

郭宇鑫, 赵卫红, 李玉, 等. 入地电流干扰地电场观测的仿真模拟[J]. 华南地震, 2021, 41(1): 60-64. [GUO Yuxin, ZHAO Weihong, LI Yu, et al. Simulation of the Interference of Grounding Current on Geoelectric Field Observation[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(1): 60-64]

入地电流干扰地电场观测的仿真模拟

郭宇鑫, 赵卫红, 李 玉, 张 骞, 高熹微

(江苏省高邮地震台, 江苏 高邮 225600)

摘要: 高压直流输电经接地极产生高值入地电流, 干扰台站地电场观测。分析了入地电流对大地电场造成的影响, 并对接地极电流场的计算方法进行了推导。应用有限元方法, 通过 ANSYS 软件的 workbench 平台, 建立地层模型, 模拟求解接地极产生电场的分布, 分析了入地电流、土壤电阻率和地理单元的影响作用, 为地电台站防护距离的确定提供了参考。

关键词: 直流感地极; 高压直流输电; 地电场观测; ANSYS

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2021)01-0060-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.01.08

Simulation of the Interference of Grounding Current on Geoelectric Field Observation

GUO Yuxin, ZHAO Weihong, LI Yu, ZHANG Qian, GAO Xiwei

(Gaoyou Seismological Station in Jiangsu, Gaoyou 225600, China)

Abstract: High value grounding current is generated by HVDC transmission through grounding electrode, which interferes with the observation of geoelectric field. The paper analyzes the influence of the grounding current on the earth electric field, and deduces the calculation method of the grounding electrode current field. The article establishes a stratum model, simulates and solves the distribution of the electric field generated by the grounding electrode, analyzes the influence of the grounding current, the soil resistivity and the geographic unit, which provides a reference for the determination of the protection distance of the geoelectric station.

Keywords: Grounding electrode; HVDC; Geoelectric field observation; ANSYS

0 引言

我国建设诸多地震观测台站, 承担着预报和监测地震活动的重要任务, 地电场作为重要的地

球物理场, 是台站日常观测的重点内容之一, 为地震预报提供重要的数据支撑。随着我国高压直流输电的使用、维护和建设, 输电线路正在严重干扰全国台站的地电场观测^[1]。

收稿日期: 2020-10-10

基金项目: 江苏省地震局青年科学基金项目(201911)

作者简介: 郭宇鑫(1992-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事地震监测预报工作。

E-mail: 961513753@qq.com

罗词建等学者^[2]针对我国不同台站受到干扰的情况进行了分析,可以看出高压直流对各台站地电场观测产生的干扰是复杂的,在这种情况下,尚未有针对地电台站防护距离的国家标准。从多位学者的研究^[3-4]可以看出,高压直流输电对地电场观测的干扰主要来自接地极入地电流,为了从各台站复杂的干扰中抽象出与入地电流有关规律,常采用模型计算的思路,主要分为无限大均匀地层及半球形接地体模型、水平分层及垂直分层地层模型,需要涉及大量的数学计算。

本文运用 ANSYS 内置的 workbench 平台进行仿真模拟,可以快速的建立所需要的地层模型,该模型充分考虑地层分层,仿真计算得出附加电场的值,直观地获得入地电流干扰地电场的分布情况,为地电场防护距离的相关研究提供理论依据。

1 入地电流干扰地电场观测的相关原理

1.1 地电场观测的原理

地电场是分布于地球表层的电场,来源于固体地球内部和外部的各种非人工电流系统与地球介质相互作用。为了观测这一矢量,台站布设地电场观测仪器,以 ZD9A-II 型为例,其工作原理为:将仪器电极所处位置的地电场强度 E_0 矢量分解为东西向地电场强度 E_{ew} 和南北向地电场强度 E_{ns} ,其中

$$E_0 = \sqrt{E_{ew}^2 + E_{ns}^2} \quad (1)$$

式(1)为地电场强度矢量分解的结果,在台站实际工作中,一般通过测量东西向地电场强度 E_{ew} 和南北向地电场强度 E_{ns} 来作为数据产出。具体算法为大地电场在电极之间产生的电位差 V 和电极间距 L 做商,方向以东和北为正方向。对某个地电台站来说,无论地电台站采用“多方向、多极距”布设方式中的任一种,通过数学计算后产出的地电数据可以视为台站所在位置的地电场实际情况。值得注意的是,在进行数公里小范围内的模拟仿真时,由于地下介质性质、土壤结构、场地环境等因素的存在,电极的布设方向或极距会影响地电场的观测,本文仿真模拟时采用数百公里的计算范围,认为模型中某一点的电场强度基本不受电极布设方式和极距的影响。

1.2 接地电流和地电场方程

直流输电系统的运行方式包括两极直接构成

回路、单极或双极以大地或金属为回路等^[5],我国国内的输电线路主要采用双极两端中性点接地的方式,当线路调试或者部分组件出现故障时,会产生较大的不平衡电流^[6],数千安的电流以大地为通道,此时类似于单极大地回线方式,会在大地产生恒定的附加电场,这种附加电场被接地极一定范围内的台站地电场仪器记录,即为入地电流对地电场观测的干扰。

根据电动力学的有关理论,在一个包含接地极和周围土壤的模型中,接地极所位于的区域包含电流源,其场方程为($\delta(x)$ 为狄拉克函数):

$$\Delta^2 V = I \delta(x) \quad (2)$$

其他区域不包含接地电流源,其场方程为:

$$\Delta^2 V = 0 \quad (3)$$

空气处的边界条件为 (n 为外法线方向指向空气):

$$\frac{dV}{dn} = 0 \quad (4)$$

不同电阻率的区域之间的边界条件为 (a 和 b 为两种电阻率介质):

$$V_a = V_b \quad (5)$$

$$\frac{1}{p_a} \frac{dV_a}{dn} = \frac{1}{p_b} \frac{dV_b}{dn} \quad (6)$$

外边界的边界条件为:

$$V = 0 \quad (7)$$

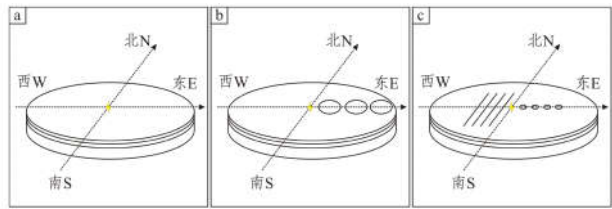
从上式(2)~(7)可以看出,模型计算的本质是计算不同边界条件约束下的场方程,计算的结果就是得到入地电流产生的附加电场在模型中的分布,处于模型中某一位置的台站就会记录到这个附加电场,记录方式一般是分解到南北方向和东西方向,形成地电仪器不同测道上的“干扰”。区别于镜像法等计算方法,基于有限元的分析方法可以借助 ANSYS 软件 workbench 平台,进行场方程的高精度计算,并且具有建模简单、结果清晰的优点。

2 入地电流干扰地电场观测的仿真

仿真模拟采用半径 400 km、厚度 10 km 的圆形地层模型(图 1a),考虑到入地电流干扰地电场观测时,与大区域介质电性结构非均匀性的影响程度密切相关,与区域内的地质构造条件有着极大的关系^[7],因此对模型进行水平分层,同时设计台址和河流湖泊的影响(图 1b,图 1c)。

模型的水平分层参考华东地区地层特点^[8-9],具体如表 1 所示。在模型中心点埋深 5 m 处加入

1000A~5000A 的电流激励条件，整个模型边界处电势设为 0。计算整个模型中埋深 3 m 处平面的电场强度分布情况，这是地电场观测中电极常用的埋深深度。



(a)水平地层模型;(b)台址仿真模型;(c)河流湖泊仿真模型
图 1 仿真所用模型

Fig.1 Model used in simulation

表 1 模型分层方案

Table 1 Model layering scheme

层深/km	地层电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)
0.2	30
2	500
10	10 000

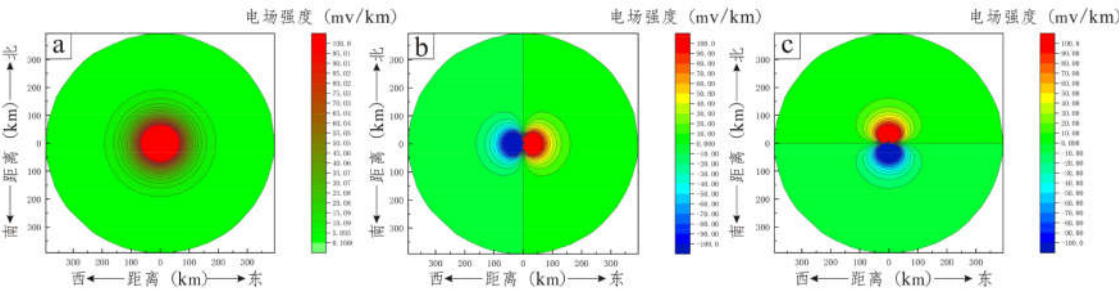
3 仿真结果

3.1 水平地层模型

根据表 1 的分层方案，当入地电流设为 3000 A 时，附加电场强度在平面上的分布如图 2a 所示，

可以看出附加电场强度从接地极向外逐渐减小。将图 2a 所示的附加电场分解为东西向地电场强度(图 2b)和南北向地电场强度(图 2c)，可以看出，由于东和北为分量的正方向，因此接地极东边区域的台站在东西分量上将受到正值的干扰，接地极北边区域的台站在南北分量上将受到正值的干扰；接地极西边区域的台站在东西分量上将受到负值的干扰，接地极南边区域的台站在南北分量上将受到负值的干扰。

根据模拟仿真的设计思路，入地电流的大小和地下浅层介质是控制附加电场强度的决定性因素，在台站实际工作中，高压直流输电的入地电流和浅层土壤的电阻率都是可以获得的信息，基于此的仿真模拟将有助于对台站防护距离的判断。根据地震台站观测环境技术要求^[10]，0.5 mV/km 为地电场干扰值的上限，从仿真结果中可以得到这一干扰上限对应的防护距离。由于本模型中的入地电流向周围土壤中扩散，因此在图 2a 所示的仿真结果下，满足干扰上限要求的区域在平面上表现为一个半径为 303 km 的圆圈，即防护距离为 303 km，大于这个半径的圆圈外部区域将受到小于 0.5 mV/km 的干扰。这里值得注意的一点是，本文的仿真模拟均针对入地电流产生的总电场强度，是台站各测道记录到分量的合成，所采用的干扰上限 0.5 mV/km 同样是指附加地电场总强度，并非在东西方向或南北方向上分解的结果。



(a)附加电场强度分布;(b)电场强度东西分量分布;(c)电场强度南北分量分布
图 2 水平地层模型仿真结果

Fig.2 Simulation results of horizontal stratum model

将入地电流值分别设为 1000A、2000A、3000A、4000A 和 5000A，将大区域地下浅层介质(<0.2 km)的电阻率分别设置为 10 $\Omega\cdot\text{m}$ 、20 $\Omega\cdot\text{m}$ 、30 $\Omega\cdot\text{m}$ 、40 $\Omega\cdot\text{m}$ 和 50 $\Omega\cdot\text{m}$ ，仿真得到的防护距离如表 2 所示，可以看出随着入地电流的增大，干扰增强，防护距离相应的增加；随着地下浅层介质电阻率的增大，干扰减弱，防护距离相

应的减小。

3.2 台址的影响

水平地层模型中设置的是整个仿真范围内的地下介质电阻率，实际上台站测区范围内(台址)的地下浅层介质也会影响附加地电场的分布^[7]。为

模拟台址的影响作用,在水平地层模型中设置半径 25 km,深度 0.2 km 的圆柱体,代表台址地下浅层介质。如图 1b 所示,在接地极东边距离 100 km、200 km 和 300 km 处分别设置三处台址,大范围内的地下浅层介质电阻率为 $30\ \Omega\cdot\text{m}$,台址地下浅层介质电阻率分别为 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 和 $50\ \Omega\cdot\text{m}$,模拟结果如图 3 所示。

表 2 不同条件的防护距离仿真结果 (单位: km)
Table 2 Simulation results of protection distance under different conditions (unit: km)

浅层介质电阻率/ ($\Omega\cdot\text{m}$)	入地电流/A				
	1000	2000	3000	4000	5000
10	284	314	331	343	353
20	259	291	310	323	334
30	248	282	303	317	329
40	242	277	299	314	327
50	240	274	296	311	325

图 3 所示为在南 100 km—北 100 km、0 km—东 400 km 的范围做图。图 3a 为台址(图 3a 中黄色圆圈)地下浅层介质电阻率设为 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 的结果,可以看出附加电场强度的等值线向接地极方向弯曲,即台址区域的附加电场强度减小,具体变化如图 3c 所示,显示了低阻台址情况下和原始情况下的附加电场强度差值(低阻台址减去原始台址),可以看出低阻台址靠近入地电流的一侧出现了附加场的增强,而台址区域的附加场减小了约 25%。图 3b 为台址地下浅层介质电阻率设为 $50\ \Omega\cdot\text{m}$ 的结果,可以看出附加电场强度的等值线向接地极反向弯曲,即台址区域的附加电场强度增大,图 3d 显示了具体的结果,在高阻体台址靠近入地电流的一侧出现了附加场的减小,而台址区域的附加场增大约 7%。综合来看,在计算防护距离时,当台址地下浅层介质的电阻率相比于大区域地下浅层介质电阻率变化 $\pm 20\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,防护距离的改变在 25 km 以内,相比于 300 km 左右的防护距离,影响较小。

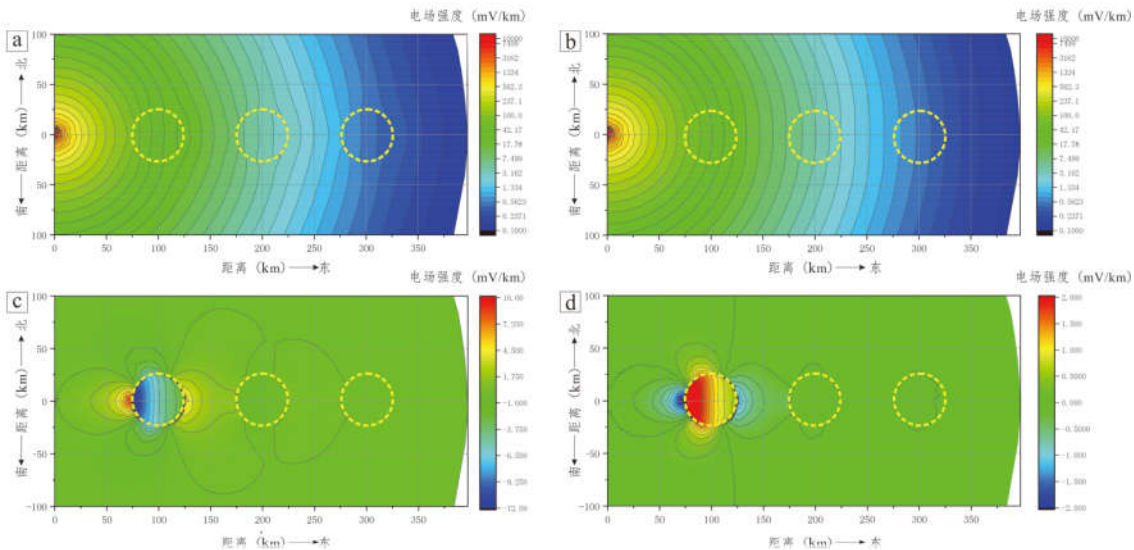


图 3 台址仿真结果

(a) $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 台址的影响; (b) $50\ \Omega\cdot\text{m}$ 台址的影响; (c) $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 台址的影响差值; (d) $50\ \Omega\cdot\text{m}$ 台址的影响差值

Fig.3 Simulation results of station sites

3.3 河流和湖泊的影响

当地震台站周围存在河流和湖泊时,会在一定程度上影响台站受到的干扰,其本质是因为水体具有不同的电阻率。图 1c 所示的为模拟仿真所用的模型,其中大范围内的地下浅层介质电阻率为 $30\ \Omega\cdot\text{m}$,在接地极东侧 50 km、100 km、150 km 和 200 km 处分别设置半径 1 km、深度 0.02 km 的圆柱体,其电阻率为 $10\ \Omega\cdot\text{m}$,代表湖泊;在接地极西侧 50 km、100 km、150 km 和 200 km 处分

别设置长度 50 km、宽度 0.1 km、深度 0.02 km 的长方体,其电阻率为 $10\ \Omega\cdot\text{m}$,代表河流。

图 4 所示为湖泊模拟结果,为便于计算,所用数据为有湖泊的附加电场强度减去无湖泊的附加电场强度。从图中可以看出,当湖泊距离入地电流 50 km 时,其周围的附加电场强度发生了变化:湖泊周围 15 km 以内的附加电场强度出现了增加,靠近湖泊处增加了约 0.5 mV/km,这种增加随着远离湖泊而消失;与入地点平行的东西两侧

15 km 以外处,出现了小范围的附加电场值下降,下降幅度约 0.1 mV/km。从 3.1 的模拟结果来看,入地电流在 50 km 距离处会产生 >100 mV/km 的附加电场值,因此这个距离处湖泊的存在引起变化是相对很小的。当湖泊距离入地点 100 km 后,产生的影响范围仅有数公里,且影响值 <0.1 mV/km,可以忽略不计。

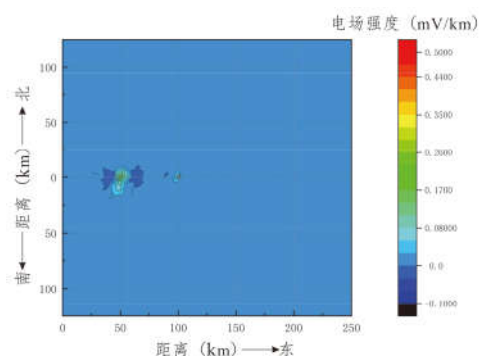


图 4 湖泊模拟仿真结果

Fig.4 Simulation results of lakes

图 5 所示为河流模拟结果,为便于计算,所用数据为有河流的附加电场强度减去无湖河流的附加电场强度。从图中可以看出,当河流距离入地电流 50 km 时,其周围的附加电场强度发生了变化:河流东西两侧的附加电场强度出现了增加,靠近河流处增加了约 0.6 mV/km,这种增加随着远离河流而消失,影响范围在 5 km 以内;5 km 以外出现了附加电场强度的降低,幅度约 0.1 mV/km,影响范围 <50 km。

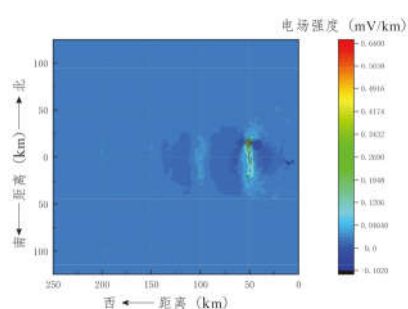


图 5 河流模拟仿真结果

Fig.5 Simulation results of rivers

4 结语

高压直流输电的接地极入地电流值是地电场观测干扰的决定性影响因素,随着距离的增大,干扰快速衰减。以 0.5 mV/km 作为电场强度干扰上限,240~353 km 为地电观测仪器的防护距离。

大范围地下浅层介质电阻率是影响干扰的主要因素,台址对干扰存在小于 25% 的影响。湖泊和河流对地电场受到的干扰影响幅度很小(<1 mV/km),影响范围分别为湖泊 15 km、河流 50 km 以内,且随着距离入地电流的距离增加,影响程度减小,当湖泊或河流距离入地电流 100 km 以上时,产生的影响可以忽略不计。

参考文献:

- [1] 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(03):434-441.
- [2] 罗词建,王秋宁,李媛媛,等. 高压直流输电对陕西地电场观测的影响[J]. 华北地震科学,2019,37(03):81-88.
- [3] 马成廉,刘连光,王乐天,等. 高压直流输电接地极地电位分布 ANSYS 仿真[J]. 电网与清洁能源,2017,33(04):19-26+33.
- [4] 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.
- [5] 马成廉,刘连光,闫旭东,等. 高压直流输电接地极电场相关问题研究[J]. 电网与清洁能源,2016,32(02):63-71.
- [6] 蒋延林,张秀霞,杨冬梅,等. 高压直流输电对地磁观测影响的特征分析[J]. 地震,2014,34(03):132-139.
- [7] 马钦忠,钱家栋,李伟,等. 源自多个大电流源的华东地区地电场空间变化特征[J]. 地球物理学报,2016,59(07):2598-2614.
- [8] 谢广润. 电力系统接地技术[M]. 北京:中国电力出版社,1991.
- [9] 滕吉文. 固体地球物理学概论[M]. 北京:地震出版社,2003.
- [10] 中国地震局. 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.