

# 井下地电阻率观测装置稳定性研究

王兰炜<sup>1,2</sup>, 张宇<sup>1,2</sup>, 张兴国<sup>1,2</sup>, 张世中<sup>1,2</sup>, 胡哲<sup>1,2</sup>

(1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085; 2. 北京市地震观测工程技术研究中心, 北京 100085)

**摘要:** 井下地电阻率观测方法能有效减小和抑制地表干扰因素影响, 提高观测精度. 近年来, 该方法在国内得到了快速发展. 但也存在一些需要解决的问题, 其中观测装置稳定性就是很重要的一个问题, 影响装置稳定性最重要的因素就是外线路绝缘性能. 外线路埋设在上百米深的地下, 其绝缘性能在长期的观测中可能出现变化, 对观测结果造成影响. 本文通过理论分析计算, 定量给出了井下地电阻率观测中线路绝缘性能对观测结果影响, 并据此提出了外线路绝缘的技术要求, 为该类台站的设计、建设和运行提供了技术依据.

**关键词:** 井下地电阻率观测; 外线路; 绝缘; 漏电; 接地电阻

**中图分类号:** P319 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)06-1167-11

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200411

## The Study on the Stability of the Configuration System of Borehole Geo-electric Resistivity Observation

WANG Lan-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xing-guo<sup>1,2</sup>, ZHANG Shi-zhong<sup>1,2</sup>, HU Zhe<sup>1,2</sup>

(1. National Institute of Natural Hazards, Beijing 100085, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Earthquake Observation, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Borehole geo-electric resistivity observation is an effective method to reduce or eliminate the earth's surface interference and as a result to improve the accuracy of observed data. It has been developed rapidly in our homeland in recent years. However, there are some key technical issues that need to be solved. Among them, the long-term stability of the configuration system is an important issue. The most important factor affecting the stability is the insulation performance of outdoor wire-line. This wire-line is often buried in a borehole deeper than 100 meters. Its insulation performance might deteriorated in a long-term observation, which thus may cause a wrong measured resistivity. Based on theoretical analysis and numerical calculation, we study quantitatively the influence of the insulation performance of outdoor wire-line, and then put forward the technical requirements. It might be a technical reference for the design, construction and operation of borehole geo-electric resistivity observation system at a station.

**Key words:** borehole geoelectric resistivity observation; outdoor wireline; insulation; leakage; grounding resistivity

## 1 引言

地震地电阻率观测在我国 50 余年的地震监测预测研究中发挥了重要作用, 取得了很好的震例研究成果, 特别是 Ms7.0 级以上地震<sup>[1-5]</sup>. 在地震台站的地电阻率观测中, 绝大部分采用大极距地表四极对称观测装置进行观测, 供电极距一般选择 1000m 左右, 测量极距为 300 ~ 400m. 按照观测规范要求, 应能从观测数据的长期变化中识别 1% 的变化, 要求观测数据精度优于 0.3%<sup>[6]</sup>.

近 20 年来, 由于城市发展, 各种人文因素对地电阻

率观测环境造成了严重影响, 导致城市周边台站的观测质量下降, 观测数据精度达不到地震监测和预测研究的需求. 而采用缩小极距的井下地电阻率观测方法来提高观测数据精度, 是一种有效方法, 该方法是指将观测电极埋设到地下几十、上百米或者更深处进行观测, 并适当缩小供电极距和测量极距, 主要有井下水平观测和垂直观测两种方式(见图 1). 在二十世纪八、九十年代我国的地震工作者已经开始进行类似的试验观测<sup>[7,8]</sup>, 但由于当时台站观测环境良好, 地表大极距观测完全能够满足地震监测和科研的需求, 而且井下观

测投资较大,所以该方法仅仅是个别台站的试验观测.直到近 10 年该方法才取得了快速发展,并被认为是今后地电阻率观测发展的一个重要方向<sup>[9,10]</sup>.目前我国地震行业已有 20 个左右的台站采用缩短极距的井下方法进行观测,采用缩短极距的井下观测方法可以有效抑制地表电磁干扰和年变化的影响,取得了良好的观测结果<sup>[11-15]</sup>.该方法的主要优点体现在三个方面:(1)观测电极埋设在地表 100m 以下,地面附近的干扰源对观测的影响相对减小;(2)降雨、灌溉、金属管线等因素造成的地表电阻率变化对观测结果影响减小;(3)由于电极极距相对减小,远场游散电流干扰影响减小,在供电电流不变时人工电位差增大,信噪比增加,使观测精度提高.

井下地电阻率观测原理与地表观测相同,图 1 为井下四极装置观测原理图,图 2 为等效电路图.

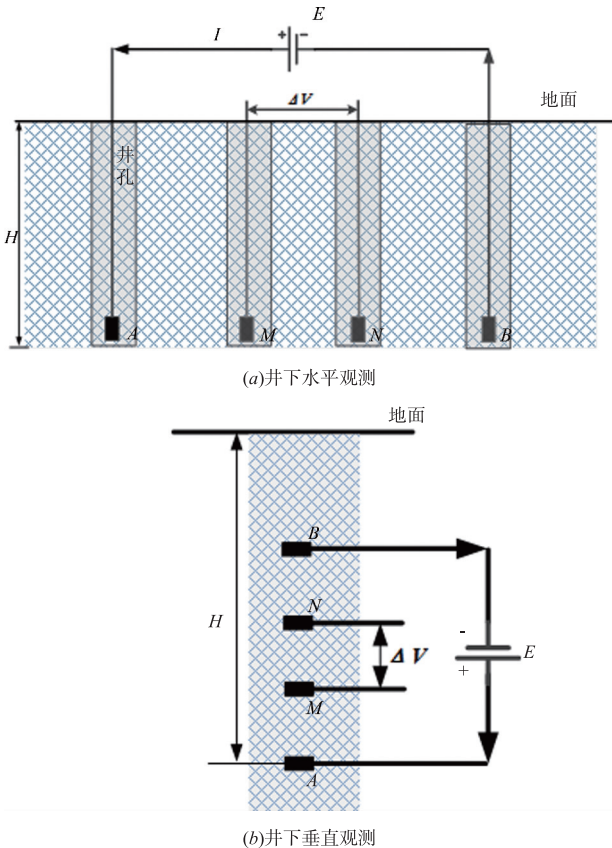


图1 井下四极装置地电阻率观测原理图

图 1(a)和(b)分别给出了井下地电阻率观测中水平和垂直观测的两种装置示意图.其中, $H$ 为井孔深度, $A$ 、 $B$ 为供电电极, $M$ 、 $N$ 为测量电极.图 2 中, $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_M$ 、 $R_N$ 分别为电极  $A$ 、 $B$ 、 $M$ 、 $N$  的接地电阻.与电极  $A$ 、 $B$  连接的电缆称为供电线,与  $M$ 、 $N$  连接的电缆称为测量线,供电电极和测量电极、供电线和测量线(统称外线路)就构成了井下地电阻率观测的观测装置.

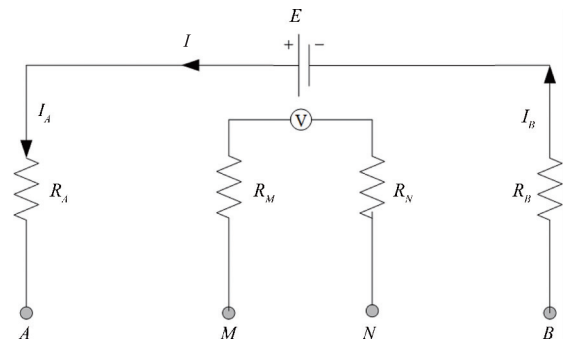


图2 观测装置等效电路

测量时,通过供电极  $A$ 、 $B$  给地下供入稳定电流  $I$ ,电流  $I$  在测量极  $M$ 、 $N$  之间产生的人工电位差为  $\Delta V_{MN}$ ,地电阻率  $\rho$  可以通过式(1)计算得到<sup>[16,17]</sup>.

$$\rho = K \times \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1)$$

式(1)中  $K$  为装置系数,仅与电极位置有关.图 3 是计算井下观测装置系数计算模型的示意图.

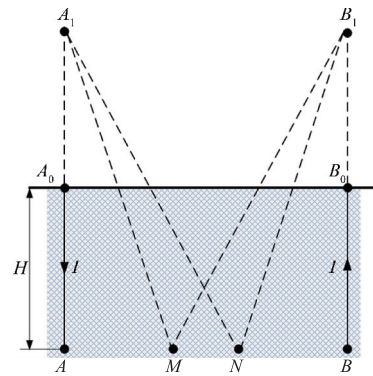


图3 装置系数示意图

图(3)中: $A_0$ 、 $A_1$  分别为供电极  $A$  在地表的投影点和相对于地表的镜像点, $B_0$ 、 $B_1$  分别为供电极  $B$  在地表的投影点和相对于地表的镜像点,装置系数  $K$  可以按照式(2)计算.

$$K = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{A_1N} - \frac{1}{B_1M} + \frac{1}{B_1N}} \quad (2)$$

当观测装置为四极对称装置时,式(2)变为:

$$K_D = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{A_1N}} \quad (3)$$

观测系统的长期稳定、可靠对地震监测和预测研究是至关重要的.井下地电阻率观测系统主要包括测量系统和观测装置两个部分,其中观测装置的稳定是影响观测结果最主要的一个环节,在实际台站工作中,要求装置稳定性对观测结果的影响不能超过 0.01%.对井下观测来说,影响观测装置稳定性的就是外线路

绝缘性能,特别是与电极连接的井下电缆在埋设后不可维护,其长期稳定性对观测来说是一个关键.本文通过理论计算,定量分析了井下地电阻率观测中外线路绝缘性能对观测结果的影响,并据此给出了外线路的技术要求,为今后该类台站的设计、建设和运行提供技术依据.

## 2 观测装置稳定性的影响因素

由式(1)中可以看到,地电阻率测量结果的准确性取决于测量人工电位差和供电电流的准确程度,以及装置系数  $K$  的稳定性.用于测量人工电位差和供电电流的测量系统的测量精度很高,而且可以通过定期的标定校准,保障测量结果的稳定.因此,对测量结果影响最主要的因素就是观测装置的稳定性.

正常状态下,电极埋设后位置是固定的,不会随时间变化,那么要保证测量结果准确可靠,实际上是要保证在长期的观测中满足以下两个要求:

- (1) 供电电流  $I$  全部从供电电极  $A, B$  流入和流出;
- (2) 人工电位差  $\Delta V$  仅来自于测量电极  $M, N$ .

当其中任意一个不能满足时,就意味着观测装置发生了改变,而引起改变的原因就是外线路绝缘性能变差出现漏电,造成人工电位差  $\Delta V$  的变化,导致地电阻率测量结果错误.

实际上,由于几百到上千米长的外线路长期暴露在空气中或埋在地下土壤中,出现线路漏电是极有可能的.线路漏电的形式主要有供电线对地漏电、测量线对地漏电以及供电线与测量线之间漏电三种.对于井下水平地电阻率观测来说,一般由于测量线和供电线井下部分埋设距离较远,地表线路在埋设时采取一定的技术措施,消除了线间漏电的可能,因此只需考虑供电线对地漏电和测量线对地漏电的影响.同时与电极连接的外线路不仅包括井下部分,还包括地表部分,这两部分线路漏电的影响不同,将分别进行讨论.

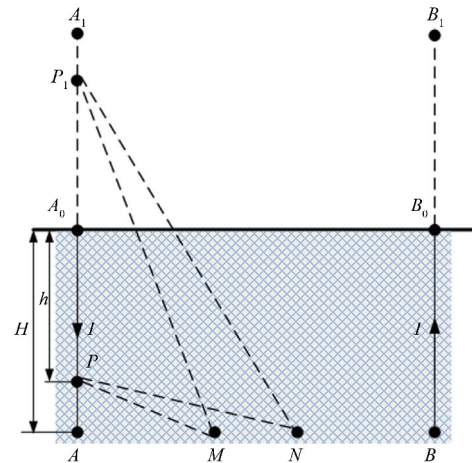
目前地震监测中绝大部分采用的是四极对称观测装置,因此以下以四极对称装置为例,在地下介质电阻率为  $\rho$  的均匀介质条件下,通过计算存在线路对地漏电时人工电位差的变化,分析线路漏电对观测结果的影响,其结果适用于图 1 所示的井下水平和垂直观测装置.

## 3 供电线路漏电影响分析

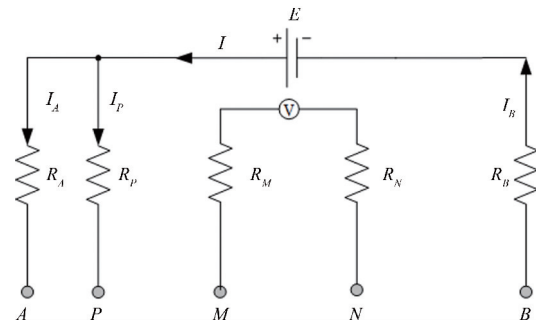
### 3.1 供电线 A 对地漏电影响

图 4(a) 是供电线 A 漏电的观测装置示意图.图 4(b) 是供电线路 A 漏电的等效电路.

图 4(a) 中,  $P$  为漏电点,  $P_1$  为  $P$  相对于地表的镜像点.  $H$  是电极埋设深度,  $h$  是  $P$  到  $A_0$  的距离.图 4(b) 中,



(a) 观测装置示意图



(b) 等效电路

图4 供电线A漏电

$R_p$  为外线路漏电电阻.  $I$  为测量得到的供电电流,  $I_A$  为实际流入供电电极  $A$  的电流,  $I_p$  为流入漏电点  $P$  的电流,即漏电流,供电电极  $B$  流出的电流  $I_B$  等于供电电流  $I$ , 有  $I_B = I = I_A + I_p$ .

正常状态下,供电电极  $A, B$  供电,供电电流  $I$  在测量电极  $M, N$  之间产生的人工电位差为  $\Delta V_{MN}$ . 根据式(1)可得:

$$\Delta V_{MN} = \frac{\rho I}{K} = \frac{\rho I}{4\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{A_1N} - \frac{1}{B_1M} + \frac{1}{B_1N} \right) \quad (4)$$

当供电线  $A$  有漏电时,导致电极  $M, N$  之间人工电位差  $\Delta V_{MN}$  变化的原因有两个,一个是由于漏电流  $I_p$  在  $P$  点供电,在测量极  $M, N$  之间产生新的电位差对人工电位差  $\Delta V_{MN}$  的影响,另一个是实际流入电极  $A$  的供电电流减小

假设,流入电极  $A$  电流减小引起的人工电位差变化为  $\Delta V_{MN1}$ ,漏电流  $I_p$  在  $P$  点供电引起的人工电位差变化为  $\Delta V_{MN2}$ ,则根据式(1)和式(2)可以得到:

$$\Delta V_{MN1} = -\frac{\rho I_p}{K} \quad (5)$$

$$\Delta V_{MN2} = -\frac{\rho I_p}{K_1} \quad (6)$$

$$K_1 = \frac{4\pi}{\frac{1}{PM} - \frac{1}{PN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{P_1M} - \frac{1}{P_1N} - \frac{1}{B_1M} + \frac{1}{B_1N}} \quad (7)$$

由图4(b)的等效电路可得,  $I_p$ 和正常状态下电流  $I$  的关系:

$$I_p = \frac{R_A}{R_p + R_A} I \quad (8)$$

设线路漏电对地电阻率观测结果的影响以影响系数来表示, 漏电影响系数就等于漏电引起的人工电位差变化与正常状态下人工电位差  $\Delta V_{MN}$  的比值. 供电线 A 漏电时, 漏电影响系数  $\varepsilon_A$  为:

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta V_{MN1} + \Delta V_{MN2}}{\Delta V_{MN}} = \frac{KR_A}{R_p + R_A} \left( \frac{1}{K_1} - \frac{1}{K} \right) \quad (9)$$

将式(1)和式(7)带入式(9), 可得:

$$\varepsilon_A = \frac{KR_A}{4\pi(R_p + R_A)} \times \left[ \left( \frac{1}{PM} - \frac{1}{PN} + \frac{1}{P_1M} - \frac{1}{P_1N} \right) - \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{A_1N} \right) \right] \quad (10)$$

当观测装置为井下水平四极对称时, 有  $AM = BN$ ,  $AN = BM$ ,  $A_1M = B_1N$ ,  $A_1N = B_1M$ . 在实际台站工作中,  $R_p \gg R_A$ , 式(10)可以简化为:

$$\varepsilon_A = \frac{KR_A}{4\pi R_p} \times \left( \frac{1}{PM} - \frac{1}{PN} + \frac{1}{P_1M} - \frac{1}{P_1N} \right) - \frac{R_A}{2R_p} \quad (11)$$

### 3.2 供电线 B 对地漏电影响

图5(a)是供电线 B 漏电的观测装置示意图, 图5(b)是供电线 B 漏电的等效电路.

图5(a)中,  $P$  为漏点,  $h$  是  $P$  点到  $B_0$  的距离.

仿照 3.1 的计算过程, 供电线 B 漏电时对观测结果的影响系数为  $\varepsilon_B$ .

$$\varepsilon_B = \frac{KR_B}{4\pi(R_p + R_A)} \times \left[ \left( \frac{1}{PN} - \frac{1}{PM} - \frac{1}{P_1M} + \frac{1}{P_1N} \right) - \left( \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{B_1M} + \frac{1}{B_1N} \right) \right] \quad (12)$$

当观测装置为井下水平四极对称时, 有  $AM = BN$ ,  $AN = BM$ ,  $A_1M = B_1N$ ,  $A_1N = B_1M$ , 同时, 在实际台站工作中  $R_p \gg R_B$ , 式(12)可以简化为:

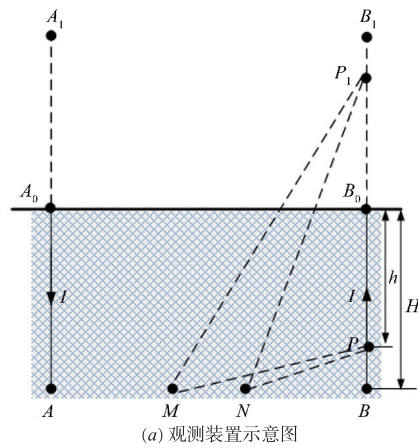
$$\varepsilon_B = \frac{KR_B}{4\pi R_p} \times \left( \frac{1}{PN} - \frac{1}{PM} - \frac{1}{P_1M} + \frac{1}{P_1N} \right) - \frac{R}{2R_p} \quad (13)$$

## 4 测量线路漏电影响分析

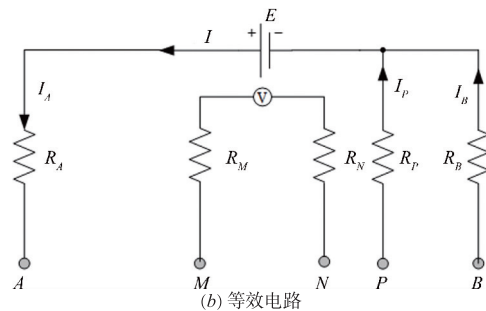
### 4.1 测量线 M 漏电的影响

图6(a)是测量线 M 漏电的观测装置示意图. 图6(b)是测量线 M 漏电的等效电路.

图6(a)中,  $M_0$  是  $M$  在地表的投影点,  $h$  是漏点  $P$

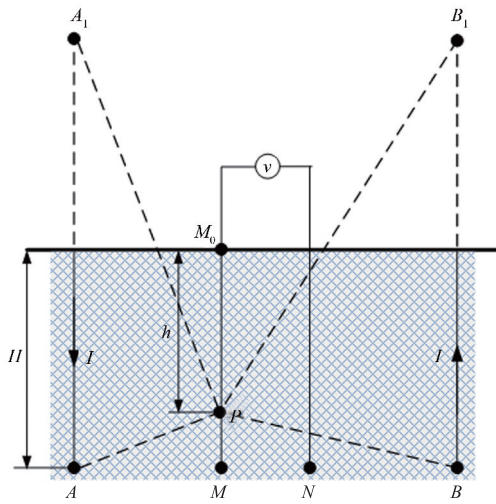


(a) 观测装置示意图

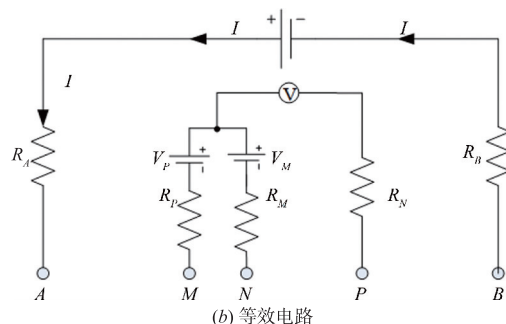


(b) 等效电路

图5 供电线B漏电



(a) 观测装置示意图



(b) 等效电路

图6 测量线M漏电

到  $M_0$  的距离。

从图 6(b) 的等效电路可以看出,当测量线  $M$  存在漏电点时,相当于除了测量极  $M, N$  外,还多了一个测量极  $P$ ,测量极  $P$  的电位  $V_p$  仅对测量极  $M$  的电位  $V_M$  有影响,而对测量极  $N$  的电位没有影响,因此测量线  $M$  的电位变化实际就是漏电引起的人工电位差变化。

供电极  $A, B$  供电,电流  $I$  在测量极  $M$  和  $P$  产生的电位分别为  $V_M$  和  $V_p$ 。

$$V_M = \frac{\rho I}{4\pi} \times \left( \frac{1}{AM} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{B_1M} \right) \quad (14)$$

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi} \times \left( \frac{1}{AP} - \frac{1}{BP} + \frac{1}{A_1P} - \frac{1}{B_1P} \right) \quad (15)$$

$V_p$  对  $V_M$  的影响就是在  $R_M$  和  $R_p$  构成的回路中,由回路电流在  $R_M$  引起的电位变化  $\Delta V_M$ :

$$\Delta V_M = (V_p - V_M) \frac{R_M}{R_M + R_p} \quad (16)$$

设测量线  $M$  的漏电影响系数为  $\varepsilon_M$ 。

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta V_M}{\Delta V_{MN}} = \frac{R_M}{R_M + R_p} \times \frac{\left( \frac{1}{AP} - \frac{1}{BP} + \frac{1}{A_1P} - \frac{1}{B_1P} \right) - \left( \frac{1}{AM} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{B_1M} \right)}{\left( \frac{1}{AM} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{B_1M} \right) - \left( \frac{1}{AN} + \frac{1}{A_1N} - \frac{1}{BN} - \frac{1}{B_1N} \right)} \quad (17)$$

$$\varepsilon_M = \frac{KR_M}{4\pi(R_M + R_p)} \times \left[ \left( \frac{1}{AP} - \frac{1}{BP} + \frac{1}{A_1P} - \frac{1}{B_1P} \right) - \left( \frac{1}{AM} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{B_1M} \right) \right] \quad (18)$$

当观测装置为井下水平四极对称时,有  $AM = BN$ ,  $AN = BM$ ,  $A_1M = B_1N$ ,  $A_1N = B_1M$ ,在实际台站工作中,  $R_p \gg R_M$ ,式(18)可以简化为:

$$\varepsilon_M = \frac{KR_M}{4\pi R_p} \times \left( \frac{1}{AP} - \frac{1}{BP} + \frac{1}{A_1P} - \frac{1}{B_1P} \right) - \frac{R_M}{2R_p} \quad (19)$$

#### 4.2 测量线 $N$ 漏电的影响

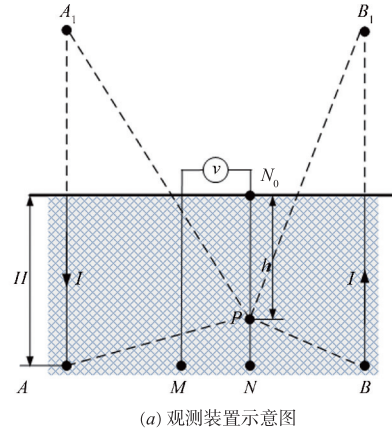
图 7(a) 是测量线  $N$  漏电的观测装置示意图。图 7(b) 是测量线路  $N$  漏电的等效电路。

图 7(a) 中,  $N_0$  是  $N$  在地表的投影点,  $h$  是漏电点  $P$  到  $N_0$  的距离。

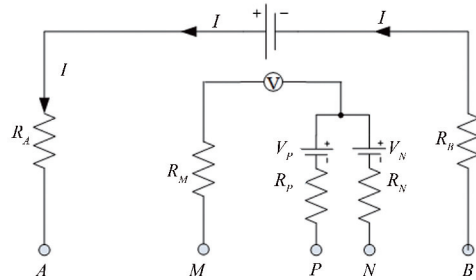
仿照第 4.1 节的计算过程,测量线  $N$  线漏电影响系数为  $\varepsilon_N$ 。

$$\varepsilon_N = \frac{KR_N}{4\pi(R_N + R_p)} \times \left[ \left( \frac{1}{BP} - \frac{1}{AP} - \frac{1}{A_1P} + \frac{1}{B_1P} \right) - \left( \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{A_1N} + \frac{1}{B_1N} \right) \right] \quad (20)$$

当观测装置为井下水平四极对称时,有  $AM = BN$ ,  $AN = BM$ ,  $A_1M = B_1N$ ,  $A_1N = B_1M$ ,在实际台站工作中,



(a) 观测装置示意图



(b) 等效电路

图7 测量线  $N$  漏电

$R_p \gg R_N$ ,式(20)可以简化为:

$$\varepsilon_N = \frac{KR_N}{4\pi R_p} \times \left( \frac{1}{BP} - \frac{1}{AP} - \frac{1}{A_1P} + \frac{1}{B_1P} \right) - \frac{R_N}{2R_p} \quad (21)$$

## 5 分析与讨论

### 5.1 漏电影响分析

#### 5.1.1 漏电影响因素

式(10)、式(12)、式(18)和式(20)分别给出了井下地电阻率观测中供电线  $A$ 、供电线  $B$ 、测量线  $M$  和测量线  $N$  漏电对观测结果的影响,这个结果适用于井下任何观测装置.可以看出:

(1) 在观测装置一定时,各条线路漏电影响与线路绝缘电阻以及各电极接地电阻有关,同时漏电影响还与位置相关.漏电影响大小与各电极的接地电阻成正比,与线路绝缘电阻成反比。

(2) 漏电影响与电极接地电阻成正比,这是因为在供电电流一定时,供电极接地电阻越大,供电线电位 ( $V = IR$ ) 就会越高,漏电电流越大,则漏电影响会越大.测量极接地电阻越大,从漏电点电位分压到测量极的电压越大,则漏电影响会越大。

(3) 漏电影响大小与线路绝缘电阻成反比,这是因为绝缘电阻越大漏电流就越小,对测量极电位的影响越小,对观测结果影响也就越小。

因此,要减小线路漏电对观测结果的影响,就要设法增加线路绝缘电阻,同时减小电极接地电阻。

5.1.2 漏电影响随井中漏电点位置变化的形态

从式(10)、式(12)、式(18)和式(20)可以看出,各式方括号中的第一项仅与  $P$  的位置有关,假设为  $f(P)$ . 第二项为常数,由电极的相对位置决定,假设为  $C$ ,则漏电影响系数  $\varepsilon_X$  为:

$$\varepsilon_X = \frac{KR_X}{4\pi(R_p + R_X)} \times [f(P) - C] \quad (22)$$

式(22)中  $K$  为装置系数,当观测装置建设完成后,  $K$  就是一个确定的常数,它仅仅与电极  $A$ 、 $B$ 、 $M$ 、 $N$  的相对位置有关.  $R_X$  为电极  $A$ 、 $B$ 、 $M$  或  $N$  的接地电阻.

当  $R_X$  和  $R_p$  一定时,漏电影响仅随漏电点位置变化. 在井深和漏电点确定的条件下,对于不同观测极距漏电影响不同,当  $C > f(P)$  时,供电线漏电影响为负,会导致观测结果变小,当  $C < f(P)$  时,供电线漏电影响为正,会导致观测结果变大.  $C = f(P)$  时,没有影响. 同样,在井深和观测极距确定时,随漏电点  $P$  的位置变化,也可能出现  $C > f(P)$ 、 $C < f(P)$  和  $C = f(P)$ .

5.1.3 井下水平四极对称观测装置的漏电影响特点

当观测装置为井下水平四极对称、且漏电点在井下时:

(1)对比图4和图6可以发现,当供电线  $A$  和  $B$  的漏电点在井下同一深度时,式(10)中的  $PM$ 、 $PN$ 、 $P_1M$  和  $P_1N$  分别等于式(12)中的  $PN$ 、 $PM$ 、 $P_1N$  和  $P_1M$ ,如果  $R_A = R_B$ ,则  $\varepsilon_A = \varepsilon_B$ ,也就是说,无论是供电线  $A$  还是供电线  $B$  漏电,其对观测结果的影响随漏电点位置的变化是相同的.

(2)对比图8和图10可以发现,当测量线  $M$  和  $N$  的漏电点在井下同一深度时,式(18)中的  $AP$ 、 $BP$ 、 $A_1P$  和  $B_1P$  分别等于式(20)中的  $BP$ 、 $AP$ 、 $B_1P$  和  $A_1P$ ,如果  $R_M = R_N$ ,则  $\varepsilon_M = \varepsilon_N$ ,也就是说,无论是测量线  $M$  还是测量线  $N$  漏电,其对观测结果的影响随漏电点位置的变化是相同的.

(3)对比图4和图8可以发现,当供电线  $A$  线和测量线  $M$  的漏电点在井下同一深度时,式(10)中  $PM$ 、 $PN$ 、 $P_1M$  和  $P_1N$  分别等于式(18)中的  $AP$ 、 $BP$ 、 $A_1P$  和  $B_1P$ ,即供电线  $A$  井下漏电和测量线  $M$  井下漏电对观测结果影响随漏电点位置变化的形态相同. 同样对于供电线  $B$  和测量线  $N$  也是如此. 也就是说当线路存在井下漏电点时,各条线路随漏电点位置变化的形态一致.

5.2 数值模拟计算结果

5.2.1 水平装置计算结果

由于漏电影响系数和漏电点位置有关,在计算时设线路从井下达到地面后,按照线路从电极位置到达地表后,沿各电极的正上方向同一方向进行布设,即电极地表投影点  $A_0$ 、 $M_0$ 、 $N_0$ 、 $B_0$  的方向布设. 图8为线路走向示意图.

图9、图10分别给出了井下水平四极对称装置,漏电点  $P$  在井下和地表时,各条线路漏电影响随漏电点  $P$  位置的变化情况. 计算漏电影响时,设井深  $H = 200\text{m}$ ,

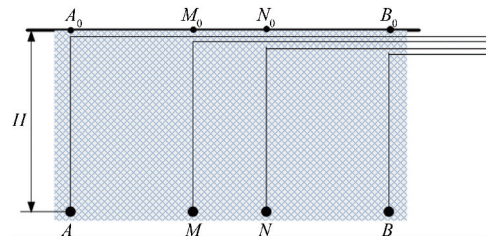


图8 井下水平装置线路布设示意图

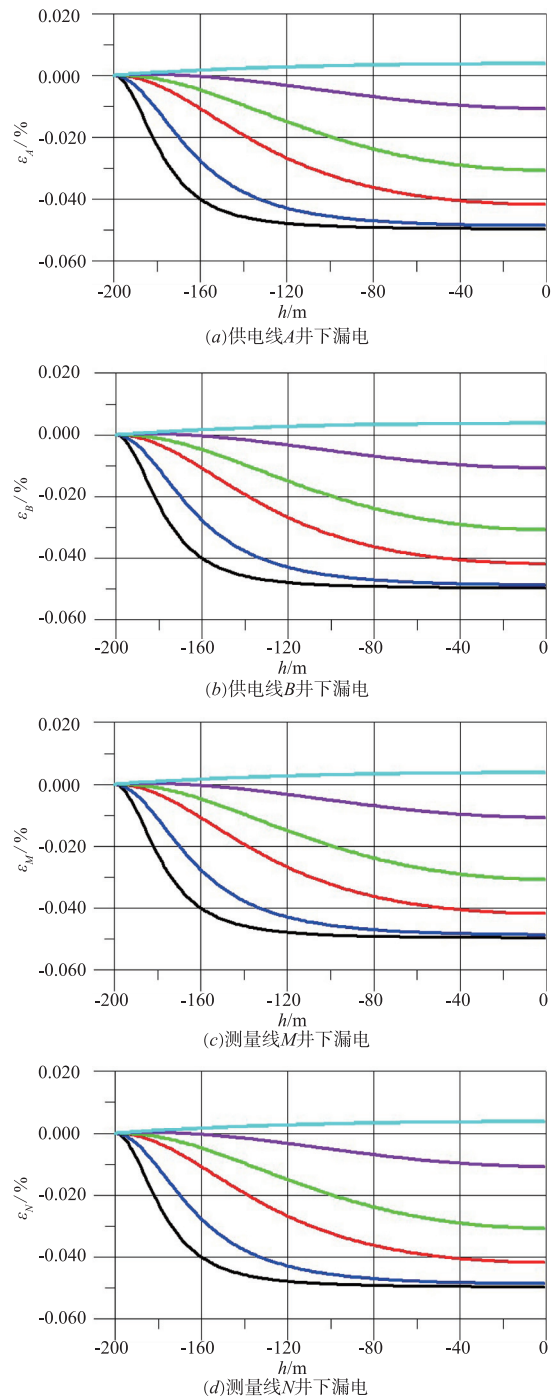


图9 井下线路漏电影响随漏电点位置变化 (H=200m,  $R_X=100\Omega$ ,  $R_P=100\text{ k}\Omega$ ,  $MN=AB/4$ 条件下)

各电极接地电阻  $R_x$  为  $100\Omega$ , 漏电电阻为  $100k\Omega$ , 供电极距  $AB$  分别为  $60m$ 、 $100m$ 、 $200m$ 、 $300m$ 、 $500m$  和  $1000m$ , 测量极距  $MN = AB/4$ .

图 9 中横坐标为井下漏电点  $P$  距离各个电极在地表投影点  $A_0/M_0/N_0/B_0$  的深度  $h$ , 坐标原点  $h=0$  表示  $P$  与  $A_0/M_0/N_0/B_0$  重合. 例如供电线  $A$  漏电,  $h$  表示  $P$  到  $A_0$  的距离,  $h=0$  表示  $P$  与  $A_0$  重合. 图 9 中黑色曲线代表  $AB = 60m$ , 蓝色曲线代表  $AB = 100m$ , 红色曲线代表  $AB = 200m$ , 绿色曲线代表  $AB = 300m$ , 紫色曲线代表  $AB = 500m$ , 青色代表  $AB = 1000m$ .

采用井下水平四极对称装置时, 存在井下漏电点时, 从图 9 可以看出:

(1) 在井深  $H$  一定时, 各线路漏电影响随  $P$  点位置变化形态一致, 这与第 5.1.3 节的结论一致. 特别是若  $R_A = R_B = R_M = R_N$ , 且各条线路绝缘电阻和漏电点深度相同条件下, 各条线路的影响系数相同.

(2) 在井深  $H$  一定, 各电极接地电阻为  $100\Omega$ 、 $R_p = 100k\Omega$  时, 对于同一漏电深度,  $AB = 60m$  时漏电影响最大, 影响系数最大为  $0.05\%$  左右, 随着  $AB$  增大, 漏电影响变小,  $AB = 1000m$  影响最小, 影响系数最大  $0.004\%$ . 也就是说, 在同样的井深、漏电点深度时, 供电极距越大, 漏电影响越小, 而极距越小, 漏电影响越大, 对线路绝缘性能要求越高.

(3) 在电极接地电阻为  $100\Omega$ 、 $R_p = 100k\Omega$  时, 线路漏电影响最大为  $0.05\%$ . 若各条线路的绝缘电阻达到  $500k\Omega$  时, 漏电影响将小于  $0.01\%$ . 但是在台站实际设计时, 由于井下电极接地电阻的不可预知, 有可能会达到  $200\Omega$  左右, 因此应根据台站实际情况进行计算. 一般情况下, 线路的绝缘电阻应至少达到  $1M\Omega$  以上.

图 10 中横坐标为漏电点  $P$  在地表时,  $d$  表示  $P$  距离各个电极在地表投影点  $A_0/M_0/N_0/B_0$  的距离, 沿  $A_0/M_0/N_0/B_0$  的方向增大. 坐标原点  $d=0$  对应各条线路  $P$  的起始位置分别为  $A_0/M_0/N_0/B_0$ , 以下各图中  $d$  最大为  $1000m$ . 图 10 中黑色曲线代表  $AB = 60m$ , 蓝色曲线代表  $AB = 100m$ , 红色曲线代表  $AB = 200m$ , 绿色曲线代表  $AB = 300m$ , 紫色曲线代表  $AB = 500m$ , 青色代表  $AB = 1000m$ .

采用井下水平四极对称装置时, 存在地表漏电点时, 从图 10 可以看出:

(1) 在  $d$  相同,  $R_p = 100k\Omega$  条件下,  $AB = 60m$  时漏电影响最小, 各条线路的最大影响系数均在  $0.05\%$  左右, 随着  $AB$  增大, 漏电影响变大,  $AB = 1000m$  影响最大, 最大影响系数为  $\varepsilon_A = -0.18\%$ ,  $\varepsilon_B = -0.04\%$ ,  $\varepsilon_M = -0.31\%$ ,  $\varepsilon_N = 0.21\%$ . 也就是说, 井深和漏电点位置确定时, 供电极距越大, 漏电影响越大, 对线路绝缘性能要求越高, 这和井下存在漏电点的漏电影响相反.

(2)  $d=0$  并不是漏电影响最大的位置, 也就是说各

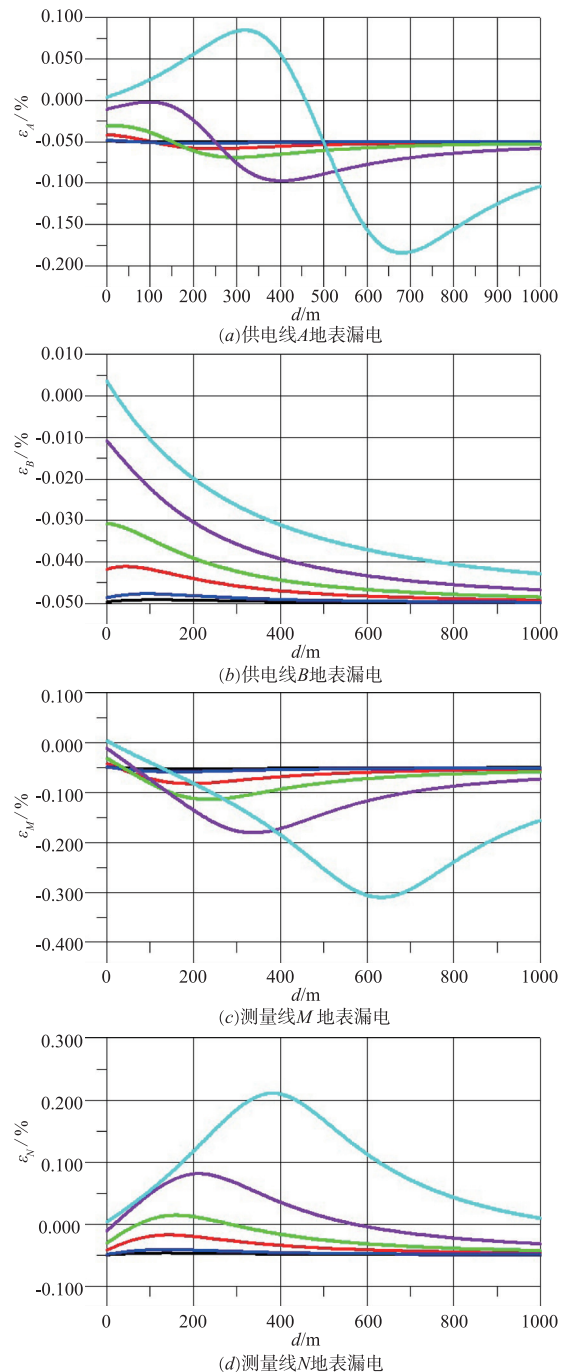


图 10 地表线路漏电影响随漏电点位置变化 ( $H=200m$ ,  $R_x=100\Omega$ ,  $R_p=100k\Omega$ ,  $MN=AB/4$ 条件下)

条线路漏电最大的位置不一定在井口位置, 这是由于井下观测时, 供电极镜像点以及地表走线与井下电极存在一定距离造成的.

(3) 按照图 8 的地表线路走向, 供电线  $B$  的漏电点  $P$  不经过任何一个电极上方, 因此, 供电线  $B$  漏电的影响比其他几个电极要小的多.

### 5.2.2 垂直装置计算结果

图 11 是单井孔的井下垂直观测装置的线路布设示

意图. 井口为  $O$  点, 井深  $H$ .

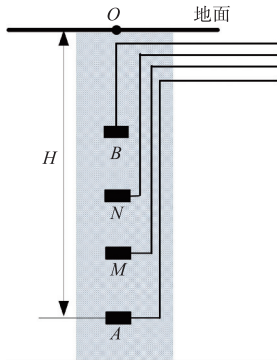


图11 单井孔井下垂直装置线路布设示意图

图 12 给出了井下垂直四极对称装置条件下,  $H = 400\text{m}$ ,  $AB = 200\text{m}$ ,  $MN = AB/4$ ,  $R_p = 200\text{M}\Omega$  时, 线路  $A$ 、 $B$ 、 $M$ 、 $N$  漏电影响随漏电点位置  $P$  的变化情况. 图中横坐标  $d$  代表  $P$  与  $O$  点的距离.  $d < 0$  代表漏电点  $P$  在井下,  $d$  绝对值越大,  $P$  点越深.  $d > 0$  表示漏电点  $P$  在地表,  $d$  越大,  $P$  点距离  $O$  点越远.  $d = 0$  表示  $P$  与  $O$  点重合, 也是坐标原点.

在采用单孔井下垂直观测装置时, 从图 12 可以看出三种情况.

情况 1: 由于供电线  $A$  经过  $M$ 、 $N$ 、 $B$  电极, 当  $P$  点趋近  $M$ 、 $N$  电极位置时 ( $d = -275\text{m}$  为电极  $N$ ,  $d = -325\text{m}$  为电极  $M$ ), 漏电影响趋于无穷大. 在  $R_p = 200\text{M}\Omega$  时, 只要  $P$  点偏离  $M$  和  $N$  电极  $0.5\text{m}$  后, 漏电影响就会减小为  $0.01\%$  左右.

表 1 给出了在不同的线路绝缘下, 供电线  $A$  井下漏电对观测结果影响小于  $0.01\%$  时, 漏电点到电极  $M$  和电极  $N$  的最小距离. 从表 1 中可以看出, 当供电线  $A$  漏电点距离测量极  $M$ 、 $N$  达到一定距离时, 对线路绝缘电阻要求就可降低, 例如, 在线路  $A$  绝缘电阻为  $5\text{M}\Omega$  时, 只要漏电点距离测量极  $16\text{m}$  以上, 漏电对观测结果的影响小于  $0.01\%$ , 可以忽略, 也就是说, 可将供电极和测量极分别放置在相距  $16\text{m}$  以上的 2 口井孔中, 以避免对线路绝缘电阻过高的要求.

表 1 供电线  $A$  井下漏电对观测结果影响

线路漏电电阻	$H = 400, AB = 200$ , 单孔垂直装置供电线 $A$ 线 漏电影响小于 $0.01\%$ 时, $PM/PN$ 最小距离	
	$PM/\text{m}$	$PN/\text{m}$
$R_p = 5\text{M}\Omega$	14	16
$R_p = 10\text{M}\Omega$	8	9
$R_p = 100\text{M}\Omega$	1	1

情况 2: 由于测量线  $M$  和测量线  $N$  都经过  $B$  电极, 当测量线漏电点  $P$  趋近供电极  $B$  时 ( $d = -200\text{m}$ ), 漏电

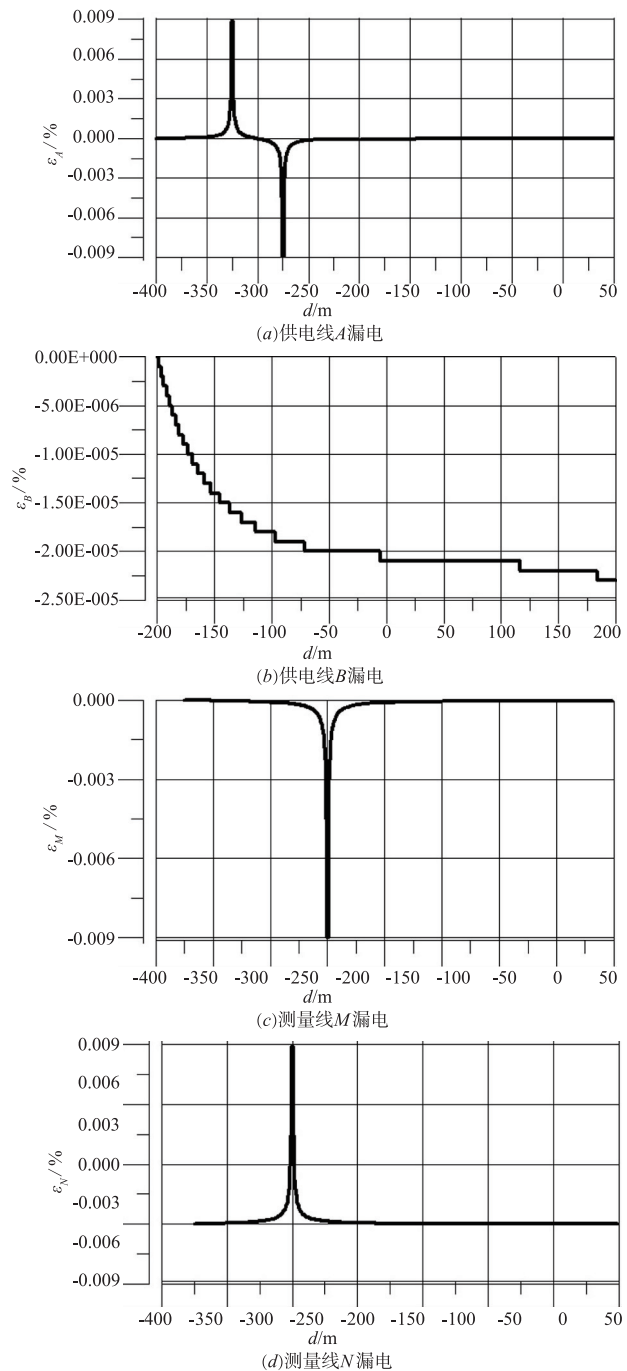


图12 垂直装置下, 漏电影响系数变化 ( $H = 400\text{m}$ ,  $AB = 200\text{m}$ ,  $RP = 200\text{M}\Omega$  条件下)

影响趋于无穷大. 在  $R_p = 200\text{M}\Omega$  时, 只要  $P$  点偏离  $B$  电极  $0.5\text{m}$ , 漏电影响就会减小为  $0.01\%$  左右.

表 2 给出了不同线路绝缘电阻下, 测量线  $M$ 、 $N$  井下漏电对观测结果影响小于  $0.01\%$  时, 漏电点到电极  $B$  最小距离. 从表 2 中可以看出, 当测量线  $M$ 、 $N$  的漏电点距离电极  $A$  达到一定距离时, 对线路绝缘电阻要求就可降低, 例如, 在测量线路绝缘电阻为  $5\text{M}\Omega$  时, 只要漏电点到电极  $B$  的距离大于  $19\text{m}$ , 漏电对观测结果影响小于

0.01% 可以忽略. 也就是说, 可将供电极和测量极分别放置在相距 19m 以上的 2 口井孔中, 以避免对线路绝缘电阻过高的要求.

表 2 测量线 M/N 井下漏点对观测结果影响

线路漏电电阻	H=400, AB=200, 单孔垂直装置测量线漏电影响小于 0.01% 时, PB 的最小距离/m	
	测量线 M 漏电	测量线 N 漏电
$R_p = 5M\Omega$	19	16
$R_p = 10M\Omega$	10	9
$R_p = 100M\Omega$	1	1

情况 3: 在计算线路漏电影响时, 将各电极当作一个点, 在理论计算时就会出现情况 1 和情况 2 中漏电影响趋于无穷大. 实际上由于电极都有一定的尺寸, 当线路 A 漏电点趋近电极 M、N 的距离等于或小于电极尺寸时, 漏电点就在 M 或 N 上, 或者当线路 M 漏电点趋近电极 B、线路 N 漏电点趋近电极 B 时, 漏电点就在 B 电极上, 此时漏电电流直接流入了电极, 就变成了线间漏电. 线路 A、M、N、B 线间漏电影响系数  $\varepsilon_{AM}$ 、 $\varepsilon_{AN}$ 、 $\varepsilon_{BM}$ 、 $\varepsilon_{BN}$  可以按式(23) ~ (26) 计算.

$$\varepsilon_{AM} = \frac{K}{\rho} \times \frac{R_A \times R_M}{R_p} \quad (23)$$

$$\varepsilon_{AN} = \frac{K}{\rho} \times \frac{R_A \times R_N}{R_p} \quad (24)$$

$$\varepsilon_{BM} = \frac{K}{\rho} \times \frac{R_B \times R_M}{R_p} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{BN} = \frac{K}{\rho} \times \frac{R_B \times R_N}{R_p} \quad (26)$$

一般情况下, 台站的地电阻率  $\rho$  为 20 ~ 50 $\Omega$ m. 在  $R_A = R_M = R_N = 100\Omega$ ,  $AB = 200m$ ,  $MN = 50m$ ,  $\rho = 50\Omega$ m 时, 要使  $\varepsilon_{AM}$  和  $\varepsilon_{AN}$  小于 0.01%, 则要求  $R_p$  大于 1200 $M\Omega$ , 这在实际工作中是很难达到的.

(4) 由于供电极 B 在最上端, 不经过任何一个测量极, 因此其漏电影响较小. 图 13 给出了  $R_p = 1M\Omega$  的漏电影响, 也就是说供电线 B 的绝缘电阻达到 1 $M\Omega$ , 可以保证满足  $\varepsilon_B \leq 0.01\%$  的要求.

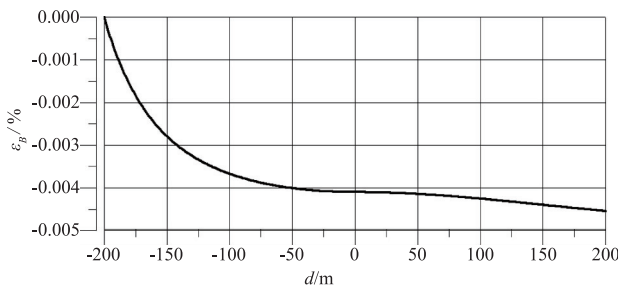


图 13 供电线 B 漏电对观测结果影响 (H=400m, AB=200m,  $R_p=1M\Omega$ 条件下)

## 6 结论

井下地电阻率观测作为一种能有效减少和抑制地表干扰因素影响的方法, 越来越多的被应用到实际观测中. 井下观测中与电极连接的外线路被埋在几十至几百米的井孔中, 由于其不可维护, 这部分线路的长期稳定是保障观测结果准确、可靠的关键.

本文对井下地电阻率观测中装置稳定性对观测结果的影响进行了分析, 定量给出了四极对称装置下, 线路绝缘性能和漏电位置等不同条件下, 线路漏电对观测结果的影响, 得到一些重要结论:

(1) 线路漏电影响与线路绝缘电阻以及电极的接地电阻有关, 漏电影响大小与线路绝缘电阻成反比, 与电极的接地电阻成正比, 同时, 漏电影响还与位置相关. 因此在观测装置建设时, 线路布设应尽量避免可能出现的漏电影响大的漏电点位置.

(2) 在井深一定、漏电位置确定的条件下, 线路漏电对观测结果的影响的正负取决于电极布设位置(不同观测极距)和漏电点的位置, 电极位置影响为常数 C, 漏电点位置影响为  $f(P)$ , 漏电影响正比于  $(f(P) - C)$ , 对于不同观测极距漏电影响不同, 当  $C > f(P)$  时, 漏电影响为负, 导致观测结果变小, 当  $C < f(P)$  时, 漏电影响为正, 导致观测结果变大. 同样在井深和极距一定时, 井中漏电影响在不同点也可能是正或负.

(3) 在井下水平四极对称装置下, 当漏电点在井下且漏电位置深度相同时, 无论是供电线还是测量线漏电, 对观测结果影响随漏电点位置变化的形态相同, 影响大小仅与电极接地电阻和线路绝缘电阻的比值有关, 而地表漏电则与线路布设走向相关.

(4) 电极接地电阻在实际工作中一般为 30 ~ 100 $\Omega$ , 但在个别情况下可能会达到 200 $\Omega$  ~ 300 $\Omega$ , 因此当采用井下水平观测装置时, 一般情况下若线路绝缘电阻达到 1 $M\Omega$  以上, 漏电对观测结果的影响小于 0.01%, 可以被忽略. 这个结果是在特定的条件下计算得到的, 在台站实际工作中, 应根据具体情况, 并考虑适当余量, 按照文中给出的计算公式进行计算.

(5) 在采用单孔井下垂直装置进行观测时, 对线路绝缘性能要求更为苛刻, 由于此装置下可能出现漏电点在电极的情况, 变成线间漏电. 为避免漏电对观测结果的影响, 要求线路绝缘电阻达到 1200 $M\Omega$  以上, 这在实际观测中是很难达到或需要昂贵的经济投入才能达到. 从这点上来看, 采用井下垂直观测装置对线路的要求要远远高于井下水平装置. 一个可行的解决办法是采用两个观测井孔, 一口井布设供电极, 另一口井布设测量极. 两口井的间距越大, 对线路绝缘电阻要求越小, 当两口井间距 10m 时, 对线路绝缘电阻的要求降低到

10M $\Omega$ ,间距 20m 时,可以降低到 5M $\Omega$ .

井下地电阻率观测方法作为近年来发展的一个重要方法,有很好的推广应用前景.本文的研究成果已经应用于江苏省高邮地震台和江宁台的井下地电阻率观测装置建设中,装置系统的各项技术指标符合地震行业观测规范要求.本文的结果不仅可以为今后井下地电阻率台站设计、建设提供技术指导,同时在台站日常观测中,也可作为观测装置稳定性的重要依据.

#### 参考文献

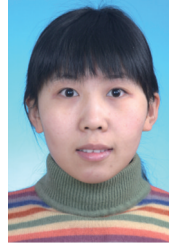
- [1] 钱家栋,马钦忠,李劭稭.汶川 Ms8.0 地震前成都台 NE 测线地电阻率异常的进一步研究[J].地震学报,2013,35(1):4-17.  
QIAN Jia-dong, MA Qin-zhong, LI Shao-nong. Further study on the anomalies in apparent resistivity in the NE configuration at Chengdu station associated with Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(1): 4-17. (in Chinese)
- [2] 钱家栋.与大震孕育过程有关的地电阻率变化研究[J].中国地震,1993,9(4):341-350.  
QIAN Jia-dong. A study on the changes in geoelectrical resistivity associated with preparatory process of great earthquakes in China[J]. Earthquake Research in China, 1993, 9(4): 341-350. (in Chinese)
- [3] 张国民,傅征祥,桂燮泰,等.地震预报引论[M].北京:科学出版社,2001.214-270.
- [4] 杜学彬.大陆中、强地震地电阻率临震突变及其时空分布讨论——短临地震预报研究[J].地震,1992,(6):51-60.  
DU Xue-bin. On sudden change of the earth resistivity preceding the moderately strong of strong earthquake in China continent and its temporal-spatial distribution—A series of studies on the short-term and impending earthquake prediction[J]. Earthquake, 1992, (6): 51-60. (in Chinese)
- [5] 朱涛.汶川 Ms8.0 地震前区域性地电阻率异常初步研究[J].地震学报,2013,35(1):18-25.  
ZHU Tao. Preliminary study on regional georesistivity anomaly before the Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(1): 18-25. (in Chinese)
- [6] DB/T33.1-2009,地震地电观测方法-地电阻率观测,第1部分:单极距观测[S].  
DB/T33.1-2009, The Method of Earthquake-Related Geoelectrical Monitoring Geoelectrical Resistivity Observation Part1: Single Separation Configuration[S]. (in Chinese)
- [7] 刘昌谋,桂燮泰,柴建勇,等.河源地电台全空间地电阻率试验[J].华南地震,1994,13(3):40-45.  
LIU Chang-mou, GUI Xie-tai, CHAI Jian-yong, et al. The observation test in deep-hole electrodes(whole space) resistivity at the Heyuan geoelectrical observatory[J]. South China Journal of Seismology, 1994, 13(3): 40-45. (in Chinese)
- [8] 苏莺声,王邦本,夏良苗,李验轩.井下电极观测地电阻率排除地面干扰的实验[J].地震学报,1982,4(3):274-276.  
SU Ying-sheng, WANG Bang-ben, XIA Liang-miao, LI Yan-xuan. Elimination of surface disturbances in earth resistivity measurement by lowering the electrodes in shallow wells[J]. Acta Seismologica Sinica, 1982, 4(3): 274-276. (in Chinese)
- [9] 聂永安,巴振宁,聂瑶.深埋电极的地电阻率观测研究[J].地震学报,2010,32(1):33-40.  
NIE Yong-an, BA Zhen-ning, NIE Yao. Study on buried electrode resistivity monitoring system[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(1): 33-40. (in Chinese)
- [10] 尹相好,田凤东,赵庆红,李佳竹.山东莒县深井电阻率资料分析[J].防灾减灾学报,2010,26(2):70-74.  
YIN Xiang-hao, TIAN Feng-dong, ZHAO Qing-hong, LI Jia-zhu. Analysis on the deep resistivity data of Juxian in Shandong[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2010, 26(2): 70-74.
- [11] 高曙德.深井地电观测技术在地震监测中的应用探讨[J].地球物理学进展,2016,31(5):2078-2088.  
GAO Shu-de. Discussion on the deep well geoelectric observation technique applied in earthquake monitoring[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2078-2088. (in Chinese)
- [12] 王兰炜,张宇,张世中,等.我国井下地电阻率观测技术现状分析[J].地震地磁观测与研究,2015,36(2):95-102.  
WANG Lan-wei, ZHANG Yu, ZHANG Shi-zhong, et al. The status of deep-well geo-electrical resistivity observation in China[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2015, 36(2): 95-102.
- [13] 康云生,安海静,马可兴,谭大诚.天水地电阻率地表与井下多种观测方式的试验分析[J].地震工程学报,2013,35(1):190-195.  
KAN Yun-sheng, AN Hai-jing, MA Ke-xing, TAN Da-cheng. Test analysis on geoelectrical resistivity observation combining the surface and deep-well methods at Tianshui seismic station in Gansu province[J]. China earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 190-195. (in Chinese)
- [14] 杨兴悦,杨立明,康云生,等.天水地震台井下地电观测系统介绍及其分析[J].地震研究,2012,35(1):92-97.  
YANG Xing-yue, YANG Li-ming, KANG Yun-sheng, et al. Introduction and analysis of geo-electrical observation system in underground well at Tianshui station[J]. Journal

- of Seismological Research, 2012, 35(1): 92 - 97. (in Chinese)
- [15] 解滔, 于晨, 卢军. 开展小极距井下地电阻率观测的可行性分析[J]. 中国地震, 2019, 35(1): 14 - 24.  
XIE Tao, YU Chen, LU Jun. Feasibility analysis on short-electrode spacing well apparent resistivity observation[J]. Earthquake Research in China, 2019, 35(1): 14 - 24. (in Chinese)
- [16] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005. 60 - 67.
- [17] 王兰炜, 张世中, 张宇, 等. 井下地电阻率观测中装置系数的计算-以天水地震台井下观测为例[J]. 工程地球物理学报, 2014, (1): 50 - 59.  
WANG Lan-wei, ZHANG Shi-zhong, ZHANG Yu, et al. Calculation of the configuration coefficient in the deep-well geo-electrical resistivity observation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, (1): 50 - 59. (in Chinese)

#### 作者简介



王兰炜 男, 1968 年 8 月出生, 甘肃兰州人. 正研级高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向: 地电观测方法与技术.  
E-mail: wanglw829@126.com



张宇(通讯作者) 女, 1984 年 7 月出生, 北京人. 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向: 地电观测方法与技术.  
E-mail: zyflyingfish@163.com