

基于 IMNSStilt 算法的磁源边界识别^{*}

周志坚 李笑东 荆志伟 王超 王言章

(吉林大学仪器科学与电气工程学院 长春 130026)

摘要: 场源边界识别是位场数据解释必不可少的任务,归一化磁源强度(NSS)因不受磁化方向影响而成为磁数据解释的主要方法。针对近场边界识别,单磁源及多磁源边界识别效果发散,以及多磁源边界识别时,磁源间相互耦合,且探测距离较远的磁源难以识别出其几何边界的问题。提出了一种新的磁性目标边界识别方法,在倾斜角边界识别方法中使用二阶偏导数并引入 NSS,并将其应用于单个长方体磁源和 3 个长方体磁源相同平面以及深浅异常的边界识别中。仿真结果表明,所提方法不仅发挥了 NSS 可以减少磁源间耦合影响和倾斜角对埋深不敏感的优势,而且使用二阶偏导数使得识别出的磁源边界更加收敛。

关键词: 边界识别;归一化磁源强度;倾斜角;多磁源

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Magnetic source boundary identification based on IMNSStilt algorithm

Zhou Zhijian Li Xiaodong Jing Zhiwei Wang Chao Wang Yanzhang

(College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Field source boundary identification is an essential task for interpreting field data, and normalized magnetic source strength (NSS) has become the main method for interpreting magnetic data because it is not affected by magnetization direction. This paper addresses issues related to near-field boundary identification, the divergent effects of single and multiple magnetic source boundary recognition, and the challenges of identifying the geometric boundaries of magnetic sources that are far apart and experiencing mutual coupling during multiple magnetic source boundary identification. A new magnetic target boundary identification method has been proposed, which uses second-order partial derivatives in the inclined angle boundary identification method and introduces NSS. This method is applied to the boundary identification of a single rectangular magnetic source, three rectangular magnetic sources in the same plane, as well as boundaries of deep and shallow anomalies. The simulation results indicate that the method proposed in this paper not only leverages the advantage of NSS in reducing the coupling effects between magnetic sources and the insensitivity of depth to inclination angle, but also allows the recognized magnetic source boundaries to converge more effectively by using second-order partial derivatives.

Keywords: boundary recognition; normalized magnetic source strength; inclination angle; multiple magnetic sources

0 引言

磁法勘探是地质调查和矿产资源勘察的重要地球物理方法之一。它具有快速、便捷等优点^[1]。边界识别是解释磁测数据的重要过程,其主要目的是通过获得的磁测数据对地下或者水下的未知磁源的几何边界进行可视化,在军事侦察(未爆物、潜艇和水雷等)、沉船打捞、未爆弹药侦察、海底电缆分布及工程地质勘探等领域有着广泛的应用^[2-5],还可应用于钼等无磁材料表面金属微弱磁异常检测等。但

是由于受到斜磁化、场源埋深、磁异常叠加以及噪声等多种因素的影响,基于磁异常数据直接进行场源的边界识别往往存在很大误差和不确定性^[6],因此更加准确地识别出磁源体的形状且使边界更加收敛一直是磁法解释工作中的重要内容^[7]。

目前,基于重磁位场边界识别的方法主要分为数理统计类和导数分析两类^[8]。其中导数分析类是目前研究最多应用最广的一类方法。此类方法主要有垂直导数(vertical derivative, VD)、总水平导数(total horizontal derivative,

THD)、解析信号振幅(analytic signal amplitude, ASM)这 3 种基本方法和倾斜角(tilt angle, TA)、Theta 图法两种基本比值法,其他方法均是在这 5 种方法的基础上发展起来的。许多基于导数分析的边界识别方法已被应用于地质结构探测^[9]。解析信号模法受磁化方向影响较小,但是受场源埋深影响比较大。而倾斜角法可以减小探测距离对于边界识别效果的影响,可以均衡深浅异常叠加的影响,同时识别出不同探测距离的磁源,但是受倾斜磁化影响。归一化磁源强度(normalized source strength, NSS)是由磁偶极子的磁梯度张量特征值推导出的旋转不变量,该方法可以减少倾斜磁化的影响,但受场源埋深影响较大^[10]。王泰涵等^[11]提出将磁张量梯度数据引入到解析信号比值中进行边界识别,准确计算出地质体范围和深度,具有较高的分辨率和精度。郑强等^[12]提出利用全张量特征值方法进行边界识别,需要相关人员不断调整取值,识别效率低。高慧杰^[13]提出利用磁梯度张量各分量及张量不变量进行边界识别,并通过最优化方法反演刻画磁性体边界。刑海燕等^[14]提出结合改进梯度下降算法优化磁梯度张量组合不变量算法对管道缺陷进行边界识别,为工程管道缺陷识别提供可行办法。近年来深度学习开始应用于地球物理领域。王劲楠等^[15]提出了基于生成对抗网络(GAN)和长短期记忆(LSTM)的改进 T-L 磁补偿模型,该方法显著提升磁测数据的质量。李春晖等^[16]提出了基于 YOLOv8 的油气管道漏磁检测智能识别算法,显著提高了检测效率,降低了人工成本。赵鹏程等^[17]提出利用改进的 YOLOv5 网络模型对漏磁缺陷图像进行智能识别,提高了检测精度。唐建华等^[18]提出了基于复合骨干网络的漏磁检测方法。Liu 等^[19]提出在求解电阻率数据反问题中使用 U-Net 神经网络的方法,提高深部地区反演精度。张政^[20]提出将迁移学习思想与深度残差网络结合用于检测地下断层。张志厚等^[21]提出 PFD-Net 网络用于边界识别,大大提高了预测精度。刘定洲等^[22]提出利用 U-Net 卷积神经网络用于识别海底磁异常条带,此方法有效提高磁条带的识别效率和精度。Cheng 等^[23]提出利用 U-Net 网络对红海盆地地磁异常源体进行了边界识别,验证了该方法的有效性。

数理统计边界识别方法比常规方法识别更细致,但在识别过程中需要通过滑动窗口方式进行计算,相对数值计算类边界识别法其效率会变低。而深度学习需要构建大量高质量样本数据用于训练网络,训练过程复杂且计算成本高。

因此,本文提出一种新的导数类边界识别方法,针对多磁源间相互耦合和磁源识别边界发散的问题,将 NSS 引入到倾斜角中用于减少倾斜磁化缩小磁源间耦合影响,并使用二阶微分用以提升边界收敛度,通过理论和实际模型对比分析了本文方法和几种经典方法的效果,描述了该方法相对于其他方法在减少磁源间相互耦合和识别边界发散方面上的优势。

1 理 论

THD 最开始应用于重力异常解释中,后来通过将磁异常变换为磁源重力异常后应用于磁异常探测。该方法通过极大值标定磁异常边界,其表达式为:

$$\text{THD} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

式中: ΔT 为总磁场的模量值, $\partial \Delta T / \partial x$ 和 $\partial \Delta T / \partial y$ 分别为总磁场模量在水平方向上的偏导数。

ASM 又称总梯度模量法,该方法通过计算磁异常水平与垂直轴向导数的总模值完成边界识别。与 THD 方法相似,利用极大值来圈定边界,其表达式为:

$$\text{ASM} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial z}\right)^2} \quad (2)$$

式中: ΔT 为总磁场的模量值, $\partial \Delta T / \partial x$ 、 $\partial \Delta T / \partial y$ 和 $\partial \Delta T / \partial z$ 分别为总磁场模量在 3 个轴正交方向上的偏导数。

Theta 图法是基于 ASM 提出的,该方法的表达式为:

$$y = \frac{\text{THD}}{\text{ASM}} \quad (3)$$

式中: THD 为总水平导数, ASM 为解析信号振幅, Theta 图法的取值范围为 0~1,并且极大值对应磁源边界。

磁梯度张量可以由一个二阶矩阵表示:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{G}$ 为磁梯度张量, $B_i (i = x, y, z)$ 为磁场三分量, $B_{\alpha\beta} (\alpha, \beta = x, y, z)$ 为磁梯度张量的 9 个分量,在静磁场中,磁梯度张量矩阵可以对角化,只有 5 个张量分量相对独立。 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 表示 $\mathbf{G}$ 的特征值, $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ 和 $\mathbf{V}_3$ 是与特征值对应的特征向量,则 $\mathbf{G}$ 可表示为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_3 \\ v_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_3 \\ v_2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

特征值满足 $\lambda^3 - I_0 \lambda^2 + I_1 \lambda - I_2 = 0$, 其中, $|\lambda_1| \geq |\lambda_3|$, $|\lambda_2| \geq |\lambda_3|$, $\lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_1$, λ_3 为中间特征值, λ_1 和 λ_2 分别为最小和最大特征值,归一化磁源强度 μ 表示为:

$$\mu = \sqrt{-\lambda_2^2 - \lambda_1 \lambda_3} \quad (6)$$

磁偶极子的归一化磁源强度在简单模型中的表示为:

$$\mu = \frac{3C_m m}{|t - t_0|^4} \quad (7)$$

式中: C_m 为模型体形态相关量, $C_m = 10^{-7} \text{ H/m}$; m 为磁偶极矩; $t - t_0$ 为场源与观测点距离。

梯度是异常体在位场中变化率最大的地方。利用位场总水平导数与垂向导数的比值定义了倾斜角,其表达式为:

$$\text{tilt} = \arctan\left(\frac{\partial u / \partial z}{\sqrt{(\partial u / \partial x)^2 + (\partial u / \partial y)^2}}\right) \quad (8)$$

其中, u 是势场标量, $\partial u / \partial x$ 、 $\partial u / \partial y$ 、 $\partial u / \partial z$ 分别表示 u 在 3 个轴正交方向上的偏导数。磁场的倾斜角是一个具有固定阈值的无量纲特征,在物体上为正值,在边界处为 0,在物体外为负值。对于深部场源,即使它的垂直梯度和水平梯度都很小,但两者的比值仍然会很大,所以对场源埋深不敏感,可以同时描述不同深度和强度的磁源,特别适合多个目标的数量和分布。

但是 Tilt 倾斜角法一个显著缺点是它对磁化方向的敏感性。虽然可以在一定程度上可以识别出区域内多个目标的分布和数量,但识别区域会受到磁化方向的影响并偏离^[24]。磁梯度张量不变量中的 NSS 对磁化方向不敏感可以减小来自临近源的干扰,因此将 NSS 引入到倾斜角法中,得到一种改进的倾斜角(normalized source strength tilt, NSSStilt):

$$\text{NSSStilt} = \arctan\left(\frac{\partial u / \partial z}{\sqrt{((\partial u / \partial x)^2 + (\partial u / \partial y)^2 + (\partial u / \partial z)^2)^{-2}}}\right) \quad (9)$$

其中, $\partial u / \partial x$ 和 $\partial u / \partial y$ 分别表示 NSS 在 x 和 y 方向的水平导数,可在空间域采用有限差分法计算, $\partial u / \partial z$ 可在频率域由傅里叶变换得到。

对方向水平导数应用高阶导数可以进一步增强边界识别的分辨率^[25],在倾斜角计算中使用双曲正切函数的实部可以更好地描绘物体的边缘。因此,为了区分相邻场源体引起的叠加异常,特别是提高对位场中细微趋势或线性异常特征的识别能力,本文提出了改进的 NSSStilt(improved normalized source strength tilt, IMNSSStilt)识别方法。

对于多磁源识别情况来说,识别区域会收到磁化方向的影响而偏离,而归一化磁源强度可以减少倾斜磁化,对磁化方向不敏感,为了减少来自临近源之间的相互耦合,将其引入到倾斜角法中^[26]。袁同等^[27]应用高阶导数定义加强解析信号振幅来提高边界的分辨率,为了提高边界检测的分辨率,使用高阶导数来改进 NSSStilt。同时在分母上引入调节因子,防止分母为 0,通常调节因子取 1 为宜^[28],其公式推导过程为:

$$\text{NSSStilt1} = \arctan\left(\frac{\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)^2 + k}}\right) \quad (10)$$

在对重磁位场数据解释的工作大多是基于等值线图上进行的,不同的等值线网格化方式,追踪的算法也不同。归

一化垂向导数是利用了反正切函数特有的属性变换了图示方式,对等值线进行细化处理,有助于突出位场形状减少冗余信息^[29],因此根据反双曲正切函数在 0 附近近似线性,可以保持主要特征形态的特性, arctanh 函数和 arctan 函数实部特性如图 1、2 所示,将反双曲正切函数引入到公式中,如式(11)~(13)所示。

$$z = \tanh m = \frac{\sinh m}{\cosh m} = \frac{e^m - e^{-m}}{e^m + e^{-m}} \quad (11)$$

$$m = \tanh^{-1} z = 0.5 \ln \frac{1+z}{1-z} \quad (12)$$

IMNSSStilt =

$$\tanh^{-1}\left(\frac{\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)^2 + k}}\right) \quad (13)$$

式中: u 为 NSS, k 为调节因子, $\partial u^2 / \partial z^2$ 为垂向二阶导数, $\partial u^2 / \partial x \partial z$ 、 $\partial u^2 / \partial y \partial z$ 为垂向一阶导数在 x 、 y 方向的偏导。

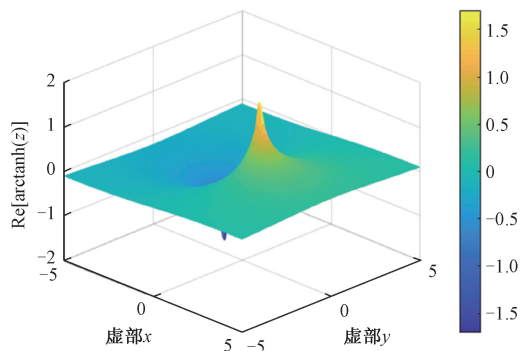


图 1 arctanh 函数实部特性

Fig. 1 Real part characteristics of the arctanh function

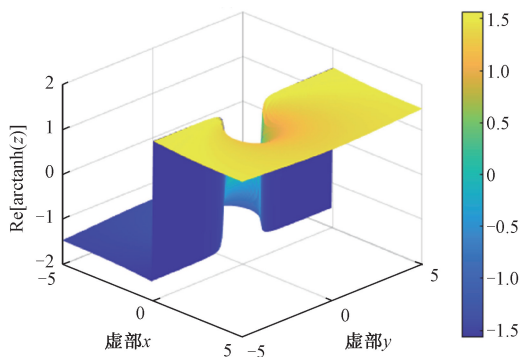


图 2 arctan 函数实部特性

Fig. 2 Real part characteristics of the arctan function

本文采用磁异常边界误差率对边界识别效果进行定量分析,边界误差率如式(14)所示。

$$\epsilon = (W - W_0) / W_0 \quad (14)$$

式中: W 为标定的磁目标的宽度, W_0 为实际的磁目标模型宽度。当 $W > 0$ 时,说明标定的磁目标宽度相对于真实磁

目标模型宽度扩大了,当 $W < 0$ 时,说明标定的磁目标宽度相对于真实的磁目标模型宽度小。

为了更好地评价识别效果,在使用边界误差率的同时,也引入平均 Hausdorff 距离来对识别效果进行评价。经典 Hausdorff 距离是一种极大极小距离,用来描述两组点集之间的相似程度,考虑到经典 Hausdorff 距离容易受到外部干扰,导致计算结果存在较大误差,本文引用平均 Hausdorff 距离:

$$d_{MH}(A,B) = \max\{d_m(A,B),d_m(B,A)\} \tag{15}$$

其中:

$$d_m(A,B) = \frac{1}{N_A} \sum_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \tag{16}$$

$$d_m(B,A) = \frac{1}{N_B} \sum_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \tag{17}$$

式中: A 和 B 代表两个有限点集; N_A 表示点集 A 中的点的个数; N_B 表示点集 B 中的点的个数。

2 仿真实验

为了比较该方法对场源边界的识别效果,本文通过 COMSOL 建立三维长方体磁源模型,仿真参数如表 1 所示,选用 ASM、THD、Theta、NSS、NSStilt 这 5 种位场边界识别方法对组合模型进行理论计算,对比分析不同边界识别方法对单个磁源边界识别能力以及相邻磁源叠加异常的区分能力。

表 1 三维目标仿真参数
Table 1 3D target simulation parameters

模型	磁化强度/(A·m ⁻¹)	个数	磁化倾角/(°)	磁化偏角/(°)	地磁场强度/nT	磁源大小/m
单个目标		1				
多目标相同平面	6	3	30	60	50 000	40×70×10
多目标深浅异常		3				

2.1 单个长方体磁源边界识别

对单个长方体磁源进行边界识别,测量平面距离磁源间距 15 m,对单个长方体磁源的边界识别效果如图 3~8 所示。从识别效果可以看出对于磁异常信号明显且无叠加干扰影响的单目标模型,导数类别的边界识别效果与理论边界的对应效果较为贴合。但是本文所提出的 IMNSStilt 方法通过在倾斜角法中改进二阶偏导数,使得边界更加收敛,从图 8 和表 2 可以看出,IMNSStilt 方法相比其他 5 种方法边界更加收敛,最为贴合实际边界。

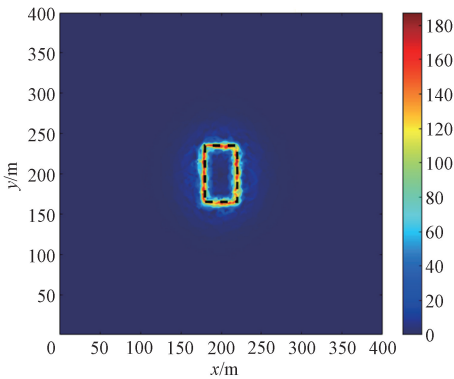


图 3 THD 边界识别

Fig. 3 Boundary identification using the THD

2.2 3 个长方体相同平面边界识别

对 3 个长方体相同平面进行边界识别,3 个长方体磁源的中心位置分别为 (100,200,30)、(200,200,30)、(300,200,30),3 个磁源水平间距 100 m,测面间距 15 m,以上是

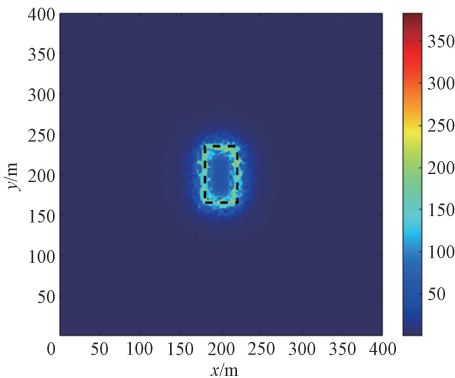


图 4 ASM 边界识别

Fig. 4 ASM for boundary identification

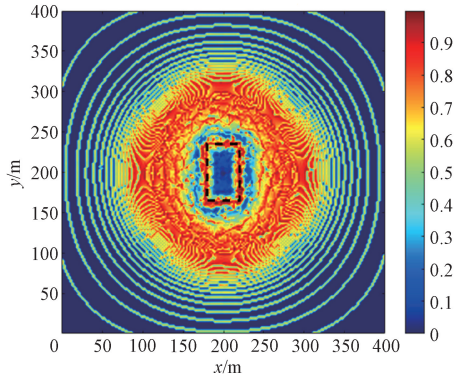


图 5 Theta 图法边界识别

Fig. 5 Boundary identification using Theta diagram method

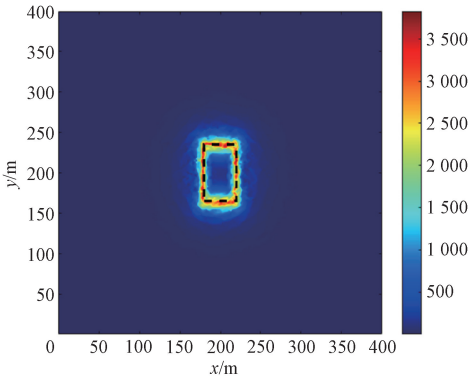


图 6 NSS 边界识别

Fig. 6 NSS for boundary identification

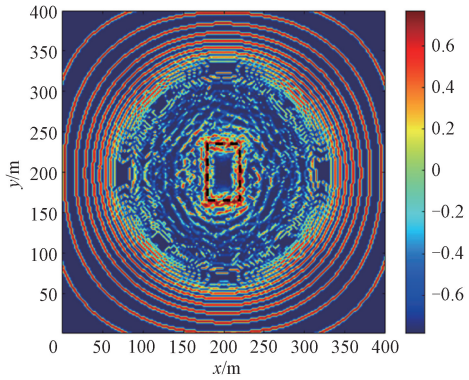


图 7 NSSStilt 边界识别

Fig. 7 NSSStilt boundary recognition

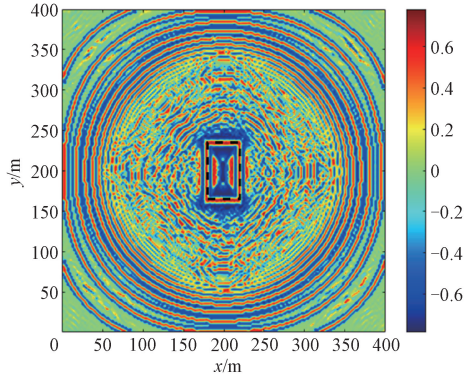


图 8 IMNSSStilt 边界识别

Fig. 8 IMNSSStilt boundary recognition

不同边界识别方法对理论磁异常的处理效果。识别效果如图 9~14 所示。从图 9 可以看出,THD 可以较好地识别出磁异常边界,与黑色虚线框实际磁源位置形状吻合,THD 利用极大值来圈定磁异常边界,对比图 9 效果可以看出,极大值集中在实际边界上。ASM 也是利用极大值来确定磁源边界,从图 10 可以看出,极大值分布在实际边界位置,但是相比 THD 方法边界比较发散。Theta 图法

表 2 单个磁源各边界识别方法误差对比

Table 2 Comparison of the error in boundary identification methods for a single magnetic source

方法	x 轴向 误差	y 轴向 误差	平均 Hausdorff 距离/m
THD	0.05	0.02	1.22
ASM	0.10	0.08	3.44
Theta	0.10	0.10	4.03
NSS	0.08	0.02	1.75
NSSStilt	0.05	0.10	3.64
IMNSSStilt	0.02	0.01	0.53

利用极大值来确定磁异常边界的,由于该方法含有低阶导数,导致边界比较发散分辨率较低,受磁化方向的影响,从图 11 可以看出,边界比较发散且磁源之间存在一定的耦合。对比图 12~14 和表 3 可以看出,本文所提的 IMNSSStilt 方法相比 NSS 方法和 NSSStilt 方法边界更加收敛。

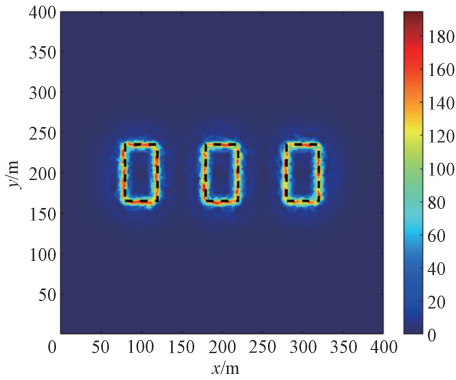


图 9 THD 边界识别

Fig. 9 Boundary identification using the THD

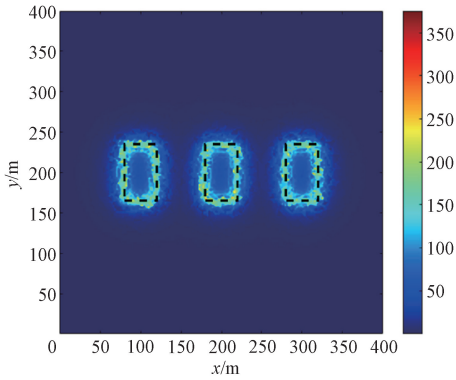


图 10 ASM 边界识别

Fig. 10 ASM for boundary identification

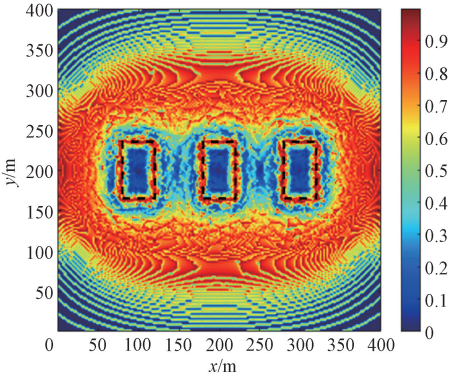


图 11 Theta 图法边界识别

Fig. 11 Boundary identification using Theta diagram method

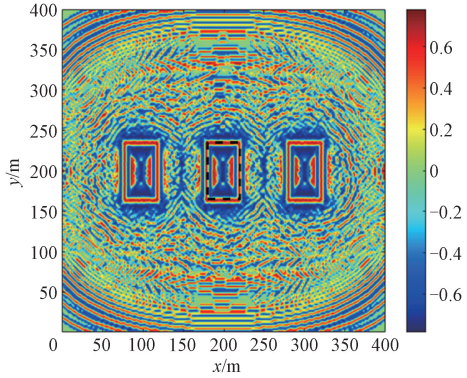


图 14 IMNSStilt 边界识别

Fig. 14 IMNSStilt boundary recognition

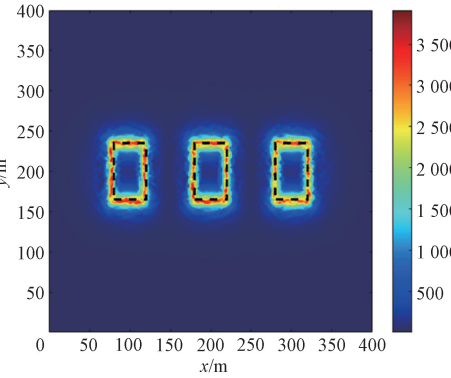


图 12 NSS 边界识别

Fig. 12 NSS for boundary identification

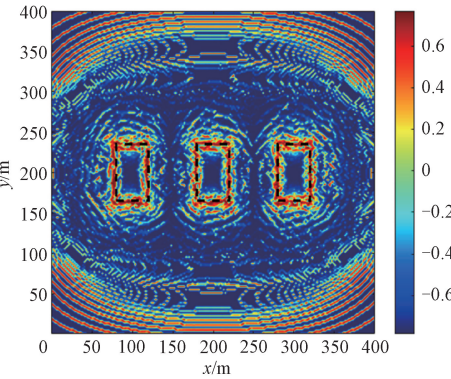


图 13 NSStilt 边界识别

Fig. 13 NSStilt boundary recognition

表 3 多个磁源各边界识别方法误差对比

Table 3 Comparison of errors in boundary recognition methods for multiple magnetic sources

方法	x 轴向 误差	y 轴向 误差	平均 Hausdorff 距离/m
THD	0.05	0.02	1.43
ASM	0.15	0.08	4.10
Theta	0.20	0.10	5.32
NSS	0.05	0.05	2.02
NSStilt	0.10	0.08	3.44
IMNSStilt	0.02	0.01	0.53

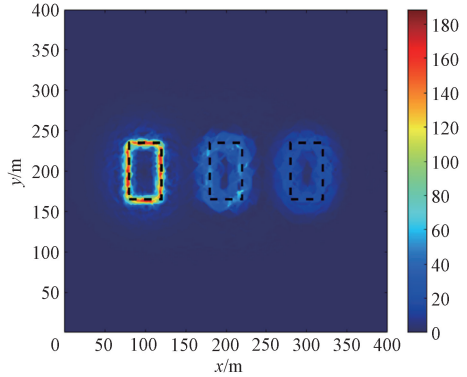


图 15 THD 边界识别

Fig. 15 Boundary identification using the THD

2.3 3 个深浅异常长方体磁源边界识别

对 3 个深浅异常的长方体磁源进行边界识别,3 个长方体磁源的中心位置分别为(100,200,30)、(200,200,22)、(300,200,14),3 个磁源水平间距 100 m,磁源间水平间距 8 m,测面距离最近磁源的间距 15 m,对于 3 个深浅异常磁源的边界识别效果如图 15~20 所示。其中 THD、ASM 和 NSS 方法对于浅层磁源识别效果较差,边界模糊,只能识

别出距离测量平面近的磁源且磁源边界比较发散。从图 17 可以看出,Theta 图法虽然可以在一定程度上均衡深浅异常的影响,但是受倾斜磁化影响较大,磁源之间相互耦合,越深层的磁源边界越发散,识别效果依旧不好。从图 19 可以看出 NSStilt 方法可以识别出深层磁源形状,但是边界比较发散。相比之下,从图 20 以及表 4 中可以观察到,本文所提出 IMNSStilt 方法,不仅可以均衡深浅异常磁源,而且在引入 NSS 后有效减少来自临近源的干扰,并且在结合二阶导数后,相比 NSStilt 边界更加收敛。

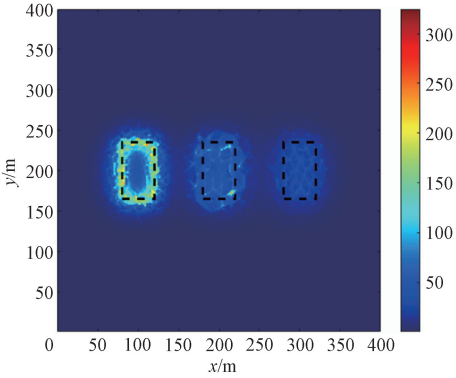


图 16 ASM 边界识别
Fig. 16 ASM for boundary identification

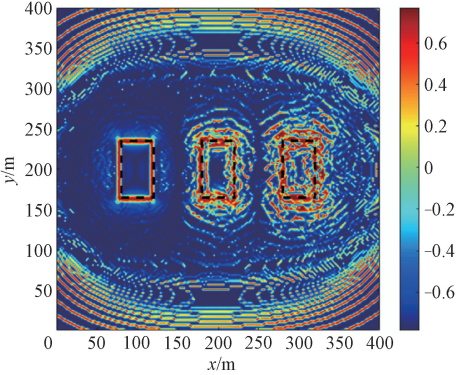


图 19 NSSStilt 边界识别
Fig. 19 NSSStilt boundary identification

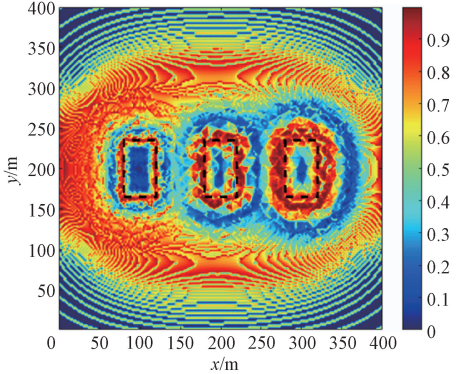


图 17 Theta 图法边界识别
Fig. 17 Boundary identification using Theta diagram method

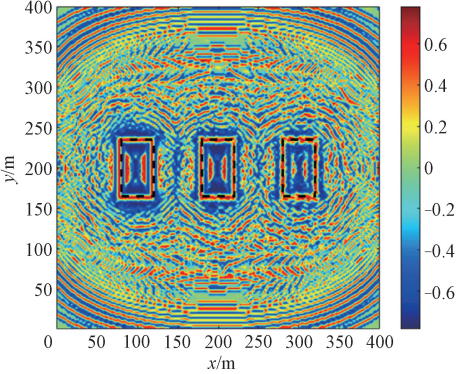


图 20 IMNSSStilt 边界识别
Fig. 20 IMNSSStilt boundary recognition

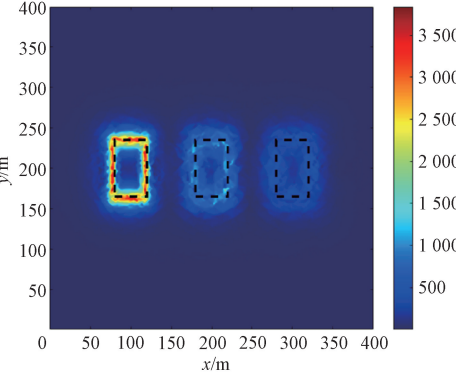


图 18 NSS 边界识别
Fig. 18 NSS for boundary identification

表 4 多个磁源深浅异常各边界识别方法误差对比
Table 4 Comparison of errors in boundary identification
methods for multiple magnetic source depth anomalies

方法	x 轴向 误差	y 轴向 误差	平均 Hausdorff 距离/m
THD	0.05	0.05	2.02
ASM	0.13	0.08	3.82
Theta	0.25	0.11	6.31
NSS	0.10	0.08	3.44
NSSStilt	0.02	0.01	0.74
IMNSSStilt	0.02	0.01	0.53

2.4 3 个深浅异常倾斜长方体磁源边界识别

对 3 个深浅异常的倾斜长方体磁源进行边界识别, 3 个长方体磁源的中心位置分别为(100, 200, 30)、(200, 200, 22)、(300, 200, 14), 3 个磁源水平间距 100 m, 磁源间水平间距 8 m, 测面距离最近磁源的间距 15 m, 倾斜角度与水平面成 30° 夹角, 如图 21~26 所示。可以看出, 对于 3 个不同平面的倾斜长方体磁源, THD、ASM 和 NSS 这

3 种方法对于深层磁源识别效果较差, 几乎被浅层磁源信号淹没, 而 Theta 图法和 NSSStilt 法对于深层磁源虽然可以识别出大致轮廓, 但是深层磁源识别效果比较发散。而本文所提出的 IMNSSStilt 方法对于深层的倾斜板状磁源识别效果相对更加收敛。

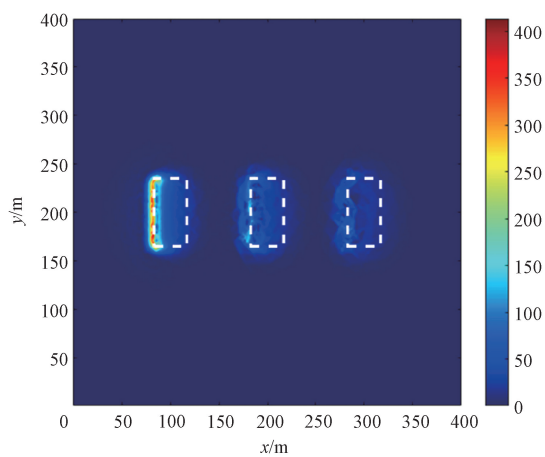


图 21 THD 边界识别

Fig. 21 Boundary identification using the THD

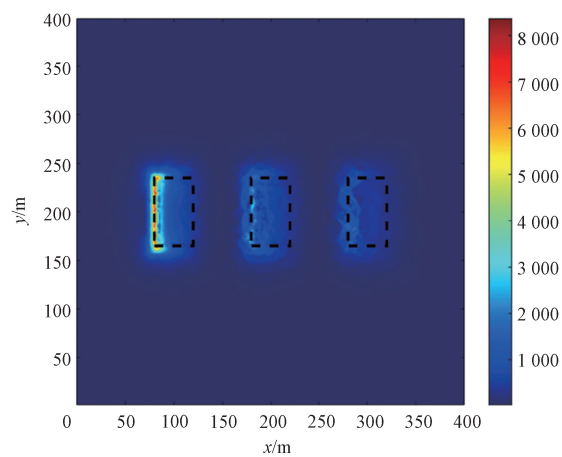


图 24 NSS 边界识别

Fig. 24 NSS for boundary identification

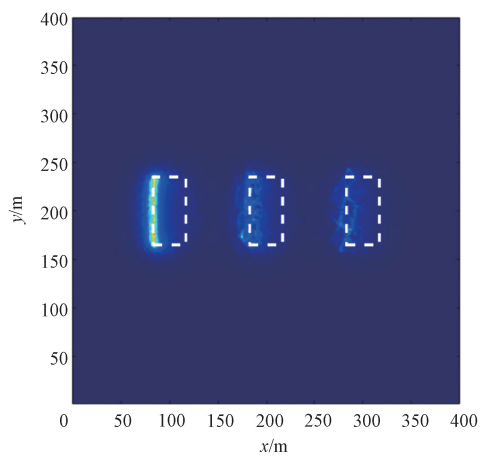


图 22 ASM 边界识别

Fig. 22 ASM for boundary identification

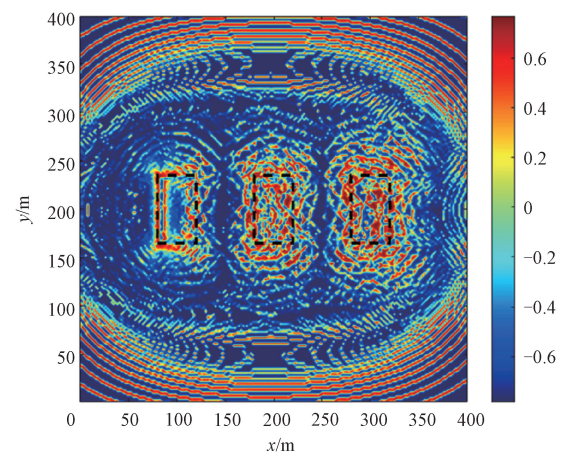


图 25 NSStlt 边界识别

Fig. 25 NSStlt boundary identification

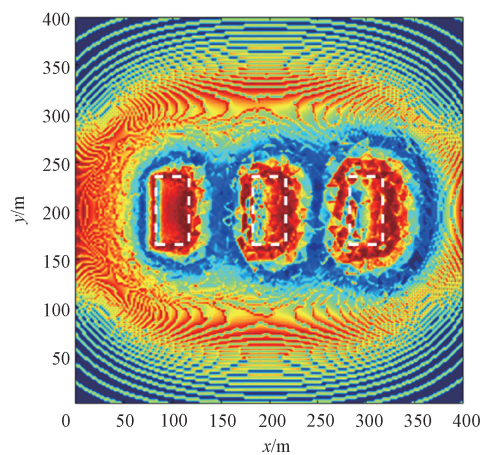


图 23 Theta 图法边界识别

Fig. 23 Boundary identification using Theta diagram method

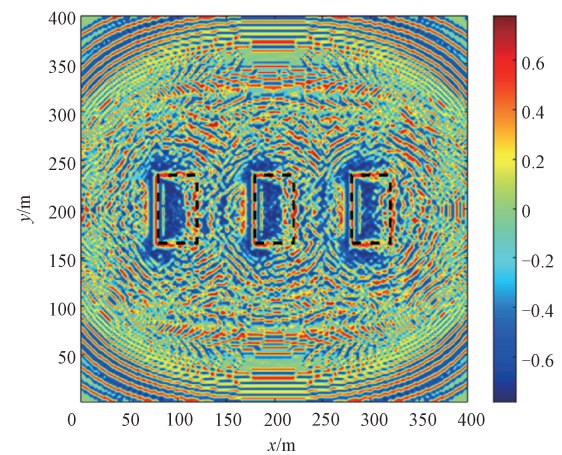


图 26 IMNSStlt 边界识别

Fig. 26 IMNSStlt boundary recognition

2.5 边界识别效果

为验证 IMNSStilt 算法在噪声环境下的边界识别效果,在磁异常信号上分别加入 -1 、 2 、 5 dB 信噪比的高斯白噪声作为原始信号,以单个长方体磁源模型识别为例分析。

1)5 dB 噪声下识别效果

从 5 dB 噪声下识别效果(图 27~32)可以看出,ASM 受噪声影响比较大,识别边界范围模糊,但是本文所提出的 IMNSStilt 方法相较于其他 5 种方法,识别出的边界是最收敛的。

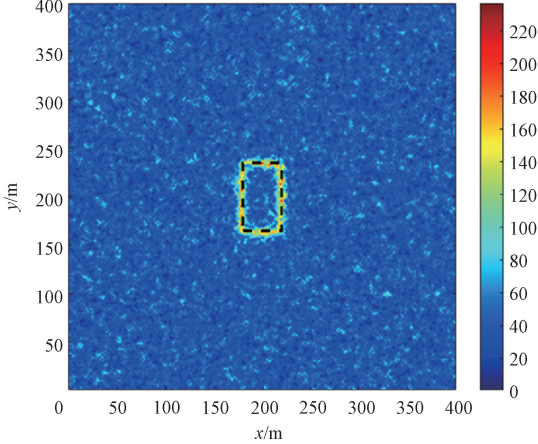


图 27 THD 边界识别

Fig. 27 Boundary identification using the THD

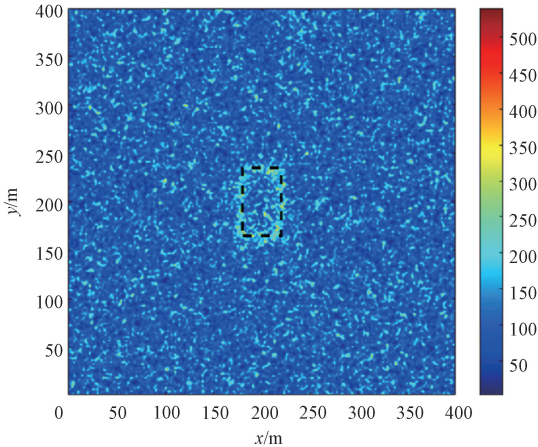


图 28 ASM 边界识别

Fig. 28 ASM for boundary identification

2)2 dB 噪声下识别效果

从 2 dB 噪声环境下的识别效果(图 33~38)可以看出 ASM 和 Theta 图法几乎淹没在噪声里,识别出的边界十分模糊,而 IMNSStilt 方法的识别效果依旧可以较清晰的识别出边界,且识别效果优于 NSStilt 方法。

3) -1 dB 噪声下识别效果

从 -1 dB 噪声环境下识别效果(图 39~44)可以看出

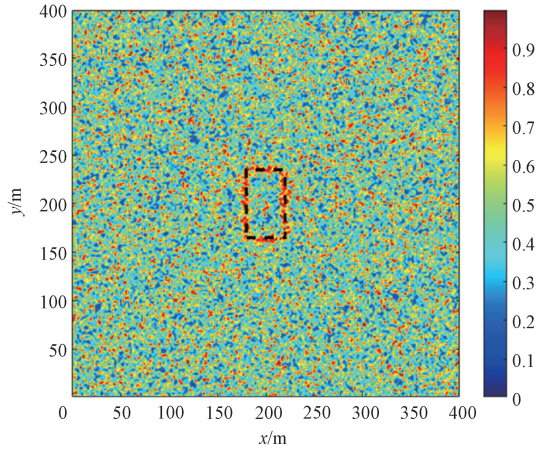


图 29 Theta 图法边界识别

Fig. 29 Boundary identification using Theta diagram method

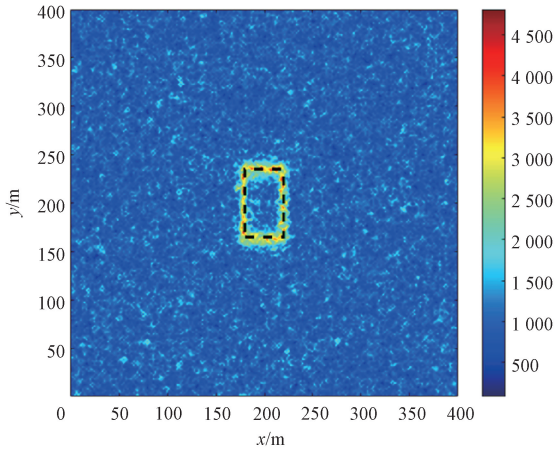


图 30 NSS 边界识别

Fig. 30 NSS for boundary identification

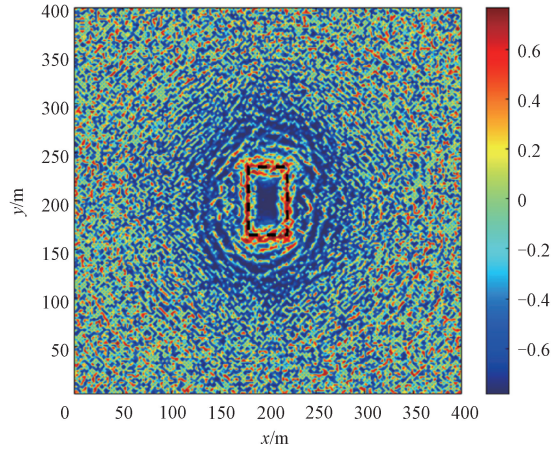


图 31 NSStilt 边界识别

Fig. 31 NSStilt boundary identification

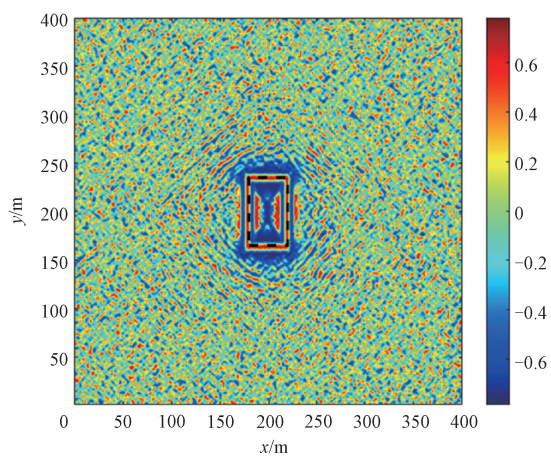


图 32 IMNSStilt 边界识别

Fig. 32 IMNSStilt boundary recognition

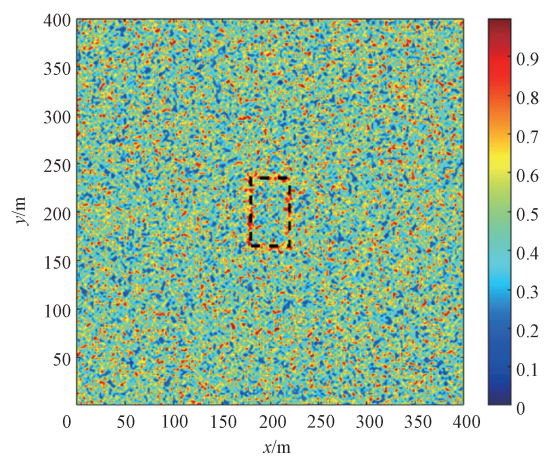


图 35 Theta 图法边界识别

Fig. 35 Boundary identification using Theta diagram method

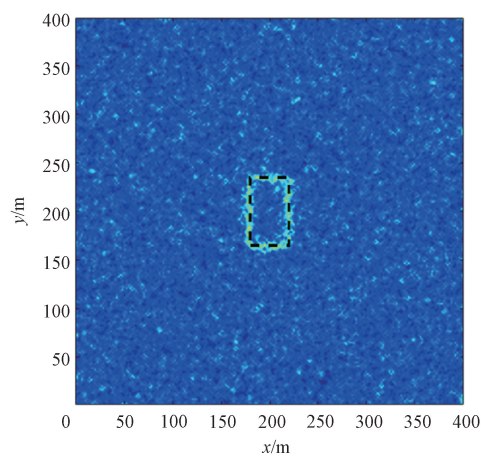


图 33 THD 边界识别

Fig. 33 Boundary identification using the THD

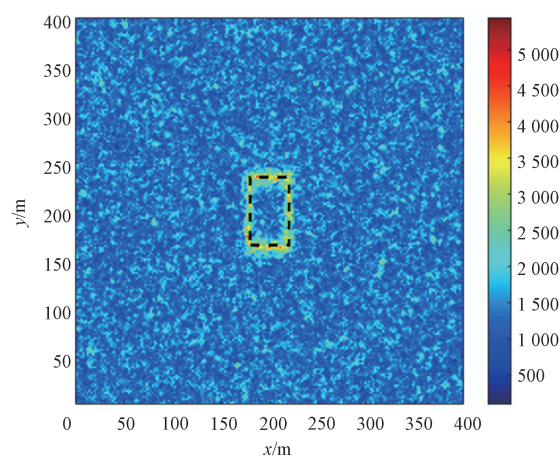


图 36 NSS 边界识别

Fig. 36 NSS for boundary identification

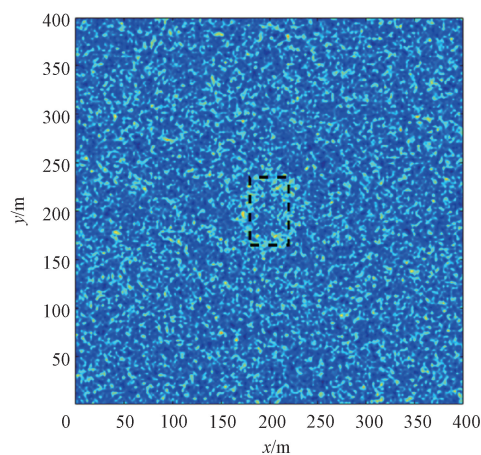


图 34 ASM 边界识别

Fig. 34 ASM for boundary recognition

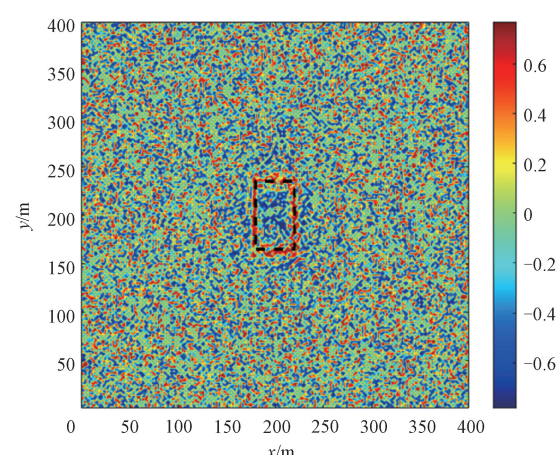


图 37 NSSStilt 边界识别

Fig. 37 NSSStilt boundary identification

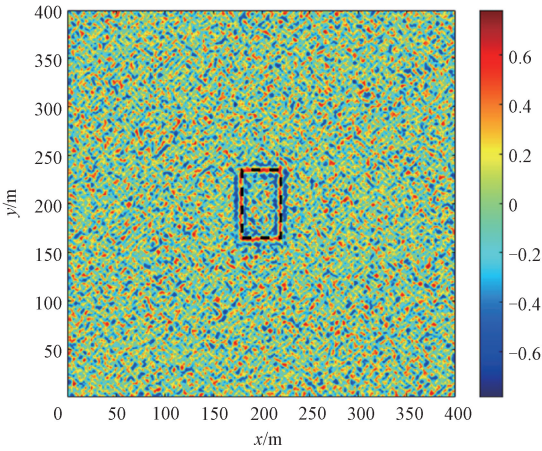


图 38 IMNSStilt 边界识别
Fig. 38 IMNSStilt boundary identification

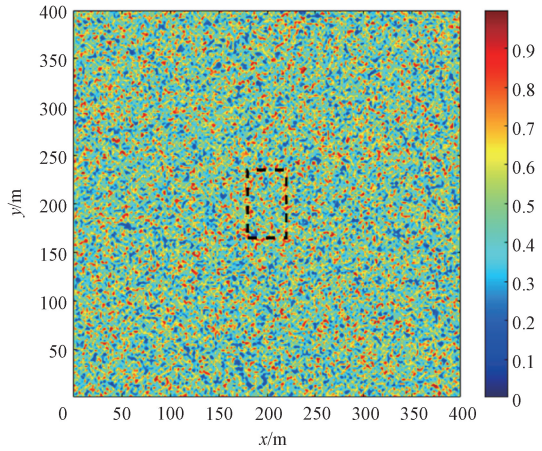


图 41 Theta 图法边界识别
Fig. 41 Boundary identification using Theta diagram method

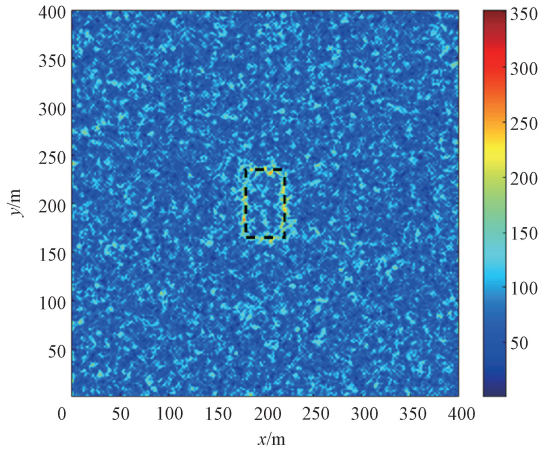


图 39 THD 边界识别
Fig. 39 THD for boundary identification

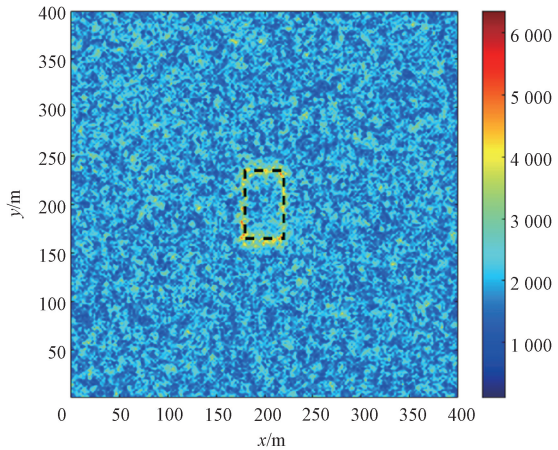


图 42 NSS 边界识别
Fig. 42 NSS for boundary identification

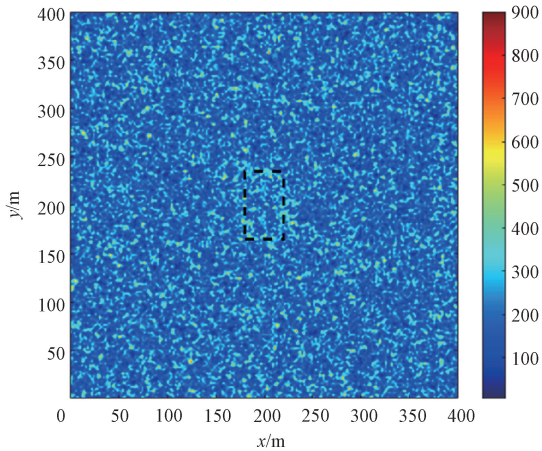


图 40 ASM 边界识别
Fig. 40 ASM for boundary identification

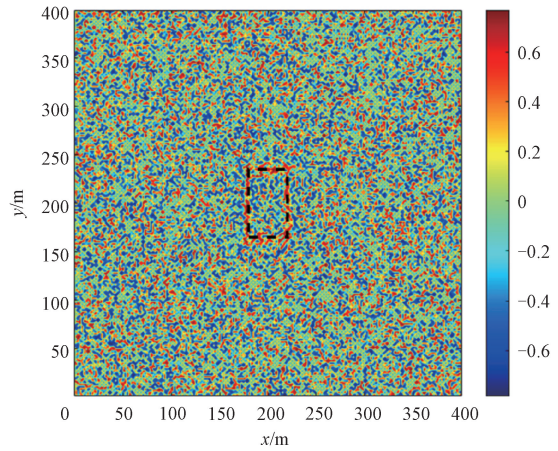


图 43 NSSStilt 边界识别
Fig. 43 NSSStilt boundary identification

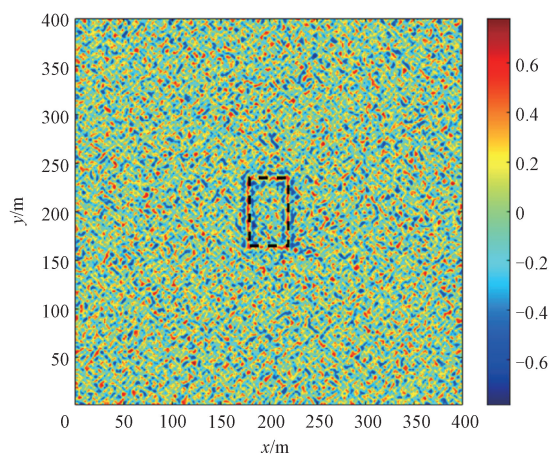


图 44 IMNSStilt 边界识别

Fig. 44 IMNSStilt boundary recognition

ASM 已完全淹没在噪声中,无法识别出磁源边界,其他 5 种方法识别效果也比较差,均受噪声影响较大。因此,为了获得更好的边界识别效果,在应用时,应首先对含噪的磁异常信号进行降噪处理,使其信噪比尽可能大。本文所提的 IMNSStilt 方法,对信噪比 5 dB 及以上的含噪磁异常信号具有良好的识别效果。

3 结 论

本研究在倾斜角法的基础上引入 NSS,并通过 NSS 求垂向二阶导数,再利用垂向一阶导数水平导数进行归一化来均衡深浅异常磁源的信号,提高了边界检测精度和区分临近磁源异常耦合的能力。模型试验表明,对于单个磁源、多个磁源相同平面以及多个磁源不同平面的情况,该方法可以有效的识别出磁源形状,并且均衡深浅异常,提高边界收敛性。但研究仍存在一些不足,该方法对于倾斜板状磁源识别效果不是很理想以及识别效果受环境噪声影响较大,需要对磁异常信号进行降噪处理。

参考文献

- [1] 陈海涛. 归一化磁源强度方法对磁异常识别对比分析[J]. 能源研究与管理, 2020(4): 47-52.
CHEN H T. Comparative analysis of normalized magnetic source intensity method for magnetic anomaly recognition[J]. Energy Research and Management, 2020(4): 47-52.
- [2] 李金朋, 范红波, 张英堂, 等. 斜磁化条件下多磁源目标的边界识别方法[J]. 兵工学报, 2020, 41(10): 2033-2044.
LI J P, FAN H B, ZHANG Y T, et al. Edge detection method of multiple magnetic sources under the condition of oblique magnetization[J]. Ordnance Industry Science and Technology, 2020, 41(10): 2033-2044.
- [3] 吕禹嵩, 雷华明. 磁异常探测中载体干扰磁场 RLS 补

偿方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 96-104.
LYU Y X, LEI H M. RLS method for carrier interference compensation in magnetic anomaly detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 96-104.

- [4] 范振峰, 黄玲, 刘敦歌, 等. 通过人工磁异常环对航空磁测系统的标定[J]. 电子测量技术, 2016, 39(9): 60-63, 76.
FAN ZH F, HUANG L, LIU D G, et al. Using current-loop induced magnetic anomaly to calibrate an airborne magnetometry system[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(9): 60-63, 76.
- [5] 徐强锋, 邓意成, 韩涛宇, 等. 基于自主全向 CPT 原子磁力仪的拖曳式地磁测绘系统[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(9): 42-51.
XU Q F, DENG Y CH, HAN T Y, et al. Towable geomagnetic surveying system based on autonomous omnidirectional CPT atomic magnetometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(9): 42-51.
- [6] 英高海, 姚长利, 郑元满, 等. 基于磁异常的边界特征增强方法对比研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4383-4398.
YING G H, YAO CH L, ZHENG Y M, et al. Comparative study on methods of edge enhancement of magnetic anomalies[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(11): 4383-4398.
- [7] 田招招, 丁然, 邵瀛杰. 重磁异常的快速均衡边界识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42: 113-122.
TIAN ZH ZH, DING R, SHAO Y J. Fast balanced edge identification method for gravity and magnetic anomalies[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42: 113-122.
- [8] 高玲举, 张濡亮, 陈聪. 基于滑动小子域滤波的重力异常边界增强技术及铀矿勘查应用[J]. 铀矿地质, 2025, 41(1): 184-196.
GAO L J, ZHANG R L, CHEN C. Edge enhancement technology of gravity anomaly based on sliding subdomain filtering and its application in uranium exploration[J]. Uranium Geology, 2025, 41(1): 184-196.
- [9] SAHOO S D, NARAYAN S, PAL S K. Appraisal of gravity-based lineaments around Central Indian Ridge(CIR) in different geological periods: Evidence of frequent ridge jumps in the southern block of CIR[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 239: 105393.
- [10] YIN G, ZHANG Y T, FAN H B, et al. Magnetic dipole localization based on magnetic gradient tensor data at a single point[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 083596.

- [11] 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.
- [12] 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 identification method based on full tensor gravity gradient eigenvalues[J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2020, 55(2): 454-464, 234.
- [13] 高慧杰. 基于磁梯度张量边界识别的最优化方法反演研究[D]. 北京:中国地质大学,2020.
GAO H J. Research on inversion of optimization method based on boundary recognition of magnetic gradient tensor [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [14] 邢海燕,弋鸣,段成凯,等. 基于改进梯度下降算法优化的磁梯度张量组合不变量算法的管道缺陷边缘识别模型[J]. 中国机械工程,2023,34(16): 1915-1920.
XING H Y, YI M, DUAN CH K, et al. Pipeline defect edge recognition model based on mgd-optimized magnetic gradient tensor combination invariant algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(16): 1915-1920.
- [15] 王劲楠,张晓明,张鸽,等. 基于GAN-LSTM改进T-L磁补偿方法[J]. 电子测量技术,2025,48(5): 50-56.
WANG J N, ZHANG X M, ZHANG G, et al. Improved T-L magnetic compensation method based on GAN-LSTM[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(5): 50-56.
- [16] 李春晖,吕岩,孟祥来,等. 基于YOLOv8的油气管道漏磁检测缺陷智能识别技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2025,46(2): 247-254.
LI CH H, LYU Y, MENG X L, et al. Research on intelligent defect recognition in oil and gas pipeline magnetic flux leakage detection based on YOLOv8[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 247-254.
- [17] 赵鹏程,秦浩东,张颖. 小管径弯头畸变漏磁缺陷图像智能识别方法[J]. 电子测量技术,2024, 47(8): 181-188.
ZHAO P CH, QIN H D, ZHANG Y. Intelligent identification method for distortion magnetic flux leakage defects image of small-diameter pipe elbows [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(8): 181-188.
- [18] 唐建华,张鑫,刘金海,等. 基于复合骨干网络的漏磁小缺陷信号检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2024, 38(10):69-77.
TANG J H, ZHANG X, LIU J H, et al. Signal detection method for magnetic flux leakage small defects based on composite backbone network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10):69-77.
- [19] LIU B, GUO Q, LI S C, et al. Deep learning inversion of electrical resistivity data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 10(11): 164-176.
- [20] 张政,严哲,顾汉明. 基于残差网络与迁移学习的断层自动识别[J]. 石油地球物理勘探,2020, 55(5): 950-956,929.
ZHANG ZH, YAN ZH, GU H M. Automatic fault recognition based on residual networks and transfer learning [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2020, 55(5):950-956,929.
- [21] 张志厚,姚禹,石泽玉,等. 基于深度学习的位场边界识别方法[J]. 地球物理学报,2022,65(5): 1785-1801.
ZHANG ZH H, YAO Y, SHI Z Y, et al. Deep learning for potential field edge detection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(5): 1785-1801.
- [22] 刘定洲,刘虹辰,张锦昌,等. 基于U-Net卷积神经网络的海底磁异常条带自动识别方法研究——以沙茨基海隆为例[J]. 地球科学进展,2025,40(8): 864-876.
LIU D ZH, LIU H CH, ZHANG J CH, et al. Automated identification of marine magnetic anomaly stripes using U-Net convolutional neural networks: A case study of Shatsky Rise[J]. Advances in Geosciences, 2025, 40(8): 864-876.
- [23] CHENG T, TAO W X, ZHOU X Y, et al. Edge recognition of magnetic anomaly source body based on convolutional neural networks in Red Sea Basin [J]. Acta Geophysica, 2025, 73(3): 2581-2590.
- [24] LI Q Z, LI Z N, SHI Z Y, et al. Multi-target magnetic positioning using SAFCM clustering and invariants-improved tilt angle[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-15.
- [25] 侯振隆,王恩德,唐水亮,等. 方向总水平导数法的改进和边界识别中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(1): 104-108.
HOU ZH L, WANG EN D, TANG SH L, et al. Improvements of the directional total horizontal derivatives and their application in edge detection[J].

- Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 104-108.
- [26] 黄远生,王彦国,罗潇. 基于归一化磁源强度垂向差分的磁源参数快速估计方法[J]. 物探与化探, 2021, 45(6): 1588-1596.
- HUANG Y SH, WANG Y G, LUO X. A fast estimation method of magnetic-source parameters based on the vertical difference of normalized source strength[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2021, 45(6): 1588-1596.
- [27] 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.
- [28] 杨宇涵,姚雨暘,郭华,等. 基于解析信号和倾斜角法的均衡边界识别方法[J]. 地球物理学进展, 2025, 40(3): 1317-1326.
- YANG Y H, YAO Y Y, GUO H, et al. Equilibrium boundary recognition method based on analytic signal and tilt-angle method [J]. Progress in Geophysics, 2025, 40(3): 1317-1326.
- [29] 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(4): 655-663.
- WANG M, GUO ZH H, HE H, et al. Level set boundary recognition technology based on anti-hyperbolic tangent [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2013(4): 655-663.

作者简介

周志坚(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为传感器检测、航空磁场补偿以及微弱信号处理与应用。

E-mail:zhouzhijian@jlu.edu.cn

李笑东,硕士研究生,主要研究方向为磁异常边界识别和微弱信号检测。

E-mail:lixid23@mails.jlu.edu.cn

荆志伟,博士研究生,主要研究方向为磁目标的检测和定位。

E-mail:jingzw24@mails.jlu.edu.cn

王超,工程师,主要研究方向为磁传感器技术和微弱信号检测。

E-mail:chaow@jlu.edu.cn

王言章,教授,博士生导师,主要研究方向为微弱磁场检测。

E-mail:yanzhang@jlu.edu.cn