

# 无人机自主控制技术发展与挑战

石鹏飞

中航工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065

**摘要** 无人机飞行环境的高度动态性、不确定性和复杂性是无人机自主控制技术发展面临的主要问题。人工智能和高性能计算技术的进步为创造拥有高度自主能力的无人机提供了有利条件。本文介绍了无人机自主控制的定义和内涵,对无人机自主控制关键技术的发展现状进行了总结,并从“智商”、“情商”和“逆商”的角度提出了无人机自主控制研究的主要挑战和解决途径。

**关键词** 无人机;自主控制;人工智能;多机协同;容错控制

随着无人机技术的进步,无人机在军事和民事领域都有广阔的应用前景。在军事领域,无人机凭借其全向传感系统,毫秒级决策周期,以及超高过载机动能力,将可能成为颠覆现有空战手段的全新武器系统。在民用领域,无人机可以凭借其低成本和集群优势,成为取代传统资源探测、环境监控、通信中继手段的分布式异构飞行平台解决方案。

鉴于无人机使用者有限的预先规划能力,基于程序的自动控制策略已经不能满足未来自主化无人机在复杂环境下的多任务需求。因此,自主飞行控制能力的提高将是未来无人机飞行控制系统发展的主要目标。由于无人机现实飞行环境的高度动态性、不确定性和飞行任务的复杂性,实时、临场决策与控制问题已成为自主无人机研制面临的主要技术挑战。人工智能和高性能计算技术的不断进步为迎接上述挑战提供了有利条件。

## 1 自主控制的概念

自主控制是在非受控的环境下采用的高度自动控制。其中高度自动控制指的是无人无需外界干预的控制过程,而非受控的环境结构主要由不确定性引起。无人机自主控制意味着能在线感知外部态势,并按预定的使命和原

则在飞行中进行决策并自主执行任务<sup>[1]</sup>。与人类智能行为相类比,无人机的自主性可以划分为几个不同的层次。其中,基础层次对应于人类的反射性行为,也被称为“执行层”;中间层次对应于程序性行为,也被称为“组织协调层”;最高层次对应于决策性行为,也被称为“决策层”。在无人机管理系统中(图1),执行层功能由综合控制系统承担(ACL<sup>[1]</sup>1级),组织协调层包括在战术飞行管理系统中(ACL 2~4级),决策层则属于飞行任务管理系统的功能范畴(ACL 5~10级)。

本文在分析无人机自主控制需求的基础上,通过模仿人类智能的一般发展路径,提出当前无人机自主控制技术的“智商”、“情商”和“逆商”3方面发展要求(图2)。

**智商:**无人机个体能力,即计算和决策方面的无人机自主控制技术,例如航路规划、舰载起降、对地攻击、空战决策等。

**情商:**无人机群体融合能力,即高带宽互联和互操作类技术,例如无人机协同编队、有人/无人协同飞行、协同侦查/打击等。



图1 无人机管理系统功能架构

Fig. 1 Functional architecture of UAV management system

收稿日期:2016-12-12;修回日期:2017-3-02

作者简介:石鹏飞,研究员,研究方向为飞行控制,电子信箱:pfshi@facri.com

引用格式:石鹏飞. 无人机自主控制技术发展与挑战[J]. 科技导报, 2017, 35(7): 32-38; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.07.003

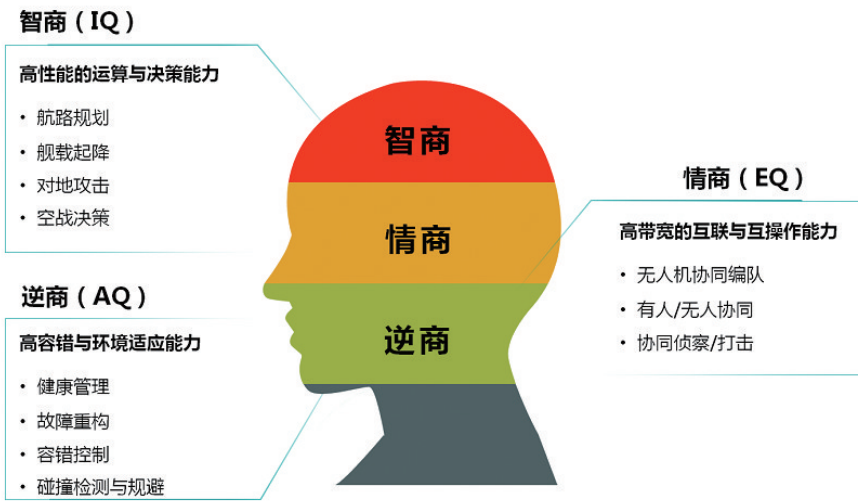


图2 无人机自主控制技术分类

Fig. 2 Categories of autonomous control technologies for UAS

逆商:无人机应对非预期状况的能力,即高容错和提高环境适应性类技术,例如健康管理、故障重构、容错控制、碰撞检测与规避等。

## 2 技术现状

近年来,发端于20世纪信息论、系统论、控制论的自动控制和人工智能技术逐渐融合,为无人机自主控制技术的发展注入了活力。人工智能技术总体呈现从程序驱动,到搜索驱动,到知识驱动,再到数据驱动的发展趋势,未来很可能出现知识驱动与数据驱动方法相结合的新发展阶段。例如20世纪60、70年代的Shakey 移动机器人属于程序驱动型人工智能技术的代表性成果<sup>[3]</sup>;20世纪90年代的深蓝(Deep Blue)计算机属于穷举式搜索的代表性成果<sup>[4]</sup>;2000年以来的Watson 机器人是词句法分析和知识表示技术的集大成者<sup>[5]</sup>;2016年的AlphaGo 围棋程序则集中体现了机器学习(数据驱动方法)技术发展的最新成果<sup>[6]</sup>。有趣的是,与人工智能技术各个发展阶段相反,无人机自主控制技术呈现出数据驱动到信息驱动,再到知识驱动的发展趋势(图3)。数据驱动方法的代表性成果包括无人机遥控系统和飞机自动驾驶仪<sup>[7-8]</sup>;数据与信息驱动方法的代表性成果包括无人机自主起降<sup>[9]</sup>与航路重规划技术<sup>[10]</sup>;信息驱动方法的代

表性成果有察打一体无人机动态任务规划<sup>[11]</sup>和逃避机动控制技术<sup>[12-13]</sup>;知识驱动方法则主要用于信息融合<sup>[7-8]</sup>、态势感知<sup>[9]</sup>、空战决策<sup>[14]</sup>等领域。本文从智商、情商、逆商的角度分别介绍无人机自主控制技术的发展成果。

### 2.1 智商类成果

美军2003年在X45-A无人机上实现了机载航路重规划<sup>[5]</sup>,美军X47-B验证机于2012年完成了航母上的自主降落<sup>[6]</sup>,辛辛那提大学2016年研发的工

智能程序Alpha在仿真空战对抗环境中打败了人类战斗机飞行员<sup>[17]</sup>(图4)。国内无人机实时在线航路重规划已成为研究热点<sup>[10]</sup>,自动对地攻击、空战决策<sup>[14]</sup>、有人/无人双模驾驶技术的工程研究正在逐步展开。

可以发现,国内与国外的主要差距表现在无人机仿真空战环境建设方面。美国波音公司已在2003—2014年间完成了先进仿真、集成和建模框架软件(AFSIM)开发<sup>[18]</sup>,作为美国未来无人机决策与控制算法试验的统一仿真平台。缺乏统一验证平台的国内研究者需要针对各自算法与应用分别开发验证环境,导致仿真平台进化缓慢,且各类算法效果评价标准混乱。

### 2.2 情商类成果

宾夕法尼亚大学2010年实现了20架四旋翼无人机的协同编队控制<sup>[9]</sup>,美军2014年完成了X-47B无人机与F/A-18战斗机的编队飞行与舰载起降实验<sup>[20]</sup>,2015年完成了KC-707加油机与X-47B无人机的自动空中加油验证<sup>[21]</sup>,法国达索飞机制造公司2015年实现神经元无人机与阵风战斗机、猎鹰7X商务机的有人机/无人机协同编队飞行(图5)。清华大学与中国电子科技集

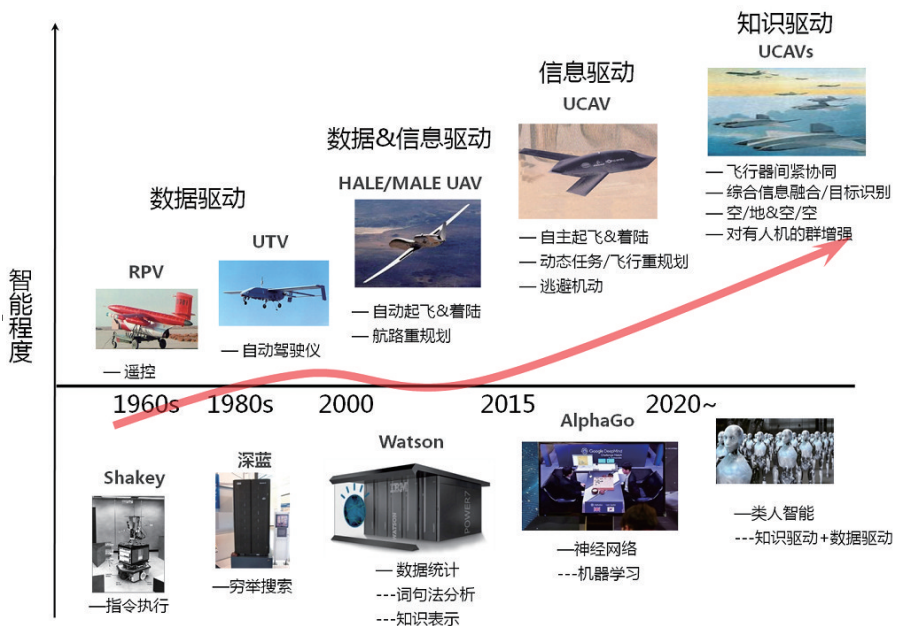


图3 自主控制与人工智能的并行发展

Fig. 3 Parallel development of autonomous control and artificial intelligence



(a) 美军在X45-A无人机上实现了机载航路的重规划  
 (b) 美军X47-B完成了航母上的自主降落  
 (c) 辛辛那提大学研发了空战对抗的人工智能程序 Alpha

图4 无人机自主控制技术智商类成果

Fig. 4 Advances in IQ-related UAS autonomous control technologies



(a) 宾夕法尼亚大学实现了20个四旋翼的协同编队控制  
 (b) 美军通过控制两架X-45A实现多机协调以及多机战术重规划  
 (c) 美军实现神经元与阵风战斗机等编队飞行  
 (d) 美军通过X-47B实现了与KC707加油验证

图5 无人机自主控制技术情商类成果

Fig. 5 Advances in EQ-related UAS autonomous control technologies

团公司于2016年实现了67架规模的固定翼无人机集群原理试飞验证,打破了之前由美国海军保持的50架固定翼无人机集群世界纪录。

随着近年来飞行自组织网络技术<sup>[22]</sup>的进步,无人机集群成员间的通信组网问题已逐渐解决,无人机协同编队飞行规模也呈现出不断扩大的趋势。

国内在无人机通信技术领域处于与国外同步发展的状态。但是情商类无人机自主控制技术的进一步发展还取决于无人机间互操作协议的制定与推广<sup>[23]</sup>。

### 2.3 逆商类成果

美军RQ-7“影子”无人机通过了容错控制,实现了故障情况下的安全飞

行<sup>[24]</sup>,Rockwell Collins公司验证了F-18缩比模型飞机在舵面部分失效情况下的飞行控制重构技术<sup>[25]</sup>,内华达山脉公司围绕MQ-8B“火力侦察机”和RQ-7A/B无人机进行了无人机防撞系统研究<sup>[24]</sup>(图6)。国内对无人机智能容错控制<sup>[26]</sup>、故障重构控制等技术<sup>[27-29]</sup>仍处于理论研究阶段,与国外仍有较大发展差距。



(a) 美军RQ-7“影子”无人机通过容错控制,实现了故障下的安全飞行  
 (b) Rockwell Collins公司验证了F-18缩比模型飞机在舵面部分失效下的安全飞行  
 (c) “内华达山脉”公司RQ-7A/B进行了无人机防撞系统的研究

图6 无人机自主控制技术逆商类成果

Fig. 6 Advances in AQ-related UAS autonomous control technologies

### 3 研究挑战与重点

无人机自主控制技术解决的是在大时间尺度下的广义控制问题,传统自动控制学科并未为这类问题提供充分的理论基础和技术实现手段。本文从智商、情商、逆商 3 个角度分别探讨无人机自主控制技术的发展挑战与潜在解决方案。

#### 3.1 智商

提高无人机的智商是为了增强无人机个体的任务完成能力。具体来说,当前提升无人机智商需要以下关键技术。

##### 1) 自主控制系统架构设计。

自主控制技术的作用对象和应用场景较以往自动控制系统更为复杂和动态,因此需要设计合理的系统架构,妥善解决软、硬件功能划分和系统内各要素的协调问题,确保复杂系统的灵活、开放、可配置。无人机自主控制系统逻辑架构可以采用类似 OSI 分层递阶式设计模式<sup>[30]</sup>,将系统分为任务、决策、执行等多个功能层次实现,以便保证任务和决策等高层功能的设计与底层硬件限制解耦合。在保证层间输入输出关系固定的基础上,每层功能设计可以采用灵活的形式。无人机自主控制系统物理架构设计中,可以选择集中式或分布式的通信/决策系统,利用通用总线形式(如军用 1553B 或 1394B 总线,或 FC 总线等),连通各个子系统。

##### 2) 空战决策与控制。

研究制空作战背景下的自主空战决策与控制技术,发挥无人机飞行机动潜能,提高无人机个体作战效能。空战决策与控制技术可以与由博伊德首创的“观察—指引—决策—行动”(OODA)循环结构相结合,从决策层和行动层两个角度出发,运用专家系统<sup>[31]</sup>、蒙特卡罗搜索树<sup>[32]</sup>、滚动时域优化<sup>[33]</sup>等方法的结合,在实时条件下达成空战决策与控制目标。相关成果应用范围包括无人作战飞机和有人/无人协同空战。

##### 3) 任务/航路重规划。

该技术要求在尽可能减少人类干预的情况下,令无人机根据高层任务目标自主完成任务或航路重规划,提高指

挥的高效性和无人机作战的灵活性。任务/航路重规划技术难点在于如何在机载计算资源支持的范围内实现短延迟,甚至实时重规划。该技术的发展一方面在于对任务相关高效搜索算法的开发<sup>[34]</sup>,另一方面也可以借助于机载高性能计算技术的进步<sup>[35]</sup>提高相同复杂度下规划算法的运行速度。

##### 4) 自主空中加/受油。

赋予无人机自动完成空中加/受油操作的能力,扩大无人机的续航能力,提高无人机的任务半径<sup>[36-37]</sup>。自主空中加/受油难点在于加/受油机间气流环境复杂,自主精度要求高。相关子技术包括加油流程规范制定、精确相对定位引导、紧密编队抗扰控制、精密对接控制、防撞规避控制以及仿真评估。

##### 5) 综合验证方法设计。

传统自动控制系统测试以重复的、响应式测量为主要特征,测试手段是给特定系统输入加入激励,然后判读系统响应,并将响应与既定性能规范进行对比。自主控制系统的测试方法需要应对自主系统行为的逻辑复杂性和动态性挑战,测试用例难以穷举。可能的解决方案是在确保系统基本功能正常的前提下,将测试范围集中于自主控制系统的智能和逻辑层面,针对无人机的典型应用场景编写测试脚本,并对测试脚本中的特征参数进行随机拉偏,以超实时运行的方式在有限时间内验证自主控制系统在大量任务场景下的综合表现,以保证对自主控制系统智能水平的有效估计。

### 3.2 情商

提高无人机的情商是为了增强无人机集群的任务完成能力。需要发展以下关键技术。

##### 1) 飞行自组织网络。

飞行自组织网络<sup>[38]</sup>(FANET)是在无地面基础通信设施环境下执行无人机集群任务的使能技术。尽管飞行自组织网络属于移动自组织<sup>[39]</sup>(MANET)、车联网<sup>[40]</sup>(VANET)的子集(3 项技术的隶属关系如图 7 所示),但考虑到无人机高速移动、三维空间通信和部分任务可预见性等特征,飞行自组织网络的研究需要在物理层、网络层、传输层的设计方面需要定制新的协议标准。

##### 2) 分布式态势共享。

在通信链路通畅的前提下,无人机集群协同一致地完成任务的另一前提是享有对当前任务环境的相同认知<sup>[41]</sup>。这就需要在机间数据链的基础上发展分布式态势共享技术,也就是“黑板”类技术<sup>[42]</sup>。欧盟异构多无人机实时协同项目(Real-Time Coordination and Control of Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles, COMETS)中即基于上述认知进行了一些列态势共享技术的尝试<sup>[43]</sup>。未来大规模无人机集群任务对共享态势信息的更新频度、同步程度、通信带宽等方面都带来了严峻的挑战。

##### 3) 有限通信条件下的多机协同。

未来自主无人机的应用环境可能存在无线电干扰和障碍物遮挡等复杂情况,无人机间的通信链路无法做到全

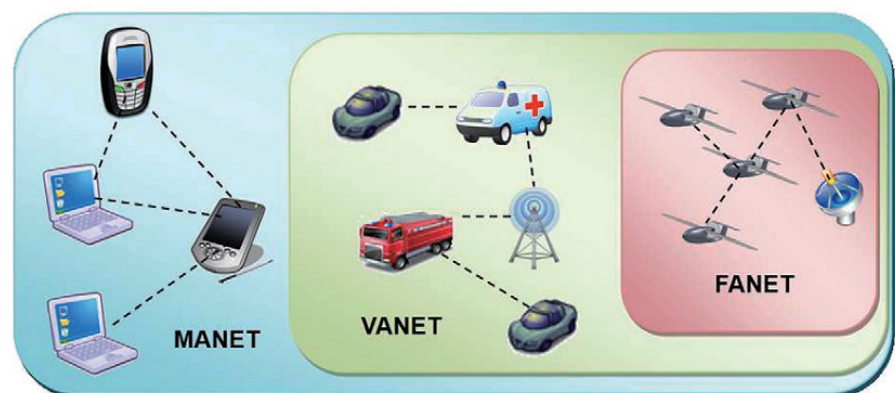


图 7 移动自组织网络,车联网与飞行自组织网络

Fig. 7 MANET, VANET and FANET

时全连通<sup>[44-45]</sup>。因此无人机集群需要在有限通信条件下实现协同,也就是说无人机群成员间需要具备通过默契配合完成任务的能力。

#### 4) 有人/无人空域集成。

由于未来自主无人机的应用范围增大,有人机与无人机空域重合已是必然趋势。在参照民机飞行程序,实现有人/无人空域融合<sup>[46]</sup>,是制造有人机与无人机协同完成任务的基础条件。与此同时,还需要积极探索无人机交通信息申报、飞行路线冲突消解等问题的自动解决方案<sup>[47]</sup>,以应对未来因无人机发展导致空中交通流量急剧增大的局面。

### 3.3 逆商

提高无人机的逆商是为了增强无人机个体的容错与环境适应能力,需要发展以下关键技术。

1) 健康管理。通过对专家系统和监督学习方法的综合运用,实现无人机系统建模和主动故障检测<sup>[48]</sup>,提高无人机的故障预测能力和任务可靠性。

2) 故障容错。从重构控制律设计、控制分配、操纵面损伤重构、软件容错、信息安全等技术研究入手,形成一套无人机故障容错机制的整体设计方案<sup>[49]</sup>,提高无人机任务成功率。

3) 碰撞检测与规避。设计空中交通告警和防撞系统(TCAS),研究基于视觉、雷达的防撞探测,使无人机具备碰撞感知与规避能力,提升无人机使用的安全性。

## 4 结论与展望

结合无人机技术的产生背景和发展现状提出了无人机自主控制的定义

与内涵,总结了无人机自主控制系统发展的挑战与重点,并按照自主化无人机“智商”、“情商”和“逆商”3方面的发展需求分别探讨了相关技术的潜在发展途径,可以为中国无人机自主控制技术的发展提供参考。

随着人工智能与自动控制领域的发展与交融,自主控制系统研制条件逐渐成熟。各类人工智能技术(如复杂系统、机器学习、人工神经网络、进化计算、模糊推理系统等)在自身发展的同时,也刺激着自主控制系统相关领域(如导航、制导、控制、健康管理、机载计算、人机交互等)不断进步。将人工智能技术与传统自动控制理论相结合,令人工智能领域的最新成果服务于无人机自主控制系统的设计,将掀起自动控制领域发展新的浪潮。

## 参考文献(References)

- [1] 杨晖. 无人作战飞机自主控制技术[J]. 飞行力学, 2006, 24(2): 1-4.  
Yang Hui. Research on UCAV autonomous control technology[J]. Flight Dynamics, 2006, 24(2): 1-4.
- [2] Cambone S. Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005-2030[M]. Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [3] Nilsson N J. Shakey the robot[R/OL].[2017-02-18]. <http://www.cs.uml.edu/~holly/91.549/readings/629.pdf>.
- [4] Campbell M, Hoane A J, Hsu F. Deep blue[J]. Artificial intelligence, 2002, 134(1): 57-83.
- [5] Ando R K. BioCreative II gene mention tagging system at IBM Watson[C/OL].[2017-02-18]. [http://riejohnson.com/rie/Ando\\_biocreative\\_cr.pdf](http://riejohnson.com/rie/Ando_biocreative_cr.pdf).
- [6] Silver D, Huang A, Maddison C J, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search[J]. Nature, 2016, 529(7587): 484-489.
- [7] 淳于江民, 张珩. 无人机的发展现状与展望[J]. 飞航导弹, 2005(2): 23.  
Chunyu Jiangmin, Zhang Heng. Survey on the developments of UAVs[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2005(2): 23.
- [8] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.  
Wu Sentang, Fei Yuhua. Flight control system[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.
- [9] 朱华勇, 牛轶峰, 沈林成, 等. 无人机系统自主控制技术研究现状与发展趋势[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(3): 115-120.  
Zhu Huayong, Niu Yifeng, Shen Lincheng, et al. State of the art and trends of autonomous control of UAV systems[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(3): 115-120.
- [10] 高晖. 无人机航路规划研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 135-138.  
Gao Hui. Study on UAV route planning[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(2): 135-138.
- [11] 叶媛媛, 闵春平, 沈林成, 等. 基于 VORONOI 图的无人机空域任务规划方法研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(6): 1353-1355.  
Ye Yuanyuan, Min Chunping, Shen Lincheng, et al. VORONOI Diagram Based Spatial Mission Planning for UAVs[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(6): 1353-1355.
- [12] 朱荣刚, 姜长生, 邹庆元, 等. 新一代歼击机超机动飞行的动态逆控制[J]. 航空学报, 2003, 24(3): 242-245.  
Zhu Ronggang, Jiang Changsheng, Zou Qingyuan, et al. Study on dynamic inversion control and simulation of supermaneuverable flight of the new generation fighter[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(3): 242-245.
- [13] 唐强, 朱志强, 王建元. 国外无人机自主飞行控制研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(3): 418-422.  
Tang Qiang, Zhu Zhiqiang, Wang Jianyuan. Survey of foreign researches on autonomous flight control for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(3): 418-422.
- [14] 陈志伟. 无人机空战攻防一体化自主攻击决策研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
Chen Zhiwei. Study on autonomous attack-defense integrating decision making of UAVs[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [15] Wise K A. First flight of the X-45A unmanned combat air vehicle (UCAV)[C]/AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Austin: AIAA, 2003: AIAA 2003-5320.

- [16] 方勇. 未来无人化战争的引领者——美国舰载无人攻击机 X-47B 发展及影响[J]. 军事文摘, 2015(13): 12.  
Fang Yong. The leading role in future unmanned combat—the development and influence of X-47B carrier-based UCAV[J]. Military Digest, 2015(13): 12.
- [17] Ernest N, Carroll D, Schumacher C, et al. Genetic fuzzy based artificial intelligence for unmanned combat aerial vehicle control in simulated air combat missions[J]. Journal of Defense Management, 2016, 6(144): 1000144. doi: 10.4172/2167-0374.1000144.
- [18] Wise K A. First flight of the X-45A unmanned combat air vehicle (UCAV)[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Austin: AIAA, 2003: 26.
- [19] Michael N, Mellinger D, Lindsey Q, et al. The grasp multiple micro-uav testbed[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2010, 17(3): 56-65.
- [20] 魏凯, 朱振宇. X-47B 无人机飞行试验进展与应用前景分析[J]. 飞航导弹, 2014(5): 6.  
Wei Kai, Zhu Zhenyu. Analysis of experimental advances and applications of the X-47B UCAV[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(5): 6.
- [21] Bhalla P. Emerging trends in unmanned aerial systems[R/OL]. [2017-02-18]. [http://www.claws.in/images/journals\\_doc/1119543205\\_Emergingtrendsinnunmannedaerialsystems.pdf](http://www.claws.in/images/journals_doc/1119543205_Emergingtrendsinnunmannedaerialsystems.pdf).
- [22] Bekmezci I, Sahingoz O K, Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3): 1254-1270.
- [23] Koucheryavy A, Vladyko A, Kirichek R. State of the art and research challenges for public flying ubiquitous sensor networks[M]//Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. New York: Springer, 2015: 299-308.
- [24] 陶于金, 李沛峰. 无人机系统发展与关键技术综述[J]. 航空制造技术, 2014, 464(20): 34-39.  
Yao Yujin, Li Peifeng. Development and key technology of UAV[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, Beijing, 2014, 464(20): 34-39.
- [25] Bennett J W, Atkinson G J, Mecrow B C, et al. Fault-tolerant design considerations and control strategies for aerospace drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(5): 2049-2058.
- [26] 姜斌, 杨浩. 飞控系统主动容错控制技术综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(12): 2106-2110.  
Jiang Bin, Yang Hao. Survey of the active fault-tolerant control for flight control system [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(12): 2106-2110.
- [27] 朱家强, 郭锁凤. 基于神经网络的超机动飞机自适应重构控制[J]. 航空学报, 2003, 24(3): 246-250.  
Zhu Jiaqiang, Guo Suofeng. Neural-net based adaptive reconfigurable control for a super maneuverable aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(3): 246-250.
- [28] 李卫琪, 陈宗基. 非线性飞机对象操纵面故障的控制律重构[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(5): 428-433.  
Li Weiqi, Chen Zongji. Non-linear reconfigurable control of fault control surfaces of aircrafts[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(5): 428-433.
- [29] 钟友武, 杨凌宇, 申功璋. 多操纵面飞机综合重构飞行控制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009(11): 1320-1324.  
Zhong Youwu, Yang Lingyu, Shen Gongzhang. Reconfigurable control of aircrafts with multiple control surfaces[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009(11): 1320-1324.
- [30] Bochmann G V. Protocol specification for OSI[J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1990, 18(3): 167-184.
- [31] Hayes-Roth F, Waterman D A, Lenat D B. Building expert system[M]. New Jersey: Addison-Wesley, 1983.
- [32] Coulom R. Efficient Selectivity and Backup Operators in Monte-Carlo Tree Search[C]//Proceedings of the 5th international conference on Computers and games. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 72-83.
- [33] Rawlings J B, Muske K R. The stability of constrained receding horizon control[J]. IEEE transactions on automatic control, 1993, 38(10): 1512-1516.
- [34] Roberge V, Tarbouchi M, Labont é G. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 132-141.
- [35] Wolf M. High-performance embedded computing: Applications in cyber-physical systems and mobile computing[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [36] Nalepka J P, Hinchman J L. Automated aerial refueling: Extending the effectiveness of unmanned air vehicles[C]. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. New York: AIAA, 2005: 15-18.
- [37] Fezans N, Jann T, Gerlach T, et al. Modelling and simulation for aerial refueling automation research for manned and unmanned aircraft[R/OL]. [2017-02-18]. [http://elib.dlr.de/106629/1/LUBETA\\_DLRK2016.pdf](http://elib.dlr.de/106629/1/LUBETA_DLRK2016.pdf).
- [38] İlker B, Sahingoz O K, Şamil T. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(11): 1254-1270.
- [39] Corson S, Macker J. Mobile Ad Hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations[J]. Rfc Ietf Network Working Group, 1999, 36(5): 309-310.
- [40] Li F, Wang Y. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey[J]. IEEE Vehicular technology magazine, 2007, 2(2): 12-22.
- [41] Ollero A, Lacroix S, Merino L, et al. Multiple eyes in the skies: Architecture and perception issues in the COMETS unmanned air vehicles project[J]. IEEE robotics & automation magazine, 2005, 12(2): 46-57.
- [42] Simonoff A J. Interactive communication system permitting increased collaboration between users: U.S. Patent 6,463,460[P]. 2002-10-8.
- [43] Ollero A, Maza I. Multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles[M]. New York: Springer, 2007.
- [44] Kingston D, Beard R W, Holt R S. Decentralized perimeter surveillance using a team of UAVs[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(6): 1394-1404.
- [45] Beard R W, McLain T W. Multiple UAV cooperative search under collision avoidance and limited range communication constraints[C]//Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on. New York: IEEE, 2003, 1: 25-30.
- [46] De Neufville R, Odoni A, Belobaba P, et al. Airport systems: planning, design and management[M]. New York: McGraw-Hil, 2013.

- [47] Pallottino L, Feron E M, Bicchi A. Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer programming[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2002, 3(1): 3–11.
- [48] Jaw L C. Recent advancements in aircraft engine health management (EHM) technologies and recommendations for the next step[C]//ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 683–695.
- [49] Rao M, Xia Q, Ying Y. Fault-tolerant control[M]//Modeling and Advanced Control for Process Industries. London: Springer-Verlag, 1994: 157–191.

## Autonomous control technology of unmanned aerial system and its challenge

SHI Pengfei

Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China

**Abstract** The highly dynamic nature, uncertainty and complexity of the flight environment compose the main challenges to the design of autonomous unmanned aerial systems (UAS). Recent advances in artificial intelligence and high performance computing technologies provide an opportunity for the further development of autonomous UAS. This work introduces the definition and connotation of autonomous control of UAS, summarizes the state of the art technology in this field, and proposes candidate solutions to the main challenges from the perspectives of IQ, EQ and AQ.

**Keywords** unmanned aerial systems; autonomous control; artificial intelligence; multi-aircraft cooperation; fault-tolerant control

(责任编辑 刘志远)