

基于几何精度因子的磁目标参数解算优化方法^{*}陈碧聪¹ 张晓明^{1,2} 张 鹤¹ 蒋仕龙¹

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘 要: 基于三轴磁传感器阵列的磁性目标参数(位置、磁矩)求解常受传感器噪声等观测误差影响,导致结果可靠性不强。为降低观测误差、测量噪声等对解算结果的影响,本文中利用几何精度因子的原理对磁传感器阵列的布局进行优化,降低噪声等观测误差对磁性参数解算时的干扰能力。经仿真实验,比较三传感器在不同排布下观测平面的几何精度因子均值与方差,找到可靠的传感器阵列优化布局方案:参考圆半径 r 为观测平面的20%~30%;传感器阵列位于参考圆弧上,且以正三角形排布;参考圆所在平面与观测平面距离 d 为0。经试验验证,传感器阵列未以优化布局排布时,利用LM算法对三轴磁矩矢量的解算偏差 $[m_x, m_y, m_z]$ 最大为:[0.034 4, 0.027 9, 0.028 8] A·m²,位置解算偏差 $[x, y, z]$ 最大为:[3.37, 3.14, 3.31] cm;优化阵列布局后,其解算偏差 $[m_x, m_y, m_z]$ 与 $[x, y, z]$ 的最大值分别降低了[75.37%, 78.66%, 76.74%]与[72.67%, 92.83%, 85.76%]。传感器阵列布局的优化对提高磁性目标参数解算精度具有一定的指导意义。

关键词: 传感器阵列优化;几何精度因子;磁性目标定位;磁矩解算;磁偶极子模型;磁场

中图分类号: TM936; TN96 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4020

Calculation of magnetic target parameters based on
geometric accuracy factor optimization methodChen Bicon¹ Zhang Xiaoming^{1,2} Zhang Ge¹ Jiang Shilong¹

(1. Natioanl Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measure, Ministry of Education, North University of
China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Solving the magnetic target parameters (position, magnetic moment) using a three-axis magnetic sensor array is a typical nonlinear least squares optimization problem, and the Levenberg-Marquardt (LM) optimization algorithm is often used. However, when solving this problem, it is affected by observation errors such as sensor noise, which leads to less reliable results. In order to reduce the influence of observation errors, measurement noise and other effects on the solution results, in this paper, the principle of geometric accuracy factor is used to optimize the layout of the magnetic sensor array, in order to reduce the ability of noise and other observation errors to interfere with the magnetic parameter solving, and the accuracy of the magnetic target parameter solving is improved by decreasing the mean and variance of the geometric accuracy factor of the observation plane. After simulation experiments, we compare the mean and variance of the geometric accuracy factor of the observation plane with different arrangements of the three sensors, and find a reliable optimal layout scheme for the sensor array: the radius of the reference circle r is 20%~30% of the observation plane; the sensor array is located in the arc of the reference circle and arranged in a positive triangle; and the distance between the plane in which the reference circle is located and the observation plane d is 0. It is verified that when the sensor arrays are not arranged in an optimized layout, the solution deviation $[m_x, m_y, m_z]$ of the three-axis magnetic moment vectors using the LM algorithm is up to [0.034 4, 0.027 9, 0.028 8] A·m², and that of the positional solution deviation $[x, y, z]$ is up to [3.37, 3.14, 3.31] cm; the optimized array layout reduces the maximum values of the solution deviation $[m_x, m_y, m_z]$ and the maximum value of $[x, y, z]$ are reduced by [75.37%, 78.66%, 76.74%] and [72.67%, 92.83%, 85.76%] respectively. The optimization of the sensor array layout is instructive for improving the accuracy of magnetic target parameter solving.

Keywords: sensor array optimization; geometric precision factor; magnetic target positioning; magnetic moment calculation; magnetic dipole model; magnetic field

0 引 言

磁性目标参数包括磁矩大小与目标位置。磁矩是描述

物体磁特性的一个重要参数,磁矩测量对于弹体姿态测量^[1]、卫星的姿态控制^[2-3]、水下目标探测^[4]工作都具有重要的意义。磁定位技术在磁通信^[5]、医疗、自动驾驶和人机

交互等跟踪及导航领域起到至关重要的作用^[6]。与其他定位技术如激光雷达、视觉和超声波定位技术相比,永磁定位技术具有抗光学干扰、全空间六维位姿跟踪和信号源无能源供给等优点^[7]。铁磁性目标在地磁场中会引起磁异常,通过磁传感器阵列接收磁性目标的磁异常信号并进行处理,可解算出目标的磁矩和位置信息^[8],是磁性目标探测的重要手段,在军事和民用领域都具有广泛应用。

主流的永磁参数解算技术利用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)优化算法,国内外学者对铁磁性目标的位置、姿态及磁性参数求解的算法研究较多。朱明慧等^[9]提出了基于递推最小二乘法的运动平台剩磁差分测量与估计方法,并通过递推最小二乘法求解差分估计模型。赵高阳等^[10]应用有限元数值方法仿真水下航行器的空间磁异常分布,建立以偶极子阵元数目、位置及磁矩为参数磁异常解析模型,采用非线性最小二乘算法求解模型系数。刘辉等^[11]将潜艇磁矩看作均匀分布于壳体上的无限个磁偶极子,提出并定义了面磁矩密度假设,得到基于面磁矩分布的潜艇磁场计算数学模型。黎威等^[12]采用机器学习技术实现无机磁性材料铁磁、反铁磁、亚铁磁和顺磁基态的分类以及无机铁磁性材料磁矩的预测,并基于机器学习的随机森林算法,构建了磁性基态分类模型和磁矩预测模型。马剑飞等^[13]基于多个偶极子的组合模型,结合无迹卡尔曼滤波算法,提出一种针对尺度磁性目标的磁梯度跟踪方法,提高磁性尺度目标的定位精度。Tan等^[14]为了提高质子磁力仪的绝对精度,提出了一种对自由感应衰减信号非线性部分进行补偿的方法。GE等^[15]利用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)对初始值不敏感的特性获得粗略解,然后利用高斯-牛顿法得到更精确的解,开发了一种基于粒子群优化和高斯-牛顿方法相结合的混合算法(PSO-GN)。李金朋等^[16]提出了基于磁传感器阵列的多磁源参数反演方法,该方法在不受地磁背景磁场影响的情况下实现了对磁源的深度和磁矩进行单点估计。王立等^[17]等利用五点定位原理,提出一种基于弱磁探测的三相电缆路径快速定位方法,提高地下电缆探测精度和深埋电缆的探测能力。马成功等^[18]等设计了基于磁通门传感器的铁磁探测系统,该系统采用卡尔曼滤波对背景磁场和磁异常信号进行处理,可在核磁共振室外复杂磁场环境可以减少设备工作时的误报警,有效探测出铁磁性物质。马凯等^[19]设计了一种基于FPGA和磁传感器阵列的磁场扫描系统,该系统采用基于磁通量与天津法为基础的程序处理,能够实现铁磁性目标的无损检测和识别。

在永磁定位、磁矩测量等永磁参数解算过程中,现有研究多为对算法的优化,旨在参数求解过程中,提高求解精度或降低算法对初值的依赖性,但此类研究无法降低磁性参数解算过程中观测误差对其产生的影响。本文提出的基于几何精度因子的磁目标参数解算优化方法填补了这一空白,首先对研究方法、磁偶极子定位模型进行说明,并利用

几何精度因子推导出传感器阵列排布对磁性目标参数解算的影响;其次通过仿真实验明确了传感器阵列布局优化方法,且构建几何精度因子平面等值线图直观展示观测平面上 DOP_p 的情况;最后分别利用传感器阵列优化布局前后采集的数据对磁性目标参数解算,将其与真实参数对比,表明了传感器阵列布局优化可降低估计过程中对观测噪声的敏感度,提升估计结果可靠性。本文对提高磁性目标参数解算精度具有一定的指导意义。

1 研究方法及理论介绍

1.1 研究方法

由于未知参数多,在测量中存在的噪声等诸多干扰因素导致传感器观测值与真实值有误差,这些因素使得传统磁性目标探测方法无法得到令人满意的精度。为提升对磁性目标参数解算的精度,大部分研究均为对以LM算法为主的最优化算法进行改进,而对传感器输入信息的相关研究有所缺失。为降低算法解算过程对观测误差的敏感度,本文将铁磁性目标产生的磁异常等效为磁偶极子,通过引入几何精度因子(geometric dilution of precision, GDOP)对磁传感器阵列进行优化,如图1所示。通过对传感器阵列优化,降低了噪声等观测误差对磁目标参数解算精度的影响能力,提升了对磁性目标未知参数解算的精度,具有一定的实际工程应用价值。

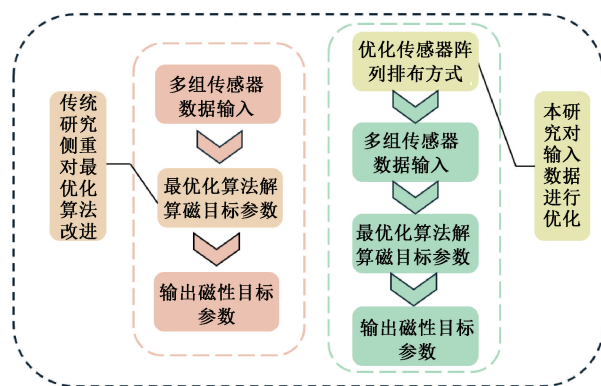


图1 传统研究思路与本文研究思路对比

Fig. 1 Comparison of traditional research ideas and the research ideas in this paper

1.2 磁偶极子定位模型

磁性目标磁矩与位置解算以磁偶极子模型为基本原理,当磁性材料等磁场源距离磁传感器较远时,可以将该磁场源视为一个磁偶极子^[20]。如图2所示, $\mathbf{m}$ 为磁性目标的磁矩,其可按坐标轴分解为 m_x, m_y, m_z 三分量;磁性目标位置为 $O(x_0, y_0, z_0)$ 。通过布置 N 个磁传感器构成的磁传感器阵列($N \geq 2$)采集磁性目标的磁场信号 $\mathbf{B}_i, i=1, 2, \dots, N$,将磁性目标矢量信息与磁传感器位置 $P_i, i=1, 2, \dots, N$,对应,磁场信号 $\mathbf{B}(B_x, B_y, B_z)$ 与传感器位置信息 $\mathbf{P}(x, y, z)$,磁性目标磁矩 $\mathbf{m}(m_x, m_y, m_z)$ 及位置信息

$O(x_0, y_0, z_0)$ 的关系为式(1)。

$$\begin{aligned} f_1: B_x &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\left(\frac{3(x-x_0)^2}{r^5} - \frac{1}{r^3} \right) \cdot m_x + \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{3(x-x_0)(y-y_0)}{r^5} \right) \cdot m_y + \left(\frac{3(x-x_0)(z-z_0)}{r^5} \right) \cdot m_z \right] \\ f_2: B_y &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\left(\frac{3(x-x_0)(y-y_0)}{r^5} \right) \cdot m_x + \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{3(y-y_0)^2}{r^5} - \frac{1}{r^3} \right) \cdot m_y + \left(\frac{3(y-y_0)(z-z_0)}{r^5} \right) \cdot m_z \right] \\ f_3: B_z &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\left(\frac{3(x-x_0)(z-z_0)}{r^5} \right) \cdot m_x + \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{3(y-y_0)(z-z_0)}{r^5} \right) \cdot m_y + \left(\frac{3(z-z_0)^2}{r^5} - \frac{1}{r^3} \right) \cdot m_z \right] \end{aligned} \quad (1)$$

以三传感器阵列为例,在定位过程中,磁性目标的位置 (x_0, y_0, z_0) 与磁矩 (m_x, m_y, m_z) 参数未知,明确磁传感器的位置 (x_i, y_i, z_i) 与测得的磁场矢量值 (B_{xi}, B_{yi}, B_{zi}) ($i=1, 2, 3$) 后,即可通过 LM 最优化解法解得磁性目标参数。

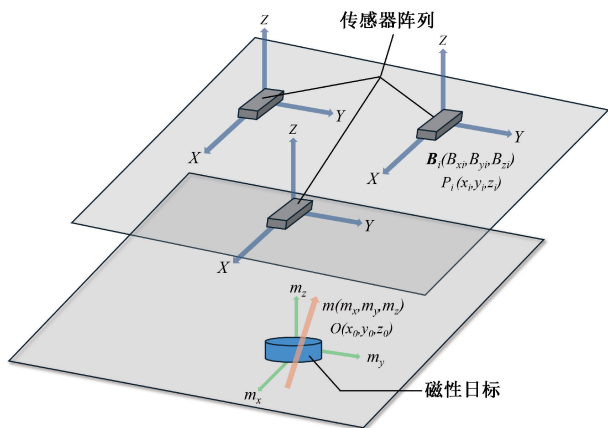


图 2 磁性目标定位数学模型

Fig. 2 Mathematical model of magnetic target localization

1.3 几何精度因子

对磁传感器阵列布局进行优化以降低观测误差对解算精度的影响,受 GPS 定位精度中的 $GDOP$ 值的启发,地面接收机与高空 GPS 卫星空间后方交汇的几何图形结构会对定位精度产生影响;在观测误差相同时,测点与卫星的几何图形不同时,定位精度亦不相同,故采用 $GDOP$ 的研究思路来明确传感器阵列的几何图形结构与其位置的选取。

精度因子本质为误差对最终解算结果的影响大小,即观测误差在当前布点状态下被放大的情况,于本研究而言,误差为磁传感器噪声与测量误差等。

待求解磁偶极子模型参数为 $X(m_x, m_y, m_z, x_0, y_0, z_0)$, 已知参数为 $B_{xi}, B_{yi}, B_{zi}, x_i, y_i, z_i, i=1, 2, 3$, 设估计出的 6 个参数为 $X'(\hat{m}_x, \hat{m}_y, \hat{m}_z, \hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0)$, 估计值参数 X' 与实际参数 X 的关系为:

$$\begin{cases} m_x = \hat{m}_x + \Delta m_x, \\ m_y = \hat{m}_y + \Delta m_y, \\ m_z = \hat{m}_z + \Delta m_z, \\ x_0 = \hat{x}_0 + \Delta x_0, \\ y_0 = \hat{y}_0 + \Delta y_0, \\ z_0 = \hat{z}_0 + \Delta z_0, \end{cases} \quad (2)$$

将其在 $(\hat{m}_x, \hat{m}_y, \hat{m}_z, \hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0)$ 处泰勒展开得:

$$\begin{cases} f_1(m_x, m_y, m_z, x_0, y_0, z_0) = \\ f_1(\hat{m}_x, \hat{m}_y, \hat{m}_z, \hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0) - a_{mx1} \Delta m_x - a_{my1} \Delta m_y - \\ a_{mz1} \Delta m_z - a_{x1} \Delta x_0 - a_{y1} \Delta y_0 - a_{z1} \Delta z_0 \\ f_2(m_x, m_y, m_z, x_0, y_0, z_0) = \\ f_2(\hat{m}_x, \hat{m}_y, \hat{m}_z, \hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0) - a_{mx2} \Delta m_x - a_{my2} \Delta m_y - \\ a_{mz2} \Delta m_z - a_{x2} \Delta x_0 - a_{y2} \Delta y_0 - a_{z2} \Delta z_0 \\ f_3(m_x, m_y, m_z, x_0, y_0, z_0) = \\ f_3(\hat{m}_x, \hat{m}_y, \hat{m}_z, \hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0) - a_{mx3} \Delta m_x - a_{my3} \Delta m_y - \\ a_{mz3} \Delta m_z - a_{x3} \Delta x_0 - a_{y3} \Delta y_0 - a_{z3} \Delta z_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{式中: } a_{mx i} = \frac{\partial f_i}{\partial m_x} \bigg|_{X'}, a_{my i} = \frac{\partial f_i}{\partial m_y} \bigg|_{X'}, a_{mz i} = \frac{\partial f_i}{\partial m_z} \bigg|_{X'}, a_{xi} = \frac{\partial f_i}{\partial x_0} \bigg|_{X'}, a_{yi} = \frac{\partial f_i}{\partial y_0} \bigg|_{X'}, a_{zi} = \frac{\partial f_i}{\partial z_0} \bigg|_{X'}, i=1, 2, 3.$$

其中, Jacobi 矩阵 J 为:

$$J = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & a_{mx1} & a_{my1} & a_{mz1} \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & a_{mx2} & a_{my2} & a_{mz2} \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & a_{mx3} & a_{my3} & a_{mz3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

令:

$$G = (J^T J)^{-1} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & G_{15} & G_{16} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} & G_{25} & G_{26} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} & G_{35} & G_{36} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} & G_{45} & G_{46} \\ G_{51} & G_{52} & G_{53} & G_{54} & G_{55} & G_{56} \\ G_{61} & G_{62} & G_{63} & G_{64} & G_{65} & G_{66} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在矩阵 G 中,影响位置解算的位置几何精度因子 DOP_p 利用观测误差 σ 作为单位误差,规范关系式后为:

$$DOP_p = \sigma \times \sqrt{G_{11} + G_{22} + G_{33}} \quad (6)$$

影响磁矩解算的磁矩 DOP_m 利用观测误差 σ 作为单位误差,规范关系式后为:

$$DOP_m = \sigma \times \sqrt{G_{44} + G_{55} + G_{66}} \quad (7)$$

显然, DOP 越小,在磁源参数(磁矩,位置)解算过程中受到观测误差影响越小。明确 $GDOP$ 的原理与公式后,通过改变传感器阵列的几何排布方式,找到一种使观测区域 DOP 值较小的方案,即可明确阵列合适的几何排布。

2 仿真结果与分析

以图 2 所示建立研究坐标系。通过 Matlab 软件仿真,定义研究区域为坐标系 xOy 平面,大小为 $x = 1 \text{ m}$, $y = 1 \text{ m}$,将其以步长 0.01 m 划分为 101×101 个网格点,磁源的磁矩设置为 $[0.01, 0.01, 0.01] \text{ A} \cdot \text{m}^2$,且磁源位置遍历所有网格点。磁传感器阵列以不同几何位置进行排列,三传感器的三轴指向均互相平行。观察不同几何排列下对观测区域 DOP_p 与 DOP_m 的影响,明确磁传感器阵列的优化方式。

设一参考圆,其圆心位于待观测平面中心,半径为 r ,且 $r = [0.1 : 0.05 : 0.5] \text{ m}$,参考圆所在平面平行于待观测平面,且两平面距离为 d , $d = [0 : 0.05 : 0.5] \text{ m}$;传感器 1、2 与 3 的位置均位于参考圆圆弧上,传感器阵列所在位置与参考圆圆心的连线与 X 轴正方向的圆心角分别为 α, β 与 γ , $\alpha = [0 : 10 : 360]^\circ$, $\beta = [10 : 10 : 360]^\circ$, $\gamma = [20 : 10 : 360]^\circ$,为保证传感器阵列的摆放组合足够,三传感器采用类似钟表内时分秒针的移动形式改变三传感器的位置,即传感器 1、2 位置固定,在圆弧上移动传感器 3 从初始位置 $\gamma = 20^\circ$ 至 $\gamma = 150^\circ$;后传感器 2 沿圆弧从 $\beta = 10^\circ$ 移动至 $\beta = 20^\circ$,传感器 3 沿圆弧从 $\gamma = 30^\circ$ 移动至 $\gamma = 150^\circ$;以此规律移动传感器,直至传感器 1、2、3 沿圆弧分别移动至 $\alpha = 330^\circ, \beta = 340^\circ, \gamma = 350^\circ$,此时可视为三传感器遍历完一个参

考圆下的所有图形排布方式。传感器排布方式如图 3 所示。

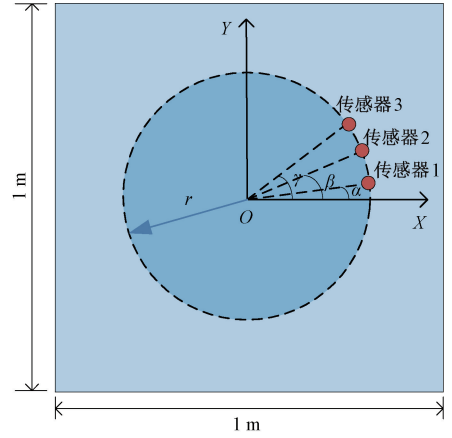


图 3 三传感器阵列示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the triple sensor array

为明确阵列排布在何种几何状态下最佳,设参考圆半径 r 为 0.2 m ,与待观测平面距离 d 为 0.1 m 。分别以待观测平面 DOP_p 与 DOP_m 在每个网格点处的均值与方差为参考,评价传感器阵列在不同排列状态下对磁源参数解算的优劣。传感器沿参考圆移动过程中,每次传感器位置改变后均对待观测平面 DOP_p 和 DOP_m 的均值与方差进行计算,其结果如图 4(a)和(b)所示。

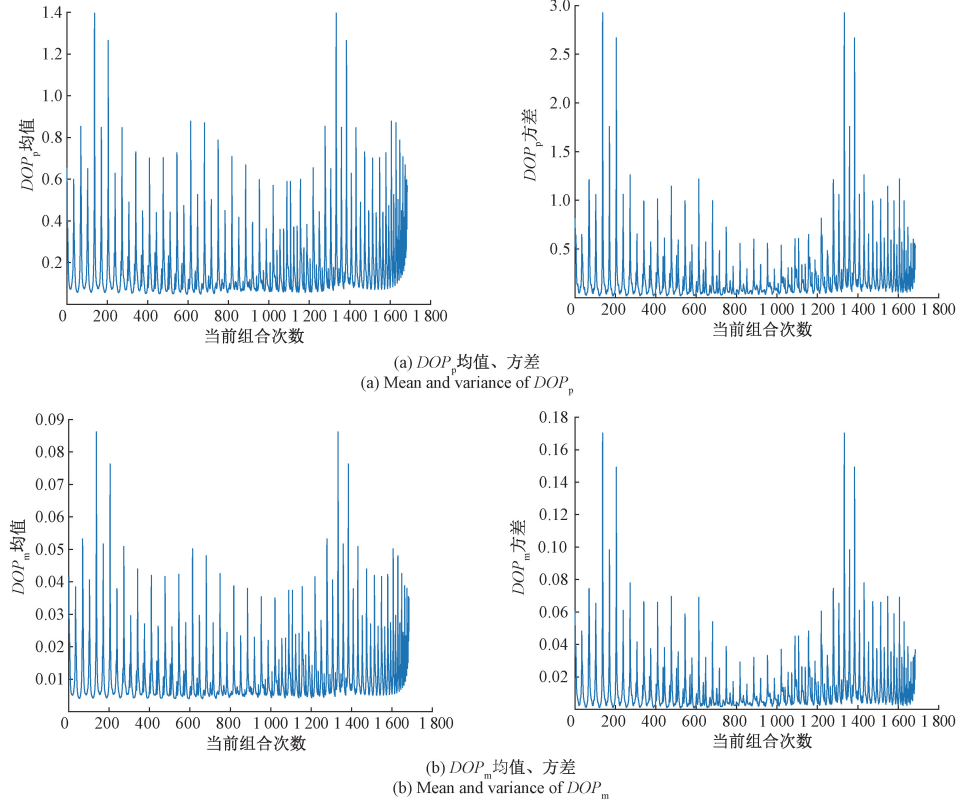


图 4 阵列不同排布待观测平面 DOP_p 与 DOP_m 均值与方差

Fig. 4 DOP_p and DOP_m for different rows of the array to be observed plane mean and variance

由图 4 可知,在传感器阵列沿参考圆弧转动过程中, DOP_p 与 DOP_m 的均值与方差变化趋势基本一致;在第 331 次组合时, DOP_p 与 DOP_m 的均值与方差达到第一个极小值排布,经推算,此时 $\alpha=0^\circ, \beta=120^\circ, \gamma=240^\circ$,传感器在参考圆上以正三角形排列;之后每当传感器阵列以正三角形排布时, DOP_p 与 DOP_m 均值与方差均达到极小值。

由于 DOP_p 与 DOP_m 的均值与方差变化趋势基本一致,为简化过程,传感器阵列每次排列后,以 DOP_p 为对象,将其在待观测平面的均值与方差为判断 DOP_p 大小的标准。为明确参考圆半径 r 改变后,观测平面 DOP 值的变化情况,固定参考圆所在平面与待观测平面距离 d 的大小为 0.2 m,改变参考圆半径 r 的大小为 $[0.1 : 0.05 : 0.5]$ m 进行仿真,其结果如图 5 所示。

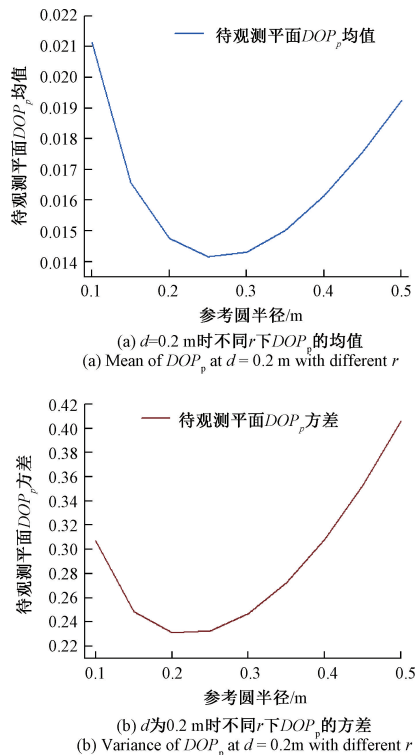


图 5 d 为 0.2 m 时不同 r 下 DOP_p 的均值与方差

Fig. 5 Mean and variance of DOP_p at d of 0.2 m with different r

类似地,为明确参考圆与待观测平面距离 d 改变后,观测平面 DOP 值的变化情况,固定 r 为 0.15 m,改变 d 的大小为 $[0.05 : 0.05 : 0.5]$ m 进行仿真,其结果如图 6 所示。

由图 5 可知,当待观测平面为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的矩形时,参考圆半径设置在 $[0.2, 0.3]$ m 区间内最佳,即设置参考圆半径为待观测平面的 20%~30%,参考圆半径 $r=0.25$ m 时,待观测平面的 DOP_p 均值较 $r=0.1$ m 时,由式(8)可知,其值降低 49.21%;由图 6 可知,待观测平面的 DOP 值随着 d 的增加而变大。

$$\frac{DOP_{p(r=0.1)} - DOP_{p(r=0.25)}}{DOP_{p(r=0.25)}} \times 100\% \quad (8)$$

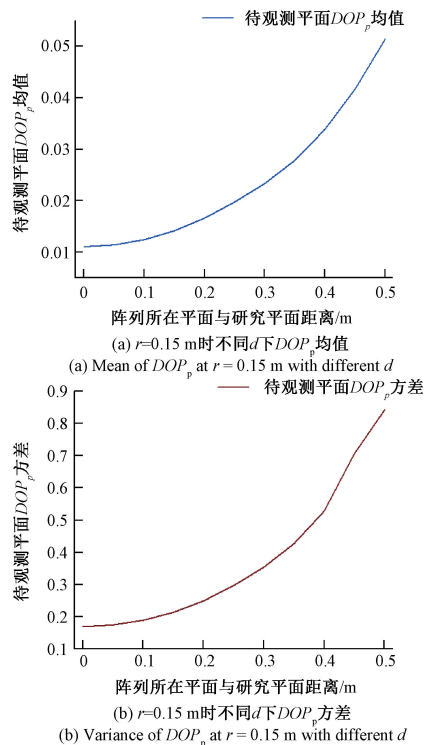
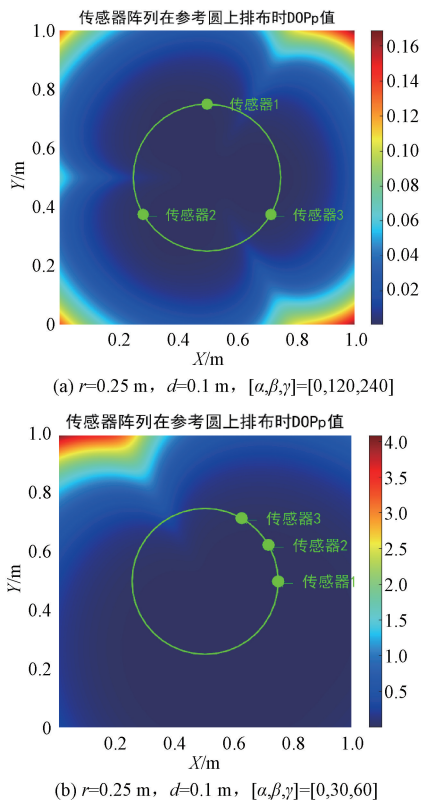


图 6 r 为 0.15 m 时不同 d 下 DOP_p 的均值与方差

Fig. 6 Mean and variance of DOP_p at r of 0.15 m with different d

为直观展示观测平面上 DOP_p 的情况,构建 $GDOP$ 平面等值线图,研究传感器阵列处于不同位置下排列时研究区域的 DOP_p 值,如图 7(a)~(f)。图中,传感器的标注



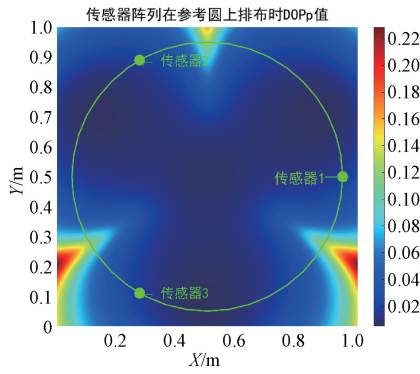
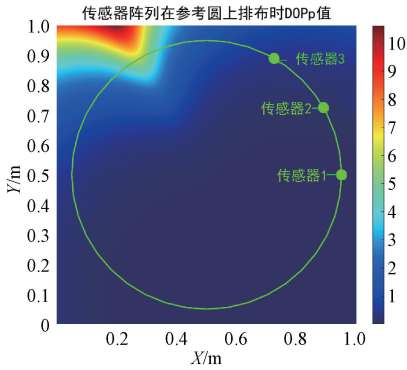
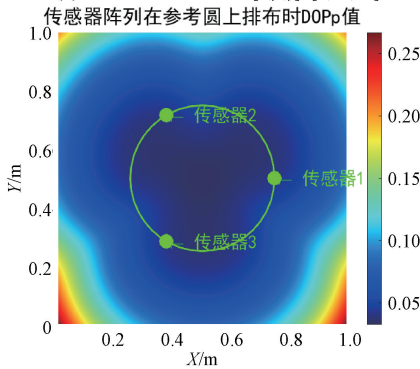
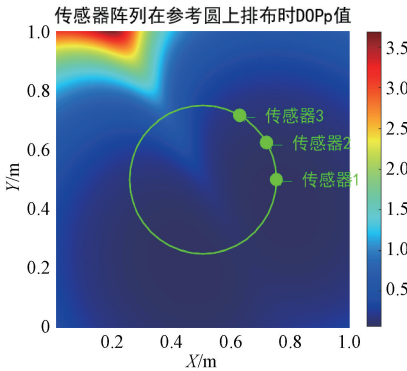
(c) $r=0.45$ m, $d=0.1$ m, $[\alpha, \beta, \gamma]=[0, 120, 240]$ (d) $r=0.45$ m, $d=0.1$ m, $[\alpha, \beta, \gamma]=[0, 30, 60]$ (e) $r=0.25$ m, $d=0.5$ m, $[\alpha, \beta, \gamma]=[0, 120, 240]$ (f) $r=0.25$ m, $d=0.5$ m, $[\alpha, \beta, \gamma]=[0, 30, 60]$

图 7 三传感器阵列不同排布下的 DOP 值

Fig. 7 DOP values of triple sensor array with different arrangements

位置均为实际位置在观测平面正上方的投影。

由观测平面 DOP_p 分布图可见,其 DOP 值在远离传感器阵列空间时变大,其原因为远离传感器时,磁场信号信噪比变低,对磁性目标参数的解算更容易受到噪声等观测误差的影响;当传感器以正三角形排布,参考圆半径 r 为 0.25 m 且参考圆所在平面与观测平面距离 d 为 0.1 m 时,研究区域的 DOP 值明显小于其他排布方式,验证上文结论;通过 $GDOP$ 定义可知, DOP 值越小,传感器噪声及其他测量误差等对解算结果的影响越小,与其他排列相比,传感器阵列以图 7(a)排布时,其 DOP 值显著降低,即对磁性目标的参数估计精度更高。

3 试验验证

以三磁传感器阵列为例设计试验。试验场地空旷且磁场梯度小于 10 nT/cm,并以纯铝材料(无磁)搭建磁场空间分布特性测试平台,平台三轴可调节,且可通过平台框架的刻度与可变焦透镜读取传感器与磁性目标的位置坐标信息,如图 8 所示。

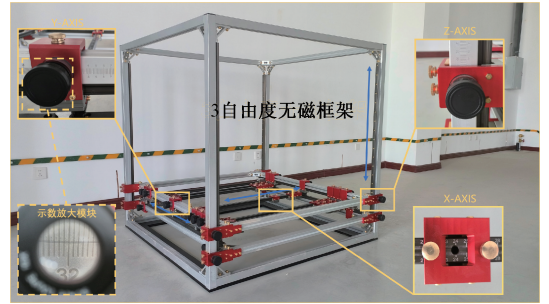


图 8 磁源磁场空间分布特性测试平台

Fig. 8 Testing platform of magnetic field spatial distribution characteristics of magnetic sources

选择磁矩矢量 $[m_x, m_y, m_z]$ 为 $[0.23, 0.16, 0.09]$ A·m², 底面半径 3 cm, 高度 1 cm 的柱形永磁体为磁性目标,该磁源尺寸较小,可保证磁偶极子模型远场的适用条件。将柱形磁体几何中心视作位置坐标参考点,观测平面范围为 1 m×1 m,研究采取的坐标系与图 2 中坐标系一致。磁传感器采用 F905 三轴磁通门,在 0.1~10 Hz 噪声下 <15 pTrms/kHz。固定磁性目标,将磁传感阵列分别以直线排布(相邻传感器间隔 0.2 m)与优化后方式排布(参考圆半径 $r=0.25$ m,阵列所在平面与观测平面距离 $d=0$ m),采集磁信息作为磁偶极子模型的输入,并解算磁性目标的位置坐标与磁矩信息;变化磁性目标的位置,利用两种几何排布的传感器阵列信息作为输入,比较解算出磁性目标的坐标与磁矩信息。其磁性参数解算结果如图 9、图 10 所示。

磁性目标遍历 10 个位置,传感器阵列优化前后对应的磁性参数估计偏差最大值如表 1 所示。显然,对传感器阵列布局优化前,即使传感器已经远离磁性目标,即磁偶极子模型适用于此条件,但对于磁性目标位置估计偏差均

值达到 $[2.980, 2.894, 2.954]$ cm,布局优化后,该值将至 $[2.980, 2.894, 2.954]$ cm,如图 10(a)。类似的,由图 10(b),对磁性目标磁矩估计偏差均值从优化前的 $[0.034\ 1, 0.026\ 9, 0.027\ 7]$ $\text{A}\cdot\text{m}^2$ 降到优化后的 $[0.009\ 1, 0.001\ 9, 0.004\ 0]$ $\text{A}\cdot\text{m}^2$ 。表 1 数据表明对其位置估计最大偏差分别降低 X 轴 75.37%,Y 轴 78.66%,Z 轴 76.74%,对磁矩矢量 (m_x, m_y, m_z) 估计最大偏差分别降低 72.67%,92.83%,85.76%。最大限度减小了由观测噪声引起的对磁性参数解算的负面影响,位置估算与磁矩估算结果可信度得到明显提高。

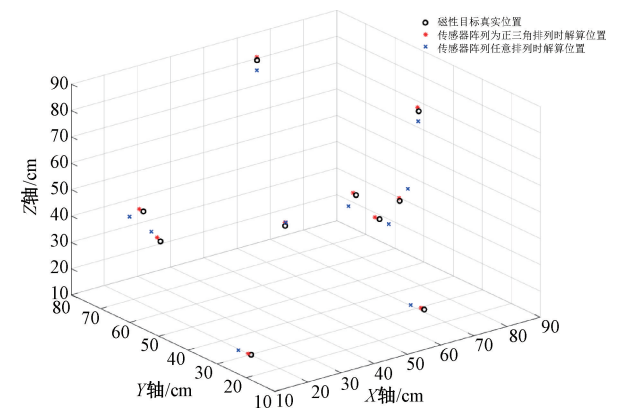
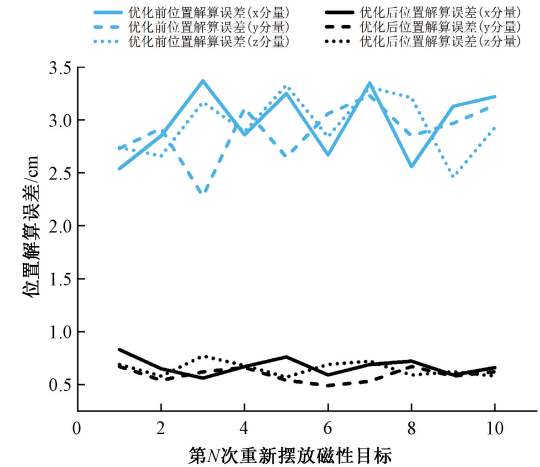
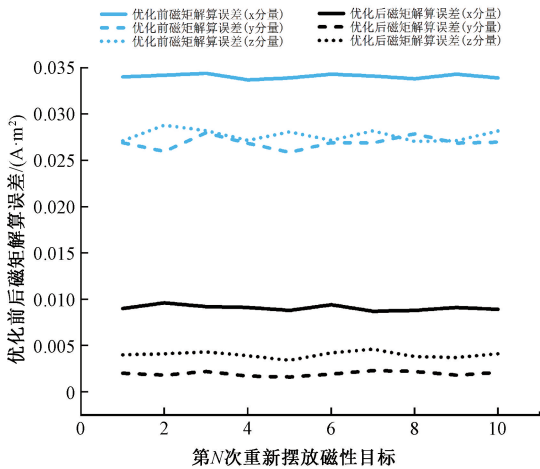


图 9 磁性目标位置与传感器阵列优化前后估计位置对比
Fig. 9 Magnetic target position vs. estimated position before and after sensor array optimization



(a) 优化前后位置估计误差对比
(a) Comparison of position estimation error before and after optimization



(b) 优化前后磁矩估计误差对比
(b) Comparison of magnetic moment estimation error before and after optimization

图 10 阵列优化前后对磁目标参数估计对比
Fig. 10 Comparison of the estimation of magnetic target parameters before and after array optimization

表 1 传感器阵列优化前后对磁目标位置、磁矩估计偏差最大值对比

阵列优化前后	位置偏差最大值/cm			磁矩偏差最大值/($\text{A}\cdot\text{m}^2$)		
	X 轴方向	Y 轴方向	Z 轴方向	m_x	m_y	m_z
阵列优化前	3.37	3.14	3.31	0.034 4	0.027 9	0.028 8
阵列优化后	0.83	0.67	0.77	0.009 4	0.002 0	0.004 1

4 结 论

本文针对磁性目标参数估算时受到观测误差影响导致参数解算可靠性不强的问题,提出基于 GDOP 对传感器阵列布局的优化方法。通过仿真实验,明确了对传感器阵列的几何布局方式;参考圆半径 r 为观测平面的 20%~30%;传感器阵列位于参考圆弧上,且以正三角形排布;参

考圆所在平面与观测平面距离 d 为 0 m。通过试验进行了对磁性目标位置与磁矩的估计,结果表明,经过对传感器布局的优化,对三轴位置坐标估计偏差分别降低 75.37%、78.66%、76.74%,对磁矩矢量估计偏差分别降低 72.67%、92.83%、85.76%。针对磁性目标位置或磁矩估计的问题,本文提出一种面向传感器阵列布局的优化方法,后续还需改变阵列中传感器个数,进一步研究分析其

优化布局。

参考文献

- [1] 张晓明. 地磁导航理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
ZHANG X M. Geomagnetic navigation theory and practice [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [2] 吴卫权. 地磁场中卫星不侧置态下磁矩测试方法[J]. 上海航天, 2014, 31(1): 50-55.
WU W Q. Test technique of magnetic-moment of satellite under upright state in earth's magnetic-field [J]. Aerospace Shanghai, 2014, 31(1): 50-55.
- [3] 张新邦, 陈德祥, 王东盛, 等. 由磁矩计算磁场强度的公式在航天器磁矩测量中的应用[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(2): 214-218.
ZHANG X B, CHEN D X, WANG D SH, et al. Application of the formula for magnetic field intensity based on magnetic moment in spacecraft magnetic moment measurement [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(2): 214-218.
- [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.
- [5] 韩滨澧, 张晓明, 李欣甜. 三维正交线圈磁通信信道稳定性分析[J]. 电子测量技术, 2023, 46(23): 175-180.
HAN B L, ZHANG X M, LI X T. Stability analysis of three-dimensional orthogonal coil magnetic communication channel [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(23): 175-180.
- [6] 向前, 马小龙. 基于磁偶极子模型的水下目标定位与跟踪[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(3): 71-75.
XIANG Q, MA X L. Underwater target passive location and tracking based on magnetic dipole model [J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(3): 71-75.
- [7] 郭鹏飞, 戴厚德, 杨千慧, 等. 融合 DenseNet 和注意力机制的永磁定位方法[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(2): 37-40.
GUO P F, DAI H D, YANG Q H, et al. Permanent magnetic tracking approach based on combining DenseNet and attention mechanism [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(2): 37-40.
- [8] 王姝姝, 戴厚德, 林志榕, 等. 融合注意力机制与神经网络的永磁定位技术[J]. 电气自动化, 2023, 45(4): 105-107, 111.
WANG SH SH, DAI H D, LIN ZH R, et al. Permanent magnet positioning technology integrated with attention mechanism and neural network [J]. Electrical Automation, 2023, 45(4): 105-107, 111.
- [9] 朱明慧, 谷鹏, 高东. 一种基于递推最小二乘法的运动平台剩磁差分测量与估计方法[J]. 空间科学学报, 2024, 44(3): 570-584.
ZHU M H, GU P, GAO D. Remanence model estimation method of geomagnetic navigation carrier based on recursive least square method (in Chinese) [J]. Chinese Journal of Space Science, 2024, 44(3): 570-584.
- [10] 赵高阳, 刘勇, 朱平杰, 等. 基于有限元法的水下航行器地磁异常模拟研究[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(7): 2191-2200.
ZHAO G Y, LIU Y, ZHU P J, et al. Simulation of geomagnetic anomaly of underwater vehicle based on finite element method [J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(7): 2191-2200.
- [11] 刘辉, 钟炆, 吴桐, 等. 基于面磁矩分布的潜艇磁场计算[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(6): 28-32.
LIU H, ZHONG Y, WU T, et al. Submarine magnetic field calculation based on surface magnetic moment distribution [J]. Naval Science and Technology, 2023, 45(6): 28-32.
- [12] 黎威, 龙连春, 刘静毅, 等. 基于机器学习的无机磁性材料磁性基态分类与磁矩预测[J]. 物理学报, 2022, 71(6): 278-285.
LI W, LONG L CH, LIU J Y, et al. Classification of magnetic ground states and prediction of magnetic moments of inorganic magnetic materials based on machine learning [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(6): 278-285.
- [13] 马剑飞, 丁凯, 颜冰, 等. 基于水下运动平台的磁性目标跟踪与特征反演[J]. 兵工学报, 2021, 42(9): 1951-1961.
MA J F, DING K, YAN B, et al. A magnetic gradient tracking method for target tracking and characteristics inversion [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(9): 1951-1961.
- [14] TAN CH, XIN L, CHEN H R, et al. Nonlinear compensation method based on data for increasing absolute measurement precision of FID signal [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.
- [15] GE J, XU W, HU X Y, et al. Intelligent suppression of non-maneuvering magnetic interference of aeromagnetic UAV [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-12.
- [16] 李金朋, 张英堂, 范红波, 等. 基于磁传感器阵列的多磁

源参数反演方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 28-37.

LI J P, ZHANG Y T, FAN H B, et al. Multi magnetic source parameter inversion method based on magnetic sensor array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 28-37.

[17] 王立, 张智鹏, 王海锋, 等. 基于弱磁探测的三相电缆路径快速定位方法[J]. 中国测试, 2024, 50(1): 24-31.

WANG L, ZHANG ZH P, WANG H F, et al. Fast positioning method of three-phase cable path based on weak magnetic field detection[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(1): 24-31.

[18] 马成功, 李丕丁. 基于磁通门传感器的铁磁探测系统设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(19): 175-180.

MA CH G, LI P D. Design of ferromagnetic detection system based on fluxgate sensor [J]. Eletronic Measurement Technology, 2022, 45(19): 175-180.

[19] 马凯, 王习东, 冯文杰, 等. 基于 FPGA 和磁传感器阵列的磁场扫描系统[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 140-147.

MA K, WANG X D, FENG W J, et al. Magnetic field scanning system based on FPGA and magnetic sensor array[J]. Eletronic Measurement Technology, 2022, 45(2): 140-147.

[20] CHEN SH D, ZHANG SH, ZHU J, et al. Accurate measure-ment of characteristic response for unexploded ordnance with transient electromagnetic system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(4): 1728-1736.

作者简介

陈碧聪, 硕士研究生, 主要研究方向为磁异常信号的分解与建模。
E-mail: nuc_bicongchen@foxmail. com

张晓明(通信作者), 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为动态测试与组合导航。
E-mail: zxm_auto@nuc. edu. cn

张鸽, 博士研究生, 主要研究方向为微弱信号处理与智能组合导航。
E-mail: gezhang_auto@163. com

蒋仕龙, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁信号的处理与建模。
E-mail: 1648933931@qq. com