

# 滑坡对输电线路的危害及防治措施

于强<sup>1</sup>, 郭艳军<sup>1</sup>, 包涛<sup>1</sup>, 刘泉<sup>2</sup>, 刘福海<sup>2</sup>

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610041;

2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:**滑坡是输电线路最常见的灾害之一,具有严重的危害性。文中针对滑坡对输电线路的危害以及防治措施进行了研究。首先,从自然因素和人为因素分析了输电线路滑坡诱因;然后,根据实际工程经验分别阐述了滑坡灾害对输电铁塔和基础不利影响的分析方法,并归纳总结了输电线路设计时预防滑坡灾害的工程措施;最后,分析了抗滑桩和桩板挡墙、锚杆(索)格构梁、重力式挡墙、微型桩等输电线路工程中几种常见滑坡治理方法的优劣,为输电线路滑坡灾害的预防和治理提供借鉴。

**关键词:**输电线路; 滑坡; 灾害分析; 防治措施

**中图分类号:** TM 726 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)01-0006-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230102

## Landslide Hazard to Transmission Line and Its Prevention and Treatment Measures

YU Qiang<sup>1</sup>, GUO Yanjun<sup>1</sup>, BAO Tao<sup>1</sup>, LIU Quan<sup>2</sup>, LIU Fuhai<sup>2</sup>

(1. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** Landslide is one of the most common disasters in transmission lines and has serious harmfulness. In order to study the harm of landslides to transmission lines and its prevention and control measures, firstly the landslide inducing factors of transmission lines are analyzed, which are mainly divided into natural factors and human factors. Then according to the practical engineering experiences, the adverse effect of landslide disaster to transmission towers and foundations is described respectively, and the engineering measures in transmission line design to prevent landslide disaster are summarized. Finally, several common landslide treatment methods in transmission line engineering such as the anti-slide pile and pile retaining wall, anchor rod (rope) lattice beam, gravity retaining wall and micro pile etc, are introduced. The research results will provide experiences for the prevention and treatment of landslide disaster in transmission lines in the future.

**Key words:** transmission line; landslide; hazard analysis; prevention and treatment measures

## 0 引言

随着经济的迅速发展和社会电力需求的不断增加,中国电网建设蓬勃发展。然而,输电线路途经区域气候条件变化多端,地质地形条件复杂,容易遭受到大风、覆冰、滑坡、泥石流、滚石、崩塌、地震等自然灾害的影响,输电线路的安全运行受到严重威胁<sup>[1-2]</sup>。据统计,电力系统75%的事故由地质气象

灾害所造成<sup>[3]</sup>。

滑坡是输电线路最常见的灾害之一,根据中国电力科学研究院有限公司统计的2018—2021年输电线路地质灾害隐患点排查结果,滑坡灾害占25%左右<sup>[4]</sup>。滑坡会引起输电线路铁塔和基础的破坏,导致线路停运供电中断,造成巨大损失。已有众多研究人员对输电线路滑坡灾害开展了相关的研究工作<sup>[5-7]</sup>,但是主要集中在滑坡灾害风险评估研究方面,缺少输电线路滑坡灾害实际工程防治方面的研

究工作。

下面从工程实际经验出发,分析输电线路滑坡的诱发因素,阐述滑坡灾害对铁塔和基础的影响分析方法,总结归纳滑坡灾害预防措施和治理措施,为输电线路滑坡灾害防治提供实践经验借鉴。

## 1 滑坡灾害诱因

滑坡是指斜坡上的岩土体层,受雨水冲刷、浸泡、地震、坡体堆载以及人工切坡等因素影响,在重力作用下沿着软弱面顺坡向下滑动的现象。输电线路滑坡灾害的诱发因素主要分为自然因素(降雨、水流冲刷、浸泡、地震)和人为因素(坡体堆载、人工切坡、爆破等)。

大部分滑坡是在降雨、水流冲刷、浸泡、地震等自然条件下发生的,其中暴雨和长时间连续降雨是产生滑坡最主要的因素<sup>[4]</sup>。结构松散的岩土体斜坡,受降雨、地震等因素的影响使边坡的稳定性在短时间内发生明显变化,最终导致坡体失稳诱发滑坡。这类滑坡可以归为自然诱发型滑坡,例如图1所示。



图1 降雨诱发滑坡

坡体堆载也是诱发输电线路滑坡灾害的常见因素。输电线路基础施工时,基坑开挖施工弃土,一般有塔基摊平堆放和外运综合利用两种处理方式。对于地形坡度较陡而弃土需要外运的塔位,施工单位往往直接将弃土向塔位下方倾倒(如图2所示),导致松散堆积岩土体沿基岩面的下滑力明显增大,改变了原来边坡的应力状态,且松散岩土体导致渗入地下的降水增多,在降雨冲刷浸泡作用下诱发滑坡。这类滑坡可称之为坡体堆载诱发型滑坡。



图2 施工弃土堆载诱发滑坡

人工切坡容易造成开挖坡脚应力集中,造成坡体地下水渗流场改变,使边坡稳定性进一步下降,引起坡体的抗滑力减弱,边坡的变形破坏从坡脚开挖面附近开始逐渐向坡体的上部发展,最终导致整体滑动。输电线路塔基应地形坡度较陡峭,需要开方降基或者开挖施工平台,这也是属于人工切坡范畴,易引发滑坡。这类滑坡可称之为人工切坡诱发型滑坡,如图3所示。

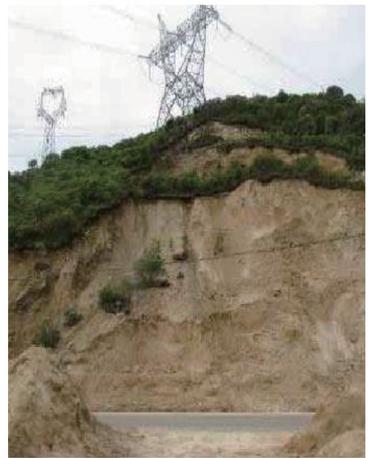


图3 公路切坡诱发滑坡

滑坡发生后,首先要对滑坡产生的原因进行分析,为下一阶段滑坡灾害评估和滑坡治理提供依据。滑坡原因分析主要有以下方面:

1) 滑坡现状和滑坡类型特征调查。要掌握滑坡的类型,从理论上分析滑坡的基本特征,调查滑坡的现状,包括滑坡范围、滑坡体厚度、滑坡与塔基的距离、滑坡裂缝等情况。

2) 滑坡区域地质、地形勘察。采用专业的地质勘探手段,查明滑坡区域地质、地形条件,包括滑坡范围地形坡度、覆盖层厚度、滑动面深度等条件。

3) 收集近期区域内的降雨情况, 调查了解是否有地震等其他自然因素诱发滑坡的可能性。

4) 调查是否存在人为活动诱发滑坡, 包括修筑道路路脚开挖、弃土堆载、爆破、挖矿等活动。

5) 滑坡发展变化趋势分析。分析滑坡是否仍在不断发展过程中, 是否危及塔位安全。如滑坡边界条件继续恶化滑坡危及塔位, 应尽早采取人工干预措施, 保证塔基安全。

6) 滑坡稳定性分析。根据现场调查结果、施工图勘察资料及测绘数据, 运用专业边坡分析软件, 对滑坡稳定性进行定量计算分析, 如图 4 所示, 得到场地稳定性结论。

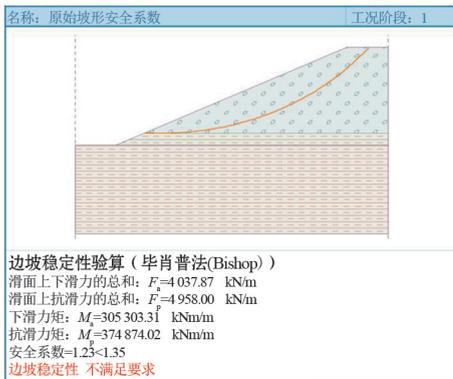


图 4 某塔位滑坡区域稳定性分析

## 2 滑坡灾害影响

输电线路滑坡会导致铁塔基础发生不均匀沉降和基础倾斜变形, 从而改变铁塔结构的受力情况, 引起铁塔杆件变形、破坏, 甚至引起铁塔倒塌。

### 2.1 滑坡对基础的影响

滑坡对基础的影响主要是导致基础发生不均匀沉降、水平位移和基础倾斜变形, 而基础本体结构强度发生破坏的情况较少。滑坡发生后, 基础周围土体常见裂缝、脱离等现象, 如图 5 所示。

可以利用全站仪等仪器对基础平面和高程数据进行测量。将实测基础高差和设计高差进行对比, 判定基础是否发生不均匀沉降; 将实测基础根开 (即基础间距) 与设计根开对比, 判定基础是否发生水平位移。实测的高差和根开的偏差, 可以与 GB 50233—2014《110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范》<sup>[8]</sup> 有关规定进行对比, 核实基础变形数据是否超限, 以评估滑坡对基础的影响。



图 5 基础周围土体裂缝和脱离

### 2.2 滑坡对铁塔的影响

滑坡对铁塔的影响, 主要是基础不均匀沉降、水平位移导致铁塔受力发生改变, 引起铁塔杆件变形、破坏甚至倒塌, 如图 6 所示。

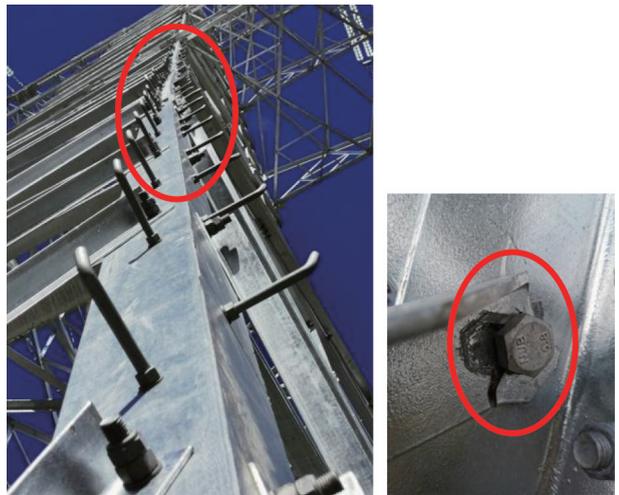


图 6 铁塔杆件变形和断裂

滑坡发生后, 通过现场观测, 判定铁塔杆件是否有弯曲变形、断裂以及铁塔是否有整体倾斜变形等情况。同样, 可以利用全站仪、激光雷达、倾斜摄影等测量技术手段, 测量铁塔主材边缘、交叉斜材交点、横隔面材、横担主材等位置, 对铁塔的整体变形情况进行测量评估。

### 2.3 滑坡影响实例分析

2020 年 10 月, 四川省阿坝州局部地区发生强降雨。受暴雨影响, 某 220 kV 输电线路工程 N56 号塔附近发生滑坡, 滑坡体距离 BC 腿基础边缘 10 m 左右, 现场滑坡裂缝发育, 基础有明显位移现象, 铁塔杆件有损坏但未倒塔。对铁塔和基础进行测量和整理, 测量数据结果见表 1、表 2。同时, 将基础和铁塔上的位置测点进行水平面投影, 如图 7 所示。

表1 基础高差测量数据

腿别	设计高差/ m	实测高差/ m	实测值与 设计值差/mm
A-B	6.0	5.968	-32
A-C	6.0	5.971	-29
A-D	2.0	1.969	-31
B-C	0.0	0.003	3
B-D	-4.0	-3.999	1
C-D	-4.0	-4.002	-2

表2 基础根开测量数据

腿别	设计值/ mm	偏心值/ mm	实测值/ mm	实测值- (设计值+ 偏心值)/ mm	比例/ %
AB	9 536.0	212	9 670.8	-77.2	-0.79
BC	10 196.0	212	10 562.5	154.5	1.48
CD	9 756.0	212	10 253.3	285.3	2.86
DA	9 096.0	212	9 308.8	0.8	0.01
AC	13 486.0	300	14 057.5	271.5	1.97
BD	13 797.1	300	14 048.1	-49.0	-0.35

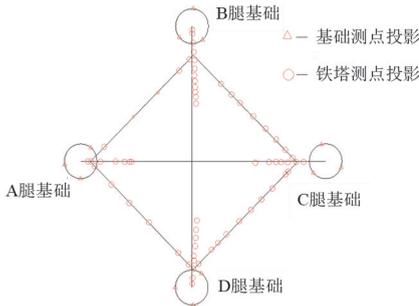


图7 测量数据平面投影

GB 50233—2014 规定:基础高差允许值不超过 5 mm;基础根开偏差允许值不超过 $\pm 2\%$ 。由表 1 和表 2 可知,各腿之间高差值和根开值均超过了规范要求。同时,由图 7 可知,铁塔主材的测量点并不在基础中心连线上,明显朝 CD 腿侧偏移。由此可以判断,基础发生了不均匀沉降且基础之间存在相对水平位移,同时铁塔也发生了整体弯曲的现象。

#### 2.4 位移对铁塔受力影响

根据实测的基础不均匀沉降值和水平位移值对铁塔进行校核,验算铁塔在正常运行工况下基础发生位移后的受力情况,并对铁塔受力进行评估,判断采取何种措施来治理滑坡灾害。例如某 220 kV 单回路塔,基础未发生位移以及一个基础发生水平和竖向位移 10 mm 的铁塔验算结果如图 8 所示。可以看到,基础发生位移后,铁塔杆件出现应力超限情况。这种情况下,建议更换应力超限杆件或者做改线方案。

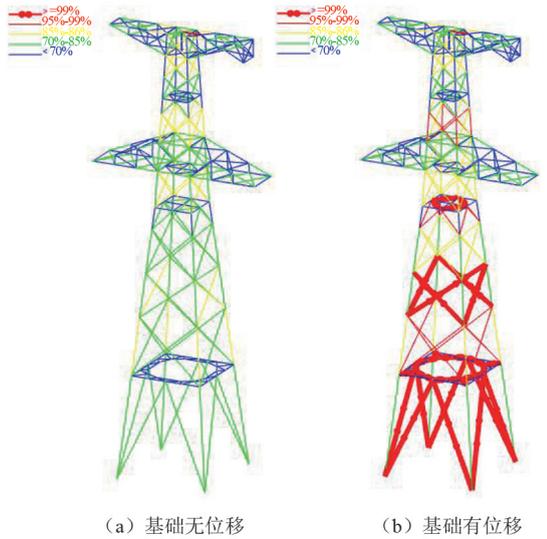


图8 位移对铁塔受力影响

### 3 滑坡灾害预防

对于输电线路工程,一般采取跨越、避让措施等来避开滑坡等不良地质作用。输电线路设计时,可以采取相应的措施来预防滑坡灾害对输电线路的影响<sup>[9]</sup>。

1) 采用原状土基础。原状土基础可以充分利用原状土高承载力的特点,减少基础尺寸,同时可以减小基坑开挖对边坡地质条件的破坏,减小对原来稳定地基的扰动,降低塔基滑坡的风险。

2) 铁塔高低腿与不同露出地面高度基础结合。由于地形原因,塔位上边坡开挖易形成高边坡,如果处理不当则造成人工切坡诱发型滑坡,影响塔基安全。铁塔高低腿与不同露出地面高度基础设计就是根据塔基断面调节塔腿,适应实际地形坡度,再配合不同基础露出高度作为塔腿长度的补充,有效解决可能出现的降基面问题,使塔位基本做到“零基面”,避免形成高边坡情况。

3) 正确处理施工弃土。施工弃土一般有塔基内摊平堆放、修筑弃土堡坎堆放和弃土外运综合利用等 3 种处理方式。对于需要外运或者修筑弃土堡坎的塔位,施工时往往为了便捷,施工人员直接将施工弃土向塔位下边坡倾倒,诱发滑坡。因此,对于塔基场地狭窄且地形坡度较陡的塔位,施工弃土必须外运,严禁在塔位附近随意堆放。

4) 保证塔基排水通畅。塔基内排水不畅极易造成坡体力学性质改变,导致塔基发生滑坡。“治

坡先治水”,塔位应利于表面散水外流,保证塔基排水畅通。对于汇水面较大的塔位,应在塔位上方修建截排水沟,将上方汇水引向塔位较远的下坡侧。

5)水土保持措施。对于易形成高陡边坡的塔位,可以考虑修筑堡坎和护坡来保持塔基土体的稳定性,也可以考虑植被护坡、播撒草籽等其余水土保持措施。

## 4 滑坡灾害治理

对于已建输电线路工程,滑坡发生后,需要对滑坡灾害造成铁塔和基础的影响进行评估,并采取合理的治理措施,包括临时措施、滑坡治理、线路改迁等。

### 4.1 临时措施

滑坡发生后,在滑坡治理之前,为了避免滑坡持续发展造成倒塔等严重事故,需要对滑坡体和铁塔基础采用一定的临时措施:1)加强巡视和观测,监测滑坡体是否扩张加剧、铁塔变形发展等情况,必要时可以加装监测基础位移、铁塔倾斜变形的在线监测装置;2)在铁塔上增加临时拉线措施,减轻铁塔变形加剧情况;3)有条件时可以考虑将塔腿或者基础顶部绑定,减轻基础侧移和铁塔根开变化的不利影响;4)塔基周围做好防水、排水等措施,避免过多雨水浸泡塔基周围土体使其达到饱和状态,引发进一步滑坡发生。

### 4.2 滑坡治理措施

目前,输电线路滑坡治理主要为“截排水+支护措施”的治理方案,主要支护方案有抗滑桩、桩板挡墙<sup>[10]</sup>、锚杆(索)格构梁<sup>[11]</sup>、重力式挡墙、微型桩<sup>[12]</sup>等。需要根据滑坡性质、地质地形条件、交通运输条件,选择经济合理且安全可靠的治理方案。在支护的同时要考虑植被恢复、塔基地面硬化等水土保持措施。

1)抗滑桩和桩板挡墙。抗滑桩是将桩(钢筋混凝土桩、钢管桩)插入滑坡滑面以下的稳固地层内,利用稳定地层岩土体的锚固作用以平衡滑坡推力,从而稳定滑坡的一种结构物。抗滑桩的抗滑能力强,支挡效果好,施工安全。若滑动土体较厚,地形较为陡峭,也可以考虑“抗滑桩+混凝土挡板”的方案(即桩板挡墙)来治理滑坡,如图9所示。抗滑桩和桩板挡墙方案相比于其他治理方案,更适用于滑坡土

体较厚、土质松散地区。但是抗滑桩开挖施工对坡体扰动相对较大,特别是地形陡峭滑坡区,施工可能会进一步加剧边坡的不稳定性。

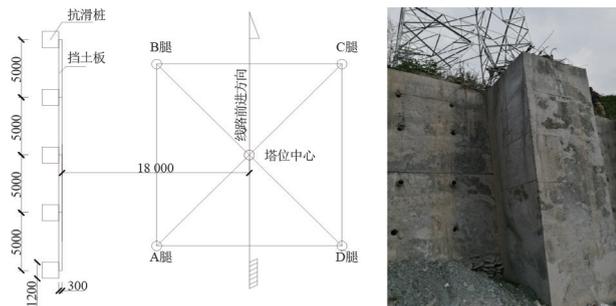


图9 抗滑桩和桩板挡墙方案

2)锚杆(索)格构梁。锚杆(索)格构梁技术是一种较新的边坡支护技术。格构的主要作用是将坡体的下滑力传递给格构结点处的锚杆(索),然后通过锚杆(索)传递给稳定岩层,从而使边坡体处于稳定状态,如图10所示。锚杆(索)格构梁对坡体的扰动少,采用机械化施工,安全风险小,能够保证边坡强度及稳定性,且布置灵活形式多样。锚杆(索)格构梁适用于滑坡面下有稳定基岩的情况,对于已经形成滑坡的松散土体作用较小。这是因为松散土体在雨水冲刷作用下极易流走,锚杆(索)的锚固力下降,从而使格构梁失去支撑而丧失其支护作用。同时由于锚杆(索)钻孔需要大型钻孔设备,在交通条件不便利的地区,锚杆(索)格构梁的使用会受到限制。

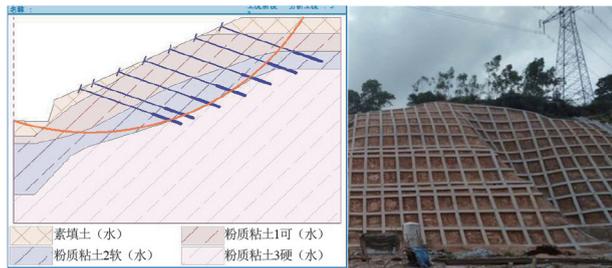


图10 锚杆(索)格构梁方案

3)重力式挡墙。重力式挡墙是靠墙身自身的重力来抵抗土体中的侧压力的一类挡土墙,其截面形式普遍采用梯形,如图11所示。为了增强挡墙效果,也可以考虑在挡墙底部增设锚杆、微型钢管等措施,进一步提高边坡稳定性。重力式挡墙的突出优点就是施工方便,具有良好的经济效果。重力式挡墙适用于场地地形相对平缓且挡墙基底地层或岩层稳定性能较好的地区。当地形陡峭或

者挡墙底部为软弱地基,挡墙的承载力会受到限制,挡墙不再适用。

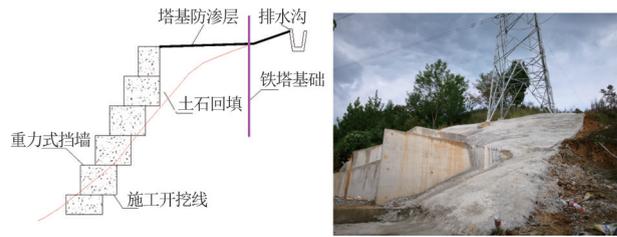


图 11 重力式挡墙方案

4) 微型桩。微型桩(微型混凝土桩或微型钢管桩)直径通常小于 400 mm,是一种新型的抗滑桩加固技术,属于抗滑桩范畴,具有“小径高强”的特点,其布置灵活,施工时间短,如图 12 所示。相比于抗滑桩,微型桩具有对土体扰动小、可机械施工的优势,同时可以采取压力注浆工艺改善桩周土体性能。目前微型桩已广泛用于滑坡治理等工程。微型桩可以单独使用,也可同其他支护结构配合使用,如“微型桩+喷锚支护”“微型桩+锚索支护”等。

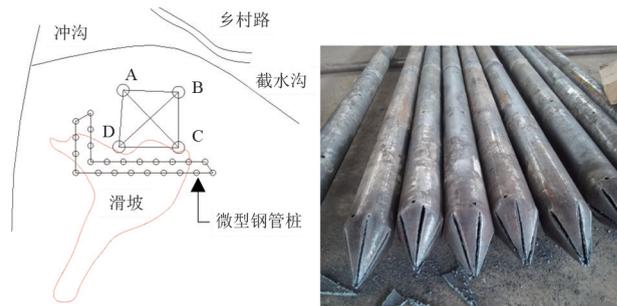


图 12 微型桩方案

## 5 结 论

上面针对输电线路滑坡灾害,从实际工程经验出发,开展了滑坡灾害预防和治理研究,得出以下结论:

1) 输电线路滑坡可分为自然诱发型、坡体堆载诱发型和人工切坡诱发型滑坡;

2) 输电线路滑坡会导致基础发生不均匀沉降或倾斜,改变铁塔结构的受力情况,引起铁塔杆件变形、破坏,因此需要从多方面对滑坡灾害进行分析;

3) 输电线路设计时,应考虑采用原状土基础、铁塔高低腿与不同露出地面高度基础结合、保证塔基排水通畅和其余水保措施等方法,来预防滑坡灾害;

4) 工程中可以采用抗滑桩和桩板挡墙、锚杆(索)格构梁、重力式挡墙、微型桩等方法治理滑坡。

### 参考文献

- [1] 朱家良.输电线路地质灾害危险性评估的基本特点与认识[J].电力勘测设计,2006(4):9-12.
- [2] 程永锋,朱照清,丁士君,等.输变电工程地质灾害防治技术研究[J].智能电网,2017,5(6):612-615.
- [3] 程永锋,丁士君,赵斌滨,等.输变电工程滑坡灾害危险性和风险性评估方法研究[J].中国农村水利水电,2015(6):148-152.
- [4] 刘书豪.降雨条件下的输电线路滑坡风险评估与预警技术研究[D].武汉:中国地质大学,2021.
- [5] 陈英,马东涛,杨敏.超高压输电线路塔基滑坡灾害特征分析与治理[J].电网建设,2014,35(10):69-73.
- [6] 郭艳军,吴数伟,于强.滑坡区输电铁塔安全性及评价分析[J].低碳技术,2020,10(12):79-80.
- [7] 黄晨忱.输电线路杆塔基础滑坡风险研究[D].武汉:中国地质大学,2021.
- [8] 中国电力企业联合会.110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范:GB 50233—2014[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [9] 肖洪伟,黄兴,肖兵.输电线路含碎石粘性土边坡滑坡特性及预防措施[J].电力建设,2007,28(10):64-66.
- [10] 叶小波.桩板挡墙在陡峻山区线路滑坡治理中的应用[J].低碳技术,2017,7(11):54-56.
- [11] 万飞.锚杆格构梁在四川山区某 500 kV 输电线路滑坡治理中的应用[J].低碳技术,2020,10(12):97-98.
- [12] 辛永福.微型钢管桩在滑坡治理工程中的应用[J].陕西水利,2011(6):82-84.

### 作者简介:

于 强(1990),男,硕士,工程师,从事输电线路结构设计工作;

郭艳军(1981),男,硕士,高级工程师,从事输电线路结构设计工作;

包 涛(1987),男,硕士,高级工程师,从事输电线路结构设计工作;

刘 泉(1984),男,硕士,高级工程师,从事特高压工程设计管理工作;

刘福海(1984),男,博士,高级工程师,从事特高压工程设计管理工作。

(收稿日期:2022-08-20)