

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905361

基于磁传感器阵列的多磁源参数反演方法^{*}

李金朋¹, 张英堂¹, 范红波¹, 李志宁¹, 姜相争²

(1. 陆军工程大学石家庄校区车辆与电气工程系 石家庄 050003; 2. 32142 部队 保定 071000)

摘要:针对传统磁源参数反演方法中存在受噪声影响大、对多个磁源参数反演能力差的问题,提出了基于磁传感器阵列的多磁源参数反演方法。首先,将磁传感器阵列测量得到的磁张量数据转化为归一化磁源强度并向上延拓,降低归一化磁源强度数据中高频噪声的影响。然后,利用基于归一化磁源强度的改进倾角对磁源的水平位置进行估计,其中计算区域内正极大值点为磁源的水平位置。最后,根据归一化磁源强度的欧拉同性质方程,提出改进的磁源深度估计方法,实现了对磁源的深度和磁矩进行单点估计。仿真和实验结果表明,与 Nara 反演方法相比,本文方法不受地磁背景磁场的影响,对多磁铁识别的水平误差不大于 0.08 m,深度相对误差不大于 24.76%,且具有较强的抗噪性。

关键词:磁传感器阵列;归一化磁源强度;上延拓;水平位置;深度

中图分类号: TH762 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.10

Multi-magnetic source parameter inversion method based on magnetic sensor array

Li Jinpeng¹, Zhang Yingtang¹, Fan Hongbo¹, Li Zhining¹, Jiang Xiangzheng²

(1. Department of Vehicle and Electrical Engineering, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. Unit 32142 of PLA, Baoding 071000, China)

Abstract: Aiming at the problems that great noise effect exists and the inversion ability for multiple magnetic source parameters is poor in traditional magnetic source parameter inversion method, a multi-magnetic source parameter inversion method based on magnetic sensor array is proposed. Firstly, the magnetic tensor data measured using the magnetic sensor array are converted into the normalized magnetic source strength (NSS), and the upward continuation of NSS is conducted to reduce the effect of the high frequency noise in the normalized magnetic source strength data. Then, the horizontal position of the magnetic source is estimated using an improved tilt angle based on the normalized magnetic source strength, wherein the maximum value of the positive extremum values in the calculation region is the horizontal position of the magnetic source. Finally, according to the Euler homogeneity equation of normalized magnetic source strength, an improved magnetic source depth estimation method is proposed to realize the single point estimation of magnetic source depth and magnetic moment. The simulation and experiment results show that the proposed method is not affected by the geomagnetic background magnetic field compared with the Nara inversion method. The horizontal location error of multi-target magnetic sources is not greater than 0.08 m, the depth relative error is not greater than 24.76%, and this method also has a strong anti-noise ability.

Keywords: magnetic sensor array; normalized magnetic source strength; upward continuation; horizontal location; depth

0 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)、水文及工程地质勘探等领域^[1-5]。磁源参数反

演是解释磁测数据的重要一步,其主要目的是利用获得的磁测数据来评估地下或水下未知磁性体的位置及磁矩。传统的磁源位置估计方法主要包括多源欧拉反褶积法^[6]、多源维纳反褶积法^[7]、小波变换法^[8]以及广义逆矩阵修正方法等^[9]。上述方法能够给出磁源的位置信息,

但是主要是基于磁总场和磁分量场信号,反演信息单一,难以满足对磁源进一步识别的要求。

利用磁传感器阵列可以测量得到磁梯度张量数据,与磁总场和磁分量场信号相比,磁梯度张量数据具有更高的分辨率,并且由磁梯度张量矩阵推导而来的归一化磁源强度等数据能够排除噪声和远处磁源的干扰,已经逐渐成为磁测数据解释方法中的研究热点^[10-16]。欧拉反褶积是一种高效的磁场数据解释方法,Nara 等^[17]结合磁梯度张量数据,提出了基于矩阵求逆的单个磁偶极子计算方法,但是该方法受背景磁场影响较大。Yin 等^[18]在 Nara 方法的基础上提出了基于张量梯度的磁偶极子单点定位方法,该方法能够排除背景磁场的影响,但容易受到噪声干扰。陈俊杰等^[19]利用网格数据采样方式,但是反演结果受优化算法寻优能力影响较大。Yin 等^[20]提出了一种基于自适应模糊 C 均值聚类多点定位方法,通过计算聚类质心获得磁性目标的位置。尽管目前已经将磁梯度张量数据引入到磁源的参数估计中,但是多用于单个磁源,在对多目标进行计算时,由于磁源产生相互叠加的磁测数据会导致部分磁性较弱的磁源被强磁性的磁源所掩盖,同时受噪声和地球背景磁场的影响导致估计结果产生较大的误差,因此使得多目标磁源的反演技术难度大大增加,目前仍处于起步研究阶段。

因此,为提高对多个磁源参数的反演能力,提出了基于归一化磁源强度的多磁源参数反演方法。该方法首先将归一化磁源强度向上延拓,降低归一化磁源强度数据中高频噪声的影响;然后利用基于归一化磁源强度的改进的倾斜角对磁源的水平位置进行估计,最后,根据归一化磁源强度的欧拉同性方程提出改进的磁源深度估计方法对磁源的深度和磁矩进行单点估计。

1 磁源参数估计理论

1.1 磁传感器阵列测量理论

在笛卡尔坐标系下,磁梯度张量可以由一个二阶矩阵表示。

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{G}$ 为磁梯度张量; $\mathbf{B}_i (i = x, y, z)$ 为磁场三分量; $\mathbf{B}_{\alpha\beta} (\alpha, \beta = x, y, z)$ 为磁梯度张量的 9 个分量。

归一化磁源强度(normalized source strength, NSS)是由磁偶极子磁梯度张量矩阵推导得到的旋转不变量,其分布位于场源中心。定义观测点坐标为 (x, y, z) 上的张

量不变量 $\mathbf{I}_1 = \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3$ 和 $\mathbf{I}_2 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3)$, 其中特征值 $\lambda_i (i = 1, 2, 3)$ 满足特征方程 $\lambda_i^3 + \mathbf{I}_1 \lambda_i - \mathbf{I}_2 = 0$ 。则 NSS (x, y, z) 可以表示为^[21-22]:

$$\text{NSS}(x, y, z) = \sqrt{-\lambda_2^2 - \lambda_1 \lambda_3} = \frac{3C_m M}{d^4} \quad (2)$$

式中: $C_m = 10^{-7} \text{ H/m}$; M 为磁偶极子的磁矩; d 为场源位置到观测点之间的距离。式(2)的推导过程如下:

磁偶极子的磁总场异常 B 为:

$$B(x, y, z) = \frac{C_m M}{d^3} [3(\tilde{\mathbf{M}} \cdot \tilde{\mathbf{d}})\tilde{\mathbf{d}} - \tilde{\mathbf{M}}] \quad (3)$$

式中: $\tilde{\mathbf{M}}$ 为磁偶极子方向的单位向量; $\tilde{\mathbf{d}}$ 为异常源指向观测点的单位向量。由于偶极子场为 $\frac{1}{d^3}$ 衰减,因此其磁梯度张量以 $\frac{1}{d^4}$ 衰减。假设观测面的坐标为 $x_i = (x_1, x_2, x_3)$, 异常源位置为 (η_1, η_2, η_3) , d 的 n 次方偏导数形式可以表示为:

$$\frac{\partial(d^n)}{\partial(x_i)} = nd^{n-2}d_i \quad (4)$$

式中: $d = \sqrt{(x_1 - \eta_1)^2 + (x_2 - \eta_2)^2 + (x_3 - \eta_3)^2}$, $d_i = (x_i - \eta_i)$, $i = 1, 2, 3$ 。假设磁偶极子在 x_i 方向上的投影为 B_i , $i = 1, 2, 3$ 。因此,可以将 B_i 表示为:

$$B_i(x_1, x_2, x_3) = B(x_1, x_2, x_3) \cdot x_i = 3C_m \cdot \frac{d_i}{d^5} (M_1 d_1 + M_2 d_2 + M_3 d_3) \quad (5)$$

式中: M_i 和 d_i 为沿不同坐标轴 x_i 方向下的投影。故磁偶极子磁梯度张量元素为磁场分量 B_i 在 $x_j (j = 1, 2, 3)$ 方向上的偏导数,计算结果如下:

$$B_{ij} = \frac{\partial B_i}{\partial x_j} = \frac{3C_m}{d^4} \left[\frac{-5 \tilde{\mathbf{M}} \cdot \tilde{\mathbf{d}}}{d^3} \cdot d_i \cdot d_j + \frac{M_i \cdot d_j + M_j \cdot d_i + \tilde{\mathbf{M}} \cdot \tilde{\mathbf{d}} \cdot \delta_{ij}}{d} \right] \quad (6)$$

式中: $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$, 振幅为归一化磁源强度数据。令

$\text{NSS} = \frac{3C_m M}{d^4}$, 则 B_{ij} 可以简化为:

$$B_{ij} = \tilde{d}_i \text{NSS}_j + \tilde{d}_j \text{NSS}_i + (\text{NSS} \cdot \tilde{\mathbf{d}}) \delta_{ij} - 5(\text{NSS} \cdot \tilde{\mathbf{d}}) \tilde{d}_i \tilde{d}_j \quad (7)$$

式中: $\tilde{d}_i$ 代表 $\tilde{\mathbf{d}}$ 在 x_i 上的方向余弦。为了方便进行计算,将坐标方向分别定义为:

$X_1 = \tilde{\mathbf{d}}, X_2 = \tilde{\mathbf{M}} \times \tilde{\mathbf{d}}, X_3 = \tilde{\mathbf{X}}_1 \times \tilde{\mathbf{X}}_2$, 可以将观测点坐标 x , 磁矩 M 以及归一化磁矩向量 u 的三分量表示。

$$\begin{cases} x_1 = d, x_2 = 0, x_3 = 0 \\ M_1 = M \cos \theta, M_2 = 0, M_3 = M \sin \theta \\ \text{NSS}_1 = \text{NSS} \cos \theta, \text{NSS}_2 = 0, \text{NSS}_3 = \text{NSS} \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

此时,根据式(7)和(8)将磁梯度张量矩阵表示为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -2\cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

求解该方程的特征方程得到特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{NSS}{2}(-\cos\theta + \sqrt{4 + 5\cos^2\theta}) \\ \lambda_2 = NSS\cos\theta \\ \lambda_3 = \frac{NSS}{2}(-\cos\theta - \sqrt{4 + 5\cos^2\theta}) \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10)可以推导出如式(2)所示的 NSS 表达式。

为了获得磁梯度张量数据,利用平面十字型的三轴磁传感器来布设磁梯度张量探测系统,测量原理如图1所示。两个磁传感器之间的基线距离为 $2d$ 。则该磁传感器阵列所测量得到的磁梯度张量数据可以被定义为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{B_{1x} - B_{3x}}{d} & \frac{B_{1y} - B_{3y}}{d} & \frac{B_{1z} - B_{3z}}{d} \\ \frac{B_{2y} - B_{4y}}{d} & \frac{B_{2z} - B_{4z}}{d} & -\frac{B_{1x} - B_{3x}}{d} - \frac{B_{2y} - B_{4y}}{d} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: B_{sv} ($s=1,2,3, v=x,y,z$) 代表第 s 个传感器测量得到的第 v 个方向。

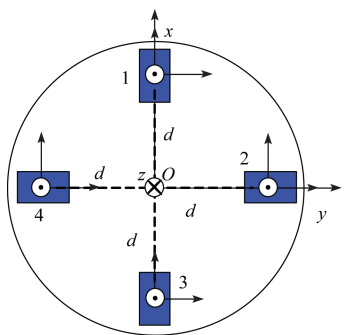


图1 平面十字型磁传感器阵列结构

Fig.1 The plane cross magnetic sensor array structure

1.2 磁源水平位置估计方法

估计磁源位置信息时,首先要判断磁源存在的水平位置及个数,确定磁化的分布区域,为下一步的参数估计提供参考。在测量区域内,磁性强弱不同的磁源之间会产生信号混叠,导致磁性较弱的磁源信号被掩盖,出现目标丢失。针对上述问题,本文根据倾斜角梯度法的计算原理,提出基于 NSS 的改进的倾斜角梯度 T_{nss} 来对目标的水平分布情况进行计算,计算公式如下:

$$T_{nss} = \arctan \left(\frac{\frac{\partial NSS}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial NSS}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial NSS}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (12)$$

与磁场的其他转换形式相比, NSS 不受磁化方向的影响^[23],因此, T_{nss} 为正值,同时在磁偶极子正上方位置达到最大值 $\pi/2$ 。利用 T_{nss} 计算值,将计算区域内的 T_{nss} 的极大值对应的水平位置作为磁偶极子的实际水平位置,能够同时对不同磁性大小的磁源进行有效的识别。

1.3 磁源垂直位置估计方法

由 2D 和 3D 目标引起的重力和磁场满足欧拉同性性质方程。然而,在实际应用中,欧拉反褶积可以用于求解任意形状目标产生的场^[24]。

$$(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \cdot \nabla f = -n(f - B) \quad (13)$$

式中: $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{r}_0$ 分别代表观测点位置和目标的实际位置; f 为测得的磁场或重力场数据; n 为构造指数; B 为背景场。利用式(13)对若干数据点计算可以对磁源的位置及背景场进行求解。在标准的欧拉反褶积算法中,构造指数 n 是基于先验信息而进行确定的。然而,在实际应用中,利用更少的先验信息对目标的参数进行求解具有更强的应用价值。

NSS 满足欧拉同性性质方程,根据 NSS 在 x, y, z 方向产生的梯度值,可以将 NSS 的欧拉反褶积形式表示为^[25]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial NSS}{\partial x}(x_1 - x_0) + \frac{\partial NSS}{\partial y}(y_1 - y_0) + \\ \frac{\partial NSS}{\partial z}(z_1 - z_0) = -nNSS \end{aligned} \quad (14)$$

式中: x_0, y_0 和 z_0 表示目标的实际坐标位置; x_1, y_1 和 z_1 表示观测点的实际坐标位置。令 $x_1 = x_0, y_1 = y_0, z_1 = 0$, 埋深 $z_0 = h$, 因此可以将式(14)进行化简为:

$$h \cdot \frac{\partial NSS_0}{\partial z} = nNSS_0, NSS_0 = NSS(x_0, y_0, 0) \quad (15)$$

向上延拓高度为 Δh 时,此时实际坐标位置变为 $x = x_0, y = y_0, z = -\Delta h$, 则式(14)进行化简为:

$$\begin{cases} (h + \Delta h) \cdot \frac{\partial NSS_1}{\partial z} = nNSS_1 \\ NSS_1 = NSS(x_0, y_0, -\Delta h) \end{cases} \quad (16)$$

将式(15)和式(16)进行联立,化简后为:

$$h = \frac{\Delta h \cdot \frac{\partial NSS_1}{\partial z}}{\frac{NSS_1}{NSS_0} \cdot \frac{\partial NSS_0}{\partial z} - \frac{\partial NSS_1}{\partial z}} \quad (17)$$

1.4 磁源向上延拓理论

在对张量场进行向上延拓过程中,由于浅源异常衰减速度比深源异常特别是区域性的深源异常衰减速度

快,因此,向上延拓过程能够有效抑制浅层高频信息干扰,突出深源长波信息^[17]。假设观测面 A 磁测数据为 $u(x,y,0)$, 距离观测面 A 高度为 h 的延拓面 B 的磁测数据为 $u(x,y,h)$, 则延拓面上位场数据可以转化为:

$$u(x,y,h) = \mathbf{F}^{-1} [\mathrm{e}^{-\sqrt{k_x^2+k_y^2}h} U(k_x,k_y,0)] \quad (18)$$

式中, $U(k_x,k_y,0)$ 为观测面上的位场数据频率域表达式,在向上延拓过程中 $h > 0$ 。将磁梯度张量数据进行向上延拓,利用式(2)计算延拓面上的 NSS 数据。

1.5 磁源磁矩估计方法

通过上述方法获得的磁偶极子的实际水平位置和埋深,根据获得的实际水平位置和埋深,将式(12)进行转换求得每个磁偶极子的磁矩方程为:

$$\mathbf{M} = \frac{d^4}{3C_m} \cdot \text{NSS}(x,y,z) \quad (19)$$

若测量点位于磁源正上方,磁源可等效为磁偶极子,则该点对应的磁矩可以表示为:

$$\mathbf{M} = \frac{z_0^4}{3C_m} \cdot \text{NSS}(x_0,y_0,z) \quad (20)$$

2 仿真分析

首先,将本文方法对噪声的敏感程度进行讨论。建立一个磁偶极子模型,磁矩为 $40 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, 磁化倾角为 0.33 rad , 磁化偏角为 -0.11 rad , 中心位置坐标为 $(1.8 \text{ m}, 2.3 \text{ m}, 0.7 \text{ m})$ 。分别向观测数据中加入不同信噪比的高斯白噪声,并对延拓前和延拓后对磁源位置参数的估计值进行对比,计算结果如图 2 所示。根据图 2 可以看出,当信噪比小于 15 时,延拓前的计算结果存在误差,而利用本文的方法进行计算,获得的磁源的水平位置几乎不受噪声的影响,这是由于在计算过程中,向上延拓的过程会自动滤除一部分高频噪声,使得本文方法在未使用其他降噪方法的前提下便可以获得稳定的磁测数据,简化了计算过程。

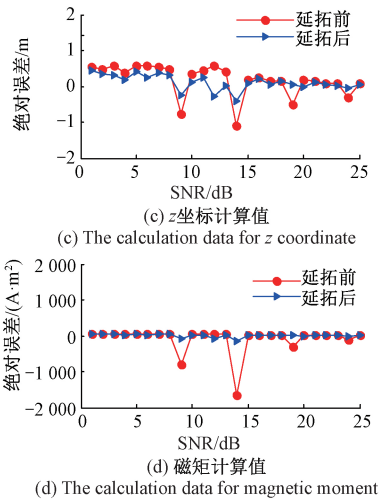
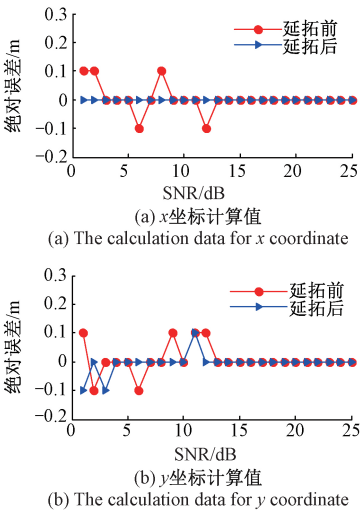


图 2 不同噪声条件下的反演结果

Fig.2 The inversion results under different noise conditions

然后,对本文方法在多磁源目标条件下的识别能力进行讨论。由于在计算过程中获得了延拓数据,因此利用延拓面上的 T_{NSS} 的极大值位置对水平位置进行估计,能够进一步提高估计精度。在测量区域内放置 8 个磁偶极子模型进行仿真试验,不同磁源的中心坐标,磁化方向和磁矩如表 1 所示。在实际应用中,还需要考虑地球背景磁场的影响,假设背景磁场的磁场强度为 $50\,000 \text{ nT}$, 磁化倾角为 0.36 rad , 磁化偏角为 0.11 rad 。在仿真信号中加入信噪比为 30 的高斯白噪声,建立 z 向下为正方向的右手坐标系,观测面上获得的磁梯度张量数据及 NSS 数据如图 3 所示。

表 1 模型理论参数

Table 1 The theoretical parameters of the models

磁源	x/m	y/m	z/m	$P_0/\text{A} \cdot \text{m}^2$	I/rad	D/rad
1	0.4	0.4	0.15	8	0.33	-0.11
2	0.4	3.9	0.18	12	0.28	-0.11
3	3.9	0.4	0.20	8	0.33	-0.11
4	3.9	3.9	0.20	12	0.33	-0.11
5	2.2	1.1	0.13	8	0.17	0.17
6	2.2	3.3	0.15	8	0.50	0
7	1.1	2.2	0.16	8	0.22	0.11
8	3.3	2.2	0.18	12	0.33	-0.11

根据图 3 获得的观测数据可以看出,观测数据中包含较强的噪声干扰,同时,NSS 数据无法对埋深较深磁性较弱的磁源进行直观的显示,仅通过 NSS 数据难以准确的判别磁源的数目与分布。因此对 T_{NSS} 及向上延拓 0.1 m 的 T_{NSS} 数据进行计算,获得的计算结果如图 4 所示。

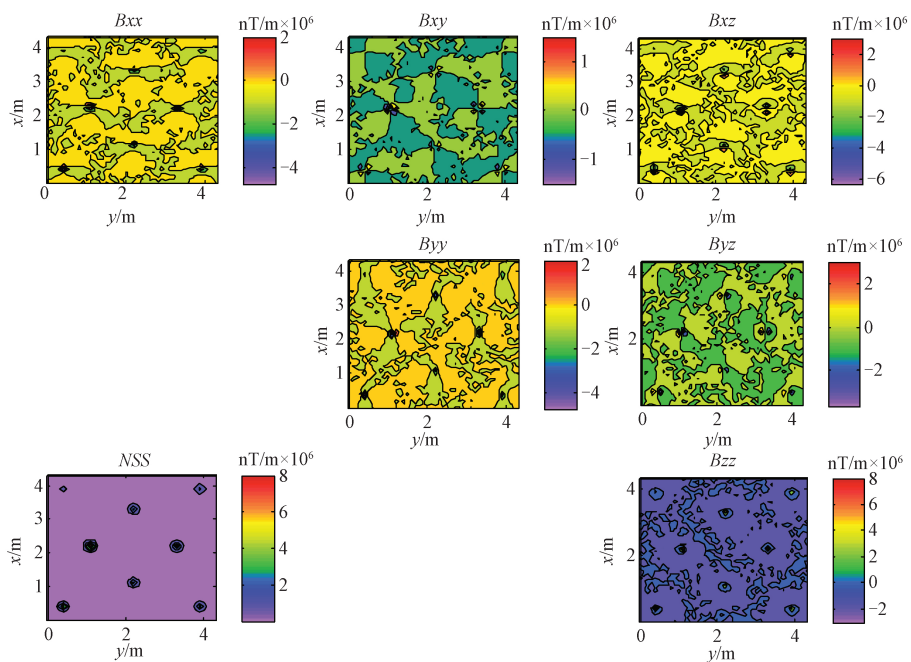


图3 观测面上磁梯度张量及NSS数据

Fig.3 The magnetic gradient tensor and NSS data on the observation surface

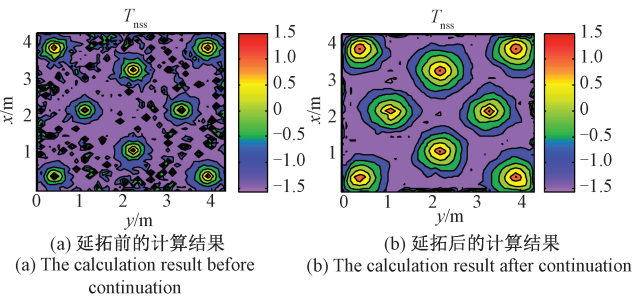


图4 T_{nss} 计算结果

Fig.4 The calculation results of the T_{nss}

根据图4可以看出,直接在观测面上对 T_{nss} 进行计算会引入较多的高频噪声,因此会影响对磁源水平位置的估计。利用本文的方法,通过将NSS数据进行向上延拓,能够提高观测数据的信噪比,计算 T_{nss} 数据可以同时获得不同磁性强度大小磁源的水平位置信息,利用获得的水平位置信息,对磁源的深度进行反演,加噪声和不加噪声获得的计算结果如表2和3所示。

根据表2和3的计算结果可知,利用本文的方法,其中水平位置的误差为0,深度的相对误差在不包含噪声的情况下在8.55%~14.89%之间,在包含噪声的情况下在9.53%~20.85%之间,同时能够较为准确地反演出磁矩的大小,证明了本文方法的有效性。

最后,将本文方法获得的计算结果与Nara方法获得的计算结果进行对比,获得不同坐标上的估计误差值,

表2 无噪声条件下的模型估计参数
Table 2 The estimation parameters of the models without noise

磁源	方法	x/m	y/m	z/m	$P_0/$ ($A \cdot m^2$)
1	本文	0.4	0.4	0.133 5	6.901 2
	Nara	0.234 5	0.375 3	0.240 4	—
2	本文	0.4	3.9	0.153 2	8.411 8
	Nara	-0.122 3	3.822 9	0.485 1	—
3	本文	3.9	0.4	0.182 9	6.439 7
	Nara	3.633 6	0.364 8	0.287 4	—
4	本文	3.9	3.9	0.181 7	9.570 3
	Nara	3.552 0	3.848 3	0.390 2	—
5	本文	2.2	1.1	0.146 5	13.434 9
	Nara	1.929 8	1.002 0	0.220 0	—
6	本文	2.2	3.3	0.130 4	6.533 3
	Nara	1.971 5	3.265 8	0.304 6	—
7	本文	1.1	2.2	0.138 4	6.144 0
	Nara	0.970 4	2.149 4	0.140 6	—
8	本文	3.3	2.2	0.154 4	8.508 6
	Nara	3.198 8	2.163 3	0.264 9	—

如图5所示。根据图5可以看出,无论是否加入高斯白噪声,利用本文方法获得的计算结果均能保持一个较

表 3 加入噪声条件下的模型估计参数

Table 3 The estimation parameters of the models with noise

磁源	方法	x/m	y/m	z/m	$P_0/(\text{A}\cdot\text{m}^2)$
1	本文	0.4	0.4	0.124 2	5.813 6
	Nara	0.227 9	0.377 1	0.243 8	—
2	本文	0.4	3.9	0.146 2	7.585 2
	Nara	-0.1106	3.822 9	0.490 9	—
3	本文	3.9	0.4	0.179 4	6.286 7
	Nara	3.634 6	0.358 7	0.282 2	—
4	本文	3.9	3.9	0.158 3	6.751 3
	Nara	3.548 4	3.853 1	0.394 7	—
5	本文	2.2	1.1	0.147 2	13.596 5
	Nara	1.932 5	1.004 8	0.215 9	—
6	本文	2.2	3.3	0.135 7	7.154 7
	Nara	1.968 5	3.261 7	0.303 3	—
7	本文	1.1	2.2	0.135 8	5.838 8
	Nara	0.969 8	2.151 4	0.139 1	—
8	本文	3.3	2.2	0.151 3	8.102 2
	Nara	3.204 3	2.163 9	0.264 0	—

高的估计精度,而利用 Nara 方法进行计算过程中,计算结果受噪声干扰较为明显,同时受地球背景磁场的影响,获得的计算结果存在较大误差。

3 实验验证

为了验证上述方法的有效性,利用 Bartington 公司的三轴磁通门传感器搭建的十字型磁梯度张量探头,测试系统主要包括十字型探头、数字采集模块及软件操作终端,在实验过程中,探头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。测区位于石家庄某地,实测区域及测试仪器如图 6 所示,在 $2.1\text{ m}\times 2.1\text{ m}$ 的区域内放置 5 个磁铁,磁铁为软铁材料,以传感器所在的平面为观测平面,该磁铁的实际分布位置见表 4。在实验过程采集过程中,测量的间隔为 0.1 m ,对获得的磁测数据进行插值处理,得到采样间隔为 0.02 m 的测量数据、获得的磁梯度张量及 NSS 如图 7 所示。

根据图 7 可以看出,直接通过 NSS 数据无法准确获得磁铁的实际水平分布信息,难以准确的判别磁铁的数目与分布,因此对 T_{NSS} 及向上延拓 0.1 m 的 T_{NSS} 数据进行计算,获得的计算结果如图 8 所示。根据图 8 可以看出,本文方法能够提高磁铁信号的信噪比,磁铁的正极值分

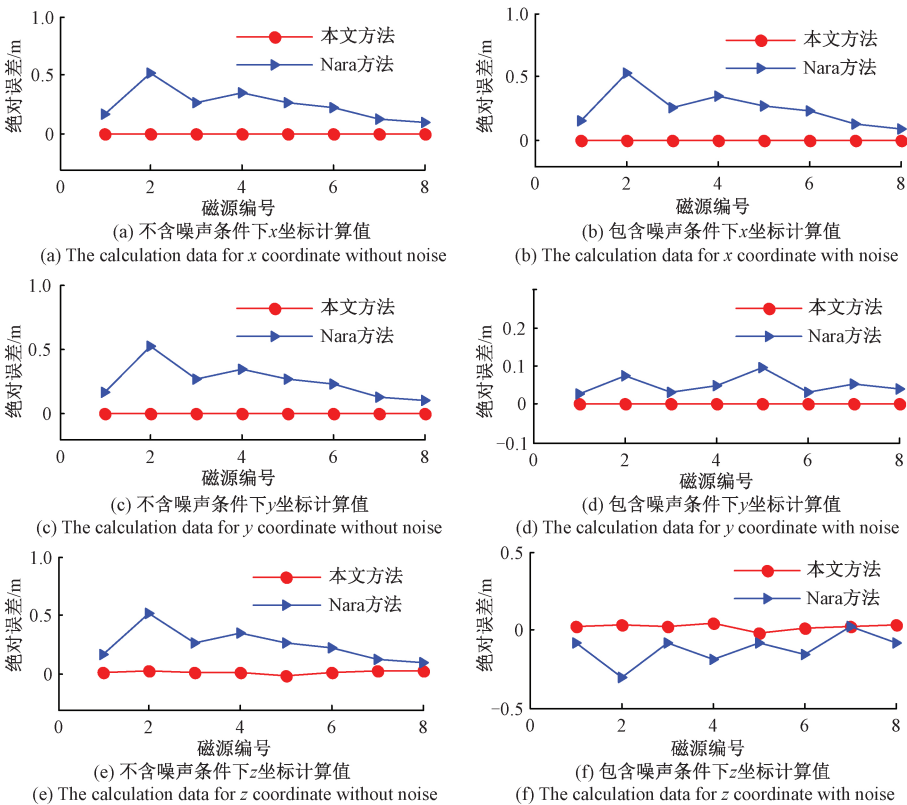


图 5 不含噪声和包含噪声条件下两种方法的绝对误差

Fig.5 The absolute errors of two methods without noise and with noise



图 6 实验区域及仪器

Fig.6 Experiment area and instrument

布较为明显。利用获得的水平位置信息,对磁铁的深度进行计算,计算结果见表 4。

根据表 4 的计算结果可知,获得的 5 个磁铁的位置信息的水平位置的误差不大于 0.08 m,深度的相对误差在 2.09%~24.76%之间,同时实现了对磁铁磁矩大小进行估计。根据实验结果可以看出,与仿真结果相比,实验结果中存在的误差整体偏高,主要因为在测量过程中由于测试系统自身存在的测试噪声以及非匀强背景磁场引起磁测数据不准确导致测试结果存在误差,下一步可以通过提高测试精度并利用稳定性较好的辅助测试装置提高计算精度。

表 4 磁铁磁性参数的真实值与估计值

Table 4 The true and estimated values of the magnetic parameters of the magnets

磁源	方法	x/m	y/m	z/m	$P_0/(\text{A}\cdot\text{m}^2)$
1	真实值	0.55	0.35	0.145	—
	本文	0.54	0.38	0.109 1	0.00 9
	Nara	0.8270	0.043 4	0.412 3	—
2	真实值	0.6	1.7	0.22	—
	本文	0.56	1.78	0.215 4	0.155 3
	Nara	1.419 3	1.530 1	-0.069 5	—
3	真实值	1.9	1.7	0.207	—
	本文	1.98	1.72	0.235 0	1.221
	Nara	2.783 7	2.132 1	0.401 9	—
4	真实值	1.9	0.4	0.207	—
	本文	1.98	0.4	0.176 8	0.025 8
	Nara	0.452 7	1.907 4	0.725 0	—
5	真实值	1.25	1.05	0.21	—
	本文	1.22	1.1	0.248 9	1.253
	Nara	1.465 6	1.017 5	0.406 3	—

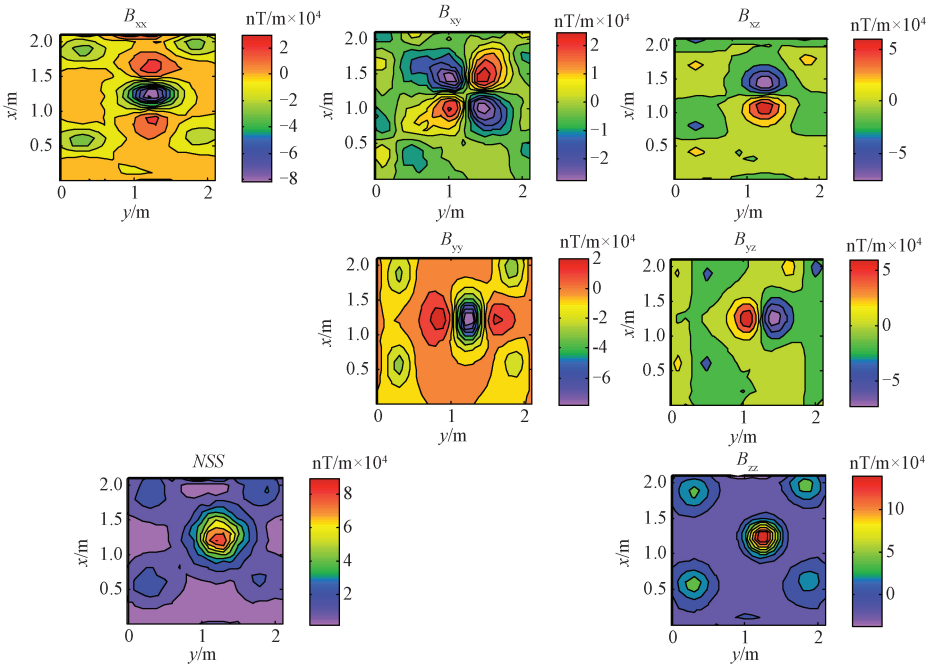


图 7 实测磁梯度张量及 NSS 数据

Fig.7 The actually measured magnetic gradient tensor and NSS data

将本文方法获得的计算结果与 Nara 方法获得的计算结果进行对比,分别计算磁源在 x,y,z 3 个方向的估计结果,并计算位置参数的绝对误差,如图 9 所示。根据图 9 的误差曲线可以看出,利用本文方法获得的 3 个方向

上的计算结果均能保持一个较高的估计精度,而利用 Nara 方法计算结果估计值与磁铁的实际位置相差较大,主要是由于受到地球背景磁场的影响,导致获得的计算结果存在较大误差。

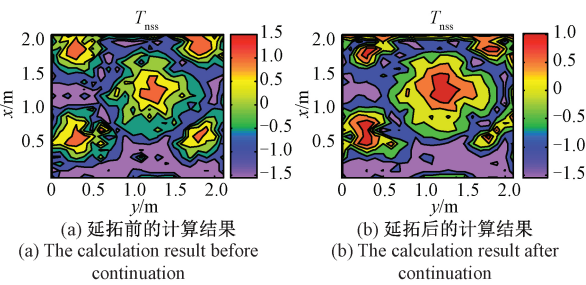


图 8 T_{nss} 计算结果

Fig.8 The calculation results of the T_{nss}

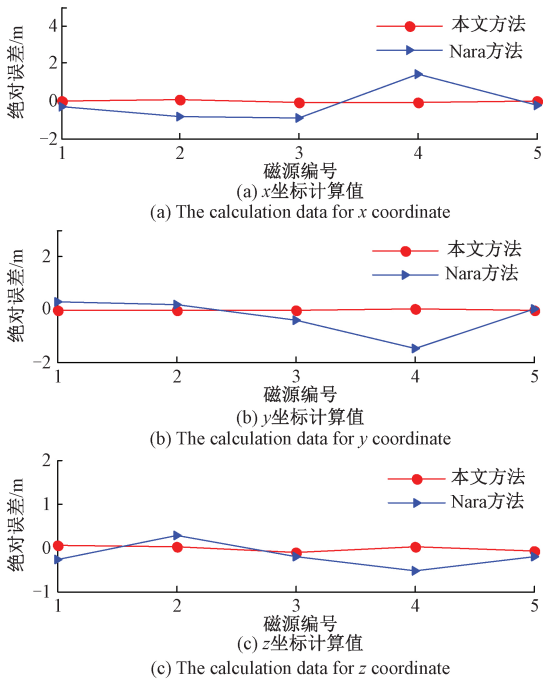


图 9 两种方法的绝对误差

Fig.9 The absolute errors of two methods

4 结 论

1) 针对高频噪声对计算结果的影响问题,提出了将归一化磁源强度数据向上延拓,有效降低了噪声的干扰。

2) 针对计算区域内利用 NSS 数据难以同时分辨出强弱磁源的问题,提出改进的倾斜角梯度法,在计算区域内获得的正极值为磁源的水平位置。

3) 通过归一化磁源强度的欧拉同性质方程,建立磁源深度和磁矩单点估计方程,能够消除地磁场的影响,并在无需任何先验信息的条件下准确的获得磁源的位置和磁矩。

参考文献

[1] 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.

[2] 郑建棚,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]. Geophysical Prospecting, 2019,54(3):692-699,491.

[3] 朱丹,刘天佑,李宏伟.基于奇异谱分析的重磁位场分离方法[J].地球物理学报,2018,61(9):3800-3811.

ZHU D, LIU T Y, LI H W. Separation of potential field based on singular spectrum analysis [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2018,61(9):3800-3811.

[4] 李端,陈超,杜劲松,等.多层等效源曲面磁异常转换方法[J].地球物理学报,2018,61(7):3055-3073.

LI D, CHEN C, DU J S, et al. Transformation of magnetic anomaly data on an arbitrary surface by multi-layer equivalent sources [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2018,61(7):3055-3073.

[5] 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. (in Chinese), 2019,62(9):3580-3590.

[6] HANSEN R O, SUCIU L. Multiple-source euler deconvolution[J]. Geophysics, 2002, 67(2), 525-535.

[7] HANSEN R O. 3D multiple-source Werner deconvolution for magnetic data [J]. Geophysics, 2005, 70(5):L45-L51.

[8] BILLINGS S D, HERRMANN F J. Automatic detection of position and depth of potential UXO using continuous wavelet transforms [C]. Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VIII. International Society for Optics and Photonics, 2003, 5089: 1012-1023.

[9] 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.
- [10] 饶椿锋,于鹏,胡书凡,等.基于加权模型参数的归一化磁源强度三维反演[J].石油物探,2017,56(4):599-606.
- RAO CH F, YU P, HU SH F, et al. The 3D inversion of the normalized source strength data based on weighted model parameters [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(4):599-606.
- [11] LI J P, ZHANG Y T, YI G, et al. An approach for estimating the magnetization direction of magnetic anomalies [J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 137: 1-7.
- [12] 袁鹏,祗会强,靳鸿,等.基于磁梯度张量不变量的椭圆误差消除方法[J].传感技术学报,2019,32(8):1194-1199.
- YUAN P, ZHI H Q, JIN H, et al. Elliptical error elimination method based on magnetic gradient tensor invariant [J]. Chinses Journal of Sensors and Actuators, 2019,32(8):1194-1199.
- [13] 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(in Chinese), 2019,34(4):1568-1576.
- [14] 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 tensor [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2018,61(04):1539-1548.
- [15] 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 J. Geophys. (in Chinese), 2019, 62 (10): 3723-3733.
- [16] 李青竹,李志宁,张英堂,等.平面十字磁梯度张量系统的两步线性校正[J].仪器仪表学报,2017,38(9):2232-2242.
- LI Q ZH, LI ZH N, ZHANG Y T, et al. Two-step linear calibration of planar cross magnetic gradient tensor system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(9):2232-2242.
- [17] NARA T, SUZUKI S, ANDO S. A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 3291-3293.
- [18] 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.
- [19] 陈俊杰,易忠,孟立飞,等.基于欧拉方法的多磁偶极子分辨技术[J].航天器环境工程,2013,30(4):401-406.
- CHEN J J, YI ZH, MENG L F, et al. Multi-dipoles discrimination technique based on Euler inverse method[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(4): 401-406.
- [20] YIN G, ZHANG Y T, FAN H B, et al. Automatic detection of multiple UXO-like targets using magnetic anomaly inversion and self-adaptive fuzzy c-means clustering[J]. Exploration Geophysics, 2017, 48(1), 67-75.
- [21] ZHOU J J, MENG X H. Three-dimensional cross-gradient joint inversion of gravity and normalized magnetic source strength data in the presence of remanent magnetization[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 119: 51-60.
- [22] LI J P, ZHANG Y T, FAN H B, et al. Estimating the location of magnetic sources using magnetic gradient tensor data [J]. Exploration Geophysics, 2019, 50(6): 600-612.
- [23] PIKINGTON, BEIKI M. Mitigating remanent magnetization effects in magnetic data using the normalized source strength [J]. Geophysics, 2013, 78(3): 25-32.
- [24] REID A B, ALLSOP J M, GRANSER H, et al. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler

deconvolution[J]. Geophysics, 1990, 55(1): 80-91.

- [25] BEIKI M, CLARK D A, AUSTIN J R, et al. Estimating source location using normalized magnetic source strength calculated from magnetic gradient tensor data [J]. Geophysics, 2012, 77(6): J23-J37.

- [26] 孟慧.磁梯度张量正演延拓数据解释方法研究[D].长春:吉林大学,2012.

MENG H. Research on forward continuation and data interpretation methods of magnetic gradient tensor[D]. Changchun: Jilin University, 2012.

作者简介



李金朋, 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, 现为陆军工程大学石家庄校区机械工程专业在读博士研究生, 主要研究方向为测试技术与信号处理。

E-mail: 714741928@qq.com

Li Jinpeng received his B.Sc. degree in 2014 from Jilin University, and received his M.Sc. degree in 2016 from Ordnance Engineering College. Now, he is a Ph.D. student in mechanical engineering in Shijiazhuang Campus, Army Engineering University. His main research interests include test technology and signal processing.



张英堂, 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, 现为陆军工程大学石家庄校区教授, 主要研究方向为机械设备性能检测与故障诊断。

E-mail: zyt01@mails.tsinghua.edu.cn

Zhang Yingtang received his B.Sc. degree in 1993 from Beijing Institute of Technology, and received his Ph.D. degree in 2004 from Tsinghua University. Now, he is a professor in Shijiazhuang Campus, Army Engineering University. His main research interests include mechanical equipment performance test and fault diagnosis.



范红波 (通信作者), 分别于 2004 年、2007 年、2010 年在军械工程学院获得学士、硕士、博士学位。现为陆军工程大学石家庄校区讲师, 主要研究方向为测试技术与信号处理。

E-mail: ffhhbboo@163.com

Fan Hongbo (Corresponding author) received his B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degree all from Ordnance Engineering College in 2004, 2007 and 2010, respectively. Now, he is a lecturer in Shijiazhuang Campus, Army Engineering University. His main research interests include test technology and signal processing.