

Research on the Overall Design of Low Cost Launch Vehicle

Danghui Liu, Yunxia Yin, Chaojun Xin, Long Cheng

Equipment Academy, Beijing
Email: liudanghui@sohu.com

Received: Feb. 22nd, 2017; accepted: Mar. 13th, 2017; published: Mar. 16th, 2017

Abstract

Expensive launch cost is a key limitation factor of aerospace technology and application development for decades. With the success recovery of FALCON-9 first stage, many space institutions in the world have proposed their different development schemes of low cost launch vehicles. This paper collected and analyzed abroad development schemes of low cost launch vehicles. Aiming at the difficulty of the design and manufacturing, the overall design researches are presented in six fields, such as structure design, engine design, and so on. The research results can afford us lessons for development of low cost launch vehicles.

Keywords

Launch Vehicle, Low Cost, Overall Design

低成本运载火箭总体设计研究

刘党辉, 尹云霞, 辛朝军, 程 龙

装备学院, 北京
Email: liudanghui@sohu.com

收稿日期: 2017年2月22日; 录用日期: 2017年3月13日; 发布日期: 2017年3月16日

摘 要

数十年来, 高昂的发射成本一直是制约航天业发展的主要因素。随着SpaceX公司成功回收猎鹰9R火箭的一子级, 世界各航天机构纷纷提出各自的低成本火箭研制发展计划。通过收集和分析国外低成本火箭发展计划, 针对低成本火箭研制难题, 主要从结构设计、发动机设计等六个方面进行了总体设计研究, 为我国低成本运载火箭研制发展提供借鉴。

关键词

运载火箭, 低成本, 总体设计

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

据统计, 航天业已成为当前推动世界经济发展的主要动力之一[1], 但将航天器送入太空的成本仍然很高, 从而一直是制约航天业发展的主要因素。数十年来, 航天业一直在探索低成本航天发射方式, 但并未取得实质性进展。近期, SpaceX 公司的“猎鹰 9R”运载火箭一子级成功回收试验将低成本运载器的研制推向一个高潮[2], 多个国家的航天机构和商业公司开始加大低成本运载火箭的研究力度, 并提出了各种不同的解决方案。本文结合低成本运载火箭发展需求, 通过总结国外发展经验, 主要从结构设计、发动机设计、新型推进剂、电子电气系统设计、先进的制造与管理、发射与回收等六个方面进行了总体设计研究, 为我国低成本运载火箭研制发展提供借鉴。

2. 结构设计

运载火箭的结构设计对运载效率影响很大, 因此一般从采用模块化设计、新型复合材料、回收辅助结构设计等技术降低成本。

1) 模块化设计

在 20 世纪 70 年代末到 80 年代初, OTRAG 公司开展研制模块化的低成本运载火箭, 火箭由多个通用火箭推进模块(CRPU)构成, 采用数十个甚至上百个 CRPU 由内到外的并联结构, 期望通过模块化设计将成本降低至当时的 1/10。模块化设计使得材料通用, 生产成本更低。近年来, 各国为了适应不同载荷的发射, 以及降低发射成本, 纷纷在新一代运载火箭上采用模块化设计方法, 如我国的新型“长征”、俄罗斯的“安加拉”、美国的“NEPTUNE”等火箭。

我国新一代运载火箭采用“一个系列、两种发动机、三个模块”的总体设计思路[3]。新型长征火箭主要包括“长征 5 号”、“长征 6 号”和“长征 7 号”, 其构成基础模块包括: 5 米直径火箭芯级(YF-77 氢氧发动机 $\times 2$); 3.35 米直径火箭芯级/助推级(YF-100 液氧煤油发动机 $\times 2$); 2.25 米直径直径火箭助推级/2 级(YF-100 液氧煤油发动机 $\times 1$); 5 米直径火箭上面级(YF-75D 氢氧发动机 $\times 2$); 3.35 米直径火箭 2 级/上面级(YF-115 液氧煤油发动机 $\times 2$); 3.35 米转 5 米直径火箭 2 级/上面级(YF-115 液氧煤油发动机 $\times 2$)。新型长征系列火箭可由 6 种基础模块灵活组成, 6 种模块根据不同需求搭配, 可以形成十余种不同的构型, 能够适应不同航天器的发射, 从而达到低成本、高可靠、适应性强、安全性好的设计目标。

美国“渐进一次性运载器”中的“德尔它 4”和“宇宙神 5”两个系列在第一级上均使用大型通用核心模块, 而且还可通过捆绑其它助推器或改变上面级配置扩大运载能力的覆盖范围[4]。美国 Interorbital System 公司的“NEPTUNE”是一种模块化的运载火箭, 师承于德国的 OTRAG 方案, 通过捆绑不同数量的通用模块, 实现不同的运载能力, 规划的构型包括 N3、N5、N7、N36, 数字表示通用模块数量, 310 km 的 SSO 运载能力从 15 kg~1000 kg 不等。2014 年已经完成了通用模块的飞行试验, 目前该公司已经获得了很多的发射订单, 但是主要以大学的微小立方体科研卫星为主。

俄罗斯“安加拉”火箭使用了公用芯级(URM)的设计,它的公用芯级使用单台新研制的 RD-191M 大推力高压补燃液氧煤油发动机[5]。“安加拉-A1”火箭使用单个公用芯级,而“安加拉-A3”火箭是一个公用芯级做芯级,两个公用芯级做助推器的设计,“安加拉-A5”火箭选择了一个公用芯级做芯级,四个公用芯级做助推器的方案。“安加拉”系列火箭通过使用不同数量的公用芯级,调节运载火箭的运载能力,实现了运载火箭设计的通用化、模块化和组合化,并覆盖了从小型到大型火箭的运力范围。

日本的“H-2A”系列也通过捆绑助推器的组合形成 5 个型号。

此外,新一代运载火箭采用比传统火箭普遍少一级的一级半或二级半构型,通过减少火箭级数来提高可靠性。

2) 先进复合材料

先进复合材料(ACM)具有质量轻,较高的比强度、比模量、较好的延展性、抗腐蚀、导(隔)热、独特的耐烧蚀性、材料性能的可设计性、制备的灵活性和易加工性等特点,在低成本火箭中应用广泛[6]。复合材料低成本制造技术主要包括以下几个方面:降低原材料成本;开发低温固化、高温使用的树脂;开发长寿命的预浸料;使用混杂纤维复合材料;创新生产工艺等。目前碳 ACM 发动机壳体以其优异的特性得到了较好的应用与发展,先后成功地用于“飞马座”、“德尔塔 II-7925”运载火箭以及多种型号的导弹。我国玻璃纤维/环氧、芳纶/环氧 ACM、碳 ACM 等发动机壳体已应用于航天运载器上。“天蝎座 α ”火箭的整流罩使用高性能轻质复合材料制造。航天公司 Rocket Lab 的“Electron”火箭使用碳复合材料作为主体。在箭体结构和材料上,“猎鹰 9 号”是世界上第一种全面应用高强度的 2195 铝锂合金的火箭,结构质量很低,一子级包括发动机在内的结构质量比超过 15,或者说加注后 390 吨的重量中,只有 21 吨是箭体重量,第二级箭体也仅有 3 吨[7]。尽管箭体很薄,却能承受将近 6 马赫下的控制、反推、再入,并在大气层内飞行数百千米并安全降落,还要在降落后检修以确认可以再次甚至多次发射,从而实现运载火箭第一级重复使用的目标[8]。

先进复合材料在热防护方面具有非常重要的作用。如可重复使用飞行器高速再入大气时,飞行器的表面会产生严重的气动加热,必须对再入飞行器采取防热措施。航天飞机首次采用了陶瓷热防护系统和材料,并获得了成功的飞行。但是陶瓷瓦具有脆性大,抗损伤能力差,维护成本高,更换周期长等问题,热防护一直是美国航天飞机可重复使用的瓶颈问题。航天飞机的 2 次灾难性事故都与热防护直接相关。2010 年发射的“X-37B”突破了传统的热防护设计,采用了新型的轻质非烧蚀的增韧单体纤维抗氧化复合结构(TUFROC),这种新型陶瓷复合结构不但能承受再入时产生的高温,还解决了陶瓷瓦在高温环境下的热裂和抗氧化等瓶颈问题,并且可以重复利用[9]。TUFROC 的密度只是增强 C/C 材料(RCC)的 1/4,成本降为 RCC 的 1/10,并且制造周期缩为 RCC 的 1/6~1/3。此外,以发动机为例,据理论计算和试验,发动机的工作温度每提高 100℃,它的推力就可提高 15%左右,可见提高发动机材料耐高温性能的重要性。“猎鹰 9”火箭通过精确的姿态控制以及发动机的数次点火反推,一子级火箭降速返回,比航天飞机进入大气层返回地面的速度低得多,因此降低了火箭返回的热防护难度。

3) 回收辅助结构

运载火箭的部分或全部回收与重复利用是节约制造成本的主要途径[10]。目前,运载火箭回收方案主要有三种:一是火箭子级采用反推火箭实现垂直回收;二是给火箭安装水平翼和垂直尾翼,水平返回,类似于航天飞机;三是采用降落伞加气囊的回收方式,如飞船返回舱的方式。三种方式各有优缺点,SpaceX 公司主要采用第一种方式,俄罗斯计划采用第二种方式,我国正在试验第三种方式。

美国 SpaceX 公司目前主要采用反推火箭垂直着陆的回收方式,因此一子级需要增加返回着陆支架;为了精确控制姿态,需要增加控制系统;这些都增加了系统的复杂性。此外,为了检测和维修回收的一子级,也需要增加地面检测维修设备。美国向量空间系统公司计划采用降落伞和无人机回收其向量火箭

的一子级。2015 年美国 ULA 宣布，新一代火箭“火神”的第一级发动机在与火箭分离后，通过降落伞减速，然后采用直升机在空中进行回收，预计发射成本将降低 50%。

2011 年，我国运载火箭技术研究院研发中心基于成熟的飞船返回方式，开展采用“降落伞 + 气囊”的火箭子级回收方式研究。2015 年完成的热气球投放试验只是一个缩比试验，但已验证了使用大型群伞的技术能力。对于垂直返回的方案，研发中心也已完成了系统的方案论证和相应的仿真研究。

前苏联曾在研制“能源”重型运载火箭时考虑过可重复使用方案，采用水平降落方式回收。2001 年，俄罗斯首次展示了“贝加尔”芯级助推器模型。该助推器是一种水平降落方式的可重复使用火箭助推器，预期可重复使用 50~100 次以上。2016 年，俄罗斯提出计划将无人机技术应用于“安加拉”系列火箭的第一级，为火箭增加水平翼和垂直尾翼，火箭可像航天飞机一样水平返回地面，计划安全回收 25 次以上，以实现节约成本的目的。

3. 发动机设计

发动机是运载火箭的核心部分，也是决定火箭总成本的主要因素。为降低运载火箭成本，首先需要降低运载火箭发动机的研制成本，因此目前大多通过采用技术继承与改进、简化发动机设计、设计新型发动机、设计推力可调发动机等方式来降低成本。

1) 技术继承与改进

新型号火箭的研制费用一般都很高，研制周期往往也很长。火箭发动机成本通常占据火箭总成本的 40% 以上，为降低发射成本，对已有成熟发动机进行技术改进是节约成本的一种有效途径。

SpaceX “猎鹰 9 号”的“灰背隼”发动机就继承了“阿波罗”登月舱下降发动机技术，其“格里芬”/“猎狮”发动机为航天飞机 F-1 发动机的改造版[11]。“宇宙神 5”所有的通用核心助推器继承了该系列火箭采用液氧/煤油推进系统的传统。日本“H-2A”和俄罗斯“安加拉”火箭所用的推进系统等多项技术也都是在现有技术的基础上加以改进来实现的。俄罗斯的火箭发动机技术在其它国家几种新型火箭上得到采用，也反映了有关厂家对通过采用成熟技术来降低研发和使用成本及提高可靠性的重视。

“阿丽亚娜五号”ECA 型(Evolution Cryotechnique type A)运载火箭能搭载 10000 公斤(多枚卫星)至地球同步转移轨道或 10500 公斤(一枚卫星)，这个改良型使用新的巴尔干(Vulcain) 2 型引擎为第一节引擎。巴尔干引擎经过修改后变得更长，更有效率的喷嘴使得推进剂的使用效率提升许多[12]。

2) 简化设计

前苏联的“能源号”重型运载火箭就是由于发动机太多而导致多次试验失败，最终取消了载人登月计划。因此，简化设计是降低成本和提高可靠性的主要措施之一。除减少火箭级数、简化箭体结构与系统设计外，简化发动机设计和数量也很关键[13]。

美国的“宇宙神 3”在简化设计方面非常先进。该火箭第一级只需使用一台发动机，包括上面级在内的整个火箭只有 3 个推力室，比老的“宇宙神 2AS”少了 6 个，火箭部件数量则减少了约 15000 个，由此不仅节省了重量，也提高了可靠性。“宇宙神 5”继承了“宇宙神 3”的特点，标准型“宇宙神 5”火箭一子级采用一台大推力的俄罗斯液氧煤油火箭发动机 RD-180，重型“宇宙神 5”火箭再加 2 个相同的采用 RD-180 发动机的助推器，第二子级采用 1 台或 2 台“半人马座”火箭 RL-10A 火箭发动机。SpaceX 公司正在发展基于“格里芬”1A 的重型运载火箭，虽然 LEO 运力和“猎鹰”9 重型运载火箭基本相当，但一子级发动机数量可以从 27 台大幅削减至 3 台，从而极大地简化了设计。这对于增加发射可靠性、降低发射费用都有非常积极的意义。猎鹰 9 号火箭的“灰背隼”液氧煤油发动机的推力虽然不高，但在剩余燃料管理上“猎鹰 9 号”火箭同样出色，在开式循环液氧煤油发动机中是比冲最高的，运载系数和全面使用高压补燃循环液氧煤油发动机的“天顶 2 号”火箭不相上下。

美国火箭实验室设计研制了以电池作为部分动力的轻量级火箭，该发动机电子推进系统循环使用电动装置和锂聚合物电池，驱动其涡轮泵高速运转[14]。火箭发动机系统也首次使用 3D 打印技术制造主要设备，其中包括：发动机舱、喷射器、涡轮泵和主推进阀，多数设备都是采用钛和其它合金材料制成。轻量级发动机系统可在 3 天之内“打印”完成，相比之下，传统制造业却需要大约 1 个月时间建造。预计该两级电动发射小型火箭能够成本更低、更快速地将 100 公斤有效载荷发射至低地球轨道。以电池作为部分动力的轻量级火箭成本少于 500 万美元，仅是维珍银河公司空中发射卫星发射系统“发射者一号”成本的一半[15]。

3) 新型发动机设计

美国“萤火虫阿尔法”小型火箭的特点是，一子级采用了塞式发动机 FRE-1，相比传统的钟形喷管，塞式喷管能够在整个飞行过程中获得更高的效率。

美国的 AJ-26 发动机是基于俄罗斯的 NK-33 发动机改造的，可靠性相当出色，NK-33/AJ-26 发动机还是目前已经投入使用的推重比最高的火箭发动机。我国在新一代运载火箭研制中，掌握了 120 吨高压补燃液氧煤油发动机技术，使得运载能力得到大幅提升。印度 2006 年获得乌克兰技术转让，开始设计研制 200 吨级高压补燃液氧煤油发动机 RD-810。与常规发动机相比，液氧煤油发动机具备诸多优点：一是推力大；二是没有污染，相比于偏二甲肼和四氧化二氮，液氧和煤油都是环保燃料，而且易于存贮和运输；三是经济，比常规发动机推进剂便宜 60%；四是可靠性高；五是可重复使用。

俄罗斯“联盟-5”运载火箭最大的竞争力在于，该型火箭将采用低温冷却甲烷作为燃料来替代传统的煤油，不仅可靠性更高，成本也更加低廉[16]。目前，配备 Fregat 上面级的“联盟-5.1”单次飞行价格预计为 5000 万美元，与“猎鹰 9”价格基本持平甚至略有优势。2013 年 10 月，航天六院 101 所的新一代 60 吨级火箭液氧甲烷发动机全系统首次点火试车获得成功。事实上，各航天大国多年来一直考虑在未来可重复使用技术中引入低成本且更易维护的甲烷发动机。2002 年至 2005 年，俄罗斯和欧洲共同研制可重复使用的 200 吨的甲烷发动机 RD-0162，没有成功。2016 年 9 月，俄罗斯宣布重新开展 80 吨可重复使用甲烷发动机的研制。

2013 年 1 月，美国 Blue Origin 公司公开了新的 BE-3 液氧液氢发动机，它采用了独特的抽气循环方式，此前只有 J-2S 发动机使用这种方式，这种循环方式具有结构简单、爆炸概率低和关机方便等优势。BE-3 发动机推力约 50 吨，并具有推力调节能力。目前，Origin Blue 公司还提出研制用于火箭上面级的真空型 BE-3 发动机的方案，即真空推力约 68 吨的 BE-3U 发动机。BE-3U 发动机的地面推力和真空推力在世界上都处于先进水平，ULA 已经将 BE-3U 发动机列为未来 ACES 先进上面级的备选发动机。

2014 年 9 月 17 日，Blue Origin 公司和 ULA 达成协议，ULA 选定 Blue Origin 公司的 BE-4 发动机作为未来主力运载火箭——“火神”火箭的主发动机。BE-4 发动机将用甲烷作为推进剂，这是美国制造的火箭发动机中首次采用这种推进剂。按照计划，2017 年可以完成发动机研制，2019 年或是更早就可用于火箭发射[17]。

4) 推力大范围可调技术

“猎鹰 9 号”的第一级火箭在回收着陆的时候，其中三台发动机的推力是精确可调的，这样才能使庞大身躯的火箭在刚刚着地时的速度基本为零，平稳地降落在平台上。一子级火箭要实现平稳着陆，成功回收，可以调节推力的火箭发动机是成功的关键[18]。要实现发动机推力可调，就需要改变燃烧室、燃料泵等的设计，实时调节发动机内部的温度和压力，并调节燃料的流量。这种大推力的可调发动机既要用于火箭发射阶段，又要用于回收时的减速反推，设计难度也很大。一旦实现发动机推力可调，就可以实现火箭的定时、定点入轨，相当于给火箭安装了油门，火箭的控制就会容易很多，火箭的适应性相应得到增强。

4. 新型推进剂

尽管推进剂一般只占发射总成本的很小一部分，但是采用具良好性能的新型推进剂，能够增加推进剂储存、运输、生产的安全性，或者提高发动机比冲。随着载荷发射效率的提高，发射总成本得以降低。

1) 新型固体推进剂

传统的固体推进剂制造需要粘合剂、氧化剂(焦化胺)与铝粉、搅拌容器等物料，其制作硬化定型过程是一个不可逆反应过程，导致固体火箭推进剂的制造设备，甚至搅拌容器，都要十分巨大，以满足一次性制作完成的需求。但是，如此巨大制造设备的使用频率却非常低，从而使制造固体火箭的设备和人员使用效率均很低。

日本“艾普斯龙(Epsilon)”固体运载火箭采用具有双向热弹性和低熔点特性的新型固体推进剂[19]，这类推进剂类似于巧克力棒，可以进行多次加热融化，并在室温下凝固、存放。室温下，推进剂为固体状态，当加热到 90℃左右时，推进剂则可融化为液态。由于这一反应过程完全可逆，推进剂制造在混合搅拌和浇注阶段几乎随时可以中断或重新进行。新型推进剂的这种性质可以使混合器小型化到实验室设备大小，并实现推进剂小份连续生产、单独存放，使搅拌器等制造设备的利用率达到近乎 100%。推进剂最后的浇注过程也可以极大简化，仅需按需求量重新融化相应燃料棒并将其注入发动机壳即可，这一过程可以完全自动完成。固体火箭发动机推力按需生产的改进，可以极大提高固体火箭的效率和发射性能，并大幅降低工艺要求和燃料存储、维护、人工等多项费用。

2) 新型液体推进剂

在大多数行业中，煤油和甲烷的性能基本相同，尽管煤油有一点优势，但是甲烷被认为更有效[20]。此外甲烷还有更好的重用性，而煤油会结焦，所以需要富氧化剂燃烧，这会对涡轮泵系统造成相当的腐蚀与侵害，对于煤油在发动机里燃烧后的残留物需要昂贵的清洗甚至是重制。甲烷则可以通过燃料预燃来运作，基本上已经没有结焦问题，而且有着更好的冷却特性，如果从液化天然气来使用，它是最便宜和最丰富的燃料。

甲烷的冷却性能良好，再生冷却指数比煤油高 75%，是仅次于液氢的再生冷却剂。比起液氢，甲烷可从天然气方便获取，沸点比液氢高 90℃，成本比液氢低，相对密度比冲又高了约 80%；相比传统的液态煤油，甲烷的比冲更高，但成本至少降低 30%，它的结焦温度高、富燃燃烧积碳少、沸点低、重复使用时无需清洗；在达到与煤油燃料同样性能的前提下，甲烷对燃烧室以及燃料泵出口管路的压力要求也更低。因此，液氧/甲烷发动机是可重复运载器较为理想的选择。

目前，新型甲烷发动机已成为研制新一代可重复使用运载火箭关键。

3) 预混合组元推进剂

预混合单组元推进剂的使用，可以简化火箭系统，使火箭携带更多的有效载荷，降低火箭的制造和运行成本。目前美国 DARPA 已经验证并建立了安全可靠的混合、存储和转移大量的单组元推进剂流程，并将其应用于火箭上，是火箭能够快速、低成本部署的关键技术。

4) 降低液体燃料温度

升级版“猎鹰-9 v1.2”与此前的“猎鹰-9 v1.1”相比，动力增加了 30%，从而保障火箭第一级在着陆平台上降落并回收。为了多带燃料，“猎鹰-9 v1.2”把燃料箱的温度降低了，这样燃料的密度变大了，从而可以多带一些燃料。

5. 电子电气系统设计

运载火箭的电子电气系统也占据了火箭的相当一部分成本，但目前这部分仍难以回收。因此，采用商业化器件、智能化技术和可靠性设计方法能适度降低火箭发射总成本。

1) 采用商业化器件

“猎鹰 9”火箭采用了高可靠性工业执行元件，而没采用成本高 5 倍的航天级元件，火箭研制成本得以进一步降低[21]。同样地，2016 年 1 月，日本宣布将把 2013 年发射的“Epsilon”火箭 1 号机的零部件替换成民用产品，并实现与日本其他火箭零部件通用化，力争到 2020 年将“Epsilon”的发射费用削减 40%，从目前的 53 亿日元降至约 30 亿日元，希望借此争夺国内外需求不断增长的小型 and 中型卫星发射订单。

2) 应用智能化技术

随着人工智能技术的飞速发展，使火箭具有强大的自查能力，就可将火箭发射时的控制人员减至数人，而这种运用人工智能技术和 IT 技术实现自主测试系统，可大幅削减发射周期和发射成本[19]。智能测试系统需要完成的工作包括各箭上设备自检、接口检测、网络检测以及趋势数据分析评估等。其中趋势数据分析评估由地面设备通过采集数据与地面设备数据库中已有数据的比较完成。测试时，由地面操作人员向箭上发送控制指令，箭上电子设备的检测由箭上自检设备及机内测试系统进行检测，测试结果和部分数据通过通信网传至地面支持设备。当地面支持设备无法完成相关操作时，通过远程专家系统进行技术支持。如日本“Epsilon”火箭通过采用先进的人工智能技术，具备自主检测能力，火箭第一级安装在发射台上 1 周内即可发射，仅需 8 名工作人员在控制中心监控。

3) 采取备份可靠性设计

为提高发射可靠性，太空探索技术公司将每一阶段的产品均进行完整的系统试验，并且在关键部件上采用多重备份，如“猎鹰 9”第一级就采用了 9 台发动机，即使一台发动机失效也不会影响发射任务。我国运载火箭一般采用冗余方式增加可靠性设计，如惯组系统、总线系统等采用双备份或三备份方式，信号的判决采用 3 取 2 方式，箭地测试信号的传输采用双路备份模式等。

6. 先进的制造与管理

运载火箭各系统组成复杂，综合采用 3D 打印、批量生产、全球采购、商业化运作模式，也能够大幅降低运载火箭研制和发射成本。

1) 采用 3D 打印技术

未来火箭的设计目标都将逐渐向低成本、高可靠性、高安全性发展，尽量使用绿色能源、绿色材料和绿色工艺。3D 打印技术将原本发射卫星巨大耗资的花费大大地降低了，并且能充分、迅速地重复使用，能够通过反复飞行来大幅降低太空发射费用。采用 3D 打印技术和 3D 打印零部件的火箭会成为未来航天航空事业的风向标。

目前，“Electron”火箭上使用了电动 Rutherford 发动机，这部发动机的所有主要部件都是 3D 打印的，包括其发动机腔室、泵、主推进剂阀和喷射器等。该火箭上的 Rutherford 发动机也是世界上第一个仅靠电池供电的火箭发动机。基于上述原因，该公司成功地将把卫星送上太空的成本削减了大约 95%。据了解，Rocket Lab 主要依靠电子束熔融技术生产其发动机的零部件。2016 年 8 月，Vector Space Systems 公司在莫哈韦沙漠成功发射了一枚“P-20”火箭，火箭能达到 500 磅的推力，火箭显示出了优秀的电气和机械性能[22]。该火箭的关键部件全部采用 3D 打印，最大限度可携带 50KG 负荷送入太空。“P-20”火箭只有 12 英尺长，它的 3D 打印引擎甚至可以用在 42 英尺火箭中。更重要的是，它可以循环发射几百次，显著降低发射成本。

2) 采用批量生产的模式

现代火箭大多采用系列化、模块化设计，这样可通过批量生产降低成本。例如中国新一代运载火箭“CZ-5”系列火箭，通过不同模块的组合，可实现发射几百公斤到 22 吨的近地轨道载荷。日本“Epsilon”

火箭新技术将被应用于新一代主力火箭“H3”的新型助推器，就是计划要通过一定数量的批量生产来降低“H3”运载火箭的发射成本，同时“Epsilon”的生产成本也有望降低[23]。

3) 采用全球采购的策略

轨道科学公司的“天蝎座 α ”火箭采取全球采购策略，并大量使用经过飞行验证的成熟子系统以降低成本，这种方式与竞争对手太空探索公司截然相反[24]。作为新型运载火箭，“天蝎座 α ”火箭运载系数并不出众，但设计上有很多特色：它适中的运力填补了美国小型的“米诺陶”4 火箭与重型的“德尔它”4 火箭之间的运力空白；预计发射报价比现有的中等运力火箭明显降低，如基本型号发射报价只有 7500 万~8000 万美元，有利于降低航天项目的总成本。

4) 采用商业化运作模式

传统航天业一直给人一种神秘的感觉，但其内部存在很多体制机制问题，阻碍了技术创新。同时，由于缺少外部竞争，问题逐渐积累，改革十分艰难。因此，美国政府不遗余力扶持 SpaceX、Blue Origin 等民营航天公司，确保良性的竞争和发展机制。SpaceX 的成功不仅在于技术的先进性，更在于采用了不同于传统航天业的商业化运作模式[18] [21]。传统航天业往往采用研发模式，每一枚火箭都需要设计、生产、测试等等，不仅环节复杂，而且大大增加了生产周期和生产成本，浪费了大量的人力物力。而且，每一次设计都会有新的风险，导致可靠性不够稳定。SpaceX 作为一家民营航天企业，十分注重成本和质量控制。通过采用商业化发展方式，所有的软硬件均在它的控制范围内，不存在外包环节，所以全程质量可控。通过在航天领域率先实践流水线化的生产模式，并通过大规模生产来大幅度降低生产成本。很多产品都会尽量按照批次生产和采购，也都会尽可能地回收利用。

7. 发射与回收

为降低航天发射总成本，目前主要从简化发射操作及设施复杂程度，采用海上移动发射平台，采用空中发射平台，回收复用运载器主要部件，以及研制新型组合动力飞行器等方面进行研究。

1) 简化发射操作及设施

“天蝎座”系列火箭发射具有多个方面的特点使其具备快速发射能力[24]，主要包括：在主要发射地点附近进行装配；在可重复使用的发射支架上进行垂直组装且可以在发射支架上移动；火箭设计的高度低且直径大(短而粗)，易于快速移动和处理；在发射支架上通过铁路或平滑的路轨在发射地点垂直运输；转移和发射过程中不需要勤务塔；运载器的高度较低，在需要的时候通过车载式吊车就可以进行航空电子设备以及载荷的装配；所有各级均使用液氧/煤油推进剂不污染环境。“天蝎座”火箭发射的其它特点还包括：火箭装载在两个标准的卡车拖车内、易起竖，发射架质量小于 1000 千克；参与发射的人数少于 20 人；适应 99.5% 以上的天气环境；自校准 GPS/INS 制导与导航；采用地面服务没有发射塔架、配备拖架与推进导向装置的水泥发射平台、多个可用的发射地点，每个发射点有多个可用的发射台；没有自燃烧或爆炸装置；利用基于 GPS 进行跟踪的飞行终止系统。

2) 采用海上移动发射平台

1995 年，美、俄、乌、挪四国公司合资成立了海上发射公司，1999 年 3 月进行了首次海上卫星发射。利用海上发射平台移动到赤道海域发射，通过借助地球的自转可显著提高运载能力。海上发射系统在安全性和灵活性方面也都有独到之处。由于海上发射采用的“天顶-3SL”火箭在乌克兰建造，70% 的零部件由俄罗斯生产，随着俄、乌关系的恶化，目前海上发射服务被迫暂停。2015 年，俄罗斯宣称将建立新的海上发射平台。

3) 采用空中发射平台

1990 年，美国轨道科学公司的“飞马座”火箭首次发射成功，开创了用空射型火箭发射卫星的先例。

空中发射的主要优点是自主性和机动性好, 载机实际上充当了可重复使用的第一级, 因而可以降低发射成本, 提高灵活性。鉴于这种考虑, 俄空射宇航公司正在研制“飞行号”空射型运载火箭, 美国波音公司也在计划研制空射型运载火箭。在同样载荷发射能力下, 机载发射火箭比传统的地面发射火箭的总质量减少 20%~30%, 能够将小卫星(45 公斤级)发射费用降低 66%。因此商业价值更大。但是, 机载发射必须克服两个主要困难[25]: 一是运载器投放过程需要考虑大气、火箭、载机及其他辅助设施(如稳定伞、发射撬等)之间的相互作用, 需要保证运载器的安全平稳释放和载机安全, 同时尽可能使火箭释放后姿态容易控制, 实现火箭点火时刻姿态稳定; 二是火箭在箭机分离后到点火前处于无动力飞行状态, 运载火箭位置、运动状态、飞行姿态具有高度不确定性和难预测性, 而初始定位、定向所产生的初始条件误差对火箭飞行过程的精确程度和入轨精度影响极大, 必须解决火箭点火前姿态控制问题, 并解决相关信息(姿态、速度、位置)的实时、精确测量问题。

4) 回收复用火箭主要部件

随着 Blue Origin 的亚轨道火箭、SpaceX 的“猎鹰 9”火箭一子级等相继成功回收, 运载器回收利用受到格外关注。欧洲空客防务开始思考如何让“阿丽亚娜 6”火箭变得更加廉价。为了回收火箭主引擎和航空电子设备等火箭高价值的部件, 火箭底部将配有有翼模块。

美国新一代运载火箭“火神”将采用两台由 Blue Origin 公司开发的 BE-4 发动机送入太空。为降低发射成本, ULA 从设计之初就打算将 BE-4 发动机在发射后抛回地球。该发动机将用可膨胀的隔热材料保护起来, 并在伞降后由直升机回收, 这么做将可大幅压低 ULA 发射成本, 将每次发射的成本从逾 2 亿美元降至平均 1 亿美元[14]。

最近, ULA 又提出了全新的“太空卡车”计划[26], 除了回收第一级的发动机外, 还将重复使用火箭第二级。火箭第二级回收计划, 其实是要让火箭第二级停留在太空中进行重复利用。按照 ULA 的设计方案, 火箭第二级外形看上去像燃料箱, 尾部配备 4 个发动机, 最大的特点是能在太空加油、再次点火启动, 能够在太空轨道上停留数周甚至数月。这个可重复使用的第二级作为发射中转平台, 被称为“太空卡车”。

5) 新型组合动力飞行器

目前, 国内外相关机构已开展“组合动力飞行器”项目研究[27]。未来的组合动力飞行器可以实现可重复的天地往返航天运输, 意味着进入太空的成本和门槛有望大大降低。组合动力是一种新型动力, 其基本原理是集成火箭发动机、冲压发动机、航空发动机等不同动力模式, 取长补短。组合动力飞行器在起飞时, 使用在低速飞行条件下性能很高的航空涡轮发动机或吸气式火箭发动机; 达到一定速度后, 使用适应在大气层内高速飞行的冲压发动机。这两种发动机只能在大气层内使用, 而飞行器到达临近空间, 便需使用火箭发动机进入太空。目前研究人员已提出火箭基组合动力(RBCC)、涡轮基组合动力(TBCC)等概念。随着空天融合趋势日益加剧、临近空间开发趋势日益明显, 组合动力技术已成为动力研究的前沿和热点。未来的组合动力飞行器除了可重复使用, 无需再苛求发射场条件, 而能像飞机一样利用普通机场实现水平起降, 既能降低航天活动成本, 也为实现航班化奠定了基础。目前美国在“X-37B”等空天飞机上试验了超然冲压发动机, 获得了极大成功。印度正在研制采用超然冲压发动机的可重复使用运载火箭。我国已经研制成功的新型冲压发动机速度可达 4.5 倍音速, 未来有望达到 7 倍甚至 10 倍音速以上。

8. 小结

不断增加的航天需求是当前推动航天业快速发展的主要动力, 但低成本运载火箭仍是制约商业航天发展的主要因素。结合国外低成本运载火箭发展现状, 主要从运载火箭结构设计、发动机设计、新型推

进剂技术、电子电气系统设计技术、先进的制造与管理技术、发射与回收技术等六个方面探讨了低成本火箭研制的总体设计技术，希望对我国低成本运载火箭研制发展有所借鉴。

参考文献 (References)

- [1] 栾海. 火箭回收成航天热门, 成功回收可降低 98% 运输成本[EB/OL]. 中国新闻. <http://news.cntv.cn/2016/01/18/ARTIQhKLApYgLw3Qjt3U9TQP160118.shtml>, 2016-1-18.
- [2] 佚名. 猎鹰 9 运载火箭——开创人类航天事业新篇章[EB/OL]. 163 军情观察室. <http://news.163.com/10/0608/16/68M08PSN00011232.html>, 2013-1-30.
- [3] 佚名. 长征五六七型火箭模块化构型详细分析与总结[EB/OL]. 深空网. <http://www.shenkong.net/Explore/1301/CZWLOXHJMKHGXXXXFXYZJ30111709.htm>, 2014-11-23.
- [4] 佚名. 国外一次性运载火箭的发展趋势[EB/OL]. 腾讯科技. <http://news.qq.com/a/20091019/001362.htm>, 2009-10-19.
- [5] 张雪松. 俄新一代安加拉火箭技术水平超中赶美[EB/OL]. 网易新闻. http://www.360doc.cn/article/19670888_427497737.html, 2014-11-23.
- [6] 何东晓. 先进复合材料在航空航天中的应用综述[J]. 高科技纤维与应用, 2006, 31(2): 9-11.
- [7] Musk, E. (2011) Why The US Can Beat China: The Fact About SpaceX Costs. <http://www.spacex.com>
- [8] 张雪松. 人类的疯狂: 运载火箭也要重复使用[EB/OL]. 腾讯网. <http://news.qq.com/a/20151223/020238.htm>, 2015-12-23.
- [9] 佚名. 美国 X 系列空天飞行器热防护系统分析[EB/OL]. 高端装备发展研究中心. <http://www.wtoutiao.com/p/3d7ovjC.html>, 2016-9-8.
- [10] 汪小卫, 张普卓, 吴胜宝, 申麟. 运载火箭子级回收技术研究[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(3): 19-28.
- [11] 李兮言. 特斯拉创始人马斯克发射火箭并回收: 国进民退下的航天[EB/OL]. 时代周报. <http://tech.hexun.com/2015-12-29/181469612.html>, 2015-12-29.
- [12] 佚名. 阿丽亚娜 5 型运载火箭简介[EB/OL]. 深空网. http://www.360doc.com/content/14/1123/20/19670888_427491766.shtml, 2014-11-23.
- [13] 丁丰年, 张恩昭, 张小平. 液体火箭发动机低成本设计技术[J]. 火箭推进, 2007, 33(3): 1-6.
- [14] 佚名. 动力电池带火箭升天已成可能[EB/OL]. 中国日报. <http://news.bjx.com.cn/html/20150417/609102.shtml>, 2015-4-17.
- [15] 佚名. 美最新轻量级火箭以电池作为部分动力来源[EB/OL]. 腾讯太空. <http://tech.qq.com/a/20150619/009912.htm>, 2015-11-16.
- [16] 张娅. 俄罗斯将继续研制“联盟”-5 新型运载火箭[EB/OL]. 俄罗斯航天新闻网. <http://www.spacechina.com/n25.../n144/n208/n232/c1225113/content.html>, 2016-5-9.
- [17] 罗伯特·赖特. 美国欲 4 年内将火箭发射成本削减一半[EB/OL]. 网易财经. <http://money.163.com/15/0414/15/AN62HRSV002524SO.html>, 2015-4-14.
- [18] 郑永春. 猎鹰九号成功回收给航天界的启示[EB/OL]. 科普中国. <http://tech.163.com/15/1223/17/BBHNBJS800094O5H.html>, 2015-12-23.
- [19] 蔡远文, 辛朝军, 程龙, 等. 航天快速发射现状与发展[J]. 装备学院学报, 2015, 26(1): 1-5.
- [20] 王维彬, 孙纪国. 航天动力发展的生力军——液氧甲烷火箭发动机[J]. 航天制造技术, 2011(2): 7-10.
- [21] 庞之浩. SpaceX 可重复使用运载器成功回收: 意义何在[EB/OL]. 新浪科技. <http://tech.sina.com.cn/d/2015-12-30/doc-ifxncvar6026549.shtml>, 2015-12-30.
- [22] 佚名. 3D 打印小型火箭可负荷 50 KG 进入太空 [EB/OL]. 中国 3D 打印网. <http://www.3ddayin.net/news/guowaikuaidi/23580.html>, 2016-8-9.
- [23] 佚名. 日本小型火箭发射费用瞄准全球最低[EB/OL]. 中国新闻网. <http://www.chinanews.com/gj/2016/01-18/7721066.shtml>, 2016-1-8.
- [24] 张雪松. 轨道科学公司的新秀——“天蝎座 α ”火箭[J]. 太空探索. 2013(7): 46-49.
- [25] 辛朝军, 蔡远文, 姚静波. 空中发射技术现状及趋势分析[J]. 装备学院学报, 2014, 25(5): 67-73.
- [26] 佚名. 欲重复使用火箭第二级, 美企推出“太空卡车”计划[EB/OL]. 新华社.

http://news.xinhuanet.com/2016-08/30/c_1119477953.htm, 2016-8-30.

- [27] 佚名. 中国研制组合动力飞行器, 预计 2030 年实现应用[EB/OL]. 环球网.
<http://mil.news.sina.com.cn/china/2016-08-07/doc-ifyutfpc4690081.shtml>, 2016-8-7.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jast@hanspub.org