

Study on Characteristics of the Full Gravity Gradient Tensors of the Typical Fault Models

Linyun Huang¹, Qiang Wang², Fuyu Jiang^{3*}

¹Geophysical Research Center of Jiangnan Oilfield Research Institute of Exploration and Development, Wuhan

²Construction and Management of Water Resources of Huaihe River Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu

³School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing

Email: 53728861@qq.com, jijwq@hrc.gov.cn, *jiangfy@hhu.edu.cn

Received: Feb. 1st, 2013; revised: Feb. 26th, 2013; accepted: Mar. 8th, 2013

Copyright © 2013 Linyun Huang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The gravity gradient tensors of five three-dimensional fault models with different dip angle were calculated and got their plane distribution map by applying the divergence theorem, which changed the volume integral into surface integral, then changed into line integral by using Green's theorem. The characteristics of gravity gradient tensors of five fault models show that the V_{zz} component can directly reflect the shapes of the fault footwall, and its abnormal symbols directly reflect the profit or loss of the residual density. V_{xx} and V_{yy} components with dense isoline zone reflect the edge of fault footwall in north-south or east-west direction. While V_{zx} and V_{zy} reflect the edge of the lower plate in the form of extremum, and V_{zx} component reveals a fault surface in the form of minimum. V_{xy} component reflects the corner of the footwall in the form of extremal. The research on the gradient tensor distribution characteristics of three dimensional fault models could provide a theory basis for finding fault tectonic.

Keywords: Gravity Gradient Tensor; Fault Model; Divergence Theorem

典型断层模型的重力全梯度张量特征研究

黄麟云¹, 王强², 蒋甫玉^{3*}

¹江汉油田勘探开发研究院物探研究中心, 武汉

²水利部淮河水利委员会建设与管理处, 蚌埠

³河海大学地球科学与工程学院, 南京

Email: 53728861@qq.com, jijwq@hrc.gov.cn, *jiangfy@hhu.edu.cn

收稿日期: 2013年2月1日; 修回日期: 2013年2月26日; 录用日期: 2013年3月8日

摘要: 以高斯定理为出发点, 将计算梯度张量的体积分变成包围该积分域的全表面积分, 利用格林公式把对每个面的积分变成对每条边的线积分之和, 实现了对5个具有不同断层倾角的三维断层模型的梯度张量数值计算, 得到其梯度张量平面分布图。断层模型的 V_{zz} 分量能够直接反映断层上下盘的轮廓, 并且异常的符号直接反映场源体剩余密度的盈亏; V_{xx} 和 V_{yy} 分量以密集的等值线带反映出断层上下盘在南北向和东西向的边缘; 而 V_{zx} 和 V_{zy} 则以极值的形式反映出上下盘的边缘位置, 且 V_{zx} 分量以极小值的形式揭示出断层面的位置; V_{xy} 分量以极值圈闭的特征揭示上下盘的各个角点位置。对三维断层模型梯度张量分布特征的研究为从重力学方面对断裂构造的识别提供了理论依据。

关键词: 重力梯度张量; 断层; 高斯定理

*通讯作者。

1. 引言

断裂构造,特别是深大断裂与两侧构造单元的演化历史、矿产的形成与空间分布等有着密切的关系,往往不同级别的断裂成为不同级别构造单元的分界线^[1,2]。实践证明,地壳中的矿产分布是受一定地质构造控制的,如内生金属矿床的形成与断裂构造有密切关系。断裂构造的存在,为矿液的运移和充填创造了有利条件。断裂构造也是沉积矿产形成的重要条件,如石油和天然气矿田,除具备生油气地层外,还需一定的储油器构造。一般有利储油器构造是背斜顶部,或是封闭良好的断层内。此外,地下水的运移和赋集与地质构造也有着密切的关系,地下水或地下水往往赋存在向斜构造或断裂带内;对于工程建筑选址来说,除分析岩石的力学性质外,断裂构造亦是影响岩石稳定性的重要因素^[1]。因此,对断裂构造的研究具有十分重要的意义。

近年来,随着国家战略资源需求逐渐加大,石油、矿产勘探及地质构造研究对重力法提出的研究小地质体及其细节的要求不断提高,传统的重力法在精度和分辨率方面已不能满足要求。相对于传统重力测量只观测重力位的铅垂一次导数(即 ∇g 或 V_z),重力梯度测量可以得到重力位的一次导数 V_x 、 V_y 、 V_z 在 x 、 y 、 z 方向上的变化率,即重力位的二次导数 V_{xx} 、 V_{xy} 、 V_{zx} 、 V_{yy} 和 V_{zy} (因重力位函数在无源空间满足拉普拉斯方程且其二次导数具有对称性,因而其二次导数的9个分量中只有5个独立分量)。这些二次导数对地下密度异常体的反映具有更高的灵敏度,一方面,能够更加直接地反映场源体的边界,即具有比重力本身更高的分辨率;另一方面,梯度测量中多个信息的综合应用能够加强应用重力数据做出的地质解释并提高地质特征的定量模拟质量^[3]。

在地球物理勘探中,模型体的正演在位场异常的解释中有着重要的意义,对其产生异常特征的认识是掌握场与场源对应关系的切入点,是进行位场反演、地质解释的基础,历来深受地球物理学家的关注^[4-6]。因此,对断裂构造模型重力全梯度张量分布特征的研究,为研究固体地球矿产、油气资源以及区域构造提供了重要依据。

2. 重力全梯度张量的计算

如果 $V(x,y,z)$ 是一个位函数,在卡迪尔坐标系

中, x 轴沿测线方向, y 轴垂直测线, z 轴垂直向下,则重力梯度张量 Γ 可用下式表示

$$\Gamma = \begin{bmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{yx} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{zx} & V_{zy} & V_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

从式(1)可以看出,重力梯度张量是对称的,即 $V_{ij} = V_{ji}$ (i, j 分别代表 x, y 或 z)。并且,由于在无源区域位函数 V 遵守拉普拉斯方程,因此 Γ 的对角元素之和为零,即 $V_{xx} + V_{yy} + V_{zz} = 0$ 。从这两个性质中可以知道,梯度张量中只有5个元素是独立的。

重力全梯度张量的计算具有一定复杂性,目前在频率域内常用的方法是利用快速傅里叶变换或余弦变换,根据位场各阶导数在频率域内的相互转换关系,由重力异常换算而得。而在空间域内则大都利用线元法、面元法和体元法等,将复杂形体分割成一系列简单形体的组合,或者是将三重积分分别用数值积分来近似计算。在本文的研究中,三维断层模型的重力梯度张量则利用M. Okabe(1979年)提出的三角元法来计算^[7]。

在笛卡尔三维坐标系中,体积为 V 的地质体在坐标原点产生的重力位 U 为

$$U = -G \int_V \rho u \, dV \quad (2)$$

式中 G 为万有引力常量, ρ 是体积为 V 的地质体相对围岩的剩余密度, u 是地质体内部某点与原点的距离,定义为

$$u = -(x^2 + y^2 + z^2)^{-1/2} \quad (3)$$

则在给定 k 方向,重力位 U 的一阶偏导数 U_k 为

$$U_k = G \int_V \nabla(\rho u) \cdot \mathbf{k} \, dV \quad (4)$$

式中 ∇ 是梯度算子($\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z$), \mathbf{k} 是 k 方向的方向矢量,且 \mathbf{k} 可表示为

$\mathbf{k} = [\cos(x,k), \cos(y,k), \cos(z,k)]$ 。由此可得,重力位的二阶偏导数 U_{kl} 即是一阶导数 U_k 在 l 方向的偏导数,可由下式表示

$$U_{kl} = -G \int_V \nabla(\nabla(\rho u) \cdot \mathbf{k}) \cdot \mathbf{l} \, dV \quad (5)$$

上式中 $\mathbf{l} = [\cos(x,l), \cos(y,l), \cos(z,l)]$ 。对式(5)的右半部分,先利用高斯公式将体积分变成包围该积分域

的全表面积分, 然后经过两次坐标旋转, 利用格林公式把对每个三角形的面积分变成对三角形每边的线积分之和, 即可得到计算任意形状三度体的梯度张量计算公式, 即

$$U_{kl} = G\rho \sum_i \sum_j \ln L_j(i) \quad (6)$$

式中 n 为第 i 个三角形面 S_i 的外法线方向矢量, $L_j(i)$ 为对第 i 个三角形面 S_i 的第 j 条边的积分结果。

3. 断层模型的重力全梯度张量

前文从理论上阐述了利用三角元法计算重力全梯度的方法。下面以 5 个具有不同倾角的典型三维断层模型为例, 研究其全梯度张量场的分布特征, 建立梯度张量场与场源的对应关系, 为三维反演和解译奠定基础。表 1 给出了 5 个不同倾角的断层模型的上、下盘各角点的坐标参数。表中 x_{top} 为上盘或下盘的顶界面在 x 轴方向(东西向)的分布范围, 而 x_{bottom} 则表示底界面在 x 轴方向的范围。同样地, y 和 z 则表示三维断层模型分别在 y (南北向)和 z 轴(深度)方向的分布范围。其中模型 1 和 2 为正断层模型, 断层倾角分别为 30° 和 60° , 模型 3 为垂直断层, 模型 4 和 5 为逆断层模型, 断层倾角分别为 60° 和 30° 。上述 5 个典型断层模型的建立采用 Matlab 软件进行, 而正演计算的结果图件则采用 surfer 软件进行绘制。

在梯度张量的正演计算中, 密度差均取为 1.0 g/cm^3 , 测网为 101×101 、纵横向网格间距均为 200 m 。图 1 给出了 5 个不同倾角的断层模型的重力梯度张量分布图。由图中可以看出, 重力梯度张量的 V_{zz} 分量在场源体(剩余密度大于 0)的正上方是正值, 在边界处为零, 而在场源体外则呈负值。此外, 在大多数情况

下, V_{zz} 异常的形状与断层上下盘的形状有直接关系, 并且异常的符号直接反映场源体剩余密度的盈亏。不同于 V_{zz} 分量, V_{xx} 和 V_{yy} 分量主要反映南北向和东西向的重力异常变化, 其所呈现的异常特征与 V_{zz} 分量恰好相反, 即在场源体(剩余密度大于 0)的正上方是负值(该负值在平面图中呈分别在南北向和东西向拉伸的特征), 在边界处为零, 而在场源体外则呈正值。重力梯度张量 V_{zx} 和 V_{zy} 分量特征相似, 分别在南北向和东西向的异常边界正上方呈极值, 而在场源体的正上方则为零值。与重力梯度张量其他分量截然不同的是, V_{xy} 分量体现 V_x 在南北向的变化特征, 呈两两对称的极值反映, 极值的位置与异常源的拐点位置相对应。由此可见, 重力梯度张量的 V_{xx} , V_{yy} 和 V_{zz} 分量均在场源体的边界处呈现梯度带的特征。需要特别指出的是 V_{xy} 分量, 当断层的延伸方向与测网方向不平行时, V_{xy} 也可反映出场源体的边界信息, 其所含的边界信息量的多少和场源体的走向与测网方向间的夹角有关, 以 45° 方向效果最好。综合来看, 对于正断层, 随着断层倾角的增大, 在梯度张量图中直接识别断层面的难度增大; 而对于逆断层, 随着断层倾角的减小, 同样表现出难以识别出断层面的特征。

为进一步研究不同倾角断层模型的梯度张量变化特征, 图 2 给出了上述 5 个断层模型的梯度张量剖面图。图 2(a)~(f)分别是梯度张量的 6 个分量, 而 5 种不同的线型则代表的是 5 种典型断层模型。图 2 中 V_{xx} 、 V_{zx} 和 V_{zz} 三个分量的剖面是 y 值固定在 10.0 km , 沿 x 轴的变化特征。 V_{yy} 和 V_{zy} 则是 x 值固定在 10.0 km , 沿 y 轴的变化。 V_{xy} 给出的是在直线 $x = y$ 上的变化曲线。由图 2 可以看出, V_{yy} 呈现出两高夹一低的特征, 两个高值的中心位置基本上于断层上下盘的外侧边

Table 1. Parameters of fault models
表 1. 断层模型参数

模型 编号	上盘				下盘			
	x_{top} (km)	x_{bottom} (km)	y (km)	z (km)	x_{top} (km)	x_{bottom} (km)	y (km)	z (km)
1	(10.1732, 15)	(11.0392, 15)	(7.5, 12.5)	(1.7, 2.2)	(5, 8.9614)	(5, 9.8268)	(7.5, 12.5)	(1, 1.5)
2	(10.0577, 15)	(10.3464, 15)	(7.5, 12.5)	(1.7, 2.2)	(5, 9.6536)	(5, 9.9423)	(7.5, 12.5)	(1, 1.5)
3	(10, 15)	(10, 15)	(7.5, 12.5)	(1.7, 2.2)	(5, 10)	(5, 10)	(7.5, 12.5)	(1, 1.5)
4	(5, 10.3464)	(5, 10.0577)	(7.5, 12.5)	(1, 1.5)	(9.9423, 15)	(9.6536, 15)	(7.5, 12.5)	(1.7, 2.2)
5	(5, 11.0392)	(5, 10.1732)	(7.5, 12.5)	(1, 1.5)	(9.8268, 15)	(8.9614, 15)	(7.5, 12.5)	(1.7, 2.2)

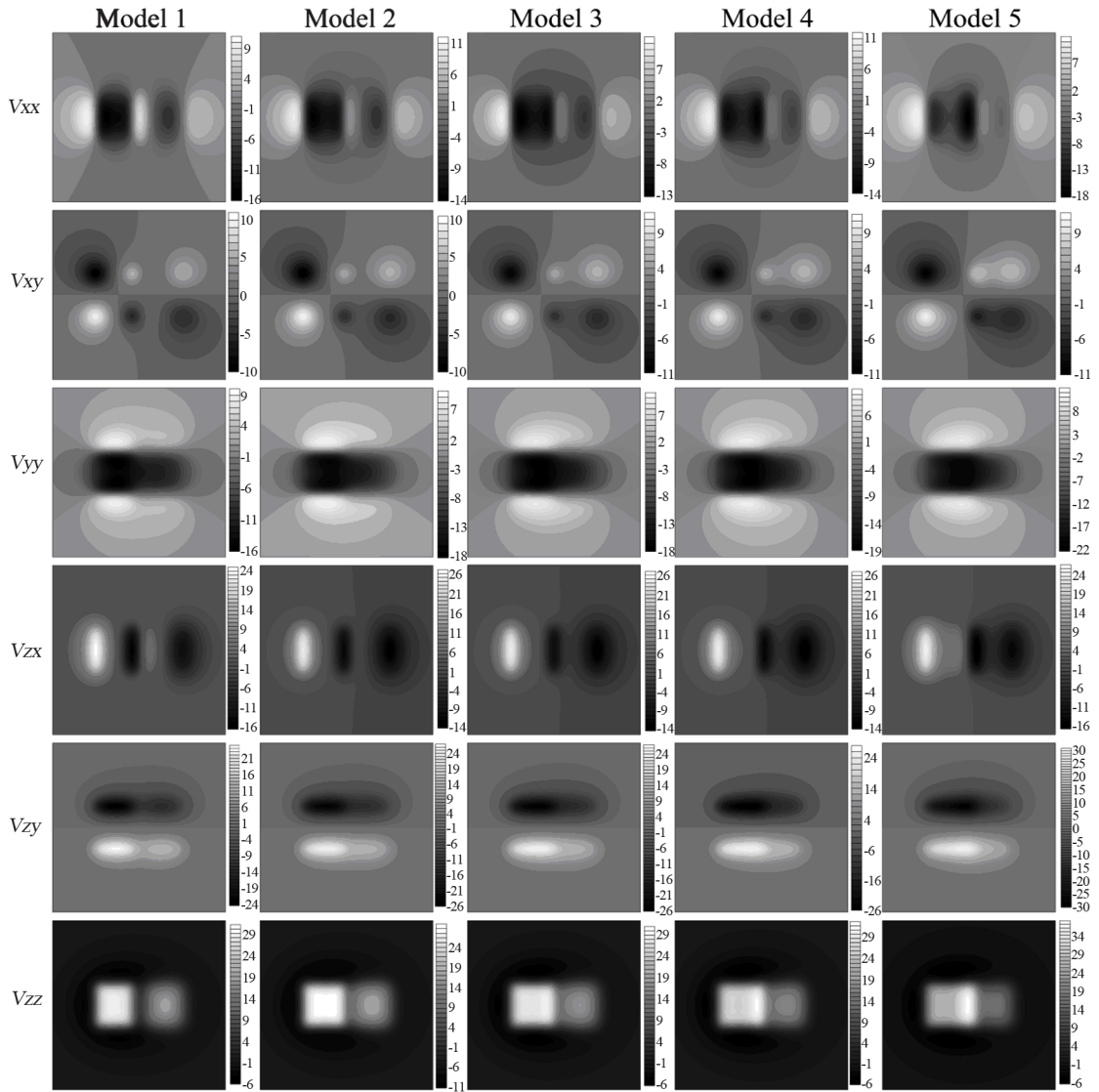


Figure 1. The gravity gradient tensors of fault models (Unit: E, $1 E = 10^{-9}/s^2$)
 图 1. 断层模型的重力全梯度张量(单位: E, $1 E = 10^{-9}/s^2$)

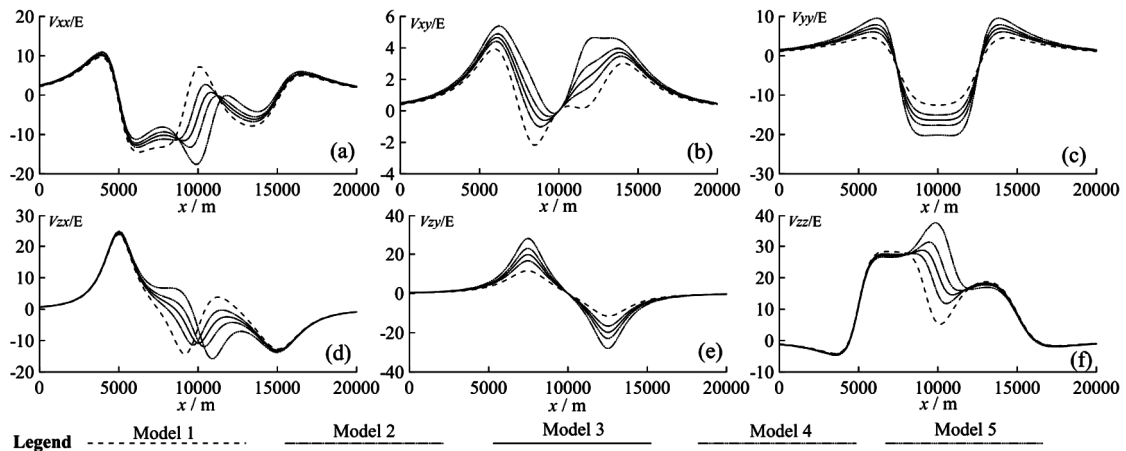


Figure 2. Profiles of gradient tensors of fault modes with different dip angle
 图 2. 不同倾角断层模型的梯度张量剖面

缘相对应, 而低值中心则对应于断层面。且高值与低值的差随着正断层倾角的增大而增大, 随逆断层倾角的减小而增大。 V_{yy} 则有两个呈反向对称的极值, 极值的大小与断层倾角密切相关, 随倾角的增大而增大。 V_{xx} 在 $x = 10.0 \text{ km}$ 处呈现出不同的特征, 随断层倾角的改变, 逐渐由极大值向极小值变化, 其余位置的极值基本上与断层的南北向边缘相对应。 V_{xx} 分别在 15.0 km 和 5.0 km 处有极小值和极大值, 且在 10.0 km 左右两侧亦有极小值和极大值, 这两个极值的位置随断层倾角的变化由东向西移动。 V_{xy} 梯度张量分量有两个极大值, 在 10.0 km 处随断层倾角的改变呈现出不同的特征。对于这 5 个模型来说, V_{zz} 分量具有相似的特征, 均能反映出断层上下盘的轮廓, 所不同的是在 10.0 km 处随倾角的逐渐增大, 该处的极值由极小值变为极大值, 对于模型 1 来说呈极小值反映, 而模型 5 则为极大值。

4. 结论

本文应用三角元法实现了三维断层模型梯度张量的数值计算。对具有不同倾角的典型三维断层模型梯度张量的研究表明, V_{zz} 分量能够反映断层上下盘的轮廓, 但不能明显地反映出断层面所在位置; V_{xx} 和

V_{yy} 分量以密集的等值线带反映出断层上下盘在南北向和东西向的边缘, 且 V_{xx} 分量能够反映出断层面的位置; 而 V_{zx} 和 V_{zy} 则以极值的方式反映出上下盘的边缘位置, 且 V_{zx} 分量以极小值的形式揭示出断层面的位置; V_{xy} 分量以极值圈闭的特征揭示上下盘的各个角点位置。综合来看, 断层模型的重力梯度异常能够反映上下盘的细节, 具有比重力异常本身更高的分辨率, 综合利用各梯度张量分量信息能够提高对断层识别的准确性。

参考文献 (References)

- [1] 李德伦, 王恩林. 构造地质学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2001.
- [2] 张凤旭, 张凤琴, 刘财等. 断裂构造精细解释技术——三方向小子域滤波[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1543-1550.
- [3] 曾华霖. 重力场与重力勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [4] F. Y. Jiang, L. K. Gao. Edge enhancement of gravity gradient tensor data using small sub-domain filtering method. Applied Geophysics, 2012, 9(2): 119-130.
- [5] F. Y. Jiang, Y. Huang and K. Yan. Full gravity gradient tensors from vertical gravity by cosine transform. Applied Geophysics, 2012, 9(3): 247-260
- [6] 蒋甫玉, 高丽坤, 张凤旭等. 基于三角元法计算三度体球冠模型的重力异常[J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 203-206.
- [7] M. Okabe. Analytical expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies. Geophysics, 1979, 44(4): 730-741.