

LIQUID PROPULSION



我国液氧煤油发动机技术发展概述

张晓军 高玉闪 杨永强 邢理想 张森
(西安航天动力研究所)

液氧煤油发动机在运载火箭发展史上具有重要地位。20世纪80年代起,我国开始研究液氧煤油发动机技术,历时三十余年我国成为世界第二个完全掌握液氧煤油高压补燃循环发动机技术的国家,并形成了系列化、型谱化发展路线。液氧煤油发动机作为运载火箭主动力装置,是大规模、低成本进出空间的首选动力装置,在国家重大航天运载项目、商业航天运输系统、重复使用运载器领域占有重要位置,是国家实现航天强国的重要保障之一。

液氧煤油发动机是指采用液氧和煤油作为推进剂的火箭发动机。煤油作为绿色环保、经济性强的推进剂，燃烧产物为水蒸气和二氧化碳，无毒无污染，是综合性能优秀的推进剂。液氧煤油推进剂组合具有密度比冲高、煤油贮存性能好等优点，使得火箭贮箱尺寸小、成本低，是火箭助推级、一级、二级和上面级动力的优选方案。目前，煤油是成熟液体火箭上在用的烃类推进剂，液氧煤油发动机已通过飞行证明其可靠性很高，并且已发展成为世界航天动力的主力。

一、我国液氧煤油发动机发展现状

（一）发展现状

为提高我国航天领域竞争力，瞄准国际先进动力，在20世纪80年代初，发动机研制单位开展了一系列液

氧/烃发动机燃烧、传热基础理论探索研究，包括烃类推进剂电传热和点火试验等，初步论证了液氧/烃发动机作为未来大型运载火箭动力装置符合我国国情，同时也是世界航天的发展方向。

1990年6月，西安航天动力研究所（以下简称“研究所”）开展高压补燃液氧煤油发动机关键技术攻关；1995年12月，研究所采用国产煤油进行首次热试车成功，证明我国煤油完全可以成为液体火箭发动机的推进剂和冷却剂，开启了我国高性能液氧煤油补燃循环发动机发展之路。之后的近30年，我国先后研制出不同推力量级、不同循环方式的高性能液氧煤油发动机，如图1所示。国内外典型液氧煤油发动机对比见表1。

1.YF-100发动机

2000年9月，液氧煤油发动机研制立项，代号为YF-100。发动机采用高压富氧补燃循环方案，与燃气



图1 国内液氧煤油发动机外形图

表1 国内外典型液氧煤油发动机参数对比

国别	名称	海平面推力	海平面比冲	循环方式	应用火箭
中国	YF-100	1200kN	2942m/s	补燃循环	“长征”五号、六号、七号
	YF-115	180kN (真空)	3334m/s (真空)	补燃循环	“长征”六号、七号
	泵后摆	1250kN	2958m/s	补燃循环	新一代载人火箭
	泵后摆二级	1434kN (真空)	3393m/s (真空)	补燃循环	新一代载人火箭
	500吨级	4800kN	3021m/s	补燃循环	重型运载火箭
	240吨级	2400kN	3021m/s	补燃循环	重型/大型/中型运载火箭
	YF-102	835kN	2700m/s	发生器循环	商业运载火箭
	YF-102V	710kN (真空)	3255m/s (真空)	发生器循环	商业运载火箭
苏联-俄罗斯	RD-107	819kN	2520m/s	发生器循环	“联盟”
	NK-33	1510kN	2915m/s	补燃循环	N-1
	RD-120	834kN (真空)	3432m/s (真空)	补燃循环	“天顶” 3SL
	RD-170	7257kN	3033m/s	补燃循环	“天顶”/“能源”
	RD-180	3827kN	3059m/s	补燃循环	“宇宙神” 5
	RD-191	1922kN	3051m/s	补燃循环	“安加拉”
美国	F-1	6895kN	2550m/s	发生器循环	“土星” 5
	RS-27	911kN	2579m/s	发生器循环	“德尔他”
	Merlin-1D+	845kN	2827m/s	发生器循环	“猎鹰” 9 Block5
	Merlin-1DV	934kN (真空)	3410m/s (真空)	发生器循环	“猎鹰” 9 Block5

发生器循环方案不同,该方案通过将燃气发生器产生的富氧燃气驱动涡轮后再次在推力室中补燃,实现推进剂完全燃烧利用,并可通过提高推力室的燃烧压力进一步提高发动机性能;与燃气发生器循环方案相比,高压富氧补燃循环发动机的比冲提升超10%。在设计之初,发动机的海平面推力确定为1000kN,为适应新一代运载火箭动力需求,研制团队在发动机原结构基础上将其海平面推力进一步提升至1200kN,使其可进行大范围推力和混合比调节,具备单向摇摆 8° 、双向摇摆 6° 功能,为运载火箭提供推力矢量控制,可为氧化剂贮箱提供高温氧气和加热氮气等增压介质,为伺服机构提供高压动力源。

2011年9月,120吨级液氧煤油发动机作为专为我

国新一代运载火箭系列研制的无毒、无污染、高性能、高可靠的基础动力装置顺利通过工程研制验收。试车考核覆盖火箭全任务剖面使用条件,包括从基本型发动机衍生出的5种飞行状态发动机,实现了对“长征”五号、六号、七号运载火箭全系列构型布局。研究所为“长征”五号/五号B系列火箭提供3.35m箭径布局双机并联发动机;为“长征”六号运载火箭一子级提供一台氧自生增压双向摇摆发动机作为主发动机,通过燃气滚控动力系统创新实现火箭滚动控制;为“长征”七号运载火箭一级提供双机并联氮增压双向摆动发动机,为助推级提供一台单向摇摆发动机。后续,研究所为满足火箭结构优化需求,又衍生出“长征”七号A/“长征”八号/“长征”六号A火箭一级双机并联

组合构型,实现了双机并联氧增压方案、推力调节方案等的应用。

2.YF-115发动机

在研制120吨级发动机的同时,我国利用突破的液氧煤油补燃循环发动机技术,及时启动了真空推力为150kN的液氧煤油高空发动机研制工作,以便与120吨级发动机形成系列。2006年,发动机整机试车成功;2008年底至2009年初,针对新一代中型运载火箭要求,我国以15吨级发动机为基础,将发动机真空推力提升至180kN。研究所为“长征”六号运载火箭二级提供一台双向摇摆发动机,为“长征”七号运载火箭二级提供四机并联发动机,其中2台固定、2台双摆。后续,为满足运载火箭性能提升和需求,我国突破了发动机2次起动和3次起动技术;通过结构改进研制了一级15吨级发动机,初步实现了基于亚轨道重复使用飞行器的液氧煤油发动机重复使用。

2015年9月至2016年11月,“长征”五号(见图2)、“长征”六号、“长征”七号运载火箭陆续圆满完成首飞任务,验证了120吨级和18吨级液氧煤油发动机的高性能、高可靠性,使得我国成为世界上第二个完全掌握液氧煤油高压补燃循环技术的国家,发动机整体指标处于国际先进水平,部分技术指标达到国际领先水平。截至2023年初,新一代运载火箭执行飞行任务34次,共有超过200台120吨级和18吨级液氧煤油发动机参加飞行,为加速推进航天强国建设作出了卓越贡献,极大地推动了我国国防科技工业技术的快速发展和进步,取得了较好的经济效益和社会效益。



图2 “长征”五号火箭

3.泵后摆与泵后摆二级发动机

2012年,研究所启动120吨级发动机性能提升课题研究工作,通过适当提高推力和减重来提升火箭运载能力,同时开展耐高温、高压、富氧燃气大口径摇摆软管技术攻关,实现120吨级发动机“泵后摆”布局,结构布局紧凑,可缩小其径向安装尺寸和摇摆半径,提高发动机的推质比,大幅提高运载火箭的单位面积推力,为下一代高性能运载火箭提供动力基础。

2016年,在中国载人航天工程支持下,研究所先期启动了130吨级泵后摆液氧煤油发动机和145吨级泵后摆高空发动机关键技术攻关,突破了补燃发动机泵后摆技术、高压大流量涡轮泵减振技术、低入口压力起动技术、分级起动技术等关键技术。按照以现有动力基础实现空间站运营阶段常态化运输和载人登月的规划,火箭总体单位提出了新一代载人运载火箭,泵后摆液氧煤油发动机得以研制立项。130吨级发动机海平面推力1250kN,海平面比冲2958m/s,为新一代载人运载火箭一级主动力装置;145吨级发动机真空推力1434kN,喷管面积比90,真空比冲3393m/s,为新一代载人运载火箭二级主动力装置。为满足新一代近地运载火箭垂直起降重复使用需求,研制团队以泵后摆发动机为技术基础,研制出具备多次起动能力、大范围变推力的重复使用发动机,该型发动机目前正在开展改进研制和验证工作。为实现空间发动机无毒化应用发展,研究所开展了2吨级和8吨级液氧煤油上面级和着陆发动机预先研究,探索研究了空间发动机多次起动、深度变推力和姿轨控一体化等多功能技术。

4.500吨级发动机和240吨级发动机

按照实施大规模深空探测、月球开发及空间基础设施建设等重大工程要求,我国开展了重型运载火箭及其动力系统的论证与研究,提出研制500吨级高压补燃液氧煤油发动机作为一级主动力的方案。该发动机海平面推力4800kN,采用涡轮泵串联、双推力室泵后摇摆方案,是世界上推力最大的双推力室液体火箭发动机。2016年8月,该发动机完成了首次燃气发生器-涡轮泵联试,2021年3月完成首次全工况半系统试车,2022年11月完成首台整机试车,关键技术得到全面验证。该发动机的研制将大幅提升我国航天动力的技术水平,为我国航天发展提供强大动力基础,带动我国液体动力技术及相关产业的全面提升。在500吨级液氧

煤油发动机的基础上,近年来我国开展了其拓展型单推力室240吨级重复使用液氧煤油高压补燃发动机的研制工作,240吨级发动机可用作未来重型、大型、中型运载火箭的主动动力。

5.YF-102发动机

为适应我国大规模、低成本的商业发射任务需求,实现现役常规推进剂运载火箭的升级换代,研究所在现役常规发动机的基础上,快速研制了一种采用液氧煤油推进剂的低成本火箭发动机。利用我国已经掌握的常规发生器循环发动机及高压补燃液氧煤油发动机技术和科研体系,研究所开展了发生器循环液氧煤油发动机研制工作,代号YF-102。该发动机海平面推力835kN,海平面比冲2700m/s,采用涡轮泵串联,泵前单向摇摆方案。2020年5月,发动机完成首台整机试车;2022年12月,70吨级高空发动机完成首台整机试车。发动机定位于中小型商业运载火箭主动力,用于发射国内外主流的中小型商业卫星,可以实现对我国现役常规推进剂火箭发动机的无毒化替代,并作为新一代运载火箭主动力的有效补充,提供成本更低的进入空间能力。

(二)发展成果

一是成功研制多型液氧煤油发动机,我国成为世界第二个掌握液氧煤油高压补燃循环发动机技术的国家,建成了系统完整的液氧煤油发动机设计、生产、试验体系,形成我国新一代运载火箭全系列型号动力型谱。

历经三代人近30年的努力,研究所成功研制了YF-100、YF-115、130吨级泵后摆、145吨级泵后摆二级等多型发动机,使推力和比冲大幅跃升,实现了航天绿色环保化。通过单摆、双摆及单双机组合,新一代运载火箭动力系统实现了系列化、模块化、型谱化,助推我国运载火箭技术水平跻身国际先进行列。

通过液氧煤油发动机的研制和应用,我国成功掌握了液氧煤油高压补燃循环技术,攻克了补燃循环自身起动系统技术、大推力高压补燃循环发动机总体结构设计技术、高压大流量推力室稳定燃烧及冷却技术、高压大流量富氧发生器技术、高压大流量高功率涡轮泵技术、高精度调节与控制组件技术、新材料应用工艺和试验技术等关键技术。发动机研制带动了超低温铸造高强不锈钢、超低碳马氏体不锈钢、耐富氧燃气高

温合金、高强马氏体不锈钢、高导热铜合金、火箭煤油和点火剂等48种新材料的研制,推动了国家高性能特种材料的发展。研究所开展了大量的仿真和模拟试验技术研究,自主开发了一批工程仿真软件,掌握了补燃循环发动机核心仿真、模拟试验技术,推动了工程仿真技术和模拟试验技术的进步;建成了配套齐全的液氧煤油发动机研制保障体系,包括涡轮性能试验台、转子试验台、亚洲最大功率泵水力试验台及亚洲最大吨位热试车试验台等;培养了一批设计、工艺、试验和管理人才,在液体火箭动力研究、生产、试验及其他领域发挥了重要作用。

液氧煤油发动机和氢氧发动机的成功研制使新一代运载火箭的近地轨道运载能力从8.6t提升至25t,地球同步轨道运载能力从5.5t跃升至14t。我国实现了全液氧煤油动力、液氧煤油动力与固体动力组合等在火箭上的应用,覆盖了不同吨位、不同轨道的载荷需求。120吨级液氧煤油发动机作为我国现役推力最大的发动机,应用于新一代运载火箭全系列型号的发射任务中,以高性能、高可靠、百分百成功的业绩,促进了新一代运载火箭快速从应用走向成熟,并持续为推进建设航天强国作出贡献。

二是持续创新,拓展泵后摆液氧煤油发动机技术,提升可靠性和打造重复使用动力,为下一代载人运载火箭提供高可靠动力装置。

液氧煤油发动机研制过程始终坚持自主创新、持续创新的发展道路。为进一步提高120吨级液氧煤油发动机的可靠性,改进泵前摆方案带来的一系列不足,研究所克服困难,以性能提升、可靠性提升和泵后摆技术为重点攻关目标,研制了两型大推力高性能泵后摆发动机。研制团队在国内首次攻克了大通径高温高压大载荷燃气摇摆装置、高压大通径燃料摇摆装置,以及复杂力热载荷下专用密封件设计、加工、试验等过程中的难题;通过发动机结构布局,实现了发动机泵后摇摆,使得摇摆力矩减小为原来的一半,优化了发动机摇摆包络和发动机布局,在5m箭径布置了7台发动机;通过改进油泵结构降低油泵振动,发动机振动减小30%以上,为发动机推力、寿命等综合性能提升奠定技术基础;攻克了推力高精度快速调节及其控制技术,实现了发动机推力高精度高可靠快速调节,满足火箭牵制释放和故障诊断功能需求;攻克了大推力

补燃高空发动机低入口压力起动技术,为研制大推力二级火箭发动机奠定了坚实的基础。

从2007年5月完成首台整机原理性验证试车,到2022年12月完成首台飞行状态发动机交付和重复使用发动机原理验证试车,研究所凭借成熟的液氧煤油发动机研发队伍和创新完善的研制体系、仿真平台和试验系统,仅通过5年多时间就完成了大量关键技术攻关和状态固化,为新一代载人运载火箭研制打下了坚实基础。通过泵后摆发动机研制,研究所实现了对高压补燃循环发动机技术的全方面优化,促进发动机可靠性全面提升,使我国高性能液氧煤油发动机技术跃上了一个新台阶。

三是赶超一流,重型运载动力装置瞄准世界一流水平,实现深度技术突破,带动液体动力新发展。

500吨级液氧煤油发动机具有高比冲、高推重比、分级起动、推力和混合比可调节、故障监控等特点,相关技术达到国际先进水平,部分技术世界领先。研究所在研制500吨级发动机时始终秉承“瞄准前沿、开拓创新、引领发展、自主可控”理念,克服了技术跨度大、产品台数少、保障条件不足等困难。与现役120吨级液氧煤油发动机相比,500吨级发动机的推力提高4倍,海平面比冲提高2.6%,涡轮泵功率提高至5倍,推重比提高22%,功能和性能指标跨度大。研制团队经过数年攻关,取得大量创新成果,突破了发动机分级起动及其控制与故障监控、泵后摇摆总体布局与装配、高压大流量高性能稳定燃烧、大功率高效涡轮泵、高压大流量高精度调节元件、先进测试与试验技术、发动机数字化研制模式及数字样机等发动机核心关键技术,发动机通过了发动机组件及分系统地面冷热试考核、燃气发生器-涡轮泵联试、半系统试车集成演示验证和首台整机试车考核。在500吨级液氧煤油发动机攻关研制的基础上,研制团队正在开展拓展型单推力室240吨级液氧煤油发动机攻关研制工作。240吨级液氧煤油发动机具有通用性、智能化、可重复使用的特点,将使我国重复使用液体动力技术达到国际领先水平。500吨级液氧煤油发动机相关技术已拓展应用于新一代液氧煤油发动机能力提升方面,后续可直接转化应用于其他大推力液氧煤油发动机的攻关研制工作,将有力推动我国液体主动力设计水平大幅提升。

四是提升商业发射竞争力,充分利用现有常规运

载火箭发动机的生产、试验和发射场基础设施,实现低成本、快速、大批量投产,拓展商业载荷发射市场。

研究所在研制YF-102发动机时结合商业航天需求,充分利用现有运载火箭发动机的生产、试验和发射场基础设施,以3.35m直径的中型火箭为主,确定了发动机的设计指标。在发动机研制过程中,研制团队充分吸取现有常规运载发动机和补燃液氧煤油发动机的优点,在继承的基础上再创新,掌握关键核心技术;转变产品研制思维,充分考虑现有生产设施,基于生产条件来设计发动机参数,为实现低成本、快速、大批量投产打下坚实基础;大量应用新技术、新验证方法,大幅加快研制速度,二级YF-102V推力室头部、身部均采用3D打印技术制造,是目前世界上已知最大的3D打印推力室。研制团队不断改进提升发动机系统,优先快速研制可用的基本型发动机,在使用中不断迭代,通过新研制高性能大喷管推力室,增加推力混合比调节系统及二次起动系统,衍生出二级高空发动机。

五是通过液氧煤油发动机研制,带来良好的经济效益,并带动社会产业应用发展。

在液氧煤油发动机研发过程中,研制团队突破并掌握的系统动力学、燃烧、特种泵、阀与密封技术等,带动了我国系统仿真技术、高效稳定燃烧技术、高效涡轮泵技术、特种制造技术等的大幅提升,促进了新材料与工艺等诸多学科及领域技术发展,同时推动了科学进步与理论创新。

液氧煤油发动机对火箭煤油的应用和更新换代起到巨大推动作用,促进了高性能煤制煤油、高能合成煤油、低流阻煤油等推进剂的发展和推广应用。

液氧煤油发动机已推广应用于多个型号运载火箭上,以及石油开采与输送等石油化工领域、烟气处理等节能环保领域、机械制造等领域。例如,研究所建成了国内焓值最高的地面满流试验系统,提高了燃烧设备的燃烧效率和工作寿命,降低了能耗和污染物排放;成功中标国内大型石油输送管道特种阀门合同,打破了该领域国外企业的长期技术垄断。

二、我国液氧煤油发动机发展建议

一是坚持动力先行,加强理论基础研究,提升发动机数字化仿真和协同设计能力,拓宽液氧煤油发动

机使用能力,不断提高运载型号可靠性。

中国航天秉承“航天发展,动力先行”的指导思想,对标国际前沿技术,加强核心基础理论研究,科学规划前沿技术研究,始终围绕液氧煤油发动机的技术特点,在确保液氧煤油发动机高可靠性的同时,不断挖掘发动机技术潜能,拓宽发动机使用维护能力,突破理论、材料及工艺壁垒,解决制约发动机可靠性的深层次技术问题,提高发动机固有可靠性,简化发动机操作工序,提高使用维护便利性及环境适应性。逐步建成核心专业技术研发平台和通用技术平台,构建航天动力技术研发新体系,显著提升中国航天动力设计仿真、制造集成、试验验证等技术水平和保障能力。将新一代数字技术与液体动力发动机研制及管理业务深度融合创新,构建全数据、全模型、全互联、全感知、全流程的数字化企业。以数据驱动、流程驱动、模型驱动和知识驱动航天发动机科研生产及经营管理活动,形成与总体及上下游组织深度协同的发动机数字化规划论证、研发设计、生产制造和试验测试模式,大幅提升发动机产品研制效率和质量水平,高效支撑航天重大工程型号发射和运营。

二是发展重型运载发动机,满足更大载荷进入空间能力,具备大规模深空探测能力,深度融合数智化设计,建成液氧煤油发动机全系列研制体系。

500吨级和240吨级液氧煤油发动机可作为未来重型、中大型运载火箭主动力,助力我国未来重大航天工程任务的实施,为我国运载火箭能力提升提供重要支撑,有力提升我国未来大规模进入空间、利用空间的能力。可开展适用于3.35m、5.0m、7.5m、10m级等不同箭径火箭,尤其是未来重复使用火箭的发动机拓展应用研究,利用发动机的高性能、高可靠、适应性强、使用维护便捷、可重复使用等优点,实现我国新一代运载火箭动力系统换代升级。

在新型液氧煤油发动机研制过程中,需要进一步深度融合数字化和智能化设计手段,搭建基于模型的液体动力发动机系统工程协同研制体系和数字孪生环境,形成智慧发动机,将智能控制、多参数融合的故障诊断及全周期健康管理融入新型液氧煤油发动机研制中,最终建成液氧煤油发动机全系列研制体系。

三是拓宽液体动力发展思路,发展无毒空间动力、低成本动力、重复使用动力等,全面提升我国在国际

航天发射市场的竞争力。

我国现役常规运载火箭采用有毒推进剂发动机作为主动力装置,已无法满足我国绿色环保发展及国际航天商业发射市场要求。液氧煤油发动机在新一代运载火箭上的成功应用表明我国现役运载火箭动力系统已具备升级换代条件。液氧煤油发动机研制团队也需拓宽液体动力发展思路,在国内航天运载需求持续增大和国际航天发射市场竞争激烈的双重需求下,大力发展无毒空间动力、低成本动力及重复使用动力等。

商业航天发展对发动机提出了低成本要求,重复使用发动机能够进一步降低火箭发射成本,是未来商业航天发展的必然趋势。基于现有发动机技术的不断迭代,未来需进一步开展重复使用发动机研制工作,掌握多次起动、大范围变推力等关键技术,开展飞行返回演示验证试验,推动发动机进入工程应用阶段,促进发动机改进优化,全面提升我国在国际航天发射市场的竞争力。

三、结束语

YF-100、YF-115两型液氧煤油高压补燃循环发动机以100%的成功率支撑了我国新一代运载火箭从应用、快速发展到成熟,并不断拓展在火箭型号和不同领域飞行器上的应用,为航天强国建设作出重要贡献。

在航天强国建设和形成世界航天产业竞争力的需求指引下,我国还需要进一步加快实现无毒运载动力规模化,全面优化火箭性能和液体动力匹配性,为未来航天重大活动的开展提供坚实可靠的动力支持,提升我国进入空间和利用空间的能力。(责任编辑 李臻)

作者简介

张晓军

西安航天动力研究所所长,长期从事液体火箭发动机的型号研制开发、基础理论研究与技术管理工作,先后负责液氧煤油发动机、全流量补燃液氧甲烷发动机、火箭冲压组合发动机等研究工作。中国航天