

# 亚热带季风气候条件下高边坡稳定性 远程实时监测系统\*

雷 鸣<sup>1</sup>, 陆仪启<sup>2</sup>, 周翠英<sup>2</sup>, 刘 镇<sup>3</sup>, 徐一鸣<sup>1</sup>, 夏 兼<sup>1</sup>

- (1. 广东云梧高速公路有限公司, 广东 云浮 527300;
2. 中山大学工学院, 广东 广州 510275;
3. 中山大学海洋学院, 广东 广州 510275)

**摘 要:** 针对粤西亚热带季风气候区雨季长、日照辐射大的特点, 设计开发了一套高边坡稳定性远程实时监测系统, 包括: 力学传感器、数据采集与处理器、无线传输装置、太阳能供电系统以及信息化管理平台等五部分。该系统应用于广东云罗高速某边坡工程稳定性远程实时监测中已一年有余, 至今运营状况良好, 充分说明所研发的太阳能供电系统能解决监测设备的长期稳定供电问题。结合当地降雨与边坡施工情况, 对监测数据进行分析, 结果显示该系统对降雨和工程扰动的敏感度较高, 可有效监测边坡稳定性状态。该系统的成功应用表明其较好解决了亚热带季风气候区雨季长、日照辐射大所带来的边坡稳定性监测问题, 具有广泛的推广应用前景。

**关键词:** 高边坡; 稳定性; 监测; 远程

中图分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2015)01-0030-07

## High Slope Stability Remote Real-time Monitoring System Used in Subtropical Monsoon Climate Zone in Western Guangdong

LEI Ming<sup>1</sup>, LU Yiqi<sup>2</sup>, ZHOU Cuiying<sup>2</sup>, LIU Zhen<sup>3</sup>, XU Yiming<sup>1</sup>, XIA Jian<sup>1</sup>

- (1. Guangdong Yunwu Expressway Company Limited, Yunfu 527300, China;
2. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** According to the long rainy season and strong solar radiation in subtropical monsoon climate zone in western Guangdong, a set of high slope stability remote real-time monitoring system was designed and developed, which includes mechanical sensors, data acquisition and processor, wireless transmission devices, solar power system and information management platform. This system has been applied to the engineering stability monitoring of a slope in YunLuo Highway more than one year, and is still working well. This indicates that the solar power system is doing well in long-time energy supply. The analysis of the monitoring data is associated with the rainfall and the proceeding of the project. The results show that this system is sensitive to the rainfall and disturbance, and the slope is stable. The successful application of this system indicates that it can dill with the stability monitoring problems of the slope which are caused by the long rainy season and strong solar radiation in subtropical monsoon climate zone, and also shows that the system has very wide popularization and application prospects.

\* 收稿日期: 2014-05-12

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41030747, 41102181, 41372302); 广东省自然科学基金资助项目(S2011020001229, S2011010002104); 广东省科技计划资助项目(2010A030200007, 2012B091000146); 广东省科技厅科研资助项目(2011-02-025); 广州市科技计划资助项目(2010GN-D00011)

**作者简介:** 雷鸣(1969年生), 男; 研究方向: 岩土工程; **通讯作者:** 周翠英, 陆仪启; E-mail: ueit@mail.sysu.edu.cn

**Key words:** high slope; stability; monitoring; remote

粤西地处亚热带季风气候区，夏季高温多雨，高边坡稳定性进行人工监测不仅难度大，而且时效性差。因此，亟需对适应于亚热带季风气候区的高边坡稳定性远程实时监测技术进行研究。

国内外在高边坡监测技术上已经达到较高水平。由早期的地层和岩层地质测量技术，过渡到由光学和电学仪器等构成的比较先进的监测手段，进而发展到 GPS 导航、远景观测和近景拍摄同时应用到边坡监测中，现正向着自动化、远程、高精度以及无线监测系统发展<sup>[1-2]</sup>，主要有 GPS 测量<sup>[3-6]</sup>、光纤传感<sup>[7-9]</sup>、激光位移监测<sup>[10-12]</sup>、孔径雷达干涉测量<sup>[13-14]</sup>、声发射<sup>[15-16]</sup>、时域反射<sup>[17-18]</sup>、微震量测<sup>[19-20]</sup>和摄动监测<sup>[21]</sup>等技术，均实现了数据的实时采集、远程传输与分析。上述监测手段在水电库区边坡、矿山边坡等工程中的应用研究已经达到较高水平，然而对于极端气候条件地区的高边坡，已有的监测设备尚不能满足其稳定性监测的需求。

本文针对粤西亚热带季风气候区夏季高温炎热、雨季长的特征，研发了一套高边坡稳定性监测系统。该系统在广东云罗高速高边坡稳定性远程实时监测上的成功应用，表明其适用性较好。

## 1 亚热带季风气候条件下高边坡稳定性监测难题

亚热带季风气候，分布在北纬 25°~35° 亚热带大陆东岸，在中国的典型分布区为秦岭淮河以南，青藏高原以东、热带季风气候以北的地带。该气候区域夏季太阳高度角大，气温较高，且南季风带来的降水丰沛，雨热同期，雨季持续时间长。此外，夏秋常受热带气旋的影响。

广东省内广泛分布红层等软弱岩体，遇水极易软化，加之部分地区属于亚热带季风气候区，夏季干湿交替频繁，导致该地区的高边坡稳定性问题突出<sup>[22-23]</sup>。粤西亚热带季风气候区内的高边坡监测存在以下问题：①夏季高温多雨，人工监测困难；②夏季太阳高度角大，太阳辐射强烈，使无线远程监测系统中太阳能电板输出的电压过高，容易导致监测电路因过压而停止工作；③雨季时间长，使无线远程监测系统面临长期供电问题；④边坡表面岩石易受风化、雨水冲刷的影响，表面位移不足表征边坡的稳定性。

针对上述问题，在已有的监测技术基础上开发

一套有效适用的高边坡稳定性远程实时监测系统，对亚热带季风气候区内高边坡的稳定性监测具有重大意义。

## 2 亚热带季风气候条件下远程实时监测原理及其系统组成

### 2.1 监测原理

针对粤西亚热带季风气候区内高边坡人工监测困难的问题，开发了数据自采集与无线远程传输技术，实现高边坡稳定性的实时在线监测；采用太阳能供电技术，解决了监测系统的长期供电问题；以锚索拉力值为监测对象，克服了表面位移在边坡稳定性判别上的不足。

#### 1) 锚索拉力值监测原理。

使用振弦式力学传感器，其内部振弦为一根张紧的钢丝，当受到外界压力变化时，振弦上就会产生一定的张力。通过给激振原件一定的电量，传感器内固定的铁片就会在电磁力的作用下发生相对运动，此时振弦就会随着铁片的运动发生振动。当振弦的张力和振动同时存在时，振弦的固有振动频率和张力的关系，如式 (1) 所示。这样就可以通过测量振弦的频率变化来间接测量外界力的变化。

$$F = kf^2 \quad (1)$$

式中： $F$  为荷载值； $f$  为中弦频率，即传感器内各振弦频率的均值； $k$  为标定系数。

#### 2) 边坡稳定性判断原理。

根据监测得到的锚索拉力值，根据极限平衡条件得到潜在滑动面上的安全系数。边坡平面滑动分析如图 1 所示，这时可得到边坡的总滑动力为

$$T = G \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

总抗滑力为

$$T_f = P \cdot [\cos(\alpha + \theta) + \sin(\alpha + \theta) \cdot \operatorname{tg} \varphi] + G \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \cdot l \quad (3)$$

由此可得潜在滑动面上的安全系数为

$$F_s = T_f/T = \frac{P \cdot [\cos(\alpha + \theta) + \sin(\alpha + \theta) \cdot \operatorname{tg} \varphi] + G \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \cdot l}{G \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

式中  $G$  为滑体的重力； $P$  为锚索拉力值； $\alpha$  为滑动面倾角； $\theta$  为锚索与水平面交角； $\varphi$  为滑动面的摩擦角； $c$  为滑动面上的粘聚力； $l$  为滑动面的长度。

通过式 (4) 可将监测到的锚索拉力值转化为潜在滑动面上的安全系数。若  $F_s > 1$ ，则沿着此计算滑

动面是稳定的;若  $F_s < 1$ , 则是不稳定的。

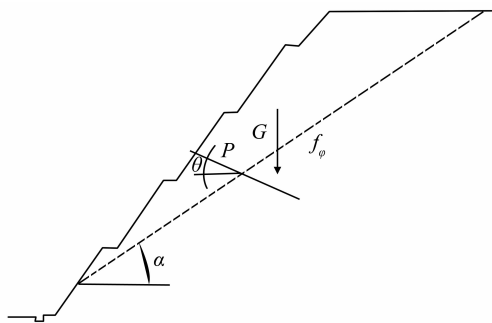


图 1 边坡平面滑动分析图

Fig. 1 The analysis diagram of slope plane sliding

### 3) 无线传输原理。

基于 GPRS/CDMA 1x 移动数据通信技术, 利用数据终端设备与 DVB 天线, 实现了数据的无线远程实时传输。

### 4) 太阳能供电原理。

太阳能供电系统如图 2 所示, 通过太阳能电板将太阳能转换为电能, 存储于锂电池中; 太阳能电板和锂电池之间通过充电管理模块相连, 该模块由稳压电路和反充电逻辑电路组成, 稳压电路解决了太阳能输出电压过高问题, 反充电逻辑电路可防止锂电池对太阳能电板的反充电。

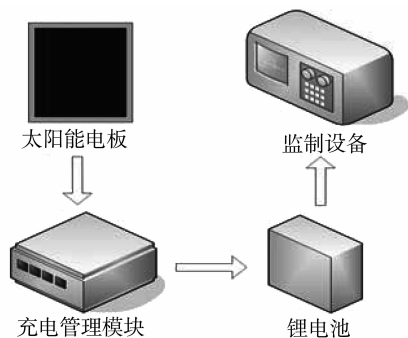


图 2 太阳能供电系统

Fig. 2 The solar energy system

### 5) 信息化管理平台工作原理。

根据智能数据仓库原理, 利用 SQL 数据库和 ASP 网页设计及 flash 技术, 建立边坡监测信息化管理平台, 对数据进行运算处理, 并通过 flash 技术将数据转换为图表。

## 2.2 系统组成

高边坡稳定性远程实时监测系统主要包括: 力学传感器、数据采集与处理器、无线传输装置、太

阳能供电系统以及信息化管理平台等五部分, 如图 3 所示。

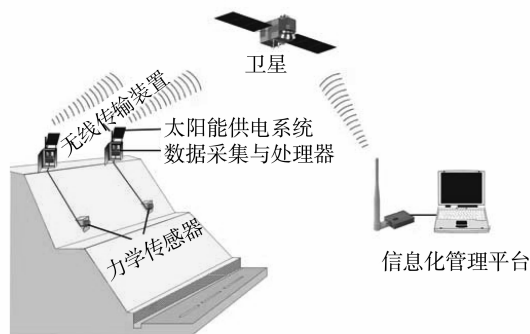


图 3 高边坡稳定性监测系统

Fig. 3 The high slope stability monitoring system

1) 力学传感器: 将锚索拉力值转换为可直接测量的振动频率信号。

2) 数据采集与处理器: 包括力学信息采集模块与计算处理模块。力学信息采集模块对力学传感器中振弦的振动频率进行自动采集, 具有休眠和脉冲启动功能。计算处理模块包括数据处理模块和数据存储模块, 数据处理模块将采集到的振动频率通过均值计算, 并按照式 (1) 转换成锚索拉力值。数据存储模块对计算后的锚索拉力值进行储存, 并对监测频率进行记录。

3) 无线传输装置: 将数据采集与处理器中得到的数据通过无线网络传输至信息管理平台。

4) 太阳能供电系统: 为现场设备提供电源, 有效解决了亚热带季风气候区无线远程实时监测系统的能源自给问题。

5) 信息化管理平台与集成: 包括数据接收工作站、中心数据库和数据处理工作站三部分。高边坡远程监测设备实时采集的监测数据通过无线网络发送至系统的数据接收工作站, 工作站将数据整理后发送至中心数据库入库备份, 数据处理工作站通过相应的应用软件对数据进行运算处理, 并将数据转换为图表, 增加数据统计的直观性。

## 3 高边坡稳定性远程实时监测系统的建立

本文以广东云罗高速公路为依托, 建立了高边坡监测选择标准与断面布设原则, 选择了监测高边坡与监测断面, 并安装了监测设备, 构建了高边坡稳定性远程实时监测系统。

### 3.1 依托工程概况

广东云浮至罗定高速公路起于云浮市郁南县东

坝镇双凤管理区，止于罗定市双东镇的大步塘，路线全长 32.457 km。全线路堑边坡共计 192 段，其中坡高 $\geq 30$  m 的高边坡有 39 段，其加固防护措施有锚索框架梁、锚杆框架梁、拱形骨架挂三维网生态防护三种。沿线以侵蚀丘陵为主，地形起伏较大，路堑高边坡可分为土质边坡、类土质边坡和岩质边坡三类，主要地层分别由砂岩、泥质粉砂岩、灰岩、片麻岩及花岗岩组成。路线区属亚热带季风气候，气候温和、雨量充沛。

### 3.2 高边坡监测选择标准与断面布设原则

通过现场踏勘和野外调研，收集整理了沿线高边坡的岩层组合、岩体结构类型、岩土体性质、风化程度、地表与地下水作用及切坡、加固方式以及周边人类工程活动等资料。依此概化了边坡典型结构模式与主要类型，建立了高边坡监测选择标准及其断面布设原则：选择岩体破碎、地质构造面发育、坡体较陡、下滑力大、安全系数低的高陡边坡进行稳定性监测，选择风险较大的断面作为稳定性监测断面。

在调研的基础上，选取坡高大于 50 m 的高边坡，按照高边坡监测断面布设原则对每个边坡的危险断面进行稳定性分析。基于瑞典条分法原理，采用数值模拟方法，结合表 1 中的岩体力学参数，研究了各边坡的稳定性，确定了其潜在滑动面及安全系数。经过对比分析，最终选定云罗高速公路 K57+020 ~ K57+235 高边坡工程作为依托工程，进行稳定性监测。

表 1 岩体力学参数表

Table 1 The rock mechanics parameter list

项目指标	岩体力学指标		
	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	黏聚力 C/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )
粉质粘土	1.85	16	18
全风化花岗岩	1.95	25	25
强风化花岗岩	2.05	31	35
微风化花岗岩	2.20	50	50

### 3.3 边坡概况及锚索与深部位移监测点布置

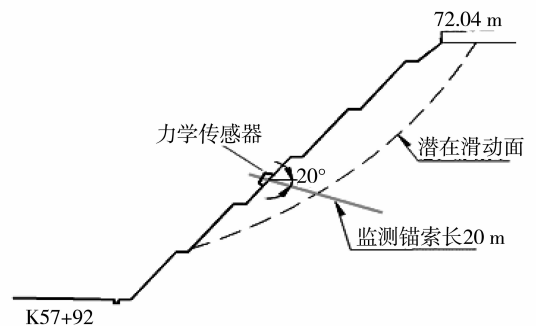
#### 1) 边坡概况。

本监测边坡位于里程桩号 K57+020 ~ K57+235 右侧，坡长 215 m，最大坡高为 62.0 m，最大坡角约  $55^{\circ}$ ，开挖方量大，地应力调整大，易形成较大松弛区；加之，边坡范围内残坡积粉质黏土及全风化层厚度较大，构成本边坡岩体主要为全~微

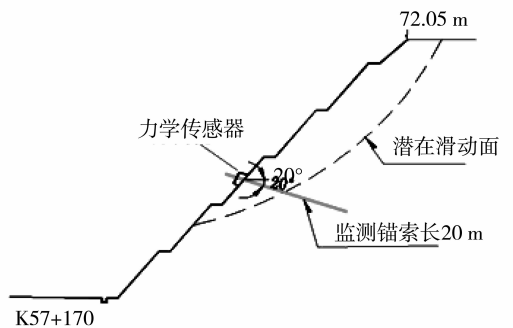
风化花岗岩，风化程度差异大，边坡开挖后，岩体受水及风化作用，强度降低；上述二者叠加该易使边坡稳定性降低。

#### 2) 监测点布置。

根据其地质与环境条件及高边坡监测断面布设原则，确定该区间监测断面为 K57+092 与 K57+170。在 K57+020 ~ K57+235 高边坡稳定性分析的基础上，确定了其潜在滑动面位置，布设了锚索拉力监测点，设计锚索深度为 20 m，超出潜在滑动面约 9 m，如图 4 (a)、(b) 所示。



(a) K57+092 右侧边坡锚索监测点示意图



(b) K57+170 右侧边坡锚索监测点示意图

图 4 K57+020 ~ K57+235 右侧边坡监测点布置示意图

Fig. 4 The schematic diagram anchor cable monitoring point on the right side of the slope between K57+020 and K57+235

### 3.4 监测设备安装

在 K57+092 与 K57+170 两断面监测点处布设力学传感器、数据采集与处理器、无线传输装置、太阳能供电系统等。根据实际情况，锚索的张拉力设置为约 200 kN，以满足监测需求。安装时，先依次将力学传感器下垫板、高精度力学传感器、传感器上垫板、锚头穿过锚索装上，然后进行张拉调试，设备安装后如图 5 所示。

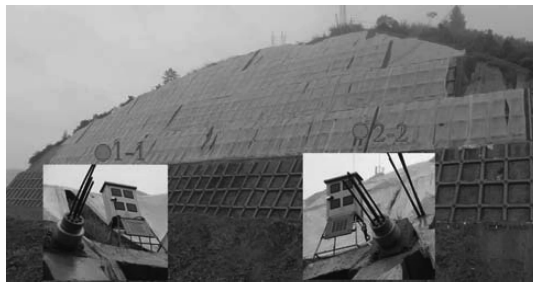


图 5 监测点布设与监测设备安装

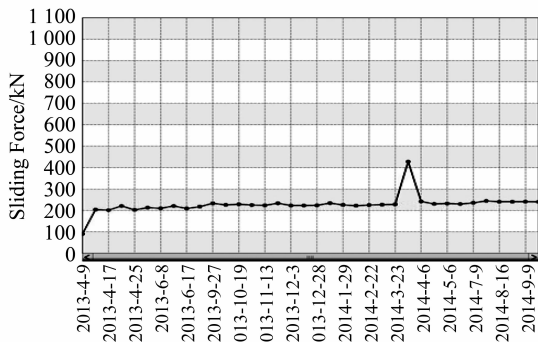
Fig. 5 The layout of monitoring point and the installation of monitoring equipment

### 3.5 云罗高速公路高边坡安全远程智能监控系统

根据智能数据仓库原理, 利用 Structured Query Language (SQL) 数据库和 Active Server Page (ASP) 网页设计及 flash 技术, 建立了云罗高速公路高边坡安全远程智能监控系统, 系统包括数据接收工作站、中心数据库和数据处理工作站三部分。高边坡远程监测设备实时采集的监测数据通过网络发送至系统的数据接收工作站, 工作站将数据整理后发送至中心数据库入库备份, 数据处理工作站通过相应的应用软件对数据进行运算处理, 并通过 flash 技术将数据转换为图表, 增加了数据统计的直观性。系统页面如图 6 所示。



(a) 系统操作界面



(b) 监测曲线

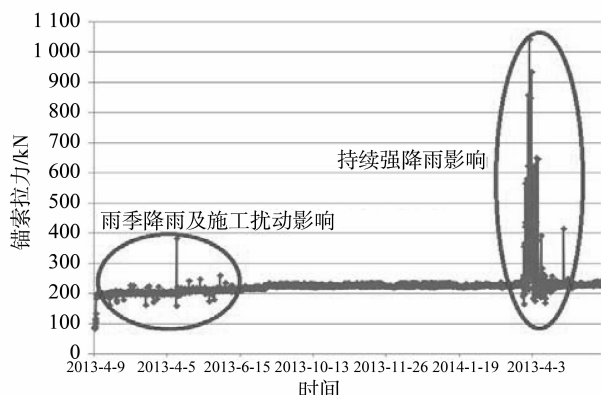
图 6 系统页面图

Fig. 6 The figures of the system pages

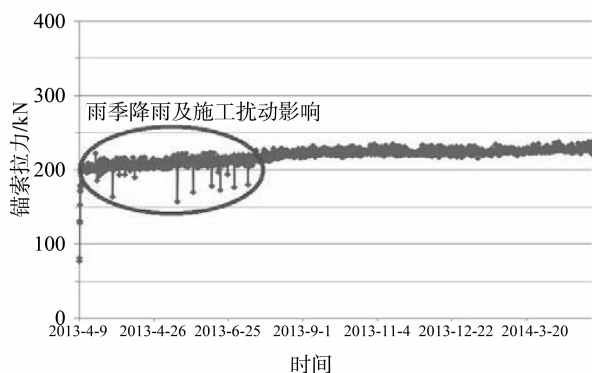
## 4 边坡稳定性远程实时在线分析

### 4.1 监测数据分析

根据该高边坡稳定性监测系统的监测结果, 绘制了 1-1 与 2-2 观测点锚索拉力随时间的变化曲线, 如图 7 所示。由图 7 可知, 两监测点锚索拉力值基本是在 150 ~ 250 kN 范围内波动, 且趋势平稳。观测点 1-1 与观测点 2-2 的锚索拉力在 2013 年 4 月—8 月时间段内有频繁的小范围波动, 观测点 1-1 在 2014 年 3 月 31 日—4 月 3 日有较大波动, 然均在波动后恢复平稳状态。



(a) 观测点 1-1 锚索拉力变化图



(b) 观测点 2-2 锚索拉力变化图

图 7 锚索拉力变化图

Fig. 7 The variation diagram of anchor cable tension

### 4.2 锚索拉力波动原因分析

根据当地气象统计资料, 2013 年 4 月—8 月时间段内共有 90 d 属于雨天, 边坡岩体由于长时间受水作用, 稳定性降低; 此外, 此段时间内边坡一、二级边坡正在进行开挖施工, 对边坡整体稳定产生了一定的扰动。上述两者导致了观测点锚索拉力值的频繁小范围波动。

2013 年 9 月—2014 年 1 月, 当地共降雨 29 次, 边坡受水作用不显著, 且边坡已经施工完毕,

整体稳定性较好,故此段时间内观测点锚索拉力值一直保持平稳态势。

2014年3月云浮开始进入梅雨季节,连绵的小雨使得边坡岩体变得潮湿而逐渐软化,3月31日—4月3日,边坡所在地连续降大到暴雨,边坡岩体受水浸泡进一步软化,边坡稳定性恶化,导致观测点1-1处的锚索拉力波动幅度较大。而观测点2-2处锚索拉力维持平稳,原因在于该断面地层有反倾存在(如图8),可以在一定程度上降低岩体下滑的风险。

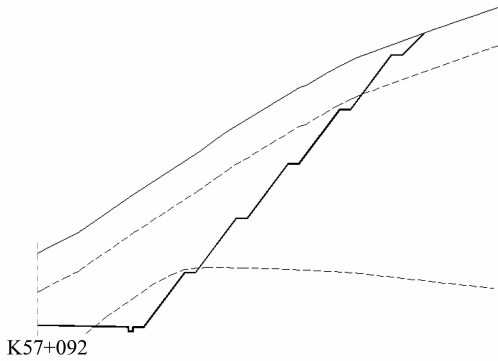


图 8 观测点 2-2 断面地层示意图

Fig. 8 The formation diagram at point 2-2

### 4.3 边坡稳定性分析

通过上述分析,两观测点锚索拉力虽有波动,但波动后都恢复平稳趋势,可知边坡处于相对稳定状态。根据监测得到的锚索拉力值,使用瑞典条分法计算出两断面对应潜在滑动面上的安全系数,计算结果表明两潜在滑动面上的安全系数均大于 1。此外,根据深部位移监测得到的各断面附近的最大变形速率和最大位移值如表 2 所示,可知两者均未超出警戒值。综上,可知边坡整体处于相对稳定状态。

表 2 深部位移数据表

Table 2 The deep displacement tables

监测断面 桩号	监测 点位	最大变形速率/(mm·d <sup>-1</sup> )		最大位移值/mm	
		东西向	南北向	东西向	南北向
K57+080	堰顶	0.03	0.04	1.75	3.99
K57+160	四级平台	0.03	0.01	1.29	-1.96

## 5 结 论

1) 本文所开发的太阳能供电系统在云罗高速高边坡监测系统运用一年余,保证了监测设备供电的稳定性和长期性,充分证明了该系统能适应亚热

带季风气候区雨季长、夏季晴天太阳辐射强的特点。

2) 通过对监测结果分析,可知锚索拉力基本在 150~250 kN 范围内波动,边坡整体处于相对稳定状态。

3) 由监测数据的波动与当地降雨以及工程施工的相关性可知,该系统对降雨和工程扰动具有较高的敏感性。

4) 通过与其他监测手段,如深部位移监测相配合,可更加有效地对边坡稳定性进行监控,避免滑坡事故的发生,可广泛推广用于边坡、隧道等工程的安全监控中。

### 参考文献:

- [1] 张兆义. 山区高速公路施工工期路堑边坡远程监测预警系统研制[D]. 成都:成都理工大学,2012.
- [2] 梅益伟. 基于无线传感器网络的高边坡监测技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [3] JULIEN C W, NICHOLAS S, ROLAND B. GPS and remote sensing study of slope movement in the Berkeley Hills, Ca [J]. Geotechnical Special Publication, 2013, 231: 319-322.
- [4] MEHRDAD A, MAHDI M, MAHMUD H H. Slope stability assessment of the sarcheshmeh landslide, northeast Iran, investigated using InSAR and GPS observations [J]. Remote Sensing, 2013, 5(8): 3681-3700.
- [5] 张清志, 郑万模, 巴仁基, 等. 应用高精度 GPS 系统对四川丹巴呷喀则滑坡进行监测及稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2013, 2: 250-259.
- [6] 王利, 张勤, 李寻昌, 张永奇, 等. GPS RTK 技术用于滑坡动态实时变形监测的研究[J]. 工程地质学报, 2011, 2: 193-198.
- [7] HUANG A B, LEE J T, HO Y T, Chiu Yun-Fang, Cheng Shyr-Yuan. Stability monitoring of rainfall-induced deep landslides through pore pressure profile measurements[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(4): 737-747.
- [8] 刘永莉. 分布式光纤传感技术在边坡工程监测中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [9] 朱鹤鹏, 殷建华, 洪成雨, 等. 基于光纤传感的边坡工程监测技术[J]. 工程勘察, 2010, 3: 6-10+14.
- [10] RICCARDO F, GIOVANNI G, LUCA L. Terrestrial laser scanning for rockfall stability analysis in the cultural heritage site of Pitigliano (Italy) [J]. LANDSLIDES, 2013, 10(4): 409-420.
- [11] ARIANNA P, GIORDANO T, GIUSEPPE C, et al. Multitemporal laser scanner-based observation of the Mt. Vesuvius crater: Characterization of overall geometry and

- recognition of landslide events [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(3): 327 - 336.
- [12] 邢正全, 邓喀中. 三维激光扫描技术应用于边坡位移监测[J]. *地理空间信息*, 2011, 1: 68 - 70 + 12.
- [13] MEHRDAD A, MAHDI M, MAHMUD H H. Slope stability assessment of the sarcheshmeh landslide, northeast Iran, investigated using InSAR and GPS observations [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(8): 3681 - 3700.
- [14] LOWRY B, GOMEZ F, ZHOU W, et al. High resolution displacement monitoring of a slow velocity landslide using ground based radar interferometry [J]. *Engineering Geology*, 2013, 166: 160 - 169.
- [15] CHEON D S, JUNG Y B, PARK E S, et al. Evaluation of damage level for rock slopes using acoustic emission technique with waveguides [J]. *Engineering Geology*, 2011, 121(11): 75 - 88.
- [16] 田增国, 陈翠梅, 刘祖强. 三峡工程永久船闸高边坡岩体变形声发射监测[J]. *工程勘察*, 2009, 10: 82 - 86.
- [17] BERY A A, ROSLI S. High resolution time-domain induced polarization tomography with merging data levels by two different optimized arrays for slope monitoring study [J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 18: 5921 - 5928.
- [18] 谭捍华, 傅鹤林. TDR 技术在公路边坡监测中的应用试验[J]. *岩土力学*, 2010, 4: 1331 - 1336.
- [19] OCCHIENA C, COVIELLO V, ARATTANO M. Analysis of microseismic signals and temperature recordings for rock slope stability investigations in high mountain areas [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(7): 2283 - 2298.
- [20] 徐奴文, 唐春安, 沙椿, 等. 锦屏一级水电站左岸边坡微震监测系统及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 5: 915 - 925.
- [21] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(6): 1081 - 1090.
- [22] 周翠英, 刘祚秋, 尚伟, 等. 膨胀土和软岩边坡加固优化设计的几个关键问题——以东深供水改造工程中 B III<sub>2</sub> 边坡为例 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2003, 42(3): 127 - 128.
- [23] 张泽鹏, 朱凤贤, 黄放军, 等. 复杂地质条件下高边坡加固设计与综合治理研究——以梅河高速公路某高边坡治理为例 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2006, 45(4): 44 - 48.

(上接第 29 页)

- [8] MARTIN S W. Livestock disease eradication: evaluation of the cooperative state-federal bovine tuberculosis eradication program [M]. Washington: National Academy Press, 1994.
- [9] VANLANDINGHAM K E, MARSTELLER H B, ROSS G W, et al. Relapse of herpes simplex encephalitis after conventional acyclovir therapy [J]. *JAMA, Am Med Assoc*, 1988, 259: 1051 - 1053.
- [10] ARDITI R, GINZBURG L R. Coupling in predator-prey dynamics: ratio-dependence [J]. *J Theor Biol*, 1989, 139: 311 - 326.
- [11] LI D, MA W. Asymptotic properties of an HIV - 1 infection model with time delay [J]. *J Math Anal Appl*, 2007, 335: 683 - 691.
- [12] COOKE K, VAN DEN DRIESSCHE P. Analysis of an SEIRS epidemic model with two delays [J]. *J Math Biol*, 1996, 35: 240 - 260.
- [13] KUANG Y. Delay differential equations with applications in population dynamics [M]. New York: Academic Press, 1993.
- [14] HALE J K, VERDUYN LUNEL S. Introduction to functional differential equations [M]. New York: Springer, 1993.
- [15] HADDOCK J R, TERJEKI J. Liapunov-Razumikhin functions and an invariance principle for functional-differential equations [J]. *J Differ Equations*, 1983, 48: 95 - 122.