

文章编号: 1000-7598 (2010) 11-3683-05

# 山区公路路基边坡地质灾害远程 监测预报系统开发及应用

邬 凯<sup>1</sup>, 盛 谦<sup>1</sup>, 张勇慧<sup>1</sup>, 李志勇<sup>2</sup>, 李红旭<sup>1</sup>, 岳志平<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 湖南省交通科学研究院, 长沙 410015)

**摘 要:** 针对山区公路路基边坡点状分布、数量较多、规模相对较小且易受人类活动和环境变化影响的特点, 确立了以位移和降雨量为主的监测原则, 基于 GPRS 技术, 集成触发式位移计、容栅式雨量计、数据采集传输模块和太阳能供电装置, 形成了经济、节能、高效的单体边坡远程监测硬件系统。采用 Visual C++ 网络编程技术, 以 SQL Server 2005 为数据库平台, 开发了地质灾害远程监测预报软件系统, 实现了数据的远程实时接收和可视化分析管理。由于公路边坡变形破坏模式多样, 系统还集成了多种时间预测模型, 建立了边坡变形预报模型库。通过在常吉高速公路的安装运行, 系统成功地进行远程实时监控, 保障了极端天气下公路的安全运营。

**关 键 词:** 公路边坡工程; 地质灾害; 实时自动监测; 远程监测预报系统

中图分类号: U 495

文献标识码: A

## Development of real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters at subgrade slopes of mountainous highways and its application

WU Kai<sup>1</sup>, SHENG Qian<sup>1</sup>, ZHANG Yong-hui<sup>1</sup>, LI Zhi-yong<sup>2</sup>, LI Hong-xu<sup>1</sup>, YUE Zhi-ping<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, China)

**Abstract:** The slopes of mountainous highways are of such characteristics as dotted distribution, relatively large number but small scale, and easily affected by human activity and environment variation. According to these characteristics, an individual slope monitoring device system is established in this essay. The system mainly aims at displacement and rainfall monitoring, and is developed based on the GPRS technology. By integrating the trigger displacement meter, grid pluviometer, data acquisition and transmission unit, and solar power supply device, the system is proved to be economical, energy-saving and highly efficient. Based on Microsoft Visual C++ network technology and SQL Server 2005 data base, the software system of remote monitoring and forecasting for geological disasters is developed, which realizes the real-time remote receiving and visual management of monitoring data. Due to the variety of slope deformation and failure modes, the system also integrates several time forecast models to establish the slope deformation prediction model database. The monitoring and forecasting system has been successfully applied to Chang-Ji highway, and provided a guarantee for the highway safety in extremely bad weather.

**Key words:** slope engineering of highway; geological disaster; real-time automatic monitoring; remote monitoring and forecasting system

## 1 引 言

我国是一个幅员辽阔、地形地貌复杂多变的多山地区, 山地面积约占国土总面积的 69%。随着我国西部大开发战略的实施和基础设施建设力度的加大, 山区高等级公路的建设已经成为我国近期高速

公路建设的重要内容。在山区修筑高等级公路不可避免地要进行深挖高填, 由此形成挖方构筑的路堑边坡和填方构筑的路堤边坡, 这些路基边坡打破了岩土体原有的地质环境平衡, 在环境与工程因素影响下, 极易诱发坍塌、滑坡等地质灾害, 砸坏路基及桥涵、中断交通, 造成行车事故, 对公路交通基础

收稿日期: 2009-10-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)专项课题(No. 2007AA11Z121); 西部交通建设科技项目(No. 200831878542); 国家自然科学基金项目资助(No. 40972202)。

第一作者简介: 邬凯, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程稳定性评价及安全监测系统的研究工作。E-mail: wukaiscu@sina.com

设施危害极大。为了促进国家经济建设和保护人民生命财产安全，必须对地质灾害采取必要的防治措施。岩土体的失稳破坏，都是从渐变到突变的发展过程。应用适当的监测手段，掌握其变形运动特征及相关影响指标的定量演化过程，捕捉灾害前兆特征信息，就能有根据地判断灾害险情的发生，做到提前预防，合理决策<sup>[1]</sup>。

山区公路突发性崩塌、滑坡等地质灾害多发生在公路沿线地形险要地段，缺乏电力，常规监测方法效率低下，决策部门和专家难以及时随时了解地质灾害现场的动态监测结果，影响快速决策，不便向公路沿线快速运动车辆发出临灾报警。近年来，光学、电学、计算机技术和通信技术的发展，给地质灾害监测仪器的研究和监测预报系统的开发带来勃勃生机。李世海、何满潮等<sup>[2-3]</sup>利用无线通讯技术提高了远距离监测数据传输的自动化程度，形成了适用于水电库区和矿山边坡的远程实时监测系统。叶英、张成平等<sup>[4-5]</sup>也将自动采集和无线传输应用于隧道工程，建立了隧道施工远程监测系统。在软件开发方面，梁桂兰、张强勇等<sup>[6-7]</sup>基于大型数据库平台、可视化和网络编程技术，开发了边坡监测信息管理系统，实现了监测数据的信息化和网络化。以上的研究对本文的系统集成和软件开发有重要的借鉴意义，但山区公路路基边坡沿公路呈点状分布，数量较多、规模相对较小，易受人类活动和环境变化影响，其变形破坏模式具有多样性、复杂性等特点，基于水电库区边坡、矿山边坡和隧道工程的远程监测预报系统在公路边坡工程应用上有诸多的不足。基于以上分析，本文的工作秉承简明、及时、自动、经济的原则，选择经济合理的监测手段与无线传输技术相结合，形成了高效、节能的单体边坡监测硬件系统；基于大型数据库平台，利用可视化网络编程技术，开发了公路路基边坡地质灾害远程监测预报系统，建立了边坡变形预测模型库，实现了多任务的网络通信、信息管理和变形预测功能，为山区公路地质灾害监测预警服务于社会提供有力工具。

## 2 系统结构

### 2.1 系统拓扑结构

边坡监测的内容繁多、方法多样，变形监测是其主要手段，也是分析预报的主要依据，而降雨是边坡失稳的主要诱发因素，因此，本系统确立了以表面位移和降雨量为主的监测原则，以触发式位移计和容栅式雨量计作为主要的监测单元。位于现场的数据采集器将位移和雨量数据采集到 GPRS 模

块，GPRS 模块负责对数据进行 TCP/IP 协议转换，再以 GPRS 数据包的形式发送至 GPRS 无线基站，GPRS 无线基站将数据处理后发送到 Internet。位于远程监控中心的服务器，接入 Internet，利用自行开发的远程监测预报系统(SRRF)即可实时接收监测数据。SRRF 系统利用 Visual C++可视化网络编程技术，以客户机/服务器(C/S)结构，实现了多用户的远程监测数据实时共享。系统总体结构如图 1 所示。

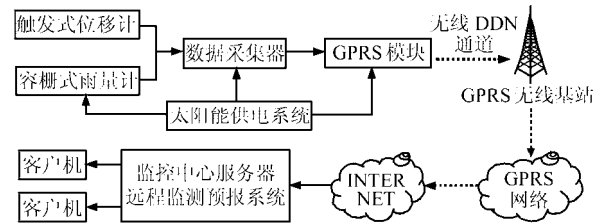


图 1 远程实时监测系统示意图  
Fig.1 Sketch of real-time remote monitoring system

### 2.2 设备性能特点

系统主要由硬件和软件两大部分构成，硬件系统包含位移计、雨量计、数据采集传输系统和供电系统。软件系统组成将在系统功能中介绍，硬件设备主要有以下特点：

①拉索触发式位移计的精度为 1 mm，量程为 4 m。它利用滑坡周边的相对稳定点与滑坡监测点的相对位置变化，得到每一监测点的相对位移量。位移计配接了低功率的无线电通讯模块，传讯器与接收器之间可以在 500 m 内进行无线数据通讯。多个监测点的传讯器可以将数据传至同一台接收器，再由接收器将数据转发给采集模块。这样便于将监测区域的多台位移传感器组成一个监测单元，避免了外接电缆的使用。位移计的安装如图 2 所示。

位移传感器采用磁感触发式设计，以数字方式感应测量，当钢索拉伸达 1 mm 间距时，即主动触发信号，平时无位移变化时，传感器和传讯器几乎不耗电。对滑坡的主要监测内容，采用低耗电的磁感式触发电路，便于进行长期监测。



图 2 触发式位移计  
Fig.2 Trigger displacement meter

②容栅式雨量计的精度为 0.1 mm，该设备采用精密容栅位移传感器，计量准确，上部承水器中的雨水进入贮水室，和贮水室雨水的排出，使用了 2 个电动阀门自动控制，即使遭遇特大暴雨，雨量也不会有任何流失。这种设计，从根本上解决了以往虹吸和翻斗雨量计遇暴雨时计量误差大的问题。雨量计的输出为脉冲信号，可以连接无线模块进行远程传输。

③数据采集与传输系统包括数据自动采集模块和 GPRS 无线传输模块，采集器会将不同传感器的数据转化成统一格式，再由 GPRS 模块进行发送，便于后续仪器的扩展应用。GPRS 模块中写入预先申请的域名，系统采用动态域名解析方案建立 GPRS 模块与远程监控中心服务器的连接。GPRS 模块通电后，首先采用域名寻址方式连接 DNS 服务器，再由 DNS 服务器找到监控中心服务器的公网 IP，这样服务器只需接入 Internet 就可以与 GPRS 模块建立无线数据通讯。由于工作模式不同，位移计和雨量计采用独立的数据采集和传输模块，位移计的数据由接收器天线转入数据采集和无线传输模块，雨量计数据通过有线电缆接入数据采集和无线传输模块，具体布置如图 3 所示。

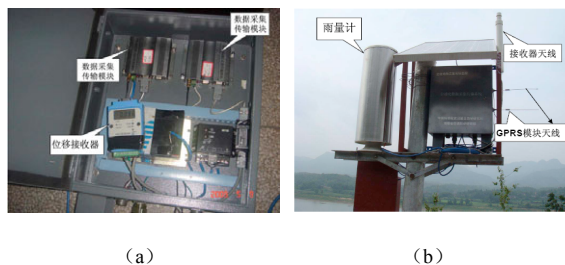


图 3 数据采集传输单元  
Fig.3 Data acquisition and transmission unit

④对于山区公路路基边坡，电力供应是远程监测系统长时间连续稳定工作的制约因素，因此，供电系统的设计至关重要。触发式位移计采取了低功耗节能式设计，利用外接式锂电池对其供电即可维持正常工作 1~2 年。雨量计和数据采集传输系统采用太阳能供电系统保障其正常工作电压，由太阳能板、电源控制器和蓄电池组成。天气晴朗时，太阳能板可对蓄电池进行充电，阴雨天由蓄电池对系统进行供电。由此保障暴雨等极端天气下系统的正常运行。供电系统的安装如图 4 所示。

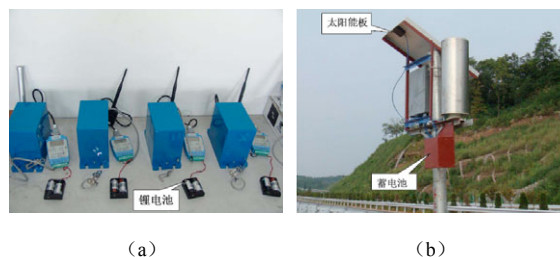


图 4 供电系统  
Fig.4 Power supply device

### 3 系统主要功能

在现场安装传感器和数据采集传输设备的基础上，采用 Visual C++为开发平台，以 SQL Server2005 为后台数据库，自主开发了山区公路路基边坡地质灾害远程监测预报系统(SRRF)。该系统基于 GPRS 技术与现场监测仪器建立通讯，实现数据的远程实时接收存储。在此基础上通过 ADO 连接数据库，实现数据查询、图形可视化等功能。通过建立边坡变形预测模型库，实现了变形数据处理和预测分析功能。软件系统的构成如图 5 所示。

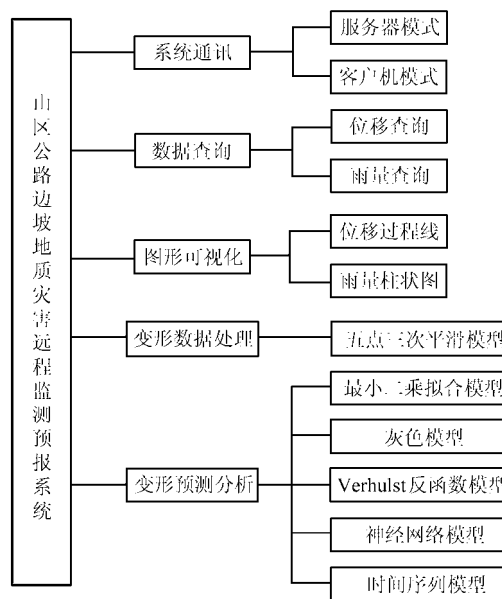


图 5 软件系统构成  
Fig.5 Structure of software system

#### 3.1 系统通讯

本系统使用 TCP/IP 协议，在客户机/服务器模型下采用 Winsock 机制实现 GPRS 模块与服务器之间，服务器与客户机之间的实时网络通讯。系统为计算机提供服务器和客户机两种工作模式，主监控中心采用服务器工作模式的计算机与 GPRS 模块建立连接之后，会自动将接收的数据实时存储到后台

数据库，同时将数据转发给使用客户机模式的联网计算机，由此可以实现多用户的远程组网和数据实时共享，图6为系统实时通讯的界面。

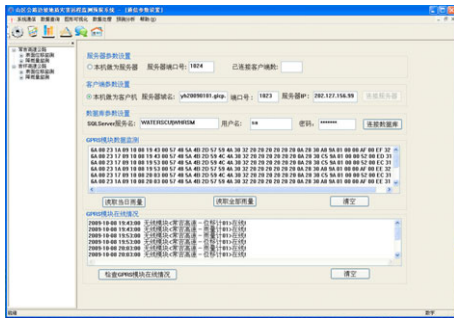


图6 系统通讯界面  
Fig.6 Interface of system transmission

### 3.2 数据查询与图形可视化

如图7所示，本系统提供多条件组合的数据查询管理，根据日期和监测仪器编号来查询相应的位移和雨量监测数据。对于位移监测数据，可以绘制单天和多天的位移过程曲线，根据曲线变化发展的形状，分析岩土体变形的演化特征。对于雨量监测数据，可以绘制每小时降雨量和日降雨量的柱状统计图。滑坡的发生与当天降雨及前期降雨特征密切相关，可以在统计分析某地区历史滑坡与降雨资料的基础上，确定该地区的降雨阈值<sup>[8]</sup>，建立降雨量统计预警模型，根据实时的降雨查询结果和统计图进行地质灾害的气象预警预报。

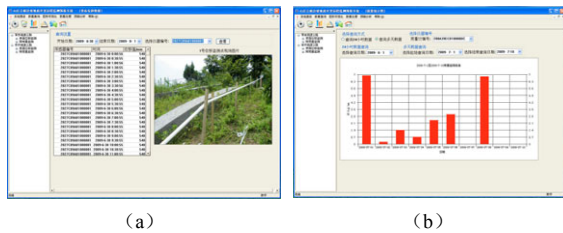


图7 监测数据查询与可视化界面  
Fig.7 Inquiring and visual interface of monitoring data

### 3.3 变形预测分析

针对公路路基边坡的变形分析和预测，系统首先提供了对监测数据进行预处理的5点3次平滑模型，其次选择了适用于短期临滑预报的灰色动态模型、Verhulst反函数模型，适用于中长期预报的最小二乘拟合模型、神经网络模型和时间序列模型，建立边坡变形预测模型库<sup>[9]</sup>。系统提供对边坡监测和预测结果图形可视化和误差分析的功能，可以通过对实测预测曲线的对比分析，为不同类型和不同演化阶段的边坡选择最合适的预测模型，使边坡变

形预报更具针对性和准确性。图8是采用灰色动态模型和神经网络模型对沪蓉西高速公路宜昌—恩施段古树屋滑坡监测资料进行预测分析的结果。

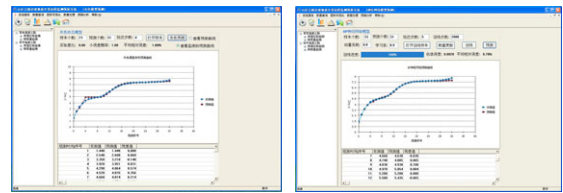


图8 滑坡变形预测界面  
Fig.8 Interface of deformation forecast

## 4 工程实例

湖南常吉(常德至吉首)高速公路经过的地区，位于我国湖北省和湖南省的西部。该区地貌形态多样，以中低山为主，地质条件复杂，降雨丰沛，是滑坡、崩塌高易发区。K169+300~550段路基边坡位于五强溪库区沅水河岸半山腰上，地质条件差，节理裂隙发育，岩性以紫红色中厚层泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主，在施工期曾进行过加固处理，为了监控其运营期的稳定状况，在该路段边坡上共安装了5台触发式位移计、1台容栅式雨量计和2套数据采集传输设备进行远程实时监测。如图9所示。4台位移计安装在路堑边坡上、1台位移计安装在路堤边坡上，5台触发式位移计与数据采集系统之间进行短距离的无线通讯，同时，在武汉建立远程监控中心，安装SRRF软件系统。2009年6月底，湖南省部分地区遭遇了强降雨的袭击，本系统实时准确地接收了位移和雨量数据，如图10所示，6月30号的日降雨量达到了80.2mm，但5台位移计的数据均无显著变化，可见边坡表面的截水沟和内部的排水孔可以有效地排出雨水，防止雨水下渗软化滑面，对疏干边坡保持其稳定起了重要作用。因此，综合判断整治后的边坡在完善的排水系统和支挡结构作用下可以应对暴雨天气，并保持稳定状态。



图9 仪器平面布置图  
Fig.9 Plan layout of monitoring devices in the slope

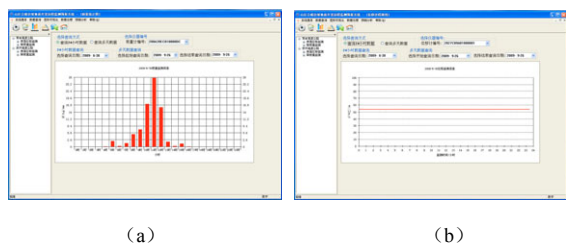


图 10 常吉高速公路边坡实时监测界面  
Fig.10 Real-time remote monitoring system interface of Chang-Ji highway

## 5 结 论

(1) 针对山区公路边坡具有点状分布、数量较多、间隔距离长、规模相对较小，且易受人类活动和环境变化影响等特点，采用触发式位移计和容栅式雨量计为主要监测单元，以 GPRS 模块为无线传输单元，太阳能系统作为电源供电，组成简明、经济、节能和高效的单体边坡远程监测硬件系统，可以实时有效的监控山区公路滑坡、崩塌等地质灾害。

(2) 采用 Visual C++ 网络编程技术，以 SQL Server2005 为后台数据库，开发了地质灾害远程监测预报系统，实现了对监测数据的远程实时接收和可视化分析，为管理部门及时了解现场监测结果和快速决策提供了强有力的平台支持。

(3) 山区公路路线长，穿越地质单元众多，路基边坡变形破坏模式复杂多样。系统集成多种时间预测模型，形成了变形预测模型库。采用可视化的图形工具，可以为不同类型和不同演化阶段的边坡选取合适的预报模型，使边坡变形预测更具针对性和可靠性。

(4) 通过在常吉高速公路运营期边坡稳定监控中的应用，表明地质灾害远程监测系统的实时性、稳定性、无线通讯、无人值守和低功耗的特点。根据实时的降雨和位移监测结果，可以综合预测地质灾害发生的风险，为高速公路的防灾减灾提供参考依据。

## 参 考 文 献

[1] 二滩水电开发有限责任公司. 岩土工程安全监测手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[2] 许利凯, 李世海, 刘晓宇, 等. 三峡库区奉节天池滑坡实时遥测技术应用实例[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4476—4483.

XU Li-kai, LI Shi-hai, LIU Xiao-yu, et al. Application of real-time telemetry technology to landslide in Tianchi Fengjie of Three Gorges reservoir region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007,

26(Supp.2): 4476—4483.

[3] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1081—1090.

HE Man-chao. Real-Time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1081—1090.

[4] 叶英, 穆千祥, 张成平. 隧道施工多元信息预警与安全管理系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 900—907.

YE Ying, MU Qian-xiang, ZHANG Cheng-ping. Tunnel construction multivariate information forewarning and safety management system research[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(5): 900—907.

[5] 张成平, 张顶立, 骆建军, 等. 地铁车站下穿既有有线隧道施工中的远程监测系统[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1861—1866.

ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, LUO Jian-jun, et al. Remote monitoring system applied to the construction of metro station undercrossing existing metro tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(6): 1861—1866.

[6] 梁桂兰, 徐卫亚, 何育智, 等. 边坡工程监测信息可视化分析系统研发及应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(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, 29(3): 849—853.

[7] 张强勇, 陈晓鹏, 刘大文, 等. 岩土工程监测信息管理与数据分析网络系统开发及应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 362—373.

ZHANG Qiang-yong, CHEN Xiao-peng, LIU Da-wen, et al. Development of monitoring information management and monitoring data analysis network system for geotechnical engineering and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(2): 362—373.

[8] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055—1060.

GAO Hua-xi, YIN Kun-long. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 1055—1060.

[9] 许强, 黄润秋, 李秀珍. 滑坡时间预测预报研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 478—483.

XU Qiang, HUANG Run-qiu, LI Xiu-zhen. Research progress in time forecast and prediction of landslides[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(3): 476—483.