

智能水肥联控自动灌溉系统

张慧茹¹, 冯 娜^{1*}, 耿星亨¹, 刘思怡¹, 梁钰琦¹, 王晨曦¹

(1.山西工学院电力工程学院, 山西省朔州市, 036000; *通讯作者, 541172282@qq.com)

摘 要: 随着全球农业现代化加速推进, 农业生产对能源和资源的需求不断攀升, 智慧农业作为一种高效, 可持续的发展模式, 正成为全球关注的焦点。而现有水肥控制系统缺乏自动化管理, 无法依据土壤特性自动灌溉, 存在上手难度高、自动化程度低、水肥浪费严重等问题。本团队基于现有水肥灌溉系统, 结合无线通讯技术、传感器技术及自动控制技术, 设计出一套能根据土壤温度、湿度、pH 值等情况实现水肥自动灌溉的控制系统, 旨在提高水资源和化肥资源利用率, 减少环境污染, 节约劳动成本, 助力农业可持续发展, 推动农业向智能化、绿色化转型, 实现“能效提升、绿色能源”目标。

关键词: 节能减排; 水肥联控; 自动灌溉系统; 智能控制

引言

农业水肥高效利用已成为我国可持续发展的重要课题。数据显示, 2022 年我国农业用水占比达 63%, 但灌溉效率长期偏低, 传统技术存在自动化不足、资源浪费严重等问题, 导致生产成本上升及环境污染。

在水肥联控灌溉系统研究领域, 国外技术发展较为成熟, 以色列作为全球水肥一体化技术的领跑者, 其技术覆盖全国约 80% 的耕地, 综合效率超 90%[1]; 荷兰在通过灌溉系统实现水肥直达作物根系的技术上取得显著进展, 并结合当地土壤特性研发了适配的水肥一体化系统[2]; Jia[3]等人研制了茶园水肥灌溉系统, 以保证茶叶的稳产、优质和适宜的灌溉施肥; 近年来, 中国在该领域也取得了显著进展, 如毛峙文等人[4]通过智能控制技术、计算机网络技术结合传感器网络, 实现对土壤物理属性和天气参数的实时数据采集, 结合农作物不同生长阶段的生理需求和营养特性, 进行灌溉控制的智能决策, 实现精准灌溉; 汤春球等人[5]设计了一种基于模糊 PID 控制的水肥灌溉系统, 实时采集土壤湿度、肥料浓度, 根据理想值配置合适浓度的水肥溶液, 将土壤湿度与肥力控制在目标范围内。然而, 中国水肥一体化技术与国外先进水平相比仍存在差距和挑战。

当前智能水肥系统研究主要不足在于缺乏基于土壤特性的精准调控和根据土壤环境参数直接自动灌溉。针对此问题, 本研究集成无线通讯、传感器网络和自动控制技术, 开发出可实时监测土壤温湿度、pH 值的水肥联控系统。创新性地引入动态反馈机制, 通过闭环控制实现灌溉量精准调节, 有效解决了传统灌溉中均匀性差、资源利用率低的问题。

当前科技领域呈现持续创新态势, 智能技术应用正加速向制造产业、国防体系等专业领域延伸拓展, 同时更深度融入民众衣食住行等生活场景。随着物联网、人工智能等技术的深度融合, 智能化系统正加速重构农业生产模式。机械的智能化也得到了广大国民的青睐, 该系统不仅可降低人工成本, 还提升水肥利用效率, 为农业智能化转型提供了可行解决方案。

1 总体设计

1.1 系统设计方案

1.1.1 系统设计

本设计将水肥联控自动灌溉系统分为控制系统[6]、监测系统、网络传输系统、反馈系统、数据中心五个子系统。监测系统实时采集土壤、空气及水肥参数，经 WiFi 网络传输至数据中心存储分析；控制系统调取数据生成灌溉指令，驱动继电器等执行机构精准作业；反馈系统通过传感器追踪执行效果，将动态数据回传至客户端重新计算优化策略，形成“感知-决策-执行-验证”闭环控制。全链路依托无线网络实现数据互通与远程调控，最终达成节水节肥、提升效率的智能化目标。如图 1 所示。

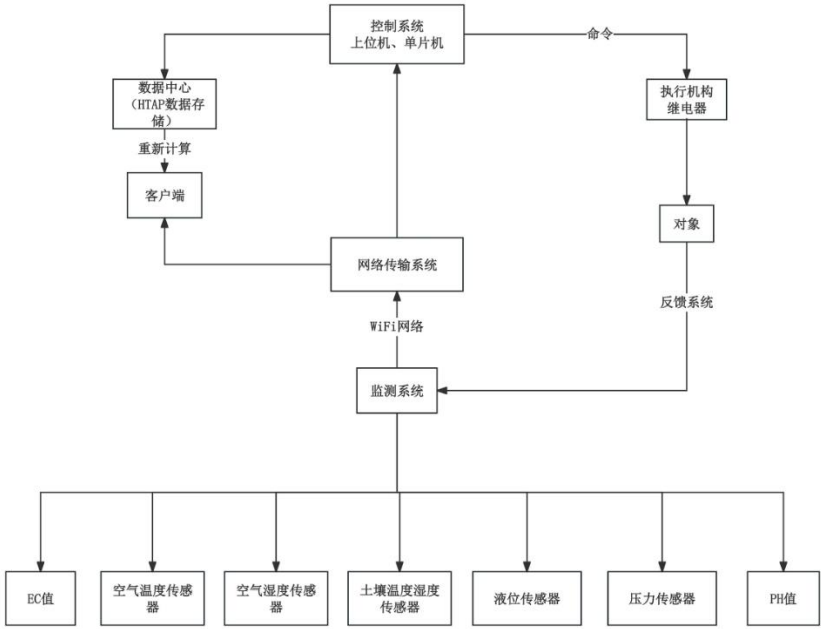


图 1 智能水肥联控自动灌溉系统

1.1.2 控制系统

控制系统以核心控制单元为主导，由上位机和单片机协同工作，配合其他系统运算；上位机与单片机控制器连接，其中安装数据处理软件，用于接收其他系统的数据，分析得到处理结果，以指令的形式传递至反馈系统，整个水肥联控系统基于控制系统来实行灌溉。实现对生产过程的实时控制，团队采用编程语言精确控制自动灌溉的要求。如图 2 为控制系统结构图。

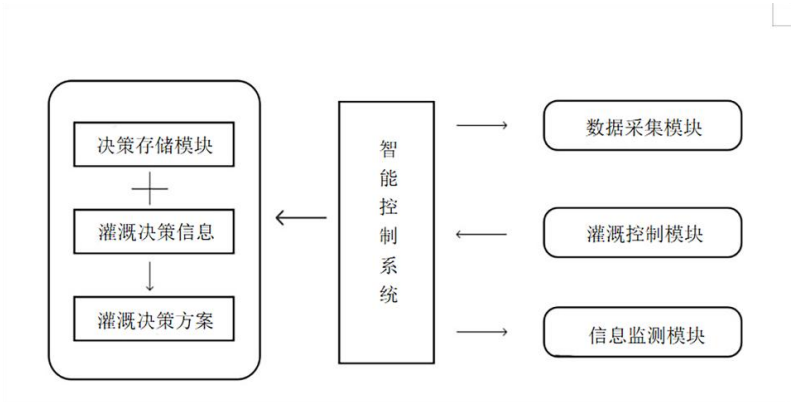


图 2 灌溉系统结构图

1.1.3 监测系统

监测系统用于实时监测环境状态，由土壤温度、湿度、PH 值传感器、空气 温度传感器、空气湿度传感器和土壤导电率（EC 值）传感器等组成，收集实时数据并发送到控制

系统的上位机端。例如，将模拟输出（AO）端接在 AD 模块上，通过单片机控制可得到输出电压，通过电压和湿度的对应关系可得到湿度具体值，如图 3 所示。

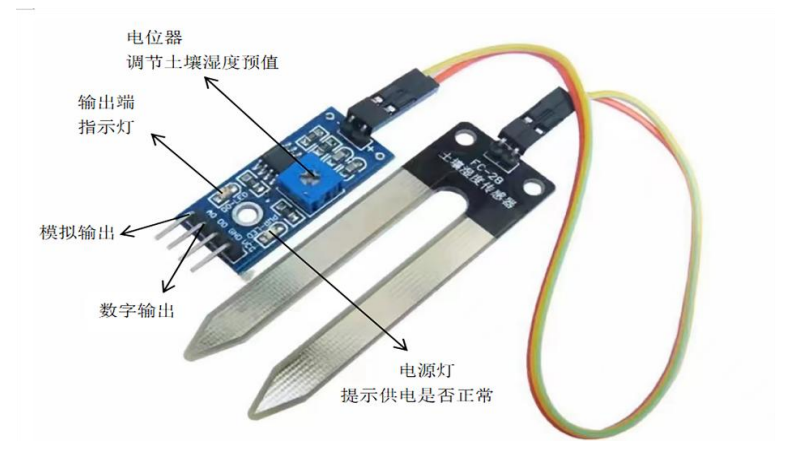


图 3 土壤湿度传感器模块

1.1.4 网络传输系统

网络传输系统采用无线网络传输技术，用于数据的传输。可以将监测系统收集到的实时数据用无线网络更快速高效的传输到控制系统的上位机。采用 WiFi 通讯技术，用户端安装数据处理软件，客户可接收数据，实现远程监控。

1.1.5 反馈系统

反馈系统基于控制系统对数据的计算分析，智能判断土壤状态，决策是否需要水肥后，传输至控制器，直接进行灌溉。根据 LM393 模块，如果实际值 > 预值则输出 0 电平，如果实际值 < 预值则输出 1 电平，DO 输出为开关指示灯亮，传感器输出端与继电器相连，当继电器输入低电平，反馈形成，实现精准自动化农业管理。如图 4 所示。

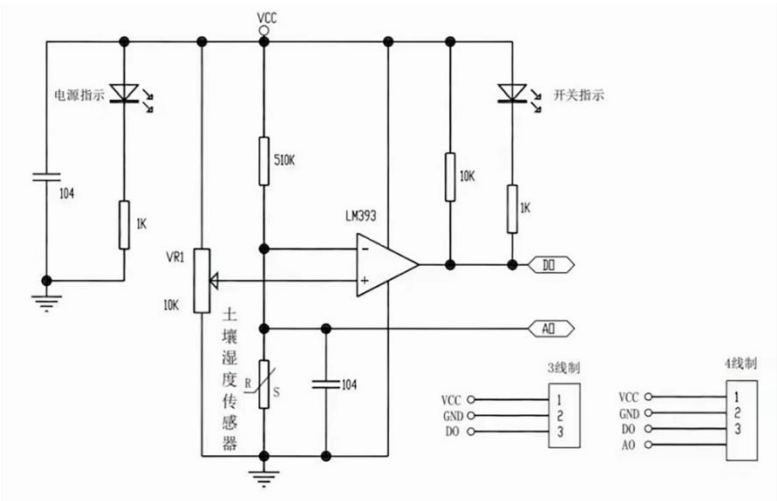


图 4 土壤湿度传感器传感器模块

1.1.6 数据中心

数据收集中心采取混合事务和分析处理（HTAP）[7]数据储存的方式，确保数据的持久性储存，并通过数据重复计算，分析作物生长习性。

1.2 系统硬件设计

本系统通过集成化设计研制出试验装置，其核心架构以 AT89C51 微控制器为主控单元，硬件配置包含 YL-69 型土壤水分传感器、光敏式环境光强检测组件、LCD1602 液晶显示屏模块及参数设置按键组。系统具备三重智能化控制特性：

环境响应模式：通过 YL-69 传感器实时监测土壤含水率，经微处理器进行阈值比对后，通过继电器模块对水泵供电回路实施通断管理，实现基于实时数据的自动灌溉；

时序控制模式：基于微控制器的定时控制机制，可预设特定时段执行精准灌溉操作；

光照联动模式：特别设计了光敏监测电路，当系统处于光照环境时方激活湿度检测功能，若土壤湿度低于预设值即启动灌溉；而在无光照条件下，即使检测到湿度不足，系统仍保持休眠状态以确保夜间节电运行。各运行参数均通过 LCD 模块进行可视化呈现，用户可通过操作面板进行阈值设定与模式切换。

1.2.1 系统电路图

此模拟系统主要由 5 个电路组建而成，分别为：YL-69 土壤湿度检测电路、继电器控制水泵电路、按键设置电路、光亮度检测电路、及 ESP8266WiFi 模块电路。系统原理图如图 5 所示。

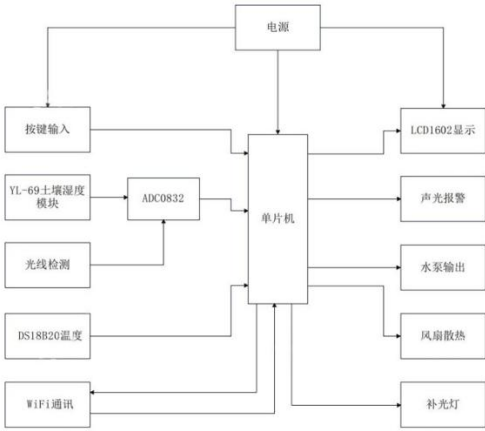


图 5 模拟系统原理图

1.2.2 YL-69 土壤湿度传感器

本装置采用的 YL-69 属于基础型土壤湿度检测装置，其工作原理基于介质变化引起电容值改变的物理特性。当传感器接触区域含水率变化时，镀膜介质层介电常数随之改变，引发传感器极板间电容值线性变化，该电容量与土壤湿度呈现正相关特性。传感器表面采用复合镀层工艺，通过镍基覆盖层增强电荷传导效率，同时提升抗腐蚀性能。系统通过可调式电位器设定湿度临界范围，当检测值低于预设下限时，数字输出端（DO）产生 3.3V 有效信号；当检测值超出设定上限时，DO 端则保持 0V 无效状态。硬件架构中，供电单元采用 5V 直流电源输入，接地端接至系统数字地，DO 端口与微控制器 I/O 口直连形成开关量信号传输通道。如图 6 电路原理所示，检测单元 k1 对应 YL-69 传感探头，其数字接口采用高低电平逻辑（0/1）输出模式，配合单片机实现湿度状态的二值化判断。电路原理图如图 6 所示，k1 是 YL-69 探头。

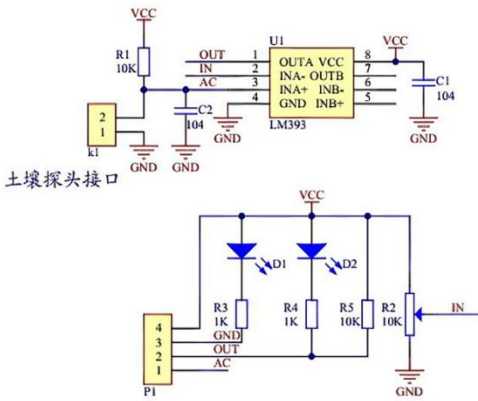


图 6 YL-69 与 AD 转化电路

1.2.3 SRS-05VDC-SL 继电器

本系统采用电磁继电器作为核心控制组件，其本质属于机电转换装置，能够将连续变化的电信号转换为离散开关动作。该器件通过预设阈值实现非线性响应特性：当输入量超越临界值时，执行机构触发电路状态跃变，形成"全通"或"全断"的多元控制效果。其核心优势在于通过低功率控制信号（毫安级）实现大电流负载（安培级）的智能管理，同时建立安全防护机制，有效抑制过压冲击对敏感元件的损害。

所选电磁继电器的基础构造包含励磁线圈、导磁铁芯、动衔铁及接触簧片等核心组件。工作原理依托电磁感应定律实现能量转换：线圈通电后产生交变磁场，通过铁芯磁路增强作用于衔铁，将电能与机械能的耦合转换为触点位移，从而建立主电路通断状态的精确控制。这种机电一体化设计既保持了电路隔离特性，又具备快速响应的操作性能。

图7中Q2PNP型三级管的b基级低电位时，三极管导通，继电器掌管K1单刀双掷开关向右边偏离，电机M水泵通电，水泵开始运行。

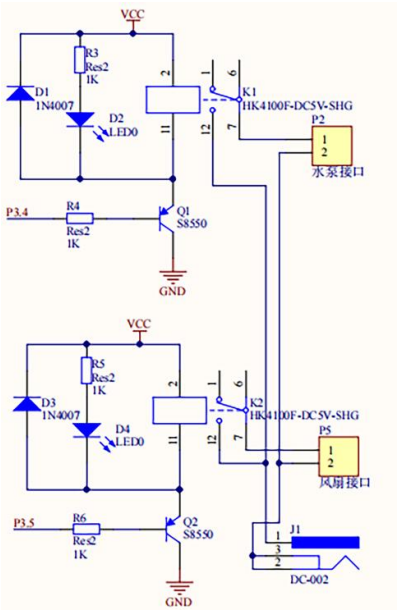


图7 继电器控制电路

1.2.4 按键电路

因本系统设计定时电路，需要用按键进行设置，所以加入按键模块按键：按键设计如图8所示。S1是模式选择键、S2是阈值加键、S3是阈值减键、S4是退出键。

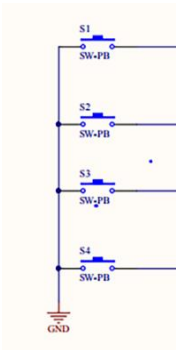


图8 按键电路

1.2.5 光敏电阻及其控制电路

本装置选用的光敏电阻属于典型光敏半导体器件，其核心功能在于实现光-电信号的线性转换。该元件在光电工程领域常称为光导管或光电导元件，其核心特性表现为可变电阻效应：材料内部载流子浓度随入射光子能量变化而产生规律性波动，进而引发电性能的显著改变。具体表现为阻值特性呈现显著的光致衰减效

应：照度增强时导电率呈指数级提升，本征电阻则呈反比例下降趋势，二者构成严格的光强-阻值负相关函数关系。

在系统架构中,该光敏检测模块与土壤湿度传感单元构成并联监测架构,形成复合式环境参数采集网络。这种并联设计不仅实现了光强与湿度参数的同步采集,更通过电路耦合特性构建了光敏条件对湿度检测的逻辑约束机制,确保系统仅在光照条件达标时激活湿度响应功能,从而优化了能源利用效率。其工作参数通过分压电路转换为模拟电压信号,经AD转换模块输入微控制器进行数字化处理。电路图如图9所示。

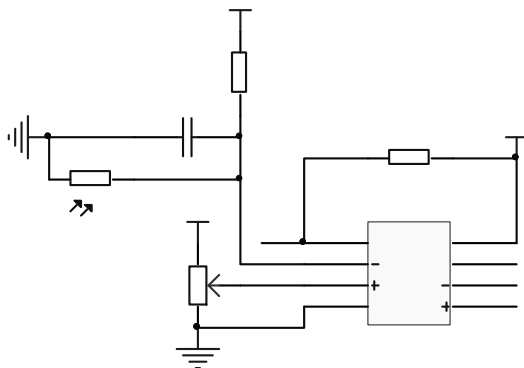


图 9 光敏电阻电路图

1.2.6 ESP8266WiFi 模块

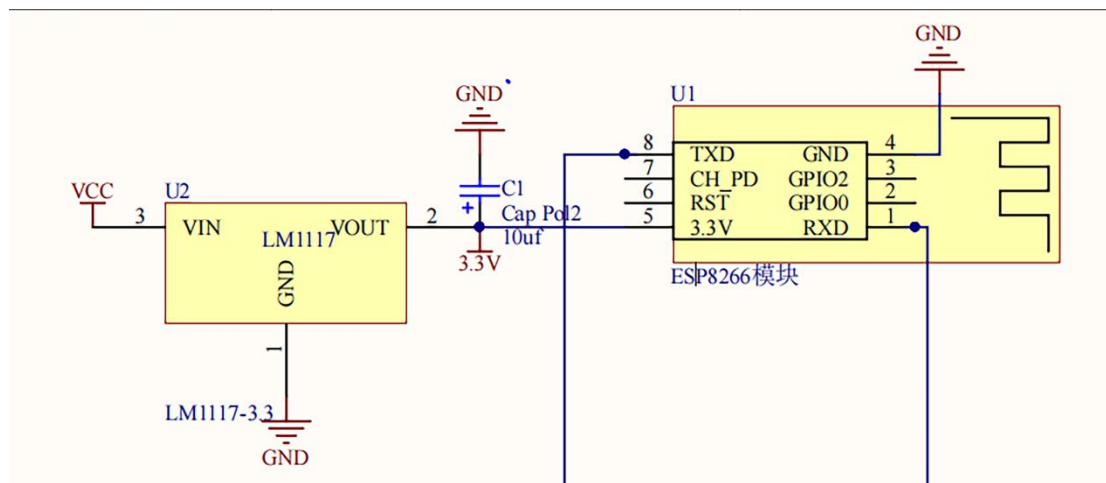


图 10 ESP8266WiFi 模块电路图

样机采用的是 lm1117-3.3V 的一个三端稳压芯片给 ESP8266[8]做供电 c1 电容,主要作用是稳定电源,防止电源波动,因为 ESP8266 在使用的过程中用电量是比较大的,如图 10 所示。ESP8266 是一款高性价比的 WiFi 芯片,基于 32 位 Tensilica L106 处理器(最高 160 MHz),集成 802.11 b/g/n 无线通信、GPIO、ADC 及多种通信接口(如 SPI/I²C),支持 Station、SoftAP 及混合模式,适用于物联网(IoT)场景。其通过 Arduino、ESP-IDF 或 AT 指令开发,可运行 TCP/UDP、HTTP、MQTT 等协议,并具备 WPA2/3 加密与 OTA 升级功能,但受限于内存资源(64 KB 指令 RAM)和 2.4 GHz 频段干扰。

1.3 软件设计

1.3.1 湿度传感器

使用 Arduino 控制器来做土壤湿度测试，Arduino 内部自带 10 位 AD 采样电路，程序简单，使用非常方便。

```
/* # Example code for the moisture sensor
# Editor      : Lauren
# Date        : 13.01.2012
# Version     : 1.0
# Connect the sensor to the A0(Analog 0) pin on the Arduino board
# the sensor value description
# 0 ~300      dry soil
# 300~700     humid soil
# 700~950     in water
*/
void setup(){
    Serial.begin(57600);
}
void loop(){
    Serial.print("Moisture Sensor Value:");
    Serial.println(analogRead(0));
    delay(100);
}
```

传感器连接至 A0 模拟引脚，通过 `analogRead(0)` 读取数据（0~950 对应干燥至浸水状态），串口以 57600 波特率每秒 10 次输出“Moisture Sensor Value: 数值”。代码结构分为初始化串口（`setup`）和循环读取数据（`loop`），可扩展为自动灌溉系统——通过判断阈值（如低于 300 触发浇水），结合延时控制（`delay(100)`）平衡数据刷新频率，为植物养护或农业智能化提供基础数据支持。

1.3.2 设置湿度上下限程序

```
void display4(void)//浇花湿度设置
{
    T0_num++;
    if(T0_num==254)
        T0_num=0;
    lcd1602_write_character(0,1," Set water num");    //初始化显示的文字
    if(T0_num%2==0)    //偶数次显示
    {
        LCD_disp_char(9,2,ASCII[guangai_num/10]);    //
        LCD_disp_char(10,2,ASCII[guangai_num%10]);
    }
    //    Delay_ms(1);
}
else
```

```
{  
    LCD_disp_char(9,2,ASCII[guangai_num/10]);  
    LCD_disp_char(10,2,ASCII[guangai_num%10]);  
}  
}
```

当用户通过按键进入“浇水湿度设置”模式时，T0_num 控制数值闪烁，提示用户正在编辑该参数。按下“增加/减小”键调整 guangai_num，LCD 实时更新显示。保存设定值后，系统根据土壤湿度自动控制水泵。但是，为了实现精细化农业管理，需要依据作物品种特性及生育期差异对营养液的 pH 指标与离子浓度进行动态配比。采用模糊 PID 控制器通过经验规则实现基础调控[9]。

1.3.3 ESP8266

首先网络初始化。

```
// ESP32 示例：连接 WiFi#include <WiFi.h>void setup() {  
    WiFi.begin("SSID", "Password");  
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {  
        delay(500);  
        Serial.print(".");  
    }  
    Serial.println("Connected to WiFi");}
```

ESP8266EX 作为高集成度 WiFi 模组芯片，具备全协议栈无线通信解决方案特性，其架构设计支持双模运行机制：既可作为独立运行的嵌入式智能终端，也可作为协处理器与主控单元构成主从式系统。在自主运行模式下，该芯片可直接通过外部 SPI Flash 存储器实现固件加载与程序执行，无需依赖外部处理器的指令调度。其创新性存储器架构整合了高速指令缓存系统，通过动态数据预读取机制有效提升指令吞吐效率，该设计不仅优化了实时响应性能，更显著降低了系统对物理存储资源的需求，实现存储空间利用效率与运算效能的双重提升。其无线网络模式为 station/softAP/SoftAP+station。

2 仿真与调试

本装置构建了智能化闭环灌溉控制系统，可实现无人值守的自动化农业灌溉作业。系统采用多模态灌溉策略：首先通过土壤-光强复合传感网络实时采集环境参数，主控单元（MCU）依据预设湿度阈值范围与光照强度阈值进行动态决策，其系统具体状态监测如表 1 所示。当检测到土壤含水量低于设定下限且光照条件满足激活要求时，控制模块驱动电磁继电器开启水泵执行灌溉作业；待土壤含水率恢复至安全阈值上限，系统自动切断动力电源终止灌溉。本实验主要完成以下几个功能：

- (1) LCD1602 液晶显示器，显示当前测量湿度，环境温度值,光线值和相应设定值。
- (2) 可通过按键设置报警值上限和下限，手动模式和自动模式，温度设置，湿度设置和光照强度设置。
- (3) 在手动模式下只能通过按键启动和关闭样机，自动模式下检测到水位小于下限值则打开水泵。
- (4) 当水泵加水量到达设定的上限值时则停止加水，并且在加水过程中声光报警。
- (5) 土壤湿度值由 YL-69 传感器通过 ADC0832 数模转换后传输至单片机。
- (6) DS18B20 检测环境温度，当高于设定值时将自动打开风扇降温,降到设定温度时停止。

- (7) 当光线值小于设定值时会自动打开灯光，在手动模式下通过按键开关。
- (8) 通过光敏电阻的变输入给 ADC0832 转换进行显示光线值的大小。
- (9) 使用 ESP8266WiFi 模块连接手机 app 进行相应的控制。
- (10) 样机所有的数据和开关状态均会传输至 app 进行实时显示。
- (11) 样机总共 4 个按键：设置、增加(开关水)、 减小(开关风)、退出(自动手动切换)。按键功能如表 2 所示。

表 1 自动灌溉系统状态监测表

参数/功能	当前测量值	设定值	状态/动作	报警状态
土壤湿度	450 (干燥)	上限:700, 下限:300	水泵: 关闭	正常
环境温度	28° C	报警值:30° C	风扇: 关闭	正常
光线强度	200 lx	报警下限:150 lx	灯光: 关闭	正常
系统模式	自动模式	手动/自动切换	-	-
水泵控制	-	-	自动: 水位<300 时启动	加水: 声光报警
风扇控制	-	-	温度>30° C 时启动	超温报警: 声光
灯光控制	-	-	光线<150 lx 自动开启	光线不足报警: 声光
WiFi 连接状态	已连接	-	ESP8266 在线	-

表 2 按键功能对应操作

按键	功能
设置	进入参数设置（切换湿度/温度/光线报警值）
增加(开关水)	手动模式下：启停水泵；自动模式下：调节设定值上限
减小(开关风)	手动模式下：启停风扇；自动模式下：调节设定值下限
退出	切换自动/手动模式；退出设置菜单

3 总结

在全球化和工业化的推动下，地球能源需求的快速增长，节水已成为全球共同关注的焦点。针对我国传统水肥灌溉技术在应用中普遍存在自动化技术相对滞后，水肥浪费严重的问题，本团队基于已有的水肥灌溉系统为基础，借助于无线通讯技术、传感器技术及自动控制技术等现代技术设计出可以根据土壤参数，环境参数结合农作物生长各阶段对水肥的具体需求比例等情况实现对水肥自动灌溉的控制系统，能够实现在无人工干预的情况下，精准地将作物所需水分和养分自动输送至作物根系附近土壤的功能。

而样机利用单片机控制系统对各部分进行控制，使其浇灌模块能够正常运作。此样机系统分为两个部分，一是通过检测土壤湿度数据并在 LCD1602 上进行显示，二是通过系统分析对灌溉进行控制。土壤湿度测量的模块为 YL-69，其主要的作用是将测量的湿度信息传递至单片机的系统内部，同时利用单片机的处理将 I/O 传递至 LCD 屏幕上。LCD 上显示的值是土壤的含水值，这是判断是否灌溉的数值。程序的控制部分由自动灌溉部分组成，而系统的监察部分则是由土壤湿度处理组成，整个系统为智能化的自动运行。单片机还可以手动输入设定时间，时间会通过 LCD1602 进行显示，通过程序设计浇灌开始及浇灌结束时间。

该项目的实施不仅提高资源利用率，降低生产成本，为作物生长提供稳定环境；还减少因水资源分配不均产生的社会矛盾，促进新就业形态的发展；更重要的是，提升了农业现代化水平，增强农产品国际竞争力，保障粮食安全。将助力国家生态环境保护战略实施，推动可持续发展。

基金项目

2024 年省级大学生创新创业计划项目（S202413534012）

参考文献

- [1] SHAKSHI M. Effect of different irrigation and fertigation schedules on growth and productivity of Red Velox apple in Northwestern Himalayan region[J]. Journal of Plant Nutrition, 2024, 47(6): 999-1010.
- [2] BGY, DINESH M K. Water and Fertilizer Use Efficiency in Aerobic Rice as Influenced by Fertigation Schedules[J]. International Journal of Farm Sciences, 2022, 12(3): 14-20.
- [3] JIA X, HUANG Y, WANG Y, et, al. Research on water and fertilizer irrigation system of tea plantation [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(3): 1550147719840182-1550147719840182.
- [4] 王宁璐, 毛峙文, 童佳妮. 水肥气灌溉智能控制技术研究[J]. 智慧农业导刊, 2024, 4(7): 13-16. DOI: 10.20028/j.zhnydk.2024.07.004.
- [5] 汤春球, 刘凤来, 余自良. 基于模糊 PID 的水肥一体化灌溉控制系统设计[J]. 数字制造科学, 2023, 21(4): 293-296.
- [6] 孙锋申, 马伟顺, 李合菊, 等. 多功能肥一体机设计[J]. 南方农机, 2018, 49(4): 40.
- [7] 俞融, 杨攀飞, 王清帅, 等. 数据同步机制自适应优化的 HTAP 数据库原型系统[J]. 华东师范大学学报（自然科学版）, 2023, (05): 11-25.
- [8] 张琥石, 林伟龙, 杨发柱, 等. 基于 ESP8266WiFi 模块的物联网体温监测系统[J]. 物联网技术, 2020, 10(12): 32-35. DOI: 10.16667/j.issn.2095-1302.2020.12.010.
- [9] 范文泽, 张博文, 李思怡, 等. 基于单片机的智能苗木浇水系统[J]. 吉林林业科技, 2024, 53(5): 24-28. DOI: 10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2024.05.006.