

数字化技术在火电厂汽机设备管理中的应用与展望

李 强

申能吴忠热电有限责任公司 宁夏回族自治区 吴忠 751100

摘要: 本文旨在系统性地探讨数字化技术在火电厂汽机设备管理中的深度应用。文章首先分析了当前汽机设备管理面临的痛点与挑战;其次,详细阐述了以物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)、数字孪生(Digital Twin)等为代表的数字化技术如何赋能汽机设备的状态监测、故障诊断、预测性维护、性能优化及全生命周期管理;再次,通过构建一个集成化的智能汽机设备管理平台架构,展示了各项技术的协同效应;最后,文章对当前应用中存在的数据壁垒、模型泛化能力不足、网络安全风险等问题进行了剖析,并对未来的发展趋势,如“云-边-端”协同、自主进化式AI、与新型电力系统深度融合等方向进行了展望。研究表明,数字化转型是提升火电厂核心竞争力、实现高质量发展的必由之路。

关键词: 火电厂;汽轮机;设备管理;数字化技术;预测性维护;数字孪生;人工智能

引言

电力是现代社会基石,火力发电在全球及我国电力供应中长期占主导。尽管可再生能源发展快,但火电因可控性强、调峰能力优,未来仍将是保障电网安全稳定运行的关键。随着“双碳”战略推进,火电企业面临更高能效标准和更严环保要求,如何通过技术创新挖掘潜力、提升效率、降低成本成为核心课题。汽轮机是火电厂能量转换核心,其状态影响热力循环效率。大型汽轮机结构复杂、工况严苛,故障后果严重。传统设备管理模式依赖固定检修周期或故障后被动维修,存在过度检修浪费资源、突发故障难预防等局限。近年来,物联网等新一代信息技术发展迅猛,为工业设备管理带来变革,能实现设备状态全面感知、实时分析等,推动管理向“预测优化”演进。将先进技术融入火电厂汽机设备管理,是技术升级必然选择,也是火电企业降本增效、绿色转型的战略支点。本文将围绕此主题,探讨数字化技术应用现状、价值、路径及方向。

1 当前火电厂汽机设备管理面临的挑战

1.1 故障诊断滞后,非计划停机损失巨大

传统模式下,对汽机设备的健康状态评估主要依赖于定期巡检和离线数据分析。巡检人员通过听音棒、测振仪等工具进行点检,这种方式主观性强、覆盖范围有限,且无法捕捉瞬态异常。当设备出现早期微弱故障征兆时,往往难以被及时发现。等到故障特征明显、引发报警甚至停机时,设备损伤通常已经较为严重,不仅维修成本高昂,而且一次非计划停机所造成的电量损失可达数百万元。

1.2 维修策略粗放,资源利用效率低下

“到期就修、坏了再修”的粗放式维修策略,导致大量不必要的检修工作。例如,某些关键部件的实际寿命远超设计寿命,但因遵循固定周期仍被提前更换,造成了备件和人工的浪费^[1]。反之,对于一些劣化速度快的部件,固定周期又显得不足,增加了故障风险。这种“一刀切”的方式,使得维修资源无法得到最优配置。

1.3 数据孤岛林立,信息价值未被充分挖掘

现代火电厂虽然配备了分布式控制系统(DCS)、厂级监控信息系统(SIS)等自动化系统,产生了海量的运行数据。然而,这些数据往往分散在不同的系统和部门之中,形成了一个“数据孤岛”。DCS关注实时控制,SIS侧重历史存储,而设备台账、检修记录、备品备件等管理信息又存在于企业资源规划(ERP)或专门的设备管理系统(EAM)中。缺乏有效的数据整合与关联分析手段,使得蕴藏在数据背后的设备健康规律、性能衰减趋势等宝贵信息无法被有效提取和利用。

1.4 专家经验依赖度高,知识传承困难

高水平的汽机故障诊断与处理高度依赖于资深专家的经验。然而,专家资源稀缺,且其经验多以隐性知识的形式存在,难以标准化和系统化。新员工培养周期长,一旦专家退休或离职,其宝贵的知识财富极易流失。在面对新型或复合型故障时,缺乏系统化的知识库支持,诊断效率和准确性都会大打折扣。

2 数字化技术在汽机设备管理中的核心应用

2.1 物联网(IoT)与边缘计算:构建全面感知的神经末梢

物联网技术是实现设备全面感知的基础。通过在汽机的关键部位(如轴承、轴瓦、转子、汽缸、阀门等)

部署高精度、高可靠性的传感器网络（包括振动、温度、压力、位移、声发射等），可以7×24小时不间断地采集设备的多维度运行状态数据。这些传感器构成了设备的“神经末梢”，将物理世界的运行状态实时映射到数字世界。边缘计算技术则部署在靠近数据源的现场侧（如就地控制柜或边缘网关）。它能够在数据产生的源头进行初步的预处理、过滤和特征提取，例如进行快速傅里叶变换（FFT）分析振动信号的频谱特征，或计算关键参数的统计值。这不仅大幅减少需要上传至中心服务器的数据量，降低网络带宽压力，还能实现毫秒级的本地实时响应，例如在检测到剧烈振动时立即触发连锁保护，防止事故扩大。

2.2 大数据平台：打造统一的数据底座

大数据平台是整个数字化体系的“心脏”。它负责接收来自IoT层、DCS、SIS、EAM、ERP等多个系统的异构数据，并进行清洗、融合、存储和管理。通过建立统一的数据模型和标准，打破数据孤岛，将设备的实时运行数据、历史检修记录、备件库存信息、设计参数、环境因素等多源信息进行深度关联，形成完整的设备全景画像^[2]。这个强大的数据底座为上层的智能分析和应用提供了坚实支撑。

2.3 人工智能（AI）与机器学习（ML）：赋予设备管理智慧大脑

AI/ML是实现从“看得见”到“看得懂”再到“会思考”的关键。在汽机设备管理领域，其应用主要体现在以下几个方面：（1）智能故障诊断：利用深度学习模型（如卷积神经网络CNN、长短期记忆网络LSTM）对复杂的振动、声音等时序信号进行自动特征学习和模式识别。模型可以精准区分不平衡、不对中、动静碰摩、轴承磨损、叶片裂纹等多种典型故障，并能对未知故障模式进行聚类分析，辅助专家判断。（2）预测性维护（PdM）：这是AI最核心的价值体现。通过构建设备关键部件（如轴承、转子）的剩余使用寿命（RUL）预测模型，系统可以基于当前的运行状态和历史劣化趋势，科学地预测其未来的失效时间。这使得维修计划可以从“定时”转变为“按需”，在故障发生前的最佳时机安排检修，最大化设备可用率，同时最小化维护成本。（3）性能优化与能效分析：AI模型可以分析汽机在不同负荷、不同主蒸汽参数下的运行效率，识别出偏离最佳工况的运行点，并给出优化建议。例如，通过分析滑阀特性曲线，指导运行人员调整阀门开度，以减少节流损失，提升热效率。

2.4 数字孪生（Digital Twin）：构建虚实交互的决策沙盘

数字孪生技术为汽机设备管理提供了一个革命性的可视化和仿真平台。它通过在虚拟空间中构建一个与物理汽机完全对应的、高保真的数字模型。这个模型不仅包含了设备的几何、物理属性，还通过实时数据流与物理实体保持同步。数字孪生的应用价值在于：（1）可视化监控与仿真：管理人员可以在三维可视化界面上直观地查看设备内部任何一点的实时状态，如同拥有“透视眼”^[3]。更重要的是，可以在数字孪生体上进行各种“假设分析”（What-if Analysis），例如模拟在不同负荷下启动或变工况运行时的热应力分布，评估操作方案的安全性。（2）故障复现与根因分析：当物理设备发生故障后，可以在数字孪生体上精确复现故障发生前后的全过程，结合多维数据进行深度回溯，快速定位根本原因，避免同类故障再次发生。（3）培训与演练：新员工可以在无风险的虚拟环境中进行启停机、故障处理等操作培训，大大缩短了培养周期，提升了应急处置能力。

3 集成化智能汽机设备管理平台架构

为了充分发挥各项数字化技术的协同效应，需要构建一个层次清晰、功能完备的集成化平台。该平台通常采用“云-边-端”三层架构：（1）端（Edge/Field Layer）：即现场层，由遍布汽机各处的智能传感器、执行器和边缘计算节点组成。负责原始数据的采集、本地预处理和实时控制。（2）边（Edge Computing Layer）：边缘计算层部署在厂区的边缘服务器或网关上。它承担着数据汇聚、协议转换、实时分析（如简单的阈值报警、FFT分析）以及与云端的协同计算任务。它是连接物理世界与数字世界的桥梁。（3）云（Cloud Platform Layer）：云端是平台的大脑和数据中心。它包含以下几个核心模块：一是数据湖/数据仓库：存储和管理所有结构化与非结构化数据。二是AI/ML引擎：提供模型训练、部署、管理和迭代更新的能力。三是数字孪生引擎：负责构建、驱动和渲染高保真数字模型。四是应用服务层：提供面向用户的各类应用，如智能预警中心、预测性维护工单系统、能效分析报告、三维可视化监控大屏、移动APP等。通过这一架构，实现了从数据采集、边缘智能、云端分析到应用反馈的完整闭环，为汽机设备管理提供了全方位的智能化支持。

4 面临的挑战与对策

尽管前景广阔，但数字化技术在火电厂的深度应用仍面临诸多挑战：（1）数据质量与治理难题：现场传感器可能存在漂移、失效等问题，导致数据失真。必须建立严格的数据质量管控体系，包括数据校验、异常值处理和传感器健康管理。（2）模型泛化能力与可解释性：AI模

型在特定机组上训练效果良好,但迁移到其他型号或工况的机组时,性能可能下降。需要采用迁移学习、联邦学习等技术提升模型泛化能力。同时,黑盒模型的决策过程缺乏透明度,影响了工程师的信任度,因此需要发展可解释AI(XAI)技术^[4]。(3)网络安全风险:将关键生产设备接入网络,极大地扩展了攻击面。必须构建纵深防御体系,从网络隔离、访问控制、入侵检测到数据加密,全方位保障系统安全。(4)组织变革与人才缺口:数字化转型不仅是技术升级,更是管理流程和组织文化的变革。需要培养既懂电力生产又懂数字技术的复合型人才,并推动跨部门协作。

5 未来展望

5.1 “云-边-端”协同智能深化

边缘计算节点将集成更强大的AI推理芯片和轻量化模型,能够在本地完成如轴承早期磨损识别、转子热弯曲趋势判断等复杂任务,实现毫秒级响应与闭环控制,极大提升系统实时性与可靠性。而云端平台则聚焦于跨机组、跨电厂的大数据分析与知识沉淀,通过联邦学习等隐私计算技术,在不共享原始数据的前提下,实现模型的全局优化与泛化能力提升,形成“边缘敏捷感知、云端智慧决策”的高效协同生态。

5.2 自主进化式AI系统

未来的智能管理系统将具备持续在线学习能力,能够自动从每一次运行工况变化、每一次维修反馈、甚至每一次误报/漏报中提取经验,动态调整和优化其诊断与预测模型。这种“越用越聪明”的自适应特性,将显著降低对人工干预的依赖,使系统在面对未知故障或极端工况时展现出更强的鲁棒性与智能性。

5.3 与新型电力系统深度融合

随着风电、光伏等间歇性可再生能源占比不断提高,火电机组的角色正从“基荷电源”转向“灵活调节电源”,频繁启停与深度调峰成为常态。在此背景下,数字化系统必须打破电厂内部边界,主动对接电网调度指令、新能源功率预测、电力市场电价信号等外部信息。通过构建

“设备健康—运行经济性—电网需求”三位一体的多目标优化模型,系统可在保障设备安全寿命的前提下,智能制定最优的负荷响应策略与检修窗口,实现电厂经济效益与电网支撑能力的双重最大化。

5.4 全生命周期价值链延伸

从设计制造阶段的数字样机验证,到安装调试阶段的虚拟联调,再到运行维护阶段的智能健康管理,直至退役阶段的残值评估与材料回收,全链条数据的贯通将催生全新的服务模式,如“性能保证+”合同能源管理、基于使用状态的备件订阅服务等,推动火电产业价值链的重构与升级。

6 结语

数字化技术正在深刻重塑火电厂汽机设备管理的范式。从全面感知到智能分析,从预测维护到优化决策,数字化不仅解决了传统管理模式的诸多痛点,更开辟了提升设备可靠性、经济性和安全性的一条全新路径。尽管在数据、模型、安全和人才等方面仍存在挑战,但其带来的巨大价值已毋庸置疑。对于火电企业而言,拥抱数字化转型已不再是“要不要做”的选择题,而是关乎生存与发展的必答题。通过系统规划、分步实施、持续迭代,构建以数据为驱动、以AI为核心、以数字孪生为载体的智能设备管理体系,火电行业定能在新时代的能源格局中焕发新的生机与活力,为国家能源安全和“双碳”目标的实现贡献坚实力量。

参考文献

- [1]武勇.火电厂设备状态检修技术与管理研究[J].中国设备工程,2023,(21):163-165.
- [2]刘朝玉,葛鑫磊,李玉玺.基于深度学习的火电厂设备检修管理系统设计[J].信息与电脑,2025,37(14):141-143.
- [3]徐岩峰,裴志铭.设备诊断技术在火电厂设备检修管理中的运用[J].电力设备管理,2025,(02):81-83.
- [4]武勇.火电厂设备状态检修技术与管理研究[J].中国设备工程,2023,(21):163-165.