

文章编号:1673-0062(2014)01-0034-06

基于无线传感器网络的滑坡地质灾害预警监测系统研究

余修武¹, 余员琴², 江 珊^{1*}

(1. 南华大学 环境保护与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 江西渝州科技学院 信息工程学院, 江西 新余 338029)

摘 要:自动实时的边坡危岩变形失稳监测是预测滑坡等地质灾害发生的有效手段, 有助于掌握其规律, 及时分析并作出安全量性评价, 使边坡灾害的概率及损失减到最小, 甚至避免发生. 为此, 采用 ZigBee 无线传感器网络技术对边坡危岩的倾角和水位信息变化进行实时采样监测, 通过无线通信和网络传输进行远程信息交互, 实现滑坡等地质灾害的监测和预警. 对该监测系统结构体系、无线传感器网络拓扑结构、无线传感节点的结构和软硬件设计、系统的性能和应用情况等方面进行了设计与测试. 相比传统的岩土工程灾害监测系统, 优点有实时监测及维护简便、系统成本低、节点简单及易布设、监控区域展扩方便等.

关键词:滑坡灾害监测; 无线传感器网络; 传感节点; ZigBee

中图分类号:X924

文献标识码:B

Study of Early Warning Monitoring System in Landslide Disaster Based on Wireless Sensor Network

YU Xiu-wu¹, YU Yuan-qin², JIANG Shan^{1*}

(1. School of Environment Protection and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. School of Information Engineering, Jiangxi Yuzhou Institute of Science and Technology, Xinyu, Jiangxi 338029, China)

Abstract: The automatic and real-time monitoring of the deformation and instability of the slopes and crags is an effective means to predict the landslide and other geological disasters. It helps people grasp the rules of those disasters, makes a qualitative or quantitative safety evaluation in time, and thus minimizes the occurrence probability of the geological disaster of landslide and damage caused by the disaster. Therefore, the rake of slopes and crags and the change of water level is sampled to real-time monitor by the means of ZigBee WSN technology in this essay. And teleprocessing interaction is made through wireless

收稿日期:2013-10-28

基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20122BAB201050)

作者简介:余修武(1976-),男,江西九江人,南华大学环境保护与安全工程学院副教授,博士. 主要研究方向:安全技术及工程、无线智能监测等. * 通讯作者.

communication and Internet messaging so as to monitor and early warn the landslide and other geological disasters. The structure configuration of this monitoring system, the topology of WSN, the structure and design of hardware and software of the nodes of wireless sensor, and the function and application of the system are introduced and discussed. Compared with the traditional monitoring system of geotechnical disasters, it has the advantages of simple nodes distribution, reliable system, easy maintenance, easy expanding of monitoring scale and low cost and so on.

key words: geological disaster monitoring; Wireless Sensor Network; sensor nodes; ZigBee

0 引言

近年来经济的快速发展,大量的基础工程和建设项目涌现造成了对地表植被、地下水文、地质结构等自然地质构造的严重失衡与破坏.在南方地区降雨量常年偏高,尤其是梅雨季期更大,山地或公路边坡在受到雨水浸刷后失稳,极易引发山体滑坡灾害,对边坡居民或过往车辆人员的生命财产会造成巨大伤亡与损失.尤其是在地震灾区的山体公路滑坡,会影响进入灾区救援的第一宝贵时间.为此,迫切需要一种现代化的成本低、易推广和有效的自动监测技术对这些潜在的滑坡体进行灾前监测和报警,来提高滑坡灾害的预防能力或可避免灾害的发生.无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一种综合多学科最新现代技术的全新无线网络化的数据采集与处理技术,其有冗余可靠、扩展易便、成本低廉、维护简单、节点布置简易和较强的抗破坏能力,多跳的无线路由方式保证了数据传输的可靠性和实时性^[1-4],能较好的满足 WSN 对滑坡灾害智能监测的技术要求.本文即研究基于 ZigBee WSN 安全监测预警系统在山体滑坡灾害监测中的应用.

1 ZigBee 技术 WSN 简介

ZigBee 技术的基础是 IEEE 无线个域网工作组 的 IEEE 802.15.4 协议,旨在为简易耗能低的小设备提供 10 m ~ 100 m 的覆盖有效范围及 20 kbit/s ~ 250 kbit/s 的低速连接,通过路由和节点间的通信接力,传输距离可以更远.其主要的市场对象,可广泛应用在恶劣环境下的检测与监控,2 节干电池可支持 1 个 ZigBee WSN 传感节点工作 0.5 ~ 2 年(可能更长时间),恰好边坡监测对数据传输速率要求不高^[5]. ZigBee WSN 有簇状、星状、树状三种结构,一个主节点可最多管理 254 个子节点, ZigBee 拓扑网络如图 1 所示^[6-7].在基于 ZigBee 的 WSN 拓扑中,按节点设备通信能力可分

为精简功能节点(RFD)和全功能节点(FFD), FFD 间以及 FFD 与 RFD 间都可以通信, RFD 之间不能直接通信,只能与 FFD 通信或者通过一个 FFD 向外转发数据,网络协调器的 FFD 是 ZigBee 网络的主控制器. ZigBee WSN 体系结构如图 2 所示^[8-9],其中物理层、介质访问层和数据链路层是基于 IEEE802.15.4 无线个人局域网(WPAN)标准协议,其以上的网络层和应用支持层,包括巨大数量节点的处理、ZigBee 设备对象、用户定义的应用轮廓以及应用支持层等由 ZigBee 联盟定义.最上层的应用层由用户根据需要进行开发.

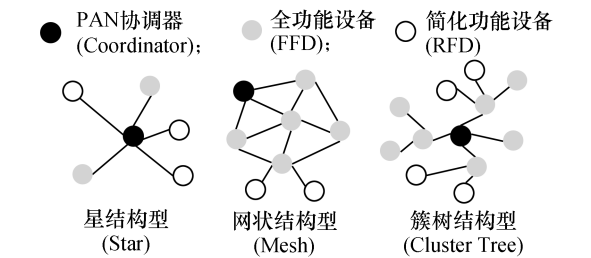


图 1 ZigBee 网络拓扑结构
Fig. 1 ZigBee network topology

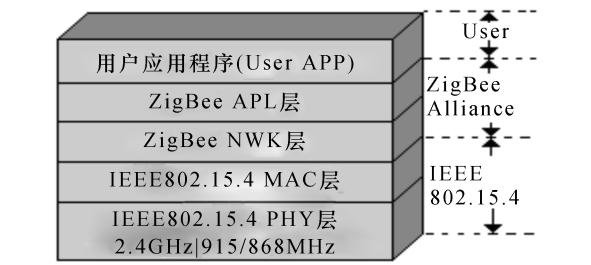


图 2 ZigBee 体系结构
Fig. 2 ZigBee architecture

2 WSN 山地边坡安全监测系统设计

2.1 监测整体系统架构

如图 3 所示,整体系统架构由监测网络层(WSN)、接入层(GPRS)和数据接收层(远程监控

中心)三层构成.

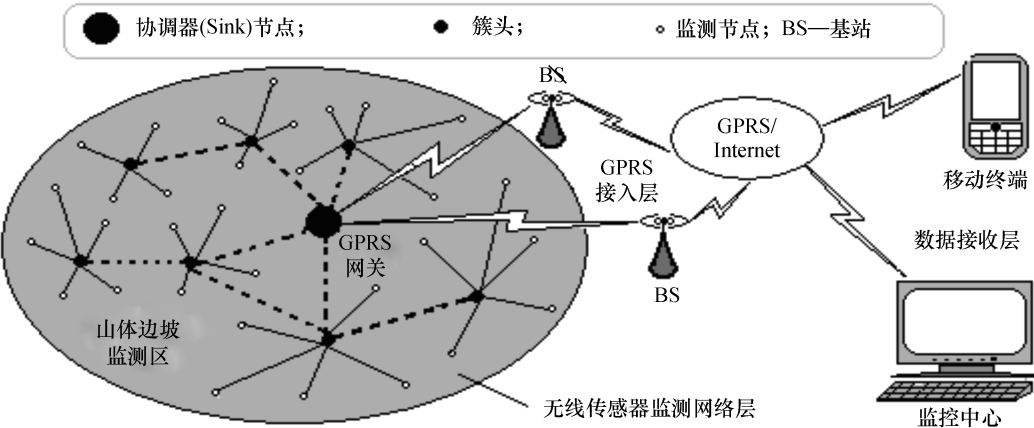


图 3 系统体系结构
Fig.3 Architecture of monitoring system

在监测区内安放大量的传感器节点以监测山体边坡的位移、倾角和水位,测量过程中节点自动调节信息的采集频率和信息的采集量,通过其簇头节点对采集的信息进行去冗融合处理和路由发送,信息数据经 GPRS 网关节点定义格式后,发送给 BS 站中继发到远程监控中心,信息数据最终由监控中心进行实时安全分析与处理示显,来对山体边坡失稳实现安全性预警监测.如图 4 所示,雨水浸泡是引起山体滑坡的主要因素,即山地下

水位高度是表征边坡危险度的重要参数之一,所以在危险的边坡山体区域沿着向下山势布设多个竖直洞孔,洞孔底端放置液位传感器采集液位值并由 WSN 处理发送.另因组成山体边坡的不同土石层间的侵蚀风化、运动速度、物理构成等不相同,所以又在洞孔的不同深度放置倾角传感器采集边坡垂直向各层段的倾角信息数据.智能监测中心就可据此判断出山体边坡失稳变形的趋势和强度,以及威胁性.

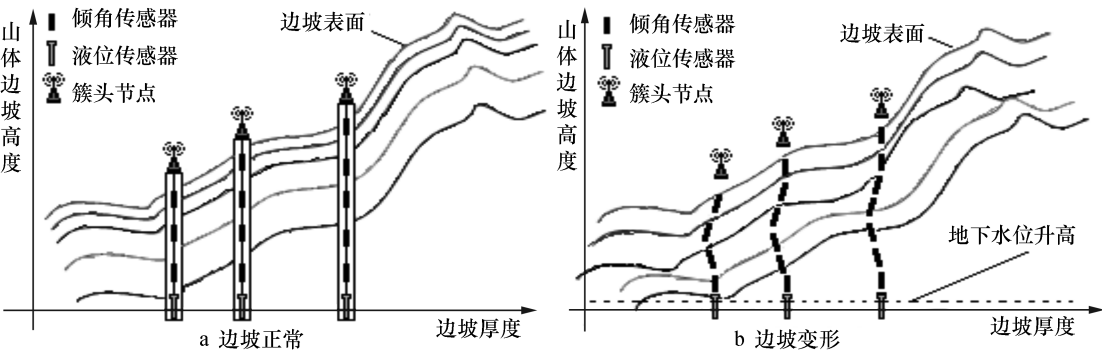


图 4 山体边坡失稳变形运动与监测
Fig.4 Landsliding and monitoring

WSN 监测层采用分层多簇结构网络,每个簇由相邻节点组成,根据确定的算法动态选出簇头节点,簇头节点将其子节点发送来的采集数据进行融合与发送上传,同时路由其他簇头节点数据,其优点是数据去冗度高、能耗低、分布式处理和路由简单可靠等.为降低传感节点能耗延长使用寿命,采取休眠/唤醒机制采集数据,节点通常处于低能耗

的休眠态宽时空比采集监测及占用信道,当边坡环境某项监测参数超设定阈值时,其本身内部监测电路就会唤醒传感节点,进行高密度的信息采集监测.监测中心也可调控传感节点的数据采集时间间隔,在一般季节信息采集频率可调设较低(8 h/次传递数据),大大节省节点电能,并可避免大量冗余数据的信道冲突,以延长系统寿命.但在雨季或有

台风的危险期,其监测频率要提高(1 min/次),以保证边坡安全的实时监测和滑坡危险预警。

2.2 系统硬件设计

无线传感器网络系统节点由 CC2430 无线通

信模块、数据采集模块、电源等部分组成。处理器功能包含在 CC2430 中为节点的核心模块,采集模块含有水位和倾角 2 种传感器,如图 5 所示为 WSN 传感节点硬件构成框图。

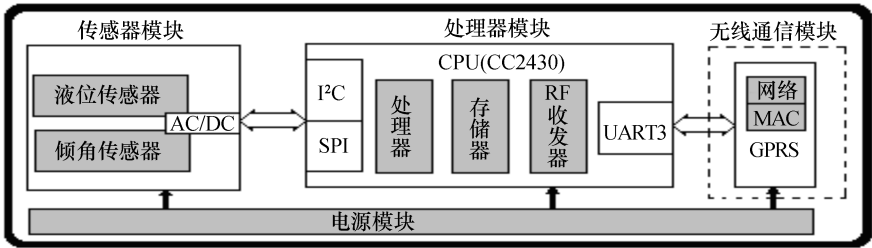


图 5 WSN 传感节点硬件结构框图
Fig. 5 Hardware structure of WSN nodes

芯片 CC2430^[10-11]模块:Chipcon 公司 2.4 GHz RF 符合 ZigBee 标准的系统单芯片,结合了世界最新 ZigBee 协议栈和工具包,Flash、可编程 MCU、两个 ZigBee 软件、IEEE802. 15. 4 等均有效集成在一颗芯片上。CC2430 系列有 3 个型号(F128、F64 和 F32),内置 Flash 大小不同,按 0. 18 μm CMOS 工艺生产,7 mm $\times$ 7 mm QLP 封装,共有 48 个引脚,工作电流 $I = 27\text{ mA}$,在收、发信号模式下,分别 $I < 27\text{ mA}$ 、 $I < 25\text{ mA}$,待机态 $I < 0. 6\text{ }\mu\text{A}$,其休眠模式($I = 0. 9\text{ }\mu\text{A}$)与快速唤醒(RTC 或外中断可唤醒)特性,对电池寿命要求较长的情况下尤其适用。其主要特点:电压范围(2. 0 ~ 3. 6 V)宽、抗扰能力强、能耗低、信号接收灵敏度高、电能与温度监测、有 RSSI/LQI 与 14 位 ADC、CSMA/CA、DMA 强大、8051MCU 核。CC2430 = 8051 核 + CC2420(ZigBee)。

采集传感模块:使用鸿泰顺达科技公司的水位传感器 BJ216,连接到 CC2430 的 I2C;使用西安迅捷导航测控公司的倾角传感器 LE-60-OEM,经 SPI 与 CC2430 相连。

电源模块:以 4. 5 V 矿用铅酸电池(也可采用定做的 4. 5 V 锂电电池组或钮扣电池)为基础,采用 TI 公司的 REG113-3 低压差稳压芯片为节点系统各芯片提供稳压直流源^[12],其系列 LDO 芯片输出电压稳度在 $\pm 1. 5\%$ 和 400 mA 电流,热保护及限流功能支持。也可通过 NCP1117ST33 电压转换芯片为传感采集模块和 CC2430 无线模块提供 3. 3 V 电压。

网关 GPRS 模块:监测环境复杂,设专线或无线基站接入监控中心,在可靠性、成本和维护等方面有很的困难,而 GSM/GPRS 通信网络国内十分

成熟覆盖了 90% 的全国区域,为监测数据信号远程传送接入监控中心或移动终端提供了一个极其方便的现成基础网络。将 Simcom 公司研制的功耗低(睡眠模式 $I = 2. 5\text{ mA}$)SIM300 GPRS 模块^[13]外挂在 Sink 节点上与 CC2430 串口 UART3 相连。该芯片频带宽,工作电压 $U = 3. 4\text{ V} \sim 4. 5\text{ V}$,有 TCP/AT 协议栈,进行模块编程由 AT 指令来实现数据、语音、传真和 SMS 信息的快速传送,支持 SMS 多种短信格式。该模块 Sink 先对收集的数据进行高级融合处理,再经 BS 中继,以 GPRS 方式将数据发送到监控中心计算机。也能以 SMS 形式发短消息给指定移动终端。

2.3 系统的软件设计

系统的软件设计是研究的重点。系统监测节点的主程序流程如图 6 所示,监测节点的主要功能是完成对山体边坡危岩失稳变形的倾角度和边坡的地下水位深度进行检测。当检测结果超出正常范围时,调取 aplSendMsg()函数把采集到的危险数据发送上传,发出预警信号。若系统运行中网络连接脱离,可由 aplRejoinNetwork()函数来重新入网。由于系统节点供电为干电池,还设有电源监测对系统在空闲时进行电量监视。

监控中心可向 Sink 发出监测数据查询命令, Sink 负责全部数据采集 WSN 的建立和维护,自身是标识码为“0”的簇头,选用一个新网络标识码形成 WSN 的第 1 层根簇。开始组网时 Sink 广播信标帧,邻节点收到后按设定机制申请入网,申请被 Sink 允许后则入网成功,成为簇一级子节点存入 Sink 的邻节点列表,并分配 16 位的短地址。采用分布式地址分配方案,各层父节点可给予节点

分配的逻辑地址间隔数 $Cskip(d)$ 的计算函数, 如式(1):

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + Cm(Lm - d - 1), & \text{if } Rm = 1 \\ \frac{1 + Cm - Rm - Cm \cdot Rm^{Lm-d-1}}{1 - Rm}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

簇头父节点会被存入新子节点的邻节点列表中,

ZigBee 技术将各层子节点数据发给簇头融合上传至 Sink, 通过 GPRS 方式最终传至监测室. 在信标帧中, 每转发一次就加入转发节点的地址, 同时, 节点还保存该地址数据包作为路由表. 这样每个节点在发送数据到目的节点时, 都在数据包中包括目的地址和下一结点的地址, 通过多跳的方式, 最后实现数据的顺利传输.

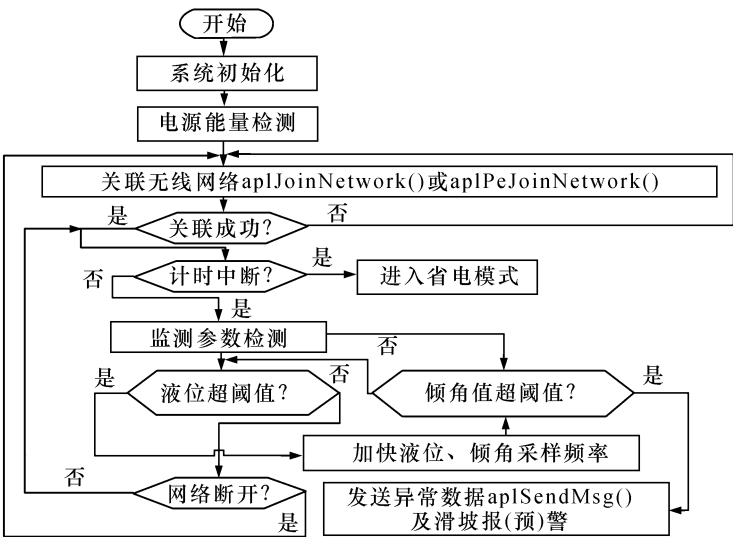


图 6 监测节点主程序流程
Fig. 6 Main program process of WSN nodes

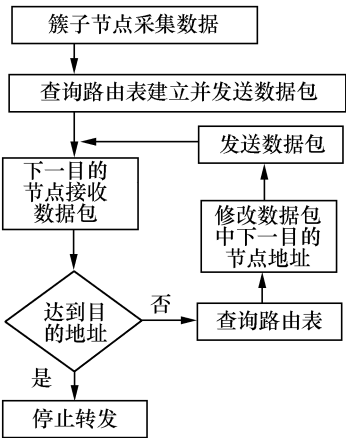


图 7 监测节点数据传输流程
Fig. 7 Data transmission process of WSN nodes

监测节点数据传输流程如图 7 所示. GPRS 模块是 AT 指令编程, 实现连网和发送数据, 连网先要查询该模块状态, 若工作正常才设置用户名、APN、密码, 网络连接方式在返回 OK 后再设置, 设好本地端口与 IP 后, 启动 UDP 或 TCP 链接开

始上传监测的信息数据.

3 系统模拟测试

为了实验, 缩短了节点采集数据的间隔时间, 降低了液位阈值和倾角阈值. 具体工作过程是水位传感器采集值 (V_{CWL}) 被节点处理器读取和设定的阈值 $VTWL$ (270 mm) 进行比较, 当 $V_{CWL} < 270$ mm 时, 就以 60 s/次的频次来循环采集水位值; 当 $V_{CWL} > 270$ mm 时, 倾角传感器就以 1 s 为时间周期采集倾角值 (V_{CDA}) 与倾角阈值 $VTDA$ (5°) 比较, 当 $V_{CDA} > 5^\circ$ 时, 则报警. 为了减少系统网络的传输数据量又能及时准确的对危险边坡进行预警, 实际监测过程中, 只要传感器监测值达到了设定阈值的 3/4 时, 才以多跳路由方式对数据进行上传, 最终由 GPRS 网关发送至远程监控计算机.

模拟测试选在近郊林区的小山斜坡上, 现场打孔安放传感器节点, 在斜坡面上组成无线监测网络, 测量现场的液位值和倾角度. 对孔洞加水模拟液位升高到 300 mm 左右 (大于阈值 270 mm),

数据的采集频率立即加快,通过无线传感器网络对数据进行采集与汇聚,经 GPRS 网络对数据进行传输,在远程监控中心得到了实时的监测数据.在测试过程中,人为的使局部斜坡变形增加倾角值,由于倾角值超过了阈值,系统立即出现了报

警;在取消人为因素后,监测数据马上回复到正常的范围,报警也自动停止.系统模拟监测数据如表 1 所示.模拟测试表明,其灵敏性、稳定性等指标均符合设计要求,可实现数据的自动采集和可靠传输,并对监测的参数变化能准确监测和预警.

表 1 系统模拟监测数据
Table 1 Data of system simulation monitoring

监测	时 间									
	16:20:01	16:20:02	16:20:03	16:20:04	16:20:05	16:20:06	16:20:07	16:20:08	16:20:09	16:20:10
液位	299	300	303	302	301	301	300	299	300	302
倾角	0.35	0.34	0.36	0.37	0.35	5.20	5.50	0.33	0.34	0.36

4 结 语

采用 WSN 对滑坡实施监测是一种先进有效的方法,系统具有自动实时监测、无人值守、远程监控、低成本等特点.随着微电子嵌入式技术、传感技术、无线通信及 MEMS 等技术的飞速发展和日益成熟,传感器节点的能力(电源、计算、通信和存储等资源)将不断增强,将使 WSN 技术的功能不断完善和提升,成本也大大降低.因此,相信此系统具有非常广阔的应用前景,如在水质污染、森林火灾、桥梁安全、室内防盗、智能交通、工业监控等领域,对系统稍加修改便可应用.对于本监测系统,认为可在以下方面去进一步研究:1)在野外重植被覆盖下如何确保节点可靠通信及正常组网;2)降低节点能源消耗,延长网络有效工作时间.

参考文献:

[1] Li X H, Cheng X, Yan K, et al. A monitoring system for vegetable greenhouses based on a wireless sensor network[J]. Sensors, 2010, 10(10): 8963-8980.
[2] 余修武,章光,李墨潇,等. 矿井安全无线传感器网络监测系统设计[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(8): 133-138.
[3] 邓贤君,易灵芝,王彦,等. 面向核环境监测的无线传感网目标检测算法研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2012, 26(4): 47-50.
[4] 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.
[5] Tong X M, Ye W H. Intelligent guiding car based on Zig-Bee and uCOS-II[J]. Microcomputer Information, 2011, 27(5): 93-94.
[6] [美]威尔逊. 传感器技术手册[M]. 林龙信,邓彬,张鼎,等译. 北京:人民邮电出版社, 2009: 430-490.
[7] Ju J W, Cai L C, Luo R J. The design of Linux Driver of WSN Nodes Based on ARM[C]. Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA'11). Shenzhen, 2011: 761-764.
[8] 陈林星. 无线传感器网络技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2009: 3-50.
[9] Liu M, Cao J N, Chen G H, et al. An energy-aware routing protocol in wireless sensor networks[J]. Sensors, 2009, 9(1): 445-462.
[10] Watthanawisuth N, Tuantranont A, Kerdcharoen T. Microclimate real-time monitoring based on ZigBee sensor network[C]//Proceedings of the IEEE Sensors 2009. Christchurch, New Zealand: IEEE Prees, 2009: 1814-1818.
[11] 刘绍波. 边坡数字无线监测系统关键技术研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2010.
[12] 周武斌. Zigbee 无线组网技术的研究[D]. 长沙:中南大学, 2009.
[13] Li M, Liu Y H. Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2009, 5(2): 1-29.