

文章编号: 1005-1538(2015)01-0021-08

# 高精度变形监测预警系统在明显陵遗址 保护中的应用研究

张 健, 李应军

(长江大学计算机科学学院, 湖北荆州 434023)

**摘要:** 为在遗址完整性保护与滑坡灾害预警方面制定切实有效的解决方案, 使用基于高精度全球卫星定位系统 GPS 与远程遥测终端 RTU 的高精度变形监测预警系统, 并结合无线通讯方式实现对遗址保护区陵墓边坡的安全监测。系统完成墓冢内部环境监测与滑坡方位的监测定位。并通过通用无线分组业务 GPRS 方式将监测参数与警情信号实时传输至监控中心, 在管理软件平台上进行实时显示并提示安保人员及时出警。该系统可针对不同规模野外文物保护区和古墓群实现有效的滑坡监测与预警防范, 具有广泛的应用推广价值。

**关键词:** GPS; 高精度; 变形监测; 遗址保护

**中图分类号:** TP277 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2015.01.004

## 0 引言

湖北钟祥明显陵属于低山丘陵岩体遗址, 境内东部为大洪山余脉、西部为荆山余脉, 汉江在两山脉之间穿过, 两山一河呈“川”字形, 形成了汉江沿岸从北向南平缓降低, 东西两侧逐级升高的有序排列地势。

由于陵墓位于地壳表层风化岩体内, 遇水或扰动后极易失稳破坏。而遗址所处地区气候湿润多雨, 大部分古遗址含水率高, 渗水情况十分严重。尤为突出的是: 因围岩物理力学性质退化而引起的遗址墓坑边坡的变形破坏, 若不及时加以治理将会严重影响遗址及其古文物的保存。

近年来, 国家针对野外遗址保护采取了一系列相应措施, 但收效甚微。而涉及陵区遗址保护的绝大部分实施方案并未切实关注到遗址内部及周边地质灾害特征、环境保护等诸多问题。本项目针对明显陵墓区中墓坑边坡形变实施动态监测预警, 并结合项目实施的具体需求及工程特点探讨针对滑坡变形监测所需解决的关键问题和防治对策, 力求在遗址完整性保护与滑坡灾害预警方面制定切实有效的解决方案。

## 1 明显陵主要地质灾害分析

### 1.1 墓区地质环境条件

钟祥明显陵地处丘陵地带, 总地势南高北低。

陵园外罗城依山势而建, 蜿蜒起伏。周长 3438m, 纵深 1656m, 总面积 1.83km<sup>2</sup>。本区属亚热带季风型气候。墓区表层岩体渗透性强: 墓坑四周可见多处渗水。墓址区内岩层薄且软弱, 墓坑壁岩体风化严重, 掉块及小型崩塌等现象时有发生。

### 1.2 墓坑边坡地质特征

显陵墓坑边坡高 13m, 坡角 70°。分为北壁、西壁两部分。由硅质岩、斜长玢岩组成。据现场调查及稳定性计算分析认为: 由于岩体中不稳定分离体导致边坡整体稳定性不佳, 随时可能出现大规模崩塌滑坡的险情, 该边坡概貌图如图 1 所示。



图 1 边坡概貌示意图

Fig. 1 Schematic overview diagram

收稿日期: 2013-04-13; 修回日期: 2014-09-01

基金项目: 长江大学荆楚文化研究中心开放基金资助(CWH201305), 湖北省教育厅中青年人才科技计划基金项目资助(Q20111311)

作者简介: 张 健(1981—), 男, 湖北武汉人, 2007年毕业于长江大学计算机应用技术专业, 讲师, 主要研究方向: 信号检测与控制技术。

E-mail: zhangjian0716@126.com

为了能对陵墓边坡进行长期、准确的形变监测、掌握该坡段实时状态及变形过程,同时,也为准确掌握坡内岩体中温湿度、地层应力、裂缝度、浸润线、渗流量、孔隙水压力等物理量的变化特征,拟建设一整套高精度远程变形在线监测与预警系统。边坡的变形监测通过设置在坡体中上部的两个监测点进行长期形变监测,该系统基于测地型 GPS 接收机,并结合 GPS 高精度定位技术对边坡的形变过程实施全时段、智能化的实时检测。当变形量触及设置的预警阈值后,系统通过多种方式自动发布预警信息<sup>[1]</sup>。坡内岩体中各参量的监测则通过分布于坡内的各类传感器进行监测,该子系统 RTU 终端将前端采集到的各种参量汇聚后以 GPRS 方式传送至控制中心,并利用专家级自动统计分析功能为文物部门提供决策依据,以及时预防灾害的发生。

## 2 高精度变形监测预警系统设计方案

### 2.1 整体目标设计

本系统可实现 7 × 24 × 365 全天候稳定、可靠运行,并可对边坡的形变状态进行长时间、不间断监测,观测精度能够完全满足实际监测要求。系统选用无线数据传输方式,平台软件可通过监测各个测点的三维位移分量实现对边坡状态的实时监控。同时还应实现远程系统设置、数据管理、结果分析、报表生成与查询等诸多功能,并能计算边坡的各向形变速率<sup>[2]</sup>,能自动将采集到的参量同预设阈值进行比较、研判并及时发布预警信息,可根据降雨型滑坡

与降雨因子相关性模型对获取到的形变参量进行初步分析与简单评价。

### 2.2 功能模块设计

该系统的功能实现模块主要分为硬件与软件两部分。数据采集与传输部分主要由前端传感器与嵌入式智能设备构成,而软件平台部分主要包含数据管理、监测分析、报表生成、报表查询、信息发布、系统设置、用户管理等诸多功能。

### 2.3 系统结构设计

变形监测预警系统是由前端数据采集单元、数据传输单元、后台数据处理单元、分析预警平台单元、综合管理单元等五部分构成。其中,综合管理子系统是服务器软件管理中心,数据处理子系统为 GNSS 数据解算中心,分析预警子系统是监测数据分析预警中心,也是高精度变形监测预警系统的核心所在<sup>[3]</sup>。

GPS 监测子系统共设置 1 个基准站与 2 个监测站。根据实地勘验,拟将基准站布署于陵墓边坡顶部。周围无任何遮挡、无大功率无线设备、水域等,完全满足基准站布署标准。监测站则根据布署要求将一个监测点布署于边坡体中上部,另一点布署于边坡中下部隆起的滑坡台阶上。坡内岩体参量采集子系统中共设置 6 支不同类型传感器,按监测要求分别埋设于边坡内的不同方位,定期采集的数据通过 RTU 汇聚处理后以无线方式传输至控制中心。同时,系统中也设置了太阳能供电、设备防雷击保护装置<sup>[4]</sup>以保证系统长期稳定运行。整个系统组成结构及运行流程如图 2 所示。

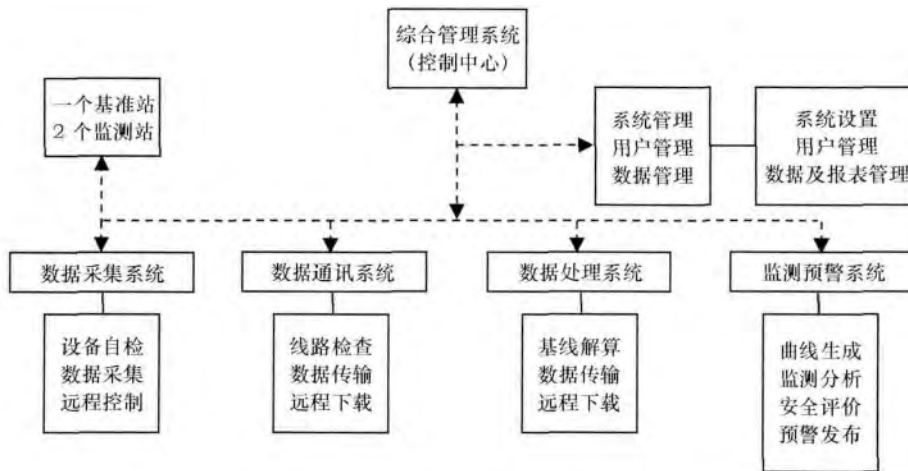


图 2 系统组成结构与运行流程示意图  
Fig. 2 System composition and operation flow diagram

### 2.4 主要硬件设备选型与设计

根据系统整体建设目标及技术指标的要求,对系统中主要硬件设备进行如下设计。

#### 2.4.1 GPS 接收机的硬件设计

GPS 硬件部分基于 AT1200 型专业大地测量型单频 GPS 天线与自主研发的分体式 GPS 接收机构成。GPS 变形监测硬件部分组成与连接结构如图 3 所示。



图 3 GPS 变形监测硬件部分的组成与连接示意图

Fig.3 GPS deformation monitoring hardware components composition and connection diagram

针对高动态应用需求,本研究设计的 GPS 接收机基于 FPGA/DSP 平台开发,采用 ALTERA 公司的 CycloneIV 系列 EP4CE30F23 完成 RF 射频数据采集与自动增益控制(AGC),并将采集到的定位数据汇聚后进行相干累加计算。采用 TI 公

司的 TMS320C6748 DSP 实现基带信号处理与接收机位置、速度、时间的解算。基于对微型化、低功耗、低成本的综合考虑,采用分立元器件构建射频前端<sup>[5]</sup>。接收机硬件结构示意图如图 4 所示。

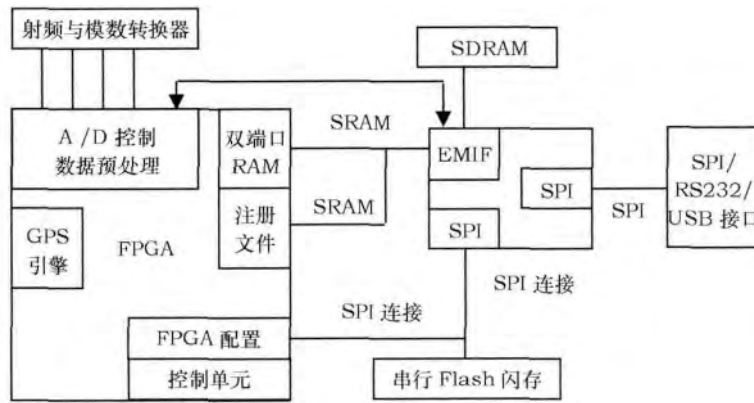


图 4 GPS 接收机硬件结构框图

Fig.4 GPS receiver hardware structure block diagram

由图 4 可知,接收机的硬件部分主要包括 RF 射频前端、GPS 信号捕获、跟踪与处理、导航解算等四大模块。射频前端主要完成 GPS 信号接收至中频的数字化变换,变换后的数字信号经第二模块处

理后输出导航电文、伪距、伪距率信息,其后通过导航解算模块进行 PVT 解算。

RF 射频前端的结构设计框图如图 5 所示,其中 L1、L2 两路通道信号的汇聚和解析均通过分立器件实现。

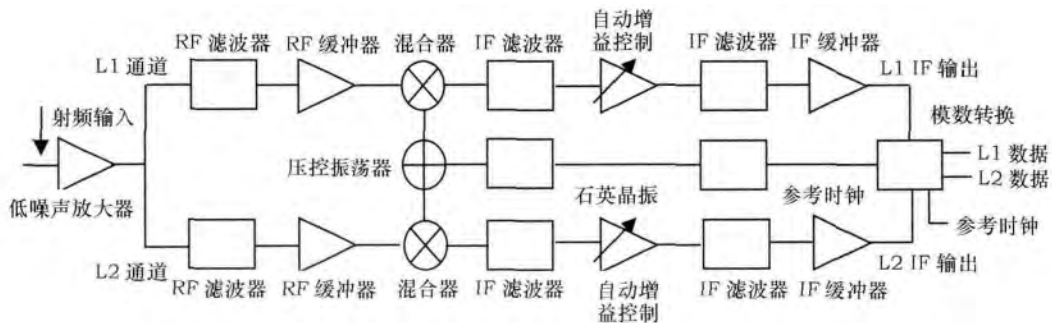


图 5 RF 射频前端结构设计框图

Fig.5 The RF front-end structure design block diagram

由图 5 可知,射频信号输入后率先经过 LNA 选用 TI 公司的 OPA211-EP 增强型低噪音放大器,该器件具有频带宽广、噪声极低、超高增益等诸多优点。其主要性能指标完全覆盖 L1、L2 波段,其增益为 108dB。射频滤波器性能指标需满足 3dB 带宽达到  $\pm 16\text{MHz}$ ,回波损耗 20dB,输入、输出阻抗  $50\Omega$ ,偏离中心频率  $\pm 100\text{MHz}$  处的带外抑制 50dB。基于诸多因素考量,射频滤波器考虑选择钽酸铝材料为介质的器件。为满足系统的高增益补充要求,射频增益放大器选用美国 ADI 公司的 ADL5330 芯片。VCO 和频率合成部分选择 TI 公司具有集成 VCO 的高性能频率合成器系统 LMX25311226EVAL,其优点是高性能、超微型化、集成度高、功耗极低。石英晶振的频率选择 20MHz。

自动增益控制部分选用 ADL5243 芯片,该芯片集成两个高性能放大器与一个数字步进衰减器,能以 6Bit、0.5 dB 步长的精度提供 31.5 dB 增益控制范围,完全满足设计要求。此处中频放大器同样选用 ADL5330 芯片用于系统的增益补充。其后由分立元件构建的第一级中频滤波主要是在自动增益之前进行首次带外噪声抑制,第二级在增益之后再次进行抑制,尤其是趋近通带上下限部分。A/D 转换部分选用双通道,10Bit 的集成电路芯片 MAX19515,转换速率大于 100MS/s,采用

单端输入方式。

FPGA 信号处理电路中,主芯片 EP4CE30F23 通过优化的 60nm 低功耗工艺使其最高处理速率可达 100MHz。芯片内部逻辑门为 28848 个、具有 132 个硬件乘法器、全局时钟数为 20,533 个 I/O 引脚,4 个 PLL 锁相环。该款芯片在同类产品中具有体积更小、容量更大、功耗更低等显著优势。同时,匹配 EPCS64 作为配置芯片存储其配置文件。为进一步节约成本,FPGA 与 DSP 共用同一块串行 FLASH RAM。上电时,配置芯片中的数据预先导入 FPGA 中,然后 DSP 复位。配置完成后,则清除 DSP 复位控制信号<sup>[6]</sup>。

经 A/D 转换后得到的射频前端数据送入 FPGA 系统中,在 A/D 与 FPGA 处理模块之间需设置 FIFO 缓冲区,作为 FPGA 采用批处理方式处理前端不间断捕获到的海量卫星数据的缓存。PLL 将 TCXO 晶振的 20MHz 进行 2 倍频,同时得到  $(40-40/1.023) * 1/40 \div (1/1.023) = 2.3\%$  的码间位移,该值有利于 C/A 码的细化分辨。

2.4.2 边坡内岩体各参量数据采集子系统中 RTU 的硬件设计 该子系统由前端多个有线传感器、RTU、GPRS DTU、RS485 线缆、双绞线及野外电源与防雷系统等组成。该子系统体系结构如图 6 所示。

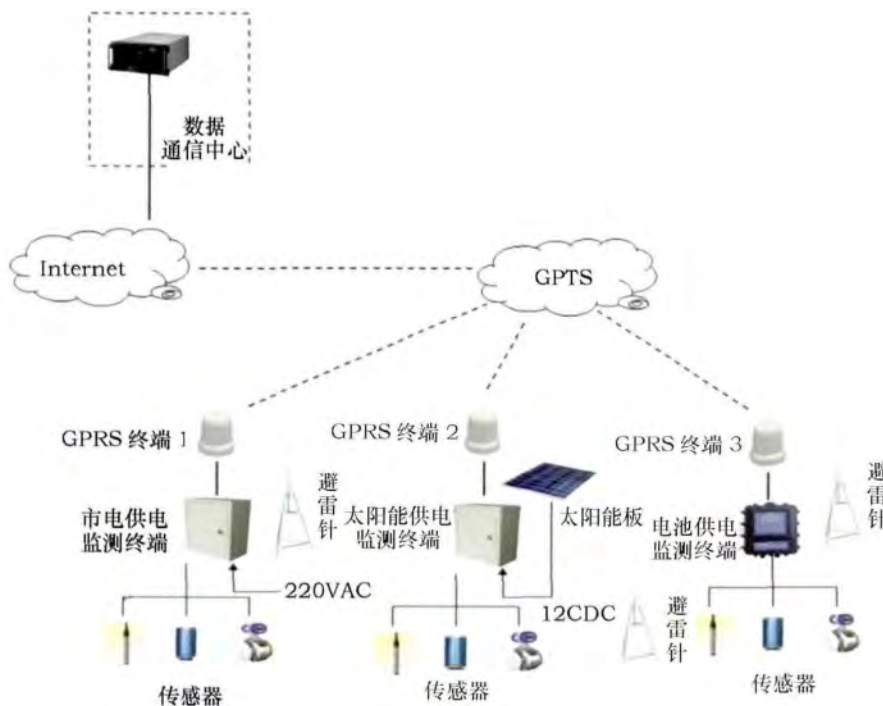


图 6 数据采集子系统体系结构示意图

Fig. 6 Data acquisition subsystem architecture diagram

基于 ARM11 的低功耗遥测 RTU 为该子系统核心部件。其采用高精度进口主板,确保设备运行的稳定可靠。RTU 系统结构如图 7 所示,该系统以 S3C6410 为主控制器,主要包括数字量输入模块、数字量输出模块、模拟量输入模块、RS232、RS485 通信

模块、以太网控制器模块 RTL8019AS、4M FLASH、1M SRAM 存储模块、GPRS 无线通讯模块、时钟、复位电路等。软件采用  $\mu$ CLinux 实时多任务操作系统,数据传输采用 ModBus 通信协议,并设计了 TCP/IP、RS232、RS485 等多种通信方式<sup>[7]</sup>。

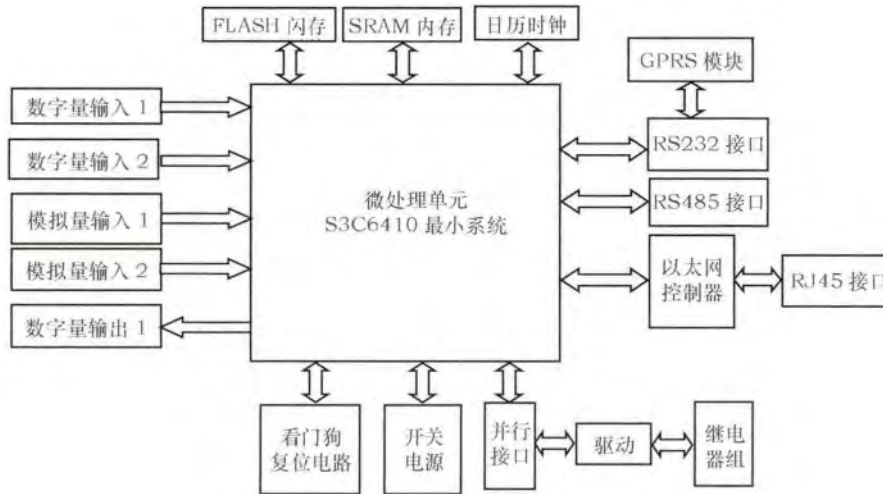


图 7 RTU 遥测终端系统结构示意图  
Fig. 7 RTU Telemetry Terminal System architecture diagram

2.5 系统软件设计

系统软件平台包括数据处理、监测预警、综合管

理三大模块:系统软件设计总体流程框图如图 8 所示。

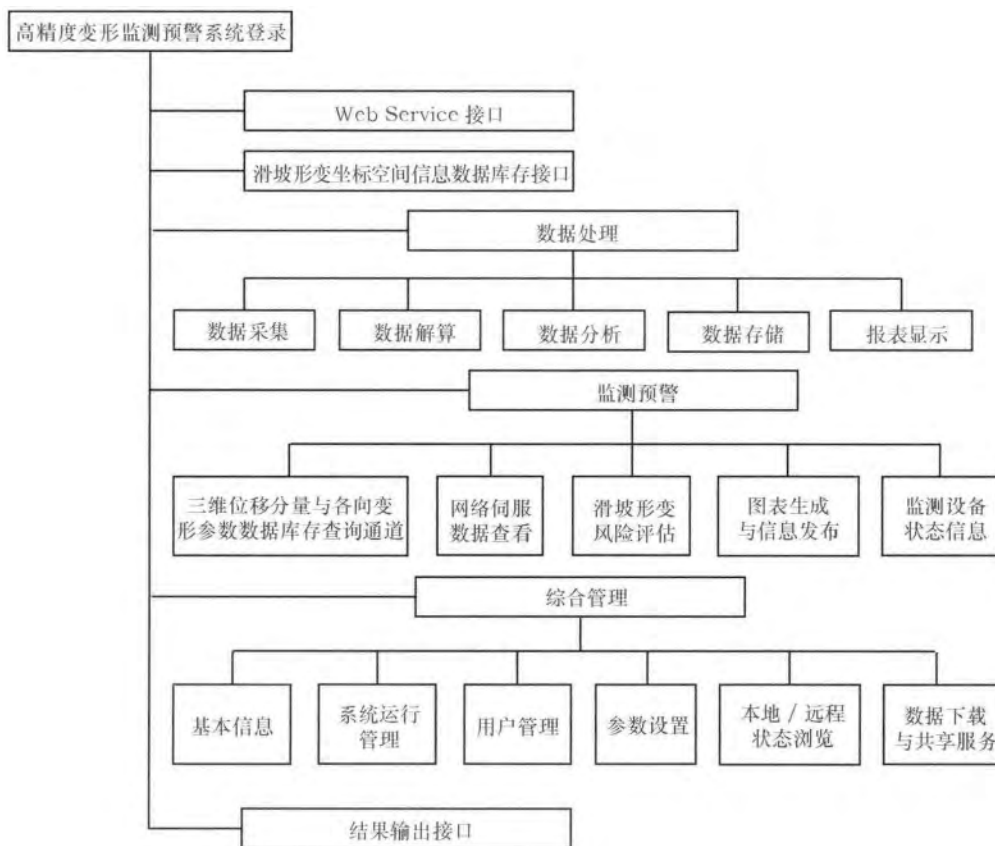


图 8 系统软件设计总体流程框图  
Fig. 8 System software design The overall flow chart

数据处理子系统采用卡尔曼滤波集成单历元整数解算方法对数据进行解算,定位精度可达毫米级<sup>[9]</sup>。

监测预警子系统能够实现对三维位移分量及各向变形速率的计算,并生成变形历时曲线如图 9 所示。亦能根据实地地形数据生成三维仿真图形,亦可生成变形场等高图与渐变色谱图如图 10 所示。通过一段特定时间采集到的两处 GPS 滑坡监测点数据如表 1 和表 2 所示。

由表 1 和表 2 中的数据可知:8 月 15~21

日监测得到的位移矢量角度相比后续时段的数据变化较大;而其他时段显示的矢量角度变化则相对较小。其原因主要是监测点布设期间正值雨季,观测墩尚未稳定;并且由于工程人员对 GPS 滑坡监测系统的操作流程以及数据解算处理过程还不十分熟悉,造成一定的误差;而通过观测后续位移矢量角度数据说明坡体在该时段监测中并未出现明显异常,处于稳定状态。这与使用其他监测方法所得到的结果一致。同时,也验证了系统的稳定与可靠。

表 1 第一处 GPS 形变监测点三维位移分量与变形速率表

Table 1 3D displacements and deformation rate of the first deformation monitoring point

日期	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	合位移	X 方向速率	Y 方向速率	Z 方向速率	位移角度
2013-8-15 5:37:00	-0.9	-23.1	-6.7	6.7602	-4.4	-19.4	-8.4	77.2113
2013-8-21 5:08:00	0.3	-26.8	-10.0	10.0045	-3.2	-23.1	-11.7	82.1131
2013-8-21 16:08:00	1.5	-26.5	-8.2	8.3361	-2.0	-22.8	-9.9	84.9869
2013-8-22 5:08:00	2.6	-23.1	-11.8	12.083	-0.9	-19.4	-13.5	87.3439
2013-8-22 16:08:00	2.8	-25.7	-8.5	8.9493	-0.7	-22.0	-10.2	88.1776
2013-8-23 5:08:00	3.2	-24.5	-2.2	3.8833	-0.3	-20.8	-3.9	89.1737
2013-8-24 16:28:00	2.9	-35.0	-1.1	3.1016	-0.6	-31.3	-21.7	88.4162

表 2 第二处 GPS 形变监测点三维位移分量与变形速率表

Table 2 3D displacements and deformation rate of the second deformation monitoring point

日期	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	合位移	X 方向速率	Y 方向速率	Z 方向速率	位移角度
2013-8-15 5:37:00	-4.3	-30.2	-17.7	30.5046	-2.6	-29.5	-14.1	84.9632
2013-8-21 5:08:00	-1.8	-30.7	-12.5	30.7527	-0.1	-30.0	-8.9	89.8090
2013-8-21 16:08:00	-1.7	-27.1	-22.0	27.1533	-2.2	-26.4	-18.4	88.3450
2013-8-22 5:08:00	-5.2	-29.5	-17.6	29.9548	-3.5	-28.8	-14.0	87.0709
2013-8-22 16:08:00	-4.4	-30.2	-10.6	30.5188	-2.7	-29.5	-7.0	86.7705
2013-8-23 5:08:00	-4.7	-29.7	-7.1	8.5147	-3.0	-29.0	-3.5	88.3987
2013-8-24 16:28:00	-4.6	-32.8	-14.2	14.9265	-2.9	-32.1	-10.6	85.6992

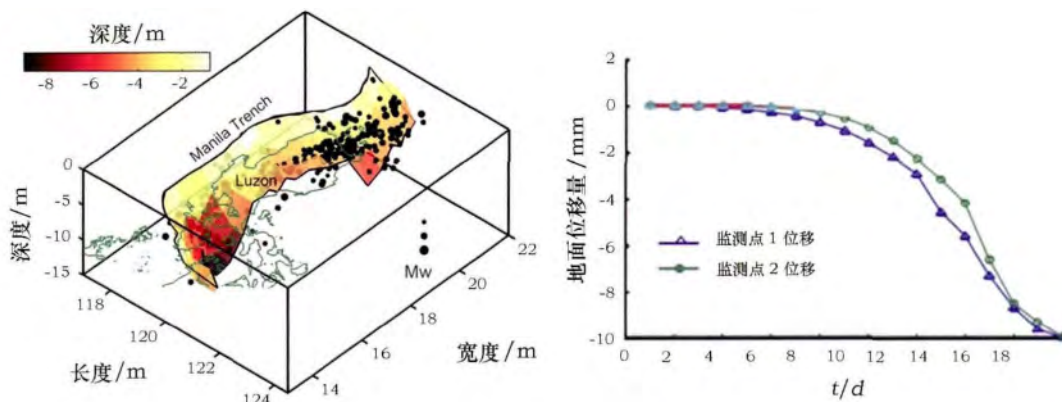


图 9 三维位移分量与变形历时曲线分布图

Fig. 9 Three-dimensional displacement components and Deformation duration curve distribution diagram

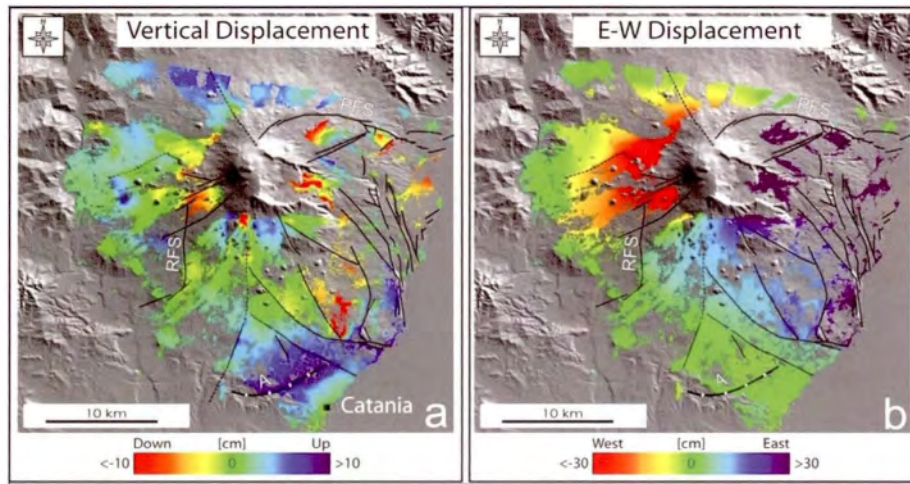


图 10 变形场等高图与渐变色谱图

Fig. 10 Deformation field contour map and gradient chromatogram

与此同时,技术人员能够通过上述功能并综合其他监测数据对监测点当前状态进行风险分析评价。亦可短信或屏显等方式进行多渠道实时信息发布、紧急状态下还能适时多渠道多形式进行预警信息播报。

综合管理子系统可实现数据管理、系统运行管理、用户管理、参数设置、本地/远程状态浏览、数据下载及共享服务等<sup>[10]</sup>。

### 3 系统运行情况分析

系统建成后,按要求进行了日常值守与现场专项考核。对系统功能、数据传输可靠性、系统运行稳定性、报警联动、供电能力等<sup>[6]</sup>诸多方面进行了严格测试。测试表明:系统软硬件部分运行正常。GPS 接收机应用于大地变形监测定位水平精度可达 2 ~ 4mm 左右、垂直精度可达 4 ~ 8mm 左右。地表裂缝监测精度可达 0.1mm。滑坡推力监测精度约  $\pm 5\%$  范围内。连续观测情况下解算基线长度变化范围  $\pm 5$  mm; 滑坡监测系统高程精度可达到 3.5mm。系统各项技术指标经测试均达到技术合同要求并完全满足国家标准。该系统运行稳定可靠。各监测点传感设备工作正常、监测参数能在规定时间内汇聚,及时、准确地传至中心站,无漏报现象,误报率严格控制在系统误差范围之内。系统完全满足设计方案的整体要求。GPS 滑坡监测剖面图及系统服务器运行状态示例如图 11 所示。

### 4 结 语

高精度变形监测预警系统设计方案目标明确、功能完备、流程清晰,具有鲜明的针对性。系统设计

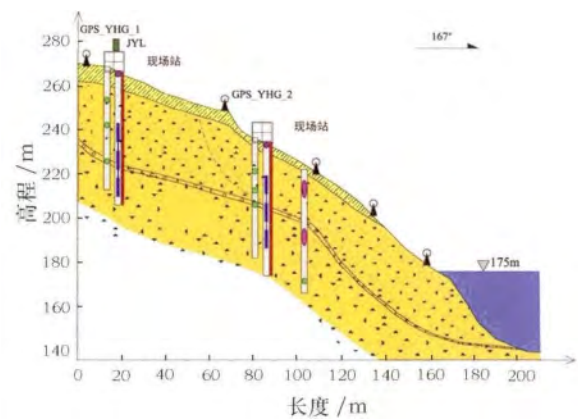


图 11 GPS 滑坡监测剖面图及系统服务器运行状态图

Fig. 11 GPS Landslide Monitoring sectional view and Systems server running status diagram

方面既考虑了监测功能及精度需求,也兼顾了工程投资的经济性与实用性。系统实行全过程监理,方案设计能够完全满足客户实际需求,实现了系统设计的整体目标,遗址管理方通过该系统的建设与运行能够准确掌握防区内的环境动态信息,为文保执法监测与管理提供了有力支撑。

### 参考文献:

[1] 李 黎. GPS 技术在变形监测中的应用及发展趋势[J]. 勘查科学技术, 2012, 11(4): 57-62.  
 LI Li. Application of GPS technology in deformation monitoring and development Trend [J]. Site Investi Sci Technol, 2012, 11(4): 57-62.

[2] 王红刚, 李 伟. GPS 技术在苗家坝水电站滑坡体监测中的应用[J]. 四川水利, 2012, 4(8): 98-103.  
 WANG Hong-gang, LI Wei. GPS technology that applied in the Miaojiaba Station Landslide Monitoring [J]. Sichuan Water Reso, 2012, 4(8): 98-103.

- [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, 6(6): 116-119.  
HE Man-chao. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application [J]. Chin J Rock Mech Eng, 2009, 6(6): 116-119.
- [4] 欧阳祖熙, 张宗润. 基于 3S 技术和地面变形观测的三峡库区典型地段滑坡监测系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 12(9): 58-62.  
Ouyang Zu-xi, ZHANG Zong-run. Slope monitoring system of three gorges area based on techniques and ground deformation observation [J]. Chin J Rock Mech Eng, 2005, 12(9): 58-62.
- [5] 王治华, 郭兆成. 基于数字滑坡技术的暴雨滑坡、泥石流预警、监测模型研究[J]. 地学前缘, 2011, 11(9): 88-91.  
WANG Zhi-hua, GUO Zhao-cheng. Model study of monitoring and early warning of rainstorm induced landslide and debris flow based on digital landslide technology [J]. Earth Sci Front, 2011, 11(9): 88-91.
- [6] 陈梓馥, 孙万蓉. 基于 ARM9 的 RTU 设计[J]. 物联网技术, 2012, 10(3): 134-137.  
CHEN Zi-fu, SUN Wan-rong. Design of RTU based on ARM9 [J]. Internet Things Technol, 2012, 10(3): 134-137.
- [7] 杨洋, 薛晓中. 基于深组合应用的 GPS 接收机设计[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 7(6): 12-15.  
YANG Yang, XUE Xiao-zhong. Design of a GPS receiver based on application in ultra tight coupling GPS/SINS system [J]. J Chin Inertial Technol, 2012, 7(6): 12-15.
- [8] 曾为民, 李志康. 基于 ARM 与  $\mu$ Linux 的 RTU 设计[J]. 电子技术应用, 2005, 12(8): 101-104.  
ZENG Wei-min, LI Zhi-kang. RTU design based on ARM and  $\mu$ Linux [J]. Appl Electr Tech, 2005, 12(8): 101-104.
- [9] 高雅萍, 冯晓亮. 一种快速建立 GPS 滑坡监测网卡尔曼滤波模型的方法研究[J]. 工程勘察, 2007, 4(2): 78-81.  
GAO Ya-ping, FENG Xiao-liang. A fast way research that related to the GPS landslide monitoring network including the Kalman filter model [J]. Geotech Invest Surv, 2007, 4(2): 78-81.
- [10] 陶春鸣, 梅杨. 基于 GPS 差分算法的研究与滑坡监测系统软件实现[J]. 河南科学, 2007, 10(1): 165-168.  
TAO Chun-ming, MEI Yang. Research of difference arithmetic and realization of landslide monitoring system software based on GPS [J]. Henan Sci, 2007, 10(1): 165-168.

## Application research of high accuracy deformation monitoring and warning system to protection of the Ming dynasty Xian tomb site

ZHANG Jian, LI Ying-jun

(School of Computer Science, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

**Abstract:** In order to protect relics and send out warnings of damage due to landslides, a monitoring system using a high accuracy Global Positioning System (GPS) and a telemetry remote terminal unit (RTU) has been set up to monitor the physical conditions of mausoleum slope by wireless communication. The system can be used to monitor both the internal environment burial mound and landslide conditions. The monitoring parameters and alarm signals will be transmitted to the control centre in real-time through general packet radio service (GPRS), then displayed continuously on the managed software platform. The security personnel can then respond immediately based on the information obtained. The system represents an efficient way to protect heritage sites and tombs of various sizes.

**Key words:** GPS; High accuracy; Deformation monitoring; Site protection

(责任编辑 马江丽)