

固体助推发动机技术研究进展及总体需求分析

佟明羲, 刘伟, 宁雷, 刘佳佳, 王鹏飞

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 随着固体助推发动机技术在航天运输领域的应用, 运载火箭对航天动力系统的需求不断提升。美国、欧洲、日本、印度等国家和地区均发展并应用了固体助推发动机技术, 并呈现出大推力、低成本、高可靠的技术特征。在总结国外固体助推发动机技术研究进展和发展趋势的基础上, 从顶层规划、总体设计、工艺实现等方面提出了未来固体助推发动机技术的总体需求, 为我国固体助推发动机技术发展方向提供参考。后续, 发动机研制应在运载火箭总体与动力联合优化的基础上, 持续开展性能提升和关键技术攻关。

关键词: 运载火箭; 固体助推发动机; 研究进展; 发展趋势; 需求分析

中图分类号: V435

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 06-0031-05

Research Process and Requirement Analysis on Solid Rocket Booster

TONG Mingxi, LIU Wei, NING Lei, LIU Jiajia, WANG Pengfei

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The requirement for space propulsion system is dramatically multiplex, as the application of solid rocket booster in the field of space transportation. The technology of solid rocket booster has been developed and used in many countries and regions, such as America, Europe, Japan and India, which breeds the characteristics of large thrust, low cost and high reliability. A detailed summary of the research process and development trend of solid rocket booster is conducted in the present paper. To clarify the advance direction of solid rocket booster, requirement analysis for solid rocket booster is drawn in terms of top development planning, overall design and technology. In future, an intensive study on performance improvement and critical technologies should be carried out based on the results of joint optimization of rocket and motor.

Key words: Launch vehicle; Solid rocket booster; Research process; Development trend; Requirement analysis

0 引言

运载发展, 总体牵引, 动力先行。在我国航天装备几十年发展牵引下, 固体火箭发动机在设计和试验技术方面得到了长足的发展, 推动了我国航天运输领域的发展^[1-2], 应用于运载火箭主动力、捆绑助推动力、上面级动力、逃逸系统动力、

姿轨控动力等方面。尤其作为捆绑助推动力, 通过固体助推器数量变化、性能提升以及和与芯级的各种组合, 能够使同一种火箭系列具有很大范围、不同梯度的运载能力。当前固体助推发动机在提高性能的同时, 统筹兼顾经济性与可靠性实现, 进一步满足降低成本、可重复使用^[3-4]等多种需求。本文在系统梳理国外固体助推发动机技术

收稿日期: 2023-08-11; 修订日期: 2023-10-27

作者简介: 佟明羲 (1989-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭总体设计。

发展现状的基础上,重点分析技术发展趋势和总体需求。

1 国外固体助推发动机技术发展现状

半个世纪以来,“增大推力、提升性能、降低成本、提高可靠性”一直引领着国外运载火箭固体动力稳步发展^[5-6]。据不完全统计,仅美、欧、日、印等国家和地区先后在 21 型捆绑式运载火箭上使用了固体助推发动机^[7-10]。为增大推力,美国发展了大型分段式发动机技术,固体发动机推力达到 1 300 t 级,欧洲发展了推力 500 t 级 P230 发动机。为提升运载系数,美国、欧空局不断研发新技术,P120C 发动机质量比达到 0.92 以上。为降低成本,欧空局将织女星 C 火箭 I 级发动机和阿里安 6 火箭助推器共用,增大批量。为提高可靠性,美国、欧洲开展了以粒子沉积、流动仿真、精细检测、先进制造等为代表的大量基础研究,提高产品可靠性。

1.1 美国

美国一直致力于发展大型捆绑式运载火箭固体助推发动机技术,目前已经形成了直径 1~3.7 m、装药量 30~500 t 的系列化固体动力体系,极大地提升了美国的航天运载能力。美国近年来发展并构建了航天发射系统(Space Launch System, SLS),其 I 期构型的固体助推器 RSRMV 于 2015 年 3 月完成地面试验,并于 2022 年 11 月成功首飞。美国在发展诸如大力神火箭 SRMU 助推器等大型固体助推器的同时,也在不断完善德尔塔、宇宙神等小型固体助推器的性能,构建全面的固体助推发动机体系。

SRMU 固体助推器总长 34 m,直径 3.2 m,装药量 315.4 t,分 3 段,真空推力 653 t,工作时间 135 s,如图 1 所示。发动机采用纤维复合材料壳体,分段之间采用金属环进行对接,金属环和复合材料壳体之间采用两道径向销钉连接,在确保可靠性和经济性的同时,进一步提升发动机质量比实现水平。

RSRMV 固体助推器总长 47.36 m,直径 3.71 m,装药量 647 t,分 5 段,真空推力 1 311 t,工作时间 132 s,如图 2 所示。发动机采用 D6AC 高强度钢壳体,为了减小惰性质量并降低成本,还研发了无石棉绝热层材料,同时通过分段技术应用,满足大推力使用需求。



图 1 SRMU 固体助推器

Fig. 1 SRMU solid rocket booster



图 2 RSRMV 固体助推器

Fig. 2 RSRMV solid rocket booster

1.2 欧洲

欧空局的大型捆绑式运载火箭有阿里安系列的几种型号。其中,阿里安 3 和阿里安 4 火箭所用的固体助推器均属于小型助推器,直径约 1.1 m,真空推力约 70 t。阿里安 5 火箭发展了直径 3.05 m 的大型分段式固体助推器 P230,推力达到 500 t 级,通过液体芯级和固体助推相结合,地球同步转移轨道运载能力可达 10 t。新型阿里安 6 火箭捆绑性能更加先进的 P120C 固体助推器(可捆绑 2 个或者 4 个,也可作为织女星 C 火箭一级动力),其性价比较阿里安 5 进一步提升^[11-14]。

P230 固体助推器如图 3 所示,直径 3.05 m,总长 31.16 m,装药量 237 t,分 3 段,真空推力 485.1 t,真空比冲 274 s。壳体采用 48CD4-10 高强度钢,喷管采用柔性喷管,喉径达到 900 mm,采用三维编织碳/碳材料。

P120C 固体助推器如图 4 所示,直径为 3.4 m,装药量 141.6 t,峰值推力 500 t,工作时间 135.7 s,采用复合材料壳体。发动机设计针对内弹道性能开展了基于火箭飞行动压和运载能力实现的联合优化,提升了火箭综合性能水平。

1.3 日本

日本近年来发展了 1.8 m 和 2.5 m 两个直径系列的大型固体助推发动机。其中,用于 H-2 运载火箭的 SRB-A 固体助推发动机直径 1.8 m,装

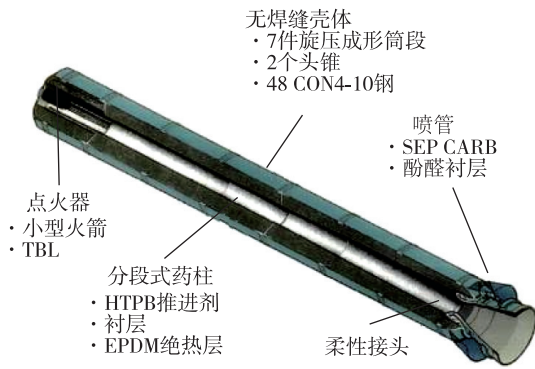


图 3 P230 固体助推器

Fig. 3 P230 solid rocket booster



图 4 P120C 固体助推器

Fig. 4 P120C solid rocket booster

药量 59 t，分 4 段。

基于 SRB-A 发动机改进和性能提升，日本研制了 SRB-3 固体发动机，用于新型 H-3 运载火箭捆绑的固体助推器。发动机直径 2.5 m，总长 15.1 m，真空推力 220 t，如图 5 所示。



图 5 日本 SRB 系列固体助推器

Fig. 5 SRB series solid rocket booster (Japan)

1.4 印度

印度运载火箭近年来技术发展迅猛，依靠大型固体助推发动机的技术优势，其运载火箭能力在短

期内得到快速提升。印度主要发展的 S-200 型固体助推发动机如图 6 所示，直径 3.2 m，长 25 m，装药量 206.7 t，分 3 段，平均推力 426 t，工作时间 130 s。该型发动机用于 GSLV-MK III 运载火箭的固体助推器，于 2014 年成功完成首次飞行。



图 6 印度 S-200 型固体助推器

Fig. 6 S-200 solid rocket booster (India)

2 固体助推发动机技术发展趋势分析

2.1 国外航天固体动力指标先进，可靠性高，持续向“大推力、高性能、低成本”方向高速发展

国外运载火箭固体动力技术发展迅速，综合性指标达到了很高的水平，重视产品研制和技术发展的继承性，在快速形成运载能力的同时，提高了产品的可靠性。在材料、设计、工艺等多领域开展关键技术攻关工作，新技术获得持续性突破，支撑运载火箭固体动力持续发展。

2.2 大型固体助推器与液体芯级发动机进行组合，大幅简化运载火箭构型

固体发动机易实现大推力，液体发动机易实现高比冲和推力可调，将二者结合，可充分发挥组合优势。如表 1 所示，据不完全统计，国外运载火箭中采用液体芯级发动机与大型固体助推器组合的构型较多，约占总数的 81%。

2.3 通过火箭模块化设计，实现发动机批量生产，基于先进智能生产工艺，降低发动机综合成本

国外将不同型号火箭使用的固体发动机共用，通过批量化、模块化生产，降低单台发动机生产成本。同时，加速增材制造、数字孪生/数字线索、增强/虚拟现实等新兴技术的发展，实现智能制造在固体发动机研制全过程的融合应用。

表 1 国外助推器
Tab. 1 Foreign rocket booster

序号	国别	运载器	助推器
1	美国	大力神 3	固体助推器 UA-1205/UA-1206
2	美国	大力神 4B	固体助推器 SRMU
3	美国	航天飞机	固体助推器 SRB-RSRM
4	美国	战神 1	固体助推器 RSRMV
5	美国	宇宙神 2AS	固体助推器 CASTOR-4A
6	美国	宇宙神 5	固体助推器 AJ-60A/B
7	美国	德尔塔 4	固体助推器 GEM-60
8	美国	SLS-1	固体助推器 RSRMV
9	美国	SLS-1B	固体助推器 RSRMV
10	美国	OmegA	固体助推器 GEM-60XL
11	欧洲	阿里安 3	固体助推器
12	欧洲	阿里安 4	固体助推器
13	欧洲	阿里安 5	固体助推器 P230
14	欧洲	阿里安 6	固体助推器 P120C
15	俄罗斯	联盟号	液体助推器
16	俄罗斯	能源号	液体助推器
17	俄罗斯	质子号 M	液体助推器
18	俄罗斯	安加拉 5	液体助推器
19	俄罗斯	安加拉 7	液体助推器
20	日本	H-1	固体助推器
21	日本	H-2A/B	固体助推器 SRB-A
22	日本	H-3	固体助推器 SRB-3
23	印度	PSLV	固体助推器
24	印度	GSLV-MK II	固体助推器 S-138
25	印度	GSLV-MK III	固体助推器 S-200
26	印度	GSLV-MK IV	固体助推器 S-200

2.4 瞄准发动机性能提升，前沿技术攻关超前布局，不断推进新技术研发

基于未来运载火箭对动力系统高性能、低成本、高可靠的技术需求^[15]，国外针对前沿技术进行布局攻关，发展新型固液混合动力、宽温域固体动力等关键技术，积极探索工程应用的可行性，满足未来固体动力的发展需求。

3 固体助推发动机总体需求分析

3.1 固体助推发动机技术的发展应适应时代发展

“十四五”期间，我国大力推进航天强国建设，“探月工程”“火星探测”等重大工程及其他民用空间基础设施项目的实施对大型助推动力提出了“大推力、快响应、高可靠、低成本”的发展方向，将大幅推动固体助推发动机技术的快速发展。

3.2 固体助推发动机技术的发展需有利于火箭总体性能提升与工程实施

在顶层型谱规划的范围內，发动机的研制要以具体任务为导向，统筹考虑综合性能、经济成本、使用流程等方面，联合论证发动机的总体技术方案，在充分识别关键技术和风险点的基础上，给出技术攻关方向。

1) 通过开展内外弹道联合优化，如图 7 所示，让发动机参与总体回路的设计和优化，从火箭总体性能最优的目标出发，确定发动机设计参数。已有仿真经验表明，通过内外弹道联合优化设计，可提高火箭约 4% 的运载能力^[16]，在提升火箭总体性能水平及设计效率的同时，减小发动机方案迭代次数与性能指标实现难度。

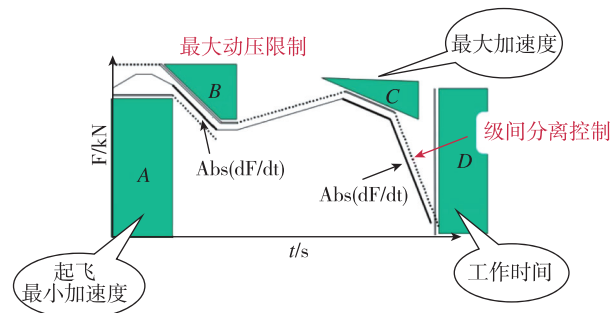


图 7 运载火箭内外弹道联合优化

Fig. 7 Joint optimization of rocket and motor

在发动机实现层面，持续推进大型燃烧室整体式装药设计、大直径发动机性能偏差优化设计、分段式轻质化碳纤维壳体设计、大型低力矩柔性喷管设计等关键技术攻关^[17]，进一步提高发动机装药量、工作推力和质量比实现水平，结合内外弹道联合优化，实现固体火箭动力系统性能跨越式发展。

2) 大型固体发动机规模尺寸和吨位显著提高，需要探索满足工程实施的大型固体发动机运输、总装、起吊等新型使用流程。一方面，受运

输规模限制,依托发射场完成发动机和主要部件的生产,并在发射场完成主要的试验工作,需要投入的基础配套建设规模较大;另一方面,发动机装药、分段燃烧室在火箭总装前完成,采用垂直总装方式,大吨位的模块化起吊、总装对发射场建设提出更高要求,增加技术厂房建设规模和工程系统建设成本。

此外,发动机作为固体运载火箭的动力源,同时也是火箭飞行过程中的振动源,需要提前开展大型固体火箭发动机的起飞噪声、力学环境预示等研究,建议在大型固体发动机试车时开展力、热、噪声等实际环境测量与研究。

3.3 固体助推发动机技术的发展需着眼于性能水平和经济性协同提升

发动机的研制应以联合论证的结果作为输入,在经济性和可靠性的双重约束下,通过设计和生产联动,确定最终的技术实现路径。

1) 从全箭经费构成上来看,固体动力系统占比很大,通过固体发动机关键技术攻关和工艺措施优化,采取面向商业航天的成本控制,可进一步优化火箭成本构成,提升火箭市场竞争力。开展发动机低成本材料优选及适应性开发、绿色低碳推进剂技术、生产工艺简化与流程优化、先进仿真模拟技术等研究,精简研制流程,降低研制费用,为低成本航天运输系统建设提供支撑。

2) 为了提高运载火箭在不同任务载荷下的适应性,需要进一步拓展固体发动机规模尺寸,加大开展分段式复合材料壳体发动机技术等研究力度,快速形成多种推力梯度的发动机型谱。通过火箭的模块化、发动机的产品化和标准化设计,实现发动机的批量化生产,从而降低成本,提高可靠性。

4 结束语

为实现高可靠、低成本、高性能、强任务适应性、便捷使用的目标,给固体助推发动机的发展研制提出了更高的要求。需要结合具体需求,全面策划,统筹发展,继续深入开展大型固体发动机的关键技术攻关与成本优化控制,助推未来运载火箭整体性能稳步提升。

参考文献

- [1] 龙乐豪,李平岐,秦旭东,等.我国航天运输系统60年发展回顾[J].宇航总体技术,2018,2(2):1-6.
- [2] 陈士强,黄辉,邵业涛,等.航天动力系统未来需求方向及发展建议的思考[J].宇航总体技术,2019,3(1):62-70.
- [3] 杨勇,王小军,唐一华,等.重复使用运载器发展趋势及特点[J].导弹与航天运载技术,2002(5):15-19.
- [4] 韩鹏鑫,穆荣军,崔乃刚,等.美国可重复使用助推器发展综述[J].导弹与航天运载技术,2010(5):56-61.
- [5] 孙勇强,徐韡,王鹏飞,等.织女星系列火箭动力系统方案发展研究[J].战术导弹技术,2023(1):69-80,92.
- [6] 孙勇强,佟明羲,王鹏飞,等.国外固体运载火箭主动力系统发展研究[J].宇航总体技术,2022,6(4):56-64.
- [7] 马志滨,何麟书.国外重型运载火箭发展趋势述评[J].固体火箭技术,2012,35(1):1-4.
- [8] 杨毅强.国外固体运载火箭技术的新进展与启示[J].固体火箭技术,2012,35(5):569-572,582.
- [9] 任庆华,刘双,张海龙,等.固体小运载火箭发动机的现状及发展趋势分析[J].现代防御技术,2016,44(5):40-45.
- [10] 《世界航天运载器大全》编委会.世界航天运载器大全[M].北京:宇航出版社,1996.
- [11] Alliot P J, Delange J F, Lekeux A. VINCI, the European reference for Ariane 6 upper stage cryogenic propulsive system[C]. Proceedings of the 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Orlando, FL, Reston, Virginia: AIAA, 2015: AIAA2015-4063.
- [12] Federici L, Zavoli A, Colasurdo G, et al. Integrated optimization of first-stage SRM and ascent trajectory of multistage launch vehicles[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2021, 58(3): 786-797.
- [13] Ariane group. Vega-C user's manual issue 0-Revision0[Z]. Arianespace, 2018: 1-6, 2-10.
- [14] Eric G. Ariane 6 & Vega-C programs-the P120C SRM nozzle[C]. The 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 2017.
- [15] 琚春光,东华鹏,王国辉.航天运输系统对火箭发动机的需求[J].导弹与航天运载技术,2011(4):23-27,36.
- [16] 黄体圣,赵民,姜利,等.固体运载器发动机内弹道设计方法[J].航空学报,2018,39(S1):9-15.
- [17] 《固体火箭技术》编辑部.2021年度固体火箭技术发展[J].固体火箭技术,2022,45(1):1-3.

引用格式:佟明羲,刘伟,宁雷,等.固体助推发动机技术研究进展及总体需求分析[J].宇航总体技术,2023,7(6):31-35.

Citation: Tong M X, Liu W, Ning L, et al. Research process and requirement analysis on solid rocket booster [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023,7(6):31-35.