

似二度体二度正、反演误差的讨论

桂林冶金地质研究所物探室磁法组

在似二度量板的研制和使用过程中,发现在似二度体(均匀磁化、横截面沿走向不变的三度体)中心横剖面内进行二度正演和反演时,带来了一定的误差。由于二度正、反演方法在生产中应用很广,讨论这种误差的规律性将有很大的实际意义。

本文采用的符号如下:

L—似二度体的半走向长度

H—重心或上顶中心的埋深

J—剖面内有效磁化强度

i —剖面内有效磁化强度的倾角

γ —板状体延深方向与剖面内有效磁化强度间的夹角

Z—磁性体在地表的垂直磁场强度

一、Z的正演误差

截面形态相同的二度体和似二度体在地

表的Z曲线有所不同。如果不考虑远离磁性体很弱的异常段,以相对误差来衡量,当 i 角不很小时,二者的差别主要表现在以下两点。

(1) **负值差异** 除无限延深的顺层(或顺轴)磁化体外,一般似二度体异常曲线负值的绝对值都小,二度体异常曲线负值的绝对值都大(见图1~3)。这种差异若论其绝对值的大小,与正极值相比当然不大,但用相对值来衡量,则误差相当大。众所周知,中心埋深相同、正极值相同、垂直磁化的球体和水平圆柱体,其负极值的比为0.16。

负值差异不仅表现为负值大小不同,而且还表现为零值点位置不同。若以 $Z=0$ 点到似二度体正极值的距离来比较,对二度体来讲此距离比较小,对似二度体来讲此距离比较大。

分析了矿体矿块控制程度对矿山开采工作的实际影响之后才能确定,并结合具体情况灵活运用。至于储量误差范围,那仅仅是工作中的一个参考数据而已,它并不能当作绝对的指标。因为有时储量误差虽然较大,但不致使开采工作受到损失、相反,有时储量误差虽然较小,却会使开采工作因矿块形态变化而受到损失。所以,只有对地质勘探、矿山设计和基本建设的全过程加以研究,才能在勘探工作问题上得出一个正确的结论。也就是说,考核一个矿区的勘探工作是否满足了矿山设计和施工的合理要求,唯一的标准就是开采实践的检验,即看它对开采工作的实际影响程度是大是小。

(3) 在矿区开发过程中,各个环节的有机衔接不是哪一个部门的问题,也不单纯

是个工作方法问题,而是如何执行党的社会主义革命和社会主义建设总路线的问题。地质勘探、矿山设计和基建施工单位,必须在毛主席革命路线的指引下,在党的一元化领导下,建立“三结合”的统一指挥系统,实行统一计划,统一行动。地质部门要做到从矿山开采的实际需要出发进行勘探。设计部门应当不怕负责任,不怕反复修改设计,不等待一切条件具备,而是主动深入现场,从实际情况出发去做设计。矿山建设部门则要为地质、设计人员创造必要的工作条件,促进各项工作的协调一致。只要三方面互相信任,互相配合,互相支援,发扬团结战斗的共产主义风格,就一定能把矿山建设工作搞得既多快,又好省,为革命事业做出更大的贡献。

在用二度方法对似二度体进行正演时，由于这种负值的差异，往往在强异常北侧（有时也在东侧或西侧）得到较低缓的假剩余异常。

(2) 正值差异 这种差异只在似二度体走向长度很短时(一般要 $2L < (1\sim 2)H$)，相对误差才显著(见图1)。这时，截面形态相同的二度体和似二度体相比，前者正极大值比较大。由于这一差异，在进行二度正演时，往往会误认为所取磁化强度或平均厚度过大。

由以上两点可以看出，在形态复杂的砂卡岩型铁矿矿区，用二度正演方法寻找剩余磁异常有很大的局限性。

在地表测得的似二度体的Z曲线，其负极值的绝对值为什么要比相同截面的二度体的地表Z曲线负极值的绝对值要小？这可用垂直磁化水平圆柱体为例来定性地说。

垂直磁化水平圆柱体(图5)可以看为一系列沿水平圆柱体走向紧密排列的垂直磁化球体的组合。对每一球体而言，在地表的Z等值线是一系列半径(r)不同的同心圆(图5中上图)。在 $r = \sqrt{2}H$ 的圆周上， $Z = 0$ ； $r > \sqrt{2}H$ 时， $Z < 0$ 。图5中下图是其示意图，水平圆柱在地面的投影以虚线绘出。对球心位于柱体横剖面-X-X上的球体1而言，设其产生的垂直磁场强度为 Z_1 ，当 $|X| = \sqrt{2}H$ 时， $Z_1 = 0$ ；当 $|X| > \sqrt{2}H$ 时， $Z_1 < 0$ 。而不在-X-X剖面上的球体(如球体2、3)，在 $|X| > \sqrt{2}H$ 时，所产生的Z均为负值，即 $Z_2 < 0$ ， $Z_3 < 0$ 。当水平圆柱体走向无限长时，相当于无限多个球体迭加。因此，无限长和有限长水平圆柱Z曲线的负值的绝对值相比，前者大于后者。有限长水平圆柱体的走向长度越短，此差异也越大。

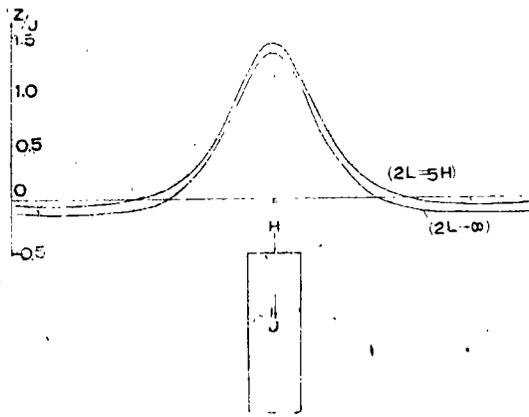


图1

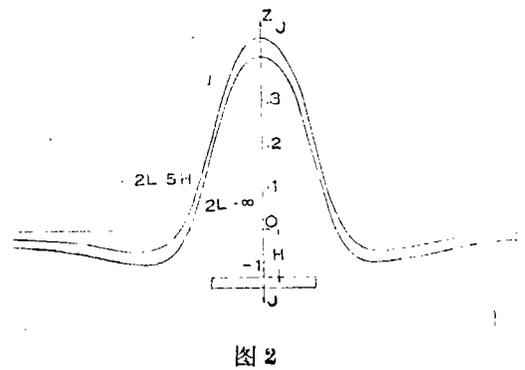


图2

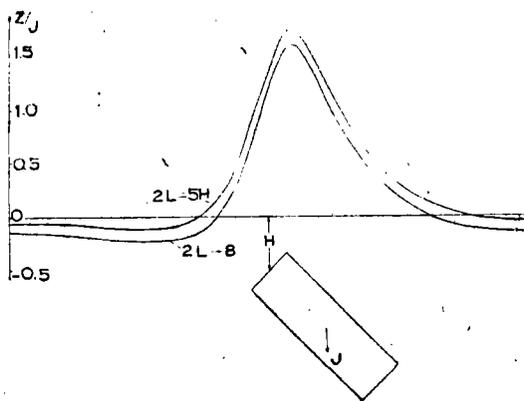


图3

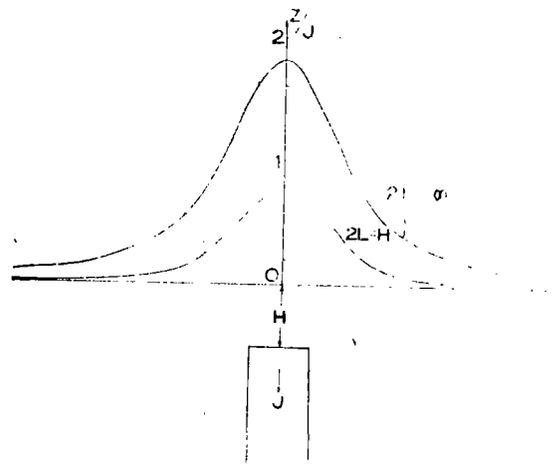


图4

下面再用解析方法讨论这个问题。设有一走向与Y轴平行、横截面为S的似二度体，其中心横剖面内的垂直场强的表达式为

$$Z_3 = J \int \int \int_S \left\{ \cos i \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[\frac{1}{[(x-\xi)^2 + \eta^2 + (z-\zeta)^2]^{1/2}} \right] + \sin i \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[\frac{1}{[(x-\xi)^2 + \eta^2 + (z-\zeta)^2]^{1/2}} \right] \right\} d\eta ds$$

式中x、y为测点的坐标，ξ、η、ζ为积分元的坐标。

$$\text{令 } [(x-\xi)^2 + \eta^2 + (z-\zeta)^2]^{1/2} = r, \\ \varphi = \text{tg}^{-1} \frac{x-\xi}{z-\zeta}, \theta = \text{tg}^{-1} \frac{L}{\sqrt{r^2 + L^2}}$$

则

$$Z_3 = J \int \int_S \frac{\sin \theta}{r^2} \left\{ -\sin i + \cos \varphi (3 - \sin^2 \theta) \sin(i - \varphi) \right\} ds$$

当L→∞，即θ=90°时，似二度体变为二度体。其垂直场强

$$Z_2 = J \int \int_S \frac{1}{r^2} [-\sin i + 2\cos \varphi \sin(i - \varphi)] ds$$

二者场强的差等于

$$\Delta = Z_2 - Z_3 = J \int \int_S \frac{1}{r^2} \left\{ -\sin i (1 - \sin \theta) \right.$$

$$\left. + \cos \varphi \sin(i - \varphi) (2 - \sin \theta (3 - \sin^2 \theta)) \right\} ds$$

$$\text{令 } f(\theta) = 1 - \sin \theta, g(\theta) = 2 - \sin \theta (3 - \sin^2 \theta)$$

$$\text{则 } \Delta = J \int \int_S \frac{1}{r^2} \left\{ -\sin i f(\theta) + \cos \varphi \sin(i - \varphi) g(\theta) \right\} ds$$

当剖面垂直磁化时，i=90°，

则

$$\Delta_1 = J \int \int_S \frac{1}{r^2} [-f(\theta) + \cos^2 \varphi g(\theta)] ds \quad (1)$$

当水平磁化时，i=0，

$$\text{则 } \Delta = J \int \int_S \frac{-1}{2r^2} \sin 2\varphi g(\theta) ds \quad (2)$$

f(θ)、g(θ)、g(θ)-f(θ)与L/r、sinθ的关系如表1所示。

由表1可见，f(θ)≥0，g(θ)≥0。

当1>sinθ>0.618时，f(θ)>g(θ)；

当0.618>sinθ>0时，f(θ)<g(θ)，并且g(θ)-f(θ)随sinθ的减小而增大。

在垂直磁化时，从(1)式和表1可归纳如下几点：

(1)似二度体走向较长、垂向延深较短时，截面S内的大多数积分元均满足-f(θ)+cos²φg(θ)<0，尤其是截面S浅部各积分元更满足上述条件。因此Δ₁<0，亦即在整条测线上Z₂<Z₃。

(2)当似二度体走向较长、垂向延深较大时，情况较复杂。在上顶正上方一带的测点上，各积分元的cosφ均接近于1；截面S

表1

L/r	0	0.258	0.577	0.748	1.13	∞
sinθ	0	0.25	0.500	0.618	0.75	1
f(θ)	1	0.75	0.500	0.382	0.25	0
g(θ)	2	1.27	0.625	0.382	0.172	0
g(θ)-f(θ)	1	0.52	0.125	0	-0.078	0

浅部各积分元的 $L/r > 0.478$, 即 $-f(\theta) + \cos^2 \varphi g(\theta) < 0$; 而其深部各积分元的 $\frac{L}{r}$

0.748 , 即 $-f(\theta) + \cos^2 \varphi g(\theta) > 0$ 。因此, 在似二度体上顶正上方的范围内, Δ_1 的正负由似二度体垂向延深的大小决定。

而在远离磁性体的测点上, 尤其是在似二度体反倾斜方向的一侧, 各积分元的 $\cos \varphi$ 均很小, 因而 $-f(\theta) + \cos^2 \varphi g(\theta) < 0$ 大都能满足, 所以 $\Delta_1 < 0$ 。在这些远离磁性体的测点处, 为果是 Z_2 或 Z_3 的负值区, 必然有 $|Z_3| < |Z_2|$ 。

(3) 当走向长度很小时, $f(\theta)$ 、 $g(\theta)$ - $f(\theta)$ 的值都很大, 由于上顶正上方一带的测点上, 起主要作用的各积分元的 $\cos \varphi$ 都接近于1, 因而 $-f(\theta) + \cos^2 \varphi g(\theta) > 0$, 而且走向越短, 此数值越大。所以, $\Delta_1 > 0$, 即 $Z_2 > Z_3$, 而且走向越短, Z_3 越小。至于截面 S 为有限延深时, 二度体和似二度体负值的差异, 和上面所讨论的两点相同。只不过由于走向很短, $f(\theta)$ 值大, 所以 $|\Delta_1|$ 也大, 负值差异更明显。

垂向无限延深的情况不容易从(1)式看出。直立无限延深的板状体可作为典型的例子。垂直磁化后, 只有上顶面形成一条只在地表引起正垂直场强的负水平磁荷带。无限长和有限长负水平磁荷带相比, 在整条测线上 $Z_2 > Z_3$, 即 $\Delta_1 > 0$ 。

水平磁化时, Δ_H 由(2)式决定。(2)式中已不含永远是非正数的 $-f(\theta)$ 项, $\sin 2\varphi$ 可正可负。在似二度体走向长度较长时, $\frac{\Delta_1}{Z_3}$ 较大处主要在 Z_3 的负值区, 而 $\frac{\Delta_H}{Z_3}$ 较大

处已不单是在 Z_3 的负值区。一般来说, 在远离似二度体顶部上方的测点上, Z_3 的正、负值区的 $\left| \frac{\Delta_H}{Z_3} \right|$ 都较大, 且 $|Z_2| > |Z_3|$ 。

走向越短, $g(\theta)$ 越大, $|\Delta_H|$ 也越大。

通过以上的分析可以推想到, 对于延深不太大的斜磁化似二度体来说, 在其中心剖面的 Z_3 负值区内, Z_2 和 Z_3 仍会有明显的差

异, 并且是 $|Z_2| > |Z_3|$ 。当走向很短时, 除负值有差异外, 正极值附近还会有明显的正值差异, 而且 $Z_2 > Z_3$ 。

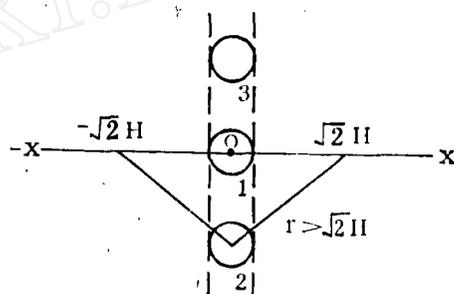
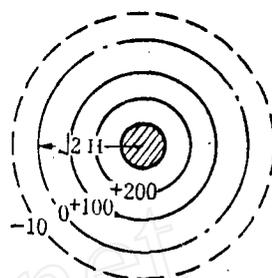


图5

二、用选择法带来的误差

为了研究似二度体中心横剖面地面 Z 曲线的二度反演误差, 我们在电子计算机上对一些似二度体中心横剖面 Z 曲线进行了二度选择法自动计算。所用程序见《地质与勘探》74年第3期20~26页。反演时所取磁化强度与似二度体磁化强度数值相同, 所取二度体的截面为矩形。现将较有代表性的四个例子绘于图6~9。

由图可见, 反演得到的截面形态与原似二度体的截面形态相比, 有很大的误差。误差主要分为如下四种:

(1) 下延加大 (见图6和图7)。

延深短的似二度体经常有这种现象发生, 尤以截面积小的水平圆柱体最为显著。在图6中, $2L = 5H$ 的水平圆柱体, 反演结果为一下延是上顶埋深2.7倍的近乎直立的薄板。如果圆柱体的其它参数不变, 只是截面积缩小为原来的 $1/10$, J 增大10倍。此时地面 Z 曲线不发生变化。这样, 薄板与圆柱体相比, 下延加大的趋势更明显。

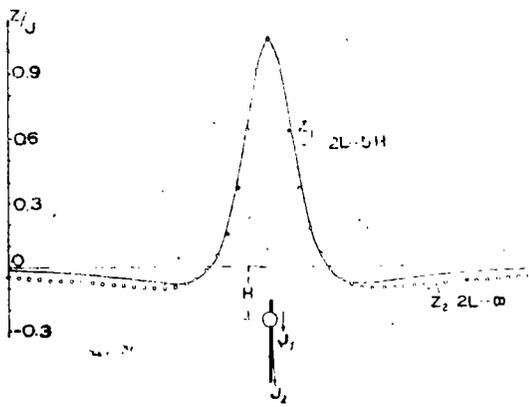


图6

图7是磁化倾角为 45° 时的情况。由图可见，斜磁化的水平圆柱体的反演下延误差比垂直磁化的要小。但所得截面的倾向与水平磁化强度的方向相反。

(2) γ 角有所减小

这一现象经常发生在延深较大非顺层磁化的似二度体上。因为延深大时，产生负Z值的主要因素是磁化强度垂直于延深方向的分量。 γ 角减小，该分量也减小，Z的负值绝对值也减小。

γ 角的减小一般不会太大，最多不超过 20° 。

图8中似二度体有一 $2L = 5H$ 、下延为 $100H$ 的板状体(截面1)。反演所得二度体为埋深与似二度体相同、但下延为 $80 \sim 100H$ 的板状体(截面2)。两板状体的磁化强度方向相同，而两板状体倾角的差为 10° 。

(3) 倾向、倾角与下端位置的变动

具有一定延深(相对H而言)的二度体，当其磁化后，下端形成正磁荷，并在地面引起Z的负异常。若对似二度体的地面Z曲线进行反演时，对磁化方向并不加任何限制。那么用选择法得到的二度体，其下端往往离开原似二度体的下端，使产生的负Z值离开似二度体Z曲线的负值区。这就导致二度体的倾角、甚至其倾向与似二度体的倾角及倾向不同。在图9中，对 $2L = 5H$ 和 $2L = 2H$ 的斜磁化直立板状体Z曲线进行反演，所得结果是相似的。下端向左移动，以使曲线右

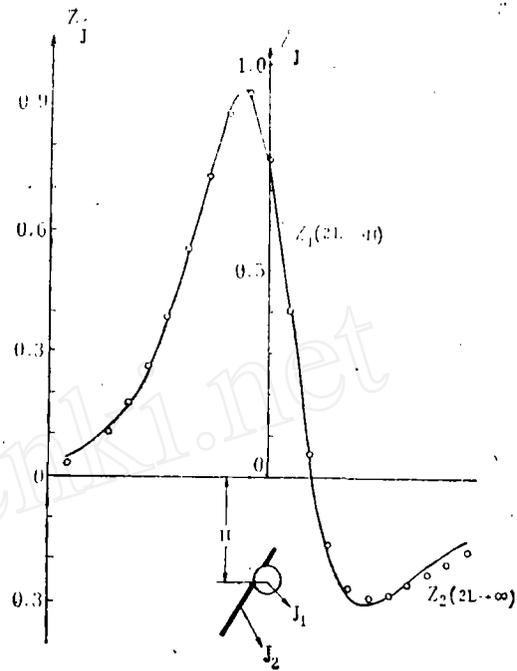


图7

侧负值部分能够较好的吻合。

在图9中，如果在反演时，假定二度体与似二度体二者的磁化方向相同，可以预料，反演结果，二度体的倾角变化很小，而下延变大。

(4) 厚度或截面积减小

当似二度体走向长度很小时($2L < (1 \sim 2)H$)，用二度方法进行反演，必然导致厚度(或截面积)减小，或是磁化强度减小。这是易于理解的。

从图6~9可看出，尽管二度反演所得结果，其截面与原似二度体的截面有很大的不同，但除延深很短的似二度体外，反演结果，上顶位置的误差很小。当其有一定的延深时， γ 角的误差也不很大，一般在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内。如果似二度体的产状上下有所不同时，可以预料，用二度选择法反演，所得二度体的 γ 角与似二度体的 γ 角，在上部的差别不是很大的。

上面讨论的四种误差，在实际工作中可以只出现一种，也可以同时出现几种。出现的形式尽管有所不同，但引起误差的原因，

不外乎是截面形态相同的似二度体与二度体地面 Z 曲线的负值差异和正值差异。负值差异普遍存在(无限延深顺层磁化的板状体除外)。在反演时,它引起截面形态和产状的改变。正值差异一般只在似二度体走向很短时才明显地在正极值及其附近的测点上出现(无限延深顺层磁化的板状体在远离极大值处,正值的相对误差也大),引起截面厚度或面积的减小。

当然,以上的讨论有其局限性。首先,计算的类型和数量还不够多,尤其是缺少对小磁化倾角的计算结果。上面的结论,可能对小磁化倾角的情况不一定适用。其次,计算机所进行的选择法用的只是单一的矩形截面的二度体作为模型,而且磁化强度均取与似二度体磁化强度相同的数值,这显然是不够的。譬如,在实际工作中,我们完全可以在实测的似二度体 Z 曲线负值区下面,补加一个磁性体使二度理论曲线与实测曲线得到最好的拟合。

有人采用短剖面方案进行反演。这种方案在一定程度上有助于克服对似二度体异常进行二度反演所带来的产状差异。但剖面太

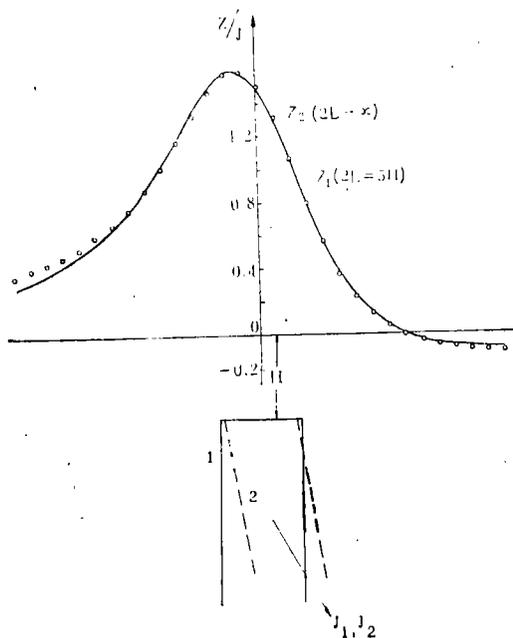


图 8

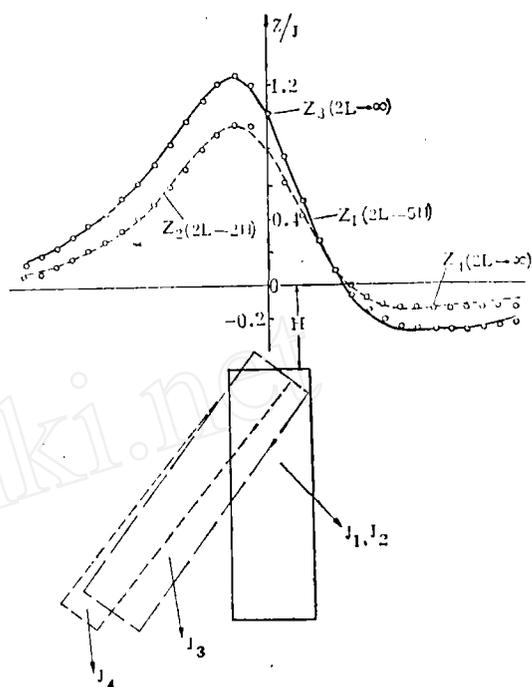


图 9

短,实测数据少,又会引起问题的多解性。在图10中,采用较短剖面方案,对一水平磁化的二度水平圆柱体(实际上 $2L = 100H$)用二度选择法进行反演,结果得到一个埋深较浅的、水平磁化的水平板状体。因此,就提出了剖面要取多长才算合适的问题。

综上所述,对似二度体地面 Z 曲线用二度选择法进行反演,可以归纳为以下几点:

(1)多数情况下,当似二度体有一定延深时,确定上顶位置的误差不大,确定上部 γ 角的误差也不大。这意味着,对多数似二度体异常而言,用二度选择法确定磁性上顶位置和浅部大致的产状,并依此来布置验证钻孔是可行的。

(2)在 $2L = (2 \sim 5)H$ 范围内,走向长短对反演结果的影响是次要的,主要要看似二度体有无一定的延深。延深越大,截面上部反演误差越小。

(3)延深较小和延深较大的似二度体,其地面 Z 曲线用二度选择法反演,都会得到延深较大的截面形态。因此,确定似二度延深大小,不宜用二度方法。在形态复杂的砂

辽宁某铅锌矿床中汞的 赋存形式

桂林冶金地质研究所岩矿室电子探针组

辽宁某矿床，是以铅锌为主的多金属热液矿床，产于震旦系浅海相沉积岩下部的条带状白云岩中。矿床受断裂构造控制，矿化在空间上与石英闪长岩关系密切。

矿体形态为脉状、透镜状或柱状。矿石构造为致密块状、细脉浸染状或脉状。以块状矿石为主，构成工业富矿体。主要金属矿物有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿，其次有白铅矿、菱锌矿、黝铜矿类矿物、黄铜矿等。矿石中除铅锌外，还伴生有汞等有益组份，具

有一定综合利用价值。同时汞元素的赋存形式的查明也有利于采矿与冶炼工作的防护。镜下鉴定和电子探针分析结果表明，本区汞的赋存矿物有：

闪锌矿 汞主要呈分散状态分布。电子探针分析以闪锌矿为主的块状矿石中闪锌矿含Hg 0.15~0.25%；被方铅矿交代的闪锌矿含Hg 0.07%，而在方铅矿中呈包裹体的闪锌矿含Hg 0.01%。

银汞膏 电子探针分析结果如表1。

表1

元素含量 分析号	化 学 成 份 (%)		
	Hg	Ag	合 量
1	39.51	60.97	100.48
2	39.55	62.23	101.78
3	39.72	61.02	100.74

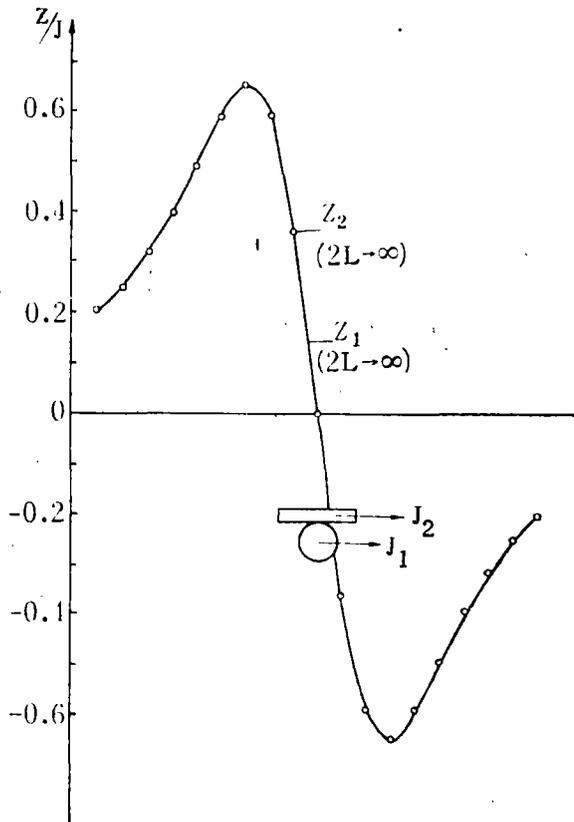


图10

卡岩型磁铁矿矿区，在勘探阶段用二度选择法进行反演，不一定到处都能适用。

(4)所取实测剖面长度不是越长越好，而是取一适当的长度为佳。在磁化倾角不太小的情况下，剖面长度以不包括Z的负极为佳。

上面只是对一些正演和选择法反演的误差作了讨论。实际工作中对似二度体地面Z异常也常用某些其它二度方法进行反演，或是用各种二度方法进行处理（如地形改正、空间延拓、垂直和水平场强的互相转换、滤波等）。将这些二度反演或处理的方法，用于似二度体异常，也必将带来或大或小的误差。但二度反演和处理方法比相应的三度方法简便得多。所以研究各种二度反演和处理方法所带来的误差，可以了解和明确在甚么条件下、要解决什么问题，有哪些二度方法可用，哪些方法的误差大，这是很有实际意义的，是一个值得注意和深入研究的问题。