表 2

地质体形状	i_s			M_s		
	理论值	计算值	相对误差	理论值	计算值	相对误差
水平圆柱体	60°	62.23°	3.72%	500	478.16	-4.37%
有限延深薄板状体	60°	59.37°	-1.05%	500	502.23	0.45%

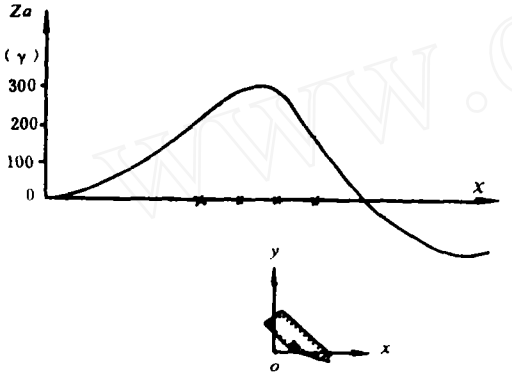

图 8

下面举一计算实例。图 8 是山东某地的磁测剖面(引自《地质与勘探》1980年第11期，42页)。选用异常中心附近四个观测点（“×”号示）及其异常值，根据（32 b）式建立四阶线性方程组，解之求得$i_s=48.32°$，$M_s=230.8$CGSM·米^2，磁性体中心点位置则用“▲”号示于图 8。实算结果也是令人满意的。

岩矿露头电性测定的装置选择及边界影响

桂林冶金地质学院　海戴援

在岩石露头上，特别是在探槽新揭露的新鲜露头或坑道壁上，测定岩矿石的电性参数，比室内在标本上测定，能获得较为真实的数值。本文对露头上测定电参数的技术条件，包括电极装置和边界影响进行了讨论。

露头测定所用装置的选择

从电法勘探基础理论可知，当地下半无限空间充满了均匀各向同性介质（其电阻率为ρ_1，极化率为η_1）时，无论采用何种装置，所测得的视电阻率ρ_s和视极化率η_s的值就是它们的真实值（ρ_1和η_1）。

四极（此处指对称四极装置）、三极以及二极装置都可用在露头上进行小极距的测深，或小极距的剖面测量，以获取露头的ρ及η值。三种装置计算电阻率的公式在一般电法勘探的教科书中均可查到，其极化率计算公式就是其二次电位与一次电位的比。三种装置测得的电位差ΔV对比的特点是，在电极距及电流相同的情况下有：

$$\Delta V_{MN}^{二极}>\Delta V_{MN}^{四极}>\Delta V_{MN}^{三极}$$

根据上述三种装置场的特征，在进行露头测定时，装置的选择可遵循如下原则：

1.要使ΔV_{MN}读数增大，可采取增大电流或改变装置两种方式。前者只能有限度的增大，这是因为露头面积不大，电流太大则导致过大的电流密度，破坏了场的线性特征，使基本公式不能适用。所以，在电流密度较大的情况下，欲增大ΔV_{MN}读数，以改变装置为宜。

例如：在极化率较低的露头上测定η参数时，为了保证ΔV_{MN}的观测精度而又不使电位密度过大，以采用二极装置为好。

2.欲使ΔV_{MN}读数减小而又要保证电流有较大的读数时，应采用三极装置。

例如：测定电阻率较高的岩石露头的ρ时，

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如果采用DDC—2自动补偿仪，它的ΔV最大测程是1000mV，电流小于1mV则不能保证观测精度。若要保证电流能准确读数，电位差又不超格，可采用三极装置。这样，在电流相同的条件下，电位差可以小一倍，用DDC—2便可测定。当然，改变装置后仍不能解决上述矛盾，则可以配备微安表或采用ΔV_{MN}分压线路（即增设$\Delta V_{MN}\times10$档或$\Delta V_{MN}\times100$档）。

3.待测露头特别坚硬，或电阻率特别高时，AB及MN接地电阻很大，至使电流很小，观测误差大。而且在这类露头上包括在坑道壁和陡岩的布极也很困难，钻眼不容易，接地条件差，应该选择在露头上布极最少的装置。而“无穷远”极则可任意选在露头外接地好的地方。露头上布极少，除能减小接地电阻及提高效率外，还有减小K值误差等优点。

4.在比较平坦的露头上可采用四极装置，它具有测量极附近场均匀的特点，电极离边界的距离可以较近。

露头测定的边界影响问题

在露头上测定参数，无论采用何种装置，都应避免露头边界影响，保证观测数据正确。装置系统应离边界多远才能忽略边界的影响呢？下面以露头电阻率测定为例进行讨论。

设地下有一个ρ_0介质与ρ_1介质的直立接触面（图1），欲测定ρ_1介质的真电阻率，离界面最近的电极A与界面距离d应取多大，才能避免边界影响（即，使ρ_1的相对误差＜5%，或ρ_s/ρ_1＜1.05或0.95）。

以下逐一对不同装置进行了计算。

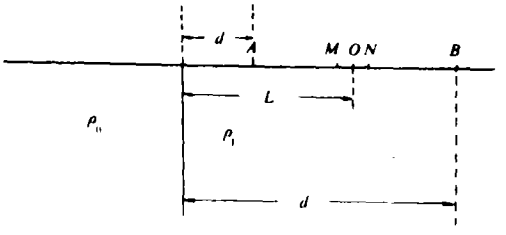

图1

1.二极装置（图1中$N\to\infty$，$B\to\infty$）

当A极远离边界时，即$d\to\infty$时，相当于在均匀各向同性半无限空间中充满了ρ_1介质。不言而喻，测得的ρ_s即等于ρ_1。

当d有限，ρ_0介质对A点电源电场的影响存在，即存在边界影响。此时，根据静象法原理有：

$$V_M=\frac{I\rho_1}{2\pi}\left(\frac{1}{\overline{AM}}+\frac{K_{12}}{2d+\overline{AM}}\right)\quad(d\text{有限})$$

$$K_{12}=\frac{\rho_0-\rho_1}{\rho_0+\rho_1}$$

$$\rho_s=2\pi\overline{AM}\frac{V_M}{I}=\rho_1\left(1+\frac{\overline{AM}\cdot K_{12}}{2d+\overline{AM}}\right)$$

于是可得

$$\rho_s/\rho_1=1+\frac{\overline{AM}K_{12}}{2d+\overline{AM}}=1+\frac{K_{12}}{\frac{2d}{\overline{AM}}+1}\quad(1)$$

由（1）式可知，当d不够大时，应用二极装置在ρ_1介质中测到的视电阻率ρ_s就不等于ρ_1，即边界影响的存在使电阻率ρ_1的测定值产生了误差。这一误差值除与d及$\overline{AM}$的选取有关外，还与$K_{12}=\frac{\rho_0/\rho_1-1}{\rho_0/\rho_1+1}$有关。表1根据（1）式计算了当$\mu=\rho_0/\rho_1=\infty$，100，10，2，$\frac{1}{2}$，$\frac{1}{10}$，$\frac{1}{100}$，0等值时，$\rho_s$随$d$的变化值，并绘出了$\rho_s/\rho_1$与$d/\overline{AM}$的关系曲线图（图2）。

由表1和图2可知：采用二极装置测定电阻率ρ_1时，若使边界影响的误差小于5%（即：ρ_s/ρ_1＜1.05或0.95），A极离边界的最近距离d与围岩电阻率值有关，由计算结果可知：当μ与d满足下列关系式，即：

$\mu=\infty$（或0）时，　$d\geqslant10\overline{AM}$；

$\mu=100$（或$\frac{1}{100}$）时：$d\geqslant9\overline{AM}$；

$\mu=10$（或$\frac{1}{10}$）时：　$d\geqslant8\overline{AM}$；

$\mu=2$（或$\frac{1}{2}$）时：　$d\geqslant3\overline{AM}$。

可以使边界影响小于5%。实际工作中，μ值未知，可取$\mu=\infty$，这时的d值为最佳保险距离，

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1

$d/\overline{AM}$ \ ρ_0/ρ_1	ρ_s/ρ_1							
	∞	0	100	1/100	10	1/10	2	1/2
1/2	1.5	0.5	1.49	0.51	1.41	0.59	1.16	0.84
1	1.33	0.67	1.32	0.68	1.27	0.73	1.11	0.89
2	1.2	0.8	1.196	0.804	1.16	0.84	1.06	0.94
3	1.14	0.86	1.137	0.863	1.11	0.89	1.048	0.952
4	1.11	0.89	1.108	0.892	1.09	0.91	1.039	0.961
5	1.09	0.91	1.088	0.912	1.07	0.93	1.030	0.97
7	1.067	0.933	1.066	0.934	1.055	0.945	1.022	0.978
10	1.048	0.952	1.047	0.953	1.039	0.961	1.015	0.985

即 $d>10\overline{AM}$ 时，对任意 μ 值，均可忽略边界影响。

2. 三极装置

计算条件仍如图 1，此时，$B\to\infty$，并假定 $MN\to 0$（实际只要 $\frac{MN}{AO}<0.4$ 即可）。当 d 有限，ρ_0 介质对 A 点电源电场的影响存在，据镜象法原理，有：

$$\left.\begin{aligned} V_{MN} &= \frac{I\rho_1}{2\pi}\left(\frac{1}{\overline{AO}}+\frac{K_{12}}{2d+\overline{AO}}\right) \\ E_{MN} &= \frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{\overline{AO}^2}+\frac{K_{12}}{(2d+\overline{AO})^2}\right] \\ \rho_s &= 2\pi\overline{AO}^2\frac{E}{I}=\rho_1\left[1+\frac{\overline{AO}^2\cdot K_{12}}{(2d+\overline{AO})^2}\right] \end{aligned}\right\} \quad (d\text{ 有限，MN}\to 0)$$

于是有：

$$\rho_s/\rho_1 = 1+\frac{\overline{AO}^2K_{12}}{(2d+\overline{AO})^2} = 1+\frac{K_{12}}{\left(\frac{2d}{\overline{AO}}+1\right)^2} \qquad (2)$$

据（2）式可计算出表 2 并绘制出不同 μ 值的 ρ_s/ρ_1 与 $d/\overline{AO}$ 的关系曲线于图 3。

由图 3 及表 2 可见，若要保证露头边界影响小于 5 %，则要满足：

$\mu=\infty$（或 0）时，　$d>1.7\overline{AO}$；

$\mu=10$（或 $\frac{1}{10}$）时，　$d>1.5\overline{AO}$；

$\mu=2$（或 $\frac{1}{2}$）时，　$d>0.8\overline{AO}$。

实际工作中，对任意 μ 值，$d>0.8\overline{AO}$ 均可忽略边界影响。因此，这一距离是三极装置避免边界影响的最佳保险距离。

3. 四极装置

当 d 有限，根据（2）式，对 A 点电源有：

$$\rho_s^A=\rho_1\left[1+\frac{K_{12}}{\left(\frac{2d}{\overline{AO}}+1\right)^2}\right]$$

对 B 点电源则有：

$$E_{MN}^B=\frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{\overline{AO}^2}-\frac{K_{12}}{(2d'-1)^2}\right] \qquad (MN\to 0)$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

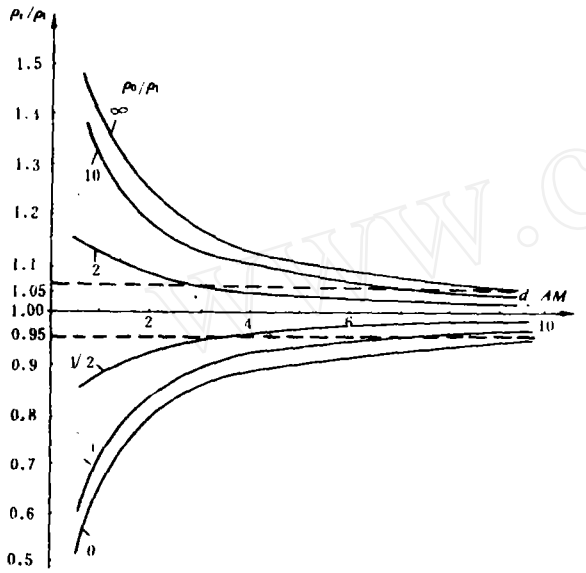

图 2

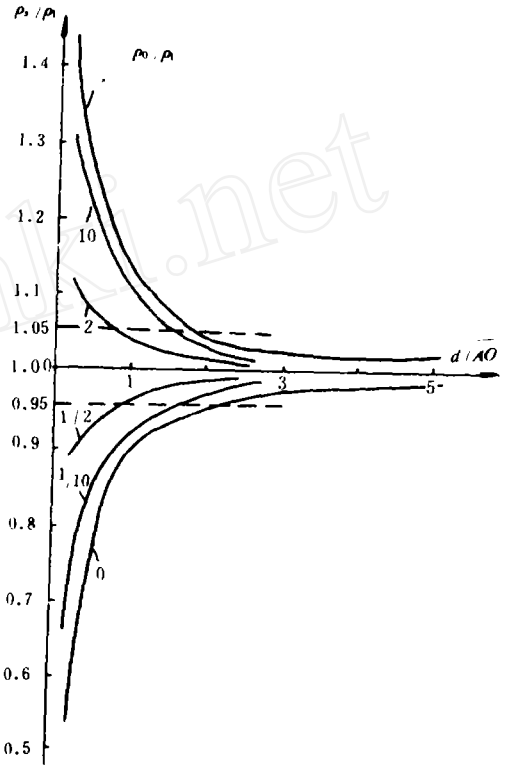

图 3

表 2

$\mu=\rho_0/\rho_1$ ＼ $d/\overline{AO}$	ρ_s/ρ_1					
	∞	0	10	1/10	2	1/2
0.25	1.44	0.56	1.36	0.64	1.148	0.852
0.5	1.25	0.75	1.2	0.8	1.08	0.92
0.8	1.148	0.852	1.12	0.88	1.049	0.951
1.0	1.11	0.89	1.09	0.91	1.037	0.963
1.5	1.06	0.94	1.05	0.95	1.02	0.98
1.7	1.052	0.948	1.042	0.958	1.017	0.983
2	1.04	0.96	1.03	0.97	1.013	0.987
3	1.02	0.98	1.0167	0.9833	1.0068	0.9932
4	1.012	0.988	1.01	0.99	1.004	0.996
5	1.008	0.992	1.007	0.993	1.003	0.997
10	1.002	0.998	1.002	0.998	1.0007	0.9993

$$\rho_s=\rho_1\left[1-\frac{K_{12}}{\left(\frac{2d'}{\overline{AO}}-1\right)^2}\right]=\rho_1\left[1-\frac{K_{12}}{\left(\frac{2d}{\overline{AO}}+3\right)^2}\right]$$

（$\because d'=d+2\overline{AO}$）

由电法勘探理论可知，对称剖面与三极剖面之间有如下关系（极距相应K值相同时）

$$\rho_s^{AB}=\frac{\rho_s^A+\rho_s^B}{2}$$

于是得到：

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\rho_s^{AB}=\frac{\rho_s^A+\rho_s^B}{2}=\frac{\rho_1}{2}\left\{\left[1+\frac{K_{12}}{(\frac{2d}{\overline{AO}}+1)^2}\right]+\left[1-\frac{K_{12}}{(\frac{2d}{\overline{AO}}+3)^2}\right]\right\}$$

所以四极装置的ρ_s/ρ_1式为：

$$\rho_s/\rho_1=1+\frac{K_{12}}{2}\left[\frac{1}{(\frac{2d}{\overline{AO}}+1)^2}-\frac{1}{(\frac{2d}{\overline{AO}}+3)^2}\right] \quad (3)$$

表3是根据（3）式计算的不同μ值的ρ_s/ρ_1与$d/\overline{AO}$的对应值，并给出了对称四极装置的ρ_s/ρ_1与$d/\overline{AO}$的关系曲线图（图4）。此处的d，是离边界最近的供电电极与界面之间的距离。

$d/\overline{AO}$ \ $\mu=\rho_0/\rho_1$	ρ_s/ρ_1					
	∞	0	10	1/10	2	1/2
0.25	1.181	0.819	1.148	0.852	1.06	0.94
0.5	1.094	0.906	1.077	0.923	1.031	0.969
0.8	1.0503	0.9497	1.041	0.959	1.017	0.983
1	1.0355	0.9645	1.029	0.971	1.012	0.988
1.5	1.0174	0.9826	1.014	0.986	1.0058	0.9942
2	1.01	0.98	1.008	0.992	1.0033	0.9967
3	1.0039	0.9961	1.003	0.997	1.0013	0.9987
4	1.002	0.998	1.0016	0.9984	1.0007	0.9993
5	1.001	0.999	1.001	0.999	1.0003	0.9997

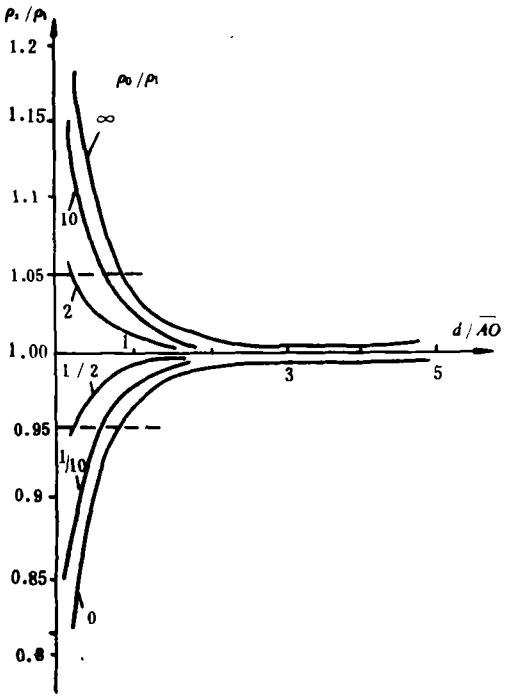

图4

由表3及图4可以清楚的看到，只要$d>0.8\overline{AO}$，则无论μ值多少，都足以保证$\rho_s/\rho_1<1.05$或0.95，因此，$d>0.8\overline{AO}$是对称四极装置避免边界影响的最佳保险距离。

以上三种装置都只讨论了一侧边界的影响，其他侧面的影响，讨论和计算方法相同，如讨论B极一侧的界面影响，则d为B与界面的距离，d'为A与界面的距离，同样可以得到（3）式的结论。

通过对三种装置的边界影响的讨论可见，各装置避免边界影响的最佳保险距离是：

四极：$d>0.8\overline{AO}$；三极：$d>1.7\overline{AO}$；二极$d>10\overline{AM}$。即对相同的电极距，四极装置的边缘电极离边界的距离要求最低（$0.8\overline{AO}$），二极装置要求最高（$10\overline{AM}$）。上述边界影响的规律，在测定η时，也可参照考虑。

然而，对于一个具体的露头，是否四极装置最易避免边界影响呢？不尽然。因为四极装置要

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在露头上找到平坦的地方对称布置四个极，又要保证AB两侧离边界的距离都满足$d>0.8\overline{AO}$，还得保证$MN<0.4\overline{AO}$(即满足$\overline{MN}\to 0$的条件)，这些条件同时满足，往往是不容易的。而二极装置只要在露头上布两个电极，且A、M两极又可离得很近，它要满足$d>10\overline{AM}$就不难做到。根据野外实践体会，最理想的是三极装置，它对离边界的要求不高，$d>1.7\overline{AO}$即可。由于少布置了一个对称的B极，给布极和测量带来极大的方便，并能提高观测精度。所以说，三极装置是露头测定的较理想的装置。当然，根据露头及预测参数的特点，综合上述各种分析，我们可以灵活的、有依据的合理选择装置形式，并在布极中有意识地避免边界影响。

视磁化率（SUSC）填图的理论与实践

视磁化率（SUSC）填图是对总磁场强度数据进行高分辨率增强滤波的一种方法。虽然也可以对地面磁测或一维数据进行视磁化率的计算，但用于二维航磁图的分析，更能发挥其巨大的潜力。计算视磁化率最简单直接的方法，是在波数域中进行分支线性滤波(component linear filter),需要作以下四种滤波处理:低通稳定滤波、向下延拓、化到磁极、消去几何因子。方法所依据的统计前提是：假定地面（测区）是由一些直立矩形棱柱体组合而成的；棱柱体的截面等于数据抽样间距；向下无限延伸；只有感应磁化。航磁图上二维的等间距M×N的网点值，就与由这些大小和磁化方向不完全相同的棱柱集合体所产生的叠加异常对应。

在波数域中将总磁场强度数据转换成视磁化率图的方法很简单。布哈塔恰尼亚曾给出了棱柱体的频谱表达式：

$$F(u,v)=2\pi|J_t|\cdot D(u,v)\cdot B(u,v)\cdot H(u,v) \qquad (1)$$

式中：

$|J_t|$—包括剩磁在内的总磁化强度；

$D(u,v)$—方向因子（复数）；

$B(u,v)$—几何因子；

$H(u,v)$ = 深度因子。

实际上，$F(u,v)$ 相当于将总磁场图进行离散的快速富氏变换（FFT）。经此变换后再转换为视磁化率图就容易了，只需将因子都消掉即可。消除方向因子或化到磁极，是用$D(u,v)$的倒数乘$F(u,v)$来实现的。同样消除深度因子可通过向下延拓来完成，而几何因子的消除则是通过乘上$B(u,v)$的倒数实现的：

$$F'(u,v)=F(u,v)\cdot D(u,v)^{-1}\cdot B(u,v)^{-1}\cdot H(u,v)^{-1} \qquad (2)$$

式中$F'(u,v)$—磁化强度在波数域中的分布；

$D(u,v)^{-1}$—化极滤波器；

$B(u,v)^{-1}$—几何因子滤波器；

$H(u,v)^{-1}$—向下延拓滤波器。

实际工作中，在（2）式中还必须加用一种起稳定作用的低通滤波器，以控制$H(u,v)^{-1}$的高波数成分被放大。虽然通过$D(u,v)^{-1}$可以解释剩余磁化强度，但所需要的参数一般仅适用于某一棱柱体组合，而对整个图来说并不合适。如果不考虑剩磁，则（2）式变为：

$$F'(u,v)=2\pi KH \qquad (3)$$

在上式中，K为磁化率，H为磁化强度平均值，（3）式现在为视磁化强度在波数域的分布。通过快速富氏变换的逆变换并除以$2\pi H$，就得到视磁化率图，由于（在FFT之前）最初消除的区域场的类型在不同程度上控制背景场或平均视磁化率的水平，因此在最后一步中需使用一个任意的位移因子。实际上，最后的视磁化率图被调整到某一测量的K值，在无磁性地区，则调到0.0值。

由于受方法本身的限制，以及棱柱集合体不符合上述物理假定等因素的影响，可能使视磁化率的异常解释复杂化。

如果物理假设条件有一条或多条没有满足的话，视磁化率异常就会发生各种各样的并且有一定特征的畸变。按畸变严重程度降低的顺序，这些物理假设条件依次为：（1）组合的棱柱体的磁化强度只有感应磁化；（2）组合的柱体的侧边是垂直的；（3）组合柱体为无限延深；（4）数据下延

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net