

光学传感技术在输电走廊滑坡 在线监测中的研究及应用

刘勇¹, 薛志航²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 为提升电网对地质灾害的监测及防护水平, 对基于光学传感技术的输电走廊滑坡在线监测方法进行了研究, 并在某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔进行了现场应用。根据大量现场勘察数据, 针对性地制定了科学有效的监测方案, 搭建了一套基于光纤传感网络的在线监测平台, 并且分析了降雨量、倾斜角和表面裂缝与滑坡体状态的关联; 最后依据获取的监测数据对某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔进行了诊断, 诊断结果表明其具有较高的实时性和准确性。

关键词: 光纤传感; 滑坡; 降雨量; 倾斜角; 表面裂缝; 诊断

Abstract: In order to improve the monitoring and protection level of geological disasters in power grid, online landslide monitoring method is studied for transmission line corridor based on fiber optic sensing technology, and the research results is applied to No. 313 and No. 314 tower of a 500 kV transmission line. According to plenty of site survey data, a scientific monitoring program is developed, an online monitoring system is set up and the relationship between rainfall, tilt angle, crack and landslide status is analyzed. At last, No. 313 and No. 314 tower of a 500 kV transmission line are diagnosed according to the monitoring data, and the results show that the system is more timely and accurately.

Key words: fiber optic sensing; landslide; rainfall; tilt angle; crack; diagnosis

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)02-0041-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.02.010

0 引言

随着人类社会经济与科学技术的发展, 电力系统的正常运行, 直接关系到社会稳定、经济发展和人民生活。但是, 由于山区输电线路常常受到山地灾害的威胁, 特别是汶川地震以后, 地质环境找到严重破坏, 对电网的安全提出了严峻的挑战, 电网安全生产问题引起了社会的高度关注。由于中国 70% 属于山地环境, 地形地貌和地质构造条件非常复杂, 泥石流、滑坡、崩塌等各种山地灾害时有发生, 对电网系统造成的破坏较为突出, 地质灾害导致的电网大面积停电风险始终存在, 这给当地社会及经济繁荣造成很大的威胁。

根据统计, 四川省的输电通道主要受到滑坡灾害的影响。比如 500 kV 跨区电网二滩—自贡输电线路自投运以来十几年来, 几乎每年都会发生因滑坡引起的输电线路设备损坏事件并使线路被

迫停运改造。其中 2000 年 7 月, 西昌地区发生滑坡造成二普 III 线 N205 铁塔倒塌, 并将相邻铁塔折断, 共造成倒塔 6 基, 铁塔损坏 3 基。在该耐张段内的导线、绝缘子及金具全部损坏, 在后期治理过程中, 地质滑坡又造成该段铁塔移位 1 次, 改线 2 次, 经济损失巨大。

目前电力系统针对地质灾害的频发, 也采取了一些监测和应对手段, 并在部分存在灾害隐患的杆塔搭建了在线监测平台, 但由于铁塔所在自然环境恶劣, 长期出现雨雪天气, 且电磁干扰严重, 经常导致传统电学传感器失效, 数据无法及时回传, 监测效果并不理想。

这里介绍了一种基于光纤传感技术的铁塔滑坡监测系统, 解决了恶劣自然环境和强电磁干扰下数据监测的稳定性和可靠性, 并针对存在滑坡隐患的某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔进行了现场应用, 以改善目前电网对地质灾害的监测及防护水平。

1 光纤监测技术原理简介

由于现场监测环境恶劣且电磁干扰严重,项目采用光纤传感器进行监测,与电测量原理的传统传感器相比,光纤光栅传感器有以下优点^[1]:

- 1) 不受潮湿环境影响,能避免电磁场的干扰,电绝缘性好,耐腐蚀,耐高温,能够有效地防止雷击、电磁干扰等;
- 2) 耐久性好,具有抵抗包括高温在内的恶劣环境及化学侵蚀的能力;
- 3) 质量轻,体积小,对结构影响小,易于布置,容易加工;
- 4) 既可以实现点测量,也可以实现分布式测量,组成复用系统,便于成网。

光纤传感器通常由光源、传输光纤、传感元件或调制区、光检测等部分组成。其工作原理是基于光纤的光调制效应,即光纤在外界环境因素(如温度、压力、电场、磁场等)发生改变时,其传光特性(如相位与光强)会发生变化的现象。也就是说,如果能测出通过光纤的光相位和光强的变化特点,就可以



图1 光纤传感器的原理结构示意图

知道被测物理量的变化过程^[2]。光纤 Bragg 光栅是指单模掺铒光纤经紫外光照射成栅技术而形成的全新光纤型 Bragg 光栅。成栅后的光纤纤芯折射率呈现周期性分布条纹并产生 Bragg 光栅效应。对于光纤 Bragg 光栅,当宽带光在 FBG 中传输时,将产生模式耦合,满足 Bragg 条件的一个窄带光谱将被反射回来。Bragg 条件为

$$\lambda_B = 2n_{eff}A \quad (1)$$

式中: λ_B 为 Bragg 波长; n_{eff} 为光纤芯区的有效折射率; A 为光纤 Bragg 栅格周期。

当光纤光栅测量的参数发生改变时,会导致光纤光栅 n_{eff} 或 A 的改变,从而引起光纤光栅反射波长 λ_B 的变化。因此通过测量光纤光栅的中心反射波长的变化,即可获得待测物理量的变化情况。中心波长的获取及工作原理如图 2 所示。

宽带光源发出的光经过耦合器入射到光纤光栅

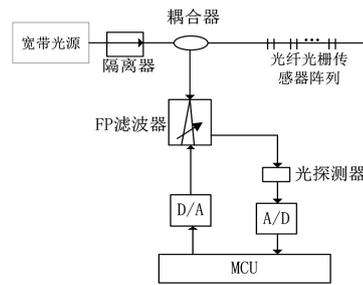


图2 光纤光栅传感原理图

传感器阵列,被各光纤光栅反射,经过耦合器后传输到 FP(Fabry Perot)滤波器。当探测器探测到光信号时,滤波器的透射波长即为光纤光栅的反射波长。

当 FBG 同时受到变化的监测量和变化的温度作用时,光纤 Bragg 光栅的波长变化量为 $\Delta\lambda_B$, 则

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_c) \Delta\epsilon_f + (\alpha_s + \zeta_s) \Delta t \quad (2)$$

式中: P_c 为有效的光弹性系数; $\Delta\epsilon_f$ 为 FBG 变化的环境量; α_s 为光纤的热膨胀系数; ζ_s 为热光系数; Δt 为温度变化量。且有

$$P_c = \frac{n_{eff}^2}{2} ((1 - \nu) P_{12} - \nu P_{11}) \quad (3)$$

式中: ν 为纤芯材料的泊松比; P_{11} 和 P_{12} 为光弹性张量的普克耳系数。

传感器的中心波长是通过光纤光栅传感分析仪进行解调,转换为数字信号。其工作原理如下:

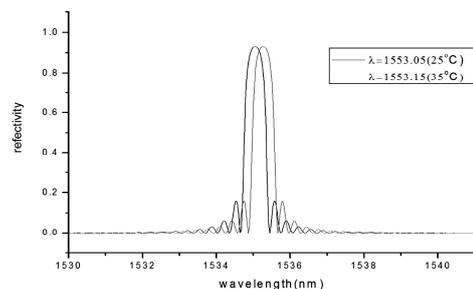


图3 光纤解调仪中心频率变化实例

系统工作时,光纤光栅传感分析仪内部光源发出连续的宽带光,经光缆传输到监测现场布设的光纤光栅传感器,这些传感器内部的测量敏感元件——光纤光栅对该宽带光有选择地反射回相应的一个窄带光,经同一传输光缆返回到光纤光栅传感分析仪内部探测器来测定出各个传感器所返回的不同窄带光的中心波长,从而解析出各监测点的值,如图 3 所示。由于多个传感器所返回的窄带光信号中心波长范围不同,所以可以将这些传感器串接组网实现多点同时测量,大大简化了传感器及引出线的

布设,避免了以往逐点测量的不便。

2 某500 kV输电线路313号和314号塔滑坡情况

2.1 滑坡塔位概况

某500 kV输电线路313号和314号塔位于昭觉县解放沟乡,于1998年7月20日正式投入运行。

由于省道307线西昌川兴至昭觉县城段改建公路的坡脚开挖、持续强降雨等因素,导致313号塔位下方坡体变形和314号塔位下方坡体变形滑动,威胁斜坡体后缘的313号、314号塔铁安全。

2.2 区域地质环境

314号塔位滑坡和313号塔位变形体位于昭觉县解放沟乡,坐标位置: N 27°52'26", E 102°33'51"。滑坡位置位于西昌川兴至昭觉县城段改建公路桩号K46+470至K46+620处,如图4所示。滑坡所处的地貌单元为中山地貌,以构造作用为主,受到强烈的剥蚀作用和局部的冰雪作用;出露地层岩性为白垩系下统阜新组(K1f),岩性以褐灰色紫色砾岩为主,夹有灰色、灰黑色砂岩、泥岩,局部含薄煤层和炭质泥岩,基岩产状近水平 $93^\circ \angle 3^\circ \sim 8^\circ$;构造上受安宁河断裂带及其支断裂影响,岩层结构面比较发育。因此,该区域山地灾害的易发性较强,易发生小到中等规模的基覆交界面堆积层滑坡灾害。

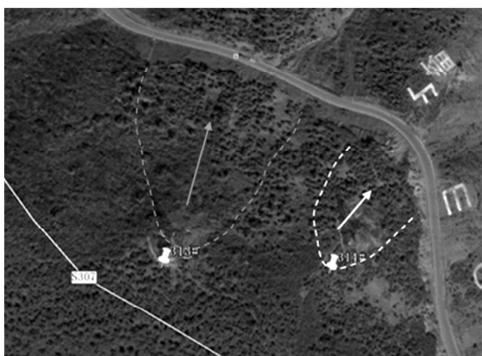


图4 塔位变形体遥感示意图

2.3 314号塔位变形体特征

314号塔位滑坡发生于2015年8月28日。滑坡后缘海拔高度约3020m,滑坡主滑方向约NE 72°,滑坡剪出口位于前方公路附近,海拔高度约3000m,滑坡相对高差约20m。314号塔位于山脊末端临近公路,山体坡度约30°~40°,塔腿距公路边界最近距离42m,滑坡后B腿距滑坡体边缘4.7m。

据调查,滑坡已经发生整体滑动,滑坡后壁、侧壁明显,在滑坡中部和后部有大量拉张裂缝,裂缝宽度约0.1~0.3m,长约10~20m,深度约0.2~0.5m,走向基本垂直于主滑方向,约NW 10°~15°(见图5)。



图5 314号塔位滑坡体上的拉张裂缝

2.4 313号塔位变形体特征

313号塔位距离原K46+575至K46+620滑坡后缘约50m。由于下方滑坡导致313号塔位斜坡稳定性下降,产生牵引,在后缘形成明显的拉裂缝。据调查,位于313号塔位下方约5m处的山体出现拉张裂缝。目前裂缝长约20~30m,宽约10~20cm,深50cm(见图6)。调查人员根据裂缝走向开展调查,裂缝走向从约NW 330°逐步变化为约NE 50°,发现潜在变形体的后缘和侧缘的裂缝已经基本贯通,且裂缝正在持续变形阶段。

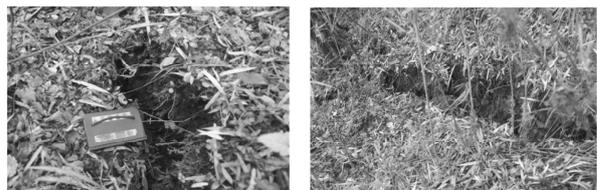


图6 313号塔位变形体后缘拉裂缝

变形体的组成物质为碎石土,其地层岩性和物质组成与314号塔位滑坡一致。根据目前变形体所在山体的地形特征和变形特征,初步估计变形体长约100m,平均宽50m,厚度约6~10m。推测整个变形体的规模约为 $(2 \sim 5) \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3 监测手段及实施方法

3.1 监测因素

由于314号和313号塔变形体和滑坡体是牵引式滑坡,且主要危害对象是塔基,因此,方案设计中主要考虑降雨量、杆塔倾斜和地表裂缝的监测。原因如下:

1) 地表裂缝监测

地表裂缝监测可以了解滑坡所处的变形范围发

展阶段。滑坡最明显的特征为滑动,需要监测的是滑动及其特征(包括大小和速率)和滑动时地面动态与变形,因此,滑坡的地表变形观测历来受到重视。

2) 降雨量

降雨作用下水可能从边缘以及缝隙等渗入坡体内,从而增加滑体自重,软化滑动带土体,降低滑动带土体的抗剪强度,影响坡体稳定性。目前在滑坡后缘边界附近分布有若干条张拉裂缝,雨水可直接沿裂缝进入滑体或至滑带,并对滑体产生动水压力和浮托力,对坡体稳定性能产生较大影响。

3) 杆塔倾斜

杆塔倾斜角度是滑坡、下沉、塌陷等典型地质灾害的直接表现,也是监测地表缓慢变形的直观特征。由于监测滑坡属于蠕变型滑坡,所以倾斜角度监测是重要且必要的。

3.2 监测方案

如图7所示,整个检测系统分为前端采集模块、控制模块、供电模块和传输模块4个部分^[3]。

前端采集模块包含3类传感器,分别包含雨量计、表面裂缝计和杆塔倾斜仪,主要用来监测影响杆塔稳定的状态量。

控制模块包含光纤光栅解调电路、MCU控制电路,主要用于提供光纤传感器的检测光源并对反射回来的光信号进行处理,从而得出被测量滑坡体位移、地下水位、表面裂缝、温度等的变化值。

供电模块包含蓄电池、太阳能电池板、电源管理模块,主要用于保证系统正常供电,确保系统在遭遇连续阴雨天时能够持续工作20天以上。

传输模块包含GPRS数据无线传输模块、后台数据接收模块,主要用于开展间断的、突发性的和频繁的、少量的数据传输,同时能够完成短时大数据量传输。

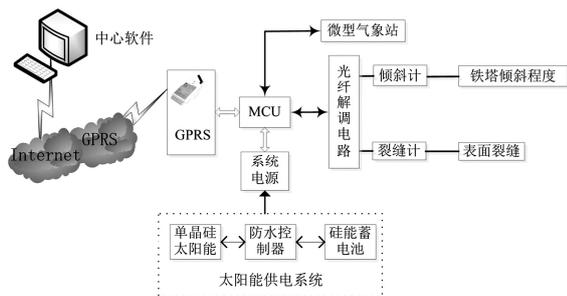
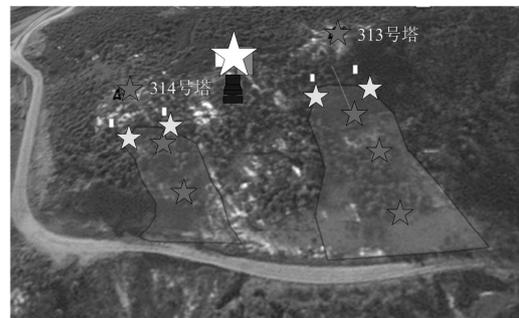


图7 系统监测方案

在两基杆塔位置,各布置倾斜仪1台,直接测量杆塔变形;沿滑坡体中轴滑动方向,从上至下各布置

倾斜仪2台和3台,直接测量坡体的滑动情况。在滑坡体上方的裂缝处,各布置大量程的传感器2个,用于监测地表裂缝情况。在313号和314号杆塔之间空旷无遮挡处安置雨量计1台。在313号和314号杆塔高处,各布置数据采集仪1台,用于采集测斜计、裂缝计数据,并转发回后方的数据处理中心^[4-5]。



图例: ★ 测斜仪
★ 表面裂缝计(伸缩计)
■ 数据采集及通信单元
☆ 雨量计

图8 系统布点方案

表1 塔位监测设备统计表

监测装置	监测位置	设备数量	型号规格、主要技术指标
测斜计	313、314号塔	7	杆塔部分2个:量程±10° 精度0.01° 滑坡体部分5个:量程±10° 精度0.01°
数据采集仪	313、314号塔较高的位置	2	支持GPRS无线通信收发模块,供电能够满足30d无太阳保证
雨量计	313、314号塔附近空旷无遮挡位置	1	测量范围为0~8mm/min,分辨率为0.2mm
地表裂缝计	313号塔下	2	量程250~300mm,精度为1mm

4 监测数据分析

4.1 地表裂缝计数据分析

自仪器安装调试结束之日起至2016年7月,现场313号塔位变形体区域变形显著。6月15日的强降雨导致裂缝计发生突变,当天的变化量高达10mm,随后变形体进入加速蠕变阶段,应变速度约为4.37mm/d,总变形量约为61mm。

4.2 雨量计数据分析

根据某500kV输电线路313号和314号塔位雨量站的2016年6月监测数据显示表明:昭觉县

313 号和314 号塔位滑坡区降雨量在6月15日达到最大值为47.5 mm。6月19日降雨量为38 mm,如图9所示。

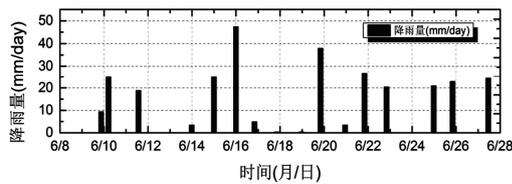


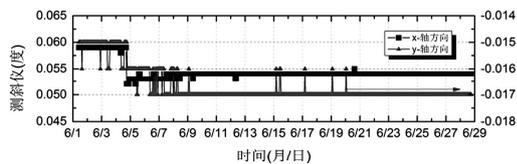
图9 313 号和314 号塔位滑坡区
降雨数据(2016年6月)

图9的监测数据显示,6月的降雨强度不大,最强的一次降雨在6月10日凌晨3点,强度为9.5 mm/h。6月降雨量超过大雨等级的次数为4次,分别为14日、15日、19日和21日。

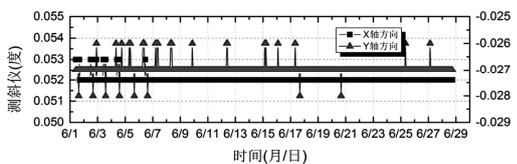
4.3 倾斜仪数据分析

测斜仪(4个)分别布设于313号塔位塔顶、塔身、塔下挡墙及塔下坡体,用于监测塔位及滑坡体地表变形量,编号01~04。

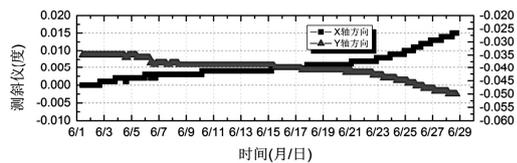
图10给出了313号塔位变形体测斜仪(01~04)监测数据,其中,测斜仪01和02数据基本保持



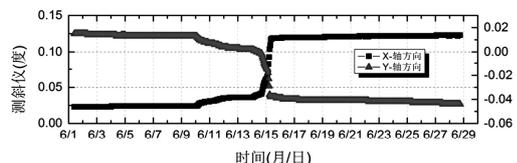
(a) 测斜仪01 监测数据



(b) 测斜仪02 监测数据



(c) 测斜仪03 监测数据



(d) 测斜仪04 监测数据

图10 313号塔身倾斜仪监测数据(01~04)

不变。由于测斜仪01和02分别布设于输电塔顶及塔身,因此,初步判定313号塔处于基本稳定状态。

测斜仪03监测数据显示:6月3日开始监测点持续变形,至28日x轴累积变形量约为0.04°,变形速率约为0.0015°/d(如图10(c)所示)。由于变形速率缓慢,且从现场反馈信息判断,313号塔基下部挡土墙未出现较大变形破坏,综合分析判断挡土墙基本处于稳定状态,但进入蠕变初级阶段(匀速变形阶段)。

测斜仪04监测数据显示:6月10日至14日,313号塔位变形体中下部斜坡进入稳定变形阶段,岩土体变形大致以等速发展,曲线近似一倾斜直线的应变速率发展,累计变形量约为0.02°,变形速率大体不变约为0.004°/d。6月15日监测数据有一突变,其中00:00~08:00x轴累积变形量达到0.06°,y轴累积变形量到达0.04°,变形速率约为0.18°/d,斜坡进入加速蠕变阶段。

4.4 数据综合分析

综合分析313号塔位变形体雨量计、裂缝计和测斜仪的监测数据,只有313号塔左侧裂缝计和测斜仪04监测数据变化较大,因此仅分析这两台设备监测数据与降雨量之间的关系,如图11所示。

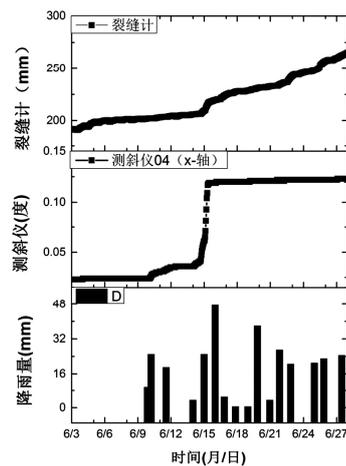


图11 313号塔位监测数据综合分析

图11显示6月9日至11日3天累计降雨量高达53.5 mm,313号塔位变形体中下部测斜仪04点监测区域进入蠕变初级阶段(匀速变形阶段)。6月14日至15日的中转大雨,两日累计降雨量高达72.5 mm,裂缝计数值发生突变,当天的变化量高达10 mm,随后变形体进入加速蠕变阶段,应变速度约为4.37 mm/d,总变形量约为61 mm。测斜仪04监测(下转第55页)

功率机制及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 82-89.

[5] 陈慧粉, 乔颖, 闵勇, 等. 风电场动静无功补偿协调控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 248-254.

[6] 秦涛, 吕跃刚, 徐大平. 采用双馈机组的风电场无功功率控制技术[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 105-110.

[7] 陈惠粉, 乔颖, 鲁宗相, 等. 风电场群的无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 78-83.

[8] 邓卫, 唐西胜, 裴玮, 等. 含风电微型电网电压稳定性分析及控制技术[J]. 电工技术学报, 2012(1): 56-62.

[9] 赵利刚, 房大中, 孔祥玉, 等. 综合利用 SVC 和风力发电机的风电场无功控制策略[J]. 继电器, 2012, 40(2): 45-50.

[10] 姜宁, 赵剑锋, 王春宁, 等. 电压无功控制及其优化技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[11] 陈宁, 何维国, 钱敏慧, 等. 风电场无功电压控制系统设

计和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 32-36.

[12] 王伟, 徐殿国, 王琦, 等. 大规模并网风电场的无功电压紧急控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 8-14.

作者简介:

李朝阳(1986), 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制;

常喜强(1976), 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制、调度自动化;

张锋(1978), 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制、调度自动化;

王衡(1984), 高级工程师, 研究方向为调度自动化;

郭小龙(1983), 高级工程师, 研究方向为调度自动化;

刘德福(1976), 高级工程师, 研究方向为调度自动化;

徐志(1988), 研究生, 研究方向为电力系统分析与控制.

(收稿日期: 2016-11-29)

(上接第45页)

数据有一突变, 其中 00:00~08:00, x -轴累积变形量达到 0.06° , y -轴累积变形量达到 0.04° , 变形速率约为 $0.18^\circ/d$, 斜坡进入加速蠕变阶段。这与现场调查反馈资料完全一致, 见图 12。



图 12 313 号塔基在建挡墙右下侧新增裂缝

5 结 语

在大量现场查勘和试验的基础上, 研究了一种基于光纤传感器技术的滑坡在线监测平台, 解决了现有技术中监测系统存在的监测装置实时性和有效性较低、成本高、效率和准确率低以及可靠性较低的技术问题。该监测系统能够高效准确地实时地进行监测, 具有良好的可靠性和较高的性价比。

对传统监测平台进行了改进, 将光纤传感器、光调制解调仪、太阳能及蓄电池供能单元和无线通信装置等集成在一起, 最大化地减小了工程量, 提高了系统工作的可靠性; 同时由于无需利用现有的电力系统通信网络, 便于成果大规模地推广应用。

研究成果在某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔进行了现场应用, 对获取的降雨量、表面裂缝和倾斜量进行了特征分析及关联分析, 对滑坡体所处的状态进行综合诊断, 并开展了比较验证工作, 实现了对铁塔安全状态有效而全面的评估。

参考文献

[1] 丁勇, 施斌, 崔何亮, 等. 光纤传感网络在边坡稳定监测中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27: 338-342.

[2] 黄民双, 陈伟民, 黄尚廉. 基于 Brillouin 散射的分布式光纤拉伸应变传感器的理论分析[J]. 光电工程, 1995, 22(4): 11-36.

[3] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 香港某边坡综合自动监测系统的设计和安装[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 790-796.

[4] Cao Yongxing, Xue Zhihang, Zhang Changhua, et al. Design and Application of Online Landslide Monitoring System for Transmission Lines Corridor Based on the Optical Fiber Sensing Technology [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 556-562: 3160-3163.

[5] Cao Yongxing, Chang Ming, Tang Chuan, et al. Remote Sensing Interpretation and Early Warning System Designing of Geohazards along Transmission Lines—A Case Study of the Danba-kangding 500 kV Double Circuit Transmission Line [J]. Advanced Materials Research, 2014, 986-987: 1647-1650.

作者简介:

刘勇(1968), 高级工程师, 国网四川省电力公司副总经理;

薛志航(1987), 工程师, 主要从事电力系统带电检测及故障诊断技术.

(收稿日期: 2017-03-03)