

猎鹰9火箭 Block5 构型首次飞行任务解析

牟宇¹, 孙冀伟², 秦旭东¹

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076

2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 美国太空探索技术公司于2018年5月完成猎鹰9 Block5 构型火箭的首次飞行任务, 研究猎鹰9 Block5 构型火箭的总体方案, 以及为更好地实现重复使用所采取的动力系统升级、箭体结构优化和其他改进措施, 回顾了猎鹰9火箭3次主要构型升级的改进方案和衍化路线, 分析了此构型火箭首飞对世界航天发展的影响, 提出了未来商业航天运输系统的发展建议。

关键词: 猎鹰9; 重复使用; 首次飞行; 构型升级

中图分类号: V42

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2018) 05-0001-07

The Analysis of Falcon 9 Block5's Maiden Flight

MOU Yu¹, SUN Jiwei², QIN Xudong¹

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The Space Exploration Technologies Corporation has completed Falcon 9 Block5 launch vehicle's maiden flight recently. The general proposal of the Falcon 9 Block5 launch vehicle is studied. The technical improvement for better recycle using is introduced, including the engine promotion, the structure optimization and so on. The ameliorations and the improvement ways of main three block-upgrades have been reviewed. The influence of this maiden flight for the whole industry is analyzed, and the advice for the future commercial space transportation system development is proposed.

Key words: Falcon 9; Recycle use; Maiden flight; Block upgrade

0 引言

2018年5月11日15时14分^[1] (北京时间5月12日4时14分), 美国太空探索技术公司 (SpaceX) 在肯尼迪航天中心的 LC-39A 发射工位, 利用猎鹰9 Block5 构型火箭成功完成了孟加拉国 Bangabandhu-1 通信卫星的发射任务 (图1), 并再次成功完成了芯一级模块的海上回收。此次任务是猎鹰9 Block5 构型火箭的首次飞行任务, 对后续更加快速地重复使用和执行国际空间站载人任务意义重大。本文通过对 SpaceX 公司的猎鹰9 Block5 构型火箭改进项

目进行分析, 并通过猎鹰9火箭从首飞到目前的技术状态更迭优化历程的梳理, 分析其对世界航天发展趋势产生的影响。



图1 猎鹰9 Block5 构型首次发射现场

Fig. 1 The live view of Falcon 9 Block5's maiden flight

收稿日期: 2018-06-04; 修订日期: 2018-07-17

基金项目: 航天系统部“十三五”专用技术 (30506030304)

作者简介: 牟宇 (1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。E-mail: emu1982@sina.com

1 发射任务情况简介

本次发射任务原定于5月10日发射,但在前一天的发射准备过程中,倒计时进行到距离起飞仅58s时自动中止,SpaceX确认出现了一次标准的地面系统自动中止,但未给出触发中止的具体原因。本次发射的孟加拉国Bangabandhu-1通信卫星质量约3.5t,由法国泰雷兹阿莱尼亚宇航公司制造,原定采用阿里安5火箭进行发射,由于其发射计划无法满足孟加拉国部署要求,从而转由SpaceX的猎鹰9火箭发射并最终完成了卫星的发射与部署。

2 猎鹰9 Block5 构型总体方案

猎鹰9 Block5 构型火箭是SpaceX公司猎鹰9火箭的最新升级构型,也将是SpaceX公司在开展其超重型火箭BFR研制之前将固化技术状态的火箭,并最终实现其LEO轨道22.8t,GTO轨道8.3t的极限运载能力(不重复使用)^[2]。此构型火箭通过改进,力图实现不经历较大维护的情况下重复使用至少10次,加上后期维修达到100次的目标,并为后续执行NASA载人发射合同的火箭积累飞行子样^[3]。

2.1 全面升级动力系统

在猎鹰9 V1.2 构型全推力版本隼-1D发动机的基础上,猎鹰9 Block5 再次提升发动机海平面推力至913.5kN,提升约6.97%;二级发动机真空推力达到945kN,真空发动机推重比达到180:1,居世界主流发动机之首,如图2所示。在发现前期回收后的火箭在涡轮泵叶片上有裂纹后,重新设计其发动机的涡轮泵,确保其重复使用的性能满足要求。

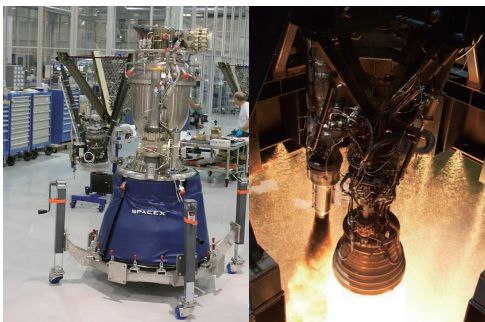


图2 改进后的隼-1D发动机

Fig. 2 The upgraded Merlin 1D engine

2.2 改进箭体结构,以便重复使用

为了确保能够将一子级重复使用箭体更快地进行再次发射,猎鹰9 Block5对前期重复使用的发动机机架、栅格舵、着陆支腿等结构进行了优化设计,并更新了级间段和尾段的热防护材料,如图3所示。

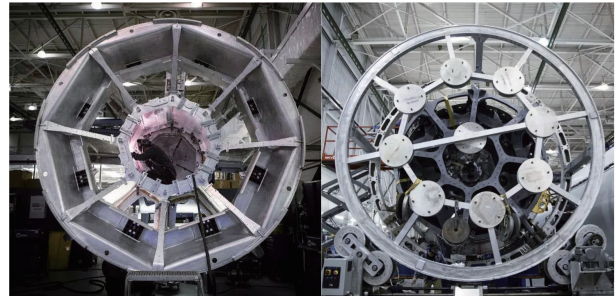


图3 改进前、后的发动机机架

Fig. 3 The original/upgraded engine frame

之前称之为Octaweb(环形排列)的一级发动机机架结构是通过巨大的高强度铝合金框架连接到一起后,再焊接到一级箭体上的,一旦单台或者多台发动机出现故障,或者铝合金框架出现不可逆的形变,整个一级火箭就会因维修成本过高而整体报废;Block5型的连接盘不再焊死在箭体上,而是用螺栓连接,一旦发现问题,可整体拆卸,更换连接盘,这样整枚一级火箭还可以再次使用。此外,为了能够实现重复使用10次的目标,9台发动机之间的防热装置也改为可拆卸式设计。

一子级回收过程中,栅格舵将承受较大的羽流冲刷及大热流环境,将栅格舵由铝合金+防热涂层方案更改为更耐热、刚度与强度更好的钛合金方案,不更换也能满足多次重复使用要求,见图4。将前期设计的回收后必须拆除重新安装复位的一级着陆支腿外部闭锁机构,改为在一级箭体结构内部一个主作动器带动8个小机构联动完成,实现自如伸缩,以快速完成维护进行再次发射。

此次一级箭体结构外观最显著的变化是级间段和尾段由原来的白色变成了黑色,主要是将火箭黑色级间段、电缆长排罩和着陆支腿采用了自行研制的重复使用性能更高、无须喷涂的新型防热材料,外观变化可见图5。

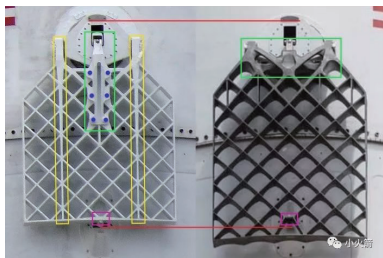


图 4 改进前、后的栅格舵对比

Fig. 4 The comparison of the original/upgraded grid fin



图 5 更新后的火箭箭体结构外观

Fig. 5 The appearance of the upgraded rocket structure

2.3 其他优化项目

为更大程度地提升火箭的运载能力，SpaceX 公司优化了一子级重复使用前的控制律算法，使得其返回过程中所需推进剂量进一步减少；而针对

在 CRS-7 任务和 Amos-6 任务故障中均出现的二级复合材料增压气瓶（COPVs）的材料问题，结合重复使用需求对其进行了重新设计。

3 猎鹰 9 火箭构型衍化路线

猎鹰 9 火箭是 SpaceX 公司研发的一款低成本、两级构型全液体中型运载火箭，其设计目标是：研制出一种对抗联合发射联盟（ULA）改进型一次性运载火箭（EELV）的新型火箭，同时显著增加可靠性、降低成本，提升快速响应能力^[4]。猎鹰 9 火箭主要执行近地轨道空间站货运/载人、高轨通信商业卫星、太阳同步轨道侦察卫星等多种载荷发射任务。自 2010 年首飞成功之后，截至 2018 年 5 月 11 日，共进行了 54 次发射，除在 2015 年 6 月 28 日执行 CRS-7 任务时失利以外，其余发射任务均取得成功^[5]。

其中猎鹰 9 Block5 构型火箭是猎鹰 9 系列火箭不断优化设计的最新构型，在此之前经历了两次较为重要的构型优化。前后几个构型火箭的性能参数可见表 1，更迭示意图见图 6。

表 1 猎鹰 9 火箭构型性能对比

Tab. 1 The comparison of the Falcon 9 blocks' performance

参数	猎鹰 9 Block5	猎鹰 9-V1.2	猎鹰 9-V1.1	猎鹰 9-V1.0
高/m	70	70	68.4	54.9
直径/m	3.66	3.66	3.66	3.66
级数	2	2	2	2
起飞质量/t	约 570	约 549	约 506	约 333
LEO 运载能力/t	22.2	18	13.15	10.45
GTO 运载能力/t	8.3/6.0 (回收)	7/5.5 (回收)	4.85	4.54
发射次数	1	33	15	5
发射服务报价/万美元	6200/5000 (回收)	6200	6120	5950
使用时间	2018.5 开始	2015.12 至今	2013.9—2016.1	2010.6—2013.3



图 6 猎鹰 9 火箭构型更迭示意图^[2]

Fig. 6 The sketch map of the Falcon 9 upgrade^[2]

3.1 猎鹰 9 V1.0 构型

猎鹰 9 V1.0 构型是猎鹰 9 火箭的最初始构型，其首飞时间为 2010 年 6 月 4 日，创造了私营航天公司为国际空间站运送货物的历史，共进行了 5 次飞行试验任务，前 3 次飞行试验均为满足 NASA 要求的演示飞行，后 2 次为正式的国际空间站货物补给任务（CRS 任务）。猎鹰 9 V1.0 构型一子级采用 9 台隼-1C 发动机，单台隼-1C 发动机的海平

面推力为 420kN。二子级采用 1 台隼真空发动机，其 90% 以上的组件都与隼-1C 相同。为降低生产成本，火箭一、二级的推进剂贮箱只是长度有所不同，而在工装、材料和制造工艺上都完全相同^[6]，如图 7 所示。

即使是如此早期的版本，SpaceX 都从设计上考虑了“重复使用”这个概念。猎鹰 9 V1.0 构型中一子级拟采用伞降模式回收，让一级箭体利用降落伞缓慢落入水中，但在飞行试验中均验证失败，因为箭体和降落伞在再入大气的时候损坏，最后回收船只只回收到了二级火箭的部分碎片。



图 7 猎鹰 9 V1.0 构型火箭

Fig. 7 The Falcon 9 V1.0 rocket

3.2 猎鹰 9 V1.1 构型

在使用猎鹰 9 V1.0 构型火箭满足了 NASA 的合同需求后，SpaceX 公司升级了猎鹰 9 火箭，设计了猎鹰 9 V1.1 构型，进行了 15 次发射任务（成功 14 次）。改进的主要目的是重复使用一子级，提升了 80% 的运载能力以抵消由于重复使用带来的运载能力损失，对一子级重复使用进行了技术方案的升级。

1) 发动机从隼-1C 变为隼-1D，包括发动机推力、比冲、推重比等性能有了明显提升（海平面推力从 43t 提升至 63.5t，每台发动机减重 450kg），一级发动机可节流 70%，用节流方式取代原来分离前关闭部分发动机的方式，控制飞行过载；提升发动机的可靠性和批生产能力，包括使用同一种类型阀门替换原两个燃料、氧化剂阀门，提升发动机燃烧室、喷嘴的热环境极限条件，改进了燃烧室制造工艺，增设发动机之间耐热防护装置，防止发动机爆炸时波及到其他发动机。

2) 为了提升火箭运载能力，增加推进剂加注量，延长了火箭一级、二级贮箱长度，火箭高度相应增加至 68.4m。

3) 一级底部发动机从 3×3 排列变为环形排列，使得一级尾部不需再配套扩张段，为后续芯级捆绑芯级的重型猎鹰火箭 BFR 使用重复使用模块奠定基础，与此同时也简化了发动机故障情况下的重构算法。

4) 首次使用 5.2m/5.18m 直径整流罩；升级火箭控制系统，引入三冗余飞控计算机，基于龙飞船已飞行验证单元设计新软件；简化一、二级连接（从 9 个硬件接口、3 个用于分离的推杆部件变为 3 个包含推杆的连接器）。

针对重复使用需求，V1.1 火箭一子级进行了全面的技术改造和升级，主要包括：

1) 发动机具备空中再次点火与节流能力，包括一子级 3 台发动机再入点火与单台发动机着陆点火^[8]；

2) 首次加入闭环液压系统驱动的栅格舵以控制一级再入大气和下降过程（图 8）；

3) 安装着陆支架，尝试在陆上和海上平台垂直回收箭体（图 8）。



图 8 猎鹰 9 V1.1 构型火箭增加的栅格舵和着陆支架

Fig. 8 The added grid fins and landing legs of the Falcon 9 V1.1 rocket

3.3 猎鹰 9 V1.2 构型

2015 年 6 月 28 日，SpaceX 公司使用猎鹰 9 V1.1 火箭执行国际空间站 CRS-7 任务，一级飞行段由于二级液氧贮箱内气瓶支架断裂造成箭体破坏最终造成飞行失利^[7]。SpaceX 公司在故障调查定位后，重新优化并完成了猎鹰 9 V1.2 火箭研制，2015 年 12 月 21 日其第一次飞行任务中一子级陆上回收首次成功，取得了人类航天史上具有里程碑意义的成就。

在猎鹰 9 V1.1 构型的基础上，猎鹰 9 V1.2 主要有以下方面的改进（图 9）：

1) 二子级火箭（包括级间段）长度增加了 1.5m，使得全箭高度达到约 70m，起飞规模提升约

50t, 其基础级发动机推力提升约 920.7kN, 使其起飞推重比仍然维持在较优的水平;

2) 一级隼-1D 发动机海平面推力增加 102.3kN, 达到 756.2kN, 为适应更大推力, 加强了机架结构;

3) 二级隼-1D 真空发动机喷管延长, 最高推力达到934.1kN; 对连接火箭一子级和二子级的级间段进行加长和结构增强, 以适应发动机延长的喷管;

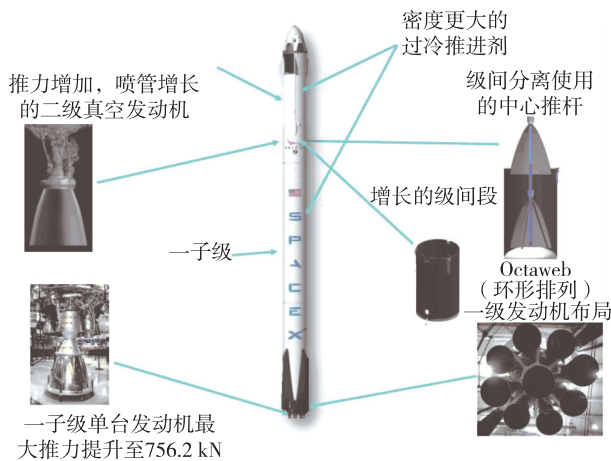


图 9 猎鹰 9 V1.2 火箭改进示意图

Fig. 9 The sketch map of the Falcon 9 V1.2 rocket upgrade

4) 火箭氧化剂和燃料进行过冷加注, 液氧温度约为 -207°C , 煤油温度约为 -7°C , 其中加注了超

过 2/3 的超冷液氧, 使得推进剂的密度提高了约 4%, 从而增大推进剂加注质量, 提升发动机性能;

5) 在保持一子级长度的同时, 结合推进剂温度调整情况调整一子级氧化剂和燃烧剂的贮箱长度;

6) 对用于一子级箭体回收使用的栅格舵和着陆支腿结构进行了适应性改进。

经过以上改进工作, 火箭运载能力提升约 33%, 一子级箭体在飞行结束后依然有足够的剩余推进剂, 为后续进行陆上垂直回收提供足够的运载能力余量。

4 首飞成功的影响分析与启示

4.1 持续创新是提升市场竞争力的源泉

SpaceX 公司猎鹰 9 火箭凭借其优异的性能和突出的成本优势, 市场竞争力持续提升, 根本原因在于其持续创新的技术理念 (猎鹰 9 火箭技术发展路线见图 10)。隼 1 发动机在继承阿波罗登月飞船发动机的基础上经过了多次改进, 使其推重比达到了世界第一, 动力故障监测与冗余技术、箭体可控垂直回收技术也在搭载试验过程中得到了长足进步, 其火箭构型通过采用创新技术的同时, 性能和成本得到持续提升, 为最终提升市场竞争力奠定了基础。

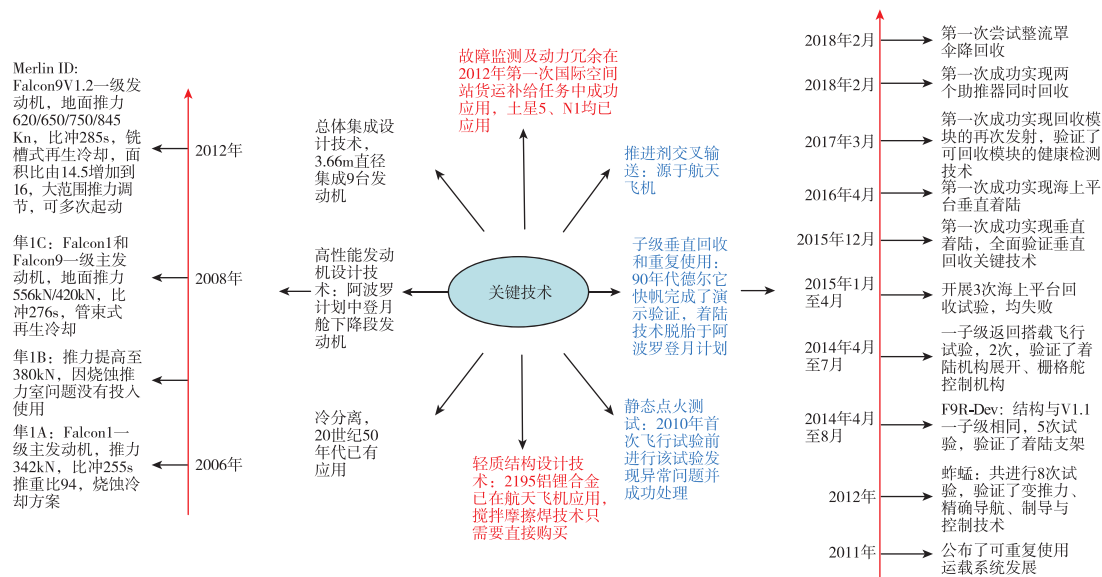


图 10 猎鹰 9 火箭技术发展路线

Fig. 10 The Technical improvement path of Falcon 9

以上分析说明, 在商业航天市场必须紧紧围绕创新驱动发展战略: 一方面要大胆采用兼具创新型和成本优势的解决方案, 另一方面, 要大胆试验,

允许失败。通过必要的地面试验及搭载飞行试验进行验证, 通过设计、生产、测试试验的快速反复迭代, 逐步掌握先进的运载支撑技术, 使得火箭的性

能够全面提升，成本能够得到有效控制，并最终在商业航天市场获得较强市场竞争力。

4.2 持续降低成本是提升市场竞争力的另一利器

美国联邦航空管理局（FAA）预计未来10年全球商业发射总次数为412次。SpaceX公司利用低成本这一重要优势，自2008年起强势争夺商业发射订单，以低成本、可重复使用逐渐建立竞争优势，这也迫使世界各国在商业发射领域着力压缩火箭成本，提升竞争力。就连2018年2月6日首飞成功的猎鹰重型火箭也已经签订了4份合同^[9]，一旦猎鹰重型火箭验证了其可靠性并且最终投入使用，将加剧美国国内火箭市场和国际市场的竞争。猎鹰火箭之所以能够对美国宇宙神5、德尔它4火箭以及国际上其他商业火箭造成很大的冲击，其成本优势是一个重要原因。

SpaceX公司于2016年5月初公布了猎鹰系列火箭的最新发射价格，猎鹰9V1.2的发射价格为6200万美元，猎鹰重型火箭的发射价格为9000万美元。最近马斯克在Block5构型首飞前表示，Block5构型的报价仍然维持在6200万，重复使用箭体后的报价为5000万左右。如果Block5对应的一子级能够实现预期10次以上的重复使用，并有效控制检修费用，该型火箭的实际成本可以进一步降低，相对现役其他火箭的优势将进一步扩大。

猎鹰9火箭和阿里安5、质子号等现役和在研主要商业运载火箭的发射价格对比如表2所示，表中发射价格特指商业载荷（主要指GEO通信卫星）的发射价格。

表2 主要商业运载火箭发射价格对比

Tab. 2 The comparison of the main commercial launch vehicles' launch service price

火箭	GTO运载能力/t	发射价格/万美元	发射单价/(万美元/kg)
猎鹰9	5.5	6200	1.127
阿里安5*	10.5	16923	1.611
质子号M	6.35	7700	1.212
猎鹰重型	8	9000	1.125
阿里安64单星	11	10152	0.923
阿里安64双星	10	10152	1.015

注：阿里安5的发射成本约为1.7亿欧元，合1.92亿美元，实际发射价格约1.5亿欧元，约合1.69亿美元，两者差价由欧洲政府补贴。

然而对于完全市场化的商业发射市场，其发

射价格更多地体现市场竞争力，SpaceX公司通过采用较小的公司规模、垂直整合的运行模式和采用重复使用技术，使得其发射成本相比传统航天巨头有较大优势；但由于其在重复使用等技术研发中投入巨大（据马斯克和肖特维尔透露研发耗资约10亿美元），需要通过发射服务费用抵消相应研发费用，因此其重复使用火箭发射报价并未完全降低至前期承诺的发射服务费用60%~70%，尽管如此，依然具备足够的市场竞争力。在最新的国际空间站货运补给合同中，SpaceX公司每千克发射费用上涨了50%，使得2020—2024年的合同将比第一轮增加4亿美元，但货运次数比第一轮少了6次，而原因更多的是SpaceX公司认为其第一轮的出价过低或者它在补给任务中已完成部分节省费用的目标。

在政府强力支持和自身采用创新技术的共同推进下，SpaceX公司的发射服务报价极具竞争力，但其价格还远未达到其前期承诺的那么低廉，完全的商业化竞争下也隐藏着美国太空航天政策的引导与支撑，这一点需要引起整个航天发射领域企业的重视。只有通过采用创新技术、高度的产业整合、更加密切的合作，才能实现整体市场份额的增加和市场竞争力的持续提升。

4.3 整个商业航天的发展得益于清晰的政策指导

SpaceX公司的异军突起正是得益于美国国家航天政策的调整。进入21世纪以来，NASA在获取国会经费支持越来越有限的情况下，提出通过政策支持和鼓励私营商业航天公司开展近地轨道运输任务，并通过大量试验设施及技术支持，使得以SpaceX公司为代表的私营商业航天公司发展迅速，成为了航天发射市场的有力“搅局者”，使整个行业发生了积极的连锁反应，世界各国的火箭研制承包商均在采取各种途径降低产品成本，提升市场竞争力。

SpaceX公司猎鹰9火箭对美国传统发射领域的主要执行者——联合发射联盟（ULA）造成了巨大冲击。特别是近期，SpaceX公司甚至进入了ULA赖以生存的军事发射市场，开始承接诸如GPS-3卫星、X-37B轨道飞行器等利润巨大的发射任务。ULA在新火箭研发过程中必须审视自身不足，提出具有市场竞争力的产品方案。

ULA正在研制的火神火箭，将取代德尔塔4和宇宙神5两型火箭，通过构型的精简、产品性能

的提升,增强市场竞争力。火神火箭通过采用模块化设计,借鉴 SpaceX 公司的垂直整合思路和关键产品复用技术开发,实现研制与发射成本的持续降低。为实现部分可重复使用技术,ULA 提出了敏感模块自主返回技术 (SMART),计划回收火箭芯一级的两台发动机,其单发火箭报价为 1 亿美元,预计 2020 年首飞^[10]。

欧洲阿里安航天公司研发的阿里安 6 火箭,通过采取低成本措施等手段积极应对 SpaceX 公司的竞争,将两种构型发射价格直接降低至 7500 万欧元和 9000 万欧元,发射单价甚至低于目前的猎鹰 9 火箭报价,近期还提出了基于垂直起降回收的阿里安 6 NEXT 火箭。阿里安 6 的方案受到了猎鹰 9 火箭垂直回收技术影响,火箭基于 7 台普罗米修斯发动机并联的芯一级、一台普罗米修斯发动机的二级以及 P120C 固体级组合而成。

日本的 H-3 火箭同样觊觎商业市场,在吸取 H-2 火箭开发的经验教训之后,将其一子级主动力由前期的闭式循环发动机更改为经济性更好、价格更低的 2~3 台 LE-9 新型开式循环氢氧发动机,发射价格降至 5000 万美元左右,计划 2020 年首飞。

5 结束语

美国 SpaceX 公司不断进行技术创新和管理创新,猎鹰火箭的每一次更新与技术创新都给人们带来了巨大的震撼,甚至改变了世界商业航天的发展走向。通过全面分析其技术更迭和优化过程,从中找到适合我国未来火箭发展特点的措施,才

能够在未来的商业航天浪潮中,站稳脚跟,迎难而上,闯出一条有中国特色的运载火箭发展道路。

参考文献

- [1] Stephen Clark. Falcon 9 launch timeline with Bang-abandhu1 [EB/OL]. <http://spaceflightnow.com/2018/05/11/falcon-9-launch-timeline-with-Bang-abandhu1/>.
- [2] SpaceX. Capability & Services (2016) [EB/OL]. <http://www.SpaceX.com>, 2016.
- [3] 邢强. 剖析 SpaceX 公司的最新版猎鹰运载火箭 [EB/OL]. 小火箭微信公众号.
- [4] 牟宇,王俊峰,陈宇,等. 美国 SpaceX 公司猎鹰火箭创新技术的启示 [J]. 飞航导弹, 2016 (6): 3-8.
- [5] Wikipedia Web. Falcon 9 [EB/OL]. http://en.m.wikipedia.org/wiki/Falcon_9.
- [6] 胡炜. SpaceX, 一时传奇 or 一世传奇? [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015.
- [7] Stephen Clark. Falcon 9 rocket explosion traced to upper stage helium system [EB/OL]. <http://spaceflightnow.com/2016/09/23/falcon-9-rocket-explosion-traced-to-upper-stage-helium-system/>.
- [8] 高朝辉,刘宇,肖肖,等. 垂直着陆重复使用运载火箭对动力技术的挑战 [J]. 火箭推进, 2015, 41 (3): 1-6.
- [9] Stephen Clark. U. S. Air force certifies Falcon heavy rocket awards launch contract [EB/OL]. <http://spaceflightnow.com/2018/06/26/U-S-Air-Force-certifies-Falcon-Heavy-rocket-awards-launch-contract/>.
- [10] 牟宇,魏威. 火神火箭技术方案及低成本控制措施分析 [J]. 中国航天, 2016 (7): 10-15.

引用格式: 牟宇,孙冀伟,秦旭东. 猎鹰 9 火箭 Block5 构型首次飞行任务解析[J]. 宇航总体技术, 2018, 2 (5): 1-7.

Citation: Mou Y, Sun J W, Qin X D. The analysis of Falcon 9 Block5's maiden flight [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2 (5): 1-7.