

范本, 胡祝敏, 胡伦俊. 基于徠卡测量机器人的山区边坡地质失稳监测研究[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 29-33. [FAN Ben, HU Zhumin and HU Lunjun. Geological Instability Monitoring of Mountain Slopes Based on Leica Geometry Robot[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 29-33. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.03.006.]

基于徠卡测量机器人的山区边坡地质失稳监测研究*

范 本¹, 胡祝敏², 胡伦俊³

(1. 四川建筑职业技术学院 测绘工程系, 四川 德阳 618000; 2. 重庆市地质灾害自动化监测工程技术研究中心, 重庆 400042; 3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610052)

摘 要: 传统的边坡地质失稳监测方法, 由于选取测量设备的适用性较差, 导致得到的监测数据缺失、断层, 因此基于徠卡测量机器人的功能特性, 提出对山区边坡地质失稳的监测方法。根据极坐标与三角高程, 自动定位监测位置; 分析参数之间的相互作用关系, 利用 SLIDE 模型获取边坡失稳数据; 设置形变数据序列, 剔除奇异值, 根据序列均值与标准差, 内插加密监测数据; 利用曲线切角理论判别边坡地质形变速度, 实现对山区边坡地质失稳状态的动态实时监测。

关键词: 徠卡测量机器人; 山区边坡; 地质失稳; 监测方法;

中图分类号: P208; X43; X915.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)03-0029-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.03.006

由于边坡地质大多数处于山区, 该区域内有公路、铁路以及部分村镇, 严重威胁了人民的居住安全、日常工作以及城镇交通运输, 因此需要实时监测山区边坡地质的稳定性^[1]。传统的监测方法是利用 LTD 探底雷达, 实时监测山区边坡地质的地下空间结构, 但由于该设备在数据监测的连续性、精准性、预测性方面不具有系统化特征, 同时自动化程度不高, 对于一些紧急数据的反应效果不佳^[2]。

根据传统监测方法存在的不足, 提出全新的山区边坡地质失稳监测方法。徠卡 TM30 测量机器人的硬件中包括伺服马达, 同时拥有 TPS 程序控制系统, 结合激光技术、通讯技术及 CCD 技术, 构成一个集目标识别、跟踪、自动照准、测角、测距、记录等技术于一体的测量平台, 可以精确获取边坡地质的不稳目标数据, 在短时间内完成对极多目标的连续性重复监测, 实现完全自动化的地质数据测量。当边坡地质发生极微小的形变时, 徠卡测量机器人也可以及时观测出形变数据, 实现对边坡地质变化状况的实时掌控, 降低突发型地质灾害的发生概率^[3]。此次提出的监测方法, 不仅能对山区边坡地质失稳做出及时预警, 也可以为矿井的地下结构失稳监测、沙漠化土地、盐碱地的地质监测提供技术支持。

1 基于徠卡测量机器人的山区边坡地质失稳监测方法

1.1 机器人自动定位监测位置

使用徠卡测量机器人监测山区边坡地质的失稳情况时, 该机器人通过多测回测角机载软件, 设定测量数据, 包括水平角度、天顶距角度以及斜距。其中水平角度为监测点与仪器后视点之间的水平角, 角度范围为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$; 天顶距角度为监测点与仪器垂直方向之间的夹角, 范围在 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 之间; 而斜距是待监测边坡与监测点之间的直线距离。为了更加直观的反应边坡地质的形变状况, 将角度数据和距离数据设置为监测点位置坐标, 根据坐标值确定监测范围边界节点^[4]。将山区地质数据上传到机器人控制界面, 徠卡测量机器人将极坐标计算公式作为基本控制原理, 获取设备监测位置; 通过三角高程法计算出待监测点高程。图 1 为极坐标计算示意图。图 1 中, 点 A 与点 B 为已知的设备监测边界位置; 点 D 表示待监测的山区边坡中心位置; 空心圆表示以点 D 为原点的可能失稳区域, 用字母 W 表示; L 表示点 A 与点 B 之间的水平距离; l_1 表示点 A 与 D 之间的距离; l_2 表示点 B 与 D 之间的距离; α_1 与 α_2 表示两侧极限位置的机器人监测角度^[5]。假定两个监

* 收稿日期: 2019-12-10 修回日期: 2020-03-20

基金项目: 四川省教育厅研究项目(16ZB0517); 四川建筑职业技术学院课题“基于测量机器人的高层建筑物安全监测预警系统研究”
第一作者简介: 范本(1986-), 男, 汉族, 河南商丘人, 硕士, 讲师, 研究方向为工程测量. E-mail: fanben228@163.com

测点的选位没有误差, 根据极坐标计算原理, 得到机器人极限监测的边坡最远位置, 该位置的平面坐标为:

$$\begin{cases} X_D = X_A + p \cos \alpha; \\ Y_D = Y_A + p \sin \alpha. \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_D 与 Y_D 分别表示以 D 为原点, 边坡最远位置的横坐标、纵坐标; X_A 与 Y_A 表示点 A 的横、纵坐标; p 表示点 A 到待监测边坡的平面距离。测量机器人根据上式设置监测距离极值^[6]。同时测量机器人运行高程设定程序, 该程序的运行是根据三角高程法获得, 可知边坡的监测高程值为:

$$H_D = H_A + p \sin \alpha + a_h - b_h. \quad (2)$$

式中: H_D 表示待监测点 D 与监测点 A 之间的高程; H_A 表示机器人在 A 点的高程; h 表示高度值; a_h 表示仪器的自身高度; b_h 表示机器人棱镜的高度^[7]。徠卡测量机器人按照上述公式(1)、(2)设定的定位程序, 自动演算出监测点位置, 实现对边坡地质失稳监测位置的自动定位。

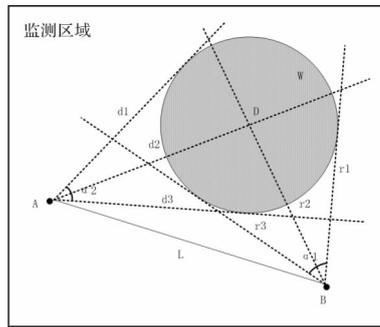


图1 极坐标计算示意图

1.2 基于 SLIDE 模型获取边坡失稳数据

按照设定的位置调整测量机器人, 打开软件运行自动监测程序, 根据机器人数据采集模块中的 SLIDE 模型, 获取边坡数据。SLIDE 模型计算公式为:

$$FS = \frac{\tan \varphi + \frac{f+f(t)}{\mu_c d_t \sin \vartheta \cos \vartheta}}{\tan \vartheta} \quad (3)$$

式中: FS 表示采集模块的稳定系数; φ 表示山区边坡土层之间的摩擦角度; ϑ 表示边坡区域坡度; f 表示土壤或土层黏结力; t 表示监测时刻; $f(t)$ 表示 t 时刻下土质表层黏结力; c 表示土壤总容重; μ_c 表示土壤的单位容重; d_t 表示 t 时刻下的边坡地质入渗深度^[8]。公式中, 土层黏结力 f 与边坡土层间的摩擦角度 φ , 可通过计算土壤含水率获得, 假设含水率用 s 表示, 则 f 、 φ 与 s 之间的关系, 如表 1、表 2 所示^[9]。

表 1 f 与 s 在不同密度下的关系

干密度/ (g/cm^3)	方程	参数(U^2)	样本数 数据量 n
1.1	$f = -0.016s^2 + 0.647s - 2.312$	0.962	15
1.2	$f = -0.057s^2 + 2.833s - 23.014$	0.843	12
1.3	$f = -0.091s^2 + 4.661s - 30.265$	0.959	15
1.4	$f = -0.184s^2 + 9.558s - 86.527$	0.927	12
1.5	$f = -0.363s^2 + 16.995s - 145.452$	0.910	12

表 2 与 φ 在 ϑ 不同密度下的关系

干密度/ (g/cm^3)	方程	参数(U^2)	样本数 数据量 n
1.1	$\varphi = -0.552s + 31.463$	0.961	12
1.2	$\varphi = -0.579s + 33.429$	0.995	10
1.3	$\varphi = -0.682s + 35.177$	0.974	12
1.4	$\varphi = -0.771s + 38.286$	0.985	12
1.5	$\varphi = -0.635s + 34.741$	0.972	10

假定 k_i 是一个极端天气影响指标, 极端天气包括强降水、暴雪、地壳剧烈运动等。引入由该指标引起的土壤厚度变化的无量纲值:

$$\gamma_i = \frac{k_i \sum_{t=1}^N q_t}{\rho d_t (q - \ln e)} \quad (4)$$

式中: γ_i 表示 t 时刻内, 土壤厚度变化的无量纲值; q_t 表示 t 时刻内, 极端天气 k_i 影响常量; ρ 表示土壤孔隙密度; $\ln e$ 表示表 1 或表 2 中的关系值^[10]。假设极端天气影响下, 土壤或土层的入渗率为, 结合 SLIDE 模型, 则山区边坡地质失稳指标为:

$$IFS = 1 - \omega FS = 1 - \sqrt{\frac{2v_\gamma h' t}{q' - q_0}} \times \frac{F_{\min} + \left[1 - \min\left(E_{\max} \frac{j}{\sin \beta}, 1\right) \cos^2 \beta \cdot t_{\min} \right]}{\left[1 + \min\left(E_{\max} \frac{j}{\sin \beta}, 1\right) \right] \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad (5)$$

式中: IFS 表示边坡地质失稳系数; v_γ 是根据公式(4)求得的土壤饱和层水力传导度; h' 表示土壤毛管力; q' 表示土壤的初始含水量; q_0 表示土壤的含水饱和量; F_{\min} 表示土层间的最小聚力; E_{\max} 表示边坡地质的土壤最大承载力; j 表示边坡滑坡系数; β 表示边坡滑面角度; t_{\min} 表示失稳监测的最短时长^[11]。测量机器人根据上述失稳系数, 设定数据采集模块的数据采集标准, 确保获取数据均为失稳数据。

1.3 剔除奇异值内插加密监测数据

由于徠卡测量机器人在监测过程中的误差是不可避免的, 因此利用三角网间接平差, 对误差数据进行筛选。但边坡地质监测过程中, 所得的监测数据中会出现奇异值, 混淆边坡形变数值与误差数据的区别, 因此设置形变数据序列为 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中需要满足 $n \geq 3$; 同时设立新的数据序列为 $\{z_1, z_2, \dots, z_i\}$, 则存在公式:

$$z_i = 2x_i - (x_{i+1} + x_{i-1}). \quad (6)$$

式中: z_i 表示新序列中的第 i 个数据; x_i 表示形变数据序列中的第 i 个数据, 存在 $i = 1, 2, \dots, n - 2$ ^[12]。因此新序列中的监测数据个数为 $n - 2$, 计算 z_i 数据序列的均值与标准差:

$$\begin{cases} \Delta z = \sum_{i=1}^{n-2} \frac{z_i}{n-2}; \\ \delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-2} \frac{z_i - \Delta z}{n-3}}. \end{cases} \quad (7)$$

式中: Δz 表示 z_i 数据序列的均值; δ 表示数据序列标准差。用 z_i 减去均值的绝对值, 与标注差 δ 的比值为奇异值判别参数, 计算表达式为:

$$\eta_i = \frac{|z_i - \Delta z|}{\delta} \quad (8)$$

当 $\eta_i \leq 3$ 时, 则表明序列中不存在奇异值; 当上式不满足上述条件, 即 $\eta_i > 3$ 时, 则说明形变序列中的失稳数据, 存在奇异值, 需要剔除该数据^[13]。而剔除奇异值后的数据序列会存在数据缺失, 导致监测数据不连续, 因此对数据缺失区间进行内插加密处理。假设在数据区间 $[x, y]$ 上, 存在缺失点 $[u, v]$, 其中 u 值已知, 且该缺失点的相邻点坐标为 $[u_0, v_0]$ 、 $[u_1, v_1]$, 根据三角形特性可推算出:

$$\frac{u - u_0}{u_1 - u_0} = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \lambda \quad (9)$$

式中: λ 表示横坐标 u_0 到 u 的距离, 与 u_0 到 u_1 的比值。因此可以得到缺失点的纵坐标方程:

$$v = \lambda(v_1 - v_0) + v_0 \quad (10)$$

根据上式两个公式确定缺失点的坐标, 将分段的数据重新排列, 得到完整连续的边坡失稳数据序列^[14]。

1.4 判断边坡地质形变量

根据测量机器人得到的连续失稳数据, 判别边坡地质的形变量, 从而获取边坡的失稳程度。利用曲线切角理论对破边形变进行判断, 边坡纵坐标 $G(m)$ 为:

$$G(m) = \frac{f' \Delta T \times g(m)}{v} \quad (11)$$

式中: m 表示通过公式 (10) 得到的失稳数据连续序列; $g(m)$ 表示周期内的边坡位移变化量; ΔT 表示一个监测周期; f' 表示作用在该边坡上的自然影响因素指标; v 表示等速变形阶段边坡的位移速率^[15]。根据曲线切角, 得到判别公式:

$$\alpha_i = \arctan \frac{G(m) - G(m-1)}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\Delta G}{\Delta t} \quad (12)$$

式中: α_i 表示边坡的形变量; ΔG 表示单位时间内的形变量; ΔT 表示与 ΔG 对应的单位时间。根据上式公式计算结果, 当 $\alpha_i < 45^\circ$ 时, 说明此时的边坡地质失稳处于初始变化阶段; 当 $\alpha_i \approx 45^\circ$ 时, 说明边坡处于匀速变形阶段; 当 $\alpha_i > 45^\circ$ 时说明边坡处于加速变形阶段^[16]。通过上述结果可知边坡的变化状况, 根据 α_i 设置不同级别的预警指示, 让监控管理中心迅速做出反应, 根据 α_i 的不同, 为群众的转移、财产的保护手段设定不同的救援时间, 降低地质失稳导致的山体滑坡、泥石流等灾害的影响。

2 模型实例检验与分析

模型对比实验, 比照本文所提出的监测方法与传统监测方法的差异, 分析两种监测方式所获数据, 在数据连续性上的差异, 确定性能更好的监测方法。

2.1 实验准备过程

搭建实验测试平台, 本文实验地点选择为四川省某边坡公路附近, 将图 2 所示的山区边坡地形, 作为实验背景环境。



图 2 山区边坡地质实景图

收集该地区降水量、风速、地壳变迁历史等数据, 将上述数据导入到测试系统中。已知该地区地壳活跃, 强降水次数较多, 实验测试之前, 已经出现轻微的土壤下滑情况, 可见此处山体边坡地质处于失稳状态。同时设置两种监测方法中, 测量设备的监测位置, 数据导入界面与位置界面如图 3、图 4 所示。



图 3 模拟数据导入界面



图 4 测量设备位置界面

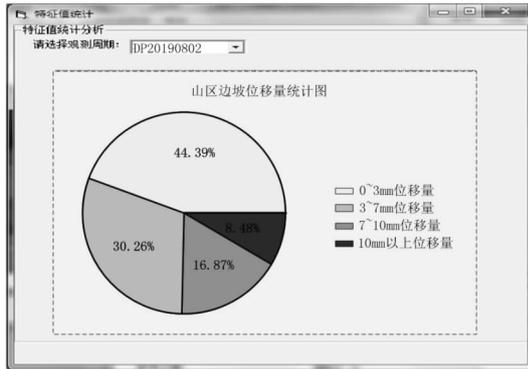
试运行两个测量硬件, 没有软硬件问题就可以开始监测图 2 地区的边坡地质失稳情况。

2.2 测试结果与分析

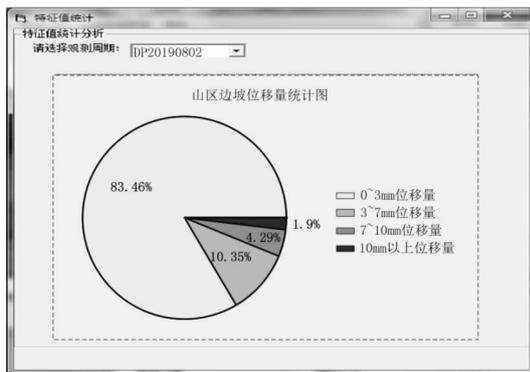
将本研究的监测方法的监测数据作为实验组, 将传统监测方法的监测数据作为对照组。图 5 为此次实验的测试结果。

已知该区域的边坡处于失稳状态, 本文提出的监测方法所得到的实验组数据符合当前的边坡失稳条件; 而传统监测方法下, 对照组中的位移变化量, 大多处于同一个阶段, 可见连续变化的动态数据部分缺失, 导致监测数据断层, 最终使监测结果失真。通过实验结果对比分析可以看出,

本文研究提出的监测的结果比传统方法更加可信, 具有较好的先进性。



(a) 实验组测试结果



(b) 对照组测试结果

图5 实验对比结果

3 结束语

本文通过区分奇异值和误差值, 利用徕卡测量机器人的功能特性, 自动定位山区边坡地质的监测位置, 确保数据真实; 同时内插加密监测数据, 使监测结果具有连续性, 增强监测结果的可靠程度。该方法解决了传统监测方法下, 监测数据由于混淆奇异值和误差值, 导致加密数据不具备连贯性、数据链断层的问题。但该方法对三角网间接平差的研究较少, 日后的研究中, 可以进一步分析探讨此方面的内容。

Geological Instability Monitoring of Mountain Slopes Based on Leica Geometry Robot

FAN Ben¹, HU Zhumin² and HU Lunjun³

(1. Geomatics Engineering Department, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China; 2. Chongqing Engineering Research Center of Automatic Monitoring for Geological Hazards, Chongqing 400042, China; 3. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd. Chengdu 610052, China)

Abstract: Traditional slope geological instability monitoring methods, due to poor applicability of measuring equipment, lead to missing and faulty monitoring data. Therefore, based on the functional characteristics of Leica measuring robots, a method for monitoring mountain slope geological instability is proposed. The Leica measuring

参考文献:

- [1] 王振林, 廖明生, 张路, 等. 基于时序 Sentinel-1 数据的锦屏水电站左岸边坡形变探测与特征分析[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(2): 204-209.
- [2] 王春梅, 黄凤山, 薛泽. 装车机器人激光雷达测量系统及其标定方法[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 129-136.
- [3] 白洁, 巨能攀, 张成强, 等. 苗尾水电站赵子坪岸坡变形失稳的地下水动力作用分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 159-166.
- [4] 陈龙飞, 刘高, 田华, 等. 黄土-红层接触面滑坡稳定性可靠性分析[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 244-248.
- [5] 裴小娜, 潘洪刚, 魏红彦. 基于激光测量的机器人智能定位系统[J]. 激光杂志, 2019, 40(4): 45-49.
- [6] 普运伟, 郭媛蒲, 侯文太, 等. 模糊函数主脊切面极坐标域形态特征提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 1-9.
- [7] 刘晓阳, 张龙, 王中晔, 等. 基于单目标双站测距的改进型三角定位法[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(05): 90-96, 101.
- [8] 刘天骏, 王坚, 韩厚增, 等. GPS/BDS 分类组合定位的指数加权 Helmert 方差分量估计法[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(7): 684-688, 694.
- [9] 周英博, 周秋鹏, 段志强, 等. 不同地形地质下岩质边坡的场地效应与地表地震影响范围的初步确定[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(7): 200-208.
- [10] 易武, 王鸣, 于冬升, 等. 考虑地层岩性及地质构造的区域边坡岩体完整程度预测[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(5): 60-64.
- [11] 苏昭. 组合去噪分析-趋势分析在路基沉降监测数据分析中的应用[J]. 中外公路, 2019, 39(4): 20-25.
- [12] 江桥, 彭军还, 杨红磊, 等. 改进小基线集技术的 GB-InSAR 铁路边坡监测[J]. 测绘科学, 2017, 42(12): 140-145, 150.
- [13] 石波, 王云鹏, 李太恒. 基准站观测数据加密方法及其在差分 GNSS 后处理中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(5): 651-657.
- [14] 崔凯, 秦晓同, 荆祥. 季节性冻土区路基高边坡变形多因素时变预测模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(6): 1109-1114.
- [15] 杨金旺, 陈媛, 张林, 等. 基于地质力学模型试验综合法的顺层岩质高边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 131-140.
- [16] 赵华, 李文龙, 卫俊杰, 等. 反倾边坡倾倒变形演化过程的模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 749-757.

robot automatically locates the monitoring position according to polar coordinates and the triangular elevation; analyzes the interaction between the parameters and uses the SLIDE model to obtain slope instability data; sets the deformation data sequence, removes singular values, and uses the sequence mean and standard deviation to interpolate the encrypted monitoring data; use the curve cut angle theory to determine the slope geological deformation speed, and realize the dynamic real-time monitoring of the mountain slope geological instability. The experimental results show that compared with the traditional monitoring methods, the proposed monitoring method can still maintain the continuity of the monitoring data after removing error data and singular values, making the monitoring results of geological instability real and reliable. It can be seen that the proposed monitoring method is more suitable for mountain slope geological monitoring.

Key words: leica survey robot; mountain slope; geological instability; monitoring method

(上接第 23 页)

- [15] 许庆虎, 王建国, 康小方, 等. 地震激励下参数不确定的相邻建筑结构重叠分散保性能混合控制方法[J]. 应用力学学报, 2017, 34(4): 615-621, 810.
- [16] 刘成清, 杨巍, 赵必大. 基于中日规范强震作用下的隔震结构响应对比分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(2): 67-77.

Design of Safety Appraisal System for Building Structure in post Earthquake Disaster Area

ZHENG Baocheng¹, ZHANG Lei², LIU Yu² and LIULiBo³

- (1. Economics and Trade Department, Hebei College of Industry and Technology, Shijiazhuang 050091, China;
2. Department of Building Engineering, Hebei College of Industry and Technology, Shijiazhuang 050091, China;
3. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to solve the problem that the reliability of the original building structure safety appraisal system is poor due to the small range of the appraisal index, the building structure safety appraisal system in the disaster area after the earthquake is designed. The hardware part of the identification system is first designed, the selection range of the index is expanded, the weight of the index is calculated, the safety identification model is constructed to obtain the identification result, and the building safety identification is completed according to the safety level dividing result. Combined with the above earthquake disaster area building structure safety appraisal system design completed. Build the system test link, obtain the system test results. Compared with the original system, the index of this system is more widely selected and the accuracy of identification is higher. It can be seen from the above that the performance of the system is superior to that of the original system.

Key words: building structure; safety performance; severe disaster area; performance appraisal