

中国运载火箭地面系统发展方向研究

肖士利, 郭 振, 谢志丰, 黄 辉

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 地面系统用于支持和保障火箭的发射与试验, 对火箭的使用性能、发射能力、发射场配置及工作流程等有重要的影响。调研了国外运载火箭地面系统发展现状, 总结了国外运载火箭地面系统发展趋势。从快速发射、简易发射、安全发射、自动发射和通用发射等方面提出了地面系统发展思路和主要关键技术, 为我国后续运载火箭地面系统发展提供参考。

关键词: 地面系统; 发展方向; 简易发射; 测试发射模式

中图分类号: V553

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2020) 02-0025-08

Research on the Development Directions of Chinese Launch Vehicle Ground System

XIAO Shili, GUO Zhen, XIE Zhifeng, HUANG Hui

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The ground system is used to support and guarantee the launch and test of launch vehicle, which has an important impact on the performance, launch capability, launch site configuration and process of the launch vehicle. Based on the research of the ground system abroad, the development tendency was summarized. The development thoughts and the main key technologies are put forward through five aspects: quick launch, simple launch, safe launch, automatic launch and universal launch. It can be used as reference for the development of the future launch vehicle ground system in our country.

Key words: Ground system; Development directions; Simple launch; Test and launch mode

0 引言

地面系统用于支持和保障火箭的发射与试验, 是实施火箭发射准备与发射以及其他技术准备的系统^[1]。从广义上讲, 地面系统包括火箭发射支持系统、发射场总装测试厂房、勤务塔、脐带塔、加注供气系统以及测控通信系统的设施设备^[2]。从狭义上讲, 地面系统特指火箭发射支持系统, 属于火箭分系统之一, 主要设备包括发射台、运输吊装设备、供配气设备、定位定向设备和各类电气液箭地连接器等, 与火箭有机结合形成运载

火箭系统。

无论是广义地面系统还是狭义地面系统, 在论证时, 首先要确定火箭的发射方式和测试发射模式 (以下简称测发模式), 其中发射方式包括陆上发射、海上发射和空中发射等, 测发模式一般包括一平两垂、三垂和三平^[3]; 其次, 明确火箭从出厂到点火前的使用流程和运输方式, 合理地确定自然环境条件, 进而提出发射场系统和发射支持系统总体方案和需求。地面系统的优劣对火箭的使用性能、发射能力、发射场配置、费效比及

收稿日期: 2019-12-06; 修订日期: 2020-03-09

基金项目: 航天系统部专用技术项目 (30506020305)

作者简介: 肖士利 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭总体设计。

E-mail: 170456059@qq.com

发射场工作流程等有重要的影响。本文重点分析了火箭在发射场总装、测试、运输和发射等环节中密切相关的地面系统设施设备技术状态,总结了地面系统发展趋势,提出了我国运载火箭地面系统发展思路 and 方向。

1 国外运载火箭地面系统发展现状

1.1 美国

猎鹰9火箭采用“水平总装、水平测试和水平运输”三平测发模式和“活动发射平台(含脐带塔)+无勤务塔”方案,脐带塔用于支撑和连接箭上与地面之间的电缆、加注管路及各种连接器,水平转运车由发射台、牵制释放机构、行走装置和起竖装置组成^[4],如图1所示。发射区无勤务塔,对发射场保障要求低,可在美国卡纳维拉尔角发射场、肯尼迪航天中心和范登堡空军基地三大发射场进行发射,充分体现了简化流程、简化发射设备和设施、降低成本的特点。由于2016年9月,猎鹰9火箭在加注后的静态点火测试中发生爆炸,目前火箭基础级在发射区完成静态点火测试后需返回技术区水平组装星罩组合体,然后再次整体转运至发射区进行加注发射。从-40min开始进行过冷推进剂加注,脐带塔与火箭仅有电气液管路柔性连接,箭体起飞时箭地连接器才脱落,实现了发射前端从加注开始的无人值守。



图1 猎鹰9火箭地面系统

Fig. 1 The ground system of Falcon 9 launch vehicle

德尔它4H火箭采用“活动发射平台+活动勤务塔+固定脐带塔”方案,基础级(一二级和助推器)采用“水平总装、水平测试和水平运输”三平测发模式,由于有效载荷不能适应三平测发状态,整流罩/有效载荷组合体在发射区采

用垂直组装的方式与基础级对接,这种模式可认为是三平模式的过渡状态,或称为“两平一垂”测发模式,如图2所示。活动勤务塔用于吊装整流罩以及对火箭进行发射前检测,发射前活动勤务塔移开,进入倒计时程序。火箭从射前-5.5h开始推进剂加注,实现了射前无人值守。固定脐带塔设置3层摆杆,一级氢加注口设置在箭体底部,所有的加泄和电连接器都是通过摆杆实现0s脱落^[5]。火箭在发射场周期共24d,其中技术区16d,发射区8d,整流罩/有效载荷组合体在射前-4d与基础级对接。

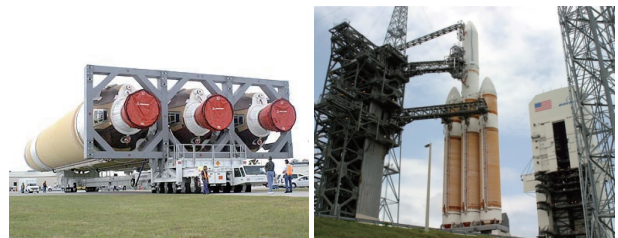


图2 德尔它4H火箭地面系统

Fig. 2 The ground system of Delta 4H launch vehicle

宇宙神5火箭采用“垂直总装、垂直测试和垂直运输”三垂测发模式和“活动发射平台(含脐带塔)+无勤务塔”方案,发射区只有导流槽、加注供气设施和避雷塔,极大地简化了发射区设施,充分体现了美国火箭地面系统简易发射的设计理念,如图3所示。火箭在射前-14h运往发射区,从-7.5h芯级推进剂开始加注至点火发射,基本实现了无人值守^[6]。火箭通过脐带塔上多个集成连接器与箭体相连,点火后箭地连接器才脱落,提高了射前流程可逆性。



图3 宇宙神5火箭地面系统

Fig. 3 The ground system of Atlas V launch vehicle

空间发射系统SLS火箭采用“垂直总装、垂直测试和垂直运输”三垂测发模式和“活动发射

平台（含脐带塔）+无勤务塔”方案，如图 4 所示。除活动发射平台外，SLS 火箭使用的发射设施几乎都曾用于土星 5 火箭和航天飞机的发射，通过对原有设施一定规模的改造和改装，达到重复利用、降低成本的目的。

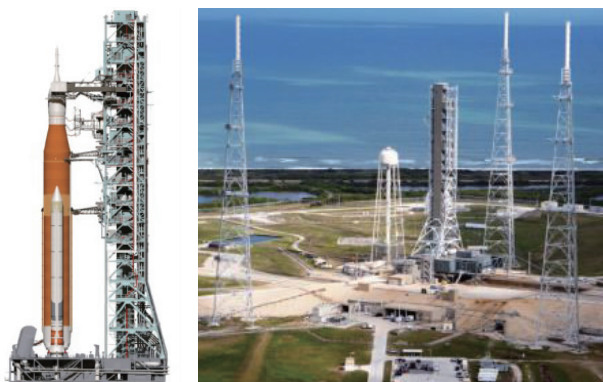


图 4 SLS 火箭地面系统

Fig. 4 The ground system of SLS launch vehicle

1.2 俄罗斯

质子号火箭采用“水平总装、水平测试和水平运输”三平测发模式和“固定发射台+活动勤务塔”方案，水平转运起竖车无发射台，如图 5 所示。当火箭起竖到发射台后，水平转运起竖车离开火箭，然后活动勤务塔移动过来，环抱住火箭进行测试和操作，射前-5h~6h 活动勤务塔移开火箭约 340m，进行发射^[7]。



图 5 质子号火箭地面系统

Fig. 5 The ground system of Proton launch vehicle

联盟号火箭采用“水平总装、水平测试和水平运输”三平测发模式和“固定发射台（含脐带塔）+后倒式勤务塔”方案，水平转运起竖车无发射台，如图 6 所示。当火箭起竖到发射台后，转运起竖车离开火箭，然后分成两半的后倒式勤

务塔合拢，将火箭围住。当火箭测试加注结束以后，勤务塔向两边倾倒一定的角度，只留下脐带塔矗立在火箭旁边，火箭点火发射前，各种插头脱落，脐带塔后倾一定的角度，让出火箭的横向漂移安全区^[8]。火箭在发射场需 21d，其中发射区 3d。



图 6 联盟号火箭地面系统

Fig. 6 The ground system of Soyuz launch vehicle

1.3 欧洲

阿里安 5 火箭采用“垂直总装、垂直测试和垂直运输”三垂测发模式和“活动发射平台（含脐带塔）+简易勤务塔”方案，如图 7 所示。简易勤务塔无回转平台，仅用于二子级低温推进剂加注。火箭在发射场需 22d，发射前-9h 从技术区转运至发射区，-6h 开始进入倒计时程序，此时人员撤离发射前端^[9]。箭上大量采用了气、电液组合连接器，二子级加泄连接器在-4s 由可伸缩的低温加注机械臂完成脱落。在中止发射工况时，二子级推进剂通过零秒脱落的紧急泄出连接器泄出，一子级推进剂通过底部零秒组合连接器泄出。



图 7 阿里安 5 火箭地面系统

Fig. 7 The ground system of Ariane 5 vehicle

根据欧洲与俄罗斯的航天合作协议，在庫魯发射场建设了一个联盟号火箭发射工位，与俄罗斯传

统测发模式不同的是,联盟号火箭在该发射场采用两平一垂测发模式和“固定发射台(含脐带塔)+活动勤务塔”方案,类似于德尔它4H火箭测发模式,如图8所示。基础级火箭和整流罩/有效载荷组合体于射前一4d从技术区转至发射区活动勤务塔中,其中基础级火箭整体水平起竖,整流罩/有效载荷组合体与火箭垂直对接。活动勤务塔是一个可移动设施,射前一30min活动勤务塔移开^[10]。



图8 联盟号火箭地面系统

Fig. 8 The ground system of Soyuz launch vehicle

2 国外运载火箭地面系统发展趋势分析

随着近年来世界航天发射技术的不断进步,各国运载火箭在优化测发模式、快速测试发射和无人值守加注发射等方面都有长足的进步。

2.1 选择适合本国国情的测发模式,发射区设施趋于简化,实现简易发射

各国火箭根据自身的综合技术水平、传统用法、发射场环境、火箭/有效载荷技术状态和经济能力等因素选择了各自的测发模式。俄罗斯火箭一直采用三平模式,欧洲火箭主要采用三垂模式,美国火箭采用多种测发模式,早期以三垂模式为主。随着猎鹰9的发展,目前是三垂模式和三平模式并重。国外火箭发射区设施均较为简单,宇宙神5、猎鹰9和天顶号等火箭发射区采用无勤务塔方案,阿里安5、质子号和联盟号等火箭采用简易勤务塔方案,大部分火箭在发射区都是露天测试及加注,实现了简易发射。

2.2 通过优化火箭测发流程,实现快速发射和连续发射

国外主流火箭在发射场测发周期为20d左右,在发射区时间一般为3d~5d,宇宙神5和阿里安5火箭在发射区的时间不到1d,占位时间很短,如表1所示。猎鹰9火箭在肯尼迪航天中心LC-39A

工位和质子号火箭在拜科努尔航天发射场同一工位的两次发射最小间隔只需12d。联盟号火箭在普列谢茨克航天发射场同一工位两次发射最小间隔为17d,地面系统具备短时间内快速发射以及连续发射的能力。

表1 国外主流火箭测发模式和测发周期

Tab. 1 The test and launch mode and time of foreign mainstream launch vehicle

运载火箭	测发模式	测发周期
猎鹰9	三平	16d, 技术区 12d, 发射区 4d
宇宙神5	三垂	21d, 技术区 20d, 发射区 14h
德尔它4H	两平一垂	24d, 技术区 16d, 发射区 8d
质子号	三平	30d, 技术区 25d, 发射区 5d
联盟号	三平	21d, 技术区 18d, 发射区 3d
阿里安5	三垂	22d, 技术区 21d, 发射区 9h

2.3 具备射前无人值守加注发射和牵制释放能力,实现安全发射

国外火箭通过减少射前操作项目、优化射前流程、射前状态参数远程监控、连接器自动对接及脱落、连接器零秒脱落等技术基本实现了加注测试发射全过程无人值守,宇宙神5、德尔它4H、猎鹰9、阿里安5等火箭从低温推进剂加注实现了发射前端无人值守^[11]。美国、欧洲和俄罗斯研制的大部分火箭都采用了牵制释放技术,猎鹰9火箭在每次发射前还会开展静态点火测试,利用牵制释放机构将火箭系固在发射平台上,验证各发动机和全系统的工作状态,并多次找到了隐患,这对确保火箭不带问题上天、安全可靠完成发射任务起到了重要作用,如图9所示。

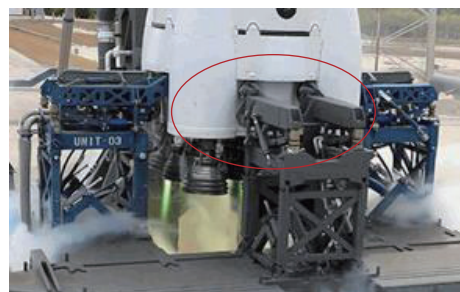


图9 猎鹰9火箭牵制释放机构

Fig. 9 The hold-down and release mechanism of Falcon 9 launch vehicle

2.4 具备自动化测试发射能力,实现自动发射

国外火箭在自动化测试发射方面开展了大量

的研究,并在火箭发射中进行了实际应用。旋风号是国际上首个采用全自动射前准备与发射技术的火箭,火箭在发射区完成总装测试后,就不再需要人直接操作,后续自动按程序执行,地面系统具备自动起竖、自动对接、自动加注、远程测试发射的能力。天顶号火箭在离开水平总装测试厂房后,通常在 28h 内实现自动发射,所有的发射操作都是按照事先确定的程序自动进行^[12]。艾普斯龙火箭利用箭上和地面设备自动检测功能以及高速网络实现了自动发射,简化了地面设备,缩短了操作时间,只需要通过一台笔记本电脑就可以遥控进行发射控制,大幅减少了参与准备及发射工作的人数^[13]。

2.5 地面系统向通用化发展,提高任务适应性,实现通用发射

国外地面系统同一个工位可以发射同一型谱多种构型的火箭,每一种构型火箭都有自己的专用发射工位已经成为历史。部分工位也可以发射多种型谱的火箭,比如肯尼迪航天中心的 LC-39A 发射工位可用于发射土星 5、航天飞机、猎鹰 9 等火箭,LC-39B 发射工位经过适应性改造后,可用于空间发射系统 SLS 火箭发射。另外,同一型谱火箭可在多个发射场多个工位发射,用以支撑高密度发射任务。比如质子号火箭在拜科努尔发射场有 3 个发射工位,猎鹰 9 火箭在美国 3 个发射场都各有 1 个发射工位,宇宙神 5 和德尔它 4H 火箭在卡纳维拉尔角空军基地和范登堡空军基地各有 1 个发射工位。

2.6 地面系统具备多种发射方式和不同大小火箭的发射能力,综合发射能力强

为了适应新型航天器、运载火箭的发展需要,国外火箭地面系统已经实现了陆上发射、海上发射和空中发射等多种发射方式。海射天顶号火箭是世界上第一型实现海上发射的火箭(见图 10),美国的“飞马座”火箭是世界上唯一正式应用的空射火箭。与传统的陆上发射火箭相比,海上发射具有航落区安全性好、发射点灵活、发射低倾角卫星能量利用效率更高等突出优点,而空中发射由于火箭具有一定初始速度和高度,可提高运载能力,同时还具备机动发射、快速发射以及低成本等优势。美国、俄罗斯和欧洲等国家的地面系统大多可以发射液氧煤油、液氢液氧等推进剂的火箭,具备小型、中型、大型和重型等多种火

箭发射能力。



图 10 海射天顶号火箭地面系统

Fig. 10 The ground system of Sea Zenith launch vehicle

3 我国运载火箭地面系统发展方向

3.1 发展思路

我国航天经过 60 多年的发展,已形成完善的小型、中型以及大型运载火箭系列^[14],但在地面发射技术方面,与航天强国还存在一定的差距,主要体现在火箭发射方式单一,测试发射周期特别是在发射区占位时间较长,火箭发射准备操作自动化程度低,在地面系统健康管理、牵制释放和无人值守等技术方面,启动较晚,仍停留在方案设计阶段,尚未进行有效的型号应用,与国际先进水平存在较大差距。

我国未来运载火箭地面系统应具备多种发射方式和测发模式进入空间的能力,其中发射方式包括陆上发射、海上发射和空中发射,测发模式包括一平两垂、三垂和三平测发模式。目前我国在液体火箭海上发射技术和大中型捆绑液体运载火箭三平测发模式技术方面尚属空白,后续需要重点研究突破。在具备多种方式进入空间的基础上,从快速发射、简易发射、安全发射、自动发射和通用发射等方面全面提升火箭地面系统发射能力,牵引各项新技术和其他系统发展。

快速发射能力主要反映火箭在发射场的测发周期以及在同一个工位连续两次发射的时间间隔和火箭在发射区占位时间。简易发射能力主要反映发射场和发射台的建设规模。安全发射能力主要反映火箭在射前加注发射过程中人员和产品的安全性。自动发射能力主要反映火箭发射过程的自动化程度。通用发射能力反映不同构型火箭在同一个发射工位的适应能力。地面系统未来发展方向及关键技术如图 11 所示。

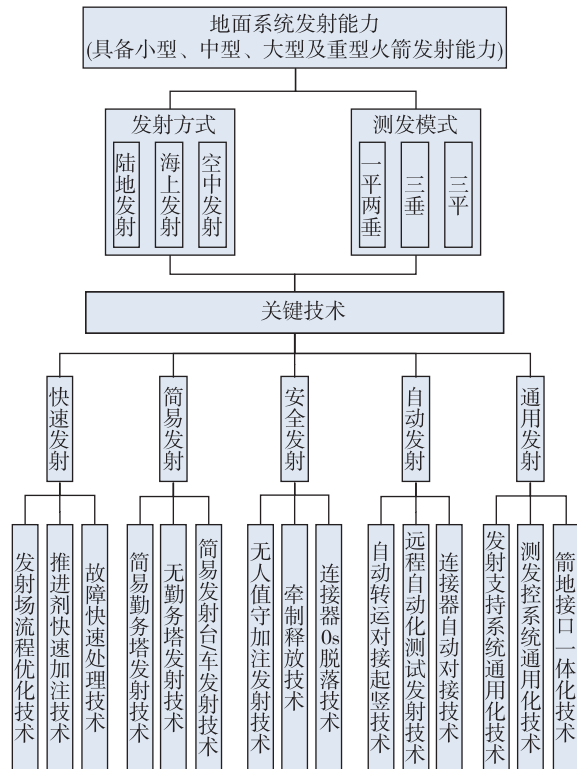


图 11 地面系统未来发展方向及关键技术

Fig. 11 The development direction and key technologies of ground system

3.2 主要关键技术分析

3.2.1 液体运载火箭海上发射技术

与陆地发射相比，海上发射可以灵活选择发射点和航落区，有效解决航区和残骸落区的安全问题，同时也可满足各种不同轨道尤其是低倾角轨道卫星的发射需求。液体火箭海上发射需考虑发射点位置、运输路线、总装测试模式、测控及安控方式、低温推进剂运输贮存适应性等因素，保障难度比陆地上更大。火箭在海上平台发射时，火箭发动机喷出的高温高速燃气导流效应与陆地导流槽的导流效应不同，需开展海上发射开放式导流技术研究。

火箭海上发射易受海浪、海风、洋流等海洋环境影响，发射平台存在一定程度的晃动，火箭与海上发射平台运动响应耦合关系较强。通过开展风-浪-火箭-塔架-发射平台-冲击载荷多物理场建模与动态响应仿真，分析火箭初始姿态和发射平台运动特性，以评价典型海况环境下海上发射平台与火箭起飞多物理场的相容性和安全性设计。

3.2.2 三平测发模式技术

我国运载火箭测发模式主要为一平两垂模式

和三垂模式，虽趋于成熟，但也存在着不足。三垂模式发射场配套设施设备复杂，费用高；一平两垂模式发射区占位时间长，不能实现快速发射和连续发射；而三平模式可以兼顾三垂模式和一平两垂的优点，发射场配套设施较为简单且在发射区占位时间较短，具备快速发射和连续发射能力，对于丰富我国测发模式应用、优化发射场布局 and 降低发射成本具有重要意义。

目前，我国大部分液体运载火箭都是按垂直状态开展总装测试设计的，部分总装测试项目只能在垂直状态完成，如惯性器件、伺服机构及氢氧发动机等单机安装和运输。通过大中型捆绑运载火箭三平模式总体技术研究，完成三平模式发射流程和逆流设计和单机改进，解决全箭垂直状态和水平状态总装测试差异性问题的同时，对火箭与起竖托架、发射台、发射场的箭地接口进行适应性改进，满足三平模式下箭地接口对接脱落要求。

3.2.3 发射场流程优化技术

我国现役运载火箭发射场流程经过多轮优化，测试发射效率大幅提升。但面对未来持续高密度任务形势，仍有深入优化的空间和必要性。开展现役运载火箭流程持续深入优化工作，包括火工品、氢氧发动机大喷管装箭运输，争取在总装厂安装，减少发射场操作项目；优化分系统测试和总检查项目，提高测试效率等。

新一代运载火箭测试发射周期长，距工程目标尚有较大差距，且难以满足未来高密度任务要求。从减少发射场保留工序、总装操作和测试过程中的技术状态变化、状态快速转换等方面着手，主要优化项目包括：开展氢氧发动机大喷管装箭运输技术攻关、减少重复性测试项目、动力系统贮箱置换改在技术区、优化箭体垂直度调整和地面光学瞄准等测试项目。同时提升箭上设备防水性能，缩短活动发射平台发射后恢复时间等。

3.2.4 推进剂无人值守快速加注技术

推进剂快速加注技术是实现快速发射的重要手段，主要包括推进剂大流量加注、不同种类推进剂并行加注和推进剂过冷加注等方面。我国现役液体运载火箭多为串行加注模式，加注流量小，加注时间长，加注后温升大，贮箱内的蒸发损耗大，射前还需要过冷补加。通过开展液氧煤油、液氢液氧并行大流量加注关键技术研究，评估不

同推进剂并行加注和大流量加注的安全性,论证火箭和地面系统对并行加注和大流量加注的适应性。在现有理论研究基础上开展液氧全过冷加注应用研究,确保全过冷加注过程中能够有效控制贮箱内液氧温度,防止输送过程产生两相流,保证加注平稳,同时加强发动机以及全箭对过冷低温推进剂适应性研究。

低温推进剂加注和发射的各流程环节互相耦合影响,导致流程复杂。为实现无人值守加注发射,在保障安全性和系统协调性的基础上,从全流程、全工况开展无人值守加注流程设计,同时开展关键技术攻关及关键产品的演示验证等,以确保关键技术和关键产品功能性能指标、可靠性满足飞行试验要求。

3.2.5 简易发射技术

简化发射设施特别是简化发射区是航天发射的发展趋势,也是火箭先进性的一个重要标志。通过简化火箭在发射区工作项目,优化射前流程,提高火箭的使用性能和自然环境防护能力,可以降低对固定勤务塔、脐带塔和活动发射平台的保障要求。不管火箭采用何种测发模式,可优先考虑在发射区建设简易勤务塔,只在某些特定部位设置操作可达性,甚至可以考虑完全取消固定勤务塔,利用活动发射平台上的脐带塔完成射前各项工作。

完全取消发射区勤务塔需将原来设置在勤务塔的加注供气设备、管路、测试间等功能移植到活动发射平台脐带塔中,会给脐带塔方案设计和设备布局带来新的问题,同时对火箭的发射可靠性和环境适应性提出了更高的要求。相对于取消勤务塔方案,简易勤务塔方案可不设置回转工作平台,为非全封闭状态,火箭在发射区处于露天状态。通过将加注、供气、空调管路、电缆等设备放在简易勤务塔内,可降低活动发射平台脐带塔的设计难度和规模。

3.2.6 牵制释放技术

火箭采用牵制释放技术可以降低由于发动机、伺服机构等关键系统及单机早期故障导致的危害火箭、发射场安全的事故发生概率,提高火箭发射可靠度。牵制释放装置的牵制力可按火箭起飞推力与起飞质量之差即富余推力作为基本载荷,再将风载造成的载荷转移、发射台刚度、发动机推力偏差等因素综合后作为附加载荷来决定每一

个牵制点的设计载荷。过去我国火箭发动机不能变推力启动,富余推力较大,导致牵制释放装置的牵制载荷较大,其本身设计难度和对火箭的冲击响应均较大。未来我国火箭发动机实现节流和变推力启动后,可以降低牵制释放装置的设计难度及对火箭的冲击。

目前,我国尚无工程应用的牵制释放技术可供参考,需开展发动机变推力启动、牵制释放与故障监测技术研究,通过对爆炸型牵制释放装置和机构型牵制释放装置两种方式对比分析论证,确定牵制释放装置方式;通过多参数融合信息开展牵制释放故障诊断方案;通过优化论证提出助推器与芯级发动机启动时序,并开展牵制—释放/紧急关机对火箭结构及地面设施影响分析。

3.2.7 远程自动化测试发射技术

我国火箭在测试、操作、检查等环节基本都需要人工的现场参与,自动化程度仍然偏低。从推进剂加注开始,到点火前 $-15\text{min}\sim 30\text{min}$,发射区前端仍需大量的人员保障,以完成加注连接器对接脱落、加注管路撤收、箭体封舱、空调管路撤收、空调监测设备撤收、垂直度调整、瞄准、爆炸器引爆器安装、拔短路插头、拆防风拉杆、防水、防热以及诸多地面设备通断电等操作。对于一些射前状态参数的检查确认还需要人员做到现场“眼见为实”,未能实现远程自动监测。

连接器自动对接和零秒脱落技术是实现远程自动化测试发射的重要手段,连接器自动对接机构可在无人的状态下实现远程对接;火箭点火起飞后,箭体中部箭地连接器才脱落,可以有效规避连接器二次对接风险,提高射前流程的可逆性,为实现射前无人值守提供有力的技术保障。通过在发射前端增加非接触式、无线通信网络及其相应的传感器,完成无人值守所需的监测参数、音频视频信息的采集、汇总、入网,提高自动化测试发射水平。

3.2.8 箭地接口一体化技术

在传统的研制模式下,不同发射场、不同火箭的接口不同,流程不同,严重影响地面系统的保障能力。随着新一代运载火箭研制的不断加速,发射场新老火箭发射能力可靠并存与逐步替代的全面推开,“十三五”期间酒泉发射场、太原发射场、西昌发射场均将建设新一代运载火箭发射工位,“十四五”及较长一段时期文昌发射场还将建

设新一代载人运载火箭和重型运载火箭发射工位等。因此,有必要规范、优化和简化火箭与地面系统的技术接口,提升箭地一体化设计与发射水平。

火箭按照模块化、系列化、组合化设计生产,以型谱化的思路提出对发射场建设要求,统一小型、中型、大型及重型火箭对发射场建设要求,具备同一工位多构型火箭发射能力及同一构型火箭多工位发射能力,实现火箭从通用的发射场实施通用发射,提高发射任务适应性。推进发射场地面设备装备化,采用“通用硬件基础设备+适应性软硬件组合”实现火箭地面测发控设备的一体化设计。

4 结论

地面系统的性能对运载火箭的使用维护性能有很大影响,在我国新一代运载火箭研制的牵引下,地面系统发展应满足多型号、多任务需求,突出快速发射、简易发射、安全发射、自动发射和通用发射的特点。按照地面系统整体发展思路,突破相关关键技术,实现我国运载火箭综合发射能力提升,助力航天强国建设。

参考文献

[1] 李福昌. 运载火箭工程[M]. 北京:中国宇航出版社, 2002:221-223.

- [2] 魏继友. 航天发射塔设计[M]. 北京:国防工业出版社,2007:1-7.
- [3] 刘海波,张敬. 新型运载火箭测试发射模式[J]. 导弹与航天运载技术,2012(5):27-31.
- [4] Space X. Falcon 9 launch vehicle payload user's guide (Rev 2)[M]. Space Exploration Technologies Corporation, 2015.
- [5] 孙雅平. 德尔它4系列运载火箭[J]. 导弹与航天运载技术,2005(6):21-27.
- [6] 张菽. 宇宙神5系列运载火箭的现状及其未来的发展[J]. 导弹与航天运载技术,2008(2):56-60.
- [7] 康开华,才满瑞,尚辉,等. 质子号运载火箭及其运营[J]. 导弹与航天运载技术,2006(3):21-27.
- [8] 《世界航天运载器大全》编委会. 世界航天运载器大全(第2版)[M]. 北京:中国宇航出版社,2007:600-619.
- [9] 文隆枝. 阿里安5运载器的发射与操作设备[J]. 导弹与航天运载技术,1995(4):64-74.
- [10] 周凤广. 世界航天发射场系统(国外篇)[M]. 北京:国防工业出版社,2009:111-129.
- [11] 肖士利,谢志丰,潘忠文,等. 运载火箭发射场无人值守加注发射技术研究[J]. 宇航学报,2019,40(4):459-465.
- [12] 周媛. 天顶号运载火箭的发射方式研究[J]. 飞航导弹,2017(5):15-17.
- [13] 张铎予,吴小宁. 日本艾普斯龙火箭的发射场测发控技术分析[J]. 中国航天,2017(10):20-26.
- [14] 龙乐豪,李平歧,秦旭东,等. 我国航天运输系统60年发展回顾[J]. 宇航总体技术,2018,2(2):1-6.

引用格式:肖士利,郭振,谢志丰,等. 中国运载火箭地面系统发展方向研究[J]. 宇航总体技术,2020,4(2):25-32.

Citation: Xiao S L, Guo Z, Xie Z F, et al. Research on the development directions of Chinese launch vehicle ground system [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(2): 25-32.