

基于 ZigBee 的山体滑坡实时监测系统设计

卢展明 李雁星* 黄赢

南宁学院信息工程学院, 南宁 530200

摘要 针对传统山体滑坡人工巡检存在实时性差、监测范围受限、预警滞后等缺陷, 设计一套融合 STM32 嵌入式、ZigBee 自组网与 MQTT 物联网的山体滑坡多参数监测系统。系统采用 MPU6050 倾角、DS18B20 温度、TYTR012 土壤湿度三类传感器采集滑坡关键地质参数; 以 CC2530 搭建本地 ZigBee 无线传感网络完成节点数据汇聚, ESP8266 作为网关接入 MQTT 服务器, 配套 Web 远程监测平台实现数据可视化、报警阈值远程下发, 本地搭载 OLED 显示与蜂鸣声光预警。硬件完成最小系统、传感采集、无线通信电路设计; 软件分层实现终端采集、协调转发、Web 平台交互逻辑。多组实测结果表明: 倾角最大测量误差 1.1° , 温度误差 $\leq 0.7^{\circ}\text{C}$, 土壤湿度最大误差 1.7%; ZigBee 组网传输稳定, Web 端可同步本地预警, 系统低功耗、易部署, 适用于山区地质灾害常态化监测场景。

关键字 山体滑坡监测, ZigBee, STM32, MQTT, 无线传感网络, 物联网监测

Design of Landslide Real-Time Monitoring System Based on ZigBee

Lu Zhanming Li Yanxing Huang Ying

School of Information Engineering of Nanning University
Nanning 530200, China
Yanxing.li@foxmail.com

Abstract—Aiming at the defects of traditional manual landslide inspection such as poor real-time performance, limited monitoring range and early warning lag, a multi-parameter landslide monitoring system integrating STM32 embedded system, ZigBee ad hoc network and MQTT Internet of Things is designed. The system uses three types of sensors including MPU6050 tilt sensor, DS18B20 temperature sensor and TYTR012 soil moisture sensor to collect key geological parameters of landslides. CC2530 is adopted to build local ZigBee wireless sensor network for node data aggregation, ESP8266 acts as gateway to access MQTT server, and supporting Web remote monitoring platform realizes data visualization and remote distribution of alarm thresholds. Local OLED display and buzzer sound-light early warning are equipped. Hardware completes the design of minimum system, sensor acquisition and wireless communication circuit; software hierarchically realizes terminal acquisition, coordinated forwarding and Web platform interaction logic. Multiple groups of measured results show that the maximum measurement error of tilt angle is 1.1° , temperature error $\leq 0.7^{\circ}\text{C}$, and the maximum soil moisture error is 1.7%. ZigBee network transmission is stable, and the Web terminal can synchronize local early warning. The system has low power consumption and easy deployment, which is suitable for normalized geological disaster monitoring in mountainous areas.

Keywords—Landslide monitoring, ZigBee, STM32, MQTT, wireless sensor network, IoT monitoring

1 引言

我国山地丘陵分布广泛, 山体滑坡、崩塌等地质灾害频发, 极端降雨进一步提升滑坡发生概率。传统监测手段以人工定期巡检、全站仪定点测量为主, 存在人力成本高、监测盲区多、无法 24 小时连续采集、预警响应慢等短板。现有高精度 GPS、InSAR 监测设备

成本高昂, 难以大面积布设; 4G、WiFi 无线方案功耗大、山地遮挡环境通信稳定性差, 不适用于野外长期低功耗监测场景。

无线传感网络 (WSN) 为低成本分布式地质监测提供新思路, 其中 ZigBee 基于 IEEE802.15.4 标准, 具备自组网、超低功耗、低成本、多节点并发接入优势, 适合山区大范围部署监测节点。国内外相关研究多采用单一倾角或湿度传感, 缺少多参数协同预警、本地声光+Web 远程双预警架构, 远程参数配置功能缺失, 实用性受限。

***基金资助:** 本文得到南宁学院 2025 年自治区级大学生创新创业训练计划项目《智联守护者》(S202511549169) 资助。

****通讯作者:** 李雁星 Yanxing.li@foxmail.com

本文以 STM32F103 为主控，集成三轴姿态、土壤温湿度多传感采集，搭建 CC2530ZigBee 星型组网完成区域数据汇聚，通过 ESP8266WiFi 网关基于 MQTT 协议上传云端，开发轻量化 Web 监测平台，实现本地实时显示、现场声光报警、远程数据查看与阈值在线修改一体化功能，完整完成硬件电路、分层软件设计与多维度系统实测试验。

2 系统相关核心技术

2.1 ZigBee 无线通信技术

ZigBee 协议栈分层架构为物理层、数据链路层、网络层、应用汇聚层、应用层，支持协调器、终端、路由器三类设备，单网络可容纳上百节点，通信距离 10~100m，待机功耗毫瓦级，远低于 WiFi、蓝牙。本系统采用 TICC2530 芯片，搭载 Z-Stack2.5.1a 协议栈，协调器负责信道扫描、网络建立、终端数据接收转发，终端节点完成传感数据封装无线发送，适配分散山体测点组网需求。主流短距离无线技术对比如表 1。

表 1 短距离无线通信技术对比

无线技术名称	ZigBee	WiFi	BlueTooth
频率	868MHz 915Mhz 2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz
传输距离	1~100m	1~50m	1~10m
优点	功耗低 成本低 容量大	热点组网	自适应快速跳频
缺点	传输速率低	耗电高	组网节点少

2.2 多传感检测原理

(1) MPU6050 六轴姿态传感器：集成三轴加速度、三轴陀螺仪，I2C 通信，通过重力分量换算山体 X/Y/Z 三轴倾斜角度，判断边坡形变趋势。

(2) DS18B20 数字温度传感器：单总线防水探头，测量土壤内部温度，温变是土体含水率变化的辅助判断依据。

(3) TYTR012 土壤湿度传感器：基于土壤介电常数检测，LM393 比较器输出模拟/数字信号，ADC 采集换算土壤含水率，高含水率是滑坡核心诱因。

2.3 嵌入式与 MQTT 通信

主控选用 STM32F103C8T6 (Cortex-M3 内核)，外设资源丰富，支持 I2C、UART、ADC 多接口，适配多传感器驱动。远程传输采用 MQTT 轻量级发布/订阅协议，相比 HTTP 协议数据包体积更小、长连接实时性更强，适合物联网低带宽野外场景。系统划分 2 组通信主题：022 (终端上传监测数据)、022/ctrl (Web 下发报警阈值指令)，实现双向数据交互。

3 系统总体方案设计

3.1 系统整体架构

系统分为三层：终端感知层、ZigBee 本地传输层、云平台远程监测层，整体框架如图 1。

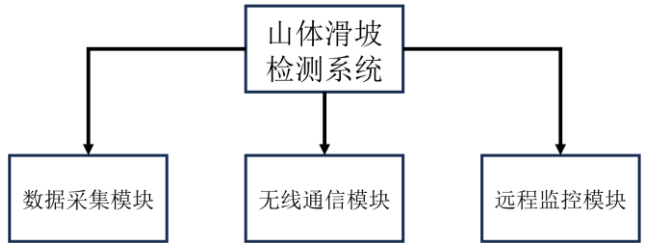


图 1 系统组成框架

(1) 感知终端节点：STM32 驱动三类传感器采集倾角、温湿度，本地 OLED 刷新数据，超限触发蜂鸣报警，串口发送数据至 CC2530ZigBee 终端。

(2) ZigBee 协调网关节点：接收所有终端无线数据，串口转发至 ESP8266WiFi 模块。

(3) Web 远程监测平台：ESP8266 作为 MQTT 客户端上传数据至服务器，Web 页面订阅主题实时渲染数据，下发阈值控制指令反向传递至终端更新报警门限。

整体数据流：传感器→STM32→ZigBee 终端→ZigBee 协调器→ESP8266→MQTT 服务器→Web 平台；控制指令反向链路：Web→MQTT 服务器→ESP8266→协调器→ZigBee 终端→STM32。系统整体数据传输架构如图 2。

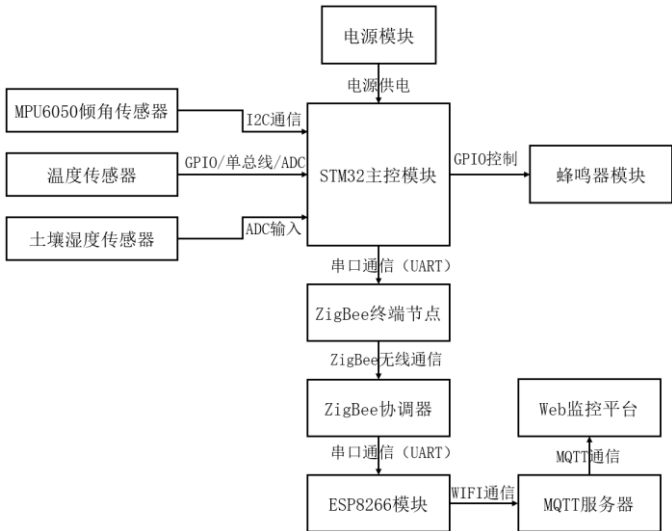


图 2 系统整体数据传输架构图

3.2 核心模块功能分工

各单元硬件通信接口与功能划分如表 2。

表 2 核心单元功能与通信方式

硬件单元	核心功能	通信接口	交互对象
STM32主控	多传感采集 阈值判断 本地显示 报警控制	I2C ADC UART GPIO	MPU6050 DS18B20 湿度传感器 OLED、蜂鸣器 CC2530 终端
CC2530终端	数据无线封装发送	UART ZigBee	STM32 协调器
CC2530协调器	组网 数据接收转发	ZigBee UART	终端 ESP8266
ESP8266 网关	MQTT双向数据透传	UART WiFi	协调器 MQTT 服务器

4 系统软硬件详细设计

4.1 硬件电路设计

(1) STM32最小系统

主控采用 STM32F103C8T6，配套晶振、复位、USB 下载电路，预留 I2C (PB6/PB7)、多路 ADC、串口引脚，为全部外设提供硬件接口。

(2) CC2530 ZigBee 模块

选用 LR-ZIG913 模块，板载 PCB 天线，3.3V 供电，TX/RX 串口引脚直连 STM32 串口，支持 Z-Stack 协议栈烧录，模块尺寸 21mm×26mm，ZigBee 协调器工作流程如图 3。

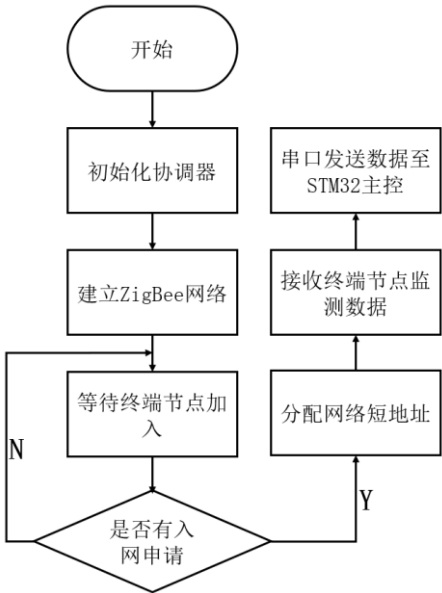


图 3 ZigBee 协调器工作流程

(3) 传感采集电路

① MPU6050: I2C 总线与 STM32PB6/PB7 连接，3.3V 供电，实时输出加速度、角速度原始值；

② DS18B20 单总线探头，GPIO 单引脚通信，防水不锈钢外壳适配地下埋置；

③ TYTR012 湿度传感器: 模拟输出接入 STM32ADC，电位器可调比较阈值，LM393 处理电路。

(4) ESP8266 网关与外设电路

ESP-12F 模块 3.3V 供电，系统 5V 输入经 AMS1117-3.3 稳压；串口连接协调器主控，内置 TCP/IP 协议栈实现 MQTT 连接。本地外设包含 0.96 寸 IICOLED、低电平触发有源蜂鸣器，分别完成数据本地显示、超限声光预警。ESP8266 网关与系统数据传输流程如图 4。

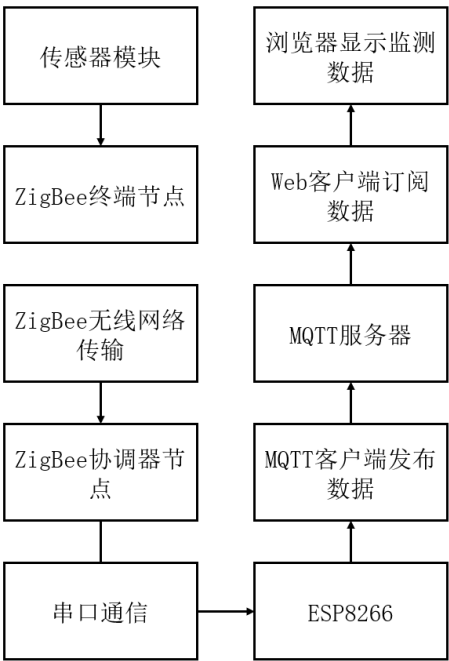


图 4 ESP8266 网关与系统数据传输流程

4.2 软件系统设计

(1) 开发环境

① STM32 程序: KeiluVision5, C 语言开发，ST-LINK 下载调试。

② CC2530ZigBee 程序: IAR Embedded Workbench, 搭配 SmartRF04EB 仿真器、SmartRF Flash Programmer 烧录 Z-Stack 协议栈。

③ Web 前端: Paho.MQTT.JS 实现浏览器 MQTT 客户端，HTML+CSS 完成监测界面。

(2) STM32 主控软件流程

系统上电依次初始化时钟、I2C、ADC、串口、OLED、蜂鸣器；循环采集倾角、温度、土壤湿度；实时与预设阈值对比，超限驱动蜂鸣器间歇报警；同步刷新 OLED 界面，并通过串口向 ZigBee 终端发送格式化监测数据，主程序流程见图 5。

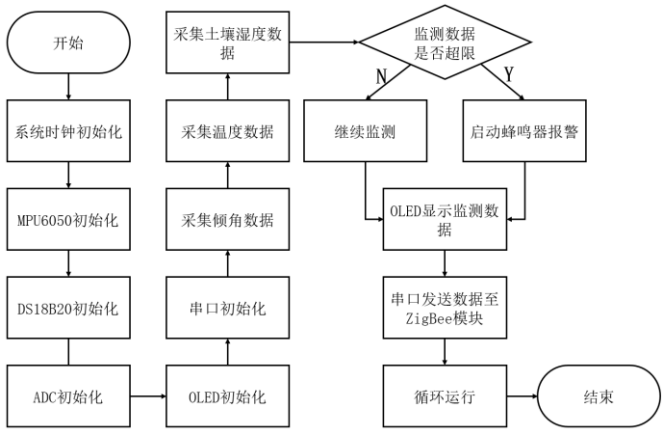


图 5 主控模块程序总体流程图

各传感器独立子程序：MPU6050 读取加速度计算倾角、DS18B20 单总线温度转换、ADC 采样换算土壤湿度，采集完成后统一打包发送。报警子程序逻辑：数据>阈值时 GPIO 输出低电平导通蜂鸣器，数值回落至安全区间自动关闭预警。

(3) ZigBee 节点软件

① 协调器流程：上电初始化→信道扫描→创建 ZigBee 网络→等待终端入网→接收无线数据包→串口转发至 ESP8266；

② 终端流程：初始化→主动申请入网→入网成功后循环接收 STM32 串口数据→无线发送至协调器。

(4) MQTT 与 Web 监测平台

Web 平台分为实时数据显示区、阈值控制区两大模块，界面见图 6。



图 6 滑坡检测系统 Web 检测平台界面

核心通信逻辑：

① 数据上传：ESP8266 订阅 / 发布主题 022，JSON 格式推送倾角、加速度、温湿度、异常标记。

② 阈值下发：用户在页面输入 X/Y/Z 倾角、温湿度上下限，点击保存后 JS 调用 send () 函数向

022/ctrl 主题发布控制报文，报文经服务器、ESP8266、ZigBee 网络下发至终端 STM32 更新本地报警门限，下发核心代码：

```
function send(vala) {
    if (vala) {
        message = new Paho.MQTT.Message(vala);
        message.destinationName = myid + "/ctrl";
        client.send(message);
    }
}
```

平台实时识别异常数据，页面弹出红色滑坡预警弹窗，同步本地蜂鸣器报警，实现软硬双端同步预警。

5 系统测试与结果分析

搭建完整样机，分传感器精度、ZigBee 通信、本地报警、Web 远程监测四组完整测试，全部原始数据完整保留。

5.1 传感器采集精度测试

(1) MPU6050 倾角测试

人为调整传感器 0°~50° 梯度放置，标准量角器作为真值，每组静置 10s 记录数据，测试结果如表 3，测量图见图 7。

表 3 倾角测量误差数据

序列	实际角度 (°)	模块测量值 (°)	误差 (°)
1	0	0.3	0.3
2	10	10.5	0.5
3	20	20.3	0.3
4	30	30.5	0.5
5	40	40.6	0.6
6	50	48.9	1.1

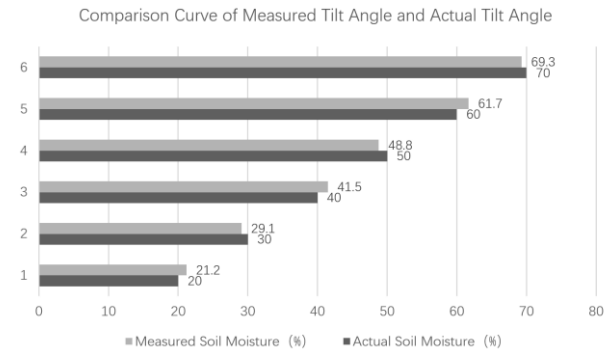


图 7 倾角测量数据对比柱状图

最大误差 1.1°，边坡形变监测允许误差范围内，满足滑坡形变判断需求。

(2) DS18B20 温度测试

标准水银温度计作为参照，20~30℃ 区间分段测试，结果如表 4，测量图见图 8。

表 4 温度测量误差数据

序列	实际温度（℃）	测量温度（℃）	误差（℃）
1	20	20.4	0.4
2	22	21.6	0.4
3	24	24.5	0.5
4	26	25.7	0.3
5	28	28.6	0.6
6	30	29.3	0.7

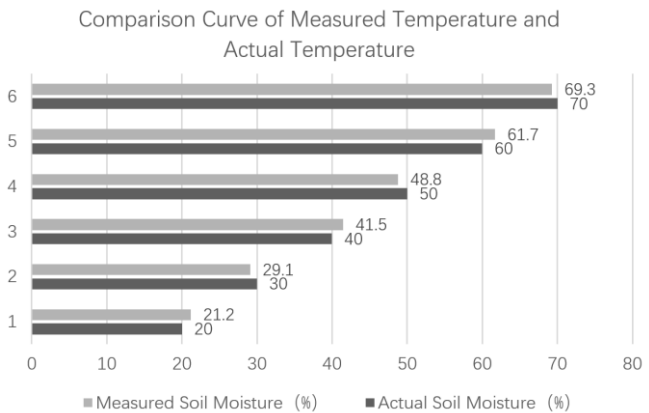


图 8 温度测量数据对比柱状图

温度最大误差 0.7℃，可精准反映土体温变趋势。

(3) TYTR012 土壤湿度测试

商用土壤墒情仪作为标准设备，20%~70%含水率测试，数据如表 5，测量图见图 9。

表 5 土壤湿度测量误差数据

序列	实际湿度 (%)	测量湿度 (%)	误差 (%)
1	20	21.2	1.2
2	30	29.1	0.9
3	40	41.5	1.5
4	50	48.8	1.2
5	60	61.7	1.7
6	70	69.3	0.7

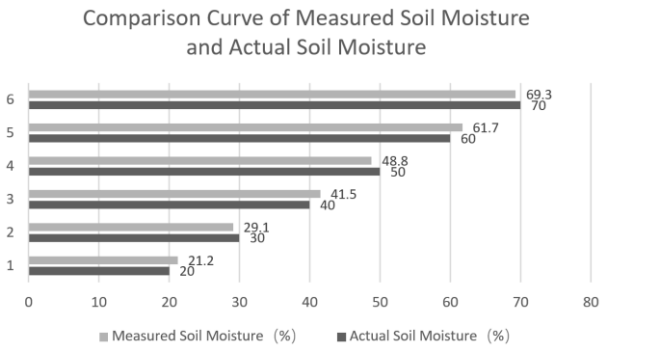


图 9 土壤湿度测量数据对比柱状图

土壤湿度最大误差 1.7%，可有效区分干燥、湿润、过湿土体状态，满足滑坡诱因监测。

5.2 ZigBee 无线通信测试

协调器连接 PC 串口调试助手，终端持续循环发送监测帧，长时间接收测试结果如表 6。

表 6 ZigBee 通信功能测试结果

测试内容	测试结果
协调器节点连接上位机	正常
终端节点加入网络	正常
数据无线发送功能	正常
串口助手接收数据	正常
数据显示完整性	正常

ZigBee 组网传输稳定，数据包完整接收，无丢失、乱码现象，山区分散测点通信可靠。

5.3 本地声光报警功能测试

针对滑坡监测场景的现场预警需求，系统设计了本地声光报警模块，可在监测参数超出预设阈值时，通过蜂鸣器与指示灯同步发出预警信号，为现场人员处置争取时间。为验证报警触发、解除逻辑的准确性与响应速度，分别针对倾角、温度、湿度三类核心监测参数设置多组报警阈值，通过人为调整监测对象状态制造正常、超限及恢复工况，开展本地声光报警功能测试，测试数据汇总见表 7。

表 7 本地声光报警功能测试结果汇总

参数类型	检测值	阈值设置	系统状态
倾角（°）	19	25	正常
	10	25	正常
	46	45	报警
	53	50	报警
温度（℃）	13	16	正常
	19	20	正常
	41	30	报警
	45	40	报警
湿度（%）	35	40	正常
	44	50	正常
	58	55	报警
	80	60	报警

测试结果表明，三类参数超限均可快速触发蜂鸣器报警，数值回落至安全区间后自动解除预警；全工况测试未出现漏报、误报现象，本地现场预警响应及时可靠，满足滑坡监测的现场预警需求。

5.4 Web 远程监测功能测试

① 实时数据显示: Web 页面持续刷新倾角、加速度、温湿度, 数据与本地 OLED 同步, 无延迟、丢失。

② 远程阈值配置: 页面修改阈值点击保存弹出“保存成功”提示, 指令下发后终端同步更新门限。

③ 双端同步预警: 人为抬升传感器倾角超限, Web 页面弹出红色滑坡风险提示, 同时硬件蜂鸣器报警, 软硬预警同步触发。

Web 平台双向通信稳定, 远程参数配置、远程风险预警功能完整, 无需现场调试设备, 大幅降低巡检人力成本。

5.5 测试综合结论

整套系统多传感器测量误差可控, ZigBee 组网低功耗稳定传输, 本地声光预警、Web 远程可视化与远程阈值配置全部功能正常, 结构轻量化、硬件成本低, 可批量布设于山区滑坡隐患点, 实现 24 小时无人值守常态化监测。系统局限为 ZigBee 单跳传输距离有限, 复杂深山遮挡环境可增设路由节点拓展覆盖范围; 后续可接入降雨量传感器, 融合多因子滑坡预警模型提升预测精度。

6 结束语

针对传统山体滑坡监测方案的短板, 本文设计基于 STM32 与 ZigBee 无线传感网络的多参数滑坡监测系统, 完成全套硬件电路、分层嵌入式软件、MQTTWeb 远程监测平台开发。系统集成倾角、土壤温度、土壤湿度三类核心滑坡监测参数采集, 构建本地 ZigBee 自组网+MQTT 云端双向通信架构, 实现现场声光预警、远程数据查看、报警阈值在线修改一体化功能。多组实验验证: 传感采集精度满足工程监测需求, 无线传输稳定, 本地与 Web 双预警同步响应。系统功耗低、部署简单、成本低廉, 适合西南、西北山区大范围分布式地质灾害监测, 为低成本物联网地质监测设备提供可行设计方案。后续将增加雨量传感、优化 ZigBee 路由拓展传输距离, 引入滑坡预警算法提升灾害预判能力。

参考文献

- [1] 汤雪菁. 滑坡地质灾害成因机制分析及治理措施[J]. 中华建设, 2026, (03): 63-65.
- [2] 刘彦君, 曾春平, 马琨, 等. 基于 ZigBee 技术研究新平县山体滑坡建立监测预警系统[J]. 软件, 2022, 43(11): 159-163.
- [3] Zhang F, Jiang W, Lin Q, et al. ZigBee-Based Wireless Sensor Network for Environment Monitoring ZigBee [J]. Sensors & Transducers, 2019, 237 (9/10): 144-149.
- [4] Huang W, Yang F. Design of Intelligent Watering System of Flower Based on ZigBee and WiFi [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 768 (4): 042010.
- [5] 梁先武, 侯冬晴. 基于 GPRS 的高精度山体滑坡监测系统设计[J]. 信息与电脑(理论版), 2022, 34(15): 112-114.
- [6] 黄焕君, 周勇. 基于 STM32 的便携式空气质量检测系统设计[J]. 物联网技术, 2026, 16(06): 46-48.
- [7] 甄彤, 李雄飞, 吕宗旺, 等. 基于 LoRa 通信与传感技术的储粮温度变频通风测控系统[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(11): 60-67.
- [8] 黄玲, 王霄, 张译. 基于 Web 的山体滑坡监测预警系统开发[J]. 微处理机, 2022, 43(02): 26-29.
- [9] 李伟. 基于 MQTT 的物联网信息系统设计[D]. 南京信息工程大学, 2025.
- [10] 石皓铭, 朱雪平, 陈积常, 李建. 基于国密技术的 Zigbee 安全通信模型设计[J]. 计算机技术与教育学报, 2023, 11(3): 50-56.
- [11] 卢静, 周围, 李皓维, 周运宝, 于昊楠. 基于大气环境监测数据的关联规则方法应用研究[J]. 计算机技术与教育学报, 2023, 11(3): 67-72.
- [12] 黄名俊, 林宁. 基于 Linux 的 Web 服务器设计与实现[J]. 计算机技术与教育学报, 2021, 9(1): 9-15.
- [13] 卢静, 周围, 李皓维, 等. 基于大气环境监测数据的关联规则方法应用研究[J]. 计算机技术与教育学报, 2023, 11(3): 67-72.