第41卷 第2期(374~384)	中 国 地 震	Vol. 41 No. 2
2025年6月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Jun. 2025

陈刚,李茂峰,陈强,等. 2025. 地震灾害事件驱动的输电杆塔震害自动评估系统研究. 中国地震,41(2):374~384.

地震灾害事件驱动的输电杆塔 震害自动评估系统研究

陈刚¹) 李茂峰¹) 陈强¹) 刘波¹) 岑关¹) 甘朝阳¹) 李克华¹) 申文豪²) 李强²)

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司百色局,广西百色 533000
 2)应急管理部国家自然灾害防治研究院,北京 100085

摘要 输电杆塔是电网系统重要的组成部分。地震是一种在极短时间内释放巨大能量的 自然灾害,对输电杆塔的安全造成巨大破坏。震后第一时间开展输电杆塔震害应急评估,可为 输电杆塔巡查修复提供决策支撑。针对输电杆塔震害应急评估响应效率低、巡检目标不明确等 问题,构建了基于地震灾害事件驱动的输电杆塔震害自动评估系统。本系统底层基于 GIS (Geographic Information System)技术,采用 B/S(Browser/Server)架构形式,利用网络爬虫技术自 动获取地震发震信息;以地形和场地校正后的峰值加速度(Peak Ground Acceleration,PGA)为输 人,结合输电杆塔地震易损性曲线,快速自动化地实现输电杆塔震害程度评估并实时发布。本 系统满足了输电杆塔震害应急评估需求,为"是否巡查"提供决策参考,可有效提高电网应急决 策的精准化程度和反应效率,优化输电线路杆塔震害应急处置机制和应急处置策略。

关键词: 地震 输电杆塔易损性 网络爬虫 地震应急 损失评估 [文章编号] 1001-4683(2025)02-0374-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

CMYK

地震是一种在极短时间内释放巨大能量的自然灾害,其产生的剧烈地面运动对电网系 统设施,尤其是建造在高山大岭区域的输电杆塔造成巨大破坏。随着国家现代化进程的不 断深入,对输电网络覆盖范围提出了更高要求,作为输电网络重要组成部分的高压输电杆塔 不可避免地要穿越高地震烈度区,这对电网设施造成的威胁日益严峻。

近年来全球各地发生过多起由地震及其次生灾害引发的输电塔线体系损坏甚至倒塌的 事故。国内方面,1976年唐山7.8级地震造成唐山地区90%的变电站和输电线路破损,天津 地区一半以上的变电站停运(韩文芝,1988);1999年中国台湾集集7.6级地震造成30座变 电站停运,700多万用户用电困难(王飞,2020);2008年汶川8.0级地震造成四川、甘肃等4 个省200多座变电站停运,同时诱发的滑坡、崩塌等次生灾害也对输电杆塔造成了损毁(张 大长等,2009);2013年芦山7.0级地震造成224条输电线路不同程度的破坏(刘如山等,

[项目类别]中国南方电网有限责任公司创新项目(CGYKJXM20210332)、国家自然科学基金(42271015)共同资助 [作者简介]陈刚,男,1987年生,高级工程师,主要从事强地震动模拟及电塔震害研究。E-mail:277233162@qq.com

[[]收稿日期] 2024-07-31 [修定日期] 2025-03-01

2013);2023 年 12 月积石山 6.2 级地震也造成输电杆塔的破坏。国外方面,1994 年美国北 岭 7.1 级地震造成大量输电杆塔破坏;1995 年日本阪神 7.2 级地震造成 50 余座变电站破 坏;2011 年东日本大地震致使 67 个变电站停运,造成灾区大面积停电(谢强等,2011)。

上述震害记录表明,电网设施在强震发生时容易发生破坏,呈现出明显的脆弱性。近年 来随着经济的快速发展和城市化进程的加快,电能需求不断增大,电网设施不断增多,承灾 体的暴露性日益增大,电网设施潜在的地震灾害威胁与日俱增。因此,强震后定量估计电网 设施可能遭受的震害损失是保障国民经济可持续发展的重要课题。开展电网设施地震灾损 评估不仅能对未来一段时间可能遭受的损失做出科学预测,提高电网建设规划的科学性和 合理性,而且在地震发生后结合地震基本信息,快速开展输电杆塔的震害应急评估,可为震 后巡线检查、电力修复提供参考依据。

前人针对电网系统或输电杆塔的自然灾害监测预警评估也开展了相应的研究。刘志刚 等(2014)选取云南典型滑坡、泥石流等地质灾害案例,建立了针对电网系统的区域地质灾害 风险评价模型、风险预警模型以及监测预警系统,探讨了电力系统应对地质灾害的科学原理 与防灾减灾理论。李正志等(2015)以云南电网为研究对象,研究了云南地区自然灾害的时 空分布特征、电网系统承灾体的脆弱性灾变耦合破坏规律风险评价模型以及风险区划预警 模型等,为建立云南电网灾害监测预警系统和风险管理控制平台提供了技术支持。方权等 (2016)采用现有 GPRS/3G 通讯技术平台,利用雨量计、位移计、测斜仪和视频仪等设备对输 电线路进行实时监测,构建了输变电线路塔基实时监测系统。田利等(2020)从理论分析、数 值模拟和物理实验等方面分析了国内外输电杆塔抗震研究进展,并从结构抗震、减震、地震 次生灾害防治等方面对未来研究方向进行展望。刘如山等(2023)以汶川地震调查震害数据 为基础,提出了根据变电站内高压电气设备和房屋建筑地震破坏状态计算变电站震害指数 的方法。

本研究以中国南方电网有限责任公司超高压输电公司百色局所辖广西境内输电线路为研究对象,开展输电杆塔震害评估工作。广西位于亚欧板块内部,地处东南沿海地震带西段,境内北东向、北西向的多组断裂控制着广西地震的发生。其中,北西向的百色一合浦断裂带、巴马一博白断裂带和北东向的防城一灵山断裂带、合浦一北流等断裂带为主要的活动断裂带,历史上曾发生多次强震(李伟琦,1989;李细光等,2017;陈刚等,2023)。 2019—2024年广西境内发生地震59次,其中百色局所辖输电线路路径的县级区域内发生地震34次(中强震1次,有感地震4次,弱震或微震29次)。广西地震多为浅源地震,加上特殊的溶岩地层对地震波的放大作用,呈现"小震级、高烈度"的特点(杨仕生,1998)。

本研究主要开展输电杆塔震害自动评估系统研制,系统主要包括两部分:①实时抓取 中国地震台网中心网站的地震信息,基于实时地震信息(包括震源位置、震级等)自动生成研 究区范围内近场强地震动初始分布结果;根据地形及场地数据对强地震动初始分布结果进 行地形及场地校正。②结合输电线路杆塔地震易损性曲线,自动生成研究区范围内各杆塔 不同震损等级概率,快速评估杆塔受损程度;自动生成杆塔震损简报并以短信、邮件等方式 发布,为震后杆塔"是否巡查"提供决策参考。

1 系统设计原则

СМҮК

2 期

系统设计的初衷是系统后台长期不间断运行,为确保系统在地震应急过程中的鲁棒性,

41 卷

提高系统的业务应用能力,系统在设计过程中遵循的原则包括实用性和先进性、开放性与稳 定性以及安全性和保密性。

首先,实用性和可行性是本系统的主要原则,在技术架构设计的过程中必须保证技术架 构成熟、稳定。同时,为满足不同用户的不同需求,需要结合地震应急时效性的需求特点,提 高系统的实用性。因此,系统设计既要保证用户可获取必要的信息,又要便于系统管理。在 系统设计时,还需要保证系统的先进性和逻辑的合理性,确保系统能符合业务化运行的逻 辑,保证输出结果的正确性。

其次,系统初期设计只针对地震灾害风险,后续在业务化运行过程中可能需接入其他自 然灾害风险评估模型,因此系统需符合开放性的原则,确保系统后期具有可扩展性。因此, 需要设计标准化的系统接口,使其对软硬件环境的依赖性达到最小。本系统为电网系统的 业务化运行系统,需要从系统结构设计、系统管理、系统权限等方面确保系统运行的稳定性。

最后,电网设备的基本参数以及对地震危害的评估结果在一定程度上涉及信息的保护, 因此需要注意信息保护和隔离,针对不同保密等级的数据需应用不同的网络通信环境,采用 不同的防护措施,确保数据安全。

2 系统架构

输电杆塔震害自动评估系统主要针对地震应急业务需求,基于时空大数据和一张图技术,整合静态应急资源和动态应急资源,在一张图上完成时空数据接入、分析、可视化、辅助 应急决策与指挥,支持平战结合,提升应急效率。

2.1 架构设计

输电杆塔震害自动评估系统突出多源数据整合、分析、标绘等功能,界面简单、清晰、美观、易操作。系统由支撑层、数据层、模型层和服务层组成。图1展示了该系统架构设计。



图 1 输电杆塔震害自动评估系统架构设计

(1)支撑层:系统部署在阿里云服务器上,以满输电杆塔震害自动评估系统的不间断运 行处理。

(2)数据层:主要用于数据的制备、可视化等。数据主要包括输电杆塔分布数据、抗震性能数据、地形数据以及历史地震分布数据等。数据层对整个系统的数据进行管理。存储

376

MYK

的数据涉及空间地理信息、遥感影像等结构化及非结构化数据,种类多、数量大。数据治理 依托标准字段定义,对归集的数据进行标准定义、质量检核等,打造一体化的数据治理体系, 提升数据质量,为后续模型的运行提供支撑。

(3)模型服务:系统模型服务主要包括地震信息的实时抓取与自动响应、输电杆塔震害 损毁程度评估两个模型。同时模型管理也将系统中各阶段的模型根据业务需求定义成一套 运行流程模型,提供可视化工作流构建工具,包含模型查询、模型新增、模型编辑、模型删除、 模型发布、模型分类管理、模型复制等功能。

(4)服务层:主要用于产出系统的专题产品,主要包括评估专题报告、专题产品生成、图件的标绘等功能。同时服务层也提供了数据的可视化功能,可提供数据资产目录,以资产目录的形式提供数据资产的展示窗口。通过资产目录能够快速定位所需数据资产,提供多元化的资源共享方式,包括数据的整合、查看、展示等,实现不同类型数据资产共享的需求。另外,服务层也包括资源管理功能,可实时查询各集群节点的 CPU、内存等状态。支持实时获取、监控、诊断基础软硬件以支撑模型算法的运算。

2.2 前端技术

2 期

CMYK

为确保系统的先进性、稳定性并满足灾害应急响应的业务需求,提升系统平台的可用性,系统采用目前主流端构建技术 HyperText Markup Language 5(HTML5)。HTML5 是一种标记语言,可直接在浏览器中执行(李慧云等,2012),便于本系统的开发。HTML5 技术具有语义特性、本地存储特性、设备兼容特性、连接特性、网页多媒体特性、三维、图形及特效特性、性能与集成特性(马新强等,2010)。

2.3 后端技术

系统后台采用 GIS 作为技术支撑,利用模型化的技术方法将现实世界转为可视化的信息世界。WEBGIS 作为 GIS 软件的新一代代表得到了广泛的应用,可将相关功能封装成为组件,以构件的形式嵌入到任何一种语言中,实现组件与其他系统的无缝集成。本系统基于GIS 客户端+HTML5 技术,采用 ArcGIS API for JavaScript 3.24,构建的系统具有数据可视化、GIS 功能任务集成、组件快速集成、本地几何引擎启用交互等特点(袁怀月等,2011)。

3 系统流程

本系统处于 24h 自动运行状态,每 10min 刷新中国地震台网中心网站实时地震信息目录。系统获取地震三要素信息后,结合该地区活动断裂分布数据、地形数据和 V₃₃₀数据,利用 衰减关系计算区域和各杆塔 PGA 值并进行地形和场地条件校正。再结合输电杆塔地震易 损性曲线,实现输电杆塔损毁程度的评估。评估完成后自动生成杆塔损毁评估专题图和专 题报告,包括不同损毁程度的杆塔编号和位置信息等,给出巡视策略以供参考。最后,评估 报告以邮件或短信的方式发送至指定接收人的邮箱或手机中,该过程在抓取地震信息后 5min 内完成。系统总体流程如图 2 所示。

4 系统算法模型

4.1 网络爬虫驱动的地震信息抓取

网络爬虫是一种可自动抓取网络信息的程序,通过访问网页实现所需数据的提取(周德



图 2 输电杆塔震害自动评估系统流程

懋等,2009),抓取的过程可模拟人类浏览网页的行为。网络爬虫已广泛应用于多个领域,如数据挖掘和分析、网站数据的监测和更新等。在应用过程中,网络爬虫由统一资源定位系统(uniform resource locator,URL)管理器、网页下载器、网页解析器和数据存储器构成(朱莉娜等,2017)。URL管理器负责管理需要抓取的网页信息;网页下载器用于下载抓取的网页信息,并通过相关协议进行数据传输;网页解析器将抓取的网页信息进行解析,提取所需的数据信息;数据存储器将提取的数据信息进行保存,可保存至本地磁盘或者数据库中。系统工作流程是先设置一个种子 URL,通过管理器抓取网页一解析网页信息一提取所需信息一保存数据信息,循环迭代该过程,实现不间断抓取网页信息。

本系统基于网络爬虫技术实时抓取中国地震台网中心网站的地震速报数据。为确保数据的完整性,系统同时抓取美国地质调查局(USGS)网站的地震速报数据,从而保证地震信息无遗漏。目前系统采用增量型抓取模式,抓取频率为10min一次。系统会将新增地震事件录入到数据库,在入库过程中完成去重操作,避免出现重复的数据。数据入库后,根据自定义规则(例如震级大于3.0级)选择是否触发后台输电杆塔震害评估分析流程,并根据模板产出分析报告。后台业务流程包含地震事件定位、震害评估分析、评估结果截图、报告生成和邮件/短信通知等。

4.2 PGA 等值线图生成

系统采用 PGA 作为输电杆塔震害评估的地震动强度指标,并选用适用于华南地区的地震动衰减关系生成 PGA 值。王继等(2008)利用华南地区 25 次地震烈度数据给出了该区域 烈度衰减关系,长轴方向烈度(*I*_{k轴})及短轴方向烈度(*I*_{k轴})衰减方程表示为

 $\int I_{\text{K}ii} = 6.6079 + 0.9543M - 3.5688 \log(R + 18), \text{ RMS} = 0.540$ (1)

$$I_{\text{fight}} = 4.9540 + 0.9543M - 2.9566 \log(R + 9)$$
, RMS = 0.540

式中, *M* 为震级, *R* 为震中距, RMS 为回归分析中不确定性变量。给定震中位置、断层走向 及震级,便可利用式(1)计算各位置烈度值,再利用烈度 *I* 与 PGA 转换关系(丁宝荣等, 2017)获得基岩 PGA 结果,即

$$PGA = 10^{(I+1.23)/3.73}$$
(2)

4.2.1 PGA 地形校正

通常认为山体地形对地震强地面运动具有明显的放大作用,山体越陡峻其放大倍数越大,山脚处的放大效应不明显。研究表明,山体地形对地震动的放大作用主要体现在地震动峰值和反应谱高频段(刘晶波,1996)。随着山体高度和坡度的变化,放大系数分布在1.1~2.1 范围之间(张建毅等,2012;孙崇绍等,2011)。考虑到广西地区地形特点,本研究采用地形形状比(shape ratio) *H/L* 为约束的地形校正方案(Molina et al,2019),地形形状比定义如图3所示。



图 3 地形形状比定义示意图

根据相关研究 (Molina et al, 2019), 地形对 PGA 的放大系数 $A_{_h}$ 可表示为

$$A_h = 1.0 + 0.96(H/L) \tag{3}$$

利用衰减关系快速获得区域及各杆塔 PGA 值后,可以基于式(3)以及区域数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)快速获得 PGA 放大系数,得到地形校正后的 PGA 分布。本系统将结合广西地区 DEM 数据,使用上述公式对 PGA 数据进行第一次自动化校正。 4.2.2 PGA 场地校正

除了地形因素对地震动有影响之外,场地条件也是影响地震动参数的重要因子(史大成等,2012)。本研究采用 *V*_{s30}数据对场地影响进行校正。*V*_{s30}数据来源于全球地形数据,其不 是严格意义的地表 30m 以下的横波速度,而是平均的横波速度。增加场地放大效应后的峰 值加速度 PGA' 与基岩 PGA 存在如下关系(申文豪等,2019)

$$\ln(PGA') = \ln(PGA) - 0.36\ln(V_{s30}/760)$$
(4)

本系统将采用上述公式结合广西地区 V_{s30} 数据,对地形校正后的 PGA 数据进行二次校正。

4.2.3 地震烈度等值线生成

基于烈度 I 与 PGA 的转换关系(式(2)的变形),可得到最终地震烈度分布,即

$$I = 3.73 \lg(PGA) - 1.23 \tag{5}$$

式中, PGA 为经过地形和场地条件校正后的最终结果。

4.3 杆塔震害损伤程度评估

输电杆塔震害损伤评估主要依赖杆塔地震易损性曲线,地震易损性曲线的获取则通过 构建输电杆塔概率地震需求模型。构建概率地震需求模型的目的是建立地震动强度指标 (*IM*)和工程需求指标(*D*)之间的概率关系,该概率关系可以用对数正态分布的形式表示 (Padgett et al,2008),即

$$P(D \ge d \mid IM) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln d - \ln S_D}{\beta_{D \mid IM}}\right)$$
(6)

其中, Φ 表示标准正态累积分布函数; d 表示结构不同极限状态下的阈值; S_D 表示结构工 程需求指标的中位值; β_{DIM}表示对数标准差。S_D 和地震动强度指标 IM 的关系可以近似表 达为指数形式,即

$$\ln(S_p) = b\ln(IM) + \ln a \tag{7}$$

其中, b和 lna 分别为线性回归分析的一次系数和常数项。张伟等(2016)和王飞(2020)分 别给出了酒杯型和猫头型输电杆塔地震易损性曲线,表1给出了两类输电塔概率需求模型 参数分析结果。

2 期

MYK

380		中 国	地 震		41 卷	
表 1 输电塔概率需求模型参数分析						
杆塔类型	地震动强度指标(IM)	工程需求指标(S _D)	回归常数项(lna)	回归系数(b)	回归方差估计	
酒杯型	PGA	塔顶最大位移	-1.4934	0.8879	0.2105	
猫头型	PGA	修正的节间位移角	-5.1285	1.0187	0.1225	

利用易损性曲线评估震害最终获取的是输电杆塔在各破坏等级上的概率值,本研究结 合输电塔处于不同破坏状态的概率分布和对应的破坏指数中位值,计算输电塔震害破坏指 数期望值(林世镔等,2011),确定杆塔在特定地震作用下最终的破坏等级。

4.4 其他功能

除提供以上功能外,系统还提供标绘和文字标注,对受灾态势及救援态势做标注说明。 系统提供点线面的标绘工具以及应急二维标绘工具,包括文字标注、点标注、线标注、面标 注、箭头标注,并可以将标注方案进行保存、加载、清除等操作,完成简单的地图标绘功能。 同时也提供了文字标注功能,在设置标注颜色和文字大小后,即可完成文字标注。

5 系统案例展示

以模拟地震为例,阐明输电杆塔震害自动评估系统烈度生成及杆塔震害评估功能实现 流程。首先,进入系统主页面,可见杆塔的空间分布、杆塔类型及各杆塔编号,主页面右下角 "切换底图"可点击切换不同类型底层地图,主界面右侧包括四项主要功能,分别为地震模 拟、应急标绘、测量工具和地震台网。地震模拟功能主要实现设定地震烈度生成和杆塔震害 评估;应急标绘功能提供标绘和文字标注,对受灾态势及救援态势做标注说明,完成地图标 绘功能;测量工具提供测距离、测面积和点坐标获取功能,通过在地图上点击任意多个点, 获取距离和面积信息;地震台网可提供研究区域内 24h、48h、7 天、30 天和 1 年时间内的历 史地震信息,并可在地图中展示。系统主界面及各功能模块示意图,如图 4 所示。

在区域内选择模拟地震震中位置,系统将自动选择距离该位置最近活断层走向为烈度 计算公式中长轴方向。输入震级值,点击"计算烈度"便可即刻生成烈度等值线图。图5展 示了利用本系统模拟的一个震中位于百色市市区、震级为7.5级的设定地震产生的烈度等 值线分布图。系统可根据烈度分布及杆塔位置信息自动统计相关信息,根据此次地震预测 的震动图分布特征,预计极震区震动烈度可能达X度以上,其中V~VI度区范围内共有输电 杆塔约363个; VI~VI度范围内共有输电杆塔约943个; VI~VI度范围内共有输电杆塔约 1883个; VI~VI度范围内共有输电杆塔约1292个; IX~X度范围内共有输电杆塔约673个; X~XI度范围内共有输电杆塔约336个。决策者可依据该信息获取烈度分布及各烈度值范 围内输电杆塔数量。

点击"杆塔震害"可进一步计算各杆塔破坏程度,包括基本完好、轻微破坏、中等破坏、严 重破坏和倒塌。在当前7.5级模拟地震条件下,杆塔震害情况为:基本完好数量为5300个, 轻微破坏数量为551个,中等破坏数量为31个,严重破坏数量为0个,倒塌数量为0个,结果 如图6所示。点击"生成报告",则可将详细的地震信息、烈度信息和杆塔破坏信息自动生成 报告,并自动发送至特定接收人邮箱。管理人员可根据不同震害程度的杆塔分布数量以及

CMYK



图 4 系统主页面及各功能模块示意图



图 5 烈度等值线生成示意图

杆塔编号,前往现场进行现场勘查。报告同时也针对不同震害程度的杆塔给出应急勘查以 及修复建议。

СМҮК



图 6 输电杆塔震害分布示意图

6 讨论和结论

针对输电杆塔"灾后抢"的应急业务需求,本研究将输电杆塔地震易损性曲线与地震强 地面运动快速评估结果相结合,开发了输电杆塔震害自动评估系统。系统基于 GIS 技术,采 用 B/S 架构形式,实时获取中国地震台网中心发布的地震信息后 1min 内快速评估地震产生 的强地面运动水平,5min 内给出强地震动参数分布信息,10min 内结合输电线杆塔的地震易 损性曲线快速预测地输电杆塔震害结果,生成区域输电塔震害分布图及抢险目标分布图,并 实时自动推送发布。系统的主要特点包括:①定向高频次抓取中国地震台网中心和 USGS 网站的实时地震信息,在获取地震信息后快速接入出图流程;②基于实时地震信息或模拟 地震,自动计算烈度分布并评估各杆塔震害信息,制作专题图,形成分析报告;③提供标绘 功能,在一张图上完成标绘方案制作、保存和分发功能。

需要说明的是,目前系统中所使用的杆塔地震易损性曲线类型只涵盖了猫头型和酒杯 型两种,实际上输电塔还有干字型、T字型等多种类型,系统中易损性曲线类型需要进一步 补充。此外,建筑结构的相关研究表明,相比于峰值加速度 PGA,结构基本周期对应的谱加 速度离散程度更小,更适合作为输电塔地震易损性分析的地震动参数。因此,后续应发展以 谱加速度为参数的强地震动参数快速生成方法。本系统的开发研制提升了电网系统地震应 急的时效性和自动化程度,能够更准确地了解杆塔震害情况,从而合理配置和利用资源,避 免不必要的资源浪费。另一方面,通过本系统尽早发现和修复受损的输电杆塔,不仅可以减 少直接的修复和管理成本,还能通过确保电力系统的稳定性和可靠性,减少因电力中断造成 的经济损失,从而带来整体的经济效益。

СМҮК

41 卷

МҮК

参考文献

陈刚,李茂峰,李克华,等. 2023. 基于随机振动模型的强地面运动数值模拟及其在广西灵山M6%地震中的应用. 中国地震,39(4):832~844. 丁宝荣,孙景江,杜轲,等. 2017. 地震烈度与峰值加速度、峰值速度相关性研究. 地震工程与工程振动,37(2):26~36.

方权,石毅,侯金华,等. 2016. 三峡地区输电线路监测与应急处置预警系统设计与实现研究. 三峡大学学报(自然科学版),**38**(3):73~80.

韩文芝. 1988. 电力系统的抗震防灾对策. 工程抗震,(2):28~29,5.

李慧云,何震苇,李丽,等. 2012. HTML5 技术与应用模式研究. 电信科学,28(5):24~29.

李伟琦. 1989. 广西新构造分区特征及其与地震的关系. 华南地震, (4):22~26.

李细光,李冰湖,潘黎黎,等. 2017. 广西灵山 1936 年 6¾级地震地表破裂带新发现. 地震地质,39(4):689~698.

李正志,韩彤,杨瑞波,等. 2015. 云南电网自然灾害监测预警系统研究. 云南电力技术,43(1):135~137.

林世镔,谢礼立,公茂盛,等. 2011. 城市建筑物抗震能力评估方法. 自然灾害学报,20(4):31~37.

刘晶波. 1996. 局部不规则地形对地震地面运动的影响. 地震学报,18(2):239~245.

刘如山,刘金龙,颜冬启,等. 2013. 芦山 7.0 级地震电力设施震害调查分析. 自然灾害学报,22(5):83~90.

刘如山,闫路鹏,姜立新,等. 2023. 110kV及以上变电站地震易损性研究. 中国地震, 39(2): 290~298.

刘志刚,邢忠信,王孟科,等. 2014. 震后地质灾害特征与防治研究:以汶川地震灾区为例. 北京:地质出版社.

马新强,孙兆,袁哲,等. 2010. Web 标准与 HTML5 的核心技术研究. 重庆文理学院学报(自然科学版),29(6):61~64,74.

申文豪,李永生,焦其松,等. 2019. 联合强震记录和 InSAR/GPS 结果的四川九寨沟 7.0 级地震震源滑动分布反演及其地 震学应用. 地球物理学报,62(1):115~129.

史大成,温瑞智,杜春清. 2012. 区域性场地 V_{s30}及峰值加速度放大系数估算方法. 地震工程与工程振动,**32**(4):40~46. 孙崇绍,闵祥仪,周民都. 2011. 陇南山区局部地形对地震动强度的影响. 西北地震学报,**33**(4):331~335.

田利,董旭,周梦瑶,等. 2020. 输电塔-线体系抗震研究综述. 世界地震工程,36(3):201~212.

王飞. 2020. 特高压输电线路杆塔结构抗震性能研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.

王继, 俞言祥. 2008. 华中、华南中强地震区地震烈度衰减关系研究. 震灾防御技术, 3(1): 20~26.

谢强,谢超,管政. 2011. 特高压 8 分裂导线风荷载干扰效应风洞实验. 高电压技术,37(9):2126~2132.

杨仕升. 1998. 广西地震活动与我国主要地震区(带)地震活动的相关分析. 西北地震学报,20(2):36~42.

袁怀月,侯澄宇,杨恒. 2011. 基于 ArcGIS Flex API 的工厂基础地理信息共享服务系统设计. 测绘工程,20(2):61~65,69.

张大长,赵文伯,刘明源. 2009. 5·12 汶川地震中电力设施震害情况及其成因分析. 南京工业大学学报(自然科学版),31 (1):44~48.

张建毅,薄景山,王振宇,等. 2012. 汶川地震局部地形对地震动的影响. 自然灾害学报,21(3):164~169.

张伟,周强,唐可人. 2016. 基于位移的输电塔地震易损性分析. 钢结构,31(12):47~52.

周德懋,李舟军. 2009. 高性能网络爬虫: 研究综述. 计算机科学,36(8):26~29,53.

朱莉娜,李泽平. 2017. 网络爬虫技术的研究与实现. 黑龙江科技信息,(10):166.

Molina S, Lang D H, Singh Y, et al. 2019. A period-dependent topographic amplification model for earthquake loss estimation. Bull Earthq Eng, **17**(7): 3709~3725.

Padgett J E, Nielson B G, DesRoches R. 2008. Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios. Earthq Eng Struct Dyn, 37(5):711~725.

Research on Automatic Assessment System for Earthquake Damage of Transmission Towers Driven by Earthquake Disaster Events

Chen Gang¹⁾, Li Maofeng¹⁾, Chen Qiang¹⁾, Liu Bo¹⁾, Cen Guan¹⁾, Gan Chaoyang¹⁾, Li Kehua¹⁾, Shen Wenhao²⁾, Li Qiang²⁾

1) Baise Bureau of Ultra High Voltage Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd., Baise 533000, Guangxi, China

2) National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management, Beijing 100085, China

Abstract Transmission towers are critical components of the power grid infrastructure. Earthquakes, as sudden and high-energy natural disasters, can cause substantial damage to these structures. Rapid post-earthquake assessment of transmission tower damage is essential for guiding inspection and repair efforts. To address the challenges of low response efficiency and unclear inspection priorities in damage assessment, this paper proposes an automatic seismic damage assessment system for transmission towers, developed in the context of earthquake disaster events. The system is built on a browser/server(B/S) architecture and leverages Geographic Information System(GIS) technology alongside web crawling techniques to automatically retrieve earthquake information. By integrating terrain- and site-corrected peak ground acceleration(PGA) data with seismic vulnerability curves for transmission towers, the system enables rapid, automated evaluation and real-time dissemination of damage and loss estimates. This approach meets the urgent needs of emergency assessment following strong earthquakes, supports informed decision-making regarding inspection necessity, enhances the accuracy and efficiency of emergency response in power grid management, and contributes to the optimization of transmission tower emergency response mechanisms and strategies.

Keywords: Earthquake; Vulnerability of transmission towers; Web crawlers; Earthquake emergency response; Loss assessment

CMYK