

国外高超声速飞机动力发展研究



秦亚欣¹, 廖孟豪²

1. 中国航空发动机研究院, 北京 101304

2. 中国航空研究院, 北京 100029

摘要: 常规水平起降、可重复使用的高超声速飞机是未来军民用航空器的重要发展方向之一。本文针对高超声速飞机的使用需求和动力技术发展难题, 概述了美国、欧盟、英国高超声速飞机动力的发展现状, 提出了我国高超声速飞机动力发展的建议, 为制定我国高超声速飞机动力发展战略提供参考和借鉴。

关键词: 高超声速; 涡轮发动机; 组合动力; 战略规划

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.11.003

高超声速飞机是未来军民用航空器的重要发展方向之一。未来远程高超声速侦察/打击飞机和高超声速民用客机对动力系统均提出了新的要求。近年来, 以美、俄为首的世界航空大国全力推进高超声速武器装备发展, 尤其是2022年各国都加大了高超声速技术研究的投入, 呈新的军备竞赛的态势^[1-2]。

为了兼顾安全性、经济性和作战效能的综合要求, 高超声速飞机的飞行高度和速度范围十分宽广, 这就要求动力装置不仅在宽广的飞行包线内能够稳定可靠地工作, 还要具备水平起降和重复使用的能力。目前可选的动力方式主要是涡轮、冲压和火箭, 从飞机需求和技术可行两个方面综合考虑, 都无法实现 Ma 0~7 高效工作, 必须采用组合循环, 可以说组合动力装置是能否实现高超声速飞行的核心关键技术。

本文从作战需求和技术可行两个方面深入分析了高超声速飞机的不同种类组合动力装置性能, 以及不同国家高超声速动力系统的发展路线和发展模式, 聚焦推力陷阱、模态转换等“瓶颈”难题, 将为制定我国高超声速动力系统发展规划提供参考和借鉴。

1 不同种类组合动力装置性能对比分析

由于热力循环形式不同, 不同形式的组合动力系统在不同工作速域的性能存在较大区别, 在进行选择时需结合飞行器的工作任务场景、飞行剖面及工作需求等因素综合考量。截至目前, 国内外研究了多种高超声速组合动力形

式, 包括涡轮基组合循环(TBCC)发动机、火箭基组合循环(RBCC)发动机、涡轮火箭冲压三组合发动机、吸气式涡轮火箭发动机等。

对不同的组合动力形式进行对比分析, 见表1。由表1可知, RBCC作为水平起降飞机动力, 低速状态火箭低比冲严重限制了飞机航程; 涡轮火箭冲压三组合动力包括TriJet、TRRE、ATRR、SABRE等, 系统复杂, 保障性较差, 同时动力综合性能也不如TBCC。TBCC是目前组合动力的最优形式和未来的发展方向。

表1 不同组合动力形式的对比

Table 1 Contrast of dynamic forms of different combinations

类型	性能	可靠性	保障性	经济性
TBCC	同时发挥涡轮和冲压优势, 比冲高	结构简单, 可靠性好	普通机场保障	长时间可重复使用, 吸气式高比冲, 可维护性好
RBCC	采用火箭加速, 综合比冲低	可靠性好	携带氧化剂, 保障复杂	比冲低, 航程小, 难以重复使用
三组合动力	比冲偏低, 迎面阻力大	系统复杂, 可靠性低	携带氧化剂, 保障复杂	难以重复使用
ATR	难以实现 Ma 5+ 高效循环	带火箭动力, 系统较复杂	需要携带氧化剂, 保障复杂	可重复使用

2 美国高超声速动力系统发展趋势

美国高超声速组合发动机技术开发主要由政府主导,

收稿日期: 2023-07-12; 退修日期: 2023-09-13; 录用日期: 2023-10-10

引用格式: Qin Yaxin, Liao Menghao. Research on foreign hypersonic aircraft power development[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(11): 17-22. 秦亚欣, 廖孟豪. 国外高超声速飞机动力发展研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(11): 17-22.

早在20世纪50年代考虑使用吸气式发动机作为高超声速飞机动力时,首先采用的就是涡轮基组合循环发动机,但涡轮发动机工作范围一般不超过 Ma 3,再加上结构比火箭发动机复杂,所以研究重点从涡轮组合发动机转向了火箭组合发动机。随着研究的不断深入,考虑水平起降、可重复使用等需求,涡轮冲压组合动力方案近年来又被重点研究。美国通过对高超声速动力系统的持续探索研究,逐渐明晰了技术路径、研发模式,组织老牌军工企业与初创公司同台竞技推进高超声速技术研发。

2.1 顶层战略规划牵引高超声速动力系统研发

进入21世纪后,围绕顶层战略规划,美国启动了多项高超声速飞机及动力系统的研发计划,高超声速推进技术研发计划见表2。可以看出,美国高超声速动力系统主要围绕涡轮冲压组合动力、高速涡轮发动机、冲压发动机开展研发工作。2022年7月,美国国防部高超声速领域项目主管Mike White在高超声速论坛表明,美国国防部已制定“国家高超声速倡议2.0”(NHI 2.0)战略规划,这一战略规划将加快美国高超声速技术的发展^[3-5]。

表2 高超声速推进技术研发计划

Table 2 Research and development program of hypersonic propulsion technology

项目名称	牵头部门	年份	研究内容
国家航空航天倡议(NAI)	DoD	2002—2005	国家层面的高超声速战略规划
猎鹰组合循环发动机技术(FACET)	AFRL	2005—2009	地面验证 Ma 6级TBCC推进系统
高速涡轮加速器计划(HiSTED)	AFRL	2005—2008	Ma 3~4短寿命涡轮发动机
模态转换演示项目(Motr)	DARPA	2007—2009	在FACET计划基础上继续研究TBCC发动机模态转换技术
火神计划(Vulcan)	DARPA	2008—2012	采用定容燃烧的 Ma 4+发动机技术
远程高速发动机(Stelr)	DARPA	2011—至今	高速涡轮发动机技术研究
先进全状态发动机(AFRE)	DARPA	2017—2021	Ma 5全尺寸TBCC地面验证
高超声速技术项目(HTP)	NASA	2017—至今	高超声速技术(高超声速推进系统技术、可重复使用飞行器技术等)

2.2 从基于高速涡轮发动机转为基于成熟涡轮发动机

美国对高超声速动力系统技术路径进行了多种探索与尝试。2009年,美国国防预先研究计划局(DARPA)启动了模态转换演示项目,由洛马公司的“臭鼬工厂”负责,计划将

FACET项目的进气道、尾喷管、PW9221双模态冲压发动机燃烧室与DARPA/空军联合支持HiSTED项目发展的高速涡轮发动机进行集成,形成一台完整的TBCC动力系统,验证模态转换性能。MoTr项目于2012年终止,据分析,由于高速涡轮发动机研制难度大,随后美国对高超声速飞机动力的研制思路进行了调整,即将高速涡轮发动机匹配双模态超燃冲压发动机调整为成熟涡轮发动机匹配双模态超燃冲压发动机^[6]。通过射流预冷、闭式循环预冷等技术提高成熟涡轮发动机工作速度上线,满足近期高超声速飞机的发展需求;再进一步发展基于 Ma 4级的高速涡轮发动机,以满足长远 Ma 0~7高超声速飞行的需求。

2017年,DARPA启动先进全速域发动机(AFRE)项目^[7],AFRE发动机结构如图1所示。该项目旨在综合猎鹰组合循环发动机技术(FACET)、高速涡轮加速器计划(HiSTED)、模态转换演示项目(Motr)和远程高速发动机(Stelr)等计划的技术成果,完成 Ma 0~5级的全尺寸涡轮冲压组合发动机模态转换地面技术集成验证,为未来吸气式可重复使用高超声速飞行器提供动力装置。AFRE项目使用的成熟涡轮发动机(F405-RR-402)是罗罗公司于1968年研制的无加力涡扇发动机。

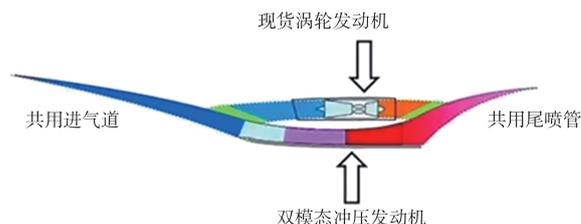


图1 AFRE发动机结构

Fig.1 AFRE engine structure

2.3 高超声速飞机项目促进组合动力系统研发

近年来,高超声速动力系统逐步由关键技术探索研究转变为以高超声速飞机为应用背景的集成验证与工程研制阶段。目前,美国在研的高超声速飞机项目有2013年洛马公司提出的SR-72、2018年波音公司提出的高超声速客机和“女武神”II、2019年赫尔墨斯公司提出的“夸特马”高超声速飞机、2021年NASA牵头发展的“苍穹”以及2022年维纳斯航空航天公司提出的“观星者”高超声速飞机^[8-9]。高超声速飞机项目牵引并促进了高超声速组合动力系统研发。下面分别介绍各项目采用的动力系统。

2.3.1 SR-72和“女武神”II牵引并联TBCC动力系统研发

洛马公司和波音公司分别在2013年和2018年提出了各自的高超声速飞机研制项目,即SR-72(见图2)和“女武

神”II。二者提出的方案基本一致,巡航速度为 Ma 5~6级,均采用并联式TBCC发动机,都计划在2030年前后完成研制。

SR-72动力方案采用射流预冷和“超级燃烧室”技术,将涡轮发动机最大工作速度提升到 Ma 2以上,可达 Ma 3左右;冲压发动机向下扩包线,使其起动速度更低;涡轮发动机与双模冲压发动机并联布置共用进气道和尾喷管。2020年成功完成了TBCC模态转换试验验证。

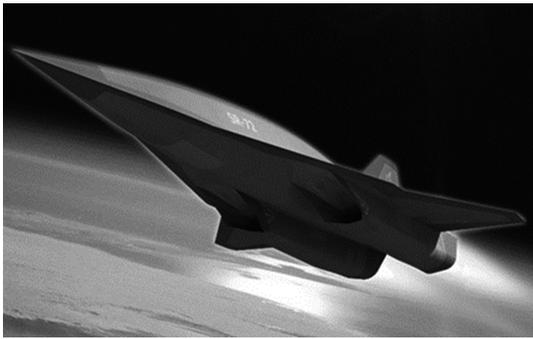


图2 SR-72高超飞机概念图

Fig.2 SR-72 hypersonic aircraft concept

2018年1月,波音公司首次公开展出了高超声速飞机模型,采用大后掠双三角翼无尾加双垂尾布局,动力系统采用常规涡轮发动机和双模态亚燃/超燃冲压发动机并联布局。2022年1月,在美国航空航天学会会议上展出了“女武神”II高超声速无人机效果图,如图3所示。两个方案的共同点是都选择了并联TBCC动力系统。



图3 “女武神”II高超声速飞机模型

Fig.3 "Valkyrie" II hypersonic aircraft

2.3.2 “夸特马”牵引串联TBCC动力系统研发

2020年3月,赫尔墨斯公司完成了高超声速飞机TBCC发动机缩比验证机静态和高速(Ma 5)试验。2021年7月,美国空军联合私营投资公司授予赫尔墨斯公司价值6000

万美元、为期3年的科研合同,要求完成一型可重复使用的TBCC推进系统和三型“夸特马”(Quarterhorse)高超声速验证机研制及飞行验证工作,并为后续在验证机上集成任务载荷提供设计规范和数据积累。“夸特马”和TBCC概念图如图4所示。“夸特马”验证机采用单台串联TBCC组合发动机,涡轮发动机采用GE公司J-85-21加力式涡喷发动机,在进气道出口和压气机入口之间加装预冷装置,使涡轮发动机的工作范围达到 Ma 0~3.3;亚燃冲压和涡轮加力两种工作模态,工作范围为 Ma 2.8~5。

2022年6月,赫尔墨斯公司宣布已完成“夸特马”高超声速飞机发动机“奇美拉”(Chimera)的地面缩尺试验,如图5所示。2022年12月,赫尔墨斯公司宣布选定普惠公司的F100-229涡扇发动机作为“奇美拉”TBCC动力系统的涡轮发动机,F100将飞机从 Ma 0加速到 Ma 2.8,然后过渡到冲压模态继续加速到 Ma 5的目标速度。



(a) “夸特马”验证机概念图



(b) TBCC发动机概念图

图4 赫尔墨斯“夸特马”和TBCC概念图

Fig.4 Hermes “Quarterhorse” and TBCC concept

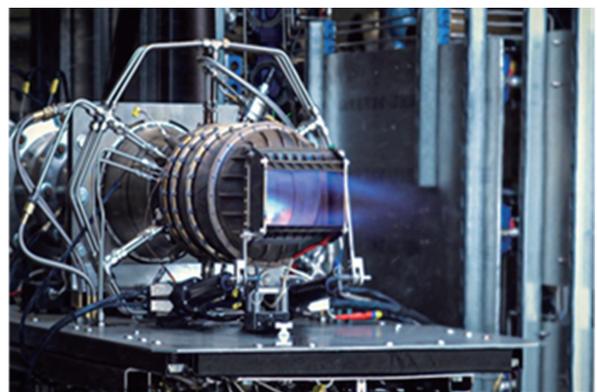


图5 赫尔墨斯缩尺TBCC试验

Fig.5 Hermes scale TBCC test

2.3.3 “苍穹”牵引 TBCC 动力系统和复合材料研发

2021年2月,NASA向通用电气公司授出总金额1300万美元、为期5年的研发合同,为“苍穹”高超声速飞机研发TBCC和耐高温陶瓷基复合材料。通用电气公司拟研究并分析F101涡扇发动机是否适用于“苍穹”高超声速飞机。

2.3.4 “观星者”牵引下一代高效率零碳排放动力研发

2022年6月,维纳斯航空航天公司报道称“观星者”是一种速度达 $Ma\ 9$ 的高超声速飞机。“观星者”采用新颖外观设计、下一代发动机技术以及先进的冷却装置。发动机采用某种高效燃料,碳排放只占普通发动机的3%,具有更为高效的发动机效率。按照计划,“观星者”将在2023年启动亚声速和超声速缩比无人飞行器的飞行试验。

3 欧洲高超声速动力系统发展趋势

高超声速客机作为未来民用航空的重要发展方向之一,受到欧洲国家的高度重视。

(1) 在科技框架计划下开展高超声速推进系统研发

从2005年开始,在欧盟先进推进概念与技术计划LAPCAT-I和LAPCAT-II的资助下,多个成员国联合开展了巡航速度 $Ma\ 4\sim 8$ 的高超声速民用飞机以及吸气式推进系统方案可行性研究和技术验证工作。

研究重点集中在空气动力学技术、推进系统技术和燃烧建模技术方面。其中,空气动力学领域的工作主要包括机身与推进系统的综合及进气道设计;推进系统的工作主要集中于喷气式发动机和冲压发动机的研究;燃烧领域的工作主要集中于低污染燃烧室的研究。

(2) “弯刀”(Scimitar)发动机采用强预冷技术

在欧洲航天局和英国政府的支持下,英国和比利时等国联合提出了一种适用于 $Ma\ 5$ 飞行的高超声速发动机,即“弯刀”,如图6所示。该方案采用强预冷和闭式循环等新技术,与涡轮冲压组合动力相比,具有明显的技术优势,避免了涡轮冲压组合动力模态转换时的推力鸿沟的问题、组合动力结构复杂和重量大的问题。“弯刀”发动机工程应用的技术难点是:高效、轻质换热器技术,循环工质以及对转涡轮技术等。

(3) “佩刀”发动机采用闭式循环

“弯刀”发动机和“佩刀”发动机均属于多循环耦合预冷发动机,相较于单一循环预冷发动机,增加了闭式布莱顿(Brayton)循环。“佩刀”(Sabre)发动机从原理上看,是“弯刀”发动机与火箭发动机的组合,如图7所示。“佩刀”发动机采用吸气式发动机加速到 $Ma\ 5.5$,再用火箭发动机进一

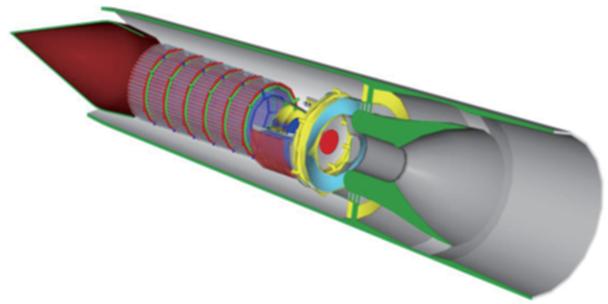


图6 “弯刀”发动机方案
Fig.6 “Scimitar” engine solution



图7 “佩刀”发动机方案
Fig.7 “Sabre” engine solution

步助推,实现单级入轨。“佩刀”发动机能够让太空发射的成本降低95%。

(4) 军用高超声速飞机“5号方案”

2022年7月,英国皇家空军快速能力办公室、国防科学与技术实验室、罗罗公司和反作用发动机(REL)公司在范堡罗航展上联合公开展出了名为“5号方案”(Concept V)的军用高超声速飞机方案(见图8)。“5号方案”出自高超声速航空器试验(HVX)项目,采用集成预冷器、涡轮发动机、加力/亚燃冲压燃烧室的组合动力方案。依靠涡轮发动机起飞至 $Ma\ 3$ 左右,然后开始模态转换,加力/冲压燃烧室加速到 $Ma\ 5$ 。REL公司还探索了在模态转换之后仍可利用预冷器和涡轮发动机提供热管理和电功率的可行性。HVX项目计划在2030年后实现 $Ma\ 5+$ 飞行。

4 启示与建议

国内高超声速飞机动力系统研发,欠缺 $Ma\ 7$ 组合动力、高速涡轮发动机和大尺寸双模态超燃冲压发动机的工程经验,本文提出以下启示建议,希望能促进高超声速飞机动力的发展。

(1) 循序渐进开展研发工作

涡轮冲压组合发动机研发工作具有高风险、高耗资的特征,要综合考虑技术风险、研发周期和研发成本等因素,采用分步研发策略,循序渐进推动高超声速动力技术的成



图8 英国“5号方案”验证机模型

Fig.8 Model of the British “Concept V” verification machine

熟。例如,从基于采用成熟涡轮发动机到基于高速涡轮发动机;先突破 Ma 5级涡轮冲压组合动力关键技术,再进行 Ma 7级的组合动力技术攻关;遵循“单项关键技术攻关—关键技术集成—飞行演示验证—工程研制—产品应用”的技术发展路线,循序渐进,分阶段开展研究。

(2) 加强全尺度试验验证和飞行验证力度

涡轮组合发动机由于涉及复杂的燃烧过程,进行缩尺试验验证的结果不具备可靠性。美国空军在开展X-51A的超燃冲压发动机研究的同时就启动了更大尺寸超燃冲压发动机的研究工作。关键技术攻关基本通过部件模型试验、地面试验、飞行试验梯次展开,逐步验证。通过开展飞行试验,可以在实际飞行环境中验证组合动力系统的可靠性,逐步掌握和验证组合动力的关键技术。

(3) 构建全寿命周期的高超声速飞发协调机制

高超声速飞机及其组合动力系统对飞/发融合设计的需求程度更高。还要解决飞/发综合能热管理等问题,需开展飞/发结构一体化、气动热防护等专项研究。要做好周密的顶层规划部署,建议飞机研制方与发动机研制方成立联合工作组,定期联合现场办公,交叉校验,实现深度专业化分工条件下的规划发展协调、技术融合发展、科研生产同步、维护保障融合推进。

(4) 加强大尺寸动力试验条件建设

高超声速组合动力的试验涉及组合技术、高速涡轮发动机、综合能热系统等多个技术领域,系统复杂,建议加快对现有航空发动机基础试验设施进行升级建设,特别是宽速域试验台及全尺寸地面试验条件建设,快速提升地面试验能力。

AST

参考文献

- [1] 李茜. 2022高超声速技术进展[J]. 航空动力, 2023(1): 15-18.
Li Qian. Progress of hypersonic technology in 2022 [J]. Aerospace Power, 2023(1): 15-18. (in Chinese)
- [2] 孙聪. 高超声速飞行器强度技术的现状、挑战与发展趋势[J]. 航空学报, 2022, 43(6): 8-27.
Sun Cong. Development status, challenges and trends of strength technology for hypersonic vehicles [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(6): 8-27. (in Chinese)
- [3] 邹正平, 王一帆, 额日其太, 等. 高超声速强预冷航空发动机技术研究进展[J]. 航空发动机, 2021, 47(4): 8-21.
Zou Zhengping, Wang Yifan, Eri Qitai, et al. Research progress on hypersonic precooled airbreathing engine technology [J]. Aeroengine, 2021, 47(4): 8-21. (in Chinese)
- [4] 左林玄, 张辰琳, 王霄, 等. 高超声速飞机动力需求探讨[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 70-86.
Zuo Linxuan, Zhang Chenlin, Wang Xiao, et al. Requirement of hypersonic aircraft power [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 70-86. (in Chinese)
- [5] 李宪开, 王霄, 柳军, 等. 水平起降高超声速飞机气动布局技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(11): 7-13.
Li Xiankai, Wang Xiao, Liu Jun, et al. Research on the aerodynamic layout design for the horizontal take-off and landing hypersonic aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(11): 7-13. (in Chinese)
- [6] 桂丰, 李丹, 张宇超, 等. 国外典型高速/高超声速飞行器及其动力系统技术特点浅析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35(4): 55-62.
Gui Feng, Li Dan, Zhang Yuchao, et al. Technology characteristics analysis on typical foreign hypersonic aircraft and propulsion system [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2022, 35(4): 55-62. (in Chinese)
- [7] 陈敏, 贾梓豪. 涡轮基组合循环动力关键技术进展[J]. 科技导报, 2020, 38(12): 69-84.
Chen Min, Jia Zihao. Progress and prospect of key technologies for turbine based combined cycle engine [J]. Technology Review, 2020, 38(12): 69-84. (in Chinese)
- [8] 陈召斌, 廖孟豪, 李飞, 等. 高超声速飞机总体气动布局设计特点分析[J]. 航空科学技术, 2022, 33(2): 6-11.
Chen Zhaobin, Liao Menghao, Li Fei, et al. Analysis of design

characteristics of overall aerodynamic layout of hypersonic aircraft [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(2): 6-11. (in Chinese)

[9] 邹正平, 刘火星, 唐海龙, 等. 高超声速航空发动机强预冷技

术研究[J]. *航空学报*, 2015, 36(8): 2544-2562.

Zou Zhengping, Liu Huoxing, Tang Hailong, et al. Precooling technology study of hypersonic aeroengine [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(8): 2544-2562. (in Chinese)

Research on Foreign Hypersonic Aircraft Power Development

Qin Yaxin¹, Liao Menghao²

1. *Aero Engine Academy of China, Beijing 101304, China*

2. *Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China*

Abstract: High speed aircraft, which has conventional horizontal take-off and landing, reusable capabilities, is one of the important development directions of military and civil aircraft in the future. Aiming at hypersonic aircraft operational requirements and power technology development challenges, the development status of hypersonic aircraft engine in the United States, EU and UK are summarized. The suggestions on the development of hypersonic aircraft power are put forward, which provides references for the development strategy of hypersonic aircraft.

Key Words: hypersonic speed; turbine engine; combined power; strategic planning