

降低火箭发射费用的井筒推射技术

徐明毅

武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉
Email: myxu@whu.edu.cn

收稿日期: 2020年7月16日; 录用日期: 2020年7月29日; 发布日期: 2020年8月5日

摘 要

讨论了降低火箭发射费用的火箭回收、空中发射和井筒推射技术, 分析了井筒推射技术中气动推射和电磁推射方案的各自特点, 提出了中国开展井筒推射技术的具体实施计划, 并建议近期中国航天事业的发展方针为“由近及远, 稳妥推进, 降低费用, 滚动发展, 多路并举, 积极探索”。

关键词

航天运输系统, 重复使用运载器, 气动推射, 电磁推射, 雅鲁藏布江

Shaft Pushing Technology to Reduce Rocket Launching Cost

Mingyi Xu

School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: myxu@whu.edu.cn

Received: Jul. 16th, 2020; accepted: Jul. 29th, 2020; published: Aug. 5th, 2020

Abstract

In this paper the rocket recovery, air launch and shaft pushing technologies are discussed to reduce the rocket launch cost. The respective characteristics of pneumatic pushing and electromagnetic pushing are analyzed in shaft pushing technology. The detailed implementation plan is put forward to develop shaft pushing technology in China, and it is suggested that the development policy of China's space industry in the near future should be "from near to far, push forward steadily, reduce costs, develop in a rolling way, develop in multiple ways, and explore actively".

Keywords

Space Transportation System, Resuable Launch Vehicle, Pneumatic Pushing, Electromagnetic Pushing, Brahmaputra River

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

火箭发射的安全性和经济性是商业发射的竞争关键点,迄今为止火箭发射一般是一次性的,发射成本很高,因此回收火箭后经简单维修再重复使用将极大降低发射成本,这一技术近年来得到了长足发展[1][2][3]。美国太空探索技术(SpaceX)公司于2015年12月22日成功发射并回收猎鹰9号一级火箭,并于2017年3月31日实现了回收火箭的再发射,在2020年5月31日的龙飞船载人前往国际空间站任务中也实现了一级火箭的成功回收。随着火箭回收技术的进一步发展,SpaceX公司今后还将试验回收火箭第二级,完全的可重用火箭将使太空探索成本降低两个数量级。除经济性外,可回收火箭还能保障地面人员和财产的安全,避免火箭残骸落入居民区损害财物甚至伤人[1]。

当前可回收火箭的优点是复用一级火箭,特别是造价昂贵的火箭发动机,但缺点是需要保留一部分燃料用于返回从而降低了火箭运力,同时由于复杂性太高使得偶尔会出现失败,最后回收的火箭还需要一定的维修费用才能再次使用。如果维修成本太高,就达不到大大降低火箭发射成本的目的,美国已经终止发展的航天飞机就是一个典型例子。因此,可回收火箭不代表一定可以重复使用火箭,可重复使用火箭不代表一定可以降低成本,可回收火箭的性价比在当前条件下与回收费用、维修费用、可重复发射次数等有关[1]。

在不改变运载火箭起飞方式的情况下,仅仅依靠可复用技术来降低航天发射成本仍然有限。能否完全节省火箭的一级推进器,在最大程度上提高经济性的同时还增强火箭发射的安全性?这可以采用井筒发射的方法。这种发射方法实际上是火炮原理的延伸,可以利用山体凿成的火箭发射筒,将火箭从这个筒中像发射子弹一样射出,至一定高度后再使火箭点火。这种方法用井筒推射代替火箭的第一级推进器,可望比复用一级火箭有更高的性价比。

近年来中国发展了能够弹射重型舰载机的电磁弹射器,将电磁发射技术应用于航天领域可谓是水到渠成。采用电磁发射技术,就是在电磁推力作用下,将电磁能转化为火箭的动能,使其达到一定的高度和速度以后,再依靠自身动力将卫星送入轨道。这样运载火箭能够以更少的燃料、更轻便的结构携带尽可能多的有效载荷,发射成本比可复用式运载火箭更加低廉,安全性大大提高,发射准备周期也更短。井筒推射方法不管用电磁推射,还是用压缩空气、高温燃气推射,都能够将运载火箭高效廉价地送入太空,比复用一级火箭有更好的经济性和更高的安全性。如果结合可回收火箭技术,将进一步降低火箭发射费用,加快人类的太空探索步伐。

探索、开发和利用空间正成为世界主要国家未来发展的战略取向,为继续保持和巩固我国的大国地位,增强综合国力、民族凝聚力和对世界的影响力,需要保持我国航天技术的持续发展势头。我国的重复使用运载器和轨道转移运输飞行器的开发还处于刚刚起步的阶段,对我国航天运输系统的构建和发展提出了严峻的挑战[4][5],因此加快发展火箭推射技术可望另辟蹊径,补足进一步降低火箭发射费用、增加火箭发射商业竞争力这一短板。

2. 降低火箭发射费用的常用方法

火箭发射要支持越来越广泛的航天计划，需要逐步降低费用，可从以下方面考虑：首先在一次性火箭的基础上，通过模块化、通用化设计实现各部件的成本降低，提高可靠性，然后考虑重复使用火箭，回收火箭一级、二级，整流罩等，采用重复使用、费用均摊的原则降低损耗，最后还需要考虑降低燃料费用，如利用弹射加速手段将燃料消耗用更便宜的电力代替。当然，最理想的情况是装备推力强大且灵活可调的轻便发动机，使火箭能在天地间无硬件损耗往返，无论是发射卫星还是载人航天，都能如地面交通一样方便，然而要达到如此的便利程度，还需要艰苦的技术探索。

世界各国初期的运载火箭基本是从弹道导弹改进而来的，普遍存在型号众多、任务适应性低、成本高等不足。从设计伊始就考虑民用与商用目标，并且以低成本、高可靠作为主要设计原则，采用模块组合、系列规划的发展思路，将会对一次性运载火箭的降费起到决定作用。我国一次性运载火箭以长征火箭为主，已经形成了完整的运载能力型谱，实现了从常温推进剂到低温推进剂、从串联到捆绑、从一箭单星到一箭多星、从发射卫星到发射载人飞船的跨越式发展。2007年6月1日，长征三号甲火箭完成了长征系列运载火箭的第100次发射，标志着长征火箭从试验型向产业化发展的重大飞跃。为适应不同的发射目标，需要做到推力可调、经济适用，长征系列运载火箭在不同的发动机、不同的捆绑方式上，发展了多种型号，但型号之间做到模块可换、安全可靠的保证，为在国际卫星发射市场占领一席之地起到了积极作用[4][5]。

20世纪中期，冯·布劳恩和钱学森就提出了重复使用天地往返运输系统的概念。美国于20世纪60年代末提出研制航天飞机，目的之一就是降低宇航活动的成本。按照设计要求，航天飞机除外储箱为一次性使用外，轨道器可重复使用100次，发动机可以使用50次，两个捆绑助推器可以使用20次。然而航天飞机返回后维修量太大，导致成本大大提高。30年间，美国5架航天飞机共飞行135次，至2011年“亚特兰蒂斯”号完成谢幕之旅，航天飞机遗憾地退出了太空舞台。不过其可重复使用助推器的技术，如今被沿用到火箭的重复使用上。

经历了空天飞机和火箭动力单级入轨相关计划的失败之后，世界各航天大国都提出了重复运载器的现实发展目标，主要特点是多级入轨，部分重复使用。相对一次性使用运载火箭来说，它可以大幅度降低成本，能够满足天地往返运输任务的近期需求；相对于完全重复使用运载器来说，它能够降低技术难度和风险，易于实现，还能够为研究完全重复使用运载器奠定技术基础。我国重复运载器发展的长远目标是：水平起降、单级入轨，“廉价、快速、机动、可靠”地进出空间[4][5]。水平起降、单级入轨的空天飞机能够像飞机一样，自由、便捷、安全地往返于天地之间，是理想的重复运载器。但是水平起降的空天飞机涉及的先进组合动力系统、轻质材料、热防护等关键技术难题在短期内难以克服，实现需要一段较长的时间。

目前世界上有能力的航天部门都在研究可回收火箭。火箭回收一般有三种方案，第一种是伞降方案，即在火箭分离后先进行空中制动变轨进入返回地球大气层的返回轨道，接着在低空采用降落伞减速，最后打开气囊或用缓冲发动机着陆[6]，这种方案与回收飞船返回舱和返回式卫星类似；第二种是滑翔飞行水平降落方案，即箭体采用翼式飞行体，火箭像飞机一样水平降落返回地面，其中又分为有动力和无动力两种，美国航天飞机采用无动力形式；第三种是动力反推垂直下降方案，目前采用垂直回收的有美国蓝色起源公司的“谢新泼德”和美国太空探索技术公司的“猎鹰9号”。

回收火箭的难度大于航天飞机、宇宙飞船和返回式卫星，因为火箭外形细长，不好控制姿态。一是控制火箭姿态和落点精度技术。在5~20 km高度经过“大风区”时，会受到较大干扰，火箭在着陆前的垂直姿态控制仍是难点。二是火箭发动机推力可调和多次启动技术，使用偏二甲肼为燃料的发动机基本

上都不具备二次点火能力。三是再入隔热技术。未来回收速度更快、飞得更高的第二级火箭，其隔热技术是个严峻挑战。四是着陆支架技术。支架要有很好的强度和缓冲功能从而保证着陆的稳定性[1]。

目前，中国也正沿着“降落伞 + 气囊”和“垂直降落”两条路走。2020年3月9日长征三号乙运载火箭成功发射第54颗北斗导航卫星，在这次发射中首次实现了“火箭残骸伞降控制精准回收”。在助推器坠落过程中，多个降落伞展开，成功控制了坠落姿态和方向。2019年8月10日我国“翎客航天”公司的“RLV-T5”小型液体火箭成功进行了300 m高度的起飞降落试验，发动机工作时间为50 s。这标志着我国的液体火箭回收技术进一步成熟，但要完成一级火箭垂直回收任务还需要很大努力。

将火箭发射平台转移到空中也可以减少发射费用，与地面发射平台相比，空中发射可以减少燃料消耗，并省去地面发射台，使发射成本得以大幅降低，还可规避恶劣天气对发射活动的影响，提高火箭发射频率。2019年4月13日，美国同温层发射系统公司的“巨鸟”大型双体飞机在美国加利福尼亚州莫哈韦航空航天港完成首飞。“巨鸟”采用的是双机身设计，长72.5 m，机身高15.2 m，翼展达到117.3 m，是目前翼展最大的飞机，最大有效载重250 t，双机身之间的中央翼盒携带运载火箭飞行到平流层进行入轨发射[7]。

“巨鸟”已规划的近地轨道发射能力达到6 t，能覆盖世界商业卫星发射市场至少60%的卫星。“巨鸟”及其配套的运载火箭如投入使用，将具备低成本和灵活高效两大竞争优势。执行任务时，“巨鸟”中央翼盒下可挂至少一枚、至多三枚火箭从跑道上起飞，爬升到10 km以上的高空释放火箭并发射，之后返回地面进行维护，理论上第二天便可再次升空。从空中发射火箭，可免去陆基航天发射场建设投入，同时可利用平台的飞行高度和速度，相同重量发射成本可比传统陆基发射降低约30%。此外，陆基航天发射场位置固定，易受风、雨、雷电和严寒等不良气象影响，而在平流层高度进行空中发射，气象影响会大大减弱，且“巨鸟”可飞抵更合适区域进行发射，灵活高效，可满足各种紧急发射需求。

空中发射平台从某种意义上来说相当于运载火箭的一级，提高了火箭的初速，并且可重复使用，优点是十分明显的。但缺点是发射吨位有限、初速仍然不足。能否在地面上直接给予火箭初速，以增加发射效能？这就可以考虑推射方案。在火灾消防中使用的灭火弹同样面临提高费效比的问题，已经发展出了气动发射、火箭发射、飞机投掷、电磁发射等多种方式[8]。其中飞机投掷方式可以认为相当于空中发射平台，而气动发射和电磁发射方式都可以归结为地面上的直接推射技术，从实际使用上看，将之扩展到原理相同但规模更大的火箭发射领域是同样可行的。

3. 井筒气动推射方案

对火箭进行井筒推射就是利用气体压力或电磁力等在井筒中对火箭进行加速。若火箭弹出井筒后不进行点火，火箭将在自重作用下随高度上升不断减速至零而达到最高点，可以根据弹射作用力计算该最高点。假设弹射过程中加速度恒定，根据恒加速公式： $s = at^2/2$ ，得到 $2as = a^2t^2 = v^2$ ，其中 s 为加速长度， a 为推射加速度， t 为加速时间， v 为加速末端的速度。在不考虑空气阻尼的理想情况下，加速段的末端和减速段的始端速度相同，即有 $2as = 2gh$ ，因此火箭在弹射作用下能达到的最大高度为 $h = sa/g$ ，其中 g 为重力加速度， h 为推射高度。若井筒高度为5 km，选取人体可承受的最大加速度为10 g，则推射高度为10倍弹射距离，能推射到50 km的高空；若进行货运推射，将最大加速度增加到40 g，则推射高度达到40倍弹射距离，能推射到200 km的高空。

接着估算推射所需的气体压力。按直径 $D = 3.5$ m的井筒计算，面积为 $\pi D^2/4 = 9.62$ m²，若压差达到1 MPa（约10个大气压），提供推力达到9.62 MN，对于质量100 t火箭，能达到的加速度 $a = F/M = 96.2$ m/s² ≈ 10 g；若直径为5 m，面积为 $\pi D^2/4 = 19.625$ m²，压差仍为1 MPa，提供推力达到19.625 MN，对于质量100 t火箭，能达到的加速度 $a = F/M = 196.25$ m/s² ≈ 20 g，或者能用10 g的加速

度推动质量 200 t 的火箭。可以看到, 要达到所需的推送加速度, 需要的气体压力并不大, 对工程材料的要求不高。

接着估算井筒材料的厚度。不考虑岩体的弹性抗力作用, 取半圆进行力的平衡分析, 得到 $2d[\sigma] = pD$, 则圆筒厚度 $d = pD/2/[\sigma] = pR/[\sigma]$, 其中 p 为内外气体压差, $[\sigma]$ 为材料的容许拉应力, R 为圆筒半径。若圆筒材料选取为不锈钢, $[\sigma]$ 取为 300 MPa, 那么在 1 MPa 的内压力作用下, 3.5 m 筒径时管壁所需厚度为 5.8 mm, 5 m 筒径时管壁所需厚度为 8.3 mm, 都在较合理的范围内。如果考虑山岩以及混凝土衬砌的联合作用, 则圆筒能承受更大的气体压力。因此从材料的承受能力来说, 较容易满足如此压力下的气动推射。

推射时, 如果火箭的直径和井筒的直径相近, 可以直接在火箭上布置气密装置, 这样靠气压就能直接推动箭体移动, 将火箭像炮弹一样推射到高空, 在飞行一段时间后再启动点火操作。由于火箭燃料的效率与当前的箭体速度有关, 在理想情况下, 在箭体刚出筒口, 速度最高的时候进行点火是最有利的[9], 但考虑到空气阻尼的影响, 希望能以较小的速度穿过稠密大气层, 因此较好的方案是在大气转为稀薄的时候进行点火, 比如海拔 20~30 km 的高空, 这需要进行一定的优化计算, 与箭体大小和弹出筒口的初速度等参数有关。

如果箭体的直径比井筒的直径小很多, 或者需要对小火箭进行更大加速度的推射, 就需要一个与井筒直径相当的承台, 将火箭放置在承台上, 利用对承台的推动来对火箭进行加速, 此时发射承台可以认为是火箭的第一级。为了重复使用该承台, 在该承台被推射出井筒后, 仍然可以使用一级火箭的回收方法, 比如用降落伞回收或垂直回收的方法, 既避免砸伤事故又能再次使用。为了进一步降低回收费用, 可考虑承台在接近筒口时进行反冲减速, 使之到达筒口时正好运行速度降为零, 这样便于快速回收, 但该方法需要很高的控制精度。此时由于推射出的箭体和承台之间存在相对速度, 箭体可能需要提前进行分离点火, 这对火箭发动机的要求也提高了。

气动弹射的方案可以采取蒸汽弹射、压缩空气弹射、燃气弹射等。蒸汽弹射在航空母舰的舰载机弹射上使用比较成熟, 优点是可提供较大的气体压力。由于火箭弹射所需压力不高, 也可以直接使用压缩空气, 在地下洞室预先存储一定的压缩空气, 弹射时从筒底释放, 就可以推动箭体沿井筒运动。采用燃气弹射时, 使燃气在极短的时间内经过燃烧转变成高温高压气体, 并经过喷管排入密封井筒产生一定的压力, 从而形成弹射力推动火箭。燃气可以由外部供给, 也可以直接利用火箭发动机的喷出燃气, 由于空间是密闭的, 此时只需较少的燃料就可达到增压推射的目的, 但需要考虑井筒的耐热性是否满足要求。比较来看, 压缩空气弹射的技术要求最低, 燃气弹射需要的附属设施最少。采用弹射的方法作为火箭发射的一级动力, 能使火箭的出口速度得到提升, 避免传统自力发射火箭在发射初期效率极低的弊端, 从而达到提高火箭发射效率的目的[9]。

由于在低纬度发射火箭能够很好利用地球自转引起的附加速度, 因此可以考虑在我国南海区域采用火箭井筒推射技术。此时用钢质圆筒沉到海底, 底部固定, 顶部用船坞拉住, 使之保持直立状态。在筒内充上气体, 便于和外部水压平衡, 由于水压随着深度增加迅速, 而气压变化缓慢, 因此若在圆筒底部内外压力保持平衡, 则上部则为内压超过外压, 且大大超过大气压力。采用较高内压时筒壁材料受拉, 无需考虑屈曲稳定, 但筒口平时要封闭, 推射不方便; 内压低时筒壁材料受压, 要考虑屈曲稳定, 但筒口不封闭利于弹射。考虑到工程难度, 若采用较短的筒高, 为保证推射速度, 需要较大的加速度, 因此较适合于货运发射。如果采用压缩空气推射, 可在圆筒底部设置可变形储气箱, 充分利用海水的强大压力挤压空气, 如果采用高温燃气推射, 则无需储气箱, 操作更为简单, 同时圆筒周边海水是天然的冷却剂。海上气筒推射的优点是装置简单, 无需岩石开挖, 同时海上运输费用低; 缺点是出口海拔低, 推射速度有所限制, 因此非常适合于推射技术的初期探索和应用。

4. 井筒电磁推射方案

电磁推射是利用电磁力发射抛体的现代弹射技术, 具有成本低、操控安全、适应性强、能量释放易于控制、可重复快速发射等优点, 主要包括轨道发射、线圈发射以及磁悬浮发射等形式, 为快速、低成本地向太空投送小卫星和物资提供了新的思路[10]-[19]。电磁推射系统不仅可以比现有火箭系统发射的载荷量大, 而且分摊成本低, 发射设施成本与其经济效益相比也小很多, 这将大大有利于开展空间探索和商业使用。

20 世纪 80 年代, 美国航空航天局开始进行电磁线圈推射技术的概念性研发工作。其下属的马歇尔航天飞行中心设计利用现有的超导磁悬浮技术, 在真空隧道中采用亚声速弹射器 MagLifter 在仰角为 60° 的 3~4 km 的轨道上加速一个可重复使用的航天器, 加速度可达 30 g, 航天器在海拔约 3 km 的山顶部与导轨分离, 将 900 kg 的物体送入地球轨道[15]。MagLifter 系统主要由推进系统、电源系统、支撑系统和供给系统四部分组成。推进系统包括磁悬浮导向槽、运载滑车以及装载的临时设施等组成。超导磁体位于滑车底部, 加速完成之后运载滑车返回到起点, 用于下一次发射。实际上, MagLifter 系统替代了传统运载火箭的第一级, 从而省去大量的推进剂, 非常低的电力推进成本和每隔 2 h 的发射频率使其显示出巨大优势[15]。我国也从舰载机电磁弹射技术自然发展出火箭电磁推射技术[16] [17], “电磁 + 火箭”复合发射方式, 已看到初步应用前景。

采用较平缓的推射力时需要较长的推射距离, 如果航天器从水平的真空磁悬浮隧道进入, 加速后逐渐转为垂直方向, 同时上升到很高的海拔高度, 这样不但能解决发射器长度问题, 同时能大大降低气动发热和空气阻力。如果隧道长度取为 50 km, 加速度为 4 g, 在理想情况下能弹射到 200 km 的高空, 弹射速度达到约 2 km/s; 若加速度为 10 g, 则能弹射到 500 km 的高空, 弹射速度达到约 3.3 km/s。要达到相同的速度, 真空隧道越长, 所需要的加速度越小。在加速过程中由于方向转变, 火箭除了受到纵向加速度的作用, 还受到横向加速度的影响。若按速度 2 km/s, 曲率半径 50 km 计算, 横向加速度将达到 $v^2/r = 80 \text{ m/s}^2 \approx 8 \text{ g}$, 仍为可观数值。若用定半径转过垂直角度, 需要长度 $r\pi/2 = 78.5 \text{ km}$, 已超出了隧道预设长度, 因此比较合理的选择是采用变半径转向, 在速度较小时采用较小的转弯半径, 而速度较大时转弯半径变大, 或者减小转向角度, 采用倾斜发射而非垂直发射。

由于火箭电磁推射时所需功率很高, 一般的电力系统不能承受如此波动, 故需要储能系统来提供短时的强大能源。储能系统有电池储能、超导储能、飞轮储能等形式, 其中飞轮储能系统将能量储存在高速旋转的飞轮转子中, 具有高功率密度、无环境污染、使用寿命长、运行温度范围广, 能够实现快速充放电等优点, 已获得广泛应用, 当前以它的能量密度最高[18] [19]。对中国来说, 则可利用水电能源丰富的特点, 将大库容水电站作为储能系统, 在平时蓄水或发挥较低的发电能力, 而在进行电磁推射时全力泄流, 将很容易提供千万千瓦级别的短时附加功率, 这样就可以绕过其它方式储能系统的技术难点和建造费用, 而增加的费用只是水电站的备用容量。此部分备用容量在其它时候也可用于压缩空气制氧或者电解制氢, 在电磁推射时切换过来即可, 因此浪费并不大。当然, 如果采用飞轮储能等形式, 也能让电力系统运行更加平稳, 在技术条件成熟时可以采用。

电磁推进技术还可用在其它领域, 如真空管道磁悬浮推进的超级高铁[20], 能够在陆地上达到飞机的速度。飞机也可以利用弹射技术, 除了军事上的舰载机电磁推射, 民用飞机用推射技术也能节省航油, 缩短起飞跑道。因为飞机起飞时消耗大量燃油, 如果用推射技术获得足够初速, 自身能源则主要维持巡航需要, 这使得飞机电动化将更为可能。在数百公里远的城市间使用此种推射电动飞机, 具有方便快捷、费用低廉、节能环保的优点。初期可以采用无人机进行试验, 并有望最先用于快递货运行业, 技术成熟后就能载客飞行, 用于公共交通和观光旅游等市场。

5. 井筒推射的实施构想

我国发展火箭井筒推射技术的一个较理想的地点是雅鲁藏布江大拐弯处。雅鲁藏布江从海拔 5300 m 以上的喜马拉雅山脉中段北坡冰雪山岭发源,在派乡到墨脱县希让河段内,奔腾向东的雅鲁藏布江围绕南迦巴瓦峰(海拔 7782 m)又折返向西,形成一个巨大的马蹄型大拐弯。大拐弯峡谷中水面和山峰平均高差达到 5000 m,平均 1 km 内跌落 10 m 多的水头,其水能的单位面积蕴藏量在世界同类大河中是少见的。在此处拦截江水修建梯级电站,可以获取充沛的电力,同时高差大、地应力小的特点宜于修建深达 5000 m 的火箭发射竖井,进行火箭气动推射,也可直接利用强大电力进行电磁弹射,这对降低火箭发射费用,发展太空技术将起到积极的促进作用。初步进行构想,我国发展火箭井筒推射技术可大致分为六步:

1) 技术验证阶段。在海南文昌发射基地附近,进行火箭推射的技术探索和验证,初期可采用数百米的垂直圆筒,投资不大,可以研究压缩气体推射和高压燃气推射技术方案,研制各类必要设备,发现技术难点,理顺火箭推射技术大规模应用的关键技术路线。

2) 条件准备阶段。在雅鲁藏布江大峡谷区段修建梯级储能水电站,并且联合调度,使之具备较大的峰谷快速调节能力,为火箭推射准备动力能源。与外部能源输入相比,路程近、损耗小、独立性强是其主要优点,当然,从长期来看,该处与外部电网的连接是必要的,既便于提高可靠性,也便于将富余电力输送到其它地方。

3) 初步应用阶段。在海南文昌基地附近的海洋中搭建直径为 3.5 m、高度为 2000 m 左右的圆筒,开展货运火箭的推射任务,进一步完善火箭推射的各项技术细节。在雅鲁藏布江大峡谷梯级电站附近的高原修建直径为 3.5 m、高度为 5000 m 以上的气动推射井,应用并验证火箭推射的技术优势,为各类航天任务提供火箭发射支持。

4) 规模应用阶段。在雅鲁藏布江大峡谷梯级电站附近修建直径为 5.0 m、高度为 5000 m 以上的气动推射井,开展大吨位货运航天和载人航天任务,便于大型空间站、空间太阳能电站等建设。

5) 发展创新阶段。选择合适地形,修建长度在 50 km 以上的大直径电磁真空推射隧洞,推射加速度灵活可调,可更为方便快捷地进行航天运输,大力开展太空旅游、全球卫星互联网组网发射、空间碎片回收、月球采矿和载人火星探测等各类任务。

6) 成熟扩展阶段。依托雅鲁藏布江大峡谷的火箭推射基地,将主体设施布置在山体内的地下空间,尽可能保留原始地貌植被,逐步建成生产生活设施完善的南迦巴瓦地下航天城,便于开展航天技术的各项研究,完善拓展航天产业链,使之成为人类从地球迈向太空的为数不多的理想跳板。

2020 年 5 月 5 日亚洲运力最强的长征五号 B 型运载火箭在海南文昌发射场成功发射,标志着我国近地空间站建设正式拉开序幕,其近地运载能力超过 22 t,而正在研制的长征九号重型火箭,其地面推力达到 3000 t 以上,近地运载能力 100 t 以上。在长征九号重型火箭可用之前,可以利用推射技术节省一级火箭,只需较少的火箭总推力就可达到同样的运载能力,满足我国未来载人登月、火星探测和后续深空探测需求,不妨将基于火箭推射技术的航天发展计划称之为“天梭”计划。选择雅鲁藏布江大拐弯处发展火箭推射基地,是因为该处能源充沛,峡谷高差巨大,便于修建火箭发射竖井,当然在具体实施过程中,还需要和国家的总体规划结合起来。

我国航天科技的发展包括方方面面,近期建议采用“由近及远,稳妥推进,降低费用,滚动发展,多路并举,积极探索”的方针,经济可靠地逐步发展航天产业。当前来看,基于化学推进和电推进的航天运输飞行器已经比较广泛,基于太阳帆、微波推进、等离子推进、激光推进、先进组合循环和脉冲爆震技术的航天运输飞行器正处于演示验证研制阶段^[5],而从空间站二次起飞的空间燃料加注等一系列配套技术将对火星探测或更远的深空探测带来明显的经济性。

6. 结语

火箭推射技术具有三个优点，一是节省一级火箭，提高了整体可靠性；二是无需回收一级火箭，或者说无限次提高了回收次数，经济性十分明显；三是提高了火箭燃料的利用效率，进一步降低了发射费用。这使得不管是近地轨道还是同步轨道，在推射基础上都只需要一级火箭就可满足要求，无需助推器辅助。在推射技术成熟，推射速度得到提高后，近地发射任务甚至连一级火箭也不需要，可以直接将卫星先推射到近地轨道，然后使用卫星上携带的高效离子推进器，逐步提升轨道，直至精确入轨。可以预见，在推射技术得到发展后，火箭发射费用将会大幅度下降。

我国的雅鲁藏布江大拐弯处是优良的火箭推射选址，此处水电能源丰富，峡谷高差巨大，可建设 5000 m 以上的垂直推射井，并具有出口海拔高，空气阻力小，火箭发射噪音对周边影响小的优点。该处得天独厚的条件非常便于火箭推射技术的应用，可逐步建设成为我国又一个重要的航天发射基地。若进一步配套建成设施完善的航天产业城，将利于推进我国航天技术在国际上的前沿地位，为顺利开展各项繁重的航天任务提供坚实保障，可望成为人类迈向太空的为数不多的理想跳板。

参考文献

- [1] 庞之浩. 回收火箭的重要意义与关键技术[J]. 科技导报, 2016, 34(1): 15-19.
- [2] 王辰, 王小军, 张宏剑, 等. 可重复使用运载火箭发展研究[J]. 飞航导弹, 2018(9): 18-26.
- [3] 李斌, 张小平, 高玉闪. 我国可重复使用液体火箭发动机发展的思考[J]. 火箭推进, 2017, 43(1): 1-7.
- [4] 杨勇. 我国重复使用运载器发展思路探讨[J]. 导弹与航天运载技术, 2006(4): 1-4.
- [5] 吴燕生. 中国航天运输系统的发展与未来[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(5): 1-4.
- [6] 徐倩, 郭凤明, 苏玲, 等. 运载火箭助推器伞控回收方案及安全性分析[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(3): 9-15.
- [7] 姜廷响. 美国新型空中火箭发射平台完成首飞[J]. 航空科学技术, 2019, 30(12): 81-82.
- [8] 张亚东, 熊敏, 董明洋, 林雄. 电磁弹射灭火弹消防系统研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(2): 025023. <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190304>
- [9] 雷雨, 李开明. 火箭发射效率及其提高途径[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(9): 27-29.
- [10] Still, A.M. (1998) Electromagnetic Launchers for Use in Aircraft Launch at Sea. University of Texas at Austin, Austin.
- [11] Fair, H.D. (2007) Progress in Electromagnetic Launch Science and Technology. *IEEE Transactions on Magnetics*, **43**, 93-98. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.887596>
- [12] McNab, I.R. (2014) Large-Scale Pulsed Power Opportunities and Challenges. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **42**, 1118-1126. <https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2303884>
- [13] Powell, J., Maise, G. and Rather, J. (2010) Maglev Launch: Ultra Low Cost Ultra/High Volume Access to Space for Cargo and Humans. *AIP Conference Proceedings*, **1208**, 121. <https://doi.org/10.1063/1.3326240>
- [14] 杨杰. 蒸汽弹射器与电磁弹射器[J]. 科技视界, 2012, 26(3): 62-67.
- [15] 张亚东, 刘浴霜. 超导磁悬浮技术在太空发射中的研究与挑战[J]. 飞航导弹, 2015(10): 50-57.
- [16] 张明元, 马伟明, 汪光森, 王钰. 飞机电磁弹射系统发展综述[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(10): 1-5.
- [17] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-5.
- [18] 赵勇. 通用飞行器地面电磁弹射工程系统研究[J]. 航空工程进展, 2015, 6(3): 387-394.
- [19] 郭冀岭, 孙海亮, 陆浩然, 等. 垂直电磁发射系统及其控制技术研究[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(1): 15-23.
- [20] 沈志云. 关于我国发展真空管道高速交通的思考[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(2): 133-137.