

插值切割法在消除磁异常干扰中的应用

文百红

(中南工业大学)

本文介绍一种名为插值切割的消除磁异常干扰的算法,并通过对具有不同信噪比和不同信息密度的模型进行了大量的计算,得到选取最佳切割半径的经验关系式。其中引入了磁异常状态数的新概念,与匹配滤波法、向上延拓法和其他方法对比,插值切割法有着较高分离磁异常和磁干扰的能力,适于处理叠加有随机和非随机磁干扰的复杂磁异常。为说明该法的应用效果,举有实例。

关键词: 插值切割法; 最佳切割半径; 磁异常; 磁干扰



物探与化探

在磁测数据中,一般均含有观测误差和地表或浅层磁性不均匀的干扰(简称浅部干扰)。特别是在高精度磁测数据中,浅部干扰具有波长短、幅值变化大、呈不规则突变点出现等特点。由于信噪比低、形态复杂,浅部干扰往往使有用信号的形态特征产出很大的畸变,以致对磁测结果无法作深入的分析和解释。因此,只有尽可能压制或消除上述干扰,才有可能得出正确的地质解释。

消除干扰的方法主要有:最小二乘圆滑、维纳滤波、向上延拓和匹配滤波等。多年的数据处理实践经验表明,对于具有均值为零的观测误差,上述各法均有较好效果;而对均值不为零、形态复杂的浅部干扰,后两种方法有较好的处理效果,前两种方法效果较差。这主要因为后两种方法是以最小均方误差为基础,适合于消除均值为零的平稳和各态经历的随机干扰^[1,2]。

笔者最近提出了一种划分磁异常的新方法——插值切割法。为节约篇幅,这里只介绍该法在消除磁异常干扰中的应用效果。

方法特点

插值切割法,是以局部异常和区域异常波长(曲率)的明显差异为前提,通过连续的插值切割,把复杂磁异常的凹凸不平、长短不一的局部异常逐步切除掉,从而得到有一定光滑程度的区域异常。文中,局部异常是指所要消除的磁干扰(包括观测误差和浅部干扰),而区域异常是指原始场中除掉磁干扰后的磁异常(即有用信号)。

为便于应用,仅以二度体异常的处理为例,说明插值切割法的算法和特点。

设原始场 $Z(X)$ 是由磁干扰 $N(X)$ 和磁异常 $S(X)$ 组成。两者在波长上有明显差异。当切割半径为 R 时,令

$$Z = Z(X),$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{2}[Z(X+R) + Z(X-R)],$$

$$\Delta Z = Z(X) - \frac{1}{2}[Z(X+R) + Z(X-R)],$$

$$\Delta Z = Z(X+R) - Z(X-R),$$

$$a = \frac{(\Delta Z)^2}{(\Delta Z)^2 + (\Delta Z)^2}, \quad (a=1, \text{若}\Delta Z$$

$$=\overline{\Delta Z}=0; 0\leq a\leq 1)$$

则把当前计算点场值与其二点圆周平均值之间的插值关系

$$Q = \overline{Z} + a(Z - \overline{Z})$$

定义为提取磁异常的切割算子。其中 Q 表示切割磁异常。因此，用该算子构造的划分场的算法称为插值切割法。

上式还可转化为

$$Q = b\overline{Z} + aZ, (b=1-a)$$

可见，所求磁异常为当前计算点场值与其二点圆周平均值的变系数加权平均，显然，此方法为一种非线性的滤波法。

值得指出的是，插值系数 a 中包含有 $\overline{\Delta Z}$ 项，是反映计算点原始场局部曲率的一个变量。由数值分析可知，

$$\begin{aligned} \text{二次差商} &= -\{[Z(X) - Z(X-R)]/R \\ &\quad - [Z(X+R) - Z(X)]/R\}/R \\ &= -\frac{2}{R^2}\left\{Z(X) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2}[Z(X+R) \right. \\ &\quad \left. + Z(X-R)]\right\} \\ &= -\frac{2}{R^2}\overline{\Delta Z} \end{aligned}$$

因此， $\overline{\Delta Z}$ 可称为半二阶差分，与负二阶水平导数成正比。根据曲线曲率关系可知， $\overline{\Delta Z}$ 即与曲率成正比。通常，磁异常与磁干扰的曲率有明显的差异，在选择合适的切割半径之后，插值切割法能把不同曲率的磁异常与磁干扰有效地分离。在连续插值切割过程中作适当的圆滑处理，可以明显地压制随机误差的传递，并提高分离磁异常的可靠性和精度。

理论模型计算表明，在选择合适的切割半径时，插值切割1~5次（干扰水平高时取较大值）即可达到较高的分离精度，说明差值切割法具有较快的收敛性。

最佳切割半径的选取

插值切割法的使用，关键在切割半径。

只有选择了最佳切割半径，才能取得最佳的分离效果。原则上选取切割半径是以最大单个磁干扰信号所覆盖范围之半为判据。但由于叠加磁异常的空间结构特征（指磁异常幅值变化大小、波长长短、磁异常叠加程度和浅部干扰水平等）复杂，往往难以对单个的磁干扰信号作分别考察，只能用磁异常和磁干扰的几个基本参量（如信噪比和信息密度等）来描述。因此，确定最佳切割半径时，必须同时考虑磁异常和磁干扰的空间分布特征。

通过200多个模型试算，总结出不同信息密度（磁异常半极距 $d_{1/2}$ 与观测点距 ΔX 之比）和不同信噪比（磁异常强度 S_m 与磁干扰强度 N_m 之比）与最佳切割半径的关系，如附表所示。在模型中，干扰信号的结构，是参照野外浅部干扰（图1）的特点提出的数学模型，并不代表不同幅值变化大小和不同突变点间距的所有随机干扰和非随机干扰的情况。拟合附表数据可得到选取最佳切割半径的经验关系式。设最佳切割半径 r （以点距为单位），信息密度 S_d 和信噪比 S_n ，则最佳切割半径 r 可表示为

$$r = \text{int}\{[0.260 - 0.061 \times \log(K + 1)]K^{0.8} + 0.45\}$$

其中 $K = \frac{S_d}{S_n} = \left(\frac{d_{1/2}}{S_m}\right) / \left(\frac{\Delta X}{N_m}\right)$ ，定义为磁异常的状态数，它反映了磁异常与磁干扰的空间分布特征的反差强度； $\text{int}(X)$ 为取整函数。

可见，信噪比越小，切割半径越大，均方误差越大；当干扰很小时， $r \rightarrow 0$ ，均方误差很小；信息密度越大，切割半径越大，均方误差越小。总之，磁异常状态数越大，则最佳切割半径越大。

处理结果对比

图1为澳大利亚某矿区高精度磁测剖面曲线，磁测精度为1nT，观测点距为3m，信

信噪比信息密度与最佳切割半径的关系表

信噪比 $S_n = S_m / N_m$	信息密度 $S_d = d_{1/2} / \Delta X$						
	1*	2*	3.75*	7.5*	15**	30**	60**
8.6	1 ***	1 7.8	1 3.9	1 1.6	1 0.85	2 0.44	2 0.39
4.3	1 ***	1 7.9	1 4.1	1 2.1	2 0.82	2 0.71	3 0.76
1.72	1 ***	1 8.5	1 5.0	1 3.5	2 1.42	2 1.16	5 1.42
0.86	1 ***	1 9.4	1 7.3	1 6.3	2 2.66	5 2.61	5 2.14
0.43	1 ***	1 11.7	2 11.0	2 10.6	2 5.22	5 3.90	5 3.70
0.29	2 ***	2 12.8	2 12.2	2 11.8	5 5.99	5 5.46	6 5.50

注：① 斜线上方为最佳切割半径；② 斜线下方为均方误差(nT)；③ * 为剖面点数 $n=100$ ；④ ** 为剖面点数 $n=$

300；⑤ *** 为均方误差未算；⑥ 已知异常幅值 86nT，半极距 300m。均方误差 = $\left[\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{i,m} - Z_{i,m})^2}{n} \right]^{1/2}$ ，切割次数为 2。

噪比 1/10，矿区异常半极距约 300m。对图 1 数据用最小二乘圆滑(二阶五点公式)、向上延拓(10 倍点距)、匹配滤波($\frac{a}{b} = 1500$, $h_1 = 300\text{m}$, $h_2 = 0\text{m}$)(4)和插值切割(最佳切割半径 $r = 20$ ，切割次数为 4)进行消除干扰信号的处理，所得结果见图 2。与澳方所划分的最佳磁异常(图 2e)对比，匹配滤波和插值切割法均有较好的处理效果，而最小二乘圆滑仅压制了少量的小波段干扰信号，其他波段的浅部干扰只作了一定的光滑处理；虽然向上延拓压制了较大波段的干扰信号，但浅部干扰的影响依然存在，且在压低异常幅值的同时，抬升了两翼的异常值。

图 3 为模拟图 1 中磁干扰和磁异常的理論模型，其主要参数是观测点距 5m，异常半极距 300m、信噪比 1/10。用插值切割法(最佳切割半径 $r = 15$ ，切割次数为 4)向上延拓(5 倍点距)和匹配滤波($\frac{a}{b} = 1000$, $h_1 = 300\text{m}$, $h_2 = 0\text{m}$)对图 3 进行数据处理，

所得磁异常如图 4。与模型理论值对比可知，插值切割法和匹配滤波法比，向上延拓

法有较好的处理效果。进一步的分析对比可知，虽然匹配滤波法较插值切割法在处理结果中受较大的局部异常影响较小，但是插值切割法比匹配滤波法，从整体上与模型理论值有较高的拟合程度，即均方误差较小，划分场的精度较高。

应用实例

图 5 为用插值切割法，对黄沙坪矿区 5 号勘探线 ΔT 高精度磁异常(磁测精度 $< 2\text{nT}$)的处理结果与地质剖面对比图。从原始磁异常曲线可以估算出磁干扰水平为 170nT，磁异常强度为 60nT，磁异常半极距(近似于异常半宽度)10 倍点距，由最佳切割半径经验公式可得最佳切割半径 $r = 3$ 。取切割次数 4，所切割的磁异常与铅锌硫化矿群有良好的对应关系。而切割的磁干扰，其左段对应于随机干扰的弱磁性地层，其右段则对应于浅部非随机干扰的不均匀矿化蚀变带。

图 6 为用本文介绍的方法对锡矿山锑矿区 4 号踏勘剖面 ΔT 高精度磁异常(精度为 0.35nT)的处理结果与地质剖面对比图。从原始异常曲线上可以估算出该异常上磁干

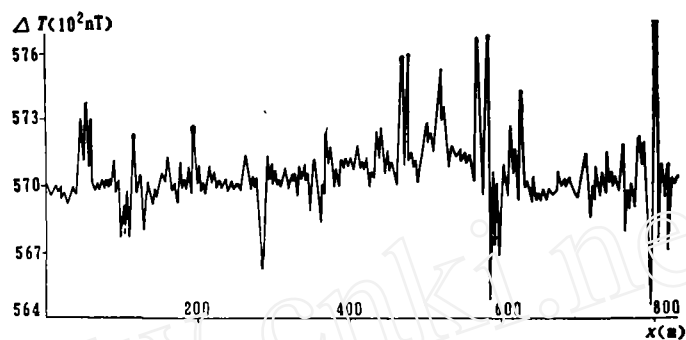


图 1 澳大利亚某矿区高精度磁测剖面曲线

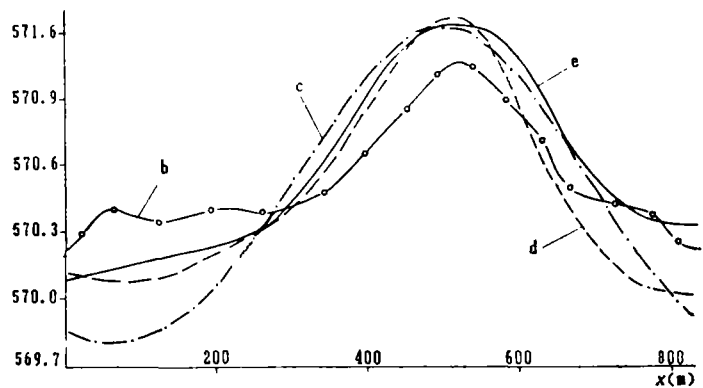
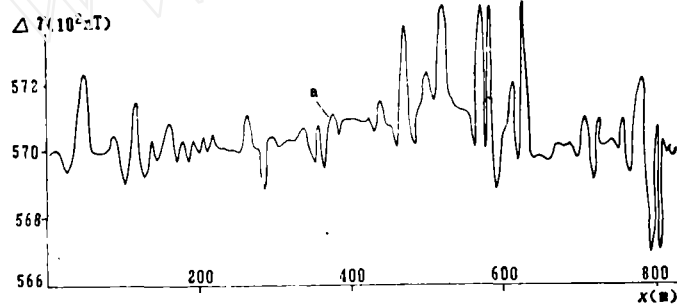


图 2 对图1用不同数据处理方法所得结果

a—最小二乘圆滑, b—向上延拓, c—匹配滤波, d—插值切割, e—澳方划分的最佳磁异常

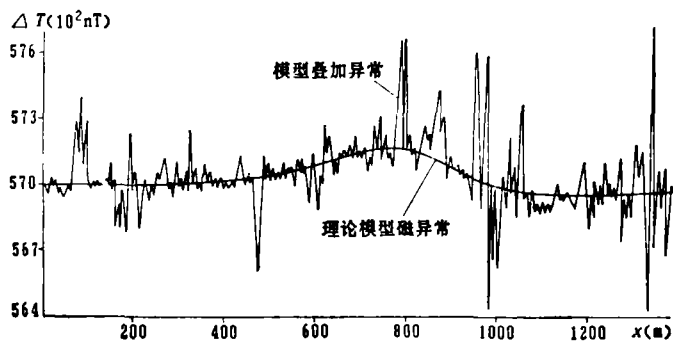


图 3 模拟图1的理论模型曲线

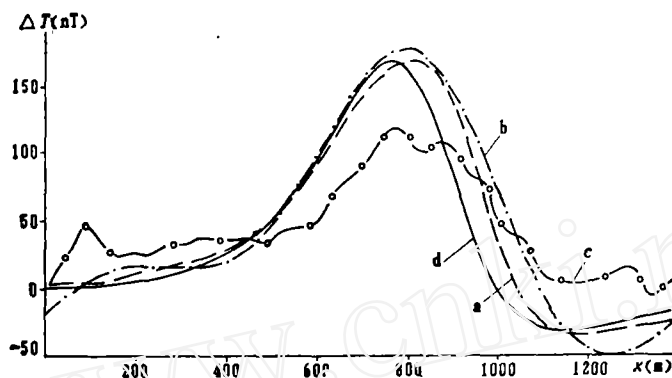


图 4 对图3用不同数据处理方法所得结果

a—插值切割, b—匹配滤波, c—向上延拓, d—理论模型磁异常

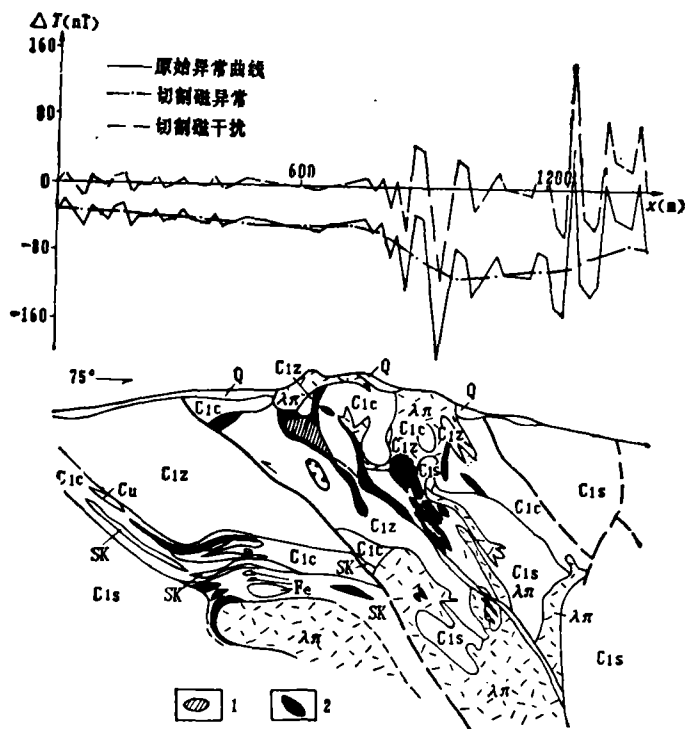


图 5 黄沙坪5号勘探线 ΔT 异常用插值切割法划分的磁异常和磁干扰与地质剖面

1—角砾状矿石, 2—铅锌矿体, Fe、Cu—铁、铜矿体, $\lambda\pi$ —石英斑岩, SK—夕卡岩, C_{1z} —梓门桥段灰岩, C_{1c} —测水段砂岩, C_{1s} —石碓子段灰岩

扰水平20nT (不是指异常旁侧的强干扰水平), 磁异常强度15nT, 磁异常半极距15倍点距。同样可由最佳切割半径经验公式可得最佳切割半径 $r=2$ 。取切割次数4, 所得磁

异常正好位于矿体正上方, 两侧显示出的次一级的弱磁异常, 左侧异常对应于较深的铋矿体, 右侧异常可能是由断层导致的两盘磁性差异造成, 也可能是未知矿体所产生, 值

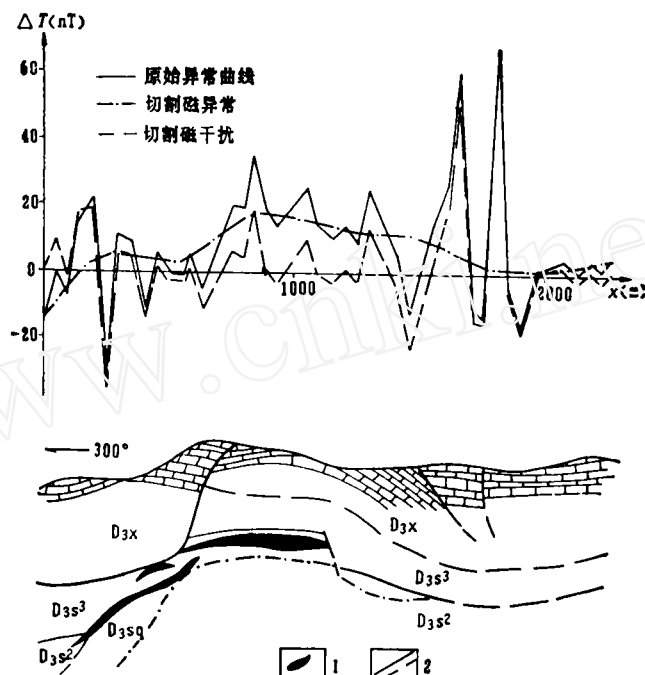


图6 锡矿山4号踏勘剖面 ΔT 异常插值切割法划分的磁异常和磁干扰与地质剖面图

1—锡矿体, 2—地质界线, D_3x —锡矿山组砂页岩、灰岩, D_3s —余田桥组灰岩与页岩互层, D_3sq —硅化岩

得作进一步工作。所得磁干扰主要是由不均匀矿化蚀变带引起。

本文是在程方道教授指导下完成的。又得到湖南地矿局秦葆瑚高级工程师的指导, 谨此致谢。

几点认识

1. 用插值切割法划分的磁干扰和异常具有高精度;
2. 选取最佳切割半径, 是用好插值切割法的关键;
3. 插值切割法适合于处理叠加有随机干扰和非随机干扰的复杂磁异常。

参考文献

- [1] Grant, F. S., Geophysics, 1972, Vol.37, No.4, p. 647~661.
- [2] Abdelrahman, E. M., et al., Geophysics, 1985, Vol. 50, No.3, p.473~480.
- [3] 文百红等, 中南矿冶学院学报, 1990, 第3期.
- [4] 程方道等, 《重磁位场波谱理论及其应用》, 中南工业大学出版社, 1987.

Application of the Interpolation Cut Method to Disturbance Elimination for Magnetic Anomalies

Wen Paihong

A computational process called the interpolation cut method for the elimination of disturbances from magnetic anomalies is briefly introduced in this paper. Through a vast of calculations for models with different signal-noise ratios and signal densities, an empirical formula for choosing the optimal cutting radius was obtained. In deriving the formula a new concept of condition number for the magnetic anomaly was introduced. In comparison with matched filtering, upward continuation and some other methods, the method discussed has great ability to separate the magnetic disturbance from significant anomalies and is suitable to handle complicated magnetic anomalies with random or/and non-random noises. Two examples are given for illustration.