

飞行控制技术面临的挑战与发展

马洪忠, 水尊师, 魏东辉
(北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: 总结了飞行器的发展趋势, 明确了飞行控制领域的前沿问题与挑战, 概括了飞行控制技术的基础问题和关键技术, 分析了现阶段飞行控制技术研究进展, 对未来飞行控制技术的发展提出了建议与思考。

关键词: 飞行控制; 复杂建模; 重构控制; 高自主性

中图分类号: V249. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095 - 8110 (2014) 02 - 0001 - 06

Challenges and Development Tendency of Flight Control

MA Hong - zhong, SHUI Zun - shi, WEI Dong - hui
(Beijing Electro - mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: For the development trend of the future aircraft, opportunities and challenges of flight control were generalized. The related basic research directions and key technologies were illustrated clearly. By analyzing the flight control technique status, suggestions and thinking were proposed.

Key words: Flight control; Complex modeling; Reconfigurable control; High autonomous

0 引言

近年来, 飞行器向新构型(无尾、飞翼、智能变形)、高超声速、高自主化、跨介质(水面)飞行和近空间飞行发展的趋势明显; 为适应巷战、反恐等战斗需求, 高灵活性的微型飞行器发展迅速; 飞行器空天一体化飞行任务需求加大。战争向多元化、复杂化, 从平台对抗演变成体系对抗方向发展^[1]。新的形势和任务需求对飞行控制技术提出了新的挑战。

1 飞行控制领域的前沿问题与挑战

1.1 复杂飞行建模对控制的挑战

由于传统飞行器的飞行包线不断扩大, 高超声速飞行器、跨介质飞行器、智能变形飞行器等新飞行器不断发展, 复杂飞行建模问题十分突出。

飞行器在临界空间高超声速飞行时, 临近空间的大气密度、温度、压力、辐射、风场具有和传统航空航天环境完全不同的复杂环境特性; 近

太空区域稀薄大气存在非连续流体的现象, 已超出了经典空气动力学的有效范围, 难以精确描述其气动特性^[2]; 采用超燃冲压发动机作为动力时, 气动、推进、流体/结构耦合严重; 导弹在跨介质飞行时, 面临多场耦合、多相绕流、海面效应等问题; 智能变形飞行器多体建模、协调变形过程飞行器响应特性; 轻质复合材料和大型薄壁结构带来的控制与结构耦合问题, 气动加热环境下, 结构/气动耦合问题更为复杂。如何准确描述这些复杂飞行问题, 构建表征飞行特征, 体现作用机理, 适合于飞行控制设计的数学模型, 是飞行控制设计的基础, 也面临前所未有的挑战。

1.2 新兴飞行器控制需求带来的挑战

为了提高飞行性能、适应飞行任务和作战需要, 新兴飞行器如高超声速飞行器、微型飞行器、智能变形飞行器, 其气动力、结构、动力装置和飞行控制互相耦合, 使得结构和动力装置也能产生控制作用, 应有效利用这些控制作用, 避免成为干扰。同时, 新兴飞行器普遍存在快时变、强

收稿日期: 2014 - 07 - 23; 修订日期: 2014 - 09 - 17。

作者简介: 马洪忠(1970 -), 男, 博士, 研究员, 主要从事飞行器总体方面的研究。

非线性特征,这些因素综合作用对飞行控制是一个重要的挑战。

高超声速飞行器在结构设计时,采用机身、发动机以及控制执行机构一体化设计,使得推进系统与飞行器气动之间存在强耦合,气动参数会影响推进系统,推力和进气道的压力又受到俯仰控制舵面的影响,前体进气道的压缩气流将产生升力和抬头力矩,而后体的喷管气流也将会产生升力和低头力矩。当飞行器的前后体气流压力在横侧向的作用力不一致时,还将会有滚转力矩扰动和偏航力矩扰动出现^[3]。

先进非常规布局通常采用创新型的操纵面,气动控制效率较常规舵面高,可提供足够的各向控制力矩,但存在操纵面偏转造成不利耦合力矩的问题。以飞翼布局飞行器为例,飞翼布局飞行器相对常规飞行器具有气动效率高和隐身性能好的优点,同时也存在航向控制手段不足和纵向稳定性下降的劣势,同时操纵面之间存在较强耦合作用^[4]。

对于微型飞行器而言,由于低雷诺数条件下的控制面效率低等原因^[5],难以使用常规的飞行控制方式,需要发展新的飞行控制方式。

如何处理新兴飞行器带来的强耦合、快时变、强非线性飞行控制问题,实现高性能飞行控制,发展新的控制方式实现微型飞行器的高灵活性控制,是飞行控制技术面临的挑战。

1.3 高可靠多元异构容错飞行需求的挑战

随着飞行空域的增大和对飞行器机动性、安全性和可靠性要求的不断提高,现代飞行器常采用多种执行机构的过驱动配置,执行机构除了配置方向舵、副翼、平尾等常规舵面外,还引入多种创新型广义气动操纵面,如升降副翼、全动翼梢、嵌入式舵面、前缘襟翼、翼梢小翼、开裂式方向舵、后缘襟副翼、扰流板、推力矢量等^[6]。临近空间飞行器在气动力不足时,需要引入直接力进行辅助控制

高可靠性需要准确和实时地检测出故障,复杂飞行环境中的各种不确定因素给诊断带来了很大困难;高可靠性也可以通过控制重构实现,多元异构执行机构为飞行控制律提供灵活的组合方式,可充分利用控制操作的冗余度,极大地提高

了飞行器故障条件下的重构能力和战场条件下的生存能力,但操纵面的增多使控制耦合度增强,执行器的非线性动态特性更为明显,如何实现指令的有效分配,特别是考虑执行器非线性特性的动态分配已经成为多操纵面飞行控制系统设计中必须首先解决的问题^[6]。

1.4 高自主性飞行带来的挑战

自主性体现了飞行器面对复杂环境和高不确定性,执行不同任务的能力,是未来飞行器的重要发展趋势。

自主控制系统主要特征是不用人干预,面对不确定环境,近实时地求解复杂优化问题^[7]。随着任务复杂性的加大,不确定动态环境越来越严苛,高自主飞行控制功能不断拓展,面临的理论问题和技术挑战更大。在自主飞行过程中,飞行控制系统的控制功能从底层不断向高层移动,从常规控制拓展为控制、决策与管理^[8],自主程度越高,对飞行控制的决策的合理性要求越高。决策本质上是一种对平台内/外态势感知基础上的规划与调度过程,如何实现态势感知及评估,实现对参数不确定性、结构不确定性和事件不确定性的自适应,是对未来飞行控制的巨大挑战。

决策的体现是任务的灵活更改。轨迹在线实时规划技术能够更好地提高任务的适应性,可根据战场态势的变化、数据链接收到的目标信息变化以及临时的火力召唤等,在导弹飞行过程中重新规划作战任务,改变攻击目标、飞行航路等,在线任务规划受事件和时间的双重驱动,面临约束条件多,规划实时性要求高的挑战。

1.5 信息化环境对飞行控制带来的挑战

随着分布式计算、通信与传感技术的发展与成熟,飞行器在网络化的飞行过程中访问、接受、处理和传输大量数据信息成为可能。在日益复杂的军事任务需求驱动下,单一系统已经无法完成既定任务,从而基于信息的系统级协同智能系统日益广泛和重要。基于信息的协同智能化使得控制对象和控制功能产生了深刻变化:控制对象从单一对象拓展为通过信息互联的群体,控制功能拓展为群体控制、决策与管理^[8]。这对飞行控制的发展提出如下挑战^[1]:

1) 被控对象由单一个体变为一个群体。群体

中每一个成员作为信息化网络的一个节点,系统的控制目标和任务需通过控制每个分布式节点实现。网络化控制系统的特点要求我们系统地设计和分析控制、计算、通信各个环节,系统地考虑通信、传感及计算的误差及约束,系统地设计稳定的,具有要求品质的控制系统。而这种系统的设计方法目前仍没有成熟的系统化的理论依据。

2) 未来飞行器控制、决策与管理系统不论是单机、多机或集群都是以事件驱动与时间驱动的混合动态系统为特征。飞行器连续时间的动力学建模已有相应的数学工具进行描述,然而事件和时间双重驱动下,相应的系统符号推理、决策及动态特性建模,还没有成熟的理论方法。

要实现系统级智能协同,需设计智能系统能够正确、实时地处理各类不确定性,系统地研究管理决策体系结构、机制和实现途径,目前这些研究仍非常缺乏必要的数学工具。

2 飞行控制技术研究进展

2.1 复杂飞行建模技术

吸气式高速声速飞行器存在气动、推进、流体/结构耦合,对复杂飞行建模具有一定代表性,下面对其发展进行概述。

吸气式高超声速飞行器一般采用超燃冲压发动机推进的升力体外形结构,由于采用机体/超燃冲压发动机一体化设计,导致气动/推进高度耦合,从而使得飞行控制与推进控制之间存在强烈的耦合作用。轻质复合材料和智能材料应用更加广泛,轻质复合材料使飞行器结构弹性更加突出,目前对于结构弹性通常采用滤波器来抑制弹性模态,设计鲁棒控制器来解决结构弹性问题,后续在线参数辨识方法能够更好地描述弹性问题,实现更加准确建模^[9]。

从20世纪90年代开始,美国先后发布了X-30、Winged cone等高超声速模型,吸引了多个研究单位积极开展高超声速飞行器建模与控制基础研究,重点采用线性化模型进行研究。2002年,NASA Dryden研究中心建立了高超声速飞行器LPV(Linear Parameter Varying)模型;2004—2006年,加利福尼亚州立大学洛杉矶分校提出了CSU-LA-GHV模型,2007年,美国Ohio大学充分考

虑了弹性形变的影响,建立了面向控制的高超声速飞行器模型;2009年,Ohio大学以X-43飞行器为例研究了高超声速飞行器气动热弹性建模问题,以流体模型、热模型和结构模型的建立为基础,使用流体动力学计算分析气动热和气动弹性的耦合关系以及材料变形特性,从而建立面向控制的气动热弹性模型。

目前国内对高超声速飞行控制技术研究,包括提出TbDyFe建模和控制方法^[10]。但关于高超声速无人飞行器气动、推进、流体/结构耦合的建模技术还有待深入研究:

高超声速飞行器建模必须综合考虑多种因素,得到的模型必定是高阶复杂非线性的,后续需研究:

1) 从机理出发,综合考虑各部分作用机理,建立全面表征飞行特征的模型,用以进行控制的设计和效果检验。

2) 目前对高超声速飞行器控制器的研究,其控制问题研究大部分集中在纵向模态,而且大部分都是以忽略模型之间相互耦合影响为前提的,当考虑到横侧向和纵向耦合的模型时,控制问题将变得更复杂^[11]。考虑实际应用,需要深入分析耦合机理和模型特征,构建面向控制的飞行器简化模型。

随着智能材料和多学科发展,智能变形飞行器成为国内研究的热点,智能变形飞行器建模技术代表了多体复杂建模的发展方向。智能变形飞行器变形过程中惯性力、气动力、弹性力相互作用耦合严重,而且变形过程中,质量分布特性和转动惯量都发生变化,从严格意义上看,基于“刚性”假设推导所得的单刚体动力学方程将不再精确适用于变形过程中的变形飞行器动力学建模问题,需要根据具体情况进行多刚体/多柔性体动力学建模。

Thomas M. Seigler^[12]对传统凯恩方法加以改进,对变形部件采用集中质量假设,推导出变形飞行器动力学方程,基于准定常假设使用Datcom计算气动力,以伸展变形飞行器的纵向飞行为例,分析了伸展变形的过渡过程中飞行器的动力学响应特性。

Adam Nicksch研究了飞翼式变形飞行器的气动

建模和动力学建模问题^[13-14]。采用偶极子网格法建立了飞翼式变形飞行器的空气动力学模型,将变形飞行器视为转动惯量随时间变化的刚体,建立了六自由度动力学方程。在此基础上,通过数值仿真研究了改变后掠角、机翼扭转角、机翼展长等变形方式对飞行器运动状态的影响。

张公平^[15-16]为揭示变形翼对导弹飞行动力学特性的影响机理,基于集中质量假设,利用动量定理及动量矩定理,构建了变翼导弹的多体动力学模型。首次提出了一种基于 Missile DATCOM 的协同求解方法,以解决多体运动与瞬变气动的交叉问题。仿真研究表明,所提出的协同求解方法能快速有效地解算耦合快变气动参数的多体运动方程;变翼展与变后掠对应的移动质量及变翼速度等因素对导弹飞行动力学特性有重要影响。

徐孝武^[17]研究了多刚体系统动力学理论应用于折叠机翼变体飞机动力学建模方法,考虑变体飞机为一个完整的多刚体系统,采用牛顿—欧拉方法建立了能够完整描述变形过程的动力学模型。针对对称变形和非对称变形进行了变体飞机的动态变量特性分析。

综上,国内外智能变形飞行器建模及分析技术研究多数是基于多刚体模型,而未充分考虑柔性/弹性变形的影响。在多刚体建模研究基础上开展多柔性体建模方法研究,建立柔性体模型,研究变形导弹的气动弹性等问题,将是未来的发展方向和挑战。

2.2 新兴飞行器控制技术

(1) 创新发展控制方式

创新飞行器控制方式能够针对新兴飞行器布局 and 任务特点,实现新型飞行器的有效控制,如太阳帆飞行器依靠面积巨大但质量很轻的太阳帆反射太阳光获得源源不断的推力,利用太阳光压连续长时间加速实现空间飞行任务^[18];采用质量矩控制技术改变再入飞行器的飞行速度和姿态,减小烧蚀影响同时具备较高的操纵效率^[19]。

常规飞行器是依靠副翼、升降舵和方向舵来操纵飞行器的滚转、俯仰和偏航的,对于微型飞行器而言,由于重量减轻和低雷诺数条件下的控制面效率低等原因,难以使用常规的飞行控制方式,一个解决途径是发展基于微机电系统技术的

新型控制方式,目前比较有前途的是在微型飞行器的表面分布微气囊和微型智能自适应机构,通过微流动控制实现对微型飞行器的飞行控制^[5]。

(2) 创新发展控制理论

目前飞行器控制技术利用经典的单回路频域或根轨迹方法设计,与奈奎斯特图、伯德图或根轨迹图相结合,这种方法简单实用、物理意义清晰直观、设计过程透明^[14];随着控制系统模型特征越来越复杂,对控制性能要求越来越高,用经典设计方法设计控制律就变得非常困难,设计进度缓慢,甚至变得不可能。采用现代控制方法应对日益复杂的控制需求非常有必要。

与经典控制方法相比,现代控制方法可以有效抑制参数摄动及各种干扰的影响,且能够跟踪系统未建模动态,因而具有更好的控制性能^[20]。这使得现代控制方法在导弹控制系统设计中得到了广泛应用,从而极大地推动了导弹飞行控制技术的发展,其中具有代表性的有滑模变结构控制、鲁棒控制、反馈线性化控制、反演控制、智能控制等方法。为了弥补参数不确定性及外界干扰的影响,利用观测器实现对干扰的逼近能力,进而实现更为精确的控制效果,自抗扰控制将系统内部的不确定性和外界扰动统一视为干扰,对总干扰进行估计,提高控制效果,已经成功应用于飞行器姿态跟踪问题^[21]。

现代控制理论在飞行控制系统设计上的主要问题是现有飞行品质要求与性能指标的相互结合转化问题、系统鲁棒性和性能鲁棒性的折衷问题及控制器阶数过高计算过于复杂的问题。目前,飞行控制的研究热点集中在鲁棒、非线性、自适应和智能控制等方面,取得了不少成果,如张政伟^[22]成功应用变论域模糊控制技术实现了无人飞行器马赫数的精确控制。后续不仅要加强这些方面的理论和应用研究,同时需要进一步完善、发展和创新制导控制的基础支撑力量和方法^[23]。

2.3 高可靠多元异构可容错飞行控制技术

(1) 异类作动器的动态分配与协调

控制分配技术经历了从静态到动态、从单目标到多目标、从线性到非线性的发展过程,已经延伸出多种分配策略。

静态控制分配主要包括直接分配、广义逆分

配、串接链分配等经典方法。静态分配方法假设执行器的频带宽度远高于飞行器的带宽,忽略执行器动态过程,实际中操纵面具有不同的动态特性,同时操纵面的动态铰链也影响控制分配的精度,进而发展出动态分配法,主要有频率加权法、动态补偿法、动态预测法^[24]。

大多数的飞行控制系统都是控制量耦合的非线性系统,考虑到执行器的非线性动态,提出了直接设计非线性控制分配方法。目前国内外关于异类作动器的分配研究大部分集中在典型执行器精确模型的动态补偿问题。对于考虑飞行器执行机构动态特性、模型不确定性和飞行任务需求的动态控制分配是当前重要的研究方向之一,越来越得到研究人员的高度重视。虽然动态控制分配在工程中得到一些应用,但仍然没有形成一套完善的系统设计方法、稳定性分析方法,目前许多异类作动器的动态分配与协调方案设计复杂、需求的计算量大,工程应用有待进一步研究^[25]。

随着智能控制技术的发展,启发式优化算法在飞行控制领域已得到初步应用。如何将遗传算法、蚁群算法、粒子群优化等新兴方法融入到控制分配优化问题中,把智能控制与控制分配结合起来,是未来控制分配研究的另一个热点。

(2) 高可靠故障诊断与容错控制技术

基于现代诊断技术的发展,故障诊断技术从线性系统发展到非线性系统,针对特定的过程实例,用非线性机制来解决非线性故障诊断控制问题。故障诊断技术在航空航天领域已经有一些应用^[26],如滑模观测器的方法、LMI方法以及基于自适应观测器设计的方案等。

按照故障处理方式,有利用故障信息的主动容错控制和基于鲁棒思想的可靠性被动控制,近年来,同时模糊控制、神经网络控制(Neural network control, MBP)等智能控制方法,反演控制、模型预测控制(Model predictive control)、反馈线性化(Feedback linearization)等技术在容错控制领域中均有相关的应用。

尽管近年来面向飞行器的控制分配研究得到了迅速发展,但由于其涉及到包括控制律、执行器动力学特性、非线性优化等多个领域和学科,因而其发展也受到相关学科和技术发展的限制。

作为一个研究领域,控制分配的理论框架和实现方法均值得进一步完善和深入研究。

2.4 高自主飞行控制技术

(1) 态势感知与自主决策方面

态势感知是^[1]飞行器利用机载传感器、地面支援系统、编队中的友机等资源信息,通过信息融合技术,从大量数据中提取平台内/外态势相关信息,通过推理、归纳,得到与完成任务相关的平台自身健康和行为的能力。周思羽^[27]对自主空战机动决策方法进行了综述,主要包括基于对策方法的机动决策,基于人工智能的机动决策。自主空战是在强对抗环境下态势感知和自主决策的典型代表,目前发展趋势是将人工智能与自主决策联系在一起,利用人工智能提高自主决策水平。

(2) 轨迹在线规划技术

近空间飞行器轨迹在线重新规划技术,普遍采用根据飞行过程中实时的飞行状态、飞行约束和任务目标,将轨迹规划问题转化为非线性优化问题,通过在线求解实现轨迹的实时规划,目前轨迹重新规划主要分为直接法和间接法,近年来离散控制变量和状态变量一类直接法中的伪谱(pseudospectral)方法,以收敛性快的特点成为研究的热点,已经用于解决机器人、太阳帆板、上升段、再入段、编队飞行、轨道转移等方面的最优轨迹规划问题。

反舰导弹航路规划方法在20世纪50年代,美、英、德等国家首先开始研究,但由于受到当时技术水平的限制,航路规划基本上都是依赖规划人员的手工操作。20世纪80年代中后期,国内外学者提出多种航路规划方法。这些方法可以采取不同的标准进行分类,按照使用方法一般可以分为三类^[28]:基于最优控制的轨迹优化、基于几何学的路径规划和基于类比的航迹规划。随着反舰导弹射程的不断增大,“射前规划”将越来越难以满足目标和环境的实时变化要求,需要着重研究在线二次规划方法。在线二次规划既要考虑反舰导弹航路规划自身的因素,又要考虑外部传感器的因素,还要考虑它们之间的交互条件和交互机制,涉及面更广、问题更加复杂、难度更大,是一个值得深入研究的问题。

2.5 基于信息的协同智能化技术

(1) 网络化控制技术

每个节点是基于分布的指令及传感信息计算控制,通过分布的执行器控制分布的对象,最终实现系统的控制目标,分布式节点间的活动是借助通信和协同任务相互关联而形成一个系统。例如美国海军的模式可重构智能作战编队计划,重点开展了编队飞行的构形设计、编队控制、态势感知、自适应决策、信息互换和传递、任务重构等算法研究。其中编队飞行控制是编队飞行的重点和核心技术。

(2) 智能协同决策技术

在飞行控制的发展中,自动控制代替了飞行员的“飞行操作”能力,使飞行员由传统意义的“飞行控制”向“任务管理”角色转变^[29]。例如基于无人机的多目标协同攻击的任务分配,在国外已经成为研究热点,并取得了较多的研究成果,其中混合整数线性规划问题模型是协同任务分配问题研究中采用最多的一类问题模型。

4 对飞行控制技术发展趋势的思考

基于目前飞行控制技术面临的问题和后续发展的关键技术,为了赢得挑战,应该加强以下5个方面的研究:

1) 加强新技术飞行器的特征研究。加强飞行器特征研究。对于新兴飞行器的控制机理、复杂的耦合特性、气弹效应等对飞行控制的影响,进行深入研究。

2) 重视新的飞行控制方法研究。针对新技术飞行器面临的控制问题,创新控制的基础支撑理论和方法,重视智能控制在解决复杂问题上的优势,实现理论和工程应用的有机结合。

3) 加强控制方式的创新研究。针对飞行器特点,创新飞行器控制方式,另辟蹊径,有效解决传统飞行控制碰到的难题,实现飞行器高效控制。

4) 加强高可靠容错飞控系统的研究。研究低误报率、高实时性的故障检测与诊断方法,研究作动器的动态分配与协调方法,发展实时、大范围、多学科优化算法,实现任务在线规划、指挥决策。

5) 加强信息化条件下的协同智能化研究。加强飞行器个体高自主性飞行控制研究,开展多飞行器协同工作模式的探索,实现系统级智能协同,加强自主态势感知与评估、协同自主的新概念、理论和方法的研究。

当前飞行器控制技术蓬勃发展,充满了机遇与挑战,虽然已经取得了一些突破性的研究成果,但仍有许多理论与工程应用问题尚未解决,需要持续不断地研究和探索。

参考文献

- [1] 陈宗基,张汝麟,张平,周锐. 飞行器控制面临的机遇与挑战[J]. 自动化学报. 2013, 39(6): 703-710.
- [2] 黄琳,段志生,杨剑影. 近空间高超声速飞行器对控制科学的挑战[J]. 控制理论与应用. 2011, 28(10): 1496-1505.
- [3] 孙长银,穆朝絮,余瑶. 近空间高超声速飞行器控制的几个科学问题研究[J]. 自动化学报. 2013, 39(11): 1901-1903.
- [4] 吴在桂. 飞翼布局飞行器飞行控制关键技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2010.
- [5] 李占科,宋笔锋,宋海龙. 微型飞行器的研究现状及其关键技术[J]. 飞行力学, 2003, 21(4): 1-4.
- [6] 陈勇,董新民,薛建平. 多操纵面飞行器控制分配技术的发展及应用[J]. 飞行力学, 2012, 30(4): 289-294.
- [7] Pachter M, Chandler P R. Challenges of autonomous control. IEEE Control Systems Magazine, 1998, 18(4): 92-97.
- [8] Murray R M, Astrom K J, Boyd S P, Brockett R W, Stein G. Future directions in control in an information-rich world[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003, 23(2): 20-33.
- [9] 孙平,刘昆. 运载器弹性运动稳定控制方法综述[J]. 航天控制, 2010, 28(3): 97-100.
- [10] 刘燕斌,陆宇平. 高超声速飞行器建模与控制的一体化设计[J]. 宇航学报. 2009, 30(6): 2176-2181.
- [11] Richman M S, Kenyon J A and Sega R M. High speed and hypersonic science and technology [A] In: 2005 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit [C]. San Francisco, CA, AIAA 2005-4099.
- [12] Thomas Michael Seigler, Dynamics and Control of Modeling Aircraft [D], Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [13] A Nicksch, J Valasek, T W. Strganac, et al. Morphing Aircraft Dynamical Model: Longitudinal Shape Changes [C], AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 18-21 August 2008, Honolulu, Hawaii. (下转第24页)

- [M]. 电子工业出版社, 2009.
- [4] John C. Curlander and Robert N. Medonough. 合成孔径雷达系统与信号处理 [M]. 电子工业出版社, 2006.
- [5] 杨士中. 合成孔径雷达 [M]. 国防工业出版社, 1981.
- [6] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用 [M]. 科学出版社, 1989.
- [7] 廖明生, 林琿. 雷达干涉测量原理与信号处理基础 [M]. 测绘出版社, 2003.
- [8] 舒宁. 雷达影像干涉测量原理 [M]. 武汉大学出版社, 2003.
- [9] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 电子工业出版社, 2005.
- [10] 穆冬. 干涉合成孔径雷达成像技术研究 [D]. 南京航空航天大学, 2001.
- [11] 刘宝泉. 干涉合成孔径雷达测量关键技术研究 [D]. 西安电子科技大学, 2008.
- [12] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论 [M]. 国防工业出版社, 2003.
- [13] 任坤. 基于星载合成孔径雷达干涉测量技术的数字高程模型生成研究 [D]. 南京理工大学, 2004.
- [14] 陶鸥. 干涉合成孔径雷达数据处理及仿真研究 [D]. 中国科学院电子学研究所, 2003.
- [15] Nikolaus P. Faller, Erich H. Meier. First Results with the Airborne Single - Pass DO - SAR Interferometer [J]. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 1995, 33 (5): 1231 - 1231.
- [16] A. Currie, T. Bungey, R. Bullock, S. Young, A. Horne, R. White. SINGLE AND MULTIPLE PASS HEIGHT FINDING INTERFEROMETRY FROM AN AIRBORNE PLATFORM [J]. Radar 97, 1997, (449): 117.
- [17] C. E. Livingstone, A. L. Gray, R. K. Hawkins, and R. B. Olsen. CCRS C/X - Band Airborne Synthetic Aperture Radar: An R&D Tool for the ERS - I Time Frame [C]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1988, 3 (10): 11 - 20.
- [18] J. Way, E. A. Smith. The Evolution of synthetic aperture radar systems and their progression to the EOS SAR [C]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29 (6): 962 - 985.
- [19] Howard A. Zebker. The TOPSAR Interferometric Radar Topographic Mapping Instrument [C]. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 1992, 30 (5): 935 - 937.
- [20] 赵佩红. 国外无人机载合成孔径雷达简介 [J]. 火控雷达技术, 1999.
- [21] 赵博, 钱正祥, 黄晓雷. 无人机载 SAR 技术应用研究综述 [J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2009.

~~~~~

(上接第 6 页)

- [14] A Niksch, J Valasek, T W. Strganac, et al. Six Degree of Freedom Dynamical Model of a Morphing Aircraft [C], AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 10 - 13 August 2009, Chicago, Illinois.
- [15] 张公平, 廖志忠, 段朝阳, 张燕, 可变形翼战术导弹飞行动力学联合仿真研究 [J], 航空科学技术, 2013, 3: 71 - 74.
- [16] 张公平, 廖志忠, 段朝阳, 张燕, 可变形翼战术导弹多提动力学特性, 弹箭与制导学报, 2011, 31 (6): 149 - 151.
- [17] 徐孝武, 张炜, 折叠机翼变体飞机的动力学建模与分析 [J], 西北工业大学学报, 2012, 30 (5): 681 - 688.
- [18] 荣思远, 刘家夫, 崔乃刚. 太阳帆航天器研究及其关键技术综述 [J]. 上海航天. 2011, 2: 53 - 62.
- [19] 赵红超, 徐君明, 林嘉新. 变质心控制技术及其应用综述 [J]. 飞航导弹, 2010 (3): 66 - 70.
- [20] 王美仙, 李明, 张子军. 飞行器控制律设计方法发展综述 [J]. 飞行力学, 2007, 25 (2): 1 - 4.
- [21] 王璐, 苏剑波. 基于干扰抑制控制的飞行器姿态跟踪 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30 (12): 1609 - 1616.
- [22] 张政伟, 李霖宇, 刘汉斌等. 变论域模糊控制在无人飞行器马赫数控制中的应用研究 [J]. 推进技术, 2013, 34 (12): 1696 - 1701.
- [23] 包为民. 航天飞行器控制技术研究现状与发展趋势 [J] 自动化学报. 2013, 39 (6): 697 - 702.
- [24] 马建军, 李文强, 李鹏, 郑志强. 飞行器控制分配技术研究现状与展望 [J]. 飞行力学, 2009, 27 (3): 1 - 5.
- [25] 陈勇, 董新民, 薛建平等. 多操纵面飞行器控制分配技术的发展及应用 [J]. 飞行力学, 2012, 30 (4): 289 - 294.
- [26] 姜斌, 赵静, 齐瑞云等. 近空间飞行器故障诊断与容错控制的研究进展 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44 (5): 603 - 609.
- [27] 周思羽, 吴文海, 张楠, 张靖. 自主空战机动决策方法综述 [J]. 航空计算技术, 2012, 42 (1): 27 - 31.
- [28] 刘钢, 老松杨, 谭东风, 周智超. 反舰导弹航路规划问题的研究现状与进展 [J]. 自动化学报, 2013, 39 (4): 347 - 358.
- [29] 张新国. 从自动飞行到自主飞行——飞行控制与导航技术发展的转折和面临的挑战 [J]. 飞机设计, 2003, (3): 55 - 59.