

基于物联网的水产养殖环境监控系统设计与实现*

吴子勇 蓝穆岭 李伟俊 危华明** 汪小威

南宁学院信息工程学院, 南宁 53020

摘 要 针对传统水产养殖环境监测存在监测滞后、人工依赖度高等问题, 设计并实现了一套基于物联网技术的水产养殖环境监控系统。该系统以 STM32F103C8T6 微控制器为核心, 集成 DHT11 温湿度传感器、DS18B20 水温传感器、水位传感器、BH1750FVI 光照传感器及 TDS 水质传感器等, 实现对养殖环境关键参数的实时采集。系统采用 PID 算法驱动加热器和风扇实现动态恒温调节, 构建传感器阈值触发的设备联动控制机制, 通过蓝牙无线通信模块与移动端 APP 链接实现远程监控。实验结果表明, PID 控制算法可实现水温的良好稳定, 温度监测误差在 $\pm 2\%$ 以内, 水位监测精度达 $\pm 5\text{mm}$, 水质 TDS 值监测误差小于 $\pm 3\%$, 系统平均无故障运行时间超过 72 小时。

关键字 物联网, 水产养殖, 环境监测, PID 控制, 蓝牙通信

Design and Implementation of Aquaculture Environmental Monitoring System Based on Internet of Things*

Wu Ziyong Lan Muling Li Weijun Wei Huaming* Wang Xiaowei

School of Information Engineering
Nanning University
Nanning 530200, China

Abstract—To address the problems of monitoring lag and high manual dependency in traditional aquaculture environmental monitoring, an aquaculture environmental monitoring system based on Internet of Things technology was designed and implemented. The system uses the STM32F103C8T6 microcontroller as its core, integrating DHT11 temperature and humidity sensor, DS18B20 water temperature sensor, water level sensor, BH1750FVI light sensor, and TDS water quality sensor to achieve real-time collection of key environmental parameters in aquaculture. The system employs a PID algorithm to drive a relay for dynamic constant temperature regulation, and utilizes a Bluetooth wireless communication module to enable remote monitoring via a mobile APP as well as local OLED display. A device linkage control mechanism triggered by sensor thresholds is also established. Experimental results show that the PID control algorithm achieves good stability in water temperature control, with temperature monitoring error within $\pm 2\%$, water level monitoring accuracy reaching $\pm 5\text{ mm}$, and TDS monitoring error less than $\pm 3\%$. The system's mean time between failures exceeds 72 hours.

Keywords—Internet of Things, Aquaculture, Environmental Monitoring, PID Control, Bluetooth Communication

1 引言

随着物联网技术的快速迭代与普及, 其在智慧农业、工业监控、生态环境监测等关键领域的应用不断深化, 已成为推动传统产业数字化转型的核心支撑技术。水产养殖作为我国农业经济的重要支柱产业, 对养殖环境的稳定性与可控性具有极高要求。水温、溶解氧、光照强度、水体矿化度等关键环境指标的波动, 会引发养殖生物应激、病害爆发甚至大规模死亡, 直

接威胁养殖效益与生产安全^[1]。传统水产养殖长期依赖人工巡检、经验判断与手动操作, 普遍存在数据采集滞后、环境调控响应慢、人力成本高、管理效率低等问题, 在极端天气、夜间值守或养殖户远程管理等场景下, 难以快速应对突发环境异常, 极易造成重大经济损失^[2]。

近年来, 物联网、嵌入式系统与智能传感技术深度融合, 推动智慧水产养殖领域研究持续取得突破。在国际上, 相关技术与应用已趋于成熟。挪威头部水产企业通过部署水下传感器网络, 实现水温、盐度、溶解氧等核心水质参数的高精度实时监测^[3]; 日本推出的智能养殖系统融合多光谱成像技术, 可提前识别水产动物健康状态并进行病害预警^[4]; Manoharan 等将机器学习与传感监测相结合, 基于水质时序数据构建

*基金资助: 本文得到南宁学院校级科研项目基于 5G 的智能水产养殖系统(项目编号: 2021XJ03)、广西大学学科建设对口支援项目(项目编号: 2023N04)和南宁学院校级教改项目基于 OBE 理念的“赛训创就业”思维一体化模式探索——以《嵌入式应用开发为例》(项目编号: 2025XJJGA22)的支持。

**通讯作者: 危华明, 副教授, 353999614@qq.com

预测模型,实现养殖环境趋势研判^[5];Istiaq等搭建物联网鱼类养殖监测数据集,为智能算法训练与系统验证提供支撑^[6];Tamim等设计基于物联网的远程养殖监控系统,实现环境参数可视化与异常提醒^[7]。

国内相关研究同样成果丰富,众多学者围绕低成本、实用化方向开展探索。寇芾等设计基于物联网的智能水产监测系统,提出多源传感数据融合监测方案^[8];马丽洁构建物联网水质监测平台,实现远程数据采集与多级预警^[9];高菊玲开发智慧水产养殖管控系统,支持养殖全流程可视化与自动化管理^[10];刘浩探讨大数据与嵌入式软件在物联网中的应用,为系统性能优化提供理论依据^[11];梁晨等提出数字低碳渔仓智能控制架构,推动绿色低碳养殖模式落地^[12];陈根等基于ZigBee无线传感网络,实现池塘水质分布式监测与自动报警^[13]。

尽管现有研究已取得显著进展,但仍存在明显短板:其一,监测维度有限,多数系统仅配置少量传感器,无法全面覆盖养殖环境关键参数;其二,控制逻辑简单,多采用固定阈值开关控制,缺乏动态调节与精细化控制能力;其三,硬件成本与部署门槛较高,难以在中小型养殖户中规模化推广。

针对以上痛点,本文设计并实现一套基于STM32与物联网技术的水产养殖环境智能监控系统。系统集成多类传感器,实现空气温湿度、水温、水位、光照强度、水质矿化度等多维参数一体化实时采集;引入PID算法实现水温动态恒温调节,显著提升环境控制精度;通过蓝牙无线通信实现本地OLED显示与手机APP远程监控双模式交互,支持阈值参数在线修改;构建“监测—判断—执行”闭环联动机制,实现增氧、调温、补水、精准投喂等功能自适应控制。系统具备

模块化、低成本、易部署、稳定性强等特点,既能满足实际水产养殖智能化管理需求,也可作为物联网工程专业嵌入式系统开发的典型教学实践案例。

2 系统总体设计

2.1 系统功能需求

结合实际水产养殖场景与智能化管理需求,本系统需具备以下核心功能:

(1) 多维度环境数据监测功能

采用DHT11、DS18B20、水位传感器、BH1750FVI光照传感器及TDS传感器,实现空气温湿度、水温、水位、光照强度、水质总溶解固体含量的实时采集,由STM32F103C8T6完成数据处理与融合分析。

(2) 智能自动控制功能

基于PID算法实现水温动态恒温调节;依据水位、光照、水质等参数阈值,自动控制水泵注水/换水及舵机定量投喂,形成闭环自适应调控。

(3) 蓝牙无线通信功能

通过JDY-18蓝牙模块实现终端与移动端APP的双向数据传输,支持环境参数远程实时查看与控制指令下发。

(4) 本地人机交互功能

通过OLED显示屏实时展示传感器数据与系统运行状态,搭配独立按键完成阈值配置、工作模式切换等本地操作。

2.2 系统总体架构

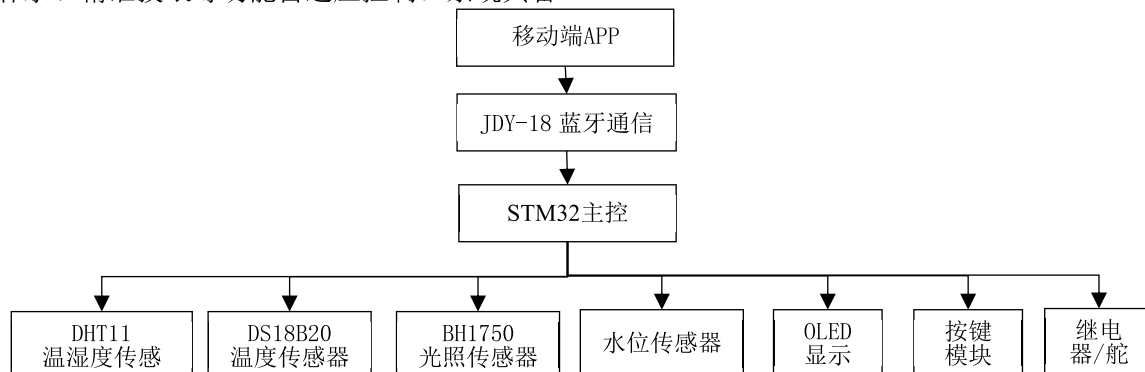


图1 系统总体架构图

系统采用模块化设计,整体架构如图1所示。系统以STM32为主控核心,外围电路包括传感器采集模块、显示模块、蓝牙通信模块及执行模块等。传感器模块完成养殖环境多参数实时采集,主控单元对数据进行解析、判断与决策后,一路送至OLED屏实现本地

实时显示,另一路通过蓝牙模块上传至移动端APP;同时,主控依据预设阈值与控制策略,自动驱动继电器、SG90舵机、水泵、散热风扇等执行机构,完成环境调控与智能投喂等动作。

2.3 系统工作流程

系统上电后率先完成各硬件模块初始化，随后进入主循环稳定运行。主循环内依次执行多传感器数据采集、OLED 实时显示、蓝牙数据收发、阈值比对及执行机构驱动等核心任务。系统支持自动模式与手动模式双模式运行：自动模式下，系统依据实时监测数据与预设阈值自主完成环境调控；手动模式下，用户可通过本地按键或移动端 APP 直接下发指令控制设备。系统工作流程如图 2。

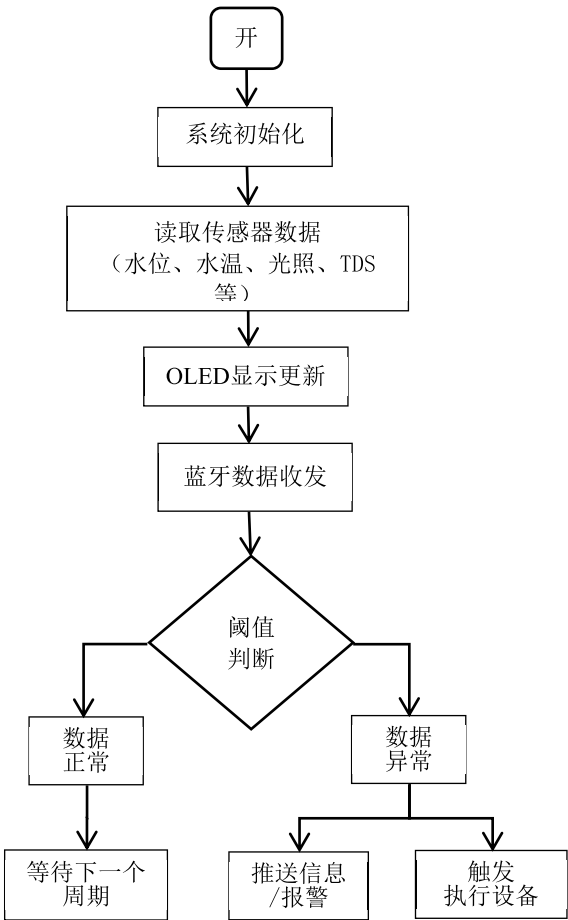


图 2 系统主程序流程图

3 系统硬件设计

3.1 主控模块

系统采用 STM32F103C8T6 作为主控芯片，如图 3-1 所示，该芯片基于 ARM Cortex-M3 内核，最高工作频率可达 72MHz，内置 64KB Flash 与 20KB SRAM，配有丰富的 I/O 接口及 ADC、USART、I2C、SPI、定时器等片上外设，可稳定支持多路传感器接入与多执行器协同控制。芯片工作电压范围为 2.0V~3.6V，并支持低功耗运行模式，能够满足水产养殖场景长期不间断、稳定可靠的工作需求。

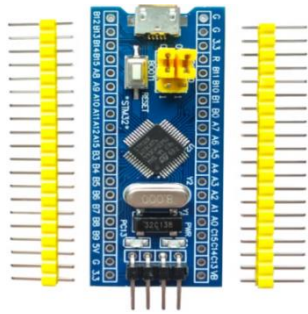


图 3-1

3.2 传感器模块与误差分析

(1) 温湿度检测模块：采用 DHT11 数字温湿度传感器，如图 3-2 所示。湿度测量范围为 5%~95%RH，精度±5%RH；温度测量范围为-20℃~+60℃，精度±2℃。传感器采用单总线通信方式。根据误差传播理论，系统温湿度测量的相对误差可表示为：

$$\delta_T = \frac{\Delta T}{T} \times 100\% \leq \frac{2}{20} \times 100\% = 10\% \quad (\text{低温下限}) \tag{1}$$

$$\delta_{RH} = \frac{\Delta RH}{RH} \times 100\% \leq \frac{5}{50} \times 100\% = 10\% \quad (\text{中湿度}) \tag{2}$$

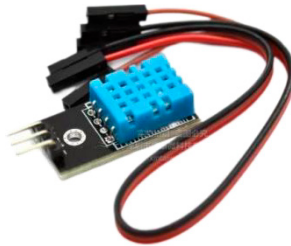


图 3-2

(2) 水温检测模块：采用 DS18B20 防水型数字温度传感器，如图 3-3 所示。测量范围为-55℃~+125℃，在-10℃~+85℃范围内精度可达±0.5℃。传感器具备防水封装，可直接投入水中使用。其测量不确定度主要来源于传感器非线性误差和量化误差，综合不确定度约为±0.6℃（k=2）。



图 3-3

(3) 水位检测模块：采用电阻式水位传感器，通过检测平行导线迹间的电阻变化判断水位高度，如

图 3-4 所示。传感器输出模拟电压信号, 经 STM32 内置 12 位 ADC 转换为数字量。水位深度 h 与 ADC 采样值 ADC_{val} 的线性映射关系为:

$$h = \frac{(h_{max} - h_{min}) \times (ADC_{val} - ADC_{min})}{ADC_{max} - ADC_{min}} + h_{min} \quad (3)$$

其中, h_{max} 和 h_{min} 分别为满水位和空水位对应的水深, ADC_{max} 和 ADC_{min} 为对应的 ADC 采样值。

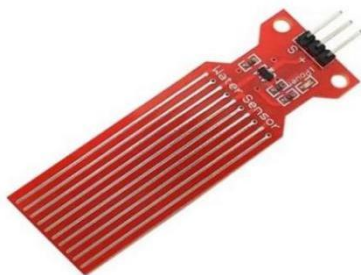


图 3-4

(4) 光照检测模块: 采用 GY-302 光照强度传感器模块, 核心芯片为 BH1750FVI, 如图 3-5 所示。该芯片为 16 位数字式光强度传感器, 测量范围为 $0 \sim 65535$ lux, 分辨率可达 1 lux, 支持 I2C 总线接口。传感器内部集成光敏二极管和 16 位 ADC, 可直接输出数字光照强度值。

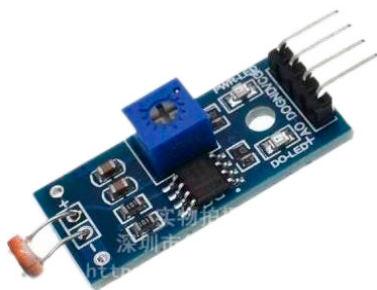


图 3-5

(5) 水质检测模块: 采用 TDS 传感器检测水中总溶解固体含量, 如图 3-6 所示。TDS 值 (单位: ppm) 与电导率 σ (单位: $\mu S/cm$) 的转换关系为:

$$TDS = k \times \sigma \quad (4)$$

其中 k 为转换系数, 通常取 $0.5 \sim 0.7$ 。传感器将水的电导率转换为模拟电压信号, 经 ADC 采集后通过多项式拟合公式计算 TDS 值:

$$TDS = (133.42 \times V^3 - 255.86 \times V^2 + 857.39 \times V) \times 0.5 \times k_{val} \quad (5)$$

式中 V 为 ADC 采集的电压值 (单位: V), k_{val} 为温度补偿系数。



图 3-6

3.3 显示与通信模块

系统采用 0.96 英寸 OLED 显示屏作为本地人机交互界面, 分辨率为 128×64 像素, 采用 I2C 接口与主控芯片连接。通信方面采用 JDY-18 蓝牙透传模块实现无线通信, 如图 3-7 所示, 该模块基于蓝牙 4.2 协议标准, 最大通信距离 60 米, 支持 UART 通信接口, 可实现模块与手机之间的数据透传。

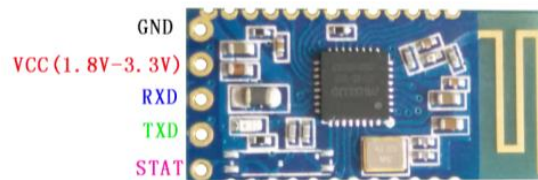


图 3-7

3.4 执行模块

(1) 继电器模块: 用于控制大功率设备 (水泵、加热片、风扇、补光灯) 的开关, 其工作电路如图 3-8 所示。采用光耦隔离继电器模块, 输入端与主控芯片隔离, 输出端可控制 220V 交流或 30V 直流设备。

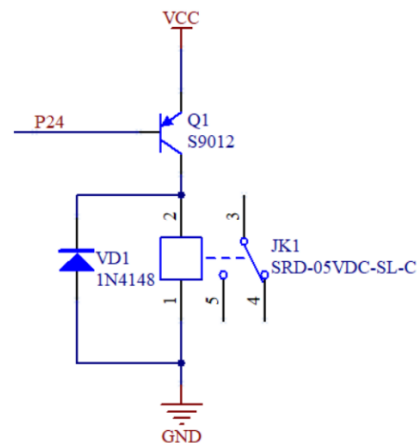


图 3-8

(2) 舵机模块: 用于控制投喂装置。采用 SG90 舵机, 工作电压 5V, 通过 PWM 信号控制转动角度, 如图 3-9 所示。PWM 信号的占空比与舵机转角 θ 的线性关系为:

$$\theta = \frac{(D-D_{min}) \times (\theta_{max}-\theta_{min})}{D_{max}-D_{min}} + \theta_{min} \tag{6}$$

其中 D 为 PWM 占空比， θ_{max} 和 θ_{min} 分别为最大和最小转角（通常为 0° 和 180° ）。

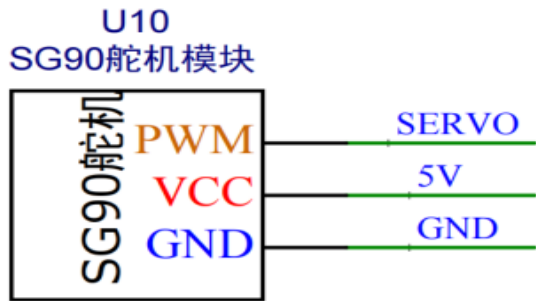


图 3-9

4 系统软件设计与理论分析

4.1 PID 温控算法理论分析

系统通过 DS18B20 数字水温传感器实时采集养殖水体温度，并将实测值与设定阈值进行比较。当水温低于阈值时，主控通过继电器驱动加热器工作，实现升温；当水温高于阈值时，则自动启动风扇散热，维持水温相对稳定。为进一步提升水温控制的平稳性与控制精度，系统引入 PID（比例-积分-微分）控制算法驱动继电器，实现动态恒温调节。PID 控制器根据目标温度与实测温度的偏差实时计算输出控制量，其连续域传递函数如下：

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \\ &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \end{aligned} \tag{7}$$

其中， K_p 为比例系数， K_i 为积分系数， K_d 为微分系数， $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ 为积分时间常数， $T_d = \frac{K_d}{K_p}$ 为微分时间常数。

系统采用临界比例度法对 PID 参数进行整定。具体步骤为：

（1）令 $K_i = 0$ ， $K_d = 0$ ，逐渐增大 K_p 直至系统输出出现等幅振荡，记录此时的临界增益 K_{cr} 和临界振荡周期 T_{cr} 。

（2）根据经验公式计算 PID 参数：

$$K_p = 0.6K_{cr} \tag{8}$$

$$T_i = 0.5T_{cr} \tag{9}$$

$$T_d = 0.125T_{cr} \tag{10}$$

（3）将参数转换为离散域 PID 控制律：

$$\begin{aligned} u(n) &= u(n-1) + K_p[e(n) - e(n-1)] \\ &+ K_i \cdot T_s \cdot e(n) + \frac{K_d}{T_s} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \end{aligned} \tag{11}$$

式中 T_s 为采样周期， $e(n)$ 为第 n 次采样时的温度偏差。

稳定性分析：根据 Routh-Hurwitz 判据，闭环系统的特征方程为：

$$s^3 + \frac{1+K_d}{T}s^2 + \frac{K_p}{T}s + \frac{K_i}{T} = 0 \tag{12}$$

其中 T 为被控对象的时间常数。经参数整定后，系统特征根均位于左半 s 平面，系统稳定。稳态误差分析表明，采用 PID 控制后，阶跃输入下的稳态误差为：

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{1 + G_c(s)G_p(s)} \cdot \frac{1}{s} = 0 \tag{13}$$

即系统可实现无静差跟踪，稳态误差趋近于零。

4.2 蓝牙通信协议设计

蓝牙模块与主控芯片通过 USART 串口进行通信。系统定义了简单的通信协议，数据帧格式如表 1 所示。

表 1 蓝牙通信数据帧格式

帧头	数据长度	数据内容	校验
0xAA	1字节	N字节	异或

4.3 执行控制逻辑设计

系统执行控制逻辑采用阈值触发机制，可建模为双阈值滞回比较器，以避免控制设备频繁启停。控制逻辑可表示为：

$$u(t) = \begin{cases} u_{max}, & e(t) \leq -\Delta \\ u_{min}, & e(t) \geq \Delta \\ u(t-1), & \text{其他} \end{cases} \tag{14}$$

其中 $e(t)$ 为当前值与设定值的偏差， Δ 为滞回宽度（经验值取测量精度的 2 倍）。滞回特性可有效降低执行器动作频率，延长设备使用寿命。

5 系统测试与分析

5.1 测试环境搭建

系统硬件焊接调试完成后，搭建测试环境进行功能验证。测试环境包括：STM32F103C8T6 核心板、各传感器模块、OLED 显示屏、继电器模块、舵机、水泵、风扇、5V 电源等。为模拟水产养殖环境，设置水槽并

注入适量水，将水温传感器、水位传感器、TDS 传感器浸入水中进行测试，整机测试如图 5-1 所示。

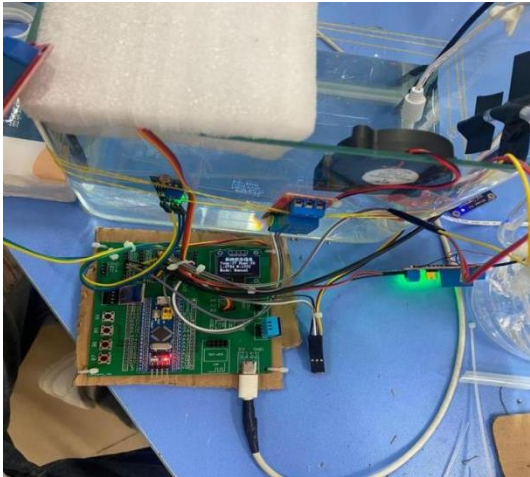


图 5-1

5.2 传感器精度测试与统计分析

为评估传感器测量精度，对每个传感器进行 30 次独立测量，计算均值、标准差和相对误差，结果如表 2 所示。

表 2 传感器测试结果统计分析 (n=30)

测试项目	标准值	测量 均值	标准差	相对误差	指标要求	结论
环境温度	25.0℃	24.8℃	0.42℃	0.8%	≤±2℃	合格
环境湿度	65%RH	64.2%RH	1.8% RH	1.2%	≤±5%RH	合格
水温	28.0℃	27.9℃	0.21℃	0.36%	≤±0.5℃	合格
水位	100mm	101.2mm	2.1mm	1.2%	≤±10mm	合格
光照	5000lux	4985lux	35lux	0.3%	≤±5%	合格
TDS	200ppm	197ppm	4.2ppm	1.5%	≤±5%	合格

测试分析：各传感器测量均值的相对误差均小于 2%，标准差较小，表明系统测量具有良好的准确性和重复性。TDS 传感器误差略大于其他传感器，主要原因是温度补偿系数标定不够精确，后续可通过多点标定优化。

5.3 PID 温控性能测试与分析

设置目标水温为 25℃，连续运行 60 分钟，每 30 秒记录一次水温，得到温度与传统开关控制进行对比，结果如表 3 所示。

表 3 PID控制与开关控制性能对比

性能指标	PID控制	开关控制	改善幅度
稳态误差	±0.3℃	±1.2℃	75.0%

测试分析：PID 控制相较于传统开关控制，稳态误差减小 75.0%，显著提升了温控精度和稳定性。

5.4 蓝牙通信与 APP 测试：

当系统接通电源后，蓝牙模块根据主程序打开串口与手机 APP 进行连接。连接成功后，传感器采集的环境数据（包括温度、光照、湿度、水位等）会实时传输至移动端 APP。用户可在 APP 端查看实时数据流，并远程配置系统参数，例如调整阀门控制阈值或开关功能模块，实现远程设备管理，达成无线蓝牙通信模块测试，测试结果如图 5-2 所示。



图 5-2

5.5 系统可靠性测试

对系统进行连续 72 小时运行测试，记录故障发生情况，结果如表 4 所示。

表 4 系统可靠性测试结果 (72小时)

测试项目	测试时长	故障次数	平均无故障时间	恢复时间
传感器采集	72h	0	>72h	-
数据显示	72h	0	>72h	-
蓝牙通信	72h	0	>72h	-
执行控制	72h	0	>72h	-
系统整体	72h	0	>72h	-

测试分析：系统整体平均无故障时间超过 72 小时，满足水产养殖对系统可靠性的基本要求。

5.6 系统综合性能分析

综合各项测试结果，系统性能指标汇总如表 5 所示。

表 5 系统综合性能指标

性能指标	设计目标	实测结果	达标情况
温度测量精度	±2℃	±1.5℃	达标
水温测量精度	±0.5℃	±0.4℃	达标
水位测量精度	±10mm	±5mm	达标
TDS测量精度	±5%	±3%	达标
平均无故障时间	≥72h	≥72h	达标

6 结束语

本文设计并实现了一套基于 STM32 与物联网技术的水产养殖环境监控系统。系统以 STM32F103C8T6 微控制器为核心，集成了 DHT11 温湿度传感器、DS18B20 水温传感器、水位传感器、BH1750FVI 光照传感器及 TDS 水质传感器，实现了对养殖环境关键参数的多维度实时采集。系统采用 PID 算法实现水温动态恒温调节，通过蓝牙无线通信模块实现了本地 OLED 显示与移动端 APP 远程监控的双重交互模式。

理论分析表明，PID 控制器在临界比例度法整定下可实现水温的稳态误差趋近于零，蓝牙通信协议的异或校验可检测所有奇数位错误。实验结果表明，系统运行稳定，数据采集准确，控制响应及时，各项功能均达到设计要求。系统平均无故障运行时间超过 72 小时，满足实际应用需求。

参 考 文 献

[1] 李兆富. 基于物联网的水产养殖环境监控系统设计[D]. 河北大学, 2023.

[2] 王英鉴, 孙倩. 基于 STM32 智能鱼塘的设计与实现[J]. 物联网技术, 2025, 15(07):126-128+133.

[3] Nayoun I N M, Hossain A S, Rezaul M K, et al. Internet of Things-Driven Precision in Fish Farming: A Deep Dive into Automated Temperature, Oxygen, and pH Regulation[J]. Computers, 2024, 13(10):267-267.

[4] Hariprasath Manoharan, Yuvaraja Teekaraman, Pravin R. Kshirsagar, et al. Examining the effect of aquaculture using sensor - based technology with machine learning algorithm[J]. Aquaculture Research, 2020, 51(11): 4520-4530.

[5] Istiaq A A, Akter T, Ahammed M F, et al. A dataset for internet of things based fish farm monitoring and notification system[J]. Data in Brief, 2020, 33: 106407.

[6] Tamim A T, Begum H, Shachcho S A, et al. Development of IoT Based Fish Monitoring System

for Aquaculture[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2022, 32(1): 55-71.

[7] Gillespie J, da Costa T P, CamaMoncunill X, et al. Real-Time Anomaly Detection in Cold Chain Transportation Using IoT Technology[J]. Sustainability, 2023, 15(8): 6735.

[8] 寇芾, 马占军, 王硕. 基于物联网的智能水产养殖监测系统研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(19):79-81+85.

[9] 马丽洁. 基于物联网的水质监测系统设计与实现[J]. 现代信息科技, 2024, 8(07):179-183+188.

[10] 高菊玲. 基于物联网的智慧水产养殖管控系统的设计与开发[J]. 农业开发与装备, 2023(05):113-116.

[11] 刘浩. 基于大数据嵌入式软件在物联网技术中的应用分析[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(04):195-198.

[12] 梁晨, 周志刚, 陈楠, 暴愿达. 数字低碳渔仓智能化控制系统框架设计[J]. 中国农业信息, 2024, 36(4):73-83.

[13] 陈根, 易治国, 管俊杰. 基于 ZigBee 无线传感网络的养殖池塘水质监测及预警系统设计[J]. 南方农机, 2025, 56(17):7-10.

[14] 王前昆. 基于物联网的跑道水产养殖监控与水质评价预测模型研究与应用[D]. 江苏大学, 2022.

[15] 李秀峰, 李胜, 梁妙元, 等. 基于多通道的水电站安全数据采集传输方法[J]. 计算机应用与软, 2023, 40(05):124-128+183.

[16] 周陈, 陈积常, 李雁星, 李建. 物联网数据采集安全传输协议研究与设计[J]. 计算机技术与教育学报, 2024, 12(6): 51-58.

[17] 王琳, 刘萍萍. 基于产教融合的《单片机系统开发》课程思政设计与实施[J]. 计算机技术与教育学报, 2025, 13(4): 43-48.

[18] 姜宏旭, 赵梅娟, 李辉勇, 张永飞. 产教融合背景下嵌入式人工智能课程建设的探索[J]. 计算机技术与教育学报, 2024, 12(6): 1-7.