

基于数字化技术的燃气—蒸汽联合循环机组状态监测研究

黄泽峪

(中电常熟热电有限公司, 江苏 常熟 215500)

摘要 本文以 GE 6F.03 型燃气—蒸汽联合循环机组为研究对象, 针对其结构复杂、运行参数耦合紧密及传统监测手段实时性不足、诊断精度低等问题, 提出一种基于数字化技术的状态监测系统。通过分析机组机械故障类型, 系统采用分层分布式架构, 整合物理层传感器网络、数据层多源信息处理与应用层智能诊断功能, 以期为机组预测性维护提供技术参考, 对保障电力供应安全、降低非计划停机风险具有积极的实践意义。性能测试结果表明, 系统频谱分析基频误差仅 0.40%, 显著优于传统方法。

关键词 数字化技术; 燃气—蒸汽联合循环机组; 故障诊断; 状态监测

中图分类号: TM611.31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.013

0 引言

GE 6F.03 型燃气轮机全球累计装机量突破 200 台, 处于中国市场规模化部署阶段。其发电出力与燃气耗量适配性良好且能效表现突出, 故在多类应用场景中得到广泛应用。燃气—蒸汽联合循环机组因结构集成度高、运行参数间存在强关联性, 致使燃气轮机运行过程易受多重故障与失效威胁。在此背景下, 对燃气轮机状态演变及潜在故障实施及时有效的监测与预判, 成为提升装备可靠性、保障生产安全的核心举措^[1]。传统监测手段普遍存在响应滞后、辨识精度有限、维护决策倚重经验等局限, 常诱发非预期停机事件并推高运维成本^[2]。基于故障特征的状态监测与预测技术成为研究与应用的焦点。本文以 GE 6F.03 机组为对象, 融合数字化技术构建状态监测系统, 旨在提升机组运行可靠性、延长设备寿命, 并为智能化运维提供实践依据, 对保障电力供应安全与经济效益具有现实意义。

1 GE 6F.03 型燃气轮机结构与故障类型分析

1.1 GE 6F.03 型燃气轮机结构

GE 6F.03 型燃气轮机是 GE Vernova 推出的重型、齿轮驱动 (geared) 燃气轮机, 采用水平分体式 (split-case) 结构, 主要由压气机、燃烧室、高压涡轮、功率涡轮、齿轮箱 (冷端驱动)、发电机、排气系统、辅助系统等组成^[3]。

该机组采用多轴、螺栓转子结构, 整体体积紧凑、功率密度高, 适用于分布式发电、工业热电联产以及偏远或海上电站。其燃烧和热路径检查间隔长达 32 000 小时, 已在全球 35 个国家超过 200 台机组中验证, 具备高效率、低排放和快速调峰能力。

1.2 机械故障类型分析

燃气轮机故障形态可归纳为四大类别: 机械失效、气流通道异常、附属系统紊乱及传感装置失灵^[4]。图 1 所示为典型机械失效形式谱系, 其根源多来自旋转轴系在服役过程中诱发的摩擦耗损、挠曲形变, 以及加工装配环节遗留的尺寸偏差。

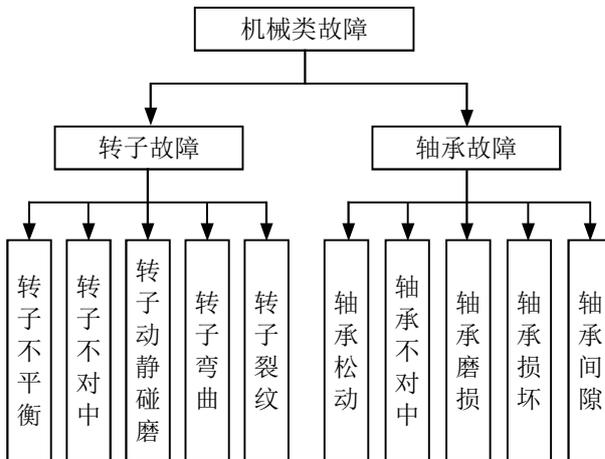


图 1 典型故障类型

作者简介: 黄泽峪 (1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 发电技术、燃气轮机。

2 燃气—蒸汽联合循环机组状态监测系统的构建

2.1 需求分析

燃气—蒸汽联合循环机组状态监测系统的设计需满足安全性、经济性与智能化运维的核心需求，结合机组运行特性与数字化技术发展趋势，具体需求如下：

1. 多源数据集成与实时性要求。机组运行涵盖燃气轮机、蒸汽轮机、余热锅炉等多个子系统，需要对温度、振动、压力、流量等多种传感器数据进行集成^[5]。系统需支持高速数据采集（采样频率 ≥ 128 kHz）与实时传输，确保关键参数（如转子振动、排烟温度）的监测延时低于1秒，避免因数据滞后导致故障漏报。

2. 状态感知与故障预警功能。通过分析振动信号的频域特征（如倍频成分）识别转子不平衡、不对中等典型机械故障，并结合历史数据训练模型，实现故障类型的精准分类与定位。

3. 智能诊断与决策支持。系统需具备数据驱动与模型驱动的混合诊断能力。一方面，利用大数据分析技术量化参数偏差对机组经济性的影响；另一方面，通过平衡流形模型估计气路部件健康参数，实现传感器故障与气路故障的协同诊断。

4. 系统兼容性与可扩展性。硬件需支持模块化设计，允许灵活扩展采集通道；软件层面需提供标准化

数据接口，便于与电厂SIS、MIS系统集成，并支持云计算边缘计算协同架构，实现预测性维护功能的持续升级。

2.2 系统架构

针对上述需求，本研究构建的燃气—蒸汽联合循环机组状态监测系统基于分层分布式架构，设物理层、数据层与应用层三个逻辑层级，系统总体架构如图2所示。

1. 物理层。系统的物理层构成基础，由燃气—蒸汽联合循环机组本体及其感知网络组成，关键设备包括GE 6F.03燃气轮机、蒸汽轮机、发电机、余热锅炉以及辅机等。层内布置电涡流位移、加速度振动、热电偶、压力变送等高性能传感器和智能仪表，直接采集振动、转速、温度、压力、流量等原始物理信号，并通过现场总线与机组的DCS、PLC等控制系统相连，形成完整的数据采集源头^[6]。

2. 数据层。数据层充当系统的中枢神经，负责数据的汇聚、清洗与初步处理。该系统由状态监测平台与数据库组成，集成数据采集、传输、处理及数据中心模块。借助状态监测技术采集燃气轮机关键运行参数；传输过程关联通信协议与具体传输手段；处理环节对采集数据实施解析并完成异常识别；数据中心由多类数据库组建。

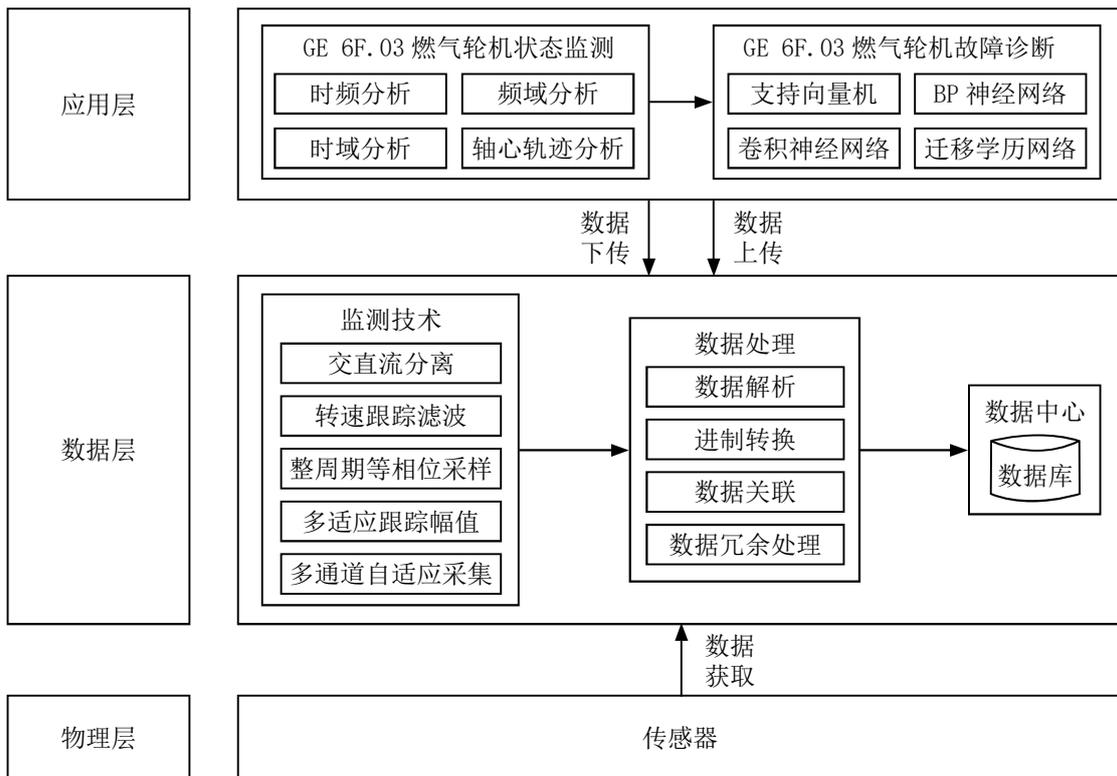


图2 系统总体架构图

3. 应用层。应用层是系统价值的最终体现,面向运维人员提供功能服务。系统针对燃气轮机关键部件实施信号处理及故障判别,动态追踪其运行态势,为运维决策提供关键支撑。

2.3 系统开发

1. 状态监测子系统开发。状态监测子系统研发聚焦高精度数据采集核心诉求,硬件与软件协同设计。硬件构型为模块化,核心架构采用 FPGA 与 ARM 协同处理机制。核心模块涵盖:双冗余电源单元确保供电稳定;瞬态信号采集单元搭载 8 路振动通道及 1 路键相信号调理电路,其内置基于开关电容的转速跟踪滤波电路(LTC1069 芯片),可依键相频率动态调节截止频率,进而高效滤除高频噪声;键相信号自适应调理电路通过数模转换器(D/A)与比较器构成闭环控制,实时跟踪键相幅值变化,避免信号异常或丢失;多通道同步数据获取及存储缓冲由 FPGA 负责,采样环节管控与网络通信运作由 ARM 完成。此外,独立的慢变信号与开关信号采集模块分别负责温度、压力等过程参数和开关量状态的采集。

软件设计采用分层模块化架构,确保系统的实时性与稳定性^[7]。底层为硬件驱动层,封装对 FPGA、A/D 等硬件的操作。核心是功能模块层,通过独立的键相倍频模块、跟踪滤波控制模块和跟踪幅值控制模块,分别实现预测脉冲周期计算、滤波器时钟动态设置及键相信号自适应调理算法。上层业务逻辑层负责解析上位机指令(如采样参数、报警阈值),协调各模块任务,并通过网络传输模块将 FPGA 缓存的数据可靠上传至服务器。这种软硬件紧密结合的设计,为系统提供了高质量的数据采集能力。

2. 故障诊断子系统开发。故障诊断子系统的开发旨在实现对机组状态的智能分析与故障精准定位,其核心是基于数据驱动算法构建一个高效、准确的诊断平台。

软件开发采用 C/S 架构,选用 Qt 框架进行跨平台人机交互界面开发。系统功能模块化设计主要包括:参数设置模块,用于配置采集卡、传感器及报警阈值;实时监测与数据存储模块,负责显示波形并依据策略存储正常与报警数据;历史数据分析模块,集成信号处理(时域、频域、轴心轨迹分析)与智能诊断算法;远程通信单元旨在实现与数据库服务器的数据互通。核心智能诊断能力基于动态链接库(DLL)调用实现,将经 Python 训练的深度卷积残差对抗网络等模型封装成 C++ 可调用接口,实现故障特征的跨域迁移及智能归类。

针对故障数据标签匮乏与分布异质性突出的难题,着重探究了迁移学习驱动的智能诊断方法。DCRWAN 模型包含深度残差特征提取、领域判别和分布差异度量等模块,能够有效提取域不变特征。该模型在由公开数据集作为源域、实验台数据作为目标域的迁移任务中,故障诊断准确率超过 95%,显著提升了在目标设备数据不足条件下的诊断精度和泛化能力。

2.4 性能评估

将本系统与高精度商用 LMS SCADAS 数据采集系统进行同步对比。在转子转速 1 500 rpm 工况下,采集轴承座振动加速度信号。结果显示,本系统频谱分析的基频为 24.90 Hz, LMS 系统为 24.88 Hz,相对误差仅为 0.40%,证明了本系统在信号采集与频谱分析方面具有高精度。

3 结束语

本文构建的数字化状态监测系统有效解决了燃气—蒸汽联合循环机组故障预警与诊断的难点。系统通过多源数据集成、智能算法融合及分层架构设计,实现了高精度实时监测与故障定位,验证了其在工程应用中的可靠性与先进性。本文的研究结果表明,基于迁移学习的诊断模型能够克服数据标签稀缺的局限,提升泛化能力;硬件软协同方案则确保了信号采集的准确性与系统扩展性。

参考文献:

- [1] 许未晴,冀守虎,安永伟,等.机器学习算法在重型燃气轮机健康监测的应用现状[J].液压与气动,2023,47(04):71-86.
- [2] 万震天,谢岳生,田书耘,等.燃气轮机性能监测与故障预警系统开发及工程应用研究[J].热力发电,2022,51(05):149-155.
- [3] 肖新宇,胡尊民,于国强,等.GE6F.03 燃气轮机一次调频测试逻辑优化[J].热力透平,2022,51(04):295-298.
- [4] 马灵楠.浅析燃气轮机系统故障识别及处理方法[J].电力设备管理,2025(17):53-55.
- [5] 潘冰.燃气轮机状态监测与故障诊断方法研究及系统开发[D].杭州:浙江大学,2023.
- [6] 彭道刚,裴浩然,尹德斌,等.基于机器学习的燃气轮机控制系统分层故障诊断[J].热能动力工程,2022,37(12):165-173.
- [7] 张明惠,董胜刚,贡文明,等.一种燃气蒸汽联合循环机组自启停控制系统[J].工业控制计算机,2022,35(10):15-16.