

舰艇磁性检测中矢量磁传感器的姿态校正

朱兴乐

(中国人民解放军 91336 部队, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 舰艇磁性检测中矢量磁传感器的姿态倾斜将导致测量不准确, 为此提出了一种矢量磁传感器的姿态校正方法; 通过在倾斜磁传感器位置紧密放置一标准磁传感器, 以标准测量值为依据采用 APO 算法反推得出倾斜传感器的姿态角矩阵, 根据此矩阵对倾斜传感器测量值进行修正可得到较准确的舰艇磁场测量值; 通过仿真和船模实验对该方法进行了验证, 实验表明测量精度有了较大改善; 该方法可用于工程实际, 为提高舰艇磁性检测的精度提供了有益思路。

关键词: 磁场测量; 舰艇磁场; 磁传感器; 姿态角; APO

Attitude Correction of Vector Magnetometer in Measurement of Ship's Magnetic Field

Zhu Xingle

(Troops 91336 of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Incorrect measurement would occur when vector magnetometer is slanting in ship's magnetic measuring, thus a method is proposed to correct attitude of magnetometer. A standard magnetometer is placed closed with the declining magnetometer, and APO arithmetic is used to calculate matrix of attitude angle taking standard measured value as criterion, then accurate value of ship's magnetic field can be got by revising measured value of slanting magnetometer based on the matrix. The method is verified by simulation and ship model's experiment, and the result indicated that the measured precision is improved greatly. The method can be applied to engineering and supports a path for improving the precision of ship's magnetic measurement.

Keywords: magnetic measurement of field; ship magnetic field; magnetometer; attitude angle; APO

0 引言

水面舰艇的船体主要由钢铁建造, 在地磁场作用下会被磁化从而产生舰艇磁场, 为获得准确的舰艇磁场信息, 一般通过将矢量磁传感器安放于舰艇周围以进行舰艇磁性检测。舰艇磁性检测一般分为静态磁性检测与动态磁性检测^[1-3], 如大平面布阵测量、测量环检测法和移动式检测等方式, 其中大平面布阵法通过在海底布置大规模的磁传感器阵列以获得固定深度下的舰艇磁场测量值; 测量环检测法将磁传感器环形排列, 当舰艇行驶在测量环内可获得舰艇空间包络面上的磁场信息; 移动式检测法通过将少数磁传感器在舰艇下方等距水平排列, 具有快速布置、方便使用的特点。在上述方式中为保证磁测量数据的准确性, 都要求磁传感器具有较高的安装精度, 即磁传感器坐标系与设定的主坐标系一致, 然而在海洋环境背景下矢量磁传感器受到冲击、震动时姿态会发生变化, 从而导致磁场测量的准确度下降, 且由于磁传感器已密封安装, 其姿态难以通过物理方式校正, 因此需要定期对磁传感器进行姿态校正, 以保证舰艇磁性检测的精度。

目前舰艇磁性检测中对于磁传感器的姿态校正一般不考虑垂直方向, 而多注重水平方向姿态变化^[4-5], 如文献[5]通过对舰艇磁场进行建模, 以模型拟合误差为适应度采用遗传算法得出了较高精度的水平偏转角。实际中矢量磁传感器受外部影响会发生倾斜、偏转, 将与设定坐标系间产生 3 个不同方向姿态角, 为贴近实际本文对 3 个姿态角综合考虑, 提出了一种针对水下矢量磁传感器姿态校正的新方法, 通过在倾斜磁传感器附近放置一标准磁传感器, 以标准测量值为依据采用 APO 混合算法对倾斜测量值求解, 得出了磁传感器在 x 、 y 、 z 三个方向上的姿态偏转角, 并可对磁测量数据进行修正, 获得准确的磁场测量信息, 从而提高了舰艇磁性检测中矢量磁传感器的测量精度。本文通过仿真证明了该方法的正确性, 并在船模实验中进行了具体分析验证。

1 舰艇磁性检测模型

在舰艇磁性检测中矢量磁传感器固定封装于海底固定点处, 舰艇在海面上沿直线匀速行驶。在仿真验证中通过单椭球体加磁偶极子阵列混合模型进行模拟舰艇磁场, 根据混合模型的计算公式可获得磁传感器所在位置的舰艇磁场强度, 将其作为标准磁传感器的测量真值, 并通过姿态变换方程可得出倾斜磁传感器的测量值, 对此模拟测量数据进行可反推算出姿态偏转角, 将磁测量校正结果与磁场真值比较以验证此方法的正确性。

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277176)。

作者简介: 朱兴乐(1985-), 男, 江苏徐州人, 博士, 工程师, 主要从事舰船磁场分析及海洋地磁场测量方向的研究。

1.1 舰艇磁场模型

采用单椭球体与磁偶极子阵列混合模型模拟舰艇磁场，具体如图 1 所示。椭球体用来模拟舰艇的主磁场，其长半轴 $a=L/2$ (L 为舰艇纵向长度)，短半轴 $b=B/2$ (B 为舰艇横向长度)，椭球心与舰艇中心重合。磁偶极子阵列用来模拟舰艇的局部磁场， N 个磁偶极子在舰艇长轴上均匀分布 (N 取奇数)，相邻两磁偶极子间隔为 $c=L/(N-1)$ ，则第 i 个磁偶极子坐标表达为 $[(i-(N+1)/2)c, 0, 0]$ 。

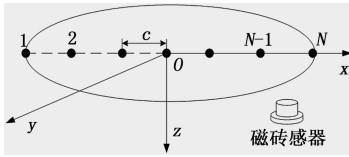


图 1 舰艇磁场模型

设定椭球体磁矩为 $\mathbf{M}_0 = [M_{x_0}, M_{y_0}, M_{z_0}]$ ，第 i 个磁偶极子的磁矩为 $\mathbf{M}_i = [M_{x_i}, M_{y_i}, M_{z_i}]$ ，则 t_j 时刻磁传感器位置处的舰艇磁场大小为 $\mathbf{H}_j = [H_{x_j}, H_{y_j}, H_{z_j}]^{[6]}$

$$\begin{cases} H_{x_j} = \sum_{i=0}^N (a_{xji}M_{x_i} + a_{yji}M_{y_i} + a_{zji}M_{z_i}) \\ H_{y_j} = \sum_{i=0}^N (b_{xji}M_{x_i} + b_{yji}M_{y_i} + b_{zji}M_{z_i}) \\ H_{z_j} = \sum_{i=0}^N (c_{xji}M_{x_i} + c_{yji}M_{y_i} + c_{zji}M_{z_i}) \end{cases} \quad (1)$$

上式可简写为 $\mathbf{H} = \mathbf{F}\mathbf{M}$ ，其中 $\mathbf{H} = [H_1, H_2, \dots, H_m]^T$ ， $\mathbf{M} = [M_0, M_1, \dots, M_N]^T$ ， \mathbf{F} 中元素与模型中磁偶极子及椭球相对测量点的距离有关，具体根据舰艇运动时的位置可计算得出，由此根据式 (1) 可模拟出舰艇在磁传感器所在位置的磁场值。

1.2 三分量磁传感器测量模型

首先在实验前测量地磁背景场，假定标准磁传感器三轴两两相互正交且没有测量误差，当传感器坐标系与大地坐标系一致时，磁传感器的测量值即为舰艇磁场与地磁背景场的叠加值，将地磁背景去除后可得舰艇磁场的标准测量值 H 。当磁传感器倾斜时，其所在坐标系与大地坐标系在 x 、 y 、 z 方向分别产生 α 、 β 、 γ 三个姿态角，将此倾斜条件下磁传感器测量值中的地磁背景场去除可得倾斜后测量值 B ，则测量值 B 与舰艇磁场 H 的关系^[7]可描述为：

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{H} \quad (2)$$

其中： \mathbf{A} 为大地坐标系与磁传感器坐标系之间的转换矩阵，简称姿态角矩阵：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{31} & a_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & \sin\beta \\ -\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & -\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\cos\beta \\ -\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma & -\cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式 (3) 分析可知 \mathbf{A} 的模为 1，且实际中姿态角 α 、 β 、 γ 都较小， \mathbf{A} 中元素 a_{ij} 在 $[-1, 1]$ 范围内。由式 (2) 可知磁传感器的姿态校正归结于 \mathbf{A} 矩阵的求解，当 \mathbf{A} 已知后根据磁测量值 B 反推可得出真实的舰艇磁场值 H 。

2 求解方法

假定磁传感器 1 放置海底且姿态倾斜，紧靠此磁传感器位置放置一姿态标准且无测量误差的磁传感器 2，则认为磁传感器 2 测量值为真实值。当舰艇在海面航行通过时，磁传感器 1、2 分别获得测量值 B 与 H ，则根据式 (2) 由 B 与 H 可求解得出 \mathbf{A} 矩阵，在求解过程中定义目标函数为：

$$F = \sum_{i=1}^n ||B_i - \mathbf{A}H_i||_2 \quad (4)$$

式 (4) 中， n 为测量点数，共获得 n 组测量数据，以姿态角矩阵 \mathbf{A} 中元素作为位置求解参数，当求解结果逼近真实值时，由式 (4) 可知目标函数 F 趋近于 0，当 F 取得最小值时则认为得到最优求解值，并由此可对倾斜测量值进行修正得出无倾斜条件下的磁场测量真值。为在较少求解次数下获得较高的求解准确度，本文采用蚁群粒子群混合优化算法 (简称 APO) 求解 \mathbf{A} 矩阵，其算法流程如图 2 所示。

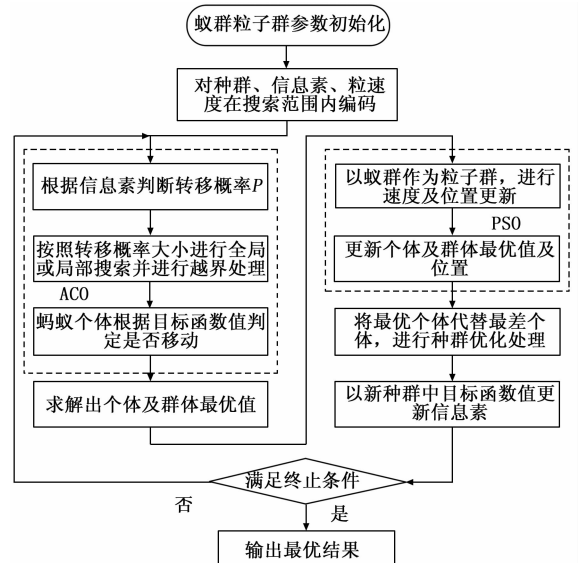


图 2 APO 算法流程图

APO 算法中具有蚁群算法 (ACO) 与粒子群算法 (PSO) 的重要步骤，由于 ACO 中蚂蚁在觅食路径上释放信息素以传递信息从而相互协作，具有较强的鲁棒性和较好的搜索能力，但求解中计算量大且收敛速度偏慢，且易陷入局部最优；粒子群算法 (PSO) 模拟鸟类的捕食行为，具有并行处理和计算效率高的特点，但易产生早熟收敛现象。APO 通过将两种算法融合，充分发挥优势并克服各自缺点，其主要思想是以蚁群算法为主体框架，以待求解参

数作为蚂蚁个体并使其具有粒子特性,采用 ACO 中的搜索步骤,并在搜索过程中个体进行越界处理,同时将 ACO 中蚂蚁信息素与 PSO 中目标函数结合,采用 PSO 进行路径选择^[8-9],满足终止条件后得到最终优化结果,具体步骤如下:

1) 初始化。设定蚂蚁个数 m , 每个蚂蚁 x_i 含有 9 位 ($x_i \in [x_{\min}, x_{\max}]$), 分别代表 A 矩阵中 9 个元素, 同时蚂蚁也为 PSO 中的粒子, 即蚂蚁也具有粒子性。设定蚂蚁初值, 蚂蚁 x_i 的信息素 $\tau_i = C - F$, (C 为一较大正值), τ_i 也是 PSO 中的适应度函数 $fitness$, 这样就将目标函数最小值转化为求信息素的最大值。

2) 转移概率。蚂蚁根据信息素大小判断是否转移, 则第 i 只蚂蚁的转移概率为:

$$p_i = \frac{\max(\tau) - \tau_i}{\max(\tau)} \quad (5)$$

3) 蚂蚁更新。蚂蚁根据转移概率进行局部搜索或全局搜索:

$$\begin{cases} x_i(t+1) = x_i(t) + \lambda * (2 * rand - 1), & p_i \leq p_0 \\ x_i(t+1) = x_i(t) + (x_{\max} - x_{\min}) * (rand - 0.5), & p_i > p_0 \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中, $\lambda = 1/t$, t 为迭代次数, p_0 为固定值。当蚂蚁搜索后, 根据适应度函数求取每个蚂蚁的历史最优值 P_{best} 及群体最优值 G_{best} , 以便于采用 PSO 进一步搜索。

4) 粒子的速度及位置更新。将上述蚂蚁个体作为粒子, 根据粒子历史及群体最优值更新速度与位置, 则粒子在第 d 维的具体变化公式为:

$$\begin{cases} v_{i,d}(t+1) = \omega * v_{i,d}(t) + c_1 * r_1 * (p_{best} - x_{i,d}) + \\ c_2 * r_2 * (g_{best} - x_{i,d}) \\ x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t+1) \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) 中, ω 为惯性权重系数, 取较大值时有利于全局搜索, 取较小值有利于局部搜索, ω 变化公式为:

$$\omega(t) = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) * (t/T) \quad (8)$$

其中: T 为最大迭代次数, ω_{start} 与 ω_{end} 分别为 ω 取值范围的边界值。

5) 优化替代。对更新后的新个体进行适应度值排列, 将其中适应度较小的个体替换成具有最大适应度的个体, 以此加快全局收敛速度。

6) 信息素更新。当所有蚂蚁完成以此循环后, 信息素进行更新

$$\tau_i(t+1) = (1 - \rho)\tau_i(t) + fitness(t) \quad (9)$$

式 (9) 中, $fitness(t)$ 为经过 PSO 更新后的适应度函数, ρ 为信息素衰减系数。

3 实验结果及分析

3.1 磁测量值模拟

首先对磁传感器测量数据进行模拟计算, 设定混合模型中磁偶极子相邻间隔为 5 m, 磁椭球体长轴为 15 m, 短轴为 5 m, 舰艇在海平面上以 1 m/s 匀速前进。磁传感器位

置为 [80, 50, 20] (m), 每隔 3 秒记录一次, 测量前可预先测量地磁场并当舰艇通过时将其从测量值中去除, 则磁测量值中只含有舰艇磁场。

将椭球与磁偶极子的磁矩代入式 (1) 可计算得出磁传感器 2 的标准磁场测量值 H 。设定磁传感器 1 的姿态角分别为 $\alpha=3^\circ, \beta=5^\circ, \gamma=2^\circ$, 由式 (2) 得出磁测量值 B , 为显示磁传感器的倾斜对测量带来的影响, 将 B 与 H 在三分量上进行比较, 定义 $\Delta B_x, \Delta B_y, \Delta B_z$ 分别为 B 与 H 在三分量上的差值, 其具体结果如图 3 所示。

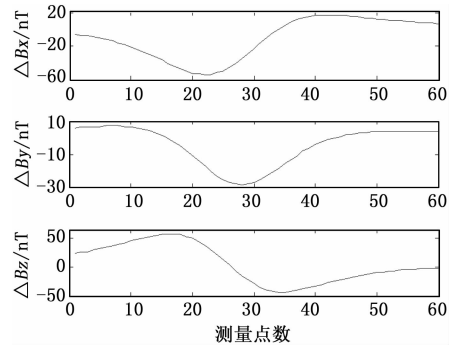


图 3 B 与 H 对比曲线

由图 3 可知, 即使磁传感器倾斜含有较小的姿态角, 也会导致磁测量值在三分量上产生较大幅度的测量误差, 其在三分量上的最大波动幅度达到了近百纳特, 而实际中经过消磁处理后的舰艇磁场本身的绝对值大小通常在百纳特级, 这必然会对舰艇磁性检测的精度产生不利影响, 因此说明有必要修正因磁传感器姿态倾斜引起的测量误差。

3.2 仿真及分析

为符合实际测量条件, 对 B 与 H 分别加入幅度为 5nT 的白噪声, 以模拟磁传感器本身的测量随机误差。本文采用 APO 对磁测量值 B 求解姿态角矩阵 A , 对此方法进行仿真验证, 其算法参数初始化设定如下:

1) 种群中个体数目 $n=50$, 初始化中 x_i 中元素的范围为 $[-1, 1]$, 最大迭代次数为 150。

2) ACO 算法模块中参数: 转移概率 $p_0=0.2$, 信息素衰减系数 $\rho=0.8$, 信息素中常数 $C=10^5$ 。

3) PSO 算法模块中参数: $c_1=c_2=1.49445$, r_1 与 r_2 为 $[0, 1]$ 区间的随机数, $\omega_{start}=0.9$, $\omega_{end}=0.4$, 粒子速度 v 的范围为 $[-0.5, 0.5]$ 。

本文以目标函数 F 作为评价标准, 当 F 越小时说明求解结果越精确。在每一次迭代搜索中记录适应度值 $fitness$, 将其与常数 C 相减得 F 的变化值。为表明 APO 算法的优越性, 将其与 ACO 与 PSO 的求解结果一比较, F 的变化曲线及 A 矩阵求解结果如下所示, 其中 Re 为求解值与真值间的相对误差:

图 4 中显示经多次迭代计算后 APO 求解精度最高, 随着迭代次数的增加目标函数 F 迅速减小, 经历较少代数搜索得到全局最优值。表 1 中 APO 计算得到的姿态角转换矩

阵 A 中元素 a_{ij} 精度在 1% 以内，与设定值基本一致，其精度相比 ACO 与 PSO 要高许多，同时 PSO 相比 ACO 具有较好的求解效果，PSO 经多次迭代计算目标函数 F 达到最小值，

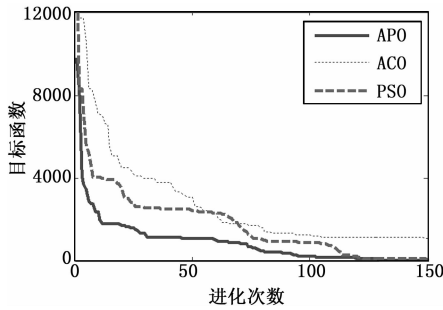


图 4 目标函数变化曲线

表 1 求解结果对比

$Re/\%$	ACO	PSO	APO
a11	1.48	0.44	0
a12	22.98	21.55	0
a13	222.47	25.8	0.1146
a21	13.95	2.03	0
a22	2.18	0.21	0.01
a23	130.51	12.09	0.19
a31	41.19	0.001	0.35
a32	274.1	0.001	1.08
a33	48.01	0.001	0.01

但在个别元素的求解上还不够精确。经上述比较可知，3 种算法中 APO 求解效果精度最高，其次为 PSO，而 ACO 的求解不太理想，同时也说明采用 APO 进行磁传感器姿态校正的方法是可行的，在磁场测量中将计算得到的 A 矩阵与磁传感器 1 测量值 B 代入式 (2) 即可得到准确的舰艇磁场测量值 H 。

3.3 实验验证

为证明此方法在模拟实际环境下的正确性及有效性，采用船模实验进行验证，其实验示意图如图 5 所示。

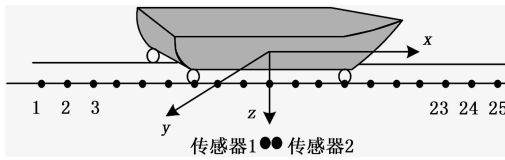


图 5 实验示意图

实验中两个磁传感器位于船模正下方沿 y 方向紧密放置，1 号磁传感器姿态倾斜，其测量值作为需校正值 B ，2 号磁传感器 x 轴指向磁北，经水平校正后无姿态误差，测量值作为标准值 H ，此实验具体步骤如下：

1) 采样点在无磁轨道上均匀分布，共 25 个，其相互间距为 25 cm。磁传感器 1、2 位于 12 号采样点下方，沿 z 轴垂直方向距船模 1 m。

2) 采用两种型号船模进行实验验证，分别定义为 I 型与

II 型。船模水平放置无倾斜，船首指向地磁北，依次推进船模到 1~25 号采样点。移动 I 型船模时得到磁传感器 1、2 的测量值 B_1 与 H_1 ，移动 II 型船模得到测量值 B_2 与 H_2 。

根据测量值 B_1 与 H_1 采用 APO 算法求解 1 号磁传感器的姿态角矩阵 A ，将 A 与 H_2 代入式 (2) 得校正后的磁场值 $B_c = AH_2$ 。若矩阵 A 求解正确，则校正值 B_c 应与 II 型船模的测量标准值 B_2 相同，因此定义校正前误差 $\Delta B = B_2 - B_c$ ，校正后误差 $\Delta B_c = B_2 - B_c$ ，当 ΔB_c 趋近于 0 说明校正效果越好， ΔB 与 ΔB_c 在三分量上的对比结果如下

表 2 校正结果对比

ΔB	最大值	最小值	幅度	均方差
x 分量	32	-119	151	49
y 分量	30	-523	553	198
z 分量	-5	-128	123	35
ΔB_c	最大值	最小值	幅度	均方差
x 分量	13	-44	57	16
y 分量	-21	-206	185	64
z 分量	13	-24	37	11

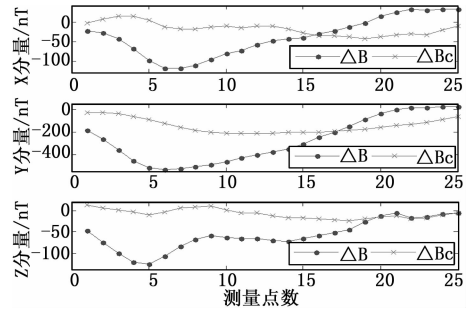


图 6 姿态校正前后 ΔB_c 对比

由上述结果可知，校正后 ΔB_c 相比校正前 ΔB 在三分量上的变化幅度及均方差均降了近 70%，说明姿态矩阵 A 的求解结果较为正确，校正后 1 号磁传感器测量精度有了较大改善。在表 1 中 ΔB_c 在 x 、 z 分量上绝对值最大不超 50 nT，但在 y 分量上绝对值较大，究其原因具体分析如下：

1) 2 号磁传感器作为标准磁传感器，测量时应没有正交、标度、零位等固有测量误差，但限于实验室测量条件并没有对 2 号磁传感器进行固有误差的校正，将其作为标准测量值 H 并不完全准确，这会对姿态矩阵 A 的算带来不利影响。

2) 1 号与 2 号磁传感器紧密放置，两者具有体积故产生一定距离，为保证 2 号磁传感器的测量值能够作为标准测量值 H ，应采用小体积磁传感器以保证两者间距离足够小，从而最大限度减小体积因素的影响。

3) 实验中传感器相距船模较近，而实际舰艇磁性检测中两传感器轴心间距相比传感器到舰艇的距离小很多，因此实际中应使磁传感器距离舰艇满足一定的限定要求，从而可将此不利影响忽略。