



民商航天运载火箭地面系统 现状与发展分析

李永俊¹ 杨毅强^{1,2}

(1. 北京中科宇航技术有限公司; 2. 中国科学院力学研究所)

摘要: 本文在论述民商航天运载火箭地面系统发展现状的基础上,总结了民商航天运载火箭地面系统的特点,分析了民商航天地面系统发展趋势,为后续民商航天运载火箭地面系统发展提供参考。

关键词: 民商航天; 运载火箭; 地面系统

商业航天是指以营利为目的,独立的、非政府的、市场驱动下的航天活动,一般由私人或企业集团投资,并可为国家和社会创造经济效益与社会效益。无论是传统航天还是商业航天,运载火箭地面系统都具有较强的通用性和继承性,但与传统航天追求高可靠性的目标有所不同,商业航天的地面系统在高可靠性的基础上追求低成本和快速响应。本文主要对完全由民营资本投资和主导的民商航天运载火箭地面系统的现状与发展进行分析。

一、固体运载火箭地面系统现状

我国民商航天公司成立初期研制了多型固体运载火箭,基本上是直径为1.2m或1.4m的小型固体运载火箭,主要包括蓝箭航空气空科技股份有限公司研制的“朱雀”一号、北京星际荣耀空间科技股份有限公司研制的“双曲线”一号、星河动力(北京)空间科技有限公司研制的“谷神星”一号、重庆零壹空间科技股份有限公司研制的OS-M1火箭。北京中科宇航技术有限公司研制的“力箭”一号固体运载火箭为中型固体运载火箭,其直径为2.65m。

(一)“朱雀”一号火箭

“朱雀”一号火箭是蓝箭航天研制的三级固体火箭,箭体直径1.2m,全长约19m,起飞质量约26t,是我国第一型民营航天轨道级运载火箭。“朱雀”一号火箭采用三平测发模式,火箭在总装厂完成总装及出厂测试后,分段运输到发射场技术区,在技术区进行水平组装,水平测试,星箭对接、合罩;发射当天,火箭以水平状态整体转运到发射工位,起竖并进行简单测试,然后完成发射,发射方式为垂直热发射。

火箭在技术区完成总装测试后,转载到起竖架上。使用通用运输车将起竖架与箭体一起从技术区厂房转运到发射区场坪,通用运输车倒车,起竖架对接发射台(见图1)。发射台为简易发射台,支撑臂可手动调平。起竖架双缸起竖,将火箭转换为竖直状态,对接发射台,起竖架回平,简单测试后发射(见图2)。

2018年10月27日,“朱雀”一号遥一火箭在酒泉卫星发射中心发射升空,第三级箭体飞行姿态出现异常,卫星未能进入预定轨道。发射后,导流器经受了

火箭烧蚀(见图3)。发射后技术人员测量了导流器防热帽的烧蚀厚度,经评估,简单整修后可再次使用。“朱雀”一号运载火箭仅研制出一枚,地面设备使用一次后封存。



图1 运输车倒车,“朱雀”一号遥一火箭起竖架准备对接发射台



图2 双缸起竖“朱雀”一号遥一火箭



图3 “朱雀”一号遥一火箭发射后的导流器

(二) “双曲线”一号火箭

“双曲线”一号运载火箭是由星际荣耀研制的四级火箭，箭体直径1.4m，全长约20.8m，起飞质量约31t。“双曲线”一号采用三平测发模式和简易地面发射支持系统，有效降低了研发成本。

火箭在技术区完成总装测试后，转载到通用运输车。发射当天，从技术区厂房水平转运到发射区场坪。箭上设有吊点，安装了2根长翻转板，使用双吊车将箭体翻转为竖直状态（见图4），对接发射台，使用高空作业车拆除翻转板。发射台为简易发射台，支撑臂可手动调平。双吊车翻转的优点是节约资金，缩短研制周期；缺点是操作时间长，可靠性、安全性降低。2019年7月25日，“双曲线”一号遥一运载火箭在酒泉卫星发射中心成功发射，实现了我国民营运载火箭成功入轨零的突破。发射后，导流器损毁（见图5）。

从“双曲线”一号遥二运载火箭开始，星际荣耀改进了发射工艺流程，使用翻转架水平运输箭体（见

图6），双吊车起吊翻转架对接发射台（见图7），单吊车翻转起竖（见图8），但操作流程仍然复杂，可靠性、安全性略有提高。

经历了连续3次发射失利，2023年4月7日，“双曲线”一号遥六火箭在酒泉卫星发射中心发射成功。从遥二火箭开始，技术人员使用了改进的导流器，导流器经受了火箭烧蚀（见图9），整修后可重复使用。



图6 水平运输“双曲线”一号遥六火箭



图4 双吊车翻转“双曲线”一号遥一火箭



图7 “双曲线”一号遥六火箭双吊车起吊翻转架



图5 “双曲线”一号遥一运载火箭烧毁的导流器

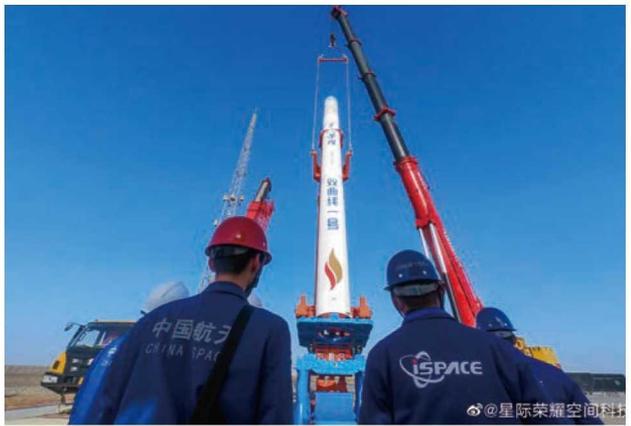


图8 “双曲线”一号遥六火箭单吊车翻转架起竖

(三) “谷神星”一号火箭

“谷神星”一号火箭是星河动力研制的四级火箭，火箭直径1.4m，全长约20m，起飞质量约33t。“谷神星”一号遥一运载火箭采用三平测发模式，发射当天，全箭使用通用运输车辆转场到发射场坪。箭上不设翻转吊点，使用带有抱臂、托盘的翻转架，双吊车翻转起竖，对接发射台，翻转架回平，撤除翻转架(见图10)。其发射工艺流程与“双曲线”一号遥一运载火箭类似。发射台为简易发射台，支撑臂可手动调平。

2020年11月7日，“谷神星”一号遥一火箭在酒泉卫星发射中心成功首飞。2021年12月至2023年8月，“谷神星”一号火箭连续发射成功。2023年9月21日，其遥十一火箭发射失利。2023年12月5日，其遥九火箭发射成功。

从“谷神星”一号遥四火箭开始，星河动力就使用了定制的运输发射车(见图11)，该发射车由起竖臂、保温舱、发射台、导流器、液压模块运输车组成，具备较好的环境温度控制、机动转场运输、快速起竖发射

等功能。车载发射台支撑臂可手动调平。

2023年9月5日，“谷神星”一号海射型运载火箭在山东海阳附近海域发射成功，为我国民营火箭首次海上发射。此次发射使用了无依托陆海通用机动平台，针对海上晃动条件下的动基座发射环境，首次使用无导向热发射。地面系统采用的技术有低成本无依托陆海通用转运发射车技术(见图12)、固体火箭非火工锁紧释放技术、固体火箭海上无导向热发射技术等。



图9 “双曲线”一号火箭改进的导流器



图11 “谷神星”一号运输发射车



图10 “谷神星”一号遥一火箭双吊车翻转架起竖



图12 “谷神星”一号海射型运输发射车

(四) OS-M1 火箭

零壹空间的 OS-M1 小型四级固体运载火箭长 19m，直径 1.2m，起飞质量 20t。OS-M1 火箭采用三平测发模式，在技术区测试后转载到通用运输车上，水平运输到发射场坪（见图 13）。箭上设有翻转轴，双吊车翻转起竖，对接简易发射台（见图 14）。2019 年 3 月 27 日，OS-M1 火箭在酒泉卫星发射中心发射失利，目前没有后续发射计划。

(五) “力箭”一号中型火箭

“力箭”一号是中科宇航研制的四级固体运载火箭，起飞质量 135t，总长 30m，直径 2.65m。“力箭”一号火箭采用三平测发模式，火箭在技术区完成总装测试后，转载到转运起竖架上，使用液压模块运输车，提前 7 天左右将转运起竖架与箭体一起从技术区厂房

转运到发射区场坪（见图 15），液压模块运输车倒车，起竖架与发射台对接。发射台支撑臂可升降，但无调平功能。

为了抵御风沙等恶劣天气，“力箭”一号火箭地面系统使用了移动式环境保障设备（见图 16），可保护火箭、发射设备，并提供适宜的温湿度环境。临射前，移动式环境保障设备自行从发射工位撤离至安全区域。传统的火箭勤务塔合抱活动平台，形成大封闭环境，可保护竖立在发射台上的火箭，但不具备包裹火箭抵抗台风的能力。移动式环境保障设备的优点在于，如果遇到台风等极端恶劣天气，可将火箭回平，在多台风的发射场尤其适用。“力箭”一号火箭使用起竖架四缸起竖（见图 17），火箭对接发射台，测试，起竖架回平，点火发射。

2022 年 7 月 27 日，“力箭”一号遥一运载火箭在酒



图 13 水平运输 OS-M1 火箭



图 15 水平运输“力箭”一号遥一火箭



图 14 OS-M1 火箭竖立在发射台上



图 16 “力箭”一号火箭移动式环境保障设备



图 17 四缸起竖“力箭”一号遥一火箭

泉卫星发射中心成功首飞，突破了大吨位固体火箭地面使用及热发射技术。2023年6月7日，遥二火箭成功发射。

“力箭”一号火箭使用自建发射工位，在发射台正下方开挖了单边导流槽，使用导流槽排导发动机尾焰。发射台台面一边固定在起竖支承横梁上，相对边使用2条发射台支腿支承，固定在场坪地面（见图18）。液压系统驱动发射台支撑臂升降，避免起竖时被干扰。

二、中型液体运载火箭地面系统现状

随着民商航天的发展，一些公司开始研制液体运载火箭。截至2023年底，已完成首飞的中型液体运载火箭有蓝箭航天研制的“朱雀”二号火箭、北京天兵科技有限公司研制的“天龙”二号火箭。

（一）“朱雀”二号火箭

“朱雀”二号中型液体运载火箭为两级构型，采用液氧甲烷推进剂，箭体直径3.35m，全箭高度49.5m，起飞质量219t。

“朱雀”二号火箭采用三平测发模式，火箭在技术区完成总装测试后，水平转载到转运架上，按正常发射流程，提前7天使用液压轴线车将转运架与箭体一起从技术区厂房转运到发射工位，伴随保障车提供的温控系统在转运过程中为整流罩内空间提供恒温恒湿环境（见图19）。后续任务将发射工位时间压缩至5天。转运架、起竖臂通过双起竖油缸起竖火箭（见图20）。经过垂直状态测试，加注低温推进剂，射前各连接器接近零秒脱落，起竖臂快速后倒，避让火箭起飞漂移空间。

“朱雀”二号火箭使用自建的液氧甲烷发射工位（见图21）。能源支持系统用于火箭在发射场的推进剂和各类工艺用气源的地面保障支持，根据功能划分为液氧加注系统、LNG加注系统、液氮加注系统、地面供气系统、测控系统等。发射台下方开挖单边导流槽，用以排导发动机尾焰（见图22）。发射台台面固定在导流槽开口正上方，台面上设有4个支撑臂，液压系统驱动发射台支撑臂升降，实现箭体垂直度自动调整功能。

2022年12月14日，“朱雀”二号遥一运载火箭在酒泉发射中心首飞失利。2023年7月12日和12月9日，



图18 “力箭”一号火箭发射台



图19 水平运输“朱雀”二号遥二火箭



图20 双缸起竖“朱雀”二号遥二火箭



图21 “朱雀”二号液氧甲烷发射工位

遥二、遥三运载火箭连续发射成功。“朱雀”二号运载火箭是我国第一款全模块双低温液体火箭，也是我国第一次在自建工位上发射成功的民商液体火箭。

(二)“天龙”二号火箭

“天龙”二号运载火箭为三级结构，采用液氧煤油推进剂，火箭直径3.35m，长32.8m，起飞质量153t。“天龙”二号火箭采用三平测发模式，其发射流程具有特色，实现了中型液体运载火箭的无依托发射。发射工位只有一块发射场坪，发射设备主要由起竖臂、发射台、桁架地基、液压系统、控制系统组成，桁架地基放置在场坪地面，与场坪没有地锚或栓固连接。预先在桁架地基上装配起竖臂、起竖油缸、发射台、导流器。

在发射前14天，“天龙”二号遥一火箭通过多用途平板运输车按计划从技术区转场至发射场坪(见图23)，与起竖臂并排放置。在2辆吊车、全箭水平吊具的辅助下实现火箭水平转载至起竖臂上(见图24)，起竖臂通过双起竖油缸起竖火箭(见图25)，起竖臂还为火箭加注供气管路、电缆敷设提供安装空间，为实现上人操作提供通道和平台。推进剂加注地面设备包括煤油

加注撬车、煤油槽车、煤油加注管路、液氧加注撬车、液氧槽车、液氧加注管路、液氮槽车、过冷器撬车、配气台车、供气管路。煤油槽车、液氧槽车使用民用槽车(见图26)，液氧为市购产品。经过垂直状态测试，煤油提前加注，手动拆除煤油连接器。发射当天加注液氧，射前手动拆除液氧连接器。二级电气脱插分离后，起竖臂快速后倒，避让火箭起飞漂移空间。发射



图24 双吊车将“天龙”二号遥一火箭转载到起竖臂



图22 “朱雀”二号发射台和导流槽



图25 双缸起竖“天龙”二号遥一火箭



图23 水平运输“天龙”二号遥一火箭



图26 “天龙”二号遥一火箭民用槽车

后,导流器经受了火箭烧蚀(见图27)。技术人员通过测量导流器隔热帽被烧蚀的厚度,估算出还可以满足一发火箭使用。



图 27 “天龙”二号遥一火箭发射后的导流器

三、中大型运载火箭地面系统现状

(一)中大型液体运载火箭

随着民商航天的继续发展,各企业发布了各自的中大型液体火箭研制计划,表1列出了部分正在或将要研制的中大型液体火箭。

表 1 未来中大型液体火箭

公司名称	火箭名称	火箭构型	推进剂
蓝箭航天	“朱雀”三号	两级,光杆4.5m	液氧甲烷
天兵科技	“天龙”三号	两级,光杆3.8m	液氧煤油
	“天龙”三号重型	芯级3.8m,2台助推器	
星际荣耀	“双曲线”三号	两级,光杆4.2m	液氧甲烷
	“双曲线”三号A	芯级4.2m,1台助推器	
	“双曲线”三号B	芯级4.2m,2台助推器	
星河动力	“智神星”一号	两级,光杆3.35m	液氧煤油
	“智神星”一号A	两级,光杆3.35m	
	“智神星”一号B	芯级3.5m,2台助推器	
中科宇航	“力箭”二号	两级,光杆3.35m	液氧煤油
	“力箭”二号重型	芯级3.35,4台助推器	
东方空间(山东)科技有限公司	“引力”二号	芯级3.8m,2台固体助推器	氧煤+固
	“引力”三号	芯级3.8m,2台助推器	液氧煤油
江苏深蓝航天有限公司	“星云”一号	两级,光杆3.35m	液氧煤油
	“星云”一号重型	芯级5m,2台助推器	
北京箭元科技有限责任公司	“元行者”一号	两级,光杆4.2m	液氧甲烷

中大型液体火箭包括串联型火箭、1台助推器捆绑型火箭、2台助推器捆绑型火箭、3台助推器捆绑型火箭和4台助推器捆绑型火箭等构型,整体水平运输和整体起竖难度依次增大,前三种火箭构型使用三平测发模式较为适宜,后两种火箭构型使用三垂测发模式较为适宜。如果大型卫星载荷不允许水平运输,则需要垂直运输、垂直对接星罩组合体。

为了满足商业航天发射需求,正在施工建设的海南文昌发射场二号工位为通用三平工位,围绕发射中心布置了前置设备间、导流槽、电缆通廊等设施,可适应液氧煤油、液氧甲烷两类推进剂的火箭发射需求。建成后的二号工位提供标准安装接口,可满足十余型商业火箭共性需求,包含了箭体直径3.5m、3.8m、4.2m光杆构型及捆绑构型。

火箭采用三平测发模式,使用液压轴线车水平运输。起竖系统采用起竖架与起竖油缸直接对接模式,发射场只提供油缸接口位置、翻转点安装位置,起竖架由各型火箭自带。中大型火箭使用四缸起竖,中小型火箭可使用外侧双缸起竖。发射台进行上、下分体式设计,发射场提供通用固定发射台,固定在导流槽上方。各型火箭自带活动发射台,对接固定发射台。

(二)中大型固体运载火箭

东方空间研制的“引力”一号全固体捆绑式中大型火箭采用三级半构型,芯级直径2.65m,捆绑4台直径2m助推器,起飞质量400t。由于4台助推器捆绑式火箭水平运输、整体起竖难度较大,火箭采用三垂测发模式在海上发射(见图28)。



图 28 海上发射“引力”一号火箭

四、民商航天运载火箭地面系统特点

(一) 发射流程特点

民商航天运载火箭在发射流程上尽量简化，发射场测试项目尽量减少，测试岗位没有区分一岗、二岗，测试人员都由火箭研发人员担任。典型的小型固体火箭发射流程如图 29 所示。

(二) 发射设备特点

截至 2023 年底，已执行首飞任务的民商运载火箭均采用三平测发模式。根据火箭尺寸、质量及推进剂种类不同，配套的地面系统也有差异。已首飞民商航天火箭发射设备特点汇总见表 2。

1. 小型固体火箭

(1) 小型固体火箭发射方式灵活。在民商航天起步阶段，为了节约成本，缩短研制周期，运输设备多使用通用运输车辆。随着民商航天的发展，相关公司研制了专用的转运发射车，提高了发射可靠性，缩短了发射准备时间。

(2) 小型固体火箭起竖方式多样。从简易翻转工装到改进后的翻转架，再到双缸起竖，可靠性逐渐提高。

(3) 小型固体火箭发射台一般为简易发射台，没有自动调平功能，也没有回转功能。导流方式一般为导流器，金属基体部分通常可重复使用，每次发射任务后需要对隔热层进行检修或者重新敷设。

2. 中型固体火箭

中型固体火箭质量较大，一般需要研制液压轴线车作为水平运输设备。起竖设备为多缸起竖，发射台具有自动调平功能，通常无回转功能。使用导流槽或导流器，导流槽效果更好，但建设成本较高。

3. 中型液体火箭

中型液体火箭直径和长度较大，一般需要研制液压轴线车或轨道车，便于载箭对接发射台时定位对准。起竖设备为双缸或四缸起竖。发射台使用支腿或支撑臂自动调平，通常无回转功能。导流方式为导流器或导流槽。

(三) 加注设备特点

传统航天企业一般在发射场建设固定的推进剂加注库房，库房内加注罐、加注泵等固定设施齐全。推

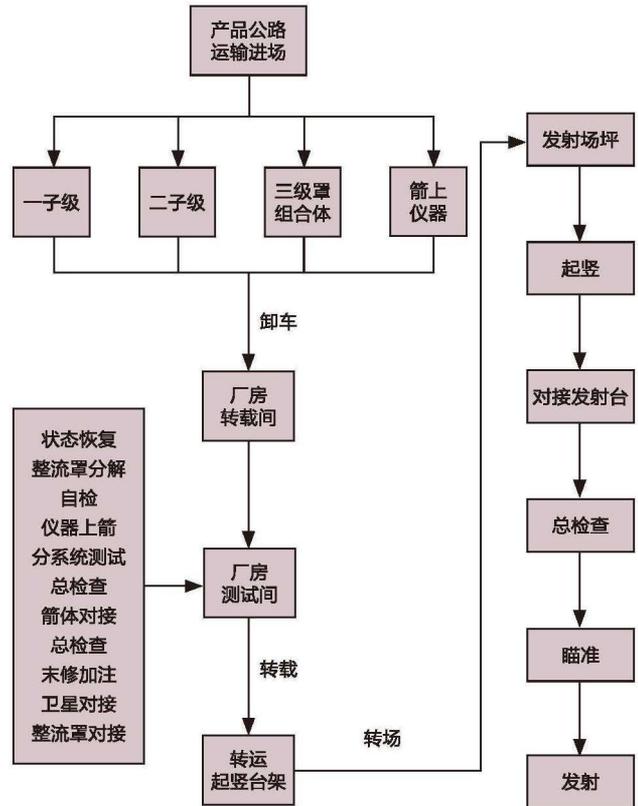


图 29 典型小型固体运载火箭发射流程

表 2 民商航天火箭发射设备

火箭名称	运输设备	起竖设备	发射台	导流
“朱雀”一号	通用运输车	起竖架+双缸	手动简易	导流器
“双曲线”一号遥一	通用运输车	翻转板+双吊	手动简易	导流器
“双曲线”一号遥二	通用运输车	翻转架+单吊	手动简易	导流器
“谷神星”一号遥一、遥二、遥三	通用运输车	翻转架+双吊	手动简易	导流器
“谷神星”一号遥四	运输发射车	起竖臂+双缸	手动简易	导流器
OS-M1	通用运输车	翻转轴+双吊	手动简易	导流器
“力箭”一号	液压轴线车	起竖臂+四缸	简易	导流槽
“朱雀”二号	液压轴线车	起竖架+双缸	自动调平	导流槽
“天龙”二号	多用运输车	起竖架+双缸	自动调平	导流器

进剂先转注到库房内,再向火箭加注。民商航天公司使用了撬装式加注设备,可移动;使用民用槽车直接加注,没有转注工序。

(四)地面测发控设备特点

1.精简地面测发控设备配套

传统航天企业一般在发射场前、后端配套两套或一套半测发控设备,试验室还有一套测试设备。为节约成本,在起步阶段民商航天运载火箭一般仅配套一套地面测发控设备,试验室、技术区与发射区共用,火箭在技术区完成测试后,前端测发控设备装箱,从技术区转运到发射区的前端设备间。随着民商航天的发展,测发控设备也在向两套设备冗余、互为热备份方向发展。

2.合并各系统测发控设备

地面测发控设备打破了传统航天专业分工,将控制、测量、动力系统测发控设备功能合并到电气测发控设备上,以节约成本。

(五)地面专业设置特点

传统航天按照传统分工设置地面专业,主要专业有地面总体、发射设备、加注供气设备、运输设备、吊装停放设备等,在其专业范围内开展工作。

民商航天地面专业设置各异:第一种是设有地面部门,大致按传统习惯分工;第二种是单独设置能源系统部门,承担加注、供气、连接器工作;第三种是没有设置地面部门,地面设计人员合并到火箭总体或火箭结构专业;第四种是设有地面部门,该部门除承担传统的地面专业工作外,还负责试车台、发射场工作。民商航天公司地面部门设置、地面专业分工、地面专业工作内容随公司的不同发展阶段不断动态调整。

五、地面系统发展趋势分析

总的来说,随着民商航天的继续发展,地面系统具备快速发射、简易发射、安全发射、自动发射和通用发射等能力。地面系统应顺应绿色、无污染、简约化、智能化、无人化发射的发展趋势,追求低成本控制,能够简单维护、快速维修,满足火箭快速重复发射的需求。新研民商火箭尤其是中大型、重型民商火箭地面系

统的发展趋势预测如下。

(一)多种测发模式补充

当前,三平测发模式广泛应用于民商航天中大型液体火箭,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。但在三平模式下,火箭竖立在发射工位时,暴露在自然环境中,要求火箭做好防风沙、防盐雾等措施,高空作业可达性不好,操作难度很大。如遇大风极端天气,火箭可能需要二次回抱、回平,择机再次起竖。

随着民商航天的发展,规划的中大型运载火箭有不少为并联构型。对于芯级并联4台助推器构型的火箭,整体水平运输、整体起竖难度较大,通常使用三垂测发模式比较经济。如果卫星载荷不允许水平运输,也只能垂直对接星罩组合体。民商航天探索将火箭芯级、助推器分别进行水平总装、水平转运、起竖,起竖后再将助推器组装到芯级的测发模式,这种测发模式可称为改进型二平二垂测发模式。在内陆发射场,一平两垂模式较为经济,也有望应用于民商航天火箭。

(二)筹划自建工位

民商航天起步阶段通常借用传统航天的发射工位。小型固体火箭需要的保障条件较少,提供一块发射场坪,接有市电即可。随着民商航天的发展,研制的中大型液体火箭需要的保障条件增多,如果沿用撬装式加注设备,规模将急剧增大,可靠性降低,应在固定的发射工位建设加注库房。中大型火箭使用导流器方式排导尾焰难度大,应在场坪上开挖导流槽。

当前,蓝箭航天、中科宇航在酒泉发射中心自建了固定发射工位,已经投入使用。天兵科技、星际荣耀、星河动力也正在或筹划自建发射工位。

(三)拓展海上发射能力

当前航天发射以陆上发射为主,海上发射较少,均为固体火箭。星河动力研制的小型固体运载火箭“谷神星”一号海射型在海上发射成功,东方空间研制的“引力”一号固体火箭成功进行了海上发射。海上发射的优点包括:提升发射安全性和任务适应性;发射点位更加灵活,能最大程度发挥火箭运力;海上发射还可以突破公路、铁路运输对火箭尺寸的限制。

海阳东方航天港提出了海上火箭发射支持系统方案,包括1个专业的航天港码头,2个系统(海面指挥系统、首区测控系统),3条船+1座平台(发射船、指挥船、服务保障船、半固定海上发射平台),4类核心装备(发射支持地面系统、移动式指控系统、移动式卫星保障系统、移动式火箭技术保障厂房)。图30为半固定式海上发射平台示意图。

海上发射的技术难度与地面发射相比要大很多,海洋的自然环境变化很大,海浪海风的影响会使发射环境难以掌控,对火箭发射平台要求很高。液体火箭在海上发射难度更大,民商航天积极拓展液体火箭海上发射方式,未来会有更多型运载火箭可以在海上实施发射。

(四)优化厂房布局

民商航天在自建工位时,对厂房布局方案进行了优化,例如,“力箭”一号火箭地面系统使用了移动式环境保障设备,建设了移动厂房并成功应用。

民商航天继续探索经济性更优的厂房布局。在满足最小火箭爆炸安全距离的前提下,技术厂房与发射工位相邻而建,距离在1km左右。火箭在技术厂房总装测试后,全箭使用铁轮架车沿铁轨推行至与起竖



图30 半固定式海上发射平台示意图

臂并非位置,使用随车起重机转载到起竖臂上,无需研制专用转场运输车辆。如果遇到极端恶劣天气,火箭还可以逆流返回技术厂房。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 彭小波,董彦民,李金梅.箭体翻转装置及火箭吊装系统:CN111071911A[P].2020-04-28.
- [3] 星河动力(北京)空间科技有限公司.运载火箭的起吊装置及其起吊方法:CN113336080A[P].2021-09-03.
- [4] 李瑞清,刘百奇,张军锋,等.运载火箭的发射准备设备及其发射准备方法:CN114754626A[P].2022-07-15.
- [5] 刘百奇,徐瑞,孙鹏军,等.一种用于火箭发射的防风锁定机构:CN212567120U[P].2021-02-15.
- [6] 高鹏,吕晓龙,王寿军,等.一种自行走式保温装置:CN214424145U[P].2021-10-19.
- [7] 高鹏,兰公英,王丽,等.用于火箭起竖系统的烧蚀防护模块及系统:CN217541656U[P].2022-10-04.
- [8] 张昌磊,戴政,张静茹,等.“朱雀”二号液氧甲烷火箭关键技术分析[J].中国航天,2023(7):8-12.
- [9] 李永俊,吴雪,韩召洋,等.一种中型液体运载火箭地面发射系统及发射方法:CN114459287A[P].2022-05-10.
- [10] 李永俊.一种中大型低温运载火箭测发系统及实现方法:CN115930696A[P].2023-04-07.
- [11] 李永俊.一种中型液体火箭烧蚀型导流器及其防热帽的制造方法:CN115891004A[P].2023-04-04.
- [12] 李同玉,彭昆雅.中国首次海上发射技术试验综述[J].中国航天.2019(6):6-12.
- [13] 杨毅强.再论美国商业航天及对我国的启示[J].卫星与网络.2020(6):18-26.

(责任编辑 徐菁) 中国航天