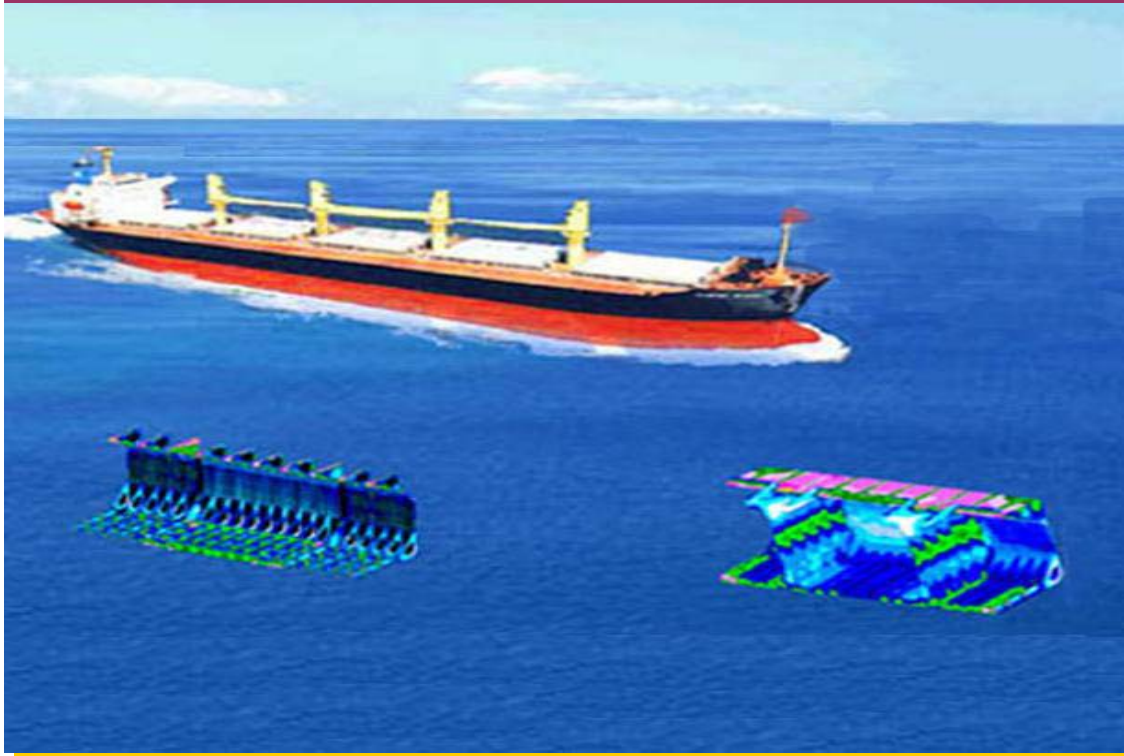




中 国 船 级 社

## 散货船结构强度直接计算分析指南



2003.5

目 录

第 1 章 总则 .....1

1.1 一般规定 .....1

1.2 定义 .....1

第 2 章 载荷直接计算 .....3

2.1 一般规定 .....3

2.2 静水载荷 .....3

2.3 波浪载荷 .....3

第 3 章 设计载荷 .....6

3.1 货物压力 .....6

3.2 舷外水压力 .....7

3.3 端面弯矩 .....10

第 4 章 结构模型 .....11

4.1 坐标规定 .....11

4.2 模型网格划分 .....11

第 5 章 边界条件 .....13

第 6 章 计算工况 .....14

第 7 章 强度标准 .....16

第 8 章 屈曲分析 .....17

8.1 一般规定 .....17

8.2 计算方法 .....18

## 第1章 总则

### 1.1 一般规定

1.1.1 对于船长大于或等于 190m 的散装货船或结构型式超出 CCS《钢质船舶入级与建造规范》(以下简称《钢规》)规定范围的散货船应根据本指南进行结构直接计算分析。

1.1.2 本指南给出了对于散货船主要构件进行直接计算的详细方法和评估要求。

1.1.3 结构模型和载荷规定应能充分反映在局部载荷和总纵弯矩载荷作用下的下述结构响应：

- (1) 纵向构件的应力；
- (2) 主要横向构件（包括横舱壁）的应力；
- (3) 主要构件的屈曲控制。

1.1.4 一般情况下，主要构件的尺寸应满足《钢规》的有关要求，否则应征得经本社同意。

1.1.5 送审的直接计算分析文件

- (1) 所使用的图纸清单；
- (2) 结构有限元模型的详细描述；
- (3) 验证结构模型和相关物理属性图形；
- (4) 所使用的材料特性详细情况；
- (5) 边界条件的详细描述；
- (6) 所施加的载荷的详细情况；
- (7) 描述与载荷有关的结构模型的响应的图形和结果；
- (8) 总体和局部变形的归纳与图形；
- (9) 描述所有构件的 von Mises 应力，各方向应力和剪应力不超过强度标准的汇总和详图；
- (10) 板的屈曲分析和结果；
- (11) 与强度标准比较结果的输出表格；
- (12) 必要时，对结构的建议修改方案，包括修改后的应力评估和屈曲特性。

### 1.2 定义

1.2.1 单位制定义

质量：吨(t)；

长度：米(m)；

时间：秒(s)；

力：牛顿(N)或千牛顿(kN)；

应力：牛顿/毫米<sup>2</sup>(N/mm<sup>2</sup>)；

压力：千牛/米<sup>2</sup>(kN/m<sup>2</sup>)。

## 1.2.2 符号规定

L——船长, (m); 与《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同;

B——船宽, (m); 与《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同;

D——型深, (m); 与《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同;

d——吃水, (m); 与《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同;

$C_b$ ——方形系数; 与《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同;

V——航速, (kn);

g——重力加速度,  $g=9.81\text{m/s}^2$ ;

$C_w$ ——波浪系数;

$\rho$ ——海水密度,  $\rho=1.025\text{t/m}^3$ ;

$\sigma_e$ ——von Mises 应力 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$ ;

$\sigma_x$ ——单元 x 方向的应力 ( $\text{N/mm}^2$ );

$\sigma_y$ ——单元 y 方向的应力 ( $\text{N/mm}^2$ );

$\tau_{xy}$ ——单元 xy 平面的剪应力 ( $\text{N/mm}^2$ );

$\sigma_l$ ——船体梁纵向的应力 ( $\text{N/mm}^2$ );

$\sigma_w$ ——船体梁横向或垂向的应力 ( $\text{N/mm}^2$ );

$\tau$ ——剪应力 ( $\text{N/mm}^2$ ); 对于纵桁和肋板取腹板总深度的平均剪应力;

k——材料换算系数;

E——材料弹性模量。对钢材,  $E = 2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ;

$\mu$ ——材料泊松比。对钢材,  $\mu = 0.3$ 。

## 第2章 载荷直接计算

### 2.1 一般规定

船舶在海上航行时，除承受浮力、货物载荷及相应的惯性载荷外，还承受来自波浪引起的波浪载荷，本节规定了船舶静水载荷和波浪载荷计算的基本原则。

船舶的静水载荷和波浪载荷可按本社的认可的计算程序进行计算。

### 2.2 静水载荷

#### 2.2.1 重量分布曲线

将各项重量（船体钢材、设备、装置、货物）沿船长方向分解成梯形重量分布块，逐项叠加形成给定工况下的重量分布曲线  $w(x)$ 。

对于船长 150m 及以上的单边壳散货船一般以肋距为块计算重量分布曲线  $w(x)$

#### 2.2.2 浮力曲线

基于船舶静水平衡条件，求得船舶的平衡浮态（以首吃水、尾吃水表达），根据船舶的形状进而求得沿船长分布的浮力曲线  $b(x)$ 。

#### 2.2.3 剪力、弯矩曲线

作用在船体梁上的静水剪力  $N_s(x)$  和静水弯矩  $M_s(x)$  可通过下式求得：

$$N_s(x) = \int_0^x [w(x) - b(x)] dx \quad \text{kN}$$

$$M_s(x) = \int_0^x N_s(x) \cdot dx = \int_0^x \int_0^x [w(x) - b(x)] dx \quad \text{kN} \cdot \text{m}$$

由于船体首尾端是自由端，当首尾端点处的剪力、弯矩计算值不为零时，需对剪力曲线和弯矩曲线予以修正。

### 2.3 波浪载荷

#### 2.3.1 适用范围

本节的计算方法适用船舶：

$$L \leq 500 \text{ m}$$

$$L/D \leq 17$$

#### 2.3.2 计算方法及其假定条件

(1) 波浪载荷可用二维线性切片理论或三维线性理论进行计算

(2) 海况条件：

① 海浪谱采用下述 P-M 谱：

$$S(\omega, H_{\frac{1}{3}}, T_2, \theta) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} 124 H_{\frac{1}{3}} T_2^{-4} \omega^{-5} \exp\left(-\frac{496}{T_2^4 \omega^4}\right) \cos^2 \theta & -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \theta \text{ 为其他值} \end{cases}$$

式中：

$\theta$  ——组合波与主浪向的夹角，rad；

$2/\pi \cos 2\theta$  ——能量扩散函数；

$H_{\frac{1}{3}}$  ——有义波高，m；

$T_2$  ——海浪跨零周期，s；

$\omega$  ——波浪圆频率，rad/s。

② 进行波浪载荷长期预报时，认为对应每一周期的波高呈“瑞雷 (Rayleigh)”分布，而航向属于均匀分布。

(3) 计算波浪弯矩时取航速为 0 节，计算波浪压力时取为船舶设计航速的 2/3。

(4) 计算波浪弯矩时概率水平取  $10^{-8}$ ，计算波浪压力时概率水平取  $10^{-4}$ 。

### 2.3.3 船舶的横摇惯性半径和横摇临界阻尼系数：

在船舶设计阶段，船舶的横摇惯性半径可取为：0.35B(满载)

0.32B(压载)

船舶的横摇临界阻尼系数可取为：0.10

### 2.3.4 波浪载荷计算

#### (1) 垂向波浪弯矩 $M_v$ 和剪力 $F_v$

设按上述方法和规定计算所得的船中剖面波浪垂向弯矩为  $M_w$ ，沿船长的设计波浪弯矩  $M_v$  通过下式求得：

$$\text{中拱 } M_v(+) = M \cdot C_{HB} \cdot M_w \quad \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{中垂 } M_v(-) = -M \cdot C_{SB} \cdot M_w \quad \text{kN} \cdot \text{m}$$

式中： $M_w$ ——由程序计算所得的船中剖面处的垂向弯矩，kN·m；

$M$ ——弯矩沿船长的分布系数，一般情况下可按《钢规》选取；

$C_{HB}$ ， $C_{SB}$ ——非线性修正系数，按下式确定：

$$C_{SB} = \frac{110(C_b + 0.7)}{95C_b + 55(C_b + 0.7)}$$

$$C_{HB} = \frac{190C_b}{95C_b + 55(C_b + 0.7)}$$

式中： $C_b$ ——方形系数，但不小于 0.6。

程序计算得出垂向波浪剪力为  $F_w$ ，则沿船长的设计垂向波浪剪力  $F_v$  为：

$$\text{中拱 } F_v(+) = F_1 C_s F_w \quad \text{kN}$$

$$\text{中垂 } F_v(-) = -F_2 C_s F_w \quad \text{kN}$$

式中：  $F_w$ ——由程序计算所得的船中剖面处的垂向波浪剪力，kN；

$F_1, F_2$ ——剪力分布系数，可按《钢规》选取

$C_s$ ——修正系数，按表 2.3.4 确定。

表 2.3.4 修正系数  $C_s$

船长 (m)	$C_s$	船长 (m)	$C_s$	船长 (m)	$C_s$	船长 (m)	$C_s$
90	1.5212	200	1.2727	320	1.3348	420	1.3471
100	1.4573	220	1.2771	340	1.3474	440	1.3536
120	1.3705	240	1.2870	350	1.3313	460	1.3604
140	1.3190	260	1.3003	360	1.3327	480	1.3674
160	1.2900	280	1.3152	380	1.3365	500	1.3743
180	1.2760	300	1.3276	400	1.3414		

### 第3章 设计载荷

#### 3.1 货物压力

舱内货物的压力通过下式确定：

$$P_i = 10\rho_c(1 + 0.35\frac{a_0}{C_b})k_b h_d \quad \text{kN/m}^2$$

式中：

$\rho_c$ ——货物密度  $\text{t/m}^3$ ；

$$a_0 = \frac{3}{L} [10.75 - (\frac{300-L}{100})^{1.5} + 0.067V\sqrt{L}] \quad (90\text{m} \leq L < 300\text{m})$$

$$= \frac{1}{L} [32.25 + 0.2V\sqrt{L}] \quad (300\text{m} \leq L < 500\text{m})$$

$$k_b = \sin^2 \alpha \tan^2 (45^\circ - 0.5\delta) + \cos^2 \alpha$$

$\alpha$ ——板与水平面之间的夹角（如，舱壁、舷侧板为  $90^\circ$ ，内底板为  $0^\circ$ ）；

$\delta$ ——货物的休止角（矿石和煤为  $35^\circ$ ，盐、黄砂、石子、谷物等为  $30^\circ$ ，散装水泥为  $25^\circ$ ）；

$h_d$ ——计算点至货物顶面的垂直距离，m。货物顶面的横向形状如图 3.1，假定舱内货物沿船长方向是均匀分布的。

货物顶面，沿纵向均布；沿横向，为抛物线方程：

$$z_s = h \times (1 - \frac{y_s^2}{b^2})$$

式中： $b=B/2$ ， $B$  为船宽；

顶面至连线的最大距离为 
$$h = \frac{b}{2} \tan \delta \quad (\delta = 35^\circ)$$

抛物线部分的面积为 
$$A = \frac{2}{3} b^2 \tan \delta$$

$$h_d = z_s + h_0 + h_{db} - z$$

$h_d$ ——货物顶面至计算点的距离，m；

$z_s$ ——货物顶面至连线的距离，m；

$h_{db}$ ——双层底高度，m；

$z$ ——计算点的垂向坐标值，从基线量起，m；

$h_0$ ：根据货舱的载货量、货物密度以及横剖面形状计算，不小于底边舱斜板顶点至内底板的距离，m。



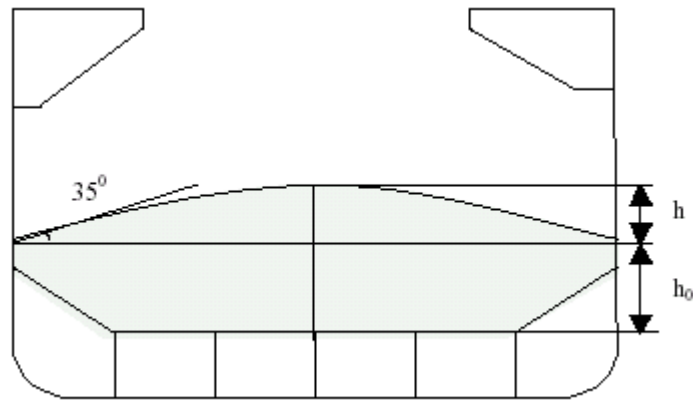


图 3.1 货物顶面形状

### 3.2 舷外水压力

对于舷外水压力，可按 2.3 节要求进行直接计算或可采用下述两种方法之一：

#### 3.2.1 方法一

##### (1) 满载工况

舷外水压力由静水压力和波浪水动压力两部分组成

$$\text{在基线处：} \quad P_b = 10d + 1.5C_w \quad \text{kN/m}^2$$

$$\text{在水线处：} \quad P_w = 3C_w \quad \text{kN/m}^2$$

$$\text{在舷侧顶端处：} \quad P_s = 3P_0 \quad \text{kN/m}^2$$

$$\text{甲板上的水动压力：} \quad P_s = 2.4P_0 \quad \text{kN/m}^2$$

式中：

$$P_0 = C_w - 0.67(D - d)$$

$$C_w = 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1.5} \quad 90\text{m} \leq L \leq 300\text{m}$$

$$= 10.75 \quad 300\text{m} < L < 350\text{m}$$

$$= 10.75 - \left(\frac{L - 350}{150}\right)^{1.5} \quad 350\text{m} \leq L \leq 500\text{m}$$

##### (2) 其他状态

$$\text{在基线处：} \quad P_b = 10d_a \quad \text{kN/m}^2$$

$$\text{在水线处：} \quad P_w = 0.0 \quad \text{kN/m}^2$$

式中： $d_a$  为对应装载工况下的实际吃水，m。

上述给出了基线、水线、舷侧顶端处的水动压力计算公式，舷侧其他部位的舷外水压力按线性插值确定。

#### 3.2.2 方法二

##### (1) 静水压力

在基线处： $P_b = 10d_a$   $\text{kN/m}^2$

在水线处： $P_w = 0.0$   $\text{kN/m}^2$

## (2) 波浪压力

水线处的水动力压力 ( $\text{kN/m}^2$ ):

$$P_{WL} = \frac{f}{4} \max(p_1, p_2)$$

$$p_1 = p_{11} + 135 \frac{|\bar{y}|}{B+75} - 1.2(T_1 - Z_w)$$

$$p_{11} = 3k_s C + k$$

$$p_2 = 13 \left[ |\bar{y}| \frac{50c}{2(B+75)} + C_B \frac{|\bar{y}| + k_f}{14} \left( 0.7 + 2 \frac{Z_w}{T_1} \right) \right]$$

水线处  $|\bar{y}| = B/2$ ;  $Z_w = T_1$ 。

舳部的水动力压力 ( $\text{kN/m}^2$ ):

$$P_{BS} = \frac{f}{4} \max(p_1, p_2)$$

$p_1$  和  $p_2$  与水线处的计算公式一样, 但  $|\bar{y}| = B/2$ ;  $Z_w = 0.0$ 。

底部的水动力压力 ( $\text{kN/m}^2$ ):

$$P_B = l_f \frac{f}{4} \max(p_1, p_2)$$

$p_1$  和  $p_2$  与水线处的计算公式一样, 但  $|\bar{y}| = B/4$ ;  $Z_w = 0.0$ 。

舷侧水线以上的动压力

$$P_{DK-side} = P_{WL} - \frac{h}{2} \cdot \frac{f}{4}$$

$h$  —— 从静止水线到载荷点的高度, m。

甲板 (舱口盖) 上的动压力

$$P_{dk} = 19.6 \cdot \sqrt{H}$$

其中： $H = 0.14 \cdot A_i \cdot \sqrt{\frac{V \cdot L}{C_B}} - d_f$

$A_i$  —— 与舱口盖中点的纵向位置有关的系数, 按表 3.2.2(2) 选取。

$V$  —— 船舶的设计航速, kn, 但不小于 13 kn;

$L$  —— 船长, m;

$C_B$  —— 方型系数;

$d_f$  —— 从夏季载重线到舱口围板顶点的垂向距离, m。

表 3.2.2(2)

到首垂线的距离	$A_i$
FP	2.70
0.05L	2.16
0.10L	1.70
0.15L	1.43
0.20L	1.22
0.25L	1.00

其中：

$T_1$ ——吃水 (m)

$$C = 10.75 - [(300 - L)/100]^{3/2} \quad 90\text{m} \leq L \leq 300\text{m}$$

$$= 10.75 \quad 300\text{m} < L \leq 350\text{m}$$

$$= 10.75 - [(L - 350)/150]^{3/2} \quad 350\text{m} < L \leq 500\text{m}$$

$A_R$ ——横摇角

$$= \frac{0.75c}{B^{0.34}}$$

$$c = (1.25 - 0.025 \frac{2k_r}{\sqrt{GM}}) k$$

式中：

$$k = 1.2 \quad (\text{没有舦龙骨})$$

$$= 1.0 \quad (\text{有舦龙骨})$$

$$= 0.8 \quad (\text{有横摇阻尼设备})$$

$k_r$ ——横摇回转半径

$GM$ ——初稳性高度 (m)

$$k_r = 0.39 B \quad (\text{均匀质量分布})$$

$$= 0.25 B \quad (\text{矿砂船})$$

$$GM = 0.12 B$$

$y$ ——中心线到载荷点的横向水平距离,  $B/4 \leq y \leq B/2$

$k_v$ ——速度系数

$V$ ——最小服务航速 (knots)

$f$ ——概率系数

$$= 4 \quad (10^{-4})$$

$$= 8 \quad (10^{-8})$$

$$k_s = C_B + \frac{0.83}{\sqrt{C_B}} \quad (\text{在为垂线及其以后区域})$$

$$= C_B \quad (0.2 L \text{ 和 } 0.6 L \text{ 之间})$$

$$= C_B + \frac{1.33}{C_B} \quad (\text{在首垂线及其以前区域})$$

在特定点,  $k_s$  线性变化

$$l_f = 1.0 \quad (\text{在 AP 及其以后区域})$$

$$= 0.5 \quad (0.2 L \text{ 和 } 0.6 L \text{ 之间})$$

$$= 1.0 \quad (\text{在 FP 及其以前区域})$$

在上述各指定点之间,  $l_f$  线性变化。

$k_f$ ——取  $T_1$  和  $T_f$  之间的较小者

$T_f$ ——对应所选定的横剖面, 从水线至舷侧顶部的垂直距离, 但不超过  $0.8C$ 。

### 3.3 端面弯矩

3.3.1 施加在端面上的弯矩应为端面处的实际弯矩, 包括静水弯矩  $M_s$  和波浪弯矩  $M_w$ 。当不能得到实际弯矩时, 可按下列 3.3.2~3.3.5 款的所述的方法替代。

3.3.2 波浪弯矩  $M_w$  按照 CCS《钢规》计算确定, 中拱为正。

3.3.3 静水弯矩  $M_s$  取对应工况的模型范围内的最大弯矩如无对应工况, 则可选取出现最大 (或最小) 弯矩对应的满载吃水工况, 中拱为正, 并按 3.3.4 款进行修正。

3.3.4 端面弯矩由静水弯矩  $M_s$ 、波浪弯矩  $M_w$  和修正弯矩  $M$  三部分组成:

$$M = M_s + M_w - M_r$$

3.3.5 修正弯矩  $M$  的计算:

修正弯矩  $M$  是由于局部载荷引起的附加弯矩。

(1) 当如图 4.1 所示的  $L_1 \approx L_2 \approx 0.5L_m$  时

中间舱段模型的线性均布压力为  $Q_m$ , 两端舱段的线性均布压力为  $Q_e$ , 沿  $Z$  轴正向为正值:

$$Q_m = P_b \times b - W_{mcargo} / L_m$$

$$Q_e = P_b \times b - W_{ecargo} / L_e$$

$P_b$ : 船底外压, 见 3.2 ( $\text{kN/m}^2$ )

$W_{mcargo}$ : 中间货舱的货物重量 (含压载水的重量), 当采用半宽模型时, 取舱内总重量的一半 ( $\text{kN}$ )

$W_{ecargo}$ : 端部货舱的货物重量 (含压载水的重量), 当采用半宽模型时, 取舱内总重量的一半 ( $\text{kN}$ )

$L_e$ : 与  $W_{ecargo}$  对应的端部货舱长度, ( $\text{m}$ )

$L_m$ : 中间货舱长度, ( $\text{m}$ )

$L_0$ : 舱段模型的总长度, ( $\text{m}$ )

$b$ : 模型的宽度, 当采用半宽模型时  $= B/2$ ,  $B$  为型宽

$$M_r = \frac{3}{32} \times Q_m L_0^2 + \frac{1}{32} \times Q_e L_0^2 \quad \text{kN} \cdot \text{m}$$

(2) 当如图 4.1 所示的  $L_1 \neq L_2 \neq 0.5L_m$  时, 可用简单梁算法进行计算。此时, 压力可采用本款(1)中计算的值,  $M_r$  取模型中最大值。

## 第4章 结构模型

### 4.1 坐标规定

x----沿船长方向，向首为正；

y----沿横向，从纵中剖面向左为正；

z----沿垂向，向上为正。

### 4.2 模型网格划分

4.2.1 采用三维有限元模型对散装货船主要构件进行强度直接计算，模型范围要求包括船中货舱区的 1/2 个货舱+1 个货舱+1/2 个货舱，垂向范围为船体型深。一般来说，强度评估采用中间一个货舱（含舱壁）的结果(见图 4.1)。

4.2.2 主要构件和载荷对称于纵中剖面时，则可以仅模型化船体结构的右舷（或左舷）。而一般情况下非对称载荷可以分解为相对于纵中剖面对称和反对称的载荷来处理(见图 4.2)，也可以采用全宽模型。

4.2.3 船体结构有限元网格沿船壳横向按纵骨间距或类似的间距划分，纵向按肋骨间距或类似的间距大小划分，网格形状尽量接近正方形。

4.2.4 一般来讲，船体的外板结构，强框架、纵桁、平面舱壁的桁材、肋骨等的高腹板以及槽型舱壁和壁凳采用 4 节点板壳单元模拟，在高应力区和高应力变化区尽可能避免使用三角形单元，如：减轻孔、人孔，舱壁与凳连接处，邻近肘板或结构不连续处，尽量少用三角形单元。

4.2.5 对于承受水压力和货物压力的各类板上的扶强材用梁单元模拟，并考虑偏心的影响。纵桁、肋板上加强筋、肋骨和肘板等主要构件的面板和加强筋可用杆单元模拟。若考虑到网格的布置和大小划分的困难，部分区域一个线单元可以用来模拟一根或多根梁/杆单元。

4.2.6 船底纵桁和肋板在垂直方向布置应不少于 3 个单元。舱壁最底部的单元一般情况下应尽量划分为正方形单元。

4.2.7 舷侧肋骨可以定义为板元或梁元，当肋骨腹板的高度与舷侧的网格尺寸之比小于 1/3 时，可用梁元。

4.2.8 槽型舱壁和壁凳：每一个翼板和腹板至少应划分为一个板元；在槽型舱壁下端接近底凳处的板单元和凳板的邻近单元，其长宽比系数接近 1。

4.2.9 主要构件的减轻孔、人孔，特别是双层底邻近舱壁处桁材和邻近底凳肘板肋板的开孔，可以用等效板厚的板元来替代这些开孔的影响。

4.2.10 在前后端面中和轴与中纵剖面相交处各建一个独立点，端面各纵向构件节点自由度 $\delta_x$ 、 $\delta_z$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$ 与独立点相关。

4.2.11 结构尺寸采用船舶建造厚度。

4.2.12 板单元许用应力标准采用的是膜应力，即：弯曲板单元的中面应力。梁单元采用的是轴向应力。

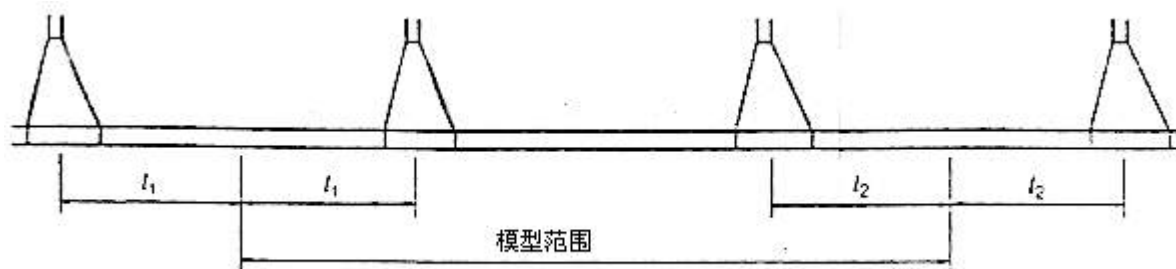


图 4.1 三维有限元模型范围

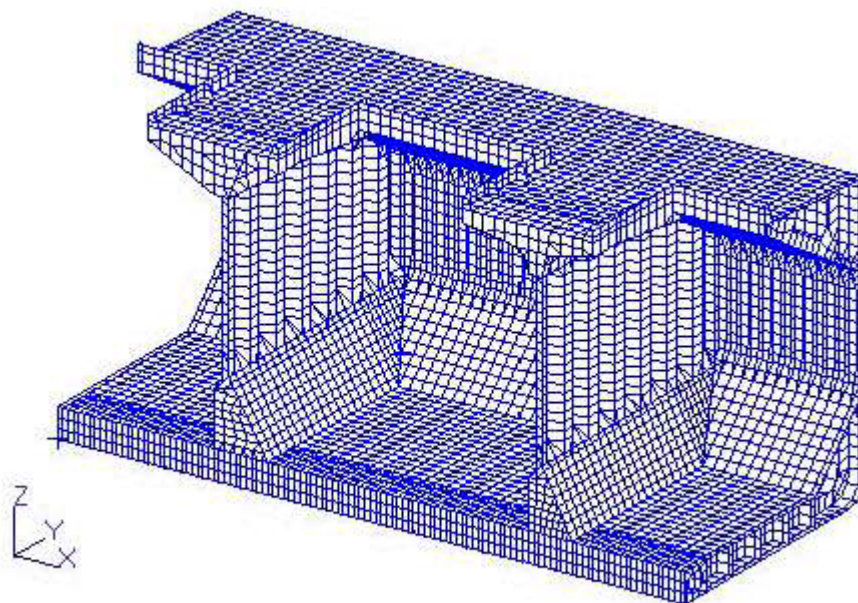


图 4.2 三维有限元模型

## 第5章 边界条件

5.1 如果载荷左右对称,则中纵剖面内节点的横向线位移为 0,绕中纵剖面内两个坐标轴的角位移为 0,即:  $\delta y = \theta x = \theta z = 0$ ;

5.2 如果载荷左右反对称,则中纵剖面内节点沿纵中剖面内两个坐标轴方向的线位移为 0,绕垂直于纵中剖面的坐标轴的角位移为 0,即:  $\delta x = \delta z = \theta y = 0$ ;

5.3 端面约束:一端独立点约束  $\delta x, \delta y, \delta z, \theta x, \theta z$ ,另一端独立点约束  $\delta y, \delta z, \theta x, \theta z$ ,如表 5.1 所示。

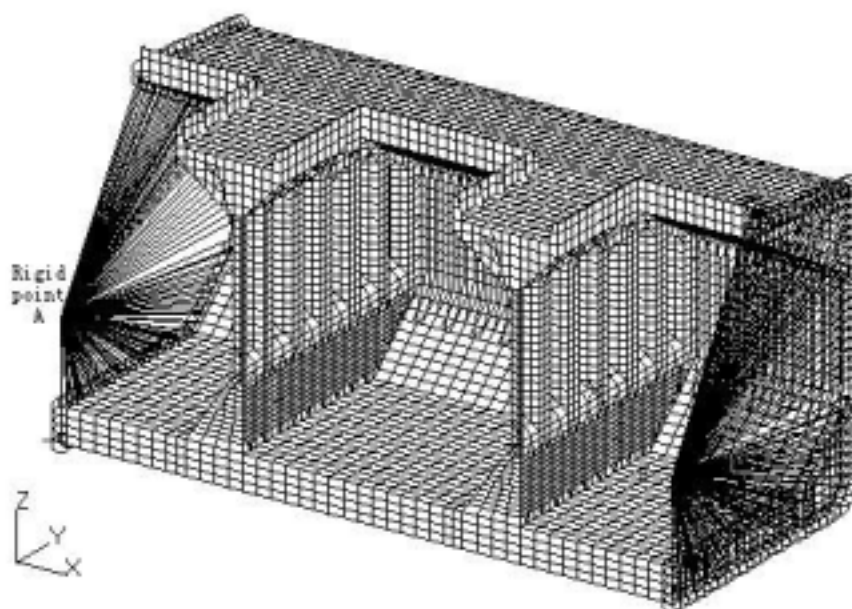


图 5.1 端面约束

表 5.1 边界条件施加表(载荷对称边界)

位置	线位移约束			角位移约束		
	$\delta x$	$\delta y$	$\delta z$	$\theta x$	$\theta y$	$\theta z$
中纵剖面	-	Cons.	-	Cons.	-	Cons.
端面 A	Link	-	Link	-	Link	Link
端面 B	Link	-	Link	-	Link	Link
刚性点 A	Cons.	Cons.	Cons.	Cons.	BM	Cons.
刚性点 B	-	Cons.	Cons.	Cons.	BM	Cons.

注:



Cons.——表示对应的位移约束；  
 Link——面内相关点位移与独立点连接；  
 BM——端面所受的总体弯矩。

## 第6章 计算工况

考虑以下装载工况：

- 6.1 工况 1 重压载工况；
- 6.2 工况 2 轻压载工况；
- 6.3 工况 3 隔舱装载：轻货满载（中间货舱装）工况；（货物密度取实际装载的最大轻货密度）
- 6.4 工况 4 隔舱装载：轻货满载（两头货舱装）工况；（货物密度取实际装载的最大轻货密度）
- 6.5 工况 5 隔舱装载：重货满载（中间货舱装）工况；（货物密度=3.0 t/m<sup>3</sup>，重量为隔舱装载最大载货量）
- 6.6 工况 6 隔舱装载：重货满载（两头货舱装）工况；（货物密度=3.0 t/m<sup>3</sup>）（重量同工况 5）

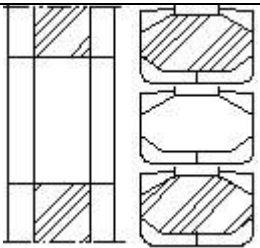
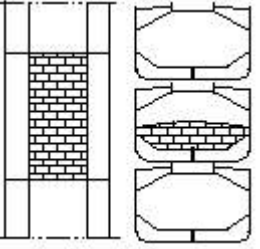
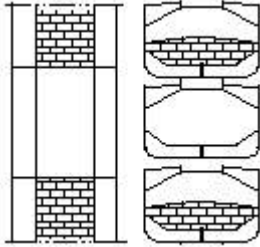
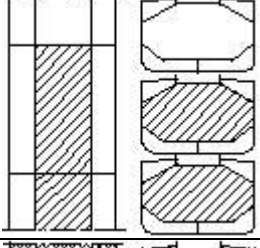
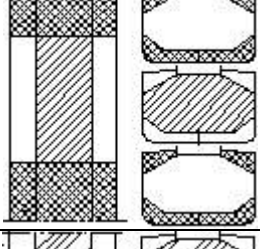
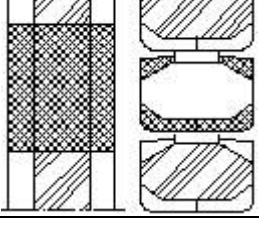
附加工况：

- 6.7 区域装载：相邻舱装载。（货物比重取装载手册中实际货物密度）
- 6.8 船东要求的特定装载工况。

Table 6.1 Loading Conditions for bulk carriers

工况	吃水	弯矩	货物密度(t/m <sup>3</sup> )	简图
1	$d=d_A$	$M_s+M_w$	1.025	
2	$d=d_A$	$M_s+M_w$	1.025	
3	$d=d_s$	$M_s+M_w$	最大轻货密度	



4	$d=d_s$	$M_s+M_w$	最大轻货密度	
5	$d=d_s$	$M_s+M_w$	3.0	
6	$d=d_s$	$M_s+M_w$	3.0	
附加工况 1	$d=d_A$	$M_s+M_w$	实际货物密度	
附加工况 2	$d=d_A$	$M_s+M_w$	实际货物密度	
附加工况 3	$d=d_A$	$M_s+M_w$	实际货物密度	

表中： $d_A$ ——对应工况的实际吃水，m

$d_s$ ——设计结构吃水，m

静水弯矩和波浪弯矩：见 3.3 节

## 第7章 强度标准

- 7.1 板单元采用中面应力，梁单元采用轴向应力。
- 7.2 对应于标准工况主要构件的应力一般不超过表 7.1 中给出的值。
- 7.3 对于舱壁，槽型端部的应力可以通过舱壁板内的平均应力外推得到。
- 7.4 平均剪应力 系指主要构件的腹板深度范围内的平均剪应力。
- 7.5 对于应力集中和形状很差的单元应力可以不采纳。

表 7.1 最大许用应力

结构分类	许用应力			
	$N/mm^2$	$N/mm^2$	$N/mm^2$	$N/mm^2$
甲板	220/k	210/k	—	—
内、外底	220/k	210/k	145/k	—
顶边舱，底边舱斜板 舷侧板	220/k	210/k	145/k	115/k
船底纵桁	235/k	210/k	—	115/k
肋板	175/k	—	—	95/k
横舱壁	175/k	—	—	95/k
凳边板、横框架	195/k	—	—	95/k
梁单元轴向应力( $N/mm^2$ )				
横向构件上的梁	176/k			
纵向构件上的梁	206/k			

## 第8章 屈曲分析

### 8.1 一般规定

8.1.1 所有主要构件应校核平板屈曲，特别是下列区域应引起注意：

- (1) 双层底肋板，特别在舱段中间部位，
- (2) 双层底纵桁，特别是：
  - 临近舱壁或凳的舱的两端
  - 从舱壁或底凳算起的第一个开孔处的板
  - 在舱中部
- (3) 顶边舱，甲板和舷侧板
- (4) 船底板和内底板，特别是：
  - 临近舱壁或凳的舱的两端
  - 舱中部
- (5) 舱壁和凳板，特别是：
  - 在跨中和邻近凳的部位，
  - 凳的外侧板

8.1.2 平板屈曲计算基于表 8.1.1 中给出的标准减缩厚度。

8.1.3 在平板屈曲计算中应考虑双向轴向压应力和剪应力，一般情况下板内的中面应力用来进行屈曲检查。

8.1.4 在计算屈曲安全因子中，CCS 钢规第 2 篇第 2.2.7 节定义的边界约束系数“c”应加以考虑。

8.1.5 在屈曲计算中，所必需的最小屈曲安全系数 如表 8.1.2 所示。

表 8.1.1 标准减缩厚度，用来计算临界屈曲应力

位置		减缩厚度 mm
风雨密甲板 1.5m 以内的压载水舱	一边与压载水相连	1.0
	两边与压载水相连	2.0
其他部位		1.0

表 8.1.2 平板屈曲所需要的安全因子

结构	屈曲安全因子
	局部应力加静水弯曲应力加波浪弯曲应力
甲板和顶边舱的板	1.0

船底板、内底和底边舱板	1.0
双层底纵桁	1.0
双层底肋板和顶底边舱内框架	1.1
横向水密舱壁和凳	1.2
横向深舱舱壁和凳	1.2
符号	
=临界屈曲应力/实际应力	

## 8.2 计算方法

可选用下列两种计算方法的任意一种：

8.2.1 方法一：用有限元方法求解板格的屈曲强度。

### (1) 模型的建立

按照净强度概念求解稳定性问题时，对选取准备进行屈曲强度校核的板格，板厚根据表 8.1.1 的规定进行减缩，网格的划分原则：各边不少于 8 个网格，尽量采用正方形网格。

### (2) 载荷和边界条件

载荷：根据所选定的工况，取出由舱段有限元模型计算在该板格处的的中面应力结果， $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ （即施加应力），分别乘上未减缩前的板厚，得到相应的压力。

$$N_x = \sigma_x \times t_0,$$

$$N_y = \sigma_y \times t_0,$$

$$N_{xy} = \tau_{xy} \times t_0,$$

式中：

$t_0$  为原始板厚。

分别施加在相应的边界上。

板格之间的压应力变化较大时，可做为线形分布的载荷施加，剪应力取平均值。

**边界条件：**为约束刚体位移，选取板格四个边界中点，纵向边界中点约束 x 方向位移，横向边界中点约束 y 方向位移，四边约束 z 方向位移。如图 8.2.1，8.2.2。

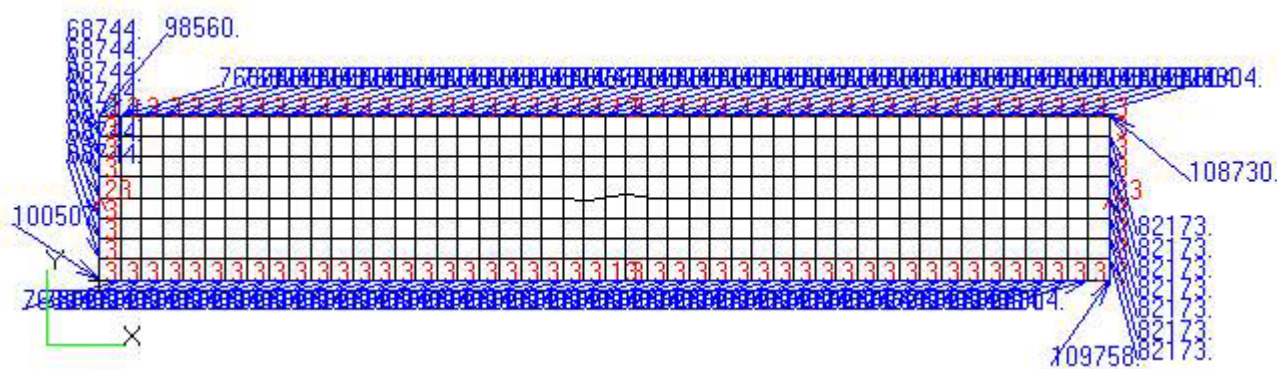


图 8.2.1 施加双向压力和剪力模型

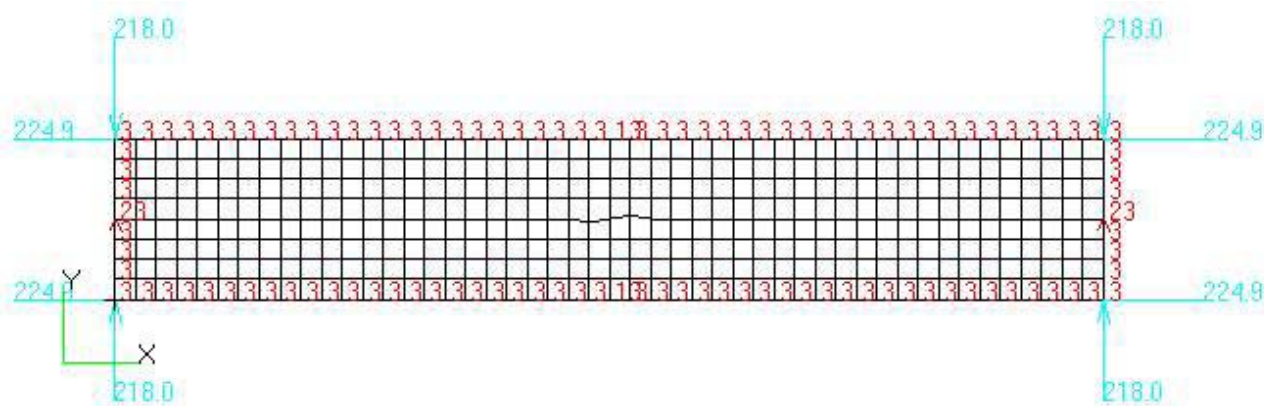


图 8.2.2 施加双向压力模型

注： 1. 边界约束，图 8.2.1 和 8.2.2 中所示的约束均可  
2. 图 8.2.1 中显示的边界载荷类型为节点压力，图 8.2.2 中显示的边界载荷类型为边界压力

(3) 屈曲强度校核

根据有限元计算，其后处理中显示的系数(factor)即为临界屈曲因子，可以根据边界约束情况乘上 8.1.4 中定义的边界约束系数，其结果应不小于表 8.1.2 中的安全因子。

8.2.2 方法二：用简化方法求解板格的屈曲强度。

(1) 由有限元计算得到的应力，按表 8.1.1 的标准减薄厚度进行应力修正：

$$\sigma_A = \sigma / (t - t_r)$$

式中：  $\sigma_A$ ——屈曲计算中的工作应力；  
 $\sigma$ ——由有限元计算得到的应力；  
 $t$ ——有限元计算中所使用的原始板厚值；  
 $t_r$ ——表 8.1.1 中所列的标准减薄厚度。

(2) 临界屈曲应力及弹塑性修正

短边受压板格弹性临界屈曲应力  $\sigma_{xcr\_e}$  定义如下：

$$\sigma_{xcr\_e} = k_x C_1 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \quad N/mm^2$$

式中：

$k_x$ ——短边受压及弯曲屈曲系数，按表 8.2.1 计算；

$C_1$ ——边界约束系数，见表 8.2.2；

$t$ ——板格厚度，mm；

$s$ ——板格的短边长度，mm。取纵骨、加强筋或扶强材间距；

$x$ ——定义为板格长边轴向。

表 8.2.1 板格屈曲系数

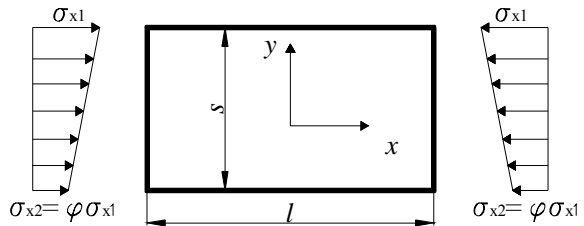
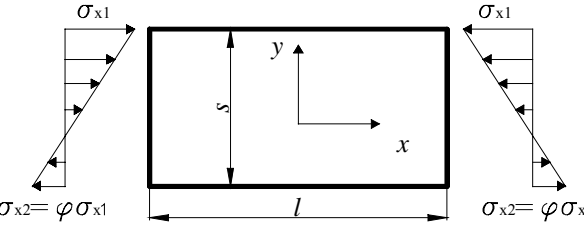
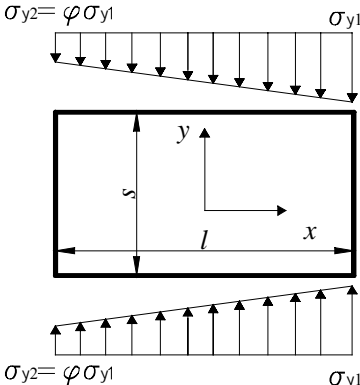
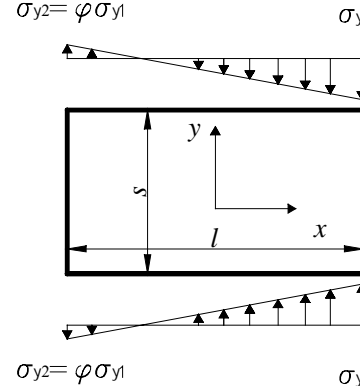
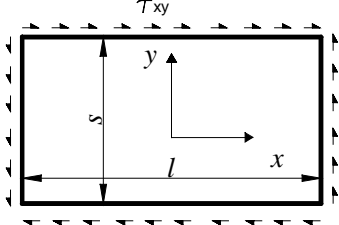
	板格受压及弯曲和剪切力学模型	屈曲系数
短边受压	 <p>其中：0 ≤ φ ≤ 1</p>	$k_x = \frac{8.4}{\phi + 1.1}$
	 <p>其中：-1 ≤ φ &lt; 0</p>	$k_x = 7.6 - 6.4\phi + 10\phi^2$
长边受压	 <p>其中：0 ≤ φ ≤ 1</p>	$k_y = \left[ 1 + \left( \frac{s}{l} \right)^2 \right]^2 \frac{2.1}{\phi + 1.1}$
	 <p>其中：-1 ≤ φ &lt; 0</p>	$k_y = 1.909(1 + \phi) \left[ 1 + \left( \frac{s}{l} \right)^2 \right]^2 - k_p \phi$ $+ 10\phi(1 + \phi) \left( \frac{s}{l} \right)^2$ <p>其中：</p> $k_p = \begin{cases} 24 \left( \frac{s}{l} \right)^2 & \frac{l}{s} \leq \frac{3}{2} \\ 2 + 16 \left( \frac{s}{l} \right)^2 + 8 \left( \frac{s}{l} \right)^4 & \frac{l}{s} > \frac{3}{2} \end{cases}$
边缘受剪		$k_t = 5.34 + 4 \left( \frac{s}{l} \right)^2$

表 8.2.2 板格边界约束系数 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>

边界情况	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	
		位于双层底或双壳之间	其他位置
角钢或 T 型扶强材	1.1	1.3	1.2
扁钢或球扁钢	1.0	1.2	1.1

长边受压板格弹性临界屈曲应力  $\sigma_{ycr\_e}$  定义如下：

$$\sigma_{ycr\_e} = k_y C_2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \quad N/mm^2$$

式中：

$k_y$ ——长边受压及弯曲屈曲系数，按表 8.2.1 计算；

$C_2$ ——边界约束系数，见本附录表 8.2.2；

$y$ ——定义为板格短边轴向。

其余符号同

受剪切板格弹性临界屈曲应力  $\tau_{cr\_e}$  定义如下：

$$\tau_{cr\_e} = k_t C_1 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \quad N/mm^2$$

式中：

$k_t$ ——剪切屈曲系数，按表 8.2.1 计算

其余符号同 、

应对板格的临界弹性屈曲应力进行修正，弹塑性修正公式如下：

$$\sigma_{xcr} = \begin{cases} \sigma_{xcr\_e} & \text{当 } \sigma_{xcr\_e} \leq \frac{\sigma_s}{2} \\ \sigma_s \left(1 - \frac{\sigma_s}{4\sigma_{xcr\_e}}\right) & \text{当 } \sigma_{xcr\_e} > \frac{\sigma_s}{2} \end{cases}$$
$$\tau_{cr} = \begin{cases} \tau_{cr\_e} & \text{当 } \tau_{cr\_e} \leq \frac{\tau_s}{2} \\ \tau_s \left(1 - \frac{\tau_s}{4\tau_{cr\_e}}\right) & \text{当 } \tau_{cr\_e} > \frac{\tau_s}{2} \end{cases}$$

式中：

$\sigma_{xcr\_e}$ 、 $\sigma_{ycr\_e}$ 、 $\tau_{cr\_e}$ ——分别为板格在单轴应力作用下的 X 轴、Y 轴的弹性临界屈曲压应力和临界屈曲剪应力，见 、 、 ；

$\sigma_s$ ——材料屈服强度，N/mm<sup>2</sup>；



$$\sigma_s / \sqrt{3}$$

(3) 屈曲强度校核

按表 8.2.3 计算板格在复合应力作用下的临界屈曲应力与计算的应力之比，应不小于表 8.1.2 中的安全因子。

$\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$  在计算时取绝对值计入。若 X 轴、Y 轴的工作应力为拉应力时，该应力分量取为零。

表 8.2.3 计算值

板格长宽比 应力状态	$1 \leq \frac{l}{s} \leq \sqrt{2}$	$\sqrt{2} < \frac{l}{s} \leq 8$
双向压缩	$\frac{1}{(1+k_1)} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_x}$	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_1^2)}} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_x}$
X 轴压缩 + 剪切	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_2^2)}} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_x}$	
Y 轴压缩 + 剪切	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_3^2)}} \frac{\sigma_{ycr}}{\sigma_y}$	
双向压缩 + 剪切	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_1^2+k_2^2)}} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_x}$	

其中：

$$k_1 = \frac{\sigma_y / \sigma_{ycr}}{\sigma_x / \sigma_{xcr}}, \quad k_2 = \frac{\tau_{xy} / \tau_{cr}}{\sigma_x / \sigma_{xcr}}, \quad k_3 = \frac{\tau_{xy} / \tau_{cr}}{\sigma_y / \sigma_{ycr}}$$

注： $\sigma_{x1}$ 、 $\sigma_{y1}$  分别为板格边所受对应 X 轴、Y 轴工作应力中的较大值； $\sigma_{x2}$ 、 $\sigma_{y2}$  为对应的另一较小值，计算时  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  应按板格边中面应力的平均值计入； $\tau_{xy}$  为平均剪应力。 $\sigma_{x1}$ 、 $\sigma_{x2}$ 、 $\sigma_{y1}$ 、 $\sigma_{y2}$ 、 $\tau_{xy}$  如表 8.2.1 中所示。

$\sigma_{xcr}$ 、 $\sigma_{ycr}$ 、 $\tau_{cr}$  分别为板格在单轴应力作用下的 X 轴、Y 轴的弹塑性修正后的临界屈曲压应力和临界屈曲剪应力