

我国航天运输系统 60 年发展回顾

龙乐豪¹, 李平岐², 秦旭东², 牟宇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: 航天运输系统包括一次性运载火箭、重复使用运载器、轨道转移运载器 3 个领域, 目前一次性运载火箭仍是我国满足进入空间需求的主体。我国运载火箭起步于 20 世纪 60 年代, 经过半个世纪的发展, 共研制了 17 种运载火箭、9 种上面级, 具备发射低、中、高不同轨道和不同有效载荷的能力。对我国航天运输系统 60 年发展历程和主要成就与不足进行了总结。

关键词: 航天运输系统; 运载火箭; 发展回顾

中图分类号: V475.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2018) 02-0001-06

The Review on China Space Transportation System of past 60 Years

LONG Lehao¹, LI Pingqi², QIN Xudong², MOU Yu²

(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 10076, China;

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

Abstract: Space Transportation System includes Expendable Launch Vehicle (ELV), Reusable Launch Vehicle (RLV) and orbital transfer vehicle. Nowadays, the majority of China's space launch missions are accomplished by ELVs. The beginning of China's launch vehicles dates back from the 1960s, and with the efforts of more than half a century, 17 launch vehicles, 9 upper stages are developed to be capable of launching various payloads to low, medium and high orbit. In this paper, the development and main achievement of China Space Transportation System in the past 60 years are summarized.

Key words: Space Transportation System; Launch vehicle; Development review

0 引言

空间是维护国家安全和国家利益的制高点, 进入空间进而利用空间是世界航天大国不懈追求的目标。航天运输系统是一个国家自主进入空间能力的集中体现, 是自主利用空间的基本前提, 是实现、保持、发展空间安全和国家利益的核心能力。

航天运输系统是指往返于地球表面和空间轨道之间, 或在不同轨道之间运输, 以及完成地外

天体着陆和返回运输各种有效载荷的运输工具的总称。一般可以分为一次性运载火箭(含快速进入空间运载器)、轨道转移运载器、重复使用运载器 3 个领域, 如图 1 所示。从目前情况来看, 一次性运载火箭仍是我国满足进入空间需求的主体。另外, 3 个领域的划分也可能随着未来的发展进行调整。以快速进入空间运载器为例, 目前论证的型号仍属于一次性运载火箭, 后续视研究方向扩展情况, 也可独立成一个单独的领域。

收稿日期: 2017-12-20; 修订日期: 2018-02-02

作者简介: 龙乐豪 (1938-), 男, 中国工程院院士, 主要从事运载火箭总体设计研究。

通讯作者: 李平岐 (1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭总体设计。E-mail: lpq311514@163.com

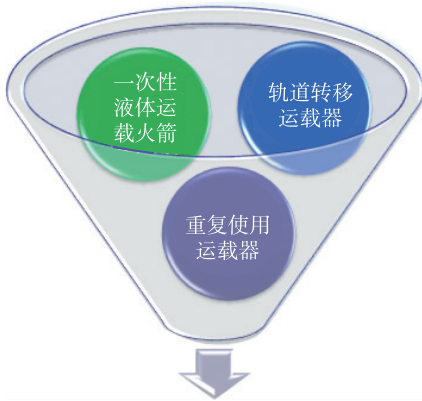


图1 航天运输系统领域划分图

Fig. 1 Division of space transportation system

轨道转移运载器是指在外层空间执行有效载荷轨道转移、轨道部署及相关延伸性服务的一种航天运载器，具有独立的动力系统和控制系统，可根据任务需要自主、长期在轨运行。轨道转移运载器以上面级为典型应用代表，通常作为火箭末级使用，又称上面级火箭。

重复使用运载器是指部组件部分或全部可多次重复使用的运载器。按重复使用程度可分为完全重复使用、部分重复使用；按动力方式可分为火箭动力、组合动力；按起降方式可分为垂直起飞水平着陆、垂直起降、水平起降；按运载器气动外形可分为升力体式、基于传统运载火箭构型。

我国的航天运输系统起步于20世纪60年代，经过半个世纪的发展，共研制了17种运载火箭、9种上面级，具备发射低、中、高不同轨道，不同有效载荷的能力。截止到2017年11月底，我国长征系列运载火箭已飞行256次，将353个航天器送入预定轨道，发射成功率为94.92%。运载火箭技术的发展为航天技术提供了广阔的舞台，推动了中国卫星和其应用以及载人航天技术的发展，有力支撑了以“载人航天”、“嫦娥奔月”和“北斗导航”为代表的国家重大航天工程以及航天对外交流合作，为中国航天的发展提供了强有力的支撑。

1 我国航天运输系统发展历程回顾

1.1 一次性运载火箭及轨道转移运载器

自20世纪60年代以来，经过半个多世纪的发展，我国运载火箭的发展大致经历了7个阶段^[1]。

第一阶段：在战略导弹基础上起步，主要解决我国运载火箭的有无问题，典型代表是CZ-1、CZ-2。

CZ-1火箭应1965年5月启动的“651计划”而生^[2]，在东风四号导弹基础上加第三级固体火箭，1970年4月24日成功发射东方红一号卫星（质量为173kg，比苏、美、法、日首颗卫星总质量多20.4kg），从此拉开中国航天活动序幕。CZ-2火箭于1975年11月26日首次飞行成功，以东风五号洲际导弹为基础研制成功，后衍生出CZ-2C、CZ-2D、CZ-2E、CZ-2F、CZ-3A系列、CZ-4系列等多种型号。

第二阶段：满足通信等卫星应用需求，按照运载火箭技术的自身发展规律而研制。追求运载能力、可靠、廉价，主要特点是研制成功了采用液氢液氧低温推进剂的第三级（如CZ-3、CZ-3A系列火箭的第三级），以及采用常规推进剂的第三级（如CZ-4系列火箭的第三级），火箭技术水平显著提升。

CZ-3火箭因1975年3月31日中央军委讨论通过的“331工程（卫星通信工程）”启动立项研制，首次采用氢氧高能推进剂，攻克了36项关键技术，经过9年多奋斗，于1984年1月29日首次发射部分成功，4月8日再次发射圆满成功。在70天内攻克了氢氧火箭发动机高空二次启动的世界性难题，使我国火箭在当时跨入世界先进行列。

第三阶段：为国际商业发射诞生，满足大质量通信卫星发射需求，典型代表是CZ-2E。

1985年10月，我国宣布长征火箭投入国际商业发射，当时我国运载能力最大的CZ-3火箭地球同步转移轨道GTO运载能力仅1.5t左右。而通信卫星为了满足大容量、多功能、长寿命的市场需求，重型化已成为大势所趋。为了满足该需求，提出在CZ-2C火箭的基础上捆绑4个助推器来提升火箭运载能力的方案，CZ-2E因此而诞生。CZ-2E火箭研制过程中攻克了助推器捆绑和分离、高空风修正、大型整流罩等多项关键技术，显著提升了长征系列运载火箭的运载能力。1990年7月16日CZ-2E首飞成功，为我国后续载人火箭研制奠定了坚实的技术基础。长征火箭自1990年4月成功发射亚洲1号卫星起，已进行60余次国际商业卫星发射（含14次搭载、12颗在轨交付），在国际发射市场占有一席之地。目前CZ-3A系列火箭是我国在国际商业发射中的主力。

面对长征火箭连续发射成功，美国个别政客捏造了“考克斯报告”（1999年5月25日出炉），

谎称美国独立专家评审团员向中方泄露了导弹技术机密。1998 年 6 月 19 日我们在中央电视台据理驳斥。1998 年美国立法，禁止中国火箭商业卫星发射服务，其政治歧视倒逼中国运载火箭和卫星提前配套出口。

第四阶段：为载人航天需要研制，最大特点是高可靠性、高安全性，火箭待发段及上升段设置了专门的航天员逃逸救生系统，典型代表是 CZ-2F。

CZ-2F 火箭是在 CZ-2E 火箭的基础上改进而成，是我国目前唯一的载人运载火箭。1992 年 9 月 21 日立项研制，1999 年 11 月 20 日首飞成功，截至目前共进行了 13 次发射，全部成功，其中载

人发射 6 次，将 14 人次航天员送入太空，飞行可靠性达 0.97。在 CZ-2F 火箭研制过程中突破了载人火箭总体设计、逃逸系统、故障检测处理系统、冯卡门外形整流罩等重大关键技术。

第五阶段：为适应环保与国家重大战略需要而研制的新一代运载火箭和重型运载火箭。新一代运载火箭遵循一个系列、两种发动机、三个模块的总体思路，贯彻通用化、组合化、系列化设计思想，以高可靠、低成本、无毒、无污染、适应性强、安全性好为发展目标，新一代运载火箭型谱见图 2。典型代表是 CZ-5 系列、CZ-6、CZ-7、CZ-11、CZ-8。

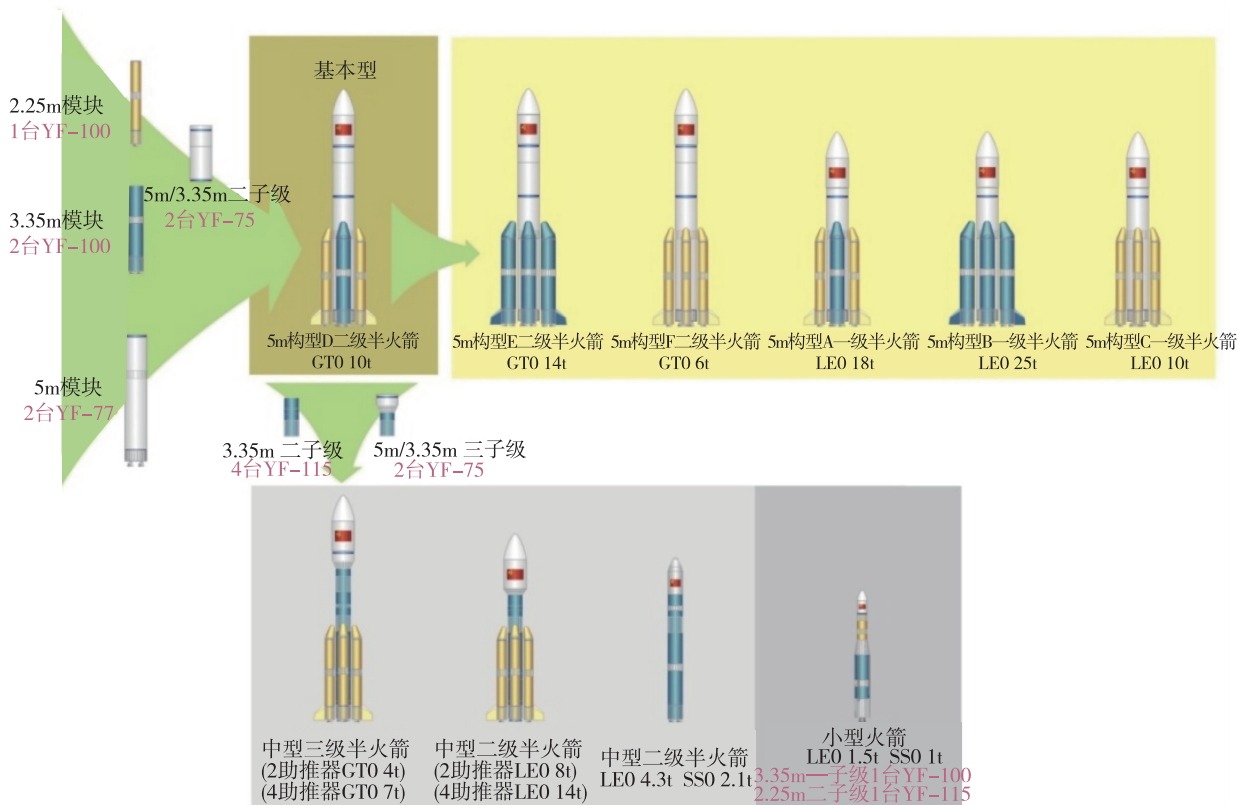


图 2 新一代运载火箭型谱

Fig. 2 Profiles of the new generation launch vehicle

基于 $\Phi 5\text{m}$ 直径模块构建了新一代大型运载火箭 CZ-5 系列^[3-5]，研制初期共规划了 6 个构型，2006 年立项研制了其中运载能力最大的 E 型（CZ-5），拉开了新一代火箭研制序幕。为满足载人空间站建设需求，2011 年原总装备部批复立项研制一级半最大运载能力构型 CZ-5B 火箭。基于 $\Phi 3.35\text{m}$ 、 $\Phi 2.25\text{m}$ 直径模块，研制了 CZ-6、CZ-7 并牵引了 CZ-8 等型号研制。CZ-6、CZ-11、CZ-7、CZ-5 分别于 2015 年至 2016 年首飞圆满成功，见

图 3。CZ-8 火箭已完成立项并开始研制。

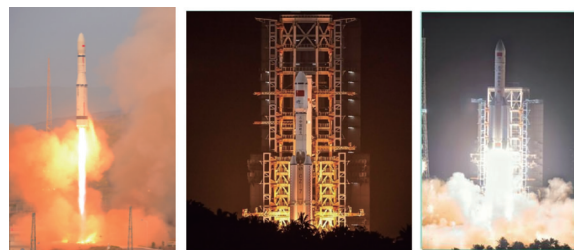


图 3 新一代运载火箭相继首飞成功

Fig. 3 The maiden flights of new generation launch vehicles

为满足载人登月、空间太阳能电站等为代表的大规模深空探测、空间基础设施建设等任务需求，重型运载火箭 CZ-9 正在开展关键技术深化论证工作^[6]。

第六阶段：为提高适应能力而研制的轨道转移运载器（上面级火箭），亦称太空摆渡车，可用于航天器轨道转移、组网、修复等。典型代表为远征系列液体上面级。

自 20 世纪 90 年代起，为满足国内外卫星发射需要，成功研制了 5 种固体推进上面级，包括自旋稳定上面级 SM、三轴稳定上面级 SMA 等。2008 年起又研制了 4 种液体推进上面级，其中 YZ-1、YZ-1A、YZ-2 自 2015 年 3 月来已连续 6 次飞行试验成功，验证了在轨 9 次启动、48 小时工作的能力，YZ-3 近期将搭载 CZ-2D 火箭首飞。后续还将

研制低温、高性能的上面级。

第七阶段：为快速响应而研制，具有可整体贮存、操作简单、发射成本低、发射周期短等特性，最大优势是快速、便捷、灵活。典型代表是 CZ-11。

CZ-11 为四级固体火箭，2012 年正式立项研制，2015 年 9 月 25 日“一箭四星”首飞圆满成功，它为后续海射、空射快速响应火箭奠定了基础。

1.2 重复使用运载器

重复使用技术目前主要围绕助推级可控回收及部分重复使用开展相关研究工作，突破了助推器和芯级翼伞回收关键技术，开展了演示验证，见图 4；后续将对重复使用亚轨道运载器、重复使用轨道转移运载器开展演示验证，逐步突破运载器的一级和轨道级的重复使用技术。

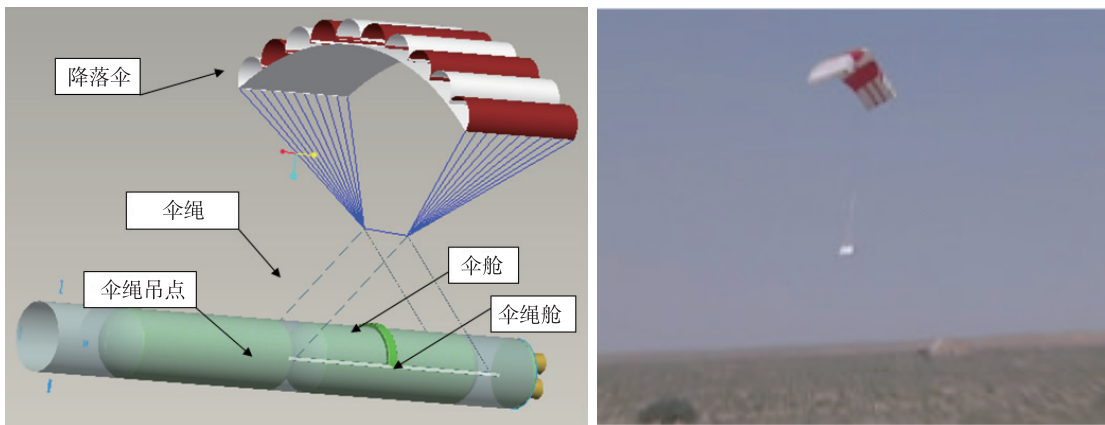


图 4 火箭助推器翼伞回收方案及演示验证

Fig. 4 Parachute recovery scheme and demonstration verification of launch vehicle booster

通过对国内外发展情况的分析，结合我国重复使用运载器的技术研究现状及技术基础，提出

我国重复使用运载器“三步走”的发展思路^[7]，如图 5 所示。

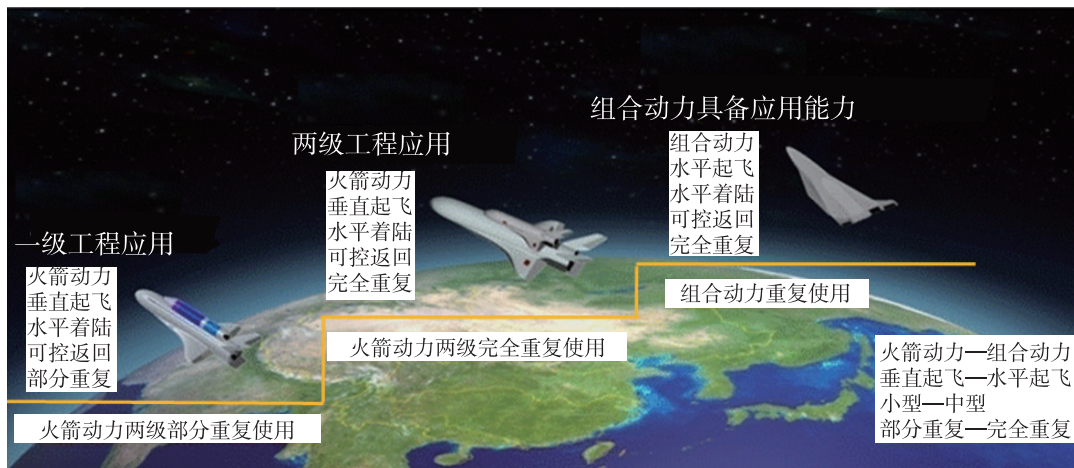


图 5 重复使用运载器“三步走”发展战略

Fig. 5 The three-step development strategy of RLV

第一步：火箭动力的助推器、第一级可重复使用实现工程应用；

第二步：火箭动力两级入轨完全可重复使用运载器实现工程应用；

第三步：组合动力两级入轨完全可重复使用运载器具备工程应用能力。

2 主要成就与不足

经过 50 余年的发展，长征系列运载火箭经历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及深空探测器的历程，成就了我国“载人航天”、“嫦娥奔月”、“北斗导航”等重大航天工程以及航天对外交流合作，支撑了国民经济和国防建设^[8]。

2.1 主要成就

(1) 总体设计能力明显提升

新一代运载火箭采用了全新的动力系统和结构设计方案，研制过程中突破多喷管发动机底部喷流复杂热环境预示难题，使复杂力、热环境理论预示与控制水平显著提升；解决了大型低温火箭低频模态密集、纵-横-扭模态耦合严重的难题，突破了助推和芯级联合摇摆控制技术，姿态控制理论水平显著提升；突破了大型低温火箭 POGO 抑制技术；解决了大质量分离体、大尺度柔性体可靠分离难题；突破了助推器三支点超静定捆绑技术，解决了大长径比助推器带来的空间模态与芯级强耦合的难题。

(2) 箭体结构设计、仿真、试验与制造能力取得跨越式发展

箭体结构设计实现了由串联向并联、由独立贮箱向共底贮箱、由 3.35m 向 5m 直径的发展，运载能力及运载效率大幅提升。箭体结构的精细化设计、强度预示水平不断提高，箭体结构的材料、制造及焊接工艺不断改进，设计效率及产品质量相应提升。箭体结构制造向精益制造和高可靠绿色制造方向发展，制造耗能降低、制造精度提高。箭体结构仿真、试验能力不断提升，实现了由实物模装向三维数字化模装的转变，具备 5m 直径结构千吨级静力试验能力。

(3) 液体推进技术取得显著进步

我国大型液体火箭发动机经过半个多世纪发展，在设计—试验—改进设计—再试验的研制过程中，不断完善和提高，发动机技术水平不断提

升。目前在用常规发动机 5 型，包括 YF-20、YF-22、YF-23、YF-40、YF-50；成功研制无毒、无污染低温发动机 6 型，包括 4 型氢氧发动机 YF-73、YF-75、YF-75D、YF-77 及 2 型液氧煤油发动机 YF-100 和 YF-115。YF-100 发动机单机推力达到 120t，采用高压补燃循环方式，使我国成为继俄罗斯后世界上第 2 个掌握补燃循环液氧煤油发动机的国家；YF-75D 发动机采用膨胀循环方式，真空比冲达到 442s。增压输送系统采取冗余设计方案，提升了可靠性；低温增压输送系统实现由排放预冷向循环预冷技术的转变，提升推迟发射的适应性；建成新一代运载火箭动力试车台、增压输送系统实验室等，具备开展液氢真实介质条件的系统及单机试验能力。

(4) 固体推进技术取得显著进步

20 世纪 60 年代以来研制成功的上面级固体推进发动机，满足了我国航天发展的需要，并与国际接轨，具备国际卫星市场竞争的能力。21 世纪以来还攻克了不同直径、分段式固体发动机技术，2016 年 8 月 2 日成功进行了 $\Phi 3\text{m}$ 、2 分段固体发动机地面热试车，最大推力 150t，为 CZ-9 大型固体助推奠定了基础。我国固体推进动力已全面采用高压强、高能发动机，采用大型发动机分段对接、复合材料壳体及全轴摆动柔性喷管技术，提升了发动机比冲、推力、质量比等特性。

(5) 控制系统信息集成与鲁棒性水平明显改善

控制方案实现了由模拟量到数字量再到基于总线制的分布式全数字容错的控制转变，功能、可靠性不断提高；制导方式实现了由隐式制导到显式摄动制导，再到迭代制导和 GPS 组合导航的改进和发展，制导控制精度、抗干扰能力不断提升；姿态控制由单独芯级摇摆到助推与芯级联合摇摆控制，控制能力和裕度不断增强；箭机、惯性器件、综控等重要单机采取三冗余技术，系统冗余、容错能力显著提升；惯性器件经历了由捷联加速度计+陀螺仪到惯性平台再到光纤和激光惯组的发展历程，惯性器件的精度和可靠性大幅提升。

(6) 测量通信技术向大容量、高码率、多途径发展

遥测传输由单一的地基传输向地基+天基组合传输转变，信息获取途径更加多样。数据综合与传输码速率由最初的几百 kbps 发展为 10Mbps

+ 5Mbps 的高码率双点频冗余传输方案, 天基测量传输码速率由 200kbps 发展为 1Mbps, 并广泛采用图像测量, 火箭遥测信息更加丰富。外测采用卫星导航定位+地基组合模式, 无线安控采用多音组合调频体制, 更加安全可靠。

(7) 测发模式及流程更加优化

测发模式由“一平两垂”到“三垂”再到“新三垂”和“三平”发展, 地面测发控系统采用远距离测发模式, 更加安全和可靠; 并且突破了自重 2000t 级活动发射平台机电液多系统集成技术, 实现箭地接口无间断连接的新三垂测发模式, 实现了液氢加注后无人值守、液氢加注后推迟 2h 发射能力, 提升我国低温火箭推迟发射适应性。实现了测试数据的快速自动判读, 提高测试判读效率; 测发流程更加优化, 发射测发时间缩减到 20 天左右。

(8) 材料、制造工艺水平逐步提升

箭体壳段结构的金属材料由第一代的 LF6 铝合金、第二代的 2014 和 7A09 铝合金向第三代 2219、7050 高强铝合金发展, 并逐渐采用高强度碳纤维复合材料、新型环保绝热发泡材料、铝蜂窝薄壁夹层等新型材料, 提高了结构效率。金属加工工艺由化铣、TIG 焊、铸造向机械铣、搅拌摩擦焊、3D 打印等制造工艺转变, 采用导管全位置焊接及装配技术、纵环缝自动焊接技术, 提升了结构部段的焊接与装配工艺水平。

(9) 生产能力持续得到改善

长征系列运载火箭生产能力持续提升, 实现了批量生产, 具备年产 21~22 发能力, 为高密度发射任务提供了强有力的保障。新一代运载火箭技改投入也在不断加大, 各研制配套单位的生产能力均得到了不同程度的提升, 为后续实现高密度发射提供了基本保障。

2.2 存在的不足

长征系列运载火箭经过半个多世纪的发展, 取得了辉煌成绩, 但相比国外先进运载火箭, 在运载火箭综合指标、设计手段、容差容错能力等方案仍存在不少差距, 具体包括:

1) 火箭最大运载能力、型谱完善性与世界航

天强国差距明显;

2) 总体多学科优化设计手段欠缺, 总体和系统设计过于保守, 材料、工艺等基础技术仍然薄弱, 造成运载火箭运载系数偏低;

3) 重复使用、智能控制等先进技术尚处攻关或初期研究试验阶段, 需要迎头赶上;

4) 火箭模块规格偏多, 设计、制造产品化程度不高, 生产与测试发射准备周期偏长, 发射任务适应性不高, 发射成本优势不再。

3 结束语

航天运输技术是衡量一个国家综合实力的重要标志, 中国航天运输系统经过 60 年发展, 形成了较完整的长征运载火箭型谱系列, 具备了发射低、中、高不同轨道、不同有效载荷质量的能力, 取得了辉煌的成就。随着新一代运载火箭的研制及首飞成功, 长征火箭综合性能显著提升, 大幅提高了国际竞争力, 加速了我国由航天大国向航天强国迈进的步伐, 相信在习近平新时代中国特色社会主义思想的指引下, 我国一定会早日成为世界航天强国!

参考文献

- [1] 秦旭东, 容易, 王小军. 我国运载火箭划代技术研究 [N]. 中国航天报, 2013-10-18 (3).
- [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, 2016, 3 (4): 315-322.
- [3] 龙乐豪, 余梦伦. 航天运载器专业发展报告 [R]. ISBN 978-7-5046-6538-6, 北京: 中国科学技术出版社, 2014.
- [4] 龙乐豪. 中国航天运输系统的现状与展望 [J]. 中国航天, 2004 (8): 9-12.
- [5] 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.
- [6] 龙乐豪, 郑立伟. 关于重型运载火箭若干问题的思考 [J]. 宇航总体技术, 2017, 1 (1): 8-12.
- [7] 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.
- [8] 龙乐豪, 王小军, 果琳丽. 中国进入空间能力的现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2006, 8 (11): 25-28.