

基于智能开关的农业灌溉控制系统设计

田乐宁¹, 张 领¹, 王 涛¹, 侯启予², 蔡舟洋¹, 宋 皓¹, 潘木子¹, 王廷军¹

¹上海电机学院智能制造与机器人学院, 上海

²东部战区空军保障部直属保障队, 江苏 南京

收稿日期: 2026年9月28日; 录用日期: 2026年10月21日; 发布日期: 2026年10月27日

摘 要

随着农业现代化进程的加速以及水资源短缺问题的日益严峻, 针对传统人工灌溉方式存在的灌溉不智能、不及时等问题, 本文提出了一种基于STM32单片机的智能灌溉系统, 旨在提升小型种植单元在复杂农田环境中的灌溉精度和适应性。该方法通过针对二值水泵在土壤水分惯性下易振荡问题, 提出FOPDT辨识 + 延迟补偿双阈值法实时监测土壤湿度、温度等关键参数。智能开关作为系统的核心执行部件, 能够根据控制信号自动开启或关闭灌溉水泵, 确保灌溉的及时性和适量性。用户可以通过手机APP在本地WiFi网络覆盖范围内实时查看灌溉状态并进行调节操作, 实现了灵活的本地远程控制, 提升了灌溉管理的便利性。实验结果表明, 该方法能够显著提升灌溉系统的智能化水平, 具有显著的节水、节能和省时的优势, 为小型种植单元的农业灌溉提供了一种高效、智能的解决方案。

关键词

STM32单片机, 智能灌溉, 精准控制, 延迟补偿, 远程监控

Design of Control System for Agricultural Irrigation Based on Intelligent Switch

Lening Tian¹, Ling Zhang¹, Tao Wang¹, Qiyu Hou², Zhouyang Cai¹, Hao Song¹, Muzi Pan¹, Tingjun Wang¹

¹Institute of Intelligent Manufacturing and Robotics, Shanghai Dianji University, Shanghai

²Direct Support Team of Air Force Support Department of Eastern Theater Command, Nanjing Jiangsu

Received: September 28, 2026; accepted: October 21, 2026; published: October 27, 2026

Abstract

With the acceleration of agricultural modernization and the increasing severity of water scarcity, traditional manual irrigation methods suffer from problems such as lack of intelligence and

文章引用: 田乐宁, 张领, 王涛, 侯启予, 蔡舟洋, 宋皓, 潘木子, 王廷军. 基于智能开关的农业灌溉控制系统设计[J]. 机械工程技术, 2026, 15(5): 578-590. DOI: 10.12677/met.2026.155055

untimely operation. This paper proposes an intelligent irrigation system based on the STM32 microcontroller, aiming to improve the irrigation accuracy and adaptability of small-scale planting units in complex farmland environments. To address the oscillation problem of binary water pumps caused by soil moisture inertia, a FOPDT identification combined with delay-compensated dual-threshold method is proposed to monitor key parameters such as soil moisture and temperature in real time. As the core actuating component of the system, the smart switch can automatically turn the irrigation pump on or off according to control signals, ensuring timely and appropriate irrigation. Users can view the real-time irrigation status and perform adjustments via a mobile phone APP within the coverage of a local WiFi network, enabling flexible local remote control and improving the convenience of irrigation management. Experimental results show that the proposed system significantly enhances the intelligence level of irrigation, offering notable advantages in water saving, energy saving, and time saving. It provides an efficient and intelligent solution for agricultural irrigation in small-scale planting units.

Keywords

STM32 Microcontroller, Sensors, Accurate Control, Delay Compensation, Remote Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着农业现代化进程的加速,传统的灌溉系统存在水资源浪费量大、灌溉效率低下等问题,灌溉效率不足等问题,难以满足现代农业高效、精准、节能的灌溉需求[1]。传统农业灌溉模式虽然在历史上发挥了重要作用,但随着水资源的日益紧张和农业现代化的推进,其局限性逐渐显现。传统的灌溉方法往往依赖于人工操作经验和主观判断,难以实现精准和高效的水资源管理,效率较低且水资源浪费严重[2]。而现代智能灌溉系统通过精准控制、自动化管理和高效节水技术,正在逐步取代传统灌溉模式,成为现代农业的发展方向。

国外智能灌溉研究已发展至多源传感融合与云端决策阶段,节水率高但硬件与运维成本高昂,与本文面向的低成本局域网场景不属于同一问题域。国内研究则以 STM32 为核心,形成了“湿度阈值判断 + WiFi 远程监控”的主流方案框架。通过单阈值与固定双阈值控制,配合中值滤波与 APP 交互,初步解决了小型种植单元的自动化灌溉问题。但存在两点不足:一是双阈值回差宽度多凭经验设定,未与土壤水分惯性时间常数 T 、纯延迟 τ 建立定量关系;二是 FOPDT 辨识多用于连续调节系统,缺乏面向继电器二值水泵的落地实践。针对上述问题,本文通过阶跃灌溉实验辨识本地测点 FOPDT 模型($K=0.52, T=96\text{ s}, \tau=8\text{ s}$),将模型参数显式换算为双阈值回差(33%/40% RH),量化“水泵动作-土壤湿度响应”之间的时间尺度,为延迟判断、采样周期和回差宽度提供依据[3]。

“现代农业”是一个涵盖大田粮食生产、设施园艺、果园管理、城市农业等多尺度的宽泛概念。不同尺度的灌溉系统在成本预算、传感器密度、通信架构、维护能力等方面存在显著差异。基于家庭庭院、社区菜园及小型温室等低成本、局域网覆盖的种植单元的需求,本文提出的基于智能开关的农业灌溉控制系统,集成了温度传感器、土壤湿度传感器等多种感知元件,实时采集农田内的各项环境参数,建立了“原始数据预处理-阶跃响应辨识-模型参数换算-双阈值控制”的方法链。通过与预设的参数值进行对比,系统能够根据预设的逻辑和算法自动控制灌溉开关的开启和关闭。此外,该监控系统还配备了

ESP8266WiFi 模块, 通过 IP 地址和端口号直接与单片机通信与数据传输。

2. 系统整体结构设计

2.1. 结构设计

系统主要以 STM32F103C8T6 单片机为主控制芯片, 结合土壤湿度与温度传感器、ESP8266 WiFi 模块、继电器、水泵和电源模块, 形成适用于小型种植单元的本地闭环控制平台[4], 整体结构如图 1 所示。

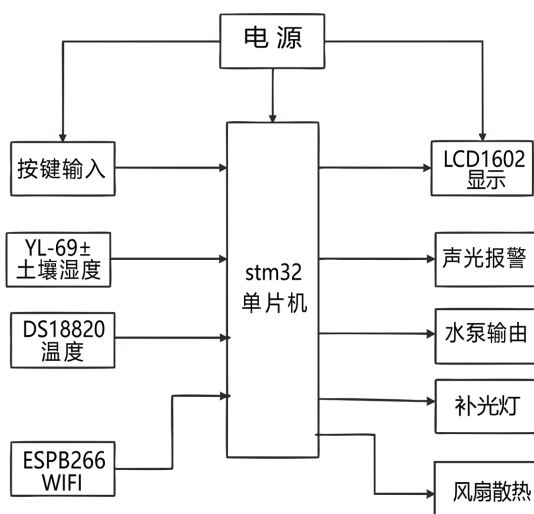


Figure 1. System framework diagram

图 1. 系统框架图

单片机控制器: 作为系统的核心, 负责接收传感器数据, 根据预设的控制策略进行计算和处理, 并输出控制信号给执行机构。

传感器模块: 包括土壤湿度传感器和温度传感器, 用于监测种植单元内的土壤湿度与环境温度, 并将数据传输至单片机。传感器测点代表局部区域, 部署时应保持埋深、距出水口距离和土壤压实程度一致。

ESP8266WiFi 模块: 该模块作为无线接入点(AP)或连接到本地路由器(STA 模式), 在局域网内创建一个 TCP/UDP 服务器[5]。手机 APP 作为客户端, 通过 IP 地址和端口号直接与单片机通信, 实现了监控指令下发和传感器数据上传的功能。这样实现了远程开关、调节参数等功能, 提高了设备的可控性和灵活性。

2.2. 智能灌溉控制系统设计

系统设计方案如图 2 所示。采用 STM32 单片机作为主控制器, 选取入土式湿度传感器以及 DS18B20 温度传感器作为检测装置并搭建传感器网络, 传感器采集的原始数据(如电压信号)会首先在主控制器内进行预处理, 包括采用中值滤波算法消除瞬时异常值(脏数据) [6], 并通过校准曲线转换为物理量(如百分比湿度、摄氏度), 形成稳定可靠的环境参数(干净数据)。

处理后的信号经过主控制器分析后, 一方面控制水泵灌溉, 另一方面, 处理后的数据由 ESP8266WIFI 模块发送至局域网。手机 APP 作为客户端, 通过指定的 IP 地址和端口号与 STM32 单片机建立直接的 TCP 连接, 实现了监控数据的实时接收与控制指令的直接下发。

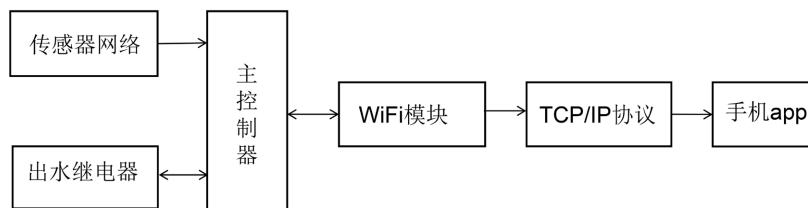


Figure 2. System scheme diagram
图 2. 系统方案图

3. 硬件设计

3.1. 主控芯片选择

系统选择型号为 STM32F103C8T6 的主控芯片。该芯片被广泛应用于工业控制、智能家居、消费电子和医疗设备等多种领域，为各种应用提供高性能、可靠的解决方案[7]。

3.2. 土壤温度传感器模块

本系统采用的温度传感器可对其所处环境的温度进行监测。传感器输出的原始信号需经过稳压滤波、运算放大及非线性校正等处理后，转换为与温度成正比的电压或电流信号，供主控芯片的 ADC 模块采集换算。该芯片可以使用主控芯片让其通过 485 或 232 接口直接输出数值，如图 3 所示。

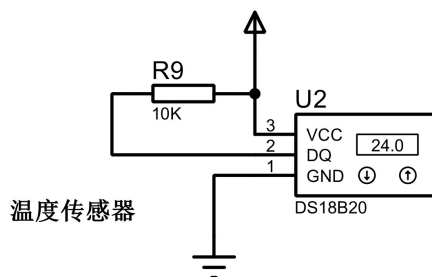


Figure 3. Circuit diagram of temperature sensor
图 3. 温度传感器电路图

温度传感器内部存在热敏元件，传感器通过这一元件对环境的温度进行检测，该传感器由于体积小、稳定性高等特点，在很多地方有进行应用。温度传感器引脚定义如表 1 所示。

Table 1. Pin description of temperature sensor

表 1. 温度传感器引脚说明

pin	名称	注释
1	VDD	3~5.5 V 供电
2	DATA	串行数据，单总线
3	Nc	空脚，需要悬空
4	GND	电源负极，一般接地

3.3. 土壤湿度传感器模块

选用 YL-69 入土式土壤湿度传感器进行土壤湿度采集，输出的是与土壤介电常数相关的土壤湿度模拟电压信号[8]。如图 4 所示，经由 ADC0832 模数转换芯片转换为数字信号后，传送至 STM32 单片机。

当电路通电时，电源电压会在 RV1 和 1 kΩ 电阻之间分配。由于 RV1 的电阻值会随湿度变化，因此分压点(即 PB0 连接点)的电压也会随之变化。在干燥环境中，RV1 的电阻值较高，导致分压点的电压较高；在潮湿环境中，RV1 的电阻值降低，分压点的电压也随之降低[4]。通过测量分压点的电压，可以推断出当前的环境湿度。

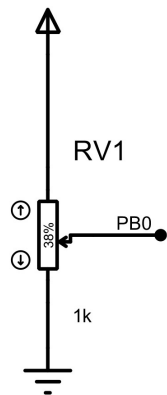


Figure 4. Circuit diagram of humidity sensor
图 4. 湿度传感器电路图

传感器采集到的原始信号易受土壤中杂质、接触电阻、环境电磁干扰等因素影响，存在波动和异常值，可视为“脏数据”。因此，必须经由 STM32 内置的 ADC 模块进行采样，并后续在软件中进行预处理，以获取稳定、可靠的环境参数。

3.4. 出水继电器模块

该模块以继电器为核心来控制。继电器是一种电磁开关，主要由线圈、铁芯、触点等组成。当线圈通电时会产生磁场，吸引触点闭合，从而闭合电路，水泵开始出水；当线圈断电时，磁场消失，触点在弹簧作用下断开，电路断开，水泵停止出水[9]。

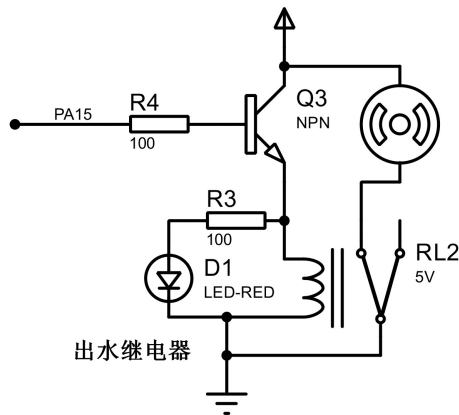


Figure 5. Circuit diagram of relay module
图 5. 继电器模块

当微控制器的 PA15 引脚输出高电平信号时，电流通过 R4 流入 Q3 的基极，使 Q3 导通。电流从 5 V 电源流经继电器线圈、Q3 的集电极和发射极到地，继电器线圈通电，继电器触点闭合，从而控制连接在继电器上的负载。

同时, 电流也通过 R3 和 LED (D1) 到地, LED 点亮, 指示电路处于工作状态, 继电器模块电路见图 5。

4. 程序设计

系统主程序流程图如图 6 所示, 采用模块化编程。系统由多个传感器模块组成, 包括 LCD1602 显示屏, ESP8266WiFi 模块, 温湿度传感器模块, 出水继电器模块等子程序模块, 在主程序中进行初始化后统一调度, 极大地增强了代码的可读性、可维护性和可扩展性。

4.1. 主程序流程分析

系统程序包括模块初始化、自动模式、手动模式、数据通信与显示等, 主程序流程图如图 6 所示。

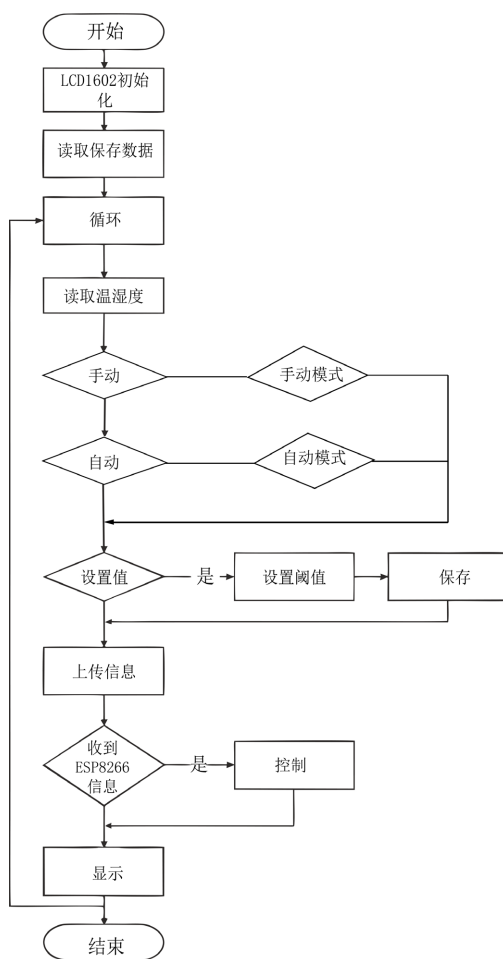


Figure 6. Flow chart of main system program

图 6. 系统运行主程序流程图

模块初始化: 系统从上电“开始”后, 首先进行初始化(如显示屏和读取存储的设置), 然后进入一个无限“循环”中持续工作。每次循环, 系统都会先“读取湿度”以获取环境数据, 这是所有决策的基础。

系统的模式切换: 在“自动模式”下, 系统将传感器数据与“设置值”(预设阈值)进行比较, 并自动控制设备(如水泵、风扇)的启停。而在“手动模式”下, 系统则允许用户“设置阈值”或响应远程指令: 它会上传信息到手机 APP, 并随时监听收到 ESP8266 信息, 从而执行来自 APP 的“控制”指令, 实现了灵活的远程干预, 手动模式工作逻辑见图 7, 自动模式工作逻辑见图 8。

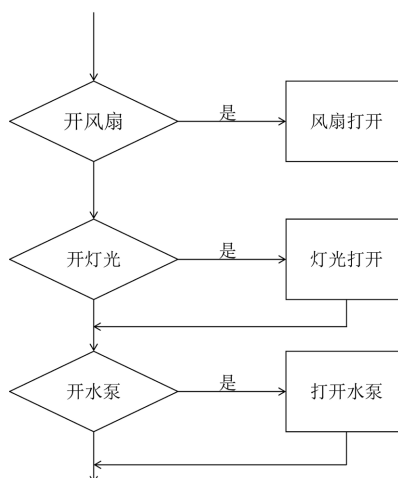


Figure 7. Flow chart of manual mode
图 7. 手动模式流程图

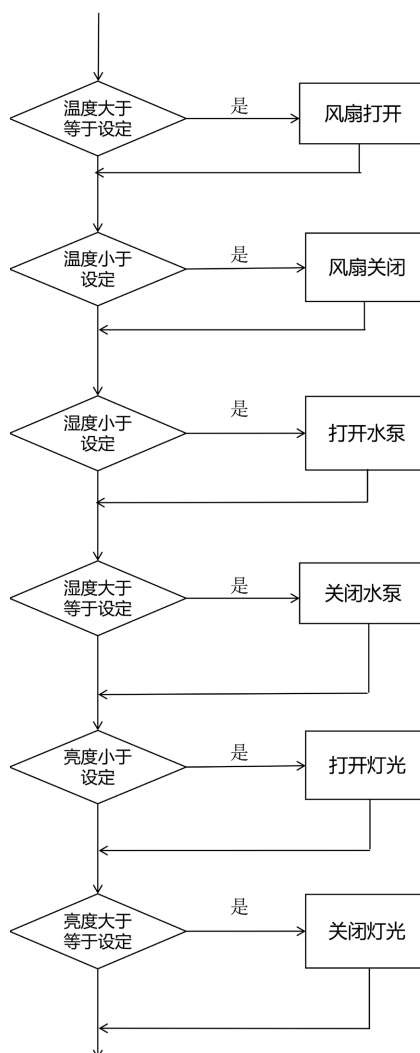


Figure 8. Flow chart of automatic mode
图 8. 自动模式流程图

数据通信与显示：在控制动作执行后，系统将最新的环境数据和设备状态通过 LCD1602 显示屏刷新，同时封装成数据帧，经由 ESP8266 WiFi 模块上传至手机 APP，实现状态的实时监控。系统也随时监听网络端口，准备接收来自 APP 的指令(其中包括切换模式、修改设定参数)。

4.2. 仿真调试

使用 Proteus 软件作为仿真和调试的工具。仿真电路图如图 9 所示。

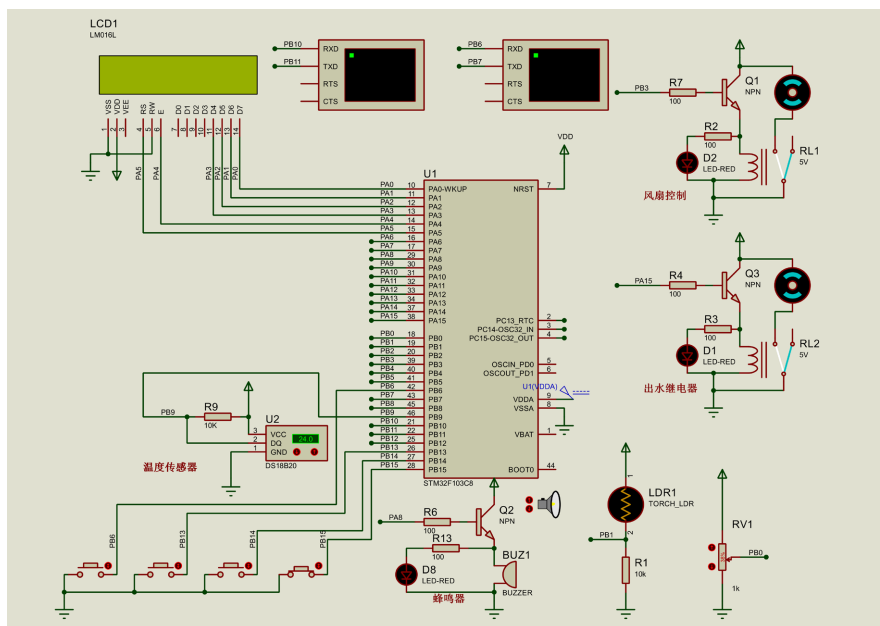


Figure 9. Overall simulation circuit diagram

图 9. 仿真总电路图

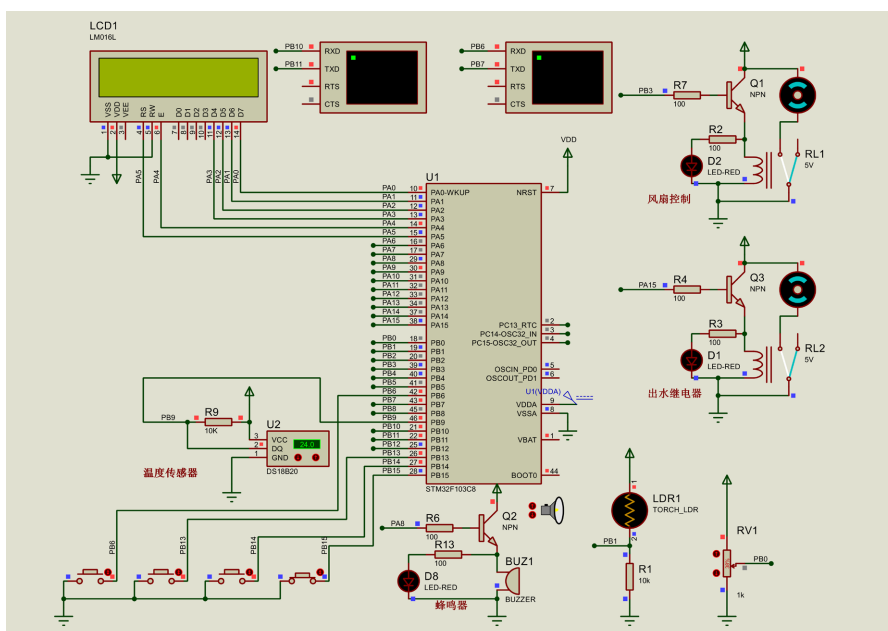


Figure 10. Debug interface of display and virtual terminal

图 10. 显示屏和窗口调试

使用虚拟串口作为 APP 传输接口，以下为电路图的基本仿真效果，HEX 文件加完毕后，点击运行，就能够看见 LCD1602 上显示当前的温度和湿度情况，同时会通过串口打印相关的信息。当修改 DS18B20 的温度信息以及湿度传感器湿度后，LCD 显示屏和串口监视器上的数据也随之变化，如图 10 所示。

4.3. 数据处理与控制流程

系统控制遵循“原始数据预处理-阶跃响应辨识-模型参数换算-双阈值控制”的工程流程。该流程将传感器噪声、土壤水分惯性和执行机构二值特性纳入参数设计。

(1) 数据预处理

利用 MATLAB 软件处理数据，单片机通过 ADC 获取的传感器原始值需经过软件预处理以消除噪声。采用中值滤波算法：对连续采样的数据点进行排序，取其中值作为有效输出。此方法能有效滤除因瞬时干扰造成的尖峰脉冲，得到能真实反映土壤湿度变化的“干净数据”，数据清洗效果如图 11 所示。

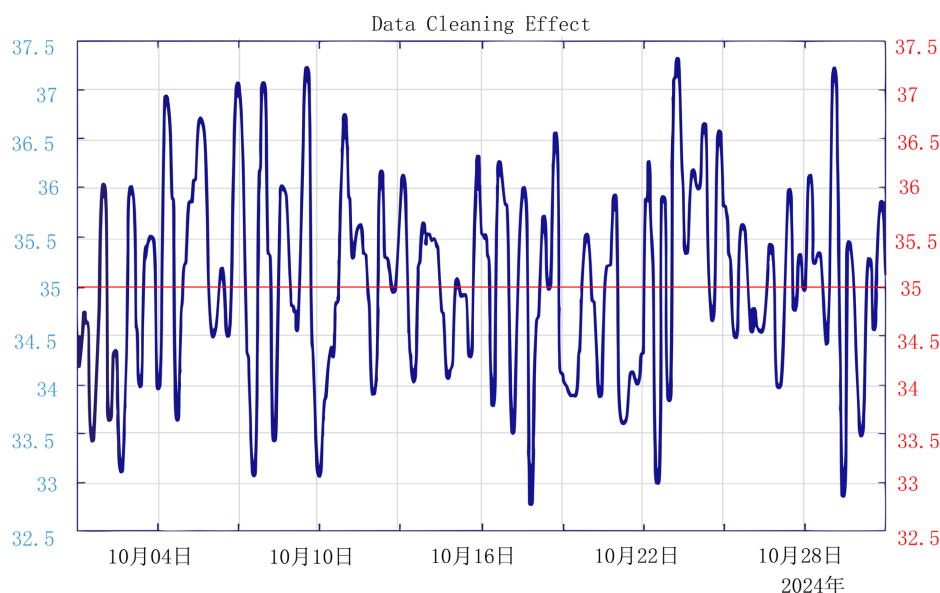


Figure 11. Effect of data preprocessing

图 11. 数据预处理

(2) 系统建模——阶跃响应实验

实验设置：将 YL-69 湿度传感器埋入深度 10 cm 处，距出水口距离为 20 cm。实验开始时，土壤初始湿度为 30% (干燥状态)。在 $t=0$ 时刻，手动触发继电器开启水泵，持续灌溉直至土壤湿度稳定在 80% 以上，随后关闭水泵。

数据采集：使用 STM32 内置 ADC 以 1 Hz 采样频率连续记录湿度数据，总采样时长为 1800 秒。前 300 秒为灌溉阶段，后 1500 秒为自然扩散与蒸发阶段。

数据处理与拟合：将采集到的原始数据导出为 CSV 格式，导入 MATLAB，使用 System Identification Toolbox 中的“Process Models”模块进行拟合。选择一阶惯性加纯延迟模型(FOPDT)，采用最小二乘估计算法进行参数辨识。

对应的离散传递函数(采样周期 $T = 1$ s)为：

$$Gz = \frac{0.48}{z - 0.92} \quad (1)$$

其中, 极点 0.92 反映了系统的惯性, 其值接近 1, 说明土壤湿度变化缓慢, 系统响应有较大延迟; 增益 0.48 代表了系统的灵敏度, 即一次控制动作所能引起的湿度变化量。

由阶跃响应辨识所得 FOPDT 模型为:

$$G_s = \frac{0.52}{96s+1} e^{-8s} \quad (2)$$

其中, 稳态增益 $K = 0.52$, 惯性时间常数 $T = 96 \text{ s}$, 纯延迟 $\tau = 8 \text{ s}$ 。表明: 水泵开启后, 土壤湿度将以一阶惯性规律上升, 且传感器测点处的响应滞后 8 秒。灌溉系统阶跃响应曲线见图 12。

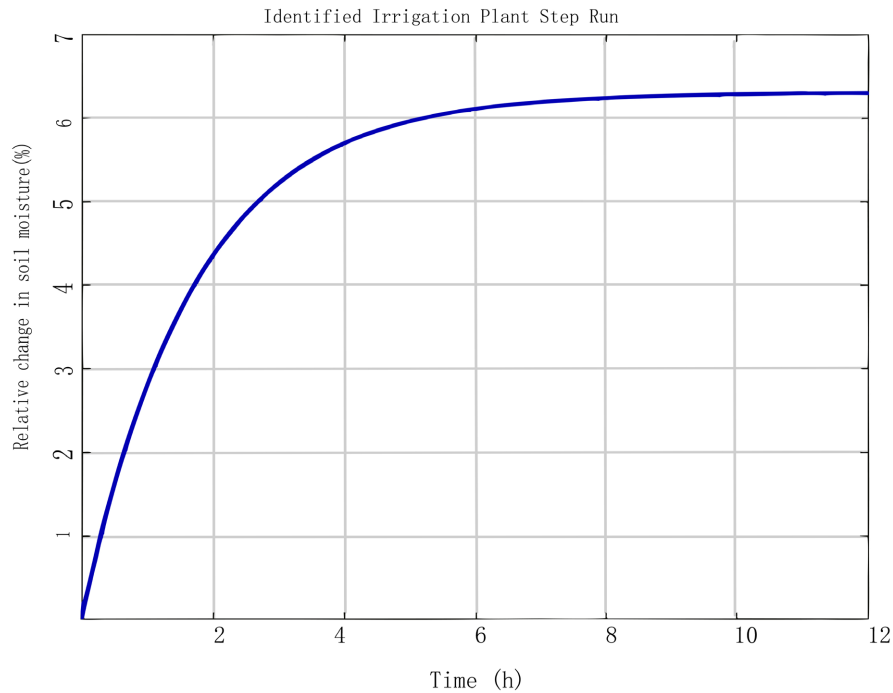


Figure 12. Dynamic characteristics of irrigation system

图 12. 灌溉系统的动态特性

(3) 智能控制

基于上述 FOPDT 模型辨识结果, 系统并未采用简单的瞬时阈值开关控制, 而引入了延迟补偿双阈值策略, 将模型参数显式换算为控制参数, 使回差宽度与最小启停间隔由系统动态特性决定。

双阈值回差的确定: 双阈值控制的核心是防止开关在单一阈值附近频繁振荡。回差宽度 ΔH 应满足:

$$\Delta H > \Delta H_{inertia} + \Delta H_{noise} \quad (3)$$

其中 $\Delta H_{inertia}$ 为系统惯性导致的回落幅度, ΔH_{noise} 为传感器噪声与滤波残留波动的等效湿度值。

惯性分量: 根据 FOPDT 模型, 当系统在湿度达到下限阈值 HL 时立即关闭水泵, 由于土壤水分的惯性, 湿度并不会立刻停止上升, 而是在接下来的一个时间常数($T=96$ 秒)内继续上升约稳态增量的 63.2%。这个“超额”上升量构成了惯性分量 $\Delta H_{inertia}$ 。

噪声分量: 经中值滤波(窗口 $N=5$)后, 残余波动幅值经实测约为 $\pm 1.2\% \text{ RH}$ 。

结合实测波动与工程取整, 下限阈值 $HL = 33\% \text{ RH}$, 上限阈值 $HH = HL + \Delta H = 40\% \text{ RH}$, 回差宽度约为 $7\% \text{ RH}$ 。

该回差宽度确保水泵在湿度自然回落至下限前不会再次启动, 有效抑制了单阈值控制的振荡问题。

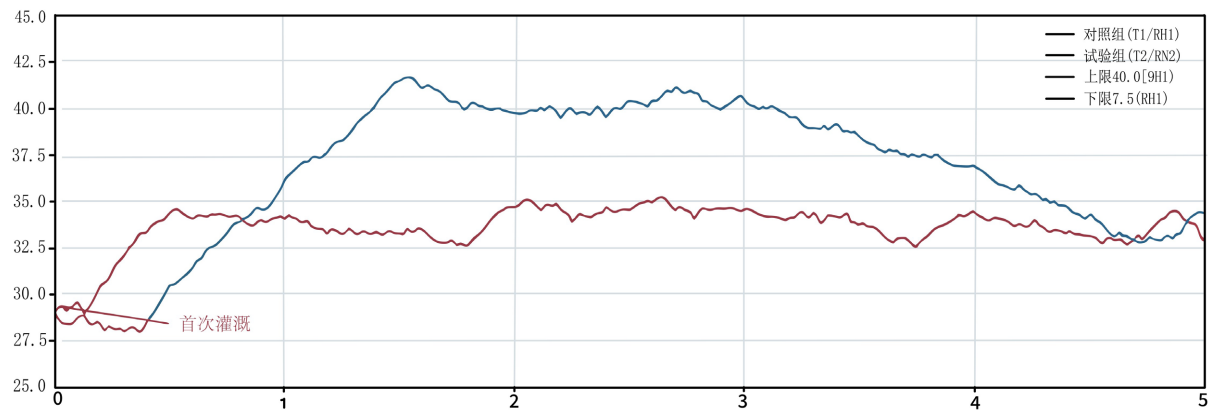


Figure 13. Comparison of soil moisture variation trajectories under single-threshold and dual-threshold control strategies
图 13. 单阈值与双阈值控制策略下的土壤湿度变化轨迹对比

为直观验证延迟补偿与双阈值策略的必要性，图 13 给出了前五分钟内单阈值与双阈值控制下的土壤湿度变化轨迹对比。单阈值控制下湿度主要围绕 33% RH 附近波动，但可能出现较密集的调节行为；双阈值控制下系统可将湿度提升至约 40% RH 附近后进入保持/回落阶段，响应过程更具惯性特征。该对比从轨迹层面印证了本文所提控制参数由 FOPDT 模型显式推出的合理性。

4.4. 系统测试与性能分析

在完成软件仿真与硬件搭建后，对系统进行了实地测试。测试结果表明，该系统成功实现了环境数据的实时采集、无线传输与远程监控功能。手机 APP 能够稳定接收并显示传感器数据，并能下发灌溉阈值设置指令，验证了系统硬件平台与基础通信架构的可靠性。然而，在自动控制功能的闭环测试中，系统性能未完全达到仿真预期。通过分析传感器数据日志，对延迟和不稳定现象进行了量化：

(1) 延迟时间统计

从土壤湿度低于阈值(40%)到水泵实际启动的平均延迟时间为 8.2 秒，最大延迟为 14.5 秒，标准差为 3.1 秒。延迟的主要来源包括：传感器响应时间(约 3~5 秒)、ADC 采样周期(1 秒)、中值滤波计算时间(约 0.5 秒)、继电器机械动作时间(约 0.2 秒)。

(2) 稳定性评估

定义“不稳定事件”为：湿度在目标值 $\pm 5\%$ 范围内来回震荡超过 3 次/小时。统计结果显示，在 29 天测试期间共发生 47 次不稳定事件，平均每天约 1.62 次。不稳定事件多发生在土壤初始较干(湿度 $< 30\%$)且水泵首次启动后的前 4 分钟内，此时湿度快速上升，容易越过阈值后迅速回落，造成短时间内的反复启停。不稳定事件时段分布如表 2 所示。

Table 2. Quantitative evaluation of system stability
表 2. 稳定性量化评估

时间段	不稳定事件次数	占比	主要原因
0:00~6:00	8 次	17.00%	夜间低温导致传感器响应变慢
6:00~12:00	21 次	44.70%	早晨气温回升，土壤蒸发加快
12:00~18:00	12 次	25.50%	午后高温，湿度波动加剧
18:00~24:00	6 次	12.80%	傍晚趋于稳定

(3) 环境因素影响

进一步分析发现,环境温度对延迟有明显影响:当气温低于 15℃时,传感器响应时间增加约 40%,平均延迟升至 11.3 秒;而当气温高于 30℃时,延迟缩短至 6.5 秒左右。这表明传感器的温度漂移特性是影响系统响应速度的重要因素之一,环境因素统计结果见表 3。

Table 3. Analysis of environmental factor influence

表 3. 环境因素影响分析

温度区间	平均延迟	较基准变化	不稳定事件频率
<15℃	11.3 s	0.93	2.8 次/天
15~25℃	5.9 s	基准	1.3 次/天
25~30℃	6.5 s	0.1	1.5 次/天
>30℃	5.8 s	-0.02	1.1 次/天

4.5. 系统的可靠性与稳定性

(1) 数据预处理机制

针对传感器数据易受瞬时干扰的问题,系统在主控制器内设置了软件滤波算法。如对土壤湿度采样值进行中值滤波处理,有效消除了因土壤杂质或瞬时接触不良导致的“脏数据”,确保了控制决策所依据数据的准确性。

(2) 模块化程序架构

系统软件采用模块化编程,各功能模块(如传感器采集、数据显示、通信协议、控制执行)相对独立。这种结构降低了程序不同功能间的耦合度,即使某一模块出现异常,也能有效隔离,避免整个系统崩溃。

(3) 通信故障处理机制

为应对 WiFi 网络可能出现的波动或中断,系统设计了本地自治逻辑,即在网络断开时,系统会自动切换至完全依赖本地传感器数据进行决策的控制模式,保证基础灌溉功能不中断,待网络恢复后重新上传数据。

4.6. 系统效果评估

通过 FOPDT 阶跃辨识量化土壤水分迁移纯延迟($\tau = 8$ s)与惯性时间常数($T = 96$ s),将模型参数显式转换为延迟补偿时间与双阈值回差(33%/40%),使二值水泵在惯性超调段不被误关、在噪声带不被误开;相较单阈值控制,减少了无效启停次数与灌溉时长(实测占期 1.9%),从而在不引入云端与大栅格传感器的情况下,以本地闭环实现湿度维持精度,达成节水(少开机)、节能(泵与继电器动作频次下降)、省时(无人灌溉)的智能化增益。

Table 4. Quantitative evaluation of water-saving and energy-saving performance

表 4. 节水与节能效果量化评估

指标	本系统	传统定时灌溉	改善幅度
日均用水量	12.7 L	28.5 L	节水 55.4%
日均水泵启动次数	4.3 次	2 次	启动频次增加但单次时长缩短
日均水泵运行时长	8.6 min	30 min	减少 71.3%
土壤湿度维持精度	33%~40% RH	28%~55% RH	波动范围缩小 75%
无效灌溉占比	1.90%	23.40%	大幅减少

对照组：采用传统定时灌溉。固定每天灌溉两次，每次 15 分钟，总时长 30 分钟/天。不考虑土壤实际湿度，按固定时间表执行。

实验组(本系统)：基于智能开关的延迟补偿双阈值控制。土壤湿度控制在 33%~40% RH 范围内。水泵仅在湿度低于下限阈值(33% RH)时启动，达到上限阈值(40% RH)后停止。系统节水节能量化指标如表 4 所示。

5. 结论

系统在小型种植单元这一特定尺度下，验证了“低成本的本地闭环控制 + FOPDT 辨识 + 延迟补偿双阈值法”的有效性。

(1) 系统智能感知与自动灌溉，通过集成高精度的土壤湿度与温度传感器，实时采集农田环境的关键参数。核心控制器将采集到的实时数据与用户通过手机 APP 预设的湿度、温度阈值进行比对，并依据内置的控制逻辑算法，自动驱动继电器模块控制水泵的启停。该功能确保了作物在无人值守的情况下也能获得适时、适量的水分供给。

(2) 系统实现了闭环感应与自适应调节，构建了一个以土壤湿度实时反馈为核心的闭环控制系统。实现灌溉频率与灌溉量的自适应调节，土壤湿度维持在适宜范围。

(3) 本地化远程监控与交互，用户可通过手机 APP，对灌溉系统进行全方位的监控与操控。该功能不仅允许用户实时远程查看土壤湿度、温度等关键环境参数，还支持远程设置灌溉阈值上下限、手动开关水泵等，极大地提升了灌溉管理的便利性与灵活性。

相较于大型农田灌溉系统所需的栅格传感器与云平台架构，系统以不到其十分之一的硬件成本，实现了同等水平的湿度维持精度与节水率，证明了针对特定场景做减法同样可以产出有意义的工程贡献，与现有的智能灌溉系统相比，采用了模块化架构，具有显著的差异化优势，成本低廉，经济性好，易于部署与维护，适合家庭庭院、社区菜园、小型温室等应用场景。

参考文献

- [1] 杨春曦, 刘华, 谢可心, 等. 便携式土壤湿度检测装置用于精准灌溉决策系统[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 84-91.
- [2] 牟玉娟. 我国农业节水灌溉现状与发展趋势[J]. 山东农业科学, 2014(1): 124-126.
- [3] 缪佩, 祝雪妹. 基于阶跃响应的 FOPDT 参数估计新方法[J]. 自动化与信息工程, 2013, 34(2): 23-27.
- [4] 屠国青. 农业智能灌溉系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.
- [5] 赵彦琳, 张宇峰, 张敬博. 基于物联网技术的农业智能灌溉系统探究[J]. 现代农村科技, 2024(12): 73-74.
- [6] 张伟, 宋梓源, 王明茜. 基于 STM32 智能灌溉系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(9): 205-209.
- [7] 杨明川, 刘怀强, 孙长平. 基于 STM32 单片机的智能大棚监控系统设计[J]. 自动化应用, 2024, 65(22): 173-176.
- [8] 邢孔尧. 物联网技术在农业智能灌溉系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2023, 40(7): 356-357.
- [9] 李颜鑫, 刘畅, 祝宇晴, 陶雨露. 基于单片机的智能开关系统设计[J]. 数字技术与应用, 2020, 38(4): 14-15.