

[11] Hu Wenhao, Su Zhuliu, Chen Qingli, 1997. Character of tipper data and V the application. OGP.32, 202-213.

EH4野外工作方法的研究与应用*

刘春明^{1, 3} 柳建新¹ 李夕兵^{2, 3}

1. 中南大学信息物理工程学院 湖南长沙 410083
2. 中南大学资源与安全工程学院 湖南长沙 410083
3. 中南大学矿业工程博士后流动站 湖南长沙 410083

摘要:随着我国矿产资源需求量的日益增长, 现有储量的逐渐减少, 如何提高对深部矿产的勘探能力, 是一个紧迫的课题。EH4 作为目前比较先进的电磁法仪器, 对于深部矿产有着很好的勘探效果, 但需要在实践中正确地应用。本文重点研究了电极距、电极相对高差、电极接地电阻、磁探头与电场电极夹角偏差、磁探头倾角偏差等情况对 EH4 勘探结果的影响程度, 并结合实例对野外作业提出了合理的建议。

关键词: EH4、深部找矿、电极距、相对高差、接地电阻、角度偏差

1. 前言

多年来由于资源的高消耗以及资源勘查投入的不足, 我国许多生产矿山陆续出现不同程度的资源危机。温家宝总理在原国家经贸委提交的报告中批示: “把解决资源危机矿山的资源接替问题作为重点, 通过对具备资源条件和市场需求的大中型矿山深部和外围探矿, 提高矿山经济效益, 延长矿山服务年限。”表明后备资源短缺已成为制约我国矿业可持续发展的一个重要因素而备受国家的重视。有关部门通过对我国金属矿山实地调研后, 认为大约有一半资源危机矿山的深部和近外围有进一步找矿的价值。这一切表明深部和外围找矿是我国矿产需求矛盾的重要途径。不管在矿山深部还是在矿区周边或外围, 探寻对象将主要针对掩盖或隐伏的资源, 因而需要采用适宜的手段和深部探测技术^[2]。

2. EH4大地电磁系统

EH4大地电磁系统是由美国GEOMETRICS和EMI公司联合生产的采用最新数字处理器的连续电导率成像系统, 该系统是采用天然场源与人工场源相结合大地电磁测量系统, 其有效勘探深度为几十米至一千米左右, 很适合于我国目前矿产勘探的现实需求, 与其他大地电磁系统如加拿大凤凰公司生产的V系统、美国EMI公司生产的MT系统等电磁仪一样, 其观测的基本参数为: 正交的电场分量(E_x , E_y)和磁场分量(H_x , H_y)。通过密点连续测量, 采用专业反演解释处理软件可以组成地下二维电阻率剖面, 甚至三维立体电阻率成像。

根据以Maxwell方程组为核心的大地电磁理论, 若将地表天然电场与磁场分量的比值定义

* 第一作者简介: 刘春明(1974~) 从事矿产资源勘探的电法研究和应用, 电话: 13755190421, E-mail: lifuming001@163.com

为地表波阻抗,那么在均匀大地背景下,此阻抗与入射场极化无关,只与大地电阻率以及电磁场的频率有关:

$$Z = \sqrt{\pi \rho \mu f (1-i)} \quad (1)$$

式中 f 是频率, ρ 是电阻率, μ 是磁导率。(1)式可用于确定大地的电阻率:

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad (2)$$

式中 ρ 的单位是 $\Omega \cdot \text{M}$, E 的单位是 mv/km , H 的单位是 nT 。

对于水平分层的大地,上述表达式仍然适用。但用它计算得到的电阻率为视电阻率,而且随频率的改变而变化,因为电磁流的大地穿透深度或趋肤深度与频率有关:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (m) \quad (3)$$

(3)式中 δ 的单位为 m 。

虽然趋肤深度在某种意义上来说与电磁波在介质中的穿透的深度有关,但它并不代表实际的有效探测深度。有效探测深度 D 是指某种测深方法的体积平均探测深度。对其有如下的经验公式:

$$D = \delta / \sqrt{2} \approx 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (m) \quad (4)$$

由(4)式说明,穿透深度仅仅取决于大地电阻率 ρ 和使用的信号频率 f 。随着电阻率的减小或频率增高,穿透深度变浅;反之,随着电阻率增大或频率降低,穿透深度加大。如大地电阻率结构一定时,改变信号频率便可以得到连续的垂直测深,这就是大地电磁法的基本工作原理^[5]。

根据上式,结合EH4的工作频率 $10\text{Hz} \sim 100\text{kHz}$,设大地电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{M}$,则EH4的有效勘探深度为 $11.5 \sim 1154\text{m}$,即通常所说的EH4的有效勘探深度为几十米到一千米左右。其具体情况与当地的不同地质情况有关。

3. 各种因素对EH4勘探效果的影响

EH4为目前最先进的大地电磁测量系统,其在1000米内的勘探精度很高,如果配以低频探头,则能达到更深的勘探深度。但在野外实践工作中如何提高其采集精度,以保证后期的数据解释与处理精度,这一点在相关论文中没有提及,但在实践工作中这非常重要,这也就是作者写作本文的主要原因。

3.1 电极距 L 的影响

电极距 L 指的是测量电场的一个偶极的水平长度,在计算中所用的单位为 km 。在测量中电极距是用来计算电场强度 E 的一个参数:

$$E = U/L \quad (5)$$

其中 U 为电位,其单位为mV。根据(2)、(5)式,视电阻率 ρ 与电极距 L 的平方为反比关系,当电极距 L 误差为10%,其他参数不变时,所计算得到的视电阻率 ρ 误差为21%;当电极距 L 误差为1%时,所计算得到的视电阻率 ρ 误差为2.01%。

由此可见,电极距 L 的误差对视电阻率的测量结果影响很大,因此在野外实践工作中,需提高电极距 L 的测量精度。由于电极距 L 为水平距离,在野外施工中由于地形起伏,测量电极距时需要进行地形改正,以提高总体测量精度,所以在前期定点工作中,应采用经纬仪或全站仪测量电极距 L 的长度。此外,为了保证电位的测量精度,提高电极距的相对精度,电极长度也不能太短。从提高观测精度方面讲,保证电极距的精度比保证点位的精度更为重要。

3.2 电极位置相对高差 ΔH 的影响

一个偶电极中的两个电极由于地形起伏的影响,往往难以在同一水平面,这种地形原因引起的电极相对高差是否会引起测量误差,这也是在现场施工中需要注意的问题。

根据加拿大凤凰公司对其生产的大地电磁系统野外施工的规范要求同一偶电极中的两电极的相对高差不能大于电极距的10%^[6],但没有具体说明对测量结果有多大的影响,虽然由于同属大地电磁法,对电极相对高差的要求可以相互借鉴,但还是有必要对电极相对高差 ΔH 对测量结果的影响进行量化,以便在后期数据处理过程中进行校正,因为有些特殊地形地貌,地形切割厉害,电极的相对高差已经超出10%。

试验表明,当在导电介质中的波长相当于地表起伏不均匀体的几何尺寸时,才出现地形对频率测深曲线的最大影响。这一现象通过有效勘探深度(或趋肤深度)得到部分解释。当频率较高时,与地表起伏的尺寸相比效勘探深度可能变为很小^[7]。如对于EH4的最高频100kHz,设地表电阻率为 $100\ \Omega \cdot \text{m}$,则其效勘探深度为11.25m;当电阻率为 $10\ \Omega \cdot \text{m}$ 时,其趋肤深度减为3.6m。可见对于EH4的高频段,当地表电阻率较低时,地形起伏的尺寸相对于其趋肤深度会很大,所以很有必要讨论地形起伏对测量结果的影响。

假设地形可用正弦函数 $y=A\sin x$ 来逼近,在参考文献[7]中有如下表1的试验结果:

表1 地形影响情况下确定 ρ_s 的误差

$\Delta H/L$	地形倾角 α	ρ_s^{E*} / ρ_s^E	ρ_s^{H*} / ρ_s^H
0.08	$4^\circ 27'$	1.01	1.02
0.16	$9^\circ 05'$	1.12	1.17
0.24	$13^\circ 30'$	1.44	1.63
0.32	$17^\circ 45'$	1.77	2.14
0.40	$21^\circ 48'$	2.41	3.22
0.48	$25^\circ 38'$	2.92	4.18
0.56	$29^\circ 15'$	3.72	5.77

其中 ρ_s^{E*} 、 ρ_s^{H*} 分别为考虑地形影响计算的E极化和H极化视电阻率, ρ_s^E 、 ρ_s^H 分别为没有考虑地形影响计算的E极化和H极化视电阻率。所谓E(H)极化是指电场E(磁场H)平行于二维构造走向的方向,而磁场(电场)与之垂直时的测量方式。

由表1可见,当地形电极高差与电极距L之比达到32%时,观测的视电阻率不考虑地形影响时将不及考虑地形影响的一半。当比率为8%时,产生的误差只有1%或2%,在物探测量的允许范围内,这也就是为何大地电磁法规范中规定的10%比率的理论依据。从上表可以发现,当高差与电极距的比率同比增加时,产生的误差比率则急骤上升,而不是同比增长。

当地形更加复杂时,由于地形起伏产生的测量误差将更加复杂,很难从量化的角度进行分析。当地形影响将严重影响测量结果时,可以选用TE模式的测量结果,因为地形影响对TE模式测量结果影响较TM模式小得多,不过TE模式反映地质不均匀体的能力较低。对于地形因素引起的干扰,现有专用程序进行地形校正,以最大可能消除其影响。

3.3 电极接地电阻 R_G 的影响

根据大地电磁理论和误差传播理论可推出:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 2 \frac{\Delta R_G}{R} \quad (6)$$

其中 R 为仪器输入电阻与接地电阻之和。

电极接地电阻 R_G 指的是同一个偶极中的两个电极间的接地电阻,接地电阻表示电极接地的情况。对于接地电阻的要求在EH4的用户手册中没有说明,查阅相关资料显示,对于V5野外施工的电极接地电阻一般要求在2000 Ω 以下,如果接地电阻太高,一方面会降低电位的测量精度,另一方面会屏障高频信号的输入,从而降低对浅层地质信息的分辨能力。但这一要求是上个世纪七、八十年代针对仪器的输入阻抗较小而提出的,如今随着仪器新的电子元器件的应用,其输入阻抗已达到百兆欧姆级,这样接地电阻对测量电位的影响已微乎其微,故对电极接地电阻的要求已没有多大必要。

但野外工作中对于接地电阻还是要加以注意,因为实际工作中出现高接地电阻往往伴随着电极接地电阻不稳、电极线接触不良等现象。

通常而言,接地电阻越低越好。一旦出现接地电阻较大的测点,则需要采取措施,查找原因,如果是由于接地问题引起的,就需要通过浇水、加盐水、挪点或深挖电极坑等手段,使接地电阻降到允许的范围内,以保证采集精度。

3.4 磁探头与电极夹角偏差

θ 的影响

根据大地电磁理论,野外磁探头与电场电极理论夹角为 90° ,设磁探头与电场电极夹角为 $90^\circ + \theta$,其中 θ 为野外工作中与理论要求夹角的偏差角, H_z 为正常方向磁场, H_r 为带偏差角 θ 的磁场, E_z 为电场电极。

如下图1所示:

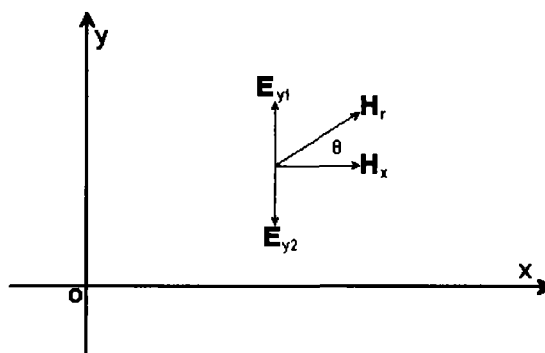


图1 磁探头与电极夹角偏差 θ 的野外布极示意图

根据电磁理论,当夹角有偏差时,野外所测得的磁场 H_r 应为 H_x 与 H_y 在 H_r 方向上的矢量和
即:

$$H_r = H_x \times \cos \theta + H_y \times \sin \theta \quad (7)$$

将上式与卡尼亚电阻率公式(2)代入 $\frac{\Delta \rho}{\rho}$,则得:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{(\rho_r - \rho)}{\rho} = \left(\frac{H_x}{H_x \cos \theta + H_y \sin \theta} \right)^2 - 1 \quad (8)$$

假设大地为均匀大地或均匀分层大地,则 H_x 与 H_y 相等,则上式可简化为:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{(\rho_r - \rho)}{\rho} = \left(\frac{1}{\cos \theta + \sin \theta} \right)^2 - 1 \quad (9)$$

根据(9)式,绘制电阻率误差与偏差角度 θ 的关系特征曲线图,如下图2:

从图中可见当为均匀大地或均匀分层大地时,所测得的电阻率误差最大可达到50%左右,当大地为二维或三维时,则由于大地电阻率为各向异性, H_x 与 H_y 不相等,且其关系复杂,具体误差关系与当地的具体地质情况有关,其误差也可能达到更高。所以在野外数据采集中,对于磁探头的布极方位要严格控制好,尽量减少布极方位误差带来的假异常。

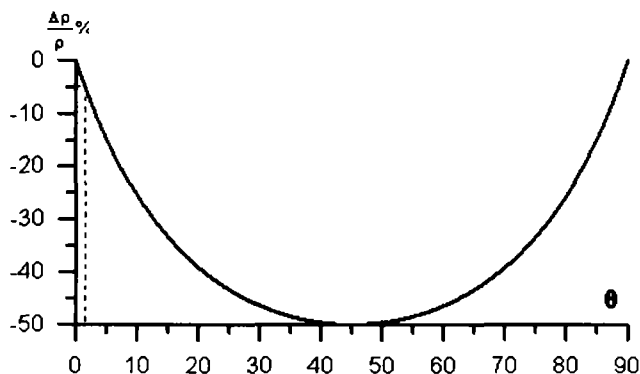


图2 电阻率误差与偏差角度 θ 的关系特征曲线图

Fig.2 the relation of resistivity error and θ

3.5 磁探头水平倾角偏差 β 的影响

在大地电磁理论中,要求磁探头必须水平放置,但在野外实际工作中,磁探头不可能做到绝对水平放置,特别在地形起伏严重的地区更是如此。对于磁探头水平倾角偏差对电阻率的影响,由于在实际工作中影响因素很多,我们仅对最理想的地质情况(即一维大地)进行研究,因为一维大地情况下源场没有垂直分量。而二维或三维大地,由于地质原因导致源场产生垂直分量,而其大小是难以估计。

假设磁探头与水平地面夹角为 β ，水平磁场为 H_x ，实际测量磁场为 H_m ，则 $H_m = H_x \cos \beta$ ，其产生的电阻率误差比为：

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \tan^2 \beta \quad (10)$$

其误差与水平地面夹角 β 的关系如下图3：

对比图2与图3，可得出在角度较小的情况下磁探头与电场电极夹角误差产生的电阻率误差要比磁探头与水平地面倾角偏差产生的要大得多，所以在野外工作中要特别注意前者的精度。

4. 综合应用

通过以上的认识，我们在福建厦门某矿山进行了野外研究工作。该矿山以磁铁矿与黄铁矿为主，夹杂以少量褐铁矿。上世纪八十年代初，曾在此地做过磁法与双频激电，均有高磁异常和低电阻率高幅频率异常，2003年在此地施工了三个80米左右的浅钻孔，但仅见少量磁铁矿化与黄铁矿化，未见可开采的工业矿体。我们首先对现场进行了踏勘，并大量查阅已知资料，特别是有关地质资料，通过研究得知该矿区内的成矿有利构造为断层或断裂带，于是研究决定采用EH4从电阻率参数来勘探断层或断裂带，以求找出成矿的有利地段。根据实际情况，共设计了三条短剖面线，勘探结果显示，EH4的反演结果很好地反映了断层的存在，也很直观地体现了已施三个钻孔的基本情况。具体情况如下图4：

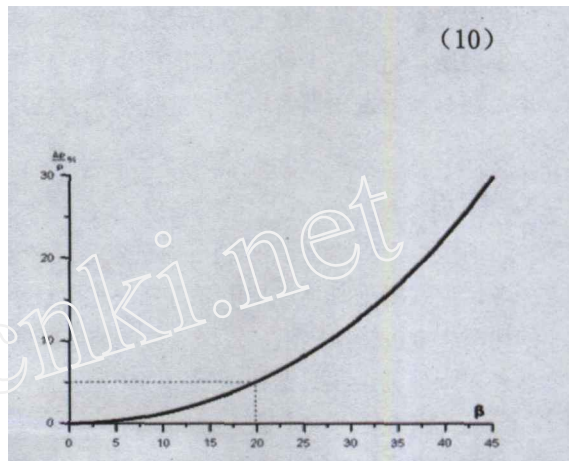


图3 电阻率误差与水平地面夹角 β 的关系特征曲线

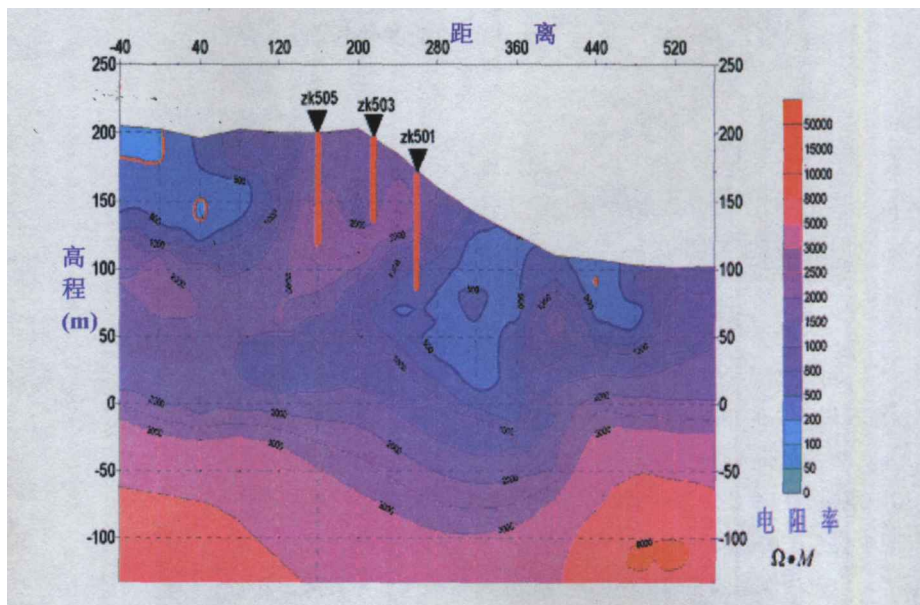


图4 福建厦门某矿区5线EH4电阻率反演断面图

从图 4 的反演结果图很清晰地看出,该矿区内存在一产状较陡的断层,该断层应为成矿的最有利部位,而已施工的三个钻孔的定位不准,根据勘探结果,建议在 5 线上水平 320 米的位置布设一 130 米左右深的钻孔贯穿断层,以作进一步验证。但 EH4 对于浅而薄的矿体反映不灵敏,所以三个钻孔所钻取的少量矿化带在反演断面图上没有反映,这是 EH4 系统的不足,在具体情况中要考虑结合其他有关方法进行综合研究。

5. 结语

通过以上对 EH4 野外施工的研究分析,该系统能很好地适用于目前我国矿产资源的勘探任务,但在野外具体施工中要特别注意电极距 L 的精度与长度、电极相对高差 ΔH 与电极距的比率、电极接地电阻、磁探头与电场电极的夹角、磁探头的倾角等情况,以保证测量精度。另外在野外施工和数据处理过程中还需要注意以下事项:

- 1、测点要远离电磁干扰区;
- 2、磁棒与电极要保持大于 5 米的距离,磁棒线与电极线要分开,并保持一定间隔,为减少风动干扰,传输电缆线要放开且压实;
- 3、当地形影响电极无法布设‘十’字形,可适当采取‘L’或‘T’字形等布极法;
- 4、数据采集时,叠加次数的选定要根据现场情况而定,以保证视电阻率、相位随频率的变化曲线圆滑、无突点和断点为标准;
- 5、在数据处理过程中,对于明显的干扰频点要进行剔除,以保证数据质量;
- 6、当电磁干扰较大时,可以采取有源的勘探方式,提高信噪比;
- 7、由于 EH4 只能测量深度与电阻率参数,故在具体应用中要分析其可行性,并结合多种物探方法的多种物性参数如双频激电测量的幅频率等提高勘探效果;
- 8、在野外实践中,要多收集与研究相关的地质和化探资料等等。

参考文献:

- [1]韦龙明等,我国有色金属矿产资源现状及建议[J].矿床地质,2002,21(增刊)
- [2]刘红涛等,用VLF、EH4和CSAMT方法寻找隐伏矿[J].地理物理学进展,2004(6),19(2)
- [3]劳雷公司,EH4操作手册,2000
- [4]孙升林,EH4电磁成像系统在中西部岩溶区地下水勘查中的应用[J].中国煤田地质,2001(9),13(3)
- [5]何继善等编,可控源音频大地电磁法[M].中南工业大学出版社,1990
- [6]何继善,激发极化法的测量精度及其对应用的影响[J].物探与化探,1995(2),19(1)
- [7]PHOENIX GEOPHYSICS, V5 System 2000MTU/MTU-A User Guide,2003
- [8]朴化荣编,电磁测深法原理[M].地质出版社,1990
- [9]莫懿,EH4电磁系统的近源效应及其校正方法[J].物探与化探,2000(8),24(4)
- [10]刘鸿泉等,电磁成像系统在煤矿中的应用研究[J].煤炭科学技术,2002(10),30(10)
- [11]祝顺义等,EH4电磁成像系统在水库大坝勘查渗漏的应用[J].有色矿冶,2004(4),20(2)
- [12]岳伍等,EH4电导率成像系统在砂岩型铀矿床上的应用研究[J].铀矿地质,1998(1),14(1)