

基于 L 模量的磁化方向估算新方法

饶椿锋

(上海市岩土地质研究院有限公司, 上海 200072)

摘要:在常规的磁异常处理过程中,可以假设无剩余磁化强度,且自退磁效应可以忽略,故总磁化强度方向与当代地磁场方向一致。然而,由于剩余磁化强度的存在,总场磁化强度方向与感应磁化强度方向可以完全不一样,进而影响磁测资料的处理、反演及解释。基于此,提出 L 模量与化极磁异常(RTP)互相关法来估算磁化方向,理论模型及实际资料试验证明该方法相比常规的方法估计磁化角度更为准确,具有更强的实际适用性和稳定性。

关键词:剩余磁化强度; L 模量;磁异常

中图分类号:P3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)05-0234-06

目前主流的估算磁化强度方向的方法^[1-3]有海尔比格磁矩法、小波多尺度边缘分析法、相关系数法,前两者由磁异常和磁化方向之间的关系直接估算出磁化强度方向,第三种方法是利用化极后数据的对称关系估算出磁化强度的方向。

1 常用的估算磁化方向方法概述

1.1 海尔比格磁矩法

海尔比格磁矩法基于磁异常各分量与磁偶极子分量的重要积分关系^[4-6]:

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xB_z(x,y) dx dy = -2\pi m_x \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} yB_z(x,y) dx dy = -2\pi m_y \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xB_x(x,y) dx dy = -2\pi m_z \end{cases} \quad (1)$$

式中: B_x 、 B_y 、 B_z 分别为磁异常 x 、 y 、 z 3 个方向上的分量; m_x 、 m_y 、 m_z 为磁性体场源的磁矩在 x 、 y 、 z 3 个方向上的投影。尽管式(1)中的积分关系式不要求任何场源体的先验信息,但是该方法比较适用于简单几何结构的场源体。

该方法首先通过磁异常 ΔT 在频率域中转换得到磁异常三分量,再通过式(1)积分关系式计算得到场源体磁矩的三分量,在假设磁源体内部为均匀磁化的条件下,就可以计算磁化强度的磁倾角和磁偏角。需要注意的是:当研究区磁异常处于低纬度带时,需要采用低纬度转换技术。近年来,随着磁力仪的不断发展,磁异常三分量也可以直接测量得

到,这样就避免了低纬度转换的技术难题。

1.2 小波多尺度边缘分析法

Haney 和 Li 提出一种基于连续小波变换得到磁异常多尺度边界的方法来估算二维场源体的磁化方向^[7]。多尺度的边界与磁异常剖面小波变换的极大值分布有一定的对应性,而且它们的分布位置与测线方位的磁化倾角有关。通过追踪磁异常的多尺度边缘,就可以计算出二维场源体的磁化倾角。

给定一个磁化倾角为 I 平面为 z_0 的二维磁异常剖面,为估算其磁化方向,选择一个磁化倾角为 $-I$ 的偶极子,对其进行连续小波变换后,多尺度边界的幅值与场源的几何尺寸有关,而其位置与场源的方向即磁化方向 I_m 有关,小波变换后有 4 条曲线形态:

$$s = x \cot \left[\frac{I_m \pm \frac{\pi}{2}}{3} \right], x \cot \left[\frac{I_m \pm \frac{3\pi}{4}}{3} \right] \quad (2)$$

式中: s 为放大因子; x 为沿次剖面方向的方位坐标。

尽管该方法是基于二维场源体的基础上提出的,但它也可以用来估算三维孤立场源体磁异常数据的磁化方向。首先在磁异常分布图上选取两条过目标磁性体的正交剖面,一条南北向,另外一条东西向。然后分别利用该方法可以估算出两条正交测线的视磁化倾角。通过这两条南北向和东西向测线的视磁化倾角可以计算出该三维磁性体的真实磁化方向。

收稿日期:2022-10-20

作者简介:饶椿锋(1993—),男,江西抚州人,上海市岩土地质研究院有限公司,部门副主任,地球物理学硕士,研究方向为工程物探。

1.3 相关系数法

相关系数法是通过计算两种与场源体中心对应性较好的转换量之间的相关系数来确定磁化方向。前人基于此原理提出了一些方法,如:Roest 和 Pilkington 在二维情况下,提出基于磁场总梯度模和磁源重力异常总水平梯度互相关的估计方法^[8];Bilim 和 Ates 通过寻找磁源重力异常与重力异常相关系数的极大值来确定磁化方向^[9];Danne-miller 和 Li 提出基于化极磁异常垂直梯度与总梯度模的互相关来确定总磁化方向^[10];Gerovska 等通过化极磁异常与磁异常模量的互相关来估计磁化方向^[11]。

该方法首先需要选取两个与场源体中心对应性较好的转换量。其中一个为与磁化方向有关的转换量,如化极磁异常(RTP)、磁源重力异常及其相关导数等;另外一个为与磁化方向无关的或者弱敏感于磁化方向的转换量,如重力异常、解析信号(AS)、磁异常 T_a 模量及其相关导数等。然后通过不断假设磁化方向,计算两者的相关系数。那么,相关系数极大值对应的假设磁化方向就为该磁性目标体的实际磁化方向。需要特别注意的是:若研究区处于低纬度地区,常规的化极算子存在奇异值,使化极后的磁异常严重畸变,因此需要引入低纬度化极技术。

$$C(D, I) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\Delta T_{\text{rtp}}(i, j) - \overline{\Delta T_{\text{rtp}}}) [L(i, j) - \overline{L}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\Delta T_{\text{rtp}}(i, j) - \overline{\Delta T_{\text{rtp}}}]^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [L(i, j) - \overline{L}]^2}} \quad (4)$$

式中: $C(D, I)$ 为相关系数; M, N 分别为东向和北向网格点数; ΔT_{rtp} 为化极磁异常; $\overline{\Delta T_{\text{rtp}}}$ 为所有网格点上化极磁异常的平均值; L 为 L 模量; $\overline{L}$ 为所有网格点上 L 模量的平均值。化极磁异常与 L 模量的相关系数是用来表征两者之间的相似程度,相关系数 $C(D, I)$ 越大,两者就越接近。因此,相关系数的极大值 C_{max} 对应的磁化倾角 I 和磁化偏角 D 就是估算的磁化方向。

通过以上改进,该方法相比同类型的相关系数法具有以下优势: L 模量与场源体的中心对应性要高于磁异常 T_a 模量和解析信号^[12]。并且在强噪声的影响下,求导运算会很大程度上放大噪声,本方法只需在转换 L 模量时进行求导运算。而实际的观测磁异常数据往往含有一定量的噪声,因此可以说明本方法更具有实用性和更广泛的适用性。

2 基于 L 模量与化极磁异常的相关系数法

在充分研究已有的估算磁化方向方法的基础上,清楚地认识到当前方法的优势和局限性。因此,本文认真分析、总结上述估算磁化方向方法的机理及共性,在相关系数法的基础上,进行改进并提出基于 L 模量与化极磁异常的相关系数法来确定磁化方向。

首先通过原始观测磁异常 ΔT 计算转换得到 L 模量,其计算公式^[11]为

$$L = \nabla^2 T_a = \frac{|\nabla H_{ax}|^2 + |\nabla H_{ay}|^2 + |\nabla Z_a|^2 - |\nabla T_a|^2}{T_a} \quad (3)$$

式中: T_a 为磁异常模量,其计算公式为 $T_a = (H_{ax}^2 + H_{ay}^2 + Z_a^2)^{1/2}$, H_{ax} 、 H_{ay} 、 Z_a 分别为磁异常 ΔT 在 3 个方向上的分量。

然后选定一个磁化方向的变化区间,若没有相关的先验信息,给定磁化倾角 I 的变化范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,步长根据实际精度要求确定,一般为 1° ;给定磁化偏角 D 的变化范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$,步长根据实际精度要求确定,一般为 1° 。磁异常根据假定的磁化倾角与偏角进行化极运算,若磁化倾角 $-20^\circ \leq I \leq 20^\circ$,常规的化极算子不稳定,应采用低纬度化极技术进行化极。

最后,计算化极磁异常与 L 模量的相关系数:

3 模型试验

为了说明各估算磁化方向方法的优缺点,以及验证本文提出的新方法的优越性,本文设计具有代表性的组合模型,用目前常规的方法和本文提出的新方法对组合模型进行磁化方向估算,并进行效果的对比分析。

理论组合模型由 5 个大小不同、物性不同、场源体形态不同且含有不同剩磁的简单几何形体组合而成。表 1 列出了各场源体的几何参数、物性参数及磁化方向。地磁场强度为 50 000 nT,地磁场倾角 I_0 为 60° ,地磁场偏角 D_0 为 0° 。组合模型空间位置分布如图 1 所示,组合模型观测磁异常数据(加入数据量级 5% 的高斯噪声)如图 2(a)所示,图 2(b)为组合模型化极磁异常数据,图 2(c)为图 2(a)转换得到的解析信号振幅(A_s)数据,图 2(d)为图 2(a)转换得到的磁异常模量

T_a 数据,图 2(e)为图 2(a)转换得到的 L 模量数据。从图 2(c)~图 2(e)可以看出 A_s 、 T_a 、 L 模量都是弱敏感于磁化方向的转换量,并与场源体有

良好的中心对应性,但是 L 模量与场源体的中心对应性要比同类型的转换量要好,与化极磁异常(RTP)形态最为相似。

表 1 组合模型各场源体的几何尺寸、物性参数及磁化方向

场源体	中心点坐标/ km	东西长度/ km	南北长度/ km	向下长度/ km	半径/ km	磁化率 κ /SI	I / ($^{\circ}$)	D / ($^{\circ}$)
A 球体	(17.5,17.5,5)	—	—	—	2	0.2	-50	135
B 水平薄板	(12,26,1.25)	3	2	0.5	—	0.06	30	45
C 垂直薄板	(26.5,22.75,4.25)	12	0.5	6.5	—	0.05	-40	170
D 水平条带	(25.5,3.75,2)	1	7.5	1	—	0.1	60	2
E 球体	(10,10,4)	—	—	—	2	0.05	55	10

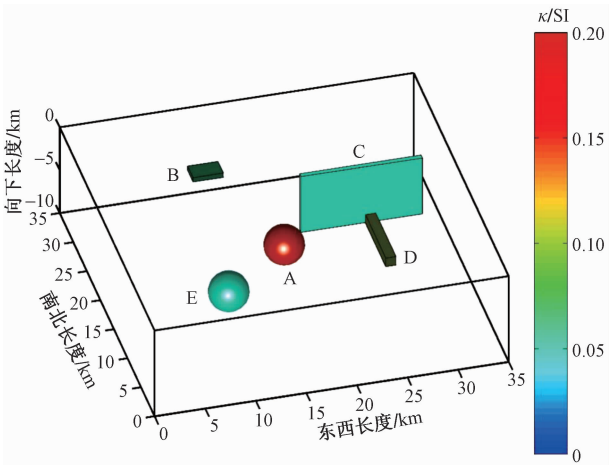


图 1 组合模型空间位置分布

将本文提出的 L 模量与 RTP 相关系数法和目前国内较流行的方法:海尔比格磁矩法^[6]、RTP_Z 和 A_s 互相关法^[9]、RTP 和 T_a 互相关法^[10]应用于该组合模型 5 个不同场源体的磁化方向估算。图 3 为 3 种相关系数法估算磁化方向结果。从中可以看出,对于 5 个大小不同、物性不同、场源体形态不同、剩磁不同的磁性目标体,并且在强噪声的影响下,本文提出的磁化方向估算方法要优于同类型的相关系数法,其估算的磁化方向与真实值更接近。表 2 列出了 4 种方法对该组合模型的磁化方向估算结果。表 2 的估算结果显示,本文提出的 L 模量与 RTP 互相关法估算的磁化角度与组合模型理论磁化方向更为接近,在强噪声的干扰下,本文方法依然可以得到一个较为准确的磁化方向,说明该方法具有更强的实际适用性和稳定性。

表 2 各方法对组合模型的磁化方向估算结果

单位:($^{\circ}$)

场源体	真实磁化方向		RTP_Z 和 A_s 互相关法 ^[10]		RTP 和 T_a 互相关法 ^[11]		海尔比格磁矩法 ^[4]		RTP 与 L 互相关法	
	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D
A	-50	135	-50(0)	128(-7)	-67(-17)	137(2)	-39(11)	144(9)	-51(-1)	135(0)
B	30	45	35(5)	44(-1)	42(12)	42(-3)	40(10)	48(3)	27(-3)	42(-3)
C	-40	170	-25(15)	117(-53)	-47(-7)	173(3)	-33(7)	165(-5)	-38(2)	169(-1)
D	60	2	39(-21)	-2(-4)	79(19)	5(3)	55(-5)	6(4)	64(4)	3(1)
E	55	10	73(18)	25(15)	71(16)	10(0)	47(-8)	11(1)	57(2)	10(0)

注:括号内的数值表示估算的方向与真实磁化方向的偏差。

4 实际资料试验

金伯利岩区域位于加拿大西北部维多利亚岛上,其具体位置如图 4 所示。该研究区域的主要地质特点为太古代基底表面被元古代沉积序列和部分零星火山岩所覆盖,上覆平卧的是寒武纪至泥盆纪的碳酸盐岩^[13]。该地区金伯利岩的形成年代距今有 250~300 Ma。研究区内围岩大部分为沉积岩,几乎都表现为无磁,而位于浅层的金伯利岩显示较强的磁性^[14]。

图 5 为金伯利岩区域观测磁异常。该区的磁异常特征为小范围的高频局部磁异常和大范围的低

频区域异常共生,其中高频磁异常主要由浅部的金伯利岩所引起,低频异常主要由深部的磁性基底和沉积岩所引起。然而由浅部金伯利岩产生的局部磁异常表现为负的,这说明引起这些负的局部磁异常很大可能是金伯利岩中含有很强的剩磁。

由观测磁异常形态和幅值特征(图 5)及上述分析可知,地下为含有强剩磁的孤立金伯利岩,因此按照本文提出的 L 模量与化极磁异常的相关系数法来估算磁化方向。图 6 为该方法估算的磁化方向。从图 6 可以看出,用本文提出的方法对该实际资料的磁化方向估算结果与上述分析有一定的一致性。

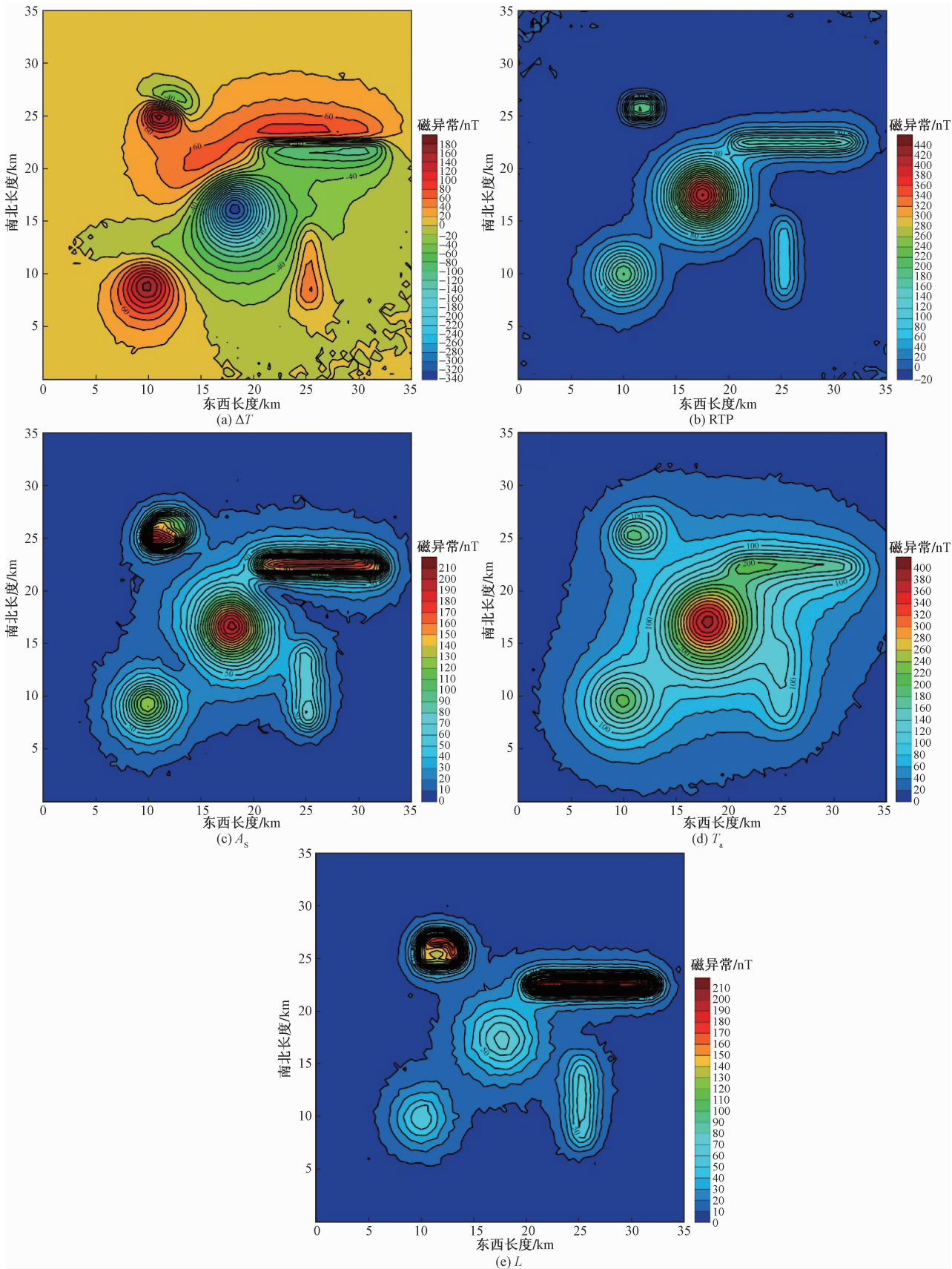
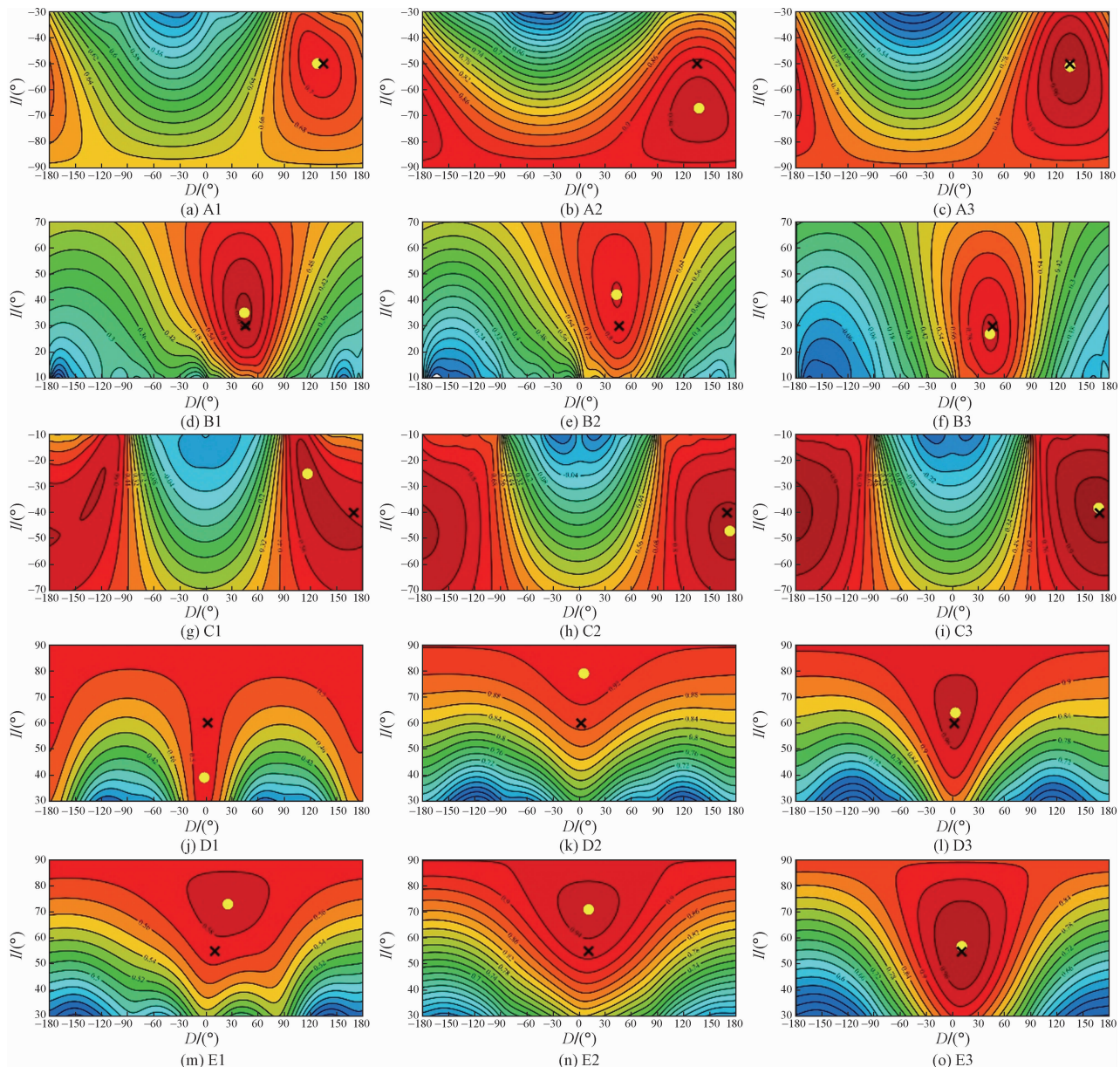
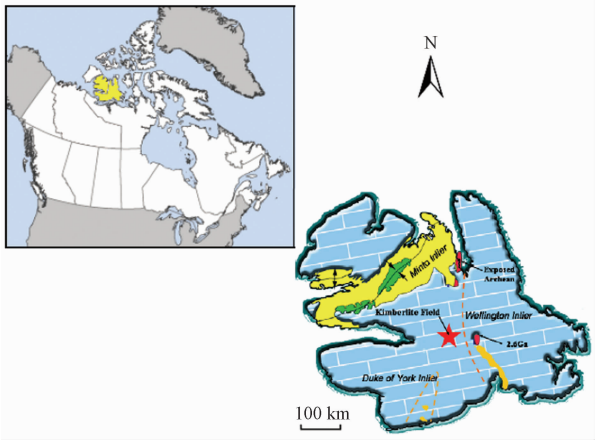


图 2 组合模型磁异常及其相关模量



A、B、C、D、E 分别为组合模型中 5 个不同的场源体,1、2、3 分别对应化极磁异常垂直梯度(RTP_Z)与总梯度模(AS)的相关系数法^[10]、化极磁异常(RTP)与磁异常模量 T_a 的相关系数法^[11]、化极磁异常(RTP)与 L 模量的相关系数法。模型实际磁化方向用“×”表示,估计的磁化方向用“•”表示

图 3 相关系数法估算磁化方向结果



★为金伯利岩区域^[10]。
图 4 研究区域位置示意图

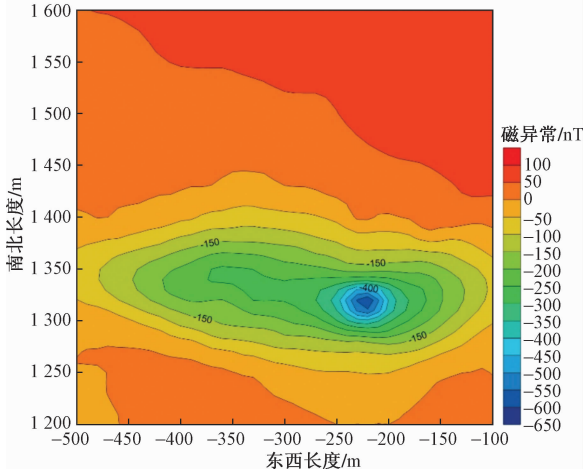


图 5 金伯利岩区域观测磁异常

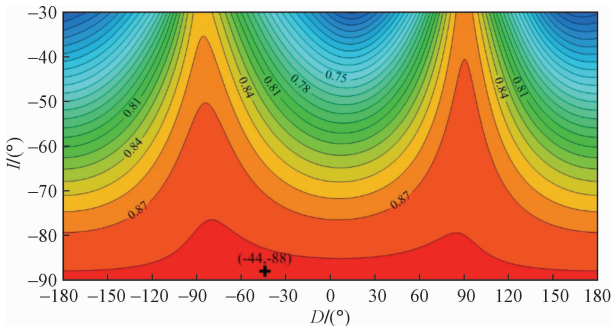


图 6 L 模量与化极磁异常的相关系数法估算的磁化方向

5 结论

本文提出 L 模量与 RTP 互相关法来估算磁化方向。理论模型试验证明该方法相比常规的方法估计磁化角度更为准确,具有更强的实际适用性和稳定性。该方法相比同类型的相关系数法具有以下优势: L 模量与场源体的中心对应性要高于磁异常 T_z 模量和解析信号^[12]。并且在强噪声的影响下,求导运算会很大程度上放大噪声,本方法只需在转换 L 模量时进行求导运算。

参考文献

[1] 石磊,孟小红,郭良辉,等. 剩磁影响下磁性体磁化方向估计的一种简单算法[J]. 地球物理学进展,2014,29(4): 1748-1751.

[2] 唐俊德. 任意磁性体磁化强度方向的确定[J]. 桂林冶金地质学院学报,1986(2):169-175.

[3] 刘双,冯杰,高文利,等. 强剩磁强退磁条件下的二维井中磁测反演[J]. 地球物理学报,2013,56(12):4297-4309.

[4] HELBIG K. Some integrals of magnetic anomalies and their relation to the parameters of the disturbing body[J].

Zeitschrift fur Geophysik,1963,29(2):83-96.

[5] LOURENCO J S, MORRISON H F. Vector magnetic anomalies derived from measurements of a single component of the field[J]. Geophysics,1973,38(2):359-368.

[6] PHILLIPS J D. Can we estimate total magnetization directions from aeromagnetic data using Helbig’s integrals[J]. Earth Planets and Space,2005,57(8):681-689.

[7] HANEY M, LI Y, Total magnetization direction and dip from multiscale edges [C]//72nd Annual International Meeting. Krakow;SEG,2002;735-738.

[8] ROEST W R, PILKINGTON M, Identifying remanent magnetization effects in magnetic data[J]. Geophysics, 1993,58(5):653-659.

[9] BILIM F, ATES A. An enhanced method for estimation of body magnetization direction from pseudogravity and gravity data[J]. Computers & Geosciences,2004,30(2): 161-171.

[10] DANNEMILLER N, LI Y. A new method for determination of magnetization direction[J]. Geophysics,2006,71 (6):L69-L73.

[11] GEROVSKA D, ARAÚZO-BRAVO M J, STAVREV P. Estimating the magnetization direction of sources from southeast Bulgaria through correlation between reduced-to-the-pole and total magnitude anomalies[J]. Geophysical Prospecting,2009,57(4):491-505.

[12] PILKINGTON M, BEIKI M. Mitigating remanent magnetization effects in magnetic data using the normalized source strength[J]. Geophysics,2013,78(3):J25-J32.

[13] 王文正,马李洋,路世远,等. 煤火区多层梯度烧变岩磁异常正演研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(20): 48-53.

[14] 张志宏,郭安宁,李梦莹,等. 2018 年吉林松原 Ms5.7 地震地磁异常分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(29): 12406-12414.

A New Method of Magnetization Direction Estimation Based on L -modulus

RAO Chunfeng

(Shanghai Geotechnical Engineering & Geology Institute Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: In the process of conventional magnetic anomaly processing, it can be assumed that there is no residual magnetization, and the self demagnetization effect can be ignored, so the direction of the total magnetization is consistent with that of the contemporary geomagnetic field. However, due to the existence of residual magnetization, the direction of total field magnetization can be completely different from that of induced magnetization, which affects the processing, inversion and interpretation of magnetic survey data. Based on this, a method of L -modulus and magnetopolarizing anomaly (RTP) cross-correlation is proposed to estimate the magnetization direction. Theoretical model tests show that this method is more accurate than conventional methods in estimating the magnetization angle, and has stronger practical applicability and stability.

Keywords: residual magnetization; L -modulus; magnetic anomaly