DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.03.028

300兆瓦级F级重型燃气轮机自主研制与实践

束国刚[1,2*]，吴宏[2]，吕煊[2]，马耀飞[2]，张岚[2]，章旋[2]，阙晓斌[2]，刘伟[2]，吴大佐[2]，辛国柏[2]

（1. 国家电力投资集团有限公司，北京 100029；2. 中国联合重型燃气轮机技术有限公司，北京 100016）

摘要：重型燃气轮机是能源动力领域的核心装备，近年来实施的国家科技重大专项“重型燃气轮机工程”，启动了包括300兆瓦级F级重型燃气轮机产品研制在内的技术攻关工作，在构建自主可控的重型燃气轮机研制体系、推动能源装备制造业转型升级方面发挥了重大推动作用。本文围绕300兆瓦级F级重型燃气轮机的自主研制，系统阐述了包括正向研发体系建设、关键技术攻关、整机试验验证在内的完整过程。基于正向研发理念，构建了覆盖设计、材料、制造、试验全流程的自主研制体系，攻克了压气机高负荷多级匹配、燃烧室宽工况低排放稳定燃烧、透平高温高效冷却等近100项关键核心技术。自主开发了UGTC47等先进高温合金材料，建立了重型燃气轮机材料数据库，实现大尺寸透平叶片、高强韧轮盘锻件的国产化批量制造。在控制与保护系统方面，构建了纵深防御系统架构，实现一键启停全自动控制，运用基于数字孪生的仿真辅助设计及软硬件在环全范围验证技术保障了燃气轮机运行的安全性与可靠性。开展了300兆瓦级F级重型燃气轮机首台样机的整机试验和运行，实现点火、升速、并网试验一次成功，完成性能考核、1000 h初步可靠性验证等关键试验。试验结果表明，燃气轮机的功率、效率、排放指标全面达到设计要求，轴系振动平稳，压气机、燃烧室、透平工作状态稳定，部件之间匹配良好，部件及整机集成设计方案与关键技术可行。通过300兆瓦级F级重型燃气轮机产品研制，构建了重型燃气轮机自主设计、制造、试验的技术能力体系，为后续更高技术等级产品研发、产业高质量发展打下了坚实基础。

关键词：重型燃气轮机；自主研制；压气机；燃烧室；透平；整机试验；高温合金；控制系统

中图分类号：TK47　　**文献标识码：**A

Independent Development of China’s 300-Megawatt F-Class Heavy-Duty Gas Turbine

Shu Guogang[1,2*], Wu Hong[2], Lyu Xuan[2], Ma Yaofei[2], Zhang Lan[2], Zhang Xuan[2], Que Xiaobin[2], Liu Wei[2], Wu Dazuo[2], Xin Guobai[2]

(1. State Power Investment Corporation Limited, Beijing 100029, China; 2. China United Gas Turbine Technology Co., Ltd., Beijing 100016, China)

Abstract: Heavy-duty gas turbines are core equipment in the energy and power sector. In recent years, China has launched technological research and development (R&D) efforts including the development of the 300-megawatt F-class heavy-duty gas turbine, which has played a major driving role in establishing an independent R&D system of heavy-duty gas turbines and promoting the transformation and upgrading of the energy equipment manufacturing industry. This study focuses on the independent R&D of 300-megawatt F-class heavy-duty gas turbine and elaborates on the forward-engineering system construction, core technological breakthroughs, and engine test verification of the gas turbine. Based on the forward-engineering philosophy, an R&D system covering the entire process of design, materials, manufacturing, and testing is established. Approximately 100 critical technologies are overcome, including high-load multi-stage

收稿日期：2026-03-12；**修回日期：**2026-04-08

通讯作者：*束国刚，国家电力投资集团有限公司教授级高级工程师，研究方向为金属材料、先进动力装备；E-mail: shuguogang@spic.com.cn

资助项目：国家科技重大专项“重型燃气轮机工程”

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

matching for compressors, stable combustion with low emissions across a wide operating range for combustors, and high-temperature efficient cooling for turbines. Advanced superalloys such as UGTC47 are developed, and a material database for heavy-duty gas turbines is created, enabling the domestic batch production of large-scale turbine blades and high-strength, high-toughness rotor disc forgings. In terms of the control and protection system, a defense-in-depth system architecture is established, enabling one-click start and stop for fully automated control. The innovative use of digital-twin-based simulation-assisted design and the full-scope hardware/software-in-the-loop verification technology effectively ensures the safety and reliability of gas turbine operation. The prototype engine test and operation of the 300-megawatt F-class heavy-duty gas turbine are carried out, achieving successful ignition, speed-up, and grid-connection tests in a single attempt, and completing key tests including performance assessment and 1 000-hour preliminary reliability verification. Core performance parameters, including power, efficiency, and emission, all comply with the design requirements. The shaft system is stable, the compressor, combustors, and turbines all operate steadily, and matching between components is excellent, validating the reliability of the design and the key technologies. Through the successful development of the 300-megawatt F-class heavy-duty gas turbine, a full-chain technical system for the independent design, manufacturing, and testing of heavy-duty gas turbines is initially established in China. This lays a solid foundation for the subsequent development of products with higher technological levels and the sustainable growth of the industry.

Keywords: heavy-duty gas turbine; independent development; compressor; combustor; turbine; engine test; superalloy; control system

一、前言

燃气轮机是航空、舰船、能源领域的核心动力装备，分为重型燃气轮机、航空发动机、轻型燃气轮机（或航改燃气轮机）。重型燃气轮机主要用于天然气发电，是事关能源安全和国家综合竞争力的重点装备。目前，在天然气发电占发电装机总量的比例方面，全球范围内为25%，而我国仅为4.3%；我国电力系统中新能源占比快速增加，供需双侧运行特性更加依赖气候等外部条件，系统平衡调节难度越来越大；天然气发电具有调节灵活、排放低、效率高等优势，能够提高电力系统灵活性、促进新能源消纳，在推进“双碳”目标过程中将发挥更加重要的作用[1-2]。同时，人工智能技术发展迅速，算力需求爆发式增长，数据中心耗电量急剧上升，新增电力缺口明显；燃气轮机电站凭借建设周期短、部署灵活的特性，成为填补相应电力缺口的现实选择，重型燃气轮机将发挥关键作用。

一般认为，重型燃气轮机集成了气动、燃烧、传热、控制、冶金材料、机械制造、电子等学科的高精尖技术，具有产业链长、覆盖面广、附加值高的特征，成为代表国家科技水平的标志性产品、装备制造业“皇冠上的明珠”。重型燃气轮机的设计和制造难度极大，核心技术长期被发达国家垄断，国际主流的重型燃气轮机厂商包括美国通用电气公司、德国西门子股份公司、日本三菱重工业集团、意大利安萨尔多公司。重型燃气轮机按照透平进口温度分为E级、F级、H/J级等：F级为在役产品的主流水平，透平进口温度为1400 ℃等级，简单循环效率>38%，联合循环效率>58%；H/J级代表着当前的最高发展水平，透平进口温度>1600 ℃，简单循环效率达到44%，联合循环效率达到64%[3]。

我国重型燃气轮机发展起步于20世纪50年代，经历了跟踪研仿、停滞不前、自主研发等阶段。2002年起，我国实施重型燃气轮机“打捆招标”，通过“以市场换技术”方式初步形成了重型燃气轮机冷端部件制造及总装能力，但未能建立自主可控的产业技术体系，也没有研制出具有自主知识产权的重型燃气轮机产品。近年来，我国加大对燃气轮机核心技术自主研发的支持力度，相关企业、科研院所、高校执行了一系列核心技术研发和产品研制项目，取得了初步成果[4-5]。“十五”时期，在原863计划支持下开展了R0110（110 MW）重型燃气轮机的设计与研制[6]，基于R0110开展了升级版AGT-110研制并于2023年通过产品验证鉴定。东方电气集团东方汽轮机有限公司自2009年开始自主研制G50重型燃气轮机（F级50 MW），于2020年完成满负荷稳定试验运行[7]。

2016年，国家开始实施国家科技重大专项“重型燃气轮机工程”，目标是突破重型燃气轮机“卡脖子”关键核心技术，研制具有自主知识产权的核心产品，建立我国自主可控的产业技术体系，推动我国能源装备制造业转型升级。中国联合重型燃气轮机技术有限公司（简称中国重燃）负责相关工程的具体实施，牵头承担了300兆瓦级F级重型燃气轮机的自主研制工作；联合产业链单位开展协同攻关，“边建队伍、边建体系、边开展技术攻关”，构建了端到端的重型燃气轮机产品结构化开发流程，完成一系列关键零部件和部件试制、零部件级和部件/系统级试验验证，攻克了整机及部件设计、控

制系统设计、高温合金材料研制、热端部件制造等关键核心技术近100项，形成了涵盖设计流程、设计准则、设计工具、工艺规范、材料规范、内控技术标准、试验规范、试验程序等要素的自主正向研制体系。300兆瓦级F级重型燃气轮机在完成概念设计、初步设计、详细设计等工作的基础上于2024年首台样机总装下线，随后启动首台样机的整机试验与运行，实现点火、升速、全速空载、并网试验一次成功，顺利达到满负荷；完成性能考核试验、1000 h初步可靠性试验等关键试验，实现功率、效率、排放指标全面达标，试验数据与设计预测结果吻合度良好，验证了整机设计方案与关键技术体系。

在300兆瓦级F级重型燃气轮机的自主研制过程中，全面探索了基于正向设计理念的自主设计、制造、安装、试验的新发展之路。本文系统梳理300兆瓦级F级重型燃气轮机研制方面的主要研究进展与成果，重点分析研制体系、技术特征、关键技术突破情况。相关内容源自工程实践，兼有理论与技术研究价值，可为我国各类高端装备自主研制提供基础参考。

二、重型燃气轮机自主正向研制体系

（一）正向研发逻辑

传统的跟踪研仿模式无法追溯设计源头，难以掌握核心技术，出现问题后不易定位原因，导致研制陷入困境、产品受制于人。正向研发是以用户需求、市场应用为导向的研发模式，通过设计和验证确定产品的功能、结构、各部件研制方案，最终形成可批量生产、稳定运行的商业化装备。正向研发离不开大量和持续的投入，国际主流的重型燃气轮机厂商均拥有数十年的设计经验和试验数据积累才逐步建立了正向研发的产品体系。中国重燃充分借鉴系统工程“V”模型（从需求到验证）理论、集成产品开发理念，把握重大装备研制高度复杂的基本特征，采用正向研发模式推进300兆瓦级F级重型燃气轮机的自主研制工作；面向产品研制的全生命周期，以顶层架构为引领、试验验证为基础，构建了支撑产品正向研发的自主研制体系。

在顶层架构方面，通过自上而下地分解需求、逐层设计，自下而上地逐层验证、系统集成，攻克了重型燃气轮机总体架构技术，完成各专业设计的底层要素建设。从无到有地构建了我国重大装备领域首个端到端的自主产品结构化开发流程，从基本原理、功能需求出发形成了具有自主知识产权的产品架构和技术方案；自主完成概念设计、初步设计、详细设计、部件制造、样机总装、整机安装、试验验证等研制全流程，实现从用户需求到产品验证的大迭代，设计与制造、安装、试验持续交互的小迭代。

在试验验证方面，通过分阶段、分层级试验验证来逐步释放技术风险，提升燃气轮机的可靠性。从整机产品研制需求出发，梳理部件、系统级、整机试验的分阶段验证需求。在各设计阶段开展部件、系统级试验，对设计方案、关键技术、设计体系进行充分验证，为整机制造和试验提供坚实支撑。在整机试验阶段，按照安全优先、综合考虑测点寿命的约束条件，统筹制定试验计划；采用半物理试验、全物理试验、“试验试刀件”等方式，逐步逼近以有效释放风险。

（二）自主研制体系

把握“重型燃气轮机工程”提出的“研制自主知识产权燃气轮机产品、形成自主创新的技术研发和产业体系”任务目标，以系统工程理论为指导，遵循需求逐级向下分解、验证逐级向上开展的“V”型逻辑，通过关键技术攻关、试验试制任务验证，建立了支撑产品正向研发设计的自主研制体系（见图1），相关体系支撑突破了国产重型燃气轮机无自主设计研发能力的瓶颈制约，为技术可持续迭代、产品序列化发展打牢了基础。

1. 设计体系

建立了端到端的重型燃气轮机产品结构化开发

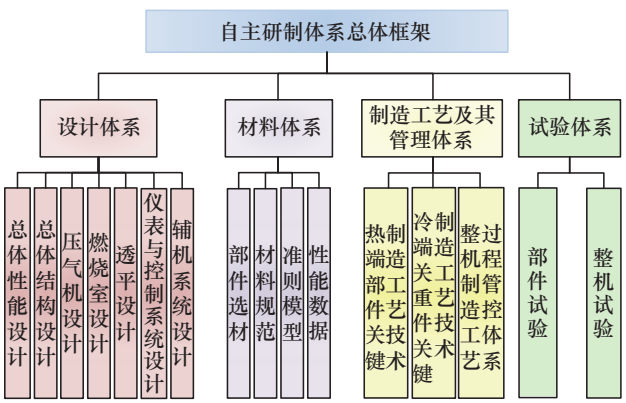

图1　自主研制体系总体框架

流程，涵盖230项母任务、3000余项子任务，86项设计流程、128项设计准则、128项设计工具、325项内控技术标准、1406项技术秘密。申请专利977件，获得授权专利580件。面向项目科研需求建设了综合设计能力，包括150万亿次高性能计算中心、数字化集成设计平台、设计制造协同平台。完全自主设计了300兆瓦级F级重型燃气轮机的压气机、燃烧室、透平三大核心部件，形成了自有的设计风格与技术路线，达到国际主流技术水平。

2. 材料体系

搭建了支撑重型燃气轮机自主设计、与国内工业体系紧密结合的材料体系。建立了国内首个重型燃气轮机用材料数据库，完成35种材料、17项性能的全面补充测试，入库10 422个测试数据，形成了54项材料规范、2300余项材料性能数据。研制了高强度、高韧性、大尺寸压气机轮盘和端轴，开发了关键热端部件用UGTC39、UGTC47、UGTC48等先进高温合金材料，筑牢了燃气轮机自主发展的材料基础能力。

3. 制造工艺体系

基于正向设计理念，形成了300兆瓦级F级重型燃气轮机制造技术要求，包括3116份图纸、110份材料和工艺技术规范。在国内首次贯通了包括热端部件、控制系统在内的重型燃气轮机整机制造全链条，初步建设了自主可控的重型燃气轮机产业链。

4. 试验体系

充分利用国内现有资源开展试验验证，带动了燃气轮机试验能力的整体性提升。建设了包括压气机试验台、透平叶片冷却效果考核试验台、多级透平综合性能试验台等部件试验台，300兆瓦级F级重型燃气轮机联合循环整机试验电站在内的试验设施，建立了21项试验规范。通过压气机、燃烧室、透平等关键零部件级/部件级试验以及整机试验验证，在国内首次形成了重型燃气轮机整机级、系统/部件级、零部件级试验规范、标准、数据库，构建了支撑正向研制的试验验证体系。

三、300兆瓦级F级重型燃气轮机的总体设计与关键技术

（一）总体设计方案

300兆瓦级F级重型燃气轮机采用单转子、双支点、冷端输出、轴向排气结构（见图2），气缸为分段式水平对开结构，转子为中心拉杆结构。压气机为15级轴流式，进口导叶（IGV）和前3级静叶可调。燃烧室采用环管型结构，设置14个燃烧筒，采用多喷嘴设计及分级策略。透平为4级轴流式、近等中径流道，前3级叶片、前2级护环采用空气冷却，前2级叶片和护环喷有热障涂层，第1、2级静叶为单片，第3、4级静叶为双联，第4级动叶带冠。透平通过压气机引气冷却，冷气经由外部气路、内部气路进入透平轮盘和叶片。

300兆瓦级F级重型燃气轮机的设计指标对标国际主流的F级燃气轮机水平，也考虑了一定的后续升级潜力。经独立第三方组织开展的简单循环性能考核试验、联合循环性能考核试验验证，整机性能满足项目考核指标要求。① 基本负荷性能达到国外主流的F级水平，部分负荷性能优异，更加适应国内电力市场需求，具备基本负荷、尖峰负荷、长寿命等运行模式。② 具有灵活启停和宽范围稳定运行能力。IGV和前3级静叶可调，空气量调节范围大，启动稳定性高。可在任意低负荷稳定运行，深度调峰能力强。在联合循环模式下，可以根据汽机匹配需求来调节燃气轮机的排气温度。③ 实现高效、低排放、稳定燃烧，具备宽负荷调节能力。采用多喷嘴贫预混分级调控燃烧策略，使NO_x排放在全负荷范围内达标。具有动态燃烧监测能力，确保燃烧室宽负荷全范围内稳定运行。④ 可维修性好，可在不起吊转子的情况下更换所有动叶，燃烧室中心喷嘴可灵活拆卸（便于检查热通道部件），透平一静、一动可通过拆卸燃烧室实现不开缸更换检修。

（二）二次空气系统设计

空气系统控制封严与冷却空气流量分配，对燃

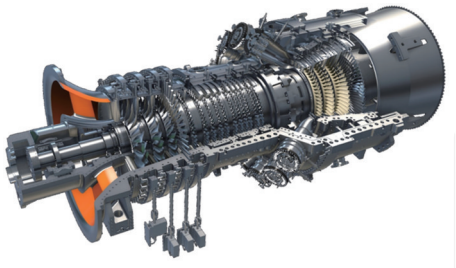

图2　300兆瓦级F级重型燃气轮机三维剖视图

气轮机性能具有重要影响[8-9]。燃气轮机转子高速旋转，在金属壁面感受到的温度是相对总温，设计预旋系统可以有效降低供应给转子的冷却气相对总温，进而降低透平动叶的平均温度，提高透平叶片寿命或降低冷却气使用量，支撑整机效率提升[10-11]。为此，300兆瓦级F级重型燃气轮机的透平动叶冷却气供应采用了预旋系统设计。对于预旋系统中的长斜孔，流量特性与标准直通孔存在差异，不能直接沿用直通孔的流量系数关联式；叶栅型预旋喷嘴的流量系数则取决于叶栅型线设计。在300兆瓦级F级重型燃气轮机的研制过程中，针对高温降效率预旋系统设计、预旋系统流量控制等开展了技术攻关并进行了试验验证，获得了不同喷嘴方案温降效率随压比的变化关系，掌握了长斜孔、叶栅型预旋喷嘴设计技术以及相应的流量控制技术。

封严流量对于重型燃气轮机的安全性、经济性有着重要影响：封严流量过少，主流燃气会通过轮缘进入盘腔内，造成轮盘过热，影响运行安全；封严流量过多，较多的冷却气未经主流做功，影响整机性能。国内外针对直通篦齿、直通篦齿–蜂窝、交错篦齿–蜂窝等封严结构开展了大量的单元试验并经过整机试验验证[12-14]，也广泛应用篦齿–螺旋齿密封[15]、刷式密封[16-17]，但国内在重型燃气轮机产品级的篦齿–螺旋齿密封特性方面研究较少。根据300兆瓦级F级重型燃气轮机的封严位置特点，设计了篦齿–蜂窝、篦齿–螺旋齿等组合式高效封严结构。通过一维计算结果与试验验证相结合的方式，研究了自主设计方案的篦齿–蜂窝、篦齿–螺旋齿流量特性以及封严间隙对流量特性的影响规律。重点分析了扭矩盘–压气机排气扩压器位置的篦齿–螺旋齿组合密封特性，掌握了多股密封流路在变间隙调节下的流量分配技术，确保扭矩盘流路具有足够冷却气量以带走沿程风阻热、避免扭矩盘超温。

（三）整机热分析及间隙设计

整机热分析是支持重型燃气轮机整机集成设计的关键核心技术。构建燃气轮机整机模型，计算燃气轮机按照给定控制规律运行时各个部件在气动、热力、机械等载荷作用以及约束条件下的稳态/瞬态温度分布、结构变形及相对位置变化[18-20]，支撑整机间隙设计、部件强度分析与寿命评估。

早期的燃气轮机功率小、压比与透平入口温度均不高，整机集成设计依赖既有经验，在样机制造后通过试验来迭代并完善方案。随着透平入口温度与压比的提升，多学科单独求解并通过接口数据迭代的设计方式成为整机集成设计的新趋势。然而，根据国外研究观点[21]，这种方式设计周期长、迭代效率低，难以推广应用。为此，发展流、热、结构等学科耦合求解方法成为现代重型燃气轮机设计的必然需求。

在300兆瓦级F级重型燃气轮机研制过程中采用了流、热、结构工程耦合求解的技术路线[20-22]。掌握了单元理论验证、工具集成开发、工作流程梳理、准则要素确定等主要内容，建立了可自动耦合迭代的整机热分析换热经验关联公式计算方法，形成了支撑整机稳态/瞬态热分析的设计体系，完成整机热分析的工程应用及验证。试验结果表明，整机运行过程中转子、气缸温度计算值与测量值的偏差均控制在工程可接受范围内，验证了自主整机热分析方法的有效性。攻克了重型燃气轮机整机集成设计中的单项关键核心技术，直接提升了重型燃气轮机整机热分析自主设计能力。

为了满足燃气轮机整机范围内用户关注位置金属温度的在线快速预测需求，分别基于整机热分析模型仿真数据集、试验数据集，采用神经网络方法构建了燃气轮机金属温度快速预测模型[23]。将该模型应用于首台样机试验并验证了适用性。对于在线模式，快速预测模型为燃气轮机运行提供了实时预测输出，同时实现缺失传感器位置的温度补偿功能，增强了燃气轮机运行状态的在线监测能力。对于离线模式，快速预测模型支持燃气轮机设计阶段的仿真迭代，以提升研发效率与优化效果。在首台样机的整机试验过程中，燃气轮机各运行阶段典型位置处的温度预测结果与试验测试结果趋势一致且偏差较小。

间隙影响燃气轮机整机运行的性能与安全性，间隙设计是燃气轮机整机集成设计中的关键技术之一。转静间隙包括压气机/透平动叶与缸体之间的径向间隙、压气机静叶与转子之间的径向间隙、透平内环与转子之间的径向间隙、压气机/透平内环与转子之间的轴向间隙等。为了确保转静间隙设计的可靠性和安全性，综合考虑机组总体架构及尺寸链的传递路径，基于整机热分析模型的整机瞬态变

形结果并叠加其他影响因素进行综合计算（再预留一定的安全裕度），确定了机组安全运行的最小冷态间隙。在整机试验中，在压气机、透平动叶叶尖安装了间隙测点，用于监测燃气轮机升速、升负荷、稳定运行、停机过程中的间隙变化。试验结果表明，瞬态过程间隙变化趋势与预测结果保持一致，稳态间隙与设计值吻合良好，验证了间隙设计方法的有效性。

（四）中心拉杆转子设计

300兆瓦级F级重型燃气轮机转子采用了中心拉杆结构，是国内自主设计和制造的最大尺寸重型燃机中心拉杆转子。通过中心拉杆和拉杆螺母将前轴头、压气机轮盘、扭矩盘、迷你盘、透平轮盘、后轴头等拉紧，再利用轮盘端面上的赫氏齿实现定心和传扭作用。中心拉杆转子具有赫氏齿非连续性接触界面的结构特点，转子动力学建模与其他结构形式转子相比具有特殊性。为了确保转子动力学设计的可靠性和安全性，在中国重燃自主设计体系上建立了考虑赫氏齿刚度简化的转子动力学模型，据此开展了轴系的临界转速、不平衡响应等的计算和评估。通过转子静频试验、厂内动平衡试验、整机试验对转子动力学设计方法进行校验。整机试验过程中转子运行稳定可靠，各项振动指标满足国际标准，显示出转子动力学设计的有效性，攻克了大跨距及非连续界面的转子动力学分析、拉杆预紧力设计难题。

四、300兆瓦级F级重型燃气轮机的压气机自主研制

（一）设计体系

重型燃气轮机压气机级数多、负荷高、叶片薄，需要同时满足气动、强度、结构方面的设计要求；多学科设计影响因素多、目标相互制约、耦合性强、迭代频率高。兼顾性能指标与设计迭代效率成为300兆瓦级F级重型燃气轮机的压气机方案设计与试验验证目标，建立了压气机设计流程、准则和工具。① 在设计流程方面，建立了覆盖气动、强度、结构的压气机耦合迭代设计流程（见图3），规范并指导压气机设计，避免压气机方案设计后期的过多调整。② 建立了涵盖压气机设计各环节的设计准则，保证压气机设计方案的可靠性。③ 在设计工具方面，开发了定制叶型参数化造型程序、多级匹配设计平台、叶片调频设计平台、多排可调静叶控制规律优化工具；结合高精度通流和S1分析、计算流体力学（CFD）、有限元（FEM）等工具，搭建了多级轴流压气机的气动、强度、结构耦合设计平台，开展了压气机多学科高效设计迭代；通过部件和整机试验，对设计工具的精度和有效性进行了充分验证。

（二）设计方案与关键技术

1. 气动设计

重型燃气轮机压气机压比高、级数多，通流设计需要建立与叶型适配的损失模型[24-25]，也应统筹考虑前后级负荷分配方式、平衡效率与裕度、兼顾设计工况与非设计工况。重型燃气轮机尺寸大且在地面工作，流动雷诺数较高，叶片内的转捩位置前移至前缘附近，难以维持大范围层流的附面层；高的效率需求进一步对叶型提出宽工况范围内低损失的要求[26-27]。为了保证重型燃气轮机的顺利启停和稳定运行，压气机需要采用适当的多排可调静叶及放气防喘控制规律[28-29]。国际主流的重型燃气轮机厂商一般依据以往运行经验、机组试验调试获得控制规律，增大了试验测试风险和周期。

在300兆瓦级F级重型燃气轮机的压气机研制过程中，针对压气机多级匹配、损失控制、启动易发生喘振等难点，发展了多级压气机高反力度通流匹配设计技术[30]。掌握了反力度对压气机效率和裕

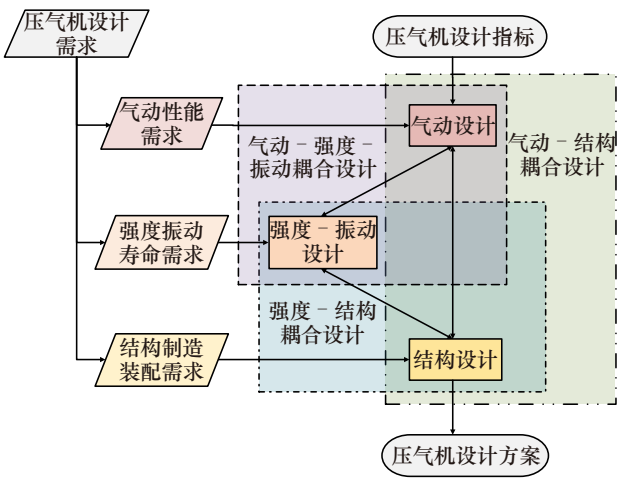

图3　压气机耦合迭代设计流程

度的影响规律，提出了高反力度通流气动布局；革新了基于通流工具预估调整量、应用三维CFD验证的压气机匹配设计方法，将匹配调整迭代周期缩短90%。开发了适应高雷诺数工况的前加载叶型设计方法、可快速准确预测性能的代理模型[31]，有效指导了宽工况范围内低损失叶型设计。攻克了多排可调静叶及放气防喘控制设计技术，提出了基于扩散因子的多排可调静叶和放气防喘联合调节优化方法，与优化控制规律配合运用，将低转速（30%~70%设计转速）裕度提升10%以上，为整机启停升速一次成功提供了关键支撑。

300兆瓦级F级重型燃气轮机的压气机共有15级，其中可调IGV和前3排静叶为可调结构。开展通流气动布局的顶层优化设计，提高压气机的气动性能。采用前面级近等中径、后面级等内径的流道形式：前者有利于加功，后者有利于保证叶片高度、降低叶片端区损失。采用高反力度通流气动布局，在保持高效率的同时提高失速裕度。精心调节气动负荷的轴向、径向分布，使压气机流量系数、负荷系数、反力度等参数取值满足通流设计准则要求。设置多排可调静叶结构，增大流量调节范围，提高部分负荷工况的工作效率。应用自主开发的定制叶型设计技术，仅选用少量的设计参数即可定制叶型，使叶型具有损失小、攻角范围大的特性；采用端弯技术来控制端区流动损失，叶型峰值马赫数位置、形状因子等参数符合叶型设计准则。

2. 结构完整性设计

重型燃气轮机压气机级数多，前面级与后面级的工作环境差异大，需采用多种类型的叶根榫槽结构。同时，叶根尺寸大、承受离心载荷高、需兼顾工艺和维护要求，导致叶根设计迭代周期长。叶片接触状态复杂、关键模态振型多且难以准确预测，因而振动或颤振导致的高周疲劳失效风险增加。为了避免共振或颤振，需对每一级叶片开展调频优化并兼顾气动性能，因气动和调频设计的反复迭代导致振动设计周期较长[32-34]。

在300兆瓦级F级重型燃气轮机的压气机研制过程中，针对动叶结构、强度以及加工、装配工艺方面的挑战，揭示了叶根关键尺寸对强度与寿命的影响规律，应用高载荷动叶–叶根的结构/强度一体化设计技术将设计周期缩减30%以上。针对叶片接触状态复杂、关键模态振型多且难以准确预测、调频优化周期长等设计挑战，建立了系统完整的高准确度叶片振动分析规范，发展了叶片高准确度振动分析技术，通过试验验证了关键模态和频率计算具有较高的准确度，如压气机第1级动叶的一阶弦向振型频率计算值与试验值偏差<1%。攻克了叶片高效调频优化设计技术，开发了集成叶片冷热态变换、三维几何建模、振动敏感性分析、叶片调频等功能的优化平台，相较传统的迭代设计大幅缩短了调频周期。调频后的关键振型模态共振避开率高，设计转速共振风险低。试验结果显示，叶片振动响应较低，叶片具有足够的高周疲劳寿命。

完成压气机叶片的结构完整性设计，包括静强度及低周疲劳寿命分析、振动及颤振分析、高周疲劳寿命分析等。针对榫头、榫槽进行了一维平均应力分析、三维FEM分析，各级动叶叶身和榫头、榫槽考核截面的安全系数均满足设计准则。针对榫槽进行了三维FEM分析、低周疲劳寿命分析，对应叶片的低周疲劳寿命满足设计准则。针对各排动/静叶进行了振动分析、调频设计及颤振分析，各级动/静叶的共振避开率、折合频率等均满足设计准则。针对各排动/静叶进行了高周疲劳寿命分析，各排动/静叶的安全系数满足设计准则。

（三）部件试验验证

完成压气机叶栅试验、压气机部件试验（含压气机进口多级、前半段、后半段、全级缩尺）、动叶动频特性试验等零部件试验，验证了多级轴流压气机高反力度通流匹配设计技术、适应高雷诺数工况的前加载叶型设计技术、多排可调静叶联调与级间及放气防喘设计技术、高载荷动叶叶根结构强度一体化设计技术、叶片高准确度振动分析技术、叶片高效调频优化设计技术等关键技术，考核了相应设计方案及设计工具，完善了压气机设计体系。

针对300兆瓦级F级重型燃气轮机的压气机典型级叶型，开展了叶栅试验验证，测量了叶型攻角特性曲线、叶表等熵马赫数分布等，叶栅试验结果与设计结果吻合较好，验证了叶型设计工具和设计方法的有效性。

分阶段开展了压气机部件试验方案的验证迭代，最后通过压气机全级缩尺试验固化设计方案。测量了设计点、部分转速特性、100%转速各IGV角度特性等，试验结果与计算结果吻合良好，表明

压气机设计点流量、压比、效率、裕度满足设计指标要求。设计工具分析结果与试验结果吻合较好（见图4），充分验证了压气机设计方案的可靠性，为后续的首台样机整机试验打下了坚实基础。

针对300兆瓦级F级重型燃气轮机的压气机典型级动叶的结构完整性设计方案，开展了动叶动频特性试验。选取了压气机不同叶根形式的动叶，按照1∶1尺寸设计试验件并进行了叶片–轮盘旋转试验，获得了两种叶根形式动叶的动频试验数据（见图5），验证了动频计算方法以及两种叶根形式对应锁紧结构的可制造性、可装配性、可靠性。

五、300兆瓦级F级重型燃气轮机的燃烧室自主研制

燃烧室是重型燃气轮机的核心热端部件，设计水平直接决定机组效率、污染物排放、运行可靠性。燃烧过程涉及复杂的流动、传热、传质、化学反应过程，燃烧室需要在高温、高压、高流速的极端工况下长期稳定运行，因而燃烧室设计成为典型的多学科耦合课题。长期以来，重型燃气轮机燃烧室设计面临宽工况低污染燃烧组织、热声振荡控制、高温部件寿命保障、“设计–试验–验证”协同等方面的挑战，在燃烧稳定性、排放控制、结构寿命、工程可实现性之间存在多目标约束关系，对自主正向设计能力提出了极高要求。为此，围绕燃烧室研制需求，建立了覆盖设计、分析、制造、验证全过程的设计体系，通过多层级试验验证与整机试验支撑了关键技术的工程化应用。

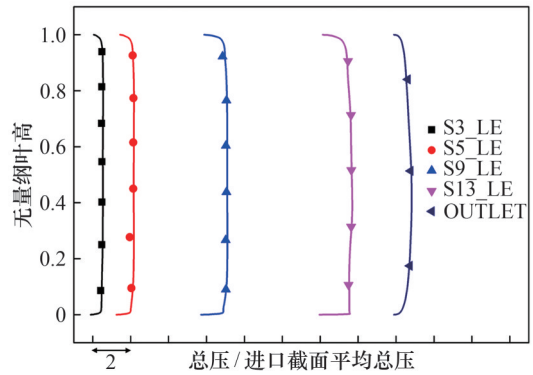

图4　压气机全级缩尺试验级间流场（总压径向分布）

注：实线为CFD结果；单点为试验结果。

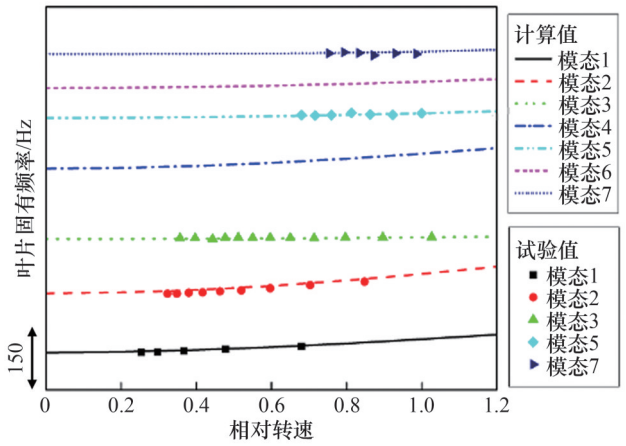

图5　压气机动叶动频试验结果

（一）设计体系

针对燃烧室设计中存在多学科耦合、受到多目标约束的特点，建立了覆盖燃烧室研发全过程的设计体系，形成了覆盖气动、结构、冷却、结构完整性及热声设计的完整技术链条，包含零部件级、部件级、整机级的三级试验体系，实现设计、分析、试验验证的系统化协同。① 制定了燃烧室全周期研发流程（见图6），形成了气动设计、冷却设计、低/高周疲劳分析、蠕变分析、三维热声设计、流量试验及部件试验等11项子流程，支撑了设计与试验的协同迭代。② 建立了旋流器设计、多级低污染排放设计、热声设计及制造规范等23项设计准则，覆盖设计、制造、试验全过程。③ 自主开发了热声振荡预测网络模型、声学抑制器设计方法、区域反应温

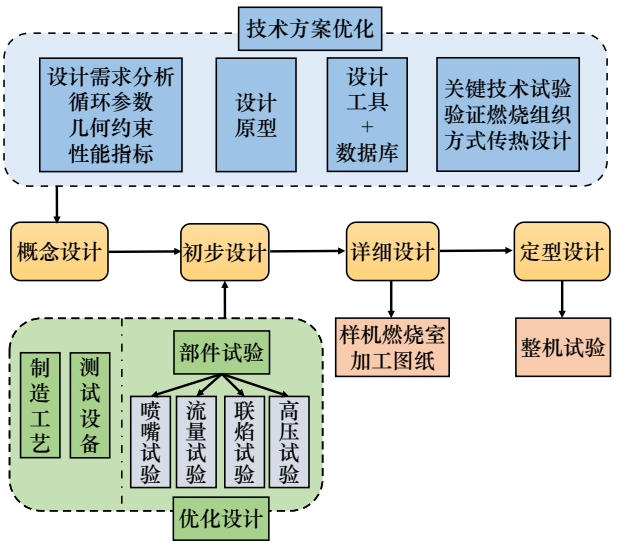

图6　燃烧室全周期研发设计流程

度与污染物预估工具，结合CFD计算与寿命评估分析开展快速设计迭代。

（二）设计方案与关键技术

1. 气动设计

燃烧室气动设计的核心难点是在有限空间内实现燃料与空气的高效掺混、稳定回流稳焰、宽工况低污染燃烧。对于多喷嘴结构，各喷嘴之间存在复杂的流场耦合作用，不同运行工况下的流动组织差异显著，容易引发火焰稳定性下降、污染物排放恶化。流场结构的不合理也可能诱发局部高温及热声耦合问题，对燃烧稳定性、部件寿命产生不利影响。在保证燃烧稳定的前提下实现低排放与宽工况运行是燃烧室气动设计的关键技术挑战。

300兆瓦级F级重型燃气轮机的燃烧室采用了多喷嘴贫预混燃烧技术，每个喷嘴具有独立且可靠的稳焰能力。这种设计使各喷嘴不仅能够在点火启动、转速攀升、低负荷运行等阶段独立工作以维持燃烧稳定，而且可以调控喷嘴之间的旋向角度、优化火焰之间的相互作用，在高负荷工况下实现高效协同燃烧。经整机试验验证，在机组负荷>50%时，NO_x、CO排放与相应的部件试验吻合度良好。

在流场构建方面，燃烧室采用“双重强化掺混+三维流场调控”方案，通过喷嘴入口的高精度空气整流装置、旋流叶片多截面控制造型设计，实现燃料与空气的高效掺混（见图7）。燃烧室在每个喷嘴出口处均形成稳定可控的高温回流稳焰区，通过卷吸高温燃气与新鲜预混气掺混，不仅有效稳定了火焰传播，而且促进了燃烧反应的充分进行。得益于预混通道的轮廓设计、壁面边界层优化，流体在通道内始终保持附着流动状态，预混段全域无流动分离，为燃烧室的稳定、安全、长周期运行提供了保障。

2. 结构设计

燃烧室结构设计面临的挑战是在高温、高压、强振动等复杂运行环境下满足结构强度、热变形控制、长寿命运行要求。热端部件在长期运行过程中受到热载荷、机械载荷的共同作用，容易产生热应力集中与疲劳损伤。燃烧室结构既要保证运行可靠性，又需兼顾制造可行性、后期维护便利性，对总体布局、结构连接方式提出了较高要求。在结构可靠性、寿命设计、工程可实现性之间取得平衡，是燃烧室结构设计的关键技术难点。

300兆瓦级F级重型燃气轮机的燃烧室采用了环管型布局设计，沿燃压缸周向均匀布置14个独立燃烧室单元。每套燃烧室单元（见图8）的头部端盖集成了燃料喷射系统，配置1支中心喷嘴、6支外围喷嘴。外围喷嘴采用分组反向旋流设计，通过端盖内部双通道燃料供给系统开展分级供气，在总体结构布局上保证燃烧组织与结构布置的协调性。在关键部件选材方面，喷嘴端部、火焰筒、过渡段等核心部件均采用成熟的镍基高温合金材料，具有优异的高温强度、抗氧化性能、抗蠕变能力。在结构连接设计方面，火焰筒通过弹性密封圈与头部、过渡段形成滑动支撑结构，既能有效缓解高温环境下部件的热膨胀应力，又可对运行过程中的机械振动产生阻尼作用，从而提高结构可靠性。在燃烧室的整体结构设计中充分融入模块化理念，一体化考量热载荷分析、制造工艺性、检修便捷性，通过头部组件、火焰筒等关键部件的快速拆装与更换来大幅缩短检修周期、有效降低全生命周期维护成本。

3. 冷却设计

燃烧室冷却设计的核心挑战是在有限的冷却空气资源条件下实现热端部件的高效降温，同时避免过量的冷却空气对燃烧效率与排放性能造成不利影响。燃烧室内部温度场分布复杂，不同区域热负荷

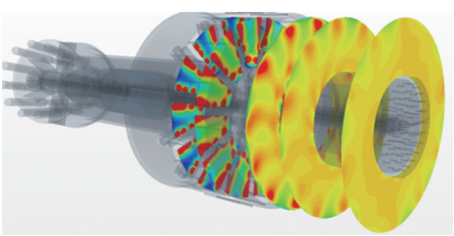

图7　燃料与空气的高效掺混

图8　单筒燃烧室结构

差异显著，局部高温易引发结构失效；多种冷却方式之间存在耦合关系。确保冷却效率、气动性能、结构寿命之间的协调统一，是燃烧室冷却设计的关键技术难点。

300兆瓦级F级重型燃气轮机的燃烧室冷却设计借鉴了主流F级、G/H级燃气轮机的前沿技术，综合应用气膜冷却、冲击冷却、肋片扰流冷却、内部通道冷却等构建了多维度复合冷却方案。在关键部件冷却策略方面，罩帽采用了气膜全覆盖冷却设计，在热表面形成连续气膜保护层以有效阻隔高温燃气热流；喷嘴端部设置了专用清吹空气通道以定向输送冷却气流，避免高温燃气直接冲刷，保障喷嘴结构安全与性能稳定。火焰筒冷却系统以强化冷侧换热为重点，应用了肋片扰流冷却技术增加换热面积和湍流强度，提升冷却效率；在火焰筒尾部设置了内部冷却通道，针对性解决高负荷工况下的局部高温问题。过渡段冷却采用了特殊布局的发散冷却技术，在降低冷却空气用量的同时，实现过渡段壁温的均匀分布，满足严苛的冷却设计指标。此外，罩帽、火焰筒、过渡段的热侧表面均喷涂高性能热障涂层，进一步提升部件的耐高温性能并延长使用寿命。

在研制过程中，依托严格的试验验证体系确保设计方案的可靠性。建设了模拟工况试验台，开展了火焰筒冷却性能验证试验，量化火焰筒冷却单元的换热效率、流阻特性等关键性能指标，为设计优化提供数据支撑。在燃烧室全尺寸试验中，布置了多点热电偶实时监测罩帽、喷嘴、火焰筒、过渡段的温度场分布，验证了冷却系统在真实工况下的综合性能。通过试验、仿真的迭代优化，实现冷却方案与燃烧系统的高度适配，保障了燃气轮机在高温、高压复杂工况下的连续稳定运行。

4. 结构完整性设计

结构完整性设计是确保燃烧室长期安全运行的关键环节，面临燃烧室运行过程中受到热载荷、压力载荷、机械振动等因素耦合作用的直接挑战。高温环境下材料性能衰减明显，局部结构易出现应力集中和疲劳损伤，若设计不合理可能导致低周疲劳裂纹萌生或高周振动失效。燃烧噪声、整机振动的综合作用对结构动态响应的影响不容忽视，对结构安全裕度提出了更高要求。在复杂载荷条件下实现结构寿命可预测、运行安全可控，是结构完整性设计的核心技术难点。

采用多物理场仿真分析手段，深入评估了300兆瓦级F级重型燃气轮机的热载荷、振动特性、材料应力水平，确保每个组件均能在极端运行工况下保持稳定。在分析方法上，以FEM分析为基础，结合低周疲劳裂纹萌生及扩展理论，重点评估了燃烧室的应力集中和高温部位。应用模态分析方法确定了零件的固有频率，通过调整造型与支撑结构的方式避开危险频率并减小振动响应幅值，降低发生高周疲劳问题的风险。

5. 热声设计

非定常热释放与声场的强耦合容易形成正反馈循环，进而诱发破坏性振荡，这种热声不稳定性是燃烧室设计面临的核心挑战。设计难点主要体现在：宽频预测难，简单机理模型不足以准确捕捉低频至高频区间的模态特性；模型准确性差，变工况条件下火焰动力学响应的敏感性导致声源项输入失真；动态管控难，工况变化引起的频率漂移会导致静态监测与被动阻尼装置的抑制作用失效。

与清华大学研究团队合作开发了低阶热声预测程序，在设计阶段对潜在的热声风险进行了快速预测，为燃烧室结构及燃烧参数优化提供了依据；建立了预测燃烧室中低频热声特性的低阶热声网络，评估了部件试验、整机试验各工况的热声稳定性状态。在模型优化方面，结合全尺寸常压热声试验结果，将热声网络中的n-τ火焰传递函数模型修正为由试验获得的真实火焰传递函数模型，进一步提高了热声网络模型的计算精确性，明确了整机升速、升负荷过程中低频热声振荡的抑制及调整方向。针对潜在的高频热声振荡，采用系统识别方法提取了不同工况CFD模拟的火焰场特性并导入声学FEM模型，获得了各工况的声模态模拟结果。结合试验测试的监测结果，准确识别出试验中的高频脉动对应的模态。

在机理预测、模态识别的基础上，构建了热声振荡的软硬协同全域闭环管控方案，攻克了燃气轮机变工况运行时热声振荡频率发生漂移而致的监测与抑制失效问题。在软件监测端，开发了基于动态频带自适应调整的信号分析系统，以识别动态安全运行窗口、准确捕捉振荡特征；在硬件抑制端，研制了基于浮动变结构颈部的谐振腔结构，支持快速调整抑制频率。

（三）部件试验验证

燃烧室部件试验验证是支撑设计方案工程化落地的关键环节，在部件级阶段充分覆盖燃烧室运行工况，全面验证气动性能、燃烧稳定性、排放特性、热声行为是面临的技术难点。燃烧室涉及多物理场耦合作用，单一试验通常难以全面反映实际运行状态，因而需要建立多层级、多维度的试验验证体系（从单喷嘴性能测验验证到全尺寸工况模拟的完整验证链条），确保设计分析、工程验证的有效衔接。根据部件试验结果指导整机运行策略调整，也是试验体系设计的重要目标。

燃烧室开发遵循“设计–试验–修改设计–再试验”的迭代优化流程，需要依据试验验证体系的结果持续改进设计方案，在各项性能指标达到设计要求的基础上完成产品开发。依据燃烧室正向设计流程、需求验证标准，在研发设计阶段开展了10项重大核心试验，涵盖单喷嘴性能测试、单筒全温全压试验等关键方面，累计试验时间达2400 h。成功获取了首台样机14个装机燃烧室的核心性能数据，掌握了流量、点火、压损、金属壁温、出口温度、燃烧效率、污染物排放、燃烧热声脉动等特性。在点火与升速性能验证方面，界定了燃烧室点火窗口，验证了升速过程中的燃烧效率、温升范围以及燃烧模式的稳定性，确保机组启动阶段的可靠运行。在负荷调节特性验证方面，明确了升负荷过程中各燃料分级条件下的热声脉动窗口，为优化燃烧控制策略提供了数据支撑。

相较国际主流的重型燃气轮机厂商，中国重燃在300兆瓦级F级重型燃气轮机的燃烧室零部件/部件级试验验证方面投入了更多资源，通过更加丰富的测试科目提升了设计方案的可靠性与稳定性。例如，针对燃烧室结构设计优化需求，开展了5轮燃烧室全尺寸性能试验，充分验证了燃烧室在全负荷工况下的运行窗口，确定了最优升负荷路径，确保机组在不同功率输出下均能稳定运行。在部分负荷、基本负荷工况下，污染物排放特性、热声特性、燃烧室筒间一致性等均满足设计要求。在试验过程中，采集了燃烧室压损、点火与熄火特性、排放指标等关键数据，验证了C2+燃料掺混燃烧性能（掺混比例最高为8%），为整机试验提供了详实的技术支撑。

六、300兆瓦级F级重型燃气轮机的透平自主研制

（一）设计体系

透平叶片是重型燃气轮机的核心热端部件，方案设计时面临高温、高应力条件下长寿命、高可靠性的严峻挑战。透平叶片设计是多专业耦合迭代过程，涉及气动、二次空气系统、传热、强度与振动、材料、精密制造等。在多个性能目标制约、多学科强耦合约束的条件下开展高温透平叶片设计和寿命评估，需立足先进高效的多学科协同设计流程以缩短研发周期。

针对高温透平部件的设计特点，基于系统工程思想构建了多学科协同设计体系（见图9），支撑了300兆瓦级F级重型燃气轮机的透平部件设计与开发。建立了包括透平气动设计、冷却设计、结构设计、结构完整性分析在内且可耦合迭代的研发设计流程，指导透平部件的多学科快速设计迭代。建立了气动设计、冷却设计、结构设计、叶片动力学分析、寿命预测等设计准则，涵盖透平设计的各个环节和主要阶段。自主开发了透平叶型设计与分析一体化程序、透平一维管网冷却分析程序、准三维冷却设计与分析程序、透平叶片振动分析程序、叶片寿命预测工具等，结合商业软件开展的CFD、FEM分析等，支撑透平叶片的设计迭代。通过单元级、零件级、部件级、整机级试验，对设计工具的精度和有效性进行了充分验证。

（二）设计方案与关键技术

1. 气动设计

透平气动设计的难点在于，透平运行工况逼近各学科极限，需在满足多学科耦合设计约束的同时保持宽工况范围的高效运行能力。在通流布局设计

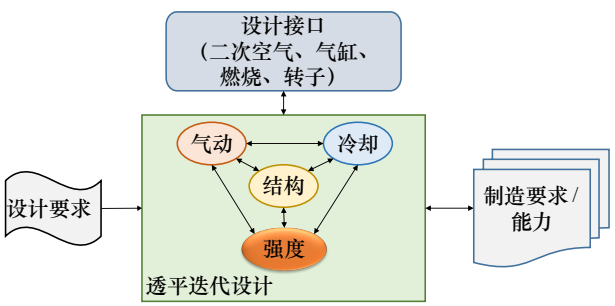

图9　透平部件设计迭代和约束

方面，发展了高载荷高效率气冷透平通流设计技术，充分考虑了轮盘强度、转子跨距、轴向力等整体结构约束；合理分配焓降以降低下游主流燃气温度，兼顾叶片冷却设计与叶片寿命；合理选取弦长、叶高、气动参数，降低了透平叶片的共振或颤振风险。在叶型设计方面，提出了低损失叶型设计技术，在充分评估冷却气流与主流之间复杂掺混以及叶尖泄漏、端区流动等复杂二次流动现象的基础上，合理设计了气动造型和载荷分布，有效组织了高载荷条件下叶片通道内流动，确保较低的流动损失、良好的攻角适应性。

300兆瓦级F级重型燃气轮机的透平采用4级设计方案，满足了透平气动、冷却、结构完整性、跨部件约束等设计需求。第1级采用高载荷设计以使主流燃气获得快速温降，其他级的载荷系数、流量系数设计处于高效率区。第3级动叶采用低展弦比设计，降低自由长叶片的颤振风险。末两级长叶片采用可控涡设计，改善端区反动度。应用气动载荷优化、基于网格定位的冷气源项方法，评估了冷气掺混损失，获得了大攻角范围内低损失的气冷透平叶型。叶型设计以后加载叶型为主，降低黏性边界层损失，兼顾较高的攻角范围，在部分负荷工况下仍保持较高的性能。三维CFD计算得到的透平叶中流动结果表明，各级透平流动状态良好，未发生流动分离（见图10）。

2. 结构设计

透平结构设计需要协调气动、冷却、结构完整性、材料、制造工艺等，以在材料、温度、应力、寿命、气动效率之间寻找最佳平衡点并确保具有可制造性。300兆瓦级F级重型燃气轮机的前3级动叶采用自由叶片设计，第4级动叶采用叶冠–蜂窝密封结构；透平动叶由枞树型叶根齿型连接，提升轮盘–叶片系统承载能力。第1、2级静叶采用单片结构，第3、4级静叶采用双联结构。考虑运行与维护的便利性并降低维护成本，透平第1级动静叶、第4级动叶采用不揭缸可拆装的设计方案。

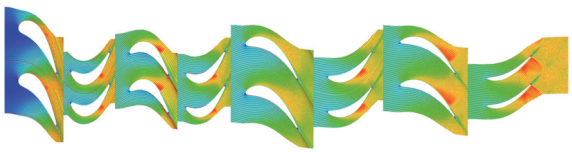

图10　透平叶中的流动状态（马赫数云图）

在透平叶片材料方面，第1、2级动叶采用定向凝固柱晶合金UGTC47，在高温下仍具有优异的抗疲劳和抗蠕变性能，其余动静部件采用镍基等轴晶材料UGTC48/K452。在涂层方面，前两级静、动叶和护环采用先进的热障涂层材料进行热防护；后两级静、动叶采用抗氧化涂层设计，防止叶片高温氧化。

3. 冷却设计

透平冷却设计的难点是在燃气初温超过1400 ℃的极端热负荷条件下，通过精密的冷却布局来确保部件的长寿命与运行安全。需要攻克高效冷却单元的开发难题，解决气膜、冲击、肋化通道等冷却方式在狭小空间内的复合布局与相互干涉问题。为了提高叶片的冷却效率（冷效），应精确协调叶片内外部的温度场并兼顾气动掺混损失与热应力。冷却方案的验证具有挑战性，需要进行从中温中压到全温全压的一系列试验，模拟真实工况下的换热特性，确保热通道部件的温度分布满足设计要求。

针对重型燃气轮机高温长寿命要求下的高效冷却设计、温度场准确评估等设计挑战，突破了高效冷却单元和透平叶片高效冷却设计技术，实现高热负荷透平热通道部件的有效降温。高效冷却单元和透平叶片冷却性能分析是透平冷却设计基础，开发并验证了典型高效冷却单元流动与换热分析基本模型，建立了透平叶片高效冷却单元流阻、换热试验关联式，形成了冷却设计分析工具，为F级重型燃气轮机透平冷却设计提供了基础条件，填补了国内技术空白。

透平冷却设计的目标是合理组织冷却工质流动与换热，有效降低叶片和护环金属基体的温度（控制在高温合金材料许用范围），保证长期可靠运行。300兆瓦级F级重型燃气轮机的透平前3级叶片、前两级护环采用空气冷却，第4级叶片、后两级护环未设置主动冷却；前两级叶片、护环热侧表面喷涂高性能热障涂层。采用了主流F级、G/H级燃气轮机的先进透平冷却方式，包括圆形／成型孔气膜冷却、冲击冷却、带肋通道冷却、柱肋冷却等[35-38]。开展了气膜／冲击／带肋通道／柱肋等冷却单元试验、气膜孔空间布局试验、动叶内部冷却结构验证试验、中温中压冷效试验、全温全压冷效试验等验证工作，开发了内外部换热高效冷却单元，通过试验拟合并验证了各种冷却结构在重型燃气轮机全工

况范围内的高精度关联式，确保了叶片 / 护环温度及其分布满足设计要求。

4. 结构完整性设计

透平叶片工作在高温、高转速条件下，精准评估叶片在多物理场强非线性条件下的寿命与振动特性，保障 5×10^4~10×10^4 h 工作寿命和可靠性设计要求，是透平结构完整性分析的难点[39]。

在 300 兆瓦级 F 级重型燃气轮机研制过程中，针对等轴 / 定向高温透平叶片的多损伤模式、长寿命设计挑战以及强非线性条件下的振动特性评估难题，开展了透平部件的结构完整性分析[40]和必要的试验验证工作。在寿命评估方面，考虑等轴 / 定向高温合金的各向异性本构特性，建立了融合静强度、低周疲劳、裂纹扩展、蠕变、氧化及涂层失效等损伤机制的寿命预测和评估模型，解决了多轴应力状态下损伤模式的交互作用难题。各级透平动叶均采用干摩擦阻尼减振的结构形式（自由叶片为缘板阻尼器结构、末级叶片为带冠整圈叶片方案），攻克了干摩擦阻尼结构（如缘板阻尼器、带冠整圈叶片）带来的强非线性振动响应分析难题，准确预测了叶盘的固有频率、模态阻尼、共振响应，规避了高周疲劳失效风险。通过设计迭代、零部件级试验的闭环验证，确保了透平部件的长寿命和高可靠性并能承受热、力、振动等极端载荷的联合作用。

通过 300 兆瓦级 F 级重型燃气轮机研制，建立了高温长寿命透平叶片结构完整性的评估体系。根据高温透平部件的寿命设计要求和损伤容限理念，建立了考虑叶片各向异性本构、多轴应力状态、多种损伤机制的寿命评估方法及准则，解决了高温透平叶片的寿命预测难题，实现燃气轮机高温部件的长寿命和高可靠性。开发了叶盘 FEM 模型减缩算法、非线性动力学算法等，创建了完整的透平非线性叶盘系统振动响应仿真系统，系统评估了透平叶片的固有频率、模态阻尼、振动响应、高周疲劳寿命。通过设计迭代、结构完整性评估、试验验证，透平部件的寿命和动力学特性满足整机设计要求。

（三）部件试验验证

实施了透平正向设计和需求验证，支撑了透平设计方案和整机试验。开展了透平级气动性能试验、透平冷却单元级试验与冷效考核试验、透平动频试验等 12 项零部件级 / 部件级试验，验证了高载荷高效率透平气动设计、高效率透平叶片冷却单元、透平叶片结构强度分析与寿命预测、透平叶片冷却性能分析等关键技术。

在与上游燃烧室联合试验的真实边界条件下，开展了透平第 1 级静叶的全温全压冷效试验，验证了冷却效果并获得冷效特性数据。对比某截面叶片表面金属温度试验数据与计算结果可见，设计方案的有效性得到验证（见图 11）。开展了透平叶片的动频试验（见图 12），验证了叶片旋转状态下的动力学特性。

七、300 兆瓦级 F 级重型燃气轮机的材料自主研制

（一）先进燃气轮机材料数据库

设计是“灵魂”，材料是基础，工艺是关键，测试是保证。材料数据作为“基础中的基础”[41]，是燃气轮机产品设计、寿命预测、安全评估的核心支撑，更是燃气轮机系列化发展的重要保障。面对

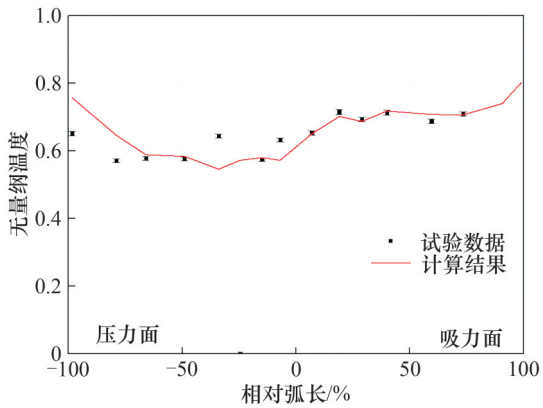

图 11　某截面温度试验数据与计算结果对比

图 12　透平某级叶片的动频试验产品

300兆瓦级F级重型燃气轮机的正向研制需求，针对性开展了技术攻关，构建了先进燃气轮机材料数据库，填补了国内领域空白。

此前，国内尚未建立支撑重型燃气轮机自主设计并与国家工业体系适配的先进材料体系，材料数据存在“少、缺、散”的问题，如高温热端部件及关重件的高温长时性能数据匮乏，数据标准不统一、检测标准体系不健全、质量评估与处理方法缺乏系统性。为此，主要从三个方面着手推进研究和建设。① 完善材料体系与标准，构建材料优选及淘汰机制，制定入库标准，形成先进材料体系框架，补充高温蠕变、持久等关键数据以完善数据体系。② 建设智能化平台，开发数据采集、存储、分析等功能模块，可存储海量材料数据；集成多种机器学习算法，优化与主流分析软件的接口功能，确保数据抽取时间<200 ms、操作响应时间<100 ms。③ 突破数据处理核心技术，提出适用于小样本科技文献的材料命名实体识别方法、启发式多关系抽取算法，提升数据提取的准确率与召回率。现已建成国内重型燃气轮机领域首个自主设计的材料数据库平台，入库189项备选材料（含3项自主研发牌号）、32 305条设计用材料数据、24 852条测试数据、1117项标准规范；实现材料数据的“存–管–用”闭环，具备数据可视化、处理分析等基本功能，应用于300兆瓦级F级重型燃气轮机的设计、生产与试验，并在其他燃气轮机设计和制造单位进行推广应用。

（二）透平叶片用高温合金

透平叶片作为重型燃气轮机的核心部件，需在1300 ℃以上高温、高速旋转工况下保持强度，工作环境严苛[42-44]；依赖复杂的冷却结构设计，以铸造为主，对高温合金的综合力学性能、组织稳定性、铸造加工性提出了极高要求。国内在透平叶片用高温合金研发方面取得一定的进展[45]，但仍有一些不足。中国重燃在材料设计、冶炼、铸造技术方面积极创新，实现大尺寸透平叶片的自主化研制（见图13）。

在材料设计方面，国内构建了具有知识产权的高温合金体系，涵盖等轴晶、定向晶、单晶系列合金，但高温长时稳定性与纯净度不足，大尺寸叶片适用的合金牌号匮乏。中国重燃坚持正向研发，应用机器学习、材料集成计算方法并结合自主材料数据库，建立了高温合金成分优化体系，研制了定向晶高温合金UGTC47、等轴晶高温合金UGTC48[46-48]。UGTC47性能优异，室温抗拉强度>750 MPa，900 ℃条件下50 000 h持久强度>135 MPa（国外文献报道同类合金为115 MPa），室温下应变幅值为±0.89%的低周疲劳次数为2580次，各项指标达到或优于国际水平，满足大尺寸叶片的长寿命设计需求。

在冶炼技术方面，中国重燃联合产业链企业突破了超高纯冶炼集成控制技术，掌握了冶炼过程中元素迁移与挥发机理，解决了高温合金成分波动对缺陷控制和性能影响的难题。优化冶炼工艺，实现吨级母合金批量稳定生产，有效降低了铸造缺陷形成倾向，将合金纯净度提升到国际先进水平。UGTC47的O、N、S杂质元素总和<5 ppm（国外同类合金实测值<11 ppm，ppm表示百万分之一），45种痕量元素总和<23 ppm（国外同类合金实测值<36 ppm），为叶片冶金质量提升筑牢了基础。

在铸造技术方面，中国重燃提出了以陶瓷型芯为核心的铸造体系新理念，破解了大尺寸复杂空心叶片制造难题。联合陶芯、铸造等产业链企业研发了新型硅基陶瓷型芯，实现型芯性能的精准调控；建立了多孔陶瓷型壳/型芯高温连续损伤力学模型，厘清了应力应变间隙匹配关系；揭示了精密铸造全流程尺寸误差传递机理，确保工艺闭环，攻克了型芯制备、变形预测、全流程尺寸控制等关键技术。在凝固控制技术方面，提出了改进射线追踪方法、糊状区形态数学判据，研发了随形固相颗粒增强冷却和射流水冷铜盘装备，支持精准控制变截面温度梯度。

通过一系列技术创新，实现大尺寸超复杂空心透平叶片的批量化生产，摆脱了关键部件的进口依赖，丰富了国内高温合金牌号。相关产品应用于国内外多型燃气轮机，支撑了300兆瓦级F级重型燃

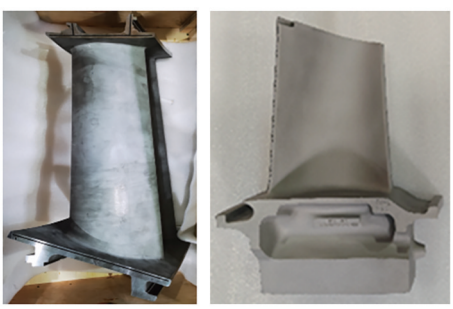

图13　国产重型燃气轮机透平叶片

气轮机首台样机的制造与试验。

（三）高强韧大尺寸轮盘锻件

转子轮盘作为燃气轮机的核心承载部件，受到离心力、疲劳交变载荷、宽温度区间考验，对强度、韧性、低周疲劳性能、超声波探伤提出严苛要求。大型转子锻件用钢合金成分复杂，具有强烈的组织遗传效应，在热加工过程中易出现晶粒粗大现象，也因杂质元素较多而易产生回火脆性问题[49]。此前，国产轮盘锻件存在的核心难题有：钢种Mn含量偏高，需要叠加控制J因子、X因子，双因子控制对超纯净冶炼提出挑战；NiCrMoV钢存在强烈的组织遗传效应与回火脆性，难以兼顾高强度和高韧性。

中国重燃联合产业链企业，针对300兆瓦级F级重型燃气轮机的应用需求，以“超纯、高强、高韧”为目标形成了重型燃机大尺寸轮盘锻件制造全流程核心技术体系。① 在冶炼环节，优化“电炉粗炼→钢包精炼→真空碳脱氧除气→真空浇注”全流程工艺，结合优质原材料精选、钢包底吹氩搅拌等措施，精准控制有害微量元素，实现Mn含量≤0.02%、Si含量≤0.04%、P含量≤0.003%、S含量≤0.001%的超低杂质控制，J因子稳定在2~3、X因子稳定在4~5.2，达到超纯净钢的国际主流水平。② 在锻造环节，通过数值模拟优化变形量、温度、火次等参数，明确了工艺对动态再结晶、晶粒度、开裂倾向的影响规律，实现“零缺陷”锻造；协调控制锻件形状、应力和组织，为材料性能提升确立基础条件。③ 在热处理环节，突破了组织遗传难题，开发了“正火+回火”预备热处理工艺，有效细化晶粒；优化了调质热处理参数，结合淬火冷却方式调控，实现屈服强度≥960 MPa、伸长率≥14%、脆性断面率为50%时断裂形貌转变温度≤−80 ℃等高性能指标；屈服强度波动≤70 MPa，兼顾了高强韧性与性能均匀性。

完成端轴类、轮盘类锻件毛坯试制，经超声波探伤、理化检测、解剖验证，主要性能指标达到国际主流水平，形成了完整的规范、工艺、质保体系。完成2台（套）（超过60件）转子锻件的批量化生产，应用于300兆瓦级F级重型燃气轮机，为重型燃气轮机自主化发展排除了关键障碍，同步带动了合金冶炼、加工设备、检测技术等产业链上下游的协同发展。

八、300兆瓦级F级重型燃气轮机的控制与保护系统自主研制

重型燃气轮机是强耦合、非线性的动态系统，服役工况复杂且变化迅速。控制与保护系统发挥着“大脑和神经中枢”的关键作用，设计质量直接影响整机的运行效能及安全可靠性，需要精准快速地协调并匹配各系统部件的动静态特性，使整机在窄幅有效区间内安全稳定运行。国内曾经对在役燃气轮机控制系统进行了国产化探索，但缺乏正向设计体系支撑，未能掌握燃气轮机运行控制策略、功能安全设计等核心技术。中国重燃构建了“以需求驱动为牵引、分析评估为支撑、仿真验证为核心”的燃气轮机控制与保护系统自主正向研制体系，攻克了一系列关键技术，形成了配套的规范、方法和工具，开辟了控制与保护系统仿真辅助设计新技术路径，保障了300兆瓦级F级重型燃气轮机的运行安全性与可靠性。

（一）纵深防御的技术架构

重型燃气轮机运行面临复杂的潜在风险及各类外部干扰风险，与机组高安全运行要求相适应的系统架构开发难度较大。针对性设计了功能分散、多样化配置的全链路全场景纵深防御技术架构（见图14）。① 监测端采用重要状态参数冗余配置、交叉验证机制，提供高置信度的决策数据。② 控制与保护段选用技术独立、安全等级不同的异构双平台架构，提供关键设备的冗余配置；控制平台采用模块化设计，分布式部署全流程监视与控制任务，降

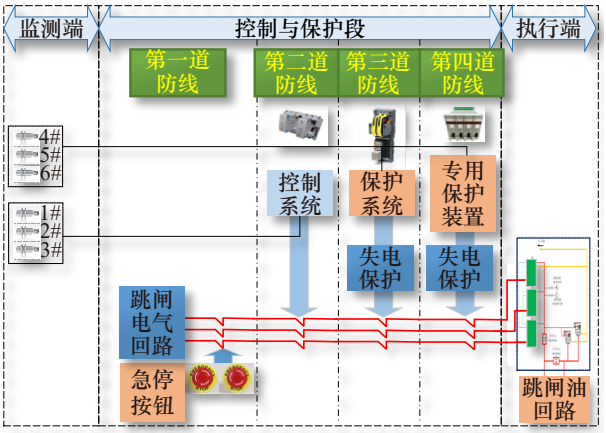

图14　机组超速保护纵深防御技术架构图

低单点失效风险；保护平台配置硬电路专用保护装置，确保极端工况下的快速可靠响应；两类平台通过专用网络交互且物理隔离，避免共模失效。③ 执行端配置多样化操控与冗余跳闸链路，保证指令精准执行与故障快速保护。

（二）一键启停全自动控制

1. 控制策略与功能安全设计

建立了整机运行控制策略与功能安全设计方法及技术标准体系，解决了控制策略、功能安全设计与整机特性匹配度不佳、缺乏系统性的难题。提出了燃气轮机运行控制需求技术框架，自主设计并形成了覆盖燃气轮机运行全工况、全系统、全范围的运行控制策略；通过设计、仿真、试验验证的迭代，使运行控制策略精准贴合燃气轮机的工作特性，兼顾安全可靠、快速灵活、经济环保等综合性能[50]。

按照“识别潜在危险 – 定性分析 – 定量分析 – 制定保护措施 – 实施和验证”的流程，从环境安全、人员安全、功能安全、设备可靠性等维度全面评估了燃气轮机运行异常与故障风险，平衡安全、可靠与经济性目标，明确分级保护需求[51]，摸清了燃气轮机运行安全红线并逐步逼近运行极限。

2. 控制与保护系统仿真辅助设计

开发了控制与保护系统设计仿真一体化平台，解决了高精度实时仿真建模、燃气轮机控制保护专用算法、逻辑与仿真模型计算同步等难题。研发了燃气轮机模型及专用算法组件库，支持控制与保护逻辑的模块化、规范化设计以及动态仿真验证，便捷高效地开展逻辑设计、集成、修改、验证。完成300兆瓦级F级重型燃气轮机的控制与保护逻辑设计仿真协同研发，形成了先进的一键启停全自动控制方案、完整且规范的逻辑设计图，为控制与保护系统试制及开发提供了清晰可靠的技术指引。

（三）基于数字孪生的全范围验证

控制与保护系统集成涉及仪表、设备、软硬件、逻辑等层面的交叉适配，缺陷类型繁杂且关联性隐蔽，易引发连锁和系统性故障而造成破坏性后果。当前主流的测试验证模式存在“重后期、轻前期”倾向，质量问题暴露滞后，加剧修复成本和不可控安全风险。为此，全面运用了基于数字孪生的验证技术，开展控制与保护系统递进式、全范围的测试验证，确保在研制前期即充分识别并修正错误、释放风险。

1. 高精度实时动态仿真建模

鉴于复杂的内部流场、燃烧、变工况特性，燃气轮机全范围建模具有强非线性以及多物理场、多尺度耦合特征，也面临高精度、高实时性“双高悖论”难题。为此，采用了多物理域建模、流体网络算法，突破了大规模系统动态建模瓶颈，形成了全范围仿真能力；基于集总参数、分段精细化方法，构建了整机集总参数模型[52]、燃烧室分区燃烧精细化代理模型，依托多模型协同调度引擎开展联合仿真，有效平衡了仿真精度和实时性要求；建立了主辅机故障模型，增强了复杂场景动态演化建模能力，为控制与保护系统多维度验证评估提供了坚实支撑。经测试，燃气轮机动态仿真模型中关键参数仿真的稳态误差<0.5%、动态误差<5%、计算步长<40 ms，满足控制与保护系统仿真验证要求。

2. 软硬件在环的虚拟仿真验证

构建了全维度测试验证体系、基于燃气轮机数字孪生的软硬件在环虚拟仿真验证环境，实施分级递进式测试并逐步逼近真实运行场景，开展了控制与保护系统全范围、全输入 / 输出、全工况下功能、性能、安全可靠性、可维护性的精准测试与深度验证。软件在环的验证环境集成了虚拟控制器、燃气轮机数字孪生模型，支持对控制与保护组态软件的正确性、完整性，与运行控制和功能安全要求的一致性进行全范围验证。在此基础上，进行了三级硬件在环验证：第1级采用真实控制器，将控制与保护系统的真实控制器和高精度燃气轮机实时动态仿真模型进行集成测试，验证了控制与保护系统软硬件集成的有效性；第2级采用真实控制器与真实输入 / 输出通道，通过硬通道实时开展验证系统的集成测试，验证了控制与保护系统完整通道的有效性；第3级采用真实控制系统与主要执行机构集成进行半物理试验，完成深度联动测试以及设备静态特性与动态特性的匹配性、控制参数的适用性等测试，确保控制与保护系统硬件配置及软硬件集成的精准适配。

通过基于数字孪生的全范围验证，有效识别并修正了近1000项偏差，最大程度地确保了控制与保护系统的研制质量。在300兆瓦级F级重型燃气轮

机的整机试验期间，保护系统动作准确率为100%，控制系统执行无偏差，未发生控制与保护系统造成的非计划跳机，控制参数无需调整即可满足控制性能要求。控制与保护系统不仅实现一键启停全自动控制的一次性成功，而且所有控制与保护变更项均一次性生效，为整机试验成功提供了有力的技术保障。

九、300兆瓦级F级重型燃气轮机的整机制造与装配

（一）整机制造

重型燃气轮机的多数零部件需要在高温、高转速、高气动负荷环境下长期稳定运行，极端运行环境催生了对零部件质量与性能的极致苛刻要求，不仅需要材料具有极高的耐热性、抗氧化性、抗腐蚀性，而且应保证极高的加工制造与装配精度。300兆瓦级F级重型燃气轮机的首台样机共有52 898个零部件，其中35 599个为国内首次设计和制造。我国通过前期的重型燃气轮机“打捆招标”，具备了冷端部件的加工制造能力，但对于透平叶片、燃烧室等热端部件的加工制造而言，产业链生产配套技术积累薄弱，需要进行工艺攻关。

透平叶片作为燃气轮机最核心的部件之一，制造难度极大。尤其是包含近100道工序的透平叶片精密铸造成为加工制造难度最大的环节，大到原材料的性能参数调整、小到环境温湿度控制，任一工序的细微波动都可能影响成品率。300兆瓦级F级重型燃气轮机的透平叶片具有大尺寸、内部结构复杂、长寿命（5×10^4~1×10^5 h）的特点，针对透平叶片制造和特种加工需求，在设计、制造、材料等专业充分迭代后建立了覆盖透平叶片制造全流程的工艺验收标准。中国重燃联合产业链企业攻克了重型燃气轮机透平叶片超长、超宽、超不均匀、超复杂等特征带来的一系列重大技术难题，掌握了变截面温度梯度的精准控制、长程凝固路径顺序调控技术，开发了“结构协同–复合矿化”的陶瓷型芯相变控制技术，建立了多孔陶瓷型壳/型芯的高温连续损伤力学模型，揭示了精密铸造全流程工序的关键尺寸误差传递机理，实现大尺寸超复杂空心透平叶片的批量化生产。

重型燃气轮机燃烧室的加工制造是另一个重大难题，主要体现在材料、结构、工艺的复合叠加：为了耐受远超金属熔点的极端高温，相关部件大量使用镍基高温合金等难加工材料，导致切削过程中刀具磨损剧烈；由火焰筒等组成的薄壁构件结构复杂、刚性极差，在焊接和加工过程中极易变形；燃烧室中布置了数量众多、用于冷却的冷却孔，需要严格控制孔径公差和角度偏差以保证冷却性能。中国重燃联合产业链企业，坚持设计、制造、材料一体化，攻克了喷嘴旋流器燃料孔精度与流量一致性控制、罩帽零件成型尺寸与组件装焊精度控制、过渡段复杂曲面成型与装焊精度控制、环形薄壁件焊接成型与机加精度控制、燃烧室热障涂层喷涂与发散孔保护等关键技术，支撑了燃烧室部件工艺定型，完成首台样机（包含备件）的20套单筒燃烧室制造。在燃烧筒制造的一致性控制方面，进行了精心处置：严格控制加工制造尺寸，对于影响流量的关键流动截面进行尺寸公差的有效控制；开展零部件级、组件级、单筒级流量试验，根据结果筛选组合成套，确保燃烧室满足整机装机的一致性要求。此外，设置了过渡段整环试装配、燃烧室整机环境模拟装配程序，保障了整机状态下的燃烧室顺利装配。

（二）整机装配

2024年2月，300兆瓦级F级重型燃气轮机首台样机总装下线（见图15），标志着我国大功率重型燃气轮机首次走完基于正向设计的制造全过程。中国重燃在正向设计的基础上，结合关键技术攻关成果、产业链的实际制造能力，经过多轮迭代形成了300兆瓦级F级重型燃气轮机制造技术标准。整机制造集成是对整机设计可装配性的全面验证，也是装配工艺迭代完善的重要过程。300兆瓦级F级重型燃气轮机的装配过程涉及59项主工艺道序、334项子工艺道序，全部实施环节超过1×10^4个；采用了多个专用工装来保证装配的可靠性，控制整机装配质量的关键步骤有转子的加工及叠装、静子叠装对中、整机间隙的测量及调整、整机清洁度控制等工序。

（三）整机现场安装

结合300兆瓦级F级重型燃气轮机的结构特点、整机测试需求，明确了安装技术标准，制定了安装

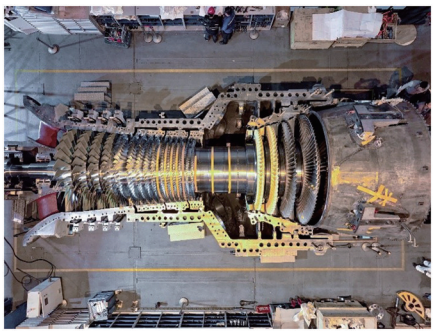

图15　300兆瓦级F级重型燃气轮机首台样机（总装合缸前状态）

手册，确定了安装工艺方案。采用了以轴系对中为主线，二次空气管路安装、整机支撑、辅机系统布置为支线的整体安装路线：在整机水平校准方面，采取了前后支撑均经由负荷分配、再由四点水平仪进行数据校准的方案，确保了燃气轮机的稳定；考虑到300兆瓦级F级重型燃气轮机与成熟机组存在一定的结构差异，采用了联轴器螺栓孔“镗孔+磨孔”的工艺方案，保证了加工质量及效率；鉴于300兆瓦级F级重型燃气轮机二次空气管路的复杂性，采用了空气管路“二次预制+现场焊接”的方案，保证了空气管路的清洁度。此外，构建了燃气轮机岛安装数字化仿真验证平台，针对安装手册、工艺方案等进行了前置验证与优化。在现场实施中，采取“安装+试验”思维，稳妥审慎推进安装过程，在验证设计方案可安装性的同时，将过程中发现的问题反馈至上游设计。以燃气轮机与发电机的轴系对中为例，通过正向开展尺寸链计算、精准分配前后支撑负荷等措施，使轴系振动特性达到优秀水平。在推进首台样机安装的同时，结合可拆装性设计要求，发布了16份典型拆装实施方案、62份标准作业包，开发了29项拆装专用工具，形成了完整的自主拆装能力。2024年6月，300兆瓦级F级重型燃气轮机首台样机的主机安装完成，各项安装指标均满足设计图纸、安装手册的技术要求。通过整机试验，检验了首台样机的安装质量。

（四）辅机系统集成

300兆瓦级F级重型燃气轮机包括了进气、排气、燃料、润滑油与顶轴油、控制油、罩壳及通风、盘车装置、压气机水洗、干燥、危险气体监测、火灾监测保护与消防、变频启动装置共12个辅机系统。各个辅机系统均为完全正向设计，根据主机需求、边界条件等确定了系统功能及参数，结合危险与可操作性分析、功能安全及可靠性设计，依次开展了概念设计、初步设计、详细设计、施工设计，完成出厂试验、现场调试、整机试验验证，确保各项功能指标满足设计要求。

十、300兆瓦级F级重型燃气轮机的整机试验验证

（一）整机试验体系

试验验证是贯通重型燃气轮机正向设计全流程的“最后一千米”，也是在产品集成状态真实运行条件下检验设计正确性、评估整机性能及可靠性的核心手段。此前，国内尚未建立大功率重型燃气轮机的整机试验台。针对性研究了测试技术和试验技术，构建了支撑大功率重型燃气轮机正向设计的整机测试验证体系，完成300兆瓦级F级重型燃气轮机首台样机的试验验证。

重型燃气轮机的整机试验台建设面临三大核心难题：电网扰动是高能量的快速动态过程，试验台需要具有记录和应对强能量瞬态扰动的能力；极端试验环境（高温、高压、高振动、强电磁、大应力）下大规模测点部署与长时稳定测量困难；整机试验是多物理场耦合的强瞬态过程，多源耦合工况下的单一维度报警模式难以满足安全管控需求。为此，中国重燃牵头开展了系统性的试验技术攻关。① 突破了高能量环境下的大规模测试技术，获得了22类参数、3076个测点、5200个数据通道、100 TB数据，实现长周期（>1000 h）连续采集、高效存储、跨系统协同。② 建立了“重型燃气轮机–发电机–电网”实时能量交互试验测试平台，应用了高灵敏度转速传感器（精度≤0.5 rpm）、高精度阀位（≤0.5%满量程）和压力（≤0.75%满量程）传感器，配置了毫秒级响应温度传感单元、千赫兹级高速采集装置，形成了功能完备的瞬态参数测量体系，完整获取了电网扰动工况下重型燃气轮机各部件的动态响应数据。③ 应用绝对安全理念构建了深度学习驱动的主动风险管控体系，开发了在线智能预测工具、多专业协同监视界面，支持多专业监控工位实施多维度、前瞻性的监控，构筑了多道智能安全屏障；创建了跨测试类型、跨部件的燃气轮机综合安

全准则，形成了从机理预测到安全管控的完整闭环，有效管控了重型燃气轮机高能量多物理场快速瞬态耦合的试验工况。

在中国重燃上海临港试验基地完成300兆瓦级F级重型燃气轮机的整机试验任务，累计并网运行时间>1000 h，实现点火、并网、168 h满负荷、730 h连续高负荷运行等工况的“一次成功”，有力支撑了国产重型燃气轮机走通正向研制全过程。不仅破解了极端环境下整机验证的技术瓶颈，而且构建了功能完整、高置信度的测试体系，为国产重型燃气轮机谱系化发展提供了坚实有效的试验能力。

（二）整机试验与运行效果

整机共布置压力、温度、应变片、间隙、叶尖计时法等测点超过3000个，满足整机及部件性能、转子振动、叶片振动、叶片金属温度、间隙等参数的测试验证需求。试验内容包括燃气轮机点火试验、升速及空负荷试验、并网试验、升负荷及满负荷试验、简单循环性能优化及考核试验、运行优化试验、168 h满负荷试运行、边界拓展及联合循环性能考核试验、730 h持续运行试验等。300兆瓦级F级重型燃气轮机的整机试验过程中，轴系振动平稳，压气机、燃烧室、透平工作状态稳定，部件之间匹配良好，各种监测参数符合设计预期；验证了转子、二次空气系统、压气机、燃烧室、透平设计方案，实现功率、效率、排放性能达标，确定了燃气轮机运行控制概念与功能安全保护项。

1. 总体

燃气轮机升速过程中各部件均工作在远离设计点的状态，存在转子振动、压气机喘振、叶片振动等方面的风险。考虑到前期国内尚无大功率重型燃气轮机的整机试验与运行经验，基于整机性能模型开展了多轮启停分析，确定了启动升速控制规律。300兆瓦级F级重型燃气轮机的整机试验与运行过程中升速试验一次成功，设计预估的共同工作线与试验结果吻合良好，轴系平稳通过一、二阶临界转速，压气机、燃烧室、透平工作稳定；获得了稳定的升速路径，验证了各部件匹配性及轴系稳定性，确定了燃气轮机升速控制规律。

燃气轮机升负荷过程存在转子振动、压气机喘振、燃烧室热声振荡、透平超温等方面的风险。为此，分阶段开展了升负荷试验，逐步释放各项风险，确保燃气轮机顺利升至满负荷。开展了升负荷及满负荷优化调整试验，以调整温度控制方案的方式确定了整机性能和各部件匹配较优的运行区间，拓宽了燃气轮机的运行边界。开展了简单循环性能试验，获取了燃气轮机在部分负荷及满负荷下的整机性能，同步验证了燃气轮机关键部件在不同工况下性能参数，均满足考核指标要求。

此外，开展了联合循环性能试验，验证了燃气轮机与联合循环主设备的匹配性，确保300兆瓦级F级重型燃气轮机首台样机的联合循环性能达标。

2. 压气机

压气机在升速、升负荷及满负荷运行过程中工作状态稳定，设计点性能指标达到设计要求。在气缸布置了壁面静压测点，在部分级静叶前缘布置了级间总温、总压叶型探针，用于详细测量级间流场。CFD模拟、通流计算准确预测了壁面静压分布，得到的级间总压分布情况与试验结果吻合较好。

利用动、静叶片上布置的应变测点，获得了整机试验过程中的压气机叶片振动应力（见图16）。记录值为升速、升负荷过程中叶片的最大振动应力，可见叶片振动响应均小于许用振动应力的40%，保证了叶片具有足够的高周疲劳寿命。

3. 燃烧室

在整机试验过程中，燃烧室在各运行工况下均表现出良好的稳定性和一致性，各项关键性能参数满足考核指标要求。为了评估300兆瓦级F级重型燃气轮机的污染物排放水平，在烟囱污染物排放测点标定位置安装了烟气取样系统，利用烟气分析仪测量了燃烧室全工况范围内的NO_x排放特性。试验结果表明，燃烧室在全工况范围内NO_x排放达标，

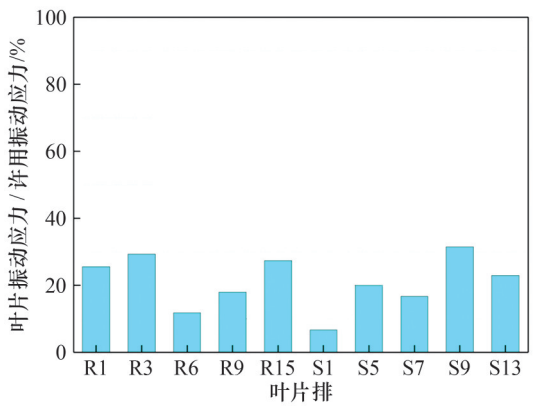

图16　整机试验压气机叶片振动应力与许用振动应力的比值

表明燃烧室具有良好的宽工况适应能力和低负荷运行性能。

整机试验与部件试验的热声特性高度吻合，验证了试验数据的良好传递性。依托部件试验累积的宽频域信号特征，引入动态频带监控与脉动限值设计方法，精准划定了全负荷状态下的热声振荡安全“窗口”；基于安全“窗口”形成了燃烧智能调整策略，实现潜在热声失稳状态的极早期感知与主动干预，达到了全负荷下压力脉动幅值低于平均压力2%的设计目标。

针对部件试验，建立了各种负荷工况及进口参数下燃烧室燃料不同分级模式的运行图谱，据此形成了最优燃料分级方案、燃气轮机由点火至满负荷运行最简洁稳定（仅单次切换）的燃烧模式切换方式，保证了燃气轮机安全稳定运行。

4. 透平

为了全面验证透平的气动性能、冷却设计方案、强度与振动特性，布置了总温探针、总压探针、应变片、金属温度等类型的测点，获得了大量的试验数据，支撑了透平叶片寿命评估。例如，对于设计工况下透平沿程壁面静压分布，试验测量结果与CFD计算结果吻合良好（见图17）。

此外，在透平动、静叶片关键位置处布置了金属温度、动应变测点，各工况下测得结果均低于设计限制值，表明叶片冷却设计和动力学设计状态良好、工作寿命满足设计目标。

十一、结语

本文围绕300兆瓦级F级重型燃气轮机的自主研制，系统阐述了包括正向研发体系建设、关键技术攻关、整机试验验证在内的完整过程。① 基于系统工程“V”模型与集成产品开发理念，构建了覆盖设计、材料、制造、试验全流程的重型燃气轮机自主研制体系，形成了128项设计准则、128项设计工具、325项内控技术标准，为重型燃气轮机谱系化发展筑牢了体系基础。② 全面突破了压气机、燃烧室、透平三大核心部件的关键技术。压气机采用高反力度通流匹配与多排可调静叶控制技术，保持了高的效率并提升了失速裕度。燃烧室采用多喷嘴贫预混燃烧、双重强化掺混–三维流场调控等技术，实现燃气轮机全工况的低排放与稳定运行。透平采用高载荷气动设计、复合冷却布局、干摩擦阻尼减振技术，实现透平叶片的气动和冷却性能、振动特性、工作寿命等满足长周期运行要求。③ 材料与制造工艺自主化取得重要进展。自主研制了UGTC47、UGTC48等材料，将杂质元素控制水平提升至国际领先。攻克了大尺寸透平叶片精密铸造、高强韧轮盘锻件冶炼锻造等核心工艺，实现热端部件与转子锻件的国产化批量生产，打通了自主可控的产业链条。④ 实现控制与保护系统的自主正向研制。构建了功能分散、多样化配置的纵深防御系统架构，研制了一键启停全自动控制策略。运用了基于数字孪生的仿真辅助设计及软硬件在环全范围验证技术，确保控制系统性能优异、执行无偏差，保护系统动作准确率为100%，为整机试验一次成功提供了核心保障。⑤ 通过整机试验全面验证了设计方案。首台样机实现点火、升速一次成功并顺利达到满负荷，完成性能考核、1000 h初步可靠性等关键试验，确认功率、效率、排放指标全面达标。试验数据与设计预测结果吻合良好，完成设计方案与关键技术的综合验证。

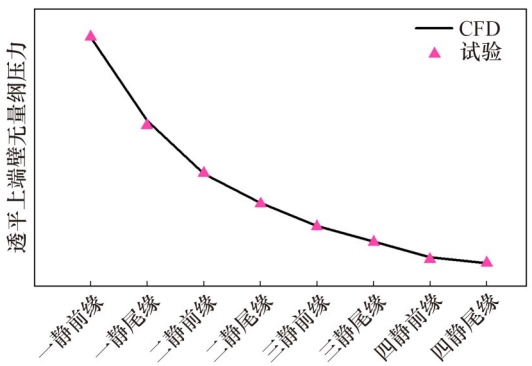

图17　整机试验设计工况透平沿程壁面静压分布

300兆瓦级F级重型燃气轮机的成功研制，标志着我国重型燃气轮机技术发展的重大突破。尽管如此，我国重型燃气轮机技术水平和产业化能力与先进国家相比仍有一定差距，后续可持续深化以下工作。① 推进自主重型燃气轮机的批量化应用，开展长周期运行可靠性验证，积累全寿命周期运行数据。针对长周期运行中可能暴露的关键问题（如燃烧稳定性、热端部件寿命、控制系统可靠性），通过设计优化进行快速迭代，筑牢规模化应用的能力基础。② 把握先进燃气轮机技术发展趋势，开发更高技术等级的燃气轮机产品。在已突破的F级重型

燃气轮机技术的基础上，通过持续优化设计以进一步提升效率、运行灵活性、可靠性。提前布局更高参数的H/J级重型燃气轮机技术研发，重点提升高效气动与先进冷却、灵活燃料低污染燃烧、先进材料与智能制造、系统智能测控与运维等技术能力。面向碳中和的长远目标，开展纯氢、掺氢/掺氨燃烧等关键技术攻关。③面向更高技术等级、更宽功率范围、更多应用场景的发展目标，构建具有自主知识产权的重型燃气轮机产品谱系，形成覆盖设计、材料、制造、试验、运维的完整创新链与产业链，为高端装备制造业发展、能源安全提供关键支撑。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 12, 2026; **Revised date:** April 8, 2026

Corresponding author: Shu Guogang is a professor-level senior engineer from State Power Investment Corporation Limited. His major research fields include metal materials, advanced power equipment. E-mail: shuguogang@spic.com.cn

Funding project: National Science and Technology Major Project "Heavy-Duty Gas Turbine Program"

参考文献

[1] 舒印彪，陈国平，贺静波，等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
Shu Y B，Chen G P，He J B，et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE，2021，23(6)：61-69.

[2] 傅观君，张富强，夏鹏，等. 天然气发电在新型电力系统中的功能定位及发展前景研判[J]. 中国电力，2024，57(8)：67-74.
Fu G J，Zhang F Q，Xia P，et al. Functional orientation and development prospect of natural gas power generation in new power system[J]. Electric Power，2024，57(8)：67-74.

[3] 束国刚，余春华，沈国华，等. 新时期我国重型燃气轮机发展研究[J]. 中国工程科学，2022，24(6)：184-192.
Shu G G，Yu C H，Shen G H，et al. Development of heavy-duty gas turbines in China in the new era[J]. Strategic Study of CAE，2022，24(6)：184-192.

[4] 蒋洪德. 加速推进重型燃气轮机核心技术研究开发和国产化[J]. 动力工程学报，2011，31(8)：563-566.
Jiang H D. Promote heavy-duty gas turbine core technology development and industrial application in China[J]. Power Engineering，2011，31(8)：563-566.

[5] 蒋洪德，任静，李雪英，等. 重型燃气轮机现状与发展趋势[J]. 中国电机工程学报，2014，34(29)：5096-5102.
Jiang H D，Ren J，Li X Y，et al. Status and development trend of the heavy duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE，2014，34(29)：5096-5102.

[6] 崔荣繁，陈克杰，郭宝亭. R0110重型燃气轮机的研制[J]. 航空发动机，2011，37(3)：8-11.
Cui R F，Chen K J，Guo B T. Development of R0110 heavy-duty gas turbine[J]. Aeroengine，2011，37(3)：8-11.

[7] 孔祥林，田晓晶，程国强，等. 中国首台F级50 MW重型燃气轮机的自主研制[J]. 天然气工业，2020，40(12)：12-17.
Kong X L，Tian X J，Cheng G Q，et al. Independent development of the first F-class 50 MW heavy-duty gas turbine in China[J]. Natural Gas Industry，2020，40(12)：12-17.

[8] Foley A. On the performance of gas turbine secondary air systems[C]//ASME Turbo Expo 2001：Power for Land，Sea，and Air，2001：199.

[9] Geis T，Dittmann M，Dullenkopf K. Cooling air temperature reduction in a direct transfer preswirl system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power，2004，126(4)：809-815.

[10] Chew J W，Ciampoli F，Hills N J，et al. Pre-swirled cooling air delivery system performance[C]//ASME Turbo Expo 2005：Power for Land，Sea，and Air，2005：1129-1137.

[11] Didenko R A，Karelin D V，Ievlev D G，et al. Pre-swirl cooling air delivery system performance study[C]//ASME Turbo Expo 2012：Turbine Technical Conference and Exposition，2012：1921-1932.

[12] Schramm V，Willenborg K，Kim S，et al. Influence of a honeycomb facing on the flow through a stepped labyrinth seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power，2002，124(1)：140-146.

[13] Ha T W，Childs D W. Annular honeycomb-stator turbulent gas seal analysis using a new friction-factor model based on flat plate tests[J]. Journal of Tribology，1994，116(2)：895-899.

[14] McGreehan W F，Ko S H. Power dissipation in smooth and honeycomb labyrinth seals[C]//ASME 1989 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition，1989：182.

[15] 张元桥，李军，马登骞，等. 螺旋篦齿–刷式密封泄漏特性实验和数值研究[J]. 西安交通大学学报，2020，54(11)：1-9.
Zhang Y Q，Li J，Ma D Q，et al. Experimental and numerical investigations on the leakage flow characteristics of helical-labyrinth-brush seals[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2020，54(11)：1-9.

[16] Aslan-Zada F E，Mammadov V A，Dohnal F. Brush seals and labyrinth seals in gas turbine applications[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part A：Journal of Power and Energy，2013，227(2)：216-230.

[17] 邱波，李军，冯增国，等. 两级刷式密封泄漏特性的实验与数值研究[J]. 西安交通大学学报，2013，47(7)：7-12.
Qiu B，Li J，Feng Z G，et al. Experimental and numerical investigations of the leakage characteristics of two-stage brush seal[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2013，47(7)：7-12.

[18] Arkhipov A N，Karaban V V，Putchkov I V，et al. The whole-engine model for clearance evaluation[C]//ASME Turbo Expo 2009：Power for Land，Sea，and Air，2009：59259.

[19] Boeller S，Feuillard B，Filkorn G，et al. An introduction into the clearance management of ansaldo GT36 from development to validation[C]//ASME Turbo Expo 2018：Turbomachinery Technical Conference and Exposition，2018：75652.

[20] Ekong G I，Long C A，Childs P R N. The effect of heat transfer coefficient increase on tip clearance control in H.P. compressors

in gas turbine engine[C]//ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition,2013:64958.

[21] Giuntini S,Andreini A,Facchini B. Finite element transient modelling for aero-thermo-mechanical analysis of whole gas turbine engine[C]//ASME Turbo Expo 2019:Turbomachinery Technical Conference and Exposition,2019:91278.

[22] Giuntini S,Andreini A,Facchini B,et al. Transient thermal modelling of whole GT engine with a partly coupled FEM-fluid network approach[C]//ASME Turbo Expo 2017:Turbomachinery Technical Conference and Exposition,2017:64512.

[23] 李甲珊,阙晓斌,闫学慧,等. 面向数字孪生应用的燃气轮机金属温度快速预测模型研究[J]. 动力工程学报,2026,46(3):190-200,220.
Li J S,Que X B,Yan X H,et al. Fast prediction model for gas turbine metal temperature in digital twin applications[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2026,46(3):190-200,220.

[24] Konig W M,Hennecke D K,Fottner L. Improved blade profile loss and deviation angle models for advanced transonic compressor bladings:Part I—A model for subsonic flow[J]. Journal of Turbomachinery,1996,118(1):73-80.

[25] Konig W M,Hennecke D K,Fottner L. Improved blade profile loss and deviation angle models for advanced transonic compressor bladings:Part II—A model for supersonic flow[J]. Journal of Turbomachinery,1996,118(1):81-87.

[26] Köller U,Mönig R,Küsters B,et al. Development of advanced compressor airfoils for heavy-duty gas turbines:Part I—Design and optimization[C]//Aircraft Engine,Marine,Turbomachinery;Microturbines and Small Turbomachiner,1999:95.

[27] Küsters B,Schreiber H A,Köller U D,et al. Development of advanced compressor airfoils for heavy-duty gas turbines:Part II—Experimental and theoretical analysis[C]//Aircraft Engine,Marine,Turbomachinery,Microturbines and Small Turbomachinery,1999:96.

[28] Petkovic D,Banjac M,Milic S,et al. Modeling the transient behavior of gas turbines[J]. Journal of Turbomachinery,2020,142(8):081005.

[29] Mehrpanahi A,Payganeh G,Arbabtafti M. Dynamic modeling of an industrial gas turbine in loading and unloading conditions using a gray box method[J]. Energy,2017,120:1012-1024.

[30] Wu H,Zhou X Y,Zhou G Y,et al. Investigation on predicting the stall limit of compressor at low rotating speed[J]. Advances in Mechanical Engineering,2025,17(2):16878132251319385.

[31] 刘岩松,阙晓斌,吴帅,等. 基于神经网络的重型燃气轮机压气机叶型性能预测[J]. 热能动力工程,2025,40(5):21-31.
Liu Y S,Que X B,Wu S,et al. Prediction of heavy-duty gas turbine compressor blade performance based on neural network[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2025,40(5):21-31.

[32] Eulitz F,Kuesters B,Mildner F,et al. Design and validation of a compressor for a new generation of heavy-duty gas turbines[C]//ASME 2007 Power Conference,2007:22100.

[33] Sanders A J,Hassan K K,Rabe D C. Experimental and numerical study of stall flutter in a transonic low-aspect ratio fan blisk[J]. Journal of Turbomachinery,2004,126(1):166-174.

[34] Berger R,Hofmeister B,Gebhardt C G,et al. A two-objective design optimisation approach for blending repairs of damaged compressor blisks[J]. Aerospace Science and Technology,2020,105:106022.

[35] Bunker R. Evolution of turbine cooling[C]//ASME Turbo Expo 2017:Turbomachinery Technical Conference and Exposition,2017:63205.

[36] Han J C,Dutta S,Ekkad S. Gas turbine heat transfer and cooling technology[M]. Boca Raton:CRC Press,2012.

[37] Colban W F,Thole K A,Bogard D. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface[J]. Journal of Turbomachinery,2011,133:011002.

[38] Lawson S A,Thrift A A,Thole K A,et al. Heat transfer from multiple row arrays of low aspect ratio pin fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2011,54(17/18):4099-4109.

[39] Seinturier E,Paniagua G. Structural design of aircraft engines:Key objectives and techniques[R]. Brussels:Von Karman Institute for Fluid Dynamics,2008.

[40] 束国刚,陈坚,张晓毅,等. 重型燃气轮机结构完整性分析[J]. 动力工程学报,2022,42(12):1213-1222,1271.
Shu G G,Chen J,Zhang X Y,et al. Mechanical integrity analysis of heavy-duty gas turbines[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2022,42(12):1213-1222,1271.

[41] 孙宝德,疏达,付华栋,等. 高端新材料智能制造的发展机遇与方向[J]. 中国工程科学,2023,25(3):152-160.
Sun B D,Shu D,Fu H D,et al. Intelligent manufacturing for high-end new materials:Opportunities and directions[J]. Strategic Study of CAE,2023,25(3):152-160.

[42] Carter T J. Common failures in gas turbine blades[J]. Engineering Failure Analysis,2005,12(2):237-247.

[43] Raytpour M,Mehdizadeh M. Failure analysis of the first stage vane of the gas turbine[J]. Engineering Failure Analysis,2025,170:109281.

[44] Rani S,Agrawal A K,Rastogi V. Failure analysis of a first stage IN738 gas turbine blade tip cracking in a thermal power plant[J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis,2017,8:1-10.

[45] 师昌绪,仲增墉. 我国高温合金的发展与创新[J]. 金属学报,2010,46(11):1281-1288.
Shi C X,Zhong Z Y. Development and innovation of superalloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica,2010,46(11):1281-1288.

[46] 李家兴,陆民刚,束国刚,等. 重型燃气轮机用定向凝固UGTC47合金近服役条件下的显微组织演化[J]. 材料热处理学报,2025,46(2):152-163.
Li J X,Lu M G,Shu G G,et al. Microstructure evolution of directionally solidified UGTC47 alloy for heavy-duty gas turbines under near service conditions[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2025,46(2):152-163.

[47] 李家兴,陆民刚,郑为为. 定向凝固UGTC47合金低周压缩保载疲劳过程显微组织演化[J]. 材料研究与应用,2025,19(3):497-504.
Li J X,Lu M G,Zheng W W. Microstructure evolution of directionally solidified UGTC47 alloy under low cycle fatigue with compression dwelling time[J]. Materials Research and Application,2025,19(3):497-504.

[48] 戴睿卿,玄伟东,张强,等. 定向高温合金UGTC47与硅基陶瓷

型芯界面反应研究[J]. 特种铸造及有色合金，2025，45（1）：112-117.
Dai R Q，Xuan W D，Zhang Q，et al. Interfacial reaction between UGTC47 directional superalloy and silicon-based ceramic core [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys，2025，45（1）：112-117.

[49] McNaughton W P，Richman R H，Jaffee R I. “Superclean” 3.5NiCrMoV turbine rotor steel：A status report：Part I：Steelmaking practice，heat treatment，and metallurgical properties[J]. Journal of Materials Engineering，1991，13（1）：9-18.

[50] National Academies of Sciences，Engineering，and Medicine. Advanced technologies for gas turbines[EB/OL]. [2026-05-15]. https://www.nationalacademies.org/our-work/advanced-technologies-for-gas-turbines.

[51] IEC 61508：2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems[S].

[52] 张会生，周登极. 热力系统建模与仿真技术[M]. 上海：上海交通大学出版社，2018.
Zhang H S，Zhou D J. Modeling and simulation technology for thermal power system[M]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University Press，2018.