

文章编号: 1004-7182(2017)03-0001-05

DOI: 10.7654/j.issn.1004-7182.20170301

# 长征五号运载火箭总体方案及关键技术

李东<sup>1</sup>, 王珏<sup>1</sup>, 何巍<sup>2</sup>, 李平岐<sup>2</sup>, 牟宇<sup>2</sup>

(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:** 长征五号运载火箭是中国全新研制的新一代大型运载火箭, 2006年获得国家立项, 正式开始工程研制, 2016年11月3日在海南文昌发射场实施首次发射, 并取得圆满成功, 工程研制历时10年。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, 长征五号运载火箭大幅提高了中国运载火箭的运载能力, 其首飞成功在迈向航天强国的征程中踏出了最为坚实的一步, 中国也由此进入了拥有大型运载火箭的国家行列。

**关键词:** 运载火箭; 长征五号; 运载能力

中图分类号: V421 文献标识码: A

## The General Scheme and Key Technologies of CZ-5 Launch Vehicle

Li Dong<sup>1</sup>, Wang Jue<sup>1</sup>, He Wei<sup>2</sup>, Li Ping-qi<sup>2</sup>, Mou Yu<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** The CZ-5 launch vehicle, approved and started at 2006, is the new generation large launch vehicle of China. Its maiden flight is in November 3rd, 2016 and overall successful. The CZ-5 launch vehicle has been designed for 10 years. During this period, the design team has solved a lot of difficult technical problems and learns abundant experience in designing cryogenic launch vehicle. The design ability and foundation of the term has also upgraded. The CZ-5 increases the capability of Chinese launch vehicles. The successful maiden flight of CZ-5 makes China become the country that has the large cryogenic launch vehicle.

**Key words:** Launch Vehicle; CZ-5; Launch capability

### 0 引言

2016年11月3日, 全新研制的新一代大型运载火箭长征五号(CZ-5)在中国海南文昌航天发射场托举着远征二号上面级和实践十七号卫星(SJ-17), 经过约1821s的飞行成功进入预定轨道, 首飞取得圆满成功。长征五号运载火箭的首飞成功标志着中国运载火箭从此进入了拥有大型运载火箭的国家行列<sup>[1]</sup>。

### 1 研制背景及总体方案

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。21世纪, 世界主要航天强国均推出了新一代运载火箭, 如美国的宇宙神5、德尔他4, 欧洲的阿里安5等。中国运载火箭在运载能力等方面与国外同类火箭相比存在一定差距。为全面提升中国运载火箭的技术水平, 提高运载能力、可靠性、安全性、适应性和环境友好性, 2006年, 长征五

号运载火箭正式获得国家航天局立项, 进入工程研制阶段。作为中国新一代运载火箭中第1个立项研制的火箭型号, 是为满足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运载火箭, 它以大幅提升中国进入空间的能力为目标, 是中国由航天大国向航天强国迈进的重要支撑和显著标志之一。

长征五号运载火箭按照“通用化、系列化、组合化”设计思想, 以“一个系列、两种发动机、三个模块”为基础, 瞄准中国航天发展的现实和迫切的需求而规划的一个系列化运载火箭, 而不为单一特定载荷设计。基于5m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(见图1), 首飞构型为二级半最大构型, 即长征五号运载火箭, 地球同步转移轨道(Geosynchronous Transfer Orbit, GTO)能力达到14吨级; 用于载人空间站工程空间站舱段发射任务的长征五号乙运载火箭, 为一级半最大构型,

收稿日期: 2017-05-05; 修回日期: 2017-05-08

作者简介: 李东(1967-), 男, 研究员, 现任长征五号运载火箭总设计师, 主要研究方向为运载火箭总体设计

其近地轨道（Low Earth Orbit, LEO）最大运载能力达到 25 吨级。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和小型运载火箭。



图 1 新一代运载火箭型谱

长征五号运载火箭总长约 57 m，捆绑 4 个助推器，起飞质量约 878 t，采用二级半构型，由结构系统、动力系统、电气系统和地面发射支持系统等组成，主要方案如下：

a) 芯一级采用 5 m 直径模块，2 台地面推力 50 吨级的 YF-77 氢氧发动机双向摆动；

b) 助推器采用 4 个 3.35 m 直径模块，每个模块配置 2 台地面推力 120 吨级的 YF-100 液氧煤油发动机，每个助推器摆动靠近芯级内侧的 1 台发动机；

c) 芯二级采用 2 台真空推力 9 吨级改进的新型膨胀循环氢氧发动机 YF-75D 作为主动力，双向摆动、两次启动；

d) 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 5.2 m，高 12.267 m，助推器采用斜头锥外形等。

## 2 主要技术特点

长征五号运载火箭是中国首个起飞推力超过千吨的大型运载火箭，相比现役长征系列运载火箭，运载能力提高 2.5 倍以上，运载能力和运载效率位居世界前

列。

长征五号运载火箭的研制工作历时 10 年，研制过程中突破了以 12 项重大关键技术为代表的 247 项关键技术，在关键技术攻关过程中，开展了各类地面试验 2 100 余项，试验次数 7 000 余次，火箭整体技术达到国际先进水平，建立和完善了中国大型低温运载火箭的研制体系和规范，提升了中国运载火箭的研制技术水平和能力。

### 2.1 总体优化及环境预示技术

为了满足长征五号运载火箭系列化构型设计要求，按照火箭总体性能需求完成了大型运载火箭构型优化、级间比优化、传力路线方案优化，确定了液氧煤油助推与氢氧芯级的组合，以及助推支撑、前捆绑传力，二级悬挂氧箱和助推器斜头锥等火箭总体方案。分离设计方面，完成了中国最大的 3.35 m 直径助推器分离（见封二图 2）的方案设计、仿真及试验验证；完成了 8 m 超长分离距离级间分离仿真分析、5.2 m 直径整流罩分离设计、仿真及试验验证；采用全箭精细化模型完成全箭气动仿真分析、发动机工作羽流分析等。

长征五号运载火箭采用全新研制的大推力发动机，为了提高箭上仪器设备工作可靠性及鉴定余量，

开展了火箭力学环境、热环境预示分析及试验验证工作：完成了高、低频振动预示、噪声环境预示等力学环境预示；完成了气动加热、多喷管底部喷流、侧推火箭喷流等热环境预示；完成了地面试车、其他型号飞行等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，解决力、热环境预示难度大以及精细化设计的难题。

## 2.2 大直径箭体结构设计制造与试验技术

长征五号运载火箭首次采用 5 m 直径结构（见封二图 3），突破了传统火箭 3.35 m 直径限制，是实现运载能力大跨越的基础。采用全新贮箱和壳体新材料——2219 铝合金，全新搅拌摩擦焊焊接工艺，全新低温贮箱绝热方案，开展了大直径结构设计、制造、试验技术攻关，完成了大型助推捆绑传力设计、大直径贮箱设计、大直径壳段设计，以及新型贮箱焊接技术、整体锻环制造技术、大型低温贮箱静力及蒸发量试验技术、大直径壳段部段联合试验技术等。

5.2 m 直径大型冯·卡门透波整流罩结构，创新使用了碳纤维轻质蒙皮+预成型泡沫夹芯结构技术方案；大尺寸蒙皮桁条结构级间段承载能力近千吨，是目前中国最大尺寸单一部段半硬壳结构；偏心集中载荷超过 300 t 的大型偏置斜头锥结构技术、大直径及大集中载荷薄壳结构技术均实现跨越式发展。成功研制了中国规模最大的低温轻质贮箱，解决了大直径锻环过渡结构变形协调和刚度匹配性难题。大型结构研制同时带动了机械加工、热处理、焊接、检测等装备的发展。

## 2.3 低温增压输送系统及新型阀门技术

长征五号运载火箭动力系统采用全低温新型发动机。助推煤油系统采用常温氮闭式增压方案，氧系统采用氦气引射循环预冷和氦气加温闭式增压方案；芯一级氢系统采用循环泵强迫循环预冷方案和闭式自生增压方案，氧系统采用氦气引射循环预冷和开式自生增压方案；芯二级氢系统采用排放预冷和开式自生增压方案，氧系统采用排放预冷和闭式氦加温增压方案。为满足全箭“可靠性高、适应性强、安全性好”的研制要求，动力系统解决了循环预冷、大口径高精度阀门、高可靠冗余增压、统一供配气、配气台冗余控制等技术难题。

## 2.4 助推器与芯级发动机联合摇摆技术

长征五号运载火箭采用 5 m 芯级直径、助推前捆绑传力结构形式，全箭动力学特性异常复杂，控制系统设计难度极大，并且首次论证采用了助推与芯级发动机联合摇摆控制技术。在姿态动力学方面，基于牛顿-欧拉矢量力学体系、拉格朗日分析力学体系推导建

立基于空间模态的新一代运载火箭姿态动力学模型；攻克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，箭体模态如图 2 所示。通过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、速率陀螺与加速度计箭上选位试验，有效抑制了箭体弹性边界对控制回路的质量影响。

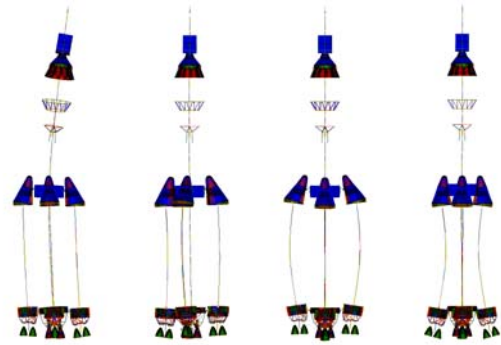


图 2 箭体模态示意

## 2.5 大型低温火箭 POGO 抑制技术

长征五号运载火箭 POGO 设计面临发动机新、箭体结构低频模态密集、安全频率窗口较窄等难题，为此开展了全新的频率特性分析，解决了密集窄窗口问题；引入了高压补燃和膨胀循环发动机的动力学模型，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，有效地解决了大型复杂模态、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。通过开展 YF-100 和 YF-77 发动机氧泵动态水试、助推和一级氧管路动态特性试验、YF-100 氧泵间管两相流原理性验证试验等地面试验，保证了 POGO 抑制设计的可靠性。

## 2.6 120 吨级液氧煤油发动机技术

120 吨级液氧煤油发动机是中国首台自主研发的采用高压补燃循环方式的大推力液体火箭发动机，发动机自身启动、化学点火为单推力室、泵压式结构。发动机技术创新性强、研制难度大，攻克的关键技术包括：补燃循环系统自身启动技术，大推力发动机总体结构及布局设计技术，高压大流量推力室稳定燃烧及冷却技术，高压大流量富氧发生器技术，高压大流量高功率涡轮泵技术，高精度调节与控制组件技术，新材料应用工艺和试验技术等。120 吨级液氧煤油发动机的研制突破了 73 项设计、制造、试验技术，新研制了 50 余种材料。截至长征五号运载火箭首飞，发动机试车超过 57 000 s，单机实现 5 次启动、试车时间 2 000 s；该发动机的研制成功，使中国成为继俄罗斯

之后,第2个掌握高压补燃液氧煤油发动机全部核心技术国家。

### 2.7 50吨级大推力氢氧发动机技术

50吨级氢氧发动机YF-77是中国自主研发的首台大推力、地面点火启动的氢氧火箭发动机,代表了中国氢氧发动机技术的最高水平,填补了中国大推力氢氧发动机的空白。发动机采用化学推进剂中能量最高、燃烧产物零排放的液氢作为燃料,与现役氢氧发动机相比,YF-77发动机真空推力是其9倍,推力室室压是其2.7倍,氢涡轮泵功率是其15倍,氧涡轮泵功率是其20倍,外廓尺寸是其5倍,且工作过程中承受严酷的飞行热环境以及泵前高过载环境条件。发动机在研制过程中,解决了高压大尺寸氢氧燃烧室高频不稳定燃烧和冷却技术及高性能、高功率密度多级氢涡轮泵技术等关键技术,使中国氢氧发动机技术能力跨上了新的台阶。截至长征五号运载火箭首飞,发动机试车超过38000s,单台发动机启动15次、试车5346s。

### 2.8 9吨级膨胀循环氢氧发动机技术

芯二级YF-75D发动机是中国首次采用闭式膨胀循环的氢氧发动机,取消了燃气副系统,系统构成极大减化,固有可靠性大幅提高,具有推进剂混合比调节功能和二次启动能力。研制过程中解决了以受真空环境影响的发动机高空二次启动技术;高转速下长寿命、高可靠氢涡轮泵技术;高强换热、高可靠推力室身部换热技术;小温差冷氦换热器技术;小通径叶轮粉末冶金成型技术为代表的设计、工艺、试验等关键技术。截至长征五号运载火箭首飞,YF-75D发动机试车超过45000s,无故障试车超过30000s,创造了中国运载火箭发动机研制的新纪录。YF-75D发动机实现了氢氧发动机由开式循环到闭式循环的跨越,成为目前中国比冲性能最高的火箭发动机。推力室再生冷却通道单位压降下的换热功率等指标达到国际先进水平。

### 2.9 采用总线技术的系统级冗余控制技术

长征五号运载火箭控制系统在中国运载领域首次全面采用基于1553B总线的系统级冗余技术,箭上核心控制设备均采用三取二冗余设计,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冗余技术。采用先进的摄动+迭代+天基组合制导技术,助推和芯级两类发动机三通道联合摇摆控制技术,大风区实时卸载、主动导引和预测关机复合控制,助推器多点支撑起飞主动抗漂移控制方法,大推力助

推器、芯级制导关机和落点安全控制技术,飞行控制与推进剂利用集成的数字化动态重构系统,远距离测试发控方案,提供了完整的新一代运载火箭控制系统解决方案,使长征五号控制系统的技术水平、可靠性处于国际先进行列,实现了运载火箭控制系统的更新换代。

### 2.10 采用高压煤油和氢气为能源的高可靠伺服技术

长征五号运载火箭助推器伺服系统为中国首次采用高压煤油直接引流驱动伺服系统,功率大、负载特性复杂。研制中攻克了冗余设计及管理技术、恒压恒流控制技术、三冗余大流量伺服阀技术、煤油密封技术、动特性优化技术、液压锁定设计技术等关键技术。其中恒压、恒流控制技术设计了多种高可靠阀门,攻克压力波动、谐振、流量不稳等技术难题;动态特性优化解决了低刚度、大惯量负载的动特性控制问题;液压锁定技术通过研制多种零泄漏组件实现了偏心负载的任意位置可靠锁定。

长征五号运载火箭芯级伺服系统首次采用以超高速氢气涡轮为动力、集成高效毛细管氢/液冷却器的伺服动力新方案和基于数据总线/数字信号处理器的三冗余数控伺服方案,解决了高压氢气引流利用和转换为长时工作大功率液压动力等技术难题,其中氢气涡轮泵累计完成约70000s氢吹试验,实现了大型运载火箭液氢/液氧发动机的高动态、高可靠伺服控制。

### 2.11 10Mbit/s高码速率遥测数据综合与传输技术

长征五号运载火箭全箭遥测参数总数2200个(其中速变参数约500个),总线数据2400个,总计达4600个,与现役火箭相比,遥测参数数量和容量有较大程度增加。在中国首次采用“10M+5M”双点频遥测传输方案和10Mbit/s高码率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,高码率下基带数据综合与时序调度,确定10Mbit/s码遥测的帧同步码组,解决高码率下天地通信模式。遥测单点频码速率达到国际领先水平。

### 2.12 大型活动发射平台技术

长征五号运载火箭活动发射平台是复杂的机、电、液、气一体化的大型产品,是中国规模最大的发射平台。活动发射平台首次集成了地面发射支持系统气液连接器、供气系统、发动机排氢燃烧系统、地面瞄准系统等多个子系统。通过开展结构强度、燃气流场排导、喷水降温等仿真计算、摆杆结构静载及加载摆动试验、平台行走试验、台体总装及加载试验,验证了发射平台总体设计的正确性;通过开展DN100液氧加

泄连接器低温液氮密封试验,一级液氢加排连接器液氮、液氢密封试验、常温和低温对接锁紧解锁脱落试验,验证了低温大口径连接器密封设计和脱落设计方案的正确性。

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。长征五号运载火箭垂直转运情况见封二图5。

长征五号运载火箭的成功研制,代表了中国运载火箭研制领域经60年发展的又一大跨越,运载火箭总体构型与优化设计水平大幅提升,全面突破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。

### 3 结束语

长征五号运载火箭的研制突破掌握了一大批具有完全自主知识产权的全新技术,推动了中国运载火箭

技术的进步,实现了中国运载火箭从3.35 m直径向5 m直径的跨越,为中国未来大规模开发利用空间资源、在深空探测中发出“更强中国音”提供了坚实基础。长征五号运载火箭的研制也培养了一批技术人才,牵引了天津大运载火箭基地和海南文昌发射场的建设,为后续重型运载火箭的研制打下了良好基础。

长征五号运载火箭作为中国新一代大型运载火箭,具有高可靠、低成本、无毒无污染、适应性强、安全性好的优势,应用前景广阔。长征五号运载火箭将是中国未来航天发射任务的主力军,在未来的探月工程三期、载人空间站工程空间站舱段发射、火星探测等重大专项工程任务中都将承担重要角色。同时在未来大载荷地球同步转移轨道、中高轨道等发射任务中也将担当主要角色,对于构建中国未来空间运输体系、加快现役运载火箭的更新换代,都具有重要的意义,标志着中国进入太空空间的能力大幅提升,由航天大国向航天强国迈出了坚实的一步。

### 参 考 文 献

- [1] 李东,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.

## 法尔肯重型火箭芯级完成地面静态点火试验

SpaceX公司在德克萨斯州的麦格雷戈试验场对法尔肯重型火箭的芯级完成静态点火试验,为法尔肯重型火箭在2017年下半年的首飞任务奠定了重要基础。SpaceX公司在社交媒体网站上公布了点火试验的视频,但并未说明具体的试验日期。

法尔肯重型火箭为2级构型,芯级和法尔肯9火箭一子级基本相同,捆绑了2枚助推器。根据此前SpaceX公司披露的信息,法尔肯重型首飞火箭的芯级是新制造的,并进行改进以便和2个助推器进行匹配,而捆绑的2枚助推器将采用该公司回收的法尔肯9火箭一子级。

法尔肯重型火箭的首飞已经从最初的2013年推迟至2017年下半年,其中很重要的一个原因是芯级的改进难度超过了预期。另外,2016年法尔肯9火箭在地面静态点火试验过程中发生爆炸,导致SLC-40发射工位受损,迫使SpaceX将法尔肯9火箭的发射转移至计划用于发射法尔肯重型的SLC-39A,导致SLC-39A发射工位匹配法尔肯重型火箭的改进工作中断,也是引起法尔肯重型发射推迟的一个重要因素。SpaceX公司表示,SLC-40的修复工作将在今年6月份完成,届时SLC-39A适配法尔肯重型火箭的工作将会继续。

(杨开 摘译自 <http://spacenews.com/static-fire-test-brings-falcon-heavy-one-step-closer-to-debut/>)