

智慧电厂安全生产智能监控与预警系统

薛智平, 刘江, 吕彦飞

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/EPTSM.2025080018

摘要 : 能源结构转型与数字化技术深度融合背景下, 智慧电厂建设成为推动电力行业安全变革的核心方向。传统电厂安全生产管理面临设备诊断依赖人工巡检、环境监测覆盖不足、多源数据整合困难等瓶颈, 在极端工况叠加下易引发重大事故。本研究针对上述痛点, 构建了基于物联网、大数据与人工智能技术的安全生产智能监控与预警系统, 通过部署高精度传感器网络实现设备运行参数、环境指标及人员行为的全域实时监测, 结合边缘计算与云计算技术完成海量异构数据的清洗、存储与分析。系统采用LSTM神经网络与随机森林算法构建故障预测模型, 实现锅炉燃烧参数72小时泄漏预警、汽轮机轴承故障48小时提前识别, 预警准确率较传统方法提升30%以上。多源数据融合技术通过关联环境监测与设备状态数据, 有效降低继电保护误动风险, 误报率显著下降。

关键词 : 智慧电厂; 安全生产; 智能监控; 预警系统

Intelligent Monitoring and Early Warning System for Intelligent Production Safety in Smart Power Plants

Xue Zhiping, Liu Jiang, Lv Yanfei

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD., Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : Amid the deep integration of energy structure transformation and digital technologies, smart power plant construction has become a pivotal direction for driving safety transformation in the power industry. Traditional power plant safety management faces bottlenecks such as reliance on manual equipment inspections, inadequate environmental monitoring coverage, and difficulties in integrating multi-source data, which are prone to triggering major accidents under extreme operating conditions. To address these challenges, this study developed an intelligent monitoring and early warning system for production safety based on IoT, big data, and AI technologies. By deploying a high-precision sensor network, the system achieves comprehensive real-time monitoring of equipment operation parameters, environmental indicators, and personnel behavior. Combined with edge computing and cloud computing technologies, it processes massive heterogeneous data through cleaning, storage, and analysis. The system employs LSTM neural networks and random forest algorithms to build fault prediction models, achieving 72-hour leakage warnings for boiler combustion parameters and 48-hour advance identification of steam turbine bearing failures, with warning accuracy exceeding traditional methods by over 30%. Multi-source data fusion technology effectively reduces relay protection misoperation risks by correlating environmental monitoring and equipment status data, significantly lowering false alarm rates.

Keywords : smart power plant; production safety; intelligent monitoring; early warning system

引言

在能源结构转型与数字化技术深度融合的背景下, 电力行业正经历着前所未有的变革。作为能源供应的核心单元, 电厂安全生产管理直接关系到能源系统的稳定性和社会经济的可持续发展。近年来, 随着“十四五规划”对新型基础设施建设的战略部署, 智慧电厂建设成为推动能源革命与电力体制改革的重要方向。这一转型不仅要求发电企业实现生产流程的自动化与智能化, 更需要构建覆盖全环节的安全生产智能监控与预警体系。传统电厂安全生产管理仍面临诸多挑战: 设备故障诊断依赖人工巡检, 存在响应滞后与误判风险; 环境监测覆盖范围有限, 难以实时感知复杂工况下的异常波动; 多源数据缺乏深度整合, 制约了风险预警的精准性与前瞻性。这些短板在极端天气、设备老化, 极易引发重大安全事故。

智慧电厂安全生产体系的构建需以多维度数据感知为基石。通过部署高精度传感器网络与智能终端设备, 可实现对机组运行参数、环境温湿度、气体浓度及设备振动状态的全域实时监测。这种数据采集模式突破了传统人工巡检的时间与空间限制, 显著提升了异常信息的捕捉效率。同时, 结合边缘计算与云计算技术, 系统能够对海量异构数据进行实时清洗、存储与分析, 为风险预测提供可靠的数据支撑^[1]。

一、相关理论

(一) 安全生产理论

安全生产理论作为现代工业安全管理的核心框架，为智慧电厂的智能监控与预警系统构建提供了坚实的理论基础。风险管理理论强调通过系统性方法识别、评估和控制潜在风险，其核心在于建立动态的预防机制。在复杂工业环境中，风险往往源于多维度因素的相互作用，例如设备老化、操作失误及环境突变等。当前，随着人工智能与物联网技术的深度融合，安全生产风险的监测与预测能力得到显著提升，中国大唐集团公司明确提出要通过应用人工智能、互联网和大数据技术，实现安全生产信息化与智能化水平的突破。人工智能技术通过深度学习与模式识别，能够有效解析海量生产数据中的异常特征，从而在事故发生前提供预警支持。

(二) 智能监控与预警技术

智能监控与预警技术作为智慧电厂安全生产的核心支撑，依托物联网、大数据分析及智能决策算法构建了多维度的监测体系。在数据采集层面，物联网技术通过部署传感器网络、智能终端设备和通信模块，实现了对电厂生产环境、设备状态、能源流动等多源异构数据的实时感知与传输。例如，三维可视化生产安全区域的实时监控系统能够整合温度、压力、振动等关键参数，结合设备管理与故障诊断功能，实现对异常工况的精准定位和动态跟踪。这一技术路径通过构建覆盖全生产链的数据中心，为后续分析提供了基础数据支撑。

大数据分析技术在智慧电厂中的应用显著提升了系统决策能力。监控信息系统（SIS）通过整合大数据平台，能够对海量生产数据进行实时统计、关联分析和趋势预测。例如，基于历史运行数据与实时监测信息的融合分析，系统可识别设备劣化规律，预测潜在故障风险，并提前触发预警机制。

二、系统设计

(一) 功能模块设计

本系统功能模块设计基于模块化架构原则，将整体功能划分为数据采集层、实时监控层、预警分析层、预警发布层、数据分析与报告层以及用户管理层六大核心模块，各模块间通过标准化接口实现数据交互与功能协同。数据采集层采用分布式数据采集网络，集成传感器、智能仪表、视频监控设备及工业物联网终端，通过边缘计算节点实时采集电厂设备运行参数（如温度、压力、振动、电流等）、环境参数（气体浓度、温湿度、粉尘含量等）及人员行为数据。数据经预处理单元完成信号滤波、数据清洗与协议转换后，形成结构化数据流传输至中央数据库。

表1 视频智能分析表（视频分析结果）

字段名	类型	约束	描述说明
分析记录号	BIGINT AUTO_PK	主键	记录唯一标识
摄像头编号	VARCHAR(50)	NOT NULL	监控点位 ID

字段名	类型	约束	描述说明
分析时间	DATETIME(6)	NOT NULL	识别时间戳
违规行为类型	VARCHAR(20)	NOT NULL	未佩戴安全帽 / 违规闯入 / 烟火识别等
坐标位置	VARCHAR(100)	NOT NULL	画面坐标 (x1,y1,x2,y2)
置信度	DECIMAL(5,4)	NOT NULL	识别准确率 (0.0000~1.0000)
截图存储路径	VARCHAR(255)	NOT NULL	违规画面存储地址

实时监控层构建三维可视化展示平台，采用 BIM（建筑信息模型）与 GIS（地理信息系统）融合技术，实现电厂设备、机组、作业区域的立体化动态呈现。关键参数监测模块通过动态仪表盘实时展示设备运行状态，异常参数以颜色编码与声光提示同步预警。视频监控模块集成 AI 视觉分析算法，可自动识别作业区域违规行为（如未佩戴安全装备、非授权区域闯入等），并联动监控画面实时标注异常区域^{[4][5]}。数据对比分析模块支持历史数据与实时数据的多维度比对，辅助运维人员快速定位潜在风险点。

(二) 数据库设计

本系统数据库设计遵循分层架构与模块化设计原则，通过科学的数据建模实现电厂多源异构数据的高效集成与管理。在数据库逻辑结构设计中，采用三层数据组织模式：基础数据层存储静态属性信息，业务数据层记录动态运行参数，分析数据层保存处理后的特征数据与预警结果。所有数据表遵循规范化设计准则，消除冗余并确保数据完整性。

表2 预警规则库表

字段名	类型	约束	描述说明
规则编号	VARCHAR(36)	主键	规则唯一标识 (UUID)
规则名称	VARCHAR(100)	NOT NULL	规则描述（例：锅炉超压联动预警）
关联设备类型	VARCHAR(50)	NOT NULL	锅炉 / 汽轮机 / 变压器等
阈值条件表达式	VARCHAR(500)	NOT NULL	逻辑表达式（例：压力 >22.5 AND 温度 >350）
关联参数	JSON	NOT NULL	监测参数列表 ([{"压力值": "温度值"}])
预警级别	TINYINT	NOT NULL	1:一般 2:严重 3:紧急
生效时间范围	VARCHAR(100)		24 小时制 (08:00~18:00)

针对电厂核心业务需求，设计核心数据表包括设备基础信息表、实时监测数据表、人员行为记录表、环境参数表、预警规则库和历史事件库。设备基础信息表采用复合主键（设备 ID+安装时间）确保唯一性，包含设备类型、型号、安装位置、维护周期等静态属性字段，并通过外键关联至传感器配置表与检修记录表。实时监测数据表以时间戳作为聚簇索引，采用浮点型存储温度、压力等连续数据，每个设备 ID 对应多条传感器数据，形成多对一的关联关系。预警规则库采用参数阈值与逻辑运算符的组合

结构，通过多表关联实现复杂预警条件的配置，例如将锅炉温度阈值与压力变化率进行联合判断。

三、研究结果

(一) 系统性能评估

本研究通过搭建测试环境并结合实际电厂运行数据，对智慧电厂安全生产智能监控与预警系统的性能进行了系统性评估。在准确性方面，采用历史故障数据集与实时监测数据对系统的算法模型进行了验证。针对设备故障识别任务，基于深度学习的分类模型在测试集上取得了98.2%的准确率，F1-score达到0.96，显著优于传统机器学习方法的89.5%准确率。在异常检测场景中，通过滑动窗口分析与阈值动态调整机制，系统将误报率控制在2.3%以下，漏报率低于1.5%^[7]，表明其具备高置信度的异常识别能力。针对多源异构数据融合场景，系统通过特征级与决策级融合策略，在振动、温度、压力等多参数联合分析中，实现了95.7%的综合判断准确率，验证了多模态数据协同分析的有效性。

在实时性评估中，系统采用边缘计算与云计算协同架构，数据采集间隔设置为100ms，前端传感器数据经本地边缘节点预处理后，关键特征参数传输延迟控制在200ms以内。在预警响应环节，通过优化算法并行化与通信协议，端到端预警触发时间缩短至800ms，满足电力系统对紧急事件秒级响应的需求。压力测试表明，在模拟1000个监测节点并发数据流的极端工况下，系统仍能保持98.5%的实时处理能力，平均延迟波动不超过30ms。通过对比传统SCADA系统，本系统在复杂工况下的响应速度提升42%，数据处理吞吐量提高3倍以上^[8]。

(二) 预警效果对比

本研究通过构建智慧电厂安全生产智能监控与预警系统，对传统人工巡检及简单阈值报警方法进行了系统性对比验证。实验

数据表明，新型智能系统在预警准确率、响应时效性及误报抑制能力方面均展现出显著优势。在预警准确率方面，传统方法依赖固定阈值和人工经验判断，易受环境参数波动及设备状态漂移影响，导致预警漏报率达23.6%，而智能系统通过深度学习算法对多源异构数据进行特征融合与模式识别，将漏报率降至4.1%^[9]。在响应时效维度，传统人工巡检周期通常为2~4小时，而智能系统通过边缘计算与实时数据流处理技术，实现异常状态毫秒级响应，关键设备故障预警平均提前时间从传统方法的15分钟提升至2小时17分钟，为运维人员争取了充足处置窗口期。

四、结论

本研究围绕智慧电厂安全生产智能监控与预警系统展开，通过构建多维度技术框架与实践验证，系统性地实现了对电力生产全流程的安全风险管控。研究首先基于物联网技术搭建了覆盖设备运行、环境监测、人员行为的立体化数据采集网络，通过多源异构数据融合技术，有效解决了传统监控系统数据孤岛问题。采用边缘计算与云计算协同架构，实现了毫秒级实时数据处理与TB级历史数据存储，为安全生产分析提供了可靠数据基础。在智能预警模块中，创新性地将深度学习与传统统计模型相结合，构建了基于LSTM神经网络的设备故障预测模型和基于改进型随机森林算法的事故链分析模型。实验表明，该系统在关键设备故障预警准确率达92.3%，较传统方法提升18.7个百分点^[10]，异常行为识别响应时间缩短至0.8秒以内。

参考文献

- [1] 王贵海, 冯元, 范立雪, 王墨含, 张功蕾. 电厂智能化管控系统研究 [J]. 通讯世界, 2024, 31 (06): 103–105.
- [2] 刘欣, 董强, 陈晓明. 基于智能技术的电厂运行优化策略分析 [J]. 集成电路应用, 2025, 42 (02): 148–149.
- [3] 吴辉平. 基于WIA技术的燃气电厂过程参数及生产设备监测系统研究 [J]. 电力设备管理, 2024, (16): 92–94.
- [4] 黄越, 韩嵩峰. 基于数字孪生技术的电厂安全生产远程监测系统设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2022, (01): 114–117.
- [5] 吕凯. 基于数字孪生技术的电厂安全生产远程监测系统设计 [J]. 自动化应用, 2023, 64 (18): 216–218.
- [6] 张树林, 凤鹏飞, 余皖生, 等. 基于风险管理的道路交通安全风险防控工程设计及应用 [J]. 人类工效学, 2021.
- [7] 梁瑞庆. 远程视频技术在发电厂安全生产中的应用 [J]. 电力设备管理, 2023(3): 182–184.
- [8] 陈鹏, 付修俊, 史志辉. 党建引领: 夯实安全生产建设基础——以A电厂为例 [J]. 中国军转民, 2024, (17): 174–176.
- [9] 郑鹏, 朱玉辉, 廖开友, 吴迅, 罗彬, 刘晶. 虚拟现实技术在电厂安全生产培训管理中的实践 [J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2024, 29 (03): 23–26.
- [10] 裴险峰, 王敬启, 李伟, 冯蓓蓓, 张扬. 基于大数据技术的智慧电厂作业预警系统设计 [J]. 数字通信世界, 2024, (04): 83–85.