

中国运载火箭型谱发展

朱雄峰, 刘阳, 刘鹰, 谭云涛, 雍子豪, 崔朋, 王铁兵, 韩秋龙

北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 针对中国运载火箭型谱规划, 提出了运载火箭体系定位、火箭划代和规模划分, 明确了运载火箭型谱规划的重点是第3代和第3.5代中大型一次性运载火箭, 以及第4代重复使用运载火箭。分析了运载火箭技术发展需求和能力发展需求, 明确了运载火箭的动力配套、火箭构型、发射成本、运载能力、载荷包络和发射容量等。针对技术需求和发展需求, 提出了第3代一次性运载火箭型谱共7型火箭、第3.5代一次性运载火箭型谱共6型火箭、第4代重复使用运载火箭型谱共2型火箭。同时提出了第2代、第3代、第3.5代和第4代运载火箭型谱之间的演进策略以及更新换代策略, 即第2代运载火箭持续使用到2030年前后, 第3代运载火箭持续使用到2035年前后, 第3.5代和第4代运载火箭持续使用到2045年前后, 最终完成对第2代和第3代运载火箭的更新换代。

关键词 发射运输系统; 运载火箭; 液氧煤油; 液氧甲烷; 液氢液氧; 重复使用

运载火箭的核心任务是将卫星、人员和物资等投送到指定空间, 是一个国家开发利用太空的基础和前提, 其能力高低很大程度上制约着其空间的发展和水平, 并关乎国家政治、经济、科技等长远发展。近年来, 世界航天强国正全面谋求太空优势, 制定或调整太空发展战略, 将进出空间能力提升到决胜太空新高度: (1) 加速发射运输系统更新替代, 提出大运力、低成本的中大型主力运输系统; (2) 加快推进创新性技术研发应用, 发展高可靠、低成本、重复使用等为特点的下一代运输系统;

(3) 加大颠覆性技术探索支持力度, 设立专项推进水平起降组合动力、天地往返、航班式进出太空新技术研究, 试图将技术领先优势快速转化为新的代差优势。中国运载火箭研究起步较早, 经过几代人数十年的艰苦创业, 已经基本建成满足需求的小、中、大各型运载火箭。然而当前中国运载火箭正面临新老火箭更新替代, 在运载能力、发射成本、发射容量等方面尚存在明显不足。国内外运载火箭存在体系能力差距越拉越大的风险, 在未来空间竞争博弈中可能存在“上不去、下不来、耗不起”的巨大

收稿日期: 2022-12-15; 修回日期: 2023-03-29

基金项目: 航天系统部综合研究项目(TJ20203C020096)

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

引用格式: 朱雄峰, 刘阳, 刘鹰, 等. 中国运载火箭型谱发展[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 16-28; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.19.002

风险。特别是中国运载火箭国家队中仍然存在重采购、轻研发,重型号、轻预研,重利用空间、轻进出空间的思维惯性,迫切需要统一思想、加快发展路线的制定和落地推进。面对新形势、新挑战、新机遇,应以航天强国建设为契机,面向国家重大战略需求、瞄准世界科技前沿,以运载火箭型谱规划为切入点,推进各项战略和规划落地,走出一条适合中国国情的发展道路,为航天发展筑牢坚实基础^[1]。

运载火箭型谱规划的核心意义是“统型”,目的是将纷乱复杂的运载火箭型号按任务需求、能力需求、发展趋势等进行设计,须突出任务通用、能力梯度合理、低成本和高可靠。由于载人火箭和重型火箭等重点面向专项任务研制,具有发射成本高、发射周期较长、任务适应性较为单一、全寿命周期总发射次数有限等特征,且由于该专项运载火箭主要为大重型运载火箭,能力梯度相对明确和唯一,建议按照专项任务按需启动建设,待型号立项和构型方案明确后补充到现有运载火箭型谱。同时考虑到固体运载火箭特别是大中型固体运载火箭还没有形成足够规模,当前仍处于技术牵引型的发展思路,宜按技术推动建设,暂不纳入本研究考虑。因此,本研究中的型谱规划重点瞄准大中型主力液体运载火箭,提出相关发展建议。

1 基本概念

首先明确几个基本概念,包括运载火箭在发射运输系统中的体系定位、运载火箭划代、运载火箭的规模划分。这几个概念或出处较多、或概念提出时间较长,不符合当前发展实际。为在规划中统一对话语境,在此提出“一张体系、一种划代、一个规模”^[2]。

1.1 体系定位

根据航天发射运输系统的特点,并结合近年来国内外发射运输系统的发展现状和趋势,将发射运输系统分为常态空间投送、快速空间投送、轨道转移部署、天地往返运输和全球跨域投送等五位一体的体系(图1)。

其中,常态空间投送是指利用大中型固体或液

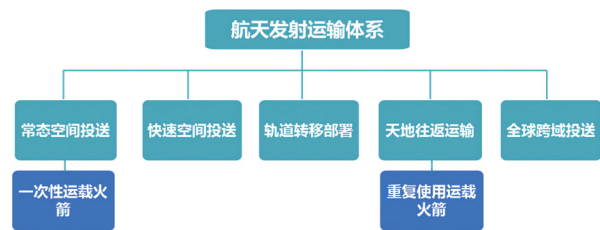


图1 发射运输体系构成

体运载火箭,按照既定的发射计划,以陆基大型固定发射为主要样式,其他发射样式为补充,常态化地将各类航天器投送至指定轨道;快速空间投送是指利用小型固体或液体运载火箭,按照快速制定的发射方案,以公路机动发射为主要样式,海基、空基发射等其他发射样式为补充,及时高效地将小型航天器送入轨道;轨道转移部署是指利用运载火箭上面级或轨道转移飞行器,以多星发射轨道转移部署为主要样式,快速机动变轨样式为补充,完成航天器从空间至空间的轨道机动和部署;天地往返运输是指利用重复使用运输系统,以垂直发射垂直返回、垂直发射水平返回、水平发射水平返回为主要样式,将各类航天器投送到指定轨道,同时可将指定轨道的航天器离轨返回地面;全球跨域投送是指利用亚轨道飞行器,以垂直发射垂直返回、垂直发射水平返回、水平发射水平返回为主要样式,将各类物资从地面投送空间或从地面投送至地面。

考虑到按照目前技术发展水平,常态空间投送主要依靠一次性运载火箭,天地往返运输主要依靠重复使用运载火箭,因此本研究所规划的运载火箭型谱,主要是补强航天发射运输五位一体体系中的常态空间投送和天地往返运输2个体系。

1.2 火箭划代

火箭划代是按照一定的发展脉络和发展规律对运载火箭进行代际划分,是实现火箭持续发展和能力演进提升的依据,也是火箭理论和工程界统一对话的标准。考虑到国际上尚无统一的运载火箭划代标准,根据中国长征系列火箭的研制建设情况,从火箭综合性能、综合效费比、可靠性和安全性、环境适应性、使用维护性等方面,将划分为5代(图2)^[3-5]:第1代解决有无,源自战略武器的一次使

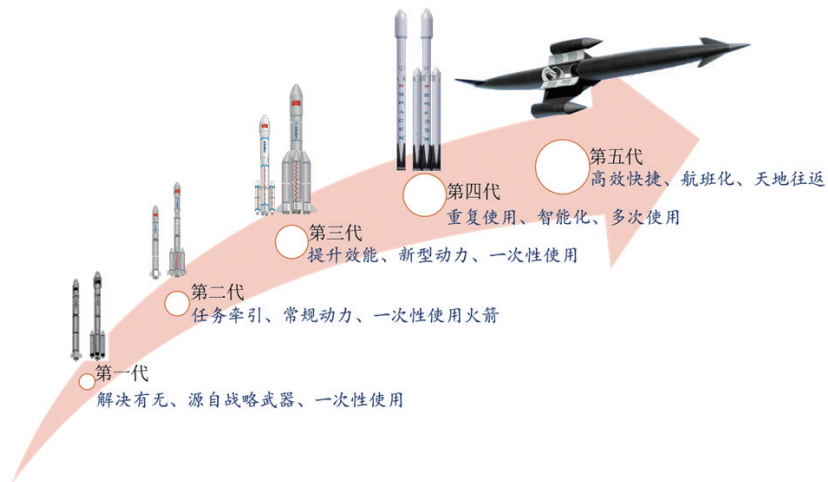


图2 火箭划代标准

用火箭,主要由战略武器型号改进而来,重点解决运载火箭有无问题,采用模拟控制系统,运载能力、运载效率、入轨精度等总体性能偏低,典型火箭如CZ-1、FB-1等,圆满完成中国“东方红一号”等系列卫星发射任务;第2代任务牵引,采用常规动力的一次使用火箭,主要采用四氧化二氮/偏二甲肼等肼类有毒推进剂,采用数字控制系统,运载能力、运载效率和入轨精度有较大提升,典型火箭如CZ-2、CZ-3、CZ-4系列等,圆满完成中国“北斗二号/三号”等系列重大发射任务;第3代提升效能,采用新型动力的一次使用火箭,主要采用液氧煤油、液氢液氧或先进固体动力等无毒推进剂,采用统一总线和先进电气系统,运载能力、运载效率和入轨精度得到大幅提升,典型火箭如CZ-5、CZ-6、CZ-7系列等,支持完成中国“载人空间站”等系列重大发射任务;第4代重复使用,基于智能化、多次使用的火箭,主要采用多次启动、深度变推力的液氧煤油、液氧甲烷或液氢液氧重复使用动力,采用智能控制系统,可快速故障诊断和系统重构,具有运载能力大、运载效率高、发射成本低、航落区可控等特点,典型火箭如美国的Falcon 9系列等,国内尚无工程化型号,正在开展相关关键技术攻关;第5代高效快捷,航班化运行天地往返运输系统,主要采用吸气组合动力等先进发动机,可在大气层、临近空间和太空跨域飞行,通常采用水平起降方式可最终实现单级入轨,该代发射运输系统是实现航班式进入太空的

有效手段,典型型号包括国外SKYLON(在研)等,国内尚无工程化型号,主要在开展组合动力发动机关键技术攻关。

从火箭划代可以看出,中国中大型主力运载火箭集中在第2代和第3代,尚无第4代工程化型号。考虑到第2代运载火箭采用有毒肼类推进剂,国际上主要航天强国均已放弃使用该类型推进剂,加快淘汰第2代运载火箭势在必行。因此本研究介绍的运载火箭型谱,重点面向补强第3代火箭型谱,前瞻布局第4代火箭型谱。

1.3 规模划分

运载火箭规模划分同样为火箭理论和工程界提供统一对话的标准。目前国际上通常采用美国航空航天局(NASA)《Launch Propulsion Systems Technology Roadmaps》的划分标准,分为小型(近地轨道(LEO) ≤ 2 t)、中型(LEO 2~20 t)、大型(LEO 20~50 t)和重型(LEO ≥ 50 t)^[6]。根据近年来运载火箭的研制进展,火箭运载能力均有不同程度提升,如小型火箭Vega运载能力LEO 2.3 t,中型主力火箭Falcon 9运载能力LEO 22.8 t,重型火箭的认识逐步统一,即LEO ≥ 100 t。为此本研究将火箭规模划分为小型、中型、大型、超大型和重型火箭(图3)。

其中,小型运载火箭是指近地轨道运载能力4 t以下的运载火箭,具有集成度高、快速发射能力强等特点,通常以固体运载火箭为主,典型火箭如CZ-6、CZ-11等;中型运载火箭是指近地轨道运载

2) 大幅简化火箭构型。由于单级火箭无法直接入轨,为实现入轨,运载火箭主要采用单芯级构型和捆绑构型,其中捆绑构型又分为固体助推、小型液体助推和通用芯级助推构型;按照级数,单芯级又可以分为两级、三级和四级构型等。一般地,级数越多,采用的分离机构越多、飞行可靠性更低。国际上在研的 Vulcan 采用两级半固体助推构型、Super-heavy Starship 采用两级单芯级构型、New Green 采用两级单芯级构型(可选三级)、Ariane 6 采用两级半固体助推构型、Amur 采用两级单芯级构型(表 1)。美国通过 Delta 和 Atlas 2 个系列火箭(图 5^[9]),运载能力覆盖 LEO 4~28 t,发射轨道覆盖 LEO、中地球轨道(MEO)、太阳同步轨道(SSO)、地

球同步转移轨道(GTO)等。为此在火箭型谱规划中,应大幅压减火箭型号、直径、构型等,按照通用化、系列化和组合化思路,兼顾考虑第 3 代和第 4 代运载火箭,重点发展大直径、单芯级两级和两级半通用芯级构型,优先以单芯级两级构型构建能力梯度,在能力梯度不足时采用两级半通用芯级构型,且一型火箭通用覆盖多种轨道。

3) 大幅提高性能降低成本。评价运载火箭核心指标是运载能力、运载效率和发射成本。运载能力毋庸置疑是运载火箭最重要的指标,按照运载火箭规模划分,一个运载火箭型谱应通过有限构型,既满足最大运载能力的需要,也应通过运载能力台阶的优化,满足同一规模等级内不同运载能力的需

表 1 典型新研火箭构型

运载火箭	构型	芯一级直径/m	助推直径/m	芯二级直径/m	芯三级直径/m
Falcon 9	两级单芯级	Φ3.66×40.9	—	Φ3.66×16	—
Falcon 9H	两级半通用芯级	Φ3.66×42.6	Φ3.66×42.6	Φ3.66×12.6	—
Super-heavy Starship	两级单芯级	Φ9×68	—	Φ9×50	—
Ariane Next	两级单芯级	Φ5.4	—	Φ5.4	—
Amur	两级单芯级	Φ4.1	—	Φ4.1	—
New Green	三级单芯级	Φ7×57.5	—	Φ7×23.4	Φ7×21.9

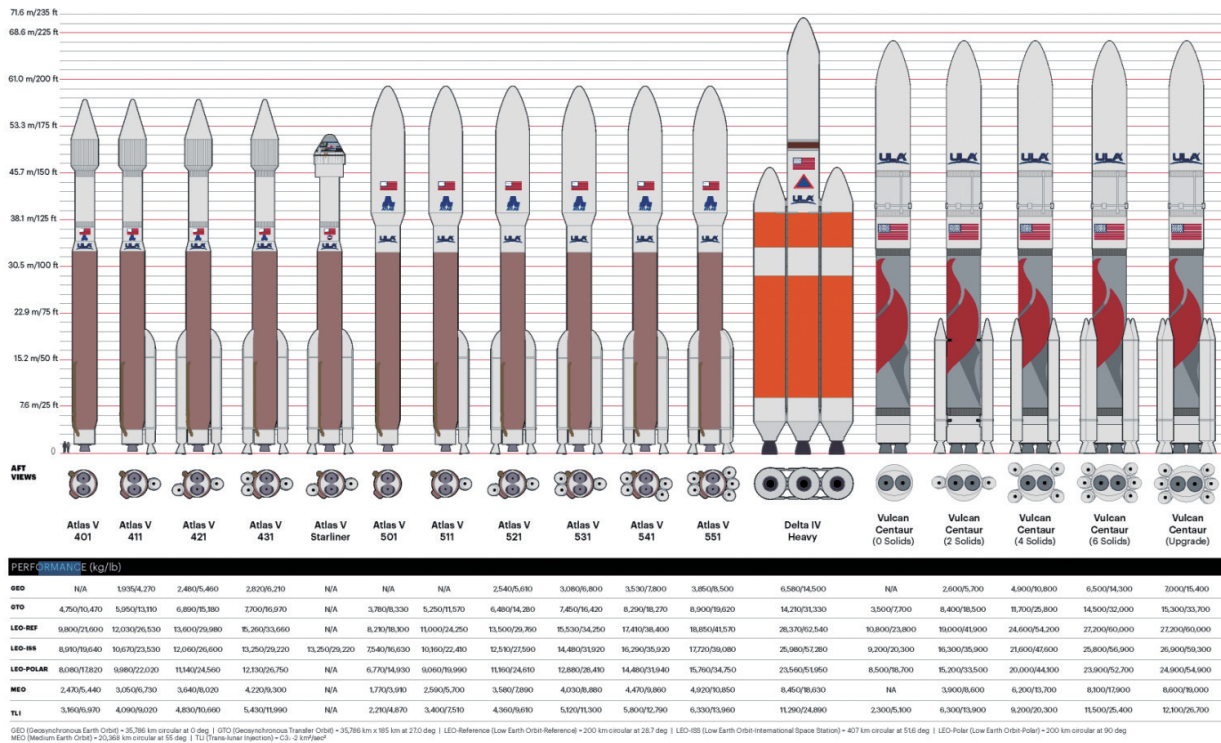


图 5 美国 Delta、Atlas 和 Vulcan 火箭

求。运载效率是投送到指定空间(通常指LEO轨道)的有效载荷质量与运载火箭质量的比值,可以最大程度表征运载火箭的综合性能。图6所示是典型运载火箭的运载能力和运载效率对比,其中Falcon 9H LEO 63.8 t(Falcon 9 LEO 22.8 t),运载效率达4.5%(Falcon 9运载效率4.1%)。图7所示是典型运载火箭的发射成本,其中Falcon 9H折算低轨0.95万元人民币/kg(Falcon 9为1.8万元人民币

币/kg)^[10]。在运载火箭型谱规划中,既要追求更大的运载能力,满足不同运载能力梯度的需求,同时应将运载效率和发射成本对标国际领先水平,实现综合性能和效能最优,避免出现木桶短板效应。对比图6和图7可以看出,中国运载火箭在运载能力、运载效率和发射成本上与国外先进中大型液体运载火箭相比还有较大差距。

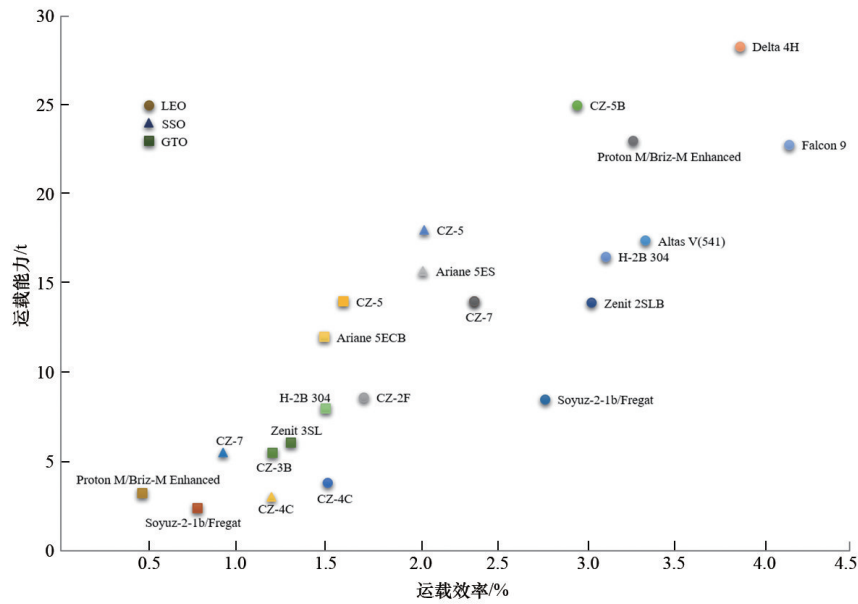


图6 典型火箭运载能力和运载效率

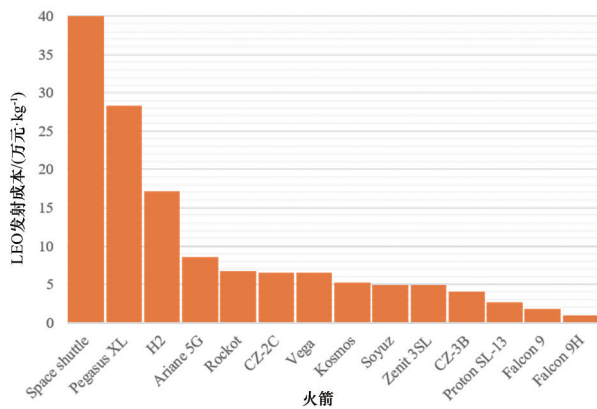


图7 典型运载火箭发射成本

2.2 能力需求

1) 运载能力需求。由于运载火箭型谱规划重点面向中大型液体运载火箭,在中型到大型的能力区间(4~25 t)通过数十年建设已经初步具备一定梯度,在大型到超大型的能力区间(25~50 t)仅有1

型CZ-5运载火箭,目前在该区间主要是专项能力需求,通用能力需求尚未生成;在中型到大型能力区间,主要由CZ-2/4、CZ-7和CZ-5系列火箭构筑了基本的能力梯度。考虑充分继承现有能力格局,将LEO能力梯度设置为0~4、4~14、14~25 t;按运载能力为LEO的70%折算,将SSO能力梯度设置为0~3、3~10、10~20 t;按运载能力为LEO的50%折算,将GTO能力梯度设置为0~3、3~7、7~14 t,如图8所示。从上述能力台阶看,运载火箭型谱规划重点需解决LEO 4 t新老火箭更新替代、SSO 10 t左右的能力补充、以及降低发射成本问题(目前构筑能力梯度的CZ-7和CZ-5火箭均为专用火箭,发射成本较高)。

2) 载荷包络需求。中国中大型液体运载火箭载荷包络集中在2.9/3.35/3.8/4.0/4.2/5.2 m等直径。从历年发射统计看,载荷包络需求≥3.35 m的占比

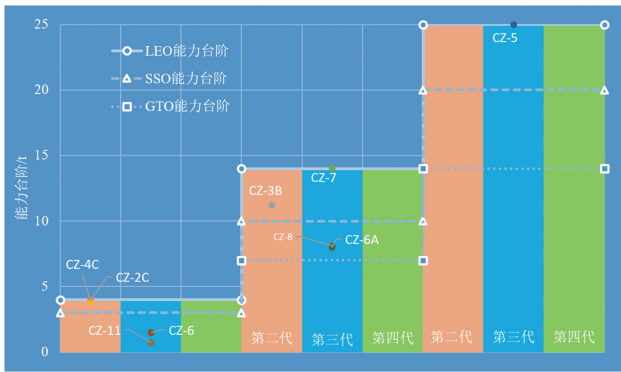


图8 中国运载火箭能力台阶

70%以上,且各类任务特别是多星发射任务对载荷包络要求有增加趋势。参考国际主流运载火箭的整流罩包络(图9^[11-15]),在役的Delta 4和Atlas 5载荷包络4/4.2/5.1/5.4 m、Falcon 9/H载荷包络5.2 m、

Ariane 5载荷包络5.4 m;在研的Vulcan载荷包络4.2/5.4 m,Ariane 6载荷包络5.4 m。可以看出,国际主流火箭的载荷包络一是尺寸相对较大,二是型号相对较少。为此,综合考虑中国运载火箭的现实情况,充分继承现有技术能力,并虑及后续大载荷包络发展需求,运载火箭型谱规划的载荷包络应重点发展3.35/3.8/4.2/5.2 m等直径类型。

3) 发射容量需求。表征发射容量的参数主要是年发射次数和年投送质量。在年发射次数方面,2020年中国总发射次数39次(美国44次),2021年中国总发射次数55次(美国51次),综合来看,中国年发射次数与美国相当甚至超越美国(表2^[16])。但从有关统计看,中国年投送质量却与美国相差甚远,主要原因是中大型运载火箭在所有发射次数中的占比不同。以Falcon 9一箭发射60颗星链卫星

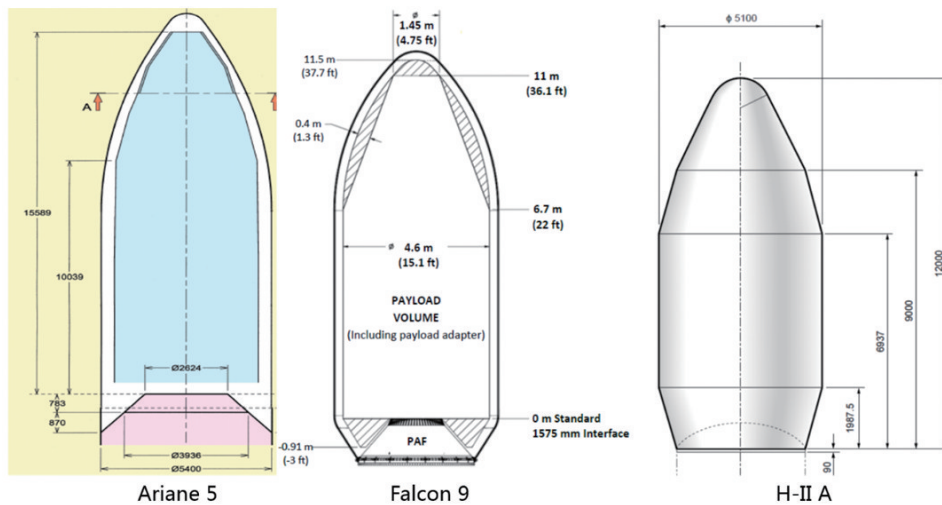


图9 典型运载火箭整流罩包络

表2 2021年世界运载火箭发射次数及航天器数量统计

国家/地区	发射次数/次	发射次数占比/%	航天器数量/个	单箭平均发射航天器数量/个	发射入轨质量/t	发射入轨航天器总数量/个
中国	55	37.67	115	2.1	190.5	111
美国	51	34.93	1335	26.2	402.6	1322
俄罗斯	25	17.12	340	13.6	139.8	340
欧洲	6	4.11	19	3.2	29.4	19
日本	3	2.05	11	3.7	9.8	11
伊朗	3	2.05	5	1.7	0	0
印度	2	1.37	20	10	0.3	19
韩国	1	0.68	1	1	0	0
合计	146	100	1846	12.6	772.4	1822

为例,按照单星 200 kg 计算,发射同样数量的卫星,需要 60 次 KZ-1A 发射任务。因此,首先是加快新一代运载火箭发射工位建设,以提高年发射次数或增强发射能力弹性;其次是大幅提高运载火箭在发射场的测试发射效率,目前新一代运载火箭中测试发射周期 14~50 d 不等,为进一步提高效率,建议新研中大型运载火箭测试发射周期控制在 10 d 以内;最后是大幅提高中大型运载火箭的发射比例,通过较少的发射次数实现较大的投送质量,同时降低对发射工位的发射频次要求。

除上述技术需求和能力需求之外,考虑到中国 4 个航天发射场的现实情况,运载火箭型谱中主力中型运载火箭应具备在 3 个内陆发射场实施发射的能力,大型运载火箭重点考虑在沿海发射场实施发射,兼顾在内陆发射场实施发射。运载火箭射向适配 4 个航天发射场现有射向范围,各子级和整流罩落区应位于现有发射场传统落区。此外,考虑到中国传统按照 5 年规划推动各项建设,运载火箭应具有较好工程实现能力,立项后应在 5 年内完成研制交付使用。

3 型谱总体设计

按照运载火箭技术发展需求和能力发展需求,以下型谱规划重点解决第 3 代、第 3.5 代和第 4 代运载火箭 3 个型谱。

3.1 一次性运载火箭型谱

3.1.1 总体考虑

1) 基于液体主动力再划代。发展火箭,动力先行,对于中大型液体运载火箭,一型动力往往使用 30 年之久,甚至更长时间,对于运载火箭型谱,不可避免地要统筹考虑到液体主动力的基本现实。国内目前新一代运载火箭的液体主动力是 120 吨级液氧煤油发动机,该型发动机在 20 世纪末开始研制,是新一代运载火箭 CZ-5/6/7 等基础主动力,该型发动机未来仍将是进入空间的发动机主力。此外,中国也在开展 300 吨级大推力液氧煤油发动机技术研究,该发动机具有高比冲、大变比、低成本等优势,对比 120 吨级液氧煤油发动机具有较大的性能跃升,在一次性运载火箭发展中,该发动机未来

将完成对 120 吨级液氧煤油发动机的接力^[17]。综合考虑基础主动力对运载火箭型谱设计的重要影响,建议 2035 年前基于 120 吨级液氧煤油发动机的运载火箭为第 3 代运载火箭,2035 年后基于 300 吨级液氧煤油发动机的运载火箭为第 3.5 代运载火箭。

2) 优选大直径两级单芯级构型。如前文所述,火箭级数越多,采用的分离机构越多、飞行可靠性越低。中国第 2 代和第 3 代现役运载火箭的构型包括单芯级两级、单芯级三级、两极半捆绑构型、三级半捆绑构型等,从发展趋势以及对我国现有运载火箭继承性角度,在运载火箭型谱规划中应首先采用单芯级两级构型,其次采用两级半通用芯级构型。同时在确保起飞规模和保障运输性等前提下,应尽可能扩大箭体直径,压缩长细比,提高火箭的整体刚度,特别是未来有可能兼容其他密度比冲较小的推进剂。中国第 2 代和第 3 代现役运载火箭的直径主要有 2.25、3.35、3.8(舱段)、4.2(舱段)、5.0 和 5.2 m(舱段)等,其中 2.25 m 直径由于效率不高,业界已初步达成共识,未来将逐步淘汰该直径火箭,考虑到第 2 代、第 3 代运载火箭的继承性、对发动机的适配性等,建议第 3 代运载火箭优选 3.35 和 5.0 m 直径。由于第 4 代运载火箭可能适配密度比冲较小的推进剂,导致箭体体积较大,为压缩长细比需进一步扩大箭体直径。此外在运输方面,中国以风力发电机筒段运输为代表,在国内基本实现了 4.2 m 以内直径的无障碍长距离运输,考虑对第 3 代运载火箭的继承性、对多机并联发动机布局方案的适配性,建议第 4 代运载火箭优选 4.2 和 5.0 m 直径。

3) 液体主动力配套。如前述液氧煤油、液氧甲烷和液氢液氧等推进剂对运载火箭优选适配性分析,中国现役无毒无污染动力中,适合作为基础动力的有 120 吨级液氧煤油发动机,适合作为末级动力的有 18 吨级液氧煤油发动机和 8 吨级氢氧发动机;在研的无毒无污染动力中,合适作为基础动力的有 300 吨级液氧煤油发动机。结合基于液体主动力的再划代原则,第 3 代运载火箭基础级拟选用 120 吨级液氧煤油发动机、第 3.5 代运载火箭基础级拟选用 300 吨级液氧煤油发动机。综合考虑安全性、发射成本和发射场易操作性等,主打中低轨运载火箭的末级拟选用 18 吨级液氧煤油发动机,

主打中高轨运载火箭的末级拟选用8吨级氢氧发动机。

3.1.2 型谱规划

基于上述考虑,以2035年前后为限,向前规划

第3代运载火箭型谱,共包含“3六3七1五”共7型火箭;向后规划第3.5代运载火箭型谱,共包含4型4.2 m和2型5.0 m中大型运载火箭(图10)^[18]。

其中第3代型谱中的7型运载火箭如下(表3)。

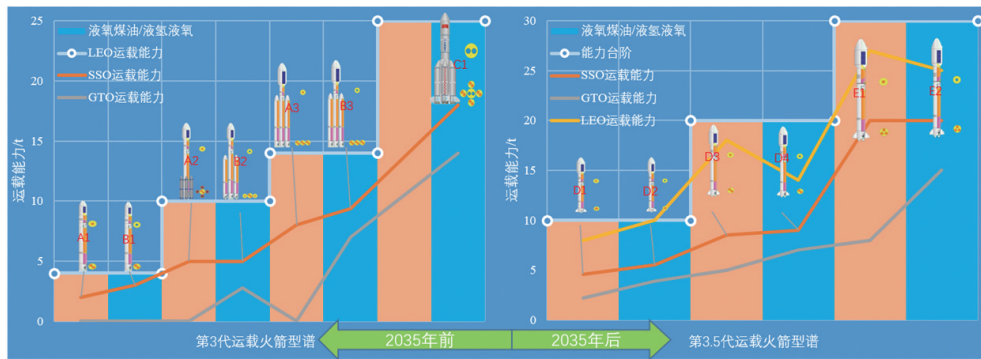


图10 一次性运载火箭型谱

1) A1构型:基于CZ-6A系列运载火箭,3.35 m直径两级单芯级全液氧煤油构型,一级采用2台120吨级液氧煤油发动机,二级采用1台18吨级液氧煤油发动机,运载能力LEO 4 t、SSO 2 t^[19]。

2) B1构型:基于CZ-7A系列运载火箭,3.35 m直径两级单芯级液氧煤油+液氢液氧构型,一级采用2台120吨级液氧煤油发动机,二级采用2台8吨级液氢液氧发动机,运载能力LEO 4 t、SSO 2.8 t^[20]。

3) A2构型:基于CZ-6A系列运载火箭,固液混合两级半构型,一级3.35 m直径采用2台120吨级液氧煤油发动机,二级3.35 m直径采用1台18吨级液氧煤油发动机,4个2.0 m助推各采用1台120吨级固体发动机,运载能力LEO 10 t、SSO 5 t^[21]。

4) B2构型:基于CZ-7A系列运载火箭,两级半液氧煤油+液氢液氧构型,一级3.35 m直径采用2台120吨级液氧煤油发动机,二级3.35 m直径采用2台8吨级液氢液氧发动机,2个2.25 m助推各

采用1台120吨级液氧煤油发动机,运载能力LEO 10 t、SSO 5 t、GTO 3 t^[22]。

5) A3构型:基于CZ-6A系列运载火箭,3.35 m直径两级半通用芯级全液氧煤油构型,3个通用芯级各采用2台120吨级液氧煤油发动机,二级采用1台18吨级液氧煤油发动机,运载能力LEO 14 t、SSO 8 t^[19]。

6) B3构型:基于CZ-7A系列运载火箭,3.35 m直径两级半通用芯级液氧煤油+液氢液氧构型,3个通用芯级各采用2台120吨级液氧煤油发动机,二级采用1台8吨级液氢液氧发动机,运载能力LEO 14 t、SSO 9 t、GTO 7 t^[23]。

7) C1构型:基于CZ-5系列运载火箭,两级半液氧煤油+液氢液氧构型,一级5.0 m直径采用2台70吨级液氢液氧发动机、二级5.0 m直径采用2台8吨级液氢液氧发动机、4个3.35 m助推各采用2台120吨级液氧煤油发动机,运载能力LEO 25 t、

表3 第3代运载火箭型谱

运载火箭	构型	助推直径/m	助推发动机 推力/t	一级直径/m	一级发动机 推力/t	二级直径/m	二级发动机 推力/t
A1构型	两级单芯级	—	—	Φ3.35	120×2	Φ3.35	18×1
B1构型	两级单芯级	—	—	Φ3.35	120×2	Φ3.35	8×2
A2构型	两级半	Φ2.0×4	120×1	Φ3.35	120×2	Φ3.35	18×1
B2构型	两级半	Φ2.25×2	120×1	Φ3.35	120×2	Φ3.35	8×2
A3构型	两级半通用芯级	Φ3.35×2	120×2	Φ3.35	120×2	Φ3.35	18×1
B3构型	两级半通用芯级	Φ3.35×2	120×2	Φ3.35	120×2	Φ3.35	8×1
C1构型	两级半	Φ3.35×4	120×2	Φ5.0	70×2	Φ5.0	8×2

SSO 18 t、GTO 14 t^[19,24-25]。

总体上,第3代运载火箭的主力构型(其中C1为非主力构型)为“3六+3七”6型火箭,如表3所示,包含3.35、2.25和2.0 m直径,全两级半或单芯级构型,基础动力为120吨级液氧煤油发动机、末级动力为18吨级液氧煤油发动机和8吨级液氢液氧发动机,运载能力覆盖LEO 4~14 t、SSO 2~9 t、GTO 3~7 t。

第3.5代型谱(表4)中的6型运载火箭分别为:

1) D1构型:两级单芯级全液氧煤油构型,一级4.2 m直径采用1台300吨级液氧煤油发动机,二级4.2 m直径采用1台80吨级液氧煤油发动机,运载能力LEO 8 t、SSO 5 t、GTO 2 t。

2) D2构型:两级单芯级液氧煤油+液氢液氧构型,一级4.2 m直径采用1台300吨级液氧煤油发动机,二级4.2 m直径采用2台8吨级液氢液氧发动机,运载能力LEO 10 t、SSO 6 t、GTO 4 t。

3) D3构型:两级单芯级全液氧煤油构型,一级4.2 m直径采用2台300吨级液氧煤油发动机,

二级4.2 m直径采用1台80吨级液氧煤油发动机,运载能力LEO 18 t、SSO 9 t、GTO 5 t。

4) D4构型:两级单芯级液氧煤油+液氢液氧构型,一级4.2 m直径采用2台300吨级液氧煤油发动机,二级4.2 m直径采用2台8吨级液氢液氧发动机,运载能力LEO 14 t、SSO 9 t、GTO 7 t。

5) E1构型:两级单芯级全液氧煤油构型,一级5.0 m直径采用3台300吨级液氧煤油发动机,二级5.0 m直径采用1台80吨级液氧煤油发动机,运载能力LEO 27 t、SSO 20 t、GTO 8 t。

6) E2构型:两级单芯级液氧煤油+液氢液氧构型,一级5.0 m直径采用3台300吨级液氧煤油发动机,二级5.0 m直径采用4台8吨级液氢液氧发动机,运载能力LEO 25 t、SSO 20 t、GTO 15 t。

总体上,第3.5代运载火箭的主力构型共6型运载火箭,包含4.2和5.0 m直径,全单芯级构型,基础动力为300吨级液氧煤油发动机,末级动力为80吨级液氧煤油发动机和8吨级液氢液氧发动机,运载能力覆盖LEO 8~27 t、SSO 5~20 t、GTO 2~15 t。

表4 第3.5代运载火箭型谱

运载火箭	构型	一级直径/m	一级发动机推力/t	二级直径/m	二级发动机推力/t
D1构型	两级单芯级	Φ4.2	300×1	Φ4.2	80×1
D2构型	两级单芯级	Φ4.2	300×1	Φ4.2	8×2
D3构型	两级单芯级	Φ4.2	300×2	Φ4.2	80×1
D4构型	两级单芯级	Φ4.2	300×2	Φ4.2	8×2
E1构型	两级单芯级	Φ5.0	300×3	Φ5.0	80×1
E2构型	两级单芯级	Φ5.0	300×3	Φ5.0	8×4

3.2 重复使用运载火箭型谱

3.2.1 总体考虑

1) 构型进一步简化。与一次性运载火箭相同,重复使用运载火箭优选单芯级两级构型。考虑到重复使用运载火箭需兼顾液氧甲烷等密度比冲相对较小的推进剂,为控制长细比、增加全箭刚度,需进一步增大箭体直径。根据统计,国外在研重复使用运载火箭直径均在4.0 m以上,国内在研商业重复使用运载火箭直径大多在3.8 m以上。从继承第3代和第3.5代运载火箭型谱角度,建议第4代运载火箭为大直径(4.2+5.0)m单芯级两级构型。

2) 基础动力采用多机并联布局。运载火箭垂

直着陆时,要求发动机的推力调节范围为 $n \times 10\%$ (n 是基础级发动机的数量)^[26]。发动机深度变推力是一个较大的技术难题,将推力拉低到标准工况后容易产生不稳定,如采用单机时,发动机推力调节范围为10%~100%,而采用5机并联时,单台发动机推力调节范围为50%~100%,因此多机并联布局是重复使用运载火箭的优选技术路线。国内发动机的研制方面,中国航天科技集团有限公司开展了80吨级液氧煤油和液氧甲烷发动机研究,并尝试与3.35和3.8 m直径进行5机和7机配套;多家商业公司开展了80吨级液氧甲烷发动机研究,并尝试开展与3.8和4.2 m直径进行7机和9机配套。

考虑到第4代运载火箭优选4.2和5.0 m直径组合,对4.2 m直径,优先采用80吨级重复使用发动机9机并联构型,且根据技术路线和发展需求等择优选择液氧煤油路线或液氧甲烷路线,重点面向中小型运载火箭;对于5.0 m直径,拟采用中心布置80吨级重复使用发动机、周向布置3台300吨级液氧煤油发动机,重点面向中大型运载火箭。

3) 通过回收方式优化能力台阶。重复使用运

载火箭往往具有一次性使用、前场回收(预计运载能力损失30%)、原场回收(预计运载能力损失50%),如图11^[12]所示。通过不同的回收方式可以优化能力台阶,进而进一步减少火箭型谱数量^[27]。

3.2.2 型谱规划

基于上述考虑,第4代运载火箭建议发展运载能力20吨级的两级单芯级重复使用运载火箭和30吨级两级单芯级重复使用运载火箭,如图12所示。

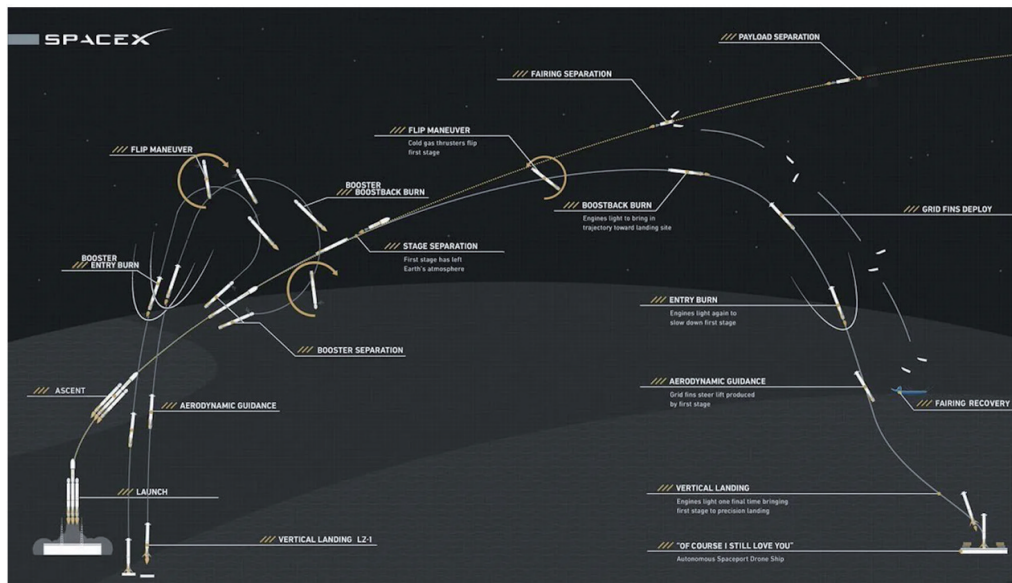


图11 重复使用运载火箭典型回收方式

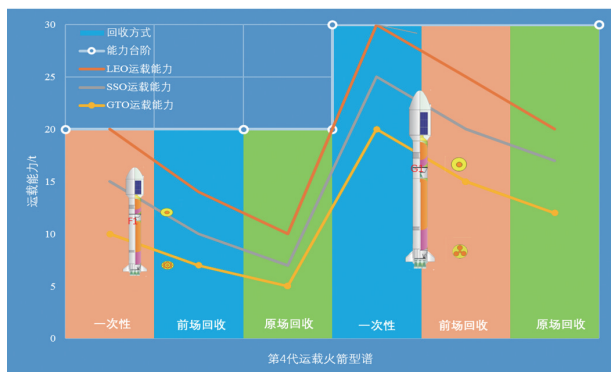


图12 重复使用运载火箭型谱

其中第4代型谱中的2型运载火箭分别为:

1) F1构型:两级单芯级重复使用运载火箭,一级4.2 m直径采用9台80吨级重复使用发动机,二级4.2 m直径采用1台80吨级重复使用发动机,一

次性运载能力LEO 20 t、SSO 15 t、GTO 10 t,前场回收运载能力LEO 14 t、SSO 10 t、GTO 7 t,原场回收运载能力LEO 10 t、SSO 7 t、GTO 5 t。

2) G1构型:两级单芯级重复使用运载火箭,一级5.0 m直径周向安装3台300吨级液氧煤油发动机、中心1台80吨级重复使用发动机,二级采用1台80吨级重复使用发动机,一次性运载能力LEO 30 t、SSO 25 t、GTO 20 t,前场回收运载能力LEO 25 t、SSO 20 t、GTO 15 t,原场回收运载能力LEO 20 t、SSO 17 t、GTO 12 t。

总体上,第4代运载火箭的主力构型共2型火箭(表5),包含直径4.2和5.0 m,全两级单芯级构型,基础动力为80吨级和300吨级液氧煤油发动机,末级动力为80吨级末级发动机,运载能力覆盖LEO 10~30 t、SSO 7~25 t、GTO 5~20 t。

表5 第4代运载火箭型谱

运载火箭	构型	一级直径/m	一级发动机推力/t	二级直径/m	二级发动机推力/t
F1 构型	两级单芯级	Φ4.2	80×9	Φ4.2	80×1
G1 构型	两级单芯级	Φ5.0	300×3+80×1	Φ5.0	80×1

3.3 型谱演进

上述运载火箭型谱规划,前后涉及第2代、第3代、第3.5代和第4代运载火箭,每一代运载火箭根据可靠性、经济性和周期性等方面因素,存在与上一代运载火箭的更新替代问题。参照中国发射运输发展战略,并结合长征系列运载火箭更新换代策略,建议第2代运载火箭持续使用到2030年前后,第3代运载火箭持续使用到2035年前后,第3.5代和第4代运载火箭持续使用到2045年前后(图13)。各代运载火箭型谱总图如图14所示。

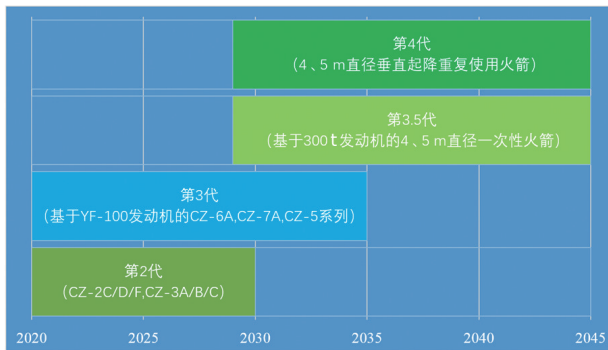


图13 运载火箭型谱更新换代

4 结论

运载火箭是进入空间的第一道关口,是空间利用的前提和基础,也是目前中国进入空间的唯一手段。中国运载火箭发展到今天取得了巨大的成绩,圆满完成了包括载人航天、北斗工程、探月工程和探火工程为代表的多项重大工程。但在发展过程中仍存在型谱不统一、运载能力不衔接、梯度不合理、缺少必要的交叉备份和有序竞争等问题。本研究以中大型主力液体运载火箭为重点,提出中国第3代、第3.5代和第4代运载火箭型谱发展考虑,同时提出了运载火箭型谱的演进策略,希望促进加快启动第3代、第3.5代中大型主力运载火箭研究,加快第4代重复使用运载火箭立项,尽早弥补国内外运载火箭技术代差。

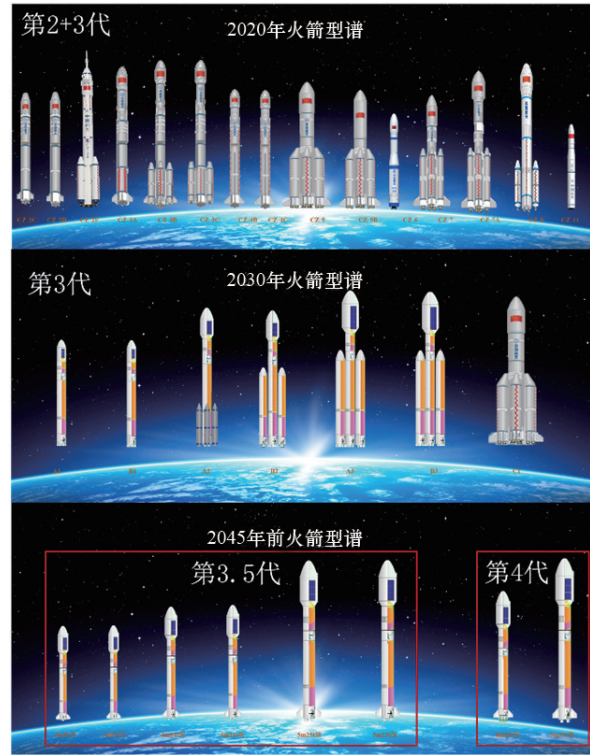


图14 运载火箭型谱总图

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] 朱雄峰, 程洪玮, 刘阳, 等. 发射运输系统顶层规划设计与对策建议[J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(15): 221-222.
- [3] 秦旭东, 龙乐豪, 容易. 我国航天运输系统成就与展望[J]. 深空探测学报, 2016, 3(4): 315-322.
- [4] 鲁宇. 中国运载火箭技术发展[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(3):1-8.
- [5] 王雪梅, 秦旭东, 王小军. 基于聚类分析的运载火箭划代研究[J]. 航天工业管理, 2013(11): 4-6.
- [6] McConaughy P K, Femmineo M G, Koelfgen S J, et al. NASA's Launch Propulsion Systems technology roadmaps[EB/OL]. [2022-12-11]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120014957/downloads/20120014957.pdf>.
- [7] 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.

- [8] 鲍丙亮, 王军杰, 钟明磊. 梅林和猛禽液体火箭发动机技术研究与启示[C]//第五届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第41届技术交流会. 北京: 中国科协航空发动机产学研联合体, 2020: 115-122.
- [9] ULA. Rocket rundown a fleet overview[R]. Washington, D. C. : United Launch Alliance, 2022.
- [10] Jones H W. The recent large reduction in space launch cost[C]//48th International Conference on Environmental Systems, Albuquerque, New Mexico: ICES, 2018: 1-10.
- [11] Lagier R. Ariane 5 user's manual Issue 5 Revision 2[R]. Evry Courcouronnes Cedex: Arianespace, 2016.
- [12] Space X. Falcon 9 launch vehicle payload user's guide [R]. Hawthorne, California: Space X, 2015.
- [13] Wilkins M, Sowers G. Atlas V launch serves users guide[R]. Washington, D. C. United Launch Alliance, 2010.
- [14] MHI. H-IIA user's manual[R]. Tokyo: MHI Launch Services, 2015.
- [15] ULA. Delta IV launch services user's guide[R]. Washington, D. C. United Launch Alliance, 2013.
- [16] 付郁. 2021年全球航天发射统计分析[J]. 国际太空, 2022, 2022(2): 10-14.
- [17] OfficeEditoria. 10 more engines! The Long March 9 rocket has a new configuration, which is thicker and taller and can be re-used[EB/OL]. (2022-04-27) [2022-12-15]. <https://inf.news/en/military/5249f3bc1a4f016c8781df63714ee5e3.html>.
- [18] 王小军, 徐利杰. 我国新一代中型高轨运载火箭发展研究[J]. 宇航总体技术, 2019, 3(5): 1-9.
- [19] 李东, 李平岐, 王珏, 等. “长征五号”系列运载火箭总体方案与关键技术[J]. 深空探测学报, 2021, 8(4): 335-343.
- [20] 胡蓝月. 一箭22星, 长征八号“变形”创记录[J]. 太空探索, 2022, 2022(4): 6-11.
- [21] 张卫东, 杨赓, 杨帆. 长征六号甲运载火箭及其技术特点[J]. 国际太空, 2022, 2022(6): 8-10.
- [22] 任悦鸣. 长征八号: “亲民”的新一代中型火箭[J]. 太空探索, 2021(2): 6-7.
- [23] 郑恩红. 长七A: 我国新一代中型高轨运载火箭[J]. 太空探索, 2021(4): 6-10.
- [24] 李东, 王珏, 何巍, 等. 长征五号运载火箭总体方案及关键技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(3): 1-5.
- [25] 王小军. 中国航天运输系统未来发展展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(1): 1-6.
- [26] 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.
- [27] 徐大富, 张哲, 吴克, 等. 垂直起降重复使用运载火箭发展趋势与关键技术研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(32): 3453-3463.

Study on launch vehicle spectrum programming of China

ZHU Xiongfeng, LIU Yang, LIU Ying, TAN Yuntao, YONG Zihao, CUI Peng, WANG Tiebing, HAN Qiuolong

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

Abstract In view of the spectrum planning of China's carrier rocket, the positioning, rocket generation and scale division of carrier rocket system are put forward, and the focus of carrier rocket type spectrum planning is the third and 3.5 generations of medium and large disposable carrier rockets, as well as the fourth generation of reusable carrier rockets. This paper analyzes the technical development demand and capability development demand of the carrier rockets, and defines the power matching, rocket configuration, launch cost, carrying capacity, payload envelope and launch capacity of the carrier rockets. According to the technical development needs and capability needs of the launch vehicles, 7 kinds of launch vehicles of the third generation expendable launch vehicle spectrum, 6 kinds of launch vehicles of the 3.5 generation expendable launch vehicle spectrum, and 2 kinds of launch vehicles of the fourth generation reusable launch vehicle spectrum are proposed, respectively. Meanwhile, the evolution and replacement strategy of the second, third, 3.5 and fourth generations are proposed, namely the second launch vehicle is suggested to use until around year 2030, the third launch vehicle is suggested to use until around 2035, and the 3.5 and fourth generation launch vehicles are suggested to use around 2045 when the second and third generation launch vehicles are finally replaced.

Keywords space launch and transportation system; launch vehicle; liquid oxygen/kerosene; liquid oxygen/methane; hydrogen/oxygen; reusable ●



(责任编辑 王志敏)