

DOI: 10.3901/JME.2022.17.191

燃气轮机正向设计研究进展*

辛小鹏^{1,2} 谭建荣¹ 刘振宇¹ 隋永枫² 丁 骏²

(1. 浙江大学计算机辅助设计与图形学国家重点实验室 杭州 310027;

2. 杭州汽轮动力集团有限公司中央研究院 杭州 310015)

摘要: 燃气轮机是多学科耦合的复杂产品, 被称作装备制造业皇冠上的明珠。正向设计是燃气轮机研发的核心关键技术。目前, 全球只有美国通用电气、德国西门子、日本三菱等少数几个能源装备巨头建立了相对成熟的燃气轮机正向设计体系, 但这些企业都将正向设计作为关键核心技术不对外公开。燃气轮机正向设计要面向市场节能环保低排放需求, 具备高温、高压、高效率、高可靠性、全生命周期低成本、智能化运维等设计特征。分析了国际燃气轮机主流厂家最新的燃气轮机设计产品的特点, 构建了燃气轮机正向设计架构矩阵图谱, 从设计任务、设计技术、设计软件、设计规范、设计集成5个维度分析了燃气轮机正向设计体系的现状, 总结和展望了燃气轮机正向设计技术发展方向。

关键词: 燃气轮机; 正向设计; 设计技术; 设计规范; 设计软件; 设计集成; 数字孪生

中图分类号: TK472

Research Progress on Forward Design of Gas Turbine

XIN Xiaopeng^{1,2} TAN Jianrong¹ LIU Zhengyu¹ SUI Yongfeng² DING Jun²

(1. State Key Laboratory of Computer Aided Design and Graphics, Zhejiang University, Hangzhou 310027;

2. Central Research Institute, Hangzhou Steam Turbine Power Group Co., Ltd., Hangzhou 310015)

Abstract: Gas turbine is a complex product of multidisciplinary coupling, which is known as the Pearl in the crown of equipment manufacturing industry. Forward design is the key technology of gas turbine research and development. At present, gas turbine forward design systems are established by only a few energy equipment giants such as GE, Siemens and MHI, but these enterprises regard forward design as the key core technology and do not disclose it to the public. The forward design of gas turbine should meet the market demand of energy saving, environmental protection and low emission, and have the design features of high temperature, high pressure, high efficiency, high reliability, low cost in the whole life cycle, intelligent operation and maintenance. The characteristics of the latest gas turbine design products of the mainstream international gas turbine manufacturers are analyzed. The forward design matrix of gas turbine is constructed. The current situation of the forward design system of gas turbine from five dimensions of design task, design technology, design software, design criteria and design integration are analyzed. The development directions of forward design technology of gas turbine are summarized and prospected.

Key words: gas turbine; forward design; design technology; design criteria; design software; design integration; digital twin

0 前言

燃气轮机是以连续流动的气体作为工质带动叶轮高速旋转, 将燃料的能量转变为有用功的内燃式动力机械, 是多学科耦合的复杂产品, 被称作装备

制造业皇冠上的明珠。自世界第一台燃气轮机 1939 年诞生于瑞士以来, 全球 1 MW 以上发电用燃气轮机已经超过 2.1 万台, 总容量超过 1 000 GW, 燃气轮机发电量已占全球发电总量的 1/5^[1]。燃气轮机国际标准 ISO 和国内标准 GB 主要为面向用户的验收与使用标准, 缺少面向装备制造厂商的设计标准和规范。

发达国家高度重视燃气轮机正向设计技术研究。美国能源部先后启动了先进燃气轮机系统计划

* 国家自然科学基金(51935009, 51821093); 浙江省重点研发计划项目(2021C01008)杭州市重大科技创新专项(20172011A02)资助项目。
20210615 收到初稿, 20220326 收到修改稿

ATS、先进氢燃气轮机研发计划 AHGTD, 美国国家科学院、工程院 2020 年发布的面向 2030 年先进燃气轮机技术^[2]十大高优先级研究领域主要为: 低排放含氢燃料稳定性燃烧、结构材料和涂层、增材制造、热管理、高保真集成仿真和验证试验、非常规热力循环、系统集成、视情运维、数字孪生和配套基础设施、燃气轮机管输应用。欧盟启动了清洁高效燃气轮机计划, 日本启动了超级舰船燃气轮机计划^[3]。全球只有通用电气、西门子、三菱等少数几个能源装备巨头建立了相对成熟的燃气轮机正向设计体系, 但这些企业都将正向设计作为关键核心技术不对外公开。

2002 年国家科技部“863 燃气轮机专项”^[4]正式启动, 研制具备自主知识产权的 E 级 110 MW 重型燃气轮机, 预算经费 5 亿元, 该样机 R0110 目前仍处于设计与示范电站长期考核试验迭代阶段。R0110 燃气轮机研制延期、研发反复的原因在于所建立的设计体系不够成熟, 严重低估了研制过程的技术难点和实施难度^[5]。我国民用燃气轮机 QD128、QD70A 等由于经济性、供气等问题而导致考核力度不足, 缺少设计与试验迭代, 无法推出能被市场接受的自主知识产权燃气轮机产品^[6]。自 2003 年起由国内主要汽轮机厂商开始合作引进生产国外先进的燃气轮机, 其中具备代表性的为东方汽轮机厂与日本三菱合作; 哈尔滨汽轮机厂、南京汽轮机厂与美国通用电气合作; 上海汽轮机厂先后与德国西门子、意大利安萨尔多合作; 杭州汽轮机厂先后与日本三菱、德国西门子合作; 以上四家汽轮机厂基本具备了除热端部件和控制系统以外燃气轮机的制造、装配以及运行维护能力, 但都不掌握合作机型的核心设计技术。2007 年国家科技部“973 燃气轮机高性能热功转换科学技术问题研究”重大基础研究项目正式启动^[7], 通过该项目获取了部分基础试验数据库, 但至今没有建立起完备的设计技术和相关设计规范, 燃气轮机正向设计体系的建立是非常重要的研究课题。2010 年随着国家航空发动机与燃气轮机重大专项的推进, 国内公司开始着手自主重型燃气轮机的设计。

2009 年东汽开始开展 F 级 50 MW 燃气轮机的设计, 2020 年 11 月完成了厂内全负荷稳定试验运行^[8], 达到了效率 36.5%、压比为 18、排气温度 536 °C 的设计要求。经过 10 年的自主研发, 建立了 25 MW 压气机试验台、燃烧室试验台、涡轮中温冷效试验台以及厂内整机试车台, 建立了国家级高温部件实验室, 积累了压气机、燃烧室、涡轮以及整

机的设计、制造、试验相关的技术与经验。其设计思路为选取研发成本适中、分布式发电市场空间大的 F 级 50 MW 燃气轮机, 然后以 G50 为母型, 以积累的设计开发体系为基础, 开发一些列不同功率等级、适用不同燃料的中小型燃气轮机。目前正在准备建设示范电站开展长期考核试验, 设计与试验迭代是燃气轮机产品推向市场所必需的过程。2016 年中国重燃开始具体负责实施国家“重型燃气轮机专项工程”^[9], 计划“十四五”期间高质量完成重燃专项^[10]。正在开展 F 级 300 MW 以及 H 级 400 MW 燃气轮机的设计。2018 年与安萨尔多签署 H 级燃机技术合作备忘录, 其设计思路为积极将数字化转型融入设计制造一体化过程, 实现由国电投用户牵头研发最具竞争力的产品, 并积极向绿氢燃气轮机发展。规划建设包括保障机组工程、试验电站工程、部件试验台工程的重型燃气轮机试验验证基地。杭汽成套、制造、运维的燃气轮机达 30 多台, 为燃气轮机的正向设计积累了工程经验, 目前致力于中小型分布式能源 F 等级燃气轮机正向设计。国内燃气轮机的研制都处于开发阶段, 尚未推出面向市场的成熟产品, 燃气轮机正向设计体系还未经过完整的设计迭代与试验验证, 国外 F 级燃机为上个世纪 90 年代产品, 国内燃机与国外燃机差距在 30 年左右。只有设计出经过用户考核验证并获得市场的认可的燃气轮机产品, 才能逐步建立起属于自己公司的核心的燃气轮机设计体系。

燃气轮机正向设计指以燃气轮机性能设计、结构设计、试验测试不断迭代为过程, 以设计技术、设计规范、设计软件、数字孪生设计集成为核心, 旨在提升燃气轮机设计、制造、运维开发一体化能力。燃气轮机正向设计内容主要分为总体与系统集成以及三大部件压气机、燃烧室、涡轮, 燃气轮机系统构成如图 1 所示。

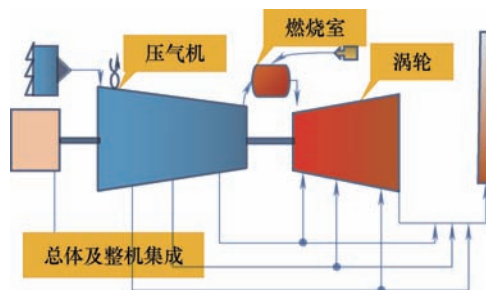


图 1 燃气轮机系统原理图

燃气轮机正向设计体系建立的关键支柱是设计技术、设计规范、设计软件、设计集成, 设计规范是通过大量设计资源包括燃气轮机整机^[11]以

及部件的物理试验与数值试验积累的数据库总结而成的^[12]。燃气轮机的正向设计要面向市场节能环保低排放需求,面向先进技术参数,即高温、高压、高效率、全生命周期低成本、高可靠性、智能化运维。

1 燃气轮机正向设计产品分析

国际主流燃气轮机厂商正向设计体系的建立,经历了长达几十年的设计经验积累,体现在为满足市场需求而不断推出的产品系列。借鉴国际通用电气、西门子、三菱、安萨尔多等先进燃气轮机厂商最新的设计产品,可以为国内燃气轮机的正向设计提供思路和发展方向。

1.1 通用电气

通用电气最先进的燃气轮机代表为 9HA.02, 基于 H 级燃气轮机和经过数代产品验证的设计体系研制而成,先进设计技术包括:新设计的 DLN 2.6e 燃烧室可掺 50% 氢燃料低排放预混合燃烧技术;简单循环启动时间 10 min,联合循环启动时间 30 min,可对不连续的可再生能源起到巨大的补偿作用;简单循环净输出功率 571 MW,净效率 44%,联合循环效率大于 64%。其最先进的燃气轮机产品在美国格林威尔工厂世界上最大的重型燃气轮机全速、全负荷试验台完成集成设计试验验证,布置超过 6 000 个传感器。

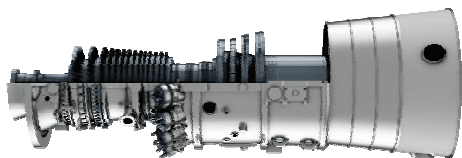


图 2 美国通用电气 9HA.02 燃气轮机^[13]

1.2 西门子

西门子最先进的燃气轮机代表为 SGT5-9000HL,其开发成功的关键为基于经过 100 余台 H 级燃气轮机验证的设计体系,将以往最佳经验与最新开发的技术相结合。先进的设计技术包括:高效的压气机 3D 叶片,创新的多层涂层,超高效涡轮叶片以及叶片内部冷却设计,可掺氢 30% 的先进燃烧系统,能够确保启动鲁棒性的叶顶液压主动间隙控制技术(HCO),压比 24,简单循环净输出功率 593 MW,净效率 42.8%,排气温度 670 °C,联合循环效率大于 63%。其最先进的燃气轮机在西门子柏林工厂整机全负荷试验台完成集成设计试验验证,该试验台有 6 000 多个传感器,配置了 Teamcenter、ELVis 协同设计与试验软件,可以在全

球多个研发中心实时访问试验数据。

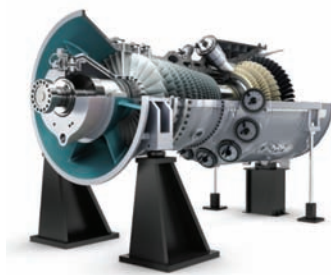


图 3 德国西门子 SGT5-9000HL 燃气轮机^[14]

1.3 三菱

三菱最先进的燃气轮机代表为 M701JAC^[15],其基于经过验证的 G 系列燃气轮机开发而成,燃气轮机整机结构设计特征已经积累了 40 年的经验,先进设计技术包括:1 700 °C 级的先进热障涂层有助于涡轮金属温度保持在常规水平,涡轮入口温度为 1 600 °C,简单循环净输出功率 448 MW,净效率 44%,排气温度 663 °C,联合循环效率大于 64%。其最先进的燃气轮机在三菱日本高砂工厂长期考核示范电站 T-Point2 完成集成设计试验验证,该示范电站布置 4 300 多个传感器,配置了人工智能-燃烧压力波动监测系统 AI-CPFM。



图 4 日本三菱 M701JAC 燃气轮机^[16]

1.4 安萨尔多

安萨尔多最先进的燃气轮机代表为 GT36 S5,研究开发历时 7 年,基于数代经过验证的燃气轮机设计体系研制而成,先进设计技术包括:采用独特的顺序燃烧技术可以实现很高的调节比,压气机 4 级导叶可调提高运营灵活性,简单循环净输出功率 538 MW,净效率 42.8%,排气温度 621 °C,联合循环效率大于 63%。

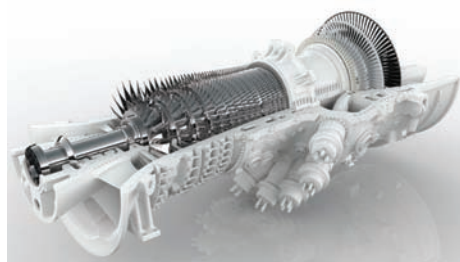


图 5 意大利安萨尔多 GT36 S5 燃气轮机^[17]

2 燃气轮机正向设计难点

燃气轮机设计是一个典型的复杂系统工程。燃气轮机的技术特征为高温、高压、宽喘振裕度、长寿命。燃气轮机正向设计的主要困难在于不断提高性能带来的技术风险、为保证可靠性而频繁进行的高成本的运行维护、多部件多学科耦合的集成设计体系建设。燃气轮机三大部件单独设计容易成功,但整机集成设计往往会遇到耦合匹配设计问题。

燃气轮机总体正向设计的难点在于高效匹配的总热力和长期运行安全可靠的总体强度设计。燃气轮机总体设计贯穿燃气轮机正向设计的全生命周期,是燃气轮机正向设计的灵魂,不断提高的燃气温度带来复杂的二次空气系统设计,多股流体不仅在工质变物性下要求达到压力、流量耦合平衡,而且各部件要达到流固热耦合平衡,同时在升转速、升负荷瞬态启动过程热力参数与控制参数要达到动态平衡设计。

压气机正向设计的难点为大载荷、跨音速、高效叶型气动设计和变工况非定常扩稳设计。压气机压比不断提高,失速喘振危害不断增大,叶顶间隙控制、多级可调静叶、多级级间放气等技术虽然扩展了失速喘振的主动控制手段,但同时增加了压气机与总体耦合正向设计的复杂度。

燃烧室正向设计的难点为低排放、宽范围稳定燃烧设计。燃烧温度不断提高,而 NO_x 排放却要求

不断下降,预混燃烧技术通过控制燃料空气比可以有效降低 NO_x 排放,但带来更为复杂的燃烧室与整机组的热声振荡控制问题。

涡轮正向设计的难点在于高温冷却性能设计与高温强度寿命设计。燃气初温不断提高,远超过金属材料的耐温范围,高效气膜冷却技术、冲击冷却技术可以有效降低金属材料表面的温度,但掺混气流、复杂旋转盘腔、轮缘密封、叶顶间隙带来复杂的流固热耦合问题。

3 燃气轮机正向设计体系

燃气轮机设计具备 VEE 系统工程开发模型的特征,首先是总体设计任务分解到压气机、燃烧室、涡轮三大部件;其次三大部件依据总体要求设计,包括一维二维热力、三维气动、强度校核迭代等,并给出部件的计算与试验修正特性线;然后总体进行匹配设计并给出控制规律,最后进行整机试验,如果整机考核部分指标不满足要求,需要重新开始迭代优化设计,其整个研制周期长达 5~10 年,研制费用达 10 亿~20 亿元。

燃气轮机正向设计架构矩阵如图 6 所示,主要由横向 6 个设计阶段和纵向 5 个设计维度构成。横向 6 个设计阶段包括概念设计、方案设计、详细设计、试验测试、示范电站、商业运行,由于正向设计的不确定性这 6 个阶段存在不断的迭代关系。纵向 5 个设计维度包括设计任务、设计技术、设计规范、设计软件、设计集成。

燃气轮机正向设计架构矩阵						
设计阶段	1概念设计	2方案设计	3详细设计	4试验测试	5示范电站	6商业运行
设计关系						
设计任务	总体技术指标和系统配置设计	总体、压气机燃烧室、涡轮一维二维设计	总体结构、压气机、燃烧室、涡轮三维设计	部件试验、厂内整机试验设计验证	整机长期考核试验设计验证	整机健康管理
设计技术	布雷顿循环、热力平衡	总体变工况、流线曲率法通流设计	压气机防喘振、燃烧振荡、涡轮冷却设计	性能数据采集、分析、设计修正	可靠性测试与评估技术	预测性维护控制、运行大数据时序分析
设计规范	燃机型号数据库、OEM燃机系列	压气机、燃烧室、涡轮特性线谱、部件特性数据库	总体、压气机、燃烧室、涡轮设计手册	调试手册、试验大纲、测试规范	材料特性数据库、运行数据库、故障树数据库	机组性能衰减特性库
设计软件	GTpro等	Matlab、Axstream、Gasturb、NREC、Flowmaster、chemkin等	ANSYS、CFX、Fluent、Starccm+、MULTALL、Openfoam等	FIDAS、Etest、Cyres、Labview、TDM等	Twin Builder、AMESim、DYMOLA、Activate、Easy5等	在线监测软件
设计集成	建立增强数字孪生平台					

图 6 燃气轮机正向设计架构矩阵

燃气轮机概念设计任务为根据市场需求, 确定关键技术指标和系统配置, 包括压比、涡轮入口温度、功率等级、效率指标等; 设计技术主要为布雷顿热力循环、热力平衡设计; 设计规范来自于燃机型号数据库、OEM 厂商燃机系列试验数据库, 设计软件有 Gtpro 等。目前燃气轮机厂商开展概念设计的数据输入主要来自于市场调研和技术积累的设计资源。

燃气轮机方案设计任务为总体性能匹配一维设计、压气机燃烧室涡轮一维二维设计、轴向结构布置; 设计技术为总体变工况、流线曲率法设计; 设计规范主要为三大部件特性线谱、部件试验特征数据库; 设计软件较多, 成熟的工业设计软件有 Matlab、Axstream、Gasturb、NREC、Flowmaster、Chemkin 等, 各燃气轮机设计 OEM 厂商都在积极开发适合于自身燃机技术特征的方案设计软件。

燃气轮机详细设计任务为总体结构、压气机、燃烧室、涡轮三维设计; 设计技术主要为压气机防喘、燃烧室热声振荡控制、涡轮高效冷却; 设计规范为基于经验的设计和基于模型的高保真仿真形成的设计手册。设计软件有 ANSYS、CFX、Fluent、Starccm+、MULTALL(开源)、Openfoam(开源)等。计算流体动力学 CFD 和有限元分析 FEA 是重要的仿真设计工具, CFD 难点在于大的流动分离、非定常失速喘振、热声振荡、流热耦合, FEA 难点在于叶片颤振、疲劳蠕变寿命, 三维设计仿真已得到较为广泛的应用, 全四维非定常设计仿真正处于开发和研究阶段。系统集成仿真可以评估各部件之间的相互作用, 如流动畸变、非预期的热冲击、级载荷突变、叶顶间隙等问题。由于数值仿真试验采用了若干假设和固定边界条件, 无法映射实物的所有特征, 明智审慎的使用数值仿真试验, 结合物理试验验证, 可以有效避免数值试验带来的错误导向风险。进一步可以采用机器学习等智能算法对仿真大数据进行挖掘, 预测流动与传热的非定常现象^[2]。

燃气轮机试验测试任务为部件试验、整机空负荷试验、整机满负荷试验; 设计技术为性能数据采集分析与设计修正; 设计规范为调试手册、试验大纲; 设计软件有 FIDAS、ETEST、Labview、Cyres。高精度、极端高温高压环境传感器与多通道高动态大数据智能采集处理是试验测试的主要发展方向。

燃气轮机示范电站设计任务为长期考核验证, 是评判燃气轮机设计是否能够进入市场、能否获得用户信任的关键; 设计技术为可靠性测试与评估, 直接关系到用户大修周期和大修成本; 设计规范为

材料特性数据库、运行数据库、故障树数据库; 设计软件有 Twinbuilder、AMEsim 等。

燃气轮机商业运行是燃气轮机正向设计的最终阶段, 设计任务为整机健康管理; 设计技术为低能耗预测性维护、大数据分析; 设计规范为机组性能衰减特性数据库; 设计软件为高可靠、高实时性的在线故障诊断与主动控制工业软件。

目前燃气轮机正向设计大部分处于离散的设计过程, 各个阶段各个部件设计相对独立, 设计数据传递相对滞后, 通过建立增强的数字孪生集成设计平台, 可以提升设计数据传递的效率, 建立设计与试验评判大数据库, 完善设计准则规范, 提高设计软件的精度, 降低研发试验成本, 加快设计研发进度, 提高产品市场化竞争力。

4 燃气轮机正向设计关键技术

燃气轮机正向设计的目标为高效率、全生命周期低成本、高可靠性。燃气轮机核心技术参数发展趋势如图 7 所示, 随着燃气轮机等级从 E 级升级到 HA 级, 效率 η 从 32% 提升到 44%, 涡轮入口温度 TIT 从 1 200 °C 提升到 1 600 °C, 压气机压比 PR 从 11 提升到 25。

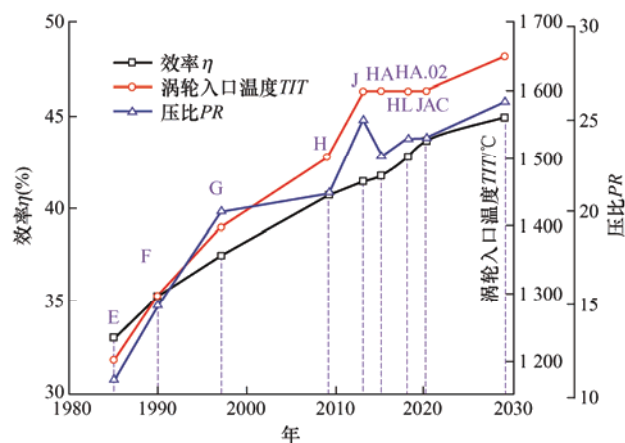


图 7 燃气轮机核心设计参数提升趋势^[2]

4.1 燃气轮机总体与系统集成设计技术

燃气轮机总体性能仿真技术居于燃气轮机设计技术的中心地位, 基于部件特性谱插值方法^[18]的以 Gasturb 为代表, KURZKE 等提出了燃气轮机概念设计用压气机特性线谱缩放方法; 基于部件一维程序分析方法^[19]的以 MARS 为代表; 面向对象方法的建模以 NASA Lewis 研究中心 NPSS、PROOSIS 软件为代表, 可以任意定制用户所需的燃机部件模块, 集成各种燃机构型。

欧盟资助的项目 PROOSIS 使用新的压气机特性图表示方法^[20]。在这种压气机特性图中增加了负荷系数、流量系数,这两个系数用于压气机概念设计,用负荷系数代替了 Beta 辅助变量插值更有物理意义。YANG 等^[21]提出从一个不完整测试数据得到整个特性图的方法。这个方法基于 TSOUTSANIS 等^[22]提出的理论:压气机特性图中的等效率线等转速线与椭圆曲线最为贴合,先用部分运行点的数据生成系列等同心圆作为初始特性图,然后拟合出相关系数放大平移旋转初始特性图从而得到完整特性图。

总体仿真软件不断升级,从稳态性能仿真到动态仿真及交互仿真,进一步发展到可以对压气机喘振等特征问题的细致建模仿真^[23]。面向对象的燃气轮机实时集成软件仿真是当前的主要发展方向。

随着燃气轮机产品的升级换代,燃气轮机核心设计参数不断提高,设计工作点越来越靠近燃气轮机的不稳定边界,这对燃气轮机控制系统的设计提出了新的挑战。燃机控制系统的控制逻辑和保护逻辑不仅变得更加复杂,而且对实时性、准确性提出了更高的要求。在控制系统设计开发阶段,采用数字仿真和半物理仿真已经被证明可以有效测试控制逻辑的准确性、稳定性和完整性^[24-25]。

一体化数字电子分布式控制系统是燃气轮机控制未来发展的主要方向,燃气轮机甩负荷动态特性是控制系统设计的难点,应用现代控制理论、同时采用数字仿真、半物理仿真试验反复调试控制参数,在减少超调量提升甩负荷的动态品质具备一定作用^[26],建立能够实时、准确映射燃气轮机性能的数字模型,是燃气轮机控制系统设计与参数调试的发展方向。

天然气冷热电分布式能源智慧系统的优化设计,需要综合考虑用户侧负荷预测、燃气轮机设备参数配置、运行策略优化,燃气轮机变工况运行的特性直接影响天然气冷热电分布式能源系统的综合能效。为进一步提升效率,采用燃气轮机与热泵相结合的集成系统是能源综合利用的方向。

21 世纪能源高效转化与清洁利用将最终发展成以燃氢燃气轮机为核心装备的综合智慧能源系统^[1]。与新能源、氢储能集成构建多能互补智慧能源系统^[27],要求燃气轮机降低启动时间、提高变工况稳定运行的能力,其中关键是要满足瞬态峰值功率的响应要求^[3];太阳能燃气轮机关键特征是压气机蒸汽回注、高温换热设计^[28];设计先进的带有 CO₂ 捕获的燃气轮机新型热力循环是解决大气升温问题

的有效方法之一^[29];采用混合空气蒸汽透平循环可以有效提高装置效率,控制系统成本^[30];外燃闭式循环燃气轮机已经在核电站中起到重要的作用,外燃混合式太阳能燃气轮机是低碳足迹热力循环升级的一个发展方向^[31];闭式循环超临界 CO₂ 工质燃气轮机是目前新型热力循环发展的热点之一^[32]。

4.2 压气机宽喘振裕度正向设计技术

影响燃气轮机总体性能匹配与控制最关键、最复杂的部件为多级轴流压气机。由于压气机处于逆压梯度工作,且具有 IGV 可转导叶机构、高中低压防喘放气机构,其变工况特性线多达 200 条以上,避免压气机喘振是燃气轮机总体运行匹配的关键。

全尺寸整机重型燃气轮机压气机试验费用昂贵,目前全球仅有通用电气整机燃机试验台具备拖动全尺寸压气机的能力,国内多级轴流压气机一般采用相似模化方法进行部件试验。压气机设计体系一般由一维二维通流设计^[33],同时辅以三维粘性流场仿真与模化试验验证构成。

压气机设计发展方向为高级载荷^[34]、跨音速、高效率、宽喘振裕度,同时减少压气机的级数,降低制造成本。李清华等^[35]采用可控扩散叶型 CDA 方法对 stage35 静叶原始的多圆弧叶型 MCA 进行了全三维反问题设计,LI 等^[36]改进了叶轮机全三维反问题设计方法,提高了压气机在设计点的气动性能。压气机抽气直接影响燃气轮机的效率,不准确的线性压升假设导致设计迭代多次,HACKNEY 等^[37]提出了在燃气轮机正向设计迭代过程建模压气机的抽气特性的一种方法。LEI 等^[38]提出了采用扩压参数作为判别量预测角区失速;TAYLOR 等^[39]研究了角区分离流动状态的转化对失速的影响;WOOLLATT 等^[40]研究了高转速压气机三维叶型的设计方法,研究了影响全三维流场仿真准确度的因素。

压气机整机全尺寸三维流场分析精度受限于物理模型的简化、边界条件的假设,但是可以为压气机整机全尺寸试验提供特性趋势参考和流场细节的捕捉^[41],基于试验修正的高保真全压气机失速喘振三维流场模型的建立是未来发展的主要方向之一。

4.3 燃烧室低排放稳定燃烧正向设计技术

燃烧室设计体系主要由一维二维热力设计和三维燃烧仿真构成,燃烧属于复杂的化学反应与湍流流动相结合的过程,燃烧室需要依靠大量的试验进行不断迭代设计。燃气轮机燃烧室设计主要目标为在高温、高压条件下实现低排放、瞬态变工况高稳

定燃烧, 同时具备多种燃料燃烧能力, 包括高炉煤气等掺氢的低热值燃料, 尤其是零碳排放的纯氢燃料。

付镇柏等^[42]总结了国外燃气轮机 OEM 厂家燃烧室研发思路, 目前最先进的 H 级燃气轮机涡轮第一级动叶前燃气温度达到 1 450 °C, 燃烧室出口温度达到 1 600 °C, 我国首先需要自主研发出 F 级燃烧室, 再以此为基础制定相关的设计准则并应用于 H 级燃烧室的设计。采用基于数据和神经网络方法预测燃烧排放^[43], 可以对燃烧室设计优化提供有意指导。干式预混燃烧 NO_x 排放体积分数 0.25% 的燃烧技术已经大规模商业化运行, 目前最新的低排放预混燃烧技术 NO_x 排放体积分数达到 0.03%^[1]。

全尺寸燃烧室燃烧试验费用昂贵, 新型燃烧室设计需要进行多轮的燃烧调整试验, 燃烧室设计体系的发展方向为高保真燃烧仿真模型构建与燃烧部件试验校准修正。

4.4 涡轮高效冷却正向设计技术

涡轮设计体系由一维二维通流设计和三维全粘性流场分析组成, 由于涡轮属于顺压梯度流动, 涡轮三维气动仿真与试验吻合结果较好, 而涡轮叶片表面温度的仿真精度一直受限于叶片表面换热系数的确定。涡轮设计的目标为新型冷却方式、高效率、长寿命、高可靠性^[44]。

涡轮设计要求在高达 1 600 °C 的环境下涡轮叶片寿命大修周期达到 48 000 EOH。BOGARD 等^[45]研究了气膜冷却对换热的影响; HORLOCK 等^[46]评估了涡轮冷却量增大对燃机性能的限制影响; ODEMONDO 等^[47]研究了大扩散 V 型冷却孔对涡轮冷效的影响; DAMIOLA 等^[48]采用格子玻尔兹曼算法研究了涡轮叶片通道气热特性; STRAUWALD 等^[49]通过实验研究了带有主流湍流度的涡轮气膜冷效温度场和速度场。高保真涡轮叶片流热耦合全三维仿真模型的构建与试验验证是涡轮设计体系发展的主要方向之一。

4.5 燃气轮机整机性能仿真技术

燃气轮机整机性能仿真的关键是建立能够实时准确运行并与虚拟 DPU 双向传递数据的燃气轮机模型, 传递的数据包括 IGV 的调节、燃料量的调节和放气阀的开关信号等。SCHOBELIRI^[50]和 CHAIBAKHSH^[51]等开发了基于部件特性线和热力学布雷顿循环原理的燃气轮机模型用于动态性能预测; ALIABAD^[52]、DEGHANI^[53]、UZOL^[54]、GHORBANIAN^[55]、ASGARI^[56]等开发了基于运行数据和人工智能的燃气轮机代理模型用于动态性能

预测。但这些燃气轮机数字模型在性能预测瞬态响应的准确性, 以及每一个仿真步长和实际物理运行时间同步性方面还有待进一步研究。

4.6 燃气轮机低能耗运维设计技术

燃机设计验收的标准为性能测试和可靠性测试, 性能测试在机组满负荷运行 168 小时后即可验证, 而可靠性测试则需经过 48 000 小时的长期示范运行, 燃气轮机低能耗运维贯穿于整个运行过程, 直接影响全生命周期的经济性、可靠性。

低能耗运维设计技术的关键为基于部件特性线的燃气轮机正向设计热力模型与实时测量获取的健康参数相融合, 开展多维度时序气路故障诊断是燃机剩余寿命预测的热点^[57], 可以提前评估燃机设计的可靠性是否满足要求, 加快设计试验的迭代速度。

4.7 燃气轮机面向制造的设计技术

燃气轮机制造能力是国家重大装备制造水平标志, 尤其是高温部件的加工制造, 涡轮叶片采用高温合金材料, 采用单晶或者定向晶叶片, 叶片成品率低, 叶片表面采用先进的热障涂层, 其制造精度直接影响燃气轮机的性能和运行安全。王铁军^[58]等对重型燃气轮机制造技术进行了系统的研究, 研究了燃气轮机高温透平叶片热障涂层中的应力分布和裂纹产生机理。范学领等^[59]展望了支撑我国燃气轮机自主设计的制造基础关键技术, 指出面向高温涡轮叶片冷却结构、热障涂层、精密成型制造的三大设计技术, 是燃气轮机自主研发的基础。通过建立燃气轮机集成设计制造过程的数字孪生模型, 可以监测制造精度、预测关键部件的强度寿命^[60]、加快设计制造试验的迭代过程。

5 燃气轮机正向设计与数字孪生融合

燃气轮机数字孪生五维模型, 包括燃气轮机物理实体、燃气轮机虚拟模型、物理实体与虚拟模型的双向连接、数字孪生数据库、设计集成应用服务五大部分, 通过建立燃气轮机数字孪生平台来实现。通过三维流体仿真与结构强度仿真模型降阶获得燃气轮机性能模型, 提高燃气轮机数字孪生实时性与准确性。通过传感器获取试验燃气轮机的运行数据, 进一步修正燃气轮机虚拟模型的准确性。通过虚拟燃气轮机的运行, 加快设计、制造、试验测试的迭代速度, 从而减少研发成本, 缩短研发周期。同时通过准确性不断提升的虚拟燃气轮机模型, 可以开展智能预测性维护, 减少停机次数和运维成本, 增

强运行安全性。

数字孪生起源于产品全生命周期管理 PLM^[61], 基于模型的数字孪生体^[62]正逐渐从概念阶段进入实际应用阶段^[63]。数字孪生应用场景广阔, 最早应用于 NASA 航天器开发^[64], 目前能源、电力、石化、交通、医疗、城市管理等行业都在探索与数字孪生的深度融合, 形成了不同的数字孪生+行业的框架体系^[65-69], 数字孪生在不同行业的落地需要开发一系列适应于不同行业技术特征的算法^[70-72]。

VICTORINO 等^[73]定义了新工业生产中的数字孪生模型, 关键在于建立物理世界与数字世界实时

的、高保真的一一映射。将先进信息技术应用于燃气轮机正向设计, 基于数字孪生的燃气轮机正向设计的技术与商业价值包括^[74]: 加快新开发燃气轮机投放到市场的时间、降低新开发燃气轮机的总体成本、识别设计过程中长周期的部件、基于大数据提高预测性维护服务效率、识别燃气轮机升级换代的关键特征指标等。

燃气轮机、航空发动机、汽轮机、风力机、风机、泵等都属于典型的旋转机械装备, 建立统一的旋转机械数字孪生框架如图 8 所示, 开发旋转机械相关的智能算法, 有助于综合能源岛的智慧运营。

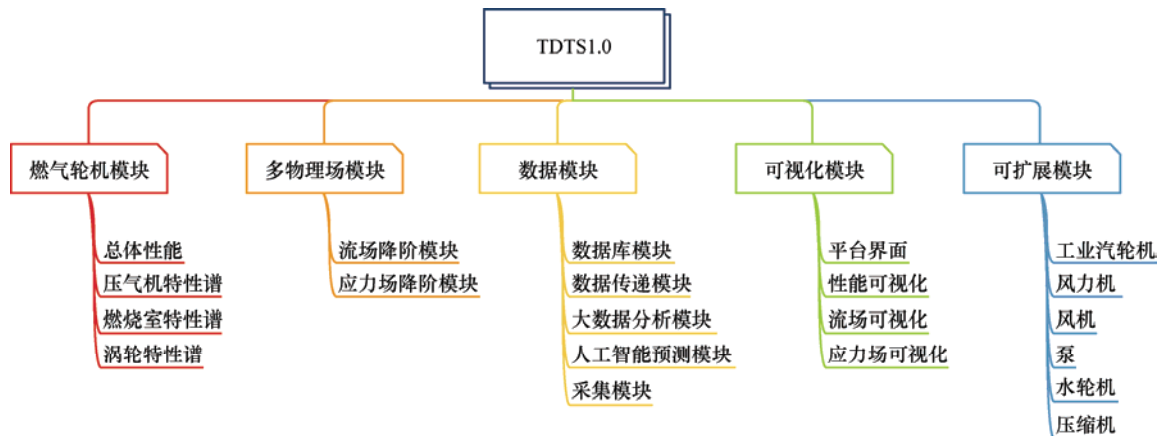


图 8 旋转机械数字孪生软件系统 TDTS1.0

HU 等^[75]开发了基于经验模式分解与 BO-LSTM 神经网络的混合时间序列预测算法用于预测风力机风速; DOUCOURE 等^[76]采用小波人工神经网络和多元分析算法进行时间序列特征性能预测风速; SCHROEDER 等^[77]研究了自动机器学习用于数字孪生数据建模和数据通信方法; ZACCARIA 等^[78]研究了航空发动机数字孪生监测与诊断系统; LI 等^[79]将动态贝叶斯网络算法用于数字孪生。

燃气轮机整机试验过程中需要布置超过 3 000 个传感器, 传感布置的位置、开孔方式、引线路径对直接影响燃气轮机的性能和测量数据的可靠性。燃气轮机试验用到的传感器分为稳态和动态两大类型, 具体按照专业又分为压力、温度、流量、振动、特种测量等, 特种测量包括示温漆、晶体、光学高温计、喘振监测、遥测系统等。高可靠性、高准确性、高灵敏性的传感器对燃气轮机数字孪生集成设计中试验数据的准确获取与有效利用具有重要意义。

通用电气^[80]打造了一个分布式开源工业操作系统 Predix 平台^[81], 该平台可以实现工业应用共享, 包括设备核心的数字孪生(图 9)、设备连接、边缘技术、分析与机器学习和大数据处理, 用于高容量、

低延时、数据管理集中集成和分析驱动产出。

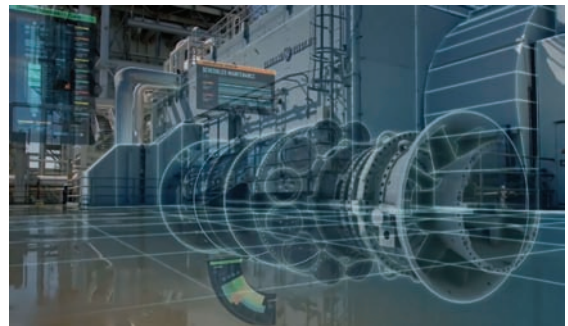


图 9 通用电气燃气轮机数字孪生

西门子^[82]正在尝试建立数字孪生平台, 开发了基于云的开放的 IoT 数字化运行系统 MindSphere, 西门子开放平台 PaaS (Platform-as-a-Service) 将产品、电厂、系统、机器设备通过大数据深度分析连接在一起。西门子 Insight 燃气轮机数字孪生模型即运行在 MindSphere 平台上, 为设计、生产、性能提供一系列综合数字解决方案(图 10)。

燃气轮机集成设计可以通过建立增强的数字孪生正向设计平台来提升设计水平。将其多年积累的燃气轮机设计技术、设计规范、设计软件、设计资源、历史运行大数据集成起来, 通过将基于物理的

模型和基于数据的模型耦合起来，燃气轮机正向设计与数字孪生深度融合是未来重要的发展方向。

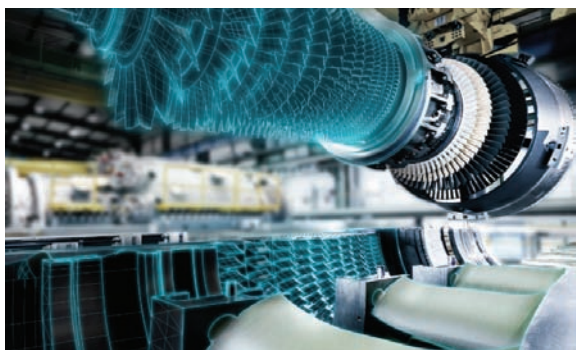


图 10 西门子燃气轮机数字孪生^[83]

燃气轮机数字孪生的关键技术包括：燃气轮机总体性能匹配技术、燃气轮机控制虚拟现实技术、大数据技术、传感器测量技术、关键部件特性三维高保真仿真技术。

燃气轮机数字孪生设计目前还处于框架搭建与潜在应用探索阶段，难点在于设计、制造、试验、示范电站、运行等各个阶段有效大数据的获取和基于物理的高保真模型的建立，以及对各种数字线的集成，各种形式数字线基础设施的建设可以有效推动燃气轮机正向设计。

6 杭汽与浙大在燃气轮机正向设计领域的研究进展

近年来，杭汽针对中小型分布式能源 F 等级燃气轮机正向设计，研究开发了一系列燃气轮机正向设计技术、设计软件、设计规范，积累了燃气轮机正向设计过程中关键的仿真数据库与部件试验数据库等设计资源，参与制定了国家标准 GB/T 38179—2019《燃气轮机应用 用于发电设备的要求》，浙大针对燃气轮机数字孪生开展了相关研究。主要进展包括：

开发了基于真实物性的燃气轮机总体匹配设计技术，编制了燃气轮机总体热力平衡设计软件。在程序中考虑了真实物性的影响，对部件特性设计采用更为准确的物性定义计算方式，减小了设计误差。在结构上考虑了二次空气冷却器对热力性能的影响，更能反应燃机的实际工作情况。

开发了基于燃气轮机机理和部件特性线的实时动态仿真技术，编制了燃气轮机整机性能仿真软件。基于燃机机理进行建模，以燃气轮机设计点参数以及各部件的性能曲线为基础进行仿真，仿真启动、

升转速、升负荷、甩负荷、停机等工况以及环境条件变化、部件特性变化、燃料变工等工况条件下燃气轮机的特性，用来检验燃机运行规律设计的合理性，校正控制系统参数设计的可靠性，作为 OPC Server 进行燃机仿真模型与外部控制参数的通信，实现与控制系统的联合仿真。

开发了基于流线曲率法与喘振判据的压气机通流设计分析技术，编制了压气机通流性能设计分析软件、压气机二维叶型参数化造型软件、压气机叶片三维造型软件，如图 11 所示。压气机气动性能预测是压气机设计的一大难点，能否快速准确的得到压气机的气动性能图谱，不仅决定了压气机设计的成败，还影响到燃烧室、涡轮、二次空气等部件的匹配设计。对一定折合转速下压气机的特征性能进行预测，包括特性线的最大流量点(堵塞边界)和最小流量点(喘振边界)。对参数化后的二维叶型进行优化，设计出的新叶型，对参数化后的三维叶片进行整体的弯曲、掠造型以及叶片端区的局部弯曲，设计出新的叶片。与国外技术公司合作，建立了基于非线性谐波法多级轴流压气机设计分析体系，如图 12、13 所示。

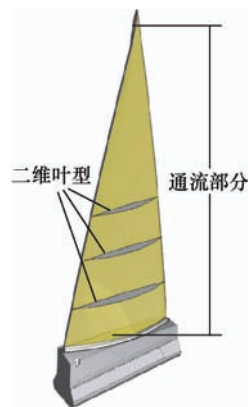


图 11 某扭叶片造型设计

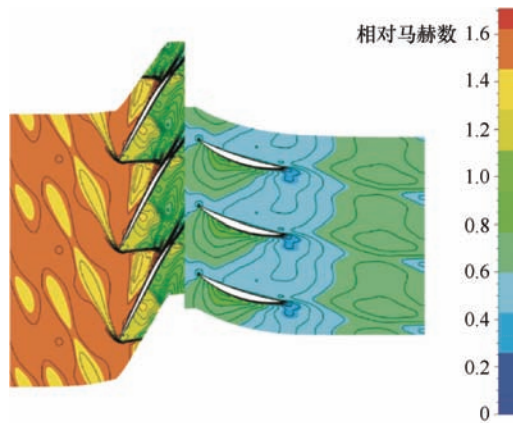


图 12 某跨音速叶顶马赫数与激波分布

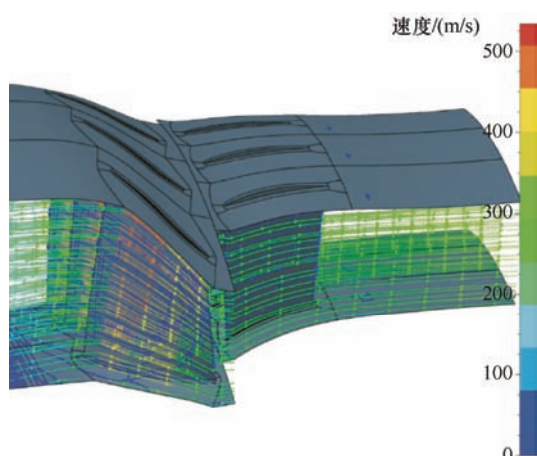


图 13 某叶片级速度三维流线分布

开发了基于燃烧室安全运行裕度及热声振荡特性的设计技术,编制了燃烧室通流设计软件。预测燃料组分或流量变化与燃烧室热声振荡非线性关系,通过调节燃料流量或空气流量,提高燃烧室安全运行裕度。开发了基于一维设计、S2 流面设计与优化、叶片积叠规律及弯掠造型、冷却结构设计、三维设计分析及优化的涡轮设计技术。建立了基于 Axstream、CFX、ANSYS 多软件协同设计的透平叶片开发平台。

开发了基于压气机试验、整机空负荷试验、整机全负荷试验,以及后续试验电站运行试验的综合试验台设计技术,申请了一种模块化多功能燃气轮机试验台发明专利。用于解决现有技术中燃气轮机的多个试验阶段需要搭建多个试验平台,导致一些设备和系统重复建设的缺陷。为了开展燃气轮机控制系统在燃气轮机全工况下的性能验证和可靠性评估。开发了基于转速监测试验台、IGV 调节测试台、模拟润滑油系统、模拟燃料系统和模拟空气系统的半物理试验台设计技术,申请了一种燃气轮机控制系统半物理仿真试验系统发明专利。

开发了基于流量匹配的宽喘振裕度设计技术,申请了一种燃气轮机防喘退喘流量调节系统及防喘退喘流量调节方法的发明专利。当燃气轮机压气机、燃烧室、涡轮三大部件的设计流量不匹配,导致熄火跳机无法启动时,调节压气机多个抽气口的空气量以及进入燃烧室和涡轮的空气量,调节空燃比,优化各部件的流量匹配,提高燃气轮机启动调试试验的成功率。

开发了基于数字孪生的燃气轮机进气畸变设计技术如图 14~16 所示,研究了燃气轮机径向进气畸变数字孪生试验平台及控制方法。通过建立燃气轮机复杂进气畸变发生与抑制系统,将测试数据与

流场仿真数据实时建立映射关系,降低试验发生深度喘振风险,提高流场仿真性能模型的准确性,从而提高燃气轮机径向进气室进气畸变设计的可靠性。

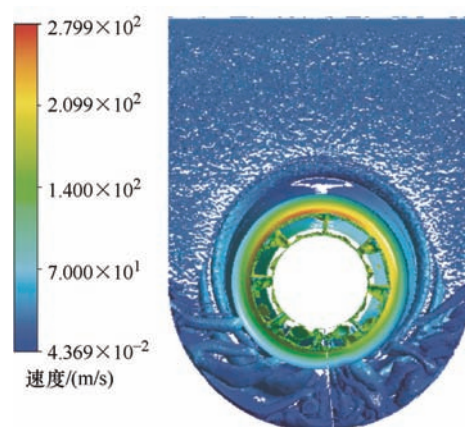


图 14 燃气轮机径向进气室三维仿真涡量分布

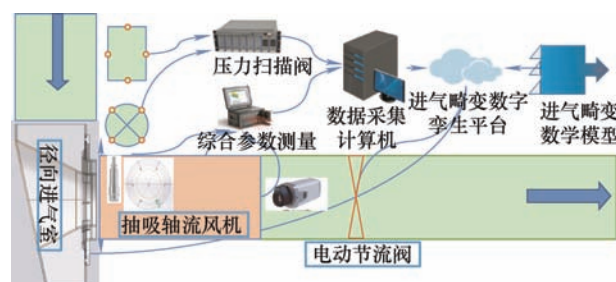


图 15 基于数字孪生的燃气轮机进气畸变正向设计

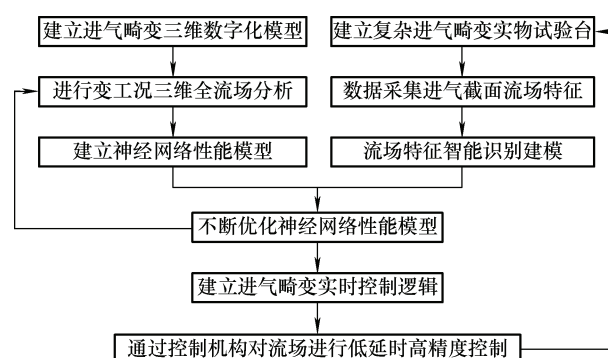


图 16 基于数字孪生的燃气轮机进气畸变正向设计流程

目前正在探索建立基于数字孪生的燃气轮机正向设计流程如图 17 所示。建立数字孪生软件系统 TDTS1.0,将各种设计软件有效的集成起来,通过物联网技术与燃气论据试验台建立实时映射关系,建立仿真及试验数据库,通过正向设计、高保真仿真、性能特性深度学习降阶建模、结果实时分析与迭代,从而提高燃气轮机正向设计目标的准确性,缩短设计周期,减少试验次数,降低研制费用。

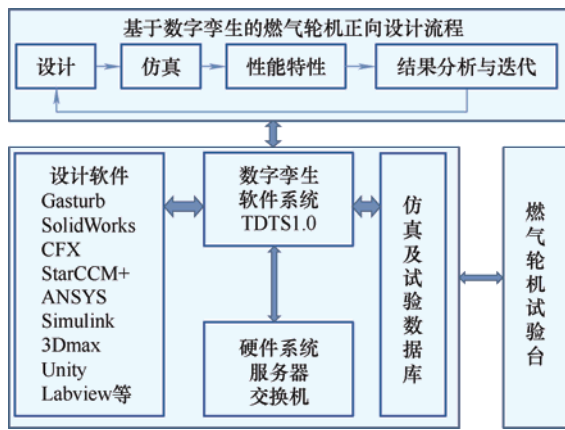


图 17 基于数字孪生的燃气轮机正向设计

7 结论

全球只有通用电气、西门子、三菱等少数几个能源装备巨头建立了相对成熟的燃气轮机正向设计体系，但其都作为行业核心技术不对外公开。提出了燃气轮机正向设计架构矩阵图谱，燃气轮机正向设计体系建立的支柱是设计技术、设计规范、设计软件、设计集成，设计规范是通过大量燃气轮机整机以及部件的物理试验与数值试验积累的数据库总结而成的。同时燃气轮机的正向设计要面向市场需求、面向先进技术参数，即高温、高压、高效率、全生命周期低成本、高可靠性、智能化运维。燃气轮机正向设计未来发展方向如下。

(1) 建立经过产品设计验证的燃气轮机正向设计体系。挖掘燃气轮机发展型号数据库，开发总体与三大部件正向设计软件，建立先进等级燃气轮机设计规范。面向能源未来，与新能源集成构建多能互补智慧能源系统，新开发设计低启动时间、高变工况稳定运行能力的氢燃料燃气轮机。

(2) 燃气轮机核心设计技术突破。进一步开发更高效率、更高可靠性、运行更灵活性的燃气轮机。具体发展方向包括：燃气轮机总体性能仿真技术居于燃气轮机设计技术的中心地位，建立能够实时、准确映射燃气轮机性能的总体动态仿真数字模型；影响燃气轮机总体性能匹配与控制最关键、最复杂的部件为多级轴流压气机，开发高级载荷、跨音速、高效率、宽喘振裕度压气机设计技术；开发低排放、瞬态变工况高稳定性、具备氢燃料燃烧能力的燃烧技术；开发新型冷却方式、高效率、长寿命、高可靠性涡轮设计技术。

(3) 燃气轮机正向设计与燃气轮机数字孪生深度融合。燃气轮机数字孪生设计目前还处于框架搭

建与潜在应用探索阶段，具体发展方向为：高保真、高实时性的燃气轮机数字孪生模型的建立；三维高保真仿真及其降阶技术；基于部件特性线的燃气轮机正向设计热力模型与实时测量获取的健康参数相融合，开展多维度时序气路故障诊断进行燃机剩余寿命预测；燃气轮机运行优化智能控制技术，各种形式数字线基础设施的建设可以有效推动燃气轮机正向设计。

参考文献

- [1] 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 Hongde. Promote heavy duty gas turbine core technology development and industrial application in China[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(8): 563-566.
- [2] National Academies of Sciences, Engineering, Medicine. Advanced technologies for gas turbines[EB/OL]. Washington, DC: The National Academies Press, 2020. <https://doi.org/10.17226/25630>.
- [3] BANCALARI E, CHAN P, DIAKUNCHAK I S. Advanced hydrogen gas turbine development program[C]// Asme Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air, 2007.
- [4] 蔡宁生, 刘红, 崔荣繁, 等. 863 燃气轮机专项进展[J]. 中国科技产业, 2006(2): 96-99.
CAI Ningsheng, LIU Hong, CUI Rongfan, et al. The progress of gas turbine key project in the 10th five year plan period[J]. Science and Technology Industry of China, 2006(2): 96-99.
- [5] 蔡宁生, 崔荣繁, 陈克杰, 等. R0110 重型燃气轮机的自主研发[J]. 燃气轮机技术, 2014, 27(3): 1-7.
CAI Ningsheng, CUI Rongfan, CHEN Kejie, et al. Independent research and development of R0110 heavy duty gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2014, 27(3): 1-7.
- [6] 李孝堂. 燃气轮机的发展及中国的困局[J]. 航空发动机, 2011, 37(3): 1-7.
LI Xiaotang. Development of gas turbine and dilemma in China[J]. Aeroengine, 2011, 37(3): 1-7.
- [7] 蒋洪德. 重型燃气轮机的现状和发展趋势[J]. 热力透平, 2012, 41(2): 83-88.
JIANG Hongde. Development of the heavy-duty gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2012, 41(2): 83-88.
- [8] 孔祥林, 田晓晶, 程国强, 等. 中国首台 F 级 50MW 重型燃气轮机的自主研制[J]. 天然气工业, 2020,

- 40(12): 12-17.
- KONG Xianglin, TIAN Xiaojing, CHENG Guoqiang, et al. Independent development of the first F-class 50MW heavy-duty gas turbine in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(12): 12-17.
- [9] 中国联合重型燃气轮机技术有限公司. 重燃专项介绍[EB/OL].<http://www.ugtc.com.cn/>.
China United Heavy Gas Turbine Technology Co. Ltd. Special introduction to re-ignition[EB/OL]. <http://www.ugtc.com.cn/>.
- [10] 束国刚. 凝集重燃力量推进重大专项[J]. 国家治理, 2020(47): 25-29.
- SHU Guogang. Gathering and rekindling power to promote major projects [J]. Governance, 2020(47): 25-29.
- [11] 倪维斗, 焦树建. 我国发展燃气轮机的可行道路[J]. 上海汽轮机, 2001(1): 1-9.
- NI Weidou, JIAO Shujian. Feasible way to develop gas turbine in China [J]. Shanghai Turbine, 2001(1): 1-9.
- [12] 焦树建. 探讨 21 世纪上半叶我国燃气轮机发展的途径[J]. 燃气轮机技术, 2001, 14(1): 10-13.
- JIAO Shujian. Inquiring into the way of developing GT in the first half of century in China[J]. Gas Turbine Technology, 2001, 14(1): 10-13.
- [13] GE Gas Power. 9HA gas turbine[EB/OL]. <https://www.ge.com/gas-power/products/gas-turbines/9ha>.
- [14] Siemens Energy. SGT5-9000HL Heavy-duty gas turbine[EB/OL]. <https://www.siemens-energy.com/global/en/offers/power-generation/gas-turbines/sgt5-9000hl.html>.
- [15] HADA S, YURI M, MASADA J, et al. Evolution and future trend of large frame gas turbines: a new 1600 degree C, J-Class gas turbine[C]// Asme Turbo Expo: Turbine Technical Conference & Exposition, 2012, ASME Paper No. GT2012-68574: 599-606.
- [16] Mitsubishi Power. M701J Series Gas Turbines[EB/OL]. <https://power.mhi.com/products/gasturbines/lineup/m701j>.
- [17] Ansaldo Energia. GT36: The Superior Value[EB/OL]. <https://www.ansaldoenergia.com/business-lines/new-units/gas-turbines/gt36>.
- [18] KURZKE J, RIEGLER C. A new compressor map scaling procedure for preliminary conceptional design of gas turbines[C]// Asme Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air, 2000.
- [19] BOLEMAN M. An alternative compressor modeling method within gas turbine performance simulations[M]. Deutschland: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2014.
- [20] SETHI V, DOULGERIS G, PILIDIS P, et al. The map fitting tool methodology: Gas turbine compressor off-design performance modeling[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(6): 061010.1-061010.15.
- [21] YANG Q, LI S, CAO Y. A new component map generation method for gas turbine adaptation performance simulation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(4): 1947-1957.
- [22] TSOUTSANIS E, MESKIN N, BENAMMAR M, et al. A component map tuning method for performance prediction and diagnostics of gas turbine compressors[J]. Applied Energy, 2014, 135(C): 572-585.
- [23] 谢志武, 苏明, 翁史烈. 燃气轮机仿真软件构造方法综述[J]. 海军工程大学学报, 2000(2): 1-7.
- XIE Zhiwu, SU Ming, WENG Shilie. Software construction methods for gas turbine engine simulation: A review[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2000(2): 1-7.
- [24] PUGI L, GALARDI E, CARCASI C, et al. Preliminary design and validation of a real time model for hardware in the loop testing of bypass valve actuation system[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 92(3): 366-384.
- [25] PUGI L, GALARDI E, PALLINI G, et al. Design and testing of a pulley and cable actuator for large ball valves[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering, 2016, 230(i7): 622-639.
- [26] 薛银春, 孙健国. 燃气轮机控制技术综述[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 1066-1071.
- XUE Yinchun, SUN Jianguo. A survey of gas turbine control technique [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 1066-1071.
- [27] 黄乃成, 吴庆礼, 苏来进, 等. 燃气轮机与新能源混合发电的互补性研究[J]. 中外能源, 2020, 25(12): 10-15.
- HUANG Naicheng, WU Qingli, SU Laijin, et al. Research on complementarity of hybrid power generation of gas turbine and new energy[J]. Sino-global Energy, 2020, 25(12): 10-15.
- [28] 刘焕磊, 陈冬, 杨天锋, 等. 太阳能燃气轮机发电技术综述[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 6-15, 62.
- LIU Huanlei, CHEN Dong, YANG Tianfeng, et al. Solar gas turbine power generation technology: a review[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 6-15, 62.
- [29] SANZ W, JERICHA H, BAUER B, et al. Qualitative and quantitative comparison of two promising oxy-fuel power

- cycles for CO₂ capture[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2008, 130(3): 161-173.
- [30] POULLIKKAS A. An overview of current and future sustainable gas turbine technologies[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2005, 9(5): 409-443.
- [31] AL-ATTAB K A, ZAINAL Z A. Externally fired gas turbine technology: A review[J]. *Applied Energy*, 2015, 138(C): 474-487.
- [32] OLUMAYEGUN O, WANG M, KELSALL G. Closed-cycle gas turbine for power generation: A state-of-the-art review[J]. *Fuel*, 2016, 180(15): 694-717.
- [33] MÜLLER C, SIKORSKI S, PASSRUCKER H, et al. New design and manufacturing concepts for aero engine compressor components[C] // *Proceedings of the 17th International Symposium on Air Breathing Engines*, 2005, ISABE Paper No. 2005-1077.
- [34] DICKENS T, DAY I. The design of highly loaded axial compressors[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(3): 57-67.
- [35] 李清华, 刘昭威. 可控扩散叶型全 3 维黏性反问题设计方法[J]. *航空发动机*, 2019, 45(1): 6-11.
- LI Qinghua, LIU Zhaowei. Full three-dimensional viscous inverse design method of controlled diffusion airfoil[J]. *Aeroengine*, 2019, 45 (1): 6-11.
- [36] LI A, ZHU Y, LI W, et al. An improved inverse method for multirow blades of turbomachinery[J]. *Archive Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, 234(22): 095440622092445.
- [37] HACKNEY R, NIKOLAIDIS T, PELLEGRINI A. A method for modelling compressor bleed in gas turbine analysis software[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 172: 115087.
- [38] LEI V M, SPAKOVSKY Z S, GREITZER E M. A criterion for axial compressor hub-corner stall[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2008, 130(3): 475-486.
- [39] TAYLOR J V, MILLER R J. Competing three-dimensional mechanisms in compressor flows[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(2): 021009.
- [40] WOOLLATT G, LIPPETT D, IVEY P C, et al. The design, development and evaluation of 3D aerofoils for high speed axial compressors: Part 2-simulation and comparison with experiment[C]//*ASME Turbo Expo*, 2005, ASME Paper No. GT2005-68793.
- [41] 袁新. 燃气轮机气动热力相关部分问题研究[J]. *热力透平*, 2006, 35(2): 65-73, 78.
- YUAN Xin. Research of some aerodynamics problems relative to gas turbine[J]. *Thermal Turbine*, 2006, 35(2): 65-73, 78.
- [42] 付镇柏, 蒋洪德, 张珊珊, 等. G/H 级燃气轮机燃烧室技术研发的分析与思考[J]. *燃气轮机技术*, 2015, 28(4): 1-9, 21.
- FU Zhenbo, JIANG Hongde, ZHANG Shanshan, et al. Analysis and deliberation upon combustor technology development for the G/H class gas turbine[J]. *Gas Turbine Technology*, 2015, 28(4): 1-9, 21.
- [43] 赵刚, 朱华昕, 李苏辉, 等. 基于数据和神经网络的燃气轮机 NO_x 排放预测与优化[J]. *动力工程学报*, 2021, 41(1): 22-27.
- ZHAO Gang, ZHU Huaxin, LI Suhui, et al. NO_x emission prediction and optimization for gas turbines based on data and neural network[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2021, 41(1): 22-27.
- [44] KREWINKEL R. A review of gas turbine effusion cooling studies[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 66(11): 706-722.
- [45] BOGARD D G, THOLE K A. Gas turbine film cooling[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2012, 22(2): 249-270.
- [46] HORLOCK J H, WATSON D T, JONES T V. Limitations on gas turbine performance imposed by large turbine cooling flows[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2001, 123(3): 487-494.
- [47] ODEMONDO V, ABBA L, ABRAM R. Implementation of wide diffusion angle V-shaped holes for gas turbine cooling: Design phase and numerical simulation[C]//*ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, 2020, GT2020-15171.
- [48] DAMIOLA L, BOFFADOSSI M, PII L M, et al. Aerothermal simulation of gas turbine blade cooling channel using Lattice-Boltzmann method[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2021, 32(6): 1-16.
- [49] STRAUWALD M, ABRAM C, SANDER T, et al. Time-resolved temperature and velocity field measurements in gas turbine film cooling flows with mainstream turbulence[J]. *Experiments in Fluids*, 2021, 62(1): 3.
- [50] SCHOBELIRI M T, ATTIA M, LIPPKE C. GETRAN: A generic, modularly structured computer code for simulation of dynamic behavior of aero- and power generation gas turbine engines[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 1994, 116(3): 494-483.
- [51] CHAIBAKHSH A, AMIRKHANI S, et al. A simulation

- model for transient behaviour of heavy-duty gas turbines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 115-127.
- [52] ARABI AF, SHOJAEI S, ZARE M, et al. Assessment of the fuzzy ARTMAP neural network method performance in geological mapping using satellite images and Boolean logic[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16: 3829-3838.
- [53] PAHLAVANI H, DEHGHANI A A, BAHREMAND A R, et al. Intelligent estimation of flood hydrographs using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)[J]. *Modeling Earth Systems & Environment*, 2017, 3(1): 35.
- [54] UZOL O. A new high-fidelity transient aerothermal model for real-time simulations of the T700 helicopter turboshaft engine[J]. *Journal of Thermal Sciences and Technology*, 2011, 31(1): 37-44.
- [55] GHORBANIAN K, GHOLAMREZAEI M. An artificial neural network approach to compressor performance prediction[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(7-8): 1210-1221.
- [56] ASGARI H, CHEN X. Gas turbines modeling, simulation, and control[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [57] 应雨龙, 李靖超, 庞景隆, 等. 基于热力模型的燃气轮机气路故障预测诊断研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(3): 731-744.
- YING Yulong, LI Jingchao, PANG Jinglong, et al. Review of gas turbine gas-path fault diagnosis and prognosis based on thermal model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(3): 731-744.
- [58] 王铁军, 范学领, 孙永乐, 等. 重型燃气轮机高温透平叶片热障涂层系统中的应力和裂纹问题研究进展[J]. *固体力学学报*, 2016, 37(6): 477-517.
- WANG Tiejun, FAN Xueling, SUN Yongle, et al. The stresses and cracks in thermal barrier coating system: A review[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2016, 37(6): 477-517.
- [59] 范学领, 李定骏, 吕伯文, 等. 国之重器, 十载砥砺——重型燃气轮机制造基础研究进展[J]. *中国基础科学*, 2018, 20(2): 32-40.
- FAN Xueling, LI Dingjun, LÜ Bowen, et al. Advances in the fundamentals of the manufacture of industrial gas turbine[J]. *China Basic Science*, 2018, 20(2): 32-40.
- [60] 林浩, 耿海鹏, 周西锋. 重型燃气轮机叶片离心载荷下应力特性的研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(22): 212-218.
- LIN Hao, GENG Haipeng, ZHOU Xifeng. Stress characteristics study of heavy-duty gas turbine blade under centrifugal load[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(22): 212-218.
- [61] GRIEVES, MICHAEL W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. *International Journal of Product Development*, 2005, 2(1/2): 71-84.
- [62] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2017, 66(1): 141-144.
- [63] BRUSA E. Digital twin: Towards the integration between system design and RAMS assessment through the model-based systems engineering[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 99: 1-12.
- [64] GLAESSGEN E, STARGEL D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles[C]//AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference Aiaa, 2012.
- [65] TAO F, SUI F, LIU A, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(11-12): 3935-3953.
- [66] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. *CIRP Annals*, 2017 66(1): 141-144.
- [67] ZHUANG C, LIU J, XIONG H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96: 1149-1163.
- [68] TAO F, ZHANG M, LIU Y, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 169-172.
- [69] WANASINGHE T R, WROBLEWSKI L, PETERSEN B, et al. Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 104175-104197.
- [70] TUEGEL E J, INGRAFFEA A, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 2011(1687-5966).
- [71] ROSSINI R, CONZON D, PRATO G, et al. REPLICA: A solution for next generation IoT and digital twin based fault diagnosis and predictive maintenance[C]// Conference on

- Security, Artificial Intelligence, and Modeling for the Next Generation Internet of Things, 2020.
- [72] PLIEGO M A, GARCÍA, PINAR P, et al. A survey of artificial neural network in wind energy systems[J]. *Applied Energy*, 2018, 228(C): 1822-1836.
- [73] VICTORINO J, RIBEIRO E, SILVA R, et al. Industry 4.0-digital twin applied to direct digital manufacturing[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2019, 890: 54-60.
- [74] MICHAEL G. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication[R]. White Paper, 2014.
- [75] HU W, HE Y, LIU Z, et al. Towards a digital twin: Time series prediction based on a hybrid ensemble empirical mode decomposition and BO-LSTM neural networks[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2020, 143(5): 1-51.
- [76] DOUCOURE B, AGBOSSOU K, CARDENAS A. Time series prediction using artificial wavelet neural network and multi-resolution analysis: Application to wind speed data[J]. *Renewable Energy*, 2016, 92(C): 202-211.
- [77] SCHROEDER G N, STEINMETZ C, PEREIRA C E, et al. Digital twin data modeling with automationML and a communication methodology for data exchange[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2016, 49(30): 12-17.
- [78] ZACCARIA V, STENFELT M, ASLANIDOU I, et al. Fleet monitoring and diagnostics framework based on digital twin of aero-engine[C]// *Asme Turbo Expo*, 2018, GT2018-76414.
- [79] LI C, MAHADEVAN S, YOU L, et al. Dynamic bayesian network for aircraft wing health monitoring digital twin[J]. *AIAA Journal*, 2017, 55(3): 1-12.
- [80] GE Digital. Digitize assets and processes to enable better industrial outcomes. 2018 WHITE PAPER[EB/OL]. <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>.
- [81] WEBER A. GE 'predix' the future of manufacturing[J]. *Assembly*, 2017, 60(3): GE70-GE76.
- [82] Siemens. A Practical Guide to Digitalization for the Power Industry. 2017 WHITE PAPER[EB/OL]. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465>.
- [83] Siemens. Engineering lifecycle management[EB/OL]. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/industries/energy-utilities/engineering-lifecycle-management.html>.
-
- 作者简介:** 辛小鹏, 男, 1984 年出生, 工程博士生, 高级工程师。主要研究方向为能源装备透平机械数字孪生智能设计。
E-mail: xinxiaopeng@zju.edu.cn
- 谭建荣, 男, 1954 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 中国工程院院士, 中国机械工程学会副理事长。主要研究方向为复杂装备数字化设计与制造、机械设计及理论、复杂装备健康管理等。
E-mail: egi@zju.edu.cn
- 刘振宇(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复杂装备数字化设计与制造、复杂装备健康管理、数字孪生等。
E-mail: liuzy@zju.edu.cn
- 隋永枫, 男, 1978 年出生, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师。主要研究方向为高端透平装备研发设计。
E-mail: suiyf@htc.cn
- 丁骏, 男, 1988 年出生, 博士。主要研究方向为燃气轮机压气机设计。
E-mail: dingj@htc.cn