

石磊. 山体和滑坡灾害的传感网络预警技术研究[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 36-40. [SHI Lei. Research on early warning technology of sensing network for mountain and landslide disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 36-40. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.008.]

山体和滑坡灾害的传感网络预警技术研究^{*}

石 磊

(阜阳职业技术学院, 安徽 阜阳 236031)

摘 要:提出一种新的山体和滑坡灾害的传感网络预警方法, 由传感监测网络层 WSN、GPRS 接入层以及监控中心, 构建山体和滑坡灾害传感网络预警体系, 利用 GPRS 联网实现传感数据的远程传输, GPRS 网关将监测数据上传到监控中心, 监控中心基于监测数据实现山体和滑坡灾害的可视化呈现和警示; 使用节点异常特征提取方式对比鉴别异常节点区域, 采用分区域异常节点定位算法检测异常节点区域中的网络异常节点, 实现山体和滑坡灾害的准确预警。

关键词:山体; 滑坡; 灾害; 传感网络; 预警; 节点异常特征; 分区域

中图分类号: X43; P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)03-0036-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.008

无限传感网络 WSN 是一种全新的网络化信息收集处理技术, 其具有广泛的应用价值^[1]。无线传感网络 WSN 可应用在山体和滑坡灾害的检测领域, 在监控地区设置大量的无线网络节点构成网状结构, 再结合无线 GPRS 通信技术, 实时监测网络节点是否出现异常, 分析、处理收集到的监测数据, 则可完成山体和滑坡灾害的准确预警^[2]。当前存在一些较好的方法, 但具有一定的局限性。王文发等^[3]提出的无线传感网络覆盖盲区监测方法, 只针对网络覆盖盲区监测, 无法有效检测传感器节点异常情况, 不能准确预警山体和滑坡灾害的发生; 张文峰等^[4]地质滑坡灾害的山层断层效应分析, 只监测地质滑坡灾害的山层断层效应, 传递滑坡灾害信息时存在较高的滞后性, 使得滑坡灾害预警效率大大降低; 孙光林等^[5]研究的边坡灾害监测预警物联网系统及工程, 只能预警倾斜顺层岩质边坡灾害, 对其它类型边坡灾害预警效果差, 具有一定局限性。

为解决以上问题, 本文提出新的山体和滑坡灾害的传感网络预警方法, 提高山体和滑坡预警效果。

1 山体和滑坡灾害的传感网络预警技术研究

1.1 山体和滑坡灾害的传感网络预警体系

WSN 监测层、GPRS 接入层以及监控中心组成山体和滑坡灾害的传感网络预警体系^[6]。图 1 为传感网络预警体系结构。

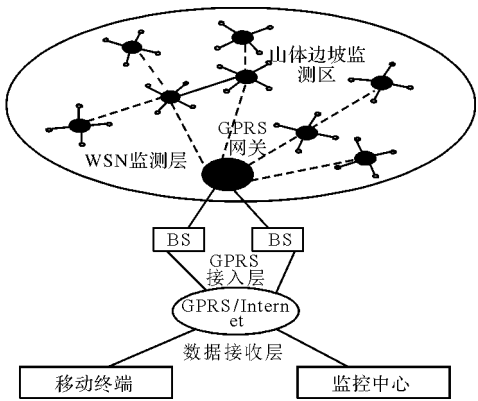


图1 山体和滑坡灾害的传感网络预警体系结构

从图1可知, 监测山体边坡的位移、倾角与水位等信息过程中, 需要在监测区中配置许多传感器节点, 信息收集频率与信息收集量在测量时通过传感器节点自动调整, 将收集到的信息利用簇头节点实施去冗融合处理后通过路由器发送, 远程监控中心接收 BS 基站内由 GPRS 网关节点界定格式处理的信息数据, 监控中心及时了解信息数据的安全性, 同时处理和呈现数据; 完成对山体边坡失稳的安全性预警监测^[7]。

图2为山体和滑坡灾害的传感网络预警体系山体边坡失稳变形运动和监测原理, 山体滑坡的核心要素是雨水浸泡, 表征边坡危险度的关键参数为山地下水位高度, 设置大量垂直孔洞在朝下山势的边坡山体危险范围内, 将液位传感器设置在孔洞底端, 向 WSN 反馈收集到的液位值。土石

^{*} 收稿日期: 2018-11-20 修回日期: 2019-01-28

基金项目: 安徽省自然科学研究重点项目(KJ2015A424); 安徽省质量工程项目(2015sxx034)

作者简介: 石磊(1981-), 男, 汉族, 安徽淮北人, 硕士, 副教授, 研究方向为无线传感器网络. E-mail: gkytzz@163.com

层受侵蚀风化等原因形成土石层巨大差异，在孔洞各个深度放置倾角传感器收集边坡不同层段的倾角信息数据^[8]。山体边坡失稳变形趋向、强度与威胁性由智能检测中心通过倾角传感器断定。

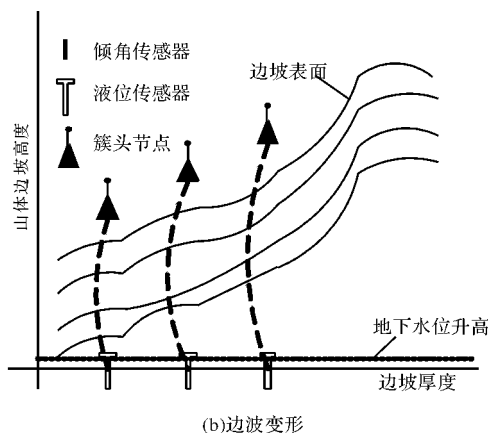
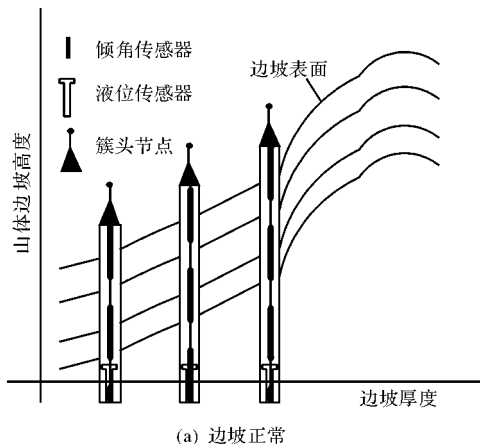


图2 山体边坡失稳变形运动和监测

WSN 监测层有冗余度高、耗能低等优点，WSN 监测层利用分层多簇结构网络，将临近的节点构成一个簇，子节点收集到的数据上传至簇头节点并融合，簇头节点依据规定算法动态选取，并将其余簇头节点数据传递给路由器向外传输^[9]。使用休眠机制收集数据延长传感器节点寿命，传感节点通过监测内部电路提醒监测边坡环境参数超出规定阈值，提升信息收集密度。为了提高系统使用寿命，节约用电，将传感节点的数据收集时间通过监控中心调至 8 h 一次传递数据。在雨季和台风危险期，为确保边坡安全的实时监测与滑坡危险预警，将监测频率提升至 1 min 一次传递数据。

1.2 GPRS 联网设计

海量数据的远程传输利用 GPRS 接入层完成，数据传输的可靠性与延迟性具有负相关性。GPRS 模块采用 Sm³00 模块为核心，利用 AT 指令编程完成网络的连接与数据的反馈^[10]。网络连接时查询模块在工作状态正常情况下，建立 APN 以及用户名与密码，网络连接形式、本地 IP 与端口在退出 OK 后建立，建立网络连接形式以及本地 IP 与端口后链接 UDP，UDP 链接完成后即刻上传数据。图 3 为 GPRS 网络连接流程。

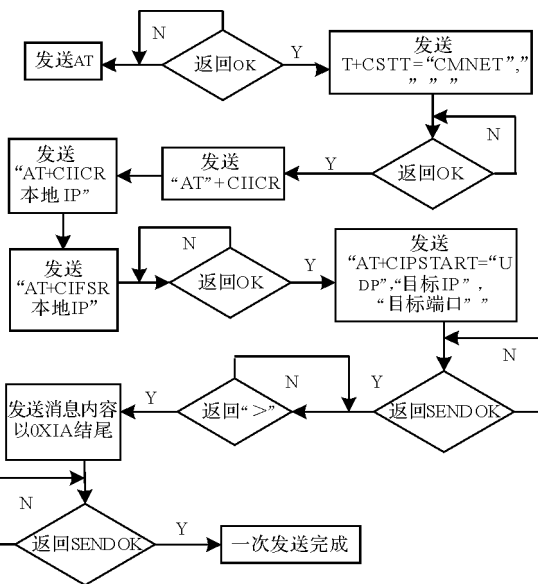


图3 GPRS 网络连接流程

1.3 监控中心的管理方式

GPRS 网关转发的监测数据上传到监控中心，通过该后台数据库存储监控数据，将数据呈现在用户页面中，基于数据研究结果完成山体和滑坡的告警^[11]，监控中心的两种功能如下。

1.3.1 可视化呈现功能

(1) 将呈现的地理信息与地理信息系统连接，通过地图呈现全部的传感器节点方位和实时数据，滑坡多发地带状况由掌握全部监测成果的监测者鉴定。

(2) 利用时间段规律反映各传感器节点的全部数据，监测者利用时间段规律分析各时间段的滑坡情况^[12]，健全预警体系。

(3) 全部实时数据与节点情况由总体节点依据网络中的标识大小反映，监测者选取监测数据并实时监测节点的特殊情况，有效的保护了网络系统。

1.3.2 警示功能

- (1) 异常标识的警示信息呈现在软件页面中。
- (2) 警示声音由监控中心内的多媒体装备发出。
- (3) 将警示短信发送至监测者的个人移动部件中。

1.4 山体和滑坡灾害传感网络异常节点检测

将山坡和滑坡灾害传感网络中邻近节点的方位信息作为基础，利用区域分割方式，实现庞大无线网络的小规模化管理^[13]。依据规划后的小节点，对比区域节点的单次多点，将区域节点局部关联：选取区域节点内正常信息，以方位信息为基础，对比选取的标准节点信息和邻近节点信息，依据方位半径大小选取适当的适配值^[14]。为增强节点定位的精确性，规划一个适当的选择算子。

1.4.1 异常节点的区域对比鉴别

利用节点异常特征提取的方式作为对比方式，对比鉴别异常节点区域，设定 k 表示向量，为收集到节点的异常特征，记作 $i = (i_1, \dots, i_k)^H$ ，且有 $i = F[i]$ ， $Q_i = F[i^H]$ 与 $D_i = F[(i - i)(i - i)^H]$ 分别为区域矩阵和特征差异矩阵。利用 i 区域特征和异常的 j 区域特征 $j = (j_1, \dots, j_k)^H$ 对比鉴别的过程为计算节点异常区域的过程。计算方法为：

$$j = R^H i = (r_1, r_2, \dots, r_k)^H i = \begin{bmatrix} r_1^H \\ r_2^H \\ \dots \\ r_k^H \end{bmatrix} i. \quad (1)$$

式中: $j_p = r_p^H i$, $p = 1, 2, \dots, k$; $i = (R^H)^{-1}$; R^H 表示计算节点。

为方便进一步对比鉴别, 加权优化节点特征对, 加权表达式为:

$$\hat{i} = \sum_{p=1}^w j_p r_p + \sum_{p=w+1}^k a_p r_p. \quad (2)$$

运算节点特征提取误差为:

$$\omega^2(w) = F[(i - \hat{i})^H (i - \hat{i})] = \sum_{p=w+1}^k [(j_p - a_p)^2]. \quad (3)$$

运用数学理论可得如果 $a_p = F[j_p] = r_p^H F[i] = r_p^H \hat{i}$, 则节点特征提取的误差最低, 则有:

$$\tilde{\omega}^2(w) = \sum_{p=w+1}^k F[(j_p - q_p)^2] = \sum_{p=w+1}^k r_p^H D_i r_p. \quad (4)$$

为了确保运算误差最低, 则要求 $\tilde{\omega}^2(w)$ 误差最低, 由 $\frac{\delta Z}{\delta r_p} = 0$ 得, 其中:

$$Z = \sum_{p=w+1}^k [r_p^H D_i r_p - \gamma_p (r_p^H r_p - 1)]. \quad (5)$$

得出:

$$D_i r_p = \gamma_p r_p, \quad p = w+1, \dots, k. \quad (6)$$

式中: 特征斜方差矩阵的特征值与相应的特征向量分别为 γ_p 与 r_p 。

实施差异对比检测方法的过程为:

$$\begin{cases} \tilde{\omega}^2(w) = \sum_{p=w+1}^k \gamma_p; \\ F[(j_p - \hat{j}_p)^2] = \lambda_p; \\ D_j = F[(j_p - j)(j_p - j)^H] \\ = R^H D_i R = \begin{bmatrix} \gamma_1 & & \\ & \gamma_2 & \dots \\ & & \gamma_k \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (7)$$

节点特征对比由公式(7)方程组求解完成, 完整存储节点异常特征值分量, 对运算量实施简化的过程中, 最大程度存储海量原有信息, 准确检测出异常区域特征和正常区域特征, 进而实现山体滑坡灾害的传感网络异常节点区域检测, 为后续异常节点定位提供可靠依据。

1.4.2 分区域异常节点定位算法实现

上小节检测到异常节点区域后, 应依据节点位置信息规划小区域无线网络, 各区域内节点数量在三个以上时可确保各节点区域对比的精确度。标准节点的验证信息反馈至邻近节点验证, 邻近节点将验证无误的标准信息反馈至其他节点。使用最佳选择算子验证三个以上的节点数量, 选取最佳多个通信节点。节点的初始位置解与节点区域的公共领域利用估计算法计算得出, 图4为多节点同时检验区域。

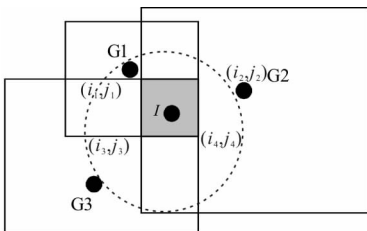


图4 多节点同时验证区域

如图4所示, (i_1, j_1) 、 (i_2, j_2) 、 (i_3, j_3) 、 (i_4, j_4) 分别为多个节点的区域, 标准节点位置信息 (i, j) 依据多个节点的区域搜索得出:

$$(i, j) = ((i_2, j_1)/2, (j_3, j_1)/2). \quad (8)$$

节点异常特征搜索算法内存在特征误差状况, 区域临近时特征误差形成波动, 依据特征误差波动获取最佳运算节点, 这一运算结果为小区域网络节点结果, 则大区域结果依据小区域结果优化运算得出, 优化表达式为:

$$O_p(G_{cur} \rightarrow G_p) = \begin{cases} 1, E(G_{cur}) \geq E(G_p); \\ \exp((E(G_{cur}) - E(G_p))/H), E(G_{cur}) < E(G_p). \end{cases} \quad (9)$$

式中: G_{cur} 以及 G_p 分别表示传感节点小区域和大区域, H_n 表示节点特征数, $E()$ 为特征误差运算函数。

为运算出整个网络节点内最佳解, 邻近无线网络区域节点特征信息由公式(9)优化得出。为保证能够准确定位异常节点信息, 由不同区域不同节点迭代运算, 运算结果能够逐渐缩短异常节点位置信息^[15], 最终定位到异常节点, 该异常节点则是山体和滑坡灾害传感网络中的异常传感节点, 提示对应区域存在山体和滑坡灾害。

2 实验结果分析

2.1 异常传感节点检测性能分析

实验选取某地区进行实验, 检测异常传感节点的性能, 实验将选取的实验点划分为6个小区域, 并配置6组同样结构的节点。设置5个任意感应器节点为异常节点, 运用本文方法与传统的基于层次分析的预警方法和基于无线传感预警方法检测异常节点, 记录检测时间。估计要检验方位信息和异常节点实际方位信息间的欧式距离为平均误差, 距离与误差呈正相关性。表1为本文方法与基于层次分析的预警方法和基于无线传感预警方法定位异常节点耗时的数据对比。

表1 三种方法定位数据对比

定位方法	定位耗时/s	平均误差/%
本文方法	2	2.2
基于层次分析的预警方法	15	32.1
基于无线传感预警方法	13	29.9

由表1可知, 本文方法检验异常节点耗时为2 s, 平均误差不超过2.2%, 基于层次分析的预警方法检验异常节点耗时为15 s, 平均误差为32.1%, 基于无线传感预警方法的检验异常节点耗时为13 s, 平均误差为29.9%。本文方法比基于层次分析的预警方法和基于无线传感预警方法检验异常节点耗时分节省13 s和11 s, 平均误差分别小29.9%、27.7%。本文方法定位异常节点相对耗时短且准确率高。

图5为不同传感节点比例情况下, 本文方法与两种传统分析方法的平均误差走向图。由图5可知, 随着传感节点比例的提升, 三种方法定位异常传感节点的平均误差都不断降低, 并且本文方法的定位的平均误差始终低于基于无线传感预警方法与基于层次分析的预警方法, 分析该图可以看出本文方法和基于层次分析的预警方法的平均定位误差分别是17%以及50%, 基于无线传感的预警方法的平均定位误差为47%, 能够看出

本文方法具有较高的异常传感节点检测精度。

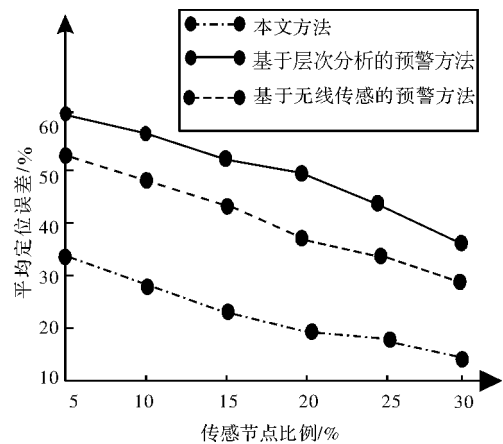


图5 平均误差走向图

2.2 预测滑坡位移性能分析

利用三种方法对实验地区某滑坡位移值与实际位移值进行比较，图6为本文方法预测滑坡位移与实际滑坡位移对比情况，图7为基于层次分析的预警方法预测滑坡位移与实际滑坡位移对比情况，图8为基于无线传感预警方法预测滑坡位移与实际滑坡位移对比情况。对比分析可知，本文方法预测滑坡位移与实际滑坡位移最高相差0.002 dm，能够精准定位滑坡位移方位。基于层次分析的预警方法预测滑坡位移与实测位移差距较大，最高相差0.023 dm，基于无线传感的预警方法预测滑坡位移与实际相差较大，最高相差0.021 dm。层次分析的预警方法与无线传感预警方法预测滑坡位移与实际滑坡位移距离相差较远，并且定位不精准。

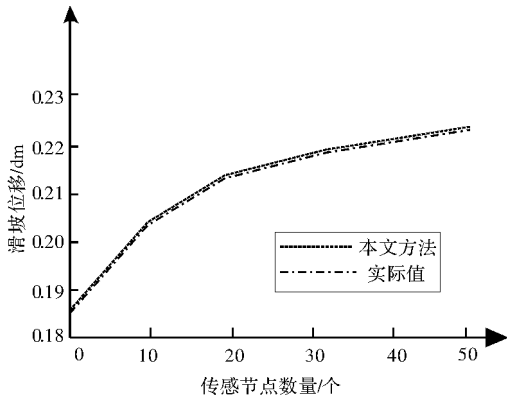


图6 本文方法预测滑坡位移与实际滑坡位移对比

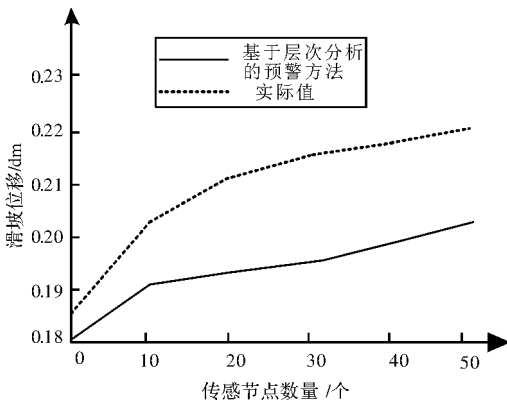


图7 基于层次分析的预警方法预测滑坡位移与实际滑坡位移对比

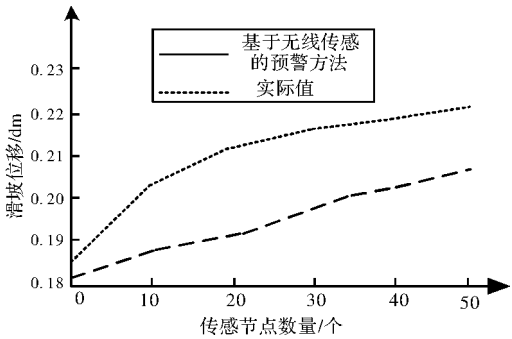


图8 基于无线传感的预警方法预测滑坡位移与实际滑坡位移对比

2.3 实际检测性能分析

采用本文方法监测预警实验地区的整个雨季时期，得到滑坡实时监测预警状况以及泥石流实时监测预警状况分别用表2和表3表示。由表2可知，本文方法监测到实验地区出现滑坡灾害的注意级8次，日降雨量超过33 mm，警示级2次，分别为6月28日与7月22日，这两日降水量分别为36 mm和40 mm，位移明显提升20 mm，后期无明显增强趋势，所以预警等级无提升。由表3可知，本文方法监测到实验地区泥石流流注意级9次，日降雨量平均超过33 mm，6月18日警示级1次，连续降雨5 d，累积雨量135 mm，泥未深度为25 cm。过后无降雨，泥位下降，预警等级没有提升。

表2 滑坡实时监测预警状况		
预警等级	时间	说明
注意级8次	5月11日	日降雨量40 mm
	5月16日	日降雨量35 mm
	6月6日	日降雨量51 mm
	6月15日	日降雨量33 mm
	6月26日	日降雨量39 mm
	7月8日	日降雨量36 mm
	7月17日	日降雨量37 mm
	7月30日	日降雨量41 mm
警示级	6月28日	日降雨量36 mm，地表位移提升
	7月22日	日降雨量40 mm，地表位移提升
警戒级	无	
警报级	无	

表3 泥石流实时监测预警状况		
预警等级	时间	说明
注意级9次	5月11日	日降雨量40 mm
	5月16日	日降雨量35 mm
	6月6日	日降雨量51 mm
	6月15日	日降雨量33 mm
	6月26日	日降雨量39 mm
	7月8日	日降雨量36 mm
	7月17日	日降雨量37 mm
	7月30日	日降雨量41 mm
	8月3日	日降雨量33 mm
警示级	6月18日	连续5 d降雨，累积雨量135 mm，泥未深度为25 cm
警戒级	无	
警报级	无	

分析上述实验结果可以看出, 本文方法通过一个雨季监测该地区的山体 and 滑坡灾害实时情况, 在实际应用中能够准确预警出滑坡和泥石流灾害, 并给出警示结果。

3 结论

本文提出了新的山体 and 滑坡灾害的传感网络预警方法, 由监测网络层 WSN、接入层 GPRS 与数据接收层构建山体 and 滑坡灾害传感网络预警体系, 使用节点异常特征提取方式对比鉴别异常节点区域, 通过分区域异常节点定位算法检测异常节点区域中的网络异常节点, 准确预警山体 and 滑坡灾害。实验结果说明, 不同传感节点比例情况下, 本文方法和基于层次分析的预警方法定位异常传感节点的平均定位误差分别是 17% 和 50%, 说明本文方法能够准确定位出山体 and 滑坡灾害的传感网络中的异常节点; 本文方法预测滑坡位移与实际滑坡位移最高相差 0.002 dm, 在实际应用检测中本文方法可准确预警出不同时间段的滑坡和泥石流灾害, 并给出详细的警示结果, 这些结果说明本文方法具有相对较高的山体 and 滑坡灾害预警效果, 取得了令人满意的效果。

参考文献:

[1] 张向营, 张春山, 孟华君, 等. 地震扰动区泥石流起动阈值研究现状及展望[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 221–227.

[2] 刘艳辉, 温铭生, 苏永超, 等. 台风暴雨型地质灾害时空特征及预警效果分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 119–126.

[3] 王文发, 富文军, 李晓英, 等. 无线传感网络覆盖盲区检测方法的研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2015, 32(9): 323–326.

[4] 张文峰. 地质滑坡灾害的山层断层效应分析与研究[J]. 科技通报, 2016, 32(5): 21–24.

[5] 孙光林, 陶志刚, 宫伟力. 边坡灾害监测预警物联网系统及工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 285–291.

[6] 周航, 刘乐军, 王东亮, 等. 滑坡监测系统在北长山岛山村山体滑坡监测中的应用[J]. 海洋学报, 2016, 38(1): 124–132.

[7] 陈宁生, 刘美, 刘丽红. 关于山洪与泥石流灾害及其流域性质判别的讨论[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 39–43.

[8] 曾庆利, 王炜风, 陈宏宇, 等. 镇雄赵家沟滑坡特征及基于坡体结构的失稳机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 510–518.

[9] 丛苏莉. 多维地震作用下钢筋混凝土建筑结构的抗连续倒塌仿真分析[J]. 地震工程学报, 2018, 35(9): 122–124.

[10] 盛凯. 滑坡监测无线传感器网络基于事件的信道分配方案[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(6): 143–147.

[11] 王东振, 赵斌, 余建胜, 等. 大规模 GPS 揭示中国现今地壳构造形变特征[J]. 地震工程学报, 2017, 39(3): 521–526.

[12] 方群生, 唐川, 程霄, 等. 汶川震区泥石流流域内滑坡物源量计算方法探讨[J]. 水利学报, 2015, 46(11): 1298–1304.

[13] 刘斌, 葛大庆, 张玲, 等. 地基雷达干涉测量技术在滑坡灾变后稳定性评估中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(8): 674–677.

[14] 陶志刚, 李海鹏, 孙光林, 等. 基于恒阻大变形锚索的滑坡监测预警系统研发及应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 3032–3040.

[15] 谢振华, 窦培谦. 基于 BP 神经网络的矿山排土场滑坡预警模型[J]. 金属矿山, 2017, 46(6): 166–169.

Research on Early Warning Technology of Sensing Network for Mountain and Landslide Disasters

SHI Lei

(Fuyang Institute of Technology, Fuyang 236031, China)

Abstract: In the early warning method of mountain and landslide hazard, there is lack of intelligent judgement link, and the early warning effect is poor. A new sensor network early warning method for mountain and landslide hazards is proposed. The sensor network early warning system for mountain and landslide hazards is constructed by WSN, GPRS access layer and monitoring center. The remote transmission of sensor data is realized by GPRS network, and the monitoring data is uploaded to the monitoring center by GPRS gateway. Based on the monitoring data, the center realizes the visualization and warning of mountain and landslide disasters; compares and identifies the abnormal node area by using the node abnormal feature extraction method; detects the abnormal nodes in the abnormal node area by using the abnormal node localization algorithm of the sub-region, and realizes the accurate early warning of mountain and landslide disasters. The experimental results show that with the increasing proportion of sensor nodes, the average error of locating abnormal nodes is 17%. The proposed method can accurately warn landslide and debris flow disasters in different periods of time, and give detailed warning results, indicating that the proposed method has a high warning effect.

Key words: mountain; landslides; disasters; sensor networks; early warning; node anomaly characteristics; sub-region