

固液捆绑运载火箭测试发射特点及展望

张 鑫, 李利群, 徐浩东, 李侯贞强, 王文笛
(太原卫星发射中心, 山西 太原 030001)

摘 要: 长征六号甲是我国首型采用固液捆绑构型的中型低温动力运载火箭, 文章简单介绍了该型火箭测试发射任务执行基本情况, 总结分析了火箭在发射场执行测试发射任务的技术特点、流程特点、任务保障特点及应对措施。提出基于固液捆绑火箭的快速测试发射技术发展方向, 分析了火箭新技术应用、测试发射流程优化、发射场能力建设等方面的发展需求, 为型号研制工作及发射场测试发射能力提升提供有益参考。

关键词: 固液捆绑运载火箭; 测试发射技术; 测试发射流程; 测试发射保障; 快速测试发射

中图分类号: V 553 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.02.003

引用格式: 张鑫, 李利群, 徐浩东, 等. 固液捆绑运载火箭测试发射特点及展望[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(2): 14-19, 27.

Characteristics and Prospect of Test Launch on Solid-liquid Bundled Launch Vehicles

ZHANG Xin, LI Liqun, XU Haodong, LI Houzhenqiang, WANG Wendi
(Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030001, Shanxi, China)

Abstract: The long March 6A (CZ-6A) is the first medium-sized low-temperature powered launch vehicle with solid-liquid bundled configuration in China. In this paper, the basic situation of the test launch mission of the CZ-6A is briefly introduced, and the technical characteristics, process characteristics, task support characteristics, and countermeasures of the CZ-6A during launch missions are summarized and analyzed. The development direction of the rapid test launch technology based on solid-liquid bundled launch vehicles is put forward, and the development needs of the application of new launch vehicle technology, the optimization of the test launch process, the capacity building of the launch site, etc. are analyzed, providing useful reference for the model development and the improvement of the test launch capacity of the launch site.

Key words: solid-liquid bundled launch vehicle; test launch technology; test launch process; test launch guarantee; rapid test launch

0 引言

经过 50 余年的发展, 中国长征系列运载火箭逐步发展成为由多种型号组成的大家族。首次采用液体芯级、捆绑固体助推器构型的长征六号改系列运载火箭, 为长征系列大家族再添新成员, 通过不同数量固体助推器和液体芯级组合形成合理运载能力台阶、性价比较高的运载火箭系列^[1-2], 填补了我国长征系列新一代运载火箭型谱空白, 其基本型长征六号甲(Long March 6A, CZ-6A)运载火箭已在发射场圆满完成 4 次测试发射飞行任务。

CZ-6A 作为我国首型固液捆绑火箭, 相较于国外先进的固液捆绑火箭及长征系列新一代液体捆绑运载火箭, 在测试发射模式、测试发射流程、发射场配套设施建设、测试发射保障等方面, 测试发射工作具有鲜明的特点。太原卫星发射中心作为首个圆满完成固液捆绑火箭测试发射任务的发射场, 通过积极探索和严密组织实施, 突破了多个发射技术难题, 积累了宝贵经验。为应对未来高密度、快速测试发射需求, 仍需要在产品设计、发射场建设、新技术应用等多个方面进行持续优化完善, 为后续航天

收稿日期: 2024-02-03; 修回日期: 2024-02-28

作者简介: 张 鑫(1984—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为航天测试发射技术。

器按需发射及航天强国建设奠定坚实基础。

1 任务基本情况

CZ-6A 火箭采用两级半构型,捆绑 4 台固体助推器。全箭总长 50 m,起飞推力 7 200 kN(720 t),起飞质量 530 t。700 km 高度太阳同步轨道(Sun-Synchronous Orbit,SSO)典型运载能力为 4 t 以上,主要用于近地轨道和太阳同步轨道一箭一星、一箭多星发射任务^[3-4]。于 2022 年 3 月 29 日首飞圆满成功,将浦江二号、天鲲二号卫星准确送入预定轨道。目前,在太原卫星发射中心已圆满完成 4 次飞行任务,表 1 为 CZ-6A 火箭发射任务情况^[5]。

表 1 CZ-6A 火箭发射任务情况

Tab.1 Launch mission status of the CZ-6A

序号	发射日期	发射场	载荷	飞行结果
1	2022-03-29	太原-9A	浦江二号、天鲲二号	圆满成功
2	2022-11-12	太原-9A	云海三号	圆满成功
3	2023-09-10	太原-9A	遥感四十号	圆满成功
4	2023-11-01	太原-9A	天绘五号	圆满成功

2 测试发射技术特点

2.1 “一平两垂”测试发射模式

测试发射模式对火箭和发射场总体方案起着重要作用,与运载火箭发挥最大效能有直接关系。国外先进的固液捆绑火箭主要有美国宇宙神系列、太空发射系统(SLS)、欧洲阿里安系列、日本 H 系列火箭等^[6],测试发射模式均采用“三垂”模式(垂直总装、垂直转运、垂直测试)。中国目前新一代运载火箭家族型谱中,只有 CZ-6A 一型固液捆绑火箭,且采用了“一平两垂”(水平转运、垂直总装、垂直测试)测试发射模式,其余均为液体捆绑火箭,采用“三垂”测试发射模式,如 CZ-5、CZ-7、CZ-8 系列火箭^[7-8]。如表 2 所示。

表 2 各捆绑构型运载火箭测试发射模式对比

Tab.2 Comparison of the test launch modes of launch vehicles with different bundled configurations

项目	捆绑方式	液体推进剂	测试发射模式
CZ-5/7/8	液体捆绑	低温	三垂
CZ-6A	固液捆绑	低温	一平两垂
宇宙神 5	固液捆绑	低温	三垂
阿里安 5	固液捆绑	低温	三垂
HII	固液捆绑	低温	三垂

“三垂”模式特点是将火箭总装、测试工作安排在技术区垂直厂房完成,火箭以垂直整体转运的方式运输至发射区,可以大幅缩短火箭在发射区工位占用时间,但对于单发火箭而言,技术区占位时间长,其总发射周期并无优势,需通过在技术区建设多个垂直技术厂房及多个活动式发射平台,才可有效提升发射场测试发射效率^[9]。我国 CZ-5、CZ-7、CZ-8 等液体捆绑火箭采用“三垂”测发模式,技术区建设垂直总装测试厂房,发射工位采用活动脐带塔和固定勤务塔两塔制方案^[10],固定勤务塔无吊装功能、封闭区无保温设计,脐带塔与活动发射平台固连,发射场设施设备规模及成本巨大。

CZ-6A 火箭采用“一平两垂”测发模式,特点是火箭技术区工作简单,以水平分段转运的方式将火箭运输至发射区,再进行总装、测试等发射准备工作,发射区占用时间较长,但通过改进产品设计、优化测试发射流程,可以缩短发射区占位时间、缩短测试发射周期。另外,配套新建的 9A 发射工位,采用全封闭式脐带勤务一塔制方案,能够满足大质量固体助推器吊装、发射场冬季低温环境保障等需求。较为简单的发射场设施设备也更加利于缩短射后修复时间、降低维修成本,从而进一步发挥固液捆绑火箭优势,达到提升发射场提升整体测试发射能力的目的。各测试发射模式特点对比如表 3 所示。

表 3 测试发射模式特点对比

Tab.3 Comparison of the characteristics of the test launch modes

项目	一平两垂	三平	三垂
发射场建设成本	低	较高	高
设施设备技术难度	低	较高	高
总装测试环境	低	较好	好
发射工位占用时间	较长	短	较短
有效载荷要求	低	高(允许水平对接)	较高
发射台复杂程度	简单	较复杂	复杂
运输安全性	高	较高	低
运输道路条件要求	低	较高	高

2.2 脐带勤务塔与零秒脱落首次结合

脐带塔和勤务塔,是参与发射或为发射直接提供勤务的设施。脐带塔主要功能是为地面设备通往发射产品的电、气、液关系提供通道和支持,直接参与发射。勤务塔主要功能是为发射直接准备提供发射勤务保障,用于产品吊装、对接,提供检查维

护和测试的工作条件,可不参与发射。采用低温动力的运载火箭,低温推进剂加注工作需持续至发射前,我国 CZ-5 等新一代运载火箭,脐带塔固连在活动发射台一侧,与箭体距离相对较近,自动脱落机构采用摆杆或机械臂连接方式^[11-12],安装在脐带塔上,射前实施自动脱落及摆杆摆开,系统设备安装空间有限、结构复杂且可靠性要求高。

CZ-6A 运载火箭在国内首次应用了二级加泄连接器、整流罩空调连接器起飞零秒脱落技术,可实现无摆杆状态发射,进一步增强了推迟发射预案的灵活性和可靠性,实现了脐带勤务一塔制模式与零秒脱落技术首次结合应用。连接器系统采用钢索牵拉软连接方案,脱落控制装置、牵拉装置、防回弹装置均安装在勤务塔各层固定平台前沿,使系统复杂性大大降低,同时充分利用空间优势,通过脱落气缸冗余、起飞牵拉备保等设计,进一步提高零秒脱落系统的可靠性。

2.3 吊装精度要求高

采用水平转运的火箭部段质量一般较轻,大质量助推器转运吊装在发射场是首次实施。由于大质量大惯性特点,对吊装指挥操作精度要求极高,轻微磕碰也有可能对产品受到致命损坏,对操作人员造成挤压伤害的风险较大。另外,为了降低固体发动机跌落瞬间的剧烈撞击有可能造成爆炸风险^[13],应尽量降低吊高、缩短空中悬吊时间。同时还需要考虑优化精简吊装对接流程,缩短助推器在露天环境下暴露时间,尽快建立封闭区,以满足固体发动机温度保障需求。综合以上考虑,发射场在火箭合练期间,组织实施了多次吊装演练以及全开塔、半开塔、穿塔吊装等多种吊装对接方案的实践验证,最终优化并固化了半开塔+穿塔的吊装实施方案,确保了产品安全,提升了工作质量和效率。

2.4 冬季低温保障难

太原卫星发射中心地处晋西北高原,冬季气候寒冷干燥,严寒期持续时间长,极端最低气温近 -40°C 。尽管发射场设计建设了多个大功率空调机组,但在极寒天气条件下,发射场温湿度保障能力仍面临极大考验,主要体现在以下几个方面。

1) 固体发动机温度保障要求高

固体发动机对温度较为敏感,药柱温度与其燃烧特性及药柱结构特性直接相关,影响全箭飞行时

序,甚至造成严重的点火安全性问题^[14]。CZ-6A 火箭为适应极寒温度条件下发射任务,固体助推器发射区温度保障要求非常高。发射场通过积极推进保障能力提升工程,增加了固定式和移动式大功率送热送风设备,有效提升了送温能力。

2) 封闭区容积大,烟囱效应突出

火箭转运至发射区后,利用塔架回转平台建立火箭封闭区,封闭空间竖直空旷,底部仅通过发射台盖板与导流槽相隔,对封闭区密封要求高,烟囱效应明显。冬季低温环境下,封闭区升温慢、降温快的特点突出。发射场通过优化改造底部密封装置,设计制作保温隔断、棉帘、塞块等措施,有效降低烟囱效应影响,同时经过多次演练优化开塔前撤收方案,尽量延长保温时间,效果较好。

3) 管路冻裂风险大

9A 发射工位配有喷水降噪系统,用于火箭点火起飞阶段,降低噪声振动和尾焰对发射台损伤。塔架高层设有大型水箱,水路主管道自塔上竖井至地下管廊进入发射台下各支管,总水量近千吨,管路因低温冻裂而产生的影响难以估量。竖井及地下管廊各处联通,且与外部相通,保温难度极大。发射场通过对各管廊增加隔热封堵、增加取暖设施、管路包覆保温材料、任务期间 24 h 巡检巡查等措施,有效消除了管路冻裂的风险。

2.5 点火安全要求高

火箭液体发动机起动或工作异常时,在火箭起飞前,均可对液体发动机实施紧急关机,以保证箭体、卫星载荷及发射设施的安全。但由于固体发动机点火后无法强制关机的特点,为保证火箭安全点火起飞,CZ-6A 火箭采用了先芯级点火,后固体点火的方案^[15-16]。通过发动机健康诊断系统,在芯级发动机点火并进入额定工况后,对芯级涡轮泵转速及各压力参数进行健康诊断,若判断结果异常,则及时输出紧急关机指令,关闭液体发动机。芯级点火后至固体发动机点火前时间段内,需保证各连接器连接绝对可靠,发射台上各电缆及管路绑扎牢固,通过合理布置电缆管路走向及绑扎点、增加限位装置、科学设置安全余量等方式,确保在所有发动机点火后,火箭能够安全起飞。

2.6 工位射后损伤大

CZ-6A 运载火箭起飞时,2 台液体和 4 台固体助推器产生巨大噪声振动、热辐射、尾焰冲刷对发射场设施设备破坏力强且辐射范围大。固体发动机尾焰中携带的大量三氧化二铝粒子、铝粒子,呈熔融态或液态形式^[17],经过高温附着、冷却固化,附着在塔架钢结构、发射台体、管路阀门等金属表面,形成了极难清除的污染镀层,对管路阀门等关键设备机构的可靠性造成影响。总体来看,9A 工位相较于常规火箭发射工位,射后损毁情况严重、修复难度及规模明显增大、修复周期明显增长。发射场结合射后勘察,通过增加易损结构强度、简化不必要易损结构等措施,达到降低受损程度且可控的效果;通过对重点管路、阀门组件进行打磨刷漆、包覆防烧蚀材料、加严检测等方式,减小烧蚀损伤,确保关键设施设备的可靠性;通过区分优先级,科学制订射后修复方案,逐步优化修复周期,进一步提升高密度发射条件下发射场的射后修复能力和效率。

3 测试发射流程特点及现状

3.1 测试发射流程特点

CZ-6A 火箭采用液体芯级,捆绑 4 台固体助推器方案,采用“一平两垂”测试发射模式,相较于采用“三垂”测试发射模式的新一代液体捆绑火箭,CZ-6A 火箭测试发射流程主要有以下特点。

1) 技术区工作简单

CZ-6A 火箭在技术区需完成必要的箭体恢复工作,另只需完成姿控发动机加注充气等工作,即可具备转场条件,对技术区保障要求低。

2) 固体发动机测试简单

固体发动机结构简单,在发射场测试工作主要为状态监测及点火可靠性测试,无须进行复杂的增压输送系统气密性检查等测试工作。

3) 发射区对接总装工作复杂

CZ-6A 火箭在发射工位首先完成芯级与 4 个固体助推器对接,再完成芯二级对接,总装工序复杂,操作要求高、用时较长。

4) 地面测试发射系统集成化智能化程度高

新一代火箭采用了总线测试体制,具备箭上单机自测试能力,相较于常规液体火箭的传统地面测试体制,新一代测试发射控制系统测试设备一体化、集成化程度高,测试流程更加灵活、智能。

5) 发射周期短

虽然 CZ-6A 火箭总装工作较为复杂,但其在发射工位总占位时间相较于采用“一平两垂”模式的常规动力火箭仍具有优势。由于技术区工作简单,其在发射场总占位时间相较于采用“三垂”模式的液体捆绑火箭优势也十分明显^[18]。

6) 加注发射流程简单

CZ-6A 火箭加注发射流程中,只需对芯级进行推进剂加注,加注工艺流程较为简单,加注时间相对较短。各捆绑型运载火箭特点见表 4。

表 4 各捆绑型运载火箭特点对比
Tab.4 Comparison of the characteristics of the bundled launch vehicles

项目	CZ-6A	CZ-5	CZ-3A
火箭构型	固液捆绑(低温)	液体捆绑(低温)	液体捆绑(常规)
测试发射模式	一平两垂	三垂	一平两垂
发射场设施复杂度	简单	复杂	简单
技术区测试	简单	复杂	简单
发射区测试	复杂	简单	复杂
发射周期	短	长	中
测试体制	总线	总线	传统
加注发射流程	较复杂	复杂	提前加注

3.2 测试发射流程现状

CZ-6A 运载火箭与我国大多数运载火箭类似,均采用子系统测试模式,测试发射流程分为单元测试及转场准备、箭体总装、发射区测试、加注发射 4 个阶段。现阶段测试发射流程较长,存在发射区占位时间长、操作复杂等问题,测试发射基本流程如图 1 所示。

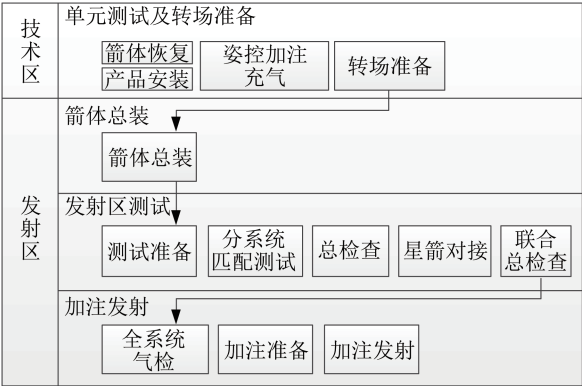


图 1 CZ-6A 火箭现阶段测试发射基本流程
Fig.1 Basic test launch process of the CZ-6A at the present stage

根据火箭在发射场实际执行任务情况,现阶段流程主要存在以下问题。

1) 发射区总装对接操作复杂

火箭固体助推器、芯级各部段水平运输至发射区,完成垂直总装。由于固体发动机质量大惯性大,捆绑连接机构设计较为复杂,在吊装对接过程中需要精细操作。各对接面电缆管路多,有大量复杂的总装工作。

2) 部分测试项目重复

在型号研制和飞行试验初期,为充分考核验证总体设计方案,保证测试覆盖性、可靠性等,存在部分测试项目重复安排的情况,如各类信号对接测试、箭上配电测试等。

3) 手动测试项目耗时长

全箭在发射区完成总装工作后,需进行导通绝缘测试、火工品通路测试,以验证全箭电气系统连接正确性,测试各通路导通阻值及绝缘性能。在测试过程中,大多采用手动测试,自动化辅助测试设备应用不足,导致测试时间较长。

4) 串行测试项目多

由于技术成熟度和人员操作熟练度需时间积累,为避免各系统并行工作相互干扰,项目安排多以串行方式进行,如火箭总装与加电测试准备工作串行等。

5) 加注发射流程余量大

火箭加注测试发射流程采用无人值守模式,为保证前端人员撤离前,各项工作准备就绪,各阶段工作时间留有较大余量,工作项目不够紧凑,具有进一步优化空间。

4 测试发射保障特点

4.1 智慧发射场系统首次应用

9A 发射工位是我国首个智慧发射场系统,综合运用网络云架构及物联网技术,实现了测试发射全流程信息数据汇集、智能判别、辅助决策功能,使发射场信息化水平大幅提高,在数字化、智能化方面取得了突破性进展。

4.2 国产自主可控技术全面应用

国产自主可控技术在 9A 发射工位地面设施设备自控系统得到全面应用,在基础层面的中央处理器(Central Processing Unit, CPU)和操作系统、系统

层面的交换机等核心设备都采用了国产自主品牌,通过试验任务检验,证明自主可控技术能够满足处理能力、实时性和可靠性要求。需要指出的是,国产自主可控技术当前尚处于初级发展阶段,在系统兼容性、系统安全性、配套工具完善性、功能性能指标等方面仍存在一定风险^[19],需采取有效应对措施并持续迭代完善。

4.3 地面设备系统复杂性大幅增加

为提高测试发射安全性,实现前端无人值守液氧加注,9A 发射工位地面设施设备系统采用了远控为主,近控为辅的自控模式,具备测试发射全流程远端控制、远端监控能力,普遍采用多设备、多通道、多模式冗余措施,系统复杂性增加,对指挥员的应急处置能力提出更高要求。

5 未来展望

作为长征系列新一代运载火箭的新成员,CZ-6A 运载火箭具有运载能力大、发射周期短、可靠性高的技术特点,将其与发射场经验优势结合,有效提升综合效益,大幅提高固液捆绑火箭发射场测试发射能力,建立高效、及时响应、灵活的航天发射系统是未来发展的主要方向和重点任务^[20]。

5.1 持续深入优化测试发射流程

火箭测试发射流程一般由火箭总体设计方案决定,但发射任务性质、发射场任务组织模式、地面设施设备性能、发射资源保障能力等各方面因素对测试发射任务的执行也具有重要影响^[21]。总体来看,火箭测试发射流程优化是一个需要系统设计、综合优化、长期优化的过程。因此,结合当前测试发射流程存在的问题,综合考虑预期效果、实施难度、客观条件、任务需要等不同因素,将测试发射流程优化分为近期、中期、长期 3 个阶段目标,以达到系统性综合优化的目的。

近期目标:火箭测试发射流程优化。根据发射场实际任务执行情况,针对存在的问题,且已具备优化条件的项目,采取一定的措施,达到优化测试发射流程的目的。

中期目标:任务全周期优化。火箭通过改进产品设计、配套生产,进一步简化工序、提高操作便利性;发射场通过设施设备性能提升、工艺流程优化改进、射后修复能力提升,提高发射场执行测试发

射任务保障能力。通过火箭与发射场协同优化,提升任务执行效能,达到任务全周期优化的目的。

长期目标:快速测试发射流程优化。以多种任务需求为背景,综合考虑火箭工作程序、任务组织指挥、协调关系、资源调配等各方面因素,优化设计能够满足快速发射、连续发射、按需发射的快速测试发射流程。

5.2 积极探索快速发射新技术应用

快速、可靠地进入空间是大规模和平开发利用空间资源的重要手段。固液捆绑构型运载火箭拥有良好的快速测试发射技术基础,且具备投送大质量载荷的能力,能够适应航天快速发射需求的新变化^[22]。积极探索应用电气系统智能化机内测试技术、并行测试技术、无线传输、无线传能、数字孪生健康管理技术以及智能化故障诊断技术等关键新技术,提升火箭使用维护性,进一步缩短发射周期,增强火箭任务适应能力,为构建快速测试发射体系提供支撑,对实现运载火箭快速、可靠进入空间具有极大的军事和经济价值^[23-24]。

5.3 不断提升发射场保障能力

航天器、运载器是航天发射任务的对象,发射场是航天发射任务的实施场所,两者需密切协同。以星箭产品性能指标和保障需求作为牵引,建立星箭产品与发射场设施设备、研制方与使用方之间协同优化机制进行系统性综合优化,是有效提升测试发射能力的关键环节。如通过增加地面设备远控备份功能、运用信息数据网络化技术、优化岗位人员配置、加强技术培训,提高地面设备在线冗余能力以及运行维护效率;进一步研究论证低温加注系统全过冷补加、火箭燃烧剂与氧化剂并行加注等关键工艺流程,大大缩短射前加注时间^[25-27]。

5.4 努力完善发射场智慧化水平

智能化和信息化已成为各国航天发射场建设的重要发展方向,是提升测试发射效率的主要手段^[28]。为适应未来快速高密度发射需求,发射场在信息数据应用、智能安全分析、智慧辅助决策等方面,仍有紧迫需求。如加强智慧发射场总体架构设计,逐步替换老旧设备,消除各链路间存在网络隔离、信息孤岛等问题;深入挖掘基于星箭产品测试数据、发射场信息化数据等各类数据,开发有效的

信息聚合、数据应用以及任务辅助支撑系统,建设包含任务规划、指挥决策、技术支持等多维度、一体化综合指挥信息平台。

5.5 加快构建快速测试发射体系

为适应未来高密度发射、按需发射的发展趋势,加快在星箭产品长贮维护、星箭去任务化设计^[29]、任务组织指挥机制、快速测试发射流程设计、测试发射资源保障、岗位配置及能力等方面的研究论证,构建基于新型固液捆绑火箭的快速测试发射体系,可最大限度发挥型号特点,是系统性提升测试发射能力的有效手段。

6 结束语

长征六号甲运载火箭发射任务的圆满成功,标志着我国在固液捆绑构型中型运载火箭研制和测试发射技术方面取得了突破,与长征系列其他型号捆绑火箭、单芯级常规动力火箭,在测试发射技术、测试发射流程、地面设施设备保障等方面均有明显优势,发射场在测试发射任务组织实施过程中,积累总结了大量宝贵经验,面向未来航天发射任务趋势进行了展望,提出了发展方向和思路,为进一步提升测试发射能力提供有益参考。

参考文献

- [1] 张卫东,杨赟,杨帆.长征六号甲运载火箭及其技术特点[J].国际太空,2022(6):8-10.
- [2] 洪刚,李红兵,范鑫,等.新一代固液捆绑运载火箭研制及创新[J].上海航天(中英文),2022,39(5):1-7.
- [3] 何巍,牟宇,朱海洋,等.下一代主力运载火箭发展思考[J].宇航总体技术,2023,7(2):1-12.
- [4] 王小军.中国航天运输系统未来发展展望[J].导弹与航天运载技术,2021(1):1-6.
- [5] 刘洁,陈凯,谷巍.2022年世界航天发射活动回顾[J].中国航天,2023(2):54-59.
- [6] 陈海鹏,王小铤.固液混合运载火箭:各具特色 殊途同归[J].太空探索,2022(6):14-19.
- [7] 肖士利,何巍,秦旭东.中国运载火箭测试发射模式发展思路研究[J].宇航总体技术,2021,5(1):65-72.
- [8] 崔浏,郭金刚,范虹,等.三种常用火箭测发模式下发射支持系统设备需求研究[J].导弹与航天运载技术,2019(2):89-93.
- [9] 钟文安,张俊新,李智斌,等.某大型运载火箭测试发射流程优化策略[J].导弹与航天运载技术,2021(5):85-88,116.

(下转第27页)