

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190238

一种降雨诱发滑坡灾害下输电杆塔的监测与预警方法

陈强¹, 王建¹, 熊小伏¹, 冯长有², 马超²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 国家电网有限公司国家电力调度控制中心, 北京 100032)

摘要: 高压输电杆塔作为输电网络的重要组成部分, 不可避免地会架设在山脊、陡坡边缘等类似地带, 可能在短时间内遭受强降雨灾害诱发山体滑坡的破坏。针对降雨诱发滑坡灾害下输电杆塔的预警问题, 通过北斗卫星定位和数值天气预报等多源信息融合, 按照滑坡体与杆塔的相对位置关系, 提出了滑坡影响因子的量化分级方法。基于双因素分级叠合法分别构建输电杆塔的风险预警方法。最后通过算例测试对所提方法进行了有效性与实用性验证, 并根据测试结果给出了相关建议, 有助于提前采取预防措施, 降低地质灾害对电网的灾害影响。

关键词: 强降雨; 滑坡灾害; 输电杆塔; 北斗系统; 风险预警

Monitoring and early warning method for transmission tower under rainfall-induced landslide disaster

CHEN Qiang¹, WANG Jian¹, XIONG Xiaofu¹, FENG Changyou², MA Chao²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. State Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China)

Abstract: High-voltage transmission tower, as an essential part of the transmission network, will inevitably be constructed in the ridge, steep slope edges and other similar areas. It may be damaged by landslides induced by short-time heavy rainfalls. This paper focuses on the problem of early warning of transmission tower under rainfall-induced landslide disaster. According to the position relationship between landslide body and tower, a quantitative classification method of landslide impact factors based on multi-source information fusion of BeiDou Navigation Satellite System (BDS) and numerical weather forecast is proposed. The risk early warning method of transmission tower through the two-factor hierarchical overlapping method is established. Finally, the validity and practicability of the proposed method are verified by a case study. Some suggestions are given according to the test results, which is helpful to take preventive measures in advance and reduce the catastrophic impact of geological disasters on the power grid.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSDDK00KJJS1800210) "Multiple Serious Fault Online Early Warning and Fault Disposal Decision Making Technology Large Scale Power Grid".

Key words: heavy rainfall; landslide disaster; transmission tower; BDS; risk early warning

0 引言

近年来, 在全球气候变化的大趋势下, 恶劣天气和极端自然灾害的频率和强度有增加的趋势, 暴露于大气环境中的电网更容易发生故障甚至遭受破坏, 对公众生活和社会经济造成较大影响^[1-2]。尤其

在中国西南地区, 受暴雨和持续性强降雨诱发, 丘陵、山脊和陡坡等地势极易发生岩体滑坡、泥石流等地质灾害。例如: “6·24”四川茂县山体滑坡事件, 造成 46 户农民被掩埋、141 人失联, 河道堵塞 2 km, 1 600 余米道路被掩埋^[3]; 2017 年 8 月 28 日, 贵州省纳雍县发生山体滑坡, 造成 27 人死亡和 8 人失踪以及电力、通信中断, 直接损失高达 8 400 余万元^[4]。

高压输电杆塔作为输电网络的重要组成部分,

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGSDDK00KJJS1800210) “大电网多重严重故障在线预警及故障处置决策技术”

不可避免地会架设在山脊、陡坡等地带,可能遭受短时间的强降雨气象灾害,进而诱发山体滑坡,给电网造成损失^[5]。因此研究强降雨诱发滑坡灾害下输电杆塔的预警方法,有助于提前采取预防措施,降低地质灾害对电网的灾变影响,对保障电网的安全运行具有重要意义。

杆塔所处位置的地质构造是产生滑坡的内因,而降雨是滑坡的重要诱因^[6-7],如何对强降雨诱发的滑坡灾害进行预警,一直是滑坡研究领域的热点问题^[8]。国内外已有许多研究者基于边坡的地形地貌和地质条件等内在因素^[9],研究降雨强度以及降雨过程与滑坡的时空分布关系^[10-12],进而提出相应的滑坡预警方法。文献[13]在全面分析降雨及滑坡数据的基础上,对降雨因子、前期降雨衰减系数与滑坡数量的相关关系进行了统计分析,提出了基于 Logistic 回归的滑坡预测模型。针对采用统计结果建立的滑坡预测模型对降雨诱发机理考虑不足的缺点,文献[14]以花岗岩风化壳地区的典型二元结构斜坡为原型,以实际勘查数据为基础,提取该斜坡结构特征,基于饱和-非饱和渗流理论,分析研究降雨入渗过程和斜坡失稳机制,建立典型斜坡的预警判据。但是该方法通常只适于小尺度的特定边坡,对于较大空间与时间范围的降雨型滑坡预警效果还有待实践检验。

降雨型滑坡预警方法的研究促进了滑坡灾害下输电杆塔风险预警模型研究^[15-17]。其中,文献[15]基于气象模型和地质灾害致灾模型,结合气象台的降雨预报,建立了强降雨灾害诱发输电杆塔失效的概率评估模型;文献[16]通过量化分析地质环境和降雨两大因素,采用分级叠合法确定滑坡危险性等级,根据输电塔的抗灾性能及自身特性,构建了强降雨诱发滑坡灾害下的输电杆塔风险预警模型。以上研究未考虑输电杆塔与滑坡体的相对位置,同时现有研究往往从边坡的地形地貌、地质条件出发量化滑坡的危险性等级,未有效融合变形监测数据,忽略了滑坡体与输电杆塔的初始状态以及滑坡灾害发展过程中的状态更新,因此预警模型的准确度和实效性有待提高。

随着变形监测精度要求的提高,GPS 以全天候、自动化、高效益等显著特点逐步推广应用在输电杆塔^[18-19]、高层建筑物^[20-21]、山体滑坡监测^[22-23]、桥梁健康监测^[24-25]等方面。然而,GPS 发布的信号会受到不定期的短暂干扰,导致 GPS 经常出现载波相位差分技术(Real-time kinematic, RTK)失锁现象,大大降低了测量精度^[22]。近年来,随着我国北斗卫星导航系统建设的不断完善以及北斗地基增强系统的

建设,逐步利用自主可控的北斗高精度服务替代 GPS 是符合国家战略的大趋势。

北斗卫星系统的三频信号相比于 GPS 的双频信号,可以更好地消除高阶电离层延迟影响,增强数据预处理能力,提高定位精度与可靠性^[26]。因此,北斗精确定位技术为输电杆塔的定位与监测提供了新的技术手段。北斗卫星系统可利用 RTK 算法及静态后处理技术定位输电杆塔的地理位置信息,采用高精度的二维倾角传感器检测输电杆塔的姿态信息,实现对杆塔基础进行毫米级精度的全天候不间断在线监测,实时获取输电杆塔姿态信息^[27]。

综上所述,强降雨诱发滑坡灾害下的输电杆塔风险预警,既涉及到强降雨诱发滑坡风险,又涉及滑坡情况下杆塔的位置监测和预警。数值天气预报中的强降雨量数据、暴雨灾害天气和地质灾害预警信息可以预测滑坡风险,而北斗卫星导航系统可以监测并更新杆塔的状态信息,反映滑坡的发展过程。通过数值天气预报和北斗卫星定位的多源信息融合,可以为降雨型滑坡诱发输电杆塔故障预警提供新的技术手段,提高预警的准确性和实效性。

为此,本文按照滑坡体与杆塔的相对位置关系,将降雨诱发滑坡输电杆塔预警问题处理成降雨诱发滑坡和滑坡导致杆塔故障两个子问题,通过北斗卫星定位和数值天气预报等多源信息融合,提出滑坡影响因子的量化分级方法,并基于双因素分级叠合法分别构建输电杆塔的风险预警方法。最后,针对两种杆塔预警模型进行算例分析,验证所提故障预警模型的有效性与实用性。

1 强降雨诱发滑坡灾害模型

在构建降雨诱发滑坡灾害的概率统计模型之前,需要对杆塔所在位置的地质构造等内部因素进行量化分析,其中,影响杆塔滑坡灾害的内部因素主要包括杆塔微地貌单元、水文条件、构造发育情况、塔基岩土体、植被条件等。对于这 5 种影响因素,它们的描述方式各不相同,本文采用文献[9]的方法,通过专家评分对这些影响因素进行量化分析,随后采用层次分析法计算研究区域杆塔滑坡危险性等级指数,进而分析各降雨型滑坡案例中的雨量信息,确定有效降雨量对诱发滑坡的“贡献”。同时,该指数也是选择滑坡预警点和安装北斗监测的重要参考依据。

通过大量的降雨型滑坡案例分析可得,降雨诱发的滑坡大多发生于降雨中后期或降雨停止后几天,降雨诱发滑坡风险不仅与当日降雨量有关,还与前期累计降雨量有关^[28]。“前期有效降雨量”综

合考虑了滑坡发生当日降雨强度、累计降雨量、滑坡发生前期降雨历史等因素对滑坡的影响, 计算方法简单、可操作性强^[29], 可以作为预测较大空间与时间范围的滑坡的综合输入量。滑坡的前期有效降雨量计算如下:

$$R_e = R_0 + \sum_{i=1}^{10} f(T_i)R_i \quad (1)$$

式中: R_e 为该滑坡区域的有效降雨量; R_0 为当日降雨量; R_i 为第 i 天前的降雨量; $f(T_i)$ 为第 i 天前降雨量的权重, 可根据历史上诱发滑坡的降水资料和所在区域的滑坡危险性等级指数 (反映地质结构状态) 确定, 如式(2)所示。

$$f(T_i) = \frac{G_L}{G_{Lmax}} (k)^i \quad (2)$$

式中: G_L 为定期巡线后的最新滑坡危险性等级指数; G_{Lmax} 为滑坡危险性等级指数最大值; k 为有效降雨系数。所在研究区域的前期降雨量的权重具体见表 1 所示。

表 1 滑坡前逐日降雨量的权重

Table 1 Weight of daily rainfall before landslide

前 i 日	权重	前 i 日	权重
1	0.840	6	0.351
2	0.706	7	0.295
3	0.593	8	0.248
4	0.498	9	0.208
5	0.418	10	0.175

通过统计某区域的滑坡发生时段的降雨信息, 经过式(1)和式(2)处理可得滑坡前有效降雨量; 然后根据与之对应的滑坡灾害记录, 可绘制滑坡前期有效降雨量的频率直方图。为了准确描述滑坡与有效降雨量的关系, 选取常用的正态分布、Logistic 分布和广义极值分布来拟合降雨诱发滑坡的概率密度函数。

其中, 正态分布的概率密度函数为

$$f(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中: r 为前期有效降雨量, mm, 下同; σ 为标准差; μ 为期望。

广义极值分布的概率密度函数为

$$f(r) = \frac{1}{\delta} \left[1 + \xi \left(\frac{r-v}{\delta} \right) \right]^{\frac{1}{\xi}-1} \exp \left[1 + \xi \left(\frac{r-v}{\delta} \right) \right]^{\frac{1}{\xi}} \quad (4)$$

式中: v 为位置参数; δ 和 ξ 为形状参数。

Logistic 分布的概率密度函数为

$$f(r) = \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{r-\alpha}{\beta}\right) \left[1 + \exp\left(-\frac{r-\alpha}{\beta}\right) \right]^{-2} \quad (5)$$

式中: α 为位置参数; β 为尺度参数。

概率密度函数的分布拟合结果列于表 2, 拟合曲线见图 1。表 2 中的 $\ln L$ 表示对数似然估计值, $Mean$ 表示拟合函数的均值, Var 表示拟合函数的方差, 它们均是拟合优度指标。从表 2 中可见: Logistic 拟合优度指标相比于广义极值分布、正态分布的取值好。因此, 本文选用 Logistic 分布来描述滑坡前期有效降雨量的概率密度。

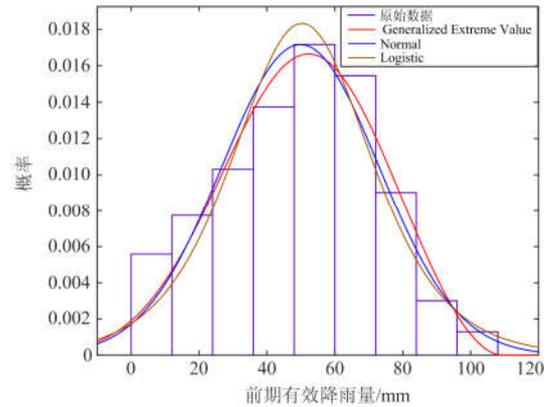


图 1 降雨诱发滑坡的概率密度曲线

Fig. 1 Probability density curve of rainfall-induced landslide

表 2 三种概率密度分布拟合结果

Table 2 Fitting results of three probability density distributions

概率分布函数	参数估计	极大似然估计值
Logistic 分布	$\mu=50.309\ 3$	$\ln L=-882.127$
	$\sigma=13.628\ 5$	$Mean=49.809\ 8$ $Var=524.509$
广义极值分布	$\zeta=-0.357\ 685$	$\ln L=-890.354$
	$v=42.528\ 2$	$Mean=50.309\ 3$
	$\delta=23.763\ 8$	$Var=611.049$
正态分布	$\alpha=49.872\ 4$	$\ln L=-884.886$
	$\beta=23.217\ 5$	$Mean=49.872\ 4$ $Var=539.053$

2 滑坡导致输电杆塔故障预警

前期降雨会引起研究区域的地质结构发生改变, 甚至引起滑坡体的快速位移。通过定期巡线后更新滑坡危险性等级指数, 以修正前期有效降雨量权重的方法, 存在时间滞后性问题。为此, 本文认为单次或某一季节性的降雨过程, 前期有效降雨量的权重不变, 通过引入位置监测来实时更新杆塔位置状态, 以弥补定期巡线判断杆塔所在位置地质构造变化的不足。

根据滑坡体与输电杆塔的位置关系, 滑坡对输电杆塔的影响可以分为两种情况: ① 输电杆塔位于滑坡体之上时, 一旦滑坡失稳, 输电杆塔失效概率为1; ② 输电杆塔不在滑坡体上, 但位于滑坡影响范围之内, 滑坡会对输电杆塔造成冲击破坏, 且处于不同的位置, 破坏程度也存在差异。因此, 本文将分两种情况来构建预警模型。

2.1 滑坡体上的输电杆塔故障预警

输电杆塔的危险性由处于滑坡体上的输电杆塔初始状态和前期有效降雨量两大因素决定, 故可使用“双因素”分级叠合法来进行量化, 即

$$F = F_R F_G \quad (6)$$

式中, F_R 、 F_G 分别为降雨影响因子和初始状态影响因子。

对指标进行量化分级是量化分析的前提。研究表明, 输电杆塔初始状态影响因子的量化分级可由输电杆塔的倾斜度和DL/T 741—2010《架空输电线路运行规程》中规定杆塔变形的划分等级共同确定。

在输电杆塔的关键位置布置北斗监测点, 如图2所示。同时, 还应在杆塔附近选取基准点, 由于RTK技术实现mm级监测要求基准站和监测点之间的距离小于30 km^[30], 故可在距离杆塔30 km内稳固的基岩上选取监测点, 并埋设相对塔基位置固定且稳定的观测墩, 以确保基准点的坐标固定不变。

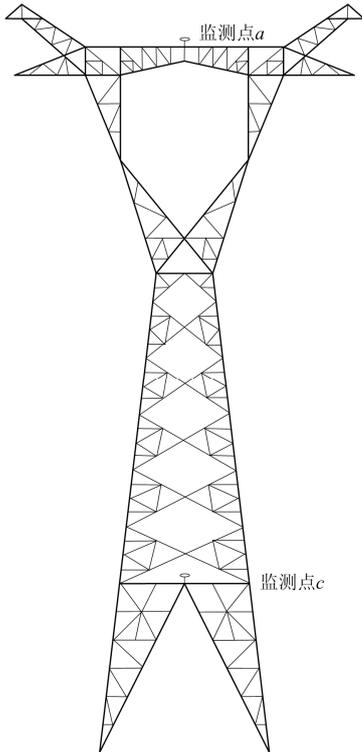


图2 输电杆塔监测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of transmission tower monitoring

通过RTK技术实时计算监测点的精确坐标, 实现输电杆塔在滑坡前期初始状态的监视; 对于输电杆塔倾斜度的计算, 可分为塔基座位置不变和塔基座位置变动两种情况, 具体如下。

1) 输电杆塔基座不变时

杆塔的水平偏移量为

$$\Delta S_{xoy} = \left[(x_{at} - x_{a0}) + (y_{at} - y_{a0}) \right]^2 \quad (7)$$

杆塔的竖直偏移量为

$$\Delta S_z = z_{at} - z_{a0} \quad (8)$$

杆塔的倾斜值为

$$\Delta S = \sqrt{(\Delta S_{xoy})^2 + (\Delta S_z)^2} \quad (9)$$

杆塔的倾斜度为

$$\alpha = \frac{\Delta S}{H} \times 100\% \quad (10)$$

式中: H 为观测点 a 与塔地面的高度; 监测点 a 在时刻 t_0 的位置坐标数据为 (x_{a0}, y_{a0}, z_{a0}) ; 在时刻 $t_0 + \Delta t$ 时的位置坐标数据为 (x_{at}, y_{at}, z_{at}) 。

2) 输电杆塔基座变动时

当输电杆塔基座变动时, 应当有效利用监测点 c (塔基中心点) 在不同时刻的位置信息。监测点 c 在时刻 t_0 的位置坐标数据 (x_{c0}, y_{c0}, z_{c0}) , 在时刻 $t_0 + \Delta t$ 时的位置坐标数据 (x_{ct}, y_{ct}, z_{ct}) , 故杆塔的水平偏移量为

$$\Delta S_{xoy} = \left\{ \left[(x_{at} - x_{a0}) - (x_{ct} - x_{c0}) \right]^2 + \left[(y_{at} - y_{a0}) - (y_{ct} - y_{c0}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

杆塔的竖直偏移量为

$$\Delta S_z = \left| (z_{at} - z_{a0}) - (z_{ct} - z_{c0}) \right| \quad (12)$$

将式(11)与式(12)代入式(9), 可以计算得到杆塔的倾斜值, 再利用式(10)计算杆塔的倾斜度。根据DL/T 741—2010《架空输电线路运行规程》中规定的输电杆塔倾斜限值: 高度为50 m以下的铁塔, 倾斜度 $\alpha \leq 1\%$; 50 m及以上的铁塔, 倾斜度 $\alpha \leq 0.5\%$ 。为准确刻画输电杆塔的初始状态, 将其倾斜度分为正常、预警和危险3个不同等级, 具体如表3所示, 并且针对3个不同的等级分别对 F_G 赋值为1、2和3。

在滑坡体上的输电杆塔初始状态确定的情况下, 滑坡的发生是由滑坡前累计有效降雨量和未来24 h的降雨量所决定的, 为了量化研究前期有效降雨量对滑坡的影响, 参照文献[9], 本文结合气象台发布的降雨预报, 基于概率论中 p -分位数的概念, 将累计滑坡概率达20%、40%、60%、80%时所对应的前期有效降雨量作为降雨等级划分的分位点,

降雨影响因子 F_R 的等级与对应的前期有效降雨量的范围如表 4 所示。

表 3 输电杆塔倾斜度监测范围

杆塔性质	倾斜度等级划分		
	正常	预警	危险
塔高小于 50 m, 塔基位置不变	$\alpha < 0.50\%$	$0.50\% \leq \alpha < 1.00\%$	$\alpha \geq 1.00\%$
塔高小于 50 m, 塔基位置变动	$\alpha < 0.40\%$	$0.40\% \leq \alpha < 0.80\%$	$\alpha \geq 0.80\%$
塔高超过 50 m, 塔基位置不变	$\alpha < 0.40\%$	$0.40\% \leq \alpha < 0.50\%$	$\alpha \geq 0.50\%$
塔高超过 50 m, 塔基位置变动	$\alpha < 0.35\%$	$0.35\% \leq \alpha < 0.45\%$	$\alpha \geq 0.45\%$

表 4 前期有效降雨量等级

前期有效降雨量/mm	F_R	前期有效降雨量/mm	F_R
[0, 31.42)	1	[55.83, 69.21)	4
[31.42, 44.78)	2	[69.21, +∞)	5
[44.78, 55.83]	3	—	—

在获取降雨影响因子 F_R 和初始状态影响因子 F_G 之后, 可根据式(6)计算滑坡的危险性指数, 划分输电杆塔危险性等级, 具体如表 5 所示。

表 5 输电杆塔故障预警等级

F (危险性指数)	0~3	4~6	7~9	10~12	13~15
故障预警等级	1	2	3	4	5

2.2 滑坡体下的输电杆塔故障预警

当输电杆塔不在滑坡体上, 但位于滑坡影响范围之内时, 滑坡动能逐步转化为受灾体的变形成能, 导致输电杆塔出现不可恢复的塑性变形, 最终导致整体破坏。本文将滑坡对输电杆塔的冲击作用简化为悬臂梁受水平推力的作用^[13], 在给定横向荷载作用下, 悬臂梁的变形成能表达式为

$$W_b = \frac{F^2 x_0^3}{6E_1} \quad (13)$$

依据能量守恒定律, 可得式(1)。

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{F^2 x_0^3}{6E_1} \quad (14)$$

式中: F 为冲击力, 单位为 N; v 为滑坡体到达输电杆塔的冲击速度, 单位为 m/s; x_0 为载荷作用点位置; m 为滑坡冲击体的质量, 单位为 kg; E_1 为输电杆塔的抗弯刚度, 单位为 $N^2 \cdot m^3$ 。

根据简化的滑坡动力学模型, 滑坡体的动能等于滑坡体重力势能减去坡面以及水平面摩擦力做的

功, 公式为

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh - \mu mg(h \cot \theta + y) \quad (15)$$

式中: h 为滑坡体高度, 单位为 m; μ 为坡面和水水平面的摩擦系数; θ 为坡角, 单位为($^\circ$); y 为坡脚距离, 单位为 m。

将式(15)代入式(14)即可求得滑坡体对输电杆塔的等效冲击力 F 为

$$F = \left\{ \frac{6EI[mgh - \mu mg(h \cot \theta + y)]}{x_0^3} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

由 DL/T 741—2010《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》计算输电杆塔抗弯刚度为

$$E_1 = 2ES \left(\frac{a}{2} \right)^2 \quad (17)$$

式中: E_1 为输电杆塔的抗弯刚度, 单位为 $N^2 \cdot m^3$; E 为输电杆塔主材的弹性模量, 单位为 GPa; S 为输电杆塔的水平截面积, 单位为 m^2 ; a 为荷载作用点输电杆塔的宽度, 单位为 m。而冲击体质量可根据滑坡堆积体的厚度来估算, 即

$$m = \rho a x_0^2 \quad (18)$$

式中, ρ 为滑坡土密度, 单位为 kg/m^3 。

本文采用输电杆塔的挠曲度作为控制指标, 基于悬臂梁简化法求取抗弯刚度为 E_1 的输电杆塔顶端挠曲度为 ω , 即

$$\omega = -\frac{F x_0^2}{6E_1} (3H - x_0) \quad (19)$$

代入 F 、 m 、 E_1 , 则输电杆塔顶端挠曲度可表示为

$$\omega = -x_0 (3H - x_0) \left\{ \frac{[\rho gh - \mu \rho g(h \cot \theta + y)] x_0}{3ESa} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

由式(20)可知, 输电杆塔的损毁程度与输电杆塔主材的弹性模量 E 、输电杆塔高度 H 、输电杆塔的水平截面积 S 、输电杆塔的宽度 a 、滑坡体高度 h 、滑坡土密度 ρ 、坡脚距离 y 、滑坡路径摩擦系数 μ 和堆积体厚度 x_0 等参数有关。其中, 滑坡路径摩擦系数 μ 和堆积体厚度 x_0 的随机性对输电杆塔顶部挠曲度的计算有较大影响。根据 μ 和 x_0 的参数分布情况, 使用蒙特卡洛模拟方法, 根据式(20)计算输电杆塔的挠曲度值 ω ; 假设 m 次模拟中有 n 次计算的挠曲度超过输电杆塔的最大挠曲度 ω_{\max} , 则输电杆塔受滑坡冲击而损毁的概率可表示为

$$p = P(\omega > \omega_{\max}) = \frac{n}{m} \quad (21)$$

基于输电杆塔受滑坡冲击而损毁的概率，本文依据表 6 对该指标进行量化分级，以表征滑坡体对输电杆塔损毁的差异性。

表 6 输电杆塔损毁差异性等级

Table 6 Differential classification of transmission tower damage

损毁概率	等级 F_T	损毁概率	等级 F_T
[0, 20%]	1	[60%, 80%)	4
[20%, 40%)	2	[80%, 100%]	5
[40%, 60%)	3	—	—

当输电杆塔不在滑坡体上，但位于滑坡影响范围之内时，输电杆塔的危险性指数由杆塔损毁差异性影响因子 F_T 和降雨影响因子 F_R 分级叠合确定，基于输电杆塔的危险性指数，可确定输电杆塔故障预警等级，具体如表 7 所示。

表 7 输电杆塔故障预警等级划分

Table 7 Classification of failure early warning level for transmission tower faults

危险性指数 F	0~5	6~10	11~15	16~20	20~25
故障预警等级	1	2	3	4	5

综上所述，根据滑坡体与杆塔的相对位置关系，可分别构建强降雨气象诱发滑坡灾害下输电杆塔的预警模型。当输电杆塔位于滑坡体之上，可使用降雨影响因子 F_R 和初始状态影响因子 F_G 分级叠合计算输电杆塔危险性指数，划分输电杆塔危险性等级；当输电杆塔不在滑坡体上，但位于滑坡影响范围之内，可使用降雨影响因子 F_R 和杆塔损毁差异性影响因子 F_T 分级叠合计算输电杆塔危险性指数，划分输电杆塔危险性等级。实现的流程图如图 3 所示。

3 算例分析

使用本文提出的强降雨气象诱发的滑坡灾害下输电杆塔的预警模型，对四川某地的输电杆塔进行实际测试。该地区的输电杆塔主材主要包括 Q345、Q235，其结构参数如表 8 所示。

其中，电网资料显示，1#~4#杆塔置于滑坡体上，5#~8#杆塔置于滑坡体下。

以该地某年 7 月 25 日的滑坡为例，根据气象台发布的降雨信息，该地区前 10 日的降雨量分别为 6.1、10.8、16.1、2.2、2.5、6.2、11.3、0、0、0 mm，气象台发布未来 24 h 的降雨量为 30.5 mm，由式(1)可知，前期有效降雨量为 60.44 mm，因此降雨影响因子 $F_R=4$ 。

表 8 输电杆塔结构参数

Table 8 Structural parameters of transmission towers

杆塔序号	型号	塔高/m	弹性模量/GPa	平均截面面积/m ²	平均宽度/m	最大挠曲度/m
1#—4#	Q235	45	206	9	3	0.30
5#—8#	Q345	48	200	10	3.5	0.35

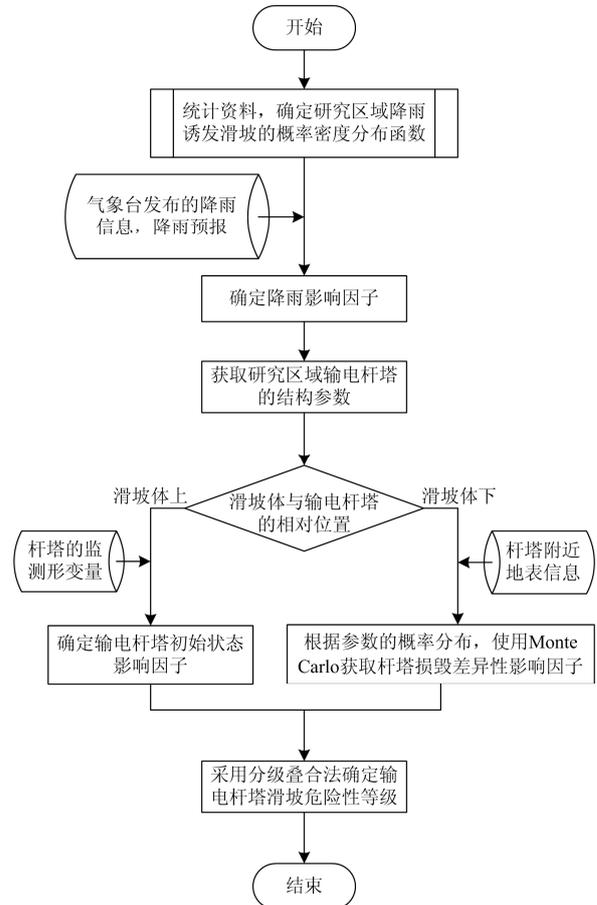


图 3 强降雨诱发输电杆塔滑坡预警流程图

Fig. 3 Flow chart for early warning of transmission tower landslide induced by heavy rainfall

1) 当输电杆塔位于滑坡体之上

在研究区域 1#—4#输电杆塔的关键位置布置北斗定位系统的监测站，如图 2 所示。基于北斗卫星提供的输电杆塔的变形监测数据，计算滑坡前期输电杆塔的初始倾斜度，实现输电杆塔初始状态的量化分级，结合降雨影响因子，依据式(6)，确定输电杆塔故障预警等级，具体结果如表 9 所示。

由表 9 可知，未来 24 h，1#—4#输电杆塔故障预警等级分别是 3、3、4、2，电网运维人员应对 3#杆塔进行加固维修等紧急处理，也要关注 1#和 2#输电杆塔的运行状态，确保强降雨过程输电杆塔正常运行。

2) 当杆塔位于滑坡影响范围之内

利用北斗卫星系统实现 5#—8#输电杆塔的准确定位, 并结合高分辨率遥感影像技术观测输电杆塔周围的地表信息, 包括地形地貌特征、岩土性质等参数, 并利用北斗短报文准确报送滑坡体与输电杆塔的相对高程差、坡脚距离、坡角等参数, 将上述地表信息进行整理, 如表(10)所示。

表 9 滑坡体上的杆塔故障预警等级计算结果

Table 9 Results of early warning level of tower failure on the landslide body

杆塔序号	监测类型	监测形变量/mm	F_G	F (危险性指数)	故障预警等级
1#	杆塔倾斜	8.1	2	8	3
2#	杆塔倾斜	5.8	2	8	3
3#	杆塔倾斜	10.3	3	12	4
4#	杆塔倾斜	4.1	1	4	2

表 10 输电杆塔周围的地表信息

Table 10 Surface information around transmission towers

杆塔序号	地形地貌	岩土性质	密度 kg/m^3	相对高程差/m	坡脚距离/m	倾斜角/(°)
5#	丘陵	黏土、碎石	2.72	22.34	10	13.22
6#	丘陵	黏土、碎石	2.72	43.26	8	14.88
7#	山地	块碎石堆积体	2.68	56.22	6	24.22
8#	山地	块碎石堆积体	2.68	40.36	14	23.66

据勘察可知, 以黏土、碎石为主的丘陵的滑坡路径摩擦系数 μ 服从均值 0.5、变异系数为 0.1 的正态分布, 堆积体厚度 x_0 服从均值为 3.5 m、变异系数为 0.1 的正态分布; 以块碎石堆积体为主的山地的滑坡路径摩擦系数 μ 服从均值 0.4、变异系数为 0.1 的正态分布, 堆积体厚度 x_0 服从均值为 4 m、变异系数为 0.2 的正态分布。

融合北斗卫星系统结合高分辨率遥感影像技术获取的数据, 经过 10 000 次 Monte Carlo 模拟, 可得到输电杆塔因降雨型滑坡影响而损毁的次数与概率, 进而实现输电杆塔损毁差异性的量化分级, 结合降雨影响因子, 确定输电杆塔的故障预警等级, 结果如表所示。

表 11 滑坡体下的杆塔故障预警等级计算结果

Table 11 Results of early warning level of tower failure below the landslide body

杆塔序号	损毁次数	损毁概率	F_R	F (危险性指数)	预警等级
5#	348	3.48%	1	4	1
6#	727	7.27%	1	4	1
7#	6 164	61.64%	4	16	4
8#	4 153	41.53%	3	12	3

由表 11 可知, 未来 24 h, 5#—8#杆塔的故障预警等级分别是 1、1、4、3, 电网运维人员应对 7#杆塔周围的滑坡隐患进行清理, 防止输电杆塔因降雨型滑坡故障, 引起电网停电, 也应关注 8#杆塔周围的滑坡险情, 掌握该区域滑坡状态变化趋势。

4 结论

针对降雨诱发输电杆塔滑坡灾害问题, 本文通过北斗卫星定位和数值天气预报等多源信息融合, 按照滑坡体与杆塔的相对位置关系, 分别构建了输电杆塔的风险预警方法; 通过算例测试对方法进行了验证, 并根据测试结果给出了相关建议。通过研究, 得出如下结论:

1) 将降雨诱发输电杆塔滑坡预警问题处理成降雨诱发滑坡和滑坡导致杆塔故障两个子问题, 提出滑坡影响因子的量化分级方法, 并基于双因素分级叠合法计算输电杆塔的危险性指数, 划分危险性等级, 过程清晰, 可操作性强。

2) 通过历史降雨量和预报降雨量构造前期有效降雨量, 并用 Logistic 概率分布函数描述有效降雨量诱发滑坡的概率密度函数, 既体现了降雨对滑坡的累积效果, 又体现了随机激发特性。

3) 依据滑坡体与输电杆塔的相对位置, 分别构建了滑坡导致输电杆塔故障模型, 弥补了现有输电杆塔预警模型单一的不足。使用北斗卫星定位监测并更新杆塔的状态以及融合北斗卫星观测杆塔周围的地表信息, 可有效地提高预警模型的准确性。

参考文献

- [1] 罗剑波, 郁琛, 谢云云, 等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 158-170.
LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 158-170.
- [2] 黄伟, 黄廷城, 王立勇, 等. 基于态势感知的电网台风预警防御框架研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 167-174.
HUANG Wei, HUANG Tingcheng, WANG Liyong, et al. Research on typhoon early warning and defense framework of power grid based on situation awareness[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 167-174.
- [3] 温铭生, 陈红旗, 张鸣之, 等. 四川茂县“6·24”特大滑坡特征与成因机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(3): 7-13.
WEN Mingsheng, CHEN Hongqi, ZHANG Mingzhi, et al.

- Characteristics and formation mechanism analysis of the "6-24" catastrophic landslide of the June 24 of 2017, at Maoxian, Sichuan[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(3): 7-13.
- [4] 郑光, 许强, 巨袁臻, 等. 2017年8月28日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(1): 223-240.
ZHENG Guang, XU Qiang, JU Yuanzhen, et al. The pusacun rock avalanche on August 28, 2017 in Zhangjiawan Nayongxian, Guizhou: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(1): 223-240.
- [5] 朱凌, 陈涛威, 周晨, 等. 考虑风速风向联合分布的大风灾害下电力断线倒塔概率预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 115-122.
ZHU Ling, CHEN Taowei, ZHOU Chen, et al. Probability prediction of transmission line breakage and tower topple over under wind disaster considering the joint distribution of wind speed and wind direction[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 115-122.
- [6] 郭子正, 殷坤龙, 唐扬, 等. 库水位下降及降雨作用下麻柳林滑坡稳定性评价与预测[J]. *地质科技情报*, 2017(4): 265-270, 275.
GUO Zizheng, YIN Kunlong, TANG Yang, et al. Stability evaluation and prediction of Maliulin landslide under reservoir water level decline and rainfall[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017(4): 265-270, 275.
- [7] XIA M, REN G, MA X, et al. Deformation and mechanism of landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall, Three Gorges, China[J]. *Natural Hazards*, 2013, 68(2): 467-482.
- [8] 李聪, 朱杰兵, 汪斌, 等. 滑坡不同变形阶段演化规律与变形速率预警判据研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1407-1414.
LI Cong, ZHU Jiebing, WANG Bin, et al. Critical deformation velocity of landslides in different deformation phases[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1407-1414.
- [9] 李哲, 梁允, 熊小伏, 等. 基于层次分析法的输电线路塔基降雨滑坡预警方法[J]. *智能电网*, 2014, 2(9): 29-33.
LI Zhe, LIANG Yun, XIONG Xiaofu, et al. A rainfall caused landslide early-warning method for transmission line tower based on analytic hierarchy process[J]. *Smart Grid*, 2014, 2(9): 29-33.
- [10] 李环禹, 陈朝晖, 范文亮, 等. 区域降雨型滑坡风险分析统计模型研究[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(4): 103-111.
LI Huanyu, CHEN Zhaohui, FAN Wenliang, et al. The statistical risk analysis model of rainfall-induced landslide in large areas[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(4): 103-111.
- [11] 徐则民, 梅雪峰, 王礼荣, 等. 滑坡预警中的降水时空变异性——以云南头寨沟为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(1): 154-162.
XU Zemin, MEI Xuefeng, WANG Lirong, et al. Precipitation temporal and variability of landslide early warning research: a case study on Touzhai Gully in Yunnan Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(1): 154-162.
- [12] IRINA K, GOGA C. The forecast of stability of the landslide slope existing in the River Gldaniskhevi Valley, Three Gorges, China[J]. *Annals of Agrarian Science*, 2018, 16(3): 321-323.
- [13] 唐红梅, 魏来, 高阳华, 等. 基于逻辑回归的重庆地区降雨型滑坡预报模型[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(3): 32-37.
TANG Hongmei, WEI Lai, GAO Yanghua, et al. A prediction model for rainfall-induced landslide based on logistic regression in Chongqing area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(3): 32-37.
- [14] 刘艳辉, 刘丽楠. 基于诱发机理的降雨型滑坡预警研究——以花岗岩风化壳二元结构斜坡为例[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(4): 542-549.
LIU Yanhui, LIU Linan. Rainfall-induced mechanism based early warning model for slopes of dualistic layers in weathered granitic area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(4): 542-549.
- [15] 邓创, 刘友波, 刘俊勇, 等. 考虑降雨诱发次生地质灾害的电网风险评估方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3825-3834.
DENG Chuang, LIU Youbo, LIU Junyong, et al. A risk assessment method of power grid considering secondary geological hazards caused by rainfall weather[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3825-3834.
- [16] 司鹤, 张艳艳, 李伟, 等. 滑坡灾害输电塔易损性评估模型[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2015(3): 382-385.
SI Hu, ZHANG Yanyan, LI Wei, et al. Vulnerability evaluation model of landslide hazard to transmission towers[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2015(3): 382-385.
- [17] 翟成林, 司鹤, 胡凌, 等. 基于滑坡灾害输电网的预警模型[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(1): 223-229.
ZHAI Chenglin, SI Hu, HU Ling, et al. Early warning

- model for the power transmission network in reference to the landslide disaster forecast[J]. *Journal of Safety & Environment*, 2018, 18(1): 223-229.
- [18] 任堂正, 杨俊杰, 楼志斌, 等. 基于 ZigBee 的覆冰区杆塔倾斜在线监测系统[J]. *电测与仪表*, 2016, 53(23): 122-128.
- REN Tangzheng, YANG Junjie, LOU Zhibin, et al. Design of online monitoring system of icing region tower tilt based on ZigBee[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(23): 122-128.
- [19] 陈新岗, 陈果, 李松, 等. 基于 LabVIEW 的孤堡输电杆塔基础偏移监测研究[J]. *计算机工程与科学*, 2015, 37(05): 1024-1030.
- CHEN Xingang, CHEN Guo, LI Song, et al. Research on real-time skewing monitoring of slope transmission towers based on LabVIEW[J]. *Computer Engineering & Science*, 2015, 37(5): 1024-1030.
- [20] KIJEWski-CORREA T, KOCHLY M. Monitoring the wind-induced response of tall buildings: GPS performance and the issue of multipath effects[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(9-11): 1176-1198.
- [21] MA P, LIN H, LAN H, et al. Multi-dimensional SAR tomography for monitoring the deformation of newly built concrete buildings[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 106: 118-128.
- [22] 高绍伟, 李长青, 郑阔, 等. 北斗与其他星座在 GNSS 变形监控系统中的数据对比分析[J]. *测绘通报*, 2017(4): 21-24, 43.
- GAO Shaowei, LI Changqing, ZHENG Kuo, et al. Bei Dou with other constellations in GNSS data comparison and analysis of deformation monitoring system[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(4): 21-24, 43.
- [23] BENOIT L, BRIOLE P, MARTIN O, et al. Monitoring landslide displacements with the Geocube wireless network of low-cost GPS[J]. *Engineering Geology*, 2015, 195: 111-121.
- [24] 余加勇, 邵旭东, 晏班夫, 等. 基于全球导航卫星系统的桥梁健康监测方法研究进展[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(4): 30-41.
- YU Jiayong, SHAO Xudong, YAN Banfu, et al. Research and development on global navigation satellite system technology for bridge health monitoring[J]. *China Journal of Highway & Transport*, 2016, 29(4): 30-41.
- [25] XI R, JIANG W, MENG X, et al. Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques[J]. *Measurement*, 2018, 120: 128-139.
- [26] 杨新文, 王燕. 北斗三频消电离层伪距差分定位及其精度分析[J]. *测绘通报*, 2016(7): 70-72.
- YANG Xinwen, WANG Yan. Differential positioning using BDS triple-frequency ionosphere-free pseudorange observations and its accuracy analysis[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(7): 70-72.
- [27] 邓召魁, 吕玉祥, 高存博, 等. 基于北斗卫星的输电杆塔在线监测系统[J]. *现代电子技术*, 2016, 39(10): 162-166.
- DENG Zhaokui, LÜ Yuxiang, GAO Cunbo, et al. Beidou satellite based online monitoring system for power transmission tower[J]. *Modern Electronics Technique*, 2016, 39(10): 162-166.
- [28] 田山刚二. 滑坡和斜坡崩塌及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [29] 马力, 游扬声, 缪启龙. 强降雨诱发山体滑坡预报[J]. *山地学报*, 2008, 26(5): 583-589.
- MA Li, YOU Yangsheng, MIU Qilong. The research of landslip forecast reduced by strong precipitation[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(5): 583-589.
- [30] 王阅兵, 甘卫军, 陈为涛, 等. 北斗导航系统精密单点定位在地壳运动监测中的应用分析[J]. *测绘学报*, 2018, 47(1): 48-56.
- WANG Yuebing, GAN Weijun, CHEN Weitao, et al. The analysis of precise point positioning of BeiDou navigation satellite system application in crustal motion monitoring[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2018, 47(1): 48-56.

收稿日期: 2019-03-06; 修回日期: 2019-07-09

作者简介:

陈强(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: chenqiangzxy@foxmail.com

王建(1986—), 男, 通信作者, 博士(后), 讲师, 硕士生导师, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警, 电力系统保护与控制; E-mail: wangrelay@foxmail.com

熊小伏(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制, 新能源并网故障分析, 电网风险评估与气象灾害. E-mail: cqxxxf@vip.sina.com

(编辑 周金梅)