

文章编号: 1671 - 8585(2006)05 - 0373 - 04

剖面重力高阶水平导数在地热勘查中的应用

田 舍¹, 宋宇辰²

(1. 北京市地质勘察技术院, 北京 102218; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要:目前剖面重力资料处理主要采用布格重力异常正演拟合以及求取其一阶水平导数, 在应用方面尚存欠缺, 为此提出重视重力剖面高阶水平导数的应用。其目的是发挥布格重力异常的高阶水平导数的优势, 突出浅部地质体的重力场特征, 压制区域性深部地质体的重力场, 区分相邻地质体引起的叠加异常。采用最小二乘法演算了布格重力异常高阶水平导数的计算过程, 对计算和使用中涉及的圆滑处理、区间选择等相关问题进行了简略探讨, 并列举了在地热勘查中利用高阶水平导数提高重力资料解释效果的实例。

关键词: 高阶水平导数; 重力资料; 地热勘查; 解释

中图分类号: P314

文献标识码: A

重力剖面测量是一种常规的物探手段, 它高效且不受电磁干扰, 在反映基岩起伏及断裂产状等方面效果明显, 因而在城市及周边地区的地热勘探中被广泛使用。

目前人们对重力剖面资料的分析解释多采用计算机可视化实时处理方式, 以正演拟合布格重力异常 Δg 为主^[1], 但应用效果尚有欠缺。这主要是由于布格重力异常 Δg 在反映地质体细节特征方面表现得比较“迟钝”, 具有多解性; 另一方面软件程序正演计算的是近地表有限范围内具有二度体特征的目标地质体所产生的重力场值, 而实测布格重力异常还包含了地下深部以及测区周边地质因素的影响, 因此, 在作正演拟合时往往先要进行区域场校正, 事实上却很难准确做到。

在这种情况下, 如果我们盲目追求重力异常的精确拟合, 可能会导致将区域地质因素添加到目标地质体中, 造成错误的结果。而布格重力异常剖面的各阶水平导数对不同形状地质体有着不同的表现特征, 它可以突出浅而小的地质体的重力特征而压制区域性深部地质因素; 可以将几个互相靠近、埋深相差不大的相邻地质体引起的叠加异常划分开来, 其导数的阶次越高, 这种分辨能力亦越强。如果我们在做正演拟合时参考重力高阶水平导数提供的信息, 建立(或限定)模型地质体的基本形态特征, 就可避免单纯依靠布格重力异常所造成的缺陷。求取布格重力异常高阶水平导数, 可用最小二乘法对实测重力布格值进行函数拟合^[2,3], 即圆滑处理, 并对 x 求导即可。

本文试图通过重力剖面高阶水平导数的计算和应用, 改善重力场在反映地质体细节特征方面的“灵敏度”, 以期提高重力剖面可视化实时解释的应

用效果。

1 方法原理

假设在实测重力剖面上由 n 个测点组成的区间中, 布格重力异常 Δg 可以展成 4 阶多项式, 即

$$\Delta g(x) \approx f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \quad (1)$$

则

$$\begin{aligned} \Delta g(0) &\approx a_0 \\ \frac{\partial \Delta g(0)}{\partial x} &\approx a_1 \\ \frac{\partial^2 \Delta g(0)}{\partial x^2} &\approx 2a_2 \\ \frac{\partial^3 \Delta g(0)}{\partial x^3} &\approx 6a_3 \\ \frac{\partial^4 \Delta g(0)}{\partial x^4} &\approx 24a_4 \end{aligned} \quad (2)$$

用区间上 n 个测点值进行最小二乘拟合, 使

$$\Phi = \sum_{i=1}^n (f(x_i) - \Delta g(x_i))^2$$

最小的代定系数 a_0, a_1, \dots, a_4 必满足方程组

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_k} = 0 \quad (k = 0, 1, \dots, 4)$$

展开此式得到法方程组

$$\begin{aligned} a_0 \sum_{i=1}^n 1 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^3 + \\ a_4 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n \Delta g_i \end{aligned}$$

收稿日期: 2006-01-26; 改回日期: 2006-04-16。

第一作者简介: 田舍(1957—), 男, 高级工程师, 1982年毕业于河北地质学院物探系, 长期从事石油地质、地热地质、区域地质等领域地球物理勘探工作。

$$\begin{aligned}
 & a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^4 + \\
 & \quad a_4 \sum_{i=1}^n x_i^5 = \sum_{i=1}^n x_i \Delta g_i \\
 & a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^5 + \\
 & \quad a_4 \sum_{i=1}^n x_i^6 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \Delta g_i \\
 & a_0 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^5 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^6 + \\
 & \quad a_4 \sum_{i=1}^n x_i^7 = \sum_{i=1}^n x_i^3 \Delta g_i \\
 & a_0 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^5 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^6 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^7 + \\
 & \quad a_4 \sum_{i=1}^n x_i^8 = \sum_{i=1}^n x_i^4 \Delta g_i \tag{3}
 \end{aligned}$$

解此方程组即可得到 a_0, a_1, \dots, a_4 。当重力剖面为等点距时,为使计算简便将 n 取为奇数,计算区间中点置于坐标原点,并以点距为单位,则

$x_i = i - 1 - m \quad (i = 1, 2, \dots, n; n = 2m + 1)$
 即 x_i 为区间 $[-m, m]$ 中的连续数,由于其对称性,故有

$$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n x_i^5 = \sum_{i=1}^n x_i^7 \equiv 0$$

于是与上述法方程组对应的增广矩阵成为

$$\begin{vmatrix}
 n & 0 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n \Delta g_i \\
 0 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i \Delta g_i \\
 \sum_{i=1}^n x_i^2 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i^6 & \sum_{i=1}^n x_i^2 \Delta g_i \\
 0 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i^6 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \Delta g_i \\
 \sum_{i=1}^n x_i^4 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i^6 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i^8 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \Delta g_i
 \end{vmatrix}$$

可将其化为 2 个方程组,即

$$\begin{aligned}
 & na_0 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_4 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n \Delta g \\
 & a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_4 \sum_{i=1}^n x_i^6 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \Delta g_i \\
 & a_0 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^6 + a_4 \sum_{i=1}^n x_i^8 = \sum_{i=1}^n x_i^4 \Delta g_i \tag{4}
 \end{aligned}$$

和

$$\begin{aligned}
 & a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i \Delta g_i \\
 & a_1 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^6 = \sum_{i=1}^n x_i^3 \Delta g_i \tag{5}
 \end{aligned}$$

这种方程组可以按“克莱姆法则”用行列式直接求解

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \left(\Delta_{11} \sum_{i=1}^n \Delta g_i - \Delta_{21} \sum_{i=1}^n x_i^2 \Delta g_i + \right. \\
 & \quad \left. \Delta_{31} \sum_{i=1}^n x_i^4 \Delta g_i \right) / \Delta \\
 a_2 &= \left(-\Delta_{12} \sum_{i=1}^n \Delta g_i + \Delta_{22} \sum_{i=1}^n x_i^2 \Delta g_i - \right. \\
 & \quad \left. \Delta_{32} \sum_{i=1}^n x_i^4 \Delta g_i \right) / \Delta \\
 a_4 &= \left(\Delta_{13} \sum_{i=1}^n \Delta g_i - \Delta_{23} \sum_{i=1}^n x_i^2 \Delta g_i + \right. \\
 & \quad \left. \Delta_{33} \sum_{i=1}^n x_i^4 \Delta g_i \right) / \Delta
 \end{aligned}$$

亦即

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{11} - x_i^2 \Delta_{21} + x_i^4 \Delta_{31}}{\Delta} \Delta g(x_i) \\
 &= \sum_{i=1}^n p_{0i} \Delta g(x_i)
 \end{aligned}$$

式中: $p_{0i} = (\Delta_{11} - x_i^2 \Delta_{21} + x_i^4 \Delta_{31}) / \Delta (i = 1, 2, \dots, n)$ 为计算 a_0 时第 i 个节点上的系数。其中 Δ 为行列式; $\Delta_{11}, \Delta_{21}, \Delta_{31}$ 为对应行列的二阶子行列式,当 n 确定后,它们都是常数。

$$\Delta = \begin{vmatrix}
 n & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \\
 \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^6 \\
 \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^6 & \sum_{i=1}^n x_i^8
 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix}
 \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^6 \\
 \sum_{i=1}^n x_i^6 & \sum_{i=1}^n x_i^8
 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{21} = \begin{vmatrix}
 \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \\
 \sum_{i=1}^n x_i^6 & \sum_{i=1}^n x_i^8
 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{31} = \begin{vmatrix}
 \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \\
 \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^6
 \end{vmatrix}$$

求 a_2 和 a_4 的系数 $p_{2i}, p_{4i} (i = 1, 2, \dots, n)$ 方法同上。关于 a_1 和 a_3 的求法则要简单些,可以直接写

出来

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^6 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \Delta g_i - \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 \Delta g_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^6 - \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4}$$

$$= \sum_{i=1}^n p_{1i} \Delta g_i$$

$$p_{1i} = \frac{x_i \sum_{i=1}^n x_i^6 - x_i^3 \sum_{i=1}^n x_i^4}{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^6 - \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4}$$

$$a_3 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 \Delta g_i - \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \Delta g_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^6 - \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4}$$

$$= \sum_{i=1}^n p_{3i} \Delta g_i$$

$$p_{3i} = \frac{x_i^3 \sum_{i=1}^n x_i^2 - x_i \sum_{i=1}^n x_i^4}{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^6 - \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4}$$

按以上诸式求出 a_1, a_2, a_3, a_4 后,再按式(2)求得重力各阶方向导数值。据此可编制计算程序,具体做法是在实测剖面上取小范围内 n 个奇数点作最小二乘拟合,仅计算所取区间中点的导数值,然后同步移到下一点。

2 应用实例

以北京地区地热勘探为例。北京平原地区蕴藏着丰富的地热资源,地热储层主要为古生界、中上元古界碳酸盐岩地层(蓟县系白云岩和寒武—奥陶系灰岩);中生界、新生界的巨厚沉积对下部热储层起到隔热保温作用,成为热储盖层;切入深度大、属张性特征的深大断裂具有导热导水作用,是地热地质构造的重要特征。因此,在地热勘探中分析研究断裂的形态、走向、产状等特征至关重要^[4,5]。

图 1 为北京某地前期地热勘查布格重力异常剖面。工区位于北京市区北端城乡结合部,由于城市存在严重的电磁干扰(对物探而言主要是磁信号干扰严重),电磁波类物探方法效果欠佳;强震源(炸药)深部人工地震勘探在城区使用亦受到限制,因而高精度重力剖面测量成为本次地热勘查的主要手段。重力剖面按 1:25 000 工作比例尺布设,点距 250 m,剖面长 10 km,布格异常 Δg 总精度为 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$,数据处理采用了上述最小二乘法在

对重力资料进行圆滑的同时计算其一阶水平导数 Δg_x 和三阶水平导数 Δg_{xxx} 。另外该地区曾做过直流电测深,是我们进行综合分析的重要参考资料。由图 1 可见,重力剖面两侧布格异常值相差较大、落差较陡、曲线顺滑,反映出左侧抬升、右侧下降的断裂构造形态。图 2 为该重力剖面的一阶水平导数,它明显表现出在剖面 5 km 处存在一条断裂。曲线左侧的微弱上弯,往往使我们误以为是断裂左倾引起的异常反映。按照常规的分析判断我们将按照一条断裂模型去拟合地层的特征。

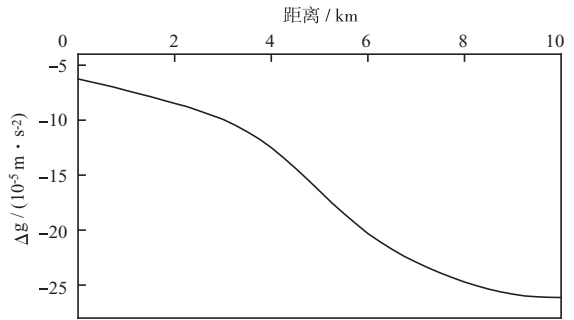


图 1 布格重力异常剖面

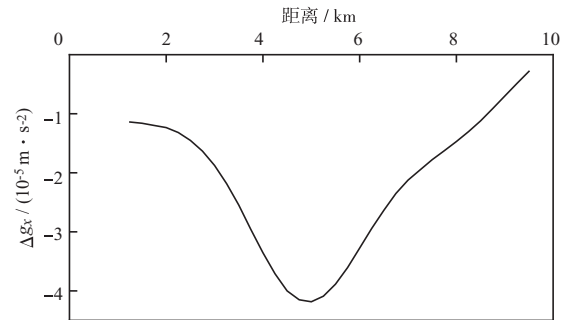


图 2 重力一阶方向导数异常

但与重力剖面位置相同的直流电测深剖面却反映出了不尽相同的结果(图 3),电测深 ρ_s 断面图上清晰地勾画出了剖面左侧第四系厚度薄而右侧厚,这与布格重力异常的特征是一致的,但 ρ_s 断面反映的断裂形态是一组断阶,位置分别在剖面的 5 km 和 8 km 处附近,两断裂间明显存在一个台

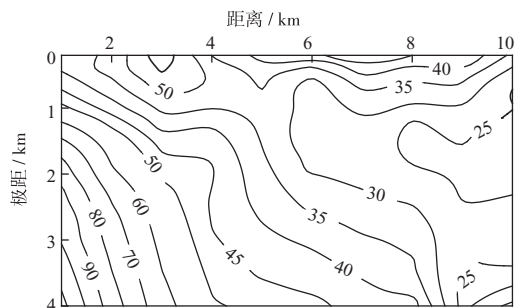


图 3 直流电测深剖面
图中数值单位为 $\Omega \cdot \text{m}$

阶。图 4 是布格重力异常剖面的三阶水平导数,它所反映的断裂特征与 ρ_s 断面完全一致,显示出高阶导数在区分微弱叠加异常方面的明显优势。

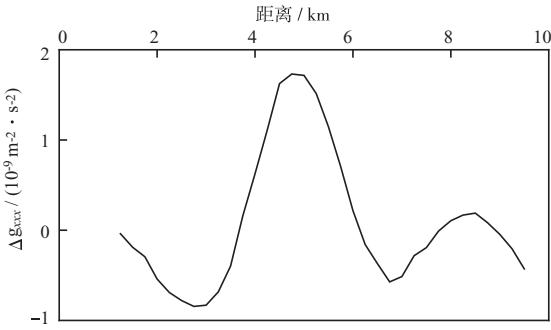


图 4 重力三阶方向导数异常

图 5 是重力正演拟合的地质断面。拟合前对布格重力异常进行了必要的区域场校正,根据电测深剖面 and 布格重力三阶水平导数反映的特征建立初始地质模型。我们根据前述计算过程改进了目前常用的重力剖面可视化正演拟合软件,经反复调整最终达到地质模型的正演值及其三阶水平导数与实测剩余布格重力异常及三阶水平导数形态相一致。经后期钻探证实该地前期的物探分析和推断解释是完全正确的。

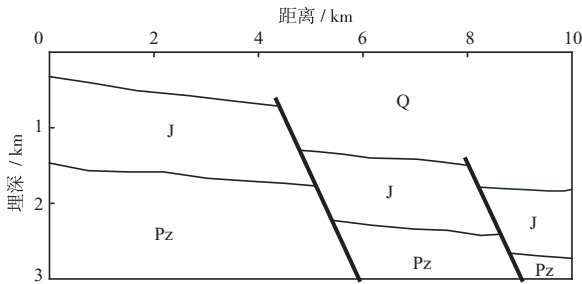


图 5 拟合地质剖面

3 讨论

在实际应用中,我们要特别注意重力实测曲线经常存在随机干扰成分,要想取得好的导数效果就要求原始曲线比较光滑,精度高,干扰小,否则误差会很大。事实上我们在作最小二乘拟合时,得到的 a_0 即为圆滑重力值,亦可在作重力导数计算前先

对实测重力曲线进行圆滑并求其导数。

关于计算点数 n 的选取要根据实测剖面的异常特征和精度进行试验。一般情况下, n 值较大时对于干扰有一定的压制作用,但“边部损失”也大, n 值较小高阶导数异常有可能畸变。图 6 是 n 分别为 9, 11, 13 时的三阶水平导数曲线,随着 n 值的增大,导数异常曲线亦越光滑。

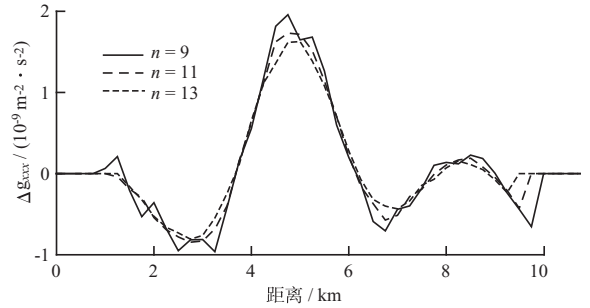


图 6 不同 n 值三阶方向导数比较

4 结束语

布格重力异常的高阶导数在突出浅部地质体的特征、压制区域性深部地质因素、区分相邻地质体引起的叠加异常等方面具有独特的优势。在进行重力剖面的分析解释时,应充分注意提取其有用信息,并尽可能从其他物探方法和地质资料中寻找相关信息加以佐证,这样才有可能取得预期的地质效果。

参 考 文 献

- 1 姚长利,黎益仕,管志宁. 重磁异常正反演可视化实时方法技术改进[J]. 现代地质,1998,12(1):115~122
- 2 王家林,王一新,万明浩等. 石油重磁解释[M]. 北京:石油工业出版社,1991. 373
- 3 李祺. 物探数值方法导论[M]. 北京:地质出版社,1991. 184~195
- 4 徐光辉. 北京奥运公园地区地热地质条件的地球物理论证[A]. 见:刘久荣主编. 北京地热国际研讨会论文集[C],北京:地质出版社,2002. 178~185
- 5 丁雷,宋绍军,关键. 地热资源勘探方法技术的应用与展望[J]. 吉林地质,2004,23(04):113~117