

# 猎鹰9运载火箭结构分系统设计特点分析与研究

吴晗玲 宋保永 苏 晗 张乔飞

**摘 要** 对 SpaceX 公司研制的猎鹰9运载火箭的总体构型进行了概述,研究了整流罩、二子级、级间段及一子级四个主要结构部件的技术方案。从箭体结构分系统原材料、贮箱结构构型及分离方式三个方面,总结了结构分系统的设计特点,分析了其应用优势,并提出了发展建议。

**关键词** 运载火箭 猎鹰9 结构 分系统

## 引 言

美国东部时间2016年9月1日9时,佛罗里达州卡纳维拉尔角空军基地的猎鹰9(Falcon 9)运载火箭在发射台进行静态点火测试时出现“异常”,突然发生爆炸导致星箭俱毁,损失了一枚价值2亿美元的AMOS-6卫星。这是猎鹰9运载火箭第二次发生爆炸事故,SpaceX公司(Space Exploration Technologies Corporation,太空探索科技公司)及其猎鹰9运载火箭又一次遭遇到了重大挫折。

然而,作为全球私营商业航天公司的典型代表以及商业发射市场异军突起的一员,SpaceX公司及

猎鹰9运载火箭在箭体结构分系统设计上通过成熟技术与创新技术相结合,采用简化结构,消除或将故障最少化等措施,致力于大幅度提高运载火箭的安全性和可靠性,并显著降低成本,为将其打造成为一款经济实用型中型运载火箭奠定了坚实的基础。这其中有许多值得学习和借鉴的地方。

## 1 猎鹰9运载火箭总体构型

猎鹰9运载火箭是美国SpaceX公司研发和制造的两级运载火箭,采用液氧煤油作为推进剂,其目标是实现安全、可靠且低成本的进行卫星发射以及通过龙飞船实现天地之间的载人和货物运输,是目前唯一实现第一级火箭完全回收的运载火箭。该运载火箭的总体结构如图1所示,主要由一子级(含着陆支撑腿)、级间段、二子级(含卫星支架和栅格翼)及整流罩组成。

猎鹰9运载火箭是在猎鹰1运载火箭的基础上研制而成,共推出过三个版本:猎鹰9 1.0版(在役

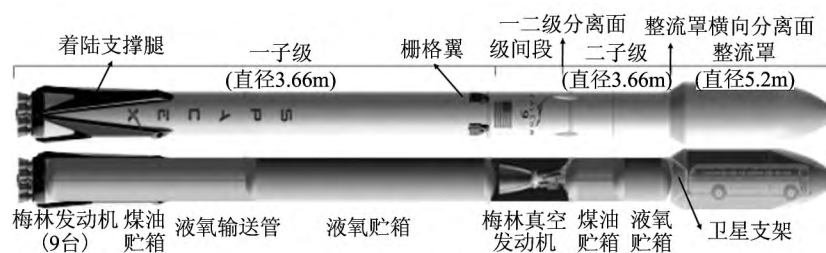


图1 猎鹰9运载火箭总体结构

本文2017-02-22收到,吴晗玲、宋保永均系北京宇航系统工程研究所高级工程师

飞航导弹 2017年第9期

• 1 •

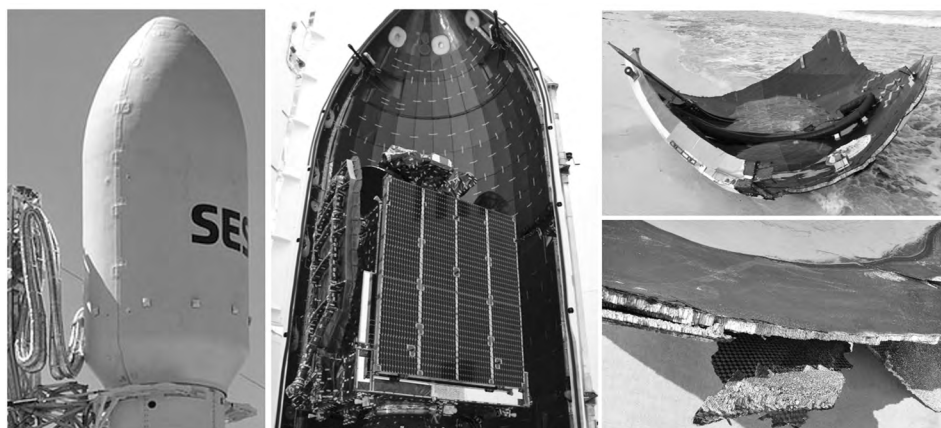


图2 整流罩及其残骸

时间: 2010 年 6 月 ~ 2013 年 3 月, 成功次数/发射次数: 5/5)、猎鹰 9 1.1 版(在役时间: 2013 年 9 月 ~ 2016 年 1 月, 成功次数/发射次数: 14/15), 以及猎鹰 9 全推力版(在役时间: 2015 年 12 月至今, 成功次数/发射次数: 8/8, 不含在静态点火测试中炸毁的那枚火箭)。

## 2 箭体结构分系统技术方案

猎鹰 9 运载火箭在设计之初就遵循 NASA 载人航天安全裕度的相关要求, 其中结构的安全系数为 1.40, 而非传统的 1.25。

### 2.1 整流罩

猎鹰 9 运载火箭整流罩为两瓣式构型, 其长度为 13.2 m, 直径为 5.2 m(外径), 采用碳纤维面板-2.5 cm 厚铝蜂窝夹芯结构, 外形为钝头锥柱形式, 如图 2 所示。整流罩纵向连接采用机械锁机构锁紧, 在接收到分离指令后, 高压氦气驱动机械锁, 使两瓣整流罩解除纵向连接, 高压氦气继续驱动推冲器(4 个)直至将两瓣整流罩推开。

### 2.2 二子级

猎鹰 9 运载火箭二子级的直径为 3.66 m, 长度为 14.3 m(不含过渡支架), 由贮箱(液氧和煤油)、过渡支架、卫星支架、1 台真空梅林发动机等组成, 如图 3 所示。贮箱采用铝锂合金材料及搅拌摩擦焊工艺制成, 其中液氧贮箱为硬壳式结构, 煤油贮箱为蒙皮-桁条-环框式结构, 采用共底结构将煤油和液氧推进剂分开。

• 2 •



图3 二子级

在一二级分离后的若干秒内, 二子级发动机开始点火工作, 且具备多次启动能力, 可以将多个有效载荷送往不同的轨道。

过渡支架安装在二子级的前端, 用于连接箭体与卫星支架, 其与卫星支架的连接接口为: 120 个螺栓, 间隔  $3^\circ$  分布, 其分布圆直径为 1 575 mm。Space X 公司根据 EELV 标准接口规范(2012 年)设计了两种过渡支架: 轻型和重型。前者可用于发射质量达 3 453 kg 的卫星, 后者可用于发射质量达 10 866 kg 的卫星。卫星支架及其分离系统由卫星方或者 SpaceX 公司提供, SpaceX 公司也可以根据用户特殊要求进行定制。过渡支架接口实物如图 4 所示。

### 2.3 级间段

猎鹰 9 运载火箭级间段采用碳纤维面板-铝蜂窝夹芯结构, 用于连接一子级和二子级, 在接收到分离指令后, 级间段与二子级分离。级间段内部装有用于驱动栅格翼展开的液压设备以及用于一子级

飞航导弹 2017 年第 9 期

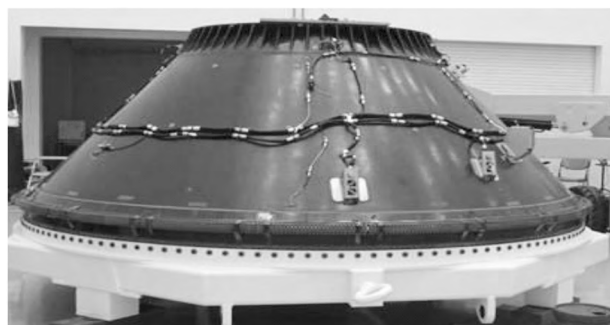


图4 过渡支架接口实物

返回时的冷气(氮气)姿态控制系统。

一子级与二子级的连接与分离面位于级间段与二子级的对接面,采用三个机械锁装置(安装在图5左图中圆圈处)实现一二级之间的连接与解锁功能:一子级发动机关机后,高压氦气通过冗余的驱动器使得机械锁解锁,同时氦气驱动推冲器在级间对接面产生一个相互作用力,使得二者分开。为了增加分离可靠性,在一子级上安装一个冗余的中心推冲器,可以用来大幅度降低级间分离后发生碰撞的概率。

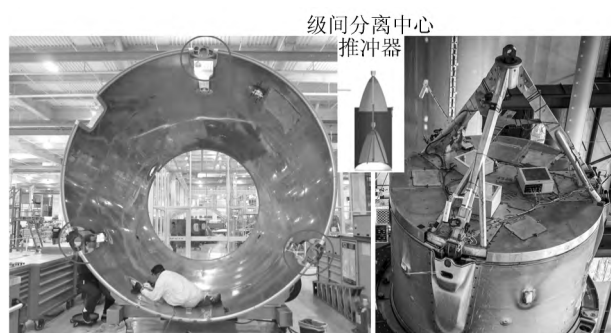


图5 级间段

猎鹰9运载火箭一子级在回收过程中采用4个栅格翼进行滚转、俯仰和偏航控制,以保持箭体稳定。栅格翼安装在级间段上,横跨一子级与级间段对接面,前端在升空时固定在一子级上,如图6所示。每片栅格翼的尺寸约为 $1.22\text{ m} \times 1.52\text{ m}$ ,都可以独立调整姿态,在开式液压系统的驱动下,能够进行旋转和倾斜。它们升空时收拢,降落时打开。

飞航导弹 2017年第9期

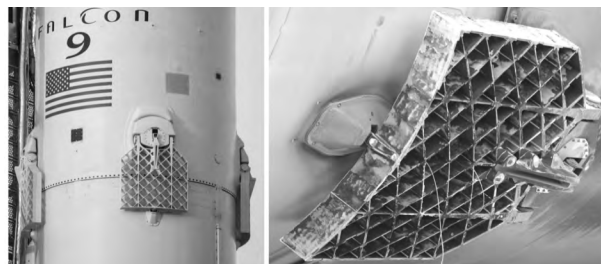


图6 箭上栅格翼及其飞行后的状态

## 2.4 一子级

猎鹰9运载火箭一子级与二子级的直径一致,但一子级较长(长度为 $41.2\text{ m}$ )且可回收再用,如图7所示。一子级由贮箱(液氧和煤油)、着陆支撑腿、9台真空梅林发动机等组成。此外,一子级贮箱和二子级贮箱使用了相同的材料、结构构型、加工与制造工艺,节省了成本,提高了制造与装配效率。

着陆支撑腿用于一子级回收,如图8所示。一子级上共有四条着陆支撑腿,它采用碳纤维面板-铝蜂窝夹芯结构,腿的下端通过两个铰接点和裙部连接,中部一个铰接点和一个液压作动筒相连,起



图7 一子级



图8 一子级回收系统的着陆支撑腿

飞时腿是收起的,此时作动筒被腿包住,降落时作动筒伸长,将腿打开,展开的角度是钝角,以免发动机和地面接触。支撑着陆腿展开动力源是高压氦气系统。

### 3 设计特点分析

SpaceX 公司自成立以来就坚持“简单、低成本、高可靠”的经营与设计理念,并在箭体结构分系统的设计与制造上得到了充分体现。

#### 3.1 减少原材料种类,使用高强度轻量化结构材料

在箭体主结构的材料选用方面,整流罩、级间段以及着陆支撑腿的主承力结构均采用碳纤维面板-铝蜂窝夹芯材料,液氧贮箱和煤油贮箱均使用铝锂合金材料,这些材料比常规铝合金具有更高的强度和弹性模量、更低的密度,属高强轻量化结构材料。通过减少原材料种类,可增大原材料的批量,一方面便于组织生产,缩短生产周期,有效降低成本,另一方面有利于原材料生产质量控制,确保产品性能。

#### 3.2 减少贮箱结构类型,使用成熟构型和制造工艺

在贮箱结构构型方面,一子级贮箱和二子级贮箱除了长度不同外,结构构型完全相同,其中液氧贮箱均为硬壳式结构,煤油贮箱均为蒙皮-桁条-环框式结构,这两种结构相对于现在常用的等边三角形网格加筋结构,其制造成本可减少 5 倍。此外,液氧贮箱与煤油贮箱采用共底结构,贮箱焊接则采用搅拌摩擦焊技术。一方面,这些工艺简单、生产方便、成本低廉,已广泛用于航天运载器领域,技术成熟。另一方面,可以使用相同的设备、加工与制造工艺,节省了成本,提高了制造和操作效率。

#### 3.3 减少分离次数,使用非火工分离方式

箭体结构采用二级构型,而非常见的三级构型,减少了分离次数。一二级及整流罩分离系统均采用高压氦气作为解锁及分离动力源而非采用火工品,这样可以在飞行前对参与飞行任务的分离系统进行验收和性能测试,级间用于一子级与二子级连接与解锁用的机械锁由早期的 9 个减少到最终的 3 个,所有这些措施都从设计源头上提高了猎鹰 9 运载火箭的飞行可靠性。同时非火工分离方式还能真正实现无污染分离,有效降低分离冲击。

• 4 •

### 4 启示

作为 SpaceX 公司目前唯一在役的运载火箭,猎鹰 9 运载火箭体现了 SpaceX 公司长久以来对于运载火箭低成本和高可靠性设计理念中的创新意识,其在箭体结构分系统的研发思路等对我国运载火箭的研制工作具有重要的启示和借鉴意义。

1) 大量使用成熟技术和产品,确保产品质量,降低研制成本。

SpaceX 公司十分注重使用成熟技术与产品,如液氧贮箱和煤油贮箱分别采用硬壳式结构和蒙皮-桁条-环框式结构,使用铝锂合金材料及搅拌摩擦焊工艺技术进行生产制造,从结构方案、材料到制造工艺都是非常成熟的,硬壳式结构和蒙皮-桁条-环框式结构都是较为简单的结构构型,并已广泛应用于各类运载火箭。蒙皮-桁条-环框式结构在土星 5 号运载火箭贮箱中已有成熟应用,铝锂合金材料则曾用于航天飞机外贮箱,搅拌摩擦焊工艺技术更是如此,在波音公司 Delta II 和 Delta IV 运载火箭的贮箱生产上已经使用多年,并在工业焊接市场得到广泛应用,所以不需要重新进行工艺研发。沿用成熟技术和产品在很大程度上降低了运载火箭的研制费用,同时由于继承了相应的技术成熟度和产品成熟度,产品质量能够得到有效保证。这也启示在我国低成本、高可靠商业运载火箭的研制过程中应突破传统思维模式,在确保满足使用要求和可靠性的前提下,尽量使用成熟技术和产品以尽可能地降低研制和发射成本,提升发射市场竞争力。

2) 大力推行产品化发展思路,减少产品种类,提高产品可靠性。

SpaceX 公司从原材料和结构方案着手,通过减少原材料种类和结构构型,构建原材料-零组件-大结构件(贮箱、整流罩、级间段等)三层次产品研发体系。一子级贮箱和二子级贮箱除了长度不一致外,其结构设计方案、材料和制造工艺完全一致,使得火箭芯级贮箱具有较大的通用性,从而简化火箭设计工作以及简化贮箱生产线,可共享制造设备及技术人员。在分离系统方面,采用高压氦气-机械锁-推冲器的不同组合方式完成了一二级分离系统和整流罩分离系统的搭建。

(下转第 59 页)

飞航导弹 2017 年第 9 期

## 参考文献

- [1] Zhou X. Photonics for microwave measurements. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10( 5)
- [2] Lee J J. Photonic wideband array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43( 9)
- [3] Ghelfi P. A fully photonics-based coherent radar system. *Nature*, 2014, 507( 7492)
- [4] McKinney D J. Photonics illuminates the future of radar. *Nature*, 2014, 507( 7492)
- [5] Scotti F. Multi-band software-defined coherent radar based on a single photonic transceiver. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2015, 63( 2)
- [6] Priest T S. Demonstration of a microwave photonic link insertion into the ALR-2001 EW system. *ACOFT/AOS 2006-Australian Conference on Optical Fibre Technology/Australian Optical Society*, 2006
- [7] Anzalchi J. Application of photonics in next generation telecommunication satellites payloads. *International Conference on Space Optics*, 2014
- [8] Piqueras M A. Photonic front-end for the next-generation of space SAR applications. *Proceedings of the 45th European Microwave Conference*, 2015
- [9] Tavik G C. The advanced multifunction RF concept. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53( 3)
- [10] Cliché J, Shillue B. Precision timing control for radio astronomy. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, 26( 1)

( 上接第 4 页)

通过上述产品化措施,有效减少了产品种类,从而有利于快速批量生产,确保产品制造质量,提高产品可靠性。对我国航天企业来说,应尽快实现结构类产品从型号定制走向产品化,通过实施原材料-零组件-大结构件三个层次产品化发展思路,减少产品种类,以快速制造质量高、竞争力强的航天产品,从而可以有效提高产品可靠性。

## 5 结束语

猎鹰 9 运载火箭从总体结构构型到结构分系统的四个主要结构部段都积极贯彻低成本和高可靠性的设计思想,从原材料和通用结构构型入手,将成熟技术、成熟产品与创新技术相结合,不断改进和提高运载火箭的飞行可靠性。随着商业航天的纵深发展,设计及制造成本与可靠性同等重要,已成为新型运载火箭研制的重要指导思想,在确保可靠性的前提下尽量降低设计及制造成本是运载火箭关键分系统之一的箭体结构的主要发展趋势。

## 参考文献

- [1] 牟宇,王俊峰,陈宇,等. 美国 SpaceX 公司猎鹰火箭创新技术的启示. *飞航导弹*, 2016( 6)
- [2] 丁文华,康开华. 猎鹰 9 运载及其应用. 第二十三届全国空间探测学术交流会, 2010
- [3] 庞娟,苏鑫鑫. SpaceX 公司低成本路径探析. *飞航导弹*, 2016( 9)
- [4] Max Vozof, John Couluris. SpaceX products-advancing the use of space. *AIAA Space 2008 Conference & Exposition*, San Diego, California, USA, 2008
- [5] 单文杰,高晓明. Space X 公司“低成本、高可靠”理念引发的联想. *航天工业管理*, 2012( 1)
- [6] 袁宇. 猎鹰系列火箭总体设计特点. *太空探索*, 2014( 7)
- [7] 郑初桂,李东. 美国 Space X 公司发展成功的双能力. *飞航导弹*, 2017( 1)
- [8] 李丹丹,张绍芳,刘永喆. 美国新兴航天企业发展成功经验浅析. *飞航导弹*, 2016( 9)