

中国新一代中型运载火箭总体方案及发展展望

范瑞祥¹, 王小军¹, 程堂明², 徐利杰², 马英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: 长征七号(代号 CZ-7)运载火箭是为了满足中国载人空间站工程货运飞船发射任务而全新研制的新一代无毒无污染中型运载火箭。在空间站运行阶段, CZ-7 火箭可满足货运要求并减少发射次数, 有利于降低空间站的维护成本, 便于发射任务的组织实施。CZ-7 火箭对未来主战场卫星发射任务具有良好的适应性, 是新一代中型运载火箭系列的基本型, 通过货运飞船和主战场卫星的发射可靠性子样积累, 后续可用于发射载人飞船。2016 年 6 月 25 日, CZ-7 运载火箭成功完成了首次飞行试验。对 CZ-7 火箭总体方案进行了介绍, 并对新一代中型运载火箭的发展做了展望。

关键词: 新一代中型运载火箭; 总体方案; CZ-7

中图分类号: V42

文献标识码: A

General Scheme and Development Prospects for New Generation of Chinese Medium Launch Vehicle

Fan Rui-xiang¹, Wang Xiao-jun¹, Cheng Tang-ming², Xu Li-jie², Ma Ying²

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

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

Abstract: Long March-7(CZ-7), as a new generation of medium and basic launch vehicle, with the design concepts of non-toxic and non-polluting, is developed for the purpose of launching a cargo space-flight to China space station. In the space station operation stage, CZ-7 meets the requirements of ensuring the freight transport while reducing the launch missions to reduce the maintenance cost and optimizing the organizational process. Based on the accumulation samples for the services of launching cargo space-flights and satellites, CZ-7 is adaptive to the mainstream satellites launch missions in the future with its characteristics of serialization and continuous optimization. CZ-7 is expected to launch a manned spacecraft in the future. CZ-7 performed its maiden flight successfully with all missions completed in 25th June, 2016. This paper presents a general review of CZ-7 in regard to the general scheme and provides references for the development prospects of medium launch vehicle series in China.

Key words: New generation medium launch vehicle; General scheme; CZ-7

0 引言

航天技术是国家综合实力的重要组成和标志之一, 进入空间的能力是综合国力和科技实力的重要标志。1970 年中国第 1 次成功发射人造卫星, 标志着中国人独立自主地掌握了进入空间的能力。经过 50 余年的发展, 中国长征系列运载火箭走过了从常温推进到低温推进、从串联到捆绑、从一箭单星到一箭多星、从发射卫星到发射载人飞船的技术历程, 逐步发展成为由多种型号组成的大家族, 具备进入低、中、高等多种轨道的能力, 入轨精度达到了国际先进水平。

然而, 中国现役长征系列运载火箭面临运载能力不满足更长远发展需求的问题: 有毒推进剂全产业链环境危害大, 从推进剂的生产、运输、储存、使用、试验、销毁到残骸内剩余推进剂的处理等均需付出很大代价, 不符合绿色环保的国际潮流; 已有发射场均处于内陆, 落区选择越来越困难, 而且不利于对外开放和国际交流合作。

为了满足中国未来航天发展的需求, 国家决策开展新一代运载火箭的研制, 以满足载人航天工程、月球探测等重大专项工作的需要并实现中国运载火箭的

收稿日期: 2016-07-19

作者简介: 范瑞祥(1965-), 男, 研究员, 主要研究方向为运载火箭总体设计, 现任长征七号运载火箭总设计师

更新换代。在此背景下，长征七号（代号 CZ-7）火箭应运而生。CZ-7 火箭是为了满足中国载人空间站工程货运飞船发射任务而全新研制的新一代无毒无污染中型运载火箭，其成功研制将其他衍生构型的发展奠定坚实的基础。2016 年 6 月 25 日在新建成的海南文昌发射场，CZ-7 火箭首次飞行试验取得圆满成功。这标志着中国新一代中型运载火箭在技术和工程应用上取得了重大突破。

1 总体方案

CZ-7 火箭为带助推器的 2 级火箭，各级均采用了新研发的液氧/煤油发动机以及为适应发动机而研制的低温增压输送系统。助推器直径 2.25 m，安装 1 台 1200 kN 液氧/煤油发动机 YF-100，发动机单向摆动参与姿态控制；芯一级直径 3.35 m，并联安装 2 台 1200 kN 液氧/煤油发动机 YF-100，发动机双向摆动参与姿态控制；芯二级直径 3.35 m，并联安装 4 台 180 kN 液氧/煤油发动机 YF-115。

CZ-7 火箭总长 53.1 m，起飞质量约 597 t，起飞推力约 735 t。在海南发射场发射，按轨道高度 200 km/400 km、轨道倾角 42°计算，运载能力不低于 14 t。火箭构型如图 1 所示。飞行过程中火箭主要经历起飞、程序转弯、助推器分离、一二级分离、整流罩分离、星箭分离等动作，主要事件如表 1 和图 2 所示。

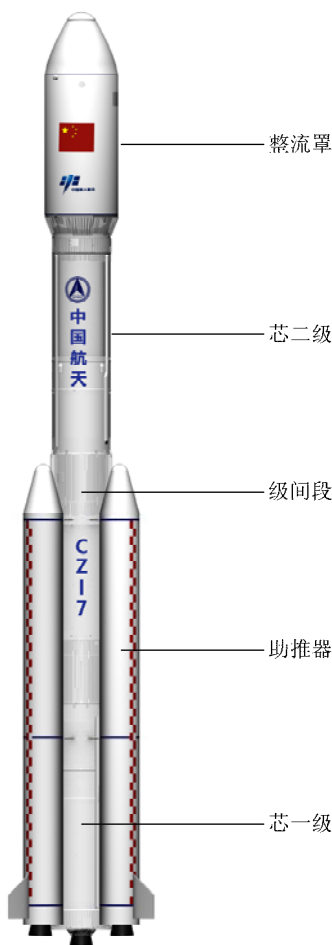


图 1 CZ-7 火箭构型

表 1 CZ-7 火箭主要飞行动作事件

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
累计时间/s	0	15	174	188	191	215	599	603
主要动作	起飞	开始一级程序转弯	助推器发动机关机 (助推器分离)	芯一级发动机关机 (一、二级分离)	芯二级发动机点火	抛整流罩	芯二级发动机关机	船、箭分离

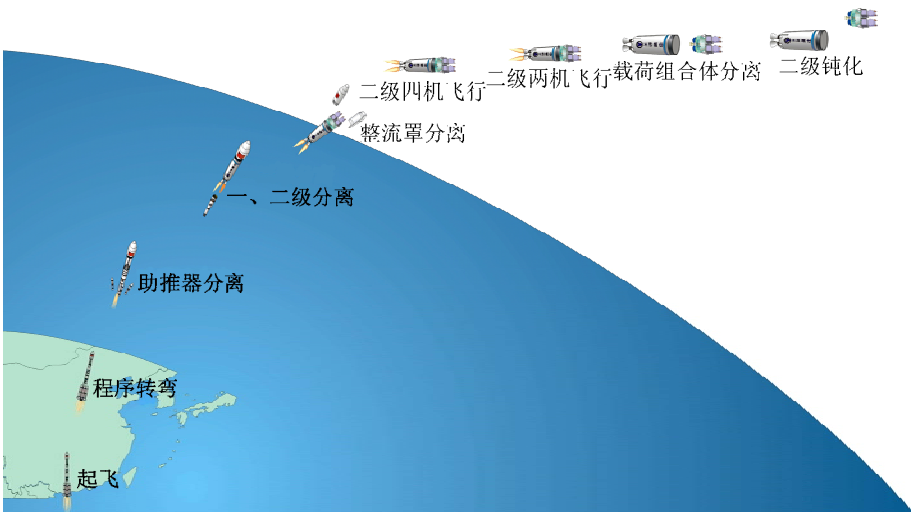


图 2 CZ-7 火箭主要飞行时序

火箭姿态控制采用助推器与芯一级发动机联合摇摆控制方案,助推器与芯一级之间的连接采用三支点超静定捆绑方案,有效地提高了助推器局部模态频率。

火箭在发射场发射工位采用近距离光学平瞄方案。火箭起飞后自主滚转完成射向对准,以适应不同发射任务对射向的要求。

箭体采用“海运+公路”运输方式,完成总装测试后的箭体各模块装入集装箱,在天津港装船,海运至海南清澜港,然后通过公路运输将集装箱运至发射场。1枚 CZ-7 火箭采用 1 艘火箭运输船运输。

火箭采用“新三垂”发射模式,垂直总装、垂直测试、垂直运输。火箭前端的测试发射控制设备均放置在经过减振、隔噪的活动发射平台前置设备间内。火箭转场过程中保持箭-地的气、液、电连接状态不变,取消了箭-地连接的脱落插头。在发射阵地仅完成简单的功能检查后,即可进入推进剂加注、预冷、点火等临射程序,缩短了发射区准备时间。火箭起飞过程中采用喷水系统对发射台和火箭底部进行降温、降噪。

2 主要技术创新点

作为中国全新研制的新一代运载火箭,CZ-7 火箭具有完全自主知识产权,研制阶段共突破了 11 项重大关键技术和 96 项创新技术。新技术均通过了首次飞行试验的验证。主要技术创新点包括:

a) 全液氧/煤油构型,实现了近地轨道运载能力的跨越。

作为中国第 1 个全液氧/煤油动力的运载火箭,助推器和芯一级采用 6 台新一代大推力 YF-100 高压补燃液氧/煤油发动机并联,起飞推力达到 735 t。二级采用 4 台 YF-115 高压补燃液氧/煤油发动机并联。突破了贮箱闭式冗余智能增压控制、低温火箭 POGO 抑制等多项关键技术。

采用轴内压承载效率较高的等边三角形网格结构等设计方案,实现了结构的高效和轻质化设计,将中国中型运载火箭近地轨道(LEO)的运载能力由 8.6 t 提升至 14 t 以上,达到了国际同类火箭先进水平。

b) 突破和掌握了运载火箭多发动机并联的力、热环境设计及防护关键技术。

采用工程算法、理论预示及试验验证相结合的飞行环境预示方法,解决了一级和助推器并联使用 6 台、二级并联使用 4 台液氧/煤油发动机导致的力、热环境严酷带来的防护难题,通过首次飞行试验,验证了理论设计的正确性。

成功研制了箭上新型轻质隔热及烧蚀涂层和整体

防热装置,发射台采取 2 级大流量喷水方案,前置设备间实现整体隔音降噪,这些力、热防护措施突破了力、热防护技术,通过首飞飞行试验的验证,火箭各级尾部、发射台和前置设备间的力、热环境防护方案效果良好,设备工作正常,重大关键技术得到突破。

c) 采用助推器三支点超静定捆绑方案。

CZ-7 火箭助推器的长径比大(长度与直径之比近 12),且在中国首次实现了助推器发动机摇摆参与火箭飞行控制。首次采用的助推器三支点超静定捆绑设计方案,解决了助推器低频模态密集、各方向模态耦合严重导致火箭飞行姿态难控制、动力系统纵向耦合振动等难题,成功攻克了助推器低频模态辨识和控制、助推器参与摇摆控制以及火箭动力系统纵向耦合振动抑制等关键技术。

d) 创新测试发射模式,解决了新建海南发射场的自然环境设计与防护技术难题。

针对中国第 1 个沿海发射场高温、高湿、高盐雾、浅层风大、台风雷雨频繁等恶劣自然环境带来的火箭设计条件苛刻的问题,提出了保持箭-地气、液连接,火箭前端测试发射控制设备放置在活动发射平台前置设备间并随火箭一起从技术区转运至发射区的“新三垂”测试发射方案,实现了进入发射区后只需进行简单的功能测试即可快速发射的目标,使 CZ-7 火箭成为目前中国发射区占位时间最短的运载火箭。

在火箭垂直转场过程中首次采用了防风减载方案,减载效果达到 48% 以上,转场 50 m 高度抗浅层风的最大平均风速由 17 m/s 提升至 20 m/s,有效提升了垂直转场概率和安全性。

全箭开口、部段对接面、火工品及电缆网等均采取了防水、防潮设计,并设计了舱段干燥空气吹除系统,提升了对海南发射场自然环境的适应性,使火箭具备了中雨发射能力。

3 发展展望

CZ-7 火箭作为中国全新研制的新一代高可靠无毒无污染中型运载火箭,除了满足载人空间站工程发射货运飞船任务外,对未来主战场卫星发射任务也具有好的适应性,是新一代中型运载火箭系列合理、优化的基本型。通过发射可靠性子样积累,未来可用于发射载人飞船。

对中型运载火箭构型的命名进行如下约定:名称为 CZ-7XYZ,代号中的 X 代表级数,Y 代表助推器个数,Z 代表助推器类型,对有固体推进剂助推器的构型用 S 表示,对液体推进剂助推器省略;对有上面级

的状态,增加 /SM 加以区分;对芯二级采用氢氧发动机的构形,增加 (HO) 加以区分。如捆绑 2 个 2 m 直径的固体推进剂助推器、芯二级采用氢氧发动机的 2 级构型命名为 CZ-722S(HO)。按照上述命名规则,基本型 CZ-7 代号为 CZ-724,简称为 CZ-7。

3.1 载人运载火箭

CZ-7 火箭在研制过程中贯彻载人航天工程高可靠性、高安全性的研制要求,执行载人航天工作标准。按照“一度故障工作,二度故障安全”的设计原则,火箭的飞行可靠性设计值为 0.98,发射可靠性设计值为 0.92。通过增加故障检测系统和逃逸系统即可满足载人运载火箭的要求。

3.2 卫星发射衍生构型

以 CZ-7 火箭为基础,通过调整助推器个数、增加固体推进剂助推器、增加上面级、增加氢氧三子级,可实现新一代中型运载火箭的系列化。其中,助推器和芯一级完全共用。基于 CZ-7 基本型火箭构建的中型运载火箭优先发展的构型包括: CZ-724、CZ-734、CZ-722/SM 和 CZ-722S(HO) (CZ-720(HO)),形成了一个运载能力覆盖较为全面的中型运载火箭系列,详见表 2。图 3~5 依次为 CZ-7 火箭 LEO、太阳同步轨道 (SSO) 和地球同步转移轨道 (GTO) 的运载能力覆盖情况。

表 2 CZ-7 火箭及其衍生构型

代号	构型	轨道	运载能力/t
CZ-724	CZ-7 (基本型)	LEO	14.0
		500kmSSO	7.5
		600kmSSO	6.5
		700kmSSO	5.5
CZ-724/SM	CZ-7+YZ-1 上面级	700kmSSO	8.0
CZ-722/SM	CZ-7 减少 2 个助推器 + YZ-1 上面级	700kmSSO	4.5
CZ-720(HO)	CZ-7 芯一级 + CZ-3A 氢氧三子级	700kmSSO	2.9
CZ-722S(HO)	CZ-720(HO) + 2 个 $\Phi 2m$ 固体推进剂助推器	700kmSSO	4.4
CZ-734	CZ-7+氢氧三子级	GTO	7.0

4 结束语

CZ-7 火箭于 2016 年 6 月 25 日完成首次飞行试验,取得圆满成功,火箭总体及各系统方案得到了全面验证,关键技术得到突破。CZ-7 火箭的成功研制,对于构建中国未来空间运输体系和加快中国现役运载火箭的更新换代都具有重要意义。



图 3 LEO 运载能力覆盖情况

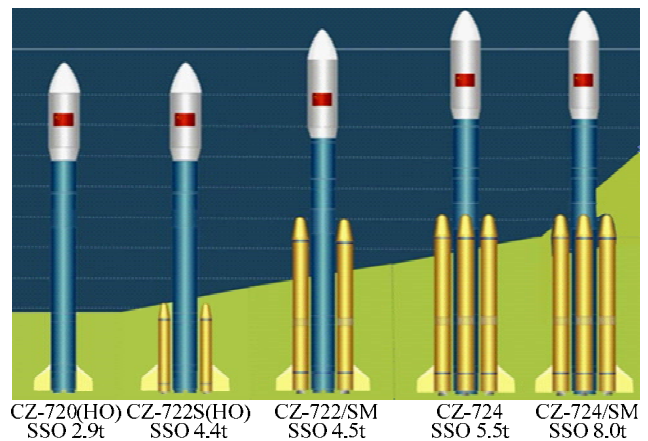


图 4 SSO 运载能力覆盖情况

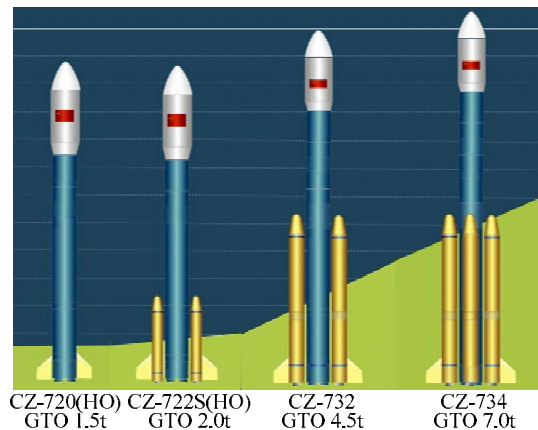


图 5 GTO 运载能力覆盖情况

参考文献

- [1] 范瑞祥, 容易. 中国新一代中型运载火箭的发展展望[J]. 载人航天, 2013,19(1):1-4.
- [2] 龙乐豪. 中国航天运输系统的现状与展望[J]. 中国航天, 2014,(8):9-12.
- [3] 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.
- [4] 吴燕生. 积极探索发展中国航天运输系统的新思路[J]. 导弹与航天运载技术, 2002,(5):1-4.
- [5] 李东, 程堂明. 中国新一代运载火箭发展展望[J]. 中国工程科学, 2006,8(11):33-38.