Lewis S. Artificial intelligence and communication: A Human-Machine communication research agenda[J]. *New Media & Society*, 2020, 22: 70-86.
- [2] Sun D, Ou Q, Yao X, et al. Integrated human-machine intelligence for EV charging prediction in 5G smart grid[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, 139: 1-15.
- [3] 程洪, 黄瑞, 邱静, 等. 人机智能技术及系统研究进展综述[J]. *智能系统学报*, 2020, 15(2): 386-398.
- [4] 艾兴, 赵瑞雪. 人机协同视域下的智能学习: 逻辑起点与表征形态[J]. *远程教育杂志*, 2020, 38(1): 69-75.
- [5] Hong M, Kim G T, Yoon Y. ACE-Ankle: A novel sensorized RCM (Remote-Center-of-Motion) ankle mechanism for military purpose exoskeleton[J]. *Robotica*, 2019, 37: 2209-2228.
- [6] 宋鹏, 莫新民, 周加永, 等. 军用外骨骼传感系统设计与步态识别研究[J]. *机械设计与制造*, 2018(S2): 175-177.
- [7] 王新蕊, 范宇翔, 刘钰. 国外军用助力外骨骼装备发展路线[J]. *轻兵器*, 2018(4): 26-31.
- [8] 卫锦萍. 国外军用可穿戴装备发展探析[J]. *军事文摘*, 2016(19): 33-35.
- [9] 申京玉, 张仕民, 陈冲, 等. 无动力外骨骼助力机器人研究进展[J]. *机械传动*, 2020, 44(2): 166-176.
- [10] Yung R, Khoo-Lattimore C. New realities: A systematic literature review on virtual reality and augmented reality in tourism research[J]. *Current Issues in Tourism*, 2019, 22: 2056-2081.
- [11] 邓平煜, 裘旭益, 姚子羽. 航空军事领域的人机混合智能技术[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(10): 3-6.
- [12] Ahir K, Govani K, Gajera R, et al. Application on Virtual Reality for enhanced education learning, military training and sports[J]. *Augmented Human Research*, 2019, 5: 1-9.
- [13] Gače I, Jakšić L, Murati I, et al. Virtual Reality serious game prototype for presenting military units[C]. *The 15th International Conference on Telecommunications (ConTEL 2019)*, 2019.
- [14] Chaudhary U, Xia B, Silvoni S, et al. Brain-Computer Interface-Based Communication in the completely Locked-In State[J]. *PLoS Biology*, 2017, 15: 1-25.
- [15] 祝翠琴. 脑与认知技术发展综述[J]. *无人系统技术*, 2020, 3(1): 60-64.
- [16] Munyon C N. Neuroethics of non-primary brain computer interface: Focus on potential military applications[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2018, 12: 1-4.
- [17] 吴敏文. 脑机接口军事应用的潜力与挑战[J]. *军事文摘*, 2021(1): 56-60.

作者简介:



张俊辉(1986-),男,博士,主要研究方向为智能交通系统、交通知识图谱。



张欢欢(1993-),女,硕士,助理工程师,主要研究方向为信息处理、大数据共享交换、人工智能等。

[引用格式] 朱小伶. 2020年量子计算技术发展综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 26-32.

# 2020年量子计算技术发展综述

朱小伶

(社会安全风险感知与防控大数据应用国家工程实验室, 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041)

**摘要:** 量子计算技术是当今世界最具颠覆性的前沿技术之一, 已成为世界主要国家进行高新技术竞争的重要领域。对量子计算领域的研究进行了综合评述, 并对其宏观发展趋势进行了分析。首先分析世界上主要国家均对量子信息技术寄予厚望, 制定了雄心勃勃的国家级发展计划, 以抢占新一轮科技革命的战略高地; 随后介绍2020年世界范围内的量子计算机研发现状, 成绩斐然、呈现“追逐战”趋势; 然后概述量子计算在美国陆、海、空、网等多军兵种的军事应用。最后, 分析未来量子计算发展趋势和宏观态势。综述表明, 量子计算发展具有重大科学意义、战略价值、军用潜力, 是一项对传统技术体系产生革命性冲击、进行颠覆式重构的重大技术创新, 将引领新一轮科技革命、产业变革、军备变革方向。

**关键词:** 量子计算; 国家战略; 量子计算机; 量子霸权; 人工智能; 军事应用

**中图分类号:** O641      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2021)02-26-07

**DOI:** 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.2.015

## Survey of Quantum Computing Technology in 2020

ZHU Xiaoling

(National Engineering Laboratory for Risk Perception and Prevention (RPP),  
China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

**Abstract:** Quantum computing technology is one of the most disruptive cutting-edge technologies in the world, and has become an important field of high-tech competition among major countries. In this paper, the research in the field of quantum computing is reviewed, and the further macro development trend is presented. This paper firstly analyzes that the major countries in the world place high hopes on quantum information technology and formulates ambitious national development plans, to seize the strategic highland of the current new round of scientific and technological revolution. Then the world-wide research and development of quantum computer in 2020, with remarkable achievements and “chasing war” trend, is introduced. Besides, this paper summarizes the military applications of quantum computing technology in the U.S. land, sea, air, network and other military services. Finally, this paper analyzes the development trend and macro situation of quantum computing in the future. This survey shows that, the development of quantum computing has great scientific significance, strategic value and military potential. It is a major technological innovation which has a revolutionary impact on the traditional technology system and carries out subversive reconstruction. Hence, it will lead a new direction of scientific and technological revolution, industrial revolution and armament revolution.

**Key words:** Quantum Computing; National Strategy; Quantum Computer; Quantum Superiority; Artificial Intelligence; Military Application

收稿日期: 2021-01-03; 修回日期: 2021-03-03

基金项目: 全国一体化国家大数据中心先导工程(17111001)

## 1 引言

2016 年 8 月,中国墨子号量子科学实验卫星成功发射升空,“量子”这个神秘的概念,在公众面前掀起面纱。2019 年 10 月,谷歌公司正式在《自然(Nature)》期刊上发表了关于验证“量子霸权”的论文<sup>[1-2]</sup>。近年来,量子计算技术发展突飞猛进,成为新一轮科技革命和产业变革的前沿领域。加快发展量子科技,对促进高质量发展、保障国家安全具有非常重要的作用<sup>[3-5]</sup>。2020 年 10 月,中共中央政治局就量子计算研究和应用前景举行第二十四次集体学习,习近平总书记指出,安排这次集体学习,目的是了解世界量子科技发展态势,分析我国量子科技发展形势,更好地推进我国量子科技的发展。

## 2 量子计算发展战略规划概况

近年来,在新一轮科技革命和产业变革之际,量子科技已经成为继人工智能之后,各国竞相角逐的又一关键性前沿科技领域<sup>[6]</sup>。以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子计算信息技术的研究与应用在全球范围内加速发展<sup>[7-10]</sup>,世界主要国家均对量子信息技术寄予厚望,制订了雄心勃勃的发展计划,以抢占新一轮科技革命的战略高地。根据美国国会通过的《国家量子计划法案》,未来十年内美国还将在量子技术上投入超过 12 亿美元。尤其是进入 2020 年以来,美国不断加快推进量子计划,促进量子计算与人工智能耦合式发展,开启抢占未来发展高地的新十年。

2019 年以来,特别是美国《国家量子计划法案》颁布后,美国在量子计算上的投资与日俱增、量子技术渐入现实。2020 年,美国(批复)成立多个量子研究机构和联盟:白宫科技政策办公室、国家科学基金会和美国能源部宣布未来 5 年投资 10 亿美元成立 12 个人工智能和量子研究机构;美国成立马里兰量子联盟,加强技术交流,共同确定量子信息科学未来发展中的关键问题和重大挑战,简化技术转化流程,旨在培育一个包含政

府、学术界、产业界等多方在内的量子信息科学生态体系。美国出台多项报告或草案,规划和支持量子计算技术发展:美国量子协调办公室发布《美国量子网络战略构想》(图 1),明确提出美国将开辟“世界首个量子互联网”,启动开发人类历史上首个“量子互联网”计划<sup>[11]</sup>。根据该份文件,美国计划未来 5 年内实现量子网络基础科学和关键技术的突破与改进,20 年内利用量子安全、传感和计算模式等来实现传统技术无法实现的新功能;美国白宫向美国国会提交了 2021 年联邦政府预算报告草案,在联邦研发预算整体增幅不大的情况下,美国政府建议削减其他关键领域的联邦研究经费,大幅度增加各部门在量子信息科学等方面的投资,这是美国为维持全球领先地位、在量子信息科技和人工智能上的又一次加码;美国人工智能国家安全委员会(NSCAI)发布了 2020 年年中报告以及第三季度的建议,向国会提交的六方面建议就包括需要为与人工智能相关的技术发布互联的战略,其中包括量子计算和生物技术;此外,美国国家量子计划启动了其网站——Quantum.gov(图 2),该网站被定为该项目的大本营,并将报道正在进行的探索和促进量子信息科学的活动。

世界其他主要国家同样加紧量子布局步伐,以缩小与中、美之间的差距。欧盟 24 个成员国共

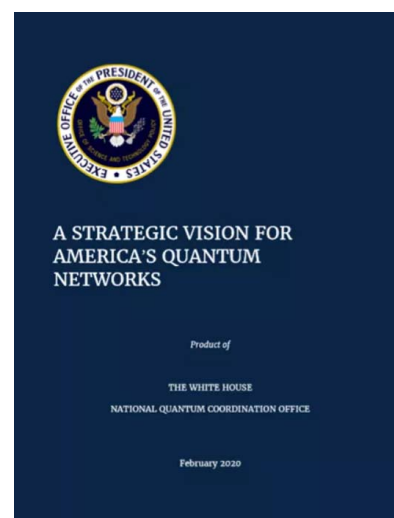


图 1 《美国量子网络战略构想》

Fig. 1 A strategic vision for America's quantum networks



图 2 美国国家量子计划启动网站 Quantum.gov  
Fig. 2 US National quantum project launch website:  
Quantum.gov

同开展《欧盟量子通信基础设施计划》，在未来 10 年共同研发和部署欧盟量子通信基础设施，旨在提升欧盟在量子技术、网络安全和产业竞争的實力。早在 2018 年 10 月，欧盟已投资 10 亿欧元启动为期 10 年的“欧洲量子技术旗舰计划”，该计划涵盖五个领域：量子通信、量子计算、量子模拟、量子计量和传感以及量子技术基础研究。2020 年 5 月，该计划官网发布《战略研究议程（SRA）》报告，明确指出未来三年将推动建设欧洲范围的量子通信网络，完善和扩展现有数字基础设施。此外，由 12 家欧洲机构联合发起的“下一个量子计算应用”项目启动，该项目汇集了量子计算、高性能计算、人工智能、化学和能源管理等多学科的学者与行业专家，旨在推动噪声中间尺度量子设备的实际使用案例的问世。英国方面，启动的量子计算商业化项目 DISCOVERY 计划是迄今为止英国最大的行业主导的量子计算项目，旨在解决量子计算在商业化道路上的技术障碍。光学和量子系统的国际供应商 M Squared 将与八个在各自领域中处于领先地位的合作组织（包括中性原子、离子阱和量子计算光学量子比特方法）协调 DISCOVERY 项目（图 3）。俄罗斯方面，俄罗斯国家原子能集团公司与俄罗斯量子研究中心宣布，将联合建立俄罗斯第一个“量子-人工智能”实验室，致力于研究和开发基于量子计算机的机器学习和人工智能技术及其在核工业领域的应用；俄罗斯圣彼得堡国立信息技术、机械与光学研究大学正在利用俄罗斯铁路公司的基础设施打造量子互联网平台，量子互联网平台试验区将在 2021 年启动。印度方面，印度科技部公布了《国家量子技术与应用任务》，计划将在 5 年内予以共计 800 亿卢比（约 79 亿元人民币）的经费支持，全面提升印度量子科学的发展。日本

方面，日本启动“量子人才培养项目”，旨在用 10 年时间培养“量子原住民”，将为青年人提供从年轻时代起就习惯于量子技术的环境，就像“网络原住民”在电计算机和互联网环境中长大一样。

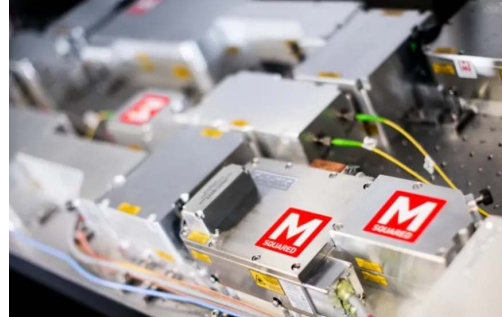


图 3 量子系统供应商 M Squared 将参与协调英国最大的行业主导的量子计算项目 DISCOVERY 项目  
Fig. 3 Quantum system supplier M Squared will be involved in coordinating the Discovery project, the UK's largest industry-leading quantum computing project

### 3 量子计算机研究进展概况

规范场理论是现代物理学的根基，如描述基本粒子相互作用的量子电动力学、标准模型等都是满足特定群对称性的规范场理论。伴随着规范场理论半个多世纪的发展，科学家发现各种规范场方程求解的计算复杂度非常高，对超级计算机的数值计算能力形成了严重的挑战。于是，科学家提出了开发专用量子模拟器——量子计算机，来构建晶格规范场模型，在实验中通过对模拟器的各种参数的精准调控制备目标量子物态，并用量子气体显微镜成像等手段，观测所模拟的量子物态的相变、量子关联等性质，获得待研究规范场模型的各种物理性质<sup>[12]</sup>。

继 2019 年谷歌 53 个量子比特的量子计算机实现“量子计算优越性”之后，2020 年世界范围内的量子计算机研发成绩斐然，呈现“追逐战”趋势。2020 年 6 月，美国霍尼韦尔公司宣布研发出世界上最快的量子计算机，其 H0 量子计算机的量子比特为 64 个，是当时 IBM 量子计算机 Raleigh 的 2 倍；两个月后，霍尼韦尔量子计算机的量子比特从 64 个增加到 128 个，测试显示，对



于全连接量子比特, 平均单量子比特保真度为 99.97%, 平均两量子门保真度为 99.54%; 2020 年 10 月, 霍尼韦尔推出最新一代的离子阱量子计算机 System Model H1, 使用了“离子阱技术”, 拥有 10 个完全连接的量子比特, 可以达到 128 的量子体积。离子阱量子计算机具有量子比特品质高、相干时间较长、量子比特的制备和读出效率较高等三大特点。同样是追求离子阱技术, 美国量子计算公司 IonQ, 推出了拥有 32 个“完美的”量子比特、量子体积预计超 400 万的量子计算机, 并开设了新的可容纳至少 10 台量子计算机量子数据中心。2020 年 12 月, 中国科学技术大学构建了 76 个光子 100 个模式的量子计算原型机——“九章”<sup>[13]</sup>(图 4), 该成果标志着我国成功达到了量子计算研究的第一个里程碑——量子计算优越性 (Quantum Supremacy, 又称“量子霸权”)。该量子计算系统处理高斯玻色取样的速度, 比目前世界上最快的超级计算机“富岳”快 100 万亿倍。此外, 美国各大科技巨头纷纷在 2020 年公布量子计算机与模拟技术路线图。如 2020 年 7 月, 美国谷歌公司发布了将在 2029 年前实现 100 万个物理量子比特处理器的计划; 2020 年 9 月, 美国 IBM 公司公布其量子计算机发展路线图, 计划到 2023 年建造一台包含 1000 个量子比特的量子计算机 (IBM 目前最先进的量子计算机仅包含 65 个量子比特)。

作为全球十大著名量子初创公司的 IonQ 则率先提出了区别于谷歌在 2019 年和中国科学技术大学在 2020 年取得的“量子霸权”里程碑的新术语、新概念——“广义量子霸权”, 并计划于 2023 年实现量子机器学习、2023 年建成一台机架式量子计算机 (计划在室温下高功率运行, 所有计算机都会在量子网络上)、于 2025 年实现“广义量子霸权”, 同时不同于传统物理量子位, 该公司还设计出全新衡量量子计算能力的“算法量子位”, 取以 2 为底数的 IBM 量子体积的对数。IonQ 公司认为 72 个量子位会成为“广义量子霸权”的起点, 同样也是量子计算机开始成为超级计算机的起点。整体而言, IonQ 公司的量子计算技术与

应用路线图专注于提高量子逻辑门操作的质量, 以继续增加算法量子位元或可用量子位元, 并致力于实现低开销的量子错误校正, 并缩小物理量子位的数量, 以进一步增强其度量值。



图 4 量子计算原型机“九章”的光量子干涉实物图

Fig. 4 Optical quantum interference of quantum computing prototype Jiuzhang

#### 4 量子计算应用概况

量子计算技术已在探测、通信、计算等领域初显身手, 同样可以广泛应用于军事领域, 并有可能引起战争基因的重大突变——通过技术重组与其他技术融合, 量子计算技术将对现代战争形态和制胜机理产生深远影响。目前, 量子计算的军事应用领域已遍布陆、海、空、网等多军兵种。

陆军方面, 美国陆军研究实验室正在量子技术领域探索研发新型作战系统。战场上, 一旦全球定位系统 (GPS) 遭到干扰或者破坏, 就会导致依赖传统 GPS 设备的美军士兵无法获取位置数据。美国陆军研究实验室正在进行的量子实验旨在为士兵提供便携式的定位、导航和授时系统, 不使用 GPS 也能实现定位、导航、通信、授时以及战场探测。目前, 美国陆军研究实验室量子研究工作的应用主要集中于原子钟、隧道或掩体探测器、通信和计算安全三个方面: 第一, 开发更便携的原子钟、计时设备以及惯性传感器 (如加速计、旋转传感器和陀螺仪等) 是陆军研究实验室近期量子研究工作的重点, 该成果是未来替代全球定位系统的技术装备的核心部分; 第二, 基于量子计算技术的隧道或掩体探测器可对地下环境进行探测, 通过发现由隧道或掩体等引起的环境质量异常变化, 准确测定敌方隧道或掩体的信

息，为实施后续打击提供情报信息；第三，通信和计算的安全性受益于量子纠缠（两个相距遥远的粒子之间具有的独特关联）研究，这方面的研究成果可直接用于满足陆军的需求。按照计划，未来战场上士兵的每一个动作都将使用陆军部队的量子技术装备完成。但是，目前量子装备研发的许多工程问题仍然停留在基础研究和组件层面上，只有把这些问题解决了，量子技术才能走出实验室，形成能在真实战场上使用的加固型装备。该实验室还与其他国防实验室、工业和学术界开展合作，共同探索可以直接应用于战场的量子技术。空军方面，美国空军研究实验室在2020年授出量子通信、计算、授时及感知等领域合同36份（总价值达540万美元）并计划在纽约成立一个新的量子信息科学创新中心，认为量子信息科学将在诸多方面影响未来的美国空军能力，主要包括在没有GPS信号或信号质量严重下降的定位导航中寻求类似GPS的精度、超安全的全球通信网络、与量子网络连接在一起的高精度传感器以及用于优化资产和资源分配的新计算范例、发现新材料以及人工智能的新颖应用等。美国空军研究实验室还发布一份全球100万美元挑战，为国际量子研究界寻求新兴领域的新解决方案。海军方面，美国海军部指定美国海军研究实验室为美国海军的量子信息研究中心。美军已将量子通信技术运用在核潜艇上，除了优越的加密性外<sup>[14]</sup>，此举也弥补了核潜艇因为通信发射出的电波可以被检测到这一致命缺点，被认为是应对中国在2020年初建成的世界首个民用低频大功率电磁波发射台，该发射台覆盖范围极其广泛、可让核潜艇无处遁形。此外，美国国防信息系统局（DISA）将抗量子加密技术列为2021财年重点关注的领域，宣布已开始密切关注其加密能力，以保护国防通信免受强大的量子计算机攻击。

随着主要竞争对手努力研发足以突破当前加密技术的量子计算能力，抗量子加密正变得越来越重要——尽管相关研发还需要数年时间，但量子计算机将使安全通信变得几乎“不可能实现”。因此，美国国防信息系统局积极寻求与美国

国家标准技术研究所（NIST）和美国国家安全局（NSA）的合作，后两个机构目前正在开展抗量子计算的工作；同时通过扩大“基于云技术的互联网隔离（CBII）”项目，在美国国防部用户的互联网流量与美国国防部网络之间建立一个保护性的“缓冲区”从而提高电子邮件的安全性。此举的动因包括新冠疫情影响，由于美国国防部居家办公带来了新的网络安全风险，迫使美国国防信息系统局重新思考美国国防部的网络边界并组织“零信任”网络安全概念（从根本上不信任用户）的讨论。在美国国防信息系统局公布的修订后的2021—2022财年战略规划中，确认“零信任”对其修订后的网络防御重点领域而言是一项有利的工作。



图5 极低频发射系统调谐设施

Fig. 5 Tuning facility of ELF launch system

## 5 量子计算发展趋势与宏观态势分析

量子力学及量子计算是人类探究微观世界的重大成果。量子计算发展具有重大科学意义、战略价值、军用潜力，是一项对传统技术体系产生革命性冲击、进行颠覆式重构的重大技术创新，将引领新一轮科技革命、产业变革、军备变革的方向。对未来量子计算发展趋势和宏观态势分析概述如下。

一是量子信息科学将迎来密集政策期，形成量子技术与人工智能的优势互补已成为世界主要国家的共识。在摩尔定律逐渐失效、冯·诺依曼架构遇到瓶颈、传统计算机计算能力有限等情况下，量子计算为进一步提高人工智能的数据分析处理能力、进一步获取高阶智能提供了有效途径。另外，量子计算的关键突破势必需要人工智能的参与——量子技术与人工智能的结合相辅相成，

重点体现在量子计算赋能的人工智能、量子机器学习、量子模拟、量子启发式机器学习、智能控制量子硬件等方面。目前部分人工智能技术成果已经进入应用层,而量子计算尚处于早期。为抢占量子计算先机,世界主要国家自顶向下、通过出台国家战略等手段,不断强化量子计算在国家科技实力建设中的布局,例如,在美国 2020 年推出“量子互联网计划”之前,欧盟、日本、俄罗斯等世界主要经济体已经在积极布局。

二是世界范围内将在数据层面寻求与盟友更深度的合作,数据资源竞争加剧。当前人工智能与量子计算研究领域,数据“富国”和数据“穷国”阶层划分明显。例如,中国有足够庞大的市场需求和数据支撑,这是中国人工智能竞争特有的优势所在;而对于美欧等发达国家,其数据资源较为薄弱,因此为积累更多数据资源,势必将积极与其他国家达成合作:从技术竞赛到商业对垒,数据资源的争夺将是全方面、多主体的。

三是量子计算、人工智能等前沿科技领域的国际话语权的争夺将更加激烈。面向全球制定人工智能使用规范和技术标准<sup>[15]</sup>,通过与拥有共同利益和相同价值观的国家合作,推广本国的监管规范和技术标准、扩大影响力,是输出本国价值规则的常用路径——在目前量子计算竞赛刚刚打

响的今天,这一趋势适用于任何试图在此赛道上领跑的国家。例如,美国白宫于 2020 年 10 月发布的《关键和新兴技术国家战略》(图 6)就包括了量子信息技术,而且强调“引导全球技术发展的规范、标准和治理模式,使其反映民主价值观和利益”。此外,在技术标准、技术监管、科技伦理等领域的量子计算领域国际治理任务中,加强国家层面、企业层面的国际合作,寻求人工智能和量子计算技术发展的最大共识,也已列在世界主要国家的量子计算发展路线图。

## 6 结束语

量子技术是当前世界上最具颠覆性的前沿技术之一,已成为世界主要国家进行高新技术竞争的重要领域。量子计算在未来不但使计算机的计算能力提高、通信更快,还能使传感技术更灵敏、信息精度更精确。

我国于 2016 年发布的《国家“十三五”规划纲要》支持战略性新兴产业发展中,就明确将量子通信作为重要发展方向;2017 年,国家发展和改革委员会组织实施了量子保密通信“京沪干线”技术验证及应用示范项目;2019 年底,国家信息中心、国科量子、国家数据通信工程技术研究中心联合组建了电子政务量子安全工程实验室;2019 年 12 月中共中央、国务院发布的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》中明确,“加快量子通信产业发展,统筹布局和规划建设量子保密通信干线网,实现与国家广域量子保密通信骨干网络无缝对接,开展量子通信应用试点”;2020 年 3 月,科技部《关于科技创新支撑复工复产和经济平稳运行的若干措施》中表示,要加大 5G、人工智能、量子通信、脑科学、工业互联网、重大传染病防治、重大新药、高端医疗器械、新能源、新材料等重大科技项目的实施和支持力度——总体来看,我国已具备了在量子计算领域的世界领跑科技实力和创新能力。同时也要看到,我国量子计算发展存在不少短板、面临多重挑战:第一,我国在量子科技上的短板与现在信息技术的短板类似,如支撑设备、关键核心元器件等,也涉及

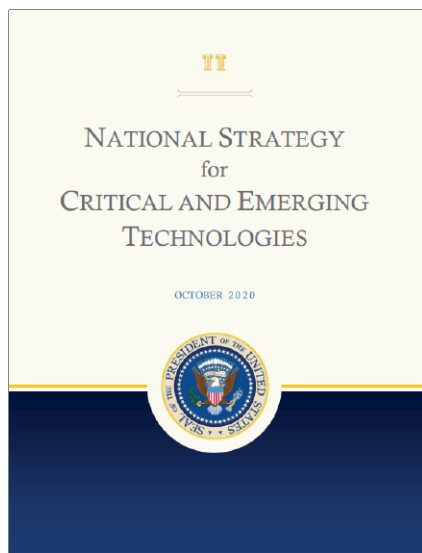


图 6 美国《关键和新兴技术国家战略》

Fig. 6 National strategy for critical and emerging technologies of American

量子计算技术的一些问题，因此，加强关键核心元器件这种高端技术材料、设备的研发是今后一段时间需要解决的关键问题<sup>[16]</sup>；第二，需要系统总结我国量子科技发展的成功经验，借鉴国外的有益做法，深入分析研判量子科技发展大势，找准我国量子科技发展的切入点和突破口，统筹基础研究、前沿技术、工程技术研发，培育量子通信等战略性新兴产业，抢占量子科技国际竞争制高点；第三，目前量子技术的应用前景尚不完全清晰，从“实验室”走向“产业链”还需要较长时间，因此需加强量子技术领域的产学研合作，将研究机构与产业界联系起来，促进技术、人才、产品、市场等要素的有效沟通，推动量子通信、量子网络等产业化应用，实现技术突破与产业化并行。

### 参 考 文 献

- [1] Arute F, Arya K, Babbush R, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor[J]. *Nature*, 2019, 574: 505-510.
- [2] Charles H B, Ethan B, Djabeur M S Z, et al. Strengths and weakness of quantum computing[J]. *Siam Journal on Computing*, 2016, 26(5): 1510-1523.
- [3] Deng D. Quantum entanglement in Neural Network states [J]. *Physical Review X*, 2020, 7: 021021-1-17.
- [4] 江逸楠. 量子计算的发展趋势综述[J]. *无人系统技术*, 2020, 3(3): 67-74.
- [5] Liu Z, Li S, Ge Y. A quantum computing-based numerical method of mixed-integer optimal control problems under uncertainty for alkali-surfactant-polymer flooding[J]. *Engineering Optimization*, 2020, 53: 531-550.
- [6] 林雄, 林帅. 量子计算与量子计算机展望[J]. *微型机与应用*, 2012, 31(22): 4-6.
- [7] Mastriani M, Iyengar S, Kumar K. Bidirectional teleportation for underwater quantum communications[J]. *Quantum Information Processing*, 2021, 20, 1-23.
- [8] 赖俊森, 赵文玉, 张海懿. 量子保密通信技术进展及应用趋势分析[J]. *信息通信技术与政策*, 2020(12): 64-69.
- [9] Naus H W. On the Quantum mechanical measurement process[J]. *Foundations of Physics*, 2021, 51: 1-13.
- [10] Han S, Krawec W O, Miao F. A game-theoretic security framework for quantum cryptography: Performance analysis and application[J]. *Quantum Information Processing*, 2020, 19: 349.
- [11] 王超. 全球量子互联网进展及启示[J]. *中国信息化*, 2020(11): 7-9.
- [12] 王立娜, 唐川, 田倩飞, 等. 全球量子计算发展态势分析[J]. *世界科技研究与发展*, 2019, 41(6): 569-584.
- [13] Zhong H, Wang H, Deng Y, et al. Quantum computational advantage using photons[J]. *Science*, 2020, 370: 1460 - 1463.
- [14] 王潮, 姚皓南, 王宝楠, 等. 量子计算密码攻击进展[J]. *计算机学报*, 2020, 43(9): 1691-1707.
- [15] 张亮. 针对未来量子计算制定国际标准[J]. *电器工业*, 2020(12): 51.
- [16] 余泽平. 量子科技及其未来产业应用展望[J]. *中国工业和信息化*, 2020(11): 20-26.

作者简介：



朱小伶 (1993-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为人工智能、大数据、前沿信息技术等。

[引用格式] 徐广通, 邹汝平, 王 祝, 等. 基于滚动规划框架的多无人机协同轨迹快速生成方法[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 33-39.

# 基于滚动规划框架的多无人机协同轨迹快速生成方法

徐广通<sup>1,2</sup>, 邹汝平<sup>3</sup>, 王 祝<sup>4</sup>, 孙景亮<sup>1,2</sup>, 龙 腾<sup>1,2</sup>

(1. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081; 2. 飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081;  
3. 西安现代控制技术研究所, 西安 710065; 4. 华北电力大学自动化系, 保定 071003)

**摘要:** 面向多无人机协同轨迹快速规划的需求, 提出基于滚动规划框架轨迹高效求解方法, 将协同轨迹规划问题分解为若干短时域规划子问题, 通过降低求解维度, 提升协同轨迹规划效率。在考虑飞行性能与避障/避撞约束的基础上, 设计了终端状态启发的目标函数, 确保滚动规划结果能够准确收敛到终端状态。定制基于剩余距离的速度调节机制, 通过动态调速保证规划结果的时间一致性。使用序列凸优化方法求解短时域轨迹规划问题, 进一步提升规划效率。典型任务想定下的数值仿真验证结果表明: 所提方法能够在满足避障/避撞与性能约束的前提下, 快速生成短时域协同轨迹(耗时小于1s), 具有工程实用性。

**关键词:** 多无人机; 协同轨迹规划; 滚动规划框架; 凸规划; 速度调节机制

中图分类号: V249.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2021)02-33-07

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.2.016

## Multiple Unmanned Aerial Vehicle Rapid Cooperative Trajectory Generation Method Using Receding Planning Framework

XU Guangtong<sup>1,2</sup>, ZOU Ruping<sup>3</sup>, WANG Zhu<sup>4</sup>, SUN Jingliang<sup>1,2</sup>, LONG Teng<sup>1,2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Dynamics and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, Beijing 100081, China;

3. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China;

4. Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** To improve the efficiency of the multiple unmanned aerial vehicle cooperative trajectory planning, this paper proposes the rapid trajectory generation method using receding planning framework. The cooperative trajectory planning problem is divided into several short-horizon planning subproblems to reduce the problem dimension, which can save the runtime. Considering flight performance and obstacle/collision avoidance constraints, the final-state-heuristic objective function is designed to ensure that the solution of receding planning converges to the final state. The surplus-distance-based velocity adjustment mechanism is customized and the flight velocity is adjusted dynamically for guaranteeing the time consistency of cooperative trajectories. To further enhance the computational efficiency, the sequential convex programming method is used to solve the short-horizon trajectory planning problem. The simulation results on typical scenarios show that the proposed method can generate short-horizon cooperative trajectories in less than 1 second subject to obstacle/collision avoidance and flight performance constraints, which demonstrates the engineering

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61903033, 51675047); 中国博士后科学基金特别资助(站前)项目(2019TQ0037)

practicability of the proposed method.

**Key words:** Multiple Unmanned Aerial Vehicles; Cooperative Trajectory Planning; Receding Planning Framework; Convex Programming; Velocity Adjustment Mechanism

## 1 引言

近年来,多无人机协同理论得到了广泛的研究,已在区域搜索、目标追踪等军事和包裹运输、农业植保等民事领域应用<sup>[1-3]</sup>。轨迹规划作为多无人机协同的关键技术之一,可生成满足动力学、边界、初始及终端状态、威胁规避、机间避碰等约束的轨迹,引导无人机安全高效执行既定任务<sup>[4]</sup>。

协同轨迹规划因其高维特征,传统的轨迹规划方法(混合整数规划<sup>[5]</sup>、快速扩展随机树<sup>[6]</sup>、伪谱法<sup>[7]</sup>)难以对其进行快速求解。滚动时域规划可将原轨迹规划问题分解为短时域规划子问题,通过滚动求解一系列低维度问题,提升规划效率。滚动时域规划已成功应用于航天器编队构成<sup>[8]</sup>、火箭着陆制导<sup>[9]</sup>及多飞行器协同<sup>[10]</sup>等领域。Kuwata 等人<sup>[11]</sup>首先使用滚动规划架构求解多无人机轨迹规划问题,并利用混合整数规划方法对短时域轨迹规划问题进行求解,但是随着无人机数量增加,该方法求解效率明显降低。Van Parys 等人<sup>[12]</sup>提出分布式滚动规划方法,使用交替方向乘子法求解短时域规划问题,然而该方法没有考虑机间避碰约束。Morgan 等人<sup>[8]</sup>首先结合滚动规划框架与序列凸优化方法,高效求解大规模航天器轨迹规划问题。在此基础上,Morgan 等人<sup>[13]</sup>将滚动规划方法与序列凸优化应用于多旋翼无人机协同轨迹规划,Morgan 所提方法逐步降低滚动时域长度,在前期滚动规划中仍需考虑较长的时域,因此降低了整体规划效率。Luis 等人<sup>[14]</sup>发展出改进的滚动规划方法,可将多旋翼无人机轨迹问题拆解为若干短时域规划问题,但该方法使用二阶积分动力学模型,难以处理复杂动力学约束下无人机协同轨迹问题,无法保证多无人机时间一致性。

为高效求解多无人机协同轨迹规划问题,本文提出基于滚动规划框架的轨迹快速求解方法,构建一系列短时域规划问题,并发展终端状态启

发的目标函数,保证滚动规划逐渐收敛至终端状态。考虑无人机飞行动力学特性,开发基于剩余距离的速度调节机制,减少剩余距离短的无人机的飞行速度上边界,保证多无人机同时抵达终端位置。使用序列凸优化方法对短时域规划问题进行求解,进一步降低求解耗时。设计编队重构典型任务想定,开展数值仿真试验,试验结果表明所提方法可快速生成满足飞行约束的轨迹,验证了所提方法的合理性和时效性。

## 2 问题描述

考虑飞行动力学、状态与控制边界、初始与终端状态、威胁规避及机间避碰约束,多无人机轨迹规划可生成时间最优轨迹,引导无人机快速同时抵达任务区域。本节通过离散化和凸化<sup>[15]</sup>,将协同轨迹规划问题建立为凸优化问题。

### 2.1 无人机动力学模型

考虑存在  $N$  架同构无人机,无人机动力学状态量  $\mathbf{s}_i \in \mathbb{R}^{ns \times 1}$  ( $ns = 6$ ) 包括三维位置  $\mathbf{p}_i = [p_{x,i}, p_{y,i}, p_{z,i}]^T$ 、飞行速度  $V_i$ 、航向角  $\mathcal{G}_i$  及航迹倾角  $\gamma_i$ ; 控制变量  $\mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^{nc \times 1}$  ( $nc = 3$ ) 包括切向过载  $n_{x,i}$ 、法向过载  $n_{y,i}$  与垂直过载  $n_{z,i}$ 。无人机动力学模型如式(1):

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_{x,i} \\ \dot{p}_{y,i} \\ \dot{p}_{z,i} \\ \dot{V}_i \\ \dot{\mathcal{G}}_i \\ \dot{\gamma}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i \cos \gamma_i \cos \mathcal{G}_i \\ V_i \cos \gamma_i \sin \mathcal{G}_i \\ V_i \sin \gamma_i \\ g(n_{x,i} - \sin \gamma_i) \\ gn_{y,i} / (V_i \cos \gamma_i) \\ g(n_{z,i} - \cos \gamma_i) / V_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:  $p_{x,i}$  与  $p_{y,i}$  表示无人机水平位置;  $p_{z,i}$  表示无人机飞行高度;  $g$  为重力加速度。

### 2.2 约束条件

无人机飞行轨迹需满足初始与终端状态约束、状态与控制边界约束,分别如式(2)与式(3):

$$s_i(t_0) = s_{i,0}, \quad s_i(t_f) = s_{i,f} \quad (2)$$

$$s_{\min} \leq s_i(t) \leq s_{\max}, \quad u_{\min} \leq u_i(t) \leq u_{\max} \quad (3)$$

其中:  $s_{i,0}$ 、 $s_{i,f}$ 、 $s_{\min}$ 、 $s_{\max}$ 、 $u_{\min}$  与  $u_{\max}$  表示初始状态、终端状态、状态下边界、状态上边界、控制下边界以及控制上边界;  $t_0$  与  $t_f$  分别表示初始和终端时间。

无人机在飞行过程中需规避环境中的威胁。本文将任务环境中存在的探测雷达、防空导弹阵地等威胁建立为半球形威胁,并建立威胁规避约束如式(4),保证无人机与威胁保持一定的安全距离。

$$\|p_i(t) - p_m^{\text{obs}}\|_2 \geq r_m^{\text{obs}}, m=1,2,\dots,M \quad (4)$$

其中:  $p_m^{\text{obs}} = [p_{m,x}^{\text{obs}}, p_{m,y}^{\text{obs}}, 0]^T$  与  $r_m^{\text{obs}}$  表示第  $m$  个威胁的中心位置坐标和半径;  $\|\cdot\|_2$  代表 2-范数;  $M$  表示威胁数量; 威胁高度设置为无限高。

机间避碰约束如式(5),用于保证无人机之间保持一定的安全距离,其中  $r^{\text{coll}}$  表示无人机之间最小距离限制。

$$\|p_i(t) - p_j(t)\|_2 \geq r^{\text{coll}}, j=1,2,\dots,i-1,\dots,N \quad (5)$$

### 2.3 凸优化问题

使用离散化和凸化技术,构建协同轨迹规划凸优化问题。将初始与终端状态约束、状态与控制边界约束分别离散为式(6)和式(7),其中  $K$  表示离散区间个数。

$$s_i[0] = s_{i,0}, \quad s_i[K] = s_{i,f} \quad (6)$$

$$s_{\min} \leq s_i[k] \leq s_{\max}, \quad u_{\min} \leq u_i[k] \leq u_{\max} \quad (7)$$

基于基准轨迹  $\bar{p}_i[k]$ ,飞行动力学约束线性化为式(8),其中矩阵  $A_{k+1}$ 、 $A_k$ 、 $B_{k+1}$ 、 $B_k$ 、 $C_{k+1}$ 、 $C_k$ 、 $D_{k+1}$  和  $D_k$  具体形式参见文献[16];  $\Delta t = (t_f - t_0) / K$  表示时间步长。

$$A_{k+1} \cdot s_i[k+1] + A_k \cdot s_i[k] + B_{k+1} \cdot u_i[k+1] + B_k \cdot u_i[k] + (C_{k+1} + C_k) \cdot \Delta t + D_{k+1} + D_k = 0 \quad (8)$$

威胁规避约束转化为如式(9)和式(10)的仿射约束,保证离散点之间仍可满足威胁规避约束:

$$\frac{(\bar{p}_i[k] - p_m^{\text{obs}})^T}{\|\bar{p}_i[k] - p_m^{\text{obs}}\|_2} \cdot (p_i[k] - \bar{p}_i[k]) + \|\bar{p}_i[k] - p_m^{\text{obs}}\|_2 \geq r_m^{\text{obs}}, m=1,2,\dots,M \quad (9)$$

$$\frac{(\bar{p}_i[k-1] - p_m^{\text{obs}})^T}{\|\bar{p}_i[k-1] - p_m^{\text{obs}}\|_2} \cdot (p_i[k] - \bar{p}_i[k-1]) \quad (10)$$

$$+ \|\bar{p}_i[k-1] - p_m^{\text{obs}}\|_2 \geq r_m^{\text{obs}}, m=1,2,\dots,M$$

机间避碰约束凸化为如式(11)的仿射约束:

$$\frac{(\bar{p}_i[k] - \bar{p}_j[k])^T}{\|\bar{p}_i[k] - \bar{p}_j[k]\|_2} (p_i[k] - p_j[k]) \geq r^{\text{coll}}, \quad (11)$$

$$j=1,\dots,N, j \neq i$$

通过离散化与凸化,构建协同轨迹规划凸优化问题(P1)如式(12):

P1

$$\min_{s_i[k], u_i[k]} \Delta t, \quad (k=0,\dots,K, i=1,\dots,N) \quad (12)$$

subject to Eqs. (6)–(11)

## 3 基于滚动规划框架的轨迹生成方法

本节介绍基于滚动规划框架的轨迹快速规划方法,设计终端状态启发的目标函数,将 P1 分解为若干短时域规划问题,并通过基于剩余距离的速度调整机制保证多无人机轨迹时间一致性。

### 3.1 滚动规划问题

在滚动规划中,规划离散点个数为  $K_H$ ,则时域长度为  $T_H = \Delta t \cdot K_H$ 。构建终端状态启发的目标函数,将终端状态约束转化为目标函数中的代价,使得滚动规划逐步收敛至终端状态。终端状态启发的目标函数可最小化飞行时间及当前时域规划与终端状态之间的偏差。多无人机轨迹滚动规划如图 1 所示,实线表示规划时域  $T_H$  内求解得到的轨迹;连接规划时域  $T_H$  终点与终端位置的虚线表示终端状态代价。

P1 转化为短时域凸优化问题(P2),如式(13):

P2

$$\min_{s_i[k], u_i[k]} \Delta t + \eta \cdot \sum_{i=1}^N \|s_i[\kappa \cdot K_H] - s_{i,f}\|_2 \quad (13)$$

$$(k = (\kappa - 1) \cdot K_H, \dots, \kappa \cdot K_H, i = 1, \dots, N)$$

subject to  $s_i[(\kappa - 1) \cdot K_H] = s_{i,0}^{\kappa}$

Eqs. (7)–(11)

其中:  $\eta$  表示终端状态启发项权重系数;  $\kappa$  表示滚动规划时域索引;  $s_{i,0}^{\kappa}$  表示第  $\kappa$  次滚动规划的初始

状态，即第  $(\kappa-1)$  滚动规划的终端状态。

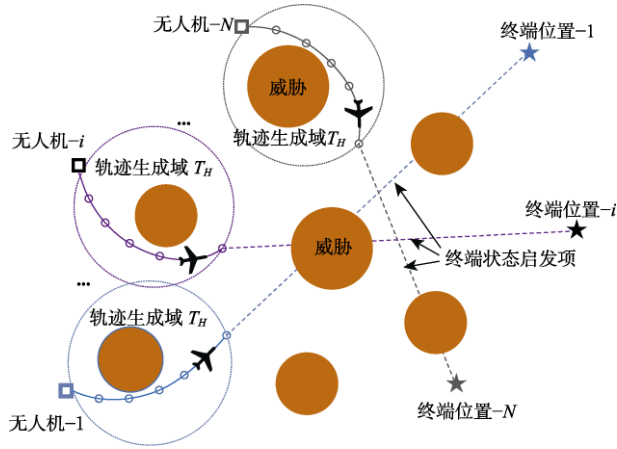


图1 多无人机协同轨迹滚动规划示意图

Fig. 1 Illustration of fixed-wing unmanned aerial vehicle cooperative trajectory receding planning

在滚动规划过程中，若当前规划终点未抵达终端位置，则时域长度  $T_H$  保持不变；若时域长度  $T_H$  超过终端位置，则需根据剩余距离  $\|p_i[\kappa \cdot K_H] - p_{i,f}\|_2$  减小时域长度，获得新的时域长度，具体计算方法如式(14)：

$$K_H = \text{ceil} \left( \frac{\max_{i=1, \dots, N} \left( \|p_i[\kappa \cdot K_H] - p_{i,f}\|_2 \right)}{\Delta t \cdot V_{\max}} \right), \quad (14)$$

$$\text{if } \max_{i=1, \dots, N} \left( \|p_i[\kappa \cdot K_H] - p_{i,f}\|_2 \right) < \Delta t \cdot K_H \cdot V_{\min}$$

其中： $\text{ceil}(\cdot)$  表示向上取整函数； $V_{\min}$  和  $V_{\max}$  分别表示无人机飞行速度上下边界。

### 3.2 基于剩余距离的速度调节机制

受限于无人机飞行器动力学，提前抵达终端位置的无人机一般需要通过盘旋的方式等待其他无人机，造成资源浪费。为实现多无人机同时抵达任务区域，避免多无人机之间的等待，提出基于剩余距离的飞行速度调节机制，实现多无人机飞行时间一致性。每次滚动规划后，根据每架无人机距离终端位置距离  $\|p_i[\kappa \cdot K_H] - p_{i,f}\|_2$ ，对飞行速度的上边界  $V_{i,\max}$  进行调整。针对剩余距离短的无人机，按照比例降低其速度上边界，该比例由每架无人机剩余距离和最大剩余距离确定，具体调整方法如式(15)：

$$V_{i,\max} = \max \left( \frac{V_{\max} \cdot \frac{\|p_i[\kappa \cdot K_H] - p_{i,f}\|_2}{\max_{i=1, \dots, N} \left( \|p_i[\kappa \cdot K_H] - p_{i,f}\|_2 \right)}}{\frac{V_{\min} + V_{\max}}{2}}, \right) \quad (15)$$

### 3.3 算法流程

基于滚动框架的轨迹快速生成方法伪代码如算法1所示，具体流程叙述如下：

步骤1：初始化算法。输入算法参数及任务环境信息，包括收敛误差  $\zeta$ 、滚动规划索引  $\kappa$ 、滚动时域长度  $T_H$ 、初始及终端状态  $(s_0, s_f)$ 、初始控制  $u_0$ 、威胁  $O$  与边界约束  $B$ 。

步骤2（第3和4行）：构建短时域凸优化问题。根据无人机剩余距离判断是否调整时域长度，并利用式(14)计算新的滚动时域长度。利用算法参数和任务信息构建如式(13)所示的短时域凸优化问题(P2)。

步骤3（第5~7行）：求解短时域凸优化问题。使用凸优化方法<sup>[17]</sup>求解(P2)获得当前时域的协同轨迹，并更新无人机飞行速度上边界，将当前规划时域终点设置为下一规划时域的起始点。

步骤4（第2和8行）：判断算法收敛。算法不断滚动求解，直到轨迹抵达终点，即满足式(16)的收敛条件：

$$\|s_i[\kappa \cdot K_H] - s_{i,f}\| \leq \zeta, \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

其中： $\zeta \in \mathbb{R}^6$  表示算法收敛误差， $\zeta$  中元素与无人机6个状态量对应。

#### 算法1 基于滚动规划框架的轨迹快速生成方法

输入：初始/终端状态  $(s_0, s_f)$ ，初始控制  $u_0$   
 边界约束  $B$ ，威胁集合  $O$ ，收敛误差  $\zeta$ ， $\kappa \leftarrow 1$   
 输出：无人机轨迹  $(s_i[k], u_i[k], k = 0, \dots, K, i = 1, 2, \dots, N)$

- 1  $(s_i[0], u_i[0]) \leftarrow (s_{i,0}, u_{i,0}), i = 1, 2, \dots, N$
- 2 **while** 不满足 Eq.  $k = (\kappa-1) \cdot K_H, \dots, \kappa \cdot K_H$
- 3 使用公式(14)计算得到  $T_H$
- 4 P2 ← 构建短时域凸优化问题  $(\kappa, B, O, T_H)$
- 5  $(s_i^k[k], u_i^k[k]), i = 1, \dots, N \leftarrow$  求解 P2
- 6 使用公式(15)更新无人机速度上边界
- 7 更新滚动时域  $\kappa \leftarrow \kappa + 1$ ;  $s_{i,0}^k = s_i[(\kappa-1) \cdot K_H]$
- 8 **end while**



## 4 仿真结果及分析

本节开展典型想定下数值仿真试验, 通过对比 Morgan 设计滚动规划方法<sup>[13]</sup>, 验证本文所提方法的合理性和时效性。基于 MATLAB R2017a 环境进行数值仿真, 使用凸优化数值优化器 SeDuMi<sup>[18]</sup>求解短时域凸优化问题(P2), 计算平台选用配置 Intel Core i7-7660 2.50GHz 处理器和 16GB 内存的笔记本电脑。

### 4.1 仿真实想定及参数设置

设计多无人机编队重构想定, 要求无人机从一字形编队变换为雁形编队, 无人机初始与终端位置如表 1 所示, 威胁位置如表 2 所示。无人机初始和终端速度、初始和终端航向角、初始和终端航迹倾角均为 0。无人机之间安全距离限制为 200 m, 状态与控制边界约束如式(17):

$$\begin{aligned} s_{i,\min} &= [-\infty, -\infty, 200\text{m}, 30\text{m/s}, -\infty, -5\pi/180\text{rad}]^T \\ s_{i,\max} &= [+ \infty, + \infty, 1200\text{m}, 40\text{m/s}, + \infty, + 5\pi/180\text{rad}]^T \\ \mathbf{u}_{i,\min} &= [-0.2, -0.2, 0.8]^T \\ \mathbf{u}_{i,\max} &= [+0.2, +0.2, 1.2]^T \end{aligned} \quad (17)$$

表 1 无人机初始/终端位置

Table 1 Initial/final positions of unmanned aerial vehicles

| 序号 | 初始位置/m         | 终端位置/m             |
|----|----------------|--------------------|
| 1  | (0, 2800, 200) | (7100, 2800, 1000) |
| 2  | (0, 2380, 200) | (6816, 2450, 1000) |
| 3  | (0, 3220, 200) | (6816, 3150, 1000) |
| 4  | (0, 1960, 200) | (6532, 2100, 1000) |
| 5  | (0, 3640, 200) | (6532, 3500, 1000) |
| 6  | (0, 1540, 200) | (6248, 1750, 1000) |
| 7  | (0, 4060, 200) | (6248, 3850, 1000) |
| 8  | (0, 1120, 200) | (5964, 1400, 1000) |
| 9  | (0, 4480, 200) | (5964, 4200, 1000) |

表 2 威胁信息

Table 2 Information of obstacles

| 序号 | 位置/m            | 半径/m |
|----|-----------------|------|
| 1  | (2000, 1800, 0) | 350  |
| 2  | (2000, 3400, 0) | 350  |
| 3  | (2000, 4700, 0) | 400  |
| 4  | (4500, 1200, 0) | 500  |
| 5  | (4500, 2500, 0) | 350  |
| 6  | (4500, 3900, 0) | 300  |

使用所提算法求解多无人机协同轨迹规划问题, 滚动时域离散点数量初始值  $K_H$  为 6, 算法收敛误差如式(18)。Morgan 所提滚动规划方法参数设置同本文方法。

$$\zeta = [0.1, 0.1, 0.05, 0.01, 0.05\pi/180, 0.01\pi/180] \quad (18)$$

### 4.2 协同轨迹规划结果

轨迹规划结果如图 2 和图 3 所示, 其中实线和虚线表示不同规划时域的轨迹, 空心圆表示不同时域之间的连接点, 红色实心圆表示威胁。从结果可以看出, 算法通过 8 次滚动规划为 9 架无人机生成满足威胁规避约束的协同轨迹。

如图 4 所示, 无人机之间最小距离始终高于安全限制, 表明规划得到的轨迹满足机间避碰约束。由于两侧无人机起始点与终点距离相对较近, 速度调节机制通过降低相应无人机的飞行速度, 实现与其他无人机剩余距离的一致, 保证了多无人机同时抵达终端位置。因此, 数值仿真结果验证了本文所提方法的有效性。

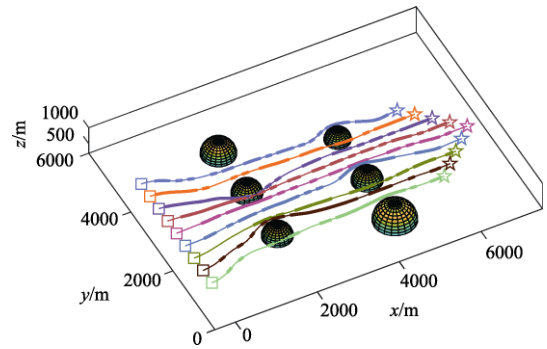


图 2 协同轨迹规划结果

Fig. 2 Cooperative trajectory planning results

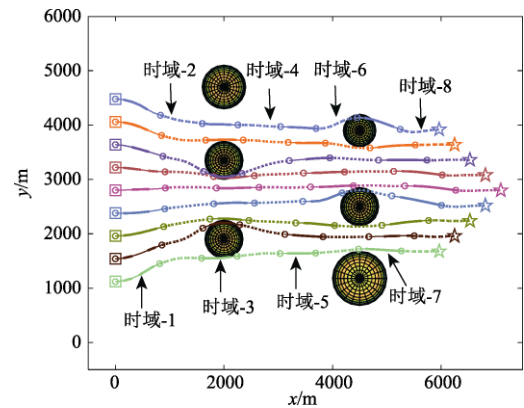


图 3 短时域轨迹

Fig. 3 Short-horizon trajectories

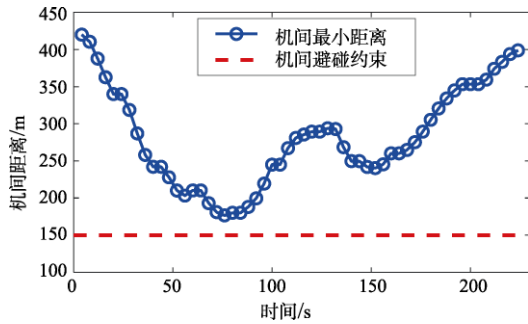


图4 无人机之间最小距离

Fig. 4 Minimal distances among unmanned aerial vehicles

### 4.3 协同规划效率分析

图5与图6分别为本文所提方法与Morgan方法滚动规划耗时。随着无人机数量增加,两种方法的规划耗时均增加。针对9架无人机协同轨迹规划问题,本文所提方法整体耗时(5.4 s),相比Morgan方法(11.0 s)降低了50.9%,具有明显的效率优势。随着滚动规划的进行,Morgan方法轨迹规划耗时呈下降趋势,9架无人机短时域滚动规划耗时从2.2 s降至0.84 s。然而,本文所提方法的短时域滚动规划耗时始终不大于1 s。考虑无人机最大飞行速度,规划时域长度,本文所提滚动求解方法满足实时在线轨迹规划的时效性要求,可根据动态变化的态势信息进行适应性调整。

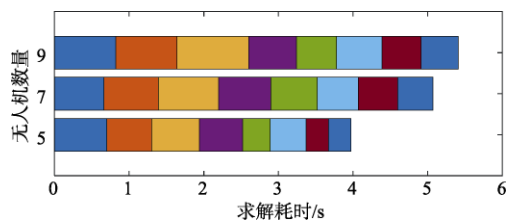


图5 本文所提方法滚动规划耗时

Fig. 5 Runtime of receding planning by the proposed method

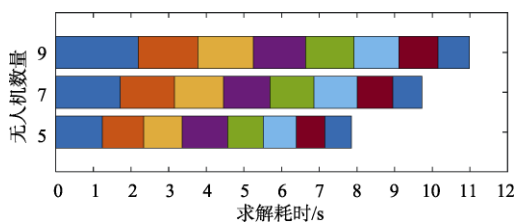


图6 Morgan方法滚动规划耗时

Fig. 6 Runtime of receding planning by Morgan's method

## 5 结论

为提升多无人机协同轨迹规划效率,本文提出了基于滚动规划框架的协同轨迹高效求解方法,将整体规划问题拆分为一系列短时域规划问题,降低规划耗时。设计典型任务想定,通过数值仿真试验对所提方法的有效性进行验证。得出以下主要结论。

(1) 构建短时域轨迹规划问题,定制终端状态启发的目标函数,引导滚动规划结果逐步收敛到终端状态。

(2) 提出基于剩余距离的速度调节机制,调整无人机飞行速度上边界,保证多无人机同时抵达任务区域。

(3) 仿真试验结果表明,短时域规划耗时小于1 s,具备实时在线轨迹规划的应用潜力。

## 参考文献

- [1] Chung S-J, Paranjape A A, Dames P, et al. A survey on aerial swarm robotics [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34 (4): 837-855.
- [2] 符文星, 郭行, 闫杰. 智能无人飞行器技术发展趋势综述 [J]. *无人系统技术*, 2019, 2 (4): 31-37.
- [3] 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.
- [4] Hönig W, Preiss J A, Kumar T S, et al. Trajectory planning for quadrotor swarms [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34 (4): 856-869.
- [5] Richards A, Schouwenaars T, How J P, et al. Spacecraft trajectory planning with avoidance constraints using mixed-integer linear programming [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2002, 25 (4): 755-764.
- [6] Desaraju V R, How J P. Decentralized path planning for multi-agent teams with complex constraints [J]. *Autonomous Robots*, 2012, 32 (4): 385-403.
- [7] Shirazi A, Ceberio J, Lozano J A. Spacecraft trajectory optimization: A review of models, objectives, approaches and solutions [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 102 (2018): 76-98.
- [8] Morgan D, Chung S-J, Hadaegh F Y. Model predictive control of swarms of spacecraft using sequential convex programming [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37 (6): 1725-1740.
- [9] Wang J, Cui N, Wei C. Optimal rocket landing guidance using convex optimization and model predictive control [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2019, 42 (5): 1078-1092.
- [10] Wang Z, Liu L, Long T, et al. Efficient unmanned aerial vehicle

- formation rendezvous trajectory planning using Dubins path and sequential convex programming [J]. *Engineering Optimization*, 2019, 51 (8): 1412-1429.
- [11] Kuwata Y, How J P. Cooperative distributed robust trajectory optimization using receding horizon MILP [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 19 (2): 423-431.
- [12] Van Parys R, Pipeleers G. Distributed MPC for multi-vehicle systems moving in formation [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 97 (2017): 144-152.
- [13] Morgan D, Subramanian G P, Chung S-J, et al. Swarm assignment and trajectory optimization using variable-swarm, distributed auction assignment and sequential convex programming [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2016, 35 (10): 1261-1285.
- [14] Luis C E, Schoellig A P. Trajectory generation for multiagent point-to-point transitions via distributed model predictive control [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4 (2): 375-382.
- [15] Liu X, Lu P. Solving nonconvex optimal control problems by convex optimization [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37 (3): 750-765.
- [16] Wang Z, Liu L, Long T. Minimum-time trajectory planning for multi-unmanned-aerial-vehicle cooperation using sequential convex programming [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, 40 (11): 2976-2982.
- [17] Xu G, Long T, Wang Z, et al. Matrix structure driven interior point method for quadrotor real-time trajectory planning [J]. *IEEE Access*, 2019, 7 (2019): 90941-90953.
- [18] Sturm J F. Using SeDuMi 1.02, A MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones [J]. *Optimization Methods Softwares*, 2008, 11 (1-4): 625-653.

## 作者简介:



徐广通 (1992-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为集群飞行器协同任务规划与控制。



邹汝平 (1962-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为总体设计与制导技术。



王 祝 (1991-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为集群飞行器协同任务规划与控制。



孙景亮 (1990-), 男, 博士后, 主要研究方向为自适应动态规划、飞行器制导与控制。



龙 腾 (1982-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器总体设计、多学科设计优化理论与应用。

[引用格式] 陈智伟, 胡劲文, 赵春晖, 等. 野外无人车路径规划与轨迹规划技术[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 40-48.

# 野外无人车路径规划与轨迹规划技术

陈智伟<sup>1</sup>, 胡劲文<sup>1</sup>, 赵春晖<sup>1</sup>, 王策<sup>1</sup>, 侯晓磊<sup>1</sup>, 潘泉<sup>1</sup>, 王腾<sup>1</sup>, 徐钊<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学自动化学院信息融合技术教育部重点实验室, 西安 710072;

2. 西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

**摘要:** 常规布局及结构化的城市环境中的无人地面车, 其环境感知和路径规划技术的研究相对成熟。然而, 无人车在信息未知、环境复杂的野外进行自主规划和障碍规避尚存在困难。针对复杂环境中无人车的路径规划和轨迹规划技术展开研究, 首先, 考虑环境相对未知、存在凹凸障碍物和起伏地面等因素, 利用激光雷达、相机和 IMU 组成车载多传感器系统获取复杂的野外环境信息并进行数据处理和校正; 其次, 通过训练径向基神经网络 (RBF 网络) 对野外环境进行建模; 然后, 基于环境模型引入起点至目标位置的距离、环境高度和梯度以构建约束, 通过优化约束函数实现复杂环境中无人车的路径规划; 最后, 基于 Minimum Snap 的思想, 利用  $N$  阶多项式拟合得到的路径, 将规划后生成的折线路径优化为最终需要跟踪的轨迹。通过仿真实验验证了方法的有效性: 所提出的方法实现了无人地面车在野外环境中自主路径规划和轨迹规划。

**关键词:** 无人地面车; 环境感知; 路径规划; 神经网络; 约束优化; 轨迹规划

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2021)02-40-09

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.2.017

## Path Planning and Trajectory Planning Technology of Unmanned Ground Vehicle (UGV) in the Field

CHEN Zhiwei<sup>1</sup>, HU Jinwen<sup>1</sup>, ZHAO Chunhui<sup>1</sup>, WANG Ce<sup>1</sup>, HOU Xiaolei<sup>1</sup>,  
PAN Quan<sup>1</sup>, WANG Teng<sup>1</sup>, XU Zhao<sup>2</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Information Fusion Technology, School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** For the Unmanned Ground Vehicle (UGV) in conventional layout and structured urban environments, the environment perception and path planning technologies are relatively mature. However, the UGV has difficulties in autonomous planning and obstacle avoidance in the field with less information. This article focuses on the path planning and trajectory planning technology of UGV in the complex field environment. Firstly, considering factors like the presence of convex obstacles, concave obstacles and the undulating ground, the on-board sensors system composed of lidar, camera and IMU are used to obtain complex field environment information and data processing. Then, the field environment can be modeled by training Radial Basis Function neural networks (RBF networks). After that, the constraint is constructed by the obtained environment model and the constraint function is optimized for path planning of UGV in the field environment by introducing the distance between start position and the target position, the environment height and

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-11-27

基金项目: 国家自然科学基金 (61803309, 61703343); 中央高校基础研究经费 (3102019ZDHKY02, 3102018JCC003); 陕西省自然科学基金 (2018JQ6070, 2019JM-254); 中国博士后科学基金 (2018M633574)

gradient. Finally, the path is fit by the N-order polynomial based on the Minimum Snap so that the obtained path can be optimized to the trajectory that needs to be tracked. The effectiveness of this method is verified by simulation experiments that it can achieve the purpose of autonomous path planning and trajectory planning of the UGV in the complex field environment.

**Key words:** Unmanned Ground Vehicle; Environment Perception; Path Planning; RBF Neural Network; Constraints Optimization; Trajectory Planning

## 1 引言

随着传感、控制、计算等关键性技术的不断发展和硬件系统的升级,无人车成为智能领域的新兴产物,无人驾驶技术也成了科研界的热门研究课题<sup>[1]</sup>。无人地面车辆是最常见的无人系统之一,在已知环境和简单地形中,无人车的路径规划技术研究相对成熟。然而,在野外环境中,先验信息不足,不仅地面起伏不平,无人车在执行任务时还可能会遇到石块、土堆、凹坑等不同种类的障碍物,野外复杂的环境情况给车辆前进和安全行驶造成困扰。在复杂环境中自主行驶的无人车可代替人类执行危险任务,如作战打击、运输物资、搜索救援等。在科学研究方面,无人车对野外复杂环境的高度适应力在未来外星勘测和采集工作方面具有值得展望的前景;在经济效益方面,野外无人车技术的研究对未来无人汽车减少事故具有应用价值<sup>[2]</sup>。

野外无人车控制的核心技术是路径规划算法,分为经典路径规划算法和启发式路径规划算法。典型的路径规划算法包括细胞分解法、采样法和基于抽样的方法,如快速探索随机树(RRT)<sup>[3]</sup>等。状态空间过大或情况相对不可预测时,典型路径规划方法效率降低,甚至无法完成。启发式搜索通过设计评价省略了无意义的计算,常见的启发式搜索算法有遗传算法(GA)<sup>[4]</sup>、蚁群算法(ACO)<sup>[5]</sup>、粒子群优化算法(PSO)<sup>[6]</sup>等,这些算法和基于这些算法简单改进的启发式路径规划方法,在复杂度高和需要实时判断的野外环境中并不适用。解决野外复杂环境中的路径规划问题,需要对传统的路径规划算法进行优化,必要时,需要与其他算法相结合以提高解决问题

的有效性。Q-learning 算法<sup>[7]</sup>是增强学习算法之一,基于该方法优化改进的经验-记忆-学习(EMQL)算法<sup>[8]</sup>用以实现自主学习下的路径规划。这类强化学习的方法是一种在研究路径规划时用于提高移动机器人环境适应度的框架,但该方法属于全局规划,难以满足实时性要求。A\*算法广泛用于机器人避障,Cheng 等人<sup>[9]</sup>提出了用动态窗和 A\*算法结合来优化路径规划的技术,检测全局地图中突然出现的障碍物实现局部避障,提高了移动机器人运动时全局最优和实时避障的能力,但该算法的计算量会随环境复杂度提高而增大,收敛慢。韩明等人<sup>[10]</sup>针对传统方法收敛慢和局部最优的问题,对粒子群优化下路径规划算法进行了改进,这种改进的方法具有较快的收敛速度,但倾向于将环境信息纳入路径规划中同时考虑,对自适应性的要求较高。Germi 团队针对移动机器人的 GA 路径规划算法,提出一种利用自适应势场优化路径规划方法的技术<sup>[11]</sup>,提高了路径规划对环境的自适应性,但路径规划时只求可行性,无法保证最优性。成昌巍等人<sup>[12]</sup>针对局部最小值和不可达点的问题改进了人工势场路径规划算法,这种改进型算法能使机器人避免陷入局部最优。路径规划得到的是空间位置点,轨迹规划得到最终的轨迹。Yu 等人<sup>[13]</sup>在机器人任务运动研究中通过多项式对关节定点进行插值,提高了机器人运动的平稳性,但罗列的动力学条件较多,拟合条件比较苛刻。Goll 等人<sup>[14]</sup>提出了基于 2D 网格的地面机器人轨迹规划方法,通过考虑路径和执行误差实现了非理想运动的轨迹拟合,但该方法是一种局部轨迹规划方法。

本文提出了一种基于环境建模的野外无人车路径规划和轨迹规划算法。直接进行野外环境下的路径规划较为困难,可利用环境感知技术和路

径规划技术相结合的方式达到目的。首先,通过传感器获取环境信息并处理,再通过训练 RBF 神经网络进行环境建模,得到较为精确的野外环境模型。其次,通过模型提取所需的高度和梯度信息作为参考,构建约束并优化约束函数进行从起点到终点的路径规划。最后对路径进行优化,由于得到的路径是由空间位置点连接成的折线路径,基于 Minimum Snap 思想用  $N$  阶多项式进行曲线拟合,达到轨迹规划的目的。

## 2 环境感知与建模

### 2.1 多传感器系统

在野外环境中,由于光线遮挡和复杂地形等因素,单独使用视觉传感器进行感知会产生偏差。随着环境感知技术的发展,多传感器融合可帮助无人车在复杂的野外环境中获取更加准确的信息。使用三维激光雷达、单目相机和惯性测量单元(IMU)组成传感器系统进行环境感知,雷达是核心传感器,相机和 IMU 是辅助传感器。雷达、相机和 IMU 将输入点云信息、图像信息和姿态角信息,其表达式分别为

$$A = \{a_i \mid a_i = (x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

$$I = \{i_{u,v} \mid i_{u,v} = (r, g, b) \in [0, 255], \\ u = 1, \dots, m, v = 1, \dots, n\} \quad (2)$$

$$Q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k \quad (3)$$

在式(1)中,  $A$  是点云集,即一个三维坐标集合,  $i$  表示第  $i$  个点,而  $a_i = (x_i, y_i, z_i)$  表示点云的坐标,  $N$  是点云总数。在式(2)中,  $I$  是三通道 RGB 值的集合,  $m \times n$  是图像像素值。在式(3)中,  $Q$  是一个四元数,通过四元数可表示空间内任意的一个旋转,即表示 IMU 的姿态角信息。

### 2.2 点云数据处理和位姿校正

在环境建模时,作为输入的点云数据存在噪声和干扰,同时,为平衡运算量和检测精度的矛盾以得到精准有效的信息,建模前先对得到的点云数据进行预处理。首先初始化点云边界为  $\{[x_{\min}, x_{\max}], [y_{\min}, y_{\max}], [z_{\min}, z_{\max}]\}$ 。然后删除离群点并使用滤波算法滤去噪声以提高检测精度。

最后,由于地面起伏不平坦,直接进行建模会因为车身位姿影响带来误差,甚至发生错误,因此需要利用 IMU 检测得到的姿态角对激光雷达的点云信息进行校正。校正时,旋转矩阵  $R$  表示为

$$R = \begin{bmatrix} 1 - 2q_2^2 - 2q_3^2 & 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 1 - 2q_1^2 - 2q_3^2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 + 2q_0q_2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 & 1 - 2q_1^2 - 2q_2^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

然后利用 IMU 得到的姿态角信息算出旋转矩阵  $R$ ,通过旋转矩阵  $R$  实现车体坐标系和地面坐标系的匹配,坐标转换的表达式为

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

最后,将校正后的点云存入新的集合  $A' = (X', Y', Z')^T$  中,以此点云作为建模输入,可消除由于地面不平导致车身倾斜的影响。

### 2.3 基于 RBF 神经网络的环境建模

如何通过传感器信息正确建立野外环境模型是后续做路径规划的基础。野外环境中的障碍物种类复杂多样,包括土坑、树木、石块等。对于路径规划技术,不需要分析具体的障碍物种类,只要获取不同类别的地面信息作为建立环境模型的参考输入即可。野外环境中,高于地面的障碍物称为凸障碍物,低于地面的障碍物称为凹障碍物。激光雷达扫描得到的点云可以反映两类不同的障碍物,把传感器信息作为输入,在建立准确的环境模型后,利用模型正确设计路径规划的约束即可达到避障的目的。环境建模的方法有构建环境的地图模型和数学模型。前者的代表是目前比较热门的同时定位与地图构建技术(SLAM),这种方法需要大量的储存空间和计算成本。相对于前者的高计算成本,无人车系统对实时性的要求更高,本文采用后者的思想,使用将传感器信息放入神经网络训练回归数学模型来进行环境建模。

RBF 神经网络是一种局部逼近的神经网络,能实现以高精度逼近任意连续的非线性网络。它

是一种单隐层前馈神经网络, 包括输入层、隐含层和输出层。输入层是传感系统信号源的输入, 隐含层指隐含神经元, 输出层则是隐含层的加权线性组合。因为混合高斯模型可拟合任意函数分布, 一般取高斯核函数为神经元。如图 1 即是一个简单的径向基神经网络结构, 包含两个信号源输入、四个隐含层高斯核函数, 将通过训练得到需要的线性输出。当信息更加复杂时, 可增加隐含层神经元的数量, 因此, 通过  $N$  个隐含神经元, 径向基神经网络不仅可以近似任意函数, 而且网络权值求取能由线性方程组求解得到。即网络由输入到输出的映射是非线性的, 而网络输出对可调参数又是线性的。

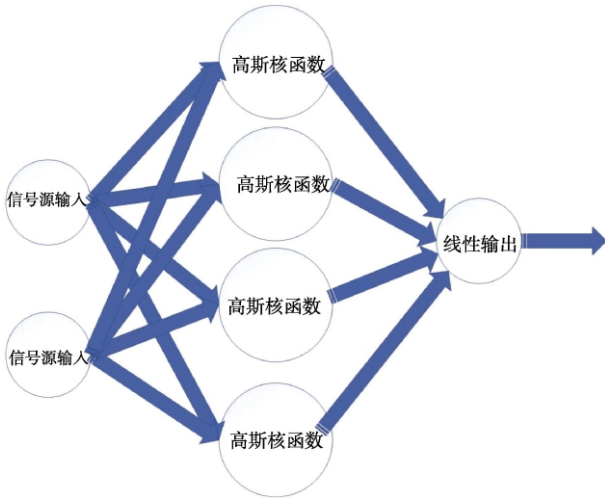


图 1 径向基神经网络

Fig. 1 Radial basis function neural networks

传感器系统感知并处理相应数据后作为输入样本, 假设此时有  $N$  个输入样本为  $(S_j, t_j)$ , 其中  $S_j = [s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jm}]^T$  为  $m$  维向量,  $t_j = [t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jn}]^T$  为  $n$  维向量。理论上, 拥有  $L$  个核函数的 RBF 网络, 其输出为

$$\sum_{i=1}^L \beta_i \phi_i(S_j) = O_j, j=1, \dots, N \quad (6)$$

其中:  $\beta_i (i=1, \dots, L)$  是连接第  $i$  个核函数和输出神经元的输出权重;  $\phi_i(S)$  是第  $i$  个隐含神经元的激活函数, 取其为高斯函数且表达式写为

$$\phi_i(S) = \exp(-\mathbf{b}_i \|S - \mathbf{W}_i\|^2) \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{W}_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}]^T$  是第  $i$  个隐含神经元的输入权重, 通过特征检测和自适应聚类的算法来分别检测凹凸障碍物, 当检测到某障碍物时, 将该障碍物的位置设为高斯核函数的中心, 其余高斯核函数中心随机确定即可;  $\mathbf{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}]^T$  是第  $i$  个隐含神经元的偏置 (方差), 通过  $K$  近邻分类 (KNN) 算法计算得到。单隐层 RBF 神经网络学习最终目的是最小化输出误差, 理想情况下满足输出误差为 0, 即尽量满足:

$$\sum_{j=1}^N \|O_j - t_j\| = 0 \quad (8)$$

建模时, 隐含层的个数  $L$  可自行设置, 采用梯度下降法训练所需的高斯核函数的中心、方差和输出权重, 通过不断迭代调整参数直到满足阈值条件来确定高斯核函数的中心和偏置方差。输入权重  $\mathbf{W}_i$  和偏置  $\mathbf{b}_i$  确定之后, 采用极限学习 (ELM) 方法训练 RBF 神经网络求输出权重  $\beta_i (i=1, \dots, L)$  使得损失函数最小, 即最小化:

$$\text{Loss} = \sum_{j=1}^N \left( \sum_{i=1}^L \beta_i \exp(\mathbf{b}_i \|S_j - \mathbf{W}_i\|) - t_j \right)^2 \quad (9)$$

本文在环境建模时, 利用点云信息作为输入训练回归模型  $z = f(x, y)$ , 即在最小化误差训练时, 把输入样本定义为  $S_i = (x_i, y_i)$ ,  $t_i = z_i$ , 进行环境建模, 最终得到环境数学模型为

$$z = f(S) = \sum_{i=1}^L \beta_i \exp(\mathbf{b}_i \|S - \mathbf{W}_i\|^2) \quad (10)$$

## 2.4 环境模型的复杂性

环境的复杂性因素可以由两方面来描述: 一是环境的结构和数据量; 二是环境建模的复杂度。结构越复杂、数据越多, 反映的信息越详细, 但是用于保存环境信息的内存开始变大, 难以实时更新和快速规划; 相对地, 若模型结构简单, 数据量小, 则会丢失有用的环境细节。环境建模的复杂度则表明建模速度的快慢, 若复杂度太大, 则建模困难, 难以反映环境变化。

本文提出的基于数学模型的建模, 其复杂性低于地图建模的 SLAM, 不论是与建立语义地图还是拓扑地图比, 数学模型的数据和结构均相对

简单,最重要的是从模型函数中提取数据更为简单。采用数学模型建模时,训练单隐层前馈 RBF 神经网络比训练多隐含层的 BP 网络效率高、收敛快、效果好。

### 3 基于环境模型的无人车路径规划

#### 3.1 基于模型的路径规划策略

环境建模将存在障碍物、情况相对未知的复杂野外环境抽象成数学模型,基于无人地面车辆的路径规划转化成数学模型中的优化求解。此时,野外无人车路径规划的策略为:通过提取环境模型中所需要考虑的环境信息,综合考虑初始位置到目标位置的距离作为约束条件,再通过优化代价函数求解路径点。本文引入距离、梯度和高度构建约束函数,通过优化约束函数求取空间路径点。

#### 3.2 约束函数的构建和路径生成

一般无人车的避障系统只需要考虑障碍物的体积和高度,规划出一条绕开阻挡车辆前进的高大物体即可。当研究野外无人车时,地面崎岖起伏不平,环境中也有凸障碍物也有凹障碍物。当无人车遇到凸障碍物时,可能会出现虽然高度较大,但是梯度小的情况,此时地面相对连续和平缓,无人车可顺利通过(如爬坡或者飞越)。当无人车遇到凹障碍物时,虽然高度值小,但是梯度值会出现剧烈变化,如无法及时避开,无人车就会掉入坑中。因此,通过综合考虑高度信息和梯度信息进行约束函数的设计。假设训练得到的环境数学模型为  $F(S)$ 。梯度信息为  $F'(S)$ ,通过对环境模型进行求导得到。设高度梯度向量函数  $G(S)$ 为

$$G(S) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(S)}{\partial x} \\ \frac{\partial F(S)}{\partial y} \\ \partial F(S) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中:前两项为环境数学模型对坐标的偏导,用以描述环境梯度,进而通过梯度值是否突变表征是否遇到障碍物地形;第三项为高度。无人车路

径规划的目的是找到一条离目标点距离近、高度和梯度综合值比较小的路径。综合考虑这些物理量,约束函数可以设计为

$$C = \sum_{i=1}^K \left( \frac{1}{2} \alpha_1 \|S_i - P\|^2 + \frac{1}{2} \alpha_2 \|G(S)\|^2 \right) \quad (12)$$

$$\|S_i - S_{i-1}\| \leq \varepsilon_1, \|G(S)\| \leq \varepsilon_2 \quad (13)$$

其中:  $S_i = (x_i, y_i)$  表示优化的参考轨迹点坐标;  $S_{i-1}$  是上一个通过优化求解得到的轨迹点坐标;  $K$  是轨迹点的总个数;  $P$  是目的地的位置坐标,当选定之后即为  $K$  个分量值相同的向量;  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  是两个参数系数,表示目的地距离和环境信息的重要性权重;  $\varepsilon_1$  表示单步步长;  $G(S)$  是在  $S$  点处综合考虑高度和梯度信息的环境特征向量;  $\varepsilon_2$  表示设定的环境特征向量阈值。通过最小化约束得到轨迹参考点  $\hat{S} = [\hat{S}_1, \hat{S}_2, \dots, \hat{S}_K]^T$ , 即满足:

$$\hat{S}_i = \arg \min_{S_i} C(S_i) \quad (14)$$

设计好约束函数后,通过求解带不等约束的非线性优化问题生成路径点,达到路径规划的目的。即求解:

$$\begin{aligned} \min \quad & C(S) \\ \text{s.t.} \quad & h_1(S) \leq 0 \\ & h_2(S) \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

其中:  $h_1(S) = \|S_i - S_{i-1}\| - \varepsilon_1$ ,  $h_2(S) = \|g(S)\| - \varepsilon_2$ , 其代表含义已经由上述过程给出。这类问题通常使用迭代求解方法,给定初始迭代步长,将非线性优化问题转化为一系列子二次规划。每一次的迭代点可以通过上一次搜索方向与迭代步长求得,最终得到  $\hat{S} = [\hat{S}_1, \hat{S}_2, \dots, \hat{S}_K]^T$  一系列路径点。

## 4 野外无人车轨迹规划方法

### 4.1 多项式拟合路径生成轨迹

路径规划求解得到路径点,最终路径是由坐标点连成的折线路径。本节研究将折线路径优化成曲线轨迹的轨迹规划技术。

多项式函数因计算简单、解耦性好可用于拟合曲线轨迹。多项式函数常用于指定平面输出轨



迹, 若经过时间  $T_{\text{total}}$ , 无其他条件下在两点之间生成曲线轨迹通常只需要考虑  $p(0) = a, p(T_{\text{total}}) = b$ , 没有多余的限制。这是最简单的轨迹拟合。情况越复杂, 约束条件越多, 可以用  $N$  阶多项式求取参数来拟合折线路径, 多项式轨迹表达式为

$$p(t) = p_0 + p_1 t + p_2 t^2 + \dots + p_n t^n = \sum_{i=0}^n p_i t^i \quad (16)$$

其中:  $p_0, p_1, p_2, \dots, p_n$  表示轨迹参数。对任意的  $t$  时刻, 对多项式轨迹求一到四导, 得到该轨迹的速度、加速度、Jerk 和 Snap。若参数为  $\mathbf{p} = [p_0, p_1, p_2, \dots, p_n]^T$  的向量形式, 则多项式轨迹可改写为

$$\mathbf{p}(t) = [1, t, t^2, \dots, t^n] \times \mathbf{p} \quad (17)$$

一个多项式轨迹无法拟合复杂的曲线。在时间同步和顺序不变的前提下, 将需要优化成曲线轨迹的路径分成多段, 每一段都是一个  $N$  阶多项式轨迹。即

$$\mathbf{p}(t) = \begin{cases} [1, t, t^2, \dots, t^n] \times \mathbf{p}_i \\ [1, t, t^2, \dots, t^n] \times \mathbf{p}_j \\ \dots \\ [1, t, t^2, \dots, t^n] \times \mathbf{p}_k \end{cases} \quad (18)$$

## 4.2 基于 Minimum Snap 思想构建目标函数和等式约束

把折线路径通过多项式轨迹优化成为曲线的本质目的是进行多项式参数  $\mathbf{p} = [p, p, p, \dots, p]$  的求解。理论上可以有无数条可以用来拟合折线路径的轨迹, 实际中要找到一条最合理的多项式轨迹去拟合路径时可以通过确定目标函数和约束来求取最优解。于是轨迹规划变成了一个带约束的优化求解问题。本文进行轨迹规划时, 最小化目标函数满足  $\min \text{Snap}(t) = \min(\mathbf{p}^{(4)}(t))^2$ , 其中 Snap 的表达式为

$$\text{Snap}(t) = \mathbf{p}^{(4)}(t) = [0, 0, 0, 0, 24, \dots, \frac{n!}{(n-4)!} t^{n-4}] \mathbf{p} \quad (19)$$

轨迹规划时, 采用均匀分配作为时间分配的策略。对于  $k+1$  个满足  $pt_i = (x_i, y_i)$  的包含起点和终点的二维路径点  $pt_0, pt_1, \dots, pt_k$ , 若总时间为  $T_{\text{total}}$ , 通过前文所述的多项式轨迹, 目标函数可

以化简为

$$\begin{aligned} \min(\mathbf{p}^{(4)}(t))^2 &= \min \int_0^{T_{\text{total}}} (\mathbf{p}^{(4)}(t))^2 dt = \\ &= \min \sum_{i=1}^k \int_{t_{i-1}}^{t_i} (\mathbf{p}^{(4)}(t))^2 dt \\ &= \sum_{i=1}^k \int_{t_{i-1}}^{t_i} \mathbf{p}^T \left\{ [0, 0, 0, 0, 24, \dots, \frac{n!}{(n-4)!} t^{n-4}]^T \right. \\ &\quad \left. [0, 0, 0, 0, 24, \dots, \frac{n!}{(n-4)!} t^{n-4}] dt \right\} \mathbf{p} = \sum_{i=1}^k \mathbf{p}^T \mathbf{Q}_i \mathbf{p} \quad (20) \end{aligned}$$

因此, 经过运算可得到优化目的为最小化目标函数:

$$\min(\mathbf{p}^{(4)}(t))^2 = \min \int_0^T (\mathbf{p}^{(4)}(t))^2 dt = \min \mathbf{p}^T \mathbf{Q} \mathbf{p} \quad (21)$$

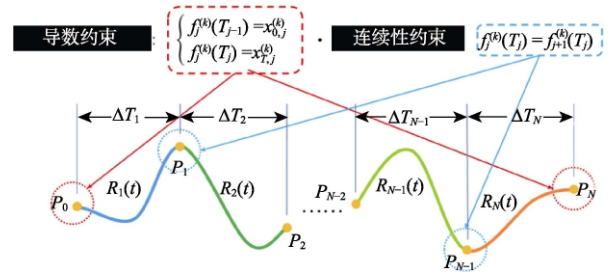


图 2 轨迹规划的等式约束

Fig. 2 Equality constraints for trajectory planning

得到目标函数后, 为进行轨迹规划还需要构建等式约束。如图 2 所示, 多项式轨迹拟合的等式约束包括两部分, 第一是导数约束, 即位置、速度、加速度的约束; 第二是连续性约束, 即位置、速度、加速度在时间策略下具体如何相等的约束。包括将起点和终点的位置、速度、加速度作为约束条件; 将中间所有点的位置、速度和加速度连续作为约束条件; 将中间所有点在时间策略下的位置匹配作为约束条件。通过等式约束下最小化目标函数可以求得轨迹参数  $\mathbf{p}$ 。

## 5 仿真实验

### 5.1 实验平台与实验场景

本文进行的实验基于优艾智和 Youibot3 无人地面车辆。如图 3 所示, 把无人车放置在一个  $30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  的矩形野外环境, 地面起伏不平。设

置相应的凸障碍物和凹障碍物：实验场地中用三个约 0.8 m 高的箱子和 1 个约 0.6 m 高的土堆代表需要避开的凸障碍物，用一个深 0.8 m 的土坑代表需要避开的凹障碍物。



图 3 实验场景  
Fig. 3 Experimental scene

## 5.2 环境感知和建模仿真

在无人地面车辆上搭载雷达、相机和 IMU 组成传感器系统，采集点云信息和位姿信息，基于 MATLABR 2017a 进行点云数据处理和进一步的仿真实验。先初始化点云边界为  $[x_{\min}, x_{\max}] = [0, 20]$ ,  $[y_{\min}, y_{\max}] = [-6, 6]$ ,  $[z_{\min}, z_{\max}] = [-3, 3]$ , 再执行滤波算法，删除离群点。然后利用公式 (5) 进行位姿校正，由于点云数据坐标中的  $z$  值不存在负值，这与凹障碍物特征不相符，为使效果更加直观，需要对  $z$  值进行坐标变换。首先令  $z = z + 0.75$ ，再执行坐标变换公式：

$$\begin{cases} z = z - 0.8, & z < 0 \\ z = 0.01, & 0 < z < 2 \\ z = 0.01, & |z| < 0.1 \end{cases} \quad (22)$$

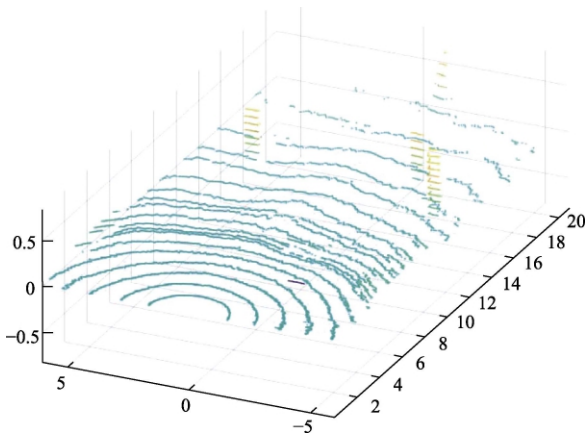


图 4 数据处理和位姿校正后的点云  
Fig. 4 Point cloud after data processing and pose correction

图 4 是数据处理后得到的点云直观图，处理后的点云反映了野外环境中障碍物的位置和大小，将该点云作为输入权重，初始化神经元数量  $K = 30$ 。在仿真时输入采样范围和概率（均匀分布），设置训练精度为文中提到的均方误差损失函数，开始训练 RBF 神经网络。通过最小化误差得到回归模型  $z = f(x, y)$ ，如图 5 所示。

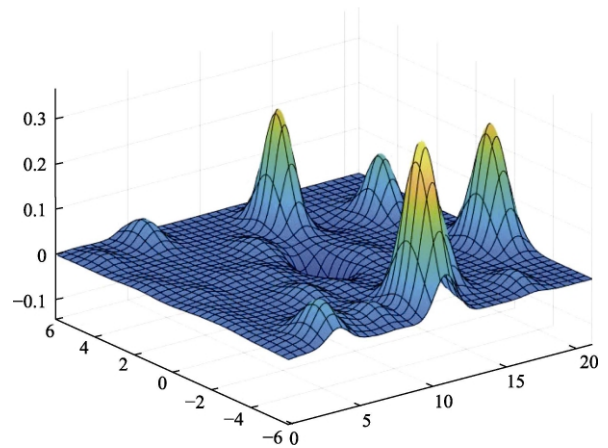


图 5 野外环境模型  
Fig. 5 Field environment model

## 5.3 路径规划仿真及分析

初始化迭代次数  $K = 25$ ，起始位置在  $(0, 0)$ ，目标位置在  $(-5, 20)$ 。初始化步长  $\varepsilon_1 = 1$ ，特征向量阈值  $\varepsilon_2 = 0.2$ ，设定系数  $\alpha_1 = 0.5$ ， $\alpha_2 = 0.5$ ，利用二次规划函数求解路径点并连接。最终路径规划仿真结果如图 6 所示。在更大和更复杂的场景中进行路径规划时，在建模模块可适当增加神经元数量，也可在预处理时将地图分开训练得到分模型，最终将地形整合到一起。

通过改变距离信息权值和环境特征向量权值可以提高环境约束对于路径规划的优先级，即提高无人车对环境信息的灵敏度。在遇到某些紧急情况时，处于复杂环境中的无人车在感知信息和规划路径时，需要更多地考虑环境信息。此时，相对于因距离而产生的时间误差，可能导致无人车损坏的障碍物更为危险。在实验中，将环境信息权值  $\alpha_2$  提高到距离权值  $\alpha_1$  的三倍，得到的结果如图 7 所示，与图 6 形成了鲜明的对比。环境信息权值和距离信息权值相同，得到的路径会使无

人车从两个凸障碍物中间穿越到达目标位置, 当把环境信息权值提高时, 得到的路径会使无人车绕过凸障碍物到达目标位置。

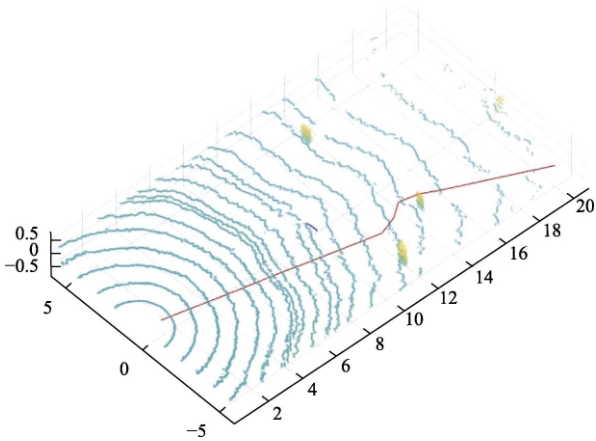


图 6 路径规划仿真结果  
Fig. 6 Path planning simulation result

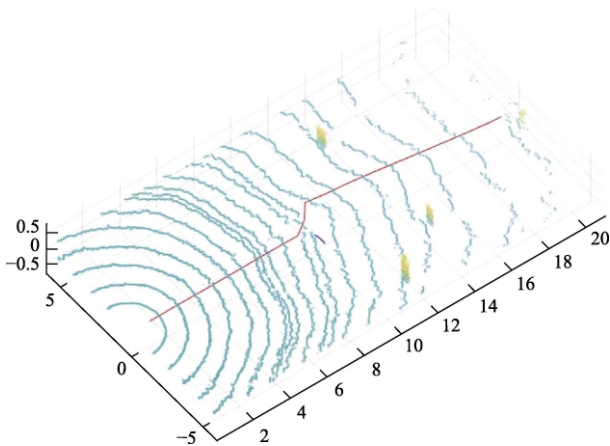


图 7 提高环境信息权值后路径规划仿真结果  
Fig. 7 Simulation results of path planning after increasing the environmental information weight

### 5.3 轨迹规划仿真

本文采用五阶多项式拟合路径并将其优化成曲线轨迹, 得到轨迹规划点后计算每一段路径的距离和总的距离, 初始化多项式阶数为 5, 参数个数为 6, 轨迹条数为  $K-1=24$ 。初始化总的分配时间为  $T=25$ , 求解矩阵  $Q$ , 利用时间分配构建位置连续约束, 通过循环求取其他约束。用二次规划函数求解目标函数和约束下的所有参数, 返回参数并画出轨迹图, 得到轨迹曲线。最终仿真结果如图 8 所示, 图 6 得到的折线路径成功拟

合成最终需要跟踪的曲线轨迹。

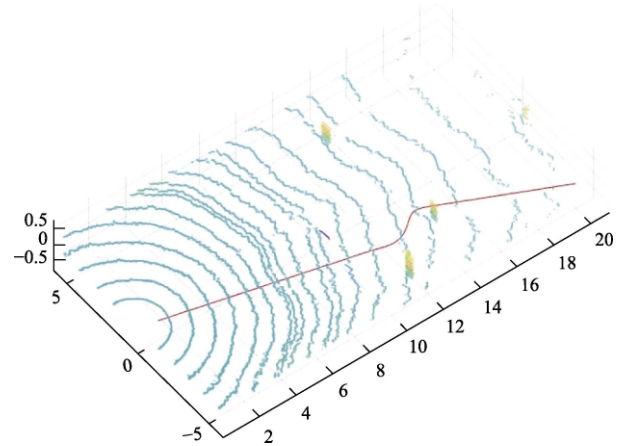


图 8 轨迹规划仿真结果  
Fig. 8 Trajectory planning simulation result

## 6 结 论

在存在障碍物和情况相对未知复杂的野外环境中, 无人车的路径规划相对困难和复杂。针对该问题, 将环境感知技术作为路径规划的基础, 提出了一种基于环境建模的野外无人车路径规划和轨迹规划方法。仿真结果表明, 这种路径规划方法可有效实现野外环境中的障碍规避, 同时生成最终轨迹。

在未来的工作中, 当需要处理的环境信息更加复杂时, 如何更好地利用传感器系统得到的数据进行信息融合, 使得感知更加准确也是一个研究方向。对于未知环境, 随着任务需求更加多元化, 多辆野外无人车协同控制也是一个研究方向。在大数据时代, 如何将机器学习与控制技术相结合设计一种高效的无人系统框架, 可以有效提高无人车的智能水平, 这也是一个值得开展的工作。

### 参 考 文 献

- [1] 李艳. 无人驾驶汽车将奔向何方[J]. 中国商界, 2017(7): 116-119.
- [2] 陈云峰, 邹丹. 美国先进野外无人战车发展历程[J]. 轻兵器, 2014(14): 20-23.
- [3] Kuffner J J, Lavelle S M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), San Francisco, USA, April

24-28, 2000.

- [4] Gemeinder M, Gerke M. GA-based path planning for mobile robot systems employing an active search algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2003(2): 149-158.
- [5] Duan H, Yu Y, Zhang X, et al. Three-dimension path planning for UCAV using hybrid meta-heuristic ACO-DE algorithm[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(8): 1104-1115.
- [6] Masehian E, Sedighzadeh D. A multi-objective PSO-based algorithm for robot path planning[C]. IEEE International Conference on Industrial Technology(ICIT), Vina del Mar, Chile, May 27, 2010.
- [7] Watkins C J, Dayan P. Q-learning[J]. Machine Learning, 1992, 8(3): 279-292.
- [8] Zhao M, Lu H, Yang S, et al. The experience-memory Q-learning algorithm for robot path planning in unknown environment[J]. IEEE Access, 2020, 1(1): 98-99.
- [9] Cheng C, Hao X, Li J, et al. Global dynamic path planning based on fusion of improved A\* algorithm and dynamic window approach[J]. Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11): 137-143.
- [10] 韩明, 刘教民, 吴朔梅, 等. 粒子群优化的移动机器人路径规划算法[J]. 计算机应用, 2017, 37(8): 2258-2263.
- [11] Gerami S B, Khosravi M A, Fesharakifard R. Adaptive GA-based potential field algorithm for collision-free path planning of mobile robots in dynamic environments[C]. RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRM). London, UK, November 19-20, 2018.
- [12] 成昌巍, 胡劲文, 王策, 等. 基于改进型人工势场的路径规划方法[J]. 无人系统技术, 2019, 2(6): 10-16.
- [13] Yu H, Meng Q, Zhang J, et al. Time-optimal trajectory planning of robot based on improved adaptive genetic algorithm[C]. IEEE Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Shen Yang, China, June 9-11, 2018.
- [14] Goll S A, Luksha S S, Leushkin V S, et al. Unmanned ground vehicle local trajectory planning algorithm[C]. IEEE Mediterranean Conference on Embedded Computing, 2016(1): 317-321.

#### 作者简介:



陈智伟 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人车自主控制、SLAM 地图重构与环境感知。



胡劲文 (1983-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无人机编队、智能车、协同控制、网络控制等。本文通讯作者。



赵春晖 (1973-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无人机感知规避与视觉导航、图像处理、目标跟踪识别。



王策 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光雷达与相机检测。



侯晓磊 (1985-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为遥操作系统、无人机飞行控制等。



潘泉 (1961-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为信息融合、目标跟踪与识别、深度网络与机器学习等。



王腾 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机飞行控制与编队。



徐钊 (1982-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为基于大数据分析的仪器故障预测等。

[引用格式] 张晨, 张涛. 基于最小磁角的抗干扰水下仿生导航研究[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 49-55.

# 基于最小磁角的抗干扰水下仿生导航研究

张晨<sup>1,2</sup>, 张涛<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学仪器科学与工程学院, 南京 210096; 2. 微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘要:** 针对无先验磁图条件下, 水下潜航器运动随机性过强, 导致其易陷入局部极值区域的问题, 开展水下抗干扰仿生导航研究。考虑到水下导航的精准性, 提出了一种基于最小磁角的抗干扰仿生导航算法。该方法利用当前位置磁场矢量与目的位置磁场矢量的关系, 得到下一个位置的最优估计值, 通过磁角的大小评价导航路径的优劣性, 建立运动趋势性, 从而避免潜航器陷入地磁异常区域。通过在正常磁场和异常叠加场上分别进行仿真实验并对比分析, 得到最大位置偏差为 0.17, 且前进趋势不受磁异常区域干扰, 验证了该方案的有效性。

**关键词:** 地磁; 最小磁角; 磁异常; 仿生导航; 潜航器; 抗干扰

中图分类号: U666.1 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)02-49-07

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.2.018

## Research on Anti-Interference Underwater Bionic Navigation Based on Minimum Magnetic Angle

ZHANG Chen<sup>1,2</sup>, ZHANG Tao<sup>1,2</sup>

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Key Laboratory of Micro-inertial Instrument and Advanced Navigation Technology, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the motion of the underwater submarine is too random, which makes it easy to fall into the local extreme area under the condition of no prior magnetic map, the research of underwater anti-jamming bionic navigation is carried out. Considering the accuracy of underwater navigation, this paper proposes an anti-jamming bionic navigation algorithm based on the minimum magnetic angle. This method uses the relationship between the magnetic field vector of the current position and the magnetic field vector of the target position to obtain the optimal estimation value of the next position. The pros and cons of the navigation path are evaluated by the size of the magnetic angle, and the movement tendency is established, thereby avoiding the submarine from falling into the geomagnetic anomaly area. Through simulation experiments and comparative analysis on the normal magnetic field and the abnormal superposition field, the maximum position deviation is 0.17, and the forward trend is not interfered by the magnetic abnormal area, which verifies the effectiveness of the scheme.

**Key words:** Geomagnetic; Minimum Magnetic Angle; Magnetic Anomaly; Bio-Inspired Navigation; Submarine; Anti-interference

收稿日期: 2020-10-03; 修回日期: 2020-12-30

基金项目: 惯性技术重点实验室基金 (614250607011709), 水下信息与控制重点实验室基金 (614221805051809), 中央高校基本科研业务费 (2242019K40040, 2242019K40041), 江苏绿色船舶技术重点实验室基金 (2019Z01), 东南大学国家自然科学基金结题项目剩余经费培育项目 (9S20172204)

## 1 引言

地磁仿生导航凭借磁趋势性到达特定目标位置。地磁场是多种参量的混合体,在无先验地磁场的情况下,以终点地磁场多参量为目标值,将多目标的求解与导航运动相结合,构建生物磁趋势性特征。目前常用的地磁导航的导航方法分为两种:一种是基于地磁图的匹配导航方法;另一种是基于地磁模型的滤波导航方法<sup>[1]</sup>。在地表及其附近运动的载体大多采用地磁匹配导航方法<sup>[2-5]</sup>,即根据磁传感器测量得到的磁场信息与地磁图进行特征点匹配,从而获得载体较为精确的定位信息。但地磁匹配法需提前得到当地的地磁图,一方面需要耗费大量的人力物力对地磁图进行测量统计,另一方面对于某些无法到达的领域无法完成地磁图的采集工作。且高空的地磁场地磁起伏不及地表明显,不满足匹配方法对匹配特征量的要求,只能通过地磁场模型和采用卡尔曼滤波方法来估计载体的导航信息<sup>[6-7]</sup>。德国的 Wiltshcko 通过对信鸽等动物特性的研究发现,信鸽能在仅依赖地磁信息的情况下完成返航行为<sup>[8-10]</sup>,该研究为地磁仿生导航方法提供了生物学基础和依据。浙江大学 Zhao 等人<sup>[11]</sup>和 Qi 等人<sup>[12]</sup>基于对鸽子和海龟等动物利用地磁信息进行长距离迁移特性的分析,通过仿真实验模拟了迁移动物在地球表面上长距离的地磁归巢,结果表明,在没有预先存储的地磁和地理数据的帮助下,地磁导航仍然可以在各种干扰环境下实现。西北工业大学的刘明雍等人受生物利用地磁信息进行导航行为的启发,提出了基于时序进化搜索策略的地磁仿生导航方法<sup>[13-15]</sup>。该方法利用生物学的磁趋性原理建立了基于地磁多参量的目标函数,导航过程中采用进化搜索模式,引导载体趋势性逼近目标点;但是其随机游走的导航搜索方式导致航向角波动较大,路径往往比较曲折。西北工业大学的王琼等人为了探求一种适用于飞行器的仿生导航方法,提出一种平行接近的地磁梯度仿生导航方法,该方法利用实测数据平行接近目的地数据这一思想进行航向角预测,从而引导飞行器不断向目标点

运动,最终完成导航<sup>[16]</sup>。但该方法在预测航向角的过程中,只利用两个地磁参量信息,易出现误匹配现象。因此,进一步对地磁干扰等复杂磁场环境下导航行为可控性的研究具有重要意义。

为更加快速有效地引导载体到达目的地,本文提出了基于最小磁角的抗干扰水下仿生导航算法,该算法在快速精准导航的同时,还能避免陷入地磁异常区域,具有较强的抗干扰特性。

## 2 地磁模型

地球可以看作一个大的磁体,地磁参量随着经纬度变化而变化<sup>[17]</sup>,地磁参量可描述为

$$\mathbf{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_n\} \quad (1)$$

其中:  $B_i (i=1, 2, \dots, n)$  为地磁参量元素,包括磁场三分量( $X, Y, Z$ )、地磁水平场强、磁场总场强、磁倾角、磁偏角,其中磁场三分量可以用来表示其他特征参量,因此本文仅选取地磁三分量作为研究参量。

从仿生角度出发,生物运动行为具有对地磁场变化趋势性敏感的特性,因此,地磁仿生导航的过程可视为地磁场多个特征参量从起始位置对目标位置的各个特征参量搜索收敛的过程。仿生搜索最后可描述为

$$F(\mathbf{B}_i) = (B_{i,x} - B_{T,x})^2 + (B_{i,y} - B_{T,y})^2 + (B_{i,z} - B_{T,z})^2 \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{B}_i = (B_{i,x}, B_{i,y}, B_{i,z})$ ,  $\mathbf{B}_i$  为潜航器  $B_{i,x}$  时刻所处位置的地磁矢量,且  $B_{i,x}$ 、 $B_{i,y}$ 、 $B_{i,z}$  分别对应为  $i$  时刻测得的  $X, Y, Z$  方向的地磁三分量,  $B_{T,x}$ 、 $B_{T,y}$ 、 $B_{T,z}$  分别对应目的地的  $X, Y, Z$  方向的地磁三分量。

若点  $i$  时刻磁场分量与目标磁场分量之间的偏差程度较小,即满足对应约束条件时,可认为潜航器到达预设目的地。

## 3 算法

### 3.1 运动模型

载体运动模型给定如下:

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + v \cos \theta^k \\ y_{k+1} = y_k + v \sin \theta^k \\ u = (v, \theta) \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $(x, y)$  表示载体位置;  $k$  表示位置信息;  $u$  表示导航参数, 是速度  $v$  和航向角  $\theta$  的函数。

通过对航向角离散采样, 得到航向角  $\theta$  集合:

$$\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M\}, \quad M = \frac{2\pi}{I_\theta} \quad (4)$$

其中:  $I_\theta$  表示采样间隔,  $\theta_i = i \times I_\theta$ 。

### 3.2 最小磁角算法

图 1 给出了  $k$  时刻地磁参量  $\mathbf{B}_k$ ,  $k+1$  时刻地磁参量  $\mathbf{B}_{k+1}$  和目的地地磁参量  $\mathbf{B}_T$ 。记  $\vec{V}_{k+1,k} = \mathbf{B}_{k+1} - \mathbf{B}_k$ ,  $\vec{V}_{T,k} = \mathbf{B}_T - \mathbf{B}_k$ , 图中  $r$  为  $\vec{V}_{k+1,k}$  的模值, 大小与潜航器速度有关。

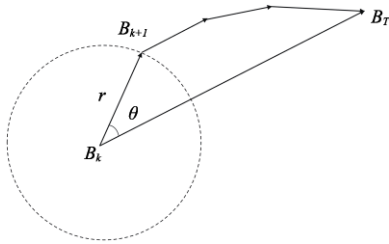


图 1 位置矢量图

Fig. 1 Location vector diagram

从图 1 可以看出, 当  $r$  恒定时, 若  $\vec{V}_{k+1,k}$  与  $\vec{V}_{T,k}$  的夹角  $\theta$  为 0, 即矢量变化方向与  $\mathbf{B}_T - \mathbf{B}_k$  一致时, 潜航器能够快速收敛至目的地。该方法可用式(5)描述:

$$\begin{cases} \vec{V}_{k+1,k} = m \vec{V}_{T,k} \\ \text{s.t. } 0 < m \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $m$  表示大小在区间  $(0, 1]$  的标量。

磁参量随着经纬度变化而变化, 且地球磁场每一处的磁场参量是唯一确定的, 给定目的地经纬度坐标, 可以得到对应的  $X, Y, Z$  三分量为  $\mathbf{B}_T = (B_{T,x}, B_{T,y}, B_{T,z})$ , 同时已知当前地磁场矢量为  $\mathbf{B}_k = (B_{k,x}, B_{k,y}, B_{k,z})$ 。根据航向角  $\theta$  计算得到下一位置, 通过磁传感器测得下一位置的地磁三分

量为  $\mathbf{B}_{k+1}^\theta = (B_{k+1,x}^\theta, B_{k+1,y}^\theta, B_{k+1,z}^\theta)$ 。由式(5)可知, 当满足

$$\mathbf{B}_T - \mathbf{B}_k = m(\mathbf{B}_{k+1}^\theta - \mathbf{B}_k) \quad \text{s.t. } 0 < m \leq 1 \quad (6)$$

时, 潜航器能够快速收敛至目的地。

在实际导航中, 由于航向角离散采样且步长  $\lambda$  确定, 因而很难找到一个  $\mathbf{B}_{N+1}^\theta$  满足式(6)。在实际运用中, 可以通过计算式(7), 找到最优航向角。

$$\alpha = \min \langle \mathbf{B}_T - \mathbf{B}_N, \mathbf{B}_{N+1}^\theta - \mathbf{B}_N \rangle \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{B}_N$  表示当前时刻地磁参量,  $\mathbf{B}_{N+1}^\theta$  表示下一时刻的地磁参量,  $\alpha$  表示  $\mathbf{B}_T - \mathbf{B}_N$  与  $\mathbf{B}_{N+1}^\theta - \mathbf{B}_N$  的最小夹角。  $\alpha$  对应的  $\theta_\alpha$  即为最优航向角。

### 3.3 收敛条件

本文以地磁场  $X, Y, Z$  三参量为研究对象构建导航模型, 由于三参量两两正交, 为摆脱各参量之间的相互影响, 提高导航的准确性, 本文将多目标参量收敛条件设置为

$$\mathbf{Q}_N = \begin{bmatrix} |B_{T,x} - B_{N,x}| \\ |B_{T,y} - B_{N,y}| \\ |B_{T,z} - B_{N,z}| \end{bmatrix} < \varepsilon \quad (8)$$

其中:  $\varepsilon$  表示由接近于 0 的极小值组成的  $3 \times 1$  的列向量。当满足式(8)时, 认为潜航器达到目的地, 结束导航。在实际导航过程中, 由于地磁参量较大, 且通常存在异常干扰,  $\varepsilon$  设置得过小使收敛条件过于苛刻, 而致使潜航器难以收敛。因此在实际应用中  $\varepsilon$  的实际值应该由地磁参量的量级决定, 即  $\varepsilon$  与地磁参量的比值为接近于 0 的极小值。

当磁场有铁矿石或其他磁性物质时, 正常地磁场将受到干扰, 这里把地磁异常区域看作正常场与干扰场的叠加, 记为

$$\mathbf{B}' = \mathbf{B} + \delta \mathbf{B} \quad (9)$$

其中:  $\mathbf{B}$  表示正常磁场强度矢量,  $\delta \mathbf{B}$  表示干扰场的磁场强度矢量,  $\mathbf{B}'$  表示正常场与干扰场叠加后的磁场强度矢量。

在地磁异常区域中, 构造损失函数表示为

$$F(\mathbf{B}_i + \partial\mathbf{B}_i) = (\mathbf{B}_{i,x} + \partial\mathbf{B}_{i,x} - \mathbf{B}_{T,x})^2 + (\mathbf{B}_{i,y} + \partial\mathbf{B}_{i,y} - \mathbf{B}_{T,y})^2 + (\mathbf{B}_{i,z} + \partial\mathbf{B}_{i,z} - \mathbf{B}_{T,z})^2 \quad (10)$$

则磁场变化表示为

$$\begin{aligned} & F(\mathbf{B}_{k+1} + \partial\mathbf{B}_{k+1}) - F(\mathbf{B}_k + \partial\mathbf{B}_k) \\ &= F(\mathbf{B}_{k+1}) - F(\mathbf{B}_k) - \partial\mathbf{B}_{k+1}(2\mathbf{B}_{k+1} - 2\mathbf{B}_T - \partial\mathbf{B}_{k+1})^T \\ & \quad + \partial\mathbf{B}_k(2\mathbf{B}_k - 2\mathbf{B}_T - \partial\mathbf{B}_k)^T \end{aligned} \quad (11)$$

其中： $\mathbf{B}_k$ 、 $\mathbf{B}_{k+1}$ 、 $\mathbf{B}_T$ 分别表示  $k$ 、 $k+1$  位置和目的地的磁场矢量。令

$$\begin{aligned} \lambda = & \partial\mathbf{B}_{k+1}(2\mathbf{B}_{k+1} - 2\mathbf{B}_T - \partial\mathbf{B}_{k+1})^T \\ & + \partial\mathbf{B}_k(2\mathbf{B}_k - 2\mathbf{B}_T - \partial\mathbf{B}_k)^T \end{aligned} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 得

$$\begin{aligned} & F(\mathbf{B}_{k+1} + \partial\mathbf{B}_{k+1}) - F(\mathbf{B}_k + \partial\mathbf{B}_k) \\ &= F(\mathbf{B}_{k+1}) - F(\mathbf{B}_k) - \lambda \end{aligned} \quad (13)$$

当在原地磁场中, 潜航器往某一方向运动时, 损失函数单调递减, 即满足条件:

$$F(\mathbf{B}_{k+1}) - F(\mathbf{B}_k) < 0 \quad (14)$$

现假设:

$$\lambda \leq F(\mathbf{B}_{k+1}) - F(\mathbf{B}_k) \quad (15)$$

即

$$F(\mathbf{B}_{k+1} + \partial\mathbf{B}_{k+1}) - F(\mathbf{B}_k + \partial\mathbf{B}_k) > 0 \quad (16)$$

此时, 地磁干扰场的存在导致原正常地磁场的单调性被破坏, 从而形成了局部极值区, 该局部极值区会对导航造成影响。若假设不成立, 叠加干扰场后, 磁场参量的单调性不变, 则不会产生局部极值区。由于磁场的复杂性, 局部极值区一定存在。

对于磁场内任意一点, 磁场参量  $\mathbf{B}_T$ 、 $\mathbf{B}_N$  均已知, 同时令  $\alpha=0$ , 通过式(7)可以计算得到理想值  $\hat{\mathbf{B}}_{N+1}^\theta$ 。这表明, 潜航器在任意一点处, 都能计算得到下一个位置点的最佳估计值, 在寻找最小夹角的过程中, 就是为了寻找一个合适的位置, 该位置处的磁场参量与计算所得的最佳估计值  $\hat{\mathbf{B}}_{N+1}^\theta$  最接近, 而夹角  $\theta$  表征了两个值之间的近似程度。

当遇到异常区域时, 相当于山体凹下去一块

(复杂异常区域可由该情况叠加而成), 如图 2 所示。对于梯度下降搜索算法而言, 潜航器必将朝着红色箭头  $\mathbf{B}$  所指的方向 (假设此方向为下降最快方向) 行进, 尽管此时的路径是理想最优的, 但利用梯度下降算法会陷入局部极值区, 使得潜航器在异常区域内来回航行。而对于最小磁角导航算法, 由于异常磁场的干扰改变干扰区域周围的磁场参量值, 原本最佳路径 (红色箭头  $\mathbf{B}$ ) 不再是最佳路径, 潜航器将会搜索更接近于原本最佳路径的方向行进, 而不会陷入磁异常区域。因此, 该算法具有较好的抗干扰能力。

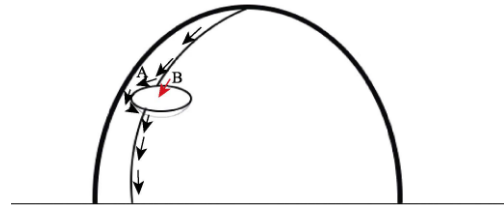


图 2 异常场区域航向图

Fig. 2 Course map of abnormal field area

## 4 仿真结果及分析

为了验证所提出算法的有效性, 本文采用国际地磁场模型 IGRF12 模拟实际地磁场, 并使用 MATLAB 仿真验证。

### 4.1 正常磁场下算法验证

首先不考虑磁场异常区域的干扰, 选取地磁场  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三分量作为导航参数, 将经纬度当作潜航器的坐标信息, 同时设定速度  $v$  为  $0.01^\circ/\text{s}$ 。由于地磁参量的量级较大, 为  $10^4$ , 因此设置  $\varepsilon$  为元素均为 20 的  $3 \times 1$  的列向量, 其比值的数量级为  $10^{-3}$ 。设置起始点分别为  $(4^\circ \text{ E}, 4^\circ \text{ N})$ ,  $(14^\circ \text{ E}, 6^\circ \text{ N})$ ,  $(10^\circ \text{ E}, 16^\circ \text{ N})$ ,  $(16^\circ \text{ E}, 18^\circ \text{ N})$ , 终点为  $(10^\circ \text{ E}, 10^\circ \text{ N})$ , 应用该算法得到仿真结果, 如图 3 所示。表 1 给出了在不同起点下, 潜航器到达目的地时, 对应的经纬度坐标结果。通过计算得到, 潜航器到达目的地时, 经纬度坐标实际值与预设值的最大偏差为 0.0226, 纬度 (直坐标实际值与预设值的最大偏差为 0.17), 该结果证明了式 (8) 给出的收敛条件有效。



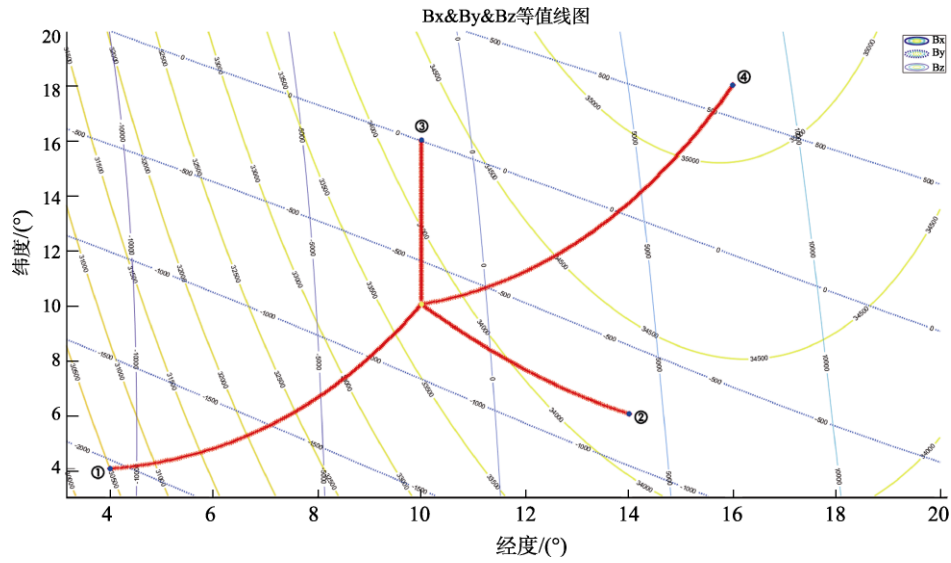


图 3 正常磁场下导航运动轨迹图

Fig. 3 Navigation track diagram under normal magnetic field

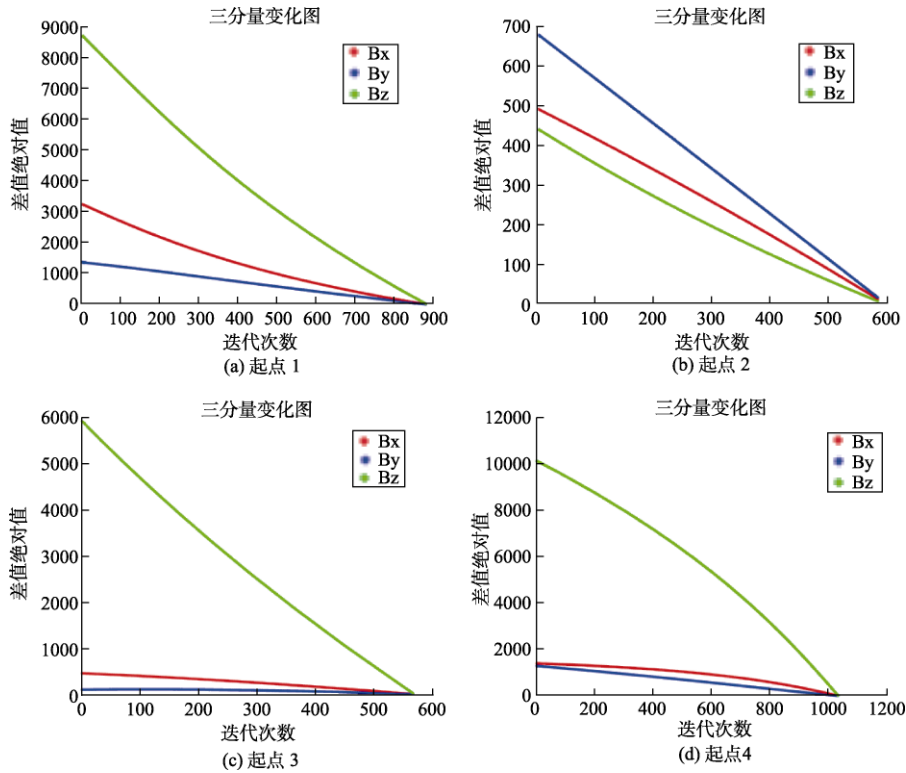


图 4 不同起点下的三分量变化图

Fig. 4 Three-component change graph at different starting points

从磁场分量变化图 4 来看, 在潜航器行进过程中, 磁场  $X, Y, Z$  三分量都在逐渐减小, 且磁场三分量的变化趋势可近似看作等比例变化, 即差值绝对值大的分量变化快, 差值绝对值小的分量变化慢。因此最小磁角导航策略也可近似看作

三分量等比收敛的过程。同时, 从图 4 可以看出, 三分量变化率在任意一点均可导, 磁场参量值过渡平滑。

#### 4.2 异常磁场干扰下算法验证

现考虑磁场异常区域的干扰, 同样选取地磁

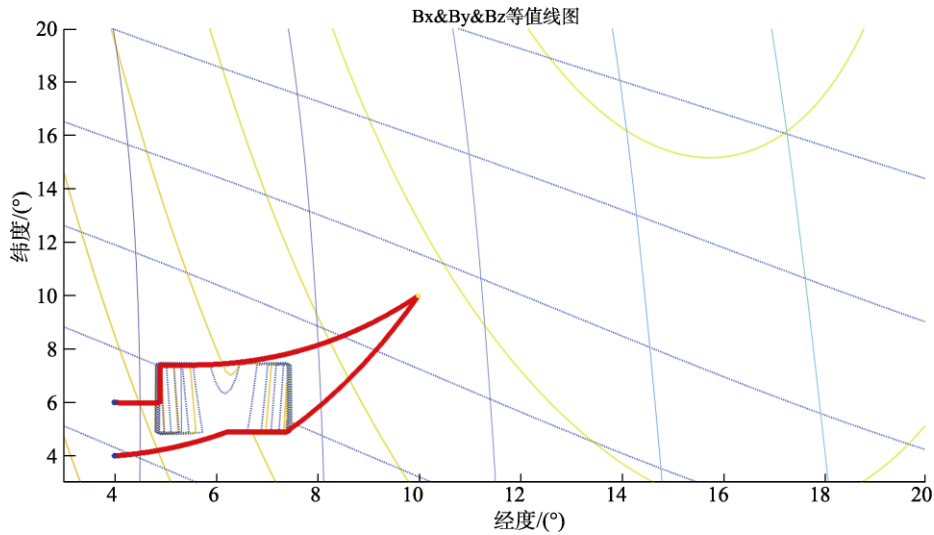


图 5 异常磁场下导航运动轨迹图

Fig. 5 Navigation trajectory diagram under abnormal magnetic field

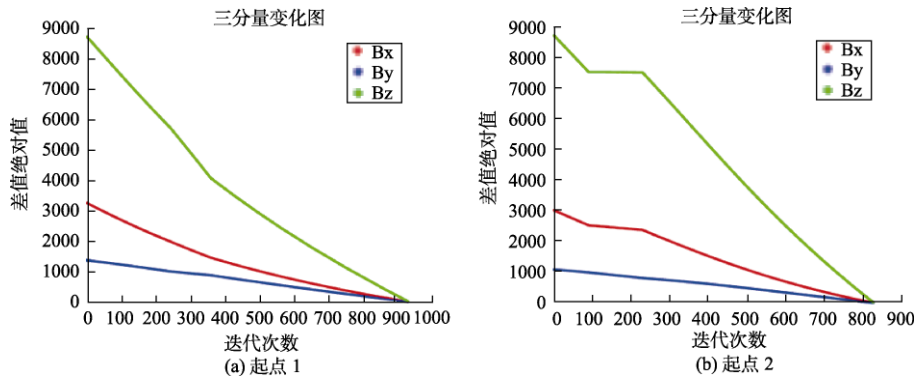


图 6 异常磁场下的三分量变化图

Fig. 6 Three-component change diagram under abnormal magnetic field

表 1 不同起点下导航结果

| 起始点 | 起点经度 /°E | 起点纬度 /°N | 终点经度 /°E | 终点纬度 /°N |
|-----|----------|----------|----------|----------|
| 1   | 4        | 4        | 9.9889   | 9.9774   |
| 2   | 14       | 6        | 10.0131  | 9.9821   |
| 3   | 10       | 16       | 10       | 10.1700  |
| 4   | 16       | 18       | 10.0078  | 10.0027  |

场  $X, Y, Z$  三分量作为导航参数, 将经纬度当作潜航器的坐标信息, 速度  $v$  与  $\varepsilon$  的设置同 4.1 节。设置多个起始点的经纬度坐标分别为  $(4^\circ \text{ E}, 4^\circ \text{ N})$ ,  $(6^\circ \text{ E}, 4^\circ \text{ N})$ , 目的地为  $(10^\circ \text{ E}, 10^\circ \text{ N})$ , 在原磁场经度  $(4.5 \sim 7.5)^\circ \text{ E}$ , 纬度  $(4.5 \sim 7.5)^\circ \text{ N}$  的矩形区域内叠加异常磁场, 通过最小磁角算法仿真得到结果如图 5 所示。仿真结果与图 2 分析结果一致, 当遇到磁场异常区域, 潜航器不会再沿原本

最优方向前进, 而选择沿叠加异常磁场后的最优路径继续朝目的地前进。

图 6 分别给出了异常磁场下的三分量变化图, 从图 6 可以看出, 与图 4 相比, 由于磁异常区域的存在, 磁场三分量的变化率在进入异常磁场时发生改变, 出现不可导点, 磁场分量值的过渡不再平滑, 这易于判断出潜航器是否遇到异常区域或干扰。而在潜航器经过磁异常区域后, 分量变化率恢复为原来的趋势, 即潜航器行进方向恢复为原来的趋势。

## 5 结论

本文针对地磁导航受先验磁图信息制约的问题, 提出了一种基于最小磁角的抗干扰仿生导航

算法。该方法将地磁参量  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  三分量作为导航参数, 利用当前位置磁场矢量与目的位置磁场矢量的关系, 得到下一个位置的最优估计值, 再通过磁角评价导航路径的优劣性, 从而选择最优路径。该方法具有较好的抗干扰能力, 能够避免潜航器陷入磁异常区域。最后通过仿真实验验证了最小磁角仿生导航策略的有效性。在实验中可以看出, 地磁三分量变化情况与三变量等比例变化类似, 后续可从地磁多参量等比例变化的角度研究路径优化问题。

### 参考文献

- [1] 踪华, 刘嫵, 杨业. 地磁导航技术研究现状综述[J]. 航天控制, 2018, 36(3): 93-98.
- [2] Chen Z, Zhang Q, Pan M, et al. A new geomagnetic matching navigation method based on multidimensional vector elements of Earth's magnetic field [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(8): 1289-1293.
- [3] Nyatega C O, Li S X. Study on geomagnetic-matching technology based on ICP algorithm [J]. International Journal of Science & Research, 2015, 4(4): 3258-3261.
- [4] Xiao J, Duan X, Qi X. An adaptive M-ICCP geomagnetic matching algorithm[J]. The Journal of Navigation, 2018, 71(3): 649-663.
- [5] 肖晶, 段修生, 齐晓慧. 一种基于概率数据关联的地磁匹配ICCP算法[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(2): 202-208.
- [6] 李镇, 王海涌, 靳宇航, 等. 一种弹道导弹捷联惯导/地磁组合导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(5): 636-641.
- [7] 蔡洪, 郭才发, 胡正东. 惯性/地磁组合导航算法[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(3): 333-337.
- [8] Wiltschko R, Thalau P, Gehring D, et al. Magnetoreception in birds: The effect of radio-frequency fields[J]. Journal of The Royal Society Interface, 2015, 12(103): 20141103.
- [9] Wiltschko R, Wiltschko W. Avian navigation: A combination of innate and learned mechanisms[J]. Advances in the Study of Behavior, 2015, 47(3): 229-310.
- [10] Wiltschko W, Wiltschko R. Homing pigeons as a model for avian navigation? [J]. Journal of Avian Biology, 2017, 48(1): 66-74.
- [11] Zhao Z, Hu T, Cui W, et al. Long-distance geomagnetic navigation: Imitations of animal migration based on a new assumption [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6715-6723.
- [12] Qi X, Ye D, Sun Y, et al. Simulations to true animals' long-distance geomagnetic navigation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(1): 1-8.
- [13] 李镇, 刘明雍, 刘坤, 等. 基于时序进化搜索策略的地磁仿生导航研究[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(6): 894-898.
- [14] 刘明雍, 刘坤, 李红, 等. 基于探索与开发权衡的地磁仿生导航搜索方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 38(7): 1644-1648.
- [15] 刘坤, 刘明雍, 杨盼盼, 等. 磁异常干扰下基于约束策略的仿生导航方法[J]. 西北工业大学学报, 2016, 42(9): 1952-1957.
- [16] 王琼, 周军. 一种平行接近的地磁梯度仿生导航方法[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(4): 611-617.
- [17] 安振昌. 地磁场水平梯度的计算与分析[J]. 地球科学进展, 1992(1): 39-43.

### 作者简介:



张晨(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无先验地磁导航技术。



张涛(1980-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为惯性/水声组合导航。

[引用格式] 赵新路, 李兵, 陈华, 等. 岛礁无人作战体系面临的挑战及关键技术分析[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 56-61.

# 岛礁无人作战体系面临的挑战及关键技术分析

赵新路<sup>1</sup>, 李兵<sup>1</sup>, 陈华<sup>1</sup>, 都业宏<sup>2</sup>, 郭继文<sup>1</sup>, 崔金雷<sup>1</sup>

(1. 四川航天系统工程研究所, 成都 610100; 2. 陆装驻哈尔滨地区航空军事代表室, 哈尔滨 150066)

**摘要:** 针对未来战争模式向智能化、多域化方向发展和装备体系对抗不断加剧的问题, 分析了岛礁无人作战体系对抗的特点, 凝练出岛礁无人作战体系面临的挑战, 主要包括作战理论与作战概念开发步伐缓慢、体系装备联合效能发挥水平有限、体系联合作战运用实现周期较长、无人作战体系集成验证评估经验薄弱。基于岛礁无人作战体系对抗的需求, 开展了面向岛礁无人作战关键技术研究, 分析了能力需求驱动技术、体系架构驱动技术、原型系统验证技术、集群化运用技术和无人自主系统评估技术等岛礁无人作战体系对抗中的应用。研究结果可为岛礁无人作战体系对抗提供参考。

**关键词:** 岛礁作战; 无人系统; 装备体系; 体系对抗; 体系架构; 原型系统

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)02-56-06

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.2.019

## Challenges of Island Unmanned Combat SoS and Research on Key Technologies

ZHAO Xinlu<sup>1</sup>, LI Bing<sup>1</sup>, CHEN Hua<sup>1</sup>, DU Yehong<sup>2</sup>, GUO Jiwen<sup>1</sup>, CUI Jinlei<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Sichuan Aerospace System Engineering, Chengdu 610100, China;

2. Military Representative Office of the Army Aviation Department in Harbin, Harbin 150066, China)

**Abstract:** Aiming at the intellectualization and multi-domain of the future war mode, the problem of equipment system combat is intensifying. The characteristics of island unmanned combat system are analyzed. It is refined that challenges, including the slow development of operational theory and concepts, and the weak overall planning capability of system and equipment, and the long realization cycle of joint operations system, and the weak experience in unmanned combat system integrated verification and evaluation. Based on the requirement of system-of-systems combat in island unmanned combat, the key technologies are researched. It is analyzed that capability requirement-driven technology, and the architecture-driven technology, and the verification technology of prototype system, and the cluster application technology, and the evaluation technology of unmanned system. The research results can provide a reference for island unmanned combat.

**Key words:** Island Combat; Unmanned System; Equipment System; System-of-System Combat; System Architecture; Prototype System

## 1 引言

近年来, 无人技术的蓬勃发展和无人装备的

广泛应用, 给信息化军队的内涵带来了很大变化, 无人化作战也已初露端倪, 并正成为未来战争的发展趋势。面向未来中小型无人值守岛礁作战,

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-12-20

基金项目: 装发“十三五”共用技术项目(41411050X0X)

无人系统作为作战力量的重要组成部分,与有人系统配合,可协同执行恶劣、危险和枯燥的作战任务,提高作战的实效性,体现出巨大的非对称优势,已经成为世界各军事强国军事博弈的重要力量。

岛礁作为我国领海的重要组成部分,因其环境恶劣、中小型岛礁常态化值守困难、前沿动态兵力的活动频度和烈度加剧等现实问题,对作战方法和装备体系提出了新的需求,未来岛礁作战正向着多域化、无人化、智能化、体系化的方向发展,这些新的形式对传统的体系对抗提出了重大挑战<sup>[1-2]</sup>。本文在岛礁无人作战体系对抗特点的基础上,提出了岛礁无人作战装备建设面临的挑战和关键技术需求,并对这些技术的解决手段展开研究。

## 2 岛礁无人作战体系对抗特点

### 2.1 作战环境多域化

随着计算机、通信、传感器等技术的迅速发展,现代战争状态已发展为陆、海、空、天、网等多个领域的全面对抗,而岛礁无人作战就是典型多域战(multi-domain operation)<sup>[3]</sup>中的作战样式,如图1所示。美国各军种基于面对的各种作战领域,在空地一体战<sup>[4]</sup>、空海一体战<sup>[5]</sup>、全球公域介入与机动联合<sup>[5]</sup>、联合作战介入理念<sup>[6]</sup>和跨域协同作战<sup>[7]</sup>的基础上提出了多域战<sup>[8]</sup>、分布式作战<sup>[9]</sup>和马赛克战<sup>[10]</sup>的概念,各军种在此基础上进行了细化。岛礁无人作战涉及陆、海、空、天、电、网等领域,打破了军种、领域之间的界限;最大限度地利用空中、海洋、岛礁、太空、网络、电磁频谱等领域联合作战的能力,以实现同步跨域火力和全域机动,夺取物理域、认知域和时间域方面的战场优势。按照多域战的作战理念,在岛礁无人作战体系对抗中,各作战域界限模糊并处于高度交叉状态,通过军中联合向作战要素融合、能力融合、体系融合转变,实现作战要素的“多位一体”融合<sup>[11]</sup>,使各军种能够进行多元化的作战任务,确保联合部队在各个作战域

拥有充分的机动自由并保持作战优势。

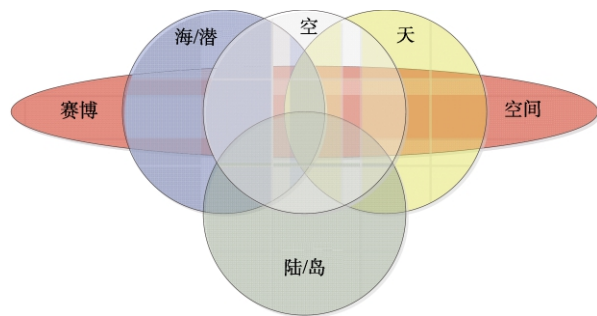


图1 岛礁多域作战示意图

Fig. 1 Sketch of island multi-domain operation

### 2.2 作战模式多样化

在岛礁无人作战中,无人机(UAV)、无人艇(USV)、无人巡飞武器(ULV)、无人潜航器(UUV)等无人作战装备的广泛运用,使信息化战争对抗形态呈现出新的特点和变化,主要特点为对抗重心转向智能较量、对抗模式趋于小型可控、对抗空间拓入全域多维等特点<sup>[12]</sup>,从而引起岛礁无人作战模式的多样化发展,主要呈现出有人-无人协同作战<sup>[13-14]</sup>、“无人先导”快速作战<sup>[15]</sup>、“饱和打击”持续作战<sup>[15-16]</sup>和“无人集群”分布式协同作战<sup>[15,17]</sup>等多种作战模式。智能化技术的引入,能够提升系统作战的弹性、多样性和自适应性,在保持武器系统自身作战能力的同时,有效提升作战系统对敌智能化杀伤的技术水平<sup>[18]</sup>。

### 2.3 作战系统智能化

人工智能、仿生、自主、机器学习、超级计算机等颠覆性前沿科技在武器装备体系的跨界发展,促进了武器装备向着智能化发展,使武器装备具备智能感知、智能决策、智能反馈的能力,从而缩短作战中的每一次的观察-判断-决策-行动(OODA)环路,比对手更迅速地发动一次有效进攻,从而赢得战场博弈的胜利,如图2所示。岛礁无人作战装备体系中的UAV、USV、UUV、UGV等无人平台从遥控式、自动化向接近完全自主性的智能化发展;同时,无人系统当前正处于由单体智能到群体智能的重要发展阶段<sup>[19]</sup>,群体智能以单机智能为基础,可实现多个无人系统的

集群作战运用为目标,将各独立发展的“烟囱式”无人系统高效集成构建群体智能服务体系结构,充分发挥群体智能的作战优势<sup>[20]</sup>,为实现未来岛礁无人作战智能化体系奠定基础。

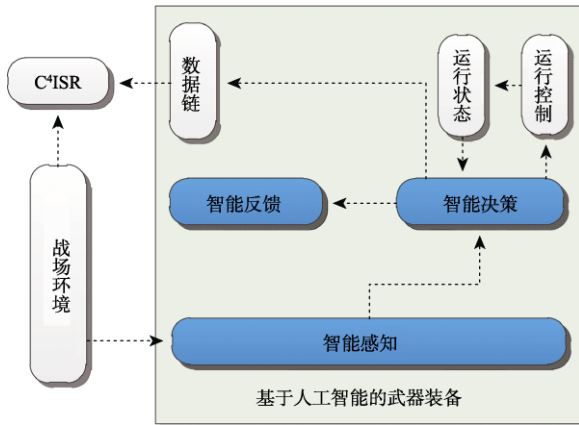


图 2 智能武器装备系统  
Fig. 2 Sketch of intelligent weapon system

### 2.4 作战装备体系化

未来岛礁无人作战的军事行动不再局限于单一军、兵种独立作战,或几个军、兵种共同作战,而是倾向于以信息技术为纽带,打破各军、兵种界限,实现陆海空天电一体化联合作战,如图 3 所示。目前各类无人装备在兼容性、模块化以及信息的互用性等方面仍急需提高;为推动无人系统标准化和模块化发展,需大力发展互联互通互操作、信息共享与分发技术、跨域协同等相关技术<sup>[21]</sup>。无人系统需要从作战应用的角度,统筹发展技术体系,充分考虑与有人作战系统的协同,发挥总体效能。



图 3 岛礁体系作战概念图<sup>[17]</sup>

Fig. 3 Conceptual diagram of island combat based on SoS

## 3 岛礁无人作战体系面临的挑战

### 3.1 作战理论与作战概念开发步伐缓慢

军事领域的装备研究与实践表明,仅从单个无人装备出发考虑无人装备的作战样式难以适应信息化联合作战的要求,近年来出现的无人机蜂群、忠诚僚机、巡飞弹狼群、无人装备母舰等新型作战样式<sup>[22]</sup>,说明了跨域多群联合作战是无人作战样式的必然发展趋势,并且具备广阔的应用前景。

岛礁无人作战体系的无人装备通过集群方式互联并与有人装备联合,形成连接各个作战领域的无人作战体系,不但能够有效提高现有体系作战能力,而且还将形成新质体系作战能力,例如集群饱和攻击能力、有人-无人协同打击能力和多平台分布作战能力。如何着眼履行岛礁无人作战使命任务需要,创新岛礁无人作战理论、开发岛礁无人作战概念,牵引装备体系和技术项目的快速发展,提升跨域多群联合体系作战能力,是岛礁无人作战体系装备建设需要解决的首要难题。作战概念的牵引作用如图 4 所示。

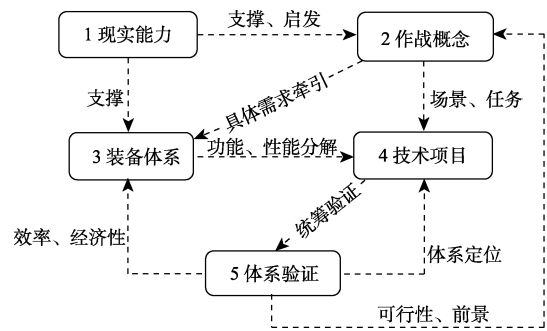


图 4 作战概念的牵引作用  
Fig. 4 Guide effect of operation concept in SoS

### 3.2 体系装备联合效能发挥水平有限

信息化战争重在体系对抗,无人装备建设弱在体系。无人系统从 20 世纪 80 年代开始相继开展了探索和研究,地面无人平台、空中无人平台、水下无人平台的关键技术取得了一些突破,并有多型无人装备列装,为无人装备建设积累了宝贵经验。但我国无人装备建设仍处于齐头并进、各

自为战的状态, 还未达到统一建设格局。在跨域联合上既存在接口、标准、协议不统一的硬连接问题, 也存在用途、流程、业务不协调的软连接问题, 如何站在无人装备体系化发展的层面, 着眼互联互通互操作的需要和无人技术的发展趋势, 加强顶层设计和统筹规划, 规范引导无人装备发展, 是目前需要着力解决的难题。

### 3.3 体系联合作战运用实现周期较长

随着我军新型无人装备的不断列装且占比越来越大, 将无人装备融入到联合作战体系、实现有人-无人装备的有机结合及创新无人装备的战术战法等问题已成为无人装备作战运用实现面临的现实难题。

未来信息化联合作战仍是体系与体系的对抗, 无人装备只有与其他各类武器配合使用、紧密协同, 融入联合作战体系, 才能充分发挥整体作战的威力; 无人装备要与有人系统相互取长补短、协同作战, 发挥有人-无人协同作战的优势, 实现“平台无人、系统有人”的协同作战模式; 智能化无人装备在未来作战装备体系中的占比将越来越大<sup>[23]</sup>, 将产生无人机“蜂群”、巡航弹“弹群”、地面“蚁群”、水中“鲸群”等集群自主协同作战和跨域集群联合作战等作战样式, 战术战法作战运用也需要随之创新发展。

### 3.4 无人作战体系集成验证评估经验薄弱

作战概念的验证方式除了设计阶段的计算机推演、手工推演和技术发展验证外, 体系的集成验证作为一种有效的验证手段发挥着重要作用, 如图5所示。随着无人装备的陆续列装, 我国对于无人装备的战技性能和作战效能试验评估有了部分经验, 但大都停留在单装战技性能验证和有限作战运用检验层面, 更多的还是依赖于有人装备的试验评估做法, 针对无人装备集成的试验评估方法流程、指标体系、支撑工具、评估环境等方面仍有很多难题需要解决, 发展无人装备应按照“设计装备就是设计战争”的指导思想, 大力开展无人作战体系集成验证评估课题的研究, 为无人装备在岛礁无人作战体系中发挥作用提供一种或多种可靠性高、实用性强的验证方法。

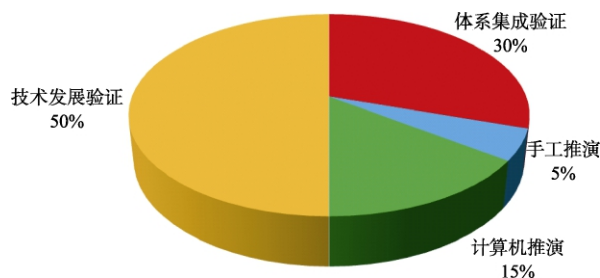


图5 作战概念的验证方式

Fig. 5 Verification methods of operation concept

## 4 岛礁无人作战体系关键技术

### 4.1 能力需求驱动技术

需求分析是岛礁无人作战体系首先执行和完成的一个必经阶段, 需要突破需求分析的重难点。需求分析要在适应性造就复杂性的科学认识基础上, 构建岛礁无人作战体系适应性机制和红蓝对抗机制, 是持续挖掘需求、分析需求和管理需求的关键。

美军采用“基于能力的评估”方法, 通过联合能力集成与开发系统进行联合能力需求分析, 提出当前体系能力存在的“短板”和未来体系发展的顶层架构, 完成联合作战概念与联合作战功能的对接<sup>[24-25]</sup>。

### 4.2 体系架构驱动技术

随着无人装备越来越多的列装运用, 采用开放系统设计原则和体系架构来增加无人装备体系完整性, 提高系统重用性和互操作性迫在眉睫。设计一种面向特定任务、基于任务想定的无人作战体系柔性分布式体系架构, 通过开放柔性的复合体系架构技术, 支持多无人集群作战系统的任务流程、装备配系、组织指控和兵力集成方案建模, 可为无人体系兵力编制设计和作战运用设计提供架构方案。

为提高军事信息系统的整体作战和支援保障能力, 推进军事转型, 外军在体系架构技术方面开展了深入研究, 颁布了多种体系架构框架, 在指导军队建设和能力生成的过程中发挥了重要作用。美军无人系统功能架构仍处于快速开发和演化过程中, 当前主要采用 DoDAF 作为需求架构指导无人体系设计, 对统筹规划和顶层设计全军

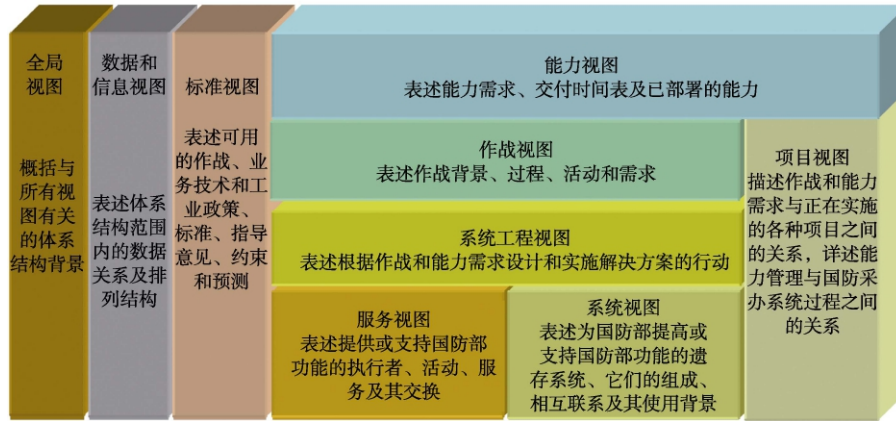
图 6 美军 DoDAF2.0 视图<sup>[26]</sup>

Fig. 6 DoDAF2.0 conceptual diagram of American army

的无人装备建设方面已经发挥了重要作用, DoDAF2.0 视图如图 6 所示。

### 4.3 原型系统验证技术

利用体系原型进行演示验证是作战概念向现实作战能力转换过程中至关重要的一环, 以体系作战需求为依据, 制定由实验部队负责实施的战役任务和作战计划, 在逻辑靶场(内场)基于 LVC 原型的仿真实验, 为在物理靶场(外场)进行实验战役拟定实验方案。对外场实验战役结果进行记录和回放, 分析实兵、实装、实战条件下存在的体系能力缺陷, 从而对体系的实战能力和改进途径进行综合评估, 通过对原型系统的验证来实现体系作战能力的提升。

### 4.4 集群化运用技术

随着战场环境的日益恶化、作战任务的多样性和复杂性及作战平台自主能力的不断提高, 未来作战体系的作战样式已逐步从单平台作战向多平台智能集群自主协同作战的方向发展。将传统昂贵的大型有人作战平台分解为数量更多、尺寸更小、成本更低的分布式无人作战平台, 无人作战平台通过能力互补、协同作战, 提升整体作战效能是未来发展的必然趋势。

美军在各军种无人装备型谱化发展的基础上, 注重集群化作战运用的研究和演示验证, 近年来开展了多个无人集群作战运用演示验证项目, 见表 1。

### 4.5 无人自主系统评估技术

无人作战体系的效能、体系贡献率等在全流

表 1 美军集群化典型项目

Table 1 Typical swarm project of American army

| 序号 | 典型项目        | 主要技术                                       |
|----|-------------|--|
| 1  | 跨域对海监视与瞄准系统 | 构建水下、海上、空中等多域的、分布式对海监视瞄准技术架构               |
| 2  | 体系集成技术和试验   | 为无人综合集成可互换的组件和平台提供统一的标准与工具                 |
| 3  | 拒止环境协同作战模式  | 协同作战自主化、航空平台自主化、监控界面、适用分布式系统的开放式结构         |
| 4  | 进攻性蜂群技术     | 完成蜂群技术开放架构设计, 通过虚拟和物理试验进行专业测试盒整体评估         |
| 5  | 班组 X        | 多域作战环境(物理、电磁和网络)中的共享态势感知技术                 |
| 6  | 忠诚僚机        | 基于人工智能技术, 增强在对抗和拒止环境下的作战行动和自主能力            |
| 7  | 马赛克战        | 开发通信、网络和软件集成技术, 解决大量低成本传感器、指控节点和武器平台快速集成问题 |

程及各子环节中发挥的作用在作战体系中尤为重要, 合理完备的评估体系能够客观反映无人平台发挥的效能, 从而指导体系全流程作战的改进。美军把体系效能、敏捷性、适应性等体系指标作为无人自主评估的重要参考, 把具备基于 OODA 闭环的 LVC 集成试验环境作为评估环境, 并把多域战背景下的无人自主体系联合试验列为该项评估重点攻克的一大难题。

## 5 结束语

岛礁无人作战是未来智能无人作战发展的重要组成部分, 将颠覆未来战争的作战形态, 岛礁



无人作战技术研究也将在未来很长一段时间内成为无人作战领域研究的热点。目前,美、欧等西方发达国家在无人作战领域取得了较大进展,多领域无人系统项目正在开展研究。但是,关于如何进一步实现岛礁无人作战应用的诸多问题尚待深入研究。比如 UAV/USV/UUV/UGV 协同多载体、异构传感器跨介质信息融合问题还缺乏较为成熟的解决方案,根据军事需求和作战任务合理安排无人作战系统的类型和数量也尚无相关标准。另外,缺乏科学有效的方法用于判定岛礁无人作战性能指标的合理性,在研究中对原型系统构建和集成试验验证存在较大难度,对岛礁无人作战集群化运用作战效能的评估也亟待开展。针对这些问题,结合国内外先进的技术,加强科学研究,对未来岛礁无人作战具有重要的指导意义,为未来实际战场的的应用提供参考。

### 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] 张灏龙, 谢平, 赵院, 等. 体系对抗仿真面临的挑战与关键技术研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(5): 1-5.
- [3] 潘乐天. 美军“多域战”的实质及启示[J]. 科学导报, 2017, 35(21):125-130.
- [4] 夏宇轩, 黄高明, 黎铁冰. 美“空海一体战”发展变化简析[J]. 海军工程大学学报, 2016, 13(2): 56-59.
- [5] 任雅广. 空海一体战的演变[J]. 航空电子技术, 2016, 47(2): 1-4.
- [6] Department of Defense, Joint Operational Access Concept[R]. 17 January 2012.
- [7] Joint Chiefs of Staff, Capstone Concept For Joint Operations: Joint Force 2020[R]. 10 September 2012.
- [8] GEN David G. Perkins, Multi-Domain Battle, Driving Change to Win in the Future[R]. July-August 2017.
- [9] 吴勤. 美军分布式作战概念发展分析[J]. 军事文摘, 2016(7): 44-47.
- [10] 李磊, 蒋琪, 王彤. 美国马赛克战分析[J]. 战术导弹技术, 2019 (6): 1-11.
- [11] 张剑龙. 美军多域战研究及对我军直升机装备发展的启示[J]. 直升机技术, 2019 (2): 1-5.
- [12] 槐泽鹏, 龚旻, 陈克. 未来战争形态发展研究[J]. 战术导弹技术, 2018 (1): 1-8.
- [13] 杨帆, 董正宏. 有人/无人平台协同技术与行动模式研究[J]. 国防科技, 2018, 39(4): 52-57.
- [14] 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): 39-47.
- [15] 赵先刚. 无人作战模式及对未来战争的影响[J]. 空军军事学术, 2016(6): 30-32.
- [16] 张丰. 无人艇群自主协同技术研究[C]. 第六届中国指挥控制大会, 2018: 447-450.
- [17] 刘鸿福, 苏炯铭, 付雅晶. 无人系统集群及其对抗技术研究综述[J]. 飞航导弹, 2018 (11): 35-40.
- [18] 关世义. 导弹智能化技术初探[J]. 战术导弹技术, 2004 (4):1-7.
- [19] 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.
- [20] 李江, 李兵, 程远林, 等. 面向无人作战体系的智能化指控技术[C]. 第六届中国指挥控制大会论文集, 2018: 443-446.
- [21] 张宏军, 韦正现, 鞠鸿彬, 等. 武器装备体系原理与工程方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [22] 程运江, 张程, 赵日, 等. 人工智能的发展及其在未来战争中的应用思考[J]. 航空兵器, 2019, 26(1): 58-62.
- [23] 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.
- [24] 郭齐胜, 樊延平, 穆歌, 等. 装备需求论证理论与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [25] 初军田, 李立伟, 李强. 关于建立信息系统联合需求生成机制的思考[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(11): 1-6.
- [26] 常慧媛, 庞海龙, 王文豪, 等. DoDAF 2.0 能力视图的网络信息体系能力结构分析方法[C]. 第七届中国指挥控制大会论文集, 2019: 681-685.

### 作者简介:



赵新路 (1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为武器装备体系总体设计、无人作战需求及体系架构设计等。



李兵 (1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为武器装备体系总体设计、指控系统总体设计等。



陈华 (1988-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为武器装备体系总体设计。



都业宏 (1984-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为武器装备体系总体设计、人工智能技术发展。



郭继文 (1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为武器装备体系总体设计。



崔金雷 (1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为装备体系总体设计。

[引用格式] 张旭东, 孙智伟, 吴利荣, 等. 未来有人机/无人机智能协同作战顶层概念思考[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 62-68.

# 未来有人机/无人机智能协同作战顶层概念思考

张旭东<sup>1</sup>, 孙智伟<sup>2</sup>, 吴利荣<sup>1</sup>, 郝明月<sup>3</sup>, 尹航<sup>1</sup>

(1. 中国人民解放军96236部队, 北京100085; 2. 西北工业大学无人机所, 西安710072;  
3. 海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京100074)

**摘要:** 无人机已成为现代与未来战争中不可或缺的重要力量, 正在逐步改变作战样式, 并可能颠覆战争形态。有人机/无人机智能协同作战使无人机更好地融入作战体系, 不仅能充分发挥无人机的作战能力, 更可进一步实现体系效能增强的作用。从有人机/无人机智能协同作战的概念和军事需求出发, 分析总结美军智能协同作战的发展现状和特点, 针对未来有人机/无人机智能协同作战顶层作战概念, 从核心思想、作战目的、作战性质、实施方案、行动准则、能力需求等方面进行思考, 进而推进以顶层作战概念牵引协同作战的发展。

**关键词:** 无人机; 协同作战; 作战概念; 行动准则; 能力需求

中图分类号: V279 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)02-62-07

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.2.020

## Research on the Fundamental and Grand Concept of Intelligent Cooperative Combat of Manned/Unmanned Aircraft

ZHANG Xudong<sup>1</sup>, SUN Zhiwei<sup>2</sup>, WU Lirong<sup>1</sup>, HAO Mingyue<sup>3</sup>, YIN Hang<sup>1</sup>

(1. 96236 Unit of the People's Liberation Army of China, Beijing 100085, China; 2. Research Institute of Unmanned Aerial Vehicle, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
3. Hiwing Aviation General Equipment Co., Ltd, Beijing 100074, China)

**Abstract:** UAV has become an indispensable force in modern and future wars, which is changing the combat style and the war form gradually. Manned/Unmanned aircraft intelligent cooperative combat can make UAV integrating into the combat system efficiently, which include the improvement of the UAV capability and the enhancement function of combat effectiveness. Basing on the concept and military requirements of intelligent cooperative combat of Manned/Unmanned aircraft, this paper analyzes and summarizes the developing process and characteristics of the U.S. Army intelligent cooperative combat. Then, the top-level concept of intelligent cooperative combat of Manned/Unmanned aircraft is proposed, which is promoted from the aspects of core idea, combat purpose, combat properties, implementation scheme, action rules, capability requirements. It could make contribution to lead the development direction of cooperative combat in the future.

**Key words:** UAV; Cooperative Combat; Combat Concept; Action Rules; Capability Requirements

## 1 引言

无人机是人工智能、信息等当前热点技术的天然载体。随着这些技术的不断发展, 无人机智能化不断提高、自主性不断增强、信息获取能力不断提升, 无人机作战运用从单机作战向集群作战、协同作战演进, 进而推动无人机的作战运用模式发生变革, 无人机成为新时代背景下联合作战不可或缺的重要力量。

有人机/无人机智能协同作战, 首先是要实现有人装备和无人装备的互联互通, 只有在此基础上才能实现互享和互操作, 进而实现协同作战; 其次, 无人机的智能自主等级也是影响协同作战运用方式的关键因素, 随着无人机智能自主性的提升, 其从信息交互的简单运用发展成有人装备伙伴, 人的负担减轻, 作战样式更加灵活多变; 最后, 先进的作战管理能够对智能协同作战起到促进作用, 帮助人认知战场态势、辅助决策、管理无人资源, 从而将有人装备和无人机形成有机整体, 协同作战。因此, 有人机/无人机智能协同作战的内涵是有人装备与无人机凭借先进的体系架构, 在网络通信的基础上, 依托智能自主能力的发展, 在先进作战管理的支持下, 有人装备和无人机互联互通互享互操作, 密切协同执行任务的作战模式。协同作战将充分发挥人的决策优势与无人机本身优势的互补作用, 丰富有人机任务域、提高有人机生存力、提升作战效能, 结合产生新的作战优势<sup>[1-9]</sup>。由此, 它能促进无人机融入联合作战体系, 发挥无人机效能; 实现装备结构优化和体系增效, 发挥不同类型装备优势互补作用; 适应复杂战场环境, 提高装备生存能力; 推动无人机技术持续发展, 顺应世界军事发展规律; 解决各兵种对无人机协同作战现实问题, 提高作战敏捷性。有人机/无人机智能协同作战, 牵引无人机与新技术深度融合发展进而催生新质作战能力, 促进装备形态快速成型, 使无人机充分满足未来高强度高烈度战场环境下的作战需要, 更好地融入作战体系。

## 2 美军有人机/无人机智能协同作战现状及特点

### 2.1 重视顶层规划, 不断发布新概念和技术攻关方向

在无人机协同及有人机/无人机智能协同作战领域, 美国毫无疑问地走在了世界的前列, 多版无人系统路线图都明确了无人机与有人装备进行协同作战的发展方向<sup>[10-11]</sup>。美国《2011—2036年无人系统综合路线图》中明确把有人机/无人机编队飞行技术列入未来重点发展技术中, 《2017—2042年无人系统综合路线图》对互操作性、人机协作等协同技术进行了深入的探讨和规划, 协同作战的能力等级逐渐提升, 牵引着技术更加向前发展。在美国空军、DARPA等机构的支持下, 美国开展了多项无人机协同项目<sup>[12]</sup>, 其中典型项目包括有人/无人系统技术项目(AMUST)、有人/无人协同编队控制、战术管理系统项目(TBM)、无人机控制最佳角色分配管理控制系统(SCORCH)、“忠诚僚机”项目和拒止环境中协同作战(CODE)项目、“空中发射效能系统”(Air-Launched Effects System)、小型空射诱饵无人机等众多研究, 有力地推动了未来空战作战模式的发展。2015年, 美空军正式向工业部门发布“忠诚僚机”征询书, 标志着“忠诚僚机”研究正式启动<sup>[13-14]</sup>。

### 2.2 重视基础标准研究, 进而使目标能力和路径更为清晰

美军重视基础标准研究, 由美海军制定的协同控制等级定义, 规定了有人平台控制无人机的5级标准, 由低到高, 能力逐渐增强。其中, 级别1为有人机通过无人机控制站间接获取无人机传感器数据; 级别2为有人机直接从无人机获取传感器数据, 无需其他平台中转或处理, 可减少延迟和数据丢失; 级别3为有人机可对无人载荷和传感器进行控制与动态任务分配; 级别4为有人机具备除起降外所有无人机控制能力; 级别5为有人机具备从无人机起飞到降落的全功能控

制能力。随后,该标准被 STANAG4586 标准沿用,并推广至北约国家<sup>[15-18]</sup>。通过基础标准研究,美军清晰描述了有人机与无人机之间从有人机与地面站的信息交互,发展到有人机对无人机的全功能控制,隐含着协同作战样式的深入发展,进而明晰有人机/无人机协同作战技术的发展路径和阶段,对协同作战技术迈向实战起到促进作用。

当然,控制等级定义不等于协同等级,随着人工智能的快速发展,在有人机实现了对无人机的全功能控制后,无人机应该能够智能自主地主动与有人机进行更深入的智能协同作战。

### 2.3 发挥技术优势,通过集成验证推动协同作战技术不断发展

美空军与洛马公司“臭鼬工厂”等合作,开展“忠诚僚机”技术验证,项目名称为“海弗-空袭者”(HAVE Raider),已经完成两个阶段的验证试飞:第一阶段聚焦飞行控制,第二阶段聚焦任务能力<sup>[19]</sup>。DARPA 在 2014 年提出了分布式作战管理项目(DBM),可以协助飞行员在通信受限的反介入环境下,依靠控制算法和辅助决策,有效地管理无人机等作战资源,保持继续执行任务的能力。在演示验证中,该系统表现良好,当通信中断后,任务还可以继续按计划进行,验证并推动了整个项目的发展<sup>[20]</sup>。美军开展了跨 5 个军种的“战术作战管理系统(TBM)”项目,用以采用人工智能技术的软件系统,协调有无人空战编组内的跨平台协同关系,提高强对抗环境中的可操作性。DARPA 与洛马公司合作的“体系集成技术与试验项目”(SoSITE),通过飞行试验,验证了有无人系统进行快速无缝集成的能力。2020 年 12 月,美国空军的 F-22、F-35 和空军研究实验室的 XQ-58A 无人机在亚利桑那州的尤马试验场进行了飞行试验,验证了使用“Gateway-ONE”技术将无人机作为通信节点,使 F-22、F-35 和无人机进行数据融合与协同作战。

美军进行的一系列演示验证项目,聚焦攻克关键技术。既对技术进行了验证又通过实际验证暴露问题,并从实飞中探索新的作战运用模式,进而牵引有人机/无人机协同作战发展,并在实际

演示验证过程中不断地明确军事需求。

## 3 有人机/无人机智能协同作战顶层作战概念

### 3.1 概念提出

为应对潜在的威胁,顺应无人机发展趋势,加快无人机融入作战体系,促进联合作战发展,本文从无人机核心作战能力需求出发,提出有人机/无人机智能协同作战顶层作战概念。作战概念中“有人”泛指有人装备,包括有人机、舰船、装甲车辆等有人装备。

有人机/无人机智能协同作战顶层作战概念重点形成概念牵引,主要提出未来无人机协同作战的核心思想、作战目的、作战性质、实施方案、行动准则、能力需求等,不涉及具体作战场景,用以牵引有人机/无人机智能协同作战的发展方向。

### 3.2 核心思想

以作战任务与典型作战场景为牵引,采用新型体系架构设计和集成方法论,在现有作战体系基础上,将无人机与有人装备高效动态组合生成新质作战力量,达到体系重构和增能。有人机/无人机智能协同作战应具备可重构能力、自适应能力和可扩充能力,加快形成态势感知多元化、决策多极化、攻击多样化、战法多变、抗毁伤的新质作战能力,提高作战效能和任务完成率,为后续形成海、陆、空、天、网、电的跨域协同,分布式、开放式、可动态协作和高度自主的可组合联合作战体系提供支撑。其中,态势感知多元化充分利用无人系统带来的作战单元数量增加,分别搭载不同类型的传感器进行侦察感知数据的多元化融合,利用多种探测手段弥补单一探测手段的不足和反制手段,提高态势感知精度和速度;决策多极化利用有/无人协同后,将指控关系向前沿下沉,面向多种任务形成杀伤网络,提高战场前沿的感知、指控、决策效率,提高战场响应敏捷性;攻击多样化和战法多变,即利用无人系统带来的数量冗余和作战能力冗余,临机组合,构

建多重杀伤链路或杀伤网络, 形成多种打击手段并存、多种战术手段可选的作战能力; 通过有人/无人系统协同作战, 基于能力联合形成的新质杀伤网络, 将形成极具弹性的作战体系, 针对单一目标时, 一条杀伤链路被破坏, 还有多种杀伤链路构建手段, 针对多目标和随机出现目标, 具备多种应对手段。

### 3.3 作战目的

现代战争的组织 and 规划必然是跨域、跨军兵种的联合作战, 我们必须认识到分布式、协同、多域作战能力的重要性。未来战争需要利用分布式、协同作战概念, 采用异构式作战平台, 协同执行作战任务, 做到“先敌发现、先敌打击”, 分散单杀伤链、重要节点易损风险, 使全系统具备自适应抗毁伤能力, 在高烈度、强对抗的战场环境下, 完成作战意图, 以期实现“发现即摧毁”的作战目标。

从实现层面来讲, 其作战目的就是充分利用现有有人机/无人机资源, 以协同相关技术为支撑, 充分发挥协同作战思想, 一方面增加作战单元的能力冗余, 加快并构建多重 OODA 作战链条, 提高作战体系架构的弹性, 提高任务效率和完成率; 另一方面以低成本无人系统单元前出, 有人作战单元后撤, 形成对高价值作战单元和有人作战单元的掩护, 降低战场损失, 保持优势作战力量, 同时消耗对手作战资源; 最后, 通过有人/无人协同作战形成的战场复杂性、对敌人的多重杀伤特性, 增加对手的态势感知难度, 延迟决策速度, 使对手疲于应对无法形成有利决策。

### 3.4 作战性质

有人机/无人机智能协同作战尚处于常规作战范畴, 战争性质判断的重要前提之一是相互保持核威慑, 而不突破核界限。该作战概念形态主要应用于依靠常规武器作战的常规战争, 依靠智能协同相关技术改变常规战争的传统形态, 达到作战理念和技术双重优势的目的。

从作战规模和范围上看, 该概念适用于多种作战规模, 既可用于两个国家间的全面战争, 也可以用于若干个类型的战斗, 如制空作战中的护

航、压制防空、制空突袭、肃清空域, 制信息作战中的信息攻击、电子攻击, 制海作战中的压制海上交通线、突击舰船等。从安全形势、武器装备和技术发展进行分析, 首先, 目前的国际安全形势随着各大国的国防战略调整, 重新回到“大国竞争”态势下, 各军事强国均不遗余力地在推进有人/无人协同作战研究, 但均是依靠常规力量的体系化联合, 并不希望突破核界限; 其次, 从作战规模来看, 都侧重于有限规模和局部战争, 希望控制有限的作战力量快速达成既定目标; 最后, 从作战意图分析, 各国发展有人/无人协同作战, 均希望形成体系上和战术上的非对称优势。

### 3.5 实施方案

体系架构层面: 采用面向逻辑单元设计和集成的体系方法, 构建支持智能可重构多重作战杀伤链的分布式互联机制<sup>[21-23]</sup>。该体系结构是基于系统结构、行为、约束和事件的抽象方法, 以构建灵活的框架实现处理接口、多尺度交互和动态的复杂性, 并支持跨多个尺度和抽象领域的设计。不仅如此, 整个架构还能支持多个抽象级别的组合, 并能够通过现有的或新开发的数学技术, 来明晰内部行为、属性与系统属性的关系, 促进系统的快速组合。

作战任务层面: 结合有人装备和无人机各自优势, 实现战术多样。在高价值有人装备受到威胁难以完成作战任务情况下, 无人机起到角色替补、补差补位、掩护犄角作用, 确保作战任务顺利完成<sup>[24-28]</sup>。有人/无人系统作战指挥中, 决策者需在作战组织的底层或跨多个作战组织实现任务的快速理解任务规划及动态重新分配, 通过分布式方法驱动任务中的资源实时分配, 以实现杀伤链构成单元动态选择并对各单元角色和责任进行分配<sup>[29]</sup>。

平台功能层面: 研制可配合海、陆、空、天、网、电多域作战的适应多重自适应杀伤链体系的智能无人机装备, 具备高效费比、任务载荷模块化、可态势共享、互操作能力强的特征, 达到提高作战效能的目的<sup>[30-35]</sup>。平台的机体结构与航电接口需进行模块化设计、具备即插即用能力; 平

台需具备随机入网、通信中继、与现有平台互联互通能力,实现不同任务模块下的有/无人协同、无人/无人协同;平台具备搭载电视、红外成像、SAR、激光雷达、诱饵、中继通信、对地打击弹药等载荷的能力;探测型平台具备与有人机形成一发多收协同探测能力。

系统架构层面:建立开放式系统架构<sup>[36]</sup>,考虑系统功能、服务及组件之间依存关系,通过设计新型系统开发模式和组件集成模式,提出具有态势感知、信息通信、自主决策等具备体系增强功能的微型单元系统架构,充分增加功能的扩展性和可维护性,解决组件的高效费比与互通性。该系统架构需针对多任务、模块化、可配置的应用需求,具有网络化互联的构型,能够支持时间触发、事件触发的实时性、灵活传输网络互联技术,形成适于无人机电子系统应用的多种速率互联架构,进而实现电子系统的综合化、统一化。

### 3.6 行动准则

有人机/无人机智能协同作战的行动准则具有较好的普适性,可广泛应用于各类能够使用无人机力量的作战场景。具体行动准则如下:

(1)随着时间、空间、作战环境的变化,任务计划和管理能够高效动态地灵活变化,依据战场态势快速进行兵力与能力的管理、组织与调度,作战任务的调整与重规划;

(2)综合使用联合作战能力,最大限度地发挥各种能力的互补效果而不仅是简单地叠加,各种作战能力可以随时按需在指定的时间和空间上通过数据链路系统联合形成杀伤链和效应链,并随着时间和战场态势的变化随机调整变化,各种作战能力尽其所能;

(3)通过先进作战管理手段,利用高性能计算与智能辅助决策手段,降低由于大量无人系统加入到现有体系中带来的系统复杂性和组织难度;

(4)优先考虑整个协同体系的体系能力,关注整个作战的任务完成率,把单体放在最低级别进行考虑;

(5)只要情况允许,优先进行协同作战提高

我方作战效能和生存能力;

(6)预先设定决策权限,按照既定的规则 and 标准进行决策权限的分配和转移,确保作战的行动自由和行动效率,避免出现多个决策节点争夺或指挥同一个作战能力情况;

(7)保持作战和组织的灵活性,各节点按作战的能力需求根据作战效能进行定制、灵巧组合;

(8)信息传输按需动态可变,基于参与度规则或安全性原则按需进行信息的筛选与传递,既要降低数据链路系统压力,又能够实现信息的精准传递,在态势感知的基础上能够态势融合和情报共享;

(9)面对高威胁任务,优先选用高效费比或高生存力无人机遂行任务。

### 3.7 能力需求

随着联合作战及相应技术的深入发展,有人机/无人机智能协同作战能力需求主要反映在七个方面:

一是态势感知能力。要能“察”,通过陆海空天网电等装备体系化联合与融合,掌握并同步交互共享情报信息,这是掌握战场主动权的关键。

二是自组通信能力。要能“连”,通过构建高效抗扰动态自组织网络,实现有人/无人机的互联互通。

三是高效指控能力。要能“控”,通过有人机/无人机的互操作,实现有人装备对无人机的高效指控,增强时敏性。

四是智能自主能力。要能“智”,通过提高无人机的智能自主,降低人的负荷,提高无人机在高烈度、强对抗环境下的作战能力。

五是电子对抗能力。既要能“抗”,也要能“扰”,无人机既要有效应对复杂电磁干扰诱骗能力,也要能通过分布式协同等方式,在恰当时机干扰或压制对手,形成攻击优势。

六是目标指示能力。要能“跟”,通过本机或他机,快速形成目标指示信息,为火力打击提供支撑。

七是协同制导能力。要能“中”,通过本机或协同制导,丰富作战样式,使发射的导弹能够命

中目标取得攻击效果。

## 4 结束语

美军重视作战概念开发, 因此多域作战、分布式作战、马赛克作战、忠诚僚机、无人机蜂群等概念层出不穷, 这体现了美军的作战构想和作战愿景。本文提出了有人机/无人机智能协同作战的顶层作战概念: 一是用于牵引具体的有人机/无人机智能协同作战概念, 比如有人机与无人机协同执行制空作战、对面打击、联合侦察, 舰船与无人机执行打击等任务, 进而映射到具体装备形态的协同作战; 二是明晰方向, 通过顶层作战概念推动关键技术发展, 促成协同作战开放式通用系统架构技术、协同态势感知技术、协同作战管理与控制技术、通信技术等共用技术向前推进。有人机/无人机智能协同作战虽然还有很长的发展过程, 但已经不是未来的作战概念, 已经应用于现在的军事斗争, 协同能力与作战效能提升迅速, 对其进行研究和推动具有十分重要的军事意义。

## 参 考 文 献

- [1] 李文, 陈建. 有人机/无人机混合编队协同作战研究综述与展望[J]. 航天控制, 2017, 35(3): 90-96.
- [2] 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(3): 59-66.
- [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]. 导航与控制, 2019, 18(1): 10-18.
- [4] Zhen, Z Y, Chen Y, Wen L D. An intelligent cooperative mission planning scheme of UAV swarm in uncertain dynamic environment[J]. Aerospace Science and Technology, 2020: 100.
- [5] Zhen Z Y, Zhu P, Xue Y X, et al. Distributed intelligent self-organized mission planning of multi-UAV for dynamic targets cooperative search-attack[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(12): 2706-2716.
- [6] Li A, Wu Q Q, Zhang R. UAV-Enabled cooperative jamming for improving secrecy of ground wiretap channel[J]. IEEE, Wireless Communications Letters, 2019, 8(1): 181-183.
- [7] Huang H Q, Zhuo T. Multi-model cooperative task assignment and path planning of multiple UCAV formation[J]. Multimedia Tools and Application, 2017: 1-22.
- [8] Zhao Y Y, Wang X K, Wang C, et al. Systemic design of distributed multi-UAV cooperative decision-making for multi-target tracking [J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2019, 33(1-2): 132-158.
- [9] 丁达理, 谢磊, 王渊. 有人机/无人机协同作战运用及对战争形态影响[J]. 无人系统技术, 2020(4): 1-9.
- [10] 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, 2018(1): 39-47.
- [11] 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.
- [12] 李磊. 国外典型有人机/无人机协同作战项目发展分析[J]. 无人系统技术, 2020(4): 83-90.
- [13] 申超, 李磊, 吴洋, 等. 美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究[J]. 战术导弹技术, 2018(1): 16-21.
- [14] 宋琛, 张蓬蓬. 有人/无人协同制空作战的特点及影响[J]. 飞航导弹, 2019(12): 78-81.
- [15] 顾海燕, 徐弛. 有人/无人机组队协同作战技术[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(6): 33-41.
- [16] 刘丽君, 涂天佳. 舰载有人直升机/无人机典型协同作战样式分析[J]. 电子技术与软件工程, 2018(13): 96-98.
- [17] Sarkesain J F, O'Brien T W. A framework for achieving dynamic cyber effects through distributed cyber command and control/battle management (C-2/BM)[J]. Modeling and Simulation Support for Systems of Systems Engineering Applications, 2015, 531-564.
- [18] Lummus R. Mission battle management system fighter engagement manager concept[C]. Proceedings of Symposium and Exposition Conference on AIAA International Air and Space, New York, July 14-17, 2003.
- [19] 贾高伟, 侯中喜. 美军有/无人机协同作战研究现状与分析[J]. 国防科技, 2017, 38(6): 57-59.
- [20] 王彤, 李磊, 蒋琪. 美国 DBM 项目推进分布式指挥控制能力发展[J]. 战术导弹技术, 2019(1): 25-32.
- [21] Cheater J C. Accelerating the kill chain via future unmanned aircraft[R]. Air War College: Center for Strategy and Technology, April 2007.
- [22] Hahn A, Thomas R K, Lozano I, et al. A multi-layered and kill-chain based security analysis framework for cyber-physical systems[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2015, 11: 39-50.
- [23] Bloye B A. Optimizing the air-to-ground kill chain for time-sensitive targets[D]. Monterey, USA: Naval Postgraduate School, 2009.
- [24] Abatti J M. Small power: The role of micro and small UAVs in the future[R]. Alabama, USA: Air War College, November 2005.
- [25] Cook K L B. The silent force multiplier: The history and role of UAVs in warfare[C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, April 2007.
- [26] Zhang X N, Luo P C, Hu X W. Defense success rate evaluation for UAV swarm defense system[C]. Proceedings of The 2nd International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence, March 2018.
- [27] Tkachenko O Y. System of electronic warfare with UAVs[C]. IEEE 3rd International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), October

- 2015.
- [28] Cevik P, Kocaman I, Akgul A S, et al. The small and silent force multiplier: A swarm UAV-electronic attack[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, 70(1-4): 595-608.
- [29] 吴立珍, 牛轶峰, 王菖, 等. 多无人机监督控制系统设计与实践[J]. *无人系统技术*, 2020(4): 42-52.
- [30] Jang J S, Tomlin C. Design and implementation of a low cost, hierarchical and modular avionics architecture for the DragonFly UAVs[C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Monterey, California, August 2002.
- [31] Howard C E. UAV command, control & communications[J]. *Military & Aerospace Electronics*, 2013, 24(7): 10.
- [32] Zhong Y, Yao P Y, Sun Y, et al. Research on command and control of MAV/UAV engagement from the cooperative perspective [C]. *2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence*, Hong Kong, June 24-26 2016.
- [33] Rodrigues A V, Carapau R S, Marques M M, et al. Unmanned systems interoperability in military maritime operations: MAV Link to STANAG 4586 bridge[C]. *IEEE, OCEANS, Aberdeen*, June 19-22, 2017.
- [34] Chen B W, Rho S. Autonomous tactical deployment of the UAV array using self-organizing swarm intelligence[J]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2020, 9(2): 52-56.
- [35] Sanchez L, Jose L, Pestana J, et al. A reliable open-source system architecture for the fast designing and prototyping of autonomous multi-uav systems: Simulation and experimentation[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2016, 84(1-4): 779-797.
- [36] Schrage D P, Vachtsevanos G. Software-enabled control for intelligent UAVs[C]. *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design*, Kohala Coast, USA, August 27, 1999.

#### 作者简介:



张旭东 (1981-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为无人机总体技术、飞行力学与控制。



孙智伟 (1984-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计、气动弹性与主动控制。



吴利荣 (1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为无人机总体技术。



郝明月 (1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人机总体技术。



尹航 (1986-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为飞行器总体与飞行控制。