第 29 卷第 3 期
2005 年 6 月
物 探 与 化 探
GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION
Vol. 29, No. 3
Jun., 2005

利用欧拉反褶积法估计二度磁性体深度与位置

史辉[1], 刘天佑[1], Dawi Muna Ghaboush[2]
(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. University of Alneelain, Sudau)

摘 要: 为了利用欧拉反褶积进行快速计算, 提出了多个大小不同的滑动窗口进行多次覆盖的算法, 对高精度磁测剖面逐点反复计算, 并根据统计学原理从大量计算结果中剔除坏解, 保留合理的解; 还根据 2-D 模型讨论了结构指数与欧拉反褶积的结果的关系。将该方法应用于我国西北某地区的高精度航磁资料处理, 获得较好的地质效果。

关键词: 高精度磁测; 欧拉反褶积; 2-D 模型; 构造指数; 滑动窗口; 剔除坏解
中图分类号: P631.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2005)03-0230-04

磁源的深度是磁测资料解释的一个重要参数。在石油勘查中利用磁测资料确定沉积基底的深度, 在矿产勘查中利用磁测资料确定磁性矿体或岩体的埋深, 为此欧拉反褶积作为一种确定磁异常场源深度的方法便应运而生。它最初由 Thompson 于 1982 年提出并应用于二维[1], 随后被 A. B. Reid 等[2] 推广应用于三维。随着其应用范围的扩大, 欧拉反褶积方法得到进一步改善, V. C. F. Barbosa 等[3] 对结构指数估计进行了改进与分析, M. F. Mushayandebvu 等提出了扩展欧拉反褶积方法, 使之能从剖面数据中估计磁化强度大小和有效磁化倾角。

这里介绍的欧拉反褶积是一种快速的反演方法, 它不需要对地质模型作任何假设, 也无需对磁测数据进行化极处理, 因此其适用的范围更广。但它的这种灵活性要求解释者具有丰富的地质知识, 例如在 2 种或多种结构指数可能性中作出选择。笔者分析了结构指数与欧拉反褶积结果的关系, 提出了利用多个大小不同的窗口多次滑动的算法以及统计学原理剔除坏解的方法。

1 方法原理

假设简单的地质体场源函数表达式为

$$f(x,y,z) = G/r^N, \tag{1}$$

其中 $r=(x^2+y^2+z^2)^{1/2}$, $N=1,2,3,\cdots$, G 与 x,y,z 无关。实际上许多单一的点磁场源有方程(1)的形式, 它们满足

$$x\frac{\partial f}{\partial x}+y\frac{\partial f}{\partial y}+z\frac{\partial f}{\partial z}=nf。$$

这就是著名的欧拉奇次方程, 简称欧拉方程。

考虑一个位于 (x_0,y_0,z_0) 的点磁源(点磁极, 磁偶极子), 那么点 (x,y,z) 处的总磁场强度具有

$$T(x,y,z) = f[(x-x_0),(y-y_0),(z-z_0)] \tag{2}$$

形式, 其必然满足

$$(x-x_0)\frac{\partial T}{\partial x}+(y-y_0)\frac{\partial T}{\partial y}+(z-z_0)\frac{\partial T}{\partial z}=-NT。 \tag{3}$$

对于二度体而言, 方程(3)中 y 方向梯度 $\partial T/\partial y$ 为零, 当测量面水平时, 通常将 z 设为 0, 故表达式可简化为

$$x_0\frac{\partial T}{\partial x}+z_0\frac{\partial T}{\partial z}=x\frac{\partial T}{\partial x}+NT, \tag{4}$$

式中沿 x,z 方向的梯度 $\partial T/\partial x$, $\partial T/\partial z$ 可以利用空间域或频率域的位场转换计算或直接测出, 因而(4)式中的未知量是 x_0,z_0,N。其中坐标 (x_0,z_0) 表示的是等效点源的位置与深度, N 表示结构指数。各种简单模型有特定的 N 值。表 1 列出了一些简单的点源模型的构造指数, 同时它们也是磁异常随场源深度变化"陡缓"的量度。许多地质体具有特定的衰减系数即构造指数。例如, 一个垂直磁化的二度岩脉其构造指数 $N=1$, 而一个垂直磁化的接触带构造指数小于 0.5。构造指数与实际地质异常形式之间的这种联系, 构成了欧拉反褶积法的基础。

表 1 简单模型的构造指数

简单模型	N	简单模型	N
磁荷面	0.0	线极	1.0
点极	2.0	偶极线	3.0
偶极子	4.0		

由于区域场或邻近异常场 B_1 的影响, 可以将观

收稿日期: 2004-04-05

测值看成：

$$T(x) = \Delta T(x) + B_1。\tag{5}$$

将(5)式带入(4)中得

$$x_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + z_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} + NB_1 = x \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + N\Delta T,\tag{6}$$

通过给出 3 个不同点的 ΔT 和 x，$\partial\Delta T/\partial x$，$\partial\Delta T/\partial z$ 的值以及合适的 N，由(6)式可以构成含未知量 x_0，z_0 和 B 的 3 个线性方程，原则上就可以解这 3 个线性方程进而得出未知数 x_0，z_0 和 B。但人们常用多个点建立一个超定方程，利用最小二乘法来求解。

实际上，不同场源产生的异常互相叠加在一起，理论上窗口越小(窗口点数一定要大于 3)，分辨率越高。然而对于大的地质体而言，窗口太小，得到的结果与实际情况相差甚远，因而要求大的窗口 对于小的地质体而言，窗口过大，常常会忽略掉许多小的异常。因此，必须根据具体情况，选择合适的窗口。通常窗口的选取与地质体的规模有关，地质体越大，窗口越大。

2　模型计算

下面以几个简单模型为例说明欧拉反褶积的效果，模型的结构指数取 $N = 1.0$，所选的窗口为 20 个点，点距为 1 m，计算结果如图 1。

为了便于对比理论值与计算值，我们将其所得

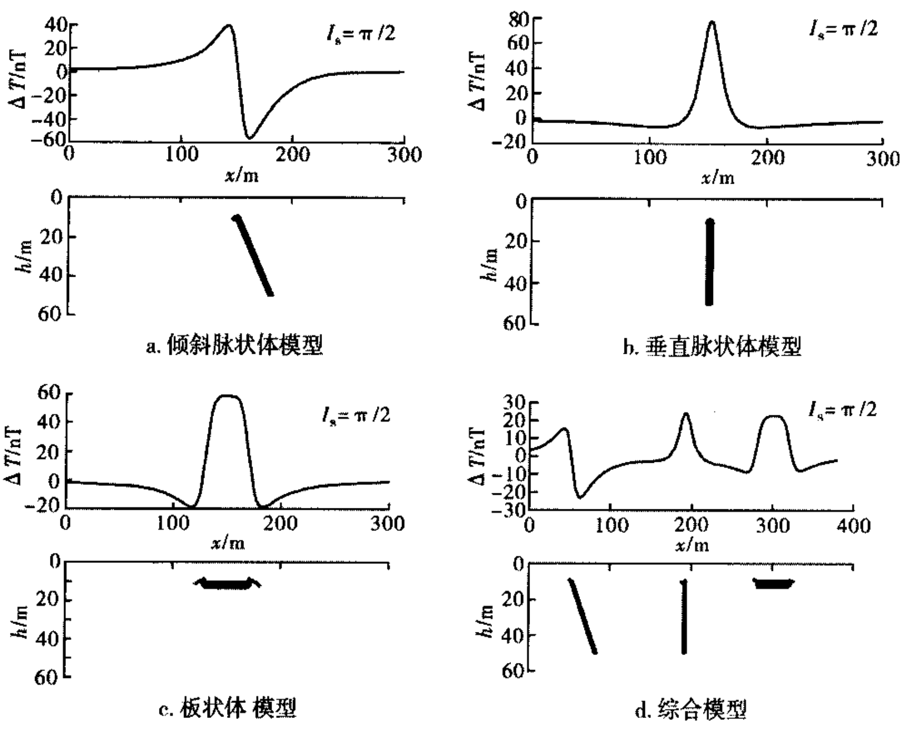

图 1　几种简单模型的欧拉反褶积计算结果

表 2　欧拉反褶积模型计算结果对比

模型	窗口大小 m²	N	水平位置(x_0/m)		上顶埋深(z_0/m)	
			计算值	理论值	计算值	理论值
a	20 × 1	1.0	152.0 ± 1.2	150 ~ 155	10.4 ± 0.4	10
b	20 × 1	1.0	152.5 ± 1.1	150 ~ 155	10.4 ± 0.4	10
c (左) (右)	20 × 1	1.0	128.6 ± 2.4 1.0171.8 ± 3.0	130 170	11.0 ± 1.2 11.0 ± 1.2	10
d	20 × 1	1.0	52.4 ± 0.8 191.8 ± 1.2 279.6 ± 1.5 320.8 ± 1.7	50 ~ 55 190 ~ 194 280 320	10.4 ± 0.6 10.3 ± 0.4 10.0 ± 1.0 11.1 ± 1.1	10

结果制成表 2，发现欧拉反褶积的模型计算的效果非常好。

下面分析 N 与 x_0，z_0 的关系。为此，利用一个梯形截面的二度水平棱柱体模型讨论结构指数 N 对 x_0，z_0 值的影响，并且利用所得的 x_0，z_0 值绘制 x_0-N，z_0-N 关系曲线(图 2、图 3)。

图 3 中 x_{01}，z_{01} 表示该模型左缘计算得出的位置与深度，x_{02}，z_{02} 表示该模型右缘计算得出的位置与

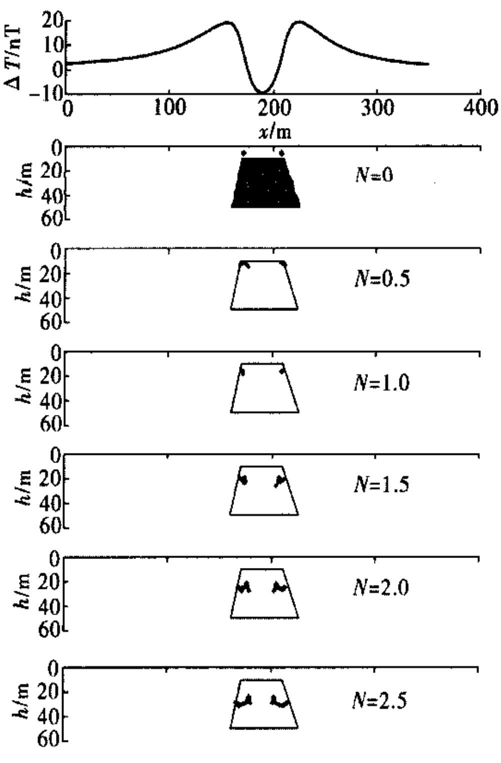

图 2　不同 N 值的欧拉反褶积结果对比

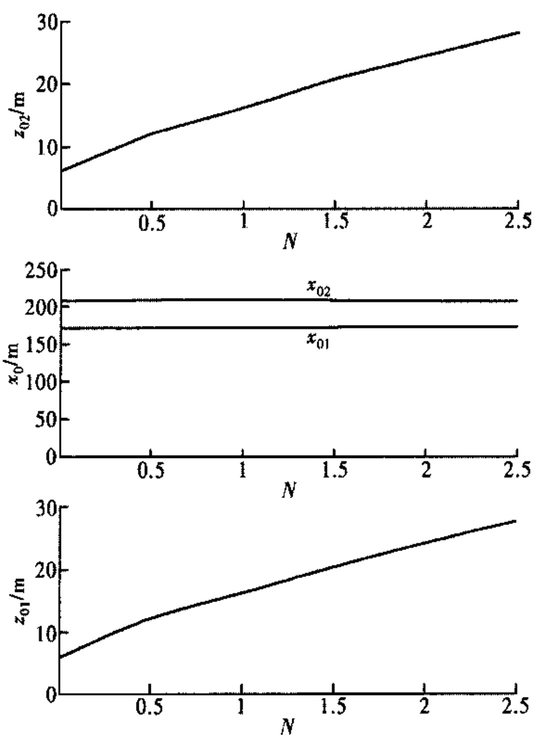

图 3　x_0-N,z_0-N 关系

深度。从中可以发现用欧拉反褶积方法计算时,结构指数的取值对所得结果中 x_{01},x_{02} 的影响很小,但对于 z_{01},z_{02} 的影响较大,而且当结构指数大于 2.5 时,所得结果与实际情况相差甚远。我们还发现结构指数与深度近似成直线关系。从图 2 中我们可以看出当 $N=0.5$ 时,计算值与理论值最接近,说明该模型的结构指数 $N\approx0.5$ 选择最合理。

在实际计算中,我们采用多个大小不同的移动窗口逐点计算窗口内磁性体的位置与深度值。由于采用大小不同的窗口对磁测剖面数据进行多次覆盖,因而产生大量的解,我们把那些与实际情况偏离较远的解叫做坏解。为了得出合理的结果,笔者采用统计学筛选法来剔除坏解,由于合适的窗口计算出的正确解往往比较近似,故剔除区域选择($\bar{x}_0-\sigma_x$,$\bar{x}_0+\sigma_x$)和($\bar{z}_0-\sigma_z$,$\bar{z}_0+\sigma_z$),将大于 1 倍 σ_x 和 σ_z 的坏解剔掉,具体方法如下:

(1)将窗口的初始位置设为剖面的起始位置,窗口初始大小设为剖面长度的一半;

(2)计算出该处窗口中的解 x_0 的平均值 $\bar{x}_0$ 与标准差 σ_x 以及解的数量 m;

(3)如果 σ_x 不大于测点距且 $m>3$,则保留该窗口中的解,如果 σ_x 大于测点距且 $m>3$,将该窗口中($\bar{x}_0-\sigma_x$,$\bar{x}_0+\sigma_x$)以外的解剔掉,然后跳回步骤(2),再重复(2),(3)步骤,直到满足为 σ_x 不大于测点距且 $m>3$ 为止,否则跳到步骤(6);

(4)计算出该处窗口中的解 z_0 的平均值 $\bar{z}_0$ 与标准差 σ_z;

(5)计算 $\bar{z}_0/\sigma_z$ 的值。如果 $\bar{z}_0/\sigma_z\geqslant10$,则保留该窗口中的解,如果 $\bar{z}_0/\sigma_z<10$,则将剔掉窗口中($\bar{z}_0-\sigma_z$,$\bar{z}_0+\sigma_z$)外的解,然后跳回步骤(4),再重复(4),(5)步骤,直到满足 $\bar{z}_0/\sigma_z\geqslant10$ 为止,否则执行步骤(6);

(6)将窗口滑动一个点距,然后跳回步骤(2),从步骤(2)开始执行,如此这般将窗口逐点移动,直到窗口移到剖面末尾;

(7)根据保留下来的解绘出结果图;

(8)如果结果不满足要求,将窗口大小减半,窗口初始位置设为剖面起点,跳回步骤(2),从步骤(2)开始执行,直到符合要求为止。

由此便可得出欧拉反褶积的最终结果,同时还可以将计算结果实时作图显示。

欧拉反褶积的步骤为:

(1)将实测的 ΔT 进行圆滑后,计算出 $\partial\Delta T/\partial x$,$\partial\Delta T/\partial z$(或直接测出 $\partial\Delta T/\partial x$,$\partial\Delta T/\partial z$)的值;

(2)根据实际情况确定合适的窗口范围,选取几个大小不同的窗口;

(3)利用(6)式建立超定方程通过多个大小不同窗口移动,进行多次覆盖逐点地计算出对应的 x_0,z_0;

(4)然后根据所得大量解,利用上文所述剔值方法,剔除坏解,得出反褶积结果。

3 实例

下面是将欧拉反褶积用于实测剖面的例子。该剖面是我国西北某地区的一条磁测 ΔT 剖面，剖面长 10 km，点距为 0.1 km。根据先验信息知地质体沿走向延伸较大，因此我们可以将该地质体看成无限长的水平棱柱体或水平圆柱体，故选取 $N=2.0$，所选窗口大小范围为 15～25 点，欧拉反褶积处理得到 4 个点，分别是 A、B、C、D 点，其中 A 点为 $x_0=(0.43\pm0.02)$ km，$z_0=(1.30\pm0.13)$ km，B 点为 $x_0=(4.41\pm0.10)$ km，$z_0=(1.46\pm0.09)$ km，C 点为 $x_0=(5.92\pm0.06)$ km，$z_0=(0.95\pm0.09)$ km，D 点为 $x_0=(6.0\pm0.09)$ km，$z_0=(1.14\pm0.08)$ km，如图4。根据欧拉反褶积结果以及结构指数与磁异常曲线，我们可以推断出 2 个地质体，一个上顶面在 A、B 处，一个上顶面在 C、D 处，这与地质上所得的结果是一致的，所以此方法是可行的。

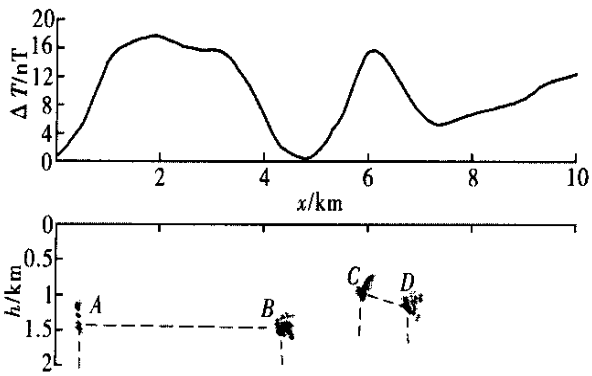

图 4　阿门子某剖面欧拉反褶积结果（虚线为推断的磁性体）

4 结语

利用欧拉反褶积的原理估计二度磁性体深度与位置上，关键是结构指数的选取。根据统计学原理，设计的大小不同的窗口进行滑动多次覆盖的剔值算法，用于我国西北某地区的高精度航磁资料处理，获得较好的效果，证明该方法的有效性，但结构指数的确定还需进一步研究。

参考文献：

[1] Thompson D T. EULDPH：A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data [J]. Geophysiscs, 1982, 47：31－37.

[2] Reid A B, Allsop J M, Granser H, et al. Magnetic interpretation in three dimensions using eular deconvolution [J]. Geophysiscs, 1990, 55：80－91.

[3] Barbosa V C F, Silva J B C, Medeiros W E. Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution [J]. Geophysiscs, 1999, 64：48－60.

[4] Mushayandebvu M F, van Driel P, Reid A B, et al. Magnetic source parameters of two-dimensional structures using extended Eular deconvolution [J]. Geophysiscs, 2001, 66：814－823.

[5] 穆石敏，申宁华，孙运生，等. 区域地球物理数据处理方法及其应用[M]. 长春：吉林科学技术出版社，1990.

THE APPLICATION OF EULER DECONVOLUTION TO ESTIMATING DEPTH AND LOCATION OF THE 2D MAGNETIC BODY

SHI Hui[1], LIU Tian-you[1], Dawi Muna Ghaboush[2]

(1. *China University of Geosciences*, *Wuhan* 430074, *China*; 2. *University of Alneelain*, *Sudan*)

Abstract: In this paper, the authors used different gliding windows to perform Euler deconvolution on magnetic profile data or 2-D model, probed into the relationship between structure indices and solutions and the method for eliminating the poor solution on 2-D model by mathematical statistics. The Eular deconvolution on magnetic profile data was successfully conducted in a certain area of northwestern China.

Key words: magnetic profile data; Euler deconvolution; 2-D model; structure index; gliding window; eliminating the poor solution

作者简介：史辉（1982－），男。2003 年毕业于中国地质大学（武汉），现在中国地质大学（武汉）地球物理与空间信息学院攻读硕士学位，研究方向为地球物理数据处理。