

船模与实船水下电场相似性分析

吴铮铮¹ 范凯¹ 印德武²

1 海军驻上海江南造船(集团)有限责任公司军事代表室,上海 201913

2 中国舰船研究设计中心,湖北 武汉 430064

摘要: 舰船水下电场信号作为重要的物理特性已受到广泛的关注和研究。通过研制船模并进行水下电场实验室测量来了解实船水下电场分布情况,可以较好地解决舰船水下电场的海上测量较困难这一问题。通过引入相似性原理,分析比例船模的电场分布与实船电场分布的相似性关系,提出满足相似性的电场船模设计准则,实船和船模水下电场对比实验验证了相似性准则的有效性。

关键词: 船模; 实船; 水下电场; 相似性

中图分类号: TM151

文献标志码: A

文章编号: 1673-3185(2012)06-112-04

Similarity Analysis for the UEF of Scaled Model Ship and Actual Naval Ship

WU Zheng-zheng¹ FAN Kai¹ YIN De-wu²

1 Naval Military Representative Office in Jiangnan Shipyard (Group) Co., Ltd, Shanghai 201913, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: The Underwater Electric Field (UEF) of naval ships has always been a focused topic due to its critical physical characteristics. However, it is often quite difficult to measure the UEF of naval ships during sea trial. To solve the problem, the UEF of a physically scaled model ship is first studied and then compared with the field data in light of the similarity theory. The result successfully validates the similarity principle, which indicates that the UEF of a real naval ship can be obtained by measuring the data from a scaled ship model. This research may provide valuable references for the electric field forecasting during the ship design process.

Key words: scaled model ship; actual naval ship; Underwater Electric Field(UEF); similarity theory

0 引言

舰船的水下电场(Underwater Electric Field, UEF)作为一种重要的军用指标^[1],已受到国内外的广泛关注和研究。在舰船水下电场机理分析、电场建模研究、电场引信研究以及电场防护等多个方面,都需要测量分析舰船水下电场的分布情况^[2-3]。由于海上实船电场测量在测量准备、测量过程以及被测船配合等方面都存在较大困难,因此,要获得电场的实测数据并不容易。此外,在进行舰船电场防护设计前,目标舰船可能尚未建造

而导致无法进行实测。为解决这一问题,在相关研究过程中,需要研制与实船成一定比例关系的电场船模来进行分析。本文将研究电场船模设计应满足的相似性关系。

要想使在模型研究中得到的结果能够用来确定原型的物理量,就必须正确建模。相似理论是指导建模与处理实验结果的理论基础,它不仅表明了相似现象具有何种性质,而且还指出了现象相似的充分条件和必要条件。相似理论的主要内容是相似三定理^[4]。

在模拟理论中,两个过程相似是指在相应的

收稿日期: 2012-04-17

作者简介: 吴铮铮(1978-),男,工程师。

印德武(1971-),男,硕士,高级工程师。

通信作者: 印德武。

时刻及相应的空间点上,两个过程的各个相应变量和参数之间的比值保持为一定的常数(这个常数称为相似常数或相似系数),在物理模拟中,相似常数是无量纲的纯数。在相似理论中,把相似常数的组合称为相似指标,把两个过程中由各自变量和参数组成的综合数据群作为该相似系统的相似判据。对于用方程描述的现象或过程,相似第三定理指出:如果由方程引出的相似判据相同,且初始条件和边界条件相似,则两现象相似。该定理指出了两现象相似的充分必要条件。

由于模拟实验通常在实验室进行,因而可重复观察某些特定因素对研究对象所产生的影响,能较方便地得出研究对象的性能指标和运行规律,也可以研究某些不变的或无法用实物进行研究的规律和现象(例如,重大设备事故,以及正在设计中的产品等)。此外,根据相似原理,还能利用适当的舰船模型来研究舰船电场的大小和变化规律以及空间分布规律^[5]、舰船电场防护方法及舰船对抗电场水雷的能力等。

1 电场船模相似性分析

采用模型模拟研究物理量时,应该考虑影响该物理量的主要因素。对电场进行模拟分析时,对于不同来源的水下电场,其船模建模的侧重点不同。本文将主要对腐蚀电场进行建模。

实船水下电场和船模水下电场主要源于腐蚀和防腐电流产生的电场,腐蚀电流与腐蚀电偶电位差及电流通路中的电阻有关,根据欧姆定律,有

$$I = \frac{U}{R_a + R_b} \quad (1)$$

式中, R_a 为螺旋桨-轴-船体等效电阻; R_b 为海水等效电阻; U 为腐蚀电偶电位; I 为腐蚀电流。

电阻:

$$R = \frac{l}{\sigma s} \rightarrow \frac{1}{\sigma l}$$

式中, $s \Delta l^2$ 表示船体的浸水面积等效于船体尺寸的平方; $\rightarrow \frac{1}{\sigma l}$ 表示电阻 R 可以表示为电导率与船体尺寸的积的倒数形式。

那么,船体腐蚀电流:

$$I = \frac{U}{R_a + R_b} \rightarrow \frac{U}{\frac{1}{\sigma_a l_a} + \frac{1}{\sigma_b l_b}}$$

式中, σ_a, l_a 分别为船体材料的电导率和尺寸; σ_b, l_b 分别为外包海水的电导率和尺寸。

以电偶极子的模型来分析水下电场远场分布时,水下电流可以简单地看成是纵向水平电偶极

子。下面将以 E_x 为例分析距离船体较远位置的水下电场分布^[6]:

$$E_x = \frac{IL}{4\pi\sigma_b} \left[\frac{3(x-x')^2 - R_s^2}{R_s^5} + \frac{3(x-x')^2 - R_t^2}{R_t^5} \right] \rightarrow \frac{U}{\left(\frac{1}{\sigma_a l_a} + \frac{1}{\sigma_b l_b} \right) \sigma_b l_b^2} \quad (2)$$

式中:

$$R_s = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$$

$$R_t = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z')^2}$$

L 为电偶极子距离,其位置在海水下 (x, y, z) 处,大小为船体长度的 $1/3$, (x', y', z') 为水下空间任意一点。

对于实船电场和船模电场,有以下比例关系(其中, $a_1 \sim a_6$ 表示比例系数,其他各参数中:下标 1 表示实船,下标 2 表示船模):

- 1) 模型外形尺寸 $l_1 = a_1 l_2$;
- 2) 电位差 $U_1 = a_2 U_2$;
- 3) 电流 $I_1 = a_3 I_2$;
- 4) 船体材料电导率 $\sigma_{1a} = a_4 \sigma_{2a}$
- 5) 海水电导率 $\sigma_{1b} = a_5 \sigma_{2b}$
- 6) 时间 $t_1 = a_6 t_2$

因此,实船水下电场:

$$E_{1x} = \frac{I_1 L_1}{4\pi\sigma_{1b}} \left[\frac{3(x_1-x_1')^2 - R_{1s}^2}{R_{1s}^5} + \frac{3(x_1-x_1')^2 - R_{1t}^2}{R_{1t}^5} \right] \rightarrow \frac{U_1}{\left(\frac{1}{\sigma_{1a} l_{1a}} + \frac{1}{\sigma_{1b} l_{1b}} \right) \sigma_{1b} l_{1b}^2}$$

船模水下电场:

$$E_{2x} = \frac{I_2 L_2}{4\pi\sigma_{2b}} \left[\frac{3(x_2-x_2')^2 - R_{2s}^2}{R_{2s}^5} + \frac{3(x_2-x_2')^2 - R_{2t}^2}{R_{2t}^5} \right] \rightarrow \frac{U_2}{\left(\frac{1}{\sigma_{2a} l_{2a}} + \frac{1}{\sigma_{2b} l_{2b}} \right) \sigma_{2b} l_{2b}^2}$$

实船环境与船模在水下对应位置的比值为:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\left(\frac{1}{\sigma_{2a} l_{2a}} + \frac{1}{\sigma_{2b} l_{2b}} \right) \sigma_{2b} l_{2b}^2}{\left(\frac{1}{\sigma_{1a} l_{1a}} + \frac{1}{\sigma_{1b} l_{1b}} \right) \sigma_{1b} l_{1b}^2} = \frac{l_{2b} \left(1 + \frac{\sigma_{2b} l_{2b}}{\sigma_{2a} l_{2a}} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{\sigma_{1b} l_{1b}}{\sigma_{1a} l_{1a}} \right)}}{\quad} \quad (3)$$

若取 $a_4 = \frac{\sigma_{1a}}{\sigma_{2a}} = 1$, $a_5 = \frac{\sigma_{1b}}{\sigma_{2b}} = 1$, 即船模壳体材料的电导率与实船材料相同,则实验海水的电导率与实际海水相同。在此条件下,不同金属的腐

蚀电位差相同,即 $a_2 = 1$, 且比值 $\frac{\sigma_{2b}}{\sigma_{2a}} = \frac{\sigma_{1b}}{\sigma_{1a}}$ 。船体模型采用与实船成比例 p 缩减, 即 $a_1 = l_1/l_2 = p$, 则有:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{p} \quad (4)$$

该式表示在以上条件下, 实船水下某点的电场值将是实验船模对应位置电场值的 $1/p$, 实验水池中的 1 m 相当于实船情况下的 $p \text{ m}$ 。此时, 实船水下电场值与实验船模水下电场的分布相似。

实船与船模水下电场的回路电阻(包含海水等效电阻和螺旋桨-轴-船体等效电阻)比值为: $R_1/R_2 = 1/p$ 。

电流比 $a_3 = I_1/I_2 = p$, 即实船腐蚀电流为船模大轴电流的 p 倍, 这与实际情况相符。

导电媒质中, 电场的分布为^[7-8]: $\nabla^2 E = \sigma\mu \frac{\partial E}{\partial t}$, 按照上述方法, 实船与船模的电场分布分别为:

$$\begin{aligned} \nabla_1^2 E_1 &= \sigma_1 \mu_1 \frac{\partial E_1}{\partial t_1} \\ \nabla_2^2 E_2 &= \sigma_2 \mu_2 \frac{\partial E_2}{\partial t_2} \end{aligned}$$

因

$$\begin{aligned} \nabla_1^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_1^2} = \frac{\partial^2}{\partial (px_2)^2} + \frac{\partial^2}{\partial (py_2)^2} + \frac{\partial^2}{\partial (pz_2)^2} = \\ &\frac{1}{p^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_2^2} \right) = \frac{1}{p^2} \nabla_2^2 \end{aligned}$$

且

$$\frac{\partial}{\partial t_1} = \frac{1}{a_6} \frac{\partial}{\partial t_2}$$

因而

$$\begin{aligned} \nabla_1^2 E_1 &= \frac{1}{p^2} p \nabla_2^2 E_2 = \frac{1}{p} \nabla_2^2 E_2 = \\ \sigma_1 \mu_1 \frac{\partial E_1}{\partial t_1} &= \sigma_2 \mu_2 \frac{1}{pa_6} \frac{\partial E_2}{\partial t_2} \end{aligned}$$

通过与 $\nabla_2^2 E_2 = \sigma_2 \mu_2 \frac{\partial E_2}{\partial t_2}$ 比较, 可得 $a_6 = 1$, 即实船与船模的时间关系相同。

2 电场船模相似条件及实验分析

电场船模缩比模型设计方法是将原型根据一定的相似准则, 从几何外形上按比例缩小而制得模型, 并通过实验进行系统仿真, 完成模型的数据测量和分析。相似条件有:

1) 几何相似。船模浸水面以下部分的长、宽、高、线型、螺旋桨、大轴以及测量点坐标都与实船对应尺度保持相同的比例。

2) 材料一致。船模采用与实船电特性相似

的钢板和铜材料建造, 实船与船模材料的电导率相同; 实验海水与待计算海区海水的电导率相同; 船模与实船采用相同的防护涂层材料。

3) 螺旋桨的转速(角速度)相同。

按照以上电场模拟理论建造的电场船模将会与实船的电场特性和水下电场分布基本相同, 通过对电场船模进行实验测量, 得到的数据可以模拟实船电场, 通过对其进行研究分析, 即可估算出实船电场的空间分布状态。

显然, 以上讨论是在较理想的情况下展开的, 缩比船模、实际船体以及海水在回路电阻、涂层、电导率及轴和船体接触处的电阻变化等方面的比例不可能完全与缩比比值相同, 且待模拟的具体对象有其自身的物理特点, 会降低船模水下电场与实船水下电场的相似度, 特别是将水下电场简化等效为 $1/3$ 船长的水平电偶极子电场来讨论相似性时, 会导致实船与船模的电场差异。其中, 静电场由于与螺旋桨一大轴转动无关, 相似性较好, 因而轴频电场相似性稍差。

以某实船为例, 首先对该船的水下电场进行海上实测。测线平行于被测船艏艉方向, 横向距离船体约 100 m , 测量深度约 10 m , 获得静电场曲线。根据相似性准则, 设计并研制了对应的比例电场船模, 实船与船模的比例为 $100:1$ 。在实验室进行船模水下电场测量, 测线与船模的横向距离为 1 m , 测量深度为 10 cm 。获得船模静电场测量数据后, 对船模电场测量结果按对应关系换算, 得到了实船测量与船模换算的水下电场三分量对比曲线, 如图 1 所示。

分析图 1 可知, 通过船模换算获得的电场三分量曲线的变化趋势与实船测量结果基本一致, 反映了实船水下电场的量级范围与空间分布特性。由于本文对相似性的讨论是针对腐蚀和防腐蚀电流展开, 而船模并不能完全模拟实船的全部电学状态, 并且与实验室环境相比, 海水环境要复杂得多, 因而导致船模电场换算值与实船测量值存在一定的差异。例如, 电场 E_x (纵向) 分量与腐蚀电流在海水中的流动方向(船体指向螺旋桨)一致, 相似性符合较好; 船模壳体外形与实船存在一定制作误差, 会改变电流大小和方向, 导致电场 E_y (横向) 和 E_z (垂向) 分量换算值与实船测量值误差较大。

3 结 语

本文通过引入相似性原理, 分析了电场船模的水下电场分布及其与实船电场分布的相似性关

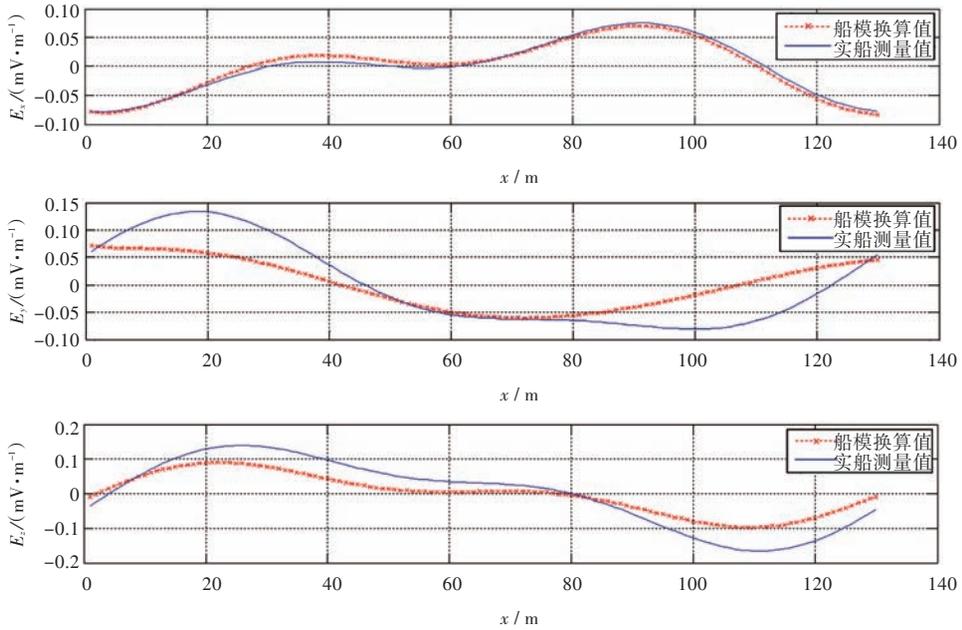


图1 水下电场相似性对比曲线

Fig.1 The measured UEF vs. the computed results of the model

系,提出了满足一定相似性关系的电场船模设计准则,实船水下电场的分布情况可根据一定的相似性关系,由船模水下电场获得。本文通过研制某船的电场船模,对比分析了船模电场换算值与实船测量值之间的相似性,验证了相似性准则的有效性。通过采用满足相似性关系的电场船模进行水下电场研究,可实现水下电场成比例、可重复的实验室测量分析,大大降低了相关研究周期和成本。电场船模相似性分析结果对舰船水下电场预测分析、水下电场防护设计优化及电场引信设计优化等具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 龚沈光,卢新城. 舰船电场特性初步分析[J]. 海军工程大学学报,2008,20(2):1-4.
GONG S G, LU X C. Pilot study of electric field characteristics of warship [J]. Journal of Naval University of Engineering,2008,20(2):1-4.
- [2] 王瑾. 舰船水下电场测量[J]. 中国舰船研究,2007,2(5):45-49.
WANG J. Measurement of underwater electric field for ships [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2007,2(5):45-49.
- [3] CERTENAIS J, PERIOU J J. Electromagnetic measurements at sea [C]//Proceeding of UDT Europe, 1997:433-434.
- [4] 周美立. 相似性科学[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [5] 赵景波. 舰船腐蚀电磁场的测量及防护方法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
ZHAO J B. Study on measuring and preventing methods for corrosion electromagnetic field of ships [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [6] 刘胜道,肖昌汉,龚沈光. 两层模型中直流电流元产生的电磁场[J]. 武汉理工大学学报,2004,28(5):641-644.
LIU S D, XIAO C H, GONG S G. Electromagnetic field of DC electric dipole in two-layer model[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering),2004,28(5):641-644.
- [7] DEMILIER L, DURAND C, RANNOU C, et al. Corrosion related electromagnetic signatures measurements and modeling on a 1:40th scaled model [J]. Simulation of Electro-chemical Processes II, Engineering Sciences Volume,2007,54:368.
- [8] 陈聪,龚沈光,李定国. 基于电偶极子的舰船腐蚀防腐相关静态磁场研究[J]. 兵工学报,2010,31(1):113-118.
CHEN C, GONG S G, LI D G. Research on the static magnetic field related with corrosion and anticorrosion of ships based on the electric dipole model[J]. Acta Armamentarii,2010,31(1):113-118.

[责任编辑:胡文莉]