

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.10.006

直流接地极入地电流对地电阻率观测的干扰研究

唐波¹, 吴卓¹, 周红², 孙睿¹, 江浩田¹, 刘任¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网七台河供电公司, 黑龙江 七台河 154600)

摘要: 随着特高压直流输电工程的建设, 直流输电系统对邻近地震台站的地震观测干扰日显突出。基于直流输电系统对地电阻率观测的干扰机理, 引入等值复镜像法, 建立了大尺度范围下 3 维复杂土壤电性模型, 推导了接地极入地电流在土壤任一点的电位计算公式。在 ± 800 kV 锦屏—苏南特高压直流输电工程带电调试期间, 进行了地电阻率观测台与野外观测点的联合地电阻率观测干扰实验。结果表明, 在线路与观测点的距离不超过 10 km 时, 提出的数学模型及其计算方法具有较高的精度, 其计算误差不超过 10.28%。

关键词: 特高压直流接地极; 入地电流; 地电阻率观测; 3 维复杂土壤模型; 等值复数镜像法; 干扰验证实验

Interference on Geoelectric Resistivity Observation from the Current of DC Grounding Electrode

TANG Bo¹, WU Zhuo¹, ZHOU Hong², SUN Rui¹, JIANG Haotian¹, LIU Ren¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China;

2. State Grid Qitaihe Power Supply Company, Heilongjiang Qitaihe 154600, China)

Abstract: The interference on geoelectric resistivity observation of seismic station from UHVDC power lines becomes increasingly prominent with growth of UHVDC transmission projects. According to the interference mechanism of DC transmission lines on geoelectric resistivity observation, the authors have established a 3-D combined-layer soil model to calculate the potential distribution of grounding current in soil. An equation for the potential distribution at any position is deduced by using the model and equivalent complex image method. Geoelectric resistivity observation experiments are conducted at both observatories and field observation points during the live debugging of ± 800 kV Jinping-Sunan UHVDC power line. Further analysis indicates that the obtained results by using the proposed model and equations are in good accordance with the experimental results, and the error is less than 10.28%, while the distance between DC power line and geoelectric resistivity observation of seismic station is no more than 10 km.

Key words: UHVDC power line; grounding current; geoelectric resistivity observation; 3-D complex soil model; equivalent complex image method; interference experiment of geoelectric resistivity observation

0 引言

具有远距离、大容量和调节灵活等输电特征的特高压直流输电网是构成中国坚强智能电网的坚实基础和核心环节^[1]。而同样遍布于各地的地震台站通过观测地球电磁参数的变化来预报地震活动^[2]。因此, 随着越来越多特高压直流工程建成投运, 不可避

免地会对线路周边地震观测产生一定的电磁影响。

地震观测的主要对象有地磁场、地电场及地电阻率^[3], 特高压直流线路对这 3 种观测均存在潜在干扰。当前, 国内外对直流输电系统对地磁场及地电场的观测干扰研究较为充分^[4-9]。如在地磁场观测干扰方面, 文[9]在大量研究基础上, 研制开发了特高压直流输电系统对地磁场的观测干扰校正系统; 在地电场观测干扰方面; 文[10]明确提出直直接地

收稿日期: 2016-04-10; 修回日期: 2016-06-08

基金项目: 国家电网公司科技项目(SG11008); 湖北省教育厅科学技术项目(Q20131302)。

Project Supported by Science-technology Project of State Grid Corporation (SG11008), Science-technology Project of Hubei Education Administration(Q20131302).

极入地电流是干扰地电场观测的决定性影响因子。而当前国内外关于直流线路对地电阻率观测干扰的研究成果较少;文[11]最早发现了直流线路对地电阻率观测工作产生的干扰现象;文[12]根据地电阻率观测仪器的工作原理,认为接地极入地电流改变了大地中土壤原始电位分布从而造成干扰,同时分别探讨了不同土壤分层时,接地极的形式对干扰的影响。因此,针对于具体直流系统干扰地电阻率观测问题,求解的关键在于土壤电性模型及其相应算法。

引入大尺度范围下土壤复杂建模的思想,文中将土壤模型变为3维复杂分层结构,推导了无穷阶级数构成的多层复杂土壤结构格林函数,提出了接地极入地电流对任意多层3维复杂土壤中的地电阻率观测干扰求解模型及公式。在 ± 800 kV 锦屏—苏南特高压直流输电工程带电调试期间进行了地电阻率观测的干扰实验,验证了地电阻率干扰水平计算的正确性。

1 直流系统对地电阻率观测的干扰

1.1 地电阻率及其观测原理

地电阻率是表征土壤地电特性的重要指标,用于在地震预测中定点观测测区下方介质电阻率随时间的变化。

地电阻率观测的基本原理是^[2]:在测量介质的表面或内部布置4个电极,其中2个电极与供电电源两端相连,用于在介质表面或内部产生稳定的电场分布;另外2个电极与测量电位差的专用仪器两端连接,通过连续测量这2个电极之间的电位差,再经过计算,可得到介质的地电阻率。地电阻率电极布置方式见图1,图1中: E 为供电电源; S 为开关; A 、 B 是供电电极; M 、 N 是测量电极。中国地电阻率观测仪器的供电电极间距多为1~2 km,观测电极间距为300 m左右。地电阻率 ρ_s 的计算公式为

$$\rho_s = \frac{\Delta U}{I} \frac{2\pi}{K} \quad (1)$$

式(1)中: I 是经过 A 、 B 两供电电极向地下提供的电流; ΔU 是电入地电流 I 在电极 M 、 N 之间产生的附加电位差,也称人工电位差,单位为V; K 是长度量纲的装置系数,其大小与4个电极的布置方式有关, K 的计算式为

$$K = \frac{1/(2\pi)}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM}} \quad (2)$$

式(2)中: AM 、 AN 、 BN 、 BM 分别为相应电极间的距离,m。

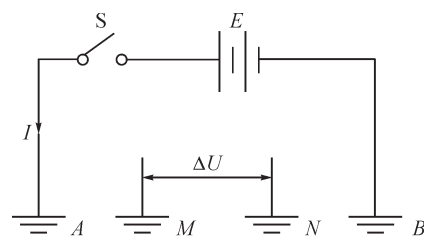


图1 地电阻率观测原理示意图

Fig. 1 Mechanism of the geoelectric resistivity observation

国家标准^[13]规定,非工频人工电磁源在地电阻率观测电极间产生的附加电压 U_d 应不大于45 μ V。

1.2 直流线路对地电阻率观测的干扰机理

文[10]认为直流输电系统影响地电阻率观测的根源主要是直流线路接地极入地电流,而合成场的干扰影响则可以忽略。从地电阻率观测仪器的工作原理及计算公式也可以看出,仪器测量值实际上是土壤的自然电位与接地极入地电流在观测电极上产生的附加电位的矢量和^[10,12]。因此,只要解出接地极入地电流在观测电极之间的土壤电位分布,即可计算出直流线路对地电阻率观测的干扰水平。

2 直流线路对地电阻率干扰的三维计算模型

2.1 土壤电位求解的数学模型

目前,直流接地极入地电流在土壤中电位分布的关键是求解土壤模型对应的格林函数^[14-15]。由于等值复镜像法具有镜像点少、求解快、计算精度较高的特点,因此比较适用于复杂土壤结构格林函数的求解。

对于距离接地极数千米乃至上百千米的大尺度范围内土壤结构是极不均匀的,特别是在介质分层明显的广域空间上,土壤结构表现出很强的复合分层特点^[16]。因此,需要选择合理的土壤模型来研究直流输电系统对地电阻率观测的干扰水平。

中国特高压直流接地极一般采用同心双圆浅埋水平布置,如 ± 800 kV 锦屏—苏南特高压直流工程接地极埋深为3.5 m,而地电阻率观测仪器埋深一般为1.5 m,因此在广域空间范围内应考虑对模型进行水平分层,且接地极和观测电极应位于同一水平层。但考虑到大地表面的地质条件(如湖泊、田园、岩石等)较为复杂,所以还要考虑土壤的垂直分层。由于3维复合分层土壤模型存在运算速度慢、计算量大的问题^[16],因此文中只对水平第1层土壤进行垂直分层。

2.2 复合土壤模型下的电位计算

数学模型见图2。将图2中的土壤模型沿垂直方向水平分为 m 层,每一层对应的厚度及地电阻率分别为 h_1 、 h_2 、 $\dots$ 、 $h_{(m-1)}$ 、 h_m 和 ρ_{z1} 、 ρ_{z2} 、 $\dots$ 、 $\rho_{z(m-1)}$ 、 ρ_{zm} ,并且

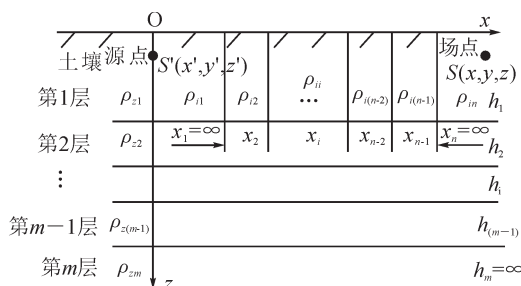


图 2 入地电流对地电阻率观测干扰的数学模型

Fig. 2 Soil model for interference research on geoelectric resistivity observation from grounding current

$H_m = \infty$; 将水平第一层沿垂直方向分为 n 层, 每一层对应的宽度和地电阻率分别为 $x_1, x_2, \dots, x_{(n-1)}, x_n$ 和 $\rho_{x1}, \rho_{x2}, \dots, \rho_{x(n-1)}, \rho_{xn}$, 且 $x_1 = x_n = \infty$ 。将位于电阻率为 ρ_{ii} 的接地极入地电流视为点电流源 $S'(x', y', z')$; 同理, 将地电阻率观测仪器的测量电极视为场点 $S(x, y, z)$, 且可位于电阻率 ρ_{xn} 的任意块中。

由文中 2.1 可知, 只要求出土壤模型对应的格林函数, 便可得到土壤中的电位分布。当场点与源点均位于水平第一层, 且该层是无限大均匀土壤, 则该模型在直角坐标系下的格林函数^[17-18]为

$$G_{z11}(x, y, z) = \frac{\rho_{x1}}{4\pi} \left[\frac{1}{r_0} + \sum_{i=1}^{m_i} a_{zi} \left(\sum_{j=1}^{n_i} \frac{k_{zj}}{r_{zij}} + \sum_{k=1}^{l_i} \frac{p_{zk}}{r_{zik}} \right) \right]. \quad (3)$$

式(3)中: $r_0 = [(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{0.5}$; $r'_0 = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+z_0)^2]^{0.5}$; $r_{zij} = [(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-c_{zj}-b_{zi})^2]^{0.5}$; $r_{zik} = [(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-c_{zk}+b_{zi})^2]^{0.5}$; r_0 表示场点与源点的距离; r_{zij}, r_{zik} 表示场点与镜像点之间的距离; $c_{zi}+b_{zi}, c_{zk}-b_{zi}$ 为镜像点 Z 轴方向坐标; $a_{zi}k_{zj}, a_{zi}p_{zk}$ 为镜像系数; $m_i n_i + m_i l_i$ 为总镜像数。

同理, 可求源点和场点位于不同土壤层时的格林函数 $G_{zjn}(x, y, z)$, 下标 j 和 n 分别表示源点和场点所在的层数。

当土壤只进行垂直分层, 且场点与源点均位于水平第 1 层时, 则该模型在直角坐标系下的格林函数为

$$G_{x11}(x, y, z) = \frac{\rho_{x1}}{4\pi} \left[\frac{1}{r_0} + \sum_{i=1}^{m_i} a_{xi} \left(\sum_{j=1}^{n_i} \frac{k_{xij}}{r_{xij}} + \sum_{k=1}^{l_i} \frac{p_{xik}}{r_{xik}} \right) \right]. \quad (4)$$

式(4)中: 每个符号的物理意义与式(3)相同。

实际上, 进行土壤垂直分层时不能忽略地面的影响, 此时式(4)需要添加源点的镜像作用, 即分别将式(3)中的 x_0 替换为 $-x_0$ 。

由式(4)可知, 在沿 x 轴方向进行垂直分层的土壤模型中, 镜像点坐标在 y 和 z 轴方向不变化, 只在 x 轴方向变化, 这可以想象为在 x 轴方向匹配有几

个镜像点。在上述镜像点的共同作用下, 沿 x 轴方向的土壤界面的边界条件可以满足, 从而可将该层视为电阻率为 ρ_{ii} 的均匀土壤, 此时得到的便是水平分层模型; 同理, 为了满足沿轴方向边界条件, 结合式(3), 将这些镜像点沿 z 轴方向再次镜像。在所有镜像点的作用下, 便得到图 2 中复合分层土壤模型对应的格林函数为

$$\Psi_{z11}(x, y, z) = \frac{\rho_{x1}}{4\pi} \left\{ G_{11}(z_0) + \sum_{i=1}^{m_i} a_{zi} \left[\sum_{j=1}^{n_i} k_{zj} G_{11}(x, y, z - c_{zj} - b_{zi}) + \sum_{k=1}^{l_i} k_{zk} G_{11}(x, y, z - c_{zk} + b_{zi}) \right] \right\}. \quad (5)$$

3 特高压直流系统对地电阻率观测的干扰实验

3.1 实验概述

为了验证文中提出的数学模型和选取的计算方法, 在 2012 年 11 月 25 日到 11 月 28 日, ± 800 kV 锦屏—苏南特高压直流输电工程全功率、全电压带电调试期间, 采用地震观测台站与野外观测点结合观测的方式, 监测了特高压直流输电线路对地电阻率观测的干扰水平。

在锦—苏线沿线范围内, 选择邻近于线路的南京地震观测台站、海安地震观测台站及广福村野外观测点 A 联合进行地电阻率连续观测, 线路与各观测点的相对位置见图 3。为节省篇幅, 文中只选取 11 月 26 日的部分观测数据, 用于线路后续研究。为避免其他直流线路干扰源对实验的影响, 野外观测点应依据实验现场的条件, 并结合地电阻率野外测量标准^[19]确定。根据观测点和线路的 GPS 经纬度坐标^[20], 计算得到接地极与各观测点的实际距离, 见表 1。



图 3 锦—苏线与实验监测点的相对位置

Fig. 3 Relative position of experiment monitoring point and Jin-Su UHVDC power line

表 1 各点的地理信息
Table 1 Geographic information of each site in the experiment

观测点和换流站	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m
裕隆换流站	102.607	27.904	2 668
同里换流站	120.462	30.828	24
南京地震台 (距接地极 148 237 m)	119.017	31.317	30
海安地震台 (距接地极 186 247 m)	120.659	32.499	24
野外观测点 A (距接地极 3 000 m)	120.494	30.893	2

3.2 入地电流的观测数据

在进行地电阻率观测的同时,在同里换流站记录了锦—苏线带电调试过程中的部分入地电流变化数据。为消除人工误差及保持数据的一致性,两者均按照北京标准时间进行记录。

由于入地电流数据采集点不同,且调试期间的电流数据无法全程自动记录,同时数据的读取存在滞后效应,因此获得电流数据并不连续,只能在获取多个离散时间节点的电流数据进行分析。在 2012 年 11 月 26 日从 07:02:57 到 21:02:57 期间,共记录电流数据 380 个,得到线路不平衡电流值。将 380 个电流数据绘点成线,见图 4,电流数据的精度为 1 A。

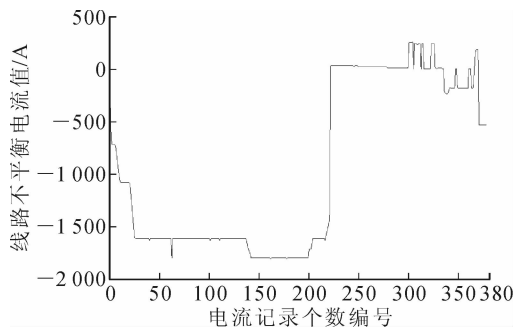


图 4 接地极入地电流变化曲线

Fig. 4 Curves of measured value of geoelectric resistivity of imbalance current on UHVDC power line

4 实验数据与计算值的比较分析

4.1 用于理论计算的土壤模型

以锦—苏线同里换流站接地极为坐标原点,通过表 1 的 GPS 定位坐标计算得到^[20],野外观测点 A 与海安台距离原点分别为 7.83 km 和 186.247 km。同时,借助 Google Earth 可以看到,海安台与接地极之间的地理条件十分复杂(如江河、田园、岩石等),其电阻率值相差较大,因此不能简单地将土壤在广

域空间上假定为无限大均匀结构,应该考虑土壤的多分层情形。

结合 2.1 节中提出的数学模型以及同里换流站接地极所处极址周边的土壤资料,可粗略地将模型在水平方向上分为 4 层:顶层土壤的电阻率为 $\rho_{x1}=45.5 \Omega \cdot \text{m}$,厚度 $h_1=4 \text{ m}$;第 2 层土壤的电阻率为 $\rho_{x2}=583 \Omega \cdot \text{m}$,厚度 $h_2=12 \text{ m}$;第 3 层土壤的电阻率为 $\rho_{x3}=16 \Omega \cdot \text{m}$,厚度 $h_3=33 \text{ m}$;第 4 层土壤的电阻率为 $\rho_{x4}=109 \Omega \cdot \text{m}$,厚度 $h_4=\infty$ 。

由于接地极与观测点之间的距离超过数百千米,且两者之间地形十分复杂,不可能完全按照实际土壤结构进行精确的垂直分层,再结合 Google Earth 显示的地形地貌和实验时周边地质情况的大概观测,可粗略确定模型垂直分层的边界线。考虑到计算量及地质情况非常复杂等问题,拟定将模型的水平第 1 层在垂直方向上分为 5 层,第 1 层的地电阻率 $\rho_{x1}=45.5 \Omega \cdot \text{m}$,宽度 $x_1=\infty$;第 2 层的土壤电阻率为 $\rho_{x2}=25 \Omega \cdot \text{m}$,宽度为 $x_2=8 \text{ km}$;第 3 层土壤电阻率 $\rho_{x3}=373 \Omega \cdot \text{m}$,宽度为 $x_3=110 \text{ km}$;第 4 层的土壤电阻率为 $\rho_{x4}=36 \Omega \cdot \text{m}$,宽度为 $x_4=60 \text{ km}$;第 5 层的土壤电阻率为 $\rho_{x5}=14.3 \Omega \cdot \text{m}$,宽度 $x_5=\infty$ 。

4.2 实验观测值与计算值对比分析

实验采用 ZD8BI 地电阻率仪进行观测,该仪器测量数据采样率为 1 次/h。采用文中 2.2 的电位计算方法和 4.1 用于理论计算的土壤电性模型,可以求解出直流接地极入地电流在观测电极处产生的附加干扰电位。

以广福村野外观测点 A 处观测值为例,其实验观测数据与理论计算值对比见图 5。图 5(a)是野外观测点 A 从 07:02:57 到 21:02:57 期间的电位观测值,图 5(b)是入地电流在地电阻率观测点处对应的电位干扰计算值。由于入地电流记录间隔时间并不相等,因此不能和图 5(a)的横轴(表示时间)相对应进行观察。但结合图 4 可看出,计算的电位干扰水平与观测得到的电位干扰曲线突变一致。

从图 5 明显看出,在野外观测点 A 处的电位计算值和实验观测值都远大于附加电位允许限值 45 mV,说明了直流接地极入地电流确实对地电阻率的观测产生了干扰影响。

同时,结合图 4、5 可知,计算得到的干扰电位计算值曲线变化趋势与对应的实验观测值曲线变化趋势保持一致,其几次突变也保持一致。此外,在入地电流突变的时刻,其电位观测数据曲线也相应地发生突变,且突变的电位观测数值和入地电流产生的电位干扰数值在误差范围内基本相同,这从时

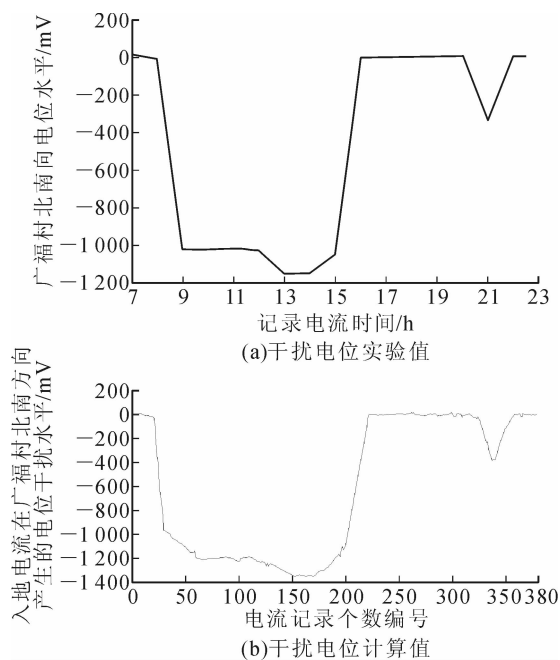


图 5 观测点干扰电位实验值和计算值变化曲线

Fig. 5 Curves of observed value of geoelectric resistivity and calculation value of the potential

间上也说明了直流输电系统接地极入地电流的变化会干扰地电阻率观测。

4.3 误差分析

从文中 4.2 可以看出, 电位干扰水平计算值与对应的实验观测值在变化趋势上保持一致, 并且变化趋势与电流记录时间也基本保持一致, 即都减小或都增大, 但数值大小存在差异。误差分析如下:

1) 观测误差。文中的各类实验数据都是通过仪器测量得到的, 而这些数据的误差会直接影响结果的分析。文中的实验仪器 ZD8BI 地电阻率仪的电流分辨力为 0.1 mA, 而入地电流的精度为 1 A; 另外, 目前民用 GPS 精度一般是 3~10 m, 而文中计算所需的 GPS 定位点近 400 个, 这种数量累积误差可能也会对计算结果有影响。

2) 模型误差。实验电极尺寸为 1 000 mm×1 000 mm×3 mm 的厚度均匀、纯度很高的铅板, 但在建立理论计算模型时将电极视为点电源, 因此与实际情况必然存在误差; 另外, 由于接地极与观测台的距离为 186.247 km, 两者之间的地形环境十分复杂, 因此计算条件下所建立的复杂土壤模型和土壤的分层情况也不可能与土壤实际情况完全一样, 必然存在较大误差。

3) 方法误差。实验中, 由于调试期间电流数据变化频率高, 只能选取稳定时的电流值进行记录。因此, 记录过程会持续数分钟, 在该时段内, 得到的地电阻率变化值实际上包含了接地极入地电流的干

扰变化和地电阻率自身的变化, 观测仪器不能予以精确分辨。

该次联合调试实验从 2012 年 11 月 25 日开始, 到 28 日结束线路调试, 其中 11 月 26 日是线路的带电调试日期。取锦—苏线带电调试日期野外观测点 A 北南向的电位数据进行分析, 见表 2, 差值百分比为电位观测值与计算值的差值绝对值除以观测值。

表 2 误差分析

Table 2 Error analysis

观测点	离线路的垂直距离/m	电位观测值与计算值的差值/mV			差值百分比/%		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
A	7 830	0.03	152.35	44.65	6.12	13.50	10.28

从表 2 可以看出, 当直流线路距离观测点的距离不超过 10 km 时, 提出的土壤电性数学模型计算结果和实验观测结果吻合度较好, 精度可达 10.28%。

5 结论

从以上分析可以得出:

1) 直流输电系统对地电阻率观测的干扰与接地极入地电流的大小之间有直接联系。当直流系统运行方式改变或发生故障时, 即使线路与观测台站相距数千米, 也会对台站产生一定的干扰。

2) 通过对比锦—苏线的干扰电位计算值和实验观测值, 认为在数十千米范围内, 提出的数学模型及其算法误差不超过 10.28%。

3) 由于准确模拟土壤实际情况的数学模型很难得到, 同时, 地电阻率也存在自身的非平稳变化, 当接地极与观测台站距离达数千米时, 通过理论计算得到干扰水平精确值较为困难。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2005.
- [2] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
XIE Guangrun. Power system grounding electrode technology[M]. Beijing: Water Conservancy Power Press, 1991.
- [3] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
HU Yuxian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Earthquake Press, 1988.

- [4] PIRJOLA R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(6): 1867-1873.
- [5] BOTELER D H, PIRJOLA R J. Nature of the geoelectric field associated with GIC in long conductors such as power systems, pipelines, and phone cables[C]//1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Proceedings. Beijing, China: 1997: 68-71.
- [6] TANG Bo, XIAO Zheng, ZHANG J, et al. Interference from UHVDC power line on geomagnetic observation and its correction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 1111-1119.
- [7] TREVOR R H, THOMAS J O. Power flow studies in the presence of geomagnetically induced currents[C]//Power and Energy Conference at Illinois. Champaign, USA: IEEE, 2012: 1-4.
- [8] 方 炜, 张国强, 邵辉成. 高压直流输电对地电场观测的影响[J]. 地震地质, 2010, 32(3): 434-441.
FANG Hui, ZHANG Guoqiang, SHAO Huicheng. Study on the impact of HVDC to geoelectric field observation[J]. Seismology and Geology, 2010, 32(3): 434-441.
- [9] 唐 波, 张建功, 孟遂民, 等. 直流输电线路对地磁场 Z 分量观测干扰校正[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 147-155.
TANG Bo, ZHANG Jiangong, MENG Suimin, et al. Correction of observation interference on Z component of geomagnetic field from DC power lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 147-155.
- [10] 唐 波, 张小武, 葛光祖, 等. 特高压直流输电线路与接地极对地电场观测的干扰[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 2951-2959.
TANG Bo, ZHANG Xiaowu, GE Guangzu, et al. Interference on geoelectric field observation from UHVDC power lines and its ground electrode[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2951-2959.
- [11] 金安忠, 李言竹, 李润贤, 等. 地电阻率观测中高压干扰场的研究[J]. 地震学报, 1990, 12(4): 428-433.
JIN Anzhong, LI Yanzhu, LI Runxian, et al. On a study of interference field of high voltage power lines in earth resistivity observation[J]. Acta Seismologica Sinica, 1990, 12(4): 428-433.
- [12] 唐 波, 瞿子航, 黄 颖, 等. 直流输电线路对地电阻率的观测干扰[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(4): 553-558.
TANG Bo, QU Zihang, HUANG Ying, et al. Interference on geoelectrical resistivity observation from DC power transmission line[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2014, 45(4): 553-558.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19531.2—2004 地震台站观测环境技术要求第 2 部分: 电磁观测[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
Standardization Administration of China. GB/T 19531.2—2004 Technical requirement for the observational environment of seismic stations-Part 2: Electromagnetic observation [S]. Beijing: Standard Press of China, 2004.
- [14] VILLAS E T, CARLOS M P. Calculation of electric field and potential distributions into soil and air media for a ground electrode of a HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 867-873.
- [15] 刘 曲, 李立涅, 郑健超. 复合土壤模型下 HVDC 系统单极大地运行时的电流分布[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 8-13.
LIU Qu, LI Licheng, ZHENG Jianchao. DC currents distribution in HVDC systems of monopolar operation with ground return in complex soil structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 8-13.
- [16] 孙结中, 刘 力. 运用等值复数镜像法求解复合分层土壤结构的格林函数[J]. 广西电力, 2003, 26(z1): 109-113.
SUN Jiezhong, LIU Li. Solution of Green function of multi-layer soil structure with equivalent complex image method [J]. Guangxi Electric Power, 2003, 26(z1): 109-113.
- [17] 郭 剑, 邹 军, 何金良, 等. 水平分层土壤中点电流源格林函数的递推算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 101-105.
GUO Jian, ZOU Jun, HE Jinliang, et al. Recursive method to obtain analytic expressions of Green's functions in multi-layer soil by computer[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24(7): 101-105.
- [18] 李文峰, 杨洪耕, 徐方维. 3 维复合分层土壤模型下竖直分层土壤对地表电位影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(5): 161-167.
LI Wenfeng, YANG Honggeng, XU Fangwei. Effect of vertical soil layer on earth surface potential under three-dimensional combined-layer soil model[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(5): 161-167.
- [19] 中国地震局. 地震及前兆数字观测技术规范[Z]. 北京: 地震出版社, 2001.
China earthquake administration. Digital observation technology standard of earthquake and precursors[Z]. Beijing: Seismological Press, 2001.
- [20] 胡伟凡, 杨恢先, 于 洪, 等. 基于高斯投影的经纬度距离参数修正方法[J]. 计算机工程, 2010, 36(2): 244-246.
HU Weifan, YANG Huixian, YU Hong, et al. Latitude and longitude distance parameter correction method based on gauss projection[J]. Computer Engineering, 2010, 36(2): 244-246.

唐 波(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事输变电系统电磁环境与超特高压输电技术研究。