

邻近公路输电铁塔边坡定量风险评估

杨兴¹, 詹晓强^{2,3}, 王浩^{2,3}, 陈伟东¹, 唐光辉¹

(1. 中国南方电网公司深圳供电局有限公司输电管理所, 深圳 518020;

2. 福州大学 环境与资源学院, 福州 350116; 3. 地质工程福建省高校工程研究中心, 福州 350116)

摘要: [目的]为了定量计算输电线路铁塔边坡风险, 采取合理手段管理铁塔边坡, 保证架空输电线路安全平稳运行。[方法]以深圳某铁塔边坡为研究对象, 根据边坡风险评估框架体系, 通过边坡破坏概率分析、危险性分析和危害后果分析, 结合边坡周边环境条件, 定量计算由于边坡变形破坏可能造成的直接经济损失。[结果]通过边坡定量风险评估, 即使在安全系数满足规范前提下, 边坡仍然具有4.75%的破坏概率, 财产损失的风险评估值为17.4万元。[结论]提出并例证了一套输电铁塔定量风险评估方法, 评估结果可为输电线路铁塔边坡运营维护部门提供参考价值。

关键词: 边坡风险管理; 风险定量评估; 破坏概率; 易损性; 危害后果

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)S1-0135-05

Quantitative Risk Assessment of Slope of Neighboring Highway Transmission Tower

YANG Xing¹, ZHAN Xiaoqiang^{2,3}, WANG Hao^{2,3}, CHEN Weidong¹, TANG Guanghui¹

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Limited Company Transmission Management Institute, Shenzhen 518020, China;

2. Department of Geotechnical and Geological engineering, School of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Geological Engineering Research Center, Fujian Provincial University, Fuzhou, 350116, China)

Abstract: [Introduction] In order to quantitatively calculate the risk of transmission line tower slope, reasonable measures are taken to manage the tower slope to ensure the safe and stable operation of overhead transmission lines. [Method] Taking a tower slope in Shenzhen as the research object, according to the framework system of slope risk assessment, the direct economic losses caused by slope deformation and failure can be quantitatively calculated through slope failure probability analysis, risk analysis and hazard consequence analysis, combined with the surrounding environmental conditions of the slope. [Result] Through quantitative risk assessment of slope, even if the safety factor satisfies the criterion, the slope still has a failure probability of 4.75%, and the risk assessment value of property loss is 174 000 yuan. [Conclusion] This paper presents and exemplifies a set of quantitative risk assessment methods for transmission tower. The assessment results can provide reference value for the operation and maintenance department of transmission tower slope.

Key words: slope risk management; quantitative risk assessment; failure probability; vulnerability; hazardous consequence

架空输电线路作为输送电能的重要载体, 它的安全稳定运行直接关系到人民的生活、生产活动, 社会稳定和国家经济发展。山区架空输电线路由于其地形条件限制, 复杂的工程地质条件, 在自然条

件和人类活动影响下, 输电线路铁塔容易遭受滑坡等地质灾害的影响^[1-2]。因此, 开展输电铁塔边坡风险评估刻不容缓。

目前国内外没有专门针对输电铁塔边坡进行风险评估的研究, 但是在滑坡风险评估及管理的研究工作已经开展30余年了, 已经形成了较完善的风险评估技术方法。国际上通用的滑坡风险评估及管理理论框架是2005年温哥华滑坡风险管理国际会

收稿日期: 2019-01-04 修回日期: 2019-06-03

基金项目: 中国南方电网公司科技项目(090000KK52160020), 福建省自然科学基金(2018J01746)

议提出的滑坡风险管理理论框架^[3]；国内如殷坤龙、张桂荣和陈丽霞等在上述研究基础上进行包括风险概念、风险识别、风险估算、风险评价和风险管理的研 究^[4]。无论是定性、半定量或定量风险评估方面，都取得了一定的研究成果，如张雷等^[5]，梁涛等^[6]，吴忠广等^[7]等都以定性或半定量方法对公路边坡风险进行定量计算。同时在 2015 年交通运输部出版了《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险 评估指南(试行)》，其中就包含了一套定性评估高速公路施工期边坡风险的计算方法。

本文以王浩等^[8]提出的边坡风险管理框架为基础，以深圳市某铁塔边坡为例，根据该边坡工程地质条件和周边环境条件，从危险性，边坡破坏概率和危害后果方面进行分析，得到各建构筑物的空间概率、时空概率和易损性，对该边坡进行定量风险评估。

1 边坡工程概况

1.1 输电铁塔工程概况

5DYB29 塔位于深圳市龙岗区横岗镇横坪公路铜锣径大桥东桥头南侧山坡上。场地地貌为丘陵地貌，输电铁塔位于丘坡腰部位置，坡面南高北低，综合坡度为 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ，局部达到 45° 。铁塔 I、II 腿高，III、IV 腿低，I、II 腿距离山顶约 10 m。I、II 腿南侧约 5 m 位置存在天然气和石油管道的平底 V 型沟槽，开挖深度约 3 m，宽度约 6 m；III、IV 腿下部(自然斜坡坡脚处)由于修建道路开挖形成边坡。铁塔自然斜坡表面土层为粉质粘土，目前尚无支护，塔位上方位置有少量堆土。除塔基正下方外，山坡其他表面植被覆盖较好。根据现场地质调查情况，未在塔位周边发现滑坡、崩塌和泥石流等不良地质作用。

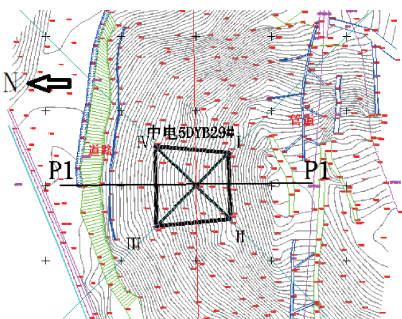


图 1 5DYB29 塔平面及剖面位置

Fig. 1 Plane and profile location of 5DYB29 tower

1.2 边坡工程地质条件

根据工程地质调查和勘探成果，场地岩土层较简单，边坡上覆坡积粉质粘土层，残积成因砂质粘性土层；下伏基岩为燕山期第三期黑云母花岗岩，钻孔揭露依次为全风化、强风化、中风化和微风化。场地地表水不发育，地下水埋藏较深，主要为赋存于风化带内的孔隙水和基岩裂隙水，详细工程地质模型如图 2 所示。

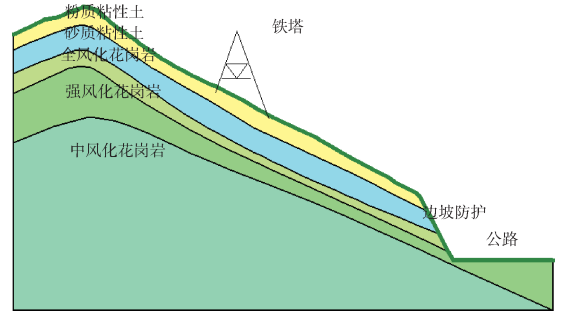


图 2 工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological profile

1.3 公路边坡工程概况

自然斜坡坡脚由于修建道路，形成最高 10 m，长 160 m，坡率约 50° 的人工边坡。边坡采用浆砌挡墙加锚杆进行加固，坡面使用水泥浆进行护面处理，加固设施总体运行良好。边坡顶部设置有排水沟，坡体布置有泄水孔，其中部分泄水孔堵塞，坡面防护局部破损，挡土墙顶部岩土体部分出现崩塌。



图 3 公路边坡支护概况

Fig. 3 Overview of highway slope support

2 输电铁塔边坡风险评估技术方案

边坡风险评估及管理由风险分析、风险评估和风险管理构成。参照王浩等^[8]提出的边坡风险管理框架，结合铁塔边坡工程特点，提出适合输电线路

铁塔边坡风险评估技术框架, 如图 4 所示。其中先定义风险分析范围, 重点就是分析对象的识别, 规划整个风险评估技术方法等; 危险性分析就是进行边坡灾害特征描述并进行边坡破坏概率分析; 危害后果分析就是对边坡变形破坏后果特征进行描述, 并进行概率分析及其财产、生命分析等。基于上述分析, 最终得出边坡的最终风险。

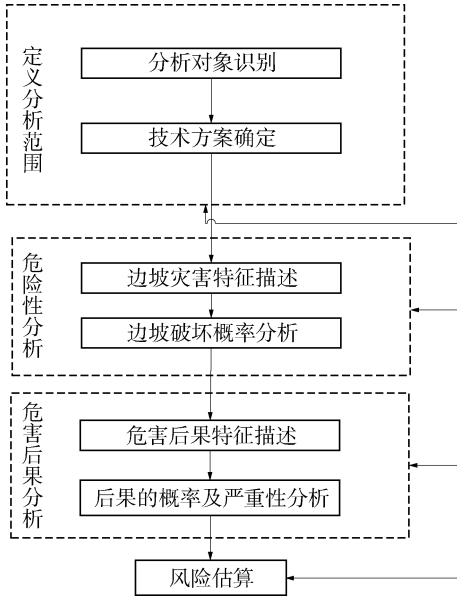


图 4 边坡风险评估技术框架

Fig. 4 Technical framework for slope risk assessment

3 输电铁塔边坡危险性分析

3.1 边坡失稳及成灾模式

根据岩土工程勘测与试验成果, 结合地区规范与工程经验, 选取合适的岩土体物理力学指标参数, 如表 1 所示, 并且根据钻孔揭露的地层厚度, 选取综合条件最不利剖面 P1 - P1 (人工边坡高度最高, 自然斜坡坡度较陡), 建立边坡工程地质剖面图, 如图 2 所示。运用 GeoStudio 软件采用极限平衡分析法对该铁塔边坡进行稳定性分析, 其中各岩土体采用摩尔库伦强度准则, 中等风化花岗岩设为基岩, 分析详细结果如图 5 所示, 其计算所得的安全系数为 1.463 满足国标允许值 1.35。

结合长期的输电铁塔边坡的运维管理工作经验, 夏季汛期是铁塔边坡病害频发的时刻, 威胁着输电线路安全运行; 同时, 降雨又是滑坡灾害的重要诱发因素, 加之现场人工边坡部分泄水孔淤塞, 部分坡面出现坍塌、水土流失等病害。铁塔边坡有

可能由于降雨而导致地下水位抬升, 坡体内水来不及排出影响孔隙水压力, 加之岩土体物理力学参数的离散性和部分岩土体遇水强度参数变差, 从而造成边坡破坏, 产生较大的损失。

表 1 边坡岩土体物理力学参数取值表

Tab. 1 Table of physical and mechanical parameters of slope rock and soil

岩土名称	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	C/kPa	$\Phi / (^{\circ})$
粉质粘土	16.5	17	22
砂质粘土	17.5	18	24
全风化花岗岩	19.5	22	29
强风化花岗岩	20.5	25	34

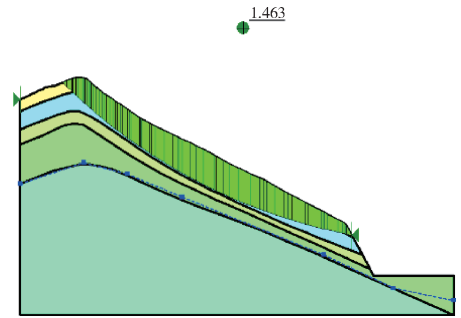


图 5 边坡 5 极限平衡下计算结果

Fig. 5 Calculation results under limit equilibrium of slope

3.2 铁塔边坡破坏概率分析

通过现场的标准贯入试验、轻型动力触探试验和室内的土工试验, 发现场地岩土体物理力学参数存在较大的离散性。实际工作中, 安全系数较高的边坡也会发生滑动破坏, 考虑岩土体物理力学参数的不确定性, 运用 GeoStudio 软件中的蒙特卡洛模拟法结合极限平衡分析法进行边坡破坏概率分析, 其中蒙特卡洛模拟次数取 2 000 次, 具体参数如表 2 所示。

表 2 概率分析岩土体参数表

Tab. 2 Probability analysis of geotechnical parameter table

岩土名称		粉质粘土	砂质粘土	全风化花岗岩	强风化花岗岩
		$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	均值	16.5	17.5
C/kPa	均值	17	18	22	25
	标准差	5	5	5	5
$\Phi / (^{\circ})$	均值	22	24	29	34
	标准差	5	5	5	5

按上述思路, 对该边坡进行考虑岩土体参数不

确定性的概率分析, 计算得到边坡平均安全系数为 1.432, 可靠性指数为 1.64, 失效概率为 4.75%, 详细结果如图 6 所示。

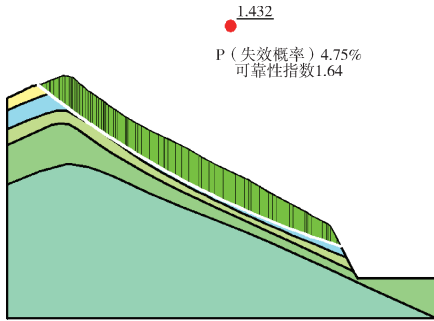


图 6 边坡概率分析计算结果

Fig. 6 Calculation results of slope probability analysis

4 输电铁塔边坡危害后果分析

4.1 铁塔边坡危害后果分析

王浩等人^[8]将承灾体分为固定型、临时型、流动型和衍生型四种。根据现场调查发现, 固定型承灾体为输电铁塔, 人工边坡防护结构和混凝土公路; 流动型承灾体为公路行车及车上人员, 本论文只针对固定型承灾体进行定量计算。

目前对危害后果分析通常分为: 灾害到达承灾体的空间概率 $P_{T,L}$ 、承灾体的时空概率 $P_{S,T}$, 及承灾体的易损性 V 。其中空间概率 $P_{T,L}$ 取决于滑体同承灾体之间的空间位置关系及滑体的可能运动轨迹; 承灾体的时空概率 $P_{S,T}$ 取决于承灾体的类型, 对于固定型通常取 1; 易损性 V 为承灾体的抗灾能力属性。

结合前人的相关研究工作(殷坤龙^[4]等人; 唐亚明^[9]等人), 得到各个固定型承灾体空间概率、时空概率和易损性取值如表 3 所示。输电铁塔处于斜坡破坏范围之内, 故 $P_{T,L}$ 和 $P_{S,T}$ 均取 1, 易损性 V 为 0.5; 公路边坡防护结构和公路为钢筋混凝土结构和沥青混凝土结构, $P_{T,L}$ 取 1, 易损性 V 为 0.7。

表 3 各承灾体概率取值

Tab. 3 Probability value of disaster-bearing bodies

承灾体	结构类型	$P_{T,L}$	$P_{S,T}$	V
输电铁塔	钢结构	1	1	0.5
公路边坡防护结构	钢筋混凝土结构	1	1	0.7
公路	沥青混凝土结构	1	1	0.7

4.2 铁塔边坡经济损失估算

1) 输电铁塔经济损失 E_{11}

针对输电铁塔, 由边坡引起的经济损失包括直接经济损失和间接经济损失, 直接经济损失为输电铁塔、电缆线和基础设施等损失, 间接损失为由输电铁塔倒塌造成供电中断的间接经济损失。

按地区经验, 取铁塔综合造价为 200 万元, 则输电铁塔经济损失 $E_{11} = 200$ 万元。

2) 公路边坡防护结构 E_{12}

该段人工边坡防护长度为 160 m, 拟定铁塔斜坡变形破坏影响范围为 160 m。边坡防护工程主要包括: 挖方工程、支挡工程和防护工程, 根据调查获得其综合造价为 80 万元。因此, $E_{12} = 80$ 万元。

3) 公路路基及路面 E_{13}

铁塔斜坡变形破坏影响区段公路长为 160 m, 公路工程包含路基工程和路面工程, 根据调查获得其路基工程每延米造价约为 1.2 万元, 路面工程约为 0.68 万元, 故公路直接损失 $E_{13} = 300.8$ 万元。

因此, 该斜坡变形破坏的直接经济损失 $E_1 = E_{11} + E_{12} + E_{13} = 580.8$ 万元。

5 边坡风险的定量估算与评价

5.1 边坡风险的定量估算

边坡风险的定量估算是基于边坡破坏概率的分析, 并同边坡危险性分析、危害后果分析中的所得的空间概率、时空概率和易损性等相乘, 得到各承灾体最终风险。其中财产损失风险如式所示:

$$R = P_L \times P_{T,L} \times P_{S,T} \times V \times E \quad (1)$$

式中: P_L 为边坡破坏概率; $P_{T,L}$ 为灾害到达承灾体的空间概率; $P_{S,T}$ 为承灾体的时空概率; V 为承灾体的易损性; E 为承灾体的财产价值。

将各承灾体直接和间接经济损失相加, 按公式 1 计算, 详细计算结果如表 4 所示, 各个承灾体计算求和得到铁塔边坡的最终财产损失风险为 $R = 17.4$ 万元。

表 4 财产损失风险评估值

Tab. 4 Assessment Value of Property Loss Risk

承灾体	P_L	$P_{T,L}$	$P_{S,T}$	V	$E/\text{万元}$	$R/\text{万元}$
输电铁塔	4.75%	1	1	0.5	200	4.75
公路边坡防护结构	4.75%	1	1	0.7	80	2.66
公路	4.75%	1	1	0.7	300.8	10.0016
求和	—	—	—	—	580.8	17.4116

5.2 边坡风险评价

通过对该边坡进行风险的定量估算, 得到其在

符合国标规范的安全系数下, 仍然存在 4.75% 的破坏概率, 造成 580.8 万元的直接经济损失。关于边坡破坏概率目前国内研究的较少, Priest 等人^[10]通过研究, 认为可接受概率在 5% ~ 10%。对于工程应用, 应综合考虑边坡破坏概率、斜坡变形破坏后果及其加固费用等。在边坡破坏概率较大的情况下, 可进行斜坡破坏后果与加固费用的效益分析; 原则上在其比值大于 1 时, 则认为加固具有一定经济效益。

因此, 针对文中存在重要构筑物的斜坡, 在破坏概率接近 5% 时, 由于其造成较大的直接经济损失; 在坡脚已经进行一定开挖量的前提下, 对其应该加以重点关注, 若边坡出现进一步变形破坏迹象, 则应该进行加固治理。结合场区的气候背景及其降雨的重要诱发因素, 可针对该边坡设置长期的地下水水位监测孔, 以掌握地下水动态变化; 同时在日常养护中, 应该重视边坡的病害, 如局部水土流失、坍塌等, 及时处理, 降低边坡破坏的概率。最后, 应该制定合理可行的抢险应急预案, 在灾害发生后, 采取合适的行动, 将损失降到最低。

6 结论

本文以深圳市某铁塔边坡为例, 根据极限平衡分析法并结合蒙特卡洛模拟, 分析了该铁塔边坡稳定性, 得到了即使在安全系数满足规范要求下, 该边坡仍然存在 4.75% 的破坏概率; 同时根据边坡风险评估理论, 给出了一套邻近公路输电铁塔边坡定量风险评估方法; 运用该方法对该铁塔边坡进行定量风险评估, 得到边坡变形破坏可能产生的直接经济损失为 580.8 万元, 财产损失风险为 17.4 万元。该方法计算得到的直接经济损失与加固治理费比较, 可为做出加固边坡还是迁移铁塔等决策提供重要参考依据。

参考文献:

- [1] 胡金政, 张洁, 陈宏智, 等. 基于随机场理论的强降雨条件下花岗岩残积土边坡的稳定性分析 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(3): 107-114.
HU J Z, ZHANG J, CHEN H Z, et al. Stability of completely decomposed granite slopes under intense rainfall infiltration based on the random field theory [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(3): 107-114.
- [2] 任双赞, 李力, 蒲路, 等. 气象灾害信息在输电线路运行维护中的应用分析 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(3):

141-144.

REN S Z, LI L, PU L, et al. Application and analysis of meteorological disaster information on the operation and maintenance of transmission line [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(3): 141-144.

- [3] HUNGR O, FELL R, COUTURE R, et al. Landslide risk management: proceedings of the international conference on landslide risk management [R]. Vancouver, Canada: [s. n.], 2005.
- [4] 殷坤龙. 滑坡灾害风险分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
YIN K L. Landslide risk analysis [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [5] 张雷, 顾文红, 王晓雪, 等. 高等级公路边坡工程风险因子识别及评估 [J]. 地下空间与工程学报, 2007(增刊 1): 1265-1268 + 1273.
ZHANG L, GU W H, WANG X X, et al. Risk factors identification and evaluation for slopes in highway engineering [J]. Chinese Journal of Under-ground Space and Engineering, 2007 (Supp. 1): 1265-1268 + 1273.
- [6] 梁涛, 王浩, 泮俊, 等. 公路边坡风险评估软件 RASlope 的研发与应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 62-70.
LIANG T, WANG H, PAN J, et al. Development and application of software RASlope for high-way slope risk assessment [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 62-70.
- [7] 吴忠广, 申瑞君, 万福茂, 等. 岩质高边坡运营安全风险源辨识方法 [J]. 公路交通科技, 2018, 35(3): 8-15 + 27.
- [8] 王浩, 豆红强, 谢永宁, 等. 路堑边坡全寿命周期风险评估及管理的技术框架 [J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3505-3516.
- [9] 唐亚明, 冯卫, 李政国, 等. 滑坡风险管理综述 [J]. 灾害学, 2015, 30(1): 141-149.
- [10] PRIEST SD, BROWN ET. Probabilistic stability analysis of variable rock slopes [J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 1983 (92): 1-12.

作者简介:



YANG X

杨兴

1973-, 男, 贵州安顺人, 工程师, 学士, 主要从事输电线路运维工作 (e-mail) yangxing@sz. csq. cn。

(责任编辑 李辉)