

微型飞行器飞行控制问题研究进展*

张为华 曾庆华

(国防科技大学航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

摘要 微型飞行器(MAV)是飞行器的一个新兴发展方向,其飞行控制问题是 MAV 研究中最具挑战性的关键技术问题。对 MAV 飞行控制系统的结构及其特点进行了归纳和评述,分析了国内外 MAV 飞行控制系统的研究现状,对其中的一些关键技术问题进行了讨论,包括飞行控制方案、机载传感器、控制算法以及控制器设计方法等内容。

关键词 微型飞行器;多学科设计优化;飞行控制

中图分类号:V249.1 文献标识码:A

The Progress of the Research on the Micro Air Vehicle's Flight Control

ZHANG Wei-hua, ZENG Qing-hua

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The micro air vehicle is a growing field of new aircraft and its control is a challenging key technology in the MAV research. Summarizing MAV, this paper presents a survey of the current situation and development of MAV flight controller, and analyzes some key tech problems in the design of MAV flight controller, which includes the scheme of flight control, on-board sensors, new control device, flight control algorithms, and controller design methods.

Key words micro air vehicle; multidisciplinary design and optimization; flight control

由于微机电技术、微米/纳米技术的进步,近年来世界各国对微型飞行器(micro air vehicle,简称 MAV)的研究产生了浓厚兴趣。1992年,首次提出了 MAV 的概念,它不仅可应用于战场侦察、指挥导引和高机动作战等军事领域,而且还可广泛应用于森林、海洋监测、灾区救援等民用领域,有着广阔的应用前景;另外,从其技术内涵来看,MAV 实际上是一个尺寸不超过 15cm、质量小于 100g 的空中六自由度微型机器人。它涉及微系统的大部分关键技术,极有可能成为未来微系统持续发展的技术驱动力^[1]。因此,MAV 研究计划已率先在美国(1997年)、法国(2000年)启动,英、德、日等国也在积极的酝酿之中,特别是美国经过六年的研究,部分 MAV 已在军事领域进入了实战功能性试验阶段,如洛克希德·马丁公司的“微星”就在美军阿富汗军事行动中投入应用。在 DARPA 的极力倡导和积极支持下,美国一大批高等院校、研究机构纷纷加入 MAV 研究开发工作。1998年,DARPA 拨款 3500 万美元使 MAV 的理论研究和工程应用研究得以全面展开,之后,美国海军陆战队、美国陆军和特种战司令部、美国陆军导弹研究发展中心等也纷纷拨款推动 MAV 研发工作。目前,MAV 在自主导航能力、稳定飞行、滞空时间和控制范围等方面与美国军方的要求存在差距,即使代表 MAV 较高水平的美国空间环境公司研制的“黑寡妇”MAV 也只是采用一个重 2g 的 3 通道遥控系统,由于飞行器尺度变小,遥控操作难度较大,MAV 推广应用受到限制。近年来随着 MAV 机体设计、制作、飞行试验技术的稳步提高,MAV 飞行控制的重要性日显突出,特别是从 MAV 应用特点来看,单机 MAV 必将由 MAV 编队机群所取代,遥控操作模式必将被自主飞行模式所取代。MAV 飞行控制问题已引起了国内外研究人员的高度重视^[2~7]。

* 收稿日期:2004-04-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60175032)
作者简介:张为华(1962—),男,教授,博士生导师。

1 MAV 飞行控制系统的结构和特点

MAV 飞行控制系统是 MAV 机载电子系统的核心部件,负责 MAV 姿态稳定、自主导航飞行以及与地面系统的信息交换等工作,其典型结构框图如图 1 所示。

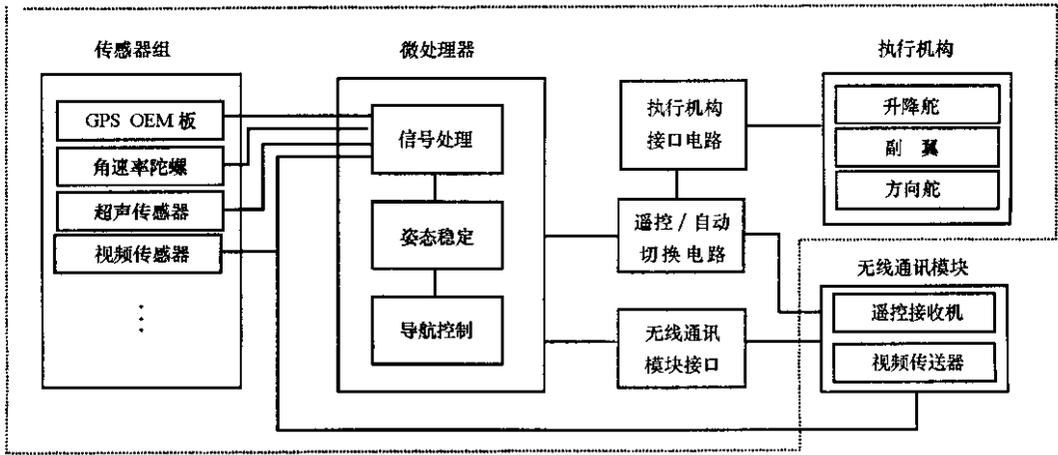


图 1 MAV 飞行控制系统典型结构框图

Fig. 1 Typical construction of MAV's flight control system

与常规飞行控制系统相比,MAV 飞行控制系统有以下特点 (1)系统中各个功能部件的选择将体积小、质量轻、功耗低、集成度高提到了一个极其重要的地位,如一般将串行口、模拟数字转换等接口电路集成在单芯片微控制器中,且要求选用低电压、低功耗芯片。(2)由于 MAV 惯性矩随尺寸减小而急剧减小,较强的阵风干扰可能使 MAV 很快进入空气动力特性的非线性区,对 MAV 的稳定控制影响很大^[2]; MAV 设计参数变化,如质心改变、发动机安装误差、执行机构动态响应时延等,对 MAV 飞行动力特性影响大。MAV 飞行控制律的设计对飞行控制品质,特别是对控制器动态品质和鲁棒品质提出了很高要求。(3)常规飞行控制系统中一般要对空气动力学量、惯性量、方位角及空间位置等测量,需要较多传感器;然而,MAV 采用这种方法不太现实,利用软件快速、准确重构状态显得尤为重要。(4)随着 MAV 体积、质量减小,传统定翼机控制方式受到挑战,很多新型气动控制方案,如利用扑翼、弹性机翼、机翼表面鼓包来控制飞行的方法随之产生,从而导致飞行控制系统的控制方式发生根本变革^[3,4]。(5)MAV 设计中最具挑战性的是充分探索 MAV 在空气动力、结构、推进、控制等学科中的协同效应,从设计上保证 MAV 飞行品质提高。(6)为了减少机载设备质量,各种机载传感器甚至微处理器等部件有可能放在地面,如文献 4 控制系统方案就是利用超声波原理对飞行姿态进行测量,主要设备置于地面上。

2 MAV 飞行控制系统的研究现状

2.1 飞行控制方式

依靠空气舵操纵飞机滚转、俯仰和偏航的传统飞行控制方式受到 MAV 体积和质量的严格限制。波音公司 20 世纪 80 年代末在 AFTI/F111 人工控制自适应机翼上的研究成果,为进行新的控制方式探索给予了很多启迪,该项研究利用机翼前后缘的弯曲变形来控制飞行姿态。目前,美国专门设立了一个飞行器形变研究基金计划,用于支持采用灵巧技术的控制装置设计,从而达到改善飞行器性能的目的。NASA 兰利研究中心在该项研究计划的支持下,把一种基于机翼表面形变的新式控制激励器(Innovative Control Effectors)应用到某无尾飞机上,取得了理想控制效果^[8]。文献 9 开展了飞行器自适应机翼研究,得到了初步仿真结果。MAV 自身的特点决定了人们对它进行新颖控制方式研究的浓厚兴趣,文献 [1][10]采用基于仿生飞行方式进行 MAV 飞行控制,取得了较好效果。近年来,基于传统定翼飞行方式的 MAV 研究人员也对飞行控制装置的创新研究产生了浓厚兴趣,如佛罗里达大学对自适应机翼随飞

飞行器同比缩小后存在的问题进行了研究^[11]。最近,NASA 兰利研究中心与佛罗里达大学联合,以佛罗里达大学某 MAV 为原型,进行了弹性变形机翼探索,该机翼能够自动适应大气扰动,从而保证 MAV 平稳飞行,目前已完成了风洞实验研究^[12]。文献 [13] 开展了 MAV 中使用主动控制弹性机翼的技术可行性研究,他们将压电陶瓷埋入由聚氨酯泡沫体铸模的可变形机翼内,通过压电陶瓷电压的改变来控制机翼弯曲度,从而操纵 MAV 飞行,仿真试验表明,当 MAV 在以正弦规律波动的风扰动环境中飞行时,控制系统能够将 MAV 维持在指定高度和指定地面速度。美国圣母大学针对与定翼 MAV 低雷诺数相连的气流分离和低升阻比特点,利用 MEMS 技术进行气流控制,改善 MAV 性能^[2]。乔治亚州理工大学在这方面的研究非常活跃,提出了两种新颖的飞行控制方案:Roglin 领导的研究小组正在研究一种压电结构部件,它可以改变 MAV 升力大小,而以 Englar 为首的研究人员则从库安达效应出发,将发动机产生的部分气流通过机翼上的表面导流槽排除,从而达到增加升力、减小阻力的目的,进一步可对升力大小实施控制。随着可用作驱动元件智能材料的不断涌现以及 MEMS 技术发展,各种新颖姿态控制方案的出现对于解决 MAV 稳定控制问题具有诱人前景。

2.2 传感器

要实现 MAV 自主飞行,空间位置、姿态和环境信息的快速、准确获取非常重要,并且 MAV 中所使用的传感器必须体积小、质量轻,最好具有多功能。目前包括我国清华大学和东南大学等在内的许多研究机构都在从事各种微型惯性器件或定姿、定位器件研制^[14],其中,包括微型加速度计、微型陀螺仪、微型惯性测量系统和微型 GPS 接收机等。另外,许多研究人员利用现有传感器技术水平,进行了 MAV 飞行控制系统的探索性研究。文献 [6] 利用微型角速率压电陀螺进行增稳系统设计,利用 HMR3000 数字罗盘进行 MAV 姿态测控系统研究。实际上,常规飞行控制系统中一般要对空气动力学量、惯性量、方位角及空间位置等进行测量,需要很多传感器,然而,MAV 采用这种方法是不太现实的,一种较为可行的作法是适当测量一些 MAV 位置、姿态或环境参数,其它参数利用状态观察器重构。问题的关键在于如何快速、准确地重构控制系统所需要的状态,因为 MAV 易受内、外扰动影响,这方面还有大量工作需要进行研究。

从目前研究进展来看,将大尺寸飞行器中的位置、姿态敏感装置缩小,以满足 MAV 低载要求的技术方案,已经证明难度相当大,甚至在现有技术条件下不太现实。MAV 中大量使用的小封装传感器器件,往往以牺牲性能为代价。实际上,MAV 最基本的功能是侦察与监控,它一般都配备微型摄像设备、图像无线传输设备以及地面监视与控制设备,目前,主要是通过遥控操作手监测机载回传图像对 MAV 进行操纵的。由于地面设备没有太多的体积和质量限制,可以预见,利用现有高性能计算机技术,对机载回传图像进行处理,实时提取与飞行姿态相关的信息,并对 MAV 进行控制,是目前技术条件下解决 MAV 飞行控制问题的一套行之有效的办法,文献 [5] 已在该领域进行了大量的理论研究和初步的试验研究。

2.3 飞行控制算法

由于 MAV 各个部件都受到体积和质量限制,受内、外扰动因素影响较大,要保证 MAV 在整个飞行路线下具有良好飞行品质,与传统飞行器相比,MAV 飞行控制器将更多依赖于飞行控制算法。文献 [16] 指出,常规飞行控制器一般采用线性、时不变控制理论进行设计,由于 MAV 不稳定的空气动力特性使问题成为非线性和时变的,采用经典的线性控制理论进行控制器设计是不可能的。一个理想的飞行控制器将充分使用诸如模糊逻辑、神经网络、遗传算法、模式识别或基于其它知识的系统。然而,在 MAV 研究领域,目前还很少有文献涉及控制算法的深入研究。对 MAV 飞行控制算法的要求突出地表现在以下方面:(1) 暂态响应的快速、平稳;(2) 模型自身扰动或模型误差的超强鲁棒性。在传统飞行控制领域,人们为了研究一些特定问题,如战斗机大迎角飞行、质心位置的急剧变化、马赫数变化等,对以上两个方面已经展开了大量研究。从目前情况来看,MAV 飞行控制算法研究应充分借鉴传统飞行控制器的研究思路和研究成果,对 MAV 建模方法、飞行性能评估准则、鲁棒性能评估准则等进行研究,建立基准的多学科仿真环境,应用鲁棒控制理论开展飞行控制算法的深入研究。

2.4 飞行控制器设计方法

国际结构与多学科优化组织于 1997 年开始举行每年一次的 MAV 设计制作比赛,将 MDO 研究报告

作为参加 MAV 比赛的基本要求。因此,各研究机构、高等院校都非常重视 MDO 研究^[17-19]。特别是近年来随着各种新颖控制装置不断在 MAV 中获得应用,将飞行器外形布局设计和飞行控制系统设计集成起来进行优化研究已显得越来越重要。文献[3]利用 MDO 方法对某 MAV 气动外形设计和控制系统设计进行了同步优化,达到了减少控制能量、改善滚转稳定性的目的。从现有文献看,MAV 多学科设计优化工作还比较初步,对于 MAV 多学科设计环境建设考虑不够,特别是设计优化回路中飞行控制子学科的研究深度不够,还有大量工作有待完善和深入。

3 结束语

MAV 飞行控制系统中传感器、控制装置的性能与飞行器受体积和质量约束之间的矛盾突出;MAV 惯性矩小,受环境影响大,稳定性差,平台的稳定和导引对飞行姿态控制的要求很苛刻;MAV 系统本质的非线性、内部结构和参数的时变性、部分非模化动力学特性以及飞行环境的随机性等因素使控制问题更加复杂。这些决定了飞行控制系统将是今后相当长一个时期内 MAV 研究的核心,其研究成果对其它微系统控制也有直接借鉴意义。

参考文献:

- [1] Wilson J R. Mini Technologies for Major Impact[J]. America Aerospace, 1998, 36(5): 36-42.
- [2] Gad-el-Hak M. Micro-Air-Vehicles: Can They Be Controlled Better?[J]. Journal of Aircraft, 2001, 38(3): 419-429.
- [3] Waszak M R, Jenkins L N. Stability and Control Properties of an Aeroelastic Fixed Wing Micro Aerial Vehicle[R]. AIAA 2001-4005, 2001.
- [4] Marti S. Free Flying Micro Platform and Papa-TV-Bot: Evolving Autonomously Hovering Robots[EB/OL]. www.media.mit.edu/~stefann/FFMP/.
- [5] Kajiwaru I, Haftka R T. Simultaneous Optimum Design of Shape and Control System for Micro Air Vehicles[R]. AIAA-99-1391, 1999.
- [6] 陈皓生,徐军,李疆. HMR3000 数字罗盘在微型飞行器中的应用[J]. 传感器技术, 2001, 20(9): 44-46.
- [7] 曹云峰,王柳文. 微型飞行器控制与导航系统研究[J]. 航空电子技术, 2002(3): 31-35.
- [8] Padula S L, Rogers J L, Raney D L. Multidisciplinary Techniques and Novel Aircraft Control Systems[J]. AIAA 2000-4848, 2000.
- [9] Inman D J. Comments on Prospects of Fully Adaptive Aircraft Wings[A]. SPIE Paper SS 4332-01, 8th International Symposium on Smart Structures and Material[C]. Newport Beach, CA, 2001.
- [10] Schenato L, Deng X, Wu W C, Sastry S. Virtual Insect Flight Simulator (VIFS): A Software Testbed for Insect Flight[R]. University of California, 2001.
- [11] Fitz-Coy N, Belcher V. A Framework for Control, Sensor and Actuator Design in Adaptive Wing MAV[A]. Proceedings of 1st International Conference on Emerging Technologies for Micro Air Vehicles[C], USA, 1997.
- [12] Waszak M R, Jenkins L N. Stability and Control Properties of an Aeroelastic Fixed Wing Micro Aerial Vehicle[R]. AIAA 2001-4005, 2001.
- [13] Limin Z, Ramaprian B R. A Piezo-Electrically Actuated Wing for A Micro Air Vehicle[R]. AIAA 2000-2302, 2000.
- [14] 丁衡高. 微系统与微米/纳米技术及其发展[J]. 微米/纳米科学技术, 2000, 2(1): 1-6.
- [15] Ettinger S M, Nechyba M C, Lfju P G, et al. Vision-Guided Flight Stability and Control for Micro Air Vehicles[J]. Advanced Robotics, 2003, 17(7): 617-640.
- [16] Douglas Page. MAV Flight Control: Realities and Challenges[EB]. www.hightechcareers.com.
- [17] 1997 Micro AV Competition Rules[R]. www.aero.ufl.edu/~issmo/mav/mav1.htm.
- [18] Rais-Rohani M, Hicks G R. Multidisciplinary Design and Prototype Development of a Micro Air Vehicle[J]. AIAA Journal of Aircraft, 1999, 36(1).
- [19] Bostjancic J, Torres G. Multidisciplinary Optimization Report for U.F.O.: University of Florida Observer Aircraft Design and Optimization[A]. Second Annual ISSMO Micro Aerial Vehicle Competition[C], USA: Florida, 1998.

