

民用涡轴发动机技术发展与展望

李概奇¹, 马东阳¹, 杨 洋², 吴志娟², 晁爱芳², 贺 龙¹

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;

2. 航发通航动力科技(上海)有限公司, 上海 201413)

摘 要: 民用涡轴发动机是航空发动机家族的重要成员,是通航产业和低空经济发展的核心动力。总结了民用涡轴发动机的技术特点及重要特性,介绍了国内外主要涡轴发动机厂商的代表性产品,分析了民用涡轴发动机的研制难点和关键技术,指出了涡轴发动机产品主要发展方式、途径和技术路线。通过总结国产 1 000 kW 级民用涡轴发动机(AES100)的创新工程实践,提炼了“尊重规章、正向研发、自主设计、自主适航”等确保 AES100 发动机研制工作行稳致远的总体思路,简述了民用涡轴发动机自主研制的重要进展和低油耗、长寿命、高安全性等方面关键技术的重要突破。同时根据市场需求,指出了民用涡轴发动机技术正朝着新要求、新构型、新材料、新工艺和新燃料等研究方向快速发展,展望了民用涡轴发动机在先进民用直升机、倾转旋翼飞行器、涡轮-电混合动力系统、可持续航空燃料和氢燃料动力等领域的广泛应用前景。

关 键 词: 民用涡轴发动机; 通用航空; 低空经济; 自主研制; 适航技术

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Technological development and prospects of civil turboshaft engines

Li Gaiqi¹, Ma Dongyang¹, Yang Yang², Wu Zhijuan²,

Chao Aifang², He Long¹

(1. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;

2. AE General Aviation Power Tech (Shanghai) Company Limited, Shanghai 201413, China)

Abstract: Civil turboshaft engines are important members of the aero-engine family and serve as the core power source for the general aviation industry and the low-altitude economy. An overview of the technical features and key performance characteristics of civil turboshaft engines was provided, representative products from major domestic and international manufacturers were introduced, the development challenges and critical technologies were analyzed, and the main development approaches, pathways, and technological routes for turboshaft engine products were identified. By reviewing the innovative engineering practices in the development of the domestically produced 1 000 kW class civil turboshaft engine (AES100), the overarching strategy that has ensured steady and successful progress in the AES100 program was distilled, including core principles such as adherence to regulations, forward design, autonomous design, and independent airworthiness. Significant achievements in the independent development of civil turboshaft engines were also highlighted, including key technological breakthroughs in low fuel consumption, long service life, and high safety. In response to market demands, turboshaft engine technology was pointed out to be rapidly advancing along new research directions, including new

收稿日期: 2026-05-28

基金项目: 某民用涡轴发动机型号研制项目

作者简介: 李概奇(1966—),男,研究员,博士,研究方向为航空发动机设计。E-mail: leipengb@163.com

通信作者: 马东阳(1987—),男,高级工程师,硕士,研究方向为航空发动机总体性能。E-mail: mdyaecc@qq.com

引用格式: 李概奇,马东阳,杨洋,等. 民用涡轴发动机技术发展与展望[J]. 航空动力学报, 2027, 42(1): 20260179. Li Gaiqi, Ma Dongyang, Yang Yang, et al. Technological development and prospects of civil turboshaft engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2027, 42(1): 20260179.

requirements, novel configurations, advanced materials, innovative manufacturing processes, and alternative fuels. Broad application prospects of civil turboshaft engines were outlined in advanced civil helicopters, tiltrotor aircraft, turbo-electric hybrid propulsion system, sustainable aviation fuels (SAF) and hydrogen-powered propulsion systems.

Keywords: civil turboshaft engines; general aviation; low-altitude economy; independent development; airworthiness technology

直升机具有垂直起降、空中悬停、全向移动、低空/超低空高机动飞行能力以及对机场基础设施要求相对较低的特点,在石油服务、通勤运输、旅游观光、警用消防、应急救援、紧急医疗和工程作业等民用领域得到了广泛应用^[1],具备固定翼飞机和其他交通工具难以替代的作用。截至 2024 年,全球直升机保有量超过 5.5 万架^[2-4],其中民用直升机保有量超过 3.5 万架,每百万人口保有量超过 4 架,在全球航空运输产业中起着十分重要的作用。

2023 年 12 月,中央经济工作会议提出打造“低空经济等若干战略性新兴产业”。2024 年 7 月,党的二十届三中全会提出“发展通用航空和低空经济”。2026 年 3 月,十四届全国人大四次会议政府工作报告将低空经济列为“新兴支柱产业”之一。在通用航空和低空经济需求牵引下,各式各样飞行器层出不穷,如采用纯电动力的垂直起降飞行器(简称 eVTOL)^[5]、采用混合动力系统的电动飞行器^[6]和异军突起的倾转旋翼飞行器^[7]等。然而,民用直升机凭借着长航程、大载重和高成熟性等优势,仍将在通用航空和低空经济领域中继续发挥主力军作用,预计未来 20 年国内直升机对涡轴发动机的需求量超过 3 500 台^[8]。国家政策的高度重视,为涡轴发动机的技术发展提供了广阔的舞台。

航空发动机是飞机“心脏”,国之重器。早期直升机主要以活塞发动机作为动力。20 世纪 50 年代世界第 1 台涡轴发动机阿都斯特(Artouste)问世以来,涡轴发动机凭借其功质比高、体积小、振动低、易于起动等优点,逐渐占据了直升机动力的主导地位^[9]。在 2023 年全球新交付的直升机动力中,涡轴发动机占比达 85%^[8]。经过 70 余年的研究与发展,涡轴发动机研制技术取得巨大进步,形成了上百型产品成熟使用、新一代产品加速研制的良好态势。

鉴于涡轴发动机在军、民用航空领域的重要地位和极强的军民通用性,长期以来,国内外研

究人员对涡轴发动机的发展动态予以高度关注。文献[10]介绍了涡轴发动机的性能、结构以及技术特点。文献[11-12]总结了涡轴发动机的发展历程。文献[13]梳理了涡轴发动机发展规划和演变过程。文献[14]总结了涡轴发动机的技术特点和性能发展趋势。文献[15-16]分析了美国实施的综合高性能涡轮发动机技术计划(IHPTET)和通用经济可承受先进涡轮发动机计划(VAATE),强调了军民两用技术和通用核心机技术发展的重要性。文献[17]介绍了国外对军、民用涡轴发动机制定的研究计划,总结了计划目标与进展情况。文献[18]综述了先进经济可承受涡轮发动机(AATE)计划/改进涡轮发动机(ITEP)计划下涡轴发动机研发情况。文献[19]介绍了中小型民用涡轴发动机的技术发展现状,归纳了发动机总体及部件技术发展特点。文献[20]介绍了民用直升机及配装发动机的发展情况,提出了我国民用涡轴发动机发展思路的建议。文献[21]系统阐述了涡轴(涡桨)/涡扇(涡喷)发动机通用核心机技术特点和研究必要性。文献[22]基于世界涡轴发动机的发展历程及现状,提出了我国涡轴发动机必须走系列化发展途径。文献[23]提出了“双循环”格局下民用航空发动机自主发展“三步走”目标。上述研究工作对我国涡轴发动机产品和技术发展提供了重要启示。

历经 70 余年的发展,在欧美发达国家,涡轴发动机早已进入成熟的产业化阶段。法国赛峰、美国通用电气、加拿大普惠和英国罗罗等少数发动机知名公司占据着民用涡轴发动机市场主导地位。然而我国民用涡轴发动机自主研制起步较晚,前期主要采用国外购买、引进专利和国际合作等方式来发展技术和产品^[24-25],自主创新民机产品十分匮乏。为了打破这一被动局面,2016 年,在国家支持下,中国航空发动机集团有限公司(简称“中国航发”)开始自主研制一款具有完全自主知识产权的 1 000 kW 级先进民用涡轴发动机(代号 AES100),以满足 3~4 吨级单发、5~6 吨级双发

直升机等飞行器的动力需求^[26]。经过研制团队和审定团队八年不懈努力,成功研制出我国第一型自主创新民用涡轴发动机 AES100,实现了我国民用涡轴发动机自主创新产品从无到有、跻身世界先进水平的重大突破。

考虑到涡轴发动机具有较强的军民通用性,本文综述基于国产民用涡轴发动机自主创新的思考和认识,分析涡轴发动机技术特点,总结民用涡轴发动机产品与技术发展现状、研制难题、关键技术、发展模式和途径,介绍 AES100 发动机自主创新研制工程实践,展望涡轴发动机未来技术发展研究方向和在通用航空、低空经济等领域的应用前景,为我国涡轴发动机未来快速发展提供技术参考。

为尽量客观反映民用涡轴发动机技术发展情况,文章写作时借鉴和参考了国内外相关文献、产品手册、企业官网和公开报道等资料数据,并辅以图表分析说明。

1 民用涡轴发动机技术特点

1.1 使用场景

涡轴发动机是一种轴功率输出型航空发动机,通过提供机械扭矩驱动直升机旋翼等推进部件,从而为飞机提供推进力;主要装机对象包括直升机、倾转旋翼机等飞行器,使用场景广泛,可执行巡逻、观光、物流、公务飞行、应急救援和近海服务等多种任务(图 1)。

涡轴发动机工作包线与直升机飞行要求密切相关,通常用高度、温度表征发动机工作包线(图 2)。对于民用涡轴发动机而言,典型的工作高度一般为 $-610\sim 6\,000\text{ m}$,大气温度为 $-40\sim \text{ISA}+35\text{ }^{\circ}\text{C}$,地面起动高度为 $4\,500\text{ m}$ 。随着倾转旋翼机等新构型飞机出现,飞行器的速度、高度也在提高;倾转旋翼飞行器的飞行速度可达 500 km/h ,飞行高度可超 $7\,000\text{ m}$,发动机工作包线随之扩大。

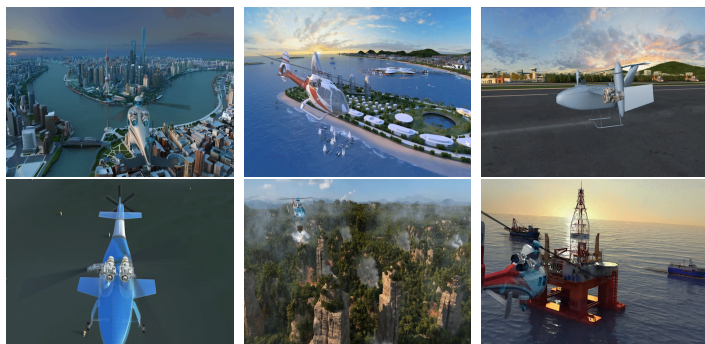


图 1 民用涡轴发动机部分应用场景

Fig. 1 Partial application scenarios of civil turboshaft engines

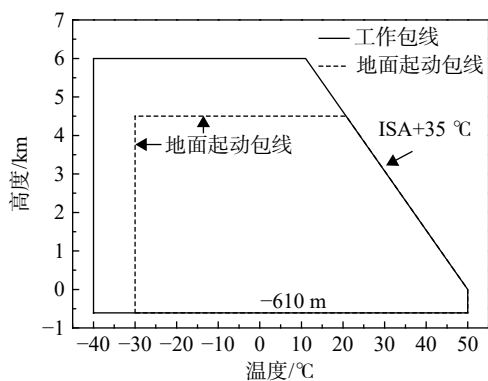


图 2 民用涡轴发动机典型工作包线

Fig. 2 Typical operating envelope of civil turboshaft engines

1.2 典型布局

涡轴发动机主要由压气机、燃烧室、涡轮、

进/排气组件和附件传动等部件组成,具有燃油与控制、滑油、空气与防冰、电气等系统(图 3),其中压气机、燃烧室和燃气涡轮构成发动机燃气发生器。发动机工作时,高温高压燃气驱动燃气涡轮和动力涡轮做功,燃气涡轮产生的功率驱动压气机,动力涡轮产生的功率由动力涡轮传动轴传递给直升机传动系统,驱动旋翼工作。

涡轴发动机部件结构形式多样,但经过 70 余年的技术发展,对民用涡轴发动机的结构特征已形成较为统一共识。轴流+离心组合压气机、短环回流/直流燃烧室和双级燃气涡轮成为涡轴发动机主流结构布局;轴承共腔、环下供油、整体叶片盘、全权限数控系统和健康管理系统等组件或系统成为反映先进性特征的典型构型。这种结构

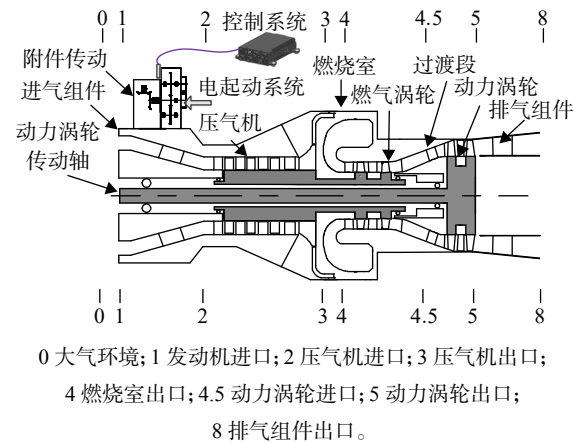


图 3 涡轴发动机结构示意图

Fig. 3 Structural configuration of a turboshaft engine

布局具有效率高、寿命长、功率拓展潜力大等优点,在涡轴发动机中得到普遍应用。

1.3 性能参数

民用涡轴发动机主要性能参数包括功率、耗油率、寿命和起动性能等。耗油率(SFC)是指发动机每小时燃油消耗量与轴功率之比;寿命用于表明发动机在规定条件下能安全可靠工作的使用时间/循环数,通常包括整机首翻期(TBO)和限寿件低循环疲劳寿命;起动性能是指发动机在一定的环境高度和温度下成功起动的能力。

统计表明,国际上已研制出上百种涡轴发动机产品,功率范围覆盖 200~9 000 kW,但大部分处于中低功率范围,其中 500 kW 级和 1 000 kW 级占比很高(图 4),可以认为属黄金功率范围,与通用航空和低空经济动力需求高度吻合。

涡轴发动机多属于中小型航空发动机,结构小巧紧凑,雷诺数较低,叶尖间隙与叶高之比相对较大,导致黏性流动损耗增加、工质泄漏加剧,

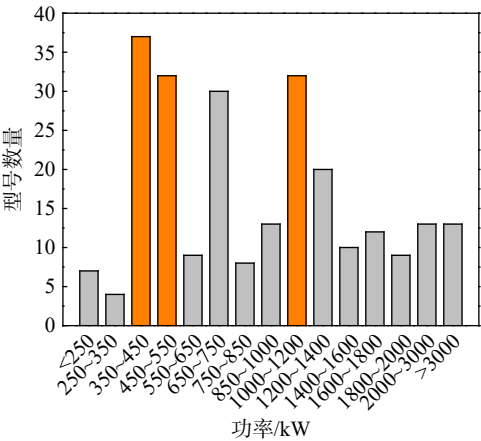


图 4 涡轴发动机功率分布^[27-31]

Fig. 4 Power distribution of turboshaft engines^[27-31]

部件效率易受“尺寸效应”影响而降低,耗油率升高。图 5 统计表明,发动机起飞功率较低时,耗油率明显偏高,因此在比较涡轴发动机性能时,宜在同功率等级发动机之间比较。

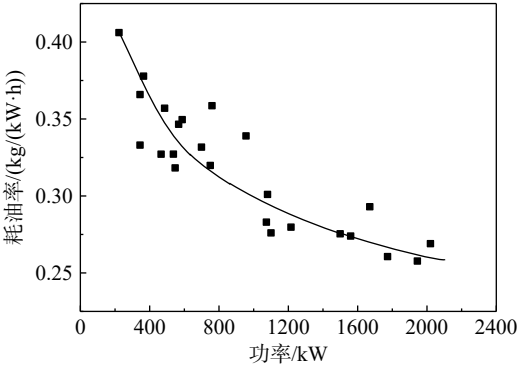


图 5 涡轴发动机耗油率和起飞功率统计^[27-31]

Fig. 5 Statistics on specific fuel consumption and rated takeoff power of turboshaft engines^[27-31]

涡轴发动机部件性能参数也与功率等级密切相关,当前 1 000 kW 级先进涡轴发动机部件性能参数水平统计见表 1。

表 1 1 000 kW 级涡轴发动机部件性能参数水平

Table 1 Performance parameters of components for 1 000 kW class turboshaft engine

性能参数	参数水平
压气机效率	0.79~0.81
燃烧室效率	0.999
燃烧室总压损失/%	2.5~4.0
出口温度分布系数	0.2~0.3
燃气涡轮膨胀比	3.7~4.5
燃气涡轮效率	0.84~0.88
动力涡轮膨胀比	2.8~3.4
动力涡轮效率	0.89~0.90
进气组件损失/%	0.5~1.5
过渡段总压损失/%	2.5~3.5
排气组件损失/%	1.5~3.0

注:数据来自文献 [10-19, 26-31] 统计分析值。

经过几十年发展,涡轴发动机产品水平显著提升。以 1 000 kW 级涡轴发动机为例,先进产品耗油率达到 0.280~0.290 kg/(kW·h),首翻期达到 2 000~3 000 h,地面起动高度为 4 500~5 500 m,空中起动高度为 5 500~6 000 m,发动机目录价格约 700 万~900 万元。

1.4 技术路线

涡轴发动机的主要循环参数包括燃烧室出口

温度、压气机压比。近70年来,随着技术进步,涡轴发动机的循环参数逐步提升。以1000 kW级民用涡轴发动机为例,燃烧室出口温度提高400℃以上,压气机压比提高2倍多,对提高发动机功质比、降低耗油率发挥了重要作用(图6、图7)。

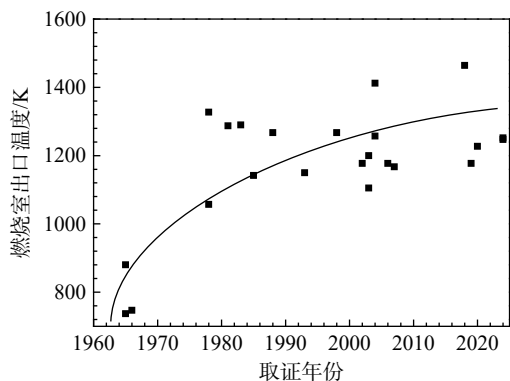


图6 1000 kW级涡轴发动机燃烧室出口温度统计^[27-31]

Fig. 6 Statistics on combustor exit temperature in 1000 kW class turboshaft engines^[27-31]

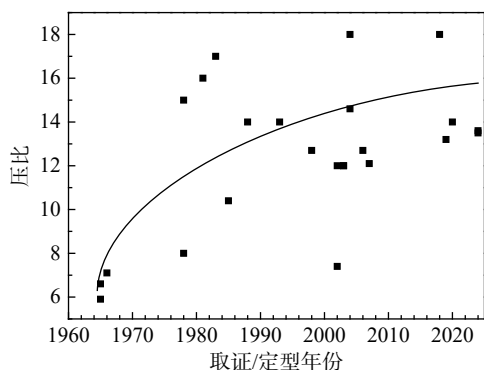


图7 1000 kW级涡轴发动机压气机压比^[27-31]

Fig. 7 Statistics on compressor pressure ratio in 1000 kW class turboshaft engines^[27-31]

涡轴发动机循环参数是影响发动机方案设计的重要因素,目前国际上涡轴发动机设计思路大致可分为中热力循环参数或高热循环参数技术路线^[19]。分析表明,美国通用电气等公司多采用高热循环参数技术路线,燃烧室出口温度通常超过1280℃,压比超过16,典型发动机有T700、T901等;法国赛峰等公司多采用中热力循环参数技术路线,燃烧室出口温度通常不超过1280℃,压比不超过16,典型发动机有RTM322、Ardiden 3C等。两条技术路线的选择主要与相关国家的材料工艺基础和技术继承性相关,也与发动机公司对性能和经济性侧重程度有关。虽然两条技术路线没有明显优劣之分,但民用涡轴发动机更重

视寿命和经济性,总体而言采用中热力循环参数更为合适。

1.5 重要特性

为了确保航空运行安全和产品市场竞争力,除了通常的发动机耗油率、寿命等指标外,民用涡轴发动机还高度重视安全性、可靠性、经济性和环境适应性等。

1.5.1 安全性

安全性是民用发动机的生命线,是衡量发动机不对航空器、人员或财产造成损坏或损伤的能力。根据CCAR-33-R2适航规章要求,非包容高能碎片、不可控火情、安装节失效等危害性发动机后果发生概率的范围不高于 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 次/飞行小时,重要发动机后果发生概率的范围不高于 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 次/飞行小时^[32]。

发动机安全性依靠安全性设计来保障、安全性分析来评估。AES100发动机的安全性设计与分析流程示意图见图8。在发动机设计过程中,通过功能危险分析(FHA)、初步系统安全性评估(PSSA)、系统安全性评估(SSA),完成从发动机安全性要求出发,到向下逐层分解、向上逐层验证评估的过程;采用的分析方法有故障树分析(FTA)、故障模式及影响分析(FMEA)、共因分析(CCA)等;开展的验证项目有高强度辐射场(HIRF)、吸雨、吸冰、防火等极端环境下试验,充分验证发动机安全性。

1.5.2 可靠性

可靠性是衡量发动机在规定的时间内完成规定功能的能力,通常用平均故障间隔时间(MTBF)表征。为提高发动机可靠性,在设计方面,主要通过合理的气动结构布局和成熟材料,逐步提高首翻期;在生产方面,主要通过制造质量保证体系和工业化鉴定等手段严格过程控制,保证产品稳定性;在试验方面,主要通过充分的结构完整性试验、寿命试验和环境试验等,充分验证发动机稳定可靠的工作能力。目前,随着技术进步,先进民用涡轴发动机的平均故障间隔时间从早期100 h左右大幅提升到550 h以上,见图9。

1.5.3 经济性

民用发动机经济性关乎型号竞争力,与发动机的全寿命周期成本密切相关,包含研制成本、生产成本和使用成本等。已有研究表明,包含方案探索、验证和全面发展等阶段研制过程的实际消耗费用,仅占全寿命周期费用的20%左右,但是对

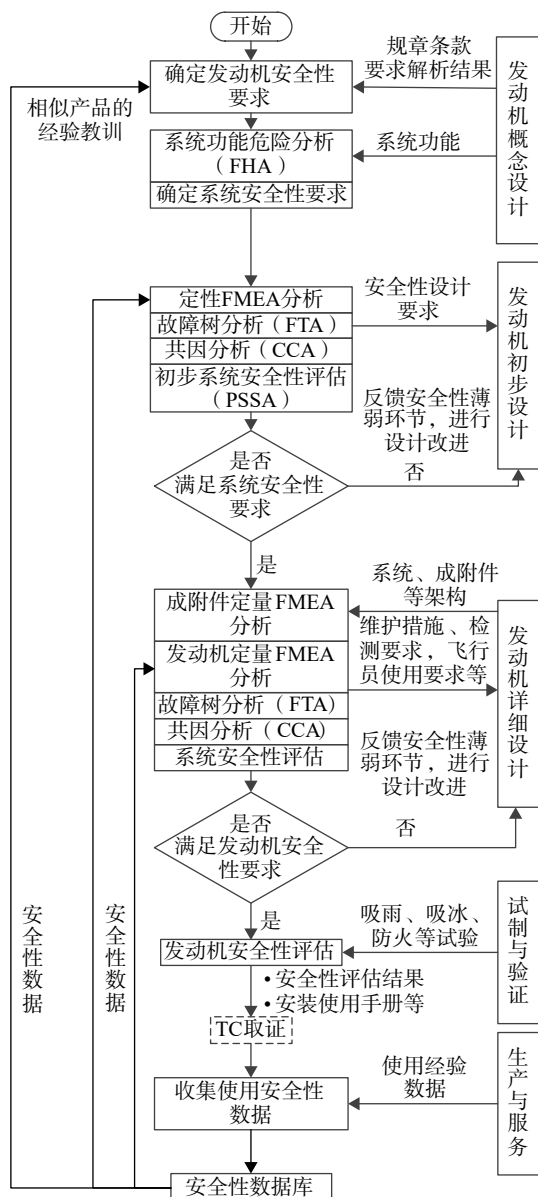


图 8 民用涡轴发动机安全性设计与分析流程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the safety design and analysis workflow for civil turboshaft engines

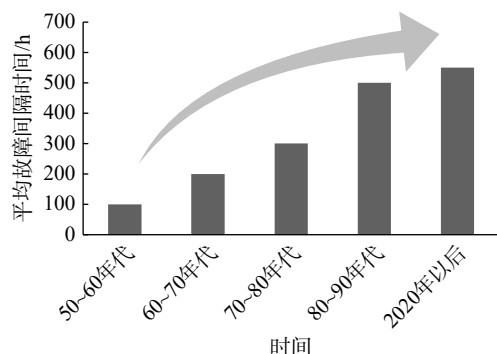


图 9 民用涡轴发动机可靠性指标变化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the reliability index changes in civil turboshaft engines

全寿命周期费用的决定程度达到了 95% (图 10)^[33], 可以说设计水平在很大程度上决定了成本高低。提高发动机经济性的主要措施包括采用先进的气动叶型, 提高部件效率, 降低耗油率; 采用简单高效的布局, 如轴承共腔、整体叶片盘等, 减少零组件数量, 降低生产成本; 采用外场可更换单元体或附件, 降低维护成本等。

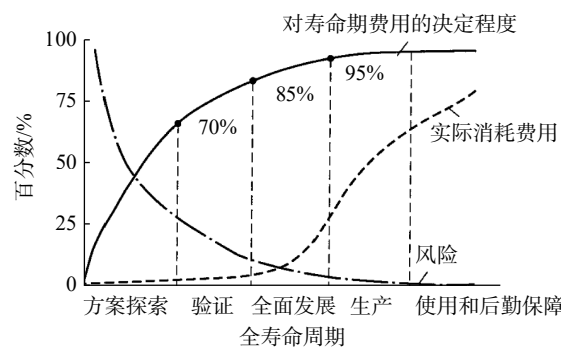


图 10 典型涡轴发动机全寿命周期费用示意图^[33]

Fig. 10 Schematic diagram of total ownership cost for a typical turboshaft engine^[33]

1.5.4 环境适应性

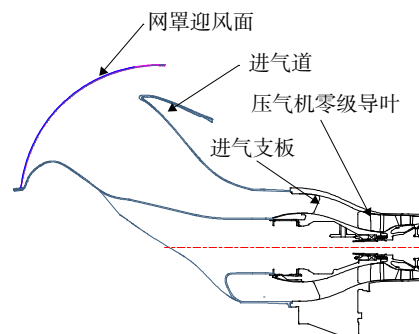
民用涡轴发动机需要在吸雨、结冰、进气畸变、电磁环境和单粒子效应等条件下安全可靠地工作, 必须具有优良的环境适应性。

在吸雨方面, 主要通过提高燃烧室稳定燃烧范围, 避免燃烧室在吸雨条件下发生熄火^[34]。

在结冰方面, 采用网罩结冰 (图 11)、热气防冰 (图 12), 或两者相结合的方式, 防止气流中的过冷水滴在发动机进气组件流道结冰^[35], 避免出现压气机喘振、冰脱落击伤叶片和发动机功率大幅降低等影响安全情况^[36]。

在进气畸变方面, 主要通过压气机导向叶片角度可调、级间放气 (图 13)、燃油控制规律优化等设计措施, 提高压气机喘振裕度^[37]。

在电磁环境和单粒子效应方面, 通过异常信



(a) 进气系统



(b) 网罩结冰

图 11 涡轴发动机网罩结冰

Fig. 11 Schematic diagram of mesh cover icing for a turboshaft engine

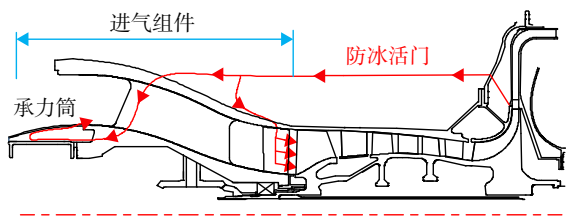


图 12 进气组件防冰流路示意图

Fig. 12 Schematic diagram of anti-icing airflow for intake components

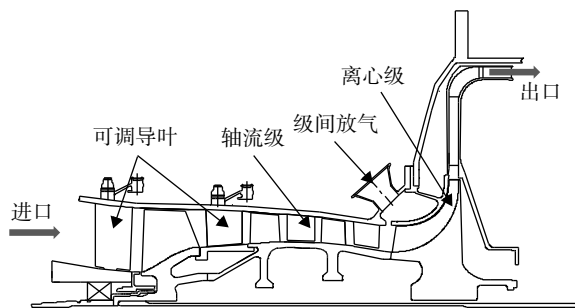


图 13 压气机导向叶片角度可调与级间放气示意图

Fig. 13 Schematic diagram of variable stator vanes and interstage bleed in a compressor

号识别、干扰信号屏蔽、电源滤波器、机箱屏蔽和余度架构设计,提高发动机在电磁干扰(EMI)、高强度辐射场(HIRF)、雷电和单粒子效应条件下可靠工作的能力^[38-39]。

2 民用涡轴发动机产品发展现状

经过 70 余年发展,民用涡轴发动机产品琳琅满目,并涌现出一批代表性的公司和经典产品。

2.1 国外代表性公司及产品

目前,国外主要涡轴发动机厂商包括法国赛峰直升机发动机公司(Safran)、美国通用电气(General Electric)、加拿大普惠(Pratt & Whitney

Canada)、英国罗罗(Rolls-Royce)、美国霍尼韦尔(Honeywell)和俄罗斯克里莫夫(Klimov)等,上述公司占据了全球涡轴发动机市场 90% 左右的市场份额,呈现出高度垄断的竞争格局。图 14 给出了代表性公司部分产品功率谱系。其中法国赛峰的民用涡轴发动机典型产品有阿赫耶(Ariel)、MTR390、马基拉(Makila)、阿内托(Aneto)、阿赫尤(Arrius)、阿拉诺(Arrano)、阿蒂丹(Ardiden)和 RTM322 等系列^[28-29];美国通用电气典型产品有 CT7、CT64 及 CT58 三大系列产品^[30];加拿大普惠典型产品有 PW210、PT6C、PW200、PT6B 和 PT6T 等^[31]。美国通用电气等公司多采用高热力学循环参数技术路线,功质比较高;法国赛峰、加拿大普惠等公司多采用中热力学循环参数技术路线,有利于控制发动机成本,提高市场竞争力。

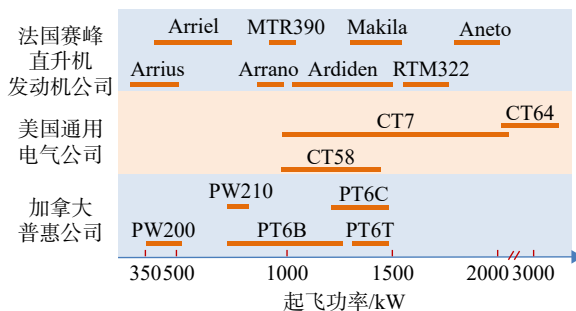


图 14 部分公司民用涡轴发动机功率谱系示意图

Fig. 14 Schematic diagram of power ranges for civil turboshaft engines from selected manufacturers

2.2 国内代表性公司及产品

目前,国内民用涡轴发动机主要厂所包括中国航发湖南动力机械研究所、中国航发南方工业有限公司和中国航发哈尔滨东安发动机有限公司等,均隶属于中国航空发动机集团有限公司。国内涡轴发动机代表性产品有 WZ8A、WZ8D、WZ16 和 AES100 等。其中 WZ8A、WZ8D 起飞功率为 500 kW 级,从透博梅卡(法国赛峰前身)引进 Arriel-1C1、Arriel-1D 发动机专利而国产化研制,分别于 2000 年 12 月和 2001 年 5 月获得中国民航局颁发的型号合格证,但难以从正向研发角度掌握民用发动机全过程研制规律,关键核心技术受制于人。WZ16 发动机起飞功率为 1 249 kW,中法双方以 50% 对 50% 经费对等模式合作研制,中方负责压气机等冷端部件,法方负责热端部件、控制系统等,于 2019 年 10 月获得型号合格证,但不少关键核心技术仍由外方负责和掌控,缺乏完全自主知识产权。AES100 发动机为 1 000 kW 级,

由中国航发自主创新研制,于 2024 年 8 月获颁型号合格证,2025 年 6 月获颁生产许可证,中国航发湖南动力机械研究所为型号合格证申请人。

3 民用涡轴发动机技术研究

为促进涡轴发动机的技术发展,美、欧各国持续不断加大投入,实施了多项研究计划。其中,美国在 1987 年实施了综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划,下设针对涡轴/涡桨发动机的子计划-联合涡轮先进燃气发生器(JTAGG)计划;实施 IHPTET 后续计划,即“通用经济可承受先进涡轮发动机”(VAATE)计划,包括小型重油发动机(SHFE)计划、先进经济可承受涡轮发动机(AATE)计划/改进涡轮发动机(ITEP)计划、未来经济可承受涡轮发动机(FATE)计划和替代概念发动机计划(ACE)等^[14, 17-18, 20]。上述计划覆盖了涡轴发动机多个功率等级,主要预期目标为大幅提高涡轴发动机功质比,降低耗油率,减少研制、生产和维修成本,所取得的重要成果为涡轴发动机的技术进步提供了强有力的支撑。

作为欧洲“清洁天空”(Clean Sky)计划中“可持续和绿色发动机”项目的组成部分,法国赛峰直升机 2009 年开始了“绿色涡轴发动机”技术研究和验证,基于 TECH 600、TECH800、TECH3000 等 3 个技术验证机推进技术研究,其目标是耗油率降低 35%、CO₂ 排放量降低 35%、NO_x 排放量减少 80%、噪声降低 10 dB 以上^[17],并将技术成果应用于 Arrius 的系列化改进产品(Arrius 2R)、新研的阿拉诺(Arrano)和以 RTM322 为基础研发的阿内托(Aneto)上。

近年来,我国民用涡轴发动机技术研究逐步加快,在先进通用核心机技术^[40]、低成本制造^[41]、适航符合性研究^[42-44]等方面取得了重要进步,为我国先进民用涡轴发动机的研制提供了支持。在设计方面,开展了民用涡轴发动机总体匹配、高效气动叶型(图 15(a))、小尺寸复合气冷空心涡轮叶片(图 15(b))、高稳定燃烧组织(图 16)、轻质化集成附件传动、小尺寸高速环下润滑轴承等技术研究^[26];在试制方面,开展了复杂曲面压气机叶片精密加工(图 17)、热端复杂构件精密铸造、复杂铝镁件精密高效加工等技术研究;在试验方面,开展了动应力测量、包容性验证^[45]和发动机结冰(图 18)^[36, 46]等符合性技术研究,显著提高了我国民用涡轴发动机自主创新技术储备。

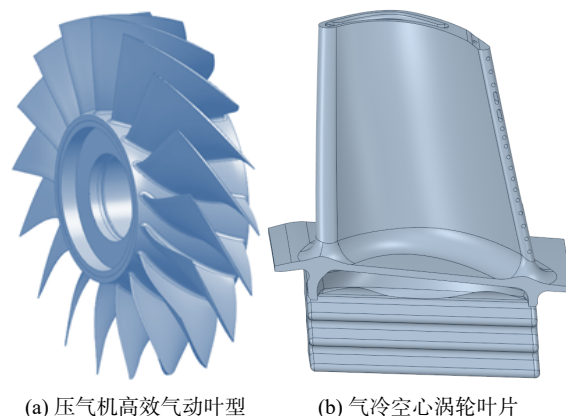


图 15 压气机叶型和涡轮叶片示意图

Fig. 15 Schematic diagram of compressor blade profiles and turbine blades



图 16 高稳定燃烧组织

Fig. 16 High-stability combustion organization



图 17 复杂曲面压气机叶片精密加工

Fig. 17 Precision machining of complex curved compressor blades

经过长期的技术研究和积累,国内外涡轴发动机技术水平得到了大幅提高,有力支撑了产品的升级换代。以 1 000 kW 级民用涡轴发动机为例,耗油率从早期的 0.370 kg/(kW·h)左右下降至 0.280 kg/(kW·h)左右,降幅 24.3%;首翻期从 1 000 h 增加至 3 000 h,增幅 200%;平均故障间隔时间从 100 h 提高至 550 h 以上,提幅 450%,外场维护正向视情维修发展。

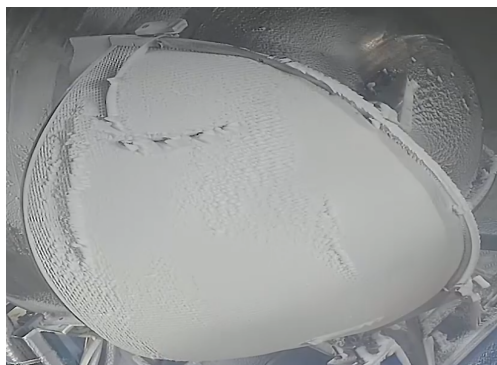


图 18 发动机进气系统冰风洞试验

Fig. 18 Icing wind tunnel test for engine inlet systems

4 民用涡轴发动机自主研制难点

涡轴发动机研制属高技术领域, 涉及气动、结构、强度、传热、燃烧、机械、控制、电子、材料等众多学科, 技术复杂。在我国, 民用涡轴发动机自主研制起步较晚, 自主创新发展中存在设计难、试制难、试验难和适航难等方面“卡脖子”技术难题。因此, 民用涡轴发动机自主研制是复杂的系统工程, 也是艰难的创新工程。

4.1 设计难

民用涡轴发动机自主设计难主要体现在两个方面。一是以 CCAR-33-R2 作为审定基础, 标准高、考卷难, 对新手而言门槛高。我国制定的适航规章 CCAR-33-R2 在技术内涵上与美国、欧洲的标准基本等效, 验证项目和审查要求同样严苛。二是为了适应市场竞争, 民用涡轴发动机性能需对标国际先进水平, 同时满足低油耗、长寿命、高安全性和好经济性等指标要求, 技术跨度大。如首翻期相比原有水平需提高 200%; 发动机能在高进口流场畸变的结冰恶劣环境下工作(图 19)^[35], 对发动机结构强度、部件性能和总体匹配等技术提出了较大挑战。

4.2 试制难

民用涡轴发动机试制难主要体现在两个方面。一是为实现长寿命、高可靠性等目标, 采用的先进构型增加了加工难度, 如油气路内置的附件传动机匣(图 20)及多功能集成防冰进气机匣、高效率压气机/涡轮复杂气动叶型、小型气冷空心叶片、高 DN 值轴承、薄壁成型火焰筒等; 二是为降低制造成本必须提高关键构件的合格率。以小尺寸空心气冷涡轮叶片试制为例, 价格昂贵, 需要通过技术攻关将合格率从 30% 提高到 80% 以上, 对设计制造协同提出了较高要求。

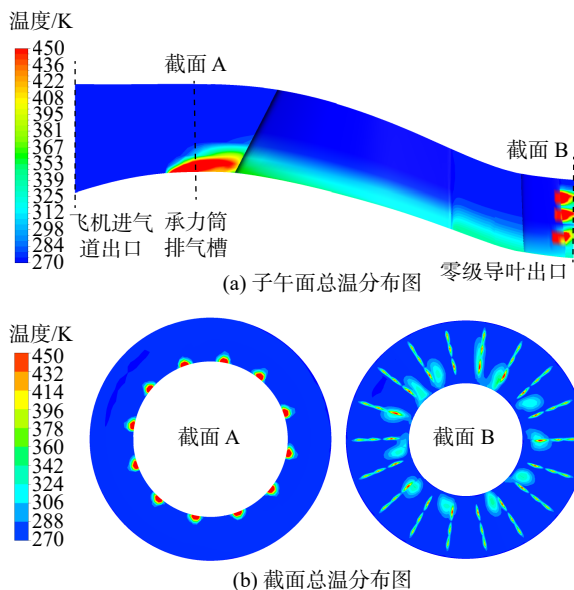
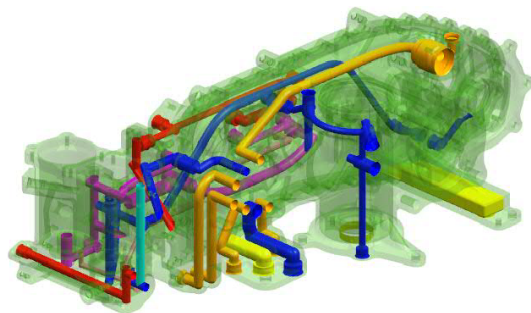
图 19 结冰环境下压气机进气流场示意图^[35]Fig. 19 Schematic diagram of compressor inlet flow field in icing conditions^[35]

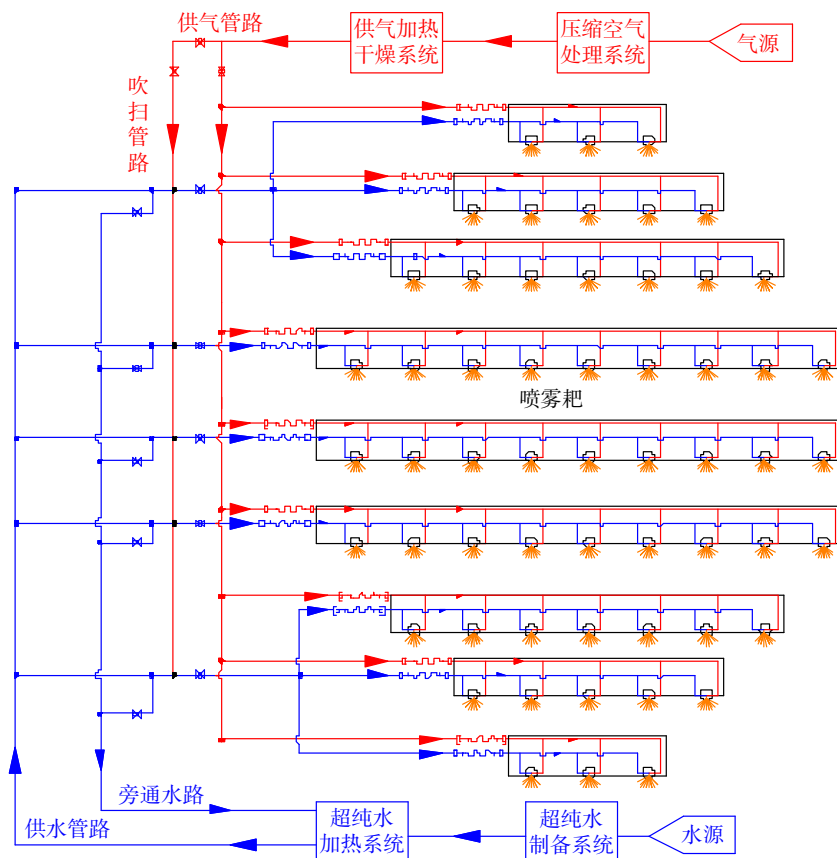
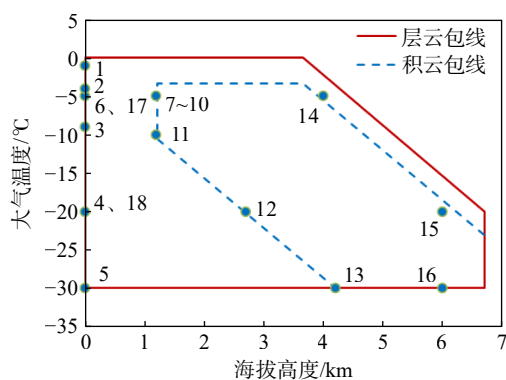
图 20 油气路内置的附件传动机匣示意图

Fig. 20 Schematic diagram of accessory drive casing integrated with oil/gas passages

4.3 试验难

民用发动机适航符合性须通过试验来表明, 发动机在全包线极端场景下仍能可靠工作, 极为苛刻的试验工况对民用涡轴发动机适航试验技术提出了重要挑战。

试验难主要体现在 3 个方面。一是一些关键适航试验设备缺失, 如高速动力轴切割装置、结冰喷雾系统(图 21)^[36]、整机结冰试验台、温度畸变模拟系统和高响应速度喷雨系统等。二是适航条款中部分高风险、高难度试验技术储备较弱, 如结冰云雾场调试、整机包容和整机喘喘试验方法等。三是不少条款涉及的适航试验技术被国外垄断或封锁, 可借鉴的公开资料极少, 需要自主攻关。例如, 按适航要求完成结冰关键点试验(图 22)^[36]和压力畸变、温度畸变组合条件下的高空台遭遇加

图 21 结冰试验喷雾系统原理图^[36]Fig. 21 Schematic diagram of icing test spray system^[36]图 22 主要结冰关键点分布示意图^[36]Fig. 22 Schematic diagram of distribution of main icing critical points^[36]

减速验证, 均为国内涡轴发动机首次开展, 难度极大。

4.4 取证难

民用涡轴发动机必须通过适航取证, 才能获得市场准入。除了适航“试验难”外, 取证难还体现在材料适航、控制系统研制保证等多方面。

材料适航涉及标准规范、材料制造、特种工艺、性能测试、数理统计、供应商管理和试验验证等诸多技术方面, 牵涉到材料、毛坯、测试、成附

件和通用件等众多供应商。长期以来, 我国存在缺乏适航认可的高置信度发动机材料数据等“老大难”问题, 需要在较短时间内攻克上百种国产材料适航难关。

控制系统是发动机的“大脑”, 其难点在于需要按 ARP4754A^[47]、DO-178C^[48]、DO-254^[49] 等国际标准要求, 证明适航取证时系统和软硬件的开发错误处于可接受状态, 为此需要从正向设计角度进行数千条需求的设计分解和逐条验证, 并考虑错误信号、错误人为操作等非预期场景, 验证项目是传统研发方式的数倍以上。

4.5 民用涡轴发动机关键技术

涡轴发动机使用场景复杂多变, 结构紧凑、尺寸小、转速高, 需突破设计、试制、试验和取证等方面的难题和相关关键技术, 主要如下。

1) 宽广工作范围低油耗设计技术

根据民机经济性要求高的特点, 涡轴发动机在巡航到起飞状态宽广工作范围内, 都需要具有良好气动性能, 需采取先进气动设计技术, 提高部件工作效率, 寻找部件与整机最佳匹配, 克服“尺寸效应”对耗油率指标带来的不利影响。

2) 长寿命设计与制造技术

发动机寿命受到设计、材料和试制等多方面影响。长期以来,国内涡轴发动机寿命与国际水平存在较大差距,需采取先进结构、材料和制造技术,克服影响发动机寿命的常见故障,如叶片烧坏、轴承磨坏、零件振坏等,大幅提升涡轴发动机寿命水平。

3) 高安全性设计技术

高安全性是民用航空发动机生命线。适航条款涉及防火、防雨、防冰、防水、防雷电、防高能碎片等极端环境下安全工作要求,需针对条款要求开展正向设计,突破结冰、暴雨、雷电等恶劣环境下发动机安全稳定工作设计技术。

4) 低成本设计与制造技术

发动机成本与设计、制造密切相关。设计方案决定了发动机大部分成本,需要通过设计制造协同,突破发动机低成本构型设计、复杂构型高合格率制造、融合健康管理的高维护性等技术。

5) 高风险整机适航试验技术

试验验证是支撑适航符合性分析的关键环节。部分整机试验风险高、难度高、成本高,需要新研包容、结冰、吸雨、喘振、持久和首翻期验证等相关试验器和辅助设备,掌握适航试验方法,确保试验成功。

6) 材料与控制系统适航技术

针对缺少适航认可的涡轴发动机国产材料设计用高置信度材料数据等问题,需要建立材料适航验证方法和国产材料适航数据库,解决因材料适航数据缺失容易导致发动机危害性后果的安全性难题。针对数控系统复杂系统需求分解、逐级验证和构型控制等适航技术难点,需要建立符合适航标准的复杂系统研发及适航体系,以满足国际标准 ARP4754A 最高等级要求。

5 民用涡轴发动机发展方式和途径

70 余年来,各国发动机公司结合自身优势,都在积极攻克关键技术,探索民用涡轴发动机“多、快、好、省”发展方式和途径,以打造“成果多、进度快、性能好、成本省”的良好局面。

5.1 产品发展方式

5.1.1 引进专利

采用引进专利生产的形式,可较快实现对现有生产、试验体系的改造,提高涡轴发动机的生产制造、加工工艺和试验技术水平,快速形成产

品。例如,我国 20 世纪 80 年代从法国透博梅卡引进 Arriel 1C1 发动机专利,为 WZ8A 适航取证提供了良好的技术基础。但也要看到关键核心技术是买不来的,如果自主研发投入不足、创新体系不完善,将制约企业长期的自主发展能力。

5.1.2 国际合作

民用涡轴发动机系统复杂、难度大,知识产权管控严格,因此国外涡轴发动机公司不时利用各自优势,通过国际合作,快速开发涡轴发动机产品,例如英国罗·罗公司、法国透博梅卡公司共同研制了著名的 RTM322 发动机。但也要看到国际合作往往存在关键核心技术受制于人和管理协同难度大等问题,影响市场开拓步伐。

5.1.3 自主研制

自主研制是众多发动机公司主要采取的研制方式,可掌握发动机研制主动权,提高核心技术水平。我国发动机厂商也只有通过自主研制,才能有效突破设计、试制、试验、适航等方面正向研发技术,打破长期以来民用涡轴发动机购买使用或引进生产的路径依赖和国外垄断的被动局面,构建完整的民用涡轴发动机产业链供应链,掌握通用航空动力产业自主发展权。

5.2 产品发展途径

5.2.1 系列化发展

系列化发展是民用航空发动机快速发展的重要途径。通过维持基准发动机结构形式、外廓尺寸、安装接口等基本不变,采用增加进气流量、提高压比、提升涡轮前温度等措施,可在较短周期快速实现发动机功率增长、性能改善,并可充分利用基准发动机已有适航符合性证据,大幅降低适航取证难度,快速满足市场需求。

以赛峰公司的 Arriel 系列涡轴发动机为例,自 20 世纪 70 年代初开始生产,历经 50 年,形成了 30 余种型号,至今已累计生产上万台,飞行时数已超过数千万小时,其可靠性和稳健性赢得了市场的高度认可^[28]。

5.2.2 衍生发展

衍生发展是以基准发动机为基础平台,快速发展适合新构型飞行器的发动机或特定类型发动机,如适应倾转旋翼飞行器、能在大功率悬停状态和高速平飞状态稳定控制的涡轴发动机,或以涡轴发动机为基础开发具有大功率输电或大流量引气功能的动力装置(图 23)。

衍生发展的另一重要方面是以涡轴发动机为

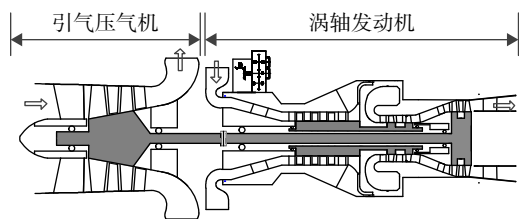


图 23 基于涡轴发动机的引气装置

Fig. 23 Bleed air system based on a turboshaft engine

基础, 改型发展涡桨、涡扇多类型发动机; 相比全新研制, 具有显著降低核心机技术风险、缩短周期、节约经费等方面的技术、经济优势^[40]。以赛峰公司为例, 应用 RTM322-01 (1 566 kW) 涡轴发动机的核心机技术, 发展出 RTM322-06 涡桨发动机 (1 500 kW 级)、RTM322-20 涡扇发动机 (1 000 kgf 级)^[10]。

5.2.3 军民融合发展

由于军、民用直升机的使用场景较为类似, 军民用涡轴发动机通用性较强, 为涡轴发动机的军民融合发展提供了良好条件。

美国通用电气公司在产品发展上采取“先军后民”的策略, 利用成熟的军用涡轴发动机平台,

发展出不少民用涡轴发动机产品, 如 T700 系列军用涡轴发动机, 通过采取“核心机”衍生策略, 开发出了民用 CT7 系列发动机, 成功应用于西科斯基 S-92、莱昂纳多 AW149/AW189 等中重型民用直升机。空客公司研制的新一代 5~6 t 民用直升机 H160, 选用赛峰集团 2020 年最新研制的阿拉诺 (Arrano) 1A 涡轴发动机作为动力, 目前已成功实现“民转军”, 开发出了三军通用的 H160M“猎豹”直升机^[50]。

6 民用涡轴发动机自主创新实践

长期以来, 我国民用直升机等飞机配装的发动机主要依赖于国外进口, 争取用最短的时间自主研发出一款具有国际竞争力的先进民用涡轴发动机, 成为刻不容缓的迫切需求。为此, 中国航发研制团队承担了 1 000 kW 级民用涡轴发动机 (AES100) 自主创新研制的历史使命, 国内首次自主走完了民用涡轴发动机设计、试制、试验、试飞和适航全过程 (图 24)。AES100 发动机于 2024 年 8 月获颁中国民用航空局型号合格证, 2025 年 6 月获颁生产许可证。

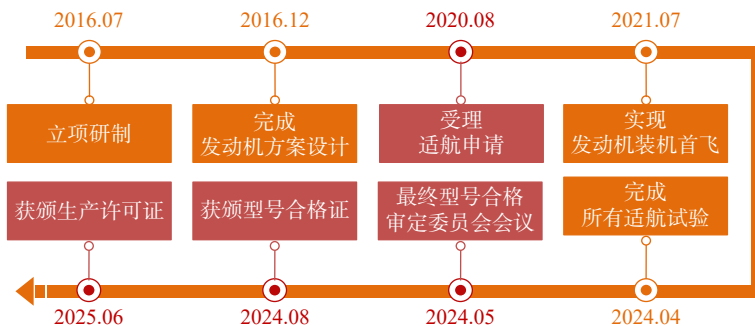


图 24 AES100 发动机研制历程

Fig. 24 Development process of the AES100 engine

6.1 总体思路

为在较短时间内自主研发出先进的民用涡轴发动机, 首先要掌握民用涡轴发动机发展客观规律, 为此研制团队结合国情, 提出了“安全至上、经济优先、质量可靠、用户满意”的研制理念、“尊重规章, 正向研发, 自主设计, 自主适航”的研制模式及“低油耗、长寿命、高安全性”的技术路线, 合理的总体思路确保了研制工作行稳致远。

6.2 总体布局

AES100 发动机具备当代先进涡轴发动机气动和结构布局特征, 由“轴流+离心”组合压气机、环形回流燃烧室、双级燃气涡轮、双级动力涡轮、

附件传动等部件以及全权限数字式电子控制 (full authority digital electronic control, FADEC) 系统和健康管理系统组成 (图 25)^[35]。

6.3 发动机性能

针对民用发动机经济性要求高的特点, 以高效率部件、低流动损失和部件/整机最佳匹配为牵引, 开展低耗油率技术攻关。在高效率部件方面, 提出了压气机进口级转子“子弹头”超声叶型 (图 26(a))、小尺寸尾缘复合弯扭气冷叶片设计等先进气动叶型; 在低流动损失方面, 突破了进气道支板一体化造型、高堵塞比 (17.0%) 下的低损失过渡段等流道设计技术 (图 26(b)); 在部件与整机匹配方

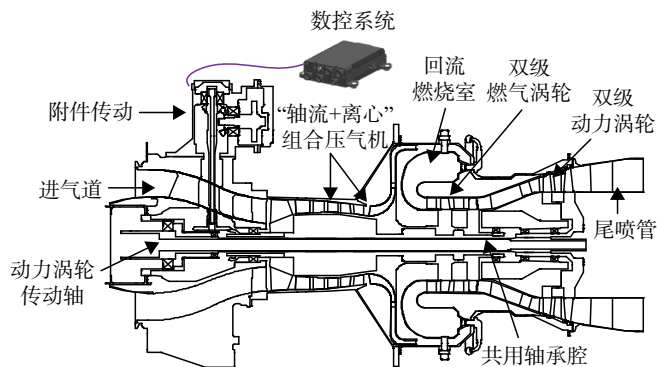
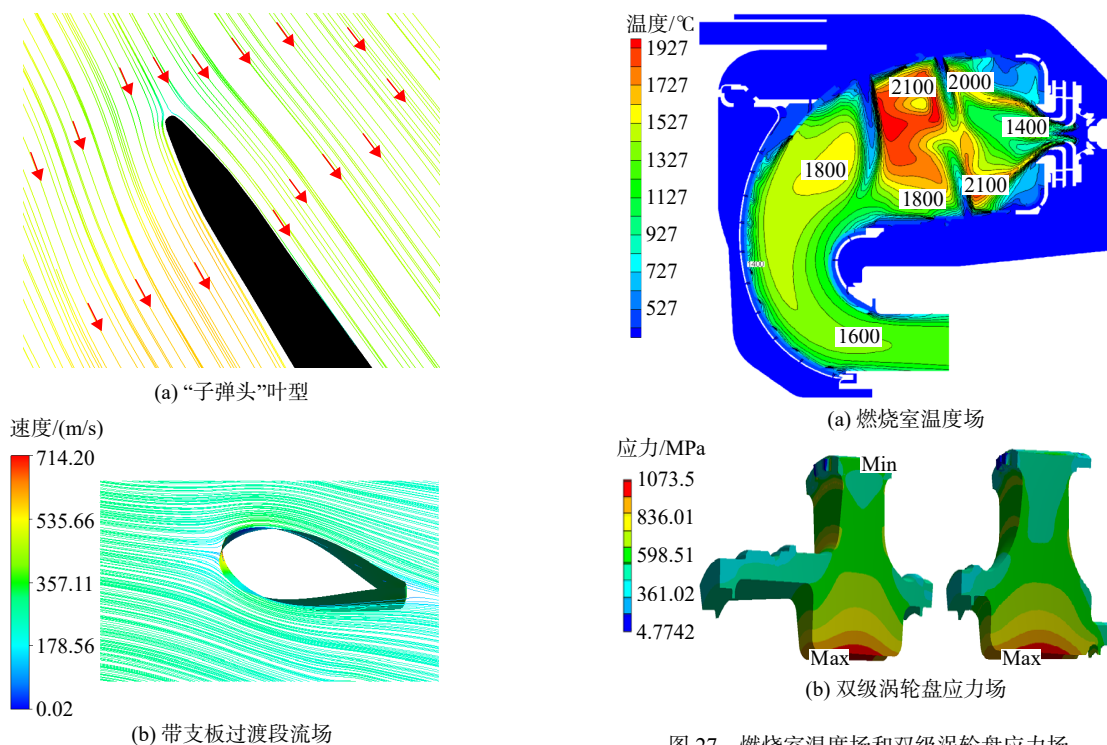
图 25 AES100 发动机结构布局示意图^[35]Fig. 25 Structural configuration of the AES100 engine^[35]

图 26 部件气动流场示意图

Fig. 26 Schematic diagram of the component aerodynamic flow field

面, 提出了民用涡轴发动机最佳工作点确定等设计方法, 确保了发动机宽广工作范围的低耗油率。

6.4 长寿命

压气机采用整体叶片盘, 应力低、可靠性高; 燃烧室采用多级涡流器和小流量双级喷嘴, 出口温度场品质好(图 27(a)), 可提高燃气涡轮导向叶片寿命; 采用双级燃气涡轮, 大幅降低涡轮叶片和轮盘负荷(图 27(b)), 提高了燃气涡轮工作叶片和轮盘寿命; 轴承环下供油技术可改善轴承润滑冷却效果, 提高轴承寿命(图 28)。

6.5 安全性

在系统安全性方面, 设置燃气发生器和动力

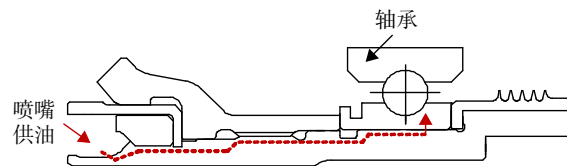
图 27 燃烧室温度场和双级涡轮盘应力场
Fig. 27 Temperature field in the combustor and stress field in the two-stage turbine disk

图 28 环下供油结构简图

Fig. 28 Schematic diagram of under-ring lubricating oil supply structure

涡轮双超转保护架构, 提高了整机运行安全性; 针对控制系统中对安全极为重要的燃油泵调节器, 提出燃油和导叶电液伺服阀“双阀异构”设计(图 29), 有效规避控制系统燃油供给共模故障; 突破高强度辐射、四级雷电等严酷环境控制系统防护设计技术, 确保控制系统高安全性。

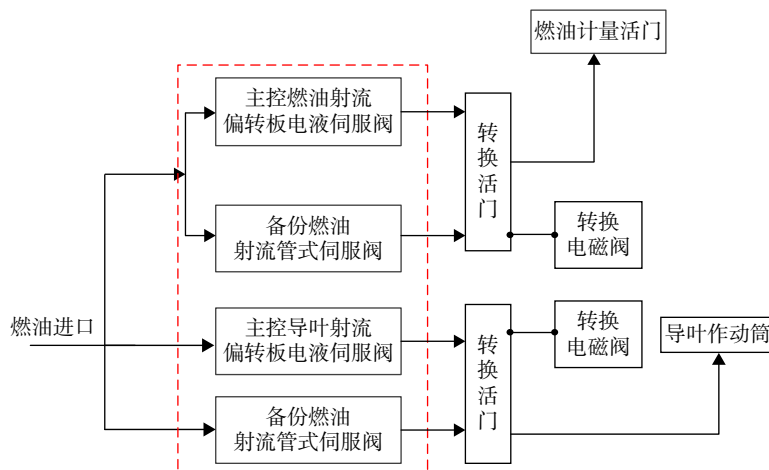


图 29 控制系统燃油“双阀异构”原理框图

Fig. 29 Block diagram of control system fuel “dual-valve heterogeneous” principle

在整机安全性方面,发动机动力涡轮采用叶片脱落包容性设计,避免因负载丢失导致涡轮盘破裂击穿机匣;提出铝合金机匣双密封封严、换向防护等密封结构,确保防火安全性;采用进气网罩结构防冰和离心级引气热气防冰相结合的方式,确保结冰包线内有效防冰^[35-36];通过新研健康管理系统,实现了寿命管理、振动诊断、润滑系统磨屑检测等支持功能。

6.6 材料适航

针对涡轴发动机适航用国产材料数据需要,按照适航条款要求,开展了材料标准建立及符合性验证、材料合格鉴定、设计许用值建立、特种工艺验证、材料适用性耐久性验证和供应商管控等方面验证工作。通过累计超 185 万小时材料适航试验,建成国内首个满足适航要求的高置信度材料性能数据库,形成了适航认可的材料标准,构建了生产过程控制文件(process control document, PCD)全流程控制+材料合格鉴定全面评价的流程及方法。

6.7 数控系统适航

严格按照国际通行适航标准,走完了符合 ARP4754A 国际标准 A 级要求的需求捕获、需求确认、安全性分析和需求验证等控制系统正向研发全过程。通过逐条评估衍生需求安全性影响,发现并排除了传统研发难以发现的多项设计隐患,并针对捕获的需求开展多层次(软硬件、系统和整机级)和多维度(试验、分析、检查等)需求验证,系统安全性得到显著提升,建立了民用涡轴发动机控制系统正向研发体系。

6.8 适航试验

开展了上千项附件试验、系统/部件试验和整

机试验。在附件试验方面,完成了以防火、防水为代表的数百项试验;在系统/部件试验方面,完成了以限寿件低循环疲劳、控制系统防雷电为代表的数十项试验;在整机试验方面,发明了高速动力轴切割装置、进气结冰试验防护装置、热射流温度畸变发生器^[51]等关键试验装置,创新完成包容、结冰、遭遇加减速、最大不平衡、吸雨、吸冰、喘振等一系列适航试验(图 30~图 32),填补了国内适航符合性验证技术诸多空白。

以整机包容试验为例,该试验涉及 10 余个技



图 30 燃油泵调节器防水试验

Fig. 30 Water resistance test of fuel pump regulator

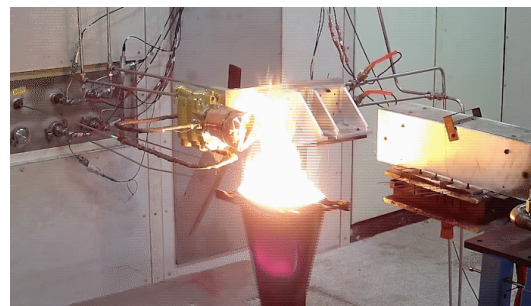


图 31 油滤机匣组件防火试验

Fig. 31 Fire resistance test of the oil filter housing assembly



图 32 发动机包容试验时尾喷管出口喷火现象
Fig. 32 Tailpipe flame ejection during engine containment test

术领域、36 个关键风险点，多学科高度交叉，是民用涡轴发动机研制中难度最大、风险最高和代价最贵的整机适航试验。试验时发动机在最高转速运行，人为切断动力传动轴，让每片承受 50 kN 左右离心力的高速旋转动力涡轮工作叶片整圈瞬间断裂飞脱；适航条款要求在叶片飞脱后的 15 s 内，机匣不能被碎片击穿、不出现不可控火情、安装

节不脱落。为此，研制团队提出了设计与试验一体化正向研究的技术思路，构建了解决动力涡轮工作叶片脱落转速、脱落截面、机匣包容结构和大冲击载荷下涡轮支承、传力路径、安装节承力等方面技术难点的设计方案；通过新研高速切轴装置等试验设备和新建包容试验方法，国内首次成功完成了涡轴发动机整机包容适航试验。

6.9 综合性能

上万小时的整机试验结果表明，AES100 发动机综合性能达到同功率级涡轴发动机产品当代国际先进水平(表 2)。其中海平面、标准天、静止条件下，起飞耗油率 0.276 kg/(kW·h)，优于国际先进水平；初始首翻期 3 000 h，与国际顶尖产品不相上下；起动高度高达 6 000 m，高原起动能力超出同类产品；发动机配有独立的健康管理系统，维护性好，发动机价格与国际同功率级发动机相当，经济性好。

表 2 AES100 发动机主要性能
Table 2 Main performance of the AES100 engine

参数	发动机型号	
	AES100	Arrano-1A、Ardiden 3C、PT6B-67A 等
耗油率/(kg/(kW·h))	0.276	0.280~0.317
初始首翻期/h	3 000	1 800~3 000
地面起动最大高度/m	6 000	4 600~5 500
起动最低环境温度/℃	-40	-40~-30
独立的发动机健康管理系统	有	个别有

6.10 市场应用

AES100 发动机已应用于中航工业、航天彩虹和联合飞机(图 33)等多家用户飞行器。2025 年实现了一年配装三型飞机首飞的新纪录，目前正根据市场新需求开展系列化发展工作，展现出良好的市场前景。



图 33 翎影 R6000 配装 AES100 地面试验
Fig. 33 Ground test of the Lanying R6000 equipped with the AES100 engine

7 民用涡轴发动机技术发展趋势

民用涡轴发动机凭借技术成熟、可靠性高、载荷适配广等优势，未来仍会是通用航空与低空经济的主流动力方案。随着技术进步，在涡轴发动机基础上发展的新构型、新能源动力也开始出现，带来了动力多元发展的态势。人工智能等新技术的兴起，将显著提升工程实践能力^[52]，对发动机的设计、制造、试验和运营产生深远影响。

显然，民用涡轴发动机产品更新换代与技术进步密切相关。总体来看，目前民用涡轴发动机技术正朝着新要求、新构型、新材料、新工艺、新燃料等研究方向快速发展，以适应未来市场对发动机高端化、智能化、绿色化等方面发展要求。

7.1 新要求

发动机新要求的内涵主要体现在 3 个方面。一是市场要求不断提高传统技术指标的水平；二

是对发动机经济性、环保性更加重视；三是新场景、新技术牵引出发动机新需求。

涡轴发动机传统性能指标主要包括发动机功率、耗油率、功质比等性能参数，难以全面反映目前市场对发动机综合性能的持续提升要求。实现全寿命周期内发动机气动性能、寿命、安全性等指标的多维最优，成为当代先进民用航空发动机不懈追求的目标。例如，尽管燃烧室出口温度不断升高，但先进涡轴发动机的首翻期已从早期的 1 000 h 达到 3 000 h 以上。

在经济性方面，20 世纪的 VAATE 计划引入成本要素，经济可承受性就被列为核心指标之一^[53]。特别是近些年来，除了制造成本外，民用航空发动机的运维效益得到了更多重视，包括送修率、送修成本、平均拆换时间间隔、小时维修费率等^[54]；为此发动机需改善空中停车率、提前换发率和返修率等指标水平^[55]；制定合适的维修策略，结合健康管理系统实现视情维修^[56]；采用模块化架构实现发动机单元体外场互换^[57]和外部附件航线可更换，控制整台发动机和航线可更换件的拆换时间^[58]。

在环保性方面，直升机经常在 3 000 m 以下的低空领域飞行，起飞降落场地与使用场所较接近居民区。尽管目前适航规章对涡轴发动机污染排放尚无明确要求，但瑞士等国家针对直升机排放问题制定了具体的规定，国内也开展了涡轴发动机燃烧室低排放的相关研究^[59-60]。

在新场景、新技术方面，作为倾转旋翼新构型等高端飞行器的动力，涡轴发动机需要兼顾悬停状态下的大功率输出和高速巡航状态下的高效率运行，同时能快速响应飞机瞬变的功率需求并稳定工作；作为混合动力系统的原动机，涡轴发动机既要满足高效运行的要求，又要解决大惯性机械系统与快速变化电力负载之间的匹配难题，对发动机的控制规律设计提出了新的挑战^[61]；智能化技术的应用可以提升发动机综合性能，而健康管理系统中振动/磨损颗粒等信号的检测精度、典型故障监测/预测率、虚警率成为重要的智能化评价指标^[62]。

7.2 新构型

为满足未来飞行器对涡轴发动机的新需求，业界正积极开展新构型的探索研究，如涡轴-涡扇变循环发动机、涡轮级间燃烧发动机、多电发动机、智能航空发动机等；在部件/系统方面，双性

能盘、空心盘、新冷却叶型、健康管理系统等新构型不断涌现。

涡轴-涡扇变循环发动机，简称轴扇发动机，可以在涡轴、涡桨、涡扇模式之间进行转换，是垂直起降飞行器的理想动力之一，但为实现轴扇发动机在多种模式之间的稳定切换，需引入大量复杂的变几何机构，如模式切换离合器、大范围可调风扇导叶、几何可变喷管等（图 34）^[63]，这对整机轻量化设计和高可靠性带来不小挑战，而如何确定模式转换点及燃油控制规律也是目前重点研究方向^[64]。

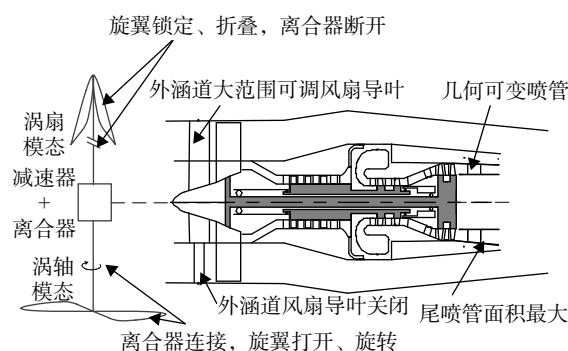


图 34 轴扇发动机不同模式示意图^[63]

Fig. 34 Schematic diagram of different operating modes of a turboshaft-turbopan engine^[63]

涡轮级间燃烧是在涡轮级间加入新的燃烧室，它在主燃烧室的基础上为发动机提供了更多的加热量^[65]。涡轴发动机如采用涡轮级间燃烧室（图 35），可快速提高涡轮的做功能力，满足发动机在起飞或极端情况下的大功率需求。近年来开展了级间燃烧技术对涡轴发动机总体性能的影响研究^[66]和级间旋转爆震涡轴发动机气动参数随爆震燃烧特性的变化规律研究^[67]。然而，涡轮级间燃烧室进口马赫数高，且结构紧凑复杂，存在燃烧组织难、燃烧效率低、出口温度场不均匀度大等难题，有待通过技术攻关提高成熟度。

在航空电气化的发展背景下，多电发动机是

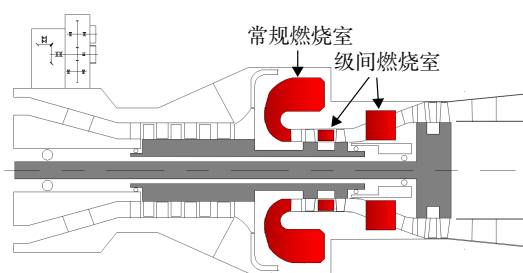


图 35 涡轮级间燃烧室示意图

Fig. 35 Schematic diagram of an inter-stage turbine combustor

航空电气化的重要途径。通过嵌入式启动/发电机及电气附件取代附件齿轮箱和机械液压部件(图36), 具有结构简化、能耗降低、可靠性提升等优势, 核心技术包括一体化嵌入式启动/发电机、电气附件、磁浮轴承及分布式控制等^[68]。目前, 技术研发主要聚焦高温环境下高可靠性电机研制、高压大功率电气连接、燃油系统高精度控制等难点^[69-71]。

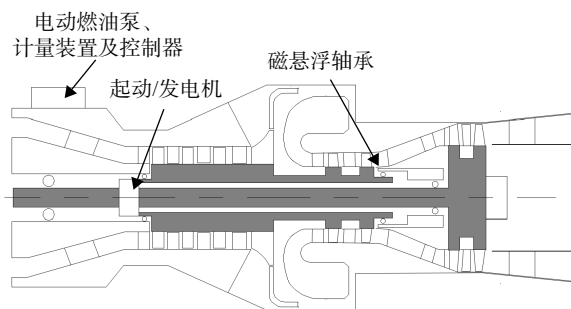


图 36 涡轴多电发动机示意图

Fig. 36 Schematic diagram of a turboshaft multi-electric propulsion engine

智能航空发动机的内涵在于依托测试数据、模型与信息融合技术, 全面感知自身状态与外部环境, 具备主动自我管理的能力, 根据环境因素与任务需求实现自适应平衡^[72]。国内基于自主研制的涡轴发动机, 开展智能化研究及应用, 以进一步提升发动机综合能力, 保障发动机全寿命周期安全、经济使用。例如根据历史启动数据, 对启动供油量进行智能化修正, 实现发动机可靠启动; 适应工作环境及直升机负载变化, 实现宽行程可变导叶和燃气温度限制值智能调节, 提升发动机高原条件下的起飞功率、降低巡航状态耗油率; 结合历史数据与性能衰减模型, 开发自动功率检查与告警功能, 智能判断发动机健康状态等。未来, 大数据分析、人工智能、物联网等智能化技术将会进一步融入涡轴发动机的全生命周期管理。

为了进一步提高发动机综合性能, 新概念部件构型正逐步在涡轴发动机上得到工程应用。双性能盘^[73]针对盘体不同部位在高温、高离心载荷下的不同服役需求, 将两种不同性能的合金通过特定工艺结合成一个整体盘件, 如涡轮双金属整体叶片盘, 叶片采用高承温、高持久蠕变性能的铸造高温合金, 轮盘采用高强度、高疲劳性能的粉末高温合金(图37(a)), 可以简化结构、减少零件、精细控制热态间隙。基于增材制造和拓扑优化技术, 空心离心叶轮及空心涡轮盘等新结构也

取得了突破^[74], 可应用于涡轴发动机实现零件的轻量化设计(图37(b))。在涡轮叶片冷却技术研究方面, 基于仿生学原理, 通过构建蜂窝等仿生冷却单元, 能显著提升冷却效率, 降低冷气消耗(图38)^[75]。

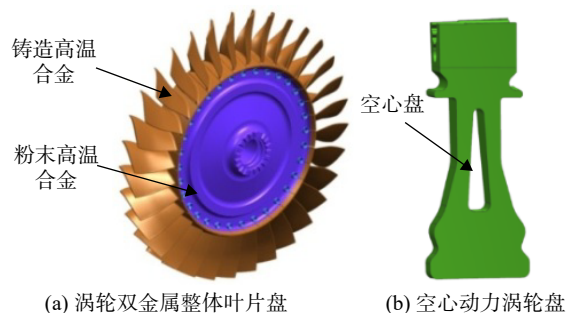
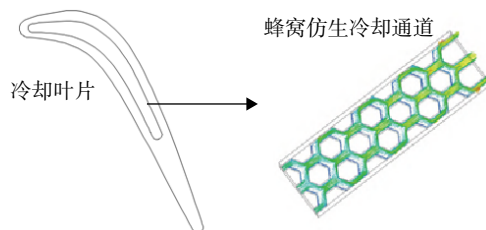


图 37 新构型零部件示意图

Fig. 37 Schematic diagrams of new configuration components

图 38 蜂窝仿生冷却通道示意图^[75]Fig. 38 Schematic diagram of honeycomb biomimetic channel^[75]

健康管理系统是当代新研涡轴发动机普遍采用的重要系统, 一般包括机载、地面两部分(图39), 通过采集并处理发动机部分工作参数, 实现发动机的故障诊断、趋势分析和寿命管理等功能, 对发动机的健康状态和潜在失效做出准确的分析评估, 为发动机的使用维护决策提供有力支持, 推动发动机从定期维护向高端化视情维护转变, 提升发动机可靠性和降低使用成本。在产品方面, AES100、阿内托、阿拉诺等新一代民用涡轴发动机均实现健康管理系统的工程应用。

7.3 新材料

“一代材料, 一代发动机”, 涡轴发动机综合性能的显著提升需要新的材料及结构来支撑。历经70余年发展, 国内外已经形成了较为成熟的材料体系, 新材料发展也方兴未艾, 并在中小型航空发动机上逐步得到工程应用, 其中高温合金、钛合金和陶瓷基复合材料的升级换代成为研究重点。新材料未来在涡轴发动机的典型应用场景见图40。

高温合金是发动机热端部件制造的基石。铸

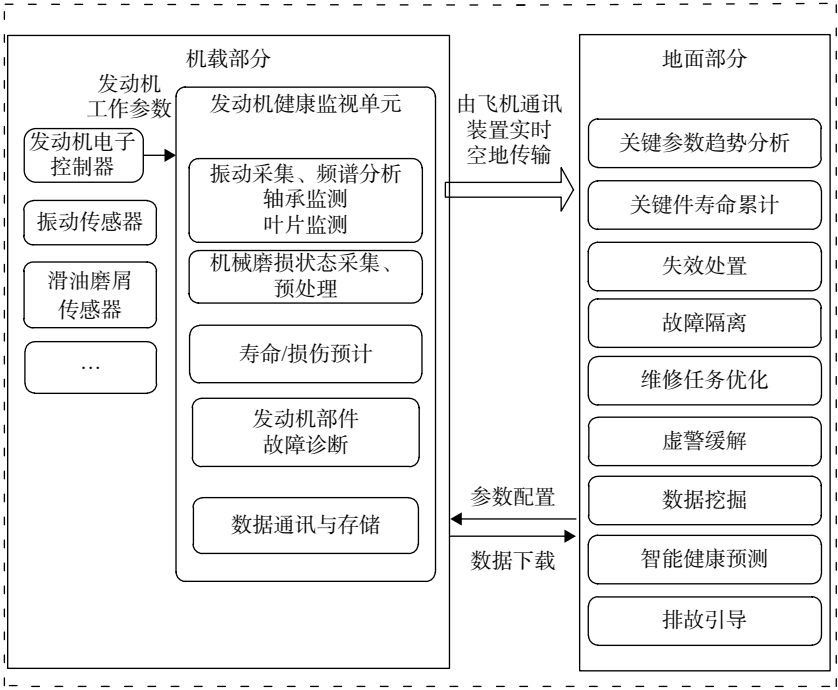


图 39 涡轴发动机健康管理系统的原理框图

Fig. 39 Block diagram of the health management system for turboshaft engines

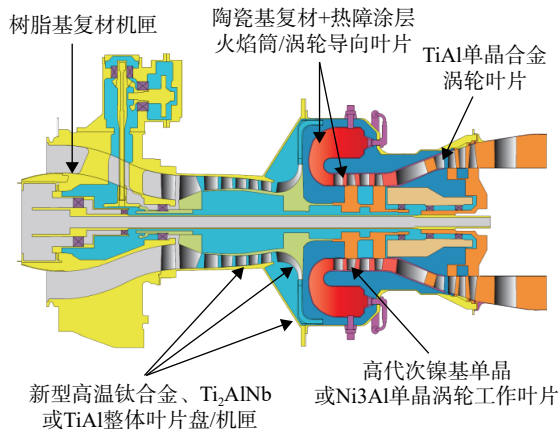


图 40 涡轴发动机新材料典型应用场景

Fig. 40 Typical application scenarios for new material in turboshaft engines

造高温合金方面,正向着更高承温能力与更长寿命发展。以涡轮叶片用镍基单晶高温合金为代表,第三代和第四代单晶高温合金已完成研制,其长时承温能力分别达到 1 120 ℃ 和 1 140 ℃^[76]。近年来,多种 Ni3Al 金属间化合物单晶材料获得重要突破^[77],其承温能力可以达到 1 100~1 160 ℃,且密度低于高代次镍基单晶高温合金,有望在新一代民用涡轴发动涡轮叶片上获得应用。变形和粉末高温合金方面,则向着更高承温能力、更高强度和更高损伤容限水平发展,承温能力达到 800 ℃ 的变形和粉末高温合金将成为新一代高性

能涡轮盘的可靠支撑^[78]。

钛合金具有高比强度,广泛应用于涡轴发动机冷端及中温部件,并向更高承温能力和强度发展;承温能力 600~650 ℃ 的高温钛合金整体叶片盘的成功研制,为新一代涡轴发动机压气机压比提升提供可靠支撑^[79]。近年来, Ti2AlNb 和 TiAl 金属间化合物的塑性等关键指标不断提高,为涡轴发动机关键材料轻量化提供支撑,尤其是承温能力 950 ℃ 的新型 TiAl 单晶材料,成为涡轴发动机涡轮叶片的理想减重“神器”^[80-81]。

陶瓷基复合材料以其低密度、超高承温能力等独特性能,在航空发动机领域展现出巨大的应用潜力。其中以碳化硅/碳化硅为代表的非氧化物陶瓷复合材料已在多型发动机上应用研究^[82-83];长时耐 1 350~1 450 ℃、短时 1 550 ℃ 的第三代碳化硅纤维复合材料已具备小批量生产制备能力^[84],并向第四代超高耐温方向发展^[85]。近年来,以氧化铝/氧化铝、氧化铝/铝硅酸盐为代表的氧化物陶瓷复合材料,因具有更好的抗氧化、抗蠕变性能,在航空发动机领域吸引了更多的应用研究。

当然,不少新材料尚处于工程应用研究早期阶段,在材料耐久性和经济性等方面走向工程实用仍有大量工作要做。

7.4 新工艺

工艺是产品从图纸变为实物的桥梁。近年来,

增材制造、新型表面强化与智能制造等新工艺,成为民用涡轴发动机制造工艺技术的重要发展方向。

增材制造(additive manufacturing, AM)是突破传统工艺限制、实现性能跃升的重要技术途径,可减少零件数量、缩短制造周期、降低制造成本^[86]。AES100 涡轴发动机通过增材制造附件传动机匣(图 41),验证了轻量化设计与整机适配的可行性^[87];阿拉诺发动机燃油喷嘴、进口导叶和扩压器叶片等零件均采用增材制造技术,快速生成复杂形状零件,零件数量大幅减少^[50]。当然微观缺陷控制、残余应力调控及大规模生产一致性等难点仍需通过多学科协同攻关,以全面释放增材制造在航空动力领域的技术潜力。

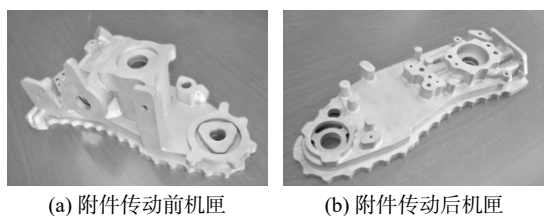


图 41 AES100 发动机 3D 打印附件传动机匣

Fig. 41 3D-printed accessory gearbox of the AES100 engine

新型表面强化加工技术可在不改变零件宏观结构的情况下,显著提升关键部件服役性能^[88]。超快激光等能量束加工,可在叶片表面构建微沟槽等仿生结构^[89],有效降低气流阻力;超声滚压强化技术利用静力滚压与高频超声冲击的耦合效应(图 42)^[90],对金属表层进行纳米级“微观锻造”,实现极低表面粗糙度与深层强化的协同调控;多级凸包旋转孔挤压强化技术驱使孔壁材料发生连续微量的旋转冷挤压变形^[91],显著改善了高应力紧固局部的表面完整性与抗疲劳承载能力;空化磨粒复合水射流强化技术则利用空化泡溃灭微射流与高速微磨粒的复合冲击^[92],在实现柔性微

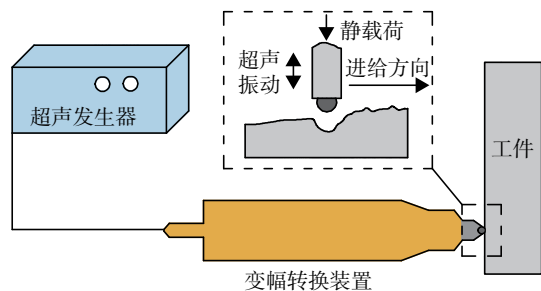


图 42 超声滚压强化原理图^[90]

Fig. 42 Schematic diagram of ultrasonic rolling process^[90]

磨抛的同时,显著细化表层晶粒并引入高幅值残余压应力。

智能制造深度融合了数字化、网络化与智能化技术,可实现制造全过程精准感知与自主决策。航空发动机智能装配检测以机器视觉、三维建模及深度学习为核心支撑,通过机电一体化平台完成 360°全方位数据采集与高精度三维模型重构,系统结合智能算法与标准化判异体系,实现检测效率与精度的双重提升,有效弥补人工检测的主观性与不稳定性,为涡轴发动机装配检测工程化、标准化提供技术支撑。

7.5 新燃料

航空业的碳排放主要来自飞机燃油的燃烧排放,采用新燃料是实现航空动力降碳的重要途径,也是支撑国家能源安全的战略必须。目前,可持续航空燃料(SAF)、氢等新燃料应用受到了广泛的关注,成为绿色化研究热点^[93]。

可持续航空燃料(SAF)作为一种利用可再生资源通过化学过程转化而成的航空煤油替代品,可与传统航空煤油混合使用,显著降低全生命周期的二氧化碳排放,是航空业中、短期内实现二氧化碳大幅减排的较为现实选择^[94]。

氢燃料具有来源广泛、绿色零碳、燃烧性好等优势。与航空煤油和可持续航空燃料(SAF)相比,氢燃料的应用可更好地消除二氧化碳以及其他温室气体的排放;与常规电池相比,压缩后的氢气具有更高的能量密度,因此氢能源在航空减碳方面具有广阔的开发前景^[95]。

尽管新燃料具有众多优点,但在发动机上的工程应用仍有大量工作要做。SAF 燃料由于原材料与工艺路线的不同,其物性参数与常规航空煤油 RP-3 存在一定差异,宜在成熟的发动机上验证评估燃料差异带来的性能影响。氢燃料使用时需要对发动机燃烧室等部件做适应性改进,攻克燃油喷嘴回火等难点;此外氢的制备、储备、运输、安全保护和降成本也是需要攻克的难题。

8 民用涡轴发动机应用展望

随着国民经济发展,传统通航产业日益壮大,低空经济作为国家新兴支柱产业,正处于方兴未艾的快速发展期,给涡轴发动机带来了广阔的应用前景。

8.1 先进民用直升机应用

民用直升机凭借其长航程、大载重、高成熟

性等优势,将在通航产业和低空经济中持续发挥主力军作用,也为涡轴发动机的市场前景提供了重要保证。为了抢占市场,国外直升机公司仍在积极推进技术创新与突破,并打造新的先进产品。例如在 5~6 t 中型双发直升机领域,空客公司配装 Arrano 发动机的新一代直升机 H160,于 2020 年取得欧洲航空局(EASA)的型号合格证。我国民用直升机也已形成覆盖轻型至大型的产品谱系,主要包括 AC311(2 吨级)、AC312(4 吨级)、AC352(7 吨级)和 AC313(13 吨级)等产品,新一代的中型民用直升机也在规划发展,将为通航产业和低空经济领域涡轴发动机应用提供有力支撑。

8.2 倾转旋翼飞行器应用

倾转旋翼飞行器兼具直升机的垂直起降能力和固定翼飞机的高速巡航性能,已成为军、民用直升机的重要发展方向,也为涡轴发动机提供了高端化应用场景。据统计,2025 年全球倾转旋翼飞行器市场规模达到 21.1 亿美元,预计到 2032 年将达到 65.5 亿美元^[96]。

倾转旋翼飞行器通过倾转机构实现旋翼姿态转换,以直升机模式垂直起降、悬停、低速飞行(图 43(a)),以螺旋桨飞机模式高速前飞(图 43(b)),从而兼顾低速与高速飞行性能,并能达到更高的平飞速度(500 km/h 以上)。较早的代表机型有美国 V22“鱼鹰”,当前民用倾转旋翼飞行器也得到高度关注^[97-98]。

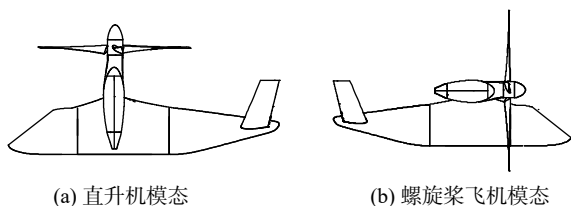


图 43 倾转旋翼机双模式示意图

Fig. 43 Schematic diagram of tiltrotor aircraft twin model

国际方面,意大利莱昂纳多公司研发的 8 吨级 AW609 开展了适航取证试验试飞工作;在欧洲“清洁天空 2”(Clean Sky 2)计划资助下,莱昂纳多公司正在研发下一代民用倾转旋翼机技术验证机,已于 2025 年 12 月完成首飞^[99]。国内方面,作为全球首款 6 吨级倾转旋翼飞行器,搭载两台 AES100 发动机的镗影 R6000,于 2025 年 12 月成功实现首飞(图 44),验证了 AES100 发动机与倾转传统系统、旋翼系统的优良匹配性能。

相比传统直升机,倾转旋翼飞行器的飞行高



图 44 镗影 R6000 配装 AES100 发动机首飞

Fig. 44 First flight of the Lanying R6000 equipped with the AES100 engine

度增加(从 6 000 m 至 7 000 m 以上)、速度提升(从 300 km/h 至 500 km/h),要求涡轴发动机开展适应性的改进。为适应倾转旋翼飞行器倾转过渡、高速飞行要求,需要突破变转速动力涡轮(75%~100% 额定转速)设计^[100]、倾转双模态发动机控制、倾转旋翼飞发联合控制等关键技术,保证发动机在悬停状态下的大功率输出与高速巡航状态下的高效运行之间实现最优平衡。

8.3 涡轮-电混合动力系统应用

燃气涡轮-电混合动力系统是当前实现电动飞行器“里程突破”的重要解决方案,也是涡轴发动机绿色化发展的重要方向之一^[101]。国际方面,Beta、Joby 等知名 eVTOL 企业,已开始换装涡轮-电混合动力系统。国内方面,适逢低空经济发展,预计未来 20 年混合动力系统需求达 1.24 万台套^[102]。

涡轮-电混合动力系统是指燃气涡轮发动机与锂电池或燃料电池通过一定的组合与调度,共同为推进器提供能量来产生推力的新构型动力系统,一般由涡轮发电、储能、能源分配和电推进等子系统组成^[103],其中涡轮发电子系统包括涡轮发动机、发电机和发电机控制器,见图 45。

在起飞、巡航等飞行阶段,通过涡轮发电子系统、储能子系统之间的功率自适应调控,可使涡轴发动机长时工作在较高的热效率区间;同时通过电力传输功率,可以实现发动机与螺旋桨/旋翼之间的机械解耦,提升飞行器推进效率,降低航空运输燃油消耗。

国外飞行器与航空发动机企业高度关注涡轮-电混合动力系统的发展。2019 年,NASA 启动了“变革性垂直升力技术计划”(RVLT),提出 4 个电推进飞行器概念方案,主要采用涡轮-电混合动力系统^[104]。近年来,空客直升机公司正在发展 PioneerLab 技术验证机混合动力系统^[105],美国通用

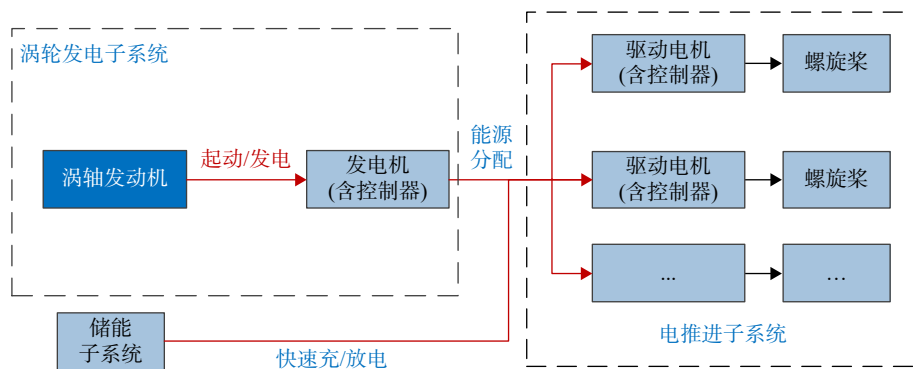


图 45 涡轮-电混合动力系统原理图

Fig. 45 Schematic diagram of a turbo-electric hybrid propulsion system

电气公司基于 CT7 涡轴发动机开展兆瓦级电气化动力装置的研究^[106]。在国内,中国航发正在基于 AES100 发动机,开展兆瓦级混合动力系统研制工作,已实现满功率运行,未来可满足 3~8 吨级电动垂直起降飞行器对绿色动力的需求(图 46)。

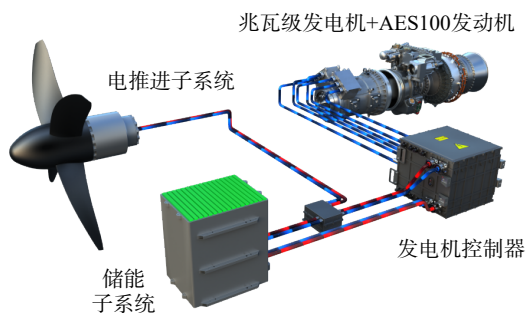


图 46 兆瓦级混合动力系统架构

Fig. 46 Architecture of a megawatt class hybrid propulsion system

相对传统动力,涡轮-电混合动力系统新增发电机及控制器、储能子系统、电推进子系统等构型,需要重点解决多元特性部件协同设计、负载瞬态波动与发动机气动响应匹配控制、受限空间多源散热、强弱电耦合下电磁干扰屏蔽等难题。

8.4 可持续航空燃料(SAF)动力应用

可持续航空燃料(SAF)是航空业实现碳减排的重要手段和有效途径之一,也是涡轴发动机重要的应用方向。

目前,法国赛峰^[107]、美国通用电气^[106]、加拿大普惠^[108]和英国罗罗^[109]等知名航空发动机企业已开展 SAF 的研究与适航认证工作。法国赛峰的阿拉诺发动机在取证时即具备使用 50%SAF 的能力。2023 年 2 月, NH90 直升机中一台 RTM322 涡轴发动机使用 100%SAF,由赛峰集团、空客公司和道达尔能源公司合作完成首飞。

国内在 SAF 燃料的研究也取得重要进展。AES100 发动机利用 92%SAF 燃料开展试验研究,目前已完成部件级和首飞前整机持久科研试验。与采用常规航空煤油 RP-3 燃料试验相比,采用 SAF 燃料时,发动机稳态运行时的耗油率、燃气温度相近(图 47),但起动试验表明,高空低温下 SAF 燃料点火性能比航空煤油 RP-3 燃料差,需要进一步加强 SAF 燃料高空高寒环境下起动性能研究。

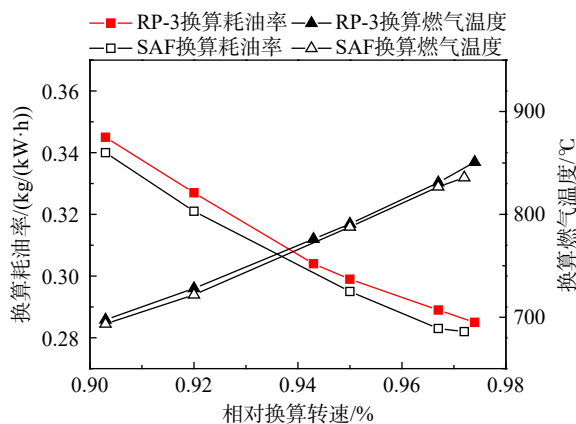


图 47 SAF 燃料在 AES100 发动机上的应用研究

Fig. 47 Study on the application of SAF in the AES100 engine

8.5 氢燃料动力应用

氢燃料动力发展也受到高度关注^[95]。技术发展方向主要有 3 个:一是氢燃料电池;二是以氢气作为燃料的氢燃料涡轮发动机;三是氢燃料混合动力。氢燃料电池能量密度有限,难以支持飞行器进行长距离飞行;而氢燃料涡轮发动机在满足中长距离飞行方面技术可行性更强;氢燃料混合动力结合了氢燃料电池和氢燃料涡轮的优势,可实现更好的飞行经济性,但氢燃料涡轮发动机仍是其动力主要部分。

国外航空发动机公司对氢燃料涡轮发动机开

展了较多技术研究。空客公司在 2020 年发布了氢动力概念飞机“ZEROe”，采用了氢燃料电池与氢涡轮发动机组合的混合动力^[110]。2023 年 6 月，赛峰集团针对氢涡轮发动机的燃烧子系统，开展了氢气从储罐到喷射燃烧的全过程稳定性和可行性验证^[111]。2023 年 9 月，英国罗尔斯-罗伊斯公司完成了 100% 氢燃料的全环燃烧室性能试验，验证了在航空发动机最大推力状态下使用氢燃料的技术可行性^[112]。

经过多年技术培育，我国在氢燃料航空动力方面的研究也取得了明显进展。中国航发湖南动力机械研究所 AES100 平台技术为基础，衍生发展兆瓦级航空涡桨等发动机，并在氢涡轮发动机总体、燃烧、控制等关键技术取得了重要进展^[113]。试验结果表明，使用氢燃料后发动机的耗油率和燃气温度明显降低(图 48)。2026 年 4 月，我国首台兆瓦级氢燃料航空涡桨发动机，配装 7.5 吨级无人运输机成功首飞，初步验证了氢燃料系统与飞行平台匹配的工程实用性。

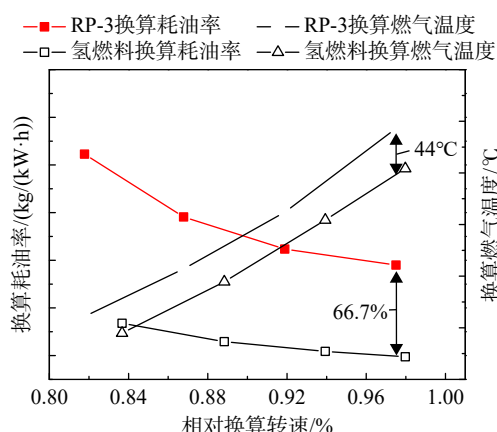


图 48 氢燃料与 RP-3 燃料的发动机试验结果对比

Fig. 48 Comparison of engine test results between hydrogen fuel and RP-3 fuel

然而，氢燃料的工程应用仍有大量艰难工作需要完成，未来不仅需要突破氢燃料高效储存、飞发储一体化、低成本控制等关键技术，还需在安全认证体系、氢能产业供给、氢能航空试点等方面持续发力，解决工程应用难题。

9 结 论

本文综述了民用涡轴发动机技术发展与应用前景，主要结论如下：

1) 70 多年来，世界主要发动机厂商高度重视民用涡轴发动机的重要作用，针对涡轴发动机技

术特点和难点，持续开展涡轴发动机性能提升技术攻关研究，通过引进专利、国际合作、自主研制等方式和系列化发展、衍生发展、军民融合发展等途径，研制了众多高水平的涡轴发动机产品，为全球航空业发展提供了重要支撑。

2) 我国民用涡轴发动机自主研制起步较晚，但在国家支持下，科研人员打破国外技术垄断和封锁，攻克民用涡轴发动机自主发展的“卡脖子”技术难题，突破低油耗、长寿命、高安全性等诸多关键技术，研制出以 AES100 民用涡轴发动机为代表的自主创新产品，形成了自主设计和批量生产先进民用涡轴发动机的体系能力，实现了多用户市场应用，为通航产业和低空经济发展提供了强劲“中国心”。

3) 为满足日益丰富的市场需求和应用场景，新一代民用涡轴发动机技术正朝着新要求、新构型、新材料、新工艺、新燃料等研究方向发展，呈现出高端化、绿色化、智能化等发展特征。随着国家通航产业和低空经济发展，民用涡轴发动机在先进直升机、倾转旋翼飞行器、涡轮-电混合动力系统、可持续航空燃料和氢燃料动力等领域大有用武之地，应用前景十分广阔。

参考文献：

- [1] 刘道建, 黄水林, 冯维超. 直升机绿色航空动力技术发展研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(1): 97-104.
Liu Daojian, Huang Shuilin, Feng Weichao. Research on the development of green power technologies for helicopter[J]. Aeronautical Science and Technology, 2024, 35(1): 97-104. (in Chinese)
- [2] Rotortrade. Global helicopter market report 2024-2025: high demand vs. fleet shortages: can the industry keep up?[EB/OL]. (2025-01-10) [2026-05-19]. <http://www.rotortrade.com>.
- [3] FlightGlobal. World air forces directory 2025[EB/OL]. (2025-02-15). [2026-05-19]. <http://www.flightglobal.com/World-air-forces>.
- [4] General Aviation Manufacturers Association. 2024-2025 General aviation market report (helicopter segment) [EB/OL]. (2025-01-10). [2026-05-19]. <http://www.gama.aero>.
- [5] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 529937.
Deng Jinghui. Technical status and development of electric vertical take-off and landing aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 529937. (in Chinese)
- [6] 尹泽勇, 李维, 肖为, 等. 我国新能源低空飞行器动力发展与展望[J]. 推进技术, 2025, 46(11): 202505052.
Yin Zeyong, Li Wei, Xiao Wei, et al. Prospect of developing new energy aero-engine for low-altitude aircraft in China[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(11): 202505052. (in Chinese)
- [7] 吕乐丰, 吴希明, 李颖辉. 民用倾转旋翼机的应用需求与关键技术分析[J]. 航空科学技术, 2023, 34(9): 31-40.
Lyu Lefeng, Wu Ximing, Li Yinghui. Application requirements

- and key technologies analysis for civil tiltrotor aircraft[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(9): 31-40. (in Chinese)
- [8] 中国航空发动机集团有限公司. 2024-2043 民用航空发动机市场预测报告[EB/OL]. (2024-11-16) [2026-05-19]. <https://news.carnoc.com/list/629/629518.html>. Aero Engine Corporation of China. Market forecast report for civil aero engines from 2024 to 2043[EB/OL]. (2024-11-16) [2026-05-19]. <https://news.carnoc.com/list/629/629518.html>. (in Chinese)
- [9] 于琦. 国外直升机发展特点及市场态势分析[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(1): 23-28.
Yu Qi. Features and market competition of foreign helicopter development[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2021, 32(1): 23-28. (in Chinese)
- [10] 郭允良. 国内外涡轮轴发动机性能、结构特点及其技术发展[M]. 北京: 蓝天出版社, 1990.
Guo Yunliang. Performance, structural characteristics and technological development of turboshaft engines at home and abroad[M]. Beijing: Lantian Press, 1990. (in Chinese)
- [11] 方昌德. 航空发动机的发展历程[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007.
Fang Changde. Development of aero-engine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 方昌德. 航空发动机百年回顾[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2003, 16(4): 1-5.
Fang Changde. A century of aero-engine in retrospect[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2003, 16(4): 1-5. (in Chinese)
- [13] 葛宁. 涡轴发动机发展与技术趋势[J]. 南京航空航天大学, 2018, 50(2): 145-156.
Ge Ning. Development and technical trend of turbo shafts engine[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 50(2): 145-156. (in Chinese)
- [14] 邹望之, 郑新前. 航空涡轴发动机发展趋势[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(12): 2577-2588.
Zou Wangzhi, Zheng Xinqian. Development trends of aero turboshaft engines[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(12): 2577-2588. (in Chinese)
- [15] Koop W. The integrated high performance turbine engine technology (IHPTET) program[J]. *ISABE*, 1997, 97: 7175.
- [16] AIAA Air Breathing Propulsion Technical Committee. The versatile affordable advanced turbine engines (VAATE) initiative[R]. Reston, US: AIAA, 2006.
- [17] 蔡建兵, 吴施志. 涡轴发动机技术发展[J]. *航空动力*, 2018(5): 37-39.
Cai Jianbing, Wu Shizhi. The technology development of turboshafts[J]. *Aerospace Power*, 2018(5): 37-39. (in Chinese)
- [18] 肖蔓. AATE 和 ITEP 计划下的涡轴发动机分阶段研发综述[J]. *航空发动机*, 2016, 42(2): 98-102.
Xiao Man. Review of research and development for turboshaft engine based on AATE and ITEP program[J]. *Aeroengine*, 2016, 42(2): 98-102. (in Chinese)
- [19] 罗宿明, 张晓爽, 陈伟, 等. 中小型民用涡轴发动机技术发展初步研究[J]. *中国科技纵横*, 2023(19): 72-74.
Luo Suming, Zhang Xiaoshuang, Chen Wei, et al. A preliminary study on the technical development of small and medium-sized civil turboshaft engine[J]. *China Science & Technology Overview*, 2023(19): 72-74. (in Chinese)
- [20] 雷新国, 周辉华, 张媛. 我国民用涡轴发动机的发展研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2016, 29(4): 57-62.
Lei Xinguo, Zhou Huihua, Zhang Yuan. The research of development of civil turboshaft engine[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2016, 29(4): 57-62. (in Chinese)
- [21] 尹泽勇, 曾源江, 石建成, 等. 涡轴(涡桨)/涡扇(涡喷)发动机通用核心技术[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(11): 2088-2094.
Yin Zeyong, Zeng Yuanjiang, Shi Jiancheng, et al. Versatile core engine technology for turboshaft (turboprop)/turbofan (turbojet) engines[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(11): 2088-2094. (in Chinese)
- [22] 蒋建军, 冯国颂. 涡轴发动机的系列化发展[C]//第13届燃烧与传热传质专业学术讨论会论文集. 北京: 中国航空学会, 2005: 345-351.
Jiang Jianjun, Feng Guosong. Serial development of turboshaft engines[C]//Proceedings of the 13th Academic Symposium on Combustion, Heat Transfer and Mass Transfer. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2005: 345-351. (in Chinese)
- [23] 尹泽勇, 秦亚欣, 李建榕, 等. 新时期我国民用航空发动机自主发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(5): 185-191.
Yin Zeyong, Qin Yaxin, Li Jianrong, et al. Independent development strategy of civil aero-engine in China in the new era[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(5): 185-191. (in Chinese)
- [24] 王正生, 刘翔. 涡轴八发动机的发展问题研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2003, 16(2): 14-17.
Wang Zhengsheng, Liu Xiang. The development and research of engine WZ-8[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2003, 16(2): 14-17. (in Chinese)
- [25] 李永佳, 宫新华. 以国际合作, 促自主研发: 涡轴 16 发动机的创新发展之路[J]. *航空动力*, 2019(6): 59-62.
Li Yongjia, Gong Xinhua. The innovation development of WZ16 turboshaft[J]. *Aerospace Power*, 2019(6): 59-62. (in Chinese)
- [26] 李概奇, 杨锐, 王旭, 等. 奋进中的 AES100 先进民用涡轴发动机[J]. *航空动力*, 2022(5): 20-22.
Li Gaiqi, Yang Rui, Wang Xu, et al. AES100 advanced civil turboshaft engine in progress[J]. *Aerospace Power*, 2022(5): 20-22. (in Chinese)
- [27] 林左鸣. 世界航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012.
Lin Zuoming. World aeroengine handbook[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [28] 王士奇, 喻彪. 赛峰直升机发动机 80 周年概览[J]. *航空动力*, 2018(5): 47-50.
Wang Shiqi, Yu Biao. A brief history of safran helicopter engines[J]. *Aerospace Power*, 2018(5): 47-50. (in Chinese)
- [29] 王士奇. 阿内托: 赛峰的新一代涡轴发动机[J]. *航空动力*, 2019(3): 52-55.
Wang Shiqi. Aneto, next generation turboshaft engine of safran[J]. *Aerospace Power*, 2019(3): 52-55. (in Chinese)
- [30] GE Aerospace. Commercial engines[EB/OL]. [2026-04-02]. <https://www.geaerospace.com/commercial/engines>.
- [31] Pratt & Whitney. Helicopter engines[EB/OL]. [2026-04-02]. <https://www.rtx.com/en/prattwhitney/products/helicopter-engines>.
- [32] CCAR-33-R2: 航空发动机适航规定[S].
CCAR-33-R2: Airworthiness standards for aircraft engines[S]. (in Chinese)
- [33] 方昌德. 航空发动机的发展研究[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009: 183.
Fang Changde. Research on the development of aeroengine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009: 183. (in Chinese)

- [34] 唐利军, 朱明明, 王欢. 涡轴发动机适航吸雨试验器喷水特性研究[J]. 航空发动机, 2023, 49(1): 158-162.
Tang Lijun, Zhu Mingming, Wang Huan. Test study on water spraying characteristics of airworthiness rain ingestion tester for a turboshaft engine[J]. Aeroengine, 2023, 49(1): 158-162. (in Chinese)
- [35] 李概奇, 赵尊盛, 马东阳, 等. 新研民用涡轴发动机防冰设计技术[J]. 航空学报, 2026, 47(11): 633025.
Li Gaiqi, Zhao Zunsheng, Ma Dongyang, et al. Anti-icing design technology for a new civil turbo-shaft engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2026, 47(11): 633025. (in Chinese)
- [36] 李概奇, 田骏丹, 吴晶峰, 等. 新研民用涡轴发动机结冰适航试验[J]. 航空学报, 2025, 46(12): 131388.
Li Gaiqi, Tian Jundan, Wu Jingfeng, et al. Icing airworthiness test on a newly developed civil turbo-shaft engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(12): 131388. (in Chinese)
- [37] 李志平, 陈家辉, 朱星宇, 等. 压力-温度组合畸变下航空发动机失速/喘振适航审定[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 3050-3062.
Li Zhiping, Chen Jiahui, Zhu Xingyu, et al. Aero-engine stall/surge airworthiness certification under combined pressure-temperature distortion[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(12): 3050-3062. (in Chinese)
- [38] 肖国松, 刘家豪, 马振洋, 等. 航空发动机电子控制器的高强辐射场干扰及防护[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(4): 043007.
Xiao Guosong, Liu Jiahao, Ma Zhenyang, et al. HIRF interference research and protection of aircraft engine electronic controller[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36(4): 043007. (in Chinese)
- [39] 杨国均. 无人机发动机单粒子翻转防护技术[J]. 航空发动机, 2026, 52(1): 162-167.
Yang Guojun. Single-event upset protection technology for UAV engines[J]. Aeroengine, 2026, 52(1): 162-167. (in Chinese)
- [40] 尹泽勇, 李概奇, 石建成, 等. 先进通用核心机派生发展的理念、方法及实践[J]. 航空学报, 2024, 45(7): 029713.
Yin Zeyong, Li Gaiqi, Shi Jiancheng, et al. Concept, method and practice of advanced versatile core engine derivative[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(7): 029713. (in Chinese)
- [41] 陈小丽, 王乐. 中小型航空发动机低成本发展的工程技术实现方法[J]. 航空动力, 2025(4): 62-65.
Chen Xiaoli, Wang Le. Engineering and technical implementation approaches for the low-cost development of small and medium-sized aero engine[J]. Aerospace Power, 2025(4): 62-65. (in Chinese)
- [42] 王永明, 何歆, 张弓, 等. 基于国情与实践的民用航空发动机材料/工艺适航审定技术路径[J]. 航空材料学报, 2025, 45(6): 81-88.
Wang Yongming, He Xin, Zhang Gong, et al. Path of airworthiness certification for civil aero-engine materials/processes based on national conditions and certification practices[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(6): 81-88. (in Chinese)
- [43] 宋明波, 严平, 王旭, 等. 基于适航要求的某涡轴发动机最大不平衡探索[J]. 航空动力学报, 2023, 38(6): 1467-1473.
Song Mingbo, Yan Ping, Wang Xu, et al. Exploration of maximum unbalance of a turboshaft engine according to airworthiness requirements[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(6): 1467-1473. (in Chinese)
- [44] 邓旺群, 唐虎标, 刘文魁, 等. 典型民用涡轴发动机燃气发生器转子风车转速模拟试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38(3): 41-48.
Deng Wangqun, Tang Hubiao, Liu Wenkui, et al. Experiment research of simulated windmill speed of a gas generator rotor of a typical civil turbine shaft engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2025, 38(3): 41-48. (in Chinese)
- [45] Yu Maoyu, Wang Jianfang, Xuan Haijun, et al. Simulation and experimental study of gas turbine blade tenon-root detachment on spin test[J]. Aerospace, 2024, 11(8): 629.
- [46] 宋建宇, 吴晶峰, 邱长波, 等. 民用涡轴发动机进气系统结冰试验[J]. 航空动力学报, 2020, 35(5): 1089-1098.
Song Jianyu, Wu Jingfeng, Qiu Changbo, et al. Civil turboshaft engine induction system icing test[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(5): 1089-1098. (in Chinese)
- [47] SAE ARP4754A. Guidelines for development of civil aircraft and system[S].
- [48] RTCA/DO-178C. Software considerations in airborne systems and equipment certification[S].
- [49] RTCA DO-254. Design assurance guidance for airborne electronic hardware[S].
- [50] 肖蔓. H160 直升机及阿拉诺涡轴发动机发展[J]. 航空动力, 2022(2): 21-23.
Xiao Man. Development of airbus H160 and safran arrano[J]. Aerospace Power, 2022(2): 21-23. (in Chinese)
- [51] 赵思瑞, 王旭, 李杜, 等. 进气组合畸变对某涡轴发动机性能影响研究[J]. 推进技术, 2025, 46(8): 2407067.
Zhao Sirui, Wang Xu, Li Du, et al. Effects of inlet combined distortion on performance of a turboshaft engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(8): 2407067. (in Chinese)
- [52] 黄维娜, 黎方娟, 祁宏斌. 航空发动机数字工程初步研究与发展思考[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 529693.
Huang Weina, Li Fangjuan, Qi Hongbin. Preliminary investigation and thoughts on aero-engine digital engineering development [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 529693. (in Chinese)
- [53] 郑玲. 军用航空发动机装备经济可承受性研究综述[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2021, 34(6): 56-60.
Zheng Ling. Review of equipment affordability for military aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2021, 34(6): 56-60. (in Chinese)
- [54] 孙见忠, 易杨, 文洪, 等. 航空发动机全寿命维修概率建模与仿真[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 573-588.
Sun Jianzhong, Yi Yang, Wen Hong, et al. Life cycle probabilistic modeling and simulation of aero-engine maintenance[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 573-588. (in Chinese)
- [55] 刘茜, 胡殿印, 王怡, 等. 航空发动机结构可靠性设计研究进展与展望[J]. 航空学报, 2025, 46(21): 532625.
Liu Xi, Hu Dianyin, Wang Yi, et al. Structural reliability design for aero-engines: review and prospects[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(21): 532625. (in Chinese)
- [56] 冷坤, 王绍华, 陈杰, 等. 涡轴发动机健康状态管理技术发展[J]. 航空发动机, 2025, 51(5): 19-27.
Leng Kun, Wang Shaohua, Chen Jie, et al. Advances in health management technology for turboshaft engines[J]. Aeroengine, 2025, 51(5): 19-27. (in Chinese)
- [57] 黄维娜, 朱晓泉, 潘辉, 等. 航空发动机模块化设计关键技术研究及展望[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38(2): 4-12.
Huang Weina, Zhu Xiaoquan, Pan Hui, et al. Research and

- prospective on key technologies of modular design for aero-engines[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2025, 38(2): 4-12. (in Chinese)
- [58] Kong Weisong, Zheng Huaqiang, Zhao Zhihao, et al. Research on a time estimation method for disassembly and assembly of turboshaft engine accessories based on maintenance process attributes[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2026, 3176(1): 012038.
- [59] 曾琦. 涡轴发动机低排放回流燃烧室流动与燃烧特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- Zeng Qi. A study on flow and combustion characteristics in low-emission reverse combustion chambers of a turboshaft engine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024. (in Chinese)
- [60] 资海林, 赵腾, 黄开明, 等. 芳香烃含量对涡轴发动机排气污染影响的试验研究[J]. 航空动力学报, 2025, 41(6): 20250230.
- ZI Hailin, ZHAO Teng, HUANG Kaiming, et al. Test investigation on influence of aromatic hydrocarbon content on exhaust emission of turboshaft engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 41(6): 20250230. (in Chinese)
- [61] 李鸿扬, 温旭辉, 王义珑. 基于微型燃气轮机发电的混合动力系统小信号稳定性分析及前馈补偿控制[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(4): 59-67.
- Li Hongyang, Wen Xuhui, Wang Youlong. Small signal stability analysis of micro turbine based power generation system and feed-forward compensation control[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(4): 59-67. (in Chinese)
- [62] 赵爽, 李锋, 张瑞, 等. 航空发动机健康管理技术综述[J]. 航空发动机, 2025, 51(6): 1-18.
- Zhao Shuang, Li Feng, Zhang Rui, et al. Overview of aeroengine health management technology[J]. Aeroengine, 2025, 51(6): 1-18. (in Chinese)
- [63] 杨尚钰, 贾琳琳, 陈玉春, 等. 涡轴-涡扇变循环发动机模式转换控制规律设计方法[J]. 航空动力学报, 2025, 40(12): 20240697.
- Yang Keyu, Jia Linyuan, Chen Yuchun, et al. Design method for mode transition control schedule of turboshaft-turbofan variable cycle engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(12): 20240697. (in Chinese)
- [64] 纪创, 汪勇, 王召广, 等. 轴扇转换式发动机最优转换点串行优化设计方法[J]. 推进技术, 2025, 46(4): 2403048.
- Ji Chuang, Wang Yong, Wang Zhaoguang, et al. Serial optimization design method for optimal transfer point of a turboshaft turbofan conversion engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(4): 2403048. (in Chinese)
- [65] 尚守堂, 程明, 刘殿春, 等. 涡轮级间燃烧室技术的研究现状与发展趋势[J]. 航空科学技术, 2011, 22(4): 79-82.
- Shang Shoutang, Cheng Ming, Liu Dianchun, et al. The status and direction of inter-stage turbine burner technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2011, 22(4): 79-82. (in Chinese)
- [66] 陶睿, 赵军, 吴川, 等. 级间燃烧涡轴发动机总体性能研究[J]. 航空动力学报, 2025, 40(7): 20230526.
- Tao Rui, Zhao Jun, Wu Chuan, et al. Overall performance study on turboshaft engine with inter-stage turbine burner[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(7): 20230526. (in Chinese)
- [67] 赵廷, 朱剑锋, 黄兴, 等. 级间旋转爆震涡轴发动机热力过程及性能分析[J]. 推进技术, 2022, 43(4): 200894.
- Zhao Ting, Zhu Jianfeng, Huang Xing, et al. Thermodynamic process and performance analysis of inter-stage turbine rotating detonation turboshaft engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(4): 200894. (in Chinese)
- [68] 王翔宇. 多电航空发动机发展思考[J]. 航空动力, 2025(6): 10-13.
- Wang Xiangyu. Thoughts on the development of more electric aero engine[J]. Aerospace Power, 2025(6): 10-13. (in Chinese)
- [69] 蒋思远. 应用于多电发动机的电励磁双凸极电机电磁热分析与设计研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- Jiang Siyuan. Electromagnetic-thermal analysis and design research of doubly salient electro-magnetic machine for more electric engine application [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022. (in Chinese)
- [70] 张路, 赵玄, 李利生, 等. 多电发动机高压大功率电气连接技术综述[J]. 电气技术, 2025, 26(6): 1-7, 57.
- Zhang Lu, Zhao Xuan, Li Lisheng, et al. A review of high-voltage and high-power electrical connection technology for more-electric engines[J]. Electrical Engineering, 2025, 26(6): 1-7, 57. (in Chinese)
- [71] 陈美娟, 金林山, 朱赟, 等. 多电发动机燃油系统设计面临的挑战和对策[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2023, 36(1): 44-48.
- Chen Meijuan, Jin Linshan, Zhu Yun, et al. Challenges and solutions for fuel system design of more electric engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2023, 36(1): 44-48. (in Chinese)
- [72] 肖洪, 肖达盛, 林志富, 等. 智能航空发动机: 本体智能化技术概述[J]. 推进技术, 2025, 46(6): 2210023.
- Xiao Hong, Xiao Dasheng, Lin Zhifu, et al. Intelligent aeroengine: an introduction of ontological intelligence technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(6): 2210023. (in Chinese)
- [73] Xie Bingchao, Ning Yongquan, Luo Youwei, et al. Achieving serrated grain boundaries within gradient microstructures of nickel-based superalloys for dual-property turbine disks in aeroengines[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2026, 39(2): 103910.
- [74] 汪文君, 徐友良, 吴雪蓓, 等. 基于增材制造的微型涡喷发动机轻量化设计及试验[J]. 航空动力, 2019(3): 20-22.
- Wang Wenjun, Xu Youliang, Wu Xuebei, et al. Lightweight design and test of micro turbojet based on AM[J]. Aerospace Power, 2019(3): 20-22. (in Chinese)
- [75] 万里, 薛树林, 陈文彬, 等. 自然灵感启发的全仿生涡轮叶片超冷技术[J]. 航空动力, 2026(1): 44-46.
- Wan Li, Xue Shulin, Chen Wenbin, et al. Nature-inspired fully bionic turbine blade with advanced ultra-cooling technology[J]. Aerospace Power, 2026(1): 44-46. (in Chinese)
- [76] 史振学, 刘世忠, 李嘉荣等. 一种第四代单晶高温合金不同温度的拉伸性能 各向异性[J]. 航空材料学报, 2019, 39(4): 78-85.
- Shi Zhenxue, Liu Shizhong, Li Jiarong, et al. Anisotropy of tensile properties of a fourth-generation single-crystal superalloy at different temperatures[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(4): 78-85. (in Chinese)
- [77] 赵海根, 李树索, 裴延玲, 等. Ni_3Al 基单晶合金 IC21 的微观组织及力学性能[J]. 金属学报, 2015, 51(10): 1279-1287.
- Zhao Haigen, Li Shusuo, Pei Yanling, et al. Microstructure and mechanical properties of Ni_3Al -based single crystal alloy IC21[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(10): 1279-1287. (in Chinese)
- [78] 王涛, 付书红, 贾崇林, 等. 变形高温合金及其制备工艺研究进展[J]. 航空材料学报, 2026, 46(5): 75-86.
- Wang Tao, Fu Shuhong, Jia Chonglin, et al. Research progress of wrought superalloys and preparation processing[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(5): 75-86. (in Chinese)

- [79] 陈子勇, 刘莹莹, 靳艳芳, 等. 航空发动机用耐 650℃ 高温钛合金研究现状与进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(19): 22-30.
Chen Ziyong, Liu Yingying, Jin Yanfang, et al. Research on 650℃ high temperature titanium alloy technology for aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(19): 22-30. (in Chinese)
- [80] 陈光, 陈奉锐, 祁志祥, 等. 聚片孪生 TiAl 单晶及其应用展望[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(5): 915-926.
Chen Guang, Chen Fengrui, Qi Zhixiang, et al. PST TiAl single crystal and its application prospect[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(5): 915-926. (in Chinese)
- [81] Zhang Qinchai, Chen Minghe, Wang Hui, et al. Thermal deformation behavior and mechanism of intermetallic alloy Ti_2AlNb [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(3): 722-728.
- [82] 董绍明, 周海军, 胡建宝, 等. 浅析极端环境下服役陶瓷基复合材料的构建[J]. 中国材料进展, 2015, 34(10): 741-750.
Dong Shaoming, Zhou Haijun, Hu Jianbao, et al. The design of ceramic matrix composites served in extreme environment[J]. Materials China, 2015, 34(10): 741-750. (in Chinese)
- [83] 董绍明. 纤维增强陶瓷基复合材料研究进展[J]. 高科技与产业化, 2023, 29(8): 16-19.
Dong Shaoming. Research progress on fiber-reinforced ceramic matrix composites[J]. High-Technology & Commercialization, 2023, 29(8): 16-19. (in Chinese)
- [84] 王衍飞, 刘荣军, 张金, 等. SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料制备技术研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(4): 52-74.
Wang Yanfei, Liu Rongjun, Zhang Jin, et al. Research progress in preparation technologies of SiC_f/SiC ceramic matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(4): 52-74. (in Chinese)
- [85] Hu Dingguo, Liu Bin, Yang Tengfei, et al. Elevated-temperature in-situ μCT characterization and progressive damage simulation of EBC-coated SiC/SiC ceramic matrix composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 307: 112925.
- [86] Gu Dongdong, Shi Xinyu, Poprawe R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372(6545): eabg1487.
- [87] 贺剑, 杨艳美, 栗晖. 3D 打印航空涡轴发动机附件传动机匣应用研究[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(3): 110-113.
He Jian, Yang Yanmei, Su Hui. Study on the application of 3D printing in accessory gearbox casing for aero turboshaft engine[J]. Machine Design & Research, 2019, 35(3): 110-113. (in Chinese)
- [88] 张显程, 张勇, 李晓, 等. 异构金属材料的设计与制造[J]. 金属学报, 2022, 58(11): 1399-1415.
Zhang Xiancheng, Zhang Yong, Li Xiao, et al. Design and manufacture of heterostructured metallic materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(11): 1399-1415. (in Chinese)
- [89] 张少平, 侯美丽, 李恒, 等. 新一代航空发动机新结构设计及其对新材料与新工艺需求分析[J]. 航空学报, 2025, 46(23): 431793.
Zhang Shaoping, Hou Meili, Li Heng, et al. Analysis of new structural designs and requirements for new materials and manufacturing processes in next generation aircraft engines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(23): 431793. (in Chinese)
- [90] 蔡振, 张显程, 涂善东. 超声表面滚压加工对 Ti-6Al-4V 合金显微组织及表面完整性的影响[J]. 机械工程材料, 2018, 42(1): 7-10, 17.
Cai Zhen, Zhang Xiancheng, Tu Shandong. Effects of ultrasonic surface rolling process on microstructure and surface integrity of Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(1): 7-10, 17. (in Chinese)
- [91] 李洪伟, 雷学林, 张成成, 等. GH4169 高温合金孔结构的多级凸包旋转冷扩孔挤压强化工艺参数优化[J]. 航空学报, 2024, 45(16): 429692.
Li Hongwei, Lei Xuelin, Zhang Chengcheng, et al. Parameter optimization of multi-stage convex rotating cold reaming extrusion strengthening process for hole structure of GH4169 superalloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(16): 429692. (in Chinese)
- [92] Yao Shulei, Wang Gongyu, Li Kaishang, et al. Cavitation abrasive integrated waterjet peening process and the effect of process parameters on the surface integrity of TA19 titanium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 440: 128477.
- [93] 尹泽勇. 新能源航空发动机发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27: 1-10.
Yin Zeyong. Development strategy of new-energy aero-engines[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27: 1-10. (in Chinese)
- [94] 北京大学能源研究院. 中国可持续航空燃料发展研究报告现状与展望[EB/OL]. (2022-10-28)[2024-04-10]. <https://energy.pku.edu.cn/xsdt/kycg/973cb49fa19742b9aa41526a327d2278.htm>.
Institute of Energy, Peking University. Research report on the development of sustainable aviation fuel in China: current status and prospects[EB/OL]. (2022-10-28)[2024-04-10]. <https://energy.pku.edu.cn/xsdt/kycg/973cb49fa19742b9aa41526a327d2278.htm>. (in Chinese)
- [95] 曹俊, 李维, 郭政言, 等. 我国氢能航空动力发展研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(2): 39-48.
Cao Jun, Li Wei, Guo Zhengyan, et al. Development of hydrogen-based aviation power in China[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2025, 27(2): 39-48. (in Chinese)
- [96] Statistics MRC. Tilt rotor aircraft market size & forecast 2025–2032 [R]. Gaithersburg: Statistics Market Research Consulting, 2025.
- [97] Miller R, Waterman J, Turconi F, et al. Test and analysis methodology for validating crashworthiness of AW609 tiltrotor[C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 78th Annual Forum and Technology Display. Fort Worth, US: The Vertical Flight Society, 2022: 1-9.
- [98] Meszaros J. United aircraft launches China's first 6-ton tiltrotor[J/OL]. Fairfax: Vertical Flight Society News, 2025-04-12. <https://vtol.org/news>.
- [99] Belardo M, Beretta J, Marano A D, et al. On the preliminary structural design strategy of the wing of the next-generation civil tiltrotor technology demonstrator[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2021, 22(3): 613-624.
- [100] 伊卫林, 崔志伟, 郑霆锴. 旋翼/涡轴发动机动力涡轮联合变转速对性能影响研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(9): 20220077.
Yi Weilin, Cui Zhiwei, Zheng Tingkai. Effect investigation of combined variable speed of rotor/turboshaft engine power turbine on the performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(9): 20220077. (in Chinese)
- [101] 伏宇, 刘昭威, 郑天慧, 等. 航空燃气涡轮-电混合动力系统关键技术分析[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 73-83.

- Fu Yu, Liu Zhaowei, Zheng Tianhui, et al. Turbo-electric hybrid aero propulsion system key technologies analysis[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(3): 73-83. (in Chinese)
- [102] 中国航空发动机集团. 航发通航动力科技(上海)有限公司揭牌并发布通航动力中长期需求测算数据 [EB/OL]. (2026-03-31)[2026-06-20]. <https://m.weibo.cn/detail/5282539747151192>. Aero Engine Corporation of China. Inauguration of AE General Aviation Power Tech(Shanghai) Co. Ltd and release of medium-long term demand forecast data for general aviation power [EB/OL]. (2026-03-31) [2026-06-20]. <https://m.weibo.cn/detail/5282539747151192>. (in Chinese)
- [103] 梅庆, 金海良, 申余兵. 航空油电混合动力系统设计及试验[J]. 航空动力, 2023(1): 39-42.
Mei Qing, Jin Hailiang, Shen Yubing. Design and integrated verification of fuel-electric hybrid power system[J]. Aerospace Power, 2023(1): 39-42. (in Chinese)
- [104] 孙聪, 赵群力, 孙侠生, 等. 航空工程科技 2050 年发展战略研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(11): 1-13.
Sun Cong, Zhao Qunli, Sun Xiasheng, et al. Research on the development strategy of aeronautical engineering science and technology in 2050[J]. Aeronautical Science and Technology, 2025, 36(11): 1-13. (in Chinese)
- [105] Airbus Helicopters. PioneerLab: pioneering hybrid technology for the future of vertical flight[R]. Toulouse, France: Airbus Helicopters, 2023.
- [106] General Electric Aviation. Medium-scale hybrid electric propulsion system integration with CT7 engine[R]. Cincinnati, US: GE Aviation, 2022.
- [107] Safran. Arrano engine certification with 50% SAF capability[R]. Toulouse, France: Safran Helicopter Engines, 2019.
- [108] Pratt & Whitney. GTF engine family 50% SAF certification[R]. East Hartford, US: Pratt & Whitney, 2021.
- [109] Rolls-Royce. 100% Sustainable aviation fuel test program completion for Trent engine series[R]. London: Rolls-Royce, 2023.
- [110] Airbus. ZEROe hydrogen aircraft concept[R]. Toulouse, France: Airbus, 2020.
- [111] Safran. HYPERION hydrogen propulsion system[R]. Paris: Safran, 2023.
- [112] Rolls-Royce. 100% hydrogen combustion chamber testing for aviation engines [R]. London: Rolls-Royce, 2023.
- [113] 梁振欣, 时瑞军, 李定乃, 等. 氢燃料适应性改进涡桨发动机总体性能仿真模型匹配研究[J]. 推进技术, 2026, 47(2): 202411066.
Liang Zhenxin, Shi Ruijun, Li Dingnai, et al. Matching of performance simulation model of turboprop engine with adaptation improvement of hydrogen fuel[J]. Journal of Propulsion Technology, 2026, 47(2): 202411066. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)