

ISSN 2096-5915
CN 10-1565/TJ

创刊号

无人系统技术

UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY

主管：中国航天科工集团公司 主办：北京海鹰科技情报研究所



ISSN 2096-5915



2018.1
第1卷 NO.

《无人系统技术》创刊词

未来人类进化的方向是什么？智能无人自主系统的发展将会给社会带来怎样的冲击？它会与人类和谐共处还是会取代人类？在新技术的冲击下，未来社会形态又会向何处演化？这一切都值得深思。

无人系统是集系统科学技术、控制科学技术、信息科学技术等一系列高新科学技术为一体的综合系统，多门类学科的交叉融合与综合发展是无人系统构建的基础。现代无人系统是平台技术、智能控制技术、信息技术等紧密结合的产物，也是工业与信息相互融合的代表性产品。它在工业系统、公共服务、消费产品以及各专业领域的智能系统中有着广泛的应用，在国防科技工业和军事应用领域也有着广阔的发展前景。

为全面、系统地反映我国无人系统领域的科学技术成果，《无人系统技术》期刊正式创办发行。刊物将秉承科学精神，以反映无人系统学术研究水平、促进学科交叉融合、引领无人系统发展为办刊理念，努力为无人系统领域研究成果搭建信息与技术交流平台，推广我国专业产品与能力，引进国外先进理念与技术，促进国际间交流与合作；助力无人系统相关技术的研究，引导行业规范发展，培养领域创新人才，推动产学研用深度融合；凝聚国内研究力量，着力落实军民融合发展战略，全力推动我国无人系统的技术进步与创新发展，提升我国无人系统在国际上的地位和影响力。

最后，希望《无人系统技术》在各级领导和专家的支持下，通过编辑部的不懈努力，打造国内无人系统领域一流的学术交流平台，为我国无人系统领域的发展创新做好知识服务！

北京海鹰科技情报研究所所长



卷首语

无人系统作为当今社会最热门的领域之一，其蓬勃发展的速度之快，影响范围之广有目共睹。随着科学技术的不断进步和市场需求的增加，将涌现出一大批新概念、新种类的无人系统，其任务用途逐渐拓展，技术水平日益提升，使用强度持续提高。

值此全世界劳动人民伟大导师马克思诞辰 200 周年之际，引用马克思的话：“人们自己创造自己的历史，但是他们并不是随心所欲地创造，并不是在他们自己选定的条件下创造，而是在直接碰到的、既定的、从过去继承下来的条件下创造的。”人类历史的发展有其自身的规律，无人系统是人类社会发展的必然产物。人类创造的无人系统已在人类社会的各个领域发扬光大，并将逐渐走向自主化、智能化，必将对人类社会产生深刻的影响。

◆从历史角度看，人类的历史是逐渐认识自我和解放自我的过程，无人系统经历了从机械化到自动化时代，到信息化时代，再到智能化时代的变革，从而提高了人的体力、感知力和智力。

人类在进化发展过程中，逐渐学会了直立行走释放了前肢，利用前肢获取食物和抵御敌害；又通过前肢使用树枝、石块等工具来更好的捕食和御敌；后来又学会了利用前肢制造工具（火、电等），并利用工具制造工具，获得更好的生活品质。从使用前肢再到逐渐释放前肢是人类不断进步的体现。人类科学技术发展的历史是人类认识自然并改造自然的历史，同时也是人类认识自我和解放自我的历史。人类科学技术的发展大多是以增强能力、减轻负担为主要目的，发展进程中的每一次科技革命都是一次人类能力的飞跃。

从有人系统到无人系统的发展使得人类释放了人力，并扩展了人的能力，能够更好的增强人的体力、感知力和智力。无人系统已有百年历史：空中无人系统诞生于 20 世纪初，地面无人系统诞生于 20 世纪 30 年代，水面和水下无人系统分别诞生于 20 世纪 40 年代和 50 年代。早期的无人系统在技术和使用上存在很多限制，只能执行一些特定的辅助任务或仅用于研究、试用，没能成为任务中的主力。随着平台技术和自动控制技术的发展，无人系统从机械化向自动化延伸，增强了人的体力；随着信息技术、互联网、物联网、云技术的发展，无人系统向信息化延伸，增强了人的感知力；随着人工智能、脑科学、大数据等技术的发展，无人系统向智能化延伸，增强了人类的智力。当前，各项前沿颠覆性技术集群式突飞猛进的发展，促进了无人系统在人类社会各领域的应用。

◆从发展应用角度看，于物理域、信息域、认知域和社会域考虑，无人系统在物理域将更加适应环境变化，在信息域将使信息获取、传递和处理得更快、更准确，在认知域将更敏捷的做出可靠的决策，在社会域将协助人类更好的完成相关任务。

无人系统执行任务时没有人在系统中或系统旁直接手动操控无人系统，但无人系统的平台个体本身，不可避免的要存在于当时的环境，要有信息的产生与传递，有一定的理解和决策能力，且还要与其他个体发生相应的社会关系，所以无人系统在物理域、信息域、认知域、社会域的活动贯穿于无人系统生命周期的始终。

从无人系统的物理域来看，对于人类无能力或无精力到达或触及的环境，人类发明了太空无人系统、空中无人系统、水面无人系统、水下无人系统、地面无人系统（含无人月球车、无人火星车等）、地下无人系统等，在特定物理环境中执行各自的任務，释放了人力，具有更好的环境适应性，将在其所在物理域为人类提供更优质、更可信的服务。

从无人系统的信息域来看，无人系统在信息域的活动主要包括对信息的获取、复制、传递、增值、处理、共享等，实现与其他系统或人类之间的信息交换。无人系统减少了信息的处理、共享等环节需要的大量人工操作，减少了大量的非结构化数据的人工判读，提高了信息的处理速度和利用效率。当前各类先进传感器、数据处理器以及信息网络正在向全面智能化发展，将使信息收集的范围更为广泛，信息处理的速度更快、准确度更高、质量更好。

从无人系统的认知域来看，无人系统在认知域的活动主要包括无人系统的感知、认知和决策产生等，无人系统执行任务的环境通常是具有高度的复杂性和不确定性的，也通常是人类无法到达的区域，如火星、化学腐蚀、核辐射区域等，特别是现代化战场环境复杂程度越来越高，陆、海、空、天、电、网各维度态势相互交联，单纯依赖人工对态势图判读来理解和预测态势将会变得越来越困难。无人系统的智能态势感知理解和自主决策，

将会提高其作业效果和效率，并提升人类对其分析成果的理解和信任。

从无人系统的社会域来看，社会域是任何人类团体所不可或缺的因素，在社会域中，无人系统实体不是孤立的个体。无人系统在社会域的活动主要是无人系统实体与其它实体之间相互交联、传递信息、相互感知与理解，并做出协同决策的集合，涉及无人系统、有人系统、人之间的指挥、协同/联合、信息保障、支援等关系。最基本的是，通常人要告知无人系统执行何种任务，而无人系统要报告人其执行任务的结果。未来，无人系统在社会域中将占据更为重要的角色，将人与机深度融合为共生的有机整体，让机器的精准和人类的可塑性完美结合，利用机器的速度让人类做出最佳判断，以协助人类提升认知速度和精度，快速做出决策。

◆从无人系统的科学技术角度看，多学科的深度交叉融合发展，将促进无人系统向更高水平的智能自主方向发展，同时无人系统将催生各科学技术之间的交叉，而形成新的科学前沿。

无人系统作为一个复杂系统，在“系统”与“技术”的对立统一、相互促进中逐步向更高层次演变。从控制方面看，经过近百年的发展，无人系统已经从简单的遥控向人机智能融合的交互控制转变，并逐步向自主控制方向发展；从智能方面看，无人系统已经具备了一定的感知、认知、决策能力，正在向着智能化方向发展。

就无人系统的发展而言，未来的智能无人系统将在控制论、信息论、人工智能、仿生学、神经生理学、认知和行为科学、计算机科学发展的基础上逐渐形成一类复杂系统，多学科的交叉是其构建的基础。智能控制技术、信息技术、人工智能等技术的迅猛发展，以及传感技术、多源信息融合处理技术、机器视觉、机器学习与计算能力的显著提升以及多技术的融合将为无人系统的自主化、智能化提供坚实的技术基础。

以维纳的控制论、香农的信息论和贝塔朗菲的系统论为基础，无人系统的发展也将会带动一系列的科学技术创新，有可能在信息科学、计算机科学、材料科学、生命科学、物质科学，以及脑与认知科学、地球与环境科学、数学与系统科学乃至社会科学之间的交叉领域形成新的科学前沿，发生新的突破。

◆《无人系统技术》期刊将促进无人系统技术的学术交流，促进跨学科技术领域的深度融合，推动完善的无人系统学科体系。

无人系统将在智能制造、精密制造等工业制造领域，侦查、防暴、监控、检测、救灾、灾害评估等公共安全领域，环境检察、检测、监测、巡检等生态环境领域，无人驾驶、智能交通、无人物流等交通运输领域，灌溉、喷药、病虫害检测、产量估算等农业领域，手术机器人、医疗服务机器人、康复辅助机器人等卫生医疗领域，道路、桥梁、建筑物裂缝检测安全状况评估等建筑领域，情报、监视、侦察、预警、无人作战等国防领域，水下考古、河道湖泊监测等文化领域，司法鉴定、取证等司法领域……提升国计民生，推动科技进步，促进经济增长，并对人类社会产生深远变革影响。

无人系统的智能自主等发展需求，推动着多个学科研究领域的相互渗透与交叉融合发展。因此，《无人系统技术》刊载与传播的内容并不是断言未来无人系统或某项技术的发展必会如何，这会使我们研究与交流的视野变得更窄，而是希望通过刊物承载更多具有引领性、前瞻性的论文，能够把研究的广度变得更宽，让读者去体察、探索、追寻、质疑还有其他更多的选项，可以促进无人系统向着更高的智能化、自主化、网络化、体系化、敏捷化、长续航能力等方向发展，使其更能够体现人类特征，更接近人类水平。

当然，研究视野的放宽也会面临更多的不确定，可能会让我们比以往更加困惑。面对未来无人系统发展的更多状况和可能性，“智能”和“自主”究竟能达到什么程度？会以怎样的形式展现出来？会与人类之间形成什么样的关系？各学科交叉融合发展对无人系统会产生什么样的作用？该如何评价无人系统的智能与自主性……这也是创办《无人系统技术》期刊的目的所在。

本刊以创办一流的无人系统研究领域科技期刊为发展愿景，以反映无人系统学术研究水平、促进学科交叉融合，引领无人系统发展为办刊理念，坚持开放办刊、线上线下相融合的发展路径，将聚焦无人系统研究领域科技前沿，秉承“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”的办刊宗旨，重点报道无人系统及其相关交叉学科的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结，促进跨学科技术领域的深度融合，努力打造国内无人系统领域一流的学术交流平台，竭诚为从事无人系统领域研究的科技工作者、工程技术人员、科研管理人员，以及无人系统应用部门的广大读者服务，为形成完善的无人系统学科体系贡献力量。

编委会主任

李凤雷

【中国工程院院士 李德毅题词】

把这个人变成无人船无人机
作为智能时代
军民融合的好手

李德毅



【中国工程院院士 刘永才题词】

賀《無人系統技術》創刊
創一流神技期刊
從無人技術發展

劉永才

二〇一八年五月



系统综述

轮式机器人实践与展望.....	01
李德毅	
智能无人自主系统的发展趋势.....	11
张涛, 李清, 张长水, 梁华为, 李平, 王田苗, 李硕, 朱云龙, 吴澄	
平行无人系统.....	23
陈龙, 宇文旋, 曹东璞, 李力, 王飞跃	

技术研究

微型飞行器发展现状及关键技术浅析.....	38
陈世适, 姜臻, 董晓飞, 周兵, 姜鹏, 宋斌	
面向空间机械臂在轨服务操作的视觉感知技术.....	54
郝颖明, 付双飞, 范晓鹏, 魏景阳, 朱枫	
无人机系统概念和关键技术.....	66
昂海松	
基于扰动流体动态系统的无人机三维航路规划: 方法与应用.....	72
王宏伦, 吴健发, 姚鹏	
无人机吊挂飞行控制技术综述.....	83
齐俊桐, 平原	

《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。



Systematic Review

- The Practice and Prospect of Wheeled Robot..... 01
LI Deyi
- Current Trends in the Development of Intelligent Unmanned Autonomous Systems 11
ZHANG Tao, LI Qing, ZHANG Changshui, LIANG Huawei, LI Ping, WANG Tianmiao, LI Shuo,
ZHU Yunlong, WU Cheng
- Parallel Unmanned System 23
CHEN Long, YU Wenxuan, CAO Dongpu, LI Li, WANG Feiyue

Technical Study

- Overview of Micro Aerial Vehicles and Its Key Technologies 38
CHEN Shishi, JIANG Zhen, DONG Xiaofei, ZHOU Bing, JIANG Peng, SONG Bin
- Vision Perception Technology for Space Manipulator On-Orbit Service Operations 54
Hao Yingming, Fu Shuangfei, Fan Xiaopeng, Wei Jingyang, Zhu Feng
- The Concept and Key Technology of UAV System 66
ANG Haisong
- UAV Three-Dimensional Path Planning Based on Interfered Fluid Dynamical System: Methodology and Application 72
Wang Honglun, Wu Jianfa, Yao Peng
- Survey on Flight Control Technology for Hanging Load UAV 83
QI Juntong, Ping Yuan



轮式机器人实践与展望

李德毅

(中国电子系统工程研究所, 北京 100039)

摘要: 未来人工智能将会从生产经济、社会生活等各方面深刻改变我们的世界。知识和智能将成为先进社会最重要的经济来源。文章将围棋脑和驾驶脑作为两种典型的人工智能案例进行阐述和分析, 剖析了其研究意义、技术原理、存在问题以及发展趋势, 提出知识和数据双驱动的人工智能, 是值得当前关注的重点课题。展望未来, 人类必定迎来人与机器人共舞的新时代, 毋庸置疑, 人类始终是领舞者。

关键词: 人工智能; 围棋脑; 驾驶脑; 轮式机器人

中图分类号: TP249 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 01-0001-10

The Practice and Prospect of Wheeled Robot

LI Deyi

(Institute of China Electronic System Engineering, Beijing 100039, China)

Abstract: In the future, artificial intelligence will profoundly change our world from production, economy, social life and other aspects. Knowledge and intelligence will be the most important economic source of advanced society. In this paper, weiqi brain and driving brain are described and analyzed as two typical cases of artificial intelligence, analyzing its research significance, technical principle, existing problems and development trend, putting forward artificial intelligence with dual drive of knowledge and data, which is a key topic worthy of attention at present. Looking ahead, human beings are bound to usher in a new era of human and robot dance. There is no doubt that human beings are always the leaders of dancers.

Keywords: Artificial Intelligence; Weiqi Brain; Driving Brain; Wheeled Robot

1 人工智能回顾

1956年6月，在由十几位青年学者参与的达特茅斯暑期研讨会上诞生了“人工智能”。我们格外怀念那些为人工智能做出过杰出贡献的科学家和工程师们。经历一位位熠熠生辉的大师，通过一座座巍峨炫目的里程碑，人工智能已经成长为枝繁叶茂的参天大树，对世界经济、人类生活和社会进步产生极其深远的影响，使我们更加充满前行的勇气，去拥抱人工智能的新时代。

今天，60多年过去了，为什么人工智能快速地火了起来？我认为计算机网络功不可没，有了互联网就有了云计算，有了云计算就有了物联网，有了物联网就有了大数据，所以应该说是互联网、云计算、大数据成就了当今的人工智能。

人工智能领域到底会不会出现重大发现？会不会突然在某一天颠覆世界？我们可以回顾一下历史。人类走过了农耕社会、工业社会、信息社会，现在有的机构还叫信息研究所，其实已经落后了。大家都知道这个时代仅有信息的覆盖是不够的，智能作为当今智能社会的时代印记已经成为了共识。我们曾经依靠资源、资本、劳动力等要素投入，支撑中国经济的规模扩大和快速增长，但这已经成为历史。加快从要素驱动发展向创新发展的转变，人工智能是一种解决方案，而且是一种具有开创性的方案，不是靠资本和劳动力，而是靠智能实现创新驱动。

未来我国将成为机器人最大的市场，而机器人是制造业皇冠顶端的明珠，是一个国家科技创新和中高端制造业的重要标志。机器人革命是世界性的、时代性的，只有通过贡献原创性的技术才能使我国成为机器人产品和机器人市场规则的重要制定者和主导者。因此，中国能否成为人工智能市场重要规则的制定者或主导者，就是能否把握住历史机遇的问题。毫无疑问，机器人将成为人类社会走向智慧生活的重要伴侣，这将引发人人联网、物物联网的崭新形态，会改变人类的生产活动、经济活动和社会生活。试问有哪一项

技术能够在未来不仅从深度而且从广度上改变人们的生产活动、经济活动、社会生活？人工智能作为一个答案就走到了我们的面前。所以这为我们提供了一种全新的观念，不再是劳动力或原材料，也不再是传统制造，而是知识和智能，将成为先进社会最重要的经济来源，在这种观念的强力驱动下，智能的产业化被推上了风口浪尖。

国家提出智能制造，意味着无论是人类智能，还是人工智能，都是在提升创新驱动发展源头的供给能力，这就解释了为什么所有学会都在研究人工智能，它是创新的原始驱动力量，是生产力中的核心生产力。中国人工智能学会联合科技部向中央提议把《中国人工智能2030》作为国家《科技创新2030》重大专项，是因为整个科技界都形成了共识，大家都觉得势在必行。另外，现在全国有30个学会、50所大学、100多位教授，建议增设智能科学与技术作为国家一级学科，我认为也是十分必要的。

2 当前人工智能的典型案例分析——围棋脑

关于人工智能的典型案例分析，我将列举两个例子来阐述，一个是围棋脑，一个是驾驶脑。

拿围棋来说，近年来人机对弈的结果反映出人工智能取得了突飞猛进的进展。2011年，中国人工智能学会组织了九路围棋人机大战，北邮围棋程序Lingo对阵中国围棋总教练俞斌，当时采用的是 9×9 的棋盘，还不是现在AlphaGo与李世石对弈的 19×19 的棋盘，预先商定俞斌让两子。当时俞斌还表示，和机器人下棋让两个子让得太狠了，最后北邮的Lingo程序战胜了俞斌。

根据当时的结果，舆论普遍认为电脑9路盘围棋两三年或可抗衡人类，对于19路盘围棋，机器要战胜人类还看不到希望。2011年科学家们预言的19路盘围棋，没想到5年之后就变成了事实，为什么？

2.1 计算机下围棋，难在哪里？

在研究人工智能或者数学的人看来，围棋跟

象棋的根本差别在于，象棋越下棋子数量越少，胜负最后以逼死对方将领而定。围棋并不是这种规则，棋子没有大小之分，以将对方棋子围困程度作为获胜依据。这里面有手筋、弃子、劫争等很多战术，既要有逻辑思维，更要注重形象思维。这涉及到了更大局观的问题，本质上是一个拓扑学的问题，或者可以归结为拓扑动力学的问题，这也是围棋有趣之处。

拿 19×19 路的棋盘举例，从统计学角度看，一个特定的棋局态势大概有 250 种可能的期望走法，沿某种走法深入下去就可达 150 层。因此，共有 250^{150} 遍历搜索，计算量和推理难度巨大。围棋因其巨大的搜索空间和困难的棋局态势表达，被认为“千古无同局”，历来被称为是人工智能的最大挑战。计算机如何成功应对这次挑战，是我们重点关注的内容。

2.2 大样本和自学习支撑 AlphaGo 取胜

从根本上说，我们认为 AlphaGo 胜，胜在它突破了传统程序，搭建了两套模拟人类思维的深度卷积神经网络。第一套网络是 Value Networks，它承载棋局态势评估，到底谁围住谁、当前的态势如何，这是一个网络评估，正如指挥员上战场，最需要的就是这种作战态势评估。第二套网络是 Policy Networks，它选择如何落子，这就是军事上讲的决策。所以计算机利用了两套网络，一套态势评估网，一套决策网，来向人类棋手学习，对海量样本的胜局和败局进行分析和计算，并自动提取规则，进行推理。

从人工智能角度看人机大战，这是人类高手与人工智能发展成果积累的对决，是让棋手充当测试员的一次科学试验。李世石事后表示，和机器人下棋没有感觉，这因为他实际上承受的是一个人和一群人的对决。对方阵营里，所有的程序员都是会下围棋的，既是棋类高手又是人工智能高手。就像我们现在研究无人驾驶汽车一样，你既是经验丰富的驾驶员，又是研究人工智能车的专家。所以，李世石和机器人下棋其实是一个生

物人与“人与机器混合生物”之间的对决。如果你只会下棋不懂人工智能肯定赢不了李世石这样的世界级高手，你只懂人工智能但不会下棋同样也赢不了，能编写出一个好的围棋程序的程序员不会下围棋是不实际的，所以要跨界创新。同样的道理，无论是人机的象棋大战，还是人机的围棋大战，本质上都是人机跟机人的大战。一个是机器在前面，人在后面，一个是人在前面，机器在后面。从长远来看，到底谁输谁赢，统计概率都是 50%。

2.3 AlphaGo 的局限性

AlphaGo 仅仅是一个围棋脑，确切来说它都不算是一个围棋手，因为它是靠人辅助去拿棋子的。他更不是一个围棋机器人，因为它没有眼和手，没有感知和行为能力，没有情绪和情感，不能分析对手的心理状态，不能现场和对手展开心理战，缺少交互认知能力。最近几年我对交互认知研究得稍微多一点，之前我在合肥计算机大会上提出了这个问题，大家不要总是讲计算智能、计算认知，应该多花一点精力研究交互智能、交互认知。其实下棋就是典型的交互，是两个智能体之间通过交互进行的较量。

2.4 震撼之后的思考

关于 AlphaGo，我们可以再深入展开，对以下几个问题进行思考。

第一个问题，如果让 AlphaGo 按照原来的方法和步骤再下一盘棋，是否能够完全重复？我曾经写过一本书《不确定性人工智能》，里面认为我们所处的世界本质上是处处存在不确定性的，一个鲁棒的具备处理一定不确定性问题的人工智能方法必然也是具有一定不确定性的。因此我认为 AlphaGo 每次的计算结果是很难重复的，每次都下得不同，至少不会完全相同。

第二个问题，AlphaGo 和李世石下了 5 盘棋，下棋之后这个程序有没有发生改变？如果是发生改变，改变会出现在哪里？这种改变起到什么作用？如果不发生改变，就如同我们的手机程序，

只需要重新启动就恢复如初。

第三个问题，让相同版本或者不同版本的AlphaGo对弈一下，机器人和机器人下棋，结局会如何？最初和樊麾对弈是版本9，和李世石对弈是版本13，和柯洁对弈的是AlphaGo的另外一个版本。在挑战人类的过程中AlphaGo的版本在不断升级，尤其在中国挑战柯洁这段时间，AlphaGo的版本升级速度比人类智能生活进化的速度要快得多。

第四个问题，如果让AlphaGo不再和高手下棋，而是和普通的棋手下，棋艺会不会退化？以上这些问题都值得我们去思考。

我觉得未来机器人的学习能力应该是标配。如果我们日后组织一场轮式机器人和赛车手的比赛，完全按照人和人之间的规则进行比赛，让机器人在整个过程都有一个完整的感知认知和行为能力，而不仅仅像是与AlphaGo对弈这种只存在于决策层面的比赛，我想这样的人机大战一定会更加激动人心。

3 当前人工智能的典型示例——驾驶脑

3.1 为什么要做智能驾驶

10年来，我一直在研究智能车，研究核心是驾驶脑。汽车作为曾经被称为改变了世界的机器，正在被人工智能所改变，正在被世界所改变。实际上，汽车至今只有100多年的历史，看看百年汽车工业核心竞争力转移图。19世纪，人们关注的是机械、传动、底盘、轮胎、结构；20世纪，人们关注的是被动安全、碳排放、发动机、能源；再后来人们开始考虑轻量化、主动安全、电动汽车、新能源和数字汽车。现在大家最感兴趣的是自动驾驶、自动驾驶和轮式机器人。

汽车给人类带来便利的同时，也带来了严重的忧患。一人一车、一人多车导致人类对自然资源的过度剥夺和消费，尤其是土地和能源，引发了一系列生态问题和社会问题。所以汽车是必须要变革的，不管你愿不愿意，汽车变成智能车都

是必然的。另外，从汽车造成的灾难来看，公安部发布的2010年我国交通事故死亡人数是65225人，WHO模型估计数据是275983人，相当于每天一次重大灾难。美国亦然，全球人类伤亡相当于每月一次911大灾难。所以汽车要发生变革，站在逻辑的角度看是不可避免的，站在科学理论角度上看也是必然的。我曾经讲过一句话：科学进步和人类文明不允许汽车成为全球第一杀手。客观上来讲，在紧急情况下，人类的本能无法做到绝对安全，驾驶员失误必然客观存在。我们可以做到不盲驾，也可以做到不酒驾，但是绝对做不到不犯错误。人类必然会犯错误，但人工智能将取代人类与机器直接接触，使得人工孤立驾驶机器的时代一去不复返，这就是我们做智能驾驶的动力所在。

权威机构预计，到2030年左右，80%的车辆都是自主行驶，偶尔的人工驾驶只是为了享受驾驶的乐趣而已，移动机器人将再次改变人类的生活形态。我们要做的智能驾驶是一种轮式机器人，当然也有人说智能汽车不一定是轮式机器人，也可以是一种自动驾驶的终端。例如，地铁机车和高铁的列车就可以是自动驾驶。汽车向前发展有两条路，一条路是自动驾驶加网络调度，在一个封闭的结构化环境中实现汽车的自动驾驶；另一条路是在开放的非结构化道路下运行，让汽车能够像人一样自主行驶。我们选择的第二条路，强调用人工智能技术代替驾驶员的感知。我们绝不是要取代汽车，目标并不是做一辆更好的汽车，而是要研究代替驾驶员的功能，代替驾驶员的感知、认知和行为，确保车辆自主行驶的方法和途径。我们不纠结机器驾驶脑或者驾驶员脑是否在微观上具有相似性，我们把它叫做认知的物理学方法，而不是认知的生物学方法。所以在我们看来，我们所说的智能驾驶和汽车行业的说法并不一样，即所谓最高级的自动驾驶——全自动驾驶，并不是我们定义和划分的智能驾驶。

我们可以把智能驾驶等级区分为离线辅助驾驶和在线自动驾驶，像ADAS、抬头显示、地图导

航、碰撞预警等的离线辅助驾驶，以及能够完成局部时段、局部区域自动驾驶，但这两种划分本质上都属于辅助驾驶。比如特斯拉开启自动驾驶时要求驾驶员必须把手放在方向盘上，因此有人提出质疑，这不是自动而是能够随时干预，应该称作辅助驾驶，所以后来特斯拉更名为自动辅助驾驶。可即使是这样大家还是不能认同，试想在驾驶过程中随时都可能参与人的辅助还怎么能称为自动呢？

我们希望做的自动驾驶是一种没有驾驶员的驾驶，或者叫自动驾驶。现在说的比较多的是机器自动驾驶，为什么不能称为无人驾驶？因为车里仍然有乘员，像无人机那样没有乘员才能叫作无人。科技部在发表“十三五”规划重大专项时有一个新提法，叫做“以人为本的人机协同共驾”，我认为这个说法较为妥当。人和机器人要和谐相处，类似于骑士与马的关系，马是认知主体，马的前腿怎么跨，后腿怎么蹬，不需要骑士给它发具体的操作指令，这是它的本能。我们希望将来人和机器人也能达到这种和谐相处，所以我把智能驾驶分五个等级，现在的自动驾驶本质上是辅助驾驶，还属于有人驾驶。

3.2 自动驾驶陷阱

车辆行驶过程中充满了不确定性，如果汽车采用软件定义的机器自动驾驶，我们无法知晓满足当前驾驶条件的自动驾驶窗口会维持多久，需要做随时切转到人工驾驶的准备。因此，这种

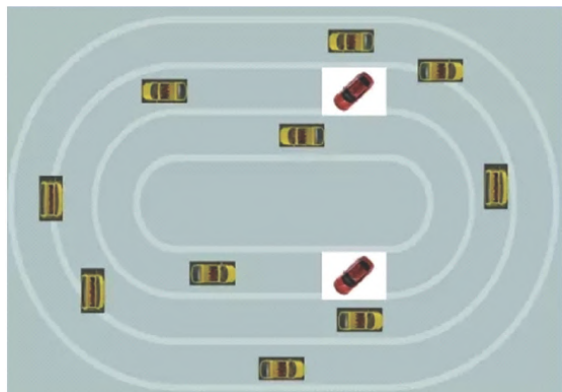


图1 自动驾驶陷阱

“自动驾驶”难以启动，甚至是一个陷阱。为什么有这种结论？图1的环形道路中有黄色和红色两种汽车，假设黄色小车是自动驾驶，两台红车是人工驾驶。黄色的自动驾驶车辆经过计算可以确定当前的窗口条件完全符合自动驾驶，但是有人驾驶的红车参与进来会带来非常大的不确定性，自动驾驶无法完全预知人的驾驶行为。所以一旦有人驾的红车出现严重干扰自动驾驶黄车的行为，黄车的预设自动驾驶条件会很快崩溃，捣乱车辆甚至可以把驾驶环境搞得一塌糊涂。即使有人说自动驾驶可行，但事实上只要参与进来两个捣乱的人，所有的合理性都会遭到破坏。所以我认为自动驾驶亦或是一个陷阱，即“自动驾驶陷阱”。

让我们思考几个问题，驾驶的作用是什么？为什么需要驾驶员？因为不管多好的车，自动化水平多高，车辆行进中驾驶员会与道路环境和周边的交通参与者不停地进行交互，通过本车的运动行为让周边车辆感知自身的存在，通过灯语、笛语、手势等方式与附近车辆、行人沟通。例如有些礼貌的司机会客气地伸出手来让其他人先通过，这就是沟通，当然按喇叭催促其他人快走也是一种沟通。交互认知的结果将会转为对自身车辆的控制，交互认知的结果会在不同个体中存在差异，这种差异是一种能够反映个人智力和运动协调能力的差异。我们需要思考如何看待驾驶员在驾驶过程中与环境及周边车辆的交互认知？驾驶员的作用在自动驾驶中由谁来替代？因此提出公式：

$$\text{自动驾驶} \neq \sum_{i=1}^N \text{自动驾驶模式 } i$$

自动驾驶是否等于若干个自动驾驶模式的叠加？设*i*为自动驾驶模式的编号，*N*为模式总数，当*N*的数量级巨大时，是否意味着亿万个自动驾驶模式的迭加就等同于自动驾驶？拿自动泊车项目举例，如果在项目初期用户提出自动泊车应该有4个模式，程序员会立即按照要求开发对应模式的功能。但项目实施过程中发现存在问题，需要临时增加4个模式，紧接着为了应付新出现的情况，

有可能马上增加到16个模式，当然这只是开始。为了能够应用于不同车型、不同时段、不同停车位，自动泊车模式做到万级也不可能穷举项目环境的多变性，在这种情况下，我们会提出第一个质疑，究竟要多少种自动驾驶模式才能够完全覆盖各种各样的驾驶场景？想象一下我们是如何泊车的，我见到很多车主泊车的环境是一半车体在路牙上面，一半在路牙下面，这种情况下泊车线根本不存在，但生活中有的人就可以这样成功泊几十年的车。第二个质疑，从一种自动驾驶模式转换到另外一种自动驾驶模式是否唯一确定？如果这两个问题的答案是否定的，上述公式存在的基础就不能成立。

3.3 三类传感器通道

智能车研发遇到的困难，是不仅仅要搞定汽车动力学各种各样的传感器问题，更重要的是研发和驾驶员一样在线的机器驾驶脑，模拟实现人在回路中自主预测和控制，应对车辆行驶中的不确定性。让车厂去模拟人在回路的自动驾驶是很困难的，把机器驾驶脑的研发放到车厂去做更是难上加难，所以我们做的工作就是给车厂减负。

我们在车上加了一个具有感知和认知功能的

设备，在已有认知的协助下将三大类传感器的信息分成类似人的视觉通道，主要有三个通道，一个是GPS+IMU通道，一个是雷达通道，另外一个图像通道，这三个通道各司其职，又只能尽力而为，形成视觉残留。这些通道是干什么的？第一做定位，第二做路权检测，第三做导航。定位就是车在什么地方，我们用GPS通道绝对定位，用雷达和图像通道相对定位；路权检测就是检测车辆周边有多大的路权用于行驶；导航就是下一步车怎么开。从技术上讲，第一类是SLAM，第二类是路权，第三类是认知箭头，我们都把它形式化。

在自动驾驶过程中我们需要关注什么？我们可以做带GPU加速的计算机图像处理，这叫先视后觉，也要做视而不见、边视边觉或者先觉后视。我们有一句话，“路边的美女不要看”，驾驶脑不需要这个“闲心”，它对不参与交通的自然风景、建筑风格、行人年龄、姿态行为、是不是美女、行人和宠物的差别、是不是时尚等都没有兴趣。所以有的东西要视而不见，有的东西要边视边觉，有的要先觉后视。我们拿驾驶脑的一张图来解释一下这种说法，这张图反映了使用已有的认知帮助当前的感知这一功能。

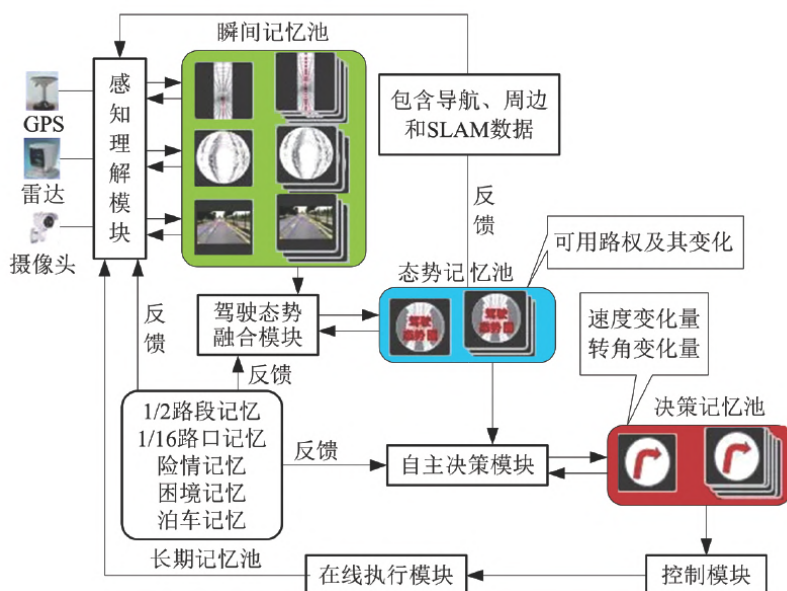


图2 驾驶脑数据流程图

大家知道人脑的记忆是完全不同于计算机的存储，人脑里至少有三个记忆区，一个叫瞬间记忆，一个叫工作记忆，还有一个叫场景记忆。我们利用瞬间记忆来感知图像、雷达给我们带来的丰富的典型信息，用驾驶态势感知之前的可用路权，用认知箭头体现我们的方向盘、油门和刹车的操作。这就是驾驶脑的形式化，这张图体现了驾驶脑的基本状态，反映了不同记忆区在过程中的反馈，以及人脑在长期记忆、短期记忆、工作记忆之间的相互关系。因此，驾驶脑里面有路口记忆、事故记忆、险情记忆等。

特斯拉并没有识别出掩映在蓝天白云下的白色大卡车，发生了事故。如果这个事故是一个事故场景的话，就可以把这个场景复制到驾驶脑中，如果所有的机器人都有这个事故记忆，就再也不会发生这样的事故，这就是机器驾驶脑的作用。真正能教机器人开车的应该是驾驶员，有经验的驾驶员长期与车互动，熟练到已经把车同化为人体的的一部分，成为与身体无缝对接的真实外延。因此，机器驾驶脑在驾驶员开车时应该能“悄悄地”自学习，将“脑和机器融合在一起”。我们将调试总线扩展为自学习总线，开创自学习板块，完成统计学习和进化学习，让轮式机器人像人一

样开车。一旦当前的认知与过去经历的记忆进行了混合比对，驾驶脑便能对不确定未来做出合适的决策，完成大脑的创造性、运动的灵巧性以及车无穷无尽的同化过程。

3.4 正学习和负学习

当前版本的驾驶脑有两个网络，第一个是驾驶态势评估网，第二个是决策网络。我们的需求网络是这样做的：人工驾驶的时候，三路机器感知通道是同时工作的，驾驶脑使用形式化的方法把各通道的感知变成当前的驾驶态势，把驾驶员对当前态势的应对，如对方向盘、油门或者刹车的动作抽象成认知箭头。这样当前的驾驶态势和对应该态势的认知箭头就组成一个图对库，这个图对就是驾驶态势-认知图对。举例来说，假设首都机场到天安门的车程为一小时，每小时行驶36km，就可以获取到数万张的态势图，结合100s控制一次方向盘，一刻钟十次方向盘的认知箭头，从一天的车辆运行数据中我们就能得到数十万张帧图对。接着我们采用神经网络学习的方法使用上述数据生成驾驶记忆棒，这个驾驶记忆棒不能像以前一样称为知识库，因为其中并不是抽象的知识。如果把驾驶态势图看作人脸图像，那么操作箭头就是一个标签。当驾驶员不在时，采用自

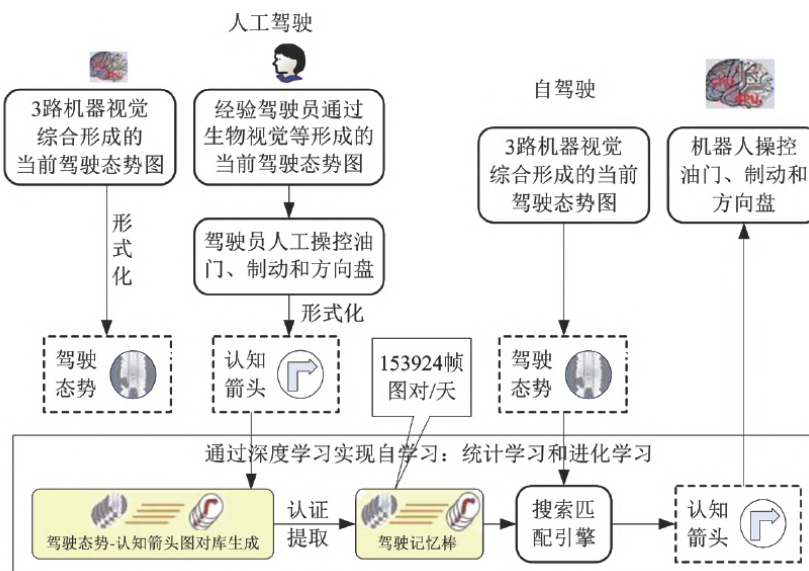


图3 正学习：机器人向经验驾驶员学习

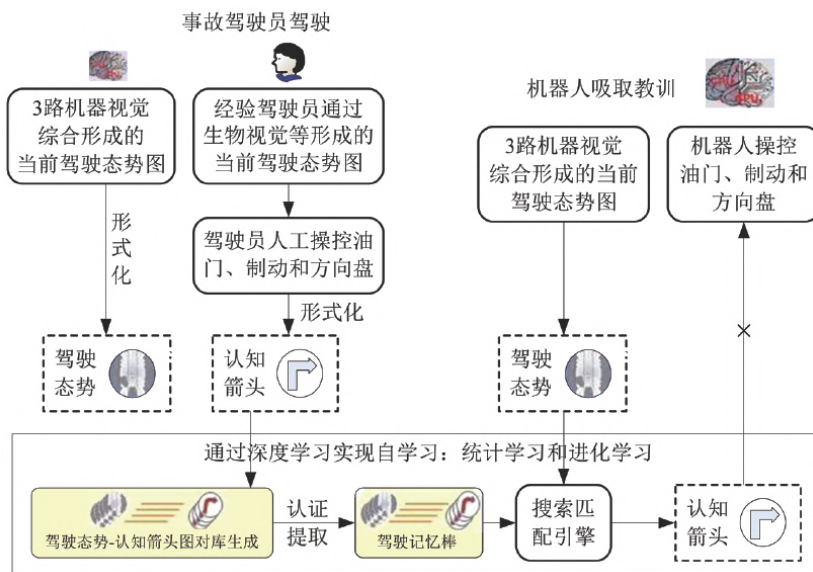


图4 负学习：机器人向事故驾驶员吸取开车教训

驾驶开车，三路传感通道仍然可以得到驾驶态势图，拿当前得到的驾驶态势图去搜索引擎里找跟当前驾驶态势图最靠近的箭头是什么样的，利用返回结果箭头来开车，这就是驾驶脑里的自动驾驶方案。

人类为了考驾照学习开车和日后经年累月积累驾驶经验是非常宝贵的过程。真正的驾驶经验积累往往是在错误中学习、在事故中学习，所以驾驶脑应该还有负学习的功能。在驾驶员操作情况下如果发生了事故，驾驶脑会通过深度学习形成一个事故记忆，当驾驶脑自动驾驶遇到类似的情形时，是万万不可以用人当时的行为进行处置，这会导致犯错误，这个叫负面学习，来避免犯错误。负学习就是驾驶脑的创意所在。

3.5 驾驶脑的创新

当下，深度学习正站在全球人工智能的风口，普遍把卷积神经网络用于点云图像识别、完成感知阶段的自学习。而我们另辟蹊径，把卷积神经网络用于形式化之后的、基于可用路权的驾驶态势图和反映驾驶操作全部内容的认知箭头形成的图对上，用于认知阶段的深度学习，大大减少、简化了实时处理的数据量。驾驶脑成功的关键是驾驶认知的形式化，以及形式化后的自学习，是

把瞬间记忆的大数据“缩水”，即“感知理解”之后，一直到认知阶段进行工作记忆区的迁移学习。

3.6 驾驶脑的定位

当然我们还可以通过网络设立云感知、云导航、云认知、云学习、云交互。回顾近十年，我们参加的比赛和里程碑实验，智能车各种感知和认知手段相互依存、彼此缠绕。在各类比赛场、测试场，智能车表现千奇百怪、反反复复，我们困惑过、迷茫过，试来试去，换车、换平台、加电源、换模块，通过多车交叉验证和常态试验，最近几年终于理出头绪，设计出全新的驾驶脑。驾驶脑将来的发展跟工厂造车并不矛盾，不是抢工厂的饭碗。

第一，我们研制的驾驶脑是拿“驾照”的。安装了驾驶脑，车子就可以跑了，相当于给车辆颁发了一个驾照，这个工作是车厂替代不了的，这就是驾驶脑的定位。

第二，我们卖“驾龄”，驾驶经验可以放到驾驶脑里面，这些驾驶脑中的“驾龄”并不是简单的驾照，装没装“驾龄”就好比刚拿了驾照的新手和拥有10年以上驾驶经验老手的差别。

第三，我们买个“路熟”，这也是很重要的。一张地图人人都是可以买到，但拥有地图并不等同

于马上就能开车实践上面的路线。用户必须自己走过这条路并对照地图才清楚这条路线是否可行。我在《环球时报》上曾写过一篇文章，倡导对人工智能要有一颗敬畏之心，因为驾驶脑能把地图默化到驾驶这件事情上来，比人类熟悉地图要快得多。实践路线只要给驾驶脑装上地图就可以，这是传统地图替代不了的。

第四，驾驶脑是个性化驾驶，或者标杆驾驶。我们现在就想做一个1路车的标杆驾驶，大家都知道北京1路车就在长安街来回跑，有的司机一辈子就开这个路线，开得很好，我们把他的驾驶经验放进去，就变成了标杆驾驶。

4 知识和数据双驱动的人工智能

我认为当前知识和数据双驱动的人工智能是尤其值得我们关注的。

以图灵模型构造的冯·诺依曼计算机的伟大之处是实现了计算智能，甚至超过了人的计算能力。但计算机实现的只是计算、存储、交互三者的分离，导致内存不同区域、以及硬盘和内存间的数据频繁访问，这是耗能大的根本原因。而人类脑认知的构成单元同时具有记忆智能、计算智能和交互智能，在架构中都没有得到体现。人类通过交互、记忆和计算获得认知，在过去的半个世纪里我们是否过多地关注了计算智能，忽视了交互智能和记忆智能？认知主体是自身进行的计算，本质是思维。从计算科学的角度讲，计算的本质是思维，从认知的科学角度看，认知的本质就是计算，计算很重要，但是记忆认知也很重要，特别是不同记忆区的不同形状和方法。

1950年图灵提出一个图灵测试，检验是不是智能。这个如果区别开来的话，本来只是一个交互智能测试，所以我们应该研究人是如何听、说、看的，如何体觉交互的，这个很重要。因此，我把智能分成记忆智能、计算智能和交互智能。而图灵是认知的主体，深度学习在图像认知中得到了广泛应用。但是记忆不等于存储，感知

不等于认知，就像英语里说的，*looking ≠ seeing*, *touching ≠ feeling*。我们构造了不同尺度连接组的、三位一体的、多个层次的认知网络。

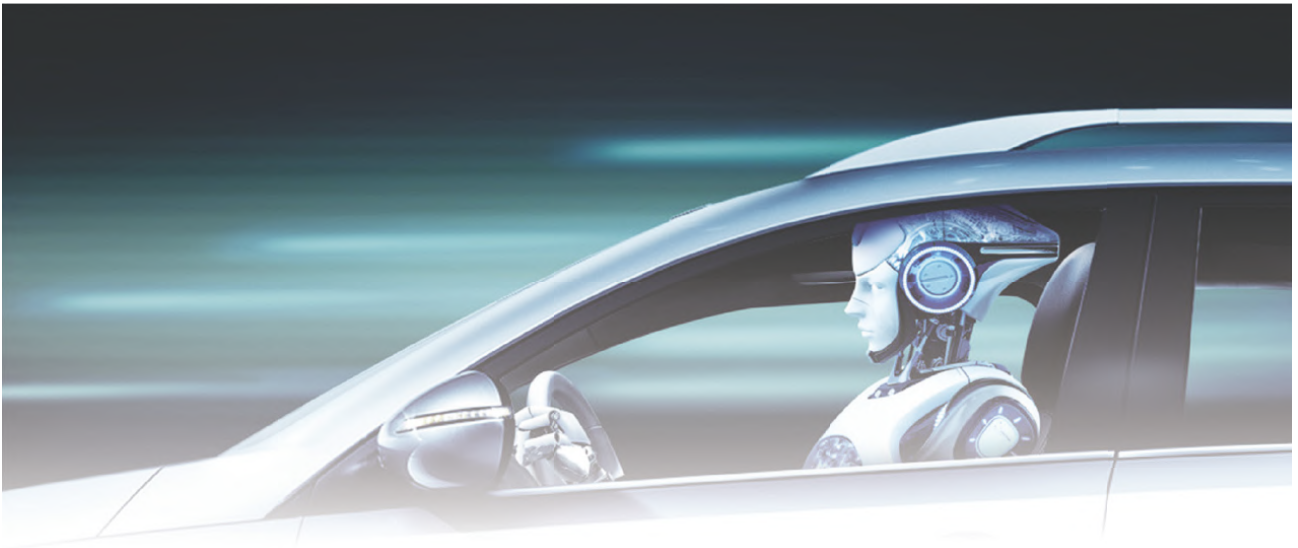
4.1 深度学习的局限性

我们可以对深度学习进行一点批判。深度学习利用了卷积神经网络，网络的性能有时候很好，有时候也很糟糕。太多的学习参数具有随意性，不能保证算法的收敛性，缺少反馈机制，大量案例也不具有累积性，此案例跟彼案例没有协和关系，不像人类的认知过程。深度学习不可能是人工智能的终结者。

深度学习和规则程序的巨大差别是学习结果不具有可解释性，也就是说它可以这样做，但不知道为什么，传统编程仍然起着搭建“脚手架”的作用。学习的过程，尤其是人工神经网络中的参数冻结过程不透明，学习的结果只知道是什么，不知道为什么。你的车子为什么开得这么好？它答不出来。如果我们从软件工程的角度来看，软件=程序+数据+文档，文档是带有语意的数据，归根到底还是程序，程序怎么来？程序的上位就是算法，算法的上位就是模型，模型的上位就是形式化约束。

4.2 知识、数据双驱动的人工智能

我们习惯于数据围着程序转，尤其是程序员，就想管理的是程序、管理的是算法、管理的是模型。今天情况发生了一些变化，我们不单单从知识驱动的形式化约束向下看模型，向下看算法，最后变成程序，我们还要习惯用数据定义的程序，卷积神经网络诸多的权重就是数据定义的，就是一个案例。由上而下的知识驱动，早先给出的形式化约束较为宽松，由此形成的“脚手架”，我们可以把它叫做模型和算法，比较宽泛。在依据算法实现的程序中，会存在有很多可选参数和可选代码段。而在由下而上的数据驱动过程中，这样的程序可以通过大数据的训练和学习被精细化调教，多次迭代，使得这些参数逐步冻结或优化，部分代码将会被修改。这样一来就形成了知识、



数据双驱动的人工智能。今天机器人通过大样本和深度学习，终于可以聪明到足以改写程序中的参变量，甚至自身的局部代码。人工智能的核心不仅仅是算法，更是学习，大数据环境下充分发挥碎片化大数据认知的机理，克服宏观认知的形式化困难，细分约束区间，通过大量微观认知的形式化，降低形式化难度，缩小在线推理范围，生成数据定义的软件，让程序围着数据转，这个是我们要关注的。

5 愿景

我们可以想象，在我们的星球上，围棋和汽车将会变成机器人，它们有智慧、有个性、有行为能力，甚至还有情感，这句话很美好但不一定正确。机器人给人类带来的影响，将远远超过计算机和互联网在过去几十年间对世界的改变。像我们这代人，计算机和互联网的改变给我们留下了非常深刻的印象，我们可以大胆预测，机器人的改变会比这个还大。

到2030年，争取我国每万名产业工人所拥有的工业机器人数量达到300台。农村城镇化导致中国农民急剧减少，无人拖拉机、农用无人机、背包机器人和收割机器人将成为新一代“农民”，黄牛退休、铁牛耕地，农民进城、专家种田；全国大中医医院的微创手术机器人近一半国产化；在全

社会普及使用形形色色的服务机器人，我国每个家庭都会有机器人，老年人、残疾人和儿童平均每人拥有一台形态各异的服务机器人，这个是可以实现的目标。

人类的发展史就是人类学会运用工具、制造工具和发明机器的历史，机器使得人类更强大，人类正在发明越来越多的机器人，智能手机可以成为你的忠实助理，轮式机器人也会比一般人开车开得更好。曾经的很多工作岗位将会被智能机器人替代，但同时又会涌现出更多的新工作，人类将更加尊严、优雅、智慧地生活！这才是我们所希望的。

人类始终善于更好地调教和帮助机器人，善于利用机器人的优势并弥补机器人的不足，或者用新的机器人淘汰旧的机器人；反过来，人类还能够利用机器人提升自身的智慧和能力，机器人一定会让人类自身更智能。各式各样人机协同的机器人，为我们迎来了人与机器人共舞的新时代，伴随优雅的舞曲，毋庸置疑，人类始终是领舞者。■

作者简介：

李德毅（1944-），男，博士，少将，中国工程院院士，主要研究方向为云计算、云模型、人工智能与无人驾驶等。

智能无人自主系统的发展趋势

张涛¹, 李清¹, 张长水¹, 梁华为², 李平³, 王田苗⁴, 李硕⁵, 朱云龙⁵, 吴澄¹

(1.清华大学自动化系, 北京 100084; 2.中国科学院合肥物质科学研究院应用技术研究, 合肥 230031;

3.浙江大学控制科学与工程学院, 杭州 310058; 4.北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100191;

5.中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016)

摘要: 智能无人自主系统是人工智能 (AI) 中最重要的应用之一, 该系统的发展可以极大地促进人工智能技术的创新。通过总结各技术平台的主要成果, 介绍了智能无人自主系统的发展趋势。此外, 我们将相关技术分为七个领域, 包括人工智能技术、无人车、无人机、服务型机器人、空间机器人、海洋机器人和无人车间/智能工厂, 本文依次介绍了各领域的现状及进展趋势。

关键词: 智能无人自主系统; 自动驾驶汽车; 人工智能; 机器人学

中图分类号: TP181 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 01-00011-12

Current Trends in the Development of Intelligent Unmanned Autonomous Systems

ZHANG Tao¹, LI Qing¹, ZHANG Changshui¹, LIANG Huawei², LI Ping³,

WANG Tianmiao⁴, LI Shuo⁵, ZHU Yunlong⁵, WU Cheng¹

(1.Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2.Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3.School of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

4.Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191, China;

5.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Intelligent unmanned autonomous systems are some of the most important applications of artificial intelligence (AI). The development of such systems can significantly promote innovation in AI technologies. This paper introduces the trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems by summarizing the main achievements in each technological platform. Furthermore, we classify the relevant technologies into seven areas, including AI technologies, unmanned vehicles, unmanned aerial vehicles, service robots, space robots, marine robots, and unmanned workshops/intelligent plants. Current trends and developments in each area are introduced.

Keywords: Intelligent Unmanned Autonomous System; Autonomous Vehicle; Artificial Intelligence; Robotics

1 引言

智能无人系统是能够通过先进的技术进行操作或管理而不需要人工干预的人工系统。自古以来，人类就创造了无数种无人系统，并且随着人类知识的增长，无人系统的技术水平也逐渐提高。近些年，人工智能(AI)的显著进步使无人自主系统达到了更高的水平。因此，有必要对智能无人自主系统的发展趋势进行深入和详细的讨论。

与传统自主系统相比，无人自主系统的研究内容更加宽泛。各种类型的智能无人自主系统相继出现，将对人类生活和社会产生显著的影响。包括无人车、无人机、服务机器人、空间机器人、海洋机器人和无人车间/智能工厂，在现在或不久的将来都可能发展成为智能无人自主系统。

智能无人自主系统是由机械、控制、计算机、通信、材料等多种技术融合而成的复杂系统，人工智能无疑是发展智能无人自主系统的关键技术之一。自主性和智能性是智能无人系统最重要的两个特征，利用人工智能的各种技术，如图像识别、人机交互、智能决策、推理和学习，是实现和不断提高系统这两个特征的最有效方法。由于这些人工智能技术的发展，我们发现人类可以创造出具有更高自主性和智能性的智能无人系统，并且该系统在某些方面可以接近人类水平。

本文通过概述几个领域的主要成就来阐述智能无人自主系统的发展趋势，第2~8章分别介绍了人工智能技术应用到智能无人自主系统，无人驾驶车辆、无人机、服务型机器人、空间机器人、海洋机器人、无人车间/智能工厂的发展趋势。由此，本文全面描述了智能无人自主系统的发展趋势。

2 智能无人自主系统中人工智能应用的发展趋势

在最近的几十年里，特别是在深度学习出现之后，人工智能和机器学习在计算机视觉、声学和其它学习难题领域中发展迅速。由于更先进

模型的提出和计算机硬件的计算能力的提高，许多令人惊叹的无人自主应用出现了。例如，由于AI和机器学习的不断进步，无人车、无人机以及医疗机器人的技术都得到了显著的发展。最引人注意的是，深度学习已经证明具有出色的能够处理复杂任务的能力。现代计算设备，比如图形处理单元(GPUs)和计算框架如Caffe、Theano和TensorFlow，有助于设计者和工程师建立具有创新性和鲁棒性的无人自主系统。

机器学习通过以下两种方式支持无人自主系统：提供类似于人类与外部世界的交互感知和控制方式，先是接收信息，然后分析和控制。从外面世界获得的信息源自感官知觉，如视觉、声觉和触觉。模型需要将获得的信息多层次抽象化，从而描述外部环境。当无人系统获得外部信息，通过与外部环境的交互，同时选择最佳应对策略，系统就可以使用强化学习机制学习控制自身行动。这些方法可以使系统具有通过收集到的数据学习特定任务的能力，并以此创建端到端系统。

视觉方面，抽象化包括目标检测、分类和使用卷积神经网络方法的语义理解。受人类视觉皮层多层次结构的启发，人们提出了多卷积池层的结构，该系统也正在进行不同的机器学习任务。对于视觉任务(如图1所示)，卷积层通过卷积本地图层和信息核计算特征映射；池化层将特征地图压缩到一个像素值，通过选择一个最大激励输出或一个局部区域的平均值，从而形成表达高层次抽象化结构的多层次金字塔结构。卷积神经网络利用局部结构和共享权值，极大地减少了完全连接网络中的过拟合问题。

在声学和语言序列数据方面，递归结构模型带来显著的性能改善。如图2所示，他们在循环神经网络中引进了递归回路结构，其中 $F(X, H)$ 定义从序列化数据输入 X 到输出隐藏状态序列 H 的映射。简单递归神经网络(RNN)结构具有长期依赖的问题，而有时我们只需要一些当前的记忆。长短时记忆(LSTM)模型通过引入不同的控制信息流的“门”结构，解决了上述问题，在语言模型

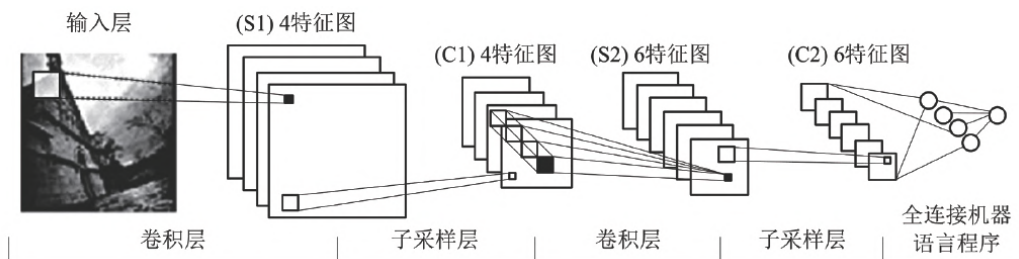
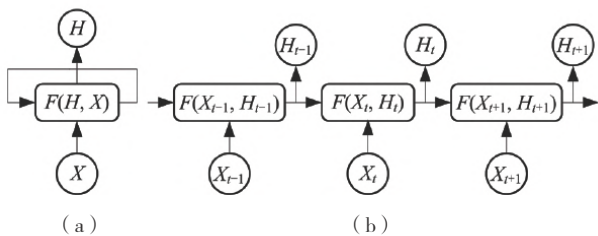


图1 卷积神经网络结构和原理

图2 循环神经网络的简单 (a) 和展开 (b) 形式简图
在LSTM和观察模型中, $F(X, H)$ 定义为内部的映射

和语音识别等方面, 这种方法很成功。同时, 通过卷积神经网络 (CNN) 和递归模型的使用, 图像字幕方面产生新的突破, 已经成功将图像转化为语言域。受图像识别科学研究的启发, 循环观察模型在未来有助于解决涉及机器翻译和图像字幕的任务。

与上述模型不同, 深度强化学习尝试学习如何与环境交互, 它包含环境集 Σ , 动作集 A , 状态 S , 和值函数 V , 定义了一个动作的效用的目标函数 $Q(S, A)$ 的某种状态, 优化该函数在某一状态下取得最大值, 得到其在后续大数据反馈下也能做出连续决定的映射 $\pi(S, A)$ 。该学习方法通常是通过动态优化, 蒙特卡洛方法和时间差分方法进行优化。第一个深度强化学习模型是深Q网络 (DQN), 该模型利用一个称为Q-网络的神经网络将学习问题转化为Q-学习问题。DQN学习中函数 $Q(S, A)$ 的参数选取的目标是使效用能够达到最大期望值的估计最优策略值, 但该方法可能会偏向于一些随机的环境, 从而导致过优化。双Q-网络同时结合Q-学习和深度学习模型能够降低过优化, 因此在大范围函数下也可以用该方法近似。在处理连续深控制模型估计问题中, 深度强化学

习模型中的深度确定性策略梯度 (DDPG) 优化方法提高了鲁棒性梯度, 实验结果也验证了该算法的收敛速度和鲁棒性。随着更多有关强化学习应用到神经网络的研究开展, 深度强化应用到了不同的领域, 如处理高维视觉信息和主动感知问题, 并引入博弈论的深度强化学习模型, 工程框架 Open AI。

随着无人自主系统研究领域的发展, 许多引人注目的应用出现了。商用和安保使用的创新型无人驾驶地面车/空中飞行器不仅使研究机构感到震惊, 甚至走进人们的生活。例如, 在加利福尼亚, 谷歌已经发布了销售无人驾驶汽车的消息, 特斯拉和其他制造商的产品也正在进行测试。此外, 在搜索、救援和战场环境中也经常使用各种无人驾驶飞机 (UAVs)。人工智能算法应用也大范围地应用到这些系统上, 实现了包括视觉、无线电/雷达信号识别和轨迹规划的使用目的。这些发明不仅创造经济效益也挽救了生命。此外, 深度强化学习的进步也引领游戏进入了一个新时代, 以至于人类将注意力集中到机器人竞争对手上: 在被认为是人类历史上最复杂的围棋游戏中, AlphaGo以比分4:1战胜著名韩国棋手李世石。

3 无人驾驶汽车发展趋势

在过去的十年中, 无人驾驶车 (UVs) 在学术界和商界已经得到了显著的关注。UVs是包含诸如认知科学、AI、机器人与车辆工程等多学科、多领域的一个典型的复杂系统。同时无人汽车也被广泛认为是一种验证视觉、听觉、认知以及人工

智能技术的通用实验平台。无人驾驶汽车的发展不仅可以提高驾驶的安全性和当前交通运输系统的效率，也在其他应用发挥了重要作用，如军事无人作战平台、极地探险和核泄漏检测，以及其他极端环境下的作业。

在20世纪50年代早期，美国巴雷特电子公司开发出世界上第一个自动导引车系统。从2004到2007年，为促进了UV技术的快速发展，美国国防预先研究计划局(DARPA)组织了三次无人驾驶汽车挑战赛。

在中国，中国国防科技大学研制的带有自动驾驶仪的红旗7460自动驾驶汽车，速度已达到130km/h，在高速公路上最高速度可达170km/h，这辆车在道路上显示了它的通过能力。清华大学、西安交大、中国科学院合肥自然科学研究所等研究机构也开发了自己的无人驾驶汽车。从2008到2015年，为应对道路交通的需要，中国国家自然科学基金会举办了七次中国智能车未来挑战赛。2014年，为应对越野环境，中国人民解放军总装备部(PLA)举办了无人地面车辆挑战赛。这些挑战赛的成功举办，对促进中国无人驾驶汽车的发展起到了重要的作用。

由于无人驾驶汽车的发展，许多衍生技术也已被应用于实际情况中。例如，美国海军陆战队的战术无人车(USMC)可以执行诸如侦察、核生物化学(NBC)检测、打破壁垒、在任何天气或复杂地形下执行直接反狙击射击等任务。卡内基梅隆大学研制出一种新的可以在复杂环境下驱动的名为破碎机的无人车。自伊拉克和阿富汗战争开始以来，大约有8000种不同类型的无人地面车辆参与到“持久自由”和“伊拉克自由行动”的任务中。到2010年9月，这些无人地面车辆已经完成了125000项任务，包括可疑目标识别、道路清扫、定位和拆除简易爆炸装置(IED)。美国陆军、海军和海军陆战队的爆破队已经使用无人地面车辆检测和摧毁超过11000个简易爆炸装置。

因为许多汽车制造商和IT公司从2010年开始把注意力转移到该领域，无人车的发展进入了一

个新的阶段。梅赛德斯-奔驰、宝马、大众、福特和新成立的公司相继推出无人车研发计划。谷歌的代表性无人车已经可以在美国加利福尼亚、内华达州、佛罗里达州、密歇根的道路上合法行驶。2014年12月22日，谷歌正式宣布首辆具有完全功能无人原型车已经完成，并计划于2015年正式开始道路试验。从那时起，他们的车辆测试行驶距离已经超过了140万英里。特斯拉无人车无线固件已经升级到版本7.1.1，并且积累了7亿8000万英里路程的测试数据。此外，该公司每10h还可以收集到100万英里的行驶数据。以色列智能驾驶技术的设备制造商Mobileeye，在2013年初宣布该公司的设备在2016年可用于道路上行驶的自动驾驶汽车，该公司最成功的应用产品C2-270智能交通预警系统，即将推出其升级产品。苹果公司也启动了一个名为泰坦的内部开发项目。

中国企业也被无人车产业的繁荣所吸引。中国搜索引擎巨头百度发布了第一个与无人车有关的项目；广州汽车集团与中科院合肥物理科学研究所合作开发出使用可再生能源的无人车；其他国产汽车制造商如比亚迪、宇通、上汽等也在积极探索无人车技术的发展并实现其产业化。

尽管在无人车方面已取得部分进展，但该领域仍存在一些需要解决的问题，包括实时环境中的态势感知、智能决策、高速运动控制、精准行车图，无人系统的评价指标和评价方法，以及系统的可靠性。

4 无人机的的发展趋势

4.1 无人机综述

无人飞行器(UAV)俗称无人机，是一种无人驾驶飞机系统，是一种典型的自主式无人驾驶系统。无人机通常可用于收集数据和执行监测、监督、调查和检查任务。根据应用领域的不同，无人机可分为民用和军用两大类，军用无人机是一种主要用于监视、侦察、电子对抗、在战斗中执行攻击

和毁伤评估等任务的武器。和具有军事用途的无人机相比，民用无人机用途更广泛，包括环境监测、资源勘探、农业调查、交通管制、天气预报、航空摄影、灾难搜救、传输线和铁路线的检查。

4.2 军用无人机现状

第一次世界大战期间，美国军方首次引入无人机，军事需求催生了各种无人机。无人机也因此多次参与到战争中，如二战、越南战争、中东冲突和科索沃战争，在战争中扮演了重要的角色，这些战争也促进了无人机技术的快速发展。到目前为止，最先进、最著名的军用无人机包括X47-B、捕食者、全球鹰和火力侦察兵，这些无人机已经能完成起飞着陆和沿着航迹自主飞行，其中一些可以部分适应飞行故障或飞行条件变化。然而，根据美国国防部于2005年公布的《无人驾驶飞机系统路线图2005—2030》，目前军用无人机自主级别低于三级，没有自主能力完成路线规划、决策、协调和相互间合作。与西方国家相比，中国无人机技术起步较晚，但目前正处于快速增长阶段，近年来也取得了相当大的成就。

4.3 民用无人机现状

除了自主方面之外，在其他技术上军用无人机比民用无人机更先进。但随着无人机政策的完善，民用无人机技术和其工业应用正在迅速增长。目前，民用无人机的应用主要集中在农业植物保护、航空摄影、电力巡线。在未来几年，一些投资组织预测民用无人机的销售将保持每年50%以上的增长率。

民用无人机通常分为固定翼和旋转翼。由于高空作业需要在低高度和低速下飞行，旋翼无人机在民用无人机领域更受欢迎。随着通信、传感器、嵌入式系统等技术的发展，民用无人机的自主性得到了极大提高。先进的民用无人机不仅可以自主起飞、着陆和飞行，还可以实时监测和躲避障碍物。此外，它们中的一些可以编队飞行并相互独立地进行协作。因此，当谈到自主能力时，在某些方面民用无人机优于军用无人机。

4.4 无人机发展趋势

随着各种技术的进步，无人机的未来发展呈现出多样化的发展趋势。然而，作为一种先进的自主无人驾驶系统，无论是军用还是民用，都注定要向低人工干预、高自主性、高智能化的方向发展。2030年前无人机的发展预测趋势如图3所示。

发展趋势的三个主要特点如下：

(1) 控制系统

无人机控制系统的自主控制水平可划分为若干等级。例如，2005年美国国防部将军用无人机自主控制系统分为10个层次。一般来说，我们可以把这些层次分成三个等级：远程控制、自动控制和自主控制。目前，大多数无人机已达到自动控制水平。换句话说，高度、速度、位置和飞行路径都可以自动控制。然而，所有这些控制行为均是预先编程的，并不能够代表无人机的自主性。随着传感器技术的发展、嵌入式计算能力的提高，无人机的自主控制能力将明显改善。当飞行中的冲突风险增加或飞行中任务条件发生变化时，无人机将自动控制飞行状态，而不是机械地跟随飞行航迹。当异常情况消失时，它又会重新回到原来的飞行路线。具有自主控制水平的未来无人机将主要以某些飞行不确定性为特征，此外，安全性和灵活性将明显提高。

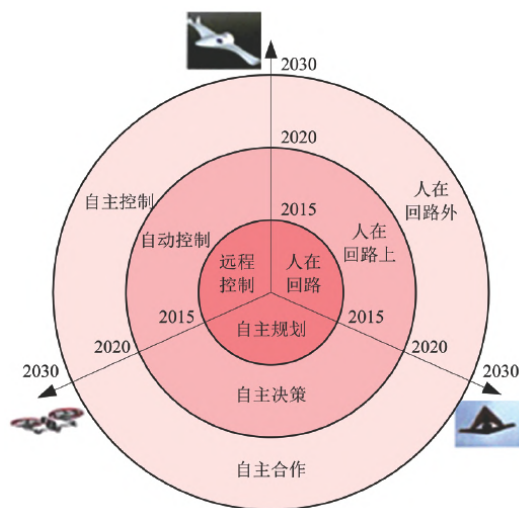


图3 无人机发展趋势预测

(2) 人机关系

改变人机关系是未来无人机发展的另一种趋势。早期的无人机都是采用人在回路模式，这意味着无人机的操作过程无法在没有人干预的情况下进行。目前，与无人机的人机交互正在逐步转向人在回路外模式。在这种模式下，无人机在根据预设程序执行任务时，人只发挥监控监察无人机状态是否正常的作用。随着硬件和软件可靠性的增强，在未来无人机系统中，人工干预将进一步降低。人们只需要作为指挥官把任务分配给无人机，而不是实时监视和控制他们，我们称这种操作为人在回路外模式，当无人机处于该级别时应该具有较高的安全性和可靠性。

(3) 智能化

AI是未来无人机系统提高自主性能的关键技术。无人机的智能化主要体现在自主飞行的路径规划能力、执行任务的自主决策能力和与空中舰队的自主协作能力。在这些能力中，自主路径规划是无人机智能化趋势的第一位。目前，无人机大多数的路径或跟踪是由人预设的，效率和灵活性较低。未来的无人机应该能够根据各自的任务和相应的约束条件自主地规划飞行路径，当约束条件发生变化时，无人机将自主调整飞行路径。无人机的第二个智能趋势是对任务的理解和分解能力。当面对复杂的任务时，他们不需要人们分配任务或做出决定，而是自主完成任务。先进的智能无人机将涉及群体智能，一个无人机集群中可以由许多相同的和不同的无人机组成，他们应该有能力进行自主合作、消除冲突，从而最大限度地提高团队表现。因此，未来智能化无人机的一个特点就是能够通过自主合作有效完成复杂任务。

随着科技、技术和政策的进步，未来的无人机系统将成为真正先进的自主无人系统。特别是，经预测，在由美国国防部发表《无人飞机系统路线图2005—2030》的10等级系统中，无人机将达到7或8等级的自主水平，并于2020年广泛应用于民用领域。到2030年底，无人机的自主水平将进一步提高到9或10等级，在航空航天等行业内的

应用覆盖率将达到50%。

5 服务型机器人发展趋势

机器人技术涉及机械、信息、材料、智能控制、生物医学等。该技术本身不仅具有高附加值、广范的应用范围，而且已经成为重要的技术平台。它也在增强国防实力，提高应急准备能力，促进经济全面发展，提高人民生活水平等方面具有重要意义。

近年来，现代服务型机器人产品在国内外市场上不断涌现。在社会交际服务中，研究的重点是在帮助老年人和残疾人，以及家政、医疗、教育、娱乐、国防、航空和运输等方面的应用上。服务型机器人发展方向主要有以下三个领域：智能材料和软体机器人、用于感知和控制技术的人工智能技术和芯片，人机交互和安全技术。

5.1 智能材料与软体机器人

从仿生学和智能材料的角度来看，服务型机器人模仿生物系统的结构、材料和其他支撑物，提供了实现机器人功能的必要技术支持。目前，主要的智能材料有形状记忆合金(SMA)、锂离子聚合物(IPMCS)、硅胶。智能材料的应用使软体机器人更安全稳定，同时耐油、耐腐蚀、抗电磁干扰。以色列Given Imaging公司，开发了一种取代传统痛苦的胃镜检查的胶囊机器人；德国机器人公司FESTO开发的一种有许多能实现肌肉功能的动态气管连接的躯干机器人，能进行各种精确的动作；在美国伯克利的加利福尼亚大学，Takei用硅制造了一种可以感受到0~15kPa压力的电子皮肤；在美国哈佛大学，George Whitesides领导的研究小组在软体机器人研究方面取得了突破，他们在机器人软体中使用了不同的结构，因此软体机器人不仅能够抓手，并且具有仿生行走机能。

5.2 用于感知和控制技术的人工智能技术与芯片

传感技术是机器从外部获取信息的主要手段，它包括机器视觉、听觉、触觉、味觉、用于大脑

认知的肌电图(EMG),模式识别和自然语言处理。AI提高了机器人模拟人类活动和学习人类知识的能力。2016年,谷歌推出了可以接收语音命令来控制家用电器的Google Home,用于iOS系统的AI助手软件Siri具备问答系统和聊天系统。在美国,iRobot机器人公司和麻省理工学院联合开发的全自动智能吸尘器Roomba机器人,配备了利用同步视觉定位和建图技术的导航信标,能够自主实现室内清洗。在2013年的Macworld大会上,苹果推出了具有开发功能的智能玩具Anki Overdrive,这种玩具车使用人工智能算法操纵机器人自动移动实现自动驾驶,并能在特殊轨道上进行竞赛。美国MQ-9死神无人机配备了电子光学设备、红外系统、微光电视和合成孔径雷达。在中国深圳,DJI-Innovations公司研制的幻影4具备传感、自动避障,及专业的空中能力。谷歌的无人车使用摄像机、雷达传感器和激光测距仪进行导航。2016年,在中国安徽省芜湖市,百度建立了全国第一个无人车作业区。2016年,中国第一个嵌入式神经处理单元芯片(NPU)诞生,它已被应用到世界上第一个嵌入式视频处理芯片中。

5.3 人机交互与安全技术

随着服务型机器人与人类生活、人机间的交互关系日益密切,安全技术得到了越来越广泛的关注。由DARPA资助的Deka Arm,是第一个获得美国FDA认证的辅助机械臂。它有一个神经接口,能够将大脑皮层的神经活动转换成操纵辅助装置的控制信号。由北京航空航天大学机器人研究所研究与开发的床椅一体化机器人,能够对老人进行保健管理,从而大大减轻护理人员的负担。美国Intuitive公司创造了能够进行微创手术的Da Vinci Xi手术系统。2016年,波士顿Dynamics公司发布了一个家庭服务型机器人SpotMini,它在许多传感器的帮助下,可以自由行走,并使用机械臂放置洗碗机。

6 空间机器人发展趋势

空间机器人是自主在轨服务的主要实现方式

之一。在过去的20年里,航天强国在自主在轨服务方面进行了大量卓有成效的研究。包括在轨测试和应用在内的一系列地面测试表明,自主在轨服务是一种可行的技术,并且在研究和开发中引起了人们的广泛关注。

一般情况下,自主在轨服务的模式主要是通过空间机器人来实现的。根据执行任务的空间机器人的数量,自主在轨服务可以分为两类,分别是:使用单一全功能空间机器人的在轨服务和使用功能相对简单的多空间机器人的在轨服务。

6.1 空间机器人研究现状

(1) 美国

美国早期就对空间在轨服务进行了研究,并在国际上居于领先地位。美国实施了12个项目,其中6个项目进行在轨示范。目前,有三个项目:FREND、机器人燃料加注任务和Phoenix。FREND和Phoenix项目的主要任务是使GEO卫星能够进行自主在轨服务,而机器人燃料加注任务适用于国际空间站并具有实际功能。美国空间机器人的发展经历了从视觉测量、循环监控、交会对接到自动捕获的完整技术进步过程。这些机器人的任务是对高轨道和非合作目标进行在轨服务。通过对自主在轨服务项目的研究,美国在空间操作、以合作对象为目标的视觉测量、绕飞、对接方面取得了良好进展。

(2) 德国

德国非常重视对空间机器人和自动化的研究。到目前为止,已有6个关于空间机器人的项目,其中3个进行了在轨演示。目前,两个有代表性的项目正在进行中,分别是DOES项目和OLEV项目。OLEV项目旨在为GEO轨道卫星提供服务,而DOES项目主要针对低轨道非合作对象的技术验证。德国在轨服务的发展,从舱内机器人(地面验证远程操作)、舱外机器人联合技术验证,到开展研究自动驾驶空间机器人。此外,他们还在远程操作技术方面有着广泛的研究和应用。

(3) 日本

日本的在轨服务技术相对成熟，并且在国际上具有很高的地位。日本已经启动了三个与空间机器人有关的项目，所有这些项目都通过在轨的演示验证，特别是ETS-VII项目，进行了第一次自主抓取的实验。从机械臂到自由驾驶的飞行机器人，日本的在轨服务技术发展已经取得了巨大的飞跃。通过其在轨项目的展示，日本已经掌握了空间机械臂、交会对接和空间远程操作的技术，从而为空间技术的发展做出了重要的贡献。

(4) 加拿大

加拿大开展的空间机器人项目主要服务于航天飞机的遥控系统(SRMS)以及空间站的移动服务系统(MSS)。SRMS系统的主要功能是接收和发射卫星，充当辅助设备。MSS系统由移动基地、空间站远程遥控系统、专用机械臂组成，其主要功能是协助货物舱的对接和运输。加拿大的在轨发展中心研究的大型空间机械臂技术已从基本的机械臂技术、精细的操作臂，发展到灵巧的机械臂技术，在设计、制造和应用方面积累了丰富的经验。

6.2 空间机器人发展趋势

空间机器人是典型的智能无人自主系统。他们未来发展的趋势可以描述如下。

(1) 需求

未来，在空间站维护、卫星在轨服务、大型航天器在轨组装等领域对空间机器人有强大的需求。空间机器人的操作将更多地关注小规模、整体和精确的操作。

(2) 机械结构

回顾历史，空间机器人的发展遵循从单臂机器人到双臂机器人，再到多臂机器人的发展路线。因此，未来的空间机器人将变得多臂并且会越来越复杂。考虑到任务和环境的多样性，可重构和兼容的机器人将应用于每个工作空间。

(3) 末端执行器的操作

广义多指机器人手和可更换工具集是末端执行器设计的两大趋势。机器人对于各种传感方式

的需求将会非常强，这将决定机器人的操控能力和智能能力。

(4) 动力学和控制

随着机器人系统越来越复杂，多臂、多机器人系统的协同控制将受到人们越来越多的关注。为确保宇航员和机器人在人机协作过程中的安全，安全问题将成为空间机器人设计的一个重要考虑方面。随着传感和信息处理能力的提高，人们将更加重视人机交互，机器人将逐渐演变为半自主控制，最终完全自主控制。

(5) 人机交互

为了充分利用机器人的智能，应更多地探索人在回路控制的优势。机器人控制系统应该与各种人机交互方式和多模态相互作用兼容。自然而灵活是新一代人机交互方法的特点。这将促进以人为本、灵活的人机交互方法，如语音、可穿戴设备和EMG。

(6) 建模及实验

由于成本较低，空间机器人的实验将在地面上进行，其重力条件为1g。考虑到空间和地面机器人的等价性，工业机器人将用于验证关键的机器人技术。

在太空探索中，未来的研究重点将更多地放在多机器人协调控制上，包括在轨操作的自主决策、深度学习、具有时间延迟的空间机器人和远程控制技术，以及自主识别和重构的新一代模块化和可代替的智能航空航天系统技术。上述技术将为在月球表面建设自主运行的无人科研站提供宝贵的支持。

7 海洋机器人发展趋势

应用需求和相关技术进步将决定和影响下一代海洋机器人的发展趋势。

7.1 海洋机器人平台发展趋势

海洋机器人在海洋勘探和开采任务中的应用正在蓬勃发展。然而，恶劣的海洋环境给海洋机

机器人发展带来了巨大的挑战，海洋机器人平台需要足够可靠的环境，才能安全地执行任务。随着通用机器人技术的进步，与海洋机器人相关的技术日益成熟，机器人的可靠性也在不断提高。以下为海洋机器人的四种发展趋势。

7.1.1 持久耐用的海洋机器人

海洋机器人的典型应用是观测海洋，收集各种科学数据。这通常要求机器人能够在巨大的空间尺度和较长的时间尺度上测量海洋。近年来，几种长航时海洋机器人平台得到了迅速的发展，无螺旋桨驱动模式的设计是一个热门话题。最近研发出的水下滑翔机使用发动机来调整浮力和机翼产生升力，使它们在海洋中滑行。波浪式滑翔机也在快速发展，与水下滑翔机不同的是，波浪滑翔机使用表面波来驱动他们的运动，使他们比无水滑翔机更具耐力。近年来，移动海洋传感器网络与多种水下滑翔机的结合得到了人们的广泛关注，并在世界各地的一些海洋观测任务中得到了应用。除了降低船上能源消耗之外，一些新型能量采集技术正在开发中，如热机，以进一步提高海洋机器人的耐用性。将来，随着能源技术的进步，并且基于在一定程度上对太阳能、洋流、海浪和生物等环境能源的使用，海洋机器人将拥有更长的运行耐力。

7.1.2 混合海洋机器人

海洋环境非常复杂，而且海洋机器人任务各不相同。没有一种类型的海洋机器人可以完成所有任务。每种类型的海洋机器人平台都有其特定的应用领域和局限性。因此，结合不同类型机器人特点和能力的混合型海洋机器人已成为一种新的发展趋势。Nereus是一款混合型海洋机器人，用于探索马里亚纳海沟，它由美国马萨诸塞州伍兹霍尔海洋研究所开发。它是一种混合动力遥控车(ROV)，通过结合ROV和自主水下航行器(AUV)的优点，改变其操作模式。基于AUV模式，Nereus可以对机械手和光纤进行光干涉。在中国，中国科学院沈阳自动化研究所也开发了一种用于极地探险的混合海洋机器人。根据任务计划，北

极ARV(自主和远程操作的水下航行器)可以在海冰下移动。当发现感兴趣的东西时，北极ARV可以切换到ROV模式，通过光纤远程操作。因此，在一次潜水中，北极ARV可以以混合的方式执行任务。最近，除了混合AUV和ROV的海洋机器人，其他类型的海洋机器人，结合USV和AUV、UAV和AUV、滑翔机和AUV的机器人已经被开发。在不久的将来，将会有更多类型的混合海洋机器人出现以满足海洋调查的需求。

7.1.3 精密介入海洋机器人

许多诸如水下干预或建造的任务，要求海洋机器人在复杂的水下环境中执行复杂和精密的任务。这就要求海洋机器人平台能够抵抗各种类型的干扰，并具有良好的可操作性。一些先进的技术，如其他领域机器人系统已经使用的灵巧手指(具有力量和触觉感应)将被整合到海洋机器人中，使其成为“技术工人”。

7.1.4 仿生海洋机器人

模仿海洋动物行为或机制的仿生海洋机器人的发展一直是海洋机器人发展的趋势。现在已经开发出各种仿生海洋机器人平台，如机器鱼、蟹、蛇和海龟。然而，由于它们的能力不足以满足实际应用的要求，所以大多数还没有被应用到实际中。未来，随着新材料、新能源和新传感器领域的技术进步，仿生海洋机器人将被应用于更多实际应用中。

7.2 海洋机器人智能发展趋势

一般来说，机器人的自主性能依赖于认知、控制和群体智能，这一点同样适用于海洋机器人。在图4中，根据海洋机器人的发展和人工智能的历史，这三个评价指标被进一步划分为几个层次。

最近几十年，致力于海洋机器人研究的科学家和工程师们集中研究了机器人的自主控制能力，并在“自主控制”轴上取得了巨大的进展(图4)。

虽然载人潜艇是由Bourne在1578年提出的，并于1620年由van Drebbel投入使用，但很快人们就认识到无人驾驶的海洋机器人将更适合很多水

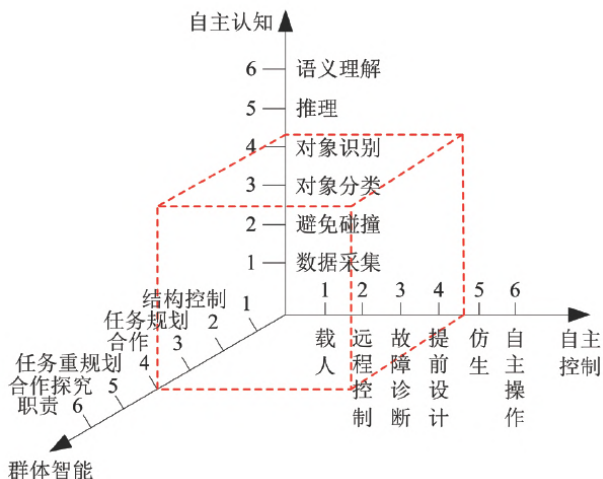


图4 海洋机器人评价指标 (SLAM: 同步定位与映射)

下任务。第一个ROV项目是1958年由美国海军发起的，目标是建立一个水下打捞装置，并且可以通过系绳电缆进行控制。第一艘AUV SPURV是1957年由美国华盛顿大学应用物理实验室开发的，SPURV是为了研究潜艇的扩散和声学传播而研制的。尽管AUV与ROV几乎是在同一时间被提出，但在其自主程度上的发展很大程度上被人工智能、控制技术和传感限制所阻碍。其结果是，ROVs和AUVs总是在海上共存，但它们在不同的情况下工作。例如，ROV适用于局部和精确的现场操作，例如水下工程。而AUV通常更适合于大范围的调查任务，例如远程搜索和探测。在自主认知和控制领域发生重大突破之前，AUVs和ROVs的相对独立性仍将持续很长时间。

海洋机器人的自主环境认知能力可以根据以下六个层次进行排序：基本数据采集和机械避碰、对象分类、识别、同步定位和映射 (SLAM)、推理和语义理解。几乎所有的海洋机器人，无论是ROVs还是AUVs，都配备了几种传感器来收集环境数据，如前向声纳、侧扫声纳和高度计。然而，并非所有机器人都能从数据中提取有价值的信息。据报道，美国海军采用的REMUS和Bluefin能够避免可能的碰撞并识别特定对象。然而，即使是普通的水雷探测任务，仍然有许多问题需要解决。在未来，海洋机器人应该能够根据其他已知的环境信息和先前的知识来推断未知物体的存在。

群体智能取决于通信网络。在地面或空中条件下，无线网络会产生优化的问题，比如信息的形成和合作。然而，由于声通信中的信号快速衰减，它在海洋机器人中的情况是不同的。图4中“群体智能”轴上列出的排名标准在其他领域的机器人中很常见。例如，适用于地面车辆和无人驾驶飞行器的地面控制、任务规划、合作、任务再规划和合作探索等问题。“责任”是指海洋机器人理解任务，自主地分配给每个成员，并自行解决问题。如上所述，海洋机器人遇到的关键问题是声信号的退化和延迟。即使是在这样薄弱的沟通条件下形成的控制与合作，仍处于学术研究阶段。

人们希望海洋机器人能像鱼一样敏捷，而且它的智力可以与人类媲美。我们相信，在不久的将来，海洋机器人将在控制、认知和群体智能方面取得实际进展。

8 无人车间/智能工厂发展趋势

在过去的30年里，中国的工业化发展取得了举世瞩目的成就，并极大地促进了全球经济增长。由于工业化发展伴随着信息化发展(图5)，传统的发展模式，即首先实现工业化发展，再实现信息化发展，已经不适合中国，中国遵循传统的发展模式既不可行也不必要。在中国，两个历史进程(信息化和工业化)正在共同发展。

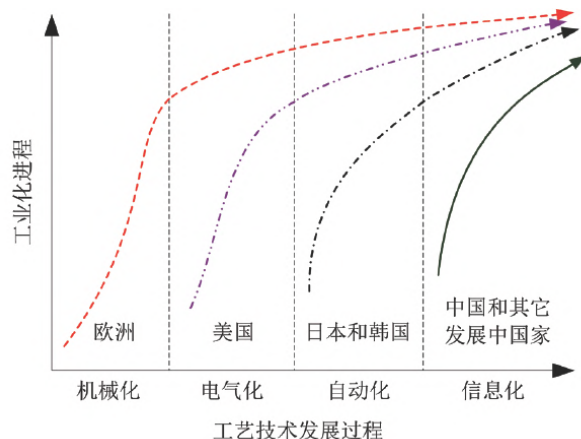


图5 世界各地的工业化和技术发展过程

随着世界贸易和全球化的发展以及信息通信技术和工业技术的发展，制造业和技术发展正面临着一个转折点。许多发达国家和发展中国家已经公布了支持其经济转型的国家战略，包括：工业信息一体化 (iI&I) 和中国制造 2025；德国工业 4.0；美国的再工业化和工业互联网。

面对当前复杂的国际国内经济形势，工业信息一体化是中国智能制造企业生存和长期可持续发展的关键战略。在中国企业中，工业信息一体化有其自身的特点。由于我国的工业化和信息化应用现状和不足，我们应更多地开展深入探索和实践。为了支持转型，标准化是中国的制造业和科技发展的重要组成部分，其中包括以下几个部分：将 ISO/IEC 标准引入中国；制定技术标准；为企业制定标准框架；制定管理架构和相关管理标准。

为了确定智能制造业的发展趋势，我们对相关标准进行分类和定位，并描述了标准之间的关系，我们在参考模型中引入了三份报告。

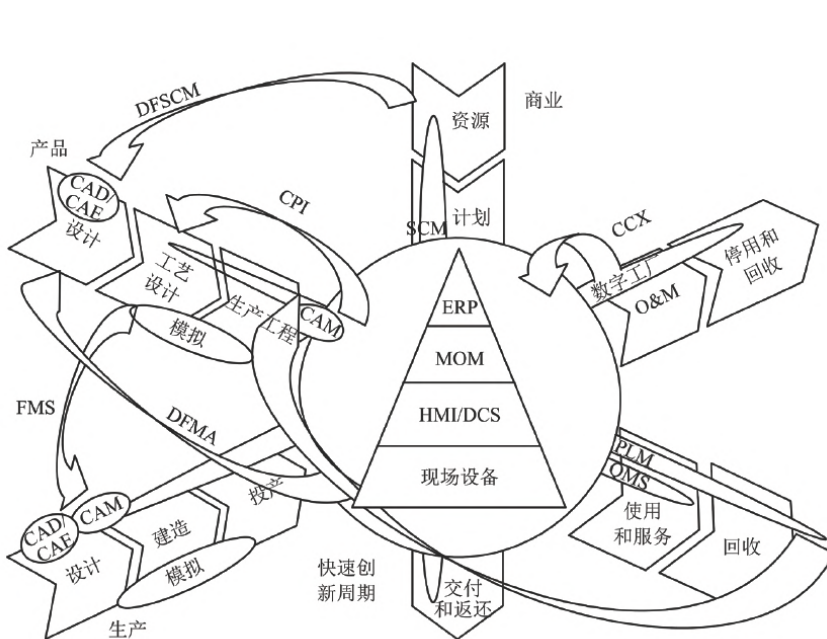
如图 6 (a) 所示，基于 ARC Advisory Group 的

协作制造管理模型和 ISA95 的企业控制系统模型，NIST 描述了一个智能制造生态系统。工业 4.0 的参考架构模型如图 6 (b) 所示。为实现中国制造 2025 国家战略，中国工业和信息化部 (MIIT) 联合中国国家标准化管理委员会 (SAC) 发表了题为《国家智能制造标准体系建设指南》的报告。在报告中，基于中国智能制造标准化参考模型，如图 6 (c)，为实现中国制造 2025 国家战略，无人车间/智能工厂将成为最重要的载体。在每个工厂，预测所有的流程都将由计算机控制的机器人、计算机数控加工设备、无人运输车 and 自动化仓库设备来操作。

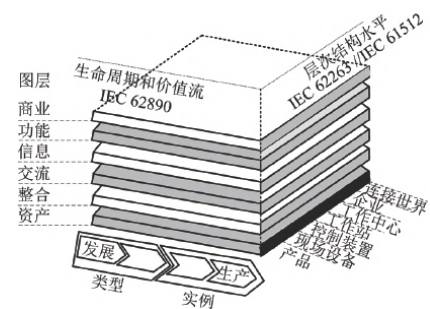
虽然这三份报告有一些共同的想法和相似的概念和元素，但有必要为智能制造标准化建立一个通用的参考模型：

(1) 需要一个广义的参考模型，将这些参考模型连接在一起，以实现它们之间的相互操作。

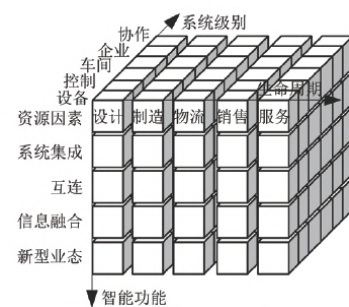
(2) 在这些参考模型中，标准位于每个维度。开发和这些标准涵盖了两个或三个维度，这一点还没有详细讨论，特别是在 NIST 的报告中。



(a) NIST 的智能制造生态系统 (Lu et al, 2016)



(b) 工业 4.0 参考架构模型 (DIN, 2016)



(c) 中国智能制造标准化参考模型 (工信部 and 国资委, 2015)

图 6 智能制造参考架构

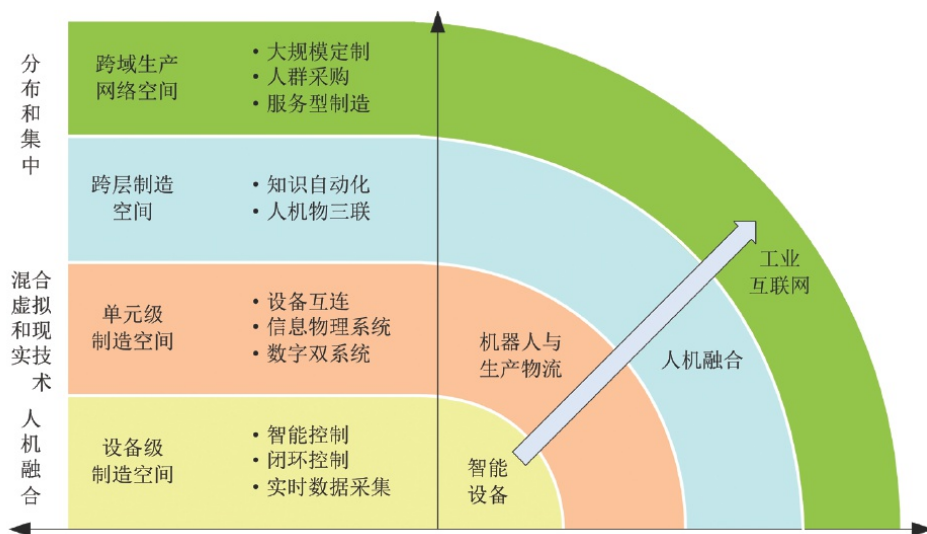


图7 无人车间/智能工厂层次结构图

服务机器人、空间机器人、海洋机器人和无人车间/智能工厂七个方面阐述了智能无人自主系统发展的趋势。我们希望这些趋势和预测会在不久的将来实现。通过智能无人自主系统，人类的生活将得到改善，世界将会变得更好。☑

(3) 人们对于标准制定和实施有不同的观点，所以将它们结合起来是一个很大的挑战。

(4) 对于一家制造公司来说，有必要接受并应用一个整体的标准框架来支持其智能制造项目。因此，需要一个系统来描述标准集群。

未来工厂的最大改变也将来自信息技术。无人车间/智能工厂将利用物联网技术和监控技术，提高生产过程的可控性，减少人工干预的生产流水线，引入合理的规划调度，加强信息管理服务。与此同时，随着工业和技术的不断发展，智能设备和系统以及其他技术将继续出现，例如计算机辅助设计。仿真技术将减少新产品推向市场的时间和成本，先进的机器人技术将使自动化变得更实惠和灵活。

通过以上讨论，我们为无人车间/智能工厂创建了一个高级架构(图7)。该架构的组件为人机融合、混合虚拟和现实技术、分布和集中。所提出的理论模型可分为四个空间：设备级制造空间、单元级制造空间、跨层制造空间和跨域生产网络空间。每个空间的技术重点反映了无人车间/智能工厂在该空间中需要解决的重要问题。

9 结论

本文从智能无人自主系统、无人车、无人机、

作者简介:

张涛(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为非线性控制理论及应用、智能控制理论及应用、机器人智能控制等。

李清(1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为复杂系统建模与评价。

张长水(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为模式识别、机器学习、人工智能、计算机视觉等。

梁华为(1966-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为检测技术与自动化装置、模式识别与智能系统、控制理论与控制工程等。

李平(1954-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为复杂工程过程综合自动化、微小型无人飞行器导航与控制、智能交通系统建模仿真与优化等。

王田苗(1960-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为先进机器人技术。

李硕(1970-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为模式识别与智能系统。

朱云龙(1967-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为群体智能理论与优化决策方法、分布式大型应用软件开发技术等。

吴澄(1940-), 男, 博士, 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为系统集成方法与技术、复杂工业大系统的建模控制及调度、系统可靠性等。

特别说明: 本文英文版首发于《信息与电子工程前沿(英文)》2017年第1期, 经编辑部与第一作者授权, 翻译发表, 特此声明。

平行无人系统

陈 龙¹, 宇文旋^{2,3}, 曹东璞⁴, 李 力⁵, 王飞跃^{6,7}

- (1. 中山大学数据科学与计算机学院无人系统研究所, 广州 510006; 2. 电子科技大学机械与电气工程学院, 成都 611731; 3. 慧拓智能机器有限公司, 青岛 266000; 4. 滑铁卢大学机电工程系, 安大略 N2L3G1 加拿大; 5. 清华大学自动化系信息科学与技术国家实验室, 北京 100084; 6. 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; 7. 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: 随着陆、海、空等交通方式的快速发展, 以地面无人系统 (UGS)、无人机系统 (UAV)、海上无人系统 (UMS) 为代表的无人系统受到了广泛关注, 但是无人系统所处外部环境复杂多变, 其设计开发充满挑战。针对这一情况, 以中科院王飞跃研究员提出的平行系统理论为指导, 提出了平行无人系统解决方案。本文首先讨论了无人系统的概念, 并对无人系统的自主性和复杂性进行了分析; 然后根据平行理论, 提出了平行无人系统的概念和框架, 并对平行无人系统的建模、平行学习、平行规划、平行控制等关键技术进行了研究; 最后, 以平行无人系统框架为基础, 设计了平行驾驶验证平台和并行机器人验证平台, 通过实验证明了平行无人系统框架可提高无人车及机器人在复杂场景下的安全性和稳定性。

关键词: 平行系统; 平行无人系统; 平行驾驶; 平行机器人

中图分类号: TP11 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 01-0023-15

Parallel Unmanned System

CHEN Long¹, YU Wenxuan^{2,3}, CAO Dongpu⁴, LI Li⁵, WANG Feiyue^{6,7}

(1.School of Data and Computer Science, Sun Yatsen University, Guangzhou 510275, China; 2.School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 3.Qingdao Huituo Intelligent Machine Company, Qingdao 266000, China; 4.Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, University of Waterloo, Ontario N2L3G1, Canada; 5.National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 6. the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 7.Research Center of Military Computational Experiments and Parallel Systems, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: With the rapid development of land, sea and air transportation methods, unmanned systems represented by unmanned ground systems (UGS), unmanned aerial vehicles (UAV), and unmanned marine systems (UMS) have received widespread attention, but the unpredictable external environment of the unmanned system makes the design of unmanned systems challenging. In view of this situation, taking the parallel system theory as a guide put forward by Wang Feiyue, a parallel unmanned system solution was proposed. This paper first discusses the concept of unmanned system and analyzes the autonomy and complexity of unmanned system. Then according to the parallel theory, the concept and framework of parallel unmanned system are proposed, and the parallel unmanned system is modeled. Key technologies such as parallel learning, parallel planning, and parallel control were studied. Finally, based on the parallel unmanned system framework, a parallel driving verification platform and a parallel robot verification platform were designed. Through experiments, the parallel unmanned system framework can be improved. The safety and stability of unmanned vehicles and robots in complex scenarios can be improved.

Keywords: Parallel System; Parallel Unmanned System; Parallel Driving; Parallel Robot

收稿日期: 2018-04-15; 修回日期: 2018-05-07

1 引言

近年来，无人驾驶汽车在世界范围内掀起了人工智能的研究热潮，其一旦广泛投入使用，将对人类的出行状况产生巨大影响。如无人驾驶汽车可以帮助减少车祸，降低交通拥堵，使驾驶员有更多的自由时间，甚至可以通过对加速、制动以及变速等方面的优化，提高燃油效率，减少温室气体排放。其巨大的社会和经济效益吸引了众多的研究人员、创业人员和投资商，甚至政府也出台了相关的鼓励政策，为无人驾驶汽车这一战略性新兴产业的研发保驾护航。无人驾驶汽车是路面无人系统(UGS)的一个特例，可以放在无人系统这一更加广阔的框架下进行研究。

无人系统包括无人机系统(UAV)、海上无人系统(UMS)、地面无人系统(UGS)，在科研人员的不懈努力下，无人系统的各领域得到了长足发展。

无人机系统是无人机及其配套的通信站、起飞(发射)回收装置、远程控制装置以及无人机操作员等组成的系统。其历史可追溯到第一次世界大战，英国的卡德尔和皮切尔两位将军提议研制一种不用人驾驶的小型飞机，飞到敌军上空投下炸弹。在海湾战争与伊拉克战争中，这一设想真正被用在了战场上。美国军用无人机出色地完成了侦察与打击任务，证明了固定翼无人战机有潜力成为未来战场的主战力量，拉开了各国竞相研制固定翼军用无人机的序幕，并逐渐辐射到民用。得益于其结构简单、造价相对低廉、机动灵活等特点，旋翼无人机迅速成为了无人机领域研究^[1-2]与应用的热点。目前，世界上已有多款产品级的无人机，包括旋翼无人机与固定翼无人机，用于航拍、监控、勘探、农业生产等多项民用、商用活动。

海上无人系统包括无人海上航行器(UMV)及必需的通信、控制及支援保障设备，其中UMV包括水面无人舰艇(USV)和无人潜航器(UUV)。水面无人舰艇是继无人机、无人车、无人潜航器之后受到关注的无人自主项目。尽管起步稍慢，但

在无人车、无人机上使用的传感器融合、导航等技术亦可用于水面无人舰艇，有助于其快速发展。2016年，美国宣布其海洋猎手型无人反潜舰已进入为期两年的测试阶段，引起社会对于无人船的热切关注。目前，无人船主要用于水样检测、水下探测、巡逻搜救等任务。无人潜航器又称自动潜水器，是一种水下机器人，包括螺旋桨潜航器与仿生机器鱼等。其研究可追溯到1957年华盛顿大学应用物理学实验室的特种用途水下研究载具(Self-propelled under water research vehicle, SPURV)。目前无人潜航器主要用于水下勘探、水下作业、洋流监测等军用、民用领域。

地面无人系统是能够依靠自身携带的传感器通过感知理解外界环境，根据任务需要进行实时决策与执行，以自主或半自主方式进行作业，在已知或未知地面环境中具有一定自我学习和适应能力的智能设备。从20世纪70年代开始，美国、英国等国率先开展了地面无人载具的研究。进入21世纪之后，随着计算机计算能力加强、传感器精度提升、机器学习与模式识别算法的突破，无人车取得突破的条件逐渐成熟。2004年，美国国防预先研究计划局(DARPA)开始举办一系列无人车比赛，无人车的研究得到空前关注。2014年，Google发布其无人车，并于一年后获得美国首个无人驾驶车辆许可证，引爆无人车热潮。随后，Tesla、Uber、百度等公司相继宣布自己的无人车计划，目前一些用户已经可以在日常出行中体验无人驾驶。

尽管无人系统正在大步迈向成熟化、市场化，但距离其全面应用，成为生产生活的主力尚面临许多挑战。北京时间3月20日凌晨，Uber的一辆自动驾驶汽车在亚利桑那州Tempe市发生交通事故，与一名正在过马路的行人相撞，行人在送往医院后不治身亡。类似这样的事例引发了人们对无人驾驶汽车，甚至整个无人系统领域在安全性和稳定性等方面的担忧，对无人系统应对复杂的实际场景的能力提出质疑。这样的担忧和质疑不无道理，随着现代化交通设施的建设，陆海空各

方面的交通状况变得愈加复杂,这就要求无人系统具有自动学习和自主决策的能力。无人系统的学习需要大量的实验数据作为支撑,然而物理实验的代价较高,且有些实验具有破坏性和不可重复性,使系统、全面的物理实验难以实现。因此亟需一套完整的理论框架,用于解决上述问题,即平行无人系统框架。

本文余下部分组织如下:第2章首先对无人系统的概念进行进一步界定,然后介绍了无人系统的自主性及其等级划分,并分析了当前无人系统研究的难点;第3章针对无人系统难点问题提出了平行无人系统框架,首先介绍了平行理论,然后根据无人系统特点提出平行无人系统框架,并就其中的关键技术进行说明;第4章和第5章根据平行无人系统框架分别设计了平行驾驶验证平台和平行机器人验证平台,介绍了平行无人系统框架在无人驾驶及机器人方面的具体应用,并通过试验验证了平行无人系统框架的合理性;第6章对本文工作进行了总结。

2 无人系统

2007至2013年间,美国国防部(DoD)前后发布了4版《无人系统路线图》^[3-6],将地面无人系统、无人机系统、海上无人系统为代表的陆、海、空无人系统集成在统一的发展规划中,为美国无人系统的发展指明了方向,同时也为我国无人系统的研究提供了借鉴。

2.1 无人系统的定义

DoD在其2007年发布的第一版《无人系统路线图》中给出了“无人飞行器”的定义:

Unmanned vehicle: A powered vehicle that does not carry a human operator, can be operated autonomously or remotely, can be expendable or recoverable, and can carry a lethal or nonlethal payload. Ballistic or semi-ballistic vehicles, cruise missiles, artillery projectiles, torpedoes, mines, satellites, and

unattended sensors (with no form of propulsion) are not considered unmanned vehicles. Unmanned vehicles are the primary component of unmanned systems.

无人飞行器(unmanned vehicle)是一类有动力、非载人飞行器(vehicle),可自主工作或遥控操作,可以是一次性的或是可回收的,可携带致命或非致命载荷。弹道或半弹道式运载工具、巡航导弹、炮弹、鱼雷、水雷、卫星和无人值守传感器(无任何形式的推进)均不属于无人飞行器。无人飞行器是无人系统的主要组成部分。

虽然DoD给出了“无人飞行器”的详细定义,明确了基本范畴,但并未直接给出“无人系统”的完整定义。从上述表达方式可知,无人飞行器是无人系统的一部分,无人系统是比UAV、UMS、UGS更高层次的系统概念。

国内外学者根据自己的理解对无人系统的概念进行了定义,如文献[7]总结了无人飞行器的特点,将无人系统定义为“无人系统是由无人运动或静止载体、致命或非致命任务载荷、支援保障设备(含发射装置)和遥控操作员(可选)等组成的,以自主工作或遥控方式完成特定任务的作战系统。”其受DoD思想的影响,将无人系统定义为作战系统,忽略了无人系统的民用属性。

本文认为无人系统是由UAV、UMS、UGS等无人飞行器及其远程控制系统等组成的,以自主或遥控方式完成特定任务的CPSS(赛博-物理-社会系统)。

2.2 无人系统的自主性

2.2.1 自主性的定义与概念

自主性是无人系统拥有感知、观察、分析、交流、计划、制定决策和行动的能力,并能够完成人类通过人机交互方式布置给它的任务^[8]。

自主系统的显著特征是在未知环境中的目标导向能力,它能基于一套规则或约束做出决策,并确定哪些信息对决策是重要的,因此其性能比预先确定运行方式的系统更优越^[9]。

2.2.2 自主性与复杂性

自主性可以根据任务的困难性、环境的复杂性和为了完成任务进行的人机交互程度等因素分为不同的等级。无人系统不同的研究领域分别给出了各自的分级标准，如无人机系统的AFRL自主控制等级(表1)及其简化版NASA无人机系统自主控制等级(表2)、SAE规定的汽车自主化等级(表3)等。

由表1至表3可知，随着自主性的提高，对无人系统处理自身状态、周围自然环境、周围社会环境组成的复杂系统出现的各种状况的综合能力提出更高要求。可见，无人系统的复杂性不仅是自身的结构、状态、控制等内部复杂性，还涉及到所面对的自然环境以及社会环境的更大的复杂性。文献[10]将无人系统面临的上述问题定义为不确定性(Uncertainty)、多样性(Diversity)和复杂性(Complexity)，简称UDC问题。只有处理好这三个方面的复杂性，找到解决无人系统UDC问题的方法，才能够真正实现无人系统的完全自主性。

3 平行无人系统

平行无人系统是使用平行无人系统框架设计的无人系统，所谓平行无人系统框架是在现有无人系统的技术基础上，引入先进的平行理论，利用其CPSS空间概念、平行理论和ACP算法，形成的一套用于无人系统设计的整体架构及其平行建模、平行学习、平行规划和平行控制等具体方法。平行无人系统框架的提出为解决由无人系统及其所处自然、社会环境组成的复杂系统的建模、实

验、感知、预测、规划、控制等方面的问题提供了新的研究思路。

3.1 平行无人系统的理论依据

平行系统的思想由中科院自动化所王飞跃研究员于2004年提出^[11]，可概括为CPSS系统、平行理论、ACP方法三个方面，分别从概念、理论和方法论三个层面全面给出了复杂系统的完整解决方案。

表1 AFRL提出的无人机系统自主控制等级

等级	中文名称	英文名称
1	遥控引导	Remotely guided
2	实时健康诊断	Real time health
3	故障自修复	Adapt to failure condition
4	飞行环境自适应	Onboard route replan
5	机上航路重规划	Group coordination
6	团队协作	Group tactical replan
7	团队战术重规划	Group tactical goals
8	团队战术目标	Distributed control
9	分布式控制	Group strategic goals
10	全自主机群	Fully autonomous swarm

表2 NASA飞行器系统计划高空长航时部等级划分

等级	名称	描述	人为参与度
1	遥控	人在回路的遥控飞行	100%
2	简单的自动操作	在操作员监视下，依靠自控设备辅助执行任务	80%
3	远程操作	执行操作人员提前编写的程序	50%
4	高度自动化(半自主)	具有对部分态势感知能力，自动执行复杂任务	20%
5	完全自主	对本体及环境态势具有广泛的感知能力，有全面决策的权限和能力	≤ 5%
6	协同操作	数架无人机之间团队协作，完全自主完成任务	≤ 5%

表3 无人车自主化等级划分

等级	名称	定义
0	无任何自动驾驶	驾驶员完成全部动态驾驶任务
1	驾驶辅助	系统能够持续或在设计适用域内进行车辆横向或纵向控制，余下所有动态驾驶任务由驾驶员完成
2	部分自动驾驶	系统能够持续或在设计适用域内进行车辆横向或纵向控制，驾驶员负责物体或事件检测与处理
3	特定条件自动驾驶	在限定的设计适用域内，能够完成所有的动态驾驶任务，同时驾驶人员时刻准备着应对无人驾驶系统在系统失效或者超出设计适用域范围时发出的需求驾驶员介入的请求，并在发出驾驶员介入请求后驾驶员介入前能够继续控制汽车几秒
4	高度自动驾驶	系统在设计适用域内不止能完成全部动态驾驶任务还要能够应对系统失效，无需驾驶员介入
5	完全自动驾驶	全工况无人驾驶，无需定义设计适用域，能够完成所有动态驾驶任务以及处理动态驾驶任务的失效

3.1.1 CPSS系统

信息物理系统 (Cyber-Physical Systems, CPS) 是一个综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统, 通过3C (Computer、Communication、Control) 技术的有机融合与深度协作, 实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务^[12], 如图1所示。

随着互联网的高速发展, 赛博空间对人们的行为方式以及交流方式都产生了重要影响, 因此到了需要考虑社会动力学的阶段。1972年奥地利哲学家波普尔 (Popper KR) 提出了“三个世界”理论, 即我们的宇宙由三个相互作用的世界组成: 物理世界 (the physical world) 称为第一世界, 心理世界 (the mental world) 称为第二世界, 还有人工世界 (the artificial world) 被称为第三世界。受这一理论的启发, 王飞跃研究员提出社会物理信息系统 CPSS (Cyber-Physical-Social Systems) 是在CPS的基础上, 进一步纳入社会信息、虚拟空间的人工系统信息, 将研究范围扩展到社会网络系统, 注重人脑资源、计算资源与物理资源的紧密结合与协调, 使得人员组织通过网络化空间以可靠的、实时的、安全的、协作的方式操控物理实体^[13], 如图2所示。

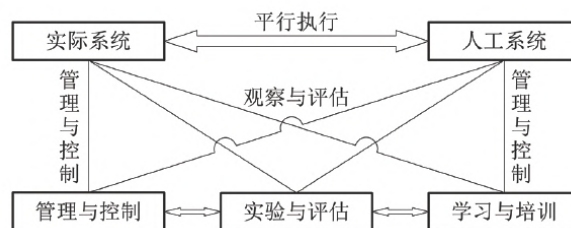
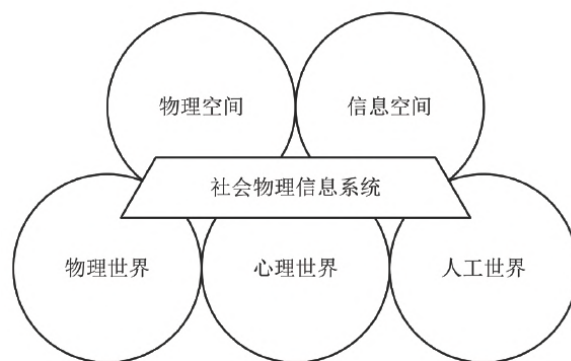
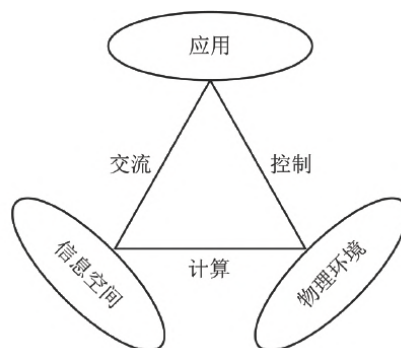
其中, P主要与现实的物质、自然或物理域即第一世界对应; S主要与现实的社会、认知或心理域即第二世界对应; C主要与现实的信息、知识或人工域即第三世界对应^[14]。这与波普尔的哲学理论高度契合, 一经提出就得到了各相关领域研究人员的高度重视。

3.1.2 平行理论

王飞跃研究员在其2004年发表的《平行系统方法与复杂系统的管理和控制》一文中首次提出了平行系统的概念。平行系统采用复杂系统研究的“多重世界”观点, 即对复杂系统进行建模时, 不再以逼近某一实际的复杂系统的程度作为唯一标准, 而将模型认为是一种“现实”, 是实际复杂系统的一种可能的替代形式和另一种可能的实现方式, 而实际复杂系统也只是可能出现的现实中

的一种, 其行为与模型的行为“不同”但却“等价”。

文中指出, 平行系统 (Parallel Systems), 是指由某一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统, 平行系统框架图如图3所示, 它包括实际系统和人工系统两部分。简单来讲, 人工系统是对实际系统的软件化定义, 不仅是对实际系统的数字化“仿真”, 也是为实际系统运行提供可替代版本 (或其他可能的情形), 从而实现对实际系统在线、动态、主动的控制与管理, 为实际复杂系统管理运作提供高



效、可靠、适用的科学决策和指导。

3.1.3 ACP方法

ACP是使用平行系统解决复杂系统问题的步骤，是人工社会（Artificial societies）、计算实验（Computational experiments）与平行执行（Parallel execution）的简写。ACP给出了实现平行系统的三个步骤：第一步，建立与实际系统相对应的人工系统；第二步，在人工系统中利用计算实验对所研究复杂问题进行分析与评估；第三步，实际系统与人工系统通过虚实互动的平行执行方式实现二者的管理与控制，如图4所示。

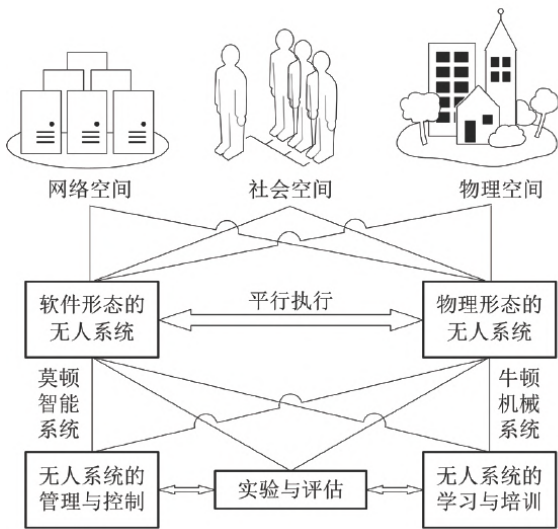


图4 ACP算法框架

所谓人工系统，可视为传统数学解析方法建模的扩展，是广义的知识模型，是落实敏捷性（Agility）的基础。构建人工系统的方法有许多，例如各学科领域都有许多本领域数值仿真器或物理仿真器，亦可以通过多智能体建立代理模型或概率图模型的方法构建。人工系统首先应与实际系统具有特征一致性，还应具备计算快速、部署简单、可交互性等特点。计算实验是仿真模拟的升华，是在人工系统中通过计算推演得到复杂系统特性的手段，是确保复杂系统能够聚焦的手段。计算实验应从由数据驱动，融合知识自动化、机器学习等方法，达到可计算、可优化、实时性等要求。平行执行是自适应控制等思想的推广，在

虚实平行系统中构成大闭环反馈机制，是确保执行结果收敛（Convergence）的方法。所以说，基于ACP的平行系统可以实现复杂系统从UDC到AFC的跨越^[15]。

3.2 平行无人系统框架

本文根据上述平行理论及其相关方法，提出了平行无人系统的框架，如图5所示。根据平行理论的CPSS空间概念，框架将无人系统分为：L1物理世界、L2认知世界和L3人工世界三个层次。其中L1物理世界层主要包括无人系统的载具，如无人车、无人机、无人船等，这个层次关注的主要是无人系统的物理属性，包括无人系统的运动学、动力学特性等牛顿力学属性；L2认知世界层主要包括驾驶员与ADAV的感知算法部分，这一层主要关注的是系统对自身状态及周围自然环境和社会环境的认知属性，符合莫顿定律；L3人工世界层包括两个子层：信息服务子层和ADAV子层，其中信息服务子层通过各种手段，收集关于无人系统及其所处自然和社会环境的信息，包括无人系统较为关心的用于定位和导航的地理信息，无人系统与社会有效融合的人类活动信息，以及通过各种先进科技可以收集到的关于无人系统的运行相关的信息，从而构建一个动态完整的无人系统信息库，形成一个完全与真实世界想对应的平行世界，为无人系统的规划和决策提供丰富的信息服务。ADAV是Artificial Drivers and Artificial Vehicles的缩写，代表人工世界中的智能控制算法与虚拟无人载具的联合体，是无人系统在人工世界中的智能主体，其通过各种科技手段实现与实际驾驶员的交互，并通过向同一层的信息服务子层请求当前信息，获得对无人系统及其所处环境的了解，并根据这些信息生成规划和控制决策，进而控制物理世界中的无人系统载具进行相关行动，从而完成既定任务。

L1层各无人系统的实体之间可通过智能网联、物联网、无线通信等技术实现信息交换，为更高层提供更加丰富可靠的一手数据；L2层驾驶员与

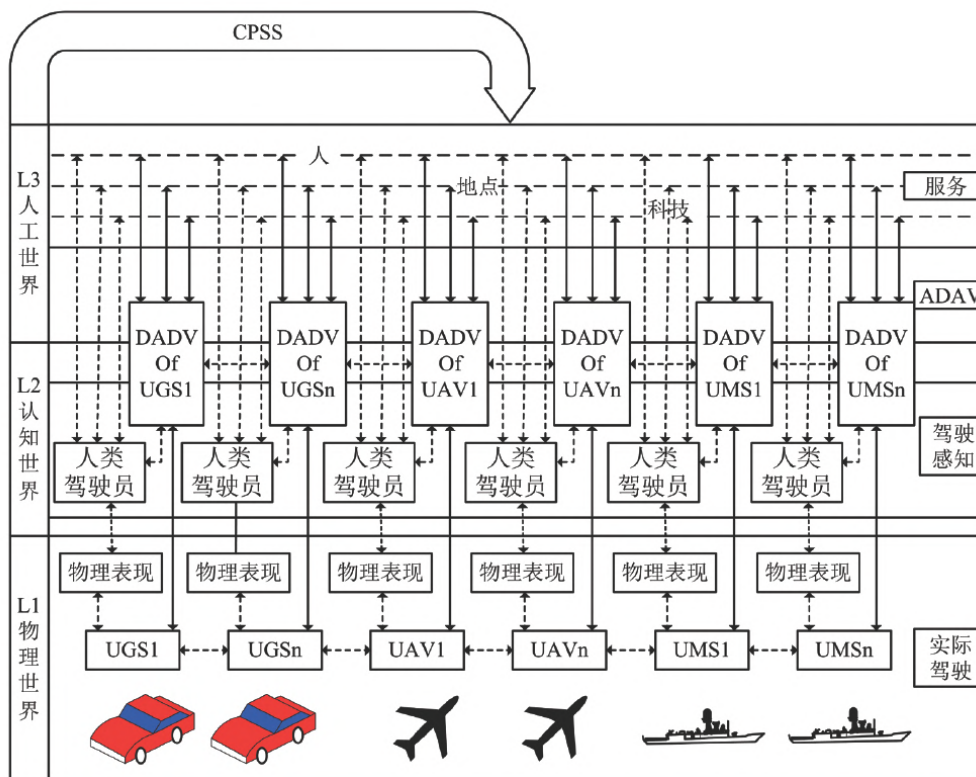


图5 平行无人系统框架

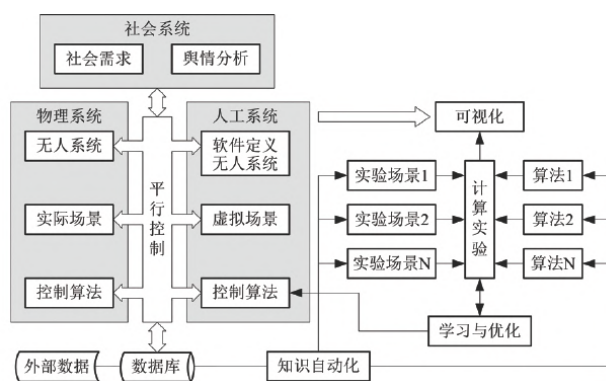
ADAV的交互实现了无人系统操作优先级的功能，即远程驾驶员具有最高的优先级，其根据传感器传回的实时影像以及从L3信息服务子层得到的信息，形成决策，进而对无人系统在复杂环境中的运行状况进行有效的监督，并在无人系统遇到难以处理的情况时及时介入，避免危险的发生，为无人系统处理紧急突发状况提供了有效的手段。

不仅L1层各无人系统的实体之间可实现信息交换，L3人工世界的ADAV子层内各ADAV之间也可以进行各种信息沟通。这与物理世界中的智能网联概念类似，但因为其所处环境为虚拟环境，所以ADAV间的信息沟通比物理世界容易得多，这种信息交互可作为L1层物理无人载具之间信息交互的重要补充手段。

通过实-实互联、虚-虚互联、虚-实互联，不仅UGS之间、UAV之间、UMS之间可通过L3人工世界的信息服务和ADAV代理形成有效的同类无人系统之间的“小系统”，还能够通过建立更加广

阔的CPSS系统，为UGS、UAV、UMS等组成的混合编队提供有效的信息服务与智能控制代理，从而形成更大的无人系统。

在上述平行无人系统的框架中，L3人工世界层除了为无人系统提供信息服务外，另一个核心功能是通过ADAV实现对无人系统的智能控制。ADAV的实现可以参照ACP算法，图6给出了ADAV设计的一种思路。

图6 基于ACP算法的ADAV设计框架^[15]

ADAV首先通过L3人工世界层的信息服务获得无人系统自身状态、运行场景、社会需求等方面的信息,生成ADAV的无人车模型、虚拟场景以及初步的控制算法,并根据所获得的有限的实际数据以及需要执行的任务在虚拟环境中生成各种运行场景,并进行相关的算法实验,由于计算机计算速度的不断提高,可以通过大量实验,在有限的时间里,生成大量的高仿真度的虚拟数据,将这些虚拟数据与原始数据进行融合,从而形成了以任务为中心,以各种场景为变量的训练数据集。通过扩展后的数据根据所要完成的任务进行针对性的训练,从而生成更加鲁棒的无人系统规划和控制策略。

3.3 平行无人系统的关键技术

3.3.1 平行无人系统的建模

平行无人系统的首要任务是要建立同实际无人系统等价的人工无人系统,通过在人工无人系统上的计算实验找到实际无人系统的等价结果,保证从人工无人系统上得到的认识等价于实际无人系统,对人工无人系统的控制结果等价于对实际无人系统的控制^[16]。现代各种物理引擎、三维模型软件以及计算机渲染技术的发展为平行无人系统的建模提供了多样化的手段,选择其中仿真度高、计算量较低的优质软件平台是平行无人系统的关键。无人系统的建模分为无人装置的建模、所处自然环境建模、所处社会环境建模以及模型的验证四个步骤。

(1) 无人装置建模。无人装置的建模主要是针对装置本身,建立其与实际无人装置在运动学、动力学上等价的模型,这是建立平行系统的基础。

(2) 自然环境建模。自然环境建模有两个方面,一方面是建立无人系统所处的自然环境模型,另一方面还要建立基于牛顿力学的虚拟世界,如重力环境、轮胎地面模型、物体碰撞模型等。给模型加入越多的人类已知的客观知识,计算结果会越来越接近于真实情况,但又不能无限制的加入各种知识,那样会使计算量大大增加。因此选择能

够对所关心的物理过程进行细致刻画,对次要物理过程进行选择性忽略的物理引擎成为平行系统设计的关键。此外,因为自然环境相对较为稳定,所以其更新可根据环境实际变化情况由人工定期进行。

(3) 社会环境建模。社会环境建模主要是对人类活动引起的无人系统所处环境的变化进行建模。因为人类活动有很大的灵活性,这就导致了社会环境的复杂性。因此需要通过各种传感器实时感知人类活动,将社会中的人类活动引入到人工世界。同时通过各种智能算法,可以对人类的行为产生认知和理解,进而对人类活动规律归纳、总结,达到预测的目的,为无人系统有效融入人类社会奠定基础。

(4) 模型验证。模型验证主要是从人工系统模型的完备度、可信度以及人工系统与实际系统的等价性等方面对所建立模型进行评价和验证。

3.3.2 平行无人系统的平行学习

当建立了与实际无人系统在关键指标上一致的人工系统后,就建立起了一个与现实世界并行存在的人工世界。在这个世界中,物与物、人与人、人与物之间存在着与真实世界相对应的基本关系。因此,可将人工系统作为无人系统测试的虚拟实验室,系统地进行各种各样的试验。虚拟实验的成本几乎可以不计,因此在物理世界的高成本实验、破坏性实验,甚至在物理世界难以实现的实验,都可在人工世界进行。系统的实验可获得大量的数据,将这些数据与物理世界中获得的少量数据进行融合,可构成无人系统的平行学习原料,从而为无人系统算法的设计提供更加丰富的数据和更加多样化的场景,提高算法的鲁棒性。

文献[17]提出了一种平行学习的理论框架,如图7所示,可作为平行无人系统的学习方法。

其将平行学习分为数据处理和行动学习两个阶段:在数据处理阶段,平行学习首先从原始数据中选取特定的小数据,输入到软件定义的人工系统中,并由人工系统产生大量新的数据,然后这些人工数据和特定的原始小数据一起构成解决

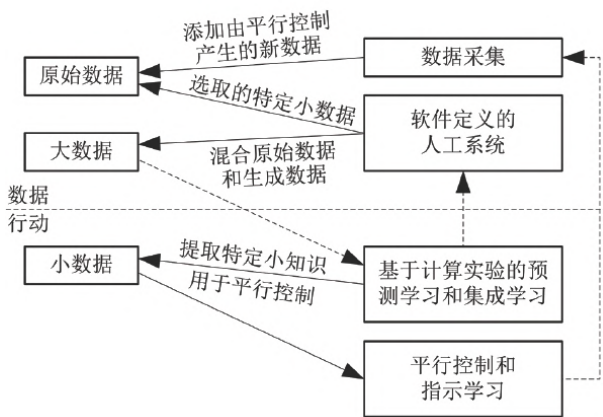


图7 平行学习框架^[17]

问题所需的大数据集合，用于更新机器学习模型；在行动学习阶段，平行学习沿用强化学习的思路，使用状态迁移来刻画系统的动态变化，从人工合成大数据中学习，并将学习到的知识存储在系统状态转移函数中，通过学习提取，可以得到应用于某些具体场景或任务的知识，并用于平行控制和平行决策。

3.3.3 平行无人系统的平行规划

路径规划是无人系统的关键技术，尤其对于路面无人系统，路径的规划能力甚至决定着其是否能够有效完成既定任务。无人系统的路径规划可分为基于地图的全局路径规划和基于传感器的局部路径规划，如图8所示。



(a) 全局规划 (b) 局部规划

图8 路径规划

路径规划的任务是根据运动空间的当前状态，依据某些性能指标（如工作代价最小、行走路线最短、行走时间最短等），制定出一系列的可行路径，并从中选取最优或接近最优的路径。对于UGS来说，这些信息包括道路信息、车道线位置、护栏位置、交通灯的颜色、路牌等静态物体的信

息；周围车辆、摩托车、自行车、行人甚至动物等动态物体的信息；交通规则、交通礼节等社会秩序；以及季节、天气状况等信息，如图9所示。



图9 UGS路径规划所需外部场景信息

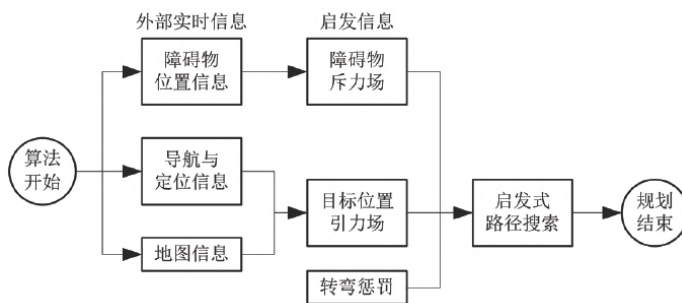


图10 路径规划算法^[18]

图10为一种常用的规划算法流程，其对外界的一切感知均来自无人系统传感器获得的实时信息，包括一些非常基础的信息也要通过对传感器数据的大量计算获得，比如道路模型。这种方法计算量大，算法难度大，不能将有限的资源集中于社会车辆、非机动车辆、行人等动态信息的获取和处理，容易造成很多常识性信息的丢失，导致感知的不完善，从而产生错误的规划和动作。此外，一些紧急情况可能会在短时间内发生，使算法没有足够的反应时间，因此，研究能够及时处理紧急状况的规划算法具有重要意义。

平行规划是一种虚实结合的规划框架^[18]，如图11所示，包括平行规划模型的学习和平行规划的执行两个阶段。

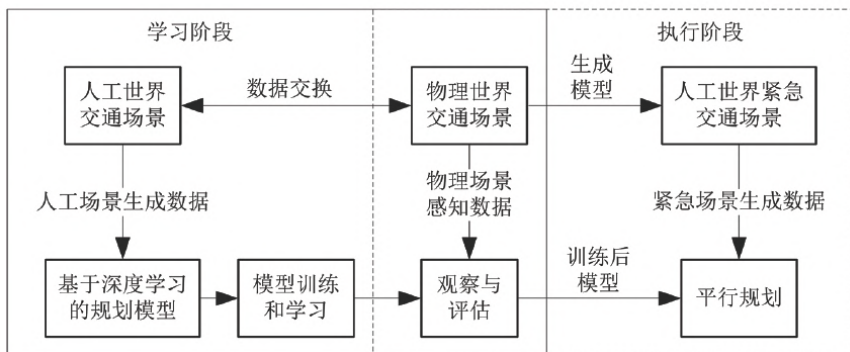


图11 平行规划框架^[18]

平行规划的模型学习阶段主要是利用平行学习的框架进行规划模型的训练与学习。已知人类驾驶员能够从环境中提取重要信息，从而做出合理的规划，这种能力来源于他们生活及驾驶体验中获得的大量知识。为了使无人系统能够获得类似的自主能力，规划模型应该能够从周围环境中学习。然而真实交通场景中的许多训练样本，尤其是紧急情况下的训练样本，难以获得，因此平行规划的模型学习可在平行学习框架的基础上进行。

平行规划的执行阶段主要是根据传感器和L3人工世界信息服务子层提供的场景信息，在全局规划的基础上，对局部路径进行修改，完成识别红绿灯、避让社会车辆、礼让行人等各种功能。

此外，在平行规划的执行阶段，可利用人工场景的计算优势，实时生成无人系统当前状况下可能出现的各种紧急情况，并计算相应的规划结果，为紧急情况下的规划提供备选方案。当没有出现紧急情况时，选择正常的规划结果，一旦出现紧急情况，马上采用对应的备用规划方案，为提高无人系统的应紧能力提供了有效方法。

3.3.4 平行无人系统的平行控制

平行无人系统的平行控制是从控制算法的层面对无人系统的改进。一般的控制算法是基于误差反馈的控制算法，即当有了误差以后才能对系统产生矫正作用，这种算法对于紧急突发情况的处理显得捉襟见肘。

平行控制就是在人工世界存在一辆人工无人

系统的模型，其所处虚拟环境和运行状态与现实无人系统一致，在发出实际控制之前，人工无人系统模型可在虚拟环境中先行进行实验，验证算法的参数是否合理，并根据实验结果和实际无人车的运行情况实时优化控制算法的参数。这样可以提前对算法的参数进行优化，提前发现可能出现的危险情况和紧急情况，从提高算法的鲁棒性和应对突发情况的能力。

4 平行驾驶

无人驾驶近来成为智能研究领域的热门领域，无人车的研发对于解决我国交通领域所面临的交通拥堵、驾车安全等方面具有重要作用，但是由于无人车在相当长的一段时间将处于有人驾驶、无人驾驶和人机共驾等多种驾驶方式共存的阶段，因此如何解决无人车所面临的复杂交通状况、保障无人车算法的鲁棒性以及处理紧急情况的能力成为无人车发展亟待解决的问题。

从2017年提交的无人车与人类驾驶人工干预或出现事故的平均里程数的数据(如图12)中不难发现，即使自动驾驶技术发展最快的谷歌无人车Waymo，每行驶5596英里(9006km)就要被迫人工干预一次，而美国人类驾驶员的平均水平为每16.5万英里出一次普通事故，每9000万英里才出一次致命事故，可见当今自动驾驶技术与人类驾驶员存在巨大差距。

差距出现的重要原因是工程复杂性和社会复杂性带来的巨大的建模鸿沟。人类能够通过各种驾驶活动和生活经历产生大量的经验，而以目前的技术，这种数据的积累和学习对于无人车是巨大的挑战。以Waymo为例，其领先主要是体现在数据积累，其截止到2017年，已有640万km的实

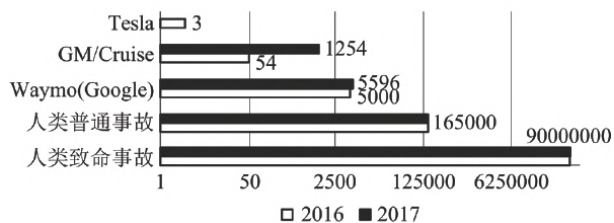


图12 无人车与人类驾驶人人工干预或出现事故的平均里程数

测数据。然而，对Waymo来说，通过路测方法收集数据已经变得异常昂贵：2017年的63次干预中大致有2/3是因为算法问题，而针对每个问题，要花1万多公里的油费和测试驾驶员人工费用，才能获得1个高价值数据，数据的平均价值密度越来越稀疏、采集成本越来越高。因此，单靠实际实验数据来对实际场景进行建模，很难完成。

为解决上述问题，在平行无人系统的基础上，进一步提出了平行驾驶的概念。平行驾驶是新一代的云端化网联自动驾驶技术，通过充分利用数字化及信息化资源，将云端、道路及车辆上的信息无缝衔接，利用平行视觉与感知^[19, 20]、平行学习、平行规划和平行控制等前沿关键技术，把智能车、管控平台及驾驶模拟器实时连接起来，使智能车的自动驾驶行为变得可测、可控，提高了车辆系统对环境的快速反应，并降低整体系统成本，从而实现车路互动、多车协同、平行操控、安全行驶。相比于传统网联自动驾驶方案，平行驾驶理念具备“车内简单，云端复杂，虚实互动，安全高效”的显著优势。

物理定义的驾驶员数据集与软件定义的驾驶员数据集通过虚实结合、平行执行理论构建起平行驾驶系统，可以在两个平台上同时做感知、决策、规划、控制，所有单体智能可以做的，都可以在两个平台上运行，这两个平台之间相互反馈、相互优化、不断提高，最终形成经验和知识。

在做大的系统平台之前，我们先定义一个“平行的车”：真实的车与软件定义的车。在平行空间内做一个软件定义的车的主要方法是通过仿真和虚拟的方式来构建，通过分析真实车的属性

与人工车在虚拟环境中的属性，可以分别得到不同的智能。真实车的属性可以通过测试得到，这种智能叫作指示智能；软件定义的车我们可以影响和驱动它，这种智能成为描述智能。两种智能合在一起，通过ACP平行执行的方式把整个架构打通实时交互，相互分享数据经验。

一台物理的车在物理世界，同时也有一个平行的人工定义的车存在于人工世界，这两台车会在一个1:1的环境中同时在运行，除了人在驾驶还有虚拟的驾驶员在驾驶。虚拟的驾驶员驾驶经验不仅来源于人本身，也来自于物理世界和人工世界两套平行学习体系下得到的知识，通过平行智能的方式融合在一起。

物理世界里有真实的车在运行，物理世界学习到的经验、模型、知识、能力都会定义在认知世界层面。认知层面的知识不仅能从物理世界获取，也可以从人工场景中获取。根据物理场景和一些知识场景中构建第三层人工车辆，第三层人工车辆相当于物理车辆的平行车辆。构建第三层人工车辆的时候，借助了认知层车辆的信息，而它本身在运行的时候也会计算出一些新知识，这些新知识可能是在物理场景中很少出现或者通过人为构建的危险场景。所有从物理世界和精神世界学习到的有利的知识都会放到被定义的人工世界层。

在真实场景中的数据可以被提炼出来生成人工场景中的一些小数据，同时人工场景中的小数据不断地运算并与真实场景中的数据构成虚实结合的大数据，这个大数据可以用来继续训练模型，得到新的知识之后继续用来构建场景做训练，这样就实现了虚实场景的交互、迭代、增进，这就是平行学习的闭环理论。不仅可以做平行学习，同样也可以做平行规划，真实世界的知识都可以反馈到物理世界来增加物理世界的可靠性，利用更高性能的云平台来做运算，另一方面通过平行规划比真实世界的车有更早的经验预测到危险的到来。

结合平行驾驶概念和平行无人系统框架，搭



图13 平行驾驶系统基本组成

建了如图13所示的平行驾驶验证平台。平台由L1物理层无人车、L2认知层远程驾驶平台、L3人工世界层信息服务与ADAV控制中心三部分组成。

其中L1物理层如图14所示，包含三辆无人车，分别改装自吉利博越、长城H7和东风景逸汽车。无人车统一了控制接口，仅需输入方向盘转角和速度两个量就可以实现无人车的控制。转角和速度的具体控制则通过底层的转角闭环和速度闭环实现，能够保证精准快速的响应指令。所有无人车均可通过5G网络实现与同层其他车辆以及L2、L3两层的信息交互，同时也接收ADAV发送的控制指令，并迅速响应。此外，车上安装有GPS模块、激光雷达模块、图像采集与处理模块等具有分布式计算能力的智能传感器，可直接输出语义层次的周围环境信息，这些信息可通过5G网络广播到其他无人车端、远程控驾端以及信息服务与ADAV控制中心。

L2认知层如图15所示，主要包括通过5G网络与无人车连接的远程驾驶平台与遥控驾驶员。一个驾驶员可同时监控多辆无人车的运行。遥控驾驶员通过L1层传感器传来的实时数据以及L3层信息服务子层传来的车辆综合信息确定车辆的行驶是否安全，如果发生紧急情况或预判其可能出现危险时，远程驾驶员及时选择对应的无人车并迅速切换到遥控驾驶状态，确保无人车出现无法应对的复杂或危险状况时，能够得到安全处置。

L3人工世界层如图16所示，信息服务子层通过仿真器生成了实验区域的高精度的三维渲染地图，并通过标定技术实现了现实中每一点与仿真

环境内每一点的一一对应关系，如图17所示。其通过5G网络接收车载传感器发来的关于车辆位置、车辆状态、车辆周围交通状况等的实时信息，并与L3人工层的虚拟信息融合，从而为车辆提供更加全面的信息服

务。在L3人工世界层的ADAV子层，每一辆无人车对应一个ADAV，每辆无人车的ADAV通过信息服务和车辆直接发来的传感器信息，进行无人车的平行学习、平行规划和平行控制。当其通过算法实验发现自身不能有效处理的复杂状况，会主



图14 L1物理层的多辆无人车



图15 L2认知层的人类远程驾驶



图16 L3人工世界层CPSS服务和ADAV智能体中心



图17 L3人工世界层信息服务子层显示界面

动向L2认知层的遥控驾驶员发出请求接管指令，同时在被接管前，根据情况减速并停到安全的位置。

根据无人车在实际运行中可能出现的几种紧急状况，在中国常熟无人车试验基地的“九宫格”赛道内设计了如图18所示的平行无人驾驶汽车系统联合实验，实验特点如下：

(1) 实验中有人驾驶和无人驾驶车辆混合运行，模拟真实交通环境，验证系统应对复杂交通环境的能力；

(2) 无人车经过的路径上放置由水马组成的障碍物，验证ADAV的局部平行规划能力；

(3) 无人车需要经过U形弯，S形弯等大变形路径，验证ADAV的平行控制能力；

(4) 在一定范围内屏蔽无人车的GPS信号，造成异常，验证系统处理紧急状况的能力；

(5) 一个远程驾驶员同时监控三辆汽车，通过紧急情况下的遥控接管实验，验证系统远程驾驶的性能。

联合实验的结果表明平行无人驾驶系统能够实现多车的同时运行与监控；L3人工世界层的信息服务子层能够提供较为全面的驾驶信息；每辆车的ADAV可有效利用信息服务子层和车载传感器传来的实时信息，进行平行学习、平行规划和平行控制，使无人车沿着合理的路线行驶；当发生异常或突发情况时，远程驾驶员能够及时介入，切换无人车的驾驶模式到远程驾驶模式，合理处理突发情况。

通过对多辆无人车组成的平行驾驶系统的联合实验证明由多辆无人车组成的小型平行驾驶系统能够实现预定的目标，这为平行无人驾驶向着更多车辆更加复杂的交通状况方向发展打下了基础。

5 平行机器人

近年来，随着人工智能、互联网、大数据技术的不断发展，世界范围内掀起了新一轮的机器

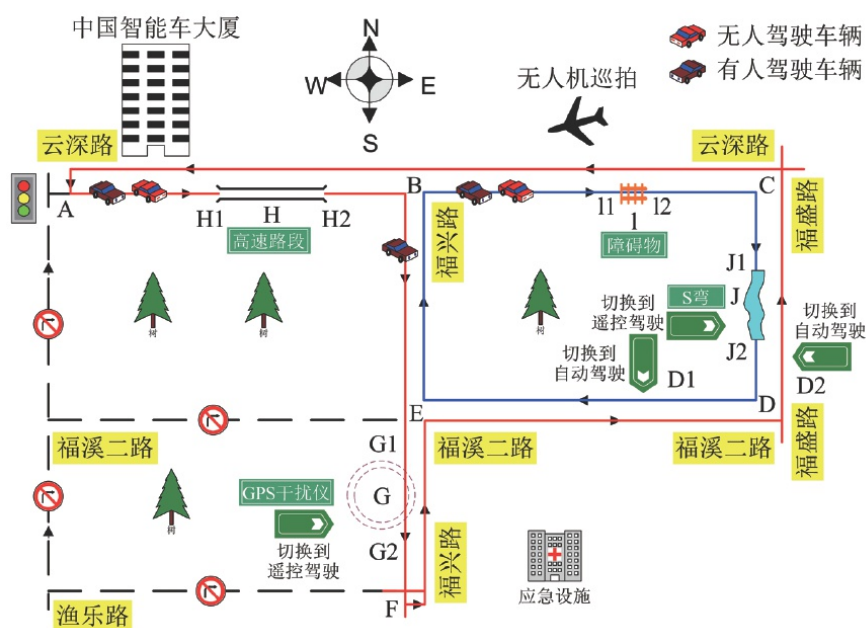


图18 平行无人系统联合实验方案



图19 L1层物理世界的机器人

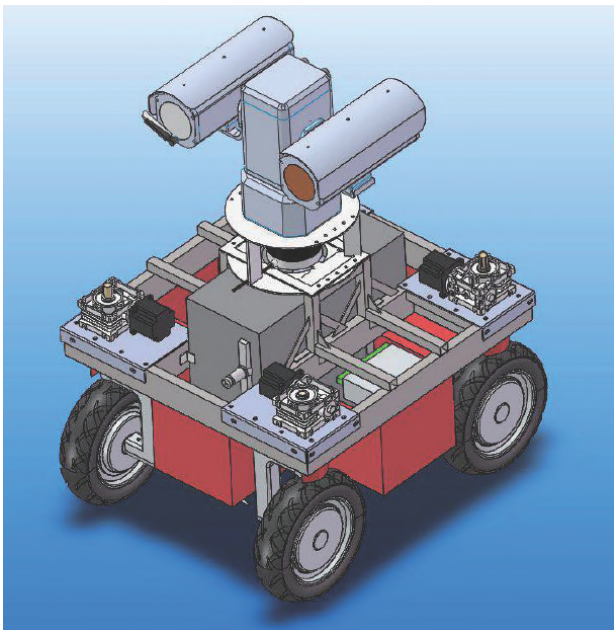


图20 L3层人工世界机器人ADAV

人研究热潮。以智能机器人为代表的智能装备不断涌现，在工业、农业、服务业发挥着越来越大的作用，对于我国产业的转型升级起到了重要支撑作用。顺应时代的发展，我国高度重视机器人发展，并将机器人研究纳入“中国制造2025”的规划中，作为国家科技创新的优先重点领域之一。

四轮移动机器人作为一种集多种学科于一体

的智能化科技产品，现已在仓储物流、餐饮、现代农业、智能工厂、智能电网等领域得到了广泛的应用^[21]。同时，各种应用领域对四轮移动机器人的要求越来越高，比如机器人面对的外部环境越来越复杂，需要完成的任务难度也在不断提高，甚至有些任务单个机器人无法完成，需要多机器人相互配合等。因此，如何提高机器人的鲁棒性、自主性以及协作能力等成为现在移动机器人领域普遍关注的问题。探索平行无人系统在机器人领域的应用对于解决以上问题具有重要作用。

以变电站智能巡检机器人为例，按照本文所提平行无人系统框架，搭建了图19和图20所示平行机器人系统。其与平行驾驶系统同作为UGS的一种，除了具体算法的不同外基本组成和算法框架大体一致。

通过对平行机器人的调试和实验，得出与平行驾驶相似的结论，即通过本地简单远程复杂的原则，设计的机器人能够实现预期功能，同时其平行机制使多个机器人组成的机器人小组能够更加良好的配合，通过L2层的远程监督与遥控，大大提高了整个机器人系统的安全性和可靠性，以及处理突发情况的能力，这为移动机器人的大规模使用打下了良好的基础。

6 总结

以地面无人系统、无人机系统、海上无人系统为代表的陆、海、空无人系统是科研领域、军用领域、民用领域共同关注的热点，但其面对的CPSS空间（物理空间、社会空间以及赛博空间）日渐复杂，这对无人系统的设计提出了更高的要求。本文首先探讨了无人系统的概念，界定了研究对象的范围，并对无人系统的自主性和复杂性进行

了分析；然后根据王飞跃研究员提出的平行理论框架，提出了一套较为完整的平行无人系统的概念和框架，并研究了平行无人系统的建模、平行学习、平行规划、平行控制等环节，为平行无人系统的设计提供了思路。最后，通过对基于本文无人系统框架所设计的平行驾驶验证平台和并行无人机器人验证平台的实验，证明了平行无人系统框架在提高无人系统在复杂环境下的安全性和稳定性具有重要作用。展望未来，平行无人系统在大型海陆空混合无人系统方面的应用具有较大的潜能。■

参考文献

- [1] Amin R, Aijun L, Shamsirband S. A review of quadrotor UAV control methodologies and performance evaluation. *International Journal of Automation and Control*, 2016, 10 (2): 87-103.
- [2] Gupte S, Mohandas P I T, Conrad J M. A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles. In: *Proceedings of the 2012 IEEE Southeastcon*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012. 1-6.
- [3] *Unmanned Systems Roadmap FY2007-2032*. United States Department of Defense. 2007.
- [4] *Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2009-2034*. United States Department of Defense. 2009.
- [5] *Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2011-2036*. United States Department of Defense. 2011.
- [6] *Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2013-2038*. United States Department of Defense. 2013.
- [7] 钱东, 赵江, 杨芸. 军用UUV发展方向与趋势(上): 美军用无人系统发展规划分析解读 [J]. *水下无人系统学报*, 2017, 25 (02): 1-30.
- [8] 涂良辉, 曾庆云, 李来国, 等. 一种新的智能化航空器自主能力等级评估方法 [J]. *教练机*, 2013 (04): 9-13.
- [9] 钱东, 赵江, 杨芸. 军用UUV发展方向与趋势(下): 美军用无人系统发展规划分析解读 [J]. *水下无人系统学报*, 2017, 25 (03): 107-150.
- [10] Wang FeiYue. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41 (1): 1-8.
- [11] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制 [J]. *控制与决策*, 2004 (05): .
- [12] 谢东亮, 王羽. 物联网与泛在智能(1) [J]. *中兴通讯技术*, 2010, 16 (4): 52-56.
- [13] Wang F Y. The Emergence of Intelligent Enterprises: From CPS to CPSS [J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, 25 (4): 85-88.
- [14] 王飞跃. 指控5.0: 平行时代的智能指挥与控制体系 [J]. *指挥与控制学报*, 2015, 1 (01): 107-120.
- [15] 白天翔, 王帅, 沈震, 等. 平行机器人与平行无人系统: 框架、结构、过程、平台及其应用 [J]. *自动化学报*, 2017, 43 (2): 161-175.
- [16] 王飞跃, 刘德荣, 熊刚, 等. 复杂系统的平行控制理论及应用 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2012, 9 (03): 1-12.
- [17] 李力, 林懿伦, 曹东璞, 等. 平行学习: 机器学习的一个新型理论框架 [J]. *自动化学报*, 2017, 43 (1): 1-8.
- [18] L Chen, X Hu, W Tian, et al. Parallel Planning: A New Motion Planning Framework for Autonomous Driving [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2018.
- [19] 王坤峰, 鲁越, 王雨桐, 等. 平行图像: 图像生成的一个新型理论框架 [J]. *模式识别与人工智能*, 2017, 30 (7): 577-587.
- [20] 王坤峰, 苟超, 王飞跃. 平行视觉: 基于ACP的智能视觉计算方法 [J]. *自动化学报*, 2016, 42 (10): 1490-1500.
- [21] 张皓. 四轮移动机器人机动性研究 [D]. 合肥: 安徽工程大学, 2017.

作者简介:

陈龙(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为自动驾驶、机器人技术和人工智能。

宇文旋(1990-), 男, 研究生, 主要研究方向为机器视觉、无人驾驶、人工智能。

曹东璞(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为车辆动力学、控制和人工智能领域。

李力(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为人工智能和机器学习、智能交通系统和智能汽车。

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。



微小型飞行器发展现状及关键技术浅析

陈世适¹, 姜臻¹, 董晓飞¹, 周兵¹, 姜鹏¹, 宋斌²

(1.北京机电工程研究所, 北京 100074; 2.中国航天科工集团第三研究院, 北京 100074)

摘要: 本文首先介绍了微小型飞行器的分类, 并从三个角度介绍微小型飞行器国外发展现状及趋势; 随后对低雷诺数空气动力学、动力装置与能源、抗干扰稳定与群组协同等7项关键技术进行提炼与浅析; 最后总结了微小型飞行器与相关技术的促进关系, 展望了未来微小型飞行器多样化、仿生化、集群化、智能化的发展方向及其应用。

关键词: 微小型飞行器; 关键技术; 发展方向

中图分类号: V278 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 01-0038-16

Overview of Micro Aerial Vehicles and Its Key Technologies

CHEN Shishi¹, JIANG Zhen¹, DONG Xiaofei¹, ZHOU Bing¹, JIANG Peng¹, SONG Bin²

(1. Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China;

2. The Third Institute of China Aerospace Science & Industry Corp, Beijing 100074, China)

Abstract: The categories of Micro Aerial Vehicles (MAVs) and their state-of-the-art abroad are first briefly introduced, and then followed by seven key technologies such as low Reynolds number aerodynamics, energy and power equipment, anti-jamming stability, group collaboration and etc. The facilitating relationships between MAVs and their key technologies are finally summarized, and the development of diversification, biomimetic, cluster and intelligence of MAVs are prospected as well.

Keywords: Micro Aerial Vehicles; Key Technologies; Development Trend

收稿日期: 2018-03-12; 修回日期: 2018-04-22

1 概述

微型飞行器(Micro Aerial Vehicle, MAV)是一个包含多种交叉学科的高、精、尖技术,其研究水平在一定程度上可以反映出—个国家的科技水平。由于微型飞行器在现代军事和民用方面应用的巨大优势,得到了世界各国的极大关注和高度重视,成为当今先进国家竞相研究的科技前沿课题。目前微型飞行器的研究还处于初级发展阶段,特别是厘米级微型飞行器的研究与设计,距离真正小巧化和实用化还有很大差距,但是微型飞行器的诱人应用前景和使用价值决定了它未来广阔的发展空间。微型飞行器的研制不仅是对其本身涉及问题的解决,更重要的是,微型飞行器涉及的关键技术问题的提出和解决将有力地带动和促进相关技术领域的巨大发展。以微机械电子系统(Micro Electro-Mechanical System, MEMS)技术为基础的各种微型器件及系统的研究与设计近年来在国际上非常活跃,各种微型飞行器相关的微型器件及系统的研究与设计以及微型飞行器的研制都属于其中重要的内容。另外分布式远程打击、大规模集群作战有着巨大优势,利用智能控制实现群体能力的无限扩展,将作战要素分布化,以低成本的个体组成强大的作战群体,可以解决由于敌高价值时敏目标不断提高机动及隐身能力,以及防御系统不断升级导致的传统武器装备执行探测及打击任务效费比不高的问题。因此,对于我国而言,微型飞行器技术的研究有着深远的战略意义,需要紧跟技术发展前沿,充分发挥微型飞行器的优势,更多更广泛地应用于军事及民用领域。

2 微型飞行器分类

自20世纪90年代开始,国内外各大科研机构广泛开展了对微型飞行器本体及其子系统的研究和开发,并研制了一系列原理性样机^[1]。至今有关小型飞行器与微型飞行器的具体划分仍不

明确,可按照美国国防预研局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)对微型飞行器所提出的尺寸与质量设计要求进行划分,即最大尺寸15cm,最大质量100g;另外国际上比较流行的分类方法为按照飞行模式和总体结构布局方案进行划分:微型固定翼飞行器、微型旋翼飞行器、微型扑翼飞行器三大类型^[2]。

2.1 微型固定翼飞行器

微型飞行器最初的设计是从固定翼式开始研究^[3]。微型固定翼飞行器的主要特点是飞行速度快,负载能力大,设计结构相对简单,巡航作战半径大;但由于有最小速度限制,因而机动灵活性差,起飞和降落比较困难。

典型代表为美国AeroVironment公司的Black Widow、美国Sanders公司的Micro Star、美国斯坦福大学林肯实验室的侦察鸟、海军MLB公司的Trochoid等^[4, 5]。



图1 微型固定翼飞行器典型代表: Black Widow (左上); Micro Star (右上); 侦察鸟 (左下); Trochoid (右下)

2.2 微型旋翼飞行器

微型旋翼飞行器与微型固定翼飞行器相比,其最大的优点是:能够实现垂直起降和空中悬停,在比较狭小的空间或复杂地形的地区进行快速机动。根据旋翼式升力系统的特点,其旋翼结构布局有单旋翼式、双旋翼垂直分布式、四旋翼水平分布式等型式。四旋翼式的飞行器因其结

构布局新颖、飞行方式独特引起了各国微小型飞行器研究人员的广泛关注。

典型代表为美国Lutronix公司的Kolibri、德国IMM公司的微型直升机、美国斯坦福大学的Mesicopter等。

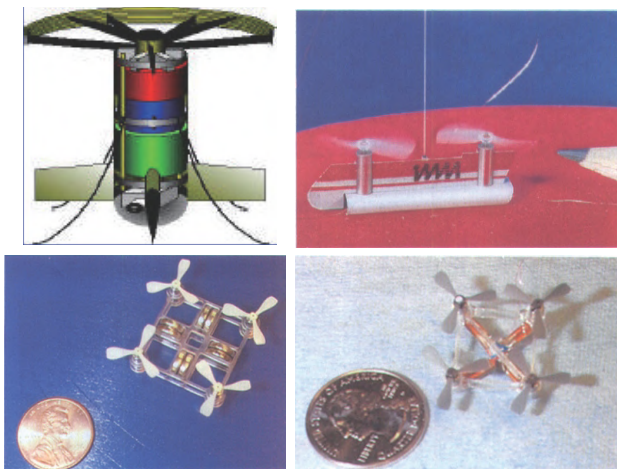


图2 微小型旋翼飞行器典型代表：Kolibri（左上）；IMM微型直升机（右上）；Mesicopter（左下与右下）

2.3 微小型扑翼飞行器

微小型扑翼飞行器是一种全新的飞行器结构设计，因其机械扑动很容易产生疲劳断裂，目前只适用于微小型飞行器的设计。与前两种结构微小型飞行器相比，微小型扑翼飞行器因其质量轻、体积小、噪音弱、隐蔽性能好等特点，既可以实现如同微小型旋翼飞行器的垂直起降、空中悬停、倒飞、侧飞，还可以像微小型固定翼飞行器那样

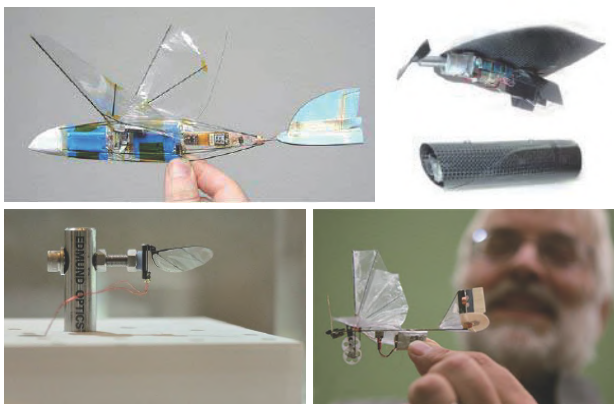


图3 微小型扑翼飞行器典型代表：Micro Bat（左上）；柔性翼（右上）；RoboBee（左下）；DelFly Explorer（右下）

实现快速高飞、长距离巡航等，是目前微小型飞行器的研究热点。

典型代表为美国加州理工学院的Micro Bat、美国佛罗里达大学的柔性翼微小型飞行器、美国哈佛大学的RoboBee、荷兰戴夫特技术大学的DelFly Explorer等。

3 国外微小型飞行器发展现状

目前，微小型飞行器主要朝着两个不同目的的方向发展，即研究性与实用性。

3.1 研究性微小型飞行器

研究性微小型飞行器主要以大学和科研机构为研究力量，仍然追寻DARPA于1996年讨论的“15cm尺寸”目标，并研制出各种各样探索性的微小型飞行器。但目前这些探索性微小型飞行器多数仅限于飞行表演与技术摸索，携带设备载荷的能力很低，甚至不携带任务载荷，同时需要人为遥控进行稳定飞行。近几年，已有研究机构成功研制出尺寸略大，但具有一定自主飞行控制与导航能力的智能微小型飞行器，如荷兰代尔夫特技术大学已研制出新型的28cm微小型扑翼飞行器DelFly Explorer，并实现自行起飞和室内自主避障飞行；美国伊利诺伊大学香槟分校航空机器人与控制实验室最近也研制出世界上最先进的仿蝙蝠扑翼无人机Bat Bot，其内部搭载微处理器与6自由



图4 具备自主飞行能力的微小型扑翼飞行器：DelFly Explorer（左上）；Bat Bot（右上）；FESTO公司的仿生鸟（左下）与仿生蝴蝶（右下）

度惯性测量单元实现自主飞行；德国FESTO公司也研制出多种仿生微小型扑翼飞行器，包括仿生鸟、仿生蝴蝶与仿生蜻蜓，它们除了能够实现单个飞行器自主飞行外，还能进行自主协同编队飞行。

此外，近几年仍有一大批高校科研人员努力探索，寻找新的突破口，成功研制出蜜蜂、苍蝇大小的超微型飞行器，如美国加州大学伯克利分校研制出25mm大的微机械飞行昆虫(Micromechanical Flying Insect)、宾夕法尼亚大学研制出硬币大小的Piccolissimo 3D打印超微型旋翼飞行器、哈佛大学研制出30mm大的RoboBee仿生蜜蜂机器人，但是目前它们只能无控制地“飞行”一小段距离或悬停很短时间。未来对研究者的最大挑战是如何通过集成微处理器和高能量密度轻型电池使得超微型飞行器更加自动化同时实现更长续航。

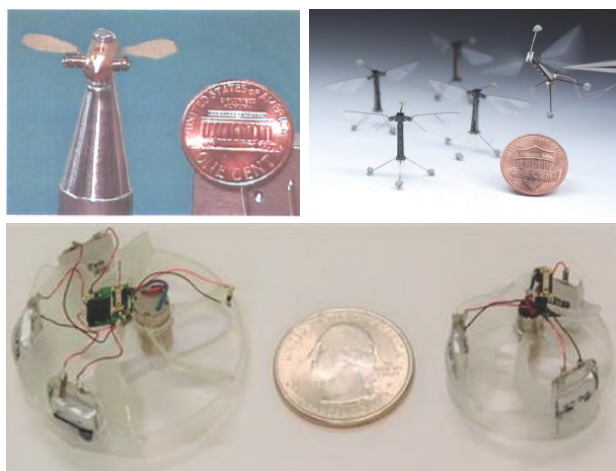


图5 超微型飞行器：微机械飞行昆虫（左上）；RoboBee仿生蜜蜂机器人（右上）；Piccolissimo 3D打印旋翼飞行器（下）

3.2 实用性微小型飞行器

除了上述探索性微小型飞行器的研究外，另一类是实用性微小型飞行器的发展。早期DARPA和美国军方同时把注意力投向军事实用性^[6]。自2001年起，美国国防部将MAV列入先期概念技术演示计划。由于军事上需求较迫切，2006年，在众多探索性微小型飞行器中，美国DARPA和军方选择一些实用可行性更大、但尺寸也更大的微小型飞行器作为微小型空中侦察装备，进入演示验

证和战场上试用。

美国AeroVironment公司成功研制了黄蜂系列(WASP)微小型飞行器，其中WASP I型翼展为330mm，WASP II型翼展为410mm。WASP I型由于采用了新的多功能结构电池，电池和机翼结构融为一体，在未装自动控制和任务设备情况下(170g)，遥控持续飞行1h47min，创造了当时MAV的飞行记录。该公司还研制了由燃料电池驱动的大黄蜂(Hornet)微小型飞行器，翼展为380mm。2006年12月，美国空军和海军陆战队选择美国AeroVironment公司研制的黄蜂系列微型无人机中较大尺寸的WASP II型(质量为273g)和WASP III型(质量为430g)，计划作为美国战场空中目标侦察系统进行研制。



图6 黄蜂(WASP) MAV(左)和大黄蜂(Hornet) MAV(右)

美国霍尼韦尔公司为DARPA研制了一种与之前的微小型飞行器完全不同的涵道风扇式MAV，涵道直径为330mm，高约为600mm，质量约为8kg，由于采用多油箱汽油发动机驱动，承重大，并且可长时间悬停。2006年，DARPA将其正式列入军事用途的先期概念技术验证计划。同年，该型MAV被部署到伊拉克进行试用，用于从空中识别临时爆炸装置(IED)。相类似的微小型涵道风扇式飞行器还有美国Allied Aerospace公司研制的iSTAR、美国西科斯基飞行器公司研制的Cypher、法国伯蒂技术公司研制的Hovereye等。

除了上述用目标侦察与信息感知功能的实用性微小型飞行器外，近几年美国DARPA与军方也致力于微小型精确打击武器的研究，主要包括微小型精确制导枪弹与导弹，例如美国雷声公司研制的40mm直径长矛导弹^[7]、美国海军空战中心研制的56mm直径的长钉导弹、美国桑迪亚国家实验



图7 微小型涵道风扇式飞行器：霍尼韦尔公司研制的MAV（左上）；iSTAR（右上）；Cypher（左下）；Hovereye（右下）



图8 长矛微型导弹（左上、右上）与长钉微型导弹（左下）以及微型制导导弹（右下）

室研制的12.7mm激光制导枪弹、美国特里蒂尼科学与成像公司研制的12.7mm光学制导枪弹。

3.3 微小型飞行器集群编队技术发展

随着微小型飞行器单机功能逐步趋向成熟，以及自主集群飞行技术的发展，集群协同编队成为了微小型飞行器新兴的研究方向之一。目前已有多家单位实现了多旋翼微小型无人机集群编队的实际飞行技术验证，例如美国宾夕法尼亚大学GRASP实验室研制的飞行机器人通过协同编队实现货物搬运、精细农作、仪器检修、乐器表演等功能；英特尔娱乐无人机业务部门采用500架微型旋翼无人机完成了灯光秀表演。

近几年，美军也在推进微小型飞行器从单机功能拓展向更复杂的集群协同作战的方向发展。

微小型无人机编队或集群可以将单个完备作战平台所具备的各项功能分散到大量低成本、功能单一的作战平台中，通过大量异构、异型的个体来实现原本复杂的系统功能，系统的倍增效益将使无人机集群具备远超单一平台的作战能力。

2016年5月，美国空军正式提出《2016—2036年小型无人机系统飞行规划》，希望构建横跨航空、太空、网空三大作战疆域的小型无人机系统。基于无人自主技术，美军提出了利用微小型无人机集群作战的模式，以降低作战成本，提升作战行动的灵活性。典型项目有DARPA的小精灵无人机，计划研制一种部分可回收的侦察和电子战无人机集群，从敌方防御范围外的大型飞机（轰炸机、运输机、战斗机等平台）上投放，利用无线网络实现通信与协同，通过影响导弹防御、通信与内部安全，甚至利用电脑病毒袭击敌方数据网络等方式压制敌方。同时，美国海军研制出一种



图9 美国宾夕法尼亚大学研制的无人机进行协同编队飞行（左）；英特尔公司采用500架无人机编队组成的复杂灯光图案（右）



图10 无人机编队协同作战构想图（左上）；采用轰炸机投放大量小精灵无人机（右上）；折叠展开后的蝉微小型无人机（左下）；筒式发射的北美狼袖珍无人机（右下）



图11 灰山鹑微小型无人机(左); F/A-18F战斗机投放灰山鹑(中); 地面站显示正在执行任务的灰山鹑无人机集群(右)

可用于集群作战的蝉微小型无人机, 并进行了飞行试验。美国海军希望未来可实现在25min内投放成千上万架蝉微小型无人机, 覆盖4800km²的区域。此外, 美国海军还在低成本无人机群技术(LOCUST)项目下开展了相关技术研究, 利用小型筒式发射北美狼袖珍无人机组成机群压制对手。

2016年10月, 美军在加利福尼亚州中国湖试验场进行了规模最大的一次无人机蜂群飞行演示, 3架F/A-18F超级大黄蜂战斗机在马赫数0.6的速度下, 利用外挂的投放装置连续投放103架灰山鹑微小型无人机。这些无人机未进行预编程, 但机间可以互通, 且“共享一个分布式大脑”, 同时蜂群还与多个地面站通信, 展现出集体决策、自修正和自适应编队飞行能力, 自组织完成了地面站设定的4项任务。该项目完美诠释了无人机集群的三大特点: 无中心化、自主化、自治化。

4 微小型飞行器关键技术

从微小型飞行器的研究现状来看, 虽然已经取得了相当的技术成果, 积累了一定的经验, 但是总的来说, 微小型飞行器还处于试验阶段, 离实用化还有一定的差距, 其发展面临着来自诸多技术领域的严峻挑战^[8]。

4.1 低雷诺数下的空气动力学分析技术

4.1.1 低雷诺数空气动力学不利影响特性消除技术

相比于常规大型飞行器, 微小型飞行器的空气动力学特性有较大不同。常规大型飞机的雷诺

数很大, 约为 $10^6 \sim 10^8$ 左右, 空气的粘性效应可以忽略。而微小型飞行器由于尺寸微小, 飞行速度较低, 所以雷诺数很小, 通常在 $10^4 \sim 10^5$ 左右。低雷诺数下, 空气的粘性效应显著, 导致一些不利影响, 主要表现为阻力增大, 升阻比减小。Muller的研究表明当雷诺数低于105后, 升阻比将迅速恶化, 如图12所示。

微小型飞行器的升力系数随攻角呈显著的非线性变化, 有时气动力和力矩甚至出现“滞回”

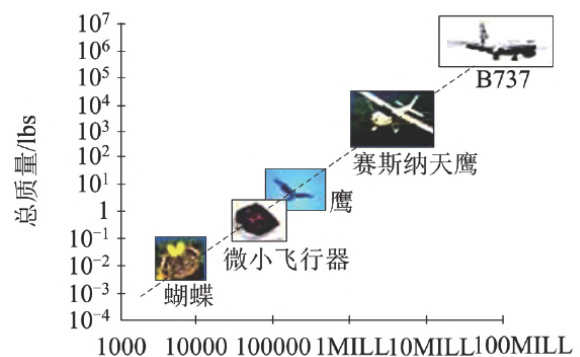


图12 微小型飞行器、常规飞机、鸟与昆虫的飞行雷诺数

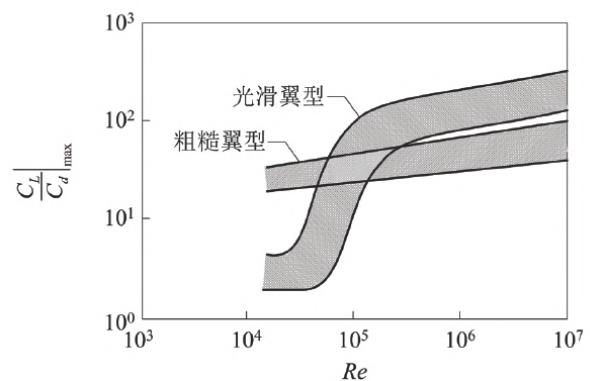


图13 最大升阻比和雷诺数的关系

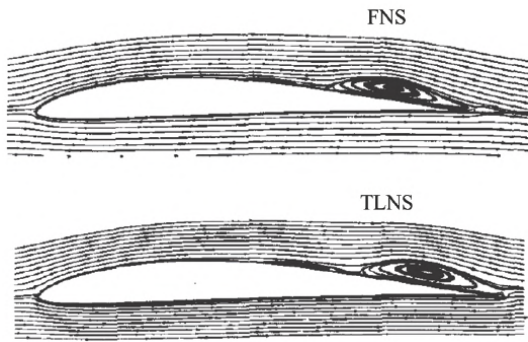


图 14 绕Eppler387翼型层流FNS和TLNS计算的翼型后缘分离泡

现象。微小型飞行器机翼上的附面层对迎角变化异常敏感，飞行器姿态的微小变化很可能导致机翼附面层分离，形成层流分离泡，如图 14 所示，使机翼气动特性变坏。另外，微小型飞行器的飞行速度和风速处于同一量级水平，风速的变化会造成雷诺数的剧烈波动，使按常规理念设计的飞行器气动性能、稳定性和操控性特性急剧恶化。

除了低雷诺数以外，非定常空气动力学也是微小型飞行器特殊的基础问题。鸟类扑翼飞行与昆虫扑动飞行过程中存在明显的低雷诺数非定常空气动力学问题，其为完全不同于目前飞机飞行的新概念空气动力学。斯特鲁哈尔数 (St 数, Strouhal) 为常被用来表示扑翼飞行上的非定常气动特征^[11],

$$St = fh/U \quad (1)$$

其中 f 为扑动频率, h 为扑动最高点到最低点的距离, U 为来流速度 (飞行速度)。 St 数定义了扑动速度相对于来流速度的大小。较大的 St 意味着扑翼大幅度高频扑动, 来流速度相对较小; 反之扑翼小幅度低频扑动, 来流速度相对较大时, St 较小。

科学家通过自由飞试验、模型风洞试验以及数值模拟技术, 对昆虫、鸟等的扑翼飞行问题进行了大量研究, 提出了扑翼低雷诺数下获得高升力的多种非定常飞行机制, 分别是 Wagner 效应、Weis-Fogh 效应、延迟失速效应、Kramer 效应、尾迹捕获效应和附加质量效应。有人曾想把研究固定翼的非定常流动理论运用于扑翼, 该理论假设机翼表面和尾流区的涡无限薄, 但这一假设对低雷诺数、粘性影响大和大幅度的扑翼非定常运动

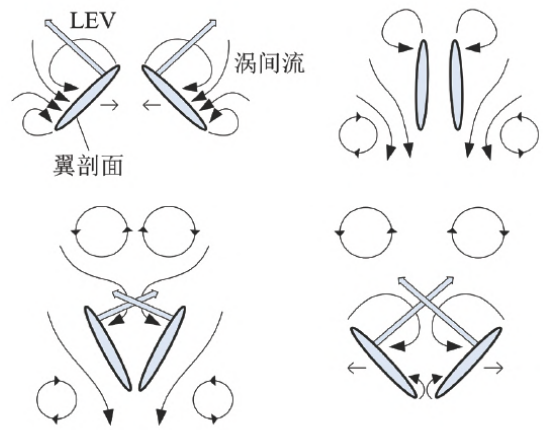


图 15 Weis-Fogh 效应机制示意图

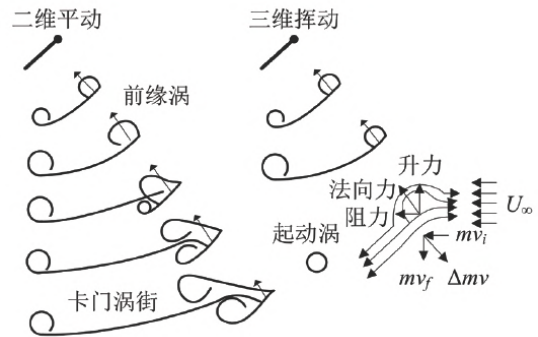


图 16 2D与3D延迟失速现象

并不适用。

近几年, 已有部分在低雷诺数下提升微小型飞行器升阻比的研究取得初步进展, 如优化气动外形和机翼形状, 采用各种有效的增升、减阻措施; 利用非定常外部激励效应 (如扰流片、吹吸气、动壁效应等); 采用仿生运动学方法等。但是总体而言, 相关研究仍处在探索试验阶段, 并未形成成熟的系统理论用于设计指导, 距离完全弄清楚低雷诺数非定常气动特性、稳定性和控制性能, 实现工程实用化还需要较长的时间。

4.1.2 低雷诺数空气动力学数值分析与风洞试验技术

针对微小型飞行器低雷诺数流动特点, 自 20 世纪 90 年代, 气动设计人员在低雷诺数计算分析和试验验证方法上开展了持续而深入研究。由于传统的定常可压缩 N-S 方程的数值方法用于不可压、低马赫数或低雷诺数流场时会面临收敛速度

慢、不稳定和精度低的所谓“刚性”问题。引起这一问题的根本原因在于低速时控制方程系统矩阵特征值对应的特征波速相差太大^[11]。比如，定义为最大特征值与最小特征值之比的条件数 CN ，

$$CN = \frac{\mu + C}{\mu} = 1 + \frac{1}{Ma} \quad (2)$$

其中 C 为声速、 μ 为对流速度。随着马赫数的减小， CN 数将越来越大，导致流场计算收敛越来越困难，甚至无法计算。目前主要的措施是通过时间导数预处理方法，对可压缩N-S控制方程时间导数的预处理，使方程系数矩阵的特征值保持在同一量级而不至于相差太大，解决了低速时系数矩阵的刚性问题，使得传统的可压缩流方法能够拓展用于求解微小型飞行器的低速低雷诺数/不可压流场。但是以往计算流体力学的研究主要集中在常规飞行器的定常流场计算，非定常流场的计算研究刚刚逐步兴起。但针对低雷诺数非定常流的研究仍然不够深入和全面。在离散格式、求解精度、动态网格处理、湍流模型等方面，低雷诺数非定常空气动力学的计算方法研究仍面临不小的挑战。

除了理论或数值计算方法以外，风洞试验方法也是一种有效、高精度的微小型飞行器气动特性分析手段，尤其是低雷诺数扑翼微型飞行器，其非定常气流分离情况复杂而不稳定，通过风洞试验才能最终确定低雷诺数微型飞行器的气动特性和最终选择。由于当雷诺数很低时物面边界层对来流湍流度十分敏感，为了研究低雷诺数微小型飞行器气动特性，需研制专用的低湍流度风洞。同时，由于微小型飞行器的气动力较小，针对微小型飞行器风洞试验的微型天平、测压仪器和外部流场显示设备也需同步研制，为准确分析微小型飞行器低雷诺数与非定常气动特性提供强有力的保障，见图17。

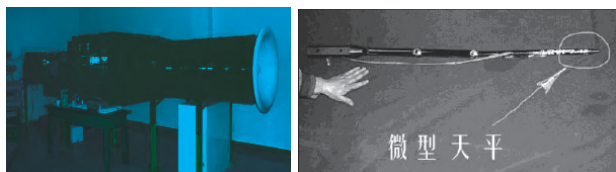


图17 微小型飞行器专用风洞与微型天平

4.2 微小型动力装置和能源技术

微小型飞行器对其动力和能源系统的主要要求是：质量轻、体积小；能量和功率密度高，可以为飞行器提供足够的动力；振动小，不干扰任务设备正常工作；噪音小，以保证飞行器的隐蔽性；动力系统应易于启动，可靠性高^[12]。从统计数据来看，微小型飞行器质量分布中最大的一部分就是动力系统，约占48%左右。动力和能源系统尺寸和质量较大、效率较低是限制微小型飞行器尺寸和质量难以缩减、性能难以提升的重要方面。

现有微小型飞行器形式主要有固定翼飞行器、旋翼飞行器和扑翼飞行器。根据不同类型飞行器的动力需求，可以采用多种类型的能量来源、动力装置和执行装置，如图18所示。

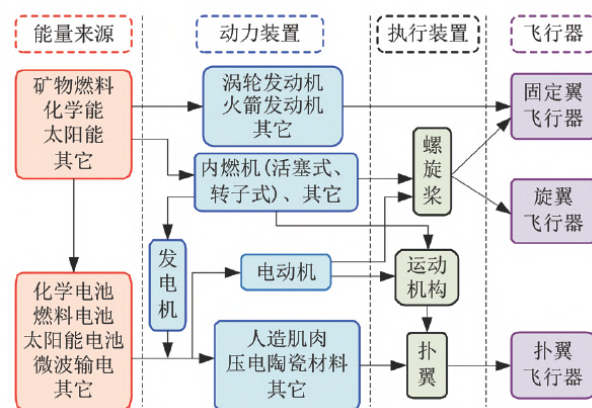


图18 微小型飞行器动力能源装置

微小型飞行器的动力装置主要有微小型内燃发动机、微小型涡轮喷气发动机、微小型电动机、微小型火箭发动机等。微小型内燃发动机和微小型涡轮喷气发动机都具有结构复杂、精度高、制造难度大、不易微型化的特点，一般用于稍大一点的微小型飞行器上，但目前微型内燃机的效率还比较低，热效率只有5%左右，功率密度不过1W/g，燃料消耗量大约0.3~0.5g/W·h，而且还存在难以节流、噪音大、可靠性低等问题。微小型电动机与微小型火箭发动机则结构简单、易于制造、较易实现微型化，一般用于尺寸更小的微小型飞行器上。但是微小型电动机具有重复多次使用



图19 D-STAR公司的微型内燃机(左)与斯坦福大学的微型涡轮发动机(右)

的特点,适用的范围与领域更加广泛,而微型火箭发动机仅能单次使用,多数用于微型打击武器上。此外,往复化学肌肉、电致伸缩人造肌肉、弹性动力和热电力新技术目前也在研究中^[13]。

作为动力装置的能量来源,微型飞行器对动力能源的要求是能量密度高、体积小、质量轻、总能量大,以保证微型飞行器的飞行速度和续航时间。现在微型飞行器的能源主要有:矿物燃料、电池能源和太阳能等。矿物燃料能量密度高,价格便宜,但存储较困难。电能源是微型飞行器上必不可少的能源。除了推进系统的微电动机,微型飞行器上的控制系统、信息传输系统都需要电能驱动。微型飞行器上常用的电能源有蓄电池、一次性化学电池和燃料电池,其中锂离子电池为目前微型飞行器最常用的电能源,但锂离子电磁的能量密度大约只有 $0.2\sim 0.3\text{W}\cdot\text{h/g}$,部分采用锂离子电池作为电源的MAV型号如表1所示。总体而言,在整个微型飞行器重量中电池部分所占比例很大(约 $30\%\sim 60\%$),若采用固态氧化物燃料电池,其能量密度可比普通电池大约高出 $2\sim 4$ 倍,但总能量和能量释放率也仍有待提高。

由于太阳能电池能量转换效率低且微型飞

行器表面积不大,因此能够提供电能有限,通常将其作为辅助电源,一般是将太阳能电池膜覆盖在机翼表面上以节省内部空间,同时能够最大程度降低对飞行器气动外形的影响。

此外,关于微型飞行器电能源的供应管理和节能问题目前仍有待深入研究。

4.3 抗干扰稳定技术

微型飞行器由于尺寸小、飞行速度低、质量和转动惯量都很小,导致其抵抗空气扰动的能力很弱。

无人机常规的比例-积分-微分(PID)控制方法已不适用,必须根据不同的微型飞行器类型、甚至不同的特定MAV对象,来建立智能飞行控制方法。常见的一种微型飞行器稳定控制方法——在线神经网络动态逆自适应控制方法(如图20所示)。

表1 以锂离子电池为动力的MAV基本情况

型号	研究单位	总重 /g	电池 /g	电池比例 /%	功率 /W	飞行时间 /min
Microstar	Lockheed-sanders	100	44.5	44.5	15	20~60
Wasp-1*	aerovirement	171	98*	57.3	-	107
Wasp-2*	aerovirement	170	97*	57	7.6	126
Black widow	aerovirement	42	26	61.9	8	30
Microbat	aerovirement	22	8	36.4	-	-
CN-7	南京航空航天大学	160	50	31.25	15	30~40
近程无人侦察机系统飞行平台	洪都航空科技公司	3300	1800	54.55	300	30

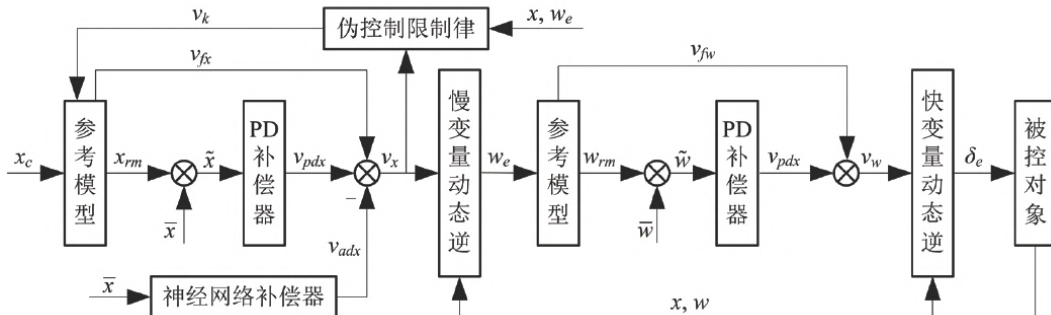


图20 在线神经网络的自适应控制系统结构

另有基于自适应逆的MAV飞行控制系统，如下图所示。控制器主要由动态逆控制器、PD补偿器、神经网络补偿器和伪控制补偿器四部分组成。动态逆控制器把伪控制信号转化为期望控制量；神经网络补偿器补偿由于模型不精确引起的逆误差；伪控制补偿器将作动器特性引起的伪控制误差引入到参考模型中，消除作动器饱和和对自适应单元的影响。

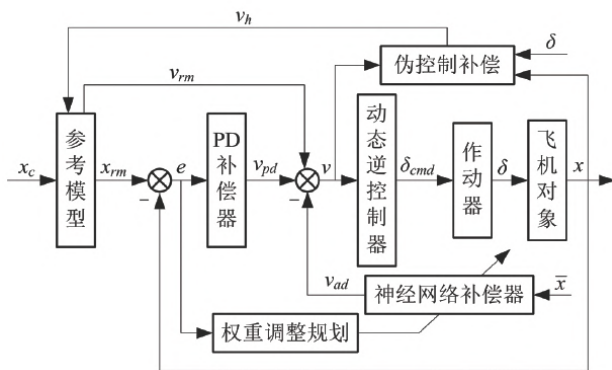


图 21 基于自适应逆的MAV控制系统结构图

图 21 中：参考模型取为一阶系统 $x_{rm} = v_{rm} - v_n$ ，其中 $v_{rm} = f_{rm}(x_{rm}, x_c)$ ； x_c 为外部命令信号； x_{rm} 为参考模型输出的期望系统响应； x 为系统状态量； e 为指令跟踪误差； v_{rm} 为参考模型输出的伪控制信号； v_{pd} 为 PD 补偿器输出信号； v_{ad} 为自适应神经网络补偿器输出信号， v_h 为伪控制补偿信号； v 为总的伪控制量； δ_{cmd} 为期望控制量； δ 为实际控制量； $\bar{x} = [1, e, x_{rm}, v_{rm}, v_{ad}, \|Z\|]$ ，为在线神经网络的输入，其中 Z 为神经网络权矩阵。神经网络补偿器不需要进行离线训练，它通过权值和阈值的实时更新来保证网络的逼近性能和在线实时控制的特性。最终可求得如下期望的控制量。

$$X = g^{-1}(X) \begin{pmatrix} \alpha_{rm} \\ \beta_{rm} \\ \mu_{rm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{\alpha}(X) \\ f_{\beta}(X) \\ f_{\mu}(X) \end{pmatrix} \quad (3)$$

另外一些比较有价值的研究方向有在飞行器表面分布微气囊或微小型固体火箭发动机阵列进行微喷流干扰控制，或者采用柔性翼智能自适应外形进行气流控制等^[15]。

4.4 自主导航与避障技术

微小型飞行器所设定的一些任务模式决定它常常需要在操纵者的视线之外飞行，这就意味着微小型飞行器必须具备自主式的导航系统^[16]。该系统的研制难度极高，一方面控制导航系统的复杂程度很高，另一方面又要求它们的体积和质量要尽量小以不影响飞行器正常飞行。

光流避障技术是近几年研究较多的避障方法，本文就其中之一的技术难点——基于光流的深度估计算法浅述其基本原理。

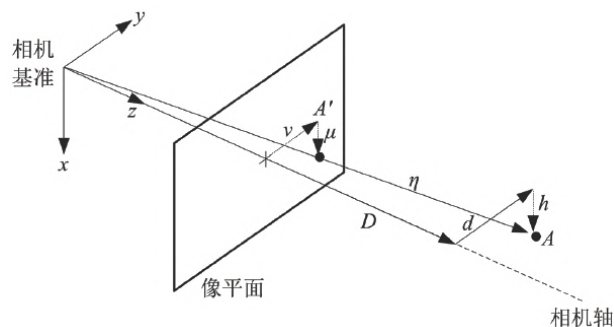


图 22 针孔成像示意图

4.4.1 光流大小与深度关系数学建模

经推导可得 $\frac{\dot{v}}{v} = -\frac{\dot{D}}{D} = \frac{1}{t} = \eta$ ，其中 v 是成像点与 FOE 的距离， \dot{v} 是光流大小， \dot{D} 是相机前进速度， D 是相机与障碍物绝对深度， η 相对深度， t 为相机按照现在状态飞行多久便碰撞障碍物。

4.4.2 图像膨胀中心 (FOE) 估计

图像膨胀中心 (FOE) 并不一定在图像的中心，实现 FOE 估计首先提取 Harris 角点，估计角点稀疏光流（好处在于角点处的光流提取精度较高），然后检测图像中每行每列光流正负跳变点，加以平均得出 FOE。

如图 23 所示，FOE 是图像中光流变化的发生源；箭头标识光流。

图像角点检测目的在于检测图像中纹理性强的区域，这类区域通常存在于边缘交界处、被遮挡的边缘和纹理性很强的图像内部区域等。这些区域由于在图像信息匹配时提供的信息可分辨性较强，匹配比较容易。相比一些无纹理特征的区域

域，即高频信息很弱的区域，角点区域的图像匹配能力明显更强。

在摄像机沿光轴运动的情况下，FOE点处没有光流，而其周围点光流方向都是向外扩散的，且距离FOE点越远光流值越大。理论上来说，所有光流向量所在的直线都经过FOE，因此，它可

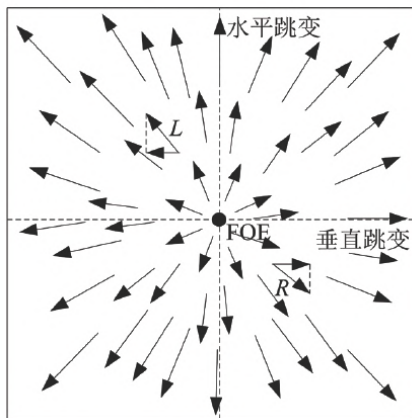


图 23 FOE与光流的关系

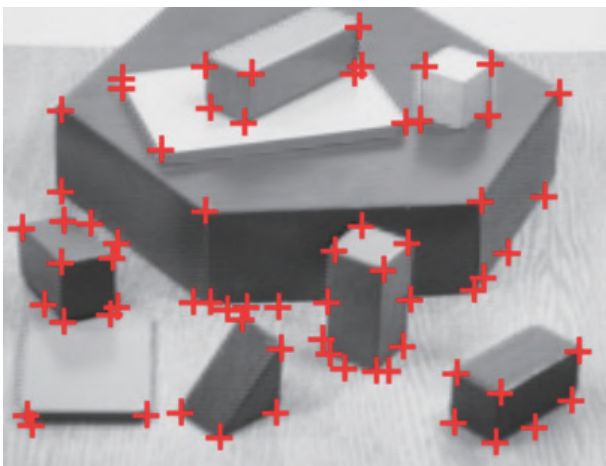


图 24 图像Harris角点检测结果（只显示邻域中的最强响应）



图 25 Harris特征点检测结果（角点检测响应值 r ）

通过求两条光流向量所在直线的交点确定。但任何微小的扰动都可能导致测量错误，所以，由所有角点的光流方向共同确定的FOE 更为准确。对于FOE左侧的点，光流矢量的水平分量指向左侧，对于FOE右侧的点，光流的水平分量指向右侧，在FOE所在的垂直直线上，光流的水平分量会有正负值之间的跳变，称为水平跳变。同理，FOE所在水平直线上存在垂直跳变，可以利用两条直线的交点求取FOE。实际场景中存在噪声，所有的跳变点不一定均分布同一直线上，可分别记录水平和垂直方向的跳变点坐标，对于同时产生水平、垂直跳变的坐标求平均值作为实际FOE。实际场景中求得的FOE如下图所示，其中，FOE以圆圈标识，为了更清晰地显示光流矢量的特征，将光流大小放大了3倍显示。

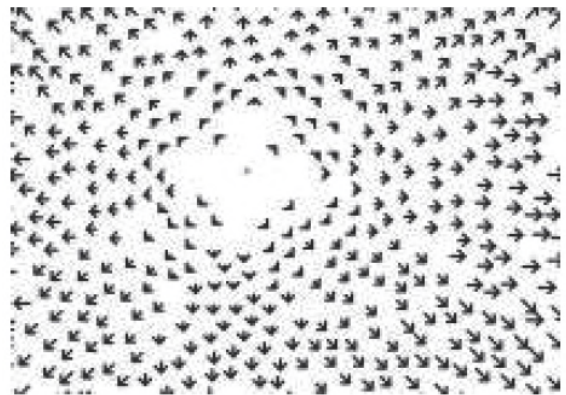


图 26 实际场景中的FOE

4.5 光电传感与图像传输技术

微小型飞行器最常用的功能是作为侦察监测工具，其情报信息是探测系统通过光电信号提供的，光电传感器可提供完整的实时图像情报信息。能够在复杂的飞行环境中实现高质量的图像探测与识别将是微小型飞行器满足未来信息战的一项关键技术。

由于微型飞行器体积小，严重限制了任务载荷容量，因而对于小体积的微型飞行器，光电类任务载荷一般采用与飞行器捷联固定方式，这就要求成像器具有宽成像视场（数十度）、较高的图像分辨率（ 1024×1024 或更高），以实现较大范

围内的成像覆盖和高分辨成像能力。而且，在低速飞行状态时，气流扰动、振动和MAV机体机动，对摄像质量会有影响，需适当采取减振和稳像处理，并采用动态性能好的图像传感器以提高成像质量。

目前微型光电类任务载荷主要采用CCD和CMOS两种传感器作为光电转换器件。与CCD相比，CMOS图像传感器实现了光敏组件阵列、图像信号放大器、信号读取电路、模数转换电路、图像信号处理器的高度集成，并具有体积小、低功耗、宽动态范围、外围电路简单等特点，是适用于微型飞行器的一种微型摄像机的理想途径。目前采用1/3英寸芯片的超微型摄像机可以做到13mm×13mm尺寸，质量几克，后续随着1/5、1/6英寸以及更小尺寸图像传感器芯片的应用，将会进一步缩小摄像机的体积，预计可做到现有体积的2/3以下。如图27所示，微型CMOS摄像载荷主要由以下几部分构成：光学系统、CMOS图像传感器、电源滤波电路、SCCB接口和输出接口。

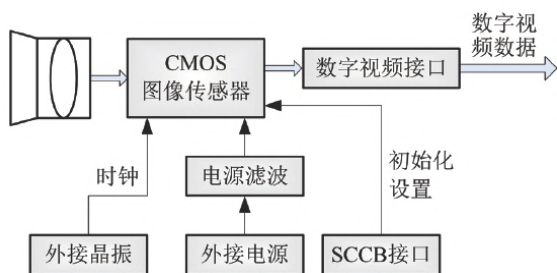


图 27 基于CMOS的微型摄像载荷原理组成框图

由于体积功耗限制，MAV上较难采用自动识别和匹配的处理方式。因此，为实现侦察监视任务，一般需要将数据记录回收或直接通过数据链路将压缩视频回传地面进行人在回路确认，后者是更利于实时侦察的方式。为了能够将探测到的图像信息实时回传至地面端的监控系统，微型飞行器需要搭载视频图像传输设备，其所消耗的电力一般占整个微型飞行器所需总电力的1/5。采用人在回路方式的系统组成原理框图如下，主要通过装备在MAV上的微型摄像载荷装置拍摄地面情况，再由视频发射机将视频信号实时发送回

地面，实现对微型飞行器飞过地区的侦察和实况监视。目前微小型飞行器的尺寸越来越小，但是传输规定带宽的视频图像的电力却不能减小。通过调节图像帧速率和采用可转向的天线，或者发展完善的数据压缩技术等方法，可以在一定程度上减少用于数据传输的电力。另外，飞行器微小化后带来发射功率的减小和器件处理能力的损失，使传输距离和传输速度都受到限制。实现图像信息的实时处理与远距离传输，并在复杂的干扰环境中有效避免图像数据丢包或者具有强大的数据纠错等功能，也将是微小型飞行器执行侦察监测任务的难点。

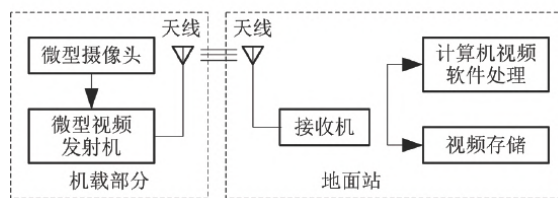


图 28 MAV光电摄像与无线传输系统原理组成框图

4.6 部件小型化及系统集成技术

微小型飞行器在尺寸上远远小于常规的飞行器，其机体容积和承载质量均十分有限，因此它可以携带的机载设备装置和有效载荷受到极大的限制。要实现微小型飞行器的进一步小型化和轻量化，必须实现微小型飞行器各部件及机载元件的微型化^[17]。

近年来，借助微纳米科技与MEMS技术的发展，微小型飞行器部件和机载元件的微型化已取得不少进展，其主要分为两类，一类是飞行控制导航所用传感器，如陀螺和加速度计、磁强计、气压计、温度传感器以及微处理计算机芯片等；另一类是对外探测传感器，如微小型可见光摄像机、热成像仪、红外探测仪、超声波测距仪、毫米波测距仪、激光测距仪等。除了传感器感知元件本身采用MEMS技术进行微型化之外，通过结构设计或加工工艺将传感器件的外围电路同样研制为芯片，甚至两者集成在单个芯片上，能够进一步提升微小型飞行器机载部件的微型化。

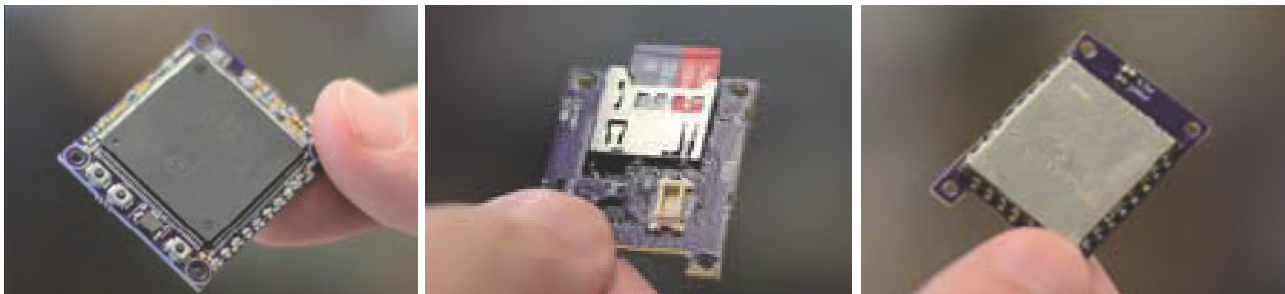


图29 微型信息处理模块、微型数据存储模块、微型惯导模块

由于微小型飞行器的体积限制，其不能像常规飞行器那样将各种部件和功能模块简单地安装在机体内。从微小型飞行器的设计要求和所需具备的功能来看，微小型飞行器应是一个各种多功能系统高度集成的复杂系统，其中包括各微小型器件的高度集成、有效载荷的高度集成和各种功能模块之间的最小限度集成等，图30所示的Kestrel TM Autopilot微型飞行控制器，集成有8位中央处理器、MEMS-IMU、静压和差压传感器、3个温度传感器、4个串行接口、4路舵机输出等，质量为17g，尺寸为51mm×35mm×12mm。

微纳米科技与MEMS技术的发展有利地推动了微小型飞行器的系统集成化与多功能化。然而，采用微纳米科技与MEMS技术本身也具有复杂性，如MEMS器件本身的微小化、跨学科、高度集成特性等所带来的设计的复杂性，以及MEMS微细加工方法会对设计本身增加新的制约等，也使微小型飞行器的设计与集成变得更加复杂。

系统的高度集成必然会存在各微小型器件或多功能模块之间的耦合以及其它相互干扰因

素，例如数据链通信系统中的高频射频信号可能对数字计算单元造成高频信号耦合干扰，大功率模拟电路中的瞬间大电流过载可能对数字电路的信号处理造成脉冲干扰。除了干扰因素之外，系统的高度集成造成的散热问题也应值得深入考虑。因此，如何克服这些难题以保证系统正常工作将是MEMS技术用于微小型飞行器所要解决的关键问题。

此外，由于系统的高度集成带来结构设计和加工工艺方面的限制，微小型器件和功能模块的精度通常较低，测量信息中有时误差比较大。通过理论研究和试验设计的方法对误差进行分析和建模，然后进一步对误差进行补偿以提高使用精度是改善微小型器件和功能模块特性的有效手段。

4.7 群组协同技术

微小型飞行器的特点决定了其自身载荷能力受限，相应的单独使用其执行任务的能力也将受到限制，因此微小型飞行器采用集群协同的方式执行任务将是未来微小型飞行器的主要使用方式，这就需要通过通讯网络将大量飞行器进行组网并协同执行任务。微小型飞行器进行组网协同主要涉及协同制导控制、载荷及数据链等关键技术。

4.7.1 协同制导控制技术

协同制导控制技术是实现微小型飞行器的协同飞行的基础技术，需要保证多个飞行器在自然和人为干扰等不确定条件下能够协同飞行，完成既定任务，如风干扰、地形障碍、通信中断等条件下机群不发生碰撞，该项技术影响任务执行能



图30 Kestrel TM Autopilot v2.22

武器装备攻击提供窗口。然而，蜂群作战对我方将带来成本问题，成百上千的个体参与战斗，若单枚的价格不能控制，那么“蜂群”就真的成为了纸上谈兵，不切实际。而降低成本的最有效手段就是批量生产，因此微小型飞行器的的发展将极大促进模块化技术的发展。微小型飞行器以模块化设计生产，实现不同功能只需换装不同的功能模块并能实现百分百兼容。另外，集群协同作战的前提就是信息共享，百量级的通信节点对未来数据链的发展提出了极高的要求，除了节点众多之外，数据传输速率更是拔高了数据链能力要求，以便蜂眼能够实时将所见共享至整个蜂群。微小型飞行器也亟需低功耗元器件、高能量密度电池等技术的支持，飞行器的发展牵引着该类基础产业的发展。

另一方面，现有技术的发展也对微小型飞行器的发展路线有着巨大的影响。当下虚拟现实技术（VR技术）正如火如荼的发展，可以想象未来微小型飞行器运用该技术可以更好的诱骗敌方防空系统，蜂群虚拟出来的场景可让敌防空导弹彻底迷失。

5.2 微小型飞行器可期的发展方向

（1）实用化是微小型飞行器发展的最终目标。目前，由于微小型飞行器的续航时间、抗风能力、协同通信等问题尚未得到很好解决，其离真正的实用化还有相当距离。从目前的研究基础看，固定翼微小型飞行器的技术在未来几年可望率先发展成熟；

（2）飞行器的大小和飞行性能与鸟类、昆虫相当，随着技术的不断发展成熟，仿照自然界生物的飞行方式，微型扑翼飞行器的研究可望成为最大的热点。另外，随着低雷诺数气动机理研究的进展，会有更有效的升力产生机制和气动布局，解决微小型飞行器气动效率过低的问题；

（3）智能微型飞行器是微小型飞行器发展的最高形式，代表了未来的发展趋势。目前，微小型飞行器的发展还提不到智能自主飞行的高度，绝

大部分都还局限于地面遥控飞行+自主导航方式。抗干扰稳定飞行控制技术还有待发展应用，飞行控制和导航系统还要进一步提高精度和处理能力，实现集成和微型化。但可以预见，随着这些基础技术问题的解决，智能控制、智能导航、任务规划、视觉和仿生智能等技术的充分发展和应用，各种微小型飞行器最终可望实现智能自主的飞行。

5.3 微小型飞行器的应用

未来微小型飞行器发展成熟将具有体积小、隐蔽性好、质量轻、成本低、功能强、携带方便、操作简单等突出特点。这些特点使其能够完成大型无人飞机无法执行的任务。如果在这类飞行器上配有摄像机和无线电收发装置，则完全有可能代替人完成在远距离和危险的区域中监视和跟踪任务。因此无论是在军事领域还是在民用领域，微小型飞行器都有十分诱人的应用前景。

可预见的军事应用包括：弹着点定位、战争中低空侦察（城市战中对目标持续监视）、战场评估、通信中继、信号干扰、雷达诱骗等；民用领域的应用则有：搜寻灾难幸存者、通信中继、渔业保护、农作物监测、环境保护、电力线机燃气管路巡检等。

微小型飞行器的发展还有很长的路要走，但其也拥有广阔的前景。不管是从使用价值方面考虑，还是从推动技术发展方面考虑，对于我们来说都是迫切需要开展的一项重要研究工作。■

参 考 文 献

- [1] 文苏丽, 宋怡然, 何煦虹, 等. 世界飞航导弹发展综述 [J]. 飞航导弹, 2015 (1).
- [2] 丛敏, 张婵. 国外微小型导弹发展现状 [J]. 飞航导弹, 2011 (10): 1-8.
- [3] 王立文. 空中小精灵: 微型飞行器挑战传统设计思维和战争模式 [J]. 国际航空. 2000.
- [4] McMichael JM, Francis MS. Micro air vehicles—toward a new dimension in flight. USAF, DARPA TTO document. august 7, 1997.

- [5] Grasmeyer JM, Keennom MT. Development of the black widow micro air vehicle. 2001. AIAA Paper No. 2001-0127.
- [6] 晓清. 美国微型飞行器计划进入飞行试验阶段 [J]. 国际航空, 1999 (9).
- [7] 张有. 单兵“掌中宝”: 美国“矛头”Pike微型导弹 [J]. 兵器知识, 2016 (1): 48-50.
- [8] 吴怀宇, 周兆英, 熊沈蜀, 等. 微型飞行器的研究现状及其关键技术 [J]. 武汉科技大学学报, 2000 (23).
- [9] 苑伟政, 马炳和, 毛竹群. 基于MEMS的微型飞机关键技术 [J]. 航空精密制造技术, 2000 (6).
- [10] 李锋, 白鹏, 石文, 等. 微型飞行器低雷诺数空气动力学 [J]. 力学进展, 2017, 37 (2), 257-268.
- [11] 昂海松. 微型飞行器设计导论 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.
- [12] 罗均, 蒋秦, 程维明, 等. 国际上微型飞行器研究的进展及其关键技术 [J]. 上海大学学报, 2001 (7).
- [13] 周新春, 昂海松. 微型飞行器研究进展与关键技术 [J]. 传感器与微系统, 2008 (6).
- [14] 蔡红明, 昂海松. 基于自适应逆的微型飞行器飞行控制系统 [J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43 (2): 137-142.
- [15] 胡宇群. 微型飞行器中的若干动力学问题研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学. 2002.
- [16] Bellingham J, Tillerson M, Richards A, How J.P. Multi-task allocation and path planning for cooperative UAVs. Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms. Denver, CO, 2003, 23-41.
- [17] Ho CM, Tai YC. Micro-electro-mechanical systems (MEMS) and fluid flows. Annual Review of Fluid Mechanics. 1998, 30, pp. 579-612.
- [18] 后德龙, 陈彬, 王青, 等. 碰撞自规避多弹分布式协同制导与控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31 (9), 1133-1142.

作者简介:

陈世适 (1987-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为飞行器总体设计。

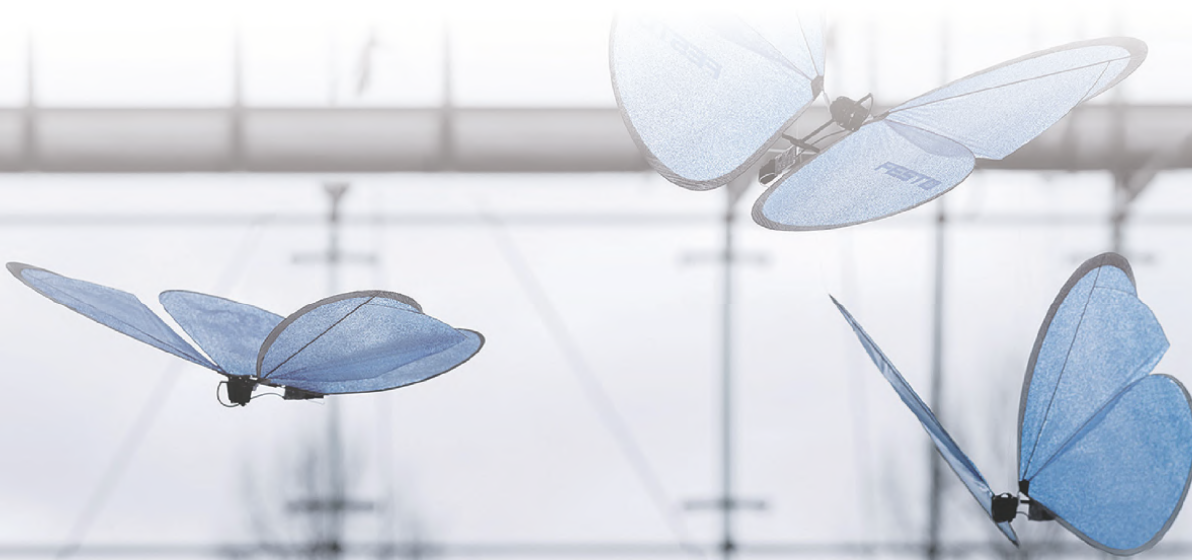
姜臻 (1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞行器设计。

董晓飞 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为多智能体控制。

周兵 (1988-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为动力工程及工程热物理。

姜鹏 (1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为激光技术、光电导引技术和目标特性。

宋斌 (1964-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。





面向空间机械臂在轨服务操作的视觉感知技术

郝颖明^{1, 2, 3}, 付双飞^{1, 2, 3}, 范晓鹏^{1, 2, 3}, 魏景阳^{1, 2, 3}, 朱枫^{1, 2, 3}

(1.中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2.中国科学院光电信息处理重点实验室, 沈阳 110016;
3.辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 沈阳 110016)

摘要: 面向空间机械手在轨服务操作, 分析了机械手操作对视觉感知技术的需求; 通过对国外典型空间在轨服务计划中空间机械手视觉系统的介绍, 给出了空间视觉感知的发展历史和趋势; 对目前各航天大国普遍关注的非合作目标视觉测量关键技术进行了综述。

关键词: 航天器; 视觉测量; 空间机械臂

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 01-0054-12

Vision Perception Technology for Space Manipulator On-Orbit Service Operations

Hao Yingming^{1, 2, 3}, Fu Shuangfei^{1, 2, 3}, Fan Xiaopeng^{1, 2, 3}, Wei Jingyang^{1, 2, 3}, Zhu Feng^{1, 2, 3}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Key Laboratory of Opto-Electronics Information Processing, CAS, Shenyang 110016, China;

3. Key Lab of Image Understanding and Computer Vision, Liaoning Province, Shenyang 110016, China)

Abstract: For the space manipulator on-orbit service operation, the requirement of manipulator operation for visual perception technology is analyzed. The development history and trend of spatial vision perception are given through the introduction of space manipulator vision system in typical space on-orbit service plan abroad. The key techniques of visual measurement of non-cooperative targets, which are widely concerned in major spacefaring countries, are analyzed.

Keywords: Spacecraft; Visual Measurement; Space Manipulator

收稿日期: 2018-04-05; 修回日期: 2018-05-17

1 引言

随着航天技术的飞速发展,空间飞行器的结构、组成日趋复杂,性能、技术水平不断提高。在这种情况下,如何保证空间飞行器在复杂的空间环境中更加持久、稳定的在轨运行,已成为目前空间技术领域亟待解决的重要问题。空间在轨服务(On-Orbit Servicing, OOS)逐渐成为航天领域的研究热点。空间在轨服务即指在太空中通过人、机器人(或类机器人卫星)或两者协同来完成涉及延长卫星、平台、空间站附属舱和空间运载器寿命和能力的空间装配、维护和服务(Space Assembly, Main-tenance and Servicing, SAMS)任务^[1]。

自20世纪60年代早期提出概念,在轨服务技术迄今已经历四十多年的发展历程,并取得了丰硕的成果^[2]。早期的在轨服务大多是由航天员完成的,但由于航天员出舱活动存在生理限制和巨大风险,随着机器人、遥操作等技术的不断发展,以空间机械臂代替航天员进行空间在轨服务已成为一种必然趋势^[3]。空间机械臂要实现在轨服务操作,离不开感知系统的支持,而视觉作为空间机械臂最主要的传感器,相当于机械臂的眼睛,在空间机械臂在轨服务操作中具有举足轻重的地位。

空间目标航天器可分为两类:合作目标航天器和非合作目标航天器。合作目标航天器指航天器上安装有经过特殊设计以配合完成在轨服务任务的专用部件,如用于机械手抓取的抓捕手柄和用于视觉测量的合作标志器。而非合作目标航天器则指不是为对接或捕获设计的任一航天器,即航天器上不安装用于机械臂捕获的抓持机构(手柄)以及用于辅助测量的合作标志器和特征块,或不能进行姿态控制,在空间自由翻滚的航天器。一般包括己方未装置合作部件的卫星、己方装置合作部件但燃料耗尽或姿轨控系统故障的卫星、己方失效卫星、空间碎片,以及对方航天器^[4]。从空间机械臂操作的控制方式来说主要有两种:一种是遥操作,即通过操作者在空间舱内或地面对

空间的机械手进行遥控操作;一种是自动操作,即不需要人的参与,自动完成对机械臂的控制。

对空间机械臂遥操作来说,视觉系统仅需提供待操作目标的图像即可,机械臂操作均由人工操作完成,这是最简单的视觉感知,可以称为遥操作监控。对自动操作来说,为实现机械臂的闭环控制,视觉系统必须能够在线测量出机械臂末端与待操作目标间的相对位置和姿态。由于操作对象有合作目标和非合作目标之分,因此自动操作的视觉测量可分为合作目标视觉测量和非合作目标视觉测量。对于非合作目标,根据目标模型是否已知,又可分为目标模型完全已知或部分已知的非合作目标和目标模型完全未知的非合作目标。这里目标模型部分已知是指目标模型的信息不能完全已知,如已知目标形状,但无法获得具体形状参数等。空间在轨服务中,绝大多数航天器是己方航天器,其目标模型应该是完全已知或部分已知的,仅在空间轨道垃圾清运中,操作对象可能不是己方的航天器,其目标模型就是完全未知的。对模型完全未知的操作目标来说,首先要建立目标三维模型,在此基础上进行相对位姿测量。因此,根据空间机械臂操作的需求,视觉感知技术从简单到复杂,包括遥操作监控、合作目标视觉测量、模型已知或部分已知的非合作目标视觉测量和模型完全未知的非合作目标视觉三维建模与测量等,各项技术的具体描述详见表1。

本文将结合国外空间在轨服务计划,对空间机械手在轨服务中的视觉感知的历史、关键技术及发展趋势进行综述。

2 国外典型空间在轨服务计划中的视觉感知

由于空间在轨服务在航天领域具有迫切的应用需求,各空间大国启动了多项空间在轨服务计划,本节将简要介绍这些计划中的视觉感知系统与技术。由于没有查到有关目标模型完全未知的非合作目标测量的计划,这里仅给出与前几项技

表1 空间机械臂视觉感知技术需求与状态

视觉感知技术	技术需求	技术状态
遥操作监控	视觉仅作监控使用，或者给出有限的测量参考，但不作为机器人控制的直接输入量。	技术成熟，已在轨应用
合作目标测量	在目标航天器上安装合作标志器，视觉系统通过对合作标志器的测量获得机械手与操作对象间的相对位置和姿态，引导机器机械手完成要求的操作任务。	技术成熟，已在轨应用
目标模型完全已知或部分已知的非合作目标测量	目标航天器上不能安装合作标志器，但操作对象的模型完全已知或部分已知，视觉系统直接测量机械手的操作对象，给出机械手与操作对象间的相对位置和姿态，引导机器机械手完成要求的操作任务。	技术攻关中，未见在轨应用报道
目标模型完全未知的非合作目标测量	目标卫星上不能安装合作标志器，且对操作对象一无所知，视觉系统通过对操作对象的在线建模，完成操作对象的建模与定位，引导机器机械手完成要求的操作任务。	技术探索中

术相关的空间计划。

2.1 空间计划中的遥操作监控

德国1993年发射的ROTEX是空间机器臂首次在轨遥操作。该机械臂上安装了4个CCD摄像机，一对在手爪上，形成手爪立体视觉，一对提供机器人工作空间的立体视觉，以虚拟立体图形预测为主，立体视觉监视图像为辅的方式通过地面遥控实现了对自由漂浮物体的捕获^[5-7]。该项目中，所有的视觉处理都是在地面完成的，可以通过双目视觉给出自由漂浮物体的相对位姿。

美国NASA的RRM计划(Robotic Refueling Mission)是目前已经成功完成的空间在轨维修计划，其目的是利用机器人对卫星进行燃料补给。其第一阶段任务于2013年完成，第二阶段任务于2015年开始^[8]。RRM首次使用加拿大的空间遥控机械臂(Space Station Remote Manipulator System, SSRMS)及专用灵巧机械臂(Canadian Space Agency's Special Purpose Dexterous Manipulator, SPDM)及相关程序，为在役卫星的推进剂燃料箱加注了推进剂燃料。

RRM计划中使用的机械臂末端可以固联4种不同功能的执行器^[9]，分别为导线切割工具、安全盖工具、加油工具及多功能工具。每个工具上带有两个相机及照明系统用于为遥操作提供视频信息。第二阶段任务中使用了新型敏感器VIPIR(Visual Inspection Poseable Invertebrate robot)^[10]。VIPIR包含三个相机，分别为焦距变化为8~24mm的变焦相机，焦距为6mm的定焦镜头相机以及一个直径为1.2mm、分辨率为224×224的航天用最小相机，每个相机上都包含有光源。图1给出了RRM计划使用的4种工具和VIPIR传感器。RRM计划中，当目标星停泊后，机械手要找到加油接口的位置，切开包覆的多层，切断导线，摘掉两种类型安全盖，完成加油操作。以上所有操作任务均由遥操作实现，机械手上的相机仅起到遥控监视的作用，不具备测量功能，可利用获取的图像信息进行三维重建。RRM的视觉系统采集到了不同光照条件下的大量图像，为后续视觉处理算法开发提供了真实的输入图像^[11]。

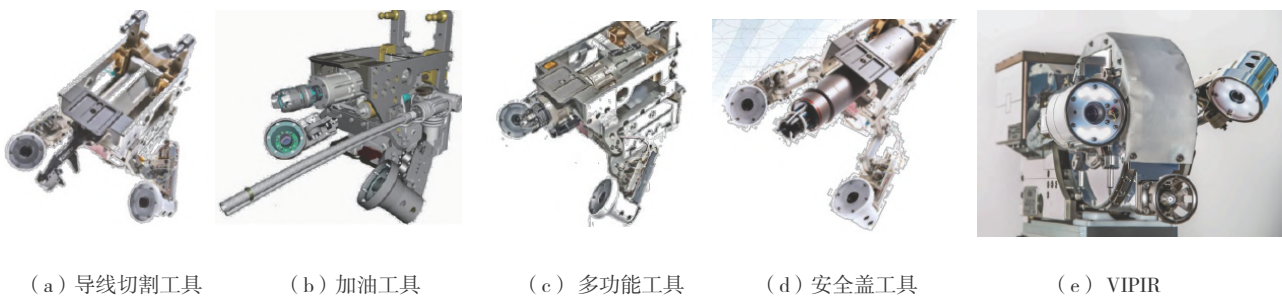


图1 RRM计划的四种工具及VIPIR

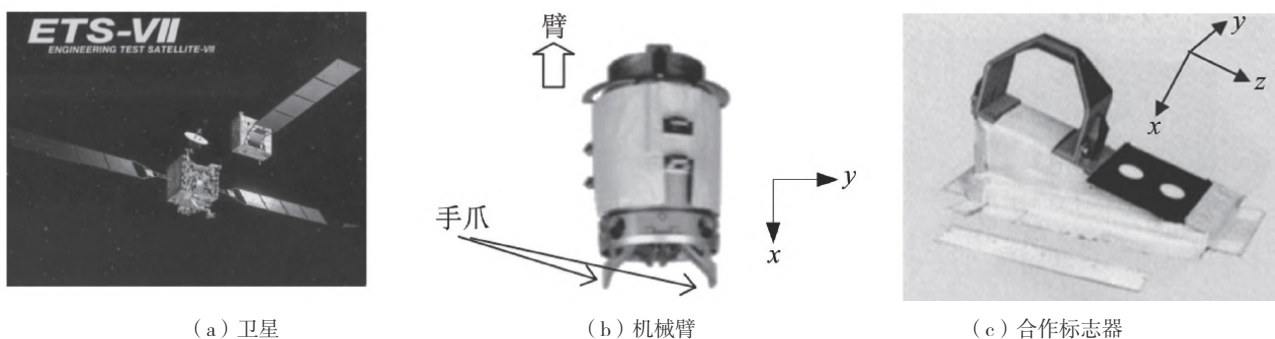


图2 ETS-VII卫星、机械臂及合作标志器

2.2 空间计划中的合作目标测量

空间合作目标视觉测量技术已经相对成熟，并已成功进行了多次在轨试验验证。国外与机械手操作直接相关的合作目标视觉测量在轨试验包括日本的ETS-VII计划和美国的轨道快车计划。

日本的ETS-VII是1997年发射的一颗实验卫星系统，用来研究及演示在轨接近、交会、抓捕及其他机器人技术。由两颗卫星组成，分别为2.5t的任务星及0.4t的目标星。任务星上装有2m长的6自由度机械臂，机械手上装有一个手眼视觉相机，为机械手控制器提供用于视觉伺服控制的图像和测量结果^[12]。其手眼视觉相机采用合作标志器进行视觉测量，在200mm范围内，位置测量精度距离方向上为3mm，其它两个方向上为1mm，姿态测量精度达到 1° ^[13]。在速度不超过20mm/s，旋转角度不超过0.2deg/s的情况下，通过视觉伺服可以抓取目标。ETS-VII机械手对目标星的抓捕在仅有地球反射光的时候进行，此时不需考虑太阳光的影响，选择地球反射光均匀的时间段进行抓捕以提高相机的成像质量并保证快门时间稳定。该系统在首次在轨实验中通过接近固定目标验证了视觉伺服算法，第二次实验中抓捕了在轨道上自由漂浮的目标星并取得成功。

美国的轨道快车计划(Orbital Express, OE)于1999年11月提出，2007年发射升空，是一项较为完善的在轨服务体系演示计划。轨道快车是一种维修卫星的太空机器人，主体由追踪星ASTRO与目标星NextSat组成，追踪星上装有空间机械臂^[15]。

轨道快车完成了多项机械臂在轨操作演示试验，其中最为关键的是对自由飞行的目标星的自主捕获和对电池ORU的自动更换。轨道快车机械臂对自由飞行的目标星的自动抓捕是基于视觉引导实现的，其机械臂末端执行器上装有一个手眼视觉相机，在机械手对目标星自动捕获过程中，采用合作目标视觉测量获取机械臂末端与目标星间的相对位姿，其合作标志器如图3(b)所示，中间为抓捕机构。

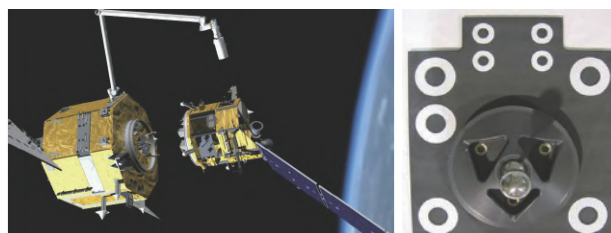


图3 轨道快车计划的卫星和合作标志器图像

2.3 空间计划中模型已知或部分已知的非合作目标视觉测量

美国在自主在轨服务方面一直处于国际领先地位，开展了多项与非合作目标在轨服务相关的空间计划。FREND计划属于比较早期的空间计划，全称为Front-end Robotics Enabling Near-term Demonstration，其前身为SUMO计划(Spacecraft for the Universal Modification of Orbits)，2006年更名为FREND计划。项目目标是研制与GEO轨道上航天器进行对接的空间飞行机器人，验证对那些没有对接装置的空间目标实现自动抓捕的能力，已开

发了地面试验样机，并在美国海军实验室近距离操作实验平台上成功进行了关键技术的演示实验。FREND机械臂的视觉测量系统由三个相机组成^[16]，每个相机为10bit像素深度，640×480的图像分辨率，且都带有照明。三个相机具有冗余备份功能，当测量目标在一个相机中成像效果差时，另外两个相机仍可构成双目立体视觉实现相对位姿测量，如果目标在三个相机中均正常成像，则可通过信息冗余提高测量精度。FREND机械臂的测量范围为20cm以内，测量输出频率为5Hz。抓捕对象有两种^[18]，一种是对接环目标，一种是杯锥状目标。对接环目标限于1194和1666对接环；杯锥状目标为内径大约为4cm的金属圆筒。目标识别算法要适应不同光照条件，为提高测量结果的可靠性，需要已知抓捕对象的物理尺寸信息。图4(c)给出了地面演示实验现场图。

美国DAPRA发起的“凤凰计划”，以及后来RSGS计划，和NASA发起的Restore-L划都使用机

械臂来完成空间卫星的抓捕、维修等操作，其中“凤凰计划”从2012年开始，持续4年，到目前为止已经完成了地面原理样机的实验论证，为后续的RSGS计划累积了多项技术^[19]。RSGS计划主要针对高轨地球同步卫星进行在轨维护，预计2021年发射^[20]；Restore-L计划主要针对低轨道地球卫星进行燃料加注，预计2020年发射^[21]。凤凰计划和RSGS计划都使用了FREND机械臂技术。凤凰计划设计了三条机械臂，其中有一条为柔性机械臂，两条FREND机械臂；RSGS计划使用两条FREND机械臂，一条用来捕获和握紧目标，另一条用于取工具和修理，如图5所示。RSGS计划的机械手操作采用自主操作与遥操作两种方式。FREND机械臂在不同的研制阶段又划分为不同的具体型号，在RSGS计划中FREND机械臂的具体型号为MARKII，机械臂末端如图6(a)所示，包括控制板、工具更换装置、相机系统及其光源。相机系统为三目相机，单个相机为带有照明的MDA相机。

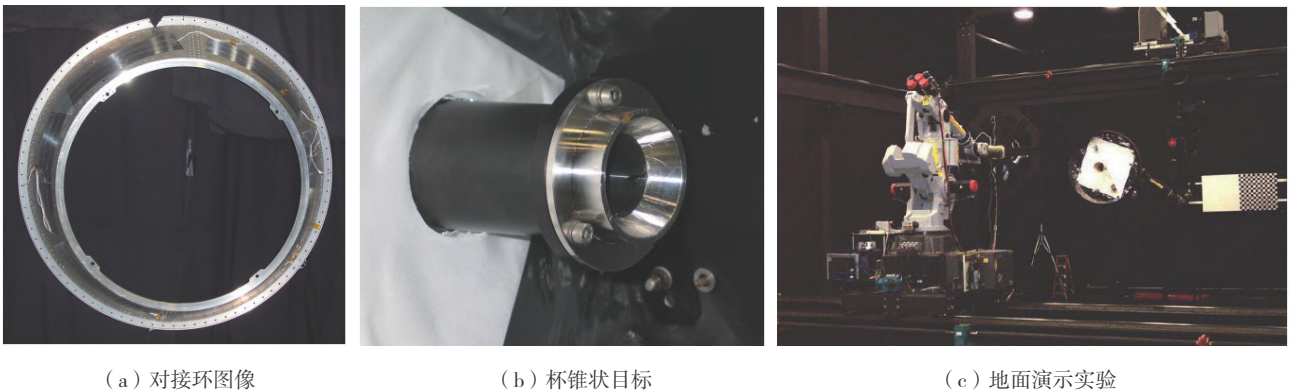


图4 FREND计划的抓捕对象与地面实验

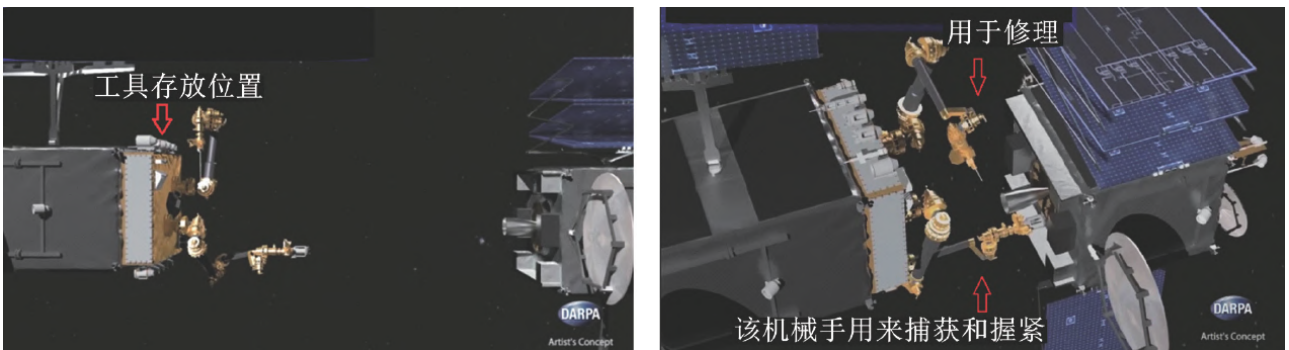


图5 在轨维修过程示意图



图6 FRENDD机械臂末端结构及对接环抓捕工具

相机在2018年完成工程样机，2019年完成飞行件，采用双目视觉对目标进行位姿测量，同时另一相机作为备份。测量数据可以用来引导机械手进行抓捕等操作，完成空间在轨维护任务。目前，已经在地面实现了对对接环的自动抓捕，其对接环抓捕工具如图6(c)所示，抓捕工具的手爪很短，3个相机镜头在抓捕工具最前端，两相机间的距离很大，基线很长。但采用的具体测量方法没有查到相关文献，图7给出了地面演示实验现场图。

DEOS计划全称为Deutsche Orbitale Servicing，于2007年开始概念设计，旨在演示验证以半自主方式从地面为地球同步轨道上的非合作卫星提供维护、燃料加注和故障维修（非合作、滚转）服务，以及如何清除非合作卫星和轨道碎片^[22]。DEOS是对德国此前开展的轻型机械臂、遥操作等在轨服务技术的首次综合在轨演示验证。DEOS机械臂的抓捕对象是目标航天器的标准对接接口，目标航天器上没有合作标志器，对视觉测量来说，属于非合作目标视觉测量。DEOS机械臂末端执行器上

的视觉传感器，2011年发表的文献中采用立体视觉系统，即立体相机加光源^[23]。其相机的视角为 $44.4^\circ \times 30.4^\circ$ ，分辨率为 384×256 ，刷新频率为10Hz，立体相机基线长为约5cm。2015年发表的文献中，机械臂末端采用单目相机加光源的形式，其中相机视场约为 60° ，保证在抓捕过程中在夹子范围内的所有物体都可以被拍摄到^[24]。捕获操作以“有监督的自动”模式执行，正常情况下完全自动执行，只在异常和突发情况下，或星上故障检测不能正确触发时才需要地面操作人员控制。

欧洲航天局（ESA）的e.Deorbit计划属于ESA清洁太空倡议工作，于2012年启动，目的是移除800~1000km太阳同步轨道和极轨道上的大质量非合作目标。将在2023年执行首次主动碎片清除任务^[25]。该计划选择的废弃卫星为欧洲环境卫星Envisat。加拿大的MDA公司还有欧洲的OHB公司分别开展了针对Envisat卫星的救援计划。这两家公司的解决方案都是采用单根机械臂抓捕对接环。与RSGS计划不同的是救援星的接近方向不是从对

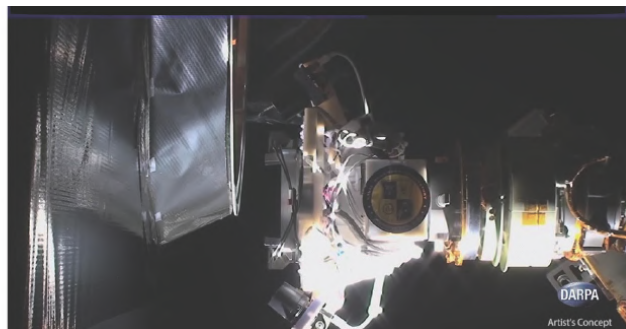
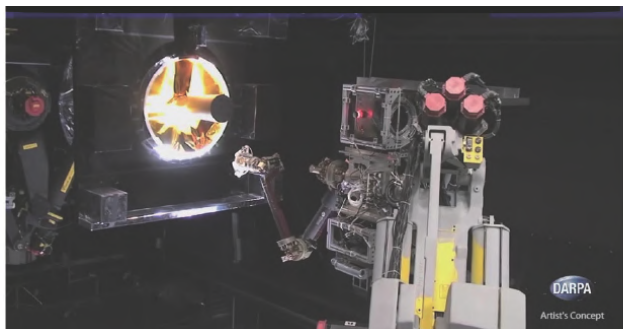


图7 对接环抓捕地面演示试验

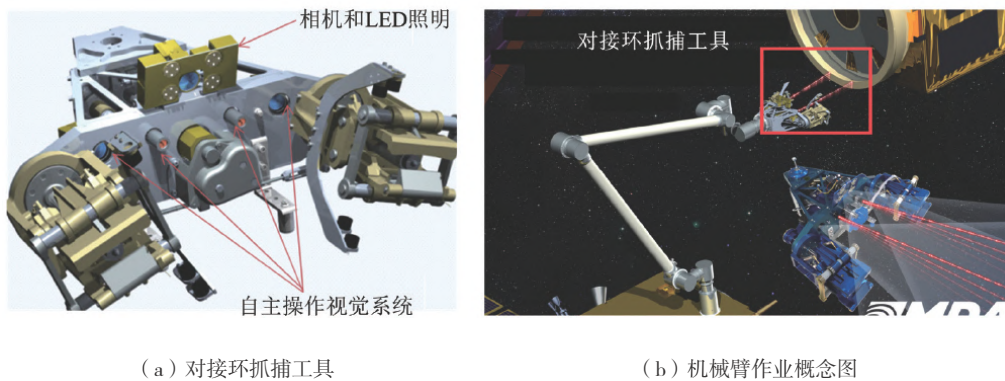


图8 MDA公司的对接抓捕工具及机械臂作业概念图

接环的正面而是从对接环的侧面接近，当接近到一定距离后，机械臂伸出，再从对接环的正面进行抓取。加拿大MDA公司提出的对接环抓捕工具如图8(a)所示^[25, 26]，包含两个开锁抓捕机构，可以抓捕直径大于937mm的对接环。其上的非接触式传感器可以判断圆环是否进入抓捕包络内。该工具的视觉系统有两组。第一组为监视用视觉系统，包括黑白相机加LED照明灯，用于人工操作时的监视，其中照明可用于补光。第二组是用于自动操作的视觉系统，包括两个相机及两个激光发射器，可以构成两套结构光测量系统。从图8(b)的机械臂作业概念图上可以看出，每个激光发射器可以发出5条点激光^[27]。德国OHB公司设计的另一种空间机械臂视觉系统如图9所示^[29]。该系统采用双目视觉结合机械手，进行对接环的抓捕。在对接初期观察电池板电机和对接环边缘来完成6自由度的追踪。在抓捕末期通过观察对接环边缘，来完成5个自由度的追踪。

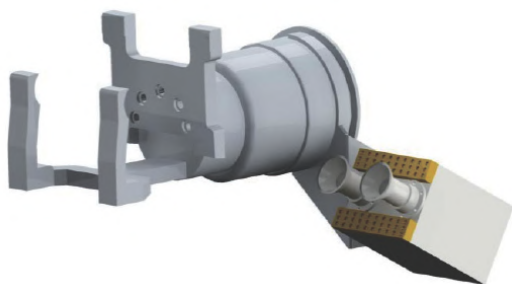


图9 OHB公司的空间机械臂视觉系统

德国的ESS计划全称为Experimental Servicing Satellite，是德国宇航局于1994年左右提出的研究计划。该计划主要针对早期发射的TV-Sat-1卫星故障（人轨后未能打开太阳帆板中的一块）进行维修，需要接近、抓捕并维修卫星。ESS计划机械臂的抓捕对象为故障卫星的远地点发动机喷嘴，通过将抓捕工具插入目标卫星远地点发动机的喷嘴中来实现抓捕。其视觉测量系统通过安装在手腕上的立体视觉相机对目标卫星远地点发动机喷嘴成像，激光测距仪测量相对距离，由图像处理系统计算相对位姿。该计划经过了概念设计和地面试验阶段以后宣告结束，但是其关键技术和抓捕装置却延续到后续项目中。

欧洲SMART-OLEV计划全称为Smart Orbital Life Extension Vehicle^[30]，相当于一个太空拖船，针对的目标是地球静止轨道上燃料耗尽或姿轨控系统故障的通信卫星，它在接近并抓捕目标卫星后，接管目标卫星的姿轨控系统，为其提供推进、导航、制导和控制，使目标卫星保持合适的轨道和姿态，使其有效载荷继续发挥作用。SMART-OLEV包括平台和抓捕系统两部分，没有专门的机械手，抓捕对象仍旧是目标航天器的远地点发动机喷嘴。平台采用瑞典Space公司的SMART-1并做了改进。抓捕系统包括：抓捕工具、伸缩臂、目标支撑托架、视觉系统（如图10所示）^[31]。视觉系统包括近距离立体视觉相机和照明系统，用于在距目标5m内的相对导航。近距离立体视觉相机对待抓

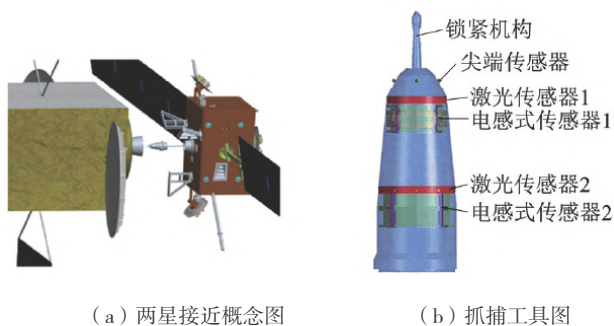


图 10 SMART-OLEV概念图及抓捕工具

捕目标成像，地面根据图像计算相对距离，并导引SMART-OLEV逼近至离目标0.3m处。SMART-OLEV是一个商用化的在轨服务项目，其服务对象是2010年后大批即将因燃料用尽而退役的GEO通讯卫星该计划于2009年启动了C/D/E阶段的研究工作^[21]。轨道ATK公司2016年和2018年先后两次获得“任务扩展飞行器”(Mission Extension Vehicle) MEV-1和MEV-2合同^[32, 33]，为Intel.SA卫星提供商务服务，采用的抓捕方案和SMART-OLEV看起来几乎相同^[34]。

2.4 空间计划中的视觉感知总结

综上所述，到目前为止各种空间在轨维护计划中，空间机械手的主要操作任务包括：对目标卫星的抓捕、维修、装配、加油、在轨更换等，其中对目标卫星的抓捕是最主要也是最基本的操作。可以自动进行，而其它操作相对复杂，多采用遥操作与自动操作相结合的方式。在抓捕对象的选择上，有星箭对接环、分离螺栓孔和远地点发动机喷嘴，以前者居多。在传感器配置上，对合作目标的视觉测量一般采用单目视觉；而对非合作目标的测量则多采用双目视觉和结构光；为提高可靠性，在设计中多考虑传感器的备份。三种传感器配置中，单目视觉结构简单，更容易满足空间机械手对测量设备质量、体积、功耗的要求，但要求目标模型完全已知，且目标特征足够多能够满足相对位姿求解的要求，受环境光照影响较大。双目立体视觉比单目视觉增加了一个相机，质量、体积、功耗都会增加，且两相机图像

特征的匹配有一定难度；但不要求目标模型完全已知，在相同条件下比单目视觉具有更高的测量精度，受环境光照影响与单目视觉相当；结构光视觉比单目视觉增加了一个或多个激光发射器，增加了质量、体积、功耗，但也不需要目标模型完全已知；与双目立体视觉相比，不存在图像特征匹配的问题，且受环境光照影响较小，但测量精度略低于双目立体视觉。表2给出了个空间计划中的视觉系统统计。

从发展趋势看，空间机械手在轨维护操作的视觉感知，经历了遥操作监控、合作目标视觉测量，目前正处于模型已知或部分已知的非合作目标视觉测量阶段，今后的发展趋势是模型完全未知的非合作目标视觉测量。对具体空间计划来说，根据机械手操作任务复杂程度的不同，在同一个空间计划中，遥操作监控、合作目标视觉测量和非合作目标视觉测量可能同时存在，各自服务于不同的操作任务。如通过非合作目标视觉测量完成对目标航天器的抓捕操作，通过合作目标视觉测量完成对操作工具的抓取操作，而通过遥操作监控实现复杂的在轨维修操作。

3 面向空间非合作目标机械手操作的视觉感知关键技术

面向空间机械手操作的视觉感知在经历了遥操作监控、合作目标视觉测量后，目前主要集中在模型已知或部分已知的非合作目标视觉测量上，当解决了这一难题后，进一步的发展方向将是模型完全未知的非合作目标视觉测量。因此，本节重点阐述非合作目标视觉测量的关键技术。

相比于合作目标视觉测量，空间非合作目标视觉测量的难度更大，这主要表现在：

(1) 视觉测量的观察目标不是专门设计的，而是目标航天器本身固有的。由于目标航天器本身都包有反光效果极强的热控包覆材料，不仅使得航天器本身能够提供精确几何特征的部位相对较少，这些特征对于相对位姿求解不见得是最佳

表2 各空间计划中的视觉系统统计表

计划	国家	操作对象	视觉配置	感知方法	状态
ROTEX	德国	自由漂浮物体	4 相机	遥操作监视	1993 年在轨试验
RRM	美国	导线、完全帽、热控多层、加油接口等	2 相机 3 相机	遥操作监视	2013 年在轨试验
ETS-VII	日本	抓捕手柄	单相机	单相机合作目标位姿测量	1997 年在轨试验
Orbital Express	美国	抓捕手柄	单相机	单相机合作目标位姿测量	2007 年在轨试验
SUMO/FREND	美国	螺栓孔、对接环	3 相机	带有备份功能的双目立体视觉非合作目标位姿测量	地面试验
RSCS	美国	螺栓孔、对接环	3 相机	带有备份功能的双目立体视觉非合作目标位姿测量、遥操作监视	预计 2021 年发射
DEOS	德国		2 相机	双目立体视觉非合作目标位姿测量	进行中
e.Deorbit	欧洲	对接环	2 相机	双目立体视觉非合作目标位姿测量	正在地面试验, 预计 2023 年发射
	加拿大	对接环	3 相机 +2 激光	带有备份功能的结构光非合作目标位姿测量加独立的遥操作监视	
ESS	德国	发动机喷嘴	2 相机	双目非合作目标位姿测量	1997 年结束, 只进行了概念设计
SMART-OLEV	欧空局	发动机喷嘴	2 相机	双目非合作目标位姿测量	2009 年开始 CAD/E 阶段研制任务

的, 而且这些特征与背景间的差异也不见得很强。因此, 对于非合作目标视觉测量来说, 即便目标模型完全已知, 其目标识别和相对位姿求解也有相当大的难度。

(2) 空间在轨道服务时, 空间光照环境变化多端, 特别是高轨卫星, 绝大部分时间均处于太阳光照中。视觉传感器又是受环境光照影响较大的传感器。因此, 如何从硬件上减弱空间光照对相机成像的影响, 在软件上提高目标识别的鲁棒性和适应性, 是空间视觉测量要解决的又一个难题。

(3) 待操作的非合作目标航天器不受维修航天器的控制, 还可能处于空间翻滚状态, 空间机械手在接近非合作航天器的过程中要有很精确的位姿控制和很快的响应速度以避免碰撞, 这就要求视觉测量不仅要有很高的精度还要有很高的数据输出频率。高精度和高速度构成了一对矛盾, 因为高精度要求相机分辨率高, 而高分辨率则直接影响处理速度。要想同时保证精度和处理速

度, 只能提高视觉处理器的处理能力。而空间视觉处理器受质量、体积、功耗和空间特殊环境的限制, 其处理能力要比地面低得多。因此, 一方面要研究适应空间应用环境的快速处理器, 另一方面从软件上要研究快速算法, 才能满足工程应用的需求。

根据前面的分析, 面向空间非合作目标机械手操作的视觉测量关键技术包括:

(1) 复杂光照条件下高鲁棒性目标识别与特征提取技术。无论采用哪种传感器配置方案, 视觉位姿测量都离不开目标图像特征的提取, 而提取目标图像特征的前提是将目标从杂乱的背景中识别出来。非合作航天器上, 可用的视觉特征明显的特征可能有点(特殊载荷的部件、卫星的自然角点、太阳帆板的角点等), 直线(部分部件的直线边缘、太阳能帆板边缘或支架等), 圆或曲线(螺栓孔边缘、对接环边缘等)。这些特征与背景间的区别本身就不是很大, 特别是当遇到热控包覆材料反光的时候, 干扰特征更多。而空间光照

条件变化较大,目标与背景间的对比关系会随着光照条件的变化而变化。因此,如何在不同光照条件下均能将目标从背景中分离出来以实现正确的图像分割,以及如何在众多类似目标的区域中找真正的目标区域完成目标识别都是空间非合作目标视觉测量必须解决的关键技术。虽然图像分割和目标识别方法与具体测量任务和目标直接相关,但针对空间航天器的共同特点,研究其典型特征的目标识别和特征提取方法,为非合作目标视觉测量的工程应用提供技术储备,我国现阶段是完全必要的。涉及的关键技术包括:面向复杂光照条件的图像预处理技术、基于目标模型约束的空间飞行器及典型部件稳定识别技术、基于目标模型约束的空间飞行器及典型部件高精度特征提取技术等。

(2) 基于全部或部分目标模型约束的相对位姿高精度求解技术。非合作目标视觉测量时,当目标模型完全已知且目标特征足够多时,可以用单目视觉实现相对位姿求解。当目标模型部分已知时,如已知目标形状但不知目标参数时,可以通过目标特征间位置关系不变的约束,通过优化求解目标模型参数和相对位姿。当采用双目视觉和结构光视觉时,目标特征间的约束条件更多,冗余信息也更多,可以利用冗余信息通过优化求解相对位姿以提高测量精度。因此,基于空间航天器的典型特征,研究不同特征组合条件下如何实现高精度位姿求解是空间非合作目标视觉测量要解决的一个关键技术。涉及的关键技术包括:不同传感器配置下的目标特征选择技术、基于冗余信息的相对位姿优化求解技术、基于部分目标模型约束的相对位姿求解技术、多相机非共视场的相对位姿求解技术等。

(3) 基于完全未知的非合作目标的三维建模与视觉测量技术。对完全非合作目标,事实上已不能定义姿态,因为对非合作目标已不能对其建立坐标系了,姿态角也就无从定义。此时,首先需要利用双目立体视觉、结构光甚至三维测量传感器对目标进行三维建模,并根据建立的三维模

型实现相对位姿的测量。此时,三维建模完成后目标坐标系的建立即可以通过人机交互的方式建立,也可以以目标初始状态为基准,后续测量只测量相对于初始状态的位置与姿态。涉及的关键技术包括:基于双目立体视觉或结构光的目标三维建模技术、基于三维点云数据与图像数据相融合的相对位姿求解技术、基于稀疏点云数据的相对位姿求解技术。

(4) 面向空间机械手操作的视觉感知硬件技术。传感器是视觉测量的硬件基础,既适应空间环境特点又能满足机械手操作需求的新型空间传感器是必须解决的关键技术。空间环境具有光照动态范围大、普通摄像机对亮区与暗区的细节均不能清晰成像,需研发高动态范围的摄像机。三维点云成像技术在空间非合作目标位姿测量方面有着巨大的应用空间,目前还存在精度低、分辨率低和作用范围小等问题,且还需要解决空间环境的约束与应用等问题。空间视觉处理器硬件速度较慢,难以满足视觉测量高速度的要求。涉及的关键技术包括:适应空间复杂光照条件下的高动态成像传感器技术;高精度、高分辨率三维成像传感器技术,适应航天环境的高速处理器硬件技术等。

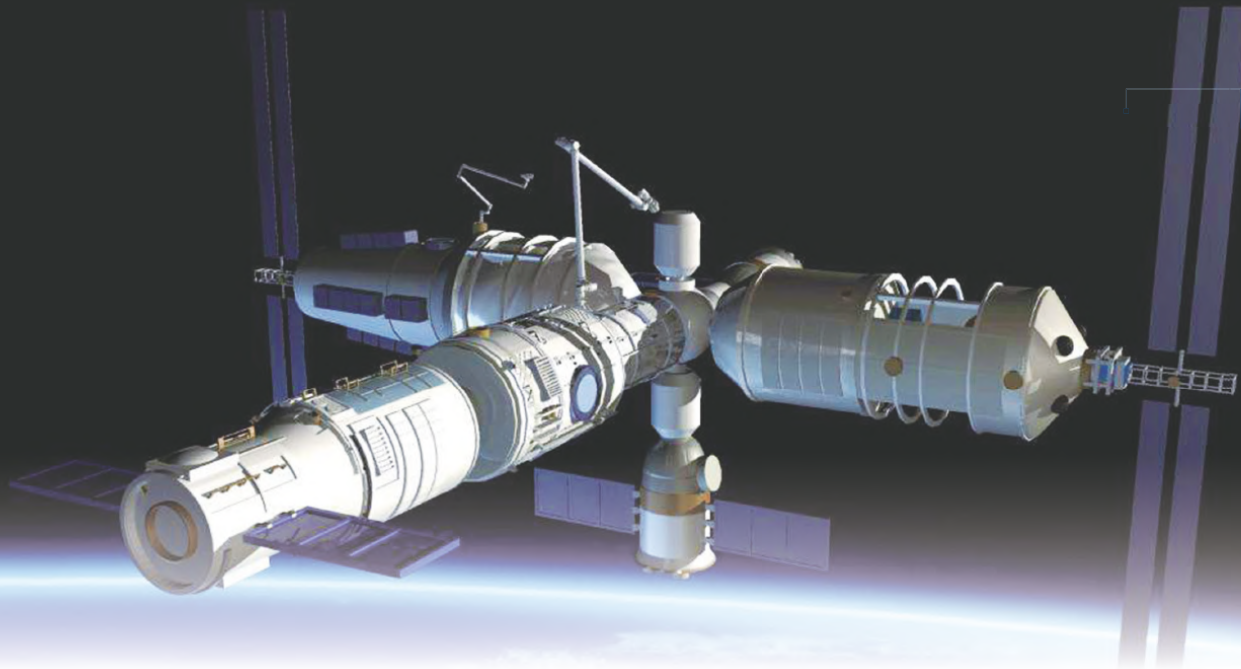
(5) 空间视觉测量工程实现技术。面向空间在轨维护与服务的需要,设计空间视觉测量系统,开发空间视觉测量软件,研制空间视觉测量样机并完成在轨试验验证。这里,既要满足空间设备对质量、体积功耗以及备份的苛刻要求,又能满足空间机械手的多种操作任务需求;既要适应空间光照条件的复杂变化实现目标的特征的稳定提取、在输入参数误差较大的情况下优化求解相对位姿以保证测量精度,又要受空间处理器处理能力及内存容量的限制。涉及的关键技术包括:面向多感知任务的传感器配置技术、基于人机协同的目标识别与特征提取技术、面向空间处理器的算法优化技术、测量系统地面验证与测试技术、在轨试验设计与验证技术等。

4 结论

本文面向空间机械手在轨服务操作，分析机械手操作对视觉感知技术的需求；通过对国外典型空间在轨服务计划中空间机械手视觉系统的介绍，给出了空间视觉感知的发展历史和趋势；对目前各航天大国普遍关注的非合作目标视觉测量关键技术进行了综述。目前，遥操作监控和非合作目标视觉测量在理论与技术上相对成熟，模型已知和部分已知的非合作目标视觉测量正处于技术攻关阶段，而模型完全未知的非合作目标视觉测量则处于探索阶段。因此，结合空间机械手在轨服务操作的应用需求，开展非合作目标视觉测量关键技术研究，对我国航天事业的发展具有重要意义。□

参 考 文 献

- [1] 崔乃刚, 王平, 郭继枫, 等. 空间在轨服务技术发展综述 [J]. 宇航学报, 2007, 28 (4), 805-811.
- [2] 梁斌, 杜晓东, 李成, 等. 空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展 [J]. 机器人, 2012, 34 (2), 233-256.
- [3] 郭筱曦. 国外载人航天在轨服务技术发展现状和趋势分析 [J]. 国际太空, 2016 (7), 27-32.
- [4] 蔡洪亮, 高永明, 邴启军, 等. 国外空间非合作目标抓捕系统研究现状与关键技术分析 [J]. 装备指挥学院学报. 2010, 20 (6), 71-77.
- [5] G.H, B.B, J.D. The First remotely controlled robot in space [C]. 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2604-2608.
- [6] ROTEX. https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/shuttlemissions/archives/sts-55.html
- [7] J O, G C, Bernard EK, et al. SUMO/FREND: Vision System for Autonomous Satellite Grapple [J]. Sensors and Systems for Space Applications, Proc. of SPIE Vol. 6555, 65550Y-1-65550Y-11.
- [8] Robotic Refueling Mission. https://en.wikipedia.org/wiki/Robotic_Refueling_Mission.
- [9] The RRM tools perform servicing and refueling tasks in the harsh environment of space—robotically by remote control, https://sspd.gsfc.nasa.gov/rrm_tools.html#fragment-2.
- [10] Gefke Gardell G, Alex Janas, Benjamin Reed. Advances in Robotic Servicing Technology Development [C], AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition, 1-9.
- [11] RRM Task: Launch Lock Removal and Vision, RRM. https://sspd.gsfc.nasa.gov/rrm_llr-vt.html.
- [12] Noriyasu Inaba, Mitsushige Oda, Masato Hayashi. Visual Servoing of Space Robot for Autonomous Satellite Capture [J]. Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol. 46, No. 153, pp. 173-179, 2003.
- [13] Inaba N, Oda M. Automatic Satellite Capture by a Space Robot [J]. Proc. IEEE International Conference on Robotic and Automation, 2000, pp. 1169-1174.
- [14] Allport Ogilvie J, Hannah M, Lymer J. Autonomous Satellite Servicing Using the Orbital Express Demonstration Manipulator System [C]. Proceedings of the 9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, iSAIRAS, Los Angeles, U.S.A., 2008.
- [15] Andrew Ogilvie, Justin Allport, Michael Hannah, et al. Autonomous Robotic Operations for On-Orbit Satellite Servicing [J]. Proceedings of SPIE 6958; 695809-695809-12.
- [16] Debus Thomas J, Dougherty Sean P. Overview and Performance of the Front-End Robotics Enabling Near-Term Demonstration (FREND) Robotic Arm [J]. AIAA Infotech@Aerospace Conference AIAA 2009-1870.
- [17] Jerome Obermark, Glenn Creamer, Kelm Bernard E, et al. SUMO/FREND: Vision System for Autonomous Satellite Grapple [J]. Sensors and Systems for Space Applications. Proc. of SPIE Vol. 6555 65550Y-1.
- [18] Carl Glen Henshawa, Keith Akinsa. A Software Architecture for Autonomous Orbital Robotics [J]. Proc. of SPIE Vol. 6220, 2006, 62200K1-62200K18.
- [19] 陈罗婧, 郝金华, 袁春柱, 等. “凤凰”计划关键技术及其启示 [J]. 航天器工程, 2013, 22 (5), 119-128.
- [20] Gordon Roesler. Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites (RSGS) Proposers Day, 2016.
- [21] Reed BB, Smith RC, Naasz BJ, et al. Restore-L



- Service Mission [J]. AIAA SPACE, pp.5478, 2016.
- [22] 贾平, 刘海印, 李辉.德国轨道任务服务系统发展分析 [J].中国航天, 2016 (6) , 24-29.
- [23] Rank P, Mühlbauer Q, Naumann W, et al. The DEOS Automation And Robotics Payload [C] . Esa/Estec, Noordwijk, The Netherlands, 2011.
- [24] Rank P, Mühlbauer Q, Naumann W, et al. The DEOS Automation and Robotics Payload [C] . Proceedings of the 11th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA) , Noordwijk, The Netherlands, April 2011.
- [25] Stéphane Estable, Jürgen Telaar, etc, Definition Of An Automated Vehicle With Autonomous Fail-Safe Reaction Behavior To Capture And Deorbit Envisat [C] . Proc.7th European Conference on Space Debris.
- [26] John Ratti. Spacecraft Robotic Capture Tool, 2014.
- [27] John Ratti. The LAR Capture Tool and the Clamping System: Mechanisms for the Capture and berthing of Envisat, 2016.
- [28] Richard Rembala. Launch Adapter Ring Capture Tool, Canadian Robotic Technology for the Autonomous Capture of Unprepared and Non-Operational Debris.
- [29] Gerrit Hausmann Matthias Wieser. E.Deorbit Mission:OHB Debris Removal Concepts.
- [30] Kaiser C, Sjberg F, del Cura B JM. Eilertsen:On-Orbit Servicing of a Geostationary Satellite Fleet: OLEV as a Novel Concept for Future Telecommunication Services [C] . 60th IAF Congress, 12.-16.10.2009, Daejeon, Republic of Korea, Paper No.IAC-09.D3.2.4.
- [31] Clemens Kaiser, Fredrik Sjberg, Juan Manuel Delcura, et al. SMART-OLEV—An orbital life extension vehicle for servicing commercial spacecrafts in GEO [J] . Acta Astronautica, 2008, 63 (1-4) , 400-410.
- [32] 庞子彦.轨道ATK首个在轨维护飞行器将由质子号发射 [J] .中国航天.
- [33] 轨道ATK获得第二个在轨卫星服务飞行器的订单. <http://www.ronghe.org.cn/news/newsview/202344>.
- [34] 轨道ATK公司的任务扩展飞行器 (MEV) 在轨延寿星. <https://www.bilibili.com/video/av4344825/>.

作者简介:

郝颖明 (1966-) , 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为机器人视觉。

付双飞 (1980-) , 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为机器视觉。

范晓鹏 (1987-) , 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为图像处理。

魏景阳 (1991-) , 男, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为图像处理。

朱枫 (1962-) , 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为机器人视觉。



无人机系统概念和关键技术

昂海松

(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016)

摘要: 本文首先阐述了无人机系统的概念, UAS作为系统更能反映无人驾驶航空器系统的技术特征。其次介绍了无人机系统的优点, 这正是无人机在军民用途上受到广泛重视的原因。作者简明扼要地归纳出了无人机系统目前发展中的关键技术, 重点阐述了无人机系统不同于有人驾驶航空器特有的技术, 如空中平台的高度集成设计, 无人机对能源与动力的特殊需求, 无人机的环境感知、视觉导航、避障和智能控制技术, 数据链, 发射和回收技术, 以及无人机的任务载荷设备。文章最后展望了无人机系统的广阔应用前景。

关键词: 无人机系统; 特点; 关键技术

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 01-0066-6

The Concept and Key Technology of UAV System

ANG Haisong

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper first elaborates the concept of UAV system, UAS system can reflect the technical characteristics of the driverless aircraft system better. Then, the advantages of UAV system are introduced, This is the reason why UAV are widely valued in military and civilian applications. The author briefly summarizes the key technology in the development of the UAV system, focusing on the unique technology of the UAV system that is different from the manned aerial vehicle. Such as the height of the aerial platform integration design, the specific requirements of the UAV for energy and power, the environmental perception of UAV, the visual navigation, the obstacle avoidance and intelligent control technology, the data chain, the transmission and recovery technology, and the task of UAV load equipment. At the end of the paper, the broad application prospect of UAV system is prospected.

Keywords: UAV System; Characteristics; Key Technology

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-03-27

1 前言

无人驾驶航空器虽然1917年就已出现,但是原来只是作为军用航空器的一种补充用途(如靶机、诱饵机等)。直到21世纪无人机才发展成为航空器中一个重要的分支。无人机从军用扩展到民用还是近几年的事,而无人机发展势头之猛、普及程度之快,超出了其他航空器发展的速度,这是因为无人机研制周期短、相对成本低、使用便捷和无人员伤亡等突出优点的缘故^[1]。目前无人机的功能和使用范围正在不断扩大,无人机系统的发展正在改变着作战模式,引来军事上一场深刻的革命。无人机在民用上越来越广泛的运用,从而推动着无人机系统技术的迅速发展,同时也带来了一系列技术上的挑战。

2 无人机系统概念

“无人机”是“无人驾驶航空器”的简称,英文简称 UAV (即 Unmanned Aerial Vehicle 的缩写)。无人机是一种机上无人驾驶、自动程序控制飞行和无线电遥控引导飞行、具有执行一定的任务能力、可重复使用的飞行器^[2]。

“无人机”从狭义概念上主要指的是空中飞行平台,但从无人机装备技术特点上,更重要的是“无人机系统”概念。所谓“系统”,是由若干

个相互联系、相互作用、相互依存的组成部分(要素)结合而成的、具有特定功能的有机整体,具体从组成上来说,是指“相关部件(子系统)、软件与功能的有机集合”;从技术上来说,是指“具有相互依存功能的机械结构、电器、电子的一种集合”。飞机本身可以作为一个独立系统,而无人驾驶空中飞行器平台通常不是一个独立系统,这正是无人机系统不同于有人驾驶飞机之处。

2005年美国在“无人机系统线路图”报告中,不再单纯提“无人飞行器(UAV)”,而将“无人机系统(UAS: Unmanned Aircraft System)”作为基本概念^[3]。即UAS不仅是无人飞行器本身,还包括无人机通信、任务载荷设备和地面设备(地面测控站、发射与回收设备、地面保障设备)。从更广意义上,“无人机系统”还包括地面测控无人机的操作人员。无人机系统的组成如图1所示。

3 无人机系统特点

无人机由于不需机载操纵人员,而带来一系列优点:

(1) 无机载人员损失。无人机在作战时或飞行器失事时不会危及飞行员和机组人员。

(2) 减少设备和质量。由于机上没有驾驶人员,因此可省去驾驶舱和人工操纵机构,也省去有关的人机环境控及安全救生设备,因而大大减

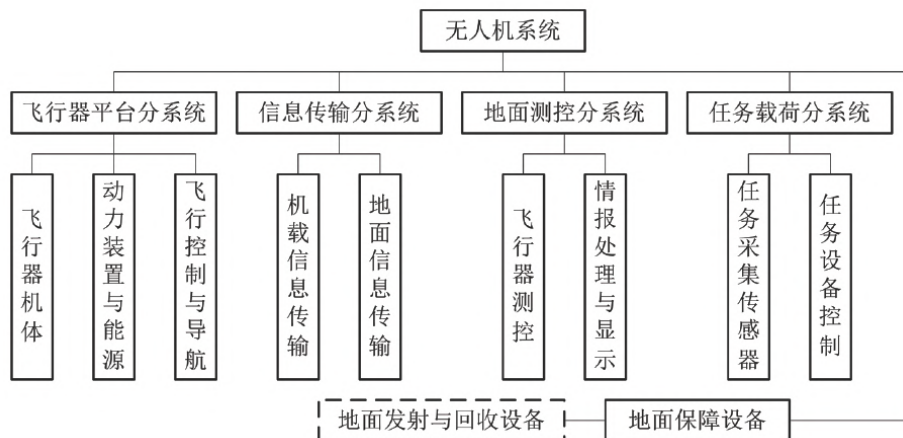


图1 无人机系统组成框图

轻了飞机的质量。

(3)降低成本,研制周期短。无人机内部系统设备比较简洁,减少了大量设备的研制,因此研制费用低,也减少了机上驾驶人员的长时期训练,只需训练在地面操作的有关人员,大大缩短了研制周期。

(4)更适于执行危险性高、续航时间长的任务。对于执行深入敌境的突防军用飞机,很容易受到敌方的导弹炮火的攻击,无人机更适于执行这类高危险性任务。由于无人机的重量轻、体积小而大大减少了摩擦阻力和升致阻力,能源的消耗也大为减少,因此增加了留空飞行时间。

(5)更高的机动性,不受人员高速过载和环境的限制。由于机上没有驾驶员,战斗机高机动过载引起的驾驶员身体所能承受的生理限制或者引起晕眩误操作的可能性,都将不复存在;也不存在缺氧、低温、低气压对机载人员造成的影响。

(6)隐蔽性好,相对体积小。由于无人机减少了机载人员、大量设备,其体积会明显减小,也便于设计各种非常规布局、表面积小的飞行器,因此更适于隐身设计,从而也增强了突防能力。

(7)使用维护方便。无人机机载系统组成相对比较简单,因此使用维护的程序也大大减少,无人机上机载设备和部件一旦出现故障,还可以进行模块式更换,迅速修好再使用。

(8)起飞、着陆容易。中小型无人机无需机场,可采用弹射起飞或手抛起飞;大型无人机也可大大缩短起飞与着陆滑跑距离;无人机还可以采用伞降与气囊等着陆手段。

美国国防部无人机系统路线图中提到无人机三个方面比有人飞机更具优势:更加适合执行枯燥无味的任务;更有利于执行有放射性侵害的任务(如核武器爆炸后采集放射样本);更便于执行危险的任务,如避免有人侦察机、有人对敌攻击机所造成的机组人员损失,以及其他飞机机载人员可能当做人质等,如果空中任务失败,采用无人机的政治和人员风险更低。无人机执行任务有更低的负面风险和更高的任务成功率^[4]。“无人机



图2 无人机系统

系统线路图”报告认为无人机系统正通过执行许多复杂而危险的任务而不造成巨大经济损失和人员伤亡,改变着全球反恐和其它战争的军事作战方式。

4 无人机系统的关键技术

无人机系统技术在很大程度上已不同于有人驾驶航空器常规技术。目前无人机系统技术研究的论文虽然很多,但是哪些是无人机系统特有的关键技术,需要我们做研究、分析和归纳。我们初步分析,无人机系统的关键技术主要体现在如下几方面。

4.1 无人机空中平台设计的特殊问题

由于无人机不受人员高速过载、环境适应性和内部设备少的限制,因此,更适于创新设计各种非常规布局构型的无人机飞行平台,更适于设计外形隐身性好的无人机^[5]。无人机体积小、重量轻,更强调高度集成设计,因此无人机不能像大型飞机那样各个部件和分系统可以独立设计,必须统一设计、综合考虑,先进的无人机需要进行协调综合“优化”设计。

要减少无人机结构质量,更多的需采用复合材料。目前,无人机多半采用比模量、比强度高碳纤维树脂复合材料和玻璃纤维材料。为了减少着陆碰撞损伤,也有将着陆部分结构用芳纶纤

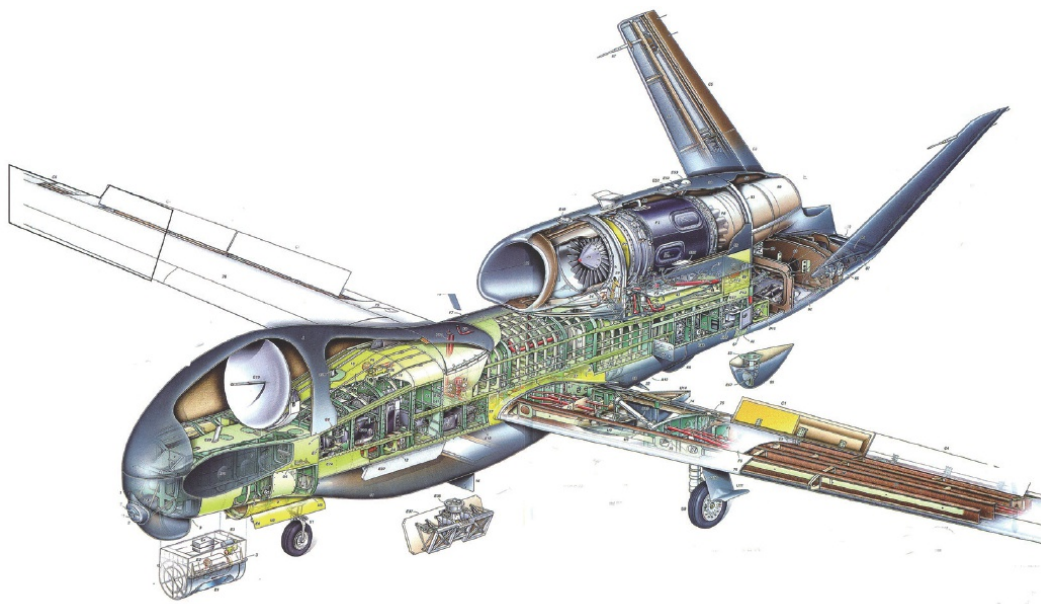


图3 全球鹰无人机结构图

维复合材料构造。

4.2 无人机对能源与动力的特殊需求

推重比大、质量轻小和长航时是无人机对能源与动力的主要需求。直接将有人驾驶飞行器的动力装置用于无人机，多半并不适合。

活塞式发动机和喷气式发动机的小型化设计成为大中型无人机之必须。无刷电动机成为微小型无人机的首选，当然，目前锂电池的能重比限制难以支撑无人机长航时飞行，因此，新的电能（燃料电池、铝空气电池、太阳能电池等）正在发展中。

4.3 无人机的自主飞行控制与导航技术

无人机上没有人员驾驶，自主飞行控制与导航技术必然成为无人机的核心技术，地面人员遥控技术只是无人机系统的辅助控制技术。无人机飞行控制要实现像飞行员一样驾驶的水平目前仍然有困难，因为飞行员对飞机在空中环境的识别能力、驾驭能力和遭遇特殊情况的处理能力依赖人的智慧和长期训练的经验。

无人机飞行控制的智能化成为自主飞行控制与导航技术的必然途径，如无人机故障的识别与

控制、无人机的抗干扰能力（如阵风、电磁干扰）、自主飞行路线的规划与修正^[6]。

4.4 无人机系统通信与数据链技术

地面测控人员要实时保持与无人机空中平台的联系，遥控、遥测、跟踪无人机的状态、飞行轨迹、任务载荷情况；无人机要将任务实施的结果（如目标图像）传送回地面站。这些都需要

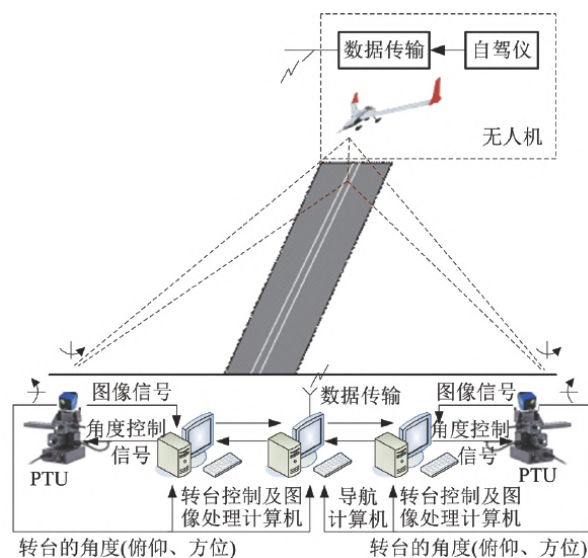


图4 视觉辅助导航技术

建立无人机空中平台与地面站之间的无线通信链路——数据链，包括地面远程遥控遥测双向链路和任务载荷的双向链路等^[7]。

无人机数据链要解决远距离传输能力、宽带传输能力，要具有低功耗、低误码率和高接收灵敏度能力，要提高抗干扰能力。对于军用无人机，地面站还需要具有低截获概率、抗欺骗性、防反辐射攻击能力，以及提供数据加密功能等。无人机蜂群组网通信技术也正发展中。

4.5 无人机系统的任务载荷设备技术

无人机系统的意义不在于无人机平台，而是要用于执行特殊任务。可以说，军用型、工业型或专业型无人机系统正是根据专门的任务目标来设计的。

无人机的侦察任务，需要对白天、夜间、雾霾环境、雨天、树叶遮挡等环境下获取高清图像，于是光学变焦高分辨率摄像、红外热成像、合成孔径雷达成像、激光雷达成像、多光谱成像、高光谱成像、立体成像等技术正在运用到无人机上。要控制、防抖、跟踪目标，各种轻巧灵活的侦察控制云台吊舱应运而生。

航测、物流、消防、公安、电力巡检、交通管理、桥梁检测、环境污染检测等等不但需要无人机机载特种设备，还需要地面测控、显示和分析处理系统。

侦察-打击一体化无人机系统的创新成功，大大扩展了无人机的军事作用。如何设计适用于无人机的自主侦察与火控装置，以及适用于无人机的武器装备，将是军用航空发展的重要方向^[8]。协

同作战、蜂群战术给无人机系统展现了更加诱人的军用前景。

4.6 无人机发射与回收技术

目前有人驾驶飞机的起飞和着陆主要取决于驾驶员的正确判断和操纵。而无人机上没有飞行员，毫无疑问，其起飞和着陆的难度大得多，无论是无人机遥控起降还是自主控制起降。大型无人机滑跑着陆仍然是个难点，微波和视觉引导滑跑着陆正在发展中。中小无人机常采用弹射起飞技术，如液压弹射技术、火箭助推起飞技术、车载助推发射技术。伞降技术、着网回收技术、撞绳回收技术、气囊回收技术也是中小无人机所采用的。

无人机垂直起降技术无需机场跑道，因而是无人旋翼类航空器发展的重要原因。为了使固定翼无人机也具有垂直/短距起降能力，矢量推力技术、倾转旋翼无人机和固定翼-旋翼组合式无人机起降技术、舰载无人机自主起飞与着舰技术正在发展中。

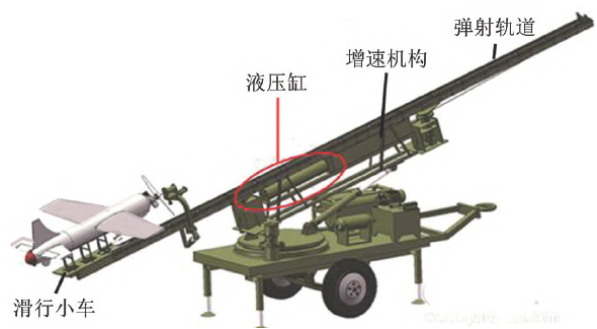


图6 一种液压弹射装置



(a) 30倍光学变焦摄像机吊舱



(b) 红外热成像吊舱



(c) 合成孔径雷达成像仪



(d) 高光谱成像仪

图5 几种成像装置

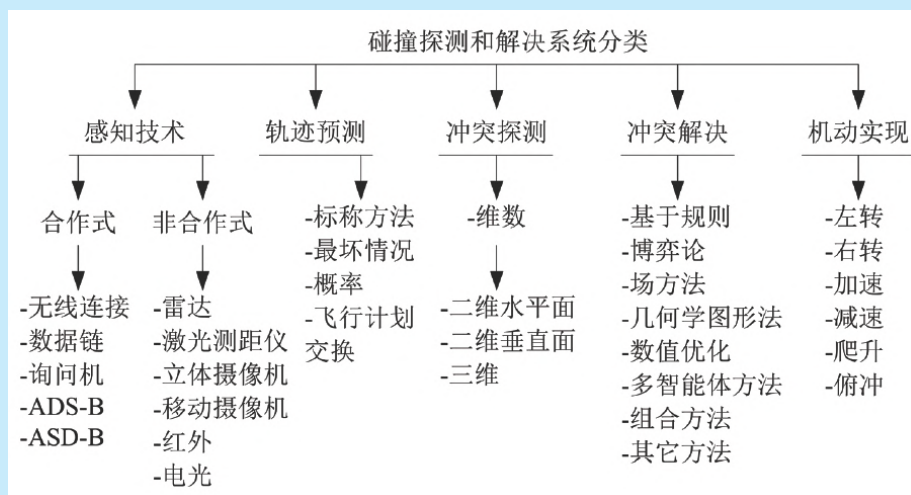


图7 无人机感知与避障系统解决方案

4.7 无人机的环境感知、视觉导航与避障技术

能否实现无人机智能化的自主飞行，如何保障空中无人机与有人驾驶航空器的交通管理和安全性，成为无人机能否科学健康地发展的重要问题。从技术上来看，研究与发展无人机对飞行环境的感知能力和自主避障功能，就成为解决上述问题的关键技术之一。尤其是无人机在低空、城市、山林、室内、群飞等复杂环境中飞行，是否能自主避障至关重要。

视觉感知是无人机对环境感知最重要的技术，单目视觉感知技术、双目视觉深度感知和立体视觉技术、光流感知技术正从简单的视觉向智能化仿生视觉发展。单纯视觉技术尚难实现全自主导航，因此视觉导航技术正与卫星导航、激光扫描测距、红外测距、超声波测距、微波与毫米波雷达测距等技术相结合，更加精确地感知环境，实现自主避障和导航功能。

无人机系统尚处于发展阶段，新型的无人机还在不断被设计创造。无人机系统的关键技术也在不断发展中，智能化、环境感知能力、自适应能力、隐身技术、协同作战能力、微型化、长航时动力与能源的发展，将使无人机系统具有更加神奇的功能和更加广阔的应用前景。□

参考文献

- [1] Office of the secretary of defense, Unmanned aircraft systems roadmap.2005–2030, UAS, 2005.
- [2] Austin R.著, 陈自力, 董海瑞, 江涛译.无人机系统-设计.开发与应用 [M].国防工业出版社, 2013.
- [3] Angelov P.Sense and avoid in UAS:Research and applications [M].Hoboken:John Wiley&Sons, 2012.
- [4] 任志文.无人机动力装置选型分析 [A].中国航空学会.2014.5
- [5] 昂海松, 周建江, 曹云峰, 等.微型飞行器系统技术 [M].科学出版社, 2014.
- [6] Li B, Mu C, Wu B.A survey of vision based autonomous aerial refueling for Unmanned Aerial Vehicles [C]. in Proceedings of IEEE Third International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2012:1–6.
- [7] 世界无人机系统大全编写组.世界无人机系统大全 [M].航空工业出版社, 2015.
- [8] 昂海松, 余雄庆.飞行器先进设计技术 (第二版) [M].国防工业出版社, 2014.

作者简介:

昂海松 (1947–), 男, 教授, 主要研究方向为微型飞行器系统技术研究。

基于扰动流体动态系统的无人机三维航路规划：方法与应用

王宏伦^{1, 2}, 吴健发^{1, 2, 3}, 姚鹏⁴

- (1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学高等理工学院, 北京 100191;
4. 中国海洋大学工程学院, 青岛 266100)

摘要: 本文阐述了基于扰动流体动态系统的复杂地形条件下无人机三维航路规划方法。扰动流体动态系统源于流水避石航路规划方法, 但其流体物理学性质被相对简化, 因此能够采用解析法进行研究。利用该方法, 可以得到光滑、可飞性高的航路, 实现无人机在复杂地形条件下的避障飞行。首先介绍了扰动流体动态系统的基本原理, 然后针对经典扰动流体动态系统面临的几个关键性问题, 例如局部极小、参数优化、航路可飞性等, 分析并列举了相应的改进与解决方案。除三维避障航路规划以外, 该方法还广泛应用于目标跟踪、能量最优飞行、区域搜索、电力巡线等特定无人机任务中, 体现出较高的应用价值。

关键词: 扰动流体动态系统; 复杂地形; 无人机; 三维航路规划; 流水避石; 局部极小
中图分类号: V249.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 01-0072-11

UAV Three-Dimensional Path Planning Based on Interfered Fluid Dynamical System: Methodology and Application

Wang Honglun^{1, 2}, Wu Jianfa^{1, 2, 3}, Yao Peng⁴

- (1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Shenyuan Honors College of Beihang University, Beijing 100191, China;
4. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: This paper introduces the UAV 3D path planning method based on Interfered Fluid Dynamical System (IFDS) in the complex terrain. IFDS derives from the theory of fluid avoiding obstacles. However, the physical property of fluids is simplified. Therefore, the analytical method can be used in IFDS. Using IFDS, the flight path with high smoothness and feasibility can be obtained and UAV can realize the obstacle avoidance flight in complex terrain. First, the fundamental of IFDS is introduced. Then, aiming at some key problems that IFDS faces, such as the local minimum, parameter optimization and flight path feasibility, this paper analyzes and introduces the related improvements and solutions. Besides the 3D obstacle avoidance path planning, IFDS has been widely applied in some specific UAV missions, such as target tracking, energy-optimal flight region search and power lines inspection, which reflects a high application value.

Keywords: Interfered Fluid Dynamical System (IFDS); Complex Terrain; UAV; 3D Path Planning; Fluid Avoiding Obstacles; Local Minimum

收稿日期: 2018-04-15; 修回日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金 (61175084)

1 引言

航路规划技术是反映无人机自主控制能力等级的关键技术之一。多年来,国内外学者对航路规划问题展开了广泛研究,取得了大量研究成果并已应用于实际无人机平台^[1-3],这些航路规划方法主要以二维水平面规划为主。但随着无人机所执行的任务逐渐复杂化,例如低空突防、编队飞行、协同攻击等,其使用空域从中、高空不断向低空、甚至超低空拓展,规划环境也从简单向复杂转变。其复杂性具体体现在:环境非结构化(包含多种类型密集障碍物、存在非凸区域);环境动态性(存在突发威胁、移动威胁、运动目标等);环境不确定性(规划空间信息部分未知或完全未知);任务背景复杂化(从单纯的避障飞行变为在规避障碍的同时完成例如目标跟踪、区域搜索、编队飞行等任务)等。这对无人机的航路规划能力提出了诸多新的挑战。无人机仅依靠水平机动已难以很好地满足此类复杂环境和任务的特殊要求,甚至存在着一些严重的隐患。因此,必须将航路规划方法由二维空间扩展为三维空间。对此,大量研究人员进行了不懈的探索。目前所提出三维航路规划方法可以被大致划分为:基于模型预测控制的规划方法^[4]、基于优化算法的规划方法^[5]、基于随机规划的方法^[6]、基于几何计算规划方法^[7],以及基于人工势场的规划方法^[8]等。前四类方法在由二维空间扩展为三维空间后,往往存在如下问题:当地形环境较为复杂时,算法计算量将呈爆炸式增长;通过将规划空间离散进行航路规划时,生成航路的平滑性难以保障,在应用中还必须设计额外的航路平滑策略^[9],增大了航路的复杂度。而基于人工势场的方法是基于物理中的势场相关概念所提出的,目标点对无人机产生“引力”,障碍物对无人机产生“斥力”,最后通过求合力来控制无人机的运动。其物理意义明确,计算量较小,能够满足实时航路规划的要求,规划航路相对平滑,因此目前看来,基于人工势场的方法是比较适合于三维航路规划的。但是这类方法存在以下

两个不容忽视的问题:

(1)在人工势场中,没有障碍形状(包络)的概念,完全依靠调整力场生成航路,因此当力场参数调整不恰当时,无人机有可能进入障碍内部,导致避障失败;

(2)力场容易陷入局部最优。针对人工势场法存在的问题,立足于势场的基本思想,在文献[10]中首次提出基于流水避石思想的三维航路规划方法。该方法借鉴了自然界水流流动的宏观特征:当无障碍物时,水流沿直线流动;当遇到障碍物时,水流会平滑地绕过该障碍并最终流向终点。引入三维障碍外包络的概念,将航路规划与流体计算有机结合,通过流体力学方法对三维地形进行流场模拟,并综合考虑无人机性能约束、飞行安全性、航路代价等指标进行航路优选,最终得到满足任务要求的三维光滑可飞航路。由于水流必定能够找到入口和出口之间的路径,因此能够避免势场法容易陷入局部势场极小点的问题。

遗憾的是,传统流水避石方法仍存在一定的局限性:其中的解析法仅能处理球体障碍,对于其他立体障碍(例如柱形、锥形等)难以获得其解析解;而其中的数值法由于需要采用CFD进行模拟,计算量过大,仅能用于离线航路规划。另外,传统流水避石方法由于自身的复杂性,难以与其他任务背景相结合,仅能做单纯的避障机动,极大的限制了其应用。

从航路规划的角度讲,对于更为复杂的障碍物,可以放宽对流体物理性质的限制,重点关注流体的避障特性,从而降低方程求解的难度。因此,针对传统流水避石方法存在的问题,在文献[11]中首次提出了扰动流体动态系统方法(Interfered Fluid Dynamical System, IFDS),该算法以解析法为基础,但避免了求解带有复杂边界条件的流体方程,便于处理复杂的地形和不同形状的障碍物。规划航路不仅具有仿流水避石的自然特性,而且环境建模简单,计算量小,大大拓展了流水避石方法的适用范围。

2 基本原理

2.1 静态IFDS

在利用IFDS进行航路规划前，首先需要对障碍进行预处理。现实中的大部分障碍可以用标准凸面体及其组合体进行描述。对于地形障碍（例如建筑和山峰），可以简化为柱体、椎体、立方体、半球体及其组合；对于移动威胁（例如入侵机），可以简化为球体。标准凸面体障碍方程如下：

$$\Gamma(\xi) = \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^{2d} + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^{2e} + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^{2f} \quad (1)$$

其中 $\xi = (x, y, z)$ 为无人机的位置； $\xi_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 为凸面体中心点位置； a, b, c 为凸面体三维轴长； d, e, f 为凸面体形状参数， a, b, c, d, e, f 六个参数共同决定凸面体的形状。

扰动流体动态系统算法（IFDS）提取了自然界流水避石现象与避障航路规划问题的相似之处：河流中的石头可看做无人机需躲避的障碍物；笔直的流水可看做初始流场，初始流场流线即为无障碍环境下的初始航路；绕过石头的流水可等效为扰动流场，扰动流场流线即为障碍环境下的规划航路。静态环境下，我们在目标点处（左下角）引入汇流作为初始流场，汇流是一种以恒定流速均匀地从四周流入目标点的流体，因此当不存在障碍物或威胁时，无人机以任意一点作为起始点都能沿直线到达目标，如图1（a）所示。当规划空间中存在障碍物时，障碍物的扰动使得初始流场发生改变，但受扰动流场仍具有全局收敛性与稳定性，即流场流线仍能够绕开障碍物并到达目标点，如图1（b）所示。由上述分析可知，IFDS算法的关键在于求解扰动流场的流速。

三维静态环境下的IFDS算法步骤如下：首先建立初始流场即汇流，然后将障碍物对初始流场的扰动影响用扰动矩阵量化表示，接着通过修正初始流场流速获得扰动流场流速，最后对其迭代积分即可得到扰动流场流线，即无人机规划航路。

假设无人机目的地为 $\xi_d = (x_d, y_d, z_d)$ ，任务

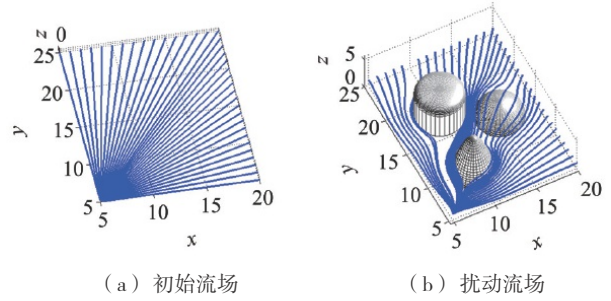


图1 流体扰动示意图

区域内共有 K 个障碍，所有障碍都按式（1）完成了建模。

当不存在障碍时，流线应呈一条从无人机当前位置指向目的点的直线段，无人机将以 V 的速度幅值沿该直线段飞行，此时无人机的速度被称为原始流速（又称汇） u ，可沿地面三轴坐标系描述为式（2）的形式：

$$u = - \left[\frac{V(x-x_d)}{d} \quad \frac{V(y-y_d)}{d} \quad \frac{V(z-z_d)}{d} \right]^T \quad (2)$$

其中 $d = \sqrt{(x-x_d)^2 + (y-y_d)^2 + (z-z_d)^2}$ ，为无人机与目标点之间的相对距离。

接下来，障碍对原始流速的影响可用总的扰动矩阵 M 来描述：

$$M = \sum_{k=1}^K \omega_k M_k \quad (3)$$

其中， ω_k 为第 k 个障碍的权重系数； M_k 为第 k 个障碍的扰动矩阵。 ω_k 和 M_k 可分别表示为

$$\omega_k = \begin{cases} 1 & K=1 \\ \prod_{i=1, i \neq k}^K \frac{(\Gamma_i - 1)}{(\Gamma_i - 1) + (\Gamma_k - 1)} & K \neq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$M_k = I + \frac{1}{|\Gamma_k|^{1/\rho_k} n_k^T n_k} (n_k^T n_k I - 2n_k n_k^T) \quad (5)$$

其中， Γ_k 和 Γ_i 由式（1）计算得出； I 为吸引矩阵，为三阶单位阵，其作用类似于人工势场中的吸引场； $n_k = [\partial \Gamma_k / \partial x \quad \partial \Gamma_k / \partial y \quad \partial \Gamma_k / \partial z]^T$ 为第 k 个障碍的单位法向量； ρ_k 为第 k 个障碍的排斥反应系数，

通常扰动矩阵与障碍的排斥反应系数密切相关, 排斥反应系数越大, 流场流线躲避障碍的时机越早, 因此可以通过调节排斥反应系数获得不同形状的流线; $\frac{1}{|\Gamma_k|^{1/\rho_k} n_k^T n_k} (n_k^T n_k I - 2n_k n_k^T)$ 为排斥矩阵, 作用类似于人工势场中的斥力场。

扰动矩阵 M 是整个 IFDS 的核心, 相应的概念源于如下流体力学中超球体障碍对绕流影响的相关理论^[12]。

在得到扰动矩阵后, 修正初始流场流速, 得到扰动流场流速: \bar{u}

$$\bar{u} = M u \quad (6)$$

最后, 对 \bar{u} 积分, 获得下一规划航点:

$$P_{t+1} = P_t + \bar{u} \cdot \Delta T \quad (7)$$

其中, ΔT 为计算步长。如此迭代求解得到一系列离散点, 将其连线即形成扰动流线, 即规划的避障航路。

经分析可知, IFDS 生成的流线符合流水避石现象的一般特性:

定理 1: 扰动流线满足地形边界约束条件, 因此无人机能安全躲避各类障碍物。

定理 2: 扰动流线最终仍收敛到目标点。

定理 3: 流线有较好的地形回避/跟随特性。

三个定理的证明过程见文献^[11-13]。

2.2 动态 IFDS

复杂动态环境下, 往往存在各类动态威胁。本文引入了无人机与移动威胁的相对速度, 将动态问题转化为静态问题来考虑, 所以动态威胁环境下的流场性质类似于静态障碍下的流场性质, 仍符合流水避石现象的一般特性: 流线在保证避碰的同时, 还能够由起点流向终点, 且具有一定的地形跟踪特性。

重点考虑了质心平移和绕质心旋转这两种运动方式。如果凸面体威胁满足条件 $a=b$ (如球体、圆柱、圆锥、圆台等), 绕质心的旋转不会改变威胁空间定义, 此时只需考虑质心平移。如果凸面体满足条件 $a \neq b$ (如平行六面体、椭球体、椭圆

柱等), 转动的影响不能忽略, 两种运动方式均需考虑。

首先以单障碍为例, 基于 t 时刻的障碍物信息 (假设可在线获得), 可预测 $t+1$ 时刻障碍物的质心平移速度 v^L 和 v^R 旋转角速度。定义 v 为威胁的参考运动速度:

$$v = e^{\frac{-1}{\lambda}(\Gamma(\xi)-1)} (v^L + v^R \times (\xi - \xi_0)) \quad (8)$$

其中 λ 为正值, 通常 λ 越大, 流线躲避动态障碍物的时机越早。当无人机离障碍物较远时, 按式 (1) 定义的 $\Gamma(\xi)$ 较大, 障碍物影响会随着指数衰减而迅速消除^[14], 此时参考速度 v 趋于 0, 可避免无人机不必要的机动, 提高避障效率。

构建相对初始流场, 其中流速定义为 $u-v$, 而相对扰动流场的流速为 $\bar{u}-v$ 。在相对初始流场下, 移动威胁可看作静止的, 因此可计算相对扰动流场的流速^[13]:

$$\bar{u} - v = M (u - v) \quad (9)$$

则实际扰动流场流速为:

$$\bar{u} = M (u - v) + v \quad (10)$$

对该流速迭代积分, 即可获得扰动流线。

当存在多个障碍时, 式 (8) 将修正为:

$$v_k = e^{\frac{-1}{\lambda}(\Gamma_k(\xi)-1)} \omega_k (v_k^L + v_k^R \times (\xi - \xi_{0,k})) \quad (11)$$

其中下标 k 表示第 k 个障碍物。

然后对多个障碍的速度进行加权求和, 得到多障碍的合成速度 v :

$$v = \sum_{k=1}^K \omega_k e^{\frac{-1}{\lambda}(\Gamma_k(\xi)-1)} v_k \quad (12)$$

然后再代入式 (10) 即可。

动态障碍环境下相应定理证明与静态环境类似, 本文不再赘述。

3 方法改进

经典 IFDS 算法能较好地模拟自然界的流水特性, 规划出安全平滑的可飞航路, 但该经典算法

也存在着易陷入陷阱区域与局部最小点(驻点)问题,这是由其本身的缺陷引起的。因此,我们主要对这两种局部极小问题进行分析,并给出了一些针对性的改进策略。与此同时,如何保证无人机在规划过程中能够生成高质量的可飞航路,本文亦给出了一定的解决方案。

3.1 陷阱区问题分析及改进方案

当规划空间中多个障碍物部分重叠时,会产生一个凹陷区域即陷阱区域(Trap area, TA),如图2阴影部分所示,此时若扰动流速 \bar{u} 指向TA,流线会落入该陷阱区域而无法逃离。最终,流线到达两个障碍物的交界线处,此时 $\Gamma_i(\zeta)=1$ 与 $\Gamma_{i+1}(\zeta)=1$ 同时成立,导致式(4)中的分子分母均为0,因此规划失败。

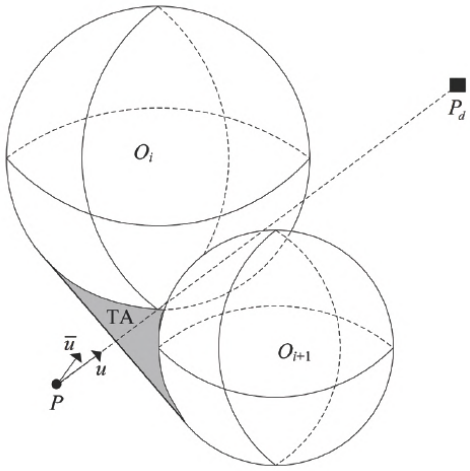


图2 陷阱区示意图

改进方案1: 引入虚拟障碍

在文献[11]中,提出引入虚拟障碍来使无人机提前规避陷阱区。设置虚拟的平行六面体障碍的总体思想是分层次地对凹形陷阱进行填充,在尽量不浪费可飞空间的前提下防止流线进入陷阱区域。

改进方案2: 引入虚拟目标点

在文献[15]中,提出引入虚拟目标点(Virtual target, VT)来解决陷阱区域问题,当满足同时满

足以下条件时:(1)多个障碍物 O_i, \dots, O_j 重叠;(2)扰动流速 \bar{u} 指向TA;(3) $\min\{d(\xi, O_i), \dots, d(\xi, O_j)\} \leq d_{TA}$ 成立,即可构建虚拟目标点。条件(3)中, $d(\xi, O_j)$ 表示无人机与障碍物表面的距离, d_{TA} 为陷阱区域判定阈值,可决定流线躲避陷阱区域的时机,该值通常与重叠障碍物的数量、尺寸等相关。

构建虚拟目标点的过程如下。首先,定义虚拟目标曲面 A_v ,虚拟目标点 P_v 可从该曲面上选取。

然后,将曲面 A_v 分别按垂直方向、水平方向等分为 N_1, N_2 份,则曲面 A_v 被离散化为 N_1, N_2 个点,将它们作为备选的虚拟目标点。

最后构造启发式评价函数筛选出最优目标点进行即可。

3.2 驻点问题分析及改进方案

当无人机起点与目标点的连线正好经过障碍中心时,如图3所示,由于吸引速度与排斥速度恰好共线且方向相反,则扰动流速 $|\bar{u}|$ 逐渐减小,流线到达障碍物表面时 \bar{u} 为0,因此流线会停滞于该点,称为驻点(Stagnation point, SP)。

改进方案: 引入附加虚拟速度

在文献[11]中,本课题组提出引入附加虚拟速度(Additional virtual velocity, AVV)来解决该类问题。以无人机的最小飞行速度 v_{min} 作为判定阈值,当同时满足以下条件时:(1) $|\bar{u}| \leq v_{min} + \epsilon_v$;(2)吸引速度与排斥速度恰好共线且方向相反,即可引入附加虚拟速度 $\bar{u}_{virtual}$ 。需同时满足以下条件:(1) $\bar{u}^T \bar{u}_{virtual} = 0$;(2) $n^T \bar{u}_{virtual} = 0$;(3) $|\bar{u}_{virtual}| \ll |\bar{u}|$ 。然后,以合速度 $\bar{u} + \bar{u}_{virtual}$ 引导无人机飞行,避免停滞于驻点。采用该种改进策略,无人机

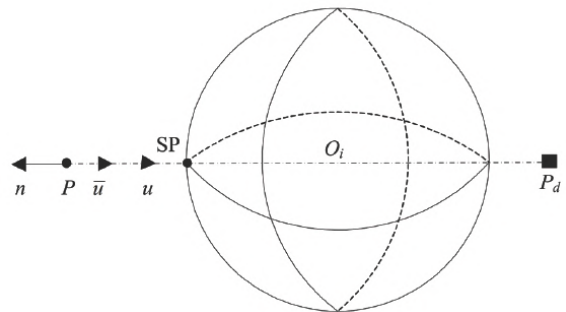


图3 驻点问题示意图

的逃离航路将较为平滑，而且不改变流线的避障特性。

3.3 局部极小问题的统一解决方案：切向矩阵的引入

上述改进方案的基本思路都是引入一个“附加控制场”，使无人机在接近陷阱区和驻点时能够及时“跳出”，虽然能够在一定程度上改善局部极小问题，但必须针对两种情况分别设计相应的策略，其过程较为繁琐。实际上，无论是陷阱区还是驻点问题，都是局部极小问题的不同形式而已，既然如此，理论上应该有统一的解决方案来一次性解决局部极小问题。

进一步分析可知，之所以在经典IFDS中会出现局部极小问题，根本原因在于对扰动矩阵 M 的定义不够全面、客观。因此，围绕对扰动矩阵 M ，仍然是借鉴之前的“附加控制场”思路，在文献[16]中，提出在扰动矩阵 M 中，除了吸引矩阵和切向矩阵外，仿照排斥矩阵的形式，再引入一个切向矩阵，其表达式为：

$$M_k^\perp = \frac{\tau_k l_k n_k^T}{|\Gamma_k|^{1/\sigma_k} n_k^T n_k} \quad (13)$$

其中， $\tau_k \in (-1, 1)$ ，其取值与避障所处状态有关，避障开始为正，结束为负； σ_k 与排斥反应系数 ρ_k 类似，其大小决定“附加控制”的强弱，称为切向反应系数^[17]。

在文献[15, 18, 19]中，进一步改进切向矩阵。对第 k 个障碍物来说，在与径向法向量 n_k 垂直的切平面 S 上，定义两个互相垂直的切向量：

$$t_{k,1} = \left[\frac{\partial \Gamma_k}{\partial y} \quad -\frac{\partial \Gamma_k}{\partial x} \quad 0 \right]^T \quad (14)$$

$$t_{k,2} = \left[\frac{\partial \Gamma_k}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Gamma_k}{\partial z} \quad \frac{\partial \Gamma_k}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Gamma_k}{\partial z} \quad -\left(\frac{\partial \Gamma_k}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \Gamma_k}{\partial y} \right)^2 \right]^T \quad (15)$$

其中 $t_{k,1}$ 为水平切向量，切平面 S 与各向量的定义如图4所示。以 $t_{k,1}$ 为 x' 轴， $t_{k,2}$ 为 y' 轴， n_k 为 z' 轴建立坐标系， $o'-x'y'z'$ 则切平面 S 上的任意单位切向

量在 $o'-x'y'z'$ 中表示为：

$$t'_k = [\cos \theta_k \quad \sin \theta_k \quad 0]^T \quad (16)$$

其中， $\theta_k \in [-\pi, \pi]$ 表示任意切向量与向量 $t_{k,1}$ （即 x' 轴）的夹角，称为切向方向系数。

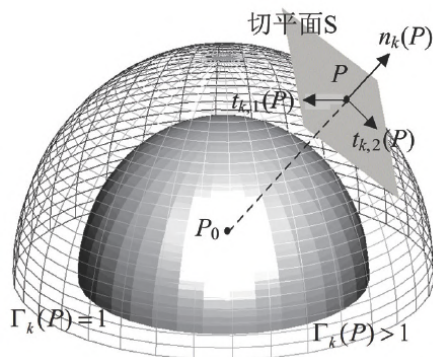


图4 各向量示意图

切向量 t'_k 在 $o-xyz$ 中表示为 t_k ，经坐标变换可得该向量：

$$t_k = R_k t'_k \quad (17)$$

其中 R_k 表示坐标系 $o'-x'y'z'$ 到 $o-xyz$ 的坐标旋转矩阵。

然后，重新定义切向矩阵： M_k^\perp

$$M_k^\perp = \frac{t_k n_k^T}{|\Gamma_k|^{1/\sigma_k} \|t_k\| \|n_k\|} \quad (18)$$

因此，修改过的IFDS的扰动矩阵 M 最终可表示为：

$$M_k = I - \frac{n_k n_k^T}{|\Gamma_k|^{1/\rho_k} n_k^T n_k} + \frac{t_k n_k^T}{|\Gamma_k|^{1/\sigma_k} \|t_k\| \|n_k\|} \quad (19)$$

其中，扰动矩阵由吸引矩阵、排斥矩阵和切向矩阵组成，共有三个可调参数，分别为排斥反应系数 ρ_k 、切向反应系数 σ_k 以及切向方向系数 θ_k 。

改进后的IFDS仍满足2.1节的定理1-3，详细证明过程见文献[15]。通过在扰动矩阵中引入切向矩阵，拓宽了流体的物理特性与扰动流速的空间表达，有效地解决了局部极小问题。

3.4 反应系数优化问题

由于无人机飞行环境是动态变化的，因此必

须实时更新环境信息，进行在线规划。为解决在线规划问题，采用了滚动优化策略实现对局部航路的在线优化：设定有限步优化时域 N ，依据实时检测到的动态威胁或目标等信息，预测未来它们的运动状态，然后优化反应系数，寻找满足无人机动力学约束与环境约束的局部可飞最优航路，然后只以局部航路飞行一步，再重复上述动作，引导无人机完成飞行任务。利用此方法，可以充分考虑未来运动态势，提前确定大致的可靠飞行航路。

优化过程主要分为如下几步：

(1) 设置航路评价指标。一般来说，包括航路长度代价、航路安全代价、航路机动代价等。航路长度代价不仅要考虑未来 N 步航路的长度，还要考虑该 N 步航路之后的航路总长度；航路安全代价一般为无人机与障碍表面相对距离的倒数；航路机动代价一般为无人机航向角和爬升角变化量的绝对值。

(2) 对各类子指标进行归一化处理，最终确定局部优化指标 $J(t:t+N)$ 。然后，即可优化各障碍物的反应系数，得到 t 时刻的最优反应系数组合：

$$U = \left\{ \rho_1^*, \sigma_1^*, \theta_1^* \cdots \rho_w^*, \sigma_w^*, \theta_w^* \right\} = \arg \min_{\rho, \sigma, \theta} J(t:t+N) \quad (20)$$

(3) 设计滚动优化策略中的解算器。为了求解式(20)，除了将参数离散化后进行遍历搜索以外，还可以设计更高效的求解器来满足实时解算的要求，例如文献[11, 20, 21]分别采用遗传算法、改进灰狼优化算法以及改进鲸鱼优化算法解算优化反应系数。

3.5 航路可飞性问题解决方案

传统的航路规划方法(包括经典IFDS，如文献[11, 13, 16])大多对于无人机动力学约束考虑较少，导致规划的航路可能不满足可飞性要求，无法实现精确航路跟踪。为解决这一问题，提出以下三种思路：

(1) 在设计航路评价指标时加入航路可飞性评价指标，当不满足该指标时，其值置为无穷或一

个较大惩罚值，然后进行迭代搜索寻优。

该方法思路比较直接，但比较容易陷入局部最优解。该方法具体见文献[18, 19]。

(2) 将轨迹延拓策略(Trajectory propagation, TP)融入IFDS。为了判断航路是否可飞，需确保飞行器沿航路飞行的各主要状态(如动压、迎角、滚转角等)连续变化、满足给定的约束且在不同阶段航路的连接点处能够匹配。采取轨迹延拓来进行轨迹分析，该方法考虑无人机的动力学模型，通过迭代求解，不但可得到能够同时满足给定轨迹约束和飞行器动力学约束的各状态变量剖面，同时还能给出制导指令。轨迹延拓实际上是在给定轨迹约束的前提下，求解飞行器动力学微分方程的过程。此外，采用轨迹延拓算法解算出的相关变量，能对排斥系数或切向系数的调整提供参考。假设无人机躲避球形威胁，经分析可知，排斥系数越大，扰动速度中的垂直分量越大，而切向系数越大，扰动速度中的水平分量越大。因此，假设飞行爬升角或迎角超出约束范围，说明扰动速度中的垂直分量过大，排斥系数需减小或切向系数需增大；假设转弯角速率太大，说明扰动速度中的水平分量过大，排斥系数需增大或切向系数需减小。

虽然该方法解算出的状态量较为连续，但当障碍环境较为复杂时，非线性微分方程可能存在解算失败或解算超时的风险。该方法具体见文献[15]。

(3) 将无人机运动学/动力学模型与约束直接融入IFDS。首先将获得的扰动流速视为无人机期望速度，然后利用其解算出期望的航向角和爬升角，再对其进行限幅，可得受约束的航向角和爬升角，然后再反算出期望过载，判断过载是否在可用范围内，若不在范围内，则将过载与航向角和爬升角进行反复修正迭代，直至满足要求。然后输出实际可达航向角和爬升角至无人机运动学方程，从而计算出位移(即可飞航路)。

该方法相当于对轨迹延拓的简化，其计算复杂度低于轨迹延拓，实时性更好，但从理论上来说，定理1-3在指令受限的情况下有可能不再满

足, 因此必须与滚动时域优化结合。该方法具体见文献[21]。

3.6 与其他避障方法的融合

除了与3.4节的滚动时域优化/模型预测控制方法相结合以外, IFDS还可与其他类型的避障方法相融合, 体现了较好的兼容性。例如在文献[22]中, IFDS与快速扩展随机树(RRT)算法(基于随机规划的航路规划方法)相结合, 以IRRT算法为基本粗规划算法, 并采用IFDS算法进行精细的新节点扩展, 该方法兼具IFDS生成航路平滑与RRT算法具有概率意义完备性, 全局搜索能力强的优点; 文献[23]提出将动态避障区^[24]与IFDS相结合, 建立了多层空中防撞决策机制。

4 方法应用

目前, 除了传统的避障航路规划以外, IFDS还广泛应用于复杂地形下单机/多机协同目标对峙跟踪^[18-19], 城市环境下太阳能无人机能量最优飞行^[21], 城市区域搜索中的避障转场^[25], 电力巡线^[26]等。本文以目标跟踪和太阳能无人机应用为例, 阐述IFDS的应用前景。

4.1 单机/多机协同目标对峙跟踪

对峙跟踪是指无人机在追踪运动目标的过程中, 无人机与目标的水平距离保持恒定的对峙距离, 从而保证无人机传感器对目标的覆盖, 减小定位误差, 降低无人机暴露风险。目前, 自由空间或简单环境下的目标对峙跟踪问题已得到了较好的解决, 但当无人机飞行环境较为复杂如障碍物密集分布时, 传统方法的计算效率较低甚至得不到可行解, 难以规划安全轨迹。因此需寻找一种复杂条件下面向目标对峙跟踪问题的有效求解框架, 在提高无人机跟踪目标效率的同时保证航路安全性。

在文献[18]中, 针对三维复杂障碍环境下的对峙跟踪问题, 提出将Lyapunov导航向量场方法(LGVF)^[27]与IFDS相结合, 在对峙跟踪的同时规

避障碍。LGVF在三维自由空间的向量场如图5所示, 生成的向量场逐渐收敛于所设定的Lyapunov极限环上, 轨迹流畅平滑, 具备流体的宏观特性, 易与IFDS结合。因此一种有效的求解思路是将LGVF代替汇流, 作为IFDS的初始流场, 也就是把按下式所定义的速度代替汇流速度即可:

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{-2\alpha r V_0 \cdot (r^2 - R^2) - 2\alpha \lambda h V_0 \cdot (h^2 - H^2)^2}{\sqrt{(r^2 + R^2)^2 + \lambda^2 (h^2 - H^2)^2}} \quad (21)$$

其中, V_d 为定义的Lyapunov距离函数; V_0 为无人机速率; r 为无人机与目标的相对距离; R 和 H 分别为设定的对峙跟踪半径和高度; α 为速率调节因子; λ 为纵向收敛速度调节因子。

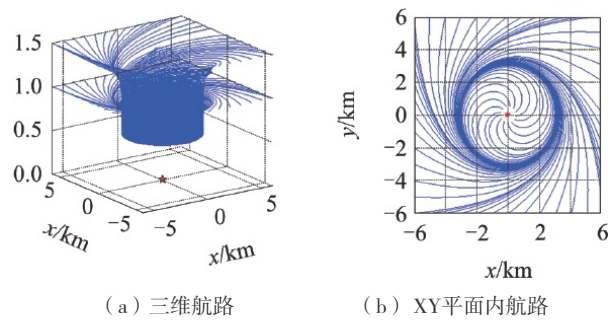


图5 LGVF在三维自由空间的向量场

两种算法因此有效结合起来。由于IFDS方法不改变原系统的稳定性, 因此扰动流线即规划航路可保证无人机在避障的同时仍能够跟踪目标。文献[19]在此基础上, 进一步引入Lyapunov相位函数确定多架无人机期望速率, 引导无人机按相位平均分布在极限环上, 实现了复杂地形下多无人机协同对峙跟踪, 效果如图6所示。

4.2 城市地形下太阳能无人机能量最优飞行

太阳能无人机的能量生产与其自身姿态和日照的相对几何关系息息相关。太阳能无人机在城市环境下飞行时, 除了要考虑规避建筑物以外, 还要尽可能确保自身能量生产最大化, 而城市中的建筑物除了会威胁无人机的飞行安全外, 还会对阳光起到遮挡效果, 恶化太阳能无人机的能量生产状况。因此文献[21]提出以IFDS为基础航路

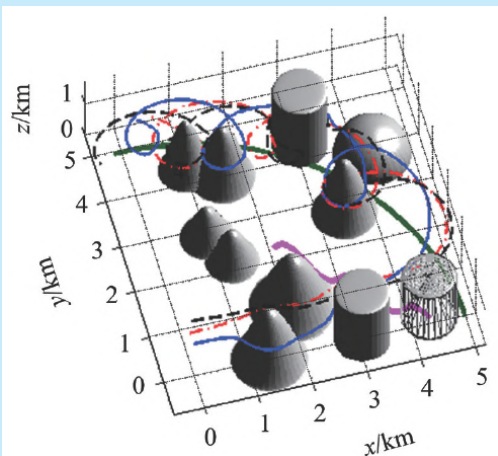


图6 复杂地形下多无人机对时跟踪运动目标效果图

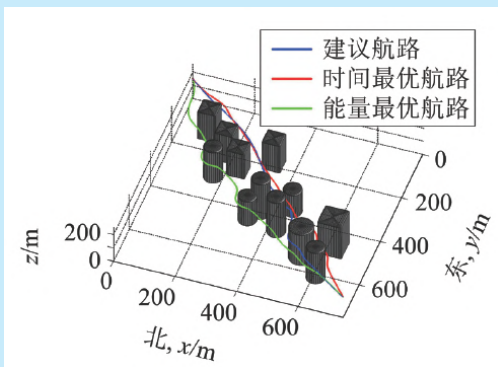


图7 太阳能无人机飞行轨迹

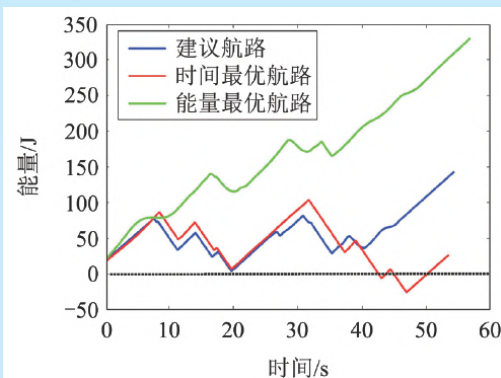


图8 太阳能无人机净能量生产值

规划算法，反解算出太阳能无人机的姿态角（即 3.5 节的第三种思路），然后依据姿态角与太阳角的相对关系计算出太阳能无人机的净能量生产值，并在考虑阳光遮挡的情况下综合规划出兼顾能量最优与时间最优的航路，效果见图 7、8。图 8 中，绿线为所提出方法在飞行过程中的净能量生产值。

5 结论

本文阐述了基于扰动流体动态系统的复杂地形条件下无人机三维航路规划方法。在基于流水避石思想航路规划方法的前期研究工作基础上，适当放宽对流体物理性质的限制，重点关注流体的避障特性，从而得到了流体扰动的一般解析形式，并将其推广到无人机航路规划中。针对经典 IFDS 存在的几个关键性问题，例如局部最小问题、参数优化问题、航路可飞性问题等，设计了多种策略加以改进与探索。除三维避障航路规划以外，IFDS 还广泛应用于目标跟踪、能量最优飞行、区域搜索、电力巡线等多项无人机特定任务中，体现出较高的应用价值。目前，流水避石思想及其延伸扰动流体动态系统方法的相关成果不断涌现，形成了从理论到应用的完整体系，逐渐成为人工势场法的重要分支，展现出旺盛的生命力。

在未来，可继续围绕 IFDS 就以下方面进行探索：

(1) 目前，以深度强化学习为代表的人工智能技术正蓬勃发展，可以考虑将此类人工智能技术与 IFDS 相融合，从而提高避障的效率和航路质量。

(2) 在将无人机运动学/动力学模型与约束直接融入 IFDS 后，能否能进一步给出在指令受限的情况下定理 1-3 的证明过程，这对于后续实现航路规划与控制一体化具有重要意义。

(3) 可以考虑在结合相应环境与任务背景后，将 IFDS 推广至其他智能载具，例如自主水下潜航器等。□

参 考 文 献

- [1] Tisdale J, Kim Z W, Hedrick J K. Autonomous UAV Path Planning and Estimation: An Online Path Planning Framework for Cooperative Search and Localization [J] . IEEE Robotics & Automation Magazine, 2009, 16 (2) : 35-42.
- [2] Chao H Y, Cao Y C, Chen Y Q. Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey [J] . International Journal of Control, Automation and Systems, 2010, 8 (1) : 36-44.
- [3] Goerzen C, Kong Z, Mettler B. A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance [J] . Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2010, 57 (1-4) : 65-100.
- [4] Wu J, Wang H, Li N, et al. Distributed trajectory optimization for multiple solar-powered UAVs target tracking in urban environment by Adaptive Grasshopper Optimization Algorithm [J] . Aerospace Science and Technology, 2017, 70: 497-510.
- [5] 陈谋, 肖健, 姜长生. 基于改进蚁群算法的无人机三维航路规划 [J] . 吉林大学学报 (工学版), 2008, 38 (4) : 991-995.
- [6] 尹高扬, 周绍磊, 吴青坡. 无人机快速三维航迹规划算法 [J] . 西北工业大学学报, 2016, 34 (4) : 564-570.
- [7] Seo J, Kim Y, Kim S, et al. Collision Avoidance Strategies for Unmanned Aerial Vehicles in Formation Flight [J] . IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53 (6) : 2718-2734.
- [8] Chen Y, Luo G, Mei Y, et al. UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory [J] . International Journal of Systems Science, 2016, 47 (6) : 1407-1420.
- [9] Zhang X, Duan H. An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning [J] . Applied Soft Computing, 2015, 26: 270-284.
- [10] 梁宵, 王宏伦, 李大伟, 等. 基于流水避石原理的无人机三维航路规划方法 [J] . 航空学报, 2013, 34 (7) : 1670-1681.
- [11] Wang H, Lyu W, Yao P, et al. Three-dimensional path planning for unmanned aerial vehicle based on interfered fluid dynamical system [J] . Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28 (1) : 229-239.
- [12] L.M.Milne-Thomson. Theoretical hydrodynamics [M] . 4th ed. London: Macmillan, 1960.
- [13] Yao P, Wang H, Liu C. 3-D dynamic path planning for UAV based on interfered fluid flow [C] . Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, Aug. 2014, Yantai, China, 997-1002.
- [14] Khansari-Zadeh S M, Billard A. Realtime avoidance of fast moving objects: A dynamical system-based approach [C] . 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics Systems (IROS) . IEEE, 2012: 121-126.
- [15] Yao P, Wang H, Su Z. UAV feasible path planning based on disturbed fluid and trajectory propagation [J] . Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28 (4) : 1163-1177.
- [16] 王宏伦, 雷玉鹏, 姚鹏, 等. 基于流体扰动计算的无人机三维无碰撞航路规划 [J] . 控制理论与应用, 2016, 33 (3) : 295-303.
- [17] 王宏伦, 姚鹏, 梁宵, 等. 基于流水避石原理的无人机三维航路规划 [J] . 电光与控制, 2015, 22 (10) : 1-6
- [18] Yao P, Wang H, Su Z. Real-time path planning of unmanned aerial vehicle for target tracking and obstacle avoidance in complex dynamic environment [J] . Aerospace Science and Technology, 2015, 47: 269-279.
- [19] Yao P, Wang H, Su Z. Cooperative path planning with applications to target tracking and obstacle avoidance for multi-UAVs [J] . Aerospace Science and Technology, 2016, 54: 10-22.
- [20] 姚鹏, 王宏伦. 基于改进流体扰动算法与灰狼优化的无人机三维航路规划 [J] . 控制与决策, 2016, 31 (4) : 701-708.
- [21] Wu J, Wang H, Li N, et al. Path planning for solar-powered UAV in urban environment [J] . Neurocomputing, 2018, 275: 2055-2065.
- [22] Yao P, Wang H, Su Z. Hybrid UAV path planning based on interfered fluid dynamical system and improved RRT [C] . Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE. IEEE, 2015: 829-834.

- [23] Liu C, Wang H, Yao P. UAV collision avoidance decision and 3D path re-planning method based on improved interfered fluid dynamical system and rolling optimization [C]. Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 2016 IEEE Chinese. IEEE, 2016: 2238-2243.
- [24] 刘畅, 王宏伦, 姚鹏, 等. 面向空中威胁的无人机动态碰撞区建模与分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41 (7): 1231-1238.
- [25] Yao P, Wang H, Ji H. Gaussian mixture model and receding horizon control for multiple UAV search in complex environment [J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 88 (2): 903-919.
- [26] Shuai C, Wang H, Zhang W, et al. Binocular vision perception and obstacle avoidance of visual simulation system for power lines inspection with UAV [C]. Control Conference (CCC), 2017 36th Chinese. IEEE, 2017: 10480-10485.
- [27] Frew E W, Lawrence D A, Morris S. Coordinated Standoff Tracking of Moving Targets Using Lyapunov Guidance Vector Fields [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2008, 31 (2): 290-306.

作者简介:

王宏伦 (1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为无人机自主控制与智能决策、复杂环境航路规划、高抗扰精准飞行控制等。

吴健发 (1993-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多智能体协同路径规划、太阳能无人机自主决策与控制。

姚鹏 (1989-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为无人系统智能决策与路径规划、多智能体协同优化与控制。





无人机吊挂飞行控制技术综述

齐俊桐, 平原

(天津大学电气与自动化工程学院, 机器人与自主系统研究所, 天津 300072)

摘要: 无人机吊挂负载飞行是无人机面向任务需求的具体体现。如何提高无人机吊挂飞行稳定性, 抑制负载摆动对无人机的影响, 一直是国内外研究人员的研究重点。文中分析总结了吊挂无人机飞行控制特点和技术难点, 对吊挂无人机的发展现状和飞行控制技术研究现状进行了综述, 并对吊挂无人机飞行控制技术的发展进行了展望。

关键词: 无人机; 吊挂飞行; 控制技术

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 01-0083-8

Survey on Flight Control Technology for Hanging Load UAV

QI Juntong, Ping Yuan

(Institute of Robotics and Autonomous System, School of Electrical Engineering and Automation, Tian jin University, Tian jin 300072, China)

Abstract: The UAV hanging load flight is a concrete embodiment of the mission-oriented demand of drones. How to improve the flying stability of drones and suppress the influence of load swing on drones has always been a research focus of domestic and foreign researchers. This paper analyzes and summarizes the hanging UAV flight control characteristics and technical difficulties, the current situation and status of the flight control technology research and development of hanging load UAV. The development of flight control technology about hanging load UAV was prospected.

Keywords: UAV; Hanging Flight; Control Technology

1 引言

当今，无人机以自身独特的优势获得了极大的发展，在军用、警用、国土安全，灾害预警，线路巡检和影视航拍，通讯，农业，环境保护等诸多领域有着广泛应用。特别是在当下人工智能的时代浪潮中，其研究成果也是日新月异，物流运输已成为无人机重要的应用方向之一。无人机作为一个理想的作业平台，吊挂飞行是其遂行任务之一。它具有灵活的机动性，可以在其它运输工具难以到达的地方，快速、高效地开展物资运输投放作业；而且无需考虑地理环境，不受陆地交通运输的管制，操作简单易上手；再者，采用吊挂形式的运输不用担心吊挂物外形的影响^[1]。因次，吊挂无人机在军事和民用领域得到了越来越广泛的应用^[2]。然而无人机在吊挂物体飞行时，其系统稳定性会受到来自吊挂物体摆动的影响，这也是国内外高校和研究团队关注和研究的焦点^[3-5]。

2 吊挂无人机飞行控制特点

吊挂无人机是一个多变量、非线性、强耦合、时变、欠驱动的高阶耦合系统，是一个复杂的被控对象，其主要特点体现在以下几个方面^[6-9]：

(1) 建模难度大。对于无人平台柔性吊挂这样的多自由度复合结构的控制有着其自身特殊的技术难点，并不能通过无人机和垂吊物各自建模、控制与规划方法的简单组合来解决，而且很难建立精确的全机动力学模型，这对吊挂无人机控制系统的鲁棒性提出了极大的挑战。

(2) 耦合特性严重。无人机本身存在严重的耦合，而吊绳和吊挂物的引入则改变了系统整体气动布局，进而加剧了耦合。

(3) 全机动力学特性复杂。面向任务作业过程中无人机、垂吊物、降落目标相对运动，加之随机的环境扰动，使其产生复杂的全机动力学特性。使得垂吊物与降落地面接触过程中两者之间的作

用力/力矩及随机的外力/力矩扰动将使系统动力学模型呈献较多不确定结构和参数。

3 国内外发展及技术研究现状

吊挂无人机是近年来出现的一个新概念，就目前公开发表的相关文献来看，其研究成果还比较少。尤其在型号无人机方面，由于一直是世界各国军方推崇的装备，相关研究属于机密，目前一些发达国际的研究成果也未公开发表。

在大型吊挂无人机研究方面，就目前来看其技术相对成熟的当属美国和以色列，比如美国的格鲁门公司，以色列飞机工业公司马拉特分部等，在型号无人机方面都具有相当成熟的技术成果。其次技术比较成熟的是英国、德国、意大利、法国等欧洲发达国家。此外日本的雅马哈公司在这方面的研究也是居世界前列^[7]。但是，对于执行外吊挂运输任务的无人直升机来说研究成果相对较



图1 K-MAX吊挂无人直升机



图2 MQ-8C吊挂无人直升机

少,公开发表的文章也寥寥无几。我们可以看到的,如美国卡曼公司的K-MAX和洛克希德马丁公司的MQ-8C都是专门用来执行机外吊挂运输任务的无人直升机。K-MAX无人直升机目前已经可以达到自主飞行的技术水平,并且在阿富汗战场上成功执行了吊挂运输补给任务^[8]。2015年6月,卡曼公司Aerosystems部门恢复K-MAX载重直升机的生产。K-MAX载重直升机在世界各地用于消防、日志记录和其他要求高载重的任务。2017年5月份,K-MAX进行了恢复生产以来的首飞测试^[10]。

国内对无人直升机的研制始于“八五”期间。发展至今,虽然取得了一定的成果,但是在飞行控制和动力等关键技术方面跟国外相比差距依然很大,多数的核心元件需要进口,并且在研制模式上基本是对国外的成熟机型进行仿制或对有人机进行无人化改造。《装备预先研究技术成熟度评价标准》把我国工业无人直升机的技术成熟度列为7级(共9级)。技术相对较为成熟的为中航工业602所,其次是总参谋部60所,最后是以北京中航智科技有限公司为首的民营企业^[11, 12]。但是,对于执行吊挂运输任务无人机的研究成果在国内还尚未出现。

20世纪中期到90年代是利用直升机开展吊挂运输作业的研发初创期,但由于关键技术问题不

能很好解决,研制进程缓慢。随着飞控技术的突破以及复合材料、动力、传感器等核心技术的快速发展及广泛应用,加之军方在高技术战场侦察的需要,我国越来越重视无人直升机的研究,确保逐步实现智能化、多元化^[13]。但是,对于无人平台柔性吊挂这样的多自由度复合结构的控制有着其自身特殊的技术难点,并不能通过无人机和垂吊物各自建模、控制与规划方法的简单组合来解决,这对吊挂无人机控制系统的鲁棒性提出了极大的挑战。因此,现有用于无人机控制技术还不能完全应用于吊挂无人机上面。

虽然目前对吊挂无人机的研究成果较少,但是针对非吊挂无人机的飞行控制,国内外学者进行了广泛的研究,对此还是有一定借鉴意义的。从经典PID控制到现代控制理论再到人工智能控制,在理论上和实际型号应用上都取得了一定成果,如表1所示。目前主要的控制方法有:鲁棒 H_∞ 控制^[14-20]、LQR控制^[21-23]、特征结构配置^[24, 25]、变结构控制^[26-28]、MPC控制^[29-32]、动态逆控制^[33-36]、神经网络^[37, 38]、模糊控制以及显模型跟踪控制等^[39-44]。

在小型吊挂无人机方面,其概念已经得到初步验证。德雷克赛尔大学自主系统实验室^[45]研究并完成了旋翼机自主跟踪、负载吊取、车辆部署

表1 无人机飞行控制方法及应用

控制方法	特点	应用及案例
PID 控制	工程实用性强,处理不确定能力弱	大多数国内无人直升机
模糊控制	不依赖于对象的数学模型,靠经验进行推理	姿态、悬停、位置等
自适应控制	处理不确定性能力强,对对象本身依赖较少,强扰动下处理能力弱	无人直升机全包线控制
神经网络控制	在推理,控制参数寻优,故障诊断上有很强的优势,然而实时性难以保证且需要对象精确的数学模型	无人直升机全包线控制
鲁棒 H_∞ 控制	鲁棒性强,设计计算复杂困难	姿态控、悬停、位置控制等
动态逆控制	对对象数学模型精确度要求高,逆模型求解困难,鲁棒性不强	姿态控制、全包线飞行控制
MPC 控制	与模型相关	姿态、高度、导航等
LQR 控制	能够处理系统的动态问题和噪声问题,需要对象的精确模型	姿态解耦控制
显模型跟踪控制	设计简单,响应效果好,鲁棒性不强	全包线飞行控制,已应用于 ADOCS 项目和 RASCAL 项目
特征结构配置	闭环系统阻尼,可解耦,稳定性好,多用在多输入多输出系统	目前在 BO-105 型直升机上得到应用
变结构控制	鲁棒性好,工程上不适用	全包线飞行控制和姿态控制

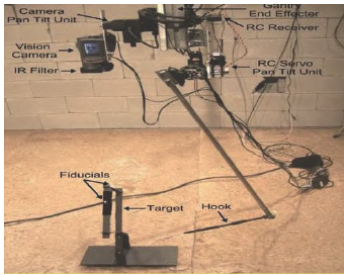


图3 货物吊取的原型

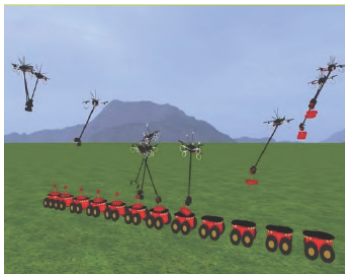


图4 无人机对运动物体的吊取

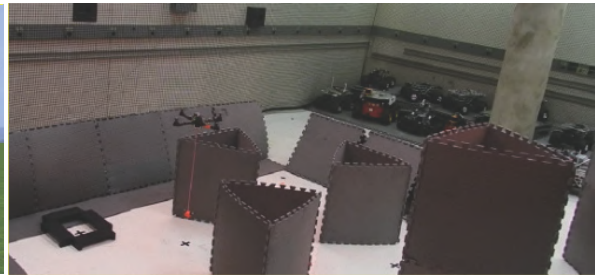


图5 旋翼无人机吊挂负载飞行演示实验

的作业。通过悬吊在机架下的吊取装置对整个系统展开了验证。德国的蒂宾根生物控制研究所采用仿真旋翼无人机重点研究了无人机与负载之间的相对轨迹跟踪，并且在仿真环境下实现了对动目标的抓取。上述验证案例均未进行样机的实际试飞试验。

新墨西哥大学计算机科学系^[45]设计并实现了基于干扰观测器的旋翼无人机分层控制的自主飞行，提出了一种运动规划方法，用于生成悬挂载荷的旋翼飞行无人机具有最小剩余摆动（无摆动）的轨迹，并通过计算机模拟和室内演示实验初步验证了结果。

不难发现，目前这些系统只是在旋翼无人机系统上增加简单吊取装置来验证整个概念的基本可行性，而无人机吊挂系统是一个多变量、非线性、强耦合、欠驱动的复杂被控对象。无人机吊挂飞行时，吊挂负载的摆动会直接影响到无人机的飞行稳定性。柔性吊挂自身的复合自由度以及其所处的复杂扰动环境使其同现有的具有作业能力的其他无人平台系统相比，具有特殊的控制难点，而且这些难点并不能通过旋翼无人机和吊挂系统各自建模、规划与控制方法的简单组合来解决。这些问题正是相关研究机构的研究重点，且已经逐渐成为了无人机研究领域的一个新热点。但到目前为止，系统性、理论性的研究成果尚未出现。

卡内基梅隆大学研究院^[48]在动力学模型建立方面考虑吊挂缆绳的弹性和阻尼特性，推导出一个无坐标系统的动力学模型。经过数值仿真表明，针对非弹性缆绳的情况开发的几何控制器仍然适

用于弹性缆绳的情况。文献[49]将吊挂缆绳简化成刚性连接杆，文献[50]研究了吊挂负载对旋翼无人机动力学特性的影响，并讨论了在吊挂负载的影响下旋翼无人机的飞行稳定性及其相应的控制方案。文献[51]研究了因吊挂负载的摆动而引起旋翼无人机系统的稳定性问题，并重点分析了摆动产生的基本条件及原因，以及悬挂点位置、不确定载荷质量等对无人机和吊挂负载耦合运动的影响。文献[52, 53]搭建了四旋翼吊挂负载时的三维动力学模型，并研究了吊挂负载的干扰对四旋翼的飞行稳定性的影响。综合上述分析，吊挂点、载荷质量和动力学模型等与吊挂无人机飞行特性密切相联，在加装吊挂装置时要充分考虑其构型及结构参数等引起的整体耦合系统的变化，降低上述因素对飞行稳定性和可控性的影响。

为了保证无人机系统能够在吊挂物摆动时保持稳定的飞行状态，需要对无人机系统的协调规划和控制问题进行研究。在这方面研究做的比较好的是特拉华大学（University of Delaware）的Agrawal等人。相关研究人员对无人机系统装载一个缆绳挂载机器人在搬运货物时二者的协调问题开展了深入研究^[54]。挪威科技大学研究人员^[55]开发了基于反推技术的非线性跟踪控制器，除了抑制摆动负载的影响之外，控制器还可以补偿未知的恒定风力扰动，通过开环整形滤波器规划无路径来减小悬挂载荷的摆动。瑞士苏黎世大学、美国麻省理工学院Foehn P和Tedrake R等人^[56]提出了一种快速轨迹优化算法，并能够将轨迹优化问题转化为带有互补约束的数学程序（MPCC）。美国宾夕法尼亚大学的研究人员基于微分平滑

(Differential Flatness)方法设计了针对平面四旋翼无人机吊挂系统的控制器,实现了针对平面四旋翼无人机吊挂系统的轨迹生成和跟踪,并将这种控制放大扩展到三维环境^[57]。利用几何控制(Geometric Control)和微分平滑方法,达到了四旋翼无人机吊挂系统几乎全局指数稳定的控制效果^[58]。

上述规划与控制方法或许对于特定的模型不确定性参数具有一定的鲁棒性/自适应性,又或许对于单纯的外界干扰具有一定的不确定性。但是,由于动力学模型的不确定性是深入到模型结构的不确定性,因此这些方法即使对于无人机系统的自主控制仍然难以取得较好的控制性能。

在国外研究取得初步进展的同时,我国也开始意识到无人机面向自主任务作业的重要性和迫切需求。中国航空工业集团在2013年成功举办了国际无人飞行器大奖赛,在旋翼组的竞技类比赛中设置的比赛任务中,以运动中舰船间的空中补给为背景,要求无人机在两个移动平台之间实现自主定位抓取,运送和码放物资的作业。以任务完成精度和完成时间作为考核指标。该比赛吸引了来自新加坡国立大学、清华大学、北航和南航等国内外众多高校研究团队参加。最终,只有中科院沈阳自动化研究所成功抓取全部物资并完成码放作业,同时以总分第一名获得冠军。

此外,近年来国内高校也相继开展了对吊挂无人机的控制研究,取得了一定的成果。中科院

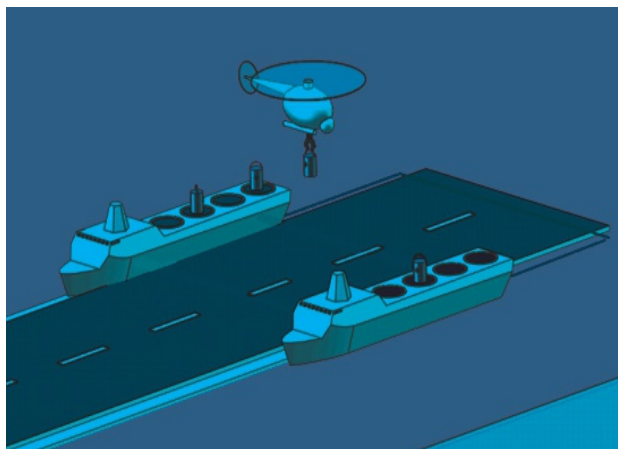


图6 国际无人飞行器大奖赛任务示意图

沈阳自动化研究所韩建达等人^[59]设计了四旋翼悬挂负载系统的滑模控制,验证了对负载摆动和系统不确定性的强鲁棒性以及良好的跟踪控制性能。天津大学鲜斌教授团队针对四旋翼无人机吊挂飞行系统,设计了一种新型控制策略,建立四旋翼无人机吊挂系统的数学模型,将吊挂负载看作由刚性绳悬挂在四旋翼无人机重心位置的质点,通过能量分析的方法设计了针对此系统的非线性控制器。经仿真验证,可以在抑制吊挂负载摆动的同时将四旋翼无人机移动到目标位置^[60]。华中科技大学杜沛力等人,针对无人机携带吊挂负载物的系统通过结构分析进行数学建模得到三维空间中四旋翼无人机运动特性与负载物摆动之间关系,提出以二型模糊集合描述该不确定性较多的系统,设计了二型模糊控制器对无人机空间位置及负载物摆动进行控制,通过仿真结果证明了二型模糊控制能达到控制无人机位移及抑制负载物摆动的效果,验证了无人机携带吊挂负载应用的可行性以及面对外界干扰的鲁棒性^[61]。

4 结论

无人机因其独特的优势,越来越受到国内外高度重视。通过上述对吊挂无人机的飞行控制技术的综述不难发现,该技术真正应用在可执行遂行任务上的无人机面临的技术问题依然艰巨。尤其对于吊挂无人机来说,其自身复杂特殊的运动机理将是我们将面临的重大难题。就目前发展来看,对于吊挂无人机的研究仍然存在着诸多挑战。但是随着相关技术的不断迭代和成熟,尤其是随着以人工智能为代表的信息技术的突破性进展和广泛应用,无人机必将得到更进一步的发展,并将深刻改变人们的生活方式、改变行业应用模式,也将改变未来战争的形式^[62-63]。而对于面向自主任务作业的吊挂无人机来说也必然会有美好的发展前景。□

参 考 文 献

- [1] 宋志民. 直升机吊挂运输的安全性分析与研究 [J]. 黑龙江科技信息, 2017 (09): 36.
- [2] 李洪兴. 美国陆军寻求以无人货运系统来减少伤亡降低成本 [J]. 现代军事, 2015 (02): 18-19.
- [3] Asseo Sabi J, Whitbeck Richard F. Control Requirements for Slung-Load Stabilization in Heavy Lift Helicopters [J]. Journal of the american helicopter society, vol. 18 no. 3 pp. 23-31 1973.
- [4] Lee SJ, Kim HJ. Autonomous swing-angle estimation for stable slung-load flight of multi-rotor UAVs [C]. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, 2017, pp. 4576-4581.
- [5] Mo R, Geng Q, Lu X. Study on control method of a rotor UAV transportation with slung-load [C]. 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu, 2016, pp. 3274-3279.
- [6] 赵秀云. 直升机外吊挂运技术研究 [J]. 直升机技术, 2001 (04): 1-8.
- [7] 程诚, 邢永军. 无人直升机的发展历程及应用前景 [J]. 商, 2013 (24): 337.
- [8] 王照瑞, 曹兴华. 吊挂物为刚体模型的直升机外吊挂飞行平衡与稳定性分析 [J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47 (02): 296-303.
- [9] 宋彦国, 王焕瑾. 多直升机协调吊挂系统飞行力学建模与特性分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39 (10): 1279-1285.
- [10] 王海忠, 史永林, 张连生, 等. 赴美国调研采购 K-Max 直升机有关情况的报告 [J]. 森林防火, 2014, (03): 50-54+3.
- [11] 林志刚. 中航工业直升机所无人直升机系列报道 (一) 无人直升机的发展现状及应用分析. 中国航空报, 2016
- [12] 陈章. 解析工业无人直升机 [J]. 科技展望, 2017, 27 (19): 275.
- [13] 温伟, 张峰, 秦银雷, 等. 国外典型重型运输直升机对比分析 [J]. 中国科技信息, 2016 (20): 17-19.
- [14] 贺跃帮, 裴海龙, 赵运基, 等. 无人直升机鲁棒积分滤波反步法飞行控制设计 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2013, 41 (02): 30-36.
- [15] 何淼磊, 贺继林, 周烜亦. 小型无人直升机鲁棒飞行控制 [J]. 机器人, 2016, 38 (03): 337-342+351.
- [16] 鲜斌, 古训, 刘祥, 等. 小型无人直升机姿态非线性鲁棒控制设计 [J/OL]. 控制理论与应用, 2014, 31 (04): 409-416.
- [17] 李庆鑫, 宗群, 王芳, 等. 基于鲁棒自适应的无人直升机悬停控制 [J]. 控制工程, 2014, 21 (02): 253-257.
- [18] 丁力, 马瑞, 单文桃, 等. 小型无人直升机航向线性自抗扰控制 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48 (05): 22-27.
- [19] 李果, 赵建中. 小型无人直升机的广义Hamilton非线性鲁棒控制 [J]. 北京信息科技大学学报 (自然科学版), 2016, 31 (04): 1-7.
- [20] 贺跃帮, 裴海龙, 周洪波. 无人直升机局部 H_∞ 最优LPV速度控制器设计 [J/OL]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (06): 1268-1274.
- [21] 姜哲, 赵新刚, 齐俊桐, 等. 基于主动建模的无人直升机增强LQR控制 [J]. 吉林大学学报 (信息科学版), 2007, (05): 553-559.
- [22] 邓高湘, 裴海龙. 基于LQR的无人直升机姿态控制器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (01): 106-109. [2017-09-28].
- [23] 马瑞, 吴洪涛, 丁力. 基于人工蜂群算法的无人直升机LQG/LTR控制律优化设计 [J/OL]. 控制与决策, 2016, 31 (12): 2248-2254.
- [24] 贾秋玲, 韩圣洁, 张福凯. 无人直升机QFT控制及基于RTX的半实物仿真 [J]. 火力与指挥控制, 2013, 38 (12): 65-67+71.
- [25] 蒋鸿翔, 徐锦法, 高正, 等. 新型复合式无人直升机悬停/着陆控制 [J]. 航空学报, 2008, (S1): 46-54.
- [26] 于海山. 无人直升机六自由度运动模拟平台控制系统设计与应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [27] 刘锦涛, 吴文海, 李静, 等. 四旋翼无人机SO (3) 滑模变结构姿态控制器设计 [J/OL]. 控制与决策, 2016, 31 (06): 1057-1064.
- [28] 汪亚真, 刘明, 王成军, 等. 可变结构小型多旋翼无人飞行器的设计 [J]. 机械设计与制造, 2016, (04): 186-189.
- [29] 孙秀云, 方勇纯, 申辉, 等. 无人直升机姿态通道模型预测控制 [J]. 控制工程, 2014, 21 (05): 643-647+652+659.
- [30] 张志清, 姜年朝, 李湘萍, 等. 某无人直升机复杂系

- 统动力学建模及试验验证 [J]. 机械与电子, 2011, (05): 3-5.
- [31] Z ü rn M, Morton K, Heckmann A, et al. MPC controlled multirotor with suspended slung Load: System architecture and visual load detection [C]. 2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2016, pp. 1-11.
- [32] Trachte J, Gonzalez F, McFadyen A. Nonlinear Model Predictive Control for a multi-rotor with heavy slung load [C]. 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Orlando, FL, 2014, pp. 1105-1110.
- [33] 郭署山. 无人直升机着舰控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [34] 单海燕. 四旋翼无人直升机飞行控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [35] 沈毅, 于晓敏, 李爱军. 无人直升机的动态逆模糊集成控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2003, (12): 1133-1135.
- [36] 孙文达, 李平, 方舟. 基于LPV模型逆的无人直升机中低速巡航控制 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2012, 52 (09): 1223-1229.
- [37] 郭署山, 袁锁中. 基于神经网络的舰载无人直升机着舰控制研究 [J]. 电子科技, 2010, 23 (09): 110-112+121. [2017-09-28].
- [38] 杜建福. 基于预测控制的小型无人直升机自主飞行研究 [D]. 上海交通大学, 2008.
- [39] 李晓峰, 曹力, 梁颖茜, 等. 基于模糊PID的无人直升机悬停控制技术研究 [J/OL]. 哈尔滨商业大学学报 (自然科学版), 2016, 32 (06): 740-744+751.
- [40] 张乐, 吴金男, 毕少杰. 基于模糊PID的直升机模型飞行姿态控制 [J]. 控制工程, 2014, 21 (03): 387-390+394.
- [41] 王小青, 黄一敏, 孙传伟. 无人直升机悬停姿态控制系统设计 [J]. 南京航空航天大学学报, 2008, (05): 583-588.
- [42] 袁涛. 显模型跟踪控制技术在舰载无人直升机姿态控制中的应用 [J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24 (05): 543-546.
- [43] 郑峰婴, 杨一栋. 控制阵解耦的直升机显模型跟踪飞行系统设计 [J]. 海军航空工程学院学报, 2007, (01): 119-124.
- [44] 陈自力, 张昊, 蔚建斌, 等. 基于非线性干扰观测器的翼伞鲁棒反步跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2017, 32 (08): 1427-1433.
- [45] Kuntz N, Oh PY. Towards Autonomous Cargo Deployment and Retrieval by an Unmanned Aerial Vehicle Using Visual Servoing, ASME Dynamic Systems and Controls Conference [J]. Brooklyn, New York, USA, pp: 841-849, 2008
- [46] Spica R, Franchi A, Oriolo G, et al. Aerial Grasping of a Moving Target with a Quadrotor UAV [C]. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Portugal, pp: 65-78, 2012
- [47] Aleksandra Faust, Ivana Palunko, Patricio Cruz, et al. Automated aerial suspended cargo delivery through reinforcement learning [J]. Artificial Intelligence, Volume 247, 2017, Pages 381-398, ISSN 0004-3702
- [48] Kotaru P, Wu G, Sreenath K. Dynamics and control of a quadrotor with a payload suspended through an elastic cable [C] // American Control Conference. IEEE, 2017: 3906-3913.
- [49] Qian L, Liu H H T. Dynamics and control of a quadrotor with a cable suspended payload [C] // Electrical and Computer Engineering. IEEE, 2017.
- [50] Zhou X, Liu R, Zhang J, et al. Stabilization of a Quadrotor with Uncertain Suspended Load Using Sliding Mode Control [C] // ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers & Information in Engineering Conference. 2016.
- [51] Wang H, Huang Y, Xu C. ADRC methodology for a quadrotor UAV transporting hanged payload [C] // IEEE International Conference on Information and Automation. IEEE, 2017: 1641-1646.
- [52] Faust A, Palunko I, Cruz P, et al. Learning swing-free trajectories for UAVs with a suspended load [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2013: 4902-4909.
- [53] C Raim ú ndez, JL Cama o, Transporting Hanging Loads Using a Scale Quad-Rotor, Springer International Publishing, 2015, 321: 471-482.
- [54] Oh SR, Ryu JC, Agrawal SK. Dynamics and control of a helicopter carrying a payload using a cable-suspended robot [J]. Vol. 128, No. 5, pp: 1113-1121, 2005.



- [55] Klausen K, Fossen T I, Johansen T A. Nonlinear Control with Swing Damping of a Multirotor UAV with Suspended Load [J] . Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017 (7) : 1-16.
- [56] Falanga D, Foehn P, Scaramuzza D, et al. Fast Trajectory Optimization for Agile Quadrotor Maneuvers with a Cable-Suspended Payload [C] // Robotics: Science and Systems. 2017.
- [57] Sreenath K, Michael N, Kumar V. Trajectory generation and control of a quadrotor with a cable-suspended load - A differentially-flat hybrid system [C] . 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, 2013, pp. 4888-4895.
- [58] Sreenath K, Lee T, Kumar V. Geometric control and differential flatness of a quadrotor UAV with a cable-suspended load [C] . 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Firenze, 2013, pp. 2269-2274.
- [59] Yi K, Gu F, Yang L, et al. Sliding mode control for a quadrotor slung load system [C] // Control Conference. IEEE, 2017: 3697-3703.
- [60] 鲜斌, 张旭, 杨森. 无人机吊挂飞行的非线性控制方法设计 [J] . 控制理论与应用, 2016, 33 (03) : 273-279.
- [61] 杜沛力. 携带吊挂负载物的四旋翼无人机二型模糊防摆控制 [A] . 中国自动化学会控制理论专业委员会. 第36届中国控制会议论文集 (E) [C] . 中国自动化学会控制理论专业委员会: , 2017: 6.
- [62] 樊邦奎, 张瑞雨. 无人机系统与人工智能 [J] . 武汉大学学报 (信息科学版), 2017, 42 (11) : 1523-1529.
- [63] 赵振平, 路瑞敏, 王锦程, 等. 智能无人飞行器技术发展展望 [J] . 战术导弹技术, 2017 (03) : 1-7.

作者简介:

齐俊桐 (1981-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行机器人系统理论及技术、无人系统三维环境的感知理解、机器人自主控制等。

平原 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为无人机自主控制。



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公司主管、北京海鹰科技情报研究所主办，中国指挥与控制学会无人系统专业委员会、中国无人系统产业联盟（筹）协办的科技学术期刊。现诚挚地向无人系统技术研究领域的专家学者、学术带头人以及致力于无人系统理论与技术创新研究的科技工作者约稿。

◆ 约稿方向

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

◆ 投稿方式

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

◆ 投稿要求

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

◆ 写作要求

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

◆ 关于稿酬

稿件一经录用，将按照字数和文章质量情况，向作者一次性支付稿酬。

联系人：王一琳 电话：010-68190652

《无人系统技术》第一届编委会名单

编委会顾问

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

编委会主任

李风雷

编委会副主任

王长青 宋斌 许玉明 张涛

编委会委员 (按姓氏拼音排序)

昂海松 蔡顺才 陈斌 戴江勇 邓宏彬 都基焱 方浩 符文星 郭继锋 黄长强
黄强 李必军 李东光 李贻斌 林平 刘建湖 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 吴向阳 夏元清 向锦武 徐昕
颜国正 于进勇 于林宇 张冬青 张梅 张山 张卫平 朱枫 朱小燕

外籍编委

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

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

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

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

Addr: 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