



“长征五号”系列运载火箭总体方案与关键技术

李东, 李平岐, 王珏, 黄兵, 刘秉

General Scheme and Key Technology of Long March 5 Launch Vehicle

LI Dong, LI Pingqi, WANG Jue, HUANG Bing, and LIU Bing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

“长征五号”火箭总体优化与设计

The Overall Optimization and Design of the Long March 5 Launch Vehicle

深空探测学报(中英文). 2021, 8(4): 344-353

“长征八号”运载火箭电气系统一体化设计技术

Integrated Design Technology of Electrical System for the Long March 8 Launch Vehicle

深空探测学报(中英文). 2021, 8(1): 17-26

基于贝叶斯理论的小子样运载火箭可靠性评估技术

Research on Launch Vehicle Reliability Assessment of Small Sample Based on Bayes Theory

深空探测学报(中英文). 2021, 8(1): 62-69

“长征五号”火箭大容量调频遥测系统研制

Development of Large Capacity FM Telemetry System for Long March 5 Launch Vehicle

深空探测学报(中英文). 2021, 8(4): 372-379

基于点云测量的运载火箭异形管路数字化制造技术

Digital Manufacturing Technology of Special-shaped Pipe of Launch Vehicle Based on Point Cloud Measurement

深空探测学报(中英文). 2021, 8(1): 34-41

长征八号：长征火箭系列商业化与智慧化的先行者

LM-8: the Pioneer of Long March Rocket Series on the Innovations of Commercialization and Intelligence

深空探测学报(中英文). 2021, 8(1): 3-16



关注微信公众号，获得更多资讯信息

“长征五号”系列运载火箭总体方案与关键技术

李东¹, 李平岐², 王珏¹, 黄兵², 刘秉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: “长征五号”(CZ-5)运载火箭是中国全新研制的新一代大型运载火箭,先后圆满完成了中国首次火星探测、探月三期工程“嫦娥五号”探测器发射任务。运载火箭历经30余年关键技术攻关和工程研制,在研制过程中,研发团队攻克了大量的工程技术难题,积累了丰富的大型低温运载火箭研制经验,构建了新一代运载火箭的研制体系,运载火箭的研制能力和研制基础有了质的提升。本文叙述了“长征五号”的研制背景,立足火箭总体技术方案及技术创新,论述了火箭发展思路及模块化构型方案、全箭总体优化设计技术、大直径大集中载荷箭体结构技术等方面内容,探讨了针对深空探测任务的“长征五号”关键技术攻关,具体有深空探测任务轨道设计及优化技术、窄窗口多轨道发射技术。“长征五号”火箭是中国新一代运载火箭标志性重大工程,代表了中国运载火箭技术的最高水平,是中国由航天大国迈向航天强国的重要标志。

关键词: 运载火箭; 长征五号; 关键技术

中图分类号: V421

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)04-0335-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210009

引用格式: 李东, 李平岐, 王珏, 等. “长征五号”系列运载火箭总体方案与关键技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(4): 335-343.

Reference format: LI D, LI P Q, WANG J, et al. General scheme and key technologies of Long March 5 launch vehicle[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(4): 335-343.

引言

2020年7月23日,“长征五号”火箭成功将“天问一号”火星探测器准确送入直接地火转移轨道,中国运载火箭首次突破第二宇宙速度,其成功发射拉开了中国行星际探测的序幕,使得中国的空间探测能力迈上了一个新台阶。2020年11月24日,“长征五号”火箭成功将“嫦娥五号”探测器准确送入直接地月转移轨道,为中国探月工程“绕、落、回”的收官之战奠定了坚实基础。“长征五号”运载火箭的成功研制及工程应用,标志着中国具备了更大、更远的空间探测及应用能力,是中国由航天大国迈向航天强国的显著标志和重要支撑。

1 研制背景

航天运载工具是一个国家进入空间的主要手段,是和平利用空间及军事争夺占领空间的基本条件和前提。航天科技的成果已经渗透到每个人的日常生活,创造了难以估量的经济和社会价值。目前运载火箭仍是人类进入空间的主要手段,“火箭的运载能力有多

大,航天的舞台就有多大”。随着航天活动规模的不断增大,对进入空间能力的要求越来越大,世界各国均将大型运载火箭的研制作为重中之重。

中国航天经过60年的发展,形成了具有独立知识产权的“长征”家族系列火箭^[1-2],面向21世纪,世界主要航天强国均推出了新一代运载火箭,如美国“宇宙神5号”(AtlasV)、“德尔塔4号”(Delta IV Heavy)火箭,欧洲“阿里安5”(Ariane 5)等^[3-7]。中国运载火箭在运载能力、推进剂有毒污染等方面与国外同类火箭相比存在一定差距(见图1)。中国新一代运载火箭的论证工作始于20世纪90年代,其研制目标是全面提升中国运载火箭的整体技术水平,提高运载能力、可靠性、安全性、适应性、环境友好性等^[7]。“长征五号”运载火箭是中国新一代运载火箭中最早立项、开展工程研制的型号,在2006年获得国家正式立项前,“长征五号”火箭经过了长达20年的可行性论证和预先研究及关键技术攻关。

“长征五号”运载火箭的研制并不是以特定的任务为目标,而是以大幅提升中国独立、自主和自由进入空间能力、满足中国航天发展对大运载能力日益迫切

的需求而研制的新一代大型液体运载火箭,“长征五号”火箭采用了众多新方案和新技术,整体技术水平相比中国上一代火箭大幅提升,研制难度极大。

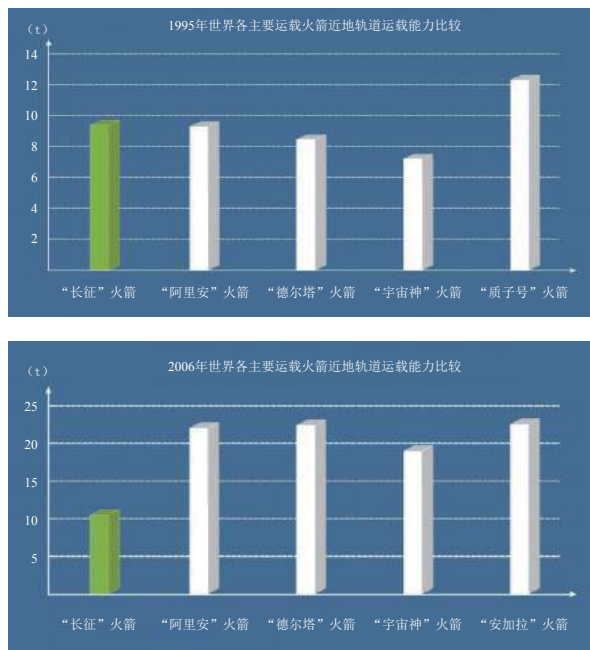


图1 21世纪初期长征系列运载火箭与国外主流火箭对比
Fig. 1 Comparison of LM rockets and foreign rockets in 21st century

2 火箭总体技术方案及技术创新

“长征五号”起飞推力接近1 100 t, 起飞规模是中国上一代火箭的约1.6倍, 但高、低轨运载能力分别是中国上一代火箭的2.5倍和2.9倍, 综合性能大幅提升, 运载能力和运载效率位居世界前列。“长征五号”运载火箭历经30余年关键技术攻关和工程研制, 在研制过程中, 研发团队攻克了大量的工程技术难题, 建立和完善了中国大型低温运载火箭的研制体系和规范, 大幅提升了中国运载火箭的研制技术水平和能力。

“长征五号”系列运载火箭采用模块化设计方案, 其中运载火箭总长约57 m, 芯级采用了5 m直径箭体结构、捆绑4个3.35 m直径助推器, 起飞重量约880 t, 采用两级半构型, 由“结构系统、动力系统、电气系统和地面发射支持系统”等四大系统组成, “长征五号”火箭剖视图见图2。

芯一级箭体直径5 m, 采用氢氧推进方案, 安装两台地面推力50 t级的YF-77氢氧发动机, 发动机采用双向摆动方案进行姿态稳定控制; 捆绑4个直径为3.35 m的助推器, 采用液氧煤油推进方案, 每个助推器安装2台地面推力120 t级的YF-100液氧煤油发动机, 每个助推器仅摆动靠近芯级的1台发动机, 发动机切向摇摆用

于姿态稳定控制; 芯二级箭体最大直径5 m, 采用悬挂贮箱方案, 安装两台真空推力10 t级的膨胀循环氢氧发动机YF-75D作为主动力, YF-75D发动机双向摆动、两次启动; 芯二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; 整流罩头锥采用冯·卡门外形, 直径 $\Phi 5.2$ m, 高12.267 m; 助推器采用斜头锥外形等^[8-9, 22]。



图2 “长征五号”火箭剖视图
Fig. 2 Section view of the LM-5

在“长征五号”运载火箭研制过程中, 共突破了以全新构型方案、5 m大直径箭体结构、先进低温动力为代表的200余项核心技术。

1) 全新的火箭发展思路及模块化构型方案

“长征五号”运载火箭按照“通用化、系列化、组合化”设计思想, 结合中国航天发展的现实和迫切需求, 以“一个系列、两种发动机、三个模块”为基础进行论证及研制的大型系列火箭。“一个系列”指中国新一代运载火箭系列; “两型发动机”指新研制的120 t液氧煤油发动机和50 t氢氧发动机; “三个模块”指2.25 m直径模块、3.35 m直径模块和5 m直径模块。经过论证, 最终确定基于5 m直径模块构建形成了中国新一代大型运载火箭“长征五号”系列, 共有6种构型, 目前已成功研制及应用了两型火箭, 分别是两级半构型的“长征五号”火箭和一级半构型的“长征五号B”火箭, “长征五号”火箭为两级半最大构型, 其地球同步转移轨道(Geostationary Transfer Orbit, GTO)运载能力达到14 t级, 主要用于深空探测及高轨道发射任务; “长征五号B”火箭为一级半最大构型, 其近地轨道运载能力

达到25 t级，主要用于载人空间站工程空间站舱段发射等近地轨道发射任务。基于3.35 m直径和2.25 m直径模

块构建形成了中国新一代中型、小型运载火箭“长征七号”和“长征六号”^[10-14]，如图3。

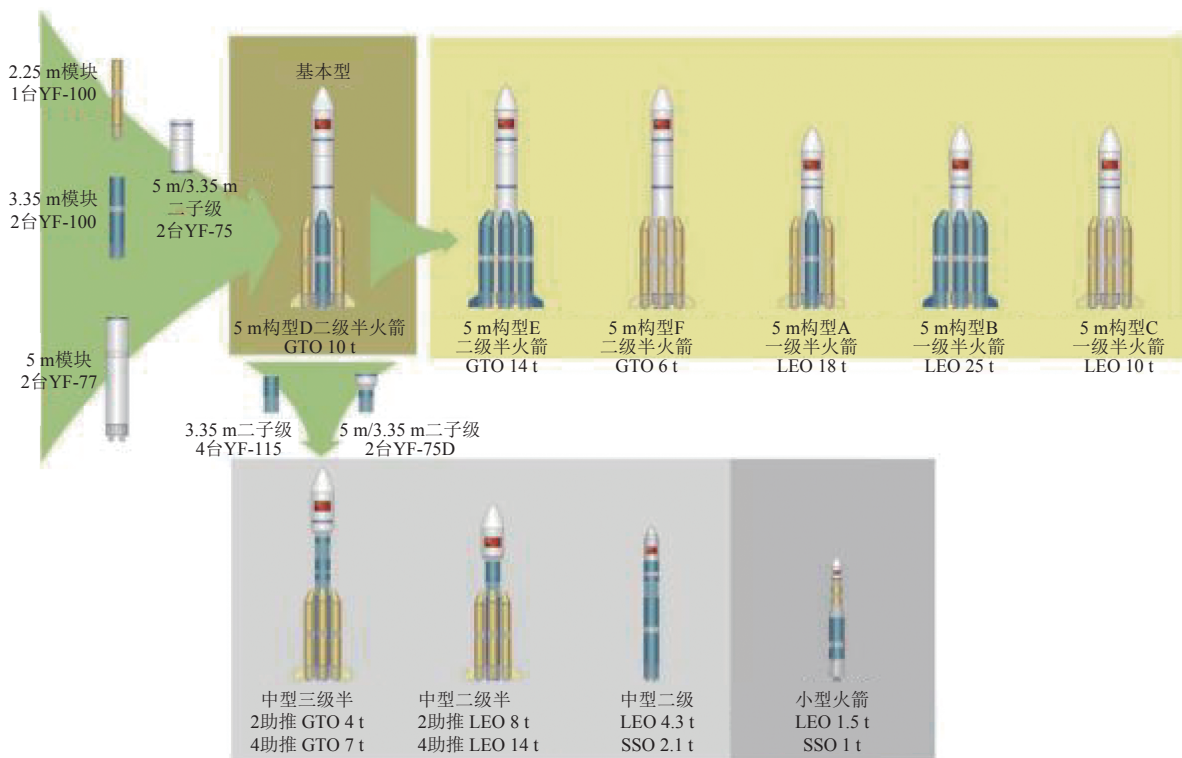


图3 “长征五号”系列运载火箭型谱

Fig. 3 The sub-types of Long March 5 series

在“长征五号”火箭系列化构型论证过程中，针对助推采用液氧/煤油+芯级采用液氢/液氧、助推采用四氧化二氮/偏二甲肼+芯级采用液氢/液氧、全氢氧、全液氧煤油，一级半构型、两级半构型、三级半构型等方案开展了大量的论证工作，论证构型达1 000余种，最终确定了5 m直径氢氧芯级捆绑3.35 m直径液氧煤油助推的构型方案，一级半构型用于发射近地轨道任务，两级半构型用于发射高轨道任务的系列化构型设计方案。

采用液氧煤油助推与5 m直径氢氧芯级的火箭构型方案在各种可选择的方案中规模较小、使用的发动机台数最少，运载效率大幅提升，综合性能优越。“长征五号”火箭采用氢氧芯级与液氧煤油助推组合的构型方案，可充分发挥液氧煤油发动机高密度比冲、大推力和液氢液氧发动机高质量比冲的优点，火箭总体性能达到国际先进水平！

为了实现同样的任务目标，相比现役火箭，“长征五号”系列火箭均减少了火箭级数，以GTO轨道为例，“长征五号”火箭两级半构型即可完成GTO轨道有效载荷的发射任务，而现役的“长征-3A”系列火箭为三级半

构型^[15]。火箭级数减少后，可降低级间分离以及发动机高空启动的风险，大幅提升火箭的固有可靠性。

2) 全箭总体优化设计技术

为确保“长征五号”火箭总体性能最优，在火箭总体构型方案确定的情况下，重点围绕全箭气动外形、捆绑结构传力方案、级间比优化、复杂力热环境预示与试验、多干扰下大质量体高可靠分离等大型运载火箭研制的重大关键技术开展了优化及攻关研制工作，大幅提升了中国运载火箭总体设计技术水平。

在全箭气动外形方面：“长征五号”火箭采用了冯·卡门外形整流罩和助推器斜头锥的气动外形方案，通过对整流罩球头半径和卡门曲线长度优化，开展了斜头锥外侧母线当地物面角优化，减低火箭的跨声速脉动压力环境；优化助推器与芯级间连接距离，减低全箭的零攻角阻力，以满足稳定性需求；开展气动布局方案优劣势对比，确定采用安定翼式气动布局，并进行了几何外形尺寸优化设计。通过多次缩比风洞试验的验证，确保全箭气动外形的优化。

在捆绑结构传力方面：助推器推力的传力路径设计，是大型捆绑式火箭的核心关键技术之一，对全箭

设计方案和火箭的运载能力影响重大。“长征五号”火箭助推器推力占起飞推力的90%以上,主捆绑点传递轴向力大幅增加,是现役“长征”火箭的3倍以上。“长征五号”火箭首次采用助推支撑、前支点传力方案,相比传统的芯级支撑、后支点传力方案,前支点传力方案大幅提升了芯级结构效率,提高了助推刚度、改善火箭的局部模态,降低了稳定系统设计难度^[16]。前捆绑传力与后捆绑传力路线对比见图4。

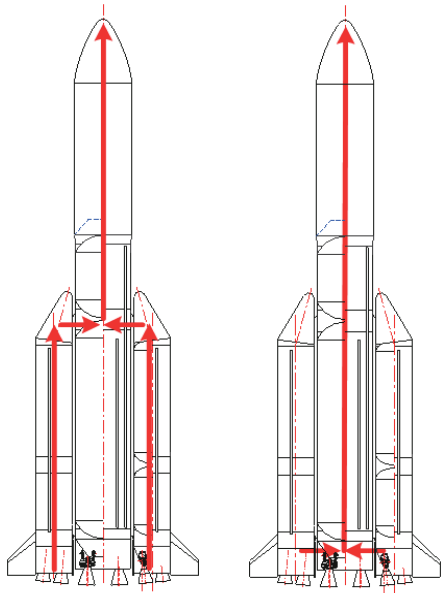


图4 前支点传力与后支点传力方案对比

Fig. 4 Comparison of fore and rear strap-on force transfer schemes

在复杂力热环境预示与试验方面:“长征五号”火箭由于采用全新的动力系统、结构设计方案,无论从环境激励源到结构传递关系,均与其它型号有较大差异,无法使用已有的火箭遥测试验数据作为设计依据;并且“长征五号”火箭点火起飞时刻有10台发动机同时工作,多喷管底部热环境极端复杂,进一步增大了力热环境预示的难度。在研制过程中,通过改进理论分析计算方法、地面试验等解决了复杂力热环境条件预示及设计的难题,包括引入入射激波与边界层干扰计算方法,解决局部精细热环境预示;采用CFD预示和激波风洞测热试验相结合的方法,提高气动加热的预示精度;通过搭载发动机地面热试车、其它型号飞行等开展了多种工况下的环境测量等,开展整舱级振动以及声振联合试验,解决复杂力、热环境预示难度,力、热环境精确预示水平大幅提升。

在高可靠分离系统设计方面:“长征五号”火箭的分离系统具有分离体尺寸规模大、助推器推力大、级间分离行程长、整流罩刚度低的特点,分离系统的设

计和验证是保障运载火箭可靠、安全飞行的一项关键技术。以级间分离系统设计为例,由于芯二级采用了悬挂贮箱方案(见图5),使得级间分离设计面临分离体质量大、发动机后效推力大、级间分离行程达8 m以上以及二级推进剂需连续沉底以发动机可靠点火等挑战,为此研制团队采用了芯一级发动机后效推力与二级正推火箭接力工作的创新思路,以及多偏差分层迭代仿真技术,解决了级间分离设计及地面试验无法覆盖的难题。

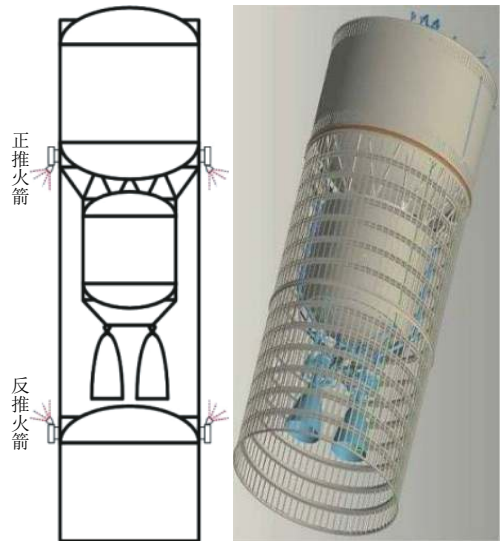


图5 悬挂贮箱方案

Fig. 5 Suspend tank

3) 大直径大集中载荷箭体结构技术

“长征五号”火箭实现了中国运载火箭箭体结构从3.35 m直径向5 m直径的全面升级换代,大直径箭体结构是中国运载火箭规模及运载能力成倍提升的基础及关键。5 m直径大型箭体结构成功研制及应用,带动了中国大直径结构设计、先进材料、制造工艺、制造工装、试验验证体系等的彻底革新。

在大直径低温薄壁贮箱设计方面,“长征五号”火箭突破传统贮箱椭球底形的限制,采用全新的“三心球冠底”与整体机加锻环的Y形过渡环结构,解决了复杂载荷下结构变形与应力控制难题;针对低温薄壁焊接结构,提出了双面应力均化理论,对结构几何曲率、刚度变化等在焊缝附近引起附加弯矩的问题,采取双面铣技术进行改进设计,改变焊接区域的传力路线,实现焊缝应力趋向内外均匀,焊缝承载能力提高了30%;针对大型低温薄壁贮箱无法承受常温水试压力的难题,提出了液氮内压检测法,实现结构大幅减重8%,成功研制了直径5 m、长21 m、容积378 m³的超大液氢贮箱(见图6)。



图6 芯一级液氢贮箱
Fig. 6 1st core-stage liquid hydrogen tank

在大直径、大集中载荷薄壳结构设计方面，攻克了单一壳段超1 600 t集中力扩散结构、400 t级偏置集中力助推器斜头锥拓扑优化设计等难题（见图7），实现了结构轻量化与高可靠的统筹协调^[17,21]。

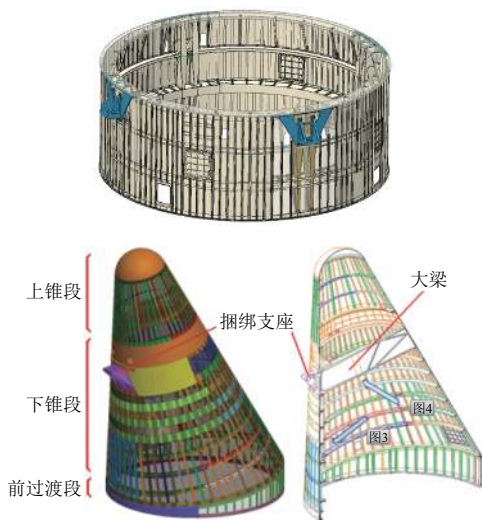


图7 大直径、大集中载荷薄壳结构
Fig. 7 Thin-walled structures of large diameter and concentrated load

“长征五号”火箭的研制带动了性能更加优越的2219铝合金在中国新一代运载火箭贮箱和壳体等主体结构上全面应用，同时带动了全新搅拌摩擦焊接工艺、全新环保材料体系的深低温贮箱绝热结构、全新泡沫夹芯结构冯·卡门曲线形的超大型整流罩、全夹层结构和高效低密度防热体系的轻质尾段结构等全新技术方案、材料和工艺技术的发展及应用。同时通过“长征五号”火箭的研制工作，首次实现了5 m直径结构千吨级静力试验，具备了1 500通道以上的试验数据测量能力，千吨级大集中力、高轴压、大弯矩和高内压载荷的多点协调平衡加载技术取得突破，具备了真实边界条件下多部段并行考核验证能力，试验技术及水平显著提升。大型结构研制带动了机械加工、热处理、焊接、检测等装备的全面发展。

4) 全新大推力、无毒无污染火箭发动机技术

“长征五号”火箭采用了三型全新发动机，助推器

用120 t液氧煤油发动机YF-100、芯一级用50 t氢氧发动机YF-77、芯二级用9 t氢氧发动机YF-75D。

YF-100发动机是迄今为止中国自行研制的推力最大的液体火箭发动机，采用高压补燃循环技术，发动机技术创新性强、研制难度大，研制过程中突破了富氧补燃循环、推力室可靠冷却和燃烧稳定性、化学点火、大范围推力调节和混合比调节、不下台多次试车技术、高压大热流推力室煤油冷却技术等关键技术和大量的工艺技术难题，该发动机的研制成功，使中国成为世界上第二个掌握高压补燃液煤发动机全部核心技术的国家，高压补燃液煤发动机技术水平仅次于俄罗斯。

YF-77氢氧发动机是中国上一代氢氧发动机推力的9倍，技术跨度大，研制过程中突破了大推力氢氧发动机启动控制、高性能稳定燃烧喷注器，高压大热流推力室冷却、涡轮泵轴向力平衡及高DN值超低温轴承制造等关键技术，攻克了推力室高频燃烧不稳定、推力室喷管延伸段小端烧蚀、氧轴盘二节径振动等技术难关。YF-77发动机的成功研制填补了中国大推力氢氧发动机的空白^[18-20, 22-24]，代表了中国氢氧发动机技术的最高水平。

YF-75D氢氧发动机采用闭式膨胀循环方式，取消了燃气副系统，系统构成大大减化，固有可靠性大幅提高。研制过程中突破了膨胀循环启动技术、超高转速高效率氢泵技术、高换热能力推力室技术和小尺寸叶轮粉末冶金加工等。相比开式循环方式氢氧发动机，YF-75D发动机综合性能指标大幅提升，其中比冲性能是中国目前所有火箭发动机中最高的。推力室再生冷却通道单位压降下的换热功率等指标达到了国际先进水平。YF-75D发动机的成功研制及应用，使得中国成为继美国之后，第二个掌握闭式膨胀循环氢氧发动机技术的国家。

5) 大流量深低温增压输送技术

“长征五号”火箭为满足“可靠性高、适应性强、安全性好”的要求，采用了全冗余高精度增压控制、循环预冷、消旋防塌高效出流、分级多路同一供配气、深低温大口径大补偿气液自动器、管系设计及试验等技术，突破了全新循环方式、低温永磁同步电机驱动的循环泵^[13]、常温氢气引射驱动的引射器、新型阀门等多项核心关键技术，增压输送系统的可靠性和精度大幅提高、对发射推迟适应性更强，具备液氧加注后推迟24 h、液氢加注后推迟2 h的推迟发射能力，实现了中国运载火箭增压输送系统的升级换代。

“长征五号”火箭由于采用了全新的大推力液氧煤

油发动机YF-100和大推力氢氧发动机YF-77,并且采用了5 m大直径箭体结构方案,在低温POGO抑制方面面临诸多技术难题,比如5 m大直径箭体结构的应用,使得箭体结构低频模态更加密集、安全频率窗口更窄,POGO抑制设计的难度更大。为此引入了高压补燃循环发动机等的动力学模型,创新性地将模拟打靶、参数辨识、小波分析等应用于POGO设计及数据分析中,开展了全新的频率特性分析,有效解决了大型复杂结构-控制-动力强耦合的低温液体运载火箭POGO抑制设计技术难题,经过多次飞行验证,均未出现POGO振动问题。

6) 高可靠的控制与大容量的遥测技术

“长征五号”火箭的研制带动了基于1553B总线的系统级冗余技术在中国新一代运载火箭上的广泛应用,箭上核心控制设备均采用三取二冗余设计,系统可靠性以及应对飞行中各种单机故障的能力显著提升。研制过程中成功解决了控制系统动态重构分配策略、惯组系统级冗余信息管理、速率陀螺与惯组角速度信息系统级故障诊断和重构控制等技术难题,构建了飞行控制、贮箱增压、推进剂利用的集成数字化架构,确保了火箭安全可靠飞行,使控制系统可靠性指标达到了国际领先水平。

相比中国上一代火箭,“长征五号”火箭采用了全新5 m直径箭体结构以及前捆绑点传力的全新传力方案,全箭动力学特性更加复杂,控制系统稳定设计难度更大。由于“长征五号”火箭助推器推力占全箭总推力的90%以上,传统的仅芯级发动机摆动进行控制的方案,难以满足控制力要求,首次论证采用了助推与芯级发动机联合摇摆控制技术。为了确保姿态动力建模的准确性,研制过程中分别基于牛顿-欧拉矢量力学体系、拉格朗日分析力学体系两种方案,推导建立基于空间模态的新一代火箭姿态动力学模型;解决了助推局部模态进入控制回路、发动机-伺服小回路低频谐振、POGO-姿态控制回路耦合等多个动力学与控制深度耦合的技术难题。通过开展大型仪器舱角振动试验、带箭体边界的伺服机构特性测试试验、速率陀螺与加表箭上选位试验等工作,有效抑制箭体弹性边界对控制回路品质的影响。“长征五号”火箭模态示意图见图8。

在遥测方面,“长征五号”火箭在国内首次采用“10M+5M”双点频遥测传输与数据综合方案,通过技术攻关实现了高码率下基带信号传输的完整性与可靠性,创新遥测帧同步码方案,解决单点频10 Mbps高码率下天地高可靠通信难题,遥测单点频码速率达到国际领先水平。

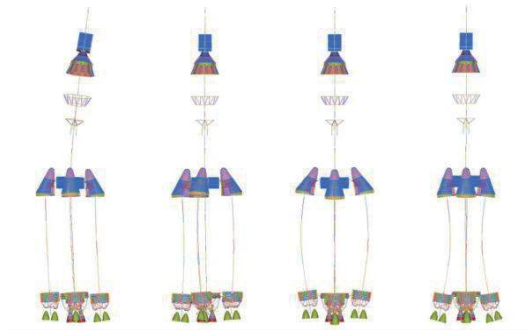


图8 “长征五号”火箭模态示意图

Fig. 8 Modal diagram of LM-5

7) 全新的测试发射模式和发射支持技术

“长征五号”火箭采用新三垂测发模式,并遵循前端无人值守的理念开展测试发射方案设计,突破了自重2 000 t级活动发射平台机、电、气、液多系统集成,外场大流量冷氢安全排放,大口径深低温连接器随动密封等技术难题;实现了火箭远程低温推进剂自动加泄与测试发射控制;本质提升了中国低温火箭的测试发射安全性。

为了满足“新三垂”测发模式提出的技术区转发射区需保持“箭地接口无间断连接”、有效缩短火箭在发射区时间的要求,活动发射平台设置了脐带塔和尾端服务塔,集成了前端测控设备、加注设备、供气设备、空调设备、供配电设备以及摆杆等,“长征五号”火箭的活动发射平台是中国规模最大的发射平台,是复杂的机、电、液、气一体化的大型产品。活动发射平台的研制攻克了台体大载荷承载设计技术、高热流燃气排导设计技术、表面结构防热技术、大流量喷水降温降噪防护技术、助推12点支撑垂直度调整技术、适应“新三垂”发射模式的脐带塔和摆杆设计技术等关键技术难题,活动发射平台的机、电、液、气及前端设备多系统集成设计能力达到了国际先进水平。

为提高“长征五号”火箭推迟发射的适应能力,首次采用芯一级氢加、排连接器零秒脱落技术、无摆杆式高空零秒脱落连接器系统,大幅提升了连接器脱落后至起飞前发生问题的应急处置能力,实现了中国低温火箭在连接器脱落后中止发射应急能力质的提升。

“长征五号”的成功研制,全面突破了大直径箭体结构设计制造技术、大推力液氧煤油发动机和液氢液氧发动机设计制造技术、大型低温动力系统循环预冷技术、高可靠控制系统设计与大容量遥测数据综合与传输技术、全新的测试发射模式和发射支持技术等,图9为“长征五号”运载火箭垂直转运照片。“长征五号”火箭代表了中国运载火箭科技创新的最高水平,其成功研制填补了中国大推力、无毒、无污染大型火箭的空白,使中国成功跻身大火箭国家行列。



图9 “长征五号”运载火箭垂直转运
Fig. 9 Vertical transportation of LM-5

3 深空探测任务关键技术攻关

对于火星探测、月球探测等深空探测任务，由于探测目标相对地球的位置是不断变化的，因此轨道设计需要考虑的因素也更加复杂，对发射窗口的要求也更加苛刻。而“长征五号”火箭作为一型大型低温运载火箭，射前流程及动作复杂，准时发射的难度也更大，因此为了增强“长征五号”火箭对深空探测任务的适应性，提升深空探测任务的实施可靠性，“长征五号”火箭采取了多项技术创新和设计改进。

1) 深空探测任务轨道设计及优化技术

在探月三期工程“嫦娥五号”发射任务中，突破传统的分工限制，火箭系统首次以近月点参数作为约束，采取了直接地月转移轨道设计模式，建立了完整的地球出发直到近月轨道的精确地月转移轨道设计方法，综合考虑火箭及探测器对地月转移轨道的特定约束要求，满足火箭运载能力、穿越大气段可靠飞行、航落区安全、测控系统约束等限制条件，建立了各约束条件与火箭设计参数的关联模型，解决了多约束条件下的直接地月转移轨道设计与优化难题，大幅缩短了火箭与探测器系统轨道拼接的时间周期，提升了探月轨道设计效率。

在中国首次火星探测任务中，首次突破了双曲线轨道设计与控制难题，提出了行星际轨道以逃逸能量C3为制导特征量的轨道控制方案，解决了制导参数畸变难题，中国运载火箭及航天器首次达到第二宇宙速度，实现了中国行星际探测的历史性跨越。

2) 窄窗口多轨道发射技术

与常规的地球轨道任务不同，深空探测任务中，月球和火星等深空探测目标相对地球是不断变化的，是一个典型的“移动靶”。为了实现对移动目标的捕获，需要运载火箭在确定的时刻点火起飞，尽量减少由于点火时间偏差引起的探测器轨道修正所需的推进剂，以实现最大的探测能力。

但对于“长征五号”火箭，其射前流程复杂，仅在射前-6 ~ -3 min时段，就涉及贮箱增压、加泄阀关闭、排气阀关闭、连接器脱落等50余项操作，准时发射的难度极大。为降低重大工程任务实施难度和风险，“长征五号”火箭首创了窄窗口多轨道发射技术，预先装订多条轨道、射前实时自主选择，将发射窗口由 ± 5 min拓宽到50 min，有效解决了深空探测任务发射窗口窄、发射实施难度大的难题。窄窗口多轨道发射技术已成功应用于“天问一号”火星探测器、“嫦娥五号”月球探测器发射任务中。

4 结 论

“长征五号”火箭是中国新一代运载火箭的标志性重大工程，具有完全自主知识产权，其成功研制构建了新一代运载火箭的研制体系和研制准则，培养了一大批航天技术人才，实现了中国运载火箭从3.35 m直径向5 m直径的升级换代，实现了中国运载能力的大跨越，推动了中国运载火箭技术的整体进步，是中国由航天大国迈向航天强国的显著标志和重要支撑。

“长征五号”运载火箭已成功应用于中国月球采样返回、首次火星探测以及新一代大型静止轨道卫星平台等重大航天工程发射任务，是中国未来载人空间站工程建设、大规模开发利用空间资源等航天活动的重要基础。未来将以火箭的故障容错及重构设计、流程优化等为重点，持续地开展改进优化，不断提升火箭的任务适应性、飞行可靠性和安全性，更好地支撑中国航天的发展需求。

参 考 文 献

- [1] 龙乐豪. 中国运载火箭技术的成就与展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2001(1): 3-8.
LONG L H. The achievement and prospect of China launch vehicle technology[J]. Missiles and Space Vehicles, 2001(1): 3-8.
- [2] 秦旭东, 龙乐豪, 容易. 我国航天运输系统成就与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(4): 315-322.
QIN X D, LONG L H, RONG Y. The Achievement and future of China space transportation system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 315-322.
- [3] GASS M C. Atlas launch system mission planner's guide[M]. Virginia:

- International Launch Services, 2001.
- [4] The Boeing Company. Delta IV payload planners guide[M]. California: The Boeing Company, 2000.
- [5] PEREZ E. Ariane 5 user's manual, issue 4 revision 0[M]. Evry: Arianespace, 2004.
- [6] NASDA. H-IIA brief description[M]. Tokyo: NASDA, 2000.
- [7] MEDVEDEV A. The Angara launch system mission planner's guide[M]. Virginia: International Launch Services, 2002.
- [8] 张庆伟. 面向21世纪的中国航天运载技术[J]. 中国航天, 2001(1): 4-8.
ZHANG Q W. China plans improvement of space launchers[J]. Aerospace China, 2001(1): 4-8.
- [9] 李东, 王钰, 李平岐, 等. 我国新一代大型运载火箭长征-5 首飞大捷[J]. 国际太空, 2016(11): 1-7.
LI D, WANG J, LI P Q, et al. New generation of large launch vehicle CZ-5 launched successfully[J]. Space International, 2016(11): 1-7.
- [10] 李东, 程堂明. 我国新一代运载火箭发展展望[J]. 中国工程科学, 2006(11): 33-38.
LI D, CHENG T M. Development prospect of China's new generation of launch vehicles[J]. Engineering Science, 2006(11): 33-38.
- [11] 李东, 王珏, 何巍, 等. 长征五号运载火箭总体方案及关键技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(3): 1-5.
LI D, WANG J, HE W, et al. The general scheme and key technologies of CZ-5 launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(3): 1-5.
- [12] 李东. 通向太空的中国“飞龙”“长征”系列火箭阵容强大[J]. 国际太空, 2009(6): 28-30.
- [13] 黄兵, 陈士强, 李东, 等. 低温推进剂地面加注停放阶段蒸发量分析[J]. 低温工程, 2016(2): 54-59.
HUANG B, CHEN S Q, LI D, et al. Analysis of evaporation during the cryogenic propellant loading and ground-hold stage[J]. Cryogenics, 2016(2): 54-59.
- [14] 李东, 马佳. 雏凤清于老凤声—中国新一代运载火箭发展思路[J]. 太空探索, 2005(2): 2-5.
- [15] 龙乐豪. 长征三号系列运载火箭[J]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 11-18.
LONG L H. Long March 3 series launch vehicle[J]. Engineering Science, 1999, 1(1): 11-18.
- [16] 杨云飞, 李东, 谭述君, 等. 运载火箭纵横扭大回路耦合动力学研究[J]. 中国科学(技术科学), 2014, 44(5): 510-516.
YANG Y F, LI D, TAN S J, et al. A study of longitudinal-lateral-torsional coupling dynamics of launch vehicles[J]. Scientia Sinica Technologica, 2014, 44(5): 510-516.
- [17] 冯丽娜, 李东, 田建东, 等. 削弱槽位置对膨胀管分离装置冲击特性的影响[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(3): 29-35.
FENG L N, LI D, TIAN J D, et al. Influence of notch position on the shock characteristic of the expanding tube separation device[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(3): 29-35.
- [18] 王珏, 张振鹏. 大推力氢氧发动机的频率特性仿真研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(12): 2341-2345.
WANG J, ZHANG Z P. Research on frequency characteristics of LOX/LH2 rocket engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2341-2345.
- [19] 李东, 刘秉. 长征五号B运载火箭及其发射服务展望[J]. 国际太空, 2020(5): 4-7.
- [20] 王珏, 王维彬. 50吨级氢氧发动机研制概况[J]. 航天推进与动力, 2004: 1-7.
- [21] 李东, 王珏, 李平岐, 等. “长五”归来 箭指星辰--长征五号遥三运载火箭发射飞行试验任务圆满成功[J]. 国际太空, 2020(1): 26-28.
- [22] 徐勤. 长征二号丙(CZ-2C)系列火箭用户手册[M]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2006.
- [23] 李东. 长征火箭的现状与展望[J]. 科技导报, 2006(3): 57-63.
LI D. Long-March launch vehicles' status and prospect[J]. Science & Technology Review, 2006(3): 57-63.
- [24] 刘竹生, 张智. CZ-2F载人运载火箭[J]. 导弹与航天运载技术, 2004(1): 6-12.
LIU Z S, ZHANG Z. LM-2F manned launch vehicle[J]. Missiles And Space Vehicles, 2004(1): 6-12.
- 作者简介:
李东(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 运载火箭设计。
通讯地址: 北京9200信箱1分箱(100076)
电话: (010)68381927
E-mail: lidong615@sina.com

General Scheme and Key Technology of Long March 5 Launch Vehicle

LI Dong¹, LI Pingqi², WANG Jue¹, HUANG Bing², LIU Bing²

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

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

Abstract: Long March 5 (LM-5) is a new generation of heavy-lift launch vehicle developed by China. It has successfully completed the first Mars exploration of China and the 3rd phase of China lunar exploration program of Chang'E 5 (CE-5). LM-5 experienced 30 years of key technology research and engineering development. During this period, a lot of engineering technical problems were conquered, rich experience in the development of large cryogenic launch vehicle was accumulated, and the development of the new generation launch vehicle system was constructed. The research capability and foundation of carrier rockets have been greatly improved. This paper describes the development background of LM-5. Based on the overall rocket technical scheme and technical innovation, this paper discusses the development thinking of the rocket, the modular configuration scheme, the overall optimization design technology of the whole rocket and the structure technology of the large diameter and large concentrated load rocket body, and probes into the key technical problems of the LM-5 for the deep space exploration mission, specifically, the orbit design and optimization technology for deep space exploration mission, and narrow window multi-orbit launch technology. LM-5 is a landmark project of China's new generation of launch vehicle, representing the highest level of launch vehicle technology of China, and is a significant symbol for China's transformation from a major player in space to major power in space.

Keywords: launch vehicle; LM-5; key technology

Highlights:

- New idea of rocket development, modular configuration scheme, and overall optimization design technology of whole launch vehicle.
- Structure technology of large diameter and large concentrated load; new high-thrust, non-toxic and pollution-free rocket engine technology; high-flow and low-temperature supercharged conveying technology; high reliable control and large capacity telemetry technology; new test launch mode and launch support technology.
- Orbit design and optimization technology of deep space exploration mission and narrow window multi-orbit launch technology.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]