

四端法土壤电导率原位快速检测传感器设计与试验

钟翔君, 杨 丽*, 张东兴, 崔 涛, 和贤桃, 杜兆辉

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 实现土壤电导率的快速获取可为农业生产精准管理提供有效的数据支撑。目前, 田间电导率采集在农业生产前进行, 需要专门的电导率检测设备对种植田块开展大范围数据采集并生成电导率空间分布图, 该方式操作繁琐、费时费力, 同时检测的电导率值由于时间滞后原因, 难以准确反映农业生产各环节(如播种)实施过程中的真实电导率情况。针对上述问题, 基于交流“电流-电压”四端法原理, 该研究设计了一种土壤电导率原位快速检测传感器, 用于搭载在不同的农业生产机具上, 实现土壤电导率的实时检测与作业参数的在线调整。该传感器以 STM32 处理器为核心, 配合电源电路、交流信号源电路、有效值检测电路及其他外围电路搭建了硬件及软件架构, 同时集成了信息的实时检测与显示、定时存储与无线传输等功能, 实现了土壤电导率的原位高精度获取。传感器标定试验及工作稳定性试验结果表明, 传感器输出值与 DDB-303A 电导率仪测得的电导率值呈明显线性关系, 线性拟合 R^2 为 0.995, 且在不同电导率水平下, 连续测量的标准偏差均小于 $0.76 \mu\text{S}/\text{cm}$, 具有较高的准确性及工作稳定性。与 JXBS-3001 传感器在实验室条件下(温度 25°C), 对配置的不同电导率浓度土样(含水率 $<15\%$)检测的对比试验结果表明, 所设计的电导率传感器的测量误差及响应时间更低, 绝对误差为 $-5.9 \sim 19.4 \mu\text{S}/\text{cm}$, 相对误差为 $-1.05\% \sim 2.39\%$, 响应时间小于 2.01 s 。利用电导率传感器在现场(温度 20.6°C)对地块不同位置测量的绝对误差为 $-11.36 \sim 25.30 \mu\text{S}/\text{cm}$, 相对误差为 $-7.91\% \sim 7.88\%$ 。综合而言, 该研究所设计的土壤电导率传感器能快速准确的检测土壤电导率信息, 可为无人农场的土壤信息采集提供一种高精度的检测工具。

关键词: 土壤; 电导率; 传感器; STM32; 快速检测; 无人农场

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.011

中图分类号: S237

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0090-10

钟翔君, 杨 丽, 张东兴, 等. 四端法土壤电导率原位快速检测传感器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 90-99. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.011 <http://www.tcsae.org>

Zhong Xiangjun, Yang Li, Zhang Dongxing, et al. Design and experiment of a sensor for in-situ rapid detection of soil electrical conductivity using four-electrode method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 90-99. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.011 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

以现代信息技术与农业知识为基础的无人农场, 能够实现农业生产全过程的信息感知、定量决策、智能控制、精准投入和个性化服务, 可以有效地提高资源利用率、解放劳动生产力, 是未来农业的重要发展方向^[1-3]。土壤信息的快速获取是无人农场关键的数据来源, 可为变量施肥、变量播种^[4-6]及其他土壤改良作业等精准作业的定量决策提供有效的数据支撑。土壤电导率^[7-9]作为土壤肥力的重要组成部分, 能反映土壤质量和物理性质的丰富信息, 对作物的生长发育起重要作用, 因此快速获取土壤电导率信息对推动现代农业生产精准管理具有重要的意义。

目前, 土壤电导率的测量方式主要有: 实验室异位

检测^[10-12]及现场检测法。实验室异位检测方法应用较广, 但需要先进行田间采样, 并将土样带回实验室进行检测, 工作量大、检测效率低且成本高, 不适于现代农业生产所需的大规模、快速高效的需求。为解决上述问题, 国内外学者也先后开展了众多土壤电导率现场测量方面的试验研究, 主要包括: 基于电磁感应原理的非接触测量法^[13-14]、基于 TDR (Time domain reflectometry) 原理的时域反射法^[15-17]及基于电位差原理的“电流-电压”四端法。其中, 基于电磁感应原理的非接触测量方式, 操作方便, 但是仪器的设计复杂, 成本高且易受外界环境干扰。基于 TDR 原理的土壤电导率测量方式, 多应用于便携式产品, 虽然测量方便, 但价格昂贵, 不适于大面积动态检测应用。而四端法相较于前两种具有设计方便、可操作性强等优势, 被广泛采用。国外电导率检测设备已应用于大田土壤电导率的信息动态采集^[18-20]。目前, 国内相关专家也进行了研究, 陈玲等^[21]设计了便携式土壤电导率实时分析仪, 并研究了土壤电导率随含水率和盐分含量的变化关系。赵燕东等^[22]设计了土壤多参数复合测试仪, 可以同时测量土壤含水率、电导率及温度等多个参数。可见, 实现土壤电导率信息的动态快速获取

收稿日期: 2021-03-16 修订日期: 2021-05-01

基金项目: 国家自然科学基金(32071915)

作者简介: 钟翔君, 博士生, 研究方向为农业装备智能化研究。

Email: zhongxj@cau.edu.cn

※通信作者: 杨丽, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业装备智能化和玉米生产全程机械化研究。Email: yl_hb68@126.com

中国农业工程学会会员: 杨丽 (E041200411S)

是当前研究的关键方向,国内相关专家对土壤电导率的快速获取进行了有益的探索并开发了一些产品^[23-25],但是在田间动态信息检测方面距离国外仍有一定差距。且目前田间电导率采集在农业生产前进行,需要专门的电导率检测设备对种植田块开展大范围数据采集并生成电导率空间分布图,实际农业生产时再通过查询空间分布图的信息指导实际作业,该方式操作繁琐、费时费力,同时检测的电导率值由于时间滞后原因,难以准确反映农业生产各环节(如播种)实施过程中的真实电导率情况。

针对以上问题,本文基于交流“电流-电压”四端法原理,采用 STM32 处理器为核心,设计一种快速检测土壤电导率传感器,配合 GPS 设备实现土壤电导率信息及位置信息的同步获取,并通过 WiFi 模块实现传感器数据的无线通信,实现电导率信息的实时检测与显示、定时存储与无线传输,旨在为加快土壤电导率信息的动态原位获取技术的研究与推广应用提供软硬件参考,有助于推动现代农业生产精准管理进程。

1 传感器检测原理和结构

1.1 工作原理

电导率传感器的工作原理如图 1 所示,形状尺寸相同的四探针(标号 1、2、3、4)均与土壤直接接触。其中,恒流交流源所提供激励信号的外侧两探针(标号 1、4)为输入端,中间两探针(标号 2、3)作为输出端,通过检测输出端两电极的电压差和经过精密电阻的电流,即可换算出土壤的电导率信息。

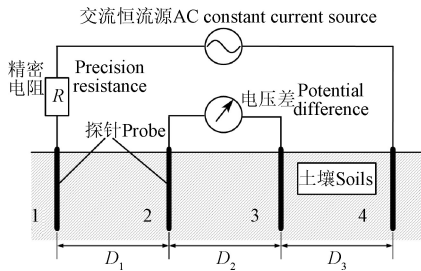


图 1 电导率测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of soil electrical conductivity

当测量对象的横截面积和长度确定时,电导率与其成函数关系。但是,由于土壤是一种非常不规则、组成成分复杂的测量对象,横截面积及长度难以确定,其电导率的计算公式^[24]为

$$\sigma = \frac{\left(\frac{1}{d_{12}} - \frac{1}{d_{13}} \right) - \left(\frac{1}{d_{24}} - \frac{1}{d_{23}} \right) U_R}{2\pi R \Delta V} \quad (1)$$

式中 σ 为土壤电导率, mS/cm ; d_{12} 、 d_{13} 、 d_{24} 、 d_{23} 表示探针间距, cm ; U_R 表示精密电阻两端的电压, V ; R 表示精密电阻的阻值, Ω ; ΔV 表示中间两探针之间的电压, V 。当四个探针的排布间距相等 ($D_1=D_2=D_3=k$), 即按照 Wenner 组态排布时, 土壤电导率的计算公式^[25]为

$$\sigma = \frac{1}{2\pi k} \frac{U_R}{R \Delta V} = \frac{1}{2\pi k} \Delta E \quad (2)$$

式中 ΔE 表示土壤电导, mS 。

由上式可知,在已知探针间距 k 和精密电阻阻值 R 的情况下,只需要获取精密电阻两端的电压 U_R 及中间两探针之间的电压 ΔV , 即获取 ΔE 的数值后,可计算得到土壤的电导率值。

1.2 整体结构

依据上述土壤电导率测量原理,设计了如图 2 所示的土壤电导率传感器,主要由按键、LCD 液晶显示模块、主壳体、外接串口端、传感器探针、SD 卡模块、STM32 单片机最小系统、WiFi 无线模块、探针接口、恒流源模块、DDS 信号发生模块、信号采集模块、有效值转换模块、差分放大模块、电源模块等组成。其中检测和数据处理模块作为核心,采用 STM32 处理器为核心处理单元, LCD1602 液晶显示模块采用四线制通信, 供电电压 5V , 用于实时显示电导率传感器的输出值; 集成 SD 卡存储模块, 实现数据的实时保存; 集成以 ESP8266 为核心的 WiFi 无线模块, 实现数据的无线传输。传感器四根探针均为长度 65 mm 、直径 3 mm 的不锈钢实心材质, 探针间以 20 mm 的间距通过螺帽固定于 PVC 固定板上, 与主壳体通过屏蔽线连接, 避免信号交叉干扰。以上可以看出, 设计的传感器的整体结构紧凑, 体积小, 可以装配到农业机具各行的作业单体上, 进行不同作业行的土壤电导率的实时检测与作业参数的在线调整。

工作时, 传感器探针与土壤直接接触, 通过内部的信号产生模块, 使得两端的探针形成一个稳定的交流源, 土壤电导率的不同使得中间两根探针间的电压差发生变化, 通过信号的采集与处理, 将数据实时显示在 LCD 屏幕上, 并实时将数据存储到内部 SD 卡上。工作时, 可通过 LED 信号灯的工作状态判断传感器是否正常工作, 通过按键进行数据发送等操作。

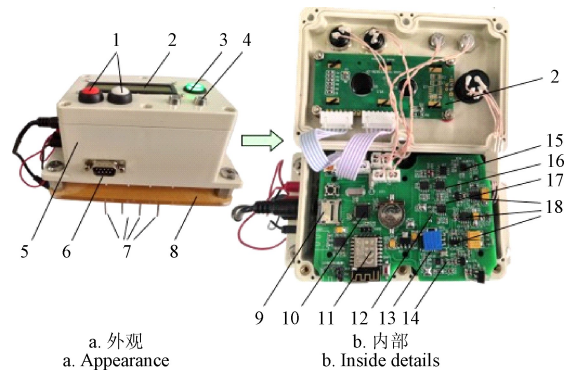


图 2 土壤电导率传感器实物图

Fig.2 Photo of soil electrical conductivity sensor

2 传感器设计

2.1 硬件结构设计

2.1.1 硬件电路总体结构

设计的土壤电导率传感器硬件电路总体结构如图 3 所示, 主要包括 STM32 处理器及核心电路模块、电源电路模块、交流信号源模块、有效值检测电路模块及其他外围电路等。有效值检测电路模块包括差分信号放大电路、有效值转换电路以及信号采集电路。其中, 设计的 STM32 处理器及核心电路是整个土壤电导率传感器的核心单元, 负责控制 DDS 芯片输出正弦波信号, 并将采集到的传感器信息进行处理及传递。

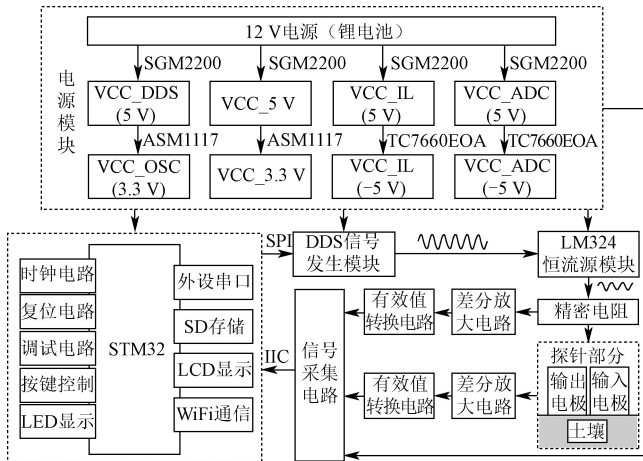


图 3 土壤电导率传感器电路结构图

Fig.3 Schematic diagram of soil electrical conductivity sensor

工作时, 电源模块为各个单元模块提供有效的电源输入; STM32 处理器通过控制交流信号源模块的 AD9833 信号发生模块输出一个正弦波信号, 产生的正弦波信号经 LM324 搭建的恒流电路整流、稳压后, 输出具有稳定电流的正弦波信号; 稳压后的正弦波经过精密电阻到金属探针的输入电极将正弦波输入到土壤中, 在土壤中产生一个稳定的信号源; 然后分别将精密电阻两端和探针输出电极的差分信号经 AD623 仪表放大器模块放大, 并将放大后的差分信号送入 AD736 交直流转换器模块将正弦波转化为有效电压值; 转换后的两路电压及锂电池的输出电压经 PAC1934 电压电流采集模块完成数据的采集, 实时采集数据的同时监控系统电源的稳定性; 最后 STM32 处理器再将对应电压值读取并进一步处理, 完成数据的显示、存储与通信。

2.1.2 电源电路设计

电源电路模块是传感器的基础单元, 为了防止不同模块间信号的干扰, 电源电路分别为各个模块电路单独供电, 保证各个模块的有效工作。如图 4 所示, 由于供电电源为 12 V 锂电池, DDS 电路、LCD 液晶屏、信号采集电路等均需要 5 V 供电, STM32 处理器及核心电路均需要 3.3 V 供电, 另外, 交直流转换电路、恒流源电路均需要 ± 5 V 供电, 需要对输入电源进行稳压、降压以及电平转换处理。图 4a 中采用滤波及稳压电容对锂电池电源进行滤波及稳压, 用于保证装置的输入电压稳定可靠;

图 4b、4c 中分别采用了 SGM2200 及 ASM1117-3.3 稳压器, 用于将滤波稳压后的 12 V 电源降压至 5 V 及将 5 V 电压降压至 3.3 V, 图中的两个降压电路仅用于为 LCD 液晶屏、STM32 处理器供电, 其他模块的供电电源单独设置, 以保证每个模块工作的稳定性; 图 4d 中采用 TC7660 电压逆变器实现 +5 V 电压与 -5 V 电压的转换, 其中, C17 为储能电容, 由于转换后会产生一定的压降, 所以在 LV 引脚与 V_{OUT} 引脚增加了滤波及稳压电路, 保证输出电压的稳定性。设计的电源模块, 除了 12 V 直流电源稳压电路为共用电路之外, 各个模块所需的 5、3.3 及 ± 5 V 电源均单独设置了降压及电平转换电路, 各部分互不干扰。

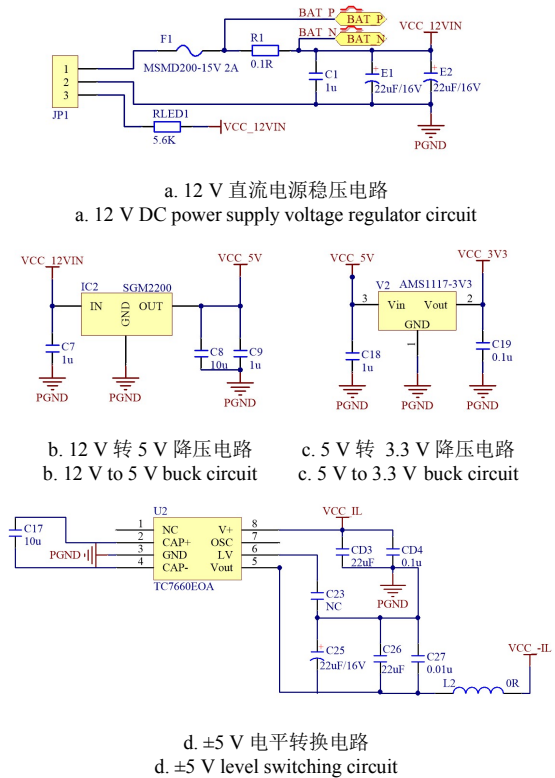


图 4 部分电源电路原理图

Fig.4 Schematic diagram of part power circuit principle

2.1.3 交流信号源电路设计

为了给装置提供一个稳定可靠的正弦信号电流, 设计了以 AD9833 芯片为中心的正弦信号发生电路, 如图 5 所示。该 DDS 电路无需外部元件, 保持低功耗的同时控制了成本, 主要包括一个 25 MHz 的参考时钟、一个精密电阻和多个去耦电容, 用数字方式产生 0~12.5 MHz 范围的正弦波; 同时与 STM32 处理器通过三线式串行 (SPI) 接口 (对应 6、7、8 引脚) 进行通信, 编程调整方便。DDS 信号发生电路产生的正弦信号滤波后, 经 V_{OUT} 引脚传递到 LM324 芯片组成的恒流源中, 该系列芯片是带有差分输入的四运放集成电路, 除电源共用外, 四组运放相互独立, 保证输出的电压更加稳定。

2.1.4 有效值检测电路模块设计

有效值检测模块主要对流经精密电阻及传感器探针回馈的电压差信号进行有效检测, 并将得到的信息传递

到 STM32 处理器中。该模块主要由差分放大电路、有效值转换电路及信号采集电路组成, 设计的电路原理图如图 6 所示。

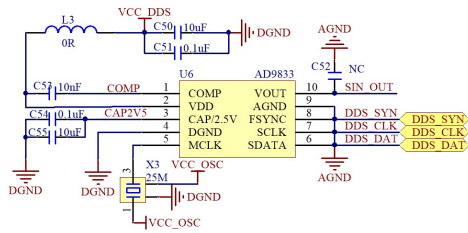
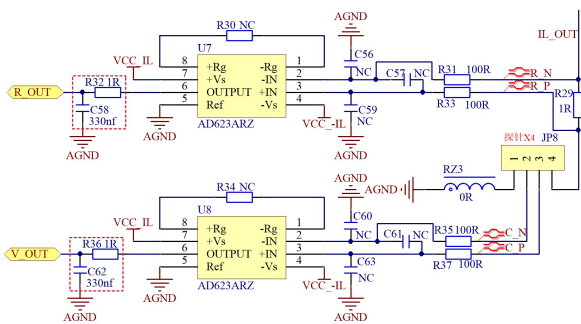


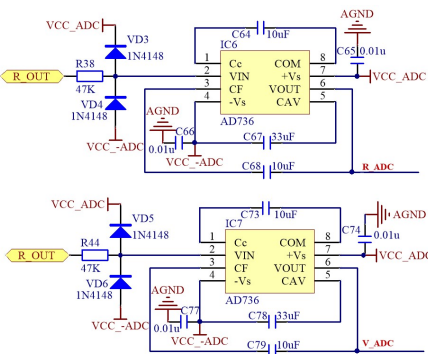
图 5 DDS 信号发生电路原理图

Fig.5 Schematic diagram of DDS signal generator principle



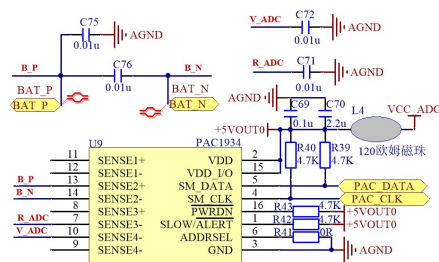
a. 差分放大电路

a. Differential amplifier circuit



b. 有效值转换电路

b. RMS conversion circuit



c. 信号采集电路

c. Signal acquisition circuit

图 6 有效值检测电路模块原理图

Fig.6 Schematic diagram of RMS detection circuit module principle

由于最终采集的信号为交流信号且幅值较小, 因此采用差分仪表放大器对其进行放大, 如图 6a 所示。采用 AD623 放大器及外围电路组成的差分放大电路, 分别对流经精密电阻 R29 和传感器探针的微弱信号进行差分放

大。AD623 是一款低成本、高精度的仪表放大器, 功耗低成本低, 符合设计要求。该电路采用 ± 5 V 供电, 由 12 V 电源降压至 5 V 后, 再转换为负电源。芯片的 Ref 是输出电压基准引脚, 由于采取了 ± 5 V 供电方式, 因此将该引脚接 AGND, 定义零输出电压; 输入端配有串联的电阻片, 用于防止过载造成芯片损坏, 适用于所有的增益及上电、断电过程; 该放大电路增益可以通过更换 R30 阻值的方式进行调节; 同时, 输出部分有低通滤波电路, 初始通过频率为 3 MHz, 可通过修改阻容参数设置所需通过频率。

为了方便对检测到的信息进行读取, 需要将交流电压波形转换为直流电压, 设计了如图 6b 所示的有效值转换电路。该电路主要由高精度、灵敏性好的 AD736 转换器及其外围电阻组成, 采用 ± 5 V 供电, $+V_s$ 、 $-V_s$ 引脚与输入电源之间均并联一个 $0.01 \mu\text{F}$ 的电容以消除电路中的高频干扰; C_c 与 COM 引脚串联了一个 $10 \mu\text{F}$ 的电容, 起到隔直作用; 同时, 输入端设置了双向限幅二极管, 起到过压保护作用。

如图 6c 所示设计了以 PAC1934 检测器及其外围电路组成的信号检测电路, 以实现信息的有效提取。该芯片可以采集电压电流信号到相应通道的电压寄存器, 再通过 IIC 与单片机通信, 单片机便可读取相应寄存器的电压值数据。其中, 差分输入主要是相对于取样电阻来设置的, 通过采集取样电阻两端的差分电压, 便可以计算出流过取样电阻的电流值, PAC1934 有四个通道此系统只用到三个通道, 1 通道悬空, 2 通道可以用来检测电池的电量 and 耗电情况, 3 通道采集精密电阻两端的差分电压值, 4 通道采集探针端的差分电压值。

2.2 软件设计

2.2.1 主程序软件设计

传感器的主程序基于 C 语言设计完成, 主要实现信号的产生、数据的定时读取、存储、显示与通讯等功能, 如图 7 所示。工作开始时, 电源模块完成各模块所需的电源转换, 保证各部分的有序供电。供电完成后, 首先完成各个系统模块硬件和系统参数的初始化, 主要包括时钟、按键、串口、IIC、DDS、ADC 等初始化; 实时读取系统时钟的时间, STM32 处理器按照固定的时间间隔, 对采集的土壤电导率信息进行分析 and 处理, 同时对 GPS 位置信息进行有效解析并获取, 此外, 设定的固定时间间隔还可为数据存储及发送提供有效的参考时间; 通过 SPI 完成对 DDS 模块的设置与通信, 通过 IIC 完成数据的读取, 并通过 RS232 串口完成数据的发送。

2.2.2 GPS 位置信息获取

为实现取样点电导率信息与位置信息 (经纬度) 的同步获取, 传感器内部集成了 GPS 信息获取驱动单元, 外设 GPS 接收机可通过预留的 RS232 串口与 STM32 单片机进行通信, 定时解析获取 GPS 设备的经纬度与时间信息。GPS 接收机输出格式是采用 NMEA-0183 数据协议, 包含了定位时间、经纬度、高度、速度、日期等信息, 以独立相关的 ASCII 码传递信息, 不同数据流间以

逗号隔开。工作时, 首先系统上电完成各个模块的启动, 主程序完成各部分硬件及关键参数初始化以后, 开启定时器负责数据的采集和发送, 同时开始解析 GPS 报文的数据。其中, GPS 报文信息存放在缓存寄存器数组中, 首先通过判断字符串开头信息“\$”, 并以此作为数据的起始端; 通过一个接收状态标记变量判断数组的状态, 解析出寄存器中报文的长度并判断这组报文是否接收完毕, 并通过不同的逗号(“,”)标记读取不同数据流的信息(本文只读取经纬度和时间信息)并进行数据转换。其中, STM32 单片机控制定时器每隔一定的时间间隔读取信息, 以降低功耗。

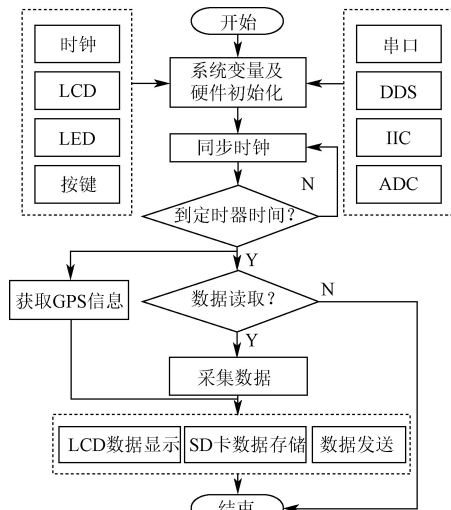


图7 软件流程图

Fig.7 Schematic diagram of software flow

2.2.3 无线通信软件设计

考虑到复杂性的田间作业环境, 为方便实际操作, 将 WiFi 模块设置成 AP 模式, 将其配置为无线网络的中心节点, 供别的设备接入, 组成一个局域网。相较于有线传输的方式, 无线传输在硬件架设及使用的机动性、可拓展性方面均有明显的优势。首先将传感器 WiFi 模块作为 TCP (Transmission Control Protocol) 服务器, 并依据指令配置服务器的属性参数(热点名称、密码及加密方式), 波特率设置为 115 200 bit/s, 手机或平板电脑等终端设备作为客户端与其连接通信。传感器读取、处理后带有位置和时间信息的数据, 通过单片机 RS232 串口与 ESP8266 WiFi 无线模块连接, 实现与手机或平板电脑等终端设备的数据无线传输, 最多可支持 5 个终端设备(客户端设备)进行连接。

3 传感器试验

3.1 试验材料与方法

土壤样本取自河北省廊坊市(39°19'N, 116°17'E)的砂壤土, 有机质质量分数为 1.51%。以五点采样法在约 660 m² 的农田区域中采集 0~20 cm 的耕层土壤, 采样时将表层的石块及动植物残体清除, 以保证土壤样本的完整性。将取到的土壤充分混合后装入密封袋中, 带回实验室进行下一步处理。

将田间采集的部分土壤置于若干个直径 100 mm 的培养皿中, 用恒温干燥箱(DHG-9123A 型, 上海)在 45 °C 条件下烘干 24 h 至恒质量后, 取出冷却至常温。按照《HJ 802-2016 土壤-电导率的测定-电极法》^[26]相关要求, 对烘干的土壤样品进行缩分、研磨和过 2 mm 样品筛后备用。

用电子秤称取 20.00 g 筛后土壤样品于 250 mL 三角瓶中, 并按照质量比 1:5 的配比加入 100 mL 的蒸馏水, 制成土壤溶液。将装有土壤溶液的三角瓶置于往复式水平振荡器(HY-4A 型, 常州)中振动 30 min, 结束后取下三角瓶静置 30 min。过滤后将溶液分别转移至离心管并置于高速离心机(HR/T16M 型, 湖南)中离心分离 30 min, 将离心分离后的上清液置于 100 mL 烧杯中, 用标准电导率仪(DDB-303A 型, 上海)测量其电导率值。该仪器选自上海仪电科学仪器股份有限公司, 采用 DJS-1C 型铂黑电极, 可测量 0~10 000 μS/cm 范围的电导率, 可进行手动温度补偿, 精度较高, 其测量结果可作为样本的准确电导率。

3.2 传感器标定试验

为保证采集的电导率数据的准确性, 需要对传感器进行标定。试验前, 抽取 10 份 1 kg 土壤样本置于托盘, 分别均匀喷洒 120 mL 经蒸馏水稀释后的不同浓度 KCl 溶液, 制备成 10 个不同电导率梯度(0.269、0.341、0.435、0.522、0.619、0.703、0.797、0.885、0.973 及 1.062 mS/cm)的土壤样本(含水率均低于 15%), 以降低含水率对电导率测量结果的影响^[27]。将样本搅拌均匀并静置后, 用设计的电导率传感器测量其电导率的值。参考美国材料与试验协会(ASTM) D5391-1999(2009)试验标准^[28], 将测量温度设置为 25 °C 左右, 以降低温度对电导率测的影响。试验均重复 3 次测量并记录平均值。按照 3.1 节的操作方法将样本制备成土壤溶液, 用 DDB-303A 型便携式电导率仪测量样本溶液的电导率, 得到其标准值, 并对试验数据进行拟合分析。

3.3 传感器工作稳定性试验

为进一步明确传感器的工作稳定性, 选取 3.1 节配置的 5 组不同电导率梯度(0.269、0.435、0.619、0.797、0.973 mS/cm)的土壤样本, 测量温度为 25 °C 左右, 每组静态连续测量 50 组数据, 得到传感器在不同电导率浓度下连续测量数据。

3.4 传感器性能对比试验

选用目前市面上广泛应用的精讯畅通公司 JXBS-3001 型传感器和设计的电导率传感器进行对比试验, 测量土壤样本电导率。该传感器是基于时域反射原理的电导率测量方法, 信号源产生的信号经过土壤时, 信号会产生相应的衰减, 通过监测信号的衰减值来确定被测土壤的电导率^[29]。该传感器对于土壤状况的检测, 多是采用全部埋入或是探针全部插入被测介质中进行, 但不能应用于田间动态检测, 其内部芯片封装采用国外进口, 稳定性可有效保证, 且该传感器在国内广泛应用于大棚等农业设施及野外环境检测中。考虑到设计的电导率传感器最终要应用到实际农业生产相关环节, 因此, 在相同的试验条件及相邻的时间段内进行两种传感器的

对比试验,以反映设计的传感器与该传感器实际工作情况,验证其工作性能。

1) 检测精度对比试验

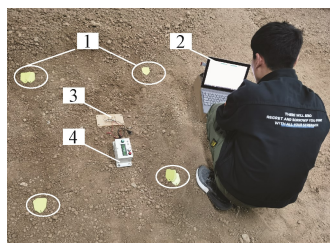
采用3.1节方法随机配置5种不同浓度的土壤电导率样本,测量温度为25℃,分别采用JXBS-3001型传感器和设计的电导率传感器对每个土壤样本重复测量5次,并记录其平均值。测量完的样本按照3.1节的操作方法将样本制备成土壤溶液,用DDB-303A型便携式电导率仪测量样本溶液的电导率,作为其标准值。

2) 响应时间对比试验

将JXBS-3001型传感器和设计的电导率传感器分别通过串口与电脑通信,设置同样的数据发送间隔200ms,即两种传感器均按照200ms的频率向电脑实时发送检测数据。首先选取3.1节制备的其中一份土壤样品(电导率为0.485 mS/cm),并将JXBS-3001型传感器通电,传感器在空气中静置一段时间后,打开串口调试助手开始接收数据,然后将其插入到准备好的土壤样品中,保存串口助手中的试验数据;随后,按照相同的步骤获取该传感器从土壤中转移到空气中的数据变化。同理,采用相同的方式对设计的电导率传感器进行试验。分别获取两种传感器在“空气-土样”及从“土样-空气”两种状态下的数据变化情况,并对比两组试验的数据。

3.5 传感器现场验证试验

为了验证传感器在实际环境中的工作性能,在中国农业大学选取两个地块(40°03'N, 116°29'E; 40°00'N, 116°37'E)进行土壤电导率定点获取试验。分别在每个地块选取不同的位置作为测量点,进行现场电导率数据获取及取样工作,每个地块选取了4个测量点共计8个测量点。测量前,用TP101型温度传感器获取土壤的实际温度。如图8所示,测量时,首先用设计的电导率传感器依据五点取样法原理,分别获取每个测量点5个位置的电导率数据,将平均值作为该测量点的电导率测量值;参考3.1的方法,对每个测量点传感器测量位置的土壤进行采集并混合,密封后带回实验室进行室内分析,用恒温干燥箱烘干获取土样的含水率,用DDB-303A型便携式电导率仪测得土样的标准电导率值。



1.测量点 2.电脑 3.PVC固定板及传感器探针 4.传感器主壳体
1.Measuring position 2.Computer 3.PVC board and sensor probe 4.The main shell

图8 传感器现场试验

Fig.8 Field test of the sensor

4 结果与分析

4.1 标定试验结果

将传感器采集的数据与DDB-303A电导率仪记录的

数据进行拟合,结果如图9所示。从图中可以看出,电导率传感器输出的电导值与DDB-303A电导率仪测得的电导率值呈明显线性关系,拟合曲线 $y=1.161x+0.272$,决定系数 $R^2=0.995$,拟合度较高,表明设计的电导率传感器在测量土壤电导率时具有较高的准确性。

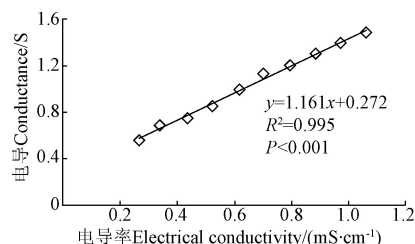


图9 电导率传感器标定曲线

Fig.9 Calibration curve of electrical conductivity sensor

4.2 工作稳定性试验结果

对不同电导率梯度下土壤样本的测量结果进行整合,得到传感器工作稳定性试验结果如图10所示。从图中可以看出,传感器对各样本电导率进行连续采样时,数据的波动都比较小。分别计算每组数据的标准偏差,在不同电导率水平下,传感器测量值的标准偏差均小于 $0.76 \mu\text{S/cm}$ 。试验结果表明,设计的传感器在不同电导率范围内的土壤中,均有良好的工作稳定性。

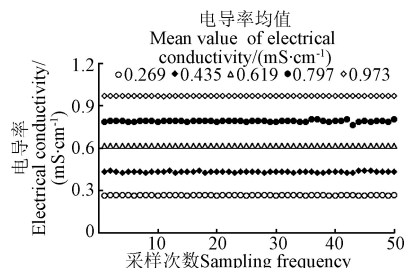


图10 电导率传感器稳定性试验结果

Fig.10 Stability test results of electrical conductivity sensor

4.3 性能对比试验结果

4.3.1 检测精度对比试验结果与分析

对不同传感器的测量数据整理后,结果如表1所示。从表中可以看出,随着土壤电导率的增加,JXBS-3001传感器和设计的电导率传感器的测量误差均有不同程度增大的趋势。其中,JXBS-3001传感器的绝对误差为 $-13.8 \sim 30.3 \mu\text{S/cm}$,相对误差为 $-2.46\% \sim 3.74\%$;设计的电导率传感器绝对误差为 $-5.9 \sim 19.4 \mu\text{S/cm}$,相对误差为 $-1.05\% \sim 2.39\%$ 。结果表明,设计的电导率传感器在以较低的生产成本条件下,测量误差要小于JXBS-3001传感器,测量精度可靠。

4.3.2 响应时间对比

对两种传感器从“空气-土样”及从“土样-空气”两种状态下的数据进行整理,将两种传感器数据产生变化的前一组数据作为不同工作状态的起始数据,得到两种传感器在不同状态下的数据变化结果如图11所示,从图中可以看出,两种传感器分别在“空气-土样”和“土样-

空气”两种状态下的变化趋势一致,在传感器状态发生变化后,传感器的输出信号均是先快速增加或减小,待变化一段时间后数据保持稳定。经过拟合计算,JXBS-3001 型传感器在两种状态下的响应时间均小于

2.23 s,设计的电导率传感器在两种状态下的响应时间均小于 2.01 s,结果表明两种传感器在不同状态下的响应时间相近,甚至设计的传感器可以更快地完成不同工作状态的切换,可以对土壤电导率信息进行快速有效获取。

表 1 电导率传感器和 JXBS-3001 传感器对比试验结果
Table 1 Results of soil electrical conductivity sensor and JXBS-3001 sensor experiments

样品编号 Sample number	DDB-303A 测定的标准值 Standard value for DDB-303A measurements / $(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$	JXBS-3001			电导率传感器 Soil electrical conductivity sensor		
		测定值 Measurement value/ $(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$	绝对误差 Absolute error / $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	相对误差 Relative error /%	测定值 Measurement value/ $(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$	绝对误差 Absolute error/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	相对误差 Relative error /%
1	0.383	0.380	-3.5	-0.91	0.381	-1.6	-0.42
2	0.485	0.481	-3.6	-0.74	0.492	6.6	1.36
3	0.560	0.546	-13.8	-2.46	0.554	-5.9	-1.05
4	0.688	0.713	24.5	3.56	0.703	14.7	2.14
5	0.811	0.841	30.3	3.74	0.830	19.4	2.39

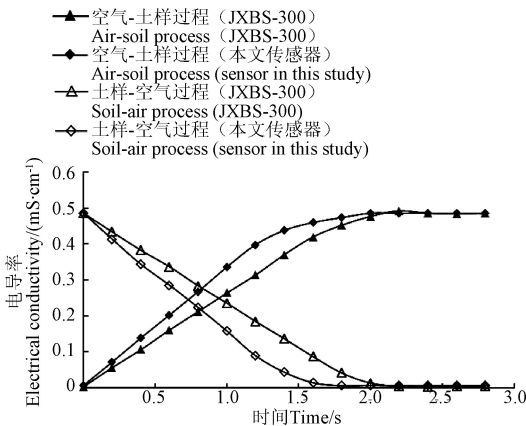


图 11 响应时间对比试验结果
Fig.11 Result of response time comparison

4.4 现场验证试验结果

测量前,用温度传感器测得土壤的平均温度为 20.6℃,对采集的数据进行整理后,结果如表 2 所示。从表中可以看出,地块 1 的电导率与含水率值明显高于地块 2,其中,地块 1 的平均电导率为 333.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$,平均土壤含水率为 11.48%,测量的最大绝对误差为 25.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$,最大相对误差为 7.88%;地块 2 的平均电导率为 136.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$,平均土壤含水率为 9.25%,测量的最大绝对误差为-11.36 $\mu\text{S}/\text{cm}$,最大相对误差为-7.91%。综上所述可以看出,利用电导率传感器在两地块不同位置测量的精度接近,绝对误差为-11.36~25.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$,相对误差为-7.91%~7.88%,表明设计的电导率传感器可以进行不同土壤电导率的快速有效测量。

表 2 电导率传感器现场试验测定值与实验室测量标准值对比

Table 2 Comparison of field test results of soil electrical conductivity sensor with standard values measured in the laboratory

编号 Number		含水率 Moisture content/%	标准值 Standard value/ $(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$	测定值 Measurement value/ $(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$	绝对误差 Absolute error/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	相对误差 Relative error/%
地块 1 Field 1 (40°03'N, 116°29'E)	1	13.16	0.330	0.336	5.92	1.79
	2	11.00	0.321	0.346	25.30	7.88
	3	10.02	0.339	0.329	-9.24	-2.73
	4	11.72	0.345	0.354	8.86	2.57
地块 2 Field 2 (40°00'N, 116°37'E)	1	11.31	0.144	0.132	-11.36	-7.91
	2	8.98	0.119	0.117	-1.97	-1.66
	3	8.06	0.136	0.130	-6.51	-4.79
	4	8.63	0.149	0.140	-8.88	-5.97

5 讨论

土壤电导率是土壤的基本理化特性,可有效反映土壤含水率、有机质含量及质地结构等不同土壤参数的综合属性^[30]。目前土壤电导率的田间动态原位检测是国内外相关专家及机构研究的热点,但该环节在农业生产前进行,需提前对种植田块进行大范围数据采集,难以准确反映农业生产各环节实施过程中的真实电导率情况。本文基于四端法原理设计的电导率传感器,整体结构紧凑,体积小,用于搭载在不同的农业生产机具上,实现土壤电导率的实时检测与作业参数的在线调整。以

STM32 最小系统为核心,配合其他功能模块电路,各个功能模块及主要芯片单独供电,保证信号的有效获取与处理;内部集成 GPS 报文解析与 WiFi 无线通信功能,可与终端设备实现土壤电导率信息及位置信息的同步获取与无线通信;另外,设计时为方便后期功能拓展,预留出许多功能接口,方便后期装置的进一步优化改良。在实验室条件下,传感器与标准电导率呈显著线性关系,决定系数为 0.995,在不同电导率浓度的土样中连续测量的标准偏差均小于 0.76 $\mu\text{S}/\text{cm}$,并在实验室条件下(温度 25℃)配置了不同电导率浓度的土样(含水率<15%),并进行了检测精度和响应时间的对比试验,相对误差为

-1.05%~2.39%, 响应时间小于 2.01 s, 利用电导率传感器在现场(温度 20.6 °C)对地块不同位置测量的绝对误差为-11.36~25.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 相对误差为-7.91%~7.88%, 表明设计的电导率传感器可以进行不同土壤电导率的快速有效获取。本传感器的软硬件设计均可为实现土壤电导率的田间动态原位检测提供参考。

本文在试验设计时均降低了含水率、温度等因素对电导率测量结果的影响, 但是与田间作业环境相比仍有较大的差异。下一步研究中, 会针对影响电导率的环境因素(温度、含水率等)以及影响传感器的作业因素(速度等)开展相应田间试验, 并针对试验结果进行相应的改进优化, 以实现土壤电导率的田间动态高精度检测。

6 结 论

1) 设计了基于交流“电流-电压”四端法的土壤电导率传感器, 以 STM32 处理器为核心, 配合电源电路、交流信号源电路、有效值检测电路及其他外围电路搭建了硬件及软件架构, 集成了信息的实时检测与显示、定时存储与无线传输等功能, 实现了土壤电导率的高精度原位获取。

2) 对设计的电导率传感器进行了试验标定及工作稳定性试验。标定试验结果表明, 电导率传感器输出的电导值与 DDB-303A 电导率仪测得的电导率值呈明显线性关系, 决定系数 $R^2=0.995$; 工作稳定性试验结果表明, 在不同的土壤电导率水平下, 测量值的标准偏差均小于 0.76 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 试验结果表明本电导率传感器在不同电导率水平下具有较高的准确性及工作稳定性。

3) 在实验室条件下(温度 25 °C)配置了不同电导率浓度的土样(含水率<15%), 利用设计的电导率传感器与 JXBS-3001 传感器进行了土壤电导率检测精度和响应时间对比试验, 结果表明设计的电导率传感器绝对误差为-5.9~19.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 相对误差为-1.05%~2.39%, 响应时间小于 2.01 s, 均小于 JXBS-3001 传感器, 表明设计的电导率传感器可以获取较为可靠的测量结果。

4) 利用电导率传感器在现场(温度 20.6 °C)对地块不同位置进行了电导率测量, 并与室内得到的结果进行对比, 结果表明利用传感器在现场测量的绝对误差为-11.36~25.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 相对误差为-7.91%~7.88%, 表明设计的电导率传感器可以进行不同土壤电导率的快速有效获取。

[参 考 文 献]

- [1] 李道亮, 李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1-12.
Li Daoliang, Li Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵春江. 人工智能引领农业迈入崭新时代[J]. 中国农村科技, 2018(1): 29-31.
- [3] 陈学庚, 温浩军, 张伟荣, 等. 农业机械与信息技术融合

- 发展现状与方向[J]. 智慧农业: 中英文, 2020, 2(4): 1-16.
Chen Xuegeng, Wen Haojun, Zhang Weirong, et al. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 1-16. (in Chinese with English abstract)
- [4] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38-48.
Yang Li, Yan Bingxin, Zhang Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese with English abstract)
- [5] He X T, Ding Y Q, Zhang D X, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part I: Design and laboratory experiment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162(7): 318-327.
- [6] He X T, Ding Y Q, Zhang D X, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part II: Field performance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162(7): 309-317.
- [7] 陈世超, 杜太生, 王素芬, 等. 基于农田管理分区的制种玉米产量估算与限制因子评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 128-133.
Chen Shichao, Du Taisheng, Wang Sufen, et al. Evaluation of limiting factors and prediction of seed maize yield based on management zones[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(15): 128-133. (in Chinese with English abstract)
- [8] Fortes R, Millán S, Prieto M H, et al. A methodology based on apparent electrical conductivity and guided soil samples to improve irrigation zoning[J]. Precision Agriculture, 2015, 16(4): 1-14.
- [9] 刘文全, 卢芳, 徐兴永, 等. 滨海废弃盐田复垦区土壤盐分和有机质的空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 183-190.
Liu Wenquan, Lu Fang, Xu Xingyong, et al. Spatial variability of soil salinity and organic matter in reclaimed area of abandoned salt pan in coast[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 183-190. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王全九, 毕磊, 张继红. 新疆包头湖灌区农田土壤水盐热特性空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 138-145.
Wang Quanjiu, Bi Lei, Zhang Jihong. Spatial variability analysis of large-scale soil water, salt and heat characteristics in Baotou lake irrigation area of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(18): 138-145. (in Chinese with English abstract)
- [11] 徐志闻, 刘亚斌, 胡夏嵩, 等. 基于水分和原位电导率的西宁盆地盐渍土含盐量估算模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 148-154.
Xu Zhiwen, Liu Yabin, Hu Xiasong, et al. Salt content estimation model of saline soil in Xining Basin based on water content and in-situ electrical conductivity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(5): 148-154. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张智韬, 杜瑞麒, 杨帅, 等. 水盐交互作用对河套灌区土壤光谱特征的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 153-164.
Zhang Zhitao, Du Ruiqi, Yang Shuai, et al. Effects of water-salt interaction on soil spectral characteristics in Hetao Irrigation Areas of Inner Mongolia, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 153-164. (in Chinese with English abstract)
- [13] Taghizadeh-Mehrjardi R, Minasny B, Sarmadian F, et al. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran[J]. Geoderma, 2014, 213: 15-28.
- [14] 姚荣江, 杨劲松, 郑复乐, 等. 基于表观电导率和 Hydrus 模型同化的土壤盐分估算[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 91-101.
Yao Rongjiang, Yang Jinsong, Zheng Fule, et al. Estimation of soil salinity by assimilating apparent electrical conductivity data into HYDRUS model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(13): 90-101. (in Chinese with English abstract)
- [15] Skierucha W, Wilczek A, Szyplowska A, et al. A TDR-based soil moisture monitoring system with simultaneous measurement of soil temperature and electrical conductivity[J]. Sensors, 2012, 12(10): 13545-13566.
- [16] Scudiero E, Berti A, Teatini P, et al. Simultaneous monitoring of soil water content and salinity with a low-cost capacitance-resistance probe[J]. Sensors, 2012, 12(12): 17588-17607.
- [17] Rêgo Segundo A, Martins J, Paulo M, et al. A novel low-cost instrumentation system for measuring the water content and apparent electrical conductivity of soils[J]. Sensors, 2015, 15(10): 25546-25563.
- [18] Farzamian M, Monteiro Santos F A, Khalil M A. Application of EM38 and ERT methods in estimation of saturated hydraulic conductivity in unsaturated soil[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 112: 175-189.
- [19] 吴亚坤, 刘广明, 苏里坦, 等. 基于电磁感应研究新疆土壤盐分三维空间变异对季节的响应[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 173-178.
Wu Yakun, Liu Guangming, Su Litan, et al. Response of three-dimensional spatial variability of soil salinity to change of season of Xinjiang based on electromagnetic induction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(14): 173-178. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李茂娜, 孙宇, 严海军, 等. 基于土壤表观电导率的变量灌溉管理分区方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 172-180.
Li Maona, Sun Yu, Yan Haijun, et al. Method for variable rate irrigation management zone delineation based on apparent soil electrical conductivity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 172-180. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈玲, 李民赞, 赵勇. 便携式土壤电导率测试仪改进设计及实验[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 175-177.
Chen Ling, Li Minzan, Zhao Yong. Improvement and experiment of the portable soil EC detector[J]. Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7): 175-177. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵燕东, 李宁, 皮婷婷. 基于交流“四端法”的土壤电导率在线实时检测系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 299-307.
Zhao Yandong, Li Ning, Pi Tingting. Soil electrical conductivity online real-time detection system based on four-electrode method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 299-307. (in Chinese with English abstract)
- [23] 裴晓帅, 孙红, 郑立华, 等. 车载式土壤光-电特性参数采集系统研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊 1): 90-95.
Pei Xiaoshuai, Sun Hong, Zheng Lihua, et al. Development of movable acquisition system for soil optical-electrical parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(S1): 90-95. (in Chinese with English abstract)
- [24] 裴晓帅, 郑立华, 孙红, 等. 基于 Android 的车载式土壤电导率和光谱反射率检测系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 112-117.
Pei Xiaoshuai, Zheng Lihua, Sun Hong, et al. Vehicular soil electrical conductivity and spectral reflectance detection system based on Android[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Suppl.2): 112-117. (in Chinese with English abstract)
- [25] 魏鸿怡, 孟繁佳. 基于四端法和时域反射法的土壤电导率测量研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊 1): 237-242.
Wei Hongyi, Meng Fanjia. Soil electrical conductivity measurement based on four-terminal method and time domain reflectometry method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S1): 237-242. (in Chinese with English abstract)
- [26] HJ 802-2016, 土壤电导率的测定电极法[S].
- [27] 王瑛瑛, 宋良图. 土壤电导率测量系统开发[J]. 仪表技术, 2013(12): 21-24.
Wang Yingying, Song Liangtu. Measurement system development of soil electrical conductivity[J]. Instrumentation Technology, 2013(12): 21-24. (in Chinese with English abstract)
- [28] ASTM D5391-1999(2009), Standard test method for electrical conductivity and resistivity of a flowing high purity water sample[S].
- [29] Agah A E, Meire P, Deckere E D. Laboratory Calibration of TDR probes for simultaneous of measurements soil water content and electrical conductivity[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2019, 50(13): 1525-1540.
- [30] 刘文全, 卢芳, 徐兴永, 等. 滨海废弃盐田复垦区土壤盐分和有机质的空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 183-190.
Liu Wenquan, Lu Fang, Xu Xingyong, et al. Spatial variability of soil salinity and organic matter in reclaimed area of abandoned salt pan in coast[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 183-190. (in Chinese with English abstract)

Design and experiment of a sensor for in-situ rapid detection of soil electrical conductivity using four-electrode method

Zhong Xiangjun, Yang Li^{*}, Zhang Dongxing, Cui Tao, He Xiantao, Du Zhaohui

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Soil-Machine-Plant System Technology of Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: Soil electrical conductivity is an important parameter that characterizes soil quality and physical properties. The rapid acquisition of soil electrical conductivity can provide effective data support for accurate management of agricultural products such as variable-rate fertilization, variable-rate seeding, and other soil improvement operations. At present, the collection of field electrical conductivity is carried out before agricultural production, and special electrical conductivity detection equipment is needed to carry out large-scale data collection and generate a spatial distribution map of electrical conductivity for planting plots. The operation of this method is cumbersome, time-consuming, and laborious, and the detected electrical conductivity value is difficult to accurately reflect the real conductivity in each link of agricultural production (such as sowing) due to the time lag. Aiming at the above problems, a rapid in-situ detection sensor for soil electrical conductivity was designed based on the principle of the AC “current-voltage” four-electrode method. It is used to carry on different agricultural production machines to realize the real-time detection of soil electrical conductivity and online adjustment of operating parameters. The STM32 processor was taken as the core component of the sensor, cooperating with the power supply circuit, AC signal source circuit, effective value detection circuit, and other peripheral circuits to build a hardware and software architecture, to realize the high-precision in-situ and rapid acquisition of soil conductivity. The four probes of the sensor are in direct contact with the soil, all of which are made of stainless steel solid material with a length of 65 mm and a diameter of 3 mm. The probes are fixed on the PVC fixing plate with a pitch of 20 mm between them through the nut. The sensor probe and the main shell are connected by the shield wires to avoid the cross-interference of signals. The fixing plate can be separated from the main shell to adapt to different working environment requirements. The STM32 processor controls the AD9833 signal generation module of the AC signal source module through SPI to output a sine wave signal with adjustable frequency and amplitude. It obtains data through the communication between IIC and the RMS detection module, and processes, displays, stores and transmits the data. The LCD1602 liquid crystal display module adopts four-wire communication to display the output value of the electrical conductivity sensor in real-time. An integrated SD card storage module is used for real-time storage of data. WiFi wireless module is integrated with ESP8266 as the core component to realize wireless data transmission. The reserved interface can also be equipped with GPS equipment for location information acquisition, which is convenient for later function expansion. The designed power supply circuit adopts an independent power supply for each functional module and main chip to eliminate signal interference and improve detection accuracy. The designed electrical conductivity sensor has been calibrated and tested for working stability. The calibration test results show that the electrical conductivity values output by the electrical conductivity sensor are significantly linear with that measured by the DDB-303A conductivity instrument, and the linear fitting correlation is 0.995. The experimental results show that the standard deviation of the measured value is less than 0.76 $\mu\text{S}/\text{cm}$ under different soil electrical conductivity levels. Soil samples with different conductivity concentrations (moisture content < 15%) were prepared under laboratory conditions (temperature 25 $^{\circ}\text{C}$). The contrast test of soil conductivity detection accuracy and response time was carried out by using the designed conductivity sensor and JXBS-3001 sensor. The test results show that with the increase of soil conductivity, the measurement errors of the JXBS-3001 sensor and designed conductivity sensor also increases. Among them, the absolute error of the JXBS-3001 sensor is $-13.8\sim 30.3\ \mu\text{S}/\text{cm}$, the relative error is $-2.46\%\sim 3.74\%$. And the absolute error of the designed electrical conductivity sensor is $-5.9\sim 19.4\ \mu\text{S}/\text{cm}$, the relative error is $-1.05\%\sim 2.39\%$, indicating that the designed conductivity sensor has a smaller measurement error than the JXBS-3001 sensor at a lower production cost, and the measurement accuracy is reliable. The response time comparison test results show that the response time of the JXBS-3001 sensor in the two states is 2.23 s, and the response time of the designed electrical conductivity sensor is less than 2.01 s. Conductivity sensors were used to measure the conductivity at different locations of the field at a temperature of 20.6 $^{\circ}\text{C}$, and the results were compared with those obtained in the laboratory. The results show that the absolute error is $-11.36\sim 25.30\ \mu\text{S}/\text{cm}$, and the relative error is $-7.91\%\sim 7.88\%$. The designed sensor can switch between different working states more quickly, and realize the rapid and effective acquisition of the information of the soil electrical conductivity. In summary, the designed soil electrical conductivity sensor can rapidly and accurately detect soil electrical conductivity, which can provide a high-precision detection tool for soil information collection in unmanned farms.

Keywords: soils; electrical conductivity; sensors; STM32; rapidly detection; unmanned farm