

文章编号 1004-924X(2025)23-3754-11

飞蛾扑火优化与密度聚类融合的高精度多磁源定位

邱景^{1*}, 曹聪¹, 张顺雨¹, 孙赫轩¹, 曾歆杰¹, 樊蓓蓓¹, 孙亦恺²

(1. 重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 401331;

2. 台州学院 智能制造学院, 浙江 台州 318000)

摘要:多磁源定位由于受到地磁噪声和多磁源边界模糊等因素干扰,从而限制了其应用。为了实现多源目标的精确同步定位,提出了飞蛾扑火(Moth-Flame Optimization, MFO)非线性优化和密度聚类融合的多磁源目标定位方法。利用高精度磁传感器在二维平面网格内进行磁异常检测(Magnetic Anomaly Detection, MAD),确认各磁目标的最大磁异常值点。针对地磁干扰问题,在磁异常最大值区域设计了两点磁异常定位方案。将磁异常定位数据作为飞蛾扑火算法的初始输入,利用非线性算法优化,实现了磁性目标定位精度的进一步优化。最后,在同一磁性目标处多次进行优化,将其真实位置形成密集的点簇,通过基于密度的空间聚类算法(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN),排除噪声与算法优化异常对定位精度的干扰,实现了对多个磁性目标的同时定位。仿真结果表明,9个磁性目标经过飞蛾扑火算法均实现了磁性目标的初步定位,平均均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为0.134 6 m,聚类算法结果排除了噪声的干扰,平均RMSE下降到0.076 4 m,下降幅度为57.1%,实现了精度的提升。实验结果表明,3个典型磁目标定位在1 m×1 m×1 m的测试区的平均RMSE小于0.081 2 m,该方法可实现高精度多磁源定位。

关键词:地磁探测;两点定位;飞蛾扑火优化;密度聚类;多磁源定位;非线性优化;地磁异常;空间聚类算法

中图分类号:TP181 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253323.3754 CSTR:32169.14.OPE.20253323.3754

High-precision multimagnetic source localization by fusion of moth-flame optimization and density clustering

QIU Jing^{1*}, CAO Cong¹, ZHANG Shunyu¹, SUN Hexuan¹, ZENG Xinjie¹, FAN Beibei¹, SUN Yikai²

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems of the Education Ministry of China, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 401331, China;

2. College of Intelligent Manufacturing, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

* Corresponding author, E-mail: jingqiu@cqu.edu.cn

Abstract: Multi-source localization is often affected by geomagnetic noise and ambiguous source boundaries, which significantly constrain its practical application. To achieve accurate and simultaneous localization of multiple magnetic targets, a multi-magnetic-source localization method based on Moth-Flame Opti-

收稿日期:2025-06-05;修订日期:2025-07-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62271089);重庆市自然科学基金面上资助项目(No. CSTB2022NSCQ-MSX0425);中央高校基本科研业务资助项目(No. 2024CDJXY008, No. 2024CDJGF-048);航空科学基金资助项目(No. 2024Z0630Q9001)

mization (MFO) nonlinear optimization and density clustering fusion is proposed. First, magnetic anomaly detection (MAD) is performed on a two-dimensional planar grid using a high-precision magnetic sensor to determine the point of maximum MAD value for each magnetic target. To address geomagnetic interference, a two-point magnetic anomaly localization scheme is designed in the region of maximum magnetic anomaly. The obtained localization data are then used as the initial input of the MFO algorithm, and the target positions are further refined through nonlinear optimization to improve localization accuracy. Subsequently, repeated optimization of each magnetic target is conducted, generating dense point clusters at the true target locations. Simultaneous localization of multiple magnetic targets is then achieved using the density-based DBSCAN clustering algorithm, which effectively suppresses the influence of noise and optimization outliers on localization accuracy. Simulation results for nine magnetic targets indicate that, after MFO-based initial localization, the average root mean square error (RMSE) is 0.134 6 m. Following clustering, the interference of noise is mitigated and the average RMSE is reduced to 0.076 4 m, representing a 57.1% improvement in accuracy. In experimental tests, the average RMSE for localizing three typical magnetic targets within a $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ test area is less than 0.081 2 m, confirming that the proposed method enables high-precision multi-magnetic-source localization.

Key words: geomagnetic detection; two-point localization; moth-flame optimization (MFO); density clustering; multiple magnetic sources; nonlinear optimization; geomagnetic interference; spatial clustering algorithm

1 引 言

铁磁性材料在长期暴露在地磁场时,会被地磁场磁化,其周围地磁场叠加磁化磁场,从而出现磁异常,因此可被检测^[1]。当磁目标距离超过其几何尺寸的 2.5 倍时,磁目标被识别为磁偶极子,进而通过反演得到位置信息。磁定位被广泛运用于未爆弹探测^[2]、运动轨迹探测^[3]、水下目标探测^[4-5]和医学辅助^[6]等领域。

磁梯度张量是磁探测的重要信息,其可保留磁矢量的强度和方向信息,同时在一定程度上抑制电磁场干扰^[7]。相比于传统定位方法,基于磁梯度张量定位方法仅利用单点信息实现定位,且计算量小,因此,运用磁张量信息来定位磁目标成为磁定位的研究热点。迄今为止,磁张量定位可被分为两大类:基于磁张量信息的分析反演法和基于数据拟合的非线性优化反演法两种。其中,分析反演法主要通过磁张量之间的数学变换进行目标参数推导,从而求出闭合解。Wynn^[8]等利用 Frahm 张量,对运动状态下的磁目标进行定位。Clark^[9]等使用归一化强度来确定真实源。Wiegert 和 Oeschger^[10]等基于张量选择不变量,提出标量三角测量和测距方

法进行定位,但存在椭圆误差。Nara^[11]等将欧拉反褶积用于单点定位中,但其效果受噪声影响明显。Li^[12]等利用二阶磁梯度张量对 Nara 法进行改进,提高了抗噪声能力,但是存在一定的假解无法消除。非线性优化反演法主要基于测量数据拟合参数,通过非线性迭代求解,比如基于梯度的最小二乘法估计^[13],但该方法容易陷入局部最优;基于统计的递归贝叶斯^[14]、最大似然估计^[15],但其通常计算量比较大。随着优化算法的不断改进,衍生出基于优化算法的高斯-牛顿^[16]、粒子群优化^[17]、遗传算法^[18]等求解方法。此外,神经网络^[19]、正交基等方法也被运用在磁定位中^[20]。

以上研究主要是对单个目标的定位,而多目标定位研究由于磁异常场的相互叠加干扰而陷入瓶颈^[21]。Hu 等将多目标的信息表示为正则化的非线性问题,通过 L-M 算法进行求解^[22],但是需要预先得知目标数量。Wang 等利用改进的聚类 iForest 算法进行反演定位^[23]。Zheng 等通过 DBSCAN 聚类算法对改进的欧拉方法结果进行聚类,从而实现定位^[24],但定位精度不高。Wang 等首次将一维磁数据升维,通过磁信号能量图来实现定位,但是该方法比较复杂^[25]。

磁测数据选取,可实现对单个磁性目标位置的反演。

2.2 基于两点定位先验信息的MFO单点磁定位

磁偶极子产生的连续磁场在探测空间中呈现非线性分布,因此,非线性优化算法广泛应用于磁定位领域。该类方法基于磁场矢量的非线性数值反演,利用非线性方程匹配测量磁场和正演模型产生磁场,通过算法多次迭代来估计磁性目标的位置参数。为进一步提高单个磁目标定位精度,在初步定位结果的基础上,利用MFO非线性优化提升定位的精度。

MFO是一种新型的启发式群体优化算法,具有结构参数简单、计算成本小、迭代速度快等优点。虽然该算法的全局寻优能力较差,但它具备较强的局部收敛能力,适用于存在先验条件下的参数求解。算法的具体流程如图2所示。

得益于前文已经对被测磁性目标的坐标信息进行了初步反演,因此,在迭代过程中可以给

予该算法较强约束,使得算法在检索未知空间时不易产生“错解”和“无解”两种情况,该算法适用于解析被测磁性目标的位置坐标与磁矩数值。

由于MFO算法本质上是一种群体智能优化算法,因此飞蛾种群在矩阵中可以表示为:

$$M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \cdots & m_{1,d} \\ m_{2,1} & \cdots & \cdots & m_{2,d} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{n,1} & m_{n,2} & \cdots & m_{n,d} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中: n 是飞蛾数量, d 是搜索空间维度。每只飞蛾只用对应的唯一火焰来更新自己的位置,从而避免算法落入局部最优值,大大增强了算法的全局搜索能力。故火焰和飞蛾在搜索空间中的位置是相同维度的可变矩阵:

$$F = \begin{bmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n,1} & \cdots & f_{n,d} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

为了对飞蛾向火焰飞行的行为进行数学建模,每只飞蛾相对于火焰位置的更新机制用以下方程表示:

$$M_i = S(M_i, F_i) = D_i \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi t) + F_j, \quad (9)$$

其中: $|D_i| = |F_j - M_i|$ 是飞蛾 M_i 与火焰 F_j 之间的距离, b 是与螺旋形状相关的常数,随机数 $t \in [-1, 1]$, $t = -1$ 表示离火焰最近的位置, $t = 1$ 表示离火焰最远的位置。在优化过程中,为了进一步增强开发能力,假定 t 是 $[r, 1]$ 中的随机数, r 从 -1 线性递减到 -2 。

这个螺旋更新方程决定了飞蛾绕着火焰进行简单螺旋运动。当包含先验条件时,螺旋运动能较快实现飞蛾对最佳火焰的搜索,但飞蛾也会随着火焰更新减少而逐步减少^[28],种群多样性差^[29],导致飞蛾可能被一个火焰吸引,从而陷入局部最优。

为了通过飞蛾扑火算法对被测磁性目标的位置信息进行解析,被测磁性目标的磁矩向量可表示为 $M(M_x, M_y, M_z)$;被测磁性目标的位置表示为 $r(a, b, c)$;测量点的位置表示为 $O(x, y, z)$;其中测量点与磁性目标之间的方向表示为 $r = (x - a, y - b, z - c) = (X, Y, Z)$;在测量点上得到的磁场强度矢量表示为 $B = (B_x, B_y, B_z)$;将 M 和 r 带入磁偶极子模型中,得到 B 在 x 轴, y 轴, z

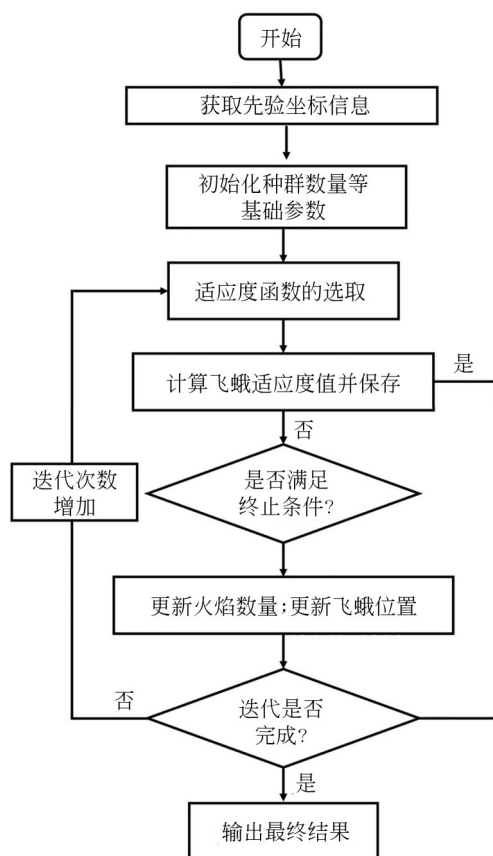


图2 飞蛾扑火算法流程

Fig. 2 Flow chart of MFO algorithm

轴方向上 3 个分量的表达式,公式如下:

$$\begin{cases} B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3[M_x X + M_y Y + M_z Z]X}{r^5} - \frac{M_x}{r^3} \right] \\ B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3[M_x X + M_y Y + M_z Z]Y}{r^5} - \frac{M_y}{r^3} \right] \\ B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3[M_x X + M_y Y + M_z Z]Z}{r^5} - \frac{M_z}{r^3} \right] \end{cases} \quad (10)$$

因此,定义算法的适应度函数为 $err = err_x^2 + err_y^2 + err_z^2$,其中:

$$\begin{cases} err_x = B_x - B'_x \\ err_y = B_y - B'_y \\ err_z = B_z - B'_z \end{cases} \quad (11)$$

式中: B'_x, B'_y, B'_z 为算法所得值。通过对种群规模、迭代次数、收敛约束等方面进行设置,在探测平面上同一区域对磁测数据进行 50 次收敛,计算定位数据的方差以衡量算法的稳定性,其公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (r_i - r)^2 / N}, \quad (12)$$

其中: r_i 为算法收敛所得的最优解, r 为设置的真实值, N 为测量次数,越小的方差意味着算法的收敛能力越强,具有更强的稳定性。基于两点磁异常反演方法结果作为飞蛾扑火算法收敛约束的定位误差曲线如图 3 所示。

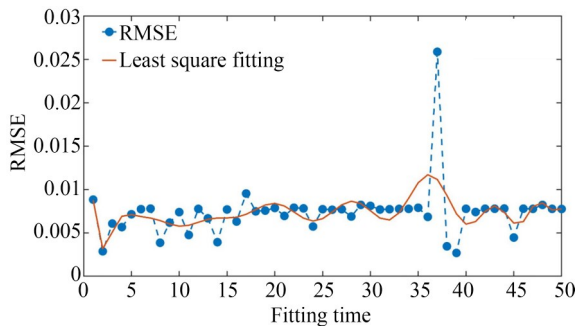


图 3 基于飞蛾扑火算法的定位误差曲线

Fig. 3 Localization error profile based on MFO algorithm

仿真结果显示,50 次定位拟合的结果平均 RMSE 为 0.010 5 m,可以认为基于飞蛾扑火算法的定位算法实现了对磁性单目标的有效定位,多次收敛将算法收敛导致的随机误差降到了最低。

然而,第 37 次出现了一次误差较大的噪声,这可能是因为算法火焰更新滞后^[30]或者目标函数的多模态干扰^[31]导致,从而陷入了局部最优解。

2.3 基于密度 DBSCAN 聚类的多点同步定位

为了避免在实际定位中出现上文所提及局部最优解误差,拟采用聚类算法对多次优化的结果进行聚类,降低随机误差和偶然优化失败所造成的干扰。同时,为了将磁性单目标定位算法引入多目标定位,利用基于密度的 DBSCAN 聚类算法排除噪声点、可同时聚类多个簇的特点,将多个磁性目标分别定位的结果进行聚类。具体流程如图 4 所示。

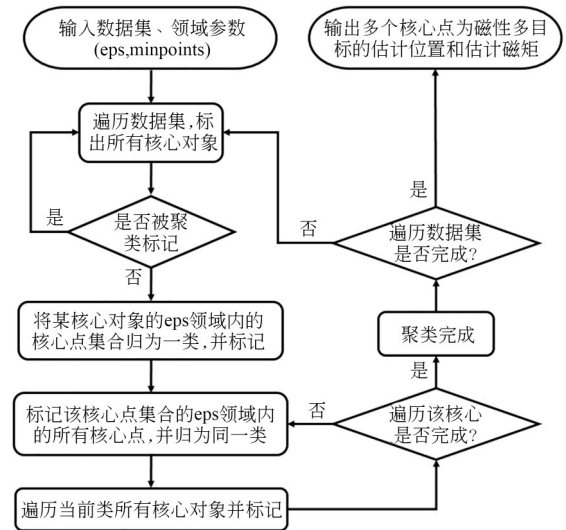


图 4 DBSCAN 聚类算法的多目标定位流程

Fig. 4 Flowchart of DBSCAN clustering algorithm for multi-target localization

DBSCAN 聚类算法总共需要领域半径 eps 和核心点最小邻居数 $MinPts$ 两个参数^[32]。领域半径是指一个数据到另一个数据的最远距离,该距离的点被认为是该点的相关点。若是在领域半径内有超过最小样品点数的相关点,则称该点为核心点。这两个参数对聚类效果影响较大,因此需要将上文的优化结果作为先验信息对参数进行优化以获得优秀的聚类结果,其总体伪代码如表 1 所示。

通过在探测平面上选取不同的探测区域进行单独定位,探测区域的选定由阈值判断,通过设置合理阈值,选取磁异常信号较大区域,示意图如图 5 所示。

表 1 DBSCAN 算法伪代码

Tab. 1 Pseudo-code of DBSCAN algorithm

算法 1 DBSCAN 聚类算法
输入:待聚类数据,聚类半径参数 ϵ ,邻域密度阈值, MinPts%聚类数据为多次优化定位结果
输出:多个核心点
方法:
初始化,为所有数据点设置状态为 unmarked;
遍寻数据集;
If p 状态不是 unmarked
跳过;
else 标记 p 为 marked;
查找 p 的 ϵ 邻域:所有与 p 距离 $\leq \epsilon$ 的点;
if p 的邻域点数 $< \text{MinPts}$
标记为噪声点;
else 创建新聚类 a,将 p 添加到 c;
令 b 为 p 的邻域点集;
for c 中每个点 q
if q 是 unmarked
标记 q 为 marked;
查找 q 的 ϵ 邻域;
if 邻域点数 $\geq \text{MinPts}$
将这些点加入 b;
if q 不属于任何聚类
将 q 加入聚类 a;
end for
输出 c;
所有标记为噪声点的依旧为噪声点;
所有 unmarked 点标记为噪声点;
结束

心数量代表目标的数量,聚类中心的值代表磁性目标的位置,具体仿真结果如图 6 所示。仿真结果表明,聚类算法有效地将上图红圈部分中优化失败的坐标点视作噪声排除(彩图见期刊电子版),定位 RMSE 下降到 0.007 5 m,定位误差下降了 28.57%。结果与理论相符,表明该算法去除噪声点,实现了定位精度提高,不仅提高了磁定位算法的抗干扰能力,还进一步增强了非线性优化算法的稳定性。

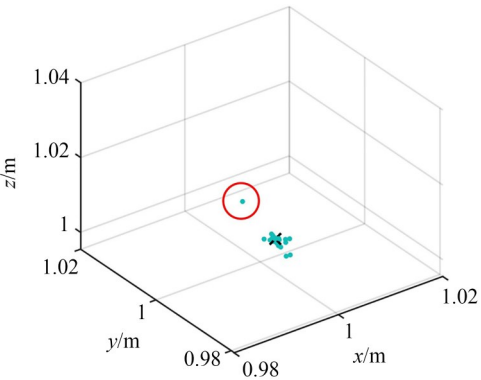


图 6 基于密度的 DBSCAN 聚类算法结果

Fig. 6 Results of density-based DBSCAN clustering algorithm

3 仿真模拟

为进一步验证该算法对于多个探测目标同时存在时的定位效果,仿真实验中假设探测区域为 15 m×15 m 的正方形平面范围,设定各个探测点之间的间距为 20 cm,假设使用的探测传感探头为三轴矢量磁异常信号传感器,使得每个探测点都能同时包含 x,y,z 三轴的磁分量数据;同时探测点均匀分布在整个探测区域内;本次多目标定位仿真共设定 9 个被测目标,均匀分布在探测范围内;利用在一定范围内选取的随机数据,其中磁矩在 $(-30,30)$ 内随机选取并取整;为验证算法的抗干扰能力,在仿真产生的磁场数据中加入高斯白噪声。9 个磁性目标的具体坐标位置与磁矩矢量的参数设置如表 2 所示。

依照多磁性目标模型计算磁异常信号在空间中分布,结合探测平面绘制的多磁性目标模型平面磁场总强度和 x,y,z 三轴磁场强度分布如图

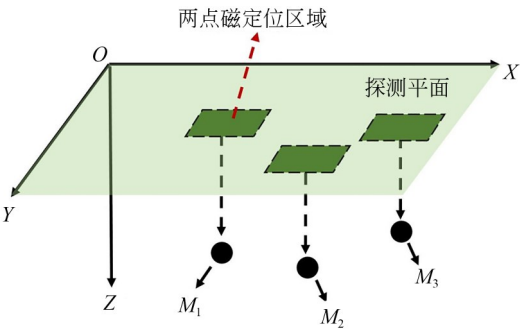


图 5 多磁性目标定位示意图

Fig. 5 Multi-magnetic target localization schematic

然后,多次进行基于两点定位先验信息的 MFO 单点磁定位方法,将所得的目标位置信息通过聚类算法得到多目标定位结果,其中聚类中

表 2 被测目标的具体坐标位置与磁矩矢量参数

Tab.2 Specific coordinate position of measured target with magnetic moment vector parameters

磁性目标	坐标位置/m	磁矩大小/(A·m ⁻²)
1	(9.42,10.71,1.04)	(-18,-2,-20)
2	(10.16,0.09,0.94)	(-9,20,-15)
3	(10.71,-10.46,0.89)	(-17,-5,-3)
4	(0.29,10.85,1.15)	(12,-6,-5)
5	(0.14,-0.45,1.11)	(19,10,7)
6	(0.11,-9.96,0.99)	(-15,-10,-8)
7	(-9.96,11.00,0.97)	(19,-10,-12)
8	(-9.78,0.01,0.99)	(-7,-17,17)
9	(-9.12,-10.14,1.10)	(6,0,-1)

7 和图 8 所示。结果表明,磁性目标的水平位置对其在探测平面上产生的磁异常信号强度分布有着显著的影响。使用两点磁异常反演方法,具

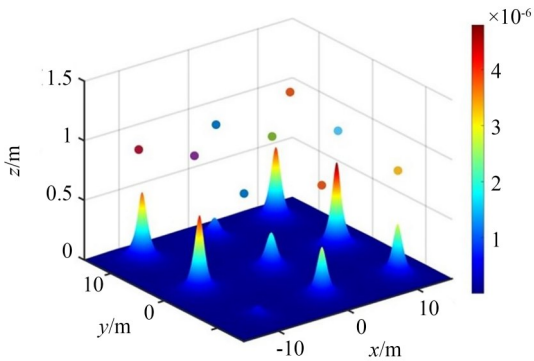


图 7 磁性目标真实位置分布与三维磁场总强度分布
Fig.7 Distribution of real position of magnetic target and distribution of total intensity of magnetic field in three dimensions

体结果如图 9 所示,使用该算法同时定位 9 个被测磁性目标,位置坐标的平均 RMSE 为 0.134 6 m,可以认为通过磁异常反演已经完成初步定位,由此为飞蛾扑火算法设置了收敛约束。

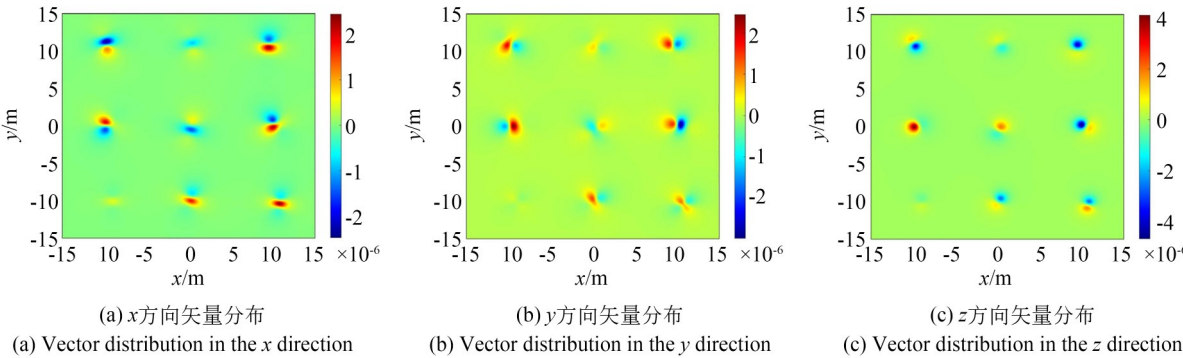


图 8 磁场矢量分布
Fig.8 Distribution of magnetic field vector

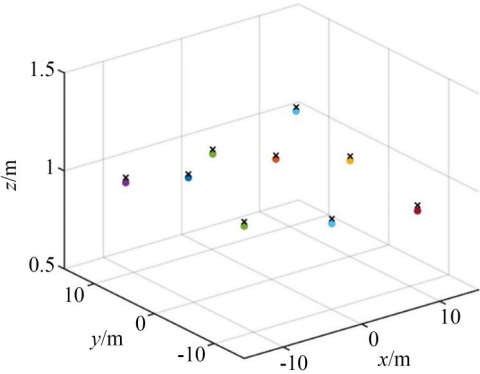


图 9 两点磁异常反演方法的定位结果
Fig.9 Localization results obtained by two-point magnetic anomaly inversion method

针对单一定位点重复优化次数为 50 次,利用聚类算法对 9 个磁性目标的 50 次结果进行聚类处理,结果如图 10 所示。经过聚类算法后,精度得到进一步的提升,针对 9 个磁性目标定位的平均 RMSE 下降到 0.076 4 m,下降幅度为 57.1%。基于两点磁异常反演方法的初步定位结果,结合飞蛾扑火算法实现了磁性单目标定位精度的提高。聚类算法一定程度上避免了因为噪声而带来的优化失效与随机误差,极大地提高了定位的精度,仿真结果与理论分析相符。

通过仿真实验探究了基于多种精度优化手段的磁性多目标定位方法的可行性,验证了多种方法结合对于定位效果的提升。最终在噪声干

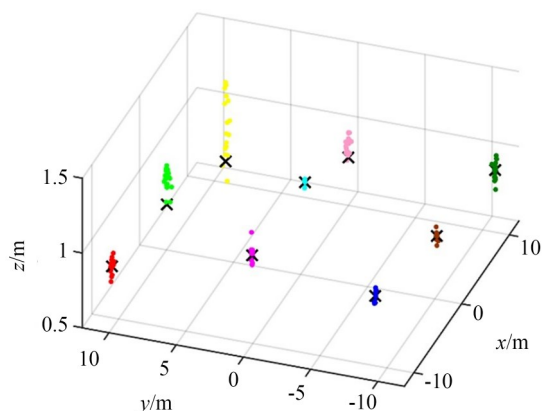


图 10 基于密度聚类算法的多目标定位结果

Fig. 10 Multi-target localization result based on density clustering algorithm

扰的环境下,实现了9个被测磁性目标坐标的定位和磁矩的计算,本文提出的磁定位方法在磁性单目标定位与磁性多目标定位方面均取得了优异的效果。

4 实 验

4.1 实验环境设置

为了验证MFO与密度聚类结合的多磁源定位系统在实际定位中的精度,设计了3个磁目标定位实验。在中国重庆某校的平坦草地中进行实验,测试区域为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$,当天温度为 10° ,湿度为67%,搭建的平面MGTS磁梯度张量测量系统,其基线距离为0.1 m,采集卡为VK7015N,采集精度为24位。实验使用的传感器为1个Mag-13(用于测量地磁场)和4个Mag-690(用于目标测量磁梯度张量数据),具体参数如表3所示。在测试区中放入3个典型磁目标,磁矩大概为 $50\text{ A} \cdot \text{m}^2$,用木板保证同一水平面,非磁材料进行高度调整,各网格点采样时间不小于2 s,采样频率为100 Hz。

为保证环境中工频信号噪声干扰和电子设

表 3 磁通门传感器参数

Tab. 3 Parameters of fluxgate sensor

型 号	分辨率/nT	最大采样频率/kHz
Mag-13	0.01	1
Mag-690	0.1	1

备干扰(主要为高频噪声),对采集到的磁总场数据和磁张量数据进行低通滤波,截止频率为3 Hz。由于地磁场值在短时间内变化缓慢,可对实验场地进行空白采样20 s,选取较为平缓的地磁场数据段平均数作为该地测试时间段的地磁场值,测得地磁场均值为49 963 nT。测试实际平台搭建如图11所示。

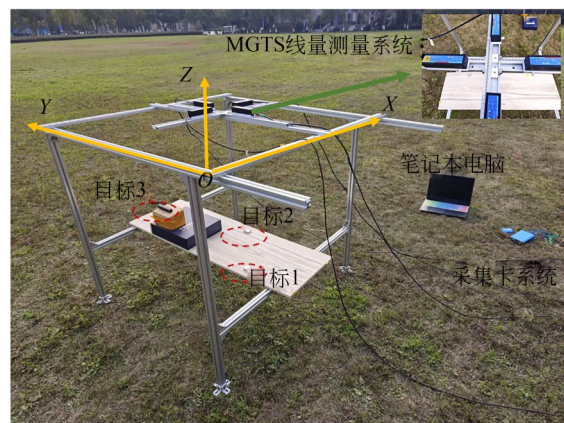


图 11 多磁源定位实验场景

Fig. 11 Experimental scenario for multimagnetic source localization

4.2 实验结果及分析

3个目标分别被设置为 $(0.40\text{ m}, 0.30\text{ m}, -0.70\text{ m})$, $(0.50\text{ m}, 0.55\text{ m}, -0.70\text{ m})$ 和 $(0.40\text{ m}, 0.90\text{ m}, -0.53\text{ m})$,具体实验结果如表4所示。结果显示,传统Nara法定位误差明显较大,而通过两点定位,MFO算法和基于密度的DBSCAN聚类算法三重优化精度提升后,实现了3个典型磁目标的有效定位,定位的最小误差为0.060 4 m,平均RESM为0.081 2 m,下降幅度为62.9%,大幅提升了多目标定位精度。

从表4中发现,目标2和目标1的定位精度明显低于目标3,其中目标2的定位精度最低,其原因可能为目标3离系统距离最近,其信号最强。而目标2位于目标1和3的中间,可能受目标1和目标3的磁信号干扰,从而导致定位精度最低。

为了进一步突出所提出方法在多目标定位的优越性,将其定位性能与改进的欧拉定位^[24]和边缘识别定位^[33]等先进多磁定位方法进行比较,结合表4和表5可以看出,本文提出的方法在室外的定位精度更高。

表 4 不同方法的实验结果对比

Tab. 4 Comparison of experimental results of different methods (m)

定位方法	目标 1				目标 2				目标 3			
	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标	RESE	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标	RESE	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标	RESE
Nara 法定位	0.573 0	0.146 0	-0.729 8	0.233 6	0.683 7	0.386 4	-0.715	0.248 2	0.277 1	0.777 6	-0.546 6	0.174 2
两点定位	0.541 0	0.266 7	-0.696 5	0.174 3	0.622 9	0.475 8	-0.704 9	0.143 6	0.461 6	0.982 5	-0.531 1	0.102 9
非线性优化	0.507 1	0.279 2	-0.724 7	0.115 7	0.552 0	0.638 1	-0.687 0	0.115 6	0.416 8	0.914 7	-0.560 9	0.066 2
本文提出方法	0.478 9	0.290 5	-0.700 2	0.081 3	0.552 7	0.624 3	-0.679 1	0.098 4	0.415 7	0.913 0	-0.559 2	0.060 4

表 5 不同定位方法的定位误差对比

Tab. 5 Comparison of positioning errors of different positioning methods (m)

方 法	最大定位误差(RESM)
改进的欧拉定位 ^[24]	0.12
边缘识别定位 ^[33]	0.122
本文提出方法	0.098 4

5 结 论

本文提出了一种利用 MFO 与密度聚类结合定位多磁源的方法。通过基于两点目标磁异常线性定位方法获得初始定位值,减小地磁场干扰。在定位过程中引入 MFO 非线性优化算法,利用初始定位值缩小参数寻优区间,同时提高了定位精度。基于密度的 DBSCAN 类算法对这些点云进行三维聚类,降低了定位结果的随机性,进一步提高了定位精度,最终实现多目标定位。

参考文献:

[1] ZHAO Y, ZHANG J H, LI J H, *et al.* A brief review of magnetic anomaly detection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32 (4): 042002.

[2] 陆子渊,何勇,卞雷祥,等. 基于一发多收线圈阵列的频域电磁法未爆弹探测技术[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(5): 79-87.

LU Z Y, HE Y, BIAN L X, *et al.* Frequency domain electromagnetic method based on the configuration of single transmitting and array receiving coils for unexploded ordnance detection[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(5): 79-87. (in Chinese)

[3] CHI C, WANG D, YU Z T, *et al.* A hybrid meth-

仿真实验证明了该方法的有效性和稳定性。在 1 m×1 m×1 m 的测试区域中,对磁矩约为 50 A·m²的典型磁目标进行定位估计,定位的最小误差为 0.060 4 m,定位的平均 RESM 为 0.081 2 m,实现了高精度定位。然而,由于磁目标之间磁信号的混叠问题,多磁源定位算法精度受到了一定的限制,下一步需要发展相近多磁目标信号混叠分离问题的方法,同时实验中发现 MGTS 系统的姿态会较为严重影响定位效果,有必要研究 MGST 系统姿态补偿问题,进一步提高本文方法的定位性能,扩展其应用场景。

作者贡献声明:

邱景:论文审核与测量方法指导;
曹聪:实验设计与论文撰写;
张顺雨:方法提出和论文构思;
孙赫轩、樊蓓蓓:实验数据分析;
曾歆杰、孙亦恺:实验数据整理。

od for positioning a moving magnetic target and estimating its magnetic moment [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(21): 25882-25894.

[4] 韩滨澧,张晓明,李欣甜. 基于水下磁感应定位技术的研究[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2024(2): 86-90.

HAN B L, ZHANG X M, LI X T. Research on underwater magnetic induction positioning technology [J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2024 (2): 86-90. (in Chinese)

[5] WANG Z, LIU S W, GUO Y G, *et al.* Joint use of scalar and vector magnetometers for underwater magnetic target localization [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2023, 20: 7505305.

[6] BARDOUILLE T, SMITH V, VAJDA E, *et al.* Noise reduction and localization accuracy in a mobile

- magnetoencephalography system [J]. *Sensors*, 2024, 24(11): 3503.
- [7] WYNN W, FRAHM C, CARROLL P, *et al.* Advanced superconducting gradiometer/Magnetometer arrays and a novel signal processing technique [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1975, 11 (2) : 701-707.
- [8] WYNN W M. Magnetic dipole localization using the gradient rate tensor measured by a five-axis magnetic gradiometer with known velocity [C]. *Detection Technologies for Mines and Minelike Targets. Orlando, FL. SPIE*, 1995: 357-367.
- [9] WIEGERT R F. Magnetic STAR technology for real-time localization and classification of unexploded ordnance and buried mines [C]. *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIV. Orlando, Florida, USA. SPIE*, 2009: 73031U.
- [10] CLARK D A. New methods for interpretation of magnetic vector and gradient tensor data II: application to the Mount Leyshon anomaly, Queensland, Australia [J]. *Exploration Geophysics*, 2013, 44(2): 114-127.
- [11] 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.
- [12] LI Q Z, SHI Z Y, LI Z N, *et al.* Magnetic object positioning based on second-order magnetic gradient tensor system [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(16): 18237-18248.
- [13] INOUE Y, FUSHIMI M, CHIKAKI S, *et al.* Localization of a ferromagnetic marker being magnetized by a magnetic probe equipped with a permanent magnet [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2023, 59(11): 5300205.
- [14] JANKOWSKI L, PISARSKI D, KONOW-ROCKI R, *et al.* Efficient real-time positioning using Bayesian analysis and magnetic anomaly field [J]. *Measurement*, 2024, 233: 114738.
- [15] PEPE P, ZOZOR S, ROUVE L L, *et al.* Generalization of GLRT-based magnetic anomaly detection [C]. 2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO). August 31-September 4, 2015, Nice, France. IEEE, 2015: 1930-1934.
- [16] GE J, WANG S Q, DONG H B, *et al.* Real-time detection of moving magnetic target using distributed scalar sensor based on hybrid algorithm of particle swarm optimization and Gauss - Newton method [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20 (18) : 10717-10723.
- [17] ZHANG X J, FAN L M, CHENG P, *et al.* A method to remotely track a magnetic target using a scalar magnetometer array [J]. *Journal of Sensors*, 2017, 2017(1): 6510980.
- [18] 羊艳玲, 姚旭峰, 罗世昌, 等. 脑磁源定位重建算法研究进展 [J]. 中国生物医学工程学报, 2024, 43(4): 489-498.
- YANG Y L, YAO X F, LUO SH CH, *et al.* Research progress in brain magnetic source localization reconstruction algorithm [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2024, 43 (4) : 489-498. (in Chinese)
- [19] FU Q, ZHAO D D, SHAO L, *et al.* Magnetic localization algorithm of capsule robot based on BP neural network [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 4002509.
- [20] JIN H H, GUO J, WANG H B, *et al.* Magnetic anomaly detection and localization using orthogonal basis of magnetic tensor contraction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(8): 5944-5954.
- [21] 李青竹, 李志宁, 石志勇, 等. AFCM 聚类和张量不变量用于磁源多目标定位 [J]. 光学精密工程, 2022, 30(20): 2523-2537.
- LI Q ZH, LI ZH N, SHI ZH Y, *et al.* Multi-target magnetic positioning with the adaptive fuzzy c-means clustering and tensor invariants [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(20) : 2523-2537. (in Chinese)
- [22] HU S G, TANG J T, REN Z Y, *et al.* Multiple underwater objects localization with magnetic gradiometry [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(2): 296-300.
- [23] WANG M C, LIN J, WANG Y, *et al.* Multiobject localization using magnetic tensor gradiometer array and improved iForest [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 19: 8023405.
- [24] ZHENG X P, TIAN Y C, WANG B. A magnetic gradient tensor based method for UXO detection on movable platform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5905709.

- [25] WANG T, LI J T, LIU N Z, *et al.* A new data processing method for magnetic anomaly detection and localization based on 2-D orthonormal basis functions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5912011.
- [26] XU L, HUANG X Y, DAI Z H, *et al.* Blind spots analysis of magnetic tensor localization method[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(8): 2199.
- [27] ZHANG Y Z, LIU G G, WANG C, *et al.* A remote two-point magnetic localization method based on SQUID magnetometers and magnetic gradient tensor invariants [J]. *Sensors*, 2024, 24 (18) : 5917.
- [28] MIRJALILI S. Moth-flame optimization algorithm: a novel nature-inspired heuristic paradigm [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2015, 89: 228-249.
- [29] PELUSI D, MASCELLA R, TALLINI L, *et al.* An Improved Moth-Flame Optimization algorithm with hybrid search phase [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2020, 191: 105277.
- [30] KAUR K, SINGH U, SALGOTRA R. An enhanced moth flame optimization[J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32(7): 2315-2349.
- [31] ZHANG K, CHEN M S, XU X, *et al.* Multi-objective evolution strategy for multimodal multi-objective optimization[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 101: 107004.
- [32] CHENG D D, ZHANG C, LI Y, *et al.* GB-DBSCAN: a fast granular-ball based DBSCAN clustering algorithm[J]. *Information Sciences*, 2024, 674: 120731.
- [33] JING Z W, ZHOU Z J, LI X D. A multiple magnetic target localization method based on boundary identification and NSS characteristics[J]. *Measurement*, 2025, 254: 117896.

作者简介:



邱 景(1982—),男,湖北随州人,教授,博士生导师,2004年于武汉理工大学获得学士学位,2010年于华中科技大学获得博士学位,主要从事水下磁异常探测、平台磁补偿和弱磁目标信号应用等方面的研究。E-mail: jingqiu@cqu.edu.cn