

运载火箭智能控制的能力特征与关键技术

郑卓^{1,2}, 禹春梅^{1,2}, 程晓明^{1,2}, 张惠平^{1,2}, 彭汉章^{1,2}, 柳嘉润^{1,2}

(1.北京航天自动控制研究所,北京 100854;2.宇航智能控制技术国家级重点实验室,北京 100854)

摘要: 运载火箭智能控制是智慧火箭研制的核心技术之一。结合智能技术在航天控制上的应用研究与工程实践,对运载火箭智能控制的能力特征进行了分析;介绍了运载火箭的智能测试与发射、典型动力故障诊断与重构、环境与模型自适应控制,以及“软件”定义运载火箭等关键技术;对我国运载火箭智能控制系统的未来发展进行了思考。通过对航天智能控制技术持续不断地研究与实践,为我国智慧火箭的研制提供强有力的支撑。

关键词: 运载火箭; 智能控制; 能力特征; 关键技术

中图分类号: V 488.131

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.04.005

Capability Characteristics and Key Technologies for the Intelligent Control of Launch Vehicles

ZHENG Zhuo^{1,2}, YU Chunmei^{1,2}, CHENG Xiaoming^{1,2}, ZHANG Huiping^{1,2},
PENG Hanzhang^{1,2}, LIU Jiarun^{1,2}

(1.Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;

2.National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Intelligent Control, Beijing 100854, China)

Abstract: Intelligent control is one of the core technologies for the research and development of intelligent launch vehicles. In this paper, the capability characteristics of intelligent control for launch vehicles are analyzed by combining the application research and engineering practice of intelligent technologies in aerospace control. Then, the key technologies such as intelligent test and launch, fault identification and control reconfiguration for typical propulsion systems, adaptive control of environments and models, and “software” definition of launch vehicles, are introduced. Finally, the future development of intelligent control systems for launch vehicles in China is considered. The continuous research and practice of aerospace intelligent control technologies provide strong support for the development of intelligent launch vehicles in China.

Key words: launch vehicle; intelligent control; capability characteristics; key technologies

0 引言

经过 60 多年的不懈努力,我国运载火箭的发展取得了举世瞩目的成就,独立自主研制的以“长征”系列为代表的数十种运载火箭,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有效载荷的运载能力^[1]。截至 2022 年 4 月,“长征”系列运载火箭累计成功发射了 410 余次,并且已具备年发射 40 余次的发射能力,这些能力的持续提升使我

国航天运输系统具备了任务多样化、发射高密度的特点,对运载火箭的安全性、可靠性和低成本等性能提出了更高的要求。运载火箭所涉及的控制理论和技术是当今航天控制领域研究的热点和难点,具有前沿性、基础性和综合性,已成为支撑中国航天事业未来发展的核心关键领域之一^[2-3]。

近年来,世界运载火箭控制技术得到了快速发展,如美国猎鹰 9 号火箭的可重复使用技术、故障重

收稿日期:2022-04-29; 修回日期:2022-06-06

基金项目:国家自然科学基金(U21B2028)

作者简介:郑卓(1975—),男,硕士,研究员,主要研究方向为智能飞行控制系统。

通信作者:程晓明(1989—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为飞行器智能制导与控制。

构技术,空间发射系统(Space Launch System, SLS)的先进冗余控制技术、模型自适应控制技术^[4],以及俄罗斯在火箭基础级故障后为任务挽救提出的自适应制导技术^[5]等。虽然我国的运载火箭控制技术也取得了长足的发展,入轨精度达到了国际先进水平^[6],但面对国际运载领域的激烈竞争与我国航天发射任务对安全性、高效性等的要求提升,我国航天运输系统对新一代运载火箭的控制技术有了进一步的需求:1) 具备对典型故障的控制重构能力;2) 具备对复杂环境与模型的自适应控制能力;3) 具备支撑可重复使用火箭高空返回的控制能力;4) 具备应急快速发射能力。

这些新的需求,使运载火箭控制系统需创新制导控制理论与方法,由适应偏差、适应环境逐步向

适应故障、适应任务的智能控制理念转变^[7-8]。基于以上理念与思考,本文结合智能技术在航天控制上的应用研究与工程实践,对运载火箭智能控制的能力特征与关键技术进行介绍,并对运载火箭智能控制系统的发展趋势进行探讨和展望。

1 运载火箭智能控制的能力特征

运载火箭智能控制是将智能技术应用于火箭控制系统设计的各个环节,使火箭变得更聪明,主要技术指标得到显著提升,或具备以往所不具备的能力;并能通过学习和训练,使火箭能力得到持续提升,从而适应来自本体、环境和目标的不确定性,完成复杂任务^[9]。运载火箭智能控制系统主要由“测试与发射、感知与辨识、规划与制导、姿控与执行、学习与演进”等部分组成,如图 1 所示。

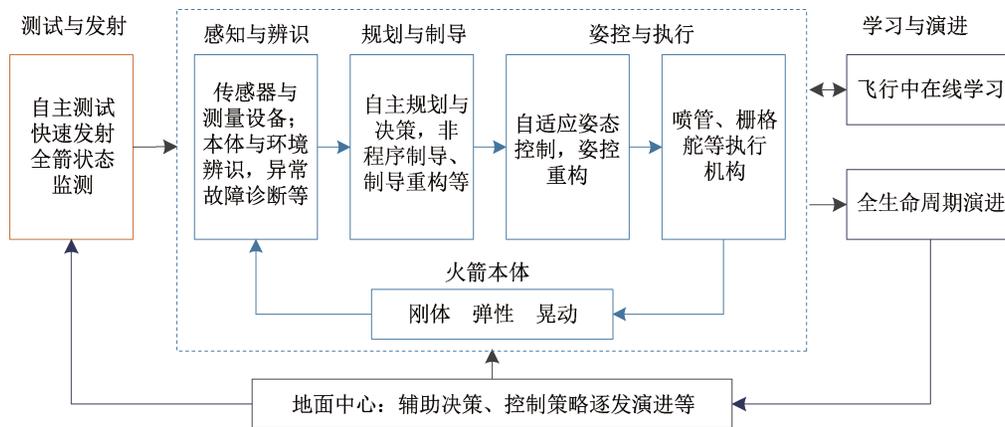


图 1 运载火箭智能控制系统组成

Fig. 1 Intelligent control system of a launch vehicle

根据以上对运载火箭智能控制系统的定义,结合新一代运载火箭的控制需求,将运载火箭智能控制的能力特征描述为以下 5 个方面:

1) 智能测试与发射。运载火箭的智能测试与发射主要包括测试过程“去任务化、去型号化”,可远程测试,自主健康管理,快速定位并处置故障;可实现多窗口自适应一键发射,适应异常状态下的自主中止与发射、地外星球的自主发射等任务。

2) 智能感知与辨识。运载火箭智能感知与辨识主要是指在飞行中,火箭自主感知大气密度、风场等环境特征与弹性、气动、动力、典型故障等本体特征。对这些特征的准确感知、理解、修正与预测,是火箭充分发挥自身的控制能力,提高入轨精度,并降低故障造成损失的重要保障,是实现火箭智能

控制的一项重要前提。

3) 智能规划与制导重构。运载智能规划与制导重构主要是指运载火箭利用智能规划与决策、智能制导与控制、智能计算与软件等技术,能够通过一次设计,使火箭自主适应多种不同的飞行任务,也可以使火箭在复杂干扰与异常故障下,开展任务决策与降级、制导控制重构、计算资源迁移等,提高控制系统的容错能力,增强系统的健壮性,保障有效载荷的安全。

4) 环境自学习与模型自适应控制。环境自学习与模型自适应控制是指基于对不确定环境模型与本体模型特征的不断感知,开展控制策略自学习,持续优化后续的控制策略,通过“边飞边学”^[2],提升控制品质,并能适应故障带来的模型改变,实

现火箭的稳定控制。面对无法准确掌握的环境与本体模型散布包络以及出现突发故障的情况,火箭具备的环境自学习和模型自适应特征,对提升火箭的快速发射能力与故障适应能力具有重要的意义。

5) 经验迁移与自主演进。运载火箭的经验迁移与自主演进是指火箭能够基于每次飞行的数据,对下一发火箭的控制系统进行自主或半自主地改进与进化,实现“飞行经验”的迁移,使得离线设计的“辅助决策与控制策略”逐发演进,不断提升火箭控制系统的全生命周期“演进”能力。该能力特征可使运载火箭不断地提升“自我认知”,控制系统设计实现不断的“自我完善”,为智慧火箭研制提供关键能力支撑。

2 运载火箭智能控制的关键技术

针对新一代运载火箭的任务需求,在以上运载火箭 5 个智能控制能力特征的牵引下,开展了一系列火箭智能控制关键技术的研究与实践。本章在智能测试与发射方面,主要介绍了远程测发控、健康管理和能源动态分配等技术;在智能感知与辨识、智能规划与制导重构、环境自学习与模型自适应控制方面,涉及的关键技术通常是相互关联的,主要介绍了典型故障辨识与诊断、能力评估与在线决策、在线规划与重构、减载控制以及状态辨识与模型自适应控制等技术;在经验迁移与自主演进方面,主要介绍了数据管理与挖掘技术。此外,本章介绍了基于“软件定义”的运载火箭智能软件系统,为智能控制能力特征的实现提供箭上软硬件产品设计支撑。

2.1 智能测试与发射技术

火箭的智能测试与发射,主要包括火箭的远程测发控与零窗口自动发射、火箭智能健康管理、能源智能动态分配等,通过形成多任务资源共享集成平台,为智慧火箭快速测发、状态评估、辅助决策等提供平台支撑。

2.1.1 远程测发控与零窗口自动发射

远程智能测发控系统方案,是将智能计算中心部署在后端,对前端微系统收集并传送的所有数据,进行归类、存储、计算与分析,能够为并行计算、数据中心和深度学习训练调优提供远程数据支持,辅助控制系统设计。零窗口多弹道自动选择与发射技术,是实时根据目标轨道与 GPS/北斗授时,自主选择飞行弹道,减少箭地通信交互以及地面人员

决策、操作带来的延时问题。这两项关键技术目前已在我国长征系列火箭中开展了实践与应用,提升了火箭对发射窗口的适应能力。

2.1.2 智能健康管理

运载火箭发射前的智能健康管理,是通过采集并分析火箭全生命周期与历史测试数据,发掘数据特征和故障机理间的潜在对应关系,利用测试性模型和神经网络等学习算法,实现对单机、供配电模块等故障的自适应判断;通过射前智能故障诊断设计方案,使火箭能够基于全生命周期测试数据,开展预先维护,提升控制系统故障检测隔离能力与任务保障能力。

2.1.3 能源智能动态分配

运载火箭的能源智能动态分配,是根据控制系统的任务需求和功能单元工作状态实施能源动态分配、自主充放电和健康状态评估。在火箭测试发射过程中,可通过数字配电技术,实现各单机配电控制、供电保护、断电重启等功能,实现发射前的可靠转电和逆转电,提高任务保障能力。

2.2 典型动力故障在线诊断、评估与重构技术

针对近年来国内外运载火箭由于动力故障导致多次发射失利的情况,通过提高火箭控制系统对典型动力故障的适应能力,提升火箭可靠性与安全性,是火箭控制技术的发展趋势之一^[10]。

2.2.1 典型动力故障在线辨识与诊断

运载火箭的典型动力故障通常包括推力异常下降、发动机异常关机、发动机点火失败、喷管极性接反等,如 2006 年,印度 GSLV-F02 运载火箭发射后 1 枚助推器发动机发生异常导致火箭偏离预定轨迹后爆炸;2016 年,俄罗斯联盟-U 火箭第三级氧箱破裂导致发射任务失败等。

液体火箭动力系统故障发生后可准确测量的信息较少,通过融合动力系统信息和控制系统信息,可实现对典型动力故障的准确辨识。如对于火箭主发动机推力下降故障,可根据发动机的部分传感器信息(如涡轮泵转速、燃烧室压力等),结合控制系统中的惯组信息与伺服摆角指令信息,在线辨识主发动机的推力故障大小和哪台发动机发生了故障。对于运载火箭喷管极性接反故障,可基于推力指令与惯组测量信息的解析模型,或基于深度学习的推力极性故障辨识,实现对火箭推力极性故障

的准确诊断^[2],该技术在飞行演示试验中进行了验证,效果表明能够较为准确地诊断故障,并为火箭的轨迹规划提供准确的动力系统信息。

2.2.2 能力评估与在线决策

根据推力下降故障辨识结果,对火箭的飞行能力进行评估与任务决策,使火箭进入安全停泊轨道或降级轨道,以保证火箭的安全。通常的任务决策策略有:1)故障影响较小时,通过故障吸收后仍然进入预定轨道;2)故障影响较大时,通过故障重构,火箭首先选择进入安全停泊轨道,然后择机进入预定轨道或降级轨道;3)故障影响导致任务无法挽救时,快速分离以避免对后续飞行产生更大的不利影响。

在动力故障发生后,目前的火箭能力评估方法通常采用基于数值优化的方法,这种方式对箭载计算机的计算资源和算力要求较高,难以实时得到较为全面、精确的火箭可达轨道包络^[10-11]。随着智能技术的发展,运载火箭评估与决策的发展将会基于深度强化学习等方法,对地面模拟的大量故障情况与对应的最优决策数据开展网络训练,将能力评估与智能决策融合起来,能够使火箭在实际飞行中通过诊断出的故障结果,快速给出任务决策,形成“边飞边决策”的智能决策体系,持续增强火箭飞行任务的故障适应能力。

2.2.3 在线规划与制导控制重构

运载火箭在完成任务决策后,需要对其飞行轨迹进行在线规划与制导控制重构。目前国内学者利用凸优化方法开展了火箭入轨问题的在线轨迹规划^[12-13]研究,然后利用规划结果对迭代制导进行重构,并通过力矩重分配或自适应增益调节方法^[14],实现故障火箭的姿态稳定。后续将在该技术的基础上,继续开展在线多阶段(包含滑行段)轨迹规划与制导重构,保证实时收敛性与全程轨迹的最优性。

针对喷管故障后的姿态控制重构,可基于喷管与惯组信息的解析模型,对相应通道进行姿态控制重构^[15-16]。该项技术已在火箭上进行了飞行试验,验证了喷管故障辨识与姿态控制重构技术的实现正确性,加大提升了火箭对喷管极性故障的可靠性。

2.3 适应环境与模型不确定性的自主控制技术

运载火箭在飞行中受高空风与模型不确定性影响较大,需要研究针对高空风环境影响的智能减载技术与针对模型不确定性影响的在线辨识与自适应控制

技术,以提升火箭应对环境与模型不确定性的能力。

2.3.1 减载控制技术

目前常用的基于过载反馈的减载控制,在保证火箭姿态稳定的前提下,能够降低平稳风和切变风产生的载荷^[17-18]。在此基础上,近年来研发的基于自抗扰的运载火箭减载技术也逐步在工程实践中得到了应用^[19]。该技术实时性好,飞行试验结果表明,该技术的减载效果明显,可提升火箭对不确定风载荷的适应能力。

为进一步提高火箭的减载效率,可充分利用历史飞行数据和实现效果较好的减载策略,形成减载策略专家库,基于逆强化学习方法,在离线学习基础上,利用专家库中的最优减载策略对飞行中的实时减载策略进行探索,并根据实时减载效果,调整控制策略,提高火箭的主动减载能力。这种基于经验知识与飞行中自主探索的“边飞边学”减载方式,能够提升火箭的主动减载效率,并在运载火箭间具有较强的通用性与方法迁移能力。

2.3.2 状态辨识与模型自适应控制技术

运载火箭飞行中的不确定环境与本体模型,使火箭通常采用基于离线偏差带的方式开展控制系统设计,导致控制系统设计保守。为了释放控制余量,火箭需开展针对弹性、气动以及稳定裕度等参数在线辨识的自适应控制技术,以提升火箭的控制能力。

1)针对运载火箭的刚弹耦合问题,研究基于弹性状态估计与主动抑制的刚弹自适应控制技术^[20],实现低频弹性信号的主动抑制与刚弹耦合状态下的箭体姿态稳定控制,并且能够增强控制系统对箭体弹性的适应性,简化弹性模态试验。这种方法可较好地估计火箭低频弹性,从而能够适应大型运载火箭控制品质受箭体低频弹性影响显著的问题。

2)针对气动参数不确定性的控制问题,研究基于气动参数智能辨识的自抗扰控制技术^[21],对通道间耦合进行解耦控制,减弱对模型信息的依赖性,抑制非匹配不确定性对控制系统的影响,有效应对气动模型参数的大范围变化。这种通过在线气动参数辨识,并进行自抗扰控制的方法,在飞行试验中进行了验证,能够使控制系统减小对地面离线偏差带的依赖,并可提升控制精度,降低因气动参数不确定性带来的结构载荷需求。

3)针对火箭姿态控制能力不能灵活配置,制约火箭一次设计、多任务通用的问题,研究稳定裕度在线辨识与姿控参数在线优化技术,基于最优激励

与频域辨识的稳定裕度在线辨识方法,可在线实现控制能力协调分配与自适应调参,这一技术在飞行演示试验中进行了验证,能够增强火箭对自身模型适应性的同时,还可以为飞行轨迹在线调整提供控制能力的相关信息,对于需要在线规划轨迹的飞行任务具有重要的意义。

2.4 数据管理与挖掘技术

运载火箭的数据管理与挖掘,主要是利用专家经验及飞行数据建立智能经验库,训练设计方案以及设计参数,并通过研究多种集群智能算法对系统设计参数进行优化,实现控制系统不断改进与演化。

2.4.1 基于全生命周期数据的控制系统自我学习技术

采用的全生命周期数据包括仿真、飞行及测试数据,通过基于大数据分析,在前序飞行数据基础上,对环境、火箭本体模型不断修正。通过基于飞行历史数据,并从数据中固化飞行经验,分析每次飞行的环境特征、全箭健康状态与控制策略执行效果,快速理解飞行环境特征或定位异常状态,持续改善后续飞行性能。

2.4.2 基于自学习的控制系统持续优化技术

利用神经网络训练、集群智能算法等,对系统设计参数进行优化;基于历史飞行过程数据与飞行结果数据,不断优化飞行策略,适应深空探测、载人运输所需要的多次变轨、在轨加注任务等多种任务,使火箭处理问题更加智慧。

2.5 基于“软件定义”的智能软件系统

新一代运载火箭智能控制技术呈现出硬件集成化、软件系统化的发展态势,控制系统将从传统的单机互联,逐步发展到部署在一个高度集成的硬件平台上、运行在统一的软件框架中、软硬件高度结合的智能控制系统。传统的功能与硬件紧密耦合的装备研制模式难以适应智能时代多变的特性,亟需建立更加先进的技术框架与产品平台。

2.5.1 基于“软件定义”的分层云化系统框架

基于“软件定义”的分层云化系统框架,是指通过虚拟化技术,分层隔离封装,打破业务与平台、软件与硬件的耦合,向下将实体硬件变成虚拟化的部件,向上为各种任务提供可调度的服务接口。系统整体功能可以通过加载软件组件灵活定制、灵活扩展,软件、硬件、系统可以独立发展、快速集成,同时组件的可迁

移、可重构特性可以保证整个框架的安全性、可靠性,并为系统级的容错设计提供更多选择。

2.5.2 适应云架构的分布式实时操作系统

为了适应云架构模式,需要在传统嵌入式操作系统上进行扩展,增加对分布式混合异构嵌入式平台的适配,突破硬件平台抽象、异构资源管理等关键技术,形成对计算、存储资源以及接口的综合管理能力,进一步解除软硬件耦合关系;突破以内存资源安全隔离、资源透明访问为代表的虚拟化关键技术,使分层云化系统框架可以便利地运行在不同载体。

2.5.3 可重构的分布式实时软总线

为了让分布式计算资源上运行的不同任务间实现透明通信,同时故障状态下发生任务迁移后,整体通信实现无感重建,研制实时分布式软总线,突破通信介质抽象及接口封装、全局路由映射、虚拟通讯节点管理等关键技术,形成对通信资源的综合管理能力,使分层云化系统框架可以便利地调度、管理各组件,进而实现跨操作系统、跨平台的数据传输、任务群调度。

3 运载火箭智能控制系统的发展思考

运载火箭智能控制系统的发展将是航天控制系统与人工智能理论与技术成果不断融合的过程。结合当今智能技术的发展态势与新一代运载火箭的智能自主需求,基于对运载火箭智能控制系统能力特征的理解,我国运载火箭智能控制系统将在以下方面取得创新性发展。

3.1 地面简捷发射

火箭测试发射控制系统可实现无人值守,具备远程快速自主测试、全面健康管理、操作通用简单等特征,实现测发设备与岗位人员的极大减少;可实现自主发射,发射窗口可自主决策,并能支持地外天体非人工干预发射,为航班化航天运输提供支撑。该能力的实现,主要包括:通过自主健康管理,实现巡检测试及自动判读、故障诊断、健康评估及状态预测等射前辅助决策;通过自测试,实现远程测试,自动充放电,火工品自动短路/解保控制等,提升测试安全性;通过自发射,实现一键发射、多窗口多弹道自适应发射、预案自动执行、自动红线中止等,提升发射自主性。地面简捷发射,需要控制系统产品具备:

- 1) 简化性,能够实现系统单机化,单机单板化,单板

器件化;2) 集成性,能够实现箭地一体化、软硬件一体化;3) 通用性,能够实现火箭各部段接口统一、结构统一,支持部段测试,利于敏捷开发。

3.2 飞行随机应变

火箭控制系统具备任务强适应能力,可以针对不同轨道、不同载荷、不同空间飞行任务,一次设计全适应;在飞行中具备不确定性强适应能力,能够适应不确定环境和本体模型,取消弹道风修正,降低对模态试验的依赖;在飞行中具备异常情况强适应能力,可以适应箭机、动力系统的非致命故障,提升发射成功率。该能力的实现,主要包括:通过自感知、自辨识,实现对环境与模态的在线感知与故障的准确诊断等;通过自决策、自规划,实现火箭的能力评估、任务决策、轨迹规划以及燃料分配等;在无故障下,通过自适应、自优化,实现火箭飞行策略的自适应调节与控制参数的自优化;在发生非致命故障情况下,能够通过自重构,实现制导控制的重构,挽救发射任务。飞行随机应变,需要控制系统的产品:1) 在“感知辨识”方面,需要有丰富的感知模块,实现对飞行环境、状态以及异常故障的自感知、自辨识;2) 在“规划制导”方面,需要具有高性能异构计算模块,高速信息传输,实现并行计算、软硬件资源动态调配;3) 在“姿态控制”方面,需具备可在线优化、可重构姿控模块,实现自主参数调整、控制能力动态分配;4) 在“执行”方面,需具备独立、解耦、通用的精细化执行机构,可实现灵敏反应、智能均衡配置等。

3.3 终身自主演进

火箭控制系统能够自主学习,实现控制参数与控制策略的在线学习、自主优化,降低对总体大型试验与地面半实物试验的依赖,提升火箭的研制效率;能够快速迭代,实现数据积累与利用,控制模型持续修正,运载效能越来越优,型号全生命周期性能不断提升。该能力的实现,主要包括:首先通过数据生成、管理与挖掘,完成飞行与试验数据的生成、采集、存储、清洗、挖掘等;其次基于这些数据,通过智能化设计方案,支撑快速设计与飞行中的边飞边学与性能持续提升,实现设计智能化;最后基于数据积累,通过设计参数一发比一发优,本体模型一发比一发准,实现设计自演化。终身自主演进,需要控制系统的产品:1) 在“在线设计与学习”

方面,可开展模块化设计,其中的控制模块和软件可快速迭代、在线替换与升级,具备 AI 架构与在线学习功能,支撑神经网络并行计算、在线训练;2) 在“终身学习”方面,满足大型学习与训练的强算力,支撑全生命周期数据挖掘、系统方案持续优化。

4 结束语

我国运载火箭控制技术经过半个多世纪的发展,取得了长足的进展,并在我国“长征”系列各型运载火箭的四百余次飞行任务中得到了充分验证。随着新型航天任务对智慧火箭的需求越来越迫切,人们逐渐认识到智能控制问题在运载火箭中举足轻重的地位。部分智能控制成果已在火箭控制系统设计和飞行控制中进行了应用,大幅提高了火箭的智能控制水平。本文对运载火箭智能控制的能力特征与关键技术进行了介绍,并对火箭智能控制系统的未来发展进行了思考。我们相信,通过对运载火箭智能控制技术持续不断地研究、突破与实践,将为智慧火箭的研制奠定新的基础,为建设航天强国做出更大贡献。

参考文献

- [1] 包为民. 航天智能控制技术让运载火箭“会学习”[J]. 航空学报, 2021, 42(11): 525055.
- [2] 马卫华, 禹春梅, 路坤锋, 等. “会学习”运载火箭的制导控制技术[J]. 航天控制, 2020, 38(2): 66-71.
- [3] 吕新广, 宋征宇. 长征运载火箭制导方法[J]. 宇航学报, 2017, 38(9): 895-902.
- [4] ORR JS, WALL JH, VANZWIETEN T S, et al. Space launch system ascent flight control design[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2014, 151: 141-154.
- [5] YANOVA O V, AKOBIAN B G. Launcher mission risk reduction due to the advanced adaptive guidance algorithms [C]// The 67th International Astronautical Congress (IAC). 2016: IAC-16, D5, 1, 5, x34770.
- [6] 龙乐豪, 王小军, 果琳丽. 中国进入空间能力的现状与展望[J]. 中国工程科学, 2006, 8(11): 25-32.
- [7] 李洪. 智慧火箭发展路线思考[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(1): 1-7.
- [8] 吴宏鑫, 胡军, 解永春. 航天器智能自主控制研究的回顾与展望[J]. 空间控制技术与应用, 2016, 42(1): 1-6.
- [9] 马卫华, 包为民, 禹春梅, 等. 关于“航天智能控制系统”的认识[J]. 航天控制, 2019, 37(5): 3-8.
- [10] XUE D, LI J F, BAO Y, et al. Reachable domain for spacecraft with a single impulse[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(3): 934-942.

(下转第 93 页)