

果园环境监测及灌溉驱鸟系统设计

姚敏茹, 郭旭阳, 杨泽辰, 万宏强, 荣兴宇, 刘雨翰

(西安工业大学 机电工程学院, 西安 710021)

摘要: 果树等农作物极易受到极端环境的影响, 灾害事件的频繁发生, 对水果种植行业造成巨大经济损失, 因此对果树等农作物的保护十分重要; 为了预知极端天气和鸟害的到来, 对果园环境监测问题进行了研究, 并研发了一种环境监测及灌溉驱鸟系统; 以 STM32F103 作为主控芯片, 采用多传感器数据融合技术, 搭载了多参数监测及控制系统, 能够实现环境数据实时采集和显示, 以及发生极端干旱和鸟害时灌溉、报警驱鸟的功能; 经过样机进行调试和实验, 结果表明系统性能良好, 能够达到预期目标, 具备较强的可行性。

关键词: STM32; 果园灾害; 多传感器融合; 灌溉; 驱鸟

Design of Orchard Environmental Monitoring and Irrigation Bird Repellent System

YAO Minru, GUO Xuyang, YANG Zechen, WAN Hongqiang, RONG Xingyu, LIU Yuhan

(School of Electromechanical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Crops such as fruit trees are highly susceptible to environmental extremes, and due to the frequent occurrence of catastrophic events, the fruit growing industry has suffered huge economic losses. Therefore, it is of very importance to protect crops such as fruit trees. In order to forecast extreme weather and bird damage, a study is conducted on the monitoring of orchard environment, and an environmental monitoring and irrigation bird repellent system is developed. By taking STM32F103 as the main control chip and using multi-sensor data fusion technology, the system is equipped with a multi-parameter monitoring and control system, which can achieve real-time acquisition and display of environmental data. The system has the functions of irrigation and alarm bird repellent in case of extreme drought and bird damage. After debugging and testing with the prototype the results show that the system has a good performance and can achieve the expected goals, with a strong feasibility.

Keywords: STM32; orchard disasters; multi-sensor fusion; irrigation; bird repellent

0 引言

据国家统计局公布的最新统计数据, 2022 年我国水果生产继续保持稳步增长态势, 果园面积与产量双双再创历史新高, 分别达 1 300.95 万公顷和 31 296.24 万吨, 较 2021 年分别增加了 1.57% 和 4.42%, 较 2012 年分别增加了 18.38% 和 41.67%^[1]。果园面积与产量增加的同时也面临着极端干旱对水果的损害, 增加农业灌溉自动化程度迫在眉睫, 精确的农业系统可以有效保证水果的生长质量^[2]。为了预防虫鸟对果园的损害, 种植者经常采取的方式是做一些简单的人工措施^[3]。尽管这些措施能够有效地减轻极端环境带来的灾害, 但长期下去耗费人力和物力^[4]。恶劣环境对于果树构成的威胁极大, 已经成为阻碍果树健康生长和削弱当地果农收入的核心因素。因此, 果业科技人员需要解决的关键问题

在于如何迅速且科学地实施果园防护措施^[5]。

国内外针对果园环境监测做了大量研究, 利用传感器、嵌入式技术及无线通讯技术等先进的信息技术, 开发了一套基于物联网的果园环境监测系统^[6]。文献 [7] 中研究并开发了基于 4G 通信网络的果园环境监测与报警系统, 具有实时、准确和便捷等特点。文献 [8] 研究开发了基于 ZigBee 与 GPRS 的低功耗果园监控系统, 实现果园数据的远程测量与传输。得益于国家政策的制定与科技的不断进步, 种植物的保护方法也在迅速升级。同时, 持续更新的微控制器技术也推动了种植业的自动化与互联互通^[9-10]。文献 [11] 设计了针对农业环境信息传感器节点无线网络及相关环境参数的监控方法, 设计的无线传感器网络系统测试后, 环境数据通过远程监测平台查看。文献 [12] 针对意大利阿尔卑斯山区的果园, 采用了一种基于卫星遥感技术的卫星遥感

收稿日期: 2024-05-24; 修回日期: 2024-08-06。

基金项目: 西安市 2022 年科技计划项目(22NYZF063); 2024 年大学生创新创业训练计划项目(S202410702167)。

作者简介: 姚敏茹(1973-), 女, 硕士, 副教授, 硕士生导师。

引用格式: 姚敏茹, 郭旭阳, 杨泽辰, 等. 果园环境监测及灌溉驱鸟系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8): 8-13.

技术，对其地表土壤湿度进行了实时监控，并对其与作物的生理学关了研究。文献 [13] 在意大利的葡萄园建立了由主节点和子节点组成葡萄实时传感无线网络监测系统，采集葡萄园内的生态因素资料，经由 WSN 传输至主站，并将监控结果以图表形式即时呈现。

国内学界积极研究新兴的灌溉和驱鸟技术以提高对灾害事件的准确预测，并将此作为重要信息的支撑，为灾害防范工作提供高效支持。文献 [14] 设计了基于 5G 通信技术的智慧果园灌溉系统，基于灌水量分析结果建立动态配水模型，通过模型求解得到智慧果园精准灌溉方案。文献 [15] 设计了 NRF52832 蓝牙系统级芯片（SOC，system on chip）为核心的果园无线环境监测与灌溉控制系统，通过信息采集终端模块实时采集果园的土壤含水率、空气温湿度等环境信息，通过电磁阀节点实现精准灌溉，为农业生产提供技术支撑。文献 [16] 基于 Pycharm 和 Arduino 平台开发了鸟类识别算法、物联网通信模块，设计出一种改进的驱鸟器。以摄像头的视频流为输入信息，服务器为运算端，接收视频流并实时识别视频中的害鸟。当识别到果园中的害鸟时，服务器端调用 Socket 发送信号给控制驱鸟器电源的物联网继电器模组。该设计能准确识别果园中的害鸟并驱赶，智能化程度高、高效节能，不易被适应，可为果园精细化管理提供参考。文献 [17] 设计了一种适用于果园的智能声光驱鸟器，采用微波移动物体探测器为鸟类探测装置，利用程序控制器检测处理微波移动物体探测器的输出信号，控制 MP3 语音解码器播放存储在 TF 卡中的驱鸟音乐，通过功率放大器放大后经扬声器输出，使鸟类产生恐惧，达到驱鸟的目的。

随着单片机技术的迅速发展和日趋成熟，使用单片机技术进行环境传感和研究分析已经成为未来发展的重要方向^[18-19]。系统的基本工作机制如下：环境监测设备所收集的数据被送至微控制器进行分析与处理。在此基础上，采集了果园周围的各种环境参数，并在 OLED 屏幕进行显示；在干旱、鸟害的环境数值达到设定阈值时，系统驱动灌溉和报警驱鸟。得益于电子技术的进步，环境监测和防护技术也得到了广泛的发展，各种环境防护装置的研发也因此取得了重大进展^[20-21]。

1 系统的整体设计

- 系统主要分为 4 个模块：
- 1) 传感器监测模块：传感器是果园监测系统的信息来源，本系统选用温湿度传感器、风速传感器、风向传感器、光照传感器、大气压传感器、土壤湿度传感器、超声波测距传感器和雨量传感器，通过对这些传感器所捕捉到的信号进行精准检测，能够将环境变化信息转化为电信号，并输入至单片机进行后续处理。
 - 2) 信号调理模块：通过对传感器采集到的信息进

行放大、过滤后，将采集到的信息传送到主控单元的 ADC 通道、USART 通道、IIC 通道进行数据处理，以便于单片机执行补偿处理，确保所测的环境信息的真实性。

- 3) 主控模块：利用 STM32F103 单片机来控制整个系统。
- 4) 外围功能模块：OLED 显示、灌溉驱动和报警驱鸟。
- 5) 供电及电压转换模块：该系统采用 DC12V5521 型号锂电池作为主要电源，其标称电压为 12 V，容量为 2 800 mAh；采用 DC-DC 电路将 12 V 电源进行降压。

系统的整体架构如图 1 所示。

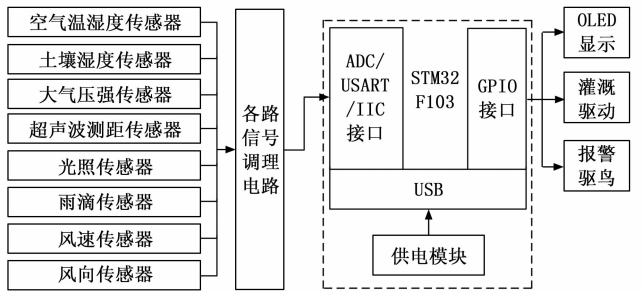


图 1 系统的整体架构图

2 系统的硬件设计

2.1 STM32F103

本系统选用 STM32F103 作为系统的主控制器，该型号的控制器的性能、丰富资源、运行快、集成度高、尺寸小、IO 接口数量多、功耗低、价格实惠、稳定性好等诸多优点。该芯片的资源结构如图 2 所示。

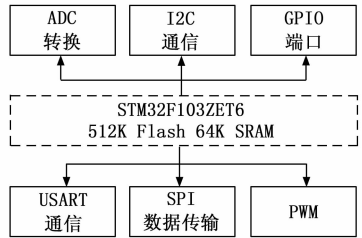


图 2 STM32F103ZET6 资源结构图

2.2 环境监测传感器的选型及电路设计

环境传感器的选取对于系统的性能表现有着十分重要的作用。一旦传感器不能采集准确的数据，数据分析和相应的工作都会受到很大的限制。

该系统主要是对果园等类似环境中的土壤湿度、鸟害距离、空气温湿度、风速、风向、光照、大气压及雨量进行检测，在土壤湿度达到阈值时驱动直流电机带动水泵进行灌溉，在超声波测量鸟害距离达到阈值时驱动蜂鸣器进行报警驱鸟。检测系统具备同时运用多个环境检测器的能力，这显著提升了其对周边环境目标参数的探测精度。通过这一设计，检测系统能够更有效地实现

灾害灌溉驱鸟,为果园等种植环境提供更为可靠的防护。

1) 空气温湿度测量选择 SHT30 芯片。SHT30 基于电容测量原理,利用温度传感器和湿度传感器来测量环境中的温度和湿度。SHT30 的微处理器可以将这些数字信号转换成标准的数字信号,以便进行数据处理和分析。SHT30 具有高精度、低功耗和快速响应时间等特性,使其成为一种非常有用的数字温湿度传感器。将芯片的 SDA、SCL 分别接在主控芯片的 IIC-SDA 和 IIC-SCL 上,利用 IIC 通信进行数据的发送。

2) 风速、风向的测量选择 Max485 芯片。使用 Max485 的芯片来完成 TTL 电平至差分电平的转换,Max485 采用 RS485 通讯协议,DE (发送使能) 引脚控制着 RS485 线的数据传输方向,RO 为传输数据引脚,连接 USART 的 TX 引脚,DI 为接受数据引脚,连接 USART 的 RX 引脚,与主控芯片采用串口通信的方式传输信息。

3) 土壤湿度的测量选择 Risym 公司生产的 FDR 式土壤湿度传感器模块,该传感器的测量原理是借助土壤介电常数的检测,以实现对土壤水分含量的准确反映。将其数据输入口与主控芯片 ADC 通道相连完成数据的模数转换。

4) 光照强度的测量选择由 Telesky 公司制造的 BH1750 光强度芯片,它集成了数字型光强度传感器的电路,采用两线式串行总线接口设计。BH1750 芯片由光敏二极管,运算放大器,模数转换器,晶体振荡器等组成。将其 SDA、SCL 与主控芯片 IIC 通道相连以完成数据的传输。

5) 雨滴的测量选择 Telesky 公司研发的 MH-RD 雨水传感器模块,该传感器利用电路板上的平行线路与液体接触的原理,实现对雨滴的存在以及雨滴量大小的精确测量。将传感器的 AO 口与主控芯片的 ADC 引脚相连,将模拟信号 (AO) 输入和转换成数字信号 (DO) 输出。

6) 大气压的测量选择 Zave 公司生产的 BMP180 气压传感器芯片,该器件内置温度传感器,还实现对气压测量值进行自动补偿,通过 IIC 协议与主控设备进行通信,BMP180 的 SDA 接主控芯片的 IIC-SDA, SCL 接主控芯片的 IIC-SCL 以输出数字化的测量结果,方便集成和处理。

7) 鸟害的距离测量选择 HC-SR04 超声波测距传感器,利用超声波的发射和接收来测量与障碍物之间的距离,由于其非接触式测量的特点,可以在不接触被测物体的情况下进行精准的距离测量,将其发射和接受口主控芯片 I/O 口相连即可。

传感器采集的信息,通过各路信号采集电路进行滤波与整合处理,输入至控制器,控制器判断输入的数据

是否超过设定的阈值,在土壤湿度超过阈值时驱动电机进行灌溉,在鸟害测量超过阈值时驱动蜂鸣器进行驱鸟。

2.3 外围功能模块设计

为满足果园环境监测以及灌溉驱鸟系统的功能需求,详细设计了相应的外围电路。在对每一个外围模块进行构建时,始终按照降能增效的要求,设计了 3 种外围功能,分别是 OLED 显示、直流电机驱动灌溉和蜂鸣器驱鸟。

1) OLED 显示选用淘晶驰研发的 X5 系列 4.3 寸液晶显示屏。本模块的内部集成了 OLED 的驱动电路,外部集成了与 STM32 无缝衔接的 5 V 电源口、GND、TX、RX,通过 STM32 内部的 UART 就能实现主控芯片与显示屏的异步通信,从而完成数据的收发,将数据在 OLED 屏幕上显示。

2) 蜂鸣器驱鸟选用有源高电平蜂鸣器。蜂鸣器选择有源高电平触发蜂鸣器,其内部就由震荡源,只需给予其高电平即可触发。

3) 灌溉水泵的直流电机选用继电器驱动。当系统判断土壤湿度超过阈值时,继电器输出口输出高电平,继电器闭合,电机正转带动水泵出水灌溉;反之输出低电平,继电器为常开状态。

2.4 供电及电压转换模块设计

电源是系统的能量来源,它的正确工作是保证测试系统平稳工作的重要条件。在本系统中,采用电感对输入电源进行储存,电容对输入电源进行滤波稳压。在此基础上设置了电源开关,当按钮朝上移动时,电感便开始放电;而若按钮朝下移动,系统则会立即停止供电。该充放电系统具备宽泛的输入电压范围,从 0.3~9 V 均可适用,并能提供高达 500 mA 的放电电流,从而有效实现锂电池的充放电功能。在此基础上设置了电源开关,当按钮朝上移动时,电池随即启动供电功能;而若按钮朝下移动,系统则会立即停止运行。

系统的电源为混合型电源系统,其供电需求涵盖了 5 V 和 3.3 V 两种工作电压。为满足这一电压需求,特别采用了 DC-DC 电路,将输入的 12 V 高压高效地转换为 5 V 输出,再将 5 V 转换为 3.3 V,从而确保传感器和外设芯片获得稳定且可靠的电力供应。

2.5 PCB 板设计

硬件电路通过嘉立创 EDA 软件来完成,采用双层面板结构。根据之前所设计的传感器电路和外围功能电路,将电路集成到 PCB 板,图 3 为该系统的 PCB 设计图。

3 系统的软件设计

3.1 整体框架

根据对系统的要求,明确了系统中软件的作用,整体分成 OLED 软件设计、终端检测系统软件设计和外

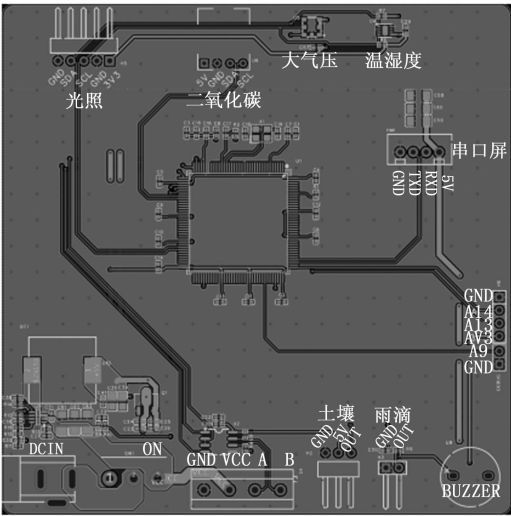


图 3 系统 PCB 设计图

围功能软件设计等 3 部分。采用 C 语言编写程序, 高效地实现了对采集和处理的有关功能。软件的总体框架如图 4 所示。

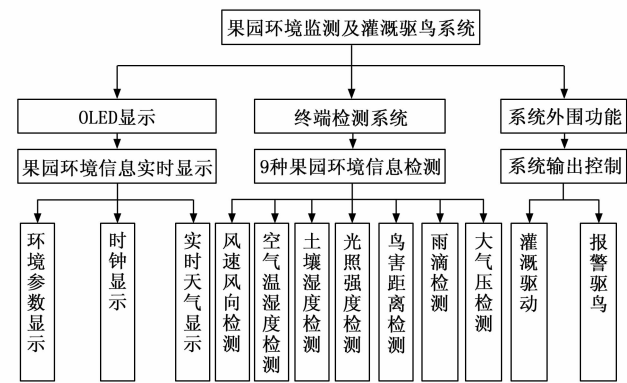


图 4 软件系统总体框架图

系统的终端监测主要由各个传感器模块构成, 检测模块负责精确测量果园内的空气温湿度、风速、风向以及土壤湿度等关键环境参数, 并将其在 OLED 界面上显示, 控制模块则负责在系统判断土壤湿度, 鸟害距离超出设定阈值时驱动灌溉或者报警驱鸟。

3.2 主程序软件设计

在待机状态下, 需要按下开关键后等待约 2 s, 才能为系统供电。在系统上电启动的过程中, 首先要对 STM32 上的所有片内模块以及外设进行初始化和配置, 此过程非常重要。只有正确地将所有硬件初始化并配置好, 才能确保系统能够正常地工作。接着, 系统将启动初始化, 进行必要的驱动初始化, 为后续的显示操作做好准备。在这一过程中, 应当仔细测试和排查各种潜在的硬件故障和软件问题, 确保整个系统的稳定性和可靠性, 以实现系统的成功启动。

当初始化完成后, 会自动启动自检功能。当自检

时, 本装置会综合感知到的声响与振动讯号, 判断其是否正常。当自检结束后, 系统装置将回归到工作模式。在正常工作模式下, 系统会持续监测土壤湿度、鸟害距离, 并与设定阈值进行比较, 当土壤湿度低于 10 %RH 时, 驱动电机进行灌溉, 当鸟害距离少于 10 cm 时, 驱动蜂鸣器进行驱鸟。同时, 测得所有环境数值在 OLED 界面显示。系统主程序流程如图 5 所示。

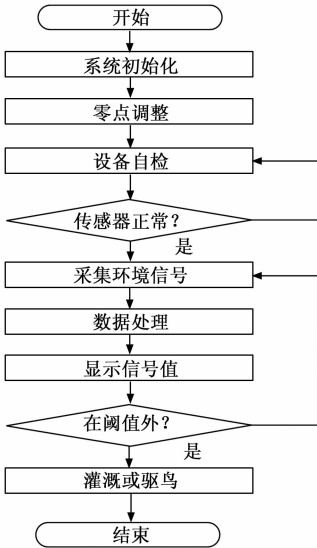


图 5 系统主程序流程图

3.3 OLED 界面设计

使用与 OLED 显示屏配套的 USART HMI 软件, 在软件中根据系统功能需求自主设计 OLED 界面, 根据果园环境监测和灌溉驱鸟系统功能设计了 OLED 显示界面。

USART HMI 软件除了可以在显示界面上插入各种数据显示文本之外, 还能自主插入图片, 对界面进行美化设计。系统加入了温度、湿度、风速、风向、大气压及雨量等数据显示文本, 添加了城市、天气、时钟的显示以及图片美化设计。这里的文本标号与后续在 Keil 中编写显示程序的标号相对应。系统 OLED 界面设计如图 6 所示。



图 6 OLED 界面设计

界面时钟显示采用屏幕内部 RTC 时钟, 在屏幕后面安装纽扣电池, 再在 USART HMI 软件进行时钟程

序的编写,便可以在屏幕实时显示时间、日期和星期,在纽扣电池的支持下,屏幕便可以在断电的情况下继续记录时间。在使用软件对界面和程序调试成功后,使用 CP2102USB 转 TTL 串口下载工具,相较于 CH340,CP2102 传输数据更加稳定,不容易造成数据丢失的情况。使用之前先安装 CP2102 串口驱动,并将串口屏与 CP2102 模块相连,串口屏的 TX 连接 CP2102 模块的 RX,串口屏的 RX 连接 CP2102 模块的 TX。并配置好串口号与波特率,将界面和程序导入串口屏中即可进行界面的显示。串口下载界面如图 7 所示。



图 7 串口下载界面

4 系统的实验及结果

4.1 硬件调试

根据 PCB 板上接线端口,用杜邦线将各个模块的设备与 PCB 板连接,组成完整的果园环境监测及灌溉驱鸟系统。

在系统通电后的测试环节中,对电路电压及信号进行全面的检测工作。利用万用表,逐一仔细测量了芯片各输出端的电压值,以确保电路的稳定性和可靠性。并在设备供电后检查各个硬件模块是否通电,待硬件线路经过确认供电成功后,进入程序调试阶段。

4.2 软件调试

在 Keil5 环境中,完成了对系统整体程序的开发。接着,使用 ST-Link 接口模块,实现了对程序的快速读取,将这些程序直接写入单片机的闪存中。在进行了元器件的连接工作之后,进一步使用了 Keil 软件对整个系统的各个部分进行了仔细的调试工作。试验结果表明,该系统的主程序和各个子模块都满足了设定的要求。

4.3 环境监测设备标定

4.3.1 零点标定

在开始系统的调试前,首先要对其各项指标进行准确的校正。提前需要确保实验环境的完备,这包括设置好加湿器、大功率风扇、台灯等。加湿器模拟土壤湿度突然变化的情况;大功率风扇模拟出风速变化;移动物体作为鸟害距离改变,由于这几种环境参数是影响系统输出的主要参数,所以对这 3 个参数进行实验室测试,其余环境参数均进行简单测试标定。将仪器放在实验室环境条件中进行通电处理 3 min 之后,观察 OLED 显示

屏上的数据,重复上述动作 10 次,并记录不同环境参数数值,然后取平均数值为日常情况下系统的参数标准值。

4.3.2 准确性标定

在系统中,为确保对果园环境测量的准确性,精度校验是至关重要的环节。在该过程中,对每个元件实行单独的验证是必要而不可或缺的环节。首先将试验设备启动并运行 5 min,简单测试非主要依靠的环境信息,比如大气压、雨滴等。然后依次使用风扇、加湿器、灯光这 3 种模拟环境来测量风速、空气湿度、光照这 3 种主要依靠的环境信息。在获取上述环境数据后,将其与标准仪器的测量结果进行比对。当所携带的传感器表现稳定后,随即开始进行调整工作。为了将传感器数据精准转化为标准环境信息数值,每种环境传感器均须经历至少 4 次的调整过程。测试的工作场所应确保无风,温度正常。确认全部的感应器都工作正常之后,依次测量其他环境信息,测量完毕后再再次测量,并测试多次。

4.4 系统性能测试

4.4.1 误差测试

完成检测设备的标定后,利用加湿器等工具模拟不同环境参数,进而开展误差实验。为确保测试的全面性,每种参数都选取两种差异显著的数值进行测试。待数值显示稳定后,记录数据,并通过多次测量取平均值以提高准确性。随后,将这些数据与湿度计等专业工具的测量结果进行对比分析,最后对测试数据进行统计整理。误差测试满足要求。

通过对已有数据的统计分析可知,用指数分割法进行拟合,所得测量值虽然存在一定误差。但是,本系统的准确性仍在可以接受的限度。在外部环境保持稳定的情况下,该系统的准确率和稳定性均表现正常。该系统的偏差被严格控制在 $\pm 1\%$ 的范围内,这一数值完全符合传感器容许误差的标准要求。当含量为 $0.00\% \sim 3.00\%$ 时,容许误差为真值的 $\pm 2.00\%$;而在 $3.00\% \sim 4.00\%$ 的范围内,误差控制在 $\pm 3.00\%$ 以内。

4.4.2 重复性测试

在同样的试验环境下。以湿度计显示数值作为当前时刻的参考空气湿度值,然后使用该系统进行一段时间的测试,直至测量数值趋于稳定后记录测试结果,进行 10 次重复测试,满足设定要求。

4.4.3 稳定性测试

系统能否长期稳定且精确地进行测量,其稳定性成为了一个至关重要的评判标准。首先,将检测装置放在室外环境下进行 24 h 的不间断检测,第二天将装置收回后,在实验前,需要对检测装置进行了精确的校准。随后,将校准完成的检测装置接通电源,并置于实验室的特定环境中。当仪器的显示量逐渐平稳以后,设置 3 min 一次的读数,重复 10 次,每次测量结果与湿度计

相比较。根据分析结果推断，该仪器所测量得到的数值在 24.8~27.4 之间。基于这些数据，进一步计算出该装置的稳定度为 0.34%。证明该系统已能够基本满足稳定运转的需求。

4.4.4 反应时间测试

在测试反应速度前，先人工将各传感器的状态变成静止状态，以确保它后续测量数值变化准确。当前显示值稳定后，再开始对空气湿度、风速和光照进行分别的反应测试，从传感器数值发生变化为开始计数，到步进电机开始启动为最后计数，两次计数之差时间为系统的反应时间，实验数据如表 1 所示。

表 1 反应时间实验数据

环境信息种类	期望值/s	实验值/s	结果评价
空气温湿度	≤60	21.2	合格
风速	≤60	21.4	合格
光照	≤60	27.6	合格

经过对试验数据的分析，证明系统的各项性能参数均达到了预定的设计标准。根据之前进行的测试可以得出，空气湿度、风速以及光照的相对偏差均严格控制在 5% 以内，这满足了设计要求。同时，从表 1 中可以了解到，传感器对空气湿度、风速、光照的响应时间都应当控制在 60 s 以内，上述都符合最初的设计预期。试验结果显示，当系统检测到关键环境参数超出正常范围时，它能够迅速自动工作，满足农户的需求。

5 结束语

针对目前果园智能化监测的研究现状，开发了一种适合现代化果树园应用的智能化环境监测和灌溉驱鸟系统。系统选择了 STM32F103 作为系统的主控器，在硬件方面选用土壤湿度、鸟害距离、温湿度、风速、风向、光照、大气压、雨滴、传感器作为检测装置，并设计了各个传感器的调理电路对信号进行放大输入至 STM32，设置了 OLED 显示、灌溉、驱鸟 3 种外围功能，并制作了整个系统的 PCB 板；在软件方面对 OLED 显示和报警功能的程序进行了实现。最后，将各模块与 PCB 板相连接组成环境监测及灌溉驱鸟原型机，搭建实验环境进行了误差实验和稳定性实验，结果表明本环境监测装置具有良好的准确性和稳定性。

参考文献：

[1] 张 放. 2022 年我国水果生产变化简析 [J]. 中国果业信息, 2024, 41 (2): 35-43.

[2] 唐 靖, 宋志强. 基于 STM32 的果园环境监测及灌溉系统设计 [J]. 计算机时代, 2023 (1): 82-84.

[3] 于 强, 张 健, 殷程凯, 等. 鸟害防治技术及其在农林中的应用展望 [J]. 中国农机化学报, 2023, 44 (3): 64-72.

[4] 邢 艳, 张 伟, 王 军, 等. 川东地区农田鸟害发生情况和防治措施 [J]. 植物医生, 2021, 34 (3): 45-48.

[5] 薛晶晶, 刘 珂, 冯 瑶, 等. 一种基于 WSN 的果园土壤状况监测系统 [J]. 延安大学学报 (自然科学版), 2019, 38 (3): 34-37.

[6] 刘九材. 基于物联网的果园环境监测系统设计与实现 [D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022.

[7] 张兴宇. 物联网在果园监测与报警方面的应用 [D]. 河北工程大学, 2020.

[8] 杨嘉鹏. 基于 ZigBee 与 GPRS 的果园监控系统设计与研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

[9] 刘丽伟. 发达国家农业发展方式转变能力成长态势研究 [J]. 农业经济, 2024 (1): 15-19.

[10] 叶兴艺, 谢 闯. 乡村振兴战略下我国智慧农业发展问题与策略分析 [J]. 农业经济, 2023 (12): 3-6.

[11] MOIS G, FOLEA S, SANISLAV T. Analysis of three IoT-based wireless sensors for environmental monitoring [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66 (8): 2056-2064.

[12] MAIONE B, VIANI F, FILIPPI E, et al. Wireless sensor network deployment for monitoring soil moisture dynamics at the field scale [J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 19: 426-435.

[13] TOSCANO P, GIOLI B, FRATINI G, et al. CO₂ and aerosol particle fluxes measured by eddy covariance in Florence [C] //Proceedings of the International Workshop on Urban Weather and Climate: Observation and Modeling, 2011: 102-105.

[14] 赵 巍, 黄少雄, 邓 镒, 等. 基于 5G 工业通信技术的智慧果园灌溉系统设计 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37 (5): 34-36.

[15] 赵善政. 基于蓝牙 Mesh 的果园智慧灌溉系统的设计 [J]. 黑龙江科学, 2024, 15 (4): 158-161.

[16] 于 强, 陈 青. 基于计算机视觉与物联网的驱鸟器改进设计 [J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50 (12): 44-48.

[17] 杨 敏, 刘贵婷. 基于微波探测的果园智能声光驱鸟器的设计及制作 [J]. 农业技术与装备, 2020 (2): 35-37.

[18] LUO X B, LIU S, JIANG X P, et al. Experimental and numerical study on a micro jet cooling solution for high power LEDs [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2007, 50 (4): 478-489.

[19] 单绍隆, 康 华. 蔬菜大棚环境质量监测系统——基于网络通信技术 [J]. 农机化研究, 2024, 46 (8): 134-137.

[20] 刘寒冰, 王小涵. 基于物联网的水生态环境智慧监测及管理系统 [J]. 物联网技术, 2024, 14 (2): 33-36.

[21] 梁 悦, 刘俊峰, 孙贵先, 等. 果园环境远程监测系统构建与设计 [J]. 河北农业大学学报, 2019, 42 (2): 116-121.