

基于改进 PSO 的两点磁梯度张量定位方法

石琴, 王晋哲, 孔慧华, 李凯

(中北大学 智能探测技术与装备山西省重点实验室, 太原 030051)

摘要: 针对磁梯度张量定位法中单点定位受地磁场影响误差大、多点定位优化算法中对局部最优解敏感及定位精度差等问题, 提出了基于改进粒子群优化算法的两点磁梯度张量定位方法; 该方法基于磁偶极子理论求解磁梯度张量分量; 并利用两点信息建立目标位置和磁梯度张量之间的非线性目标函数, 最后采用基于动态调整的粒子群算法对目标位置坐标进行求解, 通过改进惯性权重和学习因子, 使其从固定值变为随搜索过程中适应度函数变化而非线性变化的值; 结果表明, 与单点定位法及传统粒子群算法的两点定位法相比, 该方法将平均定位误差分别由 35.16 cm、12.6 cm 降低至 5.58 cm, 明显减小了定位误差, 且该方法具有受地磁场影响较小、自动平衡全局搜索和局部搜索及抗噪性等优点。

关键词: 磁偶极子; 磁梯度张量; 磁通门传感器; 磁性目标定位; 粒子群算法

Two-Point Magnetic Gradient Tensor Localization Method Based on Improved PSO

SHI Qin, WANG Jinzhe, KONG Huihua, LI Kai

(Shanxi Key Laboratory of Intelligent Detection Technology & Equipment,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In response to the problems of large errors in single point positioning in magnetic gradient tensor positioning method due to the influence of geomagnetic field, sensitivity to local optimal solutions, and poor positioning accuracy in multi-point positioning optimization algorithms, a two-point magnetic gradient tensor localization method based on improved particle swarm optimization algorithm is proposed. This method is based on the magnetic dipole theory to solve the magnetic gradient tensor components. And then, two-point information is used to establish a nonlinear objective function between the target position and magnetic gradient tensor. Finally, the target position coordinates are solved using a particle swarm algorithm with dynamic adjustment. By improving the inertia weight and learning factor, it is changed from a fixed value to a value that nonlinearly varies with the fitness function during the search process. The results show that compared with the single point positioning method and traditional particle swarm algorithm's two-point positioning method, this method reduces the average positioning error from 35.16 cm and 12.6 cm to 5.58 cm, respectively, significantly reducing the positioning error. Moreover, this method has the advantages of reducing the influence of geomagnetic field, automatically balancing global and local search, and resisting noise.

Keywords: magnetic dipole; magnetic gradient tensor; fluxgate sensor; magnetic target location; particle swarm optimization

0 引言

铁磁目标受地磁场的影响不可避免地会发生磁化现象, 这种磁化过程会导致周围环境磁异常的产生, 许多

学者利用这一现象, 通过仪器测量这些微弱的磁异常信号并结合有效的定位算法, 能够准确地推断出磁性目标的具体位置信息^[1]。磁检测技术之所以备受瞩目, 是因

收稿日期: 2025-01-19; 修回日期: 2025-02-11。

基金项目: 中央引导地方科技发展资金(YDZJSX20231A025, YDZJSX2024D032); 山西重点研发计划项目(202202010101007); 山西省科技成果转化引导专项(202204021301044, 202304021301028)。

作者简介: 石琴(1999-), 女, 硕士研究生。

李凯(1979-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

引用格式: 石琴, 王晋哲, 孔慧华, 等. 基于改进 PSO 的两点磁梯度张量定位方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4): 255-261, 269.

为它具备了高分辨率、抗干扰性强、非破坏性等一系列显著优点。正是这些特点，使得磁检测技术在军事侦察、医疗诊断、地形探测以及诸多其他领域中都得到了广泛的应用^[2-4]。

与磁标量^[5]和磁矢量^[6]相比，磁梯度张量在揭示磁性目标源场方面展现出了更为丰富的信息量，并且其受地球背景磁场的影响相对较小，从而进一步提升了磁检测技术的准确性和可靠性。因此，近年来引起了众多学者的高度关注。磁梯度张量的测量提供了包含源场信息的 9 个分量的信息，利用这些信息进行目标定位的方法基本上可以分为两类：单点法和多点法。为简化磁场问题，当磁性目标与测量点间距离相对于靶体尺度 2.5 倍及以上时，可将磁性目标抽象为磁偶极子^[7-8]。为了检测磁偶极子，必须解决一个包括位置和磁矩在内的六个未知目标参数的非线性问题。为此，文献 [9] 基于磁偶极子场源理论提出了一种基于目标磁梯度张量测量信息和矢量场信息的单点定位方法，实现了对铁磁性目标的定位。但该方法依赖于目标的矢量场信息，受地磁场影响较大，且公式本身存在估算误差。为了减少这种误差，许多学者提出了几种单点高阶磁梯度张量定位方法^[10-11]。文献 [12] 利用三分量磁梯度结构结合二阶张量定位算法和垂直梯度定位算法实现了水下电缆的精确定位；文献 [13] 提出了二阶张量欧拉反褶积的单点定位方法，对小目标定位误差在 10 cm 均方根误差范围内，但该方法无法直接测量二阶梯度张量矩阵。然而，由于高阶量受仪器测量噪声的影响很大，这些方法对传感器的精度要求很高。为了提高定位精度，众多学者深入研究了磁梯度张量传感器阵列的结构设计与定位算法，并积极探索应用各种典型的优化算法，以期有效解决定位过程中复杂且关键的非线性逆问题，从而进一步提升定位系统的准确性和可靠性。文献 [14] 提出了 3 种简化的平面磁梯度张量测量结构，并验证了平面十字形结构的测量误差最小。文献 [15] 设计了双十字形测量结构，结合两点式定位方法并利用粒子群算法 (PSO, particle swarm optimization) 有效消除了地磁场和其他恒定磁场的影响，但该算法易陷入局部最优解；文献 [16] 提出了一种基于张量收缩的标量三角测量和测距 (STAR) 方法，有效地避免了地磁场的影响，但该方法存在非球面误差；文献 [17] 利用超导磁梯度张量探测系统基于张量不变量针对远距离实时定位时相对误差为 5.47%，但测量系统结构复杂，误差参数较多。文献 [18] 采用十字形阵列，结合叠加几何不变量约束下的两点定位方法和 Levenberg-Marquardt 算法 (LM) 在近距离定位时平均定位误差为 7.3%，但该算法受初值影响较大。

针对上述磁梯度张量定位法中单点定位受地磁场影

响误差大、多点定位优化算法中对局部最优解敏感及定位精度差等问题，文中创新性地提出了基于自适应调节粒子群优化算法的两点磁梯度张量定位方法。该方法基于磁偶极子场源理论，求解了磁梯度张量矩阵中的各个张量分量，并利用两个不同位置的信息消除磁矩的影响，建立了一个仅包括磁梯度张量分量和磁性目标位置测量值的非线性优化模型；采用粒子群算法对目标位置坐标进行求解。为了进一步提升算法的搜索性能，设计了一种自适应机制：将适应度函数值动态地引入到算法的惯性权重和学习因子中，使这些参数从固定的常数转变为随着搜索进程和适应度函数值变化而非线性调整的值。这一改进明显增强了算法自动平衡全局与局部搜索的能力，大幅提高了收敛速度和搜索效率，且该方法具有受地磁场影响较小及一定的抗噪性等优点。

1 一阶磁梯度张量定位原理

1.1 磁梯度张量

以磁性目标为原点，建立空间直角坐标系，磁感应强度 $\mathbf{B} = [B_x \ B_y \ B_z]$ 与磁矢势 A 之间的关系为：

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1)$$

磁矢势 A 为：

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} (\mathbf{m} \times \mathbf{r}) \quad (2)$$

式中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 为真空磁导率， $r = \|\mathbf{r}\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 为磁性目标与测量点之间的探测距离， $\mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z)^T$ 为磁性目标的磁矩矢量，磁矩分量可以由磁矩模和方向余弦表示，设磁矩模为 $m = \|\mathbf{m}\| = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}$ ，磁偏角为 D ，磁倾角为 I ，则对应的磁矩分量为 $m_x = m \cos I \cos D$ 、 $m_y = m \cos I \sin D$ 、 $m_z = m \sin I$ ^[19]。

由式 (1) 可知，在距离磁性目标任意一点 $r(x, y, z)$ 的磁感应强度 B ^[20] 为：

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r}_0) \mathbf{r}_0 - \mathbf{m}}{r^3} = \frac{\mu_0}{(4\pi r^5)} \begin{bmatrix} 3x^2 - r^2 & 3xy & 3xz \\ 3xy & 3y^2 - r^2 & 3yz \\ 3xz & 3yz & 3z^2 - r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， \mathbf{r}_0 是探测距离 r 的单位向量。

磁梯度张量被定义磁场矢量在三维空间的变化率信息。磁梯度张量 \mathbf{G} 可以表示为两个矩阵的乘积^[21]，即：

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

式中， B_{ij} ($i, j = x, y, z$) 为磁梯度张量矩阵的分量。

在空间坐标系中, 磁场与磁梯度的 3 个方向如图 1 所示。

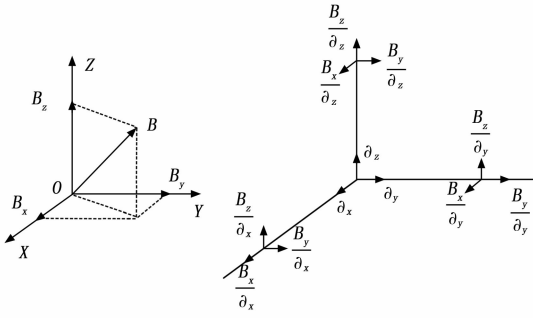


图 1 磁场与磁梯度张量

磁力勘探中可以将地磁场看成无源静磁场, 由于没有电流存在, 无源空间中的磁场具有无旋性和无散性^[22], 故有 $divB=0, rotH=0$; 即:

$$\begin{cases} \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial B_x}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial B_y}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

因此可知磁梯度张量矩阵是对称的, 且磁梯度张量对角元素之和为零, 故磁梯度张量的 9 个元素中, 只有 $B_{xx}, B_{xy}, B_{xz}, B_{yy}, B_{yz}$ 五个元素是独立的, 即有:

$$G = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ * & B_{yy} & B_{yz} \\ * & * & -B_{xx} - B_{yy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式 (3) 中磁感应强度三分量分别进行求偏导数计算, 可以得到磁梯度张量矩阵中 5 个独立的张量分量的理论值, 表达式为:

$$Q = Wm \quad (7)$$

式中,

$$Q = \begin{bmatrix} B_{xx} \\ B_{xy} \\ B_{xz} \\ B_{yy} \\ B_{yz} \end{bmatrix}, m = (m_x, m_y, m_z)^T$$

$$W = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \begin{bmatrix} 9x^2 - 15x^3 & 3y^2 - 15x^2y & 3z^2 - 15x^2z \\ 3y^2 - 15x^2y & 3x^2 - 15xy^2 & -15xyz \\ 3z^2 - 15x^2z & -15xyz & 3x^2 - 15xz^2 \\ 3x^2 - 15xy^2 & 9y^2 - 15y^3 & 3x^2 - 15y^2z \\ -15xyz & 3z^2 - 15y^2z & 3y^2 - 15yz^2 \end{bmatrix}$$

但在实际测量中, 通常利用短距离的差分方法来代替微分, 估计磁梯度张量在各个方向上的分量。则有:

$$B_{ij} \approx \frac{\Delta B_i}{d_j} \quad (8)$$

式中, $i, j=x, y, z$, ΔB_i 表示两个磁传感器在 i 方向上的差分, d_j 表示两个传感器在 j 方向上的距离。结合式 (8) 可由如下公式计算磁梯度张量矩阵 G 的各个分量:

$$\begin{cases} B_{xy} = B_{yx} = \frac{\partial B_y}{\partial x} = \frac{\partial B_x}{\partial y} \approx \frac{\Delta B_x}{\Delta y} \\ B_{yz} = B_{zy} = \frac{\partial B_z}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial z} \approx \frac{\Delta B_y}{\Delta z} \\ B_{xz} = B_{zx} = \frac{\partial B_z}{\partial x} = \frac{\partial B_x}{\partial z} \approx \frac{\Delta B_x}{\Delta z} \\ B_{xx} = \frac{\partial B_x}{\partial x} \approx \frac{\Delta B_x}{\Delta x} \\ B_{yy} = \frac{\partial B_y}{\partial y} \approx \frac{\Delta B_y}{\Delta y} \\ B_{zz} = -B_{xx} - B_{yy} = -\frac{\Delta B_x}{\Delta x} - \frac{\Delta B_y}{\Delta y} \approx -\frac{\Delta B_x}{\Delta x} - \frac{\Delta B_y}{\Delta y} \end{cases} \quad (9)$$

1.2 磁梯度张量测量系统

用于测量磁梯度张量的传感器模型有诸多种, 如: 直四面体测量阵列、平面十字测量阵列、正三角形测量阵列、正方形测量阵列等, 文献 [23] 中验证了平面十字测量阵列的定位精度最高。如图 2 所示, 平面十字测量阵列一共由 5 个磁通门传感器组成, 同一轴向上相邻的磁通门传感器的距离 (基线) 为 d 。

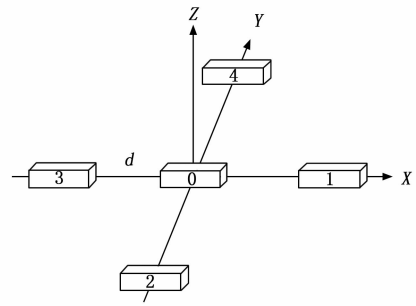


图 2 平面十字形磁梯度张量测量阵列

假设某时刻 0~4 号磁通门传感器测得矢量磁场强度为 B_x^i, B_y^i, B_z^i ($i=0, 1, 2, 3, 4$), 通常利用短距离的差分方法来代替微分, 估计磁梯度张量在各个方向上的分量。十字形测量阵列中心点的磁梯度张量矩阵表示为:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{B_x^1 - B_x^3}{2d} & \frac{B_y^1 - B_y^3}{2d} & \frac{B_z^1 - B_z^3}{2d} \\ * & \frac{B_y^2 - B_y^4}{2d} & \frac{B_z^2 - B_z^4}{2d} \\ * & * & \frac{B_x^3 - B_x^1 + B_y^4 - B_y^2}{2d} \end{bmatrix} \quad (10)$$

1.3 单点磁梯度张量定位方法

由式 (3) 可得, 另外一点的磁感应强度为:

$$\mathbf{B}' = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(m \cdot r_0) r_0 - m}{(r + \Delta r)^3} \quad (11)$$

则两点间的磁感应强度的差值为:

$$\mathbf{B} - \mathbf{B}' = -\frac{3}{r} \frac{3\mu_0(m \cdot r_0) r_0 - \mu_0 m}{4\pi r^3} dr \quad (12)$$

根据磁梯度张量矩阵, 可得:

$$\mathbf{B} - \mathbf{B}' = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix} r_0 dr \quad (13)$$

将式 (12) (13) 结合, 可以得到单点 Nara 定位公式:

$$r = -3\mathbf{G}^{-1}\mathbf{B} \quad (14)$$

式 (14) 为基于磁梯度张量的单点定位公式。理论上讲, 获得空间中某个特定点的磁梯度张量和三分量磁场强度就能够实现磁性目标的定位。但在实际测量中, 估计背景磁场时会存在一定的测量误差, 这可能会导致式 (14) 中的一些残留背景场。因此, 该方法对定位结果的影响很大。对此, 可利用两点磁梯度张量定位方法来解决, 旨在减轻实际应用中地磁场估计误差的影响。总体思路是建立一个仅包括磁梯度张量和目标位置测量的优化模型, 通过使用优化算法, 实现目标位置参数的求解。

2 两点磁梯度张量定位法

2.1 方法原理

由式 (7) 可知, 磁矩 m 和矩阵 \mathbf{W} 都为未知参量, 若要求解目标位置还须进一步求解。如果在两个测量点测量磁梯度张量信息, 表达式为:

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_1 = \mathbf{W}_1 m \\ \mathbf{Q}_2 = \mathbf{W}_2 m \end{cases} \quad (15)$$

消除磁矩可得:

$$\mathbf{W}_2(\mathbf{W}_1/\mathbf{Q}_1) = \mathbf{Q}_2 \quad (16)$$

式 (16) 表示的是一个包含 3 个未知数的非线性方程组, 由于该方程组的复杂性, 我们无法直接通过数学推导得到其解的明确表达式, 必须依赖数值方法来求解。式 (16) 进行变形, 并构建以下目标函数:

$$F = \min \|\mathbf{Q}_2 - \mathbf{W}_2(\mathbf{W}_1/\mathbf{Q}_1)\|_2 \quad (17)$$

在上述表达式中, 矩阵 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 是仅取决于目标位置的矩阵, 是要求解的量, 而 \mathbf{Q}_1 和 \mathbf{Q}_2 是两个测量点处的磁梯度张量的测量值, 是已知量。上述优化模型中不包括磁场矢量项, 因此, 它不受地磁场估计误差的影响。建立以式 (17) 为目标函数的优化模型, 选择合适的优化算法, 对式中的位置参数进行优化, 使得函数值 F 最小, 这时所求得的坐标值就是磁性目标的位置

参数。

2.2 目标函数求解方法

粒子群优化算法是一种基于鸟群觅食行为的优化算法, 展现了其独特的优势与广泛的应用潜力^[24]。该算法的核心优化流程模拟了鸟群在探索食物源过程中的集体智慧, 其过程主要分为两大核心阶段: 初始化阶段与更新阶段^[25]。

在初始化阶段, 算法首先生成一个由 N 个粒子组成的群体, 每个粒子在 D 维搜索空间中随机分配一个位置 x_{ij} 和速度 v_{ij} (其中 $i=1, 2, 3, \dots, N$, 从 1 到 N ; $j=1, 2, 3, \dots, D$; D 对应于待优化目标函数的维度)。这些初始化的粒子各自代表目标函数潜在解的一个候选点, 它们的随机分布确保了搜索空间的全面探索。

随后进入更新阶段, 通过一系列迭代过程, 每个粒子根据自身迄今为止发现的历史最优位置以及整个群体历史发现的最优位置来调整其飞行速度和方向。这一动态更新机制促使粒子在解空间中不断逼近更优的位置, 旨在寻找全局最优解。

在每次迭代循环中, 算法会在每次迭代中, 计算每个粒子的适应度值 f_i , 更新个体和群体的最优位置; 不断迭代, 直至满足预设的停止条件, 如达到最大迭代次数或找到满足特定精度要求的解。最终, 算法输出全局最优解, 标志着搜索过程的结束。粒子群优化算法因其操作简便、参数设置少、搜索效率高等特点, 在众多优化问题中展现出了强大的应用能力和实用性。

基本粒子群优化算法的速度和位置更新公式如式 (18) (19) 所示:

$$v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 r_1 (p_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2 r_2 (p_{gj}^t - x_{ij}^t) \quad (18)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (19)$$

式中, ω 是惯性权重; v_{ij}^t 是第 t 次迭代时粒子 i 在维度 j 上的速度, x_{ij}^t 是粒子 i 在维度 j 上的位置, p_{ij}^t 是粒子 i 在维度 j 上的个体最优位置, p_{gj}^t 是所有粒子在维度 j 上的全局最优位置, c_1 和 c_2 是学习因子, r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 区间内的随机数。

由式 (17) 可知, 该目标函数是一种复杂的非线性问题, 但传统的 PSO 算法存在许多缺点: 惯性权重 ω 和学习因子 c_1 、 c_2 通常是固定的常数, 这种固定的参数设置可能无法适应搜索过程中粒子状态的变化, 导致算法性能受限; 容易陷入局部最优解, 导致搜索精度不足; 缺乏精密搜索方法的配合, 难以得到非常精确的结果; 高度依赖参数设置, 不恰当的参数可能导致算法性能下降; 理论基础相对薄弱, 缺乏严格的理论证明其有效性和适用范围; 以及适用范围有限, 特别是在处理离

散及组合优化问题时效果不佳, 且在处理高维复杂问题时可能出现早熟收敛现象。

为了克服这种不足, 本文提出一种改进非线性惯性权重和学习因子的策略。选择对惯性权重函数 ω 及学习因子 c_1 、 c_2 进行改进, 使其从固定的常数转变成随着搜索过程中适应度函数变化而非线性变化的值。新的惯性权重系数 ω 及学习因子 c_1 、 c_2 公式为:

$$\omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{1}{1 + e^{-f/f_{\text{avg}}}} \quad (20)$$

$$c_1 = c_{1\min} + (c_{1\max} - c_{1\min}) \frac{1}{1 + e^{-f/f_{\text{avg}}}} \quad (21)$$

$$c_2 = c_{2\max} - (c_{2\max} - c_{2\min}) \frac{1}{1 + e^{-f/f_{\text{avg}}}} \quad (22)$$

式中, ω_{\max} 和 ω_{\min} 是惯性权重的上下限, 其中 $\omega_{\max} = 0.9$; $\omega_{\min} = 0.4$ 。 t_{iter} 是当前迭代次数, T_{iter} 是最大迭代次数, $c_{1\max}$ 、 $c_{1\min}$ 、 $c_{2\max}$ 、 $c_{2\min}$ 分别是学习因子 c_1 和 c_2 的上下限, 其中 $c_{1\max} = c_{2\max} = 2.5$; $c_{1\min} = c_{2\min} = 0.5$, f 为适应度值, f_{avg} 为当前迭代过程中所有粒子的适应度平均值。

公式 (20) ~ (22) 中的非线性变化公式是基于 Sigmoid 函数的变体, 该函数在机器学习和神经网络中广泛应用, 用于实现平滑的过渡和概率输出。在这里, Sigmoid 函数用于将适应度值 f 与平均值 f_{avg} 的比值映射到 (0, 1) 区间内, 进而控制 ω 、 c_1 和 c_2 的变化。这种映射方式使得参数调整更加平滑和连续, 避免了突变带来的不稳定。

通过式 (20) (21) 可以发现, 在寻优过程中, 权重 ω 随适应度值 f 与平均值 f_{avg} 比值的增大而增大, 通过异步变化并结合惯性权重的更新方式来动态调整学习因子的大小。当粒子陷入局部最优时, 较小的 ω 值和较小的 c_1 值有助于粒子跳出局部最优, 并进行更广泛的全局搜索。同时, 较大的 c_2 值有助于粒子从其他优秀粒子中学习更多信息, 从而加速收敛到全局最优解。当粒子接近全局最优时, 较大的 ω 值和较大的 c_1 值有助于粒子在全局最优附近进行细致的局部搜索, 从而提高搜索精度和收敛速度。同时, 适中的 c_2 有助于粒子保持其优秀的搜索方向, 并避免被其他较差粒子误导。 ω 、 c_1 和 c_2 的动态调整使得算法能够根据粒子的适应度自动调整这些参数的值, 有助于算法在搜索过程中自动平衡全局搜索和局部搜索的能力, 从而提高搜索效率。

改进的粒子群优化算法的基本流程如图 3 所示。

3 仿真分析

3.1 不同方法对比

为了验证文中方法的有效性, 采用平面十字形磁梯度张量阵列系统进行仿真定位实验。仿真条件设置如下: 十字形磁梯度张量系统基线距离 d 为 0.3 m, 磁性

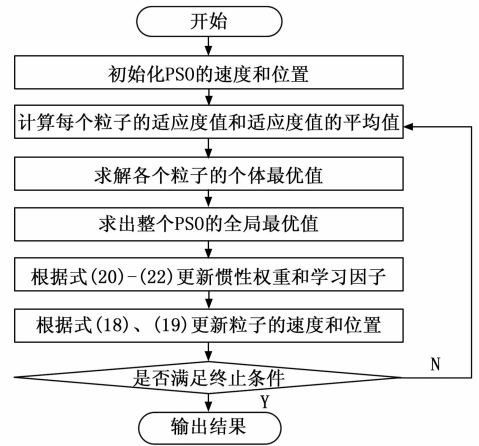


图 3 改进的粒子群优化算法流程

目标磁矩矢量为 (600, 346, 400) A · m², 如图 4 所示, 磁性目标位于坐标原点 (0, 0, 0) 处, 探测系统在 $z=0.5$ m、 $y=x$ 的直线上运动并等间隔取 10 个测量点, 相邻两测量点之间的位移为 0.3, 0.3, 0 m。仿真时利用每对间隔一个点的测量数据 (两点位移为 0.6, 0.6, 0 m) 计算得到目标位置。分别计算单点 Nara 定位方法、文中定位方法利用传统 PSO 算法和改进的 PSO 算法的定位结果。定义定位距离误差为: $e = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$, 作为衡量磁梯度优化效果及定位效果的评价指标。其中 (x_0, y_0, z_0) 为算法估计的位置向量。计算得到的理想条件下及含均值为 0 nT, 标准差为 1 nT 的高斯噪声条件下目标定位误差分别如图 5、图 6 所示。

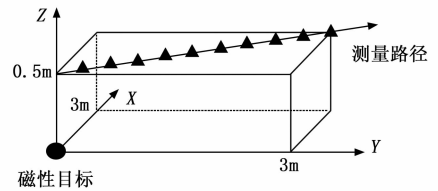


图 4 测量路线示意图

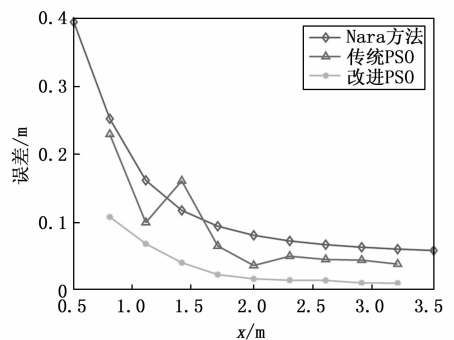


图 5 理想条件下不同方法误差对比

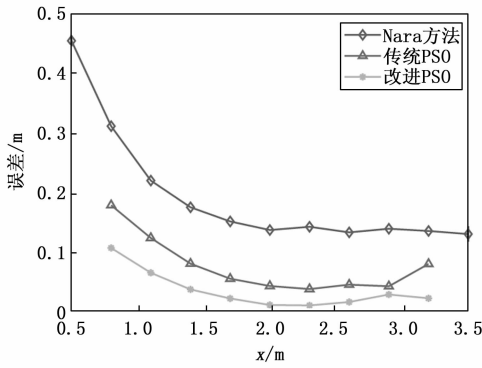


图 6 含噪声条件下不同方法误差对比

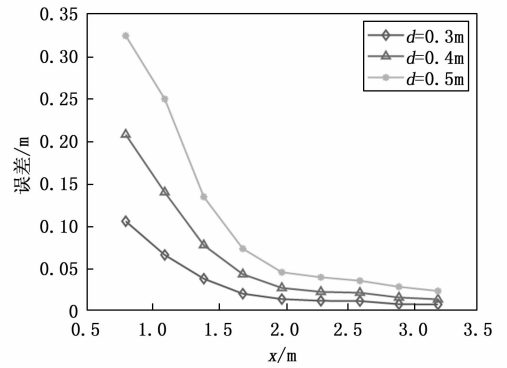


图 7 不同基线长度下定位误差

经计算，单点 Nara 定位方法、文中定位方法利用传统 PSO 算法和改进的 PSO 算法的平均运行时间分别为：0.000 201、0.015 127、0.015 939 s。Nara 方法的运行时间最短，改进的粒子群方法的运行时间比传统的粒子群方法多了 0.000 812 s，这是因为，在改进惯性权重和学习因子时，引入了适应度值和适应度平均值的比值，增加了计算量，但差异非常小。由图 5、图 6 可知，3 种方法的定位误差整体上随距离的增大而减小，这是因为十字形磁梯度张量系统利用短距离的差分方法来求解磁梯度矩阵时，将磁场的衰减当作线性关系，而在近距离条件下，磁场的衰减并非线性关系，距离越远，磁场的衰减越接近线性。其中，无论是理想条件下还是含高斯噪声条件下，Nara 方法的定位误差较大，平均定位误差分别为 12.71 cm、19.32 cm，传统的粒子群方法的平均定位误差分别为 8.31 cm、7.62 cm，改进的粒子群方法平均定位误差最小，分别为 3.14 cm、3.56 cm。由仿真结果可得，传统的粒子群算法容易陷入局部最优解，理想条件下，距离磁性目标 1.4 m 处，传统的粒子群优化算法的定位误差高达 15.88 cm，而文中改进的粒子群优化算法的定位误差为 3.79 cm。因此文中方法能搜索到全局最优解，定位效果较好，且具有一定的鲁棒抗噪性。

3.2 基线长度对定位误差的影响

在实际测量中，磁梯度张量测量阵列的基线长度也会影响定位精度，仿真分析系统的基线长度分别为 0.3、0.4、0.5 m 时的定位误差，仿真中其余条件不变，仿真结果如图 7 所示。

由图 7 可知，该方法得到的定位误差随着基线长度的增加而增加，这是因为，当基线长度趋近于零时，短距离差分实质上转化为了微分。但距离越远，定位误差变化曲线相差越小。因此，在实际测量中，并不意味着基线距离的缩小会导致定位误差的减小。定位误差的大小还受到诸如目标磁矩的强弱、磁传感器的精确度以及定位距离的远近等多重因素的影响。要结合探测条

件及探测目标选择合适的基线长度。

3.3 传感器精度对定位误差的影响

在实际测量中，传感器的精度也会影响定位精度，其余条件不变，仿真分析传感器的精度分别为 1、0.1、0.01 nT 时，文中所提方法对磁性目标的定位误差，仿真结果如图 8 所示。可以看出，传感器测量精度越高，定位误差越小，且距离越远，传感器的精度对定位结果影响越大。因此，在实际测量中，应尽可能地选择精度高的磁传感器。

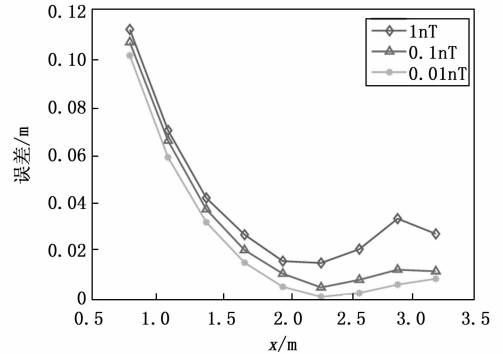


图 8 传感器精度不同时定位误差

4 实验验证

为验证上述基于改进粒子群算法的两点磁梯度张量定位优化效果，在开阔、无扰动、地磁场稳定的室外环境中，设计如图 9 所示的磁性目标定位系统实验平台。测量系统包含能够承载 5 个磁通门传感器构成十字形阵列的无磁性支架设计、能够同步采集 5 个磁通门传感器测量数据的磁梯度张量阵列系统以及电脑，磁通门传感器的灵敏度为 1 nT。电脑端上位机软件发出指令后，磁梯度张量阵列系统开始对 5 个磁传感器进行采集工作，并通过有线传输将磁场信息传入电脑中。

为了去除地磁场干扰及电子设备电磁干扰的影响，首先将传感器系统放置于待测目标所在场地，采集无磁

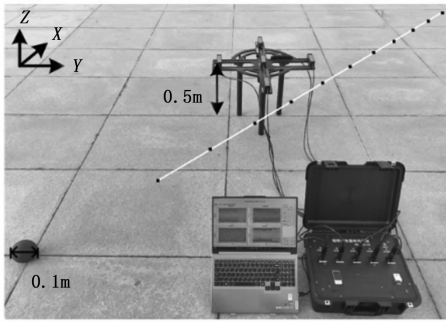


图9 磁梯度张量定位系统

性目标时的环境磁场,作为当地的地磁场。其次,选择直径为10 cm的铁球固定在坐标原点处,测量系统中心在 $z=0.5\text{ m}$ 、 $y=x$ 的路径上等间隔取11个测量点,并分别采用单点Nara定位方法、文中定位方法利用传统PSO算法和改进的PSO算法进行定位实验。不同方法的定位误差如图10所示。

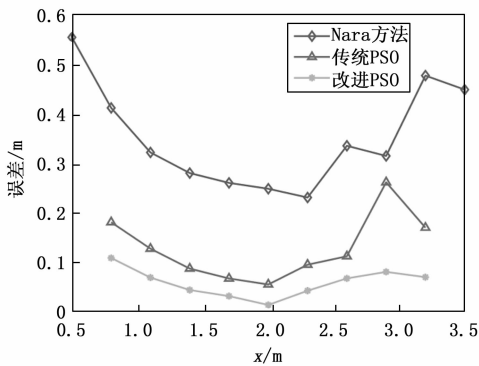


图10 不同方法的误差分布图

由图10可知,Nara方法、传统的粒子群方法、文中方法的平均定位误差分别为35.16、12.6、5.58 cm,且距离磁性目标2.9 m处,传统的粒子群优化算法的定位误差高达25.96 cm,而文中改进的粒子群优化算法的定位误差为7.78 cm。因此,传统的粒子群优化算法容易陷入局部最优解,文中方法定位效果较好,且具有受地磁场影响较小、能搜索到全局最优解及一定的鲁棒抗噪性等优点。

5 结束语

本文面向复杂环境中隐藏金属目标探测的需求,旨在解决单点磁梯度张量定位法中受地磁场影响误差大、多点磁梯度张量定位法中优化算法中对局部最优解的敏感性以及定位精度不高等问题。提出了一种基于改进粒子群优化算法的两点磁梯度张量定位方法。首先,基于磁偶极子场源理论,求解磁梯度张量矩阵中的张量分量;其次,通过中间变量代替磁矩来建立目标位置和磁

梯度张量之间的非线性目标函数,并采用基于动态调整的粒子群算法对目标位置坐标进行求解,改进非线性惯性权重和学习因子,使其从固定的常数转变成随着搜索过程中适应度函数变化而非线性变化的值。最后,对单点Nara定位方法、文中定位方法利用传统PSO算法和改进的PSO算法进行了实验测试,结果表明,与单点Nara定位方法、文中定位方法利用传统PSO算法相比,文中改进的PSO算法使平均定位误差分别由35.16 cm、12.6 cm降低至5.58 cm,明显减小了定位误差,且具有受地磁场影响较小、自动平衡全局搜索和局部搜索及一定的鲁棒抗噪性等优点。然而,文中还存在一些不足,比如,磁梯度张量定位系统中磁梯度张量的理论计算与实际测量存在一定的偏差,会导致定位精度下降。在接下来的研究中,将优化磁梯度张量定位系统的结构,进一步优化定位精度。

参考文献:

- [1] JIN H, GUO J, WANG H, 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.
- [2] WANG X, LIU H, WANG H, et al. Quantitative analysis of the measurable areas of differential magnetic gradient tensor systems for unexploded ordnance detection [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21 (5): 5952 - 5960.
- [3] CONNOLLY R P, YAN W, ZHANG D, et al. Simulation and experimental measurements of internal magnetic field gradients and NMR transverse relaxation times (T_2) in sandstone rocks [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019: 985 - 997.
- [4] 康良伟, 边瑞卿, 董浩森, 等. 基于瞬变电磁阵列的地下金属定位系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2024, 43 (2): 93 - 96.
- [5] BIRSAN M. Inversion of magnetic dipole parameters using a scalar field gradiometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21 (6): 7434 - 7438.
- [6] ALIMI R, WEISS E, RAMCOHEN T, et al. A dedicated genetic algorithm for localization of moving magnetic objects [J]. Sensors, 2015, 15: 23788 - 23804.
- [7] QIN Y, LI K, YAO C, et al. Magnetic anomaly detection using full magnetic gradient orthonormal basis function [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20 (21): 12928 - 12940.
- [8] SANDMAN W A, ASCHWANDEN J M. A new method for modeling the coronal magnetic field with STEREO and submerged dipoles [J]. Solar Physics, 2011, 270 (2): 503 - 522.

(下转第269页)