

舰船磁场磁单极子阵列法建模技术

郭成豹 殷琦琦

Magnetic monopole array model for modeling ship magnetic signatures

Guo Cheng-Bao Yin Qi-Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 114101 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190201

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190201>

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

外加磁场压电悬臂梁能量采集系统的磁化电流法磁力研究

Magnetic force of piezoelectric cantilever energy harvesting system with an externally applied magnetic field based on magnetizing current method

物理学报. 2015, 64(6): 060502 <https://doi.org/10.7498/aps.64.060502>

由N-E-V分布及赝势法研究弱磁场中弱相互作用费米子气体的热力学性质

Investigation of thermodynamic properties of weakly interacting Fermi gas in weakly magnetic field by using the N-E-V distribution and pseudopotential method

物理学报. 2015, 64(4): 040501 <https://doi.org/10.7498/aps.64.040501>

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>

磁液变形镜的镜面动力学建模和实验验证

Modeling and experimental verification of surface dynamics of magnetic fluid deformable mirror

物理学报. 2018, 67(3): 034702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171281>

基于介质与铁氧体的通阻捷变磁可调频率选择表面设计研究

Design and research of magnetic tunable frequency selective surface based on dielectric and ferrite

物理学报. 2016, 65(19): 197701 <https://doi.org/10.7498/aps.65.197701>

匀强磁场对水中气泡运动的影响

Effect of magnetic field on single-bubble in water

物理学报. 2015, 64(12): 124301 <https://doi.org/10.7498/aps.64.124301>

舰船磁场磁单极子阵列法建模技术*

郭成豹[†] 殷琦琦

(海军工程大学电气工程学院, 武汉 430033)

(2019年2月15日收到; 2019年3月12日收到修改稿)

针对现有舰船磁场等效源反演建模方法存在的精度较低和适应性不强的问题, 提出了一种舰船磁场磁单极子阵列反演建模新方法, 按照舰船铁磁结构布置磁单极子阵列, 采用正则化技术进行舰船磁场的反演建模. 建立了三种典型的磁单极子阵列形式: 舰船水平面上的长方形阵列、包围船体的长方体阵列、按照舰船铁磁结构分布的三维船体阵列. 理论分析表明, 三维船体磁单极子阵列减少了等效磁源设置的盲目性, 所得到的等效磁源与真实磁源一致性高, 能够更大程度地复现舰船磁场完整信息. 利用典型虚拟舰船的磁场进行了验证试验, 结果表明所提出的三维船体磁单极子阵列比长方形或长方体阵列具有更高的精度和适应性, 特别是能实现舰船远磁场与近磁场、舰船上方和下方磁场之间的相互精确转换. 所提出的三维船体磁单极子阵列模型具有复杂度小, 建模简单, 布置灵活的独特优势, 为舰船磁场高精度反演建模、磁场定位等的数据处理和解释提供了新的技术选择.

关键词: 静磁场, 等效源法, 磁单极子, 舰船磁特征**PACS:** 41.20.Gz, 02.30.Zz**DOI:** 10.7498/aps.68.20190201

1 引言

舰船磁特征控制对于其安全运行至关重要, 尤其是面对磁性水雷的威胁. 二战以来, 海军舰船的磁隐身对于各国海军都是非常重要的关注点. 舰船磁场的空间特性及其变化是舰船磁隐身技术研究中的重要内容. 舰船磁场的完整边值问题公式是非常复杂的, 难以解析表达舰船各个组成部分(船体、机械等)的铁磁材料分布函数以及磁性历史等. 人类对于舰船磁场的认识主要源于测量, 采用在海底和空中布置磁传感器阵列的方式来获取舰船磁场数据, 仅包括特定深度和范围的舰船磁场数据. 但所能获得的测量资料总是有限的, 要得到舰船完整包络面或大平面的舰船磁场测量数据是非常困难的. 因此, 如何从有限的测量数据中得到丰富完整的舰船三维空间磁场的信息, 就成为一项重要的

工作^[1,2].

基于舰船磁场的本构关系和有限的测量数据, 采用数学物理方法模拟测量数据, 进而建立一个数学模型来表达舰船磁场, 这种方法被称为舰船磁场的重构或重建. 舰船磁场反演重建计算问题引起了广泛的关注, 并得到了广泛应用^[3-5]. 随着磁性水雷技术的发展, 对舰船磁隐身提出了更高的要求, 需要在所关心的所有空间上给出尽可能精确的磁场数据, 为后续设计和调整舰船磁场消除和补偿措施奠定基础.

等效源方法是最常用的舰船磁场重构方法, 基于位场的等效性原理, 利用一组简单的等效磁源代替真实磁源, 通过充分拟合测量数据建立等效源模型, 进而利用等效源模型正演实现舰船磁场的重构和转换. 该方法具有适用性好、稳定性强和计算精度高的优势, 受到广泛关注^[6,7]. 具体应用包括: 对不同检测场地所测量的舰船磁场数据进行对比; 将

* 国家自然科学基金(批准号: 51277176)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: guochengbao@outlook.com

舰船磁场数据从一个深度换算到另一个深度(通常更深);根据检测数据计算“安全深度”;检查磁特征测量值的质量;将磁特征数据转换到任意位置等.

根据高斯通量定理,磁场源的位函数沿包围场源的封闭曲面法向积分与曲面所包含的磁场源总量有关,而与磁场源分布无关,因此在理论上只要满足位场不变条件,就可以任意地构造“等效”磁场源,但是由于所测量的舰船磁场分布往往是有限且离散的,所以合理地构造“等效磁源”模型就成为等效源方法在应用中取得高精度计算结果的关键问题.

常用的等效磁源构建方式为,将舰船磁性等效为位于舰船水线面的均匀磁化旋转椭球体和均匀分布于吃水线上的磁偶极子阵列混合模型.其中,旋转椭球体的长轴等于船长,短轴等于船宽,用于拟合舰船的宏观磁场;磁偶极子阵列模拟舰船的局部不均匀磁场.例如,采用磁偶极子和旋转椭球的混合阵列来模拟舰船磁场,实现了被测目标的磁场反演建模、磁性定位等功能^[8-10].但是,目前的舰船磁场等效源方法仍存在一些不足,忽视了舰船结构的非对称影响,导致建模精度不高、稳定性较差,很多时候无法完美拟合到舰船磁场测量数据上.多个文献采用遗传算法、粒子群算法、模拟退火法等得到磁偶极子阵列的最优位置分布,获得舰船磁场高精度稳定模型^[11,12].该类模型计算量较大,等效磁源模型设置方案缺少针对性,计算误差较大,妨碍了这种方法的有效使用.

根据理论分析可知,若设置的等效磁源与真实磁源在空间分布上十分接近,将会得到高精度的重构与转换结果.但真实磁源通常是未知的,获得真实磁源及其分布无异于舰船结构全空间的磁性物性反演,计算量和计算难度均会大幅增加.传统的等效源方法,其等效性不强调所构建舰船磁性物理模型的合理性,而较多关注对测量数据的充分拟合,虽然等效源模型所重构的磁异常值可以很好地拟合测量数据,但不能控制在随后的数据转换处理中所产生的误差.例如,由较深深度向较浅深度预测;舰船上方磁场和下方磁场的相互转换等.其主要原因在于构建等效磁源时与真实场源存在不一致,距离测量磁场点较远位置处的磁场信号分布范围较广,传统的等效源方法通常会将其采用较近位置处的等效磁源来表达,难以保证重构或转换的舰船磁场具有完整的波谱特性.

最近,已经出现了考虑船体结构的磁特性,基于数值分析方法的舰船磁场反演技术,具有计算精度高的优点^[13-18].然而这些技术需要对船体和机械设备剖分单元,存在建模困难,求解过程复杂的难题,不如等效源法适应性好.

本文从等效源方法理论出发,提出了一种新的舰船磁场磁单极子阵列反演建模法.采用最简单的磁单极子,即所谓的点磁荷^[19,20],以描述舰船磁性并建立舰船磁特征的反演数学模型,并给出了正演和反演数学过程,拟合参数是描述磁单极子强度的系数.研究舰船铁磁结构三维建模的简化和优化技术,将磁单极子配置于实船铁磁结构所定义的坐标上,提出磁单极子阵列的优化布置方法.该方法的构建思想是:设置等效磁源与真实磁源在空间分布上尽量接近,将会得到高精度的重构与转换结果.研究了磁单极子等效源布置形式等参数的选取对舰船磁场重构效果的影响.通过分析产生舰船磁特征信号重建失真的原因,认为利用按照舰船铁磁结构分布的磁单极子三维船体阵列,相对于长方形阵列或长方体阵列,更能有效抑制信号失真.反演过程重点是要避免过度拟合,同时需要平衡模型的复杂度.正则化方法被用于拟合过程以限制模型的复杂度,模型的系数采用正则化函数进行约束.采用Tikhonov正则化反演技术求解反演问题^[21,22],实现舰船磁场的精确重现.

所提出的方法被用于一艘典型虚拟舰船的磁场进行验证试验,从重构精度、磁特征重建情况以及计算效率等方面进行对比,按照舰船铁磁结构分布的三维船体磁单极子阵列等效磁源布置方案具有最佳的重构效果.该研究可以显著高舰船空间磁场重构与转换的精度和计算效率,具有重要的理论意义和实用价值.

2 磁单极子阵列法

磁单极子(magnetic monopole)模型是磁性物理世界复杂度最小的数学模型,具有建模简单、计算量小的巨大优势,不但能够方便地按照舰船铁磁结构精确分布,而且计算量比传统方法小得多,因此非常适合于舰船磁场反演建模的需要.

根据磁性物理理论,坐标原点存在一个具有磁荷 Q 的磁单极子,类似于点电荷,那么

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = Q. \quad (1)$$

每个磁单极子在空间中特定点处所产生的磁场可以采用经典的磁单极子模型计算,

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Q}{r^3} \mathbf{r}, \quad (2)$$

其中 μ_0 是真空磁导率, r 是磁单极子与场点 P (磁场测量点) 之间的距离, 向量 $\mathbf{r}$ 从磁单极子指向点 P , 如图 1 所示.

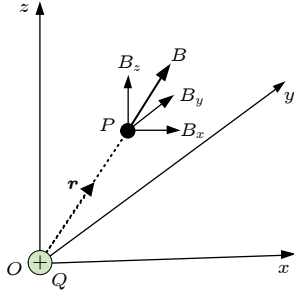


图 1 磁单极子模型

Fig. 1. Magnetic monopole model.

舰船磁源可表示为按照舰船铁磁结构布置的磁单极子阵列, 含 n 个磁单极子. 设磁单极子 i 的坐标为 (u_i, v_i, w_i) , $i = 1, 2, \dots, n$. 舰船周围包含 m 个传感器测量点 (场点). 设场点 j 的坐标为 (x_j, y_j, z_j) , $j = 1, 2, \dots, m$. 所有磁单极子在场点 j 处所产生的磁感应强度 $\mathbf{B} = [B_{xj}, B_{yj}, B_{zj}]$ 可根据下述公式计算:

$$B_{xj} = \sum_{i=1}^n A_{xji} Q_i, \quad (3)$$

$$B_{yj} = \sum_{i=1}^n A_{yji} Q_i, \quad (4)$$

$$B_{zj} = \sum_{i=1}^n A_{zji} Q_i, \quad (5)$$

其中 Q_i 是磁单极子 i 的强度, 并且

$$A_{xji} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{x_j - u_i}{r^3}, \quad (6)$$

$$A_{yji} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{y_j - v_i}{r^3}, \quad (7)$$

$$A_{zji} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{z_j - w_i}{r^3}, \quad (8)$$

其中 $r = \sqrt{(x_j - u_i)^2 + (y_j - v_i)^2 + (z_j - w_i)^2}$.

考虑所有的场点, 可得到一个线性方程组:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{Q}, \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{b} = [B_{x1}, B_{y1}, B_{z1}, \dots, B_{xm}, B_{ym}, B_{zm}]^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{Q} = [Q_1, Q_2, \dots, Q_n]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{x11} & A_{y11} & A_{z11} & \cdots & A_{x1n} & A_{y1n} & A_{z1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{xm1} & A_{ym1} & A_{zm1} & \cdots & A_{xmn} & A_{ymn} & A_{zmn} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

一艘舰船从一个水下磁传感器线阵上方通过 (如图 2 所示), 每隔一定时间间隔进行一次磁场采样, 可认为是在舰船下方形成了一个虚拟的水下磁传感器长方形阵列 (如图 3 所示).

针对上述舰船, 可采用一定的技术步骤得到最优化的磁单极子阵列分布, 如图 4 和图 5 所示, 并反演重建舰船的磁性参数.

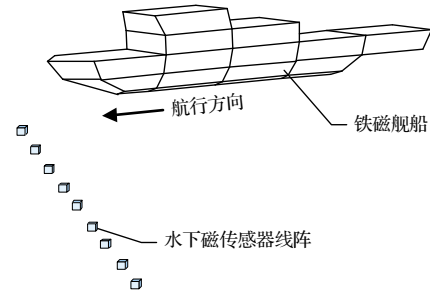


图 2 铁磁舰船航行通过一个磁传感器线阵

Fig. 2. Ferromagnetic ship runs over a line array of magnetic sensors.

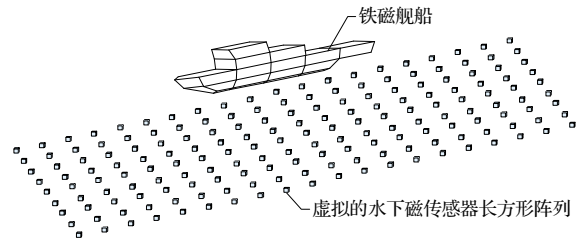


图 3 铁磁舰船及其下方的虚拟磁传感器长方形阵列

Fig. 3. Ferromagnetic ship stands over a virtual array of magnetic sensors.

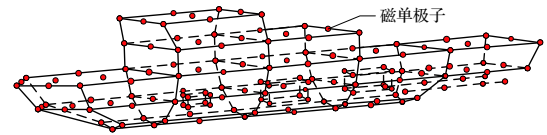


图 4 舰船结构上的磁单极子阵列分布

Fig. 4. Magnetic monopole array in the geometry of ship.

本研究采用反演技术根据虚拟磁传感器阵列测量值来重建舰船的磁源模型, 由舰船铁磁结构上分布的磁单极子阵列构成. 舰船图纸或 CAD 模型被用于建立舰船磁单极子阵列模型. 采用自编的

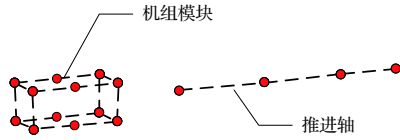


图 5 机组和推进轴的磁单极子分布

Fig. 5. Magnetic monopoles for the engine block and the shaft.

舰船磁场综合分析软件 MagShip 来实现这个目的^[23-25]. 所建立的舰船磁性模型包括船体、机械设备、推进轴等. 舰船结构被划分为一定数目的点单元, 并找出等效磁单极子阵列的最优分布. 根据舰船的铁磁结构信息可方便地构建相应的磁单极子阵列模型, 能够完整体现舰船磁性结构信息. 最后, 采用 Tikhonov 正则化反演技术得到舰船磁单极子阵列磁源模型.

舰船磁模型将给出重建的磁特征, 根据磁特征测量数据, 按照最小二乘理论可以得到磁单极子强度 Q . 根据不同航向上的磁特征测量数据, 可以分解得到磁特征的感应部分和固定部分. 该模型可以用于计算舰船不同深度或距离上的舰船磁特征.

舰载消磁线圈的磁特征可以定义为磁单极子强度的差值, 每个线圈只需要一个航次的测量就可以实现, 多个航次的磁场测量值就可以进一步消除不确定性. 在不同测磁阵列、不同深度、不同航向、不同航次上测量的磁场数据都可以归结为磁单极子的强度数据.

舰船下方测磁阵列测量得到的磁场数据可作为反演问题的目标磁场. 问题的目标函数在数学上可以定义如下:

$$F = \sum_{j=1}^m (B_{x_j} - B_{ox_j})^2 + (B_{y_j} - B_{oy_j})^2 + (B_{z_j} - B_{oz_j})^2, \quad (12)$$

其中 m 是测量点数目, B_{x_j} , B_{y_j} , B_{z_j} 是在测量点 j 上的磁感应强度三分量的预测值, 是基于计算过程中获得的磁单极子分布, 而 B_{ox_j} , B_{oy_j} , B_{oz_j} 是在测量点 j 上测量得到的舰船磁场三分量测量值.

研究表明, 磁单极子阵列法比现存方法具有更高的反演建模精度、可靠性和速度. 该方法不但适用于舰艇磁场的反演建模, 还适用于舰载消磁线圈系统的磁场反演建模.

3 正则化反演技术

在实践中, 测量系统存在误差, 磁源模型决定

于磁性目标的位置、尺度和结构. 将误差引入线性方程组可以得到

$$(b + \Delta b) = (A + \Delta A)Q, \quad (13)$$

其中的 ΔA 和 Δb 分别表示模型测量数据的误差.

关于病态问题的理论已经存在很多文献. 主要的困难涉及下述最小二乘问题, 是求解最优化问题,

$$\min_Q \|(A + \Delta A)Q - (b + \Delta b)\|^2. \quad (14)$$

本研究的问题是超定问题, 并且是病态问题, 问题的解是不唯一的, 通常采用正则化技术来限制解空间. 在已知矩阵 A 和舰艇磁场测量值 b 的情况下, 可采用变分正则化方法求解方程组 $b = AQ$. 变分正则化方法又称之为 Tikhonov 正则化方法. 在所有的正则化方法中, Tikhonov 正则化方法最古老, 且在正则化问题中处于核心地位.

若算子方程 $AQ = b$ 是不适定的, Tikhonov 正则化方法的最简单形式为, 对于任给的正数 α , 求下述极小问题:

$$\varphi_\alpha(Q) = \|AQ - b\|^2 + \alpha\|Q\|^2. \quad (15)$$

对 (15) 式求最小的问题, 事实上是在数据的拟合程度 (式中的第一项) 和最小范数解 (式中第二项) 之间寻求一种折衷. $\alpha > 0$ 称为正则化参数. 在 Tikhonov 正则化方法中, 正则化参数 α 选取得越大, 则在目标函数式中赋予解的范数的权就越大, 从而可以保证所求的解的范数较小, 但此时以牺牲数据的拟合程度为代价; 反之, 正则化参数选取得越小, 则 (15) 式越接近于未正则化的原问题, 此时正则化后的问题, 可能还存在某种程度上的不适定.

若记 Q_α 为正则化问题的解, 则可证明, 求目标函数式达到最小的解 Q_α 等价于下述方程的解:

$$(A^*A + \alpha I)Q_\alpha = A^*b, \quad (16)$$

其中 $\alpha > 0$, 此时相当于用正则化算子 $R_\alpha = (A^*A + \alpha I)^{-1}A^*$ 来替代原问题的伪逆算子 $A^\dagger$, 其正则化解为

$$Q_\alpha = (A^*A + \alpha I)^{-1}A^*b. \quad (17)$$

当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, Tikhonov 正则化解趋向于 Moore-Penrose 伪逆解.

采用 L 曲线法选择正则化参数, 能够深入探究所研究的问题, 有助于问题的解决, 如图 6 所示.

根据已知的舰艇磁场测量值和线性测量矩阵, 采用 Tikhonov 正则化技术求解线性方程组所描述

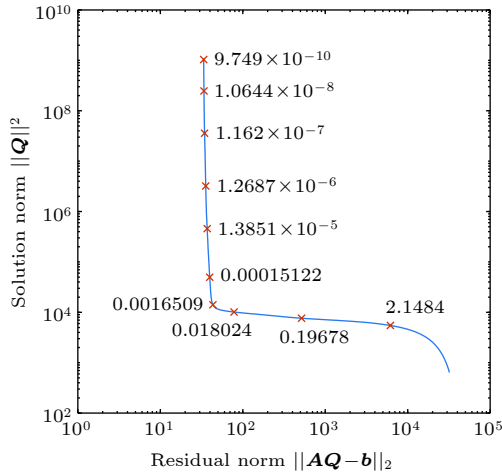


图6 根据L曲线法得到正则化参数

Fig. 6. Regularization parameter obtained by the L-curve method.

的逆问题,可以得到所有磁源的正则化解 Q_α . 从而可以知道舰艇磁场的拟合计算值 $b_\alpha = A Q_\alpha$, 进而知道拟合误差 $b_{\text{err-}\alpha} = b_\alpha - b$. 实际上根据拟合误差 $b_{\text{err-}\alpha}$, 可以判断哪些测量点上的磁场测量值存在粗大误差, 需要重新测量以修正测量误差或排除该测量值, 实现舰艇磁场纠错的目的. 根据纠错后的舰艇磁场测量值, 再次进行正则化反演计算, 得到最接近真实的正则化解 Q_α . 根据该正则化解 Q_α 可以得到其他测量点位置处的舰艇磁场预测值, 从而实现舰艇磁场的综合分析, 如图7所示.

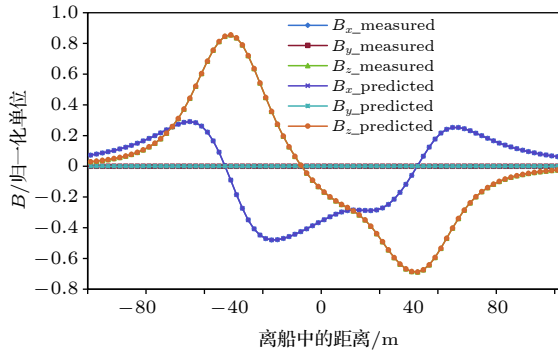


图7 舰船磁场预测值和测量值的对比

Fig. 7. Comparison of predicted and measured values of ship's magnetic field.

4 磁单极子阵列分布形式的对比

4.1 磁单极子阵列设置

所采用的反演目标为按照实际舰船结构抽象出来的一艘虚拟典型舰船, 其中船长表示为 L , 船

宽表示为 B , 船高表示为 H . 不同的磁单极子分布形式具有不同的反演效果, 设置三种磁单极子阵列分布形式进行对比分析, 分别为:

1) 水线平面上的长方形磁单极子阵列 (简称“长方形阵列”), 由 $L \times B = 25 \times 5 = 125$ 个磁单极子构成, 如图8所示;

2) 包围船体的长方体磁单极子阵列 (简称“长方体阵列”), 由 $L \times B \times H = 25 \times 5 \times 4 = 500$ 个磁单极子构成, 如图9所示;

3) 按照船体铁磁结构分布的三维船体阵列 (简称“三维船体阵列”), 由 $L \times B \times H = 347$ 个磁单极子构成, 如图10所示.

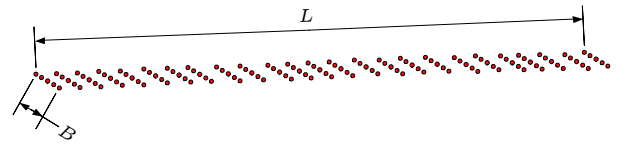


图8 吃水线水平面上的长方形磁单极子阵列

Fig. 8. Rectangular magnetic monopole array on the horizontal surface of the draft line.

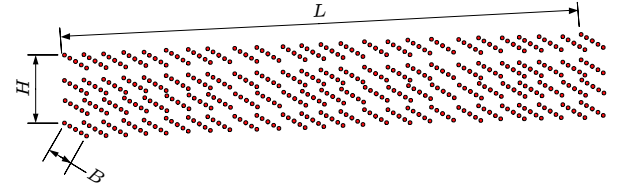


图9 包围船体的长方体磁单极子阵列

Fig. 9. Cuboid magnetic monopole array enclosing the ship hull.

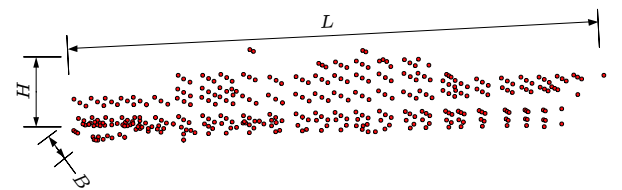


图10 按照船体铁磁结构分布的三维船体磁单极子阵列

Fig. 10. Three-dimensional ship magnetic monopole array distributed according to the ferromagnetic structure of the ship hull.

4.2 磁场测量点的配置

磁场测量点配置为 $2L \times 2B = 81 \times 9 = 729$ 的点阵, 分布范围为长 $2L$ 、宽 $2B$, 点的纵向间隔为 $L/40$, 横向间隔 $0.25B$, 如图11所示. 取5个测量深度平面: 吃水线下方 $+1B$, $+2B$, $+5B$ 三个深度, 吃水线上方 $-2B$, $-5B$ 两个深度, 如图12和图13

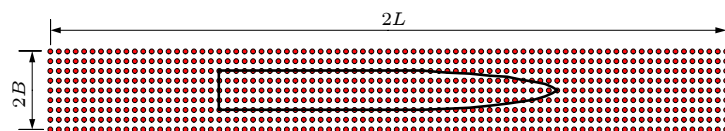


图 11 舰船磁场测量点分布俯视图

Fig. 11. Top view of the distribution of magnetic field measurement points on ship.

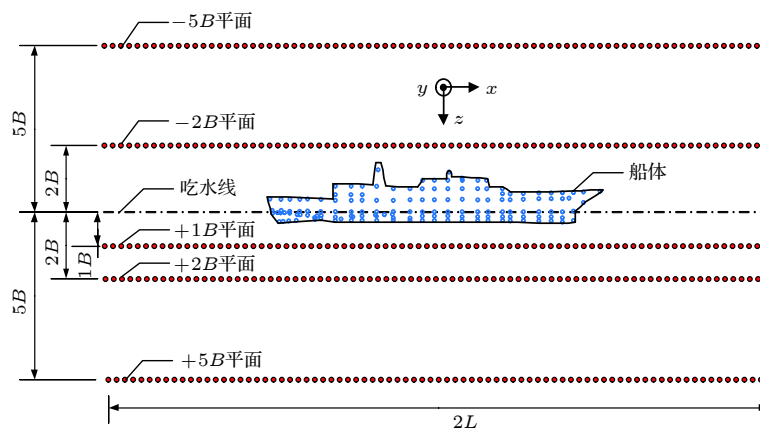


图 12 舰船磁场测量点分布侧视图

Fig. 12. Side view of distribution of magnetic field measurement points on ship.

所示. 此处未设置 $-1B$ 深度平面, 因为舰船部分上层建筑高度较大, 与此深度平面存在结构冲突. 在舰船磁场测量领域, 一般取船首方向为 x 轴正向, 右舷方向为 y 轴正向, 垂直向下为 z 轴正向, 如图 12 和图 13 所示.

4.3 舰船磁场的产生

舰船磁场的产生采用自编的舰船磁场综合分析软件 MagShip^[23–25], 该软件联合了磁矩量法 (magnetic moment method)^[26,27] 和多层自适应交叉近似法^[28], 能够方便快速地建立复杂结构舰船的磁特征模型. 更重要的是, 该技术尤其适用于计算舰船这种开域铁磁结构的磁性磁场, 因为其无需在自由空间中划分网格, 仅需要对舰船铁磁结构建模. 无论计算舰船磁场的近场还是远场, 均能保持相同的高精度. 例如, 对于典型舰船, 只需对舰船铁磁结构划分几万个单元就可以得到精确可靠的舰船磁特征, 近场 (例如上述 $+1B$ 测量深度平面磁场) 计算结果与商业有限元软件相比差别小于 1%, 而且易于处理有限元软件难以处理的远场 (例如上述 $+5B$, $-5B$ 测量深度的平面磁场).

采用约 10 万单元处理上述虚拟典型舰船, 其具有复杂铁磁结构, 包含船体、上层建筑、机械设备、船轴等完整舰船铁磁结构, 能够代表实际舰船

的复杂磁特征. 采取下述设置产生舰船磁场数据, 包括感应磁场、永久磁场、测磁噪声:

- 1) 感应磁场 舰船在纵向 40000 nT, 横向 20000 nT, 垂向 30000 nT 的均匀外磁场作用下产生的感应磁场;
- 2) 永久磁场 取感应磁场的 30% 为永久磁场;
- 3) 测磁噪声 取 $[-1 \text{ nT}, +1 \text{ nT}]$ 范围内的随

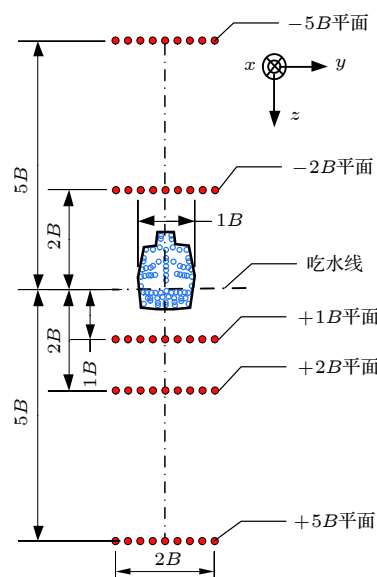


图 13 舰船磁场测量点分布后视图

Fig. 13. Rear view of the distribution of magnetic field measurement points on ship.

机量作为测磁噪声.

4.4 数据分析参数的定义

为了分析数据, 定义下述两个变量:

1) 相对误差 (relative error, RE)

$$RE = \frac{\|\mathbf{b}_{\text{reg}} - \mathbf{b}_t\|_2}{\|\mathbf{b}_t\|_2}, \quad (18)$$

其中 $\mathbf{b}_{\text{reg}}$ 表示正则化解得到的磁场预测值, $\mathbf{b}_t$ 表示磁场精确值, RE 实质上表示正则化解的精确程度. 这一变量通常是不可知的, 因为在实际问题中, 无法得到 $\mathbf{b}_t$, 但是为了验证仿真结果与真实解的逼近程度, 特地定义了此量.

2) 相对残差 (relative residual error, RRE)

$$RRE = \frac{\|\mathbf{A}\mathbf{Q}_{\text{reg}} - \mathbf{b}\|_2}{\|\mathbf{b}\|_2}, \quad (19)$$

其中 $\mathbf{Q}_{\text{reg}}$ 表示正则化解. 这一变量表示正则化解对数据的拟合程度. 实际问题中, 只能根据相对残差来判断问题解对数据的拟合程度.

4.5 数值仿真试验结果

按照上述设置, 得到具有典型意义的虚拟舰船磁性分布, 产生 5 个测磁深度平面的舰船磁场分量数据. 分别采用长方形、长方体、三维船体磁单极子阵列模型进行舰船磁场反演建模, 根据得到的磁单极子阵列强度在 5 个测磁深度平面之间互相

进行舰船磁场预测, 计算结果见表 1. 从表中可以看出:

1) 长方形磁单极子阵列在 5 个深度上均对测量数据拟合较差 (相对残差 1.54%—4.65%); 在舰船上下方的同一侧由近场向远场预测精度较低 (相对误差 6.62%—28.23%), 无法由远场向近场预测 (相对误差 13.28%—29.79%); 无法在舰船上下方的两侧相互预测 (相对误差 78.21%—190.80%);

2) 长方体磁单极子阵列在 5 个深度上均对测量数据拟合较好 (相对残差 0.08%—0.50%); 在舰船上下方的同一侧由近场向远场预测精度高 (相对误差 0.03%—0.24%), 由远场向近场预测精度尚可 (相对误差 1.23%—11.07%); 难以在舰船上下方两侧相互预测, 由近场向对侧远场预测精度尚可 (相对误差 2.41%—8.50%), 向对侧同等距离预测误差较大 (相对误差 5.65%—16.42%), 由远场向对侧近场预测误差很大 (相对误差 15.43%—29.81%);

3) 三维船体磁单极子阵列在 5 个深度上均有较小相对残差 (0.05%—0.49%), 对测量数据的拟合较好; 能在舰船上下方的同一侧由近场向远场高精度预测 (相对误差 0.01%—0.05%), 由远场向近场预测精度较高 (相对误差 0.65%—5.55%); 可在舰船上下方两侧相互预测, 由近场向对侧远场精度较高 (相对误差 0.50%—5.49%), 向对侧同等距离预测精度较高 (相对误差 3.12%—7.05%), 由远场

表 1 验证试验的计算结果
Table 1. Results of the validation test.

测量深度	阵列形式	正则化参数 α	相对残差/%	相对误差/%				
				+1B	+2B	+5B	-2B	-5B
+1B	长方形	0.1323	4.65	4.56	8.25	28.23	95.00	101.76
	长方体	0.0069	0.08	0.08	0.03	0.24	8.50	3.65
	三维船体	0.0030	0.05	0.04	0.01	0.03	5.49	0.50
+2B	长方形	0.0177	2.15	13.28	2.14	10.03	91.06	85.98
	长方体	0.0026	0.09	1.23	0.02	0.09	16.30	3.64
	三维船体	0.0020	0.09	0.65	0.01	0.03	7.05	1.64
+5B	长方形	0.0190	3.64	34.51	19.15	3.62	80.15	78.21
	长方体	0.0028	0.50	11.07	2.28	0.07	25.99	11.68
	三维船体	0.0021	0.49	5.55	0.94	0.04	17.13	3.12
-2B	长方形	0.0020	1.54	190.80	114.68	92.25	1.54	6.62
	长方体	0.0024	0.08	15.43	5.65	2.41	0.03	0.05
	三维船体	0.0026	0.11	10.20	3.63	1.25	0.08	0.05
-5B	长方形	0.0216	4.39	90.31	86.81	86.29	29.79	4.39
	长方体	0.0034	0.46	29.81	20.97	16.42	7.01	0.11
	三维船体	0.0021	0.44	15.36	8.99	5.18	3.51	0.06

向对侧近场预测精度尚可 (相对误差 8.99%—17.13%).

5 讨论

长方形磁单极子阵列所构建的等效磁源与舰船真实磁源很不一致, 既无法较好地拟合测量数据, 更无法进行高精度磁场预测, 对于舰船上下方的对侧磁场更是完全无法重建, 因此不适合用于舰船磁场的高精度反演预测.

长方体磁单极子阵列所构建的等效磁源能够覆盖舰船真实场源的分布空间, 因此也可以较好地拟合测量数据. 但是所构建的等效磁源与舰船真实磁源存在一定的位置偏差, 甚至部分等效磁源不可避免地超出了舰船铁磁结构的分布空间, 偏差更大. 因此, 导致在舰船上下方的同一侧由近场向远场预测时虽然能实现很高的计算精度, 但是对于由远场向近场预测以及舰船上下方两侧之间相互预测问题上则存在较大误差.

三维船体磁单极子阵列所构建的等效磁源按照舰船铁磁结构布置, 与舰船真实磁源的一致性很高, 分布范围和位置均非常接近. 因此, 三维船体磁单极子阵列是最优的布置形式, 不但能很好地拟合测量数据, 后续的磁场预测结果也具有非常高的精度. 尤其是能够实现舰船磁场的上下方两侧之间相互预测, 且精度较高.

以三维船体磁单极子阵列模型从舰船上方的 $-2B$ 平面向舰船下方平面预测为例, 在 $-2B$ 平面对测量数据拟合的相对残差为 0.11%, 在 $+1B$, $+2B$, $+5B$ 平面磁场预测的相对误差分别为 10.20%, 3.63%, 1.25%. 取舰船龙骨下方坐标 $x = -1L$ — $+1L$,

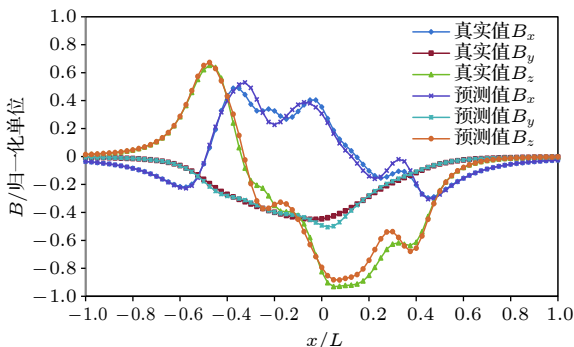


图 14 $+1B$ 深度典型测量点线上的舰船磁场预测值和真实值对比

Fig. 14. Comparison of predicted and real values of ship's magnetic field on typical measuring point line in $+1B$ depth.

$y = 0$, $z = +1B$, $+2B$, $+5B$ 的三条典型测量点线, 进行舰船三分量磁场预测值和真实值的对比, 结果分别如图 14, 图 15 和图 16 所示. 从图中可以看出, 从 $-2B$ 平面向 $+1B$, $+2B$, $+5B$ 平面的预测值与真实值均符合较好, 证明三维船体磁单极子阵列模型能够实现舰船磁场从舰船上方向舰船下方的高精度预测.

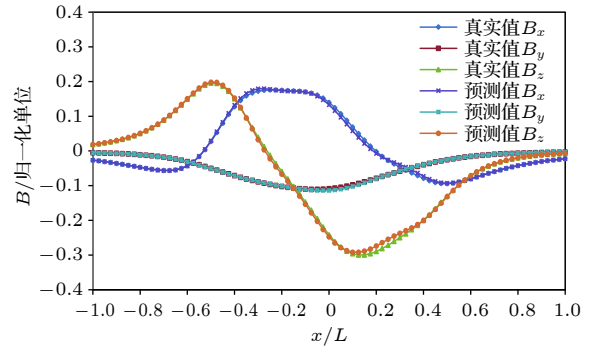


图 15 $+2B$ 深度典型测量点线上的舰船磁场预测值和真实值对比

Fig. 15. Comparison of predicted and real values of ship's magnetic field on typical measuring point line in $+2B$ depth.

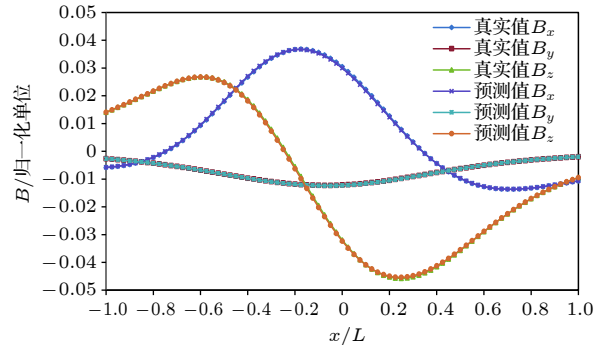


图 16 $+5B$ 深度典型测量点线上的舰船磁场预测值和真实值对比

Fig. 16. Comparison of predicted and real values of ship's magnetic field on typical measuring point line in $+5B$ depth.

6 结论

提出了一种按照舰船铁磁结构布置的三维船体磁单极子阵列模型, 尝试获取更完整可靠的舰船磁源信息, 应用于舰船磁场不同深度之间、上下方两侧之间相互预测. 理论分析和验证试验结果表明, 与长方形和长方体磁单极子阵列模型相比, 三

维船体磁单极子阵列模型获得的等效磁源与舰船实际磁源一致性较好, 具有很高的计算精度, 能够更大程度地复现舰船磁场完整信息. 不但能够实现舰船上下方同侧不同深度的高精度磁场预测, 还可以实现舰船上下方两侧之间相互预测. 磁单极子阵列模型具有复杂度小、建模简单、布置灵活的独特优势, 为后续舰船磁场高精度反演建模、磁场定位等的数据处理和解释奠定良好的基础.

参考文献

- [1] Holmes J J 2007 *Modeling A Ship's Ferromagnetic Signatures* (Maryland: Morgan & Claypool Publishers) p3
- [2] Holmes J J 2008 *Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures* (Maryland: Morgan & Claypool Publishers) p8
- [3] Nixon D A, Baker F E 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 539
- [4] Kildishev A V, Nyenhuis J A, Morgan M A 2002 *IEEE Trans. Magn.* **38** 2465
- [5] Chen J, Lu X W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3839 (in Chinese) [陈杰, 鲁习文 2009 物理学报 **58** 3839]
- [6] Synnes S A 2008 *IEEE Trans. Magn.* **44** 2277
- [7] Kamondetdacha R, Kildishev A V, Nyenhuis J A 2004 *IEEE Trans. Magn.* **40** 2176
- [8] Jiang M Z, Lin C S 2003 *Journal of WUT (Information & Management Engineering)* **25** 168 (in Chinese) [蒋敏志, 林春生 2003 武汉理工大学学报·信息与管理工程版 **25** 168]
- [9] Wei Y L, Chen J C, Li G Y, Wang Y D, Zeng X J 2017 *Computer Measurement & Control* **25** 213 (in Chinese) [隗燕琳, 陈敬超, 李贵乙, 王彦东, 曾小军 2017 计算机测量与控制 **25** 213]
- [10] Lin C S, Gong S G 2007 *Ships Physical Fields* (Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry) p233 (in Chinese) [林春生, 龚沈光 2007 舰船物理场(北京: 兵器工业出版社) p233]
- [11] Dai Z H, Zhou S H, Shan S 2018 *Acta Electronica Sinica* **46** 1524 (in Chinese) [戴忠华, 周穗华, 单珊 2018 电子学报 **46** 1524]
- [12] Wu Z D, Zhou S H, Guo H S 2013 *Journal of Wuhan University of Technology* **35** 67 (in Chinese) [吴志东, 周穗华, 郭虎生 2013 武汉理工大学学报 **35** 67]
- [13] Alqadah H F, Valdivia N P, Williams E G 2016 *Progress In Electromagnetics Research B* **65** 109
- [14] Chadebec O, Coulomb J L, Bongiraud J P, Cauffet G, Thiec P L 2002 *IEEE Trans. Magn.* **38** 1005
- [15] Chadebec O, Coulomb J L, Cauffet G, Bongiraud J P 2003 *IEEE Trans. Magn.* **39** 1634
- [16] Vuillermet Y, Chadebec O, Coulomb J L, Rouve L L, Cauffet G, Bongiraud J P, Demilier L 2008 *IEEE Trans. Magn.* **44** 1054
- [17] Yang C S, Lee K J, Jung G, Chung H J, Park J S, Kim D H 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07D905
- [18] Guo C B, Xiao C H, Liu D M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4182 (in Chinese) [郭成豹, 肖昌汉, 刘大明 2008 物理学报 **57** 4182]
- [19] Dirac P A M 1931 *Proc. Roy. Soc. A* **133** 60
- [20] Dirac P A M 1948 *Phys. Rev.* **74** 817
- [21] Tikhonov A N, Arsenin V Y 1977 *Math. Comput.* **32** 491
- [22] Hansen P C, O'Leary D P 1993 *SIAM J. Sci. Comput.* **14** 1487
- [23] Guo C B, Zhou W C 2017 *Acta Armamentarii* **38** 1988 (in Chinese) [郭成豹, 周炜昶 2017 兵工学报 **38** 1988]
- [24] Guo C B, Liu D M 2012 *Acta Armamentarii* **33** 912 (in Chinese) [郭成豹, 刘大明 2012 兵工学报 **33** 912]
- [25] Guo C B, Liu D M 2014 *Acta Armamentarii* **35** 1638 (in Chinese) [郭成豹, 刘大明 2014 兵工学报 **35** 1638]
- [26] Chadebec O, Coulomb J, Janet F 2006 *IEEE Trans. Magn.* **42** 515
- [27] Morandi A, Fabbri M, Ribani P L 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 3848
- [28] Zhao K Z, Vouvakis M N, Lee J F 2005 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **47** 763

Magnetic monopole array model for modeling ship magnetic signatures^{*}

Guo Cheng-Bao[†] Yin Qi-Qi

(*School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

(Received 15 February 2019; revised manuscript received 12 March 2019)

Abstract

Aiming at the problems of low accuracy and low adaptability of the existing ship magnetic field inversion modeling methods with equivalent sources, a new method of inversion modeling of magnetic monopole array of ship magnetic fields is proposed. Three-dimensional ship magnetic monopole array is arranged according to the ship ferromagnetic structure, and the inversion prediction model of ship magnetic fields is established by regularization technology. Three typical forms of magnetic monopole arrays are established: rectangular magnetic monopole array on the horizontal surface of the draft line, cuboid magnetic monopole array enclosing the ship hull, three-dimensional ship magnetic monopole array distributed according to the ship's ferromagnetic structure. The theoretical analysis shows that the three-dimensional ship magnetic monopole array reduces the blindness of the equivalent magnetic source setting, and the obtained equivalent magnetic source is highly consistent with the real magnetic source, which can reproduce the complete magnetic field information of the ship to a greater extent. The magnetic field of a typical virtual ship is applied to the validation test. The results show that the proposed three-dimensional ship magnetic monopole array has higher precision and adaptability than the rectangular or cuboid magnetic monopole array. In particular, the proposed three-dimensional ship magnetic monopole array can realize the mutual conversion between the near and far magnetic fields, and between the magnetic fields above and below the ship. The proposed three-dimensional ship magnetic monopole array model has the unique advantages of small complexity, simple modeling and flexible layout, and it provides an alternative method for the high-precision data processing and explanation to the inversion modeling of ship magnetic fields, ship magnetic field positioning, et al.

Keywords: magnetostatic field, equivalent source method, magnetic monopole, ship's magnetic signature

PACS: 41.20.Gz, 02.30.Zz

DOI: 10.7498/aps.68.20190201

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51277176).

[†] Corresponding author. E-mail: guochengbao@outlook.com