

【引用格式】曹军宏, 刘飞, 许喆, 等. 面向实际应用的舰艇水下磁场标准化建模方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(5): 463-466.

# 面向实际应用的舰艇水下磁场标准化建模方法

曹军宏<sup>1</sup>, 刘飞<sup>1</sup>, 许喆<sup>1</sup>, 赵志强<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 92942 部队, 北京 100161;  
2. 中国人民解放军 91663 部队, 山东 青岛 266011)

**摘要** 舰艇消磁是有效防护舰艇遭受水雷攻击的重要手段之一, 高效精准的测磁技术是舰艇消磁的前提。针对舰艇首次消磁工作中使用手提式测磁仪与大平面测磁阵列之间的测量点位置差异问题, 提出基于磁偶极子阵列的舰艇水下磁场换算方法, 引入舰艇几何模型标准化数据库, 计算出舰艇水下标准测量点处的磁场, 解决了测量点位置差异导致无法发挥消磁站自动化大平面测磁的实际难题, 该方法可推广适用于大部分舰艇消磁站。

**关键词** 舰艇; 磁场换算; 磁偶极子阵列; 标准测量点

中图分类号 U674.70

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)05-0463-04

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.05.013

## A Standardized Modeling Method of Ship's Underwater Magnetic Field for Practical Application

CAO Junhong<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, XU Zhe<sup>1</sup>, ZHAO Zhiqiang<sup>2</sup>

(1. No. 92942 Unit of PLA, Beijing 100161, China;  
2. No. 91663 Unit of PLA, Qingdao 266011, China)

**Abstract** Ship degaussing is one of the important means to effectively protect ship from mine attack. Efficient and accurate magnetic measurement technology is the premise of ship degaussing. Aiming at the position difference problem of the measuring points between the portable magnetometer and the large plane magnetometer array used in the first degaussing work of ship, the underwater magnetic field conversion method of the ship based on the magnetic dipole array is proposed. The standardized database of the ship geometric model is introduced to calculate the magnetic field at the underwater standard measuring points of the ship, which solves the practical problem that the position difference of the measuring points makes it impossible to give full play to the automatic large-plane magnetometer of the degaussing station. This method is suitable for most ship degaussing stations.

**Key words** warship; magnetic field conversion; magnetic dipole array; standard measuring points

## 0 引言

目前新造舰艇开展首次消磁勤务工作时, 舰艇总体设计研究所要求采用舰艇龙骨和左右舷下曲

线对应的水下测量点磁场进行磁场考核。目前大多数消磁站使用的磁场阵列是敷设在海底的磁传感器组成的水下大平面磁场直线阵列, 即使通过舰艇磁场换算, 获得的舰艇下方磁场阵列仍与总体设计

研究所要求的阵列存在考核点位置差异。当消磁站面临的首次消磁船型较多时,考核点位置差异带来的问题尤其突出。因此消磁站开展首次消磁时,依旧经常使用手提式测磁仪进行测量,而无法使用消磁站先进的自动化测磁系统。因此,为了提高舰艇测磁精度和效率,本文开展了舰艇测磁和磁场换算技术研究,以提高消磁站工作效率。

### 1 舰艇水下磁场测量技术现况

目前对舰艇进行精确、快速、自动磁场检测和实施综合磁性处理主要依靠综合式消磁站完成。舰艇磁场测量、磁场分解、磁场换算是消磁工作中的重要环节,舰艇消磁绕组设计、舰艇磁性处理、磁性防护性能研究等均需要准确测量舰艇磁场,通过测量可以分析舰艇磁场特征和消磁效果,是提高舰艇消磁速度与消磁效果的前提<sup>[1-4]</sup>。

舰艇磁场测量的方法主要有手提式测磁仪测量法、水下行车测量法、大平面测量法、敞开式磁性检测法。其中使用最为广泛的就是手提式测磁仪测量法和大平面测量法。

手提式测磁仪主要测量舰艇龙骨下、舷下磁场,是最早采用的测磁方法,其主要优点是设备简单、投资少、机动性好、便于携带,而且操作和维修简便;缺点主要是受海情气象影响较大,占用人力较多,劳动强度大,测量时由人工读绳长来确定测量深度,容易造成人为误差,影响精确度。

大平面测量法是在无磁码头的海底布设一个探头矩阵,可以测量东、西、南、北 4 个主航向的磁场。每个探头都由电缆连接到电缆接线箱,再通过信号线送到磁强计机柜,磁强计机柜将磁场信号通过数据采集系统输入电脑进行显示和打印。由于磁探头布设在海底,测量时不受海情气象影响,测量准确、迅速,自动化程度高。

大平面测量法是在舰艇的正下方测得一个平面矩阵,经换算后得到一定深度处的磁场阵列,其中中间一列对准龙骨,其余均匀分布,如图 1 所示,为大平面阵列和标准测量点阵列位置之间的区别。由此可见,大平面测量法更好地反映了舰艇磁场的全貌,但是大平面测量法的缺点是造价昂贵,投资大,水下工程复杂,施工精度要求高;另外磁探头

布放在水下固定深度,受海水潮位影响,能够测到舰艇标准深度的时间比较短,致使通电消磁时测量的标准深度不在同一个深度上,因此对磁场深度换算软件要求较高,但大平面测量以其先进的设计思想代表着测磁技术的发展方向。

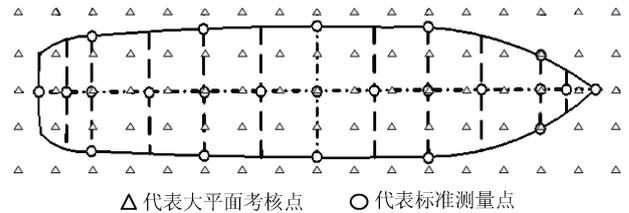


图 1 舰艇水下磁场大平面考核点与标准测量点之间的位置差异

Fig. 1 Spatial position difference between large-plane survey points and standard assessment points of ship magnetic field

显然,利用大平面测磁的舰艇磁场向标准测量点换算过程中,标准化是统一测磁技术亟待解决的关键环节,标准的统一不仅能提高消磁站工作效率,而且能使常用的 2 种测磁形式更好的衔接起来。

### 2 舰艇水下磁场标准化建模方法

舰艇测磁标准化可以在考虑消磁站测磁条件和被消磁舰艇个体情况下同时进行,具体说可以在消磁站构建不同舰艇型号的测磁数学模型,利用更加准确的舰艇磁场换算方法来实现。这样不仅提高了舰艇测磁的速度,避免使用手提式测磁仪消耗大量人工劳动力的弊端,而且能够准确计算出总体设计研究所要求的舰艇下方标准测量点位置处的磁场。

由于新型舰艇船体不断增大和海水潮差变化,舰艇一般无法直接获得标准测量深度上的磁场数据。这时往往需要由非标准深度上测得的磁场推算出标准深度上的磁场,而且只有对这些数据标准化以后才能准确提取舰艇特征信息,有效进行磁场分析、绕组调整,指导消磁通电电流决策<sup>[5-6]</sup>。

在舰艇磁场换算研究领域,磁荷模拟法是一种简单、高效、适应性强的磁场换算方法<sup>[7-9]</sup>。本文在经过多次优化调整建模参数基础上,选用磁荷模拟法中的单分量磁偶极子阵列平面模型对大型舰

艇进行舰艇磁场换算,但对小型舰艇依然沿用过去的换算方法。新算法中数学模型使用了磁偶极子阵列,但只选用磁偶极子磁矩的垂向分量,而且磁偶极子的排列不在椭球的立体空间上,而是在位于测量点位置对应的平面上,这样有利于简化磁场建模复杂性。

在建立磁偶极子阵列模型时,当磁偶极子数量太少时,模型泛化性比较弱;当磁偶极子数量多于测量点数量时,解方程会出现欠定问题。因此为了建立一种简单高效、泛化性强的磁偶极子阵列模型,在舰艇船型差异不是很大的情况下,假设在每一个磁场测量点处有一个磁偶极子,即磁偶极子数量和位置与磁探头数量和位置均保持相同。

舰艇磁场建模具体如下:设在舰艇下方某深度平面上有  $m$  个测量点,测出  $m$  个磁场值,现在假设存在这样一个函数,它满足下面 2 个条件:1)在上述  $m$  个测量点上函数值与所测函数值相等;2)函数在测量平面的附近是连续的。

由于舰艇磁场具有连续变化的特点,故可以推断在测量面附近相同的测量点上,函数值与舰艇磁场值必定是相近的。如果能够找到这个函数,则可用这个函数对舰艇磁场进行近距离的磁场深度换算。当然由于噪声和误差存在,磁场换算距离越远,换算准确度越低。

事实上,上述假设的函数是存在的。现构造换算函数如下。

设  $m$  个测量点中第  $j$  个测量点的纵向坐标为  $x(j)$ ,横向坐标为  $y(j)$ ,舰艇磁场在该测量点上的测量值为  $hz_j$ 。

设想在水平面上有  $m$  个磁偶极子,第  $i$  个磁偶极子的垂向磁矩为  $M(i)$ ,其纵向坐标和横向坐标为  $x_0(i)$  和  $y_0(i)$ ,又设第  $i$  个单位磁矩在第  $j$  个测量点上产生的磁场位置参数为  $a_{j,i}$ ,当第  $j$  个测量点上各个磁偶极子所产生的磁场与该点的舰艇磁场相等时,可建立方程

$$a_{j,1}M_1 + a_{j,2}M_2 + a_{j,3}M_3 + \dots + a_{j,m}M_m = hz_j \quad (1)$$

当  $j$  依次取  $1,2,\dots,m$  时,可得到  $m$  个方程,它们构成了一个  $m$  阶方程组

$$\begin{aligned} a_{1,1}M_1 + a_{1,2}M_2 + \dots + a_{1,i}M_i + \dots + a_{1,m}M_m &= hz_1 \\ &\dots \\ a_{i,1}M_1 + a_{i,2}M_2 + \dots + a_{i,i}M_i + \dots + a_{i,m}M_m &= hz_i \quad (2) \\ &\dots \\ a_{m,1}M_1 + a_{m,2}M_2 + \dots + a_{m,i}M_i + \dots + a_{m,m}M_m &= hz_m \end{aligned}$$

在这个方程组中  $hz_j (j=1,2,\dots,m)$  是已知的,  $a_{j,i} (j=1,2,\dots,m)$  可以根据第  $j$  个测量点的坐标和第  $i$  个磁偶极子的坐标,用磁偶极子的磁场计算公式计算出来,所以也是已知的。  $M_1,\dots,M_i,\dots,M_m$  是未知的,通过解方程组可以将其计算出来。一旦求出了  $M_1,\dots,M_i,\dots,M_m$ ,则可根据换算点位置处的坐标去计算换算点的磁场值。

换算点数组录入被测舰艇龙骨及舷下测量点的坐标,就可以利用点阵式大平面测量数据准确计算出这些点的磁场值。换算点数组的准确制定是非常关键的,消磁站可以协同总体设计研究所,针对不同型号舰艇计算制定不同的换算点数组,建立一个不同型号舰艇磁场换算点位置坐标的标准化数据库。

### 3 实船试验验证

选择在某消磁站进行消磁的某型舰的水下 4 个深度考核面,由深至浅依次为:A 深度、B 深度、C 深度、D 深度,每个深度考核面磁场分别向 A 深度进行换算。各考核面的深度、相对均方差、相对误差如表 1、表 2 所示,其中舰艇磁场数据在换算时已进行了归一化处理。

表 1 某型舰北航向磁场换算误差的考核结果  
Table 1 Assessment result of magnetic field conversion error of a ship in north heading

换算深度	D 深度	C 深度	B 深度	A 深度
换算误差均方差	0.67	0.65	0.63	0
换算误差百分比/%	2.79	2.76	2.65	0

表 2 某型舰南航向磁场换算误差的考核结果  
Table 2 Assessment result of magnetic field conversion error of a ship in south heading

换算深度	D 深度	C 深度	B 深度	A 深度
换算误差均方差	0.67	0.66	0.62	0
换算误差百分比/%	2.77	2.73	2.64	0

试验结果表明：换算误差相对均方差不大于1%，相对误差不大于3%，说明换算方法稳定、准确，能够满足舰艇消磁需要。但是需要指出的是，表1和表2显示的相对误差和相对均方差随距离增加呈上升趋势。究其原因，主要是由测磁噪声、换算误差等综合因素导致的，因为随着距离增加，舰艇模型磁场信号迅速减弱，背景噪声及测量误差所占比重随之增加。

使用磁荷模拟法对舰艇磁场进行深度换算时，如果模型中磁偶极子阵列布置合理，磁荷模拟算法可以满足舰艇磁场换算要求，精度较高，速度较快。而磁偶极子阵列布置合理性需要根据不同型号舰艇分别制定，因此消磁站建立的包括各型舰艇标准测量点坐标在内的数据库显得至关重要，需要将不同型号舰艇几何模型尤其左右两舷尺寸与消磁站大平面阵列结合在一起。

#### 4 结束语

本文利用磁偶极子阵列模型，优化调整参数，引入舰艇几何模型标准化数据库，计算出了舰艇水下标准测量点位置处的磁场。本文在舰艇磁场建模上是特殊的，用此模型换算舰艇磁场的准确度与换算面到测量面的距离有着紧密关系，换算距离越小，磁场换算准确度越高，随着距离增大，换算误差也逐渐增大。

某消磁站的实船试验表明：本文方法对大型舰艇进行磁场深度换算是可行的，不仅满足舰艇磁场

深度换算的快速性，而且计算准确、可靠性高。该方法使测磁数据能够直接参照舰艇消磁标准进行实际使用，充分发挥消磁站测磁系统自动化优势，大幅降低人工劳动量。该方法可适用于大部分舰艇消磁站，在提高舰艇消磁质量和效率方面，具有重要的军事意义。

#### 参考文献

- [1] 刘大明. 舰船消磁理论与方法[M]. 北京：国防工业出版社，2011.
- [2] 周耀忠，张国友. 舰船磁场分析计算[M]. 北京：国防工业出版社，2004.
- [3] 田东，刘胜道，高俊吉. 消磁技术对舰船磁场特征的影响[J]. 船电技术，2017，37（3）：48-50.
- [4] WANG K S, ZHOU G H, WANG Y F. Review of research on ship's physical field characteristics and underwater attack and defense technology[C]// The Proceedings of the 16<sup>th</sup> Annual Conference of China Electrotechnical Society. Singapore: Springer, 2022.
- [5] 幸善成，刘大明. 基于专家系统的消磁电流决策[J]. 海军工程大学学报，2001，13（1）：87-90.
- [6] 汪家骅，周峰. 舰艇局部磁场消磁技术[J]. 水中兵器，2005，3（1）：60-61.
- [7] 王德强，余强. 舰船磁场数值计算方法发展综述[J]. 舰船科学技术，2014，3（3）：1-6.
- [8] 郭成豹，殷琦琦. 舰船磁场磁单极子阵列法建模技术[J]. 物理学报，2019，68（11）：1-10.
- [9] 汪家骅. 正则化技术在舰船磁场建模逆问题中的应用[J]. 水雷战与舰船防护，2010，18（4）：1-5.

（责任编辑：肖楚楚）