

· 载人运载火箭技术专题 ·

新一代载人登月运载火箭总体方案和关键技术

张 智¹, 徐洪平¹, 邓新宇², 何兆伟²

(1. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要:载人月球探测是数千年来中国人的美好梦想,也是世界大国科技水平和国家实力的综合体现。在分析了国家任务及技术发展等需求的基础上,充分利用以 YF-100、YF-75D 发动机和 5 m 直径箭体结构为代表的现有技术,提出了新一代地月载人运载火箭总体方案,并明确了 13 项重大关键技术。新一代载人登月运载火箭的研制将实现中国运载火箭由能力型和效率型、规模型向技术型的重大跨越,快速提升中国进出、利用和控制空间的能力,大力拓展中国太空活动的领域,是实现航天强国伟大梦想的关键支撑。

关键词:载人运载火箭; 总体方案; 关键技术; 运载能力

中图分类号:V421 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-5825(2022)04-0427-06

Overall Scheme and Key Technologies of New Generation Lunar Manned Launch Vehicle

DOI:10.16329/j.cnki.zrht.2022.04.001

ZHANG Zhi¹, XU Hongping¹, DENG Xinyu², HE Zhaowei²

(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Manned lunar exploration is a great dream of the Chinese people for thousands of years. It is also a comprehensive reflection of the science and technology level and the national strength of a world power. In this paper, the needs of the national tasks and technological development were analyzed and the overall scheme of a new generation of lunar manned launch vehicle was proposed based on the existing mature technologies represented by the YF-100, YF-75D engine and 5 m diameter structure. In addition, 13 major key technologies were identified. The development of a new generation lunar manned launch vehicle will realize the major leap from emphasis on capability and scale to emphasis on efficiency and technology for the Chinese launch vehicle. Our ability to enter/exit, to utilize and control space will be quickly improved and the field of our space activities will be vigorously expanded. It may serve as a key support to boost our strength in space.

Key words: manned launch vehicle; overall scheme; key technologies; launch capability

1 引言

载人月球探测是航天强国的重要标志,也是载人航天工程发展的长远战略。美国已制定了 2024 年重返月球计划,俄罗斯计划于 2028 年发

射重型火箭,世界航天领域掀起了新一轮载人月球探测热潮。

中国新一代运载火箭长征五号、长征六号、长征七号以及长征八号已经研制完成,并逐渐成为发射市场的主力火箭。常规推进剂运载火箭的更

收稿日期:2022-03-24;修回日期:2022-05-31

第一作者:张智,男,硕士,研究员,研究方向为运载火箭总体技术。E-mail:zlwht@hotmail.com

新换代势在必行,载人运载火箭的更新换代也已提上议程。

未来的载人航天将从探索型向应用型转化^[1],按照立足成熟技术、确保安全可靠,能力上台阶、技术上水平的发展思路,在充分继承新一代运载火箭和常规推进剂载人运载火箭研制成果和成熟技术的基础上,通过方法和技术创新,开展新一代载人登月运载火箭方案论证与设计。

2 需求分析

2.1 载人月球探测的任务急需

载人登月一直是数千年来中国人追逐渴求的美好梦想,也是世界大国科技水平和国家实力的综合体现。月球距离地球约 38 万公里,实现载人飞行并登陆月球需要进入奔月轨道的全部载荷达到 50~100 吨级,中国目前最大的运载火箭受起飞规模、动力系统性能、结构效率等制约,奔月轨道运载能力仅为 8.2 t,需要的发射次数过多,任务适应能力不足,且不具备载人飞行能力,无法满足载人登月的任务需求。研制运载能力更大,满足载人飞行标准的新一代载人登月运载火箭,填补载人登月的能力空白,是当务之急。

2.2 航天强国建设的关键支撑

航天技术是决定中国国际地位和世界影响力的战略制高点。火箭的能力有多大,航天的舞台就有多大,运载火箭技术水平是航天强国的重要标志,运载能力是衡量航天强国的指标之一。航天强国建设的国家战略赋予了航天人新的历史使命。深化载人登月方案论证,组织开展关键技术攻关,夯实载人探索开发地月空间基础^[2],快速提升我国进出、利用和控制空间的能力,大力拓展我国太空活动的领域,是实现航天强军、航天强国伟大梦想的关键支撑。

2.3 运载火箭发展的必然使命

根据世界运载火箭技术发展趋势,未来发展焦点将从满足当前任务急需转化为形成长远竞争优势,发展模式将从能力的迫切提高升级为效率的极致追求。与美国、俄罗斯等世界航天强国相比,中国运载火箭技术在运载效率、结构效率、智能飞行、自动测发等方面仍有较大差距。开展新一代载人登月运载火箭研制,在继承中国现有新一代运载火箭和常规推进剂载人运载火箭研制经

验基础上,针对当前运载火箭设计、生产、试验、测发中的深层次难题开展攻关,实现中国运载火箭由能力型向效率型、规模型向技术型的重大跨越,使各项技术指标全面达到世界先进水平。

2.4 国家创新战略的有力助推

创新是一个国家发展的灵魂,根据世界技术发展趋势和竞争态势,党和国家高瞻远瞩,提出了中国制造 2025、人工智能等国家重大战略。新一代载人登月运载火箭瞄准世界一流水平,全面深化创新,将应用大直径低温共底贮箱、大推力泵后摆发动机、智能飞行、一体化电气系统等一大批创新技术,极大地带动大型高端精密装备制造、新材料、新工艺、国产化元器件等国家基础工业发展,助力中国整体工业体系的升级换代。

3 总体方案

新一代载人登月运载火箭采用三级半构型,总长约为 90 m,捆绑 2 个与芯一级基本相同的助推器,起飞重量约为 2200 t,构型示意图 1。该火箭由箭体结构系统、电气系统、发动机系统、增压输送系统、地面测发控系统和发射支持系统组成,主要方案如下:

1) 芯一级采用 5 m 直径,安装 7 台地面推力 125 t 级的 YF-100K/L 液氧煤油发动机,其中 3 台 YF-100K 发动机双向摇摆;

2) 助推器捆绑 2 个通用芯级模块,安装于 II、IV 象限;

3) 芯二级采用 5 m 直径,安装 2 台真空推力 146 t 级的 YF-100M 液氧煤油发动机,每台发动机双向摇摆;

4) 芯三级采用 5 m 直径,安装 3 台真空推力 9 t 级的 YF-75E 氢氧发动机,每台发动机双向摇摆;

5) 三级采用辅助动力完成滑行段姿态控制、推进剂管理和有效载荷分离前末修、调姿;

6) 助推器、芯一级、芯二级和芯三级均采用共底贮箱,一二级分离采用二次分离方式;

7) 液氧贮箱采用自生增压;

8) 电气系统采用一体化设计,高速实时以太网总线,全程天基测控;

9) 采用新三垂测发模式,简化发射场和发射区工作项目和设施。



图 1 新一代载人登月运载火箭构型示意图
Fig.1 The sketch of new generation lunar manned launch vehicle

新一代载人登月运载火箭奔月轨道运载能力 27 t,运载效率为 1.23%,达到世界先进水平。

4 关键技术

新一代载人登月运载火箭的研制充分吸收新一代火箭和常规推进剂载人运载火箭的研制经验和成果,充分借鉴国际主流运载火箭的先进经验,全面对标世界一流技术水平,创新设计方法和系统设计方案,通过综合优化实现运载效率大幅提高,性能、可靠性和安全性达到国际先进水平,突破以 13 项重大关键技术为代表的 120 项关键技术,提升中国运载火箭的研制技术水平和能力。

4.1 器箭一体化技术

器箭一体化技术是针对飞行器在上升段的工作环境和载荷条件,通过运载火箭与飞行器联合建模,对上升段飞行器内部响应分布进行精细分

析,并且形成基于一体化设计的仿真和试验方法,实现飞行器设计条件的优化,提升任务效益,与传统设计方法的差异对比见表 1。

表 1 器箭一体化设计与传统设计差异
Table 1 Differences between integration design and traditional design

| 项目 | 器箭一体化设计 | 传统设计 |
|------|------------------------------------|-------------------------------|
| 模型类型 | 飞行器:物理有限元模型 火箭:物理有限元模型 | 飞行器:广义缩聚模型 火箭:物理有限元模型 |
| 设计参数 | 截面静动载荷为主 频率要求为辅 | 频率要求为主 质心准静态过载为辅 |
| 设计过程 | 飞行器假设为火箭子级, 参与各研制阶段设计和分析 | 飞行器与火箭独立设计, 仅通过接口控制文件保证一致性 |
| 设计方法 | 强度和刚度并行设计 | 刚度设计强度校核 |
| 试验方法 | 分舱开展地面振动试验 | 整器开展地面振动试验 |
| 环境优化 | 设计初始阶段即可 增加主要改善振动、 冲击、噪声环境措施 | 环境改善措施 一般为事后补救, 优化代价较大 |

4.2 电气一体化技术

电气一体化技术通过一体化的综合电子架构设计(图 2),将原有分布式的相关设备进行适度集成,一体化架构、一体化通信、一体化能源,通过全箭电气系统软硬件资源共享,实现系统功能性能优化及设备的模块化和小型化。

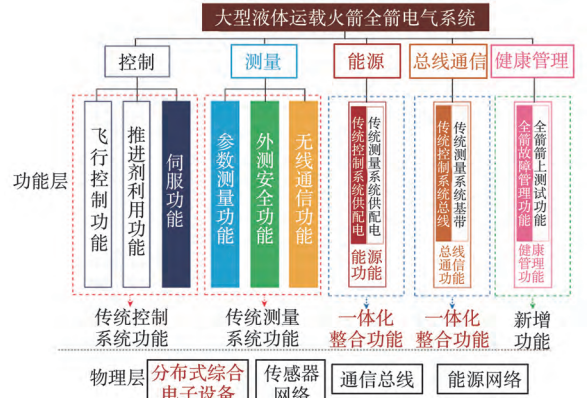


图 2 电气系统架构图^[3]
Fig.2 The sketch of avionics system architecture^[3]

4.3 新型数字化技术

新型数字化技术是在传统设计技术基础上,按照基于模型的系统工程思想、方法、工具和手段,规范数字化设计工作、提升数字化协同设计水平,形成高效协同研制模式,提升系统仿真水平。基于模型的产品研制全寿命周期活动示例见图 3,在传统 V 字形研制流程的基础上,将设计结果由模型承载和传递,在设计阶段便开展大量的综

合集成验证,缩短闭合迭代周期、增强总体优化能力。

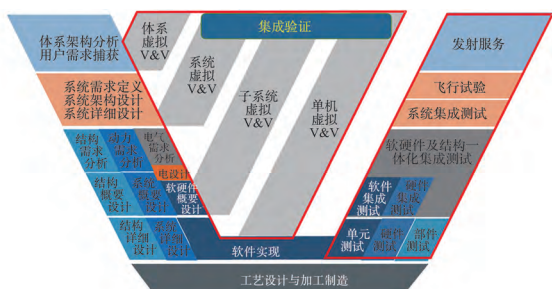
图 3 基于模型的产品研制全寿命周期活动图示例^[4]

Fig. 3 The sketch of model-based full life cycle activity in product development^[4]

4.4 高性能结构材料应用技术

通过研究高性能铝合金、碳纤维复合材料和紧固件高性能材料等工程应用技术,提升箭体结构的性能和工艺稳定性,实现运载火箭结构效率和运载能力的提升。

4.5 故障诊断与处置技术

故障诊断与处置技术负责完成待发段及飞行阶段的全箭数据综合、故障诊断,协同控制模块完成系统重构功能,同时在火箭发生威胁航天员安全的故障时发出逃逸指令。为提升该技术实现的可靠性与有效性,采用先进感知技术与诊断算法。箭上重点负责飞行阶段可预知的重构类故障诊断以及需要执行逃逸的速变类故障诊断,地面重点负责待发段故障以及飞行段缓变故障的检测,能够充分利用地面运算资源强大的优势,实现箭上和地面协调配合。故障诊断与处置流程见图4。

4.6 自主飞行控制重构技术

自主飞行控制重构技术是提高载人火箭系统可靠性和安全性的重要基础,是国外运载火箭广

泛采用的先进技术。通过自主飞行重构技术具备故障模式下的任务适应能力,能够进行在线自主决策与快速规划、充分利用火箭的剩余能力,转入任务降级、应急救援、可控返回等备用任务,以保证有效载荷及人员的安全,提高任务的成功率。

4.7 高性能液氧煤油发动机技术

YF-100K/L、YF-100 M 液氧煤油发动机推力面密度(单位面积安装的发动机数量)、推质比(产生单位推力的发动机结构重量)、真空比冲相比 YF-100 有较大提升,由于发动机系统参数耦合性强、力热参数变化剧烈,改进后的发动机需要针对薄弱环节进一步改进,提升固有可靠性。同时,YF-100 M 发动机采用的钛合金大喷管的制造技术也是实现发动机高性能的关键技术。

4.8 高性能氢氧发动机技术

在现有面积比 80 喷管的设计生产工艺上,再增加一段单壁金属段,将发动机喷管面积比提高到 175,从而将发动机比冲性能由 442 s 提高到 452 s。同时根据火箭时序,发动机工作时间较现有状态增加一倍,针对长寿命工作任务特点开展可靠性提升,确保载人飞行的高安全和高可靠。应用火炬点火技术提升发动机点火可靠性和发动机的使用性。

4.9 高能煤油技术

高能煤油^[6]是以工业化工原料为基础,通过脱水缩合反应、分子内成环反应、脱氮反应和产品精馏提纯等工艺得到的一种高能合成碳氢燃料。与现役火箭煤油相比,高能煤油具有密度大、比冲高等优点,在发动机结构不需要进行大的改动的条件下,可直接应用于液氧煤油液体火箭发动机。开展高能煤油关键技术研究,突破宏量制备、高效

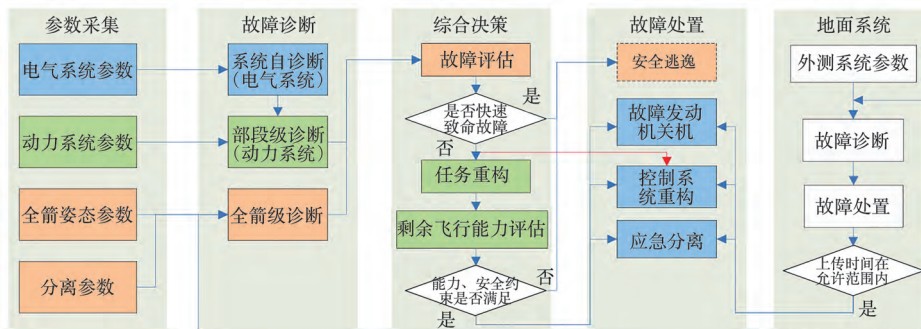


图4 故障诊断与处置流程^[5]

Fig. 4 The flowchart of fault diagnosis and disposal^[5]

精制、相容性提升等关键技术,完成高能煤油大流速流动传热、结焦性能、安全特性、热物性等研究,确定百吨级制备方案。

4.10 多机并联复杂环境预示与控制技术

新一代载人登月运载火箭起飞时 21 台发动机工作,多机并联工作时各发动机燃气喷流、振动、冲击、压力脉动等作用相互耦合,力、热等环境十分复杂。尤其是单位面积内发动机数量更多、布局更紧凑、耦合更严重,环境预示和控制难度较现役火箭更大。多机并联火箭精确环境预示及控制技术结合各级发动机布局特点开展力、热等环境分析,实现复杂环境的高精度预示,并针对环境适应性薄弱环节采取改进措施。同时针对一级动力系统需要的大能量蓄压器需求,采用新型注气式蓄压器^[7]解决传统膜盒式蓄压器能量值偏小的不足,通过注气、排气/液流量的优化设计,实现全飞行剖面内的 POGO 稳定和压力脉动有效抑制。

4.11 大承载轻质化结构与分离机构技术

箭体结构轻质化是运载火箭控制自身重量、提升运载效率的重要途径。新一代载人登月运载火箭由于发动机推力大、载荷量级高、传力形式复杂,通过尾舱传力一体化结构、大承载锥底贮箱、大直径低温共底、纵向高加筋箱筒段、整体机铰高筋壁板组合舱段等新型承载结构的设计与制造技术,从设计方法、材料体系和结构形式等方面开展全方位挖潜,以显著降低全箭结构质量,支撑新一代载人火箭高运载效率的指标要求。5 m 直径低温共底贮箱样件见图 5。



图 5 5 米直径低温共底贮箱
Fig. 5 Five meter diameter cryogenic coplanar tank

另外,分离是运载火箭至关重要的动作,关系到飞行任务的成败和航天员的生命安全。新一代

载人登月运载火箭通过突破线式分离、刚性包带等关键技术,确保在火箭载荷复杂且量级大的情况下,高可靠、高安全、低冲击的完成分离动作。

4.12 高性能增压输送系统技术

突破复杂流场设计、自生增压流量调节与控制、大口径低温密封技术、大口径管路补偿技术及电控阀门设计制造等关键技术,实现以推进剂高效利用、大口径低温密封及补偿、轻质高强管路设计以及电控阀门设计等为代表的技术水平的跨越。

4.13 快速测试发射技术

新一代载人登月运载火箭系统复杂、箭上和地面产品数量多,测试流程和项目繁杂,并且采用液氢推进剂,为确保测试操作的安全性和提高测试效率,开展大口径零秒气液组合连接器、智能化供配气、具有牵制功能的后倒支撑臂(图 6)、大流量喷水降温降噪、活动发射平台热防护、运载火箭火工品自动短路保护及解保、运载火箭火工品电磁阀及自动测试技术攻关,实现加注后全箭各系统无人值守。

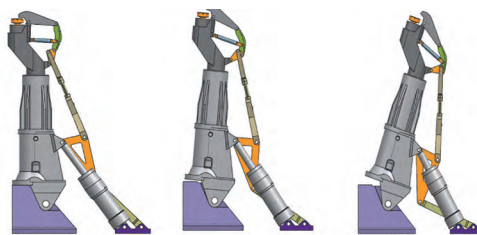


图 6 具有牵制功能的后倒支撑臂示意图

Fig. 6 The sketch of rear inverted support arm with hold-down function

5 结束语

新一代载人登月运载火箭是根据中国载人航天工程长远发展规划,为发射中国新一代载人飞船而全新研制的高可靠、高安全载人火箭,将中国奔月轨道运载能力由 8.2 t 提升至 27 t,填补中国载人登月的能力空白,推进中国载人运载火箭升级换代,具有安全可靠、性能先进、流程创新、扩展灵活等特点,是实现中国 2030 年前载人登陆月球和航天强国建设的重要战略支撑。

参考文献(References)

- [1] 张智. 载人运载火箭技术回顾与展望[J]. 宇航总体技

- 术, 2018, 2(2): 56-61.
- Zhang Z. Manned launch vehicle technical review and outlook [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(2): 56-61. (in Chinese)
- [2] 国务院新闻办公室. 2021 中国的航天[R]. 北京: 新华社, 2022.
- The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's Space Program: A 2021 Perspective[R]. Beijing: Xinhua News Agency, 2022.
- [3] 彭越, 牟宇, 宋敬群. 中国下一代运载火箭电气系统技术发展研究[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(2): 13-24.
- Peng Y, Mou Y, Song J Q. Research on the development of avionics and electrical system in chinese next generation launch vehicle[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(2): 13-24. (in Chinese)
- [4] 何巍, 胡久辉, 赵婷, 等. 基于模型的运载火箭总体设计方法初探[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(1): 12-17, 32.
- He W, Hu J H, Zhao T, et al. Research on model based launch vehicle overall design[J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(1): 12-17, 32. (in Chinese)
- [5] 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.
- Zhang B, Shen D, Zhang Z G, et al. The intelligent flight roadmap of Long March Launch Vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(1): 7-11, 38. (in Chinese)
- [6] 张星, 姚传奇, 蒋榕培, 等. 高能合成煤油 GN-1 性能研究[J]. 推进技术, 2021, 42(7): 1671-1680.
- Zhang X, Yao C Q, Jiang R P, et al. Performance of high energy synthetic kerosene GN-1[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(7): 1671-1680. (in Chinese)
- [7] 马方超, 刘文川, 陈牧野, 等. 注气式蓄压器自由液面控制技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(4): 63-67, 72.
- Ma F C, Liu W C, Chen M Y, et al. Research on liquid surface control technology of gas filled accumulator[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020(4): 63-67, 72. (in Chinese)

(责任编辑: 孙京霞)