

面向智慧农业的分层土壤墒情监测仪的设计及应用

赵小强^{1,2}, 权恒^{1,2}, 晏珠峰¹, 王录俊³

(1. 西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121; 2. 陕西省信息通信网络及安全重点实验室, 陕西 西安 710121;
3. 陕西省渭南市临渭区葡萄研究所, 陕西 渭南 714000)

摘要: 随着我国智慧农业的高速发展, 土壤墒情监测变得尤为重要, 但当下的监测方式大多存在设备布设安装困难、电极干扰、监测深度单一等问题。设计了一种适用于农田的土壤墒情监测仪, 对于硬件结构, 采用管式非接触的设计方案, 完成了多个模块的设计, 可实现分层非接触监测。对于软件协议, 提出一种基于 Modbus 协议的多节点访问控制策略, 该策略具有轮询效率高、数据稳定、监测节点广等特点。通过消息队列遥测传输 (MQTT, message queuing telemetry transport) 协议将数据传输至云服务器进行农业分析决策。在葡萄园区的测试表明, 监测仪能实现范围为 0~100%、精度为 $\pm 2.45\%$ 的墒情监测, 具有一定的稳定性和实用性。

关键词: 智慧农业; 土壤墒情监测; 分层非接触; Modbus 协议; MQTT 协议

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00188

Design and application of the layered soil moisture monitor for the smart agriculture

ZHAO Xiaoqiang^{1,2}, QUAN Heng^{1,2}, YAN Zhufeng¹, WANG Lujun³

1. School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China
2. Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security, Xi'an 710121, China
3. Institute of Grapevine Research of Linwei, Weinan 714000, China

Abstract: With the rapid development of the smart agriculture in China, the soil moisture monitoring has become particularly important. But there exist many problems in current monitoring methods, such as difficulties in layout and installation, electrode interference, and single monitoring depth. A soil moisture monitor suitable for the farmland was designed. For the hardware structure, a tube-type non-contact design scheme was adopted, and multiple modules were designed in order to realize the layered non-contact monitoring. For the software protocol, a control strategy of the multi-node access based on the Modbus protocol was proposed, which had the characteristics of high polling efficiency, data stability, and wide monitoring nodes. The data was transmitted to the cloud server through the message queuing telemetry transport (MQTT) protocol for the agricultural analysis and decision-making. The test in the vineyard area shows that the monitor can monitor the moisture content in the range of 0~100% and accuracy of $\pm 2.45\%$, which is of certain stability and practicality.

Key words: smart agriculture, soil moisture monitoring, layered non-contact, Modbus protocol, MQTT protocol

收稿日期: 2020-02-25; 修回日期: 2020-04-08

通信作者: 权恒, 411914895@qq.com

基金项目: 陕西省创新人才推进计划——科技创新团队 (No.2019TD-28); 西安市科技计划项目 (No.201806117YF05NC13-2); 陕西省教育厅产业化培育项目 (No.18JF029); 陕西省国际科技合作计划项目 (No.2018KW-025)

Foundation Items: The Shaanxi Province Innovative Talent Promotion Plan-Science and Technology Innovation Team (No.2019TD-28), The Science and Technology Projects of Xi'an (No.201806117YF05NC13-2), The Industrialization Cultivation Project of Shaanxi Provincial Department of Education (No.18JF029), The Shaanxi Province International Science and Technology Cooperation Project (No.2018KW-025)

1 引言

随着我国农业与通信、计算机、物联网等多学科交叉融合,农业生产模式逐渐由传统的粗放式经营管理模式向精细化的智慧农业转变。其中,信息感知作为智慧农业的基础支撑和精准决策的数据保障,变得尤为重要^[1-3]。

土壤墒情监测^[4-6]即土壤的湿度监测,是农田植被生长的重要监测因子之一,目前主要采用人工烘干法、电阻法、张力计法、中子仪法和介电常数法等进行监测。介电常数法作为最常用的土壤墒情监测方法,一般分为时域反射法和频域反射法,其中,频域反射法由于其测量精准、响应速度快、环境影响小、价格便宜等优点应用更广泛。接触式传感器一般采用双探针设计,但由于直接与土壤接触,土壤中盐离子易受农田作业(如施肥、施药、灌溉等)的影响^[7],同时电极产生的电力因素也会对农作物的生长造成干扰^[8]。多传感器纵向分梯度布设存在操作复杂、容易造成农田植被破坏等问题,同时,动态扩展能力较差,多个传感器的使用造成墒情监测代价较昂贵。非接触式传感器采用环形探头设计,整套监测单元处于管状结构中,对于解决上述问题具有一定价值,但是由于其监测单元传感模型较复杂,目前存在监测准确度不高和稳定性不足等问题。基于上述考虑,本文面向智慧农业采用非接触式方法设计了一种分层土壤墒情监测仪,可有效感知多层土壤墒情信息,整套设备安装在聚氯乙烯(PVC, polyvinyl chloride)管中,避免了土壤环境对测量数据的影响,提高了监测精度,消除了传感器电极对农作物生长的干扰。同时降低了安装施工难度,避免了被植被破坏,增强了动态扩展能力。

2 设计原理

2.1 监测原理

土壤的介电常数特性^[9]是指土壤分子之间存在的约束电荷对外界所加电场的响应特性,当外加电场发生改变时,该响应特性会发生相应的增强或削弱。相对介电常数是指在真空环境下,外加电场与所测介质的实际电场的比值,该参数主要由所测频率信号决定。日常生活中常见物质的介电常数如表 1 所示,水的相对介电常数远超其他元素的相对介电常数,所以土壤的湿度对土壤整体的相对介电常数起主要影响作用,在设计土壤墒情监测仪时主要考

虑湿度这一因素对测量精度的影响。

表 1 常见物质的介电常数

| 所测物质 | 相对介电常数 | 所测物质 | 相对介电常数 |
|------|--------|------|--------|
| 水 | 80 | 花岗岩 | 7~9 |
| 空气 | 1 | 干沙土 | 2.5 |
| 乙醇 | 20~25 | 玄武岩 | 12 |
| 甲醇 | 37 | 瓷器 | 5~7 |
| 丙三醇 | 47 | 盐 | 4 |

利用介电常数的特性测量土壤湿度,其本质是根据不同湿度下不同的介电常数产生不同的电容值,进而得到相应的高频信号,所以电容与频率的变化很关键。电容与频率之间的关系可根据并联谐振原理得到,如式(1)所示。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_p C_t}{C_p + C_t}}} \quad (1)$$

在式(1)中, f 为产生的高频信号, L 为并联谐振电感,由于PVC管的电容也会影响测量精度,故引入 C_p 作为PVC管的电容值, C_t 指的是所测土壤的电容值,整体的电容大小主要由PVC管的电容和所测土壤电容值两部分组成。所以,输出的高频信号的大小主要由土壤的电容值 C_t 决定,故主要测得不同土壤湿度环境下的电容值即可得到不同的高频信号,进而获得相应的湿度信息。

2.2 系统原理

土壤墒情监测仪主要由温/湿度数据采集板、数据汇总板、数据传输单元、软件平台等部分组成。土壤墒情监测仪内部结构如图 1 所示,主要由环形黄铜电极、供电模块、土壤温度测量点、数据采集板等 10 部分组成。可实现 5 层土壤温度、4 层土壤湿度监测,主要包括土表温度、土表下 10 cm 处温/湿度、土表下 20 cm 处温/湿度、土表下 30 cm 处温/湿度、土表下 40 cm 处温/湿度,系统原理框架如图 2 所示。

各层主要负责各层的温/湿度信息采集,多层板件采用改进型 Modbus^[10-11]访问控制策略将多层信息汇总至数据汇总点。访问控制策略采用主从式访问方式,其中主监测层数据汇总点向监测层下发数据交互指令,结合不同的控制位和不同监测层的不同地址位,从监测层向主监测层进行相应的数据返回,从而达到将多层墒情信息汇总至主监测层数据

汇总点的目的，主从层之间采用 CRC16 的循环冗余校验法，保证了数据的准确性和稳定性。数据汇总点将各层数据进行汇总、解析、重组等操作，通过 SIM7600 模块采用 MQTT 协议^[12]上传至云服务器端。为了解决农田中电信网络覆盖差的问题，采用 SX1278 无线通信模块实现本地布局局域网的方式，实现了数据本地的传输和存储功能。

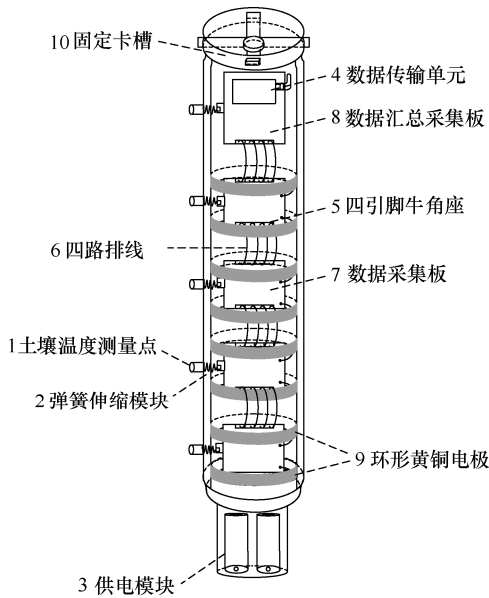


图1 土壤墒情监测仪内部结构

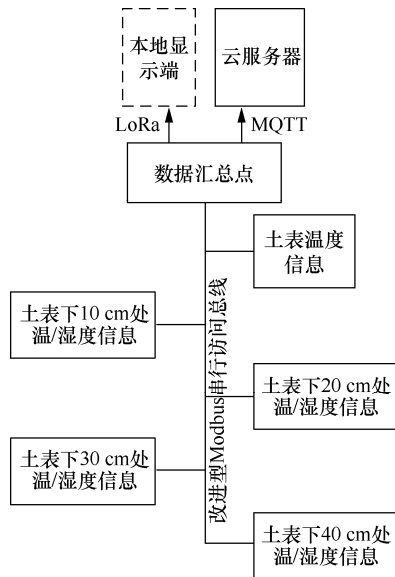


图2 系统原理框架

3 硬件设计

土壤墒情监测仪的硬件部分主要由电源模块、LC 振荡单元、整形分频单元、放大单元、数据处理单

元、通信单元等部分构成，硬件电路设计如图3所示。其中，核心控制器采用 ST 公司的 ARM 32 位 STM32F103RCT6 处理器，该微控制单元（MCU，microcontroller unit）基于 Cortex-M3 内核，具有丰富的外设资源，最高工作频率可达 72 MHz，完全满足监测仪对高频信号的处理工作需求。

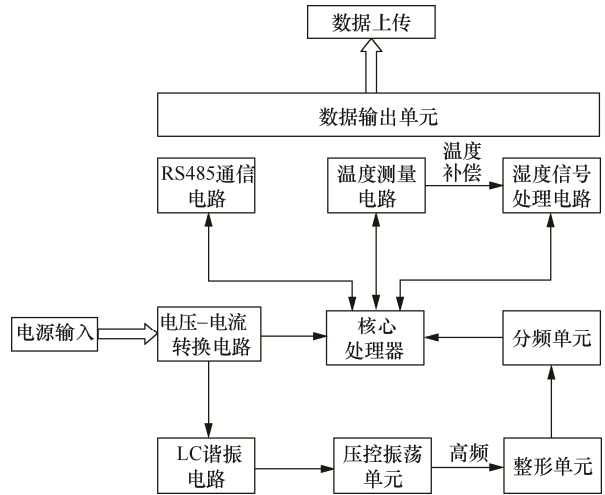


图3 硬件电路设计

由于设备需要 5 V 和 3.3 V 的双电压模式，所以电源模块采用 MP2359+ASM1117 芯片组合，输入 12 V 电压转化为 5 V 和 3.3 V 的输出电压，同时在 MP2359 电路输入中加入了肖特基二极管，防止电路短接烧毁设备的状况出现。压控振荡单元采用 MC1648，环形黄铜电极作为 LC 谐振电路部分的测试电容，该电极在所测土壤环境中的变化主要集中在 6.9~20.5 pF 的容值范围内，在压控振荡单元的作用下可产生 110~170 MHz 的高频谐振信号。由于 MCU 最大只能处理 72 MHz 的高频信号，则对生成的信号经过 MB506 芯片进行整形分频处理后转化为 0~2 000 mV 的电压信号，由于 MCU 的识别电压为 3.3 V，所以选取 OPA820 芯片实现对该信号的放大处理。同时为了保证测量精度，采用设备外壁上安装的 DS18B20 温度传感器进行温度补偿。

通过对不同电压下土壤体积含水率进行分析，结合人工烘干法和插针式传感器所测数据作为对比组，拟合出不同电压下的土壤体积含水率模型，进而得到相应的土壤温/湿度信息。在数据输出单元采用电信网+局域网双模式，电信网方面通过 SIM7600 模块将所测土壤墒情传输至云服务器端，局域网采用工作在 433 MHz 频率下的 SX1278 模块

将数据传输至本地显示端，该模块具有抗干扰能力强、功耗低、传输距离远等优点，在野外农田环境下自组网具有突出的优势。

4 软件设计

4.1 嵌入式软件设计

土壤墒情监测仪采用了 Modbus 主从机轮询协议，其中，主监测层数据汇总采集板担任主机角色，从采集层土壤温/湿度采集板担任从机角色。主机主要通过不同的功能码和地址码对数据进行汇总采集，采集格式主要为“起始符+从机地址+功能码+正文字节数+正文内容+CRC 校验”。同时为了降低多址轮询时延，减少数据冲突，提高系统的实时性，基于 Modbus 主从机轮询协议提出了一种适用于多节点的 Modbus 访问控制策略，采用与 RS485 总线通信相同的半双工通信方式，一台主机挂载多台从机。当有指令需要下发时，主机通过 RS485 接口发送命令帧至远程终端单元 (RTU, remote terminal unit) 总线，从机自动匹配命令帧完成任务下发功能。当有数据需要上传时，从机借助 RS485 接口通过传输总线将数据传输至主机，多节点 Modbus 访问控制策略如图 4 所示。

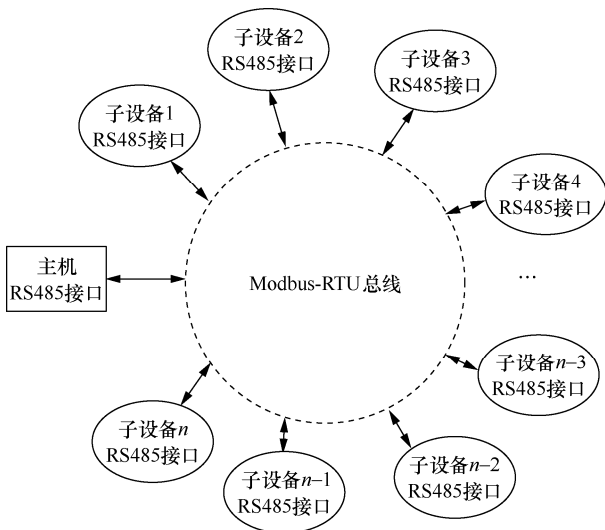


图4 多节点 Modbus 访问控制策略

主机主要包括以下工作流程：当主机需要向从机发送指令时，RS485 监测串口处于有新数据分组需要发送状态，则检测总线是否空闲，若总线繁忙，说明此时传输总线上正在进行数据分组接收，等待随机时间后重新进行检测发送，接收完成后发送确认字符 (ACK, acknowledge character) 帧给从机，

提醒数据已成功接收，不需要再进行数据重发。若总线空闲，向从机直接发送控制帧数据分组，数据分组发送成功后，RS485 监测串口重新处于监测状态。当从机向主机发送相关的监测数据时，RS485 监测串口监测到有新的数据分组需要接收，则接收数据分组，并向 RS485 传输总线发送 ACK 帧，表示数据分组接收成功，之后，RS485 监测串口重新处于监测状态，主机工作流程如图 5 所示。

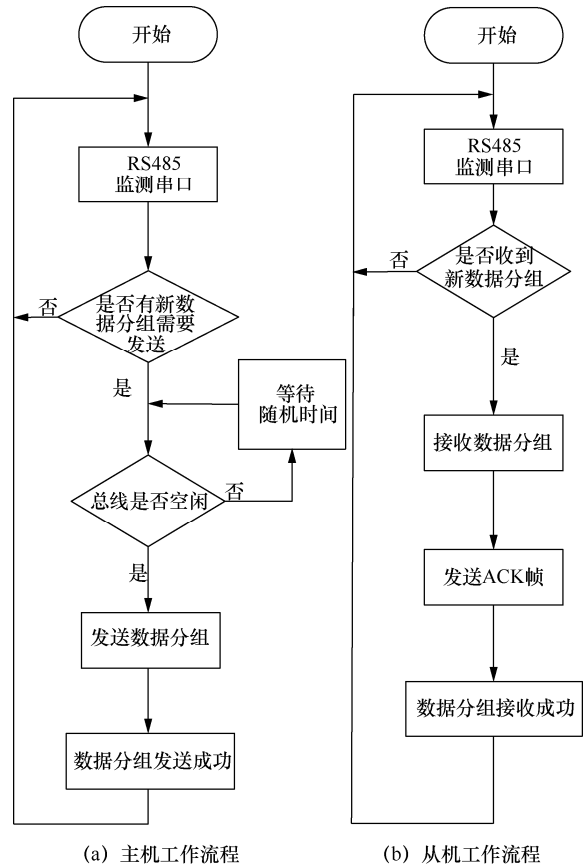


图5 主机工作流程

从机主要包括以下工作流程：当 RS485 监测串口接收主机传输的数据分组时，解析帧对应的类别。首先确认其是否为 ACK 帧，其次确认其是否为该从机所对应的 ACK 帧，如果均符合条件，则代表该从机向主机发送数据分组任务成功，主机已完全收到正确的数据分组，此时可清除该次任务，防止从机向主机重复发送数据。如果不是 ACK 帧，再确认其是否为相应从机的命令帧，如果是相应从机的命令帧，说明主机向从机发送了获取该设备数据信息的命令，则将该命令帧载入任务队列以获取本地设备数据；如果不是相应从机的命令帧，则重新回到监测串口。当从机收到主机向其发送的命令

帧后，此时应该有数据需要发送，但是如果无数据需要发送则说明从机故障或数据采集未完成，则重新返回监测串口；若从机数据采集完成，有数据等待发送，则检测传输总线是否空闲，如果总线空闲，则发送数据；如果总线繁忙，则等待随机时间后再进行数据发送，数据发送完成后，RS485 监测串口重新回到监测状态。从机工作流程如图 6 所示。

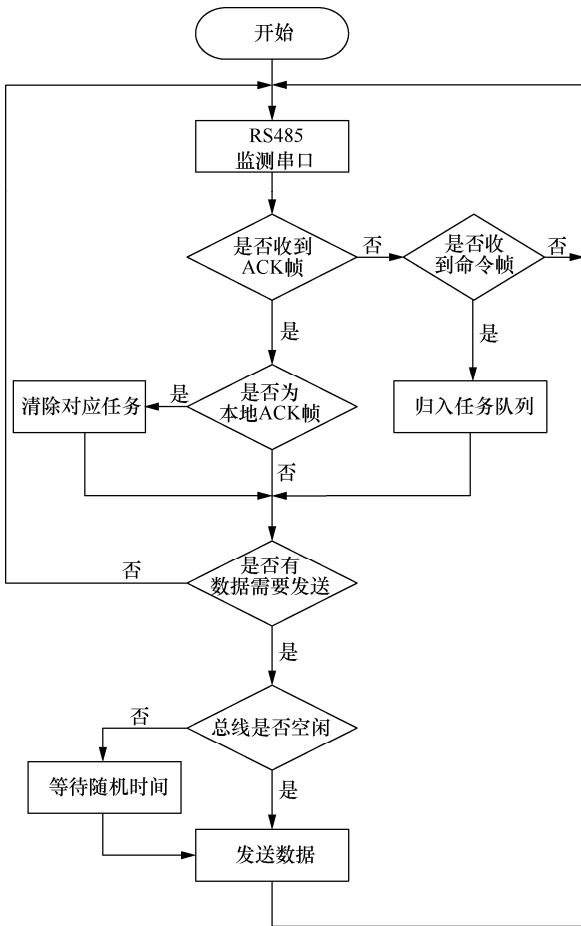


图 6 从机工作流程

4.2 物联网云平台软件设计

物联网云平台数据上传采用 MQTT 协议，该协议支持数据双向传输、实时性高，也具有长时间稳定连接的优点。通过数据上传模块 SIM7600 将处理后的土壤墒情数据打包发送至云服务器端，同时云服务器端也可下发相应的控制命令对底层数据采集设备进行操作。具体的通信建立和数据发送传输流程如下。

1) 首先使 SIM7600 模块退出透传模式，通过串口发送相应的连接指令 (AT, attention) 与云服务器建立传输控制协议 (TCP, transmission control protocol) 连接。

2) 通过不同的 MQTT 协议控制报文完成服务器连接、确认消息请求、发布消息、发布确认、发布收到、心跳请求等设备的基础连接测试。

3) 根据 MQTT 协议的封装要求对数据分组进行封装，其中包含采集的土壤墒情信息，将信息按照规定格式在相应的数据流发布至云服务器端。

物联网云平台作为土壤墒情数据远程监测管理的数据平台，主要可以实现对多层土壤温度和湿度最新数据查询、历史数据查询、历史曲线分析、海量数据的存储、数据导出等功能。同时为了方便使用，设计了可用手机查询的二维码，用户可通过扫描设备二维码，随时随地浏览和查询数据。物联网云平台实际应用效果如图 7 所示。

5 应用测试与分析

本文所研制的仪器目前已在陕西省渭南市临渭区葡萄研究所示范基地进行实地应用和设备测试，该基地为长约 200 m、宽约 100 m、面积约 20 000 m² 的矩形区域。选取园区的某一监测点进行数据对

| 时间 | 土壤温度 (单位: °C) | 土壤湿度1 (单位: %) | 土壤湿度2 (单位: %) | 土壤湿度3 (单位: %) | 土壤湿度4 (单位: %) | 土壤湿度5 (单位: %) | 土壤湿度6 (单位: %) | 土壤湿度7 (单位: %) | 土壤湿度8 (单位: %) | 土壤湿度9 (单位: %) | 土壤湿度10 (单位: %) | 土壤湿度11 (单位: %) | 土壤湿度12 (单位: %) | 土壤湿度13 (单位: %) | 土壤湿度14 (单位: %) | 土壤湿度15 (单位: %) | 土壤湿度16 (单位: %) | 土壤湿度17 (单位: %) | 土壤湿度18 (单位: %) | 土壤湿度19 (单位: %) | 土壤湿度20 (单位: %) | 土壤湿度21 (单位: %) | 土壤湿度22 (单位: %) | 土壤湿度23 (单位: %) | 土壤湿度24 (单位: %) | 土壤湿度25 (单位: %) | 土壤湿度26 (单位: %) | 土壤湿度27 (单位: %) | 土壤湿度28 (单位: %) | 土壤湿度29 (单位: %) | 土壤湿度30 (单位: %) | 设备电压 (单位: V) | |
|----|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--|
| 1 | 2020-01-08 00:01:00 | -1.1 | 2.6 | 82.8 | 3.8 | 86.5 | 5.1 | 87.6 | 5.1 | 91.5 | 3.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 2020-01-07 23:31:00 | -0.8 | 2.8 | 82.9 | 3.8 | 86.5 | 5.2 | 87.6 | 5.1 | 91.5 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 2020-01-07 23:01:00 | -0.6 | 2.9 | 83.0 | 3.9 | 86.5 | 5.2 | 87.6 | 5.1 | 91.4 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 2020-01-07 22:31:00 | -0.8 | 3.0 | 82.9 | 3.9 | 86.5 | 5.2 | 87.6 | 5.1 | 91.5 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 2020-01-07 22:01:00 | -0.8 | 3.1 | 82.9 | 4.0 | 86.5 | 5.2 | 87.6 | 5.1 | 91.6 | 3.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 2020-01-07 21:31:00 | -0.8 | 3.3 | 83.1 | 4.1 | 86.6 | 5.2 | 87.7 | 5.1 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 2020-01-07 21:01:00 | -0.3 | 3.5 | 83.2 | 4.1 | 86.7 | 5.2 | 87.7 | 5.1 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 2020-01-07 20:31:00 | -0.8 | 3.6 | 83.2 | 4.1 | 86.8 | 5.2 | 87.7 | 5.1 | 91.5 | 3.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 2020-01-07 20:01:00 | -0.3 | 3.8 | 83.3 | 4.3 | 86.9 | 5.2 | 87.8 | 5.1 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 2020-01-07 19:31:00 | -0.1 | 4.0 | 83.4 | 4.3 | 86.9 | 5.2 | 87.8 | 4.8 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 2020-01-07 19:01:00 | -0.1 | 4.2 | 83.6 | 4.3 | 87.0 | 5.2 | 87.8 | 5.1 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 2020-01-07 18:31:00 | 0.4 | 4.5 | 83.8 | 4.4 | 87.2 | 5.2 | 88.0 | 5.1 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 2020-01-07 18:01:00 | 1.7 | 5.0 | 84.1 | 4.5 | 87.4 | 5.2 | 88.0 | 5.1 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 2020-01-07 17:31:00 | 3.9 | 5.3 | 84.6 | 4.5 | 87.6 | 5.2 | 88.0 | 5.1 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 2020-01-07 17:01:00 | 5.7 | 5.5 | 85.1 | 4.4 | 87.6 | 5.1 | 88.0 | 5.1 | 91.5 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 2020-01-07 16:31:00 | 7.3 | 5.6 | 85.2 | 4.3 | 87.5 | 5.1 | 88.0 | 5.1 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 2020-01-07 16:01:00 | 8.3 | 5.6 | 85.2 | 4.3 | 87.5 | 5.1 | 87.9 | 5.0 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 2020-01-07 15:31:00 | 9.5 | 5.6 | 85.1 | 4.2 | 87.3 | 5.1 | 87.9 | 5.1 | 91.6 | 4.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 2020-01-07 15:01:00 | 10.4 | 5.3 | 84.9 | 4.1 | 87.2 | 5.1 | 87.9 | 5.0 | 91.6 | 4.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 2020-01-07 14:32:00 | 10.0 | 5.1 | 84.6 | 4.0 | 87.3 | 5.0 | 87.9 | 5.0 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 2020-01-07 14:01:00 | 8.8 | 4.8 | 84.5 | 4.0 | 87.2 | 5.0 | 87.8 | 5.0 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 2020-01-07 13:31:00 | 8.2 | 4.6 | 84.4 | 3.9 | 87.1 | 5.0 | 87.7 | 5.0 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 2020-01-07 13:01:00 | 8.2 | 4.3 | 84.3 | 3.9 | 87.0 | 5.0 | 87.7 | 5.0 | 91.6 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 2020-01-07 12:31:00 | 6.2 | 4.0 | 84.2 | 3.8 | 87.0 | 5.0 | 87.6 | 5.0 | 91.5 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 2020-01-07 12:01:00 | 4.8 | 3.8 | 84.2 | 3.8 | 87.0 | 5.0 | 87.6 | 5.0 | 91.5 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 2020-01-07 11:31:00 | 4.8 | 3.8 | 84.0 | 3.8 | 86.9 | 5.0 | 87.5 | 5.0 | 91.5 | 3.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 2020-01-07 11:01:00 | 4.6 | 3.6 | 84.1 | 3.8 | 86.8 | 5.0 | 87.5 | 5.0 | 91.5 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 2020-01-07 10:30:00 | 3.8 | 3.6 | 84.0 | 3.8 | 86.8 | 5.0 | 87.5 | 5.0 | 91.5 | 3.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 2020-01-07 10:04:00 | 3.1 | 3.5 | 83.9 | 3.8 | 86.8 | 5.0 | 87.5 | 5.0 | 91.5 | 3.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 2020-01-07 09:37:00 | 2.8 | 3.5 | 83.7 | 3.8 | 86.7 | 5.0 | 87.5 | 5.0 | 91.6 | 3.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

图 7 物联网云平台实际应用效果

比，分别采用人工烘干法、插针式传感器和所设计的土壤墒情监测仪进行对比分析^[13]。测试地选取了园区较平坦、不易积水的地形，确保了积水不会对其测量精度产生影响。由于土壤墒情监测仪可以实现土表下 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 处的土壤温/湿度监测，所以其他两种测量方法均采用相同深度进行测量。图 8 分别为采用土壤墒情监测仪、插针式传感器、人工测量的实际测试情况。

人工烘干法作为测试实验的标准值^[14]，分别对采用土壤墒情监测仪和采用插针式传感器两种监测方式进行数据比较，对其准确性进行分析，连

续采集 2019 年 8 月 1 日至 8 月 31 日的 4 层土壤湿度，由于土壤墒情监测仪每半小时采集一次各层数据，但人工烘干法和插针式传感器不能满足频繁测量的要求，为了方便实验测量，选取每日 8:00、12:00、18:00 共 3 组数据进行分析对比。4 层土壤湿度的 3 种测试方式数据比较分别如图 11~图 14 所示，可以看出在土表下 10 cm 处，插针式传感器、土壤墒情监测仪与人工烘干法均处于较稳定的状态，土表下 20~40 cm 处，部分监测时间点出现较大偏差，与人工烘干法相比，插针式传感器的偏差更明显。



图 8 实际测试情况

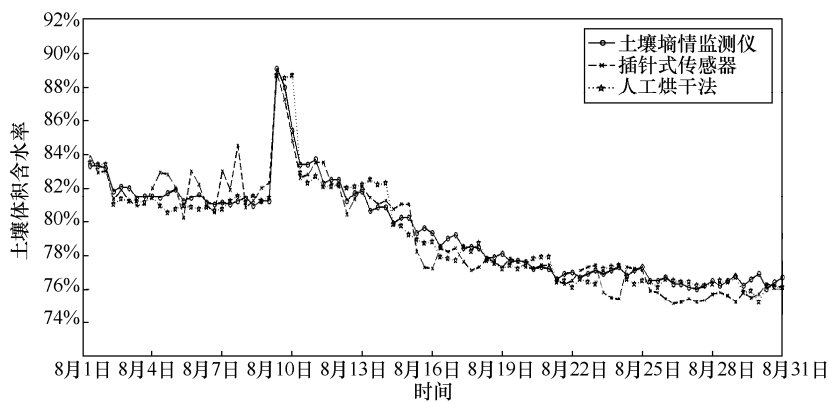


图 9 土表下 10 cm 处 3 种测试方式数据比较

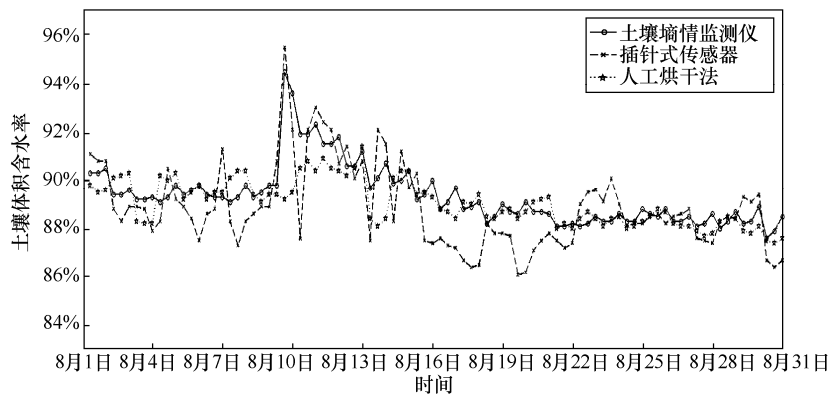


图 10 土表下 20 cm 处 3 种测试方式数据比较

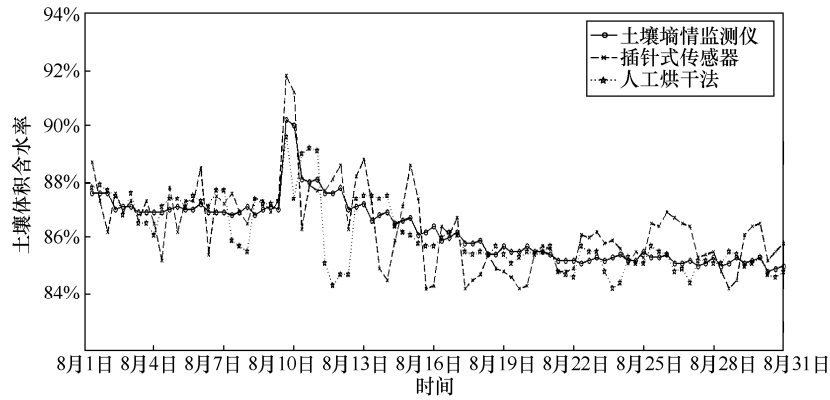


图 11 土表下 30 cm 处 3 种测试方式数据比较

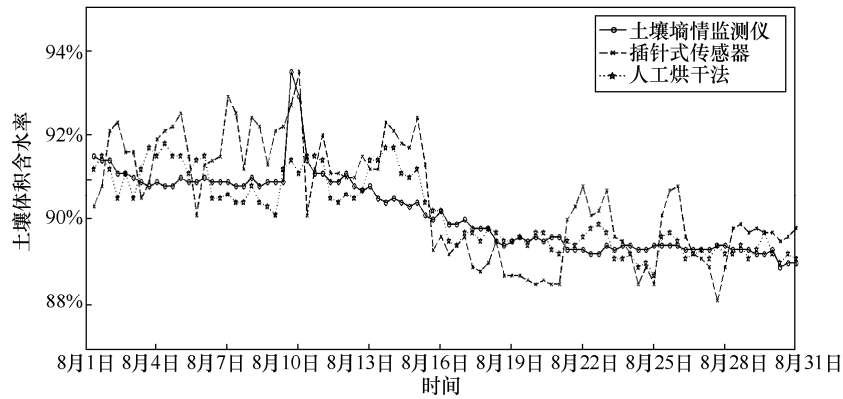


图 12 土表下 40 cm 处 3 种测试方式数据比较

表 2 多种监测方式精度对比

| 测量方式（与人工烘干法相比） | | 土表下 10 cm 处 | 土表下 20 cm 处 | 土表下 30 cm 处 | 土表下 40 cm 处 | 平均相对误差 |
|----------------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|
| 插针式传感器 | 均方差 | 2.98 | 2.68 | 2.94 | 2.84 | 3.33% |
| | 相对误差 | 3.8% | 3.1% | 3.5% | 2.9% | |
| 土壤墒情监测仪 | 均方差 | 1.40 | 2.34 | 2.43 | 2.54 | 2.45% |
| | 相对误差 | 1.7% | 2.6% | 2.9% | 2.6% | |

通过对两种监测方式的均方差和相对误差两方面进行分析，得到多种监测方式精度对比如表 2 所示，取多层平均值，插针式传感器的相对误差为 $\pm 3.33\%$ ，土壤墒情监测仪的相对误差为 $\pm 2.45\%$ ，同时土壤墒情监测仪每层的监测精度均高于插针式传感器的监测精度。

6 结束语

分层土壤墒情监测仪主要针对农田土壤墒情监测的需求，可以实现对土壤环境的纵向分梯度实时监测。多层监测板通信策略方面基于 Modbus 主从机轮询协议，加入信道检测和 ACK 确认帧，既实现了基本的数据轮询采集，又解决了信道堵塞等

问题，提高了数据交互时延。该仪器连接物联网云平台和设备二维码，数据可传输至物联网云平台用于决策与分析。本文所研制的仪器经过实地测试，通过将分层土壤墒情监测仪与传统的插针式传感器进行比较，监测精度和稳定性均有提高。

参考文献：

[1] 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 222-230.
 GE W J, ZHAO C J. State-of-the-art and developing strategies of agricultural Internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 222-230.
 [2] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 1-20.

- LI D L, YANG H. State-of-the-art review for Internet of things in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 1-20.
- [3] 赵春江, 杨信廷, 李斌, 等. 中国农业信息技术发展回顾及展望[J]. 中国农业文摘——农业工程, 2018(4): 3-7.
- ZHAO C J, YANG X T, LI B, et al. Review and prospect of the development of agricultural information technology in China[J]. Agricultural Science and Engineering in China, 2018(4): 3-7.
- [4] MENG D L, MENG F J, DUAN X F, et al. Design and experiment of portable wireless soil moisture measuring device based on frequency-domain method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33: 114-119.
- [5] 高志涛, 刘卫平, 赵燕东. 基于电容法的土壤水分传感器设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 185-191.
- GAO Z T, LIU W P, ZHAO Y D. Design and performance analysis of soil moisture sensor based on capacitance method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 185-191.
- [6] LI J, XU Y, JIANG R, et al. Establishment and verification of model for ultrasonic soil water content detector[J]. Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 127-133.
- [7] SCHUBERT M J W, SEIGN S, DAI Q, et al. Capacitive sensor technology for soil moisture monitoring networks[C]//2017 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). IEEE, 2017.
- [8] DENG X, GU H N, YANG L, et al. A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance[J]. Measurement, 2020, 150: 107052.
- [9] ZUO D Y, TIAN H, ZHOU J C, et al. Study on correlation among soil dielectric properties and its influencing factors[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29: 1712-1719.
- [10] MHAPANKAR S, VANJARE G, PAPPU A, et al. Implementing an efficient lightweight Modbus protocol over a wireless sensor network[C]//2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). IEEE, 2017.
- [11] 赵小强, 陈玉兵, 高强, 等. 基于 Modbus 协议的农田气象信息监测站设计[J]. 电子技术应用, 2018, 44(12): 55-59, 64.
- ZHAO X Q, CHEN Y B, GAO Q, et al. Design of farmland meteorological information monitoring station based on Modbus protocol[J]. Application of Electronic Technique, 2018, 44(12): 55-59, 64.
- [12] SYAFARINDA Y, AKHADIN F, FITRI Z E, et al. The precision agriculture based on wireless sensor network with MQTT protocol[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 207: 012059.
- [13] 苏志诚, 张立祯, 丁留谦, 等. 四种新型土壤墒情传感器的对比分析[J]. 水文, 2014, 34(4): 55-60.
- SU Z C, ZHANG L Z, DING L Q, et al. Comparative analysis of four new types of soil moisture sensor[J]. Hydrology, 2014, 34(4): 55-60.
- [14] 闫华, 邢振, 薛绪掌, 等. 土壤剖面水分传感器探头仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 245-251.
- YAN H, XING Z, XUE X Z, et al. Simulation and experiment on soil moisture profile sensor probe[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 245-251.

[作者简介]



赵小强 (1977-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安邮电大学教授, 主要研究方向为物联网技术及应用。



权恒 (1994-), 男, 陕西宝鸡人, 西安邮电大学硕士生, 主要研究方向为物联网技术及应用、智慧农业。



晏珠峰 (1995-), 男, 陕西西安人, 西安邮电大学硕士生, 主要研究方向为物联网技术及应用、智慧农业。



王录俊 (1968-), 男, 陕西渭南人, 陕西省渭南市临渭区葡萄研究所高级农艺师, 主要研究方向为葡萄栽培及新品种选育。