

基于科技融合的组合动力飞行器技术研发管理模式

蔡闻一¹, 蒋佳玲¹, 邱宇峰¹, 高晓明²

1. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076

2. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048

摘要 为满足未来新型航天飞行器跨空域、宽速域、高机动飞行的需求, 组合动力发动机应运而生。介绍了组合动力系统的主要类型和工作原理, 分析了美国典型组合动力飞行器技术项目研究进展及管理模式, 并从科技融合的角度, 结合中国组合动力系统未来发展提出了相关措施建议。

关键词 组合循环动力; 飞行器; 航天动力系统

高超声速技术是21世纪航空航天技术的制高点, 也是重要的军地两用技术, 其发展将对未来军事发展战略、空间技术、武器体系构建等产生重大影响。高超声速飞行器的飞行包线十分宽广, 飞行高度0~40 km甚至更高, 飞行速度从亚声速、跨声速、超声速扩展到高超声速, 这对动力装置性能提出了极为苛刻的要求, 要求其必须在宽广的飞行包线内稳定可靠地工作。但目前来看, 除火箭发动机外, 任何一种单一类型的发动机都不能满足以上要求, 而火箭发动机由于比冲较低, 难以支持长时间高超声速飞行。因此, 发展技术性能更为先进的组合动力装置势在必行。

1 组合动力的主要类型

不同类型的发动机在不同的飞行范围内具有各自的性能优势, 为实现零速起飞直至高超声速飞行, 必须结合各类型发动机有效工作范围的特点, 采用以火箭、冲压、涡轮等发动机技术为基础的不同形式组合循环推进系统(combined-cycle propulsion system)。组合动力飞行器是利用组合动力技术进行航天运输的工具。组合动力是一种新型动力, 其基本原理是, 将冲压发动机、涡轮发动机、火箭发动机等不同类型的发动机(两种或以上)有机融合, 取长补短, 在不同的飞行阶段体现不同发动

收稿日期: 2019-11-01; 修回日期: 2020-04-11

作者简介: 蔡闻一, 高级工程师, 研究方向为航天发展战略、企业管理、公司治理等, 电子信箱: caiwenyi0803@163.com

引用格式: 蔡闻一. 基于科技融合的组合动力飞行器技术研发管理模式[J]. 科技导报, 2020, 38(12): 109-114; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.12.010

机的飞行优势^[1]。

目前,典型组合动力主要包括:火箭基组合循环发动机(rocket based combined cycle, RBCC)、涡轮基组合循环发动机(turbine based combined cycle, TBCC)、空气涡轮火箭发动机(air turbine ramjet, ATR)和复合预冷吸气式火箭发动机(synergetic air-breathing rocket engine, SABRE)等^[2]。组合动力发动机不同组合方式见图1。

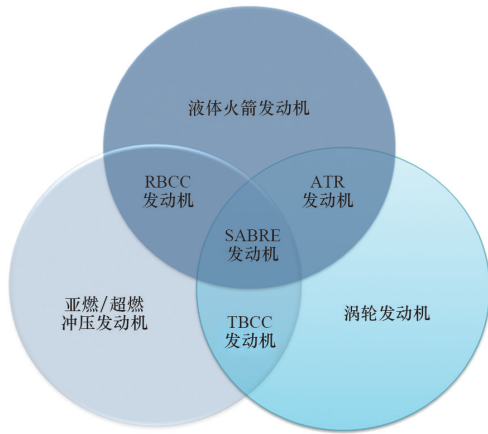


图1 组合动力发动机不同组合方式示意

通过不同动力的组合,根据其优势转换使用,在不同的工作模式下,发挥各自性能优势,从而使飞行器在起飞、穿越大气层、入轨等不同飞行阶段

的全速度范围内均能获得最优的推进效果,实现飞行器跨空域、宽速域、高机动飞行。

2 美国组合动力飞行器技术研究历程

美国从20世纪50年代末开始进行组合动力技术探索性研究,先后制定了多个相关研究计划。组合动力系统作为实现高超声速天地往返的重要技术途径,随着多个航天计划的实施,在关键技术方面取得了一定研究进展。美国组合动力飞行器技术研发历程见表1。

2.1 20世纪50年代至20世纪末

20世纪50年代,美国开始进行组合动力系统概念性研究。20世纪60年代,美国国家航空航天局(NASA)提出开始发展下一代可重复使用运载器(RLV)计划^[3],该计划是一项综合性的地面和飞行试验计划,旨在研制一种经济、可靠、便于操作的可重复使用航天运载器系统,以便取代现有航天飞机和一次性使用运载火箭。在RLV计划的支持和推动下,Marquardt公司由空军资助,对引射冲压发动机(ERJ)和超动力引射冲压发动机(SERJ)进行了一系列地面试验,对起飞加速、跨声速和超声速飞行等工作过程进行研究,主要目标是解决冲压发动机无法自主起飞的问题。20世纪80年代,美国启

表1 美国组合动力飞行器技术研发历程

时间阶段	牵头部门	计划名称	计划目标
20世纪50年代	NASA	下一代可重复使用运载器(RLV)计划	研制经济、可靠、便于操作的可重复使用航天运载器系统,以便取代现有航天飞机和一次性使用运载火箭
20世纪末	DARPA、NASA	国家空天飞机计划(NASP)	研发一种单级入轨的航天运载器,彻底改变航天运输方式
21世纪初期	NASA	空间运输计划(ASTP)	研究单级入轨技术,提高第三代可重复使用空间飞行器的性能,降低发射和维修费用,实现航天运输班机化
	NASA	下一代发射技术计划(NGLT)	通过开展RBCC动力系统研究,研发出能够同时适用于火箭和吸气式高超声速飞行器的推进系统
目前	DARPA、美国空军	陆地强制应用与发射预研计划(FALCON)	研发能够实现全球快速到达任务的高超声速飞行技术
		完全可重复使用进入太空技术预研计划(FAST)	分别对以涡轮发动机、火箭、RBCC、TBCC为动力装置的技术预研计划(FAST) TSTO飞行器,针对体积和空载质量等参数进行详细分析

动国家空天飞机计划(NASP)^[4],由国防预先研究计划局(DARPA)领导,国防部和NASA联合开发。该计划旨在研发一种单级入轨的航天运载器,彻底改变航天运输方式,既能够像普通飞机那样重复使用,能够从机场起飞和降落,同时相对于火箭动力运载器可大幅降低发射成本。在此计划推动下,吸气式高超声速技术研究取得显著进展。该计划之后,组合动力研究进入快速发展阶段。

2.2 20世纪末至21世纪初期

20世纪90年代,NASA启动先进空间运输计划(ASTP),旨在研究单级入轨技术,提高第三代可重复使用空间飞行器的性能,降低发射和维修费用,实现航天运输班机化。该计划下设想的第三代可重复使用运载器 Spaceliner 100 拟用RBCC动力系统。在该计划的带动下,美国掀起了RBCC组合推进系统的研究热潮,多家公司和研究机构进行了大量研究,并围绕RBCC模型样机研制工作展开了激烈的竞争。Rocketdyne公司、航空喷气公司(Aerojet)、NASA盖仑研究中心等分别提出了不同的发动机方案。NASA和美国空军针对多家提出的不同方案开展了大量试验验证,试验马赫数范围0~8,涵盖引射模态、亚燃模态和双模态。

21世纪初,NASA开始实施下一代发射技术计划(NGLT),旨在通过开展RBCC动力系统研究,研发出能够同时适用于火箭和吸气式高超声速飞行器的推进系统。其中,X-43B高超声速演示器旨在演示RBCC动力系统推进模式,探索工作包线,验证系统的可行性。X-43B演示器研发终止后,NASA与美国空军联合启动了可重复使用组合循环飞行验证器计划(RCCFD),旨在演示验证组合循环推进技术。在该计划支持下,航空喷气公司开展ISTAR发动机研发,后来又加入了普惠公司的煤油燃烧技术,逐步将RBCC技术的研究重点从关键技术攻关向工程化样机转变,并开始进行部件级别的详细研究。相关研究成果为后续开展从猎鹰计划(陆地强制应用与发射预研计划,FALCON)提供了理论依据。

2.3 21世纪初期至今

2003年,美国空军和DARPA开始实施FAL-

CON计划,旨在研发能够实现全球快速到达任务的高超声速飞行技术。FALCON计划的研制目标之一是发展由涡轮组合循环发动机推进的、能从普通机场跑道起飞的高超声速巡航飞行器(HCV)。其中,FALCON组合循环发动机地面技术验证项目(FaCET)^[5]针对TBCC发动机开展了研究,为后续FALCON设计概念的可行性奠定了基础。随后,在完全可重复使用进入太空技术预研计划(FAST)下,美国空军分别对以涡轮发动机、火箭、RBCC、TBCC为动力装置的TSTO飞行器,针对体积和空载质量等参数进行了详细分析。2008年,美国空军委托Astrox公司对8种TSTO飞行器的构型进行了比较。同年,美国国防部发布高超声速技术发展路线图,明确提出了TSTO飞行器发展预研计划,该飞行器以可重复使用涡喷发动机或TBCC发动机为第一级动力装置、以可重复使用RBCC发动机为第二级动力装置,使美国太空进入能力由一次性垂直“按计划发射”转换到像飞机一样的“按要求发射”。

2016年8月,DARPA战术技术办公室(TTO)在美国政府联邦商机网站上发布了先进全速域发动机(AFRE)项目的广泛机构通告(BAA)。AFRE项目是DARPA在2016年2月新披露的一个项目,以未来高超声速情报监视与侦察(ISR)飞机为应用背景,旨在利用“现货涡轮发动机+宽速域双模冲压发动机”方案,完成全尺寸TBCC模态转换的地面集成验证,研究确立高超声速飞机TBCC推进系统工程化的可行性,该推进系统可在Ma 0~5+之间的全速域范围实现连续无缝运行,以确保快速响应的高超声速飞机在拒止环境下完成ISR任务。

3 美国组合动力飞行器技术研发管理模式分析

通过梳理美国组合动力研究进展,可以看出,美国的组合动力研究体系相对完善,是一个层级分明、结构完善、军民一体的综合体系,从顶层制定发展计划,在广泛合作中开展竞争,统筹资源,集中优势,避免重复研究的浪费,推动了各项研究工作有序开展。

3.1 统筹管理,确保国家战略落实

美国于20世纪50年代提出组合动力发动机的概念,在NASP计划之后进入快速发展阶段。通过梳理美国组合动力研究进展,可以看出,在组合动力研究方面,都是从国家层面制定研究计划,集中各方的研究力量进行具体实施。研究团队包括政府的军用部门和民用部门、军兵种、宇航和推进工业的合同承包商、部分高校及研究机构。从顶层制定适当的研究规划,合理安排研究进度,为开展技术研发提供强有力的组织保障。在研究过程中,集合国家各层面的力量,分阶段开展研究和验证试验,体现美国航天领域的整体技术水平,注重技术储备,为组合动力长远发展打好坚实的技术基础。

3.2 科技融合,共同推进技术发展

美国几乎每一个组合动力系统研发都是由多家单位联合开展的,合作开展研究工作的方式也是多种多样的。美国国防部和军兵种对NASA所研究的相关技术进行辨识后,认为该技术有军事应用前景的,就会和NASA签订合同,进行共同开发,对该技术在军事领域的应用情况进行有效验证,反之亦然。在每项具体计划下,NASA和DARPA都会发布招标通告,具备研究能力的商业公司以参与投标的形式进行招标谈判。NASA和DARPA确定中标者(一个或多个)后,与其形成分担费用的政府—企业伙伴关系,签订一定期限的研究合同。各承研单位根据自身的优势和特长承担相关工作。通过集合优势资源,加强军方与企业之间以及各部门单位之间的合作,可以有效节省研究成本,共同推动研究进展。

3.3 开展竞争,激发各方研究潜能

美国国防部在经费允许的范围内,尽力维持国防工业的竞争态势,以长期、全面地保持国防工业在武器装备研制、生产、保障方面的全套能力以及多个厂商之间的竞争。各竞争单位或团队根据国防部或NASA的需求提出不同的研究方案,在进行可行性、性价比等系列评估后,国防部或NASA最终选择最优的一家或多家单位进行研发。例如,NASA每年花费近1.3亿美元进行先进推进系统研究,针对RBCC发动机系统和TBCC发动机系统,在

商业公司之间展开研制竞赛,以选择最佳的动力装置。在广泛的合作中积极开展竞争,可以有效打破垄断体制,激发各研究机构的潜能,加快推进研究进展。

4 关于中国组合动力飞行器技术未来发展的思考

近年来,随着新军事变革的进程不断加快,研究新型的具有更宽适应范围、更高综合性能的动力系统成为航天领域发展的必然要求,组合动力技术已经成为动力技术研究的前沿和热点。通过分析美国组合动力发展现状,结合中国发展实际,建议从以下几个方面加强发展。

1) 抓住历史机遇期,顶层谋划发展计划,吸纳军地优势技术力量和资本投入,推动中国航天运输系统能力提升。

航天运输系统作为进入空间、利用空间的基础和前提,决定着一个国家进出空间的能力及未来可持续发展的潜力,是开发利用外层空间、维护国家空间权益、形成和保持空间威慑的战略基础。航天运输系统的能力、技术水平及以其为基础开展的重大航天活动,是一个国家航天实力和水平的重要体现。要满足未来高频率、低成本的航天运输任务需求,需要发展准备时间短、运行成本低、飞行包线宽、环境适应性强的先进航天运输系统。组合动力可以大大拓宽飞行器的飞行高度和速度包线,实现重复使用天地往返及水平起降入轨飞行,缩短航天运输准备时间,降低航天运输成本,为实现高频率、低成本航天运输奠定基础。鉴于以上发展需求,以美国为代表的主要航天国家先后提出了新的空间运输计划,高度重视高超声速组合动力装置研发工作,并取得了一定研究进展。

航天发展,动力先行。在高超声速飞行时代即将到来之际,宇宙深度探索、低成本太空旅游、高超声速商业飞行等,都为人类勾勒出了更美好的未来蓝图,但同时也对未来航天动力系统提出了更高的性能要求。在创新驱动发展战略、航天强国战略等政策环境支持及新一轮科技产业革命呼之欲出的

历史机遇期,为满足未来可重复使用天地往返运输系统的发展要求,有必要紧密跟踪国外组合循环推进系统研究动态和最新进展,系统思考,明确思路,顶层谋划航天技术未来发展,结合军、民领域对组合动力技术的发展需求,制定相应的研究计划,面向社会发布项目方案需求通告,广泛吸纳在动力系统方面具有研发优势的军工企业和民营企业,在政策和经费上给予支持,鼓励民营资本参与相关技术研发,实现资金合理利用,产生协同带动效应,共同推动中国组合动力相关关键技术研究取得突破。

2) 充分利用现有科研资源,加强军地合作和资源共享,建立相应机制,共同推进组合动力技术发展。

美国十分重视开展组合动力及相关应用技术研究,研究层面涉及飞行器总体、发动机系统以及相关基础关键技术,研究单位包括政府军用和民用部门、商业公司以及科研院所。总体上说,美国组合动力技术研发实施的是以军事技术民用化、民用科技军用化为核心的一体化发展战略。国防部和 NASA 从政府层面,分别针对军事和民用领域发展需求,提出先进推进系统发展计划,充分利用高校的科研资源进行基础理论研究,积极吸纳具有强大研究基础和技术实力的商业公司参与研究,吸收和运用民用科技基础研究成果及资源,发挥军工企业在运行和生产方面的优势作用,有效增强技术储备,提高研制效率,降低成本和风险,加快推进研究进展。

近年来,在信息、制造、能源、材料等前沿领域,基础及支撑技术的军地两用属性日益凸显。在国际航天领域发展商业化、全球化趋势加快的大背景下,国防科技与民用科技深度融合的空间也愈加广阔。当前,中国大力推行科技创新融合发展,为组合动力技术的军地融合发展提供了良好的政策环境。因此,应积极探索开展交流合作,创新合作模式,在顶层牵引下,建立军方、科研院所、高校以及民营企业之间的合作开发机制,建立开放型技术协同创新体系,充分调动和利用各单位和部门的技术优势,加强技术交流和资源共享,根据项目研制和型号任务具体需求,组织专业队伍开展协同攻关,

有效弥补组合动力基础研究领域存在的差距,共同推动中国先进动力技术研究水平的提升。

3) 结合实际发展需求,利用已有技术基础,科学制定研究方案,分阶段稳步推进关键技术验证。

近年来,伴随着世界各国对空间开发利用的逐步扩展和深入,现有的航天运输系统在技术性能上已经无法适应未来“班机化”的航天运输应用需求,发展技术性能更为先进、可重复使用的航天运输系统势在必行。发展可重复使用运载火箭,一定程度上可以使运载器单位有效载荷的运载成本随发射次数的增加而降低。美国私营公司 SpaceX 率先完成了可重复使用运载火箭一子级的回收试验,开创了火箭垂直着陆回收的重复使用方式,是在可重复使用航天运输技术领域的有益探索。组合动力技术的应用,可以使未来航天运输实现水平起降、重复使用以及低成本、高频率运营,是实现航天运输系统重复使用更先进的一种技术路径,将有助于重复使用航天运输系统能力的全面提升。

然而,不可避免的是,目前各种组合循环发动机的推进方案,虽都有自身独特的性能优势,但又都存在一定的技术瓶颈或性能短板。例如, TBCC 动力可实现飞行器水平起降,发动机比冲性能高,但飞行速域和空域受限,只能在大气层范围内工作,因此只能作为未来重复使用航天运输系统的一子级使用; RBCC 动力理论上可实现飞行器水平起降以及全空域、全速域飞行,且系统集成度高、结构较简单,但目前低速引射火箭模态推力增益较低,使得 RBCC 动力飞行器零速水平起飞存在较大难度,成为目前制约 RBCC 动力技术在天地往返领域应用的最重要的技术难题。

因此,在开展组合循环推进系统方案研究的过程中,应综合考量任务需求、各技术特点以及技术的发展预期等多种因素,科学合理地开展相应的组合动力技术研究。例如,对于远程民用运输机、高超声速客机应用背景,飞行器全程在大气层内飞行,需要具备可靠水平起降、低成本运营等能力,可以优先选择 TBCC 等动力作为飞行器动力系统方案,在具备技术研究和试验能力的民营企业和军工企业内广泛征求意见,充分调研各单位已有技术基

基础和具备的研究能力,推进概念分析、基础研究、工程方案设计和演示验证试验等各个阶段工作有序开展。

5 结论

人类未来航天运输活动将向班机化、低成本化、高可靠等方向进一步发展,必将对动力系统提出更高的技术要求。组合动力技术是未来先进航天动力技术的重要发展方向,能够针对不同飞行阶段,采取最高效的动力推进方式,最大限度地发挥不同动力的性能优势,大幅度拓宽飞行器的飞行高度和速度包线,降低航天运输成本,具有十分广泛的应用前景。通过对组合动力系统的主要类型和工作原理、美国典型组合动力飞行器技术项目研究进展情况及管理模式等进行全面分析,可以系统了解当前组合动力飞行器技术研究现状及国外的有

益经验,应结合未来军事、政治和经济发展需求,从科技融合角度出发,积极推动组合动力飞行器技术研发及应用。

参考文献(References)

- [1] 杨潮兴, 张志峰, 王建辉, 等. 国外组合推进技术研究现状[J]. 飞航导弹, 2012(5): 78-84.
- [2] 邓英, 朱大明. 空天飞行器及动力技术发展研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2013(2): 47-52.
- [3] 彭小波. 组合动力飞行器技术发展[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(5): 1-6.
- [4] 费王华, 申亮, 郭鹏飞, 等. 组合动力飞行器军民融合发展方向及面临的技术挑战[J]. 军民两用技术与产品, 2017(7): 16-18.
- [5] 刘红霞, 梁春华, 孙明霞. 美国高超声速涡轮基组合循环发动机的进展及分析[J]. 航空发动机, 2017(8): 96-102.

Reflection and analysis on management mode of combined-cycle aerospace vehicle technology R&D based on the military and civilian integration

CAI Wenyi¹, JIANG Jialing¹, QIU Yufeng¹, GAO Xiaoming²

1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China

Abstract To meet the needs of new space vehicles in the future, the combined power engine emerges timely. This paper introduces the main types and working principles of the combined power system, makes a preliminary analysis of the research progress and management mode of the typical combined power vehicle technology project in the United States, and puts forward some relevant measures and suggestions based on the military and civilian integration strategy in China.

Keywords combined-cycle propulsion; aerospace vehicle; space power system ●



(责任编辑 王丽娜)