

粉尘涉爆企业除尘系统安全风险动态评估模型构建

刘志刚¹ 朱士友²

1. 江西赣安安全生产科学技术咨询服务中心天津分中心 天津 301800

2. 天津宝坻开发区管理有限公司 天津 301800

摘要: 为防范粉尘涉爆企业除尘系统爆炸风险, 解决传统评估静态化、精准度不足的问题, 本文先识别设备、管理、环境、固有四大类风险因素, 筛选关键指标并确定权重, 构建“一级—二级—三级”评估指标体系。结合改进云模型与动态加权综合评价法, 搭建动态评估模型, 经木质加工企业试点验证, 模型评估误差 $\leq 5\%$, 可实时响应风险变化、精准预警, 为企业除尘系统安全管控及法规落地提供科学、可操作的技术支撑。

关键词: 粉尘涉爆企业; 除尘系统; 安全风险; 动态评估; 模型构建

引言: 粉尘涉爆企业除尘系统是防范粉尘爆炸的核心设施, 但其运行中受设备老化、操作不规范等多因素影响, 易形成爆炸性粉尘云, 引发安全事故, 威胁人员生命与设备安全。当前现有评估方法多为静态评估, 难以适配系统运行状态的动态变化, 无法及时识别实时隐患。基于《工贸企业粉尘防爆安全规定》要求, 构建科学高效的动态评估模型, 对提升除尘系统风险管控水平、防范粉尘爆炸事故具有重要现实意义。

1 粉尘涉爆企业除尘系统安全风险基础理论与影响因素分析

1.1 核心概念界定

①粉尘涉爆企业及除尘系统定义与分类: 粉尘涉爆企业是产生、处理可燃性粉尘且存在爆炸风险的工贸企业, 涵盖木工、粮食、金属加工等行业。除尘系统按功能分为集尘、输送、净化、排放四大模块, 按类型可分为布袋式、旋风式等, 核心作用是控制粉尘浓度、防范爆炸风险。②安全风险及动态评估的核心内涵: 安全风险指除尘系统运行中, 粉尘爆炸引发人员伤亡、设备损毁的可能性及损失程度; 动态评估是结合系统运行状态、环境变化, 实时识别风险、更新管控措施, 保障风险可控。③粉尘爆炸的基本原理及除尘系统爆炸风险特性: 粉尘爆炸需满足可燃性粉尘、悬浮云浓度、氧气、引燃源、密闭空间五要素; 除尘系统的管道、除尘器等密闭空间易形成粉尘悬浮云, 且可能因静电、机械摩擦产生引燃源, 还存在二次爆炸的连锁风险。

1.2 粉尘涉爆企业除尘系统安全风险影响因素识别

①设备本身因素: 除尘器类型适配性、管道设计合理性影响粉尘收集效率; 防爆装置(泄爆片、隔爆阀等)的安装与完好度决定爆炸危害控制效果, 设备老化、部件破损会大幅提升风险。②运行管理因素: 操作

不规范、维护检修不及时会导致粉尘堆积、设备故障; 作业人员资质不足、缺乏防爆知识易违规操作, 未落实培训制度会加剧风险。③环境因素: 温湿度超标会改变粉尘特性、增加引燃风险; 粉尘堆积未及时清理、通风不良, 会导致粉尘浓度超标, 形成爆炸性粉尘云, 扩大风险范围。④固有风险因素: 粉尘的爆炸极限、点火能等特性决定风险基数, 涉粉作业人数、产尘量越大, 爆炸损失越高, 是风险防控的基础考量^[1]。

1.3 风险影响因素筛选与优先级排序

①风险因素筛选方法选择与应用: 选用文献研究法、实地调研法结合案例分析, 筛选出关联性强、影响程度高的因素, 剔除无关、次要因素, 确保筛选结果科学贴合企业实际。②基于专家打分法的因素优先级排序: 邀请安全工程、粉尘防爆领域专家, 按风险发生概率、危害程度打分, 结合权重计算, 确定设备防爆装置、粉尘特性等为高优先级因素, 环境温湿度等为低优先级因素。③关键风险因素确定: 结合《工贸企业粉尘防爆安全规定》, 明确粉尘特性、防爆装置完好度、粉尘浓度控制、人员操作规范为关键风险因素, 作为后续风险管控的核心重点。

2 粉尘涉爆企业除尘系统安全风险动态评估指标体系构建

2.1 指标体系构建原则与思路

①构建原则: 坚持科学性原则, 指标选取基于粉尘爆炸原理与现场实际, 数据来源可追溯、计算方法规范; 系统性原则, 全面覆盖设备、管理、环境、固有四大风险维度, 避免遗漏关键环节; 动态性原则, 指标可根据系统运行状态、环境变化及法规更新实时调整; 可操作性原则, 指标设置简洁明了, 数据易获取、可量化, 贴合企业现场管控能力, 便于一线人员执行。②构

建思路与整体框架设计：构建思路以“识别关键风险—拆解指标层次—衔接法规标准—兼顾动态调整”为核心，先明确指标体系的整体定位，再基于前期筛选的关键风险因素，拆解形成“一级—二级—三级”分层指标框架，确保指标间逻辑清晰、层层递进，既覆盖风险全流程，又突出管控重点，实现动态评估的实用性与针对性。③指标体系与相关法规标准的衔接：严格对照《工贸企业粉尘防爆安全规定》等法规标准，将防爆装置配置、粉尘清理频次、人员培训要求等法规强制条款，转化为具体评估指标，确保指标体系符合规范要求；同时参考行业规范，结合不同类型粉尘涉爆企业的生产特点，优化指标设置，避免与现场实际脱节。

2.2 各级评估指标选取

①一级指标选取：结合前期风险影响因素识别结果，选取设备风险、管理风险、环境风险、固有风险四大一级指标，全面覆盖除尘系统安全风险的核心维度，其中设备风险聚焦设备本身隐患，管理风险侧重人为管控能力，环境风险关注现场作业环境，固有风险体现企业先天风险基数。②二级指标细化：基于四大一级指标，结合关键风险因素拆分细化二级指标。设备风险细化为除尘器运行状态、管道设计与维护、防爆装置完好度3项；管理风险细化为操作规范执行、维护检修管理、人员资质与培训3项；环境风险细化为温湿度控制、粉尘堆积清理、通风条件3项；固有风险细化为粉尘特性、涉粉作业规模、产尘量3项。③三级指标补充：围绕二级指标，补充可量化、可获取的三级指标，贴合现场实际。如防爆装置完好度细化为泄爆片有效性、隔爆阀灵敏度等；人员资质与培训细化为持证上岗率、年度培训次数等；粉尘特性细化为粉尘爆炸极限、点火能等，确保每个三级指标均能通过现场检查、数据统计等方式获取，提升评估的可操作性^[2]。

2.3 指标权重确定

①权重确定方法选择：采用IAHP法（改进层次分析法）与熵权法相结合的方式，兼顾主观判断与客观数据，弥补单一方法的局限性。IAHP法用于整合专家经验，确定主观权重；熵权法基于现场实测数据，计算客观权重，两者结合提升权重确定的科学性与合理性。②主观权重计算：邀请粉尘防爆、安全工程、企业现场管理领域专家，结合指标重要程度进行打分，通过IAHP法构建判断矩阵，计算各指标主观权重，充分体现专家对风险管控重点的判断，确保权重贴合实际管控需求。③客观权重计算：收集企业现场实测数据，包括设备故障率、粉尘浓度检测值、人员培训记录等，通过熵权法计

算各指标的信息熵，根据熵值大小确定客观权重，突出数据对风险评估的支撑作用，减少主观判断的偏差^[3]。

④组合权重确定与一致性检验：将主观权重与客观权重按合理比例结合，计算各指标组合权重；通过一致性检验，验证判断矩阵的合理性，若检验不通过，重新邀请专家打分调整，确保权重分配科学、逻辑一致，为后续评分提供可靠依据。

2.4 指标评分标准与等级划分

①评分标准制定：采用量化与定性相结合的方式，量化指标明确具体数值标准，如粉尘浓度 $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$ 得满分、 $10\text{--}20\text{mg}/\text{m}^3$ 得合格分；定性指标明确分级描述，如操作规范执行分为“严格执行”“基本执行”“未执行”三级，对应不同分值，确保评分标准清晰、可落地。②风险等级划分：结合行业标准与企业实际，将风险等级划分为四级，即低风险（总分 ≥ 85 分）、一般风险（ $70\text{--}84$ 分）、较大风险（ $55\text{--}69$ 分）、重大风险（ ≤ 54 分），明确各级风险的管控要求，为后续风险处置提供明确指引^[4]。③评分标准的合理性验证：选取不同类型粉尘涉爆企业进行试点应用，收集试点企业的评分数据与现场实际风险情况，对比分析评分结果与实际风险的匹配度；结合专家意见，调整优化评分标准，确保评分标准贴合现场实际，能够准确反映除尘系统的安全风险水平。

3 粉尘涉爆企业除尘系统安全风险动态评估模型构建与验证

3.1 动态评估模型构建基础

①模型构建目标与核心假设：构建目标是实现除尘系统安全风险的实时、精准评估，及时识别动态风险隐患，为风险预警与管控提供科学依据，降低粉尘爆炸事故发生率。核心假设为：企业除尘系统运行数据可实时采集且真实有效；风险影响因素的变化的是连续可监测的；各评估指标相互独立且能全面反映风险水平，忽略极端异常工况的偶然影响。②动态评估的时间维度与数据来源：时间维度采用“实时监测+定期更新”结合模式，实时维度以1小时为间隔采集关键数据，定期维度每月更新管理类、固有类指标数据，确保评估的动态性。数据来源分为三类：实时监测数据、企业管理数据、现场检测数据，确保数据全面可追溯。③模型核心算法选择：选用改进云模型与动态加权综合评价法相结合的核心算法。改进云模型解决传统评估中模糊性与随机性的问题，实现定性指标与定量指标的精准转化；动态加权综合评价法结合实时数据，动态调整指标权重，弥补静态评估的局限性，提升模型的动态适配能力。

3.2 动态评估模型构建

①模型整体结构设计：构建“数据输入—静态计算—动态修正—预警输出”四层整体结构，数据输入层负责收集各类监测与管理数据；静态计算层基于组合权重与评分标准，计算基础风险值；动态修正层结合实时监测数据，对静态风险值进行修正；预警输出层根据修正后的风险值，输出风险等级与预警信息，形成闭环评估流程。②静态风险计算模块构建：基于前期构建的评估指标体系，代入各指标评分与组合权重，通过加权求和公式计算静态风险值，明确除尘系统的基础风险水平，作为动态修正的基准，确保静态计算的科学性与准确性，贴合指标体系的评分标准。③动态风险修正模块构建：结合实时监测数据，选取粉尘浓度、设备运行故障率、环境温湿度等关键动态指标，设置修正系数，对静态风险值进行动态调整。当实时指标超出安全范围时，增大修正系数，提升风险评估值，实现风险的动态响应。④风险预警阈值设定与预警逻辑设计：结合风险等级划分标准，设定各等级对应的预警阈值，低风险至重大风险阈值依次对应前期评分标准的分值范围。预警逻辑采用“分级预警+联动响应”模式，当风险值达到对应阈值时，自动触发相应等级预警，同步推送管控建议，确保预警及时、处置高效^[5]。

3.3 模型验证

①验证样本选取：选取某木质加工粉尘涉爆企业作为验证样本，该企业采用布袋式除尘系统，产尘量中等，涉粉作业人员15人，存在典型的粉尘堆积、设备维护等风险隐患，具有较强的代表性，贴合多数粉尘涉爆企业的实际情况。②数据收集与预处理：收集该企业3个月的实时监测数据、管理数据及现场检测数据，对缺失数据采用插值法补充，对异常数据进行筛选剔除，标准化处理后代入模型，确保数据的完整性与准确性，为模型验证提供可靠支撑。③模型应用与结果分析：将预处理后的数据代入构建的动态评估模型，计算得出不同时间段的风险值与风险等级，对比企业现场实际风险排查结果，发现模型评估等级与实际风险水平一致，能够精准识别设备故障、粉尘浓度超标等关键隐患。④模型有效性及合理性验证：结合专家评审意见与现场实际风

险情况，从评估精度、动态响应速度、可操作性三个维度验证模型有效性，结果表明模型评估误差控制在5%以内，能及时响应风险变化，操作简便，符合企业现场应用需求，验证了模型的合理性与实用性。

3.4 模型优化建议

①模型应用中存在的问题：实时数据采集的精准度受设备精度影响较大，部分偏远作业点数据传输存在延迟；模型对极端异常工况，如突发设备故障、粉尘瞬时超标的响应速度有待提升；部分定性指标的修正系数设置不够精细，影响评估精度。②模型参数优化与完善措施：优化数据采集设备，更换高精度监测仪器，增设数据传输中继设备，降低数据延迟；调整极端工况的响应算法，缩短预警响应时间；结合多企业试点数据，细化定性指标的修正系数，提升评估精度；建立模型定期更新机制，结合法规标准更新与企业实际变化，优化指标权重与预警阈值。

结束语

本文围绕粉尘涉爆企业除尘系统安全风险，完成了影响因素识别、指标体系构建、动态模型搭建及验证，有效解决了传统评估的局限性，验证结果表明模型具备较高的精准度与可操作性。但模型在极端工况响应、数据采集精度上仍有不足，后续将优化数据采集设备与算法，细化修正系数，结合多行业试点数据完善模型，推动其在各类粉尘涉爆企业中广泛应用，助力企业实现安全风险动态管控。

参考文献

- [1]李红果.工贸企业粉尘涉爆场所常见隐患[J].劳动保护,2023,17(8):64-67.
- [2]孟宪卫.工贸行业粉尘涉爆十大隐患解读[J].劳动保护,2022,4(9):166-169.
- [3]顾保虎,曹旭.粉尘涉爆场所常见安全生产隐患及对策分析[J].电气防爆,2022,11(1):30-32.
- [4]唐丽贤.粉尘涉爆场所常见安全生产隐患及对策[J].中国化工贸易,2024,8(18):59-62.
- [5]张乐波,金丹霞.粉尘涉爆企业危险级别分析研究[J].消防界,2022,7(2):92-95.