

中国航天发射场航班化发射能力提升策略研究

苗岩松, 侯 华, 吴海龙
(太原卫星发射中心, 太原, 030032)

摘要: 航班化发射能力是未来航天发射场必须具备的能力之一, 是衡量航天发射场发射能力的重要指标。针对航天发射场提升航班化发射能力所面临的顶层规划短板、基础设施压力大、亟需技术升级和管理安全风险4个方面的挑战, 从体系架构、整体布局、运营模式、火箭型谱、测发技术等方面全方位分析并提出了10条应对策略, 为航天发射场提升航班化发射能力提供借鉴。

关键词: 航班化; 航天发射场; 发射能力; 挑战; 应对策略

中图分类号: V554 文献标识码: A

Research on the Strategy of Launch Capability Improvement of Airline-flight-mode Based Space Launch Site in China

MIAO Yansong, HOU Hua, WU Hailong
(Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan, 030032)

Abstract: The airline-flight-mode launch capability is essential for future spaceports and a key indicator of their space launch capacity. Spaceports face challenges in improving this capability. These challenges include a lack of top-level planning, infrastructure pressure, an urgent need for technology upgrades, and management and safety risks. To tackle these issues, this analysis proposes ten countermeasures. These strategies cover system architecture, overall layout, operation modes, rocket families, and testing and launch technologies. They provide valuable guidance for spaceports to enhance their airline-flight-mode launch capability.

Keywords: airline-flight-mode; space launch sites; launch capability; challenges; coping strategies

0 引言

航天科学技术迅猛发展, 世界各国加速对太空进行探索、开发与利用, 航天发射活动呈现爆发式增长态势, 太空领域竞争日趋激烈。尤其近年, 新型航天器、运载火箭发射需求急剧增加, 在此背景下“航班化航天运输系统”的理念被提出与论证, 未来航天发射可以像飞机一样实现航班化运营, 具备常态化、高频次、经济性等基本特质, 支撑全球1 h速达、自由进出太空、常态化开发空间资源等长远目标^[1-3]。

航天发射场作为航班化航天运输系统的重要基础, 必须提高发射场地面设施设备的“三化”(模块化、标准化、智能化)水平, 持续提升发射安全性、降低发射成本、提高发射效率, 实现测试简易化、保障智能化和发射集成化, 逐步推进先进航天发射系统工程建设, 最终实现运载火箭航班化发射。

1 国外航天发射场的现状分析

1.1 美国航天发射场

美国航天发射场形成了以肯尼迪航天中心(含卡纳维拉尔角太空军基地)和范登堡空军基地为核心的双基地格局, 辅以商业航天企业设施(包括蓝色起源发射场、SpaceX Starbase等)多场协同, 商业与军事并重, 不仅覆盖不同轨道要求, 能够实现全球快速响应, 而且主导着全球航天发射市场^[4]。

美国在发射场、发射工位数量方面均处于世界领先地位, 并且在发射场选址、射向、发射轨道、航落区安全等方面也比较完善^[5]。如肯尼迪航天中心作为美国最大的航天发射基地, 承担地球同步轨道卫星、深空探测任务及SpaceX猎鹰9号/星舰发射, 是全球最忙的发射场, 仅在2024年就完成了93次发射(累计220次), 单日最高执行3次发射。在发射场测发模式上, 美国已采用“三垂”模式(垂直总装、垂直测

试、垂直转运)多年,具有很高的技术水平^[5],近年来在“三平”模式(水平总装、水平测试、水平转运)上也有突破。

美国运载火箭型谱秉持传统巨头与创新企业并行理念,传统主力型号、重型火箭和新型火箭多点用力,体现出覆盖范围广、技术先进多样和应用领域丰富等特点。为适应其型谱特点,美国航天发射场具备了以下能力:

a) 设施多样化方面。

美国的发射场不仅能够满足不同类型运载火箭的装配、测试和发射需求,而且可满足不同轨道倾角、不同载荷类型的要求。

b) 火箭类型适应性方面。

不仅对传统的一次性使用火箭有成熟的发射流程和配套设施,而且对可回收火箭配套有支持回收测控、着陆的设施,能够实现灵活发射。

c) 保障体系方面。

在发射场周边建设有完善的能够实现推进剂贮存、运输,火箭部件存储、维护的设施,可满足不同规模、不同类型火箭发射所需的保障服务需求。

综合来看,美国航天发射场发射频次高、技术成熟可靠、设备先进完善,能够满足不同类型火箭和任务的需求。此外,美国商业航天公司众多,竞争合作机制成熟,推动了发射场运营模式创新,更使其整体模式趋向航班化。

1.2 俄罗斯航天发射场

俄罗斯航天发射场形成了以普列谢茨克发射场为核心、东方发射场为新兴力量、拜科努尔发射场为补充的三元格局,发射能力整体呈现“军用主导、民用追赶”特征。

在发射场测发模式上,俄罗斯采用的“三平”测发模式经过了长期实践检验,技术已经相当成熟稳定,能够保障火箭发射的可靠性。另外,俄罗斯为确保其航天实力,近年来不断进行发射场设施升级,以满足高精度、高可靠发射需求;不断创新发射、测控技术,以满足快速组装、快速发射的需求。

当前,俄罗斯航天发射场正处于新旧交替阶段,传统发射场设施老化,智能化、自动化水平落后于美国,技术停滞的问题突出,再加上俄乌冲突等带来的社会经济压力使得俄罗斯在航天预算方面显得捉襟见肘。技术升级、成本控制和地缘博弈促使俄罗斯必须积极寻找对策,以应对同中美两国的双重竞争。

综合来看,俄罗斯发射场数量领先,但区位优势

明显^[5],尽管在发射频次上远低于美国,但也能够稳定完成各类航天任务。同时,作为老牌航天大国,其技术基础雄厚,拥有成熟的火箭技术和丰富的发射经验,这为其适应航班化发射需求提供了一定的支撑。但也应看到,俄罗斯面临的经济和国际环境压力,严重制约了其在航班化发射方面的进程。

1.3 欧洲国家航天发射场

欧洲拥有数量少但区位优势明显的发射场,即法属圭亚那航天中心,包括第一、第二、第三发射场,赤道发射优势明显。

欧洲国家拥有多种类型和用途的运载火箭,主要包括了阿丽亚娜系列、织女星系列等。在测试发射技术上能够博采众长,针对不同系列火箭采用不同的测试发射模式,具有一定的灵活性;另外,欧洲各航天发射场也在不断进行技术升级和设施改进,在技术设施共享基础上,广泛与各国开展在航天领域的合作和交流,保障欧洲航天发射需求。

综合来看,随着阿丽亚娜火箭的退役,大型火箭空缺严重影响了欧洲大型载荷的航班化发射,同时小型火箭研发受挫和多国合作协调难度大,都严重影响其在适应航班化发射的快速响应和高速运营方面的发展。

1.4 先进发射场能力分析

美国在航天发射领域一直处于世界领先地位,拥有丰富的发射经验和先进的技术,本节重点以美国航天发射场为例进行分析。

1.4.1 系统架构协同性布局

a) 地理维度优化。

美国航天发射场整体布局在地理纬度与轨道适配方面基本实现精准匹配。比如以卡纳维拉尔角/肯尼迪航天中心为代表的低纬度发射集群,依靠北纬 28° (卡纳维拉尔角)的地理优势,可借助地球自转初速度使运载火箭节省 $15\% \sim 20\%$ 的燃料,进而提升有效载荷质量;范登堡空军基地位于北纬 32° ,在此可以实现高倾角发射($82^{\circ} \sim 108^{\circ}$),载荷直接进入太阳同步轨道,无需多次变轨,节省燃料 30% 以上。

b) 功能模块集成。

截至目前,美国航天发射场基本形成了模块化功能区的协同网络,比如垂直整合发射复合体——博卡奇卡专用发射场,在仅 40 km^2 的园区内就集成了火箭制造、燃料生产、发射平台与回收设施,实现“制造-加注-发射-回收”闭环,使得猎鹰9号发射周期从3个月缩短至21天,复用火箭燃料贮箱周转时间从45

天缩短至72小时；佛罗里达-卡纳维拉尔角集群实现区域资源共享，在该区域的液氢/液氧生产厂、轨道运输系统及测控网络实现了共享。

c) 物流网络智能。

美国航天发射场的物流和供应链体系建设完备，实现了自动化、数字化和网络化的深度集成。例如SpaceX Transporter Roadster的自动驾驶运输网络可以使一级箭体从制造厂到发射平台的运输时间由72 h缩短至12 h，人工干预风险减少了70%；SpaceX Starship工厂建立了智能货架系统，采用多层穿梭车货架，存储密度达10 t/m³，配合射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)标签和AI视觉识别，拣货准确率达99.99%，人工成本降低80%。

1.4.2 发射平台适应性设计

a) 模块化。

发射平台采用标准化分段预制钢结构，钢梁/柱采用标准截面便于公路运输，“搭积木”式快速组装大幅缩短平台建造速度，不仅支持火箭快速迭代测试周期，而且还支持发射平台快速改造。

b) 兼容性。

发射平台利用形状记忆自适应夹持器，夹持力可在2 000 t范围内无级可调，兼容不同直径、不同质量的火箭，实现发射任务快速适配的同时，辅助完成火箭垂直组装测试、射前姿态校准和燃料加注；或者利用液压折叠臂，亦可适配其他不同直径的火箭。

c) 一体化。

发射平台采用快速断开装置，而不再安装摆臂，可满足火箭发射前后箭地气、液、电连接需求，使平台功能更加紧凑，实现射前快速分离而不造成燃烧室压力波动；台体框架与起竖臂集成，便于火箭起竖后整体落在导流槽入口承力结构上，简化火箭和发射平台对接操作；夹持机械臂具备起升、回转、平移功能，兼顾火箭吊装和回收捕捉功能，同时满足箭地气、液、电连接管线支撑需要^[6]。

d) 高效率。

高效导流槽和冷却机制双管齐下，一方面采用FireX抑爆系统和冷却气体回收系统，减少发射平台下方液氧积累，另一方面取消传统导流槽，采用水冷式钢制防爆平面，加速助推器火焰羽流导出，有效吸收热能和声能，降温降噪，保护火箭、发射台及地面设施安全。

1.4.3 燃料供应系统安全快速设计

a) 高安全性。

通过配备2 000余个高精度传感器，采用多层复合型泄漏检测技术、毫秒级紧急切断与处置技术，实时检测燃料管道和储罐压力，紧急情况下可手动/自动双重切断燃料供给。

b) 高效性。

采用自动燃料加注车搭载激光雷达与机器视觉、数字孪生预加注校准、氢气加压循环和自适应燃料混合等多项技术，实现无人干预下燃料舱的精准对接，大幅缩短加注准备时间，提高加注效率；通过“低温过冷、并行大流量”加注方式，单个液氧过冷器过冷后的流量可达7 036 L/min，过冷温度66 K。

c) 多功能性。

采用多层绝热材料制成通用储罐，兼容液氢、液氧、液态甲烷等多种燃料，使储罐复用率达到95%，单次加注后清洁时间从8 h压缩至2 h；通过设计快速转换接口系统，采用模块化快拆接口，30 min内完成液氧/液氢与液氧/甲烷燃料系统间的切换。

2 航班化带给航天发射场的挑战

据公开数据统计，2024年，全球运载火箭共计完成265次发射，其中，美国147次，中国68次；全球共发射了2 795颗航天器，其中美国2 370颗，中国257颗。以入轨载荷质量计算，2024年入轨载荷质量大约2 085 t，其中美国约为1 786 t，中国大约为202 t。可以看出中国目前的航天发射能力仍与美国存在较大差距。

2.1 顶层规划短板

a) 地理布局不均。

中国航天发射场整体布局区域高度集中，导致极地/太阳同步轨道发射窗口不足（缺失类似阿拉斯加式高纬度发射场），缺少海洋资源探测和国际商业发射等大规模订单的支撑，灵活性受限。

b) 任务适配不足。

中国航天发射场能够实现长征系列火箭的全覆盖以及新型火箭的快速适配，但是重型火箭工位缺失、复用火箭回收场空白和商业航天工位不足严重制约任务的适配性。

c) 全流程未形成体系。

中国航天发射场未涉及火箭生产和回收以及回收后的运输、检测维护、状态恢复、复用准备等，相应基础设施设备缺乏，从火箭生产、进场测试、加注、发射到回收整链路全流程未形成集中闭环，距离高密度、快响应、航班化测试发射任务组织要求还有很大差距。

d) 国际接轨不足。

国内航天发射场的快速释放装置 (Quick Release Device, QRD) 未采用 NASA 的 QD 标准, 接口兼容性不足导致国际合作发射需定制接口, 另外中国发射场未通过 FAA 或欧空局的认证, 导致无法承接国际商业火箭发射订单。

2.2 基础设施压力

a) 发射工位数量有限。

中国发射场固定发射工位, 每个工位需经历“火箭转运-竖立-加注-发射-射后恢复”的完整周期, 且周期内各环节必须按固定顺序执行, 无法支持多任务并行开展, 导致年发射次数严重受限。

b) 箭地接口标准不统一。

目前中国火箭型谱庞大, 主要包括常规动力的一次使用火箭 (主要采用四氧化二氮/偏二甲肼等肼类有毒推进剂) 和新型动力的一次使用火箭 (主要采用液氧煤油、液氢液氧、液氧甲烷或先进固体动力等无毒推进剂), 各型号发射模式单一, 对发射场要求不统一, 箭地接口不统一, 造成发射场地面发射支持设备技术和状态复杂, 状态转换和维护修复工作量大。因此, 集成箭地接口, 有效简化发射区设施势在必行。

c) 推进剂加注及周转效率低。

液氧、液氢等低温燃料的加注要求“预冷管道+缓慢加注”, 加注耗时长, 且加注后发射窗口时长受限, 无法适应“快速发射+弹性待命”的航班化发射要求; 同时, 超低温燃料的储存、运输技术难度大, 成本高, 发射场燃料的自主化生产、供应链完善更值得期待, 与新型燃料适配的环保燃料储存与加注设备亟需投入使用^[7]。

2.3 亟需技术升级

a) 不可复用的单线程流程需优化。

发射场火箭测试发射传统流程一般是“串行模式”, 即同一工位需完成当前火箭测试发射后才能服务下一枚火箭。面对航班化的高频次发射需求, 工位占用率将很可能超过 90%, 此种条件下, 发射场或将面临无冗余设施应对意外推迟状况, 发射场任一环节工作的滞后都可能造成整体发射效率的降低, 因此亟需优化发射场测试发射模式与工艺流程, 精简操作项目和操作流程, 有效借鉴“脉动生产线”理念。

b) 测试周期需缩短。

按照航班化要求火箭“即插即用”的理念, 目前中国运载火箭在发射场测试发射周期长, 距离航班化

要求差距明显。

c) 周转时间需压缩。

正如 SpaceX 提出的“向航空级周转效率逼近, 周期压缩至 7 日以内”目标 (目前 SpaceX 猎鹰 9 号最短周转记录为 21 天), 为匹配航班化要求, 需突破火箭回收检测、燃料加注、发射平台复位等环节的快速周转技术极限。

d) 智能辅助需突破。

航班化势必带来快速周转, 要求发射场在检测覆盖率、测试效率、结果准确性, 以及过程有效性之间取得突破, 诸如无人化测控、AI 辅助故障诊断等“自动化系统”将被深入挖潜, 从而避免因压缩周期导致的故障率上升。

2.4 管理安全风险

a) 任务调度复杂性剧增。

航班化条件下, 势必会将发射计划由传统的以月/周/日为单位制定变为以小时计动态调整, 动态窗口冲突不可避免; 另外, 国家、商业公司甚至国际合作等多主体介入, 共用一个发射场时利益诉求差异带来的优先级冲突产生的多主体协同难题也会增加发射任务的复杂性。

b) 管理理念转变压力较大。

传统航天发射要求“100%可靠”, 但在航班化的“多、快、好、省”节奏驱动下, 很可能要求发射场接受“99%可靠+快速修复”的航空理念, 这与“严、细、慎、实”的标准相矛盾, 如何在继承保持基础上创新转变, 必须深思熟虑, 谨慎分析。

3 发射场应对策略思考

针对航班化带给航天发射场的 4 个方面的挑战, 提出了 10 条应对策略, 具体对应关系如图 1 所示。

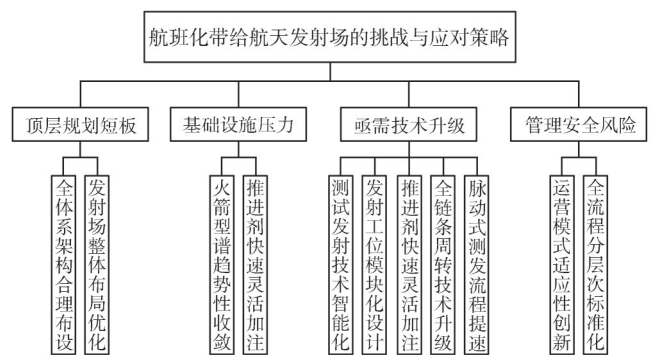


图 1 航班化带给航天发射场的挑战与应对策略对应关系

Fig.1 Relationship of the challenges and countermeasures brought to space launch complexes by airline-flight-mode

3.1 全体系架构合理布设

航班化背景下“高度集成化、模块化、智能化”的航天任务综合体模式——“六厂合一”（总装厂、制造厂、发射场、回收场、维修厂、试验场）是未来发射场体系架构的发展趋势。首先是基于功能整合，将火箭总装、卫星制造、测试发射、回收维修等功能区集中布局，减少转运距离和时间；其次采用可扩展架构，将各功能区模块化，从而可以根据任务需求快速调整和配置；最后还可以结合数字孪生和AI技术，实现各功能区间流程监控、资源配置、协同并行的智能化管理模式^[8]。

3.2 发射场整体布局优化

针对航班化发射需求，中国航天发射年入轨质量将大幅增长，随之而来的则是因运载火箭技术、能力的发展而带来的火箭型谱发展。为实现快速、规模化进入太空，缩小与美国在太空领域的差距，发射场以国家航天港发展建设为目标，配套建设发射工位、科学合理优化工位设置，形成集技术厂房、发射工位和子级回收场为一体的核心发射区（重型工位）+快速响应带（小型工位）+回收复用带（一级火箭着陆场+检测厂房）+商业配套带（卫星总装+载荷测试+数据服务中心）的“一核三带”布局（适应三平/准三平测发模式），满足覆盖小型固体火箭至大型液体火箭+固体/液体、低温/常温的型谱适配性需要，实现单发射场至少3~5枚火箭同步并行准备、各工位协同使用的目标。

3.3 运营模式适应性创新

发射场运营模式创新的核心在于必须从原来的“长周期、定制化”的传统模式中走出来，逐步向“敏捷化、标准化、平台化”转型。首先迫切需要构建“航班式”的标准化流程体系，比如任务流程模块化，可将发射任务拆分为载荷适配、火箭加注、发射窗口规划、测控响应等标准化模块，实现火箭快速组装、发射平台零周期复用等，从而缩短准备周期；引入全周期数字化管理方法，可以通过数字孪生技术模拟发射流程，预测测试发射过程中的风险节点。其次可以打造共享化基础设施平台，即类似“资源池化”运营模式，由独占式变成共享式，通过采用物理层标准化改造、虚拟化资源调度等方法将发射平台、燃料库、测控资源等设施融入“共享资源池”，吸纳“拼车发射”“分时租赁商业模式”等理念，通过“拼车发射标准化套餐”、资源闲置期利用等策略，降低单次发射的运营成本，缩短工位切换时间、增强多任务

并行能力。同时，积极推进商业化合作模式，树立“运营商-客户”理念，增强服务意识的自觉性，例如以提供“订购制服务”为亮点吸引中小客户，满足用户对低轨卫星星座批量部署需求，联合火箭研制生产方、卫星公司及数据服务商打造一站式生态链整合方案，提高发射场同客户间的契合度。

3.4 火箭型谱趋势性收敛

为适应航班化航天发展趋势，火箭必须通过优化设计，提升研发效率、降低制造成本、增强可靠性，尤其在商业航天快速发展的背景下，型谱收敛已成为提升竞争力的关键策略。中国火箭型谱规划势必贯彻通用化、系列化和组合化思想，大幅压减火箭型号、直径、构型等，并兼顾新型一次使用火箭和可重复使用智能化火箭，型谱整体需呈现出以简化与优化、模块化与通用化、小型化与商业化为基本特点的收敛趋势。国家发射场只有通过布局优化、能力提升、技术创新，全力支持中国型谱收敛发展，实现箭地接口标准化、规范化，再以商业发射场为补充，才能为中国航天强国建设提供坚实基础^[9]。

3.5 测试发射技术智能化

面对航班化发射需求，发射场必须突破传统人机协同模式，通过智能化、自主化技术重构测试发射流程，实现从火箭测试、转运、加注到点火发射的全流程无人值守愿景^[10]。构建无人值守系统，测试中通过部署机器人、智能传感器、高精度执行机构等，完成火箭电气检查工作；加注过程中通过智能视觉识别，自动校准流量；发射时基于5G甚至6G网络实现边缘节点信息采集计算与指挥中心（人工或AI技术）指挥箭载计算机的实时交互，再基于专家知识系统、AI融合数字孪生等技术的全箭健康监测系统，完成指令信息上传下达、自动化检测及无人点火控制等功能。

3.6 发射工位模块化设计

发射工位模块化作为应对航班化的核心基础设施革新，基本思想是“可替换组件+标准接口”，从而实现多型号任务快速切换。通过采用分体式结构、轨道滑移系统、标准化接口、智能自检测系统等技术，适配不同火箭型号（如液氧甲烷、可重复使用火箭等）^[11]。其中分体式结构是将发射工位拆分为导流槽、发射台、支撑臂、燃料口等独立模块单元，实现快速切换以适应不同类型火箭目标，如设计可配置支撑系统，采用“通用支撑臂+定制适配环”技术，同一工位可适配不同直径运载火箭；发射台轨道滑移系

统是在发射台底座预埋转向轨道,通过电动滑轨将不同模块移至工位,俄罗斯的联盟-5发射台即采用了该思想,发射台切换时间不大于4 h;标准化接口,就是采用类似USB-C的全向兼容插头理念,统一发射场星箭地接口,设计适配多种推进剂和火箭的电气协议,实现燃料/电气接口标准化适配。

3.7 推进剂快速灵活加注

推进剂快速加注技术的突破,将为“随叫随到”的发射活动提供强大的助推力。实现推进剂加注从传统的数小时缩短至30 min内,同时兼容多种类型燃料,确保安全性。首先,建设基于高压差加注、预冷管路技术的超高速低温流体输送系统,采用多级离心泵+超临界压力驱动,配置内涂氧化硼纳米涂层、外置液氧夹套循环的预冷管路,实现推进剂加注速度的大幅提升;其次,在确保加注管路对接精度和泄漏率合格的前提下,设计即插即用自适应接口和自反馈流量控制电路,实现管路快速对接切换和流量自适应调节;随后,重构加注流程,通过模块化加注单元,借鉴NASA移动发射平台设计思想,将推进剂集成于自行走平台上,使其能够快速切换到不同发射工位进行加注工作,从而实现加注工序由串行变为并行;同时,建设推进剂地下储罐网络,达到燃料存储和加注多工位共享,不仅实现推进剂管道直供(类似航空燃油加注系统),而且能够兼容多次加注、泄回。

3.8 全链条周转技术升级

运载火箭“回收—检测—返修—再发射”全链条流程占用发射场设施设备多、转运周期长,为此,可通过自主着陆系统建设、原位无损检测、零周期发射平台复位、模块化降噪喷水、快速加注、智能化运维等,实现发射场“航天级精密”向“航空级敏捷”的范式变革。通过热防护层快速评估+发动机健康诊断等原位无损检测技术的突破,缩短周转耗时;开发原位3D打印修复技术,快速处理发射平台烧蚀损伤,采用耐高温陶瓷基复合材料制造导流槽,同时配备模块化喷水系统,实现发射平台的自修复;通过引入数字孪生技术、AI技术建设智能化运维系统,快速准确预测设备损耗,做好应对措施和风险防范,大幅缩短周转时间^[12]。

3.9 脉动式测发流程提速

航班化发射必然对运载火箭和航天器从研制、生产到测试发射的全流程周期效率提出更高的要求,需要广泛借鉴其他领域先进的生产线理念。比如采用飞机“脉动生产线”理念,对传统“流水线”式运载火

箭生产、测试、加注、发射流程进行分步、模块化的改进优化。以多卫星测试设计脉动式测试流程为例,假设以6颗卫星为一组作为开展流程的主线,通过对测试项目的人员、场地和设备资源灵活调配,将测试准备项目进行整合,将电气测试、帆板展开、对接准备以及星箭对接等项目按照不同分组同时开展。卫星脉动式测试流程在发射场技术厂房、发射工位和子级回收场集群条件支持下,开展运载火箭和卫星多线程、动态并行、模块组合集成测试,并根据发射需求对测试计划进行灵活调整,测试合格后,随即开展加注、发射工作,确保各环节协同高效^[13-15]。改善传统测试发射模式下,一发火箭串行开展测试、加注和发射,持续占据测试厂房和发射工位,严重制约发射数量、效率等弊端,实现航天测试发射流程提质增效。

3.10 全流程分层次标准化

将发射场设备拷机、电气测试、燃料加注、射前准备、发射点火、卫星入轨等环节的操作细化,制定标准手册规程,减少误指挥误操作,加强双岗双人复核机制,分层次分阶段细化可能出现的应急预案,有针对性地开展模拟演练,提升突发情况下快速响应处置能力。

未来,航班化航天发射将重塑太空实力格局,推动人类从“探索太空”迈向“利用太空”,促进太空资源开发、互联网星座部署,甚至太空旅游等产业应用,成为建设航天强国维护太空安全、达成战略平衡和占据优势地位的重要引擎。其成功必然依赖于打破传统思维、提出先导技术、挑战颠覆创新和开拓市场需求的密切协同,期待不久或见证航天发射从“专属定制”到“航班发射”的跨越式变革。

4 结束语

航班化发射能力是未来航天发射场必须具备的能力之一,是衡量航天发射场航天发射能力的重要指标。本文在现状分析研究的基础上,从体系架构、整体布局、运营模式、火箭型谱、测发技术等方面提出10条应对策略,可为航天发射场提升航班化发射能力提供借鉴。

参 考 文 献

- [1] 包为民,汪小卫.航班化航天运输系统发展展望[J].宇航总体技术,2021,5(3):1-6.
BAO Weimin, WANG Xiaowei. Development prospects of airline-flight-mode space transportation systems[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(3): 1-6.

- [2] 包为民, 祁振强. 航班化航天运输系统中的控制问题[J]. 宇航学报, 2023(4): 607-611.
BAO Weimin, QI Zhenqiang. Control issues in airline-flight-mode space transportation systems[J]. Journal of Astronautics, 2023(4): 607-611.
- [3] 王小军. 下一代航天运输系统发展思考[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2022(6): 1-7.
WANG Xiaojun. Development considerations for next-generation space transportation systems[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(6): 1-7.
- [4] 张凤林, 苏剑彬, 刘鹰, 等. 世界航天发射场典型规划模式研究[J]. 中国航天, 2020(11): 32-37.
ZHANG Fenglin, SU Jianbin, LIU Ying, et al. Research on typical planning models of global space launch sites[J]. Aerospace China, 2020(11): 32-37.
- [5] 朱雄峰, 程洪玮, 刘阳, 等. 世界航天发射运输的发展趋势[J]. 科技导报, 2021, 39(11): 46-58.
ZHU Xiongfang, CHENG Hongwei, LIU Yang, et al. Development trends of global space launch transportation[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(11): 46-58.
- [6] 张志成, 崔展鹏, 刘俊林, 等. 国外新型主力火箭测试发射模式分析及启示[J]. 中国航天, 2023(7): 20-27.
ZHANG Zhicheng, CUI Zhanpeng, LIU Junlin, et al. Analysis and implications of test launch modes for new foreign mainstream rockets[J]. Aerospace China, 2023(7): 20-27.
- [7] 古宇飞, 钟文安, 张博, 等. 液氧煤油并行加注流程设计和适应性分析[J]. 低温工程, 2022(6): 76-81.
GU Yufei, ZHONG Wenan, ZHANG Bo, et al. Design and adaptability analysis of liquid oxygen and kerosene parallel loading process[J]. Cryogenics, 2022(6): 76-81.
- [8] 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.
LIU Yang, XIN Tengda, TONG Jiang. Research on next-generation smart launch site development[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(2): 61-68.
- [9] 朱雄峰, 刘阳, 刘鹰, 等. 中国运载火箭型谱发展[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 16-28.
ZHU Xiongfang, LIU Yang, LIU Ying, et al. Development of China's launch vehicle family[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(19): 16-28.
- [10] 李利群, 马翀, 王二亮. 国内外航天发射技术现状与未来发展综述[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(2): 1-6+170.
LI Liqun, MA Chong, WANG Erliang. Review on current status and future development of space launch technology domestically and internationally[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(2): 1-6+170.
- [11] 冯国峰, 杨毅强, 胡小伟, 等. “星舰”发射支持系统特点与分析[J]. 中国航天, 2022(11): 31-34.
FENG Guofeng, YANG Yiqiang, HU Xiaowei, et al. Starship launch support system characteristics and analysis[J]. Aerospace China, 2022(11): 31-34.
- [12] 钟文安, 吴纯治, 陈少将. 发射场航班化发射能力建设思考[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(4): 71-78.
ZHONG Wenan, WU Chunzhi, CHEN Shaojiang. Reflections on airline-flight-mode launch capability construction at launch sites[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(4): 71-78.
- [13] 王淼. 飞机总装脉动生产线研究[J]. 中国科技信息, 2019(2): 23-24+27.
WANG Miao. Research on pulsed assembly line for aircraft final assembly[J]. China Science and Technology Information, 2019(2): 23-24+27.
- [14] 张曦文, 吕瑞强, 杜曦晨, 等. 飞机总装脉动生产线仿真与优化研究[J]. 新型工业化, 2023(12): 87-95.
ZHANG Xiwen, LYU Ruiqiang, DU Xichen, et al. Simulation and optimization of pulsed assembly line for aircraft final assembly[J]. Journal of New Industrialization, 2023(12): 87-95.
- [15] 刘瑶, 李振凯, 王健有, 等. 卫星规模化测试任务流程及方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2): 16-22.
LIU Yao, LI Zhenkai, WANG Jianyou, et al. Process and methods for large scale satellite testing tasks[J]. Computer Measurement & Control, 2025, 33(2): 16-22.

作者简介

苗岩松 (1973—), 女, 正高级工程师, 主要研究方向为航天发射总体设计。

侯华 (1984—), 男, 工程师, 主要研究方向为航天发射总体设计。

吴海龙 (1993—), 男, 工程师, 主要研究方向为航天发射总体设计。