

侧斜螺旋桨桨叶强度计算及其可靠性分析

田斌斌 姜治芳 朱英富
(武汉船舶设计研究所 武汉 430064)

摘 要: 本文用有限元方法并结合 Monte Carlo 法校核了侧斜螺旋桨的强度,在此基础上对侧斜螺旋桨强度进行了可靠性分析,得出相应的可靠度系数。

关键词: 侧斜螺旋桨 强度 Monte Carlo 法 可靠性

Reliability Analysis for Strength of Skewed Propeller Blades

Tian Binbin Jiang Zhifang Zhu Yingfu
(Wuhan Ship Design and Development Institute, Wuhan, 430064)

Abstract: In this paper Monte Carlo method and Finite Elements Method are used to check the strength of skewed propeller blades, and reliability of skewed propeller blades is analysed to deduce the reliability coefficient.

Key words: skewed propeller, strength, monte carlo method, reliability

1 引 言

现代驱逐舰、护卫舰由于主机功率大、航速高,随之出现诸如螺旋桨激振力大、桨舵剥蚀及空泡噪声等一系列问题,直接影响舰的可靠性、隐蔽性、居住性,以致全舰作战能力。而侧斜螺旋桨能够较好地解决上述问题。近年来国内外相继对侧斜螺旋桨进行了广泛而深入的研究,其中关于桨叶强度的研究是关注的焦点。一般常规螺旋桨的强度计算通常采用经典的悬臂梁方法,使用中一般未出现过强度不足的问题。而侧斜螺旋桨由于几何形状及载荷分布都相当复杂,悬臂梁这种简单计算方法已不适用于侧斜螺旋桨的强度计算,且又很难采用在实施上、经费上及周期上都有较大困难的实桨(模)测量方法,所以目前普遍采用有限元方法。

近年来,结构可靠性理论得到了迅速发展,分析结构可靠性的方法已经达到实用程度。作为一种尝试,本文应用结构可靠性理论,对螺旋桨静态负荷和动态负荷作用下的强度进行了可靠性分析,得出了相应的可靠度系数。

2 侧斜螺旋桨强度计算

2.1 有限元计算方法的选取

采用有限元方法对侧斜螺旋桨强度进行计算,关键在于运用何种运行单元能从几何学上、力学上更精确地模拟侧斜桨这一复杂结构。在比较了几种有限元方法后本文采用了俄罗斯克雷洛夫研究院提供的“螺旋桨叶片总强度估算方法及计算程序”来完成该计算。该方法具有自动划分有限元网格、自动加载功能,使用者只需要输入螺旋桨性能参数、几何参数和螺旋桨材料机械性能参数,便可得出叶片的应力—应变状态。

2.2 强度计算结果

计算出船舶正车时一周固定应力值 σ_m ,一周最大的不定常分量值 σ_a 和倒车时最大的静力应力 σ_m^R 。这几个应力值都是下面进行桨叶强度可靠性分析所必需的。

3 侧斜螺旋桨强度可靠性分析

3.1 影响螺旋桨强度的不确定性因素

影响侧斜螺旋桨强度的不确定性因素也很多,概括讲主要有以下几方面:

(1) 在计算螺旋桨强度时,通常都以船在全速航

行下螺旋桨发出的推力及吸收的转矩为依据,但在启航时,由于进速系数甚小,推力系数及扭矩系数都很大,致使螺旋桨所受的应力值可能大于全速时的数值。

(2) 螺旋桨在实际工作中因桨叶在不同位置时其伴流相差甚大,桨叶所受之应力产生周期性变更,空泡及振动等使材料有剥蚀及疲衰作用。

(3) 桨叶与桨毂之厚度相差甚大,在铸造时两部分的冷却速度不同,使叶根部分的实际强度降低。

(4) 螺旋桨在工作中可能碰击漂浮物体而遭受突然负荷。

针对上述不确定性因素,根据结构可靠性理论,采用随机变量进行描述。具体而言,把螺旋桨的正车转速 N 、倒车转速 N_r 、船的正车航速 V 、倒车航速 V_r 及伴流系数 w 作为随机变量,分别用各自的均值和变异系数来描述,计算叶片的静力强度可靠性指标、周期运行强度可靠性指标及倒车时叶片静力强度可靠性指标。

3.2 侧斜螺旋桨强度可靠性模型的建立

设随机变量 R 为桨叶强度,随机变量 S 为桨叶应力,于是有

$$R = R(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$$S = S(V, V_r, N, N_r, w)$$

这里 X_i 是与结构强度有关的量,如结构尺寸、表面粗糙度、划痕、裂纹等。极限状态方程为

$$g(R, S) = R - S$$

从而,桨叶强度可靠度 P_r 可以表示为:

$$P_r = P(R - S > 0)$$

3.3 用 Monte Carlo 方法确定桨叶的应力和强度分布

用 Monte Carlo 方法确定应力分布的程序如下:

- (1) 确定应力函数 $S = S(V, V_r, N, N_r, w)$;
- (2) 确定应力函数中每一变量的分布类型;

(3) 对应力函数中的每一变量,在 $0 \sim 1$ 之间生成许多均匀分布的随机数,然后采用适当的抽样方法产生随机变量;

(4) 将产生的随机变量代入应力函数,计算出相应的应力;

(5) 重复上述过程,最好使模拟次数大于 1 000 次;

- (6) 对应力数据进行统计分析,确定它的分布;

用 Monte Carlo 方法确定强度分布的程序与产生应力分布的程序相同。

3.4 桨叶强度可靠性的计算

根据上面的讨论,设桨叶应力 S 、强度 R 均为正态随机变量(本文只就应力、强度均服从正态分布的情况进行讨论),概率密度函数各为:

$$g(s) = \frac{1}{s \sqrt{2}} \exp \left[-\frac{(s - u_s)^2}{2 s^2} \right] \quad -\infty < s < \infty$$

$$f(r) = \frac{1}{r \sqrt{2}} \exp \left[-\frac{(r - u_r)^2}{2 r^2} \right] \quad -\infty < r < \infty$$

式中: u_s 、 u_r 和 s 、 r 分别为 S 、 R 的均值和标准差。

由概率论可知,干涉随机变量 Z 的概率密度函数为

$$h(z) = \frac{1}{z \sqrt{2}} \exp \left[-\frac{(z - u_z)^2}{2 z^2} \right] \quad -\infty < z < \infty$$

式中: $z = (s^2 + r^2)^{1/2}$, $u_z = u_r - u_s$ 。

$Z < 0$ 的概率就是失效概率 P_F ,故

$$\begin{aligned} P_F &= P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 h(z) dz \\ &= \int_{-\infty}^0 \frac{1}{z \sqrt{2}} \exp \left[-\frac{(z - u_z)^2}{2 z^2} \right] dz \end{aligned}$$

将上式变化为标准正态分布,可得:

$$P_F = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{u_p} e^{-u^2/2} du = \Phi(u_p)$$

$$\text{式中: } u_p = -\frac{u_z}{z} = -\frac{u_r - u_s}{\sqrt{\frac{2}{r^2} + \frac{2}{s^2}}}$$

反映了强度随机变量 R 、应力随机变量 S 和概率之间的关系,称为联接方程或耦合方程。 u_p 称为失效概率系数,可由正态分布表用 u_p 值查出 P_F 值。

相应的可靠度

$$R = 1 - P_F = 1 - \Phi(u_p) = \int_{u_p}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-u^2/2} du$$

因为正态分布为对称分布,故上式可变化为

$$R = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{u_p} e^{-u^2/2} du = \Phi(u_R)$$

$$\text{式中: } u_R = \frac{u_r - u_s}{\sqrt{\frac{2}{r} + \frac{2}{s}}}$$

称为可靠度系数。

4 计算实例

本文分析的对象为某船用侧斜螺旋桨,该桨的侧斜角为 28° 。螺旋桨正车转速为 273r/min ,相应的航速为 16.2kn ,倒车转速为 163r/min ,相应的航速为 6.99kn ,螺旋桨叶数为 5,直径为 2.44m ,材料为镍铝青铜,伴流系数为 0.159。

对此桨作了静力强度可靠性分析、周期运动强度可靠性分析和倒车瞬时状态静力强度可靠性分析。

材料的屈服极限 σ_s 均值为 2200kg/cm^2 ,腐蚀-疲劳极限 σ_{-1} 均值为 1800kg/cm^2 ,变异系数取为 0.1,船正车航速、螺旋桨正车转速、倒车航速、倒车转速和伴流系数的变异系数分别取为 0.028, 0.01, 0.1, 0.112, 0.127(考虑到船的实际运营情况)。

4.1 螺旋桨强度计算结果

计算出船舶正车时一周固定应力值 σ_m ,一周最大的不定常分量值 σ_a 和倒车时最大的静力应力 σ_m^R 。以船速、螺旋桨转速、伴流系数、倒车航速、螺旋桨倒车转速分别为 17.06、276、0.121、6.44、164.2 这组随机变量为例,计算结果如下:

$$\sigma_m = 393\text{kg/cm}^2, \sigma_a = 197\text{kg/cm}^2, \sigma_m^R = 450\text{kg/cm}^2$$

4.2 螺旋桨强度可靠性分析

船舶全速正车时不出现叶片塑性变形的条件为:

$$\sigma_s / n_T \geq \sigma_m + \sigma_a$$

式中: n_T 为正车静力强度安全系数;

周期运动强度表达式为:

$$\sigma_{-1} / n_{-1} \geq \sqrt{\frac{2}{a} + \frac{2}{a_m}}$$

式中: n_{-1} 为周期运行强度安全系数。

当螺旋桨在紧急倒车的瞬间状态时静力强度储备为:

$$\sigma_s / n_R \geq \sigma_m^R$$

式中: n_R 为螺旋桨在紧急倒车的瞬间状态时静力强度安全系数。

由此,可以得出 3 个极限状态方程:

$$Z_1 = \sigma_s - \sigma_m + \sigma_a$$

$$Z_2 = \sigma_{-1} - \sqrt{\frac{2}{a} + \frac{2}{a_m}}$$

$$Z_3 = \sigma_s / n_R - \sigma_m^R$$

对应的三种情况下可靠性分析分别为:

(1) 静力强度可靠性分析

可靠度系数为:

$$u_R = (2200 - 750.38) / \sqrt{561.03 + 48400} \\ = 6.55$$

$$\text{算得 } R = (6.55) = 0.9^{10} 71231$$

(2) 周期运动强度可靠性分析

可靠度系数为:

$$u_R = (1800 - 383.61) / \sqrt{61.81 + 32400} \\ = 7.86$$

$$\text{算得 } R = (7.86) = 0.9^{14} 80794$$

(3) 倒车瞬时状态静力强度可靠性分析

可靠度系数为:

$$u_R = (2200 - 455.43) / \sqrt{8544.34 + 48400} \\ = 7.31$$

$$\text{算得 } R = (7.31) = 0.9^{12} 86643$$

由计算结果可以看出,3 种情况下可靠度系数都很高,桨叶失效的可能性几乎是不存在的。

5 结 语

由以上的分析计算,可以得出以下结论:

(1) 结构可靠性分析理论可以应用于螺旋桨桨叶强度可靠性分析。

(2) 本文使用有限元结合 Monte Carlo 方法,提高了桨叶应力计算的精确度,从而提高了桨叶强度可靠性的精确度。

参 考 文 献

- 1 王国强、盛振邦.《船舶推进》.第 1 版.上海:上海交通大学出版社,1995.
- 2 王玉华.“侧斜螺旋桨强度研究”.《船舶力学》.1998,2(2): 44~51.
- 3 胡云昌、于洪洁、夏定武等.“螺旋桨强度的可靠性分析”.《船舶工程》.1994,(1):21~27,35.
- 4 Yamasaki S. Highly Skewed Propeller. Jur. Soc. Nav. Archit., Jap., Vol. 153, 1983.
- 5 陆延孝、郑鹏洲、何国伟等.《可靠性设计与分析》.第 1 版.北京:国防工业出版社,1995.

作者简介: 田斌斌,男,汉族,1977 年 10 生,西北工业大学工程力学系 2000 届毕业生,获学士学位,现在武汉船舶设计研究所攻读船舶与海洋结构物设计制造专业硕士研究生。