

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.012



# $\text{Cu}^{2+}$ 对温州软粘土电阻率特性影响的试验研究

蒋吉方, 余闯, 廖饶平, 朱超鹏

(温州大学 建筑工程学院, 浙江 温州 325035)

**摘要:**温州制革、电镀等轻工业发达, 废水中  $\text{Cu}^{2+}$  含量较高, 多处地下水和土壤受到污染。选取典型温州软黏土, 将土样重塑, 加入不同浓度的  $\text{Cu}^{2+}$  和适量水泥进行固化, 通过测试不同土样电阻率来研究  $\text{Cu}^{2+}$  对土体性能的影响。电阻率测试在改装的一维压缩固结试验中进行, 压缩中部分土样电阻率变化不显著, 但可量测到压缩过程中电阻率的变化规律。试验结果表明: 电阻率可以很好地评估加入水泥之后土体性质的改变, 在实际工程中可以用来反映土体的污染程度; 土体在  $\text{Cu}^{2+}$  含量和含水量很高时, 不宜采用电阻率法评估土体污染压缩的过程。

**关键词:**软黏土; 电阻率; 固化; 一维固结

**中图分类号:** TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)06-0085-06

## Tests on electrical resistivity characteristics of Wenzhou soft clay with $\text{Cu}^{2+}$

Jiang Jifang, Yu Chuang, Liao Raoping, Zhu Chaopeng

(College of Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China)

**Abstract:** The previously developed industry has contaminated part of groundwater and soils in Wenzhou with high concentration of  $\text{Cu}^{2+}$  in waste water, such as tannery, electroplating and etc. To study the characteristics of typical Wenzhou soft clay with  $\text{Cu}^{2+}$ , the soil samples are remodeled to test the electrical resistivity with different concentrations of  $\text{Cu}^{2+}$  and reasonable amount of cement for consolidation. Electrical resistivity tests were carried out via the self-designed one-dimensional consolidation compression apparatus. The resistivity variation can be directly observed during the compression process. The testing results indicate that: while the concentration of  $\text{Cu}^{2+}$  and water in soil is high, electrical resistivity measurement should not be applied to assess the compression process of the soil. However, this measurement is a good indication for characteristics changes in soil after adding cement. Therefore the electrical resistivity might be taken as an effective means to estimate the degree of contamination of soil in practical engineering.

**Keywords:** soft clays; electrical resistivity; solidification; One-dimensional compression

**收稿日期:** 2018-03-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(51508418, 51578427); 浙江省基础公益研究计划(2015C33220, 2014C33015); 温州市重大科技专项(ZS2017002)

**作者简介:** 蒋吉方(1989-), 男, 主要从事环境岩土研究, E-mail: 148310087@qq.com。

余闯(通信作者), 男, 教授, 博士, E-mail: geoyuchuang@163.com。

**Received:** 2018-03-20

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China( No. 51508418, 51578427); Public Welfare Application Research Project of Zhejiang Province (No. 2014C33015, 2015C33220); Key Research Project of Wenzhou(No. ZS2017002)

**Author brief:** Jiang Jifang(1989-), main research interest: environment geotechnical, E-mail: 148310087@qq.com.

Yu Chuang(corresponding author), professor, PhD, E-mail: geoyuchuang@163.com.

温州位于浙江省东南沿海地区,东濒东海,南接福建,是中国著名的软粘土地区。温州软粘土成因类型为泻湖相,沉积厚度达到 35 m,呈现流塑状态,深厚均匀,有不规则的粉砂层或透镜体,属于高压缩性、低强度的软弱土<sup>[1]</sup>。温州市轻工业比较发达,制革、电镀等行业污染严重,工业废水中含有大量的铬、铜、镍等重金属离子,对电路板电子元件等进行酸洗时,所产生的废液中含有大量的  $\text{Cu}^{2+}$ ,多处水源和土壤已受到一定程度污染。

土的电阻率作为土体的固有参数,也可以表征土体的导电性,具有连续、快捷、无损等优点<sup>[2]</sup>。自 1942 年 Archie<sup>[3]</sup>首次提出了适用于饱和和无粘性土的电阻率模型以来,电阻率法在土体和岩石的工程现状的研究中得到了重视。Cai 等<sup>[4]</sup>用电阻率参数作为重要的技术指标来评价氧化镁固化砂土的性质;Hassan 等<sup>[5]</sup>对非饱和土的干湿循环特性进行研究,发现电阻率是一个有效的评价指标;刘松玉等<sup>[6]</sup>在中国率先对电阻率室内测试技术进行了研究,建立了分析模型,并在土颗粒的组成方面对土电阻率的影响进行了研究;查甫生等<sup>[7]</sup>在地基处理中运用电阻率法,并在膨胀土改良等方面进行评价,都有着显著的效果;刘志彬等<sup>[8]</sup>研究锌离子对膨胀土一维压缩特性的影响,并在对黄土的研究中也充分运用了电阻率法;章定文等<sup>[9]</sup>在污染土干湿循环的耐久性研究中也运用到了电阻率法,效果显著;董晓强等<sup>[10]</sup>对污染水泥土搅拌桩取芯的检测也使用了电阻率这种新方法,通过室内进行模拟试验得到有效验证,建立了一定的相关关系;宋志伟等<sup>[11]</sup>在重金属污染砂土方面也做了交流电阻率相关的研究。

本文在分析前人研究成果的基础上,采用电阻率法研究不同铜离子浓度和水泥掺入量对温州软粘土的影响特性,揭示电阻率与其他参数之间的关系。

## 1 土的电阻率理论及测试方法

土体的导电性有 3 个不同路径:孔隙水导电、颗粒表面(阳离子)导电或二者的综合作用,如图 1 所示。

同时,土体的导电性能主要由两个参数控制孔隙水中的盐含量及其饱和度:土的比表面积与粘土矿物含量。电流通过单位立方土体产生的电阻值被称为电阻率( $\Omega \cdot \text{m}$ ),用  $\rho$  表示。土体是三相系统,其电阻率也是受孔隙水、土体颗粒与结构共同

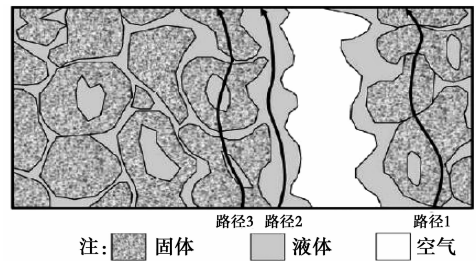


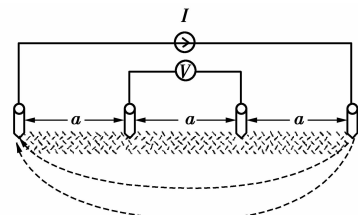
图 1 粘性土中电流的 3 种流通过径示意图 (据 Rhoadels 等<sup>[12]</sup>)

Fig. 1 Three conductance pathways unsaturated soil model (From Rhoades et al)

影响的结果<sup>[13]</sup>。目前主要有两种方法<sup>[14]</sup>对它进行测定:

1) Wenner 方法。直接通电流的 Wenner 法(DC 法)是室内和现场测定的主流方法,其示意图见图 2。作为一种四相电极法,外部电极通电流  $I$  (mA),内部电极测诱导电压,半空间电阻率  $\rho$  为

$$\rho = 2\pi aV/I$$



注:  $I$ : 电流;  $V$ : 电压;  $a$ : 两电极片间的水平距离。

图 2 Wenner 法示意图

Fig. 2 Wenner method for determining soil resistance

2) 二相电极法。二相电极法示意图如图 3 所示。可分为两大类:第一类是土样电阻  $R$  是用两相电极法测得,再由公式  $\rho = RS/l$  求出。其中: $\rho$  为土样电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $R$  为土样电阻,  $\Omega$ ;  $S$  为电流通过土样的横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $l$  为电极片距离,  $\text{m}$ 。另外一类用高阻抗电压表测得土样两端电位差,回路电流强度用电流表测得,再由公式  $\rho = (\Delta U \cdot S)/(I \cdot l)$  计算获得土样电阻率。式中: $\rho$  为土样电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $\Delta U$  为电位差,  $\text{V}$ ;  $I$  为电流强度,  $\text{A}$ ;  $S$  为电流通过土样的横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $l$  为电极片距离,  $\text{m}$ 。

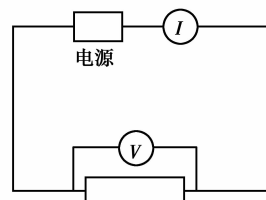


图 3 二相电极法示意图

Fig. 3 Two electrodes method for determining soil resistance

## 2 试验准备及方法

### 2.1 测试仪器

试验在改装过的一维固结仪(WG-2A型双联固结仪)下进行,环刀采用自制高强度树脂绝缘环刀;打了小孔的透水石;分析天平;电阻测试采用 Precision LCR Meter(LCR-800)电阻测试仪,用两相电极法测得土样电阻  $R$ ,由公式  $\rho=RS/l$  求得土样电阻;标准养护箱。

### 2.2 试验材料

试验所用土为温州地区软黏土,Cu<sup>2+</sup>采用分析纯的 CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 晶体,高纯水和普通水泥。

### 2.3 试验方法

1)试验准备。首先改装固结仪,将原有的不锈钢护环进行绝缘处理,用绝缘环刀代替不锈钢环刀,绝缘上盖代替原不锈钢上盖。再制作数片圆形薄铜片,使其直径与环刀内径一致;最后,在透水石上钻孔,方便测试电阻的导线与试样上的金属片接触。

2)试验开始。最先进行的是常规试验,根据土工试验规范对土样进行基本测试,测出其基本物理指标。然后进行试样的制备。配置不同含量 Cu<sup>2+</sup> 的土样,称量 CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 晶体,置于烧杯中,缓缓倒入高纯水,并持续搅拌,配置样本污染液,以每千克土样中所含不同 Cu<sup>2+</sup> 的量作为梯度浓度,分别为 3、6、9、12 g/kg。对土样进行烘干磨细,称量后缓慢倒入托盘内,缓慢倒入溶液进行充分搅拌后,击实制成环刀样(先用不锈钢环刀制样,制样前内壁涂上凡士林,然后再平稳地转移到绝缘环刀内)。环刀两侧附上铜片,放置改装的固结仪上进行电阻测试。



图4 固结仪上土电阻率测试示意图

Fig. 4 Electrical resistivity measurement with modified oedometer consolidation cell

采用上述制样方法,制定相应的实验方案控制变量,如表1所示。

表1 实验方案

Table 1 Experiment of different conditions

含水量/ %	离子浓度/ (g·kg <sup>-1</sup> )	水泥掺入量/ %	养护时间/d
30	3	0	0
30	6	0	0
30	9	0	0
30	12	0	0
30	3	0	0
35	3	0	0
40	3	0	0
50	3	0	0
40	12	5	0
40	12	10	0
40	12	20	0
40	12	30	0
40	12	35	0
40	12	10	0
40	12	10	7
40	12	10	14

## 3 试验结果与分析

土体基本物理力学性质指标:天然含水量为 70.34%,密度为 1.870 g/cm<sup>3</sup>,比重为 2.71,液限为 58%,塑限为 26%。

### 3.1 Cu<sup>2+</sup> 浓度

含水量 30%时,不同的离子浓度下电阻率试验结果见图5、图6。

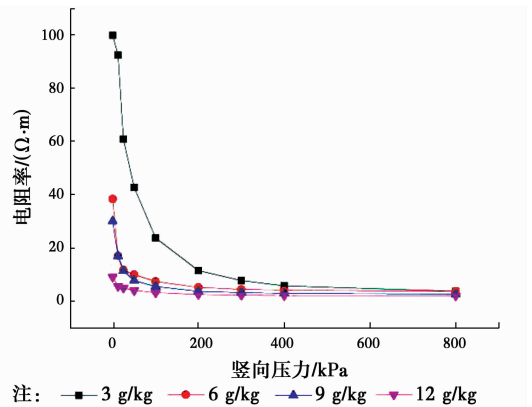


图5 不同浓度 Cu<sup>2+</sup> 污染土电阻率试验结果

Fig. 5 Electrical resistivity test results of contaminated soils with different Cu<sup>2+</sup> concentration

图5、图6所示为含水量较小时,不同 Cu<sup>2+</sup> 浓度的污染土在一维压缩固结过程中测得的电阻率结果。由图可见:初始孔隙较大时,电阻率值的变化较

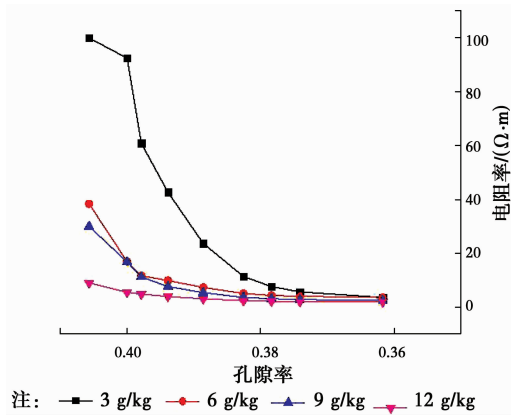


图 6 不同孔隙率污染土电阻率试验结果

Fig. 6 Electrical resistivity test results of contaminated soils with different porosity

为明显,当孔隙比减少到 0.6 左右时,电阻率变化值趋于平缓,由于电阻率值变化不明显,此时,不宜再用电阻率法来表征土体性质;  $\text{Cu}^{2+}$  浓度较高时的电阻率值变化较低浓度时小很多,此时也不宜用电阻率法来表征土体性质的变化。

### 3.2 含水量

$\text{Cu}^{2+}$  浓度为 3 g/kg 时,不同含水量下的电阻率试验结果见如图 7。

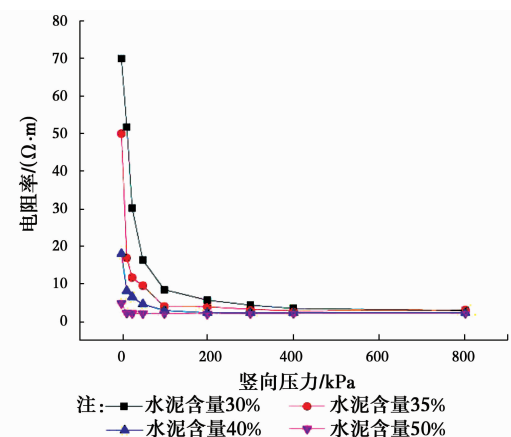


图 7 污染土不同含水量电阻率试验结果

Fig. 7 Electrical resistivity test results of contaminated soils with different water content

图 7 所示为土中  $\text{Cu}^{2+}$  浓度为一定时,随含水量变化测得的电阻率在一维压缩过程中的结果。由图可知:电阻率值在含水量较低时变化很明显,当含水量到达 50% 左右,其值变化很小,可见,当含水量较大时,电阻率法用来评估土体性质改变的区分度降低,不宜采用。

### 3.3 水泥掺入量

含水量 40%,  $\text{Cu}^{2+}$  浓度 12 g/kg 时,不同的水泥掺入量下土样电阻率试验结果见图 8。

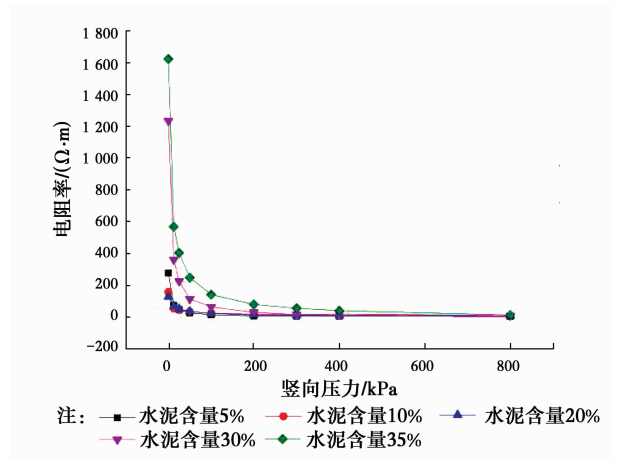


图 8 污染土不同水泥含量电阻率试验结果

Fig. 8 Electrical resistivity test results of contaminated soils with different cement content

图 8 所示为土体  $\text{Cu}^{2+}$  浓度、含水量为固定值,水泥掺入量分别为 5%、10%、20%、30%、35% 情况下,在一维压缩固结过程中测得的电阻率结果。由图可知:水泥含量增加到 30% 左右时,电阻率的值会有一个突增,随着固结的进行,其变化值较大。可见,该土体中水泥掺入量较多时,电阻率法可以很好的反映土体的性质的改变。

### 3.4 养护龄期

同一含水量 40%,离子浓度 12 g/kg,水泥掺入量为 10%,不同养护时间下电阻率试验结果见图 9。

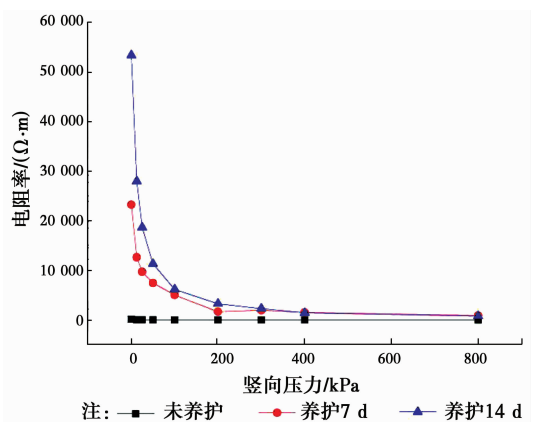


图 9 水泥污染土不同龄期电阻率试验结果

Fig. 9 Electrical resistivity test results of contaminated soil-cement with different curing time

图 9 所示为土体在  $\text{Cu}^{2+}$  浓度、含水量、水泥掺入量一定的情况下,将土体分别养护不同时间,分别在一维固结压缩过程中测得的电阻率值。由图可知,进行养护后,水泥污染土的电阻率有很明显的增高;养护越久,水泥污染土电阻率越大;未养护土体的电阻率与养护后的相比微乎其微,可以推测出,在

Cu<sup>2+</sup>影响下的温州软黏土与水泥土之间有着微观上的改变,使得土体电阻率增大太多,故没有对养护28 d后的土样进行分析比较。

### 3.5 综合分析

如图7和图8所示,在土体中加入一定量水泥亦或养护后,Cu<sup>2+</sup>污染土体的电阻率有很大幅度升高。由此,有以下几点分析:1)测试时,薄铜片与土体表面没有很好地接触,只接触了一部分,实际接触面积较小,但通过计算公式 $P=RS/l$ 算出的电阻率比实际值偏大;2)试验控制含水量为变量,重塑土样,土体未达到饱和状态,Archie提出的适用于饱和和无粘性土的电阻率模型在此处不适用;3)掺入水泥比值增大的同时,水泥水化的程度变高,水泥土与粘土的反应增强,水化形成硅酸钙胶体增多;随着水泥量的增加,水泥水化产物充填粘土颗粒间的空隙程度也随之增大,致使结构密实,因而导致了导电性降低,电阻率升高;4)未养护过的土样电阻率值比养护过的小很多,可能是因为所掺水泥初期阶段反应不完全,但随着时间的推移,水泥土的反应充分发展,形成的产物填充了孔隙,结构密实,导电性降低,电阻率升高;5)从矿物成分分析角度,水泥中硅酸三钙(3CaO·SiO<sub>2</sub>)水化反应生成氢氧化钙Ca(OH)<sub>2</sub>使得环境pH>7,形成氢氧化铜Cu(OH)<sub>2</sub>沉淀,降低了Cu<sup>2+</sup>对水泥水化的不利影响,该沉淀同时还会充填土体颗粒之间的间隙;另外,氢氧化钙和水中的二氧化碳发生反应生成碳酸钙沉淀导致空隙被填充,从而降低了Cu<sup>2+</sup>污染土的导电性,电阻率升高,生成的水化硅酸钙具有胶结包裹及吸附作用,较大的土团粒因此粘结起来,形成蜂窝状结构,并且封闭了空隙,使Cu<sup>2+</sup>无法流动,弱化了其影响,Cu<sup>2+</sup>的流动减少后,相对原污染土的导电性也大幅降低,电阻率大幅升高。

## 4 结论

1)孔隙率较小时,电阻率特性不明显,不能很好地评估土体特性的改变。

2)含水量和Cu<sup>2+</sup>浓度较高时,土体电阻率的变化区间减小,不宜采用电阻率法来表征土体的性质的改变。

3)加入水泥和养护之后,电阻率值突变综合分析表明:温州软黏土中Cu<sup>2+</sup>的流动性在水泥固化土中被抑制,水化反应越完全,土体中孔隙越小,导电性能降低,电阻率升高。

4)电阻率值可用于评估工程中土体重金属的污

染程度,反应水泥固化土体中重金属的效果。

### 参考文献:

- [1] 祝卫东. 温州软土与台州软土工程特性及其比较分析[D]. 杭州:浙江大学,2003.  
ZHU W D. Engineering properties and comparison analysis of Wenzhou soft clays and Taizhou soft clays [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)
- [2] LOKE M H, CHAMBERS J E, RUCKER D F, et al. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method [J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 95(8):135-156.
- [3] ARCHIE G E. The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. Well Logging Technology, 2007, 146(3):54-62.
- [4] CAI G H, DU Y J, LIU S Y, et al. Physical properties, electrical resistivity, and strength characterist [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52:150408143425002.
- [5] AHMED H A. Electrical resistivity method for water content characterization of unsaturated clay soil [D]. Durham:Durham University, 2014.
- [6] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 土的颗粒组成对电阻率的影响试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(3):71-74.  
ZHA F S, LIU S Y, DU Y J, et al. Effect of soil grain composition on soil electrical resistivity [J]. Industrial Construction, 2013, 43(3):71-74. (in Chinese)
- [7] 储亚, 查甫生, 刘松玉, 等. 基于电阻率法的膨胀土膨胀性评价研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1):157-164.  
CHU Y, ZHA F S, LIU S Y, et al. Evaluation of expansibility of expansive soil using resistivity method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1):157-164. (in Chinese)
- [8] 刘志彬, 方伟, 陈志龙, 等. 锌离子污染对膨润土一维压缩特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8):2211-2217.  
LIU Z B, FANG W, CHEN Z L, et al. Experimental study of influence of zinc ions on one-dimensional compressibility of bentonite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8):2211-2217. (in Chinese)
- [9] 曹智国, 章定文, 刘松玉. 固化铅污染土的干湿循环耐久性试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(12):3485-3490.  
CAO Z G, ZHANG D W, LIU S Y. Experimental research on durability of solidified lead-contaminated soils under wetting-drying cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12):3485-3490. (in Chinese)
- [10] 董晓强, 宋志伟, 张少华, 等. 水泥土搅拌桩芯样电阻

- 率特性的应用研究[J]. 土木工程学报, 2016(10): 88-94
- DONG X Q, SONG Z W, ZHANG S H, et al. Application study of electrical resistivity characteristics of core samples from soil-cement mixing piles [J]. Civil Engineering Journal, 2016(10):88-94. (in Chinese)
- [11] 宋志伟, 董晓强, 高宜涛, 等. 重金属锌污染砂的交流电阻率特性试验[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(5):60-65
- SONG Z W, DONG X Q, GAO Y T, et al. Experimental analysis of AC resistivity of zinc contaminated sand [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(5):60-65. (in Chinese)
- [12] DOOLITTLE J A, BREVIK E C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies [J]. Geoderma, 2014, 223/224/225:33-45.
- [13] 朱勇, 王振翀. 基于快速傅里叶变换直流分量的土壤电阻率测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 115-123.
- ZHU Y, WANG Z C. Measurement of resistivity based on FFT DC component [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1):115-123. (in Chinese)
- [14] KIBRIA G, HOSSAIN M S. Investigation of geotechnical parameters affecting electrical resistivity of compacted clays [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(12): 1520-1529.

(编辑 王秀玲)