

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201111022

高空长航时无人机技术发展新思路

段海滨^{1,2} 范彦铭³ 张雷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. 中国航空工业集团公司 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035; 4. 中国人民解放军 空军装备部, 北京 100843)

摘要: 根据未来航空发展的战略需要, 面向新一代高空长航时无人机的系统设计, 十分有必要开展探索性、创新性和面向高空长航时无人机的关键技术研究. 提出了高空长航时无人机技术发展的新思路和其瓶颈问题的解决方案. 重点从高空长航时无人机多目标组合优化、气动-隐身一体化、能源动力、软件使能自主控制、自主导航、测控和信息传输、空地多机分布协同等方面给出了可行技术方案和重点研究方向. 这些技术的实现可增强高空长航时无人机系统方面的可持续发展能力, 支撑和引领相关领域的技术发展.

关键词: 高空长航时无人机; 多目标组合优化; 气动-隐身一体化; 软件使能自主控制; 多机分布协同

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2012)03-0195-05

New thoughts on the development of a HALE UAV

DUAN Haibin^{1,2}, FANG Yanming³, ZHANG Lei⁴

(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. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110035, China; 4. Air Force Arming Department, People's Liberation Army, Beijing 100843, China)

Abstract: According to the strategic requirements of future aviation development, and considering system design for the new generation of high-altitude and long-endurance (HALE) unmanned aerial vehicles (UAVs), it is necessary to develop exploratory, innovative, and key technologies for HALE UAVs. In this paper, some new ideas were proposed for HALE UAVs which mainly focus on multi-objective optimization, integrated design of aerodynamic and stealthy performance, energy and power, software-enabled control, autonomous navigation, measurement and control systems, information transmission, and multi-platform distributed cooperation. The proposed technologies can enhance the capacity of HALE UAV systems for sustainable development, and support the developments in other relevant technical areas.

Keywords: HALE UAV; multi-objective optimization; integrated design of aerodynamic and stealthy performance; software-enabled control; multi-platform distributed cooperation

高空长航时 (high-altitude long-endurance, HALE) 无人机是指飞行高度在 18 000 m 以上, 飞行时间不少于 24 h 的无人驾驶飞机 (unmanned aerial vehicle,

UAV)^[1]. 在未来战争中, 高空长航时无人机将成为侦察卫星和有人驾驶战略侦察飞机的重要补充和增强手段, 同时也成为获取战略情报的重要手段之一^[2-5]. 高空型长航时无人机在战场上的任务是对敌方进行战略或战役侦察, 具备持久的情报收集和战场监视能力, 并且可转换成对地作战平台. 高空长航时无人机已经成为当今各国武器装备发展的重点, 被美国空军列为 21 世纪的关键技术之一^[6].

收稿日期: 2011-11-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60975072); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-10-021); 航空科学基金资助项目 (20115151019); 北京科技新星计划资助项目 (2007A017).

通信作者: 段海滨. E-mail: hbduan@buaa.edu.cn.

高空长航时无人机与有人驾驶战略侦察机相比,其最主要的优势是不必考虑人的安全问题,在危险区域执行侦察任务时,既不必冒生命危险,也不需派遣护航机保护,无人机还能昼夜持续进行空中侦察探测,这些都是有人驾驶战略侦察机所不及的^[7-9]。以美国“全球鹰”为例,其巡航高度可达19 850 m,可在距防空武器发射区5 556 km的范围外活动,具有全天候侦察能力,为了满足高空长航时的任务要求,飞机最大起飞重量为11 610 kg,其中燃料约6 600 kg,载油系数非常高,有效地利用了机内的空间,飞机采用了大展弦比的直机翼(翼展为35.5 m),为了兼顾低可探测性的要求,飞机采用了V型尾翼和背负式进气道。“全球鹰”可同时携带光电、红外传感系统和合成孔径雷达,既可进行大范围雷达搜索,又可提供74 Gm²范围内的光电/红外图像,目标定位的圆误差概率最小可达20 m,另外装有1.2 m直径天线的合成孔径雷达能穿透云雨等障

碍,能连续地监视运动的目标。2006年,第一架生产型“全球鹰”无人机部署到中东地区,用以支持美军在伊拉克和阿富汗的军事行动。

根据我国未来无人机发展的战略需要,为了全面提升高空长航时无人机飞行的安全性、经济性和可靠性,本文将从多目标组合优化设计、能源动力、软件使能自主控制、自主导航、测控和信息传输、多机分布协同等方面提出高空长航时无人机的发展思路,可提升高空长航时无人机系统方面的可持续发展能力,增强我国在相关领域的自主创新能力和国际竞争力,支撑和引领行业发展,为创新型国家建设和保障国家安全提供必要的发展战略支撑。

1 高空长航时无人机技术发展思路

图1给出了所提出的高空长航时无人机技术发展新思路的框架。

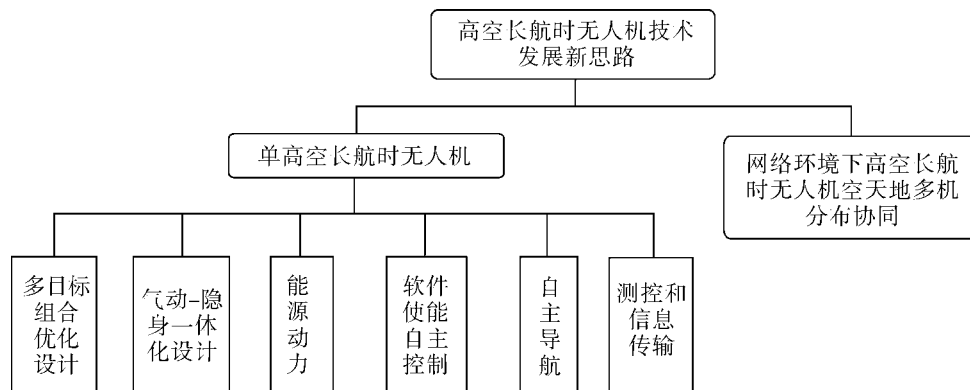


图1 高空长航时无人机技术发展新思路框架

Fig. 1 Block diagram of HALE UAV new technical development

1.1 高空长航时无人机多目标组合优化设计技术

高空长航时无人机的设计过程是一个典型的系统工程^[9]。按照系统工程的观点,概念设计阶段负责确定高空长航时无人机的外形、载荷、尺寸、质量和其他总体性能,高空长航时无人机一切好的或坏的特征均在设计的起始阶段被确定下来^[10]。衡量一个高空长航时无人机设计是否成功标准很多,通常情况下这一目标并不具有惟一性。由于对飞机的要求是多方面的,因此,进行多目标总体优化的好处是能对众多方面的要求进行协调分析,从而发掘方案潜力,提高设计质量。

传统的无人机设计方法是一种串行设计模式,存在诸多缺陷,例如虚拟设计阶段短缺、各学科配合不到位、不能充分利用虚拟设计阶段时的自由度来改进设计质量、不能集成不同学科以实现最优化等,这种设计方式不能适应新的需求,导致设计的僵化。随着现代系统设计技术的发展,一种跨学科多目标

的系统设计优化思想开始出现。其基本思路是:增加虚拟设计在整个设计过程中的比例,在设计每个阶段力求各学科的平衡,充分考虑各学科间相互影响和耦合作用,应用有效的设计/优化策略对设计过程进行优化,应用分布式计算机网络来组织管理整个系统的设计过程,通过充分利用各个学科之间的相互作用所产生的协同效应,以获得系统的整体最优解^[11]。

目前多目标系统优化设计方法尚未成熟,处于对最优化方法的探索阶段。高空长航时无人机系统的多目标组合优化设计是总体设计阶段所需解决的一个重要问题。在全面考虑气动、隐身、结构、发动机等因素的前提下,今后可着重研究该方向的关键技术如下:

- 1) 运用飞行器设计理论进行高空长航时无人机总体布局设计;
- 2) 高空长航时无人机多目标组合优化建模技术;

3) 高空长航时无人机多参数优化技术,这些参数包括总体参数设计、发动机匹配、机翼平面参数设计、翼型选择、舵面配置以及起落架参数设计等。

1.2 高空长航时无人机气动-隐身一体化设计技术

隐身化是现代和未来武器装备的重要发展趋势,隐身技术的发展和运用也日益成为现代化战争中决定胜负的一个重要因素^[12]。无人机的隐身性能在很大程度上决定于其气动布局方式。对高空长航时无人机而言,由于飞行任务与结构的限制,对实现隐身十分苛刻,因此必须综合考虑气动和隐身要求,运用一体化设计思路寻找气动和隐身性能要求的最佳组合搭配。高升力、低雷诺数和跨声速是高空长航时无人机主要的气动特征,在进行相关的气动设计和分析过程中,必须处理流动的粘性问题和边界层问题。由于长航时飞行,不仅要求发动机耗油率低、机内储油空间大,而且要求巡航阻力小,这就需要采用大展弦比、厚翼型机翼,于是在小迎角下翼面上就可能出现超声速区,从而导致跨声速问题。

影响高空长航时无人机隐身性能的因素包括机翼构型、翼身结合方式、尾翼形式、部件遮蔽等。如何从低雷诺数条件下气动性能的要求出发,综合隐身要求是现阶段高空长航时无人机气动设计方面面临的主要问题^[13]。面对高空长航时无人机的高升力、低雷诺数和跨声速等主要气动特征,可以通过具备描述边界层转捩和分离能力的分析和设计工具进行相关的气动设计和分析,处理流动的粘性问题和边界层问题。

今后可研究如何采用 XFOIL 技术来解决高空长航时无人机翼型的分析与设计问题,XFOIL 通过指定特定的表面速度分布,计算转捩的气泡分离等,对翼型进行设计和优化,可以实现完全反设计和混合反设计,并且可以进行互动式的翼型优化设计,可望在我国高空长航时无人机的气动-隐身一体化设计与研究中发挥一些促进作用。由此,今后可着重研究该方向的关键技术如下:

- 1) 基于面元法的气动性能计算技术;
- 2) 基于物理光学法的雷达散射截面计算技术;
- 3) 基于 XFOIL 技术的高空长航时无人机翼型分析与设计技术;
- 4) 基于智能优化气动性能目标与隐身性能目标之间的折衷技术;
- 5) 推进/热控/气动力/姿态耦合特性分析与建模技术。

1.3 高空长航时无人机能源动力技术

高空长航时无人机对动力的要求包括发动机应具有良好的燃油经济性,稳定的高空工作能力,良好的任务可靠性和良好的爬升能力;发动机的重量应

尽可能轻,寿命应尽可能长,成本应尽可能低;由于高空的空气密度低,发动机的散热不好,对发动机的冷却提出了更高的要求,而采用普通的发动机和电池已不能满足无人机长时间高空飞行的要求^[14]。由于高空长航时无人机与民用运输机对发动机的要求有许多相似之处,例如它们都要求发动机的重量轻、油耗低、成本低、工作寿命长、维护性好、可靠性高等。因此,可以考虑采用现成的民用大涵道比涡扇发动机作为高空长航时无人机的动力。在高空条件下,由于空气密度减小,雷诺数的降低带来许多问题,如压气机的喘振裕度减小,并且由于功率提取的增加,压气机的喘振裕度进一步减小。因此,涡扇发动机在用作高空长航时无人机动力时,需根据其任务特点进行一些适应性的技术改进。由此,今后可着重研究该方向的关键技术如下:

- 1) 涡轮-冲压组合发动机技术;
- 2) 涡扇发动机技术;
- 3) 基于液氢(LH₂)为燃料的推进系统;
- 4) 太阳能动力技术;
- 5) 燃料电池推进技术。

1.4 高空长航时无人机软件使能自主控制技术

高空长航时无人机的飞行速度、高度等变化很大,从而大气密度或动压均会随之在大范围内变化。另外飞行航迹因飞行任务的不同而不同,这些因素都使得无人机成为一个模型不准确、参数和干扰大范围不确定性变化的被控对象^[14]。针对高空长航时无人机的飞控系统面向的环境、任务、功能的日益复杂和更多的不确定性,研究和实现增稳控制、主动控制、自适应控制、自动飞行和飞行管理、健康管理等多重任务系统和复杂系统结构的综合技术,依据软件使能控制理论与技术解决复杂飞控系统的软硬件综合实现问题。软件使能自主控制不仅在于控制理论和实时计算的先进性,还在于控制算法和实现平台(软件和硬件)的交互作用和统一。此外,基于仿生智能的自主控制技术也是该领域一个重要的研究内容^[15]。今后可着重研究该方向的关键技术如下:

- 1) 多操纵面飞行控制技术;
- 2) 鲁棒自适应控制技术;
- 3) 综合飞行/推进隐身控制技术;
- 4) 可重构飞行控制技术;
- 5) 余度配置理论与余度容错高可靠控制技术;
- 6) 面向突发事件的航路重规划技术;
- 7) 仿真建模的校核、验证与确认技术。

1.5 高空长航时无人机自主导航技术

高空长航时无人机由于飞行距离远,航行时间长,对导航定位精度提出了很高的要求^[16]。惯性导航系统以其时间短、精度高,可以连续输出位置、速

度、姿态信息,以及完全自主等突出优点^[17],已被各种类型的飞行器普遍采用,但其误差随时间积累而逐步扩大.根据长航时无人机对隐蔽性的要求,需要完全自主的导航系统,并且由于其飞行高度一般在18 km以上,选择天文导航系统与惯导系统进行组合导航是最佳选择.

高空长航时无人机的导航系统要比常规飞行器的导航系统复杂得多,且自主性要求很高.现有的常规飞行器导航系统的体系结构很难适合高空长航时飞行状态下的技术要求,需要研究新的高空长航时无人机自主导航技术的体系结构.今后可着重研究该方向的关键技术如下:

- 1) 基于天文与速度联合观测的自主导航技术;
- 2) 基于天文/惯性导航的自主导航技术;
- 3) 基于星敏感器/红外地平仪的自主导航技术;
- 4) 基于日、地、月方位信息的自主导航技术;
- 5) 提高自主导航精度的自适应滤波技术;
- 6) 多自主导航的传感信息融合技术.

1.6 高空长航时无人机测控和信息传输技术

高空长航时无人机的测控和信息传输系统是非常关键和重要的组成部分.无人机测控与信息传输技术是指对无人机进行遥控、遥测、跟踪定位和信息传输的技术.遥控是指对无人机飞行状态和设备状态的控制;遥测是指对无人机飞行状态和设备状态参数的测量;跟踪定位是指对无人机实时连续的位置测量;信息传输是指无人机任务载荷传感器信息的传输.在高空长航时无人机的测控和信息传输技术中,还应重点关注超视距中继传输技术和宽带数据链技术等研究方向:

- 1) 超视距中继传输技术;
- 2) 宽带数据链技术;
- 3) 数据链自适应功率控制技术;
- 4) 战术数据链仿真新技术.

1.7 网络环境下高空长航时无人机的空天地多机分布协同技术

高空长航时无人机本质上是一个分层递阶的混合自主系统^[18].自主性的体现包括顶层的任务管理直到底层的飞行器可重构控制.系统具有自适应决策、组织协调和控制执行3个层次,各层次均可在线实时感知和评估内外环境,并通过调整其可调环节,使系统性能满足要求或达到最优.而网络环境下高空长航时无人机空天地多机分布协同技术是一个新的前沿性技术领域,该技术可以拓宽高空长航时无人机的应用范围,提高其侦察及执行其他任务的效率.将多机、多编队协同控制的规划问题进行抽象和递阶分解,通过协调变量将复杂的集中式优化问题转化成相对简单的分散式优化问题,进而将多机协

同控制规划问题转化成单机的规划问题,大大简化问题的复杂程度,并且确保性能满足要求.今后可着重研究该方向的关键技术如下:

- 1) 空天地网络环境下的复杂态势/威胁评估技术;
- 2) 多机协同航路规划及重规划技术;
- 3) 多机协同任务分配及重分配技术;
- 4) 多机异构协同控制技术;
- 5) 多机隐身察打一体化技术;
- 6) 多机作战效能评估技术.

2 结束语

近年来,高空长航时无人机有了惊人的快速发展,而高空长航时无人机技术的设计与实现基本上仍遵循一种固定的模式.如今,当大家争相研制高空长航时无人机的時候,就感到常规的设计与实现技术难以满足新型高空长航时无人机的發展需求.新型高空长航时无人机强调要高、精、尖,特别在自主化和智能化方面有很高的要求,各种技术上也要创新,从而带来研制上的高难度和高风险.本文从多目标组合优化、气动-隐身一体化、能源动力、软件使能自主控制、自主导航、测控和信息传输、空天地多机分布协同等方面所提出的發展思路,可为新型高空长航时无人机的自主化、智能化、综合化和先进化提供一些概括性的新方向和技术途径.

参考文献:

- [1] TUZCU I, MARZOCCA P, CESTINO E, et al. Stability and control of a high-altitude, long-endurance UAV [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2007, 30(3): 713-721.
- [2] ATREYA S, MATA M, JONES R, et al. Power system comparisons for a high altitude long endurance (HALE) remotely operated aircraft (ROA) [C]//AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO). Arlington, USA, 2005: AIAA-2005-7401.
- [3] AGTE J, COHEN K. First order effects of new technology on a high altitude long endurance (HALE) unmanned aerial vehicle (UAV) [C]//Proceedings of the 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, USA, 2008: AIAA-2008-168.
- [4] PATIL M J, HODGES D H, CESNIK C E S. Nonlinear aeroelasticity and flight dynamics of high-altitude long-endurance aircraft [J]. *Journal of Aircraft*, 2001, 38(1): 88-94.
- [5] CARNIE G, QIN N. Fluid-structure interaction of HALE wing configuration with an efficient moving grid method [C]//Proceedings of the 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, USA, 2008: AIAA-2008-309.
- [6] TUZCU I, MARZOCCA P, AWNI K. Nonlinear dynamical

- modeling of a high altitude long endurance unmanned aerial vehicle [C]//Proceedings of the 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials. Palm Springs, USA, 2009: AIAA-2009-2404.
- [7] GRAY D. Design and integration of antennas with prototype HALE UAVs [C]//Proceedings of the 25th AIAA International Communications Satellite Systems. Seoul, Korea, 2007: AIAA-2007-3143.
- [8] NICKOL C L, GUYNN M D, KOHOUT L L, et al. High altitude long endurance air vehicle analysis of alternatives and technology requirements development [C]//Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, USA, 2007: AIAA-2007-1050.
- [9] SIVAJI R, GHIA U, GHIA K N, et al. Aerodynamic analysis of the joined-wing configuration of a HALE aircraft [C]//Proceedings of the 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, USA, 2003: AIAA-2003-606.
- [10] 李珂. 长航时无人机机翼平面参数及翼型选择分析 [J]. 飞行力学, 2007, 25(3): 9-11, 16.
LI Ke. A study on wing geometry and airfoils effects for long endurance unmanned aircraft [J]. Flight Dynamics, 2007, 25(3): 9-11, 16.
- [11] 曹秋生 张会军. 高空长航时无人机的发展特点及技术难点探讨 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(1): 8-13.
CAO Qiusheng, ZHANG Huijun. Characteristics of HALE UAVs in development and discussion of existing technical difficulties [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008, 3(1): 8-13.
- [12] 郭科志. 鸭式布局高空长航时无人机系列的概念设计与气动优化 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 34-35.
GUO Kezhi. Conceptual design and aerodynamic optimization for UAV family with canard configuration [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008: 34-35.
- [13] 邱玉鑫 程娅红, 胥家常. 浅析高空长航时无人机的气动研究问题 [J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(3): 1-5.
QIU Yuxin, CHENG Yahong, XU Jiachang. A brief discussion of high-altitude long-endurance unmanned aerial vehicle aerodynamic research [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2004, 18(3): 1-5.
- [14] 赵刚 蔡元虎 屠秋野, 等. 高空长航时无人机用涡扇发动机技术分析 [J]. 推进技术, 2009, 30(2): 154-158, 181.
ZHAO Gang, CAI Yuanhu, TU Qiuye, et al. Technological analysis for the turbofan engine of high altitude long endurance unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(2): 154-158, 181.
- [15] DUAN Haibin, SHAO Shan, SU Bingwei, et al. New development thoughts on the bio-inspired intelligence based control for unmanned combat aerial vehicle [J]. Science China: Technological Sciences, 2010, 53(8): 2025-2031.
- [16] 吴海仙 俞文伯 房建成. 高空长航时无人机 SINS/CNS 组合导航系统仿真研究 [J]. 航空学报, 2006, 27(12): 299-304.
WU Haixian, YU Wenbo, FANG Jiancheng. Simulation of SINS/CNS integrated navigation system used on high altitude and long-flight-time unpowered aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(12): 299-304.
- [17] 周姜滨 袁建平 罗建军, 等. 高空长航时无人机导航系统研究 [J]. 西北工业大学学报, 2008, 26(4): 463-467.
ZHOU Jiangbin, YUAN Jianping, LUO Jianjun, et al. Navigation system of HALE UAV (high altitude long endurance unmanned aerial vehicle) suitable for China [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(4): 463-467.
- [18] 林伟廷. 高空长航时无人机侦察任务规划问题研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007: 87-89.
LIN Weiting. Research on high altitude and long endurance unmanned aerial vehicle reconnaissance mission planning [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007: 87-89.

作者简介:



段海滨,男,1976年生,副教授,博士生导师,博士,主要研究方向为无人机自主控制与智能决策、计算机仿生视觉等。主持国家自然科学基金3项、国家“863”计划4项、航空科学基金3项,作为第一完成人获省部级科技进步一等奖、二等奖、三等奖各1项,曾入选教育部新世纪优秀人才计划、北京市科技新星计划。发表学术论文40余篇,其中被SCI检索30余篇。



范彦铭,男,1964年生,研究员,中航工业沈阳飞机设计研究所副总设计师,中航工业集团首席专家,主要研究方向为先进飞行控制系统。先后荣获国防科学技术进步特等奖、一等奖各1次、二等奖4次,荣立部级一等功1次、二等功2次、三等功1次,曾被授予“沈阳市青年科技先锋”称号,发表学术论文20余篇。



张雷,男,1978年生,中国人民解放军空军装备部参谋,博士,主要研究方向为无人机任务规划与自主控制、发动机控制等。获省部级科技进步二等奖2次,发表学术论文20余篇。