

doi:10.3799/dqkx.2015.185

Tilt 梯度算法的改进与应用:以江苏韦岗铁矿为例

刘鹏飞, 刘天佑, 杨宇山, 张恒磊, 刘 双

中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要: 为解决 Tilt 梯度存在的“解析奇点”这一问题, 介绍了 Tilt 梯度位场边界识别方法, 并提出了改进算法. 理论分析与模型计算表明, 改进的 Tilt 梯度方法继承了垂向一次导数与传统 Tilt 梯度以零值线识别边界的性质, 相对其他的导数类方法(如水平总梯度模等)能够更好地识别深部弱异常; 此外, 改进的 Tilt 梯度方法物理意义明确, 从理论上避免了方法的畸变性. 对韦岗矿区磁异常分析表明, 除工区南侧由东向西分布的 A、B、C 3 个主体异常外, 尤其是工区 5 号线以北的弱异常 D 得到显著增强. 结合钻孔资料以及磁异常反演结果, 认为弱异常 D 可能是由深部隐伏矿体的影响产生, 结合二度半人机交互反演推测矿体埋藏深度在 1 000~1 200 m. 6 号线上的 DH6-6 见矿钻孔位于异常 D 的东侧, 该钻孔钻遇的薄层铁矿体位置与弱异常 D 的范围相吻合; 另外 DH6-7 未见矿钻孔位于该弱异常范围以外, 若向西在 5 号线以北布置钻孔, 则有见矿可能.

关键词: Tilt 梯度; 边界识别; 危机矿山; 韦岗铁矿; 地球物理.

中图分类号: P592

文章编号: 1000-2383(2015)12-2091-12

收稿日期: 2014-12-18

An Improved Tilt Angle Method and Its Application: A Case of Weigang Iron-Ore Deposit, Jiangsu

Liu Pengfei, Liu Tianyou, Yang Yushan, Zhang Henglei, Liu Shuang

Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In order to solve the “singularity” problem of Tilt angle, an improved tilt angle method to detect the field source boundaries is proposed in this paper. Theoretical simulations reveal that improved Tilt angle method inherits the properties of the 1st order vertical derivative and traditional tilt gradient that identifies boundaries by zero value line and it is better for the deep weak anomalies identification than other methods such as the total module of horizontal gradient. Besides, the improved Tilt angle method avoids the abnormal degeneration due to its clear physical significance. Magnetic anomalies of the Weigang iron-ore deposit is analyzed and anomaly D is significantly enhanced except for three main anomalies of A, B, C, which indicates that the weak anomaly D is caused by deep concealed orebodies. The orebody depth is found as 1 000–1 200 m, based on the interactive inversion results of the 2.5 dimension. DH6-6 drilled hole is located in line 6, exactly on the east side of anomaly D, which coincides with the boring drilling of thin ore body. No-mine DH6-7 drilled hole is located at the outside of the weak anomaly area. It is possible that iron orebodies may be discovered if a drilled hole is arranged to the west and the north of Line 5.

Key words: Tilt angle; boundary detection; crisis mining; Weigang iron-ore deposit; geophysics.

0 引言

地质体边缘识别在重、磁资料处理解释中占据相当重要的地位, 在重、磁异常边缘识别方法中, 前人做过大量的研究, 并提出了多种方法, 可归纳为 3

大类, 即数理统计、数值计算和其他类(王万银等, 2010): (1)数理统计类边缘识别方法包括小子域滤波和归一化标准差; (2)数值计算类基本方法有垂向导数(VDR)、水平总梯度模(THDR)、解析信号振幅(ASM)和 Tilt 梯度、 θ 图两种比值法; (3)其他类

基金项目: 国土资源部“十二五”科研专项(No.1212011121101); 全国危机矿山接替资源找矿专项方法技术总结磁法专题项目(No.20089928).

作者简介: 刘鹏飞(1989-), 男, 博士在读, 主要从事地球物理学重、磁数据处理方法与解释研究. E-mail: liupf0828@163.com

引用格式: 刘鹏飞, 刘天佑, 杨宇山, 等, 2015. Tilt 梯度算法的改进与应用: 以江苏韦岗铁矿为例. 地球科学——中国地质大学学报, 40(12): 2091–2102.

方法主要包括方向滤波法(Sykes and Das, 2000)、图像增强技术(夏玲燕等, 2008; 赵希刚等, 2008)以及磁异常分量转换(Gerovska and Araúzo-Bravo, 2006)。最早提出的目标场源体边缘识别方法是垂向导数法(Hood and McClure, 1965), 利用零值线识别地质体边界, 适用于化极磁异常或换算所得磁源重力异常以及重力异常; 同年, Bhattacharya(1965)提出利用频率域垂向二次导数法识别场源体边界, 由于该方法具有高滤波的性质, 因此在深部场源边界识别中达不到较理想的效果; Nabighian(1972)提出了二维解析信号方法, 并证明了其不受磁异常分量和磁化方向的影响, 三维解析信号的理论提出后, 一直没有得到实际应用, 直到 Roest *et al.*(1992)首次利用磁力异常三维解析信号振幅识别地质体的边缘位置; 经过多年的发展, 在理论和认识上趋于成熟, 三维解析信号振幅受磁异常分量和磁化方向的影响逐渐明确(Li, 2006), 只是相比于其他方法, 该方法受磁异常分量和磁化倾角的影响较小(管志宁和姚长利, 1997; Huang and Guan, 1998), 但受地质体埋深的影响较大, 即随着埋深的增加, 其极大值位置会快速收敛到形体的“中心位置”(王万银, 2012); 有学者提出了在倾斜台阶的条件下利用最大水平导数法来探测其边界(Grauch and Cordell, 1987); Hood and Tskey(1989)采用垂向导数法对化极磁异常进行了处理, 通过零值线确定垂直地质体的边缘位置, 并提出了适用于定位倾斜二度体上顶边缘的方法, 即通过垂向导数极大值与极小值连线与垂向导数的交点来确定。后来, 利用最大水平梯度识别场源体边界的方法相继提出; 在总结前人研究成果的基础上, 深入讨论了水平方向导数极大值识别密度和磁性体边界的方法(余钦范和楼海, 1994), 指出当目标地质体的边界不垂直时, 水平梯度模的极大值与地质体边界位置有所差异, 此外, 对于一些相对而言厚度较薄的地质体, 水平梯度极大值将不能够如实地反映出它们的边界位置; 传统导数类边缘识别方法均为同阶导数之间的组合, 增强性滤波器利用了不同阶导数之间的非线性组合(马国庆等, 2012), 对地质体边界识别效果较好, 能够同时对深部与浅部地质体的边界清晰地显示; 随着对构造细节以及弱异常信息提取的需求增加, 新的边缘识别方法不断涌现出来, 如各项异性标准化方差法(张恒磊等, 2011)、均方差归一化垂向梯度法(王彦国等, 2012)和归一化水平总梯度模法(Ma and Li, 2012)等。

在多场源同时存在且埋深差别较大的情况下, 传统导数类方法边界识别能力不足。为了解决这一

问题, Miller and Singh(1994)首次提出了 Tilt 梯度的定义, 探测的倾角范围为 $0 \sim \pi/2$, Tilt 梯度法对于场源体的深度不敏感, 受其场源埋深的限制较小, 因此, 对埋深不同的多场源异常体的边缘识别效果较好; Fairhead and Green(2004)提出 Tilt 梯度的水平导数的概念, 不同倾角的异常体边界的识别能力得到增强。

传统 Tilt 梯度中, 存在分母为零的畸变, 本文提出了一种改进的 Tilt 梯度法, 将该方法应用于江苏韦岗铁矿 1: 2 000 ΔZ 磁异常精细处理, 并结合二度半人机交互反演方法对矿体位置与埋深进行了推断解释; 前人通过开展地质与物探工作认为, 江苏韦岗勘探工区为两层矿, 第 1 层矿已被控制或开采, 第 2 层矿不完全清楚, 存在的主要问题是深部特征没有论述, 没能够较好地提取出深部弱异常信息, 本文将改进的 Tilt 梯度法应用于江苏韦岗铁矿实际资料的处理, 通过运用改进的 Tilt 梯度法, 提取出工区北部弱异常 D, 笔者认为弱异常 D 可能是深部隐伏矿体的影响, 并获得了磁性体的边界, 该边界对于查明韦岗铁矿的分布范围提供了线索, 为扩大老矿山的远景储量提供了重要依据。

1 方法原理

1.1 Tilt 梯度

梯度是异常体、构造带等在位场中变化率最大的地方。Miller and Singh(1994)给出了 Tilt 梯度(Tilt Derivative)的数学定义, 并用于重磁源边缘识别。定义方法如图 1 所示:

图中: $\frac{\partial T}{\partial x}$ 是总场 T 沿 x 方向的导数; $\frac{\partial T}{\partial y}$ 是总场 T 沿 y 方向的导数; $\frac{\partial T}{\partial z}$ 是总场 T 沿垂向方向的导数; $\frac{\partial T}{\partial h}$ 是总场 T 的水平总梯度模; α_{tilt} 为 Tilt 梯度。

Tilt 梯度 α_{tilt} 的数学定义为: 重力异常及其化极磁异常的垂向导数 $\frac{\partial T}{\partial z}$ 与水平总梯度模 $\frac{\partial T}{\partial h}$ 的比值的反正切值, 即:

$$\alpha_{\text{tilt}} = \arctan\left(\frac{\text{垂向导数}}{\text{水平总梯度模}}\right) = \arctan \frac{\partial T / \partial z}{\partial T / \partial h}, \quad (1)$$

式中: $\frac{\partial T}{\partial h} = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$. T 表示化极磁异

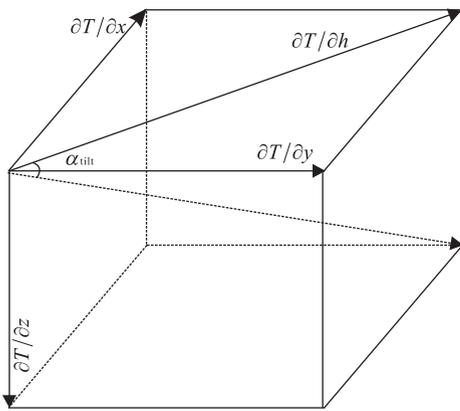


图 1 Tilt 梯度法的几何定义

Fig.1 Geometric definition of Tilt angle method

常, T 的垂向一阶导数在目标地质体上方为正值, 在目标地质体外围为负值, 在边界处取得零值; 由 $\partial T/\partial h$ 的表达式可知, $\partial T/\partial h$ 即水平总梯度模值总为正值, 且在目标地质体边界处取得最大值. 对于 Tilt 梯度而言, 极大值对应于目标地质体的中心位置, 零值线对应于边界位置, 这也是该方法识别场源体边界的理论依据. 深部地质体引起的异常曲线较浅部而言平缓一些, 水平方向导数和垂向方向导数数值都较小, 根据公式(1)计算, 将其值放大, 突出深部弱异常信息, 这是 Tilt 梯度法在边界识别中能够得到广泛应用的原因之一.

1.2 Tilt 梯度的改进算法

通过对前人成果的总结和凝练以及对大量数值的模拟计算, 在深刻领会 Tilt 梯度法的基础之上, 考虑到存在的“解析奇点”这一问题, 为了避免分母的无限小以及计算结果的畸变现象, 本文提出了一种改进的 Tilt 梯度边界识别方法(improved tilt), 记作 α_{imlt} , 定义式为(参数如图 1 所示):

$$\alpha_{\text{imlt}} = \arctan \frac{\partial T/\partial z}{\sqrt{(\partial T/\partial x)^2 + (\partial T/\partial y)^2 + (\partial T/\partial z)^2}}. \quad (2)$$

改进的理论基础为: (1)改进的 Tilt 梯度继承了垂向一次导数与传统 Tilt 梯度的优良性质, 即通过零值线来识别地质体边界. 传统方法中采用了

$$\frac{\partial T/\partial z}{\sqrt{(\partial T/\partial x)^2 + (\partial T/\partial y)^2}}, \quad \text{本文改进为}$$

$$\frac{\partial T/\partial z}{\sqrt{(\partial T/\partial x)^2 + (\partial T/\partial y)^2 + (\partial T/\partial z)^2}}, \quad \text{改进前后分}$$

子均为 $\partial T/\partial z$, 因此, 从零值线识别边界的视角来看, 文中给出的不同形式的方法与传统 Tilt 梯度法具有等价性; (2)在原始 Tilt 梯度公式中, 分母为水

平总梯度模 $\frac{\partial T}{\partial h} = \sqrt{(\frac{\partial T}{\partial x})^2 + (\frac{\partial T}{\partial y})^2}$, 在背景场区域, x 和 y 方向上的水平方向导数分别趋于 0, 所求得水平总梯度模也趋近于 0, 存在“解析奇点”, 造成计算结果不稳定(王万银等, 2010), 导致垂向导数与该水平总梯度模比值计算在背景场区域产生高幅值的畸变异常, 虽然这种畸变可以通过反正切变换缩小在 $\pm 90^\circ$ 的范围内, 但其计算的震荡性是客观存在的; (3)在改进的 Tilt 梯度 α_{imlt} 公式中加入了垂向一次导数 $\partial T/\partial z$ 一项, 这使得归一化的分母项由原先的水平总梯度模变为解析信号振幅, 从理论上避免了分母的无限小, 因此保证了计算的稳定性.

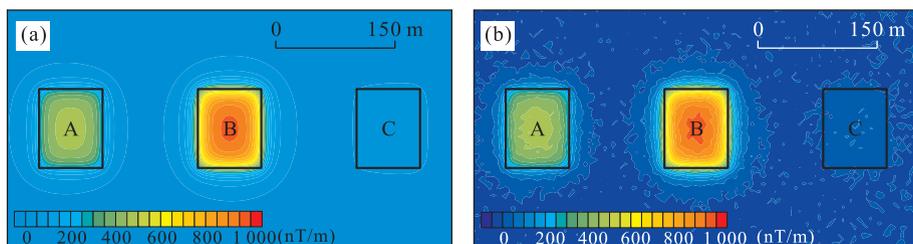
本项目研究动机与改进的必要性为: 自从 Tilt 梯度算法提出以来, 它得到了广泛的应用, 国内刘金兰等人对其作了较详细的分析, 并且获得了一定的应用效果(刘金兰等, 2007; 刘银萍等, 2012). 在肯定 Tilt 梯度算法具有优良效果的同时, 笔者注意到传统 Tilt 梯度方法在计算时存在畸变, 在实际资料处理中, 通过比值计算, 在异常平缓区出现了畸变现象, 虽然通过反正切变换可以降低这种畸变, 但依旧会影响识别效果. 本研究在继承传统 Tilt 梯度性质基础之上, 用解析信号振幅改进原分母中的水平总梯度模, 保证计算的稳定性. 从零值线角度看, 两者的零值线位置一致, 或者说它们都与垂向一次导数的零点位置一致.

2 模型试验

本文为了论证改进的 Tilt 梯度法的正确性和有效性, 总共设计不包含噪声和包含了一定噪声的两种理论模型, 下面首先通过模型试验结果展示该方法的正确性, 然后通过对实际资料的处理解释, 显示其优越性.

为了验证本文方法, 文章中设计了一个直立长方体组合模型, 包含 3 个直立长方体, 上底埋深都为 10 m, 形状相同, 唯一变化的参数为磁化强度, 这样在结果分析中具有很强的参照性. 模型位置平面投影如图 2 所示, 模型参数见表 1. 不考虑剩磁, 正演磁异常如图 2 所示, 由模型 B 引起的主异常非常明显, 受该主异常的影响, 相邻模型 A 和 C 所引起的异常幅值相对较小, 尤其是模型 C 对应的异常难以识别.

为了识别 3 个模型体位置, 笔者采用了水平总梯度模、垂向一次导数、传统 Tilt 梯度以及改进了

图 2 正演 ΔT 磁异常Fig.2 Magnetic ΔT anomalies

a. 不含噪声的原始异常; b. 包含 5% 噪声的正演异常; 图中黑线框为实际模型位置

表 1 模型参数

Table 1 The model's parameters

模型编号	上底埋深(m)	方向长度 x, y, z (m)	磁化强度(A/m)	磁化倾角($^{\circ}$)	磁化偏角($^{\circ}$)
A	10	80,100,200	1.0	90	0
B	10	80,100,200	2.0	90	0
C	10	80,100,200	0.1	90	0

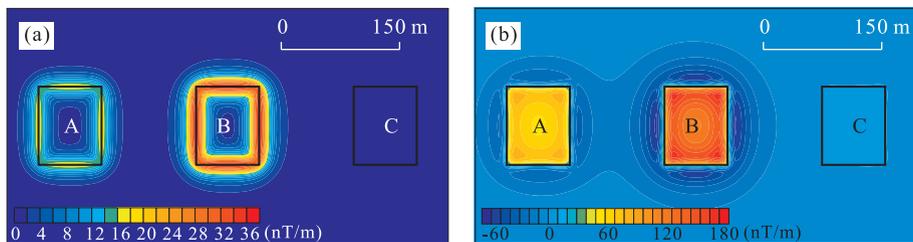


图 3 水平总梯度模(a)和垂向一次导数(b)

Fig.3 Total module of horizontal gradient (a) and 1^{st} order vertical derivative (b)

的 Tilt 梯度方法进行处理,并将结果对比分析;水平总梯度模(图 3a)极大值位置对应于地质体边界,对浅源强幅值异常识别效果好;垂向一次导数(图 3b)极大值对应于场源中心位置,零值线对应于地质体边界,该方法对浅源强幅值异常识别效果好。纵观这两类传统的导数类方法,它们都属于高通滤波器,突出浅部异常,压制深部异常,因此,图 3 的结果都对 C 异常的识别欠佳;事实上,垂向一次导数法可通过零线直接识别出模型体 C 的边界,但其幅值受相邻浅源强幅值异常影响较大,降低了有效异常显示的直观性。

图 4 是分别采用传统 Tilt 梯度法和本文改进的 Tilt 梯度法对图 2a 中不含噪声的磁异常边界识别结果,与之前的水平总梯度模和垂向一次导数结果相比,有显著的改善,最明显的特点体现在对模型体 C 引起的弱异常的识别,说明以上两种方法受相邻地质体的影响较小,增强了方法的实用性。受场源体埋深的影响,所识别的场源体边界与实际边界之

间具有一定的差距。图 4b 是采用本文改进的 Tilt 梯度计算结果,实现了对 3 个地质体边界的识别,极大值对应于模型体中心位置,仅从零值线识别边界的视角来看,文中给出的不同形式的方法与传统 Tilt 梯度法具有等价性;但从识别所得成果图件的效果而言,改进的 Tilt 梯度结果避免了背景场区域产生高幅值的畸变现象,确保了计算的稳定性。

在生产实践中,野外采集的实际资料或多或少包含一定的噪声,为了验证改进的 Tilt 梯度法性能的优越以及普遍适用性,对图 2b 含 5% 噪声的正演结果进行了相应的处理,考虑到导数计算对噪声的敏感性(张恒磊等,2011),对图 2b 中的数据先进行了低通滤波,采用的方法是向上延拓 20 m,然后再进行计算,结果如图 5 所示,它们在保持稳定计算的同时,都获得了 3 个异常体的位置。此外,相对于传统 Tilt 梯度法,改进的 Tilt 梯度避免了在异常平缓区的振荡现象,保证了计算的稳定性。

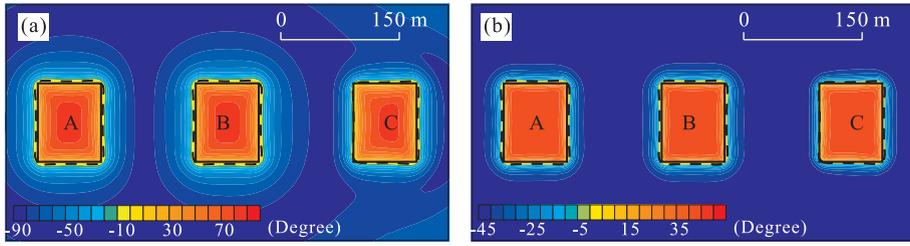


图 4 传统 Tilt 梯度结果(a)和改进的 Tilt 梯度结果(b)(黑色虚线框为识别边界)

Fig.4 Results of traditional tilt gradient (a) and results of improved tilted gradient (b)

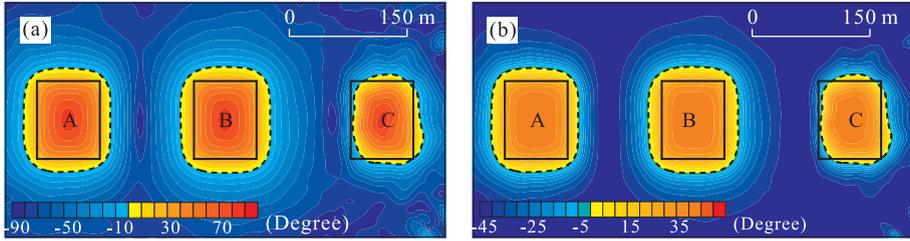


图 5 对图 2b 含噪声的磁异常边界识别结果(向上延拓 20 m)

Fig.5 Boundary identification results to fig.2b anomalies of containing 5% noise

a.传统 Tilt 梯度结果;b.改进的 Tilt 梯度结果

3 韦岗矿区磁异常分析

3.1 研究区地质概况

江苏省韦岗铁矿位于下扬子凹陷褶皱带东部、宁镇穹断褶束中段、汤仑复背斜东端北翼和上党火

山岩盆地西北边缘,属长江中下游铁、铜成矿带的东段.该区成矿地质条件优越,主要矿产种类有铁、铅、锌(铜)等多种金属矿产,是江苏省重要的矿产地和成矿远景区.该区自 20 世纪 60 年代以来做过大量的地质、物探勘查工作.图 6 为工区地质图.

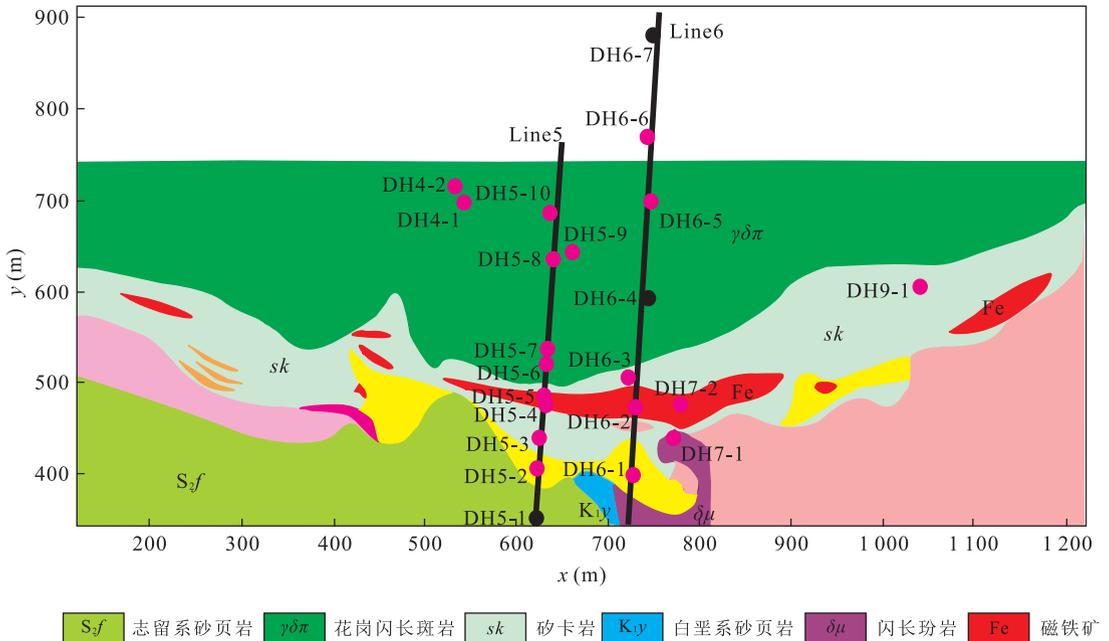


图 6 韦岗铁矿区-200 m 基岩地质

Fig.6 Geology of Weigang iron deposit at -200 m depth

粉色点代表见矿钻孔,黑色点代表未见矿钻孔

表 2 韦岗铁矿区岩矿石磁性参数统计结果

Table 2 Magnetic parameter statistics of rock and ore samples in Weigang iron mining area

岩矿石名称	块数	$K \times 10^{-6} 4\pi(SI)$			$J_r \times 10^{-3} (A/m)$		
		max	min	平均	max	min	平均
角砾岩	1			2.9			1.4
花岗闪长斑岩	7	3 392.8	2 841.4	3 117.9	812.0	527.5	636.1
闪长玢岩	6	1 706.0	22.8	523.1	326.8	2.8	96.1
矿化矽卡岩	2	109 180.0	74 860.0	92 020.0	108 547.0	48 271.0	78 409.0
矽卡岩	11	277.0	28.4	121.9	106.1	3.7	42.7
大理岩	8	26.9	2.0	9.6	109.2	3.2	28.0
磁铁矿	15	165 776.0	2 089.2	73 598.0	180 870.0	470.5	46 395.0

矿区侵入岩主要为燕山晚期花岗闪长斑岩($\gamma\delta\pi$)、闪长玢岩($\delta\mu$)和石英闪长斑岩($\delta\sigma\pi$)。燕山晚期花岗闪长斑岩为矿区的成矿母岩; 矿区内铁矿体均赋存于花岗闪长斑岩与大理岩、角岩接触带。矿床成因类型为矽卡岩—高温热液矿床; 为多次成矿作用形成, 铁质为多种来源, 矿石矿物主要有磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿等。矿区由于受近南北向挤压应力场的作用, 伴随近东西向褶皱构造的形成而产生一系列纵向张性、压性、压扭性断裂, 横向张性、扭性断裂; 前人认为该工区含两层矿, 第 1 层矿已被控制或开采, 第 2 层矿不完全清楚; 以往对该工区开展的物探工作有: 1961 年, 江苏省地质局物探队进行地面 1: 2 000 ΔZ 磁测测量, 提交《镇江市韦岗铁矿区磁法详查物探工作结果报告》; 2006—2009 年, 安徽省勘查技术院测量了 2 条复电阻率剖面, 控制长度 2 km, 计 45 个排列。存在的主要问题是: 对深部隐伏矿体没有确切的论述, 没能很好地提取出深部弱异常信息, 识别这些弱异常信息对于预测隐伏地质体(包括矿体)具有重要意义(成秋明, 2012); 前人虽然提出有第 2 层矿的存在, 但缺乏清晰地认识, 也没有探讨第 2 层矿是否有向下进一步延伸的可能性。本文针对是否存在深部隐伏矿体, 做了一些精细分析和探讨。

3.2 磁测数据处理与解释

由于地质过程的复杂性以及成矿过程的多期次叠加性, 原始磁异常往往反映多种地质因素的综合信息(陈建国等, 2011); 韦岗铁矿区岩矿石磁性统计结果(表 2)表明, 该区磁铁矿、矿化矽卡岩与围岩(花岗闪长斑岩等)有明显的磁性差异, 可以认为磁异常是由磁铁矿和矿化矽卡岩引起, 因此矿化矽卡岩是本区磁铁矿勘探的主要干扰因素。图 7 为工区铁矿 1: 2 000 ΔZ 磁测结果, 其中异常高值区经钻探证实为工区主矿体, 该异常南正北负, 由西向东构成一弧形形状。该区见矿钻孔除一部分位于正负异

常梯度带上以外, 还有部分见矿钻孔位于工区北侧负异常区。图 8 是化到地磁极后的磁异常, 它消除了斜磁化的影响, 化极磁异常北陡南缓, 反映矿体向南倾斜的特征。南部见矿钻孔位于化极正异常中心, 北侧见矿钻孔位于化极异常北侧的平缓下降区域, 推测是矿体向北倾伏所致。图 9 是化极磁异常水平总梯度模, 在化极磁异常水平总梯度模中, 只有 A、B 异常得到较好的反映, 没有凸显出 C、D 异常, 而钻孔 DH9-1 为已验证的见矿钻孔, 落在 C 异常范围内, 说明水平总梯度模提取弱异常信息的能力不足; 对于 B 异常, 见矿钻孔 DH5-2~DH5-7、DH6-1~DH6-3 以及 7 线钻孔 DH7-1 和 DH7-2 共 10 个钻孔均分布于 B 异常内, 而未见矿钻孔 DH5-1 和 DH6-4 落在 B 异常范围外侧, 该结论表明水平总梯度模对浅部异常信息提取效果明显。

图 10 为传统 Tilt 梯度法对工区 1: 2 000 ΔZ 磁测数据处理结果, 明显地提取出了弱异常 C 与 D, 但其弊端是背景场部分出现明显的振荡现象; 图 11 是采用本文提出的改进 Tilt 法对工区 1: 2 000 ΔZ 磁测数据处理结果, 黑色零值线对应于识别出的磁性围岩的边界, 与工区地质图 8 所示的磁性围岩边界对应良好。3 个未见矿钻孔 DH5-1、DH6-4 以及 DH6-7 均落在零值线识别出的磁性围岩的边界以外; 见矿钻孔 DH5-9 和 DH6-5 分布于识别出的磁性边界以外, 这可能是在数据采集过程中受到干扰或其他一些不确定因素导致原始数据出现误差, 在边界识别过程中没有正确的显示。见矿钻孔 DH4-1、DH4-2、DH6-6 位于磁性边界体上, 除此之外, 见矿钻孔均落在所识别的磁性边界范围以内。

通过将改进的 Tilt 梯度法应用于实例, 背景场畸变现象得到一定程度的压制或减弱, 增强了计算结果的稳定性。另外, 笔者结合已有地质钻孔剖面, 分析如下:

针对本研究区内两条钻孔剖面(剖面位置如图

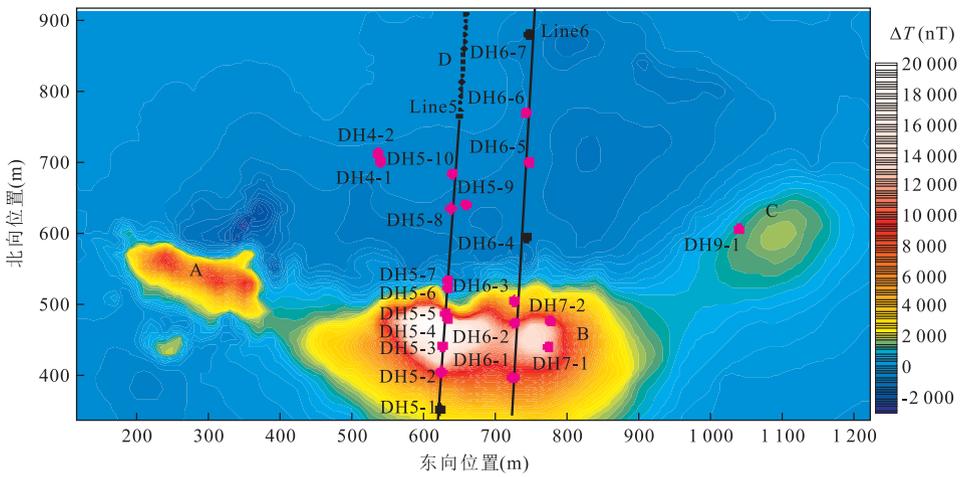


图 7 工区铁矿 1 : 2 000ΔZ 磁测结果

Fig.7 1 : 2 000ΔZ magnetic anomalies in iron ore area

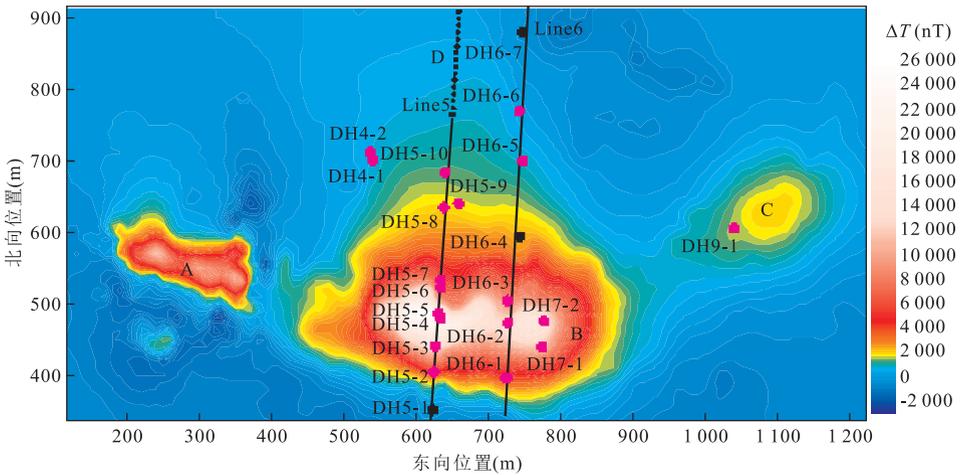


图 8 工区铁矿 ΔZ 磁测结果化到地磁极(化极磁异常)

Fig.8 Reduction to the pole results of work area iron ore ΔZ magnetic survey

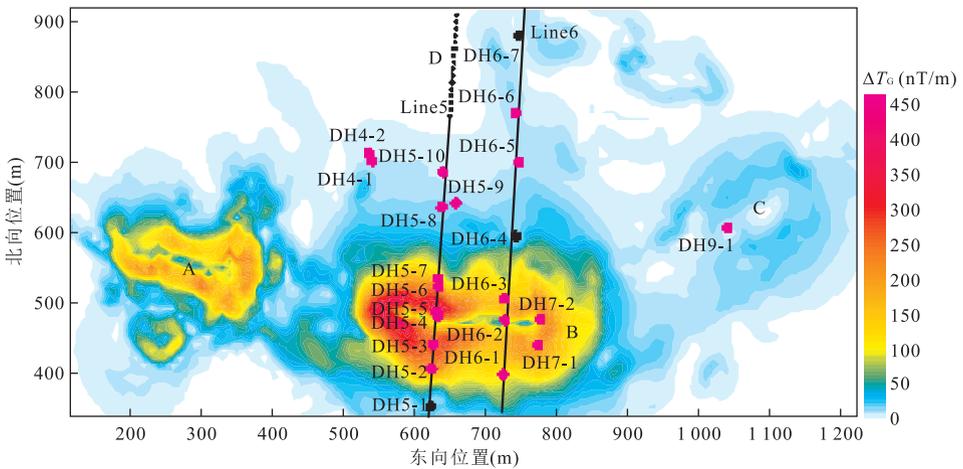


图 9 化极磁异常水平总梯度模

Fig.9 Reduction to the pole results of Total module of horizontal gradient

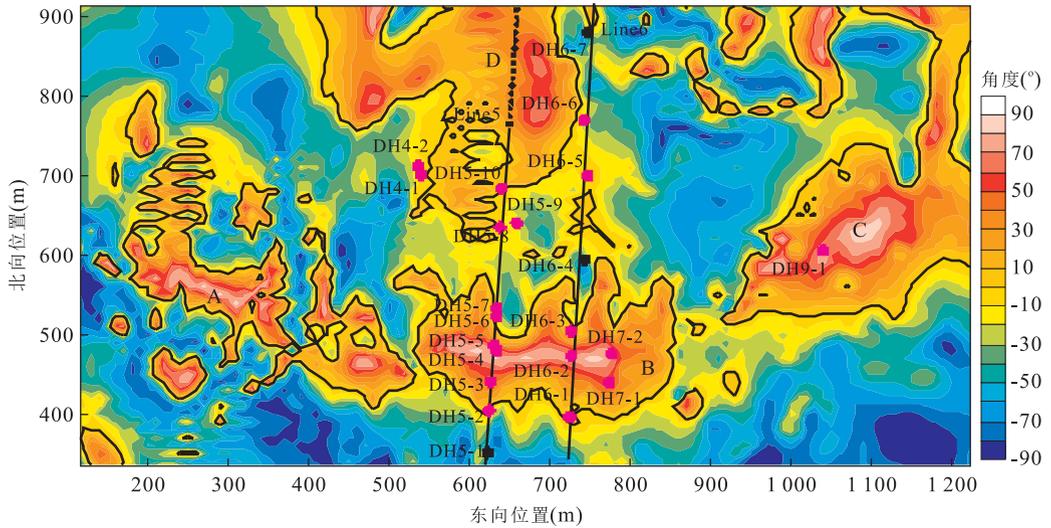


图 10 Tilt 梯度法识别结果

Fig.10 Identification results of traditional tilt gradient method

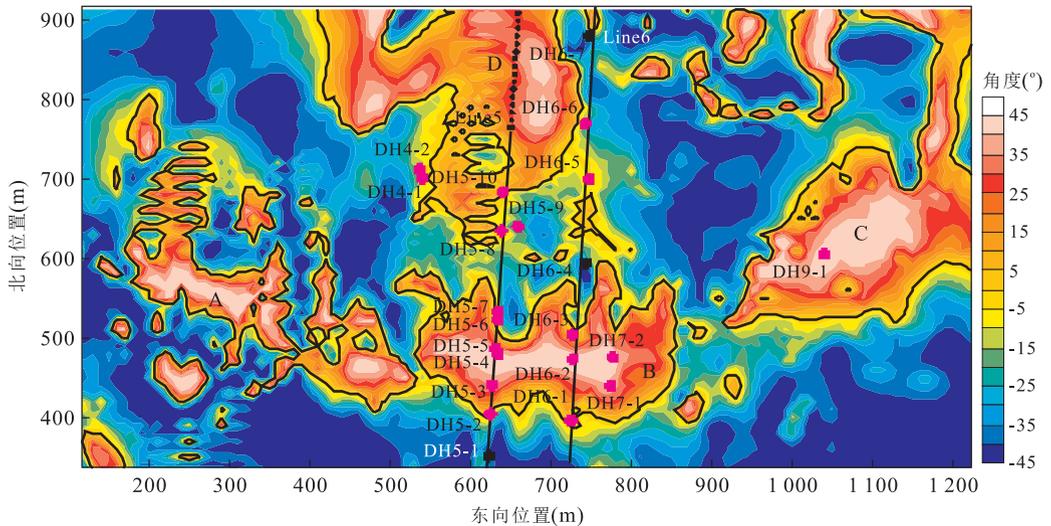


图 11 改进的 Tilt 梯度法识别结果

Fig.11 Identification results of improved tilt gradient method

7 中 5 号线和 6 号线), 对应的钻孔剖面如图 12 所示, 其中 5 号线上钻孔名分别为 DH5-1~DH5-10, 共 10 个钻孔, 6 号线上钻孔名分别为 DH6-1~DH6-7.

为了进一步论证弱异常 D 是由深部隐伏矿体引起的, 还是由虚假异常产生的, 本文结合 5 号线、6 号线地质剖面图与物性资料, 采用剖面精细正反演计算, 结合二度半人机交互反演方法, 获得了更加充分的证据.

3.2.1 5 号线精细分析 首先对 5 号线上钻孔控制的铁矿进行磁异常正演计算, 结果如图 13a 所示; 值得注意的是围岩也具有一定的磁性, 正演过程中添

加了围岩, 文章中为了突出显示矿体分布, 没有将围岩在图中显示. 显然, 该正演异常主峰值部分与观测异常相似, 反映了该区浅表矿体已经被很好地控制的事实; 而在横坐标 400~600 m 范围内, 存在一部分剩余异常, 最大幅值 618 nT. 图 13b 绿色实线条为剩余磁异常, 即原始 ΔZ 值与钻孔控制的已知铁矿正演计算所得磁异常的差值, 黑色虚线为从图 11 中改进的 Tilt 梯度识别结果所截取的 5 号线剖面值, 两者都显示可能在 5 号线北侧存在深部异常场源. 在此基础上, 笔者对 5 号线做了二度半反演, 结果如图 14 所示. 笔者认为在 5 号线北侧地下约 1 000 m 深度以上可能存在 3 号矿体(Fe_3).

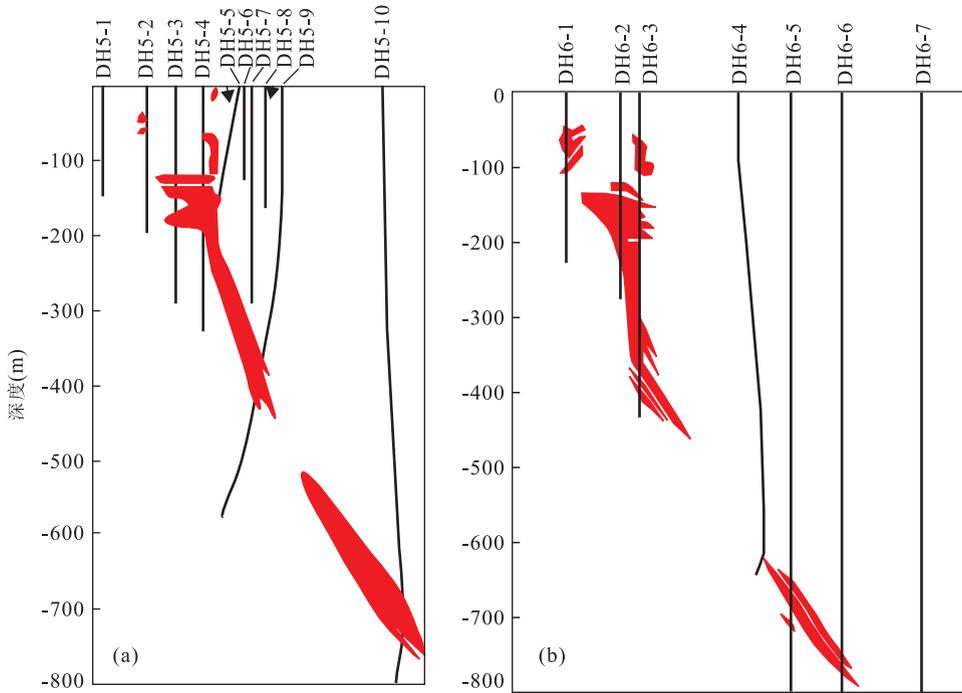


图 12 5 号线(a)和 6 号线(b)的地质剖面

Fig.12 The geological profile of line No.5 (a) and line No.6 (b)

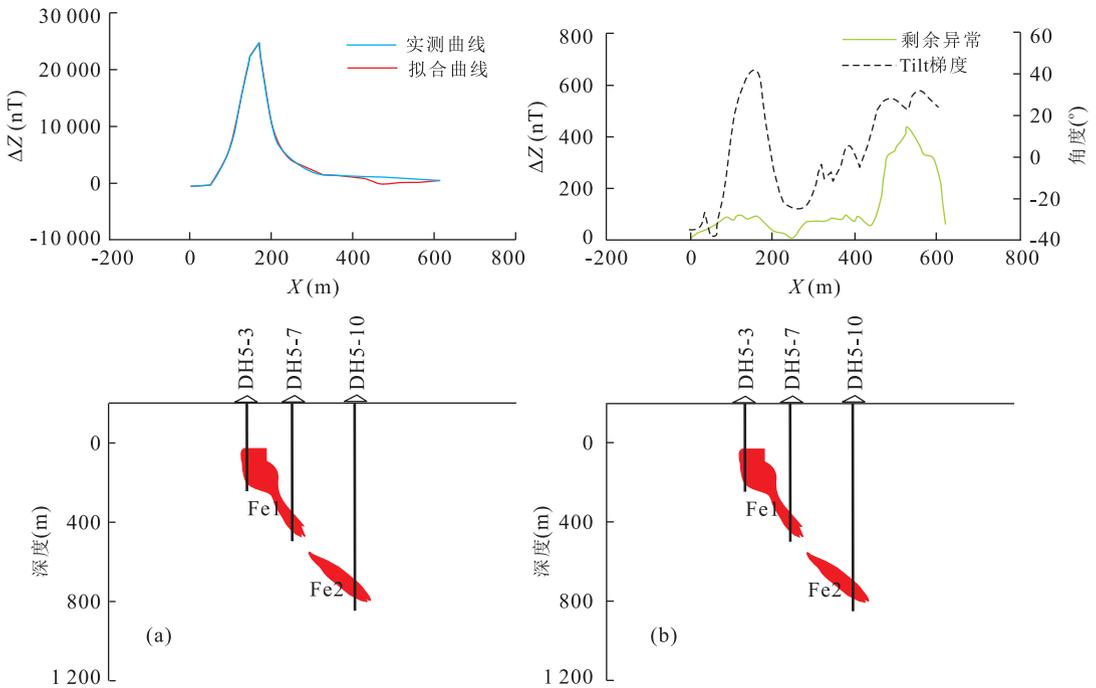


图 13 韦岗铁矿 5 号线

Fig.13 The Weigang iron ore of line No.5

a.已知铁矿产生的磁异常;b.剩余异常及 Tilt 梯度值

3.2.2 6 号线精细分析 与 5 号线精细分析类似, 首先对 6 号线上钻孔控制的铁矿进行磁异常正演计算, 结果如图 15a 所示; 其中, 围岩也具有一定的磁

性, 为了突出矿体分布, 故没有把围岩在图中显示出来. 在 6 号线北部 400~600 m 之间存在剩余异常, 但钻孔 DH6-7 资料已证实 6 号线北边深部不存在

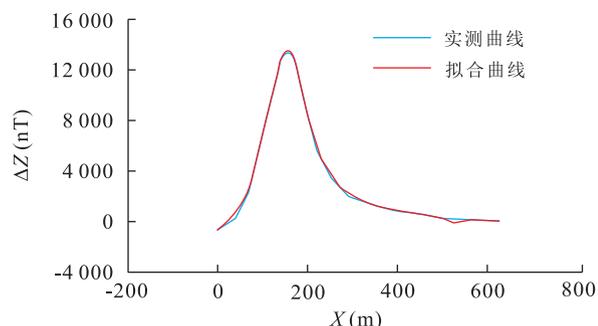
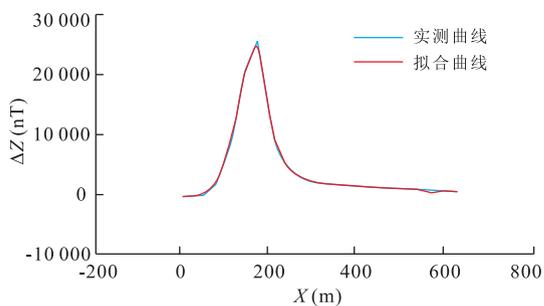


图 14 韦岗铁矿 2.5D 人机交互反演结果(5 号线)

Fig.14 2.5D Inversion results of the Weigang iron ore

图 16 韦岗铁矿 2.5D 人机交互反演结果(6 号线)

Fig.16 2.5D Inversion results of the Weigang iron ore

隐伏矿体,故初步推断原因之一是钻孔 DH6-7 深度不够,原因之二为该剩余异常是由深部旁侧矿体引起;基于以上推断,结合图 15b 中剩余磁异常以及

Tilt 梯度曲线特征,笔者对 6 号线做了二度半反演,结果如图 16 所示,通过添加旁侧矿体 Fe3,使剩余

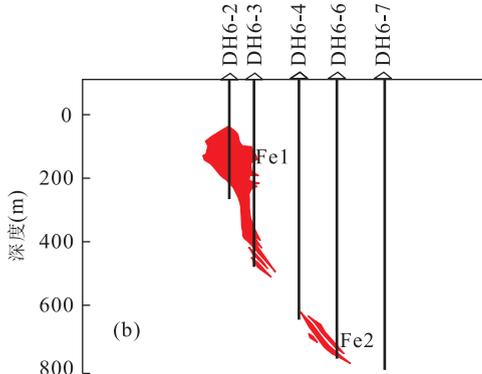
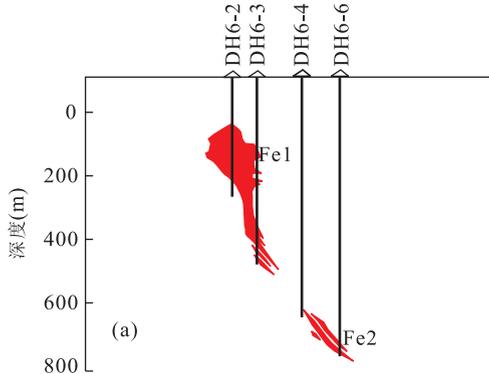
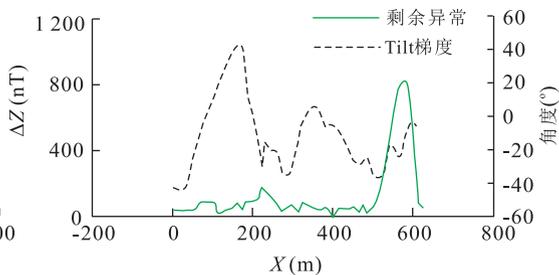
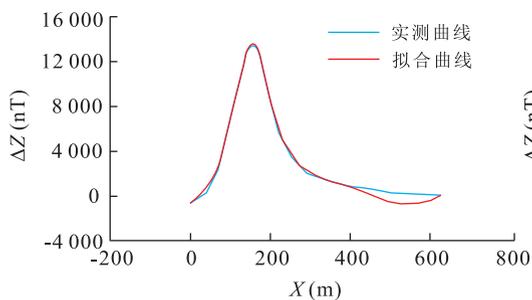


图 15 韦岗铁矿 6 号线

Fig.15 The Weigang iron ore of line No.6

a.已知铁矿产生的磁异常;b.剩余异常及 Tilt 梯度值

异常得以补偿,该结果与采用 Tilt 梯度法识别出 6 号线北部东侧弱异常可能是受深部隐伏矿体影响的结论相一致.因此,若在 DH6-7 钻孔以西、5 号线以北布置钻孔,则可能见孔.

4 分析与结论

本文对 Tilt 梯度法进行了改进,解决了存在的“解析奇点”这一问题,从理论上避免了分母的无限小,即避免了背景场区域的振荡现象,保证了计算的稳定性;采用本文算法对危机矿山江苏省韦岗铁矿区磁异常作了精细分析与解释,增强了对深部弱异常的识别效果;基于改进的 Tilt 梯度算法的处理结果,笔者在研究区南侧已有的由东向西分布的 A、B、C 3 个主体异常外,在工区北部发现了深部弱异常 D 的信息.通过结合地质钻孔资料,并利用剖面磁异常反演,推测韦岗铁矿区北部可能存在深部隐伏矿体,认为该可能的矿体是已知的第 1 层、第 2 层矿体向下向北延伸的产物.需要指出的是,由于该推断矿体位于地下 1 000 m 深处,地表异常微弱,加之所采用的磁异常资料是 60 年代观测的 ΔZ 异常,精度较低,解释难度很大.这项新结论还有待更进一步的工作验证.

References

- Bhattacharyya, B. K., 1965. Two-Dimensional Harmonic Analysis as a Tool for Magnetic Interpretation. *Geophysics*, 30(5): 829—857. doi: 10.1190/1.1439658
- Chen, J. G., Xiao, F., Chang, T., 2011. Gravity and Magnetic Anomaly Separation Based on Bidimensional Empirical Mode Decomposition. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(2): 327—335 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dgkx.2011.034
- Cheng, Q. M., 2012. Ideas and Methods for Mineral Resources Integrated Prediction in Covered Areas. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(6): 1109—1125 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2012.118
- Gerovska, D., Araúz-Bravo, M. J., 2006. Calculation of Magnitude Magnetic Transforms with High Centricity and Low Dependence on the Magnetization Vector Direction. *Geophysics*, 71(5): 121—130. doi: 10.1190/1.2335516
- Grauch, V. J. S., Cordell, L., 1987. Limitations of Determining Density or Magnetic Boundaries from the Horizontal Gradient of Gravity or Pseudogravity Data. *Geophysics*, 52(1): 118—121. doi: 10.1190/1.1442236
- Guan, Z. N., Yao C. L., 1997. Inversion of the Total Gradient Modulus of Magnetic Anomaly due to Dipping Dike. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(1): 81—85 (in Chinese with English abstract).
- Hood, P. J., Teskey, D. J., 1989. Aeromagnetic Gradiometer Program of the Geological Survey of Canada. *Geophysics*, 54(8): 1012—1022. doi: 10.1190/1.1442726
- Hood, P., McClure, D. J., 1965. Gradient Measurements in Ground Magnetic Prospecting. *Geophysics*, 30(3): 403—410. doi: 10.1190/1.1439592
- Huang, L. P., Guan, Z. N., 1998. Discussion on “Magnetic Interpretation Using the 3-D Analytic Signal”. *Geophysics*, 63(2): 667—670.
- Fairhead, J. D., Green, C. M., 2004. New Insights into Magnetic Derivatives for Structural Mapping. *The Leading Edge*, 23(2): 116—119.
- Li, X., 2006. Understanding 3D Analytic Signal Amplitude. *Geophysics*, 71(2): L13—L16. doi: 10.1190/1.2184367
- Liu, J. L., Li, Q. C., Zhao, B., 2007. New Detection Techniques of Geologic Boundaries Using Potential-Field Data and Its Application in the Shanxi Paleo-Structure Zone and Faults. *Journal of Engineering Geology*, 15(4): 569—574 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1004—9665.2007.04.024
- Liu Y. P., Wang Z. W., Du X. J., et al., 2012. Boundary Detection Method and Its Application in Hulin Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42 (Suppl. 3): 271—278 (in Chinese with English abstract).
- Ma, G. Q., Huang, D. N., Yu, P., et al., 2012. Application of Improved Balancing Filters to Edge Identification of Potential Field Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12): 4288—4295 (in Chinese with English abstract). doi: 10.6038/j.issn.0001—5733.2012.12.040
- Ma, G. Q., Li, L. L., 2012. Edge Detection in Potential Fields with the Normalized Total Horizontal Derivative. *Computers & Geosciences*, 41: 83—87. doi: 10.1016/j.cageo.2011.08.016
- Miller, H. G., Singh, V., 1994. Potential Field Tilt—A New Concept for Location of Potential Field Sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2—3): 213—217. doi: 10.1016/0926—9851(94)90022—1
- Nabighian, M. N., 1972. The Analytic Signal of Two-Dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross-Section; Its Properties and Use for Automated Anomaly Interpretation. *Geophysics*, 37(3): 507—517. doi: 10.1190/1.1440276
- Roest, W. R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992. Magnetic In-

terpretation Using the 3-D Analytic Signal. *Geophysics*, 57(1):116–125. doi:10.1190/1.1443174

Sykes, M.P., Das, U.C., 2000. Directional Filtering for Linear Feature Enhancement in Geophysical Maps. *Geophysics*, 65(6):1758–1768. doi:10.1190/1.1444860

Wang, W. Y., 2012. Spatial Variation Law of the Extreme Value Position of Analytical Signal Amplitude for Potential Field Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(4):1288–1299 (in Chinese with English abstract). doi:10.6038/j.issn.0001–5733.2012.04.024

Wang, W. Y., Qiu, Z. Y., Yang, Y., et al., 2010. Some Advances in the Edge Recognition of the Potential Field. *Progress in Geophysics*, 25(1):196–210 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1004–2903.2010.01.027

Wang, Y. G., Wang, Z. W., Zhang, F. X., et al., 2012. Edge Detection of Potential Field Based on Normalized Vertical Gradient of Mean Square Error Ratio. *Journal of China University of Petroleum*, 36(2):86–90, 96 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1673–5005.2012.02.014

Xia, L. Y., Wu, H. N., Bai, G. J., et al., 2008. Research on Enhancing Weak Signal Technology and Recognition of Linear Structures Using Aerial-Magnetic Data in the Qaidam Basin. *Progress in Geophysics*, 23(4):1058–1062 (in Chinese with English abstract).

Yu, Q. F., Lou, H., 1994. Locating the Boundaries of Magnetic or Gravity Sources Using Horizontal Gradient Anomalies. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 16(4):363–367 (in Chinese with English abstract).

Zhang, H. L., Liu, T. Y., Yang, Y. S., 2011. Calculation of Gravity and Magnetic Source Boundary Based on Anisotropy Normalized Variance. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(7):1921–1927 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.0001–5733.2011.07.026

Zhao, X. G., Wu, H. N., Bai, G. J., et al., 2008. Magnetic and Gravity Data Processing Method and Imaging Techniques for

Faulted Structure Interpretation. *Progress in Geophysics*, 23(2):414–421 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈建国, 肖凡, 常韬, 2011. 基于二维经验模态分解的重磁异常分离. *地球科学——中国地质大学学报*, 36(2):327–335.

成秋明, 2012. 覆盖区矿产综合预测思路与方法. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(6):1109–1125.

管志宁, 姚长利, 1997. 倾斜板体磁异常总梯度模反演方法. *地球科学——中国地质大学学报*, 22(1):81–85.

刘金兰, 李庆春, 赵斌, 2007. 位场场源边界识别新技术及其在山西古构造带与断裂探测中的应用研究. *工程地质学报*, 15(4):569–574.

刘银萍, 王祝文, 杜晓娟, 等, 2012. 边界识别技术及其在虎林盆地中的应用. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(增刊3):271–278.

马国庆, 黄大年, 于平, 等, 2012. 改进的均衡滤波器在位场数据边界识别中的应用. *地球物理学报*, 55(12):4288–4295.

王万银, 2012. 位场解析信号振幅极值位置空间变化规律研究. *地球物理学报*, 55(4):1288–1299.

王万银, 邱之云, 杨永, 等, 2010. 位场边缘识别方法研究进展. *地球物理学进展*, 25(1):196–210.

王彦国, 王祝文, 张凤旭, 等, 2012. 基于均方差比归一化垂向梯度法的位场边界检测. *中国石油大学学报:自然科学版*, 36(2):86–90, 96.

夏玲燕, 吴汉宁, 柏冠军, 等, 2008. 柴达木盆地航磁资料微弱信息增强技术研究及在线性构造识别中的应用. *地球物理学进展*, 23(4):1058–1062.

余钦范, 楼海, 1994. 水平梯度法提取重磁源边界位置. *物探化探计算技术*, 16(4):363–367.

张恒磊, 刘天佑, 杨宇山, 2011. 各向异性标准化方差计算重磁源边界. *地球物理学报*, 54(7):1921–1927.

赵希刚, 吴汉宁, 柏冠军, 等, 2008. 重磁异常解释断裂构造的处理方法及图示技术. *地球物理学进展*, 23(2):414–421.