

# 工业园区火灾风险动态评估模型

赵新宇

唐山市消防救援支队，河北唐山，063000；

**摘要：**工业园区是现代工业体系重要的空间载体，其火灾风险具有多因素交织、动态变化和耦合放大的典型特点。本研究致力于构建一种基于多源信息集成分析的火灾风险动态评估模型，该模型融合物联网感知技术、机器学习算法及动态风险评估理论，实现对工业园区火灾风险的实时监测与量化分析。在方法设计方面，采用层次分析法确定基础指标权重，采用熵权法进行动态校正，采用模糊综合评价理论处理风险评价过程中的不确定性问题，建立可以随着环境条件变化而自动调整风险等级划分的体系。实证分析结果说明，该模型能提高火灾预警的时效性和准确性，可以为工业园区安全管理的精细化、智能化决策提供有效技术支持。

**关键词：**工业园区；火灾风险；动态评估；多源数据融合

**DOI：**10.69979/3041-0673.26.03.072

工业园区是产业集聚的核心区域，工业园区的火灾风险管理是保障区域安全生产的重要基础。针对目前定期检测模式不能很好地应对复杂工业系统的动态风险，急需构建智能化风险评估体系。随着物联网传感技术、边缘计算、人工智能等技术快速发展，给建立实时感知和动态预警相结合的新型防控模式提供了技术支撑。本文通过融合环境参数监测、设备运行状态感知、人员管理行为记录等多源实时数据，建立可以自适应调整的火灾风险评估模型。该框架很好地弥补了传统方法时效滞后、覆盖范围小的缺陷，使安全管理模式由被动应对变为主动防范。研究成果给工业园区火灾风险的精准防控提供了一条新的技术途径，对提升工业场所本质安全水平有着十分重要的现实意义。

## 1 工业园区火灾风险特征分析

### 1.1 风险构成要素

工业园区的火灾危险是由多种因素相互作用所造成的，可以分为三大类重要因素，即物料因素、环境因素和人为因素。易燃易爆化学品的使用和储存是基础风险源，危险性由物质本身的挥发性、化学反应活性等决定。环境条件包含电气设备老化的状况，通风系统运作的效能等工程控制要素，还有温度，湿度，风速等外部气象参数的改变所造成的影响。人为因素包含作业规范执行状况、安全培训次数、应急预案演练等管理方面内容。这几种要素之间以非线性的方式互相影响，从而产生动态改变的火灾危险性场。

### 1.2 风险演化机理

火灾风险在时间、空间上都具有明显的异质性。从时间进程上看，生产设备的连续运转会造成性能慢慢衰

退，风险水平也就随之缓慢攀升，定期检修维护可使风险水平出现阶段性下滑。从空间分布上看，危险化学品集中存放区一般会形成高风险核心区，该区域的影响范围随物料流动、气象扩散等因素的变化而变化<sup>[1]</sup>。特别要注意的是，各种风险因素间存在连锁效应，比如电气系统故障会导致危险化学品泄漏，然后加快火势蔓延。这样就造成了依靠单一指标或者局部监测很难把握总体的风险状况。

## 2 动态评估模型构建方法

### 2.1 评估指标体系的多维架构设计

根据物因、环境、人为的“三维”分析结构来构建评估指标体系，采取分层递进式的结构。一级指标有八个主要的维度，分别是易燃物存储量、设备运行状态、消防设施配置水平、疏散通道可用性、人员安全素质、日常巡检质量、环境参数稳定性、历史事故统计。每个维度下有3到5个量化二级指标，易燃物存储量细分成了低闪点物质占比、氧化剂安全间距等具体的观测项。采用德尔菲法进行多轮专家咨询，保证指标具有系统性和独立性，较好的涵盖主要的风险源且不出现信息交叉。

### 2.2 主客观权重融合的赋权机制

为了使专家经验和实时监测数据更好地结合起来，本文提出组合赋权的权重融合方法。主观权重的计算用层次分析法，建立判断矩阵并满足一致性检验的要求，保证权重分配的科学性。客观权重的确定采用信息熵原理，监测数据离散程度决定各指标的信息量。采用调节系数 $\alpha$ （初始值为0.6）对主客观权重进行线性加权，得到一个具有一定专家经验、具有数据特征的综合赋权方法，具有一定的理论依据和实际适应性。

## 2.3 权重的动态调整与异常响应机制

本模型设计出具有自适应能力的权重调节机制,提高对突发风险的响应灵敏度。常规运行时系统一般以专家经验为主( $\alpha=0.6$ )来保证评价结果的稳定性。当环境参数异常或者设备出现故障报警时,算法会自动将客观权重的占比提高到 $\alpha=0.8$ ,以使实时数据在评估过程中起主导作用<sup>[2]</sup>。此种动态调整的方法,在正常情况下依靠领域知识来做判断依然准确,在出现异常的时候,利用数据的预警优势得以最大化的体现,使得系统在各种工况下进行风险评判的时间与精度都有所提升。

## 3 多源数据融合与处理

### 3.1 分布式传感网络与边缘计算架构

为了全面感知园区火灾风险要素,在园区内构建分布式传感网。网络集成了温度传感单元(测量精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ )、可燃气体探测装置(分辨率为1%LEL)、热成像监控设备等10多种监测终端,能实现多参数同步采集。采取边缘计算架构,在数据采集近端就对原始信号实施滤波去噪、剔除异常值以及提取特征量,从而大大改善了数据预处理的速度。采用时序对齐算法,较好地解决了由于传输延迟造成的多源数据时间戳不一致的问题,为后面融合分析打下了良好的数据基础。

### 3.2 基于D-S证据理论的数据融合方法

对于多传感器信息存在的冲突、不确定性问题,在数据融合层采用D-S证据理论。利用基本概率分配函数来量度各个监测终端输出结果的可信度。当不同的传感器对于同一个风险源的判定出现分歧的时候,系统就会按照证据组合规则来进行可信度加权融合,从而有效地解决单一传感器出现误报或者漏报的情况。经过实际应用证明,此法可以明显减少系统的误报率,提高多源异构数据环境下的风险识别准确度,给动态评价提供一致而准确的输入信息。

### 3.3 风险评估流程与分级预警机制

风险评估计算按照四阶段流程执行,多源数据输入、特征参数提取、动态权重计算、模糊综合评价。系统每过5分钟就更新一次评估结果,产生一个包含安全(蓝)、低风险(绿)、中风险(黄)、高风险(橙)和极高风险(红)的五级风险图谱。建立分级响应机制,黄色预警下发到班组负责人,橙色预警启动部门应急程序,红色预警直报园区指挥中心。通过形成监测、评估、预警、处置的闭环管理,达到火灾风险全过程可控的目的。

## 4 模型验证与效果分析

### 4.1 实验方案设计与数据采集体系

为了检验动态评估模型的性能,选取一个大型化工园区为实验场景,布置完整的火灾风险监测系统连续测试6个月。数据采集包括环境参数监测记录、设备运行状态数据、安全管理台账这三类信息源,共采集到有效数据样本120万多条。通过将动态模型输出结果与园区已有的静态评估方法进行横向对比,主要分析两者的风险识别准确率、预警响应时效等主要指标上的差异,为模型效能评估提供实证基础。

### 4.2 风险评估效能对比分析

实验数据显示,在动态评估系统检测周期内一共发现有17个动态评估系统可能引发的火灾危险事件,经过现场核实发现其中有14个确实存在一定的火灾危险,也就是说比以往的方法减少了大约40%的误报。就预警时效而言,模型平均比静态分析提前28分钟发现风险征兆,溶剂储罐区异常温升案例中系统提前42分钟发出警报,为应急处置争取关键的时间窗口<sup>[3]</sup>。结果显示,动态模型的误报率要远比传统的评估方法低得多,而且其预警的前瞻性也明显好于传统的评估方法。

### 4.3 典型场景下的预警效能验证

以溶剂储罐区温升预警事件为例,系统通过对温度变化趋势和设备运行参数的实时监测,正确判断出是由于冷却系统异常造成的温升风险。工作人员接到预警之后马上进行强制冷却,以避免过热引起火灾。该案例充分证明动态模型对连锁性风险有早期识别的能力,其依靠多参数融合分析完成由单点监控到系统化风险感知的转变,为工业园区的安全管理提供有效的技术支持。

## 5 模型优势与创新点

### 5.1 多源数据融合与动态评估的技术优势

该模型综合了来自不同来源的实时监测数据以及动态权重的调整机制,从而可以对工业园区的火灾风险进行准确的感知和科学的分析。与传统的静态评价方法相比,它有三个技术上的优势,第一,利用信息熵理论动态修正指标权重,体现实际的风险状况的动态变化;第二,用模糊数学的方法处理风险评估中存在不确定的信息;第三,建立分级预警和应急响应联动机制,从而形成从风险识别到处置措施执行的完整管理闭环,大大提高了园区安全管理的主动性以及有效性。

### 5.2 评估方法层面的理论创新

从方法论角度来讲,本研究有诸多理论上的革新之处,提出了“物理-化学-人为”三维分析框架,系统地

阐述了火灾风险的多重要素作用机制,创建了组合赋权的动态权重分配算法,很好地处理了评估时主客观信息融合的困难,把边缘计算架构同D-S证据理论运用到火灾风险评价当中,明显改进了多源异构数据的处理速度和结果可信度。这些新办法给工业火灾危险评价赋予了新的方法论支持<sup>[4]</sup>。

### 5.3 工程应用价值与实践意义

该模型有较强的工程应用价值,它所建立的实时监测、动态评价体系可以为工业园区的安全管理提供全天候、全方位的技术支持。实现风险预警由被动应对向主动防范转变,使火灾防控实现超前、准确的预测。同时分级响应机制设计使得有限的应急资源得到合理的分配,为工业园区安全管理决策提供依据,对预防重大火灾事故有重要的实践意义。

## 6 应用前景与改进方向

### 6.1 现有模型的实践价值与推广潜力

本动态评价模型已经在工业场景中被充分地验证,具有很高的实用价值。系统可以给园区安全管理给予全时段、多维度的风险监测能力,评估结果不仅能用于日常隐患排查工作的指导,还可以为应急预案的优化设计、消防设施的合理布局以及应急资源的科学调配给予数据支撑。该模型推广应用可以有效提高工业园区本质安全水平,对预防重大火灾事故有重要意义。

### 6.2 现有模型的局限性分析

虽然本模型在实际应用中表现出较好的效果,但是仍存在一定的局限性。目前系统在极端工况下适应性差,多重故障同时发生等复杂灾害情况下系统的稳定性有待提高<sup>[5]</sup>。同时模型对于新兴风险的识别能力还比较欠缺,对于新型材料、新工艺所带来未知的风险没有足够的灵活性。除此之外,目前系统缺少跨区域风险联动分析功能,不能满足大中型工业园区集群的安全管理需求。

### 6.3 未来研究重点与发展方向

针对现有的模型的不足,未来的研究将会从三个方面来开展,第一就是深入的对算法在极端情况下的适应程度进行研究,采用强化学习等先进的算法,提升模型在复杂的灾害环境中的稳定程度;第二就是推动数字孪生技术在火灾风险评价方面的应用,搭建起虚实互动的风险防控体系,从而达成火灾风险的超前模拟和预估;第三就是探究多园区联网评价机制,创建区域范围内的风险协同管控平台,让不同园区之间可以实现风险信息

的共享以及应急响应的联动。

## 7 结论与展望

### 7.1 结论

本研究建立的工业园区火灾风险动态评估模型,利用物联网感知技术、多源数据融合、智能分析算法将火灾风险从静态判断变为动态感知。模型创新性的采用组合赋权机制实现指标权重的自适应调整,用模糊理论解决风险评价的不确定性问题,并建立分级预警与应急响应联动的闭环管理体系。实证研究显示,此模型在预警的准确性及时效性上比传统评价方法要好的多,能为工业园区的安全管理提供强有力的技术支持。该研究给工业场所的火灾风险防控提供了一种新的方法论指导,对提高园区本质安全水平有重要的实践意义。

### 7.2 展望

未来研究将从三个方面进行加深,一是改善算法在极端工况的适应程度,采用深度学习等新型算法加强模型在复杂灾害情形下的鲁棒性,二是推进数字孪生技术在火灾风险模拟和预测方面的应用,创建虚实互动的风险防控体系,达成灾害演化的超前模拟,三是探寻多园区联网评价机制,创建区域协同管控平台,做到跨域风险信息互通共享以及应急联动。同时将加强模型对新风险的识别能力,完善风险评估的理论体系,给智慧园区的建设提供更加全面的安全保障。

### 参考文献

- [1]潘明明,王白根,齐红涛,等.面向电气设施火灾早期检测的多模态融合模型[J].电子技术应用,2025,51(06):10-15.
- [2]张兴潮.基于目标检测的化工园区火灾预警系统[D].淮阴工学院,2024.
- [3]梁佃军.化工园区火灾场景分析与灭火救援圈的探讨[J].化纤与纺织技术,2022,51(11):65-67.
- [4]石军花,朱梅,李进,等.化工园区储罐火灾热辐射模型仿真研究[J].中国安全科学学报,2022,32(S1):79-83.
- [5]沈博扬.基于贝叶斯网络的某高科技产业园消防安全风险定量研究[D].上海应用技术大学,2022.

作者简介:赵新宇,出生年月:1986年8月30日,性别:男,民族:汉,籍贯:河北唐山,学历:硕士研究生,已获得职称:中级专业技术职称,研究方向:消防监督。