

【制造技术】

基于 LCC 技术的船舶涂料方案^{*}

耿俊豹, 张小海, 张 军

(海军工程大学 船舶与动力学院, 武汉 430033)

摘要:不同的涂料防腐和防污能力不同,对船舶经济性影响也不同。从寿命周期费用(LCC)的角度出发,建立了基于 LCC 技术的防腐费用模型,包括 LCC 计算模型、涂料量计算模型以及涂装面积计算模型等。以某工作船为研究对象,建立了4套可选的涂装方案,运用 LCC 技术分别计算了4种涂装方案的 LCC。从价格、涂料防腐原理、防污效果、综合效益等方面对各方案进行综合比较和权衡,得出最佳涂装方案。

关键词:涂料;寿命周期费用;腐蚀(corrosion);船舶经济性

中图分类号:TQ63

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2010)03-0078-04

船舶腐蚀不仅影响船舶的结构强度,也影响船舶的航速,导致船舶寿命和经济性下降。为了减少船舶腐蚀,一般采用涂装和阴极保护方案。不同的防腐方案,其防腐能力、防污能力以及价格不同,对船舶经济性影响也不同。实际上,船舶腐蚀是个经济问题^[1]。国际上较权威的防腐工程腐蚀经济评价方法是由 NACE T3 技术委员会在其《腐蚀经济》技术报告中提出的内部收益率、预期收益的现值、成本收益比率等方法,美国赫伯特·H·尤立格教授提出了有名“尤立格”计算公式,和腐蚀专家 D. Everin 教授提出适合于腐蚀经济评价的 Verink 通用方程,以及 Uhlig 方法^[2]。我国石油行业参考上述文件及结合我国在税务和折旧上的特点(即不考虑纳税和折旧因素,计算税前的现值和年费用),采用 SY/T0042-2002《防腐蚀工程经济计算方法标准》。国内外在进行腐蚀的费用计算时都选用最小费用法,以费用现值比较法和费用年值法两项指标作为经济比较的准则^[3]。上述方法中,并没有从船舶的全寿命观点出发来选择方案,获得的方案并不一定是船舶全寿命周期费用最小的方案。因此,本文中提出采用寿命周期费用方法来优选防腐方案,以期得到寿命周期费用最小的防腐方案。

1 基于 LCC 技术的防腐方案费用

1.1 防腐方案 LCC 计算模型

防腐方案的 LCC 是指考虑整个涂装工程的使用寿命内直至全部更新为止的所有发生的费用,主要包括初始投资费用、使用费用、后果费用、材料遗留价值、处置费用。可用下面的计算公式表示

$$C_{CLCC} = C_{CI} + C_{COS} + C_{DP} + C_{CM} - C_{RV} \quad (1)$$

式中: C_{CLCC} 为腐蚀寿命周期费用; C_{CI} 为初始费用; C_{COS} 为使用费用,包括预防性维修、事后维修、服务、能源消耗等项费用; C_{DP} 为由于腐蚀而产生的后果费用或减产费用; C_{CM} 为处置费用; C_{RV} 为材料的遗留价值。由于腐蚀报废的材料重新利用的价值。

1) C_{CI} 初始费用

初始费用包括设计费用和建造费用。

设计费用:包括初步设计、详细设计和生产设计,以及对船舶腐蚀进行全面观察和研究,材料选择、表面保护腐蚀监测、特殊材料的测试费用。涂装工程设计是由船舶设计院完成的,所需费用已含入总设计费中,没有单列此项目费用,在单独进行防腐方案时,可以不考虑该费用。

建造费用:包括涂料费用,涂装费用、阴极保护费用。涂装费用包括船体表面处理、保障、船坞、船台费用。阴极保护费用包括阴极保护材料购置、安装、测量费用。完成上述工作的人员工时费用。

2) C_{COS} 使用维护费用

预防性维修费用、事后维修费用、阴极保护费用。对使用阶段发生腐蚀问题的失效分析和研究费用、由于腐蚀导致实施失效进行维修的工时费用、相关的备品备件费用、材料费用以及能源消耗费用。

对于水线及船底涂料,平时无法维护,也不需要维护,特殊情况下船舶上船台修理时,只作检查、视情修理,工作量很少,所以,若仅计算水下线的防腐工程,使用维修费用可不计。

3) C_{DP} 后果费用

由于腐蚀和海生物附着污损造成的阻力增加,航速减少,燃料消耗量增加。

4) C_{CM} 处置费用

* 收稿日期:2010-01-07

作者简介:耿俊豹(1973—),男,博士,副教授,主要从事寿命周期费用、可靠性和维修性研究。

清理船底旧涂料及海生物进行表面处理的费用。

5) C_{RV} 材料的遗留价值

对于船舶防腐层或重复性维修的材料/设备,此项价值为零。

1.2 涂料量计算模型

在防腐方案中,材料费用占用不少比例,而材料费用与涂装量息息相关。涂料量应根据要求的涂装面积、单位面积理论消耗量和工厂施工损耗等因素,按下面公式计算:

$$P = (1 + \alpha)QS \quad (2)$$

式中: P 为涂料实际用量,单位为升; α 为涂料的损耗系数。

涂料的损耗系数与涂装作业方式有较大的关系,同时还与其它许多因素相关,如船舶表面状况,膜厚分布要求,采用涂料品种、风速、气温、施工人员的水平等。手工辊刷涂漆模式下, $\alpha=0.3 \sim 0.4$;高压无气喷漆作业模式下 $\alpha=0.6 \sim 0.8$ 。 Q 为单位面积上的理论用量,单位为 L/m^2 。 S 为涂装面积,单位为 m^2 。

稀释剂的用量一般不应超过油漆用量的 5%,其订货量为涂料订货量的 8%~10%。

1.3 涂装面积计算

本文选取船体水线及水线以下的防腐蚀问题为具体实例。涂装面积主要计算出轻载(船底)以下船体面积和轻重载水线间的面积即可。

轻载水线以下总面积 M_1 的计算模型如式(3)所示。

$$M_1 = \text{船总长} \times (\text{平均吃水} \times 2 + \text{船宽}) \times 0.8 \quad (3)$$

轻重载水线间总面积 M_2 的计算模型如式(4)所示。

$$M_2 = \text{船总长} \times \text{轻重平均吃水差} \times 2 \quad (4)$$

则涂装面积 S 为: $S = M_1 + M_2$ 。

2 某工作船的防腐蚀防污技术方案

针对某工作船的防腐蚀防污技术方案(主要分析评价船底和水线部分的防腐蚀和防污损涂料)作 LCC 分析。

2.1 初始条件

1) 船体基本属性

根据船舶设计任务书,船舶的基本属性如表 1 所示。

表 1 某工作船船体基本属性

| 序号 | 属性名称 | 符号 | 值 | 单位 |
|----|----------|-----------|-------------|----|
| 1 | 总长 | L_{oa} | 72.50 | m |
| 2 | 垂线间长 | L_{bp} | 63.80 | m |
| 3 | 型宽 | B | 15.00 | m |
| 4 | 型深 | D | 7.00 | m |
| 5 | 设计吃水 | T | 4.80 | m |
| 6 | 最大吃水 | T_{max} | 5.70 | m |
| 7 | 最大吃水时载重量 | W | 1 500 | t |
| 8 | 自由试航航速 | V | ≤ 15.0 | kn |

2) 涂装面积

根据 2.3 节涂装面积计算模型,和船舶的初始条件,可计算出轻载水线以下以及轻重载水线间涂装总面积。

轻载水线以下面积 M_1 :

$$M_1 = \text{船总长} \times (\text{平均吃水} \times 2 + \text{船宽}) \times 0.8 =$$

$$L_{oa} \times ((T + T_{max}) + B) \times 0.8 =$$

$$72.5 \times ((4.8 + 5.7) + 15) \times 0.8 = 1479 \text{ m}^2$$

轻重载水线间面积 M_2 :

$$M_2 = \text{船总长} \times \text{轻重平均吃水差} \times 2 =$$

$$L_{oa} \times (T_{max} - T) \times 2 =$$

$$72.5 \times (5.7 - 4.8) \times 2 = 130.5 \text{ m}^2$$

涂装总面积

$$M = M_1 + M_2 = 1479 + 130.5 = 1619.5 \text{ m}^2$$

3) 年均耗油量

该工作船的年工作时间为 2 000 h,有 2 台主机,单台主机的平均油耗为 0.2 kg/kW,单台主机的功率为 3 460 kW,柴油的密度为 0.84 kg/L,价格设为 5.8 元每升,则工作船的年平均耗油量 Q 为:

$$Q = 2\,000 \times 0.2 \times 3\,460 \times 2 = 2\,768\,000 \text{ kg}$$

工作船的平均油费 $C_{油}$ 为:

$$C_{油} = 2\,768\,000 / 0.84 \times 5.8 = 19\,112\,381 \text{ 元}$$

4) 施工工序

涂料的使用寿命——有效的防腐蚀防污期为:3 年左右。根据船检局规定船舶在使用 5 年中安排 2 次进坞修理计划。涂装的施工工序根据不同的涂装方案,其施工工序也不同。根据以往船舶使用的实际情况,间隔 2.5 年左右,全部涂装工程进行一次。

船舶进坞除锈需要 4 天,涂防腐防污漆 3 天,船在船坞开工 7 天,船坞费用 8~9 万,若在船台施工费用为 6 万。但是,船坞费用不仅仅应用于船体的防污和防腐,还包括其它的动力系统的修理。因此,费用需要进行一定的分摊,本文中假定分摊到水下的防腐防污工程的比例为 80% 左右,即取 7 万。

2.2 可选的涂装方案

通过调研,选取 3 个涂料厂家提供的 4 个典型可行的涂装方案,具体方案如表 2 所示。

2.3 涂装方案费用计算

第 1 套方案的具体情况参见表 2 所示。由初始条件可知涂装面积为 $S = 1\,619.5 \text{ m}^2$

对每一种涂料,其材料价格的计算模型如下:

$$C = (1 + \alpha) \times S \times Q \times C_0 \quad (4)$$

其中: S 为涂装面积,即为 $S = 1\,619.5 \text{ m}^2$; Q 为单位面积上的理论用量,单位为: L/m^2 ; C_0 为该涂料的单位价格,单位为:元/升; α 为涂料的损耗系数; C 为某种涂料的材料价格。

施工费用主要包括喷砂,涂漆费用,喷砂的价格一般为:30~40 元/平方米,而每道油漆每平方米的施工价格为:0.7~1 元/平方米。在本方案中,取喷砂的施工单价为 35 元/平方米,每道油漆的施工费用为每平方米的价格取为 1 元/平方米。

阴极保护采用锌块共 93 块,每块重 9 kg,价格为 40 元/公斤,则每个锌块价格为 360 元,安装和拆卸每块锌块的费用为 80 元/块,平时无需维护管理。因此,计划更换一次锌块的费用为 440 元/块,包括材料,所有锌块的费用为

$440 \times 93 = 40\,920$ 元,即在一个周期为 2.5 年的锌块的费用为 40 920 元。

采用第 1 套方案的涂料材料、工时费用如表 3 所示。

表 2 水线以下船壳可选的涂装方案

| 涂装部位 | 涂料编号 | 名称 | 干膜厚度/ um | 理论用量 (L/m ²) | 参考道数 | 参考年限 | 参考价格 (元/升) | |
|--------|-------|--------|-------------|-----------------------------|-------|------|---------------|------|
| 水线以下船壳 | 第 1 套 | HT-1 | 环氧厚浆防锈漆 | 300 | 0.47 | 2 | 5 | 31.1 |
| | | HT-1 | 连接漆 | 50 | 0.15 | 1 | 3 | 31.1 |
| | | J300 | 氯化橡胶长效防污漆 | 200 | 0.97 | 3 | 3 | 63.9 |
| | 第 2 套 | AC | 氯化橡胶防腐漆 | 100 | 0.49 | 2 | 5 | 33.9 |
| | | BTD | 氯化橡胶面漆 | 50 | 0.13 | 1 | 3 | 33.9 |
| | | AF-100 | 氯化橡胶防污漆 | 100 | 0.29 | 2 | 3 | 110 |
| | 第 3 套 | H900 | 环氧厚浆型防锈漆 | 300 | 0.566 | 2 | 5 | 47 |
| | | H838 | 环氧中间连接漆 | 100 | 0.20 | 1 | 5 | 56 |
| | | 889 | 长效自抛光防污漆 | 300 | 1.2 | 3 | ≥3 | 112 |
| | 第 4 套 | EX21AC | 新型环氧防锈底漆 | 300 | 0.738 | 2 | 5 | 150 |
| | | EX21AC | 乙烯中间连接漆 | 50 | 0.143 | 1 | 3 | 120 |
| | | Takata | 无锡自抛光防污漆 | 360 | 1.25 | 3 | ≥3 | 280 |

表 3 第 1 套方案的涂料材料、工时费用

| 项目 | 符号 | 单位 | 环氧厚浆防锈漆 | 连接漆 | 氯化橡胶长效防污漆 |
|------------------|----------|-------|---------|---------|-----------|
| 1 理论用量 | Q | 升/平方米 | 0.47 | 0.15 | 0.97 |
| 2 涂料单位价格 | C01 | 元/升 | 31.1 | 31.1 | 63.9 |
| 3 耗损系数 | α | | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| 4 参考道数 | n | | 2 | 1 | 3 |
| 5 涂装面积 | S | 平方米 | 1 619.5 | 1 619.5 | 1 619.5 |
| 6 各涂料总量 | Q2 | 升 | 1 294 | 413 | 2 670 |
| 7 各涂料价格 | C1 | 元 | 40 243 | 12 843 | 170 648 |
| 8 各稀释剂量 | Q3 | 升 | 129 | 41 | 267 |
| 9 稀释剂量单位价格 | C02 | 元/升 | 15.21 | 15.21 | 15.21 |
| 10 各稀释剂总价 | C2 | 元 | 1 968 | 628 | 4 062 |
| 11 涂料材料总价 | C3 | 元 | 42 211 | 13471 | 174 710 |
| 12 每道油漆每平方米的施工价格 | C03 | 元/平方米 | 1 | 1 | 1 |
| 13 涂油漆工时费用 | C4 | 元 | 3 239 | 1 619 | 4 858 |
| 14 喷砂单位价格 | C04 | 元/平方米 | 35 | | |
| 15 喷砂费用 | C5 | 元 | 56 682 | | |
| 16 船坞分摊费 | C6 | 元 | 70 000 | | |
| 17 防腐锌块总费用 | C7 | 元 | 40 920 | | |
| 18 总费用 | C | 元 | 407 712 | | |

其中,总费用为涂料材料总价、涂油漆工时费用、喷砂费用、船坞分摊费和防腐锌块总费用之和。

按第 1 套防腐方案的计算模型,可计算出第 2,3,4 套方案的总费用,计算结果如表 4 所示。

表 4 防腐方案费用计算结果

| | 第 1 套方案 | 第 2 套方案 | 第 3 套方案 | 第 4 套方案 |
|--------|---------|---------|---------|-----------|
| 总费用(元) | 407 712 | 325 209 | 659 650 | 1 501 863 |

2.4 方案比较

根据寿命周期费用分析技术的特点,在做多方案权衡时,注重考虑各方案的差异,对于各方案相同的费用,以及费用值很小不影响优劣排序的,可以不计。本文中,对方案的管理费用、折旧费、残值、税值以及测试费用都不作考虑。主要从以下几个方面进行比较。

1) 总费用比较

4套备选涂料方案中,第2套方案的费用最小,从涂料单价上来看,第2套方案的涂料价格不是最便宜的,但是,其施工工艺不同,每道涂料的用量少,因此,其整个的费用也相应减少,经过综合计算,其费用是最小的,为325 209元,方案费用最大的是第4套方案,费用1 501 863元,是第2套方案的4倍多。实际上,这两个方案是采用同一个公司提供的防腐方案,可见,针对同一公司,选择不同的防腐方案,其寿命周期费用差距也很大。

2) 涂料防腐原理比较

第1套和第2套方案采用的是氯化橡胶涂料系列,氯化橡胶涂料是天然橡胶/合成橡胶经氯化反应而得。高温下因氯化橡胶涂料在生产过程中用四氯化碳作为溶剂,对环境污染的问题较为突出,破坏臭氧层。在许多国家中氯化橡胶涂料的生产受限制,并在研究开发代用品。第3套方案为长效自抛光防污漆,采用丙烯酸聚合物来实现将水解速度控制在较低的速度,以满足高磨损、高航率船舶的要求;又由于水解发生在表面,可随时保持表面的新鲜和活性,从而保证防污漆的长期和高效。第4套方案为无锡自抛光防污涂料,溶解型(水合型)树脂和氯化橡胶类树脂组合,可控制防污剂溶出速度,实现防污的长期和高效^[4-5]。

从涂料防腐原理来看,第1和第2套方案应用广泛,但在防污的长期性和环保性有所欠缺,第3和第4套方案采用自抛光技术,可以实现长期、高效的防污效果,而第4套方案符合国际海事组织所规定的环保要求。

3) 防污带来效果比较

根据选用美军的统计数据,每年增加10%~15%的燃油消耗量,对于民用船舶,由于经常航行,因此船舶受污染的程度小,可假定为每年增加6%~9%的燃油消耗量。不同的涂装方案,其防污效果不同,第2套方案,效果比第1套方案效果好,保守可以假定比第1套方案可以节省1%的燃油。而第3套方案采用自抛光技术,可以实现长期、高效的防污效果,第4套方案比第3套方案,突出环保,可以假定第3套和第4套的防污效果相对于第2套方案,可以节省1%的燃油。

4) 各方案综合比较

由计算可得,工作船年均耗油费为191 123 81元,假定每年的受污染后增加6%的燃油消耗量,则第1年的燃油费为19 112 381,第2年相对第1年增加6%,即第2年的年均耗油费为20 259 124元,第3年相对于第2年又增加

6%,由于在第3年的一半时,就进行计划维修,因此,仅计算第3年的半年耗油费,为10 737 335元,则2.5年内的平均耗油费为50 108 840元。

第1套方案的材料、工时以及船坞费用为407 712元,第2套方案的材料、工时以及船坞费用为325 209元。假设第2套的防污效果可以比第1套方案年节省1%的燃油,则周期为2.5年内可节省501 088元。因此,第2套方案的费用不仅比第1套方案费用少,而且可以节省501 088元,因此采用第2套方案。

第3套方案的材料、工时以及船坞费用为659 650元,比第2套方案多334 441元,若假定比第2套的防污效果可以节省1%的燃油,2.5年内则可节省501 088元。考虑节省的费用,第3套方案的费用与第2套方案基本相近,但是需要一次投资费用较大,在资金比较紧张的前提,可以不考虑第3套方案。

第4套方案的材料、工时以及船坞费用为1 501 863元,具有环保效果,但是费用过高,在我国还没有强制使用无锡涂料的前提下,从企业效益上来,暂时可以不考虑该方案。

综合以上分析,建议采用第2套方案。

3 结束语

不同的涂料防腐蚀和防污能力不同,对船舶经济性影响也不同。涂料单价低并不表示防腐方案的寿命周期费用少。通过寿命周期费用方法,可以权衡出寿命周期费用最小的方案,选择防腐方案的有效工具之一。通过实例,得出了采用第2套涂装方案是最佳的结论,也证明了采用LCC技术来进行船舶防腐方案优选,是科学的可行的,值得借鉴。

参考文献:

- [1] Winstom Revie. Uhlig's corrosion handbook[M]. Second edition. John Wiley & Sons Inc,2000.
- [2] Verink E.D. Corrosion Economic Calculations. In Metals Handbook, Corrosion, Metals Psrk[M]. Ohio, ASM International,1987.
- [3] 胡士信,廖宇平,王冰怀,等.管道防腐层设计手册[M].北京,化学工业出版社,2007.
- [4] 张淳,史春辉.船舶防污涂料[J].中国修船,2004(1):43-45.
- [5] 熊金平,左禹.船舶防腐蚀涂料的研究发展方向[J].现代涂料与涂装,2006(6):23-27.

(责任编辑 周江川)