

层流介质中曲面螺旋桨旋转对腐蚀静电场的影响

王向军, 张建春, 徐庆林

(海军工程大学电气工程学院, 湖北武汉 430033)

摘要: 为了研究实际海水环境下螺旋桨转速及海水流速对舰船腐蚀静电场的影响, 提出了一种层流介质条件下腐蚀静电场的求解方法. 结合流体力学及电化学相关理论, 建立层流状态下的曲面螺旋桨旋转模型, 利用动量积分法和电化学方法分别求解层流介质下曲面桨叶表面的边界层厚度和极限腐蚀电流密度, 基于该电流密度建立电偶极子模型对腐蚀静电场进行求解, 并通过实验验证结论的正确性. 结果表明: 层流状态下, 静电场的幅值大小随着螺旋桨转速及介质流速的增加而增加, 在流速及转速较小时, 理论数据与实验数据拟合程度较好.

关键词: 腐蚀静电场; 电偶极子; 层流; 动量积分法; 曲面螺旋桨; 电流密度

中图分类号: TM151 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)11-2330-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.11.014

The Influence of Rotating Curved Surface Propeller on the Corrosion Electrostatic Field in Laminar Medium

WANG Xiang-jun, ZHANG Jian-chun, XU Qing-lin

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: In order to research the effect of propeller rotating speed and flowing velocity on the corrosion static electric field under sea water, a method for the corrosion static electric field under laminar medium is proposed. Combining the theory of hydrodynamics and electrochemistry, the rotational model of curved propeller in laminar flow is established, the momentum integral method and electrochemical method are used to calculate boundary layer thickness and ultimate corrosion current density of curved blade surface in laminar medium respectively. An electric dipole model is established to solve the corrosion static electric field based on the current density, and the correctness of the conclusion is verified by experiments. The results show that the amplitude of electrostatic field increases with the increase of propeller speed and medium velocity. The theoretical data are in good agreement with the experimental data when the velocity and rotational speed are small.

Key words: corrosion static electric field; static electric dipole; laminar medium; momentum integral method; curved propeller; current density

1 引言

舰船静电场作为一种可测量的信号源, 国内外不少学者在电场测量应用及防护方面取得了较为理想的成果^[1-4]. 电场的主要来源是由于舰船船体与螺旋桨在海水中发生极化作用构成电偶腐蚀, 金属间的不同极化电位在海水中产生腐蚀电流, 从而激发产生静电场. 在电偶腐蚀过程中, 海水中的氧化剂会在金属表面发生“去极化”作用, 阻止阴极、阳极电位进一步变化, 使螺旋桨及船壳之间的电位达到动态平衡. 该腐蚀反应极易受到外界环境的影响, 氧化剂向螺旋桨表面的传

质过程与螺旋桨的有效面积(半径大小)、转速及附近海水的流动状态均密切相关. 当前关于舰船静电场最新的建模方法主要是通过等效源法、有限元法、边界元法等对静水条件进行分析, 这些方法均是在电流强度或船体电位等边界条件给定的情况下对水下静电场的分布进行分析^[5,6]. 这些建模方法并没有考虑海水流动、螺旋桨旋转等因素对舰船腐蚀情况的影响, 从而导致仿真结果与实际情况下测量得到的静电场信号不能很好的进行拟合, 因此, 目前在静电场建模方面仍存在较大的创新空间.

为了研究海水流动对腐蚀静电场的影响, 本文结

合流体力学和电化学相关理论对实际螺旋桨进行建模,计算得到氧的传质过程控制下曲面螺旋桨在流动介质中产生的腐蚀电流密度,基于该电流密度建立电偶极子模型对海水中的静电场分布进行求解,以此进一步提高理论建模的精确度.

2 旋转螺旋桨桨叶三维边界层

2.1 理论模型

对曲面桨叶表面的边界层厚度进行求解时,螺旋桨整体坐标系采用直角坐标系 (X, Y, Z) 和圆柱坐标系 (X, r, θ) , 桨叶表面采用局部直角坐标系 (x, y, z) , 坐标分布如图 1 所示. 局部坐标系与圆柱坐标系有关系 $x = \theta, z = r$, 曲面螺旋桨模型半径 r 处的曲率可由螺距角 β_p 表示. 根据文献[7]知,局部坐标系的度量系数为

$$\begin{cases} h_x = r/\cos\beta_p \\ h_y = h_z = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\beta_p(r) = \arctan[p/(2\pi r)]$, p 为螺距.

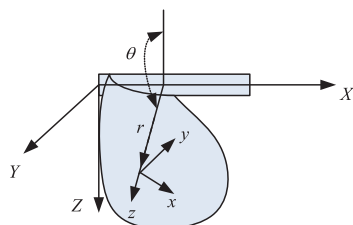


图1 坐标系定义

螺旋桨旋转时,桨叶表面的流体介质会因旋转受到 Coriolis 力和离心力作用,根据 Navier-stokes 方程及动量守恒定理,考虑压力梯度存在的情况下, x, z 方向边界层动量方程及连续方程可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{u}{h_x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{h_y} \frac{\partial u}{\partial y} - 2\Omega w \cos\beta_p - \frac{uw \cos^2\beta_p}{r} \\ = \frac{U}{h_x} \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{u}{h_x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{v}{h_y} \frac{\partial w}{\partial y} + 2\Omega u \cos\beta_p + \frac{(u \cos\beta_p)^2}{r} \\ = \frac{U^2}{r} + 2\Omega U - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_z}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{1}{h_x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{h_y} \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

式中: u, v, w 分别为局部坐标 x, y, z 方向上的速度分量; $\tau_x = \mu (\partial u / \partial y)_{y=0}$ 、 $\tau_z = \mu (\partial w / \partial y)_{y=0}$ 为 x, z 方向上的剪切力; μ 为液体的粘度系数; ρ 为流体密度; Ω 为螺旋桨旋转角速度; U 为边界层外介质与船体沿 X 轴方向的相对流速.

式(2)~(4)即为三维坐标系下的边界层方程,称为“准三维”边界层方程. 桨叶不同半径位置处的边界

层厚度可通过上式进行求解.

2.2 层流边界层求解

当前对二维层流边界层的研究较为成熟,文献[8]采用积分方法对边界层二维偏微分方程进行了求解,将动量损失厚度表示为外部介质与船体相对流速 U 的积分. 为了求解“准三维”边界层方程,在二维求解的基础上,采用解析算法对方程进行求解.

引入表示物体表面流线与介质主流流线之间夹角的极限流线角 β_w ,它是三维边界层区别于二维边界层的重要参数. 物体表面的剪切力满足

$$\tau_z = \tau_x \tan\beta_w \quad (5)$$

由于桨叶表面曲率的存在,螺旋桨旋转时桨叶附近的流体压力分布不均,产生压力梯度. 在有压力变化的条件下, x, z 方向上的速度分布分别采用 Pohlhausen 和 Mager 速度分布^[7]

$$\begin{cases} u/U = a(x)\eta + b(x)\eta^2 + c(x)\eta^3 + d(x)\eta^4 \\ w/U = (1-\eta)^2 \tan\beta_w (u/U) \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\eta = y/\delta$, δ 为边界层厚度,系数 a, b, c, d 是 x 的函数,令 $u/U = f(\eta, x)$.

x 方向上的速度 u 分布满足边界条件:

$$\begin{cases} y=0, u=0, v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{y=0} = -U \frac{\partial U}{\partial x} \\ y=\delta, u=U, \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)中的速度 u 代入边界条件(7)可解得

$$\begin{cases} a(x) = 2 + \lambda/6 \\ b(x) = -\lambda/2 \\ c(x) = -2 + \lambda/2 \\ d(x) = 1 - \lambda/6 \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\lambda = \frac{\delta^2 dU}{\nu dx}$ 表示相对流速 U 对边界层厚度的影响, ν 为介质的运动粘度系数.

将式(8)代入式(6)可得

$$\begin{cases} u/U = F(\eta) + \lambda G(\eta) \\ F(\eta) = 2\eta - 2\eta^3 + \eta^4 \\ G(\eta) = \eta(1-\eta)^3/6 \end{cases} \quad (9)$$

结合式(6)、(9),可将位移厚度 δ_1 、动量厚度 δ_2 及剪切力 τ_x 表示为^[9]

$$\begin{cases} \frac{\delta_1}{\delta} = \frac{3}{10} - \frac{\lambda}{120} \\ \frac{\delta_2}{\delta} = \frac{1}{63} \left(\frac{37}{5} - \frac{\lambda}{15} - \frac{\lambda^2}{144} \right) \\ \frac{\tau_x \delta}{\mu U} = 2 + \frac{\lambda}{6} \end{cases} \quad (10)$$

其中:位移厚度 δ_1 、动量厚度 δ_2 分别定义为 $\delta_1 U =$

$$\int_{y=0}^{\infty} (U-u) dy, \delta_2 U^2 = \int_{y=0}^{\infty} u(U-u) dy.$$

为了通过式(10)中的 δ_2 间接求解出边界层厚度 δ , 结合式(10)引入比例系数 K

$$K = \frac{\delta_2^2}{v} \frac{dU}{dx} = \lambda \left(\frac{37}{315} - \frac{\lambda}{945} - \frac{\lambda^2}{9072} \right)^2 \quad (11)$$

将式(6)求出的 Pohlhausen 速度分布代入式(2)对 y 方向进行积分可得

$$F(K) = \frac{dF_1(x)}{dx} - F_1(x) \frac{1}{U} \frac{dU}{dx} + a_2 F_1(x) \tan\beta_w + a_3 F_1(x) \frac{\tan\beta_w}{U} \quad (12)$$

其中:

$$F_1(x) = U\delta_2^2/v, a_2 = 2I_2(\delta/\delta_2) \cos^2\beta_p/r,$$

$$F(K) = \frac{\tau_w \delta_2}{\mu U} - 4K - 2K \frac{\delta_1}{\delta_2} \approx a_0 - a_1 K,$$

$$a_0 = 0.47, a_1 = 6, I_1 = \int_0^1 f(\eta)(1-\eta)^2 d\eta,$$

$$I_2 = \int_0^1 f^2(\eta)(1-\eta)^2 d\eta, a_3 = 4\Omega I_1(\delta/\delta_2) \cos\beta_p.$$

对式(12)中的 $F_1(x)$ 积分求解可得^[10]

$$F_1(x) = \frac{a_0 \int_0^x U^{a_1-1} \exp\left[\int_0^x (a_2 + a_3/U) \tan\beta_w dx\right] dx}{U^{a_1-1}(x) \exp\left[\int_0^x (a_2 + a_3/U) \tan\beta_w dx\right]} \quad (13)$$

其中: $U(x)$ 为边界层内介质相对流速关于 x 的函数表达式。

当 $\tan\beta_w = 0$ 时, 式(13)等效为二维边界层积分结果, 其结果与文献[8]给出的结果一致, 从而验证了推导结果的正确性。

式(13)中的极限流线角 β_w 会随着桨叶不同位置处曲率的不同而发生变化, 为了使边界层推导结果收敛, 还需对 z 方向动量方程(3)进行积分求解, 求出 $\tan\beta_w$ 的积分表达式。结合式(4)对式(3)两边沿 y 方向积分, 并将式(5)、(6)代入积分表达式, 最终化简可得

$$\frac{d\tan\beta_w}{dx} + \frac{2}{U} \frac{dU}{dx} \tan\beta_w + \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dx} \tan\beta_w + c_1 \tan\beta_w = c_2 \quad (14)$$

其中: $c_1 = C_r/(\delta I_2)$, $C_r = \frac{1}{U} \int_0^{\delta} \frac{\partial U}{\partial x} dy$ 为剪切系数; $c_2 =$

$$\frac{1 + H_{12} \delta_2}{r I_2 \delta} + \frac{2\Omega H_{12} \cos\beta_p \delta_2}{U I_2 \delta}, H_{12} = \delta_1/\delta_2.$$

对式(14)利用式(12)相同的积分法可得

$$\tan\beta_w(x) = \frac{\int_0^x c_2 U^2 \delta \exp\left(\int_0^x c_1 dx\right) dx}{U^2(x) \delta(x) \exp\left(\int_0^x c_1 dx\right)} \quad (15)$$

2.3 求解方法

假设初始条件 $\beta_w(x) = 0$, 在边界层外部相对流速分布 $U(x)$ 给定的情况下, 将初始条件 $\beta_w(x) = 0$ 代入式(13)得到 δ_2 , 将得到的 δ_2 代入式(10)、(15)求得第一次迭代值 $\beta_w^{(1)}$, 依次计算直到所得 $\beta_w^{(n)}$ 满足 $|\beta_w^{(n)} - \beta_w^{(n-1)}| < \varepsilon$ (ε 为规定的小数值), 此时结果为收敛。将 $\beta_w^{(n)}$ 代入式(13)求出最终动量损失厚度 δ_2 , 通过式(10)中动量厚度 δ_2 与边界层厚度 δ 的关系即可得出 δ 。

3 腐蚀电流密度

舰船在海水中发生的腐蚀反应属于吸氧腐蚀, 氧的传质过程主要发生在扩散层内, 其扩散层厚度 δ_c 与边界层的关系可表示为^[8]

$$\delta_c/\delta = Sc^{-1/3} \quad (16)$$

式中: $Sc = \nu/D$ 为施密特(Schmidt)数, D 为氧在介质中的扩散系数。

传质过程控制下产生的腐蚀电流密度 i 可表示为^[11,12]

$$i = nFD(c_0 - c_s)/\delta_c \quad (17)$$

式中: n 为电化学反应过程中电子转移个数, 对于氧的还原过程 $n = 4$; $F \approx 96500$ 为法拉第常数; c_0 为介质主体中反应物浓度; c_s 为电极表面反应物浓度, 当电极反应速度无限大时, $c_s = 0$ 。

由于舰船-海水腐蚀回路中的电流强度相等, 故忽略船体舵板、海底阀箱等其他充当阴极的部件时, 船体腐蚀在海水中产生的腐蚀电流强度大小可由螺旋桨产生的还原电流强度决定。螺旋桨在海水中的浸水面积可表示为^[13]

$$S = \pi N(d_1^2 \xi/2 + d_2 L) \quad (18)$$

式中: N 为螺旋桨数量, $d_1 = 2R$ 为螺旋桨直径, R 为螺旋桨半径, d_2 为轴毂半径, ξ 为螺旋桨展开盘面比, L 为轴毂长度。

式(18)给出的总面积包括螺旋桨桨叶及轴毂的面积, 忽略轴毂面积时螺旋桨面积如图2所示。

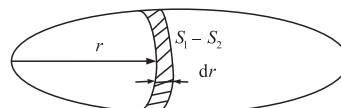


图2 螺旋桨等效面积

当浸水面积均发生腐蚀反应时, 旋转过程中螺旋桨产生的还原电流强度 I 为

$$\begin{cases} I = \int_0^R i(S_1 - S_2) dr \\ S_1 = 2\pi N \xi (r + dr)^2 \\ S_2 = 2\pi N \xi r^2 \end{cases} \quad (19)$$

由于 dr^2 相对 dr 小很多可忽略不计,化简式(19)对腐蚀电流强度 I 近似求解可得

$$I = \int_0^R 4\pi r N \xi i dr \quad (20)$$

4 舰船静电场求解

基于式(20)得到的腐蚀电流密度建立电偶极子模型,对层流介质条件下舰船静电场进行求解,整体坐标选取直角坐标系 (X, Y, Z) .

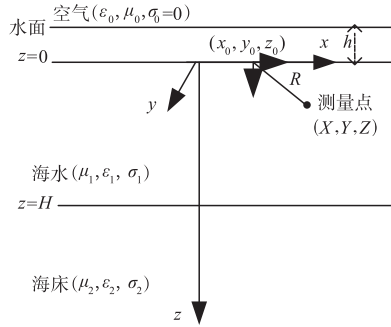


图3 三层介质中的电偶极子模型

假设图 1 中求解边界层厚度的局部坐标位置对应整体坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 处,即对应电偶极子在海水中的位置坐标,各介质的电磁性参数如图 3 所示.在腐蚀状态均匀的情况下,腐蚀电流关于舰艇左右对称,此时可将电偶极矩分解为 x, z 两个方向进行叠加.根据文献[14]知,任意方向的静态电偶极子在三层介质中任意位置处 (X, Y, Z) 产生的静电场解析表达式为

$$\begin{aligned} \varphi = & \sum_{k=1}^{\infty} \kappa^k I_x dl (X - X_0) \left[\frac{1}{4\pi\sigma_1 |r_{1k}|^3} + \frac{1}{4\pi\sigma_1 |r_{2k}|^3} \right] + \\ & \sum_{m=0}^{\infty} \kappa^m I_x dl (X - X_0) \left[\frac{1}{4\pi\sigma_1 |r_{1m}|^3} + \frac{1}{4\pi\sigma_1 |r_{2m}|^3} \right] + \\ & \sum_{k=1}^{\infty} \kappa^k I_z dl \left[\frac{-(Z - 2kH + 2h + Z_0)}{4\pi\sigma_1 |r_{1k}|^3} + \frac{Z - 2kH - Z_0}{4\pi\sigma_1 |r_{2k}|^3} \right] + \\ & \sum_{m=0}^{\infty} \kappa^m I_z dl \left[\frac{-(Z + 2mH + 2h + Z_0)}{4\pi\sigma_1 |r_{1m}|^3} + \frac{Z + 2mH - Z_0}{4\pi\sigma_1 |r_{2m}|^3} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

其中: $\kappa = (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 + \sigma_2)$, σ_1, σ_2 分别为海水及海床电导率, h 为电偶极子的深度,

$$\begin{aligned} r_{1k} &= (X - X_0)\mathbf{i} + (Y - Y_0)\mathbf{j} + (Z - 2kH + 2h + Z_0)\mathbf{k}, \\ r_{2k} &= (X - X_0)\mathbf{i} + (Y - Y_0)\mathbf{j} + (Z - 2kH - Z_0)\mathbf{k}, \\ r_{1m} &= (X - X_0)\mathbf{i} + (Y - Y_0)\mathbf{j} + (Z + 2mH + 2h + Z_0)\mathbf{k}, \\ r_{2m} &= (X - X_0)\mathbf{i} + (Y - Y_0)\mathbf{j} + (Z + 2mH - Z_0)\mathbf{k} \end{aligned}$$

在介质中电场强度为电位梯度的变化,海水中的电场三分量可表示为

$$\begin{cases} E_x = -\partial\varphi/\partial X \\ E_y = -\partial\varphi/\partial Y \\ E_z = -\partial\varphi/\partial Z \end{cases} \quad (22)$$

将层流条件下的腐蚀电流替换式(21)、(22)中电偶极矩中的电流强度即可求得流动海水中的腐蚀静电场分布.

5 实验与仿真对比

调研结果发现,舰船因型号及用途的不同,螺旋桨直径范围约为 $1.5\text{m} \sim 2.5\text{m}$,盘面比约为 $0.92 \sim 0.98$,桨叶数量基本为五叶桨或七叶桨,因执行任务的不同,舰船具备双轴螺旋桨.由于实验条件的限制,只对单轴五叶螺旋桨进行分析.令仿真条件如下:电偶极子位置为 $(2, 0, 0)$,海水电导率为 $\sigma_1 = 3.98\text{S/m}$,海水深度为 $H + h = (50 + 5)\text{m}$,介质流速 $U = 1\text{m/s}$,螺旋桨转速 $\Omega = 40\text{r/min}$.当测量点的位置为 $(2, 0, 50)$ 时,腐蚀静电场幅值大小随桨叶半径的变化规律仿真如图 4 所示.

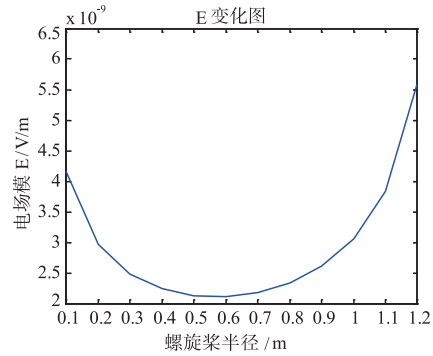


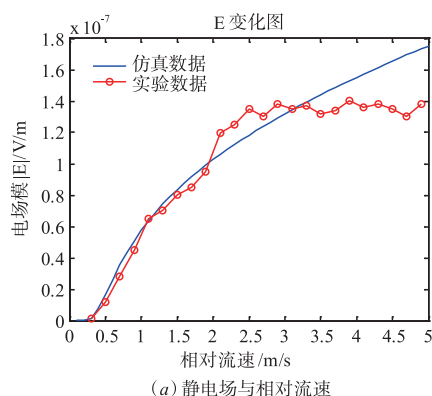
图4 螺旋桨半径与静电场

由图 4 可知,静电场幅值大小的变化规律随螺旋桨半径呈二次分布,当螺旋桨的半径约为 $0.5\text{m} \sim 0.6\text{m}$ 时,氧的传质过程控制下产生的静电场幅值最小,约为 $2.1 \times 10^{-9}\text{V/m}$,螺旋桨半径在 0.7m 以上时,静电场大小会随着半径的增加而增加.其主要原因是由于半径的变化会直接影响螺旋桨表面任意位置处的螺距角,使该位置处的曲率发生变化,进而影响到极限流线条角 β_w ,同时半径的变化也会直接影响到螺旋桨表面的浸水面积,因此,螺旋桨半径对腐蚀静电场幅值的影响是曲率变化及浸水面积共同作用的结果.由于实验条件的限制,并没有对该结论进行实验验证.

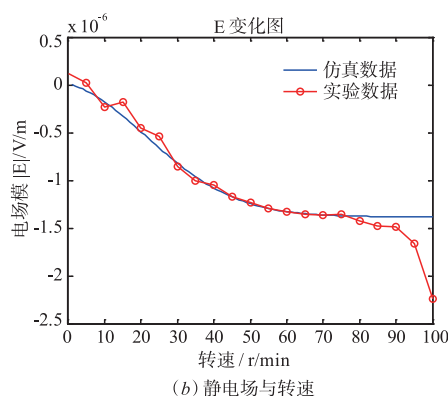
2018年7月在水深约为 100m 的某海域,对船舶以不同航速通过测量区域时产生的静电场信号进行了测量,实船与海水的相对速度可由其自身设备测得.利用绳索将银-氯化银电极组成的传感器固定在水下 50m 处进行测量,采用不同航速下的峰-峰值与仿真结果进行对比.随后对实船停靠码头后,对水下 50m 处的静电场进行不同转速下的定点测量,传感器与船体龙骨的横向距离约为 20m ,实验过程中对每个转速稳定后的静电场点值平均值进行采集,实测信号经过放大、滤波处理后介质相对流速及转速对实测信号的影响与仿真结果

对比如图 5 所示。

由图 5(a)可以看出,当舰船与介质的相对流速小于 3m/s 时,静电场的变化随着流速的增加而增加,与仿真结果基本一致,平均误差约为 5.82%,其主要原因是由于在螺旋桨转速一定的情况下,流速 U 的增加会使螺旋桨表面的边界层的厚度减小,导致极限电流密度增加,最终会导致电偶极子模型中的电偶极矩增加.在 3m/s 之后,静电场的幅值变化基本保持不变,由于



(a) 静电场与相对流速



(b) 静电场与转速

图5 实验与仿真对比

腐蚀静电场幅值随转速的变化如图 5(b) 所示. 通过对比可以发现,在转速小于 75r/min 时,实验与仿真结果拟合度较高,平均误差约为 8.93%,实测数据产生波动的主要原因是由于海水流速的不断变化和测量系统的自身误差导致的.当转速大于 75r/min 时,实验与仿真的对比误差逐渐增大,实验过程中,螺旋桨转动在海水中产生涡流及涌浪,破坏了流体的层流状态,同时在理论推导过程中并未考虑螺旋桨的边缘效应,最终导致实验与仿真不符.

因为螺旋桨旋转过程中,边界层的分布不仅受桨叶半径的影响,而且还与任意位置处的曲率(即螺旋角)有关,这也是与平板圆盘旋转时边界层变化规律不同的主要原因^[7].

在腐蚀静电场实际测量过程中,由于介质流速不断变化使静电场通过特性曲线出现波动.为了进一步验证建模方法的正确性,选取螺旋桨转速为 50r/min 时的静电场通过特性曲线分别与文献[15]给出静水条件下腐蚀静电场分布及基于本文提出的层流条件下腐蚀静电场仿真结果进行对比,根据测量过程中实船测量得到的流速变化数据对流速 U 进行设定,电场分量对比结果如图 6 所示.

由图 6 可以看出,实际测量得到的腐蚀静电场通过特性曲线会产生幅值波动,与静水条件下电偶极子模型相比,本文建立的模型算法更能体现实际测量结果.实测过程中,螺旋桨转速一定时,螺旋桨附近介质流速状态的变化会改变其表面产生的边界层厚度,进

而影响腐蚀电流密度及静电场的变化,经过图 6 发现,流速变化是导致静电场通过特性曲线波动的原因之一,并进一步验证了理论结果的正确性.

6 结论

本文对层流状态下流速及螺旋桨半径、转速对舰船腐蚀静电场的影响规律进行了分析研究.首先,采用边界层动量积分法从流体力学角度出发,分析曲面螺旋桨表面的边界层分布,将计算结果与二维边界层的精确解进行对比验证了正确性.其次,基于腐蚀电流密度建立电偶极子模型,求解出三层流动介质条件下的腐蚀静电场随螺旋桨半径、介质相对流速及螺旋桨转速的变化规律,并通过实验验证了结论的正确性.结果表明:①螺旋桨半径的大小与静电场幅值呈二次分布;②静电场会随着介质流速及螺旋桨转速的增加而增加;③流速状态的变化是造成静电场分布曲线产生波动的原因之一.

在实际测量过程中,层流状态极易被破坏,对理论结果还需进一步完善,比如考虑湍流、紊流等其他流动状态下的静电场分布.同时,在理论计算过程中,并未考虑金属表面电化学极化对腐蚀电流的影响,最终造成实测数据与仿真结果不一致.根据实验与仿真结果对比发现,该模型主要适用于舰船与介质相对流速及螺旋桨转速较小时的腐蚀静电场仿真.因此,模型存在局限性.

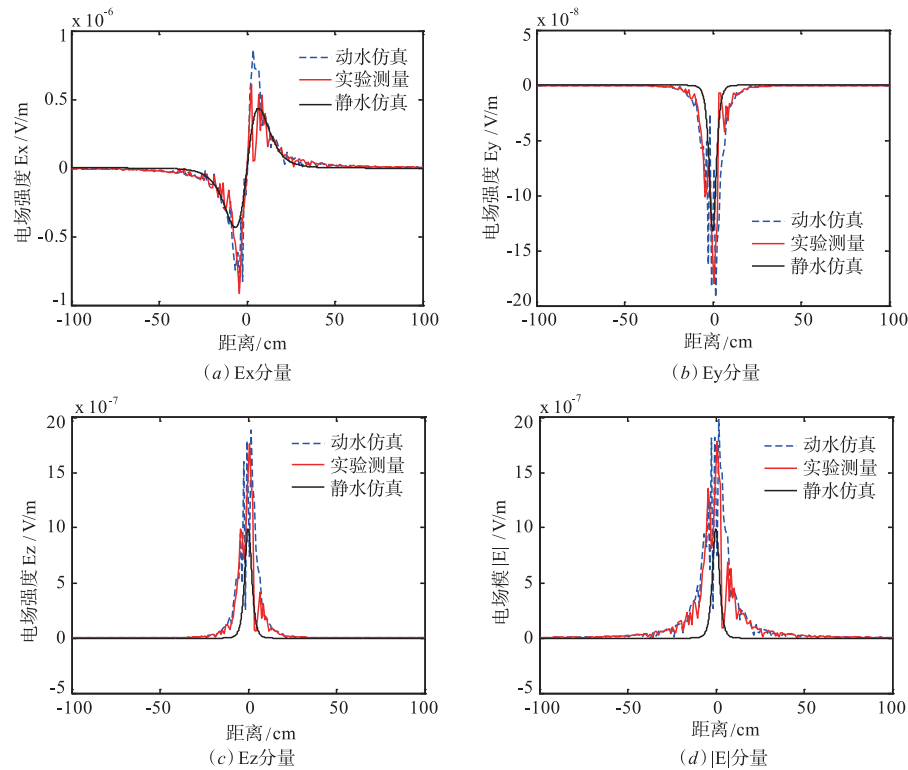


图6 静电场分布实验与仿真对比

参考文献

- [1] 张建春,王向军. 水平电流元在深海中的电场强度算法研究[J]. 舰船科学技术,2016,38(01):90-93.
ZHANG J C, WANG X J. Arithmetic research about electric-field intensity of horizontal-harmonic current in the deep sea[J]. Ship Science and Technology,2016,38(01):90-93. (in Chinese)
- [2] 张建春. 海水中腐蚀相关轴频电场建模及其特性分析[D]. 湖北武汉:海军工程大学,2015.
ZHANG J C. The modeling and analysis about ship's shaft-rate electric field related to corrosion in seawater[D]. Wuhan, Hubei: Naval University of Engineering, 2015. (in Chinese)
- [3] DYMARKOWSKI K, UCZCIWEK J. The extremely low frequency electromagnetic signature of the electric field of the ship[A]. Conference of Process[C]. London: UDT, 2001. 1-6.
- [4] SCHAEFER D, ZION S, DOOSE J, et al. Numerical simulation of UEP signatures with propeller-induced ULF modulations in maritime ICCP system[A]. MARELEC Conference[C]. San Diego: University of Wisconsin-Madison, 2011. 1045-1050.
- [5] LIU D H, WANG X J, JI D. Underwater target recognition technology based on ship speed-paddle speed characteristic curve[A]. Mechatronics and Manufacturing Technologies [C]. Taiwan, National University of Science and Technology, 2017. 572-579.
- [6] ZHANG H, WANG X J, SHAN C L, et al. Electric field distribution measurement equipment calibration based on electric field calculation of space[J]. International Journal of Digital Content Technology & Its Applications, 2012, 6(16):524-531.
- [7] SCHLICHTING H. Boundary-Layer Theory (7th edition) [M]. New York: McGraw-Hill Book, 1979. 152-173.
- [8] 郭永怀. 边界层理论讲义[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2008. 46-57.
- [9] FERZIGER J H. Computational Methods for Fluid Dynamics[M]. Washington DC: NBS, 2012. 86-97.
- [10] 姚端正, 梁家宝. 数学物理方法(第二版)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2011. 33-54.
- [11] 杨德钧. 金属腐蚀学(第二版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999. 72-89.
- [12] 查全性. 电极过程动力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 85-104.
- [13] 黄永昌. 电化学保护及其应用[J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(7):324-328.
HUANG Y C. Electrochemical protection technology and its application[J]. Corrosion & Protection, 2000, 21(7): 324-328. (in Chinese)
- [14] BIAN Q, LIU D H, WANG X J. Research on underwater static electric field for warship based on hybrid model

- [J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 713: 925 - 929.
- [15] 刘文宝,王向军,嵇斗. 基于电偶极子模型的舰船静电场深度换算[J]. 空军雷达学院学报,2010,24(6):435 - 438.

LIU W B, WANG X J, JI D. Conversion of static electric field depth of ships based on electric dipole model[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2010, 24(6): 435 - 438. (in Chinese)

作者简介



王向军 男,1973年11月出生,河北唐山
人.现为海军工程大学电气工程学院教授,主要
研究方向为电场防护装置制备与研究.
E-mail: wxjnue@163.com



张建春(通信作者) 男,1990年8月出生,
河北沧州人.2013年于燕山大学电气工程系取
得学士学位,2015年于海军工程大学电气工程
学院取得硕士学位并继续攻读博士学位.主要
从事舰船腐蚀静电场的研究.
E-mail: 844269762@qq.com