

下一代主力运载火箭发展思考

何巍, 牟宇, 朱海洋, 陈晓飞

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 针对我国下一代主力运载火箭后续发展问题, 首先回顾了世界主要航天国家和地区运载火箭发展历程, 分析了当前我国运载火箭发展问题, 基于运载火箭自身代际发展技术规律和外部发展需求两方面, 构建了运载火箭发射效能公式, 据此提出了我国下一代主力运载火箭4个重点发展方向, 最后给出了发展目标和建议。

关键词: 下一代运载火箭; 发展规律

中图分类号: V475.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 02-0001-12

Reflections on the Development of Next Generation Main Launch Vehicle

HE Wei, MOU Yu, ZHU Haiyang, CHEN Xiaofei

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

Abstract: For Chinese next generation main launch vehicle subsequent development problem, this paper first reviews the development process of major aerospace countries' launch vehicles in the world, analyzes the current development problems of Chinese launch vehicle, constructs the launch vehicle launch efficiency model based on two aspects of launch vehicle' own inter-generational development technology and external development needs, puts forward four key development directions of Chinese next generation main launch vehicles. Finally development goals and suggestions are given.

Key words: Next generation launch vehicle; Development law

0 引言

运载火箭一般指从地球将有效载荷送入空间轨道的运输工具, 决定着一个国家进出空间的能力, 具有高技术、高风险、高成本的特点, 是国家空间科学、空间技术、空间应用和安全体系建设的战略基础, 也是一个国家现代科技发展水平和综合国力的重要标志^[1-2]。

世界各国和地区在发展运载火箭过程中, 根据国家工程需求、市场需求以及技术发展情况适时调整, 形成了各具特色的发展规划。美、苏/俄始终致力于发展覆盖小、中、大、重型运载能力的运载火箭, 确保航天强国地位。欧洲地区运载

火箭发展更加注重实用与经济性。中国航天经过60余年的自力更生、艰苦创业, 发展了覆盖小、中、大型运载能力以及满足低、中、高和地球逃逸轨道不同有效载荷发射需求的运载火箭^[3]。截至2022年12月底, 长征系列运载火箭已累计发射458次, 飞行成功率超过96.5%, LEO运载能力达到25 t, GTO运载能力达到14 t, 综合性能位居世界前列, 支撑铸就了中国航天的“三大里程碑”, 有力支撑了载人航天、北斗导航、高分工程、月球探测、火星探测等一系列国家重大工程顺利实施。

我国虽然已经建立了较为完备的运载火箭能力体系, 快速响应能力、可靠性等部分技术指标

收稿日期: 2022-12-22; 修订日期: 2023-03-17

作者简介: 何巍 (1979-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为运载火箭总体设计。E-mail: yhzts@163.com

达到了世界先进水平，但在进入空间的能力、效率和成本^[4]方面与之相比还存在差距^[5-6]，亟须科学规划下一代主力运载火箭发展，支撑航天强国建设。本文通过调研分析主要航天国家与地区的运载火箭发展趋势，总结了美国运载火箭发展规律，提出下一代主力运载火箭重点发展方向，以指导后续运载火箭论证与发展。

1 世界主要国家和地区的运载火箭发展回顾

1.1 美国运载火箭发展回顾

美国作为航天领域技术领先的强国，自艾森豪威尔政府起，每届政府均出台《国家航天政

策》，顶层指导运载火箭等航天领域发展，美国航天重要事件发展见图1。依托国家政策牵引，美国具备陆、海、空基多平台发射手段，覆盖小、中、大、重等各种载荷发射需求。在不同时期先后发展了包括大力神（Titan）系列、宇宙神（Atlas）系列、德尔塔（Delta）系列、猎鹰（Falcon）系列等多种火箭，美国现役入轨级运载火箭见图2。

发展初期，美国运载火箭由国家战略需求单一驱动，1958年，基于丘比特导弹改装的丘诺1号运载火箭发射成功，解决了美国运载火箭的有无问题。20世纪60年代初期，美国和苏联太空竞赛白热化，美国集中优势科研力量研制了土星五号重型运载火箭，实现了人类第一次载人登月。之后为进一步提

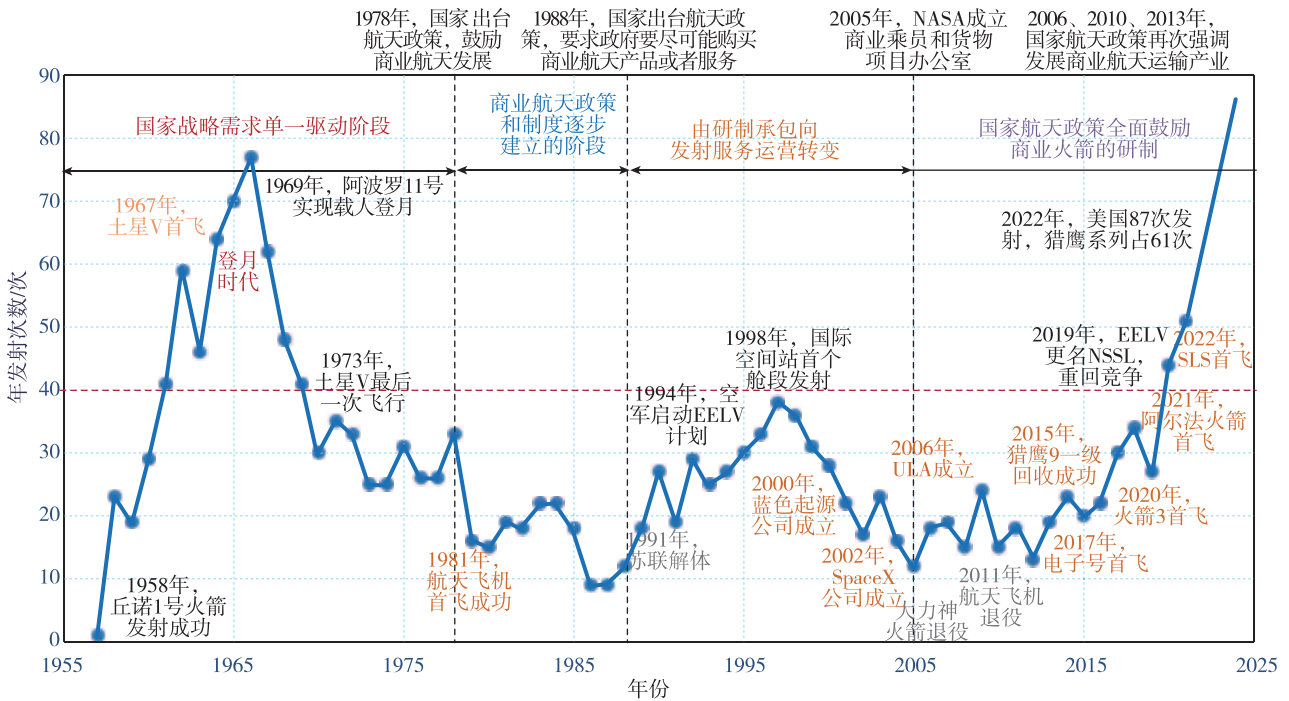


图1 美国航天发展重要事件

Fig. 1 Important events in the development of American aerospace

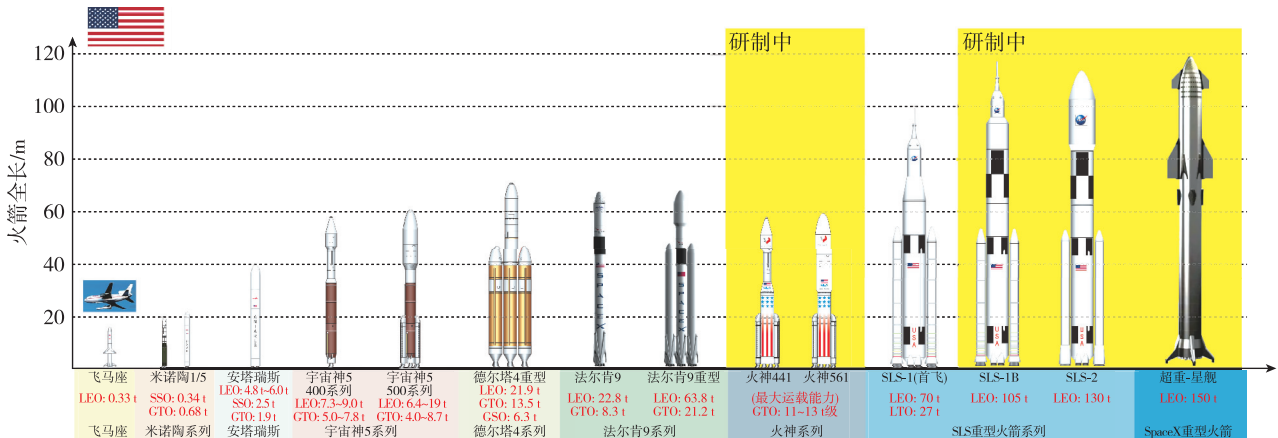


图2 美国现役部分入轨级运载火箭^[7]

Fig. 2 American partial launch vehicle in service^[7]

升发射效益, 1972 年启动了可重复使用的航天飞机研制计划。随着冷战结束及技术的不断发展, 美国运载火箭发展更加注重成本与效益, 在 1994 年启动了改进型一次性运载火箭发展计划 (EELV), 逐渐由研制承包向发射服务运营转变。进入 21 世纪, 美国开始全面鼓励商业火箭研制, 促使 SpaceX、蓝色起源公司等商业航天公司蓬勃发展, 大幅提升了航天发射效益。2022 年美国入轨级航天发射 87 次, SpaceX 公司占据了 61 次。同时致力于发展火箭完备能力, 新研重型运载火箭太空发射系统 (Space Launch System, SLS) 成功首飞, 重复使用重型火箭超重-星舰计划于 2023 年完成首飞。

整体来看, 美国作为航天强国, 始终致力于维持其在航天领域的世界领先地位; 强大的工业、技术基础是美国航天发展的先决条件, 支撑其政策转变后商业航天快速发展, 也支撑发展了众多中、小型运载火箭, 从国家层面审视存在明显的重复建设; 重复使用技术驱动航天运输系统产业升级, 猎鹰火箭凭借价格优势, 大幅挤占了传统火箭生存空间; 所发展的火神、超重-星舰等下一代运载火箭均具备部分或完全重复使用能力, 降低成本、提高效率的发展趋势明显。

1.2 苏联/俄罗斯运载火箭发展回顾

自 1957 年以来, 苏联先后成功研制卫星号、东方号、联盟号、闪电号、宇宙号、旋风号、质子号、能源号等运载火箭, 形成了能力完备的运载火箭体系, 支撑其在人类航天史上创造了第一颗人造地球卫星、第一艘载人飞船、第一个月球探测器等多项世界第一。但 1991 年苏联解体后, 俄罗斯年航天发射次数呈下降趋势, 见图 3。目前俄罗斯主要依托进步国家航天科研生产中心、赫鲁尼切夫国家航天科研生产中心两大科研生产联合体研制火箭, 前者以联盟号为主, 后者以质子号、安加拉系列为主。由于经济逐渐下行, 运载火箭整体更新换代比较缓慢, 如安加拉系列火箭研制工作前后持续了 20 多年。如何在有限经济约束下完成更多的航天发射任务, 逐渐成为其主要发展矛盾。为此, 俄罗斯一方面积极开展国际合作: 积极参加国际空间站舱段建造以及载人与货运发射任务, 为美国宇宙神系列运载火箭研制提供高性能液氧煤油发动机; 另一方面俄罗斯还将

退役的和根据战略武器削减条约而裁减的战略导弹改装成隆声号、第聂伯、波浪号和静海号等火箭, 投入商业发射市场。依靠运载火箭发射价格低、性能好、可靠性高的优点, 俄罗斯占据了一定国际市场。但随着美国 SpaceX 公司持续降低发射成本, 且 2010 年后俄罗斯发射事故频发, 以及国际环境持续恶化, 俄罗斯逐步丧失了国际发射市场。

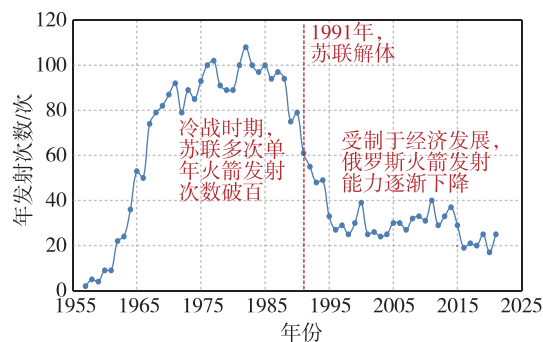


图 3 苏联/俄罗斯每年航天发射次数

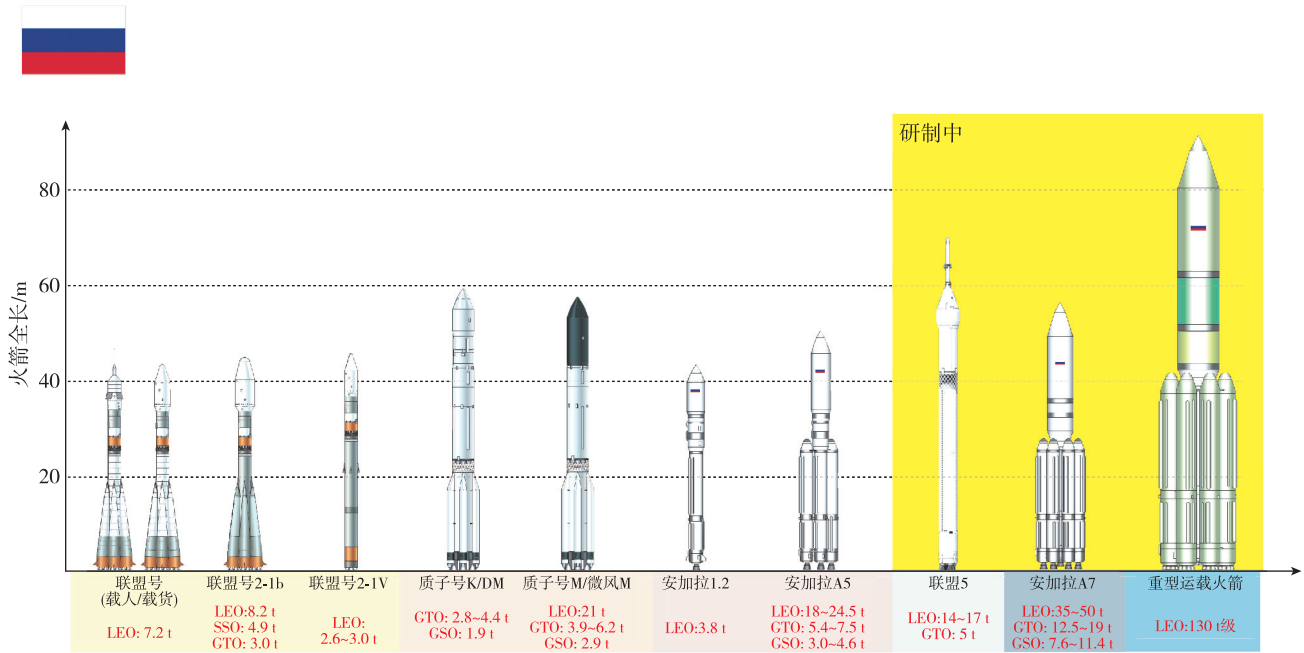
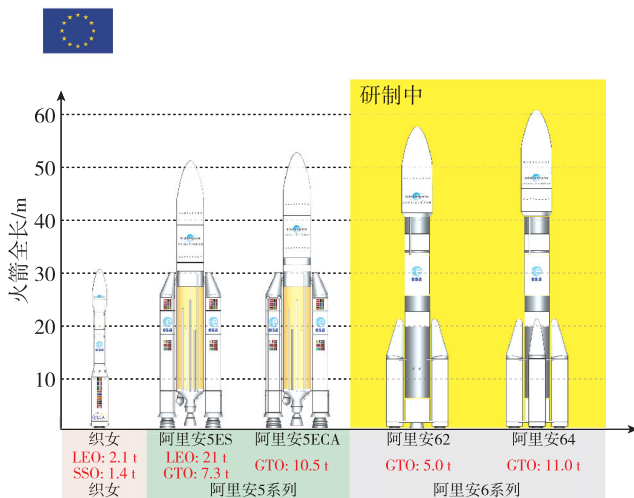
Fig. 3 Number of USSR/Russia space launches per year

整体来看, 俄罗斯由于受经济下行和国际环境持续恶化影响, 运载火箭更新换代缓慢, 仍以苏联时期联盟号、质子号为主力火箭, 当前俄罗斯现役运载火箭见图 4。

1.3 欧洲运载火箭发展回顾

欧洲是继美、俄之后第 3 个拥有卫星发射能力的地区, 多国联合研制了阿里安系列运载火箭, 可执行单星、双星甚至多星的发射, 确立了欧洲运载火箭在国际航天发射市场中的地位。同时, 欧洲也在积极发展中小型运载火箭, 与俄罗斯合作研制联盟号 ST 运载火箭, 以及意大利牵头研制的织女星小型运载火箭有效地补充了阿里安运载火箭在中低地球轨道有效载荷发射方面的空缺。欧洲运载火箭坚定执行模块化发展路线, 新研的阿里安 6 火箭和织女星 C 采用了通用化、模块化设计, 使用最少模块就可以适应从高到低几乎所有轨道发射任务的需求。

整体而言, 欧洲火箭发展坚持“少而精”的发展路线, 注重经济性、实用性, 但火箭具体技术方案受困于欧洲多国利益平摊, 无法实现最优, 且近期受到俄乌战争等国际形势影响, 航天任务和研制经费存在诸多不确定性。当前欧洲现役火箭见图 5。

图4 俄罗斯现役火箭^[7]Fig. 4 Russian launch vehicle in service^[7]图5 欧洲现役火箭^[7]Fig. 5 European launch vehicle in service^[7]

1.4 中国运载火箭发展回顾

从20世纪五六十年代开始,中国运载火箭持续发展,经历了从串联到并联、从一简单星到一箭多星、从常温推进剂到低温推进剂、从未级一次启动到多次启动、从发射卫星到载人飞船再到深空探测器的技术跨越,具备了发射任意地球轨道有效载荷的能力^[3]。参考文献[8],并结合当前最新的重复使用、重型火箭发展趋势,中国长征系列运载火箭发展历程如下:

1) 20世纪六七十年代,基于前期技术积累,

研制形成CZ-1、CZ-2运载火箭,实现我国运载火箭从无到有。

2) 20世纪80年代至21世纪初,研制了包括CZ-2C/D/E/F、CZ-3、CZ-3A/B/C、CZ-4A/B/C在内的共11型运载火箭。其中CZ-2C、CZ-2D、CZ-3、CZ-2E运载火箭仍然使用有毒推进剂(四氧化二氮和偏二甲肼),开始部分应用数字电路;CZ-2F、CZ-3A、CZ-3B、CZ-3C、CZ-4B、CZ-4C持续开展可靠性增长和技术改进,采用系统级冗余设计;部分型号通过增加三子级,高轨任务适应能力大大提高;或为满足载人航天任务需求,增加了故检逃逸系统;简化了发射场测发流程,测发效率得到了提高。经优化,退役CZ-2E、CZ-3、CZ-4A三型火箭,现役8型常规火箭见图6,实现了LEO 8.6 t、SSO 3.0 t、GTO 5.5 t的能力覆盖。

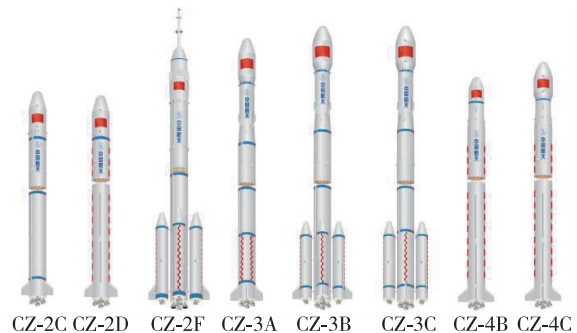


图6 我国在役长征系列常规火箭

Fig. 6 The conventional Long-March launch vehicle in service

3) 21 世纪以来, 火箭研制基于“通用化、系列化、组合化”、无毒无污染的理念, 采用无毒无污染推进剂, 环境友好。在液体火箭领域, 形成中小型 (CZ-6/6A、CZ-7/7A/8) 和大型 (CZ-5/5B) 两系列液体运载火箭^[9], 共 7 型火箭, 实现了 LEO 25 t、SSO 9.5 t、GTO 14 t 的能力覆盖; 在固体火箭领域, 形成以 CZ-11、捷龙 3、快舟系列、力箭一号为代表的小型火箭, 具备了 LEO 1.5 t、700 km SSO 1 t 以上的运载能力, 陆海通用发射, 响应时间短, 任务适应性大幅提升。我国在役新一代长征系列运载火箭如图 7 所示。

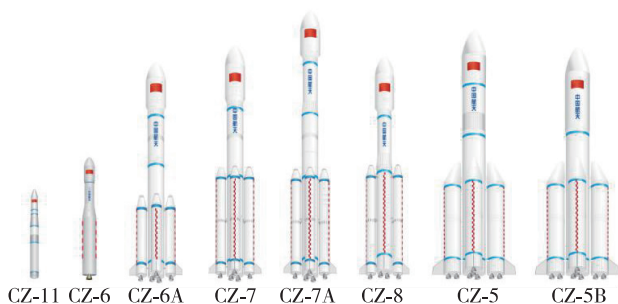


图 7 我国在役新一代长征系列运载火箭

Fig. 7 The new generation Long-March launch vehicle in service

4) 进入新时代, 新一代载人运载火箭、重型火箭正在开展总体方案论证设计, 攻关发动机等系统关键技术, 后续将支撑我国载人登月、深空探测等重大工程实施。

1.5 问题分析

我国虽然建立了能力相对完备的运载火箭体系, 但与航天强国相比, 在进入空间的能力、效率和成本方面还存在一定差距, 亟须通过发展下一代运载火箭支撑航天强国建设。

1) 进入空间能力不够强。主要表现在我国火箭运载能力还不够大, LEO 轨道能力仅为 25 t, 尚不具备 LEO 百吨级的重型运载能力; 尚不具备重复使用能力, 美国重复使用火箭猎鹰系列在 2022 年成功完成 61 次发射任务 (含 1 次重型猎鹰); 运载效率等综合性能指标偏低, 发动机推力、推重比、比冲等核心指标与航天强国差距明显。

2) 进入空间的效率还不够高。与国外先进水平猎鹰 9 火箭 2022 年 7 天/发相比有一定差距, 主要表现在运载火箭模块种类多, 状态多, 产品化率较低, 制约了生产效率; 发射保障自动化、信

息化水平较低, 测发流程繁琐, 发射工位通用化程度低, 限制了年发射频次的提升。

3) 进入空间的成本还不够优。主要表现在重复使用技术尚未实现工程应用, 使得飞行产品不能复用, 导致成本无法本质性降低; 火箭低成本研制理念不强, 我国火箭在设计、制造、试验、质量管控等环节成本统筹不足; 我国尚未完全建立购买发射服务的运载火箭采购模式, 导致降本增效活力不足。

2 中国运载火箭发展规律研究

2.1 中国运载火箭代际发展技术规律

基于国外运载火箭发展历程以及我国运载火箭发展问题, 回归分析我国运载火箭发展历程, 发现火箭运载能力的持续提升是代际发展中最为显著的特征, 从 20 世纪五六十年代的第一代 CZ-1、CZ-2 运载火箭, 到第二代 CZ-2/3/4 系列, 再到第三代的 CZ-5/6/7/8 新一代运载火箭, 运载能力从 1 t 级持续提升至 20 t 级, 下一代运载火箭以新一代载人运载火箭、重型运载火箭为典型代表, 其最大运载能力将达到 100 t 级, 比肩世界一流。同时, 技术发展是我国火箭代际发展的底层驱动力, 第一代运载火箭实现运载火箭的从无到有; 第二代运载火箭基于有毒推进剂与模拟电路技术, 以贮箱为代表的结构材料体系主要使用 2A14 铝合金; 第三代运载火箭基于无毒无污染液氧煤油、液氢液氧推进剂, 使用数字总线技术, 并且以贮箱为代表的材料体系升级到 2219 铝合金; 基于运载火箭技术发展趋势并对标我国运载火箭发展问题和不足, 第四代运载火箭将以重复使用、运载能力跨越提升为核心特征, 持续牵引智能飞行、大推力重复使用动力、铝锂合金新质材料、功能型机构等技术攻关突破, 支撑航天强国建设; 第五代运载火箭处于多技术路径探索阶段。中国运载火箭代际发展如图 8 所示。

2.2 运载火箭发展需求分析

当前随着世界主要航天大国和主体加速太空经济与军事发展, 航天运输领域对于运载火箭的需求呈现快速上升趋势, 2022 年世界运载火箭全年入轨级发射 186 次, 创下历史新高, 2023 年预计发射超过 200 次, 将再创新高。爆发式增长的入轨发射需求对运载火箭发展提出了新要求, 一是增大火箭入轨能力; 二是提升发射效费比,

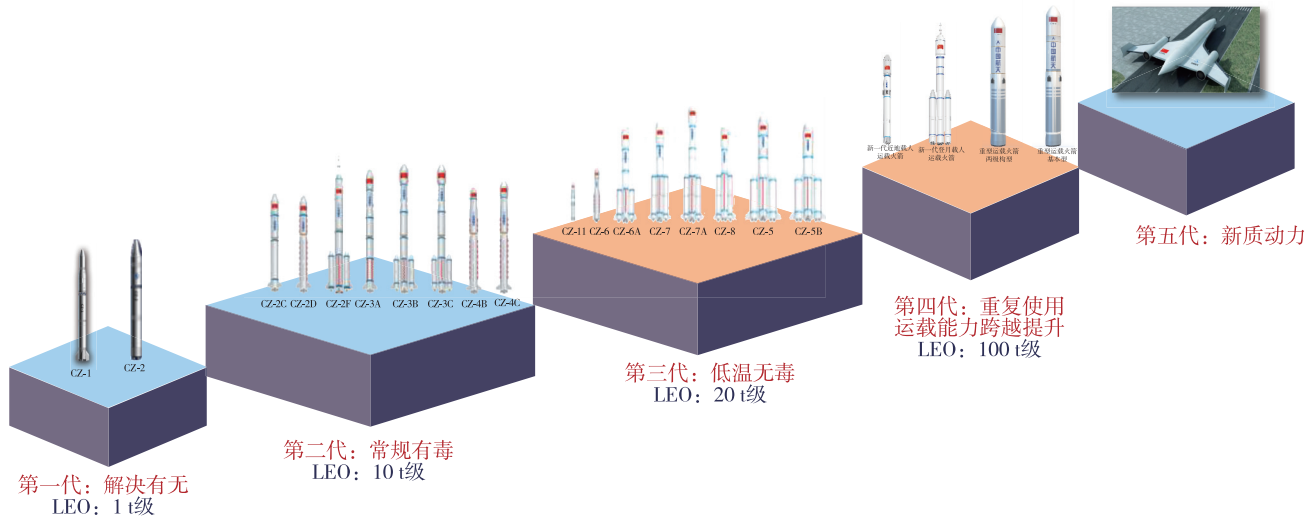


图8 中国运载火箭代际发展

Fig. 8 Inter-generational development of Chinese launch vehicle

用更少的成本将更多的有效载荷送入目标轨道。由此可建立公式(1)和(2)以表征运载火箭发展要求。

$$J_{\text{发射效能}} = \frac{\sum [(M_{\text{起飞质量}} \times K_{\text{运载效率}} \times \eta_{\text{发射效率}}) \times R_{\text{可靠性}}]}{\sum [(M_{\text{起飞质量}} \times K_{\text{运载效率}} \times \eta_{\text{发射效率}}) \times \omega_{\text{成本}}]} \quad (1)$$

式中, $M_{\text{起飞质量}}$ 、 $K_{\text{运载效率}}$ 分别表征运载火箭起飞质量和运载效率, 两者相乘可得运载能力; $\eta_{\text{发射效率}}$ 表征火箭每年最大发射次数, 与火箭生产能力、测发周期、发射场工位数量等条件有关; $R_{\text{可靠性}}$ 表征飞行可靠性; $\omega_{\text{成本}}$ 表征单位载荷发射成本; $J_{\text{发射效能}}$ 表示单位经费可发射的入轨质量, 其数值越高, 代表运载火箭整体效费比越高。

为满足增大有效载荷入轨能力需求, 基于公式(1), 分解得到

$$M_{\text{入轨总质量}} = \sum (M_{\text{起飞质量}} \times K_{\text{运载效率}} \times \eta_{\text{发射效率}}) \quad (2)$$

式中, $M_{\text{入轨总质量}}$ 表征一个自然年内, 一个国家所有运载火箭在一年内理论入轨最大质量。

分析式(2)可得, 对于小、中型运载火箭, 由于起飞质量偏小, 要想获得较大的入轨质量, 需提高运载效率、发射效率指标。对于大、重型运载火箭, 由于起飞质量大, 在入轨总质量满足发射需求前提下, 可适当放宽运载效率、发射效率指标要求, 支撑提升运载火箭不同任务剖面的适应性。同时为满足发射效能提升需求, 基于式(1), 分析可得可靠性指标需有效提升, 而发射成本指标需合理降低。

随着我国低轨星座等空间基础设施建设以及空间探索需求持续增长^[10], 年入轨质量需求将持续提升, 若此时火箭运载能力和发射效能无法提升, 将导致出现高昂的发射服务费, 难以满足新时代高质量发展要求, 必须通过创新技术驱动运载效率与能力、成本、可靠性和发射效率等核心指标跨越升级, 推动下一代主力运载火箭发展, 助推航天强国建设。

3 下一代主力运载火箭发展思考与创新实践

3.1 运载效率与能力提升

传统运载火箭依靠增加级数、研制大推力发动机实现效率、能力的一定提升, 下一代主力运载火箭将主要在总体载荷精细化设计、基于偏差概率的总体协同设计、轻质高效结构和增压技术、新质材料、更大直径结构以及发动机性能提升等方面突破发展。

3.1.1 总体载荷精细化设计

为提升火箭运载效率, 总体方案设计阶段重点针对载荷精细化、偏差余量控制以及环境条件降低等方面开展。

在载荷精细化设计方面, 主要包括载荷计算输入降低、外激励精确预示以及计算方法改进。一是要降低载荷计算输入, 在现有双向准实时风修正技术、加表主动减载基础上, 拓展至三向准实时风修正技术, 并研究基于风攻角高精度测量的主动减载技术, 综合降低载荷计算输入; 二是

要精确预示与辨识外激励,通过研究跨声速脉动压力(见图 9)等外源激励机理和反向辨识方法,提升外激励表征精度,降低动载荷;三是要应用概率设计等方法,转变传统包络设计模式,降低保守性。最终使同等工况下载荷计算值相较上一代火箭降低 20%。

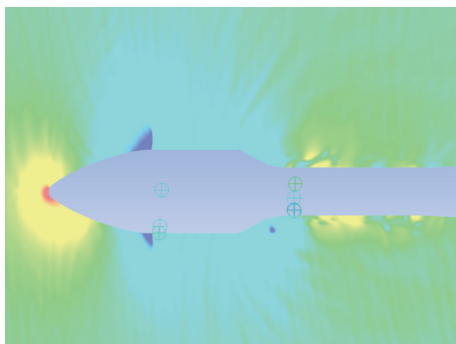


图 9 火箭跨声速压力云图

Fig. 9 Cloud map of the transonic pressure of a certain type of launch vehicle

在偏差余量控制方面,主要基于飞行和地面试验数据,通过运载火箭动力学天地一致性分析技术,采用智能算法回归辨识气动压心等偏差。相较上一代运载火箭,偏差绝对值压缩 20%。

在环境条件降低方面,一是通过回归辨识飞行和地面数据降低环境条件;二是通过主被动减振降噪设计,如采用吸隔声一体化声学覆盖层等技术实现轻质化全频段复合降噪,以支撑单机及系统减少不必要的设计裕度。相较上一代运载火箭,降低星箭界面和关键位置的环境条件 30%。

3.1.2 基于偏差概率的总体协同设计

在降低偏差的基础上,进一步合理使用偏差,突破并应用基于偏差概率的总体协同设计,解决制约运载火箭总体性能提升的偏差余量大、设计保守等共性瓶颈问题,提升运载火箭总体性能。

开展运载火箭总体协同设计平台建设,通过规范数据接口,构建统一数据架构,实现“数据同源”;通过集成总体各专业核心设计工具,实现基于显性化流程的数据“变化同知”;有效集成总体设计流程、数据接口、设计工具,实现总体设计小小回路、小回路、大回路的多专业快速迭代设计,总体协同设计平台功能见图 10。在此基础上,一是可实现弹道、制导、控制与载荷多专业联合优化飞行剖面,减少专业解耦设计后各自重复留取的设计余量问题;二是开展基于偏差概率

的增压优化设计、结构安全系数设计,转变传统极限偏差包络设计模式,实现偏差的合理使用,解决偏差余量较大的问题。相较上一代运载火箭,偏差使用方式由单项叠加变为同源分析,降低偏差综合影响 20%。

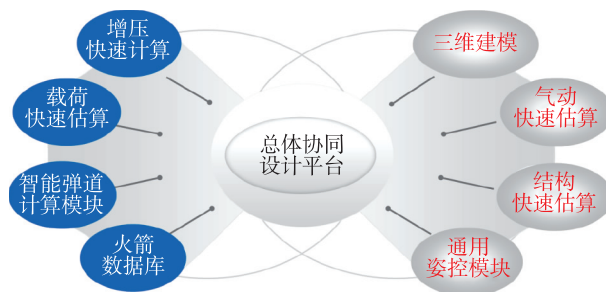


图 10 总体协同设计平台功能

Fig. 10 The overall collaborative design platform functions

基于上述两项技术,同时结合轻质高效结构和增压技术、新质材料等技术和材料的发展与应用,共同支撑运载效率提升 20%以上。

3.2 成本降低

新技术与新管理方法相结合共同促进下一代运载火箭成本降低。在新技术方面,重点通过攻关垂直起降、带翼飞回等重复使用总体技术,攻克高精度返回导航制导姿控、再入热防护等关键技术,实现一子级重复使用以及两级完全重复使用,使运载火箭回归运输工具的本质特性,将本质降低下一代运载火箭成本;在新管理方法方面,主要推动运载火箭产品化、通用化发展,基于通用货架产品实现高效集成,推动成本降低,同时可保证产品质量。

3.2.1 重复使用技术

在新技术方面,通过攻关垂直起降、带翼飞回等重复使用总体技术,实现一子级重复使用以及两级完全重复使用,使运载火箭回归运输工具的本质。垂直起降等重复使用回收技术将对火箭构型方案^[1]产生多方面影响。

(1) 一子级重复使用火箭级间比减小

与一次性火箭不同,为确保一子级返回,一二级分离高度不能过高,否则将导致额外的热防护质量增大和更多的减速推进剂需求,影响火箭上升段性能,所以重复使用火箭相对于同等规模一次性火箭级间比有所减小。以某型火箭为例,其重复使用运载能力随级间比变化情况如图 11 所示,重复使用时最优运载能力对应的级间比为 3.6

左右，同等起飞规模一次性火箭构型的最优级间比为4.0左右。

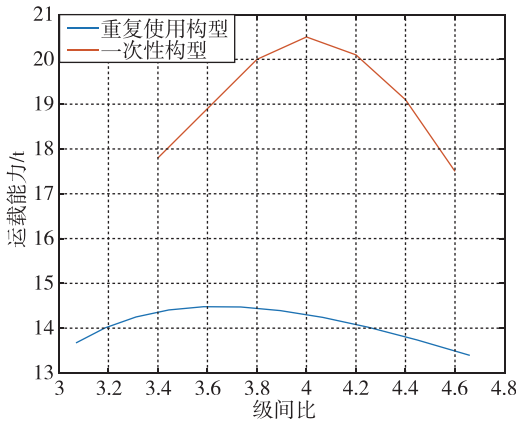


图 11 某型火箭运载能力随级间比变化情况

Fig. 11 The change in the carrying capacity of a certain type of launch vehicle with the ratio between stages

(2) 垂直起降重复使用火箭普遍采用多机布局构型

返回时火箭结构质量与剩余推进剂质量一般远远小于起飞质量，为了提升返回着陆时的速度位置控制精度，要求基础级单台发动机推力不能太大，需要与返回时火箭总质量相匹配，因此垂直起降重复使用火箭将普遍采用多机布局构型^[12]，如表 1 所示。同时一子级发动机台数变多，将增加一子级在全箭中的成本占比，有利于提升重复使用效益。

表 1 垂直起降重复使用火箭的基础级发动机台数

Tab. 1 The number of 1st stage engines of VTVL launch vehicle

国家、地区	火箭型号	基础级数量/台	发动机名称	单台发动机地面推力/t
美国	猎鹰 9 号	9	梅林-1D+	84.5
美国	新格伦	7	BE-4	249
美国	超重-星舰	33*	猛禽 V2	230
俄罗斯	阿穆尔	5	RD-169	100
欧洲	阿里安 next	7	普罗米修斯	100

*注：2022 年 SpaceX 官网数据^[13]。

(3) 重复使用火箭二级推重比增大

由于重复使用火箭级间比缩小，火箭二级飞行时须克服更多的重力，二级总速度增量增加，要求二级推重比增大，结构效率提高。同时，为适应中高轨任务要求，发动机应具备深度推力调节和多次点火能力。

3.2.2 产品化发展

基于当前我国运载火箭已有成熟产品以及未来发展需求，深入分析产品研制的本质内涵和核心逻辑，建立运载火箭“总体-系统-单机”发展架构；面向多型运载火箭，将系统功能需求细分为共性通用与个性定制两类，同时兼顾前瞻性和扩展性，对需求“既统且筹”，通过统一接口规范和制定通用试验技术条件打造通用产品平台，进而建立系统级、单机级通用产品货架，指导系统集成和单机产品研制，为型号提供成熟可靠的产品选择，产品化工作流程见图 12。目前已完成了运载火箭结构、动力、电气、地面测发控等全系统通用产品货架的制定。

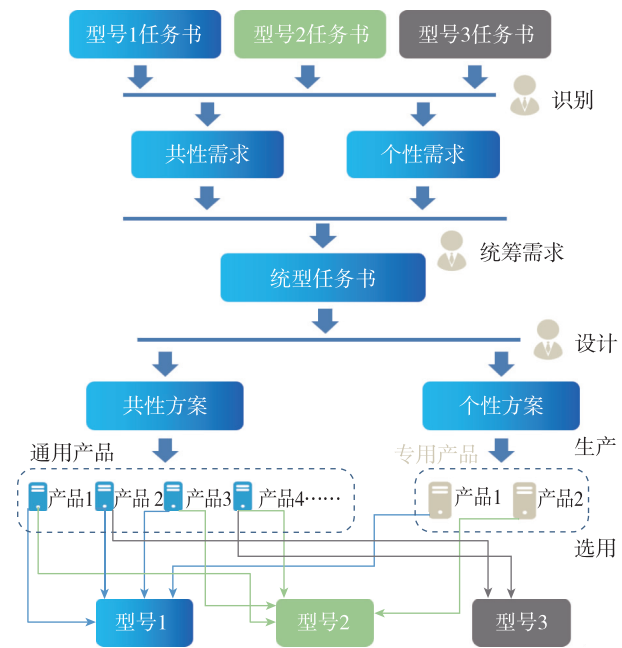


图 12 产品化工作流程

Fig. 12 The process of productization mode work

以运载火箭地面测发控系统^[14]为例，从系统物理本质出发，按照专业技术驱动将地面测发控系统按“地面供配电、有线测控、无线测控、数传通信、测发软件”5 个功能模块开展系统研制，通过推动不同型号的地面测发控系统统型，可降低维护改造费用，同时支撑实现同一工位能发射多型火箭。目前已经实现了内陆发射场 CZ-2C、CZ-3A 地面测发控系统统型，其中 CZ-2C 型号已在多次飞行试验中成功应用，地面设备种类减少 50%以上，靶场人员岗位减少 30%以上。同时按照统型方案完成了海南发射场 CZ-5、CZ-7、CZ-8 火箭地面测发控系统升级改造工作，相关成果将

有力支撑下一代运载火箭研制。

3.3 可靠性提升

下一代主力运载火箭不仅要提升产品固有可靠性，还将主要从构型模块精简、动力系统冗余以及应用智能飞行技术等方面来提升可靠性。

3.3.1 构型模块精简设计

当产品可靠性一定时，通过简化构型与模块，减少产品数量可实现可靠性提升。

针对低轨发射任务，在同等起飞规模下，假设多级火箭各级结构效率相等，发动机真空比冲一定，则在不同级数下，对运载效率和理想速度关系进行分析，如图 13 所示，分析可得：

- 1) 当两级火箭结构效率达到 0.95 时，其低轨运载效率已经高于结构效率为 0.90 的三级火箭；
- 2) 当多级火箭结构效率提升同等幅度时（例如从 0.90 提升至 0.95），三级火箭运载效率提升幅度 $\Delta 2$ 小于两级火箭的提升幅度 $\Delta 1$ 。

因此，下一代运载火箭在采用结构效率提升措施后，综合考虑可靠性和成本，可将构型精简为两级火箭。

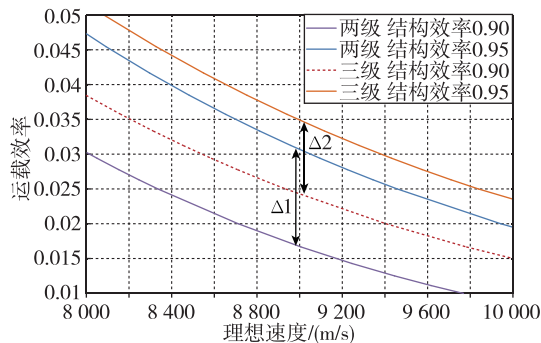


图 13 火箭级数和结构效率对理想速度与运载效率影响
Fig. 13 Effects of stage and structural efficiency of launch vehicles on ideal speed and launch efficiency

基于上述分析以及重复使用火箭构型特点，推动重型运载火箭构型方案从并联构型变为串联构型，如图 14 所示，从 3 种直径模块统一到 1 种，发动机种类从 3 种变为 2 种，其中两级串联构型全箭使用同一种液氧甲烷发动机，实现了构型模块的大幅精简。重型运载火箭构型方案的转变，将更好地支撑我国下一代运载火箭发展，助推航天强国建设。

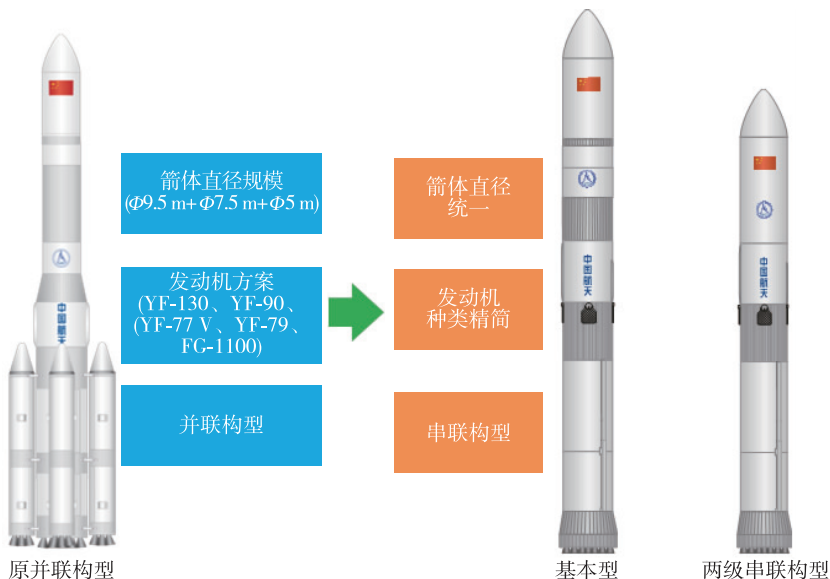


图 14 重型运载火箭构型方案演进
Fig. 14 Configuration evolution of heavy launch vehicle

3.3.2 智能飞行技术

为了在产品本质可靠性极限基础上进一步提升飞行可靠性，需发展并应用智能飞行技术^[15]，使运载火箭具备智能感知监测、评估决策以及处置能力，共同提升下一代运载火箭可靠性。在故障诊断与任务重规划技术方面，2020 年基于长征

二号丙火箭，开展了相应的飞行搭载验证^[16]，通过基于飞行动力学参数故障诊断方法，实现飞行过程中每台发动机推力系数的实时监测，并基于火箭当前飞行速度和位置以及剩余燃料，在线评估推力下降故障后的剩余入轨能力，完成了任务重规划技术的初步验证。

在此基础上,进一步突破发动机参数故障诊断、决策融合故障诊断、姿控可重构性评价算法,完成了考虑落区约束的任务重规划算法,以及控制可重构性评价、改进迭代制导、容错姿态控制

算法研究,制定如图 15 所示的运载火箭“故障诊断-重规划-控制重构”故障诊断与处置技术通用架构,可有效支撑在役火箭飞行可靠性提升和下一代运载火箭智能化升级。

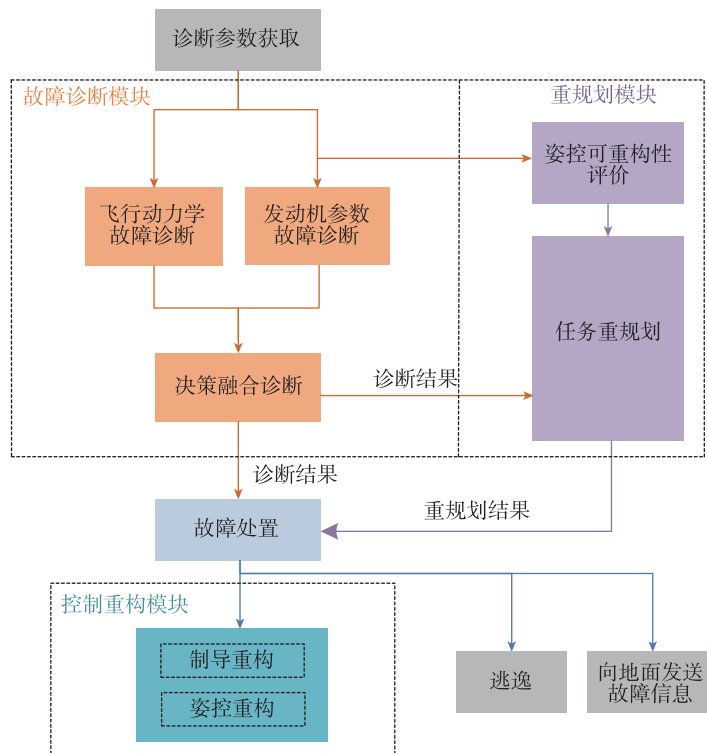


图 15 故障诊断与处置技术通用架构

Fig. 15 General architecture for fault diagnosis and disposal technology

采用故障诊断与处置等智能飞行技术,将有效提升运载火箭对发动机故障适应能力,支撑我国下一代运载火箭飞行可靠性有效提升 0.5% 以上。

3.4 发射效率提升

下一代主力运载火箭发射效率提升除进一步流程优化以外,采用智能测试、无人加注值守、远程联合辅助测发以及箭地接口通用化等设计,可以本质上提升发射效率。

3.4.1 智能测试技术

当前我国运载火箭测试阶段依赖地面等效测试设备,存在较多的切换操作,自动化水平不足,未能充分利用箭载系统的智能处理能力。为提升测试效率,下一代运载火箭需重点在 4 个方面开展工作。

1) 自动化。可将部分地测项目转移至箭上进行闭环自动判读验证,目前新一代运载火箭电气系统测试已基本实现了自动化,判读仅需要少量人为操作,参数判断以阈值法和简单的数学公式

为主。后续重点针对回路阻值测试、时序测试等项目进一步开展自动化测试设计。

2) 并行化。辨识测试过程中可并行测试的项目,采用自动并行测试大幅缩短测试时间,如控制分系统测试中,对各单机的自检、零位测试等项目同步开展。

3) 智能化。采用基于模式识别的智能化电气设备快速感知技术,依托模式识别、人工智能等技术实现电气设备状态的实时监测、综合判断及智能化快速自感知。

4) 等效化。面向重复使用一子级回收后的测试,充分借用等效器实现部段测试,支撑重复使用等特殊场景应用。

3.4.2 远程辅助测发技术

随着航天运输领域超高密度发射逐步常态化,型号研制与发射任务的持续高压,高密度的研制发射形势与有限的人力资源之间的矛盾日益凸显。通过构建远程辅助测发系统,在全箭测试、发射任务

中使用远程辅助测发技术，实现多个型号发射任务的并行保障，这是提升发射效率的重要抓手。

远程辅助测发系统以各发射基地、各测试厂房前端测发控网络为基础，以远程数据传输网络建设为根本，远程数据传输网络作为发射场测发网络的延伸，将前方数据安全回传至远程测发大厅。远程测发大厅基于音视频监测系统、通用化判读平台、全系统健康管理平台、远程诸元设计系统、数字伴飞系统等，可提供覆盖出厂测试、

发射任务全流程的后方保障服务，系统架构见图 16，实现“运筹帷幄，决胜千里”。远程辅助测发系统目前已完成第一阶段建设，实现了远程测试大厅、各发射基地和各测试厂房的互联互通，具备后方测试判读、射前监测、数字伴飞等功能，支撑了空间站建造、探月、探火等重大工程发射任务。第二阶段预计 2023 年年底完成建设，增加音视频双向互动、远程诸元设计等功能，进一步提升远程网络通信的可靠性、实时性。

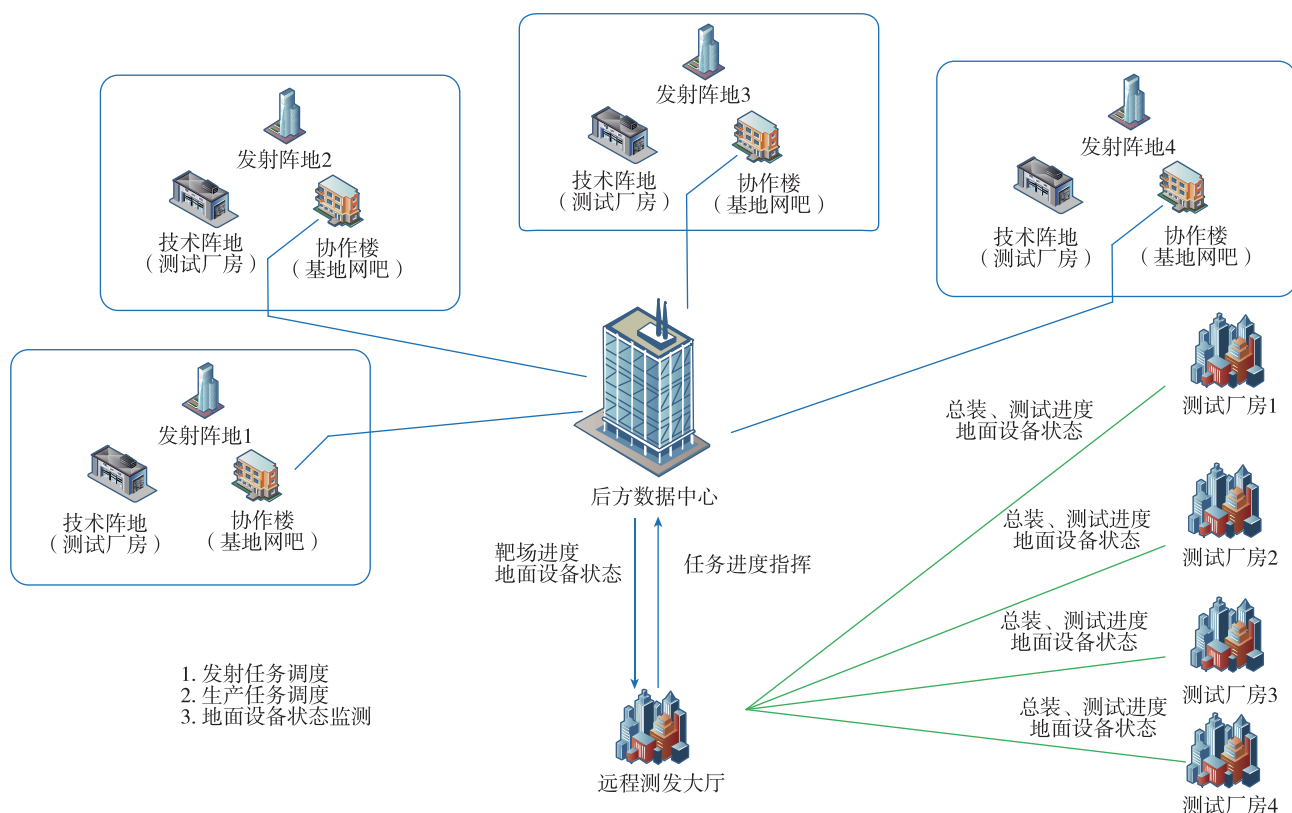


图 16 远程辅助测发系统架构

Fig. 16 Remote auxiliary test and transmission system architecture

4 总结

我国运载火箭经过 60 多年的发展与创新，支撑了载人航天、北斗导航、月球探测、火星探测等一系列国家重大工程顺利实施，托举了中华民族的飞天梦想。面向当今以大规模低轨星座建设、载人月球探测和大规模深空探测为代表的发展需求与机遇，立足我国国情和发展需要，通过分析下一代主力运载火箭发展特征与方向，科学指导我国运载火箭向更大运载能力、更高效能方向高速发展，支撑高水平科技自立自强，推动我国早日建设成为世界航天强国。

参考文献

- [1] 吴燕生. 中国航天运输系统的发展与未来[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(5):1-4.
- [2] 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.
- [3] 龙乐豪,李平岐,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.
- [4] 龙乐豪,王国庆,吴胜宝,等. 我国重复使用航天运输系统发展现状及展望[J]. 国际太空, 2019(9):4-10.
- [5] 刘竹生,孙伶俐. 航天运输系统发展及展望[J]. 中国科学:技术科学, 2012, 42(5):493-504.
- [6] 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,2022(6):1-7.
- [7] 纪小栈.各国航天实力与现役运载火箭情况[EB/OL]. [2019] <http://www.008rc.com/news/discovery/001/20190313yzhj.html>.
- [8] 秦旭东,容易,王小军,等.基于划代研究的中国运载火箭未来发展趋势分析[J].导弹与航天运载技术,2014(1):1-4,38.
- [9] 王小军,徐利杰.我国新一代中型高轨运载火箭发展研究[J].宇航总体技术,2019,3(5):1-9.
- [10] 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.
- [11] 牟宇,樊晨霄,何兆伟.运载火箭创新技术驱动构型优化规律研究[J].导弹与航天运载技术,2022(6):57-63.
- [12] 容易,牟宇,陈士强.液体运载火箭动力冗余技术工程设计与实践[M].北京:中国宇航出版社,2021.
- [13] SPACEX. STARSHIP.[EB/OL].[2023] <https://www.spacex.com>.
- [14] 任月慧,张宏德,彭越,等.运载火箭测发控技术未来发展与展望[J].计算机测量与控制,2021,29(6):1-4,24.
- [15] 李洪.智慧火箭发展路线思考[J].宇航总体技术,2017,1(1):1-7.
- [16] 张兵,沈丹,张志国,等.长征系列运载火箭飞行智能化发展路线研究[J].导弹与航天运载技术,2021(1):7-11,38.

引用格式: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.

Citation: He W, Mou Y, Zhu H Y, et al. Reflections on the development of next generation main launch vehicle [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023,7(2):1-12.