

基于物联网实验室环境远程监测系统的研究

麻小娟, 陈世亮, 党建林

(西安明德理工学院 信息工程学院, 西安 710124)

摘要: 实验室环境对电子仪器及设备的使用安全和寿命以及实验室消防安全有着非常重大的影响, 传统实验室环境监控需要安排人员进行 24 h 值班和巡检, 人力投入和安装布线成本非常高; 针对上述问题, 采用高性能低功耗离子式烟雾传感器 NIS-07 和温湿度复合传感器 DTH11 进行环境数据的采集, 采用无线网络模块完成数据的传输, 并通过微处理器将采集的数据上传服务器, 同时采用基于 BP 神经网络 PID 控制算法实现在线动态温湿度调控; 服务器端使用 Tomcat web 服务器, 采用 MySQL 数据库进行数据存储, 并通过 Java 编程语言实现传感器数据的存储、分析、处理以及客户端数据的更新; 客户端通过 Web 网页或 APP 对实验室环境进行实时监控, 从而实现精确和高效的实验室环境远程集中管理。

关键词: 温湿度; 无线网络; PID 控制; BP 神经网络; 远程

Research on Remote Monitoring System of Laboratory Environment Based on Internet of Things

MA Xiaojuan, CHEN Shiliang, DANG Jianlin

(School of Information Engineering, Xi'an Mingde Institute of Technology, Xi'an 710124, China)

Abstract: The laboratory environment has a very significant impact on the safety and life of electronic instruments and equipment, as well as the fire safety of the laboratory. Traditional laboratory environmental monitoring requires personnel to be on duty and inspection for 24 hours, and the labor investment and installation and wiring costs are very high. In response to the above problems, uses high-performance and low-power ionic smoke sensor NIS-07 and temperature and humidity composite sensor DTH11 to collect environmental data, uses a wireless network module to complete the data transmission, and uploads the collected data to the server through the microprocessor. At the same time, the PID control algorithm based on BP neural network is used to realize online dynamic temperature and humidity control. The server uses Tomcat web server and MySQL database for data storage, and realizes the storage, analysis and processing of sensor data and the update of client data through the Java programming language. The client monitors the laboratory environment in real time through the Web page or APP, so as to realize accurate and efficient remote centralized management of the laboratory environment.

Keywords: temperature and humidity; wireless network; PID control; BP neural network; remote

0 引言

随着信息技术的高速发展, 人类社会全面进入到了信息化时代, 人们对信息传递和控制的效率、准确性有了更高的要求, 随着时代变迁和生活节奏的不断加快, 信息处理的效率显得尤为重要, 伴随着智能终端及通信技术的飞速发展, 给信息控制的智能化及高效性创造了技术基础。很多特殊的实验室场合对环境的温度和湿度有着非常严格的要求, 比如中心机房、温室种植、实验室、有粉尘存在的生产车间、电子行业生产线及仓库等, 这些场合对环境的温湿度有着极高的要求。温湿度过大或过小都不能满足要求, 影响设备仪器的性能和使用, 甚至引发安全隐患, 因此对环境湿度的精准和实时控制就显的非常重要, 传统的温湿度监控多以人工巡检为主要方式, 一方面要对温

湿度进行必要的调整修正, 另一方面要对环境实际的温湿度进行监控和确认, 这种方式大大增加了人力和时间成本。为了解决效率和准确性的问题, 结合物联网技术能够对大数据的精准汇总与实时检测^[1-2]的功能和移动手机端系统功能强大, 携带方便, 应用灵活^[3-7], 开发实验室温湿度进行实时监控^[8-9]的解决方案。

1 系统设计及原理

实验室温湿度远程监控系统主要包含三部分, 即用户端、服务器和环境变量控制模块, 如图 1。环境变量控制模块通过传感器对环境温湿度进行实时采集和控制^[10-14], 服务器为用户和传感器提供数据交互服务, 用户端对环境温度和湿度进行实时监控和查看。

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-10-11。

基金项目: 陕西省教育厅 2021 年度一般专项科研项目(21JK0814); 西安明德理工学院 2020 年度科研项目(2020XY01105)。

作者简介: 麻小娟(1991-), 女, 陕西渭南人, 硕士, 讲师, 主要从事计算机科学与技术、软件工程方向的研究。

引用格式: 麻小娟, 陈世亮, 党建林. 基于物联网实验室环境远程监测系统的研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 65-70.

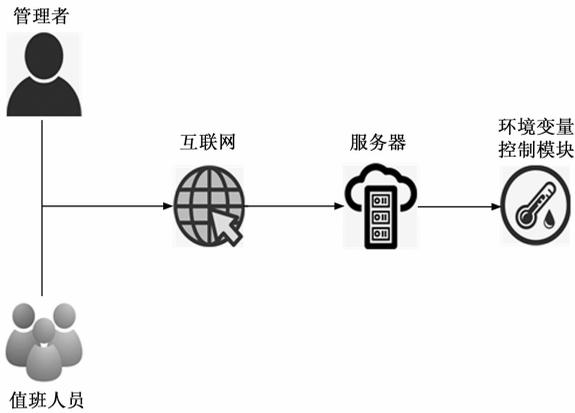


图 1 系统架构

2 系统硬件设计

2.1 环境变量控制模块

环境变量控制模块主要包含四部分：传感器、MCU、红外控制电路及无线模块，为了确保对环境数据采集的准确性和可靠性，温湿度及烟雾传感器负责采集环境数据；MCU 负责将传感器采集到的数据进行解析并显示在液晶屏上供用户现场查看；环境温湿度及烟雾数据通过无线模块接入互联网存储在云服务器上供用户访问，通过 PID 算法对环境变量进行统计和分析便于对实验室空调设备进行控制。

2.1.1 温湿度传感器初始化

考虑到实际应用及经济性，传感器选择采用纯国产芯片 DHT11，其具有检测灵敏度高、精度准确、体积小、测量范围广和成本低等特点，湿度测量精度 $\pm 5\%$ RH，温度精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，湿度测量范围 $20\% \sim 90\%$ RH，温度测量范围 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 。芯片管脚有三个：VCC、GND 及 Data，DHT11 的工作过程如下。

Data 用于 MCU 与 DHT11 之间的通讯和数据交互采用单总线数据格式，一次通讯时间 4 ms 左右，获取数据整数和小数部分，一次完整的数据传输为 40bit，数据格式如下。

8bit 湿度整数数据 + 8bit 湿度小数数据 + 8bit 温度整数数据 + 8bit 温度小数数据 + 8bit 校验和，当数据传送正确时校验和结果等于“8bit 湿度整数数据 + 8bit 湿度小数数据 + 8bit 温度整数数据 + 8bit 温度小数数据”。MCU 发送一次开始信号后，DHT11 从低功耗模式转换到高速模式，等待主机开始信号结束后，DHT11 发送应答信号，输出 40bit 数据到外设。

DHT11 初始化时序主要有四个阶段。

第一阶段：从机（DHT11）拉高等待主机输入信号；

第二阶段：主机（MCU）发送 18 ms 以上低电平，而后拉高，等待从机应答；

第三阶段：从机数据引脚开始输出 $83 \mu\text{s}$ 低电平，然后输出 $87 \mu\text{s}$ 高电平作为应答信号，主机开始接收数据；

第四阶段：主机接收从机发送的 40bit 温湿度数据，

而后输出 $54 \mu\text{s}$ 低电平转为输入状态，等待下一次主机的信号。

DHT11 初始化代码如下：

```

Void DHTint()
{
DHT=1; //主机空闲拉高；
delay40us(); //延时 40 μs；
DHT=0; //主机拉低；
delay25 ms(); //主机拉低后延时 25 ms(大于 18 ms 即可)；
DHT=1; //主机拉高；
delay40 μs(); //主机拉高后延时 40 μs；
DHT=1; //主机设为输入，等待从机输入；
if(! DHT) //判断从机是否有低电平响应信号；
{
j=2; //判断从机是否发出 80 μs 低电平响应信号；
while((! DHT)&& j++)；
j=2; //判断从机是否发出 80 μs 的高电平，如发出则进入数据接收状态；
while((DHT)&& j++) //开始接收数据；
DHTGet();
RH_HH=DHTdata; //接收湿度整数数据；
DHTGet();
RH_LL=DHTdata; //接收湿度小数数据；
DHTGet();
T_HH=DHTdata; //接收温度整数数据；
DHTGet();
T_LL=DHTdata; //接收温度小数数据；
DHTGet();
Checksum=DHTdata;
DHT=1; //数据和校验；
Check=T_HH+T_LL+RH_HH+RH_LL; //数据求和
if(Check==Checksum)
  
```

2.1.2 烟雾传感器控制电路

由于实验室空气流通相对稳定，且实验室存在大量电器、仪器及设备，对于防火要求非常高，因此需要传感器对烟雾检测的灵敏度要高，本系统选取功耗低、可靠性强、安全性好的 NIS-07 子式烟雾传感器，工作温度范围为 $-10^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ ，湿度范围为 $< 95\%$ RH，烟感灵敏度为 $0.6 \pm 0.1 \text{ V}$ ，可进行实验室环境中的烟尘和灰尘检测，满足绝大部分场景的防火需求，使用烟雾控制芯片 MC14508 对 NIS-07 采集的数据进行实时处理，通过电阻调节烟雾检测阈值，输出的数据经 MCU 解析后显示在液晶屏上，当检测到烟雾存在后，服务器将即时下发数据到管理端并发出告警提示音，提醒用户进行处置和查看，传感器控制电路如图 2。

2.2 基于 BP 神经网络 PID 红外控制电路

由于实验室内设备数量众多处于相对封闭的空间，因此对温湿度的控制需要使用空调来实现，根据 GB50174-2008《电子信息系统机房设计规范》，对于 C 类机房设备运行时，湿度要求 $35\% \sim 75\%$ 、温度要求为 $18 \sim 28^\circ\text{C}$ ，为了

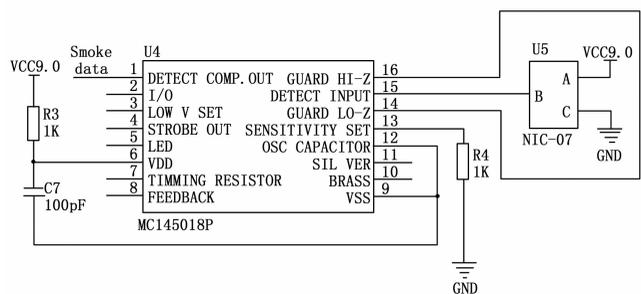


图 2 烟雾传感器控制电路

实验室设备的稳定和人员安全, 对于温湿度的控制必须符合 C 类机房标准, 由于 DHT11 及 NIS-07 可实时对环境变量进行采集和上报, 因此可根据环境变量对空调进行调节和控制, 红外控制电路如图 3。

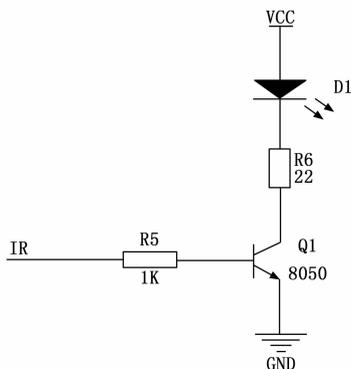


图 3 红外控制电路

为了能够满足温湿度的控制需求, 采用 PID 控制算法对温湿度调控进行优化^[15-20]。传统的 PID 控制综合考虑比例、积分和微分控制的优势, 根据温湿度的实际测量值和期望值之差, 对其比例、积分、微分进行线性组合并进行运算, 从而得出最优调控值, 并发送到被控制对象。既加快温湿度控制系统响应速度、减小振荡、克服超调, 同时有效消除静差。具体算法如下:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

式 (1) 中, $e(t)$ 为目标值与实际输出值之差; $r(t)$ 为目标值; $y(t)$ 为实际测量值。

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (2)$$

式 (2) 中, K_p 为比例增益; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; $u(t)$ 为 PID 控制器的输出信号; $e(t)$ 为给定值 $r(t)$ 与测量值之差。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

式 (3) 中, $u(t)$ 为 PID 控制器的输出信号; $e(t)$ 为目标值与实际输出值之差。 K_p 为比例增益; K_i 为积分增益; K_d 为微分增益。

温湿度及烟雾传感器采样频率为 2 秒/次, 在一天当中环境温度、湿度及烟雾采样和上报数据为 43 200 次, 一个

月可高达 1 296 000 次, 由于天气情况、实验室人员数量、设备数量、使用频率和时长的不确定性, 就会导致环境参数的动态变化, 要实现温湿度的相对稳定, 就需要对大量采集上报的环境数据进行分析 and 统计, 从中找到最佳控制目标值, 而控制的难点在于环境变量的不确定性, 无法使用固定的规则和算法进行控制, 针对环境变量参数的这一属性, 运用 BP 神经网络和 PID 控制可完美解决这一问题。

采用具有较高适应能力的 BP 神经网络, 通过不断学习, 训练优化权值和偏差, 从而调整 PID 控制系统的比例 (K_p)、积分 (K_i)、微分 (K_d)。BP 神经网络采用三层结构, 分别为输入层、隐含层和输出层。BP 神经网络输入层的神经元节点分别是温湿度目标值 $r(t)$, 实际采集的输出温湿度值 $y(t)$ 以及误差值 $e(t)$, 为了进一步增加稳定性, 添加常数 1 为输入神经元节点。输出层三个神经元节点分别对应 PID 控制器的比例 (K_p)、积分 (K_i)、微分 (K_d), 隐含层的个数根据经验和实际测试, 最终确定为 6, BP 神经网络结构如图 4 所示。服务器端将实时采集的环境数据通过 BP 神经网络进行训练, 将得出的参数传递给 PID 算法, PID 经过计算得出最优调控值, 并通过 TCP 传递给微处理器, 从而控制空调, 使实验室实时在线动态将实际环境温度湿度可以调整为最理想的温湿度值。基于 BP 神经网络 PID 控制原理图如图 5, 控制流程如图 6。

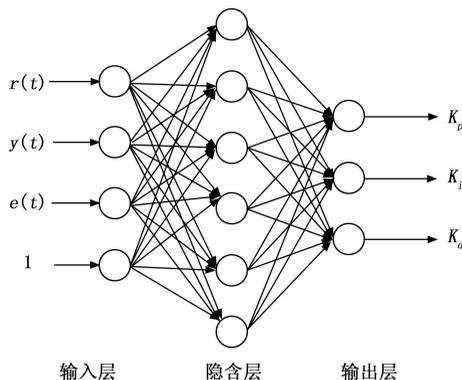


图 4 BP 神经网络结构

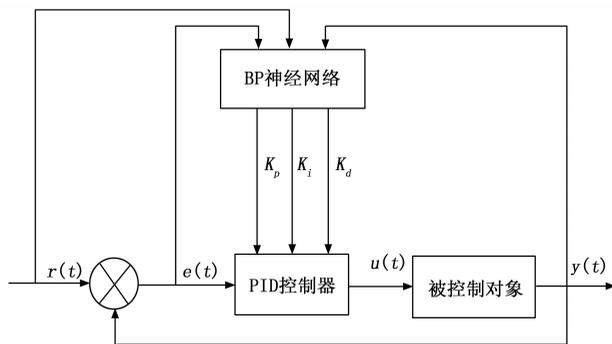


图 5 基于 BP 神经网络 PID 控制原理图

2.3 无线组网

相对有线连接通信方式, 无线通信具有施工简单、高

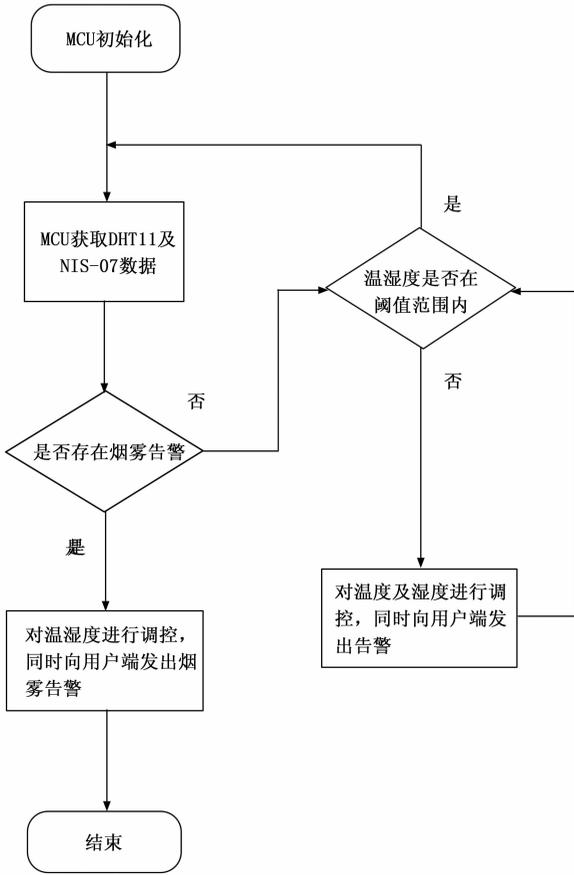


图 6 控制流程图

效和成本低等特点^[21]，为了实现高性价比的无线通信，本系统采用乐鑫科技基于 ESP8266EX 的无线模块，该模块具有时钟频率高、功耗小、发射功率大、易组网、接口丰富和性价比高等特点，支持 802.11 n (2.4 GHz)，数据传输速率可达 72.2 Mbps，无线模式支持 Station/SoftAP/Soft-AP+Station，用户可根据实际需求灵活进行自由配置，由于芯片在出厂时网络参数已配置，用户使用只需发送配置网络参数的 AT 指令，即可实现模块的初始化，进行无线通信，具体指令如下：

```

AT+CWMODE=3 //设置模块为 AP+Station 模式
AT+CWSAP=《Ssid》,《Pwd》,《Chl》,《Ecn》//设置 Wifi 名称及密码
AT+RST //重启模块
AT+CIPMUX=1 //设置为多连接模式
AT+CIPSERVER=《Mode》,《Port》//设置服务器模式和端口号

```

网络组网如图 7 所示，主机配置为 Wifi AP 模式，从机即传感器终端配置为 Wifi Station 模式，主机可通过互联网与服务器进行通信和数据存储实现集群控制。

2.4 微处理器 (MCU) 控制电路

考虑到经济性和利用率问题，微处理器选用宏晶科技设计生产的 STC15W408AS，其基于 8051 内核，指令集与时序可与 51 单片机完全兼容，自带看门狗电路、8K 程序

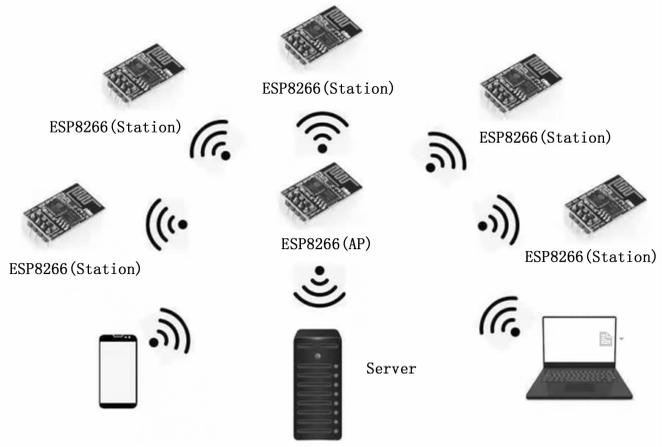


图 7 系统组网示意图

存储器、工作频率可达 35 MHz、SRAM 512 字节、 T_0 和 T_2 两个定时器、A/D 转换等，内部自带晶振和复位电路，芯片工作温度范围可达 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，工作电压范围 2.5~5.5 V，有 18 个 I/O 口可供使用，因此可方便对液晶屏、温度、湿度、红外及烟雾传感器进行控制，具体控制原理如图 8。

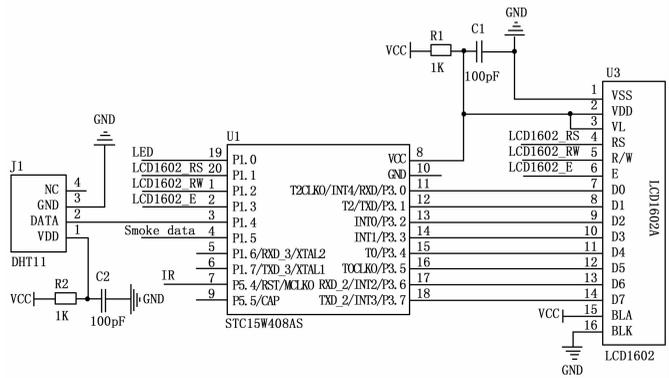


图 8 微处理器控制电路

3 系统软件设计

本系统软件部分采用 B/S 架构，使用前后端分离的方式开发。

3.1 服务器端

为了确保系统的安全性和稳定性，本文采用云服务器实现数据共享和交互。云服务器上安装 Tomcat, MySQL，并对 Tomcat 参数进行优化，提高运行性能^[22]。将系统的后端配置到服务器的 Tomcat 服务器上，服务器端主要获取通过无线网络采用 TCP 的 socket 实现和微处理器的通信，接收采集的数据，并对数据进行解析、处理、存储和计算等操作，同时通过 http 实现对 Web 端和 APP 请求的及时响应。

3.2 用户端

3.2.1 APP 端

考虑到智能设备的普及性和市场占有率，本系统采用

安卓开发环境进行用户端 App 设计。本系统采用 Android Studio 开发环境, 通过 okhttp 库中的 post 方法实现与服务器的通讯, 部分关键代码如下:

```
//服务器地址
String address =
"http://192.168.20.8:8080/monitor/servlet/MainServlet";
Log.d(LoginActivity.TAG, address);
//创建 OkHttpClient 对象
OkHttpClient client = new OkHttpClient();
MediaType mediaType = MediaType.parse("text/x-mark-
down; charset=utf-8");
String requestBody = "data";
//构建 Request 对象
Request request = new Request.Builder().url(address).post
(RequestBody.create(requestBody, mediaType)).build();
Log.d(LoginActivity.TAG, String.valueOf(request));
//封装成 Call, 并执行
client.newCall(request).enqueue(new Callback() {
.....
})
.....
```

为了提高数据的时效性, APP 每隔 1 分钟向服务器发送请求, 实现界面数据的更新。用户通过安卓手机、平板电脑及其它智能设备运行软件, 实现环境温湿度和烟雾的实时监控, 当阈值超出时, 系统进行报警, 同时调用 Vibrator 类使手机发生震动及时提醒用户。

3.2.2 Web 端

为了更加方便用户, 开发了适用于用户使用的 Web 端, 用户可以通过浏览器登录 Web 端, 访问实验室环境监控界面。Web 端采用 Element-ui 组件开发温度、湿度和烟雾的数据状态表格看板, 该数据看板展示最新环境数据, 通过这些值来判断实验室的环境是否正常; 该系统还配备有温度、湿度控制开关, 当实验室环境出现异常情况, 需要人为调节时, 点击按钮, 服务器通过无线网络给微处理器发出相应指令控制实验室的空调设备, 从而使环境达到正常阈值。使用 ECharts 组件构建折线图, 对环境变量进行实时统计分析和数据积累, 为实验室环境预测提供基础。

4 实验结果与分析

按照本文的硬件设计, 开发了系统硬件部分, 微处理器能够稳定运行, 能够顺利采集温湿度和烟雾数据, 并在液晶屏上显示当前数据, 同时能够将数据通过无线发送至服务端, 当采集的数据出现异常时, 能够及时按照目标温湿度自动实时控制实验室内温湿度。

为了验证传感器驱动准确性, 使用逻辑分析仪对传感器数据进行时序抓取和分析。传感器波形数据分析及校验, 按照 DHT11 高低电平的逻辑表达, 从液晶屏上读取数据湿度为 62%, 温度为 32℃, 二进制结果如下:

```
00111110(湿度高 8 位) 00000000 00100000(温度高 8 位)
00000111 01100101(校验和)
```

```
湿度值计算(整数) = 00111110B = 3EH(十六进制) = 62%(十进制)
```

```
温度值计算(整数) = 00100000B = 20H(十六进制) = 32(十进制)
```

```
校验和 = 00111110 + 00000000 + 00100000 + 00000111 =
01100101
```

通过以上计算可以看到, 实际显示的环境温湿度值与逻辑分析仪波形分析结果一致。

5 结束语

本文主要介绍了温湿度控制系统硬件和软件的设计与开发, 通过传感器能够准确地对实验室环境的数据进行采集, 微处理器采用基于 BP 神经网络 PID 控制算法实现温湿度调控, 同时将数据上传服务器, 服务器将数据进行分析、处理和存储, 用户可以采用 Web 或 APP 查看多个实验室当前环境数据以及状态, 从而实现多终端的集中监控和管理。当系统发现环境变量数据超过正常设置值时, 将第一时间下发报警通知信息到安卓智能设备, 对异常的终端位置及数据进行显示和提醒, 从而最大程度的保证实验室的消防安全, 在实际生产过程中有很强的推广意义。

参考文献:

- [1] 李明, 潘娟娟. 基于物联网技术的复杂网络信息传输检测系统 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (9): 74-77.
- [2] 史雷萌, 谢云, 施啸. 基于物联网的智慧建筑工地远程环境监测系统 [J]. 物联网技术, 2019, 9 (12): 64-65.
- [3] 李雷, 刘诗琪, 张赛, 等. 一种基于 Android 智能手机的 USB 体温计 [J]. 科技风, 2021 (18): 3-5.
- [4] 邢雪, 苏立伟. 基于 Android 的中华有词手机应用设计 [J]. 中国科技信息, 2021 (15): 62-64.
- [5] 童迎鹏, 张雪松. 基于 Android 的拼车应用设计与实现 [J]. 计算机应用, 2021, 41 (S1): 308-315.
- [6] 赵毅飞, 庞春颖. 基于 Android 便携式生理参数检测仪的设计与实现 [J]. 计算机应用, 2021, 41 (S1): 316-320.
- [7] 陈泽. 基于 Android 的稻田综合种养决策支持系统研发 [D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [8] 祝剑, 王琛, 姚引娣. 基于 STM32 的远程环境实时监测系统 [J]. 西安邮电大学学报, 2020, 25 (6): 95-100.
- [9] 胡国强, 杨彦荣. 基于 6LoWPAN 和 IPv6 的猪舍环境远程监测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (5): 9-12.
- [10] 任卫红, 史君诚. 基于单片机的温湿度控制系统设计 [J]. 机械与电子, 2021, 39 (6): 48-51.
- [11] 张滔, 范芸菲, 王思嘉, 等. 面向农田土壤温湿度监测的传感终端 [J]. 物联网技术, 2021, 11 (7): 9-11.
- [12] 曾颖, 温小军, 李能琛, 等. 赣州某高校典型区域下垫面温湿度监测研究 [J]. 山西建筑, 2021, 47 (15): 27-29.
- [13] 刘迎仙, 樊则胜, 李季伦. 自主组配研发的电子政务机房温湿度数据采集系统设计与实现 [J]. 网络安全技术与应用, 2021 (7): 53-56.
- [14] 姜陈欣, 高立娥, 张文博, 等. 非确定性密闭舱室温湿度控

制系统研究 [J/OL]. 计算机测量与控制, 2021 (11): 1-10 [2021-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4762.TP.20210709.1510.030.html>.

[15] 朱远帆, 杨海仕, 俞永伟, 等. 模糊 PID 算法在婴儿培养箱解耦控制中的应用 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (7): 156-160.

[16] 耿云飞, 程媛. 基于 PID 的自动台球机安全运球控制系统的设计 [J]. 计算机与数字工程, 2021, 49 (7): 1320-1324.

[17] 张卫锋, 刘致君, 张灿祥. 基于 PID 算法的疫苗保温箱温控系统设计 [J]. 计算机与数字工程, 2021, 49 (7): 1469-1474.

[18] 邓新阳, 李伟, 胡春艳, 等. 旋转直驱阀的双闭环模糊 PID 控制仿真分析 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2021, 59 (4): 915-921.

[19] 吴亘杰, 王成群, 李亮, 等. 基于模糊 PID 的桑蚕养殖物联网管理系统设计 [J]. 软件导刊, 2021, 20 (7): 129-133.

[20] 刘春玲, 王明, 张瑾. 四旋翼 ESO 的 RBF 神经网络 PID 控制器研究 [J]. 电光与控制, 2021 (9): 84-88

[21] 崔斌, 李燕. WiFi 网络技术下家庭环境远程监测系统的实现 [J]. 现代电子技术, 2020, 43 (14): 13-16.

[22] 杨帅. TOMCAT 负载优化的研究与应用 [J]. 信息系统工程, 2021 (1): 122-123.

(上接第 52 页)

表 3 结合 Hough 变换和 FFT 多投影精测方法的检测结果

实验对象	实测角度	新算法	误差/°	耗时/s
样本 1	-1.8°	-1.7°	0.1	0.529
样本 2	8.5°	8.5°	0	0.534
样本 3	-3.6°	-3.7°	0.1	0.546
样本 4	3.1°	3.3°	0.2	0.522

8 结束语

本文为实现对不同类型织物能够快速准确地检测出其纬斜角度, 提出了一种结合 Hough 变换和 FFT 多角度投影的织物纬斜检测算法。对织物图像进行频域滤波来增强织物图像的纹理特征, 利用 Sobel 算子对纬纱进行边缘方向检测, 进行形态学骨架化提取以简化图像信息; 使用 Hough 变换快速检测出纬斜的初测角度, 最后在初角士 1° 范围进行 FFT 多角度旋转投影确定精确的纬斜角度。

实验证明, 该算法有效解决了单独使用 Hough 变换精确度不高, 以及单独使用 DFT 多角度投影有足够精确度但耗时过长的问題, 兼顾检测精度和计算速度, 满足机器视觉整纬器的精确性、实时性和通用性要求。

参考文献:

[1] 金守峰. 面向机器视觉的织物纬斜检测方法 [J]. 天津工业大学学报, 2011, 30 (2): 40-42.

[2] 裴华强, 吴必端. 基于 MSP430 的织物纬斜检测系统 [J]. 国际纺织导报, 2009, 2 (1): 38-40

[3] 孙亚峰, 陈霞, 王新厚. 机织物密度的计算机自动识别 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2006 (2): 83-88.

[4] 李后隆, 马骥溟, 钟林伟. 基于改进 Hough 变换的车道线检测 [J]. 汽车实用技术, 2021, 46 (7): 16-18.

[5] 沈建强, 耿兆丰, 邹轩. 基于小波变换的织物纹理方向检测方法 [J]. 计算机工程, 2007 (6): 182-184.

[6] 彭然, 胡立文, 邓中民. 基于 Radon 变换和能量曲线的机织物密度检测 [J]. 棉纺织技术, 2021, 49 (4): 16-20.

[7] Errol J. Wood. Carpet Texture Measurement Using Image A-

nalysis [J]. Textile Research Journal, 1989, 59 (1): 1-12.

[8] 孙亚峰, 陈霞, 王新厚. 机织物密度的计算机自动识别 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2006 (2): 83-88.

[9] 董燕, 朱永胜, 张晓慧. DFT 及多投影分析的织物纬斜检测方法研究 [J]. 计算机仿真, 2013, 30 (8): 393-397.

[10] 王蕾, 厉征鑫, 刘建立, 高卫东. FFT 和 Hough 变换在织物纹理方向检测上的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50 (18): 39-43.

[11] 宫元九, 金香, 刘涛. 基于 Radon 变换的机织物纬斜检测方法 [J]. 电子测量技术, 2014, 37 (2): 58-63.

[12] 王蓉. 图像增强算法实现 [D]. 荆州: 长江大学, 2014.

[13] 王云艳, 周志刚, 罗冷坤. 基于 Sobel 算子滤波的图像增强算法 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36 (12): 184-188.

[14] Himanshu Rana and Nirvair Neeru. A Comprehensive Review of Sobel Edge Detector using Gray Scale Images [J]. Research Cell: An International Journal of Engineering Sciences, 2016, 22: 688-692.

[15] 陈浩. 基于图像的纱线质量检测研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.

[16] 江萍, 徐晓冰, 方敏. 基于形态学骨架提取算法的研究及其实现 [J]. 计算机应用, 2003 (S1): 136-137.

[17] ZHANG T Y, SUEN C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns [J]. Communications of the ACM, 1984, 27 (3): 236-239.

[18] 叶福玲. 一种改进的图像骨架提取算法 [J]. 西昌学院学报 (自然科学版), 2018, 32 (3): 91-93.

[19] 潘如如, 高卫东, 刘基宏, 等. 基于 Hough 变换的机织物组织点自动定位 [J]. 纺织学报, 2010, 31 (3): 59-63.

[20] Kazuhito Murakami and Tadashi Naruse. High-speed line detection method using hough transform in local area [J]. Systems and Computers in Japan, 2001, 32 (10): 22-30.

[21] 邢鑫. 基于快速傅里叶变换频谱细化算法的研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2013.

[22] James W. Cooley and John W. Tukey. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series [J]. mcom, 1965, 19 (90): 297-301.