

文章编号 1004-924X(2013)01-0115-09

# 基于快速傅里叶变换直流分量的土壤电阻率测量

朱 勇<sup>1,2,3\*</sup>, 王振冲<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 机电与信息工程学院, 北京 100083;

2. 阜阳师范学院 物理与电子科学学院, 安徽 阜阳 236041;

3. 中国环境科学研究院 固体废物污染控制技术研究所, 北京 100012)

**摘要:**提出一种新的土壤电阻率测量方法—快速傅里叶变换(FFT)直流分量法,研究了该方法所涉及的激励信号类型、测量信号的采集及处理、测量的精确度和稳定性验证等。首先分别分析了传统土壤电阻率测量方法采用直流供电和交流供电的益处和弊端,在此基础上,提出采用直流和交流组合波作为土壤的激励信号来克服传统测量方法的不足。然后,讨论了如何采用 FFT 直流分量法在频域上分离出测量信号中的直流分量。最后,设计了土壤电阻率测量系统。通过土壤导电模型电路实验确定了激励信号的直流分量、频率等参数的大小,并验证了系统的测量准确度。与传统测量方法做了对比实验,进一步验证了测量结果的稳定性。实验结果显示,模型电路电阻率的测量误差在 1% 以内,实际土壤电阻率测量数据的方差为 0.42,表明用提出的方法测量土壤电阻率,测量结果准确性好,稳定性高。

**关键词:**土壤;电阻率测量;直流分量;快速傅里叶变换

中图分类号:P631.3 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20132101.0115

## Measurement of soil resistivity based on FFT DC component

ZHU Yong<sup>1,2,3\*</sup>, WANG Zhen-chong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering,  
China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. School of Physics and Electronics, Fuyang Teacher's College, Fuyang 236041, China;

3. Research Institute of Solid Waste Management,  
Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

\* Corresponding author, E-mail: zywdxy@163.com

**Abstract:** A new measurement method for soil resistivity, Fast Fourier Transform(FFT) DC component method, was put forward, and corresponding power signal supply, acquisition and processing of measurement signals, measuring accuracy and data stability in the measurement were explored. First, the benefits and drawbacks of the traditional measurement methods for soil resistivity using the DC or AC power supplies were analyzed, respectively. Based on above analysis, a combination signal of DC and AC was adopted as the excitation signal of the soil to overcome the deficiency of traditional meas-

收稿日期:2012-07-12;修订日期:2012-09-28.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA063101-2);安徽省科技攻关项目(No. 12010302080)

urement methods. Then, how to isolate the DC component of the measurement signal in a frequency domain was discussed. Finally, a measurement system for soil resistivity was established. The size of the DC component and the frequency of the excitation signal were determined by a circuit experiment on the soil conductivity model, and the measurement accuracy of the system was verified. Furthermore, the stability of the measurement results was confirmed by comparing with those of traditional methods. Experimental results indicate that the error of resistivity measurement in model circuit is less than 1%, and the variance of the actual soil resistivity measurement data is 0.42, which proves that soil resistivity measurement results are reliable, accurate and stable by proposed method.

**Key words:** soil; resistivity measurement; DC component; Fast Fourier Transform(FFT)

## 1 引言

土壤的电阻率是土壤的基本物性参数之一,表征了土壤的导电特性。影响土壤电阻率的主要因素有土壤的物质组成(矿物成分、粒径大小、颗粒形状和排列方向等)、孔隙结构(孔隙率和孔隙连通性等)和孔隙水特征(含水率、溶液浓度等)。通过测量土壤电阻率,可以研究土壤的微结构形态<sup>[1-2]</sup>、物理力学性质<sup>[3-5]</sup>、以及土体污染特征<sup>[6-8]</sup>等特性,土壤电阻率的测量具有重要的理论价值和工程应用前景。

关于土壤电阻率的研究,目前主要是在室内实验研究土壤的电阻率特征和影响土壤电导率的主要因素<sup>[9]</sup>,而对土壤电阻率测量方法研究的文献相对很少,并且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>[10-11]</sup>采用交流供电,用伏安法测量了不同浓度 NaOH 污染下水泥土电阻率的变化;曹晓斌等<sup>[12]</sup>采用直流供电,用伏安法测量了不同直流电流密度下的土壤电阻率变化;刘松玉、韩立华等<sup>[13-15]</sup>采用电桥法测量了低频交流激励下水泥土和污染土的电阻率,并研究了不同温度下电阻率的变化;Fukue、Shinn 等<sup>[16-17]</sup>研制了电阻率探头,能在测量土壤电阻率的同时测量出土壤含水率,并研究了重金属污染沙土的电阻率随时间的变化趋势。

土壤电阻率测量通常采用伏安法,伏安法按电极数可以分为两电极和四电极 2 种方法<sup>[18-19]</sup>,按激励信号类型可分为直流法和交流法<sup>[12,20]</sup>。在测量土壤电阻率时,若采用直流电流供电,土壤会产生极化和电化学反应,极化的程度和供电的

时间长短相关。这使得土壤电阻率的测量值普遍偏大,并且测量值随不同的供电电流和供电时长有较大的变化。采用交流供电可以将土壤极化和电化学反应降到最小<sup>[10,21]</sup>,但土壤在交变电场激励下呈现容性,使得通过土壤的电流和产生的电压之间存在着一定的相位差,并且相位差会随供电频率的不同而变化。在测量土壤电阻率时,需要对土样两端电压和电流同步测量,但严格的同步测量在电路上很难实现,从而使电阻率测量误差较大。为此,本文提出一种新的土壤电阻率测量方法,该方法采用直流和交流的复合信号——带直流分量的交变电流供电,并对其激励下的土壤电压和电流整周期波形数据进行快速傅里叶变换,得到幅度谱的直流分量,进而得到电阻并将其换算成电阻率。

## 2 土壤电阻率测量原理

土壤电阻率测量采用伏安法。设供电电极提供的电流为  $I$ ,测量电极压降  $\Delta V$ ,根据欧姆定律计算出土样电阻  $R$ ,然后换算成电阻率。土柱试样的竖直电阻率  $\rho$  为:

$$\rho = \frac{\Delta V \cdot A}{Il}, \quad (1)$$

式中, $A$  为土柱横截面积,单位为  $\text{m}^2$ ;  $l$  为测量电极间距,单位为  $\text{m}$ 。

按电极数量,土壤电阻率测试方法可分为二电极法和四电极法 2 种,如图 1 和图 2 所示。二电极法的测量电极和供电电极共用,通过直接测土样两端的电压和通过土样的电流来计算土壤电阻率。四电极法外部的两电极(A、B)为供电电极

(电流极),用于提供电流,中间的两个电极(M、N)为测量电极(电压极),用于测定土样的压降。二电极法虽然操作简单,但测量结果受电极与土样之间的接触条件影响较大。四电极法的供电电极的作用是提供电流,它和土样间的接触电阻对测量结果没有影响。测量电极上通过的电流非常小,可将其接触电阻降到最低。而且室内实验四电极法的原理与现场测量的原理相似,所以本文采取四电极法。

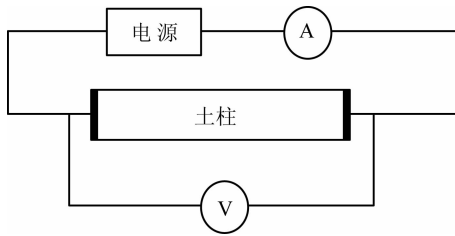


图1 二电极法测土壤电阻率

Fig. 1 Measurement of soil resistivity using two-electrode method

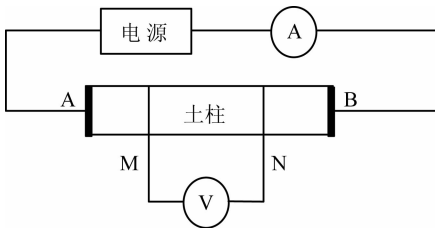


图2 四电极法测土壤电阻率

Fig. 2 Measurement of soil resistivity using four-electrode method

### 3 土壤电阻率测量方法

#### 3.1 传统测量方法及其弊端

土壤电阻率四电极法测量装置和接线如图2所示,土样装填在一绝缘盒(通称“米勒盒”)内,两端的板状电极上施加直流或交流电流,中间的两棒状电极用于测量电压。传统的测量方法是在某一时刻同时记录下电压和电流的数值,然后通过式(1)计算电阻率。

在进行土壤电阻率测量时,受供电电流的激励,特别是在直流供电的情况下,土壤会产生极化和电化学反应。这使得在同样的电流作用下,土壤两端的压降在一段时间内也会发生一定程度的

变化,按式(1)计算的电阻率也会随之发生改变,产生测量结果的失真。而且,对于同一土样,在不同电流作用下,由于土壤极化和电化学反应的速度不同,导致在通电后某一固定时刻的测量值也不同。采用交流供电虽然可以将土壤极化和电化学反应降到最小,但土壤在交变电场激励下呈现出的容性使通过土样的电流和产生的电压之间存在着相位差,并随供电频率的不同而变化。此时再用式(1)计算土壤的电阻率,就会产生较大的误差。

#### 3.2 基于FFT直流分量的土壤电阻率测量方法

本文提出的基于FFT直流分量的土壤电阻率测量方法:采用带直流分量的交流供电(可以看成是交流和直流的组合波),对得到的电流和电压信号同时进行FFT变换,然后提取频率域的直流分量以分离直流和交流信号,最后利用电流和电压频率域的直流分量计算出电阻率。这种基于FFT频谱分析的测量方法对谐波和随机噪声的干扰有较强的抑制能力,且算法的运算效率高,实时性强<sup>[22-27]</sup>。

本实验采用带直流分量的正弦交流信号供电,激励信号的表达式可以写成:

$$s(t) = E + A\sin(\omega_1 t), \quad (2)$$

式中  $E$  为直流分量的大小,  $A$  为交流信号的幅度。

根据傅里叶变换的叠加性,激励信号  $s(t)$  的傅里叶变换为:

$$F[s(t)] = 2\pi E\delta(\omega) + \pi A\delta(\omega - \omega_1), \quad (3)$$

式中  $\delta(\omega)$  为单位冲击函数。

由式(3)可以看出,激励信号  $s(t)$  的频谱只有2根谱线,分别在频率为0和  $\omega_1$  处,幅值分别为  $2\pi E$  和  $\pi A$ 。在频率域,直流分量和交流分量的幅值比被放大,是时域中的两倍,信号的分辨率得到提高。

采用图2所示的测量装置和接线方法,土样通过的电流可以写成:

$$i(t) = I_0 + I_1\sin(\omega_1 t), \quad (4)$$

测量电极两端的电压可以写成:

$$v(t) = V_0 + V_1\sin(\omega_1 t). \quad (5)$$

若在时域直接测量,土样的电阻率理论上(实际上测不到)为:

$$\rho = \frac{V_0 A}{I_0 l}, \quad (6)$$

在频域,电流和电压的直流分量幅值分别为  $2\pi I_0$  和  $2\pi V_0$ , 计算得到的土样电阻率为:

$$\rho = \frac{2\pi V_0 A}{2\pi I_0 l} = \frac{V_0 A}{I_0 l}. \quad (7)$$

比较式(6)和式(7),可以看出经过傅里叶变换后,在频域上可以准确地测量得到土样的电阻率。测量方法如下:加上供电信号后,对土样通过的电流和产生的电压进行多个周期的采样,得到时域数据。对时域数据进行快速傅里叶变换,得到频域的幅频关系数据(如图3和图4)。取其直流分量的电流幅度和电压幅度值分别作为式(1)中的电流  $I$  和压降  $\Delta V$ ,再计算出电阻率  $\rho$ 。

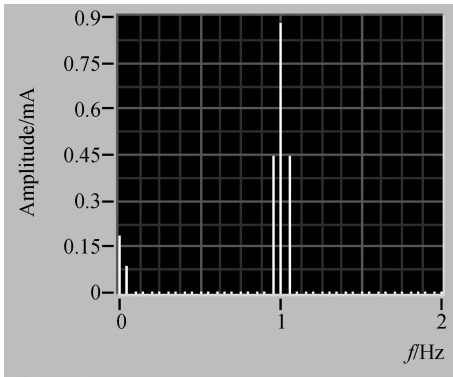


图3 电流信号幅度谱(供电频率 1 Hz)

Fig. 3 Amplitude spectrum of current signal (power supply frequency of 1 Hz)

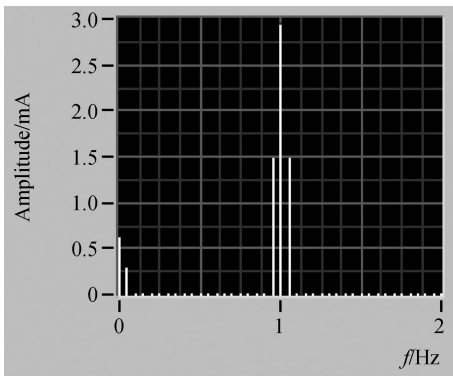


图4 电压信号幅度谱(供电频率 1 Hz)

Fig. 4 Amplitude spectrum of voltage signal (power supply frequency of 1 Hz)

### 3.3 基于 FFT 直流分量的土壤电阻率测量系统

通过对测量方法的分析,利用 NI 公司的工业计算机和 PXI 高精度数据采集模块,采用 Lab-

VIEW 软件平台设计了测量系统,如图5所示。将四电极测量装置获得的被测土样的电流信号和电压信号送至数据采集卡,利用 LabVIEW 软件控制数据采集卡对电流和电压信号数据进行采样接收,并进行快速傅里叶变换,得到电压及电流的幅度频谱。然后索引到电压及电流幅度谱的直流谱线,进而求出土壤的电阻率。

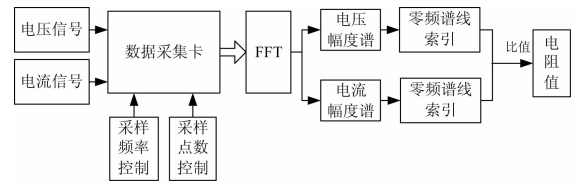


图5 土壤电阻率测量系统

Fig. 5 Measurement system for soil resistivity

## 4 土壤电阻率测量模拟实验验证

为了验证本文提出的土壤电阻率测量方法的精确性,确定激励信号中直流分量与交流分量的幅值比例及交流分量的频率,根据土壤的 Cole-Cole 电路模型,设计了已知参数的土壤电阻率模拟电路,进行了验证测量实验。

### 4.1 模拟实验电路

国内外学者通常采用 Cole-Cole 电路模型来研究土壤的导电特性,电路如图6所示。在图6中,  $R_0$  为未考虑激电效应的土样直流电阻,是要测定的量;  $R_1$  为土样阻塞通道中溶液和固体颗粒的电阻之和;  $X_c$  为回路容抗。

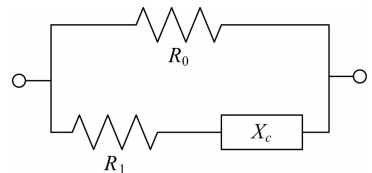


图6 Cole-Cole 电路模型

Fig. 6 Cole-Cole circuit model

按照图6的电路模型,构造了土壤电阻率测量模拟实验电路,如图7所示。其中,AC为供电信号;  $R_f$  为电流取样电阻,阻值为  $51 \Omega$ ;  $R_0$  相当于土样的直流电阻,为要测定的量,阻值取为  $390 \Omega$ ;  $R_1$  取为  $390 \Omega$ ,  $C$  取为  $0.22 \mu\text{F}$ 。

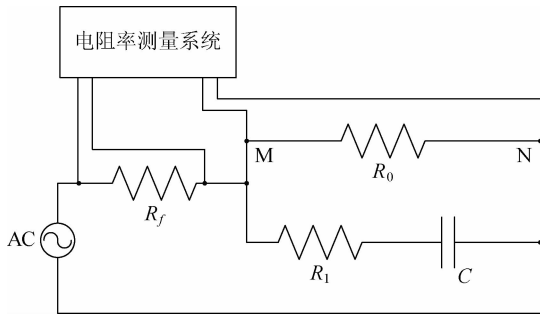


图 7 土壤电阻率测量模拟实验电路

Fig. 7 Measurement analog circuit of soil resistivity

### 4.2 直流分量大小的确定

供电正弦波信号电压幅值为 2 V, 频率为 1 Hz, 所加直流分量为电压幅值的 0.5%~50%, 测量结果见表 1。可以看出当直流分量增大时, 测量误差减小。此模型电路的电容 C 是定值, 但实际土壤会因直流分量的增大极化加强, 所以, 在保证测量数据可靠的条件下, 应尽量减小直流分压。从表 1 可见, 当直流分压增大到交流幅值的 5% 时, 测量误差已经小于 1%, 因此直流分压可以选择为交流幅值的 5%~10%。

表 1 直流分量大小不同时的电阻测量结果

Tab. 1 Measurement results of resistance under different DC components

直流分量大小/交流幅值/%	测量值/ $\Omega$	误差/%
0.5	436.54	11.933 3
1	405.31	3.925 6
2.5	396.25	1.602 6
5	393.85	0.987 2
10	392.93	0.751 3
25	392.34	0.600 0
50	392.15	0.551 3

### 4.3 供电频率相关性实验

采用直流分量为 0.2 V、电压幅值为 2 V 的正弦波供电, 在低频段以下<sup>[19]</sup>, 不同频率下的电阻率测量值见表 2。可以看出, 采用 FFT 直流分量法对 MN 两点间的直流电阻进行测量, 测量值与供电频率没有相关性(见图 8), 即不受电容 C 的影响。但当频率大于 100 Hz 时, 由于电磁感应

增强, 测量值误差略有增大。因此, 供电频率应低于 100 Hz。

表 2 不同频率激励下的电阻测量结果

Tab. 2 Measurement results of resistance under different frequency excitations

频率/Hz	测量值/ $\Omega$	误差/%
0.5	392.32	0.594 9
1	392.33	0.597 4
2	392.36	0.605 1
5	392.35	0.602 6
10	392.37	0.607 7
20	392.36	0.605 1
50	392.38	0.610 3
100	392.36	0.605 1
200	392.67	0.684 6
500	393.03	0.776 9
1 000	392.53	0.648 7
2 000	393.06	0.784 6
5 000	393.01	0.771 8

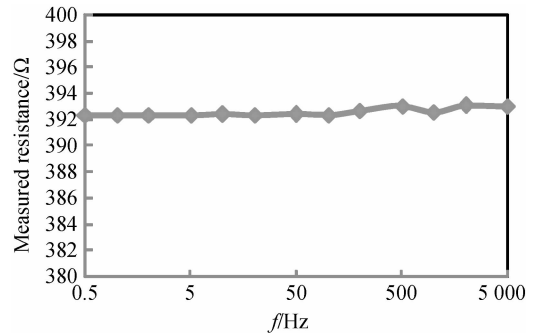


图 8 电阻测量值和频率的关系

Fig. 8 Relationship between resistance measurement values and frequency

### 4.4 测量的精确度验证实验

采用直流分量为 0.2 V、电压幅值为 2 V、频率为 1 Hz 的正弦波供电, 不同  $R_0$  (由多个 390  $\Omega$  电阻串、并联得到) 测得的结果见表 3。可以看出, 测量值和实际值的误差很小, 扣除由多个电阻串、并联计算出的“实际值”的误差, 本文提出的测量方法和设计的测量系统具有很高的精确度。

表 3 不同  $R_0$  的测量结果Tab. 3 Measurement results with different  $R_0$ 

电阻/ $\Omega$	测量值/ $\Omega$	误差/%
65	66.02	1.569 2
78	79.27	1.628 2
97.5	99.11	1.651 3
130	131.93	1.484 6
195	197.62	1.343 4
390	392.33	0.597 4
780	789.27	1.188 5
1 170	1 181.73	1.002 6
1 560	1 576.89	1.082 7
1 950	1 971.43	1.099 0

## 5 实际土样电阻率测量验证

为了验证本文提出的 FFT 直流分量测量法的稳定性,分别采用传统的土壤电阻率测量方法和 FFT 直流分量法测量了实际土样的电阻率,并对测量结果进行了对比。

### 5.1 实验材料

本实验所用土样为砂质壤土,取自北京市中国环境科学研究院,取土深度为 2~3 m。经风干、过筛,集中混合后,利用四分法对样品进行取样,每份 2 000 g 左右。土样的物理性质和主要离子含量如表 4 和表 5 所示。

表 4 土壤样品的物理性质

Tab. 4 Physical properties of soil sample

pH 值	成分组成			密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	有机质
	粘土	沙土	沙		
7.72	11.4%	65.1%	24.5%	1.17	8.06%

表 5 土壤浸出液主要元素背景值

Tab. 5 Background values of main elements of soil extract

名称	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ba}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$
含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	3.24	0.78	1.23	5.68	1.02	2.56	6.01

### 5.2 实验环境

土样为圆柱形,半径为 35 mm,高为 240 mm。两圆盘形供电电极(A、B)半径为 35 mm,厚为 1 mm,位于土柱两端。采用图 2 的接线方式,供电电极和土壤接触一面涂有碳基导电胶,可以使两者紧密接触并阻断氧化还原反应。两测量电极(M、N)长为 40 mm,半径为 1 mm,间距为 80 mm,插入土柱深度为 35 mm。测量电极采用细碳棒,以降低极化效应。

### 5.3 测量结果

在传统的土壤电阻率测量实验中,供电电极加大小为 0.5~5 V 的 10 个等级的电压,供电 30 s 测量<sup>[17]</sup>。在采用 FFT 直流分量法的实验中,供电电极加上带有直流分量,电压幅值为 0.5~5 V 共 10 个等级的正弦信号,频率为 1 Hz,直流分压大小为幅值的 10%。

测量结果见表 6,图 9 是 2 种方法测量结果对比。传统直流电阻率法测量数据的方差为 9.30,FFT 直流分量法测量数据的方差为 0.42。可以看出在不同大小电流的激励下,传统测量方法的测量值有较大的变化范围,不稳定。而本文方法测出的结果表现出很好的稳定性,特别是在电流密度较小的情况下(图 9 中电压幅度为 2V 时的电流密度为 300  $\text{mA}/\text{m}^2$ )。

表 6 两种方法的测量结果

Tab. 6 Measurement results of two methods

电压(幅值)/V	测量值/ $\Omega \cdot \text{m}$	
	传统方法	FFT 直流分量法
0.5	60.44	41.15
1	58.96	40.65
1.5	56.63	40.72
2	55.28	41.02
2.5	55.01	40.17
3	54.55	39.89
3.5	54.01	40.09
4	51.14	39.78
4.5	51.73	9.24
5	50.73	39.22

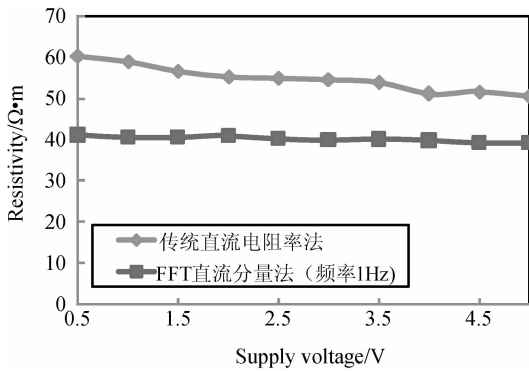


图9 2种方法的电阻率测量值对比

Fig.9 Comparison of resistivity measurement values between two methods

## 6 结 论

本文提出一种新的土壤电阻率测量方法——FFT直流分量法,并通过土壤电阻率模型电路实

验及与传统的测量方法对比实验验证了其准确性和稳定性。结论如下:

当频率小于100 Hz时,本文提出的FFT直流分量法不受供电频率的影响,可以降低土壤的容性特征给电阻率测量带来的影响,测量误差在1%以内,具有很高的准确性。

采用本文提出的FFT直流分量法测量土壤电阻率时,供电信号中直流分量大小的选取,应同时兼顾提高测量信号的可靠性和减少土壤极化两个方面,一般选择为交流幅值的5%~10%。

在不同的电流密度下,由于土壤的极化,传统的土壤电阻率测量方法测得土样电阻率会产生失真,呈现随电流密度增大而降低的趋势。本文提出的FFT直流分量测量方法在10个等级的供电电压下,测量数据的方差为0.42,表现出很好的稳定性。

## 参考文献:

- [1] ARULANANDAN K, SMITH S S. Electrical dispersion in relation to soil structure [J]. *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, 1973, 99 (2): 1113-1133.
- [2] FUKUE M, MINATO T, HORIBE H, et al.. The micro structures of clay given by resistivity measurements [J]. *Engineering Geology*, 1999, 54 (1-2): 43-53.
- [3] KALINSKI R J, KELLY W E. Electrical resistivity measurements for evaluating compacted soil liners [J]. *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 1994, 120 (2): 451-457.
- [4] ABU-HASSANEIN S Z, BENSON C H, BLOTZ L R. Electrical resistivity of compacted clays [J]. *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 1996, 122 (5): 397-406.
- [5] BRYSON L S. Evaluation of geotechnical parameters using electrical resistivity measurements [C]. *GeoFrontiers 2005*[A], New York, 2005.
- [6] CAMPANELLA R G, WEEMES I. Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies [J]. *Canada Geotechnical Journal*, 1990, 27(5): 557-567.
- [7] FUKUE M, MINATO T, MATSVMOTO M, et al.. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers [J]. *Engineering Geology*, 2001, 60(1-4): 361-369.
- [8] 黄富荣,潘涛,张甘霖,等.应用近红外漫反射光谱快速测定土壤锌含量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18 (3): 586-592.
- [9] HUANG F R, PAN T, ZHANG G L, et al.. Rapid measurement of zinc contents in soils by near infrared diffuse reflectance spectroscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 586-592. (in Chinese)
- [10] 查甫生,刘松玉,杜延军,等.非饱和粘性土的电阻率特性及其实验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(8): 1671-1676.
- [11] ZHA F SH, LIU S Y, DU Y J, et al.. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(8): 1671-1676. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] DONG X Q, BAI X H, ZHAO Y Q, et al.. Study on electrical resistivity of soil-cement polluted by NaOH [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 28 (11): 1715-1719. (in Chinese)
- [14] 董晓强. 污染对水泥土电阻率特性影响的试验与理论研究[D]. 太原:太原理工大学博士论文, 2008:46-47.

- DONG X Q. *Experimental and theoretical research of influence on electrical resistivity of soil-cement by pollution* [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008:46-47. (in Chinese)
- [12] 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 X B, WU G N, FU L H, *et al.*. The impact of DC current density on soil resistivity [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(6): 37-42. (in Chinese)
- [13] 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 S Y, HAN L H, DU Y J. Experimental study on electrical resistivity of soil-cement [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(11):1921-1926. (in Chinese)
- [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 L H, LIU S Y, DU Y J. New method for testing contaminated soil-electrical resistivity method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(8): 1028-1032. (in Chinese)
- [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 L H, LIU S Y, DU Y J. Experiment study on effect of temperature on electrical resistivity of contaminated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1151-1155. (in Chinese)
- [16] FUKUE M, MINATO T, MATSUNOTO M, *et al.*. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers [J]. *Engineering Geology*, 2001, 60(1-4): 361-369.
- [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] 孙树林, 李方, 湛军. 掺石灰黏土电阻率试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 51-55.
- SUN SH L, LI F, CHEN J. Electrical resistivity measurement for lime-stabilized silt soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 51-55. (in Chinese)
- [19] 朱勇, 王振群, 能昌信, 等. 土壤电导率测量方法的研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 413-416.
- ZHU Y, WANG ZH CH, NENG CH X, *et al.*. Research and simulation of soil conductivity measurement methods [J]. *Computer simulation*, 2012, 29(8):413-416. (in Chinese)
- [20] 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 W, WANG R, HU M J, *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. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 王旭东, 刘渝. 一种基于 FFT 的超宽带数字正交变换算法及实现[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1714-1718.
- WANG X D, LIU Y. Super-wide band digital I/Q transform algorithm based on FFT and its implementation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(8):1714-1718. (in Chinese)
- [23] 崔继文, 陈世丽, 谭久彬. 由正交傅里叶-梅林矩定位的双光纤耦合微内尺度测量[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5):1068-1076.
- CUI J W, CHEN SH L, TAN J B. Measurement of micro-cavity dimension by double optical fiber coupler based on OFMM's location [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):1068-1076. (in Chinese)
- [24] 吴元昊, 于前洋. 基于傅里叶相位差的抗噪声位移估计算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7):1137-1142.
- WU Y H, YU Q Y. Denoising algorithm of displacement estimation based on phase difference of Fourier transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):1137-1142. (in Chinese)
- [25] 张海涛, 涂亚庆. 基于 FFT 的一种计及负频率影响的相位差测量新方法[J]. 计量学报, 2008, 29(2):168-171.
- ZHANG H T, TU Y Q. A new method for phase difference measurement based on FFT with negative frequency contribution [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(2):168-171. (in Chinese)

- [26] 李辉,王岩飞. 正弦信号的直接 FFT 参数估计与相位差分法对比研究[J]. 电子与信息学报, 2010,32(3):544-547.
- LI H, WANG Y F. The contrastive study between direct FFT and phase difference in parameter estimation of sinusoidal signal [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32 (3): 544-547. (in Chinese)

- [27] 高云鹏,滕召胜,卿柏元. 基于 Kaiser 窗双谱线插值 FFT 的谐波分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2010,31(2):287-292.
- GAO Y P, TENG ZH SH, QING B Y. Harmonic analysis based on Kaiser window double spectrum line interpolation FFT [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(2):287-292. (in Chinese)

#### 作者简介:



朱 勇(1972—),男,安徽颖上人,博士研究生,副教授,1994年于南京师范大学获得学士学位,2000年于华东师范大学获得硕士学位,主要研究方向为检测技术与自动化装置。E-mail: zywdx@163.com

#### 导师简介:



王振舫(1958—),男,安徽合肥人,教授,博士生导师,1982年于安徽理工大学获得学士学位,1986年、1990年于中国矿业大学分别获得硕士、博士学位,主要研究方向为检测技术与自动化装置。E-mail: zhenchongwang@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)