

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202009053



滑坡监测预警云平台系统的设计及应用

杨小平^{1,2}, 黄然^{1,2}, 王洋^{1,2}, 刘光辉³

- (1. 桂林理工大学 信息科学与工程学院, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 广西嵌入式技术与智能系统重点实验室, 广西 桂林 541004;
3. 桂林赛普电子科技有限公司, 广西 桂林 541000)

摘要: 设计一套滑坡监测预警的云平台系统,采用模块化设计方式建立云平台系统网络,开发独立的监测管理软件系统;在云平台中建立灰色 Verhulst 模型,对实测数据进行处理,通过灰色 Verhulst 模型对边坡的变形趋势进行预测,预测边坡可能产生滑坡的时间,实现对滑坡的提前预警.系统经过调试后部署于广西百色市田林县公路两旁的边坡进行实测,结果表明:滑坡云平台系统能够有效地监测边坡的变形,通过灰色 Verhulst 模型可实现对山体滑坡的预警.

关键词: 滑坡预警; 边坡变形监测; 云平台系统; 灰色 Verhulst 模型

中图分类号: P 642.22; TP 31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)01-0059-06

Design and Application of Landslide Monitoring and Early Warning Cloud Platform System

YANG Xiaoping^{1,2}, HUANG Ran^{1,2},
WANG Yang^{1,2}, LIU Guanghui³

- (1. College of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Embedded Technology and Intelligent System, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
3. Guilin Saipu Electronic Technology Limited Company, Guilin 541000, China)

Abstract: A set of cloud platform system for landslide monitoring and early warning is designed, cloud platform system network is established by modular design, and independent monitoring and management software system is developed. The gray Verhulst model is built in the cloud platform to process the measured data, and the deformation trend of the slope and the possible time of landslide are predicted by the gray Verhulst model, and the early warning of the landslide can be realized. After debug, the system is deployed on the slopes on both sides of the road in Tianlin County, Baise City, Guangxi for actual measurement. The results show that the system can effectively monitor the deformation of the slope, and the gray Verhulst model can realize the early warning of landslides.

Keywords: landslide warning; slope deformation monitoring; cloud platform system; grey Verhulst model

收稿日期: 2020-09-29

通信作者: 杨小平(1973-),男,高级实验师,主要从事嵌入式系统、智能信息处理技术的研究. E-mail: gutyxp@126.com.

基金项目: 国家高新技术研发计划(863 计划)(2013AA12210504); 广西壮族自治区科技攻关项目(AC1638012); 广西壮族自治区科技攻关项目(AD18281068); 广西壮族自治区南宁市青秀区科技局科技计划(RZ19100041)

滑坡(含崩塌)是斜坡岩土体在重力及其他外界因素(如降雨、地震、人类工程活动等)作用下,所表现出的一种变形破坏过程和现象^[1-2].我国山地和丘陵众多,特别是南方地区,很多公路、铁路、居民住房建设在山坡上或山坡旁,直接面临山体滑坡的威胁.山体滑坡是比较常见和危害巨大的自然灾害之一^[3-4],每年造成巨大的生命和财产的损失.据《全国地质灾害通报(2019 年)》报道,全国共发生地质灾害 6 181 起,共造成 211 人死亡,13 人失踪,75 人受伤,直接经济损失 27.7 亿元,其中,滑坡 4 220 起,占地质灾害总数的 68.27%^[5].由此可见,山体滑坡在全部地质灾害中占比高,影响大,为全国地质灾害之首.因此,研究山体滑坡预警云平台系统,为国家和地区提供山体滑坡的监测、预警、管理等服务,具有重要的意义.

在物联网和信息系统未发展前,山体滑坡监测信息是靠人工管理,分散储存.信息分析要经过数据搜集、向上报告、专家讨论、向下传达等一个复杂的过程,分析周期长,难以发挥监测系统的预报作用.随着互联网、物联网、信息化系统在我国的发展,各行业开始建立信息化系统,实现信息化管理.在应对山体滑坡自然灾害过程中,研究人员建立了信息化管理系统,用于对山体滑坡信息进行管理和监测预警.

袁宝远等^[6]使用 Visual Basic 语言结合 Access 数据库设计一套主控端的边坡监测信息系统,实现边坡监测信息管理、可视化查询分析、边坡不稳定先兆分析等功能.李迎春^[7]采用物联网技术和 C/S 架构相结合,将不同监测仪器进行集成,形成一套较为完备的地质灾害监测数据采集系统.Heryana 等^[8]利用 SIK-L 的滑坡灾害数据在 Android 设备上开发预警系统,当用户进入具有高滑坡风险区域时,会收到该区域滑坡风险的通知.王毅鹏等^[9]以陕西泾阳为例,提出云计算技术下的滑坡监测云平台设计,针对传统平台由于数据计算能力和处理用户服务请求的局限性,使用云计算平台的云计算技术,合理分配计算机的实体资源,为用户提供高效、快捷、高性能的空间地理信息服务.随着人工智能的发展,云平台在数据的存储和分析上均具有独特优势和广阔的应用前景.

滑坡预警中常用的模型和方法有 Verhulst 模型、灰色 Verhulst 模型、指数平滑法、神经网络等^[10].Verhulst 模型对预警指标的选取苛刻,需多次试算才能选择合适的预警指标.指数平滑法预测模型计算简单,对边坡变化反应灵敏,可能导致误报较多.神经网络需要较多的数据进行支撑,且需要调优.灰色 Verhulst 模型^[11]是 Verhulst 模型的改进,它通过对已知数据的分析和处理,得到事件变化规律,对滑坡的复杂性和监测的局限性有较强的适应力.综合各滑坡预警模型的优缺点,本文选择灰色 Verhulst 模型作为系统的滑坡预警模型,设计一套滑坡监测预警的云平台系统,采用模块化设计方法建立系统网络,对滑坡的变形和发展进行预测和报警.

1 系统设计

1.1 系统总体结构的设计

山体滑坡监测预警云平台系统主要由阵列式传感器、主控端、电信物联网云、监测中心、用户端构成,如图 1 所示.系统需要在监测的边坡上设置阵列式分布的监测器,使监测器覆盖整个边坡,对整个边坡的位移变形进行监测,监测器为了维持电量,每 5 min 唤醒一次,进行数据采集,并通过传送设备将测量数据上传至物联网云平台,云平台接收到数据,经过清洗存入数据库中;然后,对当前数据进行分析,判断边坡的稳定性,并将判断结果发送至用户端,用户可根据接收到的结果采取进一步的措施.

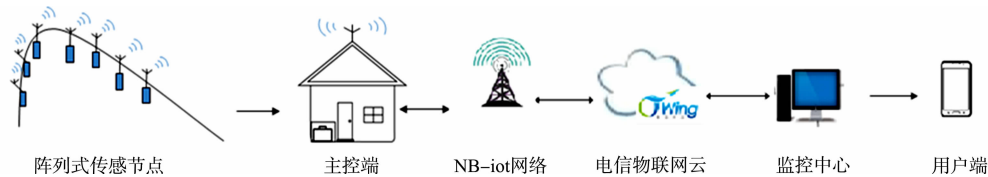


图 1 系统总体结构图

Fig. 1 System overall structure

为确保数据采集、数据传输和判定结果输出的准确性和时效性,监测预警云平台系统采用模块化设计方式,建立云平台系统网络^[12-13],将整个网络划分为不同的层次,主要分为感知层(倾角传感器、位移传感器、加速度传感器和水位计等)、网络层(NB 基站、路由器、Rola 网关等)、应用数据层(云中心、服务

器、短信中心等)、展示层(监控大屏、客户端、手机端等). 山体滑坡预警系统网络拓扑,如图 2 所示. 该网络结构设计通过采集滑坡监测器的各传感器数据,采用无线的通信方式上传至云平台,云平台通过数据库服务器对监测数据、历史数据、业务管理数据等进行存储,确保系统数据的安全性和持久性,保障云平台系统的稳定运行. 结合实际需求,对数据库进行详细设计,充分考虑模块之间的逻辑关系,设计相应的关系映射,避免在业务逻辑的实现过程中出现问题.

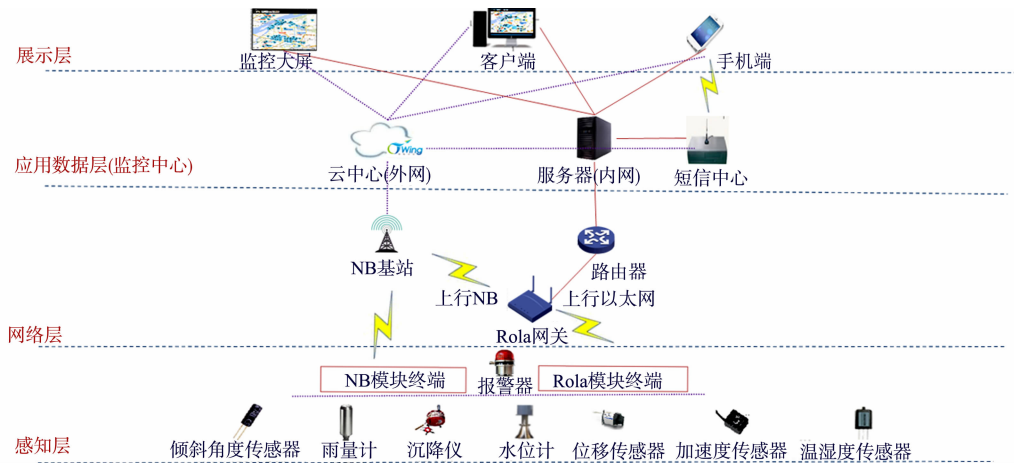


图 2 山体滑坡预警系统网络拓扑

Fig. 2 Network topology of landslide early warning system

山体滑坡云平台系统监控中心监测系统以 javaEE 技术为基础,采用 MySQL 数据库,使用 IDEA 开发环境,结合 spring boot 开源框架、bootstrap 前端框架、Hibernate 框架等进行设计. 云平台监控中心监测系统,如图 3 所示. 系统由用户管理、设备台账、终端通信、设备管理、消息管理等模块构成. 监测系统是实现边坡实时监测、预警信息输出、设备状态检测的重要平台.

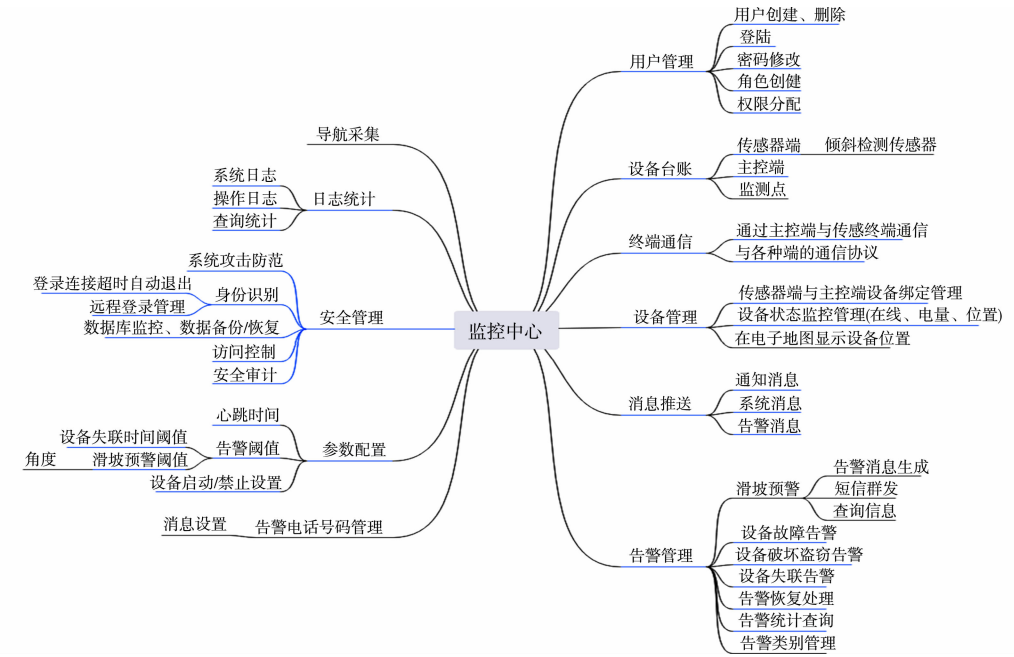


图 3 云平台监控中心监测系统

Fig. 3 Cloud platform monitoring center monitoring system

云平台自动对监测数据进行处理,若测量数据出现异常,则会在主页上显示警告信息,并发送短信和邮件通知相关工作人员,做到对监测点信息的及时处理. 工作人员可通过滑坡告警人工确认功能对监测设备的警告做出处理,若监测设备出现警告信息,负责监测点设备的工作人员需立即做出反应,确保监测区域的安全,保证监测设备一直处于正常工作状态;也可通过山体滑坡云平台系统监控中心访问云平台数据库,查看各个位移传感器的的实时测量数据,实现对边坡变形的实时监测. 监测系统主页面,如

图 4 所示.



图 4 监测系统主页面
Fig. 4 Monitoring system main page

1.2 监测预警算法

检测器的监测数据上传至云端数据库后,在数据库内对监测数据进行数据分析,根据实测数据预测边坡的变形趋势和边坡可能产生滑坡的时间. 系统对山体滑坡的监测预警算法的实现主要基于灰色 Verhulst 模型. 由于灰色 Verhulst 模型可用于描述非单调的摆动发展序列与饱和的 S 形序列状态过程^[14],而山体滑坡的前期是一个累积的变化过程,是一个非连续的 S 形序列,它的位移数据符合灰色 Verhulst 模型的数据要求. 将山体前期累计位移变化数据输入灰色 Verhulst 模型,模拟山体位移变化数据,设置告警阈值,通过判断预测位移数据是否达到阈值而实现山体滑坡预警.

设原始位移数据序列为

$$\boldsymbol{x}^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \cdots, x_n^{(0)}). \tag{1}$$

原始数据做一次累加,即

$$x_t^{(1)} = \sum_{k=1}^t x_k^{(0)}, \quad t = 1, \cdots, n. \tag{2}$$

紧邻均值生成序列 $\boldsymbol{z}^{(1)}$ 为

$$\boldsymbol{z}^{(1)} = (z_2^{(0)}, z_3^{(0)}, \cdots, z_n^{(0)}). \tag{3}$$

其中,

$$z_k^{(0)} = 0.5x_k^{(1)} + 0.5x_{k-1}^{(1)}. \tag{4}$$

则有

$$x_k^{(0)} = -a z_k^{(1)} + b (z_k^{(1)})^2. \tag{5}$$

构造向量 \boldsymbol{y}' 为

$$\boldsymbol{y}' = (x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \cdots, x_n^{(0)}). \tag{6}$$

构造矩阵为

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} -z_2^{(1)} & (z_2^{(1)})^2 \\ -z_3^{(1)} & (z_3^{(1)})^2 \\ \vdots & \vdots \\ -z_n^{(1)} & (z_n^{(1)})^2 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

灰色 Verhulst 模型的白化方程为

$$\frac{d\boldsymbol{x}^{(1)}}{dt} = -a\boldsymbol{x}^{(1)} + b(\boldsymbol{x}^{(1)})^2. \tag{8}$$

求解白化方程得

$$\hat{x}_t^{(1)} = \frac{ax_1^{(1)}}{bx_1^{(1)} + (a - bx_1^{(1)})e^{at}}. \tag{9}$$

利用最小二乘法求解白化方程参数列,即

$$\boldsymbol{B}=(\boldsymbol{a} \quad \boldsymbol{b})^{\mathrm{T}}=\left(\boldsymbol{x}^{\prime} \boldsymbol{x}\right)^{-1} \boldsymbol{x}^{\prime} \boldsymbol{y} .$$

(10)

检验灰色 Verhulst 模型精度的常用方法有相对误差检验、关联度检验、均方差比值检验和小误差概率检验^[15]等方法。使用广西壮族自治区某山体滑坡实测位移数据对滑坡监测算法进行相对误差检验,评价算法的预测精度。根据灰色 Verhulst 模型的计算公式可知:模型的计算复杂度为 $O(n)$,实验程序运行时间为 0.02 s。

2 系统监测结果分析

在广西百色市田林县公路两旁的边坡上,对山体滑坡云平台系统进行测试,将监测器布置在公路两旁的边坡上,每一个测量点分布有多个阵列式传感器。监测器部署位置图,如图 5 所示。图 5 中:蓝色圆圈位置标记为监测器位置。

某监测器记录了边坡由稳定状态到发生滑坡过程中的变形数据,并将所有的测量数据上传至云平台保存,根据测量数据绘制边坡位移-时间曲线,如图 6 所示。图 6 中: Δ 为边坡位移; t 为时间。由图 6 可知:开始测量的前 30 d 内,边坡变形逐渐增加,变形趋势缓慢上升,第 26 d 时,边坡变形量达到 90 mm;当变形量达到 100 mm 后,在短时间内变形急剧增加;边坡在距离测量开始后的第 30 d 产生滑坡。



图 5 监测器部署位置图

Fig. 5 Monitor deployment position

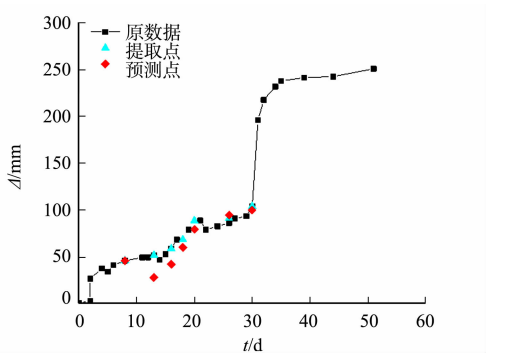


图 6 山坡位移-时间变化曲线

Fig. 6 Slope displacement-time curve

山体滑坡云平台系统可以记录边坡发生滑坡的整个变形过程,通过监测器将变形数据上传至云平台后,通过灰色 Verhulst 模型对边坡的变形进行预测。依据当地的边坡监测经验,当监测点的位移变形达到 95 mm 时,边坡即将失稳,产生滑坡,故以位移变形达到 95 mm 作为山体滑坡预警的告警阈值。

根据实测的边坡变形数据,第 9 d 的边坡变形达到 45.84 mm,选择 9 d 后的边坡变形测量数据导入灰色 Verhulst 模型中,对边坡变形趋势进行预测。灰色 Verhulst 模型预测值与实测值的对比,如表 1 所示。表 1 中: Δ_{act} 为实际值; Δ_{pre} 为预测值; ϵ 为残差; δ 为相对误差。

表 1 灰色 Verhulst 模型预测值与实测值的对比

Tab. 1 Comparison of grey Verhulst model prediction value with measured value

t/d	$\Delta_{\text{act}}/\text{mm}$	$\Delta_{\text{pre}}/\text{mm}$	ϵ/mm	δ
9	45.84	45.84	0	0
13	51.76	27.81	-23.95	0.46
16	58.87	42.03	-16.84	0.29
18	68.41	60.09	-8.32	0.12
20	88.67	79.39	-9.28	0.10
26	90.99	94.64	3.65	0.04
30	104.07	99.91	-4.16	0.04

由表 1 可知:残差呈现先增大后减小,再变大的过程。根据预测结果,山体滑坡云平台系统于第 26 d 发布预警信息,较滑坡实际发生时间提前 4 d,该算法能对山体滑坡起到监测预警效果。

3 结论

1) 设计一种山体滑坡监测预警的云平台系统,该系统采用模块化设计方式建立云平台系统网络,

确保监测数据传输、存储、输出的准确性和时效性,开发独立的监测管理软件,便于管理和实现统一调度;在云平台中建立灰色 Verhulst 模型,将实测的边坡变形数据代入模型中预测边坡的变形趋势和可能产生滑坡的时间,实现对滑坡的提前预警。

2) 运用山体滑坡云平台系统在广西百色市田林县公路两旁边坡上进行测试,试验结果表明:山体滑坡云平台系统能够有效地监测边坡的变形,通过灰色 Verhulst 模型能够实现对山体滑坡的预警。

参考文献:

- [1] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360-374. DOI: 10. 13544/j. cnki. jcg. 2020-025.
- [2] 李蒙, 丁凌灵, 林从谋. 采用演化博弈的地质灾害人员疏散仿真[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 324-328. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2013. 03. 0324.
- [3] 孙平定, 蔡润, 谢成阳, 等. 基于遗传优化神经网络的边坡稳定性评价[J]. 现代电子技术, 2019, 42(5): 75-78. DOI: 10. 16652/j. issn. 1004-373x. 2019. 05. 018.
- [4] 邱海军, 马舒悦, 崔一飞, 等. 重新认识滑坡作用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 377-385. DOI: 10. 16152/j. cnki. xdxzbzr. 2020-03-007.
- [5] 中国地质调查局地质环境监测院. 全国地质灾害通报(2019 年)[R]. 北京: 国土资源部, 2020.
- [6] 袁宝远, 任青文, 杨志法, 等. 边坡监测信息系统及其在五强溪水电站的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000(3): 103-106.
- [7] 李迎春. 三峡库区万州地质灾害监测数据采集系统研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2013, 10(7): 4, 21-25. DOI: 10. 16772/j. cnki. 1673-1409. 2013. 07. 007.
- [8] HERYANA A, NUGRAHENI E, KUSUMO B, *et al.* Applying agile methods in designing an earthquake and landslide early warning system application for Android[C]// International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications. Jakarta: IEEE Press, 2017: 80-84. DOI: 10. 1109/IC3INA. 2017. 8251744.
- [9] 王毅鹏, 张永志, 赵超英, 等. 云计算技术下的滑坡监测云平台设计: 以陕西泾阳为例[J]. 测绘通报, 2019(3): 128-132, 136. DOI: 10. 13474/j. cnki. 11-2246. 2019. 0093.
- [10] 龚淑云, 欧鸥, 刘懿俊, 等. 斜坡灾害预警模型及其综合应用研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 1062-1069. DOI: 10. 13624/j. cnki. issn. 1001-7445. 2019. 1062.
- [11] 刘峰. 基于灰色 Verhulst 模型对边坡变形预测研究[J]. 公路工程, 2013, 38(4): 265-268.
- [12] RIASETI AWAN M, PRASTOWO B N, PUTRO N A S, *et al.* G-connect: Real-time early warning system for landslide data monitoring[C]// 6th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation. Bandung: IEEE Press, 2019: 127-130. DOI: 10. 1109/ICA. 2019. 8916747.
- [13] 马玉昆, 杨延宁, 徐陈帅, 等. 基于 OneNET 云平台的山体滑坡监测预警系统设计[J]. 电子设计工程, 2019, 27(14): 92-94. DOI: 10. 14022/j. cnki. dzsjgc. 2019. 14. 020.
- [14] 易武, 王鸣. 相关性优先的滑坡位移组合预测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(1): 66-69, 93. DOI: 10. 14188/j. 1671-8844. 2016-01-011.
- [15] 杨家俊, 陈星明. Verhulst 模型在巷道围岩变形预测中的应用[J]. 化工矿物与加工, 2017, 46(12): 41-43, 49. DOI: 10. 16283/j. cnki. hgkwyjg. 2017. 12. 011.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)