

项目报告书

项目名称：家用智能水培控制核心系统研制与应用

地区：江苏省 苏州市

学校：江苏省苏州第十中学校

作者：王梓苹 朱正强

目 录

一、前言	2
二、研究方法	3
三、技术路线	6
四、结果	39
五、讨论	44
六、结论	46
七、总结	47
八、参考资料	49

项目题目：家用智能水培控制核心系统研制与应用

作 者：王梓莘¹ 朱正强²

指导教师：张 寅 钱小敏

江苏省苏州第十中学 高二年级 12 班¹ 高二年级 11 班²

摘要：水分作为植物生长的关键要素，在传统土培模式中，蔬菜易受农药残留、重金属含量超标等问题的干扰。水培技术则以精准供水为依托，具备节水高效、安全可控等显著优势，为家庭健康蔬菜培育提供了优质的解决方案。本研究以 STM32F1 系列 ARM 作为控制核心，整合温湿度、光照等传感器以及风扇、水泵等执行机构，搭建家用智能水培系统。测试结果显示，该系统能够在家庭种植的有限条件下确保蔬菜正常生长，同时充分实现水资源的节约，兼具实用性与可扩展性，亦可作为植物培育验证平台以及中学生 STEM 教育创新教具。

Abstract: As a key factor for plant growth, water easily causes vegetables to suffer from pesticide residues and excessive heavy metal content in traditional soil cultivation. Hydroponic technology, relying on precise water supply, has obvious advantages of water saving, high efficiency and safe controllability, providing a high-quality solution for home healthy vegetable cultivation. We use the STM32F1 series ARM as the control core, to build a household intelligent hydroponic system with several sensors and actors. The results indicate that the system meets the design expectations. The growth status of the cabbages in the experimental groups is better than that in the control groups. The hydroponic system can be used as a plant cultivation verification platform and an innovative STEM teaching aid for middle school students.

关键词：智能控制、嵌入式系统、无土栽培

Key words:Intelligent Control, Embedded System, Hydroponics

一、前言

水，是农耕文明的根基所在。中华民族的农耕历史，始终蕴含着与水共生、珍惜并合理利用水资源的基因。治水以兴农、善用水资源，更是维系文明延续的核心要义。

然而，我国水资源先天条件欠佳，人均水资源占有量仅为全球平均水平的 28%，水资源短缺以及分布不均衡，成为制约农业现代化发展的关键瓶颈。在传统农业模式里，水资源浪费和利用效率低下的问题十分显著。如何突破水资源的约束，让每一滴水都能发挥最大效用，是新时代农业高质量发展需要解决的重要课题。

智能水培技术为解决这一困境提供了有效途径。这一以水为核心载体的种植技术，用精准配比的营养液取代土壤，借助闭环水循环系统实现水资源的高效重复利用，水分利用率提升至 90%以上，相较于传统种植方式，节水率高达 70% - 96%。这种“以水代土、循环复用”的模式，不仅解决了水资源短缺的难题，还重塑了农业生产与水资源的共生关系。

与此同时，城市空间蕴含着巨大的水资源高效利用潜力。据统计，我国城市居民人均阳台面积约 1.5 平方米，若将这类闲置区域纳入水培种植体系，依托闭环水循环技术，理论上可形成超过 10 万公顷的“隐形耕地”。家用智能水培系统正是针对这一潜力研发

的，以“极致节水、智能循环”为核心构建微型生态，最大程度提升水资源和养分的利用效率。

水培系统还成为传承水文化、普及节水理念的优质教学工具，为中小学生的劳动教育增添了鲜活内容。通过直观参与水环境调控、观察作物生长，学生们能够深刻认识到水资源的宝贵以及高效利用水资源的价值，在实践中实现 STEM 教育与节水劳动的有机结合，让珍惜水资源、节约用水的理念深入人心，为传承农耕水文化、培育绿色发展意识奠定坚实基础。

二、研究方法

2.1 方案调研

以“无土栽培”和“参数调控”为关键词，进行了论文与专利的检索，参考《智能无土栽培设备的研制》《一种温室内二氧化碳施肥控制系统及其控制方法》和《一种种植柜》等相关资料。本研究提出了家用智能水培系统的设计方案，该系统选用 STM32F1 系列 ARM 作为核心控制器，构建了一个融合多参数环境监测（温湿度、光照、pH/CO₂值）与精准水肥控制功能于一体的家用无土栽培系统。系统使用触摸屏实现人机交互，达成了作物生长环境的智能监控与调控，相较于现有技术，具备更高的集成度、更低的能耗以及更优的家用适用性。本系统的主要创新点如下：

1. 基于植物生长周期的光合优化调控设计。该设计充分考量植物在种子萌发、幼苗生长、开花结果等不同生长周期的特性，剖析各阶段对光照强度、温度等环境因素的需求差异，通过智能设备动

态调整相关参数，以实现光合效率的最大化，推动植物在各生长阶段的健康生长。

2. 基于植物根系生长模型的综合调控方案。首先构建能够反映根系在不同土壤环境、水分条件、养分状况下生长态势的模型，随后依据模型数据从多个维度进行调控。

3. 基于植物生长需求的营养液浓度智能检测调控方案。此方案利用传感器对营养液浓度的实时变化进行监测，并结合植物不同生长阶段对各类营养元素的需求量，当营养液浓度低于或高于适宜范围时，系统自动启动补液或稀释程序，确保营养液浓度始终契合植物当前的生长需求，既规避因浓度过高导致的烧根现象，又防止因浓度过低对植物生长发育造成不利影响。

2.2 方案设计

为了能兼具人机交互、智能调控的功能，我们设计了核心控制模块、环境感知模块、执行机构模块与人机交互模块四大部分。核心控制模块以 STM32F103C8T6 为主控芯片，连接触控屏实现人机交互，通过串口通讯温度、湿度、二氧化碳、三合一等一系列传感器获取环境信息，经过控制模块处理之后反映到执行机构，完成对温湿度、光照、营养液供给等执行器的精准驱动。进而形成以 10 分钟为一个周期的“感知—决策—执行”闭环控制逻辑，并存储监测的数据，为后续分析提供数据支撑。

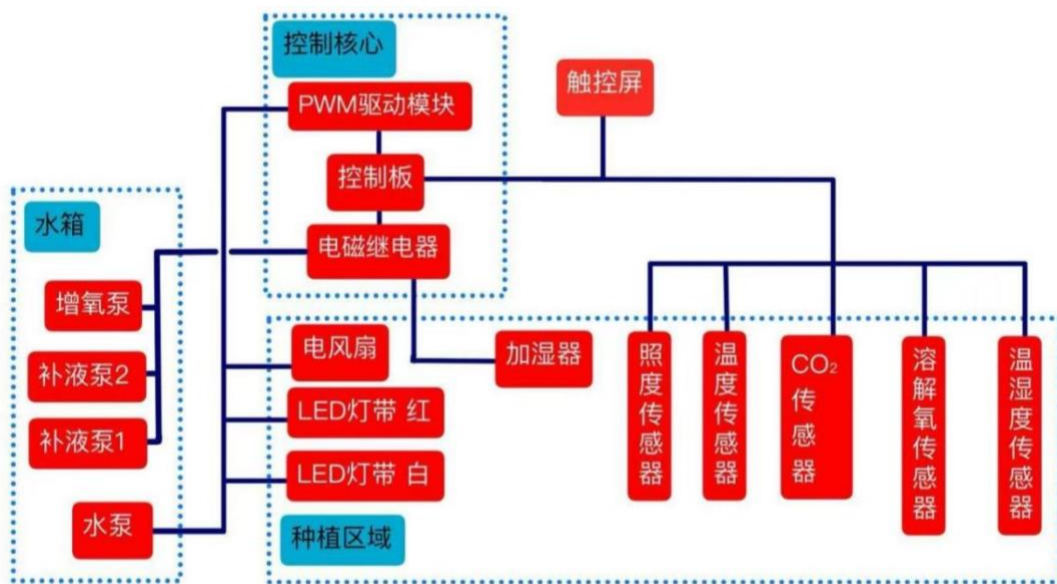


图 1：智能水体多维参数监测与调控系统硬件功能模块图

核心控制模块主要包括：控制板，PWM 驱动模块和电磁继电器等设备。控制板的功能为：运行上位机考入的程序，接收传感器传来的信息，处理后对执行机构发出指令，并反映到屏幕上；PWM 驱动模块的功能为：通过改变开关电源速度改变平均功率，达到调控水泵流速，风扇转速和灯带亮度的效果；电磁继电器的功能为：接通和断开电源，以达到开关泵体和加湿器的效果。

环境感知模块主要包括：照度传感器，温度传感器，二氧化碳传感器等设备。照度传感器的功能为：感知环境照度，提供补光依据；温度传感器的功能为：记录温度数据，以便控制风扇降低温度，并研究温度变化对植物生长影响；二氧化碳传感器的功能为：记录二氧化碳数据，以便控制风扇减低二氧化碳浓度，并研究二氧化碳变化对植物生长影响；温湿度传感器的功能为：记录湿度数据，以便控制风扇减湿，加湿器增湿；溶解氧传感器的功能是：测量水中溶解氧，以控制增氧泵开关。

执行机构模块主要包括：水泵、增氧泵、补液泵、电风扇、加湿器、LED 灯带（红、白）等设备。水泵的功能为：输送水箱内的水，为种植区域提供水源；增氧泵的功能为：向水箱内补充氧气，提升水体溶解氧含量，满足植物根系呼吸需求；补液泵的功能为：向种植系统补充营养液，维持植物生长所需的养分浓度；电风扇的功能为：调节种植区域的空气流通速度，辅助调控温度、湿度与二氧化碳浓度；加湿器的功能为：增加种植区域空气湿度，营造适宜植物生长的湿度环境；LED 灯带的功能为：提供植物生长所需的光照，红光灯带辅助促进植物开花结果，白光灯带模拟自然光照保障基础光合作用。

人机交互模块主要包括：触控屏设备。触控屏的功能为：作为用户与系统的交互界面，可实时显示各类传感器采集的环境数据（如照度、温度、二氧化碳浓度等）和执行机构的运行状态；同时支持用户手动输入控制指令，调整系统参数，例如设置目标温湿度、光照强度阈值，或直接控制执行机构的启停，实现对种植环境的精准干预与可视化管理。

三、技术路线

我们按照方案设计，硬件选型，模块测试与开发，整机集成与调试和系统运行与优化的步骤，对智能水培系统的研制规划了路径，具体各部分内容，详见图 2。



图 2：技术路线示意图

3.1 硬件选型

系统的硬件功能模块结构仍可参考图 2，它主要由控制板、触控屏、传感器组、直流电机驱动模块、电磁继电器模块组成。控制板负责和上位机、触控屏通讯，将传感器获得的数据实时显示，并根据指令进行对应操作；直流电机驱动模块接收控制板指令，对水泵和风扇调速；电磁继电器模块负责控制 LED 灯带、加湿器、酸碱平衡泵的开关，调节照度、湿度与 pH；传感器组负责测量水体的温度、照度、湿度、溶解氧含量、二氧化碳含量及 pH 值。

3.1.1 控制器

控制核心采用意法半导体的 STM32F103VET6 芯片，该芯片基于 Cortex-M3 内核，具有 512 KB Flash、64 KB SRAM，最高主频 72 MHz，运算速度 1.25 DMIPS/MHz。芯片集成 3 路 USART、2 路 IIC、3 路 SPI、16 通道 12-bit ADC、11 个定时器。在本系统中：USART1 实现与上位机实时通讯功能，实现设备的设置与调控；USART2 实现与 5 寸 TJC4827 触控屏交互，实现参数显示与控制的

视线；USART3 作为 RS485 总线主站，轮询 CO₂、温湿度、pH 等传感器，获取传感器的数据；使用 4 路 PWM 信号，驱动灯带、潜水泵与风扇实现无级调速；使用 GPIO 口，驱动继电器模组，实现加湿器、酸碱泵和充氧泵的开关控制。



图 3：STM32F103VET6 模块框图

3.1.2 照度传感器 GY-30

采用 GY-30 数字光模块，集成 BH1750FVI 传感器，I²C 接口，量程 1-65535 lx，分辨率 1 lx，光谱响应接近人眼，内置 50/60 Hz 光噪声抑制，可直接通过 RS485-I²C 桥接板挂接总线，用于实时监测水面光照并反馈至 MCU，实现 LED 灯带 PWM 补光。系统使用 GY-30 测定自然环境照度和调整后植物获得的光照强度信息。

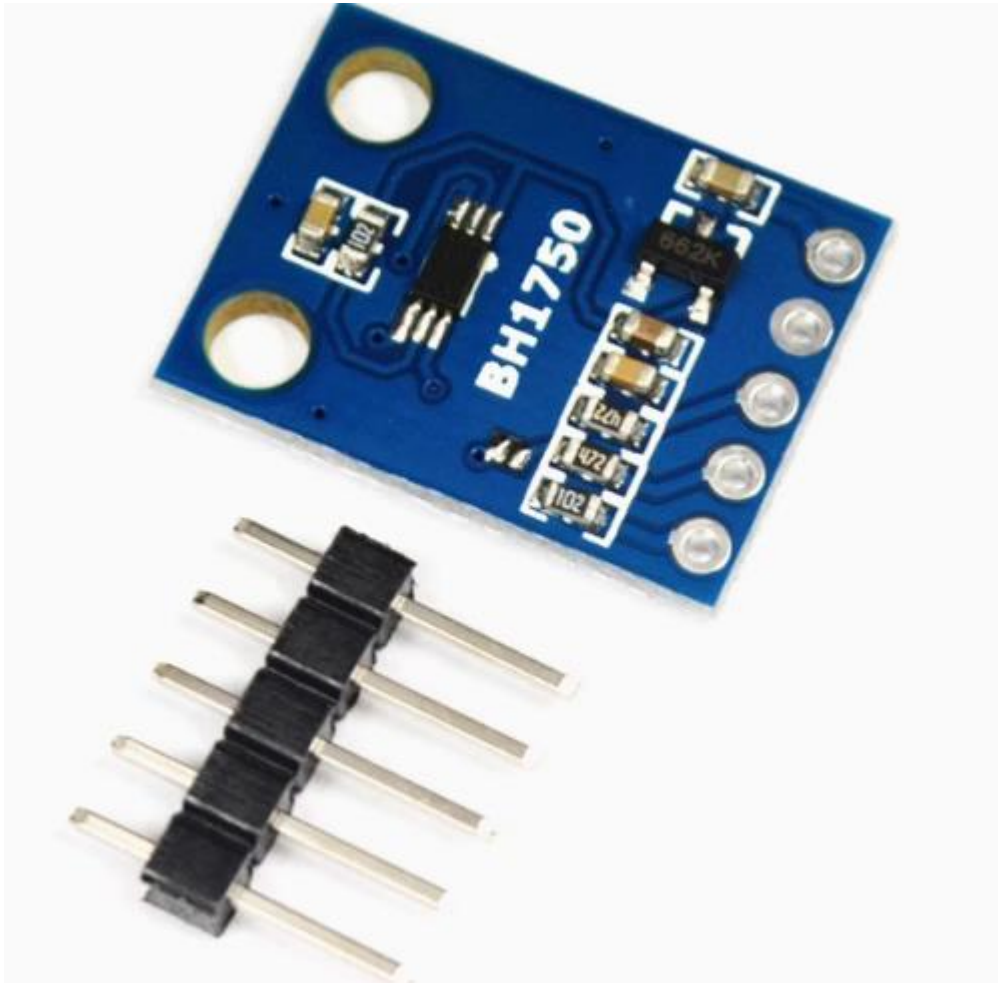


图 4: GY-30 实物图

3.1.3 温度传感器 DS18B20

选用 Maxim DS18B20 作为控制系统的内置温度传感器，DS18B20 使用的 1-Wire 总线，-55-+125 °C 量程、±0.5 °C 精度（-10-+85 °C），支持寄生供电及多点组网，用以监测控制系统工作情况，防止过热损坏。

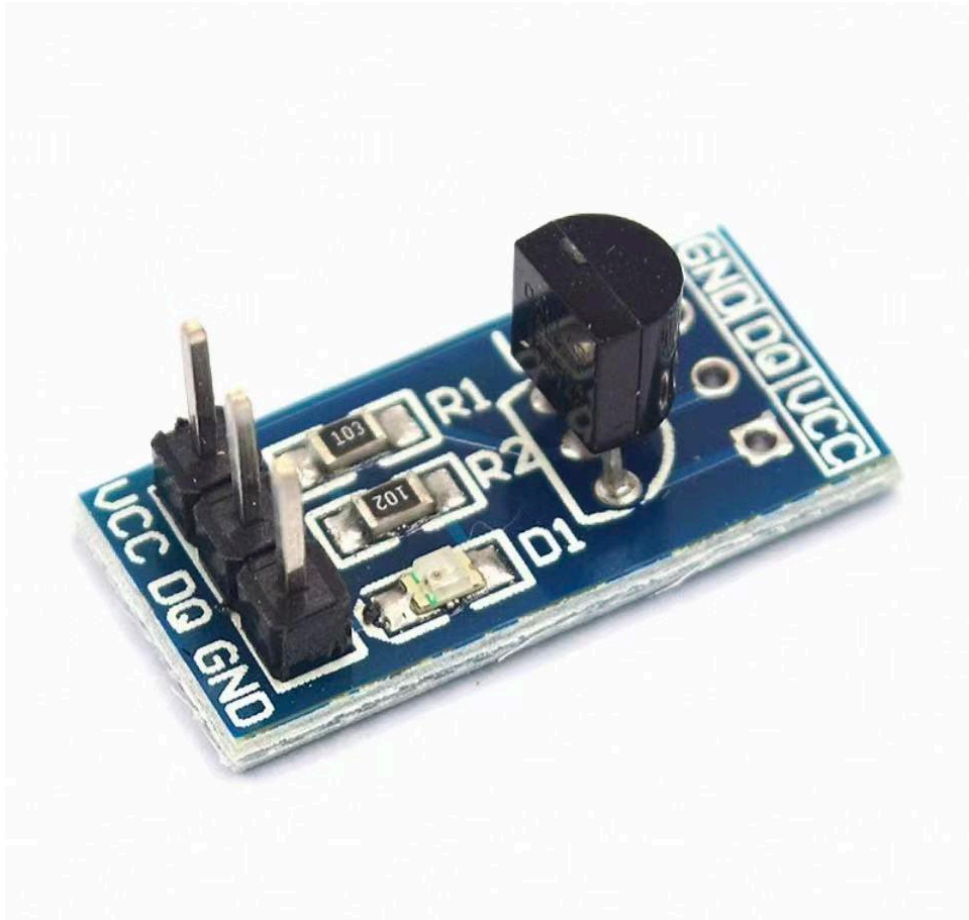


图 5: DS18B20 实物图

3.1.4 温湿度传感器 SM7820B

SM7820B 为壁挂式 RS485 温湿度探头，测量的温度范围为-30-+85 °C、精度为 ± 0.5 °C，测量的湿度范围是 5-90 %RH、精度为 ± 3 %RH，采用 Modbus-RTU 协议。在本系统中，设置其地址为 0x01，用于环境湿度监测。



图 6: SM7820B 实物图

3.1.5 塔石 CO₂ 传感器

采用塔石壁挂式 CO₂ 传感器，红外检定技术，量程 400-5000 ppm，精度 $\pm(50 \text{ ppm} + 5 \% \text{F} \cdot \text{S})$ ，响应时间 $<90 \text{ s}$ 。该传感器支持 Modbus-RTU 协议，设置其地址为 0x02，放置于水培架边，监测 CO₂ 浓度，用以推断植物生长状态。



图 7: 塔石 CO₂传感器实物图

3.1.6 开关控制驱动模块

采用 4 路继电器模组，每路最大 10 A，5 V 逻辑驱动，板载光耦隔离。四路作为开关，分别控制超声波喷雾加湿器、充氧泵和营养液补液泵的启停；



图 8：继电器模组实物图

3.1.7 LED 灯带

系统配置 6 条 LED 灯带（白光、红光各 3 条），每路通过独立的 PWM 发生器进行控制，可实现照度 0-100 %，色温 3000-8000 K 内光谱分布的调整。结合 GY-30 照度反馈，构成用于植物补光的反馈调控系统。



图 9：LED 灯带实物图

3.1.8 触控显示屏 TJC4827

采用淘晶驰 TJC4827 5 寸电容触控屏，480×272 分辨率，AIHMI T8 主控，200 MHz 主频，USART2 接口，可脱机运行脚本，实时显示各传感器曲线、报警提示，并支持手动/自动模式切换、PID 参数在线整定。



图 10: TJC4827 触控屏实物图

3.2 模块测试与开发

3.2.1 传感器测试

3.2.1.1 塔石 CO₂ 传感器

我们使用塔石科技二氧化碳传感器进行 CO₂ 浓度的测量。该传感器采用 UART 通信协议，默认波特率为 9600，数据位 8，无奇偶校验位，停止位 1 位。测试过程中，使用直流电源对传感器供电，电源电压为 5V，通过 USB 转 TTL 接口连接上位机，并运行官方提供的测试程序进行数据读取。预先制备了不同浓度的 CO₂ 气体环境，将塔石科技传感器置于相应环境中进行测量，并记录传感器反馈值。通过多次实验对比，确保该传感器能够较精准地测量 CO₂ 浓度。



图 11：塔石 CO2 传感器测试

3.2.1.2 湿度传感器

我们使用 RS485 通信协议的温湿度传感器进行温度和湿度的测量。该传感器支持 Modbus RTU 协议，默认波特率为 9600，数据位 8，无奇偶校验位，停止位 1 位。测试过程中，使用直流电源对传感器供电，电源电压为 12V，通过 USB 转 485 接口连接上位机，并运行官方测试程序“RS485_TH_Sensor_Tool_V3.0”进行数据读取。预先设置了不同温湿度的环境，将传感器置于相应环境中进行测量，并记录传感器反馈值。通过多次实验验证，确保该传感器能够较精准地测量温度和湿度。



图 12：RS485 温湿度传感器测试

3.2.1.3 DO-S20 三合一传感器

我们使用深圳九耳无限科技有限公司的 DO-S20 三合一传感器进行温度、溶氧值、溶氧比和 pH 值四项指标的测量。该传感器采用

RS485Modbus 协议，默认设置，波特率为 9600， 数据位 8，无奇偶校验位，停止位 1 位。

测试过程中，我们使用直流电源对传感器供电，电源电压 12V，使用 USB 转 485 接口，在上位机上运行 DO-S20 传感器官方的测试程序溶氧传感器测试工具 V4.2 连接传感器并进行测试，测试环境如图 13 所示。

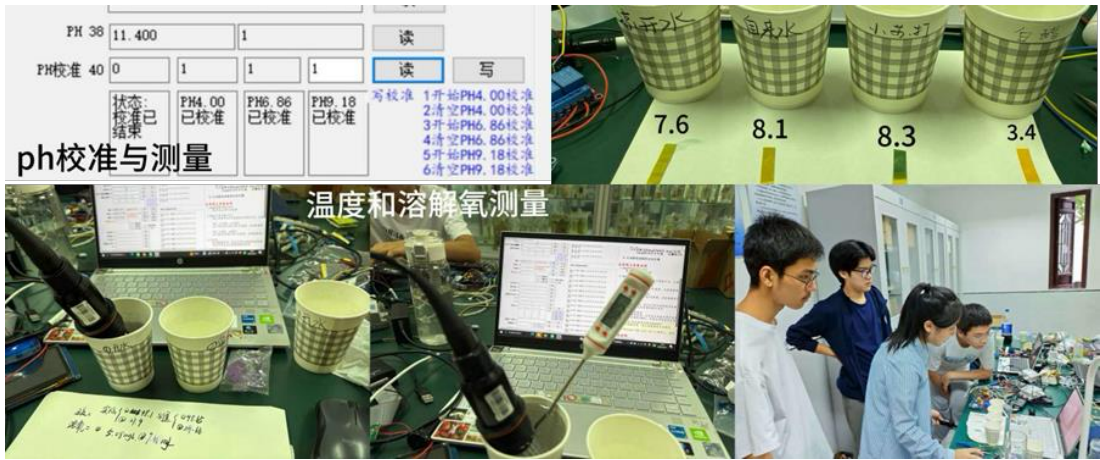


图 13: DO-S20 三合一传感器测试

预先制备了三种不同温度，不同 pH 值的溶液，先使用温度计测量水温，再使用 pH 试纸测定水体 pH 值后，在不同水体中使用传感器进行测量并读取数据，并将实际测定值与传感器反馈值进行对比，经反复实验测试后，使 DO-S20 三合一传感器可以较精准测量温度、溶氧值、溶氧比、pH 值这四项指标。

3.2.1.4 照度传感器

我们使用 BH1750 数字光照传感器进行光照强度的测量。该传感器采用 I2C 通信协议，默认地址为 0x23，支持高分辨率模式。测试过程中，使用 STM32 开发板作为主控制器，通过 I2C 接口连接 BH1750 传感器，并运行官方库函数读取光照数据。测试环境如图 14

所示。预先设置了不同光照强度的环境，将 BH1750 传感器置于相应环境中进行测量，并记录传感器反馈值。通过多次实验对比，确保 BH1750 传感器能够较精准地测量光照强度。

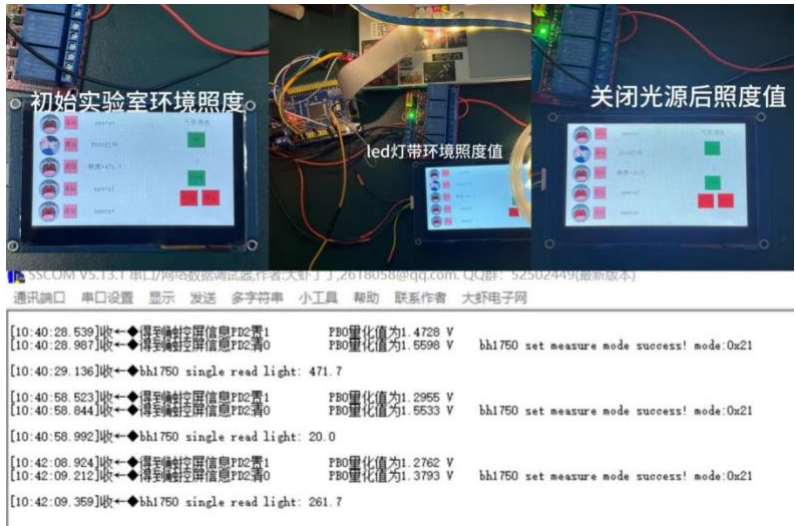


图 14: BH1750 照度传感器测试

3.2.1.5 温度传感器

我们使用 DS18B20 数字温度传感器进行温度测量。该传感器采用单总线通信协议，支持多点组网，默认分辨率为 12 位。测试过程中，使用 STM32 开发板作为主控制器，通过 I2C 接口连接 DS18B20 传感器，并运行官方库函数读取光照数据。预先设置了不同温度的环境，将 DS18B20 传感器置于相应环境中进行测量，并记录传感器反馈值。通过多次实验验证，确保 DS18B20 传感器能够较精准地测量温度。

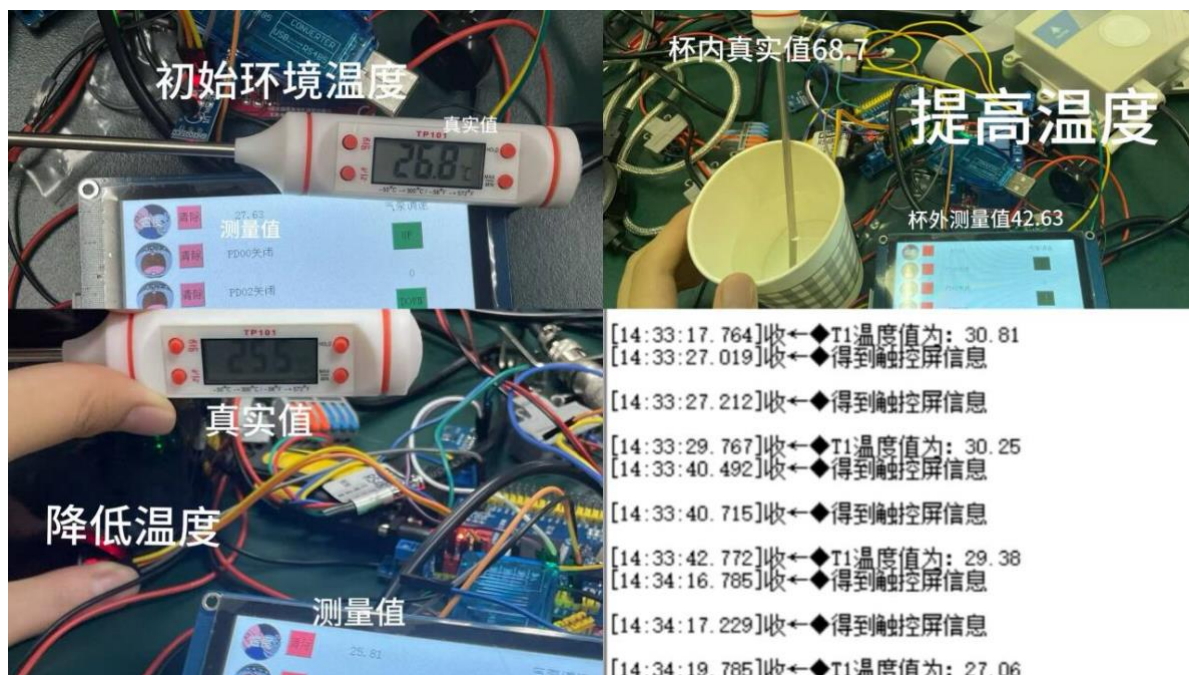


图 15: DS18B20 温度传感器测试

3.2.2 执行机构测试

传感器校准完成后，我们对系统全部执行机构进行逐项验证。上位机通过 sscome 软件发送 ASCII 指令，STM32 解析后立即驱动对应端口，并以回传方式返回当前执行状态，方便在串口调试助手实时观察结果。试验电源采用 12 V/5 V 直流源。

3.2.2.1 风扇

风扇型号为 12 V 轴流风机，由 TIM3-CH2 (PA7) 输出 PWM，经 ZK-5AD 驱动模块功率放大后供电。测试指令格式为 PWM4xxx，其中 xxx 为 000–999 的三位十进制占空比。上位机依次发送 PWM4000、PWM4400、PWM4700 和 PWM4999。测试表明，随着占空比增加，风扇转速加快，风力增强，伴随风速加大，纸张弯曲角度越来越大，弹性形变程度变大。

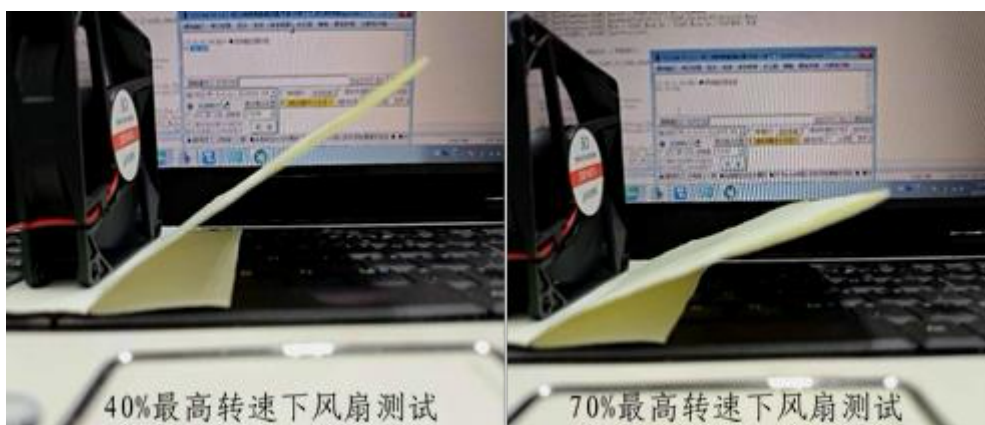


图 16： 风扇转速调整实验测试

使用风扇作为排湿工具，进行排湿测试。先在局部使用加湿器将局部湿度提高，当湿度达到 83%后。打开风扇，经 5 分钟加强换气后，区域内湿度由先前测试湿度传感器的 83%降低至 72%，证明加强通风有降低湿度的效果。



图 17： 风扇排湿实验

3.2.2.2 循环水泵

智能水培系统的循环水泵为潜水泵，其为 12 V/5 W 直流无刷泵，由 TIM3-CH1 (PA6) PWM 经 ZK-5AD 驱动模块实现驱动，最大持续电流 0.42 A。测试指令格式为 PWM3xxx。水泵调速实验在水槽中进行，通过观察水柱高度确认循环水量的改变。实验时，我们将驱动水泵的 PWM 信号的占空比从 0.00 增加到 0.99，水柱高度显著增加，连续运行 30 min 无异常，证明潜水泵调速可靠。

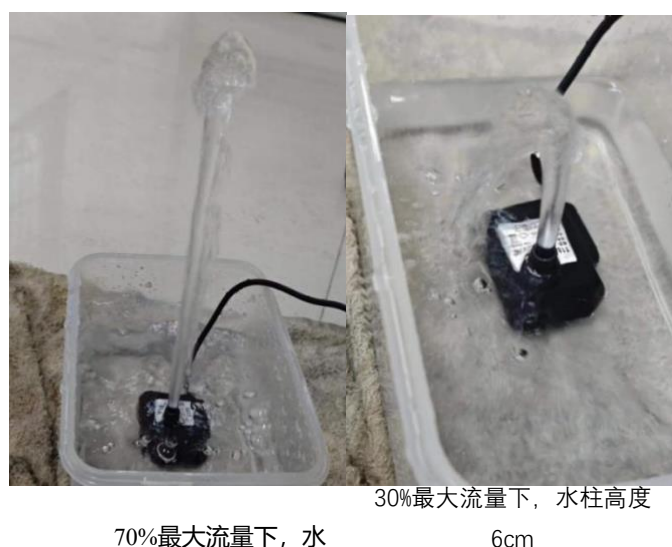


图 18: 循环水泵调速实验出水高度变化图

3.2.2.3 增氧泵

增氧泵采用 12V 柱塞泵，由开关调控，PE02 信号通过高低电平控制 AOD4184 电磁继电器的通断，实现对增氧的开关控制。测试指令格式为 PE02ON/OFF，增氧泵开启时可以看到均匀气泡出现



图 19: 增氧泵开关试验

3.2.2.4 补光灯

系统配置白光、红光 LED 灯带各 5 m，额定 5 V/25 W，使用 PWM 信号分别独立调光，使用 GY-30 作为照度反馈。实验测试时，使用 PWM1 和 PWM2 信号，能够实现占空比的调整，肉眼可见灯带的亮度发生变化。使用 GY-30 作为照度反馈，在 PWM1400，PWM2400 时，GY-30 得到照度值为 455；在 PWM1700，PWM2700，GY-30 得到照度值为 768；与照度计的测量结果接近。在调整占空比时，灯带无可见频闪，满足设计要求。



图 20： 照度调整实验

3.2.2.5 补液泵

补液泵为 5 V 隔膜气泵，最大流量 1.8 L/min，由 PE03 和 PE04 管脚控制电磁继电器对应通路的开关，使用 PE03ON/OFF 和 PE04ON/OFF 指令进行测试。实验向水液槽补充清水，计时 120 s。经测试，两台补液泵，相同泵体的一致性良好，不同泵体需要进行校准。

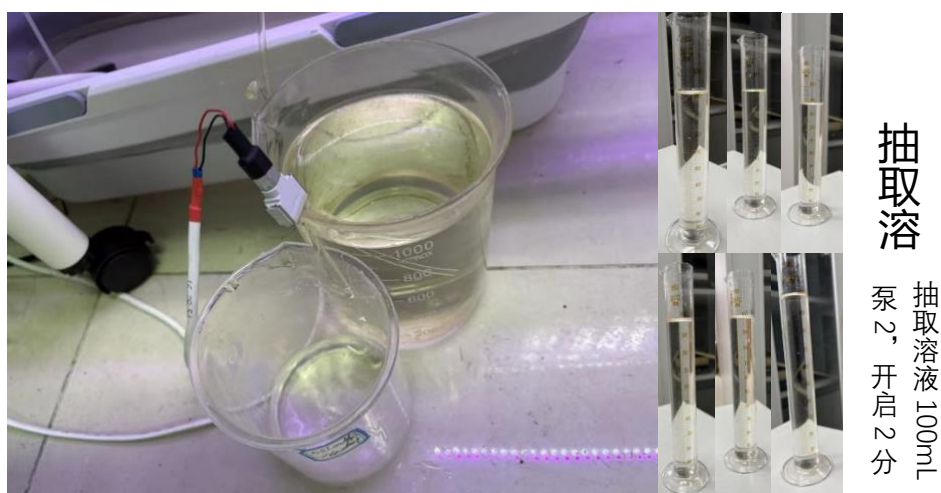


图 21： 补液泵测试

3.2.2.6 加湿器

加湿器为 5 V 超声波喷雾器，额定 5 W，由 PE01 管脚经过继电器进行控制，PE01ON / OFF。在小型密闭箱体中，使用加湿器进行加湿操作，并使用 SM7820B 检测湿度。实验结果，加湿 3 min 后湿度由 70 %RH 升至 83 %RH。

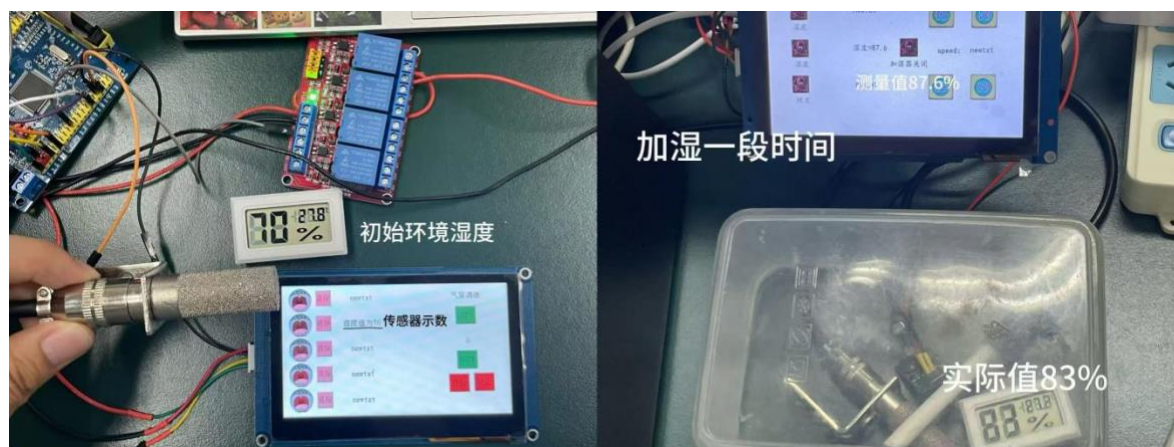
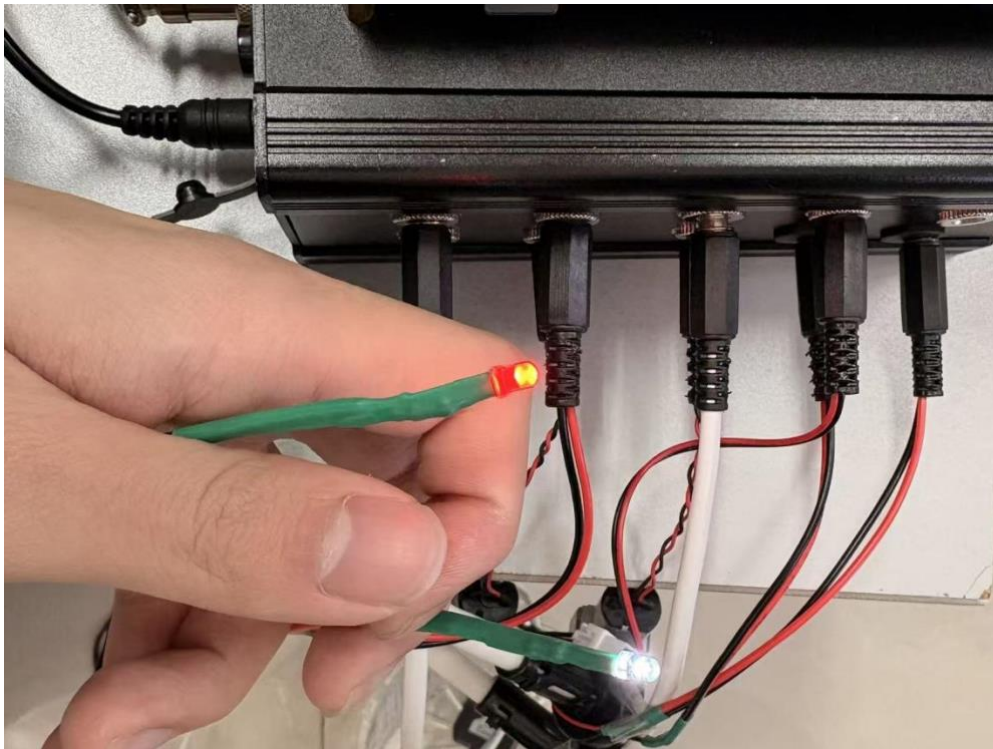
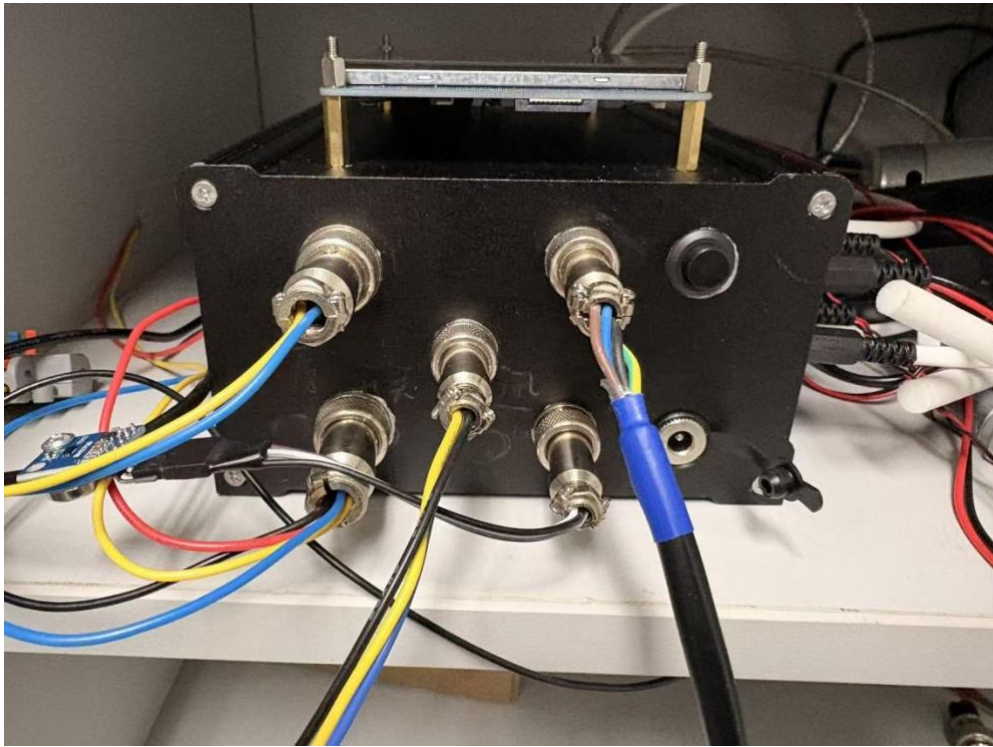


图 22： 加湿器测试

3.2.3 控制盒调试

控制盒中集成了控制核心，电磁继电器以及 pwm 调控模块。箱体三面打孔，一面是两路电源（12v 和 5v）开关等，一面连接传感器以及执行机构，一面放置屏幕供人机交互。



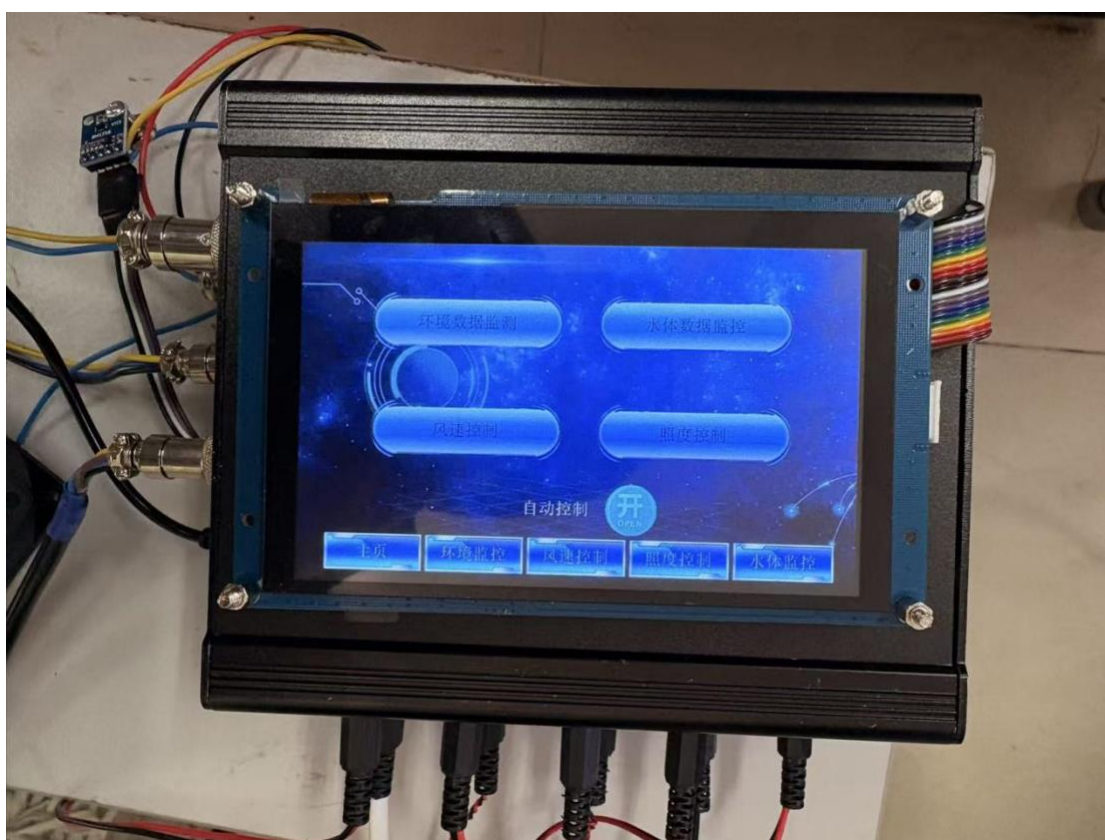
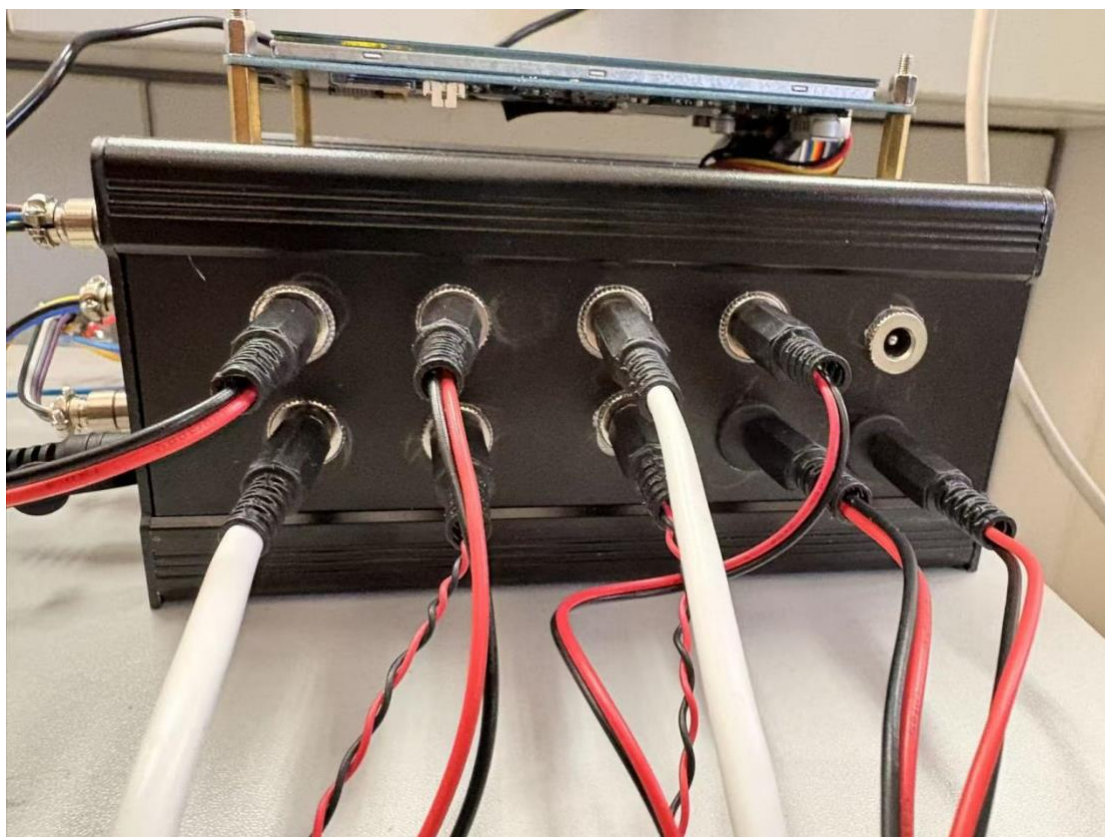
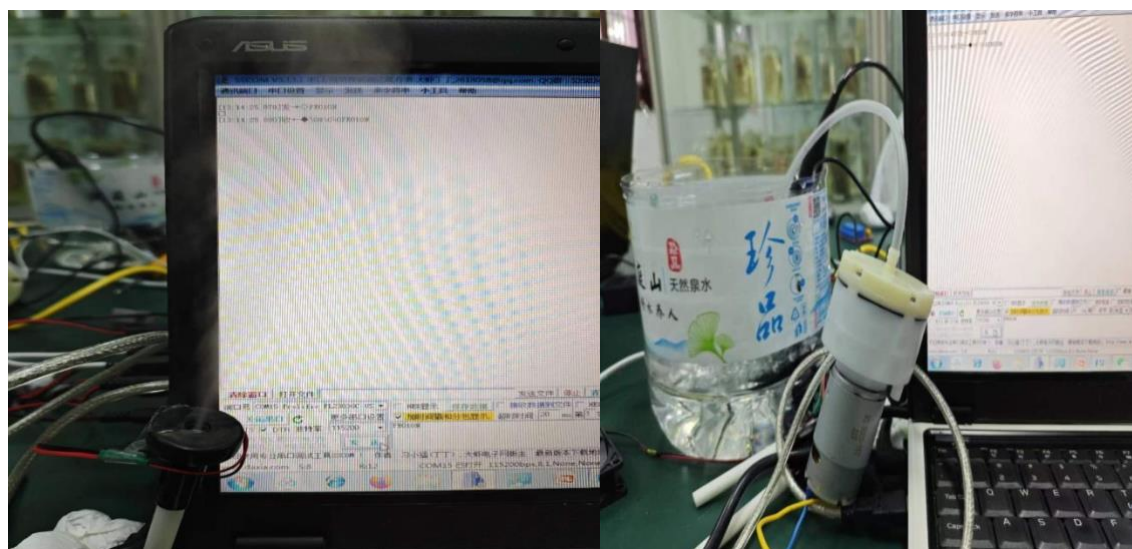


图 23：控制盒照片

侧边的 9 个接口提供了 2 个 12V 的 PWM 调制信号，用于控制循环泵和通风风扇；提供 2 个 5V 的 PWM 调制信号，用于控制白光灯带和红光灯带的亮度；提供 5 个受控电源，1 个 12V 电源用于控制增氧泵的开关，4 个 5V 的电源用于独立控制加湿器和蠕动泵的启停。

3.2.3.1 开关类指令

设置 PE 端口为 GPIO 端口，进行开关量控制，程序通过串口 USART1 收发指令，实现 PE 管脚高低电平的变化。当识别到指令“PE0XON”时，执行 `GPIO_SetBits(GPIOE,GPIO_PIN_X)`，将 PE0X 引脚置高，电磁继电器导通，执行机构运转；当识别到指令“PE0XOFF”时，执行 `GPIO_ResetBits(GPIOE,GPIO_PIN_X)`，将 PE0X 引脚置零，电磁继电器关闭，执行机构停止。其中 X 的取值范围为：0-4；分别对应 PE00（保留），PE01（加湿器控制信号），PE02（增氧泵控制信号），PE03（补液泵 1 控制信号），PE04（补液泵 2 控制信号）。



加湿器测试

增氧泵测试

图 24：开关类指令测试实验图

3.2.3.2 调速类指令

设置 TIM 定时器对应通道为 PWM 输出模式，程序通过串口 USART1 收发指令，实现 PWM 占空比的动态调整。当识别到指令“PWMX???”时，解析指令，其中 X 代表控制信号的编码号，??? 代表对应 PWM 信号的占空比参数（??? 为 000-999 的数值，代表占空比 00.0%至 99.9%），计算对应 TIM 定时器比较寄存器的值，执行 TIM_SetCompareX，改变 PWM 波占空比，从而调节执行机构的运行强度。其中 X 的取值范围为：1-4；分别对应 PWM1（白光灯控制信号）、PWM2（红光灯控制信号）、PWM3（水泵控制信号）、PWM4（风扇控制信号）。



图 25：调速类指令测试实验图

3.2.3.3 IIC 总线

程序通过串口 USART1 接收指令“LIGHT1”时，启动软件 IIC 总线通信流程：先调用 iic_software.h 中的驱动函数，执行 bh1750_power_on() 唤醒 BH1750 传感器，再调用 bh1750_reset() 重置传感器寄存器；确认通信正常后，调用 bh1750_single_read_light1() 函数读取光照原始数据，转换为

实际照度值存入 `current_light` 变量，将该数值通过串口输出。

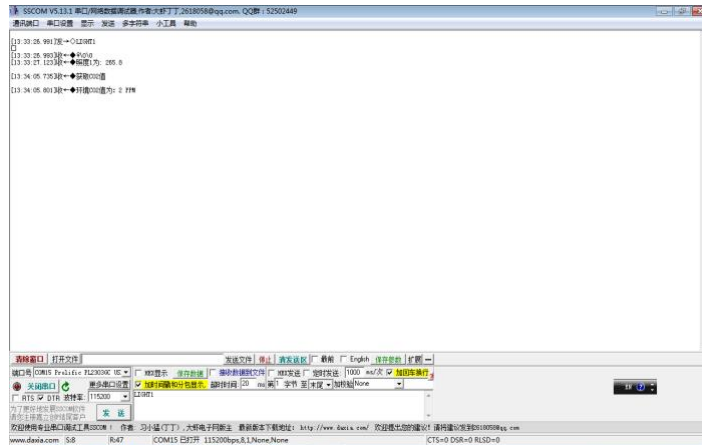


图 26: IIC 指令测试实验图

3.2.3.4 IO 单线

程序通过串口 USART1 接收指令“TEMP1”时，调用 `DS18B20_Get_Temp1()` 函数，启动 IO 单线通信：先向 DS18B20 引脚发复位信号并确认传感器在线，随后发温度转换指令，等待 1.5s 转换完成后，再发“读暂存器”指令读取 2 字节原始数据，将实际温度转换为浮点型温度值，最终通过串口输出“Temp: XX.XX 度”格式的结果。

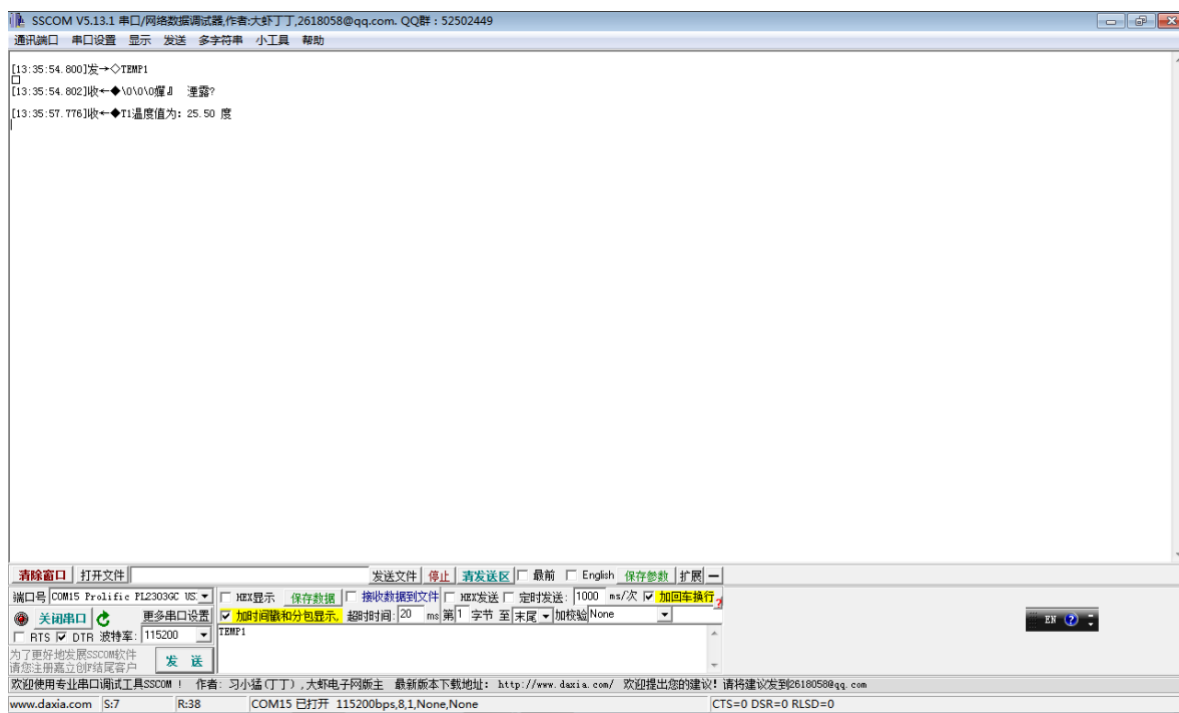


图 27: IO 单线通讯测试实验图

3.2.3.5 485 总线

设置 USART3 为 485 总线通信接口，采用 Modbus-RTU 协议通信，程序通过串口 USART1 收发指令，触发 485 总线的数据交互。当识别到指令“CMDX”时，执行 485 总线的初始化、数据帧封装与发送操作，接收从设备返回的数据帧后解析并通过 USART1 回传。其中 X 的取值范围为：1-6；分别对应 CMD1（SM7820B 传感器温度值读取）、CMD2（SM7820B 传感器湿度值读取）、CMD3（TAS 传感器 CO₂ 值读取）、CMD4（DO-S20 传感器温度值读取）、CMD5（DO-S20 传感器溶氧比读取）、CMD6（DO-S20 传感器溶氧值读取）、CMD7（DO-S20 传感器 pH 值读取）。SM7820B 湿度传感器，TAS 二氧化碳传感器，DO-S20 传感器都使用 Modbus 通讯协议，初始地址都为 0x01。因此，我们将其单独接入总线后，将 TAS 二氧化碳传感器地址改为

0x02, DO-S20 三合一传感器地址改为 0x03 后, 通讯网络正常, 所有传感器均能正确接收指令, 并反馈检测数值。



图 28:485 总线通讯测试实验图

3.3 整机集成与调试

根据系统设计方案, 我们组装了家用智能水培系统, 其主体由控制器盒、水培架、营养液槽组成, 如下图所示。控制器盒内, 集成了 STM32F103 控制器, ZK-5AD 调速驱动模块和 Mini 560 电源模块等控制器件; 控制器盒上安装有淘晶驰 TJC4827 触控屏; 电源与控制线缆通过控制器盒上的 GW12 和 DC 座等穿板接口与对应的传感器与执行机构相连。水培架上, 安装有灯带, 温湿度传感器和风扇等传感器和执行机构。营养液槽内安装有循环水泵, DO-S20 传感器和补液泵等器件。

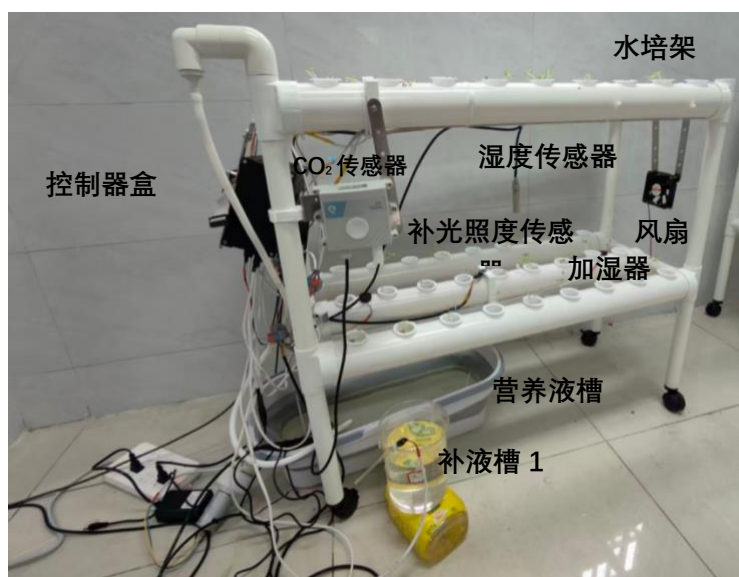


图 29：家用智能水培系统实物图

智能水培系统的供电方案如下图所示，使用 DC-01，AC-DC 变压器将 220V50Hz 的市电转为 DC12V 的直流电，输入控制器盒。控制器盒内，使用 Mini 560 芯片，将 DC12V 的直流电转为 DC5V 的直流电，供应给对应元器件。其中 DC5V 供给淘晶驰触控屏，STM32F103 控制板，GY-30 照度传感器，DS18B20 温度传感器，加湿器，补液泵 1，补液泵 2，白光 LED 灯带和红光 LED 灯带；DC12V 电源供应给风扇，循环水泵，增氧泵，塔石 CO2 传感器，SM7820B 温湿度传感器和 DO-S20 三合一传感器。

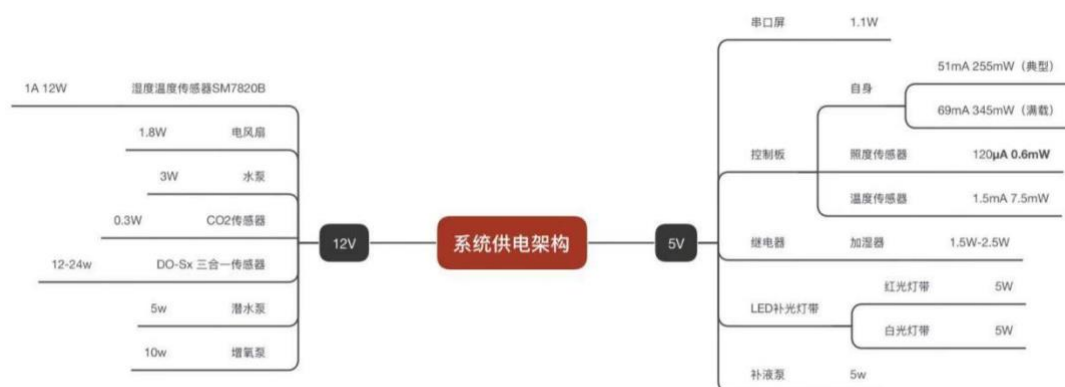


图 30：系统供电架构图

3.3.1 人机交互界面设计

3.3.1.1 总体结构设计

使用淘晶驰 TJC4827 5 寸电容触控屏，作为日常操作的人机交互载体。触控屏操作设计有主页、环境监控、水体监控、风速控制和照度控制五个功能页面。各个页面主要功能如下：

开机后自动跳转主页面，主页面上有自动控制按钮的开关，可以选择开启或关闭植物生长自动调控功能；环境监控页面主要显示空气环境中的温湿度，照度等信息，并可实现湿度和风扇的控制页面的跳转；水体监控页面显示培养液水体的溶氧值、溶氧比，水体温度和 pH 值等信息，并可实现调控；风速控制页面可操作风扇、加湿器；照度控制页面可操作白光和红光 LED 灯带，实现照度和光谱分布的调整。

3.3.1.2 主页页面

主页页面如下图所示，设计有 8 个界面跳转按钮和 1 个自动控制开关按钮。



图 31：主页页面

各按钮功能为：b0 为环境数据监测按钮，按下后显示屏跳转至环境数据监测面；b2 为风速控制按钮，按下后显示屏跳转至风速控制界面；b5 为水体数据监控按钮，按下后显示屏跳转至水体数据监控面；b4 为照度控制按钮，按下后跳转至照度控制面；bt0 为双态按钮，此按钮为自控控制开关，可切换自动控制开关状态。如果按钮处于弹起状态，发送 AUTOCTR 指令，自动控制处于关闭状态；如果按钮处于按下状态，发送 AUTOCTR1 指令，自动控制开启。需注意：系统初次上电，自动控制处于开启状态。

最下方一排按钮为通用按钮，各个界面均有设计，以实现界面间的跳转，按下对应按钮后，会跳转到按钮名称对应的页面。每一面最下方都有这五个按钮，功能同上，方便不同界面之间的快速切换。

3.3.1.3 环境监控页面

环境监控页面如下图所示，设计有温度、湿度、自然照度和补光照度等 4 个传感器信息采集按钮、1 个风扇开关按钮和 5 个控制按钮。

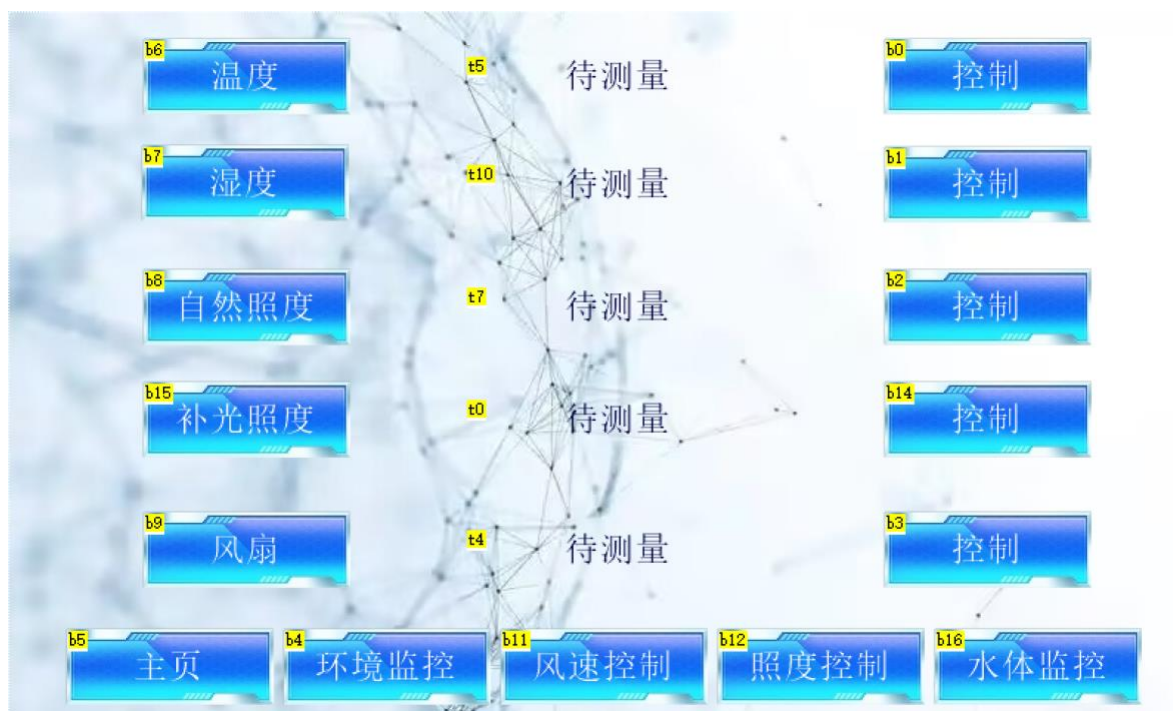


图 32：环境监控页面

各按钮功能为：b6 为温度按钮，按下后发送指令获取湿度传感器的温度值，并显示在右侧 t5 文本中；b7 为湿度按钮，按下后发送指令获取湿度传感器的湿度值，并显示在右侧 t10 文本中；右侧 b0 和 b1 控制按钮，按下后跳转至风速控制面；b8 为自然照度按钮，按下后发送指令，获取自然光照度传感器的照度值，并显示在右侧 t7 文本中；b15 为补光照度按钮，按下后补光照度传感器的照度值，并显示在右侧 t0 文本中。右侧 b2 和 b14 控制按钮，按下后跳转至照度控制面；b9 为风速按钮，按下后风扇打开，转速显示在右侧 t4 文本上；右侧 b3 控制按钮，按下后跳转至风速控制面。

3.3.1.4 风速控制页面

风速控制页面如下图所示，设计有温度、湿度和 C02 浓度 3 个传感器信息采集按钮、1 个雾化器开关按钮、1 个风扇开关按钮和 2 个风速控制按钮。



图 33：风速控制页面

各按钮功能为：b3 为温度按钮，按下后发送指令获取湿度传感器的温度值，并将环境温度显示在 t5 文本中；b7 为湿度按钮，按下后发送指令获取湿度传感器的湿度值，并将环境湿度显示在 t10 文本中；b0 为 C02 浓度按钮，按下后发送指令获取 C02 传感器的 C02 浓度值，并将环境 C02 浓度值显示在 t11 文本中；bt2 为雾化加湿器开关，使用双态按钮，同时控制两个雾化加湿器的开关状态；bt1 为风扇开关，使用双态按钮，同时控制两个风扇的开关状态；b1b2 为 UP、DOWN 按钮，在风扇打开运转情况下，按下可控制风扇转速的加减，并在 t4 文本中显示风扇实时转速。

3.3.1.5 照度控制页面

照度控制页面如下图所示，设计有补光照度和自然照度 2 个传感器信息采集按钮、2 个开关按钮，分别控制白色 LED 灯带和红色 LED 灯带开关，2 组调速按钮，分别控制白色 LED 灯带和红色 LED 灯带的亮度，以实现照度和光谱的调整。

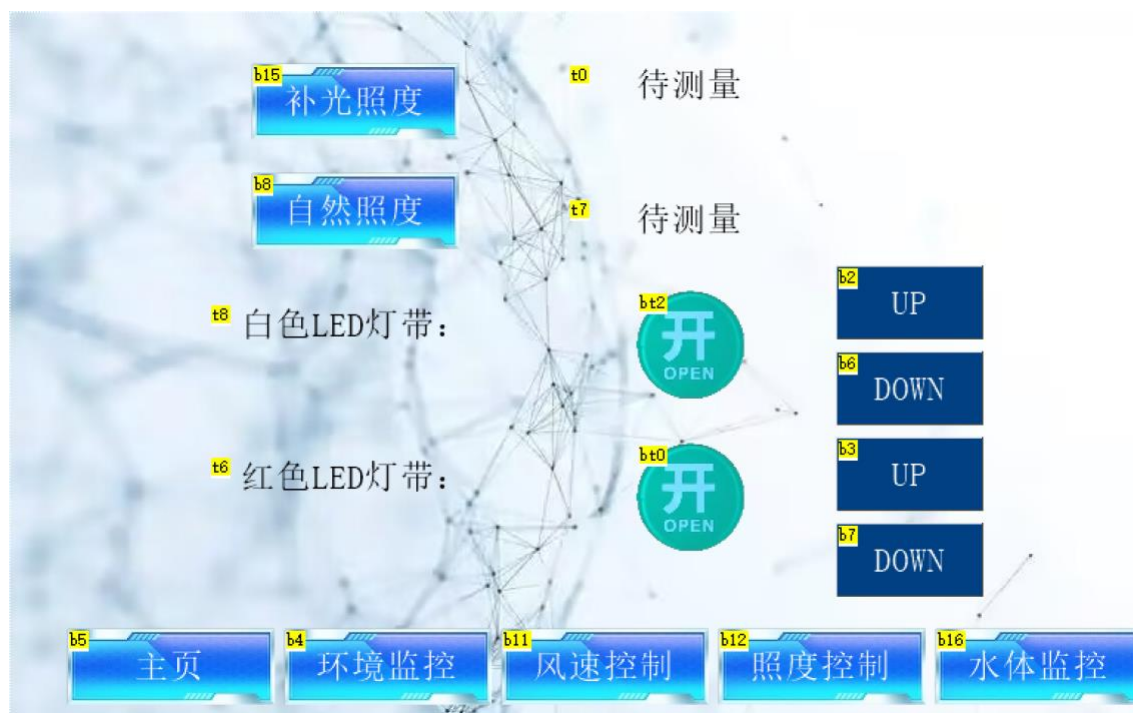


图 34：照度控制页面

各按钮功能为：b15 为补光照度按钮，按下后发送指令获取补光照度传感器的照度值，并将其显示在右侧 t0 文本中；b8 为自然照度按钮，按下后发送指令获取自然照度传感器的照度值，并将其显示在右侧 t7 文本中；bt0 和 bt2 为双态按钮，分别是红色 LED 和白色 LED 灯带的开关按钮； b2、b6 为白光亮度调整的 UP、DOWN 按钮，在灯带打开情况下，按下可控制白色 LED 灯带亮度的增加/减弱；b3、b7 为红光亮度调整的 UP、DOWN 按钮，在灯带打开情况下，按下可控制红色 LED 灯带亮度的增加/减弱。

3.3.1.6 水体监控页面

水体监控页面如下图所示，设计有酸碱度、营养液温度、溶氧值和溶氧比 4 个传感器信息采集按钮、4 个开关按钮，分别控制循环泵、补液泵 1、补液泵 2 和增氧泵的开关，1 组调速按钮，控制循环泵的出水流量，以水培系统营养液循环速率的调整。



图 35：水体监控页面

各按钮功能为：b0 为酸碱度按钮，按下后发送指令获取 D0-S20 传感器测量的 pH 值，并将其显示在右侧 t21 文本中；b1 为营养液温度按钮，按下后发送指令获取 D0-S20 传感器测量的温度值，并将其显示在右侧 t22 文本中；b3 为溶氧值按钮，按下后发送指令获取 D0-S20 传感器测量的溶氧值，并将其显示在右侧 t23 文本中；b2 为溶氧比按钮，按下后发送指令获取 D0-S20 传感器测量的溶氧比，并将其显示在右侧 t24 文本中；最右侧 bt3 为循环泵开关，是双态按钮，在循环泵开关开启情况下，可通过点击 b6、b7 循环泵的 UP、DOWN 按钮，实现泵体水流的增加/减少，循环泵水流大小显示在右

侧 t27 文本中；bt0，bt1 和 bt2 均为双态按钮，分别控制补液泵 2，补液泵 1 和增氧泵的开关。

3.3.2 程序逻辑结构

系统软件整体流程如下图所示，系统上电后开始初始化，完成对串口（USART1/2/3）、定时器（TIM3/4）及 GPIO 外设的初始化后，随后进入主循环。USART1 为指令调试串口，负责与上位电脑通讯，通过指令实现各种功能，为设计开发者和实验调试使用；USART2 为人机交互串口，负责与淘晶驰触控屏进行交互，主要实现用户操作功能和信息交互；USART3 为 Modbus 通讯串口，采用 485 总线，和塔石 CO2 传感器、SM7820B 温湿度传感器和 DO-S20 三合一传感器进行操作和数据的交互。定时器（TIM3/4）主要用来实现 PWM1-4, 4 路 PWM 信号的占空比调节，实现对灯带、循环泵和风扇的调速控制功能；GPIO 初始化 GPIO 中的 PE00-15 端口作为 IO 端口，通过与电磁继电器控制卡联用，实现对加湿器、补液泵和增氧泵等执行机构的开关控制。

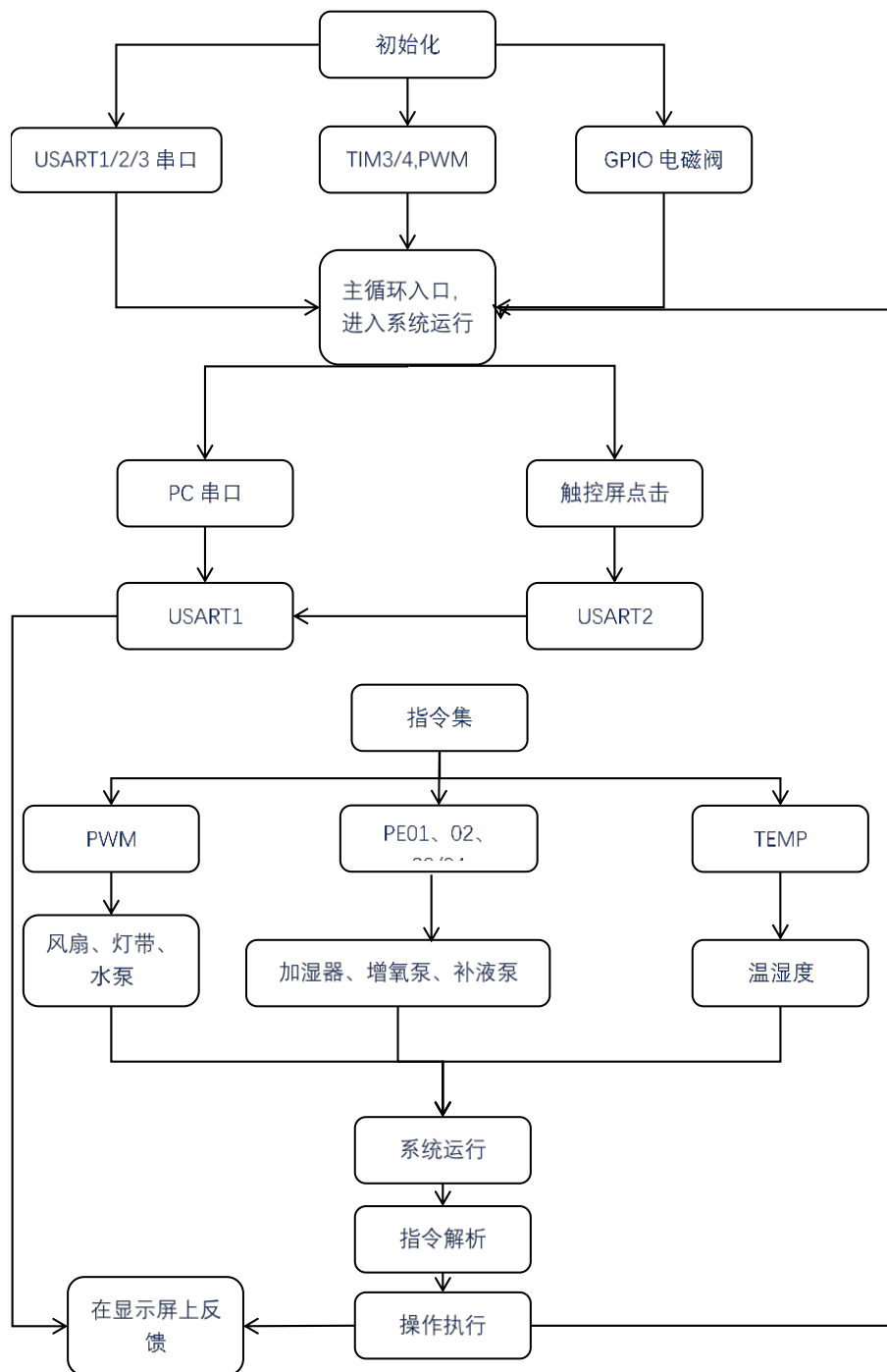


图 36: 系统软件整体流程

进入主程序后，用户可通过 PC 串口或触控屏（USART2）发送指令，系统解析指令后，根据指令控制风扇、灯带、水泵等执行机构，并实时采集温湿度数据。所有操作状态与传感器数据均反馈至显示屏，形成闭环控制，实现自动化水培环境调控。

3.3.3 集成测试

实际系统运行状态如下图所示，经 1 个月的运行测试，实验结果表明，该系统能够适配家庭水培环境，蔬菜类植物能够正常生长。



图 37：智能水培系统实际运行图（最好再补充 2 张植物对比图）



图 38：第 3 周植物对比图（左图系统干预生长，右图自然生长）



图 39：第 5 周植物对比图（左图系统干预生长，右图自然生长）



图 40：第 9 周植物对比图（左图系统干预生长，右图自然生长）

四、结果

4.1 实验设计

本实验在 2025 年 10 月 1 日至 12 月 1 日期间，于室内模拟家庭阳台环境中开展，目标是还原典型城市家庭种植条件，包括光照不足和通风受限的情况。系统主体（智能调控组）与对照组分置于水培架上下两层。智能调控组接入本文描述的 STM32 控制系统，具备自动补光、通风和调湿等功能；而对照组仅依靠自然光照和环境通风，无任何主动调节措施。设备放置在朝南窗台，智能组位于下方，对照组置于上方，以降低空间光照差异对实验的影响。



图 41：室内阳台模拟环境图

实验选取“奶油生菜”作为种植对象，每组各 6 株，种子同步发芽，幼苗期生长状态一致。实验过程中，实验组系统每隔 10 分钟自动检测以下参数：环境参数包括空气温度、湿度（SM7820B）、光照强度（GY-30）、CO₂浓度（塔石传感器）；水体参数包括营养液温度、溶解氧含量、pH 值（DO-S20 三合一传感器），每隔 30 分钟执行一次记录操作。

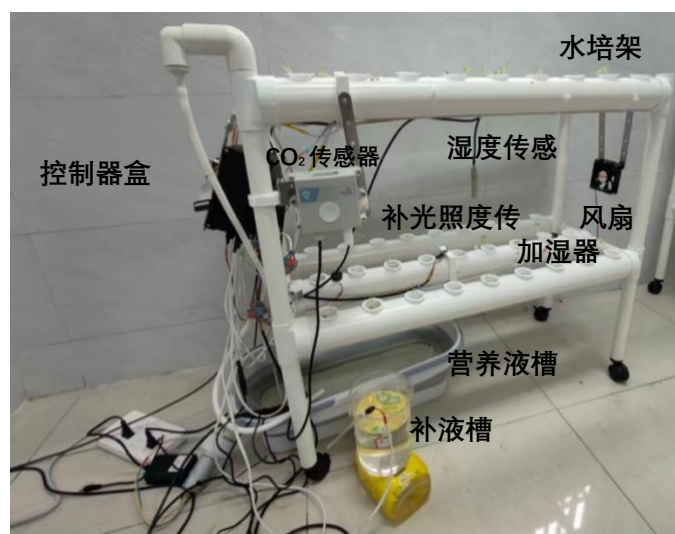


图 42：传感器集成图

4.2 数据分析

4.2.1 照度调控

本系统通过 GY-30 数字光照传感器对环境光照强度进行实时采集（见下图），并以叶菜类植物的光补偿点（约 2000 - 3000 lx）与光饱和点（约 20000 - 30000 lx）为参照，设定了动态补光阈值。当监测到自然光照低于 3000 lx 时，STM32 控制器通过 PWM 模块调节白光与红光 LED 灯带的占空比，实现照度与光谱的双重调控。在自然光照衰减至低谷时段（如 150 - 500 lx），系统可自动将照度提升至 1000 - 8000 lx 的有效光合区间，并依据植物不同生长期的需求，在幼苗期以白光为主、生长期增加红光比例，优化光质组成。该闭环反馈控制策略不仅显著提高了全天的光照积分量（DLI），还通过平滑光强波动减少了植物的光胁迫反应，为家庭环境下蔬菜作物的高效光合与健康生长提供了可靠的光环境保障。

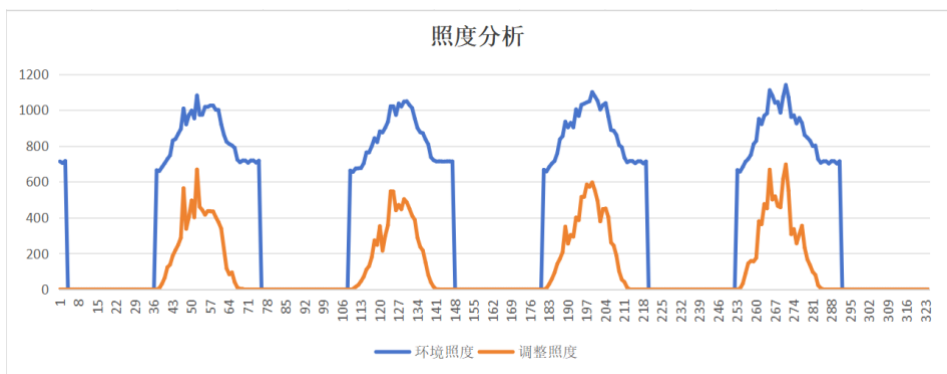


图 43：照度曲线图

温度与湿度对比、CO₂浓度变化、溶解氧含量变化等环境与水体参数分析显示，智能调控组植株叶片呈现深绿色，茎秆粗壮，根系发达；对照组存活率较低，存活株瘦弱。这表明系统通过光、温、气、水等多方面的协同调控，有效促进了植物的健康生长。

4.2.2 溶解氧变化

从本次记录的数据来看（下图），水体中溶氧比与溶氧值的变化趋势整体一致，均呈现出前中期较为平稳、后期略有波动的特点。在实验初期，溶氧比维持在较高水平，溶氧值也保持在相对充沛的状态，这反映出系统在水培初期由于植物根系规模较小、代谢活动尚不旺盛，水体中氧气消耗相对较少，同时系统增氧措施也为水体提供了充足的溶解氧。

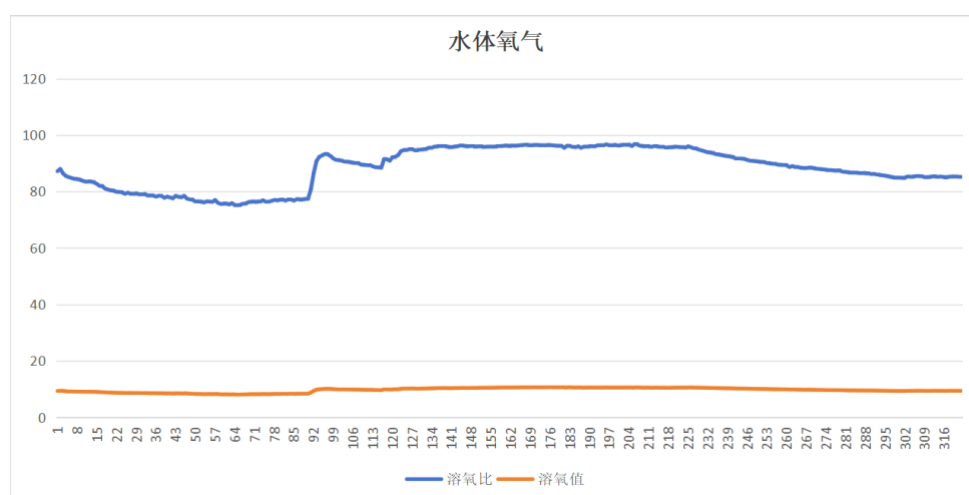


图 44：水体氧气变化曲线图

4.2.3 温湿度变化

在系统运行过程中，风扇的启停干预是影响环境参数变化的关键调控行为之一。风扇周期性启动以增强空气流通，从而实现降温与除湿的双重效果。这一干预机制直接反映在室温传感器的数据变化上：风扇启动后，由于强制对流加速了室内空气与外界或系统内部冷源的热交换，传感器所测温度通常会在短时间内出现小幅但明显的下降趋势。同时，风扇运行也会促进水分散发，有助于调节环

境湿度动态变化。这种基于阈值响应的动态调控，体现了系统在维持稳定生长环境方面的主动性与有效性，也凸显了闭环控制在家庭智能水培系统中的实用价值

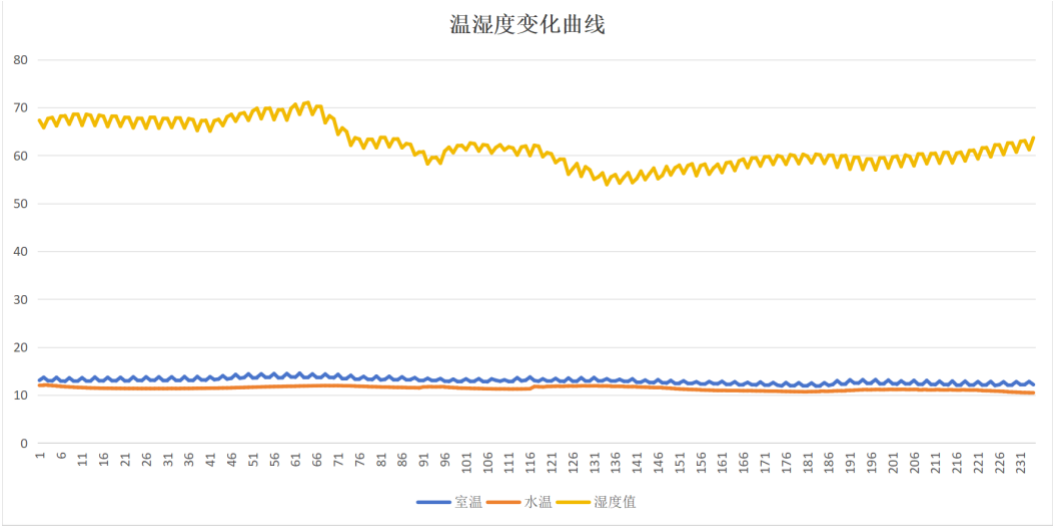


图 45：温湿度变化曲线图

4.2.4 其他

从 CO₂、pH 与湿度三参数的协同监测数据来看，本系统在实验周期内成功维持了相对稳定的植物生长微环境。CO₂浓度呈现阶梯式调控特征，始终处于适宜光合作用的有效范围，为碳同化提供了稳定底物；pH 值保持在中性附近窄幅波动，说明营养液酸碱环境受控，有利于根系离子吸收与酶活性维持；湿度则稳定在作物生长的舒适区间，减少了蒸腾胁迫与病害风险。三者共同构成了水培植物生长的“气—液—湿”平衡体系，体现出系统在多参数耦合调控上的有效性，为植物持续健康生长提供了基础保障。

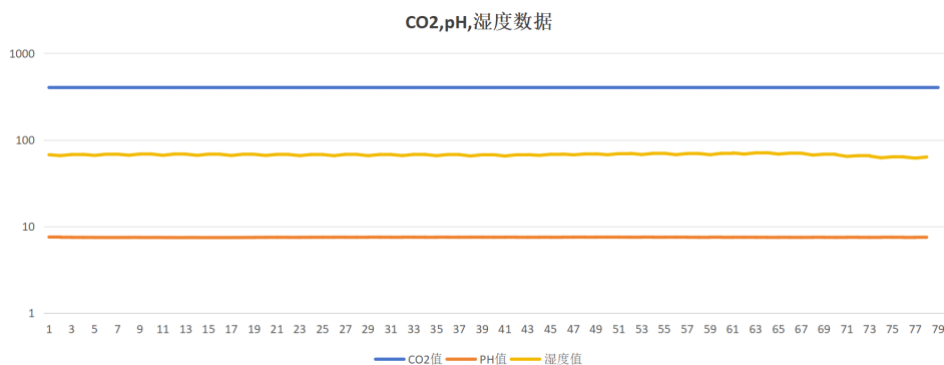


图 46: CO₂, 水体 pH, 环境湿度曲线图

五、讨论

5.1 研究色光对于植物生长影响

实验中为了植物生长，我们探究了光对水培的影响，光是植物生长的必需能源，在整个测试过程中，我们参考了相关文献了解到光对植物生长的影响主要体现在光照强度、光质和光照时长三个方面。我们主要对光照强度和光质进行了测试，我们先以荧光灯光谱为标定基准，通过采集其光谱完成背景标定，为后续样品测量提供可扣除的杂光参照，确保样品光谱数据的准确性与规范性。然后我们分别对白光灯和红光灯的光进行了测试，我们得到了图中的几组数据，其中可以相比较白光灯是对植物生长促进作用最均衡的光源类型，但某些时候利用红光灯的光谱特性也可能分别用于低光照条件下小型植物的培养和起到促进光合作用的作用。

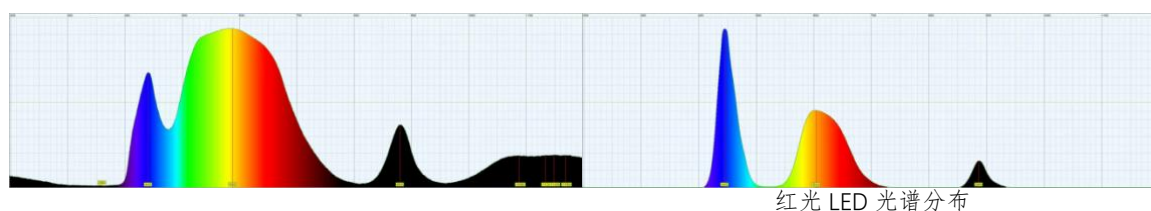


图 47: LED 补灯光谱测试结果

5.2 485 线多传感器通讯设置

实验过程中我们使用 RS485，RS485 具有传输能力强，支持多设备的优势，但我们遇到了使用 485 通讯如何复用总线的问题。在这套系统中，要利用多个需要测定气体浓度、空气湿度一组数值连续变化的传感器，所以需要使用 485 通讯。如第一张图所示 485 线共要连湿度传感器，三合一传感器，二氧化碳传感器三个传感器。但这三个传感器的初始地址都为 1，RS485 总线采用 Modbus 协议时，每个从设备都需要有唯一的地址，以便主设备能够准确的从设备进行通信，如果总线上多个传感器都使用默认地址，主设备发送的指令就会被多个传感器同时响应，为此我们修改了其中两个传感器的地址值。最后我们完成了多个传感器的同时反馈。

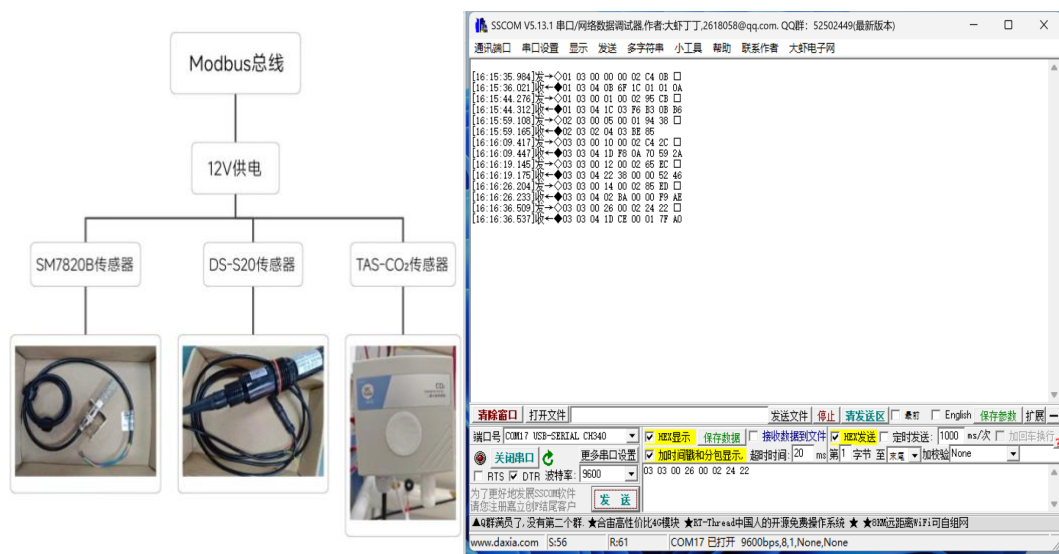


图 48:485 多传感器通讯实验

5.3 系统在 STEM 教育中的实践反馈

在本校高二年级部分班级中进行了初步教学试用，学生可通过系统观察植物生长、调整环境参数、记录实验数据。反馈显示，系统有效激发了学生对植物生理、嵌入式系统、数据科学的兴趣。但

也反映出部分学生对于传感器原理、控制逻辑的理解存在门槛。后续可配套开发阶梯式课程项目，从“观察记录”到“编程调控”，逐步提升探究深度。

六、结论

本项目围绕家庭小型水培场景实际需求开展研发，成功打造出适配家庭验证级使用的水培系统，研发工作取得阶段性成果，同时系统在实际应用中也显现出一定局限性。项目核心亮点体现在场景定位与功能设计上，充分调研家庭用户水培种植的痛点与需求，针对家庭种植空间有限、用户种植经验不足、对设备操作便捷性要求高等特点，摒弃大规模生产场景的复杂设计，专门围绕阳台、室内小面积种植场景打造系统，设备尺寸、操作流程、控制逻辑均与家庭使用习惯高度契合，大幅降低家庭用户的使用门槛；同时系统功能设计贴合家庭水培核心需求，可实现营养液浓度、水温、溶氧量等水培环境关键参数的自动监测与基础调控，能稳定支撑生菜、香草等常见作物的全生长周期种植，帮助缺乏种植经验的用户实现入门级水培种植成功，为家庭水培场景的普及提供了切实可行的硬件与技术方案。

当前系统仍存在明显的不足，一方面是大规模生产级应用场景的适配性尚未得到验证，系统的硬件配置、调控算法均基于家庭小型水培环境设计，未针对温室大棚、商业种植基地等大规模生产场景做优化调整，其在大面积种植中的覆盖能力、调控效率、成本控制能力等均未经过实际测试，暂无法直接应用于生产级应用场景；

另一方面是系统长期运行的稳定性与精度有待提升，部分核心传感器在长时间连续运行后易出现数据漂移问题，直接影响环境参数的自动控制精度，且传感器的校准工作需要专业人员操作，不仅增加了用户的运维成本，也降低了系统无人化管理的便捷性，与家庭用户低运维的实际需求存在一定差距。

针对现存问题，后续将以智能化升级、功能拓展、场景延伸为核心方向，对系统进行全方位优化迭代，进一步提升系统的实用性与适配性。计划引入网络模块与机器学习算法，构建作物生长阶段与环境参数的适配模型，让系统可根据作物不同生长阶段自动优化调控策略，实现更精准的智能化管理；同时加载远程监控模块，开发配套移动应用，支持用户通过手机实时查看水培环境数据、接收异常预警，还能远程完成补水、调温等基础操作，进一步优化用户使用体验；此外，将通过持续开展实际水培种植试验，不断收集各类作物的生长数据，扩展系统数据库，完善更多种类作物的生长参数预设功能，满足用户多样化的种植需求，推动系统功能与适配性的全面升级。

七、总结

我们提出的智能家庭水培系统的设计方案，其创新点为：

多参数调控：系统采用嵌入式技术和多传感器融合，实现了水培环境的精准监测与智能调控，填补了家庭和小型农场水培设备在低成本、高精度方面的空白。

多层可叠加的结构：采用多层可叠加的结构，能根据家庭种植空间的实际情况灵活增减层数，有效提升垂直空间利用率，适配阳台、室内等家庭小面积种植场景，在有限空间里增加种植面积，搭配智能调控体系实现稳定种植。

较高的实用性：通过程序优化，将常规控制功能与触控屏结合，系统操作简单直观，适合非专业用户使用，支持自动模式，降低了人工干预的需求。同时保留专业人员和二次开发的接口，便于后期系统的迭代优化。

生命教育意义：项目为中小學生提供了 STEM 教育的实践平台，可以为中小學生物教学提供辅助教具，引导中小學生体会植物生长到衰亡的全过程，有助于培养青少年的科学素养和动手能力。

受限于时间和知识储备，我们的系统还存在很多不足，比如：当前系统针对家庭小型水培环境设计，能适应家庭验证级的使用需求。但方案是否能够支持大规模生产级的应用场景还需要进一步测试。部分传感器在长时间运行后可能出现数据漂移，需专业人员定期校准以维持自动控制精度。

未来我们希望对系统进一步进行智能化升级，引入网络模块和机器学习算法，系统可根据植物生长阶段自动优化调控策略，进一步提升系统智能化水平。加载远程监控模块，并开发配套移动应用，支持用户通过手机远程查看数据和控制设备，增强用户体验；通过实际水培种植，扩展系统数据库，支持更多种类作物的生长参数预设，满足多样化种植需求。

八、参考资料

1. TASTEK. TAS-CO2-R00000&A00000 产品资料[R]. 2025-07.
2. 上海搜博实业有限公司. SM7820B 使用说明书: V24.3.19[EB/OL]. <http://www.sonbest.com/>.
3. 深圳市深晨科技有限公司. JW01-CO2-V2.2 数字信号空气质量模块规格书[R].
4. ROHM Semiconductor. BH1750 使用说明书: No.10046ECT01[R].
5. 赵振丰, 游方运. 数字荧光溶解氧传感器 DO-Sx 使用说明书[R]. 2024-07-17.
6. 淘晶驰串口屏开发手册: 版本 1.1.0-2024-02-21[R]. 2024-02-21.
7. 溶氧传感器软件快速使用手册[R]. 2023-11-29.
8. 张西良, 李萍萍, 胡永光, 等. 无土栽培基质水分养分无线监控网络: 中国, CN201020293280.7[P]. 2010-08-16.
9. 郑静, 赵启军, 郑强. 农业无土栽培基质生产发泡机: 中国, CN201621434209.X[P]. 2016-12-26.
10. 高万林, 何东彬, 王敏娟, 等. 温室内二氧化碳施肥控制系统及其控制方法: 中国, CN201810205476.7[P]. 2018-03-13.
11. 徐文静, 王延龙. 针对小菊生产对应设置的无土栽培系统及其方法: 中国, CN202411959665.5[P]. 2024-12-19.
12. 张金龙, 刘丽红. 光催化纳米活性水的用途是建立自由基条件下的生物、物质平衡定律并创建多个新学科: 中国, CN201010106463.8[P]. 2010-02-05.
13. 臧博. 水培农业在中小学劳动教育的应用与探索[J]. 中国教工, 2025(8): [页码].
14. 林魁, 黄枝, 金心怡, 等. 植物生长光调控应用研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(3).
15. 李敏, 王浩. 基于智能水培系统的中学生 STEM 实践课程设计[J]. 实验教学与仪器, 2023(10).
16. BAHARUDIN B M S, TAIB N S A M, GHANI N A A, et al. Smart hydroponic system using IoT and embedded system[C]. 2020 IEEE International Conference on Sustainable Engineering and Technologies (ICSET). Piscataway: IEEE, 2020.
17. PENNISI C A C M G G, VAN IERSEL S, BURR J F. Light intensity and quality affect growth, morphology, and nutrient content of lettuce grown in a controlled environment[J]. HortScience, 2020, 55(10): 1396–1403.
18. ROS J M V G, GONZÁLEZ M C P G G, LÓPEZ J M S. Project-based learning in STEM education: A review of literature[J]. Journal of Technology and Science Education, 2021, 11(2): 281 – 298.

