

张宇, 王兰炜, 赵家骝, 蒋延林, 胡哲, 张兴国, 王福才. 2017. 地电观测中电磁干扰源定位方法研究. 地震学报, 39(3): 367-373. doi:10.11939/jass.2017.03.006.

Zhang Y, Wang L W, Zhao J L, Jiang Y L, Hu Z, Zhang X G, Wang F C. 2017. Location method of electromagnetic interference sources in geo-electric field observation. *Acta Seismologica Sinica*, 39(3): 367-373. doi:10.11939/jass.2017.03.006.

地电观测中电磁干扰源定位方法研究^{*}

张 宇^{1,2)} 王兰炜^{1,2),*} 赵家骝³⁾ 蒋延林⁴⁾
胡 哲^{1,2)} 张兴国^{1,2)} 王福才⁴⁾

- 1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所
2) 中国北京 100085 北京市地震观测工程技术研究中心
3) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所
4) 中国江苏高邮 225601 高邮地震台

摘要 本文提出了一种地表偶极源干扰影响模型和动态枚举定位求解方法. 该方法基于均匀电流场和点源电流场模型, 由地表偶极源对不同测点的影响幅度和测点位置求解偶极源位置, 并给出了仿真计算结果. 利用该方法结合高邮地震台人工干扰源试验观测数据进行计算, 计算结果将干扰源定位于 30 m 范围内的小区域, 较好地验证了本文模型和定位求解方法的正确性. 该研究可为地电观测台站周边工农业漏电干扰源的定位和查找提供有效参考.

关键词 地电观测 漏电干扰 偶极源 定位 动态枚举

doi:10.11939/jass.2017.03.006 中图分类号: P315.72⁺2 文献标志码: A

Location method of electromagnetic interference sources in geo-electric field observation

Zhang Yu^{1,2)} Wang Lanwei^{1,2),*} Zhao Jialiu³⁾ Jiang Yanlin⁴⁾
Hu Zhe^{1,2)} Zhang Xingguo^{1,2)} Wang Fucai⁴⁾

- 1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China
2) Beijing Engineering Research Center of Earthquake Observation, Beijing 100085, China
3) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China
4) Gaoyou Seismic Station, Earthquake Administration of Jiangsu Province, Jiangsu
Gaoyou 225601, China

Abstract: This paper proposes a surface dipole interference model and a location method by dynamic enumeration. This location method adopts interference amplitude and location of different measuring electrodes to calculate location of the dipole source based on a uniform current field and a point source model. And then some simulation results are also presented. Furthermore, taking the

* 基金项目 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项(ZDJ2016-02)和国家自然科学基金(41374127)共同资助。

收稿日期 2016-08-08 收到初稿, 2016-11-15 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: wanglw829@126.com



test data of artificial interference sources experiment in Gaoyou seismic station as an example, the interference sources are located within 30 meters by this method, verifying the validity and feasibility of the model and the algorithm. The present research will provide an effective method for locating the leakage interference sources around geo-electric observation stations.

Key words: geo-electric field observation; leakage interference; dipole source; location; dynamic enumeration

引言

随着我国城镇化的发展,地震地电观测台站周边的工农业用电情况越来越复杂,而台站周边的工农业用电对地漏电会对地电观测造成干扰,这种干扰信号叠加在正常的地电场变化中,引起观测数据出现大幅扰动,严重时还会导致地电场观测日变形态畸变,地电阻率观测方差变大,进而影响到观测数据的质量和应用效能(林向东等,2007;马君钊等,2010;陈志刚等,2012)。

由于漏电干扰出现时间不固定,干扰源影响范围常达几千米,遇到此类干扰时多采取逐一排查的方式进行定位。蒋延林等(2015)主要以实地调查和重点走访的方式对高邮台出现的干扰源进行查找,并在供电部门的配合下采取有针对性的分片停电,最终确定干扰源位置。显然,这种方法耗时、费力,而且由于需要多个部门的协调、配合,较难实现。陈志刚(2012)等利用观测资料中各方向的干扰幅度对干扰源进行定向分析和距离推算,并且随后到现场进行排查后找到干扰源,但这一方法的计算结果与实际干扰源位置的偏差比较大。因此,亟需研究漏电干扰源的快速、准确定位方法,将地电观测受干扰的时间和影响降至最低,以保障观测数据质量。

针对以上问题,本文将建立地表偶极源对地电场观测影响模型,进而提出动态枚举定位求解算法,并利用该算法计算模拟干扰源位置;在此基础上,利用高邮地震台人工干扰源试验观测数据对该方法加以验证,以期为地电观测实践中查找漏电干扰源提供解决方法。

1 干扰源定位求解算法

1.1 基本原理

漏电干扰源定位求解算法的基本原理是将漏电干扰源视为地表偶极源,其在不同距离所产生的干扰幅度不同,通过测量两个点电荷在周围不同点位产生的电位差,反演计算偶极源位置坐标,此即为干扰源相对于测点的位置。

基于均匀电流场和点源电流场模型,假设偶极源产生的电场强度是均匀的,且处于电阻率均匀各向同性的无限介质中。图1给出了漏电干扰源与测量电极坐标的示意图,图中漏电干扰源为平面内电量相等的偶极源 Q 及 $-Q$,所产生的电场强度是均匀的, Q 和 $-Q$ 到地表任一测点 P_i 的距离分别为 r_{i+} 和 r_{i-} ,则偶极源在测点 P_i ($i=0, 1, 2, \dots, 5$) 产生的电位 U_i (李金铭,2005)为

$$U_i = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{i+}} - \frac{1}{r_{i-}} \right), \quad (1)$$

$$r_{i+} = \sqrt{(x_1 - x_{P_i})^2 + (y_1 - y_{P_i})^2}, \quad (2)$$

$$r_{i-} = \sqrt{(x_2 - x_{P_i})^2 + (y_2 - y_{P_i})^2}, \quad (3)$$

式中, (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别为 Q 和 $-Q$ 的坐标, (x_{P_i}, y_{P_i}) 为 P_i 的坐标, I 为漏电电流, ρ 为观测区域的电阻率, 均为常量. 令 $C = \rho I / (2\pi)$, 式(1)改写为

$$U_i = C \left(\frac{1}{r_{i+}} - \frac{1}{r_{i-}} \right). \quad (4)$$

计算测点 $P_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 与原点 P_0 之间的电位差 V_i 为

$$V_i = U_i - U_0, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (5)$$

将式(4)带入式(5), 将 $V_i (i=1, 2, 3, 4)$ 分别与 V_5 两两相除, 消除常量 C , 可得

$$K_i = \frac{V_i}{V_5} = \frac{U_i - U_0}{U_5 - U_0} = \frac{\left(\frac{1}{r_{i+}} - \frac{1}{r_{i-}} \right) - \left(\frac{1}{r_{0+}} - \frac{1}{r_{0-}} \right)}{\left(\frac{1}{r_{5+}} - \frac{1}{r_{5-}} \right) - \left(\frac{1}{r_{0+}} - \frac{1}{r_{0-}} \right)}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (6)$$

此即为比例系数.

在实际观测中, 由台站常规地电场观测数据可获得已知漏电干扰在各测点间产生的电位差 V_i , 从而可以计算出比例系数 K_i , 将式(2)和(3)代入式(6), 则式(6)中的未知数仅为 Q 和 $-Q$ 的位置坐标 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 这样求解干扰源位置的问题就转化为由 4 个独立的方程求解 4 个未知数. 理论上, 通过对式(6)求解可以给出漏电干扰源的位置, 但是由于该方程求解过程过于复杂, 本文采用动态枚举算法计算其数值解.

动态枚举算法的思路是: 首先, 确定枚举对象为偶极干扰源的位置坐标 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ; 其次, 确定枚举范围为以原点 O 为中心覆盖整个测区; 再次, 在测区内以一定步长(如 50 m)划分网格, 枚举值即为每个网格交叉点的位置坐标, 将位置坐标到各测量电极的距离代入式(6), 即可得到一组比例系数 K'_i , 利用

$$E = \sqrt{(K_1 - K'_1)^2 + (K_2 - K'_2)^2 + (K_3 - K'_3)^2 + (K_4 - K'_4)^2} \quad (7)$$

计算 K_i 与 K'_i 的误差系数 E . 通过动态枚举网格, 得到一系列误差系数, 取其最小值, 该误差系数所对应的坐标则最接近干扰源的实际位置.

1.2 干扰源定位模拟计算

为了验证干扰源定位算法的正确性和准确性, 模拟给出干扰源位置坐标 $Q(97, 149)$ 和 $-Q(131, 204)$. 假设其影响区域为以原点为中心的 1 km 范围, 则在该范围内划分网格. 为验证不同划分网格的计算精度, 将网格划分为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$, $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 和 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 共 3 种, 相应计算结果列于表 1. 可以看出, 当网格划分为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 时, 误差最小值为 0, 计算的干扰源位置坐标与模拟给出的定位位置重合.

为了验证该算法的可重复性, 模拟给出另一组干扰源位置坐标 $Q(1.5, 25)$ 和 $-Q(20, 32.5)$, 计算结果见表 2. 可见, 当划分网格与坐标精度一致, 均为 0.5 m 时, 能够准确定位偶极干扰源的位置. 因此, 模拟仿真计算结果验证了干扰源定位算法在理论上是可行的.

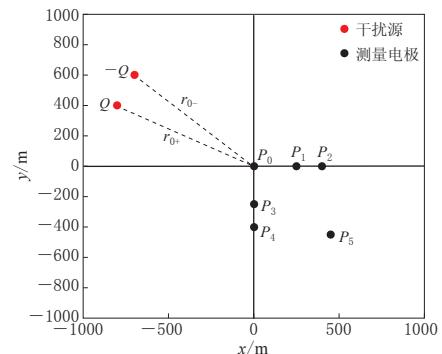


图 1 干扰源与测量电极坐标示意图

Fig. 1 Coordinate sketch-map of interference sources (red dots) and measuring electrode (black dots)

表 1 第 1 组模拟数据计算结果

Table 1 Simulation results of group 1

| 网格 | 模拟位置坐标/m | | | | 计算位置坐标/m | | | | 误差系数最 小值 E_{\min} | 坐标差值/m | | | |
|-----------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | x_1 | y_1 | x_2 | y_2 | x_1 | y_1 | x_2 | y_2 | | Δx_1 | Δy_1 | Δx_2 | Δy_2 |
| 25 m×25 m | 97 | 149 | 131 | 204 | 75 | 100 | 250 | 300 | 0.0055 | 22 | 49 | -119 | -96 |
| 5 m×5 m | 97 | 149 | 131 | 204 | 90 | 140 | 145 | 225 | 0.0018 | 7 | 9 | -14 | -21 |
| 1 m×1 m | 97 | 149 | 131 | 204 | 97 | 149 | 131 | 204 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 2 第 2 组模拟数据计算结果

Table 2 Simulation results of group 2

| 网格 | 模拟位置坐标/m | | | | 计算位置坐标/m | | | | 误差系数最 小值 E_{\min} | 坐标差值/m | | | |
|-------------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | x_1 | y_1 | x_2 | y_2 | x_1 | y_1 | x_2 | y_2 | | Δx_1 | Δy_1 | Δx_2 | Δy_2 |
| 25 m×25 m | 1.5 | 25 | 20 | 32.5 | 25 | 0 | 50 | 0 | 0.0062 | -23.5 | 25 | -30 | 32.5 |
| 5 m×5 m | 1.5 | 25 | 20 | 32.5 | -5 | 20 | 30 | 35 | 0.0003 | 6.5 | 5 | -10 | -2.5 |
| 1 m×1 m | 1.5 | 25 | 20 | 32.5 | -9 | 18 | 24 | 31 | 0.0001 | 10.5 | 7 | -4 | 1.5 |
| 0.5 m×0.5 m | 1.5 | 25 | 20 | 32.5 | 1.5 | 25 | 20 | 32.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

2 台站人工干扰源试验

为了验证干扰源定位求解方法在实际观测中的可行性和准确性, 2016年6月6—8日在高邮地震台地电观测场地人为对地供电模拟漏电干扰, 获取了干扰时段的观测数据. 本节将利用本文提出的方法计算干扰源位置, 以判断计算结果的准确性.

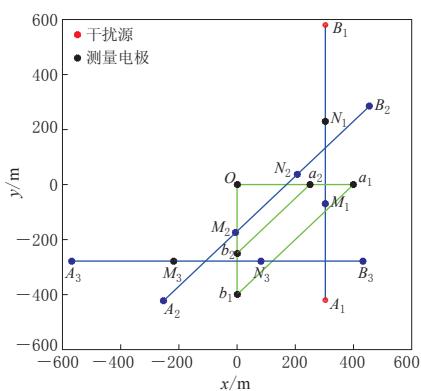


图 2 试验时干扰源和测量电极坐标图

Fig. 2 Coordinate of interference sources (red dots) and measuring electrodes (black dots) in experiment

A_1 和 B_1 设为偶极干扰源, 分别测量地电场 4 个测量极(a_1 , a_2 , b_1 , b_2)和地电阻率两个测量极(M_3 , N_1)相对于 O 点的电位差. 表 3 列出了各测量电极、干扰源和原点在直角坐标系中的位置关系及其到原点的距离.

图 2 为高邮地震台地电观测布极图, 地电阻率观测布设南北、东西、北东 45° 共 3 个测道, 采用四极对称法进行观测, 供电极距长 1000 m, 测量极距长 300 m. 地电场观测为 L 型布设, 长短极距分别为 400 m 和 250 m. 要求解干扰源位置, 至少需要 6 个测量电极, 其中一个为共用电极. 通过测量其它 5 个电极对共用电极的电位差, 来确定干扰源在不同方向和位置的影响幅度. 将地电阻率供电极

表 3 干扰源和测量电极坐标

Table 3 Coordinate of interference sources and measuring electrodes

| | 电极 编号 | x/m | y/m | 到 O 点 距离/m |
|---------|----------|-------|-------|-----------------|
| 原点 | O | 0 | 0 | 0 |
| | a_1 | 400 | 0 | 0 |
| | a_2 | 250 | 0 | 400 |
| | b_1 | 0 | -400 | 250 |
| | b_2 | 0 | -250 | 400 |
| 测量电极 | M_3 | -252 | -422 | 491 |
| | N_1 | 303 | -70 | 311 |
| 人工模拟干扰源 | A_1 | 303 | -420 | 518 |
| | B_1 | 303 | 579 | 654 |

以 A_1 和 B_1 为偶极漏电源, 选择傍晚、凌晨和上午共 3 个时段, 模拟干扰源工作以不同电流大小分别对地供正反向直流电, 供电时长为 150 s. 图 3 为人工干扰源试验时各测量电极相对于 O 点的电位差观测曲线.

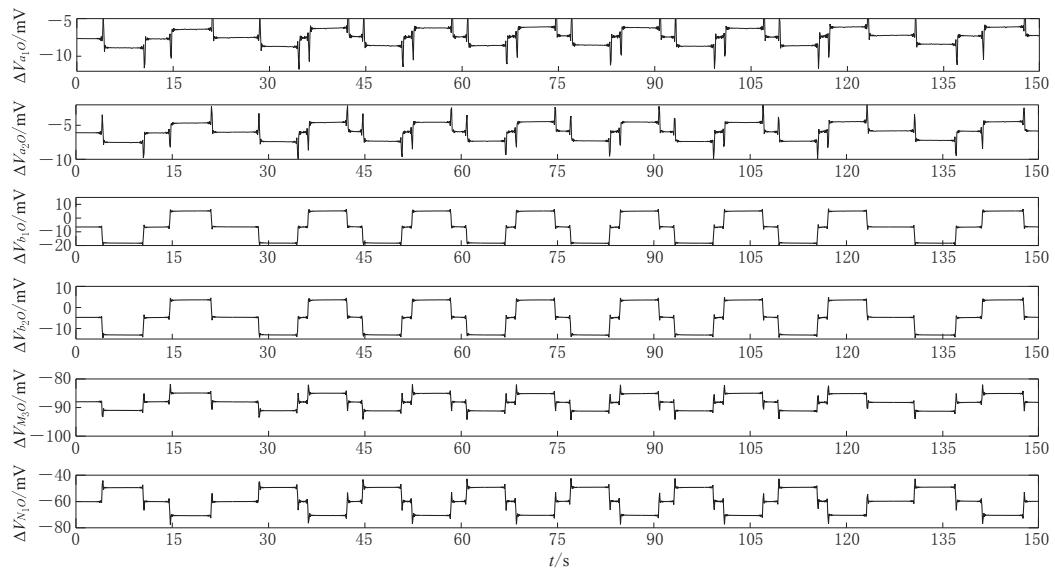


图 3 人工干扰源对测量电极影响幅度曲线

Fig. 3 Interference magnitude curves showing the influence of artificial interference sources on measuring electrodes

3 人工干扰源定位计算

针对有无干扰源影响两种情况, 分别选取等时长观测数据并采用多次测量求均值的方法减小观测误差, 计算干扰源引起的电位差, 即干扰源在各个测点的干扰幅度. 表 4 列出了不同时段、不同供电电流的 3 组电位差数据.

表 4 人工干扰源试验电位差值

Table 4 Potential difference value of artificial interference sources experiment

| 试验组 | 试验时间 | I/A | $\Delta V_{a_1}O/mV$ | $\Delta V_{a_2}O/mV$ | $\Delta V_{b_1}O/mV$ | $\Delta V_{b_2}O/mV$ | $\Delta V_{M_3}O/mV$ | $\Delta V_{N_1}O/mV$ |
|-----|----------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 6 日 18 时 | 1.19 | 1.300 | 1.537 | 12.869 | 9.187 | 3.372 | -11.767 |
| 2 | 7 日 0 时 | 1.19 | 1.323 | 1.553 | 12.844 | 9.168 | 3.384 | -11.788 |
| 3 | 7 日 9 时 | 2.17 | 2.387 | 2.804 | 23.322 | 16.621 | 6.118 | -21.316 |

利用表 4 中的电位差值, 在距离中心点 1 km 范围内划分网格, 计算人工干扰源的位置坐标, 网格大小分别为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$, $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, $20\text{ m} \times 20\text{ m}$. 图 4 给出了不同网格大小计算结果的散点分布图, 表 5 给出 3 组计算结果与实际干扰源坐标之间的误差.

由图 4 可知: 同一位置偶极源对地漏电, 50 m 和 30 m 网格划分比较粗疏, 不同时段、不同漏电电流条件下的反演计算结果一致, 利用该结果能够判断出干扰源方向, 但定位误差较大; 而 20 m 网格划分尺度更精细, 计算结果更接近实际干扰源位置(303, 579), (303, -420). 对比 3 组计算结果, 利用第 3 组试验数据反演得到的位置坐标最接近真实

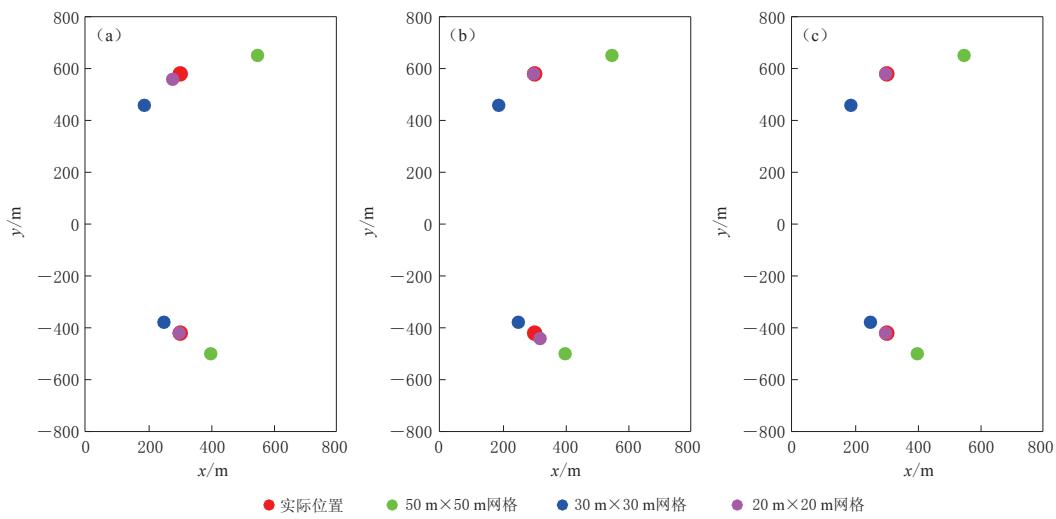


图4 基于3组试验数据的定位计算结果散点图

(a) 第一组; (b) 第二组; (c) 第三组

Fig. 4 Scatter diagrams of positioning calculation results based on three groups of test data
(a) Group 1; (b) Group 2; (c) Group 3

表5 试验定位计算结果与实际干扰源坐标差值

Table 5 Difference between true values and positioning calculation results

| 试验组 | 网格 | 人工源位置坐标/m | | | | 计算位置坐标/m | | | | 误差系数最小值 E_{\min} | 坐标差值/m | | | |
|-----|-----------|-----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | x_1 | y_1 | x_2 | y_2 | x_1 | y_1 | x_2 | y_2 | | Δx_1 | Δy_1 | Δx_2 | Δy_2 |
| 1 | 50 m×50 m | 303 | 579 | 303 | -420 | 550 | 650 | 400 | -500 | 0.192440 | -247 | -71 | -97 | 80 |
| | 30 m×30 m | 303 | 579 | 303 | -420 | 190 | 460 | 250 | -380 | 0.131370 | 113 | 119 | 53 | -40 |
| | 20 m×20 m | 303 | 579 | 303 | -420 | 280 | 560 | 300 | -420 | 0.028536 | 23 | 19 | 3 | 0 |
| 2 | 50 m×50 m | 303 | 579 | 303 | -420 | 550 | 650 | 400 | -500 | 0.195921 | -247 | -71 | -97 | 80 |
| | 30 m×30 m | 303 | 579 | 303 | -420 | 190 | 460 | 250 | -380 | 0.130975 | 113 | 119 | 53 | -40 |
| | 20 m×20 m | 303 | 579 | 303 | -420 | 300 | 580 | 320 | -440 | 0.134466 | 3 | -1 | -17 | 20 |
| 3 | 50 m×50 m | 303 | 579 | 303 | -420 | 550 | 650 | 400 | -500 | 0.191246 | -247 | -71 | -97 | 80 |
| | 30 m×30 m | 303 | 579 | 303 | -420 | 190 | 460 | 250 | -380 | 0.133431 | 113 | 119 | 53 | -40 |
| | 20 m×20 m | 303 | 579 | 303 | -420 | 300 | 580 | 300 | -420 | 0.018882 | 3 | -1 | 3 | 0 |

值, 说明较大的漏电电流会提高干扰信号的信噪比, 获取较大电位差数据, 从而更准确地计算出干扰源位置。

在本次干扰源定位解算试验中, 误差主要来源于3个方面: 第一, 地电场变化和场地噪声影响。由图3可以看出, 非干扰时段和干扰时段的地电场观测数据均有一定的波动变化, 地电场本身的变化和场地的噪声会影响干扰幅度的提取精度; 第二, 场地介质电性结构不均匀性引入误差。理论模拟计算时选用了理想化的偶极模型, 且假定偶极源产生的电场强度是均匀的, 在电阻率均匀各向同性的无限介质中, 干扰源对各电极的电位影响与距离成线性关系。从高邮台获取的电测深资料显示, 该台站目前仅有两个测向的测深资料, 两条十字电测深曲线均为KH型, 随极距增大其视电阻率变化趋势、变化范围比较一致, 但暂时还没有地表横向电性结构资料(蒋延林, 2008)。从理论上来说, 1 km^2 测区内实际介质电性结构不可能像模型一样完全均匀, 电性结构的不均匀性会造成计算误差; 第三,

漏电电流大小存在不稳定因素。这3个方面的原因,造成了定位计算结果与干扰源实际位置有一定差距。

4 讨论与结论

目前,我国地电场观测环境干扰日益严重,观测场地周边对地漏电干扰的影响范围可达几千米,严重影响了观测数据质量和观测资料的完整性。虽然可以通过在测区及周边分时断电等方法对干扰源逐一排查,但需要相关人员配合且工作量非常大。

本文给出了地电场干扰源的定位算法,依据漏电电位差定位计算干扰源位置。利用该算法进行干扰源定位,不仅能够大大减少以往干扰源排查所耗费的人力和物力,最主要的是能够实现快速、准确定位,将干扰源圈定在小区域范围内。同时,对计算误差进行了分析。后续研究将考虑场地噪声和介质不均匀性对计算精度的影响,优化该算法并提高计算精度。总之,本研究为今后地电观测台站周边工农业漏电干扰源的查找提供了一种有效的方法,在地电观测实践中对于提高观测数据质量具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- 陈志刚,田山,徐学恭,马朝晖,陈嵩。2012. 地电场观测漏电干扰的排查一例[J]. 华北地震科学, 30(4): 44-48.
- Chen Z G, Tian S, Xu X G, Ma Z H, Chen S. 2012. Study on electricity-leaking interference in geoelectric field observation at Xuzhuangzi seismic station[J]. *North China Earthquake Sciences*, 30(4): 44-48 (in Chinese).
- 蒋延林。2008. 高邮地震台地电阻率和地电场勘探及建设[J]. 地震地磁观测与研究, 29(6): 57-64.
- Jiang Y L. 2008. The survey and construction of the earth resistivity and the geoelectric field in Gaoyou seismic station [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 29(6): 57-64 (in Chinese).
- 蒋延林,赵卫红,王福才,张骞,朱晔。2015. 一种地电场观测环境干扰的分析和试验研究[J]. 中国地震, 31(1): 158-164.
- Jiang Y L, Zhao W H, Wang F C, Zhang Q, Zhu Y. 2015. Analysis and experimental study of the environment interference in the geo-electric field observation[J]. *Earthquake Research in China*, 31(1): 158-164 (in Chinese).
- 李金铭。2005. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社: 60-66.
- Li J M. 2005. *Geoelectric Field and Electrical Exploration*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 60-66 (in Chinese).
- 林向东,徐平,鲁跃,张洪魁,武安绪,李菊珍。2007. 地电场观测中几种常见干扰[J]. 华北地震科学, 25(1): 16-22.
- Lin X D, Xu P, Lu Y, Zhang H K, Wu A X, Li J Z. 2007. Several typical interferences in geoelectric observation[J]. *North China Earthquake Sciences*, 25(1): 16-22 (in Chinese).
- 马君钊,张磊,关华平,田山,马骥。2010. 大地电场观测各类干扰源的调研与分析[J]. 地震地磁观测与研究, 31(5): 65-72.
- Ma J Z, Zhang L, Guan H P, Tian S, Ma J. 2010. Analysis and research into each interference source of geoelectric field [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 31(5): 65-72 (in Chinese).