

# 一种断层重力异常定量解释方法

李丽丽\* 孟令顺 杜晓娟 马国庆

(吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130021)

李丽丽, 孟令顺, 杜晓娟, 马国庆. 一种断层重力异常定量解释方法. 石油地球物理勘探, 2012, 47(4): 665~667

**摘要** 断层解释一直是地质构造解释中的重要内容, 尤其是对断层产状的确定。本文给出了一种断层定量解释方法, 该方法利用重力异常的水平导数与垂直导数估算断层各项参数, 不需要更高阶导数参与计算。理论模型试验表明, 该方法反演得到的参数与理论参数的误差较小, 可应用于实际断层的解释, 但不适用于垂直断层情况。将该方法用于四川实测重力异常的解释中获得了断层的几何及密度参数, 与由地震资料确定的断层参数吻合较好。

**关键词** 断层 重力异常 定量解释 导数 延拓

**中图分类号**: P631 **文献标识码**: A

## 1 引言

断层解释是地质构造解释中的重要内容, 一直得到地球物理工作者的广泛重视。Stanley 等和 Green<sup>[1~3]</sup> 于 20 世纪 70 年代率先提出利用重力水平导数与垂直导数进行断层解释的方法, 该方法被应用了很长时间; 20 世纪 90 年代中期, Butler<sup>[4]</sup> 在上述方法基础上提出一种适用于二维反演的广义梯度分析方法, 此法仅采用垂直导数进行断层参数的计算, 但该方法被证明不适用于倾角  $\alpha$  较小 ( $\alpha < 10^\circ$ ) 的情况<sup>[5]</sup>; 随后, 魏伟等<sup>[5]</sup> 提出利用重力异常的二阶水平与垂直导数进行倾斜断层的解释, 并指出高阶导数的不稳定性会降低反演结果的精度。

为了解决上述方法存在的问题, 本文利用不同观测面上的水平导数与垂直导数求解断层的各项参数。通过理论模型试验及四川盆地实测重力异常处理结果的验证, 表明此法不仅可行而且十分有效。

## 2 断层重力异常解释方法

倾斜断层是最常见的一类构造, 它可近似表示地层的超覆、倾斜的接触带以及倾斜断裂等。在计算其异常时, 坐标系选取如图 1 所示。

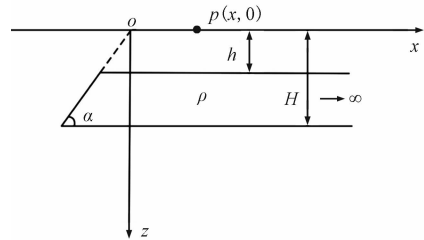


图 1 倾斜断层示意图

原点选在倾斜面延伸线与地面交线上,  $x$  轴垂直其走向。设台阶的顶、底面的埋藏深度分别为  $h$  和  $H$ , 剩余密度为  $\rho$ , 斜面倾角为  $\alpha$ , 则在地面一点  $p(x, 0)$  处所引起重力异常的垂直与水平导数的理论公式如下

$$V_z = G\rho \left[ \frac{1}{2} \sin 2\alpha \ln \frac{(H \cot \alpha + x)^2 + H^2}{(h \cot \alpha + x)^2 + h^2} + 2 \sin^2 \alpha \times \left[ \arctan \frac{\frac{H}{\sin \alpha} + x \cos \alpha}{x \sin \alpha} - \arctan \frac{\frac{h}{\sin \alpha} + x \cos \alpha}{x \sin \alpha} \right] \right] \quad (1)$$

$$V_x = G\rho \left[ \sin^2 \alpha \ln \frac{(H \cot \alpha + x)^2 + H^2}{(h \cot \alpha + x)^2 + h^2} - \sin 2\alpha \times \left[ \arctan \frac{\frac{H}{\sin \alpha} + x \cos \alpha}{x \sin \alpha} - \arctan \frac{\frac{h}{\sin \alpha} + x \cos \alpha}{x \sin \alpha} \right] \right] \quad (2)$$

\* 吉林省长春市吉林大学地球探测科学与技术学院, 130021。Email: lilili10@mails.jlu.edu.cn

本文于 2011 年 7 月 25 日收到, 最终修改稿于 2012 年 5 月 23 日收到。

本研究受中国地质调查局地质矿产调查评价专项项目 (GZH003-07-03) 资助。

式中  $G$  表示万有引力常数。求取式(1)水平方向的导数,并令其等于0,得到  $V_{zx}$  曲线的极大值和极小值坐标为

$$x_{\max} = -\frac{H+h}{2}\cot\alpha + \sqrt{\frac{(H-h)^2}{4}\cot\alpha + Hh} \quad (3)$$

$$x_{\min} = -\frac{H+h}{2}\cot\alpha - \sqrt{\frac{(H-h)^2}{4}\cot\alpha + Hh} \quad (4)$$

从式(3)和式(4)中可以看出,若把坐标原点移动到  $o' = -\frac{H+h}{2}\cot\alpha$  点上,则  $V_{zx}$  的两极值点相对新坐标系是对称的,此时

$$|x'_{\min}| = |x'_{\max}| = \sqrt{\frac{(H-h)^2}{4}\cot\alpha + Hh} \quad (5)$$

经计算得知,此时  $o'$  点的横坐标恰是断层面的中点在地面的投影,如图2所示。

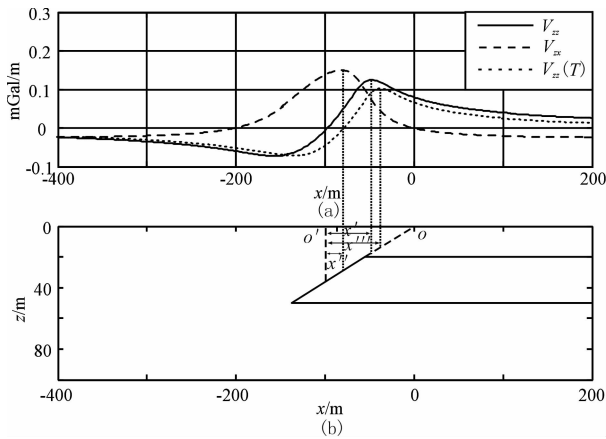


图2 断层解释模型

(a)断层所引起的水平与垂直导数;(b)断层模型

令  $d=H-h$ ,  $D=H+h$ ,则  $d$ 、 $D$  与  $H$ 、 $h$  的关系式如下

$$\begin{cases} h = \frac{D-d}{2} \\ H = \frac{D+d}{2} \end{cases} \quad (6)$$

代入式(5)可得到

$$x'_{\max} = \frac{1}{2}\sqrt{d^2(\cot\alpha - 1) + D^2} \quad (7)$$

$$x'_{\min} = -\frac{1}{2}\sqrt{d^2(\cot\alpha - 1) + D^2} \quad (8)$$

另外,我们还可以得到  $V_{zx}$  的最大值在以  $o'$  为原点的坐标系中的横坐标

$$x''_{\max} = \frac{d^2}{2D}\cot\alpha \quad (9)$$

仅依靠以上参数无法获得断层的产状信息,需引入其他参数参与计算。向上延拓是一种稳定性计算,且会降低噪声的干扰,因此将观测面上重力异常的垂直导数  $V_{zx}$  上延一个高度  $T$ ,曲线上的最大值所对应的横坐标为

$$x'''_{\max} = -\frac{1}{2}\sqrt{d^2(\cot\alpha - 1) + (D + 2T)^2} \quad (10)$$

联立式(7)、式(9)、式(10)可以得出

$$D = \frac{(x'''_{\max})^2 - (x'_{\max})^2}{T} - T \quad (11)$$

$$\alpha = \operatorname{arccot} \frac{2Dx''_{\max}}{2Dx''_{\max} + D^2 - 4(x'_{\max})^2} \quad (12)$$

$$d = \sqrt{\frac{2Dx''_{\max}}{\cot\alpha}} \quad (13)$$

或

$$d = \sqrt{\frac{4(x'_{\max})^2 - D^2}{\cot\alpha - 1}} \quad (14)$$

通过式(11)~式(13)可以得到断层倾角及上顶与下底的埋深,然后利用  $V_{zx}$  与  $V_{zz}$  在原始坐标系的原点处有  $V_{zx}(0) = 2G\rho\sin^2\alpha\ln\frac{H}{h}$  和  $V_{zz}(0) = G\rho\sin 2\alpha\ln\frac{H}{h}$  成立,因此可以得到地质体与围岩的密度差  $\rho$  的表达式为

$$\rho = \frac{V_{zx}(0)}{2G\sin^2\alpha\ln\frac{H}{h}} \quad (15)$$

$$\rho = \frac{V_{zz}(0)}{G\sin 2\alpha\ln\frac{H}{h}} \quad (16)$$

通过上述步骤,即可获得断层的产状信息。总结本文上述方法计算断层参数的基本步骤为:

- (1) 利用空间域或频率域方法计算出原始重力异常的水平(与垂直)导数;
- (2) 根据垂直(与水平)导数曲线给出坐标原点  $o'$  的横坐标;
- (3) 将垂直(与水平)导数上延一个高度  $T$ ;
- (4) 得出不同水平导数与垂直导数的最大值相对原点  $o'$  的横坐标;
- (5) 根据式(11)~式(16)得出断层的参数  $h$ 、 $H$ 、 $\alpha$  和  $\rho$ 。

通过上述计算过程可知,该方法并不适用于

$\alpha=90^\circ$ 的情况,即当  $x'_{\max}=x''_{\max}$ 时,对于该情况可采用简单的特征点法<sup>[7]</sup>来进行求解。

### 3 模型试验

为了试验方法的有效性,设立了不同角度的台阶模型进行试验,按照上述方法对断层进行反演,反演结果与理论值对比见表 1。

表 1 计算值与理论值对比

模型		$\rho/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha/(^\circ)$	$h/\text{km}$	$H/\text{km}$
模型一	理论值	1	30	10	30
	计算值	1.02	29.8	9.98	30.12
模型二	理论值	1	45	20	50
	计算值	1.06	45.3	20.01	48.60
模型三	理论值	1	60	50	100
	计算值	0.96	61.2	49.00	93.01

从表 1 中可以看出,该方法的反演结果与理论值之间误差较小,其误差百分比为 0.23%,表明该方法能很好地完成倾斜断层产状的求取。

### 4 实际数据处理

本文选取了四川盆地东部边缘秀山到凤凰一段 1:10 万比例尺的重力剖面资料进行解释,该剖面位于川黔断褶带西部边界处,此剖面经过的花垣—松桃断裂为该褶皱带的东部界限。剖面位置处的结晶基底埋藏较深,沉积层厚度较大,沉积盖层年龄较老,上地壳界面产状平缓,壳内界面及低速层顶、底面略向西倾,地区应力主要以块断、表层扭动为主。

本次重力野外测量总精度为 0.014mGal,保证了测量数据的可靠性。采用本文方法对异常进行处理的结果如图 3 所示,与地震综合解释结果<sup>[6]</sup>的对比情况见表 2。

表 2 计算结果与地震资料对比

模型参数	$\rho/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha/(^\circ)$	$h/\text{km}$	$H/\text{km}$
计算结果	0.36	62.5	17.2	35.8
地震解释结果	0.34	61	18.1	37

从表 2 中可以看出,本文方法的计算结果与地震解释结果差别较小,能较好地反映出断层的基本形态,并确定了褶皱带的西部边界。

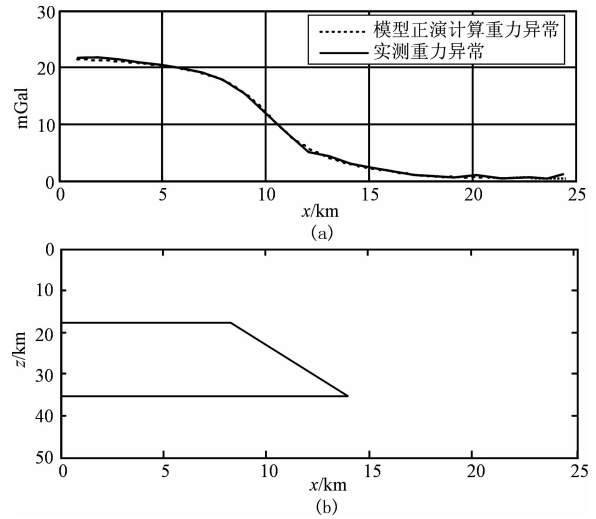


图 3 反演得到的模型及其重力异常

(a)断层正演计算得到重力异常与实测异常;(b)断层模型

### 5 结论

本文提出一种利用重力异常的不同高度水平导数与垂直导数的关系确定断层产状的方法,该方法计算简便,且不需要更高阶导数参与计算。通过理论模型试验和实际数据处理证明,该方法能很好地进行断裂的识别,并具有较高的精度。但是本文方法对于垂直断层并不适用,在实际应用中可先利用本文所提供的方法进行断层属性的判别,然后再进行解释。

#### 参考文献

- [1] Stanley J M and Green R. Gravity gradients and interpretation of the truncated plate. *Geophysics*, 1976, 41(6):1370~1376
- [2] Green R. Accurate determination of the dip angle of a geological contact using the gravity method. *Geophys Pros*, 1976, 24(2): 265~272
- [3] Stanley J M. Simplified gravity interpretation by gradients the geologic contact. *Geophysics*, 1977, 42(6): 1230~1235
- [4] Butler D K. Generalized gravity gradient analysis for 2D inversion. *Geophysics*, 1995, 60(4): 1018~1028
- [5] 魏伟,刘天佑.台阶重力异常的梯度解释.石油地球物理勘探,2005,40(2): 238~242  
Wei Wei,Liu Tianyou. Gradient interpretation of step gravity anomaly. *OGP*,2005,40(2): 238~242
- [6] 郭正吾,邓康龄,韩永辉等.四川盆地形成与演化.北京:地质出版社,1996
- [7] 穆石敏,申宁华,孙运生.区域地球物理数据处理方法及其应用.吉林长春:吉林科学技术出版社,1990

(本文编辑:冯杏芝)