

火力发电厂金属监督全流程数字化

夏 鹏, 王雨萌, 张仁珊, 娄德涵

国能浙江宁海发电有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2025年7月18日; 录用日期: 2025年8月28日; 发布日期: 2025年9月5日

摘 要

本项目构建了一套针对火力发电厂金属监督工作的信息化管理系统。该系统集成了高效的数据检索功能与检验计划自动生成机制, 实现了图纸与台账信息的实时互动, 显著提高了管理效率与成效。系统的核心目标是减少金属缺陷导致的生产安全事故风险, 保障发电厂运行的安全性与可靠性。

关键词

金属技术监督, 全流程数字化, 实时互动

Digitalization of the Entire Process of Metal Supervision in Thermal Power Plants

Peng Xia, Yumeng Wang, Renshan Zhang, Dehan Lou

CHN Energy Zhejiang Ninghai Power Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: Jul. 18th, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

This project has built an information management system for the metal supervision work at thermal power plants. The system integrates efficient data retrieval functions and an automated inspection plan generation mechanism, achieving real-time interaction between drawings and ledger information, significantly improving management efficiency and effectiveness. The core goal of the system is to reduce the risk of production safety accidents caused by metal defects, ensuring the safety and reliability of power plant operations.

Keywords

Metal Technology Supervision, Fully Digitalized Process, Real-Time Interaction

文章引用: 夏鹏, 王雨萌, 张仁珊, 娄德涵. 火力发电厂金属监督全流程数字化[J]. 冶金工程, 2025, 12(3): 144-149.

DOI: 10.12677/meng.2025.123018

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业物联网(IIoT)技术的迅猛发展,数字孪生(Digital Twin)技术在智慧能源行业应用日益广泛[1]。在火力发电领域,高温高压环境下金属部件的失效风险直接威胁机组安全,传统金属监督模式面临数据孤岛、被动响应、经验依赖三大瓶颈。设备故障诊断与预测是工业生产中的重要环节[2],却鲜有聚焦火电厂金属监督这一多源异构数据融合、高精度定位需求的特殊场景。

本研究提出“金属监督全流程数字化系统”,首次将数字孪生架构深度应用于火电厂焊口级金属部件管理,通过三维模型-KKS编码-实时运行数据的动态耦合,实现了从“定期巡检”到“预测性维护”的范式跃迁。这一实践不仅响应了《国家能源局关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》(2023)的战略要求,更填补了IIoT技术在高温承压设备全生命周期管理中的落地空白。

2. 金属监督工作研究背景和必要性

在金属监督管理领域,随着机组运行年限的累积,设备失效风险水平显著提升,对设备运行维护与检修工作的要求亦更为严格。传统管理模式存在图纸文档管理分散、被动式检修、数据价值挖掘不足、检验位置描述规范性欠缺等问题,导致缺陷漏检与过度检验并存、历史检修记录利用效率低下、整体检修效能不彰。当前IIoT研究多集中于通用设备状态监测,但对火电厂金属监督的特殊性关注不足[3],当前,伴随火电机组向大容量、高参数方向发展,金属监督技术标准持续提高,数字化是火力发电行业发展的必然趋势[4],数字孪生技术在火电领域初露头角,但现有实践存在明显局限,模型多用于可视化展示,缺乏与业务系统(如检验计划生成)的智能闭环,缺陷演化受材料、应力、介质腐蚀等多变量非线性影响,本研究首创“KKS编码+焊口ID”的双重定位机制,将三维模型压缩至工业级轻量化水平,并通过WebService接口实现检验计划自动生成,开发基于迁移学习的预警模型,复用锅炉受热面管超温记录(10万+条)预训练网络,显著提升小样本缺陷识别准确率。

3. 金属技术监督管理系统设计与实现方法

本项目基于火力发电厂金属监督管理的业务需求及现有软硬件基础,通过三维可视化、数据可视化与大数据分析技术,构建“火力发电厂金属监督三维智能管理系统”,涵盖需求分析、功能设计、算法研究与系统开发。平台构建了“一个核心平台、多类专业台账、多项辅助工具”的服务体系,重点实现关键设备的三维可视化建模与设备数据的三维化监督管理。平台集成业务功能模块,支持高效访问设备多维信息,实现数据分类记录、综合统计分析、劣化趋势评估及检验计划制定等功能。在此基础上,利用AI模型建立设备风险监控与预警机制,实现对潜在事故的早期识别与处置。

3.1. 系统的技术架构

系统采用混合技术架构(B/S+C/S+移动端),三端数据通过Web服务端实现毫秒级同步,保障“一处录入,全局可视”。

基于B/S架构的Web端涵盖核心功能模块,包括三维模型展示、金属监督等管理功能,并为C/S客户端及移动端提供数据接口服务。

基于 C/S 架构的客户端部署于工作站终端，实现金属监督信息的录入与查询功能，优化数据访问性能，提升数据交换效率。

基于 Android 开发框架的移动端 App 部署于移动终端设备，通过 Wi-Fi 网络实现数据交互，支持现场信息录入、查阅及审批流程。系统技术架构见图 1。

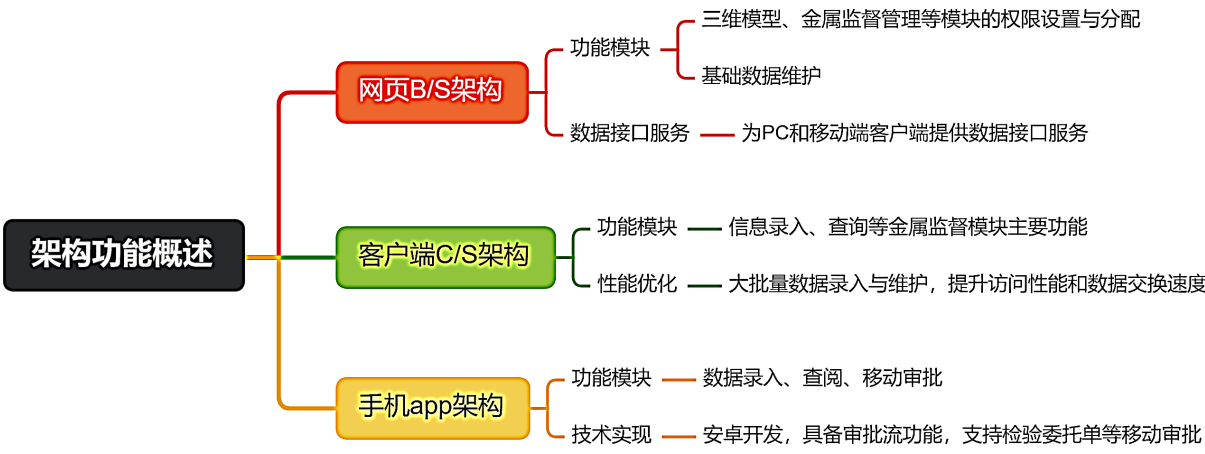


Figure 1. System technology architecture
图 1. 系统技术构架

3.2. 数据库与三维模型

数据库范式设计以第三范式(3NF)为核心目标，将存在间接依赖关系的字段拆分至独立实体(例如，在“特种设备台账”中，应将“制造单位”字段独立为字典表并通过唯一标识符关联)。三维模型与设备台账基于唯一性标识(KKS 编码 + 焊口 ID)建立一对一映射关系。支持单台设备关联多条检验记录。整合实时运行参数(源自 DCS 接口)及历史缺陷记录进行预警。

三维数据库的核心功能主要集中于高效存储各类三维模型数据，同时通过标准化的数据接口无缝调用金属监督数据库中的关键信息，包括部件基础信息、缺陷数据、统计分析结果等，以支持工业监控和决策过程。此外，该数据库还具备数据压缩、索引优化和实时同步能力，确保在复杂环境中快速访问和整合多源信息，提升整体系统的可靠性与可扩展性。

金属监督数据库核心功能为存储特种人员管理、焊接工程管理、金属检验试验管理、金属监督台账、统计分析信息、特种设备台账及防磨防爆管理等专业数据，为三维模型可视化呈现及统计图表生成提供基础数据支撑。考虑到电厂各机组运行多年，已累积了大量金属监督数据，本系统的建设将充分考虑新旧系统基础编码一致性和数据兼容性，避免已有历史经验数据缺失。

基于该数据架构，金属监督全流程涉及的图纸文档及检修数据可实现高效管理。同时，系统关联信息可与三维模型集成展示，设备缺陷可在系统中以差异化色彩进行标注，历史检修记录的利用效能显著提升。用户可实时调阅历史检验数据，为后续检验工作提供决策支持。

电厂范围内特种设备台账包括：锅炉台账、压力容器台账、简单压力容器台账、压力管道台账、电梯台账、起重机械台账、专用机动车辆台账、设备安全附件台账、特种设备检验报告台账。数据库具备防磨防爆检查报告和台账的导入、查看、下载功能。数据库见图 2。

金属监督管理系统通过 WebService 接口服务实现数据共享，三维系统调用时传递双方约定的统一编码(KKS 编码)参数，金属监督管理平台返回 JSON 格式化数据供三维 BIM 系统展示信息。

金属监督 KKS 编码层级要求到焊口层级，焊口编码建议采用 KKS + 焊口 ID 组成，焊口 ID 如设计

院图纸已标识,则采用图纸标识编号,如果没有标识则与三维系统协商,由电厂方统一发布一套唯一性编码。金属台账的部件编号与三维模型的编号必须统一。

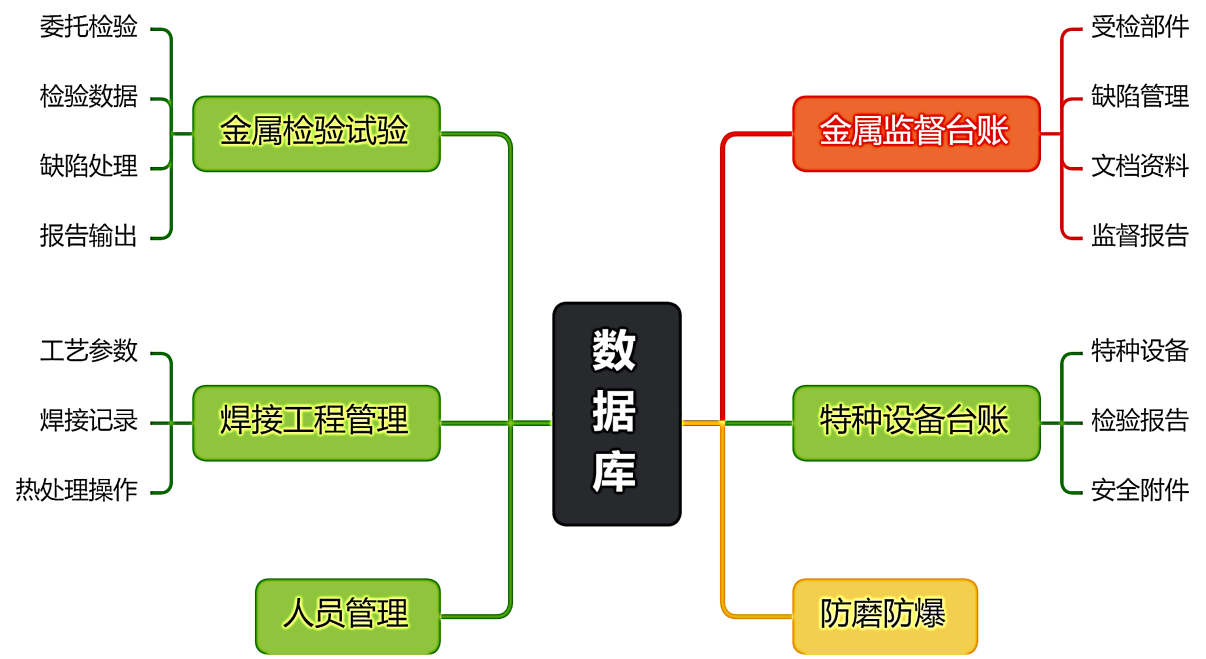


Figure 2. Database
图 2. 数据库

由电厂方提供运行数据相关接口,主要有锅炉壁温实时监控数据接口,方便金属监督系统实现超温记录统计和偏差分析,指导检修运行,减少锅炉损伤。

3.3. 金属监督数据分析

金属监督数据分析是一种综合性的分析方法,它通过系统性地分析金属监督过程中收集的各种数据,包括缺陷的发生位置、频率以及相关环境因素(如温度、湿度或应力条件),从而深入研究缺陷的分布模式和影响因素。该方法整合了机组设备的当前缺陷数据和历史缺陷记录,通过对比分析(如时间序列比较或趋势评估),揭示缺陷的形成机理、演化规律及其潜在原因。进一步地,这种分析能够识别高风险区域和周期性故障模式,为当前设备检修和未来维护策略的制定提供科学依据,优化资源配置,提升设备可靠性和运行效率,确保整个系统的安全稳定运行。

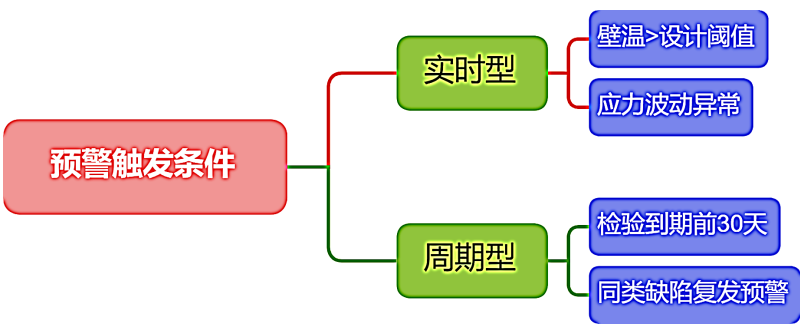


Figure 3. Metal supervision and early warning
图 3. 金属监督数据

服务器端数据监测与预警涵盖受热面管寿命分析、炉内温度变化分析等子领域。服务器端运行的数据监测功能对锅炉设备、汽机设备、压力容器及压力管道等关键设备的运行参数实施实时监测与报警；同时基于锅炉、压力容器及安全附件的检验/校验有效期建立预警机制，避免发生超期未检情况。三维展示端通过调用服务器端接口数据，将报警信息及预警结果以文字或图例形式直观呈现。金属监督预警见图3。

通过该功能的实施，可有效克服既往数据价值挖掘不足的局限性，推动设备维护模式由被动响应向主动预防转型，从而规避漏检缺陷与过度检修的现象，最终实现检修效能的最优化。

传统金属监督工作的数据采集与验证过程长期依赖人工查阅资料，存在效率低下与数据质量受限的问题。本系统实现了工单时间戳、检验记录及缺陷闭环状态等全流程追踪数据的自动提取，有效保障数据的实时性与完整性。通过构建“自动化系统数据校验为主、人工抽样复核为辅”的双重验证机制，显著降低数据偏差风险，确保效率指标与质量数据的真实可靠性。在某电厂大修实践中，系统通过预置工艺规范(如预热 300℃的预防性提示)，成功解决了高合金钢焊接的核心工艺漏项问题，借助该系统实施，大修期间返修率由 12%降至 4%。上述技术改进不仅显著提升了产品一次合格率，降低了项目延期风险，此外亦有效控制了相关的经济损失风险。

3.4. 三维可视化展示

三维建模涵盖锅炉受热面金属部件、四大管道、联箱、锅炉本体管道等承压设备，压力容器及传热管，汽轮机、发电机等，可直观展示设备属性(如材质、规格、位置)，支持区域选定查看明细(见图4)。实时监控锅炉、压力容器等运行参数，点击模型查看数据，为金属监督计划提供支持。三维技术高效定位待检部位，呈现关键参数(如几何尺寸、材料属性)，提升检验效率，减少失误。

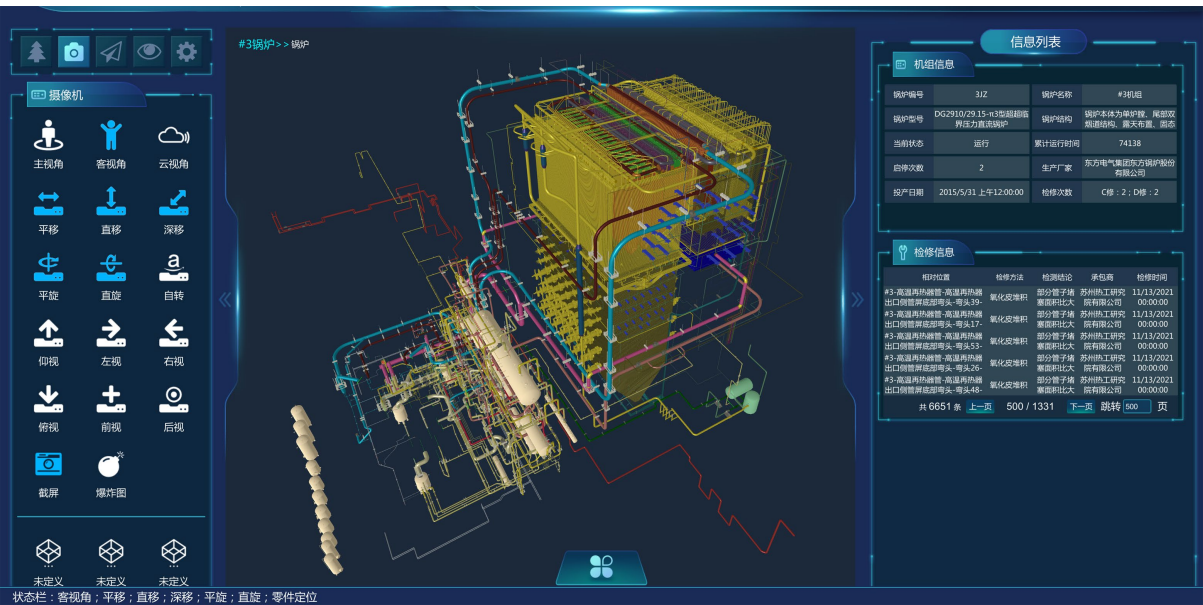


Figure 4. 3D visualization model
图 4. 三维可视化模型

4. 金属技术监督管理系统的发展

尽管本系统显著提升了金属监督的数字化水平，仍需客观审视其局限性：

系统的预警与劣化分析高度依赖历史数据的完整性与准确性。若原始记录存在缺失、格式不统一或录入错误(如焊口 ID 未标准化),将直接影响模型预测的可靠性。

当前算法基于历史缺陷数据进行趋势分析,但预测精度受限于数据维度(如未充分整合材料微观性能、焊接残余应力等物理参数)及算法复杂度(以传统统计模型为主)。对于罕见故障或突发性失效模式的识别能力有待验证。

基于上述局限,提出以下深化研究的方向:

引入基于物理机制的仿真(如有限元应力分析、材料蠕变损伤模型),将设备设计参数、运行载荷与环境因素纳入分析框架,构建“物理数据”双驱动预警模型,提升对复杂失效机制的预测精度。

开发针对小样本缺陷数据的图神经网络(GNN),利用设备拓扑关系(如管道连接结构)增强特征提取能力;试验迁移学习技术,解决新投产机组数据匮乏场景下的模型泛化问题。

5. 结语

金属技术监督管理系统实现了对监控设备状态信息的实时反馈,通过模板库和数据字典的应用,将行业标准进行规范化处理。该系统进一步实现了工艺卡和报告的自动化处理,有效减少了人工操作的需求。此外,系统通过实施检验周期预警和资质联动机制,严格预防违规行为的发生,从而显著提升了工作效率。该系统内置了严密的防错机制,并能深入分析检验数据,挖掘其潜在的应用价值。因此,该系统为金属技术监督管理提供了强有力的工具支持,对确保电厂设备的安全、稳定运行具有非常重要的现实意义[5]。

参考文献

- [1] 刘君武,陈岳飞,陈川. 数字孪生技术在智慧能源行业的应用[J]. 中国检验检测, 2022, 30(2): 27-31.
- [2] 余丞. 基于深度学习的设备故障诊断与预测技术研究[J]. 中国仪器仪表, 2025(3): 66-68.
- [3] 宋寒. 电子信息工程在工业领域的应用研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(4): 41-43, 47.
- [4] 付锐. 数字化技术在火电厂基建中的应用分析[J]. 大众标准化, 2024(20): 172-174.
- [5] 贺建伟,闫琮. 电厂设备管理中的问题分析及对策探究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 00307.