

Development and Analysis of Low Cost Launch Vehicles

Danghui Liu, Yunxia Yin, Chaojun Xin, Yan Li

Equipment Academy, Beijing
Email: liudanghui@sohu.com

Received: Apr. 19th, 2017; accepted: May 6th, 2017; published: May 9th, 2017

Abstract

By the low cost requirement in military and commerce spacecraft launch tasks, many space institutions in the world have proposed multifarious design schemes of low cost launch vehicles, and all kinds of new technologies and measures have been adapted to reduce the total launch cost. The paper researched the major design schemes and key technologies comparatively. Then the relationship between of cost and performance of the launch vehicles are independently analyzed from mass percents and cost percents of the major components for a certain American launch vehicle and carrying capability loss and total low cost for a reusable launch vehicle. At last, several proposals were presented for the development of low cost launch vehicles in China.

Keywords

Launch Vehicle, Low Cost, Carrying Capability, Development Proposals

低成本运载火箭发展与分析

刘党辉, 尹云霞, 辛朝军, 李 岩

装备学院, 北京
Email: liudanghui@sohu.com

收稿日期: 2017年4月19日; 录用日期: 2017年5月6日; 发布日期: 2017年5月9日

摘 要

为适应未来军事和商业航天低成本发射需求, 世界各航天机构纷纷提出各自的低成本运载火箭设计方案, 并采取各种技术措施大幅降低发射成本。对各主要方案和技术进行对比, 从美国某型运载火箭各组成部分与其质量和成本估计、猎鹰9R可重复使用运载火箭运载能力损失和总低成本估计两个方面分析了运载

火箭成本与性能的关系，并为我国低成本运载火箭研制提出相应发展建议。

关键词

运载火箭，低成本，运载能力，发展建议

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

太空资源以其独特的特点和优势，在国家的经济和军事等领域起着重要作用。随着卫星技术的发展，微小卫星通过组网能实现以前复杂大卫星的功能，能满足应对突发自然灾害和军事斗争对空间侦察、通信、导航、气象等信息的应急需求，因此微小卫星的快速发射任务急剧增加。但是，目前将航天器送入太空的成本仍然很高。而微小卫星即使采用搭载方式发射，也会因为主卫星发射计划变更、微小卫星入轨特殊要求、搭载发射利润不高等各种原因，往往导致发射推迟，甚至难以列入发射计划。因此，较高的发射成本已成为制约航天技术与应用发展的一个主要因素。

一般来说，新型号运载火箭的设计、研制、试验费用往往高达数亿美元。除此之外，一枚运载火箭的发射成本包括运载器生产费用、运载器发射费用和测控通信费用。近年来，由于商业卫星发射公司的竞争，如美国太空探索公司(SpaceX)的猎鹰9号运载火箭发射报价为5700万美元，使得美国联合发射联盟(ULA)的宇宙神5运载火箭发射报价从1.8亿美元降为大约1.2~1.3亿美元，欧洲的阿里安5运载火箭发射报价降为0.9~1亿美元。此外，俄罗斯的质子号运载火箭发射报价为7000万美元，中国的长征三号乙运载火箭发射报价达6000万美元[1]。这些大、中型火箭的发射周期比较长，动辄数十天或数月，且发射费用仍然很高。即使一些新研制的小型火箭，如美国的飞马座小型运载火箭，每次的发射费用也高达2000万美元，难以满足小卫星的发射需求[2]。尽管中国的发射成本较低，但由于美国针对中国实施卫星发射限制禁令，导致国际卫星发射市场份额受到严重影响，而美、俄、欧目前控制了绝大部分国际卫星发射市场。

据美国航天基金会2015年发布的统计数据，在2010年至2014年间，全球航天业保持每年6%到7%的稳定增长，其经济总量达到3300亿美元，其中约76%来自商业航天领域[3]。近期，美国卫星产业协会也发布了2016年卫星产业年度报告，指出2015年全球卫星产业产值达到2083亿美元，同比增长3% [4]。欧洲咨询公司最新发布的《小卫星市场预测》报告显示，航天领域和整个航天生态系统正在发生变革，未来10年预计将发射3600颗小卫星，这些卫星的制造和发射市场预计达到220亿美元，比过去10年增长76% [4]。由此可见，尽管全球经济发展低迷，航天业正成为带动全球航天经济发展的引擎。但是，低成本运载火箭仍是航天业发展的瓶颈。

为了降低运载火箭发射成本，打破ULA公司的发射垄断，近十年来，美国通过制定一系列政策法规、商业合同以及人员和技术转让等方式，率先大力鼓励商业航天发展[5]。在美国NASA的支持下，近年来SpaceX公司快速崛起，成为低成本商业航天发射的有力竞争者[1]。此后，欧洲、中国、日本等也积极推动商业航天的发展。近年来，很多航天机构和商业公司大力研究低成本运载火箭[6]，基于可重复使用、新材料、标准化设计、人工智能等技术以及已有成熟技术的集成创新，提出了各种不同的解决方案，有效地推动了航天业的发展。

2. 低成本运载火箭发展概况

自上世纪 60 年代以来,美国一直希望得到廉价的、反应迅速的、可靠的小型运载火箭,以满足其战时快速发射小卫星的需求。一方面,随着小卫星技术的快速发展和应用,美国开始大力发展小型低成本运载火箭[1] [7];另一方面,为了有效降低发射成本,美国积极扶持商业航天公司,以 SpaceX 公司、蓝色起源公司等为代表的一批商业航天公司,正在努力推动低成本运载火箭的发展[8]。

(1) 初期阶段

在 1960~1994 年期间,美国一直采用全固体推进小型运载火箭“侦察兵”发射小型卫星,其“侦察兵-G”型运载火箭能将 210 kg 卫星送入 LEO,价格为 1330 万美元。上世纪 80 年代,随着小卫星技术的快速发展,美国又研制了“飞马座”、“人牛怪”小型运载火箭,发射小卫星需要 2000 万美元甚至更多,因而仍没有解决缺乏廉价小型运载火箭的问题。例如,美国空军的 2 颗小卫星——PICOsat 和 XSS-10 由于缺少发射机会被推迟了数年,“21 世纪技术卫星”星座发射计划由于经费问题被取消,其他与小卫星有关的许多建议和商业投资(如 KitComm 公司)都被取消,新罕布什尔大学的 CATSAT 以及学生研制的星光-4.5 卫星被取消,NASA 的大学级探索计划大部分由于发射费用问题而延缓或推迟,从而严重阻碍了小卫星的发展和应用[2]。

(2) 发展阶段

至 2010 年前,美国继续发展低成本运载火箭,提出了一些新的设计方案,包括 Microcosm 公司的 Sprite 运载火箭、SpaceDev 公司的 Streaker 运载火箭、航天发射公司(SLC)的“快速反应小运载量可支付发射”(RASCAL)计划,以及俄罗斯的“第聂伯号”低成本运载火箭等。表 1 给出了此阶段国外主要低成本

Table 1. Some abroad low cost launch vehicles in middle stage

表 1. 发展阶段国外主要低成本运载火箭

火箭型号	研制机构	主要技术	运载能力/轨道类型	估计成本(万美元)
飞马座	美国 ATK 公司	小型三级固体火箭,采用 B52 轰炸机空中发射。改进型为飞马座-XL 采用大型 L-1011 飞机发射。	443 kg/LEO	900 万
金牛座	美国 ATK 公司	四级火箭,上面三级与飞马座相同,但是没有稳定翼,采用固体燃料。改进型金牛座-XL 第一级使用液体燃料。	1400 kg/LEO	2000
Sprite	美国 Microcosm 公司	液体火箭,采用模块化设计(由 7 个相同的推进舱组成),液氧和煤油发动机采用压力供给(不再使用昂贵的涡流泵)。	220 kg/LEO	250
航天运载火箭	美国 AFRL 公司	3 级固体小型运载火箭,需研制新型的高性能发动机,可从 F-15E 飞机上发射。	100 kg/LEO	500
Streaker	美国 SpaceDev 公司	使用固液混合火箭发动机。	315 kg/LEO	1000
RASCAL	美国航天发射公司(SLC)	使用可重复使用的超音速飞行器 Mach-3 作为第 1 级,上面级为一次性火箭。	110 kg/LEO	120
小型运载火箭	美国瑟伯空间系统公司	液体火箭,使用泵供给系统,带有合成贮箱,以水作为氧化剂。	200 kg/LEO	230
第聂伯	俄罗斯	由 SS-18 洲际弹道导弹改造,三级液体火箭,采用车载发射筒弹射。2000~2009 年间发射了 50 kg 级别内国际小卫星总数的 35% 以上。	4500 kg/LEO	2500 万
呼啸号	俄罗斯	改自 SS-19 洲际弹道导弹,三级液体火箭,使用 Briz-KM 上面级,地面塔架发射。	2140 kg/LEO	1500 万
质子号	俄罗斯	液体推进剂,不同型号采用三级或四级构型,商业发射 40 多次。	22,000 kg/LEO 6000 kg/GTO	7000 万
阿里安 5	欧洲	模块化设计,可配置成多个型号。一级芯级为低温推挤系统,捆绑两枚大型固体助推器,二级级采用可储存双组元推进剂。	6900 kg~10500 kg/GTO	12,000 万 ~15,500 万
PSLV	印度	四级固体、液体混合火箭,地面发射。	3250 kg/LEO 1420 kg/GTO	2500 万

本运载火箭的发展情况。

(3) 最新发展

近几年来,各国政府开始大力支持商业航天的发展,特别是美国为了打破ULA的发射垄断和高昂的发射费用,支持SpaceX、Blue Origin等一批商业公司加入航天商业竞争。未来航天业市场规模巨大,虽然目前仅有少数运载火箭已成功实施多次发射,但是很多机构开始提出各种低成本发射方案,一些已经进行了发动机和关键电气系统的飞行试验,而另一些还处于方案和设计论证阶段[9][10][11][12]。特别是,国外已有二十多家机构开始研制各种低成本小型运载器[7]。表2列出了国外低成本运载火箭最新发

Table 2. Recent development of abroad low cost launch vehicles

表 2. 国外低成本运载火箭最新发展

火箭型号	研制机构	主要技术	运载能力/轨道类型	估计成本(美元)
猎鹰-9	美国 SpaceX 公司	二级液体大型火箭,一子级可回收,采用垂直反推火箭和支架着陆,已成功发射数次。	13,150 kg/LEO 4850 kg/GTO	5700 万
织女星	欧洲	小型火箭,四级构型(3个固体级+1个液体上面级),大量使用新技术,包括碳纤维增强复合材料缠绕壳体、低密度隔热橡胶、新型固体推进剂、可消耗壳体的点火器等	1500 kg/LEO	4100 万
艾普斯龙	日本	小型火箭,三级全固体火箭,液体末修级,采用新型固体火箭推进剂、“移动发射控制”方式和最新 IT 技术。	1200 kg/LEO	5200 万
安加拉	俄罗斯联合火箭集团	模块化设计,不同型号分别为二级或三级构型,液氧煤油发动机。	24,000 kg/GTO	8000 万
多用途纳火箭系统	美国 Dynetic 公司	基于现有导弹技术的低成本、多构型的快速响应型简易火箭,从收到发射指令到完成发射准备仅需 24 小时。2010 年 7 月成功进行了发动机点火试验。	10 kg/LEO	100 万
SPARK(Super Strypi)	美国夏威夷大学、桑迪亚国家实验室、航空捧起	美国空军 ORS 办公室投资新型小型运载火箭,三级固体结构,轨道器发射起飞,能够满足 ORS 提出的 24 小时内按需发射的要求,可在简单水泥平台上完成发射。2015 年首飞并没有成功。2013 年 3 月获得美陆军合同,使用商业级别的材料,能以极低的成本从任何水泥路上将纳卫星送入精确轨道,从准备到发射就绪需要 24 小时。	250 Kg/LEO	
SWORDS	美国量子公司		25 kg/LEO	100 万
Electron	美国/新西兰火箭实验室	与 SpaceX 公司的猎鹰-9 类似,一二级采用同一型的“卢瑟福”发动机,一级配 9 台发动机,二级配一台发动机。2016 年下半年试飞。	150 kg/LEO	490 万
Firefly α	美国 Firefly Space System 公司	一子级采用塞式发动机 FRE-1,发动机效率高,预期 2017 年陆上发射试验。	400 kg/LEO 200 kg/SSO	900 万
Launcher ONE	美国 Virgin Galaxy 公司	采用波音 747-400 通用民航飞机发射,一子级采用牛顿三号发动机(推力 330 kN),二子级采用牛顿四号(推力约 22kN),2015 年 9 月进行了牛顿三号发动机点火试验。	220 kg/SSO	1000 万
NEPTUNE	美国 Interorbital System 公司	模块化运载火箭,继承了早期德国 OTRAG 火箭方案,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,可实现 15kg-1000kg 的有效载荷发射。2014 年已完成通用模块的飞行试验。	1000 kg/SSO	1800 万
GO2	美国 Generation Orbit 公司	小型运载火箭,得到 NASA 和 DARPA 的资助,可用于开展高超声速飞行试验。	40 kg/LEO	200 万
Haas 2C	美国 ARCA 航天公司	小型运载火箭,采用 ARCA 的“执行官”发动机,燃烧室和喷管采用复合材料制造,液氧/煤油发动机,推力 220kN,地面发射。	400 kg/LEO	
Vector	美国 Vector Space System	小型运载火箭,已完成发动机和机构等部件的研制,一子级拟采用降落伞和无人机方式回收。	50 kg/LEO	300 万
可重复使用火箭 RLV	印度空间研究局	配备一台超燃冲压发动机,5 台半低温发动机,2016 年 5 月试验了可重复使用火箭的超燃冲压发动机,希望未来可重复使用 10 次来降低成本,单位载荷的发射成本从 5000 美/千克元将至 2000 美元/千克。	10,000~20,000 kg/LEO	5000 万 ~1 亿
Aniva	俄罗斯 Lin Industrial	设计了四型运载火箭,包括三型一次性和一型可重复使用的方案。采用液氧/甲烷发动机。	90kg~700kg /LEO	360 万 ~1000 万
SagittariusSpace Arrow	西班牙 Celestia Aerospace 公司	采用米格 25 飞机空中发射,预计 2016 年末首次试飞。	4-16 颗纳卫星 /LEO	25 万

展的基本情况。我国新一代运载火箭也发展迅速,小型运载火箭快舟、CZ-6、CZ-11 以及中型运载火箭 CZ-7 和大型运载火箭 CZ-5 已发射成功,适应多种不同的发射需求。

3. 运载火箭成本与性能估计

3.1. 运载火箭组成与成本估计

运载火箭主要由箭体结构、发动机、推进剂和气体、伺服机构及阀门管线、控制与遥测等电子电气设备、火工品及其他等组成。一般地,火箭的干质量(除了推进剂和气体之外的质量)越小、发动机比冲越高,运载火箭运载效率越高。推进剂一般占火箭总质量的 90%以上,但是总成本较低;箭体结构、发动机、电子电器设备等质量综合虽小,但是总成本很高。

图 1 给出了美国 ULA 的“宇宙神 401”运载火箭各组成部分成本与质量示意图[13]。第一子级发动机占据一子级总成本的 50%以上,一子级箭体结构占据一子级总成本的 25%左右,虽然一子级推进剂成本不超过一子级总成本的 1%,但一子级推进剂质量占一子级总质量的 90%以上;第二子级的火箭结构、发动机、电子电气设备、伺服机构等成本占二子级总成本的 85%以上,而二子级推进剂依然占据二子级总质量的绝大部分。此外,一、二子级的箭体结构、发动机、电子电器设备等占据各子级总成本的比例也不同。因此,低成本火箭设计需要重点围绕高成本的系统和部件进行新型设计、高效制造或回收利用。

3.2. 影响运载火箭成本的主要因素

以猎鹰 9 运载火箭发射任务为例,有学者估计运载火箭成本约占发射任务总成本的 53%,发射测控

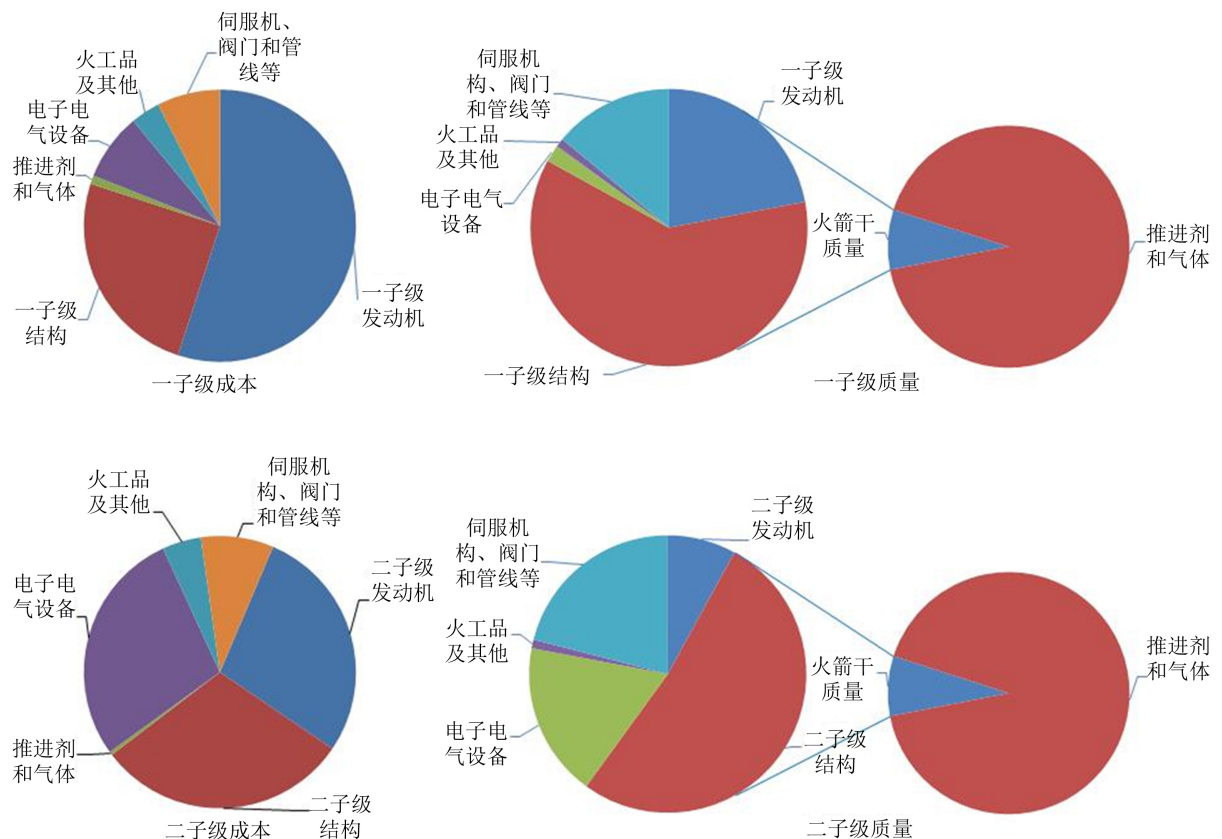


Figure 1. Atlas launch vehicle cost and mass by major element
图 1. 宇宙神运载火箭各组成部分成本与质量示意图

费约 10%，保险费 8%，利润约 24%，其他费用约 5% [15]。因此，运载火箭成本是主要部分，也直接影响了发射测控、保险等相关费用。运载火箭作为一个典型高科技产品，影响其成本的因素很多，包括设计、材料、发动机、电气系统、推进剂、智能化、制造、管理、重复使用等多个方面[6] [14]-[19]，表 3 给出了主要因素及简要解释。

3.3. 可重复使用运载火箭效费估计

既然一次性运载火箭成本高昂，数十年来国际航天界一直追求研制可重复使用运载器。美国航天飞机是一种垂直起飞、水平返回的可重复使用运载器，预期每次发射成本约为 3000 万美元，是当时火箭发射价格的 1/3 甚至更低。但是，由于航天飞机返回地面后需要进行大规模的维修，导致实际上每次总发射经费高达 4~5 亿美元[14]，再加上几次重大的载人航天事故，美国 2011 年被迫终止了航天飞机的飞行任务。

但是，随着航天技术的发展，在商业航天巨大市场利益的推动下，国际航天界一方面采用各种新技术降低一次性运载火箭的成本，另一方面继续探索发展可重复使用运载火箭。美国 SpaceX 公司通过技术创新、技术集成、优化设计和生产过程等方式，即降低了一次性火箭的成本，又成功实现了一子级火箭的回收，将可进一步大幅降低火箭成本。既然火箭需要回收并重复使用以降低成本，就需要为火箭增加回收辅助结构和返回所需推进剂等，从而会导致运载火箭运载能力降低。

猎鹰 9 火箭一子级垂直返回回收有两种方式，一种是“返回原场”(Return to the launch site, RTLS)回收方式，另一种是“不返回原场”(Not return to the launch site, NRTLs)回收方式。“返回原场”回收方式指火箭子级分离后，依靠火箭发动机对其进行减速转弯，最终在原发射场垂直着陆，实现子级无损回收；“不返回原场”回收方式指火箭子级分离后，沿惯性弹道进行飞行，在达到一定高度后，开启火箭主发动机进行减速，最终实现子级定点垂直着陆，“不返回原场”方式不对回收场位置进行严格限制，火箭子级在回收飞行段全程都按零攻角飞行。高朝辉等通过仿真 FALCON 9V1.1 运载火箭执行 200 km 近地圆轨道发射任务，针对这两种返回方式开展了运载能力损失研究[20]，主要结果如表 4 所示。

仿真结果表明，猎鹰 9V1.1 运载火箭要实现一子级垂直返回原场回收，需要预留 15.29%~17.11%的

Table 3. Major factors related to launch vehicles' cost

表 3. 运载火箭成本主要影响因素

影响因素	简要解释
结构设计	先进的系统设计可简化系统结构的复杂性，提高工作可靠性，采用模块化、标准化设计方式可显著降低成本。
先进材料	采用先进复合材料可提高箭体强度、降低箭体固有质量，运载能力的提升意味着降低了成本。
发动机	发动机成本约占运载火箭总成本 40%，而且研制发动机周期长，技术门槛高，需要通过继承、简化、创新等方式降低成本。
电气系统	电气系统也占运载火箭相当一部分成本，且目前还难以回收利用，采用商业化器件或系统可进一步降低成本。
推进剂	推进剂在火箭成本中所占比重不大，但采用新型液氧甲烷推进剂、新型固体推进剂等能大幅降低工艺要求和燃料存储、维护等多项费用。
人工智能	采用人工智能技术，提高火箭的装配、自检和信息自动化处理能力，大幅节约装配、测试和维护等成本。
制造技术	采用数字化设计、3D 打印、流水线生产、全球采购等方式，可显著降低生产制造成本。
管理模式	实行商业化管理，通过集成化、节约化、技术创新、自主研发等方式降低成本。
重复使用	通过部分贵重部件或子级组件的回收、维修和重复使用，大幅降低火箭成本。
人力成本	通过优化人员组成结构和知识技能，精简人员，降低人力成本。
批量生产	通过批量化生产均摊运载火箭的研发成本，进一步降低单箭成本。

Table 4. The comparison of fuel consumption and launch capacity for the first stage flying back
表 4. 一子级返回推进剂用量及运载能力比较

主要参数	不考虑返回	抬头转弯返回原场		低头转弯返回原场		不返回原场	
		仿真结果	损失量	仿真结果	损失量	仿真结果	损失量
运载能力	12,490.0 kg	5920.0 kg	52.60%	5400.0kg	56.76%	8880.0 kg	28.90%
上升段推进剂用量	315,875.0 kg	267,577.4%	15.29%	261,818.8%	17.11%	21,548.12 kg	6.82%

推进剂量，运载能力损失 52.60%~56.76%。相较而言，一子级不返回原场回收时，仅需要预留 6.82% 的推进剂量，运载能力损失为 28.90%，具有较明显的优势。为了弥补运载能力的损失，SpaceX 公司在火箭设计上采用了推进剂交叉补偿技术、推进剂总量增加 30% 等有效措施。

SpaceX 公司宣称[21]，猎鹰 9 火箭一子级成本占整个火箭成本的 80% 左右，而推进剂成本不到 100 万美元，一子级回收后维修成本预计 300 万美元。如果火箭一子级回收并重复利用，除去附加维修费等，回收火箭再次发射成本可降低 30%，也就是说，回收火箭的发射成本可进一步降至 4000 万美元左右，这是 SpaceX 赢得大量发射合同的最大优势，也是国际上同类型火箭难以企及的目标。

据此推算，除去发射、测控等费用以及发射利润，猎鹰 9 火箭生产成本约为 2500 万美元。一子级回收利用后，再次发射可节约成本 1700 万美元。如果一子级重复使用 20 次，可节约 3.4 亿美元。如果二子级也采取回收技术，那么发射成本会进一步降低。SpaceX 公司的未来目标是将发射价格降低到 500~700 万美元，是现有火箭价格的 1/8~1/10。但是，这仍有很多难题需要解决。

4. 低成本运载火箭发展建议

随着技术的不断发展，无论是在商业航天领域还是在军事航天领域，大力发展低成本运载火箭已成为航天业界共识。目前，我国也在积极开展低成本运载火箭的研究。通过总结国外研究经验教训，给出如下发展建议。

(1) 引入航天竞争机制

过去航天业主要由国家统一管理，由于各国政策管制和航天高科技门槛的原因，大型航天企业缺乏竞争，运行机制僵化，官僚主义严重，这些都导致研制和发射费用虚高，甚至出现 ULA 那样屡次大幅度涨价的闹剧。SpaceX 公司在低成本运载火箭上取得的巨大成功，很大程度上归功于 NASA 的技术转让、政策和资金支持以及良好的商业运作模式[14]。因此，深入开展军民融合，加强商业航天扶持，打破垄断，是降低航天发射成本的主要途径之一。

(2) 加强创新与集成

日本 Epsilon 火箭采用智能监测技术，大幅减化了操作，降低了发射成本；一些新型锂铝合金、碳纤维材料等新型材料的使用，提高了火箭结构强度的同时降低了结构质量，提高了运载能力；采用 3D 打印技术制造火箭部件，大大提高了生产加工效率。此外，“猎鹰 9”一级火箭的回收技术以着陆支架、姿态控制技术、推进剂交叉供应和高效发动机为亮点。这些技术单项看来与一些航天大国的现有技术相比并没先进到哪儿去，但将它们组合起来的系统却非常优异。这意味着不论火箭技术、卫星技术，还是探测器外星着陆技术，都可以集成在一起，系统更优化、指标更先进，这体现出火箭系统设计的出色能力。因此，加强创新与集成是降低航天发射成本的又一主要途径。

(3) 加强新型发动机研制

火箭发动机是火箭最重要的组成部分，对运载效率起到决定性作用，其成本往往占据火箭总成本一半以上。为降低发射成本，一方面需要降低发动机设计复杂性，提高可靠性和可重复使用性；另一方面

加强低成本、变推力的甲烷/液氧发动机研制，提高火箭运载效率。无论对于国家大型企业或商业公司，没有自己过硬的发动机技术，发展将会大大受限。由于火箭发动机研制技术要求高，为规避研制风险，很多国外商业航天公司一般先研制门槛较低的小型火箭发动机，待试验成功后再研制大型发动机。

(4) 发展可重复使用火箭

美国数十年来一直发展低成本运载火箭，尽管经过不懈努力，但一次性运载火箭的成本难以降低，高昂的发射费用阻碍了航天业的快速发展。随着 Blue Origin、SpaceX 等公司运载火箭回收试验的成功，火箭可回收重复使用技术已成为未来低成本火箭发展趋势。随着冲压发动机的逐步成熟，采用航空发动机、冲压发动机和火箭发动机的可重复使用组合动力飞行器将成为未来低成本天地运输的主要方式。

(5) 转变传统设计理念

传统的航天界积累了丰富的经验和教训，但也往往导致固步自封，以确保安全、可靠发射为由，对新设计、新技术不够积极。借鉴 Space X 公司成功经验，需要转变传统设计理念，包括采用火箭重复使用、采用商业级产品、缩短工业链、应用商业化管理模式等，以及加强验证型火箭研制，通过增加火箭规模实现运载能力要求，而非象传统设计方式那样过分追求有效载荷系数等。

基金项目

部委级资助项目。

参考文献 (References)

- [1] Musk, E. (2011) Why The US Can Beat China: The Fact About SpaceX Costs. <http://www.spacex.com>
- [2] 夏光. 美国小卫星运载火箭回顾与展望[J]. 国际太空, 2004(10): 14-19.
- [3] 栾海. 火箭回收“前赴后继”为哪般[EB/OL]. http://news.xinhuanet.com/2016-01/18/c_1117807058.htm, 2016-1-18.
- [4] 佚名. 未来 10 年将发射 3600 颗小卫星，它们乘坐什么样火箭上天最好? [EB/OL]. <http://www.v0086.cc/html/548463.html>, 2016-7-19.
- [5] 栾海, 林小春. SpaceX 猎鹰火箭海上回收，商业航天或成经济新增长点? [EB/OL]. http://tech.ifeng.com/a/20160409/41592242_0.shtml, 2016-4-9.
- [6] 刘党辉, 尹云霞, 辛朝军, 等. 低成本运载火箭总体设计研究[J]. 国际航空航天科学, 2017, 5(1): 1-11.
- [7] 木易. 小型运载火箭——新兴商业航天发射公司的敲门砖[EB/OL]. <http://www.wtoutiao.com/p/2cbskyA.html>, 2016-5-10.
- [8] 李分言. 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]. <http://money.163.com/15/1229/05/BBVRQIUA00253B0H.html>, 2015-12-29.
- [9] King, P.J., Weldon, A., Bradford, A., et al. (2016) Firefly Alpha-A Mass Produced Small Launch Vehicle for the New Space Era. 30th Annual AIAA/USU Conference on small Satellites, 6-11 August 2016.
- [10] Charania, A.C., Isakowitz, S., Matsumori, B., et al. (2016) LauncherOne: Virgin Galactic's Dedicated Launch for Small Satellites. 30th Annual AIAA/USU Conference on small Satellites, 6-11 August 2016.
- [11] Samuel, J., McCraw, J., Welsh, S. and Marsh, J.K. (2016) Lessons Learned from the ORS-4 Mission and First Flight of the Super Strypi Launch System. 30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 6-11 August 2016.
- [12] 佚名. 动力电池带火箭升天已成可能[EB/OL]. <http://news.bjx.com.cn/html/20150417/609102.shtml>, 2015-4-17.
- [13] Mohamed, M.R., McNeil, F., Stephen, C., Hughes, J., et al. (2015) Launch Vehicle Recovery and Reuse. AIAA SPACE 2015 Conferences and Exposition, Pasadena, 31 August-2 September 2015, 1-10.
- [14] 佚名. SpaceX 公司发射猎鹰 9 火箭并回收一子级启示录[N]. 中国航天报, 2016-1-4.
- [15] 胡炜. SpaceX, 一时传奇 or 一世传奇[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015: 10.
- [16] 郑永春. SpaceX 给航天界的启示——写在猎鹰九号火箭成功回收之际[EB/OL]. <http://tech.163.com/15/1223/17/BBHNBJS800094O5H.html>, 2015-12-23.
- [17] 何东晓. 先进复合材料在航空航天的应用综述[J]. 高科技纤维与应用, 2006, 31(2): 9-11.

-
- [18] 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): 1-5.
- [19] 冯韶伟, 马忠辉, 吴义田, 等. 国外运载火箭可重复使用关键技术综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2014(5): 82-86.
- [20] 高朝辉, 张普卓, 刘宇, 等. 垂直返回重复使用运载火箭技术分析[J]. 宇航学报, 2016, 37(2): 145-152.
- [21] 佚名. 回收火箭能省多少成本? SpaceX 称每次降 30% [EB/OL].
<http://tech.qq.com/a/20160312/007772.htm>, 2016-3-12.

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