

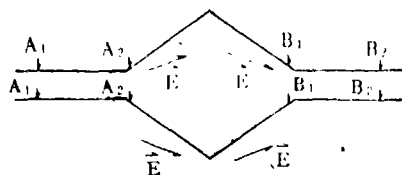
起伏地形条件下激电异常的定性分析和定量计算

贵州冶金地质勘探公司物探队 陈颖祥 梁鸿喜

测区地形起伏使地下一场发生畸变,因而矿体的激发条件和测量条件也都改变。原来适用于水平地形条件下的激电异常解释方法(如类磁选择法等),如不加分析直接用来解释起伏地形条件下的激电异常,必将导致较大的误差,甚至得到错误的结果。本文根据模拟实验结果就地形对激电异常影响进行了定性分析,并对二度激电异常的定量计算方法作了初步探讨。如有错误,欢迎批评指正。

地形对激电异常影响的定性分析

一、山脊(或山谷)两侧斜坡 当采用中梯装置工作时,地形起伏对电流密度的分布所给的影响是:在山脊下变稀,在山谷下变密,而使山脊(谷)两侧斜坡下的电流方向不平行水平面(地表)。由图1可见,在地形剖面上,山脊(谷)左侧斜坡,极化场 $\vec{E}$ 的方向与斜面正(负)方向的夹角成锐角,在右侧斜坡极化场的方向与斜面负(正)方向成锐角,因此,沿斜坡观测到的极化矿体异常形态主要决定于矿体倾向与斜面的夹角、通过矿体截面的极化场方向与斜面的夹角以及矿体的形态、大小和位置。图2中所



1

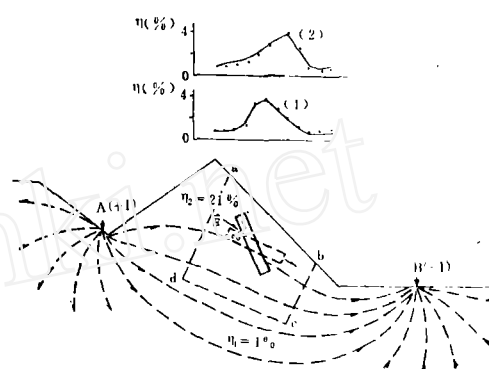


图 2

示的 η 曲线是在电阻网络上的模拟实验结果。通过板状矿体截面的极化场 $\vec{E}$ 的方向与山脊右侧斜坡负方向成锐角,矿体1和矿体2在剖面上均向右侧倾斜,但矿体1的倾向与斜面正方向成锐角,而矿体2的倾向是与斜面的负方向成锐角。如不考虑地形影响,只根据曲线分析,可能误认为矿体2向左倾斜,得出相反的判断。

二、山脊(或山谷) 由图3可见,沿

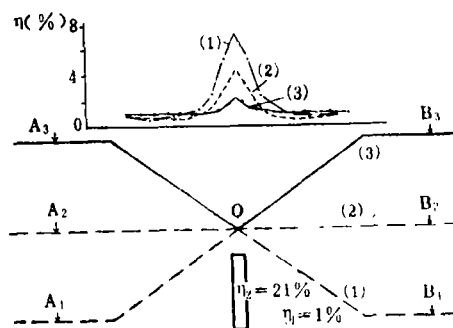


图 3

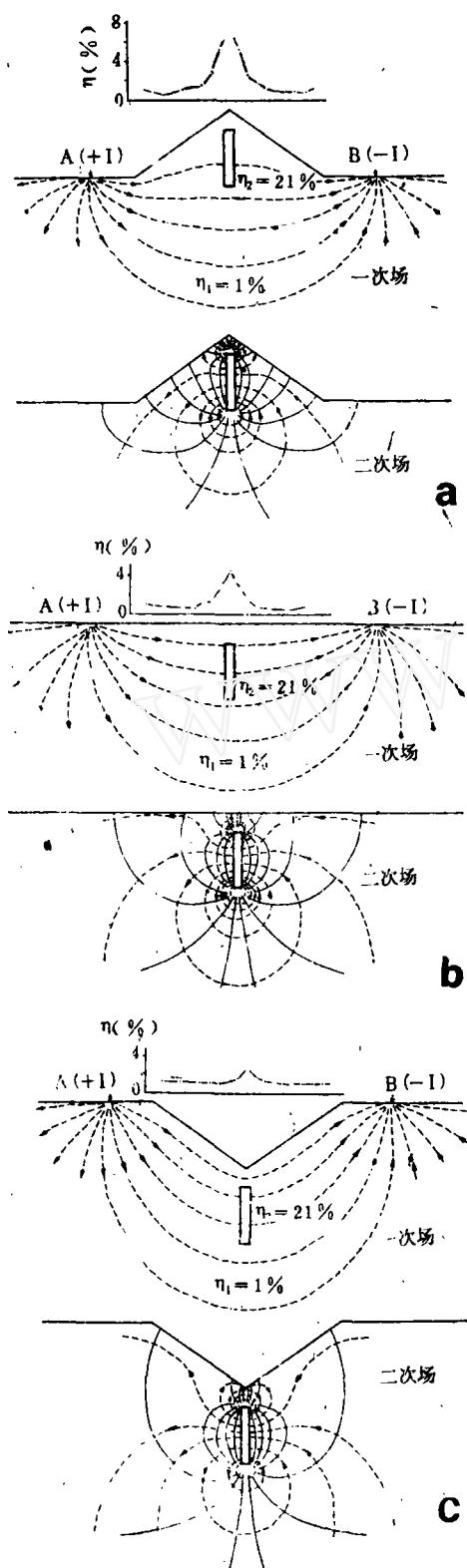


图 4

山脊观测得到的 η 异常, 其强度比在平地条件下测得的要大, 而且异常范围也宽, 沿山谷测得的则刚好相反, 异常强度小、异常范围窄。图 4 是模拟在山脊、平地、山谷三种地形条件下用中梯装置供电的极化场 (近似地等于一次场) 断面电场分布图, 和直立板状矿体的二次场断面电场分布图。从图上可定性地看出: a, 假定在三种情况下所用的供电电极距 AB 和一次电流强度 I 均相同。一次电流线的密度在山脊下比在平地下稀, 在山谷下比在平地下密。沿地面等距测点观测到的两测点之间的一次场电位差是 $\Delta U_1 \text{ 山脊} < \Delta U_1 \text{ 平地} < \Delta U_1 \text{ 山谷}$ 。b, 假定在三种情况下通过矿体的一次场电流密度都相同, 在断电后, 矿体产生的二次场电流线分布密度 (等位线分布密度) 则是在山脊下比在平地下密, 在山谷下比在平地下稀。在地面以等距测点观测到的两测点之间的二次场电位差是 $\Delta U_2 \text{ 山脊} > \Delta U_2 \text{ 平地} > \Delta U_2 \text{ 山谷}$, 这是由于山脊下围岩介质分布空间小于 2π 。相对平地 (2π) 而言, 矿体放电的二次场被压缩在山脊下, 因而电流密度增大 (等位线密)。在山谷的情况刚好与山脊的情况相反。在这三种不同地形条件下, 虽然所用的供电电极距和一次电流强度相同、极化体的埋深一样 (相对于图 3 中 O 点所在的位置), 形状、大小和极化参数也都一样, 但在体极化矿体上所通过的电流密度并不一样, 可是在异常部位, 二次场与一次场的比值始终是: 在山脊部位增大, 在山谷部位减小 (均相对平地而言)。以上的分析也同样适用于介质空间大于 2π 的山脚和介质空间小于 2π 的阶地。

计算方法

在均匀介质中, 在体积极化条件下, 即当围岩和矿体的电阻率相差不大 ($\rho_1 \approx \rho_2$), 采用中梯装置, AB 垂直矿体走向, 矿体位于 AB 中间地段。当极化场方向不平行水平地表, 为斜极化时, 为了便于讨论体积极化矿体场值的计算, 将大小一样, 空间位置相

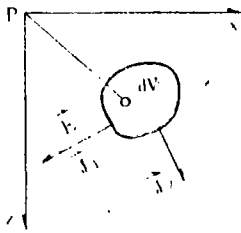


图 5

同的极化体和磁化体同置一座标系上, 这时矿体截面重合, 如图 5 所示。取极化场 $\vec{E}$ 的方向与磁化强度 $\vec{J}_1$ 的方向一致, 取磁化强度 $\vec{J}_2 \perp \vec{J}_1$, 和 $\vec{J}_2 = \vec{J}_1$, 由场论得到: 极化矿体在测点 P 所产生的二次电位 U_2 与磁化矿体在测点 P 所产生的磁位 $U_{\text{磁}}$ 具有下面的积分式:

$$U_2 = \int_v \frac{\vec{P} \cdot \vec{r}}{r^3} dv, U_{\text{磁}} = \int_v \frac{\vec{J}_1 \cdot \vec{r}}{r^3} dv.$$

在均匀极化时, 极化矿体沿 x 方向产生的二次场 E_2 为

$$E_2 = - \frac{\partial}{\partial x} \int_v \frac{\vec{P} \cdot \vec{r}}{r^3} dv = \frac{\eta \cdot E}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x} \int_v \frac{\cos(\vec{E} \cdot \vec{r})}{r^2} dv \quad (1)$$

在均匀磁化时, 磁化矿体沿力方向产生的水平磁场强度 ΔH_1 为

$$\Delta H_1 = - \frac{\partial}{\partial x} \int_v \frac{\vec{J}_1 \cdot \vec{r}}{r^3} dv = - J_1 \frac{\partial}{\partial x} \int_v \frac{\cos(\vec{J}_1 \cdot \vec{r})}{r^2} dv \quad (2)$$

由图 5 可见 $\cos(\vec{E} \cdot \vec{r}) = \cos(\vec{J}_1 \cdot \vec{r})$

对比 (1)、(2) 两式得

$$\eta_{\text{异}} = - \frac{\eta_{\text{余}}}{4\pi J_1} \Delta H_1$$

式中: $P = - \frac{\eta_{\text{余}}}{4\pi} E$ 为单位体积激发极化的电偶矩,

$\eta_{\text{余}} = \eta_2 - \eta_1$ 为极化体的剩余极化率,

$\eta_{\text{异}} = \eta_s - \eta_1$ 为剩余异常值。

由场论得知 (证明从略), 在斜磁化条件下, 空间位置相同、大小一样, 磁化强度相等而且互相垂直 ($\vec{J}_1 \perp \vec{J}_2$, $\vec{J}_1 = \vec{J}_2$) 的水平二度矿体, 磁化强度为 $\vec{J}_1$ 的水平磁异常 ΔH_1 与磁化强度为 $\vec{J}_2$ 的垂直磁异常 ΔZ_2 , 在数值上相等, 但符号相反, 即

$$\Delta H_1 = - \Delta Z_2 \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (3) 式, 得

$$\eta_{\text{异}} = \frac{\eta_{\text{余}}}{4\pi J_2} \Delta Z_2 \quad (5)$$

还可写成下式:

$$\eta_{\text{异}}^{\text{柱体元}} = \frac{\eta_{\text{余}}}{4\pi} \left[\sin 2(Q_{m+1} + \frac{\beta}{2}) - \sin 2(Q_m + \frac{\beta}{2}) \cdot L_n \frac{r_{m+1}}{r_m} \right]$$

式 (5) 说明, 在斜极化情况下, 矿体在极化场 $\vec{E}$ 的作用下所产生的激发极化异常与斜磁化 $\vec{J}_2$ 所产生的垂直磁异常 ΔZ_2 虽然幅值不同, 但曲线形态一样。

计算步骤

一、异常落在山脊(谷)的两侧斜坡上
在水平条件下, 中梯装置 AB 中间 1/3 范围内的电场方向与水平地表近乎平行, 可视为均匀场, 定量计算时可采用类同垂直磁化选择法。当山脊(谷)的斜坡具有足够长度时 (即异常两端背景值各有 3~5 个点落在斜坡上), 由模拟实验资料说明, 在斜坡的一定范围内 (如图 2 中虚线圈定的 a b c d 范围) 可近似地按均匀场处理, 只是极化场方向不平行水平面和斜面, 可采用类同斜磁化选择法作定量计算, 其步骤如下:

1. 垂直异常走向通过矿体中心用中梯装置测得一条精测剖面, 使被研究的异常落在供电极中间 1/3 地段。

2. 参看图 6, 取略大于地形剖面上最大比高为垂直距离 h, 在导电纸上用白铅笔画一条垂直两直边 eb、fd 的直线 ac, 满足 $ab = cd$, 按一定比例尺将野外地形剖面描在透明

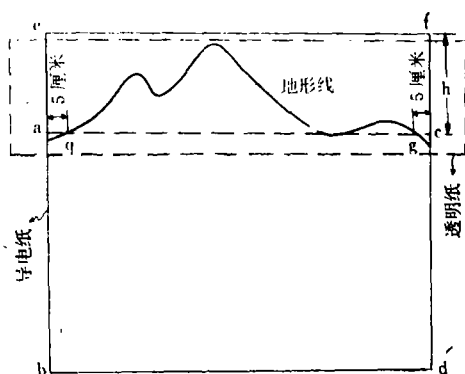


图 6

纸上, 再将透明纸和导电纸的一边重迭, 使异常所在段落在导电纸中间部位, 然后以异常中心所对应的点为轴心旋转透明纸, 使画在透明纸上的地形线与导电纸上直线ac相交, 满足 $aq = gc = 5$ 公分左右, 然后依据透明纸上的地形线, 沿 aq —地形线 qg — gc 用刀片将透明纸连同导电纸一起切开, 再将透明纸上地形线上的测点位置标在导电纸的地形线上, 即可得到以地形线 ac 为界的下半空间。

3. 参看图 7, 在导电纸的地形线上取与野外相同的AB位置进行供电, 用V—mV表头在异常所在的斜面上勾绘等位面 (表头的一端接在异常位置所对应的测点上, 移动表头另一端追索等位点, 将等位点连成等位线)。根据等位面与等电力线正交的原理, 作通过所研究的极化体截面的等位面的法线, 其方向即为电场 $\vec{E}$ 的方向 (极化场近似地等于一次场)。

4. 作 $\vec{E}$ 的垂直线 $\vec{J}$, 用米可夫量板, 使

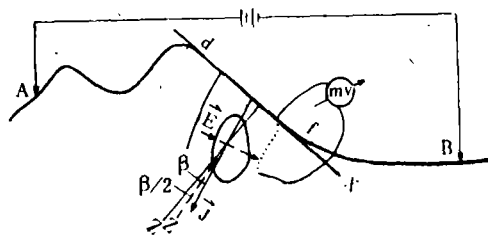


图 7

其X轴与斜面df重合, 其Z轴与 $\vec{J}$ 有一交角 β , 取 β 角的平分线得 Z' 。

5. 使量板Z轴与 Z' 重合 (平行), 和类同斜磁化法一样, 取剩余极化率 $\eta_{\text{余}} = \eta_2 - \eta_1$, 沿df地段每两测点间的中点逐点作选择法, 得到点数 $N_i (N_+ + N_-)$ 代入公式

$$\eta_s = \frac{\eta_{\text{余}}}{2\pi} (0.01N_i) + \eta_1$$

即可求得各点的视极化率 η_s 值。

6. 逐渐改变矿体截面的大小、形态和产状, 使选择的 η_s 曲线与实测曲线重合时为止。

图 2 中的 η 曲线是在电阻网络上采用等效电阻率法模拟实验得到的, 曲线上的“.”是采用类同斜磁化选择法计算得的 η 理论值, 可以看出两种方法的结果极为吻合。

图 8 为贵州某铅、锌、汞、黄铁矿化点的应用实例, 该处铅、锌、汞、黄铁矿在一定条件下有共生关系, 在验证激电异常时, 见到汞、锌矿体和黄铁矿、铅、锌矿化。还测定了岩心的激化率。用所介绍的方法进行计算, 所得的 η'_i (以·号表示的值与实测曲线基吻合)。

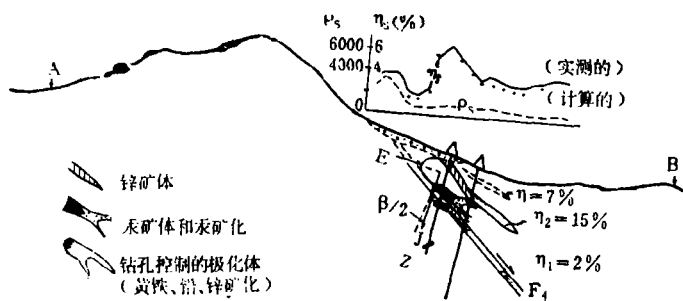


图 8

二、异常落在山脊（谷）下 应用保角映射进行坐标网模拟转换的基本原理在有关文献上已得到阐明，这里只介绍具体方法进行的步骤：

1、2、步骤与前段中的 1、2 步骤同。

3. 在已截好的以地形线 $\widehat{ac}$ 为界的下半空间导电纸上，沿 $\widehat{ab}$ 、 $\widehat{cd}$ 两边布置电极（见图 9a），用宽 2~3 毫米的薄铜片作线电极，沿 $\widehat{ab}$ 、 $\widehat{cd}$ 边安放，并用平头夹夹紧，保持铜片平直，而且与导电纸有良好的接触。对两线电极供以直流电（电源用 20 伏左右的干电池组），用 V-mV 表头和磨尖了的测量电极追索连接地形线 $\widehat{ac}$ 上各测点（1、2、3……）到对边 $\widehat{bd}$ 上的等位点（1'、2'、3'……），用白心铅笔将等位点连成等位线，在 W 面上等位线均为垂直 $\widehat{bd}$ 、平行 $\widehat{ab}$ 和 $\widehat{cd}$ 的一组不等距的平行线。Z 面上的测点（1、2、3……）和 W 面上的等位点（1'、2'、3'……）的座标一一对应。

4. 撤去铜片电极，在导电纸的地形剖面上取与野外相同的 A、B 位置供电（图 9b），将表头的一个测量电极先后固定在异常所在山脊（谷）地段的各个测点上（1、2、3……），用另一测量电极追索等位线（图中虚线所示）。在 AB 中间 1/3 地段，山脊（谷）下一定深度的局部范围内，所勾绘的等位面与沿 $\widehat{ab}$ 、 $\widehat{cd}$ 直边供电时所勾绘的等位面是近乎重合的，随着 AB 极距的加大，上述重合范围也变大。特别是在山脊等位面重合的情况比山谷的（结果未绘出）好。越往深处，等位面发生的偏离越大。越靠近供电电极位置，等位面的偏离也越大。

5. 参看图 9c，撤去 A、B 电极，先在靠近 W 面的 $\widehat{ab}$ 直边上找到使 $\widehat{bb_1} = \widehat{b_1b_2} = \widehat{b_2b_3} \dots = 1$ 公分的点 b_1 、 b_2 、 b_3 ……，过 b_1 、 b_2 、 b_3 ……用白心铅笔画出平行 $\widehat{bd}$ 的线 $\widehat{b_1d_1}$ 、 $\widehat{b_2d_2}$ 、 $\widehat{b_3d_3}$ ……。然后沿 $\widehat{ac}$ 、 $\widehat{bd}$ 布置线电极，用直径 0.1~0.2 毫米的单股裸铜丝作线电极，用透明胶纸将线电极紧靠纸边粘牢，要求接触良好。用测量表头的一个测量电极

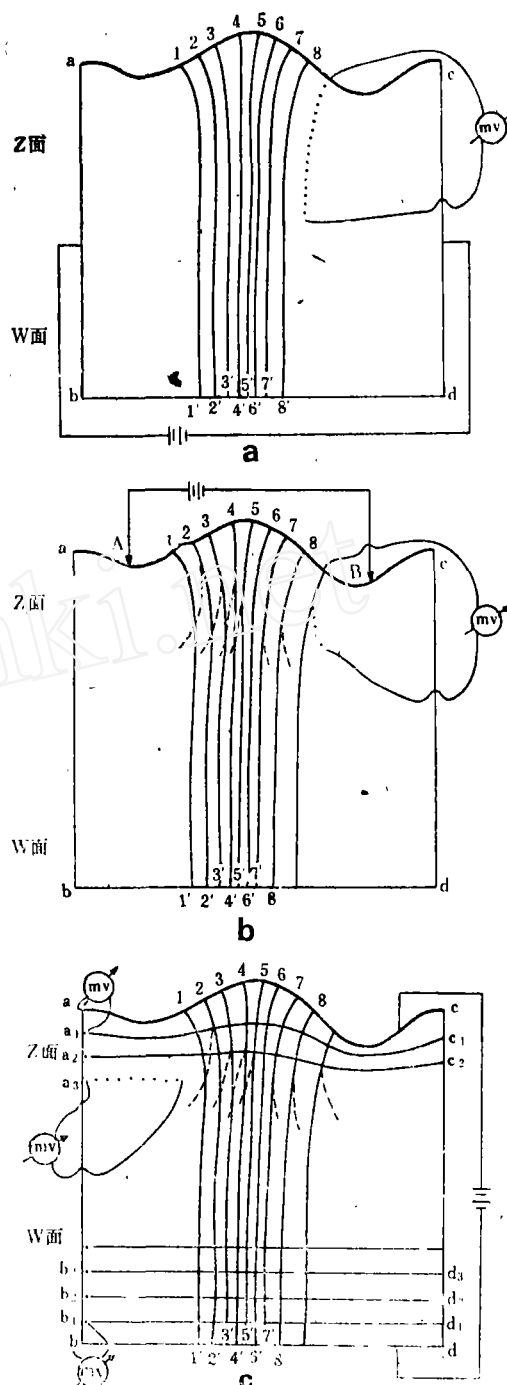


图 9

与 $\widehat{ac}$ 铜线接触，另一测量电极在靠近 Z 面的纸边 $\widehat{ab}$ 上找到 a_1 、 a_2 、 a_3 ……点，使 $\widehat{aa_1}$ 与 $\widehat{bb_1}$ ， $\widehat{aa_2}$ 与 $\widehat{bb_2}$ ， $\widehat{aa_3}$ 与 $\widehat{bb_3}$ ……的电位差相等，其次将一测量电极分别固定在 a_1 、 a_2 、

a_3 、……等点上, 而用另一测量电极追索等位点, 将所得等位点连成等位线。Z面和W面上的等位线 $\widehat{ac}$ 和 $\widehat{bd}$, $\widehat{a_1c_1}$ 和 $\widehat{b_1d_1}$, $\widehat{a_2c_2}$ 和 $\widehat{b_2d_2}$ ……一一对应。

通过步骤3、5实现了Z面到W面的座标网转换。

6. Z面与W面座标一一对应点上的场值相等。参看图10、11, 将Z面地形线上两测点(1、2; 2、3; 3、4……)上实测 η 值移到W面上相应的点(1'、2'; 2'、3'; 3'、4'……)并连成曲线。

i, 当矿体已知时, 将Z面上矿体截面映射到W面上, 在Z面上, 由(AB供电时)等位面(图10中虚线)和等电力线正交的原理, 作通过矿体截面的等电力线(图10中 $\widehat{cd}$ 虚线所示); 再将 $\widehat{cd}$ 线映射到W面上, 得到 $\widehat{c'd'}$ 。在W面上作等电力线 $\widehat{c'd'}$ 通过矿体截面时的切线, 是通过矿体截面的极化场 $\vec{E}$ 的方向。作 $\vec{E}$ 的垂线, 即类磁 $\vec{J}$ 的方向。取剩余极化率 $\eta_{\text{余}} = \eta_2 - \eta_1$ 。和类同斜磁(垂直磁化)完全一样, 在W面上用米柯夫量板, 沿(1'、2'; 2'、3'; 3'、4'; ……)各中点作选择法, 求出 $N_i = N_+ + N_-$, 代入下面的公式计算:

$$\eta_s = \frac{\eta_{\text{余}}}{2\pi} (0.01N_i) + \eta_1$$

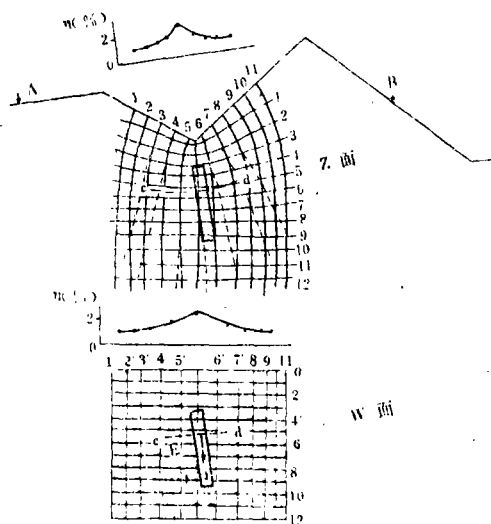


图10

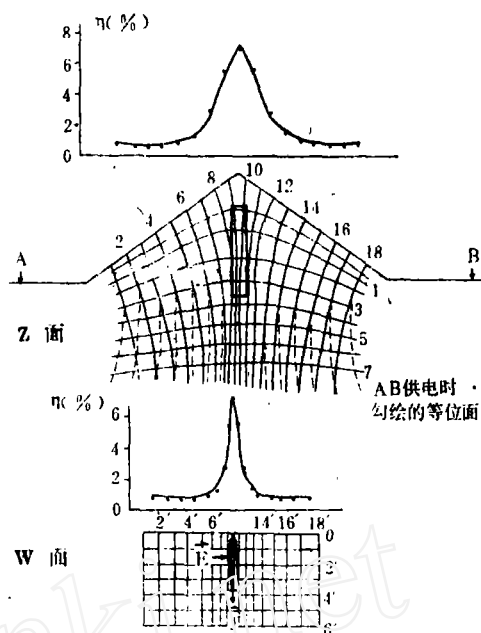


图11

逐步修改矿体截面(像)未被钻孔控制的部分, 直到计算曲线与W面的 η 曲线符合为止, 最后将W面上的矿体截面再映回到Z面。

ii, 当矿体为未知时, 所用方法基本相同, 但需要用其它方法在Z面上定出矿体顶板大致的埋深和矿体可能存在的位置, 作通过矿体截面的电力线 $\widehat{ca}$, 映射到W面上, 在W面上选好矿体(像), 再映射回到Z面。

由模拟实验得到: 对于对称山脊(谷), 在W面上作选择法时, 类同垂直磁化(图11), 对于非对称山脊, 在Z面上由AB供电和沿 $\widehat{ab}$ 、 $\widehat{cd}$ 边供电所勾绘的等位面, 在激电有限的勘探深度范围内, 等位面近乎重合, 在W面上作选择法时, 一般类同垂直磁化。对非对称的山谷(图10)、山谷到斜坡的过渡地段以及山脊(谷)斜坡(斜面长度较短), 在W面作选择法时, 一般类同斜磁化。

图10、和图11表示Z面上已知的有限延深二度板状极化体, 取极化体的极化率 $\eta_2 = 21\%$, 围岩背景值 $\eta_1 = 1\%$, 在电阻网络上采用等效电阻率法模拟了沿地形线上的 η 曲线, 再采用本文介绍的方法作选择法计算, 所得的 η 值(用·号表示)与模拟实验曲线很吻合。