

DOI: 10.11779/CJGE201412023

# 基于物联网技术的土石坝安全监测自动化系统研究

周干武, 郇能惠, 何 宁

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘 要:** 构建了基于物联网技术的土石坝安全监测自动化系统, 利用无线传感网芯片 CC2530 和 GPRS 模块完成了传感器节点、路由器节点、协调节点的硬件和软件设计, 集成无线传感网和地理信息系统。实现对土石坝大坝变形、渗流、应力应变以及环境气象等各种因子进行全天候的实时监测、采集和控制, 并在专家知识库辅助下, 实现对土石坝安全性的智能化、科学化管理。

**关键词:** 土石坝安全; 物联网; CC2530; 自动化系统

**中图分类号:** TV641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)12-2330-05

**作者简介:** 周干武(1976-), 男, 江西铜鼓人, 硕士, 高级工程师, 主要从事土石坝安全监控及智能研究。E-mail: gwzhou@nhri.cn。

## Automatic monitoring system for safety of earth-rockfill dams based on Internet of Things

ZHOU Gan-wu, LI Neng-hui, HE Ning

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The automatic monitoring system for safety of earth-rockfill dams based on Internet of Things is established. Both the hardware and the software for nodes of sensors, routers and coordinator node are designed by using the wireless sensor network chip CC2530 and GPRS module. The wireless sensor network and geographic information system are integrated. The all-weather real-time monitoring, control and data acquisition of a series of parameters including dam deformation, seepage, stress and strain as well as environmental and meteorological observations are achieved. Therefore the intelligent and scientific management of safety of earth-rockfill dams is realized with the help of the expert knowledge base.

**Key words:** earth-rockfill dam safety; Internet of Things; CC2530; automatic monitoring system

## 0 引 言

洪水地震等自然灾害对水利工程的影响巨大。土石坝通常修建在较为复杂的地质环境中, 运行中的大坝面临诸如温度更替、水压变化和地震等环境荷载; 随着时间的推移, 坝体材料将产生不同程度的徐变、老化、劣化等工程隐患问题。有必要对这些隐患问题及时诊断并及时采取工程补救措施, 否则将会影响坝体的使用功能与健康运行, 严重时可能会导致灾难性事故, 给人民的生命财产带来巨大损失。应对突发自然灾害事件, 对水利工程的安全管理提出了更高要求, 迫切需要采取新的技术手段作为支撑。

物联网(IOT)被认为是继互联网浪潮之后的又一次科技革命<sup>[1-2]</sup>。传统的土石坝安全监测自动化系统一般采用现场布设总线方式, 其监测信息不全、传输效率较低, 已不能满足土石坝安全运行所面临极端事件的不确定性、复杂性和对土石坝安全管理的要求越来越高的实际需要。因此, 以物联网技术为支撑, 构

建基于物联网技术的土石坝安全监测系统, 智能感知影响大坝安全的各种因素, 并及时反馈给大坝的安全管理人员, 使其预先采取有效的补救措施, 降低灾害的发生概率并使损失最小化, 从而提高土石坝及其周围配套设施的安全保障程度, 充分发挥相关水利水电工程的社会效益<sup>[3-4]</sup>。

## 1 物联网概述

物联网就是按约定的协议, 通过信息传感设备(射频识别设备 RFID、传感器感知设备、全球定位设备、激光扫描器等)把任何物品与互联网连接, 进行信息交换和通讯, 以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络<sup>[5-6]</sup>。物联网 DCM (devices connect manage) 的构架体系从下到上包括感知层(D)、传输

基金项目: 中央级公益性科研院所科研重点项目(Y314005)

收稿日期: 2014-02-27

层 (C)、应用层 (M) 等 3 个层次。

## 2 系统设计

构建了基于物联网技术的土石坝安全监测自动化系统, 感知影响大坝安全的各种因子, 如大坝变形、渗流、温度、应力应变、水文、气象等数据<sup>[7]</sup>, 对所采集到的信息进行提炼和挖掘, 然后将其传输到大坝安全监控中心, 系统由 3 层网络组成 (图 1)。底层为感知层, 即 ZigBee 无线传感器网络层; 中间为网络层, 即 WiFi/GPRS 网络传输层; 上层为应用层, 即大坝安全监控中心。

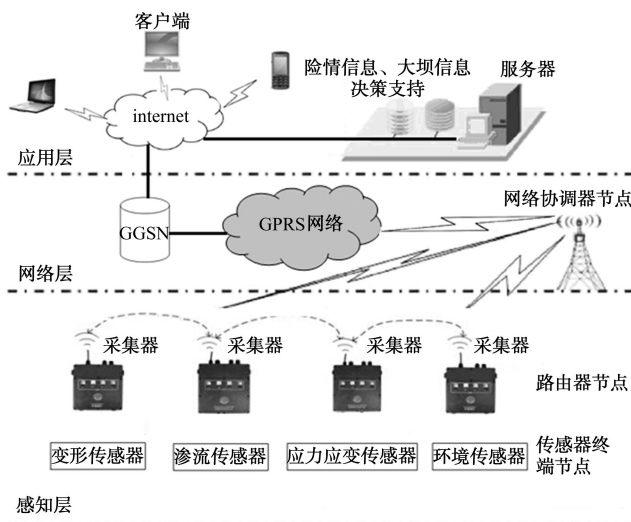


图 1 系统架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system structure

### (1) 底部感知层 (ZigBee 无线传感器网络层)

物联网的感知由传感器的信号采集、协同处理、智能组网和信息服务组成。系统采用 ZigBee 无线传感器网络, 由 3 种节点组成: ZigBee 传感器终端节点、ZigBee 路由器节点和 ZigBee 网络协调器节点, 节点之间通信均采用 ZigBee 协议。传感器终端节点布置在大坝监测区域内, 包括了变形监测、渗流监测、温度监测、应力应变监测、水位监测、雨量监测、气温监测等信号采集传感器及 ZigBee 无线模块; 路由器节点间可以采用 ZigBee 协议进行通信, 通过无线多跳自组织网络进行数据传输, 负责传感器节点的数据接收和数据转发, 最终将数据汇集给协调器; 网络协调器节点包括 ZigBee 无线模块和 GPRS 通讯模块, 是整个网络的中心节点, 负责网络的建立、维持和管理, 分配网络地址等任务。基于 ZigBee 的无线传感器网络层是由部署在大坝监测区域内传感器节点构成的 ZigBee 无线监测网络, 以星型或网型拓扑构成实时监测感知各感知目标的各种信息, 并通过 ZigBee 网络将大坝监测数据上传到网络路由器节点和网络协调器节点, 再

将数据由网络协调器节点发送到 GPRS 网络。从网络功能上看, 传感器终端节点是具体数据采集单元的设备, 不能转发其他节点的信息; 路由器是一种支持关联的设备, 能够实现其他节点的消息转发功能; 协调器负责组织网络, 是整个网络的维护者, 具有网络的最高权限。

### (2) 中间网络层 (WiFi/GPRS 物联网传输层)

ZigBee 无线传感器网络层采集的大坝安全监测数据通过 ZigBee 无线路由器节点网络上传到 ZigBee 无线协调器节点网络, 通过 WiFi/GPRS 远程数据通讯系统和 Internet 的无线连接, 实现监测数据从传感器位置到数据监测中心的远距离传输。

### (3) 应用层 (大坝安全监控中心)

应用层由计算机硬件和软件组成。系统采用 Browser/Server 架构, 以 VB6.0 为开发平台, 开发数据监测中心的数据处理、分析、发布软件, 从各网关节点获取相应的监测信息, 完成大坝监测数据解析、数据处理与存储、数据查询与统计、图表的绘制、监测信息的发布, 集成地理信息系统与决策支持专家系统等其他系统, 实现采集与监测的智能化和网络化。

## 3 硬件电路设计

系统的硬件电路设计包括了传感器节点、路由器节点和协调器节点的硬件电路设计, 主要采用将无线收发器和控制器集成在一起的 CC2530 单芯片的设计方案。

CC2530 内嵌的 8051 具有最大 256 KB 可编程 FLASH 和 8 KB 的 RAM, 主频最大 32 MHz, 在接收和发射模式下, 电流损耗分别低于 24 mA 和 29 mA。休眠模式下的电流消耗只有数  $\mu\text{A}$ 。仅用 54  $\mu\text{s}$  的时间就能从休眠模式转换到正常模式, 对要求电池长期供电的应用场合特别适合。

系统的功率在 18 dBm, 灵敏度 -97 dBm, 前端采用集成度很高的射频前端芯片 CC2591。工作频率为 2.4 GHz, 内部集成有增益为 +22 dBm 的功率放大器 (PA)、无线通信距离达 1000 m。采用电池/太阳能供电, 支持低功耗休眠, 电池寿命 2~3 a。

传感器节点 (终端节点) 硬件电路设计包括 CC2530 芯片、电池及电源管理电路以及 (变形、渗流、应力应变、环境等) 各种传感器接口电路。分成四部分: 传感单元、处理单元、通信单元以及电源。这些传感器节点间相互独立, 采用 3 种类型的拓扑结构: 星型、树型或网型, 通过自组织方式构成 ZigBee 无线监测网络, 互相协作, 对网络覆盖区域中的信息进行实时感知、采集和处理。路由器和终端设备只要

启动,就会不停地扫描 PAN,接收信标,ZigBee 网络由协调器启动来实现自组网功能。

由于大坝安全监测包含渗流压力、裂缝变形、渗流量、库区气温等诸多安全因子,需要采用不同类型的传感器,如孔隙水压力计、电位器式位移计、超声波水位计。这些传感器既有数字式又有模拟式,有些传感器还需施加激励信号。模拟式传感器接口的作用是通过转换、放大、滤波,将传感器输出的模拟信号统一转换成电压信号再接入 CC2530 的 A/D 输入端口。数字式传感器接口包括 1-wire 单线总线、I2C 二线串行总线、SPI 三线串行总线和频率信号等,数字传感器通过专用总线接口连接到 CC2530 的数字 I/O 的不同接口,与主机进行通信。

传感器节点硬件结构设计如图 2 所示,路由器节点硬件结构设计如图 3 所示。

协调器节点硬件结构设计如图 4 所示,主要包括 GPRS 模块,CC2530 芯片,RS232 转换接口电路和电源管理电路。协调器提供组织网络和路由功能,传感器节点通过协调器进行通信。

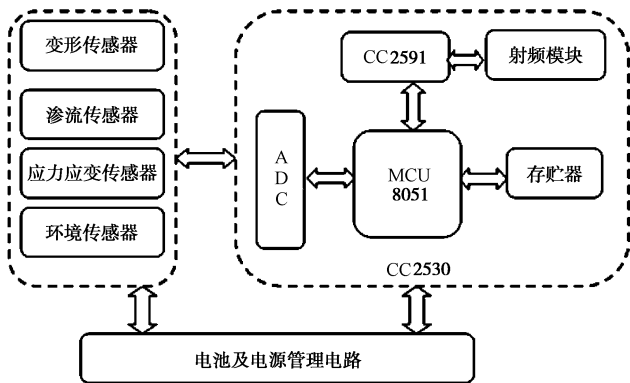


图 2 传感器节点硬件结构设计

Fig. 2 Structural design of hardware of sensor node

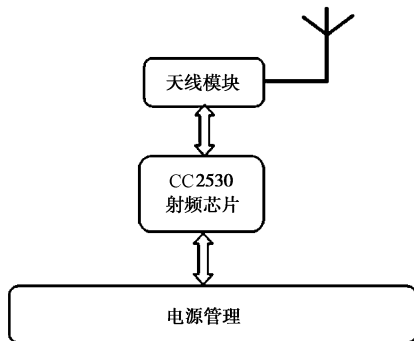


图 3 路由器节点硬件结构设计

Fig. 3 Structural design of hardware of router node

### 4 软件设计

传感器节点软件流程设计如图 5 所示,掌握每个传

感节点的网络通讯地址,终端节点采用自启动模式,在网络初始化时,调用函数来发现网络,通过加载的方式加载 PAN 网络成功,把通讯地址发给协调器。接受指令后,解析指令并迅速执行,进行数据采集并及时传送给协调器节点。

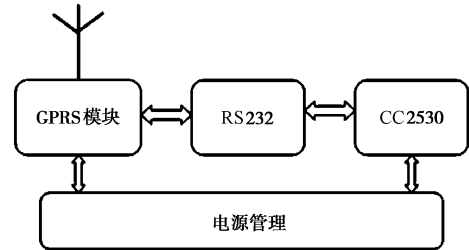


图 4 协调器节点硬件结构设计

Fig. 4 Structural design of hardware of coordinator node

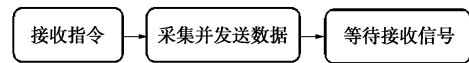


图 5 传感器节点软件流程设计

Fig. 5 Flow design of software of sensor node

路由器节点软件流程设计如图 6 所示。路由器节点采用自启动模式,网络初始化后,通过路由决定数据的转发。

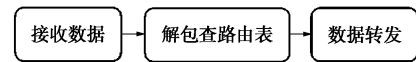


图 6 路由器节点软件流程设计

Fig. 6 Flow design of software of router node

协调器也采用自启动模式,在这个协调器节点软件环节的设计中,Zigbee 协调器对于相关通讯网络参数和大坝监测区域内的采集传感器设备参数的配置具有重要的作用,通过选择合适的信道建立通讯网络,允许其他设备进入通信网络,实现其初始化工作。作为整个无线传感网络的中心,协调器节点除负责包括网络的建立、管理和维护等功能外,还负责和上位机进行通信,其工作流程设计如图 7 所示。

基于 Windows XP 操作系统和 SQL Server 2008 数据库系统,开发了大坝安全监测平台,采用实时监控和多线编程方式,将土石坝的安全信息系统和决策支持专家系统进行集成,其主要有串口监听、数据包、数据处理、数据存储以及客户端连接请求等。土石坝安全监测自动化系统软件结构如图 8 所示,主要包括如下 3 个模块。

(1) 数据管理模块。通过运用 VB6.0 和 Socket 技术编写数据接收程序,对服务器端口进行监听,捕获 GPRS 发送的各网关节点的数据,按照自定的数据帧协议解析,保存到数据库内,可以实现监测数据实时

接收、数据解析、数据存储和数据处理等功能。

(2) 远程信息管理模块。通过请求远程客户的连接, 实现监测数据传送、数据实时显示、信息查询与发布、远程参数设置等功能。该模块可以为用户提供信息浏览、数据查询及记录下载等服务。

(3) 系统管理模块。该模块设置了系统登陆、密码重置、权限管理、系统维护与设置等多项管理功能。

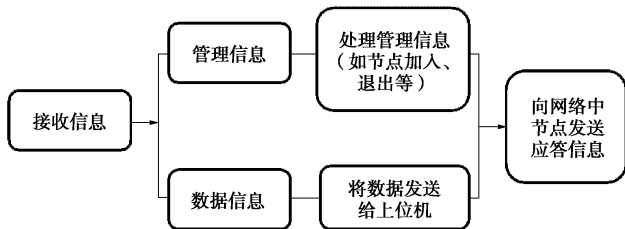


图 7 协调器节点软件流程设计

Fig. 7 Flow design of software of coordinator node

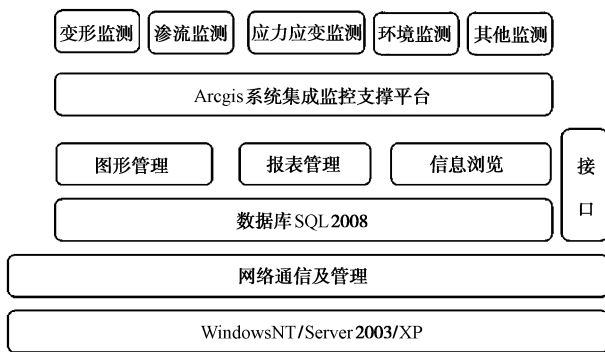


图 8 土石坝安全监测自动化系统软件结构图

Fig. 8 Software structure of automatic monitoring system for safety of earth-rockfill dams

## 5 工程应用

目前, 基于物联网的土石坝安全监测系统已经在广东台风重灾区某土石坝工程应用。本项目将 Zigbee、WiFi/GPRS 等短距离无线通信技术集成到最新研制的土石坝高精度新型监测传感器中, 包括了土石坝上、下游水位、坝体变形、坝体渗流压力、下游量水堰渗流量的监测, 形成智能化的无线传感器, 实现了短距离范围内的无线组网。

该监测系统包括 5 个监测项目, 35 个传感器节点、7 个路由器节点和 1 个网络协调器节点。基于物联网的土石坝安全监测系统传感器节点配置见表 1。传感器节点是一个微型嵌入式系统, 体积小功耗低, 由电池或太阳能供电。各传感器节点均按工程设计布置在该土石坝监测区域的指定位置处, 逐一对应。通过自组织方式构成节点网络, 数据经传感器节点采集后,

通过路由器节点不断跳跃式的传输到网络协调器节点, 而后经网络协调器节点传输到达远程数据中心, 用户也可以通过网络协调器节点对无线传感网络进行配置、管理、发布监测任务以及收集监测数据等。

表 1 土石坝安全监测系统传感器节点配置表

Table 1 Deployment of sensor nodes of automatic monitoring system for safety of earth-rockfill dams

项目	传感器节点类型	数量	路由器节点类型	节点数量
库水位	水位计	1	水位路由器	1
量水堰	量水堰计	1	水位路由器	1
渗流	渗压计	24	渗流路由器	3
变形	位移计	8	位移路由器	1
环境	温度计	1	温度路由器	1

当大坝的监控因子发生变化时, 监测系统能及时准确捕捉到快变信号, 对异常数据进行识别和疑点判别, 并进行各项分析 (包括库水位分析、变形分析、渗流分析、渗漏量分析), 及时作出相应的综合诊断分析结果, 如图 9 所示, 指导现场监测人员分析大坝安全隐患和不安全的原因及部位, 并保存当前快变报警事件 ID 和信号突变时刻相关通道的历史信号, 以便回放数据作离线故障诊断, 能满足复杂恶劣环境下土石坝安全的应急监测与及时预警的需求, 最终实现了物联网在土石坝安全监控中的应用。

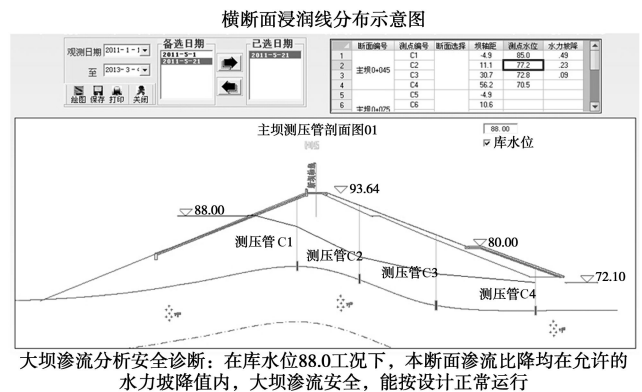


图 9 土石坝渗流分析安全诊断

Fig. 9 Seepage analysis and safety diagnosis of earth-rockfill dams

## 6 结 论

基于物联网的土石坝安全监测自动化信息系统, 改变传统的信息采集和传输模式, 实现对大坝变形、渗流、应力应变等各种因子进行全天候的实时监测、采集和控制, 与常规方法相比系统具有以下 4 个特点。

(1) 充分应用物联网感知技术和传输技术, 结合 ZigBee 无线传感器网络和 WiFi/GPRS 网络进行数据

传输,降低了系统的成本,提高了系统的效能,增强了系统的实时性和可靠性。

(2)构建基于物联网的土石坝安全监测自动化信息系统,改变传统的信息采集和传输模式,实现了测量技术的数字化和微功耗。

(3)通过地理信息系统集成,实现了土石坝安全监测数据和空间数据管理的可视化。

(4)嵌入专家系统知识,实现大坝安全性状的智能化、网络化和科学化管理。

在坝体安全变形的预测及模拟、大坝安全应急管理指挥与决策的等方面的研究尚需进一步进行。

#### 参考文献:

- [1] 孙其博, 刘杰, 黎彝, 等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010(3): 1 - 9. (SUN Qi-bo, LIU Jie, LI Shan, et al. Internet of things: summarize on concepts, architecture and key technology Problem[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010(3): 1 - 9. (in Chinese))
- [2] ZHANG Bing, MA Xin-xin, QIN Zhi-Guang. Security architecture on the trusting internet of things[J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2011, 9(4): 364 - 367.
- [3] 顾冲时, 汪亚超, 彭妍, 等. 大坝安全监控模型的病态问题及其处理方法[J]. 中国科学:技术科学, 2011, 41(12): 1574 - 1579. (GU Chong-shi, WANG Ya-chao, PENG Yan, et al. Ill-conditioned problems of dam safety monitoring models and their processing methods[J]. Scientia Sinica Technologica, 2011, 41(12): 1574 - 1579. (in Chinese))
- [4] 陈生水, 李国英, 傅中志. 高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 59 - 65. (CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, FU Zhong-zhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 59 - 65. (in Chinese))
- [5] 毛良明, 沈省三, 肖美蓉. 物联网时代来临大坝安全监测技术的未来思考[J]. 大坝与安全, 2011(1): 11 - 13. (MAO Liang-ming, SHEN Xing-san, XIAO Mei-rong. Consideration on the future technology of dam safety monitoring systems in IOT era[J]. Dam & Safety, 2011(1): 11 - 13. (in Chinese))
- [6] 丁永忠. 基于无线传感器网络的大坝安全远程监测技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011. (DING Yong-zhong. The remote monitoring systems for safety of dams based on wireless sensor networks[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [7] 周干武, 卢廷浩, 熊国文. 黄村水库面板堆石坝变形观测资料分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(增刊 2): 252 - 255. (ZHOU Gan-wu, LU Ting-hao, XIONG Guo-wen. Analysis on deformation observation data of Huangcun concrete-face rockfill dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007, 35(S2): 252 - 255. (in Chinese))