

舰船钢板地电流干扰传播方向的确定方法

潘启军¹, 马伟明¹, 赵治华², 孟进², 张磊², 张向明²

(1. 舰船综合电力技术国防科技重点实验室(海军工程大学), 湖北省武汉市 430033;

2. 海军工程大学电力电子技术研究所, 湖北省武汉市 430033)

Interference Propagation Orientation Determination of Steel Plate Ground Current in Vessels

PAN Qi-jun¹, MA Wei-ming¹, ZHAO Zhi-hua², MENG Jin², ZHANG Lei², ZHANG Xiang-ming²

(1. National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology (Naval University of Engineering),

Wuhan 430033, HuBei Province, China; 2. Research Institute of Power Electronic Technology,

Naval University of Engineering, Wuhan 430033, HuBei Province, China)

ABSTRACT: The Electromagnetic Interference (EMI) among various electrical and electronic equipment formed by ground current in steel plate in vessels via common ground loop impedance could even result in the malfunction of the sensitive devices under some serious conditions. The paper pointed out that the rotational means to find the surface current direction of single frequency is not applicable in frequency scan measurements of large-scale steel plate. Therefore, one-dimensional triple-measurement and two-dimensional double-measurement methods were put forward to determine the surface current directions of steel plate at various frequencies simultaneously, which were verified by the theoretical analysis of current constriction effect and a designed test in a vessel. Provided that the surface magnetic field orientation is calculated, we can get the corresponding surface current direction easily according to the perpendicularity between current and magnetic field. The achievements can be applied to the propagation path determination and identification, which is significant in the practical engineering application.

KEY WORDS: ground current of steel plate; propagation orientation; surface current; surface magnetic field; current constriction effect

摘要: 舰船钢板地电流通过地回路公共阻抗在不同电气电子设备之间形成电磁干扰, 严重时将使敏感设备无法正常工作, 因此必须对舰船钢板地电流的分布和传播方向进行深入研究。该文指出了确定单频率点钢板表面电流方向的旋转法不适用于频率扫描测量, 提出了一维3次测量和二维2次测

量确定钢板表面电流方向的新方法, 并经电流集中效应理论分析及实艇实验进行了验证。实验时, 只需计算出钢板表面磁场的方向, 然后根据电流与磁场的垂直关系即可确定出钢板表面电流的方向。提出的钢板表面电流方向的确定方法, 可在舰船钢板地电流干扰传播方向的辨识中得到应用, 具有重要工程应用价值。

关键词: 钢板地电流; 传播方向; 表面电流; 表面磁场; 电流集中效应

0 引言

舰船钢板地电流通过地回路公共阻抗在不同电气电子设备之间形成电磁干扰, 严重时使敏感设备无法正常工作, 这使舰船钢板地电流干扰及其相关问题日益得到重视^[1-8]。其中, 钢板地电流测试技术显得非常重要, 是电磁兼容领域中一个难点和急需解决的问题。电流的测量目前主要是采用电流卡环, 但由于钢板为大面积的连续导体, 无法采用电流卡环进行测量, 因此必须探寻钢板地电流的新型测量方法并设计有效的测量装置。文献[9-13]利用铁芯线圈对钢板地电流进行了研究, 然而这种测量装置具有本质缺陷, 即不能有效检测直流分量或缓慢变化的磁场; 铁芯面电流传感器的接入可能使钢板局部地电流的分布特性发生改变; 测试结果无时域波形, 只有幅值频谱, 无相位信息; 铁芯面电流传感器制造好后, 放大倍数不能改变, 缺乏灵活性等。为适应舰船钢板表面地电流干扰研究的需要, 研制了可以测量钢板表面磁场分布的新型磁阻磁场探头, 利用钢板表面切向磁场的分布来间接测量钢板中的电流分布^[14-20], 克服了铁芯线圈测量装置的缺陷。

基金项目: 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目(50421703); 国家自然科学基金项目(50677070)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50421703; 50677070).

测量舰船钢板壳体表面地电流时,单频率点的电流方向为传感器输出最大值时所对应的方向,测量时可通过转动磁阻磁场传感器来找到最大值的方向。然而,舰船上地电流分布非常复杂,不同频率的干扰地电流一般由多点注入钢板,从而使测量点处不同频率的电流方向并不一样。因此,单频率点时确定电流方向的转动法不适用于在宽频带范围内进行扫描测量。鉴于此,在测量钢板表面地电流大小时,必须对其方向进行深入研究,为舰船钢板地电流干扰源及其传播方向的辨识提供指导。

以矩形截面的长方体建立舰船钢板的三维导电模型,宽度方向取为X轴,厚度方向取为Y轴,长度方向取为Z轴,可根据需要来确定坐标原点的选取。长方体的长度为 $2L$,宽度为 $2a$,厚度为 $2D$,电流 I 沿Z方向注入,如图1所示。模拟孤立钢板的工作状态,使电流注入回路中 A_2A_3 远离钢板,从而可忽略钢板的邻近效应。

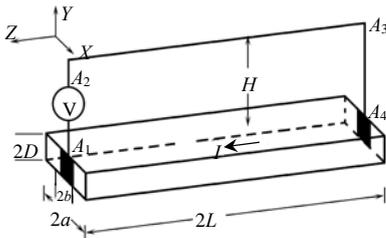


图1 钢板的三维模型

Fig.1 Three dimensional model of steel plate

1 电流方向及大小的确定方法

1.1 一维测量

舰船钢板壳体地电流的方向可认为在与钢板平行的方向上,即在钢板的宽度和长度方向构成的 XOZ 平面上, O 为根据需要所确定的坐标原点。首先确定钢板 XOZ 平面表面磁场的方向,然后根据钢板表面电流和表面磁场的垂直关系得到钢板表面电流的方向。由于磁场传感器有一维和二维两种,因此分2种情况进行分析。

使用一维磁场传感器进行测量,可通过3次测量来确定钢板表面地电流的大小和方向,顺时针方向为正方向,逆时针方向为负方向。第1次测量时使磁场传感器的敏感轴和所选参考方向一致(0方向),第2次测量时使磁场传感器的敏感轴向左旋转 θ_0 角(1方向,可表示为 $-\theta_0$),第3次测量时使磁场传感器的敏感轴向右旋转 θ_0 角(2方向,可表示为 θ_0),如图2所示。 θ_0 的选取在某种程度上具有任意性,但一般情况下应使 θ_0 的取值稍大,这一方面便于实

际测量,另一方面也有利于方向角正负的确定,如果 θ_0 过小,就有可能导致电流方向判断不准或增加方向误差。

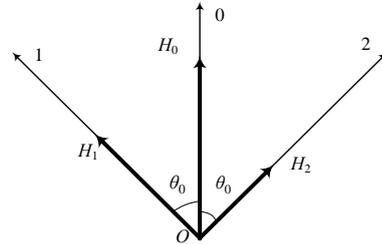


图2 3次测量示意图

Fig.2 Three-measurement diagram

设总磁场为 H ,总磁场和参考方向的夹角为 θ ,且有 $-90^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 。

(1)当 $H_2 > H_1$ 时,有 $\theta > 0$,对应的矢量图如图3所示。根据矢量分解可得:

$$H = \frac{H_2}{\cos(\theta_0 - \theta)} = \frac{H_0}{\cos \theta} \quad (1)$$

由式(1)可得:

$$\theta = \left| \arctan\left(\frac{H_2 - H_0 \cos \theta_0}{H_0 \sin \theta_0}\right) \right| \quad (2)$$

也可根据式(3)或(4)来求取总磁场的大小和方向,方向角如式(5)、(6)所示。

$$H = \frac{H_1}{\cos(\theta_0 + \theta)} = \frac{H_0}{\cos \theta} \quad (3)$$

$$H = \frac{H_1}{\cos(\theta_0 + \theta)} = \frac{H_2}{\cos(\theta_0 - \theta)} \quad (4)$$

$$\theta = \left| \arctan\left(\frac{H_1 - H_0 \cos \theta_0}{H_0 \sin \theta_0}\right) \right| \quad (5)$$

$$\theta = \left| \arctan\left(\frac{(H_2 - H_1) \tan \theta_0}{H_1 + H_2}\right) \right| \quad (6)$$

实际测量时可计算3次,然后取算术平均值,这样会减小测量误差。

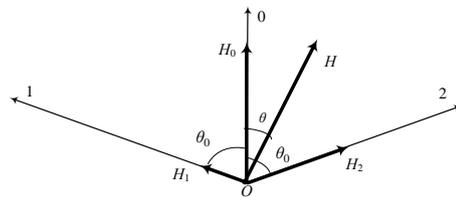


图3 $H_2 > H_1$ 时3次测量矢量图

Fig.3 Three-measurement vector diagram when $H_2 > H_1$

(2)当 $H_2 < H_1$ 时,有 $\theta < 0$,对应的矢量图如图4所示。根据矢量分解可得:

$$H = H_1 / \cos(\theta_0 - \theta) = H_0 / \cos \theta \quad (7)$$

由式(7)可得:

$$\theta = - \left| \arctan \left(\frac{H_1 - H_0 \cos \theta_0}{H_0 \sin \theta_0} \right) \right| \quad (8)$$

也可根据式(9)或(10)来求取总磁场的大小和方向，方向角如式(11)、(12)所示。

$$H = \frac{H_2}{\cos(\theta_0 + \theta)} = \frac{H_0}{\cos \theta} \quad (9)$$

$$H = \frac{H_2}{\cos(\theta_0 + \theta)} = \frac{H_1}{\cos(\theta_0 - \theta)} \quad (10)$$

$$\theta = - \left| \arctan \left(\frac{H_2 - H_0 \cos \theta_0}{H_0 \sin \theta_0} \right) \right| \quad (11)$$

$$\theta = - \left| \arctan \left(\frac{(H_2 - H_1) \tan \theta_0}{H_1 + H_2} \right) \right| \quad (12)$$

实际测量时可计算 3 次，然后取算术平均值，这样会减小测量误差。

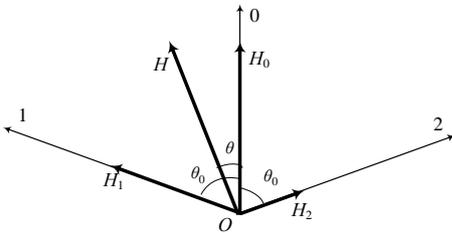


图 4 $H_2 < H_1$ 时 3 次测量矢量图

Fig. 4 Three-measurement vector diagram when $H_2 < H_1$

(3) 当 $H_2 = H_1$ 时，有 $\theta = 0$ 或 $\theta = 90^\circ$ ，对应的矢量图如图 5 所示。如果此时有 $H_0 > H_1$ ，则有 $\theta = 0$ ；如果此时有 $H_0 < H_1$ ，则有 $\theta = 90^\circ$ 。

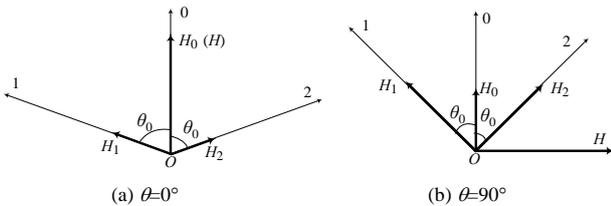


图 5 $H_2 = H_1$ 时 3 次测量矢量图

Fig. 5 Three-measurement vector diagram when $H_2 = H_1$

1.2 二维测量

所谓二维测量是指传感器可同时测量钢板水平方向相互正交两方向的磁场，测量示意图如图 6 所示。设二维磁场传感器的两敏感轴方向分别为 X、Z 轴，X 轴为选定的参考方向。 H_X 为磁场传感器在 X 轴方向上所测磁场值， H_Z 为磁场传感器在 Z 轴方向上所测磁场值， H 为总的磁场值， θ 为总磁场的方向角大小。利用二维磁场传感器进行测量时，磁场大小和磁场方向角只需一次测量就可确定，分别如式(13)、(14)所示。

$$H = \sqrt{(H_X)^2 + (H_Z)^2} \quad (13)$$

$$|\theta| = \arctan \left(\frac{H_Z}{H_X} \right) \quad (14)$$

通过第 1 次测量可定出总磁场的大小和方向角的大小，通过第 2 次测量可定出磁场方向角的正负。第 1 次测量时使二维磁场探头 1 通道敏感轴沿图 7 所示的 Z_1 方向，2 通道敏感轴沿 X_1 方向；第 2 次测量时使二维磁场探头 1 通道敏感轴沿图 7 所示的 Z_2 方向，2 通道敏感轴沿 X_2 方向。图中 Z_1 和 X_1 、 Z_2 和 X_2 分别相互垂直， Z_2 和 Z_1 、 X_2 和 X_1 的夹角均为 45° ，实际上相当于在测量时使磁场探头和第 1 次相比沿方向角正方向(顺时针方向)旋转 45° 。第 1 次测量时令 Z_1 为参考轴，第 2 次测量时令 Z_2 为参考轴。

设第 1 次测量时所确定的方向角大小为 θ_1 ， θ_1 为第 1 次测量时总磁场和参考方向 Z_1 方向的夹角；第 2 次所确定的方向角大小为 θ_2 ， θ_2 为第 2 次测量时的总磁场和参考方向 Z_2 方向的夹角； θ_1 和 θ_2 均为正值。如果 $\theta_2 > 45^\circ$ ，则总磁场的方向必定在 $X_1 O Z_1$ 坐标系的第 2、4 象限；如果 $\theta_2 \leq 45^\circ$ ，则总磁场的方向必定在 $X_1 O Z_1$ 坐标系的第 1、3 象限。如果令图 7 中 Z_1 、 X_1 和图 6 中的 Z、X 分别重合，则有：

$$\theta = \begin{cases} \theta_1, & \theta_2 \leq 45^\circ \\ -\theta_1, & \theta_2 > 45^\circ \end{cases} \quad (15)$$

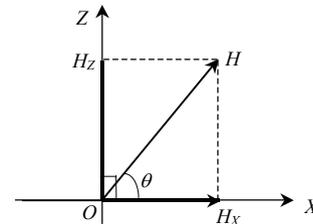


图 6 二维测量示意图

Fig. 6 Two-dimensional measurement diagram

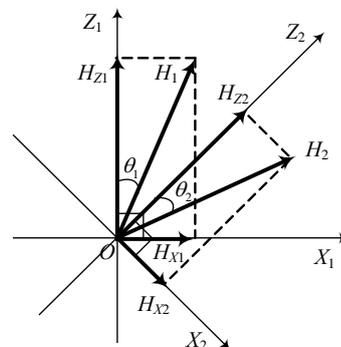


图 7 二维 2 次测量的方向确定
Fig. 7 Two-dimensional orientation determination diagram

1.3 钢板表面电流大小及其方向的确定

设钢板表面磁场的大小为 H , 单位为 A/m , 方向角为 θ , 则钢板表面电流的大小和方向如式(16)、(17)所示。电流密度 J 的单位为 A/m , 但习惯上仍然称之为电流。

$$J = H \tag{16}$$

$$\theta_J = \begin{cases} -(90^\circ - \theta), & \theta > 0^\circ \\ 90^\circ + \theta, & \theta \leq 0^\circ \end{cases} \tag{17}$$

其中, 式(16)的推导可参考文献[15]。

2 钢板表面电流方向实验测量

2.1 实验测量点布置

三维钢板模型如图 1 所示, 其尺寸长宽高分别为 $2L=3\text{ m}$ 、 $2a=1.2\text{ m}$ 、 $2D=5\text{ mm}$ 。图 8 只画出了钢板上表面 XOZ 平面的一半, OA 和 BC 分别为宽度和长度的平分线。图中各相邻圆圈在 X 与 Z 方向的距离均为 10 cm , Z 方向第 1 个圆圈距电流注入点 O 的距离约为 2 cm , 实心圆圈为测量点, 从左至右的顺序依次为第 1、2、3、4 和 5 点。

注入电流频率取 1 kHz 为例, 有效值约为 245 mA , 系统放大倍数为 $10\ 000$ 倍, 校准系数取为 $3\ 300^{[18-19]}$ 。

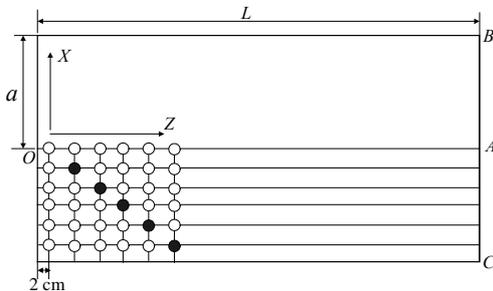


图 8 测量点位置示意图

Fig. 8 Position diagram of the tested points

2.2 一维测量

选定 X 方向为参考方向, 取 θ_0 为 30° , 测量方法见第 1.1 节。一维磁场传感器的输出电压和经过校准后得到的磁场如表 1 所示。

表 1 一维磁场传感器的输出电压及对应的磁场

Tab. 1 Output voltages and corresponding magnetic fields of one-dimensional probe

测量点	输出电压/(dB μ V)			感应的磁场/(dB μ A/m)		
	0°	-30°	30°	0°	-30°	30°
第 1 点	113.881	105.707	116.161	103.510	95.337	105.791
第 2 点	110.411	104.879	111.773	100.041	94.508	101.403
第 3 点	108.937	104.878	110.031	98.566	94.508	99.660
第 4 点	110.256	107.220	109.559	99.886	96.849	99.189
第 5 点	112.249	110.264	110.693	101.879	99.894	100.323

根据表 1 的数据, 可求得总磁场和总电流相对于参考方向 X 轴的角度, 如表 2 所示。根据表 2 可知, 钢板电流在端部注入点具有较大的 X 轴分量(相对于 Z 分量而言), 越靠近钢板宽度边缘, 电流 X 分量越小, 而 Z 分量逐渐增大, 至钢板宽度边缘时总电流基本为 Z 分量。

表 2 总磁场与总电流的方向角

Tab. 2 Orientation angles of the total magnetic fields and currents

测量点	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点
总磁场方向角/ $^\circ$	42.52	32.81	26.77	12.46	4.64
总电流方向角/ $^\circ$	-47.48	-57.19	-63.23	-77.54	-85.36

2.3 二维测量

选定 X 方向为参考方向, 取 θ_0 为 45° , 测量方法见第 1.2 节。二维磁场传感器的输出电压如表 3 所示。经过校准后得到的磁场如表 4 所示。根据表 3、4 的数据, 求得总磁场和总电流相对于参考方向 X 轴的角度如表 5 所示。

根据表 2、5 可知, 一维和二维两种情况下求得的总电流方向相差不大, 可知所使用钢板总电流方向一维及二维磁场传感器的求取方法是可行的。

表 3 二维磁场传感器的输出电压

Tab. 3 Output voltages of two-dimensional probe dB μ V

测量点	磁场传感器不旋转		磁场传感器参考轴顺时针旋转 45°	
	参考轴方向分量	参考轴垂直方向分量	参考轴方向分量	参考轴垂直方向分量
第 1 点	112.978	111.454	116.150	89.223
第 2 点	110.356	104.533	110.212	98.617
第 3 点	108.840	102.840	108.532	97.554
第 4 点	110.265	95.390	107.404	103.141
第 5 点	112.400	92.965	108.759	108.092

表 4 二维磁场传感器感应的磁场

Tab. 4 Induced magnetic fields of two-dimensional probe dB μ A/m

测量点	磁场传感器不旋转		磁场传感器参考轴顺时针旋转 45°	
	参考轴方向分量	参考轴垂直方向分量	参考轴方向分量	参考轴垂直方向分量
第 1 点	102.607	101.083	105.780	78.852
第 2 点	99.986	94.163	99.841	88.247
第 3 点	98.470	92.470	98.162	87.184
第 4 点	99.895	85.019	97.033	92.771
第 5 点	102.030	82.595	98.389	97.722

表 5 总磁场与总电流的方向角

Tab. 5 Orientation of the total magnetic fields and currents

测量点	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点
总磁场方向角/ $^\circ$	40.00	27.09	26.62	10.23	6.09
总电流方向角/ $^\circ$	-50.00	-62.91	-63.38	-79.77	-83.91

2.4 钢板端部电流集中效应分析

由 Maxwell 方程组可知, 对角频率为 $\omega = 2\pi f$ 的交变电磁场, 采用复数表示方法(时间因子取为 $e^{j\omega t}$), 忽略钢板的内部位移电流, 则电磁场的分布满足:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 \mathbf{E} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{J} 分别表示电场强度、磁通密度、磁场强度及电流密度。

由式(18)可得:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \\ & j\omega(\nabla \times \mathbf{B}) = j\omega\mu\sigma \mathbf{E} = K^2 \mathbf{E} \end{aligned} \quad (19)$$

式中: $K = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1+j)/\delta$; δ 为集肤深度;
 $\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)} = \sqrt{1/(\pi f \mu\sigma)}$ 。

在钢板内部, 电场的分布满足:

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} = K^2 \mathbf{E} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

当钢板长度注入点宽度远小于钢板宽度时, 钢板两端附近电流集中效应会使钢板内部的电流分布沿长度和宽度方向发生变化, 此时必须采用三维模型。由无限长扁平导体的分析, 钢板内部电场的交流趋肤效应主要发生在厚度方向, 所以将扁平钢板内部的电场表达为

$$E(x, y, z) = E(y) \cdot E(x, z) \quad (21)$$

式中: $E(y)$ 用于反映交流集肤效应的影响; $E(x, z)$ 反映电流集中效应的作用。此时可以将式(20)中 $\nabla^2 \mathbf{E} = K^2 \mathbf{E}$ 简化为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(y)}{\partial^2 y} = K^2 \mathbf{E}(y) \\ \frac{\partial^2 \mathbf{E}(x, z)}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}(x, z)}{\partial^2 z} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

即将一个“三维交流问题”分解为一个“一维的涡流问题(对应交流趋肤效应)”和一个“二维的直流问题(对应电流集中效应)”。

由钢板 2 个端面处注入的总电流为 I , 当钢板宽度远大于注入点宽度时, 钢板两端附近的电场分布与钢板中部不同, 钢板内部的电场分布主要由注入点的宽度 $2b$ 决定(图 1), 基本不受注入点处电场

分布的具体形式影响, 所以在 2 个端面上电场的 Z 分量可以近似采用:

$$\begin{aligned} E_{In}(x, y) &= \frac{I \cdot KD}{\sigma \cdot 2b \cdot 2D} \frac{\cosh(Ky)}{\sinh(KD)} = \\ & E_0 \cdot \frac{a}{b} \cdot KD \frac{\cosh(Ky)}{\sinh(KD)} \end{aligned} \quad (23)$$

由式(22)采用分离变量法, 并考虑到电场的对称性、边界条件和注入条件式(23), 可得导体内部的电场在 X 、 Y 、 Z 方向的分量为

$$\begin{cases} E_x = -E_0 \cdot KD \frac{\cosh(Ky)}{\sinh(KD)} \sum_{m=1}^{\infty} C_m \sin(K_m x) \frac{\sinh(K_m z)}{\cosh(K_m L)} \\ E_y = 0 \\ E_z = E_0 \cdot KD \frac{\cosh(Ky)}{\sinh(KD)} \left[1 + \sum_{m=1}^{\infty} C_m \cos(K_m x) \frac{\cosh(K_m z)}{\cosh(K_m L)} \right] \end{cases} \quad (24)$$

式中: $K_m = m\pi/a$, $C_m = 2 \sin(K_m b)/(K_m b)$, $m=1, 2, 3, \dots$ 。

根据成分方程和式(24)可得:

$$\begin{cases} J_x = \sigma E_x = -\sigma E_0 \cdot KD \frac{\cosh(Ky)}{\sinh(KD)} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} C_m \sin(K_m x) \frac{\sinh(K_m z)}{\cosh(K_m L)} \\ J_z = \sigma E_z = \sigma E_0 \cdot KD \frac{\cosh(Ky)}{\sinh(KD)} \cdot \left[1 + \sum_{m=1}^{\infty} C_m \cos(K_m x) \frac{\cosh(K_m z)}{\cosh(K_m L)} \right] \end{cases} \quad (25)$$

以 X 轴为参考轴, 则钢板表面电流与参考轴的方向角度的大小可表示为

$$\theta_J = \arctan\left(\frac{J_z}{J_x}\right) \quad (26)$$

以 X 轴方向为参考方向, 取频率 1 kHz 为例, 根据式(26)计算图 8 实心圆圈点处钢板表面电流的方向角如表 6 所示, 正负号可根据物理概念得到。

表 6 总电流的方向

Tab. 6 Orientation angles of the total currents of the tested points

测量点	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点
总电流方向角/(°)	-53.21	-58.37	-68.22	-78.38	-85.76

比较表 2、表 5 和表 6 可知, 在图 8 所示实心圆圈处电流方向角的理论分析值和实验测量值比较接近, 证明了本文所提钢板表面地电流方向确定的可行性。

2.5 实艇测量

实验时,断开某型潜艇上开关频率为 6.6 kHz 的 50 Hz 逆变装置所有接地铜片和电缆屏蔽层的接地线,并将接地线引到便于测量的钢板上。使用导电胶带将接地线粘贴在钢板表面,并使接地线垂直于钢板。钢板表面电流的测试位置如图 9 所示,点 O 为地电流注入点,圆半径 $R=40$ cm, X 方向为艇首方向。近似认为钢板表面电流各测量点电流的相位相同且均由 O 点向外传播,同时可认为图 9 中每个测试点的测量值代表该测量点 1/4 圆周的表面电流密度,则接地导线中的总电流可由钢板表面电流 4 点测量值近似表达为

$$I \approx (\pi/2)R(J_{1X} + J_{2Y} + J_{3X} + J_{4Y}) \quad (27)$$

式中 J_{mX} 和 J_{mY} 分别表示第 m 点的 X 和 Y 方向的钢板表面电流。实际上 J_{mX} 和 J_{mY} 的测量值相差较小,说明此时钢板上电流的流向基本上是均匀的。

采用式(27)计算得到的接地导线计算电流频谱如图 10 所示,接地导线实测电流频谱是由环形卡环在逆变装置接地导线(引到 O 点处的接地导线)中直接测量得到的。

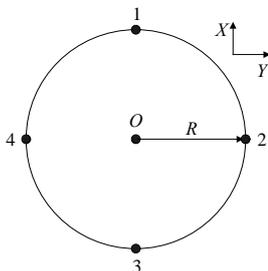


图 9 实艇验证试验测试点布置图
Fig. 9 Position diagram of the validation experiments in a submarine

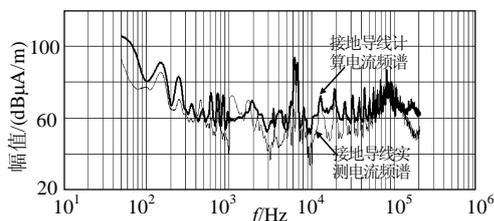


图 10 接地导线中计算电流频谱与实测电流频谱比较
Fig. 10 Comparison between calculation and experimental current spectra of the grounding wire

从图 10 可以看出,当频率在 130 kHz 范围内时,接地导线中开关频率 6.6 kHz 的高次谐波幅值约为 70~85 dB μ A(约 3~18 mA),而由磁场探头得到的接地导线中电流频谱幅值和实测电流频谱幅值基本吻合。钢板地电流低频分量中 150 和 250 Hz 的工频谐波电流一部分来自接地导线的注入电流,另一部分

来自各种耦合,这也是钢板中测量的 150 和 250 Hz 的工频谐波电流比接地导线实测值大的原因。磁场探头的噪声约为 1 mA/m(60 dB μ A/m),当频率超过 130 kHz 后,微弱的信号已被磁场探头的噪声所湮没,实际输出结果近似为磁场探头的噪声。

3 结论

指出了确定单频率点钢板表面地电流方向的旋转法不适用于频率扫描测量,原因在于不同频率的电流方向并不一样。提出了一维 3 次测量和二维 2 次测量确定钢板表面电流方向的新方法,并经电流集中效应测量和实艇实验进行了验证。理论分析与实验结果相吻合,证明了该方法的正确性,为舰船钢板地电流干扰传播方向的确定提供了指导,具有工程应用价值。

参考文献

- [1] 赵治华, 马伟明. 钢板地阻抗的频率特性[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 119-124.
Zhao Zhihua, Ma Weiming. Frequency characteristic of ground impedance for a flat steel plane[J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(8): 119-124(in Chinese).
- [2] Zhao Zhihua, Ma Weiming. AC impedance of an isolated flat conductor[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(3): 482-486.
- [3] Zhao Zhihua, Ma Weiming. Frequency characteristic of ground impedance for a flat steel plane[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(2): 468-474.
- [4] 赵治华. 钢板地阻抗计算方法研究与直流系统干扰分析[D]. 北京: 清华大学, 2006.
Zhao Zhihua. Research on calculation method of steel ground impedance and electromagnetic conductive interference of DC system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006(in Chinese).
- [5] Zhao Zhihua, Yuan Jiansheng, Ma Weiming. Coupling model and impedance calculation of the steel ground loops with proximity effect [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006, 48(3): 522-529.
- [6] 咸哲龙, 钟玉林, 孙旭东, 等. 用于传导电磁干扰分析的接地回路模型与参数[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 156-161.
Xian Zhelong, Zhong Yulin, Sun Xudong, et al. Grounding circuit model and parameters for conducted emi analysis[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(7): 156-161(in Chinese).
- [7] 咸哲龙. 大尺寸导体阻抗频率特性的研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
Zhelong Xian. Research on frequency characteristic of large conductor impedance[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005(in Chinese).
- [8] 钟玉林, 咸哲龙, 孙旭东, 等. 计及部分电容的接地回路高频电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 38-41.
Zhong Yulin, Xian Zhelong, Sun Xudong, et al. HF circuit model of conducted EMI of ground of net based on PEEC[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(17): 38-41(in Chinese).
- [9] Rusek A, Margossian R. Ground current tests in metal planes[C]. IEEE

- International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Atlanta, 1995.
- [10] Tang Shiping, Jiang Quanxin. Calibration method and device of surface current probe[C]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing, 1997.
- [11] 蒋全兴, 汤仕平. 表面电流探头的校准和应用[J]. 电子技术应用, 1997, (11): 35-37.
- Jiang Quanxin, Tang Shiping. Calibration and application of surface current probe[J]. Application of Electronic Technique, 1997, (11): 35-37(in Chinese).
- [12] 宋文武, 徐晓明, 张坤元, 等. 地电流测试装置研究[J]. 电磁兼容技术, 2005, (2): 46-49.
- Song Wenwu, Xu Xiaoming, Zhang Kunyuan, et al. A study of ground current testing apparatus[J]. Electromagnetic Compatibility Technology, 2005, (2): 46-49(in Chinese).
- [13] 徐晓明, 宋文武, 张嘉, 等. 面电流传感器定标装置研究[J]. 电磁兼容技术, 2005, (2): 50-55.
- Xu Xiaoming, Song Wenwu, Zhang Jia, et al. Research on scaler of sensor of surface current[J]. Electromagnetic Compatibility Technology, 2005, (2): 50-55(in Chinese).
- [14] Giacoletto L J. Frequency- and time-domain analysis of skin effects [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(1): 220-229.
- [15] 潘启军, 马伟明, 赵治华, 等. 适用于舰船钢板地电流检测的新型磁场测量仪器设计[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 82-86.
- Pan Qijun, Ma Weiming, Zhao Zhihua, et al. A novel magnetic-field measurement apparatus design applied in ground current testing of the steel plate in vessels[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11): 82-86(in Chinese).
- [16] 潘启军, 马伟明, 赵治华, 等. 磁场测量方法的发展及应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 7-13.
- Pan Qijun, Ma Weiming, Zhao Zhihua, et al. Development and Application of measurement method for magnetic field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 7-13(in Chinese).
- [17] Pan Qijun, Ma Weiming, Zhao Zhihua, et al. A modified design of two-stage amplification ground current testing apparatus in large steel plane[C]. ICEMI, Beijing, 2005.
- [18] Pan Qijun, Ma Weiming, Zhao Zhihua, et al. An approach to calibrate the novel apparatus applied in ground current testing of steel plane[C]. ICEMI, Beijing, 2005.
- [19] 潘启军, 马伟明, 赵治华, 等. 钢板地电流新型测量仪器校准系统设计及分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 114-118.
- Pan Qijun, Ma Weiming, Zhao Zhihua, et al. An approach to calibrate the novel apparatus applied in ground current testing of steel plane[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 114-118(in Chinese).
- [20] 潘启军, 马伟明, 赵治华, 等. 新型钢板地电流磁场测量仪的噪声分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 63-68.
- Pan Qijun, Ma Weiming, Zhao Zhihua, et al. Development and application of measurement method for magnetic field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 63-68(in Chinese).



潘启军

收稿日期: 2007-12-10.

作者简介:

潘启军(1972—), 男, 博士, 主要从事电力系统电磁兼容性与电力电子应用等方面的研究, pqijun@163.com;

马伟明(1960—), 男, 中国工程院院士, 从事独立电源系统、电力电子及电力系统电磁兼容性等方面的研究。

(责任编辑 王剑乔)