doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.050

四端法土壤电导率传感器恒流源设计与试验

陶　毅　孟繁佳　盛文溢

（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：土壤信息对于指导农业生产有着极为重要的作用，土壤电导率反映了土壤含水量、盐分、粘粒含量和类型等土壤信息，准确获取土壤电导率对于实现农业精细化生产意义重大。在各种土壤电导率测量方法中，四端法因其成本低、精度高、测量快速和操作简便而大量应用于实际测量；恒流源是四端法测量仪器的重要组成部分，其性能直接决定着测量仪器的精度以及测量范围。本文对比了 3 种恒流源对测量仪器测量性能的影响，发现采用 Howland 恒流源的四端法测量仪器高电导率测量能力强而低电导率测量范围较小，测量精度最高；采用改进型 Howland 恒流源的四端法测量仪器低电导率测量范围有所扩大，测量精度良好；采用基于差动放大器的恒流源的电导率仪低电导率测量范围最大，高电导率测量范围较优，测量精度良好。

关键词：土壤电导率；恒流源；四端法；传感器

中图分类号：S151.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2020)S2-0415-06

Design and Experiment of Constant Current Source of Four-terminal Conductivity Sensor

TAO Yi　MENG Fanjia　SHENG Wenyi

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

Abstract: Soil information plays an important role in guiding agricultural production. Soil electrical conductivity reflects soil information such as soil moisture, salinity, clay content and type, it is significant to obtain soil electrical conductivity accurately for realizing agricultural fine production. Among all kinds of soil conductivity measurement methods, the four-terminal method is widely used in practical measurement because of its low cost, high precision, fast measurement speed and simple operation, its performance directly determines the accuracy and measuring range of the measuring instrument. The effect of three constant current sources on the measuring performance of the measuring instrument was compared. It was found that the four-terminal method using Howland constant current source had the best measuring accuracy and the high measuring ability, but the low measuring range was small. The measuring range of low conductivity by using improved Howland constant current source was enlarged and the measuring precision was good. The measuring range of low conductivity by using constant current source based on differential amplifier was the largest, the measuring range of high conductivity was better and the measuring accuracy was good.

Key words: soil electrical conductivity; constant current source; four-terminal method; sensor

0　引言

土壤电导率反映了土壤含水量、盐分、粘粒含量和类型等土壤信息[1-4]。因此，准确掌握土壤电导率信息在精细化农业生产中极为重要。目前，时域反射法[5-6]（Time domain reflectrometry，TDR）以及“电流-电压”四端法是测量土壤电导率的常用方法[7-8]。

其中，TDR 的原理是通过测定时域信号在波导上传输的时间及信号衰减幅度来推算介质的介电常

收稿日期：2020-08-07　修回日期：2020-09-19

基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFD010100202)和国家自然科学基金项目(31401294)

作者简介：陶毅(1995—)，男，硕士生，主要从事精细农业智能传感技术研究，E-mail：1944150831@qq.com

通信作者：孟繁佳(1983—)，男，高级工程师，博士，主要从事精细农业智能传感技术研究，E-mail：mengfanjia@126.com

数和电导率。基于 TDR 的商品化仪器有美国土壤水分设备公司生产的 TRASE Systems,英国的 Theta Probe,波兰 EASY TEST 公司生产的 FOM/mts,德国的 TRIME 和加拿大的 Moisture Point 等,TDR 在国内也受到越来越广泛地关注,并进行了研究和应用。杨卫中等[9]对 8 种不同盐分含量的砂壤土土样在 5 个含水率水平下进行实验,得到信号的反射系数随电导率增加单调减小。TDR 可以同时测量土壤电导率和土壤含水率,且具有快速、准确、可连续原位测定及无辐射等优点,但目前商品化 TDR 仪器价格非常昂贵,且售后得不到保障,不能满足国内大田中应用的需要。

而“电流-电压”四端法是通过交流恒流源向电流端施加恒定交流电流,通过检测两个电压端的电位差来计算土壤电导率的方法[10-11]。SERRANO 等[12]采用基于四端法的表观土壤电导率传感器 veris 2000xa 绘制浅层土壤电导率、水分特性图,并探讨了覆盖植被对传感器测量结果的影响。NAGY 等[13]利用 Veris3100 测量田间土壤含水率,结果表明所测得的电导率可用于表示所调查地区土壤的含水率,具有较高的使用价值。裴晓帅等[14]开发了基于 Android 的车载土壤电导率和光谱反射率检测系统,当车辆移动时,系统可以自动采集土壤电导率和光谱反射率,并通过 GPS 保存这些测量结果。相比 TDR,低功耗高便携性的商用化四端法电导率仪测量范围为 0.2 ~ 12 mS/cm,也能够满足大部分测量场景。此外,四端法电导率仪有手持与车载等多种形式,使用简便快捷。最重要的是四端法电导率仪的成本相较 TDR 大大降低,因此,目前基于四端法的电导率仪器广泛应用于大田。

在“电流-电压”四端法中,仪器是否有足够的测量范围以及测量精度,电流源起着决定性作用。对于采用四端法的电导率测量仪来说,电流源的电流与波形越稳定,越能够在低负载与高负载情况下保持输出波形不畸变,仪器精度越高。但电流源的种类很多,本文将 3 种电流源进行对比研究,分析其对电导率仪测量结果的影响。本研究设计基于“电流-电压”四端法原理、采用不同恒流源方案的土壤电导率仪,并以标准电导率仪测量结果为基准,对采用不同恒流源方案的四端法电导率仪的测量精度和测量范围进行对比,探讨不同恒流源的适用性范围,为“电流-电压”四端法电导率仪设计中恒流源方案的选择提供依据。

1 四端法测量原理

“电流-电压”四端法属于接触式土壤电导率的测量方法[15-17],如图 1 所示,包括两个电流端和两个电压端,其中两个外部电极作为电流或传输电极,两个内电极作为电位或接收电极,两个电流端提供所需的测量激励信号,两个电压端感应电位差,此电压差与介电材料的电导率具有相关性。如图 1 所示,其中 A、B 端为电流端,C、D 端为电压端,I 表示恒流电流,V 表示 C、D 端之间的电压降。

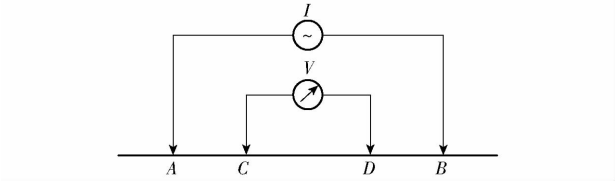

图 1 电流-电压四端法原理图

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

其电导率测量公式[18-19]为

$$\sigma=\frac{\left(\frac{1}{L_{AC}}-\frac{1}{L_{AD}}\right)-\left(\frac{1}{L_{BC}}-\frac{1}{L_{BD}}\right)}{2\pi}\frac{I}{V_{CD}}=K\frac{I}{V_{CD}} \tag{1}$$

式中 K——L_{AC}、L_{AD}、L_{BC}、L_{BD}的函数

L_{AC}——电极 A、C 之间的距离

L_{AD}——电极 A、D 之间的距离

L_{BC}——电极 B、C 之间的距离

L_{BD}——电极 B、D 之间的距离

σ——土壤电导率,S/m

I——恒流源提供的电流,A

V_{CD}——电极 C、D 之间的电压差

由式(1)可知,在交流恒流源输出电流一定的情况下,土壤电导率和电压端电压差成反比。

2 电流源与电导率测量装置设计

2.1 恒流源设计原理

2.1.1 Howland 恒流源电路设计原理

在图 2 所示电路中,同时存在正反馈与负反馈。在电路设计时,会进行外围电阻的匹配,使得正反馈系数小于负反馈系数,从而使电路呈现为负反馈效果[20-21]。

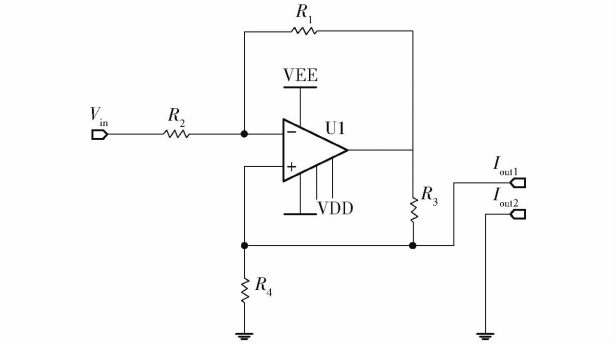

图 2 Howland 恒流源电路图

Fig. 2 Circuit diagram of Howland constant current source

假设 U1 为理想运放，根据集成运放虚短和虚断理论，若图 2 中$\frac{R_1}{R_2}=\frac{R_3}{R_4}$，则有

$$I_o=\frac{V_{\text{in}}}{R_4} \tag{2}$$

式中　V_{in}——输入电压

R_4——控流电阻

I_o——输出电流

2.1.2　改进型 Howland 恒流源电路设计原理

图 3 中，运算放大器 U1、U4 及外围电路构成电压补偿电路，运算放大器 U2、U3 及外围电路构成 U/I 转换电路[22-23]。

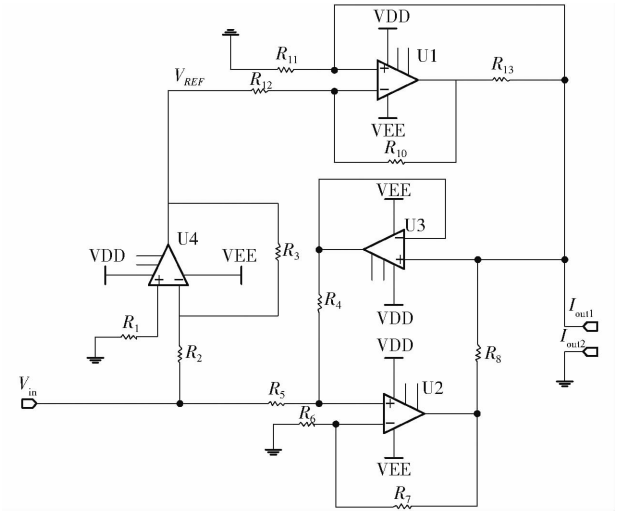

图 3　改进型 Howland 恒流源电路图

Fig. 3　Improved Howland constant current source circuit diagram

图 3 电路相对于 Howland 恒流源电路，其改进在于：在输入控制电压的同时通过反相比例运算电路对误差补偿电路基准电压 V_{REF} 进行控制，能够以单一量对输出电流进行精密控制。其输出电流理论值为

$$I_o=\frac{V_{\text{in}}}{R_8} \tag{3}$$

式中　R_8——控流电阻

2.1.3　基于差动放大器的恒流源电路设计原理

图 4 中，利用差动放大器内部匹配好的电阻，配合外围电路形成正负反馈，从而构成 U/I 转换电路[24]。

选择 AD8276 差动放大器，如图 4 所示，在此差动放大器内部集成了 4 个高精度等值电阻，阻值均为 R，根据虚短、虚断原理，可以得到

$$I_1=\frac{V_{\text{in}}-U_X-(0-U_X)\dfrac{R+R_1}{R}}{R_1} \tag{4}$$

$$I_2=\frac{V_{\text{in}}-U_X}{R} \tag{5}$$

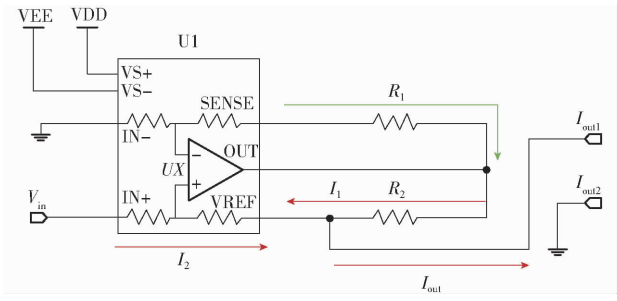

图 4　基于差动放大器 AD8276 的恒流源电路图

Fig. 4　Constant current source circuit diagram based on differential amplifier AD8276

$$I_{\text{out}}=I_1+I_2=\frac{V_{\text{in}}(R+R_1)}{RR_1} \tag{6}$$

式中　I_1——流过 R_2 的电流

I_2——流出差动放大器 VREF 端的电流

U_X——正、负反馈端电压

R_1——外围匹配电阻　　I_{out}——输出电流

R——差动放大器的内部集成电阻

2.2　电导率测量装置设计

如图 5 所示，在电导率测量装置设计中，振荡电路输出 150 Hz 交流电压信号到交流恒流源，恒流源将 150 Hz 交流电压信号转化成交流恒流输出到电流电极，则在两电流电极间就有了 150 Hz 的交流恒定电流。同时，两个输入电极间也有了电位差，此电位差通过输入电极进入信号处理电路，信号处理电路由差分放大电路、滤波与有效值电路、STM32F103 单片机 AD 采集电路构成，经过处理的信号由 WiFi 模块传输到 OneNet 物联网云平台，计算机登录云平台即可进行数据下载与处理。

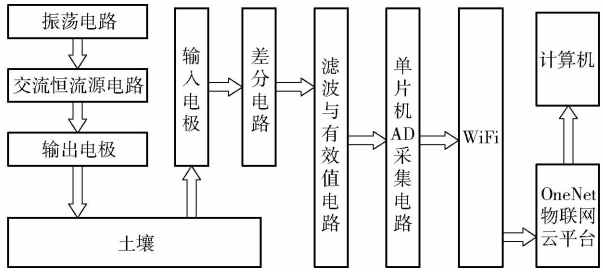

图 5　电导率测量装置整体设计图

Fig. 5　Overall design diagram of conductivity measuring device

3　试验与数据分析

3.1　恒流源仿真试验

在 Multisim13.0 环境中对图 2～4 中的 3 种恒流源进行仿真试验，设定恒流源输出交流电流为 1.9 mA，改变恒流源负载，分别为：120、240、360、480、600、720、840、960、1 080、1 200 Ω，观察负载交流电压的变化情况以及恒流源的输出电流稳定性。

表 1 为 3 种恒流源带载能力仿真结果。其中,R 为恒流源负载值,U_0、U_1、U_2 分别为 Howland 恒流源、改进型 Howland 恒流源、基于差动放大器的恒流源交流输出电压,I 为通过负载的交流电流。

表 1 3 种恒流源带载能力仿真数据

Tab. 1 Simulation data of load capacity of three kinds of constant current sources

参数	数值									
R_L/Ω	120	240	360	480	600	720	840	960	1 080	1 200
U_0/mV	229.09	458.20	687.29	916.37	1 145.00	1 375.00	1 604.00	1 833.00	2 062.00	2 291.00
U_1/mV	227.87	455.74	683.62	911.49	1 139.00	1 367.00	1 595.00	1 823.00	2 051.00	2 279.00
U_2/mV	229.10	458.20	687.28	916.37	1 145.00	1 375.00	1 604.00	1 833.00	2 062.00	2 291.00
I/mA	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90

由表 1 可知,3 种恒流源在带载不大于 1 200 Ω 时能够保持设定的恒流值稳定输出,可以看到,随着负载增大,输出电压也会相应增大以保持输出电流稳定。

3.2 电导率测量试验

试验于 2020 年 8 月在中国农业大学实验室进行。分别进行标定试验和验证试验,标定试验中配置浓度分别为 0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 mg/L 的 NaCl 溶液,对采用不同恒流源的电路分别进行标定,最终得到电导率测量值与标准值。性能验证试验中,随机配置不同含盐量的溶液,用采用 3 种不同恒流源的土壤电导率仪依次测量每个溶液的电导率,并与 DDS11A 型电导率仪测得值进行对比,验证其正确性。测量温度为 25℃左右,重复测量 8 次,求平均值。

3.3 电导率仪标定试验

配置不同浓度的 NaCl 溶液,对四端法电导率仪进行标定试验。具体操作如下:向去离子水中逐次加入 NaCl,从而得到浓度为 0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 mg/L 的 NaCl 溶液。然后用采用 3 种不同恒流源的电导率仪对样品电导率进行测量,参照 DDS11A 型电导率仪实际测量值进行标定。

3.3.1 Howland 恒流源电导率仪标定试验

如图 6 所示,Howland 恒流源电导率仪的拟合曲线 $y=0.2718x+0.1313$,决定系数 $R^2=0.9975$,其拟合程度非常好。但是在低电导率时,由于恒流源输出饱和导致输出波形畸变,此电流源设计不适用于低电导率的测量。在测量较高电导率时,此电流源输出稳定并且输出幅值较大,电导率拟合较好。因此,此电流源适用于测量高电导率。

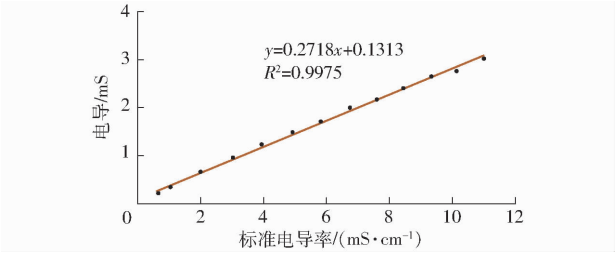

图 6 Howland 恒流源电导率仪标定曲线

Fig. 6 Calibration curve of Howland constant current source conductivity meter

3.3.2 改进型 Howland 恒流源电导率仪标定试验

如图 7 所示,改进型 Howland 恒流源电导率仪的拟合曲线为 $y=1.084x+0.6418$,决定系数 R^2 为 0.9919,其拟合程度良好。此改进型 Howland 恒流源降低了输出高幅值的特性,使得电导率仪对低电导率的测量范围有所增加,但无法测量小于等于 0.5 mS/cm 的电导率。

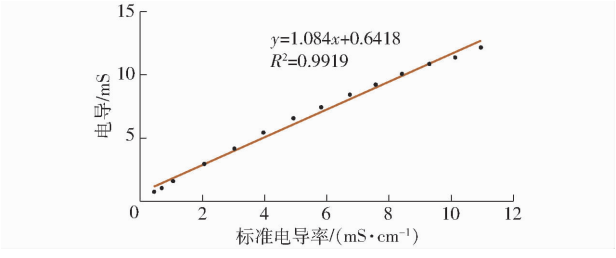

图 7 改进型 Howland 恒流源电导率仪标定曲线

Fig. 7 Calibration curve of improved Howland constant current source conductivity meter

3.3.3 基于差动放大器的恒流源电导率仪标定试验

如图 8 所示,基于差动放大器的交流恒流源电导率仪的拟合曲线为 $y=1.1491x+0.5062$,其决定系数 R^2 为 0.9929,拟合程度良好。基于差动放大器的恒流源电导率仪具有很好的低电导率测量能力,在电导率等于 0.2 mS/cm 时依旧能够输出稳定的波形,且高电导率测量能力接近于改进型

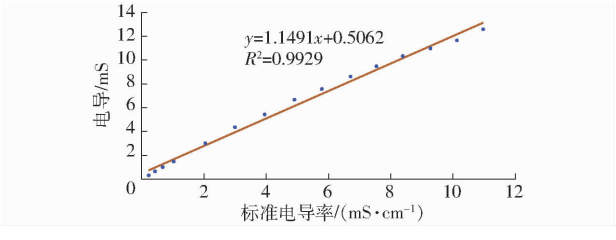

图 8 基于差动放大器的恒流源电导率仪标定曲线

Fig. 8 Calibration curve of constant current source conductivity meter based on differential amplifier

Howland 恒流源电导率仪，能够保证电导率至少为 12 mS/cm。

3.4　不同恒流源电导率仪性能验证试验

3 种恒流源四端法电导率仪与 DDS11A 电导率仪分别测量随机配置的盐溶液，将四端法电导率仪测得的数据同 DDS11A 电导率仪的测量数据进行对比，验证不同电流源四端法电导率仪的性能，测量温度为 25℃。其中，V_1 表示采用 Howland 恒流源时获取的电压差值，V_2 表示采用改进型 Howland 恒流源时获得电压差值，V_3 表示采用基于差动放大器的恒流源时获得电压差值，电导率实测值由 DDS11A 电导率仪读取。

结合表 2 和图 9 可以看到，基于差动放大器的恒流源电导率仪对电导率为 0.361 mS/cm 的样本进行了成功测量，在更大电导率样本测量中，Howland 恒流源电导率仪测量值最准确，与标准值偏差最小；而改进型 Howland 恒流源电导率仪和基于差动放大器恒流源电导率仪测量准确性十分接近。

表 2　验证试验测量结果

Tab. 2　Validation of test measurements

参数	数值							
V_1/V		5.90	3.06	1.83	1.45	1.19	0.86	0.72
V_2/V		1.43	0.72	0.42	0.33	0.28	0.21	0.17
V_3/V	3.24	1.45	0.72	0.43	0.33	0.28	0.20	0.17
电导率实测值/(mS·cm^{-1})	0.36	0.94	1.84	3.28	4.32	5.28	7.69	9.26

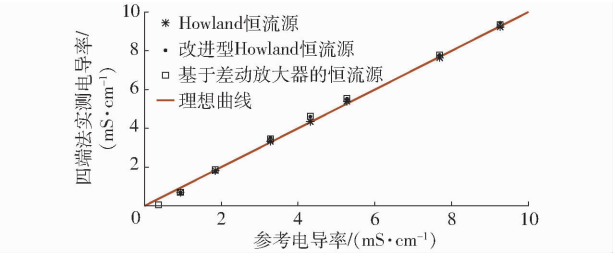

图 9　验证试验结果

Fig. 9　Verification test results

4　结论

(1)对不同恒流源电导率仪的测量性能进行对比分析，恒流源在低电导率时的波形抗畸变能力决定了其低电导率测量能力；恒流源在高电导率测量时的高幅值特性决定了其高电导率测量能力。

(2)Howland 恒流源电导率仪对低电导率的测量能力较差，较适合于高电导率测量，与基准电导率具有最高的拟合度。改进型 Howland 恒流源电导率仪性能一般，它降低了高电导率测量能力但依然不具备对 0.5 mS/cm 及以下电导率的测量能力。

(3)基于差动放大器的恒流源电导率仪具有最好的低电导率测量能力，并且也有足够的高电导率测量能力，电导率测量范围在 0.2 ~ 12 mS/cm 之间，适用于大部分测量场景。

参　考　文　献

[1] CORWIN D, LESCH S. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1): 11 - 43.

[2] 王海宏，周卫红，李建龙，等. 我国智慧农业研究的现状·问题与发展趋势[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(17): 279 - 282.
WANG Haihong, ZHOU Weihong, LI Jianlong, et al. Current situation and development trend of intelligent agriculture research in China [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(17): 279 - 282. (in Chinese)

[3] 罗锡文，张泰岭，洪添胜. “精细农业”技术体系及其应用[J]. 农业机械学报, 2001, 32(2): 103 - 106.
LUO Xiwen, ZHANG Tailing, HONG Tiansheng. Technical system and application of precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(2): 103 - 106. (in Chinese)

[4] VALENTE D, QUEIROZ D, PINTO F, et al. The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties [J]. Revista Ciência Agronômica, 2012, 43(4): 683 - 690.

[5] TOPP G C, DAVIS J L, BAILEY W G, et al. The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1984, 64(3): 313 - 321.

[6] 姜明梁，方嫦青，马道坤. 基于 TDR 的土壤水分传感器设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 147 - 153.
JIANG Mingliang, FANG Changqing, MA Daokun. Design and experiment of soil moisture sensor based on TDR[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 147 - 153. (in Chinese)

[7] 孙宇瑞. 土壤含水率和直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. Effects of soil moisture content and directness on soil electrical conductivity [J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4): 39 - 41. (in Chinese)

[8] 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8):

299 – 307.
ZHAO Yandong, LI Ning, PI Tingting. On-line real-time detection system of soil conductivity based on AC four-terminal method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(8): 299 – 307. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150841&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.041. (in Chinese)

[9] 杨卫中,王一鸣,李保国,等.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, et al. Study on measurement of soil electrical conductivity with TDR based on phase detection principle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11): 183 – 187. (in Chinese)

[10] DALTON F, HERKELRATH W, RAWLINS D, et al. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe[J]. Science, 1984, 224: 989 – 990.

[11] ROBINSON D, JONES S, WRAITH J. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 4(2): 444 – 455.

[12] SERRANO J,SHAHIDIAN S,SILVA JOSé MARQUES D A. Spatial and temporal patterns of apparent electrical conductivity: DUALEM *vs* Veris sensors for monitoring soil properties[J]. Sensors (Basel, Switzerland),2014,14(6): 10024 – 10041.

[13] NAGY V, MILICS G, SMUK N, et al. Continuous field soil moisture content mapping by means of apparent electrical conductivity (ECa) measurement[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2013,61(4): 305 – 312.

[14] 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. On-board soil conductivity and spectral reflectance detection system based on Android[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(Supp.2): 112 – 117. (in Chinese)

[15] SKIERUCHA W, WILCZEK A, SZYPOWSKA 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] TADAOMI S, HARUYUKI F, MITSUHIRO I. Calibration and simultaneous monitoring of soil water content and salinity with capacitance and four-electrode probes[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2008, 4(6): 683 – 692.

[17] SHEA P, LUTHIN J. An investigation of the use of the four-electrode probe for measuring soil salinity in situ[J]. Soil Science, 2012, 92(5): 331 – 339.

[18] 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. Mathematical modeling and experimental study of a method for measuring soil electrical conductivity[J]. Transactions of the CSAE, 2001,17(2): 20 – 23. (in Chinese)

[19] NAGY V, MILICS G, SMUK N, et al. Continuous field soil moisture content mapping by means of apparent electrical conductivity (ECa) measurement[J]. Journal of Hydrology & Hydromechanics, 2013, 61(4): 305 – 312.

[20] 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. Design of soil moisture and conductivity composite sensor for vehicle-mounted measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9): 163 – 167. (in Chinese)

[21] 赵燕东,董晓晨,李宁. 线区域尺度土壤水分实时测量方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 168 – 174.
ZHAO Yandong, DONG Xiaochen, LI Ning. Study on real-time measurement of soil moisture at line scale [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6): 168 – 174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150624&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.024. (in Chinese)

[22] ZHANG N, FAN G, LEE K, 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.

[23] GHORBANI R,NAHVI M. Analysis of performance of howland AC current source for electrical impedance spectro-tomography [J]. Sensing and Imaging, 2019, 20(1):1 – 17.

[24] BRENT J, MAUND Y,AHMED S E, et al. Enhancing the improved Howland circuit[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications,2019,47(4): 532 – 541.