

<u>物探与化探</u> GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION 1999年 第23卷 第4期 Vol.23 No.4 1999



增强解析信号技术的应用条件

张季生

摘 要 用直立长方体的磁模型对三维解析信号方程进行了研究,结果表明:三维解析信号方程是一个近似的关系式,其近似程度与磁源的几何参数有关。用增强解析信号技术计算磁源埋深和磁源边界位置的误差依赖于 磁源的水平尺度与其顶面埋深的比值。

关键词 磁法勘探;增强三维解析信号;应用条件

THE APPLICATION CONDITIONS OF THE TECHNIQUE FOR THE ENHANCEMENT OF ANALYTIC SIGNALS

Zhang Jisheng

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Abstract The magnetic model of vertical cuboid was used to study the three-dimensional analytic signal equation. The result shows that the three-dimensional analytic signal equation is an approximate relational expression, with the degree of approximation being in relation to the geometric parameters of the magnetic source. When the technique for enhancing the analytic signal is used to calculate the buried depth of the boundary of the magnetic source, the error depends on the radio between the horizontal scale of the magnetic source and the buried depth of its top surface.

Key words magnetic exploration; the enhancement of three-dimensional analytic signal; application conditions

70年代初以来,许多学者研究了利用以磁异常梯度模为基础确定异常源边界位置和深度等几何参数的反演方 法,其中最有代表性的是Nabighian N M提出的解析信号技术。采用解析信号技术的优点在于不考虑或较少考虑磁 化状态的影响,在剩余磁化强度的影响不好估计时,此方法的长处尤为突出。由于实际场源均为三维,故许多地 球物理工作者又进行了将二维解析信号技术推广到三维的研究,并取得了一定的进展。为了克服在三维磁场数据 解释中存在的场源边界受附近其它异常源干扰而定位不准的问题,Hsu Shukun等人提出了增强解析信号技术。作者 在文中提出求解三维异常源边界的三维解析信号方程,以及由该方程得出的利用增强和简单解析信号振幅比来估 算场源边界深度的简洁的计算方法。

用直立长方体磁模型对三维解析信号方程进行了验证,发现与二维解析信号技术不同,三维解析信号方程是 一个近似的关系式,其近似程度与异常源的几何参数有关。

1 理论分析

我们用无限延深直立长方体模型的磁场公式对上述解析信号方程进行验证。

1.1 简单解析信号A₀

垂直磁化无限延深直立长方体的磁场垂直分量及其导数的公式为

$$Z_a = M_z \cdot \left[\left| \arctan\left(\frac{\eta - y}{\sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + h^2}} \cdot \frac{\xi - x}{h}\right) \right|_b^{-b} \right|_L^{-L}$$
(1)

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z_a}{\partial x} &= M_z \cdot \left[\left| \frac{-(\eta - y) \cdot h}{((\xi - x)^2 + h^2) \cdot \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + h^2}} \right|_b^{-b} \right|_L^{-L} \\ \frac{\partial Z_a}{\partial y} &= M_z \cdot \left[\left| \frac{-(\xi - x) \cdot h}{((\eta - y)^2 + h^2) \cdot \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + h^2}} \right|_b^{-b} \right|_L^{-L} \\ \frac{\partial Z_a}{\partial z} &= M_z \cdot \left[\left| \frac{(\xi - x) \cdot (\eta - y) \cdot ((\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + 2h^2)}{((\xi - x)^2 + h^2) \cdot ((\eta - y)^2 + h^2) \cdot \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + h^2}} \right|_b^{-b} \right|_L^{-b} \right]_L^{-b} \right]_L^{-b}$$

这里,M_z表示垂直磁化条件下的磁化强度;L和b分别表示直立长方体的长和宽的一半;h表示长方体的顶部埋深; , 和x,y分别表示场源内、外任意点的坐标。 为了讨论简单并能说明问题,首先研究垂直过直立长方体南边缘中部(y=0)的磁场。

$$\frac{\partial Z_a}{\partial y} = 0$$
当y=0时, $\frac{\partial Z_a}{\partial y} = 0$,此时简单解析信号A₀的平方等于

$$A_{0}^{2} = \left(\frac{\partial Z_{a}}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial Z_{a}}{\partial y}\right)^{2} + \left(\frac{\partial Z_{a}}{\partial z}\right)^{2} = M_{z}^{2} \cdot \left\{\frac{2hL}{((x+b)^{2}+h^{2}) \cdot \sqrt{(x+b)^{2}+L^{2}+h^{2}}} - \frac{2hL}{((x-b)^{2}+h^{2}) \cdot \sqrt{(x-b)^{2}+L^{2}+h^{2}}}\right\}^{2} + M_{z}^{2} \cdot \left\{\frac{2L \cdot (x+b) \cdot ((x+b)^{2}+L^{2}+2h^{2})}{((x+b)^{2}+h^{2}) \cdot (L^{2}+h^{2}) \cdot \sqrt{(x+b)^{2}+L^{2}+h^{2}}} - \frac{2L \cdot (x-b) \cdot ((x-b)^{2}+L^{2}+2h^{2})}{((x-b)^{2}+h^{2}) \cdot (L^{2}+h^{2}) \cdot \sqrt{(x-b)^{2}+L^{2}+h^{2}}}\right\}^{2}$$

在上式2个大括号中的第一项分别代表直立长方体南边缘和相应的部分东西两边缘磁场的效应;2个大括号中的第二项分别代表直立长方体北边缘和相应的部分东西两边缘磁场的影响。令h/L•1,因只考虑在直立长方体南边缘(x=-b)附近的磁场变化,故有(x+b)/L < <1,h/(x-b) < <1,1/(x-b),(x-b)/L等于常数,于是简单解析信号A₀的平方近似等于

$$A_0^2 \approx M_z^2 \cdot \left\{ \left(\frac{2h}{(x+b)^2 + h^2} \right)^2 + \left(\frac{2(x+b)}{(x+b)^2 + h^2} \right)^2 \right\} = \frac{4M_z^2}{(x+b)^2 + h^2} = \frac{a^2}{d^2 + h^2}$$
(2)

其中, = 2M_z , d=x+b。当n=0时,上式为解析信号方程

$$\left[\frac{\partial^n \left(\frac{\partial Z_a}{\partial x}\right)}{\partial z^n}\right]^2 + \left[\frac{\partial^n \left(\frac{\partial Z_a}{\partial y}\right)}{\partial z^n}\right]^2 + \left[\frac{\partial^n \left(\frac{\partial Z_a}{\partial z}\right)}{\partial z^n}\right]^2 = \frac{(1^2 \times 2^2 \times 3^2 \times \dots \times n^2) \times a^2}{(d^2 + h^2)^{n+1}}$$
(3)

1.2 一阶增强解析信号 一阶增强解析信号A₁定义为

$$A_{1} = \sqrt{\left(\frac{\partial^{2} Z_{a}}{\partial x \partial z}\right)^{2} + \left(\frac{\partial^{2} Z_{a}}{\partial y \partial z}\right)^{2} + \left(\frac{\partial^{2} Z_{a}}{\partial^{2} z}\right)^{2}}$$

与简单解析信号A₀的讨论类似,只讨论当y=0时的情况,且有同样的限定的条件,则一阶增强解析信号A₁的平方近 似等于

$$A_{1}^{2} \approx \left\{ M_{z} \frac{2 \cdot ((x+b)^{2} - h^{2})}{((x+b)^{2} + h^{2})^{2}} \right\}^{2} + \left\{ M_{z} \frac{4h \cdot (x+b)^{2}}{((x+b)^{2} + h^{2})^{2}} \right\}^{2} \\ = \frac{4M_{z}^{2}}{(x+b)^{2} + h^{2}} = \frac{\alpha^{2}}{d^{2} + h^{2}}$$

$$(4)$$

上式为解析信号方程(3)的n=1的情况。

由上面的分析可以看出,对于简单解析函数A₀和一阶增强解析函数A₁,都有当h/L < <1时,解析信号方程才 成立,即解析信号方程是一个近似的关系式,它与磁源的几何形状有关。

2 模型计算

从上面的讨论可以看出,当直立长方体顶面的水平尺度远比其顶面埋深大许多时,解析信号方程才成立;当 实际模型不满足上述条件时,就会产生误差。误差表现在:解析信号的极大值点不在直立长方体边缘的正上 方; 由解析信号方程出发计算所得到的直立长方体顶面埋深不够准确。很显然,误差的大小与L/h(和b/h)有关。

h/km	h ₁ /km	e _{h1} /%	h ₂ /km	e _{h2} /%	h ₃ /km	e _{h3} /%	e _{d0} /%	e _{d1} /%	e _{d2} /%
1.0	1.0	0.1	1.0	0.6	1.0	0.3	1.1	0.1	0.1
2.0	2.0	0.2	2.0	2.1	2.0	1.1	4.6	0.3	0.1
3.0	3.0	0.3	3.1	4.1	3.1	2.2	10.7	1.4	0.5
4.0	4.0	0.1	4.3	6.2	4.1	3.1	20.0	3.7	0.9
5.0	5.0	1.0	5.4	8.7	5.2	3.8	33.5	7.9	1.0
6.0	5.8	3.2	6.7	11.8	6.2	4.0	53.6	14.0	0.5
7.0	6.5	6.7	8.1	15.5	7.3	3.8	99.6	22.3	0.4
8.0	7.1	11.9	9.6	19.7	8.2	2.7	99.9	32.8	1.4

表1 无限延深直立长方体的顶面埋深和边缘计算的误差(y=0 km)

注:h为直立长方体的顶面埋深;h₁,h₂,h₃为用公式(5),(6),(7)计算的顶面埋深;e_{h1},e_{h2}和e_{h3}为用公式 (5),(6),(7)计算顶面埋深的相对误差;e_{d0},e_{d1},e_{d2}为用A₀,A₁,A₂计算直立长方体边缘的相对误差

							- •	-	
h/km	h ₁ /km	e _{h1} /%	h ₂ /km	e _{h2} /%	h ₃ /km	e _{h3} /%	e _{d0} /%	e _{d1} /%	e _{d2} /%
1.0	1.0	0.3	1.0	1.1	1.0	0.4	1.5	0.1	0.1
2.0	2.0	0.8	2.1	3.0	2.0	1.1	6.0	1.0	0.2
3.0	3.0	1.8	3.2	4.9	3.0	1.5	14.0	3.7	0.1
4.0	3.9	4.0	4.3	7.5	4.1	1.6	26.3	8.5	0.9
5.0	4.6	7.2	5.6	11.2	5.1	1.6	44.0	15.2	2.1
6.0	5.4	10.6	7.0	16.0	6.1	1.8	75.1	23.2	3.0
7.0	6.0	14.3	8.5	21.2	7.1	1.9	99.9	32.4	3.6
8.0	6.5	18.9	10.1	26.2	8.1	1.2	100.0	43.4	4.1

表2 无限延深直立长方体的顶面埋深和边缘计算的误差(y=5 km)

说明同表1

选择顶面长为20 km, 宽为20 km的直立长方体的模型,从公式(1)出发,用解析信号技术对不同埋深的情况进行了计算。模型计算的结果见表1和表2。表1和表2分别是y=0 km和y=5 km时在无限延深直立长方体南边缘附近的计算结果。其中h为直立长方体的顶面埋深,h₁,h₂,h₃分别是用公式

$$h_1 = \frac{A_{0\text{max}}}{A_{1\text{max}}} \tag{5}$$

$$h_2 = \frac{2A_{1\max}}{A_{2\max}} \tag{6}$$

$$h_3 = \sqrt{\frac{2A_{0\max}}{A_{2\max}}} \tag{7}$$

计算得到的埋深,上式中A₀max,A₁max,A₂max分别为相同y值的简单解析信号、一阶解析信号、二 阶解析信号的极大值。 e_{h1} , e_{h2} 和 e_{h3} 分别是计算h₁, h_2 和h₃的相对误差; e_{d0} , e_{d1} , e_{d2} 分别是计算A₀, A₁,A₂极大值点偏离直立长方体边缘的相对误差。解析信号极大值点的x坐标是用0.618法求得,计算 精度为10⁻⁶。

从表1中可看出: 随着埋深的增加,计算埋深的误差越来越大。 随着埋深的增加,解析信号的极大值点越来越偏离直立长方体的边缘,而向直立长方体的中心移动。 随着解析信号阶数的升高, 解析信号的极大值点相对直立长方体边缘的偏离将减小;不同阶数解析信号的极大值点的分布反映了 磁场的分布规律,即磁场的短波长成分分布在靠近长方体的边缘,随着波长的增加,磁场相应的成分 逐渐远离长方体的边缘。 解析信号阶数升高时,可放宽模型顶面水平尺度与埋深的比的要求。

显然,当y 0时,由于东西端面影响逐渐增强,误差进一步加大(见表2)。

对于东、西、北端面的分析与上面对南端面的分析相同,故不赘述。

为了研究下底面的影响,选择有限延深直立长方体模型进行了计算直立长方体的延深是其顶面埋 深的3倍(1/h=3),其它参数同前面的模型,y=0 km时的计算结果见表3。与无限延深直立长方体的计 物探与化探990409

算结果相比,除了用公式(6)计算埋深的最大误差增大了19.4%外,其它计算的误差都小于6%。这一计 算结果表明下底面磁场的影响很小。解析信号技术是求导数运算,即进行高通滤波,而下底面的磁场 相对上顶面的磁场来说为长波长成分,将被滤去,因此其影响很小。

h/km	h ₁ /km	e _{h1} /%	h ₂ /km	e _{h2} /%	h ₃ /km	e _{h3} /%	e _{d0} /%	e _{d1} /%	e _{d2} /%
1.0	0.8	19.5	1.0	4.6	0.9	12.4	0.9	0.1	0.1
2.0	1.7	16.8	1.9	3.7	1.8	10.5	3.7	0.2	0.1
3.0	2.6	13.0	2.9	1.8	2.8	7.6	9.2	1.0	0.5
4.0	3.6	9.7	4.0	0.6	3.8	4.7	17.6	3.3	0.9
5.0	4.6	8.2	5.2	3.7	4.9	2.4	30.3	7.4	1.0
6.0	5.5	8.5	6.5	7.4	6.0	0.9	49.1	13.4	0.5
7.0	6.3	10.6	7.8	11.7	7.0	0.1	89.2	21.8	0.4
8.0	6.8	14.8	9.3	16.4	8.0	0.4	99.0	32.2	1.4

表3 有限延深直立长方体的顶面埋深和边缘计算的误差(1/h=3,y=0 km)

说明同表1

3 讨论

1. 三维解析信号方程是以无限延深直立长方体磁模型为基础的,即该方法适用于陡立的,且有一 定延深的磁性体的计算。

2. 用三维解析信号技术计算磁源的边界位置和埋深的精度取决于磁源顶面的水平尺度与其顶面埋深的比值。当磁模型的顶面宽度是其埋深的4倍(h=5 km)时,计算埋深的误差小于11.2%;除用A₀极大值点确定磁性体边缘的误差达到44%外,用A₁,A₂极大值点确定磁性体边缘的误差均小于15.2%

3. 与直立长方体的水平尺度相比,模型向下延深引起的计算误差要小得多。当直立长方体的延深 是其顶面埋深的3倍时,可视为无限延深的情况。

4. 考虑到在实际处理磁测数据时, A₀极大值点偏离磁性体边缘较大使得寻找相同y值的解析信号极 大值点会遇到一定的困难,因此,建议用公式(6)计算磁性体的顶面埋深。

作者简介:张季生,男,1950年1月生,江苏省盱眙县人。1989年毕业于西安地质学院,获应 用地球物理学硕士学位,研究方向为区域重磁勘探。现为中国地质科学地质研究所 岩石圈研究中心副研究员,已发表论文近10篇。 作者单位:中国地质科学院地质研究所,北京 100037

参考文献

1 Hsu Shukun, Sibuet J C, Shyu C T. High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An edhan-

ced analytic signal technique. Geophysics, 1996 , 61 : 373 \sim 386

2 Mohan N L.Discussion on "Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal" (by Roest W R, Verhoef J, Pilkington M.

Geophysics, 1992, 57:116 ~ 125) Geophysics, 1993 , 58 : 1214

3 Nabighian M N.The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for

automated anomaly interpretation. Geophysics, 1972 , 37 : 505 \sim 517

4 Nabighian M N.Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section:

Geophysics, 1974 , 39 : 85 ~ 92

5 Nabighian M N.Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data.

Geophysics, 1984 , 49 : 780 ~ 786

6 Ofoegbu C O, Mohan N L. Interpretation of aeromagnetic anomalies over part of southeastern Nigeria using three-dimensional

Hilbert transformation . Pageoph, 1990, 134: 13 ~ 29

7 Roest W R, Verhoef J, Pilkington M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. Geophysics, 1992, 57:116 ~ 125

- 8 王懋基, 宋正范.特殊磁场区的航磁解释. 物探与化探, 1991, 29(2): 121~128
- 9 胡中栋,余钦范,楼海.三维解析信号法.物探化探计算技术,1995,17(3):36~42
- 10 朱梅生译.由位场异常高分辨率探测地质界线:增强解析信号技术.物探化探译丛,1996,(5):5~ ~15
 - 11 管志宁,姚长利.倾斜板体磁异常总梯度模反演方法.地球科学,1997,22(1):81~85

1998年8月18日收稿,同年10月6日收修改稿。