

改进二维变分模态分解的磁源分离

李金朋, 任国全, 张英堂, 范红波, 李志宁

引用本文:

李金朋, 任国全, 张英堂, 等. 改进二维变分模态分解的磁源分离[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(5): 1200–1211.

LI Jin-peng, REN Guo-quan, ZHANG Ying-tang, et al. Source separation based on improved two-dimensional variational mode decomposition[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1200–1211.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.1200>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维经验模态分解在工程表面形貌误差评定中的应用

Application of bidimensional empirical mode decomposition in error evaluation for engineering surface texture

光学精密工程. 2017, 25(2): 425–432 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172402.0425>

磁光成像漏磁特征在焊接缺陷轮廓重构中的应用

Application of magneto-optical imaging magnetic flux leakage characteristics in contour reconstruction of welding defects

光学精密工程. 2019, 27(8): 1863–1869 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192708.1863>

壳段厚度激光检测信号的变分模态分解去噪

Adaptive denoising for laser detection signal of shell thickness based on variational mode decomposition

光学精密工程. 2017, 25(8): 2173–2181 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172508.2173>

张量衍生不变关系下的磁源单点定位

Magnetic source single-point positioning by tensor derivative invariant relations

光学精密工程. 2019, 27(8): 1880–1893 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192708.1880>

基于稀疏处理的多能X射线分离成像

Separation of multi-energy X-ray imaging based on sparse processing

光学精密工程. 2017, 25(4): 1106–1111 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172504.1106>

文章编号 1004-924X(2020)05-1200-12

改进二维变分模态分解的磁源分离

李金朋, 任国全*, 张英堂, 范红波, 李志宁

(陆军工程大学石家庄校区 车辆与电气工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要:为了解决延拓法对不同深度磁源的磁测数据进行分离时,向上延拓高度确定困难以及延拓导致深源信号损失的缺点,提出了在延拓法的基础上利用二维变分模态分解对磁性目标进行分离。首先,利用最佳延拓高度估计法对磁测数据进行第一次分离,得到分离后的局部异常与区域异常数据;然后,利用二维变分模态分解对分离后的浅源局部异常进行第二次分离,该过程无需计算延拓高度,能够自动对不同频率的磁测数据进行分离;最后,利用该方法对不同深度磁源进行识别,通过将分离得到的磁异常 B_z 分量数据转化为磁梯度张量数据,实现了对不同深度磁源的磁梯度张量数据进行分离,获得对不同深度磁源的识别结果。实验结果表明:实测中对小尺度磁性体组合磁源(高度差为 26 cm)的分离数据与单目标观测数据的互相关系数在 0.966 4 以上。相比传统的延拓分离方法,提出的方法的分离精度更高,抗干扰能力更强。

关键词:延拓法;分离;二维变分模态分解;局部异常;区域异常

中图分类号:TP212.9;TH762 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202805.1200

Source separation based on improved two-dimensional variational mode decomposition

LI Jin-peng, REN Guo-quan*, ZHANG Ying-tang, FAN Hong-bo, LI Zhi-ning

(Department of Vehicle and Electrical Engineering, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

* Corresponding author, E-mail: rrrgggqq@163.com

Abstract: Using the continuation method, it is difficult to determine the upward continuation height of the upward continuation and shortcomings of the deep source signal loss caused by continuation when the magnetic data of magnetic sources with different depths are separated. A separation method for magnetic data based on improved two-dimensional variational mode decomposition was proposed to solve the disadvantages associated with the continuation method. First, the magnetic data was separated for the first time using the best continuation height estimation method to obtain separated local and regional magnetic anomaly data. Subsequently, a two-dimensional variational modal decomposition was used to perform a second separation of the separated shallow local magnetic anomalies. The process did not need to calculate the upward continuation height and could automatically separate magnetic data at different frequencies. Finally, this method was used to identify magnetic sources with different depths. By separating the magnetic anomaly B_z component and

收稿日期:2019-12-05;修订日期:2020-03-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51305454)

converting it into magnetic gradient tensor data, the magnetic gradient tensor data for magnetic sources with different depths could be separated, and the identification of magnetic sources with different depths was obtained. The experimental results show that the correlation between the separation data of small-scale magnetic sources (26 cm height difference) and observation data for a single target in an actual measurement is greater than 0.966 4. Compared with the traditional continuation separation method, the proposed method has a higher separation accuracy and stronger anti-interference ability.

Key words: continuation method; separation; two-dimensional variational mode decomposition; local anomaly; regional anomaly

1 引言

磁测数据解释主要应用于军事侦察(未爆弹、潜艇和水雷等)、缺陷检测、剩磁估计及工程地质勘探等领域^[1-5]。在实际测量中获得的磁测数据包含了从浅部到深部所有磁源共同引起的磁异常,包含了丰富了磁源信息。当需要对某个目标进行解释时(如对浅部未爆弹进行探测),需要对磁测数据进行分离,将特定目标引起的磁异常从叠加异常中分离出来,进行下一步的磁测数据解释。因此,对磁源分离方法进行研究是当前研究的热点问题之一。

当前,磁源的分离方法主要参考重力数据上的分离方法,向上延拓法是应用较为广泛的一种方法^[6-7],通过对观测数据进行向上延拓,作为异常目标的区域异常,将观测数据与区域异常数据进行做差求解最终的局部异常。该方法需要已知最佳向上延拓高度,在向上延拓的过程中,浅源信号被压制的同时,深源信号也会产生一部分损失。Zeng等^[6]提出了向上延拓法的最佳延拓高度估计法,计算一系列的相邻延拓面磁测数据的互相关系数,互相关系数曲线的最大偏差点对应的高度为最佳延拓高度。Pawlowski^[7]提出了优选向上延拓法,该方法向上延拓时能够在对浅源信号进行压制的同时对深源信号长波不衰减。Meng等^[8]在优选向上延拓法的基础上,提出了优选向上延拓的差值法,实现对某一特定频段信号进行提取。Guo^[9-10]提出了基于格林等效层概念和维纳滤波的优化滤波方法,该方法不需要计算延拓高度。上述方法需要计算对实测数据的平均对数功率谱进行分段拟合来确定频段范围,在实际应用中存在一定难度。在实际测量中,当区域异常

较大时,对局部异常分离精度会有所降低,使得对磁性目标的识别结果产生一定影响,因此,对不同深度磁源磁测数据的分离方法进行研究仍处于起步阶段。为提高磁源的分离能力,提出了利用改进二维变分模态分解法对磁源进行分离。本文在最佳延拓高度估计法基础上,将延拓法获得的浅源局部异常利用二维变分模态分解进行二次分离,进一步去除延拓法存留的区域异常数据,提高磁源局部异常数据的精度,并转化为磁梯度张量数据实现对不同深度的磁性目标进行有效识别。

2 理论分析

2.1 基于最佳延拓高度的向上延拓方法

进行向上延拓计算时,需要对最佳延拓高度进行估计,通过计算相邻延拓面上的互相关系数,绘制互相关系数与延拓高度的互相关图像,其中磁源的最佳向上延拓高度位于互相关图像的最大偏转处^[6]。

相邻延拓面之间的互相关公式 C 为:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{B}_1(i, j) \mathbf{B}_2(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{B}_1(i, j)^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{B}_2(i, j)^2}}, \quad (1)$$

其中: M 和 N 分别为沿 x 和 y 轴的观测点数, \mathbf{B}_1 和 \mathbf{B}_2 分别为两个相邻延拓面上的磁测数据。

2.2 二维变分模态分解算法

二维变分模态分解(2D-Variational Mode Decomposition, TVMD)理论是由一维变分模态分解理论推导而来^[11-12],主要应用于生物化学和纳米科学领域。该方法从经验模态分解方法(Empirical Mode Decomposition, EMD)发展而来^[13],通过对构造的变分模型进行寻优获得不同

的子信号,使得子信号的带宽之和最小。在二维解析信号中,需要将频域一半的平面设置为零,该半平面是相对于矢量选择的,为 ω_k 。二维解析信号的频率域定义如下:

$$\mathbf{u}_{AS,k}(\omega) = (1 + \text{sgn}(\langle \omega, \omega_k \rangle)) \mathbf{u}_k(\omega), \quad (2)$$

其中: $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\}$ 为模态分量 \mathbf{u}_k 的中心频率, $k=1, 2, \dots, K$, K 为模态分量个数。

具有上述傅里叶特性的二维解析信号为^[14]:

$$\mathbf{u}_{AS,k}(\eta) = \mathbf{u}_k(\eta) * (\delta(\langle \eta, \omega_k \rangle) + j/\pi \langle \eta, \omega_k \rangle \delta(\langle \eta, \omega_{k,\perp} \rangle)), \quad (3)$$

式中 * 代表卷积且变换是可分的。

二维变分模态分解的函数最小化公式为:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}_k, \omega_k} \{ \sum_k \alpha_k \|\nabla[\mathbf{u}_{AS,k}(\eta) e^{-j\langle \eta, \omega_k \rangle}]\|_2^2 \} \\ \text{s. t. } \forall \eta: \sum_k \mathbf{u}_k(\eta) = \mathbf{f}(\eta), \end{aligned} \quad (4)$$

其中: α_k 为 Tikhonov 正则化参数, $\mathbf{f}(x)$ 为观测数据。

利用二次惩罚项以及拉格朗日乘数计算约束问题,用乘法交替方向算法(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)^[15,16]进行优化计算。对模态分量 \mathbf{u}_k 进行优化计算:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_k^{n+1} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{u}_k} \{ \alpha_k \|\mathbf{u}_k(\omega - \omega_k) \mathbf{u}_{AS,k}(\omega)\|_2^2 + \\ \|\mathbf{f}(\omega) - \sum_i \mathbf{u}_i(\omega) + \boldsymbol{\lambda}(\omega)/2\|_2^2 \}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\boldsymbol{\lambda}$ 为拉格朗日乘数项。求解 \mathbf{u}_k 会产生维纳滤波的更新结果:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{(\mathbf{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \mathbf{u}_i(\omega) + \boldsymbol{\lambda}(\omega)/2)}{(1 + 2\alpha_k |\omega - \omega_k|)} \\ \forall \omega \in \Omega_k; \Omega_k = \{\omega \mid \langle \omega, \omega_k \rangle \geq 0\}. \end{aligned} \quad (6)$$

对中心频率 ω_k 进行优化计算:

$$\begin{aligned} \omega_k^{n+1} = \operatorname{argmin}_{\omega_k} \{ \alpha_k \|\mathbf{u}_k(\omega - \omega_k) \\ \cdot (1 + \text{sgn}(\langle \omega, \omega_k \rangle)) \mathbf{u}_k(\omega)\|_2^2 \}. \end{aligned} \quad (7)$$

因此,在半平面 Ω_k 模型的功率谱 $|\mathbf{u}_k(\omega)|^2$ 表示为:

$$\omega_k^{n+1} = \int_{\Omega_k} \omega |\mathbf{u}_k(\omega)|^2 d\omega / \int_{\Omega_k} |\mathbf{u}_k(\omega)|^2 d\omega. \quad (8)$$

通过公式(6)以及公式(8),能够对二维观测信号做变分模态分解得到 K 个固有模态分量。在本文计算过程中,由于需要假设信号是由深源和浅源组合而成,因此,需要定义 $K=2$ 。

利用二维变分模态分解计算磁源分量,能够自适应的对两个频带内的观测数据进行分离,不

需要对观测数据进行人为的进行分段拟合,提高了自适应性。通过利用二维变分模态分解对延拓法分离出来浅源局部异常进行计算,能够有效保留区域异常的磁源信息,提高局部异常的分离精度。

2.3 磁梯度张量理论及应用

在笛卡尔坐标系下,假设 x 轴正方向为北向, y 轴正方向为东向, z 轴正方向为垂直向下。磁梯度张量数据是由磁场矢量 $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_y, \mathbf{B}_z]^T$ 沿坐标轴 3 个正交方向的空间变化率,磁梯度张量可以由 1 个二阶矩阵表示为^[17-19]:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{B}_x}{\partial x} & \frac{\partial \mathbf{B}_x}{\partial y} & \frac{\partial \mathbf{B}_x}{\partial z} \\ \frac{\partial \mathbf{B}_y}{\partial x} & \frac{\partial \mathbf{B}_y}{\partial y} & \frac{\partial \mathbf{B}_y}{\partial z} \\ \frac{\partial \mathbf{B}_z}{\partial x} & \frac{\partial \mathbf{B}_z}{\partial y} & \frac{\partial \mathbf{B}_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{xx} & \mathbf{B}_{xy} & \mathbf{B}_{xz} \\ \mathbf{B}_{yx} & \mathbf{B}_{yy} & \mathbf{B}_{yz} \\ \mathbf{B}_{zx} & \mathbf{B}_{zy} & \mathbf{B}_{zz} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中: \mathbf{G} 为磁梯度张量; $\mathbf{B}_i (i=x, y, z)$ 为磁场三分量; $\mathbf{B}_{ij} (\alpha, \beta=x, y, z)$ 为磁梯度张量的 9 个分量。磁梯度张量矩阵 \mathbf{G} 为对称矩阵,因此包含 5 个独立分量。

利用磁梯度张量矩阵 \mathbf{B}_{zx} 以及 \mathbf{B}_{zy} 分量能够对磁源的水平分布进行计算,计算公式为:

$$\text{THDR} = \sqrt{\mathbf{B}_{zx}^2 + \mathbf{B}_{zy}^2}. \quad (10)$$

在计算过程中,利用 \mathbf{B}_z 异常获得的磁梯度张量分量的计算公式为^[20]:

$$\begin{cases} F(\mathbf{B}_{zx}) = \frac{i \cdot u_x}{1 + \zeta_{zx} \cdot u_x^2} \cdot \mathbf{B}_z(u_x, u_y, z) \\ F(\mathbf{B}_{zy}) = \frac{i \cdot u_y}{1 + \zeta_{zy} \cdot u_y^2} \cdot \mathbf{B}_z(u_x, u_y, z) \end{cases}, \quad (11)$$

其中: $F()$ 为磁梯度张量分量的傅里叶变换, $u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$, u_x 和 u_y 为沿 x 和 y 轴的角频率, α, β 和 γ 为地磁背景场的磁化方向, $\mathbf{B}_z(u_x, u_y, z)$ 为 \mathbf{B}_z 的频率域数据, ζ_{zx} 和 ζ_{zy} 为正则化参数。

2.4 计算步骤

根据以上分析,可以利用本文方法对磁源进行分离,并获得磁梯度张量数据,计算过程如图 1 所示,计算要点可归纳为:

(1) 计算磁异常 \mathbf{B}_z 分量数据的最佳向上延拓高度 h , 利用延拓法对数据进行分离,获得局部异常 \mathbf{B}_J 和区域异常 \mathbf{B}_Q ;

(2) 对局部异常 \mathbf{B}_J 数据进行变分模态分解计算,获得局部异常 \mathbf{B}_{JQ} 和区域异常 \mathbf{B}_{JJ} ;

(3) 利用分离出来局部异常以及区域异常,通

过频率域计算方法获得磁梯度张量分量数据并计算磁源分布位置。

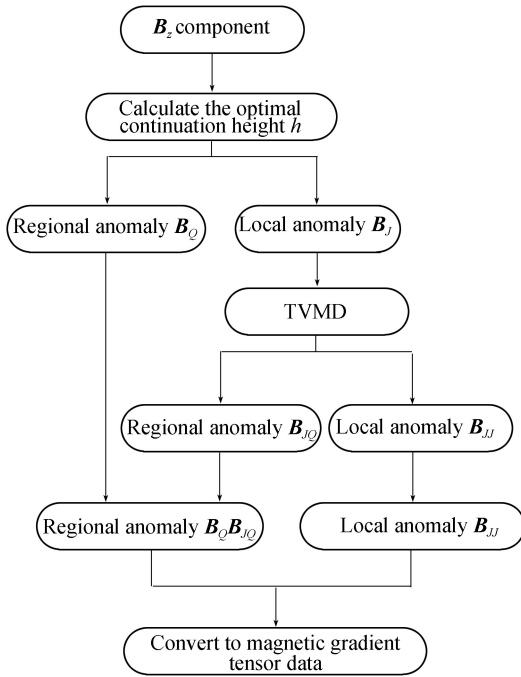


图 1 磁测数据分离步骤

Fig. 1 Separation steps of magnetic data

3 仿真分析

为了证明本文方法的有效性, 建立 5 个长方体模型, 模型形状、位置及物性参数如表 1 所示。假设观测表面的深度为 0 m, 观测点的间距为 1 m, 观测点网格为 66 × 66。理论模型具有两个深度层模型 A 和 B, 深度层模型 A 产生的磁场模拟区域异常数据, 深度层模型 B 产生的磁场模拟局部异常数据, 多目标磁源的空间分布如图 2 所示。

对不同深度层模型以及所有深度层模型的磁异常 B_z 分量数据进行仿真计算, 获得的计算结果如图 3 所示。黑线表示深度层模型 A 的水平分布位置, 白线表示深度层模型 B 的水平分布位置, 红色虚线代表测线位置。根据图 3 可以看出, 区域异常具有较高的磁场大小。对观测面上所有组合模型的磁异常 B_z 分量数据进行观察可知, 深度层模型 B 的磁测数据由于磁性较弱, 几乎被区域异常数据所淹没。

表 1 模型位置及物理参数

Tab. 1 Location and physical parameters of models

磁源	x, y, z 方向 长度/m	中心坐 标/m	$(I, D)/(^{\circ})$	$P_0 /$ ($A \cdot m^2$)
A1	36, 30, 8	(33, 32, 14)	(50, 20)	90
B1	2, 2, 2	(13, 32, 3)	(60, -20)	15
B2	2, 2, 2	(27, 33, 3)	(50, 10)	20
B3	2, 2, 2	(41, 8, 3)	(80, 40)	15
B4	2, 2, 2	(55, 59, 3)	(90, 0)	20

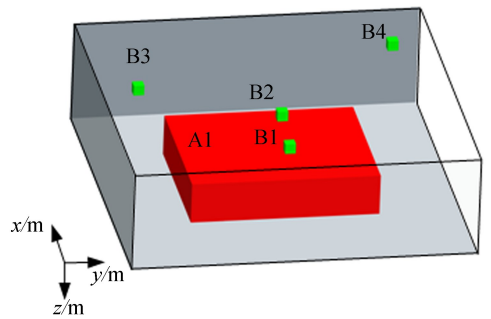


图 2 多目标磁源空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of multi-target magnetic sources

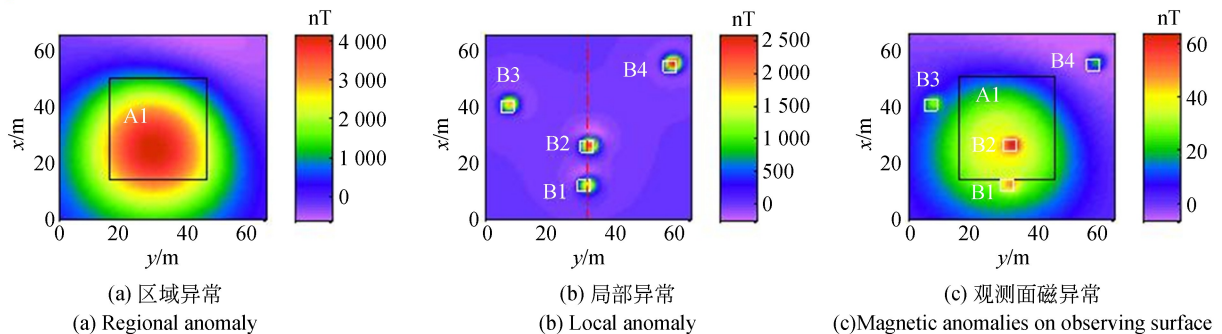


图 3 磁源磁异常 B_z 分量理论数据

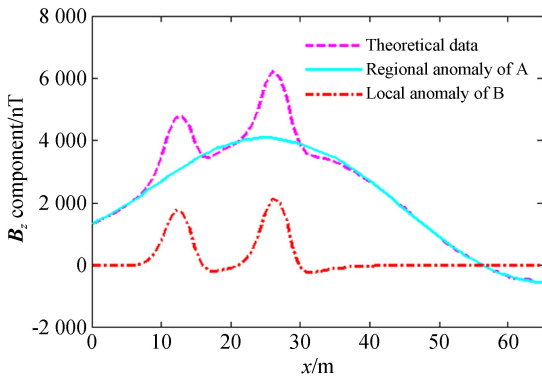
Fig. 3 Theoretical data of magnetic anomaly B_z component

为了证明本文方法的有效性,分别利用本文计算方法与延拓法及变分模态分解法的分离结果进行比较,获得测线上的分离结果如图 4 所示。根据不同的方法的分离结果可以看出,延拓法获得的深度层 A 和深度层 B 的磁测数据与理论值存在的偏差最大,这是由于在向上延拓计算过程中,在对浅层模型进行压制的同时,深度层数据也存在一定的损失。变分模态分解方法获得的结果与理论值接近,但是对浅源高频数据未完全分离。本文提出的方法获得的区域异常与局部异常数据与理论值基本一致。根据图 5 中不同分离方法获得的结果可知,延拓法与变分模态分解法得到的局部异常信号中包含更多的区域异常信号,而本文方法的计算结果保留了更多的局部异常信号。为了进一步说明本文方法的计算精度。定义

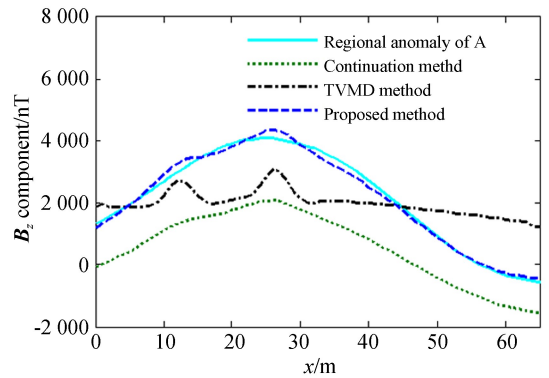
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [B(i, j) - \bar{B}(i, j)]^2}$$
 以

及互相关系数 C 对分离数据与理论值的计算精度进行比较。分别计算理论数据与加入信噪比为 30 dB 的高斯白噪声磁测数据的分离精度,计算结果如表 2 所示。根据表 2 可知,本文的计算方法计算精度优于变分模态分解的计算精度与延拓法的计算精度,在无噪声条件下,获得的计算结果互相关系数不低于 0.926 6, RMSE 不高于 489 nT,包含噪声的情况下不低于 0.859 6, RMSE 不高于 679 nT。

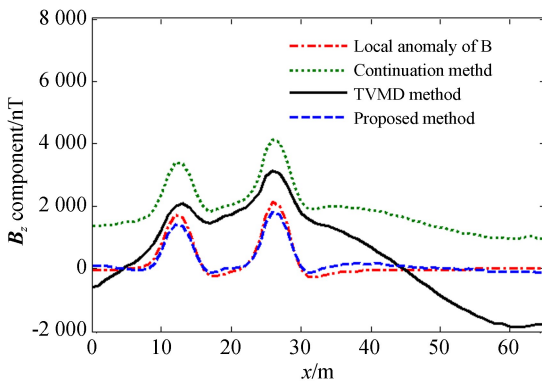
利用公式(11)对本文方法得到的区域异常与局部异常的磁梯度张量 B_{zx} 与 B_{yz} 分量进行计算,获得的磁梯度张量分量的区域异常数据与局部异常数据如图 6(a)~图 6(f)所示。通过对比分离前后的磁测数据可知,通过本文的分离方法,能够将不同深度磁源的磁测数据进行有效地分离。对分离得到的局部异常与区域异常数据的 $THDR$ 进行计算,获得的计算结果如图 6(g)~图 6(i)所示。



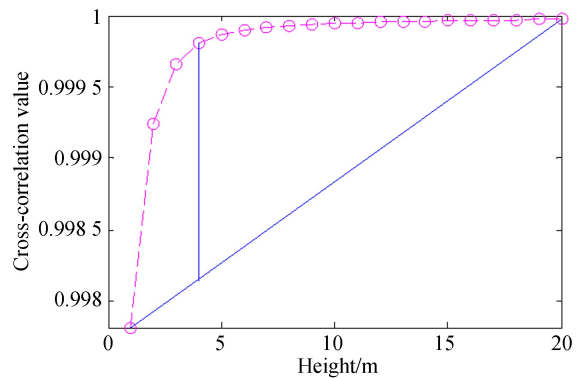
(a) 理论数据
(a) Theoretical data



(b) 区域异常
(b) Regional anomaly



(c) 局部异常
(c) Local anomaly



(d) 最佳延拓高度估曲线
(d) The best continuation height estimation curve

图 4 测线上不同方法的延拓结果

Fig. 4 Continuation results of different methods on survey line

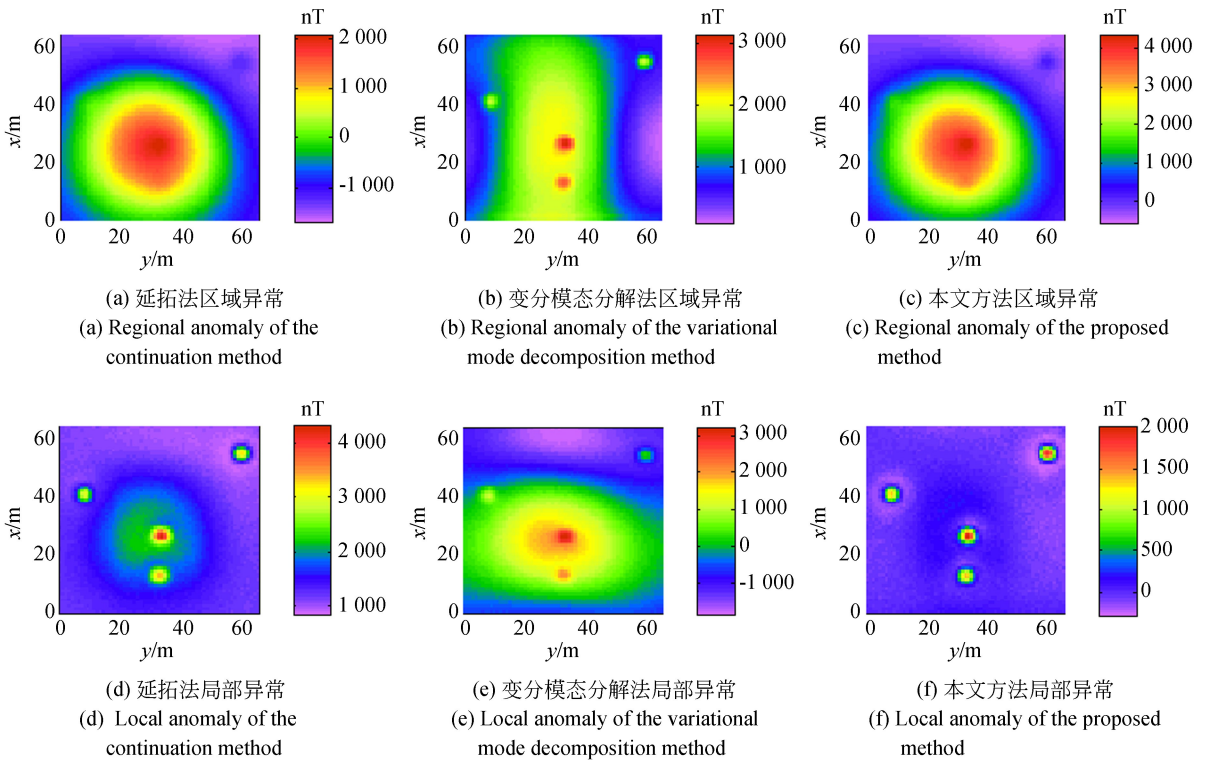


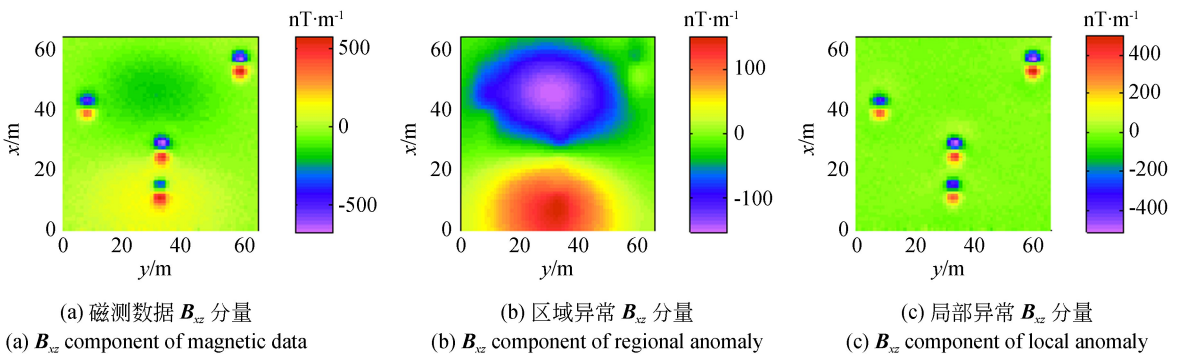
图 5 磁源磁异常 B_z 分量数据分离结果

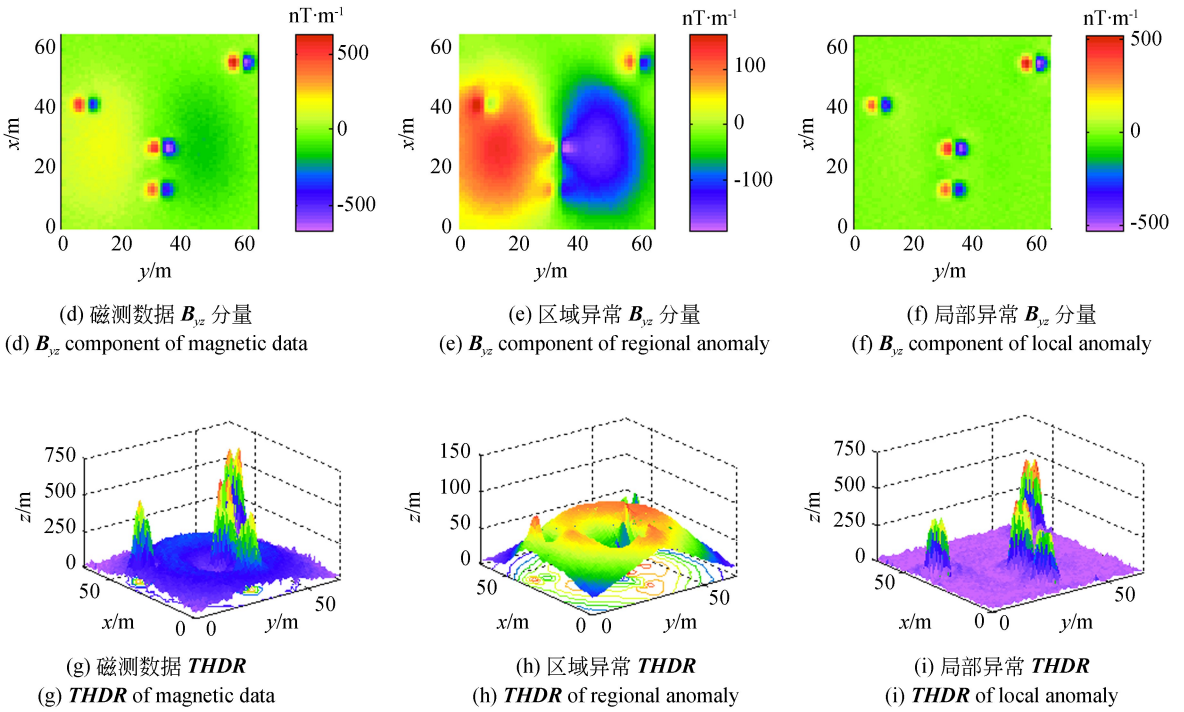
Fig. 5 Separation results of magnetic source magnetic anomaly B_z component

表 2 不同分离方法的分离结果

Tab. 2 Separation results of different separation methods

方法	磁测数据	无噪声		有噪声	
		RMSE($\times 10^4$)/nT	互相关	RMSE($\times 10^4$)/nT	互相关
延拓法	区域异常	1.170 4	0.997 8	1.172 0	0.997 7
	局部异常	1.170 4	0.493 0	1.172 0	0.491 4
变分模态分解	区域异常	0.764 2	0.703 7	0.764 5	0.703 5
	局部异常	0.764 2	0.150 2	0.764 5	0.149 9
本文方法	区域异常	0.048 9	0.998 4	0.067 9	0.997 9
	局部异常	0.048 9	0.926 6	0.067 9	0.859 6



图 6 磁梯度张量 B_{zz} 、 B_{yz} 以及 $THDR$ Fig. 6 Magnetic gradient tensors B_{zz} , B_{yz} and $THDR$

根据计算的结果可以看出,在分离之前由于区域异常数据的磁源强度较大,导致局部异常数据的分布被淹没,难以得到局部数据实际的分布位置。而利用本文分离数据进行计算,可以有效获得不同深度磁源的实际分布范围。同时,在区域异常较强的情况下,能够对局部异常的分布范围进行有效求解。

3 实验验证

在河北省石家庄某地进行实测实验测试,测试装置如图 7 所示。该测试装置系统主要包括:英国 Bartington 公司制造的 Mag-03MS 传感器,数字采集模块、软件操作终端以及无磁实验台架。在实验过程中,传感器固定在无磁实验台架上,利用扫描的方式对待测区域的每一点进行测量,其中传感器的量程为 $-70\ 000 \sim 70\ 000$ nT 之间,传感器分辨率为 0.01 nT。测区为 2.1×2.1 m 的区域,测量间隔为 0.1 m。在测区内放置一个南北走向的水平圆柱体铁管以及一个南北走向水平放置的未爆弹。其中,水平圆柱体的轴线距离观测面为 0.58 m 作为区域异常,未爆弹的轴线距离观测面为 0.32 m 作为局部异常。分别对

单个磁源 B_z 分量数据以及组合磁源的 B_z 分量之和进行测试,获得的数据如图 8 所示。在图 8 中,模型 1 代表水平圆柱体,黑色实线代表模型 1 的水平分布位置;模型 2 代表未爆弹,白色实线代表模型 2 的水平分布位置,红色虚线代表测线位置(彩图见期刊电子版)。

分别利用本文分离方法、延拓法及变分模态分解法对测线上磁源的 B_z 分量数据进行分离计算,获得的分离结果如图 9 所示。图 10 为不同分离方法获得分离结果的二维数据。对分离数据计算得到的 RMSE 以及互相关系数 C 如表 3 所示。



图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental equipment

根据图 9、图 10 以及表 3 可以看出,本文分离方法计算精度最好,延拓法的计算精度其次,变分模态分解结果最差。根据计算结果可以看出,在延拓高度不高的情况下,延拓法获得的磁源深度层

数据损失较小,因此计算精度有所提高。本文计算方法获得的计算结果互相关系数不低于 0.966 4, RMSE 不高于 7 506 nT, 优于其他两种方法。利用公式(11)对本文方法得到的水平圆柱

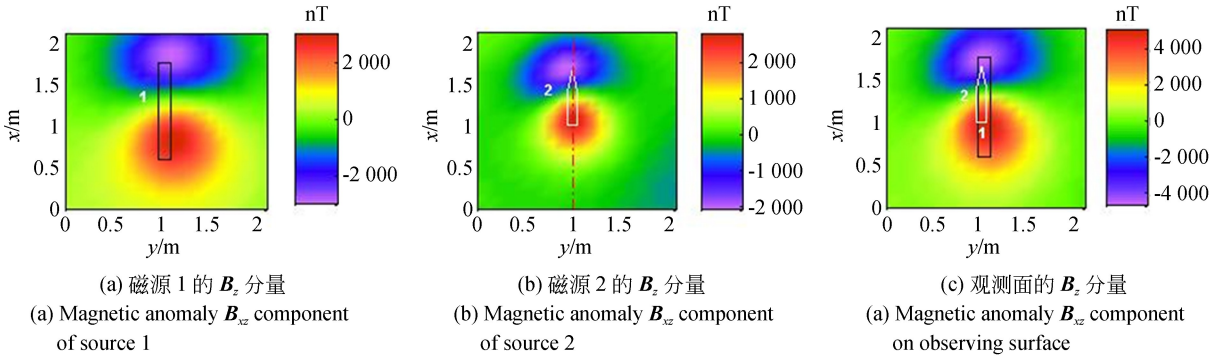


图 8 磁源磁异常 B_z 分量数据

Fig. 8 Magnetic anomaly B_z component of sources

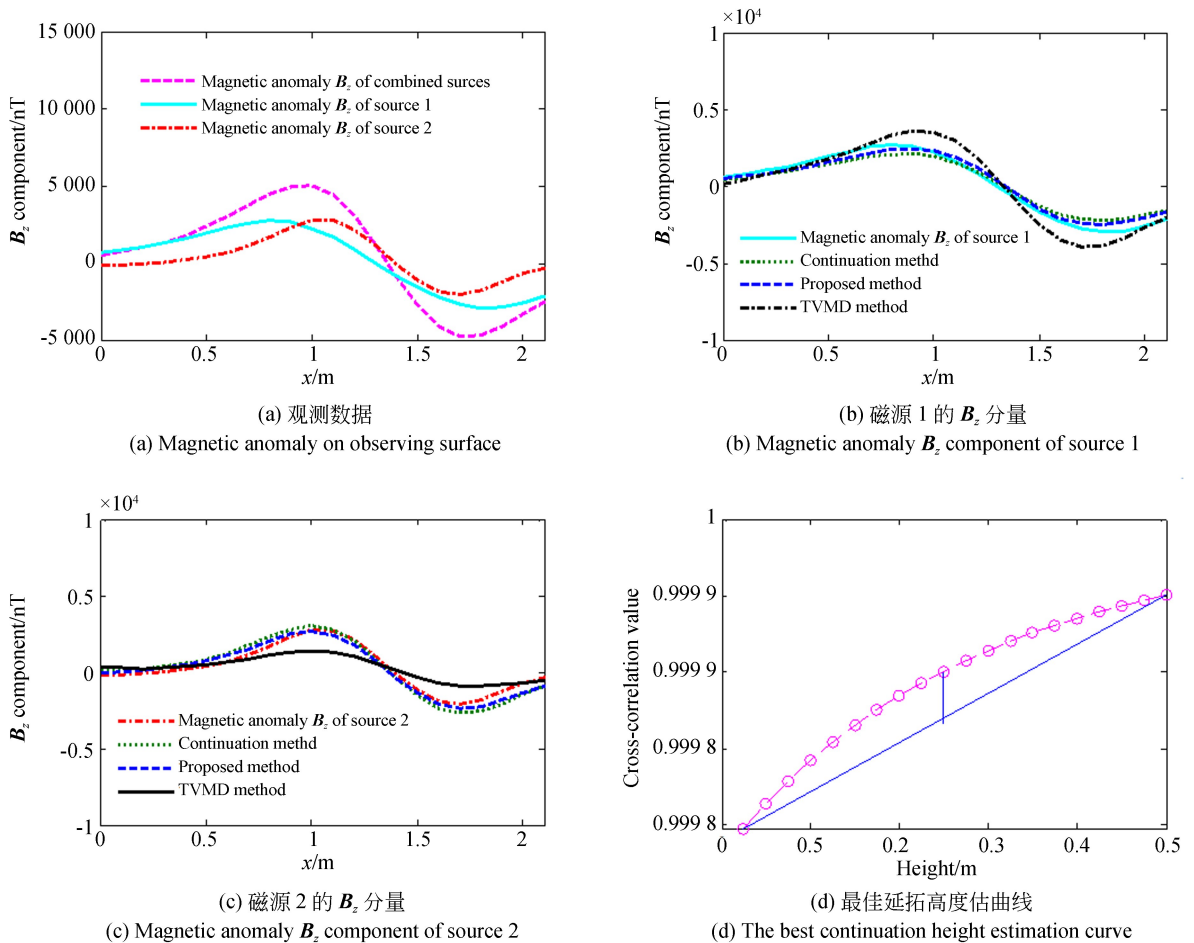


图 9 测线上不同方法的延拓结果

Fig. 9 Continuation results of different methods on survey line

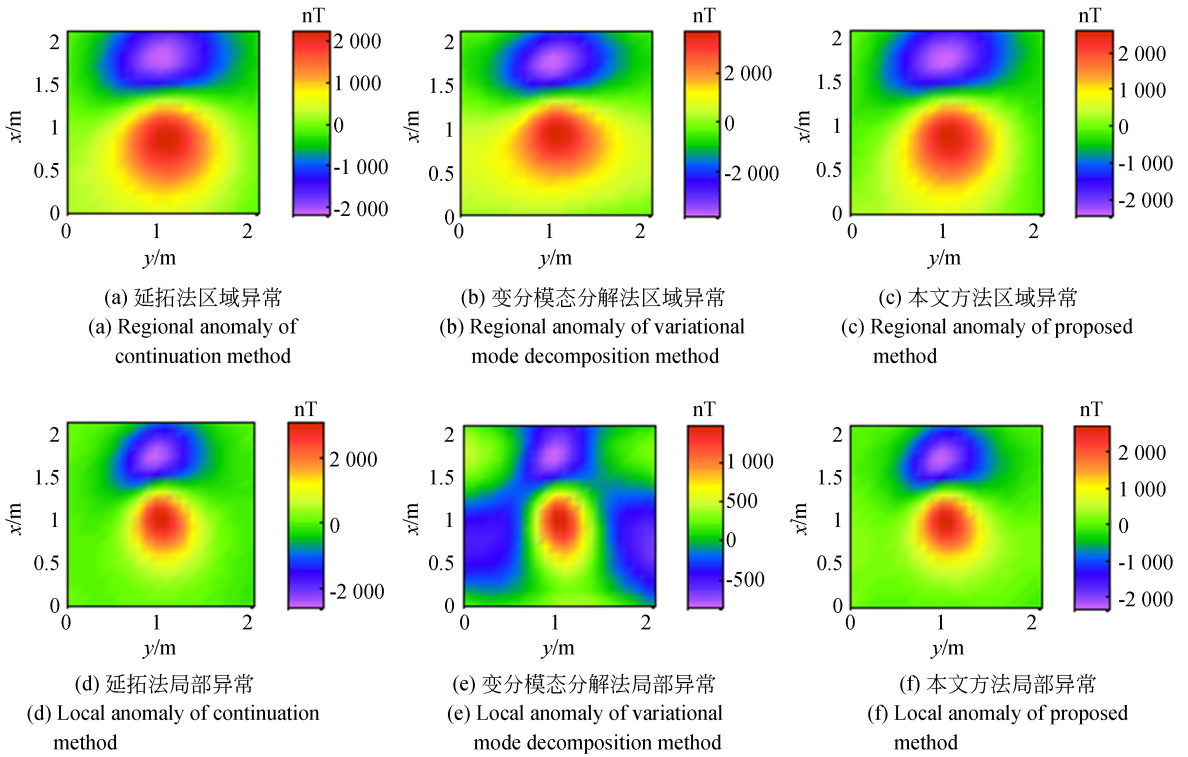


图 10 磁源磁异常 B_z 分量数据分离结果

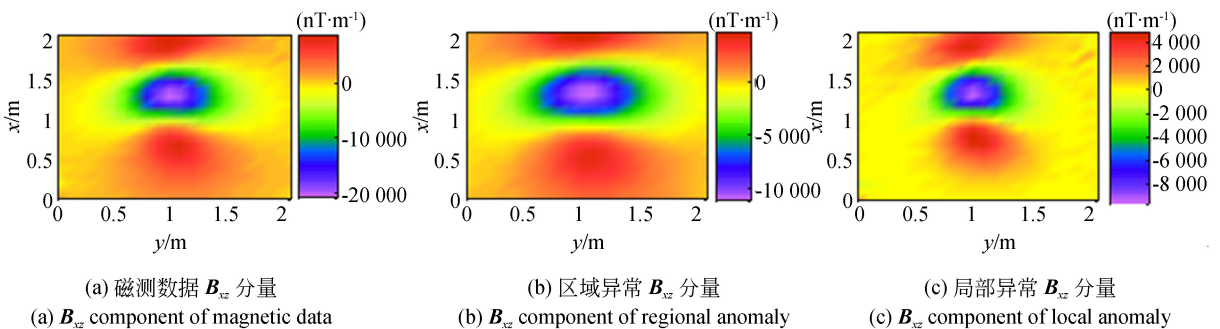
Fig. 10 Separation results of magnetic source magnetic anomaly B_z component

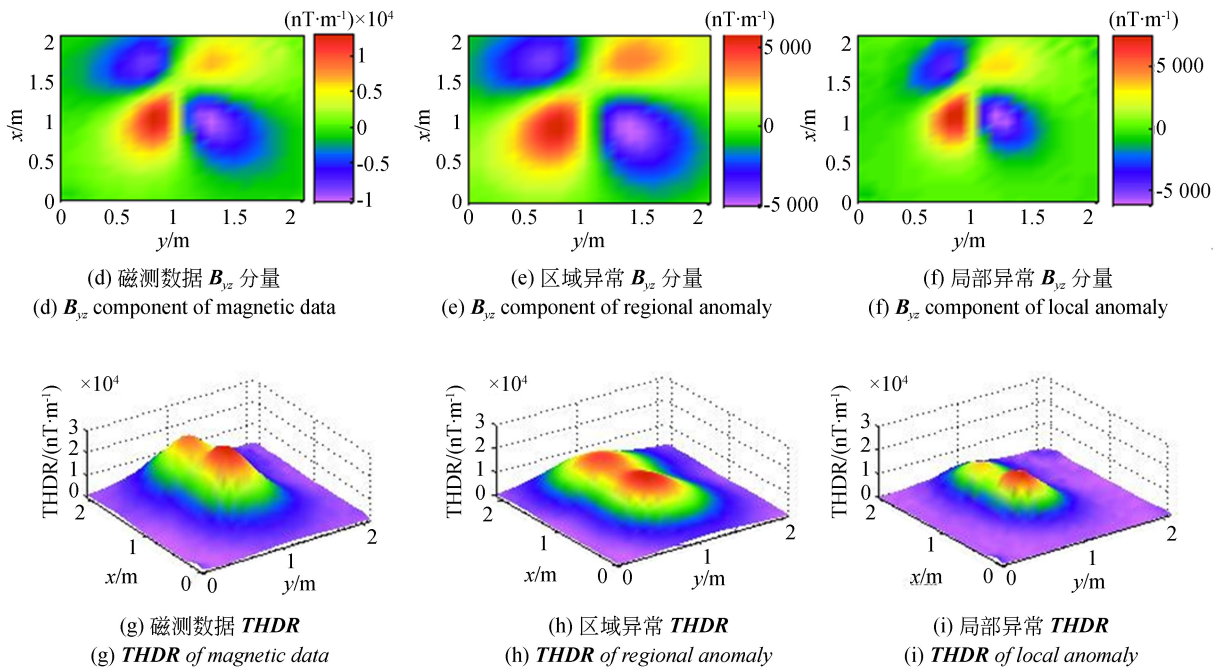
表 3 不同分离方法的分离结果

Tab. 3 Separation results of different separation methods

方法	磁测数据	RMSE($\times 10^4$)	互相关
延拓法	区域异常	1.675 4	0.9887
	局部异常	1.675 4	0.9613
变分模态分解	区域异常	1.870 6	0.970 6
	局部异常	1.870 6	0.944 3
本文方法	区域异常	0.750 6	0.990 9
	局部异常	0.750 6	0.966 4

体与未爆弹的磁梯度张量 B_{xz} 与 B_{yz} 分量进行计算,获得的磁梯度张量分量的区域异常数据与局部异常数据如图 11(a)~图 11(f)所示。计算局部异常与区域异常数据的 $THDR$,计算结果如图 11(g)~图 11(i)所示。根据计算结果可以看出,在分离之前由于水平圆柱体与未爆弹数据混合在一起,导致在计算结果中难以区分未爆弹的分布位置。通过利用本文分离数据进行计算,可以有效获得不同深度磁源的实际分布范围。实验表明,本文方法能够将组合磁源中的未爆弹进行有效分离,在实践中能够应用于未爆弹的探测。同



图 11 磁梯度张量 B_{xz} , B_{yz} 以及 $THDR$ Fig. 11 Magnetic gradient tensors B_{xz} , B_{yz} and $THDR$

时,该方法的适用范围可以从几米扩展到几千米,因此对于矿物以及石油勘探也同样适用。

4 结 论

在区域异常较大的条件下,局部异常数据不易被发现,利用改进的二维变分模态分解理论对局部异常具有较好的分离效果。

(1) 利用最佳延拓高度估计法对磁源进行一次分离,该过程能够直接对磁测数据进行分离并

获得局部异常与区域异常数据;

(2) 对延拓后的局部异常进行二维变分模态分解,能够有效提高区域异常与局部异常的计算精度;

(3) 实验结果表明:本文方法能够对区域异常较大条件下的局部异常数据进行有效分离,对小尺度磁性体组合磁源(高度差为 26 cm)的分离数据与单目标观测数据的互相关系数在 0.966 4 以上。该方法为后期不同深度磁源的定位、边界识别以及三维反演提供了理论基础与工程经验。

参考文献:

- [1] 郑强,郭华,张贵宾,等.基于全张量磁梯度方向 Theta 法进行边界识别的研究与应用[J].地球物理学进展,2019,34(4):1568-1576.
ZHENG Q, GUO H, ZHANG G B, et al.. Research and application of edge detection based on full tensor magnetic gradient direction Theta method[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(4):1568-1576. (in Chinese)
- [2] 王彦国,罗潇,邓居智,等.基于改进 tilt 梯度的三维磁异常解释技术[J].石油地球物理勘探,2019,54(3):685-691+491.

- WANG Y G, LUO X, DENG J ZH, et al.. 3D magnetic data interpretation based on improved tilt angle[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(3): 685-691+491. (in Chinese)
- [3] 郭华,韩松,郑强,等.全张量磁梯度数据的斜导数特征值边界识别方法研究[J].地球物理学报,2019,62(9):3580-3590.
GUO H, HAN S, ZHENG Q, et al.. Oblique derivative edge detection method research on full tensor magnetic gradient data [J]. *Chinese J. Geophys*, 2019, 62(9):3580-3590. (in Chinese)
- [4] 高向东,周晓虎,李彦峰,等.磁光成像漏磁特征在焊接缺陷轮廓重构中的应用[J].光学精密工程,

- 2019, 27(8): 1863-1869.
- GAO X D, ZHOU X H, LI Y F, *et al.*. Application of magneto-optical imaging magnetic flux leakage characteristics in contour reconstruction of welding defects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1863-1869. (in Chinese)
- [5] 柴国志, 黄亮, 乔亮, 等. 星上剩磁对惯性传感器的影响[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 515-525.
- CHAI G Z, HUANG L, QIAO L, *et al.*. Effect of the on-board residual magnetism on inertial sensors [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 515-525. (in Chinese)
- [6] ZENG H, XU D, TAN H. A model study for estimating optimum upward-continuation height for gravity separation with application to a Bouguer gravity anomaly over a mineral deposit, Jilin province, northeast China [J]. *Geophysics*, 2007, 72(4): 145-150.
- [7] PAWLOWSKI R S. Preferential continuation for potential-field anomaly enhancement[J]. *Geophysics*, 1995, 60(2): 390-398.
- [8] MENG X, GUO L, CHEN Z, *et al.*. A method for gravity anomaly separation based on preferential continuation and its application[J]. *Applied Geophysics*, 2009, 6(3): 217-225.
- [9] GUO L, MENG X, CHEN Z, *et al.*. Preferential filtering for gravity anomaly separation[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 51: 247-254.
- [10] 郭良辉, 孟小红, 石磊, 等. 优化滤波方法及其在中国大陆布格重力异常数据处理中的应用[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4078-4088.
- GUO L H, MENG X H, SHI L, *et al.*. Preferential filtering method and its application to Bouguer gravity anomaly of Chinese continent [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2012, 55(12): 4078-4088. (in Chinese)
- [11] 徐智, 唐刚, 刘伟, 等. 基于变分模态分解参数优化的地震随机噪声去除方法[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 60-68.
- XU ZH, TANG G, LIU W, *et al.*. Seismic random noise removal based on variational mode decomposition with parameter optimization [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2019, 46(5): 60-68. (in Chinese)
- [12] 高佳程, 朱永利, 贾亚飞, 等. 基于二维变分模态分解和 Hilbert 变换的局放信号特征提取方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(18): 25-33.
- GAO J CH, ZHU Y L, JIA Y F, *et al.*. Feature extraction of partial discharge signals based on 2D variational mode decomposition and Hilbert transform[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(18): 25-33. (in Chinese)
- [13] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454: 903-995.
- [14] BÜLOW T, SOMMER G. A novel approach to the 2D analytic signal[C]. *International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1999: 25-32.
- [15] BERTSEKAS D P. *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*[M]. US, Salt Lake City: Academic press, 2014.
- [16] HESTENES M R. Multiplier and gradient methods[J]. *Journal of optimization theory and applications*, 1969, 4(5): 303-320.
- [17] 郑建拥, 范红波, 张琪, 等. 利用磁梯度张量识别地下小型目标体[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(3): 692-699, 491.
- ZHENG J Y, FAN H B, ZHANG Q, *et al.*. Underground small target recognition using magnetic gradient tensor[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(3): 692-699, 491. (in Chinese)
- [18] 李青竹, 李志宁, 张英堂, 等. 磁梯度张量系统传感器阵列的快速旋转校准[J]. 光学精密工程, 2018, 26(7): 1813-1826.
- LI Q ZH, LI ZH N, ZHANG Y T, *et al.*. Fast rotation calibration of sensor array in magnetic gradient sensor system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(7): 1813-1826. (in Chinese)
- [19] 李青竹, 李志宁, 张英堂, 等. 张量衍生不变关系下的磁源单点定位[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1880-1893.
- LI Q ZH, LI ZH N, ZHANG Y T, *et al.*. Magnetic source single-point positioning by tensor derivative invariant relations [J]. *Opt. Precision*

Eng., 2019, 27(8):1880-1893. (in Chinese)

- [20] YIN G, ZHANG Y T, MI S L, *et al.*. Calculation of the magnetic gradient tensor from total

magnetic anomaly field based on regularized method in frequency domain[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 134: 44-54.

作者简介:



李金朋(1991—),男,吉林长春人,博士研究生,2014年于吉林大学获得学士学位,2016年于军械工程学院获得硕士学位,主要研究方向为测试技术与信号处理。E-mail: 714741928@qq.com

导师简介:



张英堂(1960—),男,河北平山人,教授,1993年于北京理工大学获得学士学位,2004年于清华大学获得博士学位,主要研究方向为机械性能检测与诊断。E-mail: zyt01@mails.tsinghua.edu.cn