

数字信号发生器参数对土壤电导率仪测量结果的影响

王 懂 杨 玮 孟 超 任新建 李民赞

(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: 针对基于电流-电压四端法的车载式土壤电导率测量系统激励源会随着土壤负载的变化而波动, 从而影响测量结果的问题, 采用波形标准、抗干扰能力强的可调频、调幅数字信号发生器代替普通激励源, 通过探究信号发生器不同频率、幅值对实验结果的影响, 进而找到最适合车载式测量系统的频率与幅值。为减少大田复杂环境对实验结果的影响, 实验分为实验室探究性实验和大田验证性实验。实验室探究性实验设置 5 个幅值和 20 个频率进行实验, 通过分析 60 组样本的 6 000 组实验室数据可知, 同频率下幅值越大实验效果越好, 最佳幅值为 10 V; 同幅值下随着频率的增加土壤电导率呈现先增加后减小的抛物线趋势, 幅值 10 V、频率 100 Hz 梯度下土壤电导率测量值和参考值决定系数 R^2 达到 0.950 5, 实验效果最佳。大田验证性实验最佳幅值仍为 10 V, 但由于土壤负载随着电极间距的变大而变大, 大田验证性实验最佳频率变为 1 kHz, 幅值 10 V、频率 1 kHz 梯度下电导率测量值和参考值 R^2 为 0.848 4, 为最佳实验效果。

关键词: 数字信号发生器; 频率; 幅值; 电流-电压四端法; 土壤电导率

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0336-08

Influence of Parameters of Digital Signal Generator on Measurement Results of Soil Conductivity Meter

WANG Dong YANG Wei MENG Chao REN Xinjian LI Minzan

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

Abstract: For the vehicle-mounted soil conductivity measurement system based on the current - voltage four-terminal method, the excitation source will fluctuate with the change of soil load, thereby affecting the measurement results. Using waveform standard and strong anti-interference ability adjustable frequency and amplitude modulation digital signal generator instead of ordinary excitation source, by exploring the influence of different frequencies and amplitudes of the signal generator on the experimental results, and then the most suitable frequency and amplitude were found for the vehicle-mounted measurement system value. In order to reduce the impact of complex environment of field on the experimental results, the experiment was divided into laboratory exploratory experiments and field confirmatory experiments. Laboratory exploratory experiments set five amplitudes and 20 frequencies for experiments. By analyzing 6 000 sets of laboratory data of 60 sets of samples, it can be known that the larger the amplitude at the same frequency was, the better the experimental effect was, and the best amplitude was 10 V. Under the same amplitude, with the increase of frequency, the soil conductivity showed a parabolic trend which was increased first and then decreased. The measured value of the soil conductivity and the reference value determination coefficient R^2 reached 0.950 5 at the amplitude of 10 V and frequency of 100 Hz, and the experimental effect was the best. The best amplitude of the field confirmatory experiment was still 10 V, but because the soil load was increased with the increase of the electrode spacing, the best frequency of the field confirmatory experiment became 1 kHz, with an amplitude of 10 V and a frequency of 1 kHz. The measured value of conductivity and the reference value R^2 were 0.848 4, which was the best experimental effect.

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

收稿日期: 2021-07-15 修回日期: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31801265)

作者简介: 王懂(1996—), 男, 硕士生, 主要从事土壤电导率技术研究, E-mail: dongwang@cau.edu.cn

通信作者: 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

0 引言

土壤作为农业生产的基础,发挥着极为重要的作用,为农作物生长提供各种营养成分^[1-2]。20 世纪以来,人口数量与粮食产量不能同比增长,粮食安全问题日益严重,为了提高粮食产量,人类在土壤中添加了大量的化肥、农药等,从而使得土壤严重污染^[3],在此背景下精细农业、智慧农业应运而生,通过检测土壤中的各种物质含量(如土壤含盐量、土壤含氮量、土壤有机质含量等)进而决定土壤的管理方式^[4-8],而土壤电导率包含丰富的土壤信息,能够在一定程度上反映土壤质地、土壤含盐量、土壤含水率、土壤孔隙度等参数信息^[9-11],因此准确获取土壤电导率至关重要。

目前很多商业化的土壤电导率测量设备价格昂贵,无法大范围普及应用。针对这一问题,国内外众多学者基于电流-电压四端法原理开发了价格低廉的手持式、车载式土壤电导率检测设备。CARTER 等^[12]开发了用于测量农作物种植前的土壤含盐量的车载式土壤电导率测量仪。MONTGOMERY 等^[13]建立的四电极有限差分模型,在一定程度上提升了仪器的精度。王琦等^[14-15]开发了便携式土壤电导率测量仪,操作简便、精度较高。ZHANG 等^[16]开发了一款小型土壤电导率设备,主要应用于测量土壤电导率和含水率。卢超^[17]开发了基于分布式无线土壤电导率测量仪,实现了无线测量。裴晓帅等^[18]开发了基于 Android 的车载式土壤电导率和光谱反射率检测系统,实现了光谱信息与电导率信息的融合,从而提升了测量精度。魏鸿怡等^[19]为改善恒流源不稳定的问题,在电流回路上添加精密电阻,实现了实时采集电流的目的。上述研究实现了土壤电导率的测量,但并没有很好地解决土壤电导率设备中激励源随着负载的增加而不稳定的问题。近几年为了解决激励源不稳定的问题,有学者研究用数字信号发生器代替恒流源^[20]的方法。

由于数字信号发生器具有可调幅和调频的功能,探究频率和幅值对实验精度的影响至关重要。在大田实验中,车载式电流-电压四端法设备的电极间距较大,当信号发生器的频率和幅值较小时,对实验结果有不同程度的影响,本文探究最适合基于数字信号发生器的电流-电压四端法设备的频率和幅值,为提高车载式土壤电导率测量系统精度提供参考。

1 实验方法与材料

1.1 实验设备

实验采用了 3 种土壤电导率测量设备,分别为:

①美国 Spectrum 公司生产的 TDR350 型便携式土壤水分电导率仪(基于 TDR 原理,测量范围 0 ~ 5.00 mS/cm),如图 1a 所示,用于测量实验室土槽的土壤电导率。②加拿大 Geonics 生产的 EM38 - MK2 型大地电导率仪(工作频率 14.6 kHz,测量范围 0 ~ 1 000 mS/cm,测量精度为全量程的 0.1%),如图 1b 所示,用于测量大田土壤电导率。③本实验室开发的基于信号发生器的电流-电压四端法车载式测量设备(测量范围 0 ~ 100 mS/cm,测量精度 0.001 mS/cm),如图 1c 所示。

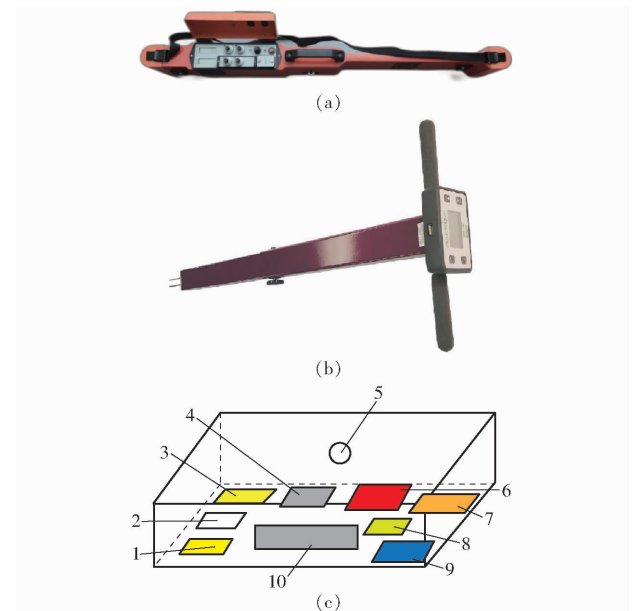


图 1 设备结构图

Fig. 1 Equipment structure diagrams

1. 数字信号发生器 2. 信号放大器 3. 电流检测卡 4. 电压检测模块 5. 运算中心 6. 数字示波器 7. GPS 模块 8. 滤波模块 9. 航空接头 10. 显示屏

自主开发的基于信号发生器的电流-电压四端法车载式测量设备原理如图 2 所示,数字信号发生器产生可调幅、调频的正弦波信号,通过电极 A 输入到土壤中,经过电极 B 输入到信号放大器中,放大后的电流信号经过数字电流检测卡后传入运算中心,得到电流 I 。两路电压反馈信号分别由 E、F 和 B、C 电压电极输入到电压检测模块,由滤波器滤波后,经过模数转换后传入运算中心(数字示波器的作用在于对比信号滤波前后的效果,若滤波效果不佳,便于及时调整滤波器的参数),得到电压 V_{out} 、 V_{in} 。土壤浅层、深层土壤电导率 EC_{in} 、 EC_{out} 计算式为

$$EC_{in} = \frac{\frac{1}{d_{AB}} - \frac{1}{d_{AC}} - \left(\frac{1}{d_{DB}} - \frac{1}{d_{DC}} \right)}{2\pi} \frac{I}{V_{in}} = K \frac{I}{V} \quad (1)$$

$$EC_{out} = \frac{\frac{1}{d_{EA}} - \frac{1}{d_{ED}} - \left(\frac{1}{d_{FA}} - \frac{1}{d_{FD}} \right)}{2\pi} \frac{I}{V_{out}} = K \frac{I}{V_{out}} \quad (2)$$

式中, d_{AB} 、 d_{AC} 、 d_{DB} 、 d_{DC} 、 d_{EA} 、 d_{ED} 、 d_{FA} 、 d_{FD} 为电极间的距离,m; K 为与电极分布有关的系数。

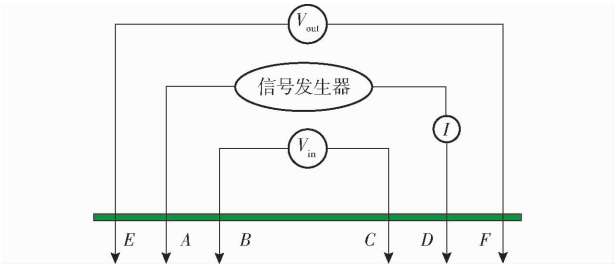


图2 电流-电压四端法原理图

Fig.2 Principle diagram of current – voltage four-terminal method

1.2 实验方法

由于大田环境比较复杂,环境噪声、温度、振动等因素对设备有不同程度的影响,此外大田电极间隔较大,很难使测定范围内的土壤含水率、粒度、电导率分布均衡。实验室条件下相对容易配置土壤含水率、粒度、电导率比较均衡的土壤样本,所以本文探究性实验在实验室完成。根据实验室实验结果进行大田验证性实验设计。

1.2.1 实验室探究性实验设计

从中国农业大学上庄实验站(位于北京市海淀区上庄镇辛力屯村,占地66.67 hm²)按图3所示的区域取60组土壤样本,每组样本包括10个随机采样点,每个采样点取土约2 kg。土壤样本经过如下预处理:①每组的10个采样点的样本放入土槽(长×宽×高为55 cm×10 cm×21 cm)中,用搅拌器充分搅拌均匀,静置24 h(为了使电导率分布均衡),随后放置于105℃恒温干燥箱中干燥24 h。②将每组干燥的样本用去离子水配置成质量含水率为10%的土壤样本(避免不同土壤含水率对实验结果造成影响),用搅拌器充分搅拌均匀后,加保鲜膜后静置24 h,使土壤水分分布平衡。③过直径0.9 mm筛,去除土壤杂质,使土壤粒度均匀。完成样本预处理后将土壤样本放置在土槽中,实验步骤为:①按Schlumberger组态制备探针电极,如图4所示,电极间隔10 cm,探针尺寸φ2×150 mm,材料为钨,电极间距与大田所用电极间距比例为1:4。②按表1设

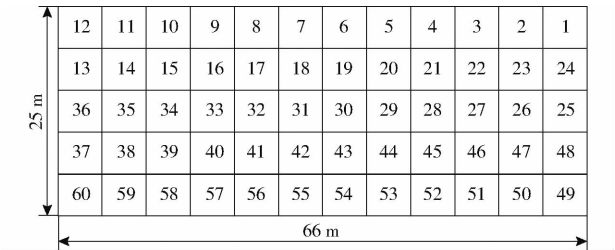


图3 实验室探究性实验样本采样点示意图

Fig.3 Sampling diagram of laboratory exploratory experiment samples

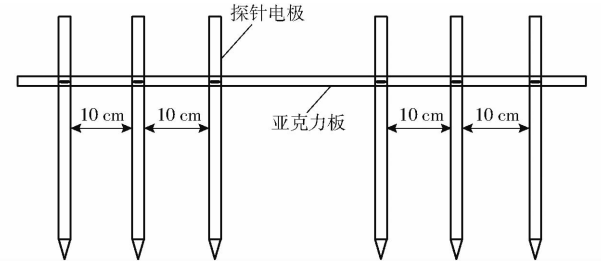


图4 自制探针电极

Fig.4 Homemade probe electrode

置信号发生器的20个频率和5个幅值。③用TDR350型电导率仪测出每组土槽中土壤的电导率,作为实验室探究性实验土壤电导率参考值。④按表1设置的频率和幅值,测量每个幅值下20个频率所对应的土壤电导率,每组样本共1 000个数据,分析60组样本的6 000个数据。

表1 实验室探究性实验信号发生器幅值和频率梯度设置

Tab.1 Laboratory exploratory experiment signal generator amplitude and frequency gradient settings	
幅值/V	频率/kHz
1	0.001、0.1、5、200
2	0.005、0.2、10、500
5	0.01、0.5、20、1 000
7	0.02、1、50、5 000
10	0.05、2、100、10 000

1.2.2 大田验证性实验设计

实验室探究性实验表明,在信号发生器的频率和幅值可调范围内,同频率下幅值越大,实验效果越好,本实验中幅值10 V下实验效果最佳;同幅值下随着频率的增加,实验效果呈现抛物线趋势,100 Hz时实验效果比较好,但频率超过50 kHz后,实验数据严重漂移,无法分析。虽然实验室探究性实验最佳频率是100 Hz,但大田所用电极的间距是其4倍,土壤负载会数倍增大,所以大田验证性实验频率有所调整。为避免拖拉机振动带来的影响,验证性实验为定点验证(每到一个测量区域拖拉机停车熄火),根据实验室探究性实验结果,设计大田验证实验:①将实验田按图5分成80组。②用EM38-MK2型电导率仪测出每组6个电极所在区域的土

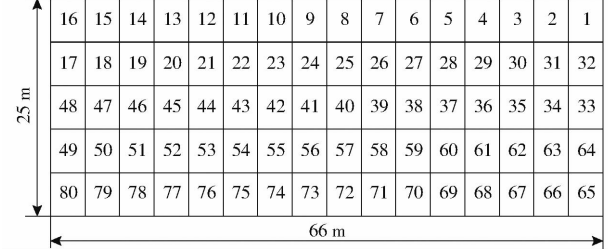


图5 大田验证性实验样本分组示意图

Fig.5 Group diagram of field confirmatory experiment samples

壤电导率,作为大田验证性实验土壤电导率参考值。
③设置信号发生器幅值 10 V 下的 10 个频率,测量幅值 10 V 下所有频率的土壤电导率,作为大田验证性实验的土壤电导率测量值,每组 10 个数据,共 800 个数据。
④分析数据。

2 结果分析与讨论

2.1 实验室探究性实验结果分析

实验室探究性实验中发现,频率超过 50 kHz 时,实验数据严重漂移,无法参与数据分析,20 个频率剩余 13 个(0.001、0.005、0.01、0.02、0.05、0.1、

0.2、0.5、1、2、5、10、20 kHz),分析剩余频率所对应的数据。图 6 为 60 组样本中随机选择的 4 组样本的 13 个频率和 5 个幅值数据分析结果。由图 6 可知,在信号发生器的可调范围内,同频率下幅值越大,土壤电导率测量值越大,同幅值下频率越大,测量值呈现由小变大再变小的抛物线(图 6 中曲线)趋势,并且从图 7 中可以看出幅值 10 V 所对应的频率 50、100、200 Hz 的测量值不同程度上接近土壤电导率参考值。

通过分析 60 组幅值 10 V 下的频率 50、100、200 Hz 数据,如图 7 所示。从图 7 可以看出,60 组样本中,

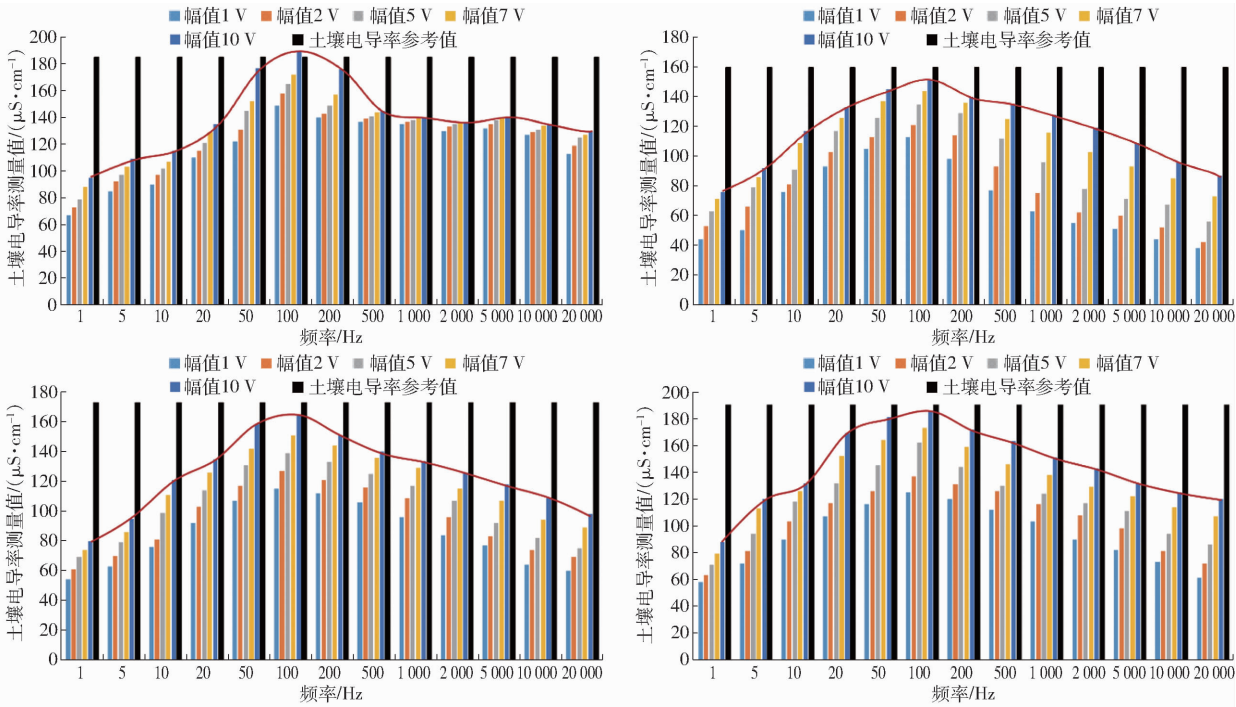


图 6 4 组随机样本在不同频率和幅值下的土壤电导率
Fig. 6 EC of 4 groups of random samples at different frequencies and amplitudes

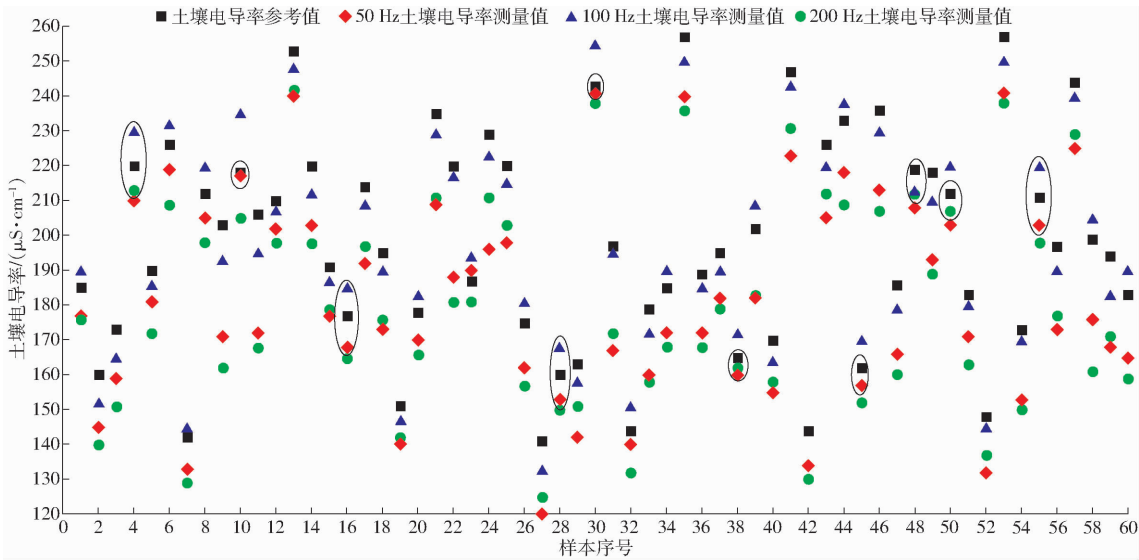


图 7 幅值 10 V 和频率 50、100、200 Hz 下 60 组样本的土壤电导率

Fig. 7 Soil conductivity of 60 groups of samples at amplitude of 10 V and frequency of 50 Hz, 100 Hz and 200 Hz

有 49 组样本在 100 Hz 下的测量值接近参考值(未用椭圆圈出的样本),有 11 组样本在 50 Hz 或 100 Hz 下的测量值不同程度上接近参考值(椭圆圈出的样本)。为了进一步区分幅值 10 V 下频率 50、100、200 Hz 的实验效果,分析 60 组样本幅值 10 V 下的上述 3 个频率下测量值和参考值的相关性,如图 8 所示。从图 8 可以看出,100 Hz 下测量值和参考值的 R^2 为 0.950 5、RMSE 为 $6.875\ \mu\text{S}/\text{cm}$;50 Hz 下测量值和参考值的 R^2 为 0.925 9、RMSE 为 $8.171\ \mu\text{S}/\text{cm}$;200 Hz 下测量值和参考值的 R^2 为 0.926 0、RMSE 为 $8.229\ \mu\text{S}/\text{cm}$;100 Hz 下测量值和参考值的 R^2 、RMSE 比 50 Hz 和 200 Hz 下测量值和参考值的 R^2 、RMSE 都好。

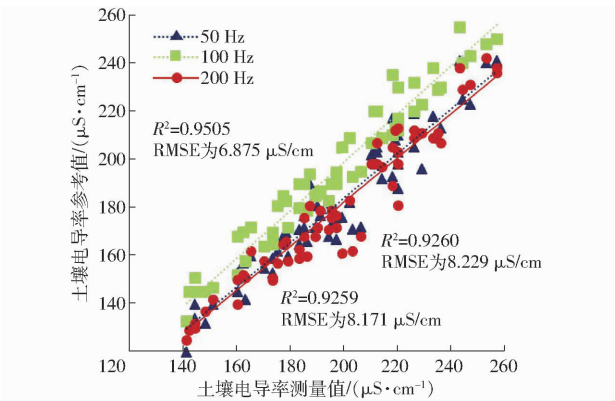


图 8 幅值 10 V 和频率 50、100、200 Hz 下 60 组样本土壤电导率测量值和参考值的相关性分析

Fig.8 Correlation analysis of 60 groups of sample soil conductivity measurement values and reference values at amplitude of 10 V and frequencies of 50 Hz, 100 Hz and 200 Hz

图 6 反映了同频率下幅值 10 V 效果更好,为进一步证实这一结论,分析频率 100 Hz 下随机样本的 5 个幅值数据。图 9 反映了 60 组样本中随机选取的 20 组的实验效果趋势。从图 9 可以看出,频率 100 Hz 下幅值越大实验效果越好,幅值 10 V 下的测

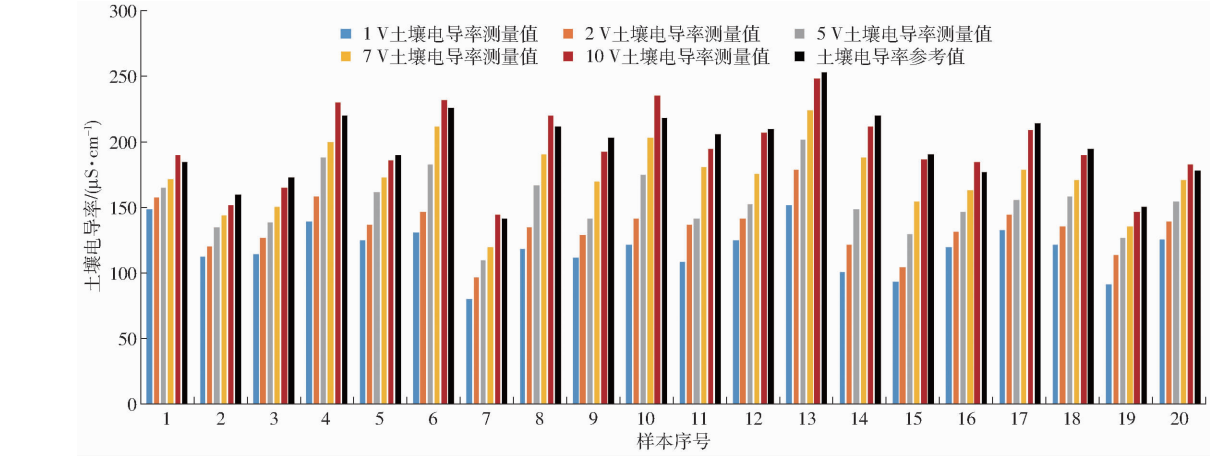


图 9 频率 100 Hz 下不同幅值的 20 组随机样本的土壤电导率

Fig.9 Soil conductivity of 20 groups of random samples with different amplitudes at frequency of 100 Hz

量值最接近参考值。

综上所述,实验室探究性实验表明,信号发生器幅值为 10 V、频率为 100 Hz,土壤电导率测量值与参考值相关性最高、均方根误差最小,实验效果最佳。

2.2 大田验证性实验结果分析

由图 9 可知,20 组随机样本实验数据表现趋势一致,说明幅值 10 V 下实验效果最好,所以大田验证实验只验证幅值 10 V 下不同频率梯度的实验效果。在大田验证性实验中发现,频率为 50 kHz 时,实验数据严重漂移,无法参与数据分析,10 个频率梯度剩余 9 个(0.05、0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20 kHz)。分析剩余 9 个频率对应的土壤电导率,如图 10 所示,从 80 组样本中随机选择的 25 组样本数据可以看出,幅值 10 V 下随着频率的增大,土壤电导率呈现先变大后变小的抛物线趋势(图中黑色虚线表示变化趋势),并且从图中可以看出 0.5、1、2 kHz 频率下的测量值在不同程度上接近参考值(椭圆圈出的样本是 0.5 Hz 或者 2 kHz 频率下测量值比较接近参考值)。

为更进一步明确幅值 10 V 下 0.5、1、2 kHz 频率下的实验效果,通过分析 80 组样本在上述 3 个频率下的土壤电导率,如图 11 所示。从图 10 可以看出,1 kHz 下的测量值有 65 组接近参考值(图中未用椭圆圈出的样本),剩余 15 组样本的参考值与 0.5 kHz 或者 2 kHz 下的测量值接近(椭圆圈出的样本)。从图 12 可以看出,1 kHz 下测量值与参考值的 R^2 、RMSE 比 0.5、2 kHz 下测量值与参考值的 R^2 、RMSE 都好。

综上所述,大田验证实验表明,信号发生器幅值为 10 V、频率为 1 kHz 时,土壤电导率测量值与参考值相关性最高,均方根误差最小,实验效果最佳。

2.3 讨论

实验室探究性实验和大田验证性实验中当数字

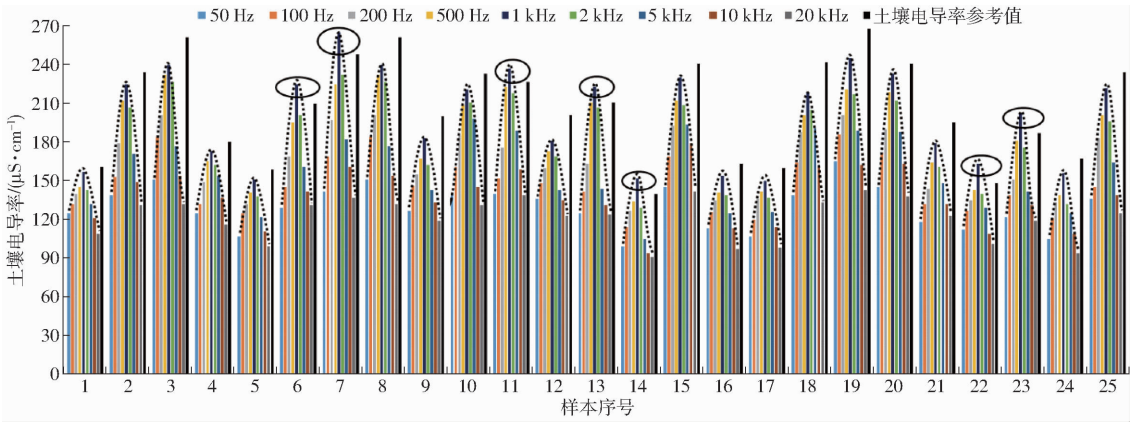


图 10 幅值 10 V 和频率 0.05、0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20 kHz 下 25 组随机样本的土壤电导率

Fig. 10 Soil conductivity of 25 groups of random samples at amplitude of 10 V and frequency of 0.05 kHz, 0.1 kHz, 0.2 kHz, 0.5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz and 20 kHz

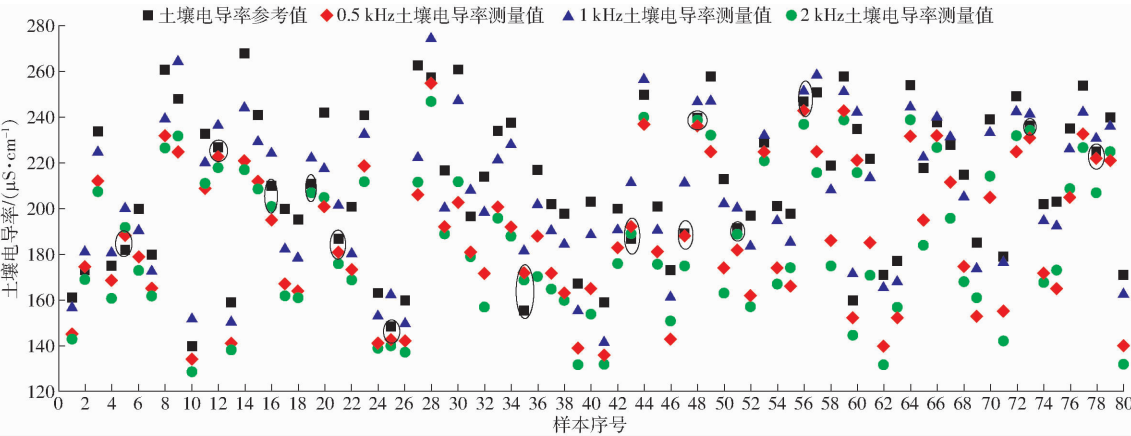


图 11 幅值 10 V 和频率 0.5、1、2 kHz 下 80 组样本的土壤电导率

Fig. 11 Soil conductivity of 80 groups of samples at amplitude of 10 V and frequency of 0.5 kHz, 1 kHz and 2 kHz

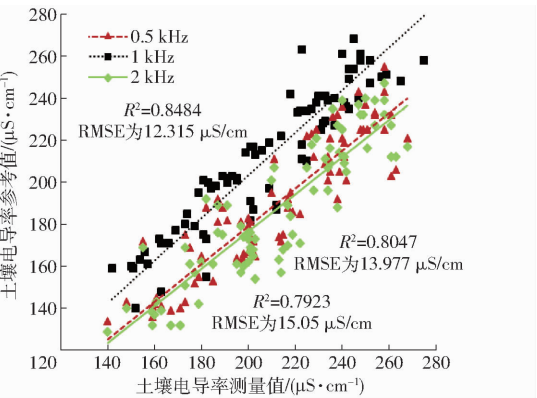


图 12 幅值 10 V 和频率 0.5、1、2 kHz 下 80 组样本土壤电导率测量值和参考值的相关性分析

Fig. 12 Correlation analysis between measured values of soil conductivity and reference values of 80 groups of samples at amplitude of 10 V and frequencies of 0.5 kHz, 1 kHz and 2 kHz

信号发生器频率大于等于 50 kHz 时,实验数据严重漂移无法分析,针对这一现象认真探索数据漂移原因。奈奎斯特采样定理表明:采样速率大于 2 倍的受测信号的最高频率才能保障信号不失真。本文设备所用的 A/D 转换器的采样速率为 1.5×10^5 次/s,

理论上 50 kHz 的信号不会失真,但本文所涉及的电流信号是毫安级的,比较微弱,在实际应用中,由于外界噪声、振动等因素的干扰可能导致采样出现偏差,进而使部分信号失真,最终导致数据漂移。大田实验表明,信号发生器在幅值 10 V,频率 1 kHz 梯度下时,实验效果最佳,A/D 转换器的采样速率是最佳频率的 150 倍,虽然采样频率越高,对信号还原越好,但这使得硬件需要处理的数据偏多,从而导致硬件功耗过高,发热严重,进而减少寿命。因此,根据实验结论,将设备的 A/D 转换器更换为采样速率为 1.5×10^4 次/s 左右,既可以降低设备成本,又能满足设备需求。

信号发生器的幅值与土壤中电流信号密切相关。土壤体负载一般偏大且比较复杂,若信号发生器的幅值较小,输入到土壤中的电流信号的有效值是毫安级的,甚至更小,针对微弱信号的放大比较困难,这就可能导致部分微弱电流信号无法被检测到,即电流检测卡检测到的电流信号小于正常值,由欧姆定律可知:电压 V 等于电流 I 与电阻 R 的乘积($V = IR$),当电流较小、负载较大时,得到的电压不是微

小值,即电压表可以检测到正常的电压信号,由土壤电导率计算公式

$$EC = K \frac{I}{V} \quad (3)$$

可知,当电流变小,电压正常时,土壤电导率测量值偏小。随着幅值的变大,输入到土壤的电流信号增大,电流检测卡检测到的电流信号逐渐恢复为正常信号,即土壤电导率测量值逐渐接近土壤电导率参考值。

关于实验结果随着频率增大,土壤电导率呈抛物线趋势这一现象的原因,由于涉及到磁场、电场以及土壤阻抗的变化,情况比较复杂,本文仅从土壤阻抗的角度作简单的讨论。土壤是比较复杂的固体,可以把土壤负载看作是阻抗 $Z(Z = R + jX, R$ 为电阻, X 为电抗, $X = 2\pi\omega, \omega$ 为频率)。当电流信号频率不高时,电抗 X 远小于 R ,因此电抗可以忽略不计,土壤阻抗 Z 可近似等于 R 。此时因为信号频率较低容易受外界干扰^[21],导致微弱的电流信号峰值增大,增大的微小电流与较大的土壤负载相乘,从而使电压电极检测到的电压值增大,由式(3)可知,当电流微弱增大,电压数倍增大时,土壤电导率测量值偏小。随着频率的增加,信号的抗干扰能力增强^[22-23],电压电极检测到正常的电压信号,由式(3)可知,当电压、电流信号都正常时,土壤电导率测量值也恢复正常,逐渐接近参考值。但当频率接着增大时,电抗 X 随着增大,此时电抗不可忽略,土壤负载不再是 R ,而是阻抗模 $|Z|(|Z|^2 = R^2 + X^2)$,电压电极检测到的电压是电流与阻抗模的乘积,即电压变大,由式(3)可知,当电流正常,电压变大时,土壤电导率测量值偏小。随着电抗 X 的逐渐变大,阻抗模也逐渐变大,即土壤电导率逐渐变小。

图8、12表明,实验室探究性实验在幅值10 V、频率100 Hz下(最佳频率和幅值)土壤电导率测量值与参考值的 R^2 为0.9505, RMSE 为6.875 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 大田验证性实验在幅值10 V、频率1 kHz下(最佳频率和幅值)测量值与参考值的 R^2 为0.8484, RMSE 为12.315 $\mu\text{S}/\text{cm}$,这表明设备在实验室条件下的测量精度明显高于大田条件下的测量精度。分析两者的实验条件可知,实验室探究性实验样本经过过筛和配置土壤含水率等预处理过程,而大田验证实验没有经过任何预处理,预处理消除了土壤粒度和土壤含水率分布不均衡对实验结果的影响,从实验测量值与参考值的相关性可以看出,土壤粒度和土壤含水率对实验结果有较大影响,所以消除这两个因素对实验结果的影响,是提高设备精度的关键点。

3 结论

(1)同频率下幅值越大,实验效果越好;同幅值下频率越大,土壤电导率呈抛物线趋势,即由小变大后,再由大变小。实验室探究性实验表明,幅值为10 V、频率为100 Hz,实验效果最佳;大田验证性实验表明,幅值为10 V、频率为1 kHz,实验效果最佳。

(2)由大田验证性实验证明大田环境下数字信号发生器最佳频率是实验室探究性实验最佳频率的10倍可知,随着土壤负载的变大,最佳频率会明显变大,即实验最佳频率与电极间距有关,电极间距越大,最佳频率随之变大。

(3)实验室探究性实验下的土壤电导率测量值与参考值的相关性比大田验证性实验下的相关性高,均方根误差比大田验证性实验下的均方根误差小,这表明设备在实验室条件下的测量精度高于大田条件下的测量精度。

参 考 文 献

- [1] ZAHRA A, ALIREZA M, JAFAR N, et al. Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 160(1-4): 83-89.
- [2] SMITH L E D, SICILIANO G. A comprehensive review of constraints to improved management of fertilizers in China and mitigation of diffuse water pollution from agriculture[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 209(SI): 15-25.
- [3] WANG Xiaobing, LIU Wuxing, LI Zhengao, et al. Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation[J]. Pedosphere, 2020, 30(4): 555-562.
- [4] BRANDOLI B, SPADON G, ESAU T, et al. A precision farming smartphone tool for real-time quantification of pesticide application coverage[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180: 105906.
- [5] JOSSE D E B. Precision agriculture technology and robotics for good agricultural practices[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(4): 1-4.
- [6] FAGNANO M, FIORENTINO N. Agronomic approaches for the remediation of contaminated soils[J]. Agronomy, 2020, 11(1): 20.
- [7] CORWIN D L, LESCH S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 46(1): 103-133.
- [8] BREVIK E C, FENTON T E, LAZARI A. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping[J]. Precision Agriculture, 2006, 7(6): 393-404.
- [9] CORWIN D L, LESCH S M, SEGAL E, et al. Comparison of sampling strategies for characterizing spatial variability with apparent soil electrical conductivity directed soil sampling[J]. Society of Exploration Geophysicists, 2010, 15(3): 147-162.
- [10] CORWIN D L, SCUDIERO E. Mapping soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity (ECa) directed soil

- sampling[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83(1): 3–4.
- [11] MOORE G E, BURDICK D M, PETER C R, et al. Mapping soil pore water salinity of tidal marsh habitats using electromagnetic induction in Great Bay Estuary, USA[J]. Wetlands, 2011, 31(2): 309–318.
- [12] CARTER L M, RHOADES J D, CHESSON J H. Mechanization of soil salinity assessment for mapping[J]. ASAE Paper, 1993: 931557.
- [13] MONTGOMERY N D, LANCASTER J L. Finite difference model of a four-electrode conductivity measurement system[J]. Journal of Electrical Bioimpedance, 2019, 7(1): 6–12.
- [14] 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, 19(4): 20–23.
WANG Qi, LI Minzan, WANG Maohua. Development of a portable detector for soil electrical conductivity[J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 19(4): 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实验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 51–55.
LI Minzan, WANG Qi, WANG Maohua. Testing and modeling of soil EC sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 51–55. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 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 measuring device[J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(8): 37–39, 47. (in Chinese)
- [18] 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 CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 112–117. (in Chinese)
- [19] 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): 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(Supp.): 237–242. (in Chinese)
- [20] 杨玮, 韩雨, 李民赞, 等. 基于数字示波器的车载式土壤电导率检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 395–401.
YANG Wei, HAN Yu, LI Minzan, et al. Vehicle mounted soil conductivity detection system based on digital oscilloscope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 395–401. (in Chinese)
- [21] 朱庆厚. 从信号特性来看干扰与抗干扰[J]. 航天电子对抗, 1995(3): 1–5.
ZHU Houzhao. From the signal characteristics of jamming and anti-jamming[J]. Aerospace Electronic Warfare, 1995(3): 1–5. (in Chinese)
- [22] 侯春光, 张润奇, 曹云东, 等. 开关柜局部放电信号抗干扰算法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(12): 22–27.
HOU Chunguang, ZHANG Runqi, CAO Yundong, et al. Research on anti-interference algorithm of partial discharge signal of switch cabinet[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(12): 22–27. (in Chinese)
- [23] 王彩雄, 唐志国, 常文治, 等. 局部放电超高频检测抗干扰与多源放电信号分离方法[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 46–50.
WANG Caixiong, TANG Zhiguo, CHANG Wenzhi, et al. A method for anti-interference and multi-source discharge signal separation in ultra high-frequency partial discharge detection[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 46–50. (in Chinese)

(上接第 236 页)

- [21] 林秉承, 秦建华. 微流控芯片实验室[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 4–5.
- [22] 毛罕平, 左志强, 施杰, 等. 基于纸质微流控芯片的农药检测系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 94–100.
MAO Hanping, ZUO Zhiqiang, SHI Jie, et al. Detection system for pesticides with paper-based microfluidic chip[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 94–100. (in Chinese)
- [23] WANG W, WANG Z J, LIN X L, et al. Simultaneous analysis of seven oligopeptides in microbial fuel cell by micro-fluidic chip with reflux injection mode[J]. Talanta, 2012, 100(15): 338–343.
- [24] XU Y, ZHANG J, ZHANG X F, et al. Separation of amino acids by in-situ polymerized anion exchange micro-monolithic column on micro-fluidic chip[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2006, 34(1): 43–46.
- [25] 皇甫咪咪. 海水氨氮现场检测方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
HUANGPU Mimi. Study on the method of field detection of ammonia nitrogen in seawater[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [26] 丁兰. 全固态氨氮传感器在环境监测中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
DING Lan. Application of solid-contact ammonia nitrogen sensor in environmental monitoring[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [27] 魏复盛, 洪水皆, 寇宏如, 等. 水和废水监测分析方法指南(上册)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 145–146.
- [28] 刘纯玮, 冯莉, 冯一纳. 无隔膜法电解制备次氯酸钠及其稳定性研究[J]. 化工学报, 2018, 69(12): 5246–5255.
LIU Chunwei, FENG Li, FENG Yi'na. Electrolytic preparation of sodium hypochlorite in undivided cell and its stability[J]. CIESC Journal, 2018, 69(12): 5246–5255. (in Chinese)