

282116

物探译文集

(磁法与激发极化法)

1975

内 容 简 介

在我国金属矿地球物理勘探工作中，磁法和激发极化法得到了广泛的应用。为了配合这方面生产工作的需要，本着“洋为中用”的原则，本译文集主要收集了近几年来欧美地球物理期刊上发表的比较实用的文章共29篇（其中磁法14篇，激发极化法15篇）。在内容上磁法着重介绍不用电子计算机的二度体和三度体的磁异常推断解释方法。激发极化法的文章则涉及到岩石矿物极化特性、激发极化场的理论、野外工作方法、成果的推断解释方法等各个方面。

本译文集主要由桂林冶金地质研究所情报室和物探室的几位同志翻译。对原文中的某些错误，凡已发现者均已更正。但由于时间仓促，主要是限于水平，译文中难免会有错误之处。请读者予以批评指正。值得说明的是，所收集的文章大都出自资产阶级学者之手，缺乏辩证的综合研究，渗透着一些形而上学的东西，希望读者批判地阅读，汲取其中有益的部分。

本书可供从事物探工作人员、科研人员以及大专地质院校师生参考。

目 录

磁 法 部 分

解释走向长度有限的板状体和棱柱体磁异常的特征曲线法·····	(加)F.S.格兰特等 (1)
直接推断解释无限延长的倾斜板状体磁异常的新方法·····	(加)TH.库洛姆金等 (15)
用共轭点法解释长板状体的磁异常·····	(印)T.K.S.P.雷峨 (31)
半无限薄板的磁异常解释·····	(印)B.S.R.雷峨等 (35)
薄板磁异常的推断解释·····	(印)B.巴勒吉 (41)
板状体磁异常的推断解释·····	(英)J.M.布鲁克肖等 (50)
倾斜棱柱体航磁异常的推断解释(解析方法)·····	(澳)J.K.C.莫峨 (57)
解释任意磁化板状体磁异常的特征曲线法·····	(挪)K.阿姆 (69)
计算任意横截面有限延伸均匀磁化柱体磁场所用的量板·····	(德)克劳斯 赫尔比格 (82)
三度体磁异常的二度推断解释结果·····	(德)H.J.莱曼 (96)
解释球体与水平圆柱体垂直磁异常的计算机程序·····	(印)B.S.R.雷峨等 (108)
磁测剖面解释中的“走向端部改正”·····	(美)R.T.舒野等 (113)
无限延伸板状体磁异常推断解释中的余磁改正·····	(芬)S.E.赫杰尔特等 (118)
重磁解释的频率分析·····	(美)W.C.迪安 (124)

激发极化法部分

某些金属矿物和造岩矿物激发极化特性的比较·····	(苏)Я.В.马尔库中等 (145)
在发展地球物理方法中岩石电参数的研究·····	(加)L.S.柯莱特等 (153)
关于激发极化模型的意见·····	(法)J.洛布 (163)
确定直立导体真充电率的方法及其在土耳其某些铅锌矿上的应用·····	(土)迪佐格鲁 (168)
时间域激发极化法的某些问题·····	(法)J.伯廷 (174)
激发极化法瞬变场的特性·····	(法)J.伯廷等 (185)
✓供电电极埋入地下的电法勘探推断解释用的解析模型·····	(美)D.D.斯奈德等 (198)
用激发极化(BII)法估计矿带分布的深度·····	(苏)A.H.巴拉晓夫 (212)
时间域激发极化法垂直测深的推断解释理论·····	(意)D.帕特拉 (214)
解释时间域激发极化法野外资料的新参数·····	(意)D.帕特拉 (224)
激发极化法的理论·····	(匈)Gy.丹克哈齐 (232)
激发极化法中时间、频率和相位测量的比较·····	(美)K.L.钟吉等 (246)
三度体的IP和电阻率的典型曲线·····	(加)K.迪特等 (255)
激发极化法的物理模拟与计算机模拟·····	(美)C.L.艾肯等 (266)
磁激发极化法·····	(加)H.O.赛格尔 (277)

磁 法 部 分

解释走向长度有限的板状体和棱柱体 磁异常的特征曲线法

(加) F.S.格兰特, G.F.威斯特

一、薄板状磁性体的异常解释

由于脉状火成岩侵入体往往含有磁性矿物,所以在磁法推断解释中经常用到薄板状的模型。

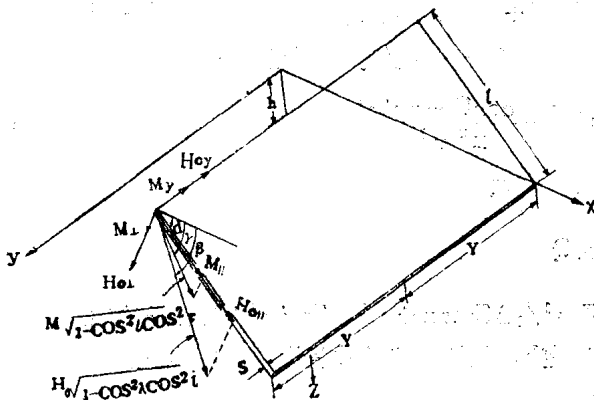


图1 薄板状模型

型。设有一均匀磁化的薄板状体,其厚度s很小,宽度为l,走向长度为2Y,倾角为d,走向沿Oy轴方向(图1),其埋深为h。当感应磁化强度 $\vec{M}$ 的x分量向右指时,d由水平方向起顺时针计算。当磁性体的厚度相对其长、宽而言很小时,就不能再忽略消磁效应,因此,即使薄板状体没有剩磁,其 $\vec{M}$ 也不一定与磁化场 $\vec{H}_0$ 的方向一致。

薄板状磁性体上方垂直磁异常强度的公式为:

$$\Delta Z(x, y) = M_s \sqrt{1 - \cos^2 i \cos^2 \tau} [f(x, y + Y) - f(x, y - Y)] \quad (1)$$

式中

$$f(x, y + Y) = \frac{y + Y}{\sqrt{C^2 + (y + Y)^2}} \left\{ \frac{(x - l \cos d) \sin Q - (h + l \sin d) \cos Q}{C^2} \right. \\ \left. - \frac{y + Y}{\sqrt{D^2 + (y + Y)^2}} \left(\frac{x \sin Q - h \cos Q}{D^2} \right) + \left(\frac{(A + l) \cos d}{\sqrt{C^2 + (y + Y)^2}} - \frac{A \cos d}{\sqrt{D^2 + (y + Y)^2}} \right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{KB - (y + Y) \sin Q}{B^2 + (y + Y)^2} \right) - K \sin d \left(\frac{1}{\sqrt{C^2 + (y + Y)^2}} - \frac{1}{\sqrt{D^2 + (y + Y)^2}} \right) \right\}$$

其中

$$A = h \sin d - x \cos d$$

$$B = x \sin d + h \cos d$$

$$C^2 = (x - l \cos d)^2 + (h + l \sin d)^2$$

$$D^2 = x^2 + h^2$$

$$Q = d - \gamma \quad \text{和} \quad K = \cos \gamma \cot \iota$$

上式中

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\tan \tau}{\sin \iota}$$

(τ 是 $\vec{M}$ 的倾角, ι 是 $\vec{M}$ 的水平投影与 Oy 轴的夹角)。

公式中有六个参数。在以 l 为单位来量度该式中的线性距离后, 其中五个成了无量纲的参数, 它们是两个比值 h/l 和 Y/l , 以及三个角度 γ , ι 和 d 。幸好, 除了 $Y < l$ 的情况外, 走向长度对剖面形态的影响都很小, 否则问题是难解决的。但是, 由于这五个参数在一个适当的变化范围内引起的情况很多, 因此, 想制作一整套理论剖面的打算都是不切实际的。对于薄板状模型来说, 特征曲线法是一种实用而必不可少的方法。

在尚未进行构造薄板状模型的特征曲线之前, 先来研究一个特殊情况。当 $Y \rightarrow \infty$ 时, 式 (1) 简化为无限长薄板状体的公式:

$$\Delta Z(x) = 2 Ms \sqrt{1 - \cos^2 \iota \cos^2 \tau} f(x; h, l, d) \quad (2)$$

式中

$$f(x; h, l, d) = \frac{(x - l \cos d) \sin Q - (h + l \sin d) \cos Q}{(x - l \cos d)^2 + (h + l \sin d)^2} - \frac{x \sin Q - h \cos Q}{x^2 + h^2}$$

如果 l 比 h 大得多, 式 (2) 可进一步简化为半平面上的垂直磁场强度的公式

$$\Delta Z(x) = 2 Ms \sqrt{1 - \cos^2 \iota \cos^2 \tau} \frac{h \cos Q - x \sin Q}{x^2 + h^2} \quad (2a)$$

这个简单公式本身就引出了一些基本的解法。例如

$$\frac{w_{1/2}}{h} = 2 \sec Q \quad \text{和} \quad \frac{L}{h} = 2 \csc Q$$

其中 $w_{1/2}$ 为异常剖面的半宽度 (即 $\Delta Z = 1/2 \Delta Z_{\max} + 1/2 \Delta Z_{\min}$ 的两点间的距离), L 是 ΔZ 的两个极值点之间的距离。所以要确定 h , 只需先确定 Q 值即可。根据关系式

$$\frac{w_{1/2}}{L} = \tan Q \quad \text{和} \quad \left| \frac{\Delta Z_{\max}}{\Delta Z_{\min}} \right| = \frac{1 + \cos Q}{1 - \cos Q}$$

均能独立地求 Q , 所以不难求得 h 。

求得 Q 后, 如果知道 $\vec{M}$ 的方向, 还可求得 d 。反之, 如果知道 d , 就可用 Q 来求 γ 。假设此板状体在地磁场中感应磁化, 没有剩磁。假设 i 是 $\vec{H}_0$ 的倾角, λ 是 Oy 的磁方位角。若将 $\vec{H}_0$ 分解为三个分量: 第一个是与板状体倾斜面相垂直的分量 $H_{0\perp}$, 第二个是沿板状体走向方向的分量 H_{0y} , 第三个是位于板状体横截面内的分量 $H_{0\parallel}$ (见图 1), 则有

$$H_{0\parallel} = H_0 (\sin i \sin d + \sin \lambda \cos i \cos d)$$

$$H_{0y} = H_0 \cos \lambda \cos i$$

$$\text{和} \quad H_{0\perp} = H_0 (\sin i \cos d - \sin \lambda \cos i \sin d)$$

如果 k 是板状体的体磁化率, 则 $\vec{M}$ 的三个分量将是

$$M_x = M_{\parallel} \cos d - M_{\perp} \sin d \quad M_y \quad \text{和} \quad M_z = M_{\parallel} \sin d + M_{\perp} \cos d$$

$$\text{其中} \quad M_{\parallel} = k H_{0\parallel} \quad M_y = k H_{0y} \quad \text{和} \quad M_{\perp} = \frac{k H_{0\perp}}{1 + 4\pi k}$$

但根据我们对 ι 和 τ 的定义,

$$M_x = kH_0 \sin\lambda \cos\tau \quad \text{和} \quad M_z = kH_0 \sin\tau$$

所以, 若 $f = 1 / (1 + 4\pi k)$, 则

$$\sin\lambda \cos\tau = \sin\lambda \cos i (\cos^2 d + f \sin^2 d) + \sin i \sin d \cos d (1 - f)$$

$$\sin\tau = \sin\lambda \cos i \sin d \cos d (1 - f) + \sin i (f \cos^2 d + \sin^2 d)$$

和 $\tan(d - \gamma) = f \tan(d - \beta)$

(3)

为求 d , 可将 k 和 β 的合适值代入式 (3)。

根据式 (2a), 还注意到

$$\Delta Z_{\max} - \Delta Z_{\min} = \frac{2 H_0 k s \sqrt{1 - \cos^2 i \cos^2 \tau}}{h}$$

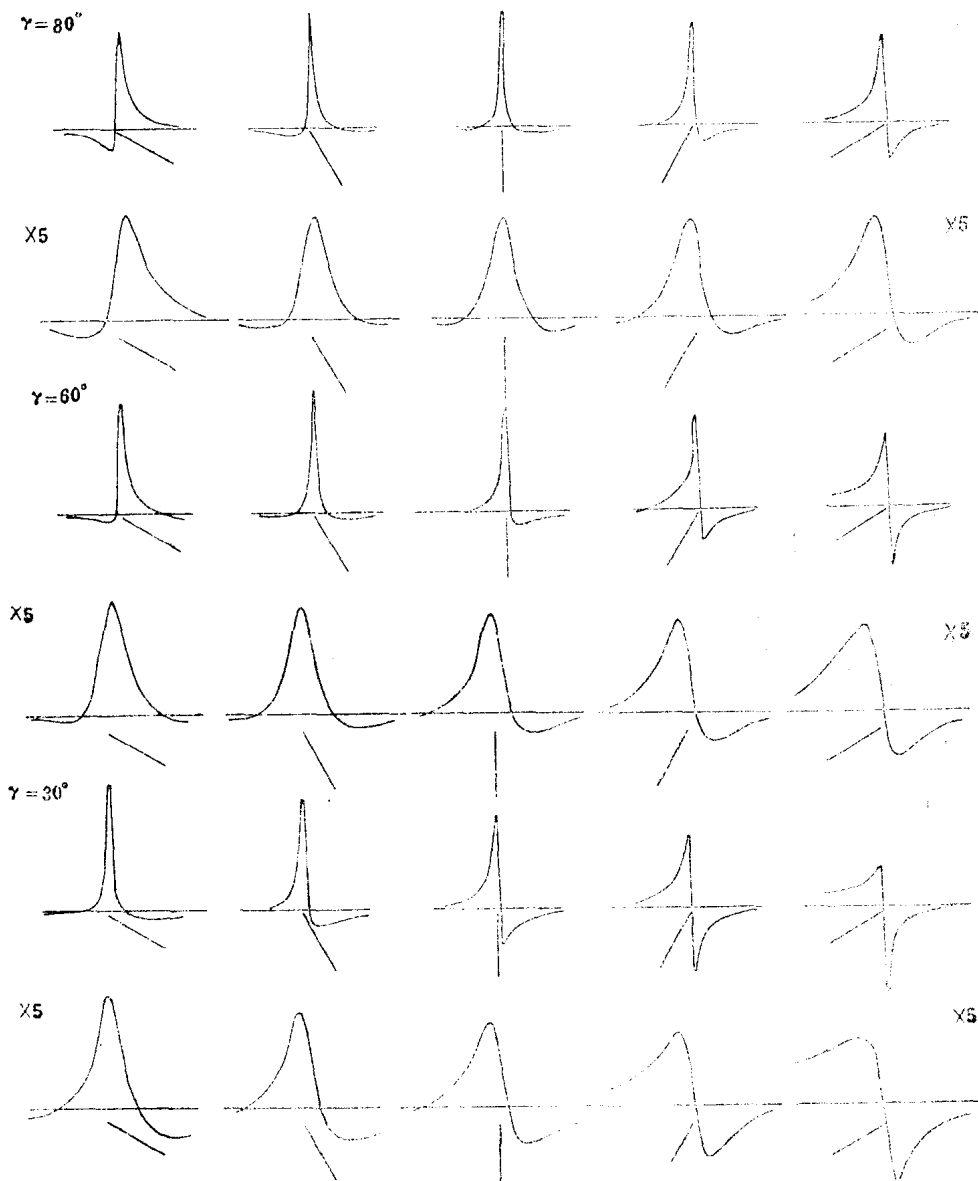


图2 在各种磁化方向条件下, 不同倾角和埋深的二度薄板横剖面上的垂直磁异常强度

于是

$$k_s = \frac{(\Delta Z_{\max} - \Delta Z_{\min}) w_{1/2} \cos Q}{4 H_0 \sqrt{1 - \cos^2 i \cos^2 \tau}} \quad (4)$$

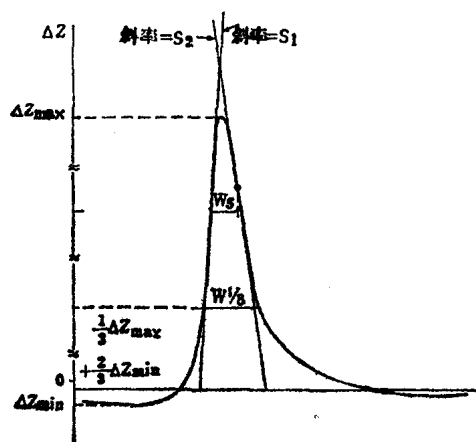
从 $\sin i \cos \tau$ 和 $\sin \tau$ 的表达式不难看出

$$(1 - \cos^2 i \cos^2 \tau)^{1/2} = (1 - \cos^2 i \cos^2 i)^{1/2} [1 - (1 - f^2) \sin^2(d - \beta)]^{1/2} \quad (5)$$

式(3)和(5)是 d 和 k 的一对非线性联立方程, 必须用逐次逼近法来求解。一个方法是先令 $k=0$, 解式(3)求得 d , 然后利用这个结果代入式(5)求得一个 k 值。在这一步骤中, 必须给定一个厚度 s 的值, 这样求得的 k 值可以再来改正 d , 如此进行下去直至所得的解收敛为止。还有一个解该问题的比较简单的方法, 但是需要知道 k 值。

上述方法仅适用于峰值明显而且延伸很长的那种异常。但是, 对走向和延深均为有限的磁性体的推断解释, 在实践中出现了如此麻烦的问题, 致使人们还是常用一些较简单的公式(即使它们并非严格地适用), 来作一般的指导。

现在我们转入有限薄板的问题。为了说明倾角、埋深和磁化方向变化的影响, 在图2中展示了一系列不同参数值的二度薄板的横剖面。在 Y 缩短到小于 l 之前, 走向长度的影响相对来讲是无关紧要的。从这张图上可以清楚地看出: (1) 剖面的对称性在很大程度上取决于 d 和 γ 之间的差值, 而不是孤立地取决于它们各自的角度; (2) 剖面的陡度取决于薄板山顶的埋深。剖面的不对称程度和陡度的定量测定方法示于图3。测定的量有: ①主剖面水平



梯度的极值之比 $|s_2/s_1|$, ②比值 $w_s/w_{1/3}$, 其中 w_s 为拐点间的水平距离, $w_{1/3}$ 是在主剖面上从最小值向上起算, 到幅度为最小值至最大值的三分之一处那两点的距离。主剖面是通过异常峰值并且垂直于薄板走向的剖面, 在实际工作中是不难确定的。

仍要确定 Y/l 。用比值 $w_{1/2}/(w_{1/2})_Y$ 来确定这一参数是十分自然的。 $w_{1/2}$ 是主剖面的“半宽度”, $(w_{1/2})_Y$ 是在半幅度处异常沿走向的宽度。有时我们把这个比值叫做异常的椭圆度。

图3 确定薄板状模型倾角和埋深的量度

在确定了求参数所要用的量度后, 显然, 薄板状模型所需的参数数目, 就成了编制特征

曲线的主要问题。这是按下列方式来解决的: (1) 按不同的 γ 值制成单独的一套曲线。因为, 这个参数值是最容易推定的。(2) 在每一套曲线中, 有类似于图4的一些图, 表示椭圆度与比值 $\bar{s} w_s/AMPL$ 的关系, $\bar{s}$ 是 $|s_1|$ 和 $|s_2|$ 的平均值, $AMPL$ 代表异常的幅度, 即 $\Delta Z_{\max} - \Delta Z_{\min}$ 。图4中的阴影带表示, 当 $\gamma=90^\circ$ 和 $k=0.2$ 时, 在 $20^\circ \leq d \leq 90^\circ$ ($0^\circ \leq Q \leq 70^\circ$) 和 $0.05 \leq h/l \leq 0.5$ 的情况下, 常数 Y/l 的轨迹。这种图可直接用来估计 Y/l 。可以用几张这样的图来概括适当变化范围的 K 值, 内插是必要的。(3) 每套图中的特征曲线是以 Y/l 和 K 为常数时, 所作的 $|s_2/s_1|$ 对 $w_s/w_{1/3}$ 的关系曲线。由于除了 $Y/l < 1$ 之外, Y 的影响很小, 因此, 实际上为减少资料数量起见, K 为常数的全部曲线都已综合

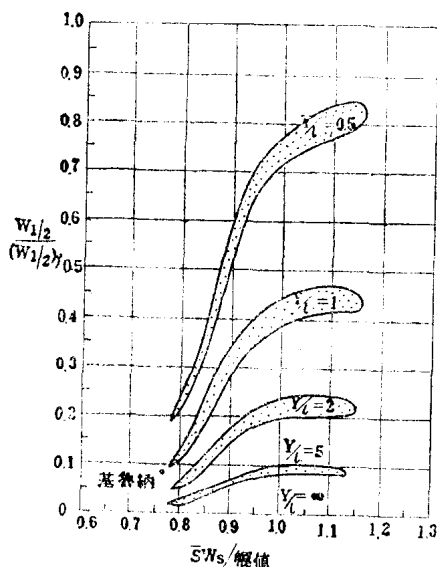


图4 根据薄板的垂直磁异常估计比值 Y/l 的曲线图(阴影带表示常数 Y/l 的轨迹)

值。先对 K ，其次对 γ 进行内插。最后就得出上述四个参数以及 Y 的最终的一套数值。

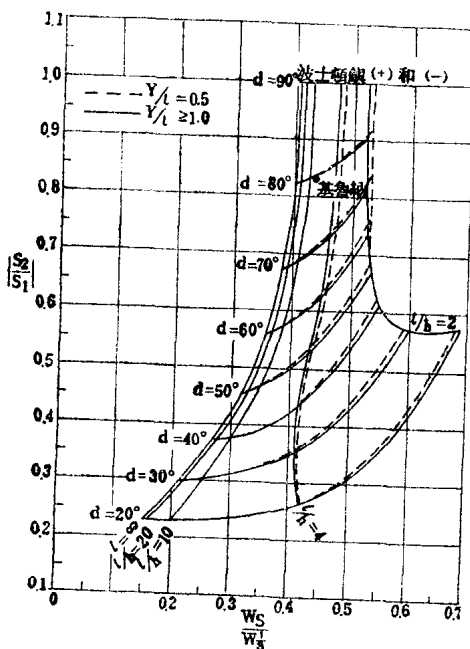


图5 薄板状模型垂直场的特征曲线
($\gamma = 90^\circ$, $K = 0.2$)

在一张图上。图5所示的是一个例子。(4) 辅助曲线给出了比值 $(\Delta Z_{\max} - \Delta Z_{\min})h / (Ms\sqrt{1 - \cos^2 l \cos^2 \tau})$ 与 $w_{1/2}/h$ 的关系, 从中可以求得埋深 h , 延深 l 和面磁化强度 Ms 。图6是对应于图5的辅助曲线。

下面介绍使用这些曲线的程序:(1) 首先选择要用的 γ 值。如果不知道, 则设想物体是感应磁化的, 可采用 β 的数值, 并在以后对它作消磁改正。选出最接近的两个 γ 值的两套曲线。(2) 在选出的每一套曲线中, 找到合适的 Y/l 曲线。(3) 从每套曲线中选择两组特征曲线, 其 K 值最接近于 $\cos^3 \cot \lambda$ 。根据所选择的每一组曲线, 估计 d 和 h/l 。这样, 从每套曲线中确定的 d 和 h/l 各有两个值。(4) 然后, 从辅助曲线求得与 h , l , d 和 Ms 相应的四个

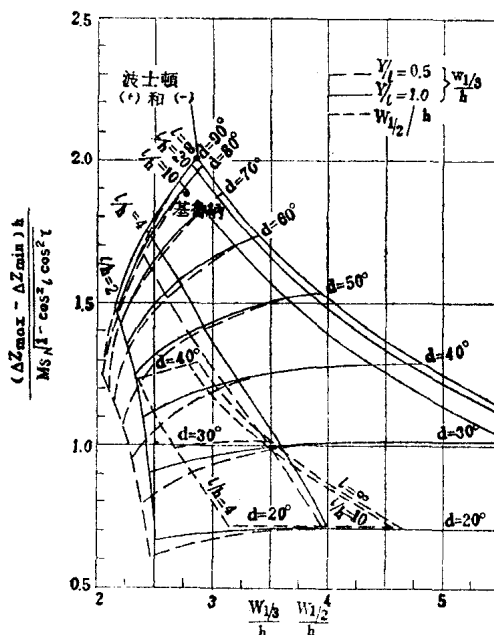


图6 根据薄板垂直场的特征估计埋深和面磁化强度的辅助曲线($\gamma = 90^\circ$, $K = 0.2$)

在厚度 s 未知的条件下, 我们所能做的就是这些。利用薄板状模型是无法直接求得 s 的, 我们应当考虑其他求 s 的方法。下面举两个例子来说明我们方法的效果。

第一个例子是瑞典北部基鲁纳区著名的磁异常, 其主剖面示于图7。该异常由一个含磁铁矿约20%, 厚约85米, 倾角为 $55^\circ N$ 的矿脉所引起。基鲁纳区的磁倾角为 76° , 异常轴的磁方位

角为 18° ，所以此时的 $\beta=85^\circ$ 。异常的总幅度为0.718奥(或71800伽马)。K($=\cos\beta\cot\lambda$)值为0.22。从这一剖面所取得的其他数据为

$$s_1=800\text{伽马/米} \quad s_2=-600\text{伽马/米}$$

$$w_s=75\text{米} \quad w_{1/2}=125\text{米} \quad w_{1/3}=174\text{米}$$

同时，通过附近的一些磁测剖面可以看出， $(w_{1/2})_y$ 约为1500米。为求 w_s ，我们利用了拉格朗日的5点有限差分公式，以测点上的实测数据进行运算。 w_s 取自 ΔZ 的二次水平微商有限差分的两个零值点之间的距离。

由这些数据得出下列特征值：椭圆度 $=w_{1/2}/(w_{1/2})_y=0.083$ ； $\bar{S}w_s/\text{AMPL}=0.763$ ； $|s_2/s_1|=0.83$ ； $w_s/w_{1/3}=0.43$ 。为解出全部参数，我们从 $\gamma=90^\circ$ 和 $\gamma=80^\circ$ 的两套曲线图着手。下面仅以前者为例来说明。

当 $\gamma=90^\circ$ ， $K=0.2$ 时，由图4求得 $Y/l=1.5$ ；当 $\gamma=80^\circ$ 时，也得到相同的比值。再从图5中求得，当 $\gamma=90^\circ$ ， $K=0.2$ 时， $d=79^\circ$ ， $h/l=0.12$ ；而根据 $\gamma=80^\circ$ 的曲线，给出 $d=69^\circ$ ， $h/l=0.15$ 。

将这两组数值应用于辅助曲线，可得到 d, h, l, Y 和 M_s 的两组数。在它们中间

进行内插，就得到第一个解：矿体倾角 74°N ，埋深60米，走向长度超过1000米，延深(在磁法推断解释中这是一个难以估计的参数)约为400米。当 s 以米为单位时，面磁化强度为27电磁单位，若假定它是感应磁化强度，则视面磁化率为46电磁单位。若取 $s=85$ 米，则 k 的表观值(视磁化率)为0.54电磁单位。此数值刚好在实测的标本值的范围内，并与过去计算的数值(0.57电磁单位)相当。当我们将具有上述参数值的理论剖面与实测剖面作对比时，可以看出，总的来说它们是相当吻合的(见图7)。显然，由于消磁或剩磁，或者多半是由于这两种因素的同时作用，基鲁纳铁矿层的真实倾角被歪曲了。

为作消磁改正，取 $Q=-11^\circ$ (此值是由特征曲线给出的)，需要求解式(3)。但在未求解之前，先对公式作一点修改，以 $k(1-s)/(1+s)$ 来代替 k 。这相当于沿薄板层面垂直方向的消磁系数 $4\pi l/(1+s)$ 和平行于薄板层面方向的消磁系数 $4\pi s/(1+s)$ ，它们是求解均匀场中扁椭圆柱体边值问题所得的结果。现在若取 $\beta=85^\circ$ ， $k=0.54$ 电磁单位， $Q=-11^\circ$ ，并利用前面求得的 l 和 s 值，则得 $\gamma=58^\circ$ 。因此，我们再来查 $\gamma=60^\circ$ 的特征曲线(图8和图9)以及 $\gamma=50^\circ$ 的特征曲线，并进行再解释。结果是 $d=47^\circ$ ， $h=63$ 米， $l=400$ 米， $M_s=32$ 电磁单位($k=0.57$ 电磁单位)。这个薄板的理论剖面(图7)与野外曲线还是非常吻合的。虽然由于进行了消磁改正，而改善了对倾角的估计，但是，不论那一种情况，推断的值都不是正确的。尽管如此，仍可以得到与野外观测曲线吻合得很好结果。

在这个例子中应注意的要点是，强磁性对倾角的确定有着很大的影响。事实上，当矿层

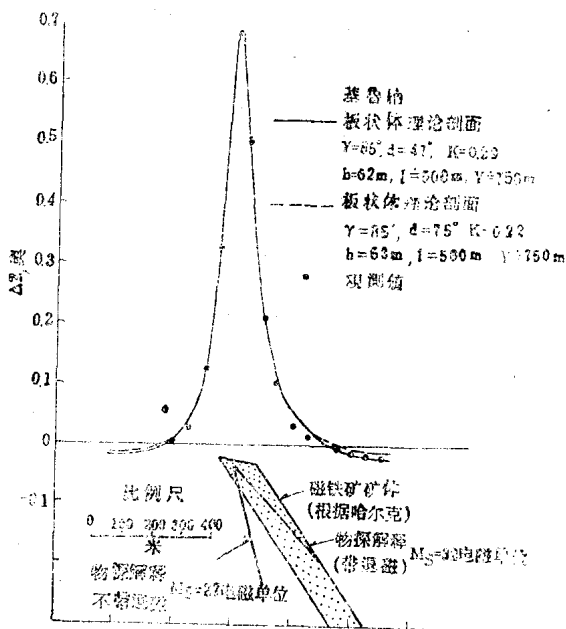


图7 瑞典基鲁纳区磁异常的主剖面

的磁化率大到象基鲁纳铁矿那样时，要对倾角作任何十分可靠的推断是相当困难的。在这种情况下，磁矩几乎偏转至矿体的层面内，并且如图 2 所示，只能确定相对于磁矩方向的倾

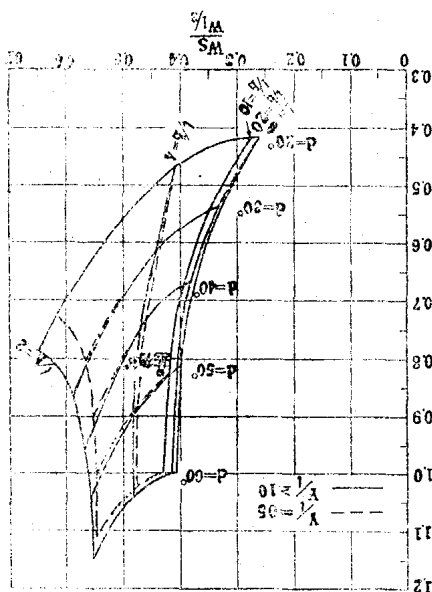


图 8 薄板状模型垂直场的特征曲线 ($\gamma = 60^\circ$, $K = 0.2$)

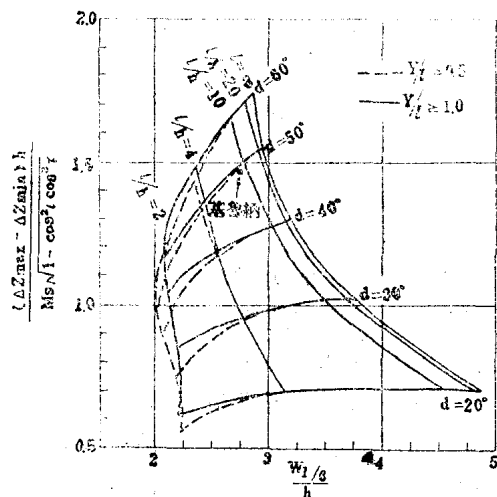


图 9 根据薄板垂直场的特征估计埋深和面磁化强度的辅助曲线 ($\gamma = 60^\circ$, $K = 0.2$)

角。因此，在解释强磁异常时，倾角通常是一个多解的参数。

在整个 85 米的宽度内，平均体磁化率为 0.57 电磁单位，表明基鲁纳铁矿在结构构造上可能是粗粒的和条带状的，因为这个数值远远超过用任何经验公式计算所得的浸染状磁铁矿的平均体磁化率的值。若是这样的话，矿石的真磁化率则可能远远大于计算的平均值，使得消磁效应比前面见到的还要大。当然，还可能有一部分剩磁。如果是这样，剩磁方向显然不会与外磁场和消磁场合成的方向相差太大。显然，在任何情况下都不可能区分两种不同的磁化强度所引起的异常，因此，对于两者的综合效应，我们采用等效体磁化率这一名词。

在第二个例子中，两个相反的磁矩存在于同一铁矿层内。图 10 所示的剖面是一个磁异常的主剖面。该异常原来是由航磁在加拿大的安大略省北部发现的。异常的总幅度比地磁场强度大 4 倍多，可算是磁力仪所能测得的最强的异常之一。异常由磁铁矿体积占 30% 的矿体引起，矿体距地表仅几呎。该区的磁倾角为 78° ，矿体走向几乎呈磁子午线方向，因此， β 近于 90° ， $K = \cos \beta \cot \lambda = 0.20$ 。

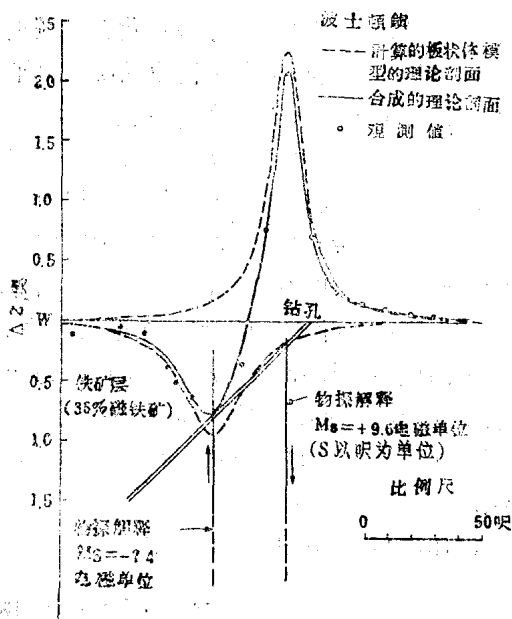


图 10 加拿大安大略省波士顿区某磁异常的主剖面

该磁测剖面除了强度大之外，其最显著的特征是，在剖面的西侧有很强的极小值。异常的最大正值为2.17奥（或217000伽马），最大负值为-75000伽马。两者的比值为2.9。根据经验法则，这表明 $Q (= \gamma - d)$ 的值应等于 $+60^\circ$ 左右。对于这样强的异常，磁化方向与倾角之间出现的这种差异几乎是不可想象的。当我们去测定剖面的特征值时，就出现了矛盾。发现水平梯度的两个极值在数值上大致相等（ ± 16000 伽马/呎），对于这一事实不可能有太大的怀疑，因为测点的间隔是足够近的（点距为10呎）。正如我们所料的那样，这表明 d 和 γ 非常接近。异常的其他特征值是：

$$w_s = 13.4 \text{ 呎} \quad w_{1/2} = 20 \text{ 呎} \quad w_{1/3} = 35 \text{ 呎} \quad \text{和} \quad (w_{1/2})_y = 90 \text{ 呎}$$

图4和图5清楚地表明，这些数值与薄板状模型不相一致。可以肯定，该剖面的形态有某些可疑之处。

有人推测异常的负值部份可能由倒转的剩磁引起，后经钻探证实，铁矿层含有粗粒的磁铁矿条带，在其西部边缘存在倒转的剩磁。而在矿层的东部见到了与地磁场方向一致的很强的正常剩磁。图10说明了如何用一个正场源和一个负场源的假设，使异常形态上的疑点得到了解释。由于这两个异常是那样地强，因此可以假定它们都是对称的。作出这一假定的另一个理由是，已知该区矿层的倾角是垂直或近于垂直的。于是，由剖面的两端起向着异常中心，可将异常唯一地分解成一个对称的正异常和一个对称的负异常。对每一个异常可选择 $\gamma = 90^\circ$ （如图5所示）的一个直立薄板状模型与之吻合。这两个薄板均为无限延深。东边的薄板埋深仅8.3呎，若 s 以呎为单位，则磁化强度为9.6/ s 电磁单位。西边的薄板埋深为15呎，磁化强度为-7.4/ s 电磁单位，负号表示其极性与 $\vec{H}_0$ 相反。因 $\gamma = \beta = d$ ，故不作消磁改正。这样两个薄板状模型合成的剖面与实测结果很吻合。钻探结果已经证实，矿体东缘的覆盖层厚为8呎。

这个推断解释的最显著的特点是，利用薄板状模型可以达到与野外资料极为一致的结果。从埋深仅8呎的角度来看，这似乎说明正常磁化的那部分是较薄的。因为，如果 s 超过 $2h$ ，一定的厚度对剖面形态的影响会变得明显起来，所以，我们推测该磁性带的宽度可能小于16呎。这意味着最小体磁化强度为0.6电磁单位，或者最小体磁化率约为1电磁单位。这样大的数值只有致密块状的磁铁矿才能达到，但如果颗粒呈浸染状时，就不可能了。由于，在几个薄层中比在单独一个厚层中更可能保存致密块状的构造，因此，在条带状铁矿层中发现这样强的磁性，是不足为奇的。事实上，当我们研究了磁铁矿获得永久磁矩的过程后，反磁化也同样不是那么不可思议的了。一种可能的解释是，由于某种原因，矿层的西部比其他部分冷却得慢，当矿层的东半部已经接受了很强的磁化时，它才达到居里温度。这时，使矿层西部的磁畴开始定向排列的外场的极性，与地磁场的极性相反。

上述情况并不少见。甚至在厚层的块状磁铁矿上，磁异常的形态也往往好象受比较狭窄的极强的磁性带控制。无疑，这正说明为什么薄板状模型能成功地运用于磁法的推断解释中，甚至对于出露在地表的矿体也是可行的。这也表示，用地球物理方法去估计磁性矿层的真实厚度往往是困难的。虽然如此，有时却必须求出厚度。例如，为作消磁改正而需要知道等效磁化率。此外，板状体的面磁化强度通常并不是一个很说明问题的物性。作为一种综合的指标，体磁矩或体磁化率更为有意义。

二、厚板状磁性体的异常解释

如果要去估计厚度，显然，我们必须放弃薄板状模型。因此，需假设板状体有一定的厚

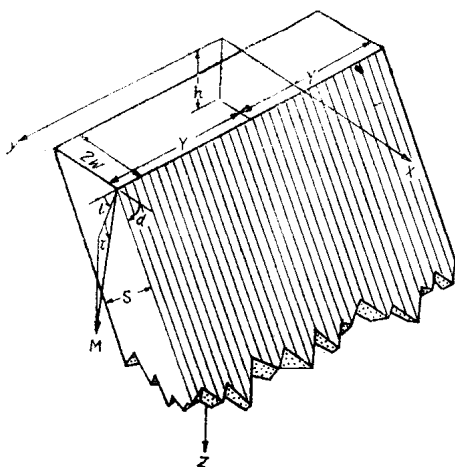


图11 厚板状模型

度 s 。但这样就多了一个参数，所以还要假设板状体的下底或两端位于无穷远处。如果真是那样的话，求解厚度的问题就近于解决了，那时，可以指望两个较大的参数中的某一个，对异常主剖面的作用不大。若剖面两侧均出现负值，显然，延深有重要作用；但若至少有一侧保持正值，则沿走向的延伸更可能起作用。

假设，有限长的无限延深厚板状体沿方向 κ 磁化（见图11）。通过它的磁场强度垂直分量的近似公式为：

$$\Delta Z(x, y) = M \sqrt{1 - \cos^2 \iota \cos^2 \tau} \sin d \{ f(x+w, y+Y) - f(x+w, y-Y) - f(x-w, y+Y) + f(x-w, y-Y) \} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} f(x+w, y+Y) = & \cos Q \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{y+Y}{B(x+w)} \right) \right. \\ & \left. - \tan^{-1} \left\{ \frac{(y+Y)A(x+w)}{B(x+w) \sqrt{D^2(x+w) + (y+Y)^2}} \right\} \right\} \\ & + \sin Q \left\{ \frac{1}{2} \ln \left(\sqrt{D^2(x+w) + (y+Y)^2} - (y+Y) \right) \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \ln \left(\sqrt{D^2(x+w) + (y+Y)^2} + (y+Y) \right) \right\} \end{aligned}$$

其中

$$A(x+w) = h \sin d - (x+w) \cos d, \quad B(x+w) = (x+w) \sin d + h \cos d,$$

$$D^2(x+w) = (x+w)^2 + h^2, \quad w = \frac{1}{2}s \csc d, \quad Q = \gamma - d$$

在这个公式的推导中，已经忽略了 $O(Y/h)^{-2}$ 和更小的项，因此，我们可以预料，该公式仅对 $Y \geq 3h$ 的条件才是正确的。因为这个公式主要是用来估计 s ，而不是其他参数，所以这种近似是容许的。这就可以根据该公式，以与薄板状磁性体的异常解释模型十分相同的方法来编制特征曲线。对于厚板状的情况，我们取 $s=1$ ，并以厚度为单位来量度所有的距离，因为， s 现在是表示模型特征的线性尺寸。

在极限的情况下，即当板状体变为二度体时（ $Y \gg s, h$ ），公式（6）简化为

$$\Delta Z(x) = M \sqrt{1 - \cos^2 \iota \cos^2 \tau} \sin d \left\{ \sin Q \ln \sqrt{\frac{(x-w)^2 + h^2}{(x+w)^2 + h^2}} + \right.$$

$$\cos Q \tan^{-1} \frac{2wh}{x^2 - w^2 + h^2}$$

该式为两项之和，第一项对于 $x=0$ 的点是反对称的，第二项是对称的。在根据野外实测结果定量估计 s , h 和 d 的各种方法中，都已经利用了这一显著的特征。多年来，无限长的厚板状模型一直是金属矿物探工作者十分注意的对象，因为它所模拟的地质体，在许多地区是很常见的。

三、根据航空磁测估计深度

在新区，尤其是在未进行填图的沉积盆地中普查石油或金属矿时，经常利用航空磁测对沉积层的垂直厚度作初步的估计。其前提是，沉积岩没有磁性，于是，任何磁异常必定是由其中的火成结晶杂岩体引起的。因此，所计算的磁性物质的深度，可以作为沉积层总厚度的上限。由于在这方面的应用上只要求场源的深度，并且，场源形态的细节没多大直接的意义，因此，相当普遍地采用象点极和偶极子那样的基本模型。

航磁解释的主要困难之一是，观测仪器通常在磁性体上方很远处，以致无论磁性体可能有多大的延伸，再也不能将它看作二度体。所以在航磁解释中，二度模型以及地面磁测解释所用的大多数特征曲线的价值都不大。鉴于种种原因，在航磁中已广泛采用的模型，与地面磁测解释中最常用的模型是不同的。

几年前，由瓦奎尔等人* 提出的横截面为矩形的、无限延深直立棱柱的模型，至今已得到广泛的流传。导致采用这种模型的想法是，一些相隔很近的场源的磁效应相互叠加，在离它们很远的地方来看，好象只是一个异常。因此，根据由几千呎的距离上进行的磁测，来分辨带状火成岩侵入体的地区和单一的均匀磁化的地段，是有困难的。棱柱模型只能用来很粗略地圈定磁性物质最集中的那部分岩石，而不能搞清这些物质的地质性质。这种模型之所以能成功地推断无磁性覆盖层的厚度，完全是由于位场效应在足够远处，受场源形态细节的影响很小的缘故。

直立棱柱上磁异常的形态取决于五个量，即两个边长 a 和 b ，飞机高度以下的深度 h ， b 边的磁方位角 λ ，以及磁倾角 i 。选取 a 作为量度的单位，我们得到四个参数： h/a ， b/a ， λ 和 i ，其中后两者为事前已知或假设的。目的是利用异常形态上的某些特征值，消除 a 和 b ，从而求得 h 。

四个独立的参数引出了大量的不同情况。在 b/a 和 λ 之间存在一种明显的关系，假设 λ 值只是在 0° 和 90° 之间，这样可以使各种不同情况的数目减少。即使如此，对于 i 为不同值的情况仍是多得惊人。瓦奎尔等人对磁倾角从 0° 到 90° 变化范围内的许多不同情况，计算了总磁异常及其二次垂直微商 ($\partial^2 \Delta T / \partial z^2$) 的图形。虽说这些图的数量并不多，但它们决不是完整的工具。这些图的使用，在于将航磁图上的特征距离与相应的理论图形上的同类长度进行直接对比。由于后者是以 h 为单位绘制的，因此，这些长度之比将直接给出 h 。

大量的这种异常图形，可以提取成几套特征曲线，从而大大缩减了资料的数量。对于比值 b/a 的一个合适的量度是，在幅度为极大和极小的平均值处，沿平行和垂直于异常走向的

*V. Vacquier, N.C. Steenland, R.G. Henderson, and I. Zeitz: "Interpretation of Aeromagnetic Maps" 《Geol. Soc. America Memoir》 47, 1951.

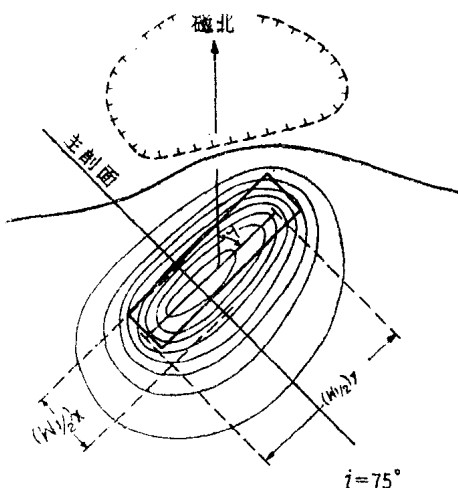


图12 直立棱柱上的理论总磁异常（图中表示了估计b/a的量度）

足够的 λ 和 i 值的变化范围，大约需要30套这样的图。这些图将包括四个参数 i ， λ ， h/a 和 b/a 的1200种以上的不同组合。

作为使用这些曲线的一个实例，我们将安大略西南部航磁测量的部分结果示于图16。该地区的前寒武纪岩石被大约3000呎的古生代沉积岩所覆盖。异常走向的方位角为 48° ，地磁场倾角为 75° 。相应于该异常的点标在图14中，该点指示的比值 b/a 为3.5， h/a 为1.25。根据图14， $(w_{1/2})_x/h$ 为2.52，因为 $(w_{1/2})_x=2.40$ 哩，所以求得 $h=5030$ 呎。飞机距地面的高度为1800呎，这样我们就得出磁性岩石的深度约为3200呎。由于假定这些岩石是位于前寒武纪杂岩体中的，因此，我们根据棱柱模型推断，该处沉积岩最大厚度刚过3000呎（在西南侧的一个较小的异常给出了小得多的深度，这表明棱柱对于那样的异常，不是一种合适的模型）。

无限延深的棱柱，在某种意义上代表了地质上的一种极端情况，即磁性岩石延伸至很大的深度，而其磁性没有任何减弱。这似乎可以表明岩石是深成的。另一种极端对应的是岩层中磁性岩石延深有限的情况，如火山岩流和岩床，适合于此的解释模型是水平矩形薄板。没打算采用有限延深的棱柱，因

两个方向上，等值线的两个宽度之比。我们用符号 $(w_{1/2})_y$ 和 $(w_{1/2})_x$ 来表示这两个宽度。对于 h/a 的量度，在纬度较高时（ $|i| \geq 60^\circ$ ），采用垂直于走向的水平梯度极值的平均值和 $(w_{1/2})_x$ 的乘积并除以总幅度（ $\Delta T_{max} - \Delta T_{min}$ ）的那样一个比值。由于采用了异常峰值两侧最大斜率（两者均取正号）的平均值，就消除了线性的区域磁场的梯度，也减小了在该模型中未加考虑的倾角的影响。图12和图13说明了这两种量度。

$i=75^\circ$ 和 $\lambda=45^\circ$ 的一套特征曲线示于图14，确定 h 的曲线示于图15。利用图14，同时求出 b/a 和 h/a ，所以棱柱形态（ b/a ）的影响，可以通过选择图15中合适的曲线加以消除。为了提供足

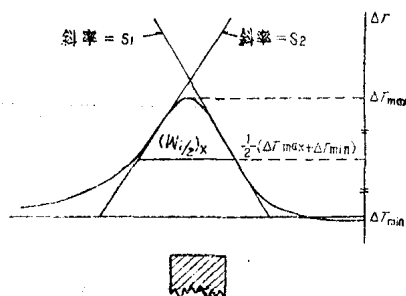


图13 图12中异常的主剖面（图中表示了当 $i=60^\circ$ 时，用来估计 h/a 的量度）

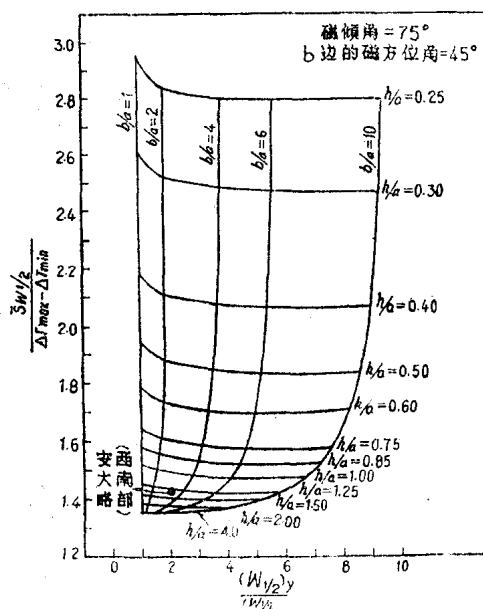


图14 直立棱柱模型总场的特征曲线（ $i=75^\circ$ ， $\lambda=45^\circ$ ）

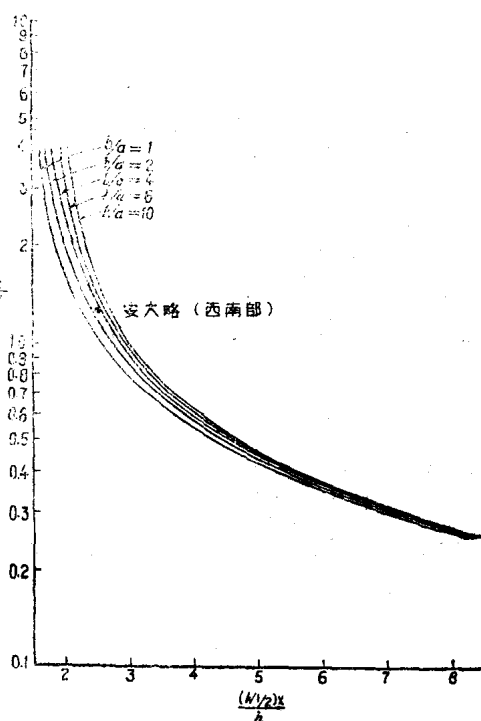


图15 根据棱柱总场的特征值，确定其深度的辅助曲线 ($i=75^\circ$, $\lambda=45^\circ$)

或侵入岩带，其大致的轮廓均呈明显的线型。这样的特点在前寒武纪的岩石中很普遍，并且，按它们的长度比例用棱柱来代表的话，大部分又窄得多。所以我们假设板是无限薄的，并且只有面磁化强度。这种模型的两个极端情况是：无限延深的薄板 ($1 \rightarrow \infty$)，相当于深断裂带；有限长偶极线 ($1 \rightarrow 0$)，它代表磁性薄岩层。

我们将忽略消磁，并假定薄板沿 H_0 的方向磁化。正如我们曾经指出的，消磁能对模型倾角的计算起决定性的作用，但对深度解释的作用仅仅是次要的。在任何情况下，倾角不是根据航磁异常所能容易解释的一个量，就研究深度而言，意义不大。这种模型总磁异常的公式为：

$$\Delta T(x, y) = Ms(1 - \cos^2 \lambda \cos^2 i) \{f(x, y+Y) - f(x, y-Y)\} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } f(x, y+Y) = & \frac{y+Y}{\sqrt{C^2 + (y+Y)^2}} \left[\frac{(x-l\cos d)\cos Q - (h+l\sin d)\sin Q}{C^2} \right. \\ & - \frac{y+Y}{\sqrt{D^2 + (y+Y)^2}} \left[\frac{x\cos Q - h\sin Q}{D^2} \right] \\ & - \frac{1}{B^2 + (y+Y)^2} \left[\frac{A+1}{\sqrt{C^2 + (y+Y)^2}} - \frac{A}{\sqrt{D^2 + (y+Y)^2}} \right] \\ & \cdot ((\cos Q \cos d - \cos^2 \beta + K^2)(y+Y) + 2K \sin(d-\beta)B) \\ & + 2K \cos(d-\beta) \left[\frac{1}{\sqrt{C^2 + (y+Y)^2}} - \frac{1}{\sqrt{D^2 + (y+Y)^2}} \right] \end{aligned}$$

为，能如此精确地测出航磁异常图形是少有的，以致我们可考虑在特征曲线中引入第五个参数。只要磁性岩层的厚度比它相对于飞机的深度大得并不多时，采用水平薄板模型都是可以的。假定薄板沿地磁场方向磁化而具有“面磁化强度”，面磁化强度是平均磁矩和厚度的乘积。

对水平薄板模型的量度，跟我们对棱柱所用的量度是一样的。没有给出它们的特征曲线，因为，除了曲线向上位移外，它们与棱柱的特征曲线是类似的。于是，我们可以预料，对于同一异常，根据薄板推断的 h 值将大于棱柱推断的值。有限延深的场源，有时可以根据其异常峰值部分有较大的陡度而区别于延深很大的场源。在发生怀疑或不能肯定的情况下，这两种模型可以用来估计 h 值的上限和下限。

我们将考虑走向延伸有限的倾斜板，作为航磁解释的第二种模型。这与我们曾在地面磁测解释中用来代表岩脉的模型是一样的。我们现在引入这种模型来代表矿化褶皱带、断裂带

$$\text{式中 } Q=2\beta-d \quad \tan\beta=\frac{\tan i}{\sin \lambda} \quad k=\cos \beta \cot \lambda$$

$$A=h \sin d-x \cos d \quad B=x \sin d+h \cos d$$

$$C^2=(x-l \cos d)^2+(h+l \sin d)^2 \quad D^2=x^2+h^2$$

该式包含有六个参数： h ， l ， Y ， d ， i 和 λ 。其中的二个： i 和 λ 假定为已知，并令第三个参数 l 作为长度的单位。于是，剩下的三个参数： h/l ， Y/l 和 d 都是无量纲的。只要 $Y \geq 2l$ ，走向长度对主剖面特征的影响就不大，因此，可以对 i 和 λ 的各种组合以及对 $Y/l=1, 2$ 和 ∞ 的情况，绘制特征曲线。

估计薄板深度的特征值是比值 $M_s \bar{s} / \text{AMPL}$ ，其中 w_s 是主剖面拐点间的水平距， $\bar{s}$ 是水平梯度的两个极值的平均值，AMPL表示异常总幅度 $\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}$ 。重复一下，采用水平梯度极值的平均值，目的是使倾角的影响变得最小，以及消除线性的区域梯度。估计倾角的特征值，一般是两个水平梯度极值之比（正的极值作分子），并取正号。示于图17的是其中的一套特征曲线，相应的辅助曲线示于图18。

现在我们举例说明精心选择解释中所采用的模型的重要性。根据图17，与图16中异常（那里的 K 值为0.18）最吻合的薄板，其倾角为 77° ，比值 $l/h=10$ 。根据另一张曲线图（未表

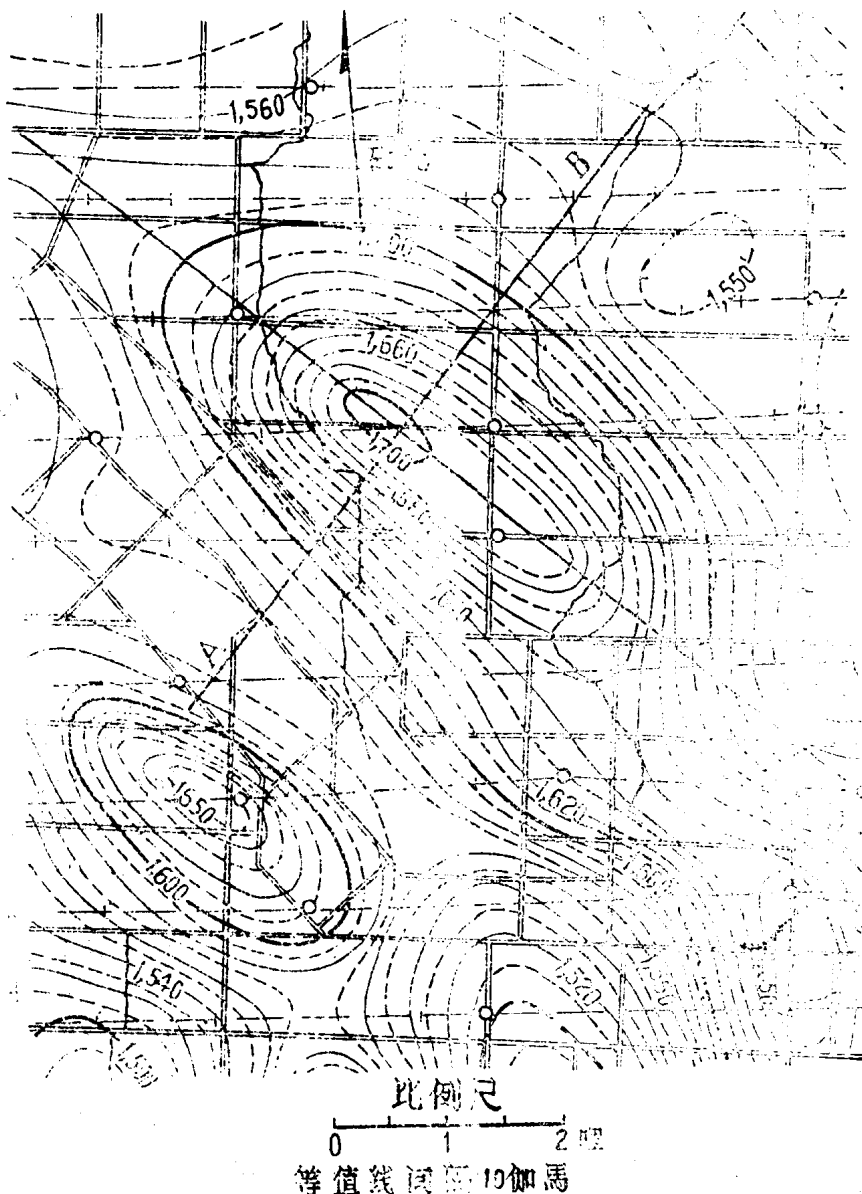


图16 加拿大安大略省西南部航空磁测的部分结果（飞行高度1800呎）

（正的极值作分子），并取正号。示于图17的是其中的一套特征曲线，相应的辅助曲线示于图18。

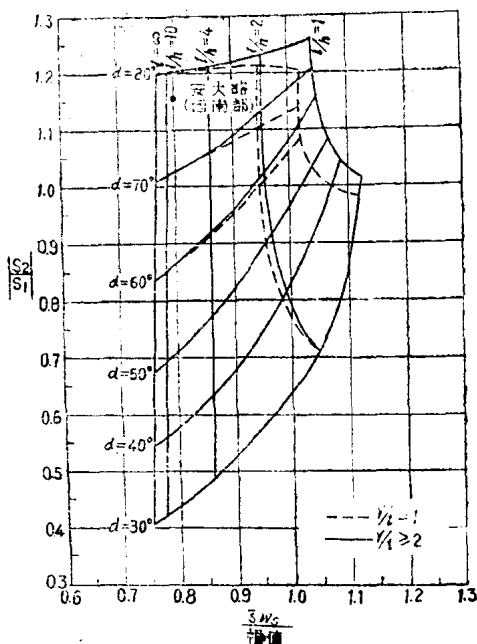


图17 薄板状模型总场的特征曲线

($\gamma = 80^\circ, K = 0.2$)

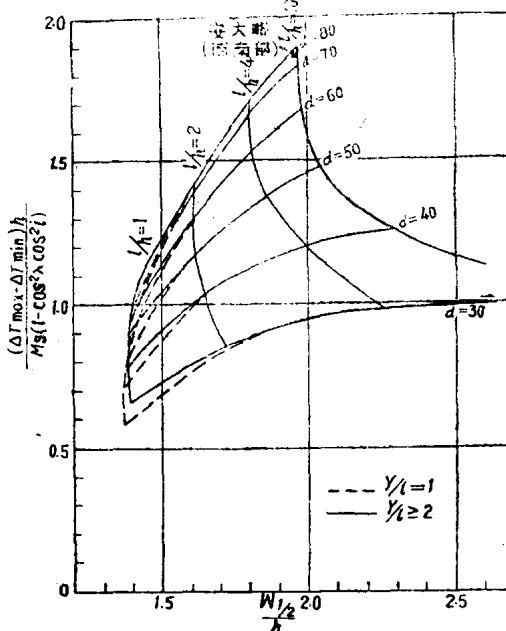


图18 根据薄板总场的特征值估计其深度和面磁化强度的辅助曲线 ($\gamma = 80^\circ, K = 0.2$)

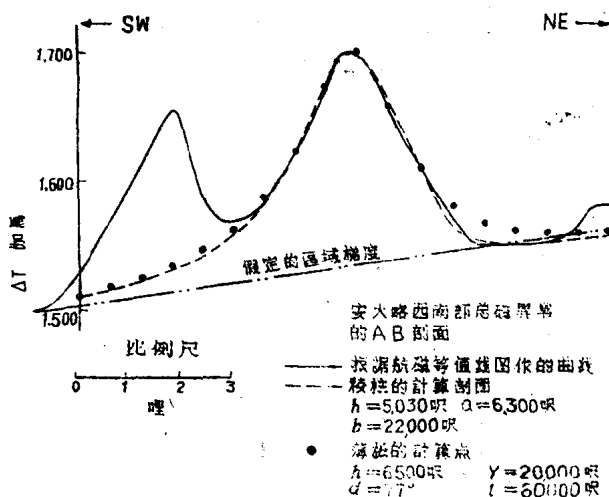


图19 图16所示总磁异常的主剖面

以至磁力仪远在5000呎以外仍能分辨。预先和熟悉一下厚板和薄板横剖面的形态，就可以认清这种实际情况，并且在一开始就能指导我们选择较好的模型。

在航磁解释中经常采用的第三种模型是走向长度很大的厚板状体，或许还有其他模型。除了已经讨论过的两种模型外，我们将不再介绍其他的了。但值得注意的是，用厚板状模型从安大略西南部异常所得的结果，与用直立棱柱所得的结果相比，十分接近。这无疑肯定了该“物体”是一个相当厚的带，并证明较浅的深度更合适些。

最后，我们要说明，根据航空磁测所作的深度计算，在目前很侧重地取决于所采用的异常

示出来)，我们还得到 $Y = 3h$ 。从图18求得 $w_{1/2}/h = 1.95$ ， $(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})h / M_s(1 - \cos^2 \lambda \cos^2 i) = 1.87$ 。因为 $w_{1/2} = 2.40$ 哩， $\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min} = 166$ 伽马，则得 $h = 6500$ 呎， $M_s = 11$ 电磁单位（s以呎为单位）。这表明薄板状模型给出的最大沉积厚度为4700呎，而棱柱模型仅得3200呎的最大厚度。然而，当我们计算并画出了这两个吻合得最好的模型的主剖面，再把它们跟观测值作对比时（图19），它们之间的任何含糊的关系都马上消失了。十分明显，由这些结果可知，该磁性带有着相当大的厚度，