

基于大数据分析的工业安全事故预测与风险控制策略研究

任继龙

西安高新区应急管理局, 陕西 西安 710117

[摘要] 工业安全生产是国民经济可持续发展的关键支撑, 大数据技术的深度融合为事故防控体系革新注入核心驱动力。研究突破传统安全管理的静态监测局限, 构建基于多源异构数据协同挖掘的智能预警框架, 创新设计融合机器学习的动态风险评估模型与自适应控制策略。通过时空特征关联分析与风险传导推演, 建立覆盖全流程的“感知-预测-决策”闭环管理系统, 显著提升工业系统的风险免疫能力。研究成果为构建自主进化的主动式安全防护体系提供方法论创新与技术实践范式, 推动智能制造向本质安全方向持续演进。

[关键词] 大数据分析; 工业安全; 事故预测; 风险控制策略

DOI: 10.33142/sca.v8i5.16411

中图分类号: U492.8

文献标识码: A

Research on Industrial Safety Accident Prediction and Risk Control Strategies Based on Big Data Analysis

REN Jilong

Xi'an High-tech Zone Bureau of Emergency Management, Xi'an, Shaanxi, 710117, China

Abstract: Industrial safety production is a key support for the sustainable development of the national economy, and the deep integration of big data technology injects core driving force into the innovation of accident prevention and control system. Research breaks through the static monitoring limitations of traditional security management, constructs an intelligent early warning framework based on multi-source heterogeneous data collaborative mining, and innovatively designs a dynamic risk assessment model and adaptive control strategy that integrates machine learning. By conducting spatiotemporal feature correlation analysis and risk transmission deduction, a closed-loop management system of "perception-prediction-decision" covering the entire process is established, significantly enhancing the risk immunity of industrial systems. The research results provide methodological innovation and technological practice paradigms for building an autonomous and evolving active security protection system, promoting the continuous evolution of intelligent manufacturing towards intrinsic safety.

Keywords: big data analysis; industrial safety; accident prediction; risk control strategy

引言

全球工业数字化转型进程加速背景下, 传统安全管理模式在应对多要素耦合、跨系统传导的新型风险时暴露出显著局限性。现行体系依赖周期性检查与事后追溯的治理逻辑, 难以适应连续化生产场景中风险的动态演化特性, 尤其在处理设备隐性故障、工艺参数漂移、人机交互失误等复杂致因时存在响应迟滞。工业物联网技术的普及催生出海量异构数据资源, 涵盖设备全生命周期状态参数、生产环境多维感知信息、人员操作行为时序记录等关键安全要素, 为构建预测性安全体系提供了数据基础。本研究突破传统方法在时空关联建模与自适应学习方面的技术瓶颈, 创新设计融合长短期记忆网络与门控循环单元的混合架构, 通过深度挖掘设备振动谱、工艺控制曲线、人员定位轨迹间的隐含关联, 建立具有风险传导推演能力的智能预警模型。同步开发的风险分级响应机制集成数字孪生与强化学习技术, 实现从风险识别、评估预警到处置优化的闭环管控, 推动工业安全治理模式实现三大跃迁: 风险认知维度从单点监测转向系统关联分析, 处置决策机制从经

验驱动升级为数据驱动, 管理体系架构从被动应急演变为主动免疫, 为智能制造时代构建新型安全保障范式奠定理论根基与技术路径。

1 工业安全管理中引入大数据分析的必要性

传统工业安全监控体系依赖定期巡检与人工经验判断, 存在数据采集碎片化、风险响应滞后等固有缺陷。以化工企业为例, 单个生产单元运行过程中产生的振动、温度、压力等多维度动态数据呈现指数级增长趋势, 传统方法受限于存储容量与计算能力, 难以实现海量数据的有效解析与深度挖掘。大数据分析技术通过分布式存储架构与流式计算框架, 突破传统监测系统的性能瓶颈, 能够对设备劣化趋势、工艺参数偏移、人员操作异常等复杂风险特征进行实时解析与关联分析。尤其在非结构化数据处理领域, 自然语言处理技术可自动解析设备维修记录、操作日志中的文本信息, 提取隐含的故障模式与风险征兆, 有效识别传统监测手段难以捕捉的潜在隐患。这种技术革新不仅实现了风险识别从局部离散向全局连续的转变, 更通过多维数据融合构建起覆盖设备全生命周期、工艺全流程、

人员全行为的立体化监测网络,显著提升了风险预测的时效性与准确性,为工业安全管理由被动响应向主动预防的转型提供了核心驱动力。

2 基于大数据分析的工业安全事故预测模型构建

2.1 数据源与数据采集

工业安全数据生态由设备运行状态监测、环境参数感知、人员行为跟踪、管理流程记录及历史事故档案构成多维数据体系。设备运行数据通过嵌入式智能传感器网络实时捕获,其采样频率根据设备关键部件的物理特性与运行工况进行动态优化,例如针对旋转机械的振动监测采用自适应频率调节机制。人员行为数据采集整合超宽带定位技术与多视角视觉识别系统,通过时空坐标映射构建作业人员的三维姿态演化模型,精准识别违规操作与疲劳作业特征。环境感知数据依托分布式物联网节点网络,实现对温度梯度、气体浓度、粉尘分布等复杂工况的全域覆盖监测^[1]。管理流程数据则聚焦于电子巡检记录、设备维修工单、安全培训档案等半结构化文档,采用语义本体建模技术解析文本中的潜在风险关联。历史事故数据通过知识图谱构建技术,将事故调查报告、应急处置记录等异构数据进行时空对齐与因果链重构,形成可追溯的事故演化数据库。

2.2 数据预处理与特征工程

工业场景的复杂工况导致原始数据存在噪声干扰与信息冗余问题,需构建系统化的数据治理体系。在信号处理层面,采用多尺度分解算法对传感器时序数据进行频域特征分离,结合滑动窗口机制实现动态基线校准,通过自适应阈值机制捕捉设备运行参数的异常波动模式。针对异构数据融合难题,提出跨域特征对齐框架,利用图神经网络建立设备振动谱、环境温湿度曲线与人员操作时序的隐式关联模型。特征工程创新性引入物理机理引导的混合特征构造方法,将设备健康状态评估值、环境扰动累积效应、人员行为模式熵等跨维度指标进行非线性组合,形成具有强解释性的复合特征向量。通过特征重要性评估算法解析多维特征与事故风险的因果关联路径,建立基于贡献度排序的特征优选机制,迭代剔除信息重叠度高的干扰变量,最终构建兼顾预测性能与工程可解释性的特征集合。

2.3 工业安全事故预测模型选择与比较

工业场景的时序特性与风险演化复杂性对预测模型提出多维适应性要求。传统机器学习算法在离散型风险分类任务中表现出较高分类精度,但受限于特征工程依赖性与时序建模能力不足,难以捕捉生产流程中动态耦合的潜在风险模式。针对连续生产系统的特征关联特性,本研究设计融合时间卷积网络与门控循环单元的混合架构,其创新性体现在时空特征解耦建模机制:时间卷积层通过膨胀因果卷积核提取设备振动信号中的多尺度周期特征,突破传统循环神经网络对长程依赖关系的建模瓶颈;门控循环单元则聚焦工艺参数的时间演化规律,通过重置门与更新门动态调节记忆单元状态,有效表征参数异常波动的累积

效应。在冶金工业场景的验证中,该模型成功识别冷却系统热力学失衡的早期征兆,相较传统时序模型展现出更优的预警时效性与工况适应性,尤其在处理设备群协同运行产生的交叉干扰信号时,误报控制能力显著提升。模型比较研究进一步揭示,混合架构通过并行特征提取与分层信息融合,实现了设备物理特性与工艺控制逻辑的双重嵌入,为复杂工业系统的风险预测提供了兼具理论严密性与工程实用性的解决方案。

2.4 模型构建与训练

工业事故预测模型的构建需兼顾历史经验继承与实时工况适应双重需求,为此设计分层迁移学习框架。基于历史事故数据集构建预训练基模型,通过特征空间映射将跨场景的共性风险模式抽象为可迁移知识库,有效缓解目标场景数据稀疏性问题。模型在线部署阶段采用增量学习机制,利用实时数据流动态更新网络权重,同时设置记忆回放缓冲区保留关键历史特征,防止灾难性遗忘现象。针对工业生产中安全事件低频特性导致的样本失衡问题,提出动态焦点损失函数,根据实时训练过程中类别分布变化自适应调整损失权重,强化模型对高危小样本事件的识别敏感度。为提升模型在复杂工况下的泛化能力,创新性设计对抗性数据增强模块,通过梯度反向传播生成具有设备物理约束的扰动样本,迫使模型学习噪声干扰下的鲁棒特征表示^[2]。超参数优化采用多目标贝叶斯搜索策略,同步权衡预测精度、计算效率与内存占用三项指标,自动推导网络深度、卷积核尺寸等结构参数的帕累托最优解。

2.5 模型评估与优化

工业安全预测模型的效能评估需突破传统机器学习评价范式,建立融合技术性能与工程价值的复合指标体系。除基础分类指标外,创新性引入风险预警时效性、处置窗口可行性、误报经济成本等业务导向型评估维度,通过层次分析法构建多准则决策框架。模型验证阶段采用设备状态感知驱动的动态交叉验证机制,依据设备健康指数曲线划分训练集与测试集,重点考察模型在设备性能拐点期的预测鲁棒性。针对工业多产线场景下的数据异质性难题,设计领域不变特征学习模块,通过梯度对抗训练消除不同生产线数据分布差异对模型泛化能力的负面影响。优化过程中嵌入元学习策略,使模型具备在线学习新设备类型风险模式的自适应能力,显著提升跨产线迁移应用效果。在流程工业的实践验证表明,经过多阶段优化的预测系统在不同生产节拍、设备负荷和工艺配方条件下均保持稳定预警性能,其误报抑制能力与风险溯源精度较初期版本实现系统性提升,为复杂工业环境中的全天候安全监控提供了可靠的技术保障。

3 工业安全事故风险控制策略设计

3.1 事故风险预警系统构建

工业安全事故风险预警系统的架构设计需实现风险感知、评估与响应的闭环管理,其核心在于构建动态智能化的预警决策体系。系统采用四级预警分类机制,依据风

险演化态势与潜在影响范围设置差异化的响应阈值,形成从常态监控到紧急处置的梯度化应对框架。基于数字孪生技术搭建虚实映射的三维可视化平台,集成设备状态监测、环境参数感知与人员定位等多源数据流,通过时空编码算法将抽象风险转化为可视化的热力分布图。该平台配备智能预案匹配引擎,当检测到多维度参数协同偏移时,自动触发复合型预警信号并推送关联处置方案,例如设备超温与人员违规的空间耦合事件将激活跨系统联动响应。预警决策树嵌入工艺知识图谱与事故案例库,支持对复杂风险场景的因果链推演,通过蒙特卡洛仿真预判不同处置路径的后果演变。

3.2 风险分级与响应机制设计

工业安全风险控制体系的效能核心在于构建层次清晰、权责明确的分级响应架构。基于组织管理维度建立“战略决策-战术指挥-现场执行”三级联控机制,企业层面设立中央安全指挥中心,统筹资源配置与跨部门协同;车间层级部署快速响应单元,配备专业处置装备与应急物资;班组单元强化一线人员应急处置能力,形成网格化防控节点。针对不同风险等级设计差异化处置规程,高危等级风险触发多级连锁响应,通过智能合约技术实现应急预案自动激活、应急通道智能解锁、关键设备紧急制动等系列操作的时序化协同。开发基于知识图谱的专家决策支持系统,依据风险类型、影响范围、工艺特性等要素,动态生成包含处置人员资质要求、特种装备需求、工艺隔离方案的最优处置路径。特别设计人员定位与应急导航融合系统,当发生有毒气体泄漏等紧急状况时,通过室内定位技术规划最优疏散路径,并实时调整逃生路线避开危险区域^[3]。响应机制中嵌入复盘学习模块,每次应急处置结束后自动生成多维评估报告,分析响应时效、处置效果、资源损耗等关键指标,通过强化学习算法持续优化应急预案库与资源调度策略。

3.3 风险控制与事故防范策略制定

工业安全风险防控需构建多层次、全要素的协同治理体系,其核心在于融合技术防护、管理创新与个体保障的立体化防御机制。在工程技术维度,开发具有自主决策能力的智能安全控制系统,集成设备状态感知、风险预测与执行机构联动功能。当系统识别到关键参数偏离安全阈值时,基于数字孪生仿真推演不同干预策略的后果,优先选择最优控制方案执行,例如在化学反应失控场景中,系统可同步启动紧急冷却、物料中和与压力平衡等多重保护措施。管理控制层面创新应用分布式信任机制,构建基于区块链技术的隐患排查治理平台,通过智能合约将隐患发现、责任分配、整改验收等环节全流程上链存证,实现整改过程的可追溯性与多方监督的透明化。个体防护领域突破传统被动式防护装备局限,研发融合生物传感、边缘计算与自主避障技术的智能穿戴系统,实时监测作业人员的心率变异度、肌肉疲劳指数与空间位置信息,当检测到生理机能异常或突发危险源逼近时,通过触觉反馈与增强现实导航引导人员安全撤离。同

时建立人机协同防护网络,将个体防护设备与生产环境中的应急设施互联互通,例如当智能安全帽检测到高温辐射时,自动触发就近喷淋系统形成局部降温屏障。

3.4 大数据支持下的持续改进与智能决策支持系统

工业安全管理的持续改进机制需突破传统经验依赖型模式,构建基于数据智能的闭环优化体系。通过融合知识工程与机器学习技术,构建跨时空、多模态的安全知识图谱,将历史事故案例的因果链、行业标准的技术规范、专家经验的隐性知识进行本体化建模,形成覆盖设备失效模式、工艺风险点、人为失误类型的立体化关联网。该图谱采用动态自学习机制,实时吸纳新增事故调查报告与设备运行日志,通过图神经网络挖掘风险传导路径中的潜在中介变量^[4]。在此基础上开发具备策略进化能力的决策支持引擎,集成深度强化学习与数字孪生仿真技术,构建包含环境状态空间、控制动作集合、奖励函数的三元决策模型。当系统监测到风险征兆时,自动在虚拟空间中模拟不同处置策略的衍生影响,通过蒙特卡洛树搜索算法评估短期控制效果与长期系统稳定性,生成兼顾安全性与经济性的最优决策方案。为提升决策系统的工程适用性,设计多源信息融合接口,将设备维护记录中的文本描述、传感器时序数据中的异常模式、视频监控中的行为特征进行跨模态对齐,构建可解释的决策依据链。

4 结语

本研究构建的工业安全智能管理系统,通过大数据深度挖掘与机器学习模型创新,实现了事故预测由经验驱动向数据驱动的模式跃迁。提出的动态风险控制体系突破传统安全管理的被动响应局限,形成“预测-预警-处置-优化”全链条协同机制,为工业生产构建起覆盖物理空间与信息空间的立体防护网络。研究创新性地将数字孪生技术与多模态感知融合,形成虚实联动的风险推演能力,推动安全管理从离散式治理向系统化免疫转变。未来研究将深化工业元宇宙技术的场景融合,构建沉浸式安全演练平台与分布式应急决策中枢,通过人机协同认知计算全面提升工业安全体系的可持续性与适应性,为智能制造时代的本质安全建设提供理论支撑与技术路径。

【参考文献】

- [1] 谭静. 大数据分析在工业管道施工安全管理中的应用[J]. 黑龙江科学, 2025, 16(4): 97-100.
- [2] 姚羽. 工业大数据中数据采集和处理系统设计与测试分析[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(33): 22-25.
- [3] 胡迪. 基于大数据分析的工业控制系统故障检测方法[J]. 信息记录材料, 2023, 24(9): 158-160.
- [4] 邹琦. 工业数据分析与可视化系统界面设计研究[J]. 鞋类工艺与设计, 2022, 2(2): 156-158.

作者简介: 任继龙 (1993.6—), 男, 汉族, 专业: 环境科学, 中级职称。