文章编号:1674-2869(2025)04-0426-08

多传感器集成的智慧大棚物联网监测系统的设计及应用

王明霞,刘裕轩,候华毅*,黄文娟,陈相柏
武汉工程大学光电信息与能源工程学院、数理学院,湖北 武汉 430205

摘 要:为降低农业生产成本,提高农业种植效率,解决传统大棚环境实时数据采集难,导致决策主观性强等问题,设计一套智慧大棚物联网监测系统。该系统以多传感器和摄像头集成技术为核心,利用微控制器STM32控制多传感器和摄像头对现场植物的生长状态和环境参数进行实时、精准监控,同时将采集得到的多元数据传送至本地显示设备和云平台,实现现场查看和远程APP监测同步进行,并融合农作物生长模型,实现大数据分析和智能预警。此外,该系统采用太阳能电池和无线网络,使其无需依赖外部电力供应和网络连接。经过实地测试与验证,该系统表现出良好的运行稳定性、实时性和准确性,可以给农户决策生产提供科学化、精细化和针对性的数据和分析指导,智能预警,最大限度地提高农作物的质量及产量,为智慧农业的发展提供有力支持。

关键词:智慧大棚;多传感器集成;STM32;物联网
中图分类号:TP277 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202404042

Design and application of an internet of things monitoring system for smart greenhouses integrated with multiple sensors

WANG Mingxia, *LIU Yuxuan*, *HOU Huayi**, *HUANG Wenjuan*, *CHEN Xiangbai*
School of Optical Information and Energy Engineering, School of Mathematics and Physics, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: To address challenges such as difficulty in real-time data collection in traditional greenhouse environments leading to subjective decision-making and high production costs, an IoT monitoring system for smart greenhouses was designed. This system was built around the core technology of integrating multiple sensors and cameras, utilizing the STM32 microcontroller to control real-time and precise monitoring of plant growth status and environmental parameters on site. It transmits the diverse collected data to both local display devices and cloud platforms, enabling on-site viewing and remote app monitoring simultaneously. The system incorporates crop growth models for big data analysis and intelligent early warnings. Moreover, it features solar battery and wireless network capabilities, eliminating the need for external power sources or network connections. Through field testing and validation, the system has demonstrated excellent operational stability, real-time functionality, and accuracy. It offers scientific, refined, and tailored data and analysis guidance for farmers to make informed production decisions, intelligent early warnings, to maximize crop quality and yield, thereby providing robust support for the advancement of smart agriculture.

Keywords: smart greenhouse; multi-sensor integration; STM32; Internet of things

收稿日期:2024-04-30
基金项目:国家自然科学基金(51902227);武汉市知识创新专项曙光计划项目(202202080120363);安徽省古建筑智能感知与高维建模国际联合研究中心开放基金(2022004)
作者简介:王明霞,硕士研究生。Email:3268687031@qq.com
***通信作者**:候华毅,博士,副教授。 Email:hhy@wit.edu.cn
引文格式:王明霞,刘裕轩,候华毅,等. 多传感器集成的智慧大棚物联网监测系统的设计及应用[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(4):426-433.

我国作为农业大国,地域辽阔、种植环境多样,但依赖种植者经验的传统种植方式易导致农作物产量、质量和土地利用率不稳定。特别是在极端天气下,传统种植方式的局限性尤为明显。而智慧农业的发展能有效弥补上述局限[1]。国外关于智慧农业的研究起步较早,如美国[2]、德国[3]、荷兰[4]、日本[5]等早在20世纪80年代就开始探索温室大棚及其环境监测技术,并取得了显著的成果。尽管我国在该方面起步较晚,但政府高度重视农业现代化发展,正积极推动智慧农业的研究与应用。

智慧农业领域未来5年仍将聚焦3大研究主题:以生物大数据为代表的现代生物技术,以无人机和农业机器人为代表的智能农机装备,以物联网、人工智能和遥感为代表的信息技术[6]。随着物联网技术的不断发展,物联网逐步应用于农业领域,智慧农业发展进入快车道[7-9]。智慧农业大棚是智慧农业的典型应用。相较于传统农业大棚在资源利用效率、病虫害综合防控、作物产出率等方面的局限性,智慧农业大棚凭借先进的传感器技术[10-11],实时监测环境信息,并通过物联网技术实现土壤、空气等环境数据的远程实时显示[12-14],显著提升了农户对作物生长环境的感知能力,使其能迅速响应环境变化,精准调控,最终保障作物的品质与产量。然而,智慧农业大棚在实际部署与运营中面临网络覆盖缺失、电力供应受限等挑战。为应对这些问题,本文设计了一种多传感器集成的智慧大棚物联网监测系统。该系统适用于无电无网的环境,实现了数据的本地监测和远程监测,在大棚可以查看实时数据与动态曲线,在云平台可以查看实时数据与历史数据并下载,此外,系统集成的全球定位系统(global positioning system, GPS)能精准定位所监测的大棚,为构建多大棚监测网络提供了坚实基础。

1　智慧大棚物联网监测系统设计框架

智慧大棚物联网监测系统基于OneNET云平台,由多传感器、摄像头、微控制器、长期演进技术(long term evolution,LTE)无线数据终端,触控平板电脑和系统软件等组成,如图1所示。其中,多传感器用来实时监测土壤的温湿度、氮磷钾含量、pH值、电导率,以及空气的温湿度、二氧化碳浓度和光照度等植物生长关键环境数据。摄像头进行大棚植物生长状况的实时监测、图像信息采集、安防管理、作业监控等,以创造最佳的生长环境。云平台负责数据的传输与存储,方便用户远程实时查看各项监测数据。其具有不受时空限制、历史数据可追溯的特点,使用户能根据生产需要,进行深入的数据分析和汇总,及时做出正确的决策。该系统利用物联网技术,实施网络化、智能化大棚环境监测,实时获取大棚内环境信息,为农业生产的精准化和高产量提供有力支持。

2　智慧农业大棚监测系统硬件与软件设计

2.1　硬件系统整体设计

智慧大棚物联网监测系统的硬件部分由多个

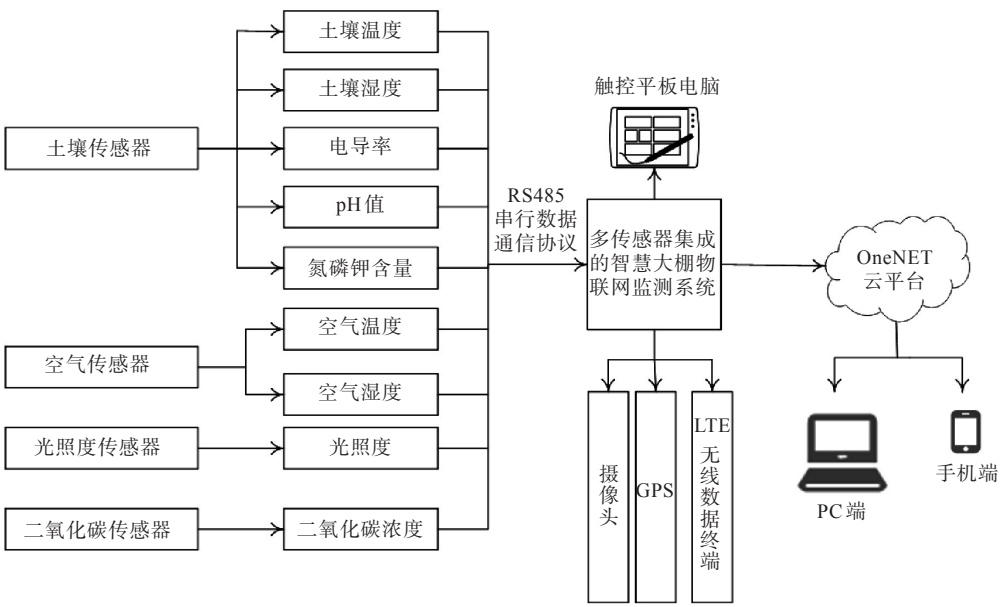

图1　智慧大棚物联网监测系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of an Internet of things monitoring system for smart greenhouse

关键组件构成，各组件相互协作，共同实现系统的各项功能，涵盖电力支持、数据监测、系统控制、数据传输以及数据展示等方面。以下将围绕实现上述功能的硬件选型及电路设计进行阐述与分析。

2.1.1 硬件选型 (1)多传感器。选用基于推荐标准485(recommended standards 485，RS485)通信协议的4种传感器：空气温湿度传感器、二氧化碳传感器、光照度传感器和土壤多参数传感器，表1为各个传感器的相关参数。

空气温湿度传感器应用数字温湿度传感器芯片，该芯片将湿度感测、信号变换、模数转换等功能集成于一体，具有测量精度高、稳定性好、功耗低等优点。该芯片还提供了丰富的功能和接口选项，如可编程测量精度、集成电路总线接口等，满足了多样化的应用需求。

二氧化碳传感器的基本构造由工作电极和参比电极组成。工作电极表面涂有特定的电催化材料，它可以催化二氧化碳分子的电化学反应。当二氧化碳分子与工作电极表面相互作用时，产生与二氧化碳浓度成正比的电流。电流信号通过传感器电路进行放大和处理，最终转化为二氧化碳浓度值。

光照度传感器的内部输入电源、感光探头与信号输出3部分完全隔离。感光探头具有高灵敏度特性，内部包含多个光电传感器，光电传感器能够响应光线的照射并产生电信号。当光线照射到感光探头上时，光电传感器中的光电材料会吸收光子的能量。该过程会导致光电材料中的电子从束缚态跃迁到自由态，产生光生电流，光生电流大小与入射光的强度成正比，因此可以通过测量电信号确定光照的强度。除了光电传感器外，感光探头还包含其他电子元件和电路，用于处理和放大光电传感器产生的电信号，并将其转换为可读的光照度值。

土壤多参数传感器测量土壤水分时利用时域反射原理，主要由信号发生器、采样器、同轴电缆和探针等实现。信号发生器会产生一个具有快速上升沿的阶跃型激励信号，该信号经同轴电缆到达探针。在信号经过探针起始段时，由于介质改变，阻抗发生变化，部分信号发生反射，其余信号沿探针继续前进，在该信号抵达探针末端时，产生末端反射。若L为探针长度，Δt为探头与同轴电缆接头处两次电磁波反射的时间间隔(信号在土壤中传播2倍探针长度的距离所用的时间)，C_0为真空中的光速，则土壤视在介电常数(apparent dielectric constant，K_a)如式(1)所示，再根据K_a反演土壤体积含水量θ_V[15]。

Topp等[16]在进行大量土壤水分测量试验之后，用经验公式给出θ_V和K_a的关系，如式(2)所示。

$$K_a = \left(\frac{C_0 \Delta t}{2L}\right)^2 \tag{1}$$

$$\theta_V = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \tag{2}$$

尽管该经验公式在θ_V的推算中具有一定的实用价值，但其主要适用于黏粒含量较低的砂性土壤。对于其他质地的土壤，直接利用介电常数推算θ_V可能会导致结果偏差，因此需对土壤进行重新标定以确保准确性。

(2)GPS。该系统选用ATGM336H模块实现对所监测大棚的精准定位，在开阔地定位精度为2.5 m，满足大棚实际需求，且功耗低。该模块输出的GPS经纬度为度分格式。若直接将度分格式数据转换为度格式数据，并利用WGS-84坐标系进行定位，会与实际地理位置存在显著偏差。偏差是由于高德地图和腾讯地图基于GCJ-02坐标系，百度地图基于BD-09坐标系，因此，需对输出数据进行坐标系统转换以实现大棚的精准定位。

(3)无线串口通信部件。本系统采用汉枫HF-A21实现无线传输。该部件具备低功耗性能，支持TCP/UDP/HTTP等网络协议栈，提供通用异步

表1 多传感器相关参数

Table 1 Multi-sensor related parameters

传感器	供电电压 / V	最大功耗 / W	测量精度(25 ℃)
空气温湿度传感器	10~30	0.10	相对湿度 ±3% 温度 ±0.5 ℃
二氧化碳传感器	12~24	0.30	二氧化碳浓度 ±5.5%
光照度传感器	12~24	0.15	光照度 ±5%
土壤多参数传感器	4.5~30	0.50	电导率 ±3% 湿度 ±3% 温度 ±0.5 ℃ 氮磷钾 ±5%

接收发送设备（universal asynchronous receiver/transmitter，UART）通信协议/以太网数据通信接口，使其在使用上更加便捷。通过STM32微控制器向该部件发送特定格式的指令，以建立与LTE无线数据终端的连接，进而将多个传感器间接接入无线网络，实现数据的远程传输。

（4）摄像头。该系统中摄像头（海康威视DS-2204IW-D3/W/XM）采用12 V直流供电，功耗为12 W。在机械运动方面，摄像头能在水平方向实现350°的连续旋转，垂直方向则能达到90°的连续旋转，确保无死角监控。通过集成摄像头设备，运用先进的图像采集和实时视频监控技术，对大棚植物生长状况实施监测，并开展安防管理以及作业监控等工作，为农作物创造最佳的生长环境。

2.1.2　电压转换电路设计　鉴于多数大棚位置偏远，缺乏电力和网络覆盖，本系统采用太阳能电池为整个监测系统提供电力。综合考量系统整体功耗及各组件所需最高电压后，选用了2块功率均为60 W的太阳能电池板，并配备额定电压为12 V、额定电流为5 A的锂电池作为储能单元。

本系统不仅需要12 V的主电压，还需满足5 V和3.3 V的辅助电压要求，因此，需要采用高效率同步整流降压开关变换器MP2315SGJ-Z以及低压差线性稳压器（low dropout regulator，LDO）AMS1117-3.3实现电压转换。两种电源调节器相比，LDO稳定性好，负载响应快，输出纹波小，但是效率低，且压降功率会转为内阻发热，而同步整流降压开关变换器有效弥补了LDO的缺点，但是成本相对较高。综合考虑以上因素，选择结合两者使用，即12 V转5 V使用同步整流降压开关变换器，5 V转3.3 V使用LDO，其转换电路如图2所示。

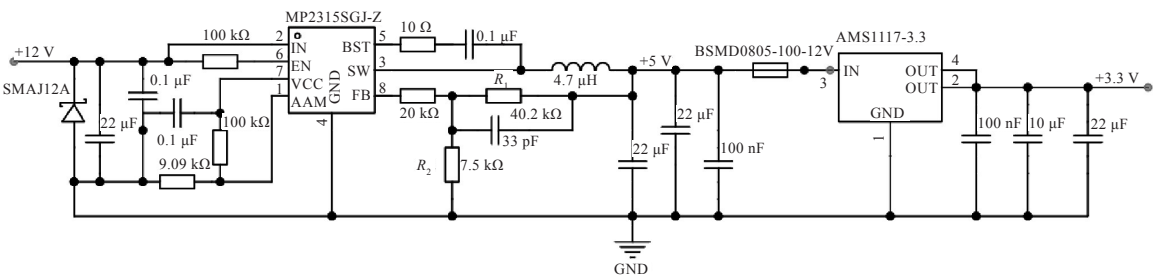

图2　电压转换电路

Fig. 2　Voltage conversion circuit

在向MP2315SGJ-Z芯片的IN引脚施加12 V输入电压前，预先集成单极性瞬态抑制二极管（transient voltage suppressor，TVS）SMAJ12A，以构建稳健的过电压保护机制，迅速响应电路中的瞬态过电压事件，并将其钳制在安全的工作电压范围内，有效防止因瞬态过电压而对电路中的其他元件造成潜在损害。22 μF的旁路电容用来滤除输入电源中的高频噪声和杂波，在由开关输出引脚SW和自举引脚BST构成的回路中，串联接入1个22 μF的电容和1个10 Ω的电阻。通过此设计，基于SW引脚产生的脉冲宽度调制信号，能够有效生成1个高频的开关电源。该电容与电阻的组合不仅有助于平滑电源电压的波动，还能够限制开关管在高频切换过程中产生的电流峰值，从而提高电源的稳定性和可靠性。此外，输出电压V_{out}与电阻R_1和电阻R_2需满足式（3）。

$$R_2 = \frac{R_1}{V_{out}/0.791 - 1} \tag{3}$$

MP2315SGJ-Z芯片在宽输入范围内可以实现3 A连续输出电流。利用此芯片提供1 A的负载电流，确保其在高效模式下运行，从而最大化系统能效并减少功耗。AMS1117-3.3芯片的输入端加入保持电流为1 A，跳闸电流为2 A的自恢复保险丝，有效防止因过载或短路引起的电路损坏。输出端利用22 μF的钽电容，有效抑制自激振荡，平滑输出电压以及优化瞬态响应。

2.1.3　STM32外围电路设计　微控制器及其外围电路负责多传感器、无线串口通信模块和GPS数据的收发以及触控平板电脑与云平台数据的实时更新。本系统中选用STM32F103RCT6芯片作为主控制器，该芯片最大工作频率可达72 MHz，可在温度范围−45 ℃至85 ℃内稳定工作，满足大棚内的使用环境，该芯片及其外围电路如图3所示，包括时钟电路、复位电路和BOOT启动电路。该芯片的高速外部时钟可以使用一个4~16 MHz的晶体/陶瓷谐振器构成的振荡器产生，本系统选用16 MHz的无源晶振，其负载电容C_L为9 pF，杂散电容C_{stray}为3 pF，通常旁路电容C_{L1}与C_{L2}具有相同的参数。根据式（4）确定两个旁路电容为12 pF。该芯片电源引脚处并联2个0.01 μF电容以滤除电

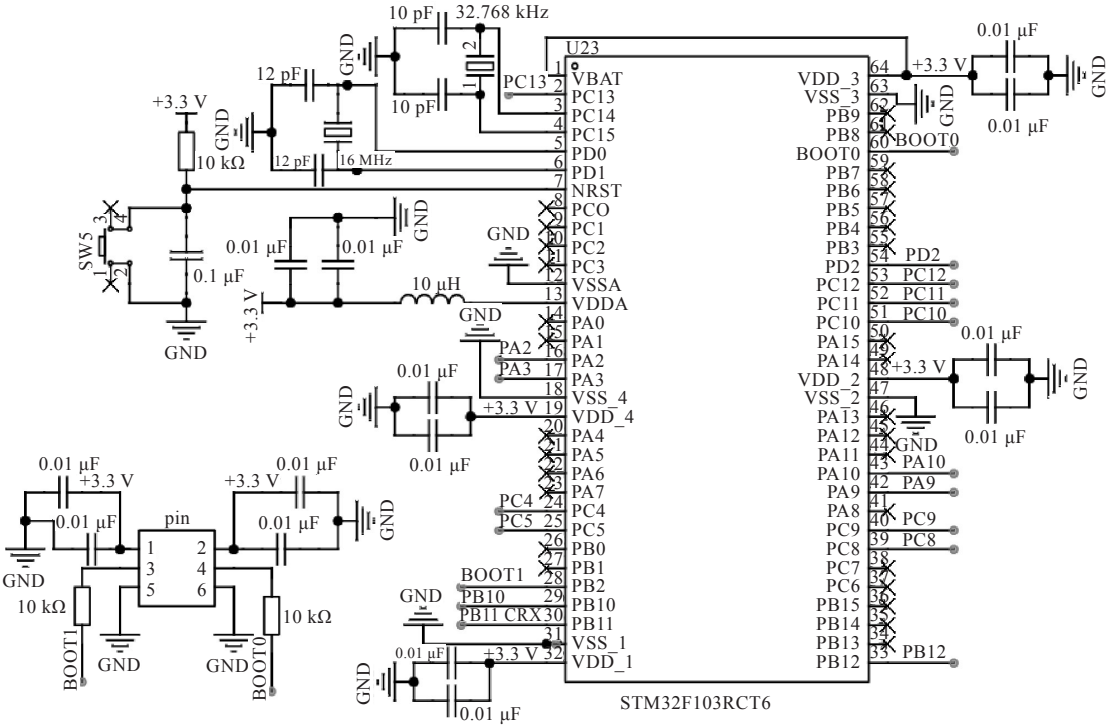

图3 STM32F103RCT6及其外围电路

Fig. 3 STM32F103RCT6 and its peripheral circuits

源线上的高频噪声,确保微控制器获得稳定的电源供应。

$$C_{\mathrm{L}}=\frac{C_{\mathrm{L1}}\times C_{\mathrm{L2}}}{C_{\mathrm{L1}}+C_{\mathrm{L2}}}+C_{\mathrm{stray}} \tag{4}$$

2.1.4 USB转串口电路设计 选用CH340E作为USB转串口芯片,用于计算机与微控制器的通信,其与计算机端Windows操作系统下的串口应用程序完全兼容,无需修改。由于计算机USB接口的输出电压一般为5 V,电源引脚VCC需添加0.1 μF电容以滤除电源中的高频噪声和杂波,内部电源相关引脚V3外接0.1 μF退耦电容,此外接收数据引脚RXD和发送数据引脚TXD与微控制器的接收数据端和发送数据端需交叉连接。

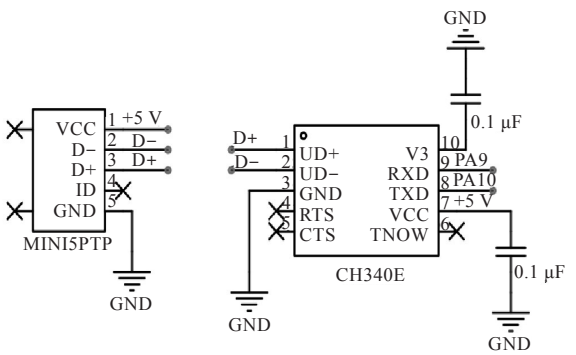

图4 USB转串口电路

Fig. 4 USB to serial port conversion circuit

2.1.5 RS485通信电路设计 传感器数据的传输采用RS485通信协议,而微控制器选用UART通信协议,并遵循晶体管晶体管逻辑(transistor-transistor logic,TTL)电平标准,两者电平标准不同,因此需要进行电平转换以确保数据传输的准确性与稳定性,转换电路如图5所示。在MAX13487EESA+T芯片的接收器输出引脚RO与驱动器输入引脚DI处添加4.7 kΩ的上拉电阻,确保引脚电平维持在预设的状态,防止引脚在不确定状态下产生误操作或噪声。VCC处100 nF的电容主要滤除高频噪声,而1 μF的电容则主要针对低频噪声进行滤波,同时维持电压的稳定。该芯片的差分信号线接口B以及A之间连接120 Ω的终端电阻以消除信号反射和提高信号质量,两引脚处的双向TVS瞬态抑制二极管SMCJ6.5CA在浪涌与静电保护方面发挥着重要作用,其反向工

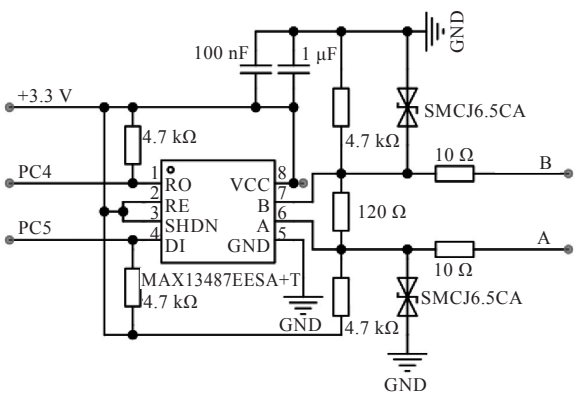

图5 RS485与TTL电平转换电路

Fig. 5 RS485 and TTL level conversion circuit

作电压为6.5 V,此外两输出线上10 Ω的电阻用于调整线路阻抗,同时减少噪声和干扰。

2.1.6　RS232通信电路设计　触控平板电脑的传输采用RS232通信协议,与微控制器电平标准不同,选用MAX3232EIDR芯片进行电平转换以确保数据传输的准确性与稳定性,转换电路如图6所示。其中电容C_1~C_4容量的确定与该芯片的工作电压有关,本系统中该芯片的工作电压为3.3 V,最终确定以上电容容量为0.1 μF。VCC与GND引脚之间的0.1 μF电容用于滤波和稳定电源电压,此外还有助于提高电源效率。

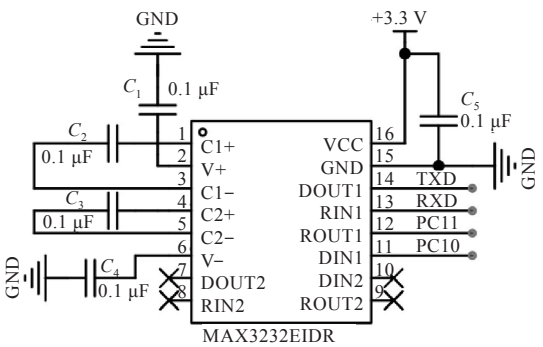

图6　RS232与TTL电平转换电路

Fig. 6　RS232 and TTL level conversion circuit

2.1.7　智慧大棚物联网监测系统电路设计　集成控制多传感器包括多传感器输入接口,用于接收来自不同传感器的数据;电压转换电路,实现12 V至5 V再至3.3 V的电压转换,以满足不同模块的工作需求;STM32微控制器及其外围电路,作为系统的控制单元;USB转串口电路,实现USB与串口之间的数据转换和通信;电平转换电路,用于适配不同电平标准的信号;无线串口通信模块及其外围电路,实现数据的无线传输;GPS及其外围电路,用于获取地理位置信息。

2.2　软件系统整体设计

智慧大棚物联网监测系统的软件设计基于STM32实时接收与发送传感器数据实现,分为本地监测界面的设计与远程监测平台的设计。本地监测界面基于触控平板电脑配套的组态软件进行开发,利用其中的数据变量显示控件、动态曲线显示控件以及基础触控控件等实现。触控平板电脑展示了空气温湿度、土壤温湿度、土壤氮磷钾含量、土壤pH值、土壤电导率、二氧化碳含量以及光照度等关键参数及其变化趋势。此外还实现了预警提示功能。当测量数据超出农作物适宜的生长参数时弹出提示框,提醒用户及时发现异常情况。为了进一步降低功耗,添加了自动息屏功能。当用户在2 min内未进行任何操作时,触控平板电脑将自动息屏以节省电力。当用户再次与触控平板电脑进行交互时,只需轻触屏幕实现即时唤醒。远程监测功能依托于OneNET云平台实现,主要为用户提供实时数据显示、历史数据查询以及任意时间段数据的Excel格式导出服务。实现流程如图7所示,用户界面如图8(a)所示,用于实时更新数据及记录近24 h的动态曲线,数据显示如图8(b)所示。

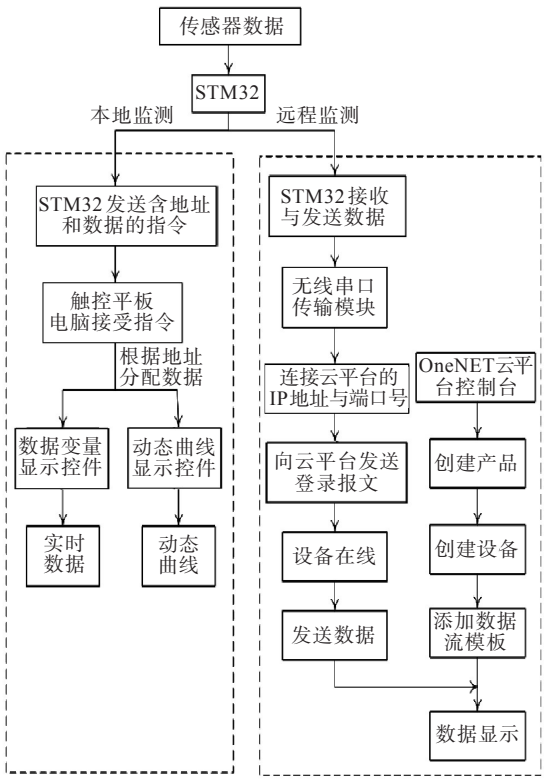

图7　本地与远程监测方框图

Fig. 7　Block diagram of local and remote monitoring

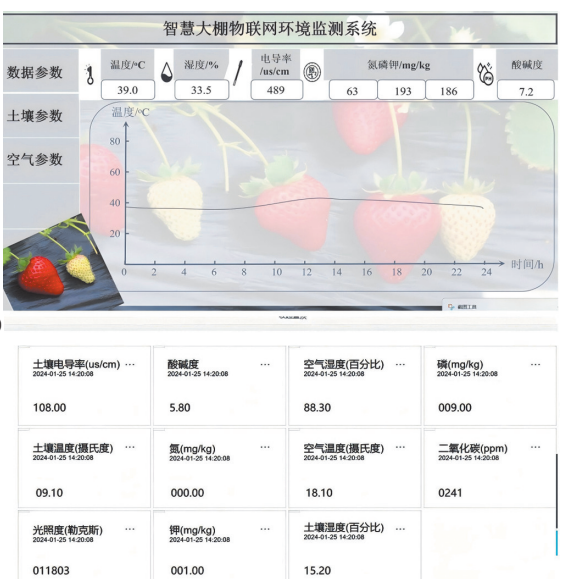

图8　监测界面:(a)本地监测界面,(b)云平台监测界面

Fig. 8　Monitoring interface: (a)local monitoring interface, (b)cloud platform monitoring interface

3 系统整体搭建与测试

3.1 系统整体搭建

完成系统的硬件设计及软件设计后，搭建多传感器集成的智慧大棚物联网监测系统硬件设备。

在立杆的2.85 m处，固定光照度传感器、空气温湿度传感器、二氧化碳传感器以及摄像头，便于拍摄大棚的整体状况，为后续的数据分析提供直观的影像资料。立杆的2.2 m处安装太阳能电池板，由于系统整体功耗较低，经过实测发现，即使将太阳能电池板安装在大棚内也能满足供电需求。此外，考虑到部分大棚面积较大以及多传感器的布局需求，若将太阳能电池板置于大棚外部，不仅会导致电源线过长，进而可能引发不稳定的问题，还可能带来安全隐患，因此本系统将太阳能电池板安装在大棚内部立杆上。立杆的1.5 m处设置设备箱，该设备箱集成串口显示屏与集成电路板。在设备箱的上层规划集成电路板的安装位置，该集成电路板将作为核心组件，负责整体设备的电气控制与信号处理。在设备箱的下层，预留了串口显示屏的安装空间。该显示屏通过串口与集成电路板连接，用于实时显示系统监测到的数据与曲线信息。串口显示屏的放置位置考虑了操作人员的视线和操作习惯，确保在设备运行过程中，操作人员能够方便快捷地读取相关数据。在最底部的设备箱安置锂电池，以便为整个系统提供持续的能源供应。

系统的各部件电源线与信号线主要从立杆内部走线，这种设计既美观又能有效避免外部环境因素对线路的影响。土壤多参数传感器的电源线与信号线则是从立杆0.5 m处的检修口引出，这样的布局便于进行线路检修和测量工作。通过这种方式，实现了系统布局的合理性与实用性，确保整个监测系统在大棚环境中稳定运行，提供准确的数据监测功能。

3.2 系统测试

系统搭建完成后，为了验证其稳定性和准确性，在湖北省农业科学院某瓜果大棚内进行实测。截至目前，本系统已经稳定运行6个月有余。以随机挑选的1周（2023年11月28日至2023年12月4日）的系统监测数据为例分析系统运行情况。在此期间天气状况呈现出复杂多变的特点，具有一定的代表性。将OneNET云平台在此期间采集的数据绘制成对应的曲线，如图9所示。空气传感器所测量的温度曲线与本周整体的温度趋势相对应。具体而言，在2023年11月28日，当温度达到最高点时，测得的数据曲线也呈现出相应的峰值。而在2023年11月30日，由于天气温度较低且持续小雨，光照度保持在较低水平。此外，由于温度降低导致二氧化碳分子排斥性减弱，扩散速度减慢，进而导致大棚中二氧化碳浓度明显低于其他几天。由于所绘制的各参数曲线与实际气象条件和温度之间展现出显著的相关性，验证了数据的准确性和可靠性。此外，云平台以稳定的每10 min更新频率确保了数据的连续性，进一步体现该监测系统的准确性与稳定性。

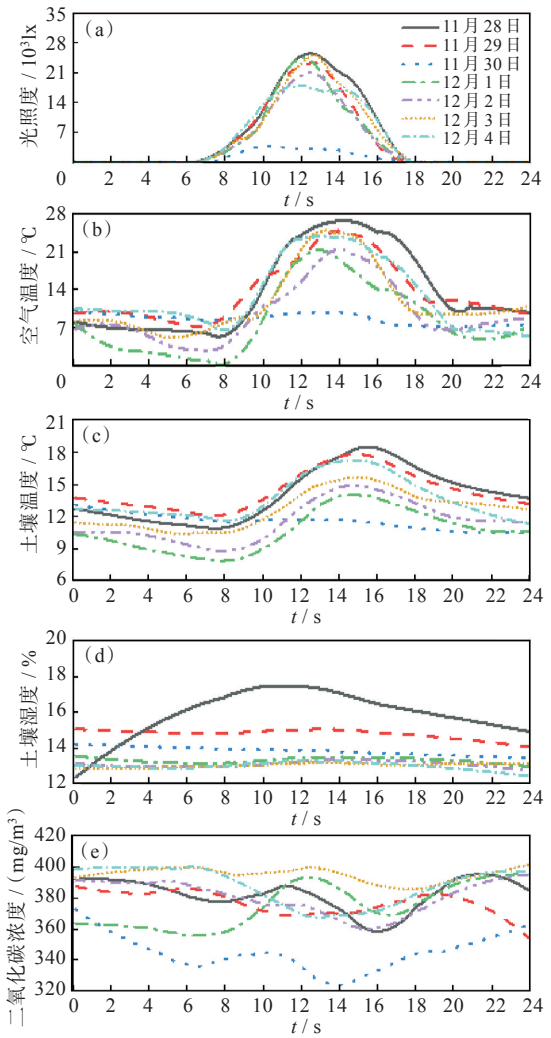

图9 不同日期下大棚环境参数随时间变化曲线：(a)光照度，(b)空气温度，(c)土壤温度，(d)土壤湿度，(e)二氧化碳浓度

Fig. 9 Curves of greenhouse environmental parameters changing over time on different dates: (a)light intensity, (b)air temperature, (c)soil temperature, (d)soil humidity, (e)carbon dioxide concentration

相较于其他监测系统，本系统在确保准确性与稳定性的同时，还具备以下显著优势：首先，基

于多传感器集成技术,采用可插拔接口连接传感器与系统电路板,极大地简化了安装与拆除过程,有效解决了传统焊接连接传感器在长期运行中出现的焊点松动等问题。其次,实现了多传感器、无线通信技术、GPS、太阳能电池、摄像头、触控平板电脑以及云平台等技术的综合集成,打破了时间和空间的限制,即使在无电无网的环境下也能同时实现本地与远程的监测,为农业生产带来更高的智能化水平,同时也为大棚环境调控提供有力的数据支撑和策略指导。

4　总结与展望

本文开发了一套多传感器集成的智慧大棚物联网监测系统,无需依赖外部电力供应和网络连接,实现了大棚内多种环境参数本地与远程的实时监测,包括土壤温湿度、氮磷钾含量、pH值、空气温湿度、二氧化碳浓度、光照度以及经纬度等。同时,系统还能够实时监测植物的生长状态,并获取相关视频资料。经过实地测试验证,本系统展现出良好的运行稳定性、准确性与实时性,为农作物的科学培养提供了有力支持。但是该系统仍存在一定局限性,其尚未将液体肥料施肥、自动喷药、自动灌溉、自动降温和自动卷膜等功能集于一体,未来的研究将沿着整合以上功能的方向持续优化,为农业生产提供更高效、精准的支持。

参考文献

[1] 文小玲,邹艳华,周洵.农业生产环境监测系统软件设计[J].武汉工程大学学报, 2014, 36(7):68-72.

[2] SCHIEFFER J, DILLON C. The economic and environmental impacts of precision agriculture and interactions with agro-environmental policy [J]. Precision Agriculture, 2015, 16(1): 46-61.

[3] PAUSTIAN M, THEUVSEN L. Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers [J]. Precision Agriculture, 2017, 18(5): 701-716.

[4] GOKMI K. A study on the analysis of agricultural and livestock operations using ICT-based equipment [J]. International Journal of Advanced Smart Convergence, 2020, 9(1): 215-221.

[5] RUBANGA D P, HATANAKA K, SHIMADA S. Development of a simplified smart agriculture system for small-scale greenhouse farming [J]. Sensors and Materials, 2019, 31(3): 831-843.

[6] SIMO A, DZITAC S, BADEA G E, et al. Smart agriculture: IoT-based greenhouse monitoring system [J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2022, 17(6): 5039.

[7] 黄东栋,程莉,党晶晶.基于物联网的环境在线监测系统研究[J].武汉工程大学学报, 2018, 40(3): 320-324.

[8] 贾珺,李静宇,董芳娟.物联网技术在智慧农业大棚监测系统设计中的应用探讨[J].智慧农业导刊,2023,3(13):9-12.

[9] 朱灿基,卢涛,冯巩,等.面向物联网的分布式跨平台数据传输系统设计[J].武汉工程大学学报, 2015, 37(3):74-78.

[10] 郭颖.基于STM32F103的智慧大棚无线温度传感器节点设计[J].物联网技术,2023,13(2):30-32.

[11] BHATT H, BHUSHAN B, KUMAR N. IoT: the current scenario and role of sensors involved in smart agriculture [J]. International Journal of Recent Technology and Engineering, 2019, 8(4): 12011-12023.

[12] QUY V K, HAU N V, ANH D V, et al. IoT-enabled smart agriculture: architecture, applications, and challenges [J]. Applied Sciences, 2022, 12(7): 3396.

[13] 李宝生.一种基于物联网技术的智慧农业大棚远程监控系统设计[J].中国科技信息,2022(15):95-96.

[14] PRATHIBHA S R, HONGAL A, JYOTHI M P. IoT based monitoring system in smart agriculture [C]// 2017 International Conference on Recent Advances in Electronics and Communication Technology (ICRAECT). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 81-84.

[15] 李晓斌.基于时域反射技术的土壤剖面分布式含水量测量研究[D].杨凌:西北农林科技大学, 2022.

[16] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research, 1980, 16(3):574-582.

本文编辑:霍淑利