

远程实时堤坝边坡监测系统设计*

任桂香 唐立军 任晓周 钟海丽

(长沙理工大学物理与电子科学学院 长沙 410114)

摘要: 针对堤坝远程监测有线传输方式信号失真、后期维护不便,以及部分无线通信技术开发难度大、成本高等问题,利用传感器多节点测量,结合RS485有线传输、2.4 G无线组网和GPRS网络,提出一种低成本、低功耗、易于开发的数据远程无线传输方案,实现高精度、大范围、全天候的堤坝边坡自动化监测。经测试,系统精度高、抗干扰性强,保持同一状态倾角传感器测量相对误差小于0.2%,温度传感器满足 $\pm 3^\circ\text{C}$ 的精确度,湿度传感器满足 $\pm 3\%\text{RH}$ 的测量精度,测试过程中无线组网稳定、远程数据传输可靠,监测界面直观明了。该系统在堤坝边坡稳定性和边坡防护检测方面具有实用价值。

关键词: 远程监测;倾角测量;堤坝边坡监测;无线组网

中图分类号: TP277; TN919.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Remote real-time dam slope monitoring system design

Ren Guixiang Tang Lijun Ren Xiaozhou Zhong Haili

(School of Physics & Electronic, Changsha University of Science & Technology, Changsha, 410114, China)

Abstract: Aiming at the problem of signal distortion and late maintenance of wired transmission in remote monitoring of dykes, some problems such as difficulty in developing wireless communication technology and high cost. By using sensor multi-node measurement combined with RS485 wired transmission, 2.4 G wireless networking and GPRS network. A low-cost, low-power, easy-to-develop data remote radio transmission scheme is put forward, the system can realize high-precision, large-scale and all-weather dam slope automatic monitoring. After testing, the system has high accuracy, strong anti-interference, remaining in the same state angle sensor to measure, and the relative error is less than 0.2%. It also has a good linearity between -30° and $+30^\circ$. The temperature sensor can meet the accuracy of $\pm 5^\circ\text{C}$, and the humidity sensor can meet the precision of $+3\%$. During the testing process, the wireless network is stable and the remote data transmission is reliable, and the monitoring interface is intuitive and clear. The system has practical value in dam slope stability and slope protection detection.

Keywords: remote monitoring; angle measurement; the dam slope monitoring; wireless networking

1 引言

近年来,由于资源的不合理开发导致自然环境的恶化,在我国尤其是南方地区,夏秋季节经常遭受暴雨的袭击,洪涝灾害愈加频繁,严重威胁了人民的生命财产安全。水库大坝作为基本的防洪基础设施,如果能对其进行有效的监测,并对有可能发生的险情进行预警,对减少事故和灾害的发生有重大意义^[1-2]。通过分析现阶段国内大坝边坡安全监测状态,由于数据远程传输以及后期设备维护成本较高,中小型水库的堤坝边坡监测多为人工定期现场检测,时效性差,难以实现大坝边坡的有效监测。大型水库大多采用分布式数据采集系统,通过有线传输的方式实现安全监测自动

化^[3],存在信号失真、漂移,以及搭建工作量大、后期维护不便等问题^[4]。随着无线传输技术的发展,无线数据传输网络应用于大坝监测。目前较为成熟的蓝牙、WiFi^[5-6]、ZigBee无线技术^[7],由于网络协议复杂,技术开发周期长,开发成本较高等特点,仅用于部分大型水库堤坝边坡监测中。

针对有线传输信号失真,部分无线技术开发周期长等问题,探索一种成本低、功耗低、稳定性好的堤坝边坡远程监测系统实现方案,为水库堤坝的自动化监测提供有效的监测方案。

2 系统总体设计

为了满足堤坝边坡远程实时监测的要求,系统主要分

为3大块:传感器检测模块,数据转发系统,远程监控中心。传感器检测模块用于采集监测数据,由高精度传感器和MCU组成。数据转发系统采用多级网络传输的方式:单个监测点的底层数据通信采用RS485总线结构,监测区域数据传输采用nRF24L01无线组网^[8]的方式完成,远程数据通信选用GPRS网络^[9]完成。远程监控中心包括数据的存储、分析、显示与预警。

由于大坝环境复杂,堤坝边坡稳定性受到多因素的影响,为了实现大坝边坡的全方位监测,系统在每个监测点埋设多个传感器检测模块,实时采集不同深度温度、湿度、倾斜角等数据,通过RS485有线传输的方式各节点数据传输上传到地面。采用nRF24L01无线传输网络和GPRS网络相结合数据传输方案,多个nRF24L01无线传输模块通过级联的形式组成树状传输结构,将各个监测点数据传送到监测终端,监测终端通过GPRS远程无线传输网络,把数据上传至云端服务器进行数据存储。远程监控中心将数据库中数据接收回来,进行数据处理分析和图形界面显示,发布预警信息,最终实现堤坝健康状态的自动化监测与预警。系统的整体结构如图1所示。

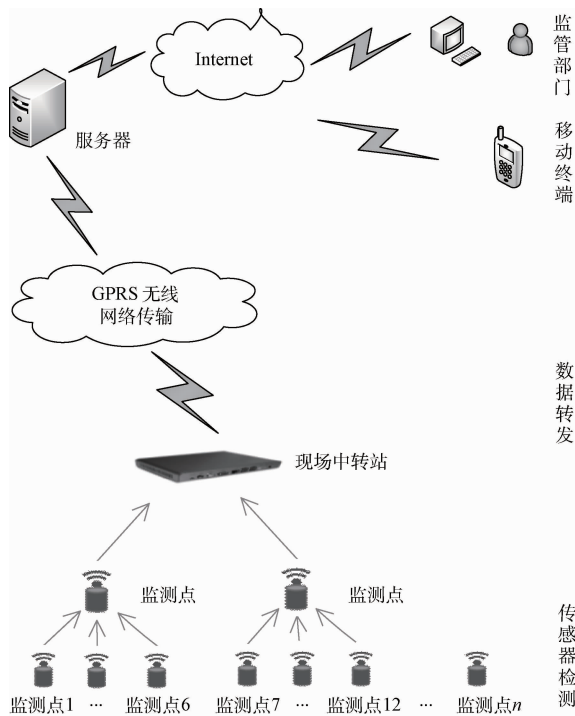


图1 系统整体框架

3 传感器检测模块的设计

堤坝监测范围广,在监测区域需要设置多个监测点,每个监测站点含多个节点,系统采用RS485组网方式建立起单一监测站点的节点网络,将地下的测量节点采集到的数据传输至地表的中转节点,有线数据采集方式提高了系统

的抗噪声干扰能力。单节点的传感器检测模块集成了温度传感器、湿度传感器、倾角传感器,对湿度、倾角传感器元件输出模拟信号经过A/D转换输入处理器进行处理,主控芯片采用意法半导体公司生产的低功耗芯片STM32F103RBT6,利用蓄电池供电,单节点的传感器检测模块设计框图如图2所示。

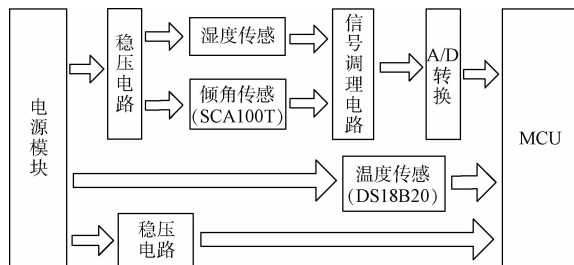


图2 单节点的传感器检测模块设计框图

倾角传感器采用SCA100T高精度双轴传感器,模拟量输出分辨率为 0.0025° ,角度和灵敏度受温度影响的偏移量小,具有高稳定性^[10]。倾角传感器输出为电压模拟量,STM32F103RET6第8引脚PC0端口采集X轴向输出模拟量,第9引脚PC1端口采集Y轴向输出模拟量。倾角传感器电路原理如图3所示。

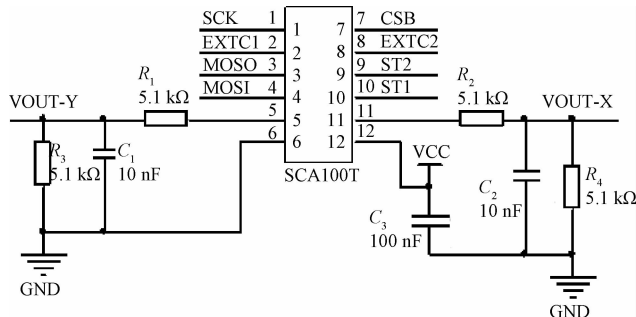


图3 倾角传感器模块电路

湿度传感器采用超低功耗土壤水分传感器,供电电压 $2.7\sim 16\text{ V}$,平均工作电流 5 mA ,适合长期野外作业。测量精度高,性能可靠,采集的湿度参数发送到STM32F103RET6第8引脚PC2端口。

DS18B20温度传感器是数字式温度传感器^[11],DS18B20与STM32F103RET6的一位双向端口PC10相连实现数据的传输。温度传感器电路原理如图4所示。

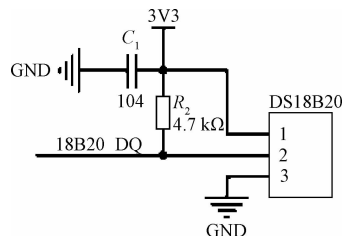


图4 温度传感器模块电路

4 数据传输网络

为了实现大范围堤坝边坡监测和数据的远程无线传输,系统利用 nRF24L01 无线传输模块组建监测区域的数据传输网,将各个监测子站点的监测数据传输到上一级监测站,通过级联的形式,向上扩展,最后将数据上传到监测终端,利用 GPRS 数据远传模块将数据传输到云端数据库,存储数据。监测参数无线数据传输结构如图 5 所示。

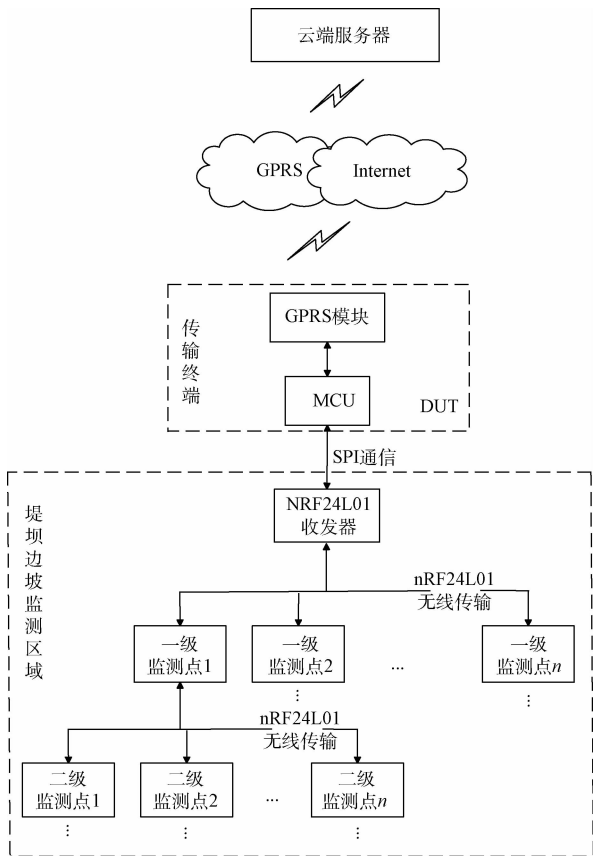


图 5 监测参数无线数据传输结构

4.1 nRF24L01 数据传输网

目前无线监控系统大多采用 ZigBee 无线组网方式完成数据采集,ZigBee 是一种低速率的数据传输技术,使用标准网络协议,协议复杂、开发周期长。相较于 ZigBee 技术,nRF24L01 无线收发器芯片的功耗更低,成本更少,传输速率高达 2 Mbps,内嵌 ANT 协议,易于开发,数据传输完整可靠^[12]。本次设计的堤坝边坡实时监测系统应用 nRF24L01 树状数据传输结构,通过这种短距离、低功耗的无线接力数据传输,将各级监测点的数据送达传输终端。

系统中,每个监测点既是一个独立的监测系统,收到与自己地址相符的指令就直接执行,若收到下一级监测点的命令时,又可以当作一个传输节点,传输上下级监测点的数据。一级监测点收到二级监测点的命令时,配置 nRF24L01 为接收功能,产生中断信号,MCU 检测到中断

信号,读取 nRF24L01 接收缓冲区数据,接收下一级监测点发送过来的数据;若一级监测点要将数据传输到监测终端时,配置 nRF24L01 为发送模式,把需要传输的数据载入发送缓冲区,读取寄存器状态,若成功发送,结束本次任务,否则重新发送^[13]。同理,二级监测点也可以作为三级监测点的传输中继,由此,逐级向下扩展,多个 nRF24L01 无线传输模块,通过级联的形式组成树状结构传输网,解决了 nRF24L01 传输距离有限的问题,实现堤坝边坡大范围的监测。

4.2 GPRS 远程无线传输

传输终端采用处理器 STM32F103RET6 驱动 GPRS 模块,通过 RS232 串口把传感器采集到的数据打成 IP 包,然后利用 GPRS 模块,连接到 GPRS 网络,将数据发送给云服务器,完成整个数据的传输。系统采用面向连接的 TCP/IP 协议^[14],保证数据可靠传输,使用 C# 语言中套接字(Socket)类技术^[15],完成传输终端与监控中心的数据通信。

5 远程监控中心

远程监控中心部署在云服务器上,由数据转存模块和 Web 应用模块组成,其中 Web 应用模块包括多变量灰色预测模型建立和堤坝监控管理事务处理。数据转存模块主要实现对监控数据的接收、处理和存储,采用 MySQL 数据库作为监控数据的存储工具。Web 应用模块中的多变量灰色预测模型建立用于对数据库中监控数据的处理(包括数据筛选、分析、建模、预测和可视化处理),用户堤坝管理事务处理包括基本信息管理、用户信息管理、预警信息设置和监测报告管理。远程监控中心结构如图 6 所示,远程监控中心主要从数据转存功能设计、多变量灰色预测模型建立和监控管理功能设计 3 个方面进行设计。

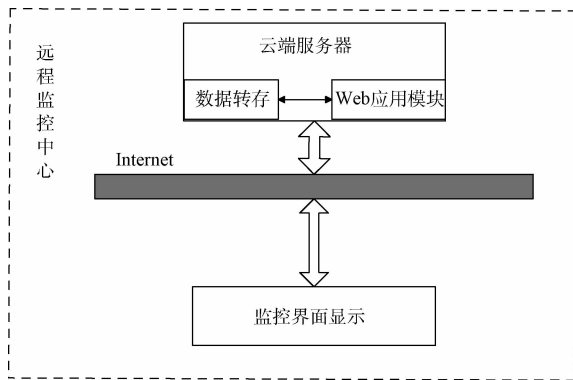


图 6 远程监控中心

5.1 数据转存功能设计

监测点实时采集的数据,经过 GPRS 网络远程传输到云服务器,通过数据转存模块接收后进行数据转存处理,GPRS 网络远程传输过程中数据格式为字符串形式,对监

控数据的格式进行自定义,自定义列表如表1所示。

表1 监控数据格式自定义列表

序号	自定义参数	字节数
1	监测点编号	1
2	节点数	1
3	X轴倾斜角	4
4	Y轴倾斜角	4
5	温度	4
6	湿度	4
7	采集时间(年/月/日 时:分:秒)	14

为了将接收到的字符串形式监控数据合理保存至数据库中,需要根据自定义参数类别和长度进行数据截取。同时,堤坝边坡实时监测数据量大,选取合理的数据储存方式尤为重要,不仅有利于数据的快速处理,而且便于用户日后的查询与管理。监控数据信息存储列表如表2所示。

表2 监测信息表

序号	字段名	数据类型	是否允许为空	字段名称
1	ID	int	否	ID唯一标识
2	Monitoring ID	int	否	监测点编号
3	NodeName	string	否	节点编号
4	InclinationX	double	否	X轴倾斜角
5	InclinationY	double	否	Y轴倾斜角
6	Temperature	double	否	温度
7	Humidity	double	否	湿度
8	CollectTime	DateTime	否	采集时间
9	CreateTime	DateTime	否	创建时间

5.2 多变量灰色预测模型建立

大坝发生险情是一个渐变到突变的过程,具有可预见性,但大坝环境复杂,堤坝边坡稳定性受到多因素的影响,可以看成是一个灰色系统,运用灰色系统模型进行预测。基于灰色理论建立的GM(1,1)预测模型^[16-17],仅利用单一的时间序列数据,无法反映多个变量间的相互影响,而GM(1,n)模型^[18]又主要描述变量间的相互关系,不用于预测。为此,系统采用能够考虑多个相关变量的灰色预测模型MGM(1,n),对温度、湿度、倾斜角数据进行分析处理,设置不同的预警状态值,实现堤坝边坡监测预警。多变量灰色预测模型建模原理如图7所示。

多变量灰色预测模型建模步骤:首先选取某些时间点的温度、湿度、倾斜角数据构建原始序列 $x^{(0)}(k)$,对原始序列进行累加运算生 $x^{(1)}(k)$,并建立一阶常微分方程组,计算数据矩阵 L 和数据列阵 Y ,通过最小二乘法估计模型参

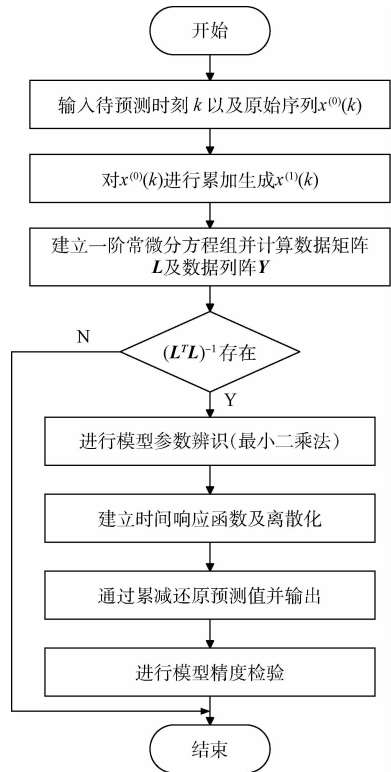


图7 多变量灰色预测模型建模原理

数值,建立时间响应函数并离散化,通过累减还原为相应变量的拟合值,对模型精度进行检验评定,并输出预测值。

5.3 监控管理功能设计

监控管理功能设计如图8所示,主要包括4大模块。1)基本信息设置,因为堤坝监测点和节点较多,监测数据量大,通过设置具体的堤坝信息、监测站编号、节点编号、监测的时间段选择,调用所需的监测数据,实现科学有序地管理。2)是用户信息管理,包括创建管理用户、用户权限管理、用户使用记录查询,为了保证监控系统的安全性,给监控人员分配用户名和密码,对不同用户设置不同使用权限,并对用户使用记录进行统计。3)预警信息管理,设置不同的预警状态阈值,选取合适的预测模型。4)监测成果报告,包括监测状态分析、安全预警报告、历史数据查询、对监测数据进行分析处理、绘制监测曲线和生成预警报告。

6 系统测试

系统测试分为3个部分,一部分是监测点的单个测量系统的稳定性测试;一部分是通信能力的测试,包括nRF24L01无线组网的抗干扰能力和整个系统的通信能力的测试;最后一部分,对监测数据分析处理,远程监控界面中监测状态的直观显示以及预警模型验证。

6.1 系统的可重复性实验

在实验室环境下进行测量系统的可重复性实验,测试



图 8 堤坝边坡远程监控管理功能设计

环境是密闭的空调房间内，控制环境温湿度恒定不变，将系统的传感器保持水平放置在地面的状态不变，同一测斜仪上 3 个不同节点上采集不同深度的数据，每个节点设定每隔 5 分钟读取一次当前状态两个轴向的角度数据、环境温度、湿度，分析测量数据，通过 RS485 总线将测量数据发送到监测端。在环境温度和湿度恒定的情况下，多次重复测量，进行 4 d 时间左右的稳定性测试，分析测量数据，系统可重复性实验结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出，系统的重复性比较好，控制环境温度、湿度恒定的情况，温度传感器满足 $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ 的精确度，湿度传感器满足 $\pm 3\% \text{RH}$ 的测量精度。对同一倾斜状态进行重复测量，倾角传感器变化较小，相对误差（相对于 180° ）控制在 0.2% 范围内，传感器工作状态良好，能够适应堤坝环境的监测。

6.2 通讯测试

由于 nRF24L01 与蓝牙、WiFi 处在同一工作频段，在通信过程中可能受到其他因素的干扰，因此，需对 nRF24L01 进行抗干扰性能测试。一个 nRF24L01 只有 6 个接收通道，因此一个监测点最多可直接与其他 6 个监测点相连接通信。考虑到实验室的条件，在本次实验中，使用 4 个监测点，由 1 个协调监测点和 3 个普通监测点组成一个传输网络。按如图 9 所示的组网方案进行实验，监测点 1 作为协调监测点，与监测区域内的普通监测点进行点对点通信，普通监测点各个子节点采集倾斜角度、温湿度，通过 RS485 总线传送到中转节点，中转节点利用 nRF24L01 无线组网将数据发送给协调监测点，协调监测点最后将数据通过 GPRS 远程通信发送至监控中心。

表 3 系统可重复性实验(2016/9/26/8:00~9/30/8:00)

测试项目	测试组数	测试结果	相对误差
节点 1	倾角传感器 X 轴	最大: -38.90°	0.144%
		最小: -38.64°	
	倾角传感器 Y 轴	最大: -5.73°	0.139%
		最小: -5.48°	
温度传感器	最大: $28.93\text{ }^\circ\text{C}$	2.99 $^\circ\text{C}$	
湿度传感器	最大: $44.1\% \text{RH}$	2.4%RH	
节点 2	倾角传感器 X 轴	最大: -52.83°	0.133%
		最小: -52.59°	
	倾角传感器 Y 轴	最大: -4.19°	0.128%
		最小: -3.96°	
温度传感器	最大: $28.66\text{ }^\circ\text{C}$	2.48 $^\circ\text{C}$	
湿度传感器	最大: $44.8\% \text{RH}$	2.1%RH	
节点 3	倾角传感器 X 轴	最大: -52.74°	0.139%
		最小: -52.49°	
	倾角传感器 Y 轴	最大: -4.31°	0.117%
		最小: -4.10°	
温度传感器	最大: $28.28\text{ }^\circ\text{C}$	2.5 $^\circ\text{C}$	
湿度传感器	最大: $44.3\% \text{RH}$	2.7%RH	

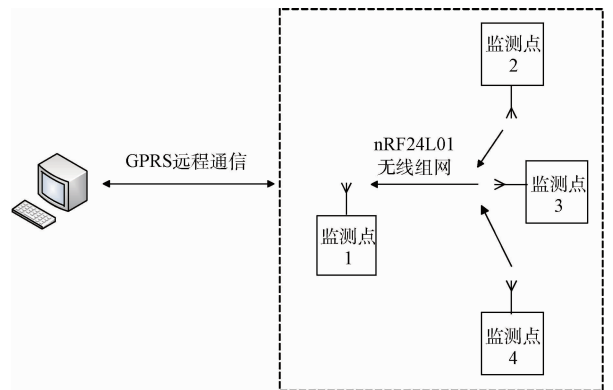


图 9 实验方案设计

实验分两次进行，第一次在无干扰以及障碍物的环境下进行，第二次在监测点附近放置 4 个无线路由，打开手机蓝牙，产生干扰信号，实验时间同样选择 8:00~20:00，持续采集 12 h，进行对比实验。设定每隔 5 min 发送一次数据，一共发送 144 组数据，检查发送端与接收端发

送数据包的数据值和数据量差别,来验证 nRF24L01 无线组网的抗干扰能力和整个系统的通信能力。

表 4 通信能力测试结果

测试条件	RS485 总线	nRF24L01 无线组网通信 (各监测点相距 10 m)	GPRS 远程通信
	无中断	无中断	无中断
有干扰	无丢包	无丢包	无丢包
	无错误	无错误	无错误
	无中断	无中断	无中断
无干扰	无丢包	无丢包	无丢包
	无错误	无错误	无错误

通讯能力测试结果如表 4 所示,实验分析表明,测试过程中没有出现数据出错以及数据丢包的情况,系统在有无无线信号干扰的条件下均能够可靠、正常的完成数据传输。

6.3 监控界面以及预警模型验证

在堤坝边坡监测系统基本信息设置中选择堤坝名称、监测站编号、节点编号、监测的时间段,在成果报告中对监测状态进行分析,分别绘制所选择时间段的该节点温度、湿度、倾斜角的曲线,便于监测人员直观了解监测状态,监控界面如图 10 所示。



图 10 远程监控界面

在预警信息管理中设置不同预警状态的下限值,选取多变量灰色预测模型,调取某个监测节点不同时刻的几组温度、湿度、倾斜角实测数据,经过对原始数据进行初始化处理后,应用多变量灰色预测模型 MGM(1,3)对倾斜角进行预测,生成安全预警报告。预报曲线与实测曲线的比较如图 11 所示,模型拟合效果较好。

7 结 论

系统采用高精度传感器采集监测点数据,通过 RS485 总线结构完成监测点多个子节点到中转节点的数据传输,结合 nRF24L01 无线组网数据传输和 GPRS 远程通信,实现堤坝边坡远程、实时、自动化监控和管理。经实验测定,测量系统传感器稳定性好,能适应大坝环境的监测。利用

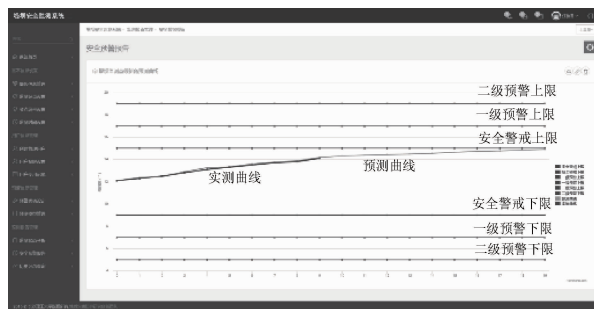


图 11 堤坝边坡倾斜预测曲线

nRF24L01 通过级联的形式组成树状结构传输网,解决了 nRF24L01 传输距离有限的问题,实现堤坝边坡大范围的监测,在多种无线信号干扰条件下仍然能保证可靠、正常的传输。结合 GPRS 远程通信技术,满足了堤坝边坡监控的远程自动化要求,在水利及其他领域有一定的推广价值。

参考文献

- [1] 李韦璇. 大坝安全监测及远程控制系统的设计与实现[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2015.
- [2] 魏永强, 宋子龙, 王祥. 基于物联网模式的水库大坝安全监测智能机系统设计[J]. 水利水电技术, 2015, 46(10): 38-42.
- [3] 乔静. 基于 ZIGBEE 的大坝安全监测系统设计与实现[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [4] 龚文超, 吴猛猛, 刘双双. 基于 CC2530 的无线监控系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2012, 35(6): 33-36.
- [5] 杨莹, 周晓旭, 郭晓澎, 等. 基于 WiFi 的分布式无线数据采集系统[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11): 121-125.
- [6] ZHAN Y, MA S, ZHUANG T, et al. Research on network integration technology of observation stations[J]. Instrumentation, 2015, 2(3): 35-42.
- [7] 周海鸿, 周嘉奉. 基于 ZigBee 技术的温湿度监测系统[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(7): 75-79.
- [8] 李长才, 肖金球, 张少华. 基于 nRF24L01 的无线多点温度监测报警系统设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(6): 94-97.
- [9] 乐联华, 江剑. 基于 STM32 的远程定位与监控终端的设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(10): 67-72.
- [10] 赵伟, 谢秀秀, 宋茂忠. 基于 SCA100T 的倾角测量系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012(10): 29-32.
- [11] 刘龙, 李钟慎. 教学楼智能化节能控制系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1876-1882.
- [12] 窦慧晶, 侯荣全, 陈凤菊. 基于 BOA 和 nRF2924L01

- 的智能家居系统[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2): 67-72.
- [13] 葛雅清. 基于 NRF24L01 无线监控系统的设计[D]. 苏州:苏州大学, 2015.
- [14] 周洁琼. 采用 RTNET 协议栈的交换式以太网时延测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 84-91.
- [15] 卢茂龙. 应用 Socket 套接字技术实现文件远程传输的方式分析[J]. 电子技术与软件工程, 2014(6): 29-29.
- [16] 冯济琴, 刘浩, 陈自然, 等. 基于域变换和灰色预测的光栅信号软细分方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 263-269.
- [17] 张文昌, 祝连庆, 娄小平, 等. 基于灰色预测恢复算法的流式细胞仪多参数提取[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1660-1665.
- [18] 沈永刚, 张明轩. 基于多变量灰色预测模型的建筑物沉降观测分析[J]. 建筑技术开发, 2013, 40(3): 25-28.

作者简介

任桂香, 1992 年出生, 硕士研究生, 研究方向为信号检测与处理。

唐立军, 1963 年出生, 博士, 教授, 研究方向为信号检测与处理。

任晓周, 1993 年出生, 硕士研究生。研究方向为信号检测与处理。

钟海丽(通讯作者), 1967 年出生, 硕士, 副教授, 研究方向为数字信号处理。

E-mail: zhhl0415@163.com

(上接第 179 页)

- [9] 徐正平, 沈宏海, 徐永森. 具有温度补偿的 APD 阵列信号采集电路[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1500-1506.
- [10] 周鹏. 基于 InGaAs/InP 单光子雪崩二极管的红外单光子探测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [11] 李扬, 刘海涛, 吕雷. 一种低噪声非制冷红外探测器驱动电路的设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(12): 4-8.
- [12] 朱勇, 欧阳俊. 单光子计数系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 28-30.
- [13] 刘俊良, 王青圃, 方家熊. 基于 InGaAs/In 雪崩光电二极管的高速单光子探测器雪崩特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(4): 427-431.
- [14] 李水峰, 熊予莹, 李日豪, 等. 红外 InGaAs/InP 单光子探测器暗计数的研究[J]. 量子光学学报, 2008, 14(3): 327-332.
- [15] NAMBU Y, TAKAHASHI S, YOSHINO K, et al. Efficient and low-noise single-photon avalanche photodiode for 1.244 GHz clocked quantum key distribution [J]. Optics Express, 2011(21): 20530-20541.

作者简介

白郭敏, 上海理工大学, 在读硕士研究生, 主要研究方向为高速门冲单光子探测。

E-mail: 985119626@qq.com

梁焰, 上海理工大学, 讲师, 主要研究方向为单光子探测及其应用。

曾和平, 上海理工大学, 博士生导师, 主要研究方向: 单光子光学及其高新技术应用、超快精密分子光谱学。