

文章编号: 1001-0920(2006)04-0361-06

无人驾驶直升机飞行控制技术综述

曾丽兰¹, 王道波¹, 郭才根², 黄向华¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016; 2. 上海雏鹰科技有限公司 总师部, 上海 200137)

摘 要: 针对无人驾驶直升机的飞行控制技术进行了简要综述. 在分析无人驾驶直升机飞行控制特点及其要求的基础上, 对无人驾驶直升机先进的控制理论和控制方法及存在的问题作了进一步分析, 最后评述了当前国际上无人驾驶直升机先进飞行控制技术的现状和展望

关键词: 无人驾驶直升机; 飞行控制系统; 先进控制技术

中图分类号: V 249.1

文献标识码: A

Survey of Flight Control Technology for Unmanned Helicopter

ZEN G L i-lan¹, WAN G D ao-bo¹, GUO Cai-gen², HUAN G X iang-hua¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Office of Chief Designer, Shanghai Little Eagle Science and Technology Company LTD, Shanghai 200137, China Correspondent: ZEN G L i-lan, E-mail: orchis_zll@hotmail.com)

Abstract: Flight control technology for unmanned helicopter (UMH) is reviewed. Characteristics and demands of UMH flight control system are analyzed, and the related problems and application of the advance control theories to flight control for UMH are explored. The state-of-art of advanced flight control technology for UMH is presented. Finally, some future research directions are pointed out.

Key words: Unmanned helicopter; Flight control system; Advanced control technology

1 引 言

无人驾驶直升机(UMH)具有任意方向飞行,可悬停对预定目标进行定点监视,也可定点做 360° 回转;外形尺寸小,雷达发射面积小,飞行安全性高;起飞着陆场地要求低;地面设备简单,架设和撤收时间短等优点,因此在军事和民用方面已广泛应用

美国从 20 世纪 50 年代开始研制无人直升机,到 1960 年 8 月 12 日,世界上首次出现有实用价值的 UMH,即美国 QH-50A。此后,其他国家相继研制 UMH,但存在许多技术难点未能突破,因而发展缓慢。20 世纪 80 年代后,随着微电子技术、信息技术、隐身技术和传感器技术的迅速发展,UMH 技术发展也跃进一个新的台阶,各种多功能、智能化、高可靠性、使用简便的 UMH 相继出现,如英国研制的舰载“小精灵”(SPRITE),加拿大的 CL-227“哨兵”

(SENTINEL),美国的 D-340“PONTER”等,这些 UMH 在军事和民用上都发挥了很大的作用^[1-3]。

我国对 UMH 的研究起步较晚,大部分型号的 UMH 均处于研制阶段。目前,国内 UMH 研制最成功是由上海雏鹰公司、中国直升机设计研究所和南京航空航天大学合作研制的 LE110A,此 UMH 在 2004 年底已成功完成超视距自主飞行试验

本文在分析 UMH 飞行控制特点和要求的基础上,综述了 UMH 先进控制方法的应用及存在的问题,最后评述了国内外 UMH 先进飞行控制技术的现状,指出了 UMH 飞行控制技术发展急需解决的若干问题,以期推动在国内的研究与发展

2 UMH 飞行控制的特点和要求

UMH 是一个多变量、非线性、强耦合、时变的高阶系统,是一个复杂的被控对象,其主要特点体现

收稿日期: 2005-06-27; 修回日期: 2005-10-16

基金项目: 航空科学基金项目(01C52015)。

作者简介: 曾丽兰(1976—),女,贵阳人,博士生,从事无人机飞行控制与仿真的研究;王道波(1957—),男,河北易县人,教授,博士生导师,从事无人机飞行控制与仿真、高精度伺服控制技术等研究

在以下几个方面^[4]:

(1) 对象特性差异显著

UMH 的纵向、横向和航向运动具有强的耦合性, 这些耦合主要表现在旋翼旋转产生偏航力矩, 横滚机动时桨叶挥舞引起俯仰力矩, 俯仰机动引起横滚力矩, 前飞速度变化时尾桨拉力变化引起偏航力矩。当 UMH 悬停/小速度飞行时, 纵向/横向耦合明显; 而当 UMH 中/高速前飞时, 纵向/高度耦合明显。这种显著的耦合特性差异使得 UMH 控制系统在全飞行包线设计时必须充分考虑悬停/小速度和前飞两种状态, 同时具有良好的解耦性和鲁棒性。

(2) 模型阶次高且建模难度大

UMH 模型除了刚体动力学模型外, 还有旋翼动力学模型、尾桨动力学模型、水平安定面和垂直尾翼等共同构成完整的直升机对象特性, 如果用数学方式表示, 则 UMH 的数学模型至少可达 27 阶。如果再与发动机、传感器等特性综合在一起, 则阶次会更高。直升机旋翼的气动载荷计算是一个复杂的问题, 而且直升机具有多变量、非线性交耦和柔性结构的动力学特性, 在理论上要精确建立 UMH 飞行动力学的数学模型目前尚未解决, 尤其不易准确建立 6 自由度非线性、交耦的动力学模型。因此 UMH 的控制系统必须具有较强的鲁棒性和模型弱相关性。

(3) 非线性特性强

从系统角度分析, UMH 的非线性主要存在于数学模型的非线性和执行机构的非线性上。由于旋翼动力特性的非线性效应严重, UMH 不仅在不同飞行状态时的特性差异较大, 而且即使在同一飞行状态, 当施加机动操纵量时, 也会激发出强非线性响应。同时, 由于 UMH 通道之间的固有耦合严重, 一个通道的执行机构非线性不仅影响本通道的飞行响应, 还会较强地影响到其他通道的响应。所以在进行控制系统设计时, 必须对 UMH 的非线性有正确的认识, 并且克服闭环系统所产生的非线性。

(4) 飞行模态数量多

在文献[5]中为直升机定义了许多飞行模态, 如 RCAH (Rate Command/Attitude Hold), ACAH (Attitude Command/Attitude Hold), 高度保持等, 且模态之间可组合的数目更多。正是由于直升机可拥有多种飞行模态, 才使直升机具有在复杂飞行环境下完成特殊任务的能力。因此, 飞行控制系统不仅要实现不同的飞行模态功能, 而且需要有良好的模态切换机制, 使 UMH 在模态切换过程中能够保持良好的飞行品质。

(5) 高阶动力学特性对操纵品质的影响大

如果在设计控制系统时忽略 UMH 模型中的高

阶环节, 那么当控制系统设计出来之后, 会发现高阶动力学特性对飞行操纵品质的影响十分严重, 尤其对于宽频带的控制系统, 极大地影响了系统的带宽和相位滞后指标^[6]。因此, 在设计控制器时必须准确把握 UMH 的高阶环节, 才能使 UMH 的飞行品质进一步得到提高。

另外, UMH 的控制系统必须将有人直升机中飞行员操纵直升机平衡、补偿、解耦等技术准确地反映到飞行控制系统设计中, 并需具备与有人驾驶/遥控直升机相当的运动性和机动能力, 因此 UMH 对象特性研究远比有人驾驶直升机要求高。

3 UMH 先进控制方法的应用及存在的问题

多年来, 飞控界的专家和学者对直升机的控制策略进行了大量的研究^[7-33], 表 1 中列出了应用于 UMH 控制的几种典型的先进控制方法。其中, 先进 PD 控制不仅具有经典 PD 控制在 UMH 单一通道的控制设计及两两通道间的解耦控制设计方面相对成熟、易于实现的特点, 而且可以克服经典 PD 调节参数的过程繁琐、可移植性差、只能静态解耦、遇到强非线性及未建模动力学特性时的响应特性差、在全飞行包线内及多模态切换时的鲁棒稳定性差等缺点, 因而在 UMH 上装备的控制器中已有广泛的应用^[11-13]。

基于神经网络控制的相关设计方法可以较好地解决控制器之间和模态之间控制律的平滑设计问题, 是设计全飞行包线控制器的有效方法^[17, 18]。

1998 年, 美国空军资助了一个名为“Reconfigurable Control for Tailless Aircraft”的项目, 目的是提高无人直升机(无人直升机的)机动性和可靠性, 为未来的自主攻击型无人直升机奠定技术基础。该项目采用基于神经网络的主动控制技术, 并于 1999 年通过飞行试验, 证明了该方法的可行性。

经典的控制和单一的现代控制设计方法都会因 UMH 的无模型高频特性而产生限制, 如经典的自适应控制方法就不能解决 UMH 的高频特性问题, 而采用基于神经网络的非线性自适应控制则可以克服 UMH 参数的不确定性、无模型性以及潜在的动态非线性。采用增益调整后的鲁棒控制也可以用来解决 UMH 飞行包络线中动态非线性问题。另外, 对于控制器在飞行包络线边界受执行机构位置和速度饱和限制的问题, 近年来一种称为“pseudo control hedging”的控制方法可以通过调节控制参数有效地解决^[23, 24]。

表 2 对 8 种典型的鲁棒控制方法优缺点进行了简单描述。其中, H_∞ 鲁棒控制理论很好地解决了常规频域理论不适于 M/MO (多输入多输出) 系统设

表 1 UMH 控制中典型的控制方法及特点

控制方法	控制特点	应 用
模糊 PD 控制	将模糊控制不需控制对象的精确模型和经典 PD 控制方法简便, 采用基于专家系统的控制逻辑, 具有鲁棒性好, 解耦性强的特点	发动机控制, 姿态(解耦)控制, 高度控制, 悬停控制, 全飞行包线设计.
非线性神经网络动态逆控制	利用神经网络解决动态逆方法需要解析模型和难以求解非线性模型逆的问题, 提高了动态逆方法工程实现的能力	姿态(解耦)控制, 高度控制, 全飞行包线设计.
H 控制 μ 综合法	利用结构奇异值 μ 方法, 克服 H 对结构不确定性系统的设计保守性的缺点, 这种综合设计方法具有好的鲁棒稳定性和鲁棒性能	姿态(解耦)控制, 悬停控制, 导航控制.
模型预测特征结构配置控制	闭环系统的性能和稳定性由特征结构配置方法来保证, 而外界干扰的作用由预测控制来抵消, 这种方法具有性能稳定, 抗干扰能力强的特点	发动机控制, 姿态(解耦)控制, 高度控制, 导航控制.

表 2 典型鲁棒控制方法的特点

控制方法	优 点	缺 点
非线性动态逆控制	能够根据控制要求设计控制器, 鲁棒性和控制性能好, 抗干扰性强	控制器阶次高, 高阶系统求逆难, 可能会造成控制饱和及不稳定的动态零点; 只适用于最小相位或相似最小相位系统
鲁棒特征结构配置方法	可认为是多变量根轨迹设计方法, 可直接设计闭环系统的阻尼, 稳定时间(settling time), 解耦度, 抗结构和非结构(摄动)不确定性好, 适合于 M M O 系统	需要系统解析模型; 抗外界干扰性能差
预测控制	能够有效地处理被控系统与众不同的动态特性和系统中的不确定性; 对有规律的干扰能够有效地进行补偿控制	闭环系统的性能取决于参考模型的有效性; 当系统存在约束时, 闭环系统的稳定性和鲁棒性难以保证
神经网络控制	不需控制对象的解析模型, 具有逼近任意非线性函数的能力, 同时具有很强的适应能力和信息综合能力; 控制鲁棒性和抗干扰性好, 实时性强	控制性能与模型的精确性相关性大
线性二次高斯 LOG 法	能够很好地处理系统的动态问题和测量的高斯噪声	单独的 L Q G 鲁棒性差, 需和 L T R 方法相结合使用
鲁棒逆动态估计	可以认为是非线性动态逆与变结构控制合成的一种控制方法, 并且设计方法简便	需要系统解析模型, 控制的鲁棒性和稳定性不能保证.
自适应控制	通过在线辨识控制系统的模型, 自动调节控制参数; 调参方便, 具有抗系统参数摄动和外界干扰的能力	受辨识算法的限制, 只适合模型参数变化缓慢, 及外界干扰不强的系统.
变结构控制	对系统相空间中不同的区域采用不同的控制律, 鲁棒性能好	抗外界干扰能力弱

计和 L Q G (线性二次高斯) 理论不适于模型摄动情况两个难题, 它可以考虑各种外界干扰和模型误差, 克服了现代控制理论对模型的精确性过于敏感的弱点^[25]. Caltech's Kyo sho EP 概念电子模型直升机已经成功运用了这种基于 H 和 L Q G 的理论进行 M M O 悬停控制. 利用结构奇异值 μ 方法, 又可以克服 H 对结构不确定性系统设计保守性的缺点, 为类似直升机的多变量有摄动系统设计鲁棒控制器提供了强有力的工具, 该方法也已在 Yam aha R-50 无人直升机的悬停和定点导航控制上获得了验证^[28].

先进控制理论的控制性能是无可置疑的, 但是

目前大多数先进控制理论仍处于实验室研究阶段, 与工程具体实现还存在一定的距离. 如 H 控制理论是鲁棒控制中最常用的方法, 其理论和算法实现上都已基本成熟, 但应用 H 鲁棒控制设计出来的多为高阶控制器, 很多仍无法工程实现. 如要工程实现, 只能降维处理, 而降维后控制器的鲁棒性也必然随之下降, 这样控制系统的鲁棒性就难以保证; μ 分析方法目前也只适用于各通道模型结构摄动形式统一的情况, 与实际工程情况严重不符. 鲁棒控制中很多控制方法属于线性设计方法, 而所有通过线性设计方法设计出来的控制器都只能在现实的平台中进行检查和进一步验证, 调整控制结构以及控制参数

的过程繁琐,而且在调整的过程中,飞机的安全性和稳定性受到一定的破坏;神经网络虽然能较好解决UMH系统中的一些非线性和模型摄动问题,但控制器的控制效果与模型的精确性有一定的相关性;模糊控制尽管不需要精确的控制模型,却对环境的自适应能力较差等^[31-33]。

4 UMH 先进飞行控制技术的现状及展望

近年来UMH飞行控制技术中出现了许多广为关注的新技术,包括:自主贴地和自主起降飞行控制技术、故障诊断与容错控制技术、传感器合成技术、航空电子综合控制和多功能综合显示技术、群飞和协同作战技术等^[34-41]。

贴地飞行是UMH的常规飞行动作,在贴地飞行状态,地面的高压电缆、树木、建筑物等对直升机的飞行构成很大的威胁。因此,贴地飞行状态下UMH的气动特性、飞行品质研究、飞行控制系统的控制律、障碍探测测距技术、UMH地形跟踪/地形回避引导(TF/TA)系统及其与障碍回避系统(OASYS)的综合研究等是自主贴地飞行控制技术研究的主要内容。

UMH起飞/降落时,由于受地面效益的影响,此时的UMH气动模型与空中飞行时的气动模型大不相同,直升机在起降时的非线性特性表现得更加强烈。同时,直升机每次起/降的地点不同,地形不同,起飞时各操纵通道的配平量不同,着陆时直升机所能允许的最大速度也不同,因此控制UMH起飞时的配平量、UMH着陆时的定点精度和下降速度是UMH自主起/降控制的核心技术。

UMH工作飞行安全、可靠是飞行控制设计时必须考虑的重要问题。容错控制、故障检测与诊断为提高UMH的可靠性、可维护性和有效性开辟了一条新途径。故障预测、故障监测、故障源识别、故障排除和任务与功能的重新规划等是故障诊断和容错控制技术的基本功能。

随着微电子技术和信息处理技术的发展,传感器技术也得到进一步提高,体积减小,重量减轻,性能提高,航空组合传感器的研究也取得了一定的进展。由于计算机技术和信息技术在UMH上的广泛应用,UMH的飞行控制正朝高度综合化方向发展。通过先进的通信识别/信号传输技术,将机载计算机获得的飞行参数和系统工作信息传输到地面测控计算机系统,由综合显示技术获得飞行状态信息和飞行运动的视景,通过地面测控计算机对地面遥控操纵、导航、飞行控制、系统监控、故障容错、敌我识别、武器火控等信息进行综合处理,从而进行综合控制。

群飞和协同控制是美国空军科学研究所正在全

力开发的6大基础研究课题之一,旨在开发无人机平台在作战中彼此协同的能力。这一领域的关键研究课题包括自适应决策制定、实时路径规划和优化、人机交互、遥控无人机的自治和对用于无人机导引的新型传感激励系统的生物拟态概念的理解等。

总之,随着现代控制方法和技术的不断进步,UMH的飞行控制技术也正朝着全数字化、智能化和综合化及三者有机结合的方向发展。但从目前的研究发展现状来看,UMH的飞行控制技术还远未成熟,实际应用也远没有挖掘出真正潜力,还有很多富有挑战的课题亟待解决,主要列举以下几个方面:

1) 在UMH的一体化建模方面,目前常用的直升机模型并不包含发动机的模型,但是UMH的发动机工作状态与直升机旋翼的动态响应相互制约,相互影响。如何进一步发展新的实验方法和建模技术,如何获得直升机旋翼和发动机一体化模型,是设计更高频带/更好性能的UMH飞行控制器,实现UMH先进飞行控制技术的一个基本前提。

2) 在先进控制理论的基础研究和工程应用方面,如何将传统控制设计方法积累的实际经验与具有较高设计效率的先进控制方法相结合,如何将理论指标与实际物理意义建立联系,如何设计出便于工程实现和验证的控制器,如何最有效地模仿飞行员的操纵技术和如何自主处理突发事件等,已成为推广各种先进控制方法在UMH上应用的最现实问题。

3) 在先进控制技术的仿真和验证方面,由于直升机飞行力学在飞行包线内是一个非线性对象,所设计的控制律必须通过非线性仿真环境才能得到全面验证。如何将仿真试验与实际飞行试验相结合,两者如何进行实时通讯是仿真试验进一步提高飞行安全、缩短研制周期、降低研制成本的一个重要课题。

对上述问题的深入研究和探索对促进我国UMH的发展具有现实意义。

参考文献 (References)

- [1] 郭才根. 无人驾驶直升机的应用与现状[R]. 南京: 南京航空航天大学, 1996.
(Guo C G. *The Present Situation and Application of Unmanned Helicopter* [R]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1996.)
- [2] 郭才根, 张延琪, 赵红宇. CL-227无人直升机的发展历程[A]. 第一届《无人机》杂志理事会第一次会议暨首届无人机发展论坛[C]. 北京, 2004.
(Guo C G, Zhang Y Q, Zhao H Y. *The Course of the CL-227 UMH Development* [A]. *The 1st Forum of UAV Development viz The 1st Council of UAV* [C]. Beijing, 2004.)

- [3] Landis K H, Davis J M, Dabundo C, et al. Advanced Flight Control Technology Achievement at Boeing Helicopter[J]. *Int J Control*, 1994, 59(1): 263-290
- [4] 黄一敏. 直升机飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1999.
(Huang Y M. *Research on Helicopter Flight Control System Design* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1999.)
- [5] ADS-33E-PRF. *Aeronautical Design Standard Performance Specification Handling Qualities Requirements for Military Rotorcraft* [S]. 2000
- [6] Ingle S J, Cele R. Effects of Higher Order Dynamics on Helicopter Flight Control Law Design [J]. *J of the American Helicopter Society*, 1994, 39(3): 12-23.
- [7] Saif A A, Harris N M. Tracking and Maneuver Regulation Control for Nonlinear Nonminimum Phase Systems: Application to Flight Control[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2002, 10(6): 780-792
- [8] 段海滨, 王道波, 朱家强, 等. 蚁群算法理论及应用研究的进展[J]. *控制与决策*, 2004, 19(12): 1321-1340
(Duan H B, Wang D B, Zhu J Q, et al. Development on Ant Colony Algorithm Theory and Its Application [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(12): 1321-1340.)
- [9] 黄一敏, 孙传伟, 高正. 直升机飞行控制系统的快速原型设计[J]. *飞行力学*, 2002, 20(1): 5-9
(Huang Y M, Sun C W, Gao Z. Rapid Prototype Design for Helicopter Flight Control System [J]. *Flight Dynamics*, 2002, 20(1): 5-9.)
- [10] Kadmiry B, Driankov D. A Fuzzy Gain-scheduled for the Attitude Control of an Unmanned Helicopter[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2004, 12(4): 502-515
- [11] Grassi E, Kostas S T, Dash S, et al. Integrated System Identification and PD Controller Tuning by Frequency Loop-shaping [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2001, 9(2): 285-294
- [12] Hu B G, Mann G K I, Gosine R G. A Systematic Study of Fuzzy PD Controllers-function-based Evaluation Approach [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(5): 699-712
- [13] 曾丽兰, 王道波, 樊春霞. 基于模糊PD的无人直升机解耦控制研究[J]. *应用科学学报*, 2004, 22(4): 498-502
(Zeng L L, Wang D B, Fan C X. An Unmanned Helicopter Decoupling Control Based on the Fuzzy PD Control Method [J]. *J of Applied Sciences*, 2004, 22(4): 498-502.)
- [14] Wai R J, Lin K M. Robust Decoupled Control of Direct Field-oriented Induction Motor Drive [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2005, 52(3): 837-854
- [15] Civita M L, Papageorgiou G, Messner W C, et al. Design and Flight Testing of a Gain-scheduled H Loop Shaping Controller for Wide-envelope Flight of a Robotic Helicopter[A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Denver, 2003: 4195-4200
- [16] Kim B S, Calise A J. Nonlinear Flight Control Using Neural Networks[J]. *IAA J of Guidance, Control and Dynamics*, 1997, 20(1): 26-33
- [17] 王志峰, 安锦文, 姜广伦. 直升机飞行/推进综合系统的神经网络控制器设计[J]. *西北工业大学学报*, 2001, 19(1): 65-68
(Wang Z F, An J W, Jiang G L. Designing of Helicopter IFPC System for the Full Envelope Flight [J]. *J of Northw estern Polytechnical University*, 2001, 19(1): 65-68.)
- [18] Silvia Ferrari. Full-envelope Flight Control Using an Adaptive Critic Neural Network [Z]. *Cambridge: FAA/NASA Joint University Program on Air Transportation*, 2001
- [19] Kadmiry B, Bergsten P, Driankov D. Autonomous Helicopter Control Using Fuzzy Gain Scheduling[A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Seoul, 2001: 2980-2985
- [20] Isidori A, Marconi L, Serrani A. Robust Nonlinear Motion Control of a Helicopter [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(3): 413-426
- [21] Krupadanam A S, Annaswamy A M, Mangoubi R S. A Multivariable Adaptive Controller for Autonomous Helicopters [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Anchorage, 2002: 2052-2057.
- [22] Calise A J, Lee S, Shama M. Development of a Recon Figurable Flight Control Law for Tailless Aircraft [J]. *IAA J of Guidance, Control, and Dynamics*, 2001, 24(5): 896-902
- [23] Johnson E, Calise J. A Neural Network Adaptive Control of Systems with Input Saturation[A]. *Proc of the IEEE American Control Conf* [C]. Arlington, 2001: 3527-3532
- [24] Johnson E N, Calise A J. *Pseudo-control Hedging: A New Method for Adaptive Control* [Z]. Alabam: Workshop on Advances in Navigation Guidance and Control Technology, 2000
- [25] Delgado I. *Robust Control Techniques Tutorial Document* [R]. London: Darteur, 1997.
- [26] Amaral T G, Crisostomo B. Automatic Helicopter Motion Control Using Fuzzy Logic[A]. *IEEE Proc of 10th Annual IEEE Conf on Fuzzy Systems* [C]. Melbourne, 2001: 860-863
- [27] Civita M L, Papageorgiou G, Messner W C, et al. Design and Flight Testing of a Gain-scheduled H

Loop Shaping Controller for Wide-envelope Flight of a Robotic Helicopter[A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Denver, 2003: 4195-4200

[28] Kadmiry B. *Fuzzy Control for an Unmanned Helicopter* [D]. Linköping: Linköpings Universitet, 2002

[29] Mazenc F, Mahony R E, Lozano R. Forwarding Control of Scale Model Autonomous Helicopter: A Lyapunov Control Design [A]. *Proc of the 42nd IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Hawaii, 2003: 3960-3965

[30] Yang C D, Liu W H. Nonlinear H Decoupling Control for Hovering Helicopter [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Anchorage, 2002: 4353-4358

[31] 于占东, 王庆超. 飞行器姿态的一种鲁棒自适应模糊解耦控制[J]. *宇航学报*, 2003, 24(4): 368-373
(Yu Z D, Wang Q C. Robust Adaptive Fuzzy Decoupling Control for the Attitude of Aircraft [J]. *J of Aeronautics*, 2003, 24(4): 368-373)

[32] Yang C D, Liu W H, Kung C C. Nonlinear H Decoupling Control for Hovering Helicopter [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Anchorage, 2002: 4353-4358

[33] Buskey G, Wyeth G, Roberts J. Autonomous Helicopter Hover Using an Artificial Neural Network [A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Seoul, 2001: 1635-1641

[34] 宋子善, 沈为群. 无人直升机综合飞行控制系统设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 1999, 25(3): 280-283
(Song Z S, Shen W Q. Design of the Control-simulation Integration Flight Control System of Remote Control-autonomy Control Type Pilotless Helicopter [J]. *J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1999, 25(3): 280-283)

[35] Pynadath D V, Tambe M. Multiagent Teamwork: Analyzing the Optimality and Complexity of Key Theories and Models [A]. *AAMAS'02* [C]. Bologna, 2002: 873-882

[36] Lapp T, Singh L. Model Predictive Control Based Trajectory Optimization for Nap-of-the-earth (NOE) Flight Including Obstacle Avoidance [A]. *Proc of the 2004 American Control Conf* [C]. Boston, 2004: 891-896

[37] Netter T, Franceschini N. Towards Nap-of-the-earth Flight Using Optical Flow [A]. *Proc of ECAL'99* [C]. London UK: Springer-Verlag, 1999: 334-338

[38] Hui K. *Advanced Modelling of the Engine Torque Characteristics of a Bell 412HP Helicopter* [R]. Montreal, 1999

[39] 邢琰, 吴宏鑫, 王晓磊, 等. 航天器故障诊断与容错控制技术综述[J]. *宇航学报*, 2003, 24(3): 221-226
(Xing Y, Wu H X, Wang X L, et al. Survey of Fault Diagnosis and Fault-tolerance Control Technology for Spacecraft [J]. *J of Aeronautics*, 2003, 24(3): 221-226)

[40] Bellur B R, Lewis M G, Templin F L. Tactical Information Operations for Autonomous Teams of Unmanned Aerial Vehicles [A]. *Proc of the 2002 IEEE Aerospace Conf* [C]. Montana, 2002: 2741-2756

[41] 倪先平, 蔡汝鸿, 曹喜金, 等. 直升机技术发展现状与展望[J]. *航空学报*, 2003, 24(1): 15-20
(Ni X P, Cai R H, Cao X J, et al. Present Situation and Prospects of Helicopter Technology [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2003, 24(1): 15-20)

下 期 要 目

多目标进化算法及其在控制领域中的应用综述	马清亮, 等
基于极点配置的网络流量控制研究	井元伟, 等
基于相干控制的二能级量子系统退相干抑制	张 靖, 等
概率 SDG 模型及故障分析推理方法	杨 帆, 等
一类 Markov 跳跃非线性系统的鲁棒自适应镇定	朱 进, 等
遮挡情况下的视觉目标跟踪方法研究	常发亮, 等
时滞相关型离散时变时滞奇异系统的鲁棒镇定	马树萍, 等
基于离差优化的信息不完全确定的多准则分类方法	王坚强
一种基于联合信息增量的网络级传感器管理算法	王 峰, 等

