

输电线路地质灾害隐患点智能识别与动态监测系统开发

李承伟

南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘要: 输电线路易受地质灾害威胁,本文深入分析滑坡、崩塌等五类隐患点类型与特征,构建“天-空-地-网”多源识别数据体系,采用集成学习模型实现智能识别。集成多维度监测技术,构建三级数据传输架构,形成“监测-识别-预警-处置”闭环。开发智能识别与动态监测系统,经测试优化,能有效提升输电线路地质灾害防控能力,保障电网安全稳定运行。

关键词: 输电线路; 地质灾害; 隐患识别; 动态监测

1 输电线路地质灾害隐患点类型与特征分析

1.1 典型地质灾害隐患点类型

根据地质灾害成因与表现形式,输电线路沿线主要存在以下五类隐患点:滑坡是斜坡土体或岩体在重力作用下沿软弱面滑动的地质现象。其形成与降雨、地震、人工切坡等因素密切相关。滑坡隐患点常表现为地形异常(如马蹄状地形、圈椅状地貌)、植被倾斜(醉汉林)、地表裂缝等特征。崩塌多发生于陡坡(坡度 $>55^\circ$ 、高度 >30 米)地段,岩体破碎或节理发育时易引发块石坠落。例如,500kV盘龙I回200#杆塔因修路切坡导致临空面形成,岩体节理裂隙发育,最终发生崩塌砸中塔基,造成杆塔倾斜角达 12° 。崩塌隐患点特征包括岩体产状混乱、块石粒径差异大(数米至数十米)、坡面不平整等。泥石流是暴雨或融雪引发的固液混合流体,具有突发性强、破坏力大的特点。其形成需满足地形陡峻(沟谷纵坡 $>25^\circ$)、松散物质丰富(堆积物厚度 >3 米)、水源充足三要素^[1]。泥石流隐患点特征包括形成区呈漏斗状、流通区峡谷狭窄、堆积区平坦开阔等。岩溶塌陷是可溶性岩石(如石灰岩)在地下水溶蚀作用下形成的地面沉降现象。其发育程度受岩石成分、断裂构造、地形坡度等因素影响。采空塌陷是地下矿层开采后上部岩层失稳引发的地面沉降。其影响范围与矿层深度、开采规模相关。

1.2 隐患点核心特征

地质灾害隐患点核心特征可归纳为以下四方面:(1)地形地貌异常。滑坡表现为斜坡局部隆起或凹陷,崩塌区坡面陡峻且岩体破碎,泥石流沟谷呈“V”形且沟床纵坡大,岩溶区地表存在漏斗或塌陷坑,采空区地表呈波浪状起伏。例如,滑坡后缘裂缝宽度与深度呈正相关,可作为稳定性评估关键指标;(2)岩土体结构破坏。滑坡体岩土层产状紊乱,崩塌体块石无胶结,泥石

流堆积物分选性差,岩溶区溶洞顶板岩体完整性低,采空区顶板岩层弯曲变形;(3)水文地质条件变化。滑坡区地下水位上升导致孔隙水压力增大,崩塌区裂隙水渗流加速岩体风化,泥石流形成区降雨入渗系数达0.6以上,岩溶区地下水径流通道改变引发塌陷,采空区地下水疏干导致土体固结沉降;(4)人类工程活动影响。修路切坡、矿山开采、施工弃土等人为活动改变原始地质环境,成为灾害触发主导因素。

2 输电线路地质灾害隐患点智能识别技术研究

2.1 多源识别数据体系构建

智能识别需融合多维度数据,构建“天-空-地-网”一体化数据体系,利用L波段合成孔径雷达(SAR)获取地表形变信息,其穿透云层能力强、空间分辨率达1米,可监测毫米级位移。无人机搭载五镜头相机获取高分辨率(0.05米)三维模型,结合点云分类算法提取地形特征参数(如坡度、坡向、高程变异系数)。部署北斗位移计(精度 ± 1 毫米)、雨量计(精度 ± 0.1 毫米)、土壤含水率计(精度 $\pm 2\%$)等设备,实时采集环境参数。整合线路张力监测数据(精度 $\pm 1\%$)、杆塔倾斜角数据(精度 $\pm 0.01^\circ$)、绝缘子泄漏电流数据(精度 $\pm 1\mu A$),分析灾害对电网设备的影响。

2.2 智能识别模型构建与优化

基于多源数据构建“特征提取-模型训练-结果优化”三级识别框架。(1)特征提取层,采用主成分分析(PCA)降维技术,从原始数据中提取12类关键特征,包括地形因子(坡度、坡向)、地质因子(岩土类型、断裂密度)、水文因子(降雨量、地下水位)、人类活动因子(切坡高度、开采强度)等。(2)模型训练层,构建集成学习模型,融合随机森林(RF)、支持向量机(SVM)、长短期记忆网络(LSTM)优势。RF用于处理高维非线性数据,SVM优化分类边界,LSTM捕捉时序

依赖关系^[2]。(3)结果优化层,引入迁移学习技术,利用历史灾害数据(如2008年汶川地震后电网受损数据)进行预训练,再通过少量现场数据微调模型参数。

2.3 识别模型性能评估

采用混淆矩阵、受试者工作特征曲线(ROC)、精确率-召回率曲线(PR)等指标评估模型性能:在滑坡识别测试中,模型准确率达91.2%,召回率达89.5%,表明对真实灾害的识别能力较强。例如,对200个测试样本(其中滑坡点80个、非滑坡点120个),模型正确识别71个滑坡点、110个非滑坡点,误报率仅8.3%。在崩塌识别中,模型AUC值达0.93,表明分类阈值变化时,模型对正负样本的区分能力稳定。通过添加高斯噪声(信噪比20dB)模拟数据干扰,模型准确率下降仅3.7%,表明对噪声具有较强抗干扰能力。

3 输电线路地质灾害隐患点动态监测技术集成

3.1 多维度监测技术选型

根据灾害类型与监测需求,选择以下技术组合:

(1)地表形变监测。北斗卫星导航系统(BDSS)实现毫米级位移监测,适用于滑坡、采空塌陷等缓慢变形灾害。例如,在±800kV锦苏线滑坡监测中,北斗监测站实时获取杆塔三维坐标,发现位移速率超过2毫米/日时自动预警;(2)深部位移监测。固定式测斜仪(精度±0.1°)监测岩土体内部变形,适用于崩塌、泥石流形成区监测;(3)环境参数监测。雨量计、土壤含水率计、孔隙水压力计等设备监测水文地质条件变化,适用于所有灾害类型。例如,在岩溶塌陷区,地下水水位监测显示水位下降速率超过0.5米/日时,触发塌陷风险预警;(4)视频监控技术。高清摄像头(分辨率4K)实时捕捉地表裂缝、滚石等宏观迹象,适用于崩塌、泥石流突发灾害。

3.2 监测数据传输与预处理

构建“终端-边缘-云端”三级数据传输架构。终端层,传感器采用LoRa无线通信技术(传输距离15公里、功耗100mW)将数据上传至边缘网关,解决山区信号覆盖难题。例如,在青藏高原某线路,LoRa设备在-40℃低温环境下仍能稳定传输数据。边缘层,边缘计算节点(如NVIDIA Jetson AGX Xavier)部署数据清洗算法,过滤异常值(如位移量突变超过阈值3倍)、补全缺失值(通过线性插值法)、归一化处理(将数据映射至[0,1]区间)。例如,对北斗位移数据进行预处理后,数据有效率从78%提升至95%。云端层,通过5G网络(带宽1Gbps、时延10ms)将预处理数据上传至云平台,采用Hadoop分布式存储系统(容量达PB级)实现海量数据存储。例如,国家电网云平台已存储地质灾害监测数据超

过100TB,支撑全国电网风险评估^[3]。

3.3 监测数据与识别结果联动机制

构建“监测-识别-预警-处置”闭环流程。实时数据驱动识别,将北斗位移数据、雨量数据等输入智能识别模型,每10分钟更新一次灾害风险等级(低、中、高)。例如,当滑坡位移速率超过1毫米/日且降雨量超过20毫米/小时时,风险等级升至“高”。多级预警机制,根据风险等级触发不同预警方式:低风险时通过Web平台推送通知,中风险时发送短信至运维人员,高风险时自动拨打语音电话并启动应急预案。例如,2024年四川暴雨期间,系统成功预警12起泥石流灾害,避免3基杆塔倒塌。动态处置策略,结合灾害类型与线路重要性制定处置方案:对一般线路采取临时加固(如打入抗滑桩),对重要线路实施改线重建。

4 输电线路地质灾害隐患点智能识别与动态监测系统开发

4.1 系统总体架构设计

采用微服务架构,分为数据层、服务层、应用层三层:(1)数据层,集成多源数据库,包括时序数据库(InfluxDB存储传感器数据)、关系型数据库(MySQL存储设备信息)、非结构化数据库(MongoDB存储视频数据)。例如,时序数据库支持每秒10万条数据写入,满足高并发需求。(2)服务层,部署智能识别微服务(基于TensorFlow框架)、动态监测微服务(基于Kafka流处理)、预警决策微服务(基于Drools规则引擎)。例如,智能识别微服务响应时间<500毫秒,支持500路视频流并行分析。(3)应用层,提供Web管理端(基于Vue.js框架)、移动APP(基于ReactNative框架)、大屏可视化(基于ECharts库)三类交互界面。例如,大屏可视化支持3D地形展示,运维人员可直观查看灾害分布与风险等级。

4.2 核心功能模块开发

实现以下六大功能模块:一是数据采集模块,支持北斗接收机、雨量计、摄像头等20类设备接入,协议兼容Modbus、IEC61850、MQTT等标准。例如,通过协议转换网关实现老旧设备数据接入,降低改造成本。二是智能识别模块,集成滑坡、崩塌、泥石流等5类灾害识别模型,支持模型热更新(无需停机即可替换算法)。三是动态监测模块,实现位移、降雨、视频等10类参数实时监测,支持阈值自定义(如位移速率阈值可设为0.5-5毫米/日)。四是预警决策模块,基于专家系统制定48条预警规则,如“滑坡位移速率>2毫米/日且降雨量>30毫米/小时→高风险”。五是应急指挥模块,集成GIS地图

(支持天地图、GoogleEarth等底图)、路径规划(基于Dijkstra算法)、资源调度(如调配无人机巡检)功能。例如,灾害发生后,系统可自动规划最优抢修路径,缩短响应时间30%。六是统计分析模块,生成灾害分布热力图、风险趋势预测图、运维成本分析表等20类报表,支持Excel、PDF格式导出。例如,通过历史数据分析发现,7-8月泥石流发生概率是其他月份的2.3倍,为运维计划制定提供依据。

4.3 系统软硬件选型与部署

硬件选型;服务器采用华为FusionServerPro2488HV6(配置2颗IntelXeonPlatinum8380处理器、1TB内存),存储采用华为OceanStor5310F(容量500TB、IOPS50万),网络设备采用华为CloudEngine6850-48S6Q-HI(带宽100Gbps)。软件选型;操作系统采用CentOS8(稳定性高),数据库采用Oracle19c(支持高并发),中间件采用SpringCloudAlibaba(微服务治理能力强),前端框架采用Vue3(组件化开发效率高)。部署方案;采用“中心云+边缘云”混合部署模式,中心云部署在国家电网数据中心,边缘云部署在省公司机房,通过SD-WAN网络实现数据同步。例如,边缘云处理本地数据,减少中心云负载,提升系统响应速度。

4.4 系统测试与优化

功能测试,验证数据采集、智能识别、预警决策等模块功能完整性,测试用例覆盖率达100%。例如,对滑坡识别功能进行黑盒测试,输入100组测试数据,模型输出结果与人工标注一致率达98%。性能测试,模拟10万设备并发接入场景,测试系统吞吐量(TPS达5000)、响应时间(<2秒)、资源利用率(CPU<70%、内存<

60%)。例如,通过负载均衡技术将请求均匀分配至多台服务器,避免单点故障。安全测试,检测系统漏洞(如SQL注入、XSS攻击),通过渗透测试验证安全防护能力^[4]。例如,采用OAuth2.0协议实现用户身份认证,防止非法访问;对敏感数据加密存储(AES-256算法),确保数据安全。优化措施,根据测试结果优化数据库索引(减少查询时间40%)、压缩视频数据(降低带宽占用60%)、缓存热点数据(提升访问速度3倍)。例如,对北斗位移数据采用列式存储(Parquet格式),使查询效率提升5倍。

结束语

输电线路地质灾害隐患点智能识别与动态监测系统的开发,是保障电网安全的关键举措。通过精准分析隐患点特征,构建智能识别模型与动态监测体系,实现了灾害的提前预警与及时处置。系统测试与优化成果显著,提升了整体性能与安全性。未来,随着技术发展,该系统将不断完善,为输电线路稳定运行提供更坚实保障,推动电力行业智能化发展。

参考文献

- [1]张倩.输电线路智能雷电监测系统开发[J].湖南邮电职业技术学院学报,2022,21(01):9-11+60.
- [2]洪浩彬.智能电网输电线路在线监测技术分析[J].光源与照明,2023(08):243-245.
- [3]彭元辉.输电线路智能雷电监测系统开发分析[J].科技创新导报,2020(14):203-205.
- [4]杨帆.输电线路地质灾害危险性评估的基本特点与认识[J].低碳世界,2020,10(04):35-36.