

基于三维GIS的丹江口水库地质灾害 监测预警系统设计与实现

陈蓓青^{1a}, 田雪冬², 曹浩^{1b}, 贾进科², 张煜^{1a}

(1.长江科学院 a.空间信息研究所;b.工程安全与灾害防治研究所,武汉 430010;

2.长江勘测规划设计研究院 长江岩土工程总公司,武汉 430010)

摘要:论述了基于三维网络地理信息系统(GIS)的地质灾害监测预警系统的总体框架结构及特点,并对采用的信息采集组网与通信、时态GIS技术和基于多模型的地质灾害监测预测预警技术等关键技术进行了介绍。系统采用部署灵活、扩展性强的多层体系结构,运用地理信息技术、虚拟仿真技术和基于多用户并发的WEB异步服务技术,构建了融合三维地理信息功能与地质灾害预警预报业务功能的网络决策支持系统,实现了地质灾害信息采集、传输、管理、分析、决策、预警发布的一体化平台,系统已在丹江口库区投入试运行,可为我国地质灾害管理科学化、应急响应高效化提供参考和借鉴。

关键词:地质灾害;监测预警;三维仿真;GIS;丹江口水库

中图分类号:TV62;P237

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2016)07-0051-04

1 研究背景

我国地质和地理环境复杂,气候条件时空差异大,是世界上地质灾害最严重的国家之一,主要包括崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、沉降等。随着人类文明的发展,地质灾害给人类生存发展带来的影响日益严重,人类也给予了地质灾害越来越多的关注^[1]。南水北调中线工程是我国一项重大战略性水利工程,丹江口水库作为南水北调中线工程的水源地,随着丹江口大坝加高,正常蓄水位由原来的157 m抬高到170 m,蓄水后库区可能出现滑坡和库岸的稳定性等问题,将危及库区居民生命、财产安全。

近年来,政府部门加大投入开展丹江口库区地质灾害的监测和防治工作,将各种新技术,如自动化监测、GPS、北斗通讯技术、物联网技术、云计算和云存储技术融入到地质灾害防治中^[2]。随着计算机技术及通讯技术的发展,针对地质灾害监测的内容更加丰富,监测技术方法逐渐过渡到无线自动化监测,监测仪器也在向精度高、性能好、适应范围广、自动化程度高的方向发展^[3]。

2 地质灾害监测预警系统设计

传统的区域地质灾害监测主要是通过群测群防

获取非重点地质灾害的状态信息,以常规监测手段获取重点地质灾害的状态信息。群测群防需消耗大量人力,而传统的监测内业整理数据耗时较长,使得监测数据常常不能实时反映地质灾害的状态^[4]。此外,地质灾害发生之前,气象条件和地质条件往往都非常恶劣,传统的变形监测不能实时获取监测目标状态,人身安全和设备安全也得不到保障。因此,需要建立一套以三维地理信息技术(GIS)和地质灾害专业监测技术为基础,集远程数据采集、处理、分析和预警预报于一体的地质灾害监测预警系统,为地质灾害的防灾减灾决策提供可靠技术支持。

丹江口水库地质灾害监测预警系统的软件体系结构采用以数据库为技术核心、GIS为支持的B/S模式,即在系统软件和支撑软件的基础上,建立应用软件层/信息处理层/数据支撑层的多层结构,不同的服务层具有不同的应用特点,在处理系统建设中也具有不同程度的复用和更新。系统总体架构见图1。

数据层实现对系统各类数据的统一存储和管理,包括现场的各种实时监测数据,以及地质灾害专题管理数据等;应用层为系统核心,通过对组件层的应用封装,借助预警分析模型和GIS空间分析模块,实现对地质灾害的分析和预警;发布层以三维场景方式展现,实现面向互联网用户的可视化交互操作方式。

根据用户需求,系统主要功能模块包括:三维地

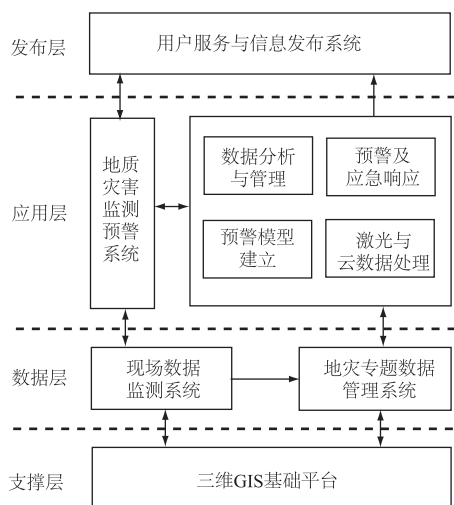


图1 系统总体架构

Fig.1 Overall structure of the system

理信息子系统、地质灾害信息子系统、专业监测子系统、群测群防子系统、预警分析子系统、查询统计子系统、系统管理子系统以及地质灾害点三维激光扫描成果展示子系统。

实现的主要功能包括:

(1) 构建基于 DEM 的丹江口库区三维基础信息平台,实现基础空间信息的检索查询和基本 GIS 分析功能,并可加载展示局部区域的海量三维激光扫描数据成果。

(2) 接收和管理通过 GPRS 传输到数据库的滑坡监测点实时监测数据,并实现对数据的综合查询、对比和分析。

(3) 对滑坡、崩塌、坍岸等调查表的信息,地质灾害群测群防行政体系及责任人信息、群测群防 2 卡 1 表信息实现录入、维护、查询等功能。

(4) 对监测数据如降雨量、地下水位、位移、倾角等对滑坡发生发展的影响力权重进行不同情况的设定,计算危险阈值及系统预警设置。

(5) 基于地质灾害信息、地质灾害危险性评价成果、地质灾害敏感性分析成果、专业监测数据等,选择不同的地质灾害预测模型,进行地质灾害预警分析研究。

(6) 实现系统的自动预警功能,并利用通信网络短信的形式发送接收方。

3 关键技术

3.1 信息采集通信组网技术

一般来说,滑坡面的监测内容包括土壤含水率、地下水位、土壤孔隙水压力、地表位移、雨量等^[5]。由

于需要监测的滑坡面较大,因此终端传输采用 ZigBee 的协议无线通信方式,ZigBee 是目前远程监控传感网络应用领域唯一的标准化技术,其体系结构基于标准开放网络互联(OSI)七层协议模型,支持星状、树状和网状 3 种拓扑结构。本系统的 ZigBee 无线传感器网络主要由 ZigBee 网络协调器节点和 ZigBee 传感器终端节点构成。网络协调器节点负责网络的维护和数据的处理任务;传感器终端节点由分布在监测区域内的倾斜传感器、温度传感器、渗压计、雨量计等和 ZigBee 无线模块组成,负责监测区域的位移、温度、水位、雨量的采集,建立和维护绑定表,并将数据通过 ZigBee 网络上传到网络协调器节点。

网络协调器节点与服务器之间则主要采用 GPRS 作为传输手段,如有监控视频等传输数量大的数据,则建议采用专网结合 3G/4G 的数据传输方式,在 GPRS 网络不能满足实时性的情况下也可利用北斗系统形成补充。

3.2 时态 GIS 技术

目前地质灾害监测预警系统使用的数据库多为空间数据库,能很好地反映地物的空间特性,但对于地质灾害动态监测的空间对象和属性信息而言,如监测的位移量、雨量等又是随着时间而变化的,这就需要建立同时捕获数据时间和空间特性的数据库—时态 GIS 数据模型,通过将时间属性添加到空间数据库中,充分展示和分析整个灾害发生的地理过程,达到过程重演和预测的目的。

时态 GIS 可以存储、管理组织区域中地理实体对象随时空的发展过程,将不同时间的数据存储到具有相同数据结构的空间数据库中,形成一种有效的具有时间存储特性的更新机制。

系统根据地质灾害监测特点,采用面向对象的方法,建立了基于 Geodatabase 和 ArcSDE 的具有双时态特征的地质灾害时空数学模型。该模型除了能支持传统的静态 GIS 系统功能外,还具有针对监测点的气象、降雨、位移以及报警信息等对象动态监测变化的数据、存储和更新功能,主要包括以下几个方面。

(1) 查询:通过构建多条件查询方式,获取某一时刻或某一时间段的灾害体状态。

(2) 存储:记录各监测点随时间变化的监测数据并存储。

(3) 可视化分析:通过各类图表方式直观展示监测数据的变化过程。

(4) 实时更新:通过与实时监测设备的连接,确保时态 GIS 数据库的时效性。

通过时态GIS数据模型和可视化仿真技术,系统可真实展示地质灾害演变过程,为灾害分析和预警提供有效的技术支撑。

3.3 地质灾害监测预测预警技术

丹江口库区地质灾害类型主要以滑坡为主,其次为不稳定斜坡、崩塌、库岸及移民安置点边坡,岸坡结构和岩性组合是影响库区滑坡的主要因素^[6]。丹江口库区滑坡大多发育于片岩区,堆积层一般沿基岩界面发生滑动;其次,库区绝大多数滑坡发育于峡谷河段,且河谷越窄越容易发生滑坡;同时,降雨、库水和地下水的活动也对滑坡的发生和发展具有重要的影响。

通过对丹江口库区不同类型滑坡形成的内在机理分析可以看到,库岸变形及稳定状况主要受坡体几何形态、介质类型及其力学性质等控制,加之水文、降雨、水库蓄水及其他工程活动等环境因素的影响,且演化过程中多种因素的动态变化,因此系统结合以往工程实践的经验,嵌入了3种变形预测模型,即非线性动力学模型、匀速加速变化型灰色模型和多因素灰色预测模型,加强对库区地质灾害的监测及预测。

非线性动力学模型公式为

$$F(X, t) = m\ddot{X} + \mu\dot{X} \quad (1)$$

式中: X, \dot{X}, \ddot{X} 为滑坡位移值、速度和加速度; t 为监测时间; m, μ 为参数。该模型适用于具有一定非线性变形特征的短期滑坡变形预测。

匀速加速变化型灰色模型由改进的灰色模型与时间序列分析模型组合而成,并采用时序模型对模型的残差进行修正,公式为

$$X^{(0)}(t+1) = (\nu + bt + cqdt) + \sum_{i=1}^q [\alpha_i \cos \frac{2\pi}{T_i}(t+1) + \beta_i \sin \frac{2\pi}{T_i}(t+1)] + \sum_{i=1}^n \varphi_{ni} q(t+1-i) + \varepsilon_{t+1} \quad (2)$$

式中: $X^{(0)}(t+1)$ 为原始数据; i 表示隐含的周期; q 表示周期项数; α_i, β_i 表示周期项系数; φ_{ni} 为模型参数; ε_{t+1} 为自噪音序列; ν, b, c, d 为曲线常数。该模型适用于滑坡变形的中长期预测。

多因素灰色预测模型公式为

$$S(t, x_1, x_2, \dots, x_n) = P(t) + Q(x_1, x_2, \dots, x_n) + R \quad (3)$$

式中: $S(t, x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为滑坡位移监测数据; $P(t)$ 为位移内在影响因子; $Q(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为位移外在影响因子; R 为位移随机因子。该模型适用

于以往的监测资料中降雨、地下水位等外在影响因素与变形存在较大关联度的滑坡变形预测。

4 应用成果

4.1 基于DEM三维场景的信息展示

系统以数字地球的三维场景展示方式集成了丹江口地区高精度影像和地形数据,并叠加各类矢量信息,以及地质灾害重点实时监测数据、传感器相关信息等属性数据。三维WEBGIS提供三维场景浏览、漫游、查询、场景切换、测量、分析以及多种显示模式,如图2和图3所示。

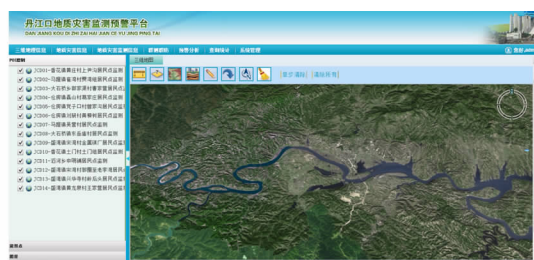


图2 丹江口库区三维场景展示

Fig.2 Three-dimensional display of Danjiangkou reservoir area

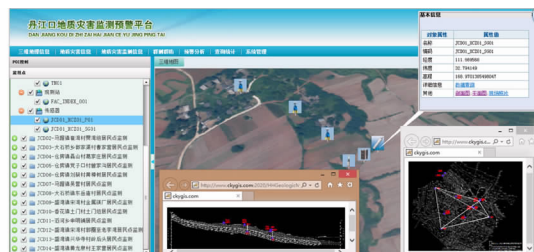


图3 监测点关联属性和设计图信息查询

Fig.3 Related attributes of monitoring points and design information query

4.2 专业信息查询与分析

系统以曲线图方式显示传感器监测的实时数据,包括雨量值、位移值、温度值等,实时自动监测数据主要是用来展现当前选择监测地点的所有传感器产生的数据。传感器数据一般都是集中到现场站,现场站为16通道输入,最多可以同时集成16个传感器值,通过互联网远程传输到数据中心的数据库中。点击下拉菜单的传感器名称可以查看其实时数据,并可以根据需要查询某时间段的实时数据,如图4所示。同时,对该仪器设置了三维场景定位跳转、图片查看和预警信息查看功能。

4.3 地质灾害实时监测预警及发布

根据地质灾害实时跟踪监测预警具体要求,监测预警分成4个阶段,分别为监测数据监控、监测数据预处理、监测预警综合分析和预警信息发布阶段。



图4 地质灾害监测点实时信息查询与分析

Fig.4 Real-time information inquiry and analysis of geological hazard monitoring points

启动监测预警程序后,为了判定地质灾害当前变形阶段,实现自动监测预警模型与方法的计算分析,首先需要对所获取的监测数据进行加密预处理;然后根据实地布设的监测对象自动匹配对应的预警方法,包括基于变形预警判据条件(改进切线角方法、临界累积位移、临界速率以及累积加速度)和辅助判据条件(雨量、地下水水位)等,在此基础上结合模型预测进行综合计算分析得到灾害监测点实时状态的预警结果,如图5所示。

(a) 预警短信发送设置

接收人	手机号	发送内容
张煜	18986061273	1级预警, 监测地点名称: 马庙镇黄庄村上尹沟居民点监测
18551655890	18551655890	1855165589018551655890
张煜	18986061273	2014-08-28 11:39:04, 香花镇黄庄村上尹沟居民点监测, 注意级预警
张煜	18986061273	级预警
1505186670	1505186670	测试信息, 请勿回复!
张煜	18986061273	1级预警, 监测地点名称: 马庙镇黄庄村上尹沟居民点监测
张煜	18986061273	1级预警, 监测地点名称: 仓岗镇黄庄村上尹沟居民点监测

(b) 预警短信管理

图5 预警信息发送与管理

Fig.5 Sending and management of prewarning message

监测预警综合分析和预警信息发布采用 C#.net 开发,以服务器端后台方式运行,预警信息发布的各项参数和指标在客户端进行设置,可选择客户端浏览器界面预警和责任人手机短信预警 2 种方式。

5 结 语

信息化技术的飞速发展,对地质灾害预警与防治起到了重大的推动作用,将地质灾害防御与信息化工程相结合不仅方便快捷而且效果显著。灾害预警是减灾工程的先导性措施,监测系统则为减灾工程提供了及时的关键数据和信息,通过网络获取实时监测数据,及时对危险区域进行预判,加强危险地区的监测和预警,使得管理工作更加透明高效。

系统结合气象、国土、水文、地质等多类数据,集信息采集监测、信息管理、分析决策、预警发布为一体,是库区及时规避风险,避免或减少灾害导致的人员伤亡和财产损失的有效非工程措施,是实施指挥决策和救灾减灾的重要辅助手段。

参考文献:

- [1] 刘彦花,陈伟清,叶国华.地质灾害多源数据一体化集成[J].广西大学学报(自然科学版),2009,34(2):246-250.
- [2] 李 昂,侯圣山,韩 冰,等.基于北斗一号数据传输的滑坡监测系统构建[J].工程地质学报,2012,19(增1):854-856.
- [3] 董 颖,朱晓东,李 媛,等.我国地质灾害监测技术方法[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(1):105-107.
- [4] 韩金良,吴树仁,汪华斌.地质灾害链[J].地学前沿,2007,14(6):11-23.
- [5] 曹道宁,张丙先,严绎强,等.丹江口库区滑坡发育规律[J].华北水利水电学院院报,2010,8(4):127-130.
- [6] 王 轶,张晓坤,童立强.三峡库区遥感三维立体仿真系统及其应用[J].遥感信息,2012,(8):40-43.

(编辑:刘运飞)

Design and Implementation of 3-D GIS-based Monitoring and Warning System for Geological Hazard in Danjiangkou Reservoir Area

CHEN Bei-qing¹, TIAN Xue-dong³, CAO Hao², JIA Jin-ke³, ZHANG Yu¹

(1.Spatial Information Technology Application Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2.Engineering Safety and Disaster Prevention Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3.Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The overall structure and features of a 3-D GIS-based monitoring and warning system for geological hazard

(下转第 67 页)

while when pressures of H1 and H3 increase synchronously, crack extended downward from hole H1 deflects towards hole H3, and crack starting from hole H3 develops towards hole H1, and finally, two opposing propagation cracks form between H1 and H3. Results show that, direction of hydraulic fracturing cracks will be interfered by adjacent holes, hence the direction can be controlled through adjusting the pressure of adjacent holes; while the initiation water pressure that crack begins to occur can be reduced through the adjacent interference, which validated the rationality of synchronous hydraulic fracturing technology.

Key words: FEMDEM; FDEM-flow; multi-hole hydraulic fracturing; synchronous fracturing; fracture; stress interference

~~~~~  
(上接第 50 页)

limits, there are few investigation and reports about the unique ecological environment conditions in the source area. According to monitoring data of water quality obtained from scientific investigations in the source area in 2012, 2014 and 2015, we analyze conventional monitoring indicators and water quality indexes such as organic and metal pollutants. On the basis of the analysis, we discuss the spatial-temporal distribution of water quality in the source area in recent years. Results show that firstly, water quality of rivers in the source area are good, and water quality belongs to I type or II type in most regions; secondly, influenced by sediment contents of water body and regional geological conditions, water quality indexes vary among rivers in different regions in the source area; furthermore, water quality shows a small inter-year variation with a similar fluctuation; in comparison with the background values of other rivers in China and abroad, values of water quality in the source area are basically within the range of background values of river; finally, organic pollutants such as phthalic acid esters are detected in surface water samples of the source area. The results are important for further study on the water ecology of Changjiang source area.

**Key words:** source area of Changjiang River; water quality; organic pollutant; heavy metal; temporal and spatial distribution

~~~~~  
(上接第 54 页)

are expounded. Key technologies including information gathering network and communication, temporal GIS, geo-hazard monitoring and warning based on multiple models are analyzed and introduced. The system with multiple layers adopts highly scalable structure and flexible deployment. GIS, virtual simulation, and WEB asynchronous service based on multi-user concurrent are also employed. Through the system, functions of information gathering, communication, management, analysis, decision-making, and warning are integrated. The system is applied to Danjiangkou reservoir as a trial. Finally, the research provides reference for the scientific management of geological hazards and emergency response.

Key words: geological hazard; monitoring and warning; 3-D simulation; GIS; Danjiangkou reservoir

~~~~~  
(上接第 62 页)

stepped spillway decreased dramatically along the flow path, and specific energy on stepped spillways first increased and then remained constant. The change of specific energy determines the gross head, and low stable specific energy reflects better energy dissipation. Two dimensionless parameters of stable specific energy and its influencing factors were obtained through dimensional analysis, and a good power function law was found between the two dimensionless parameters based on the data from test and related literature, with the correlation coefficient between 0.9949 and 0.9972. An empirical formula for calculating the residual energy and gross dissipation rate was put forward to provide references for related design.

**Key words:** stepped spillways; flow energy characteristics; specific energy of water flow; dimensional analysis; dissipation rate