

# 基于交流“四端法”的土壤电导率在线实时检测系统\*

赵燕东 李 宁 皮婷婷

(北京林业大学城乡生态环境北京实验室, 北京 100083)

**摘要:** 设计了一种土壤电导率在线实时检测系统,给出了交流“四端法”测量土壤电导率的全套设计方案,完成了信号源、交流恒流源、探针结构、传感器信号调理电路以及采集系统的设计,与直流“四端法”土壤电导率传感器相比,交流“四端法”测量土壤电导率方法具有更佳检测性能。通过与国外同类产品对比研究,本测试系统性能达到了国外同类产品水平,具有更高的性价比。以北京地区土壤为测试样本,本系统检测量程:0~1 520  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,检测误差: -2.2%~2.4%,动态响应时间:544 ms,测量带宽:1 MHz,满足土壤电导率实时在线测量的要求。

**关键词:** 土壤电导率 实时监测 传感器 交流恒流源

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)08-0299-09

## Soil Electrical Conductivity Online Real-time Detection System Based on Four-electrode Method

Zhao Yandong Li Ning Pi Tingting

(Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A soil electrical conductivity online real-time detection system was proposed. A full set of design scheme of AC method to measure conductivity was introduced, which included the design of a signal source, a stable AC current power supply circuit, probe, sensor signal conditioning circuit and acquisition system. The AC four-electrode method has a better detection performance compared with DC four-electrode method. The test system performance reached the same level compared with products from abroad and it had a more cost efficiency compared with the similar foreign products. Compared with Hydra Probe II sensor, the absolute error was -22.62~29.41  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , relative error was -2.2%~2.4%, the maximum relative error was 2.4%, the accuracy was the same. Compared with mercury thermometer, the temperature sensor had the absolute error of -0.12~0.23 $^{\circ}\text{C}$ , maximum relative error of 2.3%, which can satisfy the accuracy of measurement. The soil in Beijing area was selected as test samples, the system's measuring range was 0~1 520  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , monitoring error was -2.2%~2.4%, the dynamic response time was 544 ms, the measurement bandwidth was 1 MHz, the performance can meet the measurement requirements, which can provide a high precision measuring tool for precise agroforestry.

**Key words:** Soil electrical conductivity Real-time monitoring Sensor Stable AC current power supply circuit

### 引言

土壤学的研究表明,土壤电导率(Electrical

conductivity, EC)包含了反映土壤质量和物理性质的丰富信息,并且影响作物的生长发育<sup>[1-2]</sup>。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。有效地获取土壤电导率,对于现代精细农业具有重要的意义<sup>[3-5]</sup>。

目前,土壤电导率的测量方法,国内外一般分为两种:接触式和非接触式测量<sup>[6-7]</sup>。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<sup>[8]</sup>。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<sup>[9-10]</sup>,另一类是基于“电流-电压四端法”来测量土壤电导率<sup>[11-13]</sup>,文献[14]阐述了基于“电流-电压四端法”的土壤电导率测试系统,但激励电流源采用了直流的激励方式,容易产生极化问题。此外,土壤的电导率是随温度变化的,基于“电流-电压四端法”来测量电导率的系统都没有把温度对电导率的干扰问题考虑在内。土壤的含水率、温度和电导率3个参数之间存在着很大的耦合作用,如在高盐分的土壤中利用传感器测量水分结果有很大的偏差<sup>[15-16]</sup>。本文研究一种土壤电导率在线实时检测系统,该系统可以实时检测、存储、显示土壤的电导率、温度,并根据土壤温度对土壤电导率的输出结果进行校正,以期能够提高土壤电导率的测量精度。

## 1 系统测量原理、组成及结构

### 1.1 测量原理

#### 1.1.1 电导率的测量原理

测量电路原理图如图1所示,系统主要由4部分(虚线框)组成:正弦信号源、交流恒流源<sup>[17]</sup>、传感器探针和信号放大以及有效值监测电路。

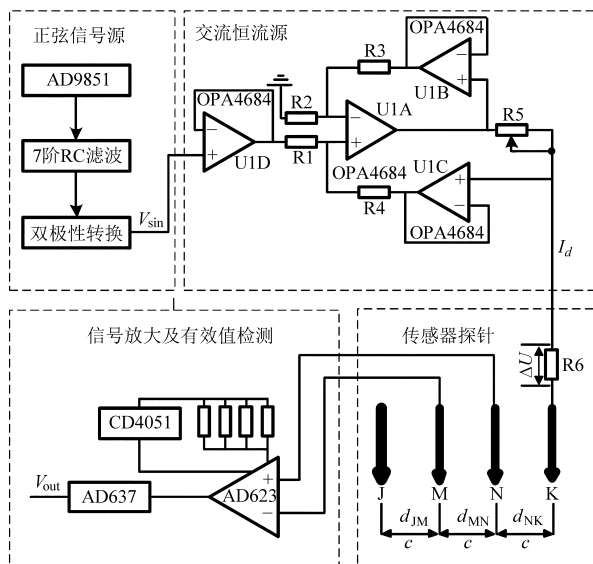


图1 电导率测量原理框图

Fig.1 Block diagram of soil electrical conductivity

传感器探针部分由4个探针组成,包括2个电

流激励端(探针J、K)以及2个电压测量端(探针M、N),交变恒定电流 $I_d$ 经过2个电流端J和K流入大地,通过检测2个电压端的交流信号的有效值,就可以换算出介电材料(土壤)的电导率,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

$$\sigma = \frac{\frac{1}{d_{JM}} - \frac{1}{d_{JK}} - \left( \frac{1}{d_{KM}} - \frac{1}{d_{KN}} \right)}{2\pi} \frac{\Delta U}{R_6 \Delta V_{MN}} \quad (1)$$

式中  $\sigma$ ——电导率

$d_{JM}$ 、 $d_{JK}$ 、 $d_{KM}$ 、 $d_{KN}$ ——探针间距

$\Delta U$ ——精密电阻 $R_6$ 两端电压

$\Delta V_{MN}$ ——M、N两电极间电压差

$R_6$ ——精密电阻的阻值,精度1%

当式(1)中 $d_{JM} = d_{MN} = d_{NK} = c$ 时,4个电极依次排布组成 Wenner<sup>[12]</sup>组态,该组态下式(1)简化为<sup>[18-19]</sup>

$$\sigma = \frac{1}{2\pi c} \frac{\Delta U}{R_6 \Delta V_{MN}} \quad (2)$$

式(2)中在已知电极间距 $c$ 和电阻阻值 $R_6$ 的前提下,通过测量M、N电极之间电压差 $\Delta V_{MN}$ 和精密电阻 $R_6$ 两端的电压 $\Delta U$ ,可测出土壤的电导率。此外,探针J内部含有PT1000铂电阻,还可以测量土壤的温度,详见文献[20]。

正弦信号源部分由DDS芯片AD9851<sup>[21]</sup>以及外围调理电路产生频率0~70 MHz、峰峰值为1V的正弦波,并且频率和幅值可调。

交流恒流源部分由一个四运放芯片OPA4684以及外围电阻组成,U1D构成电压跟随器,实现信号源和交流恒流源之间的隔离功能,根据运算放大器在环增益很大以及存在负反馈时产生“虚短”现象,同时运算放大器的输入阻抗很高,U1C输入电压约等于U1D的输出电压,U1B的输入电压约等于0,R5为100 k $\Omega$ 的数字电位器,可以根据实际情况调节阻值,所以输出电流为 $I_d = \frac{V_{sin}}{R_5}$ ,调节R5的阻值就可以调节输出电流,U1B和U1C构成电压跟随器,将基准、比较、输出3部分隔离,使得基准电压和输出电压更加稳定。

信号放大和有效值监测包括两部分,一部分是AD623和CD4051组成的交流程控放大器,将探针M和N上的交流信号进行放大;另一部分是AD637<sup>[22]</sup>以及外围电阻组成的真有效值检测<sup>[23]</sup>电路,用于检测传感器输出的交流电压有效值;此部分电路同样应用于传感器探针部分的精密电阻 $R_6$ (同样的也在 $R_6$ 的两端添加AD637芯片,用于测量交

流恒流源输出的电流)。

### 1.1.2 温度测量原理

测量土壤温度采用铂电阻 (PT1000), 本文设计原理参阅文献 [20]。

## 1.2 系统组成及结构

土壤电导率在线实时检测系统包括传感器和采集器 2 个部分, 其中传感器部分包括正弦信号源、交

流恒流源、传感器探针、信号调理电路, 传感器部分可以输出土壤电导率和土壤温度数据; 采集器部分包括 STM32 单片机模块、RX8025<sup>[24]</sup> 时钟模块、DF1008 - GPRS 模块、TF 卡模块、OLED 显示模块, 采集器部分可以采集传感器部分的电导率和温度数据, 如图 2 所示。

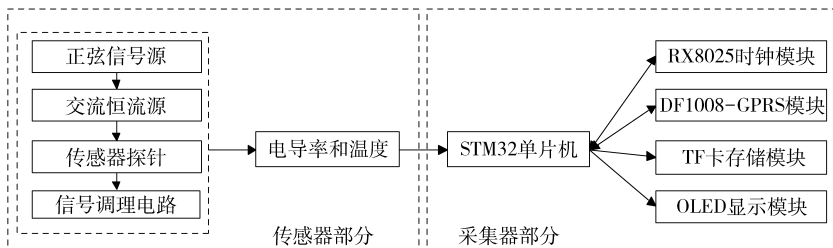


图 2 土壤电导率测试仪系统组成示意图

Fig. 2 Structure schematic of soil electrical conductivity instrument system

### 1.2.1 采集器组成

图 3 中主视图为电导率测试系统采集器部分, 微处理器采用的是 ST (意法半导体) 公司的 STM32F103RBT6 单片机, RX8025 时钟模块是高精度时钟, 为系统提供参考时间, 便于其他模块的调用; TF 卡存储模块, 移植了 ZNFAT<sup>[25]</sup> 文件系统, 可以将采集到的数据存储为 CSV 或 TXT 格式, 便于后期进行数据处理和分析; DF1008 - GPRS 模块, 可以将本地采集到的数据以及地理位置实时上传到远程的上位机、网站以及移动终端上, 同时远程可通过这个模块对下位机进行系统配置等; OLED 显示模块, 主要用于实时显示系统配置、传感器数据、以及各部分的工作状态等。

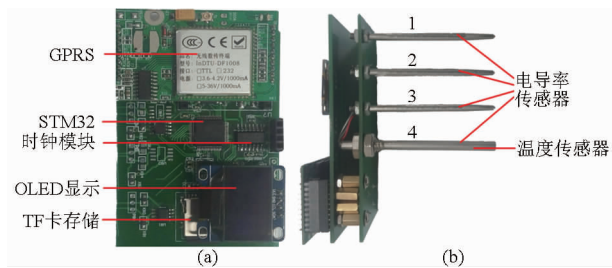


图 3 土壤电导率测试仪实物图

Fig. 3 Soil electrical conductivity instrument

(a) 主视图 (b) 侧视图

### 1.2.2 传感器组成及结构

图 3 中侧视图为电导率测试测试系统传感器部分, 传感器部分共有 4 根探针, 标号为 1、2、3、4, 其中探针 1、2、3 为不锈钢实心探针, 长度 60 mm, 直径 3 mm, 间距 15 mm; 探针 4 为长度 6 mm, 直径 4 mm 的不锈钢中空探针, 内部铠装德国贺利时公司 PT1000 高精度铂电阻, 精度为 0.1℃; 为了避免探针在土壤中被腐蚀, 探针的材质都为 316L 不锈钢。探

针 1、2、3、4 组合构成电导率传感器, 同时探针 4 内部封装有铂电阻作为温度传感器。探针 4 内部封装的铂电阻和外部不锈钢绝缘, 因此系统可以同时采集土壤电导率和土壤温度而相互不干扰, 满足兼容性要求。

选取北京林业大学八家试验基地 (116°21'14"E, 40°0'54"N) 土壤为测试样本, 土质为壤土, 放入干燥箱中 105℃ 干燥 24 h<sup>[26-27]</sup>, 过 40 目 (孔径 0.4 mm) 筛, 取出 5 份土, 每份 2 000 g, 取 5 份去离子水 (电导率 1.7 μS/cm), 每份 220 g, 向 8 份去离子水中依次加入 0、2、3、4、5 g 的 KCl, 搅拌至 KCl 溶解以后, 利用小型喷雾器将 KCl 溶液喷到土壤上, 均匀搅拌, 装到直径 150 mm, 高度 100 mm 圆柱形容器中, 制作成 5 个测试样本。之所以加入 220 g 水是因为配置出来的土样质量含水率在 10% 左右, 而当土壤质量含水率小于 15% 时, 土壤的含水率对电导率的影响并不显著<sup>[28]</sup>, 可以排除含水率对电导率的影响。

将 60 mm 探针长度等分为 12 份, 插入深度从 0 mm 间隔 5 mm 增进一次, 一直增加到 60 mm, 每次记录传感器的输出值, 依次测量传感器在 5 个土样中每一种插入深度下的输出值, 所记录数据如图 4

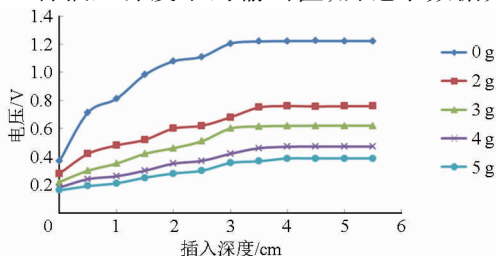


图 4 电导率测试仪插入深度分析

Fig. 4 Analysis of soil electrical conductivity instrument inserted depth

所示。

从图4可以看出,插入深度在0~35 mm范围内,传感器的输出值一直随着插入深度的增加而增大,当插入深度大于35 mm时,传感器的输出基本保持不变,所以传感器的探针长度要求大于35 mm,考虑到实际应用的需求,选择探针长度为60 mm可以避免由于探针长度带来的系统误差。

## 2 交流恒流源性能分析

### 2.1 交流恒流源电流稳定度

由于采用“电流电压-四端法”测量土壤的电导率,技术的难点在于交流恒流源的交变电流在不同电阻负载下能否保持恒定<sup>[29]</sup>。本文首先使用美国国家仪器有限公司的Multisim<sup>[30]</sup>软件对所述交流恒流源电路进行仿真,仿真结果显示当负载电阻小于100 k $\Omega$ 时可以实现恒流,这为本文进行硬件电路试验提供了可能性。在硬件电路上,通过调节R5阻值来改变恒流源输出的电流,其输出电流为9.50  $\mu$ A~2.35 mA。由于四端法测量土壤的大地电阻一般小于10 k $\Omega$ <sup>[31]</sup>,因此本文设置交流恒流源的电流为100  $\mu$ A。为了检验本文硬件电路设计的交流恒流源的稳定性,采用可以改变电阻的电位器来模拟土壤中变化的电阻。具体的测试方法是逐渐增加电阻电位器的阻值并测量传感器的输出,同时利用示波器观察交流恒流源输出的正弦波,直到恒流源输出的正弦波到达失真的临界点,记录的试验数据如表1所示。

表1 交流恒流源稳定度测试

Tab.1 AC constant current source stability test

电压/V	电阻/k $\Omega$	电流/ $\mu$ A	电压/V	电阻/k $\Omega$	电流/ $\mu$ A
0.12	1.20	100.33	2.11	21.20	99.54
0.32	3.22	99.28	2.30	22.92	100.36
0.49	4.88	100.46	2.49	24.75	100.59
0.71	7.06	100.56	2.70	26.61	101.46
0.90	8.87	101.48	2.91	28.84	100.92
1.11	11.08	100.15	3.10	31.06	99.80
1.30	12.78	101.69	3.50	34.94	100.17
1.51	15.02	100.55	3.71	37.30	99.47
1.70	16.92	100.49	3.90	38.93	100.17
1.89	18.81	100.47	4.11	40.79	100.75

从表1可以看出电流变化的最大相对误差为1.7%,具有较好的稳定性。另外经过测试,交流恒流源的所带负载临界阻值为42.5 k $\Omega$ ,由此可见,Multisim软件电路仿真结果和真实硬件电路测试结果存在一定的差距,但本硬件系统满足四端法测量土壤的大地电阻的要求。

### 2.2 交流恒流源频率稳定度

为了分析土壤电导率与交流恒流源激励频率之间的关系,找到测量土壤电导率的最佳频率,首先要保证交流恒流源系统在负载相同频率不同情况下输出值保持不变。为了找到系统所能输出的最大频率,首先设输出电流为100  $\mu$ A,负载电阻R为10 k $\Omega$ ,采用STM32单片机控制DDS芯片AD9851使系统的频率从1 Hz逐渐增大,同时测量系统传感器的输出值,直到传感器输出电压开始变化,所得数据如图5所示。

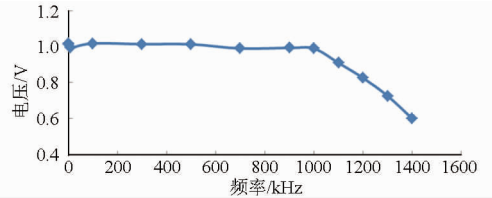


图5 频率稳定度测试

Fig.5 Frequency stability test

从图5可以看出,在频率0~1000 kHz范围内,传感器输出的电压保持不变,当频率大于1000 kHz时输出值逐渐减小,说明已经达到系统硬件的带宽,如要提高带宽频率还需要进一步进行阻抗匹配调试。所以,系统频率在1000 kHz以内可以保证负载电阻阻值不变的情况下输出值保持不变。

## 3 系统性能测试与结果分析

### 3.1 电导率传感器频率响应分析

采用Lovibond罗威邦EC110<sup>[32]</sup>(测量范围1~19999  $\mu$ S/cm,精度1  $\mu$ S/cm)电导率测试仪测量1.2.2节中5个土样电导率,依次为245、642、825、1000、1250  $\mu$ S/cm。将传感器整个探针全部插入到土样中,将交流恒流源激励频率从1 Hz逐渐增大到1000 kHz,测量传感器的输出值,每一种浓度KCl的土样对应一条曲线,结果如图6所示。

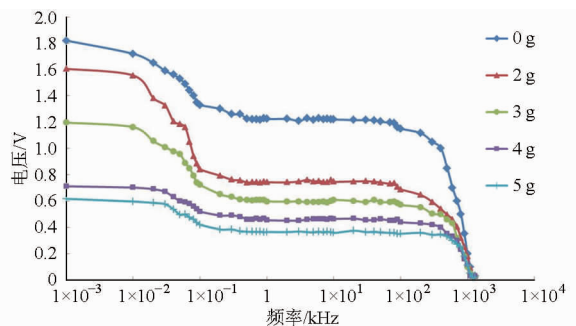


图6 电导率测试仪频率响应

Fig.6 Soil electrical conductivity instrument frequency response

从图6中可以看出,当交流恒流源激励频率小于0.7 kHz时,随着频率的增大传感器的输出值逐

渐减小;当激励频率处于 0.7 ~ 80 kHz 时传感器输出值不随频率的变化而发生改变;当激励频率处于 80 ~ 1 000 kHz 时,随着激励频率的增大,传感器的输出值逐渐减小。使用最小二乘法将传感器的输出电压和 EC110 所测得的电导率进行拟合,得出当激励处于 0.7 ~ 80 kHz 时,拟合决定系数  $R^2$  较大,当激励频率为 1 kHz 时,  $R^2$  为 0.988 4,对应曲线如图 7 所示,所以本文最终选择 1 kHz 为传感器的激励频率。

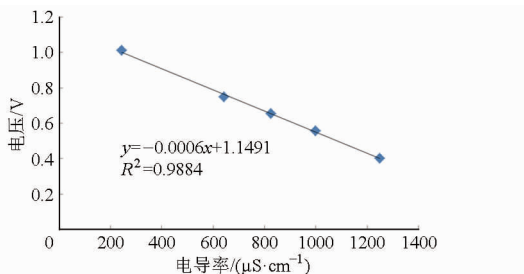


图 7 土壤电导率与传感器输出值拟合

Fig. 7 Fit of soil electrical conductivity with sensor output

### 3.2 传感器标定和对比

#### 3.2.1 电导率传感器标定

按照 1.2.2 节中土样配置方法,配置含盐量分别为 0、0.1%、0.15%、0.2%、0.25% 的 5 个土壤样本,质量含水率均小于 15%。采用 EC110 电导率测试仪测量土样的电导率,得到电导率从小到大分别为 230、650、810、1 010、1 220  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,将电导率传感器插入到土样中,测量传感器输出值,使用最小二乘法将传感器的输出电压与所测得的电导率进行拟合,得到结果如图 8 所示。

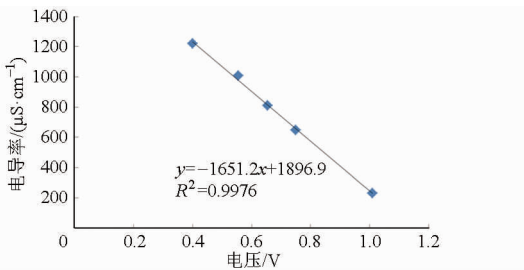


图 8 电导率传感器标定曲线

Fig. 8 Electrical conductivity sensor calibration curve

从图 8 可以看出,土壤电导率传感器在土样中输出的电压与土样的电导率具有显著的线性关系。

#### 3.2.2 温度传感器标定

为了后续试验分析温度对电导率测量的影响,首先要对温度传感器进行标定,标定实验在 SHP-450 型高低温试验箱中进行,在 0 ~ 40 $^{\circ}\text{C}$  范围内,将高低温试验箱的设定温度每次增高 2 $^{\circ}\text{C}$ ,测量温度传感器输出的温度。为了去除由于高低温试验箱温度传感器的误差对标定结果产生的影响,将量程 0 ~ 50 $^{\circ}\text{C}$ 、精度 0.1 $^{\circ}\text{C}$  的水银温度计和温度传感器探

头处于同一位置进行温度测量,同样使用最小二乘法将温度传感器的温度和水银温度计的温度进行拟合,得到结果如图 9 所示。

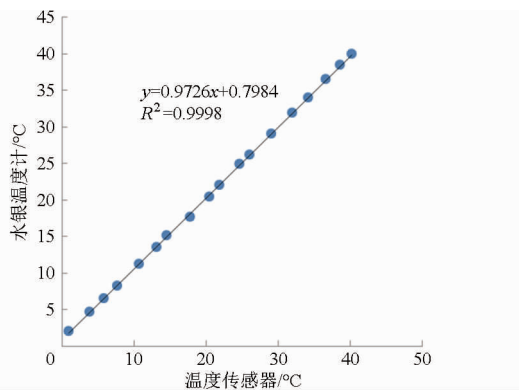


图 9 温度传感器标定曲线

Fig. 9 Temperature sensor calibration curve

从图 9 可以看出,温度传感器和水银温度计温度具有显著线性关系,二者之间绝对误差范围 -0.12 ~ 0.23 $^{\circ}\text{C}$ ,最大相对误差 2.3%,能够满足温度测量要求。

### 3.3 传感器动态响应性能试验

土壤电导率传感器的动态响应指的是,当电导率传感器从一种介质插入到另一种介质中时,传感器输出值发生改变直到输出值稳定所需要的时间。首先将传感器通电,待传感器输出的电压值达到稳定以后,将电导率传感器从空气中插入到质量含水率为 11% 的土样中,使用普源示波器 DS1072 测量传感器的上升时间,如图 10 所示。

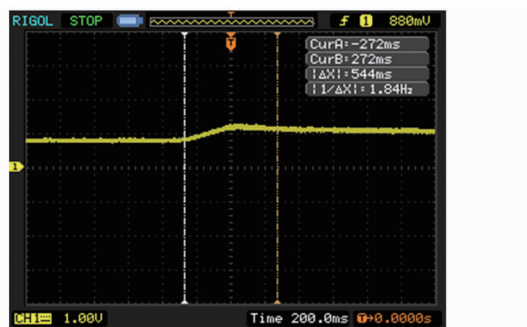


图 10 电导率传感器动态响应

Fig. 10 Dynamic response of electrical conductivity sensor

从图 10 可以看出, CurA 和 CurB 之间的时间为 544 ms,所以传感器上升时间为 544 ms,上升时间较快。同理温度传感器动态响应试验和上述步骤类似,最后得到的上升时间是 11 s,时间较长主要是由于铠装铂电阻封装以及工艺问题。

### 3.4 稳定性试验

交流恒流源四端法测量土壤电导率最重要的就是解决了直流恒流源所产生的极化问题<sup>[33]</sup>,但交流的方法本文也进行了稳定性测试试验,将土壤电导

率传感器插入到土壤中,同时将整个装置置于高低温试验箱中,试验箱的温度设置为 25℃,从 2015 年 1 月 15 日至 1 月 17 日,进行了 48 h 测试,每隔 1 h 采集一次数据并存储到 TF 卡模块中,所得数据如图 11 所示。

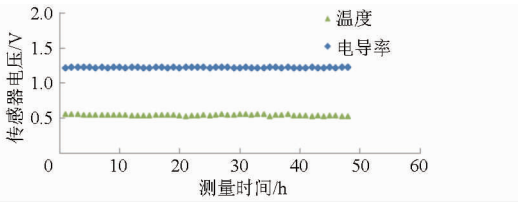


图 11 稳定性试验结果

Fig. 11 Result of stability test

对所得的数据进行组内标准差计算,电导率标准差为 0.010 9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,温度标准差为 0.010 4℃,组内数据标准差均很小,说明温度、电导率传感器的稳定性较好。

### 3.5 对比试验与结果分析

电导率传感器的对比试验采用北京林业大学实验苗圃的粘壤土,按照 1.2.2 节中的方式配置质量含水率小于 11%,含盐量分别为 0、0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30%、0.40%、0.42% 的 8 个土壤样本,采用标定好的传感器测量每一个土样的电导率,对比的传感器采用美国 Stevens 公司的 Hydra Probe II<sup>[34-35]</sup> 土壤电导率传感器(量程为 100 ~ 15 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,精度为  $\pm 2\%$ ),将所得到的数据整理后,如图 12 所示。

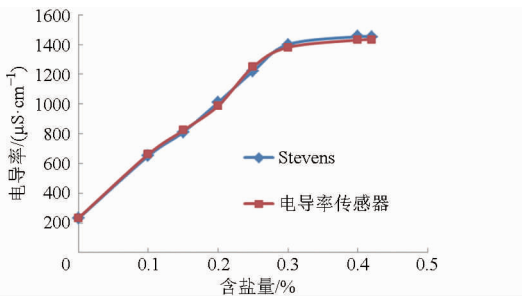
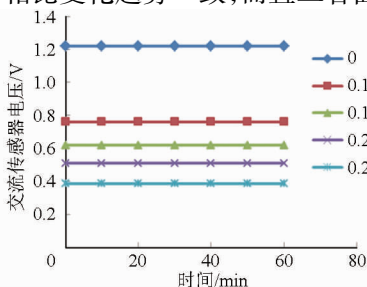


图 12 电导率传感器和 Hydra Probe II 对比

Fig. 12 Results of EC sensor and Hydra Probe II

从图 12 可看出,本文电导率传感器和 Hydra Probe II 型传感器相比变化趋势一致,而且二者曲线



几乎重合,计算得绝对误差 -22.62 ~ 29.41  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,相对误差 -2.2% ~ 2.4%,电导率传感器和 Hydra Probe II 型传感器精度相当。利用 SPSS 统计分析软件对所得数据进行单因素方差分析,结果如表 2 所示,表中可看出组间平方和 196.993,组内平方和 4.035  $\times 10^7$ ,显著性 0.973 大于 0.05,可以认为两组数据之间没有显著差异,进一步验证了精度相当。

表 2 电导率传感器和 Hydra Probe II 对比

Tab. 2 Results of electrical conductivity sensor and Hydra Probe II

	平方和	自由度	均方	F	显著性
组间(组合)	196.993	1	196.993	0.001	0.973
线性项对比	196.993	1	196.993	0.001	0.973
组内	4.035 $\times 10^7$	238	169 549.298		
总数	4.035 $\times 10^7$	239			

此外,当土壤中的盐分含量小于 0.30% 时,随着盐分含量的增加,土壤的电导率也逐渐增大,而且盐分和电导率二者之间线性相关性显著;当土壤盐分含量大于 0.30% 时,土壤电导率基本不变,所述土壤含盐量饱和,这与文献[33]现象相符合。

### 3.6 交流“四端法”与直流“四端法”对比研究

文献[29]中提到直流“四端法”测量土壤电导率存在着极化现象,本文分别采用了“直流四端法”和交流“四端法”进行土壤电导率测量进行对比试验。

利用 3.2.1 节中的土样,将 2 种方法的传感器放入到同一土样中固定,为了对比 2 种传感器在土样中输出电压的变化,调整两传感器的初始输出值一致,将 2 个传感器同时上电,每隔 2 min 采集一次数据,观测两者输出电压,随机抽取其中的 7 组数据如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,交流“四端法”电导率传感器输出值不随时间的变化发生改变,而直流“四端法”原理的电导率传感器输出值在不断减小,说明土壤中出现持续外电场以后,土壤中盐分的正负离子向相反方向移动,使平均偶极矩不再为零,介质呈现极化现象,这种现象导致土壤的电导率增大,最

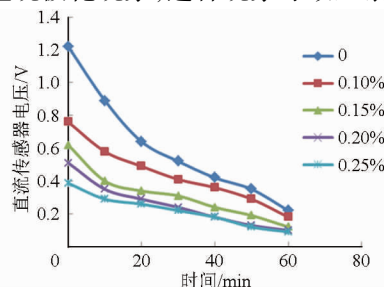


图 13 不同含盐量直流与交流“四端法”对比

Fig. 13 Results of DC and AC four-electrode methods with different salinity concentrations

终体现在传感器电压输出值减小,因此,基于直流“四端法”的土壤电导率测量仪器不满足实时在线定点检测的要求,而交流方法由于外加电场方向一直在改变而避免了这种极化现象,由此可知:基于交流“四端法”的土壤电导率检测方法可为精细农林业土壤电导率检测提供了一种有效手段。

#### 4 土壤温度对土壤电导率测量的影响

配置含水率为 16.9% 土样,含盐量为 0。将电导率传感器以及土样全部放入到高低温试验箱中,将试验箱温度设置为 30℃,测量传感器输出值,逐渐降温,每降温 1℃ 记录一次数据,直到土样温度接近 0℃ 为止,所得数据如图 14 所示。

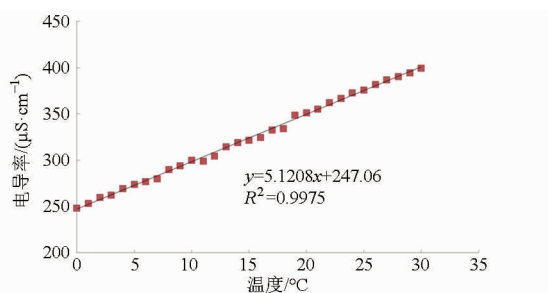


图 14 土壤温度对电导率的影响

Fig. 14 Influence of soil temperature on electrical conductivity

从图 14 中可以看出,随着温度的升高,土壤的电导率逐渐增大,并且土壤温度和电导率之间存在很好的线性关系,决定系数  $R^2$  大于 0.99;随着土壤含水率的增大,曲线上移,土壤电导率增大,这与 Rhoades<sup>[36]</sup> 和 Bohn<sup>[37]</sup> 等得出的结果一致。

#### 5 结论

(1) 在分析研究检测原理的基础上,首先设计了测量电导率所需要的交流恒流源,电流源输出电流范围 9.50  $\mu\text{A}$  ~ 2.35 mA,恒定电流稳定度最大误差 1.7%,100  $\mu\text{A}$  电流下可带负载电阻 42.5 k $\Omega$ ;交流恒流源激励频率在 1 000 kHz 以内可以保证负载电阻阻值不变的情况下输出值稳定,满足土壤电导率测量的要求。

(2) 通过试验确定了传感器的最佳结构及最佳测试频率。当传感器结构为:长 60 mm、间距 15 mm、探针直径 3 mm,在系统最佳测试频率 1 kHz 激励下,电导率传感器动态响应时间为 544 ms,传感器长时间测量所得数据组内标准差为 0.0109  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,说明组内数据之间差距较小,系统稳定性较好。以北京地区粘壤土为样本,得出测试系统的电导率传感器输出与土壤电导率的决定系数达 0.9976,温度传感器输出与土壤温度决定系数达 0.9998,系统性能满足土壤电导率及温度实时在线测量的需求。

(3) 研究表明:本电导率传感器与 Hydra Probe II 型传感器相比,绝对误差为 -22.62 ~ 29.41  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,相对误差为 -2.2% ~ 2.4%,二者测量精度相当,单因素方差分析同样验证了精度相当的结论。温度传感器与水银温度计间绝对误差范围为 -0.12 ~ 0.23℃,最大相对误差为 2.3%,能够满足测量精度。

(4) 通过与直流“四端法”电导率传感器对比,可知交流“四端法”更适合精准农林业土壤电导率的长期实时在线监测。

#### 参 考 文 献

- Rhoades J D, Shouse P J, Alves N A, et al. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(1): 46 - 54
- 曾庆猛, 马道坤, 林剑辉, 等. 面向车载式测量的土壤含水量与电导率复合传感器设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 163 - 167.  
Zeng Qingmeng, Ma Daokun, Lin Jianhui, et al. On-the-go measurement oriented combined sensor design for soil moisture content and electrical conductivity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 163 - 167. (in Chinese)
- 王凤花, 张淑娟. 精细农业田间信息采集关键技术的研究进展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 112 - 121.  
Wang Fenghua, Zhang Shujuan. Research progress of the farming information collections key technologies on precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 112 - 121. (in Chinese)
- Sudduth K A, Drummond S T, Kitchen N R. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31(3): 239 - 264.
- Minzan L, Sasao A, Shibusawa S, et al. Soil parameters estimation with NIR spectroscopy[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(3): 111 - 120.
- Kitchen N, Sudduth K, Drummond S. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils[J]. Journal of Production Agriculture, 1999, 12(4): 607 - 617.
- Sudduth K, Kitchen N, Bollero G, et al. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity [J]. Agronomy Journal, 2003, 95(3): 472 - 482.
- 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)
- 9 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.
- 10 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)
- 11 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)
- 12 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.
- 13 盛文溢, 曾庆猛, 林剑辉. 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. 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)
- 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, 8(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, 8(4): 20-23. (in Chinese)
- 15 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 39-41. Sun Yurui. Experimental survey for the effects of soil water content and soil salinity on soil electrical conductivity[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4): 39-41. (in Chinese)
- 16 胡克林, 陈德立. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克里格估值[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 460-466. Hu Kelin, Chen Deli. Spatial variability of soil water and salt in field and their estimations by the CoKriging[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(4): 460-466. (in Chinese)
- 17 黄怡然, 李娜. 基于 DDS 技术的交流恒流源设计[J]. 电源技术, 2011, 35(8): 974-975. Huang Yiran, Li Na. Design of AC constant current source based on DDS[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(8): 974-975. (in Chinese)
- 18 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. Testing and modeling of soil EC sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 51-55. (in Chinese)
- 19 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]. 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 substrates [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 302-309. (in Chinese)
- 20 赵燕东, 李宁, 皮婷婷. 土壤多参数复合测试系统研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 289-298. Zhao Yandong, Li Ning, Pi Tingting. Multi-parameter compounded testing system for soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 289-298. (in Chinese)
- 21 熊卫民, 吴运新, 沈华龙. 基于 AD9851 和 PC 机的正弦波信号源的实现[J]. 现代电子技术, 2008(1): 44-47. Xiong Weimin, Wu Yunxin, Shen Hualong. Realization of sine signal source based on AD9851 and PC[J]. Modern Electronics Technique, 2008(1): 44-47. (in Chinese)
- 22 乐珺, 姚恩涛, 张明伟, 等. 基于 AD637 的直流电源纹波真有效值测量电路设计[J]. 电源技术, 2014, 38(10): 1926-1929. Le Jun, Yao Entao, Zhang Mingwei, et al. Design of measurement circuit on true RMS for DC power ripple based on AD637[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(10): 1926-1929. (in Chinese)
- 23 张志刚, 段哲民, 强希文, 等. 基于真均方根转换器的温度脉动仪设计[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(9): 2577-2580. Zhang Zhigang, Duan Zhemin, Qiang Xiwen, et al. Design of the macro-thermal sensor based on true RMS convert[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(9): 2577-2580. (in Chinese)
- 24 田春雨, 张旭辉, 赵玉梅, 等. 实时时钟芯片 RX-8025 的原理及其应用[J]. 电测与仪表, 2003, 40(5): 48-51. Tian Chunyu, Zhang Xuhui, Zhao Yumei, et al. The principle and applications of real-time clock module RX-8025[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2003, 40(5): 48-51. (in Chinese)
- 25 王忠凯, 卢选民, 林茂宽, 等. 一种基于 RFID 的感应式智能语音讲解系统[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(6): 242-243. Wang Zhongkai, Lu Xuanmin, Lin Maokuan, et al. An intelligent inductive voice explanation system based on RFID[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(6): 242-243. (in Chinese)
- 26 赵燕东. 土壤水分快速测量方法及其应用技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002. Zhao Yandong. Study on fast-measurement of soil water content and application technology[D]. Beijing: China Agricultural University, 2002. (in Chinese)
- 27 赵燕东, 董晓晨, 李宁. 线区域尺度的土壤水分实时测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 168-174; Zhao Yandong, Dong Xiaochen, Li Ning. Research of real-time soil moisture measurement on line scale[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 168-174 (in Chinese)



- 28 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)
- 29 李民赞, 孔德秀, 张俊宁, 等. 基于蓝牙与 PDA 的便携式土壤电导率测试仪开发[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 93-96.  
Li Minzan, Kong Dexiu, Zhang Junning, et al. Development of portable soil EC meter with Bluetooth and PDA[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(2): 93-96. (in Chinese)
- 30 沈明霞, 丛静华, 张祥甫. 基于 ARM 和 DSP 的农田信息实时采集终端设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 147-152.  
Shen Mingxia, Cong Jinghua, Zhang Xiangpu. Design and implementation of terminal for agricultural data real-time acquisition based on ARM and DSP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 147-152. (in Chinese)
- 31 刘国海, 李康吉. 基于 PDA 的 GPS 定位精度提高方法[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26(5): 448-452.  
Liu Guohai, Li Kangji. Improving GPS positioning accuracy based on PDA[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2005, 26(5): 448-452. (in Chinese)
- 32 吴礼宁, 夏延秋, 冯欣. 离子液体润滑脂导电性研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(2): 198-202.  
Wu Lining, Xia Yanqiu, Feng Xin. Electrical conductivity of ionic liquids as lubricating grease[J]. Tribology Journal, 2014, 34(2): 198-202. (in Chinese)
- 33 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(7): 175-177.  
Chen Ling, Li Minzan, Zhao Yong. Improvement and experiment of portable soil detector[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(7): 175-177. (in Chinese)
- 34 Riquelme J A L, Soto F, Suardiaz J, et al. Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(1): 25-35.
- 35 Seyfried M S, Grant L E, Du E, et al. Dielectric loss and calibration of the Hydra Probe soil water sensor[J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4(4): 1070-1079.
- 36 Rhoades J D, Raats P A C, Prather R J. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5): 651-655.
- 37 Bohn H L, Ben-Asher J, Tabbara H S, et al. Theories and tests of electrical conductivity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(6): 1143-1146.

~~~~~

(上接第 263 页)

- 14 Papáček Š, Čelikovský S, Rehák B, et al. Experimental design for parameter estimation of two time-scale model of photosynthesis and photoinhibition in microalgae[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2010, 80(6): 1302-1309.
- 15 李萍萍, 李冬生, 王纪章, 等. 温室黄瓜叶片光合速率的类卡方模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 171-175.  
Li Pingping, Li Dongsheng, Wang Jizhang, et al. Quasi-ehi-square model for photosynthetic rate of cucumber leaf in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 171-175. (in Chinese)
- 16 史为民, 陈青云, 乔晓军. 日光温室黄瓜叶片光合速率模型及其参数确定的初步研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 113-118.  
Shi Weimin, Chen Qingyun, Qiao Xiaojun. Preliminary study on the model for the photosynthesis rate of cucumber leaves at different ages and determination of parameters in sunlight greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 113-118. (in Chinese)
- 17 Dai X, Shi H, Li Y, et al. Artificial neural network models for estimating regional reference evapotranspiration based on climate factors[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(3): 442-450.
- 18 Deswal S, Pal M. Artificial neural network based modeling of evaporation losses in reservoirs[J]. International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2008, 2(4): 177-181.
- 19 Gago J, Martínez-Núñez L, Landín M, et al. Artificial neural networks as an alternative to the traditional statistical methodology in plant research[J]. Journal of Plant Physiology, 2010, 167(1): 23-27.
- 20 Kmet T, Kmetova M. Adaptive critic design and Hopfield neural network based simulation of time delayed photosynthetic production and prey-predator model[J]. Information Sciences, 2015, 294(2): 586-599.
- 21 杨再强, 黄川容, 费玉娟, 等. 基于 BP 神经网络的温室番茄气孔导度的模拟研究[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(11): 70-76.  
Yang Zaiqiang, Huang Chuanrong, Fei Yujuan, et al. Modelling of stomatal conductance for greenhouse tomato using BP artificial neural net[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(11): 70-76. (in Chinese)
- 22 王伟珍, 张漫, 蒋毅琼, 等. 基于 WSN 的温室番茄光合速率预测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 192-197.  
Wang Weizhen, Zhang Man, Jiang Yiqiong, et al. Photosynthetic rate prediction of tomato plants based on wireless sensor network in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 192-197. (in Chinese)