

压载舱阴极保护系统性能仿真及优化

邢少华, 彭衍磊, 张繁, 许立坤

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护国防科技重点实验室, 山东 青岛 266101)

摘要: 针对压载舱结构复杂、电流屏蔽现象严重导致牺牲阳极数量和位置精确设计困难, 以及目前基于经验法设计的牺牲阳极保护系统常导致局部欠保护或过保护的问题, 开展了基于边界元法的压载舱保护电位仿真和优化研究。研究表明, 建立的压载舱牺牲阳极保护边界元模型可准确模拟压载舱保护电位分布, 优化后的牺牲阳极保护系统保护电位分布更均匀, 船舶服役 5 a 后, 由于牺牲阳极消耗和涂层破损, 压载舱保护电位正移, 但仍低于 -800 mV, 对压载舱起到良好的保护作用。

关键词: 压载舱; 牺牲阳极; 边界元

中图分类号: TG174.41 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)01-0005-05

Numerical Simulation and Optimization of Ballast Tank's Cathodic Protection System

XING Shao-hua, PENG Yan-lei, ZHANG Fan, XU Li-kun

(State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266071, China)

Abstract: The sacrificial anode protection system designed by experience easily leads to under-protect or over-protect because of the complexity and current shield effect of ballast tank. So, improper design of sacrificial anode number and position is one of the main causes of the ballast tank corrosion problem. In order to solve this problem, the potential distribution and optimization study was carried out based on boundary element method (BEM). The results showed that the numerical ballast tank model established by BEM can accurately simulate the protection potential distribution. The optimized sacrificial anode system can supply more effective and uniform protection to ballast tank, furthermore, although the potential changed bigger due to the sacrificial anodes dissolving and coating scrap and degrading, it was still under -800 mV after five years, that is to say the ballast tank was well protected.

Key words: ballast tank; sacrificial anode; boundary element method

船舶压载舱处于海水干湿交变的严酷腐蚀环境中, 常采用涂层加牺牲阳极保护联合防护手段加以控制, 但腐蚀问题仍然非常严重, 是船舶腐蚀的重灾区。导致压载舱腐蚀问题突出的原因有: 牺牲阳极保

收稿日期: 2010-07-18

作者简介: 邢少华(1981—), 男, 山东威海人, 硕士, 主要研究方向为腐蚀与防护。

护系统设计不合理,干湿交变环境下牺牲阳极结壳导致性能下降,涂层破损维护困难。其中牺牲阳极保护系统设计不合理是主要原因。目前,我国船舶压载舱牺牲阳极保护普遍采用经验法设计,但压载舱结构复杂,肋骨、加强筋多,阴极保护电流屏蔽现象严重^[1],通过经验公式无法获得牺牲阳极最佳安装数量和安装位置,采用经验法设计的牺牲阳极系统的保护电位分布往往不均匀,易导致欠保护或过保护,且保护效果不可预测。

近几十年,随着数学计算方法和计算机技术的飞速发展,数值仿真技术在阴极保护电位、电流场计算领域得到广泛应用,包括有限差分法、有限元法和边界元法等^[2-3],成为船舶压载舱等复杂结构阴极保护设计最优化的有效手段之一。与传统的经验设计方法相比,数值模拟优化设计具有在设计阶段就可预测所设计的牺牲阳极系统保护效果、牺牲阳极数量和位置更精确、阴极保护电位分布均匀,无过保护和欠保护现象发生等优点。因此,开展压载舱的数值模拟优化设计研究对提高压载舱阴极保护设计水平和保护效果具有重要意义。

1 牺牲阳极保护及边界元法仿真的基本原理

1.1 牺牲阳极保护原理

铝合金材料在海水中的腐蚀电位要明显负于压载舱的腐蚀电位,当二者电连接后,由于电位差的存在,电流由铝合金材料即牺牲阳极流向压载舱,压载舱由于电流流入而受到保护。当流入的电荷量足以使其阴极极化至铁在海水中的平衡电极电位后,即-0.80 V(相对于Ag/AgCl电极),压载舱腐蚀被完全抑制。为避免电位过负导致船体发生氢脆或导致涂层阴极剥离等不利影响发生,一般要求最负阴极保护电位不超过-1 000 mV,即-800 ~ -1 000 mV为合理的阴极保护区间。

1.2 边界元法仿真原理

在海水电解质区域内,由欧姆定律可知,船体阴极保护系统产生的电场中的电位和电流密度满足式(1):

$$J = -\gamma \nabla V \tag{1}$$

式中: J 为电流密度; V 为电位; γ 为海水的电导率。由式(1)可知,任意时刻微小立方体积分元($dx \times dy \times dz$)中电荷量的变化量为:

$$Q = \gamma \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) dx dy dz \tag{2}$$

当阴极保护系统产生的电场达到平衡状态时,微小体积元中的电荷量处于恒定状态,即 $Q=0$,则:

$$\gamma \nabla^2 V = 0 \tag{3}$$

由此可知,阴极保护过程的控制方程为拉普拉斯方程。据文献[4],由格林公式得与式(3)对应的边界积分方程(其中 Γ 为域 Ω 的边界):

$$c(\xi)E(\xi) + \int_{\Gamma} E(x)J^*(\xi, x) d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} J(x)E^*(\xi, x) d\Gamma(x) \tag{4}$$

式中: $c(\xi)$ 为系数,只依赖于物理模型中边界的几何形状; $E^*(\xi, x)$ 和 $J^*(\xi, x)$ 为拉普拉斯方程电位和电流密度基本解。对于三维问题:

$$E^*(\xi, x) = \frac{1}{4\pi\gamma r}, J^*(\xi, x) = \gamma \frac{\partial E^*}{\partial n} \tag{5}$$

将边界 Γ 划分为 n 个单元后,式(4)可表示为:

$$c_i E_i + \sum_{j=1}^n E_j + \int_{\Gamma_j} J^* d\Gamma_j = \sum_{j=1}^n J_j + \int_{\Gamma_j} E^* d\Gamma_j \tag{6}$$

$$\text{定义: } \hat{H}_{ij} = \int_{\Gamma_j} J^* d\Gamma_j, \hat{G}_{ij} = \int_{\Gamma_j} E^* d\Gamma_j,$$

$$H_{ij} = \hat{H}_{ij} + c_i \delta_{ij}$$

式中: δ_{ij} 为克罗内克函数。由式(6)可得:

$$\sum_{j=1}^n H_{ij} E_j = \sum_{j=1}^n G_{ij} J_j \tag{7}$$

通过求解式(7)即可获得研究对象表面电位和电流密度分布。

文中研究的压载舱主要存在以下2种边界条件。

1) 压载舱表面。压载舱表面涂装环氧防腐涂层体系,涂层厚度约为320 μm ,压载舱表面电位和流入电荷量之间的关系满足带涂层压载舱材料的阴极极化曲线:

$$J = f_c(V) \tag{8}$$

2) 牺牲阳极表面。牺牲阳极表面电位和流出电荷量之间的关系满足Al-Zn-In系牺牲阳极的阳极极

化曲线:

$$J=f_a(V) \tag{9}$$

2 应用实例

以某型船舶压载舱为研究对象,采用涂层联合牺牲阳极方式对其施加保护,牺牲阳极保护系统由8支200 mm × 80 mm × 70 mm和1支400 mm × 200 mm × 80 mm的Al-Zn-In系牺牲阳极构成。3 a后,经实船考察,2种牺牲阳极分别消耗至200 mm × 80 mm × 50 mm和400 mm × 200 mm × 60 mm,涂层破损面积约占总面积的1%;根据NSTM手册第633章推算,5 a后2种类型牺牲阳极分别消耗至200 mm × 80 mm × 37 mm和400 mm × 200 mm × 47 mm,根据DNV RP B401推算,涂层破损面积约占总面积的4%。

2.1 数值仿真建模

2.1.1 计算机模型的建立

压载舱阴极保护电位分布仿真和优化属于有限域问题,对于壳体属于内域问题,对于加强筋和肋骨属于外域问题。采用边界元法对压载舱表面进行单元划分,整个压载舱表面共划分为10 435个四边形网格单元,其计算机仿真模型如图1所示。



图1 压载舱边界元模型

Fig. 1 The BEM model of ballast tank

2.1.2 边界条件

1) 计算介质为海水,电导率为4 S/m,海水温度为25 ℃。

2) 压载舱边界。压载舱由2种材料构成:外层壳体、肋骨和加强筋材料为A钢;内层壳体材料为B钢。服役初期涂层处于完好状态,压载舱表面电位与所需保护电流关系如图2a所示;服役3 a后,由于钢表

面涂层发生1%破损,压载舱表面电位与所需保护电流关系如图2b所示;服役5 a后涂层破损4%,压载舱表面电位与所需保护电流如图2c所示。

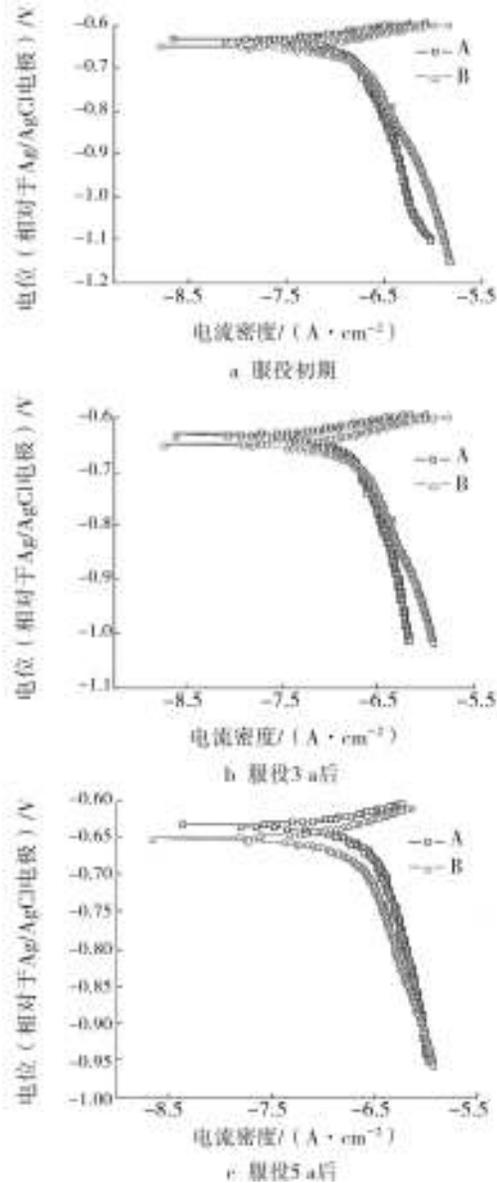


图2 压载舱边界条件

Fig. 2 Boundary conditions of ballast tank

3) 牺牲阳极边界。牺牲阳极材料为Al-Zn-In-Mg-Ti,服役初期其输出电流与表面电位之间的关系如图3a所示。干湿交变6个周期以后,由于牺牲阳极溶解产生的Al³⁺与海水中的OH⁻作用生成的Al(OH)₃絮状沉淀物在牺牲阳极表面附着,牺牲阳极的工作电位显著正移并逐渐趋于稳定。通过实验室模拟试验,以如图3b所示的极化曲线作为牺牲阳极服役3 a和5 a的边界条件。

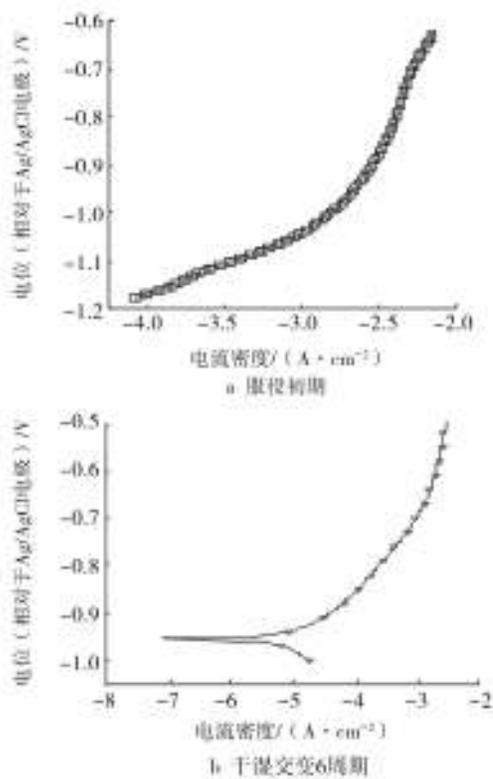


图3 牺牲阳极边界条件

Fig. 3 Boundary conditions of sacrificial anode

2.2 数值仿真结果与讨论

2.2.1 经验法设计阴极保护系统保护效果仿真

经验法设计牺牲阳极保护系统如图4所示,3号和4号肋骨间、6号和7号肋骨间、9号和10号肋骨间分别安装3块、2块、3块尺寸为200 mm × 80 mm × 70 mm的Al-Zn-In系牺牲阳极,10号和11号肋骨间的排水孔附近安装1块尺寸为400 mm × 200 mm × 80 mm的

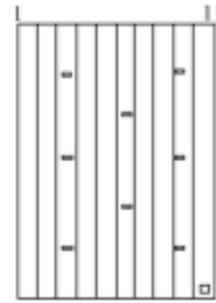


图4 压载舱牺牲阳极实船安装示意

Fig. 4 Schematic diagram of sacrificial anode installation position

牺牲阳极。

服役初期、服役3 a后和5 a后,经验法设计的牺牲阳极保护系统对压载舱的保护效果如图5所示。船舶服役初期,由于涂层良好的保护作用以及牺牲阳极无消耗且没有结壳,可发出较大阴极保护电流,牺牲保护系统可以对压载舱起到较好的保护作用,电位处于-902 ~ -975 mV(相对于Ag/AgCl参比电极,下同)之间合理的保护范围之内,既能对压载舱起到良好的保护作用,又不会产生氢脆的危险,但压载舱顶部的电位明显正于其它部位的保护电位,电位梯度相对较大。牺牲阳极保护系统工作3 a后,由于涂层破损、阳极消耗和结壳导致驱动电位减小等多种因素影响,压载舱的保护电位显著正移,如图5b所示,保护电位在-802 ~ -860 mV之间,虽然牺牲阳极仍能对压载舱起到保护作用,但已接近阴极保护要求上限。当服役期超过5 a时,随着涂层破损和牺牲阳极消耗的进一步加剧,压载舱保护电位基本处于-800 mV以上,牺牲阳极保护系统已无法提供良好的保护作用。

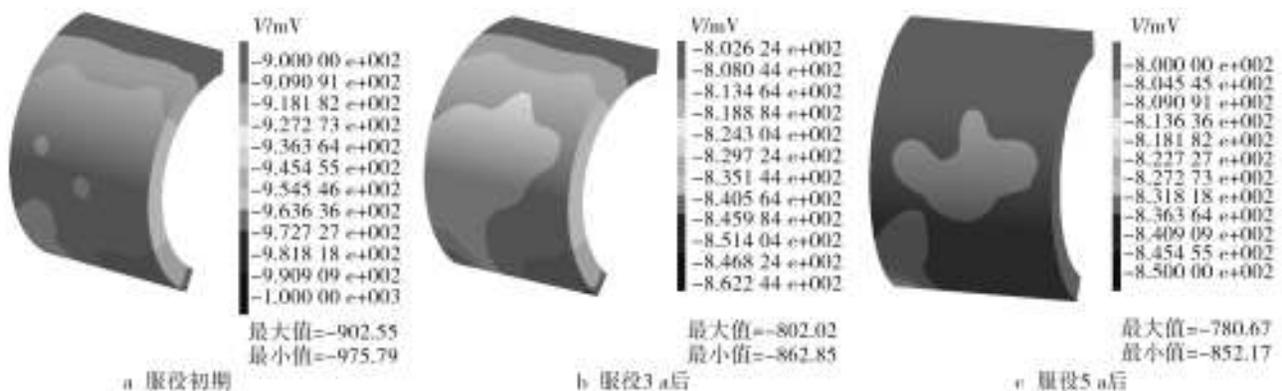


图5 经验法设计牺牲阳极保护系统不同时期对压载舱保护效果

Fig. 5 Potential distribution of ballast tank protected by experientially designed sacrificial anode system at different periods

2.2.2 牺牲阳极保护系统优化

由仿真结果可知,船舶服役5 a后,经验法设计的牺牲阳极保护系统已无法对压载舱起到良好的保护作用。为此,笔者开展了牺牲阳极保护系统优化研究。将3号和4号肋骨间、9号和10号肋骨间两侧阳极各往中间移动50 cm,6号和7号肋骨间2支阳极分别往两侧移动50 cm,并在3号和4号肋骨间顶部和底部各增加1块牺牲阳极,在9号和10号肋骨间顶部增加1块牺牲阳极,如图6所示。其中箭头指向位置为优化后牺牲阳极安装位置,箭头尾部为经验法设计牺牲阳极安装位置。



图6 优化后的压载舱牺牲阳极保护系统

Fig. 6 Schematic diagram of sacrificial anode installation position after optimization

优化后的保护系统初期、服役3 a和5 a后对压载舱保护效果如图7所示。由仿真结果可知,优化后的牺牲阳极保护系统无论是初期,还是服役3,5 a都可

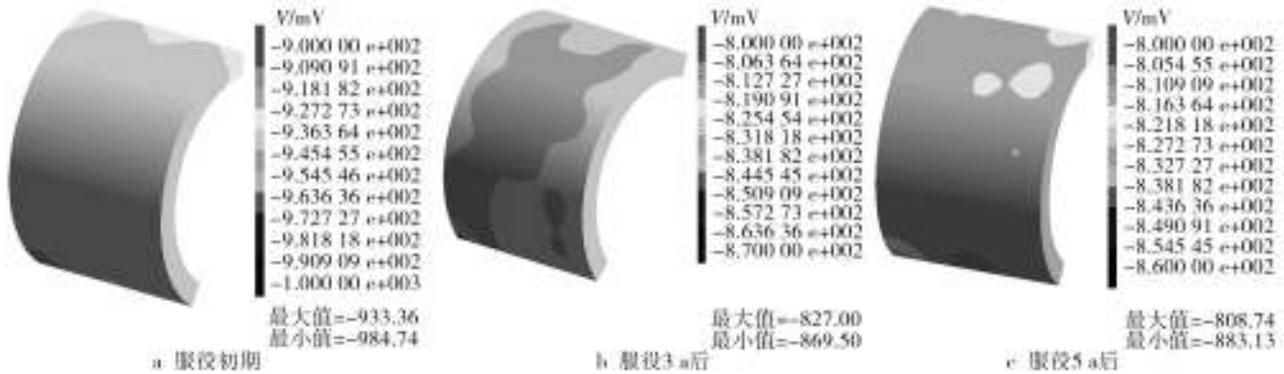


图7 优化后牺牲阳极保护系统不同时期对压载舱保护效果

Fig. 7 Potential distribution of ballast tank by optimized sacrificial anode system at different periods

通过实船测试结果证明了优化结果的可靠性,对比图5和图7可知:优化后的牺牲阳极保护系统的保护效果要明显好于优化前。这对提高该船压载舱的腐蚀防护效果具有重要意义,同时,数值仿真及优化技术还可推广应用于其它船型上。

对压载舱起到良好的保护作用,压载舱保护电位均处于-800~-1 000 mV合理保护范围内,且保护电位分布更均匀。

2.3 数值仿真优化结果可靠性分析及实用性评估

为了验证仿真结果的可靠性,在实船压载舱内部安装了电位检测装置,检测系统共有8个检测探头,探头的安装位置如图8圆点所示位置。当压载舱注入海水后,检测系统可实现八通道的电位自动测量,实船测量结果如图8所示。检测结果与数值仿真结果对比如图9所示。由图9可知,数值仿真结果与实船测量结果有较好的一致性。

由边界元法仿真原理可知,仿真结果的可靠性主要受边界条件准确性、边界元模型合理性的影响。仿真结果与实船测试结果对比表明,仿真结果与实测结果具有较好的一致性。图9证明了文中所建立的压载舱边界元仿真模型和所采用的边界条件是准确可靠的。压载舱牺牲阳极保护系统的优化工作是在保护电位精确模拟的基础上开展的,而仿真和优化过程中所采用的压载舱模型和边界条件是完全相同的,因此,可推断文中所得的优化结果同样具有很高的可靠性。为进一步证明优化结果的可靠性,在所研究的船型上按照文中所得的优化方案重新安装牺牲阳极保护系统,目前该试验还在进行中。

3 结语

通过与实际测量结果对比可知,计算机仿真结果 (下转第14页)

产过程的不确定性造成的产品强度的分布,而且试验考核真正采取抽样方式进行,必然有部分产品通不过最终环境鉴定试验的考核。这种定量描述方法形象地说明了后果,这就提醒人们在进行环境适应性设计时,必须考虑产品强度的分布,而给所设计的产品留有一定的应力裕度^[4]。

5 结语

针对航空电子产品特点并结合实例从数字样机建模、模型检查及准确性验证、数值计算及结果分析3个方面介绍了航空电子产品应力分析技术,以及该技术在环境适应性分析中的应用。基于CFD,FEA技术的产品应力仿真分析方法能够有效地支撑环境

适应性分析,并对产品研制中的热设计和耐振动设计具有较大的指导意义。

参考文献:

[1] MIL-STD-810F,环境工程考虑和实验室试验[S].
 [2] GJB/Z 27-92,电子设备可靠性热设计手册[S].
 [3] 空军装备重点型号部.重点型号可靠性维修性保障性培训教材(下册)[M].北京:国防工业出版社,2009:13—16.
 [4] CHARLES A Harper. High Performance Printed Circuit Boards[M]. New York: McGraw-Hill Company, 1999: 916—926.

(上接第9页)

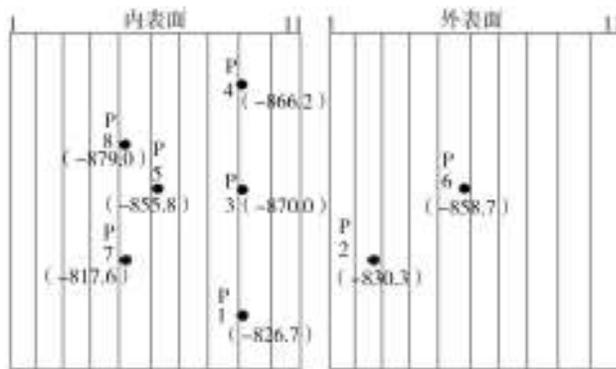


图8 3 a后压载舱保护电位分布实船测量结果

Fig. 8 The measurement results of potential distribution after three years

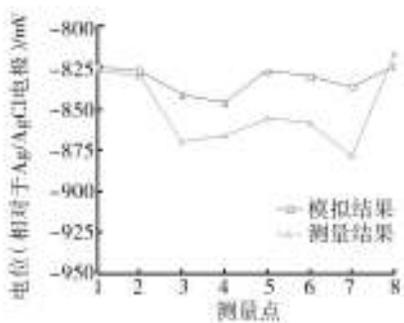


图9 数值仿真结果与实船测量结果对比

Fig. 9 Contrast between simulation and measurement results

果与试验测量结果具有较好的一致性,证明压载舱保护电位仿真和优化结果是准确可靠的。

经验法设计的牺牲阳极保护系统初期能对压载舱起到良好的保护作用,但保护电位梯度大,分布不均匀。船舶服役5 a后,随着涂层的破损和牺牲阳极的消耗和结壳,牺牲阳极保护系统已无法对压载舱起到足够保护作用。

优化后的牺牲阳极保护系统5 a后仍能对压载舱起到良好的保护作用,且电位分布较优化前更均匀。

参考文献:

[1] 李碧英.船舶压载舱阴极保护屏蔽效应研究[D].大连:大连理工大学,2002:6—16.
 [2] SANTANA-DIAZ E, ADEY R. Optimising the Location of Anodes in Cathodic Protection Systems to Smooth Potential Distribution [J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36 (9): 591—598.
 [3] SANTANA-DIAZ E, ADEY R, BAYNH AMJ. Optimising the Location of Anodes in Cathodic Protection Systems[M]. Southampton UK: WIT Press, 2003.
 [4] ADEY R, NIKU SM. A CAD System for the Analysis and Design of Cathodic Protection Systems[C]//Ellis Horwood. Prediction of Materials Performance. Cranfield UK: Cranfield Institute of Technology, 1985: 233—255.