

关于发展商业小火箭的几点思考

刘佳佳, 严宝峰, 毕永涛, 布向伟, 宋永生

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 近年来, 小卫星已成为发展最迅猛、最具活力的商业航天领域, 受到国际社会的广泛重视, 其发射服务也成为商业航天创投的热点。全面梳理国外商业小火箭发展动态, 在总结商业小火箭发展技术特点的基础上, 通过分析和思考当前商业小火箭发展中面临的问题, 如火箭能力与任务需求的匹配性、研发周期与方案设计的匹配性等, 给出我国商业小火箭发展的建议, 以期为其更好的发展提供新的思路。

关键词: 商业; 小火箭; 发展思考

中图分类号: V421.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2018) 05-0065-06

Considerations on the Development of Small Commercial Launch Vehicles

LIU Jiajia, YAN Baofeng, BI Yongtao, BU Xiangwei, SONG Yongsheng

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 10076, China)

Abstract: Commercial launch service has attracted abroad international attentions and drawn significant interests of commercial aeronautic investment in recent years, owing to the rapid and vigorous growth of small satellite market. Based on the summarization of the recent progresses of international small commercial launch vehicles, controversy problems are discussed. By considering their technical features and analyzing the problems encountered during developments, such as matching launch ability with mission payloads, optimizing system design with development process, suggestions for domestic small commercial launch vehicles are proposed, to provide initiating ideas for promoting further developments.

Key words: Commercial; Small launch vehicles; Development considerations

0 引言

2006—2015年的10年间, 全球共发射了780颗微小卫星, 市场总额达125亿美元; 而2016—2025年, 全球将发射约3600颗微小卫星, 其中2/3为小卫星星座, 市场总额将达220亿美元。为抢占轨道、频段及牌照资源, 国内外商业卫星公司及星座发射计划层出不穷, 如OneWeb计划通过小卫星提供覆

盖全球的高速互联网服务, SpaceX公司也推出了万颗级小卫星星座计划。国内方面, 近10年国家从政策上逐步放开了卫星制造、应用权限, 民营企业进入航天领域热情高涨, 国内商业卫星公司组网服务计划纷纷出台, 微小卫星研制部门激增, 国内商业小卫星发射需求逐年增长^[1]。

在小卫星蓬勃发展的同时, 国际上也掀起一股商业小火箭发展的热潮^[2], 商业小火箭是以执行

收稿日期: 2017-08-03; 修订日期: 2017-12-15

基金项目: 航天系统部“十三五”专用技术(30506010104)

作者简介: 刘佳佳(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为运载器总体设计。E-mail: 67994573@qq.com

商业发射任务为目标, 运载能力 1000kg 及以下的运载火箭。从以米诺陶、艾普西隆、CZ-11 等为代表的主流运载工具, 到部分初创公司推出的概念型商业小火箭, 均瞄准广阔的商业发射市场, 力求为新时代背景下的航天产业提供更好的服务, 然而在发展的不断探索中也存在一些争议性问题。本文旨在通过分析和思考当前商业小火箭发展中面临的问题, 给出我国商业小火箭发展的建议, 为其更好的发展提供新的思路。

1 商业小火箭的技术特点

1.1 国外商业小火箭的发展

随着小卫星市场的蓬勃发展及科技的不断进步, 商业小火箭市场迎来了许多投资者和参与者。从国际范围看, 众多新兴公司或具有一定经济基础的跨界企业都瞄准了小卫星发射市场, 针对低

轨 1000kg 以下的运载能力已推出或即将推出各类商业小型运载火箭。据统计, 全球正在开展商业小火箭研制的公司接近 20 家, 其中部分火箭已经完成了首飞或多次发射; 部分火箭完成了设计与生产, 即将进行飞行试验; 还有部分公司在探空火箭或运载火箭相关技术基础上, 已经完成了某些关键部件的研制; 另外还有一些公司暂时只停留在方案设计阶段^[3]。

目前已经实现发射的国际商业小火箭包括美国的法尔肯(猎鹰)-1、金牛座、米诺陶-1、飞马座 XL、超级斯迪比、电子号, 俄罗斯的起跑号, 日本的艾普西隆、SS-520-4 等^[4]; 尚未进行飞行试验的商业小火箭包括美国的运载器一号、阿尔法、空中发射辅助航天运输系统^[5]、前进发射者, 西班牙的蓝星、亚里安 1、亚里安 2 等。国外小火箭的基本情况如表 1 和图 1 所示。

表 1 国外主要商业小型火箭基本情况表
Tab. 1 Foreign major small commercial launch vehicles

序号	火箭	发展动态	运载能力	价格		发射方式	服务商
				万美元	万美元/kg		
1	法尔肯(猎鹰)-1	2008年成功	200kg/500kmSSO	670	3.35	发射场	SpaceX
2	金牛座	1994年首飞	800kg/700kmSSO	1800	2.25	发射场	Orbital ATK
3	米诺陶-1	2000年首飞	310kg/700kmSSO	1250 (1999)	4	发射场	Orbital ATK
4	飞马座 XL	1990年首飞	230kg/700kmSSO	5600 (2015)	24.3	空射	Orbital ATK
5	超级斯迪比	2015年首飞	300kg/LEO	—	—	滑轨发射	美国桑迪亚国家实验室
6	电子号	2017年首飞	150kg/500kmSSO	490	3.3	发射场	Rocket Lab
7	起跑号-1	1993年首飞	210kg/700kmSSO	900 (1999)	4.3	发射场	ZAO PuskovieUslugi
8	艾普西隆	2013年首飞	450kg/500kmSSO	3800 (2013)	8.4	发射场	JAXA
9	SS-520-4	2017年首飞失败	4kg/LEO	—	—	滑轨发射	JAXA
10	运载器一号	在研	225kg/LEO 102kg/SSO	1000	4.4/LEO 9.8/SSO	空射	Virgin Galactic LLC
11	阿尔法	在研	400kg	900	—	发射场	Firefly
12	空中发射辅助航天运输	在研	45kg/LEO	100	2.22	空射	DARPAR/Boein
13	前进发射者	在研	50kg/SSO	—	—	空射	轨道世代公司
14	蓝星	在研	150kg	400	2.67	空射	Zero2Infinity
15	亚里安 1、2	在研	150kg	—	—	发射场	PLD



图 1 国外的小型商业火箭（电子号、艾普西隆、超级斯迪比）

Fig. 1 Foreign small commercial launch vehicles (Electron, Epsilon, Super strypi)

1.2 国外小火箭商业发展的技术途径

为了向卫星运营商提供诸多特色服务，迅速占领市场，国外的研制商均结合自身的技术优势，打造具有明显自身技术特点的低成本商业小火箭。商业小火箭最关键的是要性价比高，国外小火箭商业价格的目标正在从 3 万~5 万美元/kg 降至 1 万美元/kg。实现高性价比离不开合理的技术途径。目前，国外小火箭商业化及低成本发展的技术途径主要有以下两个方面：

(1) 注重通用化和模块化设计

电子号火箭各级电气系统均采用了模块化硬件结构，采用现场可编程门阵列及实时系统技术增强运载系统适应性，只需对其编程就可以完成不同的功能定制，可以大幅减少硬件改动，缩短生产制造周期。在达到较为理想的响应速度和高可靠性的同时，电气系统质量仅为 8.6kg。动力系统采用通用化、模块化的设计理念，火箭共采用 10 台卢瑟福液氧/煤油发动机，其中一级采用的 9 台卢瑟福发动机完全相同，二级采用真空型卢瑟福发动机，换装大扩张比喷管^[5]，这与采用多台同等状态发动机并联的 SpaceX 不谋而合：均利用自身成熟的技术优势，将效能发挥到最大，降低成本。

此外，日本的艾普西隆火箭也对重要部件进行通用化设计。火箭一级使用了用于 H-II A 和 H-II B 运载火箭固体助推的 SRB-A 发动机产品，二、三级使用了经历过 M-V 运载火箭飞行的、成熟的发动机产品。另外，目前日本正在研发用于替代 H-II A/H-II B 火箭的 H-III，计划将 H-III 火箭固体助推器 SRB-3 用于未来的艾普西隆构型的一子级，有助于通过通用化降低成本，进一步提升竞

争力。火箭发射使用的是经过改造的 M-V 运载火箭发射装置。可以看出：通用化、模块化是降低火箭成本、提高可靠性的有效途径，同时也可以加快火箭的研制进度，缩减研制成本等^[6]。

(2) 大胆使用新技术、新材料

艾普西隆火箭在发射控制方面进行了多项创新，具有高度智能的自主检测系统及发射控制系统。箭上计算机可在射前对箭上各系统的状态进行自主监控、故障诊断，并实施故障隔离及恢复，甚至包括箭上点火系统的检查。在发射控制过程中，仅需要配备便携式电脑的少量操作人员，通过因特网，可以在世界的任何一个地方利用一台便携式计算机方便地检查和控制火箭发射，未来发射场可不再设置发射控制系统。

电子号火箭所使用的卢瑟福发动机，主要部件均采用 3D 打印制造，每台发动机的再生冷却燃烧室、喷注器、泵和主推进剂阀门等最快可在 24h 内完成打印，便于发动机低成本、快速和批量制造；火箭整流罩采用碳纤维复合材料，总质量只有 30kg，新技术、新材料的大胆使用带来了实实在在的效益（图 2）。高度智能的自主检测系统及发射控制系统的利用提升了火箭的快速响应能力，大大缩短火箭射前准备时间；碳纤维整流罩的使用提高了运载效率；3D 打印的规模化应用以及简化测发控流程等显著降低了发射成本。



图 2 电子号小火箭的单台发动机和复合材料整流罩
Fig. 2 The single propulsion and composite fairing of Electron small launch vehicles

1.3 小结

目前，国外主要低成本商业小火箭的研制大多秉承简洁、高效、不拘一格的理念，力求在设计、生产、测控、发射准备等各个环节降低发射服务成本，火箭方案针对性较强，发射方式多种多样，包括地基发射场发射、机载发射、气球类浮空器悬吊投放发射、滑轨倾斜发射等，能够向卫星运营商提供专享发射服务。火箭的技术方案

也具有诸多创新亮点,包括火箭发射准备时间短、发射频率高、快速响应能力强、可以自行安排发射时间、优化发射轨道,卫星设计拥有更多的自主权、发射进度风险小,可提供更为灵活和经济的发射方式,使其不再受到搭载发射的各种限制等,逐渐在国际商业火箭市场展现出强劲的竞争力。

此外,商业小火箭通过提高产品化率、批量生产、简化发射、测控支持等,能够有效降低发射成本,适合批量发射小卫星一类有效载荷,进而推动小卫星的成规模应用,促进卫星及地面应用相关技术的发展。可提供“太空班车”甚至是“招手即来”的 Taxi 服务,卫星可随时“上车”发射,便于灵活组网和补网,大大提高了卫星快速在轨服务能力,满足小卫星应用需求。

2 关于商业小火箭的几点思考

小卫星市场带动了国外各型商业小火箭的蓬勃发展,但是其发射及应用并非一帆风顺:美国超级斯迪比小型运载火箭首飞失败^[7],新西兰的电子号运载火箭首飞未能将有效载荷送入预定轨道^[8],日本 SS-520-4 小型火箭首飞失败^[9]。上述各型商业小火箭飞行失败也引发了关于商业小火箭发展的思考:商业小火箭所服务的商业航天,和军事航天、国家航天一样,可靠性、安全性是永恒的主题,商业小火箭更应该在性能、可靠性、安全性、技术成熟度、成本和市场需求之间找出一个最佳平衡。

2.1 火箭能力与任务需求的匹配性

综合市场需求,小卫星星座的发射将是未来商业小火箭的主流业务(也可作为新技术演示验证平台)。从降低发射成本的角度,在开展商业小火箭的研制时,研发具有适度运载能力、具备一箭多星发射能力的小火箭是必要的,但是一味追求火箭的运载能力,或者在创立初期就提出“一步到位”的较大运载能力指标,将会使研发方偏离一型商用火箭的既定目标,而在以目标为牵引的大背景下,不合理目标决策将会直接影响工程结果。运载火箭研制属较为复杂的系统工程,火箭能力越大,意味着火箭规模越大,大规模的火箭需要与之匹配的动力系统和良好的结构效率,同时需要一定规模的地面发射支持设备,上述因素都会导致商业火箭的研发成本和技术难度随规

模变化而增长。从能用、够用的角度,面向市场需求,明确适度的运载能力“小目标”,积累研发经验和市场经验,对商业小火箭的发展和运营至关重要。

2.2 研发周期与方案设计的匹配性

在商业小火箭领域,“一年完成方案设计,两年完成火箭生产,三年投入商业服务”的概念并不科学。纵观国内外小型运载火箭的发展,即便是继承了成熟的技术和产品,美国的米诺陶火箭也用了5年以上的时间来完成研制,更不用说一型全新研制的商业小火箭,从设计构型到动力系统实现,以及关键技术突破都需要过程和技术积累,特别是一款小型液体发动机的研发周期一般都在8年以上。尽管可以在传统火箭的研制流程基础上进行合并和优化,但是为了验证方案正确性、产品可靠性、系统匹配性的设计和试验类项目必须严格按照相关标准或规范开展。如果不遵循基本设计流程,盲目地缩短研发周期,那么将会在技术风险和产品质量上埋下隐患;因此需要考虑研发周期与方案设计的匹配性,合理地将研发目标分阶段实施,设立工程关键节点,分步骤地完成既定的研制计划。

2.3 借用产品与使用条件的匹配性

尽管目前市场上能够采购到较为成熟的部分小火箭配套产品,尤其是电气产品,如惯性器件、导航接收机等,但无法通过大量产品借用、组合的方式轻易组合成一款商业小火箭。因为借用产品尽管具有产品状态稳定、技术成熟、可靠性高等特点,但其继承和借用必须经过严格的技术适应性分析、风险评估,甚至补充试验,否则就会引入新的风险。主要原因有以下几个方面:一是使用剖面的变化,二是飞行环境的变化,三是综合匹配的变化。比如在某型火箭的研制中,先后对标借用产品的功能及性能参数要求,梳理了之前所开展的各类试验,进行闭环确认,同时针对各类地面使用环境和飞行环境开展复查、确认,闭环力学环境、热环境和地面使用环境等指标,在新的使用环境下某些技术指标设计裕度超出范围时,补充进行了存在使用剖面差异的地面试验。因此借用产品后需要充分考虑与使用环境的匹配性,进行大量的适应性分析与验证工作。

2.4 经济效益与风险管控的匹配性

航天发射为高风险行业,每一次发射对于小

卫星,尤其是小卫星的初创公司都是里程碑事件,必须在风险投入和效益中找到平衡。在短期内达到商业航天预期的收益和盈利,实现商业小火箭公司的理想目标并不容易。从新型商业小火箭不断开展飞行试验,到可重复使用运载器技术通过多次飞行试验取得不断突破,都在传递一个较为朴素的观点:商业航天运营不能急于产生效益,必须脚踏实地地按照航天系统工程的研制规律开展。商业小火箭的效益和火箭的可靠性、成熟度密切相关,哪怕一次发射任务的失败,对于商业小火箭的商业运营都是严重的打击。从当前的研制规律看,开展故障分析和制定有效的解决措施,不论是进度上还是经费上的投入都将大大超过预期的效益,如超级斯迪比、SS-520-4和电子号火箭首飞失败后,很长一段时间内都没有能够给出故障调查报告,更不用说之前预期产生的商业效益了。

3 国内商业小火箭生态圈发展展望

3.1 成熟可靠,确保商业发射成功率

运载火箭及其发射载荷价值较高,卫星公司后续的盈利和产业增长均基于其能够顺利发射、准确进入预定轨道;因此,发射成功率和技术成熟度是商业发射服务市场在选择运载工具时所考虑的首要因素。这就需要运载火箭研制单位在航天运载器领域具有深厚的技术基础、制造基础,具有完备的研制程序、质量管控体系,才能有效保证产品设计和制造质量。同时,在允许的范围内,应尽可能采用技术成熟度较高的产品,尤其是经过其他平台飞行的、且经分析和验证后可用于商业小火箭的产品。成熟可靠,永远是商业小火箭具有市场竞争力的根本。

3.2 立足通用,适应商业发射差异化需求

商业发射需求差异化较大,通用性设计决定了固体运载火箭商业发射市场的广度。因此商业小火箭必须使用灵活,以满足各类小卫星的发射需求,上述保障的核心在于立足通用接口设计。

1) 需具有标准化星箭接口。可根据卫星需求提供包带、点式连接、立方星释放机构、轻型包带等多种机械接口。

2) 需具有较好的多星发射适应能力,可提供多路不同类型的卫星解锁释放信号。

3) 火箭的弹道规划等软件设计可适应不同轨

道、不同有效载荷质量、不同发射平台等各类任务需求。

3.3 降低成本,推动商业航天平民化

发射成本是商业发射非常敏感的要素,随着技术进步及商业航天市场化发展,各商业火箭公司需不断创新、变革,通过技术手段降低发射成本,以推动商业航天平民化应用。一般来说,可采取以下措施:

1) 集成化、产品化、模块化设计,简化系统,从设计源头降成本。

2) 生产设施共用,成熟部件通用,通过规模化生产,降低火箭生产成本。

3) 简化发射场流程,减少发射场工作人员及保障设施,缩短发射准备时间,从而降低发射场操作时间、人力及保障成本。

4) 深化可靠性增长和质量管控工作,降低发射风险控制成本。

3.4 自主灵活,创造更多商业发射机会

目前,发射场和测控资源主要用来保障国家重大工程任务,国内商业发射机会并不能满足当前商业小卫星市场蓬勃发展的趋势。商业小火箭必须充分发挥自身特点,突破相关技术瓶颈,不断降低对现有发射场和测控体系的依赖,为小卫星商业发射创造更多机会。

1) 需要高度自主,降低保障条件要求,利于组网应用时连续高密度发射。通过预存储技术、自主转运和卫星环境自主保障技术等,降低发射场相关保障条件;弱化对发射工位的依赖,实现多发连续高密度发射。

2) 需要规模化生产,使用灵活。基于整箭存贮技术与高可靠性,商业小火箭可实现规模化生产、滚动备份,推动航天发射从定制模式走向“招手即来”的Taxi模式。

4 我国商业小火箭发展建议

商业航天应该是航天的心态,商业的手法;不应是商业的心态,航天的手法,商业小火箭的发展亦是如此。商业小火箭发射服务市场目前正在逐步纳入国家战略实施框架,需要在规范的框架内加以引导,避免重复建设、资源浪费^[10]。此外,国家经济社会发展总体战略和产业发展战略,是建立商业小火箭良性发展前景的基本保证,新型商业小火箭属战略性布局产业,投入巨大,对

可靠性和飞行安全性的要求与军事航天和国家航天相同,无论是直接支撑国民经济和社会发展,还是通过技术转移、二次应用服务于其他行业,都需要在一定框架下实施。

商业小火箭除了政策引导的必要性之外,系统设计和运营的协调性也必须在发展过程中予以足够的重视。小卫星的商业发射服务属系统工程,在发射场选址及建设、落区选择、测控方案设计等方面都需要在商业小火箭研制初期统筹考虑,融资、研发、承揽发射服务、开拓市场等也应多维度协调,才能实现与卫星产业的共进发展,打造我国商业小火箭的良性生态圈。

参考文献

- [1] 孙青,刘洁. 2015 年全球商业发射市场综述(上) [J]. 中国航天, 2016(6): 40-43.
- [2] 张振华,白明生,石泳,等. 国外商业航天的发展

- 及启示 [J]. 中国航天, 2015(11): 31-39.
- [3] 罗恒,赵峰,梁唐. 美国商业航天发展态势研究 [J]. 中国航天, 2017(4): 8-10.
- [4] 尼摩. 日本小火箭能分市场一杯羹 [N]. 中国航天报, 2016-8-27(2).
- [5] 刘琳,马保海. 国外空射运载火箭的发展及启示 [J]. 中国航天, 2016(9): 45-50.
- [6] 辛朝军,蔡远文,王韬,等. 日本 Epsilon 火箭发射成功的分析及启示 [J]. 装备学院学报, 2014, 25(3): 67-71.
- [7] 张雪松. 小卫星快速发射,八仙过海各显神通 [J]. 卫星与网络, 2017(7): 52-55.
- [8] 杨浩亮,刘立东,郭凤明. 国外新型商业小型运载火箭成本控制措施简析 [J]. 国际太空, 2017(11): 19-23.
- [9] 陈海鹏. 日本发射“电线杆火箭”志在商业航天? [N]. 中国航天报, 2017-2-11(1).
- [10] 郭健. 中国商业航天现状的思考与建议 [J]. 卫星与网络, 2017(3): 16-17.

引用格式: 刘佳佳,严宝峰,毕永涛,等. 关于发展商业小火箭的几点思考[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(5): 65-70.

Citation: Liu J J, Yan B F, Bi Y T, et al. Considerations on the development of small commercial launch vehicles [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(5): 65-70.

(上接第 64 页)

- [9] DDG 1000-first of the Zumwalt class total ship computing environment and software methodology (C. HAC. S & I R & D Brief. Syring. 04. 18. 06) [EB/OL]. [http://www. Raytheon Company us.](http://www.RaytheonCompany.us)

- [10] Alberts D S, Hayes R E. Power to the edge: command and control in the information age [M]. Washington, DC: CCRP Publications, 2003.

引用格式: 陈义平. 国外潜艇指控系统的发展趋势及启示[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(5): 57-64.

Citation: Chen Y P. Development trend and revelation of foreign submarine command and control system [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(5): 57-64.