

智能化矿山背景下煤矿机电设备安全风险识别与防控机制研究

尉彦东

山西锦兴能源有限公司肖家洼煤矿安全监督部, 中国·山西 吕梁 033000

摘要: 智能化矿山建设正推动煤矿机电设备向自动化, 网络化与数据驱动方向转型, 设备系统的复杂度与耦合程度显著提升, 传统基于经验判断的安全管理模式难以适应多源异构风险的识别需求。围绕机电设备运行状态监测数据, 构建融合特征提取与风险量化评估的识别方法, 并在此基础上设计分级分层的防控机制, 是保障矿山安全生产的关键技术路径, 研究通过建立设备故障模式与风险传播关联模型, 结合多参数耦合分析, 揭示了机电系统风险演化的内在规律, 为智能化矿山安全管理提供理论支撑与工程实践参考。

关键词: 智能化矿山; 机电设备; 安全风险识别; 风险防控机制; 状态监测

Research on Safety Risk Identification and Control Mechanism for Coal Mine Electromechanical Equipment in the Context of Intelligent Mines

Wei Yandong

Safety Supervision Department, Xiaojiawa Coal Mine, Shanxi Jinxing Energy Co., Ltd., China Shanxi Lvliang 033000

Abstract: The development of intelligent mines is driving coal mine electromechanical equipment toward automation, networking, and data-driven operations. This transformation has significantly increased the complexity and interconnectivity of equipment systems, making traditional safety management approaches based on experience inadequate for identifying multi-source and heterogeneous risks. By leveraging operational monitoring data of electromechanical equipment, this study proposes an integrated method combining feature extraction and quantitative risk assessment to identify potential hazards, and designs a hierarchical and layered risk control mechanism accordingly. This approach represents a key technical pathway for ensuring safe mining operations. Through establishing a model linking equipment failure modes with risk propagation and integrating multi-parameter coupled analysis, the research reveals the intrinsic evolution patterns of electromechanical system risks, providing theoretical support and practical guidance for intelligent mine safety management.

Keywords: Intelligent mine; Electromechanical equipment; Safety risk identification; Risk control mechanism; Condition monitoring

0 引言

煤矿机电设备是矿井生产系统的核心组成部分, 其运行安全性直接决定矿井整体安全水平, 随着智能化矿山建设进程加快, 传感网络, 工业物联网与大数据分析技术逐步嵌入设备运行管理环节, 机电系统由单一机械结构向“机械—电气—信息”多域耦合系统演化, 风险因素呈现出隐蔽性强, 传播速度快与耦合关系复杂等特征^[1]。传统安全管理依赖定期巡检与经验判断, 对渐变性故障与多因素交叉风险的捕捉能力有限, 难以满足智能化矿山对风险精准识别与主动防控的要求, 基于此, 探索适应智能化场景

的机电设备安全风险识别方法与防控机制, 具有重要的理论价值与工程意义。

1 智能化矿山机电设备系统结构与风险特征分析

1.1 智能化矿山机电设备系统架构与运行模式

智能化矿山机电设备系统由感知层, 传输层, 决策层与执行层构成闭环运行结构, 感知层通过振动, 温度, 电流与绝缘等多类传感器采集设备状态参数; 传输层依托工业环网与 5G 专网实现数据实时回传; 决策层运用边缘计算与云端协同分析完成状态判别; 执行层则根据决策指令

完成设备调速, 停机或联锁保护动作。相较传统机电系统, 智能化架构显著缩短了故障响应时间, 但同时也引入了通信时延, 数据丢包与算法误判等新型风险源, 使系统安全边界由单纯的机械—电气故障扩展至信息物理耦合故障范畴^[2]。

值得注意的是, 智能化机电设备系统的四层架构并非简单的技术叠加, 而是通过反馈回路实现闭环自适应调节, 执行层动作结果经感知层重新采集后回传至决策层, 形成“感知—决策—执行—再感知”的持续迭代过程。这一反馈机制在提升设备运行效率的同时, 也使系统呈现出典型的非线性动力学特征: 局部参数的微小扰动可能通过反馈回路被放大, 进而影响系统整体稳定性, 因此, 在分析机电设备安全风险时, 不能仅关注单一部件的静态状态, 还需将反馈回路的动态响应特性纳入考量范畴, 这是智能化场景下风险分析区别于传统静态可靠性分析的本质所在, 见图 1。

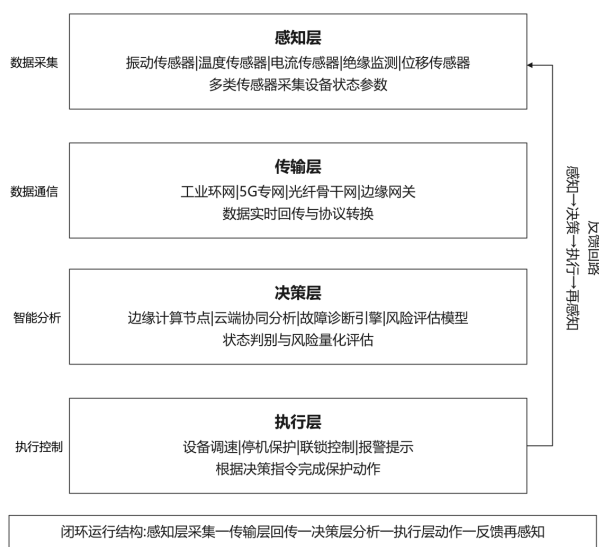


图 1 智能化矿山机电设备系统四层架构图

1.2 机电设备安全风险的来源分类与演化特征

结合设备全生命周期视角, 机电设备安全风险可归纳为本体性风险, 环境诱发性风险与信息交互性风险三类, 本体性风险源于设备磨损, 疲劳与老化, 表现为渐进式劣化过程; 环境诱发性风险与井下高湿, 高粉尘与强振动工况密切相关, 加速部件失效进程; 信息交互性风险则源于数据传输异常与控制逻辑冲突, 具有突发性强与影响范围广的特点^[3]。三类风险并非孤立存在, 而是通过设备运行状态相互耦合, 形成“渐变积累—环境激发—信息触发”的复合演化链条, 这一特征是构建识别模型的重要理论依据。

进一步分析三类风险的时间尺度特征可以发现, 本体

性风险的演化周期通常以月甚至年为量级, 呈现出缓慢的单调劣化趋势; 环境诱发性风险的作用周期相对较短, 多以班次或日为单位产生波动性影响; 而信息交互性风险则可能在秒级甚至毫秒级时间尺度内引发突变。三类风险时间尺度的显著差异, 决定了风险识别模型必须具备多时间粒度的分析能力, 既要捕捉长周期的趋势性变化, 又要对短周期的突发异常保持敏感, 这也是后续构建多源数据融合识别方法的重要设计出发点^[4]。

2 基于多源数据融合的机电设备风险识别方法

2.1 状态监测数据特征提取与风险指标构建

针对振动, 温度与电流三类核心监测信号, 采用滑动窗口方式提取均值, 方差, 峭度及频域能量占比等特征量, 形成设备状态特征向量。为消除量纲差异对综合评估的影响, 对各特征量进行归一化处理, 计算公式如下:

$$x_i' = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中, x_i 为第 i 个原始特征值, $x_{\min}$ 与 $x_{\max}$ 分别为该特征在监测周期内的最小值与最大值, x_i' 为归一化后的特征值。归一化处理后的特征向量作为后续风险等级评估模型的输入基础。

在特征提取过程中, 除时域统计特征外, 进一步引入频域特征以增强对早期故障的辨识能力, 对振动信号进行快速傅里叶变换后, 提取特征频带内的能量占比作为辅助判别指标, 可有效弥补单一时域特征对早期微弱故障不敏感的局限。同时, 考虑到井下工况的强噪声干扰特性, 在特征提取前采用小波阈值去噪方法对原始信号进行预处理, 去除高频随机噪声成分, 保留与设备状态相关的有效信息, 从而提升后续特征向量的可靠性与稳定性, 为风险量化评估提供更为纯净的数据基础。

2.2 风险等级量化评估模型构建

在特征向量基础上, 引入层次分析法确定各风险指标权重, 构建综合风险评分模型:

$$R = \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_j'$$

式中, R 为设备综合风险评分, w_j 为第 j 项指标权重 (满足 $\sum w_j = 1$), x_j' 为归一化后的第 j 项特征值, n 为参与评估的特征指标总数。依据评分区间将风险等级划分为四级, 如表 1 所示, 需要指出的是, 权重系数的确定不应完全依赖静态的层次分析结果, 而应结合设备运行历史数据进行动态修正。当某一特征指标在历史故障案例中表现出

较强的判别能力时，可通过反馈调整机制适当提高其权重占比，使评估模型逐步适应不同设备类型与工况条件下的风险表征差异，这种“先验权重—历史修正”相结合的方式，兼顾了模型的理论可解释性与工程适应性，避免了纯数据驱动方法在样本不足条件下可能出现的过拟合问题，见表 1。

表 1 机电设备风险等级划分标准

风险等级	综合评分区间	风险特征描述	建议响应措施
I 级（低风险）	$R < 0.3$	设备运行平稳，参数波动小	常规巡检
II 级（一般风险）	$0.3 \leq R < 0.5$	部分指标偏离基线，趋势平缓	加密监测
III 级（较高风险）	$0.5 \leq R < 0.75$	多指标异常联动，劣化趋势明显	限期检修
IV 级（高风险）	$R \geq 0.75$	参数急剧突变，存在失效征兆	立即停机处置

2.3 风险识别方法的实验验证与结果分析

选取井下主运输带式输送机驱动系统作为验证对象，对其滚筒轴承，电动机及减速器三类关键部件连续监测运行周期数据，并按照上述模型计算综合风险评分。结果显示，滚筒轴承在温度特征与振动峭度指标上呈现同步上升趋势，综合评分由 I 级逐步演化至 III 级，与实际检修记录中发现的轴承磨损情况基本吻合，表明该识别方法对渐变性故障具有较好的捕捉能力，识别提前量较传统阈值报警方式有明显提升^[5]。

3 机电设备安全风险传播机理与影响规律

3.1 风险传播路径建模与耦合关系分析

机电设备风险传播并非局限于单一部件，而是沿“部件—子系统—系统”层级向外扩散。以采煤机截割系统为例，截齿磨损引发切削阻力增大，进而导致牵引电机负载电流上升，若未及时干预，将进一步引发变频器过热保护动作乃至整机停机，形成典型的链式传播路径。这种传播过程本质上是能量与信息在设备耦合网络中的非线性传递过程，传播强度受部件间耦合系数与响应时延的共同制约。

从系统动力学视角审视，风险沿耦合网络传播的过程可类比为能量在弹性介质中的扩散现象：初始扰动强度，介质耦合密度与阻尼特性共同决定了扰动最终的影响范围与衰减速率，在机电设备耦合网络中，“阻尼”对应于设备自身的容错裕度与安全保护逻辑的灵敏度。容错裕度越大与保护逻辑响应越及时，风险传播过程中的能量耗散效率越高，最终波及范围越有限，这一类比为理解风险传播规律提供了直观的物理图景，也提示在设备选型与保护逻辑设计阶段应充分预留合理的容错空间，见图 2。

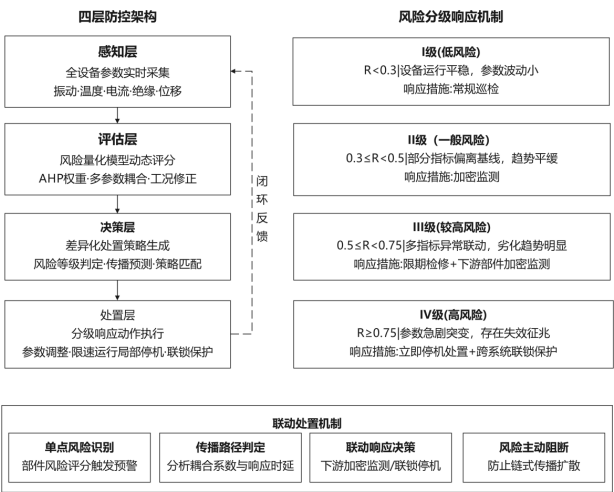


图 2 风险传播路径与防控机制图

3.2 关键参数对风险传播强度的影响规律

通过对耦合系数，响应时延与环境载荷三类关键参数进行敏感性分析发现，耦合系数是影响风险传播速度的主导因素，其数值每提高一个量级，下游子系统风险评分的响应时间相应缩短；响应时延则主要影响风险传播的累积效应，时延越长，故障在传播路径末端造成的综合影响越显著；环境载荷（如振动强度与粉尘浓度）主要通过加速部件劣化速率间接影响传播强度，其作用机制表现为对本体性风险的持续激发。三类参数的影响规律具体如表 2 所示。

进一步对比不同子系统间的传播差异可以发现，机械传动类耦合链路的风险传播速度相对较慢，通常表现为渐进式参数漂移；而电气控制类耦合链路由于信号传递速率快，风险传播往往呈现跳变式特征，一旦触发即可能在极短时间内波及多个关联部件。这一差异意味着防控机制在设计响应策略时，应针对不同类型的耦合链路采取差异化的监测频率与处置时限，对电气控制类风险应配置更高优先级与更短响应周期的处置资源，以匹配其快速传播的物理特性，见表 2。

表 2 关键参数对风险传播的影响机制

影响参数	主导传播特性	作用机制	影响程度排序
耦合系数	传播速度	直接决定风险跨部件扩散效率	高
响应时延	累积效应	延长故障暴露窗口，加剧末端影响	中
环境载荷	激发强度	加速本体劣化，间接放大传播基数	中

4 智能化矿山机电设备安全防控机制构建

4.1 分级分层防控体系架构设计

依据前述风险等级划分与传播规律，构建“感知—评

估—决策—处置”四层防控架构。感知层实现全设备参数实时采集；评估层运行风险量化模型完成动态评分；决策层根据风险等级与传播预测结果生成差异化处置策略；处置层执行分级响应动作，包括参数调整与限速运行，局部停机与联锁保护。该架构的核心优势在于将风险防控由被动式故障响应转变为主动式趋势干预，有效压缩了风险从产生到处置的时间窗口。

在四层防控架构的实际运行中，决策层的策略生成过程还应充分考虑设备当前所处的生产工况阶段，同一风险评分在设备启动阶段与稳定运行阶段所对应的实际危险程度存在差异，启动阶段因电流冲击与机械应力集中等因素叠加，相同评分下的实际风险往往更高。因此，决策层需引入工况修正系数，对基础风险评分进行动态调整，使处置策略的生成更加贴合设备实际运行状态，避免因忽略工况差异而导致的响应策略失配问题。

4.2 动态预警与联动处置机制

针对风险传播的链式特征，设计跨子系统联动处置机制：当某一部件风险评分触发Ⅲ级预警时，系统自动对其下游耦合部件启动加密监测，防止风险沿传播路径继续扩散；当耦合系数与响应时延同时超出安全阈值时，触发跨系统联锁停机指令，实现风险传播的主动阻断。该机制通过将传播规律嵌入预警逻辑，弥补了传统单点报警机制在应对复合风险时的局限性。

4.3 防控机制的应用效果评价

在实际应用场景中对比防控机制启用前后的设备异常处置效率，结果表明，联动处置机制使风险从识别到处置的平均响应周期明显缩短，同时因风险扩散导致的连锁停机事件发生频次显著下降，验证了分级分层防控体系在抑

制风险传播，提升处置时效性方面的实际效能，为智能化矿山机电设备安全管理提供了可推广的技术范式。

5 结语

智能化矿山建设推动煤矿机电设备安全管理由经验驱动转向数据驱动，风险识别防控水平直接决定矿井本质安全，文章搭建多源数据融合风险量化评估模型，厘清设备风险受本体劣化，环境载荷与部件交互共同作用的演化规律，阐释风险沿耦合网络链式传播机理，明确耦合系数，响应时延是影响传播强度的核心参数。依托该模型建立分级分层防控体系，推动风险管控由被动处置转为主动前置干预，有效阻断风险扩散与提升处置效率，后续可依托设备全生命周期数据完善模型自适应优化能力，为矿山机电安全管理体系迭代完善提供理论与技术支撑。

参考文献：

- [1] 幸伟鹏. 基于深度学习的矿山机电设备智能故障预测[J]. 中国矿业, 2024,33(S1):238-242.
- [2] 孙省, 靳友刚. 煤矿安全风险智能预警管控系统设计研究[J]. 山东煤炭科技, 2024,42(5):176-180.
- [3] 雷咸锐, 薛跃强, 薛黎明等. 基于云模型的煤矿安全风险四色图动态管控系统研究[J]. 中国矿业, 2024,33(3):76-83.
- [4] 李鹏. 矿山机电设备故障诊断分析与研究[J]. 世界有色金属, 2023(14):202-204.
- [5] 方晓, 洪继坤, 王洪琦. 智慧煤矿安全管理中智能化视频识别技术的应用[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(2):184-185+189.

作者简介：尉彦东（1991.02-），男，汉族，山西大同，本科，工程师，研究方向：机电安全管理。