

垂直起降重复使用液氧甲烷运载火箭发展路线探讨

张晓东, 刘 昶, 朱亮聪, 周 华, 赵志杰

(上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 近年来, 航天发射需求快速增长, 垂直起降重复使用运载火箭以其成本低和响应快的特点, 迅速占据了国际商业航天发射市场的主要份额, 成为航天运输领域的重要发展方向。介绍了国外垂直起降运载火箭的发展现状, 分析了其发展特点和趋势, 给出了国内垂直起降重复使用运载火箭的发展路线建议。在梳理国内垂直起降重复使用运载火箭关键技术攻关现状的基础上, 结合“十四五”国内使用需求, 提出了第一代垂直起降重复使用火箭系列化发展型谱设想。针对可完全重复使用和更具经济性的第二代垂直起降重复使用火箭, 初步归纳了需提前布局和攻关的核心关键技术, 提出了发展设想和潜在应用模式。

关键词: 垂直起降; 重复使用; 液氧甲烷; 运载火箭; 航天发射

中图分类号: V11 文献标识码: A 文章编号: 2097-0714(2022)03-0071-09

DOI: 10.16338/j.issn.2097-0714.20220619

Discussion on the development path of vertical take-off and vertical landing reusable liquid oxygen methane rocket

Zhang Xiaodong, Liu Chang, Zhu Liangcong, Zhou Hua, Zhao Zhijie

(Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

Abstract: Demand for space launch has grown rapidly in recent years. Vertical take-off and vertical landing(VTVL) reusable rockets occupy the main share of international commercial space launch market by its low cost and quick response. Therefore, VTVL reusable rocket has become an important development trend of space transportation. The current situation of VTVL rocket in other countries is introduced. Then the characteristics and development trend are analyzed. Some suggestions on the development path of domestic VTVL reusable rocket are given. Based on the key technology research status of domestic VTVL reusable rocket and demand for space launch during the 14th Five-Year Plan Period, the potential first generation of VTVL reusable rocket family is proposed. For the second generation of VTVL rocket with two reusable stages and lower cost, key technologies which should be studied in advance are summarized preliminary. At last the development path and potential application of the second generation of VTVL rocket is proposed.

Key words: vertical take-off and landing; reuse; liquid oxygen methane; rocket; space launch

收稿日期: 2022-03-13; 修回日期: 2022-04-03

作者简介: 张晓东, 研究员, 主要从事运载火箭总体设计。

引用格式: 张晓东, 刘昶, 朱亮聪, 等. 垂直起降重复使用液氧甲烷运载火箭发展路线探讨[J]. 空天技术, 2022 (3): 71-79.
(Zhang Xiaodong, Liu Chang, Zhu Liangcong, et al. Discussion on the development path of vertical take-off and vertical landing reusable liquid oxygen methane rocket[J]. Aerospace Technology, 2022 (3): 71-79.)

1 引言

重复使用低成本是航天运输系统发展的主要目标之一,随着控制、结构、机构、发动机等技术的进步和航天基础设施构建需求急速增加,重复使用运载火箭已经成为21世纪20年代航天强国发展的重点。

垂直起降 (Vertical Take-Off and vertical Landing, VTOL) 重复使用运载火箭具备技术相对成熟、运载能力适应范围广、使用灵活、对现有基础继承性好等特点,适宜于近期重点攻关,取得突破,实现工程应用。

本文分析了国外垂直起降运载火箭的发展情况,给出了国内垂直起降重复使用运载火箭的发展路线和系列化发展型谱建议,并展望了下一代两级完全重复使用运载火箭的发展前景和需提前攻关的关键技术。

2 国外垂直起降重复使用运载火箭发展情况

2.1 美国

美国在垂直起降重复使用运载火箭的技术储备和工程化方面处于领先水平。以SpaceX公司猎鹰9 (F9) 火箭、蓝色起源公司新谢帕德号商业太空旅游运载器为代表的新一代垂直起降运载火箭趋于成熟,SpaceX公司超重-星舰、蓝色起源公司新格伦和火箭试验室公司中子号等新一代垂直起降运载火箭正在加紧研发。

2.1.1 SpaceX公司

自2011年,SpaceX公司开始发展运载火箭垂直回收与重复使用技术,分步开展了低空低速测

试(蚱蜢1飞行试验8次,高度为百米级)、中空中速测试(蚱蜢2飞行试验5次,高度为千米级)和高空高速测试(一子级落海飞行试验6次,高度为100 km以上)等多次飞行试验^[1],实现快速迭代设计,具体情况如图1所示。2015年,猎鹰9号液氧煤油火箭一子级实现陆地回收。2016年,海上回收成功^[2],如图2所示。



图2 猎鹰9号火箭海上回收

Fig. 2 Offshore recovery platform for Falcon 9 rocket

截至2022年5月11日,SpaceX公司猎鹰9火箭成功实现了芯一级12次使用,完成了118次一子级回收发射,其中2021年复用一子级占全年发射量的94%,最短子级复用周期已压缩至21天,其技术可行性、经济性和高频发射能力得到验证。

SpaceX公司正加紧研发新一代两级完全重复使用超重-星舰运载器,超重(Super Heavy)为垂直起降重复使用一子级,星舰(Starship)为垂直着陆重复使用末级^[3-4],如图3所示。作为新一代垂直起降重复使用运载火箭,超重-星舰采用了9 m直径不锈钢箭体、200 t级全流量补燃猛禽液氧甲烷发动机、轨道级再入垂直着陆、新型发射回收等技术,拟于2022年首飞。

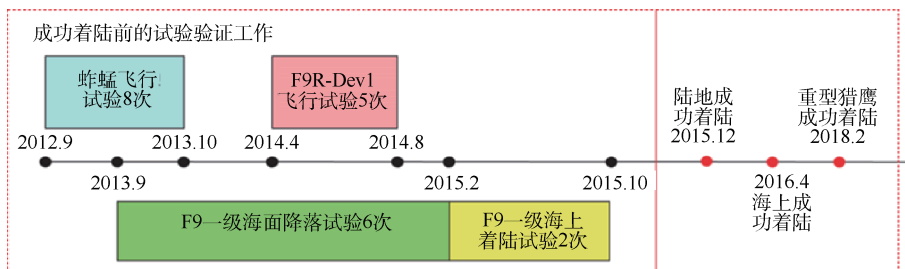


图1 SpaceX公司垂直起降试验情况

Fig. 1 VTOL tests of SpaceX



图3 超重火箭B4和星舰SN20

Fig. 3 Super Heavy B4 and Starship SN20

2.1.2 蓝色起源公司

2015年11月,蓝色起源(Blue Origin)公司成功发射一枚可回收亚轨道飞行器新谢帕德号,率先实现超过卡门线的垂直起降飞行,如图4所示。



图4 新谢帕德号

Fig. 4 New Shepard

在连续开展新谢帕德号商业轨道飞行的同时,该公司启动一子级垂直起降重复使用新格伦号超大型运载火箭研制,如图5所示。该火箭采用直径7 m不锈钢箭体、200 t级闭式循环BE-4液氧甲烷发动机。

2.1.3 火箭实验室

火箭实验室公司近期推出改进版中子号运载火箭,一子级垂直起降,采用可打关闭整流罩,一次性二子级置于整流罩内部,如图6所示。该火箭采用了最大外扩尺寸7 m级的复合材料一子级箭体,100 t级开式循环阿基米德液氧甲烷发动机、新型简易发射回收和重复使用整流罩技术。

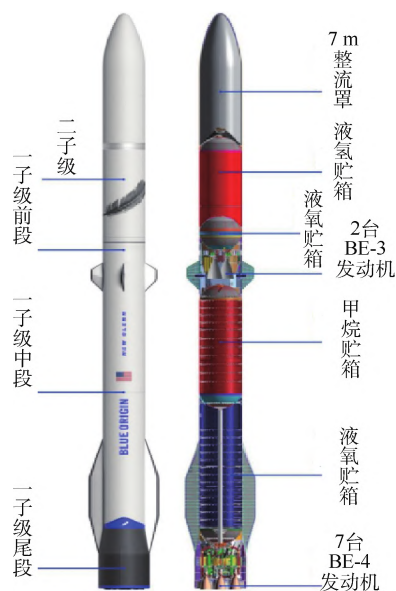


图5 新格伦火箭

Fig. 5 New Glenn



图6 中子号火箭

Fig. 6 Neutron

2.2 欧洲和俄罗斯

随着SpaceX猎鹰9火箭占领大部分国际商业发射市场,欧洲开始推动研制基于液氧甲烷发动机的垂直起降运载火箭(Ariane Next)。为积累相关技术,欧洲先期联合日本开展Callisto演示验证飞行试验,如图7所示。Ariane Next垂直起降运载火箭一子级将采用100 t级开式循环普罗米修斯液氧甲烷发动机,计划在2025—2030年实现首飞。

2020年,俄罗斯推出了下一代运载火箭阿穆尔号的研制计划,如图8所示。一级采用100 t级开式循环RD-0169液氧甲烷发动机。

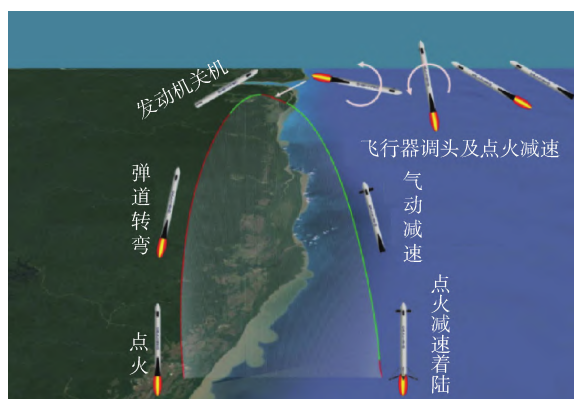


图7 欧洲 Callisto 演示验证飞行示意图

Fig. 7 Flight verification test of Callisto



图8 阿穆尔号火箭

Fig. 8 Amyp rocket

2.3 小结

国外垂直起降重复使用运载火箭发展呈现如下五个特点:

(1) 第一代垂直起降重复使用运载火箭(一子级重复使用)已具备较强工程能力, 占领了大部分国际商业卫星发射市场份额, 其技术可行性、经济性得到验证。

(2) 随着应用逐步成熟, 垂直起降重复使用运载火箭表现出高频次重复使用能力。SpaceX 公司使用约 10 个一子级即可完成全年 50~60 次超高密度发射任务, 革命性地改变了传统运载火箭的生产、总装和测试模式。

(3) 垂直起降关键技术多, 为了降低风险, 美国和欧洲在火箭工程实用前均开展或策划开展分阶段的演示验证飞行试验。

(4) 液氧甲烷动力是下一代垂直起降重复使

用火箭的重点发展方向。

(5) 下一代垂直起降运载火箭(两级完全重复使用)呈现出大型化、规模化和新型发射回收模式等新特点。

对我国垂直起降运载火箭后续发展有以下四点启示:

(1) 瞄准后续工程应用, 加紧开展垂直起降关键技术攻关和集成验证飞行试验。

(2) 推动第一代垂直起降重复使用运载火箭立项研制, 力争“十四五”期间实现工程型号首飞, 形成中型有效载荷低成本高频次发射能力。

(3) 优先采用中等推力开式循环 70~100 t 级液氧甲烷发动机作为第一代垂直起降重复使用运载火箭的主动力装置。

(4) 提前启动大推力闭式循环液氧甲烷发动机、大直径箭体结构、新型发射回收和二子级垂直返回重复使用等关键技术的攻关, 为第二代大型垂直起降完全重复使用运载火箭的研制提供技术基础。

3 垂直起降重复使用运载火箭发展路线建议

3.1 第一代关键技术攻关情况及演示验证路径

第一代垂直起降运载火箭的关键技术主要有 7 项^[5-10], (1) 多次起动深度变推重复使用发动机技术; (2) 高精度多约束垂直返回导航制导与控制技术; (3) 大承载高可靠着陆缓冲系统技术; (4) 钝头体大速域返回气动特性预示技术; (5) 高马赫反向喷流热环境预示和防护技术; (6) 大扰动负过载低温推进剂管理技术; (7) 栅格舵与直气复合控制技术。

液氧甲烷发动机多次起动需要突破火炬点火技术、涡轮泵高效多次起旋技术、发动机高效预冷技术以及低入口条件起动技术。深度变推需要突破高精度、快响应、高可靠电动调节阀技术, 大范围推力调节下高效稳定燃烧与可靠冷却技术以及高转速、大变比、长寿命涡轮泵技术。70 t 级液氧甲烷发动机完成全系统三次起动和深度变推的试车考核, 推力调节范围达到 50%~100%, 如图 9 所示, 已满足垂直起降飞行的基本要求。



图9 液氧甲烷发动机试车图

Fig. 9 Liquid oxygen methane engine test

针对垂直返回大气等干扰约束多, 着陆精度要求苛刻, 传统制导方法无法满足要求的特点, 编制了具有自主知识产权的高效在线凸优化求解器。开展无人机动态模拟试验、六自由度联合仿真和缩比垂直起降飞行试验, 分步验证高精度导航和多约束垂直返回制导技术, 充分考核着陆段制导算法和软件, 如图10~图12所示。

着陆缓冲装置需要具备轻质、大承载、多工况及应急状态吸能的能力。完成多学科一体化仿真设计, 确定油气缓冲器和蜂窝缓冲器串联的一体化吸能方案, 通过原理样机落震试验考核, 如图13和图14所示。

返回一子级箭体气动外形异常复杂, 速域和高度范围跨度大, 反向喷流与来流相互作用, 对全箭及栅格舵等部件气动特性影响较大。开展了全速域气动特性研究, 分析不同攻角、马赫数下的升力特性、阻力特性和静稳定性等。完成带反

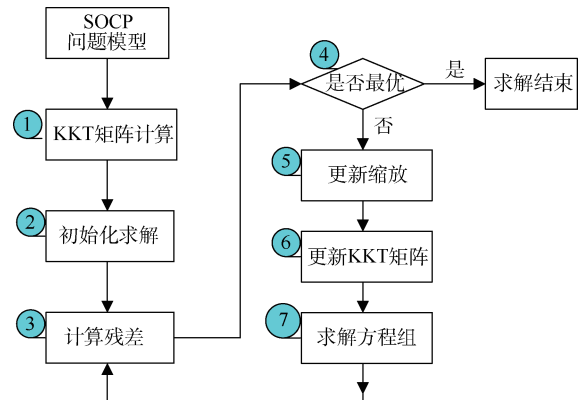


图10 RSOCP求解器求解SOCP问题的步骤

Fig. 10 Steps of RSOCP solver to solve SOCP problem

向喷流的测力风洞试验, 如图15所示, 对钝头体大速域返回气动特性进行预示, 给出返回全飞行段气动数据。

返回一子级迎风面复杂, 承受气动热冲刷以及发动机反向喷流叠加影响, 热分析计算机理复杂, 热防护需求高。建立了热环境仿真预示模型, 根据一次性火箭的飞行结果数据校核修正仿真模型, 在此基础上对返回各高度和速度下的箭体热流条件进行预示, 并完成了火箭底部防热板、防热裙和侧壁防热材料的大热流冲刷试验, 如图16所示。

返回时一子级存在调头调姿、二级点火对一子级产生负过载的工况, 推进剂状态复杂且难以

测试样本	RSOCP				ECOS			
	状态	目标值	时间	迭代	状态	目标值	时间	迭代
MPC01	Optimal	-2.11E+02	0.596515	7	Optimal	-2.11E+02	0.735405	8
MPC02	Optimal	1.60E-01	0.041066	13	Optimal	1.60E-01	0.041299	14
norm	Optimal	1.50E-09	0.000188	6	Optimal	-3.06E-11	0.000188	6
quad_over_lin	Optimal	8.54E-10	0.000328	14	Optimal	-2.64E-10	0.000293	13
sq_norm	Optimal	-9.55E-11	0.000375	15	Optimal	-6.57E-10	0.000362	14
sum_sq	Optimal	2.66E-09	0.000352	12	Optimal	-1.35E-10	0.000331	11
inv_pos	Max. iter.	1.52E-04	0.001395	100	Max. iter.	1.51E-04	0.001656	100
feas	Optimal	0.00E+00	0.000078	5	Optimal	0.00E+00	0.000123	5
unboundedLP1	Unbounded	-5.04E+05	0.000082	5	Unbounded	-1.01E+09	0.000126	5
infeasible1	Primal infeas.	-8.01E-01	0.000075	5	Primal infeas.	-8.27E-01	0.000113	5
lp_25fv47	Optimal	5.50E+03	0.309293	32	Optimal	5.50E+03	0.305926	31
lp_adlittle	Optimal	2.25E+05	0.002027	12	Optimal	2.26E+05	0.002230	12
lp_afiro	Optimal	-4.65E+02	0.000482	9	Optimal	-4.65E+02	0.000548	9
lp_agg	Optimal	-3.60E+07	0.047780	47	Optimal	-3.60E+07	0.041900	46
lp_agg2	Max. iter.	Nan	0.306925	100	Optimal	-2.02E+07	0.092271	28
lp_agg3	Optimal	1.03E+07	0.161786	37	Optimal	1.03E+07	0.086064	27
lp_banm	Optimal	-1.59E+02	0.030860	20	Optimal	-1.59E+02	0.022908	21
lp_beaconfd	Optimal	3.36E+04	0.011858	9	Optimal	3.36E+04	0.011199	10
lp_blend	Optimal	-3.08E+01	0.002779	12	Optimal	-3.08E+01	0.002790	12
lp_bn11	Optimal	1.98E+03	0.262955	63	Optimal	1.98E+03	0.173839	61
emptyProblem	Optimal	0.00E+00	0.000026	0	Optimal	0.00E+00	0.000055	0
issue98	Optimal	4.19E-09	0.000207	6	Optimal	-3.37E-10	0.000204	6
update_data2	Optimal	-2.00E+01	0.001202	10	Optimal	-2.00E+01	0.001051	10

图11 RSOCP求解器与国外ECOS求解器对比

Fig. 11 Comparison between RSOCP solver and foreign ECOS solver



图12 500 m高度飞行试验

Fig. 12 Flight test at several hundred meters

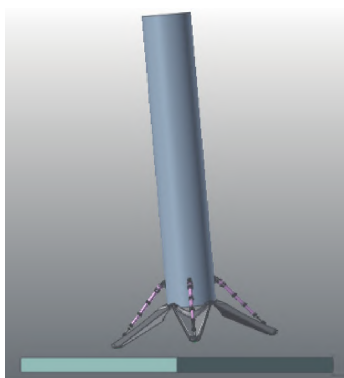


图13 1-2-1着陆工况

Fig. 13 1-2-1 landing conditions

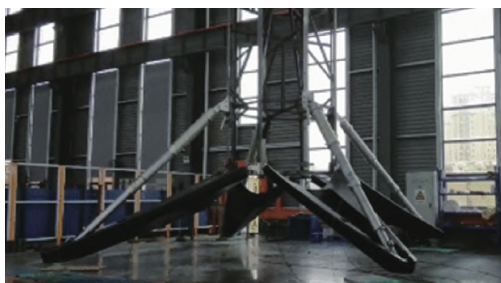


图14 着陆缓冲系统原理样机落震试验

Fig. 14 Prototype of landing buffering system

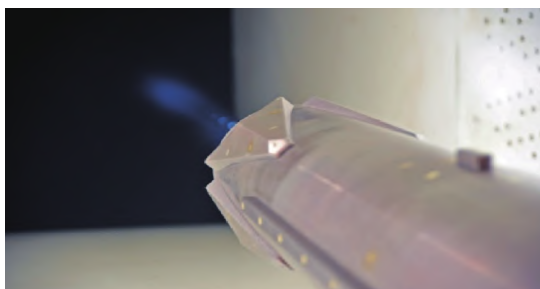


图15 带反向喷流的测力风洞试验

Fig. 15 Wind tunnel test with reverse jet flow

控制。通过多轮迭代设计和仿真，采用独立推进剂流动抑制装置+传统蓄留器的方案，有效抑制箱内推进剂的无序运动，如图17所示。

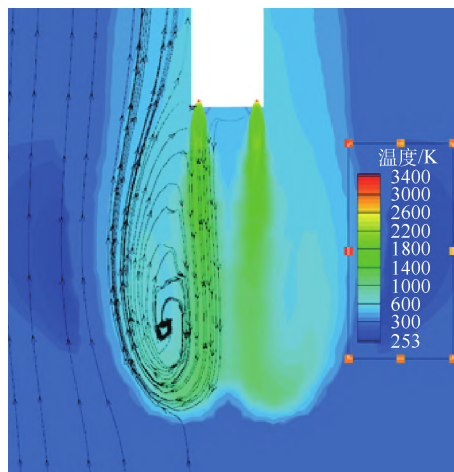


图16 热环境预示

Fig. 16 Thermal environment prediction

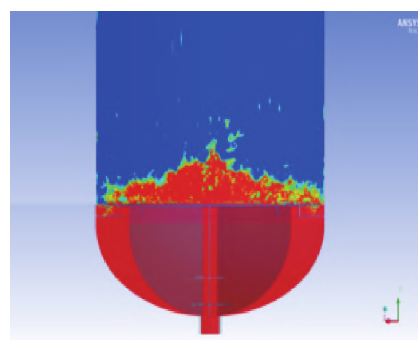


图17 贮箱内交界面形状示意图

Fig. 17 Gas-liquid interface in tank

我国已经在现役火箭上开展了多次栅格舵落区控制飞行试验，实现了一子级落区范围缩小至原范围的15%，如图18所示，基于栅格舵的气动力控制技术得到了验证。



图18 栅格舵控制

Fig. 18 Grid fin control

国内第一代垂直起降关键技术的成熟度已经满足开展演示验证飞行试验的条件。项目团队提出了动力基础,控制先行,分步演示,重点突破的发展思路,开展从火箭动力低空低速飞行试验到火箭动力高空高速飞行试验的系列集成演示验证试验。

低空低速飞行试验(飞行高度1 km以下)用于验证液氧甲烷动力系统、发动机深度推力调节与推力快速控制技术、返回导航制导技术和大承载着陆缓冲技术。

高空高速飞行试验(飞行高度100 km以上)用于验证栅格舵和直气复合控制、液氧甲烷发动机高空点火、返回推进剂管理、返回热环境预示及防护、着陆缓冲和全箭重复使用设计及维护等垂直起降重复使用全部的关键技术。

3.2 第一代垂直起降火箭系列化型谱建议

考虑我国目前的火箭制造基础、运输约束条件,结合发射场建设现状,建议我国液氧甲烷垂直起降重复使用火箭采用循序渐进的发展思路,型谱如图19所示。

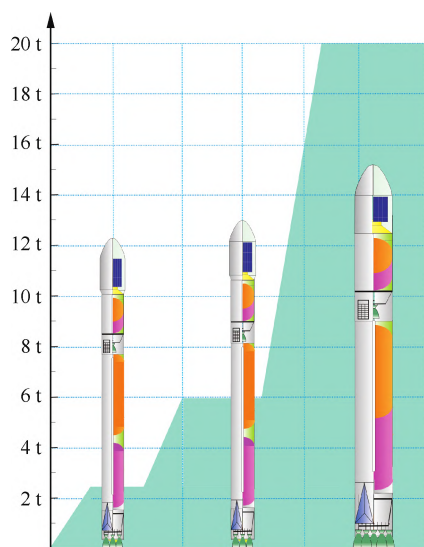


图19 垂直起降运载火箭发展型谱路线

Fig. 19 Development path of VTOL rocket family

3.2.1 3.35 m 直径火箭

3.35 m 直径液氧甲烷垂直起降运载火箭为两级构型火箭,一子级采用5台70 t级液氧甲烷发动机,二子级采用一台70 t级真空版液氧甲烷发动机。

针对700 km 典型太阳同步(Sun-synchronous Orbit, SSO)轨道,一子级前场返回运载能力约2.5 t,低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)运载能力约5 t。弹道初步设计结果如图20~图22所示。

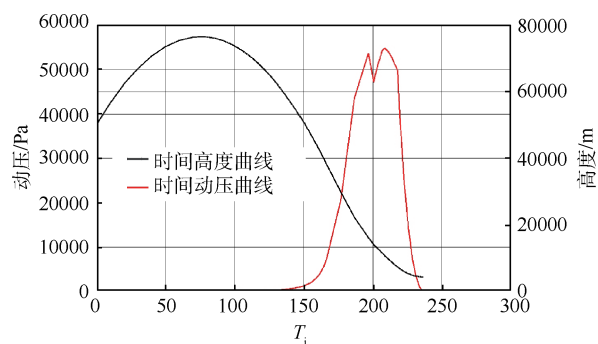


图20 返回段动压与高度曲线

Fig. 20 Dynamic pressure and altitude when returning

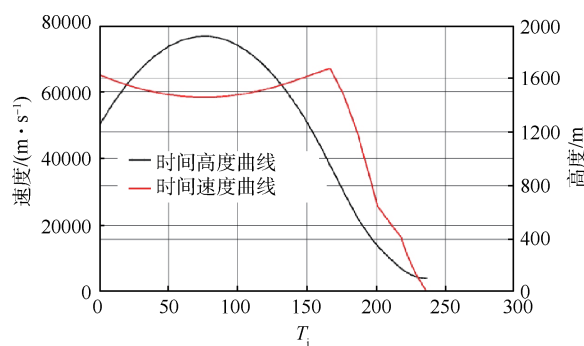


图21 返回段速度与高度曲线

Fig. 21 Speed and altitude when returning

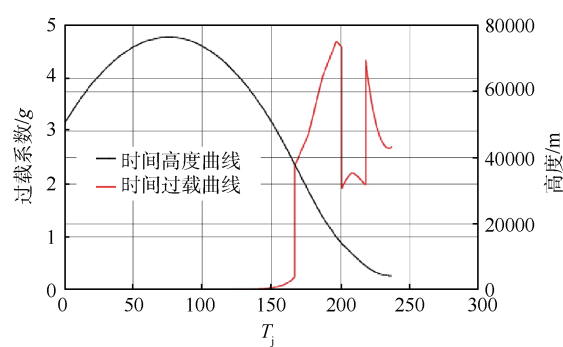


图22 返回段过载系数与高度曲线

Fig. 22 Overload factor and altitude when returning

3.35 m 直径可充分继承国内现有液体运载火箭的生产、总装、测试、运输和发射条件,一二级分离点高度、速度适中,再入段过载、动压在传统设计包络范围内,适宜于快速突破、掌握关

键技术,形成我国中型有效载荷低成本高频次发射能力。

3.2.2 4 m级直径火箭

4 m级直径液氧甲烷垂直起降运载火箭为两级构型火箭,一子级采用7台或9台80 t级液氧甲烷发动机(70 t级发动机的改进型),二子级采用一台80 t级真空版液氧甲烷发动机。该型火箭针对700 km典型SSO轨道,一子级前场返回运载能力3.5~6.5 t。

4 m级直径是内陆发射运载火箭的最大可运输直径,在发射相关设施进行适应性改建之后,可以用于提升内陆发射场的发射能力。

3.2.3 7 m级直径火箭总体方案

7 m级直径大型液氧甲烷垂直起降运载火箭为两级构型,一级安装19~22台80 t级液氧甲烷发动机,二级安装2台80 t级真空版液氧甲烷发动机。针对700 km典型SSO轨道,一子级前场返回运载能力大于20 t。

7 m级直径火箭在沿海发射,需建设新的发射工位和海上回收平台,海上回收平台根据不同弹道提前预置,全面满足大型有效载荷及巨型星座组网发射的需求。

3.3 第二代垂直起降关键技术

第二代垂直起降运载火箭的主要技术特征为:大规模和两级完全重复使用,涉及到的主要关键技术根据火箭类型分为以下四类。

3.3.1 超大型运载火箭类

大直径箭体建造技术,包括7~10 m大直径不锈钢贮箱设计、生产加工技术,7~10 m大型复合材料低温贮箱设计、生产加工技术。

多台(20台及以上)发动机并联技术,包括多路推进剂输送管路流通能力仿真分析及试验技术、多机耦合力学环境条件设计技术,箭上设备、管路、阀门等单机减振设计技术,多机并联底部热环境预示技术。

大直径箭体基于空间模态的低频密频控制技术。

本类关键技术可在第一代7 m级直径垂直起降运载火箭研制过程中实现初步积累。

3.3.2 二子级(轨道级)垂直返回重复使用类

低质阻比有翼锥柱体返回大速域适应气动设计及精确预示技术。

轨道级返回制导、姿控、气动一体化联合设计技术,包括返回制导导航技术、气动翼面操控与发动机反推组合实现大姿态机动控制技术。

轨道级返回热环境预示技术,包括考虑气体非平衡状态稠密大气高超声速再入气动热环境预示技术,不同再入姿态激波演变规律和气动转捩特性预示技术等。

可快速检测、维护的轨道级返回大热流防护技术,包括大面积大热流防护材料技术和重复使用、易于快速检测及更换的防热结构技术。

复杂剖面推进剂管理技术,包括独立贮箱起动技术以及推进剂过载管理技术等。

3.3.3 大推力闭式循环液氧甲烷发动机技术

在第一代开式循环液氧甲烷发动机基础上,研制200 t级多次起动深度变推闭式循环液氧甲烷发动机,将发动机真空比冲提高至370 s以上,全面发挥液氧甲烷动力的优势。

3.3.4 其他类

大型火箭无导流槽发射喷流影响分析及抑制技术,包括大推力火箭发动机起飞喷流和回流分布预示、发动机喷流回流对箭体热环境影响因素及变化规律预示、高温高压燃气冲击地面防护技术以及受地面影响喷流复杂噪声传播和辐射特性预示技术。

新型回收技术研究,包括发射塔架机械捕获式空中回收技术和大承载阻拦绳系等回收技术。

3.4 第二代垂直起降运载火箭展望

在第一代垂直起降重复使用运载火箭工程应用的基础上,开展两级完全重复使用火箭的研制,建议按7 m级直径和9~10 m级直径两步走。

第一步在7 m级直径一子级返回火箭的基础上,研制7 m直径低质阻比有翼锥柱体垂直返回二子级,形成两级完全重复运载火箭,提供LEO轨道运载能力10 t级的高效低成本运输能力。

第二步研制9~10 m直径重型垂直起降两级完全重复使用运载火箭。该方案基于9~10 m级直径和200 t级闭式循环液氧甲烷发动机构建。一子级

采用25~28台发动机。二子级采用6~9台与一级状态基本相同的发动机。完全重复使用状态LEO运载能力100 t, 打造高效低成本高可靠的完全重复使用航天运输系统, 可实现现有航天运输系统的全部功能, 运载火箭性能及发射价格得到跨越式进步。

两级完全重复使用运载火箭的应用模式也将逐步拓展, 如商业航天旅游、洲际运输和太阳系探索等。

商业航天旅游: 低成本搭载游客体验亚轨道、近地轨道和空间站等太空旅行。

洲际运输: 实现地球上城市间的点对点航班运输, 快速投送有效载荷。相比于传统航空运输, 在速度和飞行时间上有着明显优势。

太阳系探索: 远期拓展载人登月和登陆火星的能力, 执行深空探测的任务。

4 结束语

垂直起降重复使用液氧甲烷运载火箭是目前航天运输领域的前沿发展方向, 我国已经具备了开展工程研制的条件, 建议加紧推进。下一代大规模、两级完全重复使用垂直起降运载火箭将极大提升航天运输系统的能力, 产生颠覆性影响, 但技术难度较大, 国际上尚在探索, 我国可开展持续跟踪研究, 同时, 启动以大推力闭式循环液氧甲烷发动机为代表的长周期项目技术攻关。

垂直起降重复使用的发展将打破我国现有运载火箭的生产、总装、测试和发射模式, 需要工业部门在火箭的研制使用过程中, 结合国家需求,

积极优化论证和探索。

[参 考 文 献]

- [1] 杨开, 米鑫. SpaceX公司重复使用运载火箭发展分析[J]. 国际太空, 2020 (9): 13-17.
- [2] 王芳, 程洪玮, 彭博. “猎鹰9”运载火箭海上平台成功回收的分析及启示[J]. 装备学院学报, 2016, 27 (6): 69-74.
- [3] 焉宁, 胡冬生, 郝宇星. SpaceX公司“超重-星舰”运输系统方案分析[J]. 国际太空, 2020 (11): 11-17.
- [4] 张京男. “载人龙”飞船无人试飞和星舰跳跃试飞双双铸就SpaceX公司重大里程碑[J]. 中国航天, 2019 (4): 10.
- [5] 崔乃刚, 吴荣, 韦常柱, 等. 垂直起降可重复使用运载器发展现状与关键技术分析[J]. 宇航总体技术, 2018, 2 (2): 27-42.
- [6] 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.
- [7] 鲁宇, 汪小卫, 高朝辉, 等. 重复使用运载火箭技术进展与展望[J]. 导弹与航天运输技术, 2017 (5): 1-7.
- [8] 冯韶伟, 马忠辉, 吴义田, 等. 国外运载火箭可重复使用关键技术综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2014 (5): 82-86.
- [9] 肖杰, 张明, 岳帅. 新型垂直起降运载器着陆支架收放系统设计与分析[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46 (3): 30-35.
- [10] 李杨, 刘昶, 王吉飞, 等. 垂直起降运载火箭总体方案研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51 (增刊): 1-6.

(编辑: 朱鹤)