

电位观测系统中近场效应的影响

牛超¹, 施龙青¹, 肖乐乐¹, 魏久传¹, 翟培合¹, 曹晓莉²

(1. 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国人民武装警察部队 黄金第七支队, 山东 烟台 264004)

摘要:利用 CMOSOL Multiphysics 软件, 正演分析了 3 层模型近场效应下二极装置电位分布特征. 采用电位 AM 二极观测系统, 设计不同的 R_{AM} 供电电极距, R_{BN} 无穷远电极距, 利用 WDJ-4 型激电仪进行野外现场试验. 数值模拟表明供电电极距对 2 个异性点电源场影响较大, 但在一定的无穷远电极距范围内畸变可以矫正. 现场电测深试验表明, 小供电电极距 R_{AM} 情况下, 二极测深曲线不能正确反映电介质的电性分布. 电位观测系统的无穷远电极距 R_{BN} 使得测深曲线偏离了正常测深曲线, 甚至产生了歧义的负电阻率拐点. 通过传统电场理论分析, 利用不同观测装置下的视电阻率计算公式推导了二极装置非无穷远条件下的校正公式. 测深数据校正误差表明, 在无穷远电极距满足 $1.5R_{AO} \leq R_{BO} \leq 5R_{AO}$ (R_{AO} 为供电电极 A 距中点 O 的距离, R_{BO} 为供电电极 B 距中点 O 的距离) 的情况下, 校正误差小于 5%, 可利用的无穷远电极距提高 3 倍, 并成功应用于井下工作面实际探测中.

关键词:近场效应; 二极装置; 电测深; CMOSOL Multiphysics; 三维电法

中图分类号: P319; P631

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2015)02-0080-07

Impact of near - field effect on potential survey system

Niu Chao¹, Shi Longqing¹, Xiao Lele¹, Wei Jiuchuan¹, Zhai Peihe¹, Cao Xiaoli²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, College of Geological Sciences & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. The 7th Gold Detachment of Chinese Armed Police Force, Yantai 264004, China)

Abstract: Using CMOSOL Multiphysics software, the near field effect was analyzed, which of pole - pole potential distribution in the three layer model. The potential of AM observation system was used to design different AB current electrode spacing, and distance of MN electric potential, WDJ-4 field test was adopted. Numerical simulation shows that the current electrode spacing greater influence on the two opposite the point source field, but the distortion at infinite distance within a certain range can be corrected. Field electrical sounding show that: small current electrode distance of AB cases, pole - pole sounding curve can not correctly reflect the electrical distribution of dielectric. Infinite distance R_{BN} potential observation system makes the sounding curves deviate from the normal sounding curve, and even cause ambiguity negative resistivity inflection point. By the traditional electric field theoretical analysis, the apparent resistivity observation device using different formulas for calculating the correction formula of diode device is pushed to the near field under the influence of non infinite electrode. Sounding data correction error analysis shows that, in the infinite distance satisfies $1.5R_{AO} \leq R_{BO} \leq 5R_{AO}$, the correction error is less than 5%, can use the infinite electrode distance is increased by three times, and successfully applied to practical detection of underground working face.

Keywords: near - field effect; pole - pole array; resistivity sounding; CMOSOL Multiphysics; 3D electrical prospecting

收稿日期: 2014-10-29

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20133718110004); 青岛经济技术开发区重点科技发展计划项目(2013-1-62); 山东省自然科学基金重点资助项目(ZR2011EEZ002); 山东科技大学科研创新团队支持计划资助(2012KYTD101); 山东科技大学研究生科技创新基金(YC130104)

通信作者: 肖乐乐(1985-), 女, 山东滨州人, 博士生, 主要从事于煤矿水害防治研究. E-mail: sara_xiao@163.com

直流电法二极观测装置为电位装置,需要将供电电极,测量电极置于相对无穷远处,使得地下电场分布为半球状^[1].理论上只要使无穷远极距 R_{Bo} , R_{No} (B,N距供电电极距 R_{AM} 中点 O 的距离) 大于 5 倍的 R_{Ao} (供电电极 A 距 O 的距离) 即可,即 $R_{Bo} > 5R_{Ao}$, $R_{No} > 5R_{Ao}$ ^[2-3]. 目前二极装置普遍应用于三维直流电法勘探领域^[4-6],但现场施工地质,地貌条件并不完全能够满足前述的理论无穷远极距原则,例如在地形陡峭的山区或矿井回采工作面回采巷道等特殊地质环境,有效的利用空间条件下导致无穷远电极 B,N 对二极装置中的 A,M 电极产生较大的近场效应^[7-8].

本文基于二极观测系统现场试验,CMOSOL Multiphysics 数值模拟软件正演响应,分析了供电电极距,无穷远电极距对二极电测深数据的影响,提出了近场效应校正公式,为二极电位观测系统在非无穷远条件下的电测深数据处理提供了重要的理论依据.

1 二极装置非无穷远极试验

1.1 观测系统与使用仪器

直流电法二极测量装置的类型为 AM 装置(见图 1). 电位观测系统的采集数据记录点定位于供电电极 A 与测量电极 M 的中点 O , 勘探深度主要受供电电极距 R_{AM} 影响^[9]. 野外进行的试验设计将测量电极 M 固定不动,依次移动 A 电极,无穷远电极 B,N 分别置于垂直测线两侧的对称位置. 单次试验时,固定无穷远极距使得 $R_{BM} = R_{MN}$,通过增加供电电极距 R_{AM} 以获取不同深度的电测深数据;增加无穷远极距 $R_{BM} = R_{MN}$,重复改变 R_{AM}

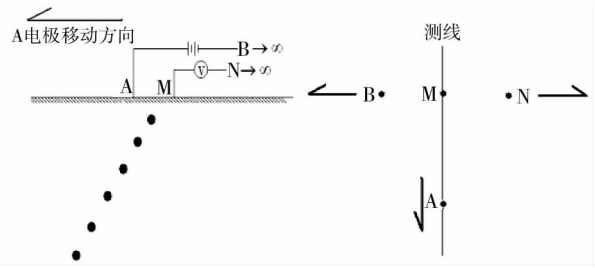


图 1 电位观测系统测深记录点示意图

极距,以获取不同无穷远极距,不同供电电极距下的测深曲线. 为了减少接地电阻,漏电等外界因素干扰,将 40 个铜质电极(作为供电电极 A 使用)编号并布设于测线固定位置,其中 1~20 号电极的单位电极距设计为 1 m,20~30 号电极的单位电极距设计为 2 m,30~40 号电极的单位电极距设计为 3 m,测线中最大供电电极距 R_{AM} 为 71 m. 本次试验将无穷远电极距 $R_{BM} = R_{MN}$ 设计为 2,4,10,15,25,50,70,100,200,1 500 m. 采用 WJDJ-4 型高密度电阻率测量系统进行数据采集工作,该仪器具有精度高,高阻抗等优点^[10-12];电源选择供电稳定的 180 V 干电池,数据记录采用人工与仪器自动存储 2 种方式.

1.2 试验区概况

试验场地地形平坦广阔,无穷远电极 B,N 可以垂直测线放置 2 000 m 以远. 为了查明试验区地电特征,利用高密度电法对其进行二维探测,获得了试验区的视电阻率等值线(见图 2). 探测成果图显示:纵向上整体分为 3 层,即浅部,深部电阻率高,中间电阻率低,浅部地层视电阻率较基底基岩低,中间层视电阻率稍低,高阻的基岩面起伏不平. 根据当地地质情况判断,试验场地的第四系沉积物厚度为 1~10 m,基底为岩浆岩,由于中部的基岩风化带富水性较强,造成断面图中部视电阻率显示为低阻. 试验场地的地电断面可以作为典型的 3 层地电介质.

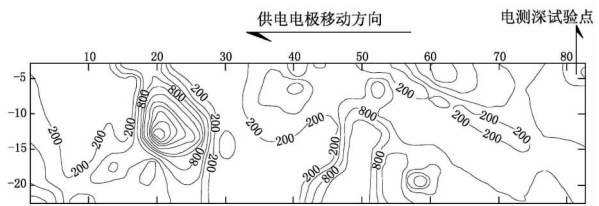


图 2 试验区测线高密度电法等视电阻率断面图

1.3 数值模拟分析

根据试验区电性特征,利用 CMOSOL Multiphysics 多场数值模拟软件建立 3 层介质模型,分析非无穷远极距条件下二极装置近场效应影响. 结合试验区地电断面物性特征,设定供电电流为 500 mA,模型两侧设置无穷远边界并做接地,模型设置参数见表 1.

在半空间点电源条件下,对数值模拟结果分析(图 4):由于中间低阻层影响使得等电位线并没有呈球形对称分布,而是发生了变形,浅部等电位线的密度明显较低阻层稀疏;由于模型两侧设置了无穷远边界接地,在边界两侧出现了零电位异常. 2 个异性点电源条件下对数值结果分析:受模型中间低阻层影响,较均匀介质条件下的等电位线发生了变形,由于负电流源存在,2 个点电源之间出现了零电位线,且电位线在负点电源一侧畸变大,另一侧畸变小;正电流源两侧电场分布虽然受负电流源影响,但是这种影响较小,在适当的供电电极距影响范围内,这种畸变可以矫正至点电源半球形分布电场,为近场效应的校正提供了

理论基础.

表1 3层地电场模型参数表

模型分层	模型尺寸(长度×宽度×厚度) /(m×m×m)	电阻率 /($\Omega \cdot m$)
底层	1 000×1 000×100	1 000
中间层	1 000×1 000×10	10
顶层	1 000×1 000×20	100

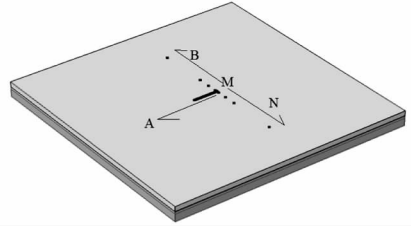


图3 CMOSOL Multiphysics 3层建模及测量点分布

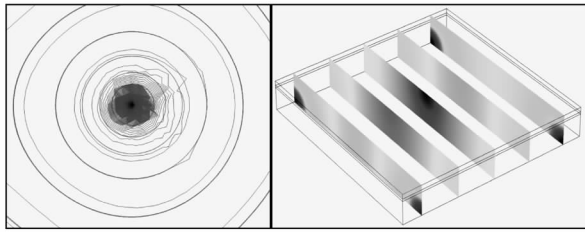


图4 半空间点电源模型等电位线分布图

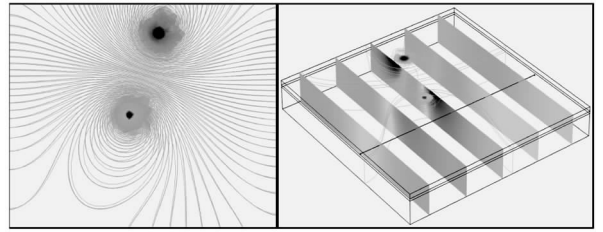


图5 近场效应下模型等电位线分布图

1.4 二极装置无穷远极距影响分析

当无穷远极距 $R_{BM} = R_{MN}$ 为 1 500 m 时,由于无穷远极距已大于本次试验设计的最大供电电极距 ($R_{AM} = 71$ m) 的 20 倍,因此将无穷远极距为 1 500 m 时的测深曲线作为标准二极装置测深曲线,并与其他受近场效应影响的测深曲线进行对比,用以分析无穷远极距对测深数据的影响.

当无穷远极距较小时 ($R_{BM} = R_{MN} = 2$ m, 4 m),受近场效应影响的测深成果表明(见图 6),曲线首段随无穷远极距的变大而逐渐弯曲,并产生极小值拐点;曲线中段,尾部均呈增大走势.本次试验中随无穷远极距 R_{BN} 的增大,电测深曲线受近场效应影响使得曲线产生较大的畸变,该畸变为中段的假性低阻异常与尾部的高阻异常;同时,假性低阻异常出现时的供电电极距 R_{AM} 随无穷远极距的增大而增大.由视电阻率计算公式可知,装置系数 (K) 值随供电电极距的增大而增大,而试验中记录的 U/I 值不变,因此在假性极小值拐点后的测深曲线已失去测深意义^[13-14].

当无穷远极距 $R_{BM} = R_{MN}$ 增大时(见图 7),测深曲线的首段与正常测深曲线重合;中段测深曲线受近场效应影响而与标准测深曲线逐渐分离,并出现受近场效应影响的假性低阻异常.当无穷远极距 $R_{BM} = R_{MN} = 70$ m, 100 m 时,假性低阻异常依然存在,测深曲线末端依然有上扬趋势.由于现场试验条件限制,测深曲线的供电电极距 R_{AM} 并未无限制增大,根据前述分析,受近场效应影响的测深曲线尾部依然将向无穷大趋势增大.当无穷远极距 R_{BM} 扩大至 200 m,测深曲线与理想条件下的二极测深曲线误差较小,最大供电电极距时的数据误差仅为 10%.由于距点电源 A 的距离增大,电位迅速降低,因此曲线总体变化趋势为视电阻率递减的曲线.

利用现场试验采集的数据,分析了无穷远极距 R_{BN} 对测深曲线假性低阻极值出现时的供电电极距 R_{AM} 值,受近场效应影响而使测深曲线畸变分离时的 R_{AM} 值.统计表明(见表 2),当供电电极距 R_{AM} 约为无穷远极距 R_{BM} 的 1/10 ~ 1/5 时测深曲线开始受近场效应影响,而假性电阻率极小值出现时的供电电极距 R_{AM} 与无穷远极距 R_{BM} 基本相等.

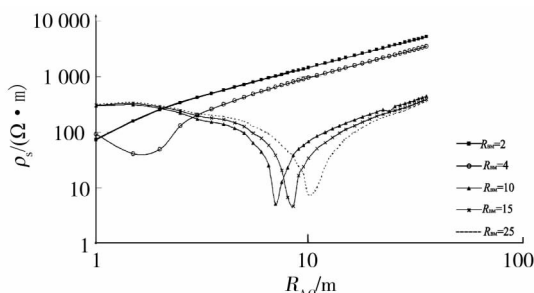


图6 近场效应下的电位装置测深曲线

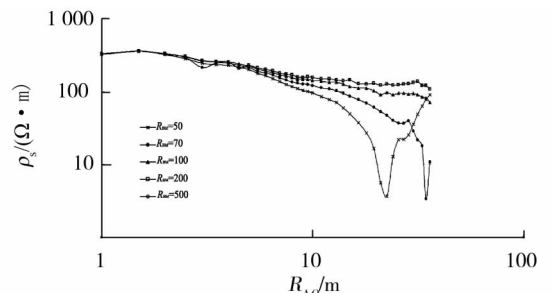


图7 现场试验电位装置测深曲线

表2 近场效应下测深数据误差分析

测深低阻极值拐点时的 R_{AM} 值/m	测深曲线与标准曲线分离时的 R_{AM} 值/m	误差为5%时的 R_{AM} 值/m	R_{BM} /m
1	1	-	2
4	1	-	4
12	3	-	10
17	5	3	15
22	7	4	20
48	17	6	50
69	24	15	70
-	22	19	100
-	69	32	200
-	-	-	1 500

2 近场效应校正研究

本次试验模拟了实际施工中需要将无穷远电极设置于固定位置,因此通过分析无穷远供电电极 B,无穷远测量电极 N 对电位装置的影响,即可对测深数据进行校正.根据地电场理论,视电阻率计算公式,四极装置,联剖装置,电位装置之间有相应的计算公式^[5],进一步分析电位观测系统近场效应理论校正公式.

2.1 理论分析

根据联合剖面装置视电阻率 ρ_s 计算公式

$$\rho_s^{AMN} = K_{AMN} \frac{\Delta U_{MN}}{I} = 2\pi \frac{R_{AM} \cdot R_{AN}}{R_{MN}} \frac{\Delta U_{MN}}{I}. \quad (1)$$

其中, ρ_s^{AMN} 为三极 AMN 装置计算的视电阻率值, K_{AMN} 为三极装置系数, $\Delta U_{MN} = U_M - U_N$ 为测量电极 M, N 之间的电位差值, I 为装置供电电流, R_{AM}, R_{AN}, R_{MN} 为 A, M, N 三电极之间的间距,继续整理得

$$\rho_s^{AMN} = 2\pi \frac{R_{AM} \cdot R_{AN}}{R_{MN}} \left(\frac{U_M}{I} - \frac{U_N}{I} \right). \quad (2)$$

根据三极 AMN 装置的特点,可以将其视作 2 个电位装置 AM, AN, 根据电位装置电阻率计算公式

$$\rho_s^{AM} = 2\pi R_{AM} \frac{U_M}{I} \text{ 或 } \frac{\rho_s^{AM}}{2\pi R_{AM}} = \frac{U_M}{I}, \quad \rho_s^{AN} = 2\pi R_{AN} \frac{U_N}{I} \text{ 或 } \frac{\rho_s^{AN}}{2\pi R_{AN}} = \frac{U_N}{I}.$$

其中, ρ_s^{AM}, ρ_s^{AN} 为 AM, AN 电位装置计算的视电阻率值,其他符号意义已述.将上式代入式(2)中,得

$$\rho_s^{AMN} = 2\pi \frac{R_{AM} \cdot R_{AN}}{R_{MN}} \left(\frac{\rho_s^{AM}}{2\pi R_{AM}} - \frac{\rho_s^{AN}}{2\pi R_{AN}} \right) = \frac{1}{R_{MN}} (R_{AN} \rho_s^{AM} - R_{AM} \rho_s^{AN}). \quad (3)$$

式(3)可以视为联剖装置 AMN 与电位装置 AM, AN 之间视电阻率值计算转换公式.根据地电场理论中电位分布计算公式,观测系统测量的电位差 $U_{测}$ 可以由以下公式得到:

$$U_{测} = U_{MN}^A - U_{MN}^B = U_M^A - U_N^A - U_M^B + U_N^B = U_M^A - U_N^A - U_{MN}^B. \quad (4)$$

式(4)中, $U_{测}$ 为观测系统测量的电位差, U_M^A, U_N^A 为供电电极 A 在测量电极 M, N 上产生的电位, U_{MN}^B 为无穷远电极在测量电极 M, N 产生的电位差.由电位装置 AM 视电阻率计算公式得

$$\rho_s^{AM} = 2\pi R_{AM} \frac{U_{测} + U_N^A + U_{MN}^B}{I_{测}} = 2\pi R_{AM} \frac{U_{测}}{I_{测}} + 2\pi R_{AM} \left(\frac{U_N^A + U_{MN}^B}{I_{测}} \right). \quad (5)$$

式中: $I_{测}$ 为观测装置测量的供电电流.

近场电位观测系统使用较小的供电电极距时 ($R_{BM} \geq 5R_{AM}$), 可以认为测量的数据不受近场效应影响, 当供电电极距 R_{AM} 逐步增大并超过无穷远极距时将其视作四极观测系统, 此时供电电极 A, B 在半空间条件下产生矩形场, 由于供电电极距 R_{AM} 与无穷远极距 R_{BM} 差值较小, 因此供电电极 A, B 在无穷远电极 N 处产生的电位相等, 即

$$U_N^A = U_N^B = \frac{\rho_s^{BM} I_{测}}{2\pi R_{BN}}. \quad (6)$$

由于 ρ_s^{BM} 为电位装置 BN 的视电阻率值,加之无穷远电极 B,N 位置不变,因此 $\rho_s^{BM} = 2\pi R_{BN} \frac{U_{终}}{I_{终}}$,其中 $U_{终}, I_{终}$ 为测量系统在最大供电电极时测量的电位差,供电电流,将其代入式(6)整理得

$$U_N^A = \frac{U_{终}}{I_{终}} I_{测} \tag{7}$$

将式(7)代入式(5)中,整理得

$$\rho_s^{AM} = 2\pi R_{AM} \frac{U_{测}}{I_{测}} + 2\pi R_{AM} \left(\frac{\frac{U_{终}}{I_{测}} I_{测} + U_{MN}^B}{I_{测}} \right) = 2\pi R_{AM} \frac{U_{测}}{I_{测}} + 2\pi R_{AM} \left(\frac{U_{终}}{I_{测}} + \frac{U_{MN}^B}{I_{测}} \right) \tag{8}$$

由电位观测系统测量的视电阻率值 $\rho_{测s}^{AM} = 2\pi R_{AM} \frac{U_{测}}{I_{测}}$,将 $\frac{U_{MN}^B}{I_{测}} = \frac{U_{终}}{I_{终}}$ 代入式(8)得

$$\rho_s^{AM} = \rho_{测s}^{AM} + \rho_{测s}^{AM} \frac{I_{测}}{U_{测}} \left(\frac{U_{终}}{I_{终}} + \frac{U_{终}}{I_{终}} \right), \text{即 } \frac{\rho_s^{AM}}{\rho_{测s}^{AM}} = 1 + 2 \frac{I_{测}}{U_{测}} \cdot \frac{U_{终}}{I_{终}} \tag{9}$$

上式即为近场效应影响下电位观测系统的校正公式.

2.2 数据校正

通过近场效应校正公式对前述现场试验采集的电测深数据进行校正(见图8),校正结果表明:出现假性电阻率极小值之前的测深数据具有良好的校正效果,不受近场效应影响的测深数据校正公式同样降低了其与标准测深数据的差值.但对于超过假性低阻异常之后的尾部数据,校正公式对其无能为力.通过对近场效应校正后的测深数据进行误差分析,结果表明:有效电阻率数据利用率提高了3倍,校正公式应用于近场效应影响数据效果明显有效(见表3).

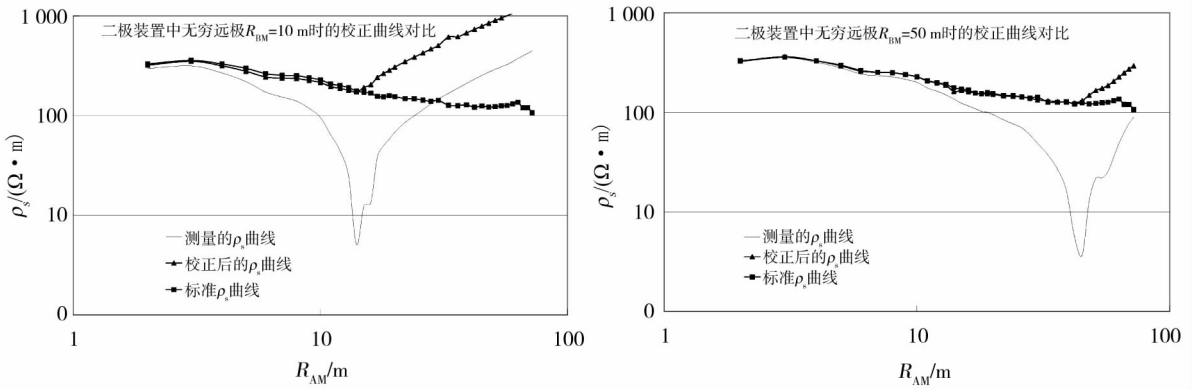


图8 电位观测系统无穷远电极距 $R_{BM} = 10 \text{ m}, R_{BM} = 50 \text{ m}$ 时的校正曲线效果图

表3 电位观测系统无穷远电极距 $R_{BM} = 50 \text{ m}$ 时数据校正误差分析表

电极序号	近场效应	近场校正	电极序号	近场效应	近场校正	电极序号	近场效应	近场校正
极距/m	误差/%	后误差/%	极距/m	误差/%	后误差/%	极距/m	误差/%	后误差/%
1(2)	2.19	0.52	12(13)	20.97	2.13	23(28)	56.23	0.57
2(3)	1.16	1.17	13(14)	22.37	8.07	24(30)	64.20	5.82
3(4)	3.15	0.23	14(15)	27.13	2.87	25(33)	69.15	2.80
4(5)	6.05	1.40	15(16)	30.30	3.89	26(36)	77.19	1.77
5(6)	7.88	1.59	16(17)	29.67	0.48	27(39)	85.41	1.05
6(7)	7.69	0.05	17(18)	32.80	0.55	28(42)	93.45	2.48
7(8)	9.33	0.52	18(19)	36.09	2.86	29(45)	95.13	4.86
8(9)	10.32	0.08	19(20)	37.98	2.30	30(48)	87.62	21.73
9(10)	12.00	0.14	20(22)	42.17	1.02	31(51)	80.63	34.09
10(11)	15.41	0.80	21(24)	47.02	1.98	32(54)	80.76	38.72
11(12)	17.79	1.13	22(26)	49.94	0.48	33(57)	78.30	46.36

3 实例应用

3.1 工程区地质概况

山东省滕东生建煤矿 $3_{\text{下}}$ 107工作面开采煤层为 $3_{\text{下}}$ 煤层,以气煤为主,伪顶为砂质泥岩,直接顶为细砂岩,老顶为粉砂岩;底板直接底为泥岩,老底为细砂岩。 $3_{\text{下}}$ 煤层顶板为砂泥岩组合,受构造、岩性、沉积环境等因素影响,其富水性存在较大差异。 $3_{\text{下}}$ 煤层底板以下50 m为三灰含水层,其富水性也存在很大差异, $3_{\text{下}}$ 煤层开采过程中深受底板三灰水害的威胁,为指导 $3_{\text{下}}$ 107工作面开采前底板三灰探放水钻孔施工,采用高密度三维电法对 $3_{\text{下}}$ 107工作面进行勘探,同时应用近场效应校正技术对其进行实际工程效果检测。由于顶板富水性差,且存在高阻煤层的屏蔽作用,因此现场采集的数据可以仅针对底板岩层的富水性进行分析。本次数据采集在 $3_{\text{下}}$ 107回采工作面的运输巷,回风巷及切眼进行,以10 m间距布设电极,单条测线长度为1 200 m,测线总长度2 520 m,观测系统使用电位观测装置。由于井下工作面空间的限制,无穷远电极仅能分别位于相邻工作面的巷道中^[15-16],最小无穷远极距为1 600 m,因此存在近场效应。

3.2 处理结果对比

本次数据处理通过最小二乘反演算法^[17],得到 $3_{\text{下}}$ 107工作面的底板地层电阻率三维数据体,长1 200 m,宽130 m,深140~160 m(见图9)。于近场效应的存在,低阻区仅位于工作面两侧巷道及中间联络巷,且低阻异常区分布较为杂乱,需要对其进行近场校正处理。

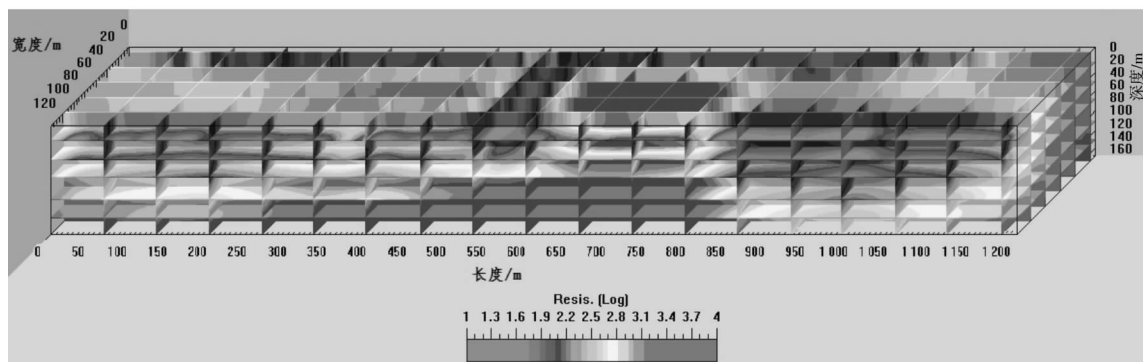


图9 未经近场效应校正的成果

由经近场效应影响校正后(见图10),低阻异常区主要位于切眼附近(水平方向0~50 m范围,垂直60~120 m范围),未经校正时的其他低阻异常均为近场效应引起的假异常。结合矿井水文地质及物探数据分析,各煤系含水层由于埋藏深,岩溶裂隙发育程度低,地下水迳流条件差,富水性较弱,在裂隙带中含有一定的裂隙水。由于物探成果的多解性,需要对切眼附近的低阻异常区进行钻探验证。

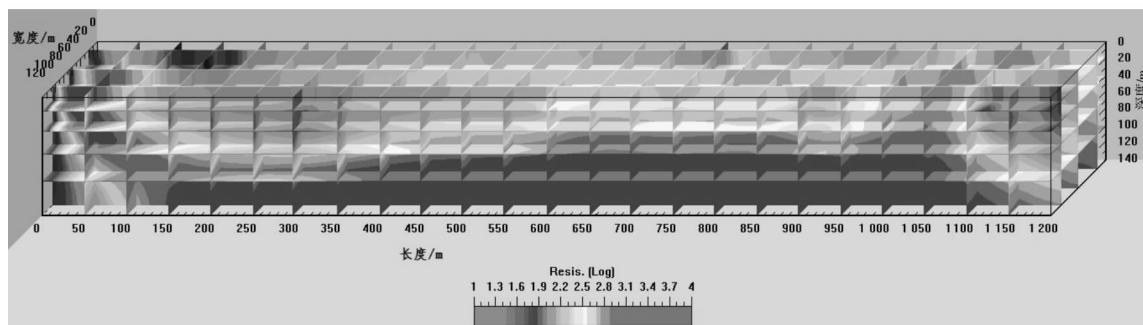


图10 经近场效应校正后的成果

目前工作面已回采完毕,根据已经施工完成的钻孔出水情况显示,切眼附近钻孔涌水量仅为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,其他钻孔无明显涌水情况,工作面回采期间及结束后涌水无明显变化,钻探验证情况符合物探结果。

4 结论

本文利用现场试验,数值模拟,现场应用等手段,分析并校正了受二极装置中无穷远极影响的直流电法数据,获得了近场影响下的电位装置校正公式,拓宽了二极装置的现场应用范围,获得了以下结论:

1) 现场试验表明,供电极距与无穷远电极距影响二极电测深数据,且无穷远极距对其影响更大.较小的无穷远极距使得测深曲线产生较大的误差,受影响的电测深曲线类型,极值位置都与无穷远极距相关.

2) 数值模拟表明,点电源,二极装置半空间电位分布受地下介质影响,2个点电源地电场受供电电极距影响,相对无穷远位置对点电源一侧数据理论上可以进行校正.

3) 根据二极装置视电阻率计算公式,理论上推导出电位观测系统近场效应校正公式 $\frac{\rho_s^{AM}}{\rho_{测s}} = 1 + 2 \frac{I_{测}}{U_{测}} \cdot \frac{U_{终}}{I_{终}}$, 此公式需要用探测数据本身校正,不受供电极距,无穷远电极位置影响.

4) 经校正处理后的测深数据,工程实例表明,近场效应校正使得探测精度明显提升,有效数据利用率提高了3倍,适合于地面半空间,井下全空间直流电法工程应用.

参考文献:

- [1] 程志平. 电法勘探教程[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007:10-121.
- [2] 牛超. 直流电法勘探中无穷远极影响及校正技术研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2011:10-45.
- [3] 施龙青,牛超,翟培合,等. 三维高密度电法在顶板水探测中应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3276-3279.
- [4] 牛超,施龙青,肖乐乐,等. 非无穷远极距对三极直流电法影响[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3324-3331.
- [5] 刘云,宋滔,王赞. 电导率连续变化2.5维直流电阻率法有限元数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1194-1200.
- [6] 吴子泉,宋文杰. 电阻率横向剖面法对倾斜断层的定量化研究解释[J]. 地球物理学进展, 2014, 28(5): 2748-2752.
- [7] 其华,王宜泰. 高密度电阻率法在煤矿界外巨空水探测上的应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(4): 107-111.
- [8] 张文俊,李术才,苏茂鑫,等. 基于井间电阻率成像的城市地铁溶洞探测方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2014, 44(3): 1672-3961.
- [9] 蔡盛. 快速汉克尔变换及其在正演计算中的应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1384-1390.
- [10] 顿月芹,闵越,袁建生. 阵列侧向测井正演响应的特征分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(1): 121-125.
- [11] 熊彬,阮百尧. 复杂地形条件下直流电阻率异常三维数值模拟研究[J]. 地质与勘探, 2003, 39(4): 60-64.
- [12] 强建科,罗延钟. 三维地形直流电阻率有限元法模拟[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1606-1613.
- [13] 宋滔,王旭本. 点源二维电场正演的一组新的波数[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 166-171.
- [14] 强建科. 起伏地形三维电阻率正演模拟与反演成像研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2006:23-56.
- [15] 冯锐,李智明,李志武,等. 电阻率层析成像技术[J]. 中国地震, 2004, 20(1): 13-30.
- [16] 陈峰,安金珍,廖椿庭. 原始电阻率各向异性岩石电阻率变化的方向性[J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 271-278.
- [17] 陈仲候,何昌礼. 电阻率测深的数字解释[J]. 地球物理学报, 1980, 23(1): 55-65.