

井中三分量磁测的模量反演

欧洋¹, 刘天佑², 高文利¹, 冯杰¹, 邱礼泉¹

(1. 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; 2. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074)

摘要:井中三分量磁测解释通常要考虑磁性体的磁化方向,但是在剩磁或退磁影响过大的情况下,磁化方向难以确定。由于磁异常模量具有不依赖或弱依赖磁性体磁化方向的特点,而且利用井中三分量数据可以直接计算模量值,因此,笔者尝试利用井中三分量磁测的模量进行磁性体反演。首先利用井中三分量磁测数据计算模量值,然后利用模量反演二度板状体和直立长方体模型的磁性参数和几何参数,并将该方法应用于新疆某铁矿区井中磁测资料的反演解释中。结果表明,该方法不受或弱受磁化方向影响,在无法准确确定磁化方向的情况下能较准确地判断异常体的位置;优于传统的单分量 Z_n 反演方法;现场应用效果良好。

关键词:井中磁测;三分量;磁异常模量;最优化反演

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2013)04-0664-06

在以往的磁异常资料解释工作中,一般假设地下磁性体的磁化方向与地磁场方向一致,而在实际问题中由于剩磁或退磁等因素的影响,磁性体的磁化方向和地磁场方向并不是一致的,所有磁异常分量以及总磁场异常 ΔT 都受到磁化方向的影响,当实际磁化方向与地磁场方向有差异时,若仅按照地磁场方向进行解释就会出现错误。因此研究不受或弱受磁化方向影响的反演方法具有实际意义。

Nabighian^[1-2]指出磁异常总梯度模量不受或弱受磁化方向的影响^[3-4],总梯度模量被应用于地面磁测资料解释中;磁异常模量受磁化方向的影响也较小,Shearer^[5-6]利用模量数据解决剩磁反演的问题,在地磁场方向和磁化方向差异较大时依然得到了可靠的结果,Richard^[7]把模量反演应用于退磁问题中,对于强磁化率的反演取得了一定效果,然而他们均是利用地面 ΔT 数据换算得到磁异常模量或总梯度模量,不是利用真正的三分量信息。地磁场是矢量场,目前地面与航空磁测都是标量测量,磁场梯度张量测量还在研究阶段,由 ΔT 转换三分量毕竟还是利用 ΔT 数据,并没有增加新的信息,而且转换过程中会带来误差,这样会影响利用磁异常模量进行解释的可信度。相对地面磁测而言,井中磁测早就实现了三分量测量,三分量磁力仪的定位精度与分辨力有了大幅度提高^[8],这样就为井中三分量磁

测资料的解释提供了基础。

对于井中磁测的解释,国内早期主要针对井中磁测的基本理论、仪器、采集方法以及简单的定性解释方法作了详细阐述^[9-10];范志雄^[11]、张雷^[12]等通过井中磁异常矢量分布特征作了一些定性和半定量的解释;随着可视化技术在井中磁测资料解释中应用,熊选文^[13]、邹美玲^[14]等开发的井中磁测可视化软件简化了解释流程,习宇飞等^[15]将欧拉反褶积法应用于井中磁测资料解释,实现了井中磁测的快速反演。由于三分量提供了更多的信息,因此高精度井中三分量磁测是矿山深部找矿的有效手段^[16],习宇飞^[17]利用井中三分量联合反演得到比单分量反演更好的结果。然而井中磁测资料处理和解释的方法落后于地面磁测与其他地球物理方法,即使一些井中磁测解释方法已经发展到定量解释,但是它们均是在已知准确磁化方向的前提下进行的,实际情况中很难通过钻孔资料得到准确的磁化方向,因此考虑使用弱受磁化方向影响的模量反演方法将在井中磁测定量解释中具有重要的作用。笔者利用井中三分量数据直接计算模量值,然后根据广义线性反演理论,利用模量数据反演二度板状体和直立长方体模型的磁性参数和几何参数,并将该方法应用于新疆某铁矿区井中磁测资料的反演解释中。

1 方法原理

1.1 磁异常模量与磁化方向的关系

由重磁位关系的泊松公式^[18],可以得出二度磁性体产生的各分量:

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{\mu_0 M}{4\pi G\sigma} (\alpha V_{xz} + \gamma V_{zz}), \\ H_a &= \frac{\mu_0 M}{4\pi G\sigma} (\alpha V_{xx} + \gamma V_{zx}). \end{aligned} \quad (1)$$

其中, H_a , Z_a 为磁场的水平分量与垂直分量, μ_0 为真空中的磁导率, M 为磁化强度, G 为引力常数, σ 为密度差, α, γ 为磁化强度的方向余弦, $V_{xx}, V_{zz}, V_{xz}, V_{zx}$ 为引力位 V 在 x 和 z 方向二阶偏导数和混合偏导数。

由上述两式可以得到二度体模量 T_a 的表达式:

$$\begin{aligned} T_a &= \sqrt{H_a^2 + Z_a^2} = \\ &= \frac{\mu_0 M}{4\pi G\sigma} (\alpha^2 V_{xx}^2 + \gamma^2 V_{zx}^2 + 2\alpha\gamma V_{xx} V_{zx} + \\ &\quad \alpha^2 V_{xz}^2 + \gamma^2 V_{zz}^2 + 2\alpha\gamma V_{xz} V_{zz})^{1/2}. \end{aligned} \quad (2)$$

由于 $V_{xz} = V_{zx}, V_{xx} = -V_{zz}$, 可以得到:

$$T_a = \frac{\mu_0 M}{4\pi G\sigma} [(\alpha^2 + \gamma^2)(V_{xz}^2 + V_{zz}^2)]^{1/2}, \quad (3)$$

而 α, γ 满足 $\alpha^2 + \gamma^2 = 1$, 所以有

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{\mu_0 M}{4\pi G\sigma} (V_{xx}^2 + V_{xz}^2) = \\ &= \frac{\mu_0 M}{4\pi G\sigma} (V_{zz}^2 + V_{xz}^2). \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,二度体的磁异常模量表达式中不含与磁化方向有关的量,因此对于任意二度体,磁异常模量的大小与磁化方向无关,在未知磁化方向的情况下,可以利用磁异常模量进行解释。

对于三度体而言,难以直接得出磁异常模量与磁化方向的关系,笔者设计直立长方体模型,磁化强度 $M = 120$ A/m;直立长方体的中心埋深 $h = 400$ m;直立长方体的长宽高分别为 $a = 200$ m, $b = 100$ m 和 $c = 100$ m。通过不同磁化条件下的模型正演计算结果说明磁异常模量与磁化方向的关系。

图1是长方体模型在不同磁化方向下计算得到的井中磁异常曲线图。其中实线为磁化倾角 $I_m = 35^\circ$, 磁化偏角 $D_m = -22^\circ$ 时的三分量和模量曲线,虚线为磁化倾角 $I_m = 65^\circ$, 磁化偏角 $D_m = 20^\circ$ 时的三分量和模量曲线。对比图1中的曲线可以看出,在不同的磁化方向下计算得到的三度体磁异常分量变化比磁异常模量大,可见磁异常模量受磁化方向的影响较磁异常分量要小。

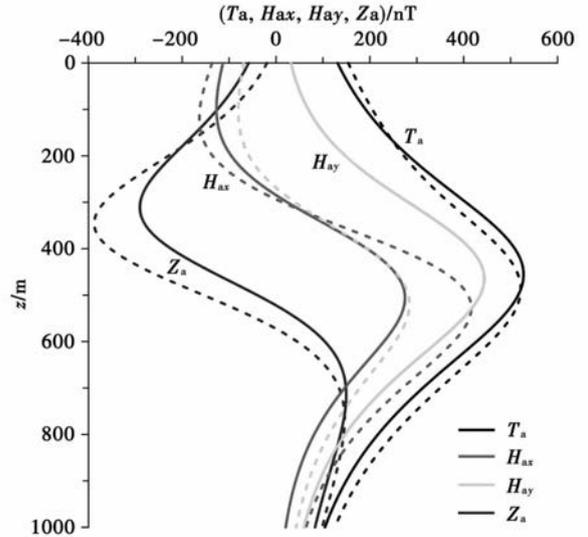


图1 三分量 H_{ax} 、 H_{ay} 、 Z_a 和模量 T_a 在不同磁化条件下的曲线

1.2 磁异常模量反演

对于非线性反演问题,可以利用线性化的方法将模型数据和观测数据近似写成

$$Gm = d. \quad (5)$$

G 为核函数矩阵, m 为模型参数, d 为由井中三分量计算得到的模量数据,考虑预测误差和模型长度最小的解,那么目标函数写成^[19]

$$E = (d - Gm)^T W (d - Gm) + \lambda^2 m^T m, \quad (6)$$

W 为观测数据权重, λ 为阻尼因子。求目标函数 E 的极小值, $E \rightarrow \min$, 由 $\partial E / \partial m = 0$, 得到方程(5)的阻尼最小二乘解

$$m^{\text{est}} = (G^T G + \lambda^2 I)^{-1} G^T W d. \quad (7)$$

2 模型试验

2.1 二度板状体模型

理论模型为一个沿走向无限延伸斜磁化二度板状体,板状体的几何参数见表1所示。在 $x = 500$ m 设置一口斜钻井,井深 1 000 m,顶角 $\alpha = \arctan 0.1$,点距 20 m。磁性体有效磁化强度 $M_s = 30$ A/m,磁化倾角 $i_s = 60^\circ$,地磁场倾角 $I = 30^\circ$ 。

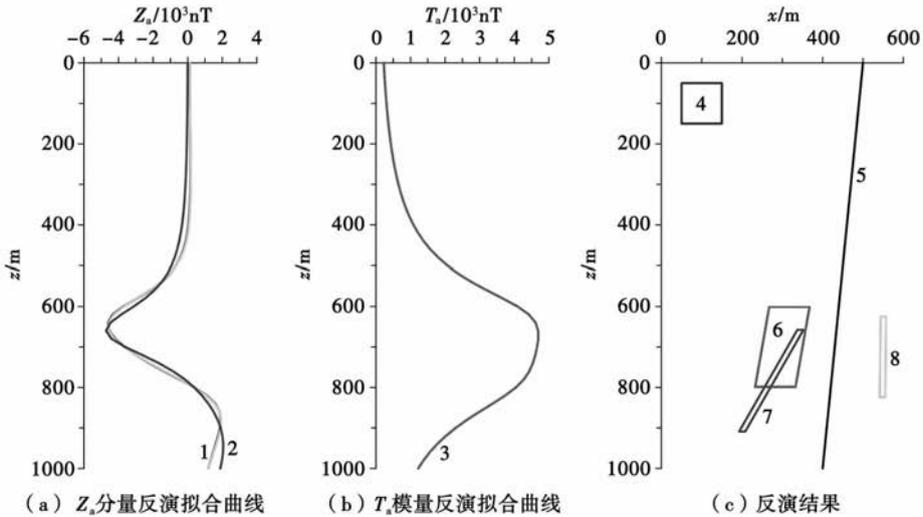
在未知磁化方向的条件下,一般可以将磁化倾角作为未知量或者只考虑感磁的影响(即将地磁倾角作为磁化倾角),就可以利用 Z_a 分量反演包括磁化倾角在内的 7 个参数,或者将地磁倾角作为磁化倾角,反演不含磁化倾角的其他 6 个参数,而由于二度体的磁异常模量与磁化方向无关,那么利用模量 T_a 反演时只需确定二度板状体形态、位置和磁化强度 6 个参数,而不需要估计磁化倾角或反演磁化倾角。

下面的3组试验中均采用了一致的初始模型,反演迭代500次(表1)。第一组将地磁倾角 30° 作为磁化倾角利用 Z_a 分量反演6个参数,反演拟合曲线(图2a中曲线2)和理论曲线形态基本拟合,但是反演结果(图2c中7)比理论模型窄,而且反演磁化强度和理论相差较大;第二组将磁化倾角作为未知量利用 Z_a 分量反演7个参数,反演拟合曲线(图2a

中曲线1)和理论曲线拟合较好,但是反演结果(图2c中8)的位置不准确,板状体宽和磁化强度和理论值差异很大;第三组利用模量 T_a 反演,不需要磁化倾角参数,得到和理论模型几乎一致的结果,同时由于减少对磁化倾角的反演,共迭代260次就到达了精度要求,相对磁异常分量反演更加稳定。

表1 二度板状体模型反演结果

模型	中心坐标 x_0/m	中心埋深 z_0/m	宽度 $2b/m$	延伸长度 $2l/m$	板状体倾角 $\alpha/(\circ)$	磁化强度 $M_s/(A/m)$	磁化倾角 $i_s/(\circ)$	相对拟合 偏差/%
理论模型	300	700	100	200	100	30	60	
初始模型	100	100	100	100	90	20	30	
Z_a 反演 6个参数	272.59	783.23	15.07	289.47	119.88	195.95		51.0
Z_a 反演 7个参数	549.52	724.12	13.47	198.85	90.68	212.86	-37.36	4.90
T_a 反演	300.00	700.00	100.01	200.00	100.00	30.00		0.0001



1— Z_a 理论曲线和 Z_a 反演7个参数拟合曲线;2— Z_a 反演6个参数拟合曲线;3— T_a 理论曲线和反演拟合曲线;4—初始模型;5—钻孔位置;6—理论模型和 T_a 反演模型;7— Z_a 反演6个参数结果;8— Z_a 反演7个参数结果

图2 二度板状体反演结果对比

表2 直立长方体模型反演结果

模型	中心坐标 x_0/m	中心坐标 y_0/m	中心埋深 z_0/m	长度 a/m	宽度 b/m	高度 c/m	磁化强度 $M_s/(A/m)$	磁化倾角 $i_s/(\circ)$	磁化偏角 $D_m/(\circ)$	相对拟合 偏差/%
理论模型	400	450	250	200	100	100	30	60	10	
初始模型	600	550	100	50	50	50	10	45	-3	
Z_a 反演 9个参数	405.30	449.90	249.98	262.03	199.67	161.91	6.83	60.49	9.62	7.06
Z_a 反演 7个参数	378.93	431.39	261.82	542.78	224.14	170.98	3.92			19.0
T_a 反演	423.19	440.64	245.58	231.0	88.30	113.8	28.55			2.98

2.2 直立长方体模型

理论模型为一个直立长方体模型,长方体的几何参数见表2所示。磁化强度 $M = 30 A/m$,磁化倾角 $I_m = 60^\circ$,磁化偏角 $D_m = 10^\circ$,地磁倾角 $I = 45^\circ$,地磁偏角 $D = -3^\circ$ 。三个钻孔的位置分别为(400 m, 250 m);(600 m,700 m);(250 m,650 m),如图3所示。每个钻孔51个测点,点距10 m,钻孔垂直,横剖面磁方位角为 0° 。分别利用 Z_a 分量和 T_a 模量进行反演。

设计了3组对比试验,选取相同的初始模型,反演确定长方体形态和磁性参数。第一组利用 Z_a 数据反演时,直接反演包括磁化方向的9个参数,反演结果如图4c中模型9,模型的位置与理论较接近,但大小和理论模型有一定差距;第二组将地磁场方向作为磁化方向,利用 Z_a 数据反演不含磁化方向的7个参数,由于估计的磁化方向并不准确,使得 Z_a 反演结果与理论值出现了偏差(图4c中模型10);

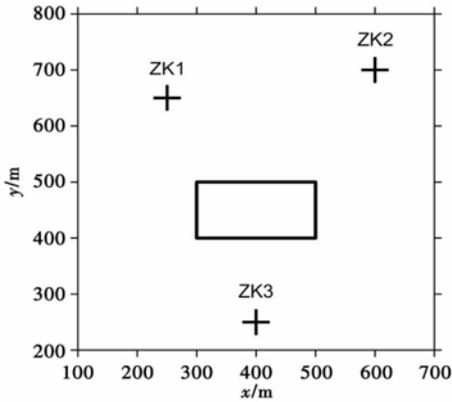
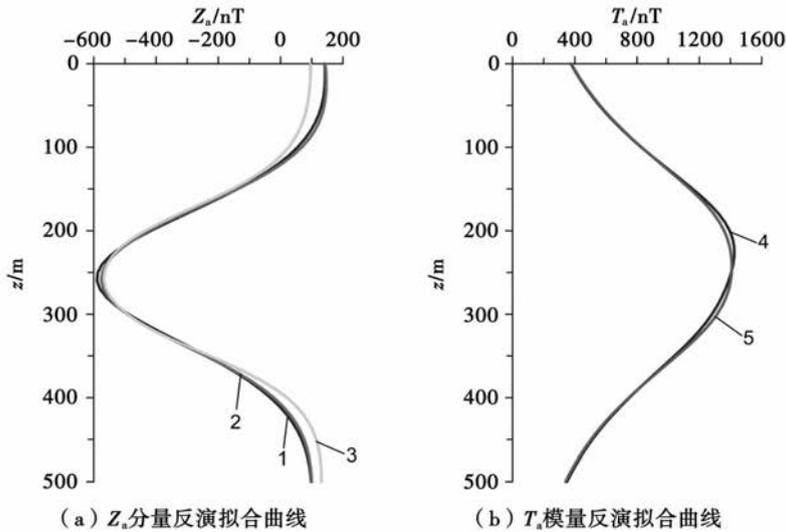
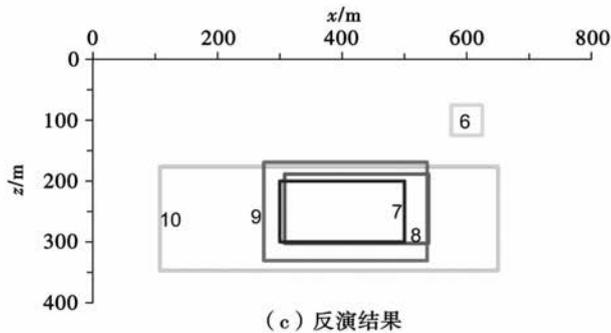


图3 钻孔平面位置



(a) Z_a 分量反演拟合曲线

(b) T_a 模量反演拟合曲线



(c) 反演结果

1— Z_a 理论曲线;2— Z_a 反演 9 个参数拟合曲线;3— Z_a 反演 7 个参数拟合曲线;4— T_a 理论曲线;5— T_a 反演拟合曲线;6—初始模型;7—理论模型;8— T_a 反演结果;9— Z_a 反演 9 个参数结果;10— Z_a 反演 7 个参数结果

图4 ZK3 井反演拟合曲线和直立长方体模型反演结果对比

深约 60 m,形态如图 5a 中的矿体 1 所示,然而地面磁测曲线由于受到干扰对深部矿体不敏感,不能够判断矿体的深部形态,因此选取旁侧 ZK4 井中三分量来确定矿体的延伸状况。

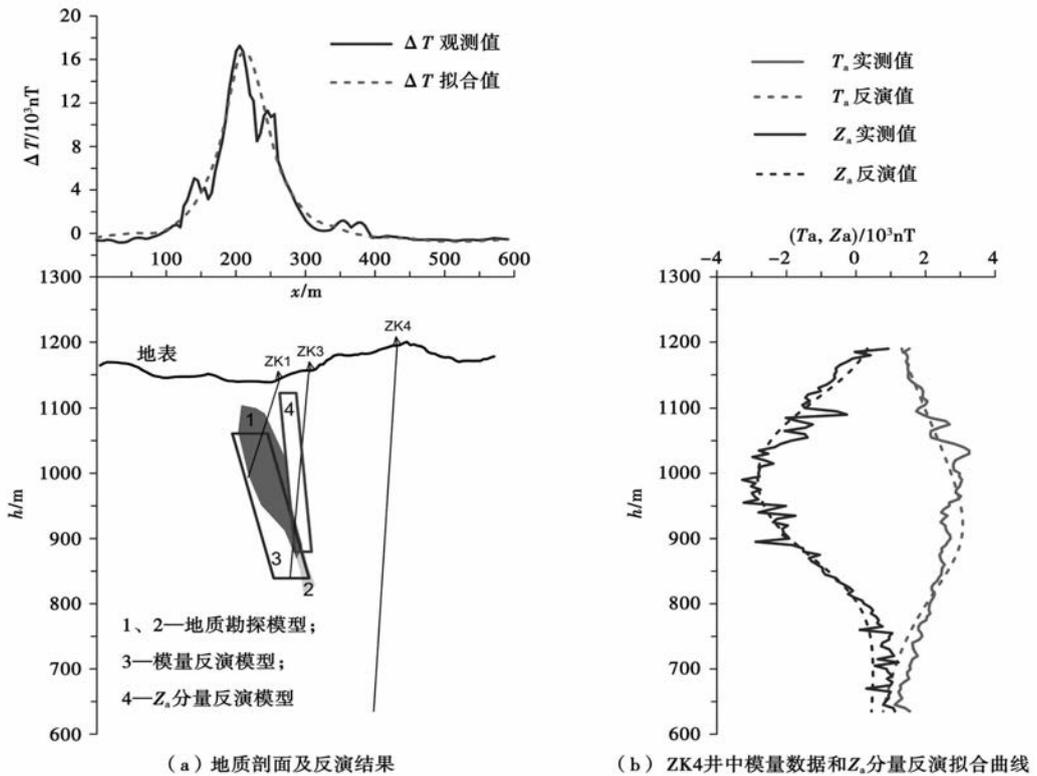
笔者设计二度板状体模型,根据地面磁测解释的结果建立初始模型,利用三分量计算的磁异常模量和 Z_a 分量分别进行反演,图 5b 是利用 T_a 模量和 Z_a 分量反演拟合曲线,图 5a 中的 3 是利用 T_a 反演

第三组也将地磁场方向作为磁化方向,利用 T_a 数据反演不含磁化方向的 7 个参数,虽然按地磁场方向估计的磁化方向不准确,但是 T_a 数据反演得到较好的结果,得到的模型参数均比前两组结果更接近理论模型,因此尽管在估计的磁化方向不准确时,利用三维模量数据反演的结果比分量反演的结果更准确。

3 某矿区井中磁测模量反演实例

新疆某区沉积变质型铁矿,根据地面磁测资料和 ZK1、ZK3 钻孔控制,得到矿体得到主矿体顶部埋

得到的模型,图 5a 中的 4 是利用 Z_a 分量反演得到的模型。 Z_a 分量反演结果受磁化方向影响,不能够较准确反映矿体的位置,而利用模量反演,由于可以不考虑磁化方向,因此得到的模型能够大致反映矿体的形态,反演得到的矿体在穿过钻孔 ZK3 后向下还有一定的延伸长度,通过进一步精细解释和打钻验证了矿体 2 的存在,由此也验证了利用井中模量反演的有效性。

图5 某矿区井中模量和 Z_a 分量反演结果

4 结论

笔者介绍了利用井中磁测三分量的模量数据反演的基本方法,通过模型试验和实际案例说明了在磁化方向未知或者不准确的情况下,利用模量数据反演依然能得到准确的结果。通过井中三分量计算模量数据,然后利用模量数据反演能够最大程度减少磁化方向的影响,增加解释的可信度,同时由于减少了对磁化方向参数的反演,降低的参数空间的维数,使得反演更加稳定,因此对于磁化方向未知或者不准确的情况,利用模量数据反演具有实际意义。

因此,笔者建议在井中磁测资料解释中应该重视井中三分量磁测的模量反演,它不仅能够避开剩磁或退磁影响的困扰,而且充分地利用了三分量的信息。

参考文献:

- [1] Nabighian M N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section; its properties and use for automated anomaly interpretation[J]. *Geophysics*, 1972, 37(3): 507-517.
- [2] Nabighian M N. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations[J]. *Geophysics*, 1984, 49(6): 780-786.
- [3] Roest W R, Verhoef J, Pilkington M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal[J]. *Geophysics*, 1992, 57(1): 116-125.
- [4] Paine J, Haederle M, Flis M. Using transformed TMI data to invert for remanently magnetized bodies [J]. *Exploration Geophysics*, 2001, 32(4): 238-242.
- [5] Shearer S E, Li Yaoguo. 3D inversion of magnetic total gradient data in the presence of remanent magnetization[C]//74th Annual International Meeting, SEG, Technical Program Expanded Abstracts, 2004, 23: 774-777.
- [6] Sarah E. Shearer. 3-D inversion of magnetic data in the presence of remanent magnetization[D]. Department of Geophysics Colorado School of Mines, Golden, 2005.
- [7] Krahenbuhl R A, Li Yaoguo. Influence of self-demagnetization effect on data interpretation in strongly magnetic environments [G]. *SEG Expanded Abstracts*, 2007, 26: 713-717.
- [8] 蔡耀泽. 高精度 JCX-3 型井中三分量磁力仪的研制[J]. *地质装备*, 2006, 7(5): 22-23.
- [9] 陕西省地质局第二物探队. 井中三分量磁测[M]. 北京:地质出版社, 1974.
- [10] 地质矿产部第一综合物探大队. 井中磁测[M]. 北京:地质出版社, 1985.
- [11] 范志雄, 陈石, 舒秀锋. 利用井中磁测异常确定磁性体走向的方法[J]. *地质找矿论丛*, 2006, 21(增刊): 160-162.
- [12] 张雷, 苑守成, 罗先中. 井中三分量磁测找磁铁矿中应用的一个实例[J]. *物探与化探*, 2007, 31(3): 202-210.
- [13] 熊选文, 邹长春. 井中三分量磁测数据转换及绘图软件的设计和实现[J]. *物探与化探*, 2008, 32(6): 685-689.
- [14] 邹美玲, 陈红, 蔡耀泽. 三分量井中磁测及软件开发[J]. *地质装备*, 2009, (04): 24-27.
- [15] 习宇飞, 刘天佑, 杨坤彪. 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.

- [16] 王庆乙,李学圣,徐立忠. 高精度井中三分量磁测是矿山深部找矿的有效手段[J]. 物探与化探,2009,33(3):235-244.
- [17] 刁宇飞,刘天佑,刘双. 井中磁测三分量联合反演[J]. 石油地球物理勘探,2012,47(2):344-352.
- [18] 管志宁. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京:地质出版社,2005:109-110,119-121.
- [19] 姚姚. 地球物理反演基本理论与应用方法[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2002:65-68.

MODULUS INVERSION OF THREE-COMPONENT BOREHOLE MAGNETIC DATA

OU Yang¹, LIU Tian-you², GAO Wen-li¹, FENG Jie¹, QIU Li-quan¹

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

Abstract: It is usually necessary to consider the magnetization direction of the magnetic body in the interpretation of three-component borehole magnetic data; however, it is rather difficult to determine the magnetization direction under the strong effect of remnant magnetization or demagnetization. The modulus of magnetic anomaly is not dependent or insignificantly dependent on the magnetization direction, and modulus can be calculated directly by using three-component borehole magnetic data. The authors hence tried to inverse the model parameters with the modulus of three-component borehole magnetic data. First, the value of the modulus was calculated by using three-component borehole magnetic data. Then, the geometrical and magnetic parameters of 2D tabular body and vertical cube were inverted with the modulus data. Finally, this method was applied to the borehole magnetic data of an iron ore mine in Xinjiang. The results show that the modulus inversion result is less influenced by magnetization direction when magnetization direction is unknown or inaccurate; the modulus inversion is superior to the traditional inversion using single-component Z_a and receives good geological results.

Key words: borehole magnetic data; three-component; magnetic anomaly modulus; optimized inversion

作者简介: 欧洋(1987-),男,中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院在读硕士研究生,研究方向为地球物理数据处理与解释研究。