



“力箭”一号技术与创新

■ 北京中科宇航技术有限公司 杨浩亮 王瑀宁
酒泉卫星发射中心 窦晓华
中国科学院力学研究所 李新宇

“力箭”一号运载火箭是中国科学院研制的具有先进性、创新性、经济性的新型固体运载火箭，主要目的是发挥国家战略科技力量的作用，引领我国运载火箭技术和研制模式的变革，支撑和推动我国空间科学的发展。

一、基本情况介绍

“力箭”一号运载火箭是中国科学院力学研究所与北京中科宇航技术有限公司联合研制的首款四级固体运载火箭，主要用于太阳同步轨道和近地轨道中小型航天器发射任务，支持单星发射、多星发射、星座快速组网和补网发射。该火箭由中国科学院“十四五”重大项目支持，是中国科学院在空天科技领域的又一次创新性尝试。该火箭是面向空间科学和空间技术发展需求，以“工程科学”思想为指导，以创新、先进、高效为设计思路发展的创新性、先进性、经济性运载火箭，对推动我国运载技术和研制模式的变革和创新、推动空间科学发展具有重要意义。

“力箭”一号运载火箭采用四级固体发动机串联式布局方案，起飞质量约134.9t，全长约29.668m，起飞推力2000kN，最大箭体直径为2.65m，首飞状态500km太阳同步轨道（SSO）最大运载能力1292kg（设计状态1500kg）。火箭采用“三平一垂”发射模式。

二、技术创新

“力箭”一号火箭先后完成了多项核心技术攻关，

为国内首次，如高吨位固体运载器、“三平一垂”等。该火箭在国内首次使用70吨级发动机装药量，并且火箭起飞推力能够达到2000kN，代表着我国高吨位固体运载器的发展与进步，为我国后续运载器的发展提供关键指导。“三平”指的是全箭水平组装、水平测试及水平状态转场，这能够缩减准备时间，甚至在关键时刻能够进行小时级发射，完成相关任务，同时也减少了对发射场地的依赖，极大提升了发射效率。多项技术的创新为我国进一步研发固体运载火箭奠定基础。

技术创新方面，“力箭”一号实现了国内目前最大规模固体运载火箭总体优化设计。在“力箭”一号运载火箭的研制过程中，中国科学院相关院所、中国航天科技集团有限公司下属航天动力技术研究院等单位联合展开科研攻坚任务，秉承“创新、创新、再创新”的设计理念，突破了大吨位固体运载器总体优化设计与试验技术、先进动力系统与推力矢量控制技术、集中-分布式现代航天电子技术、低成本箭体结构与分离技术、智慧飞行控制技术、大吨位固体火箭地面使用及热发射技术等多项重大关键技术。通过研究范式的创新实现了高效低成本敏捷开发，为我国运载火箭领域的技术变革作出重要贡献。针对我国运载火箭传统设计模式存在的分工固化和过细的缺点，“力箭”



图1 “力箭”一号运载火箭

一号首次搭建了由火箭总体设计相关专业参与研制的协同设计平台，淡化和虚化分系统的概念，面向单机开展多专业协同设计。“力箭”一号的技术创新具体包括以下12个方面：

(1) 国内最大型固体运载火箭总体优化设计。创新采用面向单机多专业协同设计，各系统方案全局优化，大幅提高火箭综合性能，运载系数1.12%。

(2) 国内首创大吨位箭体水平模态试验。创新性地采用真药发动机水平状态、以空气弹簧多点支撑状态完成了国内首创大吨位箭体水平模态试验，大幅缩短试验周期、降低保障条件、减少研制费用。

(3) 国内最大整体装药固体发动机。攻克了大型药柱结构设计及装药、大流量耐烧蚀柔性喷管柔性接头设计及成型、高性能复合材料壳体成型等技术。

(4) 国内首个测控融合新型架构航电系统。实现

“单机功能化、功能板卡化、板卡通用化”，通过自定义通信协议连接各板卡，形成硬件通用化、软件定义化能力。

(5) 国内首个数据驱动地面测发控软件。将软件和数据分离，数据驱动流程，测发流程和操控界面由自定义数据驱动。箭上和地面设备数量大幅减少，软件定义火箭初具雏形。

(6) 国内首个大分离力、无污染冷气推冲分离装置。在我国火箭分离技术上，增加了可检测的新型分离能源形式。

(7) 国内首个固液融合低成本结构设计。首次将固体发动机与蒙皮桁条结构部段结合，完成不同功能与承载部段的框桁统一化设计、不同结构型面的点式连接解锁统一化设计、工装型架统一化设计等，实现低成本和快速制造目标。



图2 新型架构航电系统



图3 低成本结构系统



图4 新型可移动厂房

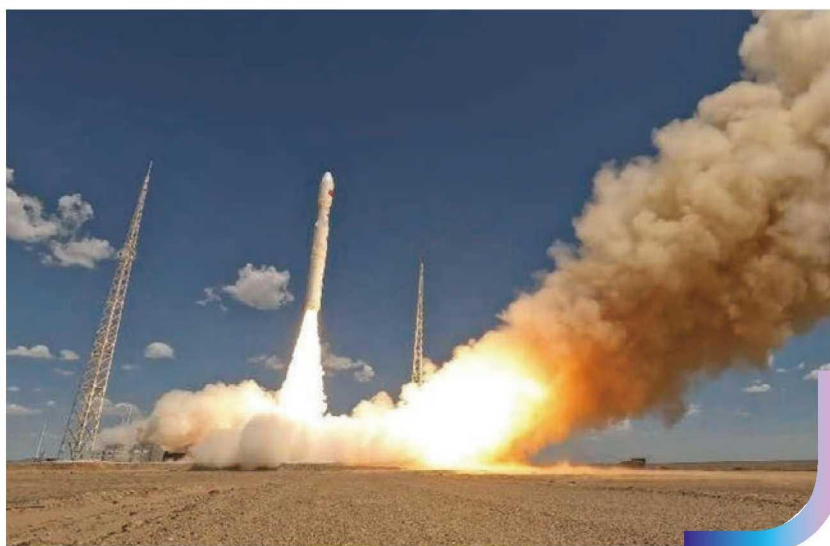


图5 “力箭”一号首飞

(8) 国内首个5ms控制周期下三冗余CPU软件。通过优化和精确分析计算时间和同步时间,兼顾了火箭飞行的高精度和高可靠性。

(9) 国内首个分层架构飞行控制系统。将传统嵌入式整体飞控软件清晰地划分为功能层、通信层和驱动层3层结构,降低了后续实现更复杂、智慧控制功能的难度。

(10) 国内首个多功能可组装移动式环境保障厂房。承担了模态试验环境保障、发射地区环境保障、发射台长期放置环境保障功能,节约了地面保障设备经费。

(11) 国内最大规模水平起竖车。突破了多油缸起竖同步载荷设计和工艺实现难题,通过了135t火箭起竖试验验证。

(12) 国内最大热发射固体火箭技术。完成了燃气流场的仿真计算、发射设备热防护方案设计和防护

材料选型,突破了大吨位固体火箭热发射技术,降低了发射成本。

三、发射任务

“力箭”一号运载火箭采用“一箭六星”方式,成功将6颗卫星送入预定轨道。6颗卫星分别是中国科学院微小卫星创新研究院研制的“空间新技术试验卫星”“轨道大气密度探测试验卫星”“低轨道量子密钥分发试验卫星”“电磁组装试验双星”,以及深圳航天东方红卫星有限公司和上海航天空间技术有限公司联合研制的“南粤科学星”。

“空间新技术试验卫星”的主要任务目标是开展空间探测新技术验证,包括开展太阳过渡区、空间高能爆发事件、X射线暂现源等空间天文观测,以及地磁场的精密测量,为后续更高性能的空间科学探测研究



图6 “力箭”一号首飞载荷

积累空间载荷研制经验。

“轨道大气密度探测试验卫星”是一颗热层大气密度探测科学实验卫星，利用全球导航卫星系统（GNSS）数据及地面基于角反射镜的测定轨数据，分析大气阻力造成的轨道变化，反演获得精确的热层大气密度，从而逐渐建立高精度大气模型，满足低轨航天器对高精度轨道大气模型应用的需求。

“低轨道量子密钥分发试验卫星”是一颗微纳量子通信试验卫星，主要开展星地量子密钥分发技术及应用的在轨测试验证工作，加速星地一体化的量子通信网络建设。

“电磁组装试验双星”开展电磁力约束下的立方星在轨近距离分离与对接试验，首次验证星间电磁力作用规律，以及与卫星控制力的耦合问题，同时配置了成像载荷实现对地遥感成像，为后续发展航天器分布式可重构技术及空间非接触作用奠定基础。

“南粤科学星”隶属于“海特”2星座，主载荷是全球导航卫星发射系统海陆环境探测载荷（GNSS-R），利用天基平台接收并处理地球表面反射信号，以实现海洋、陆地水资源环境要素的综合探测。

“力箭”一号火箭飞行过程中，各级固体发动机工

作正常、各级伺服跟踪指令正常、级间分离正常、整流罩分离正常、星箭分离正常，分离后各卫星均正常完成速率阻尼，展开太阳电池翼，并开展在轨测试工作。火箭飞行数据包括：（1）各级固体发动机工作性能与预示结果的偏差较小，满足指标要求；（2）一子级、二子级、整流罩残骸在预示落点附近降落，无人员和财产损失；（3）星箭分离姿态角速度：A星分离前 $0.2(^{\circ})/s$ ，其他星分离前 $0.6(^{\circ})/s$ ；（4）入轨精度：半长轴偏差545m、偏心率偏差 1×10^{-6} 、轨道倾角偏差 0.0005° 。

四、结束语

固体运载火箭简单可靠，发射前不需要再加注推进剂，还能够长期整箭存储。同时，固体运载火箭发射方式多样，能够快速响应；使用灵活便捷，对发射场依赖程度低，可以从陆地、海洋甚至空中发射。

“力箭”一号运载火箭首次飞行任务取得圆满成功，作为发射中小型卫星的优先选择，丰富了我国固体运载火箭发射能力谱系，对推动我国运载技术和研制模式的变革和创新，以及推动国家空间科学发展具有重要意义。中国航天