DOI:10.11720/j.issn.1000-8918.2013.4.12

井中三分量磁测的梯度张量欧拉反褶积及应用

刘天佑¹,高文利²,冯杰²,习宇飞¹,欧洋¹

(1. 中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质科学院 地球物理地 球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:2006年The Leading Edge第一期详细介绍了磁力梯度张量的理论、仪器与野外试验结果,磁力梯度张量技术已成为磁力勘探新的热点之一。笔者介绍了磁力梯度张量的概念及优点;利用频率域与空间域方法把井中三分量 磁测资料换算磁力梯度张量;根据联合反演原理与欧拉反褶积方法,推导了磁力梯度张量的联合反演方程,该方程 通过权函数矩阵可以灵活对一个或多个分量反演,比文献[14]方法更具普遍性。理论模型结果表明,磁力梯度张 量反演方法对井底异常的定位准确,对于 3D 模型,一口钻井的资料也能较好确定空间位置。将该方法用于湖北大 冶铁矿 18-2 井三分量磁测资料的解释,得出磁力梯度张量的欧拉解集中在 100~180 m 与 500~550 m 两个深度, 与钻探结果十分吻合。该结果证实了地质上关于铁矿体分布具两个台阶的推论,对大冶铁矿的深部找矿具有实际 意义。

地磁场是具有方向和幅值的矢量场,在三维空 间中,可以用由9个(3×3的矩阵)空间梯度 B_{xx}、 B_{xy}、B_{xx}、B_{yx}、B_{yx}、B_{xx}、B_{xy}、B_{xx}、B_{xx}、B_{yx}、B_{xx}、B_{yx}、B_{xx}, B_{xx}, B_x

近年来,井中磁测仪器有了很大发展,在国内, 重庆、北京、上海等地质仪器厂研制生产了各种型号 的井中磁测仪器,如 JSZ、JCX-1、JCX-2、JCX-3、 GJCX-1、JGS-1、JCC3-1、JSZ-05 等,仪器性能逐渐稳 定,自动化程度和精度提高。如 JCX-3 型井中三分 量磁力仪,垂直分量精度大约可达到 30 nT,水平分 量精度大约可达到 50~60 nT。这使得我们有可能 利用磁力梯度张量的理论对井中三分量磁测资料作 进一步的研究。 笔者研究了磁力梯度张量在井中三分量磁测中 的应用。利用井中三分量磁测资料 *B_x、B_y、B_z* 换算 磁力梯度张量 *B_{xx}、B_{xy}、B_{xz}、B_{yx}、B_{yy}、B_{yz}、B_z、B_{yy}、B_z、 再根据欧拉反褶积方法的原理,采用联合反演方法 求解场源体的空间位置。理论模型结果表明,该方 法不仅具有方便快速、且不必知道场源体的物性参 数与准确几何形态就能够求解场源体位置的优点, 而且磁力梯度张量比单分量反演结果精度更高。将 该方法用于湖北大冶铁矿 18-2 井三分量磁测资料 的解释,取得较好的地质效果。*

1 磁力梯度张量概念^[3-6]

磁力梯度张量定义为

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial x^{2}} & \frac{\partial^2 U}{\partial x^{2} \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial y^{2} x} & \frac{\partial^2 U}{\partial y^{2}} & \frac{\partial^2 U}{\partial y^{2} \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial z^{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_X}{\partial x} & \frac{\partial B_X}{\partial y} & \frac{\partial B_X}{\partial z} \\ \frac{\partial B_Y}{\partial x} & \frac{\partial B_Y}{\partial y} & \frac{\partial B_Y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_Z}{\partial x} & \frac{\partial B_Z}{\partial y} & \frac{\partial B_Z}{\partial z} \end{bmatrix}, (1)$$

式中, U 为磁性体的磁位, 磁力梯度张量即磁位对 x,y,z 的二阶导数, 或井中磁测三分量 B_x, B_y, B_z 对 x,y,z 的一阶导数。从式(1)可以看出, 磁力梯度张 量是对称的, 即 $g_{ij} = g_{ji}$, 并且, 由于在无源区域 U 遵 守 Laplace's 方程, 因此 G 的对角元素之和为零, 即 $g_{11} + g_{22} + g_{33} = 0$ 。从这两个性质中可以得知梯度张 量 9 个元素中只有 5 个元素是独立。

与总场和梯度相比,磁力梯度张量有很多的优 点,如^[2,7-10]:张量分量的等值线图类似于垂直磁 化、对场源体分辨率高、易于解释,能够减少反演的 多解性;每个张量分量代表一个方向滤波器,能够突 出场源体相应方向上的结构;张量分量的联合处理 解释能够给出场源的磁化方向信息;能够直接得到 "点源"的方位与磁矩,提高了线源的分辨率等。磁 力梯度张量的这些优点预示了它巨大的应用潜力, 得到人们的普遍关注。

2 井中磁测三分量梯度张量的计算

目前还没有仪器可直接用来测量井中磁力梯度 张量。但可以由井中磁测三分量 $B_x \ S_y \ S_z$ 换算磁 力梯度张量 $B_{xx} \ S_{xy} \ S_{xz} \ S_{yx} \ S_{yy} \ S_{yz} \ S_{zx} \ S_{zy} \ S_{zz} \$

(1)把实测的井中磁测三分量异常值 B(x,y,0)通过富里叶变换得到频谱 S_B(u,v,z);

(2)将 B(x,y,0)的频谱 $S_B(u,v,z)$ 乘以频率响 应函数 $2\pi i u, 2\pi i v, 2\pi (u^2 + v^2)^{1/2}$,得到频谱

$$\begin{split} S_{B_x}(u,v,z) &= 2\pi \mathrm{i} u S_B(u,v,0) \,\mathrm{e}^{2\pi (u^2+v^2)^{1/2} \cdot z};\\ S_{B_y}(u,v,z) &= 2\pi \mathrm{i} v S_B(u,v,0) \,\mathrm{e}^{2\pi (u^2+v^2)^{1/2} \cdot z};\\ S_{B_z}(u,v,z) &= \\ &2\pi \, (u^2 + v^2)^{1/2} S_B(u,v,0) \,\mathrm{e}^{2\pi (u^2+v^2)^{1/2} \cdot z} \,\mathrm{e}^{2\pi (u^2+v^2)^{1/2} \cdot z}; \end{split}$$

(3) 对 $S_{B_x}(u,v,z) \ S_{B_y}(u,v,z) \ S_{B_z}(u,v,z)$ 反富 里叶变换得到 $B_{T_x} \ B_{T_y} \ B_{T_z}$;由磁场 B 的三分量 $B_x \ B_y \ B_z$,可以得到磁力梯度张量 $B_{xx} \ B_{xy} \ B_{xz} \ B_{yx} \ B_{yx} \ B_{zy}$ 的九个元素。

如果井中磁测三分量 *B_x、B_y、B_z* 中有一个分量 的观测精度不高或数据缺失,则可以利用梯度张量 不变量的关系来获得另一个梯度的结果,如欲得到 *B_y*的梯度,*I*₀ 张量不变量为

 $I_0 = \operatorname{tr}(G) = g_{11} + g_{22} + g_{33} = 0,$ $\iiint g_{11} + g_{33} = -g_{22}, \qquad \Downarrow B_{yy} = -(B_{xx} + B_{zz})_{\circ}$

磁异常的梯度换算相当于高通滤波,为了减少 频率域换算的误差,水平梯度可用空间域有限差分 法换算,而磁异常的垂直梯度可用 Fedi 提出的 IS- VD 算法^[8,11-12]。

3 井中三分量磁测的梯度张量反演——欧 拉反褶积方法

3.1 方法原理

欧拉反褶积方法源于 18 世纪的欧拉齐次方程, 1965 年, Hood 首先提出了针对磁法的欧拉齐次方 程,并利用 2D 欧拉方程和特征点法得到了场源深 度、总场极大值、垂直梯度极大值以及构造指数之间 的关系。Slack、Barongo、Thompso、Reid 等进一步发 展了欧拉反褶积方法,该方法在地面高精度磁测资 料 ΔT 得到广泛的应用^[7-9,13-14]。

欧拉齐次方程可写为

$$(x - x_0) \partial f / \partial x + (y - y_0) \partial f / \partial y + (z - z_0) \partial f / \partial z = -N \cdot f, \qquad (2)$$

式中,*f* 在地面磁测资料解释中为总磁场强度异常 ΔT , (*x*,*y*,*z*)为计算点的坐标,(*x*₀,*y*₀,*z*₀)为场源体 的位置,*N* 为与场源体类型有关的参数,称构造指 数,如单极线源 *N* = 1,偶极线源 *N* = 2,偶极子源 *N* = 3。该方法通过设置一个滑动窗口,利用窗口内的 ΔT 观测值,根据最小二乘法求解线性方程组得到对 场源水平位置、深度的估计。通过移动滑动窗口与 改变滑动窗口的大小,利用统计方法剔除不合理的 解,最后得到场源的水平位置、深度值。

若式(2)中f为井中磁测的三个分量 B_x、B_y、 B_z,根据联合反演的原理,把单分量的欧拉反褶积方 法推广为三分量的联合反演,可以写出井中三分量 磁测联合反演的方程为

$$w_{1}[(x - x_{0})B_{xx} + (y - y_{0})B_{xy} + (z - z_{0})B_{xz}] + w_{2}[(x - x_{0})B_{yx} + (y - y_{0})B_{yy} + (z - z_{0})B_{yz}] + w_{3}[(x - x_{0})B_{zx} + (y - y_{0})B_{zy} + (z - z_{0})B_{zz}] = -N[w_{1}(B_{x} - b_{x}) + w_{2}(B_{y} - b_{y}) + w_{3}(B_{z} - b_{z})],$$
(3)

式中, w_1 , w_2 , w_3 分别为 B_x , B_y , B_z 分量的权系数,可 以根据观测精度来定权系数进行三分量的联合反 演,也可以只对某一分量进行欧拉反褶积。如当 w_1 =1, w_2 =0, w_3 =0 或 w_1 =0, w_2 =1, w_3 =0 或 w_1 = 0, w_2 =0, w_3 =1 时,式(3)就是利用单一分量 B_x 或 B_y , B_z 求场源深度的欧拉反褶积方法。 b_x , b_y , b_z 为 背景场(或称区域场)。场源点坐标 x_0 , y_0 , z_0 与背 景场 b_x , b_y , b_z 为6个待求的未知参数,而9个张量 元素 B_{xx} , B_{xy} , B_{xz} , B_{yx} , B_{yy} , B_{yz} , B_{xx} , B_{yy} , B_z 与三分量 B_x , B_y , B_z ,构造指数N为已知值。

由式(3)可以看出:欧拉方程的齐次项,即三分 量 $B_x \ A_y \ B_z$ 对 $x \ y \ z$ 的偏导数 $B_{xx} \ A_{yy} \ B_{xz} \ A_{yy}$ 、 B_{yz}、B_{zx}、B_{zy}、B_{zz}就是磁力梯度张量,这就是为什么要用磁力梯度张量概念来进行井中磁测资料欧拉反褶积方法反演的缘故。

若将式(3)的联合反演方程写为单个参数反演 方程的形式,则有

$$w_{1}(x - x_{0})B_{xx} + w_{1}(y - y_{0})B_{xy} + w_{1}(z - z_{0})B_{xz}] = w_{1}N(b_{x} - B_{x}),$$

$$w_{2}(x - x_{0})B_{yx} + w_{2}(y - y_{0})B_{yy} + w_{2}(z - z_{0})B_{yz} = w_{2}N(b_{y} - B_{y}),$$

$$w_{3}(x - x_{0})B_{zx} + w_{3}(y - y_{0})B_{zy} + w_{3}(z - z_{0})B_{zz} = w_{3}N(b_{z} - B_{z})_{0}$$
(4)

把式(4)改写为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} & N & 0 & 0 \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} & 0 & N & 0 \\ B_{zx} & B_{yz} & B_{zz} & 0 & 0 & N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ y_0 \\ z_0 \\ b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} & B_x \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} & B_y \\ B_{zx} & B_{yz} & B_{zz} & B_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ N \end{bmatrix}, (5)$$

 $[x_0]$

简记为分块矩阵形式:

$$[W] \cdot [B_2N] \cdot [X] = [W] \cdot [B_2B_1] \cdot [C]_{\circ}$$
(6)

式(4)表明:

(1)利用 n 个数据点就有 3n 个方程,方程中有
 6 个未知数,因此只要当 n≥2 时就可以求解场源的
 坐标 x₀、y₀、z₀ 及背景场的三个分量 b_x,b_y,b_z。

(3)若权系数 w₁、w₂、w₃等于1,则式(4)就是
文献[10]中重力梯度张量欧拉反褶积方法,可见文
献[10]的方法是式(4)的一个特例。

3.2 实现步骤

(1)对井中三分量磁测资料进行去噪,剔除畸 变点;

(2)将井中三分量磁测资料计算磁力梯度张量
B_{xx}、B_{xx}、B_{xx}、B_{yx}、B_{yx}、B_{yx}、B_{xx}、B_{zy}、B_z;

(3)设置流动窗口,按式(5)求解场源点坐标 x₀、y₀、z₀及背景场的三个分量 b_x、b_x、b_z;

(4)改变流动窗口大小,重复(3);

(5)根据统计方法剔除不合理的坏解。

4 理论模型

4.1 井旁异常

如图 1 二度板状体的模型参数为:中心埋深 100 m,x 方向宽度 80 m,z 方向厚度 10 m,y 方向无 限延伸;测线方位角 0°;有效磁化强度 100 000 × 10⁻³ A/m;磁化倾角 45°;板状体倾角 0°;井与板中 心的距离为 60 m,井深 200 m。由于是二度板状体,



图 2 板状体磁异常曲线

只考虑 B_x 分量与 B_z 分量(图2)。

图 3 为欧拉反褶积方法结果,图 3a、b 为单分量 的反演结果,图 3c 为 *B_z* 与 *B_x* 反演结果。可以看 出,梯度张量的反演结果比利用单个分量反演结果 要好,其解更集中,与板状体的位置对应的更好些。

4.2 井底异常

如图 4a 模型参数为:板状体上顶埋深 105 m,x 方向宽度 10 m,z 方向厚度 80 m,y 方向无限延伸;



窗口大小110,构造指数1.0;蓝色点为反演结果,红色为模型 图 3 欧拉反褶积结果

测线方位角 0°;有效磁化强度 100 000 × 10⁻³ A/m; 磁化倾角 45°;板状体倾角 0°;并在板状体正上方, 井深 100 m。

图 4b 是 B_x、B₂ 分量曲线,由于是井底异常,曲 线不完整。图 5 为欧拉反褶积方法的结果。可以看 出,当单一分量反演结果无法确定板状体上顶的深 度时,使用两个分量的梯度张量的效果会更好。

通过以上的分析可以看出,采用多个分量的梯 度张量欧拉反褶积方法,其结果比单个分量要好,尤 其是井底异常,井中磁测曲线不完整时,采用多个分 量的梯度张量欧拉反褶积方法,对井底盲矿体的定 位十分准确。



图 4 板状体与井的位置(a) 及磁异常曲线(b)



窗口大小30,构造指数1.0;蓝色点为反演结果,红色为模型 图5 欧拉反褶积结果

4.3 3D 长方体模型

图 6a 是长方体模型与钻井位置,图 6b 是长方体模型正演的井中三分量曲线。图 7 是 B₂ 分量反演结果,图 7a 是平面图,即反演结果在 xOy 平面的投影,图 7b 是 xOz 断面图。由图可以看出,反演结果的深度与模型位置一致(图 7b),但平面位置与长

方体模型的位置相差甚远(图 7a),这是因为仅凭一 口井的 B_z 分量曲线无法确定出长方体模型的位置。 图 8 是 B_x、B_y、B_z 分量反演结果,同样是一口井,但 磁力梯度张量能够较好地确定长方体的位置,该结 果对于钻探成本高、井资料较少实际情况具有重要 意义。











红色直线与红色十字符号为钻井位置,蓝色点为反演结果,绿色为模型

• 637 •

图 8 B_x 、 B_y 、 B_z 分量反演结果

5 湖北大冶铁矿 ZK18-12

大冶铁矿位于鄂东铁山侵入体南缘中段,为接触交代型的铁矿。区内出露地层主要为下三叠统大 冶群,其中与成矿关系密切、常见的近矿围岩是大冶 群第五段的厚层大理岩和白云质大理岩,次为大冶 群第四段的中厚层—厚层大理岩。由22~17线,接 触带走向由 NW—SE 向至近 EW 向至 NW—SE 向, 呈"S"形展布。低缓异常在接触带南缘形成波状扭 曲特征,本矿段的19-1线~21线就位于其中的一个 最为明显的凸扭异常处,是深部找矿的远景(图9a、 b)。图 9c 是 ZK18-2 的 $\Delta X \setminus \Delta Z$ 分量曲线,18 线位 于象鼻山矿段西部,剖面长 2.2 km。ZK18-12 井位 坐标:x = 3 345 220.969 m,y = 85 766.762 m, h =178.476 m,直孔钻进,钻进方向北偏西,孔深 865.8 m。由曲线可以看出,在 0 ~ 100 m 深处有一幅值低 缓的异常,在 400 ~ 600 m 深处有一尖锐的高峰值异 常。反演结果见图 9d,欧拉解主要集中在纵坐标 100 ~ 180 m 与 500 ~ 550 m 两个深度。钻探结果在 第一台阶,即 100 ~ 200 m 深度累计钻遇厚度 43 m 铁矿体,在第二台阶,即 500 ~ 550 m 深度钻遇厚度 3 m 铁矿体,反演结果与钻探结果十分吻合。



图9 欧拉反褶积反演结果(窗口大小30,构造指数1.0)

在大冶铁矿中段,21、22线北均有铁矿出露,已 被露天开采,铁矿体厚度 27.1 m 与 63 m。19-1线 已开采的浅部铁矿,位于地表以下,标高 0 m 以上, 铁矿体厚度 27.3 m。18 线已开采的浅部铁矿,位于 0~100 m 深处,铁矿体厚度 43 m。由此得出 22~ 18 线的浅部已开采矿体为同一矿体,构成大冶铁矿 的第一台阶矿体。

17、19、21、22 线在 400~600 m 深度之间均有 一沿接触带分布的边坡矿体,与 18 线 500~550 m 深处铁矿体的位置一致,它们的产状、形态和位置都 十分相似,这些矿体在走向上也是连接在一起的,一 起构成了第二台阶矿体,18、19、19-1、21、22 线铁矿 体厚度分别为3、3、50、3.1、28 m。它们证实了大冶 铁矿两个台阶的铁矿体空间位置关系的推测,对该 区的深部找矿具有十分重要的意义。

6 结论

将磁力梯度张量理论应用于井中三分量磁测资料的处理解释,提高了目前三分量磁测资料的解释效果,对于井旁或井底异常,张量解释方法比单分量好;对于3D模型,利用一口井的资料就能够较好地确定场源体的空间位置,这一点对于井资料的解释具有实际意义。

参考文献:

- Schmidt P W, Clark D A. The magnetic gradient tensor: Its properties and uses in source characterization [J]. The Leading Edge. 2006,25(1):75-78.
- [2] Foss C. Improvements in source resolution that can be expected from inversion of magnetic field tensor data [J]. The Leading Edge. 2006,25(1): 81-84.
- [3] Stolz R, Chwala A, Zakosarenko V, et al. SQUID technology for

geophysical exploration [C]//76th SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2006;894 – 898.

- [4] Stolz R, Zakosarenko V, Schulz M, et al. Magnetic full-tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications [J]. The Leading Edge,2006,25(2):178~180.
- [5] Jeffrey J T, Doll W E. Initial design and testing of a full-tensor airborne SQUID magnetometer for detection of unexploded ordnance[C]//74th SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004:798 - 801.
- [6] Schmidt P, David C, Leslie K. GETMAG—a SQUID magnetic tensor gradiometer for mineral and oil exploration [J]. Exploration Geophysics. 2004,35:297 – 305.
- [7] 史辉,刘天佑.利用欧拉反褶积法估计二度磁性体深度与位置[J].物探与化探,2005,29(3):230~233..
- [8] 习宇飞,刘天佑,杨坤彪,等.欧拉反褶积法用于井中磁测数据 反演与解释[J].工程地球物理学报,2008,5(2):181-186.
- [9] 张季生,高锐,李秋生,等. 欧拉反褶积与解析信号相结合的位 场反演方法[J]. 地球物理学报,2011,54(6):1634-1641.
- [10] Zhang C Y, Mushayandebvu M F, Reid A B. Euler deconvolution of gravity tensor gradient data[J]. Geophysics, 2000,65(2):512 -520.
- [11] 管志宁. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京:地质出版社,2005.
- [12] Fedi M, Florio G, A stable downward continuation by using the IS-VD method. Geophys[J]. J Int, 2002, 151: 146 – 156.
- [13] Hood P. Gradient measurement in aeromagnetic surveying [J]. Geophysics, 1965, 30: 891-902.
- [14] 姚长利,管志宁,吴其斌,等. 欧拉反演方法分析及实用技术改进[J]. 物探与化探,2004,28(2):150-155.

EULER DECONVOLUTION OF BOREHOLE THREE-COMPONENT MAGNETIC GRADIENT TENSOR AND ITS APPLICATION

LIU Tian-you¹, GAO Wen-li², FENG Jie², XI Yu-fei¹, OU Yang¹

(1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: Since the paper published in The Leading Edge (No. 1 issue of 2006) described in detail the theory, equipments and outdoor test results of magnetic gradient tensor, this technology has become one of the hot topics of magnetic prospecting methods. This paper describes the concepts and advantages of the magnetic gradient tensor. Both frequency and spatial domain methods are used to transfer borehole three-component magnetic data to magnetic gradient tensor. According to the joint inversion principle and Euler deconvolution, the joint inversion equations for magnetic gradient tensor are deduced, which enable us to flexibly inverse one or more components based on a weighted function matrix, and the technology is more common than the method mentioned in Reference [14]. The simulated results of synthetic models reveal that the magnetic gradient tensor inversion method can be accurately employed to locate the magnetic body according to borehole bottom anomalies. Concerning 3D models, only one borehole magnetic data can calculate the locations accurately. Moreover, the method was applied to interpreting the three-component magnetic gradient tensor are concentrated on the 100 to 180 m and 500 to 550 m elevations that are in accordance with the drilling results. The result confirms the geological inference that there are two steps of iron ore bodies, which has practical significance in search for ore bodies at deeper locations in Daye iron mining area.

Key words: magnetic gradient tensor; borehole three-component magnetic data; joint inversion equation; Euler deconvolution; Daye iron mine

作者简介:刘天佑(1945-),教授(博导),从事重磁勘探、地球物理数据处理的教学与科研工作,Email:liuty@ cug. edu. cn。