

DOI: 10.11779/CJGE2017S1019

基于光纤监测的边坡应变场可视化系统研究

许星宇, 朱鸿鹄*, 张巍, 张诚成, 施斌

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 近年来分布式光纤传感技术已成为土工测试领域的一股新生力量, 在岩土体尤其是边坡的变形监测中发挥了日益重要的作用。基于该技术构建的边坡智能监测系统能捕捉坡表和坡体内部应变场的时空分布特征。由于光纤监测可获取海量数据, 如何对其进行高效的提取、处理和挖掘是该技术应用中的瓶颈。基于 MATLAB 开发的边坡应变场可视化系统通过用户界面实现了对海量光纤监测数据的识别、去噪、预测分析和可视化展示, 并具有边坡稳定状态诊断及预警的功能。在一组室内边坡模型试验中, 采用该系统成功实现了边坡应变场监测数据的可视化, 并对边坡稳定性相关的预警阈值进行了回归分析, 体现了其处理数据方便、快捷、高效、直观等特点。该系统未来将在现场边坡的监测和滑坡预警预报中发挥重要的作用。

关键词: 光纤监测; 边坡; 数据处理; 可视化; MATLAB

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0096-05

作者简介: 许星宇(1993-), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事工程地质方面的研究工作。E-mail: xuxy@smail.nju.edu.cn。

Development of fiber optic monitoring-based visualization system for strain fields of slopes

XU Xing-yu, ZHU Hong-hu, ZHANG Wei, ZHANG Cheng-cheng, SHI Bin

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In recent years, the distributed fiber optic sensing technology has become a new tool in the research area of geotechnical tests and measurements and played an increasingly important role in deformation monitoring of geo-structures, especially slopes. Based on this technology, a smart slope monitoring system is established, which enables the collection of temporal and spatial distribution characteristics of surface and subsurface strain fields within slopes. As the fiber optic monitoring data are exceedingly huge, it brings great difficulties to data processing and mining. A visualization system for strain fields of slopes developed using MATLAB. Through software interface, this system allows the identification, denoising, prediction, analysis and visualization of massive fiber optic monitoring data and has various functions of slope stability diagnosis and warning. In the laboratory model tests, this system is successfully used to shows the strain fields within the slope model and to predict the thresholds related to the slope stability condition, which demonstrate the benefits of the system such as convenient, quick, efficient and orderly characteristics. The proposed system is of great potential in the field monitoring of slopes and landslide warning.

Key words: fiber optic monitoring; slope; data processing; visualization; MATLAB

0 引言

在土工测试过程中, 无论是室内试验还是现场监测都会获得大量的原始数据。对所收集到的原始测量数据进行识别、去噪, 并挖掘有价值的信息, 是每项研究的核心任务之一。在大数据的背景下, 可视化技术作为数据展示的一种手段正受到越来越多的关注。边坡的现场监测数据一般采用二维形式展示和分析。例如, 贾明涛等^[1]研究了边坡位移实测值的可视化分析。梁桂兰等^[2]基于地理信息系统(GIS), 开发了边

坡监测数据可视化分析系统。随着 OpenGL、X3D 等软件和相关技术的进步, 近年来边坡监测数据朝着三维可视化方向发展^[3-4]。

分布式光纤传感作为一种新型的自动化、集成化、智能化监测技术, 在岩土工程监测领域发挥着日益重

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41302217); 国家自然科学基金重点项目(41230636); 国家重大科研仪器研制项目(41427801)

收稿日期: 2016-11-28

*通讯作者 (E-mail: zhh@nju.edu.cn)

要的作用^[5-7]。基于该技术构建边坡智能监测系统, 可获取坡表和坡体内部应变场的时空分布特征, 在此基础上可在线评估边坡的稳定状态^[8-10]。但是由于分布式光纤监测数据量异常庞大, 这些数据能否被及时高效地提取、处理和挖掘, 并加以可视化, 常常在很大程度上决定了滑坡预警项目的成败。而在这一研究领域, 国内外都鲜见报道, 亟待深入研究。

本文针对边坡光纤监测的需求开发了可视化系统。该系统使用 MATLAB 编写, 集成了监测数据的二维与三维展示功能, 可通过用户界面对光纤监测数据进行识别、处理及分析, 大大提高了工作效率, 未来有望在边坡监测项目中得到推广应用。

1 系统架构和功能

在边坡光纤监测项目中, 分布式光纤可获得海量的监测数据, 且监测指标多种多样, 这给数据处理和可视化带来了极大的挑战。本文通过 MATLAB 开发了可视化系统, 实现了边坡应变监测数据的识别、去噪、预测、边坡稳定状态评估、二维和三维可视化等功能, 见图 1。

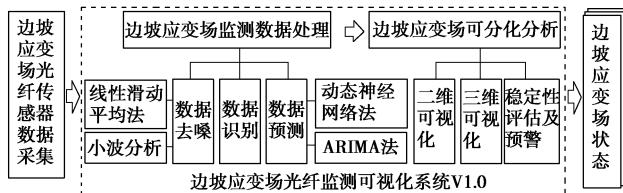


图 1 系统架构示意图

Fig. 1 Structural diagram of system

1.1 交互界面

针对实际工程的需求, 基于 MATLAB 的 GUI 功能制作了用户界面。在 GUI 编辑功能下, 添加了按钮、文本框、绘图框和菜单等控件。该系统界面直观, 交互性强, 方便用户对监测数据进行人工处理。

1.2 数据识别

分布式光纤传感技术主要包括准分布式的光纤光栅传感技术 (FBG), 和基于布里渊散射的全分布式传感技术 (如 BOTDA、BOTDR、BOFDA 等)。本文开发的可视化系统在读取监测数据的同时, 能自动识别数据类型, 辨识数据中包含的边坡空间和属性相关信息, 并可实现监测数据的矩阵化, 以提高 MATLAB 数据运算速度。

1.3 数据去噪

光纤传感器是一种高精度且极为敏感的传感元件, 因此在现场测试时监测数据存在一定的噪声。对原始监测数据进行分析前须剔除噪声数据, 保留有价

值的信息。本系统提供了如下两种去噪功能: ①线性滑动去噪法。这是最常见的数据平滑去噪方法, 其中三步和五步滑动平均法应用较广。由于光纤监测数据量庞大, 故本系统默认采用五步滑动平均法实现去噪功能。②小波去噪法。该方法源于小波分析, 是在 Fourier 分析的基础上发展而来的一种更加先进的信号去噪方法, 解决了 Fourier 分析无法表述信号时频局域性质的局限^[11]。MATLAB 软件中已集成了小波分析工具箱, 因此可通过代码调用小波分析功能实现数据去噪。根据工程经验, 本系统选用 sym3 小波分 4 层进行去噪, 并采用极大极小原理选择阈值, 去噪效果如图 2 所示。相关代码如下:

```
wname = 'sym3';level = 4;sorh = 's';
thr = thselect(S,'minimaxi');
S = cmddenoise(S,wname,level,sorh,NaN,thr).
```

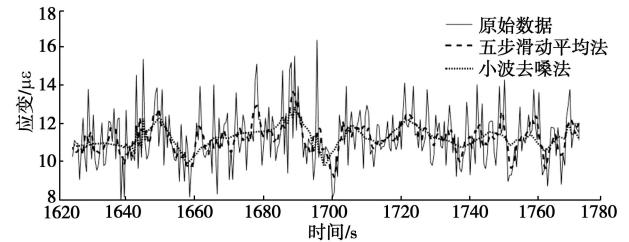


图 2 小波去噪处理效果

Fig. 2 Wavelet de-noising function

1.4 数据预测

在监测过程中, 通过一定的数学方法, 对边坡应变等参数在时间序列上的演变进行预测, 这是很多边坡监测项目的需求之一。本系统集成了以下两种预测功能 (如图 3): ①ARIMA 预测, 即自回归积分滑动平均模型 (Auto-regressive Integrated Moving Average Model)。该方法能针对非平稳序列进行差分, 实现时间序列数据的平稳化, 从而对数据进行分析预测。②动态神经网络预测, 这种方法应用类似于大脑神经突触结构来进行信息处理, 具有非线性的特点。本系统通过调用 MATLAB 集成的神经网络工具箱, 可实现监测数据的动态神经网络预测。

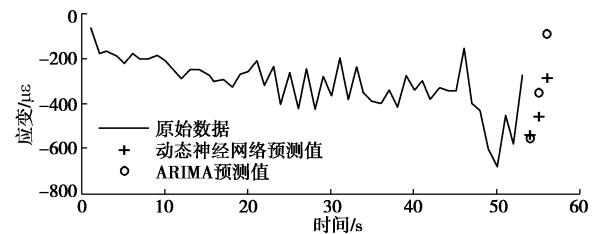


图 3 光纤监测数据预测示意图

Fig. 3 Prediction of fiber optic monitoring data

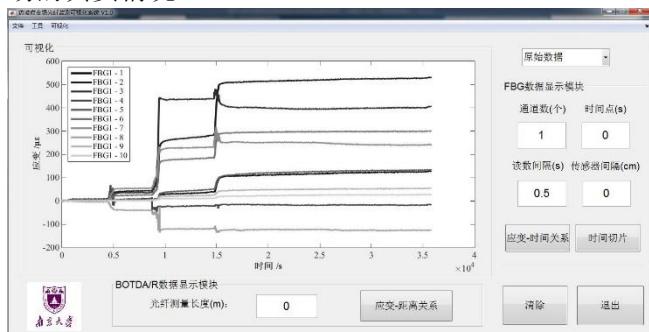
1.5 数据可视化

监测数据绘制成图是可视化系统的主要任务, 可

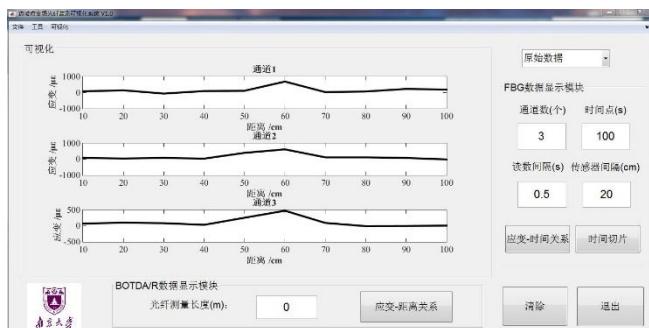
可视化处理有助于用户分析监测信息的时空分布规律，并对其进行进一步挖掘、预测。

(1) 二维绘图

边坡应变场可视化系统的二维绘图包括折线图、云图和模型示意图等。通过系统集成的数据识别功能，对基于不同传感原理（如 FBG 和 BOTDA/R）获取的监测数据进行折线图绘制，展示边坡内光纤的应变随时间的变化或是在距离上的分布（图 4 (a) 和图 5）。同时，本系统还提供监测数据的时间切片功能（图 4 (b)），即提供某一时间点各通道传感器的应变分布图。此外，系统绘制云图、模型示意图的功能可通过对数据进行空间差值等拟合处理，还原边坡内部应变场的真实情况。



(a) 应变时程图



(b) 时间切片折线图

图 4 FBG 监测结果显示图

Fig. 4 Display of FBG monitoring results

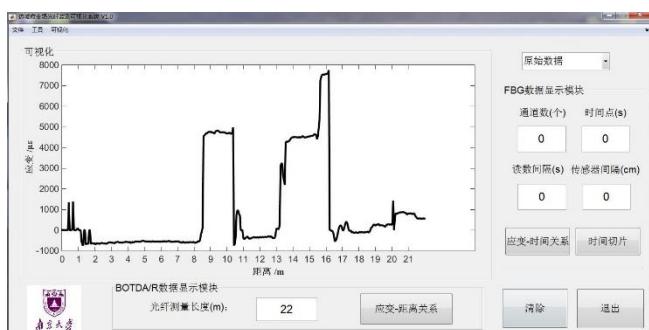


图 5 BOTDA 监测结果显示图

Fig. 5 Display of BOTDA monitoring results

(2) 三维绘图

相对二维图形，三维图像包含的信息量更大。系

统可把光纤监测时间与空间尺度上的信息相结合，使用空间插值法把二者结合到一起。在系统中绘制的三维图像可实现任意旋转、全角度观看，从而把边坡内部应变在时间上的变化与距离上的分布直观高效地显示给监测人员。

1.6 边坡稳定状态评估及预警

本文所建立的可视化系统为了实现边坡稳定状态的评估及滑坡预警，增加了临界滑动面搜索、应变阈值计算更新等功能。系统可输入边坡土体参数、轮廓尺寸、荷载条件、水位等信息，基于常规条分法对不同假定滑动面下的边坡安全系数进行试算，并求得安全系数最小值，实现边坡稳定性分析。为了将边坡应变监测数据引入稳定性评估功能中，系统运用朱鸿鹄等^[8]建立的边坡安全系数与特征应变的经验关系式，初步实现了基于应变监测的边坡失稳预警功能。边坡安全系数与特征应变之间的经验方程为：

$$K = a(\varepsilon_0 / \bar{\varepsilon}_{\max})^b \quad (1)$$

式中 K 为安全系数，在系统中默认采用简化毕肖普法计算； a 和 b 为拟合常数； $\varepsilon_0 = 1\mu\epsilon$ ； $\bar{\varepsilon}_{\max}$ 为边坡特征应变，可取为边坡各传感光纤最大应变值的平均值。

在边坡监测过程中，系统将会根据此时的荷载、水位等条件计算边坡安全系数，每当识别处理一组新的监测数据时，把实时光纤监测数据与历史数据组合，进行回归分析，不断更新经验方程。通过历史监测数据的积累与经验方程的修正，实现边坡特征应变预警阈值（ $K=1.1$ ）与临界阈值（ $K=1$ ）的逐步更新，以辅助监测人员对边坡稳定状态进行定量评价。

2 边坡模型试验应用

2.1 模型试验概况

以下以一组边坡模型试验为例，介绍本系统的实际应用情况。本次试验使用了南京大学研制的新型边坡多场作用模型试验箱。如图 6，边坡模型采用河砂和高岭土的混合土填筑而成，模型中的应变传感光纤分三层水平铺设（H1, H2, H3），每层光纤长度分别为 1.8, 1.5, 1.2 m，高程分别为 0.6, 0.85, 1.1 m。监测数据以拉应变为正、压应变为负。试验过程中采用千斤顶在坡顶进行局部加载，荷载从 12.5 kPa 逐级加至 34 kPa^[8]。

2.2 试验数据可视化

在边坡模型试验中，分布式光纤主要对边坡在某级荷载下边坡内部应变场的状态以及其内部应变场随荷载增加产生的变化进行监测。本文所编写的系统可以进行多方面的可视化展示。

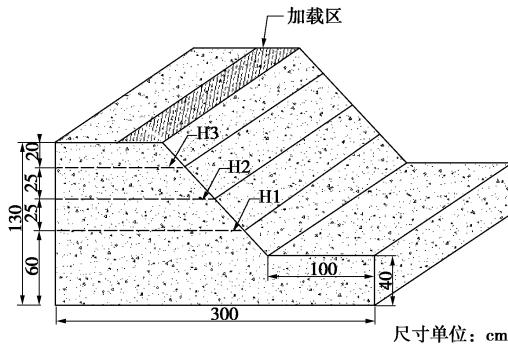


图 6 边坡模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of slope model

(1) 边坡应变分布可视化

基于试验数据, 边坡应变场可视化系统对各级荷载下边坡内部应变分布进行了二维展示(图7), 图中虚线为系统采用简化毕肖普法获得的边坡临界滑动面。图7清晰地显示了加载条件下坡体应变分布的特征: 边坡内部拉应变随着荷载逐渐增大, 同时也逐渐向深部传递; 第一层拉应变显著增加且集中在临界滑动面附近; 各层光纤在临界滑动面附近的拉应变值逐渐增大, 拉应变区也逐渐由核部向两侧扩展。

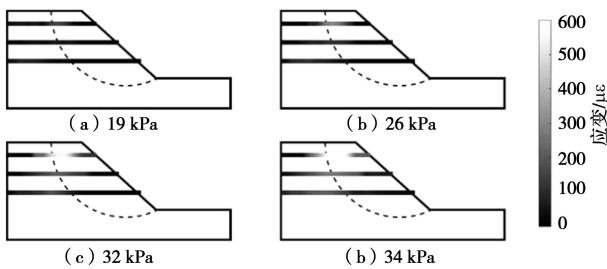


图 7 不同荷载作用下边坡内部应变分布

Fig. 7 Strain distribution within slope under different loads

(2) 监测光纤应变分布可视化

为了探究坡体应变分布随荷载增加的连续变化情况, 有时需要对每层光纤监测数据进行单独分析。图8显示了各层光纤在逐级加载条件下的应变变化。由图8(a)可看出H1光纤在前三级荷载下, 拉应变集中于15~45 cm处。从第四层荷载开始, 拉应变区发生明显偏移并最后稳定于30~90 cm处。与之相比, 图8(b)展示的H2光纤应变集中区域相对稳定, 拉应变区以70 cm为中心逐渐向两边扩展。图8(c)展示了最靠近坡顶的H3光纤应变, 与另两层光纤相比, 其拉应变总量和增量均为最大。拉应变集中区由最初的50~90 cm处向坡面偏移了约5 cm。

(3) 边坡应变场综合可视化

除了二维图, 边坡应变场可视化系统还能把不同时间点的光纤监测数据通过空间插值拟合成一个整体, 实现空间信息与时间信息的综合表达。如图9所示, 试验中坡体内部应变随荷载增加而不断累积, 拉应变区域逐渐向两边扩展。

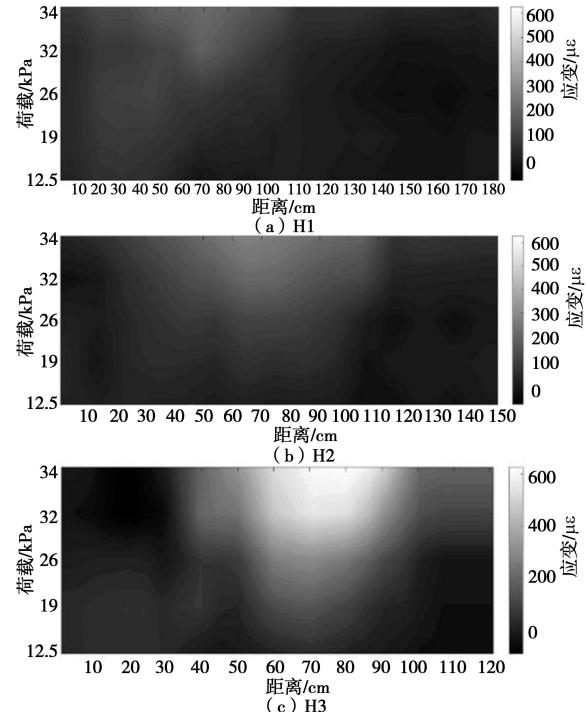


图 8 光纤应变-距离-荷载关系图

Fig. 8 Diagram of fiber optic strain-distance-load

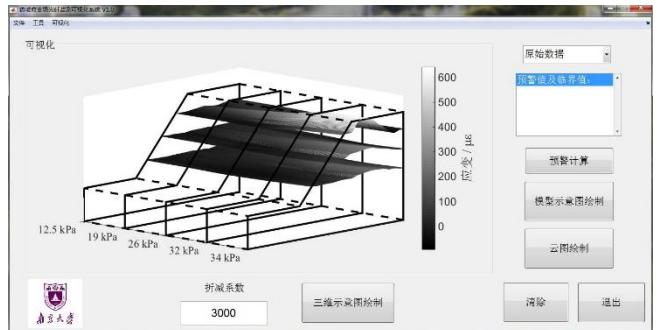


图 9 边坡应变空间分布效果图

Fig. 9 Spatial distribution of strain of slope

2.3 边坡稳定状态评估及预警

根据前述的边坡稳定状态评估及预警方法, 采用式(1)对每级荷载下的应变监测结果进行回归分析, 得到了分别对应于安全系数为1.1和1.0的边坡特征应变预警阈值与临界阈值, 如表1所示。可以看到, 随着监测数据的积累, 回归方程的 R^2 有所提高, 相关阈值更加准确。

表 1 边坡特征应变预警与临界阈值

Table 1 Warning and critical thresholds of characteristic strain of slope

荷载 /kPa	回归方程			预警阈值 /με	临界阈值 /με
	a	b	R^2		
26	2.055	0.067	0.974	11312	46920
32	2.074	0.070	0.984	8648	33747
34	2.075	0.070	0.988	8678	33863

3 结论

针对边坡光纤监测技术, 本文提出了边坡应变场

可视化系统, 该系统具有数据识别、去噪、预测、可视化显示、边坡稳定状态评估等功能。本研究表明:

(1) 在数据处理方面, 该系统能有效识别 FBG 和 BOTDA/R 的监测数据, 并去除背景噪声对监测数据的影响, 以辅助数据的可视化分析。同时, 系统集成数据预测功能, 可实现边坡稳定性的监测预警。

(2) 本系统基于 MATLAB 开发, 充分发挥其强大的绘图功能, 通过折线图、云图与三维图等形式, 实现边坡应变场光纤监测数据的可视化。

(3) 本系统兼具一定的边坡稳定状态评估及预警功能。系统可实现边坡临界滑动面搜索, 并能在监测数据采集的同时, 修正回归方程, 更新边坡应变预警值及临界值, 实现边坡稳定性分析与预警。

(4) 在室内模型试验中, 本系统有效提高了监测数据的可视化。未来该系统可结合基于应变场的边坡可靠性评价体系, 为现场监测提供更全面的评估及监测预警支持。

参考文献:

- [1] 贾明涛, 王李管, 潘长良. 基于监测数据的边坡位移可视化分析系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1324 - 1328. (JIA Ming-tao, WANG Li-guan, PAN Chang-liang. Visual analysis system for slope displacement based on monitored data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1324 - 1328. (in Chinese))
- [2] 梁桂兰, 徐卫亚, 何育智, 等. 边坡工程监测信息可视化系统研发及应用[J]. 岩土力学, 2008(3): 849 - 853. (LIANG Gui-lan, XU Wei-ya, HE Yu-zhi, et al. Visual system development and application of data analysis for slope engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(3): 849 - 853. (in Chinese))
- [3] 徐卫亚, 孟永东, 田斌, 等. 复杂岩质高边坡三维地质建模及虚拟现实可视化[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2385 - 2397. (XU Wei-ya, MENG Yong-dong, TIAN Bin, et al. Three-dimensional geological modeling and visualization based on virtual reality for complicated high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2385 - 2397. (in Chinese))
- [4] 孟永东, 蔡征龙, 徐卫亚, 等. 边坡工程中监测数据场三维云图实时动态可视化方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(增刊 2): 3482 - 3490. (MENG Yong-dong, CAI Zheng-long, XU Wei-ya, et al. A method for three-dimensional nephogram real-time dynamic visualization of safety monitoring data field in slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(S2):3482 - 3490. (in Chinese))
- [5] 施斌, 徐洪钟, 张丹, 等. BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 493 - 499. (SHI Bin, XU Hong-zhong, ZHANG Dan, et al. Feasibility study on application of BOTDR to health monitoring for large infrastructure engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 493 - 499. (in Chinese))
- [6] 李焕强, 孙红月, 刘永莉, 等. 光纤传感技术在边坡模型试中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1703 - 1708. (LI Huan-qiang, SUN Hong-yue, LIU Yong-li, et al. Application of optical fiber sensing technology to slope model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1703 - 1708. (in Chinese))
- [7] ZHU H H, HO A N L, YIN J H, et al. An optical fiber monitoring system for evaluating the performance of a soil nailed slope[J]. Smart Structures and Systems, 2012, 9(5): 393 - 410.
- [8] 朱鸿鹄, 施斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 821 - 828. (ZHU Hong-hu, SHI Bin, YAN Jun-fan, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 821 - 828. (in Chinese))
- [9] ZHU H H, WANG Z Y, SHI B, et al. Feasibility study of strain based stability evaluation of locally loaded slopes: Insights from physical and numerical modeling[J]. Engineering Geology, 2016, 208: 39 - 50.
- [10] ITEN M, PUZRIN A M, SCHMID A. Landslide monitoring using a road-embedded optical fiber sensor[C]// Proceedings of 15th International Symposium on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. SanDiego, 2008.
- [11] 徐洪钟, 施斌, 张丹, 等. 基于小波分析的BOTDR 光纤传感器信号处理方法[J]. 光电子·激光, 2003(7): 737 - 740. (XU Hong-zhong, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Signal processing of the fiber optic BOTDR sensor based on wavelet analysis[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2003(7): 737 - 740. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)