

基于风险矩阵的电力工程电气施工安全管理优化与案例分析

杨 帆

(佛山市劲能电力工程有限公司, 广东 佛山 528000)

摘 要 针对电力工程电气施工阶段传统定性管理异判率高、闭环滞后等问题, 本文构建了基于风险矩阵的安全管理优化体系。通过 WBS-RBS 耦合识别、 β -二项分布量化可能性、AHP-熵权融合赋权严重度, 建立 5×5 动态矩阵, 并开发移动端闭环平台, 在某 10 kV 变电站扩建工程中应用后, 事故率由 1.69 降至 0.38 每百万工时, 百万工时伤害率由 1.27 降至 0.29, 整改单逾期率由 17% 降至 3%, 红色风险异判率由 29% 降至 4%, 验证了体系的有效性与可移植性。

关键词 风险矩阵; 电气施工; 安全管理; β -二项分布; AHP-熵权

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.035

0 引言

高压及城市电网改扩建项目日趋密集, 电气安装与高压试验同步推进, 能量瞬释与交叉作业耦合导致事故呈现低频高损特征^[1]。传统依赖专家经验的定性评价在“红橙”边界处异判率近三成, 整改闭环平均延误 2~3 天, 难以匹配电气试验窗口的紧凑节拍。风险矩阵因其 $R=L \times S$ 简洁模型被 IEC 与 ISO 广泛推荐, 却鲜见与电力施工 WBS 节点深度耦合的研究。将矩阵模型嵌入施工全过程, 借助信息化手段实现数据实时更新与多方协同, 有望突破经验驱动瓶颈, 提升风险语言一致性与资源配置效率。基于此背景, 本文构建面向电气施工的动态风险矩阵优化体系, 并在 10 kV 扩建工程中开展实证, 旨在为行业提供可参考的范式。

1 风险矩阵理论基础与电力工程电气施工安全需求

风险矩阵源于 20 世纪 60 年代美军武器系统可靠性研究, 经 IEC 61010 与 ISO 45001 迭代, 形成可通用于建造行业的半定量框架, 其内核以二维笛卡尔结构将不确定性转化为可视化决策信息。电力电气施工具有能量密集、交叉作业、试验瞬态三大特征, 传统“经验+制度”模式难以兼顾高维度致因, 故引入 $R=L \times S$ 模型, 把风险视作发生概率与后果严重度的乘积极。该模型简洁、单调递增且满足保序性, 可在招标、图纸会审、班前会等任意环节快速复制, 为管理资源配置提供可比较标尺。

$$R=L \times S \quad (1)$$

式(1)中, R 为风险值, L 表示事件发生可能性等级, S 表示事故后果严重度等级。

在 5×5 量化域下, 模型利用有序对映射即可区分“红色禁止区”与“蓝色关注区”, 无需构建复杂分布即满足 PDCA 循环所需的快速判异需求。同时, 工作人员基于电力工程电磁场-热力场-机械场多物理场耦合特性, 建立三维风险要素拓扑图谱。将触电风险解构为空气间隙击穿概率、接地网瞬态阻抗、人体生物电阻等 9 项基础变量; 将电弧伤害量化为等离子体温度梯度、声压波传播函数、金属气化速率等 12 维参数集。采用改进的德尔菲-蒙特卡洛复合算法, 实现风险等级的动态迭代计算, 使 L4 级(灾难性)风险辨识精度提升至 92% 以上。

2 基于风险矩阵的电气施工安全管理优化体系

2.1 风险识别与可能性量化模型

电气施工具有作业面动态转移、能量瞬间释放、试验电压等级跨度大等特点, 传统清单式识别易遗漏交叉风险。本文构建 WBS-RBS 耦合矩阵, 将 10 kV 变电站扩建工程分解为 6 级作业包, 对应电气安装、高压试验、二次接线等 12 个子网络, 并在每个工作包节点映射“人机料法环”5 类风险源, 形成 1 200 余项初始事件库。经两轮德尔菲函询, 选取具有 10 年以上经验的 21 名专家, 以四分位距小于 1.2 为收敛准则, 最终凝练 7 大类 38 项关键风险, 涵盖带电距离不足、SF6 气体泄漏、继保误整定、高空坠物、交叉感应过电压、

通信中断及暴雨滑移。为消除频率统计的小样本偏差，引入 β -二项分布对历史未遂事件进行贝叶斯修正，把近三年同类型项目积累的 n 条未遂记录视为二项样本，结合无信息先验 $\text{Beta}(1, 1)$ ，得到后验期望概率，再通过线性分位函数映射至 $0 \sim 5$ 离散等级。该过程兼顾数据稀缺与专家判断，使可能性评分既服从统计规律又保留更新弹性。示例公式如下，用于标定等级 3 对应的概率区间下限：

$$p_{L=3} = \frac{k+1}{n+2} \quad (2)$$

式 (2) 中， $p_{L=3}$ 表示等级 3 的可能性概率下限， k 为历史未遂事件发生次数， n 为同类作业总次数。该式保证当样本量趋近于零时，概率估计不会退化为零，从而维护矩阵在早阶段的区分度。通过反向验证，当 n 超过 30 且 k/n 处于 $0.10 \sim 0.20$ 区间时，等级 3 概率稳定在 0.12 ± 0.02 ，满足现场对“偶发但可预见”事件的语言描述，实现语言标签与数值区间的闭环对应 [2]。

2.2 后果严重度多维权重评估

电气施工事故往往触发连锁反应，单一“人身伤亡”维度已无法表征电网安全稳定运行需求。本文建立人员伤害、设备损失、电网冲击、环境破坏、舆情延误五维指标体系，其中人员伤害按 GB 6441 分为轻伤、重伤、死亡三档；设备损失以修复成本占合同价比例为度量；电网冲击引入暂降深度与失负荷 MW 量化；环境破坏以 SF6 排放当量 tCO_2e 计算；舆情延误则通过社交媒体扩散指数与停电敏感用户占比耦合。为克服纯 AHP 主观漂移与纯熵权结构失衡的缺陷，采用 AHP-熵权组合赋权法：首先由 7 名技术专家给出两两判断矩阵，通过一致性检验后得到主观权重向量 w_{AHP} ；其次收集近五年行业事故报告，构建 70 条样本的原始数据矩阵，计算各指标熵值与冗余度，得到客观权重向量 w_{E} ；最后按最小相对信息熵原则融合，获得综合权重 w 。权重结果见表 1，其中电网冲击权重 0.327 居首，人员伤害 0.254 次之，舆情延误 0.095 最低，反映高压工程“电网安全优先”的价值导向。该权重可直接代入 $S = \sum w_i \cdot s_i$ 计算综合严重度，实现不同性质后果的同质可比 [3-4]。

2.3 动态风险矩阵与分级管控规则

将 L 、 S 得分映射至 5×5 彩色矩阵，横轴为可能性 $0 \sim 5$ ，纵轴为严重度 $0 \sim 5$ ，网格色带按 RGB 渐变划分为红橙黄蓝四级预警域：红色区 $R \geq 12$ ，禁止作业并立即启动应急预案；橙色区 $6 \leq R \leq 11$ ，须编制专

表 1 后果严重度指标组合权重

指标	主观权重 w_{AHP}	客观权重 w_{E}	综合权重 w
人员伤害	0.311	0.198	0.254
设备损失	0.218	0.201	0.209
电网冲击	0.289	0.364	0.327
环境破坏	0.102	0.137	0.119
舆情延误	0.080	0.100	0.095

项控制方案并由总监审批；黄色区 $3 \leq R \leq 5$ ，采取常规措施并加强监测；蓝色区 $R \leq 2$ ，可接受但需备案。矩阵每日 06:00 自动拉取前 24 小时现场记录，更新 L 的后验概率；每周例会复盘偏差，若连续 3 日升级或累计 5 点偏离，则触发“周校准”程序；每月底由第三方审计所有 R 值漂移记录，必要时调整 S 维权重，形成 PDCA 闭环。决策门限设定为：当红色网格占比 $> 5\%$ 或单点 R 值 ≥ 15 时，停工令由平台即时推送至业主、监理、施工三方终端，确保处置动作不滞后于风险演化。

2.4 信息化支撑与现场落地流程

研发“E-Risk Matrix”移动应用，采用 Flutter 框架实现 Android 与 iOS 双端复用，后端基于微服务架构，集成 GIS 定位、图像识别与规则引擎。系统核心内置动态规则引擎，将传统 5×5 静态矩阵升级为概率-严重度-暴露频次三维模型。针对 10 kV GIS 安装作业，在识别到未设置屏蔽罩且作业半径 3 m 内存在金属构架时，1.2 秒内完成风险熵值迭代计算，输出红色风险预警。同步触发防护资源调度：自动派发 40 cal/cm^2 电弧防护服至最近智能仓储柜，并推送含操作要点的数字作业票至关联人员移动终端。防护装备配备 RFID 芯片，未完成扫描验证将锁定下一步工序指令。作业人员现场拍照后，系统自动提取作业票编号、GPS 坐标与时间戳，调用风险识别模型实时计算 L 与 S ，5 秒内返回 R 值并匹配对应色区，同时向责任人推送控制措施清单。班前会模块嵌入电子矩阵，主持人须逐项确认风险色区与措施落实状态，未勾选红色项则无法生成会议纪要；监理人员使用专用平板扫描 NFC 电子工票，自动调取该作业面历史风险数据图谱，通过比对当前控制措施与数据库最佳实践方案校验合规性，发现擅自降级作业时，系统立即冻结电子工作票并激活定位跟踪，同步向三级责任主体发送加密告警信息流。此外，平台还需要建立风险数据立方体仓库，通过标准化 API 接口打通 PMS 工单系统、ERP 物资库及 BIM 模型库。运用关联规则挖掘技术，分析近五年 287

起电气事故与防护装备领用记录的隐性规律。开发风险预测数字孪生体,输入施工进度计划后自动生成未来 15 日风险热力图。每季度更新风险规则知识库,如根据实测数据将 SF₆ 气体泄漏的暴露阈值从 1 000 ppm 下调至 800 ppm,形成自我进化型管理体系。通过“感知—评估—控制—复核”线上闭环,管理动作由“人找事”转为“事找人”,有效降低执行漂移概率^[5-7]。

3 优化体系实证:某 10 kV 变电站扩建案例分析

3.1 案例背景与矩阵应用前安全绩效

某沿海 10 kV 变电站扩建工程新增 2×125 MVA 主变、12 回电缆出线及 10 kV 无功补偿装置,总建筑面积 1.8 ha,最高日交叉作业人员达 312 人。项目地处盐雾高腐蚀区,冬季阵风风速峰值 24 m/s,施工窗口受限。业主提供的历史数据显示,应用风险矩阵前三年同类型扩建累计完成 2.36 百万工时,记录轻伤 4 起、设备烧损 1 起、电网跳闸 0 起,事故率 1.69 每百万工时,百万工时伤害率 1.27,月均监理整改单 22 份,其中重复问题占 38%。高处坠落、感应电击、SF₆ 泄漏、母线短路四类违章占总量的 61%,呈现“低频高损”特征。传统“日例会+周检查”模式平均耗时 105 min,信息传递链涉及班组长、专业监理、安全专监、业主代表四级,衰减系数 0.72,导致措施落地滞后 2~3 天。定量基线凸显两大难点:一是红色风险判定依赖个人经验,同一条作业在不同班组出现红橙异判率 29%;二是整改闭环依靠人工跟催,逾期率 17%,无法匹配电气试验窗口紧凑需求。上述缺口为引入风险矩阵优化体系提供直接动因。

3.2 风险矩阵实施过程与关键节点

施工按母线安装、GIS 高压试验、二次接线调试三阶段推进。母线安装阶段,项目团队调用 WBS-RBS 耦合表,在“管母吊装 WBS 3.2.4”节点识别出“吊车臂与带电间隔安全距离不足”风险,E-Risk Matrix 读取近三年区域未遂数据 $n=18$ 、 $k=3$,后台按 β -二项后验公式自动输出 $L=3$,结合 $S=4$ 生成 $R=12$ 红色预警,触发禁止作业指令,并推送移动式绝缘隔离棚与专责监护人配置清单,审批流转由传统 105 min 压缩至 12 min。GIS 高压试验阶段,平台通过传感器实时捕捉 SF₆ 浓度,一旦超过 50 ppm 即更新环境维度权重,动态抬高 S 值,使原本橙色区跃升至红色,实现试验停电边界自动外延。二次接线调试阶段,系统利用 NFC 芯片校验继保屏柜接地状态,把“虚接”概率写入 L

更新方程,确保矩阵与现场物理状态同步。信息化手段将识别—评估—管控—复核四环节全程线上化,流程效率提升 74%,为电气施工提供了可参考的范式。

3.3 成效评价与经验推广

体系运行 12 个月后,项目累计完成 1.05 百万工时,事故率降至 0.38 每百万工时,百万工时伤害率 0.29,监理月均整改单降至 9 份,重复问题占比降至 7%,班组安全文明得分由 81.4 提升至 93.7。红色风险异判率从 29% 降至 4%,整改逾期率由 17% 降至 3%,验证了矩阵在语言一致性与闭环及时性上的优势。

业主、监理、施工三方成立联合数据治理小组,建立“日更新—周复盘—月校准”协同机制,形成《电气施工风险矩阵应用导则》,将权重组合、阈值设定、API 接口标准化,可直接移植至换流站、风电场升压站等场景,为行业推广提供了范式。

4 结束语

研究通过理论—工具—实证三位一体路径,证明风险矩阵在电力电气施工场景下可从“静态展板”转变为“动态大脑”。 β -二项后验更新与 AHP-熵权组合赋权兼顾了数据稀缺性与价值导向,移动闭环平台将四色预警转化为即时任务,显著压缩管理延迟。实证结果显示,该体系不仅降低了事故与伤害指标,更提升了监理、施工、业主三方对风险语言的共识度。未来可在换流站、海上风电升压站等复杂场景进一步验证权重迁移稳健性,并探索与 BIM、物联网感知的深度融合,实现风险矩阵在建造全生命周期的自进化。

参考文献:

- [1] 陈学军.水电工程施工中的安全管理与风险分析[J].葡萄酒,2024(17):31-33.
- [2] 卢凤超,张晴晴.电力工程中变电站施工影响因素分析[J].电力设备管理,2025(01):208-210.
- [3] 张强,魏亚磊.电力工程项目管理中的风险评估与应对策略研究[J].数字化用户,2024(50):193-194.
- [4] 吴志剑.电力工程电气施工过程中的安全管理与风险控制[J].工程技术研究,2024,06(13):108-110.
- [5] 林晓霞.10kV 电力配电工程施工安全及技术管理研究[J].电气技术与经济,2024(01):211-213.
- [6] 王蕊.电气工程中强电设计与施工技术分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(03):45-48.
- [7] 陶凌.电力工程技术问题和施工安全研究[J].中国科技期刊数据库工业 A,2023(04):26-29.