

基于 LoRa 无线传感网络的农业温室大棚环境测控系统设计

王楠

(杨凌职业技术学院, 陕西 咸阳 712100)

摘要: 温室大棚是种植反季农作物的重要设施, 棚内环境参数直接决定了农作物的生产质量和数量; 然而, 现有的测控系统由于受天气条件等因素的影响, 导致环境温湿度测试存在一定的误差; 为了满足农作物的生长需求, 并提高精确度, 提出了基于 LoRa 无线传感网络的农业温室大棚环境测控系统的优化设计; 通过改装传感器设备和调整数据处理器和控制器的内部结构, 构建了系统数据库并组建了 LoRa 无线传感网络, 实现了实时采集大棚环境数据和传输到系统终端; 通过计算调整控制量, 实现了对农业温室大棚环境的测控功能; 实验结果显示, 与传统测控系统相比, 优化设计的系统在环境温湿度测试方面的误差显著降低了, 分别降低了 3.65 °C 和 3.75%。

关键词: LoRa 无线传感网络; 农业温室大棚; 环境测控系统; 环境数据采集; 调整控制量

Design of Agricultural Greenhouse Environment Measurement and Control System Based on LoRa Wireless Sensor Network

WANG Nan

(Yangling Vocational & Technical College, Xianyang 712100, China)

Abstract: Greenhouses are an important environment for planting off-season crops, and the environmental parameters of greenhouses directly determine the production quality and quantity of crops. However, existing measurement and control systems have certain errors in environmental temperature and humidity testing due to factors such as weather conditions. In order to meet the growth needs of crops and improve accuracy, an optimized agricultural greenhouse environment measurement and control system based on LoRa wireless sensor network is proposed. By modifying the sensor equipment and adjusting the internal structure of data processors and controllers, the system database and LoRa wireless sensor network are established, and the real-time environmental data of the greenhouse are collected to transmit the system terminals. The control variables are calculated and adjusted to achieve the measurement and control function of the agricultural greenhouse environment. Experimental results show that compared with traditional measurement and control systems, the optimized system significantly reduces the errors of environmental temperature and humidity by 3.65 °C and 3.75%, respectively.

Keywords: LoRa wireless sensor network; agricultural greenhouse; environmental measurement and control system; environmental data collection; adjusted control quantity

0 引言

温室大棚是一种用于栽培植物的设施, 特别是在不适宜植物生长的季节, 它能提供必要的温室环境, 以促进植物的生长并增加产量。温室产业在我国农业中占有重要地位, 它不仅增加了农民的收入, 还缓解了我国冬春季节蔬菜供应紧张的问题。温室内部的环境状况对植物的生长具有重要影响。如果环境条件不适宜, 可能会导致作物生长受阻、植物病害增加, 进而给农户带来重大经济损失。随着温室大棚在我国种植面积的不断扩大, 如何实现温度、湿度和光照强度

等环境因素的自动控制成了一个巨大的挑战。受这些因素的影响, 温室大棚作物的产量和质量普遍较低, 为此设计和开发一种农业温室大棚环境测控系统具有重要的意义。农业温室大棚环境测控系统的工作目的是实时监测大棚内部的环境参数, 并根据作物的生长需要进行调整, 以确保植物能够正常生长。该系统的应用将有助于提高温室大棚作物的产量和质量, 为农民带来更大的经济效益。

近年来, 已经有很多学者对农业温室大棚环境测控系统进行了研究。例如文献 [1] 提出的基于物联网的农业温

收稿日期: 2024-01-29; 修回日期: 2024-03-15。

基金项目: 杨凌职业技术学院科研项目 (zk22-45)。

作者简介: 王楠 (1988-), 女, 硕士, 讲师。

引用格式: 王楠. 基于 LoRa 无线传感网络的农业温室大棚环境测控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 100-107.

室大棚生产环境测控系统, 在农业大棚内, 部署了具备自组网特性的 ZigBee 传感器节点, 它们实时采集关于农作物生长的各种信息, 将采集数据通过以太网传送到用户端, 调用多网融合、风光互补的野外气象监测装置, 根据用户需求, 利用 NB-IOT、LoRaWAN、WiFi、4G 或以太网等技术, 实现野外环境数据的传输, 包括温度、湿度、光照、粉尘、风速风向以及降雨量等气象数据。该系统不仅支持自动控制, 也兼容手动操作。用户可以通过手机 APP 或 PC 随时查看农作物生长的实时数据, 并且能够远程控制农业大棚内的各种设备, 如风机、卷帘、加湿器和节水灌溉装置等。这为用户提供了方便的监控和操作体验, 有助于提高农业生产的效率和智能化水平。文献 [2] 提出的基于蛙跳 PID 算法的温室大棚环境测控系统, 设计系统使用蛙跳算法替代传统的 PID 控制算法, 并对控制流程进行调整, 该系统主要针对农业温室大棚的温度和湿度进行控制。文献 [3] 提出的基于 Qt 的农业大棚自动测控系统, 设计系统以 Qt Company 开发的跨平台 C++ 图形用户界面为框架, 综合利用 GPRS 和 UDP 技术, 将采集的环境数据实时传输至 MySQL 数据库, 同时, 该自动监测系统还具备环境测控结果的可视化输出功能, 使用户能够直观地了解大棚内的环境状况。文献 [4] 提出了一种基于 LoRa 与模糊控制的温室环境测控系统设计。该系统采用 STM32 作为微控制器, 并配置限位开关以确保卷帘的安全运行。通过 LoRa 和 4G-LTE 实现与服务器的通信和交互, 从而可以采集温度、湿度、光照度等环境数据。利用模糊控制算法对风口开合宽度进行自动调节, 通过卷帘覆盖风口的方式来实现温室环境的调节。然而上述传统测控系统在功能上存在明显问题, 主要体现在测量误差和控制误差两个方面, 其主要原因是环境实时数据的采集值存在较大误差, 为此引入 LoRa 无线传感网络的概念。

LoRa 无线传感网络是一种基于 LoRa 技术的低功耗、远距离无线通信网络, 而 LoRa 是一种基于扩频技术的远距离无线传输技术^[5]。LoRa 无线传感网络由多个无线传感器节点组成, 用于监测和收集各种数据。与传统无线传感网络相比, LoRa 无线传感网络具有功耗低、通信距离远、数据传输安全性高等特点。为解决上述方法中存在的问题, 提出基于 LoRa 无线传感网络的农业温室大棚环境测控系统设计。利用 LoRa 无线传感网络对农业温室大棚环境测控系统进行优化, 以期能够提升对农业温室大棚环境的测量与控制精度, 间接地提升温室大棚的农作物产量与质量。

1 农业温室大棚环境测控硬件系统设计

优化设计的农业温室大棚环境测控系统包括硬件和软件两部分。在硬件方面, 系统根据 LoRa 无线传感网络的组网原理进行改装构架, 以农业温室大棚环境的测量装置作为 LoRa 无线传感网络的组成节点, 并选择符合大棚环境要求的传感器设备。根据网络工作原理和环境数据采集精度要求,

对传感器设备进行改装^[6], 实现对温室大棚内环境参数的监测、分析和控制。通过安装各种传感器实时监测温度、湿度、光照度、二氧化碳浓度等参数, 并收集数据。并根据预设的环境目标进行比较, 确定环境参数是否满足作物的生长需求。同时, 系统提供远程遥控和监控功能, 农户或管理人员可以使用远程控制终端设备随时监测和调整温室大棚的环境参数, 以确保作物得到最佳的生长条件。此外, 系统也致力于节约资源和提高效率, 通过智能调节加热、通风和灌溉等设备, 减少能源消耗, 提高农作物生产效益^[7]。

1.1 环境传感器

影响农作物生长的环境因素主要包括大气温度和湿度、光照条件、土壤含水量、二氧化碳浓度、养分以及生物条件等, 因此选择影响环境的因素作为农业温室大棚环境的测控对象, 在硬件系统中设置相应的传感器设备^[8]。

1.1.1 空气温湿度传感器

空气温度和湿度会在一定程度上影响温室大棚中农作物的代谢情况和蒸腾作用, 会在一定程度上影响土壤的温度和湿度, 因此空气环境中适当的温湿度是农作物生长的保障^[9]。在研究的优化系统设计中, 采用具有独立调节功能的温湿度传感器。选取 TMP36 型号的温度传感器和 HDC1080 型号的湿度传感器, 其中 TMP36 温度传感器, 电压供应范围广泛为 2.7~5.5 V, 测量工作温度范围为 -40~125 °C, 温度精度为 ±0.5 °C, 分辨率为 0.1 °C, 其易于使用且成本较低。HDC1080 湿度传感器相对湿度的测量范围为 0~100%, 相对湿度的湿度精度为 ±2%, 具有较强的抗干扰能力, 在温度变化或其它环境因素下具有较高的稳定性。则传感器温度和湿度的测量电路如图 1 所示。

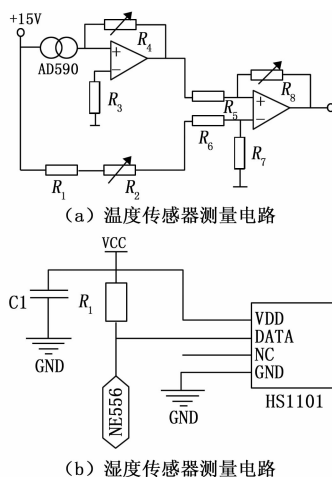


图 1 空气温湿度传感器测量电路图

如图 1 所示, 优化后的系统中, 空气温湿度传感器的温度传感芯片为 AD590, 通过芯片校准保证温湿度传感器在 0 °C 或 25 °C 附近有较高监测精度。温湿度传感器采用 HS1101 电容式湿度传感芯来测量湿度, 测量电路中集成了定时器 NE555 芯片^[10]。这些定时器与周围的电容和电阻共同构成多谐振荡器。通过研究 HS1101 的典型输出曲线, 发

现电容值与湿度值之间存在一定的关系。测量 NE556 定时器的输出脉宽,并据此计算出相应的电容值,推导出相应的湿度值。

1.1.2 光照度传感器

选用 BH1750FVI 型号的光照度传感器,光照度测量范围为 0~6 553 Lx,分辨率为 0.1 Lx,光照度精度为±5%,具备数字输出能力,可以直接与数字设备进行连接,并通过 I2C 接口进行通信,使集成和使用变得更加便捷。采用光敏电阻作为光照度传感器的核心元件,光敏电阻能够根据外界光线的强弱调整自身的电阻值^[11]。这种特性使它成为检测光照度的理想选择。硬件系统中光照度传感器的工作原理如图 2 所示。

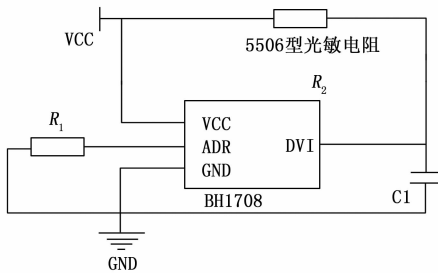


图 2 光照度传感器工作原理图

分析图 2 可知,在光照传感器中,特别选用了 5506 型光敏电阻,这是由于光敏电阻对光线极其敏感。具体来说,随着光照强度的增加,5506 型光敏电阻的阻值会相应降低。在没有光照的情况下,它处于高阻态;一旦有光照,其阻值甚至可以降低到 1 kΩ 以下。光照度传感器中的主控芯片通过模数转换器来采集光敏电阻两端的电压,从而计算出当前农业温室大棚环境中的光照情况^[12-15]。

1.1.3 二氧化碳传感器

农业温室大棚环境测控系统中使用的二氧化碳浓度传感器以红外检测作为传感原理,通过将红外光源、气室和红外探测器置于一个光学轴线上,实现了对二氧化碳气体红外吸收信号的高分辨分析。选用 Winsen MH-410D 型号二氧化碳传感器,其具有数字输出和 I2C 通信接口,适用于温室大棚环境监测应用。该传感器二氧化碳浓度测量范围为 0~10 000 ppm,精确度为±50 ppm,工作温度范围为-10~50 ℃。MH-410D 型号传感器通常使用低电压供电,其供电电压为 5 V,具备低功耗特性。该装置采用恒定电流驱动,传感器按预设调制频率发射红外线,经窗材料进入测试气室后再通过自然扩散进入测试气室。在此过程中,二氧化碳在被测气室中吸收一定波长的红外线,并通过红外检测器检测到。由红外探测器产生的电信号,经预放大电路放大,再通过高精度的放大和整流,获得与待测气体浓度相匹配的直流信号,送至测控系统处理。该传感器内部装有温度传感器用于监测工作环境温度,并在壳体上安装了一个小型的加热器,由测控系统来控制^[16]。

1.1.4 土壤水分传感器

选用 FC-28 型号土壤湿度传感器,其具有高灵敏度和快速响应。测量土壤湿度的范围为 0~100%RH,工作电压一般在 3.3~5 V 之间,操作温度范围为 0~50 ℃。为确保工作可靠性,对土壤湿度传感器进行了优化设计,选用了 DS18B20 作为 T 型探针,各管脚之间通过热收缩隔离,避免了电路之间的短路。土壤温度和湿度资料的应用,要求把传感器长时间插入土壤中,因此,在选用温度和湿度传感器时,必须考虑如何避免与土壤接触锈蚀的问题,因此对土壤湿度传感器和核心部件进行电镀处理。

按照上述方法可以实现农业温室大棚其他环境传感器的优化设计结果,确定不同类型传感器的数量与安装位置,其中光照度传感器安装在大棚的 4 个对角线终端及中心位置上,温湿度传感器和二氧化碳传感器以一定规律均匀分布在温室大棚环境中,而土壤水分传感器主要安装在农作物种植土壤内^[17]。

1.2 LoRa 无线通信模块

布设 LoRa 无线通信模块的目的是为传感器设备的实时采集数据提供传输条件,农业温室大棚环境中布设的 LoRa 无线通信网络的具体组成结构如图 3 所示。

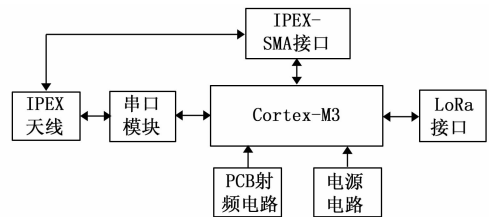


图 3 LoRa 无线通信模块组成结构图

图 3 中的 LoRa 无线通信模块采用 IPEX-SMA 接口对模块外置天线进行传输,在一定长度范围内确保天线阻抗匹配,减少 PCB 射频电路的复杂度,从而获得更好的射频性能。LoRa 模块采用 32 位、高性能的 SX1278 扩展技术,以 Cortex-M3 核为核心,支持全 AT 指令集进行节点地址、信道及无线速率分配,同时支持方向和透明两种传输模式。在系统的设计中,LoRa 通讯模块选择了模块化设计,提高了硬件设计的效率,同时,它的扩展性和灵活性也得到了很大的改善,使硬件设计更简单。此外,LoRa 通讯模块上还带有一个屏蔽壳,可以将外部的干扰信号隔绝开来,提高了系统数据传输的稳定性^[18]。

1.3 环境测试数据处理器

环境测试数据处理器的主要任务是为数据的采集、预处理等工作提供硬件支持。优化设计系统中使用的数据处理器以 S3C2440 芯片作为核心,具备高效稳定的 CPU 性能,可执行高速位操作、加减操作以及乘法操作。改造环境试验资料处理机的操作内建模组,包含 32 位作业架构群,可满足资讯融合作业之要求。该系统采用了高性能 CPU 内核,实现快速解析高层次语言代码,具有良好的语言兼容性。该处理器具有高速 ROM 与 RAM 的特点,能够

进行高速的并行读取与写入，其反应速度与运算效率能满足优化设计解控系统的运行需要^[19]。

1.4 系统控制器

系统控制器的工作内容可以分为两个部分：一部分是根据农业温室大棚环境参数的测量结果，结合农作物种植与生产对环境的要求，生成控制指令来控制环境执行机构；另一部分是对硬件系统中传感器设备、处理设备以及无线传感通信网络的运行状态与进程进行控制，保证系统中的软件程序能够成功调用相应的硬件设备。改装的系统控制器以低功耗的 8 位 CMOS 微控制器 STC89C54RD+ 为核心，缓解了系统功耗和处理速度之间的矛盾，提高了系统的可靠性和稳定性^[20]。

此外，还需添加补光、遮光、升温、冷却、加湿器、通风机等环境控制执行设备，这些设备能够直接接收控制器生成的控制指令，并依照控制指令内容作出响应。最终将系统中的所有硬件设备接入供电电源，完成完整硬件系统的优化设计。

2 农业温室大棚环境测控系统数据库设计

农业温室大棚环境测控系统需要大量存储空间，支持对测定数据的存储、历史数据的查询分析，具体包含不同类型农作物的病害与生长需求数据，为环境的控制目标提供参考。在进行数据库开发前，需要建立基本环境信息的概念模型 E~R 图，如图 4 所示。

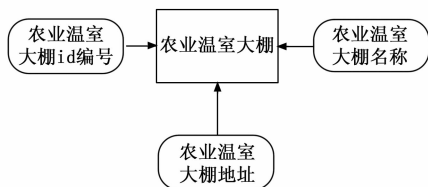


图 4 农业温室大棚基本环境信息 E~R 图

建完 E~R 模型后，就可以根据模型建立数据库，其中农业温室大棚总环境实时测量如表 1 所示。

表 1 农业温室大棚总环境实时测量表

字段名称	字段说明	存储格式	存储长度/bit	备注
greenhouse_ID	记录位置编号	int	10	主键非空
greenhouse_name	大棚名称	varchar	20	非空
greenhouse_crops	种植农作物类型	varchar	20	非空
greenhouse_time	时间	datetime	16	非空
greenhouse_temperature	温度	varchar	20	非空
greenhouse_humidity	湿度	varchar	20	非空
greenhouse_illumination	光照	varchar	20	非空
greenhouse_CO2	二氧化碳浓度	varchar	20	非空

同理可以得出其他数据库表的构建结果。依据业务信息选择合适的数据类型，设计数据库表以及表与表之间的

关联关系，完成农业温室大棚环境测控系统数据库的优化设计。

3 农业温室大棚环境测控系统软件功能设计

在硬件系统和数据库的支持下，对系统的测控功能进行优化。优化设计系统的软件运行原理为：在农业温室大棚环境中布设 LoRa 无线传感网络，网络节点为安装在环境中的传感器设备，实时采集传输温室大棚环境数据至系统测控终端。以采集的实时数据为处理对象，测量农业温室大棚的环境参数，并结合农作物类型确定温室大棚环境参数的控制目标。最终，通过计算控制量与执行控制指令，实现系统的农业温室大棚环境测控功能。

3.1 农业温室大棚环境下组建 LoRa 无线传感网络

将硬件系统中的传感器设备安装在农业温室大棚环境中，在网关、服务器等网络设备的支持下，组建 LoRa 无线传感网络，组建网络结构如图 5 所示。

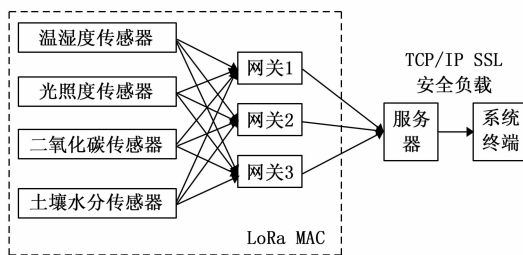


图 5 LoRa 无线传感网络布设结构图

LoRa 无线传感网络中任意两个相邻节点，即传感器的间隔距离可以通过下述公式获得：

$$d_{ij} = \frac{R(i) + R(j)}{2} \tag{1}$$

式中， $R(i)$ 和 $R(j)$ 分别为第 i 和第 j 个传感器的传感半径。根据公式 (1) 的计算结果，可以确定农业温室大棚中所有传感器设备的安装位置。

在组网过程中，网关向无线传感网络中的所有终端节点发送广播消息，传感器节点接收到广播消息后，接受传感器节点的入网请求，向传感器节点分配网络地址信息，即可完成传感器的入网处理工作。若传感器节点未成功接收广播消息，需要针对该节点重复发送，直至节点收到广播消息为止。构建的 LoRa 无线传感网络采用星形拓扑结构，保证网络中各个节点之间均可以通过点到点的方式与中央节点产生直接通信，由该中央节点向目的节点传送信息。根据 LoRa 技术原理，在无线传感网络通信过程中需要执行扩频调制环节，先将发射信号调制为数字信号，送到扩展码生成器，再将该数字信号传送到扩展码生成器，对该数字信号进行解调，对该信号的频谱进行解调，使其频谱变宽，再对载波频率进行调制，最后，通过该射频模块的天线，将该调制信号发射出去。在信息接收方面，将天线所收到的无线电频率信号通过 RF 发生器变换成中频信

号,再由接收机端的扩展代码生成器生成的扩展码序列解调,从而获得原始的信息。LoRa 无线传感网络的数据传输工作满足如下条件:

$$v = \frac{d}{W \times \log_2(1 + \sigma)} \quad (2)$$

式中, W 和 σ 分别为无线传感网络的频带宽度和信道信噪比, v 为信息传输速率,其中变量 σ 的计算公式如下:

$$\sigma = \frac{P_y}{P_n} \quad (3)$$

式中, P_y 和 P_n 对应的是有用信号和噪声信号的功率值。通过 LoRa 无线传感网络的组建为大棚数据提供传输介质。

3.2 利用 LoRa 无线传感网络采集并传输大棚环境数据

基于上述组建的 LoRa 无线传感网络,系统终端通过服务器可获取大棚环境数据。而在利用 LoRa 无线传感网络采集并传输大棚环境数据的过程中,传感器采集计算与网络采集和传输密切相关。传感器采集计算用于将传感器采集到的原始数据转换为有意义的可识别数据。例如,在大棚环境监测中,温度传感器可能输出的是模拟电压值,需要根据传感器的特性,利用相应的计算公式将电压值转换为摄氏度温度值。由此,LoRa 无线传感网络负责将传感器采集计算的数据通过 LoRa 协议进行传输,传输到系统终端,以便实时监测大棚内部环境状况。因此,传感器采集计算确保传感器采集到的原始数据得以准确处理和解读,而 LoRa 无线传感网络则负责把处理后的数据传输终端。二者共同作用,实现了对大棚环境数据的高效采集、处理和传输,为农业管理和监控提供了重要的支持。

综上,根据传感器的工作原理对农业温室大棚中的温度、湿度、二氧化碳等数据进行收集,其中温度数据的采集结果可通过下式获得:

$$x_T = \frac{\psi q v}{\kappa_b I \cdot \ln I} \quad (4)$$

其中: ψ 为不饱和值, q 为电子电荷绝对值, κ_b 和 I 分别为波尔兹常数和温度传感器中发射极的电流值。农业温室大棚空气湿度数据的采集结果可通过下式获得:

$$x_\mu = x_\mu(t) + \kappa_T(x_T - 25) \quad (5)$$

式中, $x_\mu(t)$ 为当前温度下空气湿度的测量值, κ_T 为温度系数。其中变量 $x_\mu(t)$ 的求解可表示为:

$$x_\mu(t) = \frac{C_{\text{sensor}} - 163}{0.39} \quad (6)$$

式中, C_{sensor} 为温湿度传感器中湿度传感芯片的总电容。另外,在考虑红外光特征的情况下,根据朗伯-比尔吸收定律得出大棚环境中二氧化碳数据的采集结果,具体如下式所示:

$$x_{\text{CO}_2} = -\frac{dq_{\text{exit}}}{Kq_{\text{incidence}}} \times H \quad (7)$$

式中, q_{exit} 和 $q_{\text{incidence}}$ 分别为出射光强度和入射光强度, H 为环境气体介质的厚度。按照上述方式可以得出农业温室大棚环境中其他数据的采集结果。设置数据采集频率,通过传感器设备的重复操作,完成实时环境数据的采集工作。

为满足 LoRa 无线传感网络的数据传输条件,将初始采集的温室大棚环境数据转换固定格式。环境数据的传输过程可以量化表示为:

$$x_j = x_f \otimes \kappa_{\text{modulate}} \otimes \kappa_{\text{demodulate}} \quad (8)$$

$$x_f = x_\mu + x_{\text{CO}_2} + x_T \quad (9)$$

其中: κ_{modulate} 和 $\kappa_{\text{demodulate}}$ 分别为实时采集数据的调制参数和解调参数, x_f 为初始采集的温室大棚环境参数。在数据采集频率的驱动下,反复执行数据采集和传输操作,完成实时环境数据采集工作。

3.3 测量农业温室大棚环境指标

以采集并接受的农业温室大棚环境数据作为处理对象,得出环境指标的测量结果,具体包括温度、湿度、光照度、二氧化碳浓度等,其中温度 T 和湿度 μ 参数可通过 3.2 节采集对应的计算公式直接获得。另外环境光照度 λ 和二氧化碳浓度指标 c_{CO_2} 的测量结果可以通过下式得出:

$$\begin{cases} \lambda = x(G_{\text{env}}) + x(G_{\text{diffuse reflection}}) + x(G_{\text{mirror face}}) \\ c_{\text{CO}_2} = \frac{x_{\text{CO}_2}}{V} \end{cases} \quad (10)$$

其中: $x(G_{\text{env}})$ 、 $x(G_{\text{diffuse reflection}})$ 和 $x(G_{\text{mirror face}})$ 分别为环境光、漫反射光和镜面高光的光照强度, V 为二氧化碳传感器的感知体积。将 3.2 中采集的二氧化碳环境数据 x_{CO_2} 代入上述公式中,即可得出农业温室大棚环境指标的测量结果。

3.4 实现农业温室大棚环境测控功能

根据不同农作物对环境的要求,确定农业温室大棚环境的控制目标,接着,基于上述获得有效的农业温室大棚环境指标测量结果,将其结果与农作物生长的控制目标进行比对,当该农作物生长所需的各指标超出规定范围时,由控制器根据所获各指标数据进行控制量的计算,并将控制量计算结果作为内容生成控制指令,将其作用在环境控制的执行元件上,来调节农业温室大棚环境,使各指标数值维持在农作物生长所需范围内。由此,根据上述控制方案,来实现对温室环境的精准监测和控制,提高农作物的生长效率和产量。

以温室大棚中的油桃农作物为例,该作物生长的最佳温度为 18~25℃,根系生长的最佳温度为 22~25℃。在花期,温度不能低于-2℃,也不能超过 30℃,湿度应该控制在 50~60%之间,每天需要至少 10 小时的光照。同理可以得出其他农作物对环境指标的要求,并以此作为系统的控制目标,因此系统的环境控制量可以如下式计算获得:

$$\begin{cases} K(t) = T_m - T \\ K(\mu) = \mu_m - \mu \\ K(\lambda) = \lambda_m - \lambda \\ K(c_{\text{CO}_2}) = c_{\text{CO}_2m} - c_{\text{CO}_2} \end{cases} \quad (11)$$

式中, T_m 、 μ_m 、 λ_m 和 c_{CO_2m} 分别为温室大棚环境温度、湿度、光照度、二氧化碳指标的控制目标。根据控制器的工作原理,以控制量计算结果为内容生成控制指令,将其作用在环境控制的执行元件上。以环境湿度控制任务为例,除湿的方

法包括自然通风、加温除湿、覆盖地膜、控制灌水量和使用除湿机等。在自然通风达不到效果时，可以选择强制通风。同理，利用其他执行机构可以完成农业温室大棚环境所有参数的控制结果，重复上述操作，直至大棚环境参数与控制目标相同为止。

4 系统测试

为了测试优化设计基于 LoRa 无线传感网络的农业温室大棚环境测控系统在环境测量和环境控制功能方面的优化，设计系统测试实验。根据实验目的，将系统测试实验分为两个部分，均采用黑盒测试方式，基本测试原理为：在选择农业温室大棚环境下，利用空调、通风机、加湿器、干冰机、照明灯等设备，设置大棚环境的初始状态，利用优化设计系统对环境参数进行测量，通过设置值与系统输出值的对比，得出反映系统测量功能的测试结果。根据农业温室大棚中的作物种植种类，确定环境参数的控制目标，在优化设计系统作用下，将环境的实际参数与控制目标进行对比，反映出优化设计系统在控制功能方面的测试结果。

4.1 农业温室大棚环境参数设置

此次系统测试实验选择多个种植不同类型农作物的温室大棚作为测试、控制对象，选择温室大棚的基本结构相同，均为全钢架日光温室大棚，长度为 100 m，跨度和高度分别为 10 m 和 5 m。利用温室大棚中的内置调控设备，配置农业温室大棚的初始环境参数。部分大棚环境初始参数的配置情况如表 2 所示。

表 2 农业温室大棚环境初始参数配置表

农业温室大棚类型	测点编号	温度/℃	湿度/%	光照度/Lx	二氧化碳浓度/ppm
油桃温室大棚	1	10	27	14 000	1 670
	2	16	24	14 000	1 650
	3	12	33	14 000	1 620
草莓温室大棚	1	18	25	16 000	1 840
	2	15	29	16 000	1 690
	3	13	35	16 000	1 720 </td
樱桃温室大棚	1	14	21	15 000	1 660
	2	12	27	15 000	1 710
	3	17	30	15 000	1 740

由于农业温室大棚中不同位置的环境参数存在一定差异，因此选择大棚中的多个测点作为研究对象，按照上述方式得出各个测点位置上的初始参数配置结果，以此作为验证系统测量功能的对比标准数据。

4.2 系统参数及布设环境设置

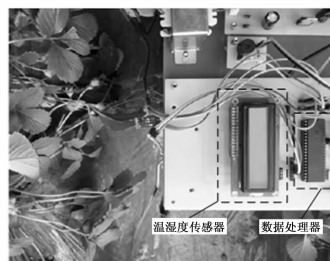
为确保后续测试所得结果的可靠性，现需对系统参数及环境设置进行设置，具体如表 3 所示。

为了给环境数据提供传输介质，在选择的农业温室大棚范围内布设 LoRa 无线传感网络。首先根据硬件系统的优化设计结果，将传感器、处理器、控制器等设备安装在指定位置上，对改装的硬件设备进行调试，并将调试成功的硬

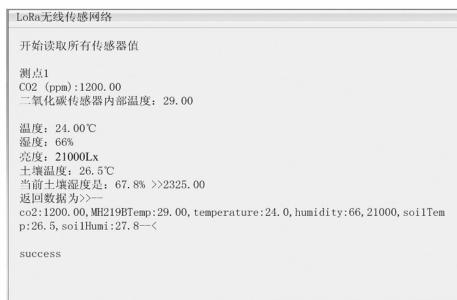
表 3 参数设置

设施	参数	内容
空气温湿度传感器	温度测量范围	-40~125℃
	湿度测量范围	0~100%
	采样间隔	每 10 min 采集一次
光照度传感器	测量范围	0~6 553 Lx
	分辨率	0.1 Lx
	采样间隔	每 30 min 采集一次
二氧化碳传感器	测量范围	0~10 000 ppm
	精度	±50 ppm
	采样间隔	每 1 h 采集一次
土壤水分传感器	检测深度	10 cm
	测量范围	0~100%RH
	采样间隔	每 2 h 采集一次
LoRa 无线通信模块	传输频率	868 MHz
	最大传输距离	20 km
	数据传输速率	50 kbps
环境测试数据处理器	主频	12 MHz
	存储器容量	32 kB Flash, 2 kB RAM
系统控制器	工作电压	5 V
	输入/输出口	14 个数字口, 6 个模拟口

件设备接入到 LoRa 无线传感网络中。LoRa 无线传感网络的节点装设环境实景和组网配置结果如图 6 所示。



(a) 环境实景



(b) 配网界面

图 6 LoRa 无线传感网络装设实景与配网结果

如图 6 所示，硬件调试的起始点是硬件电路焊接，这一步骤也是整个调试过程的基础。在开始焊接之前，仔细检查所有需要的元器件，确保它们的型号和数值与电路图相符，避免出现错焊的情况。在确认无误后，按照电路模块摆放各元器件，这样做既能使电路设计规范，看起来

也更美观,同时还能各部分留出足够的空间,为后续的电路调试和检查提供便利。在 LoRaWAN 协议约束下,对所有入网的终端节点进行初始化与激活,布设 LoRa 无线传感网络的最大节点容量为 5 000 个。

4.3 生成农业温室大棚环境控制任务

根据农业温室大棚类型选择最适宜农作物生长条件设置环境控制目标,由此生成系统测试实验的多个控制任务。部分环境控制任务的生成结果如表 4 所示。

表 4 农业温室大棚环境控制任务表

农业温室大棚类型	测点编号	温度/℃	湿度/%	光照度/Lx	二氧化碳浓度/ppm
油桃温室大棚	1	24	66	21 000	1 200
	2	25	66	22 000	1 300
	3	26	66	21 000	1 100
草莓温室大棚	1	22	68	24 000	1 400
	2	23	68	21 000	1 300
	3	24	68	24 000	1 200
樱桃温室大棚	1	18	75	25 000	900
	2	20	75	22 000	1 000
	3	22	75	23 000	1 100

同理可以得出作用在农业温室大棚中其他位置上的环境控制任务生成结果。

4.4 描述系统测试实验方案

优化设计的基于 LoRa 无线传感网络的农业温室大棚环境测控系统利用 VisualStudio2013 集成开发环境,以 C# 为编程语言,利用标准库类,实现系统上位机软件开发。将硬件系统接入到软件运行程序中,通过数据传输、环境参数测量等步骤,输出环境测控结果,如图 7 所示。

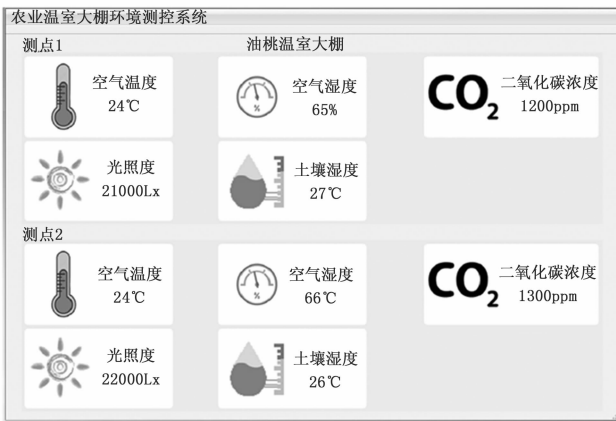


图 7 农业温室大棚环境测控系统输出界面

重复上述操作可以得出多个不同类型农业温室大棚环境的测控结果。为体现出优化设计系统在测量和控制功能上的优势,设置传统的基于物联网的农业温室大棚生产环境测控系统和基于蛙跳 PID 算法的温室大棚环境测控系统作为实验的两种对比系统,利用相同的开发工具完成对比系统的开发,并得出相应的环境测控结果。

4.5 设置系统功能测试指标

设置温室大棚环境温度和湿度测量误差作为系统测量功能的量化测试指标,上述指标的计算公式为:

$$\begin{cases} \epsilon_T = |T_0 - T_c| \\ \epsilon_\mu = |\mu_0 - \mu_c| \end{cases} \quad (12)$$

式中, T_0 和 μ_0 为环境温度和湿度的初始值, T_c 和 μ_c 对应的是环境温度和湿度的测量值。另外,设置环境温湿度控制误差作为系统控制功能的测试指标,其计算公式为:

$$\begin{cases} \delta_T = |T_0 - T_K| \\ \delta_\mu = |\mu_0 - \mu_K| \end{cases} \quad (13)$$

其中: T_K 和 μ_K 分别为系统控制作用下大棚环境的实际温度和湿度值。最终计算得出温湿度测量误差越小,证明系统测量功能越优,温湿度控制误差越小,说明系统控制功能越优。

4.6 实验结果分析

通过不同测控系统的运行,统计相关数据,得出反映系统测量功能的测试结果,如表 5 所示。

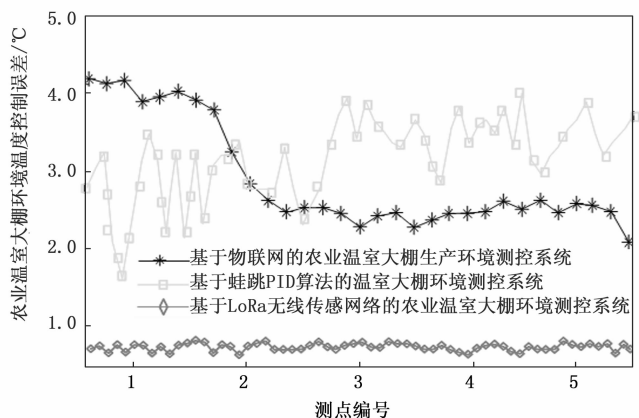
表 5 农业温室大棚环境测控系统测试功能测试结果

农业温室大棚类型	测点编号	基于物联网的农业温室大棚生产环境测控系统		基于蛙跳 PID 算法的温室大棚环境测控系统		基于 LoRa 无线传感网络的农业温室大棚环境测控系统	
		温度/℃	湿度/%	温度/℃	湿度/%	温度/℃	湿度/%
油桃温室大棚	1	20	61	21	64	24	65
	2	20	60	21	61	24	66
	3	21	61	22	62	25	65
草莓温室大棚	1	29	62	21	61	22	67
	2	29	61	26	64	22	68
	3	28	63	27	65	24	69
樱桃温室大棚	1	11	71	13	72	19	75
	2	26	71	22	73	20	74
	3	27	70	25	72	21	76

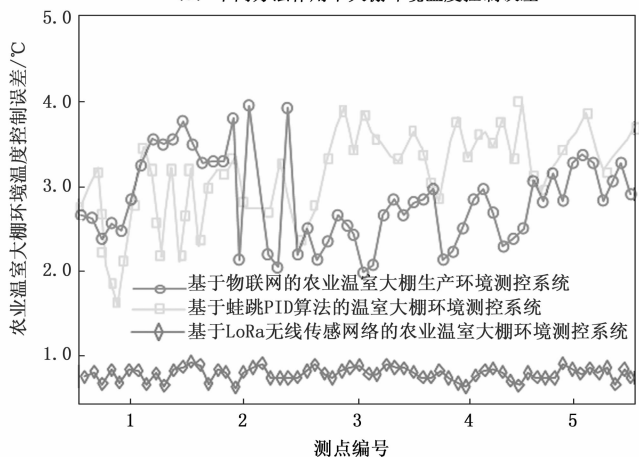
将表 5 中的数据代入公式 (11) 进行计算,得出 3 种系统作用下,农业温室大棚环境的平均温度测量误差值分别为 5.4、3.1 和 0.6 °C。这意味着优化设计的系统相较于传统系统,在温度测量方面能够显著降低误差,提高测量准确性。对于湿度测量误差,优化设计的系统在 3 种系统作用下的平均误差值分别为 5.2、3.7 和 0.7%。这显示出优化设计的系统能有效减小湿度测量误差,提高湿度测量的可靠性。这表明优化设计的系统在农业温室大棚环境测控中能够提供更准确和可靠的温湿度测量结果,有助于提高农作物生长环境的控制效果,从而提高产量和质量。

为了进一步验证研究方法的可行性,在不同系统的控制作用下,通过实际环境参数的统计与公式 (12) 的计算,得出反映系统控制功能的测试对比结果,如图 8 所示。

从图 8 中可以直观地看出,在优化设计系统的控制下,农业温室大棚的实际环境温湿度误差明显减小。这意味着优化设计的控制系统能够更精确地调节和控制温室大棚的



(a) 不同方法作用下大棚环境温度控制误差



(b) 不同方法作用下大棚环境湿度控制误差

图 8 温室大棚环境测控系统控制功能测试对比结果

环境参数,使其更接近预设的控制目标。

通过减小温湿度误差,优化设计的系统创造了更适宜的环境条件,更有利于农作物的生长。当优化设计的系统投入使用时,温室大棚的环境参数能够更稳定地接近最优状态,提供了更合理的生长环境,从而促进了农作物的健康成长。

5 结束语

基于 LoRa 无线传感网络的农业温室大棚环境测控系统,是一个集成了物联网、传感器和无线通信技术的先进系统。通过实时监测温室内的环境参数,如温度、湿度、光照和二氧化碳浓度,该系统为优化作物生长提供了科学依据。LoRa 无线传感网络以其低功耗、长距离传输和高稳定性的特点,确保了数据的准确性和可靠性,从而提升了农业生产的效率。优化设计测控系统充分考虑了农业生产的实际需求。通过智能化控制,温室环境得以精确调控,为农作物提供最佳的生长条件。这不仅有助于提高农产品的产量和质量,还有利于减少农业对环境的影响。

参考文献:

[1] 赵荣阳,王 斌,姜重然,等. 基于物联网的农业大棚生产环

境监控系统设计 [J]. 农机化研究, 2021, 43 (11): 131-137.

[2] 宫 鹤,李佳星. 基于蛙跳 PID 算法的温室温湿度控制系统设计 [J]. 农机化研究, 2021, 43 (1): 186-190.

[3] 潘瑞娟,陈晓宁,黄石原,等. 基于 Qt 的农业大棚自动监控系统设计 [J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2023, 47 (1): 62-66.

[4] 李 扬,王建春,吴华瑞,等. 基于 LoRa 与模糊控制的温室环境调控系统设计 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49 (20): 210-216.

[5] 单慧勇,张程皓,李晨阳,等. 温室环境自动调控系统设计 [J]. 河南农业科学, 2021, 50 (8): 174-180.

[6] 丁梦寒,郑 腾. 温室大棚 LED 智能调光的补光装置设计 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49 (23): 201-206.

[7] 李宗昊,杨 洁,钱苏珂. 基于 PLC 与组态王的花卉大棚温湿度监控系统设计 [J]. 河南农业科学, 2022, 51 (2): 159-168.

[8] 赵慧娟. 基于 PLC 的农业温室大棚智能监测设备应用 [J]. 农机化研究, 2021, 43 (6): 214-218.

[9] 王亚玲,贾树恒,冯朝岭,等. 基于热电效应的温室大棚自供电土壤温度传感器的设计与制备 [J]. 河南农业大学学报, 2022, 56 (2): 209-218.

[10] 李 燕. 云计算下的温室监控系统应用布局 [J]. 农机化研究, 2023, 45 (1): 229-233.

[11] 王永红,王诗瑶. 基于多协议的温室智能物联网系统研究 [J]. 北方园艺, 2021 (5): 156-161.

[12] 秦琳琳,黄云梦,吴 刚,等. 温室通风设备状态监测系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2021, 52 (1): 303-311.

[13] 欧 洋,马春燕,郝彦钊. 基于 LoRa 气雾立体栽培环境数据监测系统设计 [J]. 电子器件, 2022, 45 (1): 244-250.

[14] 宗成骥,王平智,陈先知,等. 寒潮天气表冷器-风机集热系统对连栋大棚热湿环境的影响 [J]. 农业工程学报, 2021, 37 (15): 214-221.

[15] 周斯阳,李洪强,刘丽芳,等. 温室蔬菜大棚生物质能火墙供暖系统 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (17): 6973-6983.

[16] 刘丽星,刘洪杰,李建平,等. 可变参数果园作业平台测控系统的设计与试验 [J]. 河北农业大学学报, 2021, 44 (4): 109-114.

[17] 赵 娜,李 明,赵淑梅,等. 管道送风系统对塑料大棚气流场和温度场影响的 CFD 模拟 [J]. 中国农业大学学报, 2023, 28 (8): 272-281.

[18] 周 波,孙维拓,郭文忠,等. 连栋玻璃温室天沟结构对栽培区光环境的影响分析 [J]. 农业机械学报, 2021, 52 (5): 286-292.

[19] 海 涛,李娜娜,周文杰,等. 基于 LPWAN 物联网的光伏温室智能监控系统设计 [J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2021, 39 (5): 100-109.

[20] 万 云,蒋 阳. 基于 LoRa 技术的温室群远程监控系统的设计 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (2): 595-601.