

下一代智慧发射场发展研究

刘阳, 辛腾达, 同江

(北京特种工程设计研究院, 北京 100028)

摘要: 随着各类新型航天器、新型运载火箭的飞速发展, 新的发射方式和发射需求急剧增加, 智慧化、航班化发射成为必然, 下一代智慧发射场发展需求凸显。首先对国外航天发射场现状与特点、我国航天发射场现状与不足及发射场未来发展趋势进行了总结分析。根据目前我国发射场面临的形势, 从总体架构、发展原则、系统组成与功能3方面阐述了下一代智慧发射场的总体构想。并对下一代智慧发射场发展的主要关键技术进行了概述。最后, 对我国下一代智慧发射场发展目标与途径进行了分析总结。不仅为我国下一代智慧发射场发展指引了方向, 也为未来我国发射场的规划建设提供参考。

关键词: 智慧; 发射场; 建设; 发展; 构想

中图分类号: V551

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 02-0061-08

Research on the Development of the Next Generation Intelligent Launch Site

LIU Yang, XIN Tengda, TONG Jiang

(Special Engineering Design and Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: With the rapid development of all kinds of new spacecraft and launch vehicle, the new launch mode and launch demand have increased sharply. It becomes inevitable for the intelligent and flight-based space launch, and the development of next generation intelligent launch site has become a prominent demand. At first, the current situation and characteristics of the foreign space launch sites, the current situation and shortages of China's space launch sites and the future development trend are summarized and analyzed. According to the current situation of the launch site, the overall conception of the next generation of intelligent launch site is described from three aspects: overall architecture, development principles and system composition and function. It also summarizes the key technologies that need to be developed for next generation intelligent launch site. Finally, the development goals and approaches of China's current next-generation smart launch site is summarized and analyzed. It not only guided the direction for the development of the China's next generation intelligent launch site, but also provide a reference for the planning and construction of the launch site in the future.

Key words: Intelligent; Launch site; Construction; Development; Conception

收稿日期: 2022-10-15; 修订日期: 2023-02-24

基金项目: 国家部委专题研究课题 (2021-JSLL-004-B-T)

作者简介: 刘阳 (1973-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为航天运输体系总体。E-mail: yhzts@163.com

0 引言

航天发射场是我国航天强国建设的基础设施和重要支撑,随着新型智能化航天器、运载火箭的创新发展,对航天发射场的保障能力提出了严峻的挑战^[1-2]。世界各航天大国均围绕降成本、升效率、保安全的目标,在自动化、信息化和智能化等方面开展了广泛研究。目前,我国基本形成了“沿海内陆相结合、高低纬度相结合、各种射向范围相结合”的航天发射场布局,能够较好满足我国航天发射需求。但在高密度航天发射常态化形势下,工位限制、自动化程度低和参试人员多等问题越发凸显,发射场亟须长远规划下一代智慧发射场建设。

1 国内外航天发射场发展情况

1.1 俄罗斯发射场发展情况

受国土纬度位置限制,俄罗斯一直没有建造理想的大型航天发射场,唯一一个纬度位置相对较低的拜科努尔发射场由于苏联解体只能租用。为了降低对位于哈萨克斯坦境内的拜科努尔航天发射场的依赖,俄罗斯联邦政府和航天局最终于2007年选定在远东地区的阿穆尔州分3个阶段实施东方航天发射场建设,如图1所示。2017年,俄罗斯批准了《2017—2025年发展联邦目标计划》,旨在俄罗斯疆域内建立完善的航天基础设施。

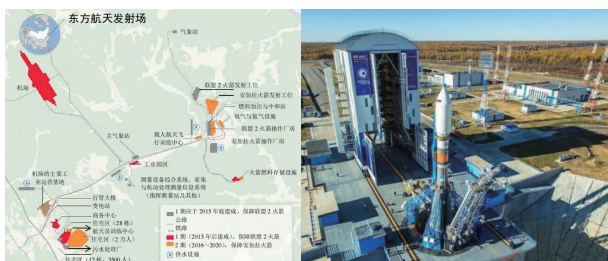


图1 东方航天发射场

Fig. 1 The eastern space launch site

俄罗斯发射场的主要特点如下:

1) 发射场技术先进,自动化程度较高。如天顶号运载火箭的发射与地面支持系统虽建成于1985年,但整个系统实现了较为先进的自动化。发射区的安装运输车、垂直度监测装置、发射台基座、箭地连接装置、空调系统、喷水降噪系统等均可采用自动控制或远程控制的方式来完成,

甚至发射台在射后还可以自动归位,以便进行下次发射,确保了发射操作运行经济、高效、安全和精确^[1]。

2) 广泛采用“三平”测发模式。从20世纪60年代起,苏联率先采用了水平整体组装、水平整体测试、水平整体运输和起竖的新模式。目前俄罗斯现役的主力运载火箭仍采用“三平”测发模式,发射流程较为简化。

3) 管理多元化,对外交流频繁。目前拜科努尔发射场是俄罗斯与其他航天大国广泛开展国际交流合作的重要平台。东方发射场在建设运营中引入了多元化机制,广泛吸引商业机构投资,建设集航天配套产业、发射服务和航天科普等功能在内的航天产业基地。

1.2 欧洲发射场发展情况

欧洲的航天发射场主要是圭亚那航天中心,位于南美洲北部、法属圭亚那大西洋海岸的库鲁地区。目前,ELA-3主要用于阿里安5火箭的发射,ELS主要用于发射联盟号运载火箭,ELA-1经改造后现用于发射织女号小型运载火箭,新建的ELA-4用于阿里安6火箭的发射^[2-3],如图2所示。



图2 ELA-4主要设施

Fig. 2 The main facility of the ELA-4

欧洲发射场的主要特点如下:

1) 测发模式和技术水平较为先进。圭亚那航天中心因地制宜,采取了多种测发模式完成火箭的测试发射。如阿里安5火箭采用了“三垂”测发模式,联盟号火箭采用了改进的“三平”测发模式,而织女号火箭则采用了“一平两垂”测发模式。同时,该中心也采用了大量自动化技术,如阿里安6火箭采用的箭地自动对接分离、低温机械臂、远程操控等技术,确保了发射操作的简单可靠。

2) 完全商业化运作。圭亚那航天中心大力发展商业化运营,通过简化流程、提高能力、降低

成本, 不断增强商业竞争力。

1.3 美国发射场发展情况

美国国家航空航天局 (NASA) 2020 年完成肯尼迪航天中心 LC-48 发射工位建设。该工位简化基础设施, 使用户节省大量费用, 并可供多个商业航天机构在此开展发射试验。美国 SpaceX 公司星舰试验基地位于美国德克萨斯州卡梅伦县的博卡奇卡海滩, 发射试验场区设施主要包括推进剂加注贮存区、测试发射区、返回着陆区、避雷塔、防爆墙等^[3]。发射试验场区采取了较为紧凑、简洁的布局设计, 发射区无导流槽, 试验设施间隔较小, 大多为露天设置, 如图 3 所示。



图 3 星舰试验基地

Fig. 3 The test site of the starship

美国发射场的主要特点如下^[4-5]:

1) 技术先进、自动化程度较高。美国的航天发射场在发射技术的研究与应用方面始终走在世界前列, 如大规模液氢加注技术、牵制释放技术、低温加注自动对接分离技术、喷水降噪技术等在美国航天发射场均有应用, 其自动化、信息化水平较高, 综合发射能力较强。

2) 测试发射模式多样化。由于美国运载火箭型谱较为复杂, 各型号运载火箭在发射场采用了不同的测试发射模式, 既有水平分级运输 (“一平两垂”) 的发射模式, 也有水平整体运输 (“三平”) 和垂直整体运输 (“三垂”) 的测发模式。其中 “三垂” 测发模式为肯尼迪航天中心首创。

3) 高度重视发射安全性。美国非常重视航天发射的安全性, 专门制定了《东西靶场安全规范》, 对发射活动中的安全性问题的识别分析、规避以及处置进行了详细的规定。现有的发射场大量采用自动化技术, 实现了射前操作的无人值守, 进一步提升了安全性。

1.4 我国发射场建设情况

经过 60 余年的发展, 我国已初步形成了布局相对合理、设施基本完善、功能较为齐全的发射

场格局, 具备了一定的航天发射规模和能力, 基本满足我国对航天发射的需求。

但发射场现状与我国日益增长的发射任务需求相比, 主要存在以下不足^[6]:

1) 发射场兼容适应能力弱。由于各型火箭技术状态差异大, 每个发射场只能满足固定一型或几型火箭测试发射, 测发控、地面保障等设备不通用, 不同型号和工位的箭地接口不兼容, 地面设备通用化、系列化、组合化水平整体较低, 面对新型号、新任务, 无法快速重构形成发射能力。

2) 测发周期及射后恢复时间长。受产品技术状态及成熟度影响, 火箭、卫星在发射场的测试发射流程复杂, 测试发射周期较长, 重复测试次数较多, 发射区占位时间较长, 发射区设施复杂, 射后损伤设备多, 状态恢复较慢。

3) 自动化、智能化水平较低。测试发射还处于人员密集型的工作模式, 大量工作还需要手动操作和人员现场值守, 自动化程度不高, 测试发射效率较低, 操作安全风险较高。发射场尽管逐步建立了各级指挥控制系统, 实现了远距离测试发射和设备状态监视等信息化应用, 但发射任务中的智能化应用, 如智能运维、智能决策、故障诊断等能力较弱。

1.5 未来发展趋势

根据国外主要航天大国和组织发射场的发展现状和后续建设规划来看, 未来航天发射场的主要发展方向可简要概括如下:

1) 测发模式向整体化方向发展。航天发射模式向整体运输发展, 不论是美国、欧洲采用的 “三垂” 模式, 还是俄罗斯采用的 “三平” 模式, 两类模式都增强了测试、运输的整体性, 减少状态变化和重复测试, 提高发射可靠性。

2) 测发设备向智能化和一体化方向发展。随着火箭和航天器采用整体总装、测试、运输的测发模式, 以及先进总线、虚拟仪器和云计算技术的应用, 火箭、航天器测发设备自动化和集成化程度不断提高, 推动测发设备向智能化和一体化方向发展。

3) 管理保障向标准化和集约化方向发展。为保证发射场长期可持续发展, 各国都在不断建立和完善发射场管理和技术标准, 加快标准化建设步伐。加强设备通用化、系列化、组合化建设, 提高互联、互通、互操作性, 向集约化发射场

迈进。

未来一段时期，航天工程新技术、新设备、新模式研发应用明显加快，载人航天、深空探测、星座组网等重大航天任务将全面展开实施，商业航天发射井喷式发展。新的任务形势呈现出技术新、要求高、保障难的特点，对我国发射场的综合能力和水平提出了更高要求。为不断适应新形势、新任务、新技术，提升发射安全性，提高发射效率，降低发射成本，亟须逐步推进下一代智慧航天发射场的发展。

2 智慧发射场发展构想

2.1 总体架构

智慧发射场是由物理环境、数智环境、运行平台、组织管理4个部分形成互联的体系，如图4所示，具备数智环路、物理环路、联合环路3类运行模式，通过网络化、智能化、数字化等手段，实现物理发射场与数智发射场的高效联动^[7]。从信息化进一步向数字化、智能化、数智化乃至智慧化的深度和广度拓展进化。

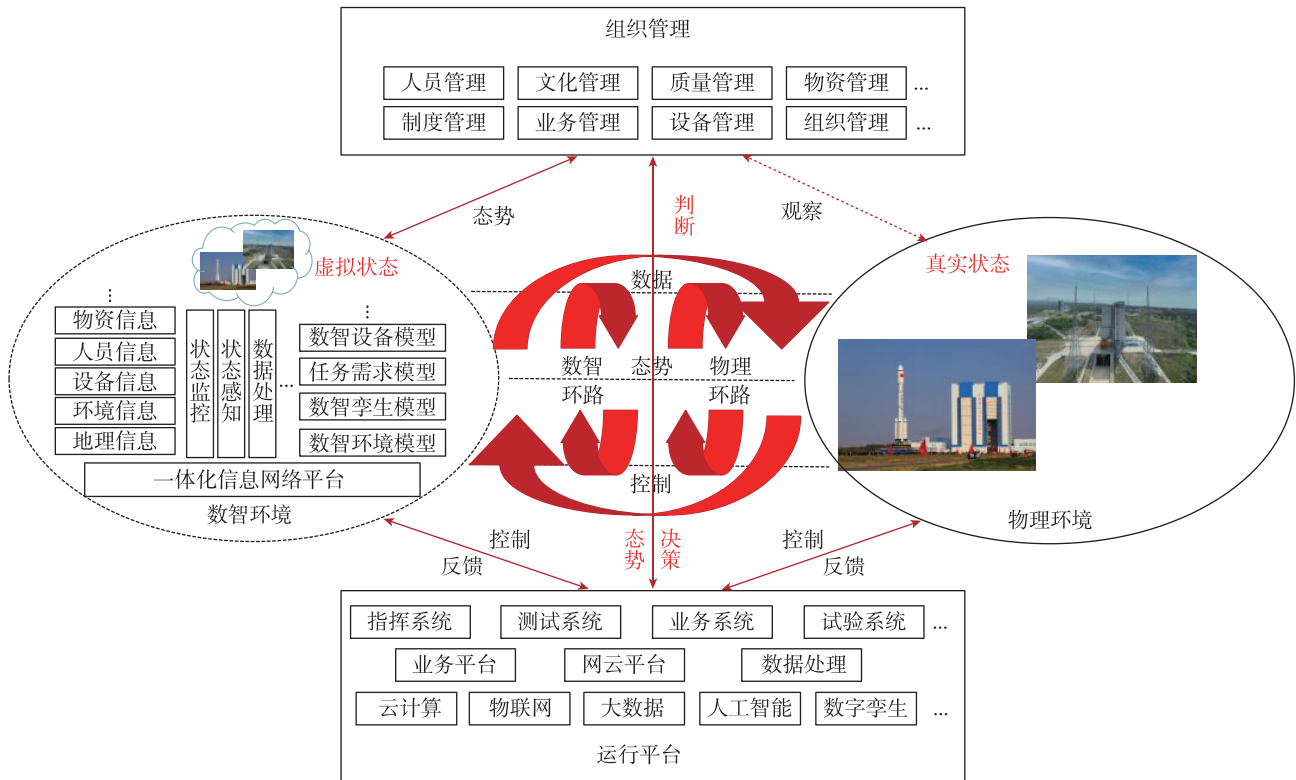


图4 智慧发射场总体架构
Fig. 4 The overall architecture of the intelligent launch site

2.2 发展原则

智慧发射场的基本原则是“能力牵引、统筹规划、突出重点、创新发展”。

2.2.1 能力牵引

转变单一依靠任务牵引的发展模式，发展形成任务和能力的双牵引机制；跟踪世界航天技术发展前沿，重点围绕航天重大专项工程任务需要和发射能力体系的整体提升，突出抓好一批战略性、前瞻性和基础性的关键技术攻关。

2.2.2 统筹规划

进一步加强发射场系统与测发技术发展的顶

层设计，统筹考虑当前与长远、需求与可能、研究与应用的关系，实现发射场发展与火箭等航天力量发展同步，与任务需求协调，力争“跟踪探索、跟上预研、同步研制、超前发展”。

2.2.3 突出重点

紧紧围绕解决制约发射能力整体提升的短线问题和关系发射场智慧化发展的重大问题，统筹开展设施设备、技术理论智慧化研究，重视新型发射系统的技术研究和体系建设。

2.2.4 创新发展

大力开展原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新，努力突破核心理论，掌握关键技术，

提升核心竞争力。同时,协调推进航天发射体制机制、组织协同、设备管理等创新发展,为发射场系统全面创新发展提供坚实基础。

2.3 系统组成与功能

智慧发射场主要由智慧技术区、智慧发射区、智慧回收系统、智慧指挥系统、智慧评估系统与

数智环境平台组成^[8-9],如图 5 所示。

2.3.1 智慧技术区

智慧技术区主要包括:

(1) 自动化产品装卸、组装

产品进场装卸、组装完全由自动化设施设备进行操作,组装完毕后自动转运至测试区域,在

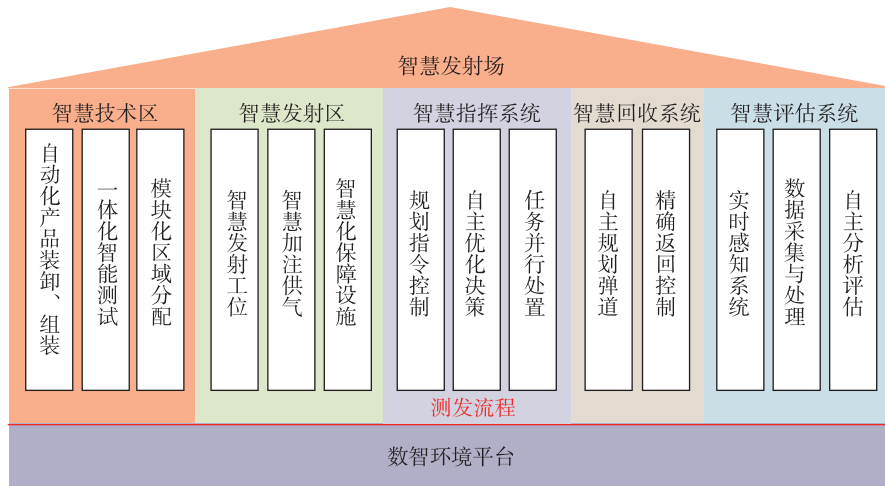


图 5 智慧发射场基本组成

Fig. 5 The basic components of the intelligent launch site

产品装卸、组装的过程中仅需要 1~2 人进行监控即可完成。

(2) 一体化智能测试

设置通用化测试接口、测试设备,适应各型火箭自主测试需求。以故障自诊断为基础,通过自主测试、自主评估、自主判断等手段,对数据进行对比分析、评估,具备地面射前一键化测试能力。

(3) 模块化区域分配

为有效提高测试发射效率,根据火箭、航天器的测试需求自主分配不同功能的工作区域,充分整合火箭、航天器测试需求,提供自动化、智能化测试设备。充分利用测试场地,实现从装卸、组装、测试、技术区加注、转运的智能化流水线式保障模式。

2.3.2 智慧发射区

智慧发射区主要包括:

(1) 智慧发射工位

与现有发射工位不同,智慧发射工位进行模块化、简易化设置,预留与智慧技术区一致的通用化测试、加注接口。利用无线传感技术,火箭也可实现无线测发控。同一发射工位可完全适用不同构型的火箭,采用新材料、新技术等手段,简化发射工位设施。

(2) 智慧加注供气

智慧加注供气可根据自主测试结果进行自主对接、加注、泄回等操作,加注接口可设置为可移动、多自由度的柔性装置,以满足不同型号火箭的加注供气需求。加注过程中具备自主监测及应急处置模式,在故障情况下可充分保障安全。

(3) 智慧保障设施

对推进剂、特种气体、供水、电、空调等保障设施设备进行智能化管理,根据火箭、航天器的保障需求,实现一键输入,自主分配保障资源的目标。设置智能传感器,监测发射区设施设备的实际状态,减少发射区设施设备不必要的射后检修与恢复。

2.3.3 智慧指挥系统

区别于以往的航天指挥系统,指挥人员在任务链最高层,通过网络实施控制,这个控制是指令控制,而不是具体操作。依据事先的规划指令和紧急情况下的应变指令,实现最优控制。根据任务需求及环境的感知,对飞行轨迹、航落区、应急安控等工作进行决策,达到飞行任务最优。

2.3.4 智慧回收系统

目前火箭飞行控制不具备飞行任务自主规划、

自主返回和自主诊断能力，残骸落区由规划的飞行弹道决定。随着火箭自主飞行控制技术的发展，实现在飞行过程中的自主故障检测、故障定位和故障隔离，飞行任务自主调整，提高飞行可靠性，一次性火箭残骸通过栅格舵、降落伞等精确控制技术实现火箭残骸的自主控制。可重复火箭实现火箭各子级的精确返回控制，返回后进行箭上设备自主健康状态评估，科学统筹可重复火箭返回需求，建设陆上、海上智慧化回收系统。

2.3.5 智慧评估系统

通过发射场布设传感器，实时感知设施设备的状态信息、环境信息等，形成大数据采集、传输、存储、管理体系。各智慧系统感知和处理所

获取的数据，利用知识库和专家系统对任务、设施设备和系统状态进行评估，对危险状态进行预警。参试人员可通过发射场三维全景虚拟系统感知发射场设施设备的状态，根据智慧评估系统给出的检修周期、剩余寿命，定期更换或维修，提高维修保障效率。

2.3.6 数智环境平台

遵循网络信息化体系“四化五层”环境平台架构，构建“以系统转型为目标，以任务应用为牵引，以模型数据为核心，以科技手段为支撑，以基础条件为保障”的布局合理、自主可控、高效顺畅的数智环境平台，平台结构如图6所示，能可靠支撑智慧发射场的建设。

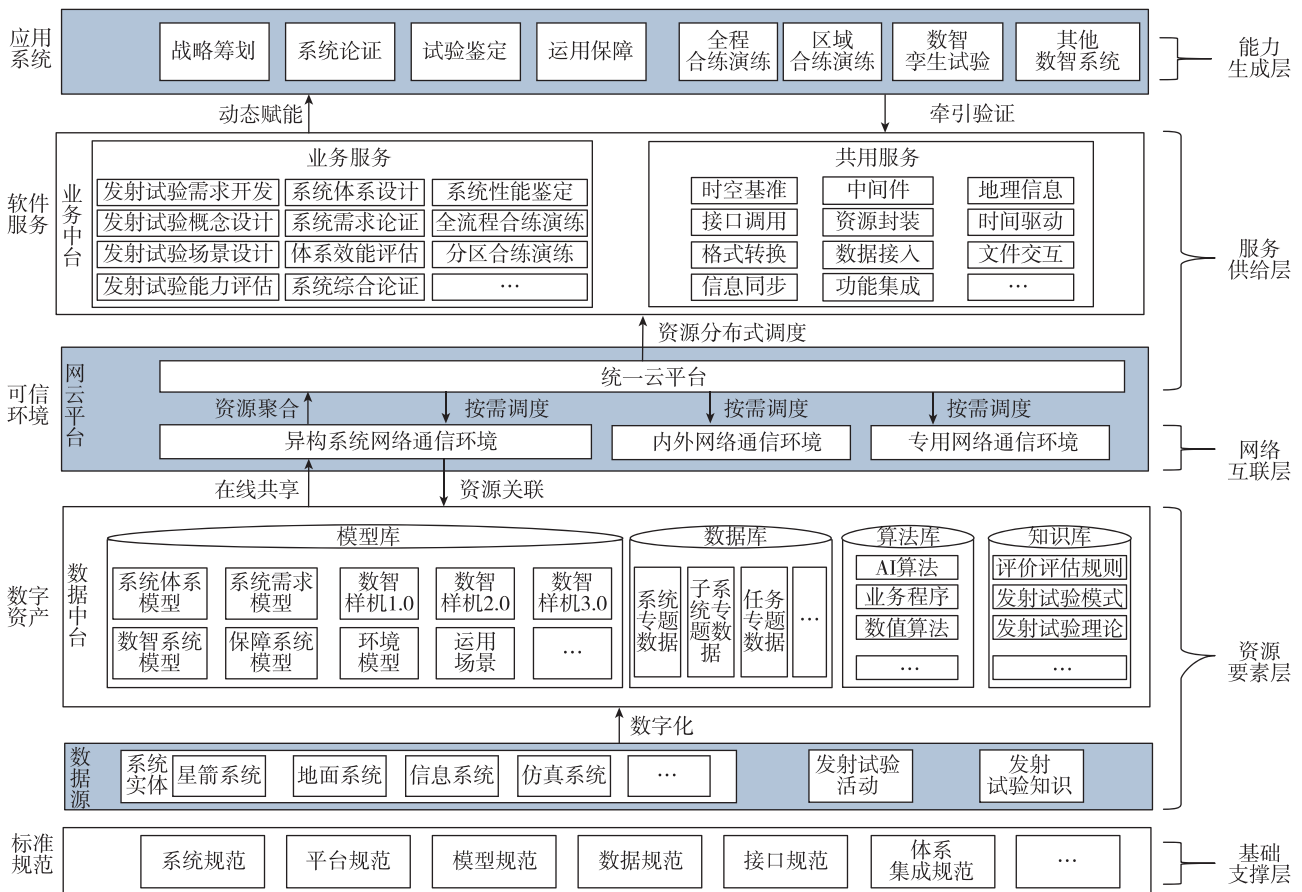


图6 智慧发射场数智环境平台结构

Fig. 6 The digital intelligence environment platform structure of the intelligent launch site

3 智慧发射场发展主要关键技术

3.1 超大流量低温自动加注技术

大型运载火箭低温加注规模大、技术难、要求高，严重制约发射场智慧化发展^[10]。亟须开展高热力学效力液化流程设计技术、大规模低温推

进剂精确加注与多模式控制技术、超大型液氢（液氧）增压技术及低温液体流动特性变化规律与自主推进剂加注技术^[11]等研究，实现发射区加注发射无人值守。

3.2 箭地一体化发射设计与优化技术

开展箭地一体化测试发射总体研究、箭地接口

指标可视化管理技术、箭地一体化测试设计与试验技术、箭地气液电接口一体化设计与验证技术等研究,推进实现发射区设施设备一体化、智能化,箭地接口统一实现自动脱落,解决箭地接口种类众多、脱落形式多样的问题,有效提高测试发射效率。

3.3 航天发射智能化保障技术

随着机器人技术、复杂网络技术和人工智能控制技术的不断成熟,开展基于智能控制的地面保障机器人集群研究,突破低温推进剂泄漏智能识别、巡检,发射场智能操作机械臂研制,基于云服务器的远程数据交互等技术,大量减少场区保障人员,提高人因可靠性,实现测试、加注、供气等勤务保障工作满足航天发射智能化保障要求。

3.4 智能化快速测发控技术

开展紧凑型测控功能优化配置技术、总线窃听信息监控技术、模型和数据驱动的地面实时测试信息处理与故障定位技术等研究。实现智能人机界面设计、全过程数据处理与闭环分析、实时数据判读、状态检测与故障定位能力,实现一键测发控、快速、智能数据判读、全自动测发流程,推动测试发射由信息化向智慧化发展^[12-13]。

3.5 天地协同高性能人工智能计算技术

发射场云端,研制基于国产芯片的分区多态架构的专用服务器,可处理全系统的人工智能流程;研制高性能人工智能计算平台,构建关键模型、编程框架、核心架构、处理芯片的自主生态,智能软件与智能硬件的协同模式。运载火箭端,研制基于国产芯片和智能加速卡的智能计算系统,支持感知、学习、决策、推理 4 类智能,实现对控制环路的有效加速^[14]。

3.6 3 残骸落区自主可控技术

开展火箭残骸自主可控降落技术、无动力气动控制技术、天基/地基测量观测技术、故障模式自主航迹规划优化技术等研究^[15],形成残骸精准控制能力、落点实时精准预报能力,推动航天发射向高安全、高智慧化发展。

3.7 数字化发射场技术

通过应用虚拟现实 VR、增强现实 AR 等技术,构建数字发射场,实现火箭、航天器与发射场系统接口、操作、测发流程的快速设计、仿真、试验,甚至替代部分实物合练,节省任务周期和费用,提高发射场测发效率。

4 智慧发射场发展目标与途径

4.1 发展目标

以建设测试简易化、设施模块化、保障智能化、发射集成化的智慧发射场为发展目标^[15-16],不断提升发射安全,降低发射成本,提高发射效率,长远推进世界一流先进航天发射系统建设。

4.1.1 测试简易化

建立火箭全程在线健康状态监测系统,对火箭出厂后运输、进场、装配、转运、发射全程健康状态进行在线监测,实现火箭无故障不测试;对测发控系统进行统型,建立通用火箭测发控平台,推进卫星测试流程标准化;实现技术区只进行加装火工品、充气、姿控和卫星加注等,发射区进行地面箭地接口连接、火箭加注、发射,达到测试操作流程的极简化的。

4.1.2 设施模块化

简化发射设施,推进无塔发射,并通过模块化装配构筑物等措施,实现技术区厂房设施的组合化、弹性化构建,通过轻量化导流模块、地形自适应转运发射车等手段,实现发射区设施的重组重构。

4.1.3 保障智能化

通过智能综合态势感知、智能运输对接系统、加注机器人等研制,实现火箭对接、装配、组装、测试、加注等自动化;综合运用物联网、大数据、机器学习等技术,建立智慧发射场设施设备,实现发射区无人值守,发射任务和设施设备的智能化管控与运维等^[17]。

4.1.4 发射集成化

全面实现一个工位、一套系统、一体测发,大数据、云计算等先进智能技术得到广泛应用。实现箭地接口更加优化、规范,测发控系统更加先进,通用化程度不断提高。通过发射一体化、集成化设计,研制集起竖、转运、发射台功能一体的集成化设备和快速大流量并行自动加注系统等,实现火箭快速发射。

4.2 发展途径

智慧发射场遵循“能力牵引、统筹规划、突出重点、创新发展”等原则,利用“航天发射场+智慧”“智慧航天发射场+”及“数智孪生发射+”等模式,全面提升发射场系统的信息化和智能化水平,有效提高航天测试发射效率。

1) “航天发射场+智慧”模式。在现有发射场

基础上,保证满足现有发射任务需求的前提下,通过充分应用物联网、云计算、大数据、新材料为代表的新技术,对现有发射场设施设备逐步进行智能化改造建设,着力提升发射综合能力与智慧化水平。

2)“智慧航天发射场+”模式。加强顶层设计,制定智慧发射场建设策略与路线图,以技术路线图规划未来一段时期内的智慧发射场关键技术发展。在总体规划论证阶段,即对发射场布局、发射场设施设备进行智慧化规划、设计与构建,高起点、高标准建设。

3)“数智孪生发射+”模式。重大航天工程建设数智孪生航天发射,在论证阶段完成重大工程运载火箭、航天器的全流程全链路的系统接口匹配地面验证与飞行数智验证,强化航天工程的一体化设计验证和工程早期与中期效果评估。以重大航天工程运载火箭及航天器的智慧化发展为牵引,推动发射场的智慧化建设。

5 结论

本文通过对国外主要航天发射场的现状与特点、国内发射场现状和不足及未来发射场发展趋势进行概述分析。针对目前面临的实际形势,从发展构想、关键技术、发展目标与途径等方面,对下一代智慧发射场发展进行了探究。由于高密度航天发射任务实施及各型号火箭专用设备限制等因素的制约,智慧发射场的规划建设仍存在诸多问题。后续,将进一步细化梳理论证总体布局、关键技术、建设规划,制定清晰的发展路线图,逐步推进下一代智慧发射场的创新发展。

参考文献

- [1] 周凤广.世界航天发射场系统[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [2] CNES. LA SILHOUETTE D'ARIANE 6 PREND FORME SUR L'ELA-4 [EB/OL]. [2022-09-08] <https://cnes.fr/fr/lanceurs-la-silhouette-dariane-6-prend-forme-sur-lela-4>.
- [3] CNES. ESSAIS CONCLUANTS POUR LES BRAS ET LES CAISSONS MANG [EB/OL]. [2022-02-03] <https://ariane6.cnes.fr/fr/lanceurs-essais-concluants-pour-les-bras-et-les-caissons-mang>.
- [4] NASA. NASA technology roadmaps TA 13:ground and launch systems [EB/OL]. [2022-03-24] <https://www.nasa.gov/offices/oct/home/roadmaps/index.html>.
- [5] NASA. 2020 NASA Technology Taxonomy TX13:Ground, Test, and Surface Systems[EB/OL]. [2022-03-24] <https://www.nasa.gov/offices/oct/taxonomy/index.html>.
- [6] 肖建军,董二奎.我国航天发射场面临的形势与未来发展探讨[J].中国航天,2015(6):11-17.
- [7] 同江,刘阳,刘鹰,等.下一代航天发射系统体系架构研究[J].导弹与航天运载技术,2020(6):74-77.
- [8] 肖力田,李梦源,王飞,等.智能发射场地面与发射系统层次体系模型设计[C].中国宇航学会发射工程与地面设备专业委员会2018学术交流会,2018.
- [9] 肖力田.智慧火箭发射场系统构建与技术发展研究[C].第一届航天工程论坛,2018.
- [10] 宋征宇,吴义田,徐珊妹,等.长征八号:长征火箭系列商业化与智慧化的先行者[J].深空探测学报(中英文),2021,8(1):3-16.
- [11] Medina J A T, Wilkins K N, Walker M, et al. Autonomous operations system: development and application [C]. Annual Conference of the PHM Society,2016.
- [12] 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.
- [13] 张青松,刘巧珍,王晓林,等.低温火箭自主故障诊断和发射控制[J].计算机测量与控制,2020,28(2):1-9,32.
- [14] 李洪.智慧火箭发展路线思考[J].宇航总体技术,2017,1(1):1-7.
- [15] 宋征宇,王聪,巩庆海.运载火箭上升段推力下降故障的自主轨迹规划方法[J].中国科学:信息科学,2019,49(11):1472-1487.
- [16] 李孟源,肖力田.发射场地面设备控制系统新型智能冗余技术[J].西北工业大学学报,2019,37(S1):80-87.
- [17] Xiao L T, Li M Y, Xiao N. A test process model and optimization framework based on network schedule[C]. Proceedings of the 2018 International Conference on Computer Science, Electronics and Communication Engineering (CSECE 2018). Sanya, China. Paris, France: Atlantis Press, 2018.

引用格式:刘阳,辛腾达,同江.下一代智慧发射场发展研究[J].宇航总体技术,2023,7(2):61-68.

Citation: Liu Y, Xin T D, Tong J. Research on the development of the next generation intelligent launch site [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023,7(2):61-68.