冯雪莲. 基于光纤应力传感的斜倾厚层山体滑坡预警研究[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 13-17. [FENG Xuelian. Study on Early Warning of Landslide in Inclined Thick Layer based on Fiber Optic Stress Sensing[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 13-17. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.02.003.]

基于光纤应力传感的斜倾厚层山体滑坡预警研究*

冯雪莲

(包头铁道职业技术学院 铁道通信信号系, 内蒙古 包头 014060)

摘 要: 以往采用仪表观测法预警对山体滑坡现象时, 只针对常态山体预警, 忽略斜倾厚层山体预警, 且需人为处理观测数据导致观测周期长、实时性差。该文基于光纤应力传感的斜倾厚层山体滑坡预警, 分析光纤应力传感器原理后, 设计斜倾厚层山体滑坡预警系统。求解斜倾厚层山体中各点安全系数, 将安全系数较低点作为光纤应力传感器设置点; 采用基于光时域反射计的光纤应力传感器将光纤探测信号通过光纤耦合器发送至可调谐光纤滤波器, 可调谐光纤滤波器改变光纤探测信号的光栅波长并发送至光电转换器; 光电接收器在光纤探测信号的光栅波长与可调谐滤波器投射波长出现重合情况下获取最大光强信号, 并将其转化为电信号发送至 A/D 转换器中采集信号; 采集的数字信号发送至现场可编程门阵列中进行运算与处理, 并将结果发送至 PC 显示端; 预警模块根据数字信号处理结果在斜倾厚层山体滑坡前进行有效预警。

关键词: 光纤应力传感; 斜倾厚层; 山体滑坡; 预警研究; 光时域反射计

中图分类号: TP212; X43; X915.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-811X(2020)02-0013-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.02.003

斜倾厚层山体滑坡是地形坡度小于山体滑移面的滑坡现象, 多发于我国重庆、云南以及四川等地。斜倾厚层山体滑坡通常以侧向崩塌形式存在, 是一种以大型失稳状态存在的山体滑坡现象, 斜倾厚层山体滑坡与常态下的山体滑坡相比所造成的危害更加严重[1]。我国应用于滑坡预警的方法主要有仪表观测法、降雨量监测法、地质观测法等, 这些方法主要应用于常态山体滑坡预警中, 不仅测量周期较长, 而且需要人为对测量数据进行处理, 不具有智能化以及现代化特点[2]。我国乃至世界对于斜倾厚层山体滑坡预警研究较少, 因此一种有效预警斜倾厚层山体滑坡系统对于人类规避危害具有重要作用[3]。光纤应力传感器灵敏度高、抗干扰性能较强, 被广泛应用于工业、天文、地质等行业的智能化监测以及预警中。提出激光光纤应力传感的斜倾厚层山体滑坡预警方法, 将光纤应力传感器应用于斜倾厚层山体滑坡预警中, 利用光纤应力传感器的高灵敏度对斜倾厚层山体内应力变化进行监测, 预测山体滑坡情况并及时报警, 有效减轻斜倾厚层山体滑坡对于人类生活以及财产所造成的损失[4]。

1 基于光纤应力传感的斜倾厚层山体滑坡预警

1.1 光纤应力传感器原理

光纤应力传感器种类众多, 本文选择将基于光时域反射计(OTDR)的分布式光纤压力传感器应用于斜倾厚层山体滑坡预警系统中, 光时域反射计具有检测范围广、灵敏度高以及工程应用性能好等优点, 可有效应用于斜倾厚层山体滑坡预警中。

光纤应力传感器中光纤受到外界扰动时, 形态会产生微弯形成微弯损耗, 微弯损耗直接影响光纤扰动物理量的数据变化[5]。将微弯调制机构应用于斜倾厚层山体滑坡应力检测中, 在传感斜倾厚层山体滑坡内应力变化时调制光纤微弯[6], 光纤应力传感器传感原理如图 1 所示。

当光纤存在微弯扰动情况时, 所受到应力变化量用 $\triangle H$ 表示, 所受到微弯形变以及相应微弯损耗变化量分别用 $\triangle X$ 与 $\triangle \alpha$ 表示:

* 收稿日期: 2019-09-10 修回日期: 2019-12-04
基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZZ17539)
作者简介: 冯雪莲(1975-), 女, 汉族, 内蒙古包头人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为计算机应用技术、计算机网络等. E-mail: snow_snowflake@sina.com

$$\triangle\alpha = f\left(\frac{\triangle\alpha}{\triangle X}\triangle H\right)。\tag{1}$$

式中：$f\left(\frac{\triangle\alpha}{\triangle X}\right)$表示光纤灵敏度系数，灵敏度系数受光纤传输特性、微弯调制机构空间周期以及微弯调制机制齿数所影响。利用光纤将数量为 n 的应力调制区串联，利用光时域反射计监测光纤存在的微弯损耗[7]，利用监测结果测量斜倾厚层山体滑坡内应力。

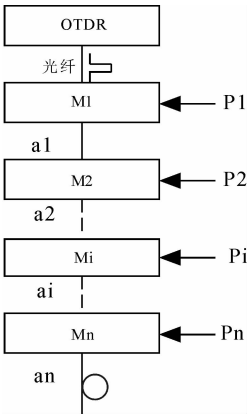


图1 基于光时域反射计的光纤应力传感原理

当光纤受到的光脉冲峰值功率大小为 P_0 时，光脉冲通过若干个压力传感区后沿光纤传送至位置 W，可得 W 点的后向散光功率在光脉冲注入端公式为：

$$P(W) = P_0\eta\exp\left(-2\alpha W-2\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\right)。\tag{2}$$

式中：α 与 η 分别表示光纤的衰减系数以及瑞利后向散射因子；η_i 表示在第 i 个应力传感区内形成的光损耗量。

在第 i 个压力调制区前 W_1 点的后向散射光功率公式为：

$$P(W_1) = P_0\eta\exp\left(-2\alpha W_1-2\sum_{j=1}^{i-1}\alpha_j\right)。\tag{3}$$

在第 i 个压力调制区后 W_2 的后向散射光功率公式为：

$$P(W_2) = P_0\eta\exp\left(-2\alpha W_2-2\sum_{j=1}^{i}\alpha_j\right)。\tag{4}$$

依据式(3)和式(4)获取光损耗量公式为：

$$\alpha_i = \frac{1}{2}\left[\ln\frac{P(W_1)}{P(W_2)}-2\alpha(W_2-W_1)\right]。\tag{5}$$

通过以上计算过程可知，通过 W_1、W_2 两点的瑞利后向散射光功率可获取第 i 个应力传感区内形成的光损耗量，依靠扰动前后形成的光损耗量差值获取斜倾厚层山体内不安全点的应力变化量[8]，通过应力变化结果可准确预警斜倾厚层山体滑坡情况[9]。

1.2 斜倾厚层山体滑坡预警系统

通过上文可知基于光时域反射计的光纤应力传感器预警原理，将基于光时域反射计的光纤应力传感器应用于斜倾厚层山体滑坡预警系统中，构建基于光纤应力传感的斜倾厚层山体滑坡预警系统，如图2所示。在利用斜倾厚层山体滑坡预警系统对斜倾厚层山体进行预警前，需要先确定斜倾厚层山体容易出现滑坡的不安全点[10]。通过最大剪应力以及最小正应力求解斜倾厚层山体中各点安全系数，将计算结果中安全系数较低的点设置为不安全点，不安全点作为斜倾厚层山体滑坡预警系统光纤应力传感器设置点[11]。

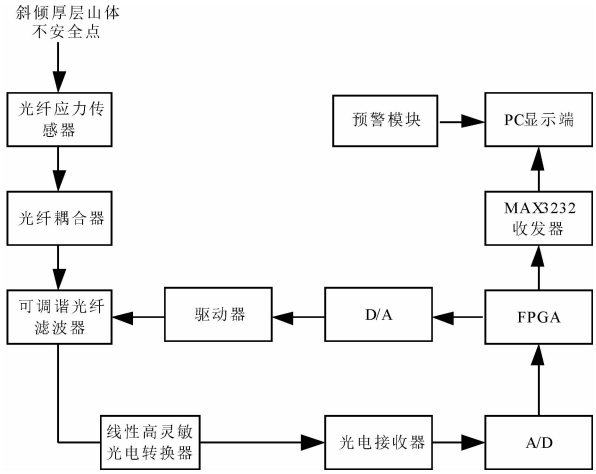


图2 斜倾厚层山体滑坡预警系统

斜倾厚层山体滑坡预警系统包括光纤应力传感器、光纤耦合器、可调谐光纤滤波器、现场可编程门阵列(FPGA)以及光纤应力传感器等器件。

光纤应力传感器将光纤探测信号通过光纤耦合器发送至可调谐光纤滤波器，FPGA 设定电压数字量，由 D/A 将电压数字转化至 12 位精度的锯齿波电压。在该系统中，电压频率以及电压幅值可随意调节，使经过可调谐滤波器的光纤光栅波长在可调谐滤波器不断工作过程中发生变化[12]。光纤探测信号在经过可调谐滤波器处理后，发送至线性高灵敏光电转换器。

滤波器的透射光强在光纤探测信号光栅反射波长和可调谐滤波器投射波长出现重合情况下数值最大，可利用光电转换器监测到最大光强，此时可调谐滤波器所受电压与光纤中心反射波长相同。光纤应力传感器中光纤受到外部影响时，光栅峰值波长相应发生变化，通过光栅波长变化量与测量过程中的变化情况，可获取光纤应力传感器监测目标的数据变化情况，获取解调结果。

光电接收器获取光强信号后转化至电信号发送至具有 16 位精度的 A/D 转换器中采集信号，获取的数字信号发送至现场可编程门阵列中进行运算以及信号处理。通过 MAX3232 收发器将现场可编程门阵列与计算机串行通信，利用 PC 显示端显示光栅变化结果，通过光栅变化结果获取斜倾厚层山体光纤应力传感器设置点(斜倾厚层山体不安

全点)的应力变化。对比该点应力变化与设定的变化阈值，当该点应力变化大于设定的变化阈值时，说明该点存在山体滑坡风险。此时，预警模块将根据光纤应力传感器设置点应力变化与变化阈值的对比结果划分山体滑坡预警等级，在发生斜倾厚层山体滑坡前进行有效预警。

2　实例应用分析

为检测本文研究的基于光纤应力传感的斜倾厚层山体滑坡预警系统对斜倾厚层山体滑坡的预警有效性，在 Matlab 仿真平台中先检测应用于斜倾厚层山体滑坡预警系统中的光纤应力传感器的传感情况。在仿真平台中将应用于本文系统中的光纤应力传感器浇注于水泥块中，水泥块形态需符合滑移面倾角小于地形坡度要求且位于顺向与逆向间，对水泥块施加压力，检测光纤应力传感器的传感情况。

实验设置光纤应力传感器光栅中心波长为 1449.315 nm，利用光谱仪测量光纤应力传感器中光栅反射波长，选取精度以及测量范围分别为 0.01 mm 以及 0～50 mm 的百分表精确测定位置挠度，通过手轮转动对设置光纤应力传感器的水泥块施加荷载。

当受力面积为 0.041 m，初始波长为 1 449.315 nm 时，在仿真平台中通过光纤应力传感器测量水泥块的应力荷载与应变结果如表 1 所示。通过表 1 实验结果可知，光纤应力传感器应变量与外加质量呈线性增长，且最大应力荷载可高达 8.426 MPa。

表 1　应力荷载与应变实验结果

外加质量/kg	应力载荷/MPa	波长变化量/nm	应变
15	0.014	－0.008	－10.055
35	0.821	－0.028	－38.776
55	1.325	－0.047	－66.068
105	2.536	－0.086	－122.254
155	3.856	－0.132	－189.254
205	5.063	－0.176	－250.486
255	6.425	－0.231	－331.285
305	7.605	－0.276	－395.428
335	8.426	－0.308	－440.549
370	9.305	—	—

通过表 1 实验结果获取光纤应力传感器波长变化量与荷载变化曲线图如图 3 所示。通过图 3 实验结果可以看出，1MPa 载荷所对应光纤应力传感器中心波长变化量为 35.4 pm，本文用于测定波长分辨率的解调仪精度为 1 pm，可得本文所用光纤应力传感器最小应力分辨率为 0.030 MPa，明显优于规定应变分辨率 0.041 MPa。说明本文系统所用光纤应力传感器符合规定要求，可应用于斜倾厚层山体滑坡预警系统中。

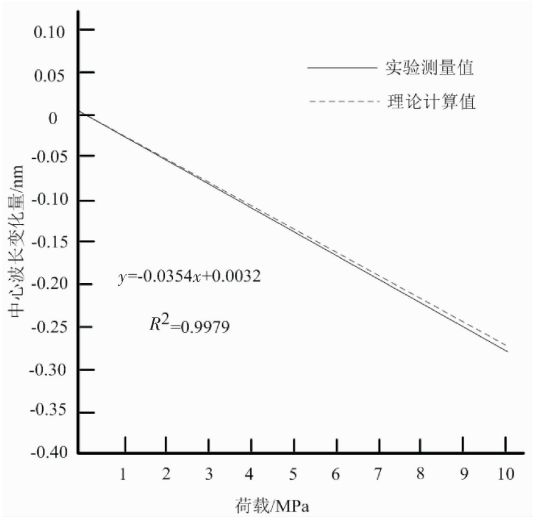


图 3　中心波长随载荷变化曲线

表 2　最大主应变大小和方向

应力载荷/MPa	最大主应变/με	实际加载主应变角度/(°)	测量主应变角度/(°)	角度相对误差/%
0.467	69.135	－45	－43.82	2.67
0.912	182.638	－45	－42.53	5.56
1.173	241.351	－45	－43.31	3.78
1.727	336.285	－45	－41.42	8.02
2.031	293.856	－45	－42.53	5.56
2.233	423.582	－45	－43.65	3.12
2.631	451.369	－45	－41.54	7.78
2.968	493.652	－45	－43.52	3.33
3.775	552.347	－45	－42.83	4.89
3.989	562.323	－45	－41.72	7.33

在仿真平台中通过光纤应力传感器测量实验最大主应变大小与方向结果如表 2 所示。通过表 2 实验结果可以看出，通过光纤应力传感器测量最大主应变方向平均值为- 42.69°，实验测量值与理论值相对误差为 5.13%，实验测量结果与实际加载主应变角度误差极小，说明该传感器测量最大主应变方向趋势正确，可应用于斜倾厚层山体滑坡预警系统中。

通过挠度仪测量挠度结果基于材料力学公式与几何关系获取实验中布设光纤应力传感器的水泥块上下表面轴向应变公式为：

$$\varepsilon = \frac{hf}{(a/2)^2 + f^2 + hf}。\tag{6}$$

式中：h 与 a 分别表示水泥块高度以及挠度仪长度，f 表示挠度。

在实验温度不变情况下，光纤传感器中光纤轴向应变与光纤中心波长漂移符合以下公式：

$$\varepsilon = \frac{1}{\eta(1-P_e)}\left[\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right]。 \quad (7)$$

式中：漂移 $\Delta\lambda$ 受荷载 P 与挠度 $y(x)$ 影响，P_e 为光纤应力传感器的有效弹光系数，本文实验选取有效弹光系数数值为 0.23，η 表示比例系数，通常取值为 0 至 1 间，实验取值为 0.946。

在仿真平台中测量不同载荷下光纤应变传感器测量应力值，获取光纤应力传感器应变值与灵敏度值结果如表 3 所示。表 3 中光纤应变传感器的测量应变值以及理论计算值通过公式(6)以及公式(7)获取。通过表 3 实验结果可以看出，光纤应变传感器测量值与理论值误差在 3% 之内，符合传感器传感要求。本文实验灵敏度平均为 0.048 με/N，而灵敏度理论值为 0.049 με/N，说明光纤应变传感器灵敏度符合传感器要求。可知应用于本文系统的光纤应变传感器具有更高的应变测量准确度以及灵敏度。

表 3 应变值以及灵敏度值测量结果

载荷/kN	光纤应变传感器测量应变值/με	理论计算应变值/με	光纤应变传感器灵敏度/(με/N)
0	0	0	0
200	10	9.7	0.051
400	23	22.6	0.049
600	34	33.7	0.047
800	47	46.7	0.048
1000	58	57.8	0.047
1200	72	71.6	0.048
1000	63	62.8	0.046
800	47	46.7	0.049
600	36	35.6	0.048
400	24	23.8	0.047
200	9	8.8	0.046
0	0	0	0

将以上通过实验测试具有良好性能的光纤应变传感器应用于斜倾厚层山体滑坡预警系统中，在仿真实验平台中设定光纤应变传感器输出光脉冲功率为 80 MW，设定光脉冲宽度分别为 10 ns、20 ns、50 ns、100 ns，通过实验测定光纤应变传感器在光脉冲宽度为 10 ns、20 ns 时，瑞利后向散射信号较好，空间分辨率为 2 m。

在仿真平台中开展野外仿真实验，利用本文系统对斜倾厚层山体进行应力监测可行性实验，在斜倾厚层山体下滑方向敷设本文预警系统，对山体滑坡方向的不安全点 A 点实施监测，检测本文系统的预警性能，通过本文系统监测斜倾厚层山体应力分布、降雨量以及地下水位变化曲线图见图 4。从图 4 可看出，采用本文系统监测的斜倾厚层山体内应力变化曲线、地下水位以及降雨量变化幅度基本相同，即应力随着降雨量以及地下水位的变化而变化，说明本文系统对于斜倾厚层山体内应力变化监测准确有效，可准确预警斜倾厚层山体滑坡。

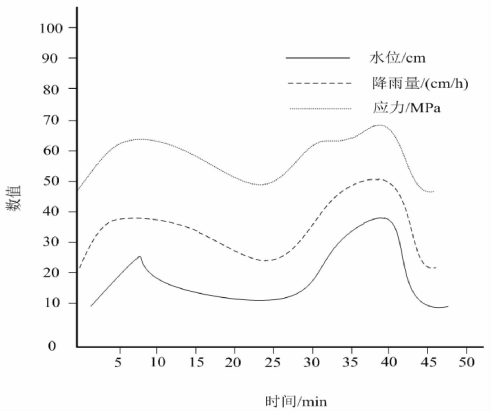


图 4 应力、降雨量、地下水位变化曲线图

在仿真平台中设置 5 个不安全点，重复 10 次检测本文系统的预警情况，预警结果见表 4。根据表 4 可知，本文系统在 10 次实验中均显示 B 点为斜倾厚层山体滑坡具体位置，说明本文系统可有效对斜倾厚层山体滑坡具体位置进行准确预警。且预警平均时间仅为 52.5 ms，验证了本文系统的实时预警性能。通过以上实验结果表明，系统可实现斜倾厚层山体滑坡数据的实时采集以及传输，对可能发生山体滑坡具体地点进行有效预警。

表 4 本文系统预警结果

次数/次	不安全点					预警时间/ms
	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点	
1	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	52
2	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	41
3	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	63
4	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	57
5	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	72
6	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	61
7	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	46
8	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	55
9	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	41
10	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	37

系统中信号与噪声比例称之为信噪比，信噪比是评价系统性能的重要指标，在仿真平台中测试不同信噪比情况下本文系统的漏报率以及误报率(图 5)。图 5 显示本文系统在不同信噪比情况下误报率以及漏报率均在 5% 以下，说明本文系统具有较好的鲁棒性，抗干扰能力较强，可应用于实际的斜倾厚层山体滑坡预警中。

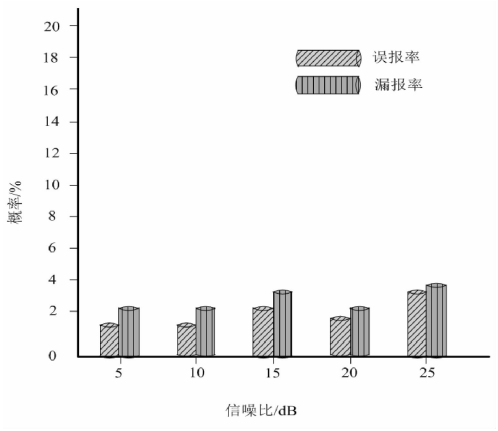


图 5　不同信噪比下系统运行情况

3　结束语

斜倾厚层山体滑坡的实时准确预警对于维护人民生命以及财产安全具有重要意义。将光纤应力传感器应用于斜倾厚层山体滑坡预警中，利用光纤应力传感器的高灵敏度以及良好的抗干扰性能，实时采集以及传输斜倾厚层山体中不安全点应力变化数据，有效增加斜倾厚层山体滑坡预警的可靠性以及实时性，实现对斜倾厚层山体的远程监控，增加预警系统的应用价值，为规避斜倾厚层山体滑坡这一自然灾害提供了有效依据。

参考文献：

[1] 胡志新，马云宾，谭东杰，等. 基于光纤光栅传感的管道滑坡监测方法研究[J]. 光子学报，2010，39(1)：33-36.
[2] 仲志成，赵斌，林君，等. 基于光纤传感技术的三维地应力传感器[J]. 光学精密工程，2018，26(2)：325-335.
[3] 刘邦，刘京诚，朱正伟. 光纤传感技术在山体滑坡的应用[J]. 压电与声光，2012，34(1)：27-32.
[4] 黄春林，李永倩，杨志，等. BOTDR 技术在山体滑坡监测中的应用研究[J]. 工程抗震与加固改造，2009，31(6)：124-128.
[5] 高潮，刘邦，郭永彩，等. 5MN 光纤布拉格光栅力值传感器[J]. 光学精密工程，2017，25(4)：857-866.
[6] 柴敬，张亮，曹敬强，等. 光纤传感应力检测的相似模拟实验[J]. 西安科技大学学报，2014，34(6)：656-663.
[7] 张磊，常新龙，张有宏，等. 基于光纤传感器的 SRM 界面黏接应力监测[J]. 航空动力学报，2018，33(10)：205-212.
[8] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(2)：217-226.
[9] 冯振，殷跃平，蔡奇鹏，等. 斜倾厚层山体滑坡启动机制的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(S1)：2600-2604.
[10] 梁山，胡颖，王可之，等. 基于无线传感器网络的山体滑坡预警系统设计[J]. 传感技术学报，2010，23(8)：1184-1188.
[11] 卜宪宪. 大区域山体滑坡危险区域挖掘方法研究与仿真[J]. 计算机仿真，2013，30(1)：382-385.
[12] 华南典型巨厚层红层软岩边坡降雨失稳的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2016，35(3)：549-557.

Study on Early Warning of Landslide in Inclined Thick Layer Based on Fiber Optic Stress Sensing

FENG Xuelian

(*Department of Railway Signal and Communication*, *Baotou Railway Vocational and Technical College*, *Inner Mongolia* 014060, *China*)

Abstract: In the past, instrumental observation method was used to warn landslide phenomena, only for normal mountain warning, ignoring inclined thick mountain warning, and the observation period was long and not real-time due to the need to process observation data artificially. Based on the optical fiber stress sensor, an early warning of the slope thick layer landslide. is given. After analyzing the principle of optical fiber stress sensor, the early warning system of inclined thick mountain landslide is designed. To solve the safety factor of each point in inclined thick mountain, the lower safety factor is used as the setting point of the optical fiber stress sensor; the optical fiber stress sensor based on optical time domain reflectometer is used to send the optical fiber detection signal through the optical fiber coupler to the tunable optical fiber filter, which changes the grating wavelength of the optical fiber detection signal and transmits it to the photoelectric converter. When the grating wavelength of the fiber detection signal coincides with the projection wavelength of the tunable filter, the device obtains the maximum intensity signal and transmits it to the A/D converter to collect the signal; the collected digital signal is sent to the field programmable gate array for calculation and processing, and the result is sent to the PC display terminal; the early warning module is based on the results of digital signal processing. Effective early warning should be carried out before inclined thick mountain landslides. The simulation results show that the system can accurately warn the specific location of inclined thick-seated landslides, and the average warning time is only 52.5 Ms.

Key words: fiber optic stress sensing; tilt thick layer; landslides; early warning; research; light time domain reflector