doi: 10.11720/wtyht.2026.1129
李泽林, 王翌冲, 王珺璐, 等. 基于归一化磁源强度的未爆炸物探测研究[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 607-613. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1129
Li Z L, Wang Y C, Wang J L, et al. Detection of unexploded ordnance based on normalized source strength[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 607-613. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1129

基于归一化磁源强度的未爆炸物探测研究

李泽林[1], 王翌冲[1], 王珺璐[2], 徐行行[1]
(1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100037)

摘 要: 未爆炸物(UXO)的探测是环境与工程地球物理中重要的研究内容之一。其中, 磁法勘探是一种经济、高效、安全、可靠的地球物理探测方法。然而, 当前基于磁法勘探的研究方法依然存在自动化程度不高、冗余解较多等不足。针对上述问题, 本文基于归一化磁源强度(normalized source strength, NSS)理论, 提出了一种适用于高精度磁测数据的 UXO 探测方法。该方法首先将磁异常数据转化为 NSS, 然后利用改进的欧拉反褶积对 NSS 数据进行反褶积计算, 得到场源的空间位置以及构造指数等信息。模型试验和实际资料处理表明, 该方法自动化程度较高, 冗余解较少, 可为后续相关工作提供一定的技术参考。

关键词: 未爆炸物; 磁法勘探; 剩磁; 归一化磁源强度; 欧拉反褶积
中图分类号: P631; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)03-0607-07

0 引言

目前, 世界上有 80 多个国家不同程度地受到未爆炸物(unexploded ordnance, UXO)的危害, 大量的 UXO 被埋藏在地下[1-2]。在城市基础建设中, 房屋建设、道路修建等许多工程中都会有大量的基础挖掘工作。在此过程中, 地下可能存在的未爆炸物, 给施工带来了很大的麻烦, 同时也对施工人员的生命财产构成了极大的威胁。地球物理方法是 UXO 无损探测的重要方法[3], 其中最有效、最常用的方法是时间域电磁法[4-9] 和高精度磁法[10-16]。本文则主要研究基于高精度磁测数据探测 UXO 的方法。

高精度磁法探测的主要原理是 UXO 产生的磁异常可以近似为类偶极子磁异常。为了获得 UXO 的三维空间分布, 前人提出了不同的磁测数据反演方法。从研究对象和适用情况的角度来分析, 这些方法大致可以分为两类: 第一类算法主要针对单个磁异常的精细反演。Butler 等[15] 将 UXO 近似为椭球体, 利用参数反演的方法来确定椭球体的空间位置、形状、体积、朝向等参数。祁光等[1] 利用人机交互建模来模拟 UXO 的空间位置, 较好地展示 UXO 的空间分布状态。上述反演尽管可以获得较多模型的参数信息, 但反演的非唯一性较强, 且难以适用于大规模数据的快速反演。第二类算法将 UXO 探测简化为偶极子的中心定位问题, 主要针对大规模磁测数据进行快速、自动的反演。Salem 等[17] 提出了基于神经网络的 UXO 自动探测方法, 但存在计算量较大的问题。Davis 等[14] 提出了基于扩展欧拉反褶积的 UXO 探测方法, 这种方法能够成功反演出场源的位置和构造指数, 但该方法需要预先对构造指数进行人为限制(构造指数需大于 2.5)。这类算法虽然仅能得到 UXO 的中心位置信息, 但可适用于大批量 UXO 磁异常的快速定位, 具有更强的实际应用价值。

本文提出了基于归一化磁源强度(简称 NSS)的 UXO 探测方法, 该方法属于上述第二类算法的研究范畴。NSS 已经被应用于在剩磁影响下的磁源定位[18-19]、三维磁性反演[20], 本文工作主要是将 NSS 应用进一步扩展到 UXO 探测工作中。本文方法首先

收稿日期: 2025-04-10; **修回日期**: 2025-05-07
基金项目: 河北省教育厅科学研究项目(BJK2024098)
第一作者: 李泽林(1990-), 男, 博士, 副教授, 主要从事重磁勘探方法理论与应用研究工作。Email: lizelin@hebeu.edu.cn
通讯作者: 王珺璐(1988-), 男, 博士, 高级工程师, 长期从事矿产预测方法技术研究工作。Email: wangiunlu2007@126.com

将磁异常数据转化为 NSS，然后利用改进的欧拉反褶积对 NSS 数据进行反褶积计算，得到场源的位置以及构造指数等信息。与前人工作相比，本文方法具有自动化程度高、冗余解少等优势。本文首先介绍 NSS 和改进的欧拉反褶积方法的基本原理，然后通过模型和实际资料试验来验证本文方法的有效性。

1 基于归一化磁源强度(NSS)的欧拉反褶积方法

1.1 归一化磁源强度（NSS）

在实际勘探中，UXO 通常具有磁化率大，剩磁强的特点，因此仅通过磁异常难以确定 UXO 的准确位置。由于 UXO 产生的磁异常多为类偶极子磁异常，基于这一假设，可以利用 NSS 来探测 UXO。偶极子产生的 NSS 有两个优点：一是与磁化方向无关；二是均为正值且极大值与场源位置在水平面的投影相对应。

偶极子产生的 *NSS* 的计算公式[18] 为：

$$NSS = \frac{3C_m m}{(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0)^4}, \tag{1}$$

式中：C_m 为 10^{-7} H/m；m 为偶极子的磁偶极矩；$\boldsymbol{r}=(x, y, z)$，为观测点的位置；$\boldsymbol{r}_0=(x_0, y_0, z_0)$，为场源点的位置。由式(1)可以看出，偶极子产生的 NSS 与磁化方向无关，且随距离的 4 次方衰减，与磁异常的梯度量级一致。

由磁异常计算 *NSS* 的公式[18] 为：

$$NSS = \sqrt{-\lambda_2^2 - \lambda_1\lambda_3}, \tag{2}$$

式中：$\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \lambda_3$，为磁异常梯度张量矩阵的特征值。

在实际计算中，可首先通过频率域方法将磁异常转换为对应的梯度张量矩阵，然后求解张量矩阵的特征值即可求得 NSS。

1.2 欧拉反褶积方法

在重磁勘探中，简单的二维和三维形体产生的磁异常均满足欧拉齐次方程，因此，欧拉反褶积可以用来确定地质体的位置，其方程为：

$$(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0)\cdot\nabla f = -n(f-B), \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{r}=(x, y, z)$，为观测点的位置；$\boldsymbol{r}_0=(x_0, y_0, z_0)$，为场源点的位置；$f$ 为实测重力异常或磁异常；n 是与场源形状相关的构造指数；B 为背景场。可以通过滑动窗口的方法求解方程(3)来估计场源位置、构造指数 n、背景场 B。

重磁位场及其任意阶导数均满足欧拉齐次方程(式(4))，且也满足欧拉方程：

$$f = \frac{C}{|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0|^n}(n>1), \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{r}$ 和 $\boldsymbol{r}_0$ 与式(1)定义相同；C 为与 $\boldsymbol{r}$ 无关的变量或常数。将式(4)代入式(3)中进行验证，有：

$$(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0)\cdot\left[-nC|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0|^{-n-2}(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0)\right] = -nC|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0|^{-n} = -nf。 \tag{5}$$

因此，式(4)满足欧拉齐次方程，而式(1)则为式(4)中 n=4 的特殊情况，因此式(1)也满足欧拉齐次方程，且构造指数为 4。

在计算 NSS 的欧拉反褶积时，需要已知 NSS 的空间导数，可以采用频率域方法或者空间域方法[18] 进行计算。本文中的所有实例均采用频率域方法来计算空间导数，导数计算完毕后，就可以通过滑动窗口的方法求解式(6)来估计场源位置和构造指数：

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial NSS}{\partial x}\right)_1 & \left(\frac{\partial NSS}{\partial y}\right)_1 & \left(\frac{\partial NSS}{\partial z}\right)_1 & NSS_1 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial NSS}{\partial x}\right)_m & \left(\frac{\partial NSS}{\partial y}\right)_m & \left(\frac{\partial NSS}{\partial z}\right)_m & NSS_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ -n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1\left(\frac{\partial NSS}{\partial x}\right)_1 + y_1\left(\frac{\partial NSS}{\partial y}\right)_1 + z_1\left(\frac{\partial NSS}{\partial z}\right)_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_m\left(\frac{\partial NSS}{\partial x}\right)_m + y_m\left(\frac{\partial NSS}{\partial y}\right)_m + z_m\left(\frac{\partial NSS}{\partial z}\right)_m \end{bmatrix}。 \tag{6}$$

在方程(6)中，背景场 B 在利用磁异常换算空间导数的过程中已经被消除，因此仅需通过窗口中的 m 个观测数据来估算 x_0、y_0、z_0 以及 n 这 4 个未知参数。

传统欧拉方法在每一个窗口内均计算得到一个解，这样会导致最终结果存在大量冗余和错误的解。为了减少冗余和错误解的个数，同时提高计算效率，我们在窗口滑动过程中增加一个准则[18]：仅当窗口中心点为整个窗口极大值时，对该窗口进行求解。这个准则可以大量减少最终解的个数，提高计算效率。此外，基于该准则参加计算的点的异常幅值较大，具有较高的信噪比，因此从一定程度上提高了计算结果的准确性。同时，我们采用变窗口的方法对每一个极大值点对应的区域进行计算，这样，一个极大值点对应多个窗口有多个解，最终按照最小不确定性原理[21-23] 来确定该极大值点最终的计算结果。

2 模型试验

我们设计了与 Davis 等[14] 类似的模型来验证该

方法的有效性。通常 UXO 产生的异常与偶极子类似, 因此我们随机生成了 20 个偶极子, 其位置、深度、磁化强度以及磁化方向各不相同, 并将其编号为 1~20。其中, 中心埋深的变化范围为 0.3~0.8 m, 磁倾角的变化范围为–90°~90°, 磁偏角的变化范围为–180°~180°, 磁化强度的变化范围在 0.1~0.5 Am^2 之间。地磁场倾角和偏角分别为 65°和 25°。观测数据的范围为–12.8~12.7 m, 网格间距为 0.1 m, 观测数据总个数为 256×256。图 1a 为不含噪声的磁异常数据。此外, 为了测试噪声对反褶积结果的影响, 向观测数据中加入了 2 nT 的高斯噪声, 含噪磁异常数据见图 1b。基于频率域算法对图 1a 和图 1b 所示磁异常数据进行转换, 得到对应的 *NSS* 数据, 如图 2a 和图 2b 所示。需要指出的是, 由磁梯度张量数据计算 NSS 并不会放大噪声, 但由磁异常计算 NSS 时会放大高频噪声, 因此在计算含噪磁异常对应的 NSS 之前, 我们对磁异常数据向上延拓了 0.1 m(1 个点距), 来减少噪声的影响。

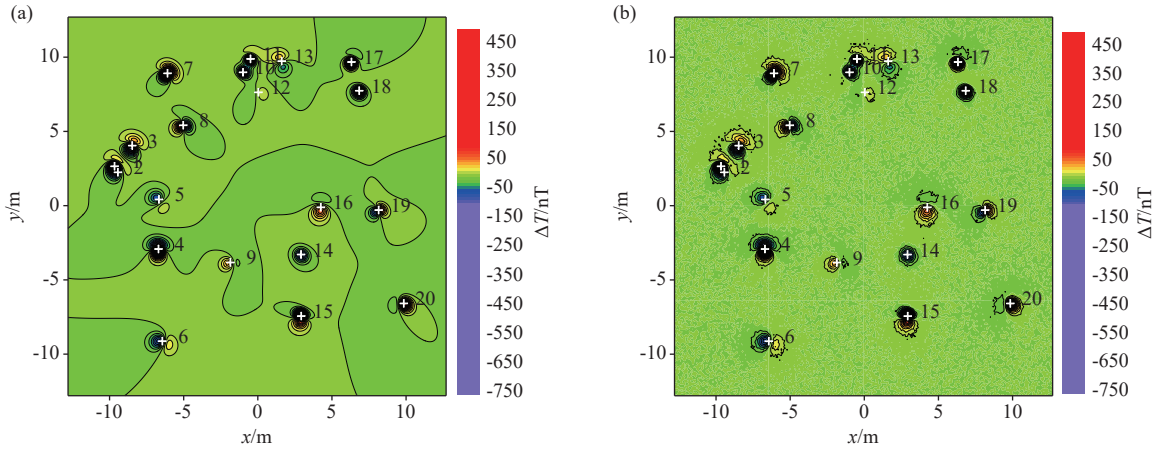


图 1　20 个偶极子产生的无噪磁异常(a)和含噪磁异常(b)("+"代表场源水平投影位置)

Fig. 1　Noise-free(a) and noise-corrupted magnetic anomalies (b) caused by twenty dipoles

(the cross symbols "+" indicate the horizontal positions of the dipoles)

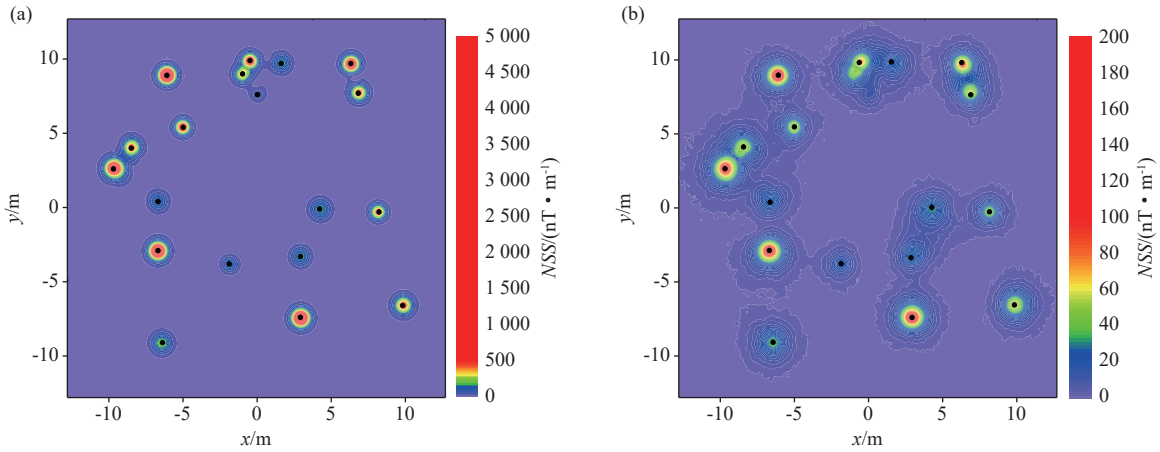


图 2　图 1 对应的无噪磁异常的 *NSS*(a)和含噪磁异常的 *NSS*(b)及其反褶积结果(黑色圆点代表反褶积结果的水平投影位置)

Fig. 2　Results of Euler deconvolution of noise-free *NSS* (a) and noise-corrupted *NSS* (b) corresponding to Figure 1

(the black dots indicate the horizontal positions of results of Euler deconvolution)

从图 1 可以看出, 磁异常与场源位置对应关系并不好, 而 *NSS* 的局部极值则与场源的水平投影位置有很好的对应关系。此外, 由于 1 号场源和 2 号场源的距离太近, 在异常图上仅反映为 1 个场源, 且由于 2 号场源埋藏较深, 因此 *NSS* 上的极大值对应 1 号场源的位置。

对图 2a 和图 2b 所示 *NSS* 数据进行欧拉反褶积计算, 滑动窗口的最小值为 11 倍点距, 最大值为 29 倍点距, 采用最小不确定性原理选择最终解。此外, 对于图 2b 所示的 *NSS* 数据, 由于噪声的影响导致异常中存在诸多虚假的极值点。因此, 对于图 2b 所示数据, 在解筛选过程中增加了两个原则: ①构造指数需要大于 1; ②反褶积计算得到的深度需要大于 0。最终反褶积结果如图 2 所示。对于不含噪的磁异常

而言，除 2 号场源未能成功恢复外，其他 19 个场源均可以成功反演出来，且无任何冗余解。对于含噪磁异常而言，由于噪声和低通滤波的影响，2 号、10 号和 12 号场源未能成功恢复，其他 17 个场源均可成功反演出来，且无其他冗余解。

图 3 展示了欧拉反褶积的详细结果及对应的误差分析。图 3a 展示了场源的真实深度、无噪磁异常对应的反褶积深度以及含噪磁异常对应的反褶积深度。其中无噪磁异常对应的反褶积的深度与真实深度较为吻合，含噪磁异常对应的反褶积深度一般小于真实深度。图 3b 展示了反褶积结果与真实场源位置之间的绝对深度误差和相对深度误差。无噪磁异常对应的深度绝对误差大都在 0.01 m 以下，最大绝对误差约为 0.20 m，相对误差大都在 1% 以下，最大相对误差约为 42.7%。含噪磁异常对应的深度绝对误差大都在 0.1 m 以下，最大绝对误差约为 0.30 m，相对误差大都在 15% 以下，最大相对误差约为 57.2%。图 3c 展示了反褶积结果与真实场源位置之间的水平误差。无噪磁异常对应的水平误差大都在 0.05 m 以下，最大水平误差约为 0.11 m。含噪磁异常对应的水平误差大都在 0.1 m 以下，最大水平误差约为 0.18 m。图 3d 展示了场源的构造指数分布。无噪磁异常对应的构造指数多在 4 左右。含噪磁异常对应的构造指数则多在 3 左右。

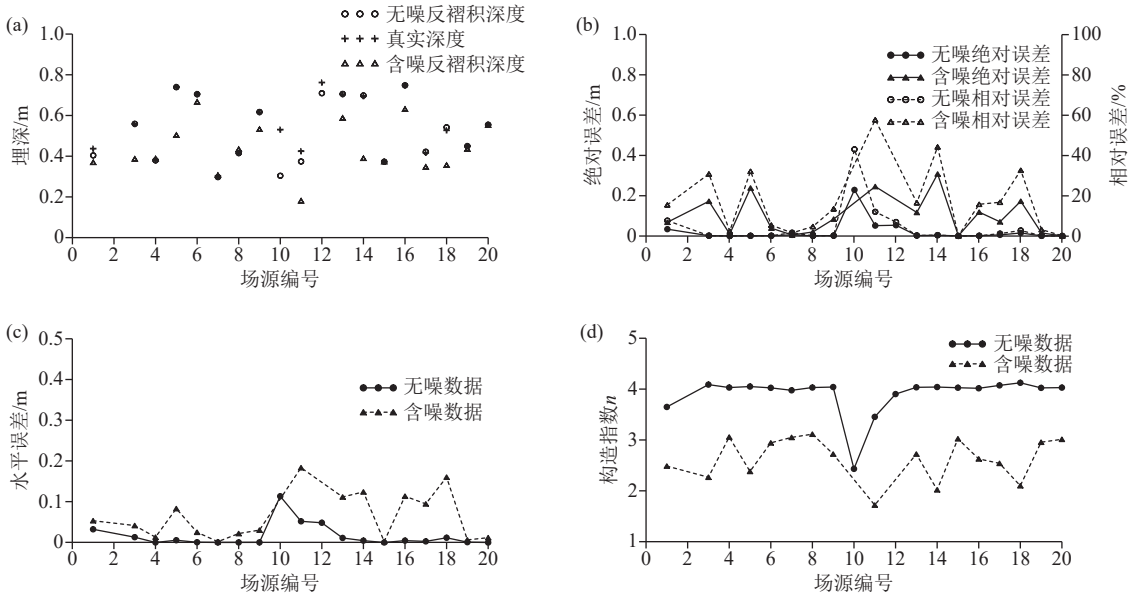
从图 3 可以看出，对于无噪磁异常而言，多数场源反褶积结果中的场源位置和构造指数结果均较为准确；对于含噪磁异常而言，场源的水平位置仍然较为准确，但场源的深度和构造指数精度均有所下降，原因是低通滤波会低估欧拉反褶积的深度值和构造指数[24-25]。对于无噪磁异常而言，误差较大的有 1、10、11 和 12 号场源。经过分析，1 号和 2 号场源水平距离较近，10 号和 11 号场源水平距离也较近，因此相互干扰，造成反褶积结果不准确；12 号场源则由于埋藏较深，异常幅值较小，受附近埋藏浅的场源的影响比较大，也造成了反褶积结果不准确。

3　实际资料实验

为了验证本文方法在实际资料处理中的效果，将本文方法分别应用到斯洛伐克和德国某地的 UXO 产生的实际磁测数据处理中。

3.1　斯洛伐克某地总场磁异常处理

图 4a 为斯洛伐克某地的单体 UXO 产生的磁异常[26]。弹药直径为 100 mm，水平放置于地表，其长轴方向指向 SN 方向，数据的测量高度为 0.7 m。因此，UXO 的中心埋深等价于 0.65 m。工区的大小约为 10 m×10 m，磁测数据的原始点距为 0.1 m，线距为 1 m，利用最小曲率方法将其网格化为 101×101 的网格数据，网格间距为 0.1 m。图 4b 展示了由频率域转换得到的 *NSS* 数据，可以看出，转换后的 *NSS* 数据沿 UXO 长轴方向有明显的拉伸，与偶极子的 *NSS* 有明显差异。



a—场源的真实深度与反褶积深度；b—场源深度的绝对误差与相对误差；c—场源的水平误差；d—场源的构造指数

a—the true and predicted depths of sources; b—the absolute and relative errors of source depths; c—the horizontal errors of sources; d—the structural indices of sources

图 3　欧拉反褶积的详细结果与误差分析

Fig. 3　Detailed results of Euler deconvolution of *NSS* and the corresponding error analysis

对图 4b 所示的 *NSS* 数据进行欧拉反褶积计算，滑动窗口的最小值为 19 倍点距，最大值为 29 倍点距，采用最小不确定性原理选择最终解，反褶积结果的水平投影标记在图 4 上。最终共筛选出 1 个解，其水平投影位置基本对应 *NSS* 极大值的中心，埋深为 0.78 m，略大于真实值(0.65 m)，构造指数为 3.2。推测实测数据反演精度下降的原因可能有两方面：一方面是观测数据的线距(1 m)远大于点距(0.1 m)，在网格化的过程中会引入误差，进而影响后续 NSS 和 NSS 空间导数换算的精度；另一方面是 UXO 的埋藏深度较浅，其异常特征与偶极子异常不完全相同，因此反褶积得到的构造指数位于水平圆柱体(构造指数为 3)和偶极子(构造指数为 4)之间。

3.2　德国某地磁总场异常垂向梯度数据处理

图 5a 为德国某区域 UXO 探测得到的磁总场异常垂向梯度数据。工区的大小约为 14 m×16 m，磁测数据的原始点距为 0.1 m，线距为 0.5 m，将其网格化为 141×161 的网格数据，网格间距为 0.1 m。图 5b 显示了频率域转换得到的 *NSS*。磁异常垂向梯度数据显示磁源的磁化方向各不相同，而在对应的 *NSS* 数据中，异常接近传统意义上的化极磁异常。

对图 5b 所示 *NSS* 数据进行欧拉反褶积计算，滑动窗口的最小值为 7 倍点距，最大值为 19 倍点距，采用最小不确定性原理选择最终解。此外，为了增强解的可靠性，与模型实验部分的含噪数据类似，我们在解筛选过程中增加了两个原则：①构造指数需

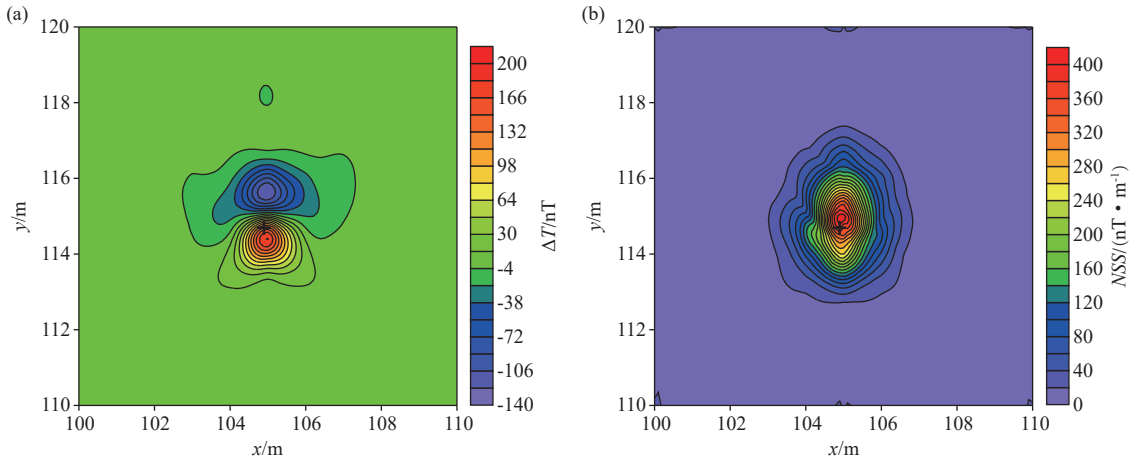


图 4　斯洛伐克某区域 UXO 探测的磁总场异常数据 (a) 和对应的 *NSS* (b)(**“+”**代表反褶积结果的水平投影位置)

Fig. 4　Magnetic total-field data (a) and corresponding normalized source strength (b) caused by a UXO in a region of Slovakia(the cross symbol “+” indicates the horizontal position of result of Euler deconvolution)

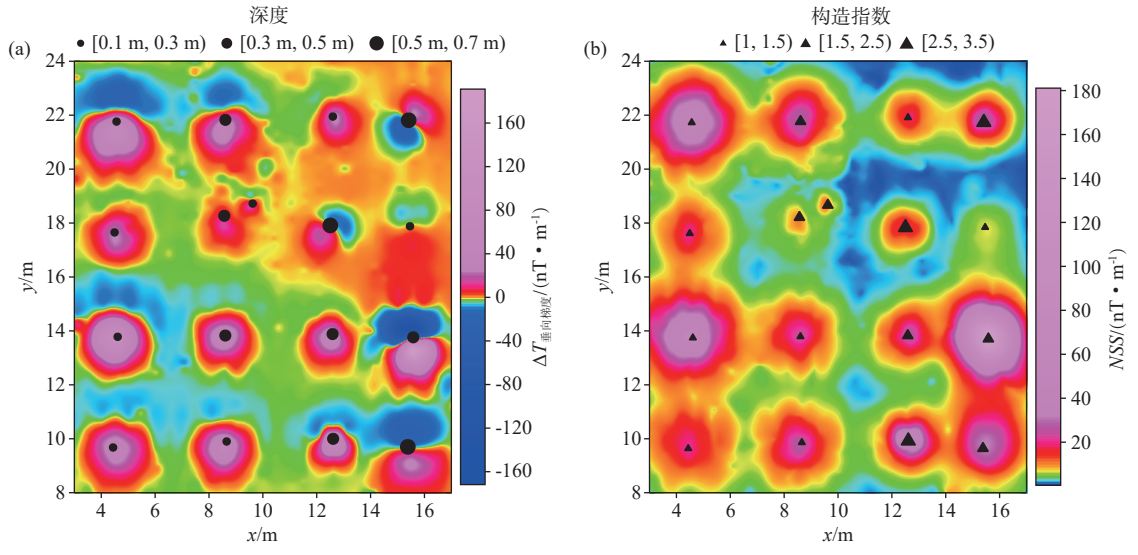


图 5　德国某区域 UXO 探测的磁异常垂向梯度数据 (a) 和对应的 *NSS*(b)(黑色圆点和三角代表反褶积结果的水平投影位置)

Fig. 5　Magnetic vertical gradients (a) and corresponding normalized source strength (b) caused by UXOsin a region of Germany(the black dots and triangles indicate the horizontal positions of results of Euler deconvolution)

要大于1;②反褶积计算得到的深度需要大于0。反褶积结果的水平投影、深度分布、构造指数分布均标记在图5上。最终共筛选出17个解,其水平投影位置基本对应*NSS*局部极大值的中心。深度位于[0.1 m, 0.3 m)的解有8个,[0.3 m, 0.5 m)的解有6个,[0.5 m, 0.7 m)的解有3个。构造指数有8个位于[1, 1.5),6个位于[1.5, 2.5),3个位于[2.5, 3.5)。由于没有该区域UXO的实际埋藏位置,因此无法对这17个解进行实际验证。

4 结论

本文提出了一种基于NSS的UXO探测方法,NSS是由磁异常换算而来的转换量,偶极子产生的NSS具有与磁化方向无关、均为正值、极大值与场源位置在水平面的投影对应关系好等优点,且NSS依然满足欧拉齐次方程。基于改进的欧拉反褶积方法对NSS进行反褶积计算,可以同时确定场源位置和构造指数,且无冗余的解。模型试验和实测资料处理验证了本文方法的有效性。

参考文献(References):

[1] 祁光,吴燕冈,严加永. 磁法勘探在寻找金属非爆炸物中的应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2008,38(S1):30−32.
Qi G, Wu Y G, Yan J Y. The application of magnetic prospect for searching UXO[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(S1): 30−32.

[2] 曲赞,李永涛. 探测未爆炸弹的地球物理技术综述 [J]. 地质科技情报,2006,25(3):101−104.
Qu Z, Li Y T. Overview on detection for unexploded ordnance (UXO) with geophysical techniques[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(3): 101−104.

[3] 杨进. 环境与工程地球物理 [M]. 北京:地质出版社,2011.
Yang J. Environmental and engineering geophysics[M]. Beijing: Geology Press, 2011.

[4] Bell T, Barrow B, Miller J, et al. Time and frequency domain electromagnetic induction signatures of unexploded ordnance[J]. Subsurface Sensing Technologies and Applications, 2001, 2(3): 153−175.

[5] Beard L P, Doll W E, Holladay J S, et al. Field tests of an experimental helicopter time-domain electromagnetic system for unexploded ordnance detection[J]. Geophysics, 2004, 69(3): 664−673.

[6] Benavides A, Everett M E. Non-linear inversion of controlled source multi-receiver electromagnetic induction data for unexploded ordnance using a continuation method[J]. Journal of applied geophysics, 2007, 61(3): 243−253.

[7] Billings S, Youmans C. Experiences with unexploded ordnance discrimination using magnetometry at a live-site in Montana[J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 61(3): 194−205.

[8] Huang H, SanFilipo B, Oren A, et al. Coaxial coil towed EMI sensor array for UXO detection and characterization[J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 61(3): 217−226.

[9] Pasion L R, Billings S D, Oldenburg D W, et al. Application of a library based method to time domain electromagnetic data for the identification of unexploded ordnance[J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 61(3): 279−291.

[10] Butler D K. Implications of magnetic backgrounds for unexploded ordnance detection[J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, 54(1): 111−125.

[11] Billings S D, Pasion C, Walker S, et al. Magnetic models of unexploded ordnance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2006, 44(8): 2115-2123.

[12] Sanchez V, Li Y, Nabighian M N, et al. Numerical modeling of higher order magnetic moments in UXO discrimination[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(9): 2568−2583.

[13] Billings S, Wright D. Interpretation of high-resolution low-altitude helicopter magnetometer surveys over sites contaminated with unexploded ordnance[J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, 72(4): 225−231.

[14] Davis K, Li Y, Nabighian M. Automatic detection of UXO magnetic anomalies using extended Euler deconvolution[J]. Geophysics, 2010, 75(3): G13−G20.

[15] Butler D K, Simms J E, Furey J S, et al. Review of magnetic modeling for UXO and applications to small items and close distances[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2012, 17(2): 53−73.

[16] Li Y, Devriese S G R, Krahenbuhl R A, et al. Enhancement of magnetic data by stable downward continuation for UXO application[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(6): 3605−3614.

[17] Salem A, Ushijima K, Gamey T J, et al. Automatic detection of UXO from airborne magnetic data using a neural network[J]. Subsurface sensing technologies and applications, 2001, 2(3): 191−213.

[18] 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.

[19] Clark D A. New methods for interpretation of magnetic vector and gradient tensor data I: eigenvector analysis and the normalised source strength[J]. Exploration Geophysics, 2012, 43(4): 267−282.

[20] Pilkington M, Beiki M. Mitigating remanent magnetization effects in magnetic data using the normalized source strength[J]. Geophysics, 2013, 78(3): J25−J32.

[21] Beiki M, Pedersen L B, Nazi H. Interpretation of aeromagnetic data using eigenvector analysis of pseudogravity gradient tensor[J]. Geophysics, 2011, 76(3): L1−L10.

[22] Beiki M, Pedersen L B. Eigenvector analysis of gravity gradient tensor to locate geologic bodies[J]. Geophysics, 2010, 75(6): I37−I49.

[23] Beiki M. Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location[J].Geophysics, 2010, 75(6): I59−I74.

[24] Davis K, Li Y, Nabighian M N. Effects of low-pass filtering on the calculated structural index from magnetic data[J].Geophysics, 2011,

76(4): L23−L28.

[25] Florio G, Fedi M, Pašteka R. On the estimation of the structural index from low-pass filtered magnetic data[J]. Geophysics, 2014, 79(6): J67−J80.

[26] Pašteka R, Karcol R, Kušnirák D, et al. Regcont: A matlab based program for stable downward continuation of geophysical potential fields using Tikhonov regularization[J]. Computers & Geosciences, 2012, 49: 278−289.

Detection of unexploded ordnance based on normalized source strength

LI Ze-Lin [1], WANG Yi-Chong [1], WANG Jun-Lu [2], XU Hang-Hang [1]

(1. *School of Earth Science and Engineering*, *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*; 2. *Development and Research Center*, *China Geology Survey*, *Beijing* 100037, *China*)

Abstract: The detection of unexploded ordnance (UXO) is a significant research topic in environmental and engineering geophysics. Magnetic survey serves as an economical, efficient, safe, and reliable geophysical method. However, current methods for UXO detection based on magnetic survey remain limited by low automation levels and significant redundant solutions. To address these limitations, this study proposed a UXO detection method for high-precision magnetic data based on the normalized source strength (NSS) theory. In the proposed method, magnetic anomaly data were first transformed into NSS data. Subsequently, an improved Euler deconvolution technique was applied to the NSS data to estimate the spatial location and structural index of the field source. Model tests and field data processing results demonstrate that the proposed method achieved a high level of automation and fewer redundant solutions.

Key words: unexploded ordnance (UXO); magnetic survey; remanent magnetization; normalized source strength (NSS); Euler deconvolution

(本文编辑: 王萌)