

多目标优化的舰船磁场建模方法

戴忠华 周穗华 张晓兵

Multi-objective optimization of ship magnetic field modeling method

Dai Zhong-Hua Zhou Sui-Hua Zhang Xiao-Bing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 164101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210334

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210334>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Pareto优化理论的多目标超椭梯度线圈设计

Design of super-elliptical gradient coils based on multiple objective Pareto optimization method

物理学报. 2017, 66(9): 098301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.098301>

舰船磁场磁单极子阵列法建模技术

Magnetic monopole array model for modeling ship magnetic signatures

物理学报. 2019, 68(11): 114101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190201>

粗糙海面与其上方多目标复合散射的混合算法

Hybrid algorithm for composite electromagnetic scattering from the multi-target on and above rough sea surface

物理学报. 2017, 66(5): 050301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.050301>

时域混合算法在一维海面与舰船目标复合电磁散射中的应用

Composite electromagnetic scattering from a ship located on one-dimensional sea surface with time-domain hybrid method

物理学报. 2017, 66(18): 180301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.180301>

基于目标场点法和流函数的磁共振有源匀场线圈设计方法

Method of designing magnetic resonance active shimming coil based on target field point method and flow function

物理学报. 2019, 68(19): 198301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190612>

磁性斯格明子的多场调控研究

Multi-field control on magnetic skyrmions

物理学报. 2018, 67(13): 137507 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180931>

多目标优化的舰船磁场建模方法*

戴忠华[†] 周穗华 张晓兵

(海军工程大学兵器工程学院 504 教研室, 武汉 430033)

(2021 年 2 月 20 日收到; 2021 年 3 月 12 日收到修改稿)

针对舰船磁场混合模型建模中存在的建模精度不高和稳定性差的问题, 提出一种高精度稳定模型建立方法, 结合混合模型中磁偶极子参数与舰船结构的相关性, 以建模精度和模型稳定性为目标构造了多目标函数, 通过对多目标函数优化获得合理的磁偶极子参数, 间接地将建模求解问题转化为多目标函数优化问题. 利用多目标粒子群优化算法进行求解, 得到了建模问题求解结果的可选集, 以建模精度为基准设计了从可选集中选取最佳结果的选择规则. 三种类型的舰船船模实测数据建模结果表明: 本文方法所建模型相对误差小于 3%, 换算误差小于 6%, 能够有效对舰船磁场进行建模; 当存在测量数据误差时, 本文方法建模求解结果稳定, 验证了文本方法建模具有较好的稳定性. 海上的某型舰船实测数据建模结果表明, 本文方法建模具有较高的建模精度和换算精度, 能够有效地在相关的工程中应用.

关键词: 舰船磁场建模, 多目标函数, 多目标粒子群优化算法, 选择规则**PACS:** 41.20.Gz, 02.30.Zz**DOI:** 10.7498/aps.70.20210334

1 引言

舰船目标通常由钢铁材料制成, 受到地磁场的磁化会产生舰船磁场, 当舰船目标进入某一地磁场区域时, 会造成该区域的磁场异常^[1,2], 水中兵器正是利用该磁异常实现对目标的探测和定位^[3–11]. 为了提高舰船的防御能力, 舰船磁隐身技术成为各国研究的热点, 舰船磁场空间分布特性的获取是舰船磁隐身技术研究的前提和关键. 高精度的舰船磁场建模可以获取精确的舰船磁场空间分布特性, 通常, 舰船建模需要测量舰船某一平面上的完整磁场数据, 运用一定的建模技术完成对舰船磁场的建模. 然而, 由于平面测量数据的不完整以及测量过程中存在的测量误差, 导致所建模型存在建模精度低、稳定性差、适用性不好等问题, 如何从有限测量数据中获得舰船的高精度稳定模型是舰船磁场

建模的研究重点.

目前, 主要的舰船磁场建模方法大致可以分为两类: 一类是依据严格的理论推导出来的, 如大平面法、边界元法、有限元法等^[12–14], 这类方法计算精度高, 但对测量要求比较严格, 需要一个完整的测量包络面, 在实际中很难满足; 另一类是磁体模拟法^[15–17], 将舰船等效为位于舰船水线面的均匀磁化椭球体和均匀分布于吃水线上的磁偶极子阵列的混合模型, 均匀椭球体模拟舰船的宏观磁场, 磁偶极子阵列模拟舰船的局部磁场, 这类方法可以在少量的磁场测量数据下完成精度较高的舰船磁场模型建立, 是工程中较为常用的方法. 使用混合模型建模时, 本质是求解一个多度的超定方程, 该超定方程通常为一个病态程度较高的方程, 对输入的敏感性极强, 而磁场测量中不可避免地存在测量误差, 导致建模求解结果的不稳定, 如何求解建模病态超定方程是混合模型建模过程中的关键.

* 国家自然科学基金 (批准号: 51509252, 42074074) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: 602024288@qq.com

对于建模病态超定方程的求解, 林春生和龚沈光^[1]最早使用逐步回归法进行求解, 通过剔除超定方程系数矩阵中的不明显列提高模型的稳定性, 但当系数矩阵病态程度过大时, 该方法建模的精度较差; 杨明明等^[18]使用正则化法来求解超定方程, 一定程度上解决了病态超定方程求解问题, 但求解正确性往往依赖正则化参数的选取; 王金根等^[19]首次考虑了测量数据误差问题, 先对误差数据进行剔除, 然后利用改进的方法来对系数矩阵的冗余列进行剔除, 一定程度上降低系数矩阵的条件数. 后续, 为了降低建模超定方程的病态程度, 多位学者通过优化磁偶极子位置降低超定方程系数矩阵的条件数^[20–25], 以增加模型稳定性, 该类方法在一定程度上解决了病态超定方程的稳定求解问题, 但为了降低系数矩阵条件数片面地优化磁偶极子位置分布, 忽略磁偶极子位置分布与舰船结构的相关性, 使得所建模型存在精度不高、推算能力差等问题. 最近, 出现了考虑舰船实际结构的舰船磁场反演技术^[26–28], 具有计算精度高的优点, 然而, 这些技术需要对船体的结构进行较为准确的三维建模, 在工程化应用中较难实现. 同时, 目前所有使用混合模型进行建模的方法存在一个共同的问题, 对磁偶极子个数的选取并未考虑, 而磁偶极子个数的多少对所建模型的有效性有较大的影响, 磁偶极子数过少, 模型精度较差, 偶极子数过多, 会造成局部拟合过度, 使得模型的推算性能不好. 其实, 混合模型中的磁偶极子个数和位置是与具体舰船的内部结构密切联系的, 选择合适的磁偶极子个数和正确分布的磁偶极子位置可以建立一个高精度稳定的舰船磁场模型.

本文将基于舰船磁场混合模型, 结合混合模型中磁偶极子参数与舰船结构的相关性, 以建模精度和模型稳定性为目标构造多目标函数, 通过多目标函数优化获得合理的磁偶极子参数, 间接地将建模求解问题转化为多目标优化问题, 利用多目标函数优化算法对多目标问题进行求解, 提出一种高精度稳定舰船磁场建模方法.

2 舰船磁场混合模型和多目标函数构造

2.1 舰船磁场混合模型

通常, 舰船磁场混合模型是指将舰船等效为一个均匀磁化旋转椭球体和磁偶极子阵列的混合模型^[1,16,17], 如图 1 所示, 建立舰船磁场混合模型时, 均匀椭球体位于舰船中心, 其长轴等于船长, 短轴等于船宽, 用于拟合舰船的宏观磁场, 磁偶极子阵列均匀分布于舰船吃水线上, 模拟舰船的局部不均匀磁场.

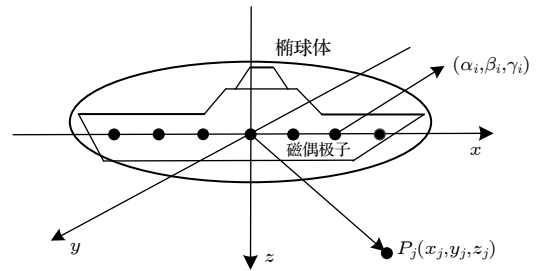


图 1 舰船磁场混合模型

Fig. 1. Ship magnetic field mixing model.

假设舰船混合模型的磁偶极子个数为 N , 坐标分别为 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$. 如图 1 所示, 以舰船中心建立坐标系, 则在测量点 $P_j(x_j, y_j, z_j)$ 产生的磁场为^[1]

$$\begin{cases} H_{xj} = \sum_{i=1}^{N+1} (a_{xij}M_{xi} + a_{yij}M_{yi} + a_{zij}M_{zi}), \\ H_{yj} = \sum_{i=1}^{N+1} (b_{xij}M_{xi} + b_{yij}M_{yi} + b_{zij}M_{zi}), \\ H_{zj} = \sum_{i=1}^{N+1} (c_{xij}M_{xi} + c_{yij}M_{yi} + c_{zij}M_{zi}), \end{cases} \quad (1)$$

式中, M_{xi} , M_{yi} , M_{zi} ($i = 1, 2, \dots, N$) 分别为第 i 个磁偶极子 x, y, z 方向的磁矩, $M_{x(N+1)}$, $M_{y(N+1)}$, $M_{z(N+1)}$ 为均匀旋转椭球体在 x, y, z 方向磁矩, $(a_{xij}, a_{yij}, a_{zij}, b_{xij}, b_{yij}, b_{zij}, c_{xij}, c_{yij}, c_{zij})$ 分别为对应的磁场计算系数, 具体计算公式如下:

1) 当 $i = 1, 2, \dots, N$ 时, 为磁偶极子对应的系数^[1]:

$$a_{xij} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3}{r_{ij}^5} (x_j - \alpha_i)^2 - \frac{1}{r_{ij}^3} \right], \quad a_{yij} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3}{r_{ij}^5} (x_j - \alpha_i) (y_j - \beta_i) \right],$$

$$a_{zij} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3}{r_{ij}^5} (x_j - \alpha_i)(z_j - \gamma_i) \right], \quad b_{yij} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3}{r_{ij}^5} (y_j - \beta_i)^2 - \frac{1}{r_{ij}^3} \right],$$

$$b_{zij} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3}{r_{ij}^5} (y_j - \beta_i)(z_j - \gamma_i) \right], \quad c_{zij} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3}{r_{ij}^5} (z_j - \gamma_i)^2 - \frac{1}{r_{ij}^3} \right],$$

$$a_{yij} = b_{xij}, \quad a_{zij} = c_{xij}, \quad b_{zij} = c_{yij},$$

其中, $r_{ij} = \sqrt{(x_j - \alpha_i)^2 + (y_j - \beta_i)^2 + (z_j - \gamma_i)^2}$.

2) 当 $i = N + 1$ 时, 为均匀椭球体对应的系数^[1]:

$$a_{xNj} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3A_j}{C^2 t_j} - \frac{1}{3C^3} \ln \left(\frac{A_j + C}{A_j - C} \right) \right], \quad a_{yNj} = \frac{3x_j y_j}{4\pi A_j B_j^2 t_j} = b_{xNj},$$

$$a_{zNj} = \frac{3x_j z_j}{4\pi A_j B_j^2 t_j} = c_{xNj}, \quad b_{yNj} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3A_j y_j}{B_j^2 t_j} - \frac{1}{4C^3} \ln \left(\frac{A_j + C}{A_j - C} \right) - \frac{A_j}{2B_j C^2} \right],$$

$$b_{zNj} = \frac{3A_j y_j z_j}{4B_j^2 t_j} = c_{yNj}, \quad c_{zNj} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3A_j z_j}{B_j^2 t_j} - \frac{1}{4C^3} \ln \left(\frac{A_j + C}{A_j - C} \right) - \frac{A_j}{2B_j C^2} \right],$$

$$C = \sqrt{L^2 + W^2} \quad (L \text{ 为船长, } W \text{ 为船宽}), \quad t_j = \sqrt{(x_j^2 + y_j^2 + z_j^2 + C^2)^2 - 4x_j^2 C^2},$$

$$A_j = \sqrt{\frac{1}{2} (x_j^2 + y_j^2 + z_j^2 + C^2 + t_j^2)}, \quad B_j = \sqrt{A_j^2 - C^2}.$$

将 (1) 式简写为矩阵形式:

$$\mathbf{F}_j \mathbf{M} = \mathbf{H}_j, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{M} = (M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}, M_{x2}, M_{y2}, M_{z2}, \dots, M_{x(N+1)}, M_{y(N+1)}, M_{z(N+1)})^T$, $\mathbf{H}_j = (H_{xj}, H_{yj}, H_{zj})^T$, \mathbf{F}_j 为由磁偶极子和均匀椭球体系数构成的矩阵, 如下:

$$\mathbf{F}_j = \begin{bmatrix} a_{x1j} & a_{y1j} & a_{z1j} & a_{x2j} & a_{y2j} & a_{z2j} & \cdots & a_{xNj} & a_{yNj} & a_{zNj} \\ b_{x1j} & b_{y1j} & b_{z1j} & b_{x2j} & b_{y2j} & b_{z2j} & \cdots & b_{xNj} & b_{yNj} & b_{zNj} \\ c_{x1j} & c_{y1j} & c_{z1j} & c_{x2j} & c_{y2j} & c_{z2j} & \cdots & c_{xNj} & c_{yNj} & c_{zNj} \end{bmatrix}.$$

2.2 舰船磁场混合模型建模求解

利用舰船混合模型建模时, 通常测量舰船某一深度平面上的 $n \times m$ 个测量点数据, 如图 2 所示. 根据 (1) 式和 (2) 式可构造求解方程组^[1]:

$$\mathbf{F} \mathbf{M} = \mathbf{H}, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{F} = (\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_1, \dots, \mathbf{F}_{n \times m})^T$, $\mathbf{H} = (\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_1, \dots,$

$\mathbf{H}_{n \times m})^T$. 在方程组 (3) 式中, 测量点坐标 (x_j, y_j, z_j) 和测量点磁场 $(H_{xj}, H_{yj}, H_{zj})^T$ 是已知的, 若混合模型中的磁偶极子均匀排布在吃水线上, 则可由舰船的长度 L 和磁偶极子个数 N 计算得到磁偶极子坐标 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$. 此时, (3) 式为一线性方程, 磁矩参数 \mathbf{M} 为唯一待求参数, 若能准确求解出磁矩参数 \mathbf{M} , 则可以根据 (1) 式计算舰船磁场空间分布, 即完成舰船的磁场建模.

若想求解方程组 (3) 式中磁矩参数 \mathbf{M} , 测量点数必须满足 $n \times m \geq N + 1$. 通常, 为了获得更为精确的舰船磁场模型, 测量点数 $n \times m$ 往往需要远大于等效源个数 $N + 1$, 这使得方程组 (3) 式为方程阶数很大的超定方程, 且其病态程度有时也会因测量点位置变得很大. 因此, 对方程组 (3) 式的求解通常使用逐步回归进行求解.

假设, 逐步回归法求得的磁矩参数为 $\hat{\mathbf{M}}$, 则舰

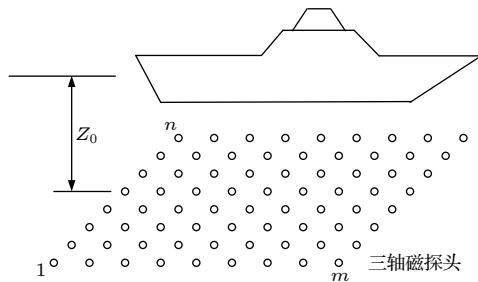


图 2 磁场测量

Fig. 2. Magnetic field measurement.

船建模精度可用相对误差来评估^[1]:

$$e = \|\mathbf{F}\hat{\mathbf{M}} - \mathbf{H}\|_2 / \|\mathbf{H}\|_2. \quad (4)$$

上述为使用混合模型进行建模和求解的相关原理和方法, 其中舰船混合模型中的磁偶极子是均匀分布于舰船的吃水线上的。

2.3 多目标函数构造

2.2 节中使用混合模型进行建模时, 是将磁偶极子均匀分布于舰船的吃水线上, 磁偶极子的位置坐标 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 是已知量。然而, 混合模型中的磁偶极子代表舰船的局部磁场特性, 其数量和位置的分布与舰船内部结构密切相关, 方程组 (3) 式实际上是对舰船磁场的一种拟合, 当磁偶极子个数过多或者位置分布不正确时, 对方程组 (3) 式的求解常常出现精度不高、稳定性差、外推能力弱等问题。

为了建立更为合理的舰船磁场模型, 假设混合模型中的磁偶极子个数 N 和位置分布 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 为未知量, 则由 (1) 式可知, 方程组 (3) 式中的系数矩阵 \mathbf{F} 为磁偶极子个数 N 及其位置分布 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 的函数, 可通过优化 (4) 式的相对误差获得磁偶极子个数及其分布, 建优化立目标函数 f_1 如下:

$$f_1 = \|\mathbf{F}(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \dots, \alpha_N, \beta_N, \gamma_N, N) \hat{\mathbf{M}} - \mathbf{H}\|_2 / \|\mathbf{H}\|_2, \quad (5)$$

式中, 磁矩参数 $\hat{\mathbf{M}}$ 可在磁偶极子个数 N 和位置分布 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 下, 利用逐步回归求解, 即 (5) 式仅为磁偶极子数和位置分布的函数。

由前面 2.2 节可知, 方程组 (3) 式往往是一个病态的超定方程, 对输入的敏感性极强, 在解方程 (4) 过程中, 轻微的测量点数据扰动都会严重影响模型求解结果。为了提高求解磁场模型的精度和稳定性, 通常的做法是降低系数矩阵 \mathbf{F} 的条件数, 系数矩阵的条件数越小, 模型越稳定, 对测量误差越不敏感。由于系数矩阵 \mathbf{F} 是磁偶极子个数及其位置坐标的函数, 因此, 可以引入系数矩阵条件数作为优化目标函数, 通过对系数矩阵条件数的优化而得到合理的磁偶极个数及其分布, 以系数矩阵条件数构造的优化目标函数 f_2 表示如下:

$$f_2 = \text{Cond}(\mathbf{F}(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \dots, \alpha_N, \beta_N, \gamma_N, N)), \quad (6)$$

式中, $\text{Cond}(\bullet)$ 为条件数计算。

因此, 由上面引入的两个优化目标函数 f_1 和 f_2 , 可构造多目标优化函数如下:

$$\begin{cases} f_1 = \|\mathbf{F}(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \dots, \alpha_N, \beta_N, \gamma_N, N) \hat{\mathbf{M}} - \mathbf{H}\|_2 / \|\mathbf{H}\|_2, \\ f_2 = \text{Cond}(\mathbf{F}(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \dots, \alpha_N, \beta_N, \gamma_N, N)). \end{cases} \quad (7)$$

对多目标函数 (7) 式进行优化求解, 获得磁偶极子个数及其分布, 由于多目标函数 (7) 式兼顾了建模精度和模型稳定, 所求磁偶极子个数及其分布能够保证一定模型精度下具备较好的模型稳定性。同时, 在目标函数 f_1 中的磁矩参数 $\hat{\mathbf{M}}$ 作为中间变量, 间接地将建模问题转换为了对 (7) 式的多目标优化问题。

通常, 用于建模的磁偶极子个数 N 在 2—15 之间, 因此, (7) 式中的变量 N 的取值约束为 $N \in \mathbb{Z}, N \in [2, 15]$ 。磁偶极子位置 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 可由舰船的尺寸进行约束, 如图 3 所示。在混合模型中, 舰船等效椭球体, 长轴为 $L/2$, 短轴为 $W/2$, N 个磁偶极子分布在椭球内, 将椭球体沿长轴方向分为 N 等份, 则第 i 个磁偶极子的分布范围为图 3 中阴影部分所代表的区域, 即 (7) 式中, 磁偶极子位置 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 分布的取值范围为

$$\begin{cases} x_i \leq \alpha_i \leq x_{i+1}, \\ -\frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2} \leq \beta_i \\ \leq \frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2}, \\ -\sqrt{\left[\frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2}\right]^2 - \beta_i^2} \leq \gamma_i \\ \leq \sqrt{\left[\frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2}\right]^2 - \beta_i^2}, \end{cases} \quad (8)$$

式中, $x_i = -L/2 + (i-1)L/N$, $x_{i+1} = -L/2 + iL/N$, $i = 1, 2, \dots, N+1$ 。

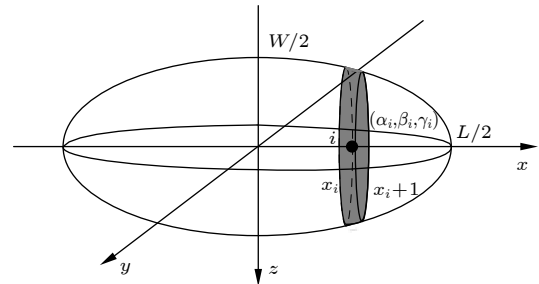


图 3 混合模型中磁偶极子分布范围

Fig. 3. Distribution range of magnetic dipoles in the mixed model.

3 基于多目标粒子群优化的建模求解算法

由 2.3 节可知, 舰船磁场的高精度稳定建模可归结为对 (7) 式多目标函数的寻优问题, 联合 (8) 式, 该多目标优化问题可表示为:

$$\begin{cases} \min f(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \dots, \alpha_N, \beta_N, \gamma_N, N) = \min(f_1, f_2), \\ \text{s.t.} \begin{cases} N \in \mathbb{Z}, N \in [3, 15], \\ x_i \leq \alpha_i \leq x_{i+1}, \\ -\frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2} \leq \beta_i \\ \leq \frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2}, \\ -\sqrt{\left[\frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2}\right]^2 - \beta_i^2} \\ \leq \gamma_i \leq \sqrt{\left[\frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2}\right]^2 - \beta_i^2}. \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

由 (9) 式可知, 待优化参数的维数为 $3N + 1$, 与磁偶极子个数相关, 且目标函数是待优化参数的非线性函数, 对于多维度非线性目标函数优化问题, 待求参数维数越高, 优化求解越困难. 混合模型中的磁偶极子个数的取值只能为整数, 其取值范围已经给出, 故可将 (9) 式中的待求参数 N 作为已知量, 按照磁偶极子个数参数取值范围依次取值, 然后再进行优化求解, (9) 式改写为

$$\begin{cases} \min f(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \dots, \alpha_N, \beta_N, \gamma_N | N) = \min(f_1, f_2), \\ \text{s.t.} \begin{cases} x_i \leq \alpha_i \leq x_{i+1}, \\ -\frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2} \\ \leq \beta_i \leq \frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2}, \\ -\sqrt{\left[\frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2}\right]^2 - \beta_i^2} \leq \gamma_i \\ \leq \sqrt{\left[\frac{W/2}{L/2} \sqrt{(L/2)^2 - \alpha_i^2}\right]^2 - \beta_i^2}, \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中的 N 为假设已知量. (10) 式是关于磁偶极子位置分布的多目标优化问题, 下面将研究该问题的求解算法.

3.1 多目标粒子群优化算法

传统多目标优化算法是将 (10) 式中的各目标函数取加权和, 从而多目标优化问题转化为单目标优化问题, 由前面可知, 目标函数 f_1 为建模相对误差, f_2 为模型系数矩阵条件数, 各目标函数不具备可比性, 加权系数难于选取. 多目标问题中, 各目标之间往往是相互冲突的, 通常通过决策变量来协调权衡和折中处理, 使各子目标函数尽可能达到最优. 多目标优化问题不存在单个最优解, 而是 Pareto 最优解集, 如何求得与真实 Pareto 前沿一致的 Pareto 最优解集是多目标函数优化问题的关键.

目前, 通常用于解决多目标函数优化问题的算法包括: 多目标进化算法 (MOEA)^[29]、多目标蚁群算法 (MASA)^[30]、多目标模拟退火算法 (MSA)^[31]、多目标粒子群算法 (MPSO)^[32] 等. MOEA 对于低维优化问题具有较好的表现, 在高维问题中, 解集的多样性不理想且耗时较长, 运行效率不高; MASA 在高维的多目标函数优化问题上同样需要较长的搜索时间, 且易于出现早熟停滞现象; MSA 对搜索空间 (目标函数的性质) 不加任何限制, 可以是不连续的、不可微的, 并且也能求得 Pareto 边界上多个不同方向的 Pareto 最优解, 但是需要大量的迭代次数, 因而收敛速度慢、优化效率较低; MPSO 具有高效的搜索能力, 有利于得到多目标意义下的最优解, 同时, 其通用性比较好, 实现也较为容易, 适合处理多种类型的目标函数和约束, 并且容易与传统的优化方法结合, 从而改进自身的局限性, 更高效地解决问题^[33]. 本文所构造的多目标优化问题是一个高维的、复杂非线性问题, 考虑到求解算法的效率和解的质量, 本文将采用 MPSO 进行 Pareto 最优解集求解.

多目标粒子群优化算法是在粒子群优化算法 (PSO) 的基础上进行改进的, 粒子群算法是由 Kennedy^[34] 提出的基于群智能的优化算法, 标准的粒子速度和位置更新公式如下:

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = w\mathbf{v}_i^t + c_1r_1(\mathbf{p}_i^t - \mathbf{x}_i^t) + c_2r_2(\mathbf{g}^t - \mathbf{x}_i^t), \quad (11)$$

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1}, \quad (12)$$

式中, \mathbf{v}_i^{t+1} 表示粒子 i 第 $t+1$ 次迭代时的速度; \mathbf{x}_i^{t+1} 表示粒子 i 第 $t+1$ 次迭代时的位置; w 为惯性权重; c_1, c_2 代表学习因子; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; \mathbf{p}_i^t 为第 t 次迭代时粒子的个体最优位置;

g^t 为第 t 次迭代时种群的全局最优位置.

MPSO 对 PSO 增加了外部储备集保存算法迭代过程中出现的 Pareto 最优解, 采取个体最优 p_i^t 、全局最优 g^t 和外部储备集的更新策略, 为防止算法早熟收敛, 增加种群多样性策略. 本文采用文献 [32] 中的自适应网格法的多目标粒子群算法, 该算法根据 Pareto 支配关系更新个体最优 p_i^t ; 采用自适应网格法计算粒子的拥挤程度, 并从拥挤程度小的网格中随机选择一个粒子作为群体最优粒子 g^t ; 采用 Pareto 占优准则和自适应网格法对外部储备集进行更新.

自适应网格法的多目标粒子群算法的具体步骤如下:

- 1) 输入参数: $w, c_1, c_2, N_{\text{iter}}$ (迭代次数), N_n (种群数), N_r (外部储备集数), \mathbf{x}_{rang} (变量范围), \mathbf{v}_{rang} (粒子速度范围), N_{gri} (网格数);
- 2) 初始化种群粒子, 随机选取可行域中的粒子初始位置和初始速度;
- 3) 计算各粒子的适应度值, 根据支配关系形成非支配解集;
- 4) 更新外部储备集;
- 5) 更新个体最优和全局最优;
- 6) 按照 (11) 式和 (12) 式更新速度和粒子位置;
- 7) 根据速度和位置的取值范围调整速度和粒子位置的取值;
- 8) 根据种群多样性策略, 对粒子进行多样性处理;
- 9) 检查是否达到最大迭代次数, 若是, 则终止程序; 如果未达到, 则继续返回第二步.

上述步骤中, 多目标粒子群算法参数 $w, c_1, c_2, N_{\text{iter}}, N_n, N_r, N_{\text{gri}}$ 可按常用的取值进行设置, 粒子的取值范围 $\mathbf{x}_{\text{rang}} = [\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max}]$ 可由 (8) 式计算, 粒子速度范围可设置为 $\mathbf{v}_{\text{rang}} = [-0.4(\mathbf{x}_{\max} - \mathbf{x}_{\min}), 0.4(\mathbf{x}_{\max} - \mathbf{x}_{\min})]$, 在算法初始化时, 粒子取值和粒子速度取值在相应的取值范围内选取.

3.2 解的选取

3.1 节中给出了求解多目标优化问题 (10) 式的算法, 利用该算法能够求解出优化问题 (10) 式的 Pareto 最优解集, 磁偶极子位置的最优分布可以从 Pareto 最优解集中选取, 同时, (10) 式的优化问题是磁偶极子个数假设已知下的简化问题, 而由 (9) 式可知, 磁偶极子个数也是需要优化求解

的. 下面, 将对如何选取磁偶极子个数和如何从 Pareto 最优解集中选取最佳的解进行研究, 给出相应的选择规则.

由前面可知, 磁偶极子个数的选取范围为 $N \in [2, 15]$, 且都为整数, 在求解 (9) 式时, 依次选取 $N = 2, 3, \dots, 15$, 则 (9) 式可简化为 (10) 式, 利用 3.1 节中的多目标粒子群算法求解得到 Pareto 最优解集 Ψ_N . 所有磁偶极子个数下求得的 Pareto 最优解集构成可选集 $\Psi = \Psi_2 \cap \Psi_3 \cap \dots \cap \Psi_{15}$. 如何从可选集中选取最佳的解, 需要考虑建模的实际情况, 对于舰船磁场建模, 最为重要的是模型精度, 在保证模型精度的情况下应尽可能使模型稳定, 故可以引入从 Ψ 中选取的限制条件:

$$\mathbf{x} = \begin{cases} f_1(\mathbf{x}) \leq e_0 \\ \min(f_2(\mathbf{x})) \end{cases}, \mathbf{x} \in \Psi, \quad (13)$$

式中, \mathbf{x} 为磁偶极子位置分布 $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \dots, \alpha_N, \beta_N, \gamma_N)$, e_0 为建模最大允许相对误差. 当选取了满足 (13) 式的 \mathbf{x} , 则其对应的磁偶极子个数为所选的磁偶极子数.

(13) 式给出了磁偶极子位置和磁偶极子个数选择规则, 按照该选择规则可以获得相应的优化磁偶极子参数, 用该磁偶极子参数联合 (1) 式—(3) 式可以求解出舰船磁场的磁矩参数, 利用磁矩参数根据 (1) 式便能获取舰船的空间磁场分布, 即完成了舰船磁场的建模.

4 试验结果分析

4.1 试验设置

试验时, 对三种舰船船模深度平面 Z_0 和 Z_1 上三条测线上的磁场进行了测量, 如图 4 所示. 三种舰船船模按照长宽尺寸分为小、中、大三种船型, 小型舰船船模参数: 长 $L = 57.2$ m、宽 $W = 8.6$ m、吃水深度 $D = 2.2$ m; 中型舰船船模参数: 长 $L =$

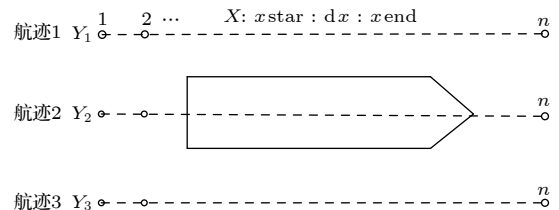


图 4 测量模式

Fig. 4. Measurement mode.

表 1 试验参数
Table 1. Test parameters.

目标	尺度参数/m		测量深度/m		航迹1/m	航迹2/m	航迹3/m
	L	W	Z_0	Z_1			
小型船模	57.2	8.6	8.6	17	$X = -80:2:80, Y = -4.2$	$X = -80:2:80, Y = 0$	$X = -80:2:80, Y = 4.2$
中型船模	76.5	8.5	12.75	20.5	$X = -100:2.5:100, Y = -15$	$X = -100:2.5:100, Y = 0$	$X = -100:2.5:100, Y = 15$
大型船模	153	17.3	17.2	28.8	$X = -128:3.2:128, Y = -8.64$	$X = -128:3.2:128, Y = 0$	$X = -128:3.2:128, Y = 8.64$

76.5 m、宽 $W = 8.5$ ，吃水深度 $D = 5.3$ m；大型舰船船模参数：长 $L = 153$ m、宽 $W = 17.3$ m，吃水深度 $D = 5.1$ m。测量参数和舰船参数如表 1 所列。

对上述三种船模利用第 3 节的方法进行建模，建模性能的评估包括建模精度和换算精度，建模精度可以用建模的相对误差来评估，见 (4) 式；换算是指用一个平面的测量数据建模，利用所建模型换算另一个深度平面上的磁场，换算精度可以用换算相对误差来评估，计算公式如下：

$$e_c = \|\mathbf{F}'\hat{\mathbf{M}} - \mathbf{H}'\|_2 / \|\mathbf{H}'\|_2, \quad (14)$$

式中 $\hat{\mathbf{M}}$ 为利用深度平面 Z_i 上的测量数据建模求解的磁矩参数， \mathbf{F}' 和 \mathbf{H}' 分别为另一深度平面 Z_j 上的系数矩阵和测量值。换算包括从深平面到浅平面和浅平面到深平面的换算。

建模使用的多目标粒子群优化算法的参数设置：种群数目 200，迭代次数 500，惯性权重 0.49，学习因子 $c_1 = c_2 = 2$ ，网格数为 20，外部储备集规模 200。磁偶极子个数 N 的取值设定为：2, 4, 6, 8, 10, 12, 14；(13) 式中小、中、大三种舰船船模的选择参数 e_0 分别为 0.03, 0.03, 0.03。

4.2 不同舰船船模实测数据建模

4.2.1 建模有效性分析

按照 4.1 的试验参数，利用表 1 中三种舰船船模 Z_0 深度平面上的三条航迹测量数据进行建模，得到三种舰船建模的可选集分布，分布结果如图 5—图 7 所示，图中不同颜色的解代表不同磁偶极子数时的 Pareto 最优解集，横坐标 f_2 和纵坐标 f_1 对应 (7) 式中的多目标函数值，分别对应模型系数矩阵条件数和建模相对误差。

从图 5—图 7 可以看出，随着磁偶极子个数的增多，对应的 Pareto 最优集的建模拟合相对误差 f_1 整体减小，条件数 f_2 整体增大，说明混合模型中的磁偶极子数越多，建模精度越高，但与此同时，

条件数会增大，模型会越不稳定。因此，建模精度和模型稳定是相互矛盾的，只能折中选择。

按照 (13) 式的选择规则，分别对图 5—图 7 中的结果进行选择，选择的结果如表 2 所列，表 2 给出了三种舰船的建模选择结果，包括磁偶极子个数、对应系数矩阵条件数和对应的建模相对误差。从表 2 可知，小型舰船选择磁偶极子个数为 10 时，系数矩阵条件数为 85.13，相对误差为 0.0295；

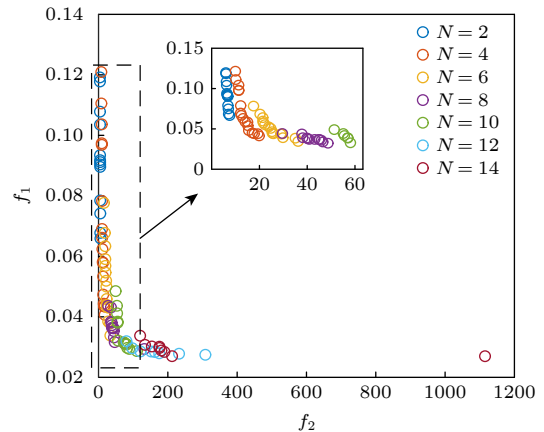


图 5 小型舰船建模结果可选集分布

Fig. 5. Selectable distribution of modeling results for small ships.

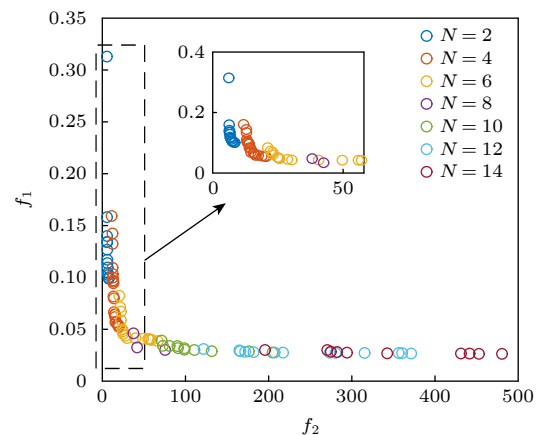


图 6 中型舰船建模结果可选集分布

Fig. 6. Selectable distribution of modeling results for medium-sized ships.

中型舰船选择磁偶极子个数为 8 时, 系数矩阵条件数为 76.5, 相对误差为 0.0290; 大型舰船选择磁偶极子个数为 14 时, 系数矩阵条件数为 128.95, 相对误差为 0.0256.

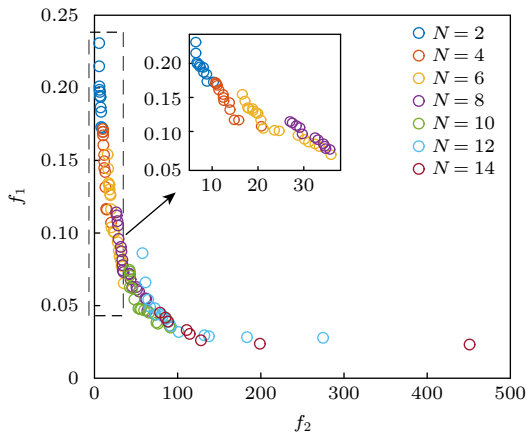


图 7 大型舰船建模结果可选集分布

Fig. 7. Selectable distribution of modeling results for large ships.

表 2 Z_0 深度平面上的三种舰船船模建模结果
Table 2. Modeling results of three kinds of ships on the Z_0 depth plane.

目标	小型舰船	中型舰船	大型舰船
磁偶极子数	10	8	14
系数矩阵条件数	85.13	76.5	128.95
建模相对误差	0.0295	0.0290	0.0256

图 8—图 10 为表 2 中结果所对应的磁偶极子分布情况, 从图 8 可知, 小型舰船的磁偶极子主要分布于舰船尾部、中间靠后下方和中间靠前上方, 与实际的舰船船模结构分布一致, 舰船尾部磁偶极子对应于舰船尾部的螺旋桨、舵、锚等结构, 中间靠后下方的磁偶极子对应的是机舱部分 (发动机) 结构, 中间靠前上方的磁偶极子分布对应的是舰桥舱室部分. 同样, 对比图 9 和图 10 中的磁偶

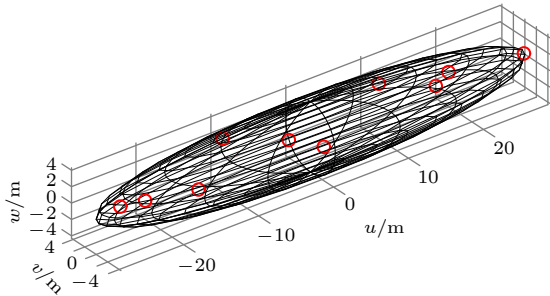


图 8 小型舰船船模磁偶极子分布情况

Fig. 8. Distribution of magnetic dipole of small ship model.

极子分布与相应舰船船模结构, 发现所求磁偶极子的分布与船模的实际结构较为一致, 说明利用本文方法建模可以得到更加合理的磁偶极子分布.

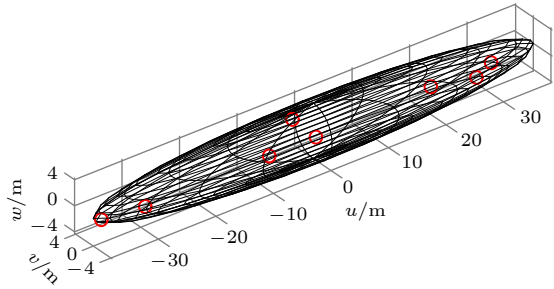


图 9 中型舰船船模磁偶极子分布情况

Fig. 9. Distribution of magnetic dipole of medium ship model.

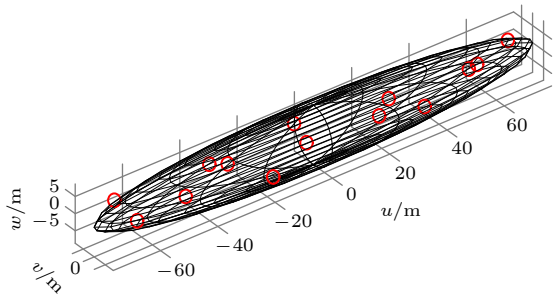


图 10 大型舰船船模磁偶极子分布情况

Fig. 10. Distribution of magnetic dipoles of large ship models.

分别对表 1 中三种舰船船模的两种深度 Z_0 和 Z_1 进行建模和换算, 得到相应的建模相对误差和换算误差如表 3 所列. 可以看出, 三种舰船船模的建模相对误差都小于 3%, 由浅到深的换算误差低于 5%, 由深换算到浅的换算误差低于 6%.

表 3 不同深度的建模相对误差和换算相对误差
Table 3. Modeling relative errors and converted relative errors of different depths.

目标	建模深度/m	换算深度/m	相对误差
小型舰船	8.6	8.6	0.0295
		17	0.0402
	17	8.6	0.0479
		17	0.0256
中型舰船	12.75	12.75	0.0290
		20.5	0.0323
	20.5	12.75	0.0387
		20.5	0.0201
大型舰船	17.2	17.2	0.0256
		28.8	0.0301
	28.8	17.2	0.0547
		28.8	0.0152

上文对三种舰船船模的实测数据进行了建模,从建模结果可知,本文方法能够有效对三种舰船船模进行建模,建模相对误差低于 3%,由浅到深的换算误差低于 5%,由深换算到浅的换算误差低于 6%,求解的磁偶极位置能够较好与真实舰船的结构相符合,验证了本文方法能够有效对舰船磁场进行高精度建模.

4.2.2 不同方法建模结果对比

下面分别用本文方法、文献 [1]、文献 [25] 中的方法进行建模对比,文献 [1] 使用磁偶极子均匀分布的混合模型进行建模,文献 [25] 对混合模型建模进行了改进,为了提高建模稳定性,利用模拟退火算法优化系数矩阵的条件数,以获得磁偶极子分布.文献 [1] 和文献 [25] 中没有给定磁偶极子个数的取值,下面使用这两种方法建模时,选择与本文方法相同的磁偶极子个数.

利用不同的建模方法对表 1 中三种舰船船模的不同深度实测数据进行建模和换算,计算结果如表 4 所列,表中“ \rightarrow ”表示从一个深度换算到另一个深度,从表 4 可知,相对其他两种方法,文献 [1] 中的磁偶极子均匀分布的混合模型系数矩阵条件数是最大的,其建模相对误差和换算相对误差,比文

献 [25] 小,比本文方法大;文献 [25] 的方法系数矩阵条件数最小,建模相对误差和换算相对误差最大,导致这种结果原因是其仅仅通过优化系数矩阵条件数来优化磁偶极子分布,虽然可以获得最小的系数矩阵条件数,但忽略了磁偶极子位置与舰船结构的关系,使得模型与舰船实际模型不符,导致建模相对误差和换算误差最大,建模性能最差;本文方法所建模型的系数矩阵条件数远远小于文献 [1],稍微大于文献 [25],模型相对误差最小,换算误差也是最小,说明本文方法建模性能要好于其他两种方法.

4.2.3 建模稳定性分析

当使用混合模型对舰船磁场进行建模时,其本质是求解一个病态超定方程,病态超定方程对输入极其敏感,输入有轻微的变化都会导致求解结果偏差很大,而对于一个舰船磁场模型,其磁矩参数应当是稳定不变的,由于测量误差的存在,常常会导致模型的求解结果(磁矩参数)不稳定.为了验证本文方法建模的稳定性,分别计算存在测量干扰下的建模精度和磁矩,对比存在和不存在测量干扰下的建模精度和磁矩变化.

现随机选取三种舰船 Z_0 深度平面上的 30 个测量数据点增加 20% 的扰动,利用本文方法、文

表 4 不同方法的建模相对误差和换算相对误差
Table 4. Modeling relative error and conversion relative error of different methods.

目标			文献[1]	文献[25]	本文方法
小型舰船		磁偶极子数	10	10	10
		系数矩阵条件数	1.28×10^3	34.65	85.13
	建模相对误差	17 m	0.0464	0.1071	0.0295
		8.6 m	0.0450	0.0458	0.0256
	换算相对误差	8.6 m→17 m	0.0609	0.0913	0.0402
		17 m→8.6 m	0.1208	0.1523	0.0497
中型舰船		磁偶极子数	8	8	8
		系数矩阵条件数	709.8	28.02	76.5
	建模相对误差	20.5 m	0.0568	0.0619	0.0290
		12.75 m	0.0655	0.0872	0.0201
	换算相对误差	12.75 m→20.5 m	0.077	0.1726	0.0323
		20.5 m→12.75 m	0.129	0.1317	0.0387
大型舰船		磁偶极子数	14	14	14
		系数矩阵条件数	2.36×10^3	78.29	128.95
	建模相对误差	28.8 m	0.0991	0.1302	0.0256
		17.2 m	0.0525	0.0602	0.0152
	换算相对误差	17.2 m→28.8 m	0.0984	0.1033	0.0301
		28.8 m→17.2 m	0.1769	0.1782	0.0547

献 [1] 和文献 [25] 中的方法进行建模, 计算各种方法的建模相对误差, 结果如表 5 所列. 从表 5 中的计算结果可知, 文本方法在有干扰的情况下, 建模相对误差不大于 0.04, 相对于无干扰时, 相对误差波动在 0.01 之内, 验证了本文方法对有干扰存在时的建模有效性; 对比其他两种方法, 本文方法无

表 5 干扰下不同方法的建模相对误差和换算误差
Table 5. Modeling relative errors and conversion errors of different methods under interference.

目标		相对误差		
		文献[1]	文献[25]	本文方法
小型舰船	未加干扰	0.0464	0.1071	0.0295
	加干扰	0.0850	0.1167	0.0378
中型舰船	未加干扰	0.0568	0.0619	0.0290
	加干扰	0.1179	0.0754	0.0313
大型舰船	未加干扰	0.0991	0.1302	0.0256
	加干扰	0.1256	0.1419	0.0303

论在有干扰和无干扰情况下, 建模相对误差都是最小. 文献 [25] 在有干扰和无干扰下, 误差波动较小, 是由于其通过优化系数矩阵条件数提高了建模稳定性, 但是, 由于忽略了磁偶极子分布与舰船结构的关系, 使其建模相对误差较大, 与前面 4.2.2 节中的不同深度上建模结果一致. 综上可知, 本文方法在测量数据存在干扰时, 具有较高的建模精度, 能够有效建模, 且相对其他两种方法, 建模性能最好.

图 11—图 13 为不同舰船使用不同方法在有干扰和无干扰时磁矩求解的绝对误差, 绝对误差计算公式为

$$\Delta m_j^i = |M_j^i - \hat{M}_j^i|, \quad (15)$$

式中, $i = 1 \sim N$ 为对应磁偶极子的序号, $i = N + 1$ 对应椭球体, $j = x, y, z$ 代表不同方向的磁矩, M_j^i 为无干扰下建模求解的磁矩, \hat{M}_j^i 为存在干扰下建模求解的磁矩.

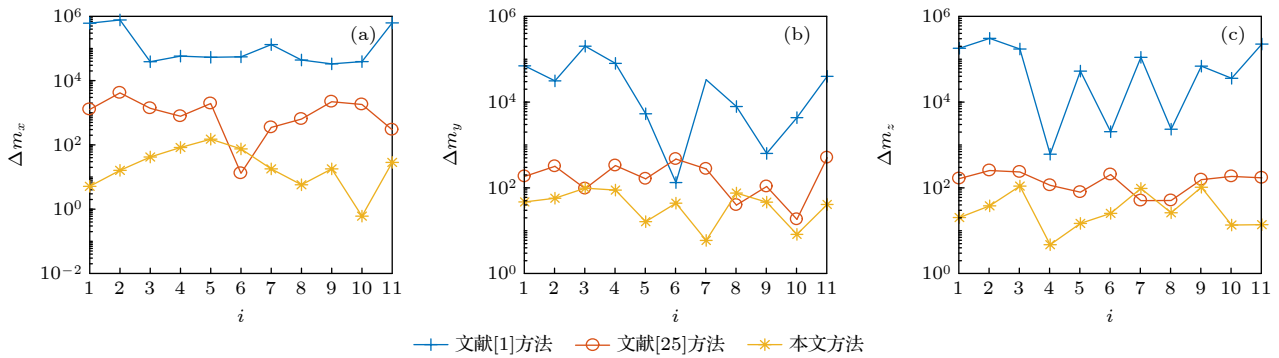


图 11 干扰下不同方法求解的小型舰船磁矩绝对误差 (a) x 方向磁矩绝对误差 Δm_x ; (b) y 方向磁矩绝对误差 Δm_y ; (c) z 方向磁矩绝对误差 Δm_z

Fig. 11. Absolute errors of magnetic moment of small ships solved by different methods under disturbance: (a) Absolute errors of magnetic moment in x -direction; (b) absolute errors of magnetic moment in y -direction; (c) absolute errors of magnetic moment in z -direction.

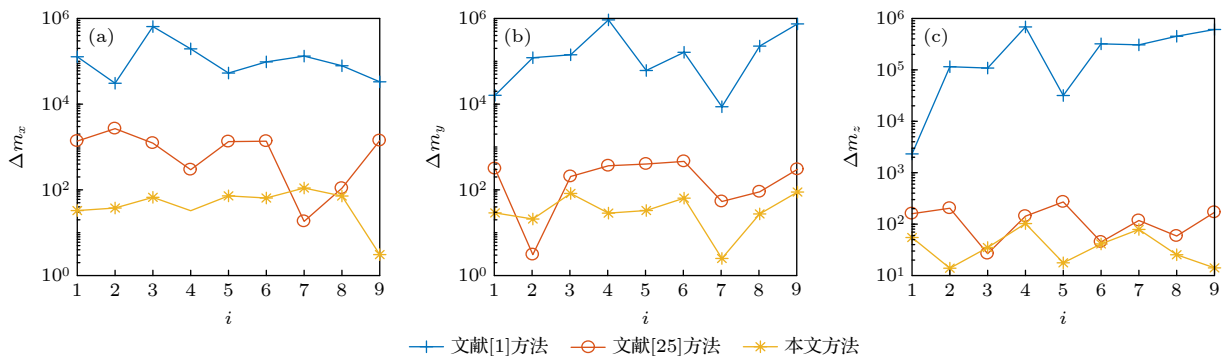


图 12 干扰下不同方法求解的中型舰船磁矩绝对误差 (a) x 方向磁矩绝对误差 Δm_x ; (b) y 方向磁矩绝对误差 Δm_y ; (c) z 方向磁矩绝对误差 Δm_z

Fig. 12. Absolute error of magnetic moment of medium ship solved by different methods under disturbance: (a) Absolute errors of magnetic moment in x -direction; (b) absolute errors of magnetic moment in y -direction; (c) absolute errors of magnetic moment in z -direction.

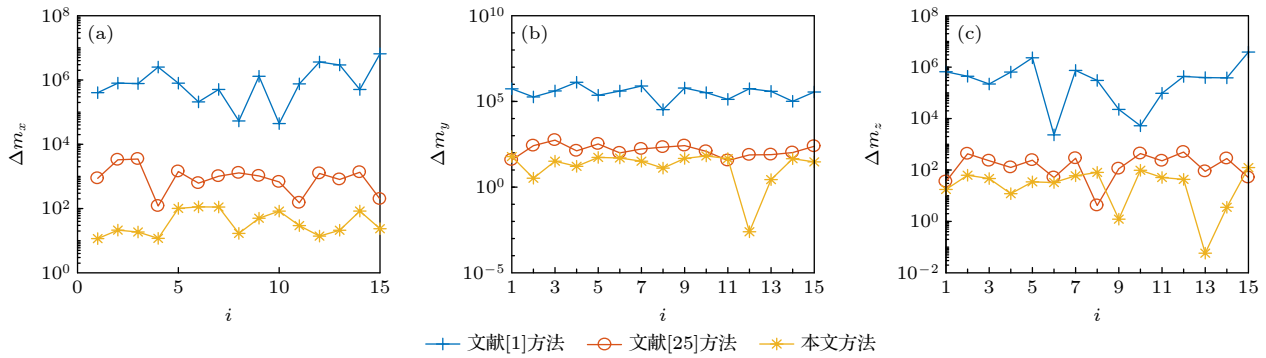


图 13 干扰下不同方法求解的大型舰船磁矩绝对误差 (a) x 方向磁矩绝对误差 Δm_x ; (b) y 方向磁矩绝对误差 Δm_y ; (c) z 方向磁矩绝对误差 Δm_z

Fig. 13. Absolute errors of magnetic moment of large ships solved by different methods under disturbance: (a) Absolute errors of magnetic moment in x -direction; (b) absolute errors of magnetic moment in y -direction; (c) absolute errors of magnetic moment in z -direction.

从图 11—图 13 中的结果可知, 本文方法在有干扰和无干扰下, 求解的磁矩绝对误差小于 10^2 , 相对于舰船磁矩量级^[4] ($10^4 - 10^7$) 来说是很小的, 可认为求解的磁矩在有干扰和无干扰时几乎是一致的, 说明本文方法具有较好的稳定性, 即本文方法能够对舰船磁场进行稳定建模. 同时, 对比图 11—图 13 中三种方法所求磁矩在有干扰和无干扰时的磁矩绝对误差可知, 文献 [1] 中的方法求解磁矩相差最大, 文献 [25] 中的方法次之, 本文方法相差最小, 验证了在三种方法中, 本文方法建模具有最好的稳定性.

上文对三种舰船船模在有干扰和无干扰下进行了建模, 对比了三种方法的建模相对误差和磁矩绝对误差, 验证了本文方法具有良好的稳定性, 且相对其他两种方法, 稳定性是最好的.

4.3 真实海况实测数据建模结果

为了进一步验证本文建模方法的现实有效性, 利用实测的某型舰船通过数据进行建模. 实际测量是在消磁站中进行的, 在海底 13 和 22.3 m 两种深度平面上布置了 5 个三轴磁传感器, 舰船的航行方向与传感器阵列垂直, 分别采集了不同航向上的实测数据, 测量系统为该消磁站自主研制的舰船水下磁测系统, 能够较为精确的测量舰船的磁场, 并且能够给出测量点相对于舰船坐标系下的位置. 如图为测量场景示意图 14.

利用本文方法进行了建模, 计算不同深度平面上的不同航向的建模相对误差和换算误差 (13 m \rightarrow 22.3 m), 计算结果如表 6 所列. 可以看

出, 本文方法在现实舰船磁场建模中, 相对误差小于 0.03, 换算误差小于 0.07, 说明本文方法能够有效在实际工程中应用.

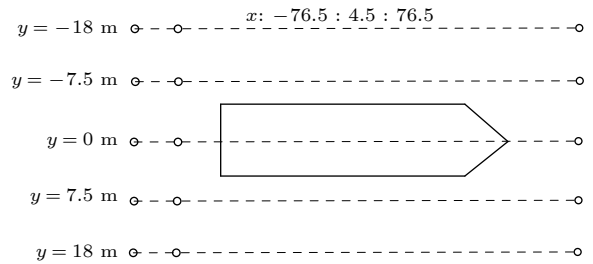


图 14 测量场景示意图

Fig. 14. The schematic diagram of measurement scene.

表 6 真实舰船测量数据建模结果

Table 6. Modeling results of real ship measurement data.

航向	建模相对误差	换算误差
东航向	0.0243	0.0543
西航向	0.0257	0.0621
南航向	0.0236	0.0325
北航向	0.0276	0.0421

5 结 论

本文围绕如何对舰船磁场高精度稳定建模进行了研究, 在舰船磁场混合模型建模方法的基础上, 充分考虑了建模系数矩阵条件数和建模精度, 构造多目标函数优化建模求解问题, 间接将模型求解转换为多目标函数优化求解, 提出了舰船磁场高精度稳定模型建模方法. 实测船模数据建模试验结果表明, 本文方法能够有效进行建模, 建模相对误

差小于 0.03, 换算误差小于 0.06, 和原有的建模方法相比具有较高的精度和较好的磁场换算性能; 通过分析有无干扰条件下的建模结果, 验证了本文建模方法受干扰影响小, 具有很好的建模稳定性. 利用本文方法对海上实测数据建模进行建模, 建模结果表明本文方法具有较高的建模精度和换算精度, 能够有效地在实际工程中应用.

参考文献

- [1] Lin C S, Gong S G 2007 *Ship Physical Field* (2nd Ed.) (Beijing: Ordnance Industry Press) p51 (in Chinese) [林春生, 龚沈光 2007 舰船物理场 (第2版) 第51页]
- [2] Lin C S 1996 *Mine Warfare & Ship Self-Defence* **3** 54 (in Chinese) [林春生 1996 水雷战与舰船防护 **3** 54]
- [3] Ginzburg B, Frumkis L, Kaplan B Z 2002 *Sens. Actuators, A* **102** 67
- [4] Wahlström N, Gustafsson F 2014 *IEEE Trans. Signal Process.* **62** 545
- [5] Yao Z N, Liu D M, Liu S D 2014 *Acta Phys. Sin.* **22** 227502 (in Chinese) [姚振宁, 刘大明, 刘胜道 2014 物理学报 **22** 227502]
- [6] Zhang H X, Zhou S H, Zhang J W 2017 *Acta Autom. Sin.* **43** 822 (in Chinese) [张宏欣, 周穗华, 张伽伟 2017 自动化学报 **43** 822]
- [7] Dai Z H, Zhou S H, Zhang H X 2019 *Acta Electron. Sin.* **47** 2457 (in Chinese) [戴忠华, 周穗华, 张宏欣 2019 电子学报 **47** 2457]
- [8] Sui Y, Leslie K, Clark D 2017 *IEEE Magn. Lett.* **8** 1
- [9] Zhang X J, Kang X Y, Fan L M 2019 *Acta Geophys. Sin.* **62** 1921 (in Chinese) [张晓峻, 康曦元, 樊黎明 2019 地球物理学报 **62** 1921]
- [10] Fei C J, Zhang Q Y, Wu P L 2018 *J. Electron. Inf. Technol.* **11** 2779 (in Chinese) [费春娇, 张群英, 吴佩霖 2018 电子与信息学报 **11** 2779]
- [11] Chen L Z, Feng Y Q, Guo R J 2020 *J. Electron. Inf. Technol.* **42** 573 (in Chinese) [陈路昭, 冯永强, 郭瑞杰 2020 电子与信息学报 **42** 573]
- [12] Gao J J, Liu D M, Yao Q 2006 *Acta Armamentarii* **27** 869 (in Chinese) [高俊杰, 刘大明, 姚琼 2006 兵工学报 **27** 869]
- [13] Guo C B, Xiao H C, Liu D M 2008 *Acta Phys. Sin.* **07** 4182 (in Chinese) [郭成豹, 肖昌汉, 刘大明 2008 物理学报 **07** 4182]
- [14] Yan H, Xiao H C, Zhou G H 2008 *Acta Armamentarii* **07** 839 (in Chinese) [闫辉, 肖昌汉, 周国华 2008 兵工学报 **07** 839]
- [15] Wang D Q, Yu Q 2014 *Ship Sci. Technol.* **36** 1 (in Chinese) [王德强, 余强 2014 舰船科学技术 **36** 1]
- [16] Holmes J J 2006 *Synth. Lect. Comput. Electromagnet.* **1** 1
- [17] Holmes J J 2007 *Synth. Lect. Comput. Electromagnet.* **2** 1
- [18] Yang M M, Liu D M, Liu S D, Lian L T 2010 *Acta Armamentarii* **9** 1216 (in Chinese) [杨明明, 刘大明, 刘胜道, 连丽婷 2010 兵工学报 **9** 1216]
- [19] Wang J G, Gong S G, Liu S D 2001 *J. Naval Univ. Eng.* **3** 49 (in Chinese) [王金根, 龚沈光, 刘胜道 2001 海军工程大学学报 **3** 49]
- [20] Liu S D, Liu D M, Xiao H C 2008 *J. Wuhan Univ. Technol. (Transp. Sci. Eng.)* **6** 1017 (in Chinese) [刘胜道, 刘大明, 肖昌汉 2008 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版) **6** 1017]
- [21] Xu J, Liu D M, Zhou G H 2009 *Ship Sci. Technol.* **01** 156 (in Chinese) [徐杰, 刘大明, 周国华 2009 舰船科学技术 **01** 156]
- [22] Wang H, Zhou Y Z, Zhou G H 2007 *J. Naval Univ. Eng.* **01** 105 (in Chinese) [王桓, 周耀忠, 周国华 2007 海军工程大学学报 **01** 105]
- [23] Zhang C Y, Xiao H C, Xu J 2010 *J. Huazhong Univ. Sci. Technol. (Nat. Sci. Edition)* **11** 124 (in Chinese) [张朝阳, 肖昌汉, 徐杰 2010 华中科技大学学报 (自然科学版) **11** 124]
- [24] Wu Z D, Zhou S H, Guo H S 2013 *J. Wuhan Univ. Technol.* **09** 67 (in Chinese) [吴志东, 周穗华, 郭虎生 2013 武汉理工大学学报 **09** 67]
- [25] Dai Z H, Zhou S H, Shan S 2018 *Acta Electron. Sin.* **46** 1524 (in Chinese) [戴忠华, 周穗华, 单珊 2018 电子学报 **46** 1524]
- [26] Guo C B, Yin Q Q 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 114101 (in Chinese) [郭成豹, 殷琦琦 2019 物理学报 **68** 114101]
- [27] Alqadah H F, Valdivia N P, Williams E G 2016 *Prog. Electromagnet. Res. B* **65** 109
- [28] Vuillermet Y, Chadebec O, Coulomb J L, Rouve L L, Cauffet G, Bongiraud J P, Demilier L 2008 *IEEE Trans. Magn.* **44** 1054
- [29] Coello C A C 2006 *IEEE Comput. Intell. Mag.* **1** 28
- [30] Dorigo M, Gambardella L M 1997 *IEEE Trans. Evol. Comput.* **1** 53
- [31] Bandyopadhyay S, Saha S, Maulik U, Deb K 2008 *IEEE Trans. Evol. Comput.* **12** 269
- [32] Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S 2004 *IEEE Trans. Evol. Comput.* **8** 256
- [33] Gong M G, Jiao L C, Yang D D, Ma W P 2009 *J. Software* **20** 271 (in Chinese) [公茂果, 焦李成, 杨咚咚, 马文萍 2009 软件学报 **20** 271]
- [34] Kennedy J 1995 *Process of IEEE International Conference on Neural Networks* Perth Australia, November 27, 1995 4 1942

Multi-objective optimization of ship magnetic field modeling method*

Dai Zhong-Hua[†] Zhou Sui-Hua Zhang Xiao-Bing

(*Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

(Received 20 February 2021; revised manuscript received 12 March 2021)

Abstract

Ship magnetic field modeling is not only beneficial to understanding the characteristics of ship magnetic field, but also can predict the space distribution of ship magnetic field, which has an important application in ship protection and underwater weapons. Aiming at the problems of low modeling accuracy and poor stability in establishing the ship magnetic field hybrid model, a method of establishing a high precision stability model is proposed in this paper. A hybrid model of magnetic field of a ship is established by using a uniformly magnetized rotating ellipsoid and a magnetic dipole array. Since the number and positions of magnetic dipoles in the hybrid model have an important effect on the modeling accuracy and stability, the fitting error function representing the modeling accuracy and the coefficient matrix condition number function representing the stability of the model are constructed by taking the magnetic dipole parameters as unknown variables. The multi-objective function is constructed by combining the fitting error function with the coefficient matrix conditional number function, which indirectly transforms the modeling problem into a multi-objective optimization problem. The multi-objective function is solved by using the multi-objective particle swarm optimization algorithm, and an optional set of modeling solution results is obtained. In order to select the best results from the optional set, the corresponding selection rules are designed based on the modeling accuracy. The proposed method is validated by the measured data of three kinds of ship models, the modeling results show that the relative error of the model is less than 3%, and the conversion error is less than 6%, which verifies that the proposed method can effectively model the ship magnetic field. Though the measurement data error exists, the modeling solution results from the proposed method have the best stability, which verifies that the modeling method proposed in this work has good stability. Compared with the two existing modeling methods, the proposed method has very good modeling accuracy and stability. Finally, the actual data of a ship on the sea are used for modeling, and the modeling results further verify that the proposed method has high modeling accuracy and conversion accuracy, and can be effectively applied to the relevant projects.

Keywords: ship magnetic field modeling, multi-objective function, multi-objective particle swarm optimization algorithm, selection rule

PACS: 41.20.Gz, 02.30.Zz

DOI: 10.7498/aps.70.20210334

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51509252, 42074074).

[†] Corresponding author. E-mail: 602024288@qq.com