

# 架空输电线路外力破坏风险智能预警模型构建

方全忠 蒋磊

石嘴山农村电力服务有限公司崇岗供电所 宁夏 石嘴山 753400

**摘要:** 随着我国电网规模持续扩大和城市化进程不断加快, 架空输电线路面临的外力破坏 (External Force Damage, EFD) 风险日益突出。传统依赖人工巡检和事后处置的防控模式已难以满足现代电网高可靠性、高安全性的运行需求。本文针对架空输电线路外力破坏风险预警问题, 提出一种基于多源异构数据融合与人工智能技术的智能预警模型构建方法。该模型以“感知—分析—评估—预警”为核心逻辑, 整合地理信息系统 (GIS)、卫星遥感、视频监控、气象数据、施工许可信息等多维数据源, 构建时空动态风险特征库; 引入深度学习、图神经网络与知识图谱等先进算法, 实现对潜在外力破坏事件的早期识别、风险量化与分级预警。论文详细阐述了模型的整体架构、关键技术模块、风险因子体系及预警机制设计, 旨在为构建主动防御型输电线路安全防护体系提供理论支撑与技术路径。

**关键词:** 架空输电线路; 外力破坏; 风险预警; 智能模型; 多源数据融合; 深度学习; 知识图谱

## 引言

架空输电线路是电力输送主干通道, 分布广、跨度大、暴露性强, 易受外部环境干扰破坏。外力破坏指非自然力 (自然灾害除外) 和非设备自身故障引发的线路损伤, 涵盖机械施工、违章建筑、树木生长、车辆撞击、放风筝、无人机侵入、山火蔓延等人为或半人为活动导致的故障。传统防控手段依赖周期性人工巡检、群众举报和故障后应急抢修, 有响应滞后、覆盖盲区多、主观性强、效率低等缺陷, 难达成闭环管理目标<sup>[1]</sup>。如今, 物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术迅猛发展, 电网数字化转型加速, 为输电线路外力破坏风险智能感知与主动预警带来技术机遇。构建融合多源感知数据、有自学习能力的智能预警模型, 可精准识别、动态评估和提前干预风险, 提升电网本质安全水平。

## 1 外力破坏风险特征分析与分类体系构建

### 1.1 外力破坏的主要类型与成因

根据破坏源性质与作用机理, 架空输电线路外力破坏类型多样。施工机械类破坏最为常见且危害大, 像吊车等大型机械作业时触碰导线或拉断杆塔, 多发生在城乡结合部等区域, 突发性强、破坏力大; 违章建 (构) 筑物类是在电力线路保护区建房屋等致安全距离不足, 大风等条件下引发放电或碰撞; 植被侵限类是线路通道内树木过高, 在风偏等情况下触及导线致短路跳闸, 春季和夏季高发; 交通类破坏是超高车辆撞击杆塔横担、船舶桅杆触碰跨河线路; 异物侵入类是风筝等轻质漂浮物缠绕导线引发短路或放电; 山火与焚烧类是线路附近焚烧产生高温烟尘降低空气绝缘强度致线路闪络; 蓄意破坏类如盗窃塔材等恶意行为, 虽发生频率低但后果严重。

### 1.2 风险影响因子体系

外力破坏是多种因素耦合作用所致, 构建科学的风险评估模型需建立全面的风险影响因子体系。该体系涵盖多方面: 空间因子, 包含线路与潜在危险源的距离、方位角、高程差, 线路电压等级与保护区范围, 以及地形地貌特征; 时间因子, 涉及季节 (如春季施工、秋季焚烧高发)、节假日、昼夜 (夜间施工监管弱)、天气状况 (大风等易诱发事故); 人类活动因子, 有区域内施工项目数量与类型、土地利用变化、交通流量、人口密度、历史违章记录; 环境因子, 如植被覆盖指数、土壤湿度、火点热异常、风速风向; 管理因子, 包括线路巡视频次、隐患整改率、安全宣传覆盖率、与地方政府及施工单位联动机制有效性。这些因子多尺度、异构且动态演化, 需经标准化处理与特征工程, 转化为模型可计算的输入变量。

## 2 智能预警模型总体架构设计

本文提出的智能预警模型采用“云-边-端”协同架构, 整体分为四层: 数据感知层、数据融合与特征工程层、智能分析与风险评估层、预警决策与服务层。其中, “端”侧部署于杆塔、巡检站或移动终端, 负责原始数据的采集与初步过滤; “边”侧设在变电站或区域运维中心, 承担轻量级实时分析与本地预警任务, 有效缓解通信压力并提升响应速度; “云”侧则依托电力企业数据中心, 集成高性能计算资源与全域数据, 支撑复杂模型训练、多源信息融合及全局风险态势研判。四层之间通过标准化接口与消息中间件实现高效协同: 数据感知层汇聚多模态异构信息, 经融合与特征工程层结构化处理后, 输入智能分析层进行深度建模与风险量化,

最终由预警决策与服务层生成分级预警指令并推送至相关责任主体，形成从感知到处置的完整闭环。该架构兼顾实时性、扩展性与安全性，为大规模输电线路外力破坏风险防控提供了坚实的技术底座。

### 3 数据感知层

该层负责采集与线路外力破坏相关的多源异构数据，构成模型的原始输入。主要数据源包括：

#### 3.1 静态基础数据

线路台账（杆塔坐标、电压等级、档距、交叉跨越信息）、电力设施保护区矢量图、行政区划、道路网络、土地利用现状图等，来源于电网GIS平台。

#### 3.2 动态监测数据

（1）视频/图像数据：部署在线路关键区段的高清摄像头、无人机巡检影像、移动终端上报图片；（2）物联网传感数据：导线舞动监测、杆塔倾斜传感器、微气象站（温湿度、风速、降雨）；（3）卫星遥感数据：高分系列卫星影像（用于监测违建、植被变化）、MODIS/VIIRS火点数据；（4）社会感知数据：政府公开的施工许可信息、12345市民热线投诉、社交媒体舆情（如微博关于“某地吊车碰线”）；（5）气象预报数据：短期与中长期天气预报产品<sup>[2]</sup>。

### 4 数据融合与特征工程层

该层的核心任务是将多源数据进行时空对齐、清洗、关联与特征提取，构建统一的“线路-风险源”时空关系图谱。

#### 4.1 时空对齐

所有数据均以WGS84坐标系和UTC时间戳为基准，通过空间插值、时间窗口聚合等方式实现统一时空参考。

#### 4.2 实体识别与关联

利用计算机视觉（CV）技术从图像中识别吊车、违建、树木等目标；利用自然语言处理（NLP）从文本中抽取事件主体、地点、时间；将识别出的实体与电网GIS中的线路要素进行空间拓扑关联（如缓冲区分析、最近邻查询）。

#### 4.3 特征构造

（1）空间特征：危险源到最近杆塔的欧氏距离、是否位于保护区内部、相对高程；（2）时间特征：危险源活动持续时间、是否处于高风险时段；（3）语义特征：施工类型（基坑开挖 vs 高空吊装）、植被种类（速生树种风险更高）；（4）衍生特征：历史同期风险发生频率、周边同类风险密度。最终形成结构化的风险事件样本集，每个样本包含若干特征向量及对应的标签（如“高风险”、“中风险”、“低风险”或“无风险”）。

### 5 智能分析与风险评估核心算法

本模型采用“深度学习+知识图谱+规则引擎”的混合智能范式，兼顾数据驱动的泛化能力与领域知识的可解释性。

#### 5.1 基于时空图卷积网络（ST-GCN）的风险传播建模

将输电线路网络抽象为图结构 $G=(V,E)$ ，其中节点 $v_i \in V$ 表示杆塔或区段，边 $e_{ij} \in E$ 表示档距连接。每个节点关联一个时空特征矩阵 $X_i \in \mathbb{R}^{T \times F}$ ，包含 $T$ 个时间步长内的 $F$ 维特征（如施工活动强度、植被高度变化率等）。

引入时空图卷积网络（Spatio-Temporal Graph Convolutional Network, ST-GCN），同时捕捉空间依赖（相邻杆塔风险相互影响）与时间动态（风险随时间演变）。其核心公式为：

$$H^{(t+1)} = \sigma(\tilde{A}H^{(t)}W_s^{(l)} + H^{(t)}W_t^{(l)})$$

其中， $A$ 为归一化邻接矩阵， $W_s$ 和 $W_t$ 分别为空间与时间维度的可学习权重， $\sigma$ 为激活函数。通过多层堆叠，模型可学习到复杂的风险传播模式，例如某工地开工后，其下游数公里线路风险同步上升。

#### 5.2 基于多模态融合的异常行为识别

针对视频监控与遥感影像，构建多模态深度学习模型：（1）视觉编码器：采用改进的YOLOv8或DETR模型，对输入图像进行目标检测与实例分割，输出吊车、违建等目标的边界框、类别及置信度。（2）时序建模：对连续帧序列使用3D CNN或Transformer编码器，捕捉机械臂运动轨迹、建筑物生长趋势等动态行为<sup>[3]</sup>。（3）多模态融合：将视觉特征与文本描述（如施工许可证内容）、位置信息进行跨模态对齐，通过注意力机制加权融合，提升识别鲁棒性。例如，仅检测到吊车可能误报（停放在路边），但若同时匹配到该位置有“深基坑支护”施工许可，则风险可信度大幅提高。

#### 5.3 知识图谱驱动的风险推理

构建“输电线路外力破坏领域知识图谱”（EFD-KG），包含以下三元组：（1）实体：线路、杆塔、施工方、机械设备、植被类型、法规条款（如《电力设施保护条例》）；（2）关系：位于、属于、违反、导致、防护措施；（3）属性：安全距离阈值、施工许可有效期、树种生长速率。当数据驱动模型输出初步风险评分后，调用知识图谱进行逻辑校验与增强。例如：若模型判定某区域为高风险，但知识图谱显示该区域已纳入“重点监控名单”且近期完成隐患整改，则自动降级；若检测到无人机飞行，但其位置在禁飞区外且高度低于线路，则依据规则排除风险。知识图谱不仅提升模型可解释性（可追溯预警依据），还能有效处理小样本场景

(如罕见破坏类型)。

## 6 风险预警机制与分级响应策略

### 6.1 风险量化与分级标准

基于综合风险评分 $R \in [0,1]$ , 设定三级预警阈值:

蓝色预警(低风险,  $R < 0.3$ ): 存在潜在隐患, 建议加强关注, 纳入常规巡视计划。

黄色预警(中风险,  $0.3 \leq R < 0.7$ ): 风险显著, 需72小时内现场核查, 向相关方发送安全告知书。

红色预警(高风险,  $R \geq 0.7$ ): 极可能在短期内发生破坏, 立即启动应急响应: 通知运维班组赶赴现场、联系施工单位停工、必要时申请线路降压或停电避险。

风险评分 $R$ 由以下公式计算:

$$R = \alpha \cdot R_{\text{data}} + \beta \cdot R_{\text{kg}} + \gamma \cdot R_{\text{history}}$$

其中,  $R_{\text{data}}$ 为数据驱动模型输出概率,  $R_{\text{kg}}$ 为知识图谱推理得分,  $R_{\text{history}}$ 为历史相似事件发生率,  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ , 权重可根据区域特点动态调整。

### 6.2 预警信息生成与推送

预警信息采用结构化模板生成, 包含: 风险位置(精确到杆塔号及GPS坐标)、风险类型与置信度、主要证据(如“卫星影像显示新增违建, 距导线仅8米”)、建议措施、相关法规依据。通过企业微信、短信、PMS2.0系统等多通道推送给线路运维人员、属地供电所、安监部门及外部协作单位(如住建局、城管执法队), 实现跨部门协同处置。

### 6.3 模型自学习与反馈闭环

建立预警效果评估机制: 对每次预警事件进行事后复盘, 记录实际是否发生破坏、处置时效、用户反馈<sup>[4]</sup>。将结果作为强化学习信号, 动态优化模型参数与规则阈值, 形成“预警—处置—反馈—优化”的闭环, 不断提升模型准确性与实用性。

## 7 系统实现与工程化考量

### 7.1 软件架构

系统采用微服务架构, 主要模块包括: (1) 数据接入服务: 对接各类数据源API或消息队列(Kafka); (2) 特征计算引擎: 基于Spark/Flink实现实时/批量特

征生成; (3) AI模型服务: 封装ST-GCN、CV模型为RESTful API; (4) 知识图谱服务: 基于Neo4j图数据库提供推理接口; (5) 预警管理服务: 负责预警生成、推送、跟踪与归档。

### 7.2 边缘计算部署

对于偏远地区或带宽受限场景, 可在变电站或巡检站部署边缘计算节点, 运行轻量化模型(如MobileNet+TinyML), 实现本地实时初筛, 仅将高风险事件上传云端, 降低通信成本与延迟。

### 7.3 安全与隐私保护

严格遵循《网络安全法》与《数据安全法》, 对敏感数据(如施工方信息、个人举报内容)进行脱敏处理; 模型训练采用联邦学习框架, 避免原始数据集中存储; 系统通过等保三级认证。

## 8 结语

本文系统性地提出了一种面向架空输电线路外力破坏风险的智能预警模型构建方法。该模型突破传统被动防御模式, 通过深度融合多源感知数据、先进人工智能算法与电力领域知识, 实现了对外力破坏风险的动态感知、精准评估与分级预警。模型采用“数据驱动+知识引导”的混合智能架构, 兼顾预测性能与决策可解释性, 并设计了完整的预警响应与自学习闭环机制。尽管在数据覆盖、协同治理等方面仍存挑战, 但该框架为构建主动、智能、高效的输电线路安全防护体系提供了可行的技术路径, 对提升电网本质安全水平、保障能源基础设施可靠运行具有重要的理论价值与实践意义。

### 参考文献

- [1]金戈. 架空输电线路防外力破坏系统研究[D]. 沈阳农业大学, 2022.
- [2]谢波林. 基于物联网与定位技术的架空输电线路防机械车辆外力破坏预警研究[D]. 福建工程学院, 2021.
- [3]韩斌, 吴阳. 架空输电线路外力破坏新型技防装置的研发与应用[J]. 科技与创新, 2024, (18): 194-196.
- [4]许海源, 裴慧坤, 陈城, 等. 架空输电线路防大型机械施工破坏装置设计[J]. 科技资讯, 2020, 18(07): 1-3.