

Digital modeling and intelligent operation and maintenance system construction and application practice of steel machinery equipment

Fuqiang Jia

Lianyungang Hualie Alloy Group Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222042, China

Abstract

With the rapid maturity of digital twins, industrial internet, big data, and artificial intelligence technologies, the digital modeling and intelligent operation and maintenance of steel equipment have become the core direction of industry transformation. Digital modeling can achieve full-element and full-cycle bidirectional mapping between physical equipment and virtual models, providing a high-precision digital foundation for intelligent operation and maintenance; while the intelligent operation and maintenance system can realize real-time perception of equipment health status, intelligent fault diagnosis, prediction of remaining service life, and optimization of maintenance decisions based on digital models, completely transforming the traditional operation and maintenance mode. Based on this, this paper systematically studies the core technologies of digital modeling for steel mechanical equipment, builds a full-process intelligent operation and maintenance system, and combines industrial field practice to verify its application effectiveness, providing a feasible implementation reference for the industry.

Keywords

Steel machinery equipment; Digital modeling; Digital twin; Intelligent operation and maintenance; Predictive maintenance

钢铁机械装备的数字化建模与智能化运维体系构建及应用实践

贾福强

连云港华乐合金集团有限公司, 中国 · 江苏 连云港 222042

摘要

随着数字孪生、工业互联网、大数据与人工智能技术的快速成熟, 钢铁装备的数字化建模与智能化运维已成为行业转型的核心方向。数字化建模可实现物理装备与虚拟模型的全要素、全周期双向映射, 为智能化运维提供高精度的数字底座; 而智能化运维体系则可基于数字化模型, 实现设备健康状态的实时感知、故障智能诊断、剩余使用寿命预测与维护决策优化, 彻底变革传统运维模式。基于此, 本文系统研究了钢铁机械装备的数字化建模核心技术, 构建了全流程智能化运维体系, 并结合工业现场实践验证了其应用成效, 为行业提供可落地的实施参考。

关键词

钢铁机械装备; 数字化建模; 数字孪生; 智能化运维; 预测性维护

1 钢铁机械装备数字化建模核心技术与实现方法

1.1 多源异构数据的标准化采集与治理

钢铁装备运行过程中产生的数据具有多源、异构、高维、强时序的特点, 涵盖设备运行工况数据(振动、温度、压力、转速、电流等)、生产工艺参数、设备设计图纸与台账数据、历史检修记录、故障案例数据五大类。针对现场强电磁干扰、数据采集频率差异大、数据质量参差不齐的问题,

采用“边缘网关+数据中台”的两级治理架构: 在边缘层, 通过支持 OPCUA、Modbus 等工业协议的智能采集网关, 实现 2000+ 监测点数据的实时采集, 针对振动等高频信号采用最高 20kHz 的采样频率, 保障故障特征信号的完整捕捉; 在平台层, 构建统一的装备数据中台, 通过数据清洗、缺失值补充、时序对齐、归一化处理等操作, 完成多源异构数据的标准化转换, 消除数据孤岛, 为后续建模提供高质量的数据基础^[1]。

【作者简介】贾福强(1983-), 男, 中国内蒙古包头人, 硕士, 工程师, 从事节能提效与环境治理研究。

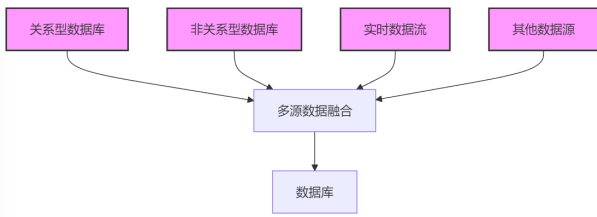


图 1: 多源异构数据

1.2 全要素数字孪生多维度建模

1.2.1 几何建模

基于装备三维 CAD 图纸，采用轻量化建模技术完成装备整机与核心零部件的三维几何模型构建，还原装备的空间结构、装配关系与尺寸参数，适配工业场景的实时渲染与可视化需求。

1.2.2 物理建模

基于有限元分析与力学机理，构建核心部件的物理特性模型，模拟轧机辊系的应力分布、齿轮箱的啮合受力、轴承的疲劳磨损等物理特性，量化装备运行过程中的物理参数变化。

1.2.3 行为建模

采用“机理模型+数据驱动”的混合建模方法，基于装备运行机理与历史运行数据，构建不同工况下的装备运行行为模型，模拟装备在负荷波动、工艺调整等场景下的动态响应，实现虚拟模型与物理实体的行为同步。

1.2.4 规则建模，将国家运维标准、设备检修规程、故障判据、工艺约束、专家经验等转化为模型内置的标准化规则库，为后续智能化运维提供判断依据。

1.3 模型动态校准与迭代优化

钢铁生产工况波动频繁，静态模型无法适配现场复杂的运行环境，因此建立模型的动态校准机制。基于装备实时运行数据，采用自适应参数优化算法，对模型的物理参数、行为特征进行实时校准，保障数字孪生体与物理实体的映射误差控制在 5% 以内；同时，基于新增的检修记录、故障案例数据，持续迭代优化模型的故障特征库与规则库，实现模型精度的全生命周期持续提升^[2]。

2 钢铁机械装备智能化运维体系整体架构与核心功能模块

基于上述数字化建模底座，本文构建了“边缘感知层-网络传输层-平台服务层-场景应用层”四层架构的钢铁机械装备智能化运维体系，实现装备运维从“经验驱动”向“数据驱动”、从“被动维修”向“主动预测性维护”的全面转型。

2.1 体系整体架构

边缘感知层是体系的感知神经末梢，部署振动传感器、温度传感器、压力变送器、高清摄像头等智能感知终端，搭配边缘采集网关，完成装备运行数据、环境数据的实时采集、边缘预处理与本地告警，实现对装备运行状态的全面感知；

网络传输层采用“5G+工业以太网”的双链路传输架构，针对高频振动信号采用低时延工业以太网传输，针对巡检、

远程运维等场景采用 5G 无线传输，保障数据传输的实时性、稳定性与安全性；

平台服务层是体系的核心中枢，基于工业互联网平台搭建，包含数据中台、数字孪生引擎、人工智能算法引擎、运维知识图谱四大核心组件，为上层应用提供模型服务、算法服务与数据服务；

场景应用层是体系的价值落地载体，面向钢铁企业运维部门、生产部门、管理部门的不同需求，搭建对应的场景化应用模块，实现运维全流程的数字化、智能化管控。

2.2 体系核心功能模块

2.2.1 设备全生命周期健康管理模块

该模块是智能化运维的核心基础，基于数字孪生模型与实时采集数据，实现装备健康状态的全周期管控。首先，通过实时数据映射，在数字孪生体中可视化呈现装备各部件的运行参数与健康状态，实现“所见即所得”的透明化管控；其次，基于小波变换、经验模态分解等信号处理技术，提取装备故障特征信号，结合卷积神经网络、长短期记忆网络等人工智能算法，构建故障智能诊断模型，实现轴承磨损、齿轮箱故障、液压系统泄漏、辊系疲劳等 300+ 典型故障的智能识别，诊断准确率可达 95% 以上；最后，基于设备劣化规律与历史运行数据，构建剩余使用寿命预测模型，精准预判核心部件的劣化趋势与剩余使用寿命，为预测性维护提供决策依据。

2.2.2 智能预测性维护决策模块

该模块是实现运维模式转型的核心，区别于传统的定期维修模式，基于设备健康状态与剩余使用寿命预测结果，构建智能维护决策模型。综合考虑生产计划安排、备件库存情况、检修人员资源、停机成本等多维度约束条件，采用遗传算法、粒子群优化算法等运筹优化方法，生成最优的维护时机、维护范围与维护方案，自动生成维护工单，实现“按需维护”，彻底解决传统模式的“过修”与“欠修”问题。同时，针对突发故障预警，可自动生成应急处置方案，匹配对应的备件、检修人员与处置流程，缩短故障处置时长，降低非计划停机损失。

2.2.3 运维全流程闭环管控与知识沉淀模块

该模块实现运维业务的全流程数字化闭环管控，覆盖故障预警、工单派发、现场检修、验收归档、效果评估的全流程。通过移动端 APP 实现工单的自动派发与进度跟踪，现场检修人员可通过 AR 眼镜调用数字孪生模型与检修规程，实现远程专家指导与可视化检修，大幅提升检修效率；同时，构建运维知识图谱，将历史故障案例、检修经验、设备参数、标准规程等数据进行结构化沉淀，形成可复用、可传承的运维知识库，解决专家经验传承难的问题，大幅缩短年轻运维人员的培养周期。

2.2.4 生产-运维协同优化模块

针对钢铁行业生产与装备强耦合的特点，该模块打破运维部门与生产部门的数据壁垒，实现设备运行状态与生产工艺参数的联动优化。基于设备健康状态，动态调整生产工艺

参数,避免设备带病高负荷运行导致的故障扩大与产品质量缺陷;同时,基于生产计划的负荷安排,提前预判设备的劣化趋势,合理安排维护窗口期,实现生产与运维的协同优化,在保障设备安全运行的前提下,最大化生产线的生产效率^[3]。

3 工业现场应用实践

本文所构建的数字化建模与智能化运维体系,已在国内某大型钢铁联合企业 2250mm 热连轧机组完成落地应用,该机组是该企业热轧板带生产线的核心装备,设计年产能 550 万吨,主要生产汽车用钢、家电用钢等高附加值产品,对生产线的连续运行稳定性与产品精度要求极高。

3.1 项目实施背景

该机组传统运维模式存在显著痛点:一是非计划停机风险高,年均非计划停机次数达 12 次以上,单次非计划停机造成的直接经济损失超 120 万元,年停机损失超 1400 万元;二是故障诊断高度依赖老专家经验,故障定位平均时长超 4 小时,且易出现误判、漏判问题;三是运维成本居高不下,定期维修模式导致备件过度更换,年备件消耗成本超 5200 万元,年机组运维总成本超 8500 万元;四是生产与运维协同性不足,因设备状态波动导致的产品质量异议年均超 30 起,造成较大的经济损失。

3.2 项目实施内容

针对该机组的运行特点与运维痛点,基于本文提出的技术体系完成全流程落地实施。首先,完成机组全要素数字化建模,针对粗轧机组、精轧机组、卷取机、输送辊道等全流程装备,构建了四维一体的数字孪生模型,部署了 2300 余个智能感知终端,实现主传动齿轮箱、工作辊轴承座、液压压下系统、卷取机主轴等核心部件的全维度监测,高频振动信号采样频率达 20kHz,保障故障特征的完整捕捉;其次,搭建了机组智能化运维平台,部署了健康状态实时监测、故障智能诊断、剩余使用寿命预测、预测性维护决策、AR 辅助检修、生产-运维协同优化等全功能模块,构建了包含 320 条典型故障案例的运维知识图谱与规则库;最后,完成了与企业现有 MES 系统、ERP 系统、备件管理系统的对接,实现了运维数据与生产、管理数据的互联互通,保障了体系的全流程落地。

3.3 关键难点解决

针对项目实施过程中的现场难点,形成了针对性的解决方案:一是针对热轧车间强电磁干扰、高温高湿的恶劣环境,采用工业级防护的智能传感器与抗干扰传输线路,搭配边缘端数据预处理算法,保障了数据采集的稳定性与准确性,数据有效率达 99.8% 以上;二是针对轧机多工况、变负荷运行导致的故障特征提取难的问题,采用自适应工况识别算法,针对不同轧制工况建立对应的故障特征库与诊断模型,解决了变工况下故障误报率高的问题;三是针对模型与现场工况适配性不足的问题,建立了月度模型校准机制,基于当月运行数据与检修记录,持续迭代优化模型参数,保障了模型的长期可用性^[4]。

4 应用成效与行业价值

4.1 量化应用成效

该体系在该热轧机组落地应用 2 年来,取得了显著的应用成效,各项指标均实现大幅优化。

一是非计划停机管控成效显著,机组年均非计划停机次数从 12 次降至 2 次以内,非计划停机时长下降 78%,年减少停机损失超 1000 万元;二是故障诊断与处置能力大幅提升,故障智能诊断准确率从传统模式的 62% 提升至 96%,故障平均定位时长从 4 小时缩短至 15 分钟以内,故障处置效率提升 90% 以上;三是运维成本大幅下降,预测性维护模式彻底解决了过修问题,备件库存成本下降 24%,年备件消耗成本减少 1200 余万元,机组年运维总成本下降 32%,年直接经济效益超 3000 万元;四是生产与质量协同提升,因设备状态波动导致的产品质量异议下降 85%,产品合格率提升 0.9 个百分点,吨钢综合能耗下降 1.3kgce,助力企业实现降本增效与绿色低碳转型。

4.2 行业推广价值

本文构建的数字化建模与智能化运维体系,具有极强的行业可复制性与推广价值。一是为钢铁行业大型机械装备的数字化转型提供了标准化的实施路径,解决了传统运维模式的核心痛点,推动钢铁装备运维模式的全面变革;二是通过全生命周期的装备健康管控,有效延长了装备使用寿命,减少了备件消耗与非计划停机的能源浪费,契合“双碳”战略下钢铁行业绿色低碳发展的需求;三是通过运维知识图谱的构建,实现了专家经验的标准化沉淀与传承,解决了钢铁行业运维人才断层的问题,为行业智能化转型提供了人才支撑;四是该体系可快速适配高炉、转炉、连铸机、冷轧机组等其他钢铁核心装备,也可推广至矿山、重型机械、化工等其他流程工业领域,具有广阔的应用前景。

5 结论

综上所述,数字化建模与智能化运维体系可有效解决钢铁装备非计划停机风险高、运维成本高、故障诊断依赖经验、生产运维协同不足等问题,是钢铁行业高端化、智能化、绿色化转型的核心支撑。未来,随着工业大模型、边缘智能、数字孪生技术的持续发展,可进一步拓展体系的应用边界,构建跨机组、全厂区的装备运维协同优化体系,打造全产业链的装备运维生态,为制造业的智能化转型提供更强有力的支撑。

参考文献

- [1] 黄翠.人才引擎驱动钢铁机械制造业发展[N].海峡人才报,2025-11-19(002).
- [2] 刘正茂.钢铁冶炼机械设备故障诊断及处理措施研究[J].冶金与材料,2025,45(10):85-87.
- [3] 潘俊伟.数字化技术在钢铁企业机械管理中的应用与实践[J].中国战略新兴产业,2025,(11):23-25.
- [4] 明小红.绿色钢铁冶金机械的研发与应用[J].新疆钢铁,2024,(01):23-25.