

矢量磁力仪本体磁性现场校正算法研究

章雪挺¹, 王周¹, 张金辉², 吴涛²

(1. 杭州电子科技大学电子信息学院 杭州 310018; 2. 国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

摘要:海洋磁力仪的本体磁性校正是磁力仪应用系统的核心技术,尤其当载体磁性发生改变后,其现场的校正算法是影响其应用有效性的关键。先分析了搭载有三轴磁通门磁力仪的水下勘探系统的主要磁干扰源,描述了相应的磁校正模型,简明扼要地介绍了椭球拟合、粒子群、遗传及粒子群遗传混合等算法,并逐一通过 MATLAB 予以实现。最后使用水下载体在西南印度洋的作业数据对上述算法进行功能性验证。由校正前后的数据波动情况、均方根误差值和相对误差值可知,磁校正领域混合算法校正效果相对较佳,能提高磁力仪传感器的测量有效性。

关键词:磁校正模型;椭球拟合算法;粒子群算法;遗传算法;混合算法

中图分类号: TH766 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.50

Research on intrinsic magnetism in-situ calibration algorithms for vector magnetometer

Zhang Xueting¹, Wang Zhou¹, Zhang Jinhui², Wu Tao²

(1. School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The intrinsic magnetism calibration of the marine vector magnetometer is the core technology for magnetometer application system, especially when the magnetism of the carrier changes; the in-situ calibration algorithm is the key to influence its application effectiveness. This paper analyzes the main magnetic interference sources of the underwater exploration system carrying three axis flux-gate magnetometer firstly, describes corresponding magnetic calibration model, and introduces the ellipsoid fitting algorithm, particle swarm optimization algorithm, genetic algorithm and particle swarm optimization-genetic hybrid algorithm briefly. These algorithms are realized with MATLAB respectively. Finally, the field operation data of the underwater vehicle in the southwest Indian ocean were used to verify the functions of the above algorithms. From the results of the data fluctuation before and after calibration, root-mean-square error and relative error, it can be seen that the hybrid algorithm can get better calibration effect and improve the measurement effectiveness of the magnetometer sensor in the in-situ magnetic calibration.

Keywords: magnetic calibration model; ellipsoid fitting algorithm; particle swarm optimization (PSO) algorithm; genetic algorithm; hybrid algorithm

0 引言

水下磁法勘探技术一般用于矿物勘探、潜艇探测和浅海筑城性工程障碍探测等领域,主要通过处理分析搭载在载体上的磁力仪传感器的测量数据完成。在上述各个现场应用中,地磁场信号和各类磁干扰信号共同组成

了磁力仪传感器的输出。要达到对磁异常区域精准探测的目标,必需先对主要的磁干扰源—水下载体本身和对其拖曳行进时所导致的干扰磁场进行校正。由此可见,校正之前需要分析主要的磁干扰源,使用契合现场应用的校正模型,利用数学理论和部分测量数据求解模型参数。

关于磁力仪的磁校正问题,很多研究者都提出了解

决办法。文献[1]采用了无迹卡尔曼滤波磁强计模型参数估计方法对三轴磁强计的总量及分量误差进行校正;文献[2]引入粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法,将磁校正问题演化为超定方程确定全局最优解的问题;文献[3]提出了基于遗传算法(genetic algorithm, GA)的磁干扰补偿方法;文献[4]提出了两步估计法求解磁力仪的零偏误差、硬磁误差和刻度因子误差。本文将以下水载体在西南印度洋作业区勘探到的磁力数据作为研究对象,寻找适用于水下载体上的磁力仪本体磁性现场校正的算法。

1 磁法勘探系统设计

磁法勘探系统主要由两部分组成:一是三分量磁力数据采集部分,本文采用的三分量磁通门磁力仪传感器输出模拟电压信号,通过信号调理电路和低通滤波电路处理后,再由高精度的24位模数芯片ADS1256实时转换之后传输到MCU中。由于磁力仪传感器的输出电压范围为 $-10 \sim 10 \text{ V}$,本文通过线性调理电路将 $[-10 \text{ V}, 10 \text{ V}]$ 转换成模数转换芯片可测量的 $[0, 5 \text{ V}]$ 。因为磁力仪传感器的有效带宽 $0 \sim 3 \text{ kHz}$,本文设计实现了一个截止频率约为 10 kHz 的有源低通滤波器。二是数据传输和存储部分,一方面MCU通过RS232接口将实时三分量磁力数据传送给水下载体,另一方面MCU通过SPI与SD卡通信,将数据保存备份以便日后数据分析使用。磁法勘探系统框图如图1所示,其中磁力仪数据采集电路板实物如图2所示。

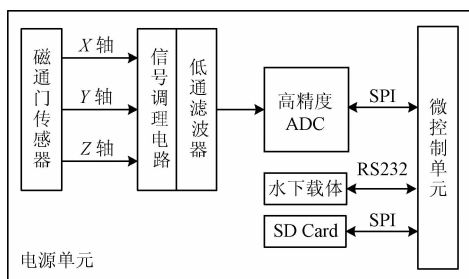


图1 磁法勘探系统框

Fig. 1 Magnetic exploration system block diagram

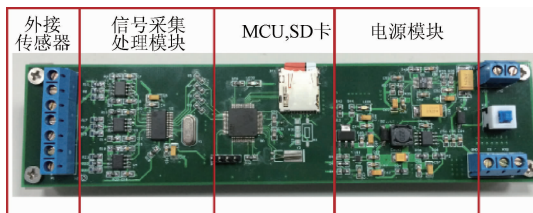


图2 磁力仪数据采集电路板实物

Fig. 2 Photo of the magnetometer data acquisition circuit board

2 误差分析与建模

2.1 误差分析

根据水下磁法勘探系统组成和实际现场应用场景分析,水下勘探系统主要的磁干扰具体来源于:

1) 磁通门磁力仪传感器研制过程产生的非正交误差和刻度因子误差^[5]、组装水下磁法勘探系统过程中出现的安装误差以及载体自身的硬磁误差等。

2) 载体作业过程中存在的测量噪声和外部干扰磁场的耦合效应,比如受外部磁场激励产生的软磁误差等。

在实际的现场应用中,多种干扰源混杂同时作用于磁传感器,降低其测量结果的有效性。本文的作业场地是西南印度洋海底洋中脊,其附近的磁环境稳定,且仅由地磁场和磁异常场组成,所以外部其他环境磁场产生的干扰影响可通过选择 $3\ 000 \text{ m}$ 深海底作为测试区来规避;水下载体所搭载的各类电子电路所导致的软磁误差远远小于地磁场以及硬磁材料的,所以暂时忽略其影响。通过以上的分析,对水下勘探过程中磁力仪传感器的输出量进行建模:

$$\hat{\mathbf{H}}^b = \mathbf{A}_{\text{soft}} \cdot (\mathbf{H}_e^b + \mathbf{H}^b_{\text{hard}}) + \mathbf{H}^b_{\text{hard}} + \mathbf{w}^b \quad (1)$$

式中: \mathbf{H}_e^b 表示载体坐标系下的真实矢量磁场的三分量强度, $\hat{\mathbf{H}}^b$ 为磁力仪传感器测量结果, \mathbf{w}^b 为测量噪声。 $\mathbf{H}^b_{\text{hard}}$ 表示载体硬磁误差,主要源自永磁体和高碳钢等硬磁性材料,其值不是时间函数且不因载体运动而改变,可认为是常量,用列向量 $[\mathbf{H}^b_{\text{hard}x}; \mathbf{H}^b_{\text{hard}y}; \mathbf{H}^b_{\text{hard}z}]$ 表示。

软磁系数矩阵 $\mathbf{A}_{\text{soft}} = \mathbf{C}_M \cdot \mathbf{C}_{N0} \cdot \mathbf{C}_{SF}$ 。由于没有精准的空间位置观测仪器,矢量磁力仪传感器安装过程中,传感器坐标系与载体坐标系会存在微小位置偏移,表示为安装误差矩阵 \mathbf{C}_M 。若安装误差角为 $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$,则 \mathbf{C}_M 可表示为:

$$\mathbf{C}_M = \begin{bmatrix} 1 & -\sin\Delta z & \sin\Delta y \\ -\sin\Delta z & 1 & -\sin\Delta x \\ \sin\Delta y & -\sin\Delta x & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

因为材料特性的差异和制造技术的限制,传感器的3个轴非严格正交且三轴敏感度存在细微的差异^[6],导致了非正交误差矩阵 \mathbf{C}_{N0} 和刻度因子误差向量 \mathbf{C}_{SF} 。设载体所在的地理坐标系的3个轴为 OX, OY, OZ ,磁力仪的实际坐标轴为 OX', OY', OZ' 。实际安装过程中可使两个坐标系的 Y 轴重合, X 平面共面。另外令 OX 轴与 OX' 夹角为 β , OZ 轴与 $X'OZ'$ 夹角为 γ , OZ 轴与 $Y'OZ'$ 轴夹角为 α ^[7],此时2个坐标系关系如图3所示。

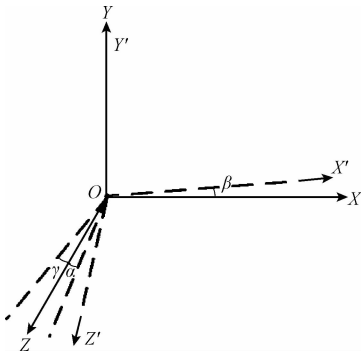


图 3 矢量磁力仪非正交误差

Fig. 3 Vector magnetometer non orthogonal error

非正交误差矩阵 C_{NO} 表示为:

$$C_{NO} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\gamma & \sin\gamma & \sin\alpha\cos\gamma \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

刻度因子误差向量 C_{SF} 由各轴的敏感度决定, 可定义为 $\text{diag}(s_x, s_y, s_z)$, 其中 s_j 为传感器轴的灵敏度值。假设安装误差角为 $[1.2 \quad -1.4 \quad 0.3]^T$ 并参考三轴磁通门磁力仪传感器产品说明可知如下误差:

$$C_M = \begin{bmatrix} 1 & -0.0052 & -0.0244 \\ -0.0052 & 1 & -0.0209 \\ -0.0244 & -0.0209 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_{NO} = \begin{bmatrix} 0.9998 & 0.0052 & 0.0209 \\ 0 & 0.9997 & 0.0244 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C_{SF} = \text{diag}[1.12 \quad 1.01 \quad 0.96] \quad (6)$$

计算得:

$$A_{\text{soft}} = \begin{bmatrix} 1.1198 & 0.0002 & -0.0035 \\ -0.0058 & 1.0097 & 0.0033 \\ -0.0273 & -0.0212 & 0.9590 \end{bmatrix} \quad (7)$$

硬磁误差的量化值与作业过程中载体自身相关, 测量噪声的量化值与作业环境有关。由于本文涉及的作业环境较难对上面两种误差进行实测, 所以 H_e^b 难以通过代数方法求得, 需要进一步分析式(1)。

2.2 校正模型

建立磁校正模型的目的是根据载体运动时采集到的磁力数据, 降低磁干扰源的影响, 从而得到更可信的区域磁场测量结果。由于水下磁法勘探的工程需要, 载体要在海底 3 000 m 深度下行进。海底环境较为稳定, 测量噪声的量级较小, 所以在建立校正模型时不考虑 w^b 的影响。针对上文所描述的磁干扰, 可按照磁力仪传感器输出量模型逆推出其校正模型。令式 $H_{\text{hard}} = (A_{\text{soft}} + I_{3 \times 3}) \cdot H_{\text{hard}}^b$, 校正模型以传感器的输出 \hat{H}^b 作为输入, 校正模型输出为地磁场的估计值 \hat{H}_e^b 。模型关系式如下:

$$\hat{H}_e^b = A_{\text{soft}}^{-1} \cdot (\hat{H}^b - H_{\text{hard}}) \quad (8)$$

文献[7]提出当地磁场的模值若是常值, 此时取模观测方程成立:

$$\|\hat{H}_e^b\| = \|A_{\text{soft}}^{-1} \cdot (\hat{H}^b - H_{\text{hard}})\| \quad (9)$$

在实际现场应用过程中很难得到某区域的常值地磁场值。通常, 水下载体在作业过程中下潜到一定海深时可认为附近海域是地磁平静地区, 即地磁场值为常值。这时可用工作区的国际地磁标准场计算的正常场近似代替 $\|\hat{H}_e^b\|$ 。所以可利用上述取模观测方程去估算未知参数矩阵 A_{soft} 及 H_{hard} 。

至此, 磁力仪校正问题转变为多参数估计问题。在式(9)中, A_{soft}^{-1} 为 3×3 可逆矩阵, H_{hard} 为 3×1 矩阵, 此时解的维度达到 12 维。当解空间的维度过高时, 不易求解方程, 通过 QR 分解理论对矩阵 A_{soft}^{-1} 进行分解, 降低维度。 A_{soft}^{-1} 分解为:

$$A_{\text{soft}}^{-1} = Q \cdot R \quad (10)$$

式中: Q 为正交矩阵, R 为正上三角矩阵, 因为正交矩阵的性质: $\|Q\| = 1$, 将式(10)代入式(8)、(9)可得:

$$\hat{H}_e^b = Q \cdot R \cdot (\hat{H}^b - H_{\text{hard}}) \quad (11)$$

$$\|\hat{H}_e^b\| = \|R \cdot (\hat{H}^b - H_{\text{hard}})\| \quad (12)$$

此时解空间的维度为 $\text{dim}(\ast) = \text{elements}(R) + \text{elements}(H_{\text{hard}}) = 6 + 3 = 9$ 。下文将使用不同的算法对方程(12)进行求解。

3 磁校正算法

3.1 椭球拟合算法

由 $Q^T \cdot Q = E$ 和式(11)可得:

$$\|\hat{H}_e^b\|^2 = \hat{H}^{bT} \cdot \hat{H}_e^b =$$

$$(\hat{H}^b - H_{\text{hard}})^T \cdot R^T \cdot R \cdot (\hat{H}^b - H_{\text{hard}}) \quad (13)$$

此方程形式与标准椭球面方程的矢量形式 $(L - L_0)^T \cdot A \cdot (L - L_0) = 1$ ^[8] 相似。同时将式(7)展开为:

$$a_1x_i^2 + a_2x_iy_i + a_3x_iz_i + a_4y_i^2 + a_5y_iz_i + a_6z_i^2 + a_7x_i + a_8y_i + a_9z_i + a_{10} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

式中: x_i, y_i, z_i 为磁力仪传感器的输出 \hat{H}^b 的 3 个分量, $a_1 \sim a_9$ 是组成 R, H_{hard} 校正矩阵的参数。本文比较式(13)、(14)可知:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & \frac{a_2}{2} & \frac{a_3}{2} \\ 0 & a_4 & \frac{a_5}{2} \\ 0 & 0 & a_6 \end{bmatrix}, \quad L_0 = -A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{a_7}{2} \\ \frac{a_8}{2} \\ \frac{a_9}{2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

由式(14)可知方程数远大于未知数个数, 这属于模式辨识的过度识别范畴, 可用似然拟合的方法求解。根

据文献[8]提出进行椭球曲面拟合时,以测量数据到拟合椭球中心点间的距离最小为评判准则,再根据高斯-马尔科夫定理和最小二乘估计法可得到拟合椭球曲面方程参数。最后本文根据关系式 $\mathbf{A} = \frac{\mathbf{R}^T \cdot \mathbf{R}}{\|\hat{\mathbf{H}}^b\|^2}$, $\mathbf{L}_0 = \mathbf{H}_{\text{hard}}$ 可解得校正参数,代入磁校正模型后可求得校正后的地磁场估计值。

3.2 粒子群算法

由 Kennedy J 和 Eberhart R 博士发明的粒子群算法,把问题的求解看作是鸟群在寻找食物,飞鸟就相当于在解空间中搜索的一个粒子,每个粒子的位置代表着一种可能解。该算法在非线性的寻优问题上表现出了非常强的搜索全局最优能力。磁力仪校正问题相当于超定方程的求解问题,可用粒子群算法的寻优思想去求解。

本文在 9 维解空间中,用随机线性插值法为每个粒子初始化位置和速率,生成由 m 个粒子组成的一个种群,表示为:

$$\mathbf{M} = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_{i-1}, X_i] \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (16)$$

初始化完成后不断迭代,第 i 个粒子在第 t 次迭代位置为:

$$\mathbf{X}_i(t) = [x_{i1}(t), x_{i2}(t), x_{i3}(t), \dots, x_{i9}(t)] \quad (17)$$

第 i 个粒子在第 t 次迭代中速率为:

$$\mathbf{V}_i(t) = [v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \dots, v_{i9}(t)] \quad (18)$$

本文通过每一次迭代后各粒子的位置计算适应度值,用来评价解的品质并更新当前 t 时刻粒子的两个极值:个体极值 P_{best} 和群体极值 G_{best} ^[9]。每个粒子需要不断地朝 P_{best} 和 G_{best} 所指向的位置靠近。第 $t+1$ 次迭代中,本文使用如下式更新种群中粒子:

$$\mathbf{V}_i(t+1) = w \cdot \mathbf{V}_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{\text{best}_i}(t) - \mathbf{X}_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G_{\text{best}}(t) - \mathbf{X}_i(t)) \quad (19)$$

$$\mathbf{X}_i(t+1) = \mathbf{X}_i(t) + \mathbf{V}_i(t+1) \quad (20)$$

式中: r_1, r_2 是 $[0, 1]$ 的随机数^[10], c_1, c_2 为学习因子,主要调整粒子飞行的步长。一般的,惯性权重 w 被设为常数,一般在 $0.1 \sim 0.98$ 取值。但本文将 w 按如下公式设置^[11]:

$$w = w_{\text{max}} - (w_{\text{max}} - w_{\text{min}}) \cdot \text{currentLoop}/\text{maxLoop} \quad (21)$$

本文取 $w_{\text{max}} = 0.95$, $w_{\text{min}} = 0.4$ 。可见粒子速度的变化可通过迭代次数自动调整。针对磁校正模型,本文构造适应度函数如下:

$$f(\mathbf{R}, \mathbf{H}_{\text{hard}}) =$$

$$\min \left[\sum_{i=1}^N (\|\mathbf{R} \cdot (\hat{\mathbf{H}}^b - \mathbf{H}_{\text{hard}}) - \hat{\mathbf{H}}^b\|^2) \right] \quad (22)$$

通过适应度函数将磁校正问题转换为一个寻找全局最优解的问题。式中 \mathbf{R} 和 \mathbf{H}_{hard} 为需要求解的校正矩阵,

存在着 9 维未知参数。 N 为水下载体作业时的数据采样总数。

3.3 遗传算法

遗传算法是从初代种群出发,每代按照个体的适应度挑选优秀基因的个体,借助遗传算子进化出新的种群。最后一代最优的个体即问题的理论最优解。遗传算法具备多处寻优等优点,其寻优方式不依赖于问题的数学表达式,可用于非线性系统的参数估计。遗传算法的主要过程如下。

1) 编码,本文将磁校正模型中 \mathbf{R} 和 \mathbf{H}_{hard} 含有的 9 个未知数看作一条染色体上的 9 段基因,根据约束条件对种群中的所有基因采用实数编码初始化。

2) 计算适应度,适应度函数的选取影响算法的收敛性。本文所讨论的遗传算法建立如下式适应度函数:

$$G(X) = \frac{1}{1 + f(\mathbf{R}, \mathbf{H}_{\text{hard}})} \quad (23)$$

将个体对应的编码值代入得到第 k 代种群的第 i 个个体的适应度值 $G_i^{(k)}(X^{(k)})$, 并由此求得第 k 代的平均适应度值 $\bar{G}^{(k)}$ 。

3) 选择,文献[12]提出根据适应度值计算各个个体的选择概率 P_{i1} , 继而求得累加概率 P_{i2} 作为选择区间。本文在每一轮中随机选取一个 $0 \sim 1$ 的数再叠加上一大步长的倍数如 $(\frac{2}{\text{SwarmSize}}, \text{SwarmSize}$ 为种群规模) 作为选择指针来确定个体进行下面的演化。

4) 交叉,从种群中随机选择两个个体,根据交叉概率判断是否采取交叉操作,利用交叉算子线性组合两个个体形成新个体。

5) 变异,从种群中随机选取个体,由变异概率判断是否采取变异操作。将个体编码串按变异算子计算得到的一个很小值 Δ 增加或减少,从而得到新个体。

重复步骤 3) ~ 5) 至预设的最大代数为止,最后输出最优解。

在参数设置中,若交叉概率 P_c 过大时,优秀基因很可能被破坏; P_c 过小会减缓搜索。若变异概率 P_m 过小则较难产生新基因; P_m 过大,算法就退化为纯粹的搜索算法^[12]。Srinvas M 等人^[13]提出的普通自适应遗传算法 (adaptive genetic algorithm, AGA) 能够根据个体适应度值自动调节 P_c 和 P_m 。本文采取文献[14]改进型的 AGA 来提高优秀个体的存活率和种群多样性,增强局部搜索能力。

3.4 粒子群遗传混合算法

粒子群算法早期会出现精度较低,易发散等不足。在后期,粒子趋于同一化,使得收敛速度显著变慢,当收敛到一定精度时,由于没有继续优化的趋势而陷入局部最优解中。另外,实现遗传算法的编程比较复杂,先要对

问题编码,寻得最优解之后还需要解码。遗传算法的交叉变异策略对初代种群的选择策略有一定的依赖性。而实现选择策略需要的参数大多依靠经验确定,需要结合一些启发式算法进行完善。针对上述算法的缺点,文献[15]提出了基于粒子群和遗传算法的混合算法,并用于泊车系统的路径规划研究。

根据磁力仪现场数据的历史校正效果,本文提出采用粒子群遗传混合算法(particle swarm optimization genetic algorithm, PSOGA)算法的一种实现方式,并首次应用于磁力仪的本体磁性校正。具体做法是在前述的粒子群算法中速率和位置更新之后再行进行自适应遗传算法的交叉和变异策略,之后用计算交叉变异后的粒子适应度值作为判据来更新粒子的速率和位置。这相当于在粒子群进化过程中引入一种突变,使其能跳出局部最优的境地,也相当于原有的遗传算法采用了较成功的选择策略。同时,2种算法混合后交叉和变异操作是有可能破坏粒子群算法更新过程中的优秀个体基因而错过最优解。所以,本文在每次迭代后对个体按适应度从小到大进行排列,保留前一半个体较为优良的基因,只对后一半个体基因进行交叉和变异操作以期产生更为优良的基因。流程如图4所示。

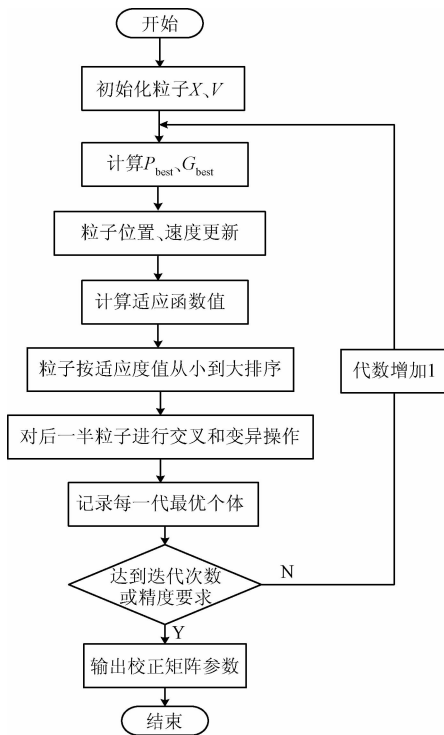


图4 PSOGA 算法流程

Fig. 4 The flow chart diagram of the PSOGA algorithm

4 现场试验与数据分析

4.1 现场试验

在水下磁法勘探过程中,由于载体所带电池、铁磁性材料等引起的各种硬磁和软磁干扰较为复杂,对后期现场磁力数据分析带来困难。为了尽量降低载体本体磁性的影响,将磁力仪安装在载体尾部或与载体拉开一定距离。西南印度洋作业过程中,磁力仪传感器搭载在水下载体尾部。水下载体在西南印度洋作业区勘探时,经历4个过程:无动力下潜、螺旋旋转、梳状轨迹勘探、无动力上浮。其中无动力下潜过程的磁力数据质量较差,对磁力数据校正也无作用。

螺旋旋转具体是载体下潜到3 000 m 海深后悬停,利用舵角使水下载体以O 字型围绕一个中心点进行旋转1 h 左右,再继续下潜至指定海深沿着梳状测线进行探测。水下载体螺旋旋转过程中,地磁场值可认为是常值,可用取模观测方程来求解磁校正矩阵。在本航次的西南印度洋作业中,水下载体共下潜了6次。本文提取了6组勘探作业中的螺旋旋转时探测到的磁力数据,并分别以这些数据为研究对象先后对文中所涉及的算法进行了功能性验证。结果发现每组数据验证的效果类似。所以本文就其中一组数据验证的结果作具体说明。

4.2 数据分析与算法验证

椭球拟合算法校正结果如图5所示。由图5可知,校正结果并不理想。查阅文献知,大多数描述的椭球拟合算法验证试验都是在一个纯净磁场环境中且不搭载载体的情况下进行,比如在手动无磁转台上进行360°旋转测试。若将水下磁法勘探系统在实验室做旋转测试,有两点存疑:1)研制可容纳整个水下勘探系统的三轴旋转平台不具有可操作性^[16]。载体在进行水下勘探时,很难像在实验室一样进行全空间测试。2)洁净的磁场环境下,椭球模型是时不变的。而在实际现场应用中,系统的椭球模型会发生变化,例如水下载体在旋转过程中无法控制椭球原点固定不变。而相对于粒子群和遗传算法,椭球拟合算法更依赖于模型的建立。由此可见,椭球拟合算法并不适用于水下运动载体的本体磁性校正。如果要使用椭球拟合算法分析时,需要对数据分段。结果如图6所示。

显然,分段校正的效果较为显著。但如果要对数据进行分段分析,分段点的选取又会成为影响校正效果的重要因素。

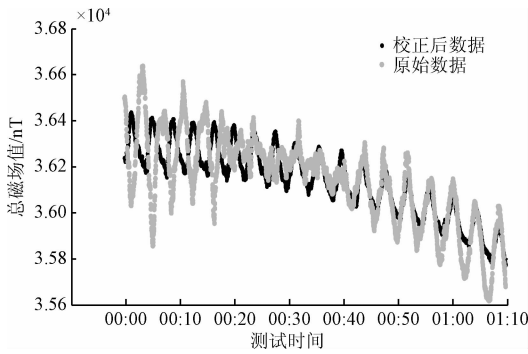


图5 椭球拟合算法校正结果

Fig. 5 The calibration result diagram of the ellipsoid fitting algorithm

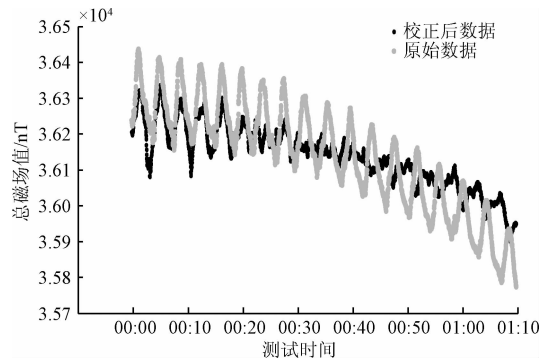


图8 粒子群算法校正结果

Fig. 8 The calibration result diagram of the particle swarm optimization algorithm

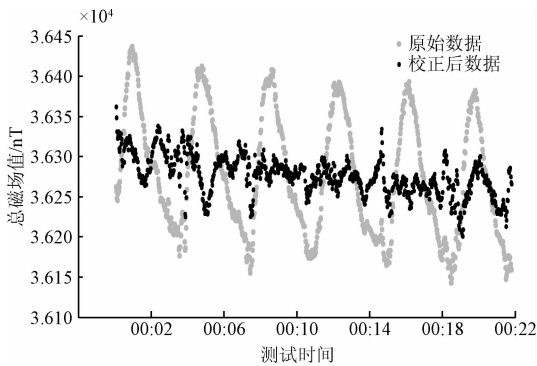


图6 椭球拟合算法分段校正结果

Fig. 6 Segmentation calibration result diagram of the ellipsoid fitting algorithm

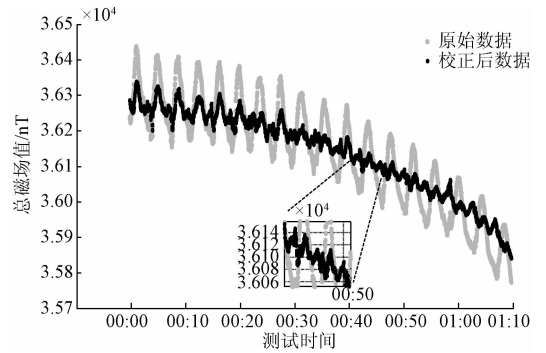


图9 PSOGA 算法校正结果

Fig. 9 The calibration result diagram of the PSOGA algorithm

遗传算法、PSO 算法和 PSOGA 算法校正的结果图分别如图 7~9 所示。其中个体数取 100 个,迭代总数为 200 次。

由图 7~9 可知,PSOGA 算法校正的效果最佳,遗传算法效果次之,放大 PSOGA 算法的部分校正结果可见校正前 250 nT 数据波动最低可降至 35 nT 以内。

本文通过观测每次迭代的磁校正值与此区域常值地磁场值的均方根值 (root mean squared error, RMSE) 来评估算法的收敛情况,具体如图 10 所示。

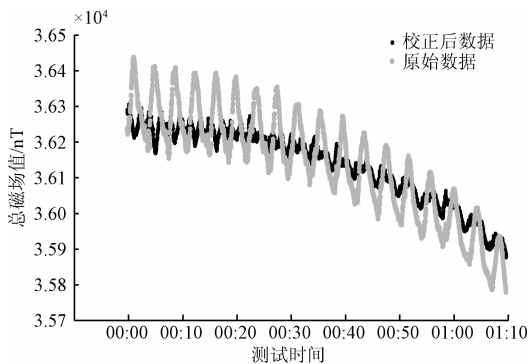


图7 遗传算法校正结果

Fig. 7 The calibration result diagram of the genetic algorithm

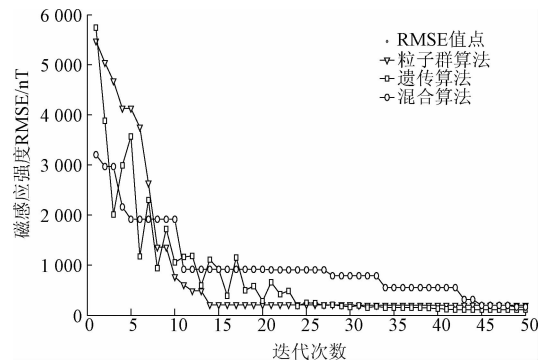


图10 三种算法收敛性能

Fig. 10 Convergence performance diagram of the 3 algorithms

图 10 中个体数取为 100 个,迭代次数从 1~50 不等。由图 10 可知,粒子群算法早期收敛速度较快,但在

算法的后期基本不变动,无法继续优化。遗传算法在收敛过程中时有反弹现象出现,这与 3 个基本策略以及参数的选择有关,在算法后期优化效果也不明显。PSOGA 算法第 1 代的 RMSE 值就相对较低,一直平稳收敛,后期存在着继续优化的趋势。图 10 的结果也受个体数和最大迭代次数影响。

本文通过计算磁校正值与磁力仪输出值的相对误差来评判估计值的可信程度。选取种群规模为 100 个个体,结果如图 11 所示。

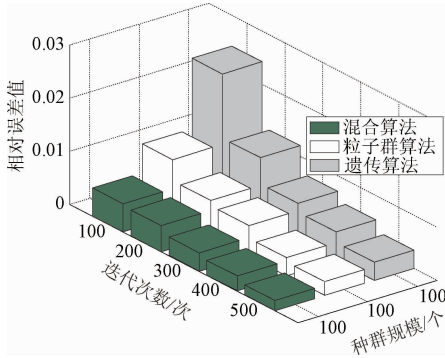


图 11 三种算法相对误差值

Fig. 11 Relative error value diagram of 3 algorithms

由图 11 可知,随着迭代次数的上升,相对误差下降,说明迭代次数越多,算法校正后得到的估计结果越可靠有效。同时可知相同迭代次数和种群规模下,PSOGA 算法结果的相对误差值比另外两种算法低。实际上,对比图 7~9 的校正前后数据的波动情况可知,PSOGA 算法校正的结果较其他两种好;理论上,PSOGA 算法的粒子群更新策略避免了遗传算法早期的随机性和盲目性;PSOGA 算法通过交叉变异操作避免粒子群算法早熟收敛。综上所述,针对本体磁性现场校正难题,本文所涉及的几种算法中,PSOGA 算法结果的可信度相对较高,更适合于工程应用。

本次水下载体以约 $1^\circ/\text{s}$ 的角速度进行螺旋旋转,对于校正前后的误差量结果,本文每隔 10 s 提取一次磁力仪数据,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,3 种算法校正后的误差量波动不大。其中 PSOGA 校正后地磁总场值最为稳定且误差量最小可减少到 30.5 nT。而校正前误差量最大可达 292.4 nT,所以使用 PSOGA 算法校正可将测量误差减少 89.7%,大大提高了测量的有效性。

表 1 校正前后结果及误差对比

Table 1 The results before and after calibration and error comparison (nT)

位置	校正前		校正后		
	地磁总场值	误差	误差		
			PSO	GA	PSOGA
1	36 044.9	96.1	60.5	46.2	37.3
2	36 034.7	106.3	66.1	50.4	42.6
3	36 284.0	143.0	74.2	55.8	46.5
4	36 330.9	189.9	80.3	61.8	50.0
5	36 398.0	257.0	86.2	67.5	53.3
6	36 433.4	292.4	92.4	72.1	57.8
7	36 403.5	262.5	89.6	68.0	54.4
8	36 347.1	206.1	81.0	66.8	49.1
9	35 980.8	160.2	72.7	60.3	44.2
10	35 994.1	146.9	67.8	53.0	40.7
11	36 261.1	120.1	60.3	46.5	35.1
12	36 042.8	98.2	53.0	40.4	31.5
13	36 241.5	100.5	59.1	45.4	34.9
14	36 242.3	101.3	62.8	48.0	37.0
15	36 258.6	117.6	68.4	52.2	42.4
16	36 303.1	162.1	75.9	59.7	47.4
17	36 341.6	200.6	80.2	64.8	50.3
18	36 387.7	246.7	86.2	68.3	53.6
19	36 409	268	89.8	70.2	55.9
20	36 398.9	257.9	87.6	71.6	52.7
21	36 376.3	235.3	84.6	68	50.8
22	35 936.7	204.3	79.6	65.9	47.0
23	35 951.7	189.3	73.4	61.1	45.2
24	35 970.4	170.6	70.5	58.3	42.1
25	36 292.1	151.1	66.5	55.3	40.5
26	36 007.5	133.5	62.9	50.8	38.6
27	36 259.2	118.2	54.3	44.5	34.6
28	36 240.0	99.0	52.1	41.6	30.5
29	36 251.4	110.4	57.1	49.8	32.9
30	36 274.5	133.5	60.2	58.2	37.5

5 结 论

本文提出并实现粒子群算法和遗传算法的一种混合方式,即文中涉及的 PSOGA 算法。针对磁法勘探系统的

磁模型,本文根据水下载体在西南印度洋“断桥”作业区测得的磁力数据对4种算法进行验证发现:一般的椭球拟合算法不太适用于磁力仪传感器的本体磁性现场校正;而使用PSOGA算法校正后的结果相对较好,有效降低了磁干扰对磁法勘探的影响,提高了测量结果的有效性。所以PSOGA算法应用于磁校正领域可以更好地发挥矢量磁力仪传感器的功能和优势,为其本体磁性现场校正难题提供了一个解决方案。

参考文献

- [1] 庞鸿锋,潘孟春,陈棣湘,等. 基于无迹卡尔曼滤波和设备的三轴磁强计校正[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8):1800-1805.
PANG H F, PAN M CH, CHEN D X, et al. Error calibration of three axis magnetometer based on UKF and equipment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8):1800-1805.
- [2] RIWANTO B A, TIKKA T, KESTIL A, et al. Particle swarm optimization with rotation axis fitting for magnetometer calibration [C]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2017:99.
- [3] 伍东凌,陈正想,王秀. 基于遗传算法的磁干扰补偿方法[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(6):16-20.
WU D L, CHEN ZH X, WANG X. Magnetic interference compensation method of genetic algorithm[J]. Journal of Detection & Control, 2012, 34(6):16-20.
- [4] FOSTER C C, ELKAIM G H. Extension of a two-step calibration methodology to include nonorthogonal sensor axes[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2008, 44(3):1070-1078.
- [5] 韩维维,杨晓非,欧阳君,等. 环形磁通门的非线性误差及补偿技术[J]. 电子测量技术, 2013, 36(3):98-101.
HAN W W, YANG X F, OUYANG J, et al. Modeling and compensation of ring-core fluxgate's nonlinear error[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(3):98-101.
- [6] 龙礼,黄家才. 基于递推最小二乘法的地磁测量误差校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6):1440-1446.
LONG L, HUANG J C. Recursive least square based online error calibration method in geomagnetic detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6):1440-1446.
- [7] 吴志添,武元新,胡小平,等. 基于总体最小二乘的捷联三轴磁力仪标定与地磁场测量误差补偿[J]. 兵工学报, 2012, 33(10):1202-1209.
WU ZH T, WU Y X, HU X P, et al. Calibration of strapdown three-axis magnetometer and measurement error compensation of geomagnetic field based on total least squares [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(10):1202-1209.
- [8] 龙达峰,刘俊,张晓明,等. 基于椭球拟合的三轴陀螺仪快速标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6):1299-1305.
LONG D F, LIU J, ZHANG X M, et al. Triaxial gyroscope fast calibration method based on ellipsoid fitting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6):1299-1305.
- [9] 张萍,魏平. 基于变异粒子群的快速运动估计算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(1):23-28.
ZHANG P, WEI P. Fast motion estimation algorithm base on particle swarm optimization with mutation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(1):23-28.
- [10] 焦巍,刘光斌,张金生,等. 基于粒子群算法的地磁匹配航迹规划 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(11):2106-2111.
JIAO W, LIU G B, ZHANG J SH, et al. Geomagnetic matching path planning based on PSO algorithm [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(11):2106-2111.
- [11] 苗静,姚金杰,苏新彦. 基于改进惯性权重 PSO 算法的目标位置测量技术[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(2):23-25.
MIAO J, YAO J J, SU X Y. A target location measurement method based on an improved inertia weight particle swarm optimizer algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2010, 29(2):23-25.
- [12] 卢兆兴,张金生,王仕成,等. 基于自适应遗传算法的三轴磁强计误差校正方法[J]. 传感技术学报, 2014, 27(3):331-336.
LU ZH X, ZHANG J SH, WANG SH CH, et al. Calibration for triaxial magnetometer based on adaptive genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(3):331-336.
- [13] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. IEEE

Transactions on Systems Man & Cybernetics, 1994, 24(4):656-667.

- [14] 王军号, 孟祥瑞. 一种基于改进遗传 RBF 神经网络的传感器动态特性补偿算法[J]. 传感技术学报, 2010, 23(9):1298-1302.

WANG J H, MENG X R. A dynamic compensation algorithm based on improved genetic-RBF neural network for sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(9):1298-1302.

- [15] 王辉, 朱龙彪, 朱天成, 等. 基于粒子群遗传算法的泊车系统路径规划研究[J]. 工程设计学报, 2016, 23(2):195-200.

WANG H, ZHU L B, ZHU T C, et al. Research on path planning of parking system based on PSO-genetic hybrid algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2016, 23(2):195-200.

- [16] 章雪挺, 陈鹰, 唐勇, 等. 海底三分量磁力仪载体固有磁性的现场校正算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7):1497-1509.

ZHANG X T, CHEN Y, TANG Y, et al. In-situ calibration algorithm of intrinsic magnetism for seafloor three-component magnetometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7):1497-1509.

作者简介



章雪挺, 2000 年于西安交通大学获得学士学位, 分别在 2003 年和 2017 年于浙江大学获得硕士学位和博士学位, 现为杭州电子科技大学副教授, 主要研究方向为地磁传感与测量技术、海洋技术装备系统集成。

E-mail: zxt@hdu.edu.cn

Zhang Xueting received B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2000, M. Sc. and Ph. D. degrees both from Zhejiang University in 2003 and 2017, respectively. Now he is an associate professor in Hangzhou Dianzi University. His main research interests include geo-magnetic sensors and measurement technique, system integration of ocean equipment, and etc.



王周, 2015 年于杭州电子科技大学获得学士学位, 现为杭州电子科技大学硕士研究生, 研究方向为电子系统集成。

E-mail: 1024856165@qq.com

Wang Zhou received his B. Sc. degree from Hangzhou Dianzi University in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in Hangzhou Dianzi University. His main research interest is electronic system integration.