

基于模拟退火算法的舰船磁场高精度建模方法

戴忠华,周穗华,单 珊

(海军工程大学兵器工程系,湖北武汉 430033)

摘 要: 在舰船消磁与防护中,需要利用混合模型对舰船磁场的空间分布规律进行数学建模,而混合模型将磁偶极子阵列等距分布忽视了舰船结构的影响,且没有考虑测量数据的真实性,导致所建模型精度不高、稳定性较差.文章以混合模型系数矩阵条件数为目标函数,采用模拟退火算法(Simulated Annealing algorithm, SA)优化系数矩阵条件数,得到磁偶极子阵列的最优位置分布;然后通过考察单个点的拟合情况剔除误差大的测量点,优化测量数据;最后利用逐步回归求解模型方程,获得舰船磁场高精度稳定模型.实测数据建模表明:与磁偶极子等距分布的混合模型建模相比,本文方法所建模型精度可达96%,对测量数据误差的敏感性低,抗干扰能力强,具有较好的鲁棒性.本方法可用于复杂海况背景下的舰船磁场高精度建模,以及水面磁性目标探测与定位系统.

关键词: 舰船磁场;磁偶极子阵列分布;测量数据;系数矩阵条件数;模拟退火算法;逐步回归

中图分类号: TM155 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)06-1524-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.037

High Accuracy Method for Ship Magnetic Field Based on Simulated Annealing Algorithm

DAI Zhong-hua, ZHOU Sui-hua, SHAN Shan

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 4300033, China)

Abstract: In modeling ship magnetic field with hybrid model, the dipole array location distribution and the authenticity of the measurement data, which affects model accuracy and stability, should be considered. The paper takes the condition number of the coefficient matrices of the hybrid model as the objective function, gets the optimal position distribution of magnetic dipole arrays by optimizing the matrix condition number with simulated annealing algorithm, optimizes the measurement data by eliminating the great error in the measurement point, and finally obtains the high precision and stable model of ship magnetic field by using stepwise regression to solve the model equation. The measured data model shows, compared with the model based on the equidistant distribution of magnetic dipole of hybrid model, the model that the proposed method builds has a higher accuracy and is more stable, and the accuracy of the model can reach 96%. This method can be used for high precision modeling of ship magnetic field under complex sea conditions, as well as surface magnetic target detection and positioning system.

Key words: ship magnetic field; dipole array location distribution; measurement data; condition number of matrices; simulated annealing algorithm; stepwise regression

1 引言

现在绝大多数的舰船都是由钢铁材料制成,在地球磁场环境中,受地球磁场的磁化,船船周围会产生一个附加磁场,该磁场称为舰船磁场^[1].舰船磁场已成为水中武器攻击的信号源,分析和计算舰船磁场在舰船目标探测和舰船防护消磁等方面具有重大的意义^[2].舰船磁场建模主要是根据几条测量数据点反推出舰船

磁场模型,然后利用反推模型对舰船空间磁场进行分析和计算.

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^[3-6],其计算精度高,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,它基于船外若干测量点处产生磁场的相似性,将整个舰船磁场等效为若干分布

于舰船所占空间内模拟体的磁场,其只需要少量的磁场测量数据,便可完成建模,且建模精度较高,是现实中最常运用的方法.舰船磁体模拟源常用的是椭球体和磁偶极子阵列混合模型,这种建模方法的本质是解一个多维的超定方程.该方程解的精度和稳定性与方程系数矩阵条件数有着密切的联系,而方程系数矩阵条件数受到磁偶极子位置分布和磁偶极子个数的影响.文献[7]中,将磁偶极子均匀分布在舰船的吃水面上,利用了逐步回归方法对每个磁偶极子的磁矩进行优化,一定程度上消除了系数矩阵的病态问题.文献[8]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.然而文献[7,8]中都没有考虑到磁偶极子位置对系数矩阵条件数的影响,将磁偶极子位置固定,单纯的剔除系数矩阵的某一列,其实是剔除对应磁偶极子的某个方向的磁矩,当磁偶极子磁矩剔除过多时,拟合误差会增大,导致建模失败.文献[9,10]中利用遗传算法优化磁偶极子位置分布,该方法建立的模型稳定性和精度较好,但其只考虑了水平面上的分布,同时也缺乏对磁矩优化和测量点误差考虑,当磁偶极子个数多时编码困难、算法复杂.文献[11~13]中利用粒子群算法对磁偶极子位置进行优化,但是算法复杂且容易陷入局部最优.

本文将舰船等效为椭球体和磁偶极子阵列混合模型,利用模拟退火算法的全局搜索、规则简单、易于实现优点优化系数矩阵的条件数,从而优化磁偶极子的位置分布,同时考虑磁矩优化和测量误差,提出了一种舰船磁场高精度建模方法.

2 舰船磁场高精度建模

2.1 舰船模拟混合模型和目标函数

建立舰船磁场混合模型时,将舰船磁场等效为一个位于舰船吃水面中心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.其中均匀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.

假设舰船混合模型的磁偶极子个数为 N ,其坐标分别为 (u_i, v_i, w_i) , $i = 1, 2, \dots, N$.以舰船中心建立坐标系,则它在测量点 $P_j(x_j, y_j, z_j)$ 所产生的磁场为:

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

其中 $i = 1, 2, \dots, m$ 为测量点个数, 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, $M_{x(N+1)}, M_{y(N+1)}, M_{z(N+1)}$ 为均匀旋转椭球体的 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,其具体计算公式在文献[2]中已经给出.

由式(1)改写成矩阵形式为:

$$\mathbf{FM} = \mathbf{H} \quad (2)$$

其中 \mathbf{F} 是由 $(a_{xij}, a_{yij}, a_{zij}, b_{xij}, b_{yij}, b_{zij}, c_{xij}, c_{yij}, c_{zij})$ 构成的系数矩阵, \mathbf{M} 是磁矩矩阵, \mathbf{H} 是测量磁场构成的矩阵.只要系数矩阵的行数大于磁矩矩阵的行数,即 $m > N$, 式(2)就有解.

为了对所建模型进行验证,通常可以考虑拟合误差和换算误差.现假设由式(2)解出的磁矩参数为 \mathbf{M} , 则拟合误差可以用相对均方根误差表示为:

$$e = \|\mathbf{FM} - \mathbf{H}\|_2 / \|\mathbf{H}\|_2 \quad (3)$$

各轴的相对误差表示如下:

$$e_{Hx} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m (\hat{H}_{xj} - H_{xj})^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (H_{xj})^2}} \quad (4)$$

$$e_{Hy} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m (\hat{H}_{yj} - H_{yj})^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (H_{yj})^2}} \quad (5)$$

$$e_{Hz} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m (\hat{H}_{zj} - H_{zj})^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (H_{zj})^2}} \quad (6)$$

式中, $\hat{H}_{xj}, \hat{H}_{yj}, \hat{H}_{zj}$ 为模型理论计算值, H_{xi}, H_{yi}, H_{zi} 为测量值.

在解式(2)过程中,由于其往往是超定方程,系数矩阵的条件数和测量点数据的误差影响着解出模型的精度和稳定性.系数矩阵的条件数越大,模型越不稳定,对测量误差越是敏感;系数矩阵的条件数越小,模型越稳定,对测量误差越不敏感.由于系数矩阵的条件数是磁偶极子位置坐标的函数,因此,可以通过对系数矩阵条件数的优化而得到最优的磁偶极子分布.

如图1所示,在混合模型中,将舰船等效椭球体,长半轴为 a ,短半轴为 b , N 磁偶极子分布在椭球内.现将椭球体沿长轴方向分为 $N+1$ 等份,则第 i 个磁偶极子的分布范围为图1中阴影部分所代表的区域.

系数矩阵的条件数优化问题可以由下式表示:

$$\min(\text{Cond}(\mathbf{F})) = f(u_i, v_i, w_i), i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中, u_i, v_i, w_i 的取值范围为:

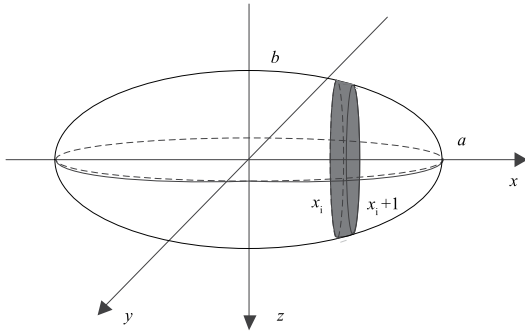


图 1 混合模型

$$\begin{cases} x_i \leq u_i \leq x_{i+1} \\ -\frac{b}{a} \sqrt{a^2 - u_i^2} \leq v_i \leq \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - u_i^2} \\ -\frac{b}{a} \sqrt{a^2 - u_i^2} \leq w_i \leq \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - u_i^2} \end{cases} \quad (8)$$

$\text{Cond}(\mathbf{F})$ 为系数的条件数可以用式(9)计算

$$\text{Cond}(\mathbf{F}) = f(u_i, v_i, w_i) = \|\mathbf{F}\| \cdot \|\mathbf{F}^+\| \quad (9)$$

于是,对系数矩阵条件数的优化问题,可以理解为对式(9)在式(8)范围中寻求最小值,则当式(9)取最小值时,其对应的 u_i, v_i, w_i 既是磁偶极子的最优分布位置。

2.2 磁偶极子位置优化及高精度建模方法

2.2.1 基于模拟退火算法的磁偶极子位置优化

为了求出磁偶极子的最佳位置分布,而式(9)是高维非线性函数,利用传统的解析法很难得到解.本文利用模拟遗传算法来进行优化磁偶极子位置.模拟退火算法是一种基于概率的全局搜索算法,能够避免粒子群算法和遗传算法陷入的局部最优。

利用模拟退火算法进行磁偶极子位置优化时,将式(9)作为目标函数,由初始解 $x = (u_i, v_i, w_i)$ 和初始退火温度值 T_0 开始,在每个温度下对当前解重复“产生新解 $x' \rightarrow$ 判断新解是否满足式(8) \rightarrow 计算目标函数差 \rightarrow 接受或舍弃”的 L 次迭代,然后根据衰减系数 α 逐步衰减 T_0 值,当温度达到常温 T 时,算法终止且当前解即为所得近似最优解.磁偶极子位置优化算法,如算法 1.通常,给定的初始温度要足够大,退火系数选取 0.95 ~ 0.99 之间,迭代次数 L 可以选取为 1000.

算法 1 磁偶极子位置优化算法

```

输入:  $T_0, \alpha, L, x$ 
Do
  For  $K = 1$  to  $L$ 
    Generate  $\Delta x$ 
     $x' = x + \Delta x$ 
  Do

```

```

Generator  $\Delta x$ 
 $x' = x + \Delta x$ 
Loop while ( $x' \notin V$ )
 $\Delta c = \text{Cond}(x') - \text{Cond}(x)$ 
If  $\Delta c < 0$ 
   $x = x'$ 
Else
  If  $\exp(-\Delta c/T) > \text{rand}()$ 
     $x = x'$ 
End
End loop
 $K = 0, T_0 = \alpha \cdot T_0$ 

```

```
Loop while  $T_0 > T$ 
```

```
输出:  $x$ 
```

2.2.2 舰船高精度磁场建模方法

为了建立稳定的舰船高精度模型,在磁偶极子位置已经优化的情况下,本文再采用逐步回归法对磁矩进行优化,剔除不明显因子,极大程度上优化磁偶极子个数,同时对测量点数据也进行粗大误差数据的剔除.建模的步骤如下:

(1) 采用模拟退火算法对模型系数矩阵的条件系数进行优化,获得最优的磁偶极子位置分布和最优的系数矩阵 F ;

(2) 对新的系数矩阵构成的超定方程,采用文献[2]中的逐步回归法求解出磁矩参数 M , 计算拟合误差;

(3) 根据模型方程和 M , 计算各测量点的理论值,然后计算各点各方向的相对偏差,若大于开始设定的门限值,剔除该测量点,更新系数矩阵,再用逐步回归重新建模,并计算拟合误差.若拟合误差得到改善,进入下一步,否则本次实验数据无效,无法建模;

(4) 利用得到的 M , 根据式(1)和式(2)能够获得舰船周围任意一点的磁场。

此方法得到的舰船磁场模型,既保证了模型的稳定性又保证了模型的拟合精度。

3 实验结果与分析

3.1 实验室船模数据建模

实验中,利用 5 个传感器测量了某型船模的五条轨迹磁场,每条测量线有 35 个点.在进行磁偶极子位置优化时,初始参数设置为:初始温度 $T_0 = 100$, 温度衰减系数为 $\alpha = 0.99$, 迭代次数 $L = 1000$.

3.1.1 模型验证

为验证本文磁偶极子位置优化算法和建模方法的有效性,用 20 个磁偶极子和一个椭球体混合模型,分别采用本文方法和文献[9]中的进行比较,计算结果如图 2 ~ 6. 表 1 给出了三条测量线的拟合误差,现建模方法相比原有的建模方法,误差降低了 2 ~ 3 倍。

表 1 拟合误差计算结果

测量线	左舷			龙骨			右舷		
	e_{H_x}	e_{H_y}	e_{H_z}	e_{H_x}	e_{H_y}	e_{H_z}	e_{H_x}	e_{H_y}	e_{H_z}
原误差	0.0440	0.3479	0.0249	0.0458	0.0515	0.0395	0.0459	0.0439	0.0756
现误差	0.0265	0.0770	0.0077	0.0190	0.0335	0.0100	0.0272	0.0190	0.0169

图 2 是优化的磁偶极子阵列位置分布. 如图 3 所示, 经过模拟退火算法的优化, 当迭代次数达到 560 时, 系数矩阵条件数收敛于 983. 图 4~6 分别是船模的左舷、龙骨、右舷三条测量线的拟合情况, 三条测量线拟合误差如表 1 所示, 模型精度较高, 拟合最小误差为 0.0077.

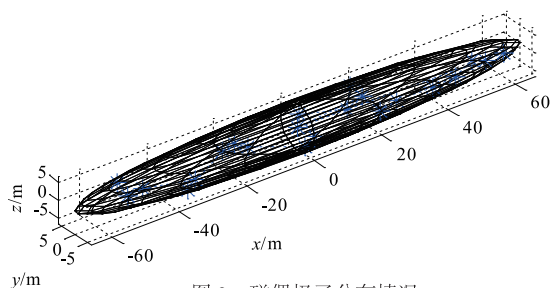


图 2 磁偶极子分布情况

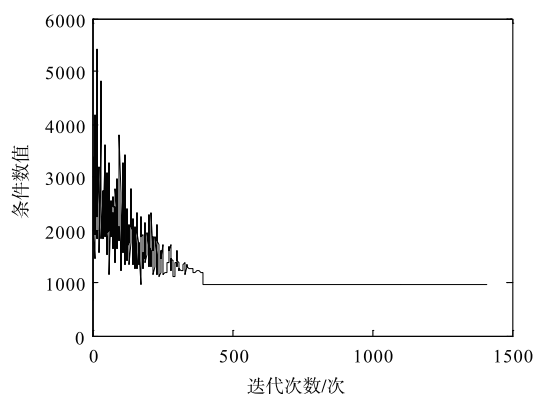


图 3 系数矩阵条件数的变化

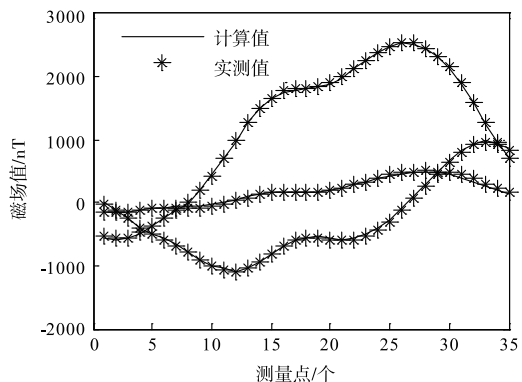


图 4 船模左舷拟合情况

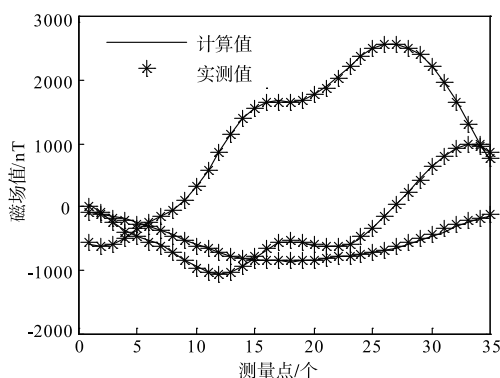


图 5 船模龙骨下方拟合情况

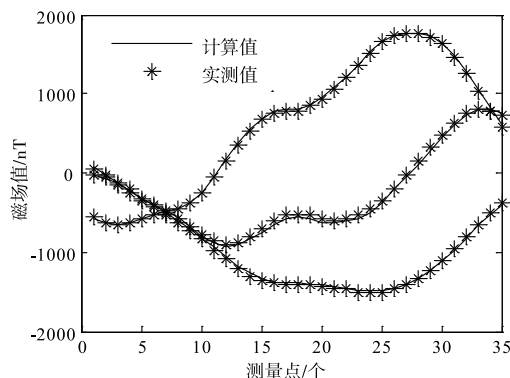


图 6 船模右舷拟合情况

误差的测量数据建模精度. 实验时, 在所测的船模磁场数据点中随机挑选 30 个数据点, 增加 3% 的扰动, 同样以 20 个磁偶极子的混合模型, 用本文方法和原方法建模, 计算拟合误差和换算误差, 计算结果如表 2 所示.

表 2 干扰下的拟合误差计算结果

种类		拟合误差	换算误差
原方法误差	不叠加	0.0725	0.0811
	叠加	0.1246	0.1521
现方法误差	不叠加	0.0231	0.0522
	叠加	0.0243	0.0533

在表 2 中, 当叠加上干扰信号后, 现方法计算的拟合误差为 0.0243, 换算误差为 0.0533, 可见所建模型精度较高, 且相对于原方法, 在有干扰信号的情况下, 误差波动为仅为 0.001, 明显优于原方法, 说明本文建模方法所建模型稳定, 对数据的敏感性低, 具有较好的鲁棒性.

3.1.2 模型稳定性分析

为分析本文所建模型的稳定性, 考察了存在一定

3.2 真实海况实测数据建模

为了进一步验证本文所提建模方法的现实有效性,现利用实测的某型舰船通过磁场信号进行建模.实际测量时,在深度为 13m 和 22.3m 两个平面上各布置了 5 个磁传感器,舰船的航行方向垂直于磁传感器的连线.分别测量了不同航向的舰船通过磁场信号.利用各航向的实测磁场数据进行建模,首先利用深度 13m 平面上的测量数据进行模型求解,然后换算 22.3m 平面上的磁场,最后分别计算 13m 平面的拟合精度和 22.3m 平面上的换算精度,计算结果如表 3 所示.从表 3 的计算结果可知,本方法在现实舰船磁场建模中精度可达 96%,换算精度可达 93%,说明本方法能够在实际环境中进行建模,且具有较高的建模精度.

表 3 真实舰船测量数据建模误差

航向	拟合误差	换算误差
东航向	0.0246	0.0315
西航向	0.0326	0.0465
南航向	0.0364	0.0512
北航向	0.0265	0.0612

4 结论

本文围绕如何建立稳定的舰船磁场高精度模型进行了研究,提出了一种基于模拟退火算法的高精度舰船磁场建模方法.该方法考虑了混合模型中磁偶极子阵列分布和测量点误差对模型精度和稳定性受的影响,通过构造含有磁偶极子阵列位置参数的目标函数,采用模拟退火算法进行优化以得到最优分布位置,考察单个点的拟合情况以剔除误差较大的测量点数据,最终能够得到高精度的稳定模型.实测数据建模表明,相对于磁偶极子等距分布的混合模型相比,本文方法所建模型精度较高,受干扰影响小,具有良好的稳定性,能够适用于实际的工程应用中.

参考文献

- [1] 林春生. 水雷引信系统设计原理[M]. 北京:兵器工业出版社,2013.
- [2] John J Holmes. Modeling a Ship's Ferromagnetic Signatures[M]. Maryland: Morgan Claypool Publishers, 2007.
- [3] 高俊吉,刘大明,姚琼荟,等. 用边界元法进行潜艇空间磁场推算的试验检验[J]. 兵工学报,2006,27(5):869-872.
GAO Jun-ji, LIU Da-ming, YAO Qiong-hui, et al. Verifying the mathematics model of submarine magnetic field extrapolation with boundary element method through experiment[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(5): 869-872. (in Chinese)
- [4] 周国华,肖昌汉,刘胜道,等. 船舶磁场的面磁荷建模方法及其稳定性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2010,31(5):553-558.
ZHOU Guo-hua, XIAO Chang-han, LIU Sheng-dao, et al. Stability analysis with magnetic modeling of ships based on equivalent surface boundary element method through experiment[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(5): 553-558. (in Chinese)
- [5] 郭成豹. 基于积分法和奇异值分解的舰船磁场建模技术研究[D]. 武汉:海军工程大学,2007.
GUO Cheng-bao. Study on Ship Magnetic Field Modeling Technique Based on Integral Equation Method and Singular Value Decomposition[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2007. (in Chinese)
- [6] 闰辉,肖昌汉,殷克全. 递推算法在船舶磁场远近向近场换算中的应用[J]. 兵工学报,2010,31(9):1200-1203.
YAN Hui, XIAO Chang-han, YIN Ke-quan, et al. The application of recursive algorithm on ship's magnetic field extrapolation[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(9): 1200-1203. (in Chinese)
- [7] 林春生. 舰船磁场信号检测与磁性目标定位[D]. 武汉:海军工程学院,1996.
- [8] 王金根,龚沈光,刘胜道. 磁性目标高精度建模方法[J]. 海军工程大学学报,2001,13(3):49-52.
WANG Jin-gen, GONG Shen-guang, LIU Sheng-dao. High accuracy method for modeling magnetic object[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(3): 49-52. (in Chinese)
- [9] 刘胜道,刘大明,肖昌汉. 基于遗传算法的磁性目标磁模型[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2008,32(6):1017-1020.
- [10] 徐杰,刘大明,周国华,等. 一种基于遗传优化算法的潜艇高空磁场换算方法[J]. 科学舰船与技术,2009,31(9):156-159.
XU Jie, LIU Da-ming, ZHOU Guo-hua, et al. Application of genetic algorithm in continuation of magnetic field of submarines in high areas[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(9): 156-159. (in Chinese)
- [11] 王恒,周耀忠,周国华. PSO 算法在舰船磁场磁体模拟中的应用[J]. 海军工程大学学报,2007,19(1):105-107.
WANG Huan, ZHOU Yao-zhong, ZHOU Guo-hua. Application of particle swarm optimism to magnet simulation[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 19(1): 105-107. (in Chinese)
- [12] 张朝阳,肖昌汉,徐杰. 基于微粒群优化的舰船模型分析[J]. 华中科技大学学报,2010,38(11):124-128.
ZHANG Zhao-yang, XIAO Han-chang, XU Jie. Analysis of magnetic model for ship using particle swarm optimization

tion method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition),2010,38(11):124-128. (in Chinese)

[13] 吴志东,周穗华,郭虎生. 磁偶极子参数优化在高精度磁性舰船建模中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2013,

35(9):67-71.

WU Zhi-dong, ZHOU Sui-hua, GUO Hu-sheng. Parameters optimization of dipole used in high accuracy modeling of magnetic ship [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2013,35(9):67-71. (in Chinese)

作者简介



戴忠华 男,1992 年生于江西宁都. 现为海军工程大学兵器工程系硕士研究生. 主要研究方向为军用目标特性及其感知技术.
E-mail:602024288@qq.com



周穗华 男,1962 年出生,广东五华人,1983 年毕业于海军工程学院,2003 年在海军工程大学获得博士学位,现为海军工程大学教授、博士生导师,从事军用目标特性信息处理及武器系统总体设计方面研究.