

牺牲阳极参数对直翼桨阴极保护效果影响研究

陈波¹, 刘爱兵¹, 宋航^{2*}, 杨文凯¹, 张迪², 刘广义²

(1. 上海船舶设备研究所, 上海 200031; 2. 洛阳船舶材料研究所 海洋腐蚀与
防护全国重点实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: **目的** 研究牺牲阳极设计参数对直翼桨结构阴极保护效果影响, 为直翼桨的阴极保护设计和工程应用提供参考。**方法** 针对直翼桨型船用推进器结构, 基于边界元法建立数值仿真模型, 开展直翼桨牺牲阳极阴极保护仿真计算, 重点研究不同牺牲阳极数量、尺寸和布置位置时, 直翼桨上箱体、旋转箱体、桨叶和桨叶上端盖等结构的电位分布情况, 核算牺牲阳极使用寿命。**结果** 采用 Al-Zn-In-Mg-Ti 铝合金牺牲阳极时, 牺牲阳极数量增多和尺寸变大都会提高直翼桨的阴极保护效果, 同时延长牺牲阳极使用寿命。牺牲阳极布置位置的改变会影响直翼桨桨叶表面的电位梯度, 改变直翼桨结构的保护电位分布。采用 10 块 $0.18D \times 0.11D \times 0.04D$ (D 为直翼桨直径) 的水滴形高效铝合金牺牲阳极在桨叶间单层布置, 可实现对直翼桨结构 2.5 a 以上的保护寿命。**结论** 通过调整牺牲阳极设计参数, 可对直翼桨桨叶、旋转箱体等关键结构提供较好的阴极保护效果, 但旋转箱体与船体和上箱体的间隙由于结构遮挡效应保护不足, 建议在实际工程应用中在这些结构部位表面涂装防腐涂料以降低腐蚀风险。

关键词: 直翼桨; 牺牲阳极; 阴极保护; 数值仿真; 防腐; 使用寿命

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)07-0140-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.07.018

Influence of Sacrificial Anode Parameters on Cathodic Protection for Cycloidal Propellers

CHEN Bo¹, LIU Aibing¹, SONG Hang^{2*}, YANG Wenkai¹, ZHANG Di², LIU Guangyi²

(1. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China; 2. National Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Shandong Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the influence of sacrificial anode design parameters on the cathodic protection effectiveness of cycloidal propeller structures, so as to provide insights for the design and engineering applications of cathodic protection. A numerical simulation model based on the boundary element method was established for the structural analysis of cycloidal propellers used in ship propulsion systems. Cathodic protection simulation calculations were conducted, focusing on quantities, sizes, and arrangement positions of different sacrificial anodes. The study emphasized the cathodic protection potential distribution on key structural components such as the upper-box, the rotating-box, blades, and blade end caps of cycloidal propellers, along with the estimation of sacrificial anode service life. Results indicated that increasing the quantity and size of

收稿日期: 2024-03-05; 修订日期: 2024-04-25

Received: 2024-03-05; Revised: 2024-04-25

引文格式: 陈波, 刘爱兵, 宋航, 等. 牺牲阳极参数对直翼桨阴极保护效果影响研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(7): 140-147.

CHEN Bo, LIU Aibing, SONG Hang, et al. Influence of Sacrificial Anode Parameters on Cathodic Protection for Cycloidal Propellers[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(7): 140-147.

*通信作者 (Corresponding author)

sacrificial anodes made of Al-Zn-In-Mg-Ti aluminum alloy enhanced the cathodic protection effectiveness and extends the service life of sacrificial anodes. Changes in sacrificial anode arrangement positions impacted the potential gradient on blade surfaces and altered the cathodic protection potential distribution of the cycloidal propeller structure. Employing 10 drop-shaped aluminum alloy sacrificial anodes sized at $0.18D \times 0.11D \times 0.04D$ (D was the diameter of cycloidal propeller), arranged in a single layer between blades, could achieve a protection lifespan of over 2.5 years for cycloidal propeller structures. Drawing upon the aforementioned discoveries, optimizing the design parameters of sacrificial anodes can significantly bolster cathodic protection for vital structures, including cycloidal propeller blades and rotating-box housings. Nonetheless, the structural shadowing effects in the gaps between the rotating-box housing and the hull and upper housing lead to inadequate protection. Therefore, it is advisable to implement corrosion-resistant coatings on these structural components during practical engineering applications to alleviate corrosion risks.

KEY WORDS: cycloidal propeller; sacrificial anode; cathodic protection; numerical simulation; anti-corrosion; service life

直翼桨垂直于船体安装,通过操控桨叶的纵向螺距和横向螺距,可实现 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围推力大小和方向的快速无级调节,实现对船舶的灵活操纵^[1-5]。直翼桨主要由桨叶操纵装置、动力传动装置和定子装置组成, Voith 公司直翼桨的基本结构如图 1 所示。

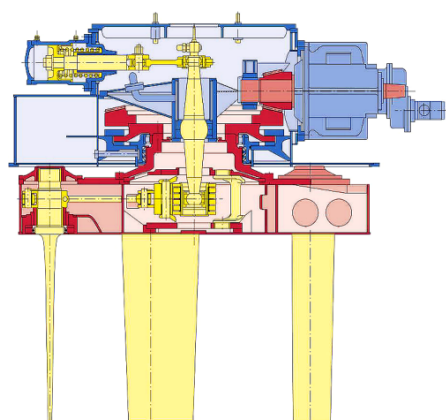


图 1 直翼桨结构
Fig.1 Structure of cycloidal propeller

船用推进器与海水接触,需要采取防海水腐蚀措施^[6-8]。常用的船用推进器(如螺旋桨)通常参照相关标准规范进行防腐设计,如牺牲阳极质量、尺寸、布置等^[9-11]。直翼桨的结构和工作方式与螺旋桨有很大区别,其防腐方式及牺牲阳极的布置和质量目前没有可供参考的规范,需要开展直翼桨牺牲阳极参数对其防腐性能影响的研究。本文针对某直翼桨的结构参数,采用阴极保护仿真设计软件(Beasy),探究牺牲阳极的数量、尺寸和布置对直翼桨阴极保护电位的影响,核算牺牲阳极使用寿命,为直翼桨阴极保护方案设计提供参考^[12-15]。

1 数值仿真模型

1.1 直翼桨模型构建

在 Beasy 软件中对直翼桨接水的部分进行三维

建模^[16-18],主要包括上箱体、旋转箱体、桨叶和桨叶上端盖等构件,其中上箱体仅下表面接触海水,桨叶和旋转箱体外表面全部接触海水。旋转箱体外侧为模拟的船体表面,在旋转箱体与船体间设定了一定的结构间隙,上箱体和端盖在船板内部,船体与直翼桨间绝缘,构建的仿真模型如图 2 所示。为了体现直翼桨在海水中使用的状态,船体计算域为旋转箱体 2 倍直径的圆面,外围计算域选用 4 倍旋转箱体直径作为边长,直翼桨置于中心区域。

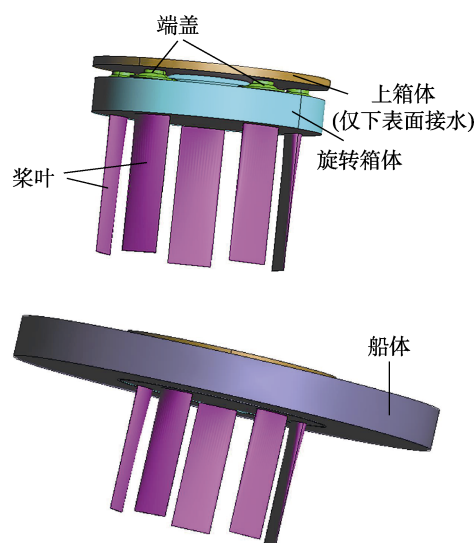


图 2 直翼桨三维仿真模型
Fig.2 3D simulation model of cycloidal propeller

1.2 模型网格划分

采用模型前处理软件 GID 自动生成网格,并通过优化将模型中的三角网格调整为四方网格,同时对网格进行疏密调整,以获得更加平滑连续的仿真结果。数值仿真模型网格优化后的结果如图 3 所示。

1.3 边界条件测取

Beasy 仿真软件的边界条件为所用金属材料在介质中的极化曲线^[19-20]。本模型中直翼桨采用不锈钢材

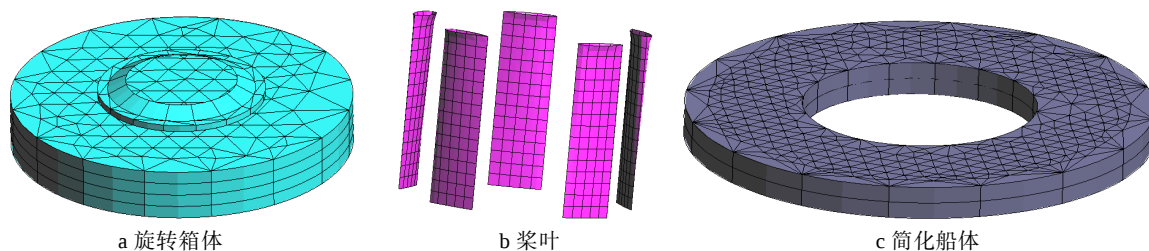


图3 优化后直翼桨的模型网格

Fig.3 Optimized grid of cycloidal propeller model: a) rotating box; b) blade; c) simplified hull

料,拟选用 Al-Zn-In-Mg-Ti 高效铝合金牺牲阳极^[21]。采用 2273 电化学综合测试系统进行动电位极化测试,测量了不锈钢材料和 Al-Zn-In-Mg-Ti 阳极在海水电解质中的极化曲线,如图 4 所示。测试体系为三电极体系,其中辅助阳极为铂铌丝,参比电极为饱和 KCl 甘汞电极 (Saturated Calomel Electrode, SCE),试验温度为 20 ℃,试验溶液为天然清洁海水,取自青岛市即墨区鳌山湾,盐度约为 3%,pH 值约为 7.6。被测试样在溶液中稳定 2 h 后,阳极极化和阴极极化曲线电位扫描范围从开路电位 (Open Circuit Potential, OCP) 开始分别向正向和负向以 20 mV/min 的速度扫描,电流密度大于 5 mA/cm² 时停止测试。开路电位即试样在溶液中的电位稳定波动在 5 min 内不超过 5 mV 时,视为达到电位平衡状态。

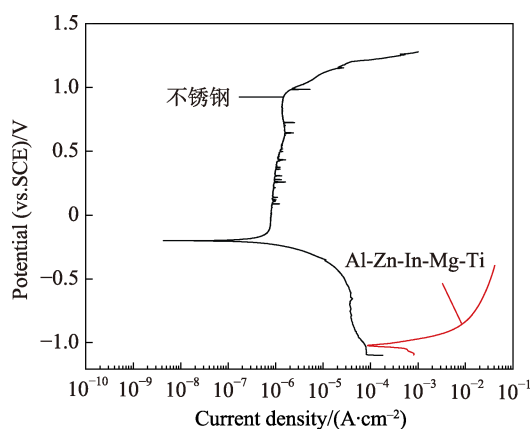


图4 不锈钢和牺牲阳极在海水中的极化曲线

Fig.4 Polarization curve of stainless steel and sacrificial anode in seawater

2 阴极保护仿真计算

为了减小牺牲阳极的流体阻力,提高电流效率,设计采用水滴型高效铝合金牺牲阳极对直翼桨进行阴极保护。参考船用牺牲阳极阴极保护设计标准^[22]进行初步估算,直翼桨所需总保护电流约为 9 A,选用尺寸为 $0.14D \times 0.08D \times 0.02D$ (D 为直翼桨直径) 的牺牲阳极时,最少设计数量为 10 块。考虑直翼桨复杂结构对保护电流的几何屏蔽作用,采用控制变量法,分别探究牺牲阳极数量、尺寸和布置对阴极保护电位的影响。

2.1 牺牲阳极数量对阴极保护电位的影响

根据直翼桨的保护电流需求和几何结构,对牺牲阳极的数量进行调整,考虑可安装阳极的位置,分别在旋转箱体下表面桨叶叶片间隔的区域,布置 10、15、20 块尺寸为 $0.14D \times 0.08D \times 0.02D$ 的牺牲阳极。对于过多数量的阳极,考虑空间所限布置了 2 层,如图 5 所示。

利用 Beasy 软件计算了高效铝合金牺牲阳极在 3 种不同阳极数量下的阴极保护电位分布,电位云图如图 6 所示。由图 6 可见,随着布置的阳极数量增加,桨叶的保护电位逐步降低,桨叶根部电位更负,延伸到远端电位逐渐提高。3 种不同阳极的桨叶电位均负于 -600 mV (vs. Ag/AgCl 海水,下同) (见表 1),可以起到有效保护作用;旋转箱体侧面电位基本负于 -600 mV;箱体上表面、端盖等位置电位相对较正,显然由于直翼桨与船体结构以及上下箱体的间隙较

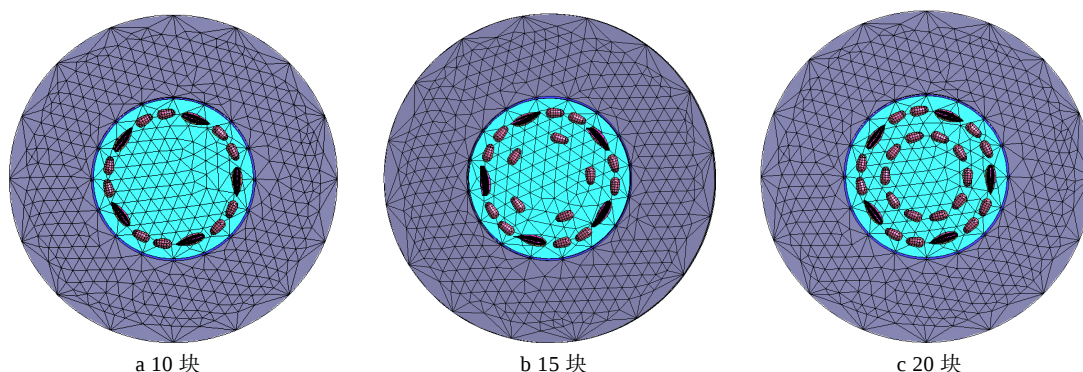


图5 不同数量的牺牲阳极布置

Fig.5 Arrangement of different sacrificial anode quantity: a) 10 anodes; b) 15 anodes; c) 20 anodes

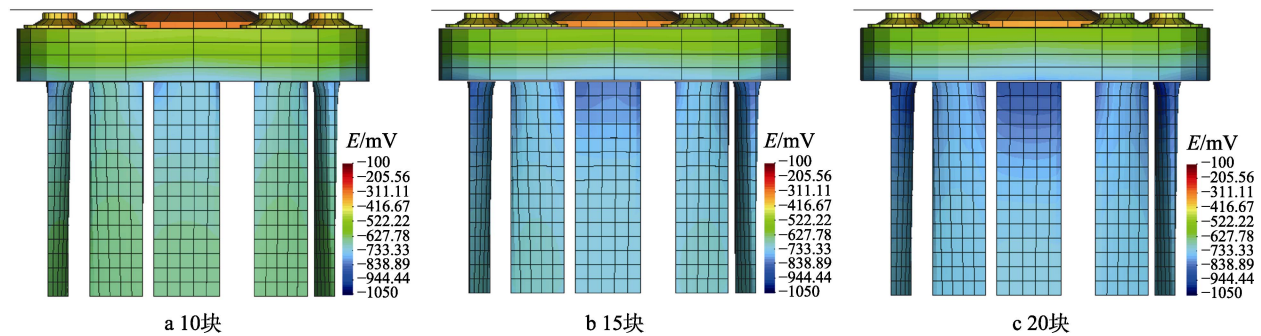


图 6 不同牺牲阳极数量的直翼桨模型电位分布
Fig.6 Potential distribution of cycloidal propeller with different anode quantity: a) 10 anodes; b) 15 anodes; c) 20 anodes

表 1 不同阳极数量的直翼桨各部位阴极保护电位
Tab.1 Potential distribution of cycloidal propeller with different anode quantity

阳极数量/块	端盖电位/mV	上箱体电位/mV	旋转箱体电位/mV	桨叶电位/mV
10	-312~-502	-238~-495	-218~-970	-637~-805
15	-334~-541	-249~-532	-225~-985	-701~-855
20	-344~-558	-255~-549	-230~-991	-729~-887

小, 导致结构遮挡效应较为突出。总体上看, 与阳极数量为 10 相比, 阳极数量为 15 时整体电位负移 7~15 mV, 阳极数量为 20 时整体电位负移 12~21 mV, 阳极数量增加, 保护电位趋负。

根据法拉第第一定律, 可以计算得到不同规格尺寸牺牲阳极的使用寿命^[23], 即式 (1)。

$$W=Z\cdot I\cdot t$$

(1)

式中: W 为被消耗的牺牲阳极质量, kg; Z 为电化学当量, 高效铝阳极取 0.335 8 g/(Ah); I 为发生电流, A; t 为消耗时间, h。

通过式(1)计算可得, 尺寸为 $0.14D\times0.08D\times0.02D$ 的高效铝合金牺牲阳极的净质量约为 3.7 kg, 仿真计算可得 10、15、20 块牺牲阳极发出的总电流分别为 8.86、9.56、9.80 A。经计算, 牺牲阳极在理想工况条件下的使用寿命分别为 1.14、1.58、2.05 a。

不锈钢的 PREN 小于 40%, 最正阴极保护电位一般为 -0.60 V, 最负阴极保护电位没有限制^[24]。从仿真结果看, 当牺牲阳极数量为 10 块时, 桨叶已达到阴极保护电位, 随着阳极数量增加, 阴极保护电位继续负移, 同时牺牲阳极总质量必然随之增加。

2.2 牺牲阳极尺寸对阴极保护电位的影响

在固定 10 块阳极的基础上, 调整阳极尺寸, 旨在进一步改善保护效果, 提升使用寿命。选取了 3 种尺寸的水滴形阳极, 分别为 $0.14D\times0.08D\times0.02D$ 、 $0.15D\times0.1D\times0.03D$ 和 $0.18D\times0.11D\times0.04D$ 。阳极布置如图 7 所示。

利用 Beasy 软件计算了 3 种尺寸的铝合金牺牲阳极对直翼桨的保护效果, 电位分布云图如图 8 所示。各规格阳极下阴极保护电位趋势相似 (见表 2), 端

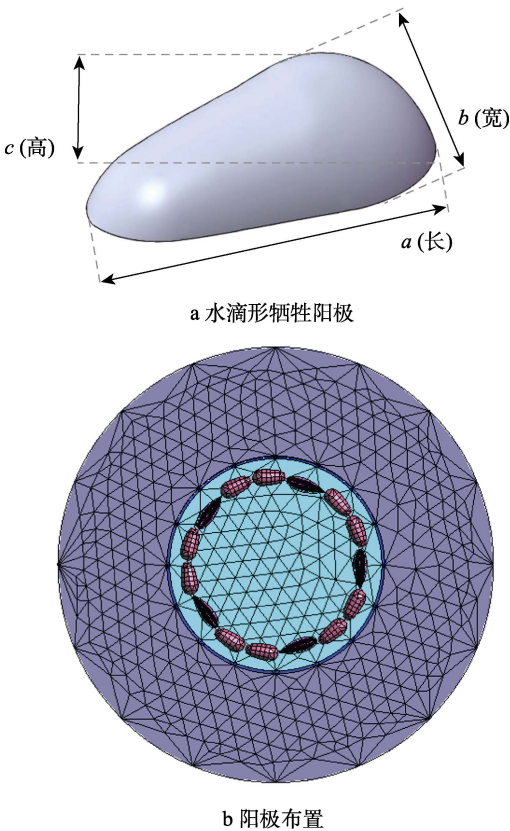


图 7 水滴形阳极及其布置
Fig.7 Droplet shaped anode and its arrangement:
a) drop-shaped sacrificial anode; b) anode arrangement

盖和上箱体电位正于 -600 mV, 旋转箱体存在电位正于 -600 mV 的区域, 因此有部分区域未达到完全保护, 分析原因是由阴极保护电流的结构遮挡效应所致。桨叶阴极保护电位均负于 -600 mV, 处于良好的阴极保护状态。

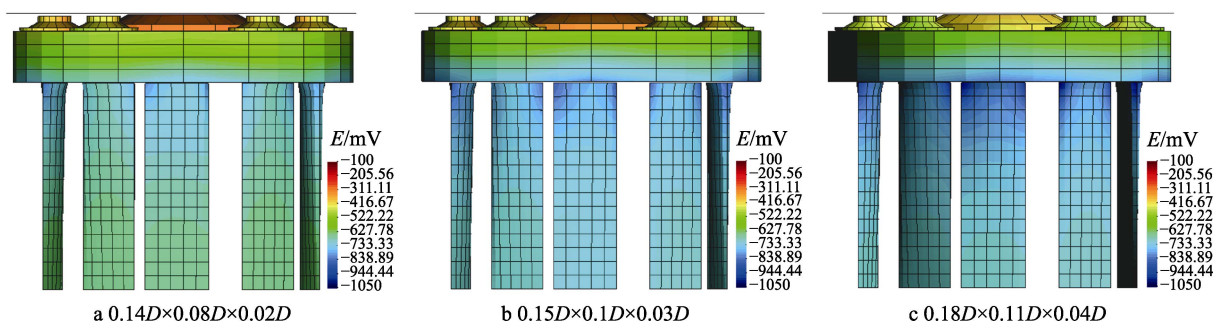


图 8 不同阳极尺寸的直翼桨模型电位分布

Fig.8 Potential distribution of cycloidal propeller with different anode dimensions

表 2 不同阳极尺寸的直翼桨各部位阴极保护电位

Table 2 Potential distribution of cycloidal propeller with different anode dimensions

阳极尺寸	端盖	上箱体	旋转箱体	桨叶
0.14D×0.08D×0.02D	-312~-502	-238~-495	-218~-970	-637~-805
0.15D×0.1D×0.03D	-332~-543	-249~-534	-227~-985	-691~-858
0.18D×0.11D×0.04D	-356~-585	-261~-578	-234~-1009	-764~-963

mV

与 $0.14D \times 0.08D \times 0.02D$ 相比, $0.15D \times 0.1D \times 0.03D$ 阳极整体电位负移 9~15 mV, $0.18D \times 0.11D \times 0.04D$ 阳极整体电位负移 16~39 mV。随着牺牲阳极尺寸增加, 直翼桨整体阴极保护电位逐渐朝负向移动, 综合防护能力更好。因此, 选用大规格的牺牲阳极在保护桨叶核心部件的同时, 也能进一步改善对其他部位的防护能力。

对牺牲阳极使用寿命进行校核, 尺寸 $0.15D \times 0.1D \times 0.03D$ 和 $0.18D \times 0.11D \times 0.04D$ 铝合金牺牲阳极的净质量分别约为 7.0、9.35 kg, 仿真计算可得各阳极发出的总电流分别为 9.33、10.13 A。经计算, 牺牲阳极在理想工况条件下的使用寿命分别为 2.05、2.51 a。

当牺牲阳极数量不变时, 提高阳极尺寸到 $0.18D \times 0.11D \times 0.04D$, 可进一步提升牺牲阳极对直翼桨的保护能力, 显著延长了阳极使用寿命。

2.3 牺牲阳极布置对阴极保护电位的影响

以 10 块 $0.18D \times 0.11D \times 0.04D$ 的水滴形高效铝合金牺牲阳极为基础, 对阳极布置位置进行调整, 设计了 3 种布置方案: 单层外环即阳极以一层环形布置, 均匀分布于桨叶间隙; 双层并排即阳极两层环形布置, 内外层各 5 块均匀分布于桨叶间隙; 双层交叉即阳极两层环形布置, 外层 5 块均匀分布于桨叶间隙, 内层 5 块与外层阳极交叉分布, 如图 9 所示。

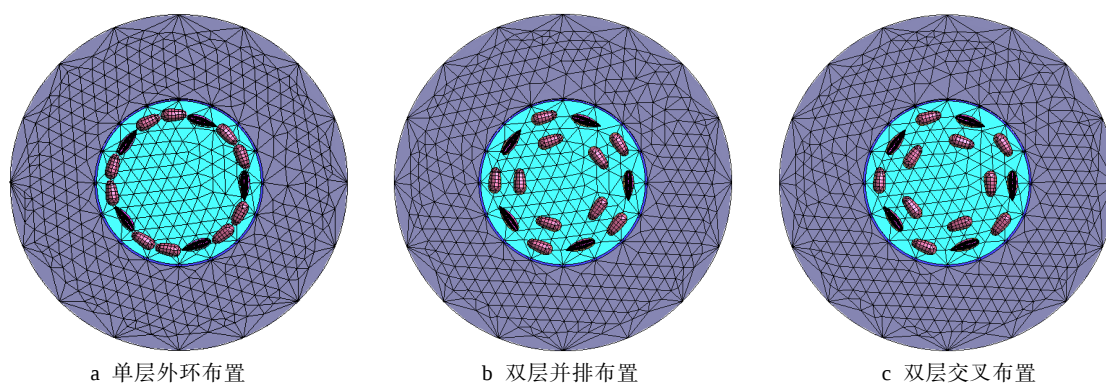


图 9 不同布置形式的牺牲阳极

Figure 9 Sacrificial anodes with different arrangement: a) single ring type; b) double ring parallel type; c) double ring intersect type

模拟获得了 3 种不同布置下的直翼桨典型部位电位分布, 如图 10 所示, 数据结果见表 3。仿真结果显示, 3 种牺牲阳极布置方案的直翼桨桨叶阴极保护电位区间相差不大, 双层并排方案下桨叶的电位梯度最小 (122 mV), 说明结构电位分布更加均匀。端盖、上箱

体和旋转箱体上表面部分区域阴极保护电位较正, 这与结构遮挡有关。单层外环对于旋转箱体则提供了更多的保护电流输出。仿真计算了不同布置牺牲阳极的使用寿命分别为 2.51、2.70、2.66 a。双层的方案阳极的消耗速率也相应下降, 提高了牺牲阳极使用寿命。

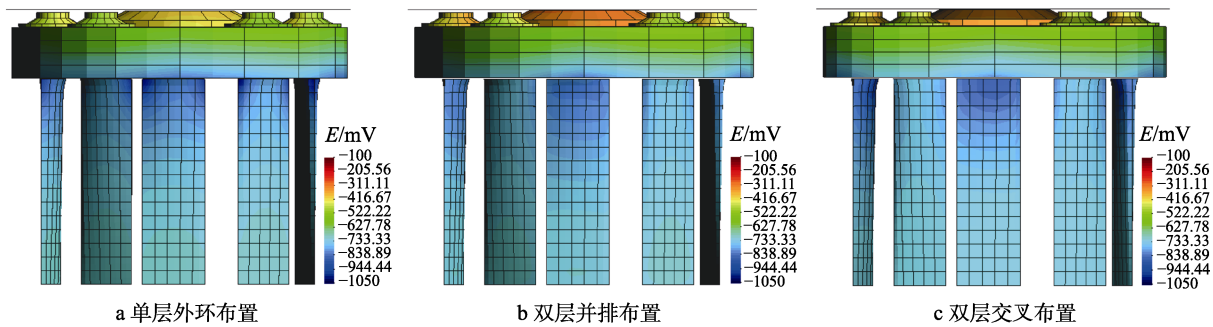


图 10 不同布置方式的直翼桨模型电位分布
Fig.10 Potential distribution of cycloidal propeller with different anode arrangements: a) single ring type; b) double ring parallel type; c) double ring intersect type

表 3 不同阳极布置下直翼桨各部位阴极保护电位
Tab.3 Potential distribution of cycloidal propeller with different anode arrangements

布置方案	mV			
	端盖	上箱体	旋转箱体	桨叶
单层外环	-418~-556	-384~-554	-358~-981	-698~-936
双层并排	-334~-536	-250~-533	-226~-991	-702~-824
双层交叉	-338~-541	-252~-537	-229~-986	-709~-871

3 结论

本文采用数值仿真的方法, 利用 Beay 软件对直翼桨接水结构牺牲阳极阴极保护进行了模拟研究, 讨论了阳极的数量、尺寸和布置位置对阴极保护效果的影响, 测算了牺牲阳极使用寿命, 得出如下结论:

1) 采用 Al-Zn-In-Mg-Ti 铝合金牺牲阳极可以实现对直翼桨不锈钢桨叶和旋转箱体的完全阴极保护, 旋转箱体与船体和上箱体的间隙由于结构遮挡效应保护不足。

2) 牺牲阳极数量增多和阳极尺寸变大都会提高对直翼桨结构的阴极保护能力, 并延长牺牲阳极使用寿命。通过调整阳极位置也会影响桨叶电位梯度, 改变结构的保护电位分布。

3) 采用 10 块 $0.18D \times 0.11D \times 0.04D$ 的水滴形高效铝合金牺牲阳极在桨叶间单层布置, 即可实现对直翼桨结构 2.5 a 以上的保护寿命。

直翼桨实际工程设计应用中, 桨叶本身基本为裸材状态。桨叶高速运转, 流态极为复杂, 腐蚀环境苛刻, 因此牺牲阳极的主要保护对象即是桨叶。本研究中采用的国标 Al-Zn-In-Mg-Ti 高效铝合金牺牲阳极, 在海洋环境下得到了广泛应用, 对于船体钢、不锈钢等材料和结构均能起到较好的保护作用^[25]。在本项研究中, 桨叶电位均负于 -637 mV, 满足该材料的最正阴极保护电位要求, 可为桨叶提供足够的保护。端盖、箱体和配合的船体等部位由于处于转动箱体与船体组成的间隙内部, 阴极保护电流的结构遮挡效应明显, 电位也有所降低。为了确保后续使用效果, 可以考虑在这些结构部位表面涂装防腐涂料, 进一步降低腐蚀风险^[26-29]。

参考文献:

[1] 黄佳林, 陈昌运. 船用直翼推进器研究[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2007, 30(2): 88-95.
HUANG J L, CHEN C Y. Research on Marine Cycloidal Propeller[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2007, 30(2): 88-95.

[2] 史俊武, 刘爱兵, 丁晨, 等. 直翼推进器水动力性能数值模拟[J]. 船舶工程, 2019, 41(8): 37-41.
SHI J W, LIU A B, DING C, et al. Numerical Simulation of Hydrodynamic Performance for Cycloidal Propellers[J]. Ship Engineering, 2019, 41(8): 37-41.

[3] BAKHTIARI M, GHASSEMI H. A 2.5D Numerical Study on Open Water Hydrodynamic Performance of a Voith-Schneider Propeller[J]. Mechanics & Industry, 2019, 20(6): 617.

[4] LIU Z H, SUN Z, ZHANG G Y, et al. Study on Thrust Directional Steadiness of Cycloidal Propeller[J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115840.

[5] NANDY S, NAGARAJAN V, SHA O P. Model Experiments with Different Cycloidal Propeller Algorithms Using Same Electric Controller[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2022, 236(2): 436-461.

[6] 顾彩香, 吉桂军, 朱冠军, 等. 船舶的腐蚀与防腐措施[J]. 船舶工程, 2010, 32(3): 1-4.
GU C X, JI G J, ZHU G J, et al. Ship Corrosion and Anti-Corrosion Measures[J]. Ship Engineering, 2010, 32(3): 1-4.

[7] ALTOSOLE M, DONNARUMMA S, SPAGNOLO V, et al. Performance Simulation of Marine Cycloidal Propellers: A both Theoretical and Heuristic Approach[J]. Jour-

- nal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(4): 505.
- [8] 李科, 翟晓凡, 管方, 等. 船用螺旋桨防护技术及其材料研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(6): 495-503.
- LI K, ZHAI X F, GUAN F, et al. Progress on Materials and Protection Technologies for Marine Propeller[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(6): 495-503.
- [9] 董国赞. 某轮艏部牺牲阳极保护阴极的设计探讨[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2016, 15(1): 36-38.
- DONG G (B /Y). Discussion on the Anodic Sacrifice Protection Design of Ship Stern[J]. Journal of Guangdong Communication Polytechnic, 2016, 15(1): 36-38.
- [10] BELLEZZE T, FRATESI R, ROVENTI G. Field Tests on the Cathodic Protection of a Ship Propeller System[J]. Metallurgia Italiana, 2013(6): 31-36.
- [11] KONG Y, HU S. Effect of Sacrificial Anode Arrangement on Unsteady Hydrodynamic Force of Bow Thruster[J]. Ship Engineering, 2021, 43(6): 66-70.
- [12] 张宇, 刘亚鹏, 李相波, 等. 冷凝器阴极保护效果评估与仿真预测研究[J]. 材料保护, 2021, 54(4): 27-31.
- ZHANG Y, LIU Y P, LI X B, et al. Research on the Simulation Prediction and Evaluation of the Cathodic Protection Effect of Condensers[J]. Materials Protection, 2021, 54(4): 27-31.
- [13] 赵雷亮. 阳极布置方式对阴极保护效果的影响[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
- ZHAO L L. The Effect of Anode Arrangement on the Cathodic Protection[D]. Qingdao: China University of Petroleum (EastChina), 2013.
- [14] 许立坤, 马力, 邢少华, 等. 海洋工程阴极保护技术发展评述[J]. 中国材料进展, 2014, 33(2): 106-113.
- XU L K, MA L, XING S H, et al. Review on Cathodic Protection for Marine Structures[J]. Materials China, 2014, 33(2): 106-113.
- [15] KIM K, CHANG H S. A Study on Corrosion Protection with Sacrificial Anode System for a Submarine[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2022, 23(7): 527-532.
- [16] 侯志强, 邢少华. 压载水舱阴极保护设计与保护效果评价[J]. 材料保护, 2008, 41(6): 67-68.
- HOU Z Q, XING S H. Design of Cathodic Protection and Evaluation of Protection Efficacy for Ballast Tank[J]. Materials Protection, 2008, 41(6): 67-68.
- [17] 蒋卡克, 杜艳霞, 路民旭, 等. 阴极保护数值模拟计算中阳极边界条件选取研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(4): 287-292.
- JIANG (K /Q)K, DU Y X, LU M X, et al. Selection of Boundary Conditions of Anodes in Numerical Simulation of Cathodic Protection System[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(4): 287-292.
- [18] GONÇALVES D J S, CAMPILHO R D S G, DA SILVA L F M, et al. The Use of the Boundary Element Method in the Analysis of Single Lap Joints[J]. The Journal of Adhesion, 2014, 90(1): 50-64.
- [19] 何芳, 王向军, 王晓蓓. 潜艇螺旋桨区域腐蚀电场模型特征及奇异峰成因分析[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(3): 198-203.
- HE F, WANG X J, WANG X B. Characteristics of Corrosion Electric Field Model and Analysis of Genesis of Singular Peaks in Submarine Propeller Area[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(3): 198-203.
- [20] 王振华, 白杨, 马晓, 等. 钛合金和铜合金管路电偶腐蚀数值仿真[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(4): 403-408.
- WANG Z H, BAI Y, MA X, et al. Numerical Simulation of Galvanic Corrosion for Couple of Ti-Alloy with Cu-Alloy in Seawaters[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2018, 38(4): 403-408.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 铝-锌-钢系合金牺牲阳极: GB/T 4948—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Sacrificial Anode of Al-Zn-In Series Alloy: GB/T 4948—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [22] 中华人民共和国工业和信息化部. 海船牺牲阳极阴极保护设计和安装: CB/T 3855—2013[S]. 北京: 中国船舶工业综合经济技术研究院, 2013.
- Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. Design and Installation of Sacrificial Anode Cathodic Protection for Ships: CB/T 3855—2013[S]. Beijing: China Institute of Marine Technology & Economy, 2013.
- [23] 刘昊天, 王金光, 张晓勇, 等. 牺牲阳极的性能监测及寿命预测技术研究[J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(1): 24-27, 125.
- LIU H T, WANG J G, ZHANG X Y, et al. Study on Performance Monitoring and Life Prediction Technology of Sacrificial Anode[J]. Total Corrosion Control, 2023, 37(1): 24-27, 125.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 海水阴极保护总则: GB/T 31316—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. General Principles of Cathodic Protection in Sea Water: GB/T 31316—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [25] 雷冰, 张华, 胡胜楠, 等. 深海环境用牺牲阳极材料研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(12): 18-23.
- LEI B, ZHANG H, HU S N, et al. Development of Sacrificial Anode under Deep Sea Environment[J]. Total Corrosion Control, 2016, 30(12): 18-23.
- [26] 丛巍巍, 桂泰江, 张凯, 等. 船舶螺旋桨表面防护涂层性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 367-371.
- CONG W W, GUI T J, ZHANG K, et al. Property Study

- of Marine Propeller Coating for Ship[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 367-371.
- [27] DAVIES J, TRUONG-BA H, CHOLETTE M E, et al. Optimal Inspections and Maintenance Planning for Anti-Corrosion Coating Failure on Ships Using Non-Homogeneous Poisson Processes[J]. Ocean Engineering, 2021, 238: 109695.
- [28] 徐滨士. 舰船装备再制造防腐蚀技术研究及应用[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 405-413.
- XU B S. Research and Application of Anti-Corrosion Remanufacture on Ship Equipment[J]. Materials China, 2014, 33(7): 405-413.
- [29] LI S M, JIA Y C, CHEN Z Y, et al. Longitudinal Vibration Analysis and Active Disturbance Rejection Decoupling Control of Marine Anticorrosive Coatings Hybrid Propulsion Screw[J]. Ocean Engineering, 2024, 292: 116548.