

# 一种面向应用的电性等效源舰船磁场建模方法\*

陈功轩<sup>1)2)</sup> 王磊<sup>1)2)†</sup> 程军胜<sup>1)2)3)</sup> 刘士菟<sup>1)2)</sup> 王心怡<sup>4)</sup> 王秋良<sup>1)2)‡</sup>

1) (中国科学院电工研究所, 北京 100190)

2) (中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

3) (中国科学院电工研究所, 高密度电磁动力与系统全国重点实验室, 北京 100190)

4) (中国船舶集团有限公司, 昆明船舶设备研究试验中心, 昆明 650216)

(2025年11月24日收到; 2026年1月16日收到修改稿)

舰船磁场建模是发展舰船磁探测与磁隐身技术的核心之一, 针对传统磁性等效源反演方法存在的参数物理意义抽象及方程病态性等问题, 本文提出了一种基于迭代建模与分级优化策略的电性等效源建模方法. 该方法以具有明确物理意义的通电圆环为基础单元, 利用烟花算法进行参数寻优, 确保模型可直接服务于物理磁场模拟. 为克服反演过程中的病态性, 本文建立了由简入繁的迭代建模框架, 结合位置-电流分级优化策略, 成功将高维病态反演转化为一系列低维良态优化问题. 数值仿真实验表明: 该方法具有优异的反演精度与稳定性, 在不同地磁环境下, 其建模平面相对误差均控制在5%以内; 即使叠加测量噪声干扰, 误差仍维持在同等水平, 表现出极强的鲁棒性; 同时向内与向外平面磁场外推误差保持在6%—9%区间, 表现出良好的外推能力. 研究证实, 本方法有效地规避了传统反演的病态陷阱, 为高精度、强鲁棒性的舰船磁场建模提供了一种极具工程应用价值的新途径.

**关键词:** 舰船磁场建模, 等效源模型, 烟花算法, 磁场反演

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251595

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251595

## 1 引言

随着舰船隐身技术的发展, 针对舰船的探测手段也发生了深刻变革, 逐步从单一物理场的探测演进为声、磁、红外等多种物理场联合探测的模式. 其中, 舰船磁场拥有独特且鲜明的目标特征, 具有极高的辨识度<sup>[1]</sup>, 已经成为世界各国在探测、隐身和模拟领域争相竞争的热点<sup>[2-4]</sup>. 舰船磁场是由于舰船的金属结构、电气设备的运行以及地球磁场的影响, 在建造及航行过程中, 产生的复杂且具有特定规律的磁场分布. 尽管直接测量是获取舰船磁场最准确的方式, 但面临成本高、周期长, 且只能测

量特定区域的磁场的问题. 因此, 发展高效、准确的舰船磁场建模方法一直是本领域研究重点.

现有建模主流方法可分为数值方法与等效源法两大类. 数值方法以有限元法 (FEM)、边界元法 (BEM) 和积分方程法 (IEM) 为代表<sup>[5,6]</sup>, 具有处理复杂几何构型与非线性材料的能力, 适用于高精度的磁场仿真. 然而对舰船这类具有大型薄壁结构的对象会导致计算规模急剧增大、求解时间显著延长. 为此数值方法的研究重点逐渐转向通过改进算法与耦合多重数值策略来提升计算效率.

舰船磁场等效源建模技术通过构建等效虚拟磁源, 并利用优化算法调整源参数, 实现对舰船磁场的高精度拟合, 因此也被称为舰船磁场反演. 该

\* 国家自然科学基金 (批准号: 52277032, 52422702) 和云南省院士专家工作站严陆光院士工作站 (批准号: 202305AF150049) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [wanglei@mail.iee.ac.cn](mailto:wanglei@mail.iee.ac.cn)

‡ 通信作者. E-mail: [qiuiliang@mail.iee.ac.cn](mailto:qiuiliang@mail.iee.ac.cn)

技术结合有限测量数据, 可实现高精度舰船磁场预测, 兼具建模灵活性与工程实用性, 在舰船磁场研究中被广泛应用<sup>[7]</sup>. 早期研究主要采用磁偶极子<sup>[8,9]</sup>、均匀磁化旋转椭球体等简单模型进行等效, 随后发展为将二者结合的混合模型<sup>[10-14]</sup>. 此外, 也涌现出一些新的磁性等效源<sup>[13,15]</sup>, 如磁单极子或面磁荷, 进一步丰富了技术路径. 磁偶极子是抽象出来的等效小磁源, 磁偶极子阵列通过在合适位置布置数个磁偶极子, 使其合成磁场逼近实测值. 旋转椭球体则将船体等效为均匀磁化椭球, 用于模拟舰船在外部场中产生的宏观感应磁场. 当前主流研究多采用混合模型, 通过综合调控旋转椭球体与磁偶极子阵列的参数, 以实现磁场整体特征的协同再现. 混合模型中参数的优化方法<sup>[8-15]</sup>, 是舰船等效源建模的核心问题, 也是典型的不适定问题, 该问题的病态性 (Ill-posed) 是固有的数学挑战. 为了解决病态问题挑战, 不能仅依赖于对算法优化, 而需要从模型构建或求解策略的层面进行系统性处理. 为克服这一挑战, 当前研究已呈现三个相互关联的趋势: 一是在模型结构上从单纯的数学等效转向物理引导, 即依据舰船铁磁结构 (如船体、轮机的实际三维分布) 优化等效源的布置位置, 使模型更具物理真实性. 二是正则化方法 (如 Tikhonov 和 TSVD), 引入正则化惩罚项来压制噪声等其他误差, 抑制过拟合. 三是采用多目标优化方法, 将问题重新定义为包含多个冲突目标的优化问题, 并通过智能算法寻找非支配解集 (例如 Pareto), 从而在建模精度与数值稳定性之间实现权衡. 不同技术方向在实际应用中常呈现融合态势, 正则化中对解光滑性的数学约束, 和多目标优化中对结构相关性的参考, 均采纳了将舰船物理结构带来的合理先验知识融入求解过程的共同思路, 共同引导反演结果向更稳定、更可靠的方向收敛.

如图 1 所示, 磁等效源建模通过测量舰船近端或可测量磁场, 建立相应的模型, 依此推算目标区域磁场, 进而设计出所需电缆以实现应用. 然而, 这类方法建模时依赖于“磁源产生磁场”的模型, 在应用于舰船消磁系统或磁性模拟诱饵等实际任务时, 需进一步通过“电流产生磁场”的方式进行电缆、磁体等电源设计<sup>[16-20]</sup>. 将建模与应用分为“磁建模”和“电生磁”两个独立环节, 不仅会增加系统设计的复杂性, 还可能导致方程病态, 显著地增加磁场反演的计算难度<sup>[14,15,21]</sup>.

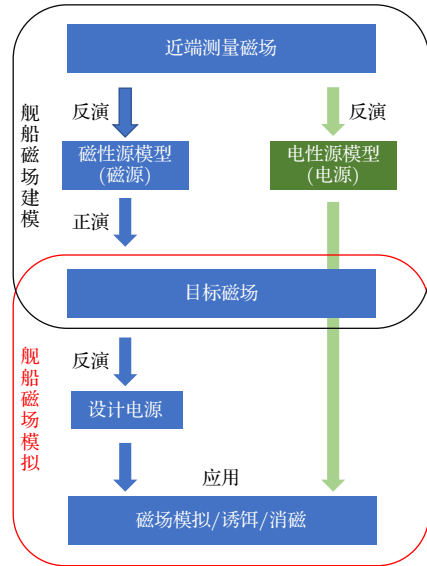


图 1 舰船磁场建模及应用思路

Fig. 1. Modeling and application routes of ship magnetic fields.

为此, 本文提出一种基于电性等效源的舰船磁场建模方法. 该方法选取通电圆环作为基础单元, 结合舰船物理尺寸约束, 利用烟花算法优化圆环参数以实现目标磁场的高精度拟合; 得益于模型参数的物理直观性, 其结果可直接服务于后续磁场模拟, 有效地简化了工程设计流程. 针对反演过程中普遍存在的病态难题, 本文采用迭代建模与分级优化的联合策略: 通过“先粗略后精细”的模型迭代演化, 配合“先位置后电流”的分步求解, 有效地避免了对高维方程组的直接计算, 从而保证了求解过程的良好性与数值稳定性. 与 COMSOL 标准潜艇模型的对比结果表明, 本文提出的方法在保证计算效率的同时, 具有优异的建模精度和鲁棒性.

## 2 电性等效源理论基础与烟花算法

### 2.1 电性等效源模型

传统磁性等效源本质是对磁化强度分布的模拟. 根据安培分子电流假说和现代物理学<sup>[22]</sup>, 磁现象本质是微观粒子运动产生的电流. 无论是固定磁场还是感应磁场, 其根源都能够看成铁磁材料内部微观粒子产生的电流的有序排列. 因此, 采用电性等效源在物理机理上是合理的.

由于电流在空间上必须形成闭环, 所以基础电性源模型的选择应该是闭合载流回路. 任意的载流回路在足够远场中仍然能够看成单磁偶极子, 这体

现了电性源与磁性源在物理上的互通. 在众多形状的载流回路中, 载流圆环具有建模简单, 计算量小, 易于理解的优势, 并且圆形与潜艇等椭球形舰体的外轮廓相似, 非常适合用于舰船建模, 因此本文将载流圆环作为基础电性源模型. 根据毕奥-萨伐尔定律<sup>[23]</sup>, 对于一段无限小的电流元  $I dl$ , 在真空某点产生的磁感应强度为

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}, \quad (1)$$

其中  $d\mathbf{B}$  为电流元在目标点产生的磁矢量;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $I$  为电流强度;  $d\mathbf{l}$  为电流源矢量;  $\mathbf{r}$  为电流源到目标点的方向矢量;  $r$  为从电流元到目标点的距离. 由此可得到, 当电流环位于  $x = 0$  的  $yz$  平面上时, 即当电流环的轴线与  $x$  方向对齐时, 空间中任意位置的磁场为

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R - z \sin \theta - y \cos \theta}{\left(\sqrt{x^2 + (y - R \cos \theta)^2 + (z - R \sin \theta)^2}\right)^3} d\theta, \\ B_y &= \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{x \cos \theta}{\left(\sqrt{x^2 + (y - R \cos \theta)^2 + (z - R \sin \theta)^2}\right)^3} d\theta, \\ B_z &= \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{x \sin \theta}{\left(\sqrt{x^2 + (y - R \cos \theta)^2 + (z - R \sin \theta)^2}\right)^3} d\theta. \end{aligned} \quad (2)$$

当电流环位于  $y = 0$  的  $xz$  平面上时, 即当电流环的轴线与  $y$  方向对齐时, 空间中任意位置的磁场为

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{-y \cos \theta}{\left(\sqrt{y^2 + (z - R \sin \theta)^2 + (x - R \cos \theta)^2}\right)^3} d\theta, \\ B_y &= \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{x \cos \theta + z \sin \theta - R}{\left(\sqrt{y^2 + (z - R \sin \theta)^2 + (x - R \cos \theta)^2}\right)^3} d\theta, \\ B_z &= \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{-y \sin \theta}{\left(\sqrt{y^2 + (z - R \sin \theta)^2 + (x - R \cos \theta)^2}\right)^3} d\theta. \end{aligned} \quad (3)$$

当电流环位于  $z = 0$  的  $xy$  平面上时, 即当电流环的轴线与  $z$  方向对齐时, 空间中任意位置的磁场为

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z \cos \theta}{\left(\sqrt{z^2 + (y - R \sin \theta)^2 + (x - R \cos \theta)^2}\right)^3} d\theta, \\ B_y &= \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z \sin \theta}{\left(\sqrt{z^2 + (y - R \sin \theta)^2 + (x - R \cos \theta)^2}\right)^3} d\theta, \\ B_z &= -\frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R - y \sin \theta - x \cos \theta}{\left(\sqrt{z^2 + (y - R \sin \theta)^2 + (x - R \cos \theta)^2}\right)^3} d\theta, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $R$  为电流环的半径, 电流  $I$  的方向遵循右手定则. 对于中心为  $(x_j, y_j, z_j)$  的圆环, 空间任意点  $(x_i, y_i, z_i)$  处的磁场, 可用  $(x_i - x_j)$ ,  $(y_i - y_j)$ , 和  $(z_i - z_j)$ ,

代替上述公式中的  $x$ ,  $y$  和  $z$  得到. 假定舰船模型中含  $n$  个电流环  $Q_j$ , 坐标为  $(u_j, v_j, w_j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ ; 周围  $m$  个目标场点的坐标为  $(x_j, y_j, z_j)$ ,  $i = 1,$

2, ...,  $m$ . 则该电流环  $Q_j$  在目标点  $i$  产生的磁感应强度  $B_{ij}$  为

$$\begin{aligned} B_{xij} &= A_{xij}Q_j, & B_{yij} &= A_{yij}Q_j, \\ B_{zij} &= A_{zij}Q_j, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $A_{xij}$ ,  $A_{yij}$ ,  $A_{zij}$  为依照 (1) 式—(4) 式简化表示的运算系数, 所有电流环在目标点  $i$  产生的磁感应强度  $B_i = [B_{xi}, B_{yi}, B_{zi}]$  可由所有电流环求和得出:

$$\begin{aligned} B_{xi} &= \sum_{j=1}^n A_{xij}Q_j, \\ B_{yi} &= \sum_{j=1}^n A_{yij}Q_j, \\ B_{zi} &= \sum_{j=1}^n A_{zij}Q_j. \end{aligned} \quad (6)$$

考虑到全部的目标点, 可将 (6) 式改写为

$$B = AQ, \quad (7)$$

其中,

$$\begin{aligned} B &= [B_{x1}, B_{y2}, B_{z3}, \dots, B_{xm}, B_{ym}, B_{zm}]^T, \\ Q &= [Q_1, Q_2, \dots, Q_j]^T, \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{x11} & A_{y11} & A_{z11} & \dots & A_{x1j} & A_{y1j} & A_{z1j} \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\ A_{xm1} & A_{ym1} & A_{zm1} & \dots & A_{xmj} & A_{ymj} & A_{zmj} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

## 2.2 烟花算法

最初的烟花算法 (fireworks algorithm, FWA) 是由谭营等<sup>[24]</sup> 在 2010 年提出的, 灵感来自烟花的爆炸. 该算法模拟烟花爆炸产生火花的过程, 在空间中进行高效全局搜索. 郑少秋等<sup>[25]</sup> 在 2013 年提出了增强型烟花算法 (enhanced fireworks algorithm, EFWA), 以解决传统 FWA 中几个算子的缺点. 所提出的 EFWA 修改了 FWA 中的映射, 高斯变异和选择算子, 并提供了一种新的幅度检查策略. 在随后烟花算法的发展中, 大部分的改进都是基于 FWA 和 EFWA 来提出更先进的运算策略<sup>[26,27]</sup>. 相较于遗传算法、粒子群优化算法等其他群智能算法, 烟花算法更适用于连续空间的优化问题. 所以本文采用烟花算法进行求解. 烟花算法的整体流程如下, 流程图见图 2 所示<sup>[28,29]</sup>.

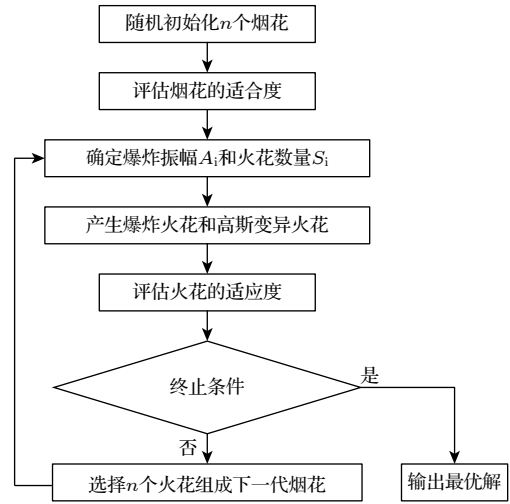


图 2 烟花算法整体流程

Fig. 2. Fireworks algorithm flow.

### 1) 烟花初始化

在搜索空间中随机初始化一定数量的位置作为第一代烟花, 其中  $N$  为烟花个数,  $X_i$  为第  $i$  个烟花.

### 2) 设置爆炸火花数和爆炸幅度

每个烟花的爆炸半径和爆炸产生火花数不同. 对于烟花  $X_i$ , 其爆炸半径  $A_i$  和爆炸火花数目  $S_i$  的计算公式分别为

$$A_i = \hat{A} \cdot \frac{f(X_i) - f_{\min} + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f(X_i) - f_{\min}) + \varepsilon}, \quad (9)$$

$$S_i = M \cdot \frac{f_{\max} - f(X_i) + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f_{\max} - f(X_i)) + \varepsilon}, \quad (10)$$

其中  $f_{\max} = \max(f(X_i))$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 为当前烟花种群中适应度最大值;  $f_{\min} = \min(f(X_i))$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 为当前烟花种群中适应度最小值;  $\hat{A}$  是爆炸半径缩放因数;  $M$  是爆炸火花数目缩放因数;  $\varepsilon$  是一个极小量用来避免除零.

为了限制适应度好的位置不会产生过多的火花, 差的位置不会产生过少火花, 进行如下限制:

$$S_i = \begin{cases} \text{round}(aM), & \text{if } S_i < aM, \\ \text{round}(bM), & \text{if } S_i > bM, \\ \text{round}(s_i), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

其中  $a$  和  $b$  是限定总体大小范围的常数参数.

### 3) 产生爆炸火花

每个烟花可以在爆炸半径  $A_i$  内产生  $S_i$  个爆炸火花, 对于其中一个烟花  $X_i$  来说, 生成的火花会随

机选择  $z$  个维度进行更新,  $z < D$ ,  $D$  为  $X_i$  的维数.

$$X_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} A_i \text{rand}(-1,1) + X_{i,j}^k, & j \in z, \\ X_{i,j}^k, & j \notin z, \end{cases} \quad (12)$$

其中  $\text{rand}(-1, 1)$  为  $-1$  到  $1$  之间的随机数;  $X_{i,j}^{k+1}$  为第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 个烟花中第  $j$  个爆炸火花 ( $j = 1, 2, \dots, S_i$ ) 第  $k$  维坐标信息.

进行火花越界检测, 如果越界, 则用随机函数重置到解的空间内.

$$X_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} \text{lb} + \text{rand}(\text{ub} - \text{lb}), & X_{i,j}^{k+1} < \text{lb}, \\ \text{ub} - \text{rand}(\text{ub} - \text{lb}), & X_{i,j}^{k+1} > \text{ub}, \\ X_{i,j}^{k+1}, & \text{otherwise}, \end{cases} \quad (13)$$

其中  $\text{ub}$  和  $\text{lb}$  分别为火花第  $k$  维坐标信息的上下边界.

#### 4) 产生高斯变异火花

高斯爆炸被设计为另一种生成火花的方式, 用于维持火花的多样性.

$$\hat{X}_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} X_{i,j}^k + (X_{\text{best}}^k - X_{i,j}^k) \cdot \text{Gaussian}(0, \sigma(g)), & j \in z, \\ X_{i,j}^k, & j \notin z, \end{cases} \quad (14)$$

其中  $\hat{X}_{i,j}^{k+1}$  为第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 个烟花中第  $j$  个高斯变异火花 ( $j = 1, 2, \dots, S_i$ ) 第  $k$  维坐标信息;  $X_{\text{best}}^k$  是当前求解得到的最优火花的第  $k$  维坐标信息,  $\text{Gaussian}$  为高斯分布随机数;  $\sigma(g)$  为引入的动态衰减因子.

#### 5) 下一代烟花选择

在每一代迭代中, 首先将烟花、爆炸火花与变异火花三类个体合并, 并利用 GPU 并行计算对整个合并种群的适应度进行评估<sup>[30]</sup>. 随后, 执行精英保留策略, 更新全局最优解, 引导后续高斯变异. 对于剩余种群, 采用锦标赛选择机制进行筛选.

6) 判断是否满足终止条件, 如果不满足则返回步骤 2), 如果满足, 则输出全局结果.

### 3 良态模型迭代优化策略

直接对包含大量未知数的 (7) 式进行求解, 会导致方程组呈现严重的病态特征: 即解的不唯一性以及对于轻微扰动的高度敏感. 针对这一问题, 本研究提出将“如何求解病态方程”转化为“如何构建良

态模型”. 不直接在超高维空间中进行盲目搜索, 采用联合先验知识引导、迭代建模与分级优化的总体策略, 逐步建立一个物理上合理、数学上稳定的电性等效源模型.

#### 3.1 目标函数

为了量化反演效果, 将空间所有测量点上, 模型计算磁场与目标磁场的三分量残差平方和作为适应度函数, 该函数与数学上相对误差的计算方法在本质上相同, 可看做相对误差的分子计算 (相对误差在第 5 节中涉及). 适应度函数的值越小, 表示模型反演效果越好, 精度越高.

$$F = \alpha \times \sum_{i=1}^m (B_{xi} - B_{xoi})^2 + (B_{yi} - B_{yoi})^2 + (B_{zi} - B_{zoi})^2, \quad (15)$$

其中  $B_o = [B_{xoi}, B_{yoi}, B_{zoi}]$  为目标点  $i$  的实际磁场,  $B_i = [B_{xi}, B_{yi}, B_{zi}]$  为模型在目标点  $i$  的计算磁场;  $\alpha$  为缩放系数, 用于避免数值过大或者过小, 提升算法稳定性与结果的可读性. 物理约束的引入进一步确保模型良态, 基于舰船结构的先验知识, 对参数空间进行降维约束: 圆环中心坐标及半径需限制在舰船本体的核心物理空间内 (可略微外延以模拟外部磁场), 禁止在无效空间搜索. 电流强度根据先验知识设定合理的取值范围和量级. 此外, 电流环本身是一种物理实体 (如通电线圈), 具有明确的物理尺度和连续的作用范围. 这种大尺寸的实体物理特性, 在数学上相较于由众多离散、抽象的磁源点的组合模型, 物理意义更清晰、数值稳定性更好.

#### 3.2 迭代建模与分级优化

本文为良态模型的建立设计了迭代建模和分级优化的框架. 迭代建模的核心遵循由简入繁、循序渐进的原则, 即利用上一代模型的求解结果作为先验信息, 引导下一代模型的构建. 演化过程从由少量电流环构成的低维度粗略模型开始, 逐步过渡至多电流环的高维度精细模型, 确保反演的全过程始终处于良态可控的范围内. 这一策略将复杂的高维反演问题分解为一系列低维良态子问题, 与“直接在高维空间求解再引入抗病态方法”的思路存在本质区别. 迭代建模具体流程如下.

1) 初始代 (低维框架): 设定 3 个电流环, 其中电流环轴线朝向  $X$ , 朝向  $Y$ , 朝向  $Z$  的电流环各一

个, 在极低维度下快速求解出舰船磁场的主要特征 (最优坐标和大小).

2) 进化代 (逐步精细): 第二代, 根据第一代的求解结果, 将某一个朝向电流环的数量增加一个, 再求解本代的电流环最优坐标和大小. 随后的每一代都基于上一代结果, 结合电流环的分布、电流环对模型的贡献、舰船结构及地磁场方向, 有针对性地增加或者减少特定朝向的电流环数量.

3) 终止条件: 当增加电流环不再显著地提升模型精度, 或者模型精度达到预期目标时终止迭代.

在确定了某一代模型的电流环数量及结构后, 针对具体参数的求解, 本文进一步采用了位置-电流分级优化策略, 流程如下.

1) 第一级: 电流分布优化 (固定位置), 在位置参数固定的前提下, 方程 (7) 保持良态特征. 本文引入烟花算法进行求解, 利用其爆炸算子和高斯变异算子, 算法能有效保持种群多样性, 避免陷入局部最优, 快速获得当前位置下的最优电流分布.

2) 第二级: 位置参数寻优 (固定电流适应度), 将第一级求得的最优适应度值作为当前位置配置的评价指标, 随后对电流环位置进行搜索. 考虑到位置与电流大小的互补性, 此处将位置搜索步长设为 1 m. 模型的可行位置有限, 此步骤无需引入智能优化算法, 可以直接采用线性优化寻找最优位置组合.

本策略通过“外层搜位置、内层算电流”的双层嵌套结构, 同时利用线性问题的稳定性和随机优化算法的全局搜索能力, 最终收敛至整体更优的稳定解.

## 4 数值仿真实验

### 4.1 目标潜艇

为验证本文提出的电性源建模方法的有效性, 采用 COMSOL 案例库中的潜艇有限元模型作为验证目标. COMSOL 模型中的几何和网格细节如图 3 所示, 因为与船舶的尺寸相比, 用于建造船舶的金属板足够薄, 所以将舰船壳体的三维几何结构建模为二维面结构来避免细长结构的体网格导致的自由度激增. 模型中潜艇艇身半径为 2.5 m, 长度 32 m, 金属壳层厚度为 0.05 m, 相对磁导率为 700, 其他区域相对磁导率为 1. 虽然几何结构和网格中的边界特征厚度为零, 但在考虑所涉及的物理

因素时, 采用的是精确的厚度. 磁场计算选用基于磁标势的三次高阶离散单元, 并对舰船磁源和目标区域执行了网格细化和无关性研究.

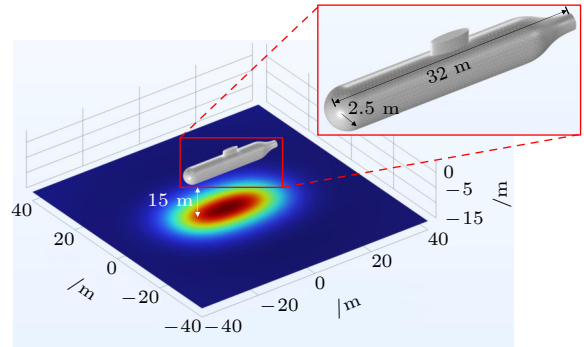


图 3 COMSOL 模型中的几何和网格细节

Fig. 3. Geometric and mesh details in the COMSOL model.

根据模型将基础电性源环的半径设为 2.5 m. 电流环中心点位于潜艇中轴线上, 将电流环的 YZ 坐标固定为 0. 所以全部模型中变量为: 电流环个数, 电流环朝向, 电流环的 X 轴坐标, 电流环电流大小.

考虑到舰船磁场相关计算在国际单位制下通常为 nT 量级, 直接计算得到的适应度值过小, 需利用科学记数法表示, 不便于直观分析与后续优化. 为此, 将缩放系数  $\alpha$  设为  $10^{16}$ , 可使适应度值的数量级调整至千、万数量级, 便于结果解读与传递, 利于最优位置线性优化.

### 4.2 1 号潜艇数值实验

本节采用案例库中默认背景磁场, 即  $B_{\text{ground1}} = [0, 0, -5 \times 10^{-5}]$  T, 该地磁场大多位于南北极地区的背景地磁场. 将潜艇模型记 1 号潜艇, 以区分后文中不同磁化环境下的潜艇模型.

将模型生成的潜艇正下方 15 m 的 40 m 正方形平面处的详细磁场数据提取出来, 并减掉背景地磁场, 得到由潜艇产生在正下方 15 m 平面产生的磁场数据. 选择其中数值较大的核心区域中特定的点, 作为建模的目标场点. 图 4 展示了潜艇正下方 15 m 平面的磁场矢量分布特征. 由图 4 可知, 从该平面不同位置发散出了各支红色箭头, 其中红色箭头的长短代表该位置磁场的模值大小, 箭头的方向代表该位置磁场的方向, 此外该平面还有一个磁场模值图, 不同颜色代表该地方磁场的模值大小.

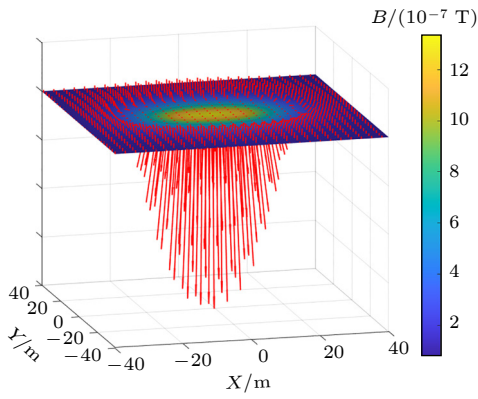


图 4 1号潜艇正下方 15 m 平面的磁场  
Fig. 4. The magnetic field 15 m below the submarine No. 1.

第一代作为轴向朝 X, 朝 Y, 朝 Z 的电流环各有一个的情况, 优化结束后列出了电流环最优分布如表 1 所列. 可以看出, Z 朝向电流环的贡献最为显著, 结合所处地磁场, 在下一代增加一个 Z 朝向的电流环. 根据求解结果画出本代模型在正下方 15 m 平面的磁场分布情况, 如图 5(a) 所示. 可以看出, 此代模型已能大致复现潜艇的磁场分布, 但拟合误差较大, 表明模型精度不足.

第二代, 对朝向 X 的电流环 1 个, 朝向 Y 的

流环 1 个, 朝向 Z 的电流环 2 个的情况进行优化求解. 表 1 列出了最优分布, 与上一代对比, 增加电流环个数大大降低了模型的适应度值, 提高了模型的模拟精度. 其中两个 Z 轴朝向电流环的位置是影响总体适应度的关键, 所以在下一代再增加一个 Z 轴朝向的电流环. 根据本代求解结果画出模型正下方 15 m 平面的磁场分布情况, 如图 5(b) 所示.

第三代, 对朝向 X 的电流环 1 个, 朝向 Y 的电流环 1 个, 朝向 Z 的电流环 3 个的情况进行优化求解. 模型精度再次实现数量级上的提升, 见表 1. 除表中列出的方案外, 众多位置方案都展示出了优越的适应度, 即使不是最优的位置, 适应度也在 4000 左右, 远小于上一代的最优适应度. 这表明, 更多等效源提供了冗余度, 增强了模型的鲁棒性, 允许通过调整电流强度来“补偿”欠佳的位置配置, 这是模型趋于稳定的重要标志.

同时从以上三代的内容还可以看出, Y 轴朝向的电流环电流值很小, 表明其在模型中的作用较小, 所以在下一代中, 舍弃此电流环, 再增加一个 Z 朝向的电流环. 根据本代求解结果画出模型正下方 15 m 平面的磁场分布情况, 如图 5(c) 所示.

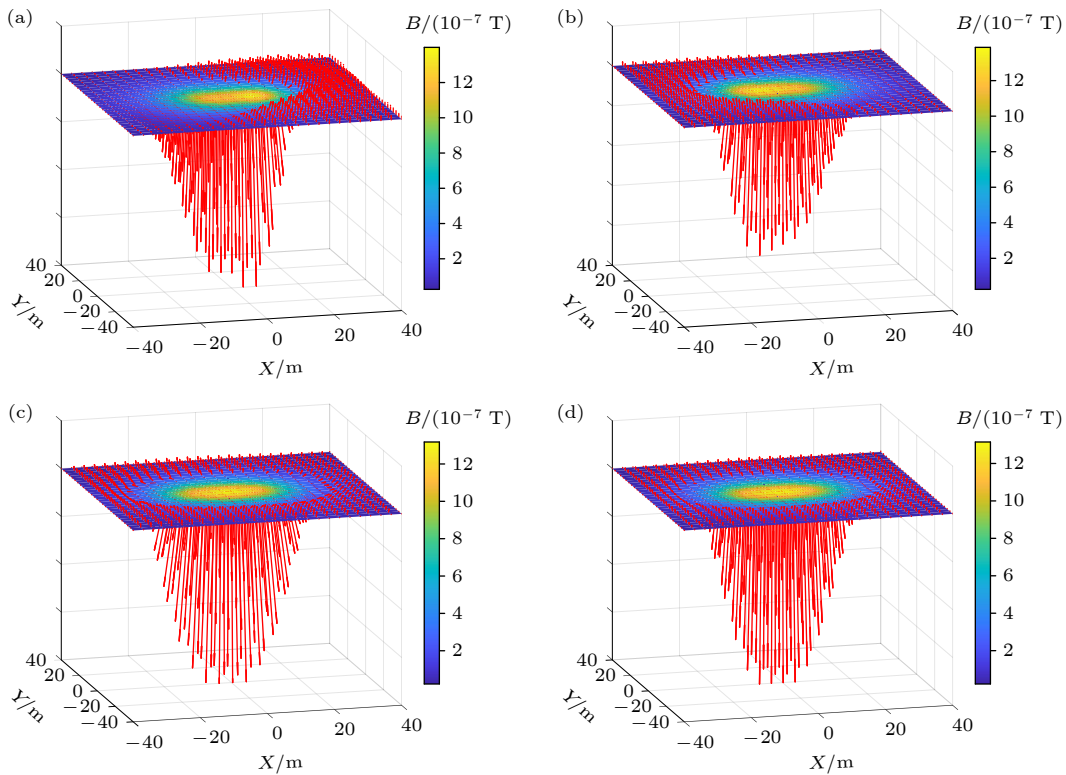


图 5 1号潜艇迭代建模过程 (a) 第一代建模结果; (b) 第二代建模结果; (c) 第三代建模结果; (d) 第四代建模结果

Fig. 5. Iterative modeling process of submarine No. 1: (a) Modeling result of the first-generation; (b) modeling result of the second-generation; (c) modeling result of the third-generation; (d) modeling result of the fourth-generation.

表 1 1号潜艇建模迭代过程  
Table 1. Iterative modeling process of Submarine 1.

代数	电流环中轴朝向	X	Y	Z	Z	Z	Z	适应度
第一代	位置	-2	0	5	—	—	—	18359
	电流大小	-1577.04	4.74	-1940.5	—	—	—	
第二代	位置	2	0	-9	-1	—	—	7725
	电流大小	1044.02	-4.36	-1128.67	-939	—	—	
第三代	位置	4	0	-11	-1	8	—	1367
	电流大小	152.27	1.14	-714.43	794.3	-551.78	—	
第四代	位置	-8	—	-11	-4	4	11	1326
	电流大小	-79.03	—	-552.4	-548.09	-642.13	-337.06	

第四代,对朝向 X 的电流环 1 个,朝向 Z 的电流环 4 个的情况进行优化求解,表 1 列出了最优分布的情况.模型精度的提升相较于上一代已不明显,且未在表中列出的不同位置方案与最优方案的性能差异很小,这证明模型已具备高容错性和鲁棒性,磁场分布如图 5(d) 所示.图 5(d) 与图 4 的目标磁场对比,视觉效果高度吻合.截止第四代模型,其模型适应度不再明显提升,且后续计算精度符合工程需要,则在本代建模结束.

### 4.3 2号潜艇数值实验

本文提出的分级优化策略不依赖于特定的磁化方向,在磁化环境发生改变时是否具备足够自适应调整能力,为证明上述内容,本文修改了地磁背景进行对比实验.本节中  $\mathbf{B}_{\text{ground}2} = [2.8 \times 10^{-5}, 0, -2.3 \times 10^{-5}] \text{ T}$  该地磁场大多位于太平洋的低纬度地区.此时潜艇磁场如图 6 所示.

第一代轴为轴向朝 X,朝 Y,朝 Z 的电流环各有

表 2 2号潜艇建模迭代过程  
Table 2. Iterative modeling process of submarine 2.

代数	电流环中轴朝向	X	X	X	X	Y	Z	Z	Z	适应度
第一代	位置	—	—	—	1	0	-3	—	—	575617
	电流大小	—	—	—	5340.51	9.77	-1423.9	—	—	
第二代	位置	—	—	8	-3	0	-7	—	—	105758
	电流大小	—	—	3179.06	5192.8	-4.37	-1633.17	—	—	
第三代	位置	—	12	2	-9	—	-15	—	—	22512
	电流大小	—	1639.08	4194.58	4315.01	—	-1022.64	—	—	
第四代	位置	15	7	-2	-11	—	-16	—	—	14845
	电流大小	668.74	2698.87	3764.54	3193.6	—	-927.28	—	—	
第五代	位置	12	4	-4	-10	—	18	-12	—	10223
	电流大小	1956.64	3564.17	3553	2537.45	—	635.28	-1594.9	—	
第六代	位置	12	4	-3	-10	—	17	-12	11	9058
	电流大小	2226.82	2758.9	3289.75	2763.57	—	862.02	-1276.83	-529.61	

一个,优化结束后列出了电流环最优分布情况,如表 2 所列,根据求解结果画出本代模型在正下方 15 m 平面的磁场分布情况,如图 7(a) 所示.

第二至四代迭代过程见表 2,第二代磁场分布如图 7(b) 所示.第三代增加 X 轴向的电流环,舍弃 Y 轴向的电流环,磁场分布如图 7(c) 所示.第四代增加 X 轴向的电流环,磁场分布如图 7(d) 所示.

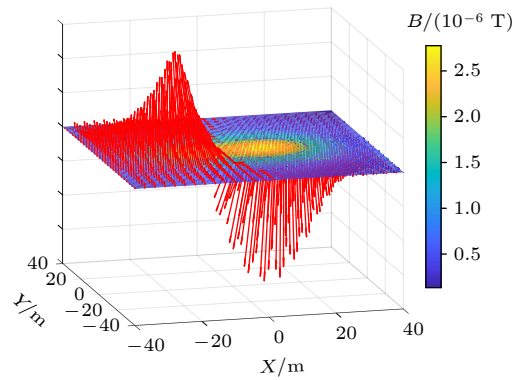


图 6 2号潜艇正下方 15 m 平面的磁场

Fig. 6. The magnetic field 15 m below the submarine No.2.

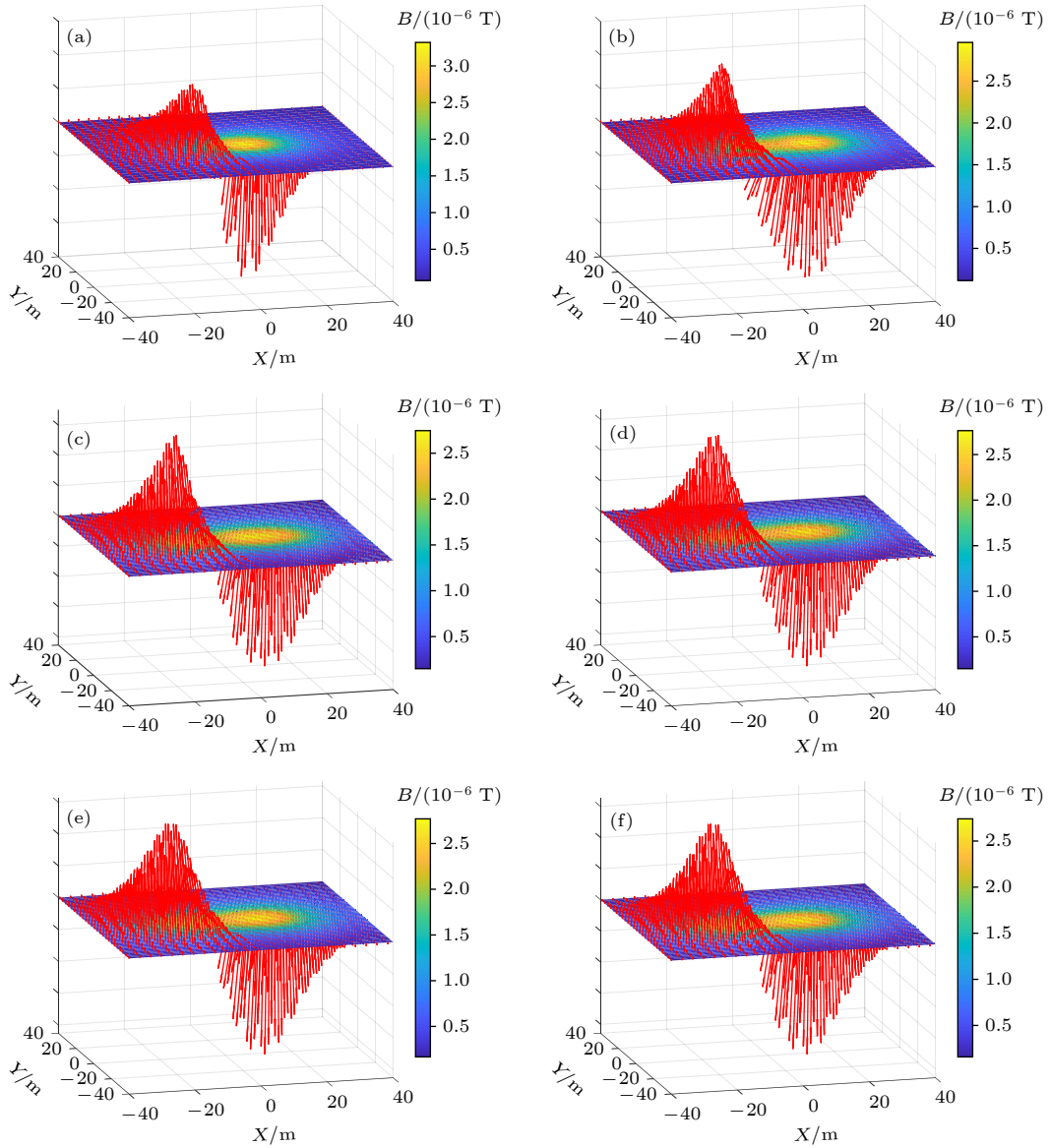


图 7 2号潜艇迭代建模过程 (a) 第一代建模结果; (b) 第二代建模结果; (c) 第三代建模结果; (d) 第四代建模结果; (e) 第五代建模结果; (f) 第六代建模结果

Fig. 7. Iterative modeling process of submarine No. 2: (a) Modeling result of the first-generation; (b) modeling result of the second-generation; (c) modeling result of the third-generation; (d) modeling result of the fourth-generation; (e) modeling result of the fifth-generation; (f) modeling result of the sixth-generation.

第四代中四个  $X$  轴向的主环已经支撑起了舰船的整体磁场, 均匀分布于潜艇核心区域, 且第一个环的电流较小, 说明该电流环起的作用已经从核心支撑磁场逐步转向为补充调节磁场, 所以第五代不再增加  $X$  轴向的电流环, 开始增加  $Z$  轴向的电流环, 求解结果如表 2 所列, 磁场分布情况如图 7(e) 所示.

本代结果表明, 两个  $Z$  轴向的电流环分布于模型两端, 起到的作用主要是补充调节磁场, 而从  $-12$  到  $18$  的大范围中间区域内没有  $Z$  轴向电流环, 所以第六代再增加一个  $Z$  轴向的电流环, 且新增

的坐标应该靠近模型中间, 其他的坐标应该与上一代类似. 以此为思路进行迭代, 结果如表 2 所列, 磁场分布情况如图 7(f) 所示.

截至第本代模型, 其模型适应度不再明显提升, 且后续计算精度符合工程需要, 则在本代电性源建模结束.

2号潜艇模型的建模构建遵循与1号模型相同的迭代框架, 受复杂的背景磁场影响, 收敛所需的迭代次数相应增加. 在实验中, 尽管第五代模型的拟合误差已收敛至 5%, 但是其在后续的外推误差计算中未满足需要, 同时第五代模型明显表现出

中部缺乏  $Z$  轴向电流环的磁场贡献, 据此引入第六代迭代进行针对性补偿. 这一过程充分验证了模型在复杂磁化环境下优异的自适应调整能力.

结果显示, 最终模型的电流环沿潜艇轴向呈现出规律性的均匀分布特征. 绝大部分电流环用于重构舰船的核心主磁场, 少部分用于补偿边缘磁场, 两者协同作用以确保模型在全局范围内的拟合精度. 这一分布特性揭示了模型具备显著的局部自适应能力: 即当舰船特定部位存在显著的固定磁场(或局部磁异常)时, 对应区域的电流环能够自动调整其参数, 以实现对该局部磁场特征的精确捕捉与拟合.

本文提出的迭代建模与分级优化策略有效地规避了反演过程中的病态问题, 确保了建模过程的稳定. 迭代过程能够自动识别主导及缺失的等效源类型, 最终构建的模型不仅精度高, 且对等效源位置配置具有良好的鲁棒性. 该良态模型为后续第五节的磁场外推预测与深度换算奠定了可靠基础. 以 1 号潜艇为例的电性源的舰船磁场建模整体效果如图 8 所示. 在进行实际工程应用时, 可根据最终得到的电性源模型, 设置模拟舰船磁场的电缆, 实现舰船磁场全方位模拟.

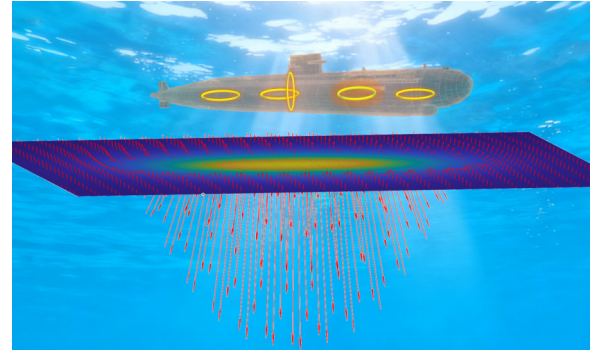


图 8 1号潜艇电性源建模整体效果图

Fig. 8. Overall effect drawing of the electric source model (submarine No.1).

中仿真生成的, 可以将其看作“真实值”, 在实际舰船建模中, 经过测量得到的磁场数据一般是带噪声的, 为此, 本文给第四节中的目标磁场中增加了  $\pm 1$  nT 的随机误差, 此误差近似于测量误差. 在两个潜艇模型中以带误差的数据为目标磁场重新进行建模, 得到了新的建模结果, 如表 3 所列. 根据求解结果画出两个潜艇模型正下方 15 m 平面的磁场分布情况, 如图 9 所示.

为了更好地展示模型精度, 除了适应度外, 在本节给出误差的计算方式, 验证模型在噪声条件下的能力. 相对残差 (relative residual error, RRE) 评估的是模型对测量数据的匹配程度, 相对误差 (relative error, RE) 评估的是模型对真实数据的匹配程度.

## 5 模型精度分析与讨论

### 5.1 抗噪声

在本文中, 目标磁场数据为 COMSOL 软件

$$RRE = \frac{\|B_{\text{calc}} - B_{\text{meas}}\|_2}{\|B_{\text{meas}}\|_2} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(B_{\text{calc}_x} - B_{\text{meas}_x})^2 + (B_{\text{calc}_y} - B_{\text{meas}_y})^2 + (B_{\text{calc}_z} - B_{\text{meas}_z})^2]}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [B_{\text{meas}_x}^2 + B_{\text{meas}_y}^2 + B_{\text{meas}_z}^2]}} \quad (16)$$

$$RE = \frac{\|B_{\text{calc}} - B_{\text{ture}}\|_2}{\|B_{\text{ture}}\|_2} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(B_{\text{calc}_x} - B_{\text{ture}_x})^2 + (B_{\text{calc}_y} - B_{\text{ture}_y})^2 + (B_{\text{calc}_z} - B_{\text{ture}_z})^2]}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [B_{\text{ture}_x}^2 + B_{\text{ture}_y}^2 + B_{\text{ture}_z}^2]}} \quad (17)$$

表 3 潜艇带噪声的建模结果  
Table 3. The modeling results under noise.

潜艇编号	电流环中轴朝向	$X$	$X$	$X$	$X$	$Z$	$Z$	$Z$	$Z$	适应度
1号	位置	—	—	—	-8	-11	-4	4	11	1419
	电流大小	—	—	—	-114.87	-515.25	-576.67	-647.95	-353.24	
2号	位置	12	4	-3	-10	17	-12	11	—	8532
	电流大小	2358.35	2718.71	3376.45	2769.94	933.86	-1327.42	-575.68	—	

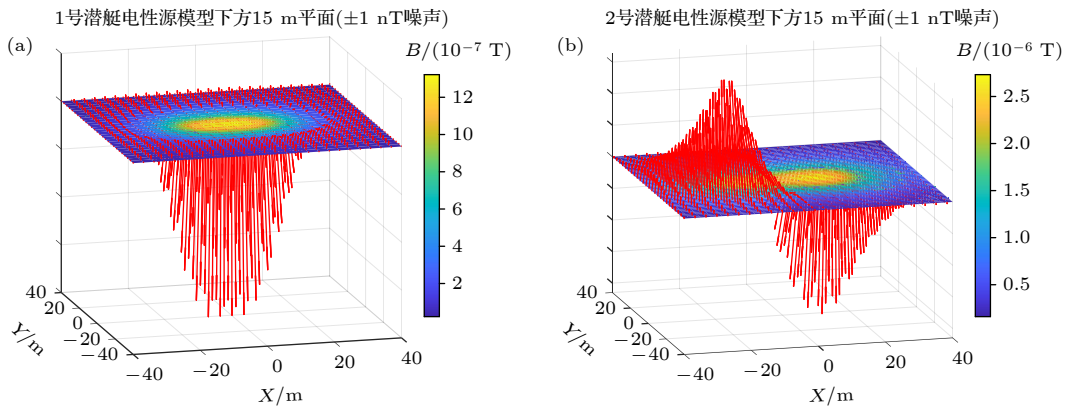


图9 带噪声建模结果磁场分布图

Fig. 9. The magnetic field distribution of the modeling results under noise.

其中,  $B_{\text{calc}}$  是模型计算的磁场,  $B_{\text{meas}}$  是测量舰船得到的磁场,  $B_{\text{true}}$  是实际的舰船磁场. 磁场三分量 ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) 均参与误差计算, 确保评估的全面性.

第4节中1号潜艇最终建模的相对误差为4.19%, 以带噪声的数据为目标磁场计算得到的相对残差为4.32%, 相对误差为4.33%. 2号潜艇最终建模的相对误差为4.74%, 以带噪声的数据为目标磁场计算得到的相对残差为4.60%, 相对误差为4.60%.

含噪数据的建模实验表明, 本模型在存在测量误差的条件下仍能保持较高的建模精度. 甚至在2号潜艇的噪声测试中, 基于含噪数据的模型精度甚至优于无噪基准. 这一现象部分归因于随机优化算法的概率特性, 但本质上佐证了本文方法在非理想观测条件下优异的抗噪能力与鲁棒性.

## 5.2 磁场外推

模型外推能力是评估舰船磁场建模方法有效性的关键指标. 磁场模型在距离变化时需保持稳定的换算精度, 才能满足实际工程应用需求. 本文选取潜艇下方10和20 m的平面进行外推, 这两个平面分布位于原始平面的上方和下方, 具有较强代表性. 根据4节中最终建立的电性源模型进行磁场计算, 通过与COMSOL仿真得到的磁场数据进行对比, 计算核心区域的相对误差(RE)来量化外推精度.

误差计算结果显示, 1号潜艇下方10 m平面的外推误差为6.00%, 潜艇下方20 m平面的外推误差为7.08%. 与建模平面4.19%的误差相比, 外推误差的增长幅度控制在合理范围内; 2号潜艇下方10 m平面的外推误差为8.83%, 潜艇下方20 m平面的外推误差为7.61%. 与建模平面4.74%的误

差相比, 外推误差的增长幅度控制在合理范围内. 图10和图11分别展示了1号、2号潜艇下方的磁场分布图与通过电性源模型计算的外推磁场分布图, 电性源模型计算的磁场分布与COMSOL结果基本一致. 在平面核心区域, 磁场梯度变化较大的位置, 模型能准确捕捉磁场分布特征; 在边缘区域, 矢量磁场特征出现轻微偏差, 磁场模值大小仍十分接近. 这主要是由于换算时, 越偏离中心区域, 等效源的作用效果越低. 外推测试结果表明模型具有良好的双向外推稳定性, 完全满足工程应用要求.

## 5.3 讨论

为全面评估本文所提电性等效源建模方法的性能优势, 本节将其与当前主流的磁性等效源建模方法进行综合对比. 鉴于现有研究在舰船模型对象(实船/船模/数值仿真)、测量工况及噪声水平等方面存在显著的异质性, 直接对比建模相对误差的绝对数值缺乏严谨的可比性. 因此, 本文侧重于从方法层面进行特征对比与性能趋势分析. 本节针对三种代表性磁性等效源建模方法作为对比对象, 具体包括: 基于正则化处理<sup>[7,10,15,31,32]</sup>或多目标优化<sup>[14,21]</sup>的磁偶极子阵列与旋转椭球混合模型, 以及磁单极子阵列模型<sup>[15,32]</sup>.

在等效源类型的物理机理上, 本文采用电流环作为基本建模单元, 其物理参数(位置、半径、电流)与物理实体(如通电消磁线圈)具有明确关系, 具备显著的物理直观性与工程复现性. 主流方法多采用磁偶极子或磁单极子, 其核心参数为抽象的磁矩矢量, 在转化为实际工程应用时, 往往涉及复杂的逆向设计与二次换算过程.

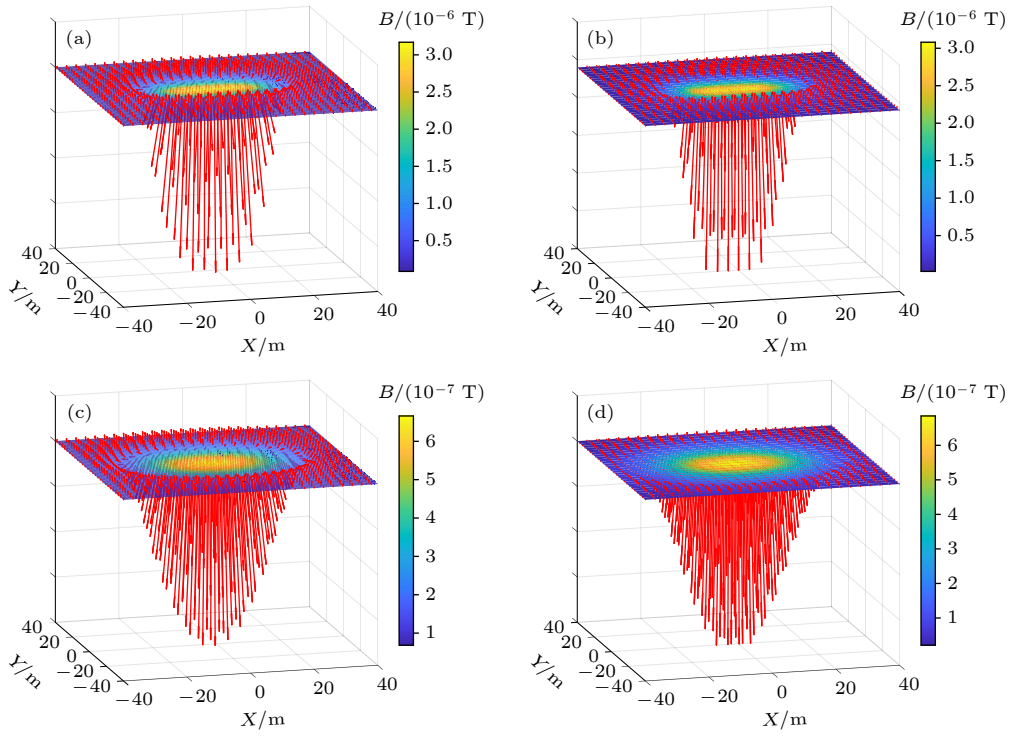


图 10 1号潜艇不同深度的磁场分布 (a) 潜艇正下方 10 m 平面; (b) 电源模型正下方 10 m 平面; (c) 潜艇正下方 20 m 平面; (d) 电源模型正下方 20 m 平面

Fig. 10. Magnetic field distributions at different depths of submarine No. 1: (a) 10 m below the submarine; (b) 10 m below the electric source model; (c) 20 m below the submarine; (d) 20 m below the electric source model.

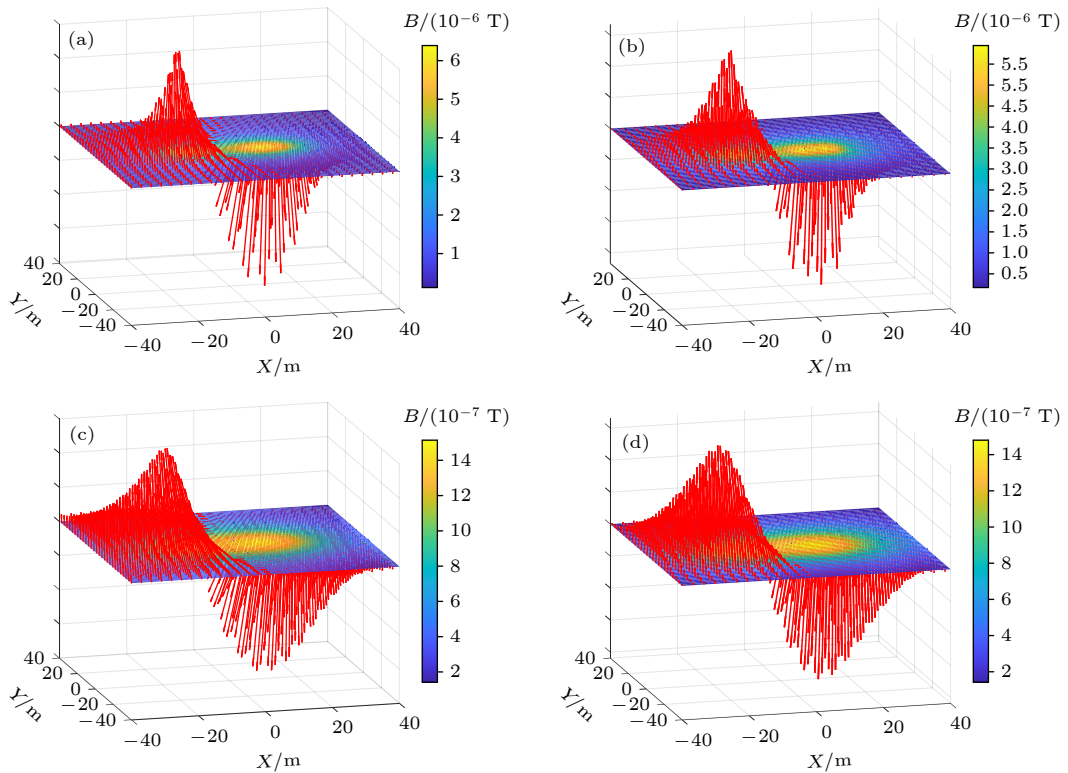


图 11 2号潜艇不同深度的磁场分布 (a) 潜艇正下方 10 m 平面; (b) 电源模型正下方 10 m 平面; (c) 潜艇正下方 20 m 平面; (d) 电源模型正下方 20 m 平面

Fig. 11. Magnetic field distributions at different depths of submarine No. 2: (a) 10 m below the submarine; (b) 10 m below the electric source model; (c) 20 m below the submarine; (d) 20 m below the electric source model.

在求解策略与抗病态机制上, 本文提出的“迭代建模与分级优化”框架, 通过将高维反演问题分解为一系列低维良态子问题, 从根本上规避了对大规模病态矩阵的直接求解. 主流方法通常面临条件数极高的线性方程组求解难题, 需要引入正则化或多目标优化等手段进行缓解.

在计算复杂度与数值稳定性上, 本文方法展现出显著优势. 得益于迭代建模的代际引导机制, 每一代优化均拥有明确的先验搜索方向, 有效地收敛了搜索空间. 在单代优化中, 最优位置的求解被简化为低维空间的线性优化问题, 核心计算开销仅集中于电流大小的烟花算法的寻优环节. 借助算法的并行计算特性与 GPU 加速技术, 在 NVIDIA RTX 3060 硬件环境下, 模型单代计算耗时约为 4.7 s, 最终迭代模型在 60 代内收敛至可信解, 初始代模型则更快. 此外, 该策略在中间迭代阶段具有极高的灵活性: 在数值实验中, 除 2 号潜艇的第六代模型外, 其余迭代阶段仅采用了粗粒度的搜索策略以提供方向引导, 并未进行详尽的全局寻优. 主流方法通常涉及大规模稠密矩阵的构建与求解, 有较高的计算负荷, 且在处理高条件数问题时, 关键参数(如正则化因子)的选取需要额外分析与试错.

从误差统计与精度潜力来看, 本文方法在 COMSOL 标准潜艇模型及两种不同地磁环境下的测试结果显示: 无论是理想工况还是含噪工况, 建模相对误差均控制在 5% 以内, 磁场外推误差保持在 6%—9% 区间. 这一性能指标与当前主流大部分文献水平(通常建模误差 < 5%, 外推误差 < 10%) 相当. 虽然部分前沿研究在特定条件下实现了极低误差(如 < 1%)<sup>[15]</sup>, 但考虑到工况差异, 本文作为电性源建模的探索性研究, 已达到了与成熟主流方法同等的精度水平. 此外, 本文的精度是在具有较大优化余地的条件下取得的. 如前文提到的当前结果是在限制电流环位置为整数, 且中间迭代过程仅采用粗粒度搜索的保守策略下获得的. 这表明若在后续研究中引入连续域的高精度位置搜索及更精细的全局优化策略, 或进一步增加电流环的数量, 或引入其他几何形状的电流环路, 本模型的反演精度仍具有显著的提升空间.

综上所述, 本文方法在保持与主流方法相当精度的同时, 在物理直观性、工程适用性及求解策略及稳定性方面具有独特优势. 但需要客观指出的是, 本文提出的宏观电性源模型, 其精度极限上限必然低

于高度细分的传统模型. 这是由反演问题的固有规律决定的: 模型越精细, 理论精度上限就越高, 病态特征也越严重. 传统模型虽然具备极高的理论极限精度, 却因严重的病态问题而难以求解或陷入不稳定, 无法达到模型的极限精度. 本文方法虽存在客观的精度天花板, 但这是为了规避病态而做出的必要牺牲. 牺牲本来就难以达到的极限精度, 以换取求解良态性与鲁棒性, 在当前的技术背景下是合理且必要的.

## 6 结 论

本文突破传统磁性等效源的框架, 提出了一种基于通电圆环的电性等效源舰船磁场建模方法. 该方法以电性源为核心, 可直接服务于磁场模拟等应用场景. 通过系统建模研究与基于 COMSOL 的数值实验, 验证了电性源模型在高精度、高稳定性的舰船磁场建模及跨深度预测方面的显著潜力. 主要结论如下.

1) 模型机理: 本文抛弃传统的磁性等效源建模框架, 提出了电性等效源的建模方法. 与磁性源相比, 电性源模型(电流环)参数具有明确的工程物理意义, 能够直接服务于物理模拟装置的设计与工程应用, 提升了模型的实用价值.

2) 良态求解策略: 针对反演问题固有的病态性, 本文提出了“迭代建模-分级优化”的联合求解策略. 该策略利用代际间的信息引导, 将复杂的非线性高维反演转化为一系列由简入繁的良态子问题, 从根本上规避了病态方程组的直接求解, 确保了反演过程的收敛性与鲁棒性.

3) 精度与稳定性验证: 数值仿真实验表明, 在不同潜艇模型及复杂地磁环境下, 本模型均实现了高精度重构. 在拟合精度上, 1 号与 2 号潜艇在建模平面的相对误差均控制在 4.8% 以内(分别为 4.19% 和 4.74%). 在抗噪能力上, 叠加  $\pm 1$  nT 测量噪声后, 模型误差波动极小, 1 号模型误差为 4.33%, 2 号模型误差为 4.60%, 2 号在含噪条件下表现出比无噪求解更优的精度, 证实了模型极强的抗干扰能力. 在外推能力上, 向内与向外平面的跨深度预测中, 1 号潜艇模型误差分别为 6.00% 和 7.08%, 2 号误差分别为 8.83% 和 7.61%, 验证了模型良好的外推能力.

本文提出了一条创新性技术路径, 证实了“物理模型优化+迭代建模+分级优化求解策略”是解

决物理场反演病态问题、实现高精度建模的有效途径,为舰船磁场及相关物理场的精密建模提供了新的研究方案.在后续研究中,将引入三角形、多边形等更贴合实际水面舰船形态的电流环路结构,以进一步提高磁场建模的精度与适用性.

## 参考文献

- [1] Li G, Zhang D H, Su Y X, Wang Z, Tang W Z 2020 *Proc. 2020 Chinese Automation Congress (CAC)* Shanghai, China, November 6–8, 2020 p4595
- [2] Yao Z N, Liu D M, Liu S D, Zhu X L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 227502 (in Chinese) [姚振宁, 刘大明, 刘胜道, 朱兴乐 2014 *物理学报* **63** 227502]
- [3] Lu B J, Zhang X B, Dai Z H 2024 *J. Ordnance Equip. Eng.* **45** 138 (in Chinese) [陆斌杰, 张晓兵, 戴忠华 2024 *兵器装备工程学报* **45** 138]
- [4] Gao J J, Zhu X L, Meng C, Wang S L 2022 *IEEE Sens. J.* **22** 19867
- [5] Menana H 2021 *IEEE Trans. Magn.* **57** 7402206
- [6] He B W, Sun Z L, Liu Y L, Zhou G H, Tang L Z 2024 *Trans. Chin. Electrotech. Soc.* **39** 1589 (in Chinese) [何保委, 孙兆龙, 刘月林, 周国华, 唐烈峥 2024 *电工技术学报* **39** 1589]
- [7] Lu B J, Zhang X B 2024 *Sci. Rep.* **14** 4070
- [8] Ou J D, Qiu J, Xie D, Wang Z, Du J Z, Chang Q J 2022 *IEEE Trans. Magn.* **58** 6500108
- [9] Gao J C, Liu C B, Zhang J J, Duan Y, Yang H R, Gao D Q 2025 *Chin. Phys. B* **34** 100701
- [10] Sheinker A, Ginzburg B, Salomonski N, Yaniv A, Persky E 2021 *IEEE Trans. Magn.* **57** 6500408
- [11] Tarnawski J, Cichocki A, Rutkowski T A, Buszman K, Woloszyn M 2020 *IEEE Access* **8** 190448
- [12] Woloszyn M, Tarnawski J 2023 *Sci. Rep.* **13** 14601
- [13] Lu B J, Zhang X B 2024 *AIP Adv.* **14** 015201
- [14] Dai Z H, Zhou S H, Zhang X B 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 164101 (in Chinese) [戴忠华, 周德华, 张晓兵 2021 *物理学报* **70** 164101]
- [15] 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]
- [16] Jin H H, Wang H, Zhuang Z H 2022 *J. Mar. Sci. Eng.* **10** 1495
- [17] Woloszyn M, Tarnawski J 2024 *Sci. Rep.* **14** 7864
- [18] Modagekar V, Karim S A, Singh N, Kazi F 2017 *IEEE Trans. Magn.* **53** 7400312
- [19] Choi N S, Jeung G, Yang C S, Chung H J, Kim D H 2012 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22** 4904504
- [20] Liu S X, Wang L, Chen Y, Wang L Z, Zhou B Z, Hu X N, Cheng J S, Wang Q L 2023 *Supercond. Sci. Technol.* **36** 064002
- [21] Liu F Y, Yan B 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 124101 (in Chinese) [刘芙妍, 颜冰 2022 *物理学报* **71** 124101]
- [22] Wang Y G, Cheng Y H, Bai L B, Zhang J, Yu H C, Alimey F J 2018 *IEEE Trans. Magn.* **54** 6203014
- [23] Martín-Luna P, Gimeno B, González-Iglesias D, Esperante D, Blanch C, Fuster-Martínez N, Martínez-Reviriego P, Fuster J 2023 *IEEE Trans. Magn.* **59** 7000106
- [24] Tan Y, Zhu Y C 2010 *Proc. 1st International Conference on Swarm Intelligence (ICSI)* Beijing, China, June 12–15, 2010 p355
- [25] Zheng S Q, Janecek A, Tan Y 2013 *Proc. 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* Cancun, Mexico, June 20–23, 2013 p2069
- [26] Li J Z, Tan Y 2020 *ACM Comput. Surv.* **52** 121
- [27] Tan Y, Zheng S Q 2014 *CAAI Trans. Intell. Syst.* **9** 515 (in Chinese) [谭莹, 郑少秋 2014 *智能系统学报* **9** 515]
- [28] Cheng R, Bai Y P, Zhao Y, Tan X H, Xu T 2019 *Knowl. Based Syst.* **163** 82
- [29] Chen Y G, Li L X, Zhao X C, Xiao J H, Wu Q T, Tan Y 2019 *Knowl. -Based Syst.* **173** 128
- [30] Ding K, Zheng S Q, Tan Y 2013 *Proc. 15th Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)* Amsterdam, Netherlands, July 6–10, 2013 p9
- [31] Tarnawski J, Rutkowski T A, Woloszyn M, Cichocki A, Buszman K 2022 *IEEE Access* **10** 16906
- [32] He B W, Liu S D, Zong J W 2022 *AIP Adv.* **12** 105221

# An application-oriented electric equivalent source method for ship magnetic field modeling\*

CHEN Gongxuan<sup>1)2)</sup> WANG Lei<sup>1)2)†</sup> CHENG Junsheng<sup>1)2)3)</sup> LIU Shixian<sup>1)2)</sup>  
 WANG Xinyi<sup>4)</sup> WANG Qiuliang<sup>1)2)‡</sup>

1) (*Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*State Key Laboratory of High Density Electromagnetic Power and Systems, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

4) (*Kunming Shipborne Equipment Research and Test Center, China State Shipbuilding Corporation Limited, Kunming 650216, China*)

( Received 24 November 2025; revised manuscript received 16 January 2026 )

## Abstract

Ship magnetic field modeling is a core element in the development of naval magnetic detection and stealth technologies. Currently, equivalent source modeling methods predominantly employ magnetic sources. However, their inversion processes often suffer from abstract physical interpretations and the ill-posed nature of equations, typically requiring multi-objective optimization or regularization to mitigate these issues. To fundamentally circumvent ill-posed problems, this paper proposes an electric equivalent source modeling method based on iterative modeling and a hierarchical optimization strategy. The proposed model utilizes current-carrying circular loops with distinct physical significance as fundamental units, ensuring the model can directly serve engineering construction. The iterative modeling follows a “simple-to-complex” principle, evolving from a low-dimensional coarse model with few loops to a high-dimensional refined model. Results from the previous generation serve as prior information to guide the construction of the subsequent model, ensuring the entire inversion process remains well-posed and controllable. Once the quantity and structure of the loops are determined, a position-current hierarchical optimization strategy is employed for parameter solving. Specifically, the outer layer utilizes linear optimization to search for loop positions, while the inner layer leverages the explosive search capability of the Fireworks Algorithm to determine optimal current magnitudes. This strategy successfully transforms high-dimensional ill-posed inversion into a series of low-dimensional, well-posed optimization problems. Numerical experiments based on finite element models under two geomagnetic environments demonstrate the method's superior accuracy and stability. The relative error on the modeling plane is consistently controlled within 5%. Even with superimposed measurement noise, the error remains at a comparable level, exhibiting strong robustness. Meanwhile, inward and outward magnetic field extrapolation errors are maintained within the 6%–9% range. This study confirms that the proposed method effectively circumvents the ill-posed pitfalls of traditional inversion, providing a novel pathway with significant engineering application value for high-precision and robust ship magnetic field modeling.

**Keywords:** ship magnetic field modeling, equivalent source model, fireworks algorithm, magnetic field inversion

DOI: [10.7498/aps.75.20251595](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251595)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251595](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251595)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52277032, 52422702) and the Luguang Yan Academician Workstation at Yunnan Province, China (Grant No. 202305AF150049).

† Corresponding author. E-mail: [wanglei@mail.iee.ac.cn](mailto:wanglei@mail.iee.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [qiuliang@mail.iee.ac.cn](mailto:qiuliang@mail.iee.ac.cn)

一种面向应用的电性等效源舰船磁场建模方法

陈功轩 王磊 程军胜 刘士冕 王心怡 王秋良

**An application-oriented electric equivalent source method for ship magnetic field modeling**

CHEN Gongxuan WANG Lei CHENG Junsheng LIU Shixian WANG Xinyi WANG Qiuliang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 070803 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251595

CSTR: 32037.14.aps.75.20251595

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251595>

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

利用深度学习从质子成像反演激光等离子体中的磁场分布

Reconstruction of magnetic field distributions in laser plasma interaction from proton radiography by deep learning

物理学报. 2026, 75(3): 070803 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251243>

磁偶极子阵列模型的适用性研究与优化分析

Applicability and optimization analysis of magnetic dipole array model

物理学报. 2022, 71(12): 124101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212223>

强磁场与有限温度下色味锁夸克星的唯象模型

Phenomenological model of color-flavor-locked quark star under strong magnetic fields at finite temperatures

物理学报. 2025, 74(14): 142101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250451>

在质子照相中利用Abel逆变换反演等离子体自生磁场结构

Self-generated magnetic field in plasma reconstructed by using inverse Abel transformation in proton radiography

物理学报. 2022, 71(24): 245203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221848>

脉冲大电流直线驱动装置电-磁-热-结构多场耦合的局域建模方法

Local modeling method for multi-field coupling of electric-magnetic-thermal-structure of pulsed high current linear driving device

物理学报. 2024, 73(10): 108502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240235>

基于MIT袋模型的零温与强磁场下夸克物质与磁星的性质

Properties of quark matter and quark stars at zero temperature or under strong magnetic fields within MIT bag model

物理学报. 2025, 74(20): 202101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250898>