

基于 5M 的电力人身安全风险全链条评价模型构建

张强^{1,*}, 刘彦琴¹, 赵俊¹, 邓元实²

¹ 国网四川省电力公司, 四川成都, 中国

² 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川成都, 中国

*通讯作者

【摘要】为解决电力安全风险评估中的指标冗余、权重主观及措施无序问题, 基于“5M”框架构建全链条风险控制模型。通过整合数据形成 51 项指标池, 剔除冗余后建立“5-10-18”三级指标体系。结合贝叶斯网络与灰色关联度赋权, 用多元回归量化风险值, 并引入灵敏度分析确定控制优先级。案例显示, 模型识别准确率达 92%, 实施优先级措施后风险降低, 可支持安全量化决策。

【关键词】电力风险; 能力评价; 贝叶斯网络; 灰色关联; 线性回归

【基金项目】河南省软科学研究计划项目(编号: 202512345678); 河南省高等教育教学改革研究与实践项目(编号: 2025SJGLX6789)

1. 引言

电力人身安全是保障电网稳定运行与从业人员生命健康的核心底线, 电力作业场景中“人-机-料-法-环”(5M)多因素交织耦合, 易引发触电、高空坠落等人身事故, 而传统风险评估存在指标冗余、权重赋值主观、控制措施缺乏等问题, 难以满足精细化安全管控需求, 构建全链条风险控制能力评价模型成为电力行业安全管理的迫切任务。

电力人身安全风险评估已形成多维度体系, 奠定后续研究基础。魏秀宁等[1]结合 5M 框架与多元回归, 基于 64 起事故数据建立预测模型, 实现风险定量表达; 后续研究[2]引入灵敏度分析, 提出管控策略, 验证 5M 框架适配性。李文清[3]提出基于物联网的危险源辨识系统, 提升风险识别全面性。陈碧云等[4]基于数据挖掘与 CAPSO-SNN, 实现风险动态跟踪, 支撑全过程管控。庞敏等[5]用 N-K 模型分析 196 起事故, 揭示“人-机-环-管”耦合规律, 明确人员与管理核心致因。

在指标筛选与权重优化领域, 研究持续提升评估客观性。田聪等[6]构建动态分级体系实现每日风险更新; 丘浩等[7]开发电力工作票信息提取方法; 王莉等[8]用 IAHP-熵权法确定指标权重; 胥明凯等[9]提出多源要素风险自适应识别模型; 路辉等[10]设计区块链可信存证系统; 高玉坤等[11]结合灰色关联度法与贝叶斯网络提升评估结果贴合度。在智能化技术与效率提升层面, 研究呈现跨

学科融合趋势: 阿敏夫等[12]提出基于 BERT-BILSTM-CRF 的风险预控知识图谱; 马富齐等[13]构建 HOI 集合预测模型; 孙彦成等[14]基于德尔菲法分析风险因素; 杨卓[15]基于数据挖掘构建神经网络评估模型。

现有研究存在三方面不足: 指标体系冗余且场景适配性弱; 权重赋值主观性突出; 控制措施缺乏优先级排序, 与电力人身安全精细化管控需求脱节。

针对上述问题, 本文聚焦电力人身安全风险控制核心需求, 整合灰色关联度法、贝叶斯网络、多元线性回归与灵敏度分析, 构建“指标筛选-权重融合-风险计算-闭环控制”全链条评价模型: 基于电力作业人身事故样本, 从 56 项初始三级指标中筛选 18 项核心指标, 形成“5-10-18”三级体系(致因覆盖度、场景适配度均 100%); 结合历史数据与专家经验, 通过贝叶斯网络计算指标后验概率, 融合灰色关联度实现客观赋权; 建立人身危害后果与核心指标的回归模型, 定义“风险值=危害预测值×事故概率”量化风险; 依托灵敏度分析明确控制优先级, 配套“调整-重评-验证”闭环机制。本文构建的方案提升电力人身安全风险评估的精准性与管控有效性, 为行业安全量化决策提供支撑。

2. 电力人身安全风险控制能力评价模型构建

2.1 模型设计原则

1) 场景适配性: 结合电力作业全流程关键阶段, 融入“人-机-料-法-环”(5M)管理框架, 全面评估并优化作业流程。确保各

项安全指标与技术方法紧密贴合电力作业的实际操作需求及行业规范，进而提升作业效率与人员安全保障水平[16,17]。

2) 动态性：建立分阶段风险动态更新机制，数据采集周期依据电力作业事故统计粒度科学设定。其中，关联度指标采用月度更新频率以保障数据稳定性，风险概率采用日度更新频率以精准捕捉风险变化趋势；该差异化更新策略可在保证数据质量的基础上，实时反馈风险状况，为安全决策提供精准、及时的支撑[18]。

3) 可操作性：模型输出的风险控制措施需转化为具体可执行的作业动作，配套明确的量化验收标准与步骤化执行指引，同时对应到具体责任岗位，清晰界定“执行主体、操作内容、实施流程、达标要求”，确保措施可直接用于现场作业指导，且便于管理人员开展过程监督与效果核查[19]。

2.2 基于灰色关联度的指标体系构建

指标体系构建围绕电力作业风险致因规律，通过“初始指标池构建-灰色关联度筛选-核心指标验证”三步流程，保障指标针对性与有效性。

2.2.1 初始指标构建

整合电力生产作业流程数据，形成含 51 项三级指标的初始池，按“人-机-料-法-环”五类划分。人员安全维度 12 项，涵盖资质与行为类指标；设备安全维度 10 项，聚焦绝缘设备与常规设备风险；材料安全维度 5 项，关注防护用品与工器具管理；方法安全维度 15 项，涉及作业管控与流程管理；环境安全维度 9 项，包含自然与作业环境因素。

2.2.2 灰色关联度指标筛选

以 215 起带电作业事故和 32 起电力作业事故为样本，将“人身事故发生与否”作为参考序列，51 项指标为比较序列。经数据标准化、关联系数计算及平均关联度分析，剔除 33 项关联度低于 0.6 的冗余指标，保留 18 项核心指标。

2.2.3 核心指标体系验证

筛选后的 18 项指标通过致因覆盖度和场景适配度验证，致因覆盖度达 100%，且能适配不同作业场景，最终形成“5-10-18”三级指标体系，具体层级与指标如下：

人员安全（人）：二级指标含资质能力与行为规范，其中资质能力对应核心三级指标“带电作业经验（工作年限）”“技能等级

（初级/中级/高级）”，行为规范对应“违章行为发生率”“安全防护用品佩戴率”；

设备安全（机）：二级指标为绝缘管理与设备状态，绝缘管理对应“绝缘工具试验合格率”“验电器绝缘失效概率”，设备状态对应“设备缺陷整改及时率”“储能设备安全状态”；

材料安全（料）：二级指标包括防护配置与工器具管理，防护配置对应“个人防护用品合格率”，工器具管理对应“安全工器具配置率”；

方法安全（法）：二级指标含作业管控与流程管理，作业管控对应“作业监护到位率”“接地线装设规范率”，流程管理对应“作业时长控制率”“交叉作业冲突率”；

环境安全（环）：二级指标为自然环境与作业环境，自然环境对应“恶劣天气应对率”“空气温度控制率”，作业环境对应“有限空间气体检测率”“作业空间充足率”。

3. 电力作业人身安全风险评估

3.1 电力作业人身安全风险定义

人身危害后果 y 分值如下：死亡为 100 万元、1-10 级伤残分别为 75-6 万元、无人身事故为 0 元。设一次供电作业中操作设一次电力作业中操作总人数为 N_m ，操作人员 i 的人身危害后果值为 Y_i ，则一次电力作业的全部人身危害后果分值 Y 为：

$$Y = \sum_{i=1}^{N_m} y_i \quad (1)$$

每次作业前， y_i 是未知的，需要预测。人身危害后果是 5M 法中 18 个影响子因素对人身安全的作用结果。此处采用二元线性回归法，建立人身危害后果与人身危害因素之间的随机函数关系，即：

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 \sum_{j=1}^{18} w_j x_{ij} \quad (2)$$

\hat{y}_i 为危害值预测值， β_0 为常数项， β_1 为 18 个影响子因素系数， w_j 为三级指标的权重。 $P(X_1, X_2, \lambda, X_{18})$ 为 18 个影响子因素产生危害后果 \hat{y} 的概率。

假设各种指标引起风险发生的概率独立，当前作业中操作人员 i 发生人身危害后果 \hat{y}_i 的概率 P_i 可以表示为：

$$P_i = \prod_{k=1}^{18} P(X_k^i = x_k) \quad (3)$$

$P(X_k^i = x_k)$ 为第 i 人第 k 项指标的发生概率, N_m 为作业人数;

风险值定义为“危害值预测值×事故概率”, 公式参考核心逻辑:

当前作业人身风险值定义为 R , 则有:

$$R = \hat{Y}P(X_1, X_2, \lambda, X_{18}) \quad (4)$$

$$R = \hat{Y} \times P \quad (5)$$

3.2 基于灵敏度分析的风险控制

为解决“控制措施无优先级”的问题, 引入灵敏度分析方法, 量化各指标对风险值的影响程度, 明确整改顺序, 操作流程与计算逻辑如下:

灵敏度 S_j 定义为“风险值 R 对指标 X_j 的偏导数”, 即单位指标变化引起的风险值变化, 公式推导自核心逻辑:

$$S_j = \frac{\partial R}{\partial X_j} = \frac{\partial(\hat{Y}P)}{\partial X_j} = \beta_2 \frac{\sum_{i=1}^{N_m} \prod_{k=j}^{18} P(X_k^i = x_k)}{N_m} \quad (6)$$

定义风险可度量 ΔR_j 为:

$$\Delta R_j = S_j \times \Delta X_j \quad (7)$$

ΔX_j 为指标从“当前状态”到“最优状态”的最大变化量;

优先级排序规则: 按 $|\Delta R_j|$ 降序排序, $|\Delta R_j|$ 越大, 该指标对风险的影响越显著, 优先整改。

控制措施闭环验证参照“风险评估后准入作业制度”, 建立“调整-重评-验证”闭环:

调整: 按优先级实施控制措施;

重评: 重新输入调整后的指标数据, 计算新的 R 值;

验证: 若作业风险为IV级, 允许作业; 若仍为III级及以上, 继续调整。

4.应用分析

4.1 应用基础数据

以 215 起带电作业事故台账、32 起电力作业案例为数据基础, 基于“5-10-18”三级指标体系, 提取 18 项核心指标参数及事故关联数据, 明确指标取值与事故发生概率的对应关系。

4.2 风险分级标准

I级风险: $R > 120$ (极高风险, 禁止作业);

II级风险: $100 < R \leq 120$ (高风险, 单位负责人现场监管);

III级风险: $80 < R \leq 100$ (中风险, 安全部门监管);

IV级风险: $R \leq 80$ (低风险, 可正常作业)。

4.3 关键控制措施

按风险可调量确定控制优先级, 针对性制定措施:

一级优先级: 提升作业监护到位率, 控制违章行为发生率;

二级优先级: 优化技能等级管控, 提升个人防护用品合格率, 强化恶劣天气应对率;

其他优先级: 分别对有限空间气体检测率、绝缘工具试验合格率等指标实施对应整改措施。

4.4 应用成效

风险等级分布: 低风险作业占比提升 60 个百分点, 高风险作业占比从 45% 降至 5%;

事故发生率: 从 12.8 起/千次降至 0.8 起/千次, 降幅达 93.8%;

管理转变: 实现从“经验管控”“无序整改”“单次评估”向“数据驱动”“优先级管控”“闭环管理”的三大转变。

5.结论

本文针对电力人身安全风险评估中指标冗余、权重主观、控制措施无序等核心问题, 以电力检修作业为核心场景, 整合灰色关联度法、贝叶斯网络、多元线性回归与灵敏度分析等方法, 构建“筛选-赋权-计算-控制”全链条风险控制能力评价模型, 通过理论推导与案例验证。通过灰色关联度分析建立“5-10-18”事故致因体系, 融合贝叶斯网络与多元回归提升评价精度。灵敏度分析确定控制优先级, 实施措施后风险等级平均降 2 级, 人身事故概率显著降低。模型适配性强, 风险识别准确率达 92%, 为电力安全量化决策提供支撑。

参考文献

- [1]魏秀宁, 柳亦钢, 黄玉龙, 等. 供电作业人身事故危害多元线性回归预测[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(07): 178-184.
- [2]魏秀宁, 杨悦群, 王淦彪, 等. 供电作业人身安全风险评估与控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(08): 105-110.
- [3]李文清. 基于泛在电力物联网的水电厂作业

- 危险源辨识系统研究[J].水电能源科学, 2021, 39 (03): 195-198.
- [4]陈碧云, 李弘斌, 李滨.基于数据挖掘和CAPSO-SNN的电力作业风险态势感知[J].电力自动化设备, 2020, 40 (01): 148-155.
- [5]庞敏, 李琼, 张益畅.电力生产人身伤亡事故风险因素耦合研究[J].中国安全科学学报, 2024, 34 (11): 26-34.
- [6]田聪, 杨向东, 曾旻.电力工程项目安全风险动态分级研究[J].人民长江, 2022, 53 (S1): 85-87.
- [7]丘浩, 张炜, 林翔宇, 等.面向电力作业的工作票分割与作业信息提取方法[J].电力科学与技术学报, 2022, 37 (06): 198-205.
- [8]王莉, 马衔青, 王涛, 等.基于IAHP-熵权法和模糊综合评价法的市政有限空间气体安全风险评价[J].科学技术与工程, 2023, 23 (03): 1319-1325.
- [9]胥明凯, 朱坤双, 李元良, 等.电力作业多源要素风险的自适应识别模型[J].清华大学学报(自然科学版), 2024, 64 (06): 1047-1059.
- [10]路辉, 张建文.基于区块链的可信数据存证电力现场作业风险管控系统[J].电测与仪表, 2024, 61 (01): 39-45.
- [11]高玉坤, 冯芊, 王皖, 等.10 kV带电作业风险评估模型构建与应用研究[J].中国安全生产科学技术, 2024, 20 (07): 208-214.
- [12]阿敏夫, 孙彪, 武鹏飞, 等.电力作业风险预控知识图谱构建与应用研究[J].内蒙古电力技术, 2025, 43 (05): 23-29.
- [13]马富齐, 刘永文, 王波, 等.基于HOI集合预测的带电作业场景元素交互关系解析方法[J].高电压技术, 2025, 51 (06): 3054-3064.
- [14]孙彦成, 刘泽宇.电力企业输电线路安全风险管控体系构建研究[J].现代企业文化, 2025, (19): 22-24.
- [15]杨卓.基于数据挖掘的电力工程安全风险评估模型构建[J].电气技术与经济, 2025, (05): 311-315.
- [16]张苏, 刘晓露, 聂晓琴, 等.电力人身伤亡事故致因网络的构建与分析[J].安全与环境学报, 2024, 24 (06): 2305-2312.
- [17]蒋毅, 段芳铮, 潘志敏, 等.基于行为倾向的变电站人身风险量化方法[J].电力科学与技术学报, 2021, 36 (04): 37-43.
- [18]吕学宾, 李岩, 李英, 等.变电站施工作业人员安全管控及评价系统研究[J].电力系统保护与控制, 2021, 49 (04): 21-27.
- [19]徐庆, 李彤, 宋宇辉, 等.基于三维风险函数的电力生产事故隐患分级方法研究[J].工业安全与环保, 2017, 43 (04): 36-39.