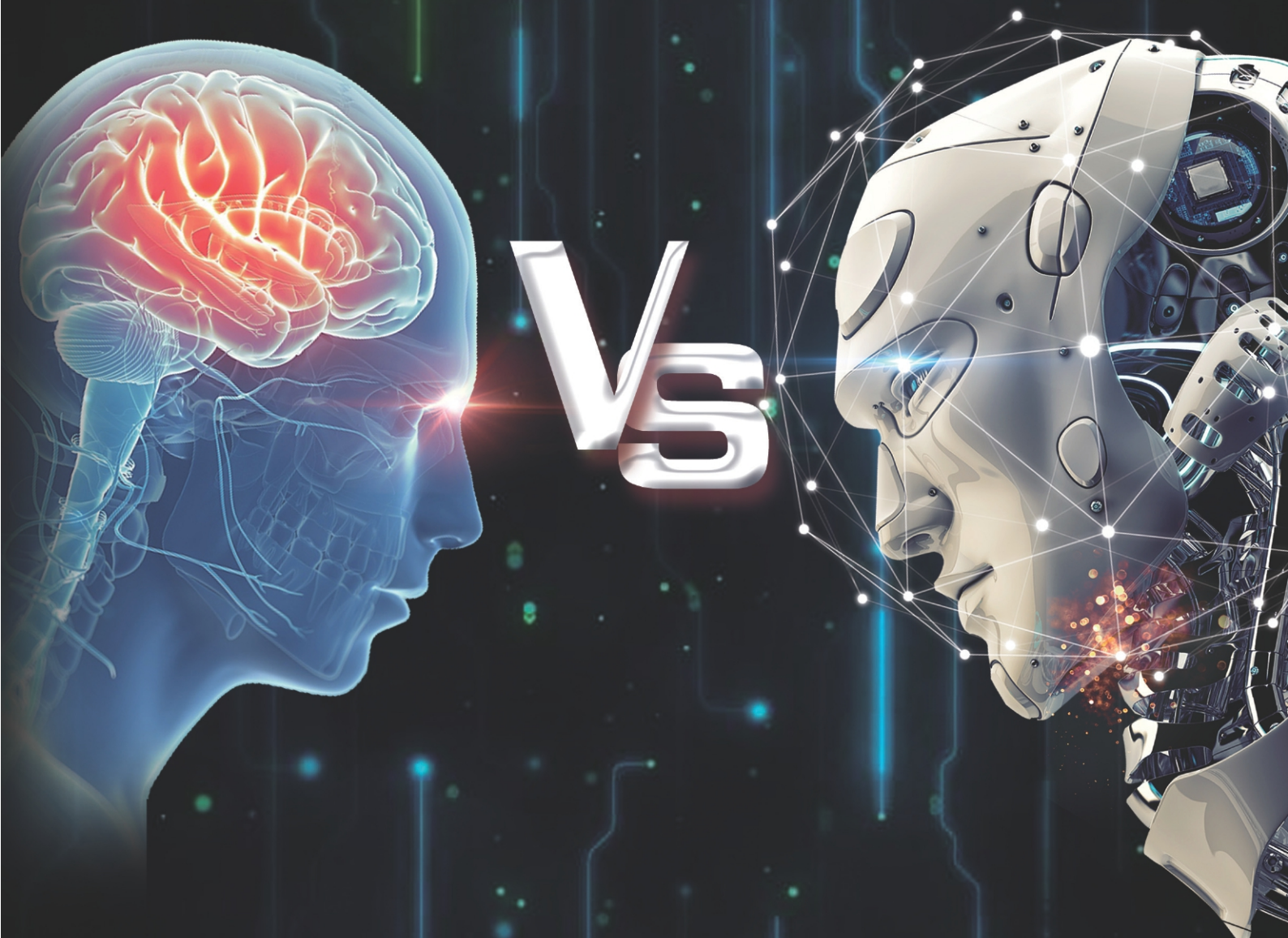


# 无人系统技术

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



## 人工智能专栏

- 从人工智能到智能产业：迈向第三轴心时代的智慧世界
- 人工智能与“星际争霸”：多智能体博弈研究新进展
- 基于人工智能技术的25个行业发展趋势
- 人工智能在自动驾驶领域的应用及启示
- 行人检测算法ACF的后处理改进

ISSN 2096-5915



2019.1  
第2卷 NO.

# 征稿启事

## 空间无人系统发展热点论坛

过去的 50 年里，人类对空间的探索卓有成效，空间无人系统的出现和发展使人类可以更安全、精确、便捷地完成地球轨道上的各种科研和生产作业，为将这一不适合人类生存、曾经一片荒芜的新领域，变成人类最有价值的生活场所创造了可能性。

为进一步探讨空间无人系统发展现状、技术难点、未来应用，哈尔滨工业大学与《无人系统技术》编辑部联合发起，拟于 2019 年 5 月在北京召开“空间无人系统发展热点论坛”，现诚挚向空间无人系统领域的专家学者发出邀请，欢迎投稿参会，《无人系统技术》期刊也将组织优秀会议论文，推出空间无人系统专刊。

### 1 专刊特约主编

郭继峰，教授，博士生导师，哈尔滨工业大学航天学院副院长。主持承担国家自然科学基金项目、863 项目、国防基础科研重点项目、民用航天十二五项目以及一批省部级重点项目和多项航天、航空科研生产单位横向合作项目等。

### 2 征稿方向（包括但不限于）

- ◆ 空间机器人 / 机械臂系统
- ◆ 空间无人探测器
- ◆ 空间在轨自主规划与智能控制技术
- ◆ 无人行星车 / 巡视系统
- ◆ 空间在轨服务技术
- ◆ 空间在轨操作卫星
- ◆ 空间在轨智能感知技术

### 3 投稿要求

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

### 4 投稿须知

1. 论文要求未在其他学术会议及公开刊物上发表过，论点明确、论据充分、论述简练、引证准确、文字精练、数据图表清晰。
2. 论文不得涉及国家秘密，论文入选与否，均不退还来稿。
3. 稿件格式请参照《无人系统技术》论文模板，关注“无人系统技术”微信公众号，后台留言邮箱，会务组会把模板发送到您的邮箱。稿件请标注“会议投稿”发送至 [chinauas310@163.com](mailto:chinauas310@163.com)。
4. 论坛具体召开时间、地点及其它相关事宜另行通知，请及时关注“无人系统技术”微信公众号。

### 5 联系方式

王一琳 18500388390  
李志 13161006067



无人系统技术

### 6 时间节点

投稿截止时间：2019 年 4 月 30 日  
专刊出版时间：2019 年 7 月 31 日

## 人工智能专栏

编者按：人工智能的概念自1956年在达特茅斯会议上被提出以来，历经60多年的发展，得到了世界众多学者的探索和研究。近年来，随着以AlphaGo为代表的机器学习领域的突破，人工智能已经成为世界范围内学术界的关注热点。习近平总书记高度重视科技创新，曾多次在讲话中谈到人工智能，人工智能是新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力，加快发展新一代人工智能是事关我国能否抓住新一轮科技革命和产业变革机遇的战略问题。基于此，本刊特推出“人工智能专栏”，为广大学者提供百家争鸣的学术交流平台。

从人工智能到智能产业：迈向第三轴心时代的智慧世界.....	01
王飞跃	
人工智能与“星际争霸”：多智能体博弈研究新进展.....	05
张宏达，李德才，何玉庆	
基于人工智能技术的25个行业发展趋势.....	17
张肇聿，王一琳，李志	
人工智能在自动驾驶领域的应用及启示.....	23
吴琦，于海靖，谢勇，刘贝	
行人检测算法ACF的后处理改进.....	29
梁桥康，汤鹏，晏昕童，孙炜	

## 技术研究

有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析.....	39
樊洁茹，李东光	
柔性充气结构在无人系统中的应用.....	48
李沫宁，孟军辉，刘莉	

## 前沿动态分析

美国“快速轻量自主”项目推进无人系统自主能力发展.....	58
王彤，李磊，蒋琪	

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

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



## Artificial Intelligence Column

- From Artificial Intelligence to Intelligent Industries: A Smart World in the Third Axis Age ..... 01  
WANG Feiyue
- Artificial Intelligence and StarCraft: New Progress in Multiagent Game Research ..... 05  
ZHANG Hongda, LI Decai, HE Yuqing
- Development Trends of 25 Industries Based on Artificial Intelligence Technology ..... 17  
ZHANG Zhaoyu, WANG Yilin, LI Zhi
- Application and Inspiration of Artificial Intelligence in the Field of Autonomous Driving ..... 23  
WU Qi, YU Haijing, XIE Yong, LIU Bei
- Improvement Methods of Post Processing for Pedestrian Detection Algorithm of ACF ..... 29  
LIANG Qiaokang, TANG Peng, YAN Xintong, SUN Wei

## Technical Study

- Overview of MAV/UAV Collaborative Combat and Its Key Technologies ..... 39  
FAN Jieru, LI Dongguang
- Application of Flexible Inflatable Structure in the Unmanned System ..... 48  
LI Moning, MENG Junhui, LIU Li

## Frontier Dynamic Analysis

- DARPA Fast Lightweight Autonomy Program Promotes Unmanned System Autonomy Development  
..... 58  
WANG Tong, LI Lei, JIANG Qi



# 从人工智能到智能产业： 迈向第三轴心时代的智慧世界

王飞跃

(中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190;  
国防科技大学军事计算实验与平行系统技术中心, 长沙 410073)

**摘要:** 从人工智能到智能产业, 是人类从工业社会向智业社会发展的必须, 也是必然。对人工智能的起源进行回顾; 将AlphaGo作为一种典型的人工智能案例进行分析, 剖析其研究意义, 引出了三个世界(物理世界、心理世界、人工世界)三种不同的IT技术(工业技术、信息技术、智能技术), 进而提出人类利用智能技术开发人工世界进入第三轴心时代的理念; 并对新时代的技术特征进行总结; 对新时代人工智能的前景进行了讨论与展望。放眼未来, 人工智能将会给人类提供更多的工作岗位, 使人类生活变得更加美好。

**关键词:** 人工智能; 智能产业; 人工世界; 平行系统; 智慧世界

**中图分类号:** TP182    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-5915 (2019) 01-0315-04

## From Artificial Intelligence to Intelligent Industries: A Smart World in the Third Axis Age

WANG Feiyue

(the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; Research Center of Military Computational Experiments and Parallel Systems, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** From artificial intelligence to intelligent industries, it is necessary and inevitable for human beings to evolve from industrial society into intelligent society. starting from the origins of artificial intelligence, took AlphaGo as a typical case of artificial intelligence, analyzed its significance, introduced three different IT technologies (industrial technology, information technology, intelligent technology) from the perspective of three worlds (physical world, psychological world, artificial world), and then proposed that human beings used intelligent technology to develop artificial world and enter the third axis age, and summarized the technical characteristics of the new age, the prospect of artificial intelligence in the new age is discussed. Looking into the future, artificial intelligence will provide more jobs for human beings and make human life better.

**Keywords:** Artificial Intelligence; Intelligent Industry; Artificial World; Parallel System; Wisdom World

现在谈人工智能, 大家都忘记了莱布尼茨, 一个不仅是著名的数学家, 更是专注研究实物与心物之间“预定和谐”理论的哲学家, 他在探索过程中不仅发明了微积分、拓扑学, 还重新发明了二进制, 但他的目标是创立一种“脑”微积分, 实现推理计算化。1701年, 莱布尼茨为皇家科学院提交的第一篇论文就是论证了其二进制与中国八卦的关

系, 并用于符号思维和符号逻辑, 设计了“演算推论器”, 成为今日数理逻辑和计算机的雏形; 后来又由英国数学家布尔在其《思维定律》一书中结合亚里士多德的形式逻辑, 进行了系统化的提高, 构成了现代计算科学与人工智能的理论基础。

这种观点影响到后来的希尔伯特, 一位非常严谨的数学家。他最有名的是提出了数学的23个

问题。但是在思想领域，它对数学家最大的冲击是如何让数学机械化，有了公理和推理规则就可以通过机械的方式把所有定理推导出来，证明数学是一致且完备的。这个梦想令全世界数学家（特别是年轻的数学家）热血沸腾，觉得这是数学改变世界的途径。

当时的口号是“背起你的背包到哥廷根（希尔伯特所在的大学）去”，其中一位年轻人就是罗素，他问自己的老师怀德海，如何才能把希尔伯特的思想实现。之后，两个人花了十年时间写了一本书，证明了上百个定理，给希尔伯特的思想提供基础。

可是不久，罗素和怀德海的心血让三个年轻人的革命一扫而光，这正是哥德尔，他证明了数学不可能既是一致又是完备的。冯·诺伊曼是第一个理解哥德尔不完备定理的人。这篇论文发表后，很快图灵就注意到，稍作修改就可以证明停机问题没有解。发现图灵论文意义的人又是冯·诺伊曼。哥德尔打破了希尔伯特的梦想，但没有给出解决方案，图灵进一步把这个梦想打碎，但给出了解决方案——图灵机。最后冯·诺伊曼读到图灵的论文时，意识到计算机就应该这样制造，这就是著名的冯·诺伊曼结构。

1956年，十几个人在达特茅斯召开了第一次人工智能会议，因此称1956年为“AI元年”。但是英国人不认为1956年是人工智能创始元年，英国人认为1947年是人工智能的开始，因为那一年图灵的技术报告——《智能机械》，之后1950年他又

发表了《论智能》，这就是著名的图灵测试，这两件事都早于1956年。

人工智能发展到今天，人类该怎么办？大家熟悉人工智能都是因为AlphaGo，AlphaGo到底意味着什么？在我看来：第一是平行，将来人们不管是工作、学习、生活，必须和形形色色的AlphaGo一起。没有AlphaGo，甚至连下围棋的资格都没有，这是不久以前，围棋国手柯洁说的。第二是从牛顿的“小数据、大定律”转变成默顿的“大数据、小定律”。第三，将来只要是做智能产品、智能设备、智能系统，必须要告诉人们产品系统的数据原料是什么，又是如何把“小数据”转变成“大数据”，把“大数据”转变成“小智能”。

AlphaGo完全做到了这样一件事情。它把最初人类的80万场对弈，自我对弈到7000万，又从这里面用机器学习的方法提炼成代表“小智能”的两张围棋知识图，横扫全部人类的围棋冠军。后来又出现了AlphaGo Zero，从零数据开始，自我对弈到3000万，“小智能”两张围棋图也变成一张围棋图，在和AlphaGo的对弈中，AlphaGo Zero以100:0胜出。从开始到具有胜利的能力，整个过程不到三个小时，这三个小时是人类围棋大师三十年一生的心血。现在在美国，小学生要参加国际象棋的比赛必须先和计算机对弈，和计算机对弈已不可能获胜，但可获得能力，之后才能和人类对弈。所以以后人类要工作，每个岗位都要有一个“AlphaGo”，要和这个“AlphaGo”一起工作，这就是平行。没有这个“AlphaGo”，人类甚



图1 三个人的革命

Fig.1 The revolution of three persons

至连在这个岗位工作的资格都没有。

AlphaGo之后，IT就不再是指“旧”IT——信息技术 (Information Technology, IT)，而是指“新”IT——智能技术 (Intelligent Technology, IT)。一百年前，IT代表的是工业技术 (Industrial Technology, IT)，这是老“IT”。并不是说“新”的比“旧”的好“旧”的比“老”的好，在未来，这三个IT技术都重要，必须三个平行应用，开发三个世界。三个世界信念是由20世纪最伟大的哲学家——卡尔·波普尔提出的，有深刻的哲学依据。卡尔·波普尔认为现实世界可以分为三个世界，分别是物理世界、心理世界、人工世界。“老”的IT是开发物理世界的主打工具，“旧”的IT是开发心理世界的主打工具，“新”的IT是开发人工世界的主打工具。

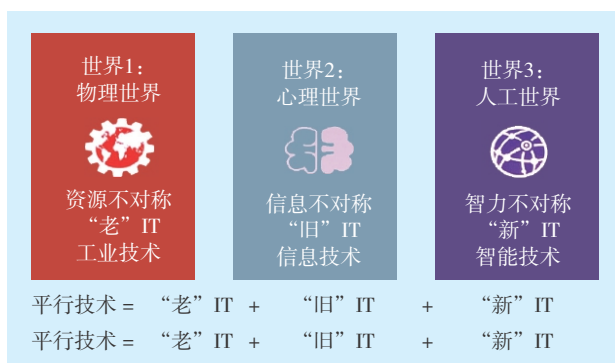


图2 三个IT技术与三个世界理论

Fig.2 Three IT technologies and three world theories

从历史的角度来看，人类进入了一个全新的时代——第三轴心时代。公元前六百年，世界各地出现了一批哲人，他们开始问“我是谁、我从哪里来、我到哪里去”。随着主体意识的产生，哲学诞生了。哲学的原意是“爱智慧”，即人工智能。但这只是物理世界的第一轴心时代，三个世界必有三个轴心时代。心理世界的轴心时代是科学时代，牛顿、爱因斯坦的出现，导致了人类理性的大觉醒。现在又开始开发第三世界，第三世界的轴心在哪里？探索源自哥德尔的不完备定理，激发了图灵和冯·诺依曼等对智能和计算的新认识，从而有了今天的人工智能，这就是第三轴心

时代的开始。

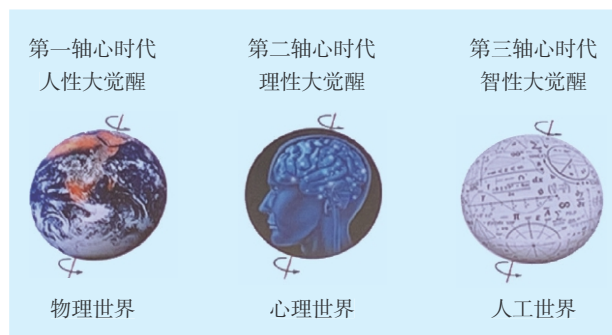


图3 三个世界的三大轴心时代

Fig.3 Three axis ages of the three world

人类一直为人工智能奋斗，不断建立自己的“5G”（五张网络Grids）。人类从交通网开始建立网络，由于这个网络，人类的居住方式从树上、山洞演变成村庄、乡镇、城市。将来的无人车、人工智能，会彻底改变人类的生活状态，使人类真正走向智能社会。但是这需要能源网来配合，除了一直都存在的互联网，现在又出现了物联网。互联网和物联网有什么区别？互联网的时候人类是“被”联，物联网的出现使人类变成了“在”联，但是在将来，人类要起主导作用，所以出现了智联网。这样一来，社会形态就要改变，交通已经变成社会交通，最重要的是变成社会智能。

实现这个目标需要智能科技的“五力合一”支持，从数之力、算之力、法之力、网之力一直到链之力——区块链的力量。区块链的力量非常巨大，它的主要技术特色：“真 (TRUE)”和“道 (DAO)”。“真 (TRUE)”是可信的 (Trustable)、可靠的 (Reliable)、可用的 (Useful)，以及管理学、经济学中的两个E (Effective 和 Efficient) 的结合，用正确的方式做正确的事！“道 (DAO)”具体而言，“D”代表分布式的全中心化而不是去中心化 (Distributed Decentralized)，“A”代表自主性自动化 (Autonomous Automated)，“O”代表组织化的有序性 (Organized Ordered)。这样就把以前不是商品的东西转成了商品，极大地扩展了商品活动范围和提高了效率途径，这就是革命，这就是为什么要有智能产业，它为我们建立智能系统提供了钢筋水泥的地

基。如果只建立在大数据上，就像楼建在沙基上，根基不稳。

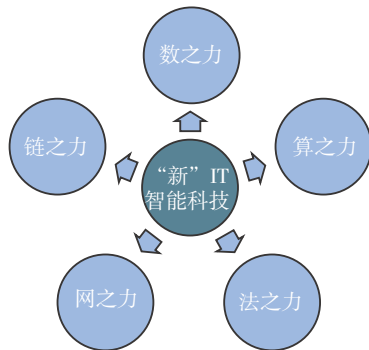


图4 智能科技包含的“五力”

Fig.4 The five forces of intelligent technology

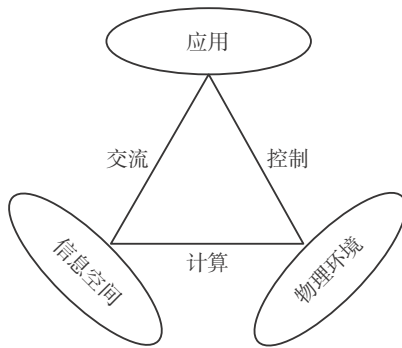


图5 CPS系统框架图

Fig.5 Framework of CPS system

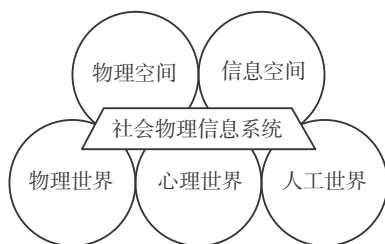


图6 CPSS系统框架图

Fig.6 Framework of CPSS system

所以，要给智能系统提供钢筋水泥的地基，就需要“五力合一”，只有通过CPSS这个五度空间助力，将来才能实现“虚实合一体”，即“人机结合、知行合一、虚实一体”。人类和机器人一起工作，自然的进入工业5.0。工业5.0和工业4.0有天然的联系，但是内涵不一样。原来的内容还是基于工业自动化，人类靠工业自动化走到了今天。再想继续

往前走，必须靠知识自动化，这就是工业5.0。

智能的组织以及产品，一定要从CPS到CPSS，这就是智能产业的崛起。2010年的时候，去百度或谷歌上还找不到“智能产业”这个词，没想到今天这个产业发展得这么快。未来的平行机，就是要把“默顿机”和“牛顿机”连通，把三个世界打通，产生一系列新的工作，不要担心它会夺取人类的工作。人类会退休、跳槽，但是机器人永远在那里，把人类的知识都记下来，为下一个工作的人提供智能化交互。人类要把在物理世界“吃一堑长一智”转变成在虚拟的世界里“吃多堑”，在物理的世界里实现“长多智”。

人工智能会威胁人类吗？当年伦敦燃煤使伦敦变成了“雾都”，英国人为了减少煤的使用从而研究提高燃煤的效率，希望少燃煤。结果杰文斯发现效率提高越多反而煤用的也越多，这就是著名的杰文斯悖论。人工智能也是如此，用人工智能取代人工，结局会是需要更多的人工，以前用不到人工智能的传统行业，特别是制造业，应该尽可能快地利用这些新的技术。

在经济社会的平行未来中，人类要在三个世界300%的安全。物理世界有“核”威慑，信息世界有“信”威慑，人工世界有人工智能的“智”威慑。将来的智能产业会极大的提高效率，让人类每周工作不到三天就够了，每天工作三个小时就可以了，所以不要过度担心人工智能，对其应该怀有激动之心。人工智能是众多科学家奋斗的结果。既然是科学，就应有敬畏之心。其实它只是种技术，做好事是它，做坏事还是它，所以要有平常心。

作者简介：

王飞跃(1961-)，男，博士，研究员，主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模、分析与控制。

特别说明：本文根据王飞跃《从人工智能到智能产业：迈向第三轴心时代的智慧世界》报告整理成稿，经编辑部与作者授权发表，特此声明。



# 人工智能与“星际争霸”：多智能体 博弈研究新进展

张宏达<sup>1, 2, 3</sup>, 李德才<sup>1, 2</sup>, 何玉庆<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110016; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 多智能体博弈游戏具有实时对抗、群体协作、非完全信息博弈、庞大的搜索空间、多复杂任务和时空推理等特点, 是当前人工智能领域极具挑战的难题。同时, 该领域研究成果在社会管理、智能交通、经济、军事等领域有广阔的应用前景。以具有代表性的多智能体博弈游戏“星际争霸”为主要研究对象, 通过分析研究难度、总结研究方法、介绍研究环境及数据集与竞赛资源, 对近年来该领域人工智能研究成果进行了梳理和总结, 并对该领域未来可能的发展方向进行预测, 为相关研究工作的开展提供可借鉴参考信息。

**关键词:** 多智能体; 实时策略; 人工智能; 对抗博弈; 深度强化学习

**中图分类号:** TP18    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-5915 (2019) 01-0319-12

## Artificial Intelligence and StarCraft: New Progress in Multiagent Game Research

ZHANG Hongda<sup>1, 2, 3</sup>, LI Decai<sup>1, 2</sup>, HE Yuqing<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Multiagent games have the characteristics of real-time confrontation, group collaboration, incomplete information game, huge search space and multi-complex tasks, spatiotemporal reasoning, etc. It is a very challenging problems in the field of artificial intelligence. At the same time, the research results in this field have broad application prospects in the fields of social management, intelligent transportation, economy, and military. We take the representative multiagent game StarCraft as the main research object, and analyzes the research results of artificial intelligence in this field by analyzing research difficulty, summarizing research methods, introducing research environment and data sets and competition resources. And summarizing, predicting the future development direction of the field, and providing reference information for the development of related research work.

**Keywords:** Multiagent; Real-Time Strategy; Artificial Intelligence; Game; Deep Reinforcement Learning

收稿日期: 2018-12-19; 修回日期: 2019-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (91748208); 国家自然科学基金联合基金 (U1608253); 中国科学院联合基金 (6141A01061601)

## 1 引言

2016年3月, Deepmind科研团队的围棋程序AlphaGo<sup>[1]</sup>以4:1的成绩战胜韩国围棋世界冠军李世石,这一研究成果在全球范围内引起巨大轰动,人工智能研究再一次吸引了世界的目光。在攻克围棋这一艰巨任务之后,Deepmind将研究重点转向更加复杂的领域——多智能体博弈游戏,并与美国电子游戏公司暴雪娱乐(Blizzard Entertainment)合作,在星际争霸II的游戏环境基础上开发了可进行更高水平人工智能研究的学习环境。鉴于该领域聚集了当前人工智能研究领域最具挑战的难题,国内外众多科研单位也竞相投入到这一领域当中。多智能体博弈游戏不仅在人工智能研究领域极具研究价值,其社会管理、智能交通、经济、军事等领域同样具有巨大的潜在应用价值。

对于当前状态或动态变化既无完美信息又无完整信息可用的复杂动态环境,给人工智能研究带来显著挑战<sup>[2]</sup>。现实社会中很多大型、复杂的动态环境问题如路面交通系统、气象预报、经济预测、智慧城市管理、军事决策等均是实例。然而,对这些实际问题进行建模仿真存在很大困难。与此同时,一系列实时策略游戏提供了与真实环境相似的、非完美和非完整信息、长远规划、复杂问题决策的仿真环境。这些实时策略游戏环境既能模拟现实问题的关键难点,又具有可准确评估、迭代迅速、便于交互和布署、可重复等特点,为解决实际问题提供了绝佳的研究平台。因此,基于实时策略游戏环境的研究工作对人工智能技术的发展和解决复杂的实际问题都有重要意义。在众多的研究平台中,星际争霸以其丰富的环境信息、逼真的环境场景等特点成为常用的理论研究和方法验证平台。

实时策略游戏——星际争霸具有实时对抗、巨大的搜索空间、非完全信息博弈、多异构智能体协作、时空推理、多复杂任务、长远全局规划等特点,同时这些也是人工智能领域极具挑战的

难题。自星际争霸第一版游戏于1998年正式发布以来,不少研究者将其作为人工智能研究环境进行了大量的研究。2010年开始,一些星际争霸人工智能游戏程序国际竞赛开始举办,大量人工智能研究和应用成果开始发布。2016年开始,深度学习在星际争霸中的应用展现出强大的信息处理和决策能力,自此之后更多的深度学习和深度强化学习算法被应用到该研究领域。基于星际争霸进行的一系列人工智能研究极大促进了机器学习、深度学习、博弈论、多智能体协作策略等研究领域的发展,对与星际争霸相关的研究成果进行总结,特别是近两年产生的新的研究理论和成果进行梳理,有助于把握该领域的研究进展和动向,为与该领域相关的研究提供参考。

综上,本文主要开展了以下几方面的工作。首先介绍星际争霸游戏环境并分析其给人工智能研究所带来的挑战。接着,对现阶段星际争霸相关研究单位研究成果进行介绍,并对该领域的相关研究方法进行了分类。在此基础上,列举了与星际争霸人工智能研究相关的资源,包括研究平台、数据集以及自主游戏程序竞赛。最后,对星际争霸相关领域未来可行的研究方向进行了预测。

## 2 星际争霸和人工智能

### 2.1 实时策略游戏——星际争霸

星际争霸是暴雪娱乐公司发布的一款极为经典的多角色实时策略游戏,目前主要有两版。自主游戏程序竞赛基于1998年发行的第一版游戏环境,如图1。2010年发行的第二版游戏以其更为细致逼真的游戏环境和新的竞技模式更受玩家的欢迎,如图2。

星际争霸提供三种类型的角色供玩家选择:人族(Terran)、虫族(Zerg)、神族(Protoss)。每个种族均包括多种生命角色、战斗装备、功能建筑等多类型单元。三种角色各具特色:



图1 星际争霸I竞赛环境

Fig.1 StarCraft I competition environment



图2 星际争霸II游戏环境

Fig.2 StarCraft II game environment

人族：人族单元灵活、多样，其平衡了虫族和神族的特点，是两者性能的均衡。其作战单元和建筑有陆战队员、攻城坦克、巡洋舰、导弹发射塔等。

虫族：虫族繁衍迅速，需要的资源少，单位能力弱但速度快，常以成群的形式以数量占据对抗优势。其作战单元和建筑有小狗、蟑螂、飞龙、孢子塔等。

神族：神族繁殖率不高，但单元科技水平很高、能力强，因此需要的资源也多，常以策略的质量取代数量占据对抗优势。其作战单元和建筑有狂热者、圣堂武士、凤凰战机、光子炮等。

在多人对抗模式中，玩家需要收集尽可能多的矿物、天然气或零散的奖励等资源来建造更多的生产、防御等建筑物和生产更多的作战单元并提升建筑单元和作战单元的技能等级，以最短的时间消灭敌方来赢得胜利。

## 2.2 星际争霸研究的难点及其对人工智能研究的挑战

与棋类游戏相比，多智能体实时策略游戏相关研究更难，主要体现在以下几点。

(1) 多玩家共存、多异构智能体合作。与棋类游戏博弈双方交替进行动作不同，实时策略游戏中多玩家同时推动游戏情节发展，不同的玩家可以同时进行动作。游戏中有不同的角色单元和功能建筑，如何更好地发挥每个单元的功能也是需要考虑的问题。

(2) 实时对抗及动作持续性。实时策略游戏是“实时”的，意味着玩家需要在很短的时间内进行决策并行动。与棋类游戏中玩家有几分钟的决策时间不同，星际争霸游戏环境以24帧/秒频率改变，意味着玩家可以以最高不到42毫秒的频率进行动作。若以环境改变每8帧玩家进行一个动作的平均水平来看，玩家仍需要以每秒3个动作的频率进行博弈。不仅如此，玩家输出的动作有一定的持续性，需要在一定的时间持续执行，而非棋类游戏玩家的动作是间断的、突发的、瞬时的。

(3) 非完整信息博弈和强不确定性。多数实时策略游戏是部分可观测的，玩家仅能观察到自己已经探索的部分地图情况。在星际争霸中，因为有战争迷雾的存在，玩家只能看到自己所控制的游戏角色当前所处环境的情况，其它环境信息无法获知。而棋类游戏玩家可以获取全棋盘的情况。多数实时策略游戏具有不确定性，即决策过程中采取的动作都有一定概率促成最后的胜利。

(4) 巨大的搜索空间及多复杂任务。实时策略游戏更复杂，其在状态空间的规模上和每个决策环节可选择动作序列均非常巨大。例如，就状态空间而言，一般的棋类游戏状态空间在 $10^5$ 左右，德州扑克约为 $10^{80}$ ，围棋的状态空间为 $10^{170}$ 。而星际争霸一个典型地图上的状态空间比所有这些棋类的状态空间都要大几个量级。以一个典型的 $128 \times 128$ 像素地图为例，在任何时候，地图上可能会有5~400个单元，每个单元都可能存在一

个复杂的内在状态( 剩余的能量和击打值、待输出动作等), 这些因素将导致可能的状态极其庞大。即便是仅仅考虑每个单元在该地图上可能的位置, 400个单元即有 $(128 \times 128)^{400} = 16384^{400} \approx 10^{1685}$ 种可能。另一种计算复杂度的方式以 $b^d$ 来计算游戏的复杂度, 其中国际象棋 $b \approx 35, d \approx 80$ , 围棋 $b \approx 30 \sim 300, d \approx 150 \sim 200$ , 而星际争霸 $b$ 的范围是 $10^{50} \sim 10^{200}, d \approx 36000$ 。

多智能体实时策略游戏的这些突出难点给该领域人工智能研究方法带来巨大挑战。文献[2]将本领域研究中的挑战总结为规划、学习、不确定性、时空推理、领域知识开发和任务分解六个方面。在此基础上, 我们将当前研究中的挑战分为多尺度规划与多层次决策一致性、多途径策略学习、降低不确定性、空间和时间上的多模联合推理、领域知识开发和多层次任务分解六大挑战。本领域研究难点与研究挑战的对应关系如图3所示。

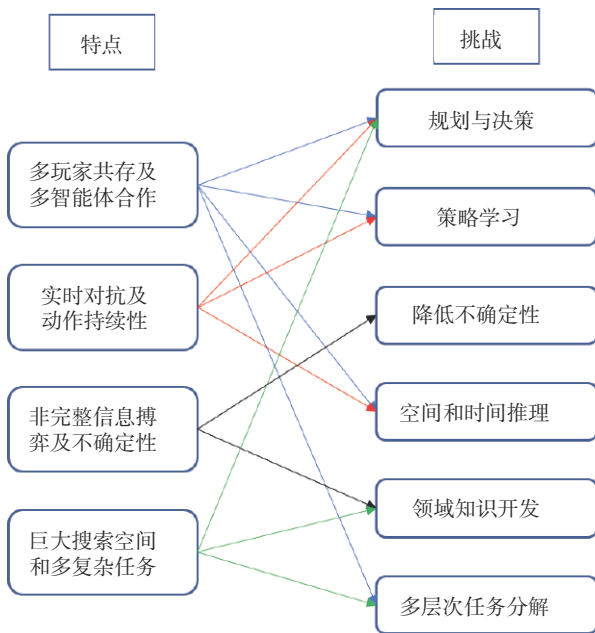


图3 多智能体实时策略游戏存在的难点与人工智能研究挑战的对应关系

Fig.3 Correspondence between the difficulties of multi-agent real-time strategy games and the challenges of artificial intelligence research

(1) 多尺度规划与多层次决策一致性。一方面, 由于多智能体游戏中巨大的状态空间和可输

出动作, 使得一般的对抗规划方法如博弈树搜索已不能满足需求, 多智能体实时策略游戏需要多尺度的规划。另一方面, 实时约束为多异构智能体大量的低层次动作规划与高层次全局决策目标的一致性耦合带来很大困难, 难点在于设计一种既考虑复杂多目标优化又兼顾计算效率的方法, 最终形成多智能体整体行动的实时一致性。

(2) 多途径策略学习。除对抗规划技术之外, 一些研究团队将注意力放在多途径策略学习技术上, 其中包含三种策略学习问题。一是提前学习, 即开发已有数据, 如已有游戏回放、已有的针对特定地图的适当策略等。难点在于策略的抽象表达方法以及在实际博弈过程中如何合理选择并应用这些策略。另外, 这些针对特定环境的策略是否具有普适性也有待验证。二是游戏中学习, 即在博弈过程中在线学习提升游戏水平, 这些技术涉及到强化学习方法及对手建模等, 其难点在于状态空间巨大且部分可观测。三是游戏间相互学习, 即如何将从一个游戏中学到的知识用在另一个游戏中以提升胜率。一些工作是利用简单博弈论方法从预先定义的策略池中挑选合适的策略, 但这些固定的策略无法根据具体对抗环境进行自适应调整和策略提升, 因此也限制了对抗的竞技水平。

(3) 降低不确定性。这里的不确定性主要包括两个部分。一是由于游戏是部分可观测的, 玩家无法看到全局的情况, 因此需要去侦察来了解更多的情况。难点在于如何设计具有自适应能力的好的侦察策略和知识表示来降低不确定性。除此之外, 由于敌人的策略也是未知的, 这种不确定性造成决策的无目的性, 不能很好地根据敌人的策略适时调整对抗策略, 所以需要通过好的预测模型预测对手的意图。

(4) 空间和时间上的多模联合推理。空间上的推理包括不同功能建筑建造的位置、防御攻击建筑建造的位置以及对战中各作战单元所处的位置等应该如何合理安排。除此之外, 各功能单元在不同的地形上可以发挥出不同程度的攻击、防御

等功能，如坦克在高地势时攻击范围更大等，这些也是空间推理应考虑的因素。时间推理是指玩家既要在当前战斗中采取战术战胜敌人，又需要在更高水平上长远地规划如何安排自己的资源、建造功能建筑或升级、策略转换等。有些策略是短时间就可以看到效果的，而有些策略需要较长的时间才发挥作用，因此需要长远全局规划和短期局部规划的统一。其中长远策略规划中由于一些策略在很长一段时间后才发挥作用，导致智能体在学习过程中不能很好地从长时间的延迟奖励中学到有用的策略。另外，由于空间推理和时间推理是两种不同模式的推理形式，需要构建两种模式相融合的推理策略。

(5) 领域知识开发。实时策略游戏已经发展了多年，产生很多可利用的战术动作、规律和策略等数据。充分利用该领域的已有知识可极大提升自主游戏程序的竞技水平。该领域早期研究者将从数据中总结的策略编写成代码，游戏程序可以从这些编好的代码中选择。近两年大量的游戏数据集可供机器学习提取有用信息。如何从大量的数据中提取有价值的策略，形成自主游戏程序的决策网络，仍存在极大挑战。

(6) 多层次任务分解。多层次任务分解是指将多智能体博弈游戏分解成不同的子任务，通过分别解决这些子任务来降低整体解决的难度。主要可分解成以下几部分：策略，即高水平决策，如全局战役主要用什么策略；战术，即当前策略、短时策略，如一场战斗中采取何种策略；反应控制，即战斗、战术实施，如战斗中应采取何种走位、用哪种武器攻击等；地形分析，主要包括敌我双方所处位置、战斗地形、可通过道路、地势等信息；智能收集信息，主要包括敌方建造了何种建筑、生产了哪种类型的战斗单元、正在采取什么样的策略等信息。对比而言，人类玩家在玩星际争霸时，决策常分为微观操作和宏观大规模操作。人们不需要进行复杂的多层次任务分解，只需根据具体游戏环境进行微观或宏观操作即可。

### 3 相关研究和成果

人工智能和游戏的研究历史可以追溯到1950年<sup>[3]</sup>。自1997年5月“深蓝”击败国际象棋大师卡斯帕罗夫起至今，已有大量的游戏程序战胜了经典游戏中的世界冠军，如跳棋、奥赛罗和拼字游戏。一些布署深度神经网络的“大脑”，甚至在极其复杂的游戏中击败了世界冠军，如围棋。

从2000年左右开始，人工智能研究人员开始关注复杂的战略模拟游戏。在早期的研究中，一些人认为，智能体需要复杂的表示和推理能力才能在这些环境中胜出，而构建上述能力是具有挑战性的。研究人员通过抽象状态缩小决策搜索空间、遗传算法学习游戏规划、使用领域知识消除静态对手假设、从专家示范中提取行为知识等方法降低搜索的难度，为自主游戏程序赋予更强的能力。

在众多实时策略游戏人工智能研究环境中，星际争霸相比之前大多数工作更具挑战性。该游戏自1997年出现至今吸引了大量人类玩家，并举办了各种级别和类型的国际性赛事。2010年起，以AIIDE、SSCAIT、CIG为代表基于星际争霸I环境的各类人工智能比赛开始举办，阿尔伯塔大学、斯坦福大学、Facebook等众多高校和研究单位投入其中。这期间的人工智能算法一般被称为经典人工智能程序，大多数基于规则。这类自主游戏程序可以打败游戏内置程序，但是远远比不上人类专业选手，甚至连普通选手也打不过。

2016年开始，以深度学习和深度强化学习为主的智能体自主学习方法开始应用于该领域，此类算法被称为现代人工智能程序。Deepmind和暴雪联合开发了基于星际争霸II的深度学习研究环境SC2LE。国内外众多极具实力的科研团队参与其中，国外有如Deepmind、Facebook、阿尔伯塔大学、牛津大学、伦敦大学等，国内如阿里巴巴、腾讯以及中国科学院自动化研究所等也进行了相关研究。

2009年开始，星际争霸相关研究成果开始发

表1 星际争霸主要研究单位和方法

Table 1 The main research groups and methods of StarCraft

序号	时间	科研单位	方法
1	2009.9	美国加州大学圣克鲁兹分校	数据挖掘为对手建模 <sup>(1)</sup>
2	2011.11	法兰西学院	贝叶斯模型预测策略构建树 <sup>(1)</sup>
3	2012.10	美国俄勒冈州立大学	动态贝叶斯网络战略模型 <sup>(1)</sup>
4	2012.11	韩国世宗大学	侦察算法和机器学习预测对手 <sup>(1)</sup>
5	2012.12	新西兰奥克兰大学	一步 Q 学习和 Sarsa <sup>(2)</sup>
6	2013.8	韩国首尔大学 延世大学	用回放进行预测 <sup>(1)</sup>
7	2013.12	新西兰奥克兰大学	扩展神经进化算法 <sup>(1)</sup>
8	2014.3	美国东北大学	战斗近似预测模型 <sup>(1)</sup>
9	2014.10	加拿大阿尔伯塔大学	逻辑回归从重放中学习模型权重 <sup>(1)</sup>
10	2016.1	加拿大阿尔伯塔大学	启发式搜索和分层投资组合搜索 <sup>(1)</sup>
11	2016.5	美国德雷塞尔大学	从数据回放中学习前向模型 <sup>(1)</sup>
12	2016.5	美国纽约大学 Facebook 人工智能实验室	多智能体通信网络 CommNet <sup>(3)</sup>
13	2016.9	Facebook	深度神经网络结合启发式强化学习 <sup>(2)</sup>
14	2017.2	英国牛津大学 微软	多智能体强化学习中重要性采样和手动调参 <sup>(2)</sup>
15	2017.3	英国伦敦大学学院 阿里巴巴团队	基于 Actor-Critic 的双向协调网络 Bicnet <sup>(2)</sup>
16	2017.5	英国牛津大学 微软	基于多 Actor-Critic 的反事实多智能体 (COMA) 策略 梯度算法 <sup>(2)</sup>
17	2017.7	丹麦哥本哈根信息技术大学	深度学习回放中的宏观管理决策 <sup>(3)</sup>
18	2017.8	DeepMind Blizzard	深度强化学习 (A3C) <sup>(2)</sup>
19	2018.6	Deepmind	自我关注深度强化学习 <sup>(2)</sup>
20	2018.9	腾讯人工智能 实验室 美国罗切斯特大学和西北大学	平层宏观动作程序 (强化学习) 结合分层组织的宏 微观混合 动作程序 <sup>(2)</sup>

注：表中上角标(1)为经典机器学习方法，(2)为强化学习方法，(3)为深度学习方法。

表。我们选出有代表性的成果进行统计(详见表1),并在下一章节中进行分类分析。

## 4 研究方法

本文将相关领域的研究方法分为基于规则、经典机器学习、深度学习、强化学习及其它有潜力的发展方向五类，并将指出这些方法适用于解决哪一类挑战。

### 4.1 基于规则

基于规则的方法用于解决策略学习和领域知

识利用的挑战。这些方法将人类玩家在实践中总结出的规则编写成程序，作为自主游戏程序的一个策略模块，游戏程序在游戏进行时根据游戏的情况选择对应的策略执行即可。Certicky M<sup>[4]</sup>等根据熟练玩家用建筑物阻挡敌人进入的策略编写了自主游戏程序。提供一个准备使用的声明式解决方案，采用答案集编程(ASP)的范例，使自主游戏程序也具备合理布局建筑物来阻止敌人进入的技能。Weber B<sup>[5]</sup>等以反应性计划语言ABL构建了在游戏中指挥个体单位的游戏程序，这种反应式规划是控制低级单位命令的合适技术，部分减少了玩家需要控制的个体单位。

## 4.2 经典机器学习

我们将除深度学习、强化学习和深度强化学习之外的机器学习方法归为经典机器学习方法。根据各方法对应解决多尺度规划与多层次决策一致性、多途径策略学习、降低不确定性以及领域知识开发利用四类挑战,将经典机器学习方法分为快速搜索与规划、对手策略建模和作战模型、降低不确定性、行为知识提取和利用四类方法。

### 4.2.1 快速搜索与规划

规划与决策问题主要关注自主游戏程序不同层次的对抗策略如何优化生成。David C<sup>[6]</sup>在星际争霸人工智能竞赛中使用在线的启发式搜索算法,该搜索算法能够实时生成专业人类玩家水平的构建命令。其为考虑时长、持续时间、投资组合的贪婪搜索分别设计了三种单位微观管理算法,并将分层投资组合搜索用于搜索巨大的游戏空间。Aha D W<sup>[7]</sup>等在搜索内部空间的遗传算法以及偏向子计划检索的加权算法基础上改进,引入一个计划检索算法,消除了前两种方法假设静态对手的不足,由此可将学习的知识扩展到具有完全不同策略的对手。Zhen J S<sup>[8]</sup>等使用扩展拓扑的神经进化(NEAT)算法,以增强人工智能游戏程序的适应性,实现快速、实时评估和反应。

### 4.2.2 对手策略建模和作战模型

策略学习问题主要关注如何从回放数据中学到有用的知识。Weber B G<sup>[9]</sup>用数据挖掘方法从大量的游戏日志中学习高水平玩家的策略,并为游戏中的对手建模,以此在游戏中检测对手策略,预测对手什么时候执行策略并做出行动。Uriarte A<sup>[10]</sup>等从回放数据中学习作战模型并用它们来模拟实时策略游戏中的战斗。

### 4.2.3 降低不确定性

不确定性问题一般可由为对手建模、为游戏建模的方法来进行预测,或者使用侦察算法等获取更多的信息来降低不确定性。Gabriel S<sup>[11]</sup>等通过使用贝叶斯建模来替代布尔值逻辑,处理信息的不完整性和由此产生的不确定性。通过机器学

习从高水平玩家的回放数据来对动态对手建模,进行战略和战术适应。这些基于概率的玩家模型可以通过不同的输入应用于决策,由此解决不确定情况下的多尺度决策。Park H<sup>[12]</sup>使用侦察算法和机器学习算法来预测对手的攻击时机。Hostetler J<sup>[13]</sup>等提出动态贝叶斯网络策略模型,该模型能够从现实的观察中推断游戏的未观察部分。Cho H C<sup>[14]</sup>通过预测对手的策略改变命令顺序。Erickson G<sup>[15]</sup>提出预测游戏中哪个玩家获胜的模型。Helmke I<sup>[16]</sup>等用简单的战斗近似模型预测不涉及微观管理的战斗。Uriarte A<sup>[10]</sup>等提出了双人博弈游戏的战斗模型,用来模拟游戏中的战斗,并分析如何从回放数据中学习作战模型。

### 4.2.4 行为知识提取和利用

领域知识开发和利用目的是更好地利用已有的策略知识和游戏数据。Mishra K<sup>[17]</sup>等提出基于案例的实时计划和执行方法。通过以个案的形式从专家示范中提取行为知识,将这些知识通过基于案例的行为生成器调用形成合适的行为,来实现当前计划中的目标。Synnaeve G<sup>[18]</sup>等主张通过人类或游戏程序玩家对录制的游戏完整状态进行探索,以发现如何推理策略。他们把军队组合起来,以此减少高斯混合程度,达到在组的水平上进行战略推理的目的。

## 4.3 深度学习

基于深度学习的方法用于从当前大量的高水平玩家数据中学习策略,以解决领域知识开发利用的挑战。Sukhbaatar S<sup>[19]</sup>等提出一种深度神经模型CommNet,它通过使多智能体间保持连续通信来完成合作任务。该网络模型可使智能体学习彼此沟通的能力,相对于非交互智能体产生了更好的表现。Justesen N<sup>[20]</sup>等通过深度学习直接从游戏回放中学习星际争霸中的宏观管理决策。从高水平玩家的2005个回放中提取的789571个状态动作来训练神经网络,预测下一个构建动作。通过将训练好的网络整合到一个开源的星际争霸自主游戏程序UAlbertaBot中,该系统可以显著地超越

游戏内置的自主程序，并以固定的急速策略进行对抗。

#### 4.4 强化学习

强化学习和深度强化学习一般用于解决策略学习中的挑战。我们将使用强化学习或深度强化学习的方法按照算法内容分为Q学习及其变体、Actor-Critic结构及其变体以及分布式多智能体强化学习三类。

##### 4.4.1 Q学习及其变体

Stefan W<sup>[21]</sup>等应用Q学习和Sarsa算法的变体，使用资格痕迹来抵消延迟奖励的问题。其设计了一个能够在复杂的环境中以无监督的方式学习的智能体，替换非自适应的、确定性的游戏人工智能程序来执行任务。针对最大化奖励或学习速度两个不同的侧重点，他们证明一步式Q学习和Sarsa在学习管理战斗单元方面是最好的。Mnih V<sup>[22]</sup>等提出深度Q网络方法，可以使用端到端的强化学习直接从高维视觉输入中学习成功的策略。该方法在Atari游戏上被证明是有效的，这为用深度强化学习解决多智能体的游戏提供了思路。Kempka M<sup>[23]</sup>等在一个三维第一人称视角环境——VizDoom中验证了视觉强化学习的可行性。在一个基本的移动及射击任务和一个更复杂的迷宫导航两种场景中，使用具有Q学习和经验回放的深度卷积神经网络，都能够训练出展现人类行为的自主游戏程序。Usunier N<sup>[24]</sup>等提出深度神经网络控制器从游戏引擎给出的原始状态特征来处理微观管理场景的方法，解决了军队成员在战斗中短期低水平的控制问题。同时提出了一个结合策略空间直接探索和反向传播的启发式强化学习算法，该算法使用确定性策略来收集学习的痕迹，这比“野兽般的探索”更为有效。

##### 4.4.2 Actor-Critic结构及其变体

Peng P<sup>[25]</sup>等在处理星际争霸中协调多个战队作战打败敌人任务时，为了保持一个可扩展而有效的通信协议，引入了一个多主体双向协调网络——BiCNet。该网络含有一个向量化扩展

的Actor-Critic公式，可以处理对战双方不同类型的任意数量的智能体的战斗。在没有任何监督如人类示范或标记数据的情况下，BiCNet可以学习各种经验丰富的游戏玩家常用的高级协调策略。Foerster J<sup>[26]</sup>等提出了一种反事实多智能体(COMA)策略梯度的多智能体Actor-Critic方法。COMA使用集中的Critic来估计Q函数，用分布式的Actor来优化智能体的策略。为了解决多智能体信用分配的挑战，其使用了一个反事实的基线，边际化一个智能体的行为，同时保持其他智能体的行为固定。在具有显著局部可观的分布式多智能体情况下，COMA方法与其它多智能体Actor-Critic方法中最先进的集中控制器最好的表现对比，发现其平均性能显著提高。Vinyals O<sup>[27]</sup>等介绍了适用于星际争霸II领域的典型深度强化学习智能体的初始基线结果。在迷你游戏中，这些智能体可以通过学习达到与新手玩家相当的游戏水平。但是，在完整游戏的训练中，这些智能体无法取得重大进展。

##### 4.4.3 分布式多智能体强化学习

Lanctot M<sup>[28]</sup>等为了解决多智能体强化学习(MARL)中使用独立强化学习(InRL)策略在训练期间可能会过拟合其他智能体策略的问题，引入了一个新的度量即联合政策关联，来量化这种影响。同时提出一种通用MARL算法，该算法基于对深度强化学习生成的策略混合的近似最佳响应以及经验博弈分析来计算策略选择的元策略。Max J<sup>[29]</sup>等在第一视角多人游戏中采用双层优化的方法。一群独立的强化学习智能体通过上千种并行游戏以团队的形式在随机产生的环境中与对手进行博弈。其中这群智能体中每个个体学习其自己的内部奖励以补充来自获胜的稀疏延迟奖励，并使用新颖的时间分层表示来选择动作，使得智能体可以在多时间尺度进行推理。

#### 4.5 其它有潜力的方向

(1)子博弈。Brown N<sup>[30]</sup>等提出用不完美信息博弈中子博弈方法解决分布式博弈和全局目标统一



的问题。该方法可用于解决多智能体实时策略游戏中分布式局部决策与团队目标统一的问题。

(2) 增量学习。Xiao C J<sup>[31]</sup>等提出的增量记忆蒙特卡洛搜索树方法,为多智能体决策系统通过不断积累来提升决策能力提供潜在的可行方向。

(3) 博弈论。Fang F<sup>[32]</sup>等用博弈论系统预测可能的袭击地点,打击偷猎行为。Tuyls K<sup>[33]</sup>等让智能体在非对称博弈中找纳什均衡。基于博弈论对多智能体博弈游戏分析,或许可以从更高水平的视野找到解决办法。

## 5 相关资源

本章介绍与星际争霸相关的资源,包括开源研究平台、开源数据集和人工智能程序竞赛。

### 5.1 开源研究平台

#### 5.1.1 完整星际争霸学习环境

(1) SC2LE。Deepmind和暴雪在2017年联合推出基于星际争霸II的人工智能学习环境SC2LE。Lanctot M<sup>[28]</sup>等描述了星际争霸II领域的观察、行动和奖励规范,并提供了一个开源的基于Python的接口来与游戏引擎进行通信。除了完整的游戏地图之外,还提供了一套迷你游戏,专注于星际争霸II游戏中的不同任务。

(2) TorchCraft。Synnaeve G<sup>[34]</sup>等开发了TorchCraft,一个通过在机器学习框架Torch中控制游戏来实现诸如“星际争霸:母巢之战”等实时策略游戏深度学习研究的库。

#### 5.1.2 类似的AI学习环境

##### (1) 轻量级星际争霸研究环境

ELF。Tian Y<sup>[35]</sup>等提出一个覆盖范围广、轻量级和灵活的基础强化学习研究平台——ELF。ELF包含三种游戏环境(微型实时策略、夺旗和塔防)的高度可定制的实时策略引擎。其中“微型实时策略”作为星际争霸的微型版本,捕捉了关键的游戏动态,可在笔记本电脑上以每秒40K帧速运行。该系统与现代强化学习方法结合使用时,

可用6个CPU和1个GPU的计算硬件在一天时间内完成端到端的完整游戏的自主游戏程序训练。此外,该平台在环境-智能体通信拓扑、强化学习方法的选择、游戏参数的变化等方面是灵活的,并且可以迁移到现有的基于C/C++的游戏环境,如ALE。

美国纽约大学和Facebook AI Research设计了一个简单的2D游戏环境,用强化学习在该环境上布署各种神经模型,在该环境中训练的模型可直接应用于星际争霸游戏<sup>[36]</sup>。

##### (2) 其它相似研究环境

VizDoom。VizDoom是一个以第一人称视角多人射击类3D游戏Doom为基础、可进行以像素信息为输入的强化学习方法研究平台。Kempka M<sup>[23]</sup>等在该环境中验证了视觉强化学习的可行性。在一个基本的移动及射击任务和一个更复杂的迷宫导航两种场景中,使用具有Q学习和经验回放的卷积深度神经网络,都能够训练出展现人类行为的有能力的自主游戏程序。

ALE。Naddaf Y<sup>[37]</sup>介绍了街机游戏学习环境——ALE。ALE为数百个Atari 2600游戏环境提供界面,并为评估和比较强化学习、模型学习、基于模型的规划、模仿学习、迁移学习等方法提供了一个严格的测试平台。ALE提供的评估方法可以在超过55个不同的游戏中报告验证结果。

Gym。由OpenAI开发的强化学习研究环境和工具包<sup>[38]</sup>。

Minecraft。微软开发了基于Minecraft(我的世界)游戏的人工智能研究平台<sup>[39]</sup>。

另外,还有如Deepmind的Psychalab心理学实验室开发的第一人称视角3D强化学习研究环境等。

## 5.2 开源数据集

### 5.2.1 基于星际争霸II的数据集

SC2LE。Deepmind和暴雪在推出基于星际争霸II的人工智能深度学习研究环境SC2LE的同时,对于完整的游戏地图,还提供了来自人类专业玩家的游戏回放数据集,并给出从该数据训练的神

经网络来预测游戏结果和玩家行为的初始基线结果。

MSC。中科院自动化所的张俊格等发布了基于SC2LE平台的新型数据集MSC<sup>[40]</sup>。MSC由良好设计的特征向量、预定义的高水平行动和每个匹配的最终结果组成。为便于评估和比较，他们还将MSC划分为训练、验证和测试集。除了数据集之外，他们还提出了基线模型，并提出了全局状态评估的初始基线结果，构建了命令预测。为了对星际争霸II的宏观管理进行研究，还介绍了数据集的各种下游任务和分析。

### 5.2.2 基于星际争霸I的数据集

Facebook的Lin Z<sup>[41]</sup>等开发了基于星际争霸I的数据集。Synnaeve G<sup>[18]</sup>等提供了包含大部分游戏状态（不仅是玩家的命令）的星际争霸游戏数据集。Alberto Uriarte开发了持续更新的基于星际争霸I的高水平玩家离线数据集。

## 5.3 竞赛

### 5.3.1 AIIDE

AAAI人工智能和互动数字娱乐会议（AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment, AIIDE）<sup>[42]</sup>由人工智能促进协会（AAAI）赞助，每年举行一次。会议展示关于娱乐中智能系统建模、开发和评估的跨学科研究，重点关注商业计算机和视频游戏。该会议长期以来一直以电脑游戏中的人工智能研究为特色，并发展到游戏以外的娱乐领域，会议上举行星际争霸人工智能自主游戏程序竞赛。会议从2005年开始，已经举办了14届。

### 5.3.2 CIG

IEEE计算智能与游戏大会（IEEE Conference on Computational Intelligence and Games, CIG）<sup>[43]</sup>是将计算和人工智能技术应用于游戏的年度盛会。会议的领域包括适用于各种游戏的各种计算智能和人工智能，包括棋盘游戏、视频游戏和数学游戏。于2005年开始作为研讨会，自2009年开始作为会议，每年召开一次。该会议上进行星际争霸

人工智能自主游戏程序比赛。

### 5.3.3 SSCAIT

学生星际争霸AI锦标赛（Student Starcraft AI Tournament & Ladder）<sup>[44]</sup>是一项教育活动，于2011年首次举办，是主要面向学生（非学生也允许提交）人工智能和计算机科学的竞赛。通过使用BWAPI提交用C++或Java编程的自主游戏程序来进行一对一星际争霸游戏。

## 6 未来研究趋势

非完美信息下的多智能体博弈研究是当前众多人工智能研究团队努力攻克的难题，虽然有新的成果不断产生，但直到目前，完整游戏情况下，人工智能游戏程序仍无法达到人类高水平玩家的水平。为了达成这一目标，除了文章前述的研究方法之外，一些研究者将注意力放在多智能体分布式决策上。分层和分任务决策对星际争霸来说可能是一种发展方向，通过将对抗任务分不同的层次和拆分成不同的任务模块，在小的任务范围内进行学习，最终将这些模块整合成一个完整的人工智能游戏程序。另外，将博弈论作为对抗分析的指导方法，会给该领域带来新的解决思路。除此之外，模仿学习、迁移学习以及增量式学习也可能在该领域展现出好的效果。

多智能体对抗博弈策略在一些实际领域具有应用价值。其中简单任务应用如追捕任务，即多机器人协同追捕“逃跑者”机器人。与之类似，有多机器人协同阻止入侵者的“疆土防御”任务。机器人足球是更高水平的复杂任务，各足球机器人需要团队协作采取策略与对手机器人团队进行对抗，防守好自己的球门并尽可能多地进球得分。值得注意的是，当前多智能体对抗博弈策略研究在军事领域受到重点关注。以美国军方为例，其连续几年发布的无人系统路线图均将多无人系统在战场中的协作作战列为重点发展方向，并进行了多项以多机器人系统或集群作战为内容的军事研究项目。另外，俄罗斯军方已将多无人系统应

用于实际战场。

目前，多智能体博弈游戏仍是一个开放的难题，人工智能游戏程序还无法超越人类顶级玩家的水平。随着人工智能技术的快速发展以及越来越多科研团队投入其中，该领域将会有更多更震撼的成果陆续产生。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Silver D, Huang A, Maddison C J, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search [ J ] . Nature, 2016, 529 ( 7587 ): 484–489.
- [ 2 ] Ontanon S, Synnaeve G, Uriarte A, et al. A survey of real-time strategy game AI research and competition in StarCraft [ J ] . IEEE Transactions on Computational Intelligence & Ai in Games, 2013, 5 ( 4 ): 293–311.
- [ 3 ] Aha D W, Molineaux M, Ponsen M. Learning to win: case-based plan selection in a real-time strategy game [ C ] . International Conference, on Case-Based Reasoning, ICCBR 2005, Chicago, USA, August 23–26, 2005.
- [ 4 ] Certicky M. Implementing a wall-in building placement in StarCraft with declarative programming [ J ] . Eprint ArXiv, 2013.
- [ 5 ] Weber B. Reactive planning for micromanagement in RTS games [ R ] . University of California, Santa Cruz, 2014.
- [ 6 ] David C. Heuristic search techniques for real-time strategy games [ D ] . Edmonton: University of Alberta, 2016.
- [ 7 ] Aha D W, Molineaux M, Ponsen M. Learning to Win: Case-Based Plan Selection in a Real-Time Strategy Game [ J ] . 2005.
- [ 8 ] Zhen J S, Watson I. Neuroevolution for micromanagement in the real-time strategy game Starcraft: Brood War [ M ] . AI 2013: Advances in Artificial Intelligence. Springer International Publishing, 2013: 259–270.
- [ 9 ] Weber B G, Mateas M. A data mining approach to strategy prediction [ C ] . IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, 2009, CIG 2009, 2009: 140–147.
- [ 10 ] Uriarte A, Ontanon S. Combat models for RTS games [ J ] . IEEE Transactions on Computational Intelligence & Ai in Games, 2016, 99: 1–1.
- [ 11 ] Gabriel S. Bayesian programming and learning for multi-player video games: application to RTS AI [ D ] . Lyon: University of Grenoble, 2012.
- [ 12 ] Park H, Cho H C, Lee K Y, et al. Prediction of early stage opponents strategy for StarCraft AI using scouting and machine learning [ C ] . Workshop at SIGGRAPH Asia. ACM, 2012: 7–12.
- [ 13 ] Hostetler J, Dereszynski E, Dietterich T, et al. Inferring strategies from limited reconnaissance in real-time strategy games [ C ] . Twenty-Eighth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. AUAI Press, 2012: 367–376.
- [ 14 ] Cho H C, Kim K J, Cho S B. Replay-based strategy prediction and build order adaptation for StarCraft AI bots [ C ] . IEEE Computational Intelligence in Games, 2013: 1–7.
- [ 15 ] Erickson G, Buro M. Global state evaluation in StarCraft [ C ] . Tenth AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment, AAAI Press, 2014: 112–118.
- [ 16 ] Helmke I, Kreymer D, Wiegand K. Approximation models of combat in StarCraft 2 [ J ] . Eprint Arxiv, 2014.
- [ 17 ] Mishra K, Sugandh N, Ram A. Case-based planning and execution for real-time strategy games [ C ] . International Conference on Case-Based Reasoning: Case-Based Reasoning Research and Development. Springer-Verlag, 2007: 164–178.
- [ 18 ] Synnaeve G, Bessiere P. A dataset for StarCraft AI & an example of armies clustering [ J ] . Eprint Arxiv, 2012.
- [ 19 ] Sukhbaatar S, Szlam A, Fergus R. Learning multiagent communication with backpropagation [ C ] . 29th Conference on Neural Information Processing Systems ( NIPS 2016 ), 2016.
- [ 20 ] Justesen N, Risi S. Learning macromanagement in StarCraft from replays using deep learning [ J ] . Eprint ArXiv, 2017.
- [ 21 ] Stefan W, Ian W. Applying reinforcement learning to small scale combat in the real-time strategy game StarCraft: Broodwar [ C ] . 2012 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games ( CIG ), 2012: 402–408.
- [ 22 ] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D. Human-level control through deep reinforcement learning [ J ] . Nature, 2015, 518 ( 7540 ): 529–533.
- [ 23 ] Kempka M, Wydmuch M, Runc G, et al. ViZDoom: A

- Doom-based AI research platform for visual reinforcement learning [ C ] . IEEE Computational Intelligence and Games, 2017: 1-8.
- [ 24 ] Usunier N, Synnaeve G, Lin Z, et al. Episodic exploration for deep deterministic policies: an application to StarCraft micromanagement tasks [ J ] . Eprint ArXiv, 2016.
- [ 25 ] Peng P, Wen Y, Yang Y, et al. Multiagent bidirectionally-coordinated nets: emergence of human-level coordination in learning to play StarCraft combat games [ J ] . Eprint ArXiv, 2017.
- [ 26 ] Foerster J, Farquhar G, Afouras T, et al. Counterfactual multi-agent policy gradients [ C ] . The Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence ( AAAI-18 ), 2018.
- [ 27 ] Vinyals O, Ewalds T, Bartunov S, et al. StarCraft II: a new challenge for reinforcement learning [ J ] . Eprint ArXiv, 2017.
- [ 28 ] Lanctot M, Zambaldi V, Gruslys A, et al. A unified game-theoretic approach to multiagent reinforcement learning [ C ] . The Thirty-first Annual Conference on Neural Information Processing Systems ( NIPS ), 2017.
- [ 29 ] Max J, Wojciech M C, Iain D, et al. Human-level performance in first-person multiplayer games with population-based deep reinforcement learning [ J ] . Eprint ArXiv, 2018.
- [ 30 ] Brown N, Sandholm T. Safe and nested subgame solving for imperfect-information games [ C ] . The Thirty-first Annual Conference on Neural Information Processing Systems ( NIPS ), 2017.
- [ 31 ] Xiao C J, Mei J C, Martin M. Memory-augmented Monte Carlo tree search [ C ] . The Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence ( AAAI-18 ), 2018.
- [ 32 ] Fang F, Nguyen T H, Pickles R, et al. PAWS — a deployed game-theoretic application to combat poaching [ J ] . Ai Magazine, 2017, 38 ( 1 ): 23-36.
- [ 33 ] Tuyls K, P érolat J, Lanctot M, et al. Symmetric decomposition of asymmetric games [ J ] . Scientific Reports, 2018.
- [ 34 ] Synnaeve G, Nardelli N, Auvolat A, et al. TorchCraft: a library for machine learning research on real-time strategy games [ J ] . Eprint ArXiv, 2016.
- [ 35 ] Tian Y, Gong Q, Shang W, et al. ELF: an extensive, lightweight and flexible research platform for real-time strategy games [ C ] . The Thirty-first Annual Conference on Neural Information Processing Systems ( NIPS ), 2017.
- [ 36 ] Sainbayar S, Arthur S, Gabriel S, et al. MazeBase: a sandbox for learning from games [ J ] . Eprint ArXiv, 2015.
- [ 37 ] Naddaf Y, Naddaf Y, Veness J, et al. The arcade learning environment: an evaluation platform for general agents [ J ] . Journal of Artificial Intelligence Research, 2013, 47 ( 1 ): 253-279.
- [ 38 ] OpenAI Gym [ EB/OL ] . <http://gym.openai.com/>.
- [ 39 ] Matthew J, Katja H, Tim H, et al. The malmo platform for artificial intelligence experimentation [ C ] . Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence ( IJCAI-16 ), 2016.
- [ 40 ] Wu H, Zhang J, Huang K. MSC: A dataset for macro-management in StarCraft II [ J ] . Eprint ArXiv, 2017.
- [ 41 ] Lin Z, Gehring J, Khalidov V, et al. STARDATA: a StarCraft AI research dataset [ J ] . Eprint ArXiv, 2017.
- [ 42 ] AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment ( AIIDE ) [ EB/OL ] . <http://www.aaai.org/Conferences/conferences.php>.
- [ 43 ] IEEE Conference on Computational Intelligence and Games ( CIG ) [ EB/OL ] . [https://cilab.sejong.ac.kr/sc\\_competition/](https://cilab.sejong.ac.kr/sc_competition/).
- [ 44 ] Student Starcraft AI Tournament & Ladder [ EB/OL ] . <https://sscaitournament.com>.

**作者简介:**

张宏达 (1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为移动机器人系统。

李德才 (1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为智能机器人。

何玉庆 (1980-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为机器人自主行为方法、非线性系统估计与控制、移动机器人系统。

# 基于人工智能技术的25个 行业发展趋势

张肇聿, 王一琳, 李志

(北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074)

**摘要:** 市场研究机构CB-Insights公司于2019年1月发布了一项有关人工智能应用前景的报告, 报告中总结了25个行业发展趋势, 并分别以市场活力水平和行业认可程度为横纵坐标, 将其划分为四种类型, 分别为: 确定前景、早期前景、预期前景和短暂前景。其中确定前景包含终端人工智能、人脸识别和医学影像与诊断等方向; 早期前景包含生成对抗网络、自动索赔系统和防伪等; 预期前景包含强化学习、自动驾驶等; 短暂前景包含: 智能语聊、药物研发等。随着人工智能算法的不断发展, 这些行业将会以更深更广的方式与其融合, 并不断涌现出新的结合点。

**关键词:** 人工智能; 发展趋势; 前景特征; 市场活力水平; 行业认可程度; 人脸识别; 生成对抗网络; 强化学习; 自动驾驶

中图分类号: TP18 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915 (2019) 01-0331-06

## Development Trends of 25 Industries Based on Artificial Intelligence Technology

ZHANG Zhaoyu, WANG Yilin, LI Zhi

(Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute, Beijing 100074, China)

**Abstract:** CB-Insights, a market research institute, published a report on the application prospects of artificial intelligence in January 2019. The report summarizes 25 trends and divides them into four characteristics, i.e. the necessary prospects, the experimental prospects, the threatening prospects and the transitory prospects, based on the market strength and industry adoption. The necessary prospects include edge artificial intelligence, facial recognition and medical imaging and diagnostics; the experimental prospects include generative adversarial networks, automatic claims processing and anti-counterfeiting; the threatening prospects include reinforcement learning, automatic driving, etc; and the transitory prospects include conversation AI, drug discovery, etc. With the continuous development of artificial intelligence algorithms, these industries will merge with them in a deeper and broader way, and new integration points will emerge constantly.

**Keywords:** Artificial Intelligence; Development Trend; Characteristics of Trend Development; Market Strength; Industry Adoption; Facial Recognition; Generative Adversarial Networks; Reinforcement Learning; Automatic Driving

## 1 引言

2019年1月，权威市场研究机构CB-Insights公司发布了一项报告<sup>[1]</sup>，预测了未来人工智能领域拥有极大发展前景的25个应用方向。这份报告是在分析了机构内部丰富的行业数据库后得出的，然后将这25个人工智能应用场景根据市场活力水平和行业认可程度两个方面进行归类。

市场活力水平参考了市场规模、投资者和资本的数量与质量、研发投入、收益情况、竞争压力和市场交易的质量。行业认可程度则是依据媒体关注度、客户采信情况和初创企业的发展势头。以这两项参考依据为横纵坐标，可得坐标图如图1所示，其中人工智能发展趋势被分为四种类型：

(1) 确定前景：该行业拥有稳定的需求，行业内的市场和客户对这一方向的投资和应用是持续增加的；

(2) 早期前景：这一方向的应用仍处于早期论证中，产品尚未被广泛使用，但是在科研机构 and 媒体中已经形成一定成果；

(3) 预期前景：此方向的产品与应用已经获得了广泛的投资，这一概念也被早期使用者所接受，预期未来会获得快速发展；

(4) 短暂前景：该方向有一定趋势，但是市场存在很强的不确定性，随着人们对该领域的关注度增加，有可能获得更多的机会和市场。

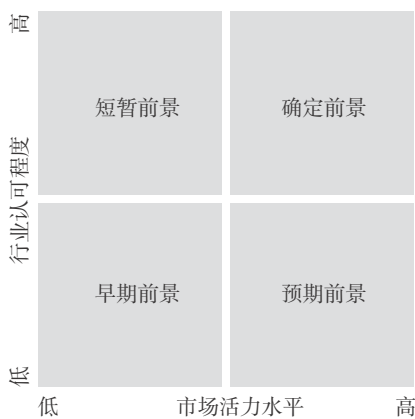


图1 四种行业发展特征

Fig.1 Four characteristics of trend development

## 2 确定前景应用

(1) 开源框架。由于开源软件的存在，进入人工智能行业的门槛比以往任何时候都要低。开源框架对于人工智能领域的发展是双向的。首先，它使所有人都可以访问该人工智能开源框架。反过来，许多科技公司也从加速人工智能研究发展的论坛或开发者中受益。例如，Google于2015年开放了它的TensorFlow机器学习数据库，在GitHub（一个用户可以协作开发的平台）上，每月有数百名用户参与关于TensorFlow的讨论、研究与开发。包括可口可乐、eBay和Airbnb等知名公司都在使用TensorFlow的开源数据库作为他们的人工智能开发框架。

(2) 终端人工智能。实时决策的需求将人工智能推向了终端领域。终端人工智能旨在能够在终端设备（如智能手机、汽车或穿戴设备）上运行人工智能算法，而不是借助与中央云或服务器的通信，从而使设备能够在本地处理信息并对情况做出更快的响应。例如在无人驾驶领域，自主车辆必须实时响应道路上发生的情况，并且可能在没有互联网连接的区域工作。在这种环境中，决策时间是极为重要的，任何短时间的延迟都可能导致致命的问题。

(3) 人脸识别。从解锁手机到航班登机，人脸识别已逐渐成为主流应用。卡内基梅隆大学最近获得了一项关于“幻觉面部特征”的专利，这是一种帮助执法机构识别蒙面嫌疑人的方法，即使只捕获了面部的眼周区域就可以重建一张完整的脸。然后可以使用面部识别将“幻觉脸”与实际脸的图片进行比较，以找到相关性强的脸。为提高面部识别的准确性，亚马逊探索了额外的验证方式，包括要求用户执行某些动作，如微笑、眨眼或倾斜头部。然后将这些操作与红外图像信息、热成像数据或其他此类信息结合起来，以获得更可靠的身份验证。

(4) 医学影像与诊断。2018年4月，美国食品药品监督管理局（FDA）批准了一项代号为IDx-DR的医疗相关人工智能软件，该系统能在87.4%的时间内正确识别出“轻度以上糖尿病性视网膜病

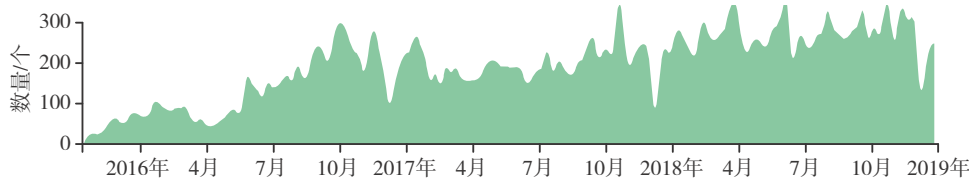


图2 TensorFlow平台评论数量  
Fig.2 Contributions to TensorFlow

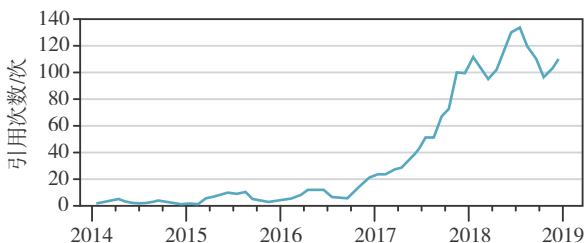


图3 中国人脸识别技术在媒体中引用次数  
Fig.3 China's facial recognition trends up in the news mentions

变”患者，并在89.5%的时间内识别出没有这一疾病的人群。除此之外，FDA近期为医用人工智能应用提供了快速监管审批的服务，批准了许多拥有庞大客户群体的医疗项目，如用于CT扫描检测中风的Viz LVO和发现肝肺损伤的Arterys套件。快速监管审批为80多家人工智能成像和诊断公司开辟了新的商业途径，这些公司自2014年以来已筹集了股权融资，共有149宗交易。

(5) 预测性维护。预测性维护技术的应用帮助制造厂商、设备保险公司和客户在设备维修和故障识别中节约了可观的资金和精力。大数据表明，意外的设备故障是导致工厂生产停机的主要原因之一，而且计划外停机平均使公司损失25万美元/小时。在预测性维护中，传感器和智能摄像头从机器收集连续的数据流，如温度和压力，而这些实时数据为机器学习算法的迭代和更新提供了丰富的数据支持。随着时间的推移，这些算法可以在故障发生之前对其进行预测。

(6) 电子商务搜索系统。对搜索词的上下文理解正逐渐完成实验阶段，但距离广泛应用还有很长的路要走。目前为止，零售商仍然没有十分重视与人工智能相关的盈利策略，许多零售公司还没有扩展或优化其电子商务运营。最近，网络零售平

台eBay开始强制要求卖家完善产品描述，并使用机器学习来处理这些数据，以在目录中找到类似的产品。除此之外，图片搜索初创公司Visenze与优衣库、Myntra和日本电子商务巨头Rakuten等客户合作。Visenze允许店内客户在商店里对他们喜欢的东西拍照，然后上传图片，在网上找到确切的产品。

### 3 早期前景应用

(1) 胶囊网络。谷歌深度学习领域研究员Hinton在2011年的一篇文章中提出了一个新概念：胶囊网络<sup>[2]</sup>。他认为目前识别图像的方法表现不佳，包括当今深度学习中最流行的神经网络结构之一，即卷积神经网络(CNN)，在图像识别的应用上依然存在许多问题。Hinton在2018年发表的论文中，讨论了一种名为胶囊网络(Capsnet Networks)的替代概念<sup>[3]</sup>，这种新的体系结构有望在多个方面超越CNN。

(2) 新一代假肢。通过结合机器学习、生物学和物理学等技术，有望解决假肢使用中最困难的灵巧性问题。从2006年以来，美国国防部预先研究计划局(DARPA)已经花费了数百万美元在高级假肢项目上，由约翰霍普金斯大学牵头，旨在帮助受伤的退伍军人。在加入了机器学习算法后，从正常人的自主运动中解码大脑和肌肉信号，方便其转化为机器人控制。在2018年，科学界研究的重点是使用强化学习来预测假肢的性能，研究人员使用一个名为Opensim的开源软件来模拟人的运动。

(3) 临床试验志愿者。临床试验中最大的难题之一是招募合适的志愿者。对临床研究团队和志

愿者来说，将特定的试验与匹配的患者进行关联是一个耗时且具有挑战性的过程。理想的解决方案是通过人工智能软件，从患者的医疗记录中提取相关信息，与正在进行的试验比较，并进行详细的匹配研究。自2015年以来，苹果公司推出了两个开源框架：ResearchKit和CareKit，以帮助临床试验团队招募志愿者并远程实时监控他们的健康情况。这些框架允许研究人员和开发人员创建医疗应用程序来监控患者特定的医学指标，从而消除医疗的地理障碍。

(4)生成对抗网络。生成对抗网络(GANs)是谷歌的研究人员于2014年提出的概念<sup>[4]</sup>，这项技术的基本观点是利用了人工智能对抗人工智能所产生的结果。例如有两个神经网络：其中一个作为生成器生成一个假图像，另外一个作为鉴别器，它将结果与真实世界的图像进行比较，并向生成器反馈与真实图像的相似程度。这就形成了两个神经网络和一个持续的反馈回路，这一过程试图让生成器和鉴别器彼此变得更聪明。

(5)联盟学习。联盟学习作为一种新开发的人工智能算法主要用于保护隐私，同时用敏感的用户数据训练学习算法<sup>[5]</sup>。以移动端设备的应用为例，用户的手机会根据本地的数据对模型进行迭代和更新。这一过程中，只有更新框架被发送回云端，以改善使用环境的全局状态，而具体的隐私数据并不会被导出。谷歌支持的人工智能初创公司Owkin正在使用保护敏感用户数据的联盟学习方法，该系统允许不同的癌症治疗中心在详细的病人隐私数据被隐藏的情况下依然能够进行协作。

(6)医疗生物特征识别。利用神经网络，研究人员和医疗人员开始研究和测量以前难以量化的

医疗生物特征。2019年，谷歌公司的研究人员根据视网膜、声音等生物特征和心血管疾病的相关性，并对被测者的年龄、性别和吸烟等影响因素进行精确量化，通过对神经网络的训练，能够对心血管疾病的风险性进行评估。与此同时，许多公司和组织机构正着手于更新人工智能算法，可实现对冠状动脉疾病、糖尿病、动脉硬化和血压的监测与监控。

(7)自动索赔系统。保险公司和初创企业逐步开始研发和使用基于人工智能算法的自动索赔系统，用来计算车主的风险评分，分析事故现场的图像，并监控驾驶员的行为。阿里巴巴旗下的蚂蚁金融在其事故处理系统中使用深度学习算法进行图像处理，车主或司机可以把车辆受损信息的图片发送到系统中，然后神经网络分析图像并自动进行损伤评估，并将其发送给汽车保险公司。除此之外阿里巴巴还推出了一种叫做“汽车保险积分”的方法，利用机器学习，根据信用记录、消费习惯和驾驶习惯等因素来计算车主的风险评分。

(8)防伪。随着电子商务的蓬勃发展，假货越来越难被发现，为了应对这种情况，品牌厂家和零售商开始尝试利用人工智能来辨别产品真伪。造假者往往使用与原始品牌非常相似的关键词和图像，不仅在假冒网站上销售假冒商品，也在合法市场或平台上销售假冒商品，还通过社交媒体促销假冒商品。阿里巴巴报告称，他们正在利用深度学习不断监测其平台的知识产权侵权行为。它使用图像识别来尝试判别商品图像中的字符，再加上相关的语义识别，从而完成防伪监视。

除以上几项应用方向外，基于人工智能算法的无人零售、自动化后台、同声翻译和数据合成



图4 基于生成对抗网络的人脸替换

Fig.4 Face to face transition based on GANs



训练也都是符合早期前景特征的应用方向。在结合了更为智能的算法后，整个行业可能会出现颠覆性的变化。

## 4 预期前景应用

(1) 强化学习。自从谷歌公司开发的AlphaGo在围棋比赛中击败世界排名第一的中国选手后，在经过海量的数据学习后，它所应用的强化学习算法引起了广泛的关注，并在游戏和机器人仿真中得到了极大的发展。简单来说，强化学习算法的基本原理是为了达到目标的最大化回报，系统所需要采取的行为的集合<sup>[6]</sup>。最近，加州大学伯克利分校的研究人员利用计算机视觉和强化学习从YouTube视频中学习人体动作和姿势，使计算机模拟的角色能够复制和识别视频中的动作，而无需手动标注姿势。

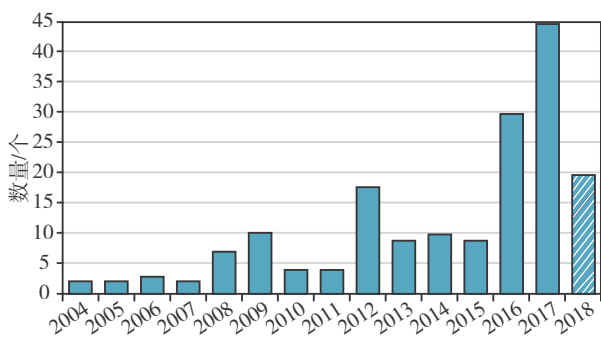


图5 美国关于强化学习的专利申请数量

Fig.5 US patent applications for reinforcement learning

(2) 网络优化。从促进频谱共享到监控资产，再到提出天线的优化设计，人工智能正在开始改变电信技术。电信网络优化是用于改善延迟、带宽和设计架构的一项新兴技术。对于通信服务提供商而言，优化意味着更好的客户体验。除了带宽限制外，电信业面临的巨大挑战之一是网络延迟。最近，苹果公司获得了一项专利，利用机器学习来形成预测网络，用来预估无线设备可能会采取的操作，并提前下载数据包以减少延迟。

(3) 自动驾驶。尽管自动驾驶车辆有着巨大的市场机遇，但实现完全无人自主的时间表仍然不

可预估。2017年4月，百度宣布推出了一个关于自动驾驶解决方案的开放平台：阿波罗(Apollo)，这一技术平台吸引了来自全球各地的合作伙伴。与其他开放源代码的平台一样，其理念是通过开放人工智能和自动驾驶的研究，使之能够受益于科研生态系统中其他参与者的研究成果。让每个人都可以使用源代码，使公司和研究团队可以在现有研究的基础上进行构建，而不是从头开始。



图6 媒体关于自动投递的提及次数

Fig.6 Number of news mentions for 'autonomous delivery'

(4) 农作物监测。新型农业正在开展三种类型的作物监测：地面、空中和立体地理空间。植保无人机作为农作物监测的主要应用产品，预计2021年全球精准农业无人机市场将达到29亿美元。无人机可以为农民绘制农田地图，利用热成像监测水分含量，还可以识别虫害作物和喷洒杀虫剂。有许多初创公司正致力于利用人工智能算法，为第三方无人机捕获的数据做出精准的分析判断。基于人工智能算法的软件平台与无人机搭载平台的结合正在逐渐成为农作物监测发展的主流。

## 5 短暂前景

(1) 网络漏洞搜索。随着网络技术的快速迭代，对网络攻击的反应速度与操作水平已经明显不足，利用机器学习主动搜索威胁的技术正在网络安全中获得优势。威胁搜索是一种主动寻找恶意活动的行为，而不是仅仅对警报或发生后的漏洞作出反应。根据全球公共数据泄露数据库中的泄露水平指数，18年上半年全球共有45亿条数据

记录遭到泄露。与人工智能所参与的其他工业应用不同，网络防御是黑客和安全人员之间的一种矛和盾的关系，两者都利用机器学习的进步来提高自身的技术水平并保持领先。

(2) 智能语聊。对于许多企业的应用场景来说，聊天机器人已经成为人工智能的代名词。最近，谷歌开发了一项人工智能对话功能，它可以代替用户进行电话呼叫和预订，并且可以像真实的人一样聊天。在某些应用程序中，基于语音和文本的智能语聊系统所表达的信息比其他应用程序更可靠。聊天机器人最广泛的应用之一是客户服务，机器人程序构成与用户交互的最外端接触层，并根据复杂程度将查询结果传递给人类<sup>[7]</sup>。

(3) 药物研发。随着人工智能生物技术初创企业的兴起，传统制药公司正在寻求人工智能系统为长周期的药物研发过程提供创新解决方案。2018年5月，辉瑞与Xtalpi公司建立了战略合作伙伴关系，以预测小分子的药物特性，并开发基于计算的合理药物设计。但辉瑞并不是唯一一家与人工智能算法结合的药物公司。诺华、赛诺菲、葛兰素史克、安进和默克等顶级制药公司最近几个月都宣布与人工智能公司建立合作关系，研发用于肿瘤和心脏病等一系列疾病的新药。

## 6 结束语

CB-Insights公司发布的这篇关于人工智能发展前景的报告，不仅很好的总结了最近几年十分热门的人工智能应用，还依据发展趋势和特点对它们进行了划分。无论是科研学术还是投资应用，这些应用的解读都具有一定的参考价值。随着人工智能算法和相关应用系统的不断研发与更新，

越来越多的行业会以更深更广的方式进行结合，并且为人类生产生活带来巨大的变革。

## 参考文献

- [1] What's next in AI? artificial intelligence trends [EB/OL]. [2019]. <https://app.ebinsights.com/research/report/ai-trends-2019/.pdf>.
- [2] Hinton G E, Krizhevsky A, Wang S D. Transforming auto-encoders [C]. International Conference on Artificial Neural Networks. 2011.
- [3] Anil R, Pereyra G, Passos A, et al. Large scale distributed neural network training through online distillation [J]. 2018.
- [4] Goodfellow I J, Pouget-Abadie J, Mirza M, et al. Generative adversarial nets [C]. International Conference on Neural Information Processing Systems. 2014.
- [5] Konečný J, McMahan H B, Yu F X, et al. Federated learning: strategies for improving communication efficiency [J]. 2016.
- [6] Silver D, Huang A, Maddison C J, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search [J]. Nature, 2016, 529 (7587): 484-489.
- [7] Graesser A C, Vanlehn K, Jordan P W, et al. Intelligent tutoring systems with conversational dialogue [J]. Ai Magazine, 2001, 22 (4): 39-51.

### 作者简介:

张肇聿(1994-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为控制算法、无人系统SLAM算法。

王一琳(1986-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为情报跟踪分析、无人系统技术、科技期刊出版。

李志(1989-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为情报跟踪分析、无人系统技术、科技期刊出版。

# 人工智能在自动驾驶领域的应用及启示

吴琦, 于海靖, 谢勇, 刘贝

(海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京 100074)

**摘要:** 对人工智能在自动驾驶领域的应用进行了综合评述, 同时对其他无人运动系统的创新研究进行思考。首先介绍了自动驾驶系统的硬件架构, 包括感知模块、自动驾驶计算机、供电模块、信号通信模块、执行和制动模块五部分, 并以通用Cruise无人驾驶汽车为例介绍了其与传统汽车硬件部分不同之处; 然后将自动驾驶软件按功能分为定位、感知、规划、控制四个模块, 并一一介绍了人工智能算法在其中的创新应用; 最后从自动驾驶技术进行拓展, 提出智能无人系统创新研究思路。

**关键词:** 自动驾驶; 人工智能; 高精度地图; 神经网络; 无人系统

**中图分类号:** TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2019) 01-0337-06

## Application and Inspiration of Artificial Intelligence in the Field of Autonomous Driving

WU Qi, YU Haijing, XIE Yong, LIU Bei

(HIWING General Aviation Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

**Abstract:** This paper reviews the application of artificial intelligence in the field of autonomous driving, and thinks about the innovative research of other unmanned systems. Firstly, the hardware architecture of the autonomous driving system is introduced, including the sensing module, autonomous computer, power supply module, communication module, actuating and braking mechanisms. And taking the Cruise, an unmanned vehicle of general motors company, as an example, the paper emphatically introduces the differences between it and traditional vehicle hardware. Then the autopilot software is divided into localization, perception, planning and control according to functions, and the innovative application of artificial intelligence algorithm is introduced one by one. At last, the technology of driverless car driving is extended, and a new idea of intelligent unmanned system innovation research is put forward.

**Keywords:** Autonomous Driving; Artificial Intelligence; Intelligent Unmanned Systems; HD (High Definition) Map; Neural Network

### 1 引言

人们越来越期望通过无人系统代替人类进行一些活动。小到帮助人们自动清扫地面的扫地机器人, 大到协助有人机进行战场态势感知协同作战的无人机, 无人系统已经渗透到人类活动的方方面面。无人车作为其中之一, 其市场需求非常广泛,

从战场作战、港口货运到乘用车驾驶林林总总。近年来随着需求的推动, 自动驾驶汽车领域取得很多技术突破, 同时吸引更多投资以及科技力量的投入其中, 使其成为一个朝气蓬勃的新兴技术领域<sup>[1-3]</sup>。

自动驾驶是通过自动驾驶系统, 部分或完全代替人类驾驶员, 安全地驾驶汽车。汽车自动驾驶系统是一个涵盖了多个功能模块和多种技术

的复杂软硬件结合的系统。在机器学习、大数据和人工智能技术大规模崛起之前，自动驾驶系统和其他的机器人系统类似，整体解决方案基本依赖于传统的优化技术。随着人工智能和机器学习在计算机视觉、自然语言处理以及智能决策领域获得重大突破，学术和工业界也逐步开始在无人车系统的各个模块中进行基于人工智能和机器学习的探索<sup>[4-6]</sup>，目前已取得部分成果。而自动驾驶系统作为代替人类驾驶的解决方案，其设计思路 and 解决方法背后都蕴含了很多对人类驾驶习惯和行为的理解。现在，自动驾驶已经成为人工智能最具前景的应用之一。

## 2 自动驾驶硬件系统架构

自动驾驶系统一般是在传统汽车上进行加装来构建整个系统。下面引用通用汽车公司的Cruise自动驾驶汽车的硬件系统架构<sup>[7]</sup>(图1)进行介绍，其他公司方案类似<sup>[8-9]</sup>。

从图1中可以清晰地看出，自动驾驶硬件系统主要包含五部分：感知模块、自动驾驶计算机、供电模块、信号通信模块、执行和制动模块。

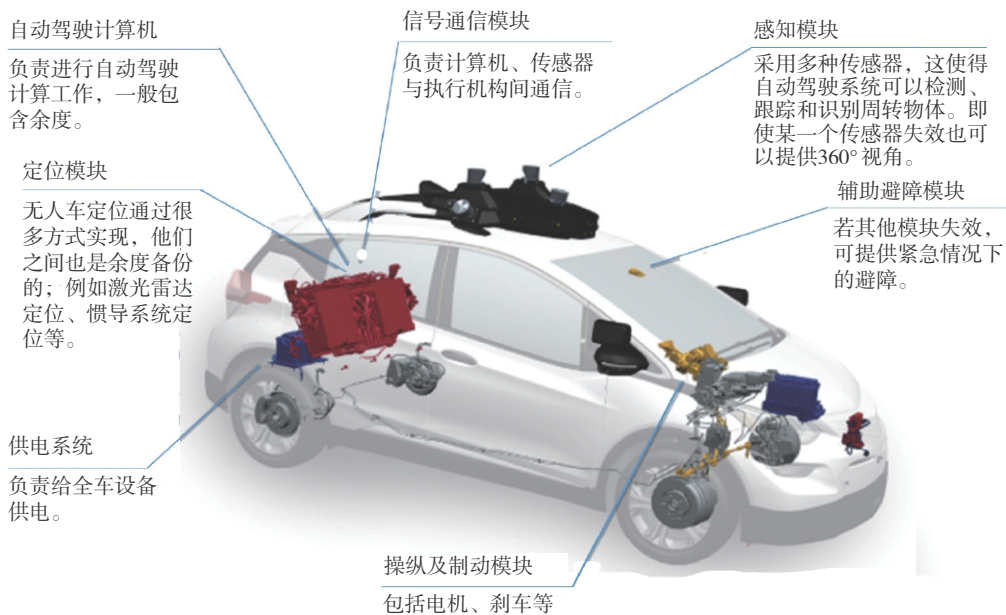


图1 自动驾驶汽车硬件系统架构

Fig.1 Hardware architecture of autonomous vehicle

### 2.1 感知模块

无人车的感知模块非常完备，是传统车辆所没有的。这部分主要代替有人驾驶汽车的驾驶员的眼睛和“车感”。通常由摄像头、激光雷达、毫米波雷达和GNSS/IMU组成。

摄像头主要用于获取图像信息，用于识别行人、车、树、红绿灯、信号灯，进行定位等。

激光雷达用于获取激光扫描反射数据，用于识别行人、车、树等障碍物，进行定位等。其三维测距原理是通过测量激光信号的时间差、相位差确定距离，通过水平旋转扫描测角度，并根据这两个数据建立二维的极坐标系，再通过获取不同俯仰角度的信号获得第三维的高度信息。图2为激光获取的数据信息经过识别分类标注不同颜色处理后得到的图。

毫米波雷达获取反射数据，主要用于识别障碍物，测距，在传统汽车上安装用于辅助避障。GNSS/IMU组合用于实时获取全局位置信息。

在感知模块中，最重要的当属激光雷达，因为它精度高，可靠性高，满足了自动驾驶高精度定位、识别等功能，可以说直接加速了自动驾驶技术的工程应用。

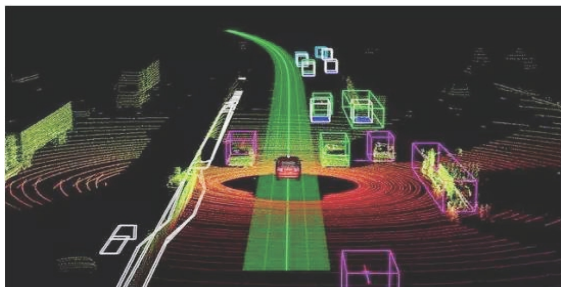


图2 激光信息

Fig.2 Laser intelligence

## 2.2 自动驾驶计算机

自动驾驶计算机顾名思义是进行自动驾驶相关的计算处理，一般主要包含五部分：CPU、GPU、超大内存、超大硬盘存储空间和丰富的硬件接口。

其中，CPU根据其性能特点用于处理含有逻辑判断、流程等控制、规划功能软件；GPU根据其性能特点用于获取传感器数据，进行大量同类型数据计算，例如识别、分类处理，执行感知、定位功能软件；超大内存用于大量数据处理、加载高精度地图；超大硬盘存储空间用于存储高精度地图；丰富的硬件接口，例如串口、CAN、以太网、USB等，用于多种传感器连接。

## 2.3 执行与制动模块

执行与制动系统也在随着自动驾驶技术向前发展。执行系统接收自动驾驶控制模块操作车辆的执行指令，控制车辆动力（油门和档位）、底盘（转向和制动）和电子电器等系统的执行，实现自动驾驶的速度和方向控制。而传统的汽车底盘制动系统是液压、气压制动，为了实现车身结构的稳定并将智能驾驶功能延伸，线控制动将是汽车制动技术的长期发展趋势，线控制动可以深度融合智能驾驶功能模块。这类类似于航空领域飞行操纵系统由液压逐步转换为电传操纵系统的过程。

## 3 自动驾驶软件系统架构

如果说自动驾驶硬件系统是在传统车辆上进行了加装升级，那么软件系统可谓是全新的。自

动驾驶软件按功能主要分四个模块：定位、感知、规划、控制。其中定位模块被普遍认为是基础，各模块包含内容见图3。



图3 自动驾驶软件系统架构

Fig.3 Architecture of self-driving software system

其中，定位解算离不开高精度地图的辅助，基于定位信息可以开展环境感知、路径规划驾驶行为决策以及汽车运动控制等内容，而路径规划、行为决策以及运动控制又是三个逐渐具体化、底层化的问题，前一个输出可以作为后一个的输入条件来使用。也就是说控制模块可以将决策规划的动作作为输入，计算应该执行的转弯角和油门。

## 4 定位与感知

### 4.1 定位

为满足汽车驾驶需求，目前自动驾驶定位精度需求为10cm左右，如此高精度的定位系统采用的定位方案一般是多传感器以及高精度地图融合的方式，具体为GNSS、IMU、激光雷达、相机、高精度地图融合。其中卫星导航系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）主要提供粗略的绝对位置（经纬度），然后根据采集自身所在环境的激光雷达数据和相机数据与高精度地图匹配得到更精确的定位。IMU（Inertial Measurement Unit）惯性器件提供状态估计算法中状态方程（预测）中的加速度、角速度。

百度无人车团队<sup>[10]</sup>采用的定位方案框图见图4。这是目前比较常见且有效的定位算法架构。定位算法的精妙之处在于，一些微小的处理与改变也能引起较大的精度差距。所以，不断有学者在定位算法上深耕突破。

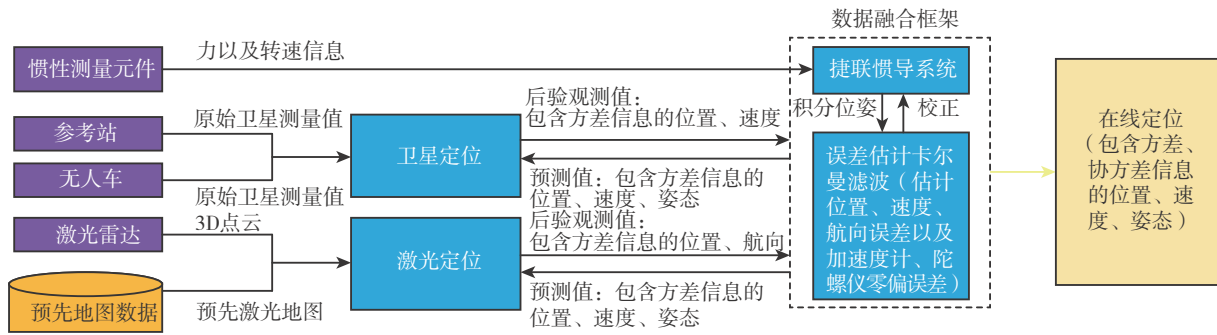


图4 定位算法实施框图

Fig.4 Block diagram of localization algorithm implementation

## 4.2 高精度地图

在定位方案中，高精度地图起了举足轻重的作用<sup>[11]</sup>。高精度地图（HD Map）是通过高精度激光雷达、相机、GNSS等传感器获取道路信息数据。传感器数量越多、信息覆盖越全面、精度越高，高精度地图就越精确。在自动驾驶使用时，可将其表示为计算机语言的形式存储在自动驾驶计算机的硬盘当中。驾驶过程中通过实时与高精度地图比对来获得高精度定位。

高精度地图需事先建立，一辆建立高精度地图外业车造价高达800万人民币，多数开销在传感器系统上。由于采集的数据庞大，必须通过人工智能算法进行数据处理。高精度地图主要包含：车道经纬度、车道宽、曲率、高程；车道交叉口位置、宽度、曲率、道口数；标牌位置以及含义；信号灯位置等。

高精度地图的建立过程中存在大量的分类问题，计算机视觉领域采用卷积神经网络（Convolution Neural Network, CNN）使问题得到很好的解决。

卷积神经网络由一个或多个卷积层和全连接层（对应经典的神经网络，可有可无）组成，卷积层执行的计算包含卷积操作和池化操作。卷积计算是通过不同窗口数据和滤波矩阵（一组固定的权重）做内积（逐个元素相乘再求和）的操作得到卷积后的数据；池化计算将数据分块，每块找最大或求平均作为数据块的代表值。具体操作示意图见图6。

卷积神经网络算法还有一个特点是权值共享，

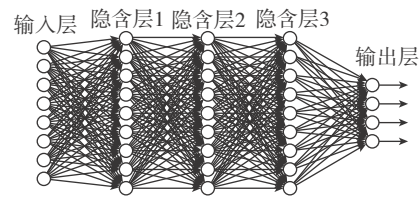


图5 神经网络示意图

Fig.5 Schematic diagram of neural network

对于一幅图片上每个点，在某一层的卷积操作权值是相同的，卷积神经网络训练的参数转化为训练滤波矩阵（卷积核），参数大大减少。卷积神经网络就是通过多个卷积层得到不同方向上的几何信息特征，通过提取这些特征，得到输入数据的相关性，通过考虑这些相关性减少训练复杂度，该方法在图像和语音处理上具有很好的应用。

## 4.3 感知

在线进行环境感知的方法类似高精度地图的构建过程，对采集的数据进行在线实时识别、分类，区别在于输入数据是动态的，具有新的挑战。

## 5 规划与控制

### 5.1 规划

规划问题是根据感知的动态环境与对运动体的预测情况进行运动序列决策<sup>[12]</sup>。这个决策问题在复杂环境下非常复杂，可以设想通过一个极其复杂的路口对规划问题的考验，是体现自动驾驶智能程度的关键问题。传统A\*、Dijkstra等路径规

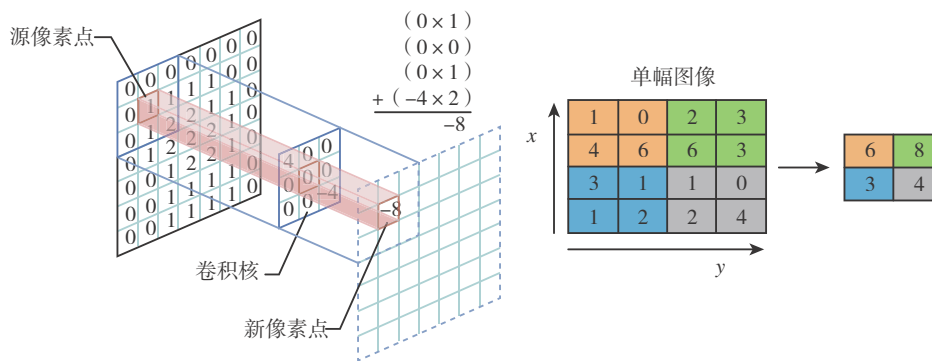


图6 卷积（左）和池化（右）操作示意图

Fig.6 Schematic diagram of convolution (left) and pooling (right) operations

划算法可实现车辆保守的驾驶，但复杂动态环境不适用，时间复杂度高，而强化学习是解决序列决策问题的好方法，目前在解决自动驾驶规划问题上有很好的仿真验证。

强化学习是与监督学习、无监督学习平级的机器学习的一个分支，来源于动物学习心理学，最早可追溯到巴普洛夫的条件反射试验，通过反馈获得成效的评价来不断提高学习效果。

强化学习问题的基本结构是交互<sup>[13]</sup>，一个智能体处于一个环境中，在每一个时间，智能体做出一个动作( $a$ )，然后从环境中获得观测(状态量 $s$ )以及回报(收益 $r$ )，强化学习的学习目标是：如何在未知环境中采取一系列行为，来最大化智能体收到的(总)累积回报(收益)。这个交互过程在一个时间段内状态、动作、回报的迭代关系如图7所示。

强化学习具有以下特点：本质上是闭环系统，输入和输出相互依赖；反馈是延时的，不是即时的，一个动作的影响可能几步之后才会体现；没有直接的指导告诉该怎么做，只有回报函数；时间很关键，观测、回报等是关于时间的序列，不满足独立同分布假设；智能体的动作直接影响到它之后收到的数据。

基于以上特点，假设环境状态的集合是 $S$ ，动作集合是 $A$ ，强化学习有四个要素：

- 策略( $\pi$ )：从环境状态到动作的映射学习，这个映射叫做策略，记为 $\pi: S \rightarrow A$ 。
- 回报( $R$ )：由状态和动作产生的影响的量化表示，记作 $R: S \times A \rightarrow R$ 。

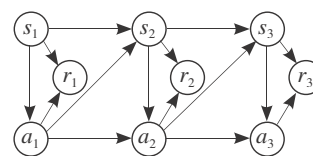


图7 状态、动作、回报的迭代关系示意图

Fig.7 A diagram of the iterative relationships of states, actions, and returns

- 价值函数：由未来 $h$ 步回报组成，最大化价值函数的策略 $\pi$ 成为强化学习目标。

- 模型：

模型已知(白箱)：系统转移到下一步状态 $S'$ 的概率 $G$ 已知，动作 $a$ 产生的回报 $r$ 已知；模型未知(黑箱)：系统转移到下一步状态 $S'$ 的概率 $P$ 未知，动作 $a$ 产生的回报 $r$ 未知，大部分场景模型都是未知的。

强化学习理论比较深奥，入门门槛较高。强化学习解决问题实施方法是离线训练学习(试错)+在线推断决策。由于神经网络擅长人类很容易完成但是很难去给出规范(解析)的描述，所以在机器学习领域广泛使用，将学习到的策略用神经网络作为函数近似器(神经网络可以认为是一种非线性拟合)的强化学习方法，称为深度强化学习<sup>[14-15]</sup>。深度强化学习被认为是走向通用人工智能的必经之路<sup>[16]</sup>。目前，采用深度强化学习解决自动驾驶的路径规划问题的理论研究和仿真试验表明其卓有成效<sup>[17]</sup>。

## 5.2 控制

控制的任务是消化上层动作规划模块的输出轨迹点，通过一系列动力学计算转换成对车辆油门、

刹车以及方向盘控制信号，从而尽可能地控制车去实际执行这些轨迹点。该问题一般转化为找到满足车辆动态姿态限制的方向盘转角控制（车辆横向控制），和行驶速度控制（车辆纵向控制）。对这些状态量的控制可以使用经典的PID控制算法，但其对模型依赖性较强，误差较大。智能控制算法，如模糊控制、神经网络控制等，在无人车控制中也得到广泛研究和应用。其中，神经网络控制利用神经网络，把控制问题看成模式识别问题，被识别的模式映射成“行为”信号的“变化”信号。甚至可以用驾驶员操纵过程的数据训练控制器获取控制算法。

## 6 结束语

汽车作为陆上运动体，其自动驾驶问题无论是按硬件系统还是软件系统划分都与空中的运动体（无人机）、水下的运动体（航行器）的自动驾驶与控制问题很相似。通过了解学习自动驾驶的技术路线，或许我们可以得到无人运动体智能化创新的思路。首先，提高获取信息能力、信息质量，增加信息种类、数据量，有助于提高系统智能性；其次，面向未来战场环境，环境模型复杂多变，传统方法适应性差，需探索不依赖模型的决策方法，强化学习或许可以尝试；最后，创新需要坚持问题导向，问题是实践的起点、创新的起点，发现问题，解决问题。

## 参考文献

- [1] 陈晓博. 发展自动驾驶汽车的挑战和前景展望 [J]. 综合运输, 2016(11): 9-13.
- [2] 余阿东, 陈睿炜. 汽车自动驾驶技术研究 [J]. 汽车实用技术, 2017(2): 124-125.
- [3] 朱敏慧. 逐步实现自动驾驶 5 个层级 [J]. 汽车与配件, 2016(11): 4.
- [4] 高洪波, 张新钰, 张天雷, 等. 基于云模型的智能驾驶车辆变粒度测评研究 [J]. 电子学报, 2016, 44(2): 365-373.
- [5] 郭旭. 人工智能视角下的无人驾驶技术分析与发展 [J]. 电子世界, 2017(20): 64-65.
- [6] 王科俊, 赵彦东, 邢向磊. 深度学习在无人驾驶汽车领域应用的研究进展 [J]. 智能系统学报, 2018, 13(1): 55-69.
- [7] 2018 Self-driving safety report [R]. General Motors Cooperation, February 2018.
- [8] On the road to fully self-driving-modeling the future challenge [R]. Waymo Safety Report, October 2017.
- [9] Apollo pilot safety report 2018 [R]. July, 2018.
- [10] Wan G, Yang X, Cai R, et al. Robust and precise vehicle localization based on multi-sensor fusion in diverse city scenes [C]. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, QLD, 2018.
- [11] Seif H G, 胡晓龙. 智能城市中自动驾驶汽车工业的关键挑战: 高清地图 [J]. Engineering, 2016(02): 27-35.
- [12] 薛建儒, 李庚欣. 无人车的场景理解与自主运动 [J]. 无人系统技术, 2018, 1(2): 24-33.
- [13] Lillierap T P, Hunt J J, Pritzel A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning [J]. Computer Science, 2015, 8(6): A187.
- [14] Van H H, Guez A, Silver D. Deep reinforcement learning with double q-learning [J]. Computer Science, 2015.
- [15] 刘全, 翟建伟, 章宗长, 等. 深度强化学习综述 [J]. 计算机学报, 2018, 41(1): 1-27.
- [16] 赵冬斌, 邵坤, 朱圆恒, 等. 深度强化学习综述: 兼论计算机围棋的发展 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(6): 701-717.
- [17] Scott P, Hans A, Xinxin D, et al. Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles [J]. Machines, 2017, 5(1).

### 作者简介:

吴琦(1991-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人飞行控制。

于海靖(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人飞行控制。

谢勇(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人飞行控制。

刘贝(1991-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人飞行控制。



# 行人检测算法ACF的后处理改进

梁桥康, 汤 鹏, 晏昕童, 孙 炜

(湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 电子制造业智能机器人技术湖南省重点实验室, 长沙 410082;  
机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室, 长沙 410082)

**摘 要:** 在无人驾驶技术的发展过程中, 行人感知和检测技术被公认为最重要的技术之一。因其不但对准确性要求极高, 而且行人检测的实时性也对于无人车能否及时避险有着很重要的意义。ACF (Aggregate Channel Feature) 算法是公认的快速行人检测算法之一, 针对传统后处理方法的不足, 对其提出了改进方法。该方法引入了高分保留尺度比变量和区域扩散抑制策略对行人周围的误检窗口进行动态阈值抑制, 基于行人本身的宽高比特性提出窗口修正机制, 使误检变为正确窗口。在INRIA行人检测数据集上进行测试, 可以使ACF算法在不损失过多时间的情况下, 大大提高行人检测精度。

**关键词:** 行人检测; 无人驾驶; 窗口修正机制; 后处理; 非极大值抑制; 实时检测

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2019) 01-0343-10

## Improvement Methods of Post Processing for Pedestrian Detection Algorithm of ACF

LIANG Qiaokang, TANG Peng, YAN Xintong, SUN Wei

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; Hunan Key Laboratory of Intelligent Robot Technology in Electronic Manufacturing, Changsha 410082 China; National Engineering Laboratory for Robot Vision Perception and Control Technologies, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In the development of driverless technology, pedestrian perception and detection technology is recognized as one of the most important technologies. Because it requires high accuracy, and the real-time pedestrian detection is of great significance to whether the unmanned vehicle can avoid danger in time. ACF (Aggregate Channel Feature) algorithm is one of the recognized fast pedestrian detection algorithms. Aiming at the shortcomings of traditional post-processing methods, this paper proposes an improved post-processing method. In this method, a high-score reserved scale ratio variable and a region diffusion suppression strategy are introduced to suppress the dynamic threshold of false detection windows around pedestrians. Based on the wide-to-high ratio of pedestrians, a window correction mechanism is proposed to change the false detection into the correct window. Testing on INRIA pedestrian detection data sets can greatly improve the accuracy of pedestrian detection without losing too much time in ACF algorithm.

**Keywords:** Pedestrian Detection; Driverless Technology; Aggregated Channel Features; Post Processing; No-Maximum Suppression; Real-Time Detection

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-01-12

基金项目: 国家自然科学基金 (61673163); 电子制造业智能机器人技术湖南省重点实验室开放基金 (IRT2018003)

## 1 引言

行人检测作为目标检测重要的分支。在无人驾驶、智慧城市和天眼侦测系统等领域中应用广泛<sup>[1]</sup>。近年来，基于行人检测的改进主要集中在检测器本身的候选框生成和分类能力上，主要是通过探寻有效特征<sup>[2-3]</sup>、增加特征维度<sup>[4-6]</sup>或设计更强的特征提取器或分类器<sup>[7-10]</sup>等，而检测结果的后处理方面鲜有改进。行人检测方法多是基于滑动窗口机制<sup>[7-11]</sup>，结合多尺度和小步长的滑动窗口能够有效地减少漏检数，但是也带来了一个难题：目标周围会产生大量覆盖目标整体或部分的彼此邻近窗口，分类器有很大可能将这些窗口分类为包含目标，从而导致对目标重复检测，造成大量误检<sup>[12]</sup>。

针对这个难题，人们提出的后处理方法一般是基于窗口融合与窗口抑制两个机制。窗口融合主要依赖Viola等针对人脸检测提出的VJ (Viola-Jones) Framework<sup>[11]</sup>的后处理步骤中采取的启发式窗口融合算法，虽然大大减少了误检的数量，但是与检测人脸不同，在检测行人时极易出现重合窗口的现象。若是按照此算法做后处理，将检测器生成的重叠初始框划分到同一个子集中，再依据此规则将所有的检测结果划分到不相交的子集中，分别计算子集的中心，最后每个子集只保留一个检测窗口，显然会造成大量漏检。

以非极大值抑制为基础的窗口抑制机制因为其简单高效成为当今通用的目标检测后处理算法，主要有基于Mean-Shift算法和基于贪心策略的非极大值抑制两类。文献[10]将非极大值抑制(Non-Maximum Suppression, NMS)阐述为局部最大值搜索(Local Maximum Search, LMS)，其工作原理为通过获得一定区域内的极大值然后抑制其他的局部非极大值。文献[2]中提出的基于Mean-Shift聚类算法的非极大值抑制，虽然可以提高精度方面的性能，但是不仅计算复杂，时间消耗大，而且在运用过程中需要设置的参数过多，如滑动窗口的步长等，因此目前较少使用。基于贪婪策略的

非极大值抑制由于简单高效的性能，成为目前主流的目标检测后处理方法。Felzenszwalb等在可变形部位模型(Deformable Part Models, DPM)<sup>[12]</sup>算法中较为详细地阐述了基于贪婪策略非极大值抑制的过程：对于检测出来的结果集合 $D$ ，其中每一个结果都是由窗口边界框的位置信息和所得分数构成的；按照分数排序，选中分数最大的检测结果作为抑制窗口进行保留，其他窗口作为被抑制窗口，依次计算抑制窗口对被抑制候选窗口的覆盖比例，丢弃覆盖率超过设定阈值的被抑制窗口；再更新检测结果集合 $D$ 并重新排序，重复上述步骤，直到被抑制候选窗口个数为0时结束。而文献[13]基于ACF目标检测算法提出的尺度比变量策略，对抑制大尺度行人窗口周围的误检窗口效果很好，但同时也抑制了部分小尺度行人窗口，限制了其提升性能的可能性。且其提出的重复抑制策略，仅仅使误检率(Miss Rate,  $MR$ )降低了0.13%，却要执行两次非极大值抑制，增加了过多的时耗。文献[14]提出的基于热扩散理论窗口融合抑制方法，在PASCAL VOC数据集上提升的精度只有0.6%。文献[15]提出增加“抑制完全覆盖检测”和“PASCAL VOC重叠判据”作为约束条件，提出了一种改变约束条件的简化非极大值抑制。文献[16]提出的SOFT-NMS方法虽然在COCO和PASCAL VOC数据集上得到性能提升，但是其对于重合窗口密集的行人检测，效果并不是很理想。

以上研究对于消除误检窗口不充分，特别是对无重合面积误检窗口不能抑制和过度抑制正确窗口的问题，提出了高分保留尺度比变量和区域扩散抑制策略来加强非极大值抑制效果。且对于非极大值抑制无法抑制的高分误检窗口，本文提出了动态窗口修正机制对误检窗口进行修正。结合改进之后的非极大值抑制和动态窗口修正机制，能够在快速性和误检率性能上取得理想效果。

## 2 后处理算法改进一般化讨论

本节主要描述了以非极大值抑制为主的后处

理工作原理及其改进的可能性，实验选择目标检测算法ACF (Aggregate Channel Features)<sup>[4]</sup>在INRIA行人检测数据集上进行验证，分析当前目标检测后处理方法的不足。

## 2.1 非极大值抑制

目标检测后处理方法旨在消除初始检测结果中的误检窗口，非极大值抑制算法因对此类冗余窗口抑制效果好，如图1所示，且时间成本低，成为目前目标检测方面的主要后处理算法。



初始检测结果 NMS抑制后的结果

图1 有无NMS效果对比

Fig.1 Comparison of effects with and without NMS

非极大值抑制主要是通过寻找局部极大值和设定约束条件来抑制极大值周围不符合约束条件的非极大值，从而达到消除误检的效果。其主要步骤如下：

(1)将检测窗口集合按照分数降序排列。

(2)保留分数最高的窗口，并将它选为抑制窗口，剩余窗口作为候选窗口。

(3)根据约束条件抑制候选窗口，约束条件一般为PASCAL VOC判据，即抑制窗口与候选窗口面积的交集与两者面积的并集大于设定阈值Thresh的时候，候选窗口被抑制，小于则保留。

(4)判断保留下来的候选窗口个数是否为0，是0则结束非极大值抑制，不是0则按照步骤(2)中排好的顺序，取下一个保留下来的候选窗口作为抑制窗口，重复步骤(3)。

值得一提的是，在ACF算法中，Dollar<sup>[4]</sup>

在步骤(3)采取的约束条件是候选窗口的被覆盖率是否大于0.5，即在PASCAL VOC判据的基础上，将条件两者面积的并集改为二者间的最小面积即可。

## 2.2 不足及其改进的可能性

在行人检测中，以非极大值抑制作为后处理方法非常简洁高效，但是也存在着明显的不足。文献[17]通过设计实验，让人来代替非极大值抑制算法对初始检测窗进行后处理，可以提升算法在INRIA数据集上的0.1的平均准确率。在文献[13]设计的实验中，通过在INRIA数据集上测试，ACF的误检数高达328个，取消ACF的后处理算法之后，行人的漏检数从46个降到了28个，充分说明了ACF的后处理算法仍有较大的提升空间。

## 3 后处理算法的改进

本节主要描述后处理算法的改进，其算法总体框架如图2所示。主要包括针对传统非极大值抑制不足改进而来的高分尺度比NMS和区域扩散抑制，以及独立于窗口抑制机制之外的窗口修正机制。

### 3.1 非极大值抑制方法改进

#### 3.1.1 高分保留尺度比变量

针对传统非极大值抑制对于大尺度行人窗口周围的重合比未达到阈值的误检窗口效果不好的问题，如图3(a)，文献[13]提出的尺度比变量，通过利用正确行人窗口之间分数接近和正确行人窗口与周围误检窗口尺度与分数差异较大的关系，进行动态阈值NMS，对行人周围误检窗口通过降低阈值进行了更加严格的抑制，相比于传统非极大值抑制取得了不错的效果。见图3(a)与图3(b)结果对比。但其在抑制周围误检窗口的同时，也会将部分高分小尺度行人窗口给抑制掉，见图3(b)与图3(d)结果对比。究其原因文献[13]提出大小尺度行人窗口的分数差异不会过大，这一假设是错误的。故本文针对尺度比变量

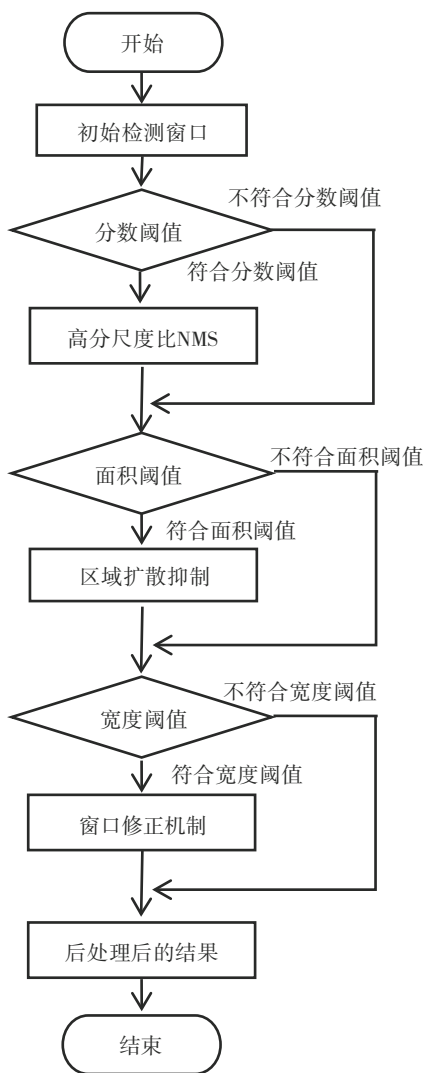


图2 后处理算法总体框架图  
Fig.2 Post processing frame chart

方法这一缺陷，提出高分保留尺度比变量。既能利用正确行人窗口与其周围误检窗口的尺度比与

分数比信息对误检窗口进行抑制，也能同时保留小尺度行人窗口。

利用高分保留尺度比变量进行动态阈值NMS的原理就是在2.1节中步骤(2)与步骤(3)之间加了一个确定设定阈值的步骤，其他还是按照非极大值步骤操作，确定动态阈值的步骤如下：

(1) 设 $\alpha$ 为分数比阈值，此处设定0.7； $\lambda$ 为面积比阈值，此处设为0.7， $\alpha$ 和 $\lambda$ 的设定值是通过参考文献[13]中分数比和高度比参数范围用两分法试探而得。 $\beta$ 为高分保留阈值，此处设定30，是在 $[0, 100]$ 进行两分法试探而得。抑制窗口为 $W_K$ 的检测分数为 $S_K$ 、面积为 $Area(W_K)$ ，未被抑制候选窗口 $W_D$ 的检测分数为 $S_D$ 、面积为 $Area(W_D)$ 、设定阈值为 $Thresh$ 与2.1节中步骤(3)中设定阈值 $Thresh$ 等价，0.575为设定阈值常值。

(2) 先对分数比条件 $\frac{S_D}{S_K} < \alpha$ 与高分阈值条件 $S_D < \beta$ 进行计算和判定。

(3) 若同时满足上述条件，则激活动态阈值机制，按照 $Thresh = \text{Min}(0.575, 0.575 \times (\frac{Area(W_D)}{\lambda Area(W_K)}))$ 计算。

(4) 若不满足上述条件，则 $Thresh$ 为设定阈值常值。

步骤(2)中分数比条件 $\frac{S_D}{S_K} < \alpha$ 与高分阈值条件 $S_D < \beta$ ，利用了正确行人窗口与周围小尺度误检窗口分数差异较大的关系和小尺度行人窗口与误检窗口之间的分数阈值关系。使动态阈值NMS



(a) NMS的结果 (b) 尺度比变量的结果 (c) 高分保留尺度比变量结果 (d) 数据标记结果  
图3 引入高分保留策略后的尺度比变量NMS对比图

Fig.3 Comparison of scale ratio NMS with high score keep strategy

的对象基本上锁定在正确行人窗口周围的误检窗口。步骤(3)中则根据两者之间的面积较大的关系,利用面积比关系  $\frac{Area(W_D)}{\lambda Area(W_K)}$  对阈值Thresh进行动态调控,可知当被抑制窗口  $W_D$  与抑制窗口  $W_K$  面积比小于  $\lambda$  时,动态阈值抑制依据公式  $Min(0.575, 0.575 \times (\frac{Area(W_D)}{\lambda Area(W_K)}))$  进一步降低设定阈值,来对误检窗口进行更为严格的非极大值抑制。效果见图3(c),不仅将周围误检窗口成功抑制,而且还将正确行人窗口保留。以上步骤数学模型可以归纳为式(1)。

$$Thresh = \begin{cases} Min(0.575, 0.575 \times (\frac{Area(W_D)}{\lambda Area(W_K)})) \frac{S_D}{S_K} < \alpha n S_D < \beta \\ 0.575 & otherwise \end{cases} \quad (1)$$

### 3.1.2 区域扩散策略

上文提及过行人检测方法大多是基于滑动窗口机制,而滑动窗口类检测因其暴力穷举式的窗口定位方式,会在行人周围出现大量误检窗口。其中就包括与行人周围无重合面积的误检窗口,如图4所示。而传统非极大值抑制及其改进方法,主要是利用抑制窗口和被抑制窗口之间的重合信息进行抑制,故对于此类无重合面积的误检窗口的



图4 误检示例

Fig.4 False positive examples

效果并不好。本文通过对大量数据的观察和归纳,发现此类误检窗口具有几点特性:只在大尺度行人窗口的周围出现,此处大尺度行人窗口特指面积大于25000个像素点的窗口;出现在大尺度行人窗口的下方且其中心点位置与大尺度行人窗口的左右边框距离与行人窗口高度呈正比关系。

鉴于此,本文提出动态区域扩散策略来抑制此类无重合面积窗口。动态区域扩散策略处理过程如图5所示,图5中(a)(b)(c)(d)分别对应下述步骤(1)(2)(3)(4)。

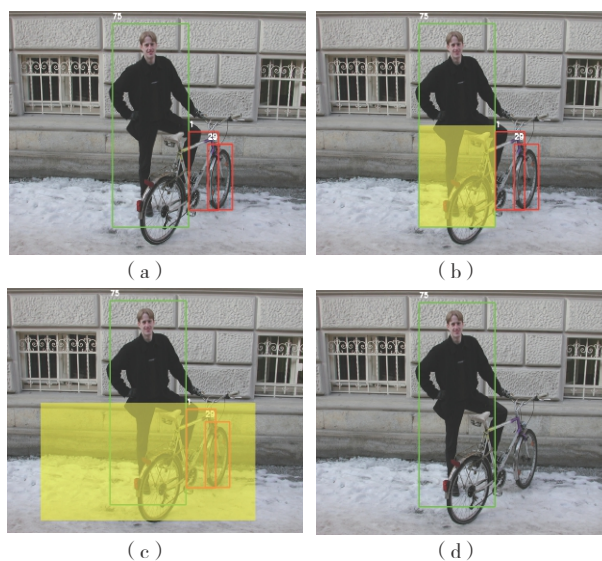


图5 区域扩散抑制处理过程

Fig.5 Regional Diffusion Suppression Process

(1)对窗口进行筛选,设窗口为  $W_T$ , 其面积设为  $Area(W_T)$ , 高度设为  $Height$ , 宽度设为  $Width$ 。当  $Area(W_T) > Thresh$  时,该窗口激活区域扩散抑制。当  $Area(W_T) \leq Thresh$  时,则不激活区域扩散抑制。

(2)选中激活区域扩散机制的窗口,其下半部分设为原始区域  $W_o$ , 左上角坐标设为  $(X_{OL}, Y_{OL})$ 、右下角坐标设为  $(X_{OR}, Y_{OR})$ 。

(3)进行动态区域扩散,设  $f_1$  为横向扩散因子,此处设为0.7,  $f_2$  为纵向扩散因子,此处设为0.4。通过式(2)~(5)计算得到扩散区域,设为  $W_{Eo}$ 。其左上角坐标设为  $(X_{EL}, Y_{EL})$ 、右下角坐标设为  $(X_{ER}, Y_{ER})$ , round为取整函数,因式(2)~

(5) 中的单位均为像素点只能为整数，故对其进行取整。

$$X_{EL} = X_{OL} - \text{round}(f_1 \times \text{Height}) \quad (2)$$

$$X_{ER} = X_{OR} + \text{round}(f_1 \times \text{Height}) \quad (3)$$

$$Y_{EL} = Y_{OL} \quad (4)$$

$$Y_{ER} = Y_{OR} + \text{round}(f_2 \times \text{Width}) \quad (5)$$

(4) 对扩散区域  $W_E$  内的窗口进行完全覆盖抑制，设扩散区域面积为  $\text{Area}(W_E)$ ，扩散区域内窗口设为  $W_{EF}$ ，其面积设为  $\text{Area}(W_{EF})$ ，即满足完全覆盖条件  $\frac{\text{Area}(W_E) \cap \text{Area}(W_{EF})}{\text{Min}(\text{Area}(W_E), \text{Area}(W_{EF}))} = 1$  时， $W_{EF}$  将会被抑制，不满足此条件  $W_{EF}$  则被保留。步骤(4)可归纳为数学式(6)，Result为  $W_{EF}$  是否抑制，Keep为保留，No-Keep则抑制。

$$\text{Result} = \begin{cases} \text{Keep} & \frac{\text{Area}(W_E) \cap \text{Area}(W_{EF})}{\text{Min}(\text{Area}(W_E), \text{Area}(W_{EF}))} = 1 \\ \text{No-Keep} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

由区域扩散抑制步骤可知，区域扩散是其中最为重要的步骤，区域扩散过大容易抑制正确窗口，过小则消除误检不充分。 $f_1, f_2$  的取值控制着区域扩散的尺度，可观察图6，图6中曲线图均是在执行完高分保留尺度比NMS后，分析区域扩散

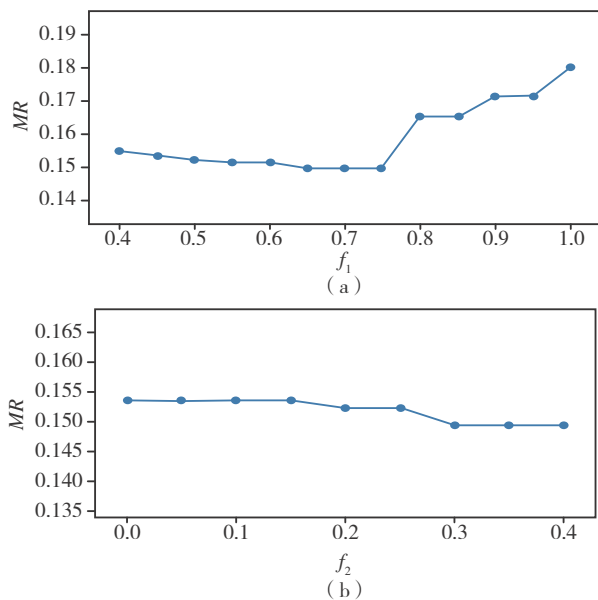


图6 参数  $f_1, f_2$  对  $MR$  的影响

Fig.6 Effect of parameters of  $f_1$  and  $f_2$  on  $MR$

抑制策略中参数  $f_1, f_2$  对  $MR$  影响。图5(a)为  $f_1$  的取值对  $MR$  的影响，此时  $f_2$  取常值 0.4，可见在  $f_1$  属于 0.4~0.75 区间内进行横向扩散时， $MR$  缓慢下降，此处如图5所示，可将正确窗口周围的误检窗口抑制。但是在  $f_1=0.8$  之后误检个数明显增加，因为在扩散区域面积过大的时候，它所需要抑制的区域将不再限于正确窗口周围的窗口，而是可能将较小尺度行人(如小孩或身高差异较大的正确行人)窗口抑制，造成过度抑制，进而形成大量漏检。图6(b)为  $f_2$  的取值对  $MR$  的影响，此时  $f_1$  取定值 0.7，可见随  $f_2$  增加  $MR$  逐渐降低，在  $f_2=0.3$  时不再下降，取得最优结果。从整体趋势可以看出，纵向扩散虽然能使  $MR$  下降，但对  $MR$  的影响不大。

### 3.2 窗口修正机制

进行完高分保留尺度比变量NMS和区域扩散抑制之后，大部分行人周围的误检窗口已经被抑制。但本文在实验过程发现，上述两种改进对高分误检窗口均效果不佳，如图7所示。究其原因，根据2.1节中步骤(2)可知，只要是基于非极大值抑制机制的算法的第一步就是将高分窗口保留，故最先保留的就是此类高分误检窗口。



图7 检测结果示例

Fig.7 Examples of detecting results

由图7中可知，尽管检测结果  $W_G$  (绿色框)

能够准确定位标签结果  $W_R$  (红色框) 的中心位置, 但是由于探测子的分类能力不足, 会将行人周围左右背景分类为行人, 导致检测结果  $W_G$  的宽度过大, 进而导致  $W_G$  的面积  $\text{Area}(\text{green})$  会远远大于标签结果  $W_R$  面积  $\text{Area}(\text{red})$ 。则根据 PASCAL VOC 准则, 如式 (7),  $W_G$  被视为误检窗口。现在针对此类问题的解决方法多是通过改进探测子本身特征提取和分类性能, 如基于深度学习的一系列目标检测网络 (如 YOLO, SSD, FASTER-RCNN 等), 但是基于卷积神经网络所提出的目标检测算法其精度是建立在牺牲时间的基础上, 在 CPU 上运算现在最快的 SSD-MOBILENET 都只有 5 帧/s, 实用性并不高。故本文提出窗口修正机制在不增加过多时间成本的基础上能够有效的解决该问题。

$$\text{result} = \begin{cases} \text{True} & \frac{\text{Area}(\text{green}) \cap \text{Area}(\text{red})}{\text{Area}(\text{green}) \cup \text{Area}(\text{red})} > 0.5 \\ \text{False} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

由 MASK-RCNN<sup>[18]</sup> 中使用语义分割结果与目标检测结果进行对齐来提升精度的思想而发, 结合本文对此类误检窗口总结出来的特性: 能够较为准确的提供正确窗口的中心位置信息, 但左右边框偏离程度过大而导致其与标签结果的交并比 (Intersection of Union, IOU) 过小形成误检。本文提出的窗口修正机制主要通过窗口左右边框的横坐标进行动态修正, 使窗口向其中心位置收缩来降低左右边框的偏离程度, 使其与正确行人窗口尽量对齐, 增大与标签结果的 IOU, 进而成为正确窗口, 能够同时减少误检数和漏检数。具体步骤为:

(1) 对每个窗口进行筛选, 设检测结果窗口  $W_A$  的宽度为  $W_x$ , 左上角坐标为  $(x_1, y_1)$ , 右下角坐标为  $(x_2, y_2)$ 。若  $W_x \geq 100$  时, 激活窗口修正机制。若  $W_x < 100$  时, 则不激活, 跳过步骤 (2), (3) 保留检测结果窗口  $W_A$ 。

(2) 激活窗口修正机制的窗口, 通过式 (8) ~ (9) 对检测结果窗口的横坐标进行修正。纵坐标则按  $y_{1\text{new}} = y_1$ ,  $y_{2\text{new}} = y_2$  保持不变, 得到修正后的窗口  $W_B$ , 左上角坐标为  $(x_{1\text{new}}, y_{1\text{new}})$ , 右下角坐标

$(x_{2\text{new}}, y_{2\text{new}})$ 。

(3) 保留修正后窗口  $W_B$ , 去掉检测结果窗口  $W_A$ 。

式 (8) ~ (9) 中  $A$  为动态修正系数, 此处设为 10。  $B$  为横向修正基础项, 此处设为 5。宽度阈值设为 100, 用以筛选需要修正的窗口, 避免了对小窗口修正过度而造成误检的情况。本文使用动态修正机制, 是因为通过对大量检测结果观察发现, 检测窗口  $W_A$  的宽度  $W_x$  越大, 其左右边框偏离正确窗口中心位置越远。故本文假设: 检测窗口  $W_A$  的宽度  $W_x$  越大, 需要修正的度量则越大, 采用动态函数  $(\frac{W_x - A}{A} + B)$  作为修正度量。关于动态函数选择, 本文尝试过线性函数、对数函数、幂函数等函数, 效果均无应用式中动态函数的效果好。

$$x_{1\text{new}} = \begin{cases} x_1 + (\frac{W_x - A}{A} + B) & W_x \geq 100 \\ x_1 & W_x < 100 \end{cases} \quad (8)$$

$$x_{2\text{new}} = \begin{cases} x_2 + (\frac{W_x - A}{A} + B) & W_x \geq 100 \\ x_2 & W_x < 100 \end{cases} \quad (9)$$

所得到结果如图 8 所示, 红色边框包围区域为标签结果, 绿色边框包围区域为未采用窗口修正机制的检测结果, 黄色边框为采用了窗口修正机制的检测结果。由图 8 可知, 之前与标签结果  $\text{IOU} < 0.5$

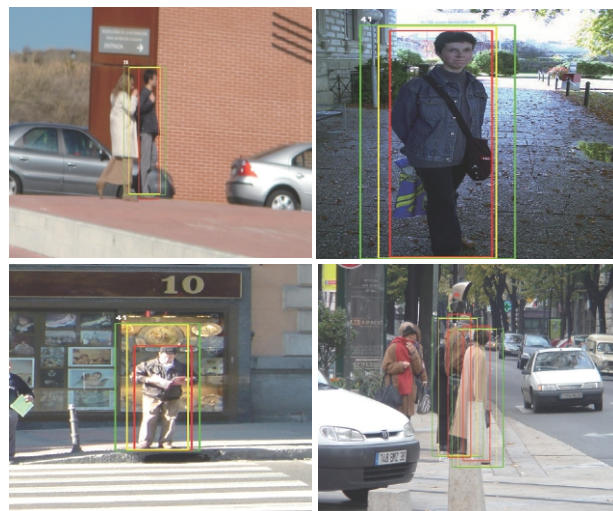


图8 窗口修正前后对比

Fig.8 Comparison of with and without window correction

而被视为误检的检测结果经过修正之后，与标签结果之间的IOU显然大于0.5，成为正确检测窗口。

由窗口修正步骤可知，修正度量是最为关键的因素，修正度量过大容易造成窗口修正过度造成误检，过小则不能充分发挥其效果。而其中 $A$ ， $B$ 是决定修正度量的参数，对此本文通过等距取点试探法和待定系数法来取 $A$ ， $B$ 的值。图9中曲线为进行过高分保留尺度比变量和区域扩散抑制之后，分析窗口修正机制中参数 $A$ ， $B$ 对 $MR$ 影响曲线图。图9(a)为 $A$ 取值变化对 $MR$ 的影响曲线图，此时 $B=5$ 。由表1可知，执行过高分保留尺度比变量和区域扩散抑制之后所得到的 $MR$ 应为14.93%。可当 $A<5$ 时， $MR$ 上升到了15.98%，这是由于当 $A$ 过小时，修正度量容易变得过大，导致对检测结果的左右边框修正过度，造成误检。当 $A>5$ 时， $MR$ 的值均小于14.93%，说明窗口修正机制在大范围中取值均能取得效果，鲁棒性强。而在 $A=10$ 时，窗口修正机制的效果最好，取得 $MR$ 的极小值13.46%。图9(b)为 $B$ 取值对 $MR$ 影响曲线图，此时 $A=10$ ，可知当 $B<5$ 时， $MR$ 持续下降，而当 $B>5$

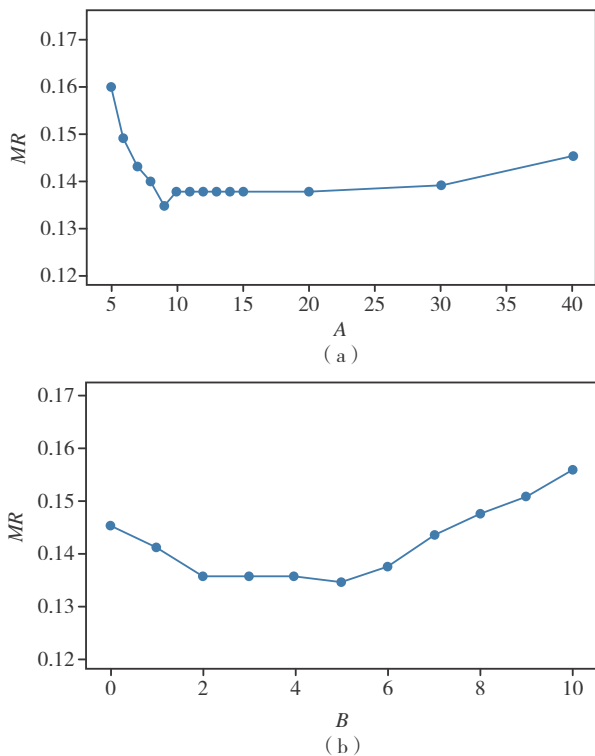


图9 参数 $A$ ， $B$ 对 $MR$ 的影响

Fig.9 Effect of parameters of  $A$  and  $B$  on  $MR$

时，则会逐渐出现窗口修正过度的现象， $MR$ 逐渐上升， $B>7$ 时， $MR$ 已经超过了14.93%，窗口修正机制显现出负效果。

## 4 实验结果分析

本文在INRIA测试集上对比了ACF的后处理算法，文献[13]中尺度比变量的后处理算法和本文所提出的后处理算法。主要采用 $MR$ 对负样本错误正例(False Positive Per Image, FPPI)的曲线<sup>[11]</sup>来说明采用不同后处理方法对目标检测算法的性能改进。如图10所示，纵轴为漏检率，横轴为FPPI，通过检测器可以得到每个窗口所得分数，然后通过设定不同分数阈值可以得到相对应的误检数和漏检率来绘制曲线。为了方便说明，本文规定：ACF为原算法的结果，ACF+SCA为出尺度比变量的结果，ACF+(1)为加入高分保留尺度比变量策略，ACF+(2)为加入区域扩散抑制策略，ACF+(1)+(2)为结合高分保留尺度比变量与区域扩散抑制策略，ACF+(1)+(2)+(3)为结合高分尺度比变量、区域扩散抑制和窗口修正机制策略。表1中ACF算法是作为评估结果基准线，故无 $MR$ 的减少值。

表1 不同后处理方法结果比较

Table.1 Comparison results of different post-preprocessing methods

算法	误检数	漏检数	$MR$	$MR$ 减少值
ACF	334	42	17.01%	-
ACF+SCA	264	47	16.02%	0.99%
文献[15]	-	-	15.79%	-
文献[13]	-	-	14.22%	-
ACF+(1)	260	42	15.42%	1.59%
ACF+(2)	289	42	15.74%	1.27%
ACF+(1)+(2)	226	42	14.93%	1.98%
ACF+(1)+(2)+(3)	103	27	13.46%	3.51%

由表1可知，ACF+(1)可以将 $MR$ 降低1.59%，误检数减少72个，漏检数保持不变；而



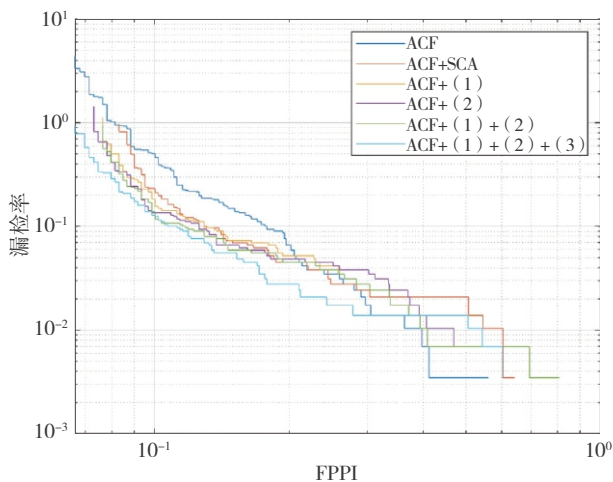


图10 INRIA数据集的检测结果对比图

Fig.10 Performance comparison in the INRIA dataset

ACF+SCA, 能使 $MR$ 降低0.99%, 误检数减少68个, 漏检数增加5个。对比两者可知, ACF+(1)方法相对于ACF+SCA可以多减少5个误检窗口, 这是由于ACF+(1)采用的面积比比ACF+SCA中的高度比更能表征两者之间的尺度比。而相比于ACF+SCA, ACF+(1)会增加5个漏检数, 可以在多减少误检窗口的同时, 保持漏检窗口数不变, 效果更优。

ACF+(2)可以使 $MR$ 降低1.27%, 误检数减少45个, 漏检数不变。当我们单独使用ACF+(1), ACF+(2), 性能均能得到提高。但是我们结合使用两者时, 即ACF+(1)+(2),  $MR$ 只降低1.98%, 误检数减少了88个, 漏检数不变, 并没有产生 $1+1>2$ 的效果。这是因为虽然区域扩散抑制的提出是为了抑制正确行人窗口周围与行人窗口无重合面积的误检窗口, 但它与高分保留尺度比变量都会抑制正确行人窗口下方与行人窗口有重合面积的误检窗口, 故两者叠加时, 对于有重合面积的误检窗口的抑制效果并不会叠加, 所以不能产生 $1+1>2$ 的效果。

当我们使用ACF+(1)+(2)+(3)时,  $MR$ 降低了 $17.01\%-13.46\%=3.55\%$ , 误检数减少103个, 漏检数减少15个, 同时减少了误检数和漏检数。对比ACF+(1)+(2)的实验结果, 说明了窗口修正机制的强大效果, 通过对误检窗口进行修

正, 使其变为正确窗口。不仅能减少误检数, 也能减少漏检数。相比文献[13]中方法将 $MR$ 降低2.63%, 本文提出方法效果更优。

在时间复杂度上的对比, 为了让时间复杂度有着更加直观的对比。本文设计的实验为: 先使用ACF对INRIA数据集进行检测, 然后将未进行非极大值抑制的结果, 分别使用ACF后处理算法与本文所提后处理算法进行处理10次, 取平均时间, 直接对比上述两种方法之间的时间复杂度。

其中, 开发环境Anconda3.4.1 Spyder (Python3.6), 代码语言Python, 处理器Inter (R) Core (TM) i7-7700 CPU 3.65GHz。

使用ACF原后处理算法所用时间为0.9375s, 使用本文提出后处理方法所用时间为1.1916s。时间消耗增加仅为0.2541s, 平均处理每张图片增加时间仅为0.00088s, 时间无明显增加。对比文献[13]中方法增加了0.538s, 主要是由于其中使用重复抑制策略, 相当于进行了两次非极大值抑制, 大大增加了时间消耗。故对比之下, 本文方法更优。

## 5 结论

本文针对传统后处理方法的不足, 对快速行人检测算法ACF后处理部分进行了改进, 在没有损耗过大的时间消耗下, 极大的提高了算法的精度。在公共行人检测数据集INRIA上进行测试, 使ACF从 $MR=17.01\%$ 提升到 $MR=13.46\%$ , 且处理单张图片的时间只增加0.00088s, 几乎没有时间增加, 对比文献[13]和[15], 本文提出后处理算法能够得到更高的行人检测精度。

## 参考文献

- [1] Dollar P, Wojek C, Schiele B, et al. Pedestrian detection: an evaluation of the state of the art [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(4): 743-761.

- [ 2 ] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradient for human detection [ C ] .IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Patter Recognition ( CVPR ) . USA, 2005.
- [ 3 ] Lim J J, Zitnick C L, Dollar P. Sketch tokens: a learned mid-level representation for contour and object detection [ C ] .IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition ( CVPR ) . USA, 2013.
- [ 4 ] Dollar P, Appel R, Belongie S, et al.Fast feature pyramids for object detection [ J ] . IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014, 36 ( 8 ): 1532-1545.
- [ 5 ] Wang X Y, Tony X, Yan S C. An HOG-LBP human detector with partial occlusion handling [ C ] .12th International Conference on Computer Vision ( ICCV ) . Kyoto, Japan, 2009.
- [ 6 ] Dollar P, Tu Z W, Peron A P, et al. Integral channel features [ C ] .British Machine Vision Conference. London, DBLP, 2009.
- [ 7 ] Marin J, Vazquez D, Lopez A M, et al. Random forests local experts for pedestrian detection [ C ] .IEEE International Conference on Computer Vision. USA, 2013.
- [ 8 ] Ouyang W L, Wang X G. Joint deep learning pedestrian detection [ C ] .IEEE International Conference Computer Vision. USA, 2013.
- [ 9 ] 苏松志, 李绍滋, 陈淑媛, 等. 行人检测技术综述 [ J ] . 电子学报, 2012, 40 ( 4 ): 814-820.
- [ 10 ] Neubeck A, Van G L. Efficient non-maximum suppression [ C ] .Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Hong Kong, China, 2006.
- [ 11 ] Felzenszwalb P F, Girshick R B, Mcallester D, et al. Object detection with discriminatively trained part based models [ J ] . IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32 ( 9 ): 1627-1645.
- [ 12 ] Parikh D, Zitnick C L. Finding the weakest link in person detectors [ C ] .IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, 2011.
- [ 13 ] 陈金辉, 叶西宁. 行人检测中非极大值抑制算法的改进 [ J ] . 华东理工大学学报: 自然科学版, 2015, 43 ( 3 ): 371-378
- [ 14 ] 张抒, 解梅. 基于热扩散理论的窗口融合方法 [ J ] . 电子科技大学学报, 2014, 43 ( 2 ): 257-261.
- [ 15 ] 张强, 张陈斌, 陈宗海. 一种改进约束条件的简化非极大值抑制 [ J ] . 中国科学技术大学学报, 2016, 46 ( 1 ):6-11.
- [ 16 ] Bodla N , Singh B , Chellappa R, et al. Soft-NMS Improving Object Detection With One Line of Code [ J ] . 2017.
- [ 17 ] Kaiming H , Georgia G , Piotr D , et al. Mask R-CNN [ J ] . IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018.

**作者简介:**

梁桥康(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器人传感器与人工智能。

汤 鹏(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与计算机视觉。

晏昕童(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为数值计算与数据分析。

孙炜(1975-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为机器人与人工智能。

# 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析

樊洁茹, 李东光

(北京理工大学机电动态控制重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 在阐述有人机/无人机协同作战基本概念的基础上, 结合协同作战系统的作战任务需求, 描述了一种典型的有人机/无人机协同作战想定, 并且给出了协同作战过程中情报指令及控制指令信息处理流程。重点总结了有人机/无人机协同作战的国内外研究情况。对有人机/无人机协同交互控制技术、协同态势感知技术、协同任务分配技术、协同航路规划技术和协同效能评估技术等关键技术进行了讨论, 最后对该领域的研究发展方向进行了展望。

**关键词:** 有人/无人机; 协同作战; 作战能力; 协同控制; 任务分配; 效能评估

**中图分类号:** E919    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-5915 (2019) 01-0353-09

## Overview of MAV/UAV Collaborative Combat and Its Key Technologies

FAN Jieru, LI Dongguang

(Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The basic concept of MAV/UAV cooperative combat is described in this paper. According to the mission requirements of cooperative combat system, a typical cooperative combat scenario of MAV/UAV is described, the information processing flows for operational information and control instruction is followed. The domestic and international research results are emphatically summarized subsequently. The key technologies are discussed, including cooperative interactive control, cooperative situational awareness, cooperative task allocation, cooperative route planning and cooperative effectiveness evaluation. Finally, a short discussion section is presented to propose several promising research directions for further investigation.

**Keywords:** Manned/Unmanned Aerial Vehicles; Cooperative Combat; Operational Ability; Collaborative Control; Task Assignment; Effectiveness Assessment

### 1 引言

无人机具有结构简单、造价低廉、侦察能力强等特点, 在电子干扰、防空压制、空中对抗、对地攻击等方面具有显著优势<sup>[1]</sup>。在军事应用层面, 无人机已经从早期的侦察监视、通讯中继逐渐向“察-打-评”一体化方向发展<sup>[2]</sup>。近年来, 随着航空科学的不断发展和无人机制造技术的不断突破, 在军事需求的牵引下, 无人机的设计和制造已经逐步走上了通用化和系列化之路, 将在未来战争中扮演越来越重要的角色<sup>[3]</sup>。但是, 随着时代的发展, 未来战场环境愈加复杂, 战争局势瞬息万变, 而且无人机的智能系统还不能替代人的思维与判断, 仅依靠无人机或无人机群的作战模式往往不能在指挥和决策中迅速做出最优决定。未来很长的一段时间内, 在大多数作战任务

断突破, 在军事需求的牵引下, 无人机的设计和制造已经逐步走上了通用化和系列化之路, 将在未来战争中扮演越来越重要的角色<sup>[3]</sup>。但是, 随着时代的发展, 未来战场环境愈加复杂, 战争局势瞬息万变, 而且无人机的智能系统还不能替代人的思维与判断, 仅依靠无人机或无人机群的作战模式往往不能在指挥和决策中迅速做出最优决定。未来很长的一段时间内, 在大多数作战任务

中，无人机还不能完全摆脱“人在作战任务回路中”这一现状。因此，为了提高作战任务的成功率，有人机/无人机协同作战模式将成为当下及未来研究的重点，通过二者的相互支援、能力互补，形成一个有机的战斗系统。

有人机/无人机协同作战模式可以弥补无人机执行特定任务过程中应对各种突发情况时指挥与决策能力不足的短板，同时避免有人机执行高危任务的作战成本，提升整体集群的智能化水平，很大程度地提高信息时代体系对抗的作战效能。从以上角度分析，有人机/无人机协同作战的模式将改变现有空战格局，成为未来无人机作战运用的必然选择，具有重大军事应用价值。

## 2 有人机/无人机协同作战系统

### 2.1 协同作战概念

通过数据传输和通信，将有人机作为指挥机，无人机作为攻击机进行密切协同。通过地面指挥控制中心实现战场信息共享、可用资源统一调度及作战任务的综合管理。由无人机完成目标探测、识别、攻击和评估，将探测和评估结果与有人机进行互通，由有人机完成信息整合，感知战场态势，最终共同完成信息获取、战术决策、指挥引导、武器发射和武器制导等作战任务。

### 2.2 协同作战想定

有人机/无人机协同作战，能够在联合编队条件下充分发挥有人平台及无人平台优势，同时结合地面指挥控制中心，制定符合战场需求的具体编队作战模式，并使其达到最大作战效能。

现假设我方接到命令要求立即执行对敌方营地的突袭任务，目标是摧毁敌方地面防御工事。由地面指挥控制中心、有人机集群、无人机集群组成的有人机/无人机协同作战编队立即启动，对目标区域实施作战。首先由若干无人机组成的侦察编队，对目标区域进行侦察，在地面指挥控制中心或有人机的控制下，无人机多机协同搜索目

标区域。多架无人机根据所携带的多种传感器，对目标区域进行综合探测，获得目标区域环境信息或态势信息，并将信息回传给指挥控制中心或有人机（如果有人机参与，则经过综合分析后，最终将目标信息发送给地面指挥控制中心）。指挥控制中心作为协同作战系统最高指控节点，通过对目标区域的卫星图像、目标信息等情报进行分析，得到战场全面态势情况。分析制定此次任务的整体作战流程和具体计划，选择符合作战计划的有人机和无人机类型及数量，组成协同作战编队，并引导其进入作战区域，共同执行地面指挥控制中心下发的打击任务。有人机作为移动的次级控制中心，主要负责完成作战执行阶段的具体战术决策和阶段性任务分配，同时需要对战场态势进行评估，为无人机组进行所需打击目标的分配，并为其规划相应的航线，最终以任务指令的方式发送给无人机。多架无人机作为编队僚机，对目标区域进行目标探测和干扰防御，发现目标后，立即锁定并跟踪，将目标信息和战场态势回传给有人机，请求有人机确认目标并下达是否攻击指令；待有人机下发攻击指令后，无人机攻击目标并进行毁伤评估。

在该作战想定中，地面指挥控制中心是该协同作战系统的最高指挥单位，能够与各有人机和无人机分别进行通讯，并可对整个作战编队的每一个体作战单元直接控制，以此确保作战系统中所有有人机与无人机之间的信息共享，最终达到统一调度可用资源和综合管理作战任务的目的。特定条件下有人机/无人机协同作战完成任务的想定示意图如图1所示。

### 2.3 协同作战流程

有人机/无人机协同作战的关键是既能保留并充分发挥有人机和无人机的优点，又能最大限度地激发二者在编队中的作战潜力。编队中的每一架有人机和无人机都可视为作战系统的节点，需要在地面指挥控制系统的指挥引导下，结合接收全部战场信息进行综合处理，以此进行战场态势

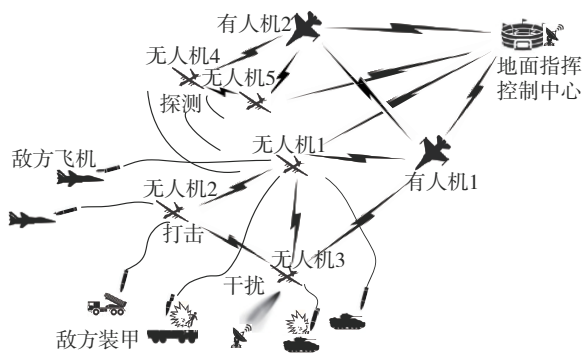


图1 有人机/无人机协同作战想定

Fig.1 Concept of MAV/UAV cooperative combat

感知和敌方威胁估计。在此基础上对特定作战任务下的指挥与控制进行决策，对编队中的每个有人机和无人机节点进行子任务分配和飞行路径规划，确保任务流程在协同条件下有条不紊地推进和展开，最终在无人机节点到达攻击区域后完成目标锁定、瞄准、发射等一系列动作，完成对目标的攻击和毁伤。有人机/无人机协同作战流程如图2所示。

(1) 任务装定。作战起初，有人机和无人机均处于待命状态，进行任务和航路数据的装定后，由地面指挥控制系统指挥引导其进入作战区域。

(2) 战场数据信息处理。有人机对战场信息进行接收汇总，经过计算分析完成综合处理，估计战场态势和敌方威胁。以此为依据对各无人机的任务进行分配，并为其规划飞行路径。处理结果通过信息传输传递给相关的各无人机。

(3) 战场侦察、监视和探测。无人机接收具体任务后，沿所分配的飞行路径进入作战区域，对该区域进行侦察、监视和探测等任务。所得到的探测信息将传输至有人机，后者据此进行信息整合，并继续为无人机输送指令，控制其下一步的探测。期间有人机和无人机时刻与地面指挥控制系统保持战场信息实时交换。

(4) 对目标实施攻击。根据无人机回传的战场实时数据，有人机再次对作战区域的无人机进行任务分配。与之前的任务分配不同的是，本次任务主要是为了对目标实时打击。无人机再次接收攻击任务指令后，开始进行末端打击所需的计算

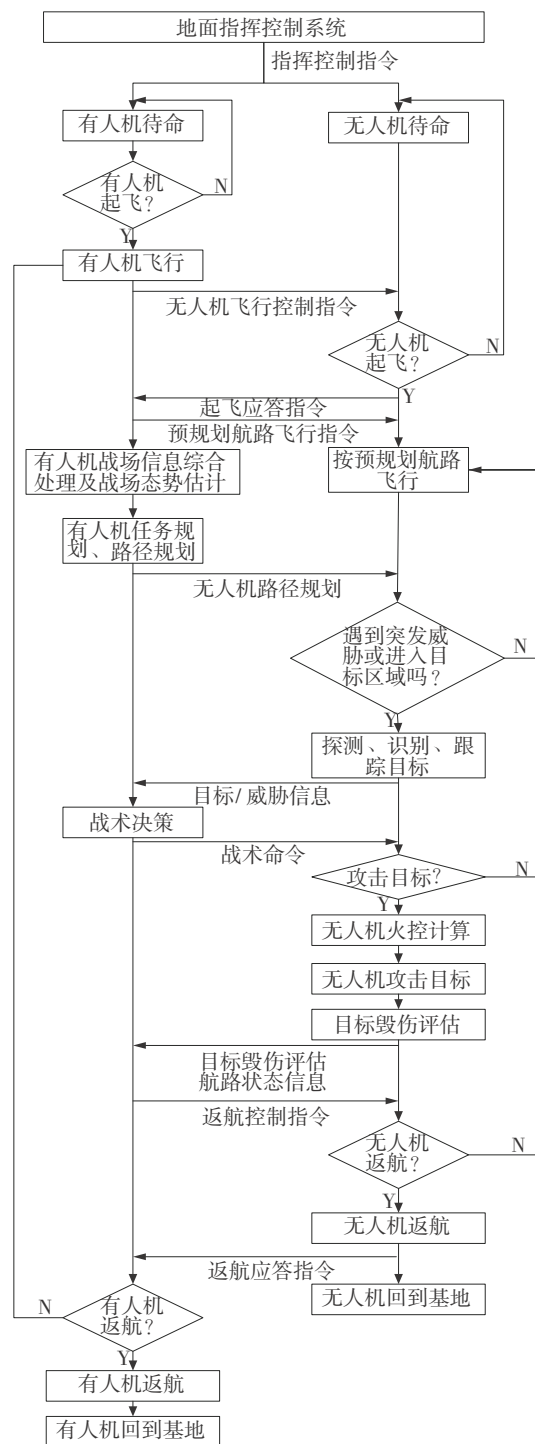


图2 有人机/无人机协同作战流程

Fig.2 Process of MAV/UAV cooperative combat

与分析，最终完成对目标的打击。

(5) 战场损伤评估。无人机在目标打击过程中时刻保持对战场的监测，并根据机载解算器及预订的算法对其自身完成的打击效果进行评估。同时，监测信息回传至有人机，有人机综合所有无

人机的作战情况，对本次作战任务进行总体分析与评估，并统计我方的损伤与消耗情况。

(6)再次攻击或返航。根据上一步对打击效果的评估，有人机将判定本轮打击是否有效，目标是否已经被摧毁。如果目标毁伤程度未达到预想标准，则有人机将再次根据当前战场信息及我方剩余战力进行评判，并准备下一轮打击。若目标已经被摧毁或已达到毁伤要求，则判定本次作战任务结束，无人机和有人机将先后返回基地。

### 3 有人机/无人机协同研究现状

#### 3.1 国外研究概况

随着科技的快速发展，越来越多的技术和手段可以用于无人机设计和制造，这极大地促进了该领域的发展，也使其受到了国内外学者和军队的普遍关注。英美等西方发达国家更是已经摆脱了纯无人机作战的设计思路，探索无人机与有人机结合的方法，开始将有人机/无人机协同作战的理念逐渐变为现实。

美国是较早开展这项研究的国家，其研究机构近年来已突破多项有人机/无人机协同所需的关键技术，并投入了大量精力进行了相关验证。比较有代表性的是20世纪末开展的Bird Dog、机载有人机/无人系统技术(AMUST)、猎人远距离杀手编队(HSKT)、无人机视频智能共享系统VUIT-2等项目。在这些项目研究中，美陆军和研究机构首先针对具体作战任务进行了有人机、无人机编队的功能需求研究，对联合编队从系统角度进行了概念定义，然后分析和突破了相关关键技术，最后选择了符合要求的有人机(Apache和Black Hawk)和无人机(Hunter和Shadow)进行了试验验证<sup>[4]</sup>。在上述项目研究中，美空军将有人机和无人机进行编队并将其整合为一个综合大系统，其中有人机负责统筹指挥，总体把控系统工作与运行情况，无人机与巡航导弹和有人驾驶的轰炸机密切配合，进行打击任务，结合C<sup>4</sup>KISR体系达到作战目的。

1996年，美军启动AMUST项目，主要负责开

发和验证有人/无人协同作战所需软件、组件和程序。1999年，美军启动AMUST6.2项目，重点关注对有无人机编队的功能和概念分析，并着重对这种作战模式的效果进行评估，结果显示，该模式极大发挥了有人机和无人机的优势，有效降低了战斗人员伤亡，机载人员生存率提高25%以上，同时将系统杀伤力提高了50%以上。时隔一年后，AMUST6.3启动，使用TCDL实现有人机与无人机之间的互联通信，并开发视频/数据接收、飞行控制等编队技术。

2003年，美国国防预先研究计划局(DARPA)和美国空军组织在前期研究的基础上联合开展了软件使能控制(Software Enabled Control, SEC)研究计划，并通过验证。波音首次验证开放式控制平台OCP转换软件用于无人机控制以及F-15E与无人战机协同飞行。研究完成了有人机和无人机的通讯接口设计并进行了试验，选用F-15E有人战斗机与无人机进行通讯，二者最终通过自然语言(英语)成功传达和接收了控制指令，完成了控制任务，最终实现了有人机/无人机协同编队飞行。在上述研究的基础上，美国空军和海军启动了联合无人空中作战系统(J-UCAS)项目，主要用于继续研究有人机和无人机的通讯问题。该项目于2004年在加利福尼亚州爱德华空军基地进行试验，试验中有人机选用了T-33教练机，无人机选用了波音公司研制的演示样机X-45A，二者成功进行了通讯和实时数据传输，在此基础上完成了协同飞行<sup>[5-6]</sup>。

2005年，美军在航空飞行器技术(PE0602201F)项目的“飞行控制与驾驶员-飞行器接口”专项下，设置了有人机和无人机之间安全、互用性先进飞控技术专题，并在2005—2006年间多次进行了有人机和无人机设计、选型及试验验证。其中，由美国海军主导的无人战斗机舰载演示试验获得很大进展。为了保证试验的顺利进行，作为合作机构的诺格公司甚至按照美国海军具体要求专门设计制造了2架飞行演示样机。样机以典型的X-47B无人战斗机作为原型，用于测试其在有人机/无

人机协同编队作战模式下的通讯和飞行状态。为了深入研究这种协同作战模式的可行性，美国联合无人机办公室也进行了无人机系统联合战术试验，在该试验中，协同编队中的无人机选择的是Hermes450，有人机选择的是Boeing F/A-18，并在此基础上搭建实验平台进行有人/无人机系统的联合战术实验验证。

美国军用航空航天电子学网站2010年12月14日报道，美国雷锡恩公司将向美国空军交付并安装用于无人机的宙斯感知和协同系统。宙斯通过提高无人机与其所支援的不同军事单位间协同和感知水平从而提高任务参与者的效能。2010年波音公司得到美国空军研究实验室(AFRL)的一个为期3年、价值980万美元的合同，用于进一步研究和验证无人机协同控制技术，该技术能实现多种小型无人机互相协同，并通过有人机的机载控制站更加安全、有效地执行情报、监视和侦察任务。项目的重点在于，有人机在空中对多种无人机组成的混合编队进行控制。

在上述研究的基础上，美军在2011年编写了《2011—2036无人系统综合路线图》，其中明确将有人/无人编队作为各军兵种无人系统发展面临的重大挑战之一，要求发展能提升有人/无人系统编队的战术、技术和规程。美国米切尔航空航天研究所发布了《有人/无人编队：将空中作战力量提升到新水平》的研究报告，指出了美国未来将重点发展有人/无人编队力量，提高美军的空中作战能力。2015年，美国海弗-空袭者IF-16改装无人机编队完成长机指挥与控制僚机航线跟随、僚机完成长机指定的预先规划任务后进行战斗毁伤评估、僚机重新加入编组、自动空中防撞系统等演示。AFRL发布“忠诚僚机”自主技术征询书，寻求支撑无人机自主能力的关键技术。2015年6月，美国国防部在阿拉斯加的“北方利刃”军事演习中，以航速约692km/h的F-16战斗机为领导者，投掷多枚微型无人机。2017年2月，美国海军在模拟器上的空战中使用控制僚机的智能软件TBM；同年3月，美国空军在“海弗-空袭者II”演习

中，展示了基于有人机/无人机编队中无人僚机自主执行对地攻击的技术能力。近年来，美国已经开始计划利用有人机和无人机的协同编队来实现具体的作战任务，比如美国通用原子公司提出了一种协同编队模式，利用8架Avenger无人机与4架F-22有人战斗机进行协同作战，协作摧毁敌方地空导弹阵地。2018年8月30日，美国国防部公开了《无人系统综合路线图(2017—2042)》，其中人机协同被列为四个关键主题之一。该路线图指出人机协同对于满足在无人系统方面的愿景至关重要，未来的军事行动将需要无人系统和人之间的协作。在经过近30年的发展，美军计划在2020年开始正式应用成熟的带有战术意义的有人机/无人机多机编队技术。可以看出，美军在有人机/无人机协同作战模式的研究已经走在世界前列，其相应的研究机构都已经陆续开展了试验验证，甚至已经开始着手将研究技术向成果转化，准备运用到未来战场中。

英国也在有人机/无人机协同作战领域进行了探索。为了更好实现编队中有人机和无人机的实时通讯问题，国防科技集团QinetiQ一直致力于开发编队执行任务过程中有人机对其他协同无人机的实时同步控制技术<sup>[7]</sup>。在该技术的使用中，有人机驾驶员无需同时对编队中的无人机进行实时监控，而是通过机载解算器对无人机提供的实时战场信息按照预定的算法进行融合和计算，以此生成任务分配指令。当准备对目标进行打击时，无人机实时将前方敌军目标的图像传输给有人机，在得到有人机下达的攻击命令后便开始进行打击行动。当出现突发情况时，有人机可以停止无人机的自动操作转而对其进行控制。另外，该协同技术还规定当由于特殊联系导致二者通讯失效时，无人机将转换为全自主作战模式，并可在任务完成后自动返回。为验证技术的可行性，英方研究机构进行了试验验证，成功演示了Tornado Fighter战斗机同时与四架BAC1-11无人机协同编队，并对其进行控制与管理，对目标进行模拟打击。整个任务过程中，无人机从起飞到目标探测、信息

传输等工作均自主完成，最终在有人机的命令下完成打击动作。另外，与美国一样，英国也提出了未来对于有人/无人协同作战的发展计划，考虑在2018—2020年完成的未来攻击航空器系统(FOAS)中增加协同编队以增强其空军力量<sup>[8-9]</sup>。

除英美外，世界其他军事强国也在积极开展有人机和无人机协同作战的技术研究。法国在2014年4月向世界展示了利用Rafale有人战斗机与Neuron无人机进行编队飞行的视频，视频显示通过两种机型的协同和实时信息交互，二者可在编队状态下稳定飞行上百公里，体现了技术的稳定性和可行性。

### 3.2 国内研究概况

目前，世界无人机市场的主要销售国是美国、以色列、法国与英国等。与西方发达国家相比，国内无人机在系统载重、空气动力、发动机、轻质结构及高精度导航等诸多方面都还存在相当的差距。

现在，国内也开始重视对有人机/无人机协同问题的研究。各级研究机构和高校对有人机/无人机协同任务分配、航路规划、编队及自主控制、协同作战等开展了理论研究，取得了很多研究成果。其中彩虹3(CH3)和彩虹4(CH4)两款无人机都带有对地攻击功能；翼龙无人机具备全自主平台，可独立执行监视、侦察及对地攻击等任务，为今后与有人机的协同奠定了良好基础。在理论模型方面，国内的很多模型都建立在比较理想的基础上，不考虑飞行器气动参数的变化和干扰、假设通讯情况都很理想等<sup>[10]</sup>；在控制算法方面，主要依靠传统的线性控制方法，并没有充分考虑编队系统的非线性特征，在设计控制方法时未充分考虑飞行器本身的动力学特性等<sup>[11]</sup>。而且这些研究都还停留在理论仿真阶段，尚未达到应用于实际模型的程度。

综上所述，与美国等发达国家相比，我国对有人机/无人机协同作战的相关技术研究仍然处于探索阶段，距技术成果转化还有很长的路要走。

## 4 有人机/无人机协同作战关键技术

### 4.1 协同交互控制技术

有人机和无人机的协同交互是二者能够成为一个完整作战系统的必要条件，保证了系统内部的信息流通，为系统中的各单元建立了联系。在协同作战模式下，有人机的数据处理量将大大增加，因为其不但要执行自身任务，还要根据无人机和地面指挥中心发送的战场信息进行分析，为无人机分配任务。因此，简单有效的协同信息传输方式将极大提高整个作战系统的作战效率<sup>[12]</sup>。

完整的协同交互方式必然包含一套指令集，保证无人机能够识别来自系统内有人机的指令，同时也保证有人机能够实时接收无人机对战场信息的检测情况。指令集按功能分为三种类型：有人机任务命令、无人机系统命令以及指令编码。这套指令集的设计首先应尽可能满足实际作战中存在的可能性和突发性，以便在任何情况下系统内部都能保持流畅的信息交互。其次命令集应尽量简单，作战任务的执行中包含了大量的数据传输和计算，简单的命令集是信息传输实时性的保证。最后，命令集应符合设计规范，以减少实际作战中信息交互过程中所存在的干扰和噪声，确保信息的正常发送和接收<sup>[13]</sup>。

近年来，随着人工智能理论的发展，基于自然语言的智能人机接口技术受到越来越高的重视。利用自然语言理解技术模拟人的语言分析能力和对话方式，完成人与计算机之间的信息交换。系统可以理解用户输入的语言，并根据给定领域的知识和概念进行推理，明确用户意图，完成用户需求。利用自然语言理解的控制技术，实现人机交互控制，实现有人机与无人机之间的信息交换。交互过程简单易行，大大减轻了操作人员的工作量和通信信道负担<sup>[14]</sup>。

### 4.2 协同态势感知技术

有人机/无人机协同态势感知是协同作战中的一个重要阶段。有人机接收无人机探测的目标信



息,从而分析战场环境,评估战场威胁,利用战场的绝对知识做出正确的决策,并将行动指令传送给无人机。

目前一些学者对有人机/无人机协同态势感知技术进行了初步探索。Endsley提出了一种询问式的态势感知方法和全局评估技术,将询问结果与随机冻结仿真的态势进行比较,探讨了基于不同情境下个人和环境因素对感知和决策结果的影响<sup>[15]</sup>。胡洪波等利用多源信息形成了面向态势感知的通用战术态势图,为指挥员战术态势分析、战术决策等提供了依据<sup>[16]</sup>。胡杰等将变精度粗糙集理论与UCAV态势评估相结合,能够正确预测敌方行动意图,解决了非确定性决策的问题<sup>[17]</sup>。

#### 4.3 协同任务分配技术

有人机/无人机协同作战任务分配是指有人机、无人机相互取长补短,在给定的约束条件下,寻求符合分配原则的最佳方案,利用各自优势充分发挥最大的综合作战效能。有人机作为核心指挥角色,可以根据目标信息和态势评估结果为无人机分配任务。无人机根据自身飞行状态进行武器和编队配置,划定武器的投放区域并确定对目标的打击方向和打击点<sup>[18-21]</sup>。

有人机/无人机协同任务分配是一种多参数、多约束的多项式复杂非确定性问题,通常称为NP(Nondeterministic Polynomial)问题。主要求解思路有最优化方法和启发式方法两种。其中最优化方法包括穷举法、图论方法、规划方法等;启发式方法包括模拟退火法、禁忌搜索法、神经网络和遗传算法等。目前,应用于任务分配的经典理论算法还有合同网算法、蚁群算法、拍卖算法、粒子群算法、Hopfield神经网络、满意决策法等。霍霄华等对多无人机攻击多目标的任务分配问题进行了优化,应用粒子群算法解决了多处理器任务分配和武器分配等问题<sup>[22]</sup>。叶媛媛等提出了基于满意决策的多UAV协同任务分配方法,解决了多机场起飞的UAV编队配置和任务分配问题<sup>[23]</sup>。

#### 4.4 协同航路规划技术

有人机/无人机协同航路规划需要结合任务规划指标、飞行约束条件和战场环境等因素,设计协同飞行航路,以优化总体作战效能。

协同航路规划是一个具有复杂性和耦合性的多约束、多目标优化决策问题。为了降低求解难度,需要将运筹学、智能计算和计算几何学结合起来。Denton等将三维路径分解为水平和竖直方向,解决了航路规划计算过程中维数过高的问题<sup>[24]</sup>。现有的路径规划方法大多基于已知信息规划初始路径,然后在发现障碍物时局部修改规划或重新规划整个路径。这些工作都是建立在对环境具有完整和准确了解的基础上,较少关注部分已知的环境问题。因此,Stentz提出了一种新的D\*算法,能够在未知、部分已知和变化的环境中实现最优路径规划<sup>[25]</sup>。当无人系统执行任务时,需要自动规划从无人机当前位置到目标位置的路径。由于路径距离较长,且情况相对复杂,Stentz提出了复杂作战环境中无人机长距离航路规划问题的解决方案<sup>[26]</sup>。Kambara从Voronoi图中的邻居节点构造Delaunay图,并利用Voronoi网络图构造子图,提出了一种根据需求计算路径的方法,有效地减少了路径搜索的步骤<sup>[27]</sup>,该方法被广泛应用于求解机器人和飞行器的航路规划问题。马向玲基于数据链通信体制,引入惯性权重系数改进了A\*算法,使无人机可以进行在线实时航路规划<sup>[28]</sup>。韩昕锋等将协同进化理论与扩展Voronoi图模型相结合,提出了一种多UCAV协同航路规划算法,实现了规划航路的时域和空域协同<sup>[29]</sup>。

#### 4.5 协同效能评估技术

在有人机/无人机协同作战系统中,如何确定协同作战指标体系,评估其作战效能也是十分重要的问题。

评估有人机/无人机协同作战效能的关键环节是对协同作战体系结构进行合理的建模与描述。随着对装备体系认识的不断深入,以往基于

美军所提出的 Department of Defense Architecture Framework (DoDAF)<sup>[30-31]</sup> 的装备体系建模和分析方法已无法体现出作战过程中整个武器装备体系涌现出的高度复杂性、连通性和网络化特征。为了弥补传统武器装备体系建模中存在的不足,使武器装备体系结构建模研究工作更具客观合理性,军事领域专家和学者纷纷尝试新的建模思路。Boyd提出了OODA循环模型<sup>[32]</sup>,该模型将军事决策过程归纳为由观测(Observe)、判断(Orient)、决策(Decide)和行动(Act)四个环节构成的动态周期循环过程。Cares基于该思想建立了一种静态模型<sup>[33-34]</sup>,将作战过程中的武器装备抽象为网络中的四类节点,用节点之间的连接边表示作战过程中的信息和物质能量交互,由此构建一种信息时代交战模型。Dekker提出了一种C<sup>4</sup>ISR体系结构分析方法,用于研究网络拓扑结构对作战效能的影响,并建立了基于Agent的仿真系统<sup>[35]</sup>。Dekker的研究指出,用复杂网络的分析思想来研究作战网络,不但能确定作战循环过程的关键所在,而且还能改进作战体系的通信和 workflows,为提高决策者的决策效率提供支持。Deller等对Cares模型进行了扩展,定量分析了一个以网络为中心的作战模型,阐明了网络连接性与作战效能之间的相关关系<sup>[36]</sup>。当前对于效能评估的研究方法大都是基于传统指标体系的建模方法,根据体系的层次结构逐层分解进行研究的<sup>[37]</sup>,忽略了有人机/无人机协同作战体系中的各作战实体之间相互作用关系对于整个协同作战体系效能的影响。

## 5 结束语

有人机/无人机协同技术符合航天技术的发展方向,能够最大限度地发展二者的优势,是未来战争的一种主要打击手段,该技术研究也将在未来很长一段时间内成为航空领域的热点。目前,西方发达国家已经在有人机/无人机协同技术上取得了较大进展。但是,关于如何进一步实现有人机/无人机协同作战应用的诸多问题,尚待深入研

究。比如有人机/无人机协同多载体、多类型传感器信息融合问题还没有完全成熟的设计方案,根据不同作战任务和军事需求选择最合适的机型和数量进行合理配置也尚无成型标准。另外,目前还没有一种科学有效的方法用于合理判断和规定这种协同作战模式的性能指标,对其作战效能的评估也亟待开展。加强在这些方面的研究,对指导军队信息化建设,打赢未来高技术条件下的局部战争,具有十分重要的意义。

总之,有人机/无人机协同体系是一种新兴的作战模式,符合未来战争发展方向。同时,这种作战模式构建了一个更为复杂的系统,其军事层面的实现难度和复杂性不言而喻。想要从这项技术中有所突破,必须综合运用大量的先进模拟与仿真技术为前期研究打下基础,同时,还需要大量的理论研究 with 试验验证为今后的实际战场应用做保障。

## 参考文献

- [1] 马向玲,雷宇耀,孙永芹,等.有人/无人机协同空地作战关键技术综述[J].电光与控制,2011,18(3):56-60.
- [2] 闫晔.有人机/无人机协同中的交互控制技术研究[D].长沙:国防科技大学,2007.
- [3] 祝小平,周洲.作战无人机的发展与展望[J].飞行力学,2005,23(2):1-4.
- [4] 包战,王树文.有人/无人机协同作战能力生成问题研究[J].国防科技,2017,38(3):76-79.
- [5] 阴小晖.有人机/无人机协同作战效能评估研究[D].南昌:南昌航空大学,2013.
- [6] Kambara T, Kibe T, NishiDe R, et al. Context-dependent route generation scheme using network voronoi diagrams[C]. 2007 IEEE International Workshop on Databases for Next Generation Researchers. Istanbul, 2007.
- [7] Roberto D, Richard L. Flexible UAV/UCAV mission management using emerging technologies[C]. Command and Control Research and Technology Symposium. California, 2002.
- [8] 王焱.有人/无人机协同作战[J].电讯技术,2013,53(9):1253-1258.
- [9] 孙晓闻.无人/有人机协同探测/作战应用研究[J].中

- 国电子科学研究所学报, 2014, 9 (4): 331-334.
- [10] 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.
- [11] 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).
- [12] 彭辉, 相晓嘉, 吴立珍, 等. 有人机/无人机协同任务控制系统 [J]. 航空学报, 2008 (b05): 135-141.
- [13] 吴立珍, 李远, 彭辉, 等. 有人机/无人机协同任务指令集的设计与实现 [C]. 全国虚拟现实与可视化学术会议, 福州, 2008.
- [14] 刘纪文, 袁胜智, 漆云海, 等. 有人机/无人机协同作战系统关键技术研究 [J]. 舰艇电子工程, 2012, 32 (6): 1-3.
- [15] Endsley M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems [J]. Human Factors the journal of the Human Factors & Ergonomics Society, 1995, 37 (1): 32-64.
- [16] 胡洪波, 郭徽东. 通用作战态势图的构成与实现方法 [J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28 (5): 28-32.
- [17] 胡杰, 黄长强, 赵辉, 等. 基于变精度粗集理论的UCAV态势评估方法研究 [J]. 电光与控制, 2010, 17 (3): 23-26.
- [18] Hathaway D C. Germinating a new SEAD: the implications of executing the SEAD mission in a UCAV [D]. Alabama: School of Advaced Airpower Studies Air University, 2001.
- [19] Wellman M P. Market-aware agents for a multi-agent world [J]. Robotics & Autonomous Systems, 1997, 24 (3): 115-125.
- [20] Schumacher C, Chandler P R, Rasmussen S J. Task allocation for wide area search munitions via network flow optimization [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Montreal, 2001.
- [21] Chandler P, Pachter M. Hierarchical control for autonomous teams [J]. AIAA Journal, 2013.
- [22] 霍霄华, 陈岩, 朱华勇, 等. 多无人机协同控制中的任务分配模型及算法 [J]. 国防科技大学学报, 2006, 28 (3): 83-88.
- [23] 叶媛媛, 闵春平, 沈林成, 等. 基于满意决策的多UCAV协同目标分配方法 [J]. 国防科技大学学报, 2005, 27 (4): 116-120.
- [24] Denton R V, Jones J E, Froeberg P L. A new technique for terrain following/terrain avoidance guidance command generation [R]. New York: IEEE, 1985.
- [25] Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially known enviroments [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994.
- [26] Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially known environments [M]. Intelligent Unmanned Ground Vehicles. Springer, 1997.
- [27] Kambara T, Kibe H, Nishide R, et al. Context-dependent route generation scheme using network voronoi diagrams [C]. IEEE International Workshop on Databases for Next Generation Researchers. IEEE, 2007.
- [28] 马向玲, 陈旭, 雷宇曜. 基于数据链的无人机航路规划A\*算法研究 [J]. 电光与控制, 2009, 16 (12): 15-17.
- [29] 韩昕锋, 叶文, 陈海生, 等. 多UCAV协同航路规划算法 [J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25 (5): 535-541.
- [30] 董彦非, 徐冠华. UCAV operational effectiveness assessment based on department of defense architecture framework [C]. 第19届中国系统仿真技术及其应用学术年会, 2018.
- [31] Ender T R. A top-down hierarchical system-of-systems approach to the design of an air defense weapon [J]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2006.
- [32] Aaron A. Bazin B. Boyd's OODA loop and the infantry company commander [J]. Infantry. 2005, 18 (1): 17-19.
- [33] Cares J R, Incorporated A. An information age combat model [J]. Paper for Iccrts, 2004.
- [34] Cares J R. Distributed networked operations: The foundations of network centric warfare [J]. IUniverse, 2006.
- [35] Dekker A H. Network topology and military performance [C]. MODSM 2005 International Congress on Modelling and Simulation, 2005.
- [36] Deller S, Michael I B, Shannon R B, et al. Applying the information age combat model: quantitative analysis of network centric operations [J]. International C2 Journal, 2009, 3 (1), 1-25.
- [37] 李进军, 刘国光, 黄谦, 等. 基于复杂网络理论的作战指挥体系结构分析模型和方法 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (17): 4712-4715.

#### 作者简介:

樊洁茹 (1989-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为武器系统总体技术、无人系统分析与设计、多机协同与智能控制。

李东光 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微小型武器系统分析与设计、灵巧弹药与引信、动态测控技术、无人系统分析与设计等。本文通信作者。

# 柔性充气结构在无人系统中的应用

李沫宁<sup>1</sup>, 孟军辉<sup>1,2</sup>, 刘莉<sup>1</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)

**摘要:** 柔性充气结构凭借其质量轻、造价低、可折叠展开和控制灵活等优点, 在航空航天和软体机器人等领域都有广阔的应用前景, 逐渐引起国内外研究者的重视。介绍了柔性充气结构在大面积天线、太阳能电池帆板、遮光罩、充气式太空舱、充气式无人机、飞艇、柔性充气式机器人等不同工业领域内的无人系统的应用与研究现状, 分析了柔性充气结构作为承力或功能结构区别于传统刚性结构的特点, 并对充气结构研制过程中所面临的关键技术, 如高性能柔性气囊材料技术、折叠与展开技术、动力学建模与仿真等进行了总结, 旨在为相关领域的研究与应用提供初步参考。

**关键词:** 柔性充气结构; 航空航天; 软体机器人; 无人系统; 柔性气囊材料; 折叠展开技术; 动力学仿真  
**中图分类号:** TH140   **文献标识码:** A   **文章编号:** 2096-5915 (2019) 01-0362-10

## Application of Flexible Inflatable Structure in the Unmanned System

LI Moning<sup>1</sup>, MENG Junhui<sup>1,2</sup>, LIU Li<sup>1</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)

**Abstract:** With the advantages of light weight, low cost, foldable and flexible shape, flexible inflatable structure has a broad application prospect in the fields of aerospace and soft robot. Gradually, researchers at home and abroad pay attention to it. This paper introduces the application and research status of unmanned systems with flexible inflatable structures in different industrial fields, such as large area antenna, solar cell panel, sun shade, inflatable space capsule, inflatable UAV, airship, flexible inflatable robot, etc. It analyzes the characteristics of flexible inflatable structures as the bearing or functional structure is different from traditional rigid structures, and the key to the development of inflatable structures, such as high performance flexible material, folding and unfolding technology, dynamic modeling and simulation, etc. The technology is summarized to provide a preliminary reference for research and application in related fields.

**Keywords:** Flexible Inflatable Structure; Aviation and Aerospace; Soft Robot; Unmanned System; Flexible Airbag Material; Folding and Unfolding Technology; Dynamic Simulation

收稿日期: 2018-12-15; 修回日期: 2019-01-07

基金项目: 教育部重点实验室创新基金 (2017CX02001); 北京理工大学学术启动计划 (3010011181807)

## 1 引言

柔性充气结构一般通过采用轻质高强度柔性复合材料制成的气囊结构, 封闭具有一定压力的特定气体, 可作为无人系统的承力和传力模块或功能模块。相比于传统刚性结构, 具有气体密度较小, 有一定的流动性和可压缩性的优点, 通过与柔性气囊组合而成的柔性充气结构, 具有成本低廉、存储体积小、重量轻、刚度可调、可靠性高等优点, 能够实现传统结构很难达到的性能。因此, 柔性充气结构在工业领域各类无人系统上的应用逐渐成为研究和开发的热点。

根据大英百科全书的定义, 固体是指“在一定时间尺度上能够抵抗大量剪切力的连续体”, 而流体则不具有此种能力<sup>[1]</sup>。柔性充气结构由柔性气囊和气体组成, 在一定程度上同时集合了固体和流体的特性, 可将其认为是具有特殊性能的复合材料。

根据柔性充气结构较之传统刚性结构不同的特点, 其不同无人系统中有着不同的应用。首先, 柔性充气结构通过气囊内部气体压力调整可实现结构较大变形和刚度的变化, 理论上具有无限多自由度和连续变形能力, 可在大范围内任意改变自身形状和尺寸, 从而通过狭窄缝隙或应用于可变结构刚度的系统; 其次, 可通过快速充放气实现无人系统服役状态下的快速成型与组装, 从而应用于无法直接部署的太空、深海或地下空间等; 再者, 可根据特定密度的气体实现系统平台在其他介质中沉浮, 如飞艇通过氦气或氢气的静浮力驻留在空中; 另外, 利用气体的可压缩性可实现对冲击载荷的缓冲, 从而研制成柔性充气缓冲气囊等。

本文对柔性充气结构在不同工业领域内的无人系统的应用与研究现状进行综述, 分析柔性充气结构区别于传统刚性结构的特点, 并对充气结构研制过程中所面临的关键技术进行总结, 旨在为相关领域的研究与应用提供初步的参考。

## 2 柔性充气结构在无人系统中的应用

### 2.1 柔性充气结构在航空航天领域的应用

飞行器结构作为承力和装载的平台, 其自身质量有着较为严格的限制, 飞行器结构设计的目标很大一部分在于满足承载和功能要求的前提下尽可能减轻结构重量。充气结构作为无人飞行器的一部分, 能够有效地降低飞行器整体结构质量, 同时也可实现服役状态下快速充气成型和组装, 近年来得到越来越多的重视, 出现了多种新型的充气式无人飞行器或无人系统。

航天技术及工程实践的发展中始终存在着航天器体积重量与运载器运载能力的矛盾<sup>[2]</sup>。如何在有限的运载能力条件下, 提高航天器效能是研究的重点。轻质柔性材料和折叠展开充气结构的发展为这一目标提供了有效的技术途径。充气式结构在未使用时处于折叠状态, 体积小、质量轻、便于储存与运输, 展开后可获得较大工作面、形式多样。

二十世纪五十年代开始, 人们就开始对充气结构进行探索, 如Echo气球卫星等<sup>[3]</sup>。充气式结构可以提高飞行器运载效率, 实现传统结构形式无法达到的性能, 使航空航天事业走向大型化、轻型化, 具有广阔的应用前景。充气式结构广泛用作航天器的结构部件和功能部件, 如充气式太空舱、大面积天线、遮光罩、高功率太阳能电池板等<sup>[2]</sup>。也可作为航天器再入返回、探索火星等任务的减速缓冲结构。

#### (1) 大面积天线

1996年NASA成功完成了第一个大型高精度IAE空间可充气展开天线轨道释放试验<sup>[4]</sup>, 展示和验证了这一新技术, 其结构如图1所示。美国Johns Hopkins应用物理实验室和ILC Dover公司成功研制出一种混合型充气天线, 该天线由固定抛物面盘和充气反射环组成, 保证可靠性的同时增加了天线面积。为降低对地成像的微波遥感合成孔径雷达天线(SAR天线)的收拢质量和尺寸, 美国喷气推进实验室(JPL)研发了图2所示的由可卷

曲充气框架和柔软辐射面组成的充气式天线<sup>[5]</sup>。

### (2) 太阳能电池帆板

太阳能帆板是航天器的重要组成部分，为其运行提供源源不断的能源。随着空间实验室、深空探测等任务的发展，卫星所需功率将增加到几千瓦，帆板展开后的长度将达到几十米<sup>[6]</sup>。利用充气式结构代替传统展开结构构建超大型太阳能阵列，可达到降低重量成本与储存容积，提高能量供给、延长卫星工作时间的目的。

美国JPL为满足DS4深空探测器12kW功率的要求，研制使用了两个宽3m，长14m的充气式太阳能帆板。全球卫星通信网络( Teledesic项目)中，充气式太阳能电池组是降低生产成本的主要方案之一，图3所示是ILC Dover公司设计制作用于部署试验的全尺寸原型展示单元<sup>[7]</sup>。火星探测项目也需要大型太阳能阵列满足功率要求，图4是JPL研制的充气展开太阳能电池阵原型<sup>[7]</sup>。

### (3) 遮光罩

航天器上的光学系统，特别是太空望远镜，为航天器设备提供稳定的热环境，需要遮光罩来减少外部杂散光对探测的影响。充气式展开遮光罩是一种高效、稳定、轻质、经济性好的途径。下一代空间望远镜( Next Generation Space Telescope, NGST)项目投入大量预算促进这一技术的发展，并开展了地面试验以及准备做空间试验。图5所示是ILC Dover公司为此制作的半比例模型<sup>[7]</sup>。詹姆斯·韦伯太空望远镜( James Webb Space Telescope, JWST)也拟采用充气式遮光罩<sup>[6]</sup>。

### (4) 太阳能热推进聚光器与太阳帆

太阳能热推进聚光器的原理是利用太阳辐射能加热推进剂以获得推力，与传统推进方式相比

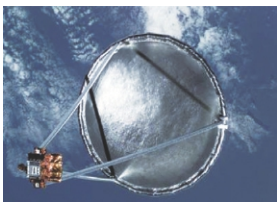


图1 IAE的充气天线  
Fig.1 IAE inflatable antenna

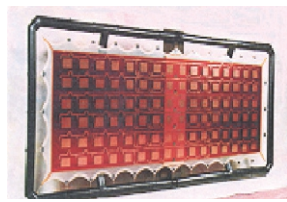


图2 充气式SAR天线  
Fig.2 SAR inflatable antenna

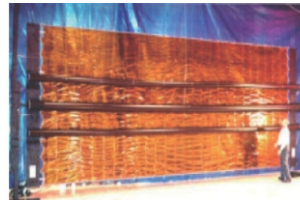


图3 Teledesic项目充气太阳能电池组  
Fig.3 Inflatable solar array in Teledesic program

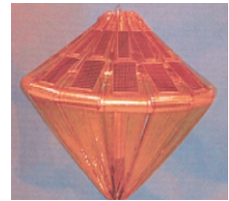


图4 火星探测项目充气展开太阳能电池阵原型  
Fig.4 Prototype of the inflatable solar array in Mars exploration program



图5 下一代空间望远镜NGST的半比例模型  
Fig.5 A semi-scale model of the next generation space telescope

较，具有比冲高、无污染、经济性好等优点。充气式展开聚光器适用于制造大面积(几十至几百平方米)的聚光器，在深空探测中有很大的应用前景，但展开度低、存在褶皱、面差大、对日跟踪难、地面试验重复性差等问题制约了其发展。

此外随着深空探测任务的兴起，太阳帆这种以太阳光压为动力，无需自身携带燃料的推进装置受到航天界的重视。太阳帆可以通过驱动气体驱动支撑管展开。肯塔基大学开展地面试验，得到了不同充气压力下Z型充气展开结构的非线性刚度特性，为有限元工具的应用提供强有力的实例<sup>[8]</sup>。佐治亚理工学院研究人员测量了充气式太阳帆在充气展开过程中的动态响应，验证了该方案的可行性并研究了该过程可能出现的问题<sup>[9]</sup>。哈尔滨工业大学研究人员根据充气管充气装置位置建立了两种模型，对太阳帆支撑管充气展开有限元仿真模拟<sup>[10]</sup>。

### (5) 减速器

充气式再入是一种在行星大气再入过程中利用充气形成的气动外形，进行防热、减速和着陆

减震的再入技术。充气式再入减速器使载荷的外形设计不再局限于大钝头等气动减速外形，发射时可折叠，可显著减少质量与体积，迎风面积大，气动加热更低，集防热、减速、减震功能于一体，简化了回收系统的设计<sup>[11]</sup>。

充气式再入减速器作为一种新的高效再入减速技术，包括概念设计和试验验证，已经形成了六种典型结构形式，即单充气环薄膜型、双充气环薄膜型、堆叠圆环型、单层锥形充气囊型、双层锥形充气囊型与气球伞型等。美国研发了堆叠圆环形充气减速器IRVE，并进行数次试验，了解其空气动力学特性。双层锥形充气减速器以欧洲和俄罗斯合作研究的充气减速器技术(IRD T)为代表<sup>[12]</sup>。

#### (6) 太空舱

充气式载人舱于20世纪50年代开展研究，由于材料经费的限制，直到2006年，俄罗斯才成功发射创世纪1号充气舱首次验证了充气展开载人环境、承受发射载荷的折叠包装、太空微重力条件下的充压扩展、柔性材料与金属的结合、密封等关键技术。2006年，比格罗公司的BEAM充气式居住舱成功在国际空间站上展开(见图6)，其容积为11.5m<sup>3</sup>。宇航员每年两次进入舱内对其空间碎片防护性能、防辐射能力、热防护性能、机械结构性能、密封性等进行测试验证。目前比格罗正在研发内部空间达330m<sup>3</sup>的膨胀模块B330<sup>[3]</sup>。我国研究人员对充气式太空舱的折叠等进行了研究与试验验证，研制了直径2m、长近4m的舱体结构。通过充水加压的方法进行内部压强试验，顺利通过了两个大气压的内压强度考核，实现了预期目标<sup>[13]</sup>。

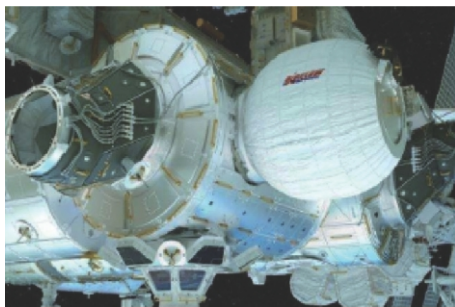


图6 BEAM充气式居住舱  
Fig.6 BEAM inflatable space station modules

#### (7) 重力梯度杆

充气式伸展臂是重力梯度杆的实现方式之一，结构完全展开后可依靠支撑臂内的自支撑增强条保持刚度<sup>[14]</sup>。这种基于自支撑增强条的充气展开臂也应用于太阳帆或充气太阳能阵列的展开结构中，具有质量轻、收拢比大、可靠性高、热稳定性高、承载能力强、振动特性好及工程复杂程度低等优点<sup>[15]</sup>。

国内外研究主要集中在充气展开自支撑增强条正、反向折叠的力学性能、充气结构动态特性以及试验检测方法等方面<sup>[14]</sup>。2013年哈尔滨工业大学联合北京空间机电研究所研制的3m长的充气式重力梯度杆成功充气展开，是国际上首次基于微卫星开展的充气式重力梯度杆的在轨测试<sup>[16]</sup>。

#### (8) 着陆缓冲气囊

缓冲气囊可以减小装备着陆时的冲击载荷，在航天器软着陆工程中应用广泛，例如地外星球探测器软着陆的冲击缓冲结构、运载火箭伞降回收装置等。美国在1997年发射的火星探路者(MPF)探测器所用的是相互联通的密闭型气囊(见图7)。2018年发射的BepiColombo水星探测器采用了双环形布局的密闭气囊来改进登陆车姿态不可控的缺点<sup>[17]</sup>。图8所示是欧空局于2016年发射的ExoMars火星探测器，采用组合式气囊，环形主气囊分成六个腔室，刚性实验平台下方为密闭型环形气囊<sup>[18]</sup>。

随着商业航天的兴起，为降低成本，可重复使用的运载火箭成为航天领域的热点，运载火箭的回收着陆技术受到广泛关注。此外降低运载火箭坠落速度，精确落点可减少对地面人员生命财

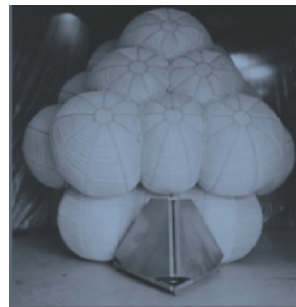


图7 MPF采用的密闭型气囊  
Fig.7 The airtight airbag used by MPF



图8 ExoMars采用的组合式气囊  
Fig.8 The modular airbag used by ExoMars

产的威胁。基于群伞-缓冲气囊的伞降回收着陆系统是适合于可重复使用运载火箭回收的典型方案，若要定点回收可选择具备机动滑翔能力的冲压翼伞回收着陆系统<sup>[19]</sup>。

### (9) 飞艇

近年来，材料、推进、太阳能电池板、能量储存系统、优化仿真等领域的发展，使人们重拾在无人监测和载重运输任务中使用飞艇的信心。平流层飞艇飞行高度高、生存能力强、覆盖范围大，在情报收集、遥感监测、预警探测、通信保障及对空对地作战等领域具有极高军用与民用价值。各国都将平流层飞艇作为战略目标，开展了可行性研究论证及飞行试验。图9所示的美国高空无人飞艇HAA，拟布置在两万米的高空进行导弹预警<sup>[20]</sup>。



图9 美国的高空无人飞艇HAA  
Fig.9 High altitude unmanned airship HAA of the United States

2005年，美国国防预先研究计划局(DARPA)分别授予洛克希德·马丁公司和飞行航空系统公司“海象”(Walrus)项目第一阶段合同，以评估大型空运浮升混合飞行器概念，如图10所示。

洛克希德·马丁公司臭鼬工程部设计并研制出P-791的原型机，于2006年1月完成首飞。P-791将三个囊瓣整合为一个具有大的升阻比外形

的完整艇囊，艇身两侧四个矢量桨提供推力并辅助姿态调节。



图10 海象计划飞行器设想图  
Fig.10 The aircraft diagram of walrus program

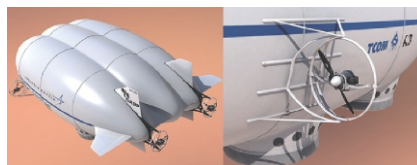


图11 洛克希德·马丁公司P-791混合飞行器  
Fig.11 The P-791 hybrid aircraft of Lockheed Martin Corporation

### (10) 充气无人机

随着无人机越来越多的应用于各种军用和民用活动，各国对无人机的轻量、便携提出了更高要求。充气机翼无人机可紧凑包装、快速部署，具有重量轻、体积小、易运载、生存率高、维修时间与成本低、易于培训操纵人员等优点，适合对机动性与战场信息要求越来越高的现代作战系统。

美国研发了两种用于炮筒发射的无人机，FASM与GLOV。并成功进行了NASA Dryden I2000充气无人机高空投放、充气展开试验。图12所示为充气展开过程。



图12 Dryden I2000充气机翼无人机飞行部署过程  
Fig.12 In-flight deployment sequence of Dryden I2000 inflatable wing aircraft



国内外学者通过风洞实验,得到了充气机翼展开过程中的动力学特性<sup>[21]</sup>,也有学者对机翼的保形设计与气动特性、初始形态问题进行研究<sup>[22]</sup>。

在旋翼方面,国外无人机公司推出如图13所示的轴为充气结构可水上起降的DIODON多旋翼无人机,抛弃传统硬质结构,降低结构重量,提高续航时间。



图13 DIODON充气多旋翼无人机  
Fig.13 DIODON inflatable multi-rotor UAV

## 2.2 柔性充气结构在机器人领域的应用

传统的无人系统平台一般由刚性模块通过各类运动副连接构成,每个运动副提供一个(或多个)平动自由度或转动自由度,通过滚动、滑动、行走、飞行、游动等实现运动位置的变化或设计动作的执行。尽管动力足、功率大、性能成熟,但是其刚性模块设计、环境适应性差等缺点很大程度上限制了其进一步发展。

研究自然界生物系统发现,为了更好地适应各种外界复杂环境,多数生物体结构均为软体结构。国内外学者以此为启发,近年来研制出了各种软体无人系统平台<sup>[23]</sup>,其结构主要由可以承受大变形的非线性材料构成,可以连续变形,具有极高的自由度,实现蠕动、扭转、爬行、游动等运动形式。可以根据实际需要任意地改变自身形状和尺寸,在更加复杂的环境中作业,具有更高的安全性和更好的环境相容性,有着巨大的发展和应用潜力<sup>[24]</sup>。柔性充气结构作为软体结构中较为特殊的一种,通过在封闭气囊内充入一定压力的气体,保证整体结构具有一定的刚度,增加控制系统、能源系统和电子系统后,实现承力和装

载等功能<sup>[25]</sup>。

软体机器人可采取气压驱动流体制动器FEA驱动,用于仿生机器人、机械手、外骨骼、超冗余机械臂等方面。如图14所示,是2014年麻省理工大学研制的机器鱼,采用的是FEA作动器,通过加压使空腔膨胀,同时限制轴向伸缩并把压缩气体的能量引向弯曲方向实现尾部摆动<sup>[26]</sup>。

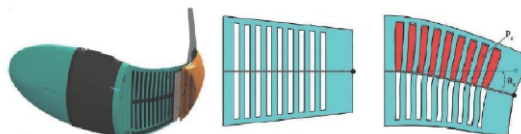


图14 仿生鱼机器人与作动器  
Fig.14 Bionic fish robot and its actuator

2015年欧盟某项目的研究人员,受章鱼启发设计了冗余软体机械臂(见图15),主要用于微创手术,避免内窥镜对人体器官碰触甚至刺破的危险<sup>[26]</sup>。



图15 仿章鱼软体机械臂  
Fig.15 Bionic octopus soft robotic arm

斯坦福大学研发了仿藤蔓生长的软体机器人,如图16所示,通过向管内加压使向内折叠的部分展开,尖端快速延长,并利用控制方向的传感器控制前进方向。实验证明仿藤蔓自生长机器人可举



图16 仿藤蔓自生长软体充气式机器人  
Fig.16 Vine-like self-growing soft inflatable robot

起重物，穿越水面陆地上的各种障碍物，并能抵御火焰，未来可在勘探救援领域发挥重要作用<sup>[27]</sup>。

机械臂的连杆已经可以用充气结构制造，然而关节往往仍采用传统刚性材料设计制造，更重且存在危及人员或财产安全的可能性。法国原子能委员会的交互式机器人实验室为避免工人的核辐射开发了一种完全采用充气结构的机器人充气检查臂。测试显示充气关节与传统结构关节具有相同的力学性能<sup>[28]</sup>。

为提高人与机器人交互的安全性，卡内基梅隆大学研究人员用充气结构代替传统刚性结构（如图17），提出一种能够实现安全交互的机械手接触检测和反应方案<sup>[29]</sup>。



图17 卡内基梅隆大学充气式机械手

Fig.17 Inflatable manipulator developed by Carnegie Mellon University

上海宇航系统工程研究所的研究人员提出了一种基于仿章鱼充气软体机器人的空间碎片柔性、自适应捕获装置，并针对典型任务进行仿真验证。相对于刚性捕获，软体材料能够减小碰撞时的冲击、吸收能量<sup>[30]</sup>。

### 3 柔性充气结构应用于无人系统的关键技术

柔性充气结构被广泛用于人们探索世界以及社会生活的进程中，在水陆空天都能见到柔性充气结构的身影。航空航天应用的大型充气展开结构设计和制备涉及的领域较多，主要包括化学材料、包装展开技术、表面工程、工程测量、动力学以及气动建模仿真等<sup>[5]</sup>。软体机器人的设计开发也需要多学科同步信息，其关键技术涉及到材料选择、运动学动力学建模、运动控制等方面。本文

结合柔性充气结构的具体应用，阐述其关键技术。

#### 3.1 高性能柔性气囊材料技术

柔性充气结构应用于无人系统的关键部件，柔性气囊高性能材料技术成为其研制的基础。根据应用领域的不同，气囊材料需要满足的性能也不尽相同，通常采用高性能薄膜材料或柔性纤维薄膜层压复合材料等。一般情况下，为降低任务的效费比、提高结构可靠性与工作时间，要求其材料具有轻质、柔性、气密性好、耐高温及防辐射等性能<sup>[31]</sup>。

（1）气密性。柔性充气结构在无人系统中无论是用于提供刚度、承受载荷、气动控制或提供静浮力，均需要保证气囊内部的气密性，如充气式无人机需要通过气密性保证结构刚度、平流层飞艇需要保证阻氦性以保持整体静浮力等。现有无人系统结构通常采用气密性良好的涂层浸泡或薄膜复合材料，如聚氟乙烯PVF膜（Tedlar）、聚亚胺酯、聚偏二氟乙烯（PVDF）薄膜等。

（2）轻质柔性高强度。充气式结构应用于无人系统通常需要承受内部气体压力、外部冲击载荷、执行机构控制力等，同时为了防止在运输或服役过程中外部环境的刮蹭、拉扯、磨损、充气展开等导致的撕裂破坏，要求气囊材料具有一定的强度。通常通过高强度薄膜或高强度纤维编织材料实现，如聚酯尼龙、聚酰亚胺以及PBO、Vectran等。充气式软体机器人常用的柔性材料的杨氏模量如图18所示，此类材料通常具有较好的柔度。

（3）耐环境性。对于具有特殊服役环境的无人系统，为了保证其运行的可靠性，需要气囊材料具有较好的耐环境性，如航空航天充气式无人飞行器需要承受紫外照射、空间辐射、高低温交变等复杂的空间环境。对于柔性气囊材料，通常通过层合或者涂覆耐环境层以保证恶劣环境下服役的高可靠性的要求。高分子氟化物耐环境性能优越，但同时必须在其内部添加防老化剂，以防止紫外线对气囊内层材料的伤害。另外，聚偏二氟乙烯（PVDF）、聚氟乙烯PVF膜等也具有较好的

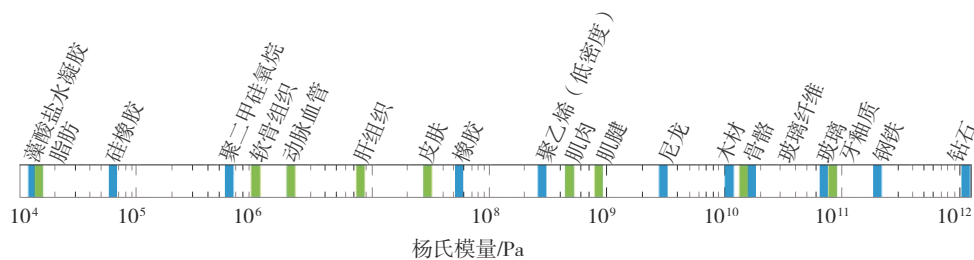
图18 工程中软体机器人常用柔性材料杨氏模量对比<sup>[32]</sup>

Fig.18 Approximate Young's modulus of engineering and biological materials

耐环境性。

充气结构应用于无人系统，要综合考虑气囊材料的物理、机械性能、成熟度、效费比等因素进行选材，并对结构进行优化设计。对于大型航空航天无人系统，其气囊材料通常采用高强纤维编织材料作为承力层，高分子薄膜或涂层作为阻气层或耐环境层。另外，近年来随着数字化设计和制造工具的快速发展，各种新型充气式软体机器人成为可能<sup>[33]</sup>。研究者通过采用快速高效的加工工艺，如3D打印技术、形状沉积制造技术(SDM)和软光刻蚀技术等，将不同的非均质材料(如不同模量的橡胶、嵌入式电子和安装驱动器的内部通道等)复合而成复杂的软体机器人。

### 3.2 柔性充气结构折叠和展开技术

充气结构依赖充入气体来保证外形与刚度，但对于航空航天中充气结构，多数要求运载发射过程中处于折叠状态以占用较小的体积，而处于服役状态时再选择合适的充气方式将其快速充气展开。柔性气囊常用的折叠方式有Z型折叠、E型折叠等，展开方式有旋转展开、仿生展开等。按照充气系统的工作方式可分为持续充气(CI)结构、刚性充气(RI)化结构、一次性充气(SI)结构<sup>[34]</sup>。例如像“天地间先进无线电干涉测量”(ARISE)需要较高的形面精度，只有CI系统才能满足要求。RI系统刚性化的方法有两种，一种是永久性发泡介质填充，另一种是使用硬化材料如热固性复合材料、紫外光固化复合材料等，可降低撞击带来的气体泄漏风险，如美国的JWST就采取RI系统。

对于大型航空航天结构，如充气天线自身刚度较低、在展开过程中受到气压变化、边界扰动易变形，提高形面精度是充气天线应用领域的技术难点，因此需要合理选择充气方式和气体生成方式，保证形面精度，降低充气系统的质量。

### 3.3 柔性充气结构数值模拟与仿真

充气结构的试验研究往往面临着真空和微重力环境模拟困难、地面试验重复性差、试验设备能力有限、试验费用高昂的问题。数值模拟方法可以有效的模拟空间环境，减少试验所需的时间和费用，是一种有效的动态分析方法，在动力学、气动分析优化方面应用广泛<sup>[35]</sup>。

大型空间结构在太空工作时会受到热辐射梯度、空间碎片撞击、姿态调整等各种各样的外界和内部因素的干扰，激发出复杂的动态响应。由于外部无阻尼，大型空间结构内部阻尼又很小，动态响应一旦被激起便很难衰减，会给航天器带来很严重的影响。充气薄膜结构的动态特性受结构弹性、微分刚度、几何非线性、结构和气动耦合等因素的影响，十分复杂。因此开展相关的理论研究及数值模拟十分重要。

航天器运行时会受到流星以及卫星碰撞后产生的太空碎片影响，因此需要对柔性充气结构展开空间碎片超高速撞击及防护设计的研究。目前大部分超高速撞击研究都是针对金属结构，对柔性薄膜的研究尚待进行。

另外数值仿真及优化在充气式再入减速器再入时气动力、气动热多物理场耦合分析，缓冲气囊工作性能的仿真分析，仿真稳健性优化设计都

有应用。可节省试验时间与费用，为初期选型、优化设计提供依据，缩短研发周期。

### 3.4 柔性充气结构动力学建模与控制

柔性充气结构作为机器人承力或功能结构的新形式，近年来取得了长足进步，在勘探、医疗等领域有着广阔的发展前景，但其研究与应用仍处于刚起步阶段。柔性充气结构应用于无人系统的发展涉及到材料科学、机电、控制、生物工程等多个学科，从材料选择、运动学和动力学建模、控制算法到制造生产还有许多问题需要深入研究。

控制传统刚性无人系统的算法不适用于柔性充气结构，因此真正精确控制柔性充气结构实现实时的无线自由度运动需要更优异的控制算法。为进一步平衡灵活性、承载能力、可靠性，需要建立精确的物理模型，涉及到多学科同步分析，将集成传感器、致动器、机载计算机集成在柔性材料中，实现预期的运动。为使柔性充气结构真正的在医疗、探测等领域造福人类，要积极的将材料科学与生物工程科学联合起来开发满足生物相容性的柔性材料，将新生产工艺及技术运用到生产中，使生产规模化、商业化。

## 4 结束语

随着航空航天技术的发展，太空成为各国科技竞争、战略部署的新制高点，人们探索太空的脚步也逐步迈向深空。航空航天装备水平是国家航天能力的核心标志，是国家高科技生产力的重要体现。同时，无人系统在医疗、制造、环境勘探等领域的发展，会给人类的社会生产生活带来极大的便利。

研究柔性充气式结构会是这一切很好的切入点。能够为航天器大型化轻量化的发展目标、高效能减速器的设计、太空旅馆概念的实现提供可行的技术途径。同时，充气结构也用在飞艇、无人机、机器人等领域，可在信息获取方面发挥至关重要的作用。相信随着柔性充气式无人系统技

术的发展及人机交互水平的提高，将对医疗康复、勘探救援等领域产生颠覆式的影响。所以我们应该放眼未来，挖掘柔性充气结构的发展潜力，攻克技术难点，提高可靠性，不断创新。

## 参考文献

- [1] Yang W, Wang H T, Li T F, et al. X-mechanics: an endless frontier [J]. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2019, 62 (1).
- [2] 贺卫亮. 充气展开式结构在深空探测中的应用前景 [C]. 深空探测技术与应用科学国际会议, 2002.
- [3] 王翔. 充气展开太空舱的发展历程 [J]. 太空探索, 2016, (8): 24-27.
- [4] Freeland R, Veal G. Significance of the inflatable antenna experiment technology [C]. 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, April 20-23, 1998.
- [5] 马小飞, 宋燕平, 韦娟芳, 等. 充气式空间可展开天线结构概述 [J]. 空间电子技术, 2006, 3 (3): 10-15.
- [6] 卫剑征, 苗常青, 杜星文. 充气太阳能帆板展开动力学数值模拟预报 [J]. 宇航学报, 2007, 28 (2): 322-326.
- [7] Cadogan D P, Lin J K. Inflatable solar array technology [C]. AIAA Aerospace Sciences Meeting, January 11-14, 1999.
- [8] Clem A, Smith S, Main J. A pressurized deployment model for inflatable space structures [C]. AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, April 3-6, 2013.
- [9] Graybeal N, Craig J, Whorton M. Deployment modeling of an inflatable solar sail spacecraft [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August 21-24, 2006: 1.
- [10] 崔乃刚, 刘家夫, 邓连印, 等. 太阳帆充气支撑管展开动力学分析 [J]. 宇航学报, 2010, 31 (6): 1521-1526.
- [11] 荣成成, 左光, 陈冲, 等. 充气式再入航天器总体方案及关键技术初探 [J]. 航天返回与遥感, 2015, 36 (1): 16-23.
- [12] 李爽, 江秀强. 火星进入减速器技术综述与展望 [J].

- 航空学报, 2015, 36 (2): 422-440.
- [13] 王娟. 中国空间技术研究院充气式太空舱研制获新突破 [J]. 军民两用技术与产品, 2016, 11 (21): 16-16.
- [14] 宋博. 充气展开自支撑结构力学特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [15] 周思达, 周小陈. 空间伸展臂的技术现状与难点 [J]. 中国空间科学技术, 2014, V34 (6): 38-50.
- [16] Wei J, Tan H, Wang W, et al. Deployable dynamic analysis and on-orbit experiment for inflatable gravity-gradient boom [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55 (2): 639-646.
- [17] Clery D, Normile D. BepiColombo set to probe Mercury's mysteries European-Japanese mission will examine idea that innermost planet formed out past Mars [J]. *Amer Assoc Advancement Science*, 2018, 362 (6410): 11-12.
- [18] Slade R, Sharp P, Jones R, et al. Analysis, optimization and probabilistic assessment of an airbag landing system for the ExoMars space mission [J]. *Aiaa Journal*, 2006, 2: 1057-1065.
- [19] 黄伟. 运载火箭伞降回收着陆技术概述 [J]. 航天返回与遥感, 2017, 38 (3): 1-12.
- [20] 李利良, 郭伟民, 何家芳. 国外近空间飞艇的现状和发展 [J]. 兵工自动化, 2008, 27 (2): 32-34.
- [21] Qi R, Khajepour A, Melek W W, et al. Design, kinematics, and control of a multijoint soft Inflatable arm for human-safe interaction [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33 (3): 594-609.
- [22] 陈立立, 李玲, 郭正, 等. 充气机翼保形设计与气动特性分析 [J]. 航空工程进展, 2015, 6 (1): 18-25.
- [23] Best C M, Wilson J P, Killpack M D. Control of a pneumatically actuated, fully inflatable, fabric-based, humanoid robot [C]. *Ieee-Ras International Conference on Humanoid Robots*, November 3-5, 2015.
- [24] 侯涛刚, 王田苗, 苏浩鸿, 等. 软体机器人前沿技术及应用热点 [J]. 科技导报, 2017, 35 (18): 20-28.
- [25] 费燕琼, 庞武, 于文博. 气压驱动软体机器人运动研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (13): 14-18.
- [26] 许彬彬. 充气式螺旋纯扭转软体机器人模块的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [27] Hawkes E W, Blumenschein L H, Greer J D, et al. A soft robot that navigates its environment through growth [J]. *Science Robotics*, 2017, 2 (8).
- [28] Voisembert S, Riwan A, Mechbal N, et al. A novel inflatable robot with constant and continuous volume [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 9-13, 2011.
- [29] Sanan S, Ornstein M H, Atkeson C G. Physical human interaction for an inflatable manipulator [C]. *Engineering in Medicine and Biology Society, Embe, 2011 International Conference of the IEEE*, August 30 - September 3, 2011.
- [30] 韩亮亮, 杨健, 赵颖, 等. 基于仿章鱼软体机器人空间碎片柔性自适应捕获装置的理想 [J]. 载人航天, 2017, 23 (4): 469-472.
- [31] 沈自才. 充气展开式结构在航天器中的应用 [J]. 航天器环境工程, 2008, 25 (4): 31-37.
- [32] Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots [J]. *Nature*, 2015, 521 (7553): 467-475.
- [33] Cho K J, Koh J S, Kim S, et al. Review of manufacturing processes for soft biomimetic robots [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009, 10 (3): 171-181.
- [34] 姚涛涛, 张玉珠. 可展开航天器的充气系统分析 [J]. 国际太空, 2008 (1): 32-35.
- [35] 刘福寿. 大型空间结构动力学等效建模与振动控制研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

#### 作者简介:

李沫宁 (1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性充气无人系统设计。

孟军辉 (1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为柔性充气无人系统设计及力学性能分析。

刘 莉 (1964-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器总体设计。

# 美国“快速轻量自主”项目推进 无人系统自主能力发展

王彤, 李磊, 蒋琪

(北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074)

**摘要:** 美国国防预先研究计划局 (DARPA) 开展的“快速轻量自主” (FLA) 项目旨在开发一种新的导航、感知、规划和控制算法, 使无人系统能够在未知、杂乱的环境中实现自主、高速飞行。首先从研究背景、目标和技术定位等方面概述了项目的基本情况; 然后重点介绍了项目的两项关键技术, 导航与感知 (视觉惯性测距技术、多层映射技术、机器学习技术), 规划与控制 (3D反馈运动基元、2D全局规划器); 最后结合项目具体试验成果, 展望未来发展趋势, 认为FLA项目可以大幅提升无人机的自主能力, 扩展无人机的应用场景, 推进分布式协同作战能力的形成, 项目成果有良好的可扩展性和极大应用价值。

**关键词:** “快速轻量自主”项目; 无人机; 导航感知; 规划控制; 三维地图绘制; 自主能力

**中图分类号:** TP29    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-5915 (2019) 01-0372-07

## DARPA Fast Lightweight Autonomy Program Promotes Unmanned System Autonomy Development

WANG Tong, LI Lei, JIANG Qi

(Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The Fast Lightweight Autonomy (FLA) program of the Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) aims to develop a new navigation, perception, planning and control algorithm that enables unmanned systems to achieve autonomous, high-speed flight through an unknown cluttered environment. Firstly, basic overview of the program including research background, objectives and technical positioning is summarized. Then two key technologies that is navigation and perception (Visual-Inertial Odometry (VIO) techniques, multi-level mapping techniques, machine learning techniques), planning and control (3D reactive motion primitives, 2D global planner) are introduced. Finally, the specific test results of the program and the future development trend are analyzed. The review shows that FLA program can greatly enhance the autonomy of UAVs, expand the application scenarios, and improve distributed collaborative battle capability. The program results are highly scalable and have high application value.

**Keywords:** Fast Lightweight Autonomy (FLA) Program; Unmanned Aerial Vehicle; Navigation Perception; Planning Control; 3D Map Creation; Autonomy Ability

收稿日期: 2018-12-09; 修回日期: 2019-01-20

## 1 引言

目前,美国在执行紧急监视侦察任务方面的能力存在不足:军队在复杂环境中执行危险的巡逻任务时或救援队开展灾难营救行动时经常使用无人机搜集数据来进行态势感知,执行队员可以在安全区域远程监控进展,但是需要了解建筑物内部的情况时(墙壁、门和杂乱的空间使无人机操控变得困难),仍需人员进入,而这通常会使用美国军人或救援队员处于危险之中。

美国国防预先研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)的“快速轻量自主”(Fast Lightweight Autonomy, FLA)项目旨在开发一种新的导航、感知、规划和控制算法,使无人系统能够在未知、杂乱的环境中实现自主、高速飞行。将这一新技术集成在小型四旋翼无人机上,该项目将展示敏捷的飞行能力,使飞行器在没有外部通信或GPS导航的情况下,以高达20m/s的速度在未知的室内/室外环境中自主感知和飞行<sup>[1]</sup>。

## 2 项目概况

2015年,DARPA启动FLA项目,通过研究非传统感知和自主方法,为不确定环境中的高速无人机进行导航,使小型无人机借助自身携带的各种传感器,在杂乱无章的建筑物内和障碍遍布的环境下自主完成任务<sup>[2]</sup>。

FLA项目开发具有先进自主算法的智能软件,并集成在质量仅为5磅的轻型四旋翼无人机上,使得无人机在续航能力和机载计算能力有限的情况下,在室内、地下或受干扰等GPS受限时无需远程遥控就可自主执行任务,以此实现高度自主。其可以将小型空中和地面系统转变为能自主执行危险任务的编队成员——例如在敌军遍布的城市环境中执行任务的先前侦察,或者在地震后搜索受损建筑物以寻找幸存者<sup>[3]</sup>。

FLA项目提出之初,DARPA提出了一些衡量

指标,见表1。

表1 FLA项目衡量指标

Table 1 FLA program performance goals

属性	衡量指标
速度	20m/s
能耗	计算 20W, 传感(待定)
环境	复杂, 城市, 杂乱无章
预先信息	提供任务目标
距离	1km
续航时间	10min
通信	无
GPS	无法使用或拒止

FLA项目共分为两个阶段,第一阶段主要对室外、仓库和办公室进行飞行测试。2015年9月25日,DARPA向Scientific Systems公司授予FLA项目第一阶段合同,同时还有麻省理工学院等优秀团队共同参与开发。2016年成功完成第一阶段飞行试验<sup>[4]</sup>。

第二阶段主要完成门、窗户和其他物体识别的飞行测试。麻省理工学院和德雷珀实验室团队此阶段致力于使无人机不需要外部通信设施或GPS就能在未知的环境中自主感知和机动。2017年参与的团队成功完成了第二阶段的飞行试验。

## 3 项目采用的智能算法

在未知环境中仅使用机载传感器进行搜索,必须解决两个关键问题:导航和感知问题,即无人机必须在快速飞行过程中非常有效地从传感器提取信息,以便定位自身位置和感知周围环境,以识别障碍物和清除不可靠路径;规划和控制问题,即无人机必须准确和快速地避免碰撞,同时朝着目标前进。此外,这些导航、感知、规划和控制子系统必须与低延迟通信紧密集成才能协同工作,以此实现这种精确的集成系统功能<sup>[5]</sup>。

### 3.1 导航与感知

为了使无人机能够在不借助GPS情况下实现各种环境中的精确定位和导航,项目研发了一种

基于视觉惯性测距(VIO)技术的估算器。估算器集成了机器视觉单目相机和惯性测量单元(IMU),其中相机能提供无漂移但缺乏标度信息的低速率测量,IMU能提供具有绝对标度但漂移的高速率测量,VIO则利用两者的互补性达到了更好的测量效果。此做法继承了多状态约束卡尔曼滤波框架的工作,将高速高漂移IMU数据和低速率低漂移视觉数据集集成在一个实时、成熟的框架中<sup>[6]</sup>。

而为了无人机高速飞行中的感知,项目开发了几种协同策略。为近场前向感知,商用立体相机和结构光传感器被用于10m或更小范围内密集深度信息的获取。同时开发基于多层映射技术的新技术,可从单目相机中提取局部几何信息,以通过帧到帧的跟踪来快速确定大体深度<sup>[7]</sup>。而为了远程感知,项目探索符号感知技术,该技术利用机器学习技术对环境和物体进行分类,有助于确认安全、可用的飞行路线,如道路、通道、门道、窗户和树木之间的空隙<sup>[8]</sup>。

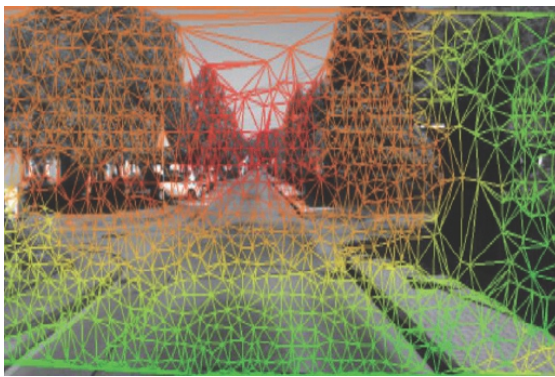


图1 基于网格的单目图像几何恢复

Fig.1 Mesh based geometry recovery from monocular imagery

### 3.2 规划与控制

项目的规划与控制系统基于3D反馈运动基元<sup>[9]</sup>,这是一种轨迹控制/规划方法,可直接使用局部深度数据来控制无人机运动行为。通过运动基元的方法,不需要经历构造地图、优化轨迹和跟踪轨迹等一般过程,核心是规划通向目标的路线(高速飞行并避免障碍),利用基于系统精确动态模型的碰撞概率快速确定,并且受益于低精度

状态估计方法的鲁棒性。

此外,运动基元方法不依赖于全局地图状态反馈,以避免无人机飞行中状态估计方法可能产生的误差。当无人机飞入复杂的空间或在大障碍物周围盘旋需要协助时,项目开发的2D全局规划器则为运动基元系统提供帮助。未来,感知系统将融入机器学习技术,用于当前环境的分类,然后根据环境类型的特征,向规划控制系统推荐超出无人机传感器探测范围的安全轨迹。

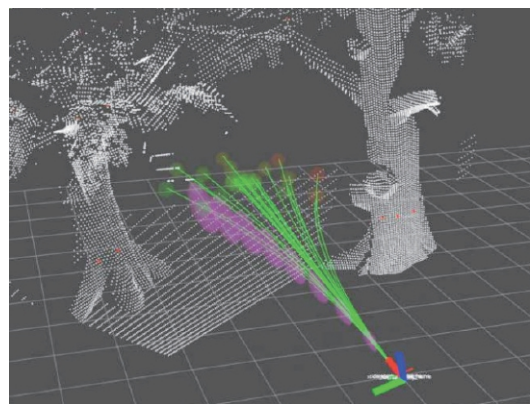


图2 飞行模拟测试中运动基元轨迹选择路线图

Fig.2 Motion primitive trajectory options during simulated forest flight

## 4 项目飞行试验成果

### 4.1 第一阶段飞行试验

2016年4月,FLA项目在一个拥有模拟墙壁和过道的室内仓库环境中进行了首次飞行试验。为了使测试更具挑战性,DARPA测试团队在通道上创造了死胡同,强制无人机在过道之间穿越,并将过道中的各种物品作为障碍物。试验的目标是一辆北极星多功能车,终点距离起点约60m。在每次试验之间,测试团队会稍微重新配置环境,使得每次试验都是不同的。在这次飞行试验中,共有39次成功达到试验目标,并且在一些试验中无人机达到了高达5m/s的速度。在这次测试中,无人机只要求找到目标,并没有要求返回原点。



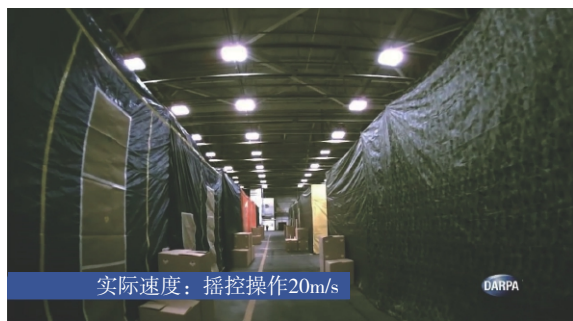


图3 首次飞行测试场景图

Fig.3 First flight test scene

第二次试验是在2016年11月,三个团队在佛罗里达州进行了飞行试验。这次飞行是在室外环境中进行的,混合了开阔的草地、道路、茂密的灌木丛、森林和一些建筑物。对于这次测试,目标距离从单程大约160m增加到1 km。试验中,无人机飞到目标位置,并返回原点自主着陆。测试的目标物体是穿过森林与停机坪后机库内部的红色化学桶<sup>[10]</sup>。

有一次试验与其他不同,在出发点与目标之间基本没有障碍物,旨在展示高速飞行,试验的最大距离为1 km,无需返回原点。在飞行中,飞行速度达到了19.5m/s。由于目标距离的增加(需要更好的导航精度才能成功到达目标),不确定的环境(影响障碍物检测)以及多变/具有挑战的光线(依赖相机的导航和感知系统),这个试验在复杂性方面有了明显进步<sup>[11]</sup>。

## 4.2 第二阶段飞行试验

2018年,FLA项目完成了第二阶段的飞行试验,研究人员演示最新FLA软件在模拟城市环境中,在没有人类帮助的情况下执行现实世界的任务。为使更小、更轻的四轴无人机取得更好的性能,研究人员基于2017年第一阶段飞行测试,改进了软件并且使用商业传感器,在佐治亚州佩里的监护中心培训基地的模拟城镇进行了空中测试,测试的场景包括城市室外和室内,取得了重大进展,包括:以更快的速度飞行在多层建筑之间,穿过狭窄通道,同时识别感兴趣的物体;穿过狭窄的窗户飞进建筑物,沿走廊搜索房间,并绘制

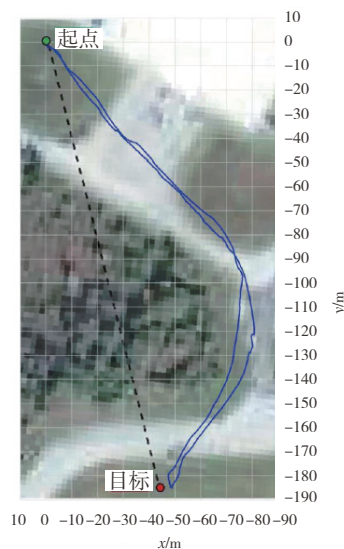
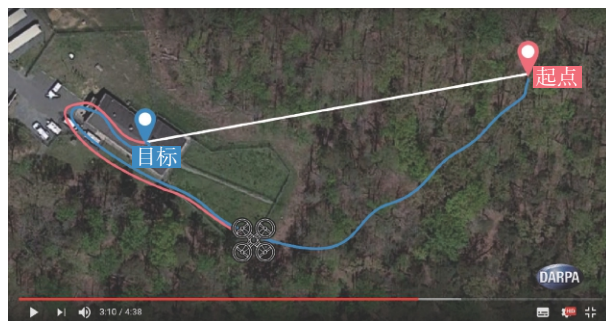


图4 寻找红色化学桶并返回原地概念图(上)与现实仿真图(下)

Fig.4 FLA vehicle planning position (above) and simulation position (below) during out and back mission test

室内三维图;以及识别楼梯并沿楼梯飞行,最后从一个敞开的出口离开大楼<sup>[12]</sup>。

### 4.2.1 麻省理工学院和德雷珀实验室团队为无人机配备Wi-Fi手持设备

麻省理工学院和德雷珀实验室的工程师团队为提高无人机飞行速度,减少了机载传感器的数量,以减轻无人机的重量。第一阶段中,团队在平台上安装了各种不同的传感器执行侦察任务。而在第二阶段,只使用一台摄像机。

无人机在侦察时不仅要绘制出准确的地图,还要绘制语义地图。当无人机使用传感器在未知环境中进行障碍物快速探测和导航时,它会不断地绘制地图,探索和记忆已经侦察的地点,因此可以自行返回起点。

在无人机执行任务中,机载计算机利用神经

网络可识别出道路、建筑物、汽车和其他物体，并在地图上对其进行标识并支持点击功能。在任务完成后，人类操作员可以从机载处理器下载地图和图像。为提升任务效率，麻省理工学院和德雷珀实验室团队开发了一款名为安卓战术攻击套件 (ATAK) 的手持应用设备，该设备可以连接来自无人机的可选Wi-Fi (人类操作员可以按需打开或关闭)。当Wi-Fi连接时，无人机可以发送关注对象的实时图像，不必等待任务完成。

在飞行试验中，研究人员成功验证了无人机对模拟城镇周边处于不同位置的汽车的自主识别能力。在“探索模式”下，无人机对车辆进行识别，并通过Wi-Fi实时提供可点击的高分辨率图像，同时可在手持设备ATAK上显示地理数字地图<sup>[13]</sup>。



图5 无人机识别车辆 (左) 与手持设备图像显示 (右)  
Fig.5 UAV identify vehicle (left) and handheld app image display (right)

#### 4.2.2 宾夕法尼亚大学团队为无人机增加三维地图绘制功能

宾夕法尼亚大学研究团队为提升无人机自主性，减小了其尺寸和重量以便能够在杂乱无章的狭小室内空间中自主飞行。为容纳所有需要的传感器和计算平台，该团队开发了一款新的集成单板计算机，使得无人机尺寸减小一半，重量减少一半以上。同时使用一款通用处理器，只需很少的功耗就可以完成全部的计算任务。在任务执行中，无人机不仅需要认知环境的一部分，还需要掌握它上方以及下方的环境，因为它有可能需要绕着桌子或椅子飞行，因此建立一个完整的三维图在室内环境中非常重要。

在该团队试验中，无人机从室外起飞，以更快的速度飞行在多层建筑之间，识别并穿过只有几英寸宽的二层窗户；沿走廊搜索房间，并绘制室内三维地图；识别楼梯间并沿楼梯飞下，最后从一个敞开的门离开大楼飞回室外。该项目下一步是将更多的计算能力集成到更小的平台上，生产一种足够小到可以放在手心里的智能无人机<sup>[14]</sup>。

## 5 分析与展望

FLA项目研究了先进的算法，可以使小型无人机借助自身携带的各种传感器，在不确定的环境中自主完成任务。

FLA项目所涉及到的关键技术主要有几个方面：能源与动力技术，包括发动机技术和能源类型；平台技术，包括气动设计、外形设计、材料等方面；网络通信技术，主要用于无人机和有人

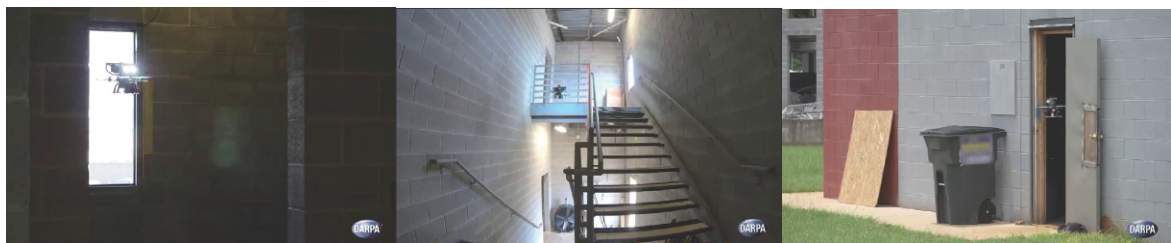


图6 无人机识别穿过窗户 (左) 与飞下一段楼梯 (中) 以及飞出敞开的门 (右)  
Fig.6 UAV identify and pass through the window (left) and fly down stairs (middle) and fly out of the open door (right)

平台之间以及无人机集群内部的通信，需要满足高速、低延迟、高可靠、抗干扰等需求；载荷技术，包括高性能的传感器、探测器以及其他任务载荷的设计制造等；自主控制技术，包括自主导航、路径规划、态势感知、自主决策、集群协同等方面。FLA项目研发是以现有的轻型无人机平台为基础，并且预期的主要应用场景是缺少外界信息支援的复杂环境，因此项目重点发展的是无人机自主控制这一领域的技术。该项目有以下优势：

(1) 提升无人机自主能力，以提高自身生存能力并降低人员危险。多次飞行试验的成功表明，该项目开发的先进算法可以使无人机绘制三维地图并记忆环境，该功能使得无人机可以在没有任何通信GPS等外界支撑的情况下自主执行并完成任务，并能自主回到出发点以供人员下载信息。这些自主能力减少了无人机被无线电检测的几率，很大程度上提升了它的生存能力和安全性，同时降低了人员危险。此外，新开发的手持设备可通过Wi-Fi与无人机载荷进行数据同步，以便人员可以根据需要实时关注无人机侦察情况，而无需等待

其返回再下载信息，避免可能因延迟带来的危险。

(2) 后续将改进算法，成果即将过渡到陆军。该项目合作的大学和工业研究团队今后将致力于对FLA项目算法的改进，在不久以后只要提供一般的航向、飞行距离和需要搜索的特定目标，这些算法可以将轻型、商用现成的空中或地面无人系统转换为无需人工干预的高性能操作系统。配备FLA算法的无人系统不需要远程飞行员、GPS导航、通信链路，也不需要该区域的预编程序地图，只需要机载软件、轻量级处理器和低成本传感器，可以自动实时地完成所有工作。

(3) 支撑其他项目，推进分布式协同作战能力的形成。项目研究重点是无人机，但是这一项目所取得的成果在地面、水面和水下系统，尤其在GPS信号不佳或无GPS信号的环境中，均具有很大的应用潜力。FLA项目是DARPA战术技术办公室发起的，该项目侧重于单个无人机自主能力的研究，该办公室还发起了“拒止环境中协同作战”(CODE)<sup>[15]</sup>、“进攻性蜂群使能战术”(OFFSET)项目，这两个项目侧重多无人机蜂群协

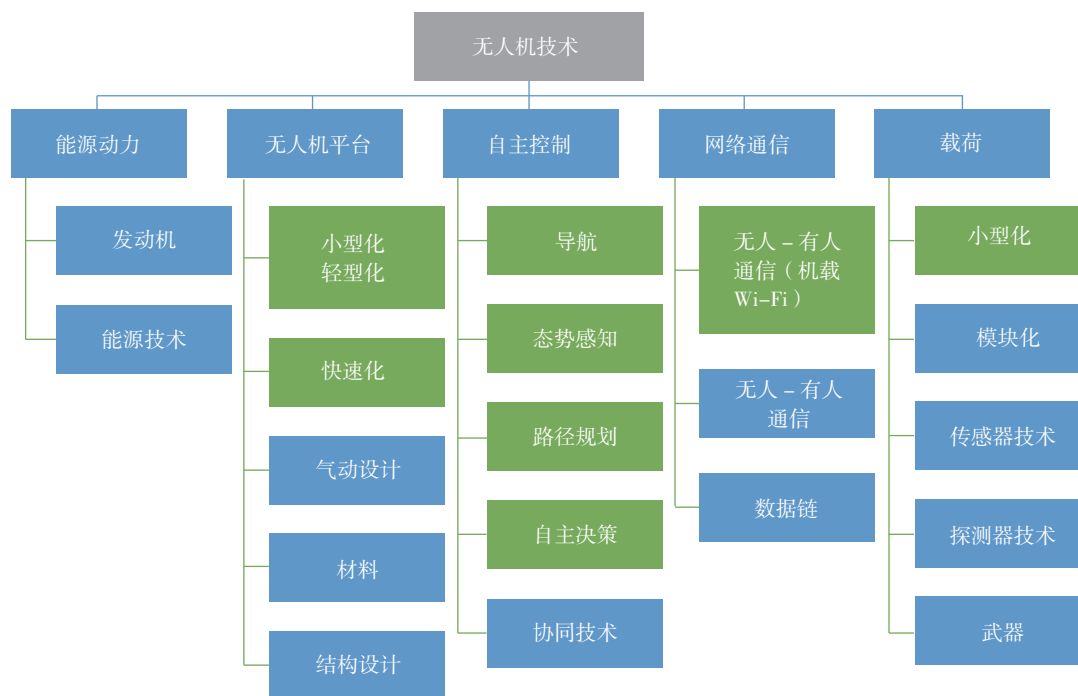


图7 无人机主要关键技术图谱

Fig.7 UAV key technology map

同作战，FLA项目研究成果很有可能应用于CODE和OFFSET项目<sup>[16]</sup>。

## 6 结束语

无人机快速、轻量、自主的特点逐渐受到国内外各行各业的高度关注。本文通过研究DARPA开展的FLA项目，分析美国对于优化无人机性能的解决思路。项目通过开发先进的智能算法，应用于集成了小巧轻便传感器和计算载荷的小型无人机平台，使无人机可以在室内、城市室外、野外等复杂、危险和缺少外部支持的未知环境中自主执行任务，同时也能使人员通过手持设备在无需暴露的情况下仍能保持对态势的感知。项目成果表明单架无人机可在无GPS或GPS不佳环境中自主执行侦察等任务，该项目已计划过渡到陆军，未来无人机协同形成蜂群后，在侦察、饱和攻击等实战应用中将很大程度提高美军作战能力。

## 参考文献

- [ 1 ] FLA program takes flight [ EB/OL ] . [ 2016 ] . <https://www.darpa.mil/news-events/2016-02-12>.
- [ 2 ] Lte P R. Fast Lightweight Autonomy ( FLA ) [ EB/OL ] . [ 2015 ] . <https://www.darpa.mil/program/fast-lightweight-autonomy>.
- [ 3 ] Defense Sciences Office. Broad agency announcement: Fast Lightweight Autonomy ( FLA ), DARPA-BAA-15-16 [ R ] . Defense Advanced Research Projects Agency, December 22, 2014.
- [ 4 ] Fast Lightweight Autonomy ( FLA ) [ EB/OL ] . [ 2015 ] . <https://www.darpa.mil/program/fast-lightweight-autonomy>.
- [ 5 ] Paschall S, Rose J. Fast, lightweight autonomy through an unknown cluttered environment: distribution statement: A — Approved for public release; distribution unlimited [ C ] . 2017 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, March 4–11, 2017.
- [ 6 ] Li M, Mourikis A I. High-precision, consistent EKF-based visual - inertial odometry [ J ] . The International Journal of Robotics Research, 2013, 32 ( 6 ) :690–711.
- [ 7 ] Greene W N, Lommel P, Roy N. Multi-level mapping: real-time dense monocular SLAM [ EB/OL ] . [ 2016 ] . [https://groups.csail.mit.edu/rrg/papers/greene\\_icra16.pdf](https://groups.csail.mit.edu/rrg/papers/greene_icra16.pdf).
- [ 8 ] 潘泉, 康童娜, 吕洋, 等. 无人机感知规避技术发展与挑战 [ J ] . 无人系统技术, 2018, 1 ( 4 ) : 51–61.
- [ 9 ] Pete F, John C, Russ T. Integrated perception and control at high speed: evaluating collision avoidance maneuvers without maps [ R ] . WAFR 2016.
- [ 10 ] Smart quadcopters find their way without human help or GPS [ EB/OL ] . [ 2017 ] . <https://www.darpa.mil/news-events/2017-06-28>.
- [ 11 ] Fully loaded quadcopter achieves 20 m/s flight video [ EB/OL ] . [ 2016 ] . <https://www.youtube.com/watch?v=LaXc-jmN89U&t=48s>.
- [ 12 ] Faster, lighter, smarter: DARPA gives small autonomous systems a tech boost [ EB/OL ] . [ 2018 ] . DARPA FLA website: <https://www.darpa.mil/news-events/2018-07-18>.
- [ 13 ] 美国防高级研究计划局“快速轻量自主”(FLA)项目完成第二阶段试飞 [ EB/OL ] . [ 2018 ] . [https://mp.weixin.qq.com/s?src=11&timestamp=1548141825&ver=1381&signature=UeHdjPxxD9rk5S4\\*cgtsEtSyyN5bbGDVFGFn7czYu6fXX3NF3bDpuw0uytjcXYkwWRnckGJ7Tm9puet7oeDFzVPGrEGhYQbo2Y5vFqFGVUMXiV5mAjW15a0Yzau1Wnf&new=1](https://mp.weixin.qq.com/s?src=11&timestamp=1548141825&ver=1381&signature=UeHdjPxxD9rk5S4*cgtsEtSyyN5bbGDVFGFn7czYu6fXX3NF3bDpuw0uytjcXYkwWRnckGJ7Tm9puet7oeDFzVPGrEGhYQbo2Y5vFqFGVUMXiV5mAjW15a0Yzau1Wnf&new=1).
- [ 14 ] Fast Lightweight Autonomy ( FLA ) phase 2 flight testing video [ EB/OL ] . [ 2018 ] . <https://www.youtube.com/watch?v=vDYy3L9nvLk&t=3s>.
- [ 15 ] 李磊, 王彤, 蒋琪. 美国CODE项目推进分布式协同作战发展 [ J ] , 无人系统技术, 2018, 1 ( 3 ) : 59–66.
- [ 16 ] 王彤, 李磊. 更轻, 更小, 更智能: DARPA完成FLA项目第二阶段飞行试验 [ EB/OL ] . [ 2018 ] . <http://dy.163.com/v2/article/detail/DN697K3H0514FBM4.html>.

### 作者简介:

王彤 (1992–), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为分布式作战、无人系统等。

李磊 (1982–), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为无人系统技术及作战模式、装备保障技术等方面的情报研究。

蒋琪 (1982–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为精确打击、电子对抗、作战模式、前沿技术等方面的情报研究。



# 征稿启事

## 《无人系统技术》期刊

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

### ◆ 约稿方向

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

### ◆ 投稿方式

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

### ◆ 投稿要求

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

### ◆ 写作要求

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

### ◆ 关于稿酬

稿件一经录用，将按照字数和文章质量情况，向作者一次性支付稿酬。

# 顾 问

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

## 第 一 届 编 委 会

### 主 任

李风雷

### 副主任

王长青 宋 斌 谷满仓 张 涛 符文星

### 委 员 (按姓氏拼音排序)

昂海松 蔡顺才 陈 斌 陈家斌 戴江勇 邓宏彬 都基焱 方 浩 符小卫 郭继峰 黄 强  
黄长强 李必军 李东光 李贻斌 林 平 刘 莉 刘培志 罗 均 马洪忠 孟 红 潘 泉  
齐俊桐 时兆峰 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 浩 于进勇 于林宇 赵 杰 张 梅 张 宁 张 山 张冬青  
张卫平 朱 枫 朱小燕 Simon X. YANG Wei Ren Yang SHI Yantao Shen

无人系统技术 2018 年创刊 (双月刊)

主管单位: 中国航天科工集团有限公司

主办单位: 北京海鹰科技情报研究所

协办单位: 中国无人系统产业联盟 (筹)

中国指挥与控制学会无人系统专业委员会

西北工业大学无人系统发展战略研究中心

西北工业大学无人系统技术研究院

主 编: 张冬青

副 主 编: 蔡顺才 孙柏原 李东光 陈少春

执行主编: 王一琳

编辑出版: 《无人系统技术》编辑部

地 址: 北京 7254 信箱 4 分箱 (100074)

电 话: 010-68190652 (编辑部)

010-68375084 (发行部)

邮 箱: chinauas310@163.com

国内发行: 北京海鹰科技情报研究所

印刷单位: 北京博海升彩色印刷有限公司

Unmanned Systems Technology Started in 2018 (Bimonthly)

Administrated by: China Aerospace Science & Industry Corporation Limited

Sponsored by: Beijing HIWING Scientific and Technological  
Information Institute

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

Technical Committee on Unmanned Systems, CICC

Research Center for Unmanned System Strategy

Development, NWPU

Unmanned System Research Institute, NWPU

Editor-in-Chief: ZHANG Dongqing

Associate Editor: CAI Shuncaï SUN Baiyuan LI Dongguang

CHEN Shaochun

Executive Editor: WANG Yilin

Edited & Published by: Editorial Office of Unmanned Systems  
Technology

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

Tel: (8610) 68190652 (Editorial office)

(8610) 68375084 (Circulation office)

E-mail: chinauas310@163.com

Distributed by: Beijing HIWING Scientific and Technological  
Information Institute

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

本期责任编辑: 李 志

ISSN 2096-5915  
CN 10-1565/TJ

国内定价: 30 元 / 期

