

空中发射技术特点的量化分析

刘琳, 吕艳, 林崧

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 近几年, 随着小卫星市场的蓬勃发展, 小型卫星发射市场持续升温, 以飞马座 XL 和运载器一号火箭为代表的空射火箭完成多次发射任务, 将数十颗卫星送入近地轨道。空射运载火箭具备快速响应、机动灵活、发射成本低、任务适应性强等技术特点。运载火箭从空中发射可以充分利用载机的飞行高度和飞行速度, 在相同的系统运载能力下, 火箭的起飞质量更小; 在相同的火箭起飞质量下, 系统运载能力更高; 同时, 对于规模星座快速部署, 空中发射的灵活优势显著。围绕空射火箭的上述技术特点, 基于空射火箭模型开展仿真分析研究及不同发射方式的结果对比, 结果表明空射方式对提升系统效益效果显著。

关键词: 空射运载火箭; 空中发射; 量化分析

中图分类号: V421.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 06-0051-06

Quantitative Analysis of Air Launch Technology

LIU Lin, LYU Yan, LIN Song

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In recent years, with the booming development of the smallsats market, the smallsats launch market continues to heat up. The air launched vehicle, represented by Pegasus XL and Launcher One rocket, have completed multiple launch mission, sending dozens of satellites into LEO. The air launched vehicle has the technical characteristics of fast response, flexible maneuverability, low launch cost and strong mission adaptability. The launch vehicle from the air can make full use of the height and speed of the carrier aircraft, under the same carrying capacity, the rocket takes off mass is smaller, and under the same taking off mass, the carrying capacity is higher. Meanwhile, for the rapid deployment of large-scale constellations, the flexibility of air launch has significant advantages. This article focuses on the above technical characteristics of air launched vehicle, conducts simulation analysis research based on air launched vehicle models, and compares the results of different launch methods. The results show that air-launched methods have a significant effect on improving system efficiency.

Key words: Air launched vehicle; Air-launching; Quantitative analysis

0 引言

探索浩瀚宇宙, 发展航天事业, 建设航天强国, 是我们不懈追求的航天梦。运载火箭是人类

进入空间的基础运输工具, 可以说“运载火箭的能力有多大, 航天的舞台就有多大”。运载火箭作为进入空间的重要途径之一, 当前存在着发射价格昂贵、准备周期漫长、发射资源短缺等不足,

收稿日期: 2023-08-16; 修订日期: 2023-09-18

基金项目: 国家部委预研项目

作者简介: 刘琳 (1981-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器总体设计。

制约着人类探索宇宙空间、发展天基文明的步伐。进入后疫情时代，航天发射的热度持续走高。2022年全球发射载荷数量超过2 500个，质量超过1 000 t。以快速响应、机动灵活为特征的空中发射运载火箭技术在快速应急响应发射，以及未来的商业航天领域有着广阔的发展空间。

1 空射火箭技术优势与挑战

空射运载火箭是利用载机将运载火箭携带至离地面一定高度的空中进行发射的运载火箭，空射运载火箭与地面发射运载火箭相比，具有“机动、快速、灵活”的特点，是微小型航天器进入空间的重要途径。

1.1 空射火箭技术优势

1) 地面支持要求低，可实现全球发射。空射运载火箭理论上不受固定发射地点的限制，可在载机航程范围内任意点实施发射。目前，飞马座XL空射火箭已经从美国、欧洲和马绍尔群岛的5个独立发射场发射；运载器一号空射火箭已经在美国和英国两个地点发射。空射火箭的设计目标都是实现任意点发射的移动发射系统。图1为运载器一号空射火箭在执行发射任务。



图1 运载器一号空射火箭在英国执行发射任务

Fig. 1 Mission of Launcher One rocket in the UK

2) 提供最快的响应能力，一旦接到发射命令时可快速发射。飞马座XL火箭最近的一次发射证明了这一点，在合同授予后不到4个月的时间完成了运载火箭的设计、集成和测试。启动发射程序后，仅用10 min左右的时间就将卫星送入预定轨道。

3) 更小的起飞质量和更大的运载能力。空中发射可以充分利用载机的飞行高度和飞行速度，同时，在高空工作的固体发动机可获得更高的性能，在相同的起飞质量条件下，比从地面发射具有更大的运载能力。

4) 满足单星轨道部署任务需求，星座部署优势显著。各国都将空间快速响应能力作为重点发展领域，为了发展能够保护和增强控制空间的能力，美国FALCON计划将“飞马座”(Pegasus)和“快速抵达”(Quick Reach)空射火箭作为探索方向之一，利用空中发射技术减少卫星发射对地面设施的依赖，提升发射灵活度。飞马座火箭从接到任务到完成发射，准备时间小于14 d，火箭总装后7 d内完成发射，表现出优异的快速响应能力。特别是对于规模星座发射任务，空中发射技术优势更为明显。

1.2 空射火箭面临的挑战

1) 采用液体推进剂的运载器一号火箭，氧化剂在地面加注完成后需要历时数十分钟到预定空域投放，需要考虑氧化剂挥发量对飞行任务的影响，长时间飞行还涉及空中燃料补加等需求。

2) 面对越来越激烈的成本竞争，属于小型火箭的空射运载火箭降低成本的难度较其他火箭更高，运载器一号火箭最近一次发射就是受低成本元器件质量影响导致发射失败。

3) 重复使用是大幅降低火箭发射成本的重要途径。随着可重复使用技术不断成熟，复用技术几乎成为在研火箭的标配方案。但是空射火箭规模较小，使用复用技术会导致运载能力的大幅降低。参考最新公布的超重-星舰的总体参数，其重复使用与一次性使用的运载能力比为1:1.67，如果换用小型火箭，比例还将进一步降低。对于运载能力本就不大的空射火箭而言，可重复技术如何使用是个具有挑战性的问题。

2 国外空射火箭进展

2.1 飞马座空射火箭

20世纪70年代，为了提高应急发射和机动生存能力，美国启动了“空中机动发射可行性验证”计划，并于20世纪80年代末将该项技术应用于运载火箭领域。

1990年4月5日，飞马座空射火箭采用B-52轰炸机发射升空，开创了商业太空飞行的新时代。飞马座火箭起初由轨道科学公司和赫尔克里斯航空航天公司合资研制，早期采用B-52轰炸机机翼下吊挂方式，1992年后采用L-1011运输机机腹挂载方式。2018年，美国诺·格公司将轨道科学公司收购为其子公司，并进一步以商业方式开展研

制、运作并执行后续发射任务。

自首飞后的 30 多年里, 该火箭系列共执行了 45 次飞行任务, 先后在位于美国本土的加利福尼亚州、弗吉尼亚州、佛罗里达州, 以及位于美国本土外的加那利群岛和马绍尔群岛的夸贾林环礁的 5 个不同发射场实施发射任务, 共计发射了近百颗卫星。

火箭使用固体推进剂, 具备在 10 min 左右的时间内将 450 kg 的小型卫星载荷送入近地球轨道的能力, 其快速响应能力和发射灵活性一度备受客户青睐, 在很长一段时间内, 成为世界上价格合理、机动灵活、性能可靠的小型火箭“标准型”, 也是空射运载火箭的伟大开拓者。

最近一次发射完成于 2021 年 6 月 13 日, L-1011 三星飞机搭载飞马座 XL 火箭从美国加州范登堡空军基地起飞, 于美国东部时间 4 时 11 分 (北京时间 16 时 11 分) 由载机投放, 成功完成美国太空军“战术快速反应发射”(TacRL) 计划下的一项任务代号为 TacRL-2 的验证性入轨发射任务, 将一颗太空态势感知卫星送入预定轨道, 如图 2 所示。该项计划的目的是掌握按需灵活发射的所需技能, 在此次任务中, 飞马座 XL 火箭自合同授予后不到 4 个月内完成了全部的设计、集成和测试。



图 2 飞马座 XL 火箭完成 TacRL-2 发射任务

Fig. 2 Pegasus XL rocket completes TacRL-2 mission

2.2 运载器一号空射火箭

进入 21 世纪以后, 随着小卫星技术的不断成熟, 拓展了人们对于太空的认知, 也加快了人类探索太空的步伐。越来越多的商业航天公司关注到小型卫星发射市场。2011 年, 理查德·布兰森创立了维珍轨道分支机构, 2017 年成为独立公司。其旨在创造一个可以在“任何时间、任何地点、任何轨道上发射”的移动发射系统, 支持全球范围内不同国家的发射需求以及定制任务, 重新定义在太空中灵活响应的含义。

2021 年 1 月 17 日, 美国维珍轨道公司采用运载器一号火箭, 搭载波音 747-400 改进型飞机发射升空, 成功将美国国家航空航天局“发射服务项目”的 10 颗有效载荷送入太空, 开拓了更为快速、灵活、可靠地为小卫星提供定制专属服务的新时代。

运载器一号空射火箭使用液体推进剂, 具备将 500 kg 载荷送入中低倾角近地轨道和将 300 kg 载荷送入太阳同步轨道的运载能力。运载器一号空射火箭共执行 6 次入轨级发射任务, 如图 3 所示。完成情况为 2 次失败、4 次成功, 已经将包括美国军事卫星在内的 33 颗卫星送入轨道, 如表 1 所示。



图 3 运载器一号火箭进行发射准备

Fig. 3 Launch preparation for Launcher One rocket

表 1 运载器一号火箭发射记录

Tab. 1 Record of Launcher One rocket

日期	客户以及有效载荷数量	结果
2020. 5	—	失败
2021. 1. 17	美国国家航空航天局, 一箭 10 星	成功
2021. 6. 30	美国国防部、波兰、奥地利, 一箭 7 星	成功
2022. 1. 13	美国国防部等, 一箭 7 星	成功
2022. 7. 1	美国太空军, 一箭 7 星	成功
2023. 1. 9	英国, 一箭一星	失败

3 空射技术特点的量化分析

3.1 相同运载能力, 火箭规模更小

空中发射可以利用飞机提供一定的初始速度和初始高度, 在相同的运载能力下, 火箭的起飞质量更小。本文以飞马座火箭、运载器一号空射火箭为例开展分析。

3.1.1 飞马座 XL 火箭地面助推级计算

飞马座 XL 空射运载火箭起飞质量约为 23 130 kg, 全长 16.9 m, 一子级外径为 1.27 m, 采用 L-1011 运输机为投放平台, 投放高度为 11 887 m, 投放速度为 242 m/s, 典型轨道 741 km 太阳同步轨道运载能力为 221 kg^[1]。

如果直接从地面发射,要实现相同的运载能力,则需要增加地面助推级^[2],即采用成熟发动机从地面实施发射,将飞马座 XL 空射火箭推送至运输机 L-1011 飞机的投放高度与速度^[2],投放条件如表 2 所示。其中地面助推级发动机性能参考美国金牛座火箭一子级发动机性能^[3]。

表 2 飞马座 XL 地面助推级设计条件

Tab. 2 Design conditions for ground booster stage of Pegasus XL

参数	数值
起飞质量/kg	23 130
点火高度/m	11 887.2
点火速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	242
投放倾角/($^{\circ}$)	0

经计算,飞马座 XL 空射火箭增加地面助推级以后的整体火箭起飞质量约为 32.8 t,全箭长度约为 22 m,结果如表 3 所示。采用从地面发射的方式,并且利用在已有空基火箭基础上,直接增加地面助推级的技术方案完成火箭规模计算,此火箭的起飞质量规模较空基发射状态增加约 41%。

表 3 飞马座 XL 地面助推级设计结果

Tab. 3 Design results of ground boost stage for Pegasus XL

参数	数值
推进剂类型	丁羟
动力形式	固体火箭发动机
外径/m	1.28
比冲/($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2 655.8
平均推力/kN	635
推进剂质量/kg	8 180
工作时间/s	34.21
质量比	0.85
助推级总质/kg	9 623.53
结构质量/kg	1 443.53

3.1.2 运载器一号火箭助推级计算

运载器一号空射火箭起飞质量为 25 900 kg,全长为 21.34 m,一子级外径为 1.8 m,采用波音 747 改装的“宇宙女孩”作为投放平台,投放高度为 10 667 m,投放速度为 199.2 m/s,投放倾角 27°^[4],如表 4 所示。

如果直接从地面发射,要实现相同的运载能力,需要增加地面助推级,采用成熟火箭动力,将运载器一号火箭推送至起始高度、速度与倾角状态,设计结果如表 5 所示。

表 4 运载器一号地面助推级设计条件

Tab. 4 Design conditions for ground booster stage of Launcher One

参数	数值
起飞质量/kg	25 900
点火高度/m	10 668
点火速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	199.2
点火倾角/($^{\circ}$)	27

表 5 运载器一号地面助推级设计结果

Tab. 5 Design results of ground boost stage for Launcher One

参数	数值
推进剂类型	丁羟
动力形式	固体发动机
外径/m	1.8
比冲/($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2 655.8
平均推力/kN	707
推进剂质量/kg	8 650
工作时间/s	31.97
质量比	0.85
助推级总质/kg	10 011.76
结构质量/kg	1 501.76

经计算,运载器一号空射火箭增加地面助推级以后的整体火箭起飞质量约为 35.9 t,全箭长度约为 24 m,采用从地面发射的方式,并且利用在已有空基火箭基础上,直接增加地面助推级的技术方案完成火箭规模计算,此陆基状态起飞质量规模较空基发射状态增加约 38%。

3.2 同等火箭规模,运载能力更高

根据文献 [5],起飞质量为 57 t、直径为 2 m 的四级固体运载火箭,采用海上发射的方式可将有效载荷发射到各种高度和各种倾角的近地球轨道,典型任务为轨道高度 200~1 000 km 的圆轨道。其标准发射能力为:500 km 近地球轨道为 620 kg,500 km 太阳同步轨道 (SSO) 为 430 kg。

如果采用空基发射方式,发射条件如表 6 所示,通过飞机等将同等起飞规模的运载火箭携带至高空,在设定的初始高度和速度条件下实施发射,将进一步提升运载能力。

表 6 空中发射初始条件

Tab. 6 Initial conditions for air-launch

参数	数值
初始发射高度/km	11
初始发射速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	230.2

经计算，对于同等起飞规模的运载火箭如果采用空中发射方式（发射纬度 40°），其标准发射能力提升为：500 km 近地球轨道（倾角 0°）为 880 kg，增加 41.9%；500 km 太阳同步轨道（倾角 97°）为 550 kg，增加 27.9%，如图 4 所示。

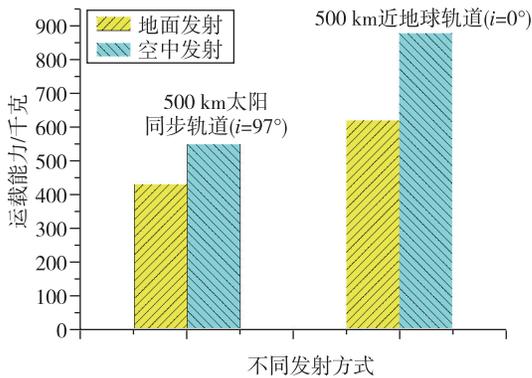


图 4 不同发射方式运载能力对比图

Fig. 4 Comparison of carrying capacity of different launch methods

3.3 分布式空间系统部署更加便捷灵活

利用空中发射技术，不仅可以实现单星轨道部署优化，还可以应用于分布式空间系统部署。分布式空间系统包括星座、星群以及编队飞行等。典型的星座包括 Walker 在 1970 年提出的全球覆盖星座（Walker 星座），其利用几何学原理将各轨道平面平均分布且轨道平面内的卫星均匀分布。

本文以飞马座空射火箭为算例，开展典型 Walker 星座的部署问题研究。

1) 星座算例：Walker 星座具有良好的全球覆盖特性，在通信、导航等全球星座系统中得到了广泛应用。Walker 星座空间构型由卫星总数 T 、轨道面个数 P 以及相位参数 F 3 个特征参数表示。本文以 30 颗星的 Walker-Delta (30/10/1) 星座作为算例，每个轨道面 3 颗卫星，共有 10 个轨道面（轨道的升交点赤经在 360° 间均匀分布），星座构型参数如表 7 所示。

2) 优化算法：采用一箭一星空中发射方式，首先解算完成单条卫星发射弹道，再采用多层编码方法逐一时间段进行整体发射任务规划。其中编码的不同层次代表发射点序列及其发射任务序列，通过基于拥挤度的解码方法，获取每架飞机的发射任务需求以及每次发射任务的发射窗口分配方案。

3) 计算结果：假设选择在国内内陆机场起飞，

表 7 近地轨道星座构型

Tab. 7 Low earth orbit constellation configuration

轨道面序号	相对升交点赤经/ (°)	相对纬度幅角/ (°)
1	0	0~240
2	36	12~252
3	72	24~264
4	108	36~276
5	144	48~288
6	180	60~300
7	216	72~312
8	252	84~324
9	288	96~336
10	324	108~348

飞机飞行速度为 800 km/h，同一架飞机相邻两次执飞间隔不小于 6 h，每架飞机部署的卫星数量为 1~3 颗，如图 5 所示。经计算，总计 14 架飞机完成 30 颗卫星星座的发射部署用时为 18 h，各轨道面部署完成时间如表 8 和图 6 所示。

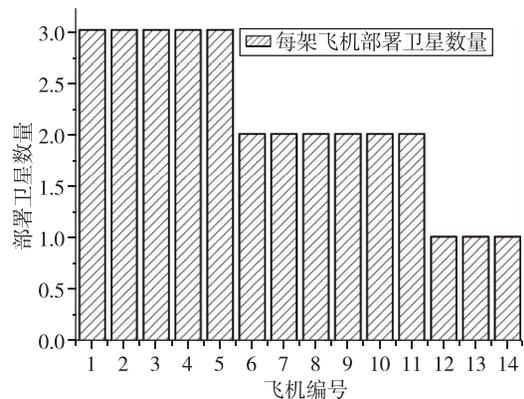


图 5 每架飞机所部署卫星数量统计

Fig. 5 Statistics on the number of satellites deployed per aircraft

表 8 内陆发射不同轨道面星座所需时间

Tab. 8 Time required for inland launch of constellations with different orbital planes

项目	数值
平均部署时长/h	10.46
最长部署时长/h	18
最短部署时长/h	1.04

4) 对比分析：采用一箭多星的部署方式，假设每枚火箭可发射 6~8 颗卫星，则需要 4 枚火箭。经计算，约 15 颗卫星入轨后需要调整相位满足部署需求，约 15 颗卫星入轨后需要改变轨道面满足部署需求。其中，轨道面调整采取利用 J2 摄动的间接法。

经计算可知，采用一箭多星发射方式，通过

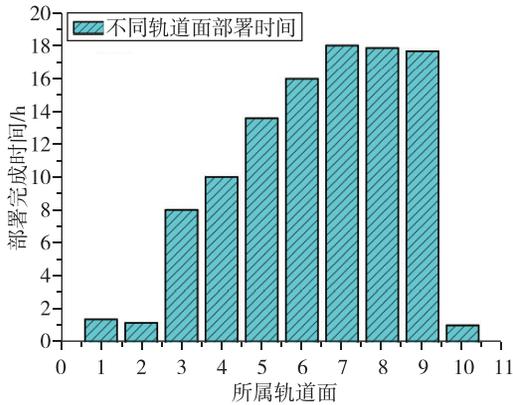


图6 国内机场部署各轨道面所需时间

Fig. 6 Time required for domestic airports to deploy various track surfaces

卫星自身调整以满足变轨需求,星座部署完成时间将会大幅增加。整体空间系统完整部署时间由18 h增加至108 d,如图7所示,难以满足快速响应等需求。

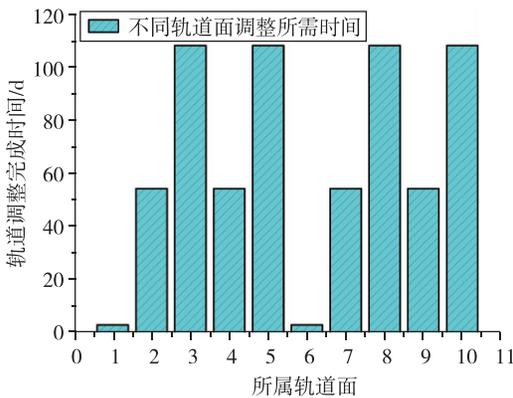


图7 一箭多星发射部署完整时间

Fig. 7 Complete deployment time for launching multiple satellites with one carrier rocket

相比之下,应用空中发射技术的单星发射方式具有更加便捷灵活的特性。

3.4 小结

本文采用仿真的方法对空中发射技术的特点进行量化分析。综合上述计算结果,可以得到以下结论:

1) 假定利用在已有空基火箭基础上,直接增加地面助推级(助推级工作结束弹道倾角为零)的技术方案完成对应陆基发射火箭规模计算的方式,则要获得相同的运载能力,空基火箭总质量规模仅占陆基火箭规模的38%~41%,空基发射火箭规模更小。

2) 相同火箭起飞质量,采用空中发射方式,近地轨道能力增幅为41%,太阳同步轨道能力增幅为27%,空基发射获得的运载能力更高。

3) 以部署30颗星的规模星座作为算例:采用一箭一星空中发射方式完成规模星座部署约18 h,采用一箭多星发射方式,同时利用卫星轨道摄动的方式调整轨道面,则规模星座部署约108 d。空中发射单星的模式更适合快速响应的应急发射任务。

4 结束语

近年来,不断有学者在空射火箭的气动外形、弹道设计、姿态控制、空投分离方案以及测试发射技术等方面开展研究和试验工作,并取得令人欣喜的成绩,但在空中发射技术的工程实践上还存在一定差距。

随着近年来低轨卫星组网的井喷式增长,利用空中发射技术满足分布式空间系统构建的快速性、灵活性的任务需求具有更为深远的意义。

参考文献

- [1] Orbital ATK. Pegasus user's guide[M]. Release 8.0. 2015.10:8-10.
- [2] 康永来. 飞马座火箭性能的几点分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2002(3): 27-32.
- [3] 《世界航天运载器大全》编委会. 世界航天运载器大全[M]. 北京: 宇航出版社, 1996:811-814.
- [4] Virgin Orbit, LLC. Launcher one service guide[M]. Version 2.2. 2023:12.
- [5] 尚辉, 张飞霆, 邵旭东, 等. 中国航天实现首次海上发射——揭秘 CZ-11 海射型运载火箭及其发射服务应用[J]. 国际太空, 2019(6): 4-9.

引用格式: 刘琳, 吕艳, 林崧. 空中发射技术特点的量化分析[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(6): 51-56.

Citation: Liu L, Lyu Y, Lin S. Quantitative analysis of air launch technology [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(6): 51-56.