航天飞行器控制技术研究现状与发展趋势

包为民 [1, 2]

摘 要 总结了航天飞行器控制领域的前沿问题与挑战, 概括了未来进入空间航天飞行器和空天飞行器控制技术基础问题和关键技术, 分析了现阶段航天飞行器控制技术研究进展, 对未来航天飞行器控制技术的发展提出了建议与思考.

关键词 航天飞行器, 控制, 运载器, 动力学

引用格式 包为民. 航天飞行器控制技术研究现状与发展趋势. 自动化学报, 2013, **39**(6): 697−702

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00697

Present Situation and Development Tendency of Aerospace Control Techniques

BAO Wei-Min[1, 2]

Abstract This paper summarizes the current issues and challenges of aerospace control techniques, and generalizes the basic problems and key technologies of launch vehicles and aerospace flights in the next generation. And it analyzes the research progresses of aerospace control at present stage. Moreover, it proposes some suggestions of development of aerospace control in the future.

Key words Aerospace craft, control, launching vehicle, dynamics

Citation BAO Wei-Min. Present situation and development tendency of aerospace control techniques. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(6): 697−702

航天技术是当今世界科技中最为尖端的技术之一, 也是一个国家科技水平和综合国力的重要体现. 世界航天大国和工作者高度关注和发展以自由进入空间、增强空间控制、实现天地往返等技术, 各种先进技术的研究计划、新概念空天飞行器已被各航天大国列入发展规划, 并取得了重要进展[1].

本文所涉及的航天飞行器, 主要指进入空间的运载火箭和空天飞行器, 而这类飞行器所涉及的控制理论和技术是当今飞行器控制领域的研究热点和难点, 具有前沿性、基础性、综合性, 已成为支撑我国航天事业未来发展的核心关键领域之一. 导航、制导与控制发展作为一个独立技术领域的历史可以追溯到 "阿波罗" 载人航天计划时代. 近几十年来, 更是被美国列为高超声速飞行器五大核心技术之一 (材料与防隔热、气动、控制、测控、动力)[2].

在进入空间方面[3−4]: 美国航空航天总署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 于 2002 年提出了空间发射倡议 (Space launch initiative, SLI) 计划, 开发一个更新的、更安全、更可靠和更低成本的发射系统体系; 研究针对运载火箭 (Expendable launch vehicle, ELV)、可复用运载火箭 (Reusable launch vehicle, RLV) 及其他飞行器的先进制导控制技术, 实现自由、可靠、安全低成本进入太空; 美国在 2010 年公布的《国家航天政策》中明确提出: 2025 年实现载人登陆小行星; 2030 年实现载人登陆火星并安全返回. 近 30 年来, 美国自由进出空间的能力不断提升.

在空天飞行方面[5]: 美国已成功实现可重复使用轨道试验飞行器 (X-37B) 飞行验证, 两架飞行器在太空中工作数百天后, 安全返回地球, 成功实现了从有地面支持的航天飞机飞行控制到无人空间变轨飞行和自主返回导航制导与控制的跨越; 与此同时, 美国正在实施从阿波罗 (Apollo) 飞船到 "猎户座" 成员探测飞行器 (Crew exploration vehicle, CEV) 的跨越发展, "猎户座" 预计在 2013 年 7 月发射, 该计划涉及火星着陆、返回的制导控制, 接近近地目标的相对导航等控制问题, 不仅可作为国际空间站的救生飞行器, 也可作为外地球轨道飞行器, 且将有能力扩展为访问近地目标、火星及其卫星. 俄罗斯已重启 "多用途空天系统计划 (MAKS)", 正在发展一种小型化、机动性强的可重复使用空天飞行器. 欧空局正在研制其第一代再入宇宙飞船, 称为过渡试验飞行器 (Intermediate eXperimental vehicle, IXV), 将用于验证先进再入技术和综合系统设计能力, 预计 2012 年底进行验证, 同时还将研制一种能向国际空间站运送物资的可重复使用货运飞船.

经过数十年的发展, 中国航天已经步入世界航天

收稿日期 2013-01-10 录用日期 2013-01-14
Manuscript received January 10, 2013; accepted January 14, 2013
本文为黄琳院士约稿
Recommended by Academician HUANG Lin
1. 中国航天科技集团公司 北京 100048 2. 北京大学工学院 北京 100871
1. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048 2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871

大国的行列, 进入空间、开展空间活动已取得了长足进步. 确保安全、可靠、快速、机动、廉价、环保地进出空间, 不仅是未来实现迅速部署、重构、扩充和维护航天器的基础, 也是大规模开发利用空间资源的前提[6]. 虽然我国一直在不断跟踪国外航天器技术的发展, 并开展了若干飞行控制关键技术的预研和技术验证工作, 但与国外主要研发机构相比还存在一定差距, 在从航天大国向航天强国迈进的过程中, 在航天器飞行控制领域主要面临以下两个方面的挑战: 1) 可靠快速进入空间的控制问题; 2) 空天飞行自主控制问题.

1 航天飞行器控制领域前沿问题与挑战

1.1 可靠进入空间的控制前沿问题与挑战

经过 40 多年的不懈努力, 我国的运载火箭得到了长足的发展, 独立自主地研制了 14 种不同型号的“长征”系列运载火箭, 具备发射近地轨道、太阳同步轨道、地球同步转移轨道等多种轨道有效载荷的运载能力, 入轨精度达到国际先进水平[7]. 虽然我国运载火箭已取得举世瞩目的成就, 已在世界商用航天发射市场占有一席之地, 并且通过了高密度发射的考核, 控制技术得到了充分验证, 但是与国外先进的航天运载技术相比, 还存在一些不足:

1) 运载火箭应对故障的能力不足: 由非灾难性故障而导致发射任务难以顺利完成或失败, 而这些故障往往可以通过理论方法来克服, 需要具备能够采用诊断和预测的方法进行系统故障的监控、检测、隔离, 能够评估系统故障的影响并为任务调整提供决策支持的能力, 对设备的维护和更换提供指导性建议.

2) 火箭发射成本和经济性有待进一步提升: 我国运载火箭与国外相比, 入轨精度处于同一个量级甚至更高, 但现役运载火箭的价格优势正在逐步丧失, 同时也暴露出运载能力不足、发射准备周期长、任务适应性差的缺点, 难以满足高效率、多样化的航天发射和空间运输需求.

3) 对任务的适应能力存在不足: 火箭对发射零时的要求较高, 现有方法不具备对发射时间敏感任务的适应性.

控制系统是运载火箭的神经中枢, 提高控制系统的可靠性, 对于提高整个运载系统的可靠性至关重要. 因此, 可以通过制导与控制理论方法的革新来提高运载火箭的可靠性、经济性[8]. 同时, 系统的高可靠性要求也对控制系统的设计提出了更高的挑战.

挑战 1. 对环境载荷影响的控制问题

由于对大气、引力等环境因素的影响机理尚未完全认知, 故而未能对环境载荷的影响实现有效控制, 导致火箭采取保守设计加强了结构强度, 大大影响了运载能力和有效投送比. 如从制导控制角度能降低环境载荷不确定性的影响, 将有助于降低运载火箭总体结构质量, 提升有效运载能力.

挑战 2. 对故障的诊断与应对能力

当前运载火箭制导控制系统在面对典型非致命的动力、控制机构等故障时缺乏自适应能力, 导致对非灾难性故障的应对能力不足.

1.2 空天飞行器的控制前沿问题与挑战

空天飞行器集航空、航天技术于一身, 兼有航空器和航天器的特点与功能, 既可以像普通飞机一样在稠密大气层内飞行, 又可以在近空间稀薄大气层内作高超声速巡航飞行, 还可以穿过大气层进入轨道运行. 归纳起来空天飞行器具有五个方面的特点:

1) 任务维数多: 主要包括在轨运行、再入返回两类任务, 在轨飞行任务包括初态建立、轨道机动、轨道维持、高精度对地观测、在轨稳定运行等任务模式, 是迄今最为复杂的一类飞行器.

2) 飞行状态跨度大: 飞行空域跨越几百公里地球轨道至地球表面, 速度跨越水平着陆低速到第一宇宙速度, 在轨飞行时间达到 200 天以上, 再入返回时间约 3 000 s 左右, 经历的环境温度从零下几十度到 1 000 度以上.

3) 飞行环境恶劣: 跨越纯空间、稀薄流区和稠密大气层, 经历空间辐照、高低温、气动热等复杂环境.

4) 动力学特性复杂: 包括轨道动力学和再入动力学, 为适应不同飞行环境, 配备了 RCS (Reaction control system) 和多操纵气动舵, 如体襟翼、升降舵、V 形垂尾、阻力板等, 姿控系统结构复杂, 且多气动舵结构导致姿控系统存在多维强耦合特性.

5) 升力式返回模式: 出于任务需要和时间限制, 空天飞行器再入模式与飞船完全不同, 它采用升力式再入模式, 从轨道快速返回, 利用高升力体外形在临近空间长时间非惯性、大范围横向机动飞行.

从这些特点可以看出, 空天飞行器具备卫星、导弹和飞机的特性, 是航空航天技术的融合. 空天飞行器具有多任务、多工作模式、大范围高速机动等特点, 其控制问题是国内外相关研究机构和学者关注的热点领域之一, 是我国一种未曾实现过的制导控制模式, 其理论和方法需进一步完善、创新和发展, 对我国控制技术提出了新的需求和挑战.

挑战 3. 如何有效、安全地从轨道空间返回一直以来都是制约航天发展的一个重要难题, 传统的航天器变轨模式需要创新

大部分航天器仅具备轨道平面内的机动能力, 异面变轨需要消耗相当大的速度冲量, 超出航天器本身能力, 示意图见图 1. 如能够利用空天飞行器升力体外形, 通过降低轨道高度, 利用稀薄气动力进行

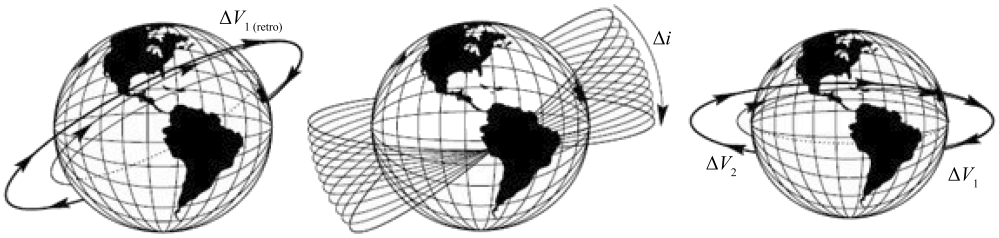

图 1　异面变轨示意图

Fig. 1　Noncoplanar transfer

辅助变轨, 同时采用发动机弥补阻力损失, 将极大提高飞行器轨道机动能力. 国外上世纪 80 年代就开始了研究, 并试图开展试验验证.

挑战 4. 对理论和方法的挑战

传统导弹、飞船的控制方法已经不能够完全满足现有需求, 需要针对空天飞行器的特点, 进一步完善、创新和发展制导与控制的基础支撑理论和方法. 如混合异类多执行机构的控制与稳定性分析、抗失控敏感控制的理论和方法等.

挑战 5. 对工程技术的挑战

全自主飞行、长时间工作、设备可重用、满足多种任务、适应多种载荷的要求对控制技术提出了前所未有的挑战. 需解决多约束制导、强适应姿态控制、长时间工作条件下的高可靠设计等技术.

挑战 6. 对试验验证能力的挑战

控制系统长时间工作、在经历空间和大气层恶劣环境后设备可重用的要求对试验验证能力提出了新的挑战, 需解决对复杂系统进行有效验证的方法, 如导航、制导与控制 (Guidance navigation control, GNC) 系统容错技术的试验验证方法、控制系统设备的检测和验证能力、控制系统设备长时间工作的可靠性验证手段和方法等.

2　航天飞行器控制技术基础问题与关键技术

航天飞行器制导与控制系统将以高可靠、高精度、强适应、自主飞行为特征, 具备快速任务响应、应急返回和故障飞行的能力, 能够满足未来空间作战、天地往返复杂飞行任务的需求. 在控制方面存在如下基础问题与关键技术:

1) 上升段最优在线轨迹规划控制技术

上升段最优可重构控制技术主要是应对大气层内气动影响、飞行过程中可能出现的故障、实现自主、快速规划、发射, 来满足自主、快速、可靠、低成本进入太空的能力.

关键技术包括: 轨迹在线规划、制导控制回路可重构、在线故障识别与管理、风载荷控制、自主制导控制技术的验证和检验等.

2) 轨道返回与大气层高超声速多约束制导技术

空天飞行器返回过程中跨越了真空、稀薄、稠密大气层三个阶段, 且必须满足各种复杂的过程约束、终端约束条件, 这要求制导系统应具有良好鲁棒性、自主性和自适应能力. 此外, 还需要解决轨道快速再入、多约束条件下的大范围横向机动飞行制导问题.

关键技术包括: 天基离轨制动返回轨道规划与制导、大范围横向机动与规避飞行制导、末端能量管理制导等.

3) 空天一体全速域复杂结构飞行器姿态控制技术

空天飞行器需要满足多任务、多工作模式、大范围机动的需求, 其在大范围机动飞行条件下存在大量的外界干扰和内部参数不确定, 为满足变轨和离轨所需的高精度姿态要求, 实现空天一体全速域飞行, 需解决姿态系统的多输入、高精度、强耦合、不确定控制问题.

关键技术包括: 基于随控气动布局的姿态控制、解耦与协调控制技术、抗失控敏感控制技术、耦合增稳控制技术等.

4) 冗余、重构飞行控制技术

空天飞行器对控制设备结构外形、安装空间、重量、及其在多种环境下的适应性和可靠性, 太空辐照和严酷热环境下的热平衡能力及电磁兼容能力等均提出了很高的要求. 为满足长期在轨运行、适应恶劣环境的要求, 以及提升飞行器应对故障的能力, 需要解决控制系统的高可靠设计、故障下重构飞行控制问题.

关键技术包括: 控制系统冗余配置与高可靠设计技术、冗余度控制系统的故障检测与隔离技术、故障情况下制导控制系统的重构技术等.

5) 自主轨道机动飞行控制技术轨道机动任务主要是应对来袭目标、任务快速响应, 为提高作战效能, 需要解决满足快速机动要求的能量最优的变轨控制问题.

关键技术包括: 基于最小能量的快速变轨、自主接近与伴飞制导、轨道自主修正等.

6) 重复使用飞行器无动力自主进场着陆控制技术

空天飞行器进场着陆时与飞机特性完全不同, 飞机升阻比高达 10 以上, 而空天飞行器升阻比仅为 4 左右; 此外, 飞机或无人机进场着陆时可依靠发动机调节速度, 而空天飞行器为无动力下滑, 主要依靠阻力板进行精确的速度控制, 需要解决无动力条件下的自主进场着陆问题.

关键技术包括: 无动力自主进场着陆轨迹设计与制导技术、低速条件下抗风稳定飞行的姿态控制技术等.

7) 天对地精确打击精确制导技术

高速下压飞行时, 由于飞行器在稠密大气层高速飞行, 对高精度成像匹配定位和定速、精确制导等问题均提出了巨大挑战, 需要解决稠密大气层内高速飞行的精确制导问题.

关键技术包括: 降低铰链力矩的下压制导技术、高速下压机动飞行抛撒制导、复杂环境下目标自动探测与识别、强适应性复合制导信息处理技术等.

8) 合作目标与非合作目标相对导航

在轨飞行过程中, 需要执行多种飞行任务, 飞行器需要具备对空间目标的探测、捕获、识别和跟踪能力. 需要解决合作目标与非合作目标的相对导航问题.

关键技术包括: 非合作目标近进相对导航、合作目标相对导航、空间弱小目标的探测与识别、空间目标的捕获与跟踪技术等.

3 航天飞行器控制技术研究进展

3.1 上升段制导

真空飞行段在 60 年代已实现闭环近似最优制导, 迭代制导、动力显式制导 (Powered explicit guidance, PEG) 已应用于阿波罗计划中的土星系列火箭、航天飞机. 但由于缺乏快速可靠解决大气内最优制导问题的算法, 大气层内上升段一直采用开环制导方式.

国外自 70 年代开始对大气层内闭路制导进行研究, 努力向自主、快速进入太空目标迈进, 力图在有较大轨迹偏离及系统性能不确定性的情况下保证相同的有效载荷能力、大量减少发射前的制导规划和准备所必须的时间和人力, 已在基于最优控制理论的上升段最优制导方法方面获得一些进展, 但还没有工程实际应用.

3.2 升力式再入制导

再入制导技术自 20 世纪 50 年代至今, 已持续发展了半个多世纪. 对升力式再入飞行器而言, 20 世纪 70 年代以后, 相关研究主要是针对航天飞机而展开的, 而针对航天飞机的再入制导律也是迄今唯一成熟的、反复经受了工程实践检验的升力式再入制导方法. 然而, 从 20 世纪 90 年代初开始, 为满足新一代天地往返可重复使用运载器对自主性、安全性、可靠性和精确性的苛刻要求, 开展了大量新型再入制导技术的研究开发和验证工作. 比较典型的研究工作有美国 NASA 在 1999 年启动的以 X-33 为背景模型的先进制导与控制项目 (Advanced guidance and control, AGC), 该项目研究计划已完成了对多种制导控制技术的测试和评估工作, 已掌握长时间在轨飞行控制技术、解决了以轨道速度高升阻比再入航天器的离轨返回控制问题, 提出并创新了一系列先进再入制导方法:

1) 标准轨道跟踪再入制导: 具有控制律简单、容易实现、对机载计算能力要求较低的优点, 但也存在落地控制精度低、受再入初始条件误差和扰动因素影响大的不足. 具体包括航天飞机再入制导、基线制导 (Baseline guidance)、线性二次调节 (Linear quadratic regulator, LQR) 制导、演化的加速度制导 (Evolved acceleration guidance logic for entry, EAGLE) 等.

2) 在线轨迹生成与跟踪制导技术: 包括准平衡滑翔制导、考虑热限制的在线轨迹生成与跟踪制导、基于实时积分的再入制导方法等.

3) 预测校正制导方法: 根据当前的飞行状态, 预测落点及其偏差, 并在线调整控制指令, 因而对各种误差因素有较强的鲁棒性, 能满足自主精确再入的要求, 但控制算法较复杂, 对机载计算能力要求较高. 具体包括自适应预测 – 校正再入制导律、三维预测校正算法等.

3.3 跳跃式再入制导

探月飞船返回地球时, 航天器将以接近第二宇宙速度的高速再入地球大气层, 如果要求飞船在月球轨道上任意时刻都能执行返回地球的任务, 并最终保证航天器安全着陆于地球上的指定点, 这就要求飞船必须具有覆盖长纵程的飞行能力. 对于太空舱式的航天器, 由于它的升阻比较低, 飞出长的纵程唯一的方法就是采取跳跃式的再入飞行轨迹, 即航天器第一次进入大气层内, 然后跃出大气层外, 最后再一次进入大气层并着陆, 再入制导系统必须能够提供可行的跳跃再入轨迹和精确执行制导任务, 以保证着陆安全性和精度. 图 2 为飞行器跳跃式再入示意图. 针对这种低升阻比飞行器大航程飞行任务的需求, 在 Apollo 再入制导基础上, 美国学者提出了两种跳跃式再入返回制导算法: 由 NASA 研发的数值跳跃式再入制导律 NSEG 和由 Draper 实验室提出的 PredGuid 再入制导律, 解决了以第二宇宙速度低升阻比跳跃式再入航天器的离轨返回控制问题.

3.4 气动控制

目前, 多数飞行器姿态控制系统的控制律主要是

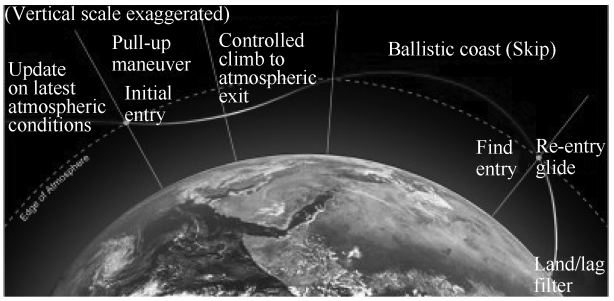

图 2　跳跃式再入示意图

Fig. 2　Skip entry trajectory

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、工程设计人员可清晰地看到系统的动态特性和性能是如何被修改的. 而且现行的飞行品质要求大多数是根据经典控制理论提出的, 设计依据充分, 设计人员凭借自身丰富的设计经验, 通过相应参数的调整, 最终可以设计出满足战场需要的控制系统. 由于新型航天器飞行高度变化大、速度变化范围跨度大、外界环境改变剧烈、飞行器飞行环境复杂, 航天器模型具有强耦合、强非线性、快时变、不确定性等特性, 针对此类型航天器, 姿态控制理论和方法在控制参数自适应、多通道交连解耦控制和控制的新理论与方法方面需要创新. 图 3 所示为美国 X-43A 飞行器多通道控制结构图.

3.5　复合控制

飞行器飞行中同时受到舵面气动力和部分发动机推力的作用, 用于改变控制飞行轨道与改变飞行姿态的途径, 称之为复合控制途径. 气动复合控制的方式多种多样, 主要是飞轮 + RCS、RCS + 多气动舵的复合控制问题, 虽然在工程上也得到了一些应用, 但还没有形成一套完善的系统设计方法、稳定性分析方法. 国外, 尤其是美国, 异类多执行机构复合控制技术已经在航天飞机、X-37B、HTV-2 得到了全面的应用和验证[10].

4　对我国航天飞行控制技术发展趋势的思考

基于国际范围航天飞行器控制技术的研究进展, 以及后续发展存在的基础问题和关键技术, 我国运载系统未来的发展一方面要积极缩短与世界先进航天运载技术之间的差距; 另一方面要提高我国航天运载系统自身的国际竞争力, 促进中国航天的市场化、产业化、国际化发展进程. 进入太空上升段的发展趋势是高自主性、高可靠性、重复使用、低成本方向. 空天飞行器对国家安全具有重大的战略意义, 发展新型空间武器已迫在眉睫, 空天飞行控制将以高可靠、高精度、强适应、自主飞行为特征, 具备快速任务响应、故障重构飞行能力, 能够满足未来空间作战、天地往返复杂飞行任务的需求. 我国航天飞行控制技术应在以下方面加以重视:

1) 加强进入空间、空天飞行控制基础理论研究

虽然美国在工程方面取得了巨大的成功, 但 NASA 并不仅仅满足于此, 仍然制定了具有影响力的 “先进制导控制技术” 的研究计划, 对传统方法进行持续改进, 支持控制技术的革新换代. 我国应围绕重大前沿领域需求, 制定相应的 “飞行器先进制导与控制专题” 的重大研究计划, 牵引国内优势单位和研发团队开展研究. 比如, 要重视由飞行器创新性布局所导致的非线性动力学特征, 多学科交叉, 创新、多元、混合、异构控制作用的飞行器控制的新概念、理论与方法研究要重视在信息化环境中, 本来分离的飞行器控制、计算与通讯, 以及控制、决策与管理

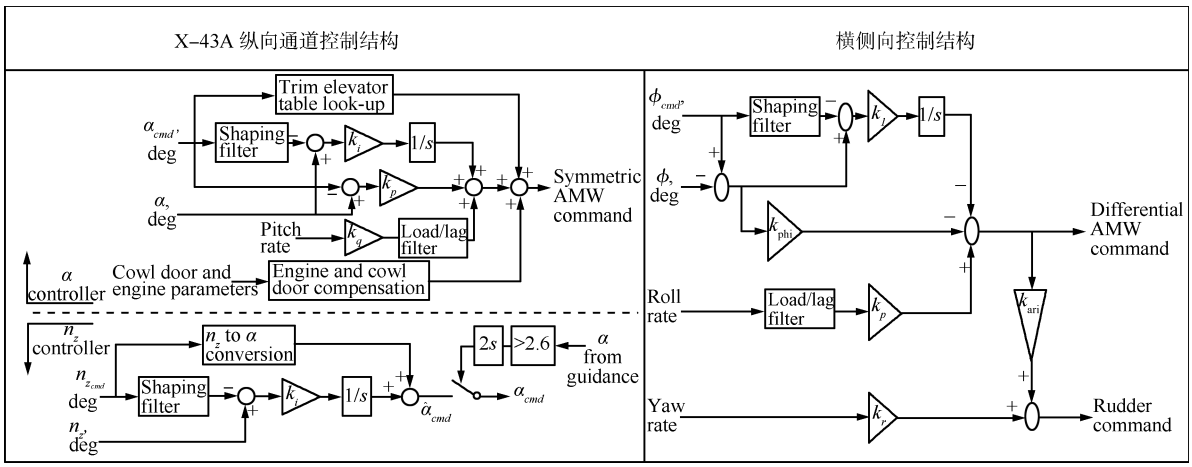

图 3　X-43A 控制结构图

Fig. 3　Control structure of X-43A

的一体化趋势所带来的的新概念、理论与方法研究.

2) 重视多学科交叉研究

美国 HTV-2 两次失败凸显了交叉学科的问题. 第一次在于气动力与控制问题: 飞行中 HTV-2 的偏航角大于预先设计的偏航角, 而且耦合到了滚转操作中, 飞行器在滚转方向上发散; 第二次在于气动热与材料问题: 严重的气动热导致机体材料剥落, 引起气动发生变化. 而未来飞行器的新需求、新布局、新控制作用使得气动力、结构、动力装置和飞行控制耦合更紧密, 动力装置不仅提供动力, 还产生重要的控制作用, 不同控制作用之间存在有利的和不利的相互影响, 多轴控制力矩引起高度耦合, 我们更应加强多学科交叉的设计方法研究, 并积极探索多学科联合与协同的设计研发模式, 如开展综合产品设计 (Integrated product design, IPD) 设计.

3) 加强飞行器和环境相互作用机理的研究

面对称飞行器通道间耦合定量化描述存在不确定性, 对稳定控制带来了极大的挑战, 且飞行器与环境相互作用的机理复杂, 对高超声速再入飞行的影响尤为突出, 应加强飞行器和环境相互作用机理的研究. 要重视在非结构化环境下自主态势感知及评估、对不确定性的适应性自主、协同性自主、以及学习型自主的新概念、理论与方法研究.

4) 关注天地一致性问题

随着工程研制的不断深入, 地面试验已无法全面覆盖高超声速飞行状态, 需要关注设计、试验和验证的天地一致性问题. 为此, 需提升基础能力建设, 加强高逼真度仿真验证与评估问题的研究, 特别重视探索先进的理论与方法指导的, 采用数字化技术实现的, 高效、高可信度的控制系统的评估与确认方法.

5 结束语

我国航天控制技术经过半个多世纪的发展, 已经走向了世界. 人们已经认识到进入空间飞行器和空天飞行器的相关控制问题在航天技术中举足轻重的地位, 并将持续不断地研究、探索与突破, 将为新型运载器的研制和空间控制技术的不断发展奠定新的基础, 也必将为实现我国航天事业的未来发展作出更大贡献.

References

1 Wang Xiao-Dong. Prospect and review of attitude stabilization and control technology development for missile and launch vehicle. *Missiles and Space Vehicles*, 2003, (3): 25−30
(王晓东. 导弹和运载火箭姿态稳定与控制技术发展的回顾和展望. 导弹与航天运载技术, 2003, (3): 25−30)

2 Wang Ya-Xun. A logic space transportation strategy. *Journal of Rocket Propulsion*, 2004, **30**(1): 58−64
(王亚训. 合理的空间运输战略. 火箭推进, 2004, **30**(1): 58−64)

3 Jiang Shao-Dong, Han Hong-Shuo. A survey of current RLV concepts in the U.S.. *Aerospace China*, 2004, (5): 21−25
(江绍东, 韩鸿硕. 美国可复用运载器现行方案概况. 中国航天, 2004, (5): 21−25)

4 Jiang Shao-Dong, Han Hong-Shuo. A survey of current RLV concepts in Europe. *Aerospace China*, 2004, (6): 25−31
(江绍东, 韩鸿硕. 欧洲可重复使用运载器现行方案概况. 中国航天, 2004, (6): 25−31)

5 He Xia. The hypersonic technology development plan in the U.S.. *Modern Military*, 2004, (12): 26−28
(禾下. 美国高超声速技术发展计划. 现代军事, 2004, (12): 26−28)

6 Yang Yong. Study on roadmap of Chinese reusable launch vehicle. *Missiles and Space Vehicles*, 2006, (4): 1−4
(杨勇. 我国重复使用运载器发展思路探讨. 导弹与航天运载技术, 2006, (4): 1−4)

7 Long Le-Hao, Wang Xiao-Jun, Guo Lin-Li. The present situation and prospect of China′s space-entering capacity. *Engineering Science*, 2006, **8**(11): 25−32
(龙乐豪, 王小军, 果琳丽. 中国进入空间能力的现状与展望. 中国工程科学, 2006, **8**(11): 25−32)

8 Lu Ping, Jing Zhong-Liang, Hu Shi-Qiang. Key technologies on advanced guidance and control for sustainable development of manned space flight. *Manned Spaceflight*, 2011, **17**(5): 25−32
(陆平, 敬忠良, 胡士强. 载人航天持续发展所需的先进制导控制关键技术. 载人航天, 2011, **17**(5): 25−32)

9 Guo Lin-Li, Shen Lin, Yang Yong, Hu De-Feng. Study on the development strategy for China space transportation system. *Missiles and Space Vehicles*, 2006, (1): 1−5
(果琳丽, 申麟, 杨勇, 胡德风. 中国航天运输系统未来发展战略的思考. 导弹与航天运载技术, 2006, (1): 1−5)

10 Li Su-Xun. Progress in aerodynamics of combination control for vehicles at high speed. *Advances in Mechanics*, 2009, **39**(6): 740−755
(李素循. 近空间飞行器的气动复合控制原理及研究进展. 力学进展, 2009, **39**(6): 740−755)

包为民 中国科学院院士, 航天科技集团研究员. 主要研究方向为飞行控制, 空天飞行器, 运载器.
E-mail: baoweimin@cashq.ac.cn
(**BAO Wei-Min** Academician of Chinese Academy of Sciences, professor at the China Aerospace Science and Technology Corporation. His research interest covers flight control, aerospace crafts, and launch vehicles.)