

文章编号: 1000-7598 (2011) 11-3269-07

# 土壤电阻率测量影响因素的试验研究

周 蜜<sup>1</sup>, 王建国<sup>1</sup>, 黄松波<sup>1,2</sup>, 豆 朋<sup>2</sup>, 张丽镭<sup>1</sup>, 姚 伟<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 电气工程学院, 武汉 430072; 2. 广东电网公司佛山供电局, 广东 佛山 528000)

**摘 要:** 实验室测量的土壤电阻率准确性受到电极布置以及测试信号类型等影响。选取 5 种不同质地土壤, 比较了四极法与二极法测量以及四极法测量中电压极探针渗入深度的影响, 分析了直流信号与交流信号的测试差别以及电流强度及交流频率的影响。结果表明, 二极法测量结果包含了土壤与电极的接触电阻, 且随土壤含水率降低接触电阻不断增大; 四极法可在电压极渗入深度较浅, 即土壤扰动较小的情况下测量; 土壤在直流电压下存在极化效应, 土壤电阻率测量宜采用交流; 土壤热容量有限, 对电阻率在  $200 \Omega \cdot \text{m}$  以内的土壤测量的电流密度不宜超过  $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ; 土壤电阻率随测量频率增加而逐渐下降。

**关 键 词:** 土壤电阻率; 二极法; 四极法; 接触电阻; 极化效应

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

## Experimental investigation on influencing factors in soil resistivity measurement

ZHOU Mi<sup>1</sup>, WANG Jian-guo<sup>1</sup>, HUANG Song-bo<sup>1,2</sup>, DOU Peng<sup>2</sup>, ZHANG Li-qiang<sup>1</sup>, YAO Wei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Foshan Electric Power Supply Bureau, Guangdong Electric Power Grid Co., Foshan, Guangdong 528000, China)

**Abstract:** Accuracy of soil resistivity measuring result in the laboratory will be influenced by electrodes arrangement, types of test signal, etc. Five types of soils with different textures are selected to investigate the influencing factors of soil resistivity measurement. A comparison of resistivity measuring results between four-electrode method and two-electrode method is made firstly; and the influence of potential electrode penetrations in four-electrode method is also studied. A comparison between the resistivity measuring results with DC and AC voltage test signal is made. Moreover, influence of the current density and AC signal frequency on soil resistivity measuring results has also been investigated here. The results have shown that, measuring results by two-electrode method contain the contact resistance between electrodes and the soil, which will increase rapidly when the water content of soils decreases. The soil resistivity test can be performed with little penetration, or little disturbance to the tested soils by the four-electrode method. Alternating current test signal should be used to prevent polarization effect of DC voltage. Due to the fact that thermal capacity of the test soil is limited, current densities should be kept less than  $1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  to test soils with electrical resistivity less than  $200 \Omega \cdot \text{m}$ . Soil resistivity has been found to be decreased as test signal frequency increases.

**Key words:** soil resistivity; two-electrode method; four-electrode method; contact resistance; polarization effect

## 1 引 言

表征土壤导电性能的土壤电阻率是研究土壤微观结构<sup>[1-2]</sup>及物理力学性质<sup>[3-8]</sup>、金属土壤腐蚀<sup>[9]</sup>、电力系统接地<sup>[10-12]</sup>等的重要参数, 在土体污染特征<sup>[13-15]</sup>、含水率预测<sup>[16-18]</sup>、农作物产量预测<sup>[19-20]</sup>等方面也具有重要的工程应用价值。

野外现场通常采用 Wenner 等距四极法或 Schlumberger-Palmer 不等间距四极法等方法测量视电阻率, 再经土壤反演得出土壤电阻率分层结构。

实验室往往将土壤样品置于土壤箱中使用直接法测量。目前不同文献对于土壤电阻率实验室测量方法并不统一。董晓强等<sup>[21]</sup>采用交流伏安法测量电路研究了 NaOH 污染下水泥土电阻率的变化; 曹晓斌等<sup>[22]</sup>采用直流伏安法电路分析了直流电流密度对土壤电阻率的影响; 刘松玉等<sup>[3,14-15]</sup>研制的低频交流电阻测试仪采用电桥法测量原理; Fukue 等<sup>[13]</sup>通过电阻率探头 (RCPT) 测量法研究砂土中掺入了重金属污染离子后电阻率随时间的变化趋势; Shinn 等<sup>[17]</sup>研制的电阻率探头能同时测量土壤含水率。土

收稿日期: 2010-09-29

第一作者简介: 周蜜, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事雷电防护与接地技术方面的研究工作。E-mail: zhoumi927@whu.edu.cn

通讯作者: 王建国, 1968 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事雷电防护与接地技术、高电压绝缘与测试技术教学和科研工作。E-mail: wjg@whu.edu.cn

壤箱测量电极数目一般采用四极法<sup>[8,18]</sup>,按施加信号类型可分为直流法<sup>[6,22]</sup>和交流法。许多研究人员因考虑四极法测试装置相对复杂,担心会对测试土样造成扰动而使用二极法<sup>[3-6,14-15,21-22]</sup>。对于交流信号,不同作者选取的频率不同。Abu-Hassanein等<sup>[23]</sup>选用 60 Hz(美国电网频率),并认为:频率为 60 Hz 可避免激化作用对土的电特性影响。Amlanandan<sup>[24]</sup>指出高频率下,土的介电常数仅为孔隙率、定向度和颗粒形状函数,因而采用高频(50 MHz)进行土壤电阻率与含水饱和土壤孔隙度分析。Fukue 等<sup>[1]</sup>则选用 1 000 Hz 频率测量黏土电阻率并研究其微观结构。我国大部分研究人员采用我国电网频率,即频率为 50 Hz<sup>[2-3,7,14-15,21]</sup>。不同方法的测量结果之间存在差别,对土壤电阻率测量准确性可能会造成较大影响。目前,有关土壤电阻率测量方法比较的文献相对很少,对土壤电阻率实验室测量方法的选择造成一些影响。

本文以各种实验室测量方法探讨土壤电阻率存在的问题,并以相关影响因素为背景,开展了土壤电阻率测量影响因素的试验。比较了二极法与四极法的电阻率测量结果,研究了四极法测量中电压探针渗入土壤深度对测量结果的影响,探讨了直流信号与交流信号测量土壤电阻率的差异,分析了电流强度及交流频率对电阻率测量结果的影响。

## 2 试样制备

### 2.1 土壤电阻率测试箱

本文使用的土壤电阻率测试箱如图 1 所示。整体框架采用有机玻璃绝缘,测试箱两端的电极 A、B 为电流极,电极 A、B 距离  $l_{AB}=22$  cm,由厚度为 1 mm 的不锈钢薄板制成,中间两电极 M、N 为电压极探针,距离  $l_{MN}=12$  cm,由可自由抽动的黄铜细棒制成。测试箱截面设计为矩形,其宽度  $w=4$  cm,高度  $h=3$  cm。

四极法测量时,土壤电阻值为处于 M、N 之间的柱状体的土壤电阻。在 A、B 之间引入电流  $I_{AB}$ ,测量 M、N 之间的电压  $U_{MN}$ ,以  $U_{MN}/I_{AB}$  作为电阻值,被测土壤样品的电阻率  $\rho_4$  为

$$\rho_4 = \frac{whU_{MN}}{l_{MN}I_{AB}} \quad (1)$$

二极法测量时,A、B 既作电流极也作电压极,在 A、B 之间引入电流  $I_{AB}$ ,测量两根细棒 A、B 之间的电压  $U_{AB}$ ,以  $U_{AB}/I_{AB}$  作为电阻值,为处于 A、B 之间的柱状体的土壤电阻,此时被测土壤样品的

电阻率  $\rho_2$  为

$$\rho_2 = \frac{whU_{AB}}{l_{MN}I_{AB}} \quad (2)$$

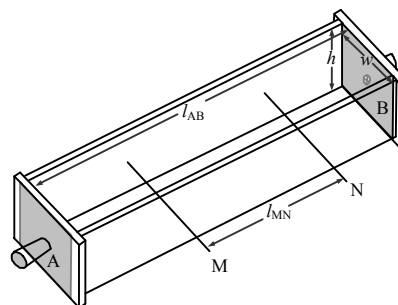


图 1 土壤电阻率测试箱示意图

Fig.1 Sketch of soil box for soil resistivity test

### 2.2 土样制备

电阻率试样为珠江三角洲地区变电站现场采集的土壤,取样深度为 60~80 cm,按质地分类<sup>[25]</sup>含砂土、砂粉土、粉土、粉壤土、黏壤土共 5 种土样。待测土壤自然状态下的物理性质指标见表 1。原状土壤在测试前经过风干、筛分、烘干、磨细等制备过程。每一试验条件下,按照自然状态下的干密度进行称量制备,采取分层夯实并配制相应含水率(质量比),将土样置于图 1 所示的测试箱。为尽量避免水分对测量结果的影响,试验中均使用电导率低于 3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  的去离子水。所有的数据观测时土样及环境温度保持在  $20\pm 1^\circ\text{C}$  的状态。土壤电阻率的测试均在数秒内完成,以免土壤长期通电升温影响测量结果<sup>[26]</sup>。

表 1 待测土样自然状态下的基本物理性质  
Table 1 Physical parameters of original soil samples

| 土样质地 | 含水率<br>/% | 密度<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 干密度<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 饱和度<br>/% | 孔隙率<br>/% |
|------|-----------|-----------------------------|------------------------------|-----------|-----------|
| 砂土   | 4.84      | 1.63                        | 1.55                         | 22.05     | 42.72     |
| 砂粉土  | 19.08     | 1.93                        | 1.62                         | 52.84     | 40.49     |
| 粉土   | 19.70     | 2.01                        | 1.68                         | 64.61     | 38.44     |
| 粉壤土  | 15.98     | 2.05                        | 1.77                         | 50.88     | 35.56     |
| 黏壤土  | 16.90     | 2.14                        | 1.83                         | 65.05     | 33.43     |

## 3 试验结果与分析

### 3.1 二极法和四极法的比较

为比较二极法与四极法的土壤电阻率测量结果,建立图 2 所示交流伏安法测试电路,其中  $T_1$  为调压器,输入交流 220 V,输出交流 0~250 V,  $T_2$  为 220 V/1 500 V 升压变压器。 $I_{AB}$ 、 $U_{MN}$  和  $U_{AB}$

由 Fluke 17B 数字表测量。土壤电阻率四极法与二极法测量结果分别由式 (1) 和式 (2) 计算。

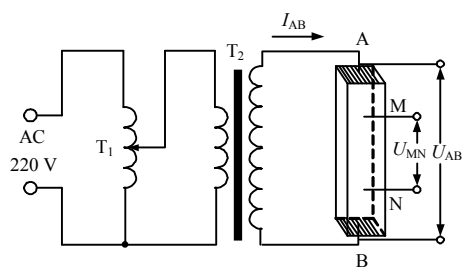


图 2 二极法与四极法的土壤电阻率交流测量电路

Fig.2 AC circuit for soil resistivity measuring by two-electrode method and four-electrode method

将表 1 中 5 种土样分别配制至 100 % 饱和, 然后通过挥发减少土壤水分, 观察土壤在不同含水饱和度和下四极法与二极法电阻率测试结果, 见图 3。其中  $\rho_2/\rho_4$  为二极法电阻率测试结果与四极法电阻率测试结果之比。当含水率过低时, 部分土样出现干裂、板结现象, 而且土样越黏, 这一现象越显著。本文没有采用土样发生干裂、板结时的数据, 因此最低饱和度只测到 20%~30% 的情况。

由  $\rho_2/\rho_4$  随土壤含水饱和度的变化规律可以发现, 在完全饱和或接近饱和的情况下, 5 种土样的二极法与四极法测量结果几乎一致, 但当砂土、砂粉土在饱和度小于 80%、粉土、粉壤土、黏壤土在饱和度小于 65% 的情况下, 二极法测量的土壤电阻率比四极法大, 并且随着土壤含水饱和度的降低, 两者差异逐渐增大。

出现上述现象的原因在于, 二极法的测量结果包含了电极 A、B 与土壤试样之间的接触电阻。在接近饱和或完全饱和的情形下, 土壤与电极 A、B 之间接触良好, 接触电阻可忽略不计。当土壤含水率较低时, 电极片与土样的接触电阻将显著增大, 且土壤电阻率越低, 二极法测量结果受接触电阻的影响越明显。如图 3 中含水饱和度为 30% 时, 砂土、粉土、黏壤土的二极法与四极法电阻率测量结果之比依次为 2.5、7.8、8.3。

因此, 土壤电阻率测量宜采用四极法以消除端面电极与土壤间的接触电阻。二极法虽然操作相对简便, 但其测量结果中包含了接触电阻的信息, 只有在含水饱和或接近饱和的土壤中可忽略接触电阻的影响, 能获得与四极法相近的测量结果。对于非饱和土壤, 若采用二极法测量, 则必须对电极与土壤之间的接触电阻进行修正<sup>[21]</sup>。从上述数据看, 这

种修正受到很多因素影响, 准确修正很困难。

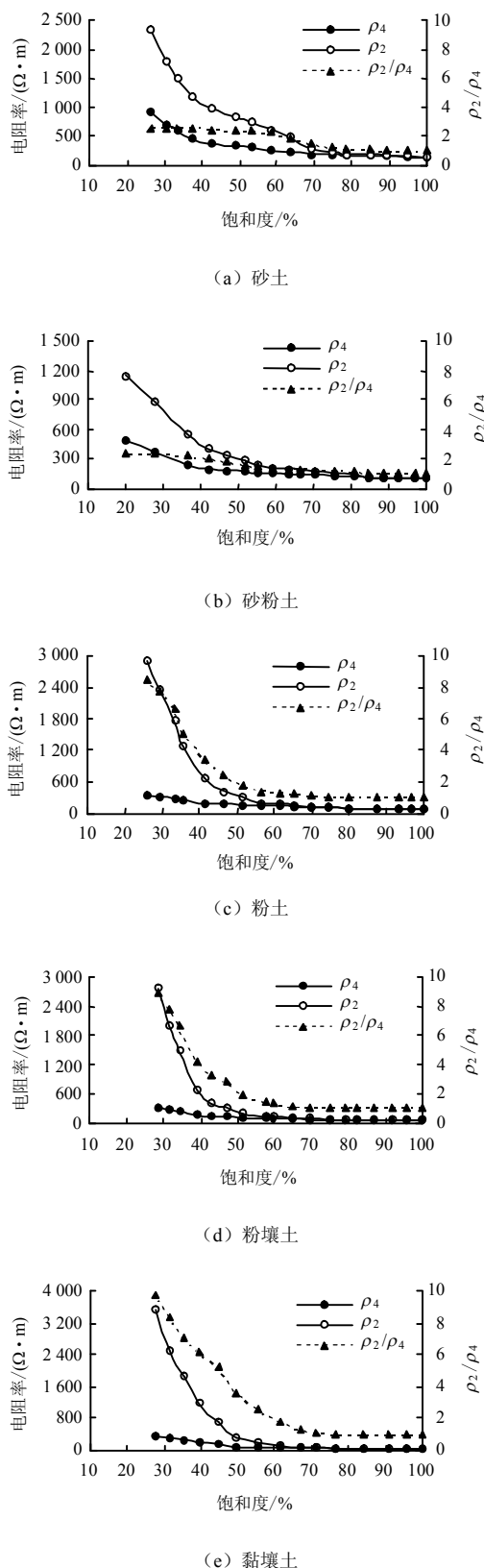


图 3 不同饱和度下土壤电阻率四极法与二极法测量结果  
Fig.3 Comparison of electrical resistivity test result of soil with different saturation degrees by four-electrode method and two-electrode method

### 3.2 电压极探针渗入深度的影响

为研究图 2 电路中四极法测量土壤电阻率时电压极探针渗入土壤深度对测量结果的影响, 对电压极探针设置不同的土壤渗入深度, 见图 4。分别测量砂土、砂粉土、粉土、粉壤土、黏壤土 5 种土样在含水率依次为 16.36%、21.13%、20.26%、22.32%、20.77%条件下的电阻率, 结果如图 5 所示。

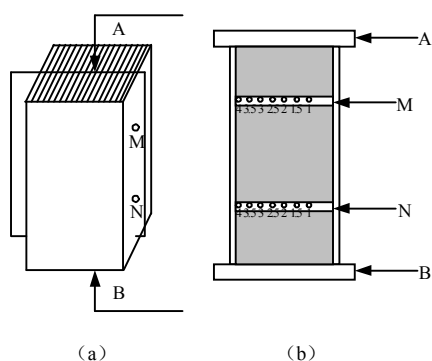


图 4 不同电压极探针渗入深度测量示意图  
Fig.4 Test setup with different potential electrode penetrations

由图 5 可见, 电压极探针渗入土壤深度不同, 但所测土壤电阻率结果相同, 即在用四极法测量土壤电阻率时, 电压极探针渗入土壤的深度对测量结果没有影响。四极法测量土壤电阻率时, 电压极探针可以插入较浅, 以满足某些需对土壤扰动较小的测试场合。

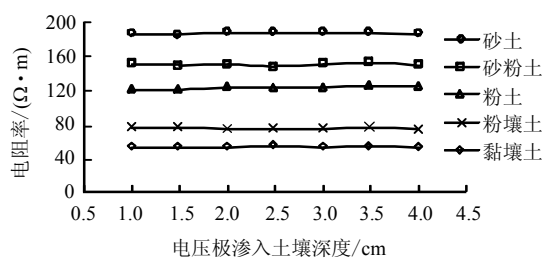


图 5 不同电压极探针渗入深度测量结果  
Fig.5 Test results with different potential electrode penetrations

### 3.3 直流测试法与交流测试法的比较

为避免电极的极化<sup>[27]</sup>, 目前大多数国内外文献采用交流信号测量土壤电阻率, 即使使用直流信号, 也是交变直流信号<sup>[28]</sup>。但本文发现, 土壤体系自身的极化和吸收现象也是非常明显的。在电极 A、B 之间对含水率为 15.05 % 的黏壤土样品施加直流 50 V 恒定电压后, 15 min 内流过回路的直流电流以

及采用四极法测量的土壤电阻率如图 6 所示。为对比直流信号与交流信号测量土壤电阻率的差异, 采用图 2 电路对同一土样施加 50 V 交流恒定电压, 测量流过回路的交流电流及相应土壤电阻率, 如图 7 所示。

对比图 6、图 7 可以发现, 与采用交流信号测试能得到稳定的回路电流及土壤电阻率结果相比, 采用直流恒压法测试时, 回路电流随时间增加而逐渐降低, 而测量的土壤电阻率数值逐渐增大。采用直流信号测量的土壤电阻率结果始终比采用交流信号测试的土壤电阻率大。类似图 6 与图 7 的现象在其他几种土壤样品中也能发现。土壤样品施加直流电压测量土壤电阻率时整个测量体系并不稳定, 存在直流电流过渡过程, 这与土壤体系在直流电压下的极化效应有关。

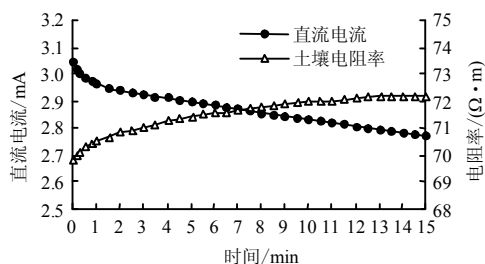


图 6 土壤样品施加直流电压后的回路电流变化及测量的土壤电阻率

Fig.6 Variations of the circuit current and measured soil resistivity after the DC voltage applied to the soil sample

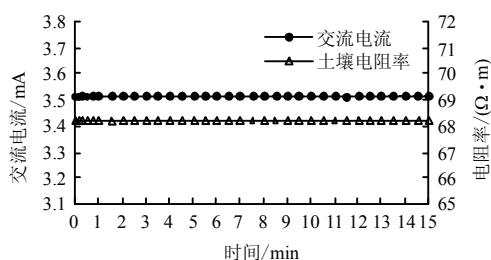


图 7 土壤样品施加交流电压后的回路电流变化及测量的土壤电阻率

Fig.7 Variations of the circuit current and measured soil resistivity after the AC voltage applied to the soil sample

土壤在直流电压下极化效应的分析等效电路见图 8, 将土壤样品等效为一个双层电介质<sup>[29]</sup>。

图 8 中  $R_{S1}$ 、 $R_{S2}$  分别为两层电介质等效电阻,  $C_{S1}$  和  $C_{S2}$  为两层电介质等效电容,  $U$  为直流电源电压, 通过 SW 控制直流电压施加与否, ①为直流电流表。根据电路分析, SW 合上时, 回路电流  $i$  为

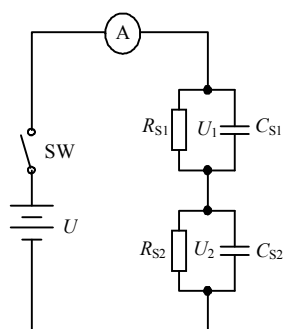


图 8 土壤双层电介质等效电路

Fig.8 Double-layer dielectric equivalent circuit of soil

$$i = \frac{U}{R_{S1} + R_{S2}} + \frac{U(R_{S2}C_{S2} - R_{S1}C_{S1})^2}{(C_{S1} + C_{S2})^2(R_{S1} + R_{S2})R_{S1}R_{S2}} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

回路过渡过程的时间常数  $\tau$  为

$$\tau = (C_{S1} + C_{S2}) \frac{R_{S1}R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}} \quad (4)$$

令

$$i_{\infty} = \frac{U}{R_{S1} + R_{S2}} \quad (5)$$

$$i_a = \frac{U(R_{S2}C_{S2} - R_{S1}C_{S1})^2}{(C_{S1} + C_{S2})^2(R_{S1} + R_{S2})R_{S1}R_{S2}} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

式中:  $i_{\infty}$  为稳态电流分量;  $i_a$  为吸收电流, 其大小与土壤均匀程度密切相关。如果土壤很不均匀,  $R_{S1}C_{S1}$  与  $R_{S2}C_{S2}$  相差较大, 则双层电介质电荷重新分配过程较长, 即过渡时间长, 吸收现象将十分明显。土壤体系的极化和吸收现象与土壤矿物中含有石英、云母等电介质材料有关。土壤电阻率的测量宜采用交流信号以抑制极化效应带来的测量误差。

### 3.4 施加电流密度的影响

选取砂土、砂粉土及粉土作为研究对象, 其含水率依次为 16.40%、18.55%、16.03%。分析图 2 所示交流伏安法测量电路中施加电流密度(电流/通流面积)对土壤电阻率测量结果的影响, 结果见图 9。

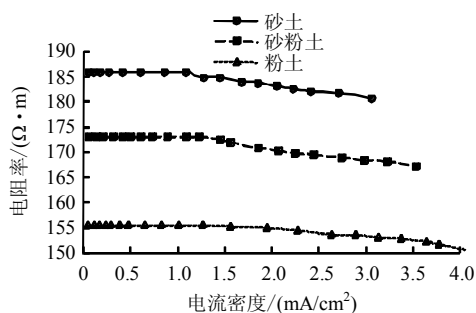


图 9 施加交流电流密度与对应土壤电阻率

Fig.9 Relationships between soil resistivity and amplitude of applied AC current density

砂土、砂粉土、粉土在电流密度分别小于 1、1.25、1.5 mA/cm<sup>2</sup> 时, 测量的电阻率为一恒定值, 而当电流密度超过这些范围时, 测量的电阻率随电流密度的增加而逐渐降低。关于电流密度的影响, Fukue 等<sup>[13]</sup>曾发现电流增大到一定程度的数据不稳定现象, 并解释是由测量电路放大器容量有限的原因造成的。本文测量电路不含放大电路, 出现上述现象的原因主要与土壤热容量有限有关, 当土壤中电流增大到某一临界值而超过其热容量时, 土壤开始升温, 从而导致其电阻率降低。可以看出, 土壤电阻率越高的土壤允许通过的电流越小, 而对于土壤电阻率在 200 Ω·m 内的土壤, 宜在电流密度不高于 1 mA/cm<sup>2</sup> 的情况下测量。

对于直流测试法, 同样存在土壤热容量有限的问题。采用直流电压测量含水率为 19.16% 的砂粉土样品电阻率时, 在极化吸收现象及热容量有限导致土壤升温的共同作用下, 观察到回路电流先逐渐变小, 后又逐渐变大, 而测量的土壤电阻率的变化趋势则与之相反(见图 10)。

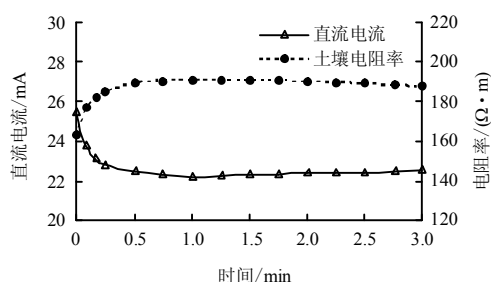


图 10 土壤样品在施加超过其热容量的直流电压下回路电流变化及测量的土壤电阻率

Fig.10 Variations of the circuit current and measured soil resistivity after DC voltage applied to the soil sample with the voltage exceeding the thermal capacity of soil sample

### 3.5 交流频率的影响

关于交流频率的影响, 目前对溶液的电导率或电阻率与测量频率的关系研究较多, 对土壤的研究则相对较少。Rinaldi 等<sup>[30]</sup>在二极法电极布置下曾测量了频率对土壤电导率的影响。本文采用四极法电极布置, 比较不同频率测量的土壤电阻率差异, 采用 HIOKI 3532-50 LCR 测试仪在配制好土样的土壤箱两端施加不同频率的交流电流。其中 50~200 kHz 频率下, 砂土、砂粉土、粉土、粉壤土、黏壤土含水率分别为 16.26%、23.99%、21.13%、16.29%、14.17% 时的土壤电阻率随频率的变化曲线见图 11。

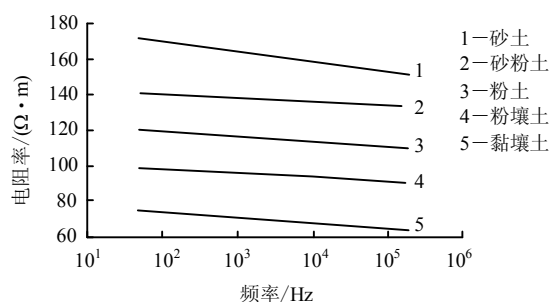


图 11 不同频率下土壤电阻率测量结果  
Fig.11 Test results of soil resistivity under different frequencies

由图可见,随着测试频率的升高,5 种土壤的电阻率均逐渐降低,但影响幅度并不大。5 种土样在 1 000 Hz 下的电阻率分别为 164.9、138.3、116.1、96.0、70.7  $\Omega \cdot \text{m}$ ,而 50 Hz 下的电阻率分别为 171.5、141.1、120.3、98.1、74.5  $\Omega \cdot \text{m}$ ,1 000 Hz 下的电阻率相对 50 Hz 下的电阻率下降均不超过 6%,表明频率 1 000 Hz 以内土壤电阻率测量结果相差不大。

## 4 结 论

(1) 二极法测量得到的土壤电阻率测量结果包含了端面电极与土壤的接触电阻,导致测量结果偏大。对于含水率较低的土壤,这种现象尤其明显。使用土壤箱测量土壤电阻率时宜采用四极法以消除端面电极与土壤的接触电阻影响。

(2) 四极法测量土壤电阻率时,电压极探针渗入土壤深度对土壤电阻率测量结果无影响。四极法可在电压极渗入深度较浅,即对土壤扰动较小的情况下测量。

(3) 采用直流电压测量土壤电阻率时,由于直流电压极化效应,存在过渡过程以及吸收现象,导致测量系统不稳定,测量的土壤电阻率随测试时间的增加而逐渐增大,因此土壤电阻率的测量宜采用交流信号以避免直流极化效应带来的测量误差。

(4) 土壤热容量有限,电阻率测量过程中施加的交流电流密度不宜过大,对土壤电阻率在 200  $\Omega \cdot \text{m}$  内的土壤施加的电流密度不宜超过 1  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 。土壤电阻率越高,施加的电流密度应越低,否则会导致电阻率测量结果偏低。

(5) 交流信号频率越高,测量的土壤电阻率越低,但这种影响并不明显,频率 1 000 Hz 以内的测量结果相差不大。

## 参 考 文 献

- [1] FUKUE M, MINATO T, HORIBE H, et al. The microstructures of clay given by resistivity measurements[J]. *Engineering Geology*, 1999, 54(1-2): 43-53.
- [2] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 黄土湿陷过程中微结构变化规律的电阻率法定量分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(6): 1692-1698.  
ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Quantitative assessment on change in microstructure of loess during collapsing using electrical resistivity measurement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(6): 1692-1698.
- [3] 刘松玉, 韩立华, 杜延军. 水泥土的电阻率特性与应用探讨[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(11): 1921-1926.  
LIU Song-yu, HAN Li-hua, DU Yan-jun. Experimental study on electrical resistivity of soil-cement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(11): 1921-1926.
- [4] 蒋建平, 阎长虹, 徐鸣洁, 等. 苏通大桥地基中深厚软土电阻率试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(10): 2077-2082.  
JIANG Jian-ping, YAN Chang-hong, XU Ming-jie, et al. Experimental study on electrical resistivity of thick soft soil in foundation of Su-Tong Yangtze River Bridge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2077-2082.
- [5] 缪林昌, 严明良, 崔颖. 重塑膨胀土的电阻率特性测试研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(9): 1413-1417.  
MIAO Lin-chang, YAN Ming-liang, CUI Ying. Studies on electrical resistivity of remold expansive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(9): 1413-1417.
- [6] 付伟, 汪稔, 胡明鉴, 等. 不同温度冻土单轴抗压强度与电阻率关系研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 73-78.  
FU Wei, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Study of relationship between uniaxial compressive strength and electrical resistivity of frozen soil under different temperatures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 73-78.
- [7] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 基于电阻率的非饱和土基质吸力预测[J]. *岩土力学*, 2010, 31(3): 1003-1008.  
ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Prediction of matric suction of unsaturated soil based on electrical resistivity[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(3): 1003-1008.
- [8] 孙树林, 李方, 谌军. 掺石灰黏土电阻率试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 51-55.  
SUN Shu-lin, LI Fang, CHEN Jun. Electrical resistivity measurement for lime-stabilized silt soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 51-55.
- [9] 金名惠, 黄辉桃. 金属材料在土壤中的腐蚀速度与土壤电阻率[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2001,

- 29(5): 103—106.
- JIN Ming-hui, HUANG Hui-tao. Relationship between corrosion rate of metal and resistivity in soil[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)**, 2001, 29(5): 103—106.
- [10] Power System Instrumentation and Measurements Committee. ANSI/IEEE Std 81-1983 IEEE guide for measuring earth resistively, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1983.
- [11] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 621—1997 交流电气装置的接地[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [12] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] FUKUE M, MINATO T, MATSUMOTO M, et al. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers[J]. **Engineering Geology**, 2001, 60(1—4): 361—369.
- [14] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 一种检测污染土的新方法——电阻率法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 1028—1032.
- HAN Li-hua, LIU Song-yu, DU Yan-jun. New method for testing contaminated soil—electrical resistivity method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(8): 1028—1032.
- [15] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 温度对污染土电阻率影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1151—1155.
- HAN Li-hua, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Experiment study on effect of temperature on electrical resistivity of contaminated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1151—1155.
- [16] KALINSKI R, KELLY W. Estimating water content of soils from electrical resistivity[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1993, 16(3): 131—137.
- [17] SHINN J D, TIMIAN D A, MOREY R M, et al. Development of a CPT deployed probe for in situ measurement of volumetric soil moisture content and electrical resistivity[J]. **Field Analytical Chemistry & Technology**, 1998, 2(2): 103—109.
- [18] 周仲华, 郑龙, 孙博. 土遗址墙体含水量与电阻率关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 4054—4058.
- ZHOU Zhong-hua, ZHENG Long, SUN Bo. Research on relationships between water content and resistivity of earthen ruin walls[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp. 2): 4054—4058.
- [19] CORWIN D L, LESCH S M, SHOUSE P J, et al. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity[J]. **Agronomy Journal**, 2003, 95(2): 352—364.
- [20] CORWIN D L, LESCH S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture[J]. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2005, 46(1—3): 11—43.
- [21] 董晓强, 白晓红, 赵永强, 等. NaOH 污染下水泥土的电阻率变化研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 28(11): 1715—1719.
- DONG Xiao-qiang, BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, et al. Study on electrical resistivity of soil-cement polluted by NaOH[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 28(11): 1715—1719.
- [22] 曹晓斌, 吴广宁, 付龙海, 等. 直流电流密度对土壤电阻率的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 37—42.
- CAO Xiao-bin, WU Guang-ning, FU Long-hai, et al. The impact of DC current density on soil resistivity[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2008, 28(6): 37—42.
- [23] ABU-HASSANEIN Z S, BENSON C H, BLOTZ L R. Electrical resistivity of compacted clays[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(5): 397—406.
- [24] ARULANANDAN K. Dielectric method for prediction of porosity of saturated soil[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 117(2): 319—330.
- [25] 全国土壤腐蚀试验网站. 材料土壤腐蚀试验方法[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [26] KAYA A, FANG H Y. Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity[J]. **Journal of Environmental Engineering**, 1997, 123(2): 169—177.
- [27] DELANEY A J, PEAPPLES P R, ARCONI S A. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine-grained soil[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2001, 32(2—3): 107—119.
- [28] BERNSTONE C, DAHLIN T, OHLSSON T, et al. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys[J]. **Environmental Geology**, 2000, 39(3): 360—371.
- [29] 关根志. 高电压工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [30] RINALDI V A, CUESTAS G A. Ohmic conductivity of a compacted silty clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(10): 824—835.