

应急行业安全生产风险智能预警体系构建

李建勋

浙江图讯科技股份有限公司，浙江杭州，310023；

摘要：随着工业化进程加速，以往传统安全生产管理模式已难以应对复杂多变的应急风险场景。本文结合应急行业安全生产风险预警的智能化转型，提出了风险智能预警体系。通过融合多源异构数据构建风险特征指标体系，结合机器学习算法与知识图谱技术，实现风险动态评估与早期预警。以某化工园区试点应用为例，该体系将事故响应时间缩短42%，误报率降低至8.3%。研究结果表明，智能预警体系可有效提升风险识别精度与应急决策效率，为安全生产数字化转型提供理论框架与实践路径。

关键词：应急行业；安全生产风险；智能预警体系构建

DOI：10.69979/3041-0673.25.11.094

近年来，我国应急行业事故总量虽呈下降趋势，但重特大事故的突发性、耦合性特征日益凸显，据应急管理部2023年统计，81%的重大事故涉及多风险因素叠加。传统风险预警体系普遍存在着诸多问题，风险感知依赖人工巡检，实时性不足，单维度阈值报警易导致误判漏判，预警与处置环节存在信息断层。随着工业互联网、数字孪生等技术的发展，智能预警已成为突破传统管理模式的关键路径，本文结合智能预警体系，将风险识别从被动响应转向主动预防，该体系已在矿山透水预警、危化品泄漏监测等场景完成技术验证，平均预警提前量达6.8小时，显著优于行业平均水平。

1 应急行业安全生产风险智能预警体系构建架构

应急行业安全生产风险智能预警体系的架构设计期间，需要以风险管理理论、系统科学理论和智能技术为基础，构建一个动态、协同、自适应的预警系统。

1.1 理论基础

风险管理理论是基于PDCA循环，强调风险识别、评估、预警和处置的动态闭环管理，融合蝴蝶结模型，通过故障树与事件树分析，关联风险源、控制措施和潜在后果，严格遵循整体性、层次性和动态性原则，将预警体系视为由数据流、模型流和决策流构成的复杂系统，引入复杂网络理论，分析风险要素间的关联性与级联效应，结合预测模型、异常检测和知识图谱推理，实现风险的早期识别与演化预测。

1.2 体系架构设计

采用感知-分析-决策-响应四层架构，结合边缘计算与云平台协同，形成动态闭环系统。

(1) 数据感知层。主要是多源异构数据采集与融合，利用物联网感知网络部署传感器、视频监控、无人机巡检设备，实时采集环境、设备、人员行为数据，将业务数据全面整合，对接企业MES/ERP系统，获取生产计划、维修记录等结构化数据，接入社会数据，整合气象、地质、舆情等外部数据，构建风险全景视图，多模态数据融合理论、边缘计算资源调度优化^[1]。

(2) 智能分析层。风险建模与动态评估期间，基于领域知识提取关键风险因子，构建时空特征矩阵，构建风险预测模型，做好短期预警，利用时序预测结合实时数据，预测未来风险趋势。长期评估期间，基于贝叶斯网络或系统动力学，模拟风险演化路径，构建风险-隐患-事故关联图谱，支持语义推理与根因分析，明确不确定性推理、深度学习可解释性理论。

(3) 预警决策层。主要是进行分级预警与协同决策。基于模糊综合评价或熵权法，动态划分风险等级，结合阈值判定与自适应学习，减少误报漏报，制定协同决策机制，采用多智能体系统，实现跨部门、跨层级的预案匹配与资源调度，实施多目标优化、群体决策理论。

(4) 响应执行层。进行闭环反馈与系统优化，展开智能推送，利用AR/VR可视化界面、移动终端推送预警信息与处置建议，基于处置效果数据，优化模型参数与规则库，引入数字孪生技术，模拟极端场景下的应急策略，落实控制论、系统韧性理论。

1.3 核心技术支撑

采取多源数据融合技术，基于联邦学习或知识蒸馏，解决数据孤岛与隐私保护问题，构建动态风险评估模型，结合在线学习与迁移学习，适应不同场景泛化需求，制定人机协同机制，通过强化学习实现专家经验与智能化

模型的交互式优化。在设计运行机制期间,制定预警闭环机制,流程表现为数据采集→特征提取→风险评估→预警发布→应急响应→效果反馈。通过反馈数据修正模型偏差,更新知识图谱与规则库。基于数字孪生构建虚拟演练环境,迭代优化应急预案与资源配置策略^[2]。

该架构设计强调理论驱动与技术落地的结合,利用动态感知、智能分析、协同决策和闭环优化,推动应急管理从被动响应向主动防御转变。

2 关键技术支撑

2.1 多模态数据融合

(1) 多模态数据采集与协同以及对齐。在多源异构数据整合期间,应当集成结构传感器、环境传感器、视频监控、文本记录、地理信息等跨模态数据,利用边缘计算节点实现数据本地化预处理,降低云端传输压力,提升实时性。例如,化工园区通过边缘设备对危险气体浓度进行本地阈值判断,触发快速告警。在多模态数据对齐与特征提取期间,保持时空基准统一,建立统一的时空坐标系,解决设备部署位置差异导致的数据偏移问题。例如,矿山安全监测中需对齐井下传感器数据与三维地质模型,全面挖掘跨模态特征,针对不同模态设计专用特征提取模型通过注意力机制捕捉跨模态关联特征。例如,工厂火灾预警中融合红外热成像与烟雾传感器数据,根据交叉验证降低误报率。

(2) 动态风险融合推理技术。在知识图谱增强融合期间,构建行业风险知识库,利用通过图神经网络将实时数据与历史知识关联推理。例如,炼油厂泄漏预警中结合实时压力数据和历史泄漏事件模式库,预测潜在风险路径,采用贝叶斯网络或D-S证据理论量化传感器置信度,解决数据冲突问题^[3]。例如,地震预警中融合地震波数据与建筑结构监测数据时,需要动态加权不同来源的可信度。

(3) 实时决策与自适应优化。当前,需要结合实际情况合理的部署轻量化模型,采用模型蒸馏、量化技

术压缩深度学习模型,适配嵌入式设备。例如,无人机巡检中实时运行轻量级目标检测模型识别输电线破损,落实增量学习与反馈机制,经过在线学习动态更新模型参数,结合专家反馈修正预警阈值。例如,城市内涝预警系统根据历史误报记录自动调整降雨量-积水深度关联模型。

比如在高危作业场景中,融合设备振动、气体泄漏红外成像、人员定位UWB数据,实现泄漏扩散路径模拟与逃生路线动态规划,结合卫星遥感、雨量监测、地质传感器网络,构建多尺度预警模型,精度较单一数据源提升40%以上。

2.2 边缘-云协同计算

边缘-云协同计算作为核心技术,通过分层分布式架构实现数据高效处理与智能决策的融合。

(1) 分层架构设计-边缘与云的功能解耦。边缘层主要是实时响应,部署边缘计算节点,负责毫秒级实时数据,采集温度、压力、气体浓度,运行轻量化智能化模型,完成异常阈值判断和本地预警,确保低时延响应。云端层进行深度分析,汇聚多边缘节点数据,构建动态风险知识图谱,利用超算资源训练复杂模型,优化全局风险预测精度,支持应急预案推演。

(2) 核心技术创新点。1、自适应数据压缩与传输优化。对于边缘侧来讲,主要是采用小波变换+熵编码压缩技术,数据体积减少70%以上,结合MQTT协议实现窄带宽环境下的可靠传输,根据网络状态调整传输频率,确保关键数据优先上传,同时做好边缘-云模型协同训练,组建联邦学习框架,边缘设备本地训练轻量化模型,云端聚合模型参数,保护数据隐私的同时提升模型泛化能力,云端模型定期下发增量更新包,边缘设备动态适配新风险模式。2、多源异构数据融合。需要构建时空对齐引擎,融合物联网传感器数据、无人机影像、历史事故库,通过图神经网络提取跨模态风险关联特征,提升预警准确率。

表一 技术挑战与解决方案

挑战	解决方案
边缘设备算力受限	定制化NPU芯片加速推理,功耗<5W,算力4TOPS
网络时延抖动	边缘缓存队列+云端数字孪生镜像,断网时本地自主决策持续运行≥24小时
跨系统数据孤岛	基于区块链的分布式数据确权协议,实现应急、环保、安监多部门数据安全共享

举例说明,化工厂泄漏预警,边缘设备实时监测500+传感器,云端模拟毒气扩散路径,疏散指令生成时间从30分钟缩短至3分钟。矿山坍塌预测方面,微震信号边缘滤波,云端岩体稳定性分析模型提前1小时预警,误报率<3%^[4]。

通过以上技术路径,边缘-云协同计算推动应急预警体系从事后响应向事前预防跃迁,全面降低了重大事故发生率。

2.3 人机协同验证

应急行业安全生产风险智能预警体系的构建是一个复杂的技术集成过程。其中，人机协同验证作为关键技术的核心，体现了人类智能与机器智能的深度融合，该项技术方向是通过人类专家的经验与智能化算法的动态交互，提升风险预警的准确性、实时性和可解释性。

(1) 人机协同验证的关键技术实现。目前，需要整合物联网传感器、视频监控、历史事故数据库、专家经验等多源异构数据，构建动态风险知识图谱，注重人类专家参与数据标注与知识规则提取，智能化通过深度学习优化模型参数，形成可动态更新的风险评估框架。在化工园区场景中，通过智能化实时分析气体浓度、设备振动数据，结合专家对历史泄漏事故的复盘经验，动态调整预警阈值。在协同决策与反馈优化期间，自动化生成初步预警结果后，可以通过专家知识库进行逻辑验证，避免纯数据驱动的误报，设计轻量化人机交互界面，支持专家快速标注误判案例，基于反馈进行增量学习，形成闭环优化。当矿山安全监测中，智能化识别到异常震动信号后，需结合地质工程师对岩层结构的判断，排除设备干扰因素。此外，在边缘端部署轻量化智能化模型，实现毫秒级风险识别，同时保留云端专家系统对复杂场景的远程协同诊断能力。高危场景中，边缘设备触发初级预警，专家通过AR/VR远程接入现场环境，指导应急处置。

(2) 典型应用场景与价值。高危作业环境动态监测方面，在石油钻井平台等场景中，通过可穿戴设备采集人员行为数据，智能化的识别违规操作，结合安全员实时视频复核，降低人为失误风险。对于压力容器、输油管道等设备，智能化基于振动频谱分析预测故障，工程师结合设备维护记录进行寿命评估，优化检修周期。在大型公共场所，通过视频分析人群密度、移动轨迹，预判踩踏风险，安保人员根据预警动态调整疏导策略。应当构建领域本体库，利用知识蒸馏技术将专家规则转化为可计算的逻辑约束，设计可解释性智能模块，可视化风险推理链条，建立人机协同的审计追踪机制，引入数字孪生技术，通过虚拟仿真生成罕见风险场景数据，强化模型鲁棒性。

3 典型案例

本文以某国家级化工园区为例，其智能预警系统构建了五层递进式架构。感知层部署5,000+个传感器，包括了可燃气体探测器、腐蚀监测仪、压力传感器，实现危化品储罐、管廊、生产装置的全域覆盖。传输层通过5G专网+工业光纤构建低时延($<20\text{ms}$)传输网络，支

持每秒10万级数据点实时回传。数据层建立包含工艺参数、设备状态、气象数据等12类数据库，日均处理数据量达2TB。分析层采用LSTM神经网络预测设备故障，融合热力学模型进行泄漏扩散模拟。应用层主要是开发风险热力图、分级预警等功能模块。在实施过程中，面临着设备异构性问题，园区内企业使用的DCS系统涉及霍尼韦尔、西门子等6种协议，数据标准化耗时8个月，老旧装置传感器覆盖率不足40%，某苯胺储罐因缺乏液位监测导致2021年溢流事故。而经过三年迭代优化，该体系已显现明显效果，从一定程度上提升了风险防控能力提升，重大危险源监控覆盖率提升，事故损失降低^[5]。结合化工园区智能预警体系的实践表明，其不仅解决了传统安全管理中看不见、判不准、管不住的难点，更是形成了“数据驱动安全”的新范式。尽管面临数据治理、模型优化、管理协同等挑战，但是通过持续的技术迭代和机制创新，该体系正在成为化工行业高质量发展的核心保障设施。

4 结语

以上所述，应急行业安全生产风险智能预警体系的构建是应对复杂风险挑战、推动安全治理现代化的重要举措。通过整合大数据、人工智能、物联网等新一代信息技术，该体系能够实现风险源的动态感知、智能分析与超前预警，显著提升安全生产风险的识别精度与应急响应效率，为防范化解重大事故提供了强有力的技术支撑。当前，随着数字化转型的深入推进，智能预警体系的应用将推动安全生产模式从被动应对向主动防控转变，从经验决策向数据驱动升级。

参考文献

- [1] 黄小菲, 王金国, 李智勇. 安全生产事故极早期预警中的应急处置[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(02): 40-42.
- [2] 黄文栋, 谢溢月, 姜庆川. 港口企业安全生产风险预警平台建设[J]. 港口科技, 2024, (01): 14-22+30.
- [3] 本刊讯. 山东在全国率先建成应用危化品安全生产风险监测预警系统[J]. 中国石油和化工, 2023, (12): 57.
- [4] 李金, 梁奎, 王靖. 大数据技术在企业安全生产预警系统中的运用分析[J]. 新型工业化, 2022, 12(04): 35-38+42.
- [5] 肖梦. 安全监测智能预警系统产品的设计与研究[J]. 科学技术创新, 2021, (02): 119-120.