

<http://htkz.cn>

引用格式:禹春梅,黄聪,白文艳,等. 智能体特征的控制技术3.0[J]. 航天控制,2025,43(4):1-6. (YU Chunmei, HUANG Cong, BAI Wenyan, et al. Agent-featured intelligent control technology 3.0[J]. Aerospace Control, 2025, 43(4):1-6.)

## 智能体特征的控制技术3.0

禹春梅,黄 聪,白文艳,钟鸿豪

北京航天自动控制研究所,北京 100854

**摘 要** 聚焦航天控制技术从古典控制、现代控制到智能体特征控制技术3.0的演进历程,论述了智能体特征控制技术3.0是航天控制系统未来发展的关键标志,重点阐述了控制技术3.0的“边飞边学”、“终身学习”、“新一代系统架构”等典型特征,深入分析了“智能赋能”、“机能增强”与“信能提升”的关键技术,在此基础上,围绕大模型赋能、软件工厂等典型场景,引出对未来航天智能控制发展的思考。

**关键词** 智能体;控制技术3.0;智能赋能;机能增强;信能提升

中图分类号:V448.2;V448.12 文献标识码:A 文章编号:1006-3242(2025)04-0001-06

## Agent-featured intelligent control technology 3.0

YU Chunmei, HUANG Cong, BAI Wenyan, ZHONG Honghao

Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China

**Abstract** The evolutionary trajectory of aerospace control technology is focused from classical control and modern control to agent-featured intelligent control technology 3.0. The agent-featured intelligent control technology 3.0 is represented and known as the key indicators of future aerospace control systems. The key attributes of control technology 3.0 labelled by "learning while flying", "lifelong learning" and the "new-generation system architecture" are pointed to elucidate. The critical technologies of "intelligence empowerment", "functional augmentation" and "information capability enhancement" are subjected to in-depth analysis. On this basis, the exploration of future aerospace intelligent control development is oriented to typical scenarios such as large model empowerment and software factories. Consequently, prospective thoughts on the development of advanced intelligent aerospace control are expanded upon the matter.

**Key words** Intelligent agent; Control technology 3.0; Intelligence empowerment; Functional augmentation; Information capability enhancement

收稿日期:2025-06-30

作者简介:禹春梅(1975-),女,博士,主要研究方向为飞行器导航、制导与控制技术;黄 聪(1992-),男,硕士,主要研究方向为运载火箭姿态控制系统设计,本文通信作者。

# 0 引 言

航天技术是目前人类科技含量最高、技术密度最大的领域之一,也是一个国家科技水平和综合国力的重要体现,在国际政治影响力方面具有重要战略意义。经过六十多年的发展,中国航天已经步入世界航天大国行列,具备了任务多样化、发射高密度的特点。纵观中国航天事业的发展史,航天控制系统作为航天飞行器的“神经中枢”,控制技术的迭代与更新始终贯穿其中<sup>[1]</sup>。

20世纪60年代,中国第一枚地地导弹“东风一号”首次验证了“位置捷联+无线电横偏控制”技术,奠定了国产化控制体系的基石<sup>[2]</sup>;1964年,东风二号复飞,首次考虑弹体弹性影响完成姿控频域设计,实现控制系统稳定性方面的飞跃<sup>[3]</sup>;进入80—90年代,我国航天控制技术进入系统性突破期,制导理论从摄动制导发展为闭路制导、组合制导,再到迭代制导,制导方法误差减小一个数量级,自主研发的全数字设计频域稳定技术支持了以CZ-2F、CZ-7等为代表的长征系列运载火箭的发射成功<sup>[4]</sup>。进入21世纪以来,弹性自适应增广控制、基于ESO估计的减载控制等自适应控制技术相继应用于CZ-8等运载火箭姿态控制系统中,提高了运载火箭控制系统对弹性模态系数不确定性及风干扰的适应能力。同时,非程序制导控制技术的突破进一步提升了弹道导弹运动控制的适应能力。纵观航天控制系统发展历史,控制技术逐步从适应偏差,向适应本体、环境和任务更新升级,以自主创新为核心,不断提升控制精度、控制品质与可靠性,推动我国航天事业的跨越式发展<sup>[5]</sup>。

当前,随着全球科技竞争的加剧和航天任务的日益复杂化,航天控制技术正面临着新的机遇与挑战,特别是以人工智能、大模型等技术为代表的新工业革命浪潮下,航天控制系统正逐步从传统控制向智能控制时代迈进。发展航天智能体,支撑航天控制系统升级换代以及航天装备的跨越发展,将具有重要的理论与工程应用价值。

## 1 控制技术的发展历程

控制科学是一门研究机器、生命、社会中控制和通信的一般规律科学,是研究动态系统在变化的

环境条件下如何保持平衡状态或稳定状态的科学。按控制技术的发展历程,可分为古典控制(控制1.0),现代控制(控制2.0)和智能体(控制3.0)共3个阶段。

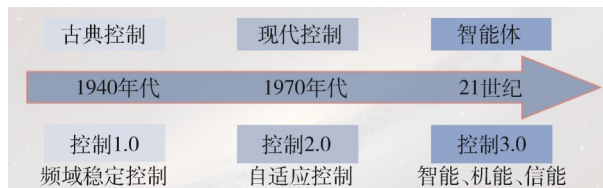


图1 控制科学的发展历程

### 1.1 古典控制(控制1.0)

1948年诺伯特·维纳出版《控制论》,定义“反馈”为核心概念,推动控制理论成为独立学科,自此控制理论迅速发展<sup>[6]</sup>。Nyquist的频率响应法和伯德图、埃文斯的根轨迹法共同构建了经典控制理论框架,主要解决单输入单输出系统的稳定性与动态性能问题,奠定了航天控制初期发展的基础<sup>[7]</sup>。1960年我国“东风一号”采用模拟电路控制与伺服随动控制实现稳定控制<sup>[2]</sup>;1961年起,美国“阿波罗计划”采用PID参数频域整定及推力调节控制实现登月舱着陆<sup>[8]</sup>;1970年我国“长征一号”火箭通过弹性振型相位稳定结合幅值稳定的方法解决了大长细比火箭弹晃交联耦合严重的难题,成功将我国第一颗人造地球卫星东方红一号送入轨道<sup>[9]</sup>。

### 1.2 现代控制(控制2.0)

自20世纪50年代中期起,迅速兴起的空间技术的发展迫切要求建立新的控制理论,1956年Bellman提出动态规划方法<sup>[10]</sup>,1960年Kalman引入状态空间模型和Kalman滤波<sup>[11]</sup>,1961年庞特里亚金提出极大值原理<sup>[12]</sup>,形成了以最优控制、自适应控制和随机控制为核心的现代控制理论。现代控制理论中的状态空间方法以及数字式控制系统被广泛应用于航天器精准控制中<sup>[7]</sup>。1984年东方红二号通信卫星采用Kalman滤波技术,轨道保持精度提升了一个数量级<sup>[13]</sup>;1994年长征三号甲火箭采用数字飞行控制计算机,极大提高了控制精度,助力中国首次实现地球同步轨道卫星发射<sup>[14]</sup>;1997年长征二号F火箭姿控系统自适应调整网络结构,迭代优化控制参数,保证了故障下的稳定飞行,从设计的源头提高了控制系统的可靠性<sup>[4]</sup>;2012年好奇号火星着陆依托模型预测控制(MPC),实现了人类首次火星精确软着陆<sup>[15]</sup>;2015年SpaceX猎鹰9火箭回收融合

在线辨识与H无穷鲁棒控制,攻克了再入阶段气动弹性与推进剂晃动难题,开创了火箭重复使用的新纪元<sup>[16]</sup>。

### 1.3 智能体(控制3.0)

进入21世纪,随着计算能力的飞跃和机器学习、大数据技术的兴起,智能控制在工业界逐渐展现出强大潜力,成为了控制理论的第3个里程碑,也成为人工智能与工业界融合发展的抓手。2016年AlphaGo击败李世石标志着强化学习算法的突破,2018年SpaceX火箭通过10万次仿真训练与深度强化学习,着陆精度达到0.7 m,燃料利用率提升40%。伴随5G时代、大数据和物联网的到来,无人系统完成自主更复杂的任务成为可能,人工智能发展步入了新阶段,呈现出深度学习、跨界融合、人机协同、群智开放和自主操控等新特性。2021年天问一号火星着陆融合视觉导航与强化学习策略,着陆偏差降到米级<sup>[17]</sup>。同年,NASA“毅力号”火星车AutoNav2.0系统利用卷积神经网络(CNN)识别地形障碍,行进速度较“好奇号”提升10倍,突破深空探测从“预设程序”到“动态适应”的能力边界<sup>[18]</sup>。当前,随着ChatGPT、Deepseek等生成式人工智能技术的突破性进展,基于多模态数据理解、自主知识生成与人机协同进化,智能控制系统的发展范式正在发生新的变革,智能控制系统将实现从“任务执行者”到“自主科学家”的范式转变。例如,深空探测器可自主提出科学假设并动态调整观测策略,开启宇宙探索的新纪元。

综上所述,从古典控制的“稳定跟踪”到智能体的“自主进化”,控制理论的每一次范式变革都重构了航天装备能力的可能性边界。当前,随着航班化航天运输、载人登月、深空探测和星座组网等航天任务复杂性呈指数级增长的背景下,亟需发展智能控制来应对日益复杂的被控对象和环境挑战,而智能体的发展与应用成为行之有效的解决途径。以数据驱动、多域协同等为特征的智能体,具备“智能赋能+机能增强+信能提升”的全新能力,正在开启航天装备“应对变化-自主学习-自主进化”的全新时代。

## 2 航天智能控制的特征与关键技术

航天智能控制旨在将智能技术深度应用于航天飞行器,构建融合人工智能的自主控制系统,以

提升飞行器关键性能指标,或赋予其之前不具备的能力;并能够基于数据驱动等机制实现能力持续进化,使飞行器能够有效应对本体、环境及任务目标等多重不确定性挑战,可靠完成复杂多变的航天任务。<sup>[19]</sup>

### 2.1 航天智能控制的特征<sup>[20]</sup>

#### 2.1.1 “边飞边学”特征

充分利用航天飞行器载多源信息,在飞行过程中,使火箭实现飞行状态与环境在线辨识、运载及控制能力在线评估,轨迹在线规划、控制在线重构和目标在线变更等功能。基于深度学习、机器学习等智能控制技术,使运载火箭具备个体强适应、任务快响应、飞行自学习和系统高自主等能力,实现“边飞边学”。

#### 2.1.2 “终身学习”特征

充分利用全生命周期中所产生的数据,包括控制系统寿命模型中的结构特性、参数、环境条件及历史数据等,以大数据和智能分析技术等为基础,实现模型智能修正、模型智能建立、方案与参数智能优化等功能,持续进行自我学习和改进,实现知识的深度挖掘、迁移应用和决策评估,使控制系统能够适应不同的载荷、内部不确定以及外部环境的扰动。控制系统通过一次设计延伸整个型号的生命周期,实现火箭“越飞越聪明”和“越飞越自信”。

#### 2.1.3 “新一代系统架构”特征

航天装备侧新一代系统架构,按平台约束开发APP,与系统高效集成,通过“平台+服务+APP”的开放式软件系统架构,实现软硬件解耦,提升系统的可扩展性和维护性;通过微服务架构、轻量化实时容器实现APP的管理调度;平台API提供透明的飞行器内/飞行器间通信接口,为应用层提供便捷的资源共享机制,通过核心要素实施,实现航天智能控制软件的开发效率、系统性能和维护能力的大幅提升,为完成复杂任务奠定坚实基础。

“边飞边学”和“终身学习”两个能力特征相辅相成、相互促进,“新一代系统架构”为“边飞边学”和“终身学习”提供载体支撑,让飞行器能力持续提升与增强。其中,通过“智能赋能”,赋予航天控制新的能力,实现对复杂环境、任务及突发状况的主动适应,使飞行器整体性能得到提升;通过“机能增强”,为“智能赋能”算法实现提供更多元的信息输入、更高效的数据处理、更开放的系统架构,使飞行器功能得到拓展、性能得到提升;通过“信能提升”,

为“智能赋能”算法提供更高速的信息传输和更强大的计算能力,支撑航天飞行器能力提升。

## 2.2 “智能赋能”<sup>[19]</sup>

### 2.2.1 典型动力故障在线诊断、评估与重构技术

充分利用运载火箭主发动机各种传感器传输信息,联合控制系统惯性器件、执行机构指令等信息,通过融合动力与控制系统信息,实现故障发动机的精确定位。

采用基于深度强化学习等方法,在动力系统发生故障后对运载火箭能力进行智能化评估与决策,通过地面离线模拟故障与决策训练,在飞行过程中利用动力故障诊断、飞行控制能力评估等结果信息,对飞行任务进行智能决策,尽可能完成既定入轨任务,以及在确定不能完成预定任务前提下让火箭进入安全轨道。

利用序列凸规划、多项式制导等方法,完成动力非致命故障下的运载火箭轨迹在线规划,并通过控制指令在线重分配策略,实现故障火箭的姿态稳定。

### 2.2.2 状态在线辨识与模型自适应控制技术

运载火箭飞行中存在气动、弹性模态及贮箱晃动等不确定的环境与本体模型偏差,工程上通常采用偏差包络进行控制参数离线设计。针对天地不一致性导致的控制系统设计保守问题,研究面向弹性、晃动等参数在线辨识的自适应控制技术,提升对不确定性的适应能力。

通过基于CZT变换策略在线辨识出的弹性频率等信息,同时在线提取姿态控制指令弹性信息,采用自适应增广控制方法实时更新火箭的静态增益及校正网络参数,实现低频弹性主动抑制和刚弹耦合下的箭体姿态稳定控制,增强控制系统的适应能力,一定程度上解决了大型运载火箭控制品质受箭体低频弹性影响显著的问题,简化了对弹性模态试验的依赖。

### 2.2.3 数据挖掘与学习技术

在运载火箭的地面仿真与测试各个环节会积累大量试验数据,结合火箭历次飞行试验数据,基于大数据分析 with 训练方法不断修正环境和火箭本体模型,通过减小火箭模型偏差降低控制系统设计的保守性,提升控制系统的适应能力。

基于专家经验与历史飞行数据,构建智能经验库,采用数据挖掘与学习技术完成运载火箭控制系统方法及参数训练,同时,借助群体智能算法的研

究与应用,持续迭代优化系统的设计参数,驱动控制系统不断改进和向更高水平演化,以适应深空探测、载人登月等多样化复杂场景的任务需求,实现火箭的“终身学习”。

## 2.3 “机能增强”<sup>[21]</sup>

### 2.3.1 智能健康管理技术

飞行器发射前的智能健康管理(IHM)是通过构建飞行器全生命周期及历史测试数据的深度集成与分析,同时建立多维数据特征与潜在失效机制之间的映射模型,利用融合测试性建模理论与神经网络等智能算法,使系统具备对核心单体设备(如供电单元)运行异常状态的自主感知与精准诊断能力,显著优化控制系统的故障识别和定位效率,提升任务执行的可靠性与保障水平。

### 2.3.2 能源智能动态分配技术

通过实时感知弹/箭飞行控制系统的任务需求与功能单元状态,动态优化能源流分配策略,并集成自主充放电控制与综合健康评估功能。其中,数字配电能力可实现对单机设备的按需供电、智能防护(过载/短路等)及故障隔离后的快速恢复供电,有效确保发射准备阶段电源转换操作的高可靠性,提升任务保障能力。

### 2.3.3 面向软件定义的航天控制系统

传统航天装备研制面临软硬件紧密耦合等现状,软件更新与维护极其受限。“软件定义”作为更为灵活、便于管理、成本节约、可快速实现的技术手段,通过虚拟化技术,向下将硬件封装成易于管理、分配和使用的资源,向上为装备执行的各种任务提供可调度的服务接口,利用分层云化系统框架、分布式实时操作系统和分布式实时软总线,提供更为灵活的任务实现方式。

## 2.4 “信能提升”

### 2.4.1 基于智能化总线的高速信息传输通讯技术

高速总线为信息传输提供“高速公路网”,为“智能赋能”提供底层快速交互基础。其中,GLink高速光纤总线是基于FC-AE-1553协议的强实时、命令响应式高速串行总线,具有高带宽、高可靠、强实时和易扩展等特点,已应用于多型航天装备电气系统;TTE通信技术是一种基于“时间触发”的实时以太网解决方案,具备故障隔离能力,能够满足混合安全关键系统的高实时通信需求,原型系统在新一代载人飞船试验船上顺利完成。

#### 2.4.2 高可靠箭载AI算力平台构建技术

箭载AI算力需具备高性能、低功耗、高可靠及全栈国产化能力以支撑飞行器应用,通过基于FPGA的异构计算架构构建智能加速器,在动态可重构特性支持下实现模型轻量化与高效计算,开发标准化部署软件栈及接口,覆盖模型优化、算子库扩展和硬件在环仿真全流程,确保算法到芯片的快速适配与性能调优,通过研制智能信息处理平台产品形成基于裸机环境的强实时性和高可靠部署方案。

### 3 航天智能控制发展思考

随着人工智能、大模型等技术的快速发展,航天智能控制正迎来新的机遇与挑战。结合当今智能技术的发展态势与航天控制的智能自主需求,面向未来航天智能控制技术发展提出了如下思考方向。

#### 3.1 基于多模态大模型的智能识别技术

针对飞行器智能识别在复杂环境中面临的小样本学习效率低、场景泛化能力差及模型迭代周期长等挑战,未来将充分利用大模型强大的多模态特征提取能力,构建先进的飞行器多模态基座模型。该技术将显著提升飞行器的智能目标识别能力,为实现大气层内飞行器的远程高效投送和深空探测器的自主导航避障提供有力支撑,确保载荷精准到达区域或最佳轨道。

#### 3.2 基于海量数据的自适应强对抗智能制导技术

针对航天装备复杂多约束飞行、智能机动博弈对抗等任务需求,传统的规划和机动控制方法难以满足未来复杂战场强对抗和强适应的任务需求,基于海量数据的自适应强对抗智能制导技术,通过充分利用算力机能,引入动力学在线计算和验证思想,结合在线学习理论,创新制导控制算法的计算样式,实现对在线海量数据的计算制导,提升轨迹控制的适应性、对抗的自主性和灵活性,使装备更加智能化。

#### 3.3 基于数据驱动的端到端智能控制技术

针对新域新质类飞行器模型及干扰复杂,难以建立精确解析模型导致传统飞行控制方法不适用的问题,未来将重点发展基于数据驱动的端到端控制技术。通过对地面试验数据及历次飞行小样本数据的持续学习,迭代修正新域新质类飞行器模

型。同时通过大模型及数据分析技术,学习控制策略与控制性能间的映射关系,实时得到优化后的端到端控制策略,端到端智能控制技术的应用将促进飞行器控制系统不断改进与演化,实现飞行器控制范式的变革性提升。

#### 3.4 面向多任务需求的多智能体在线协同技术

多智能体在线协同技术将为复杂战场环境下的任务提供有力支撑,通过深度学习算法提取关键特征与规律,结合多智能体的自主决策能力,系统能够快速整合来自智能体和从智能体的探测信息,实现对障碍与干扰的精准感知与实时处理,为在线躲避决策提供更全面的信息依据,显著提升多智能体协同任务的效率与成功率。

#### 3.5 基于“软件工厂”的智能控制系统

传统的软件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“软件工厂”研制模式。在“一代硬件+N代软件”的架构下,系统可以在不改变硬件的前提下,通过软件升级实现功能扩展和性能提升;在需求输入、算法设计、协同开发和自动测试的软件开发交付全流程中,引入成熟化、智能化和自动化软件工具并进行集成,促进软件开发“流水线”适配和合理衔接;建立软件代码库和方案技术算法库,快速组装和配置不同任务所需的控制软件,解决重复开发、技术状态管理难和协同共用不畅的问题。这种敏捷开发模式使得航天控制系统能够更快地响应任务需求,提升整体效率。

## 4 总 结

本文围绕控制技术的发展历程,将控制学科发展分为3个阶段,梳理了航天智能控制“边飞边学”、“终身学习”和“新一代系统架构”等典型特征,围绕“智能赋能”、“机能增强”和“信能提升”3个方面梳理了航天智能控制的关键技术,最后,围绕大模型赋能、软件工厂等场景,对航天智能控制技术的发展进行了思考。

### 参 考 文 献

- [1] 禹春梅. 飞行器在线轨迹规划与制导控制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018. (YU Chunmei. Research on online trajectory planning and guidance control for aircraft [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.)

- [ 2 ] 余梦伦. 仿制 1059 实现中国现代火箭的起步[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(5): 1-3. (YU Menglun. Initiating of China modern rocket by imitating of 1059[J]. Missiles and Space Vehicles, 2010(5): 1-3. )
- [ 3 ] 梁思礼. 中国航天事业的回顾与展望[J]. 科技潮, 2008(10): 24-27. (LIANG Sili. Review and prospects of China's aerospace industry[J]. Science and Technology Trend, 2008(10): 24-27. )
- [ 4 ] 陈新民, 余梦伦. 迭代制导在运载火箭上的应用研究[J]. 宇航学报, 2003, 24(5): 484-489. (CHEN Xinmin, YU Menglun. Study of iterative guidance application to launch vehicles[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(5): 484-489. )
- [ 5 ] 宋征宇, 潘豪, 王聪, 等. 长征运载火箭飞行控制技术的发展[J]. 宇航学报, 2020, 41(7): 868-879. (SONG Zhengyu, PAN Hao, WANG Cong, et al. Development of flight control technology of Long March launch vehicles[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(7): 868-879. )
- [ 6 ] 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): 8-17. (BAO Weimin. Space intelligent control technology enables launch vehicle to “self-learning”[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 42(11): 8-17. )
- [ 7 ] 王国军, 陈松乔. 自动控制理论发展综述[J]. 微型机与应用, 2000(6): 4-7. (WANG Guojun, CHEN Songqiao. Overview of the development of automatic control theory[J]. Microcontrollers and Applications, 2000(6): 4-7. )
- [ 8 ] WIENDALL W S. The minimum-time thrust-vector control law in the Apollo lunar-module autopilot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1970, 3(1): 136-153.
- [ 9 ] 韩厚健. 长征系列运载火箭介绍: 长征一号系列(一)[J]. 中国航天, 1997(5): 28-30, 34. (HAN Houjian. Introduction to Long March launch vehicles: Long March 1 series (Part I)[J]. China Aerospace, 1997(5): 28-30, 34. )
- [ 10 ] BELLMAN R. Dynamic programming and a new formalism in the calculus of variations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1954, 40(4): 231-235.
- [ 11 ] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82D:35-45.
- [ 12 ] PONTRYAGIN L S, BOLTYANSKII V G, GAMKRELIDZE R V, et al. The mathematical theory of optimal processes[M]. New York: Interscience, 1962.
- [ 13 ] 吕楠, 郭建新, 肖帅, 等. 东方红系列通信卫星控制技术发展综述[J]. 空间控制技术与应用, 2024, 50(5): 1-16. (LYU Nan, GUO Jianxin, XIAO Shuai, et al. A review on development of control techniques for DFH-series communication satellites [J]. Aerospace Control and Application, 2024, 50(5): 1-16. )
- [ 14 ] 龙乐豪. 长征三号系列运载火箭[J]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 11-18, 111. (LONG Lehao. Long March 3 series launch vehicles [J]. Engineering Sciences, 1999, 1(1): 11-18+111. )
- [ 15 ] JEONG Y, BANG H. Mars precision landing guidance based on model predictive control approach [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(11): 2048-2062.
- [ 16 ] ACIKMESE B, PLOEN S R. Convex programming approach to powered descent guidance for Mars landing [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(5): 1353-1366.
- [ 17 ] 朱庆华, 王卫华, 刘付成, 等. “天问一号”火星探测环绕器导航制导与控制技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(1): 11-18. (ZHU Qinghua, WANG Weihua, LIU Fucheng, et al. Navigation, guidance and control technology of Mars exploration orbiter Tianwen-1[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(1): 11-18. )
- [ 18 ] VERMA V, MAIMONE M W, GAINES D M, et al. Autonomous robotics is driving Perseverance rover's progress on Mars[J]. Science Robotics, 2023, 8(80): eadi3099.
- [ 19 ] 郑卓, 禹春梅, 程晓明, 等. 运载火箭智能控制的能力特征与关键技术[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39(4): 52-57+93. (ZHENG Zhuo, YU Chunmei, CHENG Xiaoming, et al. Capability characteristics and key technologies for the intelligent control of launch vehicles [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2022, 39(4): 52-57+93. )
- [ 20 ] 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): 3-8. (MA Weihua, YU Chunmei, LU Kunfeng, et al. Guidance navigation and attitude control technology of “self-learning” launch vehicle[J]. Aerospace Control, 2020, 38(2): 3-8. )
- [ 21 ] 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. (MA Weihua, BAO Weimin, YU Chunmei, et al. Understanding of ‘aerospace intelligent control system’ [J]. Aerospace Control, 2019, 37(5): 3-8. )