

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107580

重磁异常的快速均衡边界识别方法*

田招招, 丁然, 邵瀛杰

(山东大学控制科学与工程学院 济南 250061)

摘要:边界识别是位场数据解释中一项重要任务,可用于资源探测等领域,是目前研究的热点问题之一。对于深部异常体目标,采用传统的边界识别方法易出现模糊、发散、变形等问题,而改进的方法大多采用高阶导数,虽然能够很好地识别出深部异常体边界,但是计算复杂,易受噪声干扰。为了改善以上问题,提出了一种稳定的快速边界识别方法,仅利用符号函数和重磁垂直导数数据,即可均衡识别不同深度的目标,且避免了高阶导数的计算。通过理论模型的实验与对比,验证了方法的便捷性、有效性、抗斜磁化能力以及抗噪能力。同时,应用实测数据验证了方法在复杂重磁环境下,能够准确清晰地分辨出异常体,可节约相关研究人员的大量时间与精力,具有很好地应用前景。

关键词:位场;快速均衡;边界识别;符号函数;垂直导数

中图分类号: TH762 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.65

Fast balanced edge identification method for gravity and magnetic anomalies

Tian Zhaozhao, Ding Ran, Shao Yingjie

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: Edge identification is an important task in the interpretation of potential field data and can be used in the field of resource detection and so on, which is one of the hot topics in current research. For deep anomalous targets, the traditional edge identification methods are prone to blur, divergence, deformation and other problems. Most of the improved methods use high-order derivatives, although they can well identify the deep anomaly boundary, the calculation is complicated and easy to be disturbed by noises. In order to improve the above problems, proposes a stable and fast edge identification method, which only uses sign function and gravity magnetic vertical derivative data, can identify the targets at different depths in a balanced manner, and avoids the calculation of higher-order derivatives. Through experiments and comparisons of theoretical models, the convenience, effectiveness, anti-oblique magnetization ability and anti-noise ability of the method were verified. At the same time, through the application of actual data, it was verified that the method can accurately and clearly distinguish abnormal objects in a complex gravity and magnetic environment, which can save a lot of time and energy of relevant researchers, and has a good application prospect.

Keywords: potential field; fast and balanced; edge identification; sign function; vertical derivative

0 引 言

边界识别是重磁数据解释中重要的组成部分。利用在重磁异常体的边缘附近存在密度或磁化率差异,对数据特征进行研究,寻找目标边界,对资源勘查、地质构造划分、地质体三维建模等有着重要意义,得到了国内外研究者的广泛关注,也取得了丰富的研究成果。

在利用重磁异常的边界识别方法中,根据其特点可以分为数理统计、数值计算和其他类^[1]。其中数值计算类边界识别,方法灵活,可直接利用异常数据或其梯度张量数据进行运算,并将目标体的边界信息转化为便于直接观察的特殊值,如极值、零点等,其研究程度最高、应用最为广泛^[2]。

基于数值计算类的边界识别方法,又可以分为两类^[3]:一种是利用重磁异常数据或其梯度张量数据,计算

收稿日期:2021-03-09 Received Date: 2021-03-09

* 基金项目:国家自然科学基金(61973188)项目资助

模值进行边界识别,该类方法主要基本形式包括:垂直导数^[4]、总水平导数^[5]、解析信号^[6-7]、梯度矩阵的张量不变量和特征值^[8-9]等,这类方法对于深部异常体目标,边界识别结果较为模糊,但其中一些方法可降低磁化方向的影响^[6,8]。第2类是利用比值或辅以三角函数,通过计算归一化比值或相角进行边界识别,该类方法主要基本形式包括斜倾角 tilt 法^[10]、Theta 图法^[11]等,这类方法能够均衡识别出浅部、深部异常体边界,但是识别结果易出现发散、变形等问题。由于在异常目标体边界位置处,重磁异常变化率大,而利用其数据的高阶方向导数,可使变化增强,所以出现了许多第1类、第2类中的高阶导数方法,通过利用高阶导数,能够减少边界发散,使结果更为收敛。对于第1类方法,如:总水平导数的高阶导^[12]、解析信号的高阶导^[7]等,利用更高阶的导数可使浅部异常体边界更加收敛,但是对于较深目标,识别结果仍然较为模糊;对于第2类方法,如:利用高阶垂向导数的斜倾角法^[13-14]、梯度矩阵特征值的高阶导数的比值^[15]、三维解析信号高阶导数的比值^[16-17]等,同样能够减少边界发散,并且使得深部异常体边界更为明显。利用高阶导数的方法虽然能识别出深部异常体边界、减少边界发散,但是对重磁异常方向导数的计算精度的要求较高,且需要避免直接计算垂向高阶导数。

在针对深部异常体的边界识别的改进方法中,针对第2类比值类方法的较多^[18],但是方法越来越复杂,计算量较大。并需要人为设定均衡深浅部异常调节系数,然后通过对比仿真实验,不断修正达到最优,使得识别过程效率较低^[12,19]。

针对上述问题,本文提出了一系列基于重磁异常的快速均衡边界识别方法,在反正切函数方法的基础上,只需利用符号函数对重磁垂直导数数据进行均衡,即可识别浅部、深部异常体目标及边界,且更容易分辨目标与背景;在快速识别的基础上,还给出了该公式的高阶导数形式,可以得到更详细的识别结果,并通过数据验证了方法的有效性。

1 快速均衡边界识别

1.1 快速均衡边界识别公式

1) 反正切函数形式

反正切函数是边界识别中最常用的方法,可以用来均衡识别目标,垂直导数法的零值对应目标边界,极值可表示目标中心,但是对较深的目标体边界分辨率较低,可以结合两者特点,将垂直导数的强、弱异常信号进行均衡放大,实现快速边界识别。为此,提出了基于反正切函数的快速识别方法(fast edge identification of arctangent, FEI_T),公式为:

$$FEI_T = \tan^{-1}\left(\frac{k}{\partial f/\partial z}\right) \quad (1)$$

式中: k 为一个非常大的正常数,能够将重磁异常的垂直导数中的强、弱信号进行均衡放大至极大值,从而实现快速均衡边界识别。

2) 符号函数形式

对于式(1),若 k 选择太小,则会使一些弱信号放大不完全,且压制不住背景干扰,而当 k 为非常大的正数,反正切函数的计算方式可以用符号函数替代,只是将 $\pm\pi/2$ 替换为 ± 1 ,且不影响识别结果。因此,符号函数形式的快速识别方法(fast edge identification, FEI)公式为:

$$FEI = \text{sign}\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right) \quad (2)$$

式(2)可减少常数设定步骤,使得方法更加简单,且通过符号函数均衡,将垂直异常中变化大于0的数据固定极大值1,即可将微弱异常信号进行均衡放大,并将周围背景压制为固定值-1,从而更容易区分异常体与背景,实现现场的快速均衡边界识别。

3) 高阶导数形式

对于高精度的重磁梯度张量数据^[20-22],可以利用其更高阶导数的方法进行边界识别,从而显示更多细节,对于快速边界识别 FEI 法,也具有高阶导形式,仅需要垂向高阶梯度数据,其公式为:

$$FEI^n = \text{sign}\left(\frac{\partial^n f}{\partial z^n}\right) \quad (3)$$

其中, n 表示阶次,并采用 Laplace 方程计算垂直高阶导数,减少噪声放大的影响^[13],即:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = -\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (4)$$

对于重磁异常数据,FEI 法能够实现快速均衡边界识别,且能够达到一般高阶导数方法相同结果,而若为了显示更多细节,或有其高精度的梯度数据,则可以采用 FEI 法的高阶导数形式。对于磁异常数据,由于磁异常和其导数均受斜磁化的干扰,所以需要对其进行化极处理,才能使得结果更加准确^[13]。

1.2 对比的边界识别方法

为了说明本文提出方法的有效性,选取了4种经典的边界识别方法进行对比:解析信号法(analytical signal, AS)(如式(5)所示)、斜倾角总水平导数法(total horizontal derivative of the tilt angle, THDR)(如式(6)、(7)所示)、Theta 图法(Theta map, Theta)(如式(8)所示)和增强型斜倾角法(enhanced tilt angle, ETA)(如式(9)所示)。各方法分别定义如下:

$$AS = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2} \quad (5)$$

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (6)$$

其中,

$$T = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (7)$$

$$\text{Theta} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}} \quad (8)$$

$$\text{ETA}^n = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial^n f / \partial z^n}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial^n f / \partial z^n}{\partial y}\right)^2}}{\left| \frac{\partial^n f}{\partial z^n} \right|} \right) \quad (9)$$

其中, n 表示垂直导数阶次,当 $n=1$ 时,式(9)与传统的比值类边界识别方法相比,其分子高了一阶水平导数,可以使识别结果更收敛,在数据允许的情况下, n 越大即阶次越高,对深部异常体边界的收敛效果越明显,显示的细节越多。对上述边界识别方法复杂程度进行比较,如表1所示。

表1 边界识别方法的复杂程度比较
Table 1 Complexity comparison of edge identification methods

边界识别方法	计算参数数量	高阶导数数量	组合计算方法
AS	3	0	平方根
THDR	5	2	平方根和反正切函数
Theta	3	0	平方根
ETA($n=1$)	3	2	平方根和反正切函数
FEI($n=1$)	1	0	符号函数

表1列出了几种能够表示边界识别方法复杂程度的影响特征,其中计算的参量数量表示实现边界识别所需计算异常导数数据的个数,需要利用原始异常数据计算得到,如THDR法需要计算 $\partial f / \partial x$ 、 $\partial f / \partial y$ 、 $\partial f / \partial z$ 、 $\partial T / \partial x$ 、 $\partial T / \partial y$ 一共5个参数;而边界识别方法复杂程度则需要综合表中前两者影响特征的数量,计算的参数数量越多时,方法越复杂,而当计算的参数数量相同时,方法中包含的高阶导数数量越多,方法越复杂。

从原始异常数据到边界识别的整个过程中计算效率问题,主要根据计算的参数数量决定,由于方向导数需要

在空间域或频率域中计算,每进行一次导数计算,计算机都需要一定的处理时间,尤其在处理大范围异常数据时更为明显,所以当边界识别方法中所需计算的参数数量越多时,效率会越低,而导数之间的组合主要是利用各种基础数学函数进行计算,在实际操作中对效率影响程度较弱。因此,相比于表1中其他边界识别方法,FEI法($n=1$)所需计算参量最少,方法也最简单,实际应用中效率也最高。

2 理论模型实验

建立磁异常模型:2个棱柱体边均长为20 m,左下中心埋深为15 m,右上中心埋深为20 m,磁化强度为1 A/m,测区范围为 100×100 m, x 、 y 方向采集步长都为1 m,通过正演计算出模型观测数据,可以用来模拟卫星、航空、地面以及井中观测得到的数据。利用FEI法($n=1$)与传统的边界识别方法(AS法、THDR法、Theta法)和高阶导数的方法(ETA法, $n=1$)进行对比,验证本文提出方法的有效性。

1) 垂直磁化

理想情况下,当目标处于垂直磁化时,分析异常体深度对边界识别效果的影响,其中地磁倾角为 90° ,地磁偏角为 0° ,目标磁化方向与地磁方向一致,识别结果如图1所示。

对比图1垂直磁化时各个边界识别方法结果,可以看到THDR法的识别能力比AS法更强,对于浅部异常体的边界识别结果更为收敛,但这两种方法对于深部异常体的边界均不能清晰识别;Theta法与ETA法可均衡识别出浅部和深部异常体边界,但是Theta法的边界识别结果存在一定发散,且随目标体深度增加而愈加发散,而ETA法由于利用高阶水平导数,边界结果更为收敛,结果也更加准确。而FEI法与ETA法对比,可以看到,FEI法同样能够识别出深部异常体,且通过符号函数的计算,使得浅部和深部异常体均衡为固定值1,而周围背景为-1,可明显区分目标与背景,且通过选取特征值,如0,可以绘制出目标体的等值线,结果如图2所示。相比与ETA法,FEI法能够直接表示目标其边界,而ETA法则仅表示边界,这使得在某些复杂的重磁环境下,采用ETA法虽然能够很好地识别出边界,但不能很快确定目标,而FEI法目标与背景区分明显。

2) 斜磁化

实际情况往往不是垂直磁化,而倾斜磁化又会使得模型变得复杂,分析斜磁化带来边界识别效果的影响,其中地磁倾角为 60° ,地磁偏角为 0° ,目标磁化方向与地磁方向一致,识别结果如图3所示。

对比斜磁化下各个边界识别结果,由图3可以看到,

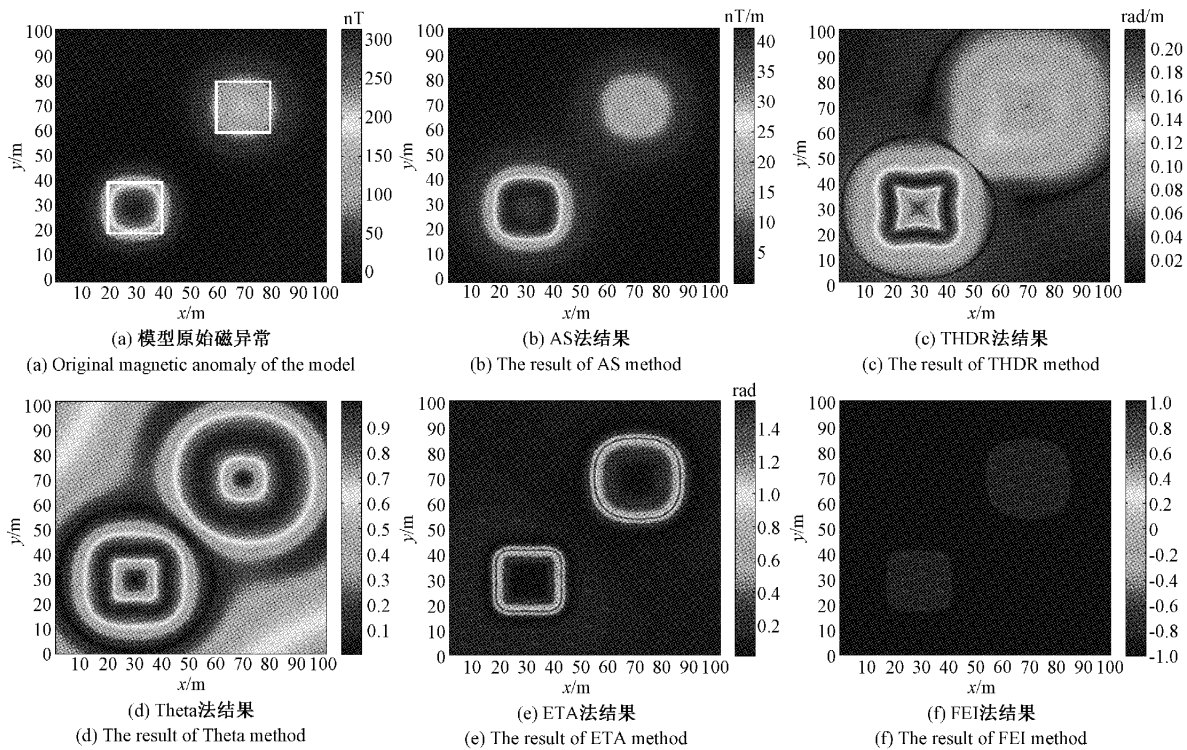


图1 垂直磁化下不同方法的边界识别结果

Fig. 1 Edge identification results of different methods under vertical magnetization

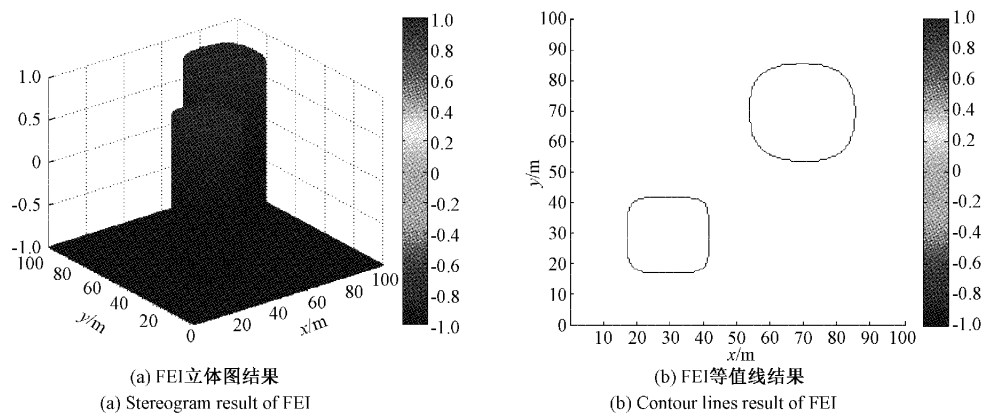


图2 FEI法立体图和边界等值线

Fig. 2 Stereogram and boundary contour for FEI method

由于倾斜磁化的影响,使得各个边界结果产生了变形以及目标位置也存在一定的偏移,其中AS法有一定能力降低磁化方向的影响,但是THDR法和Theta法受影响较大,而ETA法和FEI法识别效果相同,仍然能够圈定出目标范围,如果对斜磁化异常数据进行化极处理,则能够使得解释结果更为准确。

3) 噪声分析

由于在实际测量中,测量环境和测量仪器等因素会带来一定的噪声干扰,现对磁异常中添加不同强度信噪

比的高斯噪声,并对比分析各个边界识别结果,其中目标体均处于垂直磁化下。

(1) 信噪比为60 dB

当信噪比为60 dB时,由图4可看到各种边界识别方法均受到了噪声的影响,AS法受噪声影响最小,其次FEI法;THDR法受噪声影响最大,识别结果模糊,主要原因是该方法融合了较多的噪声数据,且需要多次计算导数;ETA法利用高阶水平导数,虽然也能增强噪声效应,但仍能够识别出边界,且结果相对于Theta法收敛,具有一定抗干扰

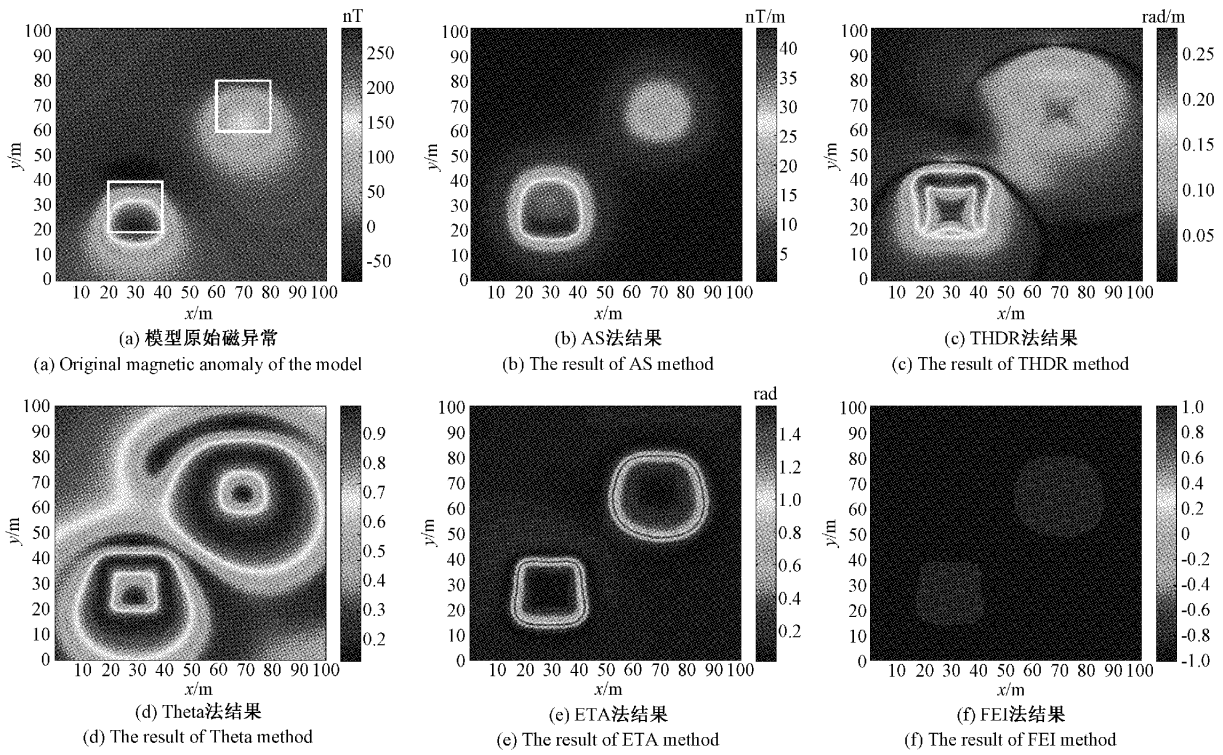


图 3 斜磁化下不同方法的边界识别结果

Fig. 3 Edge identification results of different methods under inclined magnetization

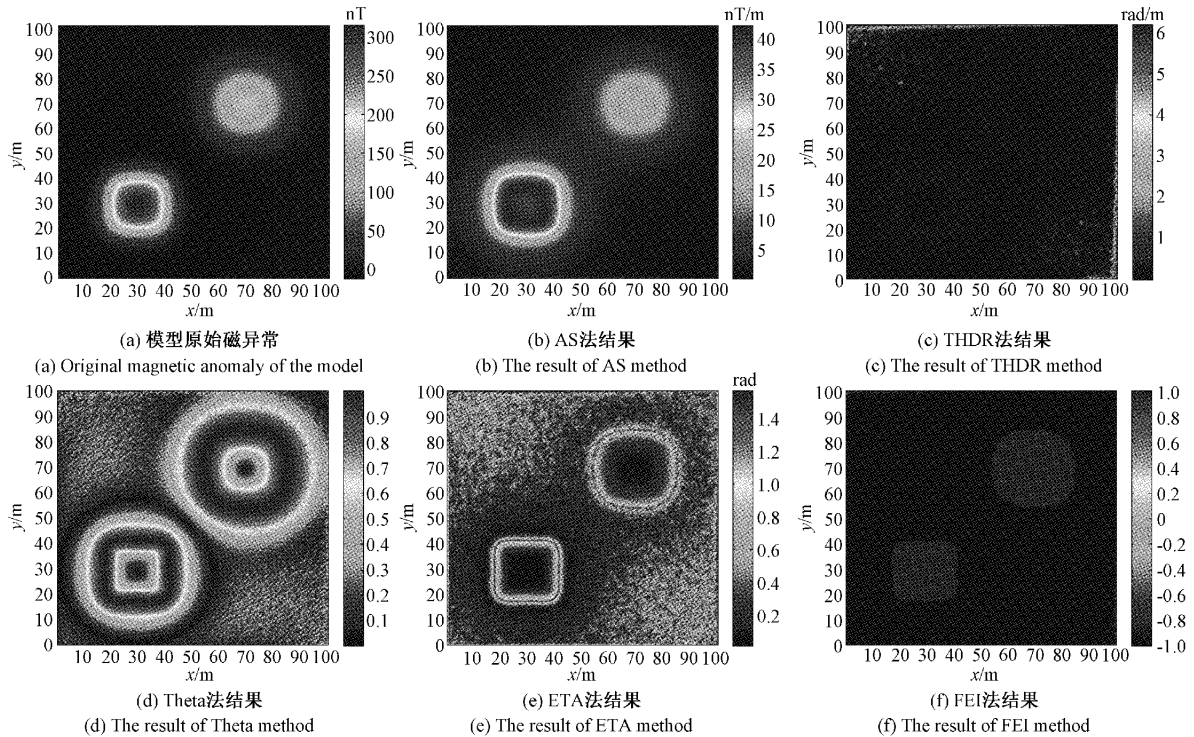


图 4 信噪比 60 dB 下不同方法的边界识别结果

Fig. 4 Edge identification results of different methods under SNR of 60 dB

能力;FEI 只利用垂直导数异常,仅一个直接噪声数据,所以受其影响较小,结果也相对于 ETA 要更好。

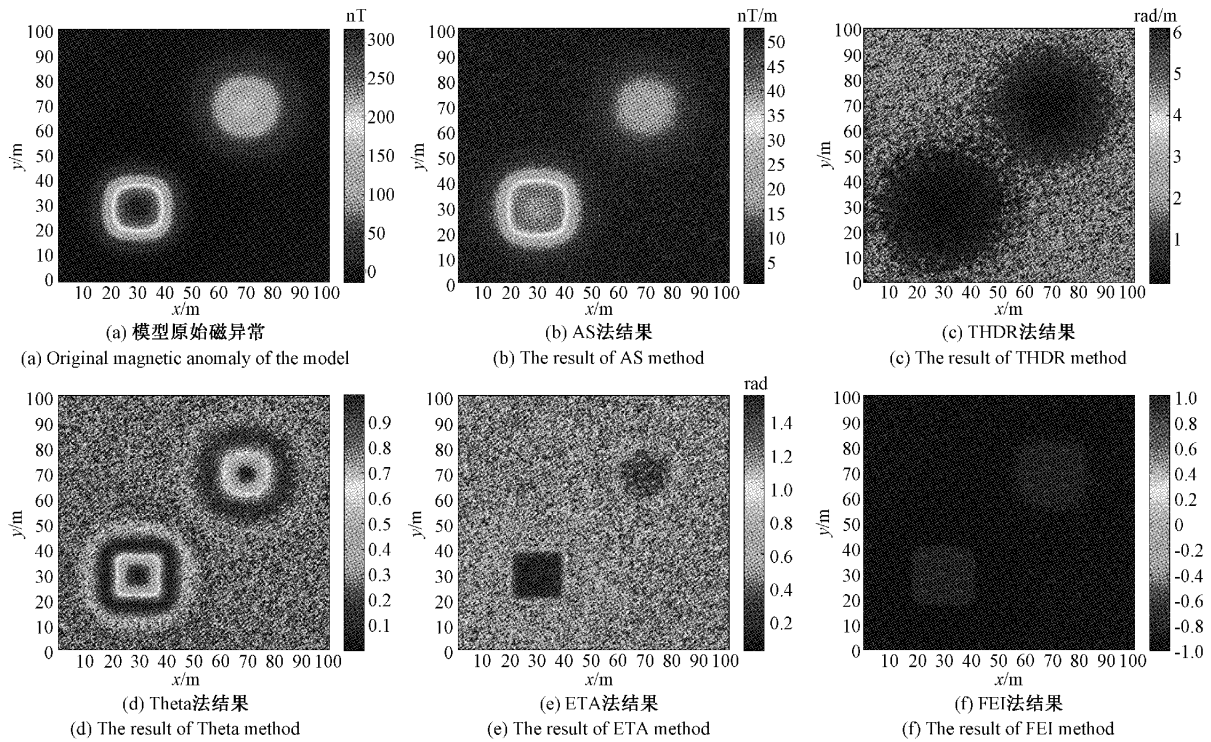


图5 信噪比 40 dB 下不同方法的边界识别结果

Fig. 5 Edge identification results of different methods under SNR of 40 dB

(2) 信噪比为 40 dB

对于严重的噪声干扰下数据,对比各个边界识别结果,由图 5 可以看到,AS 法受噪声影响仍然较小,而 THDR 已经失去了边界识别能力,对于 ETA 法,其深部异常体边界已经淹没在了背景里面中,相比之下 Theta 法虽然边界发散,但是其仍然能够识别出深部异常体边界,而 FEI 法可以通过聚集程度,仍然能够确定目标。

3 位场数据验证

3.1 磁异常数据测试

Bishop 模型为 2006 年 SEG 年度会议主题,其目的是提供一个与真实磁数据集相同复杂度的数据集,已经被许多国内外学者进行深度估计以及边界识别等相关研究^[23-24]。模型是以加利福尼亚毕晓普以北的部分火山台地的地形数据在空间坐标上按比例放大以及在深度方向上移动,从而使这些结构现在全部处于地下,用作重磁计算的测试数据集。

模型基底被假定为在地下 20 km 处并被一层非磁性沉积物所覆盖,其中磁异常同时具有高频和低频部分,场源分布复杂且多样。磁异常数据经过化极处理,边界识别结果如图 6 所示,为避免影响显示效果,仅在原始磁异常上选取 4 处区域。其中区域 1 中含有较大异常源,区

域 2 为弱异常区域,区域 3 为密集异常源,区域 4 为深部易发散区域,进行对比分析。

通过图 6 可以看到,对于区域 1 中较大目标异常源,AS 法能有较好的响应,目标突出明显,但局部细节显示能力不足,而 THDR 法的识别能力强于 AS 法,可以显示更多细节,其浅部异常边界识别结果更为收敛,但是对于弱异常或深部异常目标的识别能力不够,结果存在一定的模糊、不清晰,如区域 2、4;而 Theta 法与 ETA 法则比 THDR 法显示更多弱异常或深部异常目标体边界信息,但是 Theta 法边界结果存在一定的发散,影响边界判断,如区域 4;ETA 法的边界结果则更为收敛,对埋深不同的异常源均有很好响应,即使对于密集异常源,如区域 3,也可显示出详细的断裂构造;而通过对比 ETA 于 FEI 法可以看到,其识别结果基本相同,且 FEI 法更容易区分出目标与背景,提高了识别结果的判读。

3.2 重力数据测试

Cooper 和 Cowan 提供南非威特沃特斯兰盆地一部分的重力数据以测试归一化标准差导数 (NSTD) 方法^[25],网格间隔为 1 km,边界识别结果如图 7 所示,并进行对比分析。

如图 7(b)~(f),对于重力异常,THDR 法识别能力仍然强于 AS 法,而 Theta 法识别结果存在一定发散,ETA ($n=1$) 法的边界结果能够有效收敛,FEI ($n=1$) 法边界

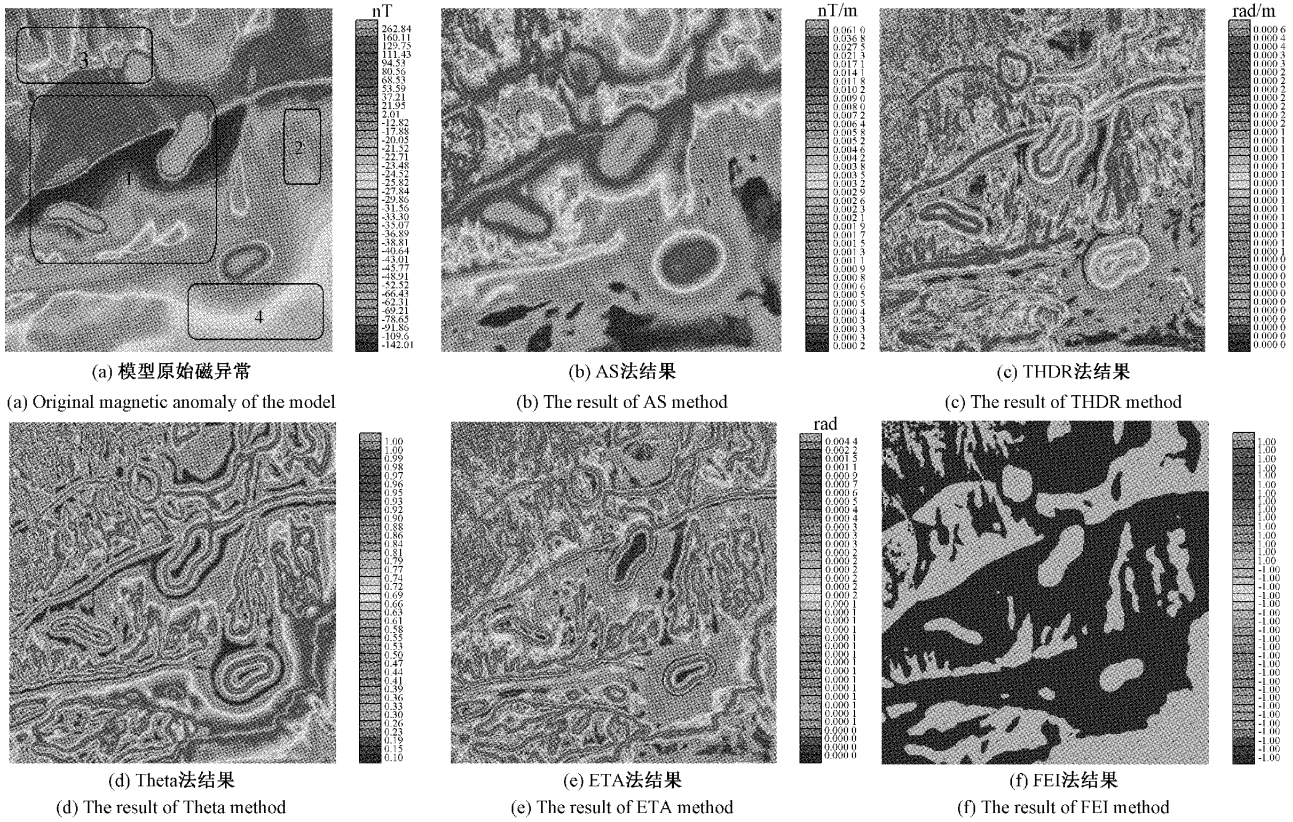
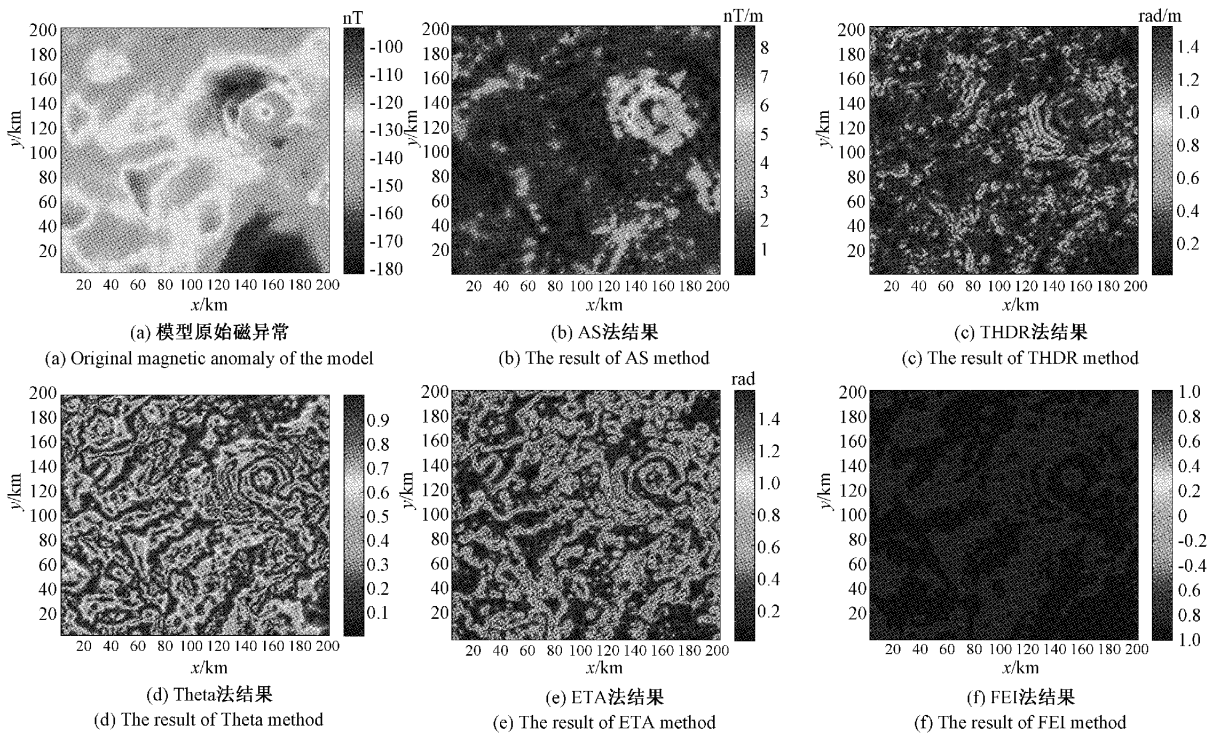


图 6 磁异常数据不同方法的边界识别结果

Fig. 6 Edge identification results of different methods for magnetic anomaly data



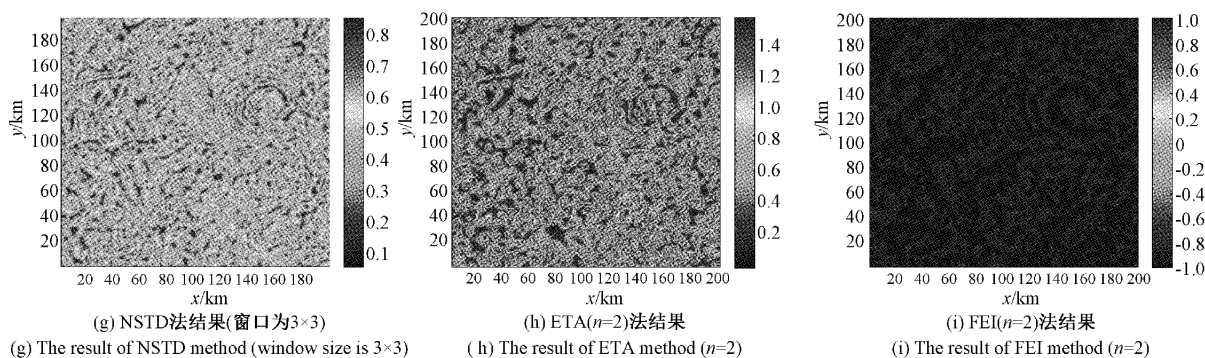


图7 重力异常数据不同方法的边界识别结果

Fig. 7 Edge identification results of different methods for gravity anomaly data

识别结果与ETA($n=1$)法相同;图7(g)~(i),NSTD法可以显示更多褶皱和断层的细节,而高阶导数ETA($n=2$)法相对于NSTD法更加清晰,FEI($n=2$)法的识别结果与ETA($n=2$)相同,且更易分辨目标与背景。

4 结 论

本文提出了一种位场(重磁)的快速均衡边界识别法,该方法仅通过符号函数和重磁异常的垂直导数,就可以均衡识别目标边界;对于需要进一步明确更多细节的情况时,则可采用其高阶导数形式,通过对模型仿真与异常数据的验证,该方法能同时识别出深浅目标及边界,方法简单有效,且更容易区分目标与背景,可以节约相关操作人员的大量时间与精力,也可以更方便嵌入各种便携式检测装备中,在异常圈定和资源勘探工作中有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] 王万银,邱之云,杨永,等. 位场边缘识别方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(1): 196-210.
WANG W Y, QIU ZH Y, YANG Y, et al. Some advances in the edge recognition of the potential field[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(1): 196-210.
- [2] 张壹,张双喜,梁青,等. 重磁边界识别方法在西准噶尔地区三维地质填图中的应用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(3): 431-440.
ZHANG Y, ZHANG SH X, LIANG Q, et al. Application of boundary identifying technologies using gravity and magnetic maps in three-dimensional geological mapping of Western Junggar Area[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(3):

431-440.

- [3] 胡双贵,汤井田,任政勇,等. 基于尺度空间技术的归一化Facet模型位场边界识别[J]. 地球物理学报, 2019, 62(1): 331-342.
HU SH G, TANG J T, REN ZH Y, et al. Normalized facet edge detection and enhancement in potential field sources with the scale-space technique[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1): 331-342.
- [4] EVJEN H M. The place of the vertical gradient in gravitational interpretations[J]. Geophysics, 1936, 1(1): 127-136.
- [5] CORDELL L. Gravimetric expression of graben faulting in santa Fe country and the espanola basin, new mexico[C]. New Mexico Geology Society Guidebook, 30th Annual Fall Field Conference, 1979: 59-64.
- [6] ROEST W R, VERHOEF J, PILKINGTON M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal[J]. Geophysics, 1992, 57(1): 116-125.
- [7] HSU S, SIBUET J C, SHYU C. High-resolution detection of geologic boundaries from potential field anomalies: an enhanced analytic signal technique[J]. Geophysics, 1996, 61(2): 373-386.
- [8] PEDERSEN L B, RASMUSSEN T M. The gradient tensor of potential field anomalies: Some implications on data collection and data processing of maps[J]. Geophysics, 1990, 55(12): 1558-1566.
- [9] 戴伟铭,黄大年,李桐林,等. 基于重力梯度结构张量特征值斜导数边界识别方法及其在南海的应用[J]. 地球物理学报, 2018, 61(6): 2494-2507.
DAI W M, HUANG D N, LI T L, et al. The edge detection method and its application in the south China

- sea based on the gravity gradient structure tensor eigenvalue[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(6): 2494-2507.
- [10] MILLER H G, SINGH V. Potential field tilt: A new concept for location of potential field sources[J]. Journal of Applied Geophysics, 1994, 32(2-3): 213-217.
- [11] WIJNS C, PEREZ C, KOWALCZYK P. Theta map: Edge detection in magnetic data[J]. Geophysics, 2005, 70(4): L39-L43.
- [12] 袁园, 黄大年, 余青露. 利用加强水平方向总水平导数对位场全张量数据进行边界识别[J]. 地球物理学报, 2015, 58(7): 2556-2565.
- YUAN Y, HUANG D N, YU Q L. Using enhanced directional total horizontal derivatives to detect the edges of potential-field full tensor data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(7): 2556-2565.
- [13] 马国庆, 黄大年, 于平, 等. 改进的均衡滤波器在位场数据边界识别中的应用[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4288-4295.
- MA G Q, HUANG D N, YU P, et al. Application of improved balancing filters to edge identification of potential field data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12): 4288-4295.
- [14] 马国庆, 杜晓娟, 李丽丽. 位场数据边界识别的新方法—增强型水平导数法[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 402-408.
- MA G Q, DU X J, LI L L. New edge detection method of potential field data-enhanced horizontal derivative method[J]. Progress in Geophys, 2013, 28(1): 402-408.
- [15] 王泰涵. 重力及其梯度张量数据高精度成像和密度反演方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- WANG T H. The study on high-precision imaging and density inversion methods of gravity and its gradient tensor data[D]. Jilin: Jilin University, 2018.
- [16] 舒晴, 马国庆, 刘财, 等. 全张量磁梯度数据解释的均衡边界识别及深度成像技术[J]. 地球物理学报, 2018, 61(4): 1539-1548.
- SHU Q, MA G Q, LIU C, et al. Balanced edge detection and depth imaging technique for the interpretation of full-tensor magnetic gradient data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(4): 1539-1548.
- [17] 王泰涵, 于平, 马国庆, 等. 磁张量梯度数据方向解析信号比值的边界识别和空间位置反演方法[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3723-3733.
- WANG T H, YU P, MA G Q, et al. Edge detection and space location inversion techniques of magnetic tensor gradient data based on ratio of analytic signal[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(10): 3723-3733.
- [18] 王林飞, 郭灿灿, 薛典军, 等. 磁梯度张量解析信号分析法及其在场源位置识别中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1164-1172.
- WANG L F, GUO C C, XUE D J, et al. Analytic signals of magnetic gradient tensor and their application to estimate source location[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1164-1172.
- [19] 郑强, 郭华, 张贵宾, 等. 基于磁力梯度全张量特征值的均衡边界识别方法[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(2): 454-464, 234.
- ZHENG Q, GUO H, ZHANG G B, et al. Equilibrium boundary recognition method based on magnetic gradient full tensor eigenvalues[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(2): 454-464, 234.
- [20] 房丰洲, 顾春阳. 高精度重力仪的测量原理与发展现状[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1830-1840.
- FANG F ZH, GU CH Y. Measurement principle and development status of high precision gravimeters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1830-1840.
- [21] 章欢开, 颜树华, 朱凌晓, 等. 冷原子干涉绝对重力精密测量与系统误差[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 1-12.
- ZHANG H K, YAN SH H, ZHU L X, et al. Precision measurement of absolute gravity by cold atom interference and the system errors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 1-12.
- [22] 张宁, 王三胜, 李华. 磁性目标定位误差分析及修正[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1719-1724.
- ZHANG N, WANG S SH, LI H. Magnetic target location error analysis and correction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1719-1724.
- [23] FLANAGAN G, BAIN J E. Depth extent—a practical

example in magnetic depth estimation [C]. 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC, 2012.

- [24] 王明, 郭志宏, 何辉, 等. 基于反双曲正切的位场边界识别技术 [J]. 物探与化探, 2013, 37 (4): 655-663.

WANG M, GUO ZH H, HE H, et al. Edge detection of potential field data using inverse hyperbolic tangent [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2013, 37 (4): 655-663.

- [25] COOPER G R J, COWAN D R. Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics [J]. Geophysics, 2008, 71 (3): H1-H4.

作者简介



田招招, 2018 年于燕山大学获得学士学位, 现于山东大学控制科学与工程学院攻读硕士学位, 主要研究方向为重磁数据处理与数据解释。

E-mail: 201834567@ mail. sdu. edu. cn

Tian Zhaozhao received his B.Sc. degree in 2018 from Yanshan University. Now, he is studying for a master degree in School of Control Science and Engineering, Shandong University. His main research interest includes gravity and magnetic data processing and data interpretation.



丁然 (通信作者), 分别于 1996 年和 2006 年在山东大学获得工学学士学位和博士学位, 现为山东大学副教授, 主要研究方向为信号检测与处理、过程系统优化等领域。

E-mail: dingrr@sdu.edu.cn

Ding Ran (Corresponding author) received her B.Sc. and Ph.D. degrees both from Shandong University in 1996 and 2006, respectively. Now, she is an associate professor in Shandong University. Her main research interest includes signal detection and processing, process system optimization, etc.