

世界航天发射运输的发展趋势

朱雄峰,程洪玮,刘阳,刘鹰,谭云涛,周城宏

北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094

摘要 针对世界航天发射运输系统,梳理了国内外发展现状和发展特点,综合对比了国内外航天发射场、运载火箭、火箭发动机的发展现状,并提出了未来发展趋势和展望。提出了低成本进入空间将改变世界航天发展的基本格局,航天远程跨域运输将突破航空领域运输效率的极限,指出了天地往返运输将成为维系空间环境的必然选择,轨道的多样性将催生多样态全域发射能力,同时传统液氧/煤油、液氢/液氧、液氧/甲烷等推进体制的主力运用领域将会迎来重大变革。

关键词 火箭;卫星;发射场;发动机;发射运输系统

空间以其独特的覆盖广域性、资源宝贵性、地位独特性正成为国际竞争新的战略制高点。进入21世纪,航天领域继阿波罗登月时代再次迎来空前繁荣,美欧等航天强国均超前布局太空。在2015年“人类与商业航天”论坛上,NASA提出人类将迈入太空2.0时代。2016年,欧盟委员会在《欧洲航天战略》中指出,人类将进入太空4.0时代,倡导政府、企业、科技界分工协作,提出一系列包括月球探测、火星探测、太空采矿、太空旅游等在内的太空计划,未来空间竞争将日趋白热化。新时期,美国全面谋求太空优势,特别是2018年6月18日,美国总统特朗普签署行政命令,指示五角大楼创建美国第六军种——独立的天军。同年12月19日,特朗普下令组建美国航天司令部,美国太空军事化进程已经不可逆转。与此同时,俄罗斯积极重振航天

强国地位,欧盟也在太空领域积极拓展利益。

航天发射运输系统将为卫星、飞船、探测器等各类航天器提供安全、可靠、准确地进入空间的能力,是利用空间的基础和前提,其性能水平在很大程度上制约着一个国家利用空间的能力。当前,全球航天发射运输系统进入新的更新换代周期,美国主力火箭Atlas V和Delta IV已经列入退役计划;俄罗斯重新规划了Angara系列中的大型火箭,拟全面替代现役主力火箭;欧盟主力火箭Ariane 6预计2022年首飞,全面替换Ariane 5火箭;日本运载火箭H-III顺利研制,将替换H-II。与此同时,商业航天异军突起,以SpaceX为代表的一批商业航天发射企业,通过快速技术迭代、集成滚动发展,部分领域已超过传统国家航天力量。发射运输系统技术难度大、研制风险高、研制周期长,同时中国正面

收稿日期:2020-06-15;修回日期:2020-07-28

作者简介:朱雄峰,博士,研究方向为发射与空间运输,电子信箱:zhuxiongfeng@yeah.net

引用格式:朱雄峰,程洪玮,刘阳,等.世界航天发射运输的发展趋势[J].科技导报,2021,39(11):46-58;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.

2021.11.006

临新老火箭更新替代、国际航天强国围追堵截、商业航天发射竞争力减弱的局面,有必要系统分析国内外发展形势,提出未来发展构想,以适度超前发展发射运输系统能力,支撑未来发射运输系统的长远发展。

1 国内外发展现状

1.1 国外发射运输发展现状

1.1.1 航天运输方面

美国重点布局氢氧动力运载系统,拥有完整的运载火箭型谱。美国具有世界上最大推力的氢氧发动机RS-68(300 t)、技术水平最高的航天飞机主发动机SSME(space shuttle main engine, 200 t)以及继承自SSME并主用于空间发射系统(SLS)重型火箭的RS-25发动机;在火箭型谱上重大型火箭包括4个系列,即NASA主导的SLS(近地轨道(LEO)70~135 t)、SpaceX公司的Super-heavy Starship(LEO 150 t)和Falcon 9H(LEO 64 t)、Blue Origin公司的New Glenn(LEO 45 t);中型火箭4个系列,包括美国联合发射联盟(ULA)的Delta IV(LEO 9~28 t)、Atlas V(LEO 9~19 t)、SpaceX公司的Falcon 9(LEO 22.8 t)、轨道科学公司Orbital ATK的Antares(LEO 5.5 t);小型火箭2个系列,包括由“民兵”和“和平卫士”弹道导弹基础上改进而来的米诺陶火箭(Minotaur, LEO 0.34 t)、轨道科学公司研制的空射火箭飞马座(Pegasus, LEO 0.44 t);重复使用运输系统3个系列,包括Blue Origin公司的New Shepard和New Glenn、SpaceX公司的Falcon系列火箭。美国大力发展商业航天,将近地轨道载人和载货运输服务交由商业公司承担,鼓励通过技术创新和市场化手段降低航天门槛,促进行业良性竞争,提升航天工业的整体实力;政府将有限的精力和资源投入到载人航天和深空探测,稳步推进新老火箭更新替代以及新一代重型运载火箭研制,确保美国在航天领域继续保持绝对领先地位。

俄罗斯重点布局液氧煤油动力运载系统,拥有完善的运载火箭型谱。俄罗斯拥有世界上推力最大的液氧煤油发动机RD-170(790 t)、比冲最高的

发动机RD-180(3313 m/s)、单管推力最大的发动机RD-191(208 t);在火箭型谱上中型火箭3个系列,包括Soyuz(LEO 2.5~8.5 t)、Proton(同步转移轨道(GTO)3.86~6.19 t)和Zenit(GTO 3~6 t),其中Soyuz主攻近地轨道载人与货运飞船发射任务,同时兼顾部分中低轨道卫星发射,Proton与Zenit则承担高轨卫星发射任务并参与国际竞争,是国际商业发射市场的主力火箭;小型火箭3个系列,包括由SS-19液体战略导弹改进而成的隆声号(Rokot)、由R-36M洲际弹道导弹改进而来的第聂伯号(Dnepr, LEO 3.2 t)和由R-14U中程弹道导弹改进而来的宇宙号(Kosmos, LEO 0.3 t);新研发的安加拉(Angara)系列运载火箭,有望替代现有大部分运载火箭等。俄罗斯作为传统航天强国,工业基础雄厚,军事实力强大,多型火箭直接从弹道导弹发展而来,通过极具竞争能力的发射服务有力地拓展了国际商业发射市场。

欧洲以多个国家联合开展航天发射活动,以较少构型满足国际主流发射市场需求。在火箭型谱上中型火箭有2个系列,包括Ariane(现役Ariane 5 GTO 6.6~12 t,在研Ariane 6 GTO 5~11 t),以及与俄罗斯合作研制的Soyuz ST;小型火箭1个系列,即Vega-C(LEO 2.2 t);在重复使用技术上,欧洲航天局(以下简称欧空局)提出了基于30%~100%节流能力的“普罗米修斯”发动机,研制Ariane Next可重复使用火箭。欧洲拥有独立、完整的航天工业体系,积极开展国际合作,保持航天前沿地位。在欧空局的统筹协调下,集中多国人力、物力和财力,推动航天工业发展,增强在国际上的竞争力。秉承经济务实的理念,充分考虑满足发射需求前提下,着眼低成本、高可靠,通过发展新一代运载火箭技术、重复使用运载火箭技术,进一步降低发射费用,抢占国际发射市场份额。

1.1.2 航天发射方面

美国拥有数量最多、区位优势显著的发射场,在测试发射技术上“三垂”模式引领世界。美国航天发射场主要包括东靶场、西靶场和肯尼迪航天中心。东靶场和西靶场属美国空军管理,位于佛罗里达州东海岸卡纳维拉尔角,主要发射0~60°倾角范

围的各种航天器, Delta IV 年发射能力 15~18 发, Atlas V 年发射能力 10~12 发; 西靶场(范登堡空军基地)位于加利福尼亚州西海岸, 主要发射倾角 70~115° 的各种卫星, Delta IV 年发射能力 15~18 发。肯尼迪航天中心属 NASA 管理, 位于佛罗里达州东海岸卡纳维拉尔角西北梅里特岛, 主要用于发射卫星、空间探测器、载人飞船和航天飞机等, 年发射能力 10~12 发。近年来, 美国商业公司 SpaceX 研制的 Falcon 9 火箭, 主要安排在东靶场 40 号发射工位、西靶场 4E 发射工位及肯尼迪航天中心的 39A 发射工位进行发射, 年发射能力 20 发以上。美国航天发射场在发射场数量上、发射工位数量上均领先世界, 在发射场选址、射向、发射轨道、航落区安全上比较完善, 在发射场测发模式上深耕“三垂”模式(垂直总装、垂直测试、垂直转运)多年, 具有很高的技术水平。

俄罗斯拥有数量领先、区位优势明显的发射场, 在测试发射技术上“三平”模式引领世界。受限于地理位置, 俄罗斯的发射场主要建设在高纬度地区, 在射向和顺行轨道发射能力上受限制; 但俄罗斯地域广袤, 因此拥有较好的射向和安全的航落区。其发射场主要有拜科努尔、普列谢茨克、卡普斯丁亚尔及新建的东方发射场, 均由俄空天军进行管理。拜科努尔发射场位于哈萨克斯坦境内锡尔河畔, 主要发射轨道倾角为 52~65° 的航天器; 普列谢茨克发射场位于莫斯科以北 850 km 的普列谢茨克市东北部, 主要发射 65~85° 的各种大倾角军用卫星; 卡普斯丁亚尔发射场位于伏尔加格勒东卡普斯丁亚尔镇, 主要发射轨道倾角为 49° 的小型科学试验卫星; 最新建设的东方发射场位于俄罗斯远东地区阿穆尔州斯沃博得内市, 未来将用于发射各类航天器, 承担俄罗斯 45% 以上的发射任务。

欧洲拥有数量少、区位优势极佳的发射场, 在测试发射技术上注重博采众长。欧洲的航天发射场主要是法属圭亚那航天中心, 它位于南美洲北部、法属圭亚那大西洋海岸的库鲁地区, 有第一、第二、第三发射场。其中, 第三发射场主要用于 Ariane 5 火箭的发射, 年发射能力 10~12 次; 联盟号火箭发射场用于发射“联盟号”运载火箭, 年发射能力

10 次; 此外第一发射场近年来改为发射 Vega 小型运载火箭, 年发射能力 10 次。欧洲的库鲁发射场靠近赤道(北纬 2~6°), 发射顺行轨道能量损失小、射向宽泛、全年气象环境优良、航落区安全性好, 是国际上公认最理想的发射场。发射场测发模式及流程随着发射场的建设不断进行优化和改进: 第一发射场原本采用的是“一平两垂”测发模式, Vega 运载火箭则改为分段垂直总装、垂直测试的模式; 第三发射场采用的是“三垂”测发模式; 而“联盟号”发射场则采取了改进型的“三平”测发模式, 即火箭采用“三平”测发模式, 卫星采用活动勤务塔垂直吊装。

1.1.3 发展特点

1) 发展模式由国家主导转向由国家和企业共同推动。当前全球航天产业正处于快速发展的新时期, 航天已经从传统的服务国家安全、提升国际地位, 转向服务人类、推动世界经济发展。以美国为代表的航天强国超前布局大航天时代, 以航天生态创新催生民商航天经济, 构建了涵盖火箭发射、卫星通信、遥感图像、数据服务、卫星运营等众多环节的航天生态。

2) 快速机动发射是太空军事化背景下的坚实基础。随着航天器技术的发展, 质量轻、成本低、研制周期短、部署应用快的小卫星成为国家空间力量建设特别是快速响应空间(operationaly responsive space, ORS)的重要组成部分, 适应战时空间信息战术保障和小卫星任务的快速机动发射也成为美、俄等航天强国发射力量发展的重点方向。近年来, 随着“作战响应空间计划”“施里弗”演习计划等的不断推进实施, 美军快速空间响应能力进一步提升。俄罗斯、欧盟和日本等国家和地区也纷纷发展自己的快速进入空间力量, 以增强空间竞争力和军事威慑力。

3) 重型火箭覆盖面广、影响力大再次得到全力发展。重型火箭在 20 世纪美苏冷战时期发展到了顶峰, 为实施登月计划, 美国推出了土星 V 火箭, 苏联推出了 N-1 火箭、能源号火箭, 近地轨道运载能力 10³ t 级。当前, 美国重返月球计划以及深空探测计划密集推出, 重型火箭再次得到了重视。2011 年, NASA 主导研发 SLS 火箭; 同年, SpaceX 公司提出研制 Falcon 9H; 2016 年, SpaceX 公司推出

了 Super-heavy Starship 火箭;2017年,俄罗斯提出研发叶尼塞重型火箭。重型火箭以其超广的专业覆盖性、超强的国际影响力,将再一次引领世界火箭发展大潮。

4) 航天测发向自动化、智能化和无人值守方向发展。从美、俄、欧、日等运载火箭测发情况看,航天测试发射向运载火箭整体总装、测试和运输的方向发展,增强测试、运输的整体性,减少状态变化和重复测试;在远距离测试发射方式下,提高测试发射设备系统化和集成化程度,推进发射区测试发射简化和无人值守;通过自动化和智能化的箭地一体化测试,加强设备通用化和标准化建设,提高测试发射效率和安全可靠性。

5) 发射方式向固定机动相结合的多方式方向发展。主要由地面固定发射方式逐渐向陆基、空基、海基机动发射方式发展,以保证发射的快速性、机动性和生存性,增强完成多样化航天任务的能力。发射操作和控制向自动化方向发展,以减少人为差错、提高发射效率和安全可靠性。

1.2 中国发射运输发展现状

1.2.1 发展现状

运载火箭是中国进入空间的主要工具,经过多年发展,中国运载火箭已形成现役运载火箭系列、新一代无毒无污染液体运载火箭、新一代固体运载

火箭3个系列。其中,现役运载火箭的主力推进剂组合是四氧化二氮/偏二甲肼和液氢/液氧,包括 CZ-2C/D/F、CZ-3A/B/C、CZ-4B/C等;新一代无毒无污染液体运载火箭的主力推进剂组合是液氧/液氢/液氧,包括 CZ-5/B、CZ-6、CZ-7/A等;新一代固体运载火箭包括 CZ-11、KZ-1A。基本形成了近地轨道、太阳同步轨道、极地轨道、中高轨道、载人航天发射等多样任务的发射能力。此外,商业发射企业崭露头角,“朱雀”“捷龙”“双曲线”等小型火箭正在研制。2019年7月,“双曲线一号”火箭成功完成中国首个商业运载火箭的入轨发射,拉开了民商航天入轨发射序幕。图1所示为世界主要运载火箭运载能力和运载效率对比。可以看出,中国运载火箭的运载能力已初步达到世界航天强国主流水平,但火箭的运载效率总体偏低。运载效率作为评价火箭的综合能力的指标,反映了火箭的结构系数、发动机比冲、推重比等,未来需重点提升。

中国运载火箭测试发射主要由酒泉卫星发射中心(JSLC)、太原卫星发射中心(TSLC)、西昌卫星发射中心(XSLC)、文昌卫星发射中心(WSLC)4个航天发射场保障和实施,在用综合发射工位7个、小型工位2个,2018年取得年发射次数39次的世界纪录。图2所示为世界主要航天发射场的地理分布,图3所示为世界主要航天发射场自转线速度

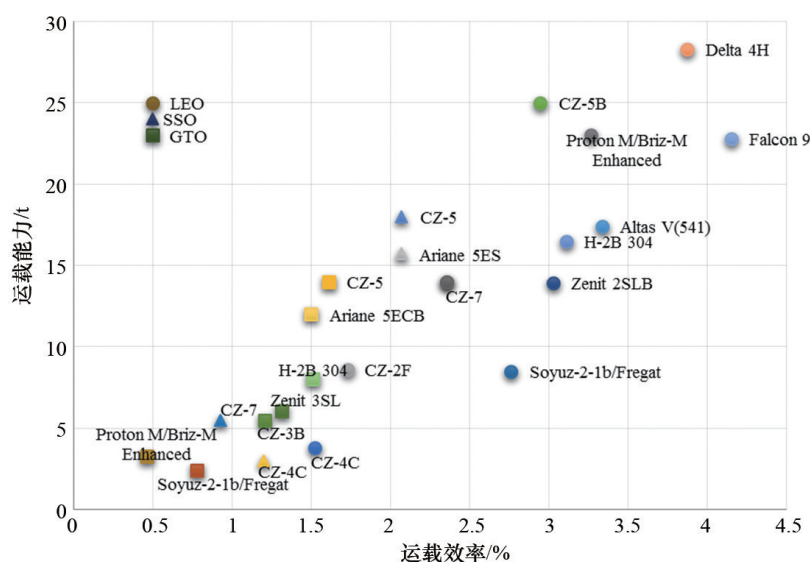


图1 世界主要运载火箭运载能力和运载效率

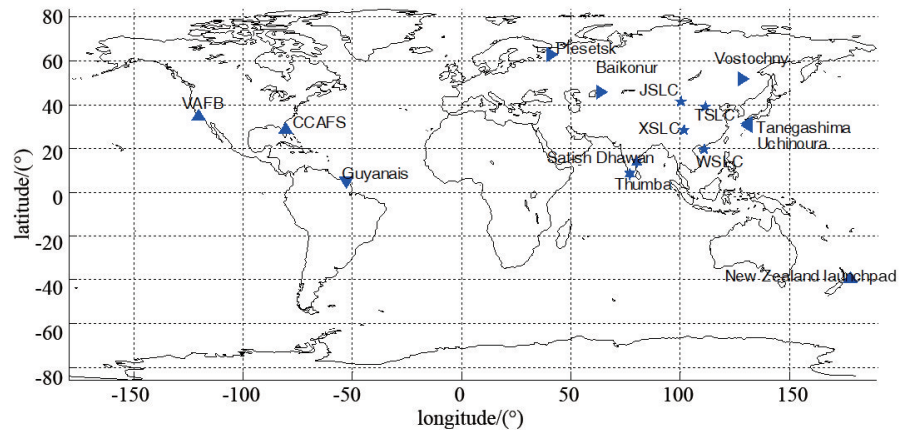


图2 世界主要航天发射场

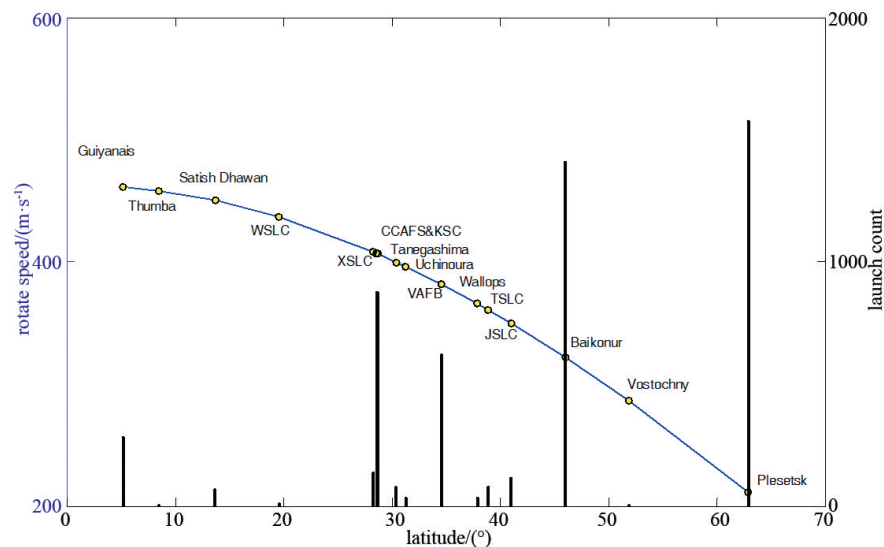


图3 世界主要航天发射场自转线速度及累计发射数量

及累计发射数量对比。由图中可以看出,中国火箭发射场已初步建成沿海内陆相结合、高低纬度相结合的布局,发射场数量和区位优势上可比肩世界航天强国,但文昌发射场作为新兴的航天发射场,发射容量尚有待进一步挖掘提升。

1.2.2 发展特点

中国运载火箭发射运输主要有以下4个发展特点。

1) 体系不够完善。长期以来火箭作为进入空间的单一手段,轨道转移飞行器和重复使用运载器发展缓慢,仍然依靠常规液体火箭,无毒无污染火箭体系不够完善,且没有形成合理运载能力台阶。

2) 测试发射不够简洁。发射场测发操作繁杂、参与人员多,箭地一体化设计和无人值守有待加强,信息化和智能化应用有待拓展。

3) 技术更新缓慢。发射运输系统载荷的通用化适应能力有待加强,异轨部署、高低轨转移等技术尚需要进一步发展,发动机核心技术能力发展相对滞后。

4) 产品质量待提升。近年来航天发射方面面临较为严峻的质量形势,重大问题接连发生,商业发射频频推延,成熟产品故障频发,迫切需要对产品质量提出更高要求。

2 未来发展趋势

2.1 低成本进入空间将改变百年航天格局

当前, GTO 发射价格约为 1 万~3 万美元/kg, LEO 运载发射价格约为 1 万美元/kg(表 1)^[1]。近年来, 在各国政府大力支持下, 新兴航天企业井喷式出现并快速发展, 涌现出一批明星商业航天企业。在火箭发射领域, 美国诞生了 SpaceX、Orbital ATK、Blue Origin 等, 打破了波音、洛克希德·马丁等在美国太空发射的垄断, 国际上诞生了海上发射公司 Sea Launch, 成为唯一提供海上发射服务的商业公司。商业航天企业采取扁平化管理提高了管理效率, 在研制和生产过程以降低成本为主要目标, 同时采用灵活的技术路线, 注重继承和集成现有技术, 提高研发效率, 显著降低了航天发射成本, 大幅提高了性价比。在商业航天发射市场, SpaceX 公司 Falcon 9 的研制周期为 4 年半, 研制费用约为 3 亿美元, Falcon 9 的单次发射费用为 5000 万美元, GTO 轨道发射费用仅为 0.6 万美元/kg, 相比 Delta IV 为 3.33 万美元/kg, Atlas V 为 3 万美元/kg。中国

的国际商业发射服务费用约为 1 万~2 万美元/kg, 在同级别火箭中, Falcon 9 无论是总价还是单位质量发射费用都是最低的。此外 SpaceX 的“龙”飞船 12 次空间站商业补给服务平均每次花费约 1.3 亿美元, 远低于航天飞机平均 15 亿美元/次的费用^[2]。图 4 所示是 SpaceX Falcon 9 多次复用后的成本趋势, 从图中可以看出, 在 9 次复用后发射成本在首次发射的基础上可降低 1/2, GTO 轨道单位质量发射费用将达到 0.3 万美元/kg, 约为美国联合发射联盟 3 万美元/kg 的 1/10。

表 1 典型运载火箭发射价格

序号	运载火箭	GTO 运载能力/t	火箭单价 /亿美元	发射费用 / (万美元·kg ⁻¹)
1	Falcon 9	8.3	0.5	0.60
2	Delta IV	4.2	1.4	3.33
3	Atlas V	5.0	1.5	3.00
4	Proton M	5.5	1.0	1.82
5	Zenit 3SL	6.0	1.1	1.83
6	H-IIA	4.2	0.9	2.14
7	Ariane 5	10.5	2.1	2.00

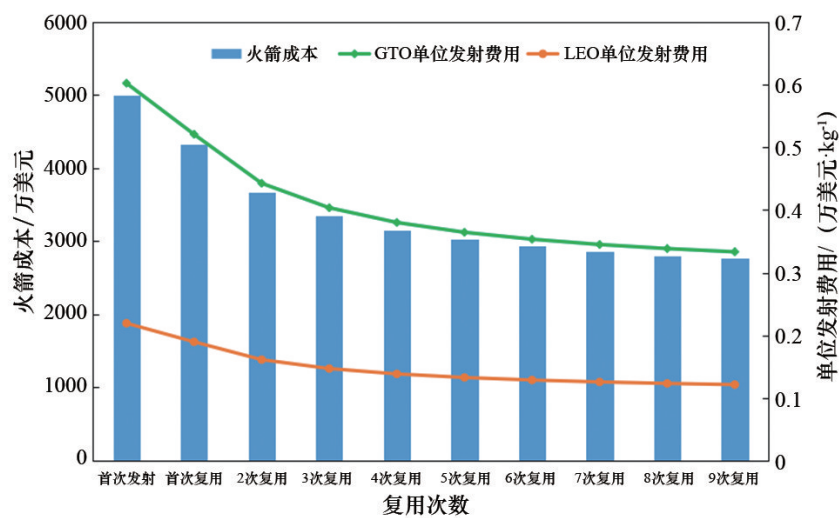


图 4 SpaceX Falcon 9 多次复用后的成本

未来, 随着民商航天发射企业的深度参与、重复使用运载技术的深入发展, 进入空间的成本有望进一步压缩, 低成本进入空间将彻底改变世界百年航天格局, 将对人类社会产生巨大影响。(1) 超大规模星座组网将变成现实。在世界航天发展的相

当长一段时间内, 对构建数以万计超大规模的星座无外乎天方夜谭。近年来, 随着 SpaceX 提出的 4.2 万颗卫星的 Starlink 计划、OneWeb 提出 2000 多颗卫星的星座建设计划, Google、Facebook、Planet Labs 等公司都提出了宏大的星座建设计划。2020

年4月22日,SpaceX公司将第7批60颗Starlink卫星发射入轨,1年来发射卫星总计422颗,标志着人类已经具备构建超大规模星座的能力。(2) 大国航天面临代际竞争局面。低成本进入空间的量变将会导致竞争的质变,航天大国推出的星座计划、载人航天计划、探月计划以及深空探测计划,上述计划投资规模将十分巨大(例如航天飞机项目耗费2285亿美元、阿波罗计划耗费1608亿美元),并且最终将主要成本转嫁到进入空间的成本(例如GPS单星发射成本3亿美元、卫星成本2.5亿美元,进入空间成本占54.5%)。进入空间成本的大幅降低将有力支撑航天大国实现上述计划;相反地,极低成

本进入空间将对其他航天国家形成“降维打击”效应,国际航天发射运输已明显呈现跨代竞争的局面。(3) 航天消费市场迎来蓬勃发展。由于进入空间的高风险和高成本,航天往往以国家和军队应用为背景,随着成本的降低,航天有望从高高在上走向生活,形成蓬勃发展的个人消费市场,诸如太空旅游、私人卫星、太空采矿等。图5所示是历年全球航天产业和航天发射产业的占比,从图中可以看出,在全球航天产业蓬勃发展过程中,航天发射产业的占比正逐步减小,进入空间成本的降低一定程度上也刺激了航天产业的繁荣。

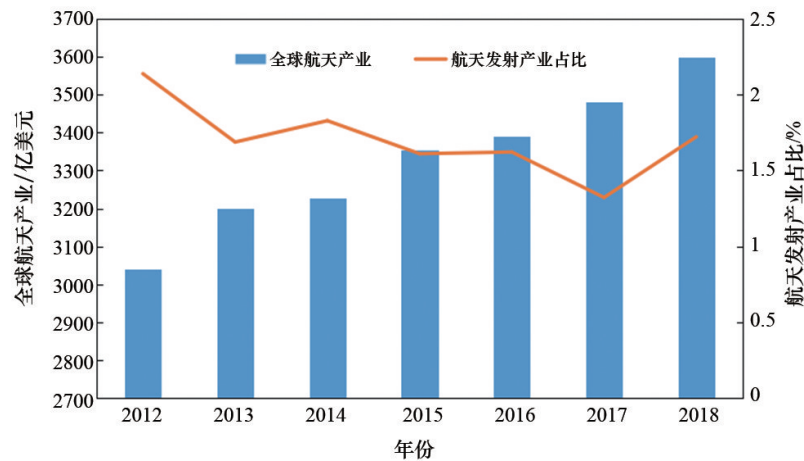


图5 全球航天产业 VS 航天发射产业占比

2.2 远程跨域运输突破百年航空运输效率极限

世界航空经历了百年发展历程,相比1903年的“飞行者一号”,在速度、航程、安全可靠、经济性和舒适性等都已发生了翻天覆地的变化。然而目前航空运输面临运输效率难以突破的窘迫局面,民用航空运输通常难以突破 $0.9 Ma$ 的飞行速度,世界唯一商业运营协和客机飞行速度 $2.02 Ma$,也因各种原因于2003年停止飞行。目前,全球尚无工程化超音速客机的计划。因此,在当前条件下跨洲际飞行仍需忍受10余h的煎熬。人类对出行速度的追求永无止境,全球1h到达的呼声此起彼伏,靠传统航空运输的技术革命已难以实现该目标,只有通过航天运输的技术革命来实现。2018年,美国SpaceX提出利用Starship完成城际间点对

点运输,速度高达 $2.7 \text{万 km/h} (\sim 20 Ma)$,从纽约飞行至上海仅需39 min。中国专家提出高可靠、低成本航班化空间运输系统,该系统由1h全球抵达运输系统、天地往返运输、空间转移运输系统3部分组成,可实现1h 40 min从美国西海岸到达上海^[9]。

航天运输系统中基于吸气式组合动力系统的亚轨道飞行器是实现远程跨域运输的理想工具^[9]。

(1) 美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)于2013年提出了试验性太空飞行器项目“幻影快车”(XS-1),并选定波音公司为主承包商,旨在验证快速响应、廉价进入空间的相关核心技术,主要指标包括10 d内连续10次试飞、飞行速度 $5 Ma$ 以上,最大飞行

速度 $10 Ma$, 将 $400\sim 1360\text{ kg}$ 载荷送入亚轨道等。然而由于技术和财务困境, 2020年1月波音公司和 DARPA 终止了该项目。图 6^[4]所示为试验性太空飞行器 XS-1 概念图。(2) 英国喷气发动机公司 (Reaction Engines Ltd, REL) 于 1994 年提出了“云霄塔”空天飞机 SKYLON, 已持续研究超 20 年, 该空天飞机长 85 m , 翼展 25 m , 起飞质量 325 t , 近地轨道运载能力 15 t , 飞行速度达 5600 km/h , 可实现水平起降、单级入轨和重复使用。可从跑道起飞、入轨, 再入返回前执行任务 (诸如发射卫星、向空间站运送成员或供应品等), 而后滑翔返回并利用自身起落架着陆于传统的跑道上。SKYLON 项目的主要目的是降低进入空间的成本, 将近地轨道发射成本降至 1000 美元/kg 。SKYLON 项目最终将研制出一架使用寿命达 200 次的运载器, 发射失败概率为 1% ,

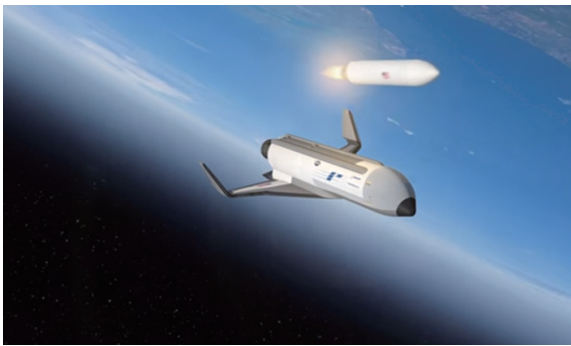


图6 试验性太空飞行器 XS-1

2.3 天地往返运输成为维系空间环境的必然选择

自 1957 年苏联发射第 1 颗人造卫星以来, 人类的空间活动产生了大量的太空垃圾。一般地, 受大气阻力、太阳风等空间环境的影响, 运行在 500 km 轨道高度的航天器, 在轨寿命为 $5\sim 20$ 年, 运行在 1000 km 以上轨道高度的航天器, 在轨寿命将达数百年。据统计, 目前全球在轨运行航天器数量 2000 余颗, 而到寿且仍在空间运行的航天器数量达 3000 余颗。此外, 由于航天发射过程末子级、航天器碰撞以及卫星拦截试验等迄今产生了约 1.7 亿个太空碎片^[7]。近年来, 随着各国特别是民商企业纷纷推出的超大规模低轨卫星星座, 例如 SpaceX 公司提出 4.2 万颗卫星组成的 Starlink 星座等, 空间碎片的爆发可能加速到来。空间碎片环境长期演

损毁概率为 0.005% , 从接收到发射指令到执行任务的时间少于 5 d 。图 7^[9]所示为云霄塔 SKYLON 空天飞机概念图。SKYLON 采用佩刀发动机 (synergetic air-breathing and rocket engine, SABRE) 作为动力装置, SABRE 具有双模态工作能力, 在火箭发动机工作模式下, 为一台闭循环液氧/液氢高比冲火箭发动机; 在吸气发动机工作模式下, 大气取代液氧, 气流通过一个 2 重激波轴对称进气管道进入发动机, 在进入主燃烧室前, 液氢燃料流为闭循环的氦回路降温, 在吸气模式下, 发动机的工作类似于一台涡轮基循环发动机^[6]。随着吸气式组合动力发动机的深入研究, 其关键技术的突破已初见端倪, 亚轨道飞行器有望超越现有航空飞行器运输效率极限, 成为跨洲际飞行的另一优选方式。



图7 云霄塔 SKYLON 空天飞机

化模型分析表明, 1100 km 左右高度的碎片对空间环境影响最大, 导致碰撞产生概率高, 新增碎片会长时间停留在空间环境中产生持续性影响。事实上, 该轨道高度也是目前大规模星座主要选用的轨道高度^[8-9]。如不采取措施及时清理空间, 未来空间环境将急剧恶化, 并将成为阻碍人类冲出地球探索宇宙的枷锁^[10]。

空间碎片的清理一般有飞网捕获、电动绳系、机械臂抓捕、激光烧蚀等方式。欧盟和美国在空间碎片移除方面研究较为深入。2019 年, 欧空局在 Remove DRBRIS 项目的支持下完成了“鱼叉”穿刺捕获空间碎片试验; 2020 年 3 月, 欧空局启动世界首次空间碎片清理任务, 计划于 2025 年发射“清洁空间 1 号”飞行器, 清理欧空局在轨 100 kg 的碎片。

美国“轨道快车”计划和“凤凰”计划可用于在轨维修和空间碎片移除。2015年,美国X-37B空天飞机(图8^[11])实现在轨飞行718 d,该项目也标志美国具备实战化的空间操作能力。由前述空间碎片清理项目的试验可知,无论采取哪种类型的技术,都对将清理平台投送至轨道空间,同时将捕获的空间碎片移除轨道或返回地面等方面提出了极高的要求。从现有技术来看,单位质量的太空碎片离轨成本要远高于将单位质量的航天器发射入轨。因此,发展高可靠、公交化、极低成本的天地往返运输系统,是支撑商业化空间碎片移除、维系空间环境的必由之路。



图8 X-37B空天飞机

2.4 空间轨道多样性催生多样态全域发射能力

卫星轨道设计主要遵从所执行的任务,按照轨道类型主要有LEO、太阳同步轨道(SSO)、地球同步轨道(GEO)、中地球轨道(MEO)、倾斜同步轨道(IGSO)等,从发射入轨角度还有GTO、LTO、地火转移轨道(MTO)等。轨道类型不同,对应的最优发射方式也不尽相同。例如,低纬度发射顺行轨道占优,高纬度发射逆行轨道占优。然而在有限数量和区位的发射场内,受限于纬度、射向、航落区安全等因素,发射场所能执行的发射任务也严格受限,随着轨道空间多样性发展趋势,将催生对多样态全域发射能力的需求。

1) 小倾角发射成为商业航天主流。随着商业航天的深入发展,低轨通信卫星星座迎来蓬勃发展势头,低轨通信卫星星座将从原来的移动通信星座转向开发大规模宽带通信星座,例如Starlink、One-web、Leosat、Telesat等,这些星座呈现采用低轨道、

小倾角、小卫星趋势^[12]。表2所示为典型低轨卫星星座参数。而传统航天发射轨道主要为大倾角、极轨和零倾角轨道,发射场和发射能力设计上未充分考虑到上述需求。此外,目前商业遥感卫星或星座大多采用大倾角太阳同步轨道,太阳同步轨道的设计与地理经度严格耦合,因此对国家而言是稀缺的战略资源。随着商业遥感小卫星的批量发射,目前太阳同步轨道卫星轨位被大量无序占用,未来太阳同步轨道必然会与地球同步轨道等稀缺轨道一并纳入国家统一管理,将按照国家安全、经济社会等方面需求统筹分配。结合上述因素,小倾角轨道将成为未来商业航天发射的主流轨道,发射场和发射能力设计上应调整满足该需求。

表2 典型低轨卫星星座

星座名称	所属公司	卫星数量	轨道倾角/ $^{\circ}$	轨道高度/km	质量/kg
Starlink	SpaceX	4.2万	30~97.7	1150/550	227
Oneweb	Oneweb	720	87	1200	150
Kuiper	Amazon	3236	33/42/51.9	—	200
Telesat	Telesat Canada	117	37.4/99.5	1000/1248	168
Leosat	Leosat	78~108	—	1432	—
Boeing	Boeing	2956	45/55/88	1200/1000	—
Dove	Planet Labs	188	52	—	5

2) 批量发射成为星座部署的手段。一般地,中大型运载火箭单位质量发射成本比小型运载火箭单位质量发射成本低。例如,欧空局Vega C 700 km SSO运载能力2.2 t,预计单位质量发射费用超10万元/kg;中国KZ-1A运载能力约250 kg,预计单位质量发射费用约14万元/kg;美国SpaceX Falcon 9 LEO运载能力22.8 t,单位质量发射费用1.8万元/kg。使用小型固体火箭按照一箭一星发射已远远没有使用中大型液体火箭一箭多星批量发射的成本优势。Falcon 9一箭发射60颗Starlink卫星,单星质量227 kg,单星发射成本83万美元,如若采用中国KZ-1A运载火箭,一箭一星发射,单星发射成本高达500万美元。图9^[13]所示为Starlink批量发射卫星整流罩内堆叠形式。因此批量发射

将成为未来大规模商业星座部署的主要手段,其中小卫星和整流罩的集成拓扑优化、小型化分离结构设计、先进上面级和异面轨道部署能力将成为航天运输的重点研究内容。



图9 SpaceX Starlink 批量发射卫星

3) 多样态全域发射能力快速形成。在陆基固定发射方面,普遍倾向由高纬度内陆,向低纬度濒海方向建设发射场。近年来建设的发射场主要包括俄罗斯东方发射场 51.9°N ,中国文昌发射场 19.6°N ,美国火箭实验室新西兰北岛发射场 39.3°S ,并计划在中大西洋地区太空中心建造第2个商业发射场^[14],SpaceX也计划在肯尼迪航天中心建设私有发射场。在空基发射方面,微软创始人之一保罗·艾伦推出了平流层发射Stratolaunch,采用双机身空基平台,可搭载275 t机载火箭发射,维珍银河公司(Virgin Galactic)推出了太空船二号(Space Ship Two),通过挂载在白骑士二号(White Knight Two)上发射进入亚轨道,将成为继美国飞马座空基发射后的工程化空中发射系统。在海基发射方面,Sea Launch公司2009年重组后,是目前世界上唯一提供海基发射服务的公司,其主力运载火箭是天顶号Zenit-3SL,截至目前共发射了36次,其中32次成功、1次部分成功。中国CZ-11海射也于2019年完成首次试验。目前航天发射领域以陆基发射为主,海

基、空基发射为补充的全域发射格局初步形成^[15],将满足军、民、商各类用户多样化航天发射任务需求,未来航天发射样态的走势,仍需经过任务和市场的检验。

2.5 航天推进系统将不可避免地迎来重大变革

近百年来,航天推进方式主要包括化学推进、核推进、电磁推进、激光推进、等离子推进等方式,但作为从地面进入空间的推进方式几乎均采用化学推进方式,在可遇见的相当长一段时间内仍将成为主要的推进方式。传统化学推进体制经历了液氧/酒精、四氧化二氮/偏二甲肼、液氧/煤油、液氢/液氧、液氧/甲烷等历程。近年来,随着民商航天发射企业的异军突起以及重复使用运载技术的重大突破,传统推进体制格局将迎来重大变革。

1) 液氧甲烷将主力运用于可重复。液氧甲烷推进体制具有比冲高(理论比冲比液氧液氢发动机低约800 m/s,比液氧/煤油发动机高约100 m/s)、无结焦(煤油极限结焦温度560 K,甲烷950 K)、不易积碳(400~900℃燃烧温度范围无明显积碳)、相容性好、无毒无污染、相对安全(爆炸容积百分数5%~15%,自动点火温度为540℃)、资源丰富(主要来源于液化天然气)、价格相对便宜(液氢的1/70、煤油的1/3)等优点^[16-17]。尤其是液氧甲烷无结焦、不易积碳的优点,可大大减少再次使用过程中的清理和测试工作,天然适用于重复使用运输系统,理论上可实现航班式“即加即飞”模式。表3为传统化学推进剂组合性能对比。近年来,民商企业成为液氧甲烷发动机的研制主力,2014年美国Blue Origin推出了BE-4液氧甲烷发动机,采用富氧分级燃烧循环,地面推力249.5 t,推力室压13.4 MPa。该发动机拟用于Blue Origin的重复使用火箭New Glenn,同时获得了ULA的合同,用于美国下一代火神运载火箭Vulcan。2019年,SpaceX公司推出了猛禽Raptor液氧甲烷发动机,采用全流量补燃循环,地面推力3050 kN,推力室压30 MPa,推力调节范围20%~100%,该发动机主力用于Super-heavy Starship火星探测重型运载火箭^[18]。中国民商企业蓝箭、星际荣耀和九州云箭在液氧甲烷发动机上取得较大进展,分别推出了80 t级天鹊、10 t级凤凰、15 t级焦点一

号、100 t级焦点二号、10 t级凌云和80 t级龙云液氧甲烷发动机。同时上述液氧甲烷发动机均有重复使用运载火箭研制需求的牵引,在可遇见的未来,液氧甲烷发动机将成为国内外重复使用运输系统的主力推进系统。

表3 传统化学推进剂组合性能

项目	四氧化二氮/ 偏二甲肼	液氧/ 甲烷	液氧/ 煤油	液氧/ 液氢
混合比	2.24	3.5	2.74	6.0
理论比冲/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3169	3481	3367	4364
相对密度	1.173	0.8276	1.024	0.3610
理论密度比冲/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3717	2881	3448	1576

2) 液氧煤油将主力运用于基础级。液氧煤油发动机具有无毒无污染、密度高、使用安全性好等优点。液氧煤油推进剂组合真空理论比冲比液氧甲烷发动机低约 114 m/s,但密度比冲却高出约 19.6%,且煤油可常温保持,在发射场使用环境友好。此外,高能合成煤油可大幅提高液氧煤油发动机的性能,例如俄罗斯采用高能煤油的 RD-58S 发动机的真空比冲高达 3541 m/s,比液氧煤油理论比冲高出 174 m/s。从世界范围看,早期液氧煤油在与液氧甲烷路线选择上,主要航天大国不约而同地选择了液氧煤油路线,并通过重大工程项目牵引取得了令人瞩目的成绩。其中俄罗斯 RD-170(推力 790 t)和美国 F-1(推力 670 t)作为能源号和土星五号重型运载火箭主发动机,均选用液氧煤油路线,其中 RD-170 仍保持世界发动机最大推力记录;RD-180 作为 Atlas V 的主发动机,取得了 100% 发射成功的记录,被 ULA 称为不可替代的发动机;Merlin-1D(推重比 183)作为 Falcon 9 重复使用火箭的主发动机,打破了世界推重比记录,并作为首型商业化重复使用火箭,开辟了火箭动力重复使用发展路线。中国 YF-100(推力 120t)作为中国新一代运载火箭基础级主力发动机,采用高压富氧补燃循环模式,在 CZ-5 系列运载火箭中提供了 90% 以上的基础级推力,未来将作为中国进入空间的主力发动机^[19-20],同时随着 500 t 级液氧煤油发动机的顺

利研制,将进一步奠定液氧煤油主力作为基础级发动机局面。

3) 液氢液氧将主力运用于末子级。氢氧发动机具有无毒无污染、最高理论比冲性能(比液氧甲烷高约 25%,比液氧煤油高约 30%)等优点。以美国为代表的航天强国在氢氧发动机上取得卓有成效的研究,其中主用于航天飞机的 SSME(Space Shuttle Main Engine)采用补燃循环,推力 209 t,比冲 4520 m/s,代表着现有氢氧发动机的技术高峰;主用于 Delta IV 的 RS-68,推力 327 t,比冲 4008 m/s,是推力最大的氢氧发动机^[21]。中国 CZ-5 系列运载火箭的研制成功,标志着中国已经掌握了 70 t 级氢氧发动机的技术,但与国外相比还有较大差距。氢氧发动机作为液体火箭发动机的技术巅峰,虽然具有很高的技术性能,但仍然存在技术难度大、材料工艺要求高、推进剂成本高、发动机成本高、特殊气体使用要求高等问题,更适宜作为投入产出比高的末子级。美国自 RS-68 之后 20 余年未推出新型号,采用 RS-68 作为基础级的 Delta IV 已列入退役规划,由 SSME 改进的 RS-25 主用于 SLS 重型火箭,成为美国唯一采用氢氧发动机作为基础级的火箭^[22]。新研的火神 Vulcan、New Glenn、Super-heavy Starship 基础级已转向液氧甲烷动力,Atlas V 和 Falcon 9 的基础级则采用液氧煤油。而自 1958 年研制的 RL10 系列(推力 6.8 t)氢氧发动机,则持续改进用于火箭末子级,包括最新的 Vulcan 火箭。图 10 所示为世界主要发动机推力和比冲对比。因此,从国内外发展趋势上看,应在中小推力氢氧发动机上精益求精,不断提高技术能力,并结合运载火箭型谱规划,将氢氧发动机研制重心转移到适配运载火箭末子级上。

3 结论

当前世界航天领域再次迎来蓬勃发展,正在掀起一场科技革命之势。发展航天,运载先行,发射运输作为基础性和支撑性手段,是所有航天产业的基础和前提。通过国内外发展现状分析可以看出,以高可靠、低成本、高安全、可重复、自主智能等特

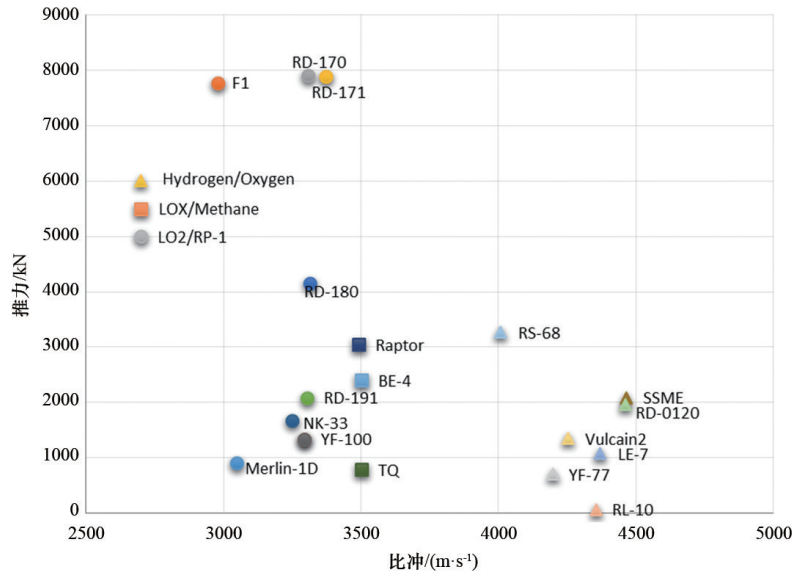


图 10 世界主要发动机推力和比冲对比

征为代表的新一代航天发射运输系统,正在对上一代航天发射运输系统形成压制竞争优势。特别是与美国相比,中国无论在运载能力、发射成本和运载效率上都还有相当的差距。通过未来发展趋势分析,一方面中国发射运输领域应摒弃弯道超车、直面短板弱项,加大对液氧甲烷动力、液氧煤油动力重复使用运输系统,大推重比、多次启动和深度节流发动机的研制,以期尽快弥补代差;另一方面应紧盯国际发展前沿,适当牵引吸气式组合动力技术、深度预冷循环技术、水平起降单级入轨完全重复使用技术等,避免再次形成技术代差。

参考文献(References)

- [1] 刘熾, 陈亮, 邹薇, 等. 国外降低运载火箭成本途径分析及对策建议[J]. 中国航天, 2018(5): 38-41.
- [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] 包为民. 全球航天运输革命时代正在到来[J]. 中国航天, 2019(4): 10-13.
- [4] 龙乐豪, 蔡巧言, 王飞, 等. 重复使用航天运输系统发展与展望[J]. 科技导报, 2018, 36(10): 84-92.
- [5] Davy J J, Timothy N, Joy N, et al. Skylon space plane[J]. International Journal of Engineering and Science, 2016, 6(4): 71-77.
- [6] 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.
- [7] 本刊编辑部. 1.7亿个太空垃圾碎片包围地球[J]. 上海商业, 2020(1): 7.
- [8] 陈险峰, 任维佳, 刘惟芳, 等. 小卫星增阻主动离轨技术的设计与实践[J]. 空间碎片研究, 2020, 20(1): 17-24.
- [9] 沈丹, 刘静. 大型低轨星座部署对空间碎片环境的影响分析[J]. 系统工程与电子技术, 2020(1): 1-16.
- [10] 徐纬地. 空间碎片移除能力发展, 中国航天当前要务之一——空间环境治理刍议[J]. 空间碎片研究, 2020, 20(1): 10-16.
- [11] Editorial office. X-37 demonstrator to test future launch technologies in orbit and reentry environments[R]. Huntsville: Marshall Space Flight Center, NASA, 2003.
- [12] 肖永伟, 孙晨华, 赵伟松. 低轨通信星座发展的思考[J]. 国际太空, 2018(11): 24-32.
- [13] Thompson A. SpaceX just launched 60 Starlink Satellites (and nailed a milestone rocket landing) [EB/OL]. (2019-11-11)[2020-07-28]. <https://www.space.com/spacex-starlink-launch-fourth-rocket-landing-success.html>.
- [14] 谭惠文, 徐晓帆. 全球航天发射状场现状分析[J]. 国际太空, 2019(6): 49-53.
- [15] 韩洪涛, 杨开. 国外航天前沿技术最新发展浅析[J]. 国际太空, 2019(4): 45-49.
- [16] 李文龙, 李平, 邹宇. 烃类推进剂航天动力技术进展与展望未来[J]. 宇航学报, 2015, 36(3): 243-253.
- [17] 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): 1-6.

- [18] 杨开, 才满瑞. 国外液氧/甲烷发动机的最新进展[J]. 中国航天, 2017(10): 14-19.
- [19] 陈士强, 黄辉, 张青松, 等. 中国运载火箭液体动力系统发展方向研究[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(2): 1-12.
- [20] 杨军, 朱怡. 液氧煤油发动机: 航天新征程 动力新高峰[J]. 中国航天, 2015(11): 10-11.
- [21] 郑孟伟, 岳文龙, 孙纪国, 等. 我国大推力氢氧发动机发展思考[J]. 宇航总体技术, 2019, 3(2): 12-17.
- [22] 郑大勇, 颜勇, 胡骏. 高性能高可靠氢氧发动机方案探讨[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(6): 10-13.

Review and development perspective of the space launch and transportation system

ZHU Xiongfeng, CHENG Hongwei, LIU Yang, LIU Ying, TAN Yuntao, ZHOU Chenghong

Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

Abstract According to space launch and transportation systems of the world, history and current development are studied in this research. Comparisons of rockets, rocket engines and satellite launch centers are carried out, which yield the future development trend. Some perspectives are also brought forward. Entering the space with extreme-low cost will totally change the centennial development of the aerial transport. Remote and cross-domain transportation will break the transportation efficiency of the aerial transport over the world. Reusable earth-space transportation system will become a necessary choice to maintain space environment, such as cleaning space debris. Multiple orbit requirement of spacecraft will expedite diversity and multi-domain launch capacity of the space launch system. Domains where conventional space propulsion systems, e.g., hydrogen/oxygen, lox/methane, and LO2/RP-1 based engines, are applied will inevitably witness an revolution. The development trend and future perspectives of the space launch and transportation system will benefit researches in our country, such as choosing technical route, tackling critical techniques, engineering and so on.

Keywords rocket; satellite; space launch pad; engine; space launch and transportation system ●



(责任编辑 王志敏)