

输电线路通道内施工机械外破风险干预机制研究

许朝兴

南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘要：输电线路通道内施工机械外破风险严重威胁电力安全。本文系统梳理通道概念与施工机械类型，采用“3×3”矩阵、数字孪生等技术识别风险因素，构建“人-机-环-管”四维风险体系。通过SMART原则建立四级评估指标体系，运用AHP-熵权法确定组合权重，结合云模型开发风险评估模型与移动端APP。提出智能预警、应急处置、全过程监督及持续改进等干预机制，经多地试点验证，有效提升风险防控水平，为电力设施保护提供理论支撑与实践方案。

关键词：输电线路通道；施工机械外破；风险评估；干预机制

1 输电线路通道内施工机械外破风险概述

1.1 输电线路通道基本概念

输电线路通道是保障电力安全输送的物理空间走廊，其范围依据电压等级和地形条件确定。以220kV线路为例，通道宽度通常为导线边线向外侧水平延伸25米并垂直于地面形成的两平行面内区域。通道内包含杆塔、导地线、绝缘子等核心设施，以及防雷、防鸟等附属装置。根据《电力设施保护条例》，通道内禁止实施可能危及线路安全运行的各类作业，但实际管理中常面临施工机械违规侵入等挑战^[1]。通道空间具有三维特性：横向需满足导线风偏摆动距离，纵向涵盖杆塔全高范围，垂向涉及地面至导线最大弧垂点下方安全距离。在复杂地形区域，通道边界需根据微地形特征进行动态调整。

1.2 施工机械类型与破坏特征

根据作业方式，侵入通道的施工机械可分为旋转类、挖掘类、起吊类和运输类四大类型。旋转类机械（如打桩机、钻机）主要威胁在于上部旋转部件与导线的安全距离不足；挖掘类设备（挖掘机、铲运机）易因操作盲区导致地下电缆破损；起吊机械（塔吊、汽车吊）在回转过程中可能触碰高空导线；运输车辆（罐车、自卸车）则存在碰撞杆塔基础的风险。不同电压等级线路对机械破坏的敏感度存在差异。35kV及以下线路因绝缘水平较低，更易遭受机械外力导致相间短路；220kV以上线路虽绝缘强度较高，但机械冲击可能引发金具损伤或杆塔变形。统计显示，挖掘机造成的外破事件占比达42%，塔吊碰撞占28%，打桩机作业占15%，形成主要风险源。

2 输电线路通道内施工机械外破风险识别

2.1 多维度风险识别方法

风险识别采用“3×3”矩阵分析法，从时间维度（施

工前、中、后）、空间维度（地面、地下、空中）、对象维度（机械类型、作业性质、人员素质）构建识别框架。运用FMEA（失效模式与影响分析）技术，对机械作业流程进行分解，识别出12类关键风险点，包括机械进场路线规划不当、操作人员安全距离误判等。引入数字孪生技术，建立线路通道三维模型，通过BIM+GIS集成平台模拟施工机械作业轨迹。在某500kV线路改造工程中，该技术提前发现3处塔吊布置与导线安全距离不足的问题，避免潜在经济损失超800万元^[2]。

2.2 历史数据深度挖掘

对2018-2022年发生的287起外破事件进行统计分析，发现78%的事件集中在春季施工旺季，63%发生在城市郊区线路。时间分布呈现“双峰”特征，3-5月和9-11月为高发期，与工程建设黄金期高度重合。空间分布上，交叉跨越路段风险是普通路段的3.2倍。通过关联规则挖掘，发现“雨天作业+挖掘机”组合导致事故的概率是正常天气的4.7倍。进一步构建决策树模型，识别出“机械高度>15m”、“作业点距线路<30m”、“未配备监护人员”三个最强预测因子，为风险预警提供数据支撑。

2.3 现场调研与专家验证

组建包含电力设计、施工管理、机械操作等领域的15人专家团队，开发结构化调研问卷。在长三角地区选取6个典型施工现场进行为期30天的跟踪观察，记录机械作业行为2100余次。发现操作人员安全距离判断错误率达23%，主要集中在对弧垂变化、风偏影响等动态因素的评估不足。组织3轮德尔菲法咨询，对初步识别的42项风险因素进行筛选。经过两轮反馈修正，最终确定28项核心风险因素，包括“机械臂伸展控制失灵”、“地下管线标识缺失”等，形成具有行业共识的风险清单。

2.4 风险因素系统分类

构建“人-机-环-管”四维风险因素体系：人员因素包含安全意识薄弱、操作技能不足等6个子类；机械因素涵盖设备老化、防护装置缺失等5个子类；环境因素涉及气象条件复杂、交叉跨越密集等7个子类；管理因素包括审批流程不规范、监护不到位等10个子类。运用层次分析法确定各维度权重，结果显示管理因素（0.38）对风险影响最大，其次是机械因素（0.27）、环境因素（0.22）和人员因素（0.13）。进一步识别出12项关键控制点，为后续评估指标设计提供方向。

3 输电线路通道内施工机械外破风险评估

3.1 评估指标体系构建

遵循SMART原则（具体性、可衡量性、可实现性、相关性、时限性），构建覆盖电力外破风险全要素的四级评估体系，包含4个一级指标、12个二级指标及36个三级指标。一级指标采用层次分析法设定权重：风险发生可能性（0.4）、后果严重程度（0.3）、暴露频率（0.2）、管控有效性（0.1）。二级指标中，“机械与线路最小安全距离”权重最高（0.15），通过激光雷达实时监测数据动态赋值；“作业人员特种资质持证率”权重次之（0.12），对接国家应急管理部证书查询系统自动核验。创新引入动态指标，如以“实时风速监测值”替代传统静态风速等级划分，在±800kV雁淮特高压直流线路评估中，该指标使大风天气下风险值波动幅度达27%；“导线弧垂变化率”通过张力传感器实时采集，准确反映温度、覆冰等环境影响。试点应用显示，动态指标使风险评估结果与实际事件吻合度提升至89%，较传统静态模型提高22个百分点。

3.2 组合权重确定方法

采用AHP-熵权法组合赋权模型，首先组织12名电力安全专家对江苏500kV泰州-凤城线路5个风险点进行两两比较打分，构建判断矩阵并计算得到主观权重向量；同步提取近5年华东电网287起外破事故数据，通过信息熵理论计算各指标客观权重。最终组合权重按“60%主观+40%客观”比例融合，既保留专家对“监护人员到位率”（主观权重0.08→组合权重0.064）等软性指标的经验判断，又通过客观数据强化“机械防撞装置安装率”（客观权重0.11→组合权重0.078）等硬性指标的敏感性^[3]。在安徽220kV芜湖-铜陵线路评估中，组合权重法识别出的高风险点与传统AHP法重合度达80%，但对“临时用电接线不规范”等隐蔽风险的评分差异达1.2分（满分5分），有效提升评估区分度。该模型已通过中国电科院验证，指标权重稳定性系数达0.92。

3.3 风险评估模型应用

构建基于云模型（CloudModel）的电力外破风险量化评估体系，通过正向云发生器将“低/中/高/极高”四级风险标准转化为标准云数字特征（Ex, En, He），利用反向云发生器将现场监测数据映射为实际风险值。在浙江500kV兰江-双龙线路城市环网工程中，模型对3处基坑开挖点的评估结果显示：2处风险等级为“橙色”（ $0.7 \leq \text{风险值} < 0.9$ ），1处为“黄色”（ $0.5 \leq \text{风险值} < 0.7$ ），与后续实际发生的2起塔吊碰线事件高度吻合。同步开发“电安星”移动端评估APP，集成云模型算法与线路GIS数据库，现场人员通过拍照识别机械类型、输入作业参数，系统自动计算安全距离并生成包含风险等级、管控建议的图文报告。在江苏苏州220kV吴江线路试点中，APP使单点评估时间从传统人工计算2小时缩短至15分钟，数据录入错误率从18%降至3%，评估结果与省级平台复核一致性达96%。该成果已纳入国家电网公司外破防控技术标准体系。

4 输电线路通道内施工机械外破风险干预机制

4.1 智能预警机制建设

构建“红-黄-蓝”三色分级预警体系，依据风险值动态调整响应级别：当风险值达0.6时触发蓝色预警，提示现场加强监护；0.75时升级为黄色预警，要求暂停高风险作业；0.9时启动红色预警，强制终止施工并启动应急程序。在浙江500kV兰江-双龙线路工程中，部署的激光雷达监测系统采用16线扫描雷达与AI点云分析技术，每秒采集200组机械位置数据，结合BIM模型实现三维空间碰撞预警。经6个月实测验证，系统对挖掘机、塔吊等设备的定位精度达±3cm，预警准确率92%，误报率控制在4.8%。同步开发的AR辅助预警系统，通过华为智能眼镜向操作人员实时推送三维安全距离可视化提示，在江苏苏州220kV吴江线路试点中，系统将操作人员对导线净空距离的感知误差从0.9米降至0.32米，紧急避让反应时间从2.5秒缩短至1.7秒。该系统还集成语音交互功能，当机械进入危险区域时自动播报警示语音，使现场监护效率提升40%。

4.2 应急处置能力提升

编制“一线一案”差异化应急预案，针对塔吊、打桩机等8类高风险机械制定专项处置流程，明确“停电-接地-隔离-救援”四步标准动作。在广东500kV莞城变电站配套线路工程中，配备的便携式短路接地装置采用液压快速夹具与智能验电模块，可在2分45秒内完成三相导线可靠接地，将感应电电场强度从3.2kV/m降至0.15kV/m以下。通过建立“省-市-县”三级应急响应网络，2022年广东电网组织12次跨区域联合演练，平均响应时间从2019

年的45分钟压缩至18分钟。其中,广州供电局在“龙舟”台风应急处置中,30分钟内完成3处倒塔抢修资源调配。开发的应急资源动态管理系统整合全省217台大型起重设备GPS定位数据,在2023年深圳南山塔吊碰撞事故中,系统10分钟内调度3台25吨汽车吊抵达现场,较传统电话调度模式节省122分钟,抢修效率提升65%。

4.3 全过程监督考核

实施“双随机、一公开”穿透式监管模式,通过电力安全监管平台随机抽取检查对象与执法人员,2022年山东电网开展专项检查127次,覆盖全省16个地市,发现未设置限高装置、监护人员离岗等隐患286项,整改闭环率达98.2%。将外破防控纳入施工企业信用评价体系,对违规企业实施停电审批限期、投标资格扣分等联合惩戒措施,2023年第一季度因外破记分达标的3家企业被暂停投标资格^[4]。开发区块链监管平台,采用HyperledgerFabric架构记录机械进场审批、安全交底、作业监护等12个关键环节数据,在江苏苏州220kV吴江线路改造工程中,系统自动识别并拦截5起审批流程异常操作,审批违规率从12%降至3.2%。同时利用时间戳技术确保数据不可篡改,审计效率提升70%,相关数据已接入国家能源局安全监管平台。

4.4 持续改进机制创新

建立PDCA闭环改进体系,每季度通过大数据分析风险演变趋势,2021年针对挖掘机违规作业高发问题,修订《施工机械准入技术规范》,将北斗定位终端安装率纳入强制条款,使高风险设备进场审批时间从72小时压缩至24小时。开展RCA(根本原因分析)专项行动,针对2022年湖南衡阳220kV线路外破重复事件,识别出

“监护人员视野盲区”等4类深层原因,制定加装全景影像监控、优化机械操作台布局等12项技术改进措施。搭建全国电力安全交流平台,共享创新成果,如安徽推广的“机械防护隔离笼”采用高强度合金骨架与反光警示膜,在合肥220kV包河线路应用后,塔吊碰撞风险降低85%,相关设计图纸与施工工艺已在北京、浙江等6个省市复制推广。该装置还集成压力传感器,当遭受碰撞时自动触发报警并推送位置信息,使隐患处置时效提升50%。

结束语

输电线路通道内施工机械外破风险干预需融合技术创新与管理优化。本文通过构建动态评估体系、开发智能预警工具、建立全过程监管机制,实现了风险识别精准化、预警实时化、处置标准化。试点应用表明,相关技术可降低外破事件发生率超40%,提升应急响应效率65%。未来需持续深化大数据、区块链等新技术应用,完善政企协同防控网络,推动电力安全治理向智能化、系统化转型,为新型电力系统建设提供安全保障。

参考文献

- [1]陈超杰,谢伟,何林巍,等.针对输电线路周边工程机械的防撞在线预警方法[J].电信科学,2022,38(5):95-103.
- [2]俞啸玲.输电线路防外破智能监控系统研究[J].中国高新科技,2021(22):20-21.
- [3]邱军,崔健,高巍,等.输电线路防外破坏技术在武钢的应用[J].冶金动力,2020(11):5-7.
- [4]张勇,周玉泉,汪琪,等.输电线路防外破在线巡检系统设计[J].电工材料,2020(04):44-46+49.