

DOI: [10.3724/zrht.1674-5825.2025097](https://doi.org/10.3724/zrht.1674-5825.2025097)

国外现役液体火箭基础级动力发展研究

崔 朋, 韩秋龙, 朱雄峰, 雍子豪, 刘 阳, 刘 鹰*, 王一杉, 谭 胜
(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要: 针对液体运载火箭基础级动力发展运用的问题, 围绕国外主要航天大国的现役液体火箭基础级发动机进行研究。分析了美国、俄罗斯、欧洲和日本等国的15款现役液体火箭发动机的技术方案特点, 并给出了主要的技术指标, 进一步凝练总结了液体火箭基础级动力的发展趋势。就中国液体运载火箭基础级动力的发展, 提出了加快发展大推力和大面推比可重复使用液体火箭发动机、重视迭代升级和边用边改、兼顾考虑先进技术的发展和工程实现、利用基础持续在液氧煤油领域发力、追求性能指标协调发展、同步开展推力调节能力建设的意见建议。

关键词: 液体运载火箭; 基础级; 发动机; 发展研究

中图分类号: V435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2026)01-0134-11

Research on the Development of First-stage Engines for Foreign Active Liquid Rockets

CUI Peng, HAN Qiulong, ZHU Xiongfeng, YONG Zihao, LIU Yang, LIU Ying*,
WANG Yishan, TAN Sheng

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

Abstract: To address the issues concerning the development and application of first-stage propulsion systems for liquid launch vehicles, this study focuses on the first-stage engines of active liquid rockets from major foreign spacefaring nations. It analyzes the technical scheme characteristics of 15 active liquid rocket engines from space powers such as the United States, Russia, Europe, and Japan and presents their main technical indicators. Furthermore, it summarizes the development trends of liquid rocket first-stage engines. On the development of first-stage engines for China liquid launch vehicles, the study puts forward suggestions including accelerating the development of high-thrust and high thrust-to-area ratio reusable liquid rocket engines, emphasizing iterative upgrading and improvement while in use, balancing the development of advanced technologies with engineering implementation, continuing to strengthen efforts in the liquid oxygen kerosene field based on existing foundations, pursuing the coordinated development of performance indicators, and carrying out throttling capacity simultaneously.

Key words: liquid launch vehicle; first-stage; rocket engine; development research

1 引言

运载火箭作为航天领域核心运输工具之一, 决定着国家的太空实力^[1]。按照发展脉络和发展规

律, 运载火箭一般可划分为五代。当前中国运载火箭主要停留在采用有毒推进剂的第二代和一次性使用的第三代, 尚无工程化应用的第四代, 而美国运载

收稿日期: 2025-08-30; 修回日期: 2026-01-04

第一作者: 崔朋, 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为液体运载火箭及其发动机研究。E-mail: 15574944942@163.com

* 通讯作者: 刘鹰, 男, 硕士, 副研究员, 研究方向为液体运载火箭及其发动机研究。E-mail: ly_20110610@petalmail.com

引用格式: 崔 朋, 韩秋龙, 朱雄峰, 等. 国外现役液体火箭基础级动力发展研究[J]. 载人航天, 2026, 32(1): 134-144. Cui P, Han Q L, Zhu X F, et al.

Research on the development of first-stage engines for foreign active liquid rockets[J]. Manned Spaceflight, 2026, 32(1): 134-144.

火箭已经进入可重复使用的第四代,代表型号为美国SpaceX公司的猎鹰9号运载火箭^[2]以及正在发展的超重星舰两级可重复使用运载火箭^[3],表明中国与美国存在较大差距^[4]。

发动机作为运载火箭的核心组件,是运载火箭的心脏,直接影响火箭性能水平^[5]。当前中国航天发射运输工具与美国存在差距的主要原因之一,就是动力水平存在一定差距。相比上面级动力,基础级动力一般采用多机并联或单台大发动机方案^[6],推力大、携带推进剂量大,对运载火箭需要的动量增量贡献大,因此对运载火箭性能影响更大。

当前美国的液体火箭基础级动力主要包括猎鹰系列运载火箭的Merlin-1D发动机、超重星舰运载火箭的Raptor发动机、宇宙神5运载火箭的RD-180发动机、火神运载火箭/新格伦运载火箭的BE-4发动机、德尔塔4重型运载火箭的RS-68发动机、太空发射系统的RS-25D发动机、安塔瑞斯运载火箭的RD-181发动机、电子号运载火箭的Rutherford发动机、萤火虫-阿尔法运载火箭的甲虫-1发动机等。俄罗斯的液体火箭基础级动力主要包括联盟2号系列运载火箭的RD-108A发动机和NK-33发动机、安加拉系列运载火箭的RD-191发动机。其他国家的液体火箭基础级动力包括欧洲阿里安6运载火箭的火神2.1发动机、日本H-2A运载火箭的LE-7A发动机和H-3运载火箭的LE-9发动机。

本文重点围绕上述美国、俄罗斯、欧洲、日本等国家的现役液体运载火箭的基础级动力开展研究,总结发展现状并凝练发展趋势,提出对中国液体运载火箭动力发展的启示。

2 国外现役液体运载火箭基础级动力发展现状

2.1 美国

针对美国的现役液体火箭基础级动力,重点分析以下9个型号。

Merlin-1D发动机由美国SpaceX公司研制,其发展进程经历了Merlin-1A、Merlin-1B和Merlin-1C状态,最终收敛到当前状态^[7,8],推力增加超过100%。采用液氧煤油推进剂,海平面推力845 kN^[9],海平面比冲2764 m/s,推力调节最大范围39%~100%^[10],具备多次起动能力。应用于猎鹰系列运载火箭,支撑猎鹰9运载火箭实现了一子级30次复用(截至2025年

8月)的辉煌业绩。Merlin-1D发动机采用开式燃气发生器循环方案,即部分推进剂驱动涡轮做功后排到环境中,比冲性能略微损失,但推重比大,结构紧凑,保证猎鹰火箭3.66 m箭径可布局9台,实现了非最高性能发动机与高性能火箭的匹配。采用化学点火、再生冷却+膜冷却方案,可靠性高,便于重复使用。Merlin-1D发动机采用了继承阿波罗落月主发动机技术的针栓喷注器^[10],该喷注器仅有一个喷注单元,具有结构简单、低成本、自带燃烧稳定性的优势^[11],如图1所示^[12]。



图1 Merlin-1D发动机^[12]
Fig. 1 Merlin-1D engine^[12]

Raptor发动机由美国SpaceX公司研制,采用液氧甲烷双低温推进剂,至今已发展3代,如图2所示^[13]。第三代构型极简,海平面推力由第一代的185 t提升至280 t,海平面比冲3204 m/s^[14],推力调节范围40%~100%^[15],推重比由第一代的约90提升至180以上(不含机架),设计理念和生产工艺发生巨大变革^[14]。Raptor发动机采用全流量补燃循环,即有2个预燃室,分别组织富氧燃烧和富燃燃烧,进入推力室中进一步燃烧,比冲等性能更高,但起动过程更为复杂^[16]。采用火炬点火器、再生冷却方案,具备多次起动能力。主要应用于SpaceX公司研制的超重星舰运载火箭,助力超重星舰完成多次回收复用飞行试验。

BE-4发动机由蓝色起源公司研制,采用液氧甲烷、富氧补燃循环(仅一个预燃室,大部分氧化剂和少量燃料组织燃烧)方案,海平面推力2450 kN,海平面比冲3038 m/s,推力调节范围45%~100%,燃烧室

压力13.4 MPa^[12]。主要应用于替代宇宙神5和德尔塔4的火神运载火箭^[17,18]、新格伦运载火箭^[19,20],支撑新格伦运载火箭成功完成首次海上回收,如图3所示^[21]。



图 2 Raptor发动机^[13]
Fig. 2 Raptor engine^[13]



图 3 BE-4发动机^[21]
Fig. 3 BE-4 engine^[21]

RD-180发动机由俄罗斯于1994年—2000年研制,根据RD-170发动机改进而来,大部分组件直接采用RD-170发动机的产品^[22],少部分组件由RD-170发动机组件改进而来,热试车时间万秒以上^[23]。发动机采用液氧煤油推进剂、双推力室、富氧补燃循环方案^[24],海平面推力3825 kN,海平面比冲3053 m/s,推力调节范围47%~100%^[25],主要用于美国正在退役^[26](存量发射,RD-180发动机替代计划于2015年左右就已启动^[27])的宇宙神五运载火箭^[28],如图4所示^[27]。

RS-68发动机研制于1990年代,2001年完成首次发射,后续升级为RS-68A^[29],性能进一步提升,是世

界上推力最大的氢氧火箭发动机。采用燃气发生器循环方案,通过采用新工艺,组件数量比航天飞机主发动机SSME减少20%以上,焊接工作量减少了85%^[30]。RS-68发动机海平面推力2950 kN,海平面比冲3580 m/s,推重比45.3,室压10.26 MPa,长度5.2 m,喷管出口直径2.43 m,推力调节范围58%~102%;RS-68A发动机海平面推力提升至3137 kN,海平面比冲提升至约3600 m/s,推重比提升至47.3,如图5所示^[31]。RS-68系列发动机主要应用于2024年退役^[32,33]的德尔塔4重型运载火箭^[34,35]。



图 4 RD-180发动机^[27]
Fig. 4 RD-180 engine^[27]

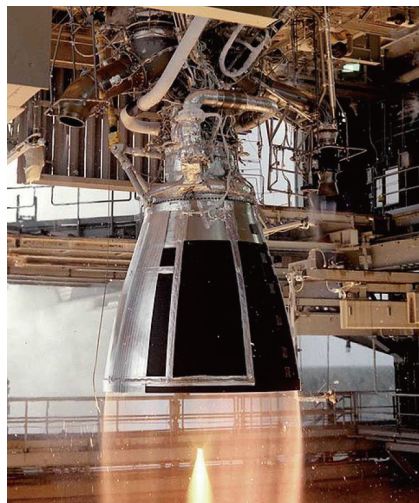


图 5 RS-68发动机^[31]
Fig. 5 RS-68 engine^[31]

RS-25发动机(航天飞机主发动机)发展于20世纪60年代^[36],1981年完成首飞,经过多次迭代升级,版本经历了RS-25、RS-25A、RS-25B、RS-25C,最终升

级为RS-25D^[37]。RS-25D发动机采用液氢液氧推进剂、富燃分级燃烧循环、双预燃室、双涡轮增压、双预压涡轮增压、再生冷却方案,海平面推力最大1860 kN(对应于109%额定工况),海平面比冲3590 m/s,推重比73.1,室压20.64 MPa,推力调节范围67%~109%,喷管面积比69,长度4.3 m,直径2.4 m^[37]。当前主要用于太空发射系统^[38,39],系统如图6所示^[40]。

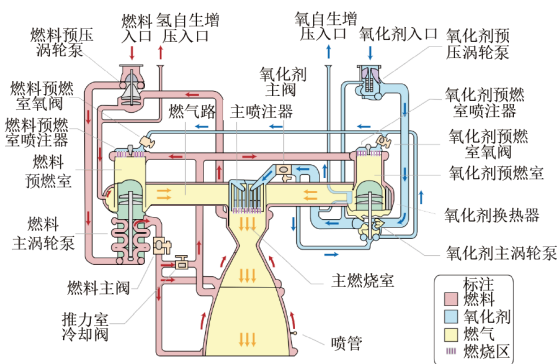
图 6 RS-25 发动机系统图^[40]

Fig. 6 RS-25 engine scheme^[40]

卢瑟福发动机由美国火箭实验室研制,于2017年完成首飞,至2025年8月已支撑电子号运载火箭完成近70次发射。首飞以来的近8年时间,卢瑟福发动机进行了多轮次迭代,海平面推力由首飞时的16.8 kN提升至25 kN^[41],比冲提升至3048 m/s^[42,43]。采用液氧煤油推进剂、新型电动泵循环、再生冷却方案,电动泵由锂聚合物电池供电,相比涡轮泵压式发动机,结构更加简单、调节更为便捷^[44]。发动机的主要部件如燃烧室、推力室、电动泵等均采用3D打印方式,有效降低结构重量、提高生产效率。主要应用于电子号运载火箭^[45,46]一级和二级(真空版,喷管面积比增大),如图7所示^[41,47]。

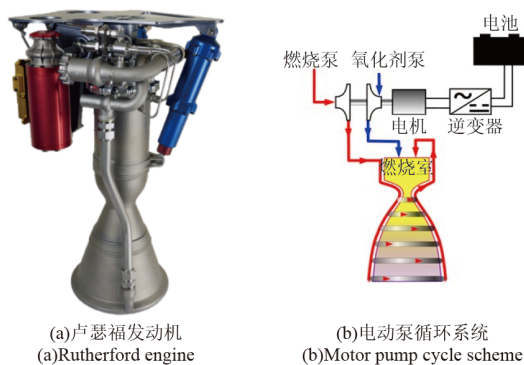
图 7 卢瑟福发动机^[41]及电动泵循环系统图^[47]

Fig. 7 Rutherford engine^[41] and motor pump cycle scheme^[47]

甲虫-1发动机由萤火虫公司研制,于2021年完成首飞,如图8所示^[48]。甲虫-1发动机采用液氧煤油推进剂、新型抽气循环方案^[48],即从燃烧室抽取部分燃气驱动涡轮做功,结构更为简单,如图9所示^[49],真空推力约200 kN,真空比冲2896.9 m/s^[50,51]。主要应用于阿尔法运载火箭^[49]。



图 8 甲虫-1 发动机^[48]

Fig. 8 Reaver-1 engine^[48]

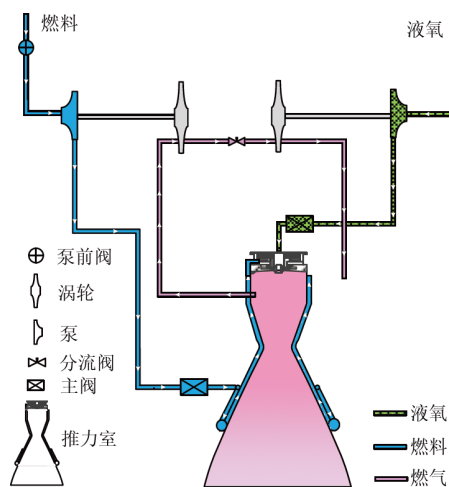
图 9 抽气循环示意图^[49]

Fig. 9 Tap-off cycle scheme^[49]

RD-181发动机在RD-191发动机基础上改进而来,是其出口版本,于2016年完成首飞^[52]。RD-181发动机采用液氧煤油推进剂、富氧分级燃烧循环方案,海平面推力1922 kN,推重比83.5^[53],推力调节范围47%~100%,如图10所示^[54]。主要应用于安塔瑞斯运载火箭的一级,但已经被萤火虫公司生产的米兰达发动机替换^[55]。

2.2 俄罗斯

针对俄罗斯的现役液体火箭基础级动力,重点

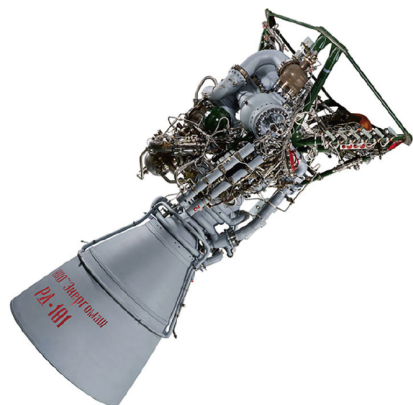


图 10 RD-181发动机^[53]
Fig. 10 RD-181 engine^[53]

分析以下3个型号。

RD-108A发动机在RD-108基础上改进而来,海平面推力792.4 kN,海平面比冲2525.5 m/s^[56],质量1068 kg,如图11所示^[57],采用燃气发生器循环。主要用于联盟2号系列运载火箭的联盟2-1a和联盟2-1b。



图 11 RD-108发动机^[57]
Fig. 11 RD-108 engine^[57]

NK-33发动机研制于1970年代,于2013年完成首飞。NK-33发动机采用液氧煤油推进剂、高压富氧分级燃烧循环、单涡轮驱动、再生冷却方案。海平面推力1510 kN,海平面比冲2910 m/s,室压14.83 MPa,推重比137,推力调节范围50 %~105 % (最大可达到108 %)^[58],长度3.7 m,直径2 m,如图12所示^[59]。主要应用于俄罗斯联盟2号系列运载火箭的联盟号2-1v。

RD-191发动机研制于1999—2011年,由RD-180改进而来,充分继承RD-180发动机的技术方案,借用了RD-180发动机推力室等部分组件,如图13所示^[60]。采用单推力室、富氧补燃循环方案,海平面推力1922 kN,海平面比冲3049.8 m/s,推重比89,推力调节范围30 %~100 %^[54],主要用于安加拉运载火箭通用芯级^[61,62]。

2.3 其他国家



图 12 NK-33发动机^[59]
Fig. 12 NK-33 engine^[59]



图 13 RD-191发动机^[60]
Fig. 13 RD-191 engine^[60]

针对其他国家的现役液体火箭基础级动力,重点分析欧空局和日本的3个型号。

火神2.1发动机由欧空局研制,在火神2发动机基础上改进而来,采用3D打印技术使零件数量大幅下降,助力火箭成本下降40 %~50 %^[63]。采用液氢液氧、燃气发生器循环方案,真空推力由火神2的1350 kN^[64,65]提升至1371kN,如图14所示^[66],主要用于替代阿里安五的阿里安六运载火箭^[67,68]。

LE-7A发动机由日本JAXA研制,在LE-7发动机基

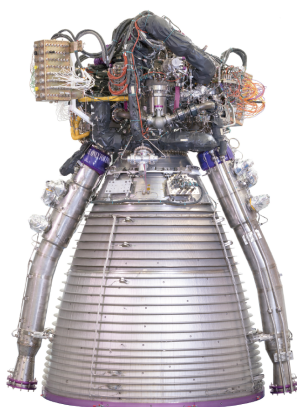


图 14 火神2.1发动机^[66]
Fig. 14 Vulcain 2.1 engine^[66]

础上改进加工工艺、减少喷注器及其它零件数量等,如图15所示,成本进一步降低,可靠性进一步增加^[69]。采用液氢液氧、富燃分级燃烧循环方案,真空推力1080 kN,海平面推力854 kN,真空比冲4321.8 m/s,干重1800 kg,推力调节范围70 %~100 %^[70,71],主要用于H-2A火箭^[72,73]。

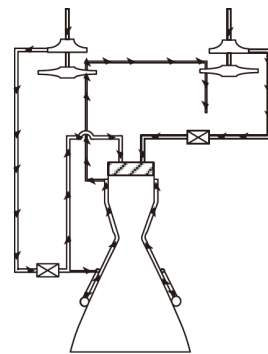


图 15 LE-7A发动机^[69]
Fig. 15 LE-7A engine^[69]

LE-9发动机早期命名为LE-X,其部分阀门、管路及喷注器等采用增材制造技术^[74],以期降本增效。采用液氢液氧推进剂,真空推力1471 kN,比冲4165 m/s,干重2400 kg,室压10 MPa,推力调节范围63%~100%^[75,76],截至首飞前累计完成约12 000 s的地面热试车,但长程试车次数较少^[77],主要应用于H-3运载火箭^[78]。LE-9发动机使用了开式膨胀循环方案,如图16所示^[79,80],该循环方式作为一种新型循环方式,不仅继承了膨胀循环结构简单、可靠性高的优点,而且通过提升涡轮压比(喷管出口压力为环境压力,不再是推力室的高压力),进一步增大涡轮做功能力,能够



(a)LE-9发动机
(a)LE-9 engine



(b)开式膨胀循环原理图
(b)Expander bleed cycle scheme

图 16 LE-9发动机^[80]及开式膨胀循环原理图^[79]
Fig. 16 LE-9 engine^[80] and expander bleed cycle scheme^[79]

弥补膨胀循环方式涡轮做工能力不足的问题,拓展了膨胀循环应用于助推或一级发动机的可行性^[81]。

3 国外现役液体火箭基础级动力发展趋势分析

1)发展大重,提升面推,促进可重复火箭更好发展。当前重复使用成为航天运输领域的发展趋势,但中小型运载火箭的重复使用效率较低(回收能力损失约30 %~50 %),故应重点发展大重型重复使用运载火箭。火箭重复使用要求发动机亦具备重复使用能力,通过建设具备结构轻质化、组件可重复、便于维护、多次使用、多次起动、与箭体机械接口可活动等特征的大推力、大面推比重复使用液体火箭发动机,促进可重复使用运载火箭更好更快发展。

2)快速迭代,边用边改,实现与运载火箭更好匹配。通过观察国外各国主要现役液体火箭发动机的发展脉络,如图17所示,快速迭代升级是普遍规律、重要传承、保证发动机具备生命力的重要手段,通过迭代改进设计、工艺或材料等提升发动机性能(不局限于推力、比冲等指标,涵盖经济性等指标),并且是在实际应用中寻找发现发动机不足然后加以改进,实现降本增效,同步改进火箭并提升火箭性能,追求实现发动机与运载火箭更好匹配,力求将运载火箭性能发挥到极致。

3)重视创新,快速应用,占领动力技术领域制高点。循环方式作为火箭发动机重要特征之一,影响发动机系统方案,直接决定发动机性能高低^[82]。可以发现,当前在传统的膨胀循环、燃气发生器循环和补燃循环之外,美国等国尤其重视发展各种新型循环方式,如表1所示。包括电动泵循环、抽气循环和

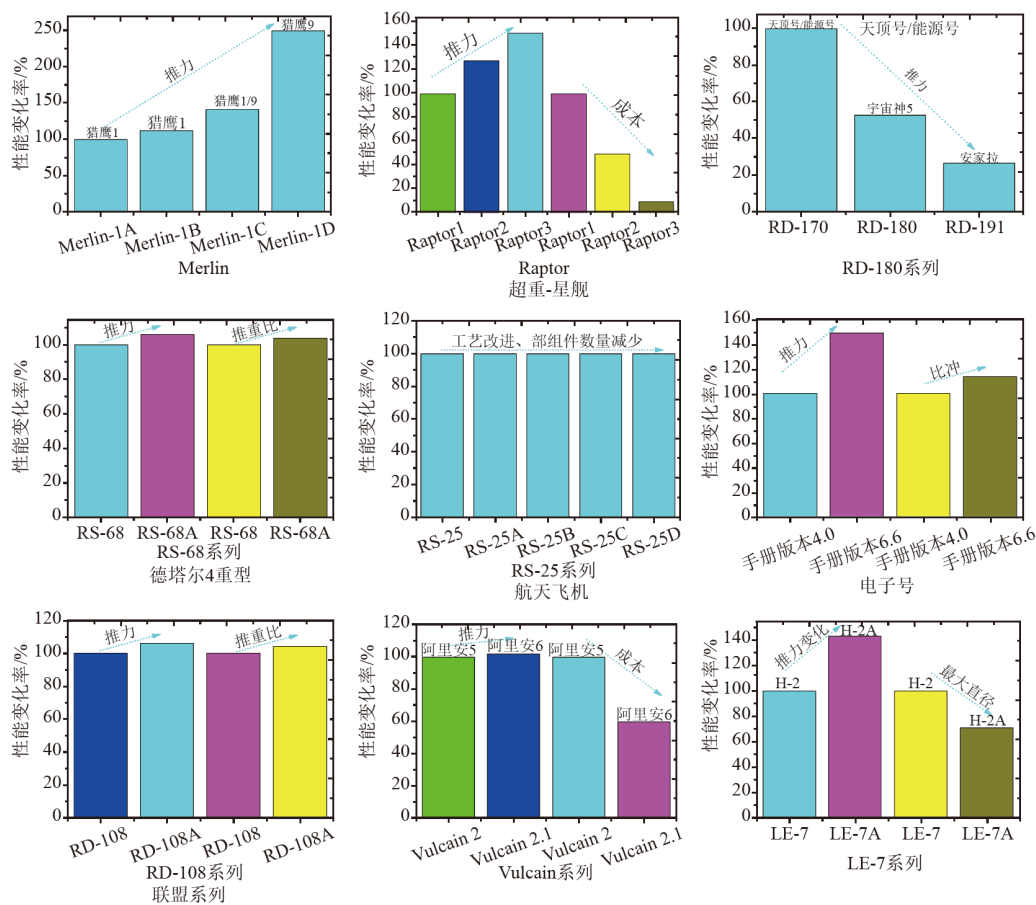


图 17 不同发动机性能迭代情况
Fig. 17 Performance iterations of different engines

表 1 国外各国研制的主动动力循环方式分布情况
Table 1 Cycle modes for engines developed by various foreign countries

循环方式	美国	俄罗斯	欧洲	日本
燃气发生器循环	Merlin-1D RS-68	RD-108A	Vulcain 2.1	—
一般补燃循环	BE-4 RS-25	RD-180 RD-181 RD-191 NK-33	—	LE-7A
全流量补燃循环	Raptor	—	—	—
电动泵循环	Rutherford	—	—	—
抽气循环	Reaver-1	—	—	—
开式膨胀循环	BE-3U	—	—	LE-9

开式膨胀循环(新格伦二级发动机BE-3U^[83])等,并且将其快速工程化应用,发展的部分型号甚至愈发成熟,直接占领了动力领域技术制高点。除此之外,美国还重视在传统循环方式上发力,追求发挥循环方式最大效能,率先将全流量补燃循环应用到实际型号中。

4)立足现状,重视基础,持续在传统动力领域发力。当前低温无毒液体运载火箭常用的推进剂包括

液氧煤油、液氧甲烷和液氢液氧等,三者在比冲和密度比冲上各有优略,如图18所示。液氧煤油和液氧甲烷更适用于基础级,液氢液氧更适用于上面级^[84]。俄罗斯在液氧煤油补燃发动机领域始终具有较大的领先优势,并且不断改进发动机以确保优势存在。日本和欧洲始终深耕于液氢液氧发动机领域,并且通过改进循环方式、采用新工艺等提升发动机性能,进一步提升运载火箭性能。

5)升级提升,综合考虑,追求性能指标向平衡发展。纵观猛禽发动机从第一代发展到第三代的过程中,在外形尺寸基本不变的情况下,通过增大室压等手段实现了推力增大,通过改进工艺实现了推重比大幅增加、成本大幅下降,而比冲等指标处于持平或下降状态。火神2和LE-7等发动机向下一代发展的过程中,在推力变化不大或略微增加的情况下,重点是通过改进工艺、减少部组件等实现降本增效,对发动机进行瘦身,而并未追求比冲等性能提升。因此,应当综合考虑推力、比冲、外形尺寸(影响运载火箭的面推比^[85])、推重比和成本对火箭性能的影响,避

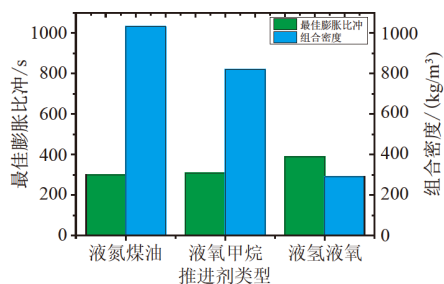


图 18 不同推进剂比冲及组合密度
Fig. 18 Specific impulses and combined densities of different propellants

免短板效应,同时追求竹竿效应。

6)拓展功能,增强适应,推力深度调节成标准配置。通过研究现状可以看出,如图 19 所示(圆圈越大,代表推力变比越大),推力深度调节成为国外液体火箭发动机普遍具备的能力,甚至部分发动机改进提升的主要目的为获得深度调节能力,由选配包变成了标配包,能够助力运载火箭控制飞行过载、实现地面软着陆,为运载火箭重复使用奠定技术基础。相比定推力液体火箭发动机,推力调节要求增加流量调节器、节流阀等部组件,各部组件结构、参数范围等能够适应宽范围工况^[86]。进一步地,具备深度推力调节能力的火箭发动机可拓展应用于提高交会对接与轨道机动灵活性、提高弹道导弹主动段的突防能力、实现无大气地外天体软着陆及大幅提升组合循环发动机性能^[87,88]等。

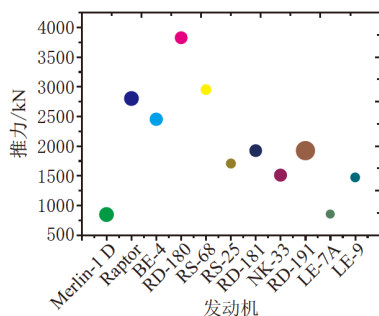


图 19 不同发动机推力变比
Fig. 19 Throttling ratios of different engines

4 结语

本文围绕国外主要航天大国的基础级液体火箭动力开展研究,重点分析了15款现役火箭发动机的技术方案特点,并给出了主要的技术指标,基于研究现状凝练总结了国外液体火箭动力的发展趋势。建议在基础级液体火箭动力的发展过程中,①加快发展大推力、大面推比可重复使用液体火箭发动

机;②充分运用政策、释放活力,促进动力迭代升级、边用边改;③保持对先进技术的敏感性,同时重视工程实现;④并行发展液氧甲烷和液氢液氧发动机的同时,利用好现有基础^[89],持续在液氧煤油领域发力;⑤追求性能指标协调发展,提升综合性能;⑥着眼长远发展,同步重视推力调节能力建设。

参考文献(References)

- [1] 朱雄峰,周城宏,雍子豪,等.垂直起降重复使用运载火箭总体设计优化方法研究[J].载人航天,2024,30(2):197-205.
Zhu X F, Zhou C H, Yong Z H, et al. Conceptual design optimization method of vertical launch and landing reusable rockets[J].Manned Spaceflight, 2024, 30(2): 197-205 (in Chinese).
- [2] 刘敏华.猎鹰9号火箭发射及箭体复用的分析[J].宇航总体技术,2024,8(1):20-27.
Liu M H. Analysis of Falcon 9 launch and booster reuse[J].Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(1): 20-27 (in Chinese).
- [3] 谭胜,朱雄峰,刘鹰,等.“超重-星舰”基本情况与应用前景分析[J].国际太空,2023,(5):35-39.
Tan S, Zhu X F, Liu Y, et al. Analysis of basic situation and application prospects of Super Heavy-Starship[J].Space International, 2023, (5): 35-39 (in Chinese).
- [4] 朱雄峰,刘阳,刘鹰,等.中国运载火箭型谱发展研究[J].科技导报,2023,41:1-13.
Zhu X F, Liu Y, Liu Y, et al. Study on launch vehicle spectrum programming of China[J].Science & Technology Review, 2023, 41: 1-13 (in Chinese).
- [5] 崔朋,刘阳,朱雄峰,等.重复使用液体火箭发动机典型特征分析[J].载人航天,2023,29(3):344-352.
Cui P, Liu Y, Zhu X F, et al. Typical Characteristic analysis of reusable liquid rocket engines[J].Manned Spaceflight, 2023, 29 (3):345-353 (in Chinese).
- [6] 崔朋,刘鹰,刘阳,等.多机并联运载火箭任务成功可靠性分析[J].载人航天,2025,31(1):81-87.
Cui P, Liu Y, Liu Y, et al. Mission success reliability analysis for multi-engine-parallel launch vehicles[J].Manned Spaceflight, 2025, 31(1): 81-87 (in Chinese).
- [7] Wikipedia. Merlin [EB/OL]. America: Wikipedia. (2021-8-21) [2025-8-21]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Merlin>.
- [8] 张雪松.猎鹰火箭的基础:不断升级的梅林发动机[J].卫星与网络,2017,(6):40-41.
Zhang X S. Foundation of the Falcon rockets:The ever-evolving Merlin engines[J].Satellite & Network, 2017, (6): 40-41 (in Chinese).
- [9] SpaceX. Falcon User's Guide [M/OL]. Version 8. American: SpaceX, (2025)[2025]. <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9>.
- [10] Elverum J R, A H, J M, et al. The descent engine for the lunar module [C]// 3rd Propulsion Joint Specialist Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1967: 1967-521.
- [11] 岳春国,李进贤,冯喜平,等.针栓式变推力火箭发动机技术

- 现状与发展探索[J].世界科技研究与发展, 2008, 30(5): 609-612.
- Yue C G, Li J X, Feng X P, et al. The research on technology actuality and development of pintle injector variable thrust rocket engine[J].World SCI-TECH R&D, 2008, 30(5): 609-612 (in Chinese).
- [12] 李斌, 李程, 高玉闪, 等. 重复使用运载火箭液体动力技术发展[J].火箭推进, 2024, 50(1): 1-11.
- Li B, Li C, Gao Y S, et al. Development of liquid propulsion technology for reusable launch vehicle[J].Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(1): 1-11 (in Chinese).
- [13] 张晨. “猛禽3”: 观察火箭发动机未来潮流的“窗口”[J]. 太空探索, 2024, (11): 52-59.
- Zhang C. “Raptor 3”: A “window” into the future trends of rocket Engines[J].Space Exploration, 2024, (11): 52-59 (in Chinese).
- [14] 朱平平, 周闯, 王铁岩, 等. 第三代猛禽发动机分析及全流量补燃循环发动机起动特性[J].宇航总体技术, 2025, 9(3): 26-32.
- Zhu P P, Zhou C, Wang T Y, et al. Analysis of the third-generation raptor engine and the full-flow staged combustion cycle engine startup characteristics[J].Astronautical Systems Engineering Technology, 2025, 9(3): 26-32 (in Chinese).
- [15] 杨浩亮, 杨毅强, 王英诚, 等. “超重-星箭”的“猛禽”发动机[J].国际太空, 2023, (8): 43-48.
- Yang H L, Yang Y Q, Wang Y C, et al. Raptor engine of Super Heavy-Starship[J].International Space, 2023, (8): 43-48 (in Chinese).
- [16] 刘子岩, 苏展, 高玉闪, 等. 全流量补燃循环发动机流量调节器起调过程仿真研究[J].载人航天, 2023, 29(4): 478-486.
- Liu Z Y, Su Z, Gao Y S, et al. Study on Simulation of start-up process of flow regulator of full-flow staged combustion cycle engine[J].Manned Spaceflight, 2023, 29(4): 478-486 (in Chinese).
- [17] 孙彬斌. 美国新一代大中型运载火箭“火神”发展研究[J].国际航空, 2024, (1): 91-93.
- Sun B B. Vulcan centaur to launch first certification mission[J].International Aviation, 2024, (1): 91-93 (in Chinese).
- [18] 陈允宗, 杨开, 王林. “火神/半人马座”火箭研制历程分析[J].国际太空, 2024, (4): 53-57.
- Chen Y Z, Yang K, Wang L. Analysis of the development history of Vulcan/Centaur rocket[J].International Space, 2024, (4): 53-57 (in Chinese).
- [19] 张晨. 新格伦火箭首飞, 能否“虎口夺食”? [J].太空探索, 2025, (2): 20-28.
- Zhan C. First flight of New Glenn rocket: Can it “snatch a share from the fierce competitors”? [J].Space Exploration, 2025, (2): 20-28 (in Chinese).
- [20] 胡冬生, 郑杰, 吴胜宝. “新格伦”火箭简析及其与“猎鹰重型”火箭的对比[J].国际太空, 2017, (6): 43-48.
- Hu D S, Zheng J, Wu S B. A Brief analysis of the New Glenn rocket and its comparison with the Falcon heavy rocket[J].International Space, 2017, (6): 43-48 (in Chinese).
- [21] 张小平, 周亚强, 严伟. 液氧甲烷发动机发展现状[J].载人航天, 2023, 29(1): 126-133.
- Zhang X P, Zhou Y Q, Yan W. Current state of lox/methane engine development[J].Manned Spaceflight, 2023, 29(1): 126-133 (in Chinese).
- [22] 邢强. RD-170世界上推力最大的液体火箭发动机[J].太空探索, 2017, (6): 48-51.
- Xing Q. RD-170: The world’s most powerful liquid rocket engine[J].Space Exploration, 2017, (6): 48-51 (in Chinese).
- [23] 张雪松. RD-180超级火箭发动机的兴衰[J].太空探索, 2016, (8): 31-35.
- Zhang X S. The rise and fall of the RD-180 heavy-duty rocket engine[J].Space Exploration, 2016, (8): 31-35 (in Chinese).
- [24] 张菽. 宇宙神5系列运载火箭的现状及其未来的发展[J].导弹与航天运载技术, 2008, (2): 56-60.
- Zhang S. Present state of Atlas V family and its future[J].Missiles and Space Vehicles, 2008, (2): 56-60 (in Chinese).
- [25] Wikipedia. RD-180 [EB/OL]. America: Wikipedia. (2021-8-21) [2025-9-16]. <https://en.wikipedia.org/wiki/RD-180>.
- [26] 张晨. 告别军情任务, 宇宙神5火箭渐行渐远 [EB/OL]. 航空知识. (2024-9-4) [2025-9-24]. <https://news.qq.com/rain/a/20240904A082OD00>.
- Zhang C. Bid farewell to military missions: Atlas V rocket fades into the distance [EB/OL]. Aeronautical Knowledge. (2024-9-4) [2025-9-24]. <https://news.qq.com/rain/a/20240904A082OD00> (in Chinese).
- [27] 张莉敏. 美替换俄制RD-180发动机计划的新进展[J].中国航天, 2015, (9): 26-28.
- Zhang L M. Latest development in the U.S. program to replace Russia’s RD-180 rocket engine[J].Aerospace China, 2015, (9): 26-28 (in Chinese).
- [28] 陈允宗. 宇宙神-5 N22火箭首飞任务[J].国际太空, 2020, (5): 64-69.
- Chen Y Z. First flight mission of the Atlas V N22 rocket[J].International Space, 2020, (5): 64-69 (in Chinese).
- [29] 新的Delta4火箭发动机成为ULA降低成本战略的一部分[J].航天工业管理, 2012, (7): 43-44.
- The new Delta IV rocket engine has become part of ULA’s cost-reduction strategy[J].Aerospace Industry Management, 2012, (7): 43-44 (in Chinese).
- [30] 李晨风. 发射中止主角: RS-68 发动机[J].太空探索, 2020, (11): 38-42.
- Li C F. The star of launch abort: the RS-68 engine [J].Space Exploration, 2020, (11): 38-42 (in Chinese).
- [31] Wikipedia. RS-68 [EB/OL]. America: Wikipedia. (2021-8-21) [2025-9-16]. <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-68>.
- [32] FARANK. 全氢氧巅峰 “德尔塔”4重型运载火箭落幕[J].问天少年, 2024, (7): 78-79.
- FARANK. The pinnacle of full hydrolox propulsion: the retirement of the Delta IV Heavy Launch Vehicle[J].Aerospace Knowledge Youth, 2024, (7): 78-79 (in Chinese).
- [33] 航天界. 全球第三大运载最后一飞, 一代名箭德尔塔谢幕 [EB/OL]. 网易号. (2025-9-23) [2025-9-23]. <https://m.163.com/dy/article/IVDII4S605325VRY.html>.
- Aerospace F. The Final Flight of the World’s Third-Largest Launch Vehicle: The End of the Legendary Delta Rocket [EB/OL]. NetEase Account. (2025-9-23) [2025-9-23]. <https://m.163.com/dy/article/IVDII4S605325VRY.html> (in Chinese).
- [34] 朱雄峰, 周城宏, 崔朋, 等. 德尔他-4 系列运载火箭发展回顾及分析[J].国际太空, 2024, (9): 35-40.
- Zhu X F, Zhou C H, Cui P et al. Review and analysis of the development of the Delta IV launch vehicles[J].International Space, 2024, (9): 35-40 (in Chinese).

- [35] 孙雅平. 德尔它4系列运载火箭[J]. 导弹与航天运载技术, 2005, (6): 21-27.
Sun Y P. Delta IV launch vehicles[J]. Missiles and Space Vehicles, 2005, (6): 21-27 (in Chinese).
- [36] 任奇野, 曲晶. RS-25发动机配备新的控制单元[J]. 导弹与航天运载技术, 2015, (1): 12.
Ren Q Y, Qu J. The RS-25 engine equipped with a new control unit[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015, (1): 12 (in Chinese).
- [37] Wikipedia. RS-25 [EB/OL]. America: Wikipedia. (2021-8-21)[2025-9-16]. <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-25>.
- [38] 张雪松. SLS: 开启美重返月球征程[J]. 太空探索, 2023, (1): 50-55.
Zhang X S. SLS: initiating the U.S. lunar return program[J]. Space Exploration, 2023, (1): 50-55 (in Chinese).
- [39] 任奇野, 曲晶. 美国SLS重型运载火箭最新进展分析[J]. 国际太空, 2018, (5): 58-65.
Ren Q Y, Qu J. Analysis of the latest progress of the U.S. SLS heavy-lift launch vehicle[J]. International Space, 2018, (5): 58-65 (in Chinese).
- [40] Commons W. Ssme schematic [EB/OL]. Wikimedia Commons. (2025-12-27)[2025-12-27]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ssme_schematic_\(updated\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ssme_schematic_(updated).svg).
- [41] Rocketlab. Payload User's Guide [M/OL]. Version 4.0. New Zealand: Rocketlab, 2016(2025-08-29). <http://www.rocketlabusa.com/>.
- [42] Rocketlab. Payload User's Guide [M/OL]. Version 6.6. New Zealand: Rocketlab, 2020(2025-08-19). <http://www.rocketlabusa.com/>.
- [43] Rocketlab. Payload User's Guide [M/OL]. Version 7.0. New Zealand: Rocketlab, 2022(2025-08-29). <http://www.rocketlabusa.com/>.
- [44] 崔朋, 宋杰, 李清廉, 等. 电动泵压式液氧煤油变推力火箭发动机动力学建模与仿真分析: Part I-单点工况分析[J]. 航空学报, 2021, 43(1): 256-270.
Cui P, Song J, Li Q L, et al. Dynamic modeling and simulation analysis of LOX/RP1 variable thrust engines using motor pump: Part I-single condition analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(1): 124884 (in Chinese).
- [45] 李宇飞. 说说电子号“拼单”那些事[J]. 太空探索, 2020, (10): 42-45.
Li Y F. Talking about the “group-booking” practice of the Electron rocket[J]. Space Exploration, 2020, (10): 42-45 (in Chinese).
- [46] 王瑞. 电子号火箭: 为小卫星而生[J]. 太空探索, 2018, (8): 44-49.
Wang R. Electron rocket: built exclusively for small satellites[J]. Space Exploration, 2018, (8): 44-49 (in Chinese).
- [47] Commons W. Electric feed rocket cycle [EB/OL]. Wikimedia Commons. (2025-12-27)[2025-12-27]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric_feed_rocket_cycle.svg.
- [48] 灰机wiki. 甲虫-1 [EB/OL]. 灰机wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/甲虫-1>.
Huiji w. Reaver 1 [EB/OL]. Huiji wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/甲虫-1> (in Chinese).
- [49] 王瑞, 陈允宗, 杨开. “萤火虫-阿尔法”小型火箭首飞概述[J]. 国际太空, 2021, (10): 46-49.
Wang R, Chen Z Y, Yang K. Overview of the first flight of the Firefly Alpha small launch vehicle[J]. International Space, 2021, (10): 46-49 (in Chinese).
- [50] Aerospace F. Alpha launch vehicle [EB/OL]. Firefly Aerospace. (2025-09-21)[2025-09-21]. <https://fireflyspace.com/alpha/>.
- [51] 灰机wiki. 萤火虫-阿尔法 [EB/OL]. 灰机wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/萤火虫-阿尔法>.
Huiji w. Firefly Alpha [EB/OL]. Huiji wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/萤火虫-阿尔法> (in Chinese).
- [52] 阳光. “心宿二”将改用俄制RD-181发动机[J]. 太空探索 (2025-9-16), 2015, (2): 16.
Yang G. Antares will switch to Russia-built RD-181 engine[J]. Space Exploration, 2015, (2): 16 (in Chinese).
- [53] Zak A. RD-181 engine for the Antares rocket [EB/OL]. russianspaceweb. (2025-9-21)[2025-9-21]. <https://www.russianspaceweb.com/rd181.html>.
- [54] 灰机wiki. RD-191 [EB/OL]. 灰机wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/RD-191>.
Huiji w. RD-191 [EB/OL]. Huiji wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/RD-191> (in Chinese).
- [55] 田丰. 因俄乌冲突“受伤”的那些火箭[J]. 太空探索, 2022, (10): 56-61.
Tian F. The rockets impacted by the Russia-Ukraine conflict[J]. Space Exploration, 2022, (10): 56-61 (in Chinese).
- [56] 灰机wiki. 联盟2 [EB/OL]. 灰机wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/联盟2>.
Huiji w. Soyuz-2 [EB/OL]. Huiji wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/联盟2> (in Chinese).
- [57] 灰机wiki. RD-108 [EB/OL]. 灰机wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/RD-108>.
Huiji w. RD-108 [EB/OL]. Huiji wiki, 2025. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/RD-108> (in Chinese).
- [58] 张绿云. 俄罗斯联盟-2.1V/“伏尔加”小型运载火箭成功首飞[J]. 国际太空, 2014, (2): 57-62.
Zhang L Y. Successful first flight of the Russian Soyuz-2.1V/Volga small launch vehicle[J]. International Space, 2014, (2): 57-62 (in Chinese).
- [59] Wikipedia. NK-33 [EB/OL]. America: Wikipedia. (2021-8-21)[2021-8-21]. <https://en.wikipedia.org/wiki/NK-33>.
- [60] Zak A. The RD-191 engine [EB/OL]. Russian Spaceweb. (2019-12-10)[2025-9-21]. <https://www.russianspaceweb.com/rd191.html>.
- [61] 王霄. 20年磨一“箭”, 俄罗斯“安加拉”首次成功试飞[J]. 国际太空, 2014, (11): 75-77.
Wang X. Twenty years in the making: the first successful test flight of Russia's Angara launch vehicle[J]. International Space, 2014, (11): 75-77 (in Chinese).
- [62] 李浩悦. 俄罗斯新一代火箭首次试飞成功[J]. 太空探索, 2014, (9): 18-21.
Li H Y. Successful first test flight of Russia's new-generation launch vehicle[J]. Space Exploration, 2014, (9): 18-21 (in Chinese).
- [63] 黄涛, 黄迪, 秦筱璇, 等. 阿里安6火箭装配和制造技术综述[J]. 飞航导弹, 2019, (10): 5-9.
Huang T, Huang D, Qin X X, et al. Review of assembly and manufacturing technologies for the Ariane 6 launch vehicle[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019, (10): 5-9 (in Chinese).
- [64] 灰机wiki. 火神液体火箭发动机 [EB/OL]. 灰机wiki. (2025-9-16)[2025-10-2]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/火神液体火箭发动机>.

- Huiji w. Vulcain liquid rocket engine [EB/OL]. Huiji wiki. (2025-9-16)[2025-10-2]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/火神液体火箭发动机> (in Chinese).
- [65] Coulon D. Vulcain-2 cryogenic engine passes first test with new nozzle extension[J]. ESA bulletin, 2000, (102): 123-124.
- [66] ESA. The engines of Ariane 6 [EB/OL]. ESA. (2024-6-5)[2025-10-2]. https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Ariane/The_engines_of_Ariane_6.
- [67] ESA. Vulcain 2.1 roars [EB/OL]. ESA, 2020. (2020-9-24)[2025-10-2]. <https://www.esa.int/eseach?q=vulcain+2.1>.
- [68] 田丰. 首飞受挫, 阿里安6火箭前景如何? [J]. 太空探索, 2024, (8): 38-41.
- Tian F. First flight setback: what lies ahead for the Ariane 6 launch vehicle? [J]. Space Exploration, 2024, (8): 38-41 (in Chinese).
- [69] 李宝蓉. LE-7A发动机可靠性研究[J]. 航天制造技术, 2004, (3): 23-25.
- Li B R. Reliability study of the LE-7A engine [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2004, (3): 23-25 (in Chinese).
- [70] Fukushima Y, Hiroyuki, Nagao R, et al. development status of LE-7A and LE-5B engines for h-ii family [J]. Acta Astronautica, 2002, 50(50): 275-275.
- [71] Fukushima Y, Nakatuzi H, Kishimoto K, et al. Development status of LE-7A engine [C]// 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit. 1997:.
- [72] 李东, 孙来燕. 日本H-2A火箭对我国火箭技术发展的启示 [J]. 中国航天, 2009, (4): 3-7, 11.
- Li D, Sun L Y. Enlightenment of Japan's H-2A launch vehicle on the development of China's rocket technology [J]. Aerospace China, 2009, (4): 3-7, 11 (in Chinese).
- [73] 灰机wiki. LE-7A [EB/OL]. 灰机wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/LE-7A>.
- Huiji w. LE-7A [EB/OL]. Huiji wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/LE-7A> (in Chinese).
- [74] 路晓红, 王旻昇. 增材制造技术在日本LE-9氢氧火箭发动机研制中的应用 [J]. 军民两用技术与产品, 2024, (2): 20-32.
- Lu X H, Wang M H. Application of additive manufacturing technology in the development of Japan's LE-9 hydrolox rocket engine [J]. Dual Use Technologies & Products, 2024, (2): 20-32 (in Chinese).
- [75] Tsutomu M, Hideo O, Kazuki N, et al. Development of Turbopump for LE-9 Engine [J]. IHI Engineering Review, 2017, 57(3): 58-64.
- [76] 张雪松. 首飞成功 前景暗淡——日本H-3运载火箭技术评论 [J]. 兵器, 2024, (6): 38-44.
- Zhang X S. Successful first flight yet dim prospects: a technical review of Japan's H-3 launch vehicle [J]. Ordnance, 2024, (6): 38-44 (in Chinese).
- [77] 张晨. H-3 成功复飞, 日本火箭更新换代起步 [J]. 太空探索, 2024, (4): 40-47.
- Zhang C. Successful relaunch of the H-3: Japan's launch vehicle fleet modernization gets underway [J]. Space Exploration, 2024, (4): 40-47 (in Chinese).
- [78] 杨青格, 张帆, 陈旭扬. 日本H-3火箭发射失败及影响分析 [J]. 中国航天, 2023, (12): 56-60.
- Yang Q G, Zhang F, Chen X Y. Launch failure of Japan's H-3 launch vehicle and analysis of its implications [J]. Aerospace China, 2023, (12): 56-60 (in Chinese).
- [79] 崔朋, 周城宏, 刘鹰, 等. 一种开式膨胀循环发动机及其参数估计方法、装置: 中国, ZL202211621701.8. [P] 2024-09-20.
- Cui P, Zhou C H, Liu Y, et al. An bleed expander cycle engine and its parameter estimation method and device: China, ZL202211621701.8. [P] 2024-09-20 (in Chinese).
- [80] 崔朋, 周城宏, 刘鹰, 等. 全开式膨胀循环发动机: 中国, 202211255422.4. [P] 2023-01-31.
- Cui P, Zhou C H, Liu Y, et al. Full bleed expander cycle engine: China, 202211255422.4. [P] 2023-01-31 (in Chinese).
- [81] 灰机wiki. LE-9 [EB/OL]. 灰机wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/LE-9>.
- Huiji w. LE-9 [EB/OL]. Huiji wiki. (2025-9-16)[2025-9-16]. <https://sat.huijiwiki.com/wiki/LE-9> (in Chinese).
- [82] 崔朋, 李清廉, 成鹏, 等. 并联式电热协同增压变推力火箭发动机方案研究 [J]. 载人航天, 2020, 26(6): 702-709.
- Cui P, Li Q L, Cheng P, et al. Study on scheme of variable thrust rocket engine with parallel electrothermal co-pressurization [J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(6): 702-709 (in Chinese).
- [83] 张雪松. “新格伦”火箭首飞——不完美的成功不明朗的未来 [J]. 兵器, 2025, (4): 28-34.
- Zhang X S. First flight of New Glenn launch vehicle: an imperfect success with an uncertain future [J]. Ordnance, 2025, (4): 28-34 (in Chinese).
- [84] 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.
- Li B, Zhang X P, Gao Y S. Consideration on development of reusable liquid rocket engine in China [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(1): 1-7 (in Chinese).
- [85] 刘鲁江, 梁建国, 吴佳林, 等. 运载火箭演进及智能技术展望 [J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(3): 53-62.
- Liu L J, Liang J G, Wu J L, et al. Evolution and intelligent technology prospect of launch vehicles [J]. aerospace shanghai (Chinese&English), 2021, 38(3): 53-62 (in Chinese).
- [86] 崔朋, 李清廉, 成鹏, 等. 液氧甲烷膨胀循环变推力发动机系统方案对比研究 [J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(3): 106-115.
- Cui P, Li Q L, Cheng P, et al. A comparative study of system schemes for LOX/LCH4 expander cycle liquid rocket engine [J]. journal of national university of defense technology, 2020, 42(3): 106-115 (in Chinese).
- [87] 崔朋, 李清廉, 吴继平, 等. 变推力液体火箭发动机系统方案研究进展 [C]// 中国航天第三专业信息网第三十七届技术交流会暨第一届空天动力联合会议. 2016:20-30.
- Cui P, Li Q L, Wu J P, et al. Research progress on system scheme of variable thrust liquid rocket engines [C]// The 37th Technical Exchange Conference of the Third Professional Information Network of China Aerospace and the 1st Joint Aerospace Propulsion Conference. 2016: 20-30 (in Chinese).
- [88] Cui P, Li Q, Cheng P, et al. System scheme design for LOX/LCH4 variable thrust liquid rocket engines using motor pump [J]. Acta Astronautica, 2020, 171: 139-150.
- [89] 杨永强, 何江, 吕发正, 等. 130 吨级重复使用液氧煤油发动机维护维修技术分析 [J]. 载人航天, 2025, 31(1): 104-110.
- Yang Y Q, He J, Lyu F Z, et al. Analysis on maintenance technology of 130-ton reusable lox/kerosene rocket engine [J]. Manned Spaceflight, 2025, 31(1): 104-110 (in Chinese).

(责任编辑:孙京霞)