



指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD29-2018

中国船级社

船体结构波激振动和砰击颤振 直接计算评估指南

2018

2018年11月26日生效

北京

简要编写说明

船舶在海浪环境的波浪力作用下会产生波激振动和砰击颤振现象,这种现象将对船舶结构疲劳寿命和船体梁极限强度产生影响。

CCS 就波激振动和砰击颤振对船体结构强度的影响进行了相关研究,该研究包括模型水池试验研究和理论计算分析。研究表明:波激和砰击诱导的船体梁振动所产生的垂向波浪弯矩高频分量对船体结构疲劳损伤有一定的贡献,砰击颤振导致的垂向波浪弯矩增加对船体梁极限强度有一定的影响。

基于上述研究并参考国内外该领域的研究成果,对 CCS 已发布的《波激振动和砰击颤振对船体结构疲劳强度影响计算指南》(2015)进行了修改、补充和完善,增加了计及砰击颤振的船体梁极限强度评估要求并对砰击颤振计算工况进行简化,完成了作为上述指南替代版的《船体结构波激振动和砰击颤振直接计算评估指南》(2018)的编制工作。本指南旨在为船体结构在波激和砰击诱导船舶垂向振动作用下的疲劳强度和极限强度评估提供评估方法。

本指南将载荷直接计算、水弹性分析、疲劳损伤等效方法和载荷长期预报理论应用于船体结构疲劳强度和船体梁极限强度评估相关的垂向波浪弯矩波激振动和砰击颤振效应计算。本指南应与 CCS 的相关疲劳评估指南或规范一并使用进行船舶结构的疲劳强度评估和船体梁极限强度评估。

目 录

第 1 章	一般要求	1
1.1	适用范围	1
1.2	波激振动和砰击颤振现象.....	2
1.3	基本假定	3
1.4	波激振动和砰击颤振评估流程.....	3
1.5	符号	7
第 2 章	计算条件	8
2.1	装载工况	8
2.2	波浪环境	8
2.3	计算要求	9
2.4	疲劳计算 S-N 曲线	9
2.5	砰击颤振计算工况简化.....	10
第 3 章	线性波激振动作用下的船体结构疲劳强度评估	11
3.1	疲劳损伤计算	11
3.2	线性波激振动对疲劳损伤的贡献度.....	13
3.3	计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估.....	14
第 4 章	砰击颤振和波激振动作用下的船体结构疲劳强度评估	15
4.1	应力响应时间历程	15
4.2	疲劳损伤计算	15
4.3	砰击颤振和波激振动对疲劳损伤的贡献度.....	16
4.4	计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估.....	16
第 5 章	砰击颤振作用下的船体梁极限强度评估	17
5.1	垂向波浪弯矩时间历程.....	17
5.2	垂向波浪弯矩极值分析.....	17
5.3	计及砰击颤振的船体梁极限强度评估.....	17
附 录	阻尼数值模型	19

第1章 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 本指南规定了计及波激振动和砰击颤振诱导载荷作用的船体结构疲劳强度和船体梁极限强度的评估方法。本指南适用于 CCS 规范或指南要求进行波激振动和砰击颤振评估的船舶，也适用于自愿申请本章 1.1.3 附加标志的船舶，或 CCS 认为需要考虑波激振动和砰击颤振影响的船舶。

1.1.2 符合下述条件的船舶，需考虑波激振动和砰击颤振作用：

a) $L > 300\text{m}$;

式中： L —— 船长， m ，见 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 1 节相关定义。

b) $f_{ec} > f_{2n}$;

式中： f_{ec} —— 考虑波激振动和砰击颤振效应的临界波浪遭遇频率， Hz ，按下式计算：

$$f_{ec} = 0.318 + 0.017V$$

其中： V —— 最大服务航速， m/s ，见 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 1 节相关定义；

f_{2n} —— 船体梁垂向两节点振动频率， Hz ，如无确切数据，可按下式计算：

$$f_{2n} = 5.117 \times 10^4 \sqrt{\frac{I_{ov}}{\Delta_v L_{pp}^3}}$$

其中： I_{ov} —— 船中横剖面垂向惯性矩， m^4 ；

L_{pp} —— 垂线间长， m ；

Δ_v —— 包含附连水质量的船舶总质量， t ，按下式计算：

$$\Delta_v = \left(1.2 + \frac{B}{3d}\right) \Delta$$

其中： B —— 型宽， m ；

d —— 计算装载工况下的平均吃水， m ；

Δ —— 船舶排水量， t 。

c) $\alpha > 45^\circ$ 。

式中： α —— 外飘角，见 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 7 章第 8 节相关定义， $(^\circ)$ ，

取首垂线后 0.1L 处夏季载重线吃水距最上层甲板垂直距离一半高度的位置。

对符合条件 a) 和 b) 的船舶，可根据本指南 3.3 进行计及线性波激振动的船舶结构疲

劳强度评估；

对符合条件 a)、b) 和 c) 的船舶，可根据本指南 4.4 进行计及砰击颤振和波激振动的船舶结构疲劳强度评估；

对符合条件 a) 和 c) 的船舶，可根据本指南 5.3 进行计及砰击颤振的船体梁极限强度评估。

其他船舶也可参照本指南，对其船体结构进行波激振动和砰击颤振强度评估。

1.1.3 附加标志

- (1) 按照本指南 3.3 进行疲劳强度评估的船舶，可授予附加标志：SAF。
- (2) 按照本指南 4.4 进行疲劳强度评估的船舶，可授予附加标志：SWAF。
- (3) 按照本指南 5.3 进行极限强度评估的船舶，可授予附加标志：WAU。

1.1.4 本指南应与 CCS《船体结构疲劳强度指南》、《钢质海船入级规范》或《国内航行海船建造规范》一并使用进行船体结构的疲劳强度和极限强度评估。

1.2 波激振动和砰击颤振现象

1.2.1 当船体结构刚度较低、船舶航速较高时，在波浪激励下船体结构会发生持续的无明显衰减的高频振动，产生所谓的“波激振动”现象，它是一种船体结构与波浪作用之间的共振现象。波激振动一般在船体一阶总振动频率等于或接近船舶航行的波浪遭遇频率时发生，也就是线性波激振动；当船体一阶总振动频率等于或接近波浪遭遇频率的整数倍或双色（或多色）规则波的和频时，船体也会产生波激振动，即为非线性波激振动。波激振动由于具有高频特征，且一般在中低海况下发生，主要影响结构的疲劳强度。对波激振动可根据需要采用线性频域水弹性谱分析方法或非线性时域水弹性统计分析方法进行计算预报。

1.2.2 当船舶以较高航速在中高浪级中航行时，大幅的船波相对运动会使船体受到波浪的强烈冲击，船体结构由于砰击载荷的作用而发生瞬时的快速衰减的高频振动，产生所谓的“颤振”现象，它是一种波浪砰击对船体的强迫振动现象。颤振不仅使船体结构中的总应力水平达到较高的量级，影响船体梁极限强度，而且其高频特征也会影响结构的疲劳强度。由于砰击颤振的强非线性特征，应采用非线性时域水弹性统计分析方法进行计算预报。

1.2.3 对计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估，应采用线性频域水弹性谱分析方法进行计算预报；对计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估，应采用非线性时域水弹性统计分析方法进行计算预报，此时砰击颤振响应和波激振动响应是耦合在一起的。

1.3 基本假定

1.3.1 仅考虑波激振动和砰击颤振对船体梁垂向波浪弯矩的影响。

1.3.2 载荷直接计算应考虑水弹性响应效应。

1.3.3 计及波激振动和砰击颤振的船体结构疲劳强度评估方法应与 CCS《船体结构疲劳强度指南》的规定一致。

1.3.4 计及砰击颤振的船体梁极限强度评估时所采用的许用静水弯矩、波浪弯矩以及船体梁极限承载能力等计算方法应与 CCS 规范对相关船型的规定一致。

1.3.5 船体梁垂向振动应至少取前三阶垂向振型。

1.4 波激振动和砰击颤振评估流程

1.4.1 计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估流程

基于线性水弹性理论和谱分析方法，计算船体梁垂向波浪弯矩。得到的波浪弯矩包含低频和高频分量，其中，低频分量为不含波激振动的垂向波浪弯矩（即，波频分量），高频分量为波激振动诱导的垂向波浪弯矩，总弯矩为包含低频分量和高频分量的垂向波浪弯矩。分别将垂向波浪弯矩的波频分量应力响应和总弯矩应力响应应用于疲劳损伤计算，按图 1.4.1 所示流程进行计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估。

1.4.2 计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估流程

基于非线性波浪载荷时域分析方法，计算船体梁垂向波浪弯矩的时间历程，包含砰击颤振和波激振动诱导弯矩。得到的波浪弯矩包含低频和高频分量，其中，低频分量为不含砰击颤振和波激振动的垂向波浪弯矩（即，波频分量），高频分量为砰击颤振和波激振动诱导的垂向波浪弯矩，总弯矩为包含低频分量和高频分量的垂向波浪弯矩。分别将垂向波浪弯矩的波频分量应力响应和总弯矩应力响应应用于疲劳损伤计算，按图 1.4.2 所示流程进行计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估。

1.4.3 计及砰击颤振的船体梁极限强度评估流程

基于非线性波浪载荷时域分析方法，计算船体梁垂向波浪弯矩的时间历程，包括弹性体砰击颤振诱导弯矩和刚体非线性波浪诱导弯矩。对不同海况下弯矩响应峰值进行 Weibull 拟合分析，并考虑航速、浪向、海况等累积概率按长期极值预报理论确定弹性体颤振弯矩和刚体非线性弯矩的极值。根据两种弯矩极值考虑砰击颤振导致船体梁波浪弯矩的增加，按图 1.4.3 所示流程进行计及砰击颤振的船体梁极限强度评估。

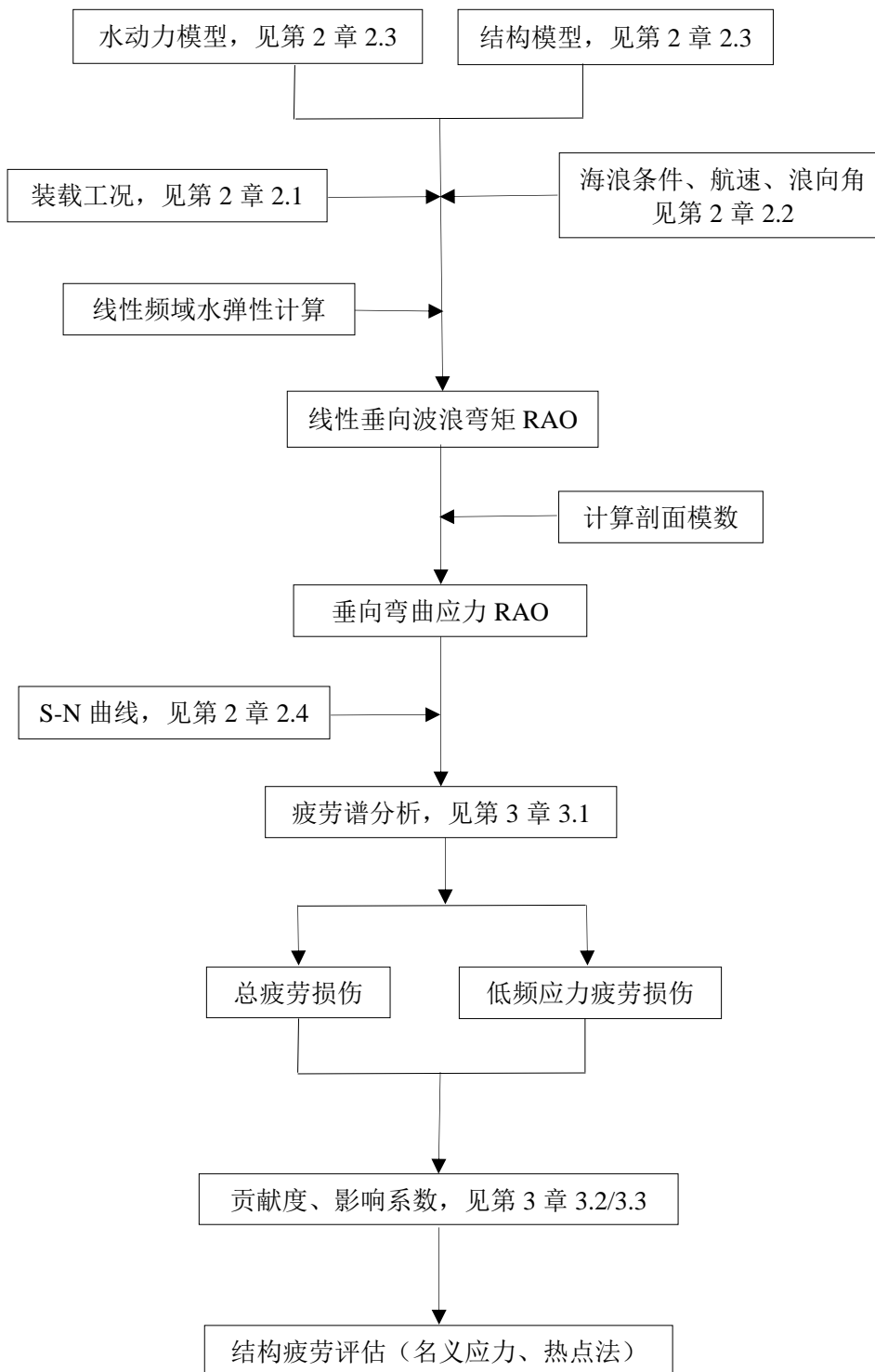


图 1.4.1 计及线性波激振动的船舶结构疲劳强度评估流程

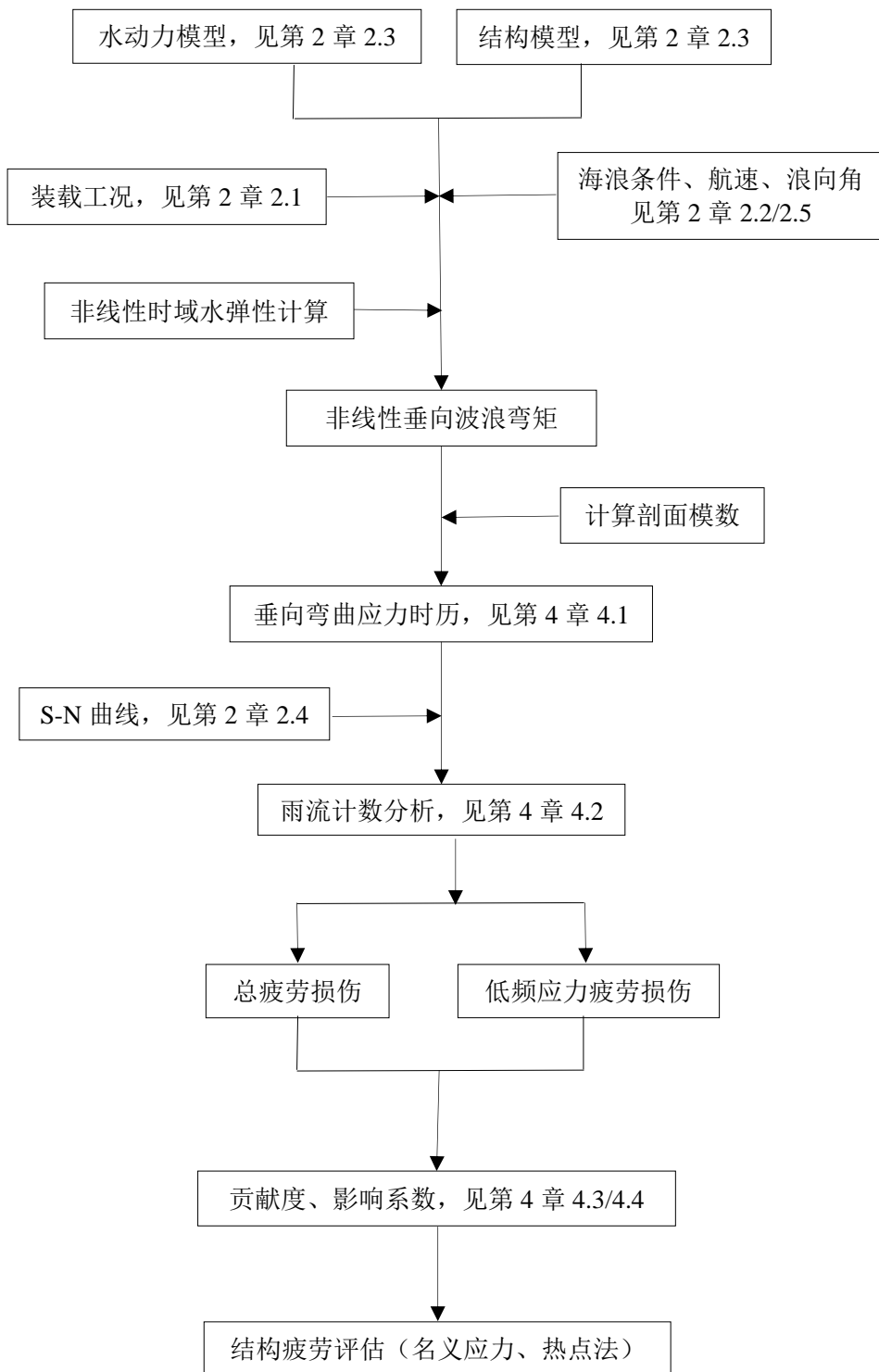


图 1.4.2 计及砰击颤振和波激振动的船舶结构疲劳强度评估流程

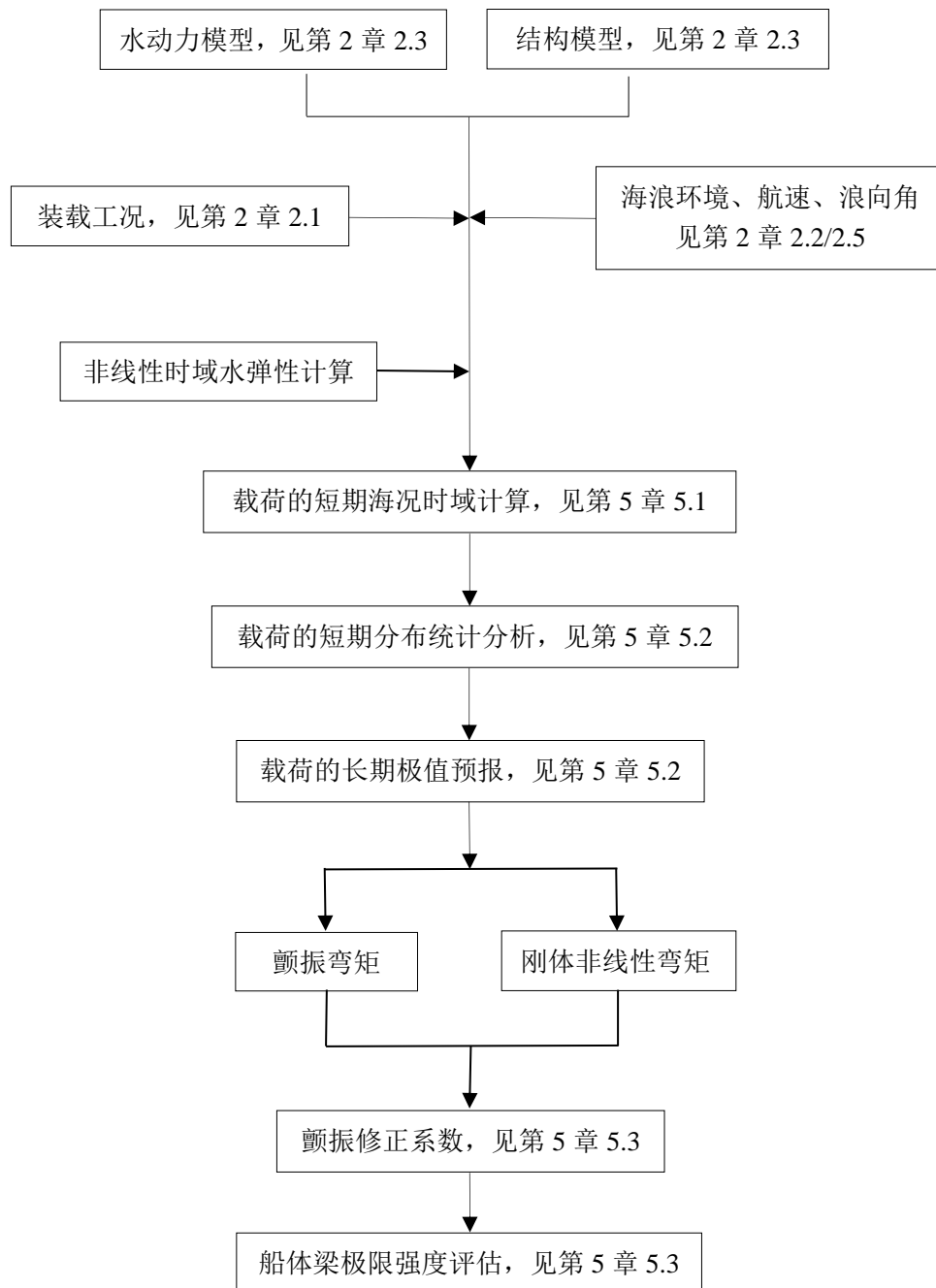


图 1.4.3 计及砰击颤振的船体梁极限强度评估流程

1.5 符号

H_S —— 有义波高, m;

T_Z —— 波浪平均跨零周期, s;

ω —— 波浪圆频率, rad/s;

θ —— 浪向角, 随浪为 0° , 迎浪为 180° ;

g —— 重力加速度, 取为 9.81 m/s^2 ;

m —— S-N 曲线反斜率;

Δm —— S-N 曲线两段反斜率差;

$\Gamma(x, v)$ —— 不完全 GAMMA 函数值;

$\Gamma(x)$ —— 完全 GAMMA 函数值;

T —— 计算疲劳寿命, s, $T = 3.1557 \times 10^7 f_t T_D$;

T_D —— 设计疲劳寿命, 年;

f_t —— 船舶海上航行时间比例系数, 应与 CCS《船体结构疲劳强度指南》的规定一致;

n_l 、 n_s 、 n_h —— 分别为装载工况总数、海况总数和浪向总数;

p_n 、 p_j 、 p_i —— 分别为第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向的发生概率;

$\Delta\sigma_{HG,WV}$ —— 船体梁垂向波浪弯矩产生的应力范围, N/mm^2 , 按下式计算:

$$\Delta\sigma_{HG,WV} = \frac{M_{WV,H} - M_{WV,S}}{W_v}$$

式中: $M_{WV,H}$ —— 未考虑波激振动与砰击颤振影响的中拱波浪弯矩, kNm, 按 CCS《船体结构疲劳强度指南》第 2 章第 3 节相关规定计算;

$M_{WV,S}$ —— 未考虑波激振动与砰击颤振影响的中垂波浪弯矩, kNm, 按 CCS《船体结构疲劳强度指南》第 2 章第 3 节相关规定计算;

W_v —— 计算点的垂向剖面模数, cm^3 ;

ξ —— 应力范围长期 Weibull 分布的形状参数, 按 CCS《船体结构疲劳强度指南》第 3 章第 5 节相关规定选取;

N_R —— 对应于相应超越概率水平的循环数, 按 CCS《船体结构疲劳强度指南》第 3 章第 5 节相关规定选取。

第2章 计算条件

2.1 装载工况

2.1.1 用于评估计及波激振动和砰击颤振的船体结构疲劳强度的装载工况一般应与 CCS《船体结构疲劳强度指南》第 1 章第 7 节的规定一致，特殊情况可另行考虑。

2.1.2 用于评估计及砰击颤振的船体梁极限强度的装载工况，应根据装载手册分别选取使静水中拱弯矩和静水中垂弯矩达到最大的航行工况。对集装箱船，静水中拱弯矩最大工况应从满载最大吃水下的航行工况中选取。

2.2 波浪环境

2.2.1 海浪散布图

对无限航区船舶，一般采用 IACS Rec.34 推荐的北大西洋海浪散布图。特殊情况可另行考虑。

2.2.2 海浪谱

海浪的功率谱密度函数 $S(\omega)$ 一般采用双参数 P-M 谱：

$$S(\omega) = \frac{124H_S^2}{T_Z^4} \omega^{-5} \exp\left(-\frac{496}{T_Z^4} \omega^{-4}\right)$$

实际响应频率为遭遇频率 ω_e 应按下式计算：

$$\omega_e = \omega \left(1 - \frac{\omega V_c}{g} \cos\theta\right)$$

式中： V_c —— 计算航速，m/s，见本章 2.2.3。

2.2.3 航速

除指定航速外，波激振动和砰击颤振计算一般采用四种计算航速 V_c ，分别按下式计算，且不应小于 5kn：

$$V_c = \begin{cases} 100\%V & \text{当 } 0 < H_S \leq 6.0\text{m 时} \\ 75\%V & \text{当 } 6.0\text{m} < H_S \leq 9.0\text{m 时} \\ 50\%V & \text{当 } 9.0\text{m} < H_S \leq 12.0\text{m 时} \\ 25\%V & \text{当 } 12.0\text{m} < H_S \text{ 时} \end{cases}$$

2.2.4 浪向角

除实际船舶设计中指定各浪向角和相应的发生概率以外，一般在 0°至 360°之间，取浪向角间隔不大于 30°，各浪向角的发生概率相等。

2.3 计算要求

2.3.1 水动力计算

(1) 对任一计算装载工况，其水动力模型应根据纵倾和稳性计算手册校核排水量、纵倾角、浮心纵向位置、静水弯矩等，其主要参数误差应控制在以下范围：

排水量：±1%；

纵倾角：±0.1(°)；

浮心纵向位置：±0.2%L；

静水弯矩：±10%。

同时，也应注意检查首尾吃水和纵横稳性高数据。

(2) 初稳性高应考虑对未装满液舱的自由液面修正，如液舱中液体的装载高度大于液舱高度的98%或低于2%，则可不对稳性高进行自由液面修正。

(3) 粘性横摇阻尼可采用试验或经验公式确定，如无适用，可取为横摇临界阻尼值的5%。

(4) 在对线性波激振动响应传递函数 RAO 计算中，船舶遭遇频率范围应能至少覆盖船体梁两节点垂向振动频率，推荐波频输入范围为[0,3.0]rad/s，频率步长不大于 $0.3\sqrt{g/L}$ 。

(5) 采用三维水动力模型计算，其网格单元尺寸应考虑与最小遭遇波长、航速及不规则波频的匹配，以达到稳定收敛的数值解。水动力模型湿表面网格数目应不小于 5000。

2.3.2 振动模态计算

将船体结构简化为两端自由的变截面梁模型（至少 21 个剖面），可采用迁移矩阵法或有限元方法计算船体梁振动的干模态，并应考虑船体长度方向上的重量分布和各剖面垂向振动转动惯量、剪切面积及抗弯惯性矩。

2.3.3 船体结构的应力响应可采用梁模型或有限元等方法进行计算。

2.3.4 结构阻尼可采用试验或经验公式确定，如无适用，对压载工况可取结构临界阻尼值的 1%，对满载工况可取结构临界阻尼值的 3%。

2.4 疲劳计算 S-N 曲线

2.4.1 一般采用本章 2.4.2 所给定的 S-N 曲线形式。如采用其他 S-N 曲线形式，第 3 章 3.1.2 的疲劳损伤计算公式应另行考虑。

2.4.2 S-N 曲线的一般表达如下式：

$$\begin{cases} NS^m = C & \text{当 } S > S_Q \\ NS^{m+\Delta m} = K & \text{当 } S \leq S_Q \end{cases}$$

式中: S —— 应力范围, N/mm^2 ;

N —— 对应于 S 的疲劳失效循环次数;

C 、 K —— S-N 曲线常数;

S_0 —— S-N 曲线二线段交点处的应力范围值, N/mm^2 。

2.5 砰击颤振计算工况简化

2.5.1 对无限航区船舶,可采用本章 2.5.2 和 2.5.3 规定的简化工况进行非线性时域砰击颤振计算评估。

2.5.2 砰击颤振疲劳载荷计算工况

对砰击颤振疲劳载荷的计算,可按如下方案选取计算工况:

- 1) 浪向角: 顶浪至顶斜浪 60° 范围, 间隔不大于 30° ; 发生概率按全浪向等概率确定;
- 2) 海况: IACS Rec.34 海浪散布图中有义波高在 12m 以下、且发生概率在 0.0001 以上的 98 个海况。

2.5.3 砰击颤振极限载荷计算工况

对砰击颤振极限载荷的计算,可按如下步骤进行计算工况的筛选:

- (1) 对船中剖面垂向波浪弯矩作全浪向线性幅频响应算子 (RAO) 计算;
- (2) 按 IACS Rec.34 海浪散布图对垂向波浪弯矩作全浪向全海况短期预报;
- (3) 根据线性短期预报结果作长期极值分析, 按如下方案选取计算工况:
 - 1) 浪向角: 顶浪至顶斜浪 30° 范围, 间隔不大于 30° ; 发生概率按全浪向等概率确定;
 - 2) 海况: 有义波高在 12m 以上, 对垂向波浪弯矩长期极值贡献率最大的 50 个海况。

采用简化工况计算的垂向波浪弯矩线性长期极值应不低于全浪向全海况线性长期极值的 98.5%, 如不满足要求则应按贡献率增加计算海况。

第3章 线性波激振动作用下的船体结构疲劳强度评估

3.1 疲劳损伤计算

3.1.1 应力范围的短期分布

(1) 垂向波浪弯矩波频分量的应力响应

应力的响应谱 $S_\sigma(\omega)$ 应按下列式计算:

$$S_\sigma(\omega) = |H_\sigma(\omega)|^2 S(\omega)$$

式中: $S(\omega)$ —— 海浪的功率谱密度函数, 见第2章 2.2.2;

$H_\sigma(\omega)$ —— 应力响应的传递函数, $(\text{N}/\text{mm}^2)/\text{m}$, 应按下列式计算:

$$H_\sigma(\omega) = \frac{H(\omega)}{W_v} 10^{-3}$$

其中: $H(\omega)$ —— 船舶剖面垂向弯矩的传递函数, $(\text{kN} \cdot \text{m})/\text{m}$;

W_v —— 计算点的垂向剖面模数, m^3 。

功率谱密度的0阶矩 m_0 、2阶矩 m_2 和4阶矩 m_4 , 应分别按下式计算:

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S_\sigma(\omega) d\omega \quad (n = 0, 2, 4)$$

交变应力过程的标准差 σ_x 为应力响应谱0阶矩的函数:

$$\sigma_x = \sqrt{m_0}$$

波浪载荷引起的应力平均跨零频率 f_0 应按下列式计算:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$$

带宽修正系数 $\lambda(m, \varepsilon)$ 应按下列式计算:

$$\lambda(m, \varepsilon) = a(m) + [1 - a(m)](1 - \varepsilon)^{b(m)}$$

式中: $a(m) = 0.926 - 0.033m$;

$$b(m) = 1.587m - 2.323;$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}。$$

(2) 船体水弹性总弯矩的应力响应

波频分量(刚体响应)和波激振动分量(水弹性高频响应)的窄带应力响应统计特性值(如响应的标准差), 应分别按如下各式计算:

$$\text{波频分量: } m_{\text{wave}-n} = \int_0^{\omega_1} \omega^n S_\sigma(\omega) d\omega$$

$$\text{波激振动分量: } m_{\text{springing}-n} = \int_{\omega_1}^{\infty} \omega^n S_\sigma(\omega) d\omega$$

式中: $S_\sigma(\omega)$ —— 应力的响应谱密度函数, 见本章 3.1.1 (1);

ω_1 —— 波频分量和波激振动分量之间的临界频率值, 见图 3.1.1。

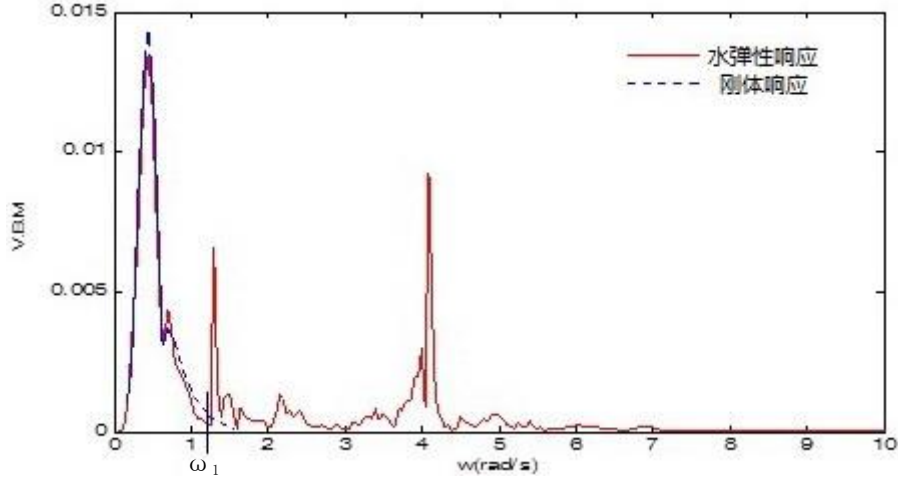


图 3.1.1 典型船舶弹性体垂向波浪弯矩频域响应

波频分量的跨零频率 f_{wave} 和波激振动分量的跨零频率 $f_{\text{springing}}$, 应分别按如下各式计算:

$$f_{\text{wave}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{\text{wave}-2}}{m_{\text{wave}-0}}}$$

$$f_{\text{springing}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{\text{springing}-2}}{m_{\text{springing}-0}}}$$

式中: $m_{\text{wave}-0}$ 、 $m_{\text{wave}-2}$ —— 分别为波频分量的 0 阶矩和 2 阶矩;

$m_{\text{springing}-0}$ 、 $m_{\text{springing}-2}$ —— 分别为波激振动分量的 0 阶矩和 2 阶矩。

应力标准差 σ_i 、跨零频率 f_0 及应力范围带宽修正系数 $\lambda(m, \varepsilon)$, 应分别按如下各式计算:

$$\sigma_i = \sqrt{m_{\text{springing}-0} + m_{\text{wave}-0}}$$

$$f_0 = \frac{\sqrt{f_{\text{springing}}^2 m_{\text{springing}-0} + f_{\text{wave}}^2 m_{\text{wave}-0}}}{\sigma_i}$$

$$\lambda(m, \varepsilon) = \frac{v_p}{v_c} \left[\lambda_H^{m/2+2} \left(1 - \sqrt{\frac{\lambda_w}{\lambda_H}} \right) + \frac{m \Gamma\left(\frac{m}{2} + \frac{1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right)} \sqrt{\pi \lambda_w \lambda_H} \right] + \frac{v_w}{v_c} \lambda_w^{m/2}$$

式中: $v_p = \lambda_H v_H \sqrt{1 + \frac{\lambda_w}{\lambda_H} \left(\frac{v_w}{v_H} \varepsilon \right)^2}$;

$$v_c = \sqrt{\lambda_H v_H^2 + \lambda_w v_w^2};$$

$$\lambda_H = \frac{m_{springing-0}}{\sigma_i^2};$$

$$\lambda_w = \frac{m_{wave-0}}{\sigma_i^2};$$

$$v_H = f_{springing};$$

$$v_w = f_{wave};$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}.$$

3.1.2 疲劳累积损伤度计算

设计疲劳寿命期内, 波频分量和波激振动引起宽带应力响应所产生的总疲劳损伤度 D_S , 应按下式计算:

$$D_S = \frac{T}{C} (2\sqrt{2})^m \Gamma \left(1 + \frac{m}{2} \right) \sum_{n=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_h} [\lambda_{nji} p_n p_j p_i f_{0,nji} (\sigma_{nji})^m \mu_{nji}]$$

式中: λ_{nji} —— 第 n 装载工况、第 j 海况、第 i 浪向垂向波浪弯矩波频分量或总弯矩应力响应的带宽修正系数, 分别按本章 3.1.1 (1) 或 3.1.1 (2) 中的 $\lambda(m, \varepsilon)$ 计算;

$f_{0,nji}$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况、第 i 浪向垂向波浪弯矩波频分量或总弯矩应力响应的跨零上穿频率, Hz, 分别按本章 3.1.1 (1) 或 3.1.1 (2) 中的 f_0 计算;

σ_{nji} —— 第 n 装载工况、第 j 海况、第 i 浪向垂向波浪弯矩波频分量或总弯矩应力响应的标准差, N/mm², 分别按本章 3.1.1 (1) 中的 σ_x 或 3.1.1 (2) 中的 σ_i 计算;

$$\mu_{nji} = 1 - \frac{\Gamma \left[1 + \frac{m}{2}, v_{nji}^2 \right] - v_{nji}^{-\Delta m} \Gamma \left[1 + \frac{m+\Delta m}{2}, v_{nji}^2 \right]}{\Gamma \left[1 + \frac{m}{2} \right]};$$

$$v_{nji} = \frac{S_Q}{2\sqrt{2}\sigma_{nji}}.$$

3.2 线性波激振动对疲劳损伤的贡献度

3.2.1 线性波激振动对疲劳损伤的贡献度 α_S , 应按下式计算, 且不应小于零:

$$\alpha_S = \frac{D_{total,S}}{D_{wave,S}} - 1$$

式中： $D_{wave,S}$ ——垂向波浪弯矩波频分量应力响应（见本章 3.1.1（1））产生的疲劳累积损伤，按本章 3.1.2 计算；

$D_{total,S}$ ——垂向波浪总弯矩应力响应（见本章 3.1.1（2））产生的疲劳累积损伤，按本章 3.1.2 计算。

3.3 计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估

3.3.1 线性波激振动影响系数 f_{es} 应根据下列方程求解得到：

$$\alpha_S = f_{es}^m \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_{ts}\right) + \nu_{ts}^{-\left(\frac{\Delta m}{\xi}\right)} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_{ts}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_{ws}\right) + \nu_{ws}^{-\left(\frac{\Delta m}{\xi}\right)} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_{ws}\right)} - 1$$

式中： α_S —— 线性波激振动对疲劳损伤的贡献度，按本章 3.2.1 计算；

$$\nu_{ts} = \left(\frac{S_Q}{f_{es} \cdot \Delta\sigma_{HG,WV}} \right)^\xi \ln N_R ;$$

$$\nu_{ws} = \left(\frac{S_Q}{\Delta\sigma_{HG,WV}} \right)^\xi \ln N_R 。$$

3.3.2 计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估应按 CCS《船体结构疲劳强度指南》进行，所采用的船体梁垂向波浪弯矩应考虑线性波激振动影响系数 f_{es} 。

第4章 砰击颤振和波激振动作用下的船体结构疲劳强度评估

4.1 应力响应时间历程

4.1.1 根据第 1 章 1.4.2 的要求, 应将非线性时域计算得到的船体梁垂向波浪弯矩的时间历程转化为疲劳计算点的应力时间历程。

4.1.2 用于疲劳分析的载荷历程应具有足够多的统计样本, 一般取 1 小时时间历程。

4.2 疲劳损伤计算

4.2.1 垂向波浪弯矩波频分量引起的疲劳累积损伤度

采用雨流计数法对应力波频分量进行计数统计, 获得各装载工况、海况和浪向角下的应力范围 $S_{w,k}$ 和相应的应力循环次数 $n_{nji}(S_{w,k})$ 。

结合 S-N 曲线和 Miner 线性累积损伤准则, 单位时间内第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角的疲劳损伤度 d_{nji} , 应按下式计算:

$$d_{nji,w} = \sum_{k=1}^{n_{s,w}} \frac{n_{nji}(S_{w,k})}{N(S_{w,k}) \cdot t_{nji,w}}$$

式中: $n_{nji}(S_{w,k})$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下第 k 个应力范围 $S_{w,k}$ 的循环次数;

$N(S_{w,k})$ —— 根据 S-N 曲线获得的对应于应力范围 $S_{w,k}$ 的疲劳失效循环次数;

$n_{s,w}$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下应力范围的个数;

$t_{nji,w}$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下载荷的拟合时间, s。

计算点处波频分量的疲劳累积损伤度 $D_{wave,t}$ 应按下式计算:

$$D_{wave,t} = T \sum_{n=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_h} p_n p_j p_i d_{nji,w}$$

4.2.2 总弯矩引起的疲劳累积损伤度

采用雨流计数法对总弯矩产生的应力进行计数统计, 获得各装载工况、海况和浪向角下的应力范围 $S_{t,k}$ 和相应的应力循环次数 $n_{nji}(S_{t,k})$ 。

结合 S-N 曲线和 Miner 线性累积损伤准则, 单位时间内第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角的疲劳损伤度 d_{nji} , 应按下式计算:

$$d_{nji,t} = \sum_{k=1}^{n_{s,t}} \frac{n_{nji}(S_{t,k})}{N(S_{t,k}) \cdot t_{nji,t}}$$

式中: $n_{nji}(S_{t,k})$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下第 k 个应力范围 $S_{t,k}$ 的循环次数;

$N(S_{t,k})$ —— 根据 S-N 曲线获得的对应于应力范围 $S_{t,k}$ 的疲劳失效循环次数;

$n_{S,t}$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下应力范围的个数;

$t_{nji,t}$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下载荷的拟合时间, s。

计算点处总弯矩的疲劳累积损伤度 $D_{total,t}$ 应按下式计算:

$$D_{total,t} = T \sum_{n=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_h} p_n p_j p_i d_{nji,t}$$

4.3 砰击颤振和波激振动对疲劳损伤的贡献度

4.3.1 砰击颤振和波激振动对疲劳损伤的贡献度 α_{WS} , 应按下式计算, 且不应小于零:

$$\alpha_{WS} = \frac{D_{total,t}}{D_{wave,t}} - 1$$

式中: $D_{wave,t}$ —— 垂向波浪弯矩波频分量应力响应产生的疲劳累积损伤, 按本章 4.2.1 计算;

$D_{total,t}$ —— 垂向波浪总弯矩应力响应产生的疲劳累积损伤, 按本章 4.2.2 计算。

4.4 计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估

4.4.1 砰击颤振和波激振动影响系数 f_{ews} 应根据下列方程求解得到:

$$\alpha_{WS} = f_{ews}^m \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_{tws}\right) + v_{tws}^{-\left(\frac{\Delta m}{\xi}\right)} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m+\Delta m}{\xi}, v_{tws}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_{ws}\right) + v_{ws}^{-\left(\frac{\Delta m}{\xi}\right)} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m+\Delta m}{\xi}, v_{ws}\right)} - 1$$

式中: α_{WS} —— 砰击颤振和波激振动对疲劳损伤的贡献度, 按本章 4.3.1 计算;

$$v_{tws} = \left(\frac{S_Q}{f_{ews} \cdot \Delta\sigma_{HG,WV}} \right)^\xi \ln N_R ;$$

$$v_{ws} = \left(\frac{S_Q}{\Delta\sigma_{HG,WV}} \right)^\xi \ln N_R 。$$

4.4.2 计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估应按 CCS《船体结构疲劳强度指南》进行, 所采用的船体梁垂向波浪弯矩应考虑砰击颤振和波激振动影响系数 f_{ews} 。

第5章 砰击颤振作用下的船体梁极限强度评估

5.1 垂向波浪弯矩时间历程

5.1.1 根据第1章 1.4.3 的流程,对垂向波浪弯矩采用短期海况下非线性时域计算,应同时计算砰击颤振弯矩时间历程和不考虑颤振效应的刚体非线性弯矩时间历程。

5.1.2 用于极值分析的载荷历程应具有足够多的统计样本,一般取3小时时间历程。

5.2 垂向波浪弯矩极值分析

5.2.1 对非线性时域计算得到的各短期海况下垂向波浪弯矩峰值进行 Weibull 分布参数拟合,其累积分布函数 $F_0(x)$ 应按下式计算:

$$F_0(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\delta}{\eta}\right)^\beta}$$

式中: η —— 尺度参数;

β —— 形状参数;

δ —— 位置参数,可取 $\delta = 0$ 。

5.2.2 对垂向波浪弯矩,长期极值的超越概率 $Q(x)$ 取 10^{-8} ,对应的极值应按下式计算:

$$Q(x) = P\{X \geq x\} = \sum_i \sum_j p_j p_i (1 - F_{0ji}(x))$$

式中: X —— 对应超越概率下的垂向弯矩极值;

$F_{0ji}(x)$ —— 第 j 海况和第 i 浪向角条件下的垂向波浪弯矩峰值累积分布函数,按本章 5.2.1 计算。

5.3 计及砰击颤振的船体梁极限强度评估

5.3.1 船体梁任一横剖面处的极限弯曲能力应满足以下要求:

$$\gamma_s M_s + \gamma_{whip} f_{whip} M_w \leq \frac{M_U}{\gamma_R}$$

式中: M_s —— 许用静水弯矩, kNm, 按 CCS 规范对相关船型的规定计算;

M_w —— 垂向波浪弯矩, kNm, 按 CCS 规范对相关船型的规定计算;

M_U —— 船体梁垂向极限弯曲能力, kNm, 按 CCS 规范对相关船型的规定计算;

γ_s 、 γ_R —— 对应于静水弯矩船体梁极限能力的分项安全系数,按 CCS 规范对相关船型的规定选取;

γ_{whip} —— 对应于颤振弯矩影响的分项安全系数,取为:

$$\gamma_{whip} = 1.05;$$

f_{whip} —— 颤振修正系数，对中拱和中垂分别给出，应按下式计算：

$$f_{whip} = C_{un} \frac{M_{whip}}{M_{nonl}}$$

其中： M_{whip} —— 按本章 5.2.2 计算得到的颤振中拱或中垂弯矩极值；

M_{nonl} —— 按本章 5.2.2 计算得到的不考虑颤振效应的刚体非线性中拱或中垂弯矩极值；

C_{un} —— 计及工况简化和随机波影响及其他计算不确定性的修正系数，取为：

$$C_{un} = 1.154;$$

附录 阻尼数值模型

1 横摇阻尼模型

1.1 在船舶耐波性计算过程中,需在船体运动方程中计入附加阻尼力,以模拟船体的粘性横摇阻尼和各类附体产生的横摇阻尼作用。对非线性横摇阻尼,可建立由线性阻尼项和二次阻尼项组成的模型如下:

$$B_{44} = B_1 + B_2 |\dot{\xi}_4| = \left(b_1 + b_2 \frac{|\dot{\xi}_4|}{\omega_4} \right) B_4^{crit}$$

式中: B_{44} ——横摇阻尼;

B_1 、 B_2 ——分别为线性阻尼系数和二次阻尼系数;

$\dot{\xi}_4$ 、 ω_4 ——分别为横摇角速度和横摇圆频率, rad/s;

B_4^{crit} ——横摇临界阻尼,应按下式计算:

$$B_4^{crit} = 1025 \cdot \Delta \cdot g \cdot \frac{GM \cdot T_R}{\pi}$$

其中: Δ —— 船舶排水量, t;

GM —— 初稳性高度, m;

T_R —— 横摇周期, s。

以临界阻尼值 B_4^{crit} 做无量纲化,则该模型由两个系数决定,即与临界阻尼值线性相关的系数 b_1 和与横摇角速度相关的二次项系数 b_2 。当在线性频域内求解时,可只确定线性阻尼项,需给定系数 b_1 。横摇阻尼 B_{44} 可采用试验或经验公式确定,如无适用,可取为横摇临界阻尼的5%。

2 结构阻尼模型

2.1 水弹性计算时,可采用在波浪阻尼项中加入附加阻尼的方法,以考虑结构阻尼和货物阻尼的影响。结构阻尼一般在临界阻尼值的1%至3%之间,对高阶振动模态,其值会增大。结构阻尼模型如下:

$$B_{ii} = \eta_{ii} \frac{K_{ii} T_{ii}}{\pi}$$

式中: B_{ii} ——第*i*阶振动模态下的附加阻尼;

K_{ii} ——第*i*阶振动模态下含静水力和结构的总刚度;

T_{ii} ——第*i*阶振动模态下的自振周期;

η_{ii} ——第*i*阶振动模态下,表达为临界阻尼百分数的系数。

加入结构阻尼力时,应保证计算剖面处水动力与惯性力的良好平衡。结构阻尼可采用试验或经验公式确定,如无适用, η_{ii} 可取1%和3%分别用于船舶压载和满载工况。