

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201908051

# 基于物联网技术的滑坡监测数据自动采集系统研究\*

张雪林<sup>1,2</sup>, 孟永东<sup>1,2</sup>, 梁诗顺<sup>1,2</sup>, 田斌<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北宜昌 443002;  
2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002)

**摘要:** 针对传统滑坡监测数据采集系统布线困难、自动化程度低、成本高等问题,设计了一种基于物联网技术的滑坡监测数据自动采集系统。该系统以 ZigBee 无线传感器网络、无线通信技术为核心,通过布置在滑坡体上的传感器节点采集数据。利用 ZigBee 协议和互联网将数据实时传输到监控中心,使相关工作人员及时掌握滑坡体信息。以三峡库区八字门滑坡为例,分析了该滑坡当前监测手段的不足,建立了八字门滑坡的物联网监测系统,分别对系统的硬件组成和软件程序进行设计。针对节点能量供应和数据远程传输问题,提出将太阳能供电系统和北斗短报文模块应用到数据采集系统来弥补野外条件的不足。结合八字门滑坡的地形地质条件,优化了滑坡测点的布置方案,并开发了数据采集界面以实现监测数据的自动采集和直观显示。

**关键词:** 物联网技术; 数据自动采集; 无线传感器网络; 八字门滑坡监测; 北斗短报文; 太阳能供电系统  
**中图分类号:** TN98    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1137-08

## Research on Automatic Landslide Monitoring Data Acquisition System based on Internet of Things Technology

ZHANG Xuelin<sup>1,2</sup>, MENG Yongdong<sup>1,2</sup>, LIANG Shishun<sup>1,2</sup>, TIAN Bin<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Three Gorges Landslide National Field Scientific Observation and Research Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of traditional landslide monitoring data acquisition system, such as difficulty in wiring, low automation and high cost, an automatic acquisition system for landslide monitoring data is designed, which is based on Internet of Things technology. The system focuses on the ZigBee wireless sensor network and wireless communication technology, collects data through sensor nodes arranged on the slope. And then, it transmits the data to the monitoring center in real-time by the ZigBee protocol and the Internet so that the relevant staff can timely grasp the landslide information. Taking the Bazimen landslide in the three gorges reservoir area as an example, the shortcomings of the current monitoring means are analyzed. The Internet of things monitoring system of the Bazimen landslide is established, the hardware composition and software design of the system are also de-

\* 收稿日期:2019-08-20;修回日期:2019-10-08

基金项目:国家重点研发项目计划(2017YFC1501100)、国家自然科学基金项目(51679129)资助

作者简介:张雪林(1994—),男,硕士研究生。主要从事滑坡安全监测方面的研究。E-mail:2335168503@qq.com

通讯作者:孟永东(1976—),男,教授,博导,博士。主要从事水工结构工程及岩土工程研究。E-mail:meng@ctgu.edu.cn

signed in detail. For the node energy supply and data remote transmission, it is proposed to apply the solar power supply system and Beidou short message module to the data acquisition system, making up for the shortage of field conditions. Combined with the topographic and geological conditions of the Bazimen landslide, the arrangement scheme of landslide monitoring points is optimized, and the data acquisition interface is developed to realize automatic collection and visual display of data.

**Keywords:** Internet of things technology; automatic data acquisition; wireless sensor network; Bazimen landslide monitoring; Beidou short message; solar power supply system

## 引言

滑坡是最常见的地质灾害之一,突发性强、破坏性大,全球每年由于滑坡造成的人员伤亡、交通阻塞、农田房屋掩埋等生命财产损失巨大。采取科学合理的滑坡监测手段,可以防患于未然,将滑坡灾害造成的损失尽可能地降到最低点。传统的滑坡监测系统主要依靠全站仪、各类传感器、分布式光纤测量系统<sup>[1]</sup>等方法来采集数据,受到监测设备成本高、实时性差、操作不便等因素的制约;何满潮<sup>[2]</sup>开发了地质灾害远程监测预报系统,并成功应用到矿山边坡,但是该系统以监测应力状态为主,难以建立覆盖大范围、多区域、实时动态的滑坡安全监测系统;无人机遥感<sup>[3]</sup>作为一项新兴技术,在滑坡监测领域也得到了应用,但面临影像数据采集和后期成果处理等挑战;也有学者提出采用先进的雷达干涉测量技术<sup>[4]</sup>对滑坡体进行监测,但只能得到滑坡体的时空分布特征<sup>[5]</sup>,对于地质地貌和气候特征极为复杂的大型滑坡体,监测工作很难开展。因此需要设计一套低成本、自动化程度高、抗干扰性强的滑坡监测数据自动采集系统,对滑坡体进行全面监测,从而做好滑坡灾害的预防预报工作。

随着物联网技术<sup>[6]</sup>、无线通信技术<sup>[7]</sup>以及传感器技术的发展,滑坡监测呈现出自动化、智能化、网络化的发展趋势。基于无线传感器网络技术<sup>[8-9]</sup>的滑坡监测数据自动采集系统,借助 ZigBee 网络技术能够实现监测数据的自动采集和无线传输。ZigBee 网络具有低功耗、低成本、组网灵活、可靠性高、双向通信等特点<sup>[10]</sup>,摆脱了线缆的束缚,可用于如大坝浇筑期间混凝土温度的实时监测、农业精准监测<sup>[11]</sup>、温室温度监测<sup>[12]</sup>以及水文监测<sup>[13]</sup>等,但在滑坡监测领域的应用还存在较大空缺。本文以三峡库区的八字门滑坡为研究对象,结合工程实际情况

设计了一套基于物联网技术的滑坡监测方案,对数据采集系统的硬件组成、软件设计以及上位机数据采集界面的实现进行了详细设计。该方案对滑坡灾害应急防治能力的提升有较大的促进作用。

## 1 系统总体设计

### 1.1 无线传感器网络组建

滑坡监测数据采集系统由近程无线传感器网络和远程监控中心两部分组成,其中无线传感器网络是搭建物联网架构的基础,包含传感器节点、路由节点以及汇聚节点,利用 ZigBee 协议组建簇状型网络结构<sup>[14]</sup>,从而实现节点之间的相互沟通和信息传递。数据传输协议的选择决定了无线传感器网络中数据传输的可靠性与稳定性,相比于蓝牙、WiFi802.11、Wireless USB、Bluetooth、Cellular 等其他传输协议,ZigBee802.15.4<sup>[15]</sup>协议虽然传输速率偏低,但是能够满足小容量的监测数据传输。功耗低,传输距离可拓展,整体更容易实现。各种无线数据传输协议对比如图 1 所示。

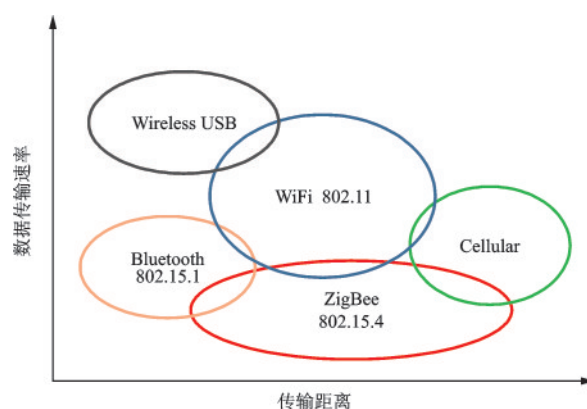


图1 各种无线数据传输协议对比<sup>[16]</sup>

Fig.1 Comparison chart of various wireless data transmission protocols<sup>[16]</sup>

数据由传感器节点采集后传输到路由节点,再由路由节点传输到汇聚节点,数据传输过程如图2所示。其中传感器节点负责数据的采集和存储;路由节点负责数据的多跳路由传输,目的是缩短节点之间传输距离,从而增加信号传输到目标节点的可靠性<sup>[17]</sup>;汇聚节点负责接收传感器节点和路由节点发来的数据并负责存储、管理和融合,同时要实现近程网络和远程网络的衔接,把数据信息发送到监控中心;监控中心是由电脑和配套的软件组成的,主要负责数据的汇总分析和自动化采集控制。

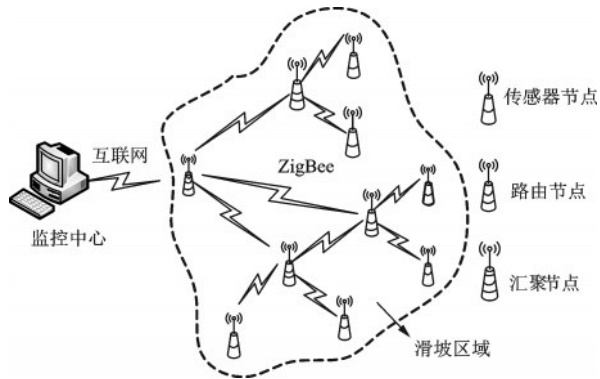


图2 无线传感器网络结构

Fig.2 Structure diagram of wireless sensor network

## 1.2 八字门滑坡监测物联网体系架构建立

八字门滑坡体位于三峡库区秭归县香溪村,滑坡纵长为550 m,宽约为80~210 m,总面积约为13.5万 $m^2$ ,总体积约400万 $m^3$ 。由于滑坡前缘长期受到水流的冲刷和掏蚀,且水库蓄水后地下水位上升,滑坡中部堆积平台的滑带土浸泡软化,滑坡后缘下滑力增大,中部抗滑力下降,导致滑坡整体趋于失稳。在地下水位上升和暴雨条件下八字门滑坡极有可能复活,因此开展该滑坡的监测工作显得尤为重要。

该滑坡目前采取的监测手段以群测群防、GPS监测站和自动雨量站为主,测点偏少,监测内容单一,难以建立覆盖整个滑坡体的监测网络。为了及时掌握滑坡动态,宜对滑坡体进行全面监测,监测内容主要包括表面位移、深部位移、裂缝发育情况、孔隙水压力以及地下水位变化等。本文选用GNSS、测斜仪、测缝计、孔隙水压力计和水位计等仪器对滑坡实施监测,物联网能够将这些传感器和互联网连接起来,实时进行信息交换和通讯,从而掌握整个滑坡体的发展过程。整个物联网系统按

功能分为三层,感知层主要由滑坡体上各种类型的传感器和无线通信模块组成,负责数据的采集和近程无线传输;网络层负责将感知层采集的数据通过Internet、北斗卫星等方式上传到监控中心;应用层主要指上位机部分,负责接收、整合感知层传来的数据,并对物联网系统进行实时控制和科学管理。滑坡监测的物联网架构如图3所示。

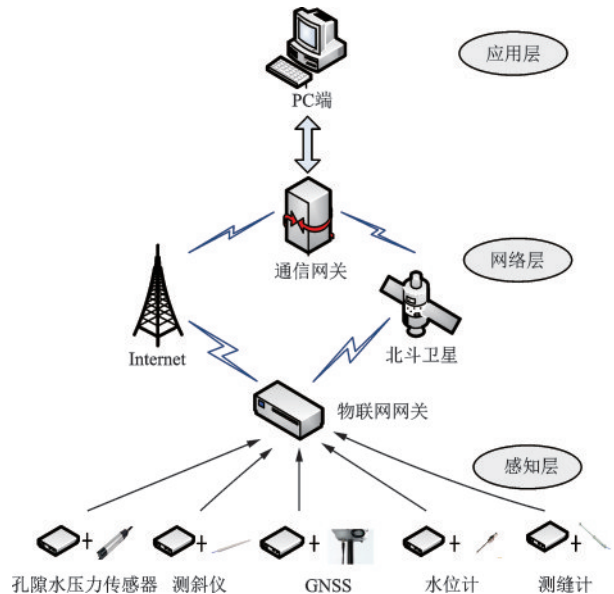


图3 基于物联网的滑坡监测体系架构

Fig.3 Landslide monitoring architecture based on Internet of Things

结合八字门滑坡的地形地质条件,在地质敏感区布置监测剖面,沿着监测剖面设置若干个监测点位,以保证变形监测数据在空间位置上的连续性。通过物联网网关管理各个测点,建立地表和地下深部的三维立体监测网,从而对滑坡进行系统、可靠的变形监测,实时掌握八字门滑坡不同部位各类型裂缝的发育情况、地表地下的位移变形以及地下水水位的变化。八字门滑坡的立体监测网如图4所示。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 无线通信模块设计

无线通信模块在设计时要考虑到以下4点:微型化;较高的传输速率和抗干扰能力;较好的稳定性和安全性;低功耗<sup>[19]</sup>,支持休眠—唤醒模式,满足工程长期监测需求。基于以上功能需求,本文采用

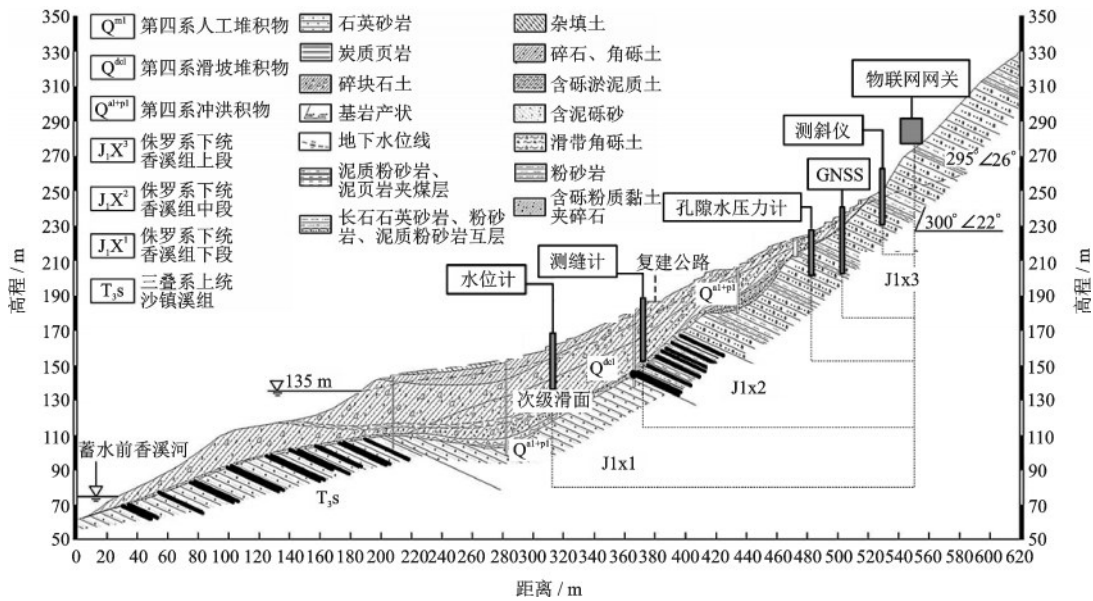


图4 八字门滑坡立体监测网<sup>[18]</sup>

Fig.4 Stereoscopic monitoring network of Bazimen landslide<sup>[18]</sup>

集成MCU加射频收发模块的SOC方案<sup>[20]</sup>,选择TI公司的CC2530射频芯片<sup>[21]</sup>加上简单的外围电路构成的2.4G无线通信模块。

## 2.2 传感器选择

对各种传感器的精度级别、测量性能和智能化程度进行比较,确定了用于八字门滑坡监测的传感器型号,见表1。选择的传感器具有体积小、精度高、耐磨耐碰、防水性能好等特点,适用于滑坡监测的恶劣环境。

表1 传感器类型及型号  
Table 1 Sensor Type and Model

监测内容	监测设备	型号	精度
滑坡深部位移	固定式测斜仪	YT-ZL-0100	$\pm 0.1\%F.S$
滑坡表面位移	GNSS位移监测机	BDY-S1	水平:1 mm以内 高程:2 mm以内
孔隙水压力	孔隙水压力计	BDY-KX-1	0.1、0.3、0.5%F.S可选
地下水位	水位计	YT-YL-0300	$\pm 0.1\%F.S$
裂缝发育	测缝计	YT-DG-0900	$\pm 0.1\%F.S$

## 2.3 能量供应模块设计

电源模块的设计要综合考虑功耗、成本及现场

实际条件,满足野外滑坡体长期、稳定的监测需求。八字门滑坡地形开阔,地理位置向阳且滑坡体上无大型植被覆盖,宜采用太阳能供电系统供电,该系统主要由太阳能电池板、可充电锂电池、充电控制器和放电保护电路组成。系统设计的思路如下:首先估算系统运行的总功耗,然后根据功耗选择合适的锂电池,再根据锂电池的容量来选择所需的太阳能电池板,最后根据锂电池输出电压和ZigBee无线传感器网络节点所需的工作电压来设计合适的DC-DC变换电路,引入DC-DC转换芯片旨在产生节点所需要的工作电压。

## 2.4 无线传感器网络节点设计

传感器节点主要是由传感器模块(以温度传感器为例)、处理器模块、无线通信模块与电源模块组成,节点硬件组成框图如图5所示。路由节点和汇聚节点无需进行数据采集,因此不含传感器模块。各个节点集合传感器模块、无线通信模块以及电源模块组建成智能传感、采集、收发系统,其构造如图6所示。

对于野外滑坡体监测,布线工作难以开展,目前主要的解决方式是借助3G模块、GPRS模块<sup>[22]</sup>、SD卡等实现信息通讯。八字门滑坡区域网络信号覆盖率较低,以上几种通信方式很难满足要求。本文借助我国自主研发的北斗卫星导航系统所特有的短报文发送功能实现远程无线通信,减少系统成

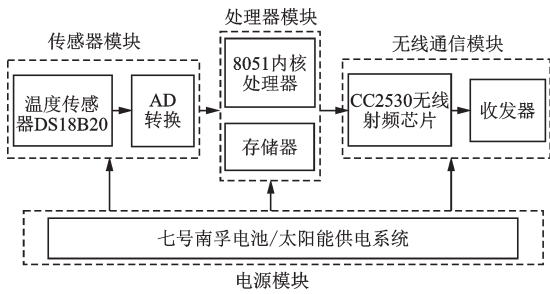


图 5 传感器节点硬件组成框图

Fig.5 Hardware block diagram of sensor node

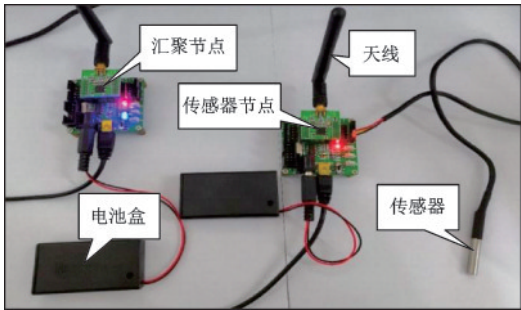


图 6 智能传感、采集、收发系统

Fig.6 Intelligent sensing, acquisition, transceiver system

本。短报文模块可以发送 140 个字的信息,还能够实现定位和双向通信,具有方便、快捷、安全等诸多优点,能够满足滑坡监测数据远程传输的需求。具体实现方式是在汇聚节点上接入荣辉北斗科技生产的 K1 型北斗短报文数传模块,当传感器终端采集的数据到达汇聚节点后,借助北斗短报文模块将数据信息和接收方 ID 号加密后通过卫星转发入站,接收方用户机接收出站信号,解调解密出站电文,完成一次通讯。协调器节点数据通信如图 7 所示。

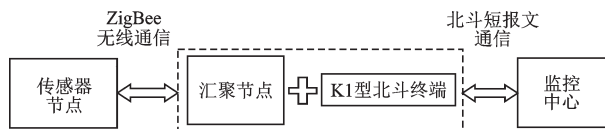


图 7 汇聚节点数据通信框图

Fig.7 Data communication block diagram of sink node

### 3 系统软件设计

本系统的软件程序是以 TI 公司推出的 Z-Stack 协议栈为基础进行开发的,该协议栈专为 ZigBee 协议设计,使用 IAR 软件集成开发环境进行程序的编写。本文主要介绍数据采集节点的软件设计和数

据汇聚节点的软件设计。

#### 3.1 终端数据采集节点程序设计

终端节点主要负责对监测区域中的信号量进行采集,并将数据发送给下一个节点,同时还需要完成汇聚节点的命令请求和节点控制等任务。以温度数据采集为例,节点被唤醒后,首先执行任务初始化函数,负责各个模块的初始化工作;然后调用任务事件处理函数,执行协调器节点发来的温度数据采集指令;调用温度检测函数,自动读取环境中的温度数据;最后调用数据发送函数,将温度数据通过 ZigBee 网络发送到路由节点或汇聚节点。其软件流程如图 8 所示。

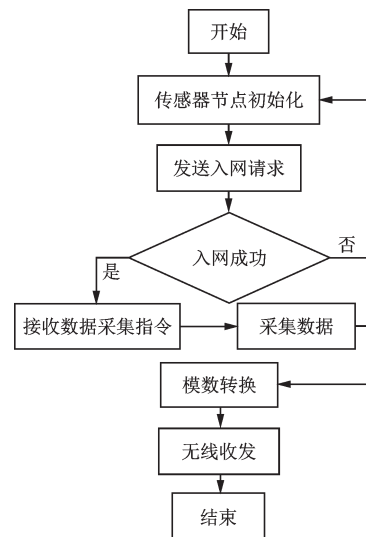


图 8 传感器节点程序流程

Fig.8 Flow chart of sensor node program

#### 3.2 数据汇聚节点程序设计

汇聚节点负责整个系统的网络建立,它通常具有较强的数据处理、存储和通信等能力。主要负责连接无线传感器网络和外部网络,完成这两种网络的通信协议转换和数据的存储转发等任务,同时控制节点的实时监测和采集情况,并把节点转发过来的数据传输给监控中心。汇聚节点建立网络后,首先执行初始化函数,实现端口初始化和串口的初始化;然后调用任务事件处理函数,对接受到的数据进行处理显示;最后将接受到的数据通过串口或者互联网等方式发送给 PC 机即可。其软件流程如图 9 所示。

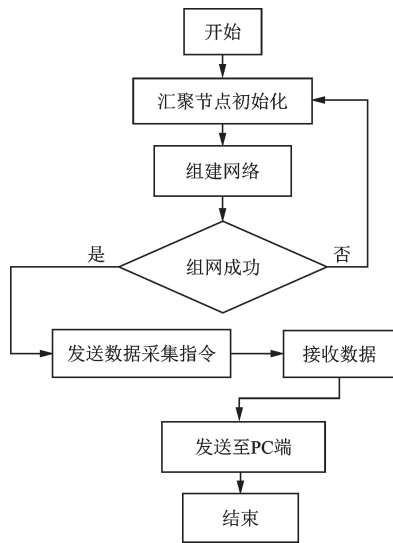


图9 汇聚节点程序流程

Fig.9 Flow chart of gathering node program

## 4 系统的实现

### 4.1 八字门滑坡物联监测系统布置示意

八字门滑坡体主要由结构松散的填土、粉质黏土和碎石土组成,属于土质滑坡。这类滑坡的主滑方向和范围比较容易掌握,监测点宜采用十字型布置方法。八字门滑坡主滑方向指向香溪河,中部是变形关键部位<sup>[23]</sup>,应重点布置监测点,汇聚节点布置在相对稳定的左侧区域。滑坡深部位移采用固定式测斜仪监测,测斜孔沿主滑方向布置;滑坡表面位移采用GNSS监测,测点宜呈网状布设在滑坡区域;孔隙水监测采用孔隙水压力计,本方案中沿着1—监测剖面线布置3个孔隙水压力监测点,与测斜仪共用同一个钻孔。滑坡裂缝主要是滑坡体后部的拉张裂缝,以及滑体中部两侧滑动体与不滑动体分界处的剪切裂缝。因此,在滑坡后缘和中部边界处共布置3个测缝计,以此观察裂缝的发育情况。根据不同测点的布置方式,结合滑坡的地理位置和地形条件,设计了八字门滑坡物联监测网,如图10所示。包含5个测斜孔、6个GNSS测点、3个孔隙水压力计、3个测缝计,形成三纵一横4条监测剖面线。各个监测点位测得的数据经 ZigBee 网络传输到汇聚节点,再借助北斗卫星将数据信息上传到监控中心<sup>[24]</sup>,各个测点彼此独立又相互关联,共同组成了八字门滑坡的物联网监测系统。

### 4.2 监测数据自动采集的程序实现

在滑坡监测网络中由传感器节点采集数据,然

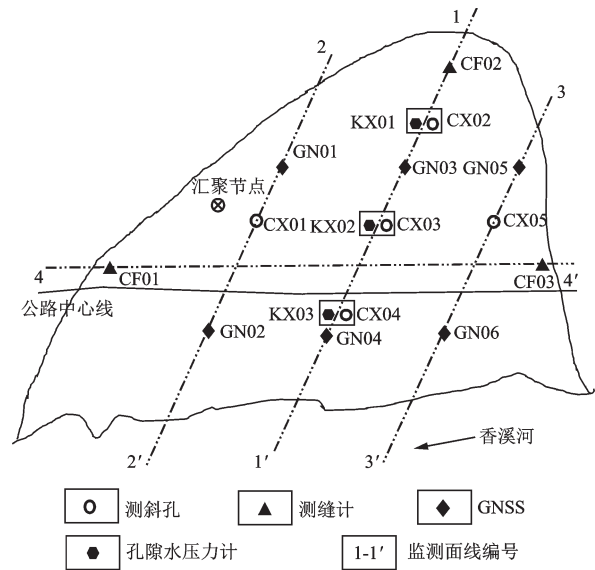


图10 八字门滑坡物联监测网设计布置

Fig.10 Design layout of the Bazimen landslide monitoring network

后通过 ZigBee 协议和外部网络将数据发送至监控中心,为了在上位机实时显示接收到的监测数据,设计了数据采集界面,如图11所示。



图11 自动化监测数据采集界面

Fig.11 Automatic monitoring data acquisition interface

设计的界面显示了数据采集的整个流程,数据开始采集,采集完成后对所采集的数据进行整编,整编结束后结合监测阈值实时更新预警状态,并通过网页推送的方式将数据推送给客户端,至此整个数据采集流程结束。设置采集间隔倒计时,直至计时结束执行下一次的数据采集流程,该界面能够实现滑坡监测数据的自动化采集和直观化显示。

该数据采集系统主要依赖 ZigBee 协议实现数据信息的传输,在空旷场地,节点间的正常传输距

离约为30~50 m。对于植被茂密的滑坡,通讯距离可能会受影响,主要的解决方法是增加路由节点的数量或者加大无线通信模块的发射功率,但后者往往会带来更大的功耗。八字门滑坡地势开阔,且滑坡体上无茂密植被覆盖,因此该系统具有很好的适用性。

## 5 结 语

(1)设计了基于物联网技术的八字门滑坡监测数据自动采集系统,详细介绍了系统的硬件组成和软件设计。

(2)针对监测系统能耗问题,提出了太阳能供电系统方案,解决野外长时间无人监护的网络节点的供电问题;提出利用北斗卫星技术实现节点与监控中心之间的远程数据传输,使得节点能够在野外没有网络信号的地方正常通信。

(3)结合八字门滑坡的地形地质条件和监测需求,优化了滑坡测点布置方案。

(4)开发了滑坡监测数据自动采集界面,能够显示数据的自动采集流程。

本系统弥补了传统数据采集方法的不足,适用于滑坡、水利工程等野外环境下的监测数据采集工作,具有很好的应用推广前景。

## 参考文献:

- [1] 徐卫军,侯建国,李端有.分布式光纤测温系统在景洪电站大坝混凝土温度监测中的应用研究[J].水力发电学报,2007(1):97-101.  
Xu W J, Hou J G, Li D Y. Application research of distributed fiber optic temperature measurement system in monitoring concrete temperature of jinghong dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007(1): 97-101. (in Chinese)
- [2] 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 M Ch. Remote monitoring and prediction system of landslide geological hazard and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1081-1090. (in Chinese)
- [3] 黄海峰,易武,张国栋,等.引入小型无人机遥感的滑坡应急治理勘查设计方法[J].防灾减灾工程学报,2017,37(1):99-104.  
Huang H F, Yi W, Zhang G D, et al. The design method

of landslide emergency control and exploration based on small unmanned aerial vehicle remote sensing is introduced [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 99-104. (in Chinese)

- [4] Casagli N, Catani F, Ventisette C D, et al. Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry [J]. Landslides, 2010, 7(3): 291-301.
- [5] 程海琴.时序雷达干涉测量探测汶川地震龙门山区滑坡的时空分布特征[J].测绘学报,2019,48(2):265.  
Cheng H Q. Temporal and spatial distribution characteristics of time-series radar interferometry for landslide detection in Longmen mountain area after Wenchuan earthquake [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(2): 265. (in Chinese)
- [6] 杨秋格,高峰,吴鹏.物联网技术在地震救灾中的应用[J].灾害学,2011,26(4):116-121.  
Yang Q G, Gao F, Wu P. Application of internet of things technology in earthquake relief [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 116-121. (in Chinese)
- [7] Na Y, Jun F L. Smart orchard soil moisture monitoring system based on wireless communication technology [C]//IEEE International Conference on Software Engineering & Service Sciences. Beijing: IEEE, 2010: 601-604. (in Chinese)
- [8] 杨冬,马剑,张宏科.智慧协同工业无线传感器网络[J].电子学报,2017,45(6):1537-1544.  
Yang D, Ma J, Zhang H K. Intelligent collaborative industrial wireless sensor network [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(6): 1537-1544. (in Chinese)
- [9] Gungor V C, Hancke G P. Industrial wireless sensor networks: challenges, design principles, and technical approaches [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4258-4265.
- [10] 李邦训,陈崇成,黄正睿,等.基于北斗与ZigBee的生态环境参数实时采集系统研发[J].福州大学学报(自然科学版),2019,47(4):460-466.  
Li B X, Chen Ch Ch, Huang Zh R, et al. Research and development of real-time collection system of ecological environment parameters based on beidou and ZigBee [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2019, 47(4): 460-466. (in Chinese)
- [11] Garcia-Sanchez A J, Garcia-Sanchez F, Garcia-Haro J. Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(2): 288-303.
- [12] 吴金洪,丁飞,陈应春,等.现代温室无线数据采集系统的研究[J].计算机测量与控制,2007,15(3):405-406.

- Wu J H, Ding F, Chen Y Ch, et al. Research on modern greenhouse wireless data acquisition system [J]. Computer Measurement and Control, 2007, 15(3):405-406. (in Chinese)
- [13] 黄海军, 余修武, 李杨, 等. 无线传感器网络技术在江河水位监测中的应用[J]. 煤炭技术, 2011, 30(4): 207-209.  
Huang H J, Yu X W, Li Y, et al. Application of wireless sensor network technology in river water level monitoring [J]. Coal Technology, 2011, 30(4): 207-209. (in Chinese)
- [14] 石军锋, 钟先信, 陈帅, 等. 无线传感器网络结构及特点分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(2): 16-19.  
Shi J F, Zhong X X, Chen Sh, et al. Analysis of wireless sensor network structure and characteristics [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2005, 28(2): 16-19. (in Chinese)
- [15] 成小良. 无线传感器网络剩余能量实时监测方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
Cheng X L. Research on real-time monitoring method of residual energy in wireless sensor network [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [16] 王小强. ZigBee无线传感器网络设计与实现[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.  
Wang X Q. Design and implementation of ZigBee wireless sensor network [J]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [17] 缪新颖, 褚金奎, 杜小文. 基于大坝监测的无线传感器网络结构的设计[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 100-103.  
Miao X Y, Chu J K, Du X W. Design of wireless sensor network structure based on dam monitoring [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 100-103. (in Chinese)
- [18] 贺可强, 王荣鲁, 李新志, 等. 堆积层滑坡的地下水加卸载动力作用规律及其位移动力学预测—以三峡库区八字门滑坡分析为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1644-1651.  
He K Q, Wang R L, Li X Zh, et al. Dynamic action law of groundwater loading and unloading and prediction of displacement dynamics of accumulation layer landslide—a case study of Bazimen landslide in three gorges reservoir area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1644-1651. (in Chinese)
- [19] 金福宝, 曹军. 无线传感器网络节点的低功耗设计[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(4): 73-75.  
Jin F B, Cao J. Low-power design of wireless sensor network nodes [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(4): 73-75. (in Chinese)
- [20] 王飞, 王黎明, 韩焱. 基于 ZigBee 无线传感器网络技术的管道监测系统[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(12): 85-86, 90.  
Wang F, Wang L M, Han Y. Pipeline monitoring system based on ZigBee wireless sensor network technology [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(12): 85-86, 90. (in Chinese)
- [21] Kan Z, Wang H, Hang L, et al. Energy-efficient localization and tracking of mobile devices in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3): 2714-2726. (in Chinese)
- [22] Fabri S N, Worrall S, Sadka A, et al. Real-time video communications over GPRS [C] // 3G Mobile Communication Technologies. London, UK: First International Conference on (Conf. Publ. No. 471), 2000: 426-430. (in Chinese)
- [23] 彭波. 三峡库区近坝库坝段八字门滑坡变形影响因素及稳定性评价[J]. 灾害与防治工程, 2006(1): 55-59.  
Peng B. Impact factors and stability evaluation of the deformation of Bazimen landslide near the dam in the three gorges reservoir area [J]. Disaster and Control Engineering, 2006(1): 55-59. (in Chinese)
- [24] 刘汉东, 王四巍. 小浪底水利枢纽东苗家滑坡预警系统研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(9): 1-9.  
Liu H D, Wang S W. Study on the warning system of Dongmiaojia landslide in Xiaolangdi water conservancy project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(9): 1-9. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)