

基于数字示波器的车载式土壤电导率检测系统研究

杨 玮 韩 雨 李民赞 孟 超

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083)

摘要: 在电流-电压四端法原理基础上,采用信号发生器替代恒流源作为激励源来提供振幅更大、稳定性更高的正弦信号,以数字示波器替代电压源进行反馈信号检测从而解决电压有效值转换和AD转换频率较慢的问题,改进设计开发了一款基于数字示波器的土壤电导率检测系统。农田现场车载式测量实验分为稳定性检测和定点测量两部分。稳定性实验测试下该检测系统能够稳定读取相关数据。农田定点测量实验结合土壤样本采集和实验室实验,得出每个定点测量点土壤电导率测量值和土壤电导率实验室真值($R^2 = 0.7531$)。根据实验中拖拉机牵引犁盘抖动导致电极与待测土壤之间形成的两种测量接触面的情况,分析并消除了实验中拖拉机抖动现象对数据结果的影响后,土壤电导率实测数据与实验数据之间的决定系数 R^2 提高到 $0.8552 \sim 0.9066$,表明设备能够在排除测量方式等外界因素影响下,测量精度达到较高水平。实验数据对比结果显示,基于数字示波器的车载式土壤电导率仪能够在农田现场进行稳定测量,并且具有较好的性能和准确度。

关键词: 土壤电导率; 电流-电压四端法; 信号发生器; 数字示波器

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0395-07

Vehicle Mounted Soil Conductivity Detection System Based on Digital Oscilloscope

YANG Wei HAN Yu LI Minzan MENG Chao

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Generally, there are two methods to detect soil electrical conductivity, which are contact and non-contact. Among them, the development of contact soil conductivity meter is generally based on the principle of current-voltage four-terminal method, using constant current source as excitation source and voltmeter as feedback signal detection equipment. Based on the principle of current voltage four terminal method, the signal generator instead of constant current source was used as excitation source to provide sine signal with larger amplitude and higher stability, and the digital oscilloscope was used to replace voltage source for feedback signal detection, so as to solve the problem of slow frequency of voltage RMS conversion and AD conversion. A soil conductivity detection system based on digital oscilloscope was developed. The field vehicular measurement experiment was divided into two parts: stability detection and fixed-point measurement. Under the stability test, the detection system can read the relevant data stably. Field fixed-point measurement experiment combined with soil sample collection and laboratory experiment, the measured value of soil conductivity and the true value of soil conductivity at each fixed point were obtained. Based on the field experiment data as the ordinate and the laboratory measurement as the abscissa, the data scatter diagram was drawn, and R^2 was 0.7531 . In order to further explore the problem of poor correlation of experimental data, according to the situation of two kinds of measurement contact surface between electrode and soil to be measured caused by tractor traction plow disc shaking in the experiment. After analyzing and eliminating the influence of tractor shaking phenomenon on the data results, the determination coefficient R^2 between the measured soil conductivity data and the experimental data can be increased to $0.8552 \sim 0.9066$, which indicated that the equipment can achieve a high level

收稿日期: 2020-08-03 修回日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801265)

作者简介: 杨玮(1981—),女,副教授,博士生导师,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: cauyw@cau.edu.cn

通信作者: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

of measurement accuracy without the influence of external factors such as measurement methods. According to the comparison of experimental data, the results showed that the vehicle mounted soil conductivity meter based on digital oscilloscope can stably measure in farmland, and had good performance and accuracy.

Key words: soil conductivity; current-voltage four-terminal method; signal generator; digital oscilloscope

0 引言

土壤作为农业生产的重要基础环境,获取其相关信息是开展农业生产的第一步,土壤参数的获取至关重要^[1]。土壤学的研究表明土壤电导率能不同程度地反映土壤中的盐分、水分、有机质含量、土壤质地结构和孔隙率等参数^[1-3],这些参数对农业作物的生长以及最终的产出结果有着不可忽视的重要作用。目前,土壤电导率测量方法主要分为实验室检测方法和基于传感器实现的土壤电导率仪检测方法两种。

实验室检测土壤电导率一般需要进行土样的采集,其次进行土壤浸提液的制备,最后利用电导率电极笔对土壤浸提液进行电导率的测量,该方法虽然能够达到较高的测量精度,但是实验过程复杂,器材要求较高,耗费时间较长,无法满足农业生产过程中对数据要求的即时性。该方法测量的结果是评价土壤电导率的基准值。

基于传感器实现的土壤电导率仪根据实现原理不同,主要分为接触式和非接触式两种类型。其中非接触式测量一般采用电磁感应原理来实现土壤电导率的测量^[4]。接触式测量国内外流行的方法大体分为两类:一类是基于 TDR 可以同时实现土壤水分和电导率的测量^[5-6],另一类是基于电流-电压四端法测量土壤电导率^[7-9]。接触式土壤电导率仪通常利用电极式传感器,在不破坏土壤总体情况下,通过电极插入土壤采集电导率数据,这种方式不会受作物生长时间和地理条件影响,并且能够满足实时测量的农业生产要求,契合现代智慧农业对土壤数据获取的及时准确性要求。

目前国内外在农田现场测量土壤电导率研究方面取得了很大进展。LYLE 等^[10]在电流-电压四端法原理上设计了一款应用于农作物种植前的土壤电导率测量仪。王琦等^[11]同样基于电流-电压四端法开发了便携式土壤电导率测量仪,操作简便、精度较高。ZHANG 等^[12]开发了一款基于“电流-电压四端法”的小型设备,主要应用于测量土壤的电导率和含水率。卢超^[13]基于电流-电压四端法开发了分布式无线土壤电导率测量仪,实现了无线测量方式的跨越发展。上述研究在便携式土壤电导率测量方面

取得了不小进展,但在激励源信号、反馈回路电压检测方面没有进一步研究,导致由于激励信号源性能较差、电压检测不精准等问题引发的测量效果不佳。此外,加拿大 Geonics 公司生产的大地 EM38 型电导率仪能够精确测量土壤电导率等数据,依靠手持数据接收端采集 GPS 等信息,但是价格昂贵、操作复杂。

本文基于电流-电压四端法的测量原理,设计一款基于示波器的土壤电导率仪,采用信号发生器替代恒流源作为激励源,从而减少环境和负载对检测精度的影响;采用数字示波器替代电压表检测反馈信号,根据数字示波器采集到信号的平均振幅作为测量结果,以弥补恒流源和电压表在测量精度上的不足,全面提升土壤电导率测量的精确性。

1 实验材料和方法

1.1 电流-电压四端法原理

接触法测量的基本结构之一是电流-电压四端法,图 1 是电流-电压四端法的一种典型结构,测试系统包括两个激励端(J 和 K)和两个反馈端(M 和 N),测量激励信号经过两个激励端流入大地,通过检测两个反馈端波形的平均振幅,可换算出介电材料(土壤)的电导率^[14]。

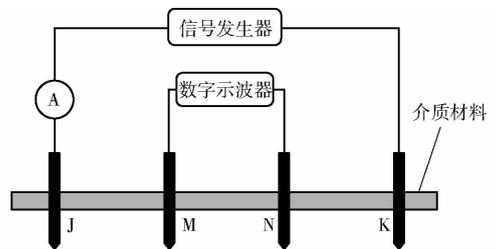


图 1 电流-电压四端法测试原理

Fig. 1 Principle of current-voltage four-terminal method

文献[11]给出了对于大地这种长度和面积都不确定的负载测量对象电导率的计算公式为

$$\sigma = \frac{\frac{1}{d_{JM}} - \frac{1}{d_{JN}} - \left(\frac{1}{d_{KM}} - \frac{1}{d_{KN}} \right)}{2\pi} \frac{I}{V_{MN}} \quad (1)$$

式中 σ ——土壤电导率, S/m

d_{JM} 、 d_{JN} 、 d_{KM} 、 d_{KN} ——探针间距

I ——数字电流表读数

V_{MN} ——M、N 两电极间电压差

基于电流-电压四端法开发的车载式土壤电导

率测量仪的车载犁共 4 片,对应电流-电压四端法的 4 个电极,一般情况下有 3 种排列方式,分别为 $d_{JM} = d_{KN} = a, d_{KM} = 2a$ 的 Wenner 组态, $d_{JM} (= d_{KN})$ 和 d_{MN} 为任意距离时的 Schlumberger 组态和 Polar dipole 组态,参照文献[15],使犁盘分布按照 Wenner 组态排列,实验测量效果能够达到较高的水平。因此,式(1)按照上述取值,4 个电极依次排布组成 Wenner^[7] 组态,该组态下式(1)简化为^[15-16]

$$\sigma = \frac{1}{2\pi a} \frac{I}{V_{MN}} \quad (2)$$

式(2)中已知电极间距 a ,通过读取激励源的瞬时电流和 M、N 电极之间电压差 V_{MN} (即平均振幅),可计算得出土壤电导率。

1.2 硬件设计

整个系统硬件结构框图如图 2 所示,主要由信号发生器电路、电流检测电路和数字示波器电路 3 部分组成。信号发生器电路产生激励电信号,通过电极传输至待被测土壤中。电流检测电路读取激励回路电流。数字示波器电路通过检测反馈信号,计算出相应信号的平均振幅。土壤电导率依据式(2),电极间距离为一定值,将定点测量状态下稳定的示波器振幅读数、电流读数代入,可以得出对应采样点的土壤电导率。

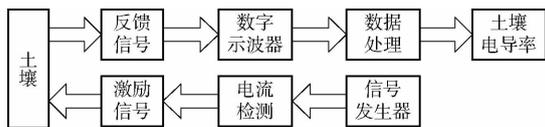


图 2 基于数字示波器的土壤电导率仪结构框图

Fig.2 Soil conductivity meter diagram based on digital oscilloscope

仪器内部结构如图 3 所示,车载连接示意图如图 4 所示,整个系统被封装在一个盒子内,封装盒正面有 3 块显示屏,分别显示激励波形参数、电流参数和平均振幅等,4 个电极通过航空接头与系统连接。外置 GPS 和供电电源在封装盒外部与系统连接。

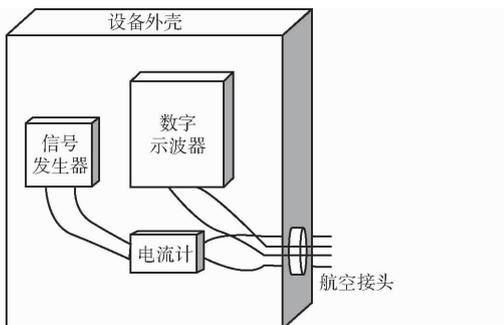


图 3 基于数字示波器的土壤电导率仪内部结构示意图

Fig.3 Internal structure of soil conductivity meter based on digital oscilloscope

激励源波形、频率可以通过按键进行选择。激

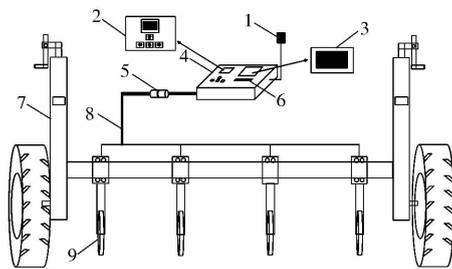


图 4 基于数字示波器的土壤电导率仪车载连接示意图

Fig.4 Schematic of vehicle connection of soil conductivity meter based on digital oscilloscope

- 1. GPS 数据采集器 2. 信号发生器显示及控制界面 3. 显示屏
- 4. 系统封装盒 5. 航空接头 6. 电流显示界面 7. 车载机械结构
- 8. 航空电缆 9. 犁盘电极

励回路电流、反馈信号的平均振幅和 GPS 数据自动读取记录。

1.2.1 信号发生器电路

信号发生器是一种能提供各种频率、波形和输出电平电信号的设备。常见的信号发生器产生原理有两种,第一种是采用传统的频率合成的方法直接产生所需要的波形,第二种是锁相环路法,但是设计方法均存在一定的局限性。

随着信息技术的发展,直接数字合成(Direct digital synthesize, DDS)这一重要的频率合成技术得以实现,相对于其他信号产生技术而言,直接数字合成技术具有相对带宽较宽,频率转换时间短,频率分辨率高,全数字化,便于集成的优点,可以实现不同相位、波形的任意波形。

信号发生器电路设计图如图 5 所示,本模块的设计是基于直接数字频率合成技术,采用 52 系列单片机控制 DDS 芯片 AD9850,通过键盘模块作为输入设备改变 AD9850 的频率,产生频率可调的信号;同时利用 LCD 液晶模块作为输出设备显示输入信号的频率从而验证输出结果的正确性。

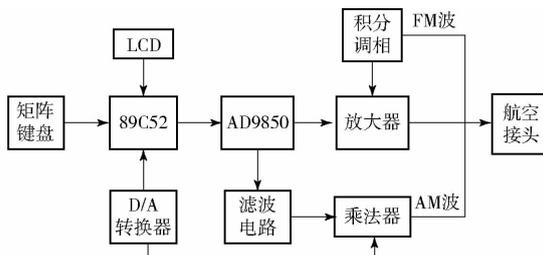


图 5 信号发生器电路设计图

Fig.5 Circuit design of signal generator

信号发生电路与传统的交流模拟电路产生的电信号相比,可以产生多种振幅更大的波形和更标准的波形。两种激励源波形图如图 6 所示,图 6a 中的传统交流信号产生电路中含有大量噪声,而图 6b 中

信号发生电路产生的信号具有更大的幅值和信噪比^[17]。

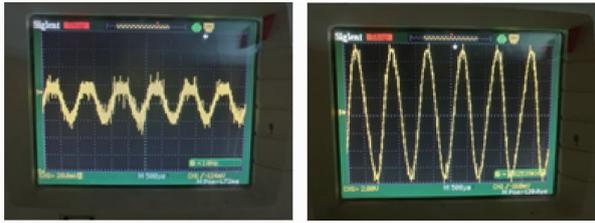


图 6 激励源波形对比

Fig. 6 Waveform comparison of excitation source

1.2.2 电流检测电路

电流检测模块主要用来对激励源回路的电流进行实时检测,通过将实时测量得到的电流代入式(2)计算电导率,可以部分消除系统激励源波动对测量结果的影响。

电流检测模块选用了一款高分辨率的多功能检测仪,如图 7 所示。电流检测范围在 $-9.9999 \sim 9.9999$ A,电流精度可达 $1 \mu\text{A}$,通过配合分流器可以测量任意大电流。系统采样周期可以根据需求调节,调节范围在 $0.33 \sim 250$ s。该检测模块供电简单,可通过 TTL 接口、MicroUSB 接口或 5.08 - 3PIN 端子供电。



图 7 电流检测模块实物图

Fig. 7 Physical diagram of current detection module

1.2.3 数字示波器电路

数字示波器(DSO)利用 A/D 转换技术和数字存储技术,根据取样定理的原则,迅速捕捉瞬时信号并保存、重现信号^[18]。数字示波器工作原理如图 8 所示,首先对模拟信号进行高速采样以获得相应的数字数据并存储,存储器中储存的数据用来在示波器的屏幕上重建信号波形,然后利用数字信号处理技术对采样得到的数字信号进行相关处理与运算,从而获得所需要的各种信号参数。最后,该示波器根据得到的信号参数绘制信号波形,并对被测信号进行实时、瞬态分析。

数字示波器结构框图如图 9 所示,主要包括电压衰减电路、电压跟随电路、程控放大电路、信号采集电路、主控制器电路和显示电路 6 部分。电压衰减电路采用多路复用器 MCP506,具有噪声小、衰减

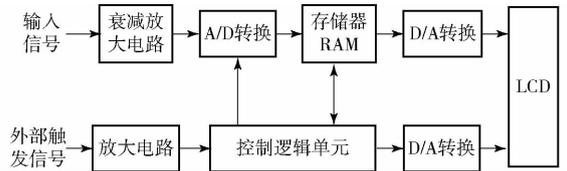


图 8 数字示波器原理图

Fig. 8 Schematic of digital oscilloscope

小等优点,能够满足系统需求。电压跟随电路采用 AD8021 作为运算放大器。AD603 作为程控放大器,电压跟随输出信号经过放大器后产生程控输出。信号采集电路采用高速模数转换器 ADS901 实现对波形的采集功能,具有操作简单、性能可靠等优点。主控制器采用 Altera 公司的低成本 Cyclone 系列的 EP4CE30F23C8 芯片,该芯片性价比较高,并且能够满足较高的设计需求。

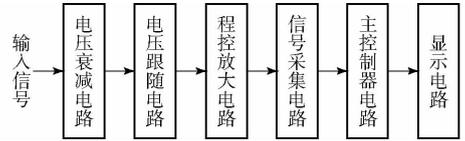


图 9 数字示波器结构框图

Fig. 9 Structure diagram of digital oscilloscope

1.2.4 数字示波器软件

数字示波器软件在 Altera 公司的 Quartus II 平台上利用 Verilog HDL 语言进行开发,Quartus II 平台具有运行速度快、界面统一、功能集中和易于学习等特点。软件实时处理后的数据通过 4.3 英寸显示屏显示,此外数据还可同步存储到 SD 卡中。

软件流程如图 10 所示,程序设计部分主要由显示屏显示控制部分、测频部分和数据处理部分组成。实验过程中,数据记录文件在存储卡中创建后,系统定时执行 A/D 转换、频率测量和幅度测量等操作,实时对采集的反馈信号进行数据处理,显示相应信号的平均振幅,如表 1 所示。

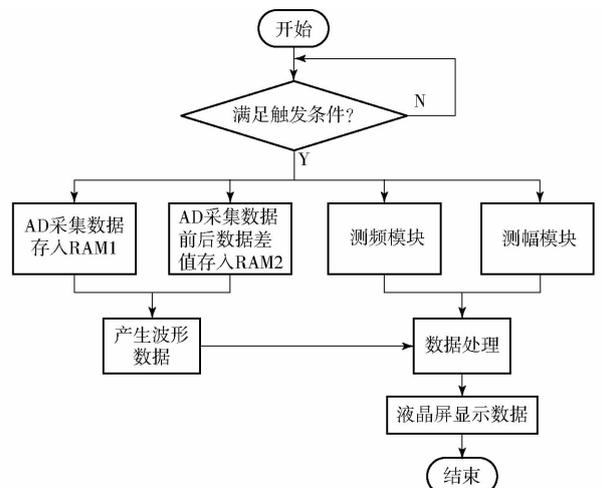


图 10 数字示波器软件流程图

Fig. 10 Flow chart of digital oscilloscope software

表 1 示波器显示数据示例

Tab. 1 Oscilloscope display data example

时刻	振幅/mV	GPS 数据
10:30:25	15.2	4008.12618N,11610.69141E
10:30:26	14.3	4008.12603N,11610.69079E
10:30:27	16.5	4008.12521N,11610.69496E
⋮	⋮	⋮

2 实验与结果分析

2.1 系统稳定性测试

田间实验前,对土壤电导率仪进行系统测试,测试地点为中国农业大学上庄实验站。该实验站位于北京市海淀区西北角(116.189 396 570 13° E, 40.141 112 854 64° N),天气晴朗,能见度高,实验地块附近无高大遮挡物阻碍 GPS 信号接收。稳定性测试方案选择在同一点进行测量,读取近 1 min 的实验数据,之后重新抬起犁盘电极再次插入土中,继续读取数据,共重复 3 次,结果如表 2 所示,测量点电导率(EC)基本保持稳定。

表 2 稳定性测试实验结果

Tab. 2 Stability test results $\mu\text{S}/\text{cm}$

EC 平均值	EC 最大值	EC 最小值
107.1	107.5	102.6
107.4	108.1	103.2
107.2	107.9	102.5

将土壤电导率仪连接在犁盘上,稳定性测试完成后,保持设备与电极连通状态下,开动拖拉机在实验区域内无固定轨迹行驶,记录数据。测试仪器是否运行正常,减少因存放导致的犁盘上生成的锈迹对实验数据采集的影响。

2.2 农田现场实验设计

于 2019 年 6 月 25 日和 9 月 9 日采用车载方式使用土壤电导率仪进行农田现场实验,地点在中国农业大学上庄实验站。

按照实验方案开展实验计划,两次实验共在选定的地块上选取等距的 126 个不同的测量点,利用标杆进行测量点标记。每个测量点使用环刀分别取 5 份土样进行混合作为该测量点的土壤总样本,采样环刀直径为 79.8 mm,采样深度 20 mm,一个采集样本体积约 100 cm³。

实验开始前,将犁盘安装在拖拉机后方,通过系统电路将土壤电导率仪与犁盘系统接通,GPS 模块安装在拖拉机驾驶舱顶部,连接电源进行供电,打开系统检查读数是否准确。驾驶拖拉机按照前序标定的位置进行定点停靠,每到达一个标记点,放下拖拉机的后接犁盘,插入土中,拖拉机车载犁盘呈现自然

放落状态,利用直尺测量,大约插入土 10 cm,显示屏开始显示读数,待读数稳定在一个可控误差范围内,确定已经检测到此地土壤电导率读数,然后抬起犁盘进入下一个标记点进行重复实验。

2.3 农田土壤样本采集

农田现场实验过程中,同步进行土壤样本采集工作。样本采集方式为五点梅花状采样法^[19],采样点俯视图如图 11 所示,俯视图是拖拉机停车状态下,通过对犁盘在土壤表面留下的痕迹进行绘制,图中方框代表土壤表面,横线代表犁盘插入土壤的表面,圆圈代表环刀取土器的采样点。具体土壤采样方式为:在外侧两个电极顶端分别以犁盘顶点为环刀圆心进行采样,一般采样过程中需先用铲子拨开表面土壤,采集约 10 cm 深的土壤。每个采样点采集到的 5 份土壤样本混合装入密封遮光袋中。

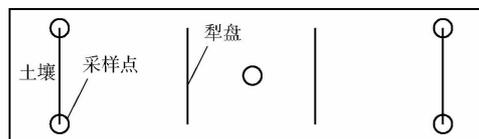


图 11 采样点俯视图

Fig. 11 Sample point top view

2.4 室内实验设计

土壤浸提液电导率的传统测量方法为:先将土样风干,然后向风干后的土样中按照 1:5 的比例加入蒸馏水,充分搅拌、沉淀,最后取出澄清液用于测量^[20]。

传统方法虽然简单可操作,但在干燥箱进行干燥过程中会因为加热引起土壤的内部结构遭到破坏,干燥也会使土样中离子的种类及其浓度发生改变,导致土壤的导电性能发生变化。

针对上述存在的问题,实验方案进行部分改进:将采集到的土样分为两份,第 1 份用来进行干燥实验,利用干燥前后土样两次称量的质量差得出土样中的含水量,从而计算出土样的含水率;利用得出的土样含水率计算得另一份未干燥土样中的含水量。实验室实验通常采用土样质量、水质量 1:5 的比例,因为土样中本身含有一定的水分,为避免土样中含水量对实验的影响,先计算出未干燥土样中的含水量,得出土壤的质量,按照 1:5 比例计算得出应加入的水量,再减去未干燥土样中的含水量,精确得出实验过程中应该加入的水量,这可以保证不会因土壤干燥导致测量电导率的不精准。

土壤浸提液电导率测量使用上海精密科学仪器厂生产的 DDB-303A 型便携式电导率仪,其主要性能参数如下:测量范围 0 ~ 10⁴ $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、电子单元基本误差 $\pm 1.0\%$ 、仪器基本误差 1.5%。

2.5 结果与分析

农田现场实验采用定点测量方式,两次实验共测得 126 组数据,农田现场测量每个采样点分别采集对应的电流、平均振幅。测量点土壤电导率根据式(2),将已知的犁盘电极距离、电流和平均振幅代入,计算得出相应电导率。实验室实验根据采集的 126 份混合后土壤样本进行实验,得出土壤样本电导率,默认实验室测量值为实际土壤电导率。

根据相关文献中土壤电导率的一般范围,剔除实验中极高或极低的 5 组异常数据,异常率约为 4%。利用 Excel 软件以农田现场实验测量值为纵坐标,实验室测量值为横坐标绘制数据散点图,如图 12 所示, R^2 为 0.7531,相关性较低。

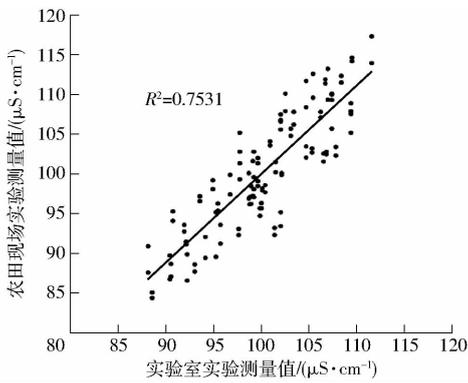


图 12 数字示波器土壤电导率仪测量值与实验室实验测量值的相关性

Fig. 12 Correlation between soil conductivity measured by digital oscilloscope and soil conductivity in laboratory experiments

通过计算数据分布曲线上下部分数据量,结合图 12 可以看出,图中的数据点均匀分布在预测曲线的两侧,这可能与实验过程中拖拉机测量时保持启动状态导致犁盘持续抖动有关。

根据农田现场实验中对犁盘电极插入土中形成的接触剖面进行分析,由于测量地块土壤硬度、测量前犁地不均匀等环境因素影响,拖拉机抖动情况下一般会形成如图 13 所示的两种测量接触面。一般情况下,农田表层土壤较为松散,再加上实验前通过拖拉机不规则犁地使地块 10 cm 左右深度土壤结构遭到破坏,变为松散状态,定点测量过程中犁盘左右振荡抖动,将松散土壤抖动形成图 13a 所示的接触面,引起测量时电极与土壤接触面较小,同时也可能会形成瞬时情况下的近似无接触情况,从而导致测量结果与实验真值相关性低或测量结果极小,进而排除该数据。图 13b 中深层土由于实验前未被犁到或硬度偏高等因素,与犁盘电极能够保持较好的接触面,测量过程中虽然会受到拖拉机抖动影响,仍然能够准确测量。

将图 12 中数据以预测曲线为分界线分为上下

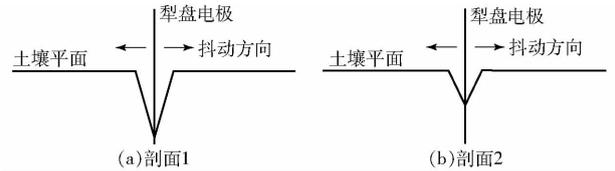
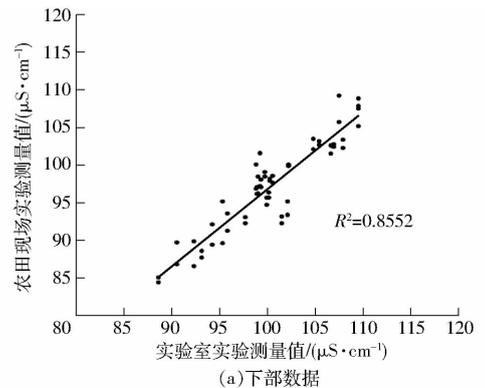
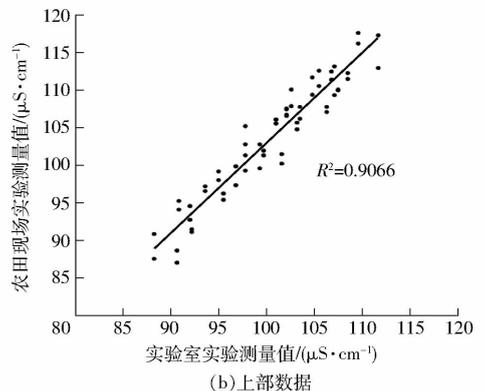


图 13 犁盘电极与农田土壤接触面的剖面示意图
Fig. 13 Profile of contact surface between plow plate electrode and farmland soil

两部分数据,预测曲线上部数据量为 62 组,下部数量为 59 组。分别以上、下两部数据绘制散点图,如图 14 所示。图 13a 中电极与测量土壤接触面较小,可能会导致测量电导率与实验室电导率相关性较差,如图 14a 所示, $R^2 = 0.8552$ 。图 13b 中,仅表层松散土壤与电极接触面分离,故测量效果较好,如图 14b 所示, $R^2 = 0.9066$ 。根据上述实验数据分析可知,若犁盘电极与土壤接触面保持相同情况下,测量数据的决定系数应该在 0.8552 ~ 0.9066 之间,设备效果能够得到进一步提高。但由于数据量较少、未进行对比实验等因素,该实验数据仅可表明农田车载式现场实验的一个研究趋势。



(a) 下部数据



(b) 上部数据

图 14 图 12 中上下部数据散点图

Fig. 14 Scatter plot of upper and lower data in Fig. 12

3 结论

(1) 基于电流-电压四端法原理开发的数字示波器土壤电导率仪在车载测量方式下,以犁盘作为电极能够稳定读取土壤数据。采用信号发生器作为激励源,能够稳定产生输入信号,通过降低环境噪声

等影响提高系统测量稳定性。

(2) 农田现场车载式实验中, 拖拉机自身抖动、土壤环境和实验前犁地不均匀等因素会引起设备读数存在一定误差。通过对测量数据的进一步分类分析可知, 上述 3 种因素会对数据采集产生一定影响。后续实验方案设计中, 可以通过拖拉机静止测量、加大犁地效果或选择硬度相同的实验地块进一步进行实验消减影响。

(3) 农田现场实验和实验室实验两种方式测量

得出同一土壤样本的电导率 R^2 为 0.753 1, 数据相关性较低。进一步根据测量接触面的不同情况, 将实验数据分类后, 得出两种电极接触面情况下实验数据相关性, R^2 在 0.855 2 ~ 0.906 6, 说明设备在测量过程中保持测量接触面相同的情况下, 测量效果实际可能更好。

(4) 该土壤电导率仪设计价格较低, 相对于售价高昂的非接触土壤电导率仪 EM38 或 topsoil mapper 仪器^[21-22]等设备, 性价比较高。

参 考 文 献

- [1] LI Minzan, SASAO A, SHIBUSAWA S, et al. Local variability of soil nutrient parameters in Japanese small size field [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1999, 61(1): 141 - 147.
- [2] 李子忠, 龚元石. 农田土壤水分和电导率空间变异性及确定其采样数的方法 [J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(5): 59 - 66. LI Zizhong, GONG yuanshi. Spatial variability of soil moisture and conductivity in farmland and the method to determine the number of samples [J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(5): 59 - 66. (in Chinese)
- [3] SUDDUTH K, DRUMMOND S, KITCHEN N. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31: 239 - 264.
- [4] 蔡彩霞, 林剑辉, 孟繁佳, 等. EM38 探测复垦土壤厚度分布的可行性研究 [J]. 农业工程学报, 2011, 26(12): 319 - 323. CAI Caixia, LIN Jianhui, MENG Fanjia, et al. Estimation of topsoil thickness in reclaimed field using EM38 [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 26(12): 319 - 323. (in Chinese)
- [5] DALTON F N, HERKELRATH W N, RAWLINS D S, et al. Time-domain reflectometry; simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe [J]. Science, 1984, 224(4652): 989 - 990.
- [6] 杨卫中, 王一鸣, 李保国. 基于相位检测原理的 TDR 土壤电导率测量研究 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 183 - 187. YANG Weizhong, WANG Yiming, LI Baoguo. Research of soil conductivity measuring technique with TDR based on phase detecting principle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 183 - 187. (in Chinese)
- [7] LI Minzan, WANG Maohua, WANG Qi. Development and performance test of a portable soil EC detector [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(2): 301 - 307.
- [8] 盛文溢, 曾庆猛, 林剑辉, 等. 大田尺度下车载式土壤多参数测量方法研究 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 188 - 192. SHENG Wenyi, ZENG Qingmeng, LIN Jianhui, et al. On-the-go measuring method of soil parameters in field-scale [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 188 - 192. (in Chinese)
- [9] BU Chongfeng, WU Shufang, YANG Kaibao. Effects of physical soil crusts on infiltration and splash erosion in three typical Chinese soils [J]. International Journal of Sediment Research, 2014, 29(4): 491 - 501.
- [10] LYLE M C, JAMES D R, JOSEPH H C. Mechanization of soil salinity assessment for mapping [J]. ASAE Paper, 1993, 93 - 1557: 1 - 18.
- [11] 王琦, 李民赞, 汪懋华. 便携式土壤电导率测试系统的开发 [J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(4): 20 - 23. WANG Qi, LI Minzan, WANG Maohua. Development of a portable soil conductivity test system [J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(4): 20 - 23. (in Chinese)
- [12] ZHANG N, FAN G, LEE K H, et al. Simultaneous measurement of soil water content and salinity using a frequency-response method [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(5): 1515 - 1525.
- [13] 卢超. 分布式无线土壤电导率测量装置的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2011(8): 37 - 39, 47. LU Chao. Design of distributed wireless soil conductivity measurement device [J]. Instrument Technology and Sensor, 2011(8): 37 - 39, 47. (in Chinese)
- [14] 孙宇瑞, 汪懋华. 一种土壤电导率测量方法的数学建模与实验研究 [J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 20 - 23. SUN Yurui, WANG Maohua. A mathematical model and its experimental study for a kind of measurement method of soil electric conductivity [J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(2): 20 - 23. (in Chinese)
- [15] 李民赞, 王琦, 汪懋华. 一种土壤电导率实时分析仪的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 51 - 55. LI Minzan, WANG Qi, WANG Maohua. Experimental study on a real-time soil conductivity analyzer [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 51 - 55. (in Chinese)
- [16] 徐坤, 张西良, 李萍萍, 等. 便携式基质多参数无线检测仪设计 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 302 - 309. XU Kun, ZHANG Xiliang, LI Pingping, et al. Development of portable wireless detector for multi-parameter of soilless substrate [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 302 - 309. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150344&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.044. (in Chinese)
- [17] PEI X S, MENG C, LI M Z, et al. Measurement of soil electrical conductivity based on direct digital synthesizer (DDS) and digital oscilloscope [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(6): 162 - 168.
- [18] 周玉鸿. 数字示波表组成分析 [J]. 今日电子, 2005(1): 35 - 36.
- [19] 姚远, 丁建丽, 张芳, 等. 基于高光谱指数和电磁感应技术的区域土壤盐渍化监测模型 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1658 - 1664.
- [20] YAO Yuan, DING Jianli, ZHANG Fang, et al. Regional soil salinization monitoring model based on hyperspectral index and electromagnetic induction technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1658 - 1664. (in Chinese)
- [21] 黄强, 殷志刚, 田长彦, 等. 施有机肥条件下的土壤溶液盐分变化动态 [J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 53 - 56. HUANG Qiang, YIN Zhigang, TIAN Changyan, et al. Dynamics of soil solution salinity change under organic fertilizer application [J]. Arid Zone Research, 2001, 18(1): 53 - 56. (in Chinese)
- [22] KITCHEN N R, SUDDUTH K A, DRUMMOND S T. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils [J]. Journal of Production Agriculture, 1999, 12(4): 607 - 617.
- [22] 张梦龙. 车载式土壤电导率测量系统开发 [C] // 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011.