

马小溪,张宇,王兰炜,等.电感性耦合对地电阻率交流观测的影响[J].地震工程学报,2023,45(6):1432-1438.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220708002

MA Xiaoxi,ZHANG Yu,WANG Lanwei,et al.Effect of inductive coupling on the alternating current observation of geoelectrical resistivity[J].China Earthquake Engineering Journal,2023,45(6):1432-1438.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220708002

电感性耦合对地电阻率交流观测的影响

马小溪^{1,2},张宇³,王兰炜³,朱涛¹,张兴国³,胡哲³

(1. 中国地震局地球物理研究所,北京 100081; 2. 吉林省地震局,吉林 长春 130117;
3. 中国地震局地震预测研究所,北京 100036)

摘要: 地电阻率交流观测方法中存在电感性耦合效应,会影响观测值的准确性。理论研究表明电感性耦合效应与供电信号频率、供电线与测量线间距离以及线路间平行走线的长度等条件相关。为了探讨理论研究与实际观测的一致性,在江苏省高邮地电台进行电感性耦合效应对地电阻率交流观测影响研究的实验,实验通过改变观测电极间的布线,分析上述条件对地电阻率交流观测结果的影响。实验结果表明,减小平行长度、增大线间距离、减小供电信号频率均能够减小电感性耦合效应,此结果与理论分析一致。当供电信号频率低于 0.5 Hz 时,平行长度与线间距离的变化对电感性耦合效应的影响较小,可忽略不计;当供电信号频率大于 1 Hz 时,为降低电感性耦合效应的影响,需要随供电信号频率增加,减小线间平行长度或增大线间距离。

关键词: 地电阻率; 交流观测系统; 电感性耦合; 台站实验

中图分类号: P319

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2023)06-1432-07

DOI:10.20000/j.1000-0844.20220708002

Effect of inductive coupling on the alternating current observation of geoelectrical resistivity

MA Xiaoxi^{1,2}, ZHANG Yu³, WANG Lanwei³, ZHU Tao¹, ZHANG Xingguo³, HU Zhe³

(1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China;

2. Jilin Earthquake Agency, Changchun 130117, Jilin, China;

3. Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract: In the alternating current (AC) observation of the geoelectrical resistivity, the observation accuracy is affected by the inductive coupling effect. Theoretical studies have shown that the inductive coupling effect is related to the electrical frequency, the distance between the current circuit and the potential circuit, and the parallel length of the two circuits. To verify the consistency between the theoretical and experimental observation results, we rearranged the wiring paths of the electrodes and conducted an AC geoelectrical resistivity observation experiment at the Gaoyou seismic station in Jiangsu Province. The results show that when the parallel lengths of the circuits and the electrical frequency decrease, the inductive coupling effect is reduced. Also,

收稿日期:2022-07-08

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CEAIEF20220202);中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项(Y201801)

第一作者简介:马小溪(1989-),女,博士研究生,工程师,主要从事地震电磁监测预报方法研究。E-mail:xiaoxistream@126.com。

通信作者:张宇(1984-),女,高级工程师,硕士生导师,主要从事地震地电观测方法与技术研究。E-mail:zyflyingfish@163.com。

when the distance between the circuits increases, the inductive coupling effect is reduced. These results support our theoretical analysis. In addition, the effects of parallel length and distance between circuits on the inductive coupling effect can be ignored when the electrical frequency is below 0.5 Hz. When the electrical frequency increases to 1 Hz, it is necessary to avoid the inductive coupling effect by decreasing the parallel length or increasing the distance between circuits.

Keywords: geoelectrical resistivity; AC observation system; inductive coupling; seismic station experiment

0 引言

地电阻率交流观测方法能够有效抑制杂散电流的干扰,特别是城市轨道交通(地铁、轻轨等)的干扰。从 20 世纪 80 年代开始,桂燮泰和马希融等^[1-2]在河北马家沟采用物探仪器开展了为期 4 年的低频交流电法的观测实验,观测结果表明,交、直流观测结果的变化趋势基本一致,交流观测能够更好地抑制工业游散电流的干扰。专门用于地震电阻率观测的新型地电阻率交流观测系统于 2016 年开始在受地铁干扰严重的江宁台开展了观测实验,实验结果也表明交流供电的地电阻率观测方法能够很好地抑制城市地铁、轻轨等引起的干扰^[3-4],并在观测中发现,受到电感性耦合效应的影响,地电阻率交流观测结果与原有的直流观测结果存在差异。虽然对于地震监测来说,地电阻率方法更关注观测值随时间的长期相对变化,固定的装置系统和确定的供电频率所造成的电感性耦合影响是确定的,且不会影响地电阻率长期的趋势性变化,不影响观测数据的在地震监测中的应用,但是研究消除其影响更有利于长期连续数据的分析与应用。

电磁干扰是电法勘探领域一个备受关注的问題,自 20 世纪 30 年代起,国内外便开始研究各种典型情况下电磁干扰的基本理论和规律。电感性耦合是电磁干扰的基本传播途径之一,它是由交变电流所产生的磁场引起的,并通过平行导线间的耦合使一根导线上的电流在另一根导线上产生感应电压。频率越高,电感性耦合越明显。Forster^[5]讨论了均匀大地表面上或者其上方有限长导线间的互阻抗;在此基础上,Riodan 等^[6]和 Hohmann^[7]针对二层介质的情况做了进一步的研究;而 Dey 等^[8]详细论述了多层介质条件下频率域和时间域偶极-偶极和三极装置的电磁耦合;国内,战克等^[9]对常用的中间梯度装置的电磁耦合问题进行了深入分析,并进行了近似校正;何继善等^[10]提出了根据电磁耦合规律对激电法中接收波形进行斩波的斩波去耦方法。这些研究的目的是对激电法中的电磁耦合效应进行校

正,在去除电磁耦合效应的同时保留激电信息。

本文在江苏高邮地电台开展电感性耦合效应对地电阻率交流观测影响的实验,通过改变电极间的布线来改变供电线路与测量线路间的距离及平行长度,研究交流观测中电感性耦合效应与线间距离、平行长度和供电信号频率等参数之间的关系,并与理论研究结果进行对比,分析其一致性,以期为消除电感性耦合提供实验数据和技术基础,为地电阻率交流观测装置系统建设提供参考依据。

1 电感性耦合影响理论基础

电感性耦合是由两电路间磁场相互作用所引起,地电阻率交流观测使用正弦交流信号供电,供电线路正常运行状态下导线上的电流为时变电流,当其发生变化时,会使周围磁场同步发生变化,此时,位于磁场中的测量线路上会感应出电动势^[11-12]。使得仪器测量的电位差值 ΔU 不仅包含了测量电极 M 、 N 之间的人工电位差 U_{MN} ,还包含了互感电动势 ε ,受电感性耦合影响的地电阻率交流观测等效电路如图 1 所示,图中 A 、 B 为供电电极, M 、 N 为测量电极,供电电流 I_{AB} ^[13]。

$$\Delta U = U_{MN} + \varepsilon \quad (1)$$

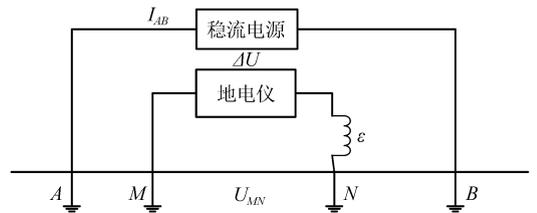


图 1 受电感性耦合影响的地电阻率交流观测等效电路模型

Fig.1 Equivalent circuit model of geoelectrical resistivity AC observation affected by inductive coupling

代入到地电阻率计算公式中可得:

$$\rho_{sEM1} = K \frac{\Delta U}{I_{AB}} = K \frac{U_{MN} + \varepsilon}{I_{AB}} = \rho_s + K \frac{\varepsilon}{I_{AB}} \quad (2)$$

式中: ρ_{sEM1} 为地电仪观测值,即受电感性耦合影响

的地电阻率观测结果; ρ_s 为地电阻率值,即不受电感性耦合影响的地电阻率观测结果,与直流通观测结果一致; K 为装置系数,四极装置系统的装置系数由公式

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad (3)$$

确定, AM 、 BM 、 AN 、 BN 分别为字母所示电极间的直线距离^[14-15]。

根据法拉第电磁感应定律,供电线路中电流 I_{AB} 发生变化时,在测量线路中引起的互感电动势 ϵ 为:

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -M_c \frac{dI_{AB}}{dt} \quad (4)$$

当供电电流为正弦交流信号时, $I_{AB} = I_m \sin(\omega t + \varphi)$,式(4)可简化为:

$$\epsilon = -M_c I_m \omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

式中: Φ 为穿过闭合回路的磁通量; M_c 为互感系数; I_m 为电流最大值; ω 为电流角频率; φ 为相位。

式(4)和式(5)是描述两电路之间互感电动势的基本方程。要减小互感电动势,可采取以下方法实现:

(1) 通过增加测量回路与供电回路间的线间距离,以减小磁通量 Φ 。

(2) 重新安排测量回路与供电回路的相对位置,减小平行走线的长度,从而减小 M_c 。

(3) 降低供电信号的频率 ω 。

目前我国地电阻率观测装置系统多为对称四极装置,其线路布设分为架空和地理两种方式,图2为地电阻率观测架空装置系统的走线示意图。观测时,稳流电源的交变电流经供电线1、供电电极A向大地供电,在测区介质中建立一个稳定的附加人工电场,再经由供电电极B和供电线2回到电源处。测量仪器经测量线1和2对测量电极M、N间电压的变化进行观测。

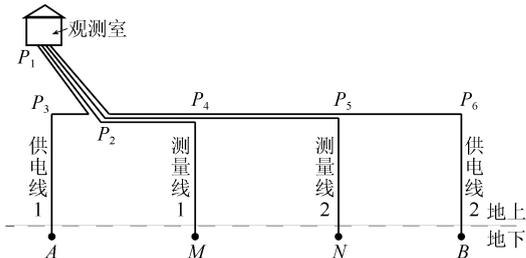


图2 地电阻率对称四极观测装置系统走线示意图(架空)

Fig.2 Schematic diagram of wiring ways of symmetric four-electrode resistivity observation system (overhead line circuit)

如图2所示,从观测室 P_1 至观测场地线路分叉点 P_2 ,供电线1、供电线2、测量线1、测量线2互相平行,且供电线与测量线间距离近似相等。如果不考虑两根测量线之间的间距,并认为它们位于两根供电线的中间,那么根据电磁感应定律,两根供电线上的供电电流大小相等、方向相反,因此可以认为在测量线1和2的 $P_1 \sim P_2$ 段产生的感应电动势大小相等、方向相反,相互抵消;图2中 P_2 至 P_4 (测量线1向测量电极M分开处)段为供电线2与测量线1和2的平行段。同样的,如果不考虑两根测量线之间的间距,那么供电线2在两根测量线上产生的感应电动势大小相等。在整个测量回路中,方向是相反的(参考图1,即如果在测量点M和地电仪之间也存在感应电动势,其方向与测量点N和地电仪之间的感应电动势相反),因此二者相互抵消。所以,在研究如图2所示的地电阻率交流观测过程中的电感性耦合效应时,可以仅考虑 $P_4 \sim P_5$ 之间单根供电线与单根测量线相互平行时的电感性耦合影响。

2 实验方案设计与结果分析

实验场地选择江苏省高邮地电台,台站地电阻率布极区在农田中,共有南北向、东西向和东北向三个测道,供电极距均为1 000 m,测量极距均为300 m,为地理布线,布极图和外线路走线见图3,其中A、B为供电电极,M、N为测量电极,电极间的实线为实际观测布线,虚线为观测走向线路。此外,该区域还有一套新建设的地电仪器检测平台地电场装置,电极分别布设在 O' 、 E_1 、 E_2 、 S_1 、 S_2 位置处,铅板电极和固体不极化电极各一套,实验使用铅板电极。

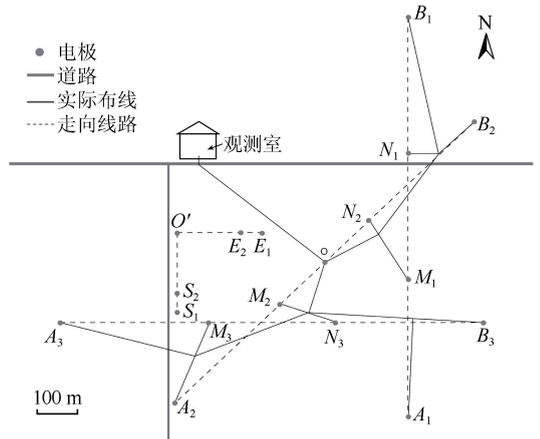


图3 高邮台地电阻率装置系统走线图

Fig.3 Wiring ways of geoelectrical resistivity configuration system in Gaoyou station

实验采用新型 ZD8AC 地电阻率交流观测系统^[3-4],同步采集测量极的电位差和稳流电源的输出电流,由于受电感性耦合效应影响的电位差和电流为复数,因此采用频谱分析法计算电压值 ΔU 与电流值 I_{AB} ,据此并根据式(2)计算出受电感性耦合影响的地电阻率值 ρ_{sEMI} ,对其取模值得到 ρ_{sEMI}^* ^[13]。同时,采用地电阻率直观点测仪器 ZD8B 测量相同实验条件下的直流电阻率值 ρ_s 。比较 ρ_{sEMI}^* 与 ρ_s 的差值,差值越大,表明电感性耦合的影响越大;反之,差值越小,电感性耦合的影响越小。

本实验通过重新布设观测系统到电极之间的线路,来改变供电线与测量线间的平行长度以及供电线与测量线间的距离,同时使用不同频率的供电信号,验证减小平行长度、增大线间距离、减小供电信

号频率是否能够有效减小互感电动势,从而降低电感性耦合效应的影响。根据实验结果完成数据拟合分析,给出满足地电阻率交流观测精度要求的观测参数范围。

2.1 电感性耦合随平行长度变化的实验

选择电极 A_1 和 B_1 作为供电电极,电极 N_1 和 N_2 作为测量电极,计算装置系数 $K=3\ 834\text{ m}$,地电阻率直观点测值为 $17.5\ \Omega \cdot \text{m}$ 。通过在东西方向的道路两侧布线,改变观测时测量线路的走线方式,分别对原始线路[图 4(a)]、重新布设观测仪器至 N_1 电极间的线路[图 4(b)]、重新布设观测仪器至 N_2 电极间的线路[图 4(c)]进行地电阻率交流观测实验,以验证平行长度对电感性耦合的影响。

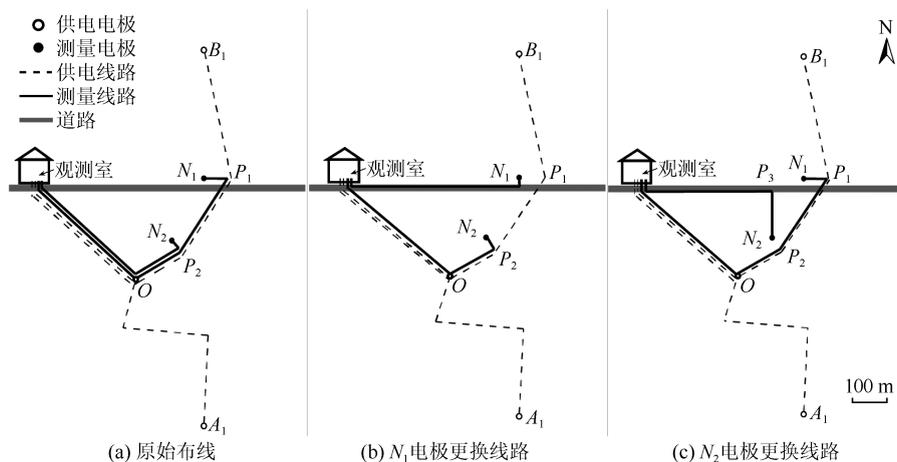


图 4 测量线路重新布线实验线路布设图

Fig.4 Schematic diagram of original circuits and re-arranged circuits in electrode N_1 and electrode N_2

图 4 中,虚线为观测时供电线路的实际走线情况,实线为测量线路的实际走线情况,图中平行段线间距约为 0.2 m 。可以看出,原始线路观测时[图 4(a)]受电感性耦合效应影响的测量线路是 P_1-P_2 ,平行长度约 240 m ;测量电极 N_1 重新布线观测时[图 4(b)]受电感性耦合效应影响的测量线路是 $O-P_2$,平行长度约 150 m ;测量电极 N_2 重新布线观测时[图 4(c)]受电感性耦合效应影响的测量线路是 $O-P_2-P_1$,平行长度约 390 m 。实验数据(圆点)和拟合结果(曲线)如图 5 所示。

分析实验数据(表 1)和拟合结果(表 2),供电信号频率越高、平行长度越长,实验得到的电阻率模值越大,与直流观测结果的差值越大,即受到的电感性耦合影响越大。供电信号频率为 0.1 Hz 时,实验数据拟合的电阻率模值(红色曲线)与地电阻率直观点测值基本一致,差值不大于 $0.1\ \Omega \cdot \text{m}$,相对误差不

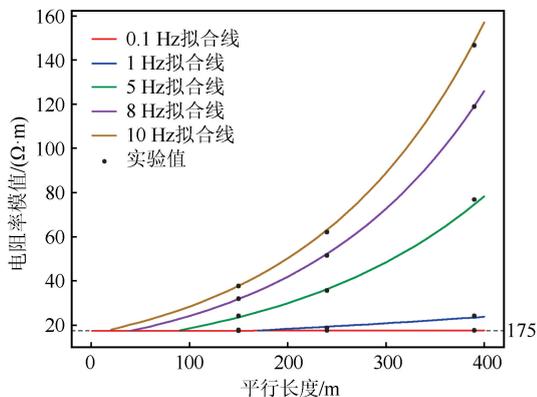


图 5 电阻率模值随平行长度的变化曲线

Fig.5 Variation of resistivity modulus with parallel length between current circuit and potential circuit

大于 0.57% ,受电感性耦合的影响较小,可以忽略不计;供电信号频率 1 Hz 时(蓝色曲线),随着平行长度大于 170 m ,电感性耦合效应开始产生影响;同样

的,供电信号频率 5 Hz 时(绿色曲线),平行长度大于 90 m;供电信号频率 8 Hz 时(紫色曲线),平行长度大于 40 m;供电信号频率 10 Hz(黄色曲线),平

行长度大于 20 m;此时,电感性耦合效应开始产生影响。因此,使用的供电信号频率越高,不受电感性耦合效应影响的平行长度范围越小。

表 1 电感性耦合效应随平行长度变化的实验数据

Table 1 Experimental data of inductive coupling effect with parallel length between current circuit and potential circuit

	平行长度 /m	平行段线 间距/m	供电信号频率/Hz					
			0.1	0.5	1	5	8	10
电阻率模/(Ω·m)	110	0.2	17.52	17.42	17.58	21.58	26.21	29.56
	150	0.2	17.53	17.47	17.72	24.21	31.99	37.76
	240	0.2	17.56	17.73	18.71	35.61	51.46	62.19
	390	0.2	17.60	19.29	24.19	76.83	118.91	146.79

表 2 电阻率模 ρ_{SEMI}^* 与平行长度 l 的拟合公式

Table 2 Fitting formula of resistivity modulus ρ_{SEMI}^* and parallel length l

频率/Hz	拟合公式: $\rho_{SEMI}^* = a \times e^{b \cdot l}$	
	参数 a	参数 b
0.1	17.488	2×10^{-5}
1	14.131	1.3×10^{-3}
5	11.484	4.8×10^{-3}
8	13.960	5.5×10^{-3}
10	16.078	5.7×10^{-3}

2.2 电感性耦合随导线间距离变化的实验

为了研究电感性耦合影响随供电线路与测量线路间距离的变化特征,采用地电阻率观测电极 A_2 和 A_3 作为供电极,地电仪器检测平台电场铅电极 O' 和 E_1 作为测量极,计算装置系数 $K = 1\ 481\ m$,

地电阻率直流观测值为 $18.75\ \Omega \cdot m$ 。保持测量线路不变,沿着观测场地的南北向道路重新布设供电线路,根据场地实际情况对供电线路向南端延长一段距离后绕回至供电电极 A_3 处。图 6 中虚线为供电线路的实际走线情况,实线为测量线路实际走线情况。如前所述,观测线路在观测室至 O' 处为两根供电线与两根测量线平行走线,感应电动势相互抵消; $O'-P_1$ 段和 A_3-P_2 段供电线与 $O'-E_1$ 测量线垂直,感应电动势为 0 V;因此,此实验中的电感性耦合效应存在于沿东西方向走线的供电线在测量线 $O'-E_1$ 产生的感应电动势。假设测量线路 $O'-E_1$ 段与其平行的供电线路 $P_1-P_2(A_3)$ 段之间的距离 D 分别为 290 m[图 6(a)]、480 m[图 6(b)]和 750 m[图 6(c)]。

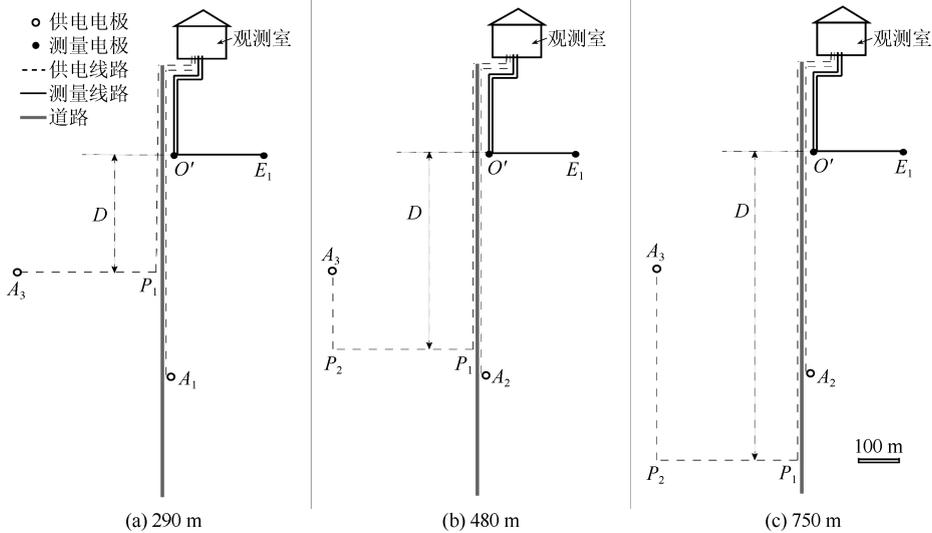


图 6 电感性耦合受导线间距离影响实验布线示意图

Fig.6 Schematic diagram of experimental wiring with inductive coupling affected by distance between current and potential circuits

分析实验数据(表 3)和拟合结果(表 4),供电信号频率越高、供电线路与测量线路间的距离越小,实验得到的电阻率模值越大,与直流观测结果的差值越大,即受到电感性耦合影响越大。如图 7 所示,供

电信号频率为 0.5 Hz 时,实验数据拟合的电阻率模值(黑色曲线)与地电阻率直流观测值基本一致,差值不大于 $0.17\ \Omega \cdot m$,相对误差不大于 1.0%,受电感性耦合效应的影响较小,可以忽略不计;供电信号

表 3 电感性耦合效应随线间距离变化的实验数据(单位: $\Omega \cdot m$)

Table 3 Experimental data of inductive coupling affected by distance between current circuit and potential circuit (Unit: $\Omega \cdot m$)

线间距离 /m	供电信号频率/Hz					
	0.5	1	3	5	8	10
290	18.91	18.96	19.58	20.41	21.81	22.80
480	18.91	18.94	19.34	19.84	20.59	21.06
750	18.82	18.84	19.13	19.41	19.74	19.89

表 4 电阻率模值得 ρ_{sEMi}^* 与线间距离 D 的拟合公式

Table 4 Fitting formula of resistivity modulus ρ_{sEMi}^* and the distance between circuits D

频率/Hz	拟合公式: $\rho_s^* = a \ln(D) + b$	
	参数 a	参数 b
0.5	-0.093	19.45
3	-0.484	22.265
5	-1.054	26.374
8	-2.184	34.153
10	-3.071	40.15

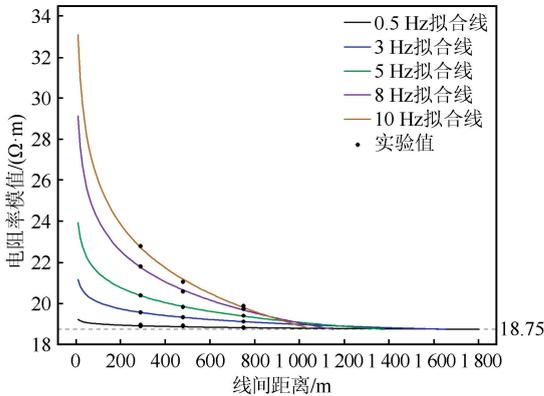


图 7 电阻率模值得随线间距离的变化曲线

Fig.7 Variation of resistivity modulus with distance between current circuit and potential circuit

频率 3 Hz 时(蓝色曲线),随着线路距离大于 1 350 m,观测值不再受到电感性耦合效应的影响;同样的,供电信号频率 5 Hz 时(绿色曲线),线间距离大于 1 250 m;供电信号频率 8 Hz 时(紫色曲线),线间距离大于 1 100 m;供电信号频率 10 Hz 时(黄色曲线),线间距离大于 1 030 m;此时,观测不再受到电感性耦合效应的影响。因此,使用的供电信号频率越高,不受电感性耦合效应影响所需要的线间距离越大。

2.3 实验结果分析

综合以上两次实验的结果,减小供电信号频率、减小供电线路与测量线路间平行长度、增大线间距离均能够减小互感电动势,从而降低电感性耦合效应对地电阻率交流观测的影响,这与理论分析的结论一致。通过对实验数据的拟合分析,若想不受电

感性耦合效应影响,随着供电信号频率的增大,需要更小的平行长度或更大的线间距离,具体参数要求如表 5 所列。

3 讨论与结论

本次实验在江苏高邮地电台地电阻率观测场地进行,使用地电阻率交流观测系统通过供电电极向大地供入正弦交流信号,同步采集测量电极间的电压信号和稳流电源的输出电流,利用离散傅里叶变换对测量数据进行频谱分析,计算电位差和电流的复数结果,从而得到地电阻率交流观测的电阻率模值得 ρ_s^* ,通过比较 ρ_s^* 和直流观测值 ρ_s 的差值,分析地电阻率交流观测过程受到的电感性耦合效应影响。

表 5 不受电感性耦合效应影响的实验参数统计表

Table 5 Statistical analysis of experimental parameters without the effect of inductive coupling

频率/Hz	最大平行长度/m	最小线间距离/m
1	170	-
3	-	1 350
5	90	1 250
8	40	1 100
10	20	1 030

根据理论计算可知,影响电感性耦合效应的因素包括供电信号频率、供电线与测量线间的距离以及平行走线长度,可以通过减小供电信号频率、增大线间距离,或减小平行走线长度等方式来减小电感性耦合影响。实验结果与理论研究结果一致。

通过对实验数据的拟合分析,供电信号频率小于 0.5 Hz 时, ρ_{sEMi}^* 和 ρ_s 的差值小于 $0.2 \Omega \cdot m$,相对误差不大于 1.0%,电感性耦合效应的影响较小,可以忽略不计。随供电信号频率的增大,不受电感性耦合效应影响所需要的平行长度范围越小,线间距离越大。因此,想要消除电感性耦合效应对地电阻率交流观测的影响,可以选择较低频率(小于 0.5 Hz)的供电信号;或根据供电频率,改变观测装置系统,增大供电线与测量线间的距离或减小线路间的平行长度。

致谢:本研究在实验过程中得到了中国地震局地震预测研究所赵家骝研究员的指导,得到了高邮地电台工作人员的大力支持和协助,作者在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 桂燮泰,戴经安,关华平.低频交流电法的试验和研究[J].西北地震学报,1988,10(2):22-28.
GUI Xietai, DAI Jing'an, GUAN Huaping. Experiment and discussion on the low frequency AC method[J]. Northwestern Seismological Journal, 1988, 10(2): 22-28.
- [2] 马希融.交流地电阻率方法在马家沟地震台试验结果[J].地震,1989,9(3):46-51.
MA Xirong. Experimental results of alternative resistivity method in Majiagou station[J]. Earthquake, 1989, 9(3): 46-51.
- [3] 张宇,张兴国,王兰炜,等.新型地电阻率交流观测系统研究及江宁台观测试验[J].地震学报,2016,38(5):807-810.
ZHANG Yu, ZHANG Xingguo, WANG Lanwei, et al. Study on a new AC observation system of ground resistivity and observation test at Jiangning station[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(5): 807-810.
- [4] 王兰炜,张宇,张兴国,等.地震地电阻率交流观测方法及观测实验[J].大地测量与地球动力学,2019,39(7):738-742.
WANG Lanwei, ZHANG Yu, ZHANG Xingguo, et al. AC geoelectrical resistivity observation method and experimental observation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(7): 738-742.
- [5] FOSTER R M. Mutual impedance of grounded wires lying on or above the surface of the earth[J]. Bell System Technical Journal, 1933, 12(3): 264-287.
- [6] RIORDAN J, SUNDE E. Mutual impedance of grounded wires for horizontally stratified two-layer earth [J]. Bell System Technical Journal, 1933, 12: 162-177.
- [7] HOHMANN G W. Electromagnetic coupling between grounded wires at the surface of a two-layer earth[J]. Geophysics, 1973, 38: 854-863.
- [8] DEY A, MORRISON H. Electromagnetic coupling in frequency and time-domain induced-polarization surveys over a multilayered earth[J]. Geophysics, 1973, 38: 380-405.
- [9] 战克,朱宝汉.均匀大地上频率域中梯装置的电磁耦合[J].物探与化探,1981,5(1):11-16.
ZHAN Ke, ZHU Baohan. Electromagnetic coupling of ladder device in frequency domain on uniform earth[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1981, 5(1): 11-16.
- [10] 何继善,熊彬,鲍力知,等.直接消除电磁耦合的斩波去耦方法[J].地球物理学报,2006,49(6):1843-1850.
HE Jishan, XIONG Bin, BAO Lizhi, et al. A direct induced-polarization decoupling scheme by chop-wave[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1843-1850.
- [11] 刘培国,侯冬云.电磁兼容基础[M].北京:电子工业出版社,2008.
LIU Peiguo, HOU Dongyun. Electromagnetic compatibility fundamentals[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [12] 杨显清,杨德强,潘锦.电磁兼容原理与技术(第三版)[M].北京:电子工业出版社,2016.
YANG Xianqing, YANG Deqiang, PAN Jin. Principle and technology of electromagnetic compatibility (third edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [13] 马小溪,王兰炜,朱涛,等.地电阻率交流观测中的电感性耦合效应特征模拟和分析[J].地球物理学报,2023,66(1):289-300.
MA Xiaoxi, WANG Lanwei, ZHU Tao, et al. Simulation and analysis of inductive coupling effect characteristics in AC observation of ground resistivity[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(1): 289-300.
- [14] 中国地震局监测预报司.地震电磁学理论基础与观测技术:试用本[M].北京:地震出版社,2010.
Detection and Prediction Department of China Earthquake Administration. Theoretical basis and observation technology of seismic electromagnetism[M]. Beijing: Seismological Press, 2010.
- [15] ZHAO J L, WANG L W, QIAN J D. Research on geo-electrical resistivity observation system specially used for earthquake monitoring in China[J]. Earthquake Science, 2011, 24(6): 497-511.

(本文编辑:任 栋)