



中国船级社

油船结构直接计算分析指南



2003年5月

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	液舱晃荡载荷计算及其结构的强度分析	6
3.1	一般规定	6
3.2	晃荡周期	6
3.3	晃荡压力	8
第 4 章	设计载荷计算	11
4.1	货物压力	11
4.2	舷外水压力计算	11
4.3	端面弯矩	14
第 5 章	结构模型	16
5.1	坐标规定:	16
5.2	模型网格划分	16
第 6 章	边界条件	18
第 7 章	计算工况	19
7.1	一道纵舱壁油船计算工况	19
7.2	两道纵舱壁油船计算工况	20
7.3	无纵舱壁油船计算工况	21
第 8 章	强度标准	23
第 9 章	平板屈曲检查	24
9.1	一般规定	24
9.2	计算方法	24

第1章 总则

1.1 一般规定

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

1.1.2 本指南给出了对于油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

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² (N/mm²)；

压力：千牛/米² (kN/m²)。

1.2.1 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；

ρ ——海水密度， $\rho=1.025\text{t/m}^3$ ；

e ——组合相当应力和 von Mises 应力 (N/mm^2)， $=\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$ ；

x ——单元 x 方向的应力 (N/mm^2)；

y ——单元 y 方向的应力 (N/mm^2)；

xy ——单元 xy 平面的剪应力 (N/mm^2)；

r ——船体梁纵向的应力 (N/mm^2)；

w ——船体梁横向或垂向的应力 (N/mm^2)；

——腹板总深度的平均剪应力 (N/mm^2)；

k——材料换算系数；

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

ν ——材料泊松比。对钢材， $\nu=0.3$ 。

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 $w(x)$ 。

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：

θ ——组合波与主浪向的夹角，rad；

$\frac{2}{\pi} \cos^2 \theta$ ——能量扩散函数；

$H_{\frac{1}{3}}$ ——有义波高，m；

T_2 ——海浪跨零周期，s；

ω ——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， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；

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，不小于 0.6。

程序计算得出的设垂向波浪剪力 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 液舱晃荡载荷计算及其结构的强度分析

3.1 一般规定

3.1.1 本章给出了液货舱部分装载时因液体运动而引起的晃动压力作用下结构的强度分析方法。

3.1.2 本节给出的部分装载系数注满度 f 小于 0.95 时的液货舱装载工况，注满度按下式确定：

$$f = \frac{d_f}{h_f}$$

式中：

d_f —液货舱内液体的高度，为液货舱内底至液面的距离，m；

h_f —液货舱深度，为液货舱内底至舱中心处甲板下沿的距离，m；对于具有舱口围板的双边舷侧货舱且舱口围板与内壳在同一平面内，液货舱深度为舱内底至舱口围板顶之间的距离，m。

3.1.3 在按规范计算下列结构尺寸时，应将液体晃动压力作为附加载荷一并考虑：

- (1) 自由液面宽度 $b_s > 0.56B$ 的液舱舷侧结构；
- (2) 以甲板为边界且舱宽 $> 0.4B$ 的液舱，当灌注高度（舱底至液面的高度）没有限制时，距液舱侧壁 $0.25b_b$ 范围内的甲板强力构件，以及无纵向制荡舱壁且自由液面宽度 $b_b > 0.56B$ 的甲板结构；
- (3) 以甲板为边界且舱长 $> 0.1L$ 的液舱，当灌注高度没有限制时，距液舱端部 $0.25l_b$ 范围内的甲板强力构件，以及无横向制荡舱壁或窄液舱内横向强肋骨，且自由液面长度 $l_b > 0.13L$ 的甲板结构；
- (4) 灌注高度没有限制的液舱两侧 $0.25bb$ 范围内的舱壁强力构件，和无纵向制荡舱壁且自由液面宽度 $bb > 0.56B$ 的液舱舱壁结构；
- (5) 灌注高度没有限制的液舱两端壁 $0.25l_b$ 范围内的舱壁强力构件，和无横向制荡舱壁或窄液舱内横向强肋骨，且自由液面长度 $l_b > 0.13L$ 的液舱舱壁结构。

其中 b_s 见 3.3.1。

b_b 为强力构件所在位置处，液舱侧壁之间或有效纵向制荡舱壁 ($a_l < 0.2$) 之间的距离，m；

l_b 为强力构件所在位置处，横舱壁之间或有效横向制荡舱壁 ($a_t < 0.2$) 之间的距离，m。覆盖部分液舱横剖面的横向强肋骨（例如油船内的边舱结构）可以被认为是制荡舱壁。

a_t 和 a_l 按 3.3.1 定义

3.1.4 除本章给出的方法以外，亦可采用其他合适的方法计算液体晃动压力和冲击压力，但应向提供能使本社认可的计算可靠性资料。

3.2 晃荡周期

3.2.1 液舱内液体固有周期与船舶运动周期之比大于 0.7 时可判定为该舱液体运动发生谐振。

3.2.2 液舱液体固有周期按以下公式计算：

纵向固有周期 T_x :

$$T_x = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g\pi}{l_t} th \frac{\pi d_f}{l_t}}} \quad \text{s}$$

横向固有周期 T_y :

$$T_y = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g\pi}{b_t} th \frac{\pi d_f}{b_t}}} \quad \text{s}$$

式中： l_t —静止状态下液体自由表面长度，m；

b_t —静止状态下液体自由表面宽度，m；

3.2.3 船舶运动周期按以下公式计算：

纵摇周期 T_φ :

$$T_\varphi = \frac{L}{1.33\sqrt{L} + 0.58VK_v} \quad \text{s}$$

式中： L —船长，m；

V —船速，kn；

K_v —航速损失系数，按下式计算：

$$K_v = 1 - \frac{750}{1000 + L}$$

纵摇周期 T_g :

$$T_g = 0.58\sqrt{\frac{B^2 + 4KG^2}{GM}} \quad \text{s}$$

式中：

B —船宽，m；

GM —所考虑装载情况下，计及自由液面修正的初稳性高度，m；

KG —所考虑装载情况下，船舶重心至基线的垂直距离，m。

3.3 晃动压力

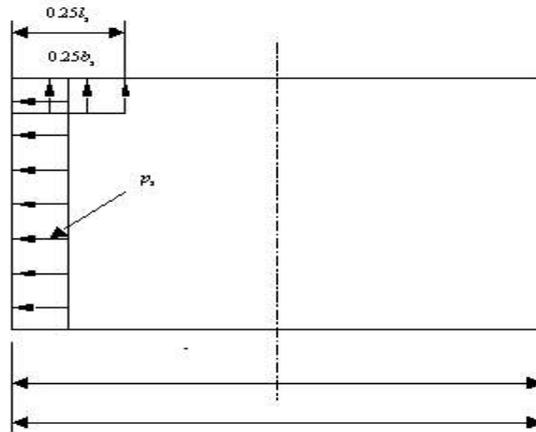


图 3.3(1) 压力分布

3.3.1 对于离制荡横舱壁或端舱壁距离小于 $0.25l_s$ 的强力构件，晃动压力应取为不小于下式所得之值（见图 3.3(1)）：

$$P = pg_0 l_s k_f \left[0.4 - \left(0.39 - \frac{1.7l_s}{L} \right) \frac{L}{350} \right] \quad (\text{kN/m}^2)$$

对于离制荡纵舱壁或液舱侧壁的距离小于 $0.25b_s$ 的强力构件，晃动压力应取为不小于下式所得这值：

$$P = 7pg_0 l_s k_f \left(\frac{b_s}{B} - 0.3 \right) GM^{0.75} \quad (\text{kN/m}^2)$$

式中：

$$k_f = 1 - 2 \left(0.7 - \frac{h}{H} \right)^2, \text{ 不大于 } 1,$$

$$\left(\frac{h}{H} \right)_{\text{最大值}} = 1$$

h —充液高度(m)；

H — $0.15l_s$ 或 $0.15b_s$ 范围内的液舱高度(m)；

GM —包括自由液面修正的最大 GM 值；

$$GM_{\text{最小值}} = 0.12B(m)；$$

l_s —有效晃动长度(m)，按下式确定：

$$l_s = \frac{(1 + n_t \alpha_t)(1 + \beta_t n_2) l}{(1 + n_t)(1 + n_2)}, \text{ 对于端舱壁；}$$

$$l_s = \frac{[1 + \alpha_t(n_t - 1)](1 + \beta_t n_2) l}{(1 + n_t)(1 + n_2)}, \text{ 对于制荡舱壁；}$$

b_s —有效晃动宽度(m)，按下式确定：

$$b_s = \frac{(1+n_l\alpha_l)(1+\beta_l n_4)b}{(1+n_l)(1+n_4)}, \text{ 对于液舱侧壁;} \\ b_s = \frac{[1+\alpha_l(n_l-1)](1+\beta_l n_4)b}{(1+n_l)(1+n_4)}, \text{ 对于制荡舱壁;}$$

l —液舱长度(m)；

b —液舱宽度(m)；

n_t —在 $\alpha_t < 0.5$ 系数修正后的液舱中制荡横舱壁的数目；

α_t —制荡横舱壁上开口面积与充液高度以下液舱总横剖面积这间的比值，见图 3.3(2)。

如果充液高度不受限制， h 取作 $0.7H$ 。

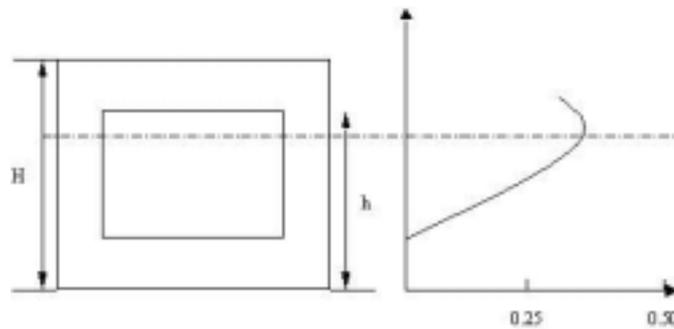


图 3.3(2) 制荡舱壁系数

n_2 —液舱中在长度 $\frac{l}{(1+n_t)}$ 内的横向强框架的数目；

β_t —横向强框架开口面积与充液高度以下液舱的总横剖面积之间的比值。见图 3.3(4)。

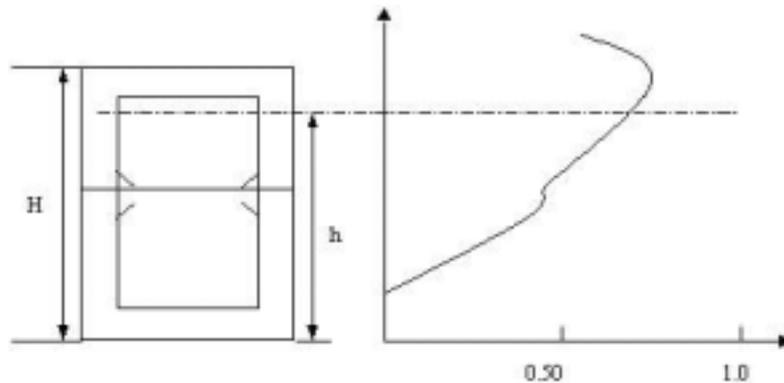


图 3.3(3) 强框架系数

如果充液高度不受限制， h 取作 $0.7H$ 。

n_l —在 $\alpha_t < 0.5$ 的液舱中制荡纵舱壁的数目；

α_l —与 α_t 相类似，但取制荡纵舱壁；

n_4 —液舱中在宽度 $\frac{b}{(1+n_l)}$ 之间纵向强框架的数目；

β_l —与 β_t 相类似，但取纵向强框架。

3.3.2 对于 $l_b < 0.13L$ 和 $b_b < 0.56B$ 的液舱，其构件尺寸应满足不受充液高度限制的要求。

对于离制荡舱壁和端舱壁距离 $0.25l_b$ 的强力构件，其压力应不小于下式：

$$p = P \left[4 - \frac{L}{200} \right] l_b \quad (\text{kN/m}^2)$$

对于离制荡纵舱壁和液舱侧壁距离 $0.25b_b$ 的强力构件，其压力应不小于下式：

$$p = P \left[3 - \frac{B}{200} \right] b_b \quad (\text{kN/m}^2)$$

式中： l_b 、 b_b 按 3.1.3 定义。

如果制荡舱壁不完全有效 ($a_t > 0.2, a_l > 0.2$)， l_b 和 b_b 可以用 5.1.2 给出的 l_s 和 b_s 来代替。 a_t 和 a_l 按

3.3.1 定义。

3.3.3 液货舱和压载货舱内的强肋骨和桁材板格承受的最小晃动压力，应取为不小于 20 kN/m^2 。

在有许多强框架或纵桁板格的长液舱或宽液舱内，作用在靠近制荡端壁或端舱壁的框架或纵桁上的晃动压力，应按下式确定：

$$P = P_{bhd} \left(1 - \frac{s}{l_s} \right)^2 \quad (\text{kN/m}^2), \text{ 对于强框架；}$$

$$P = P_{bhd} \left(1 - \frac{s}{b_s} \right)^2 \quad (\text{kN/m}^2), \text{ 对于纵桁；}$$

式中：

P_{bhd} —如 3.3.1 所给出的作用在制荡舱壁或端舱壁上的晃动压力；

s —从舱壁到所考虑的强肋骨或纵桁的距离，(m)。

b_s 和 l_s 按 3.3.1 的规定。

3.3.4 对于自由晃动宽度 $b_s > 0.56B$ 的液舱，其最大 GM 将受到规定值的限制。此外，这类液舱和/或晃动长度 $0.13L < l_s < 0.16L$ 的液舱，可以按限制液舱的充液高度设计。

最大允许 GM、液货密度和可能的充液高度限制将在《操作手册》中注明。

l_s 和 b_s 按 3.3.1 规定。

第4章 设计载荷计算

4.1 货物压力

舱内液货产生的压力通过下式确定：

$$P = \rho_0 g (h + 2.5) \quad \text{kN/m}^2$$

式中： ρ_0 ——舱内液货的密度，不小于 0.85t/m^3

h ——舱顶到计算点的垂直距离，m。

4.2 舷外水压力计算

对于舷外水压力，可按 2.3 节要求进行直接计算或按下述两种方法之一确定：

4.2.1 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：

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

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

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

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

(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。

4.2.2 方法二

(1). 静水压力

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

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

(2). 波浪压力

水线处的水动力压力 (kN/m^2):

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

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

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

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

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

舳部的水动力压力 (kN/m^2):

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

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

底部的水动力压力 (kN/m^2):

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

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

舷侧水线以上的动压力

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

h —— 为从静止水线到载荷点的高度, m。

甲板 (舱口盖) 上的动压力

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

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

A_i ——与舱口盖中点的纵向位置有关的系数，如表 4.2.2(2) 所示。

V ——船舶的设计航速，kn，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 4.2.2(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

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

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

$k = 1.2$ (没有舦龙骨)

$= 1.0$ (有舦龙骨)

$= 0.8$ (有横摇阻尼设备)

k_r ——横摇惯性半径

GM ——初稳性高度 (m)

$k_r = 0.39 B$ (均匀质量分布)

$= 0.35 B$ (压载状态下的油船)

$GM = 0.12 B$ (对油船和散货船)

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

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

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

$$\begin{aligned}
 k_s &= C_B + \frac{0.83}{\sqrt{C_B}} \quad (\text{在尾垂线 及其以后区域}) \\
 &= C_B \quad (0.2L \text{ 和 } 0.6L \text{ 之间}) \\
 &= C_B + \frac{1.33}{C_B} \quad (\text{在首垂线及其以前区域})
 \end{aligned}$$

在特定点, k_s 线性变化

$$\begin{aligned}
 l_f &= 1.0 \quad (\text{在尾垂线 及其以后区域}) \\
 &= 0.5 \quad (0.2L \text{ 和 } 0.6L \text{ 之间}) \\
 &= 1.0 \quad (\text{在首垂线及其以前区域})
 \end{aligned}$$

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 $0.8C$ 。

4.3 端面弯矩

4.3.1 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 4.3.2~4.3.5 款的所述的方法替代。

4.3.2 波浪弯矩 M_w 按照《钢规》计算确定, 中拱为正。

4.3.3 静水弯矩 M_s 取对应工况的模型范围内的最大弯矩。若无对应工况, 对于满载工况, 可选取出现最大 (或最小) 弯矩对应的满载吃水工况; 对于非满载吃水的工况, 可选取出现最大 (或最小) 弯矩对应的非满载吃水工况, 中拱为正, 并按 4.3.4 款进行修正。

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

$$M = M_s + M_w - M_r$$

4.3.5 修正弯矩 M 的计算:

修正弯矩 M_r 是由于局部载荷引起的附加弯矩。

(1) 当如图 5.1 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:

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

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

P_b : 船底外压, 见 4.2 (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 (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 (kN)

L_e : 与 W_{ecargo} 对应的端部货舱长度, (m)

L_m : 中间货舱长度, (m)

L_0 : 段模型的总长度, (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 5.1 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5章 结构模型

5.1 坐标规定：

x——沿船长方向，向首为正；

y——沿横向，由纵中剖面向左为正；

z——沿垂向，向上为正。

5.2 模型网格划分

5.2.1 用三维有限元模型进行油船主要构件的强度直接计算时，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（图 5.1）。

5.2.2 两道纵舱壁和无纵舱壁的油船，当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的和反对称的载荷来处理，否则用全宽模型。对一道纵舱壁的油船用全宽模型。

5.2.3 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。

5.2.4 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墩采用 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，舱壁与墩连接处，邻近肘板或结构不连续处，尽量少用三角形单元。

5.2.5 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。

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

5.2.7 槽型舱壁和壁墩：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墩处的板单元和墩板的邻近单元，其长宽比系数接近 1。

5.2.8 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墩肘板肋板的开孔，可以采用等效板厚的板元来替代这些开孔的影响。

5.2.9 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 δ_x 、 δ_z 、 θ_y 、 θ_z 与独立点相关。

5.2.10 结构尺寸采用船舶建造厚度。

5.2.11 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。

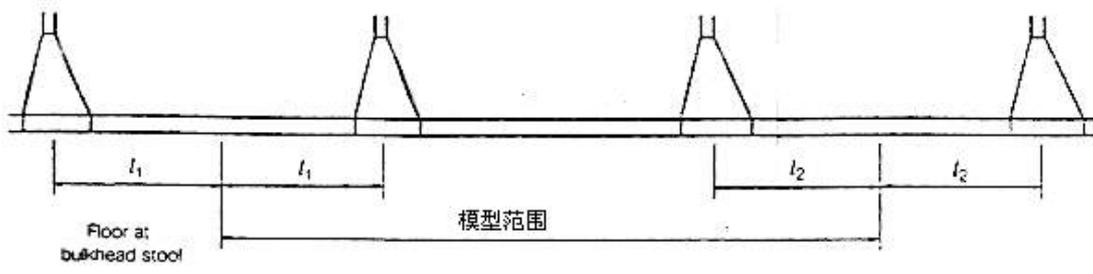


图 5.1 三维有限元模型范围

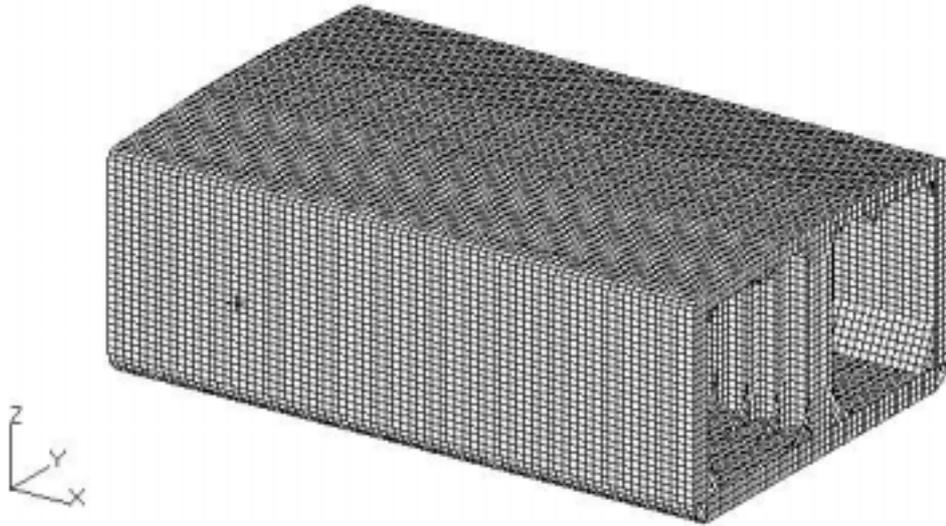


图 5.2 有限元模型图

第6章 边界条件

6.1 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： $\delta y = \theta_x = \theta_z = 0$ 。

6.2 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： $\delta x = \delta z = \theta_y = 0$ 。

6.3 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 6.1 所示。

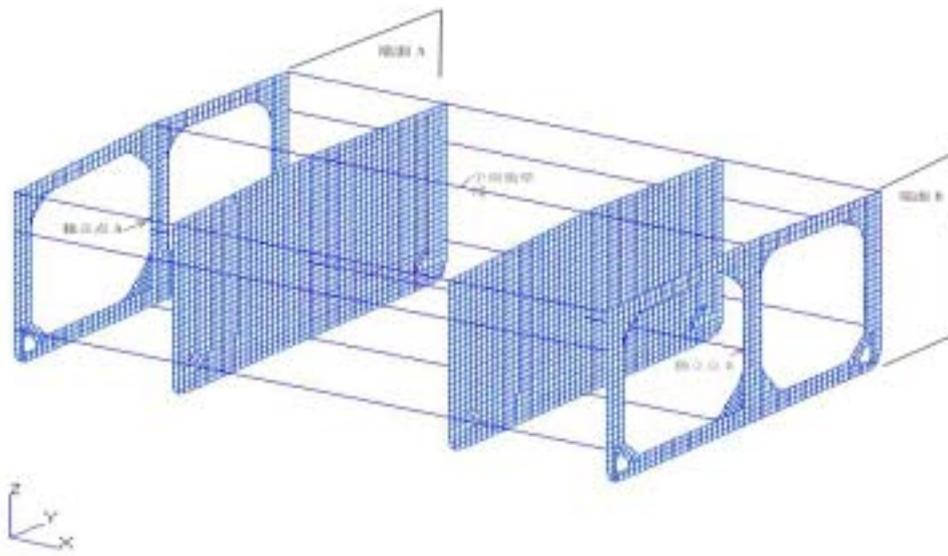


图 6.1 端面约束

表 6.1 边界条件施加表(载荷对称边界)

约束	线位移			角位移		
	δx	δy	δz	θ_x	θ_y	θ_z
中纵舱壁	-	Cons.	-	Cons.	-	Cons.
端面 A	Link	-	Link	-	Link	Link
端面 B	Link	-	Link	-	Link	Link
独立点 A	Cons.	Cons.	Cons.	Cons.	BM	Cons.
独立点 B	-	Cons.	Cons.	Cons.	BM	Cons.

注：

Cons.——表示对应的位移约束；

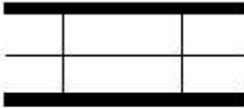
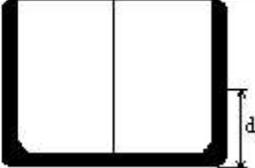
Link——面内相关点位移与独立点连接；

BM——端面所受的总体弯矩。

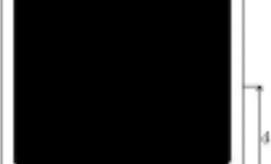
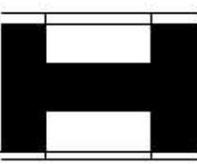
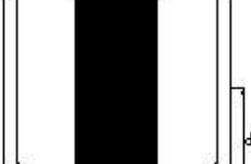
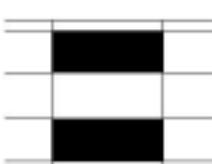
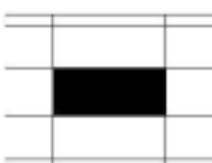
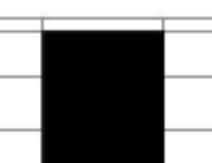
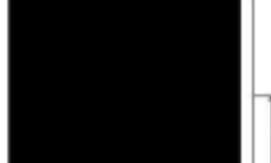
第7章 计算工况

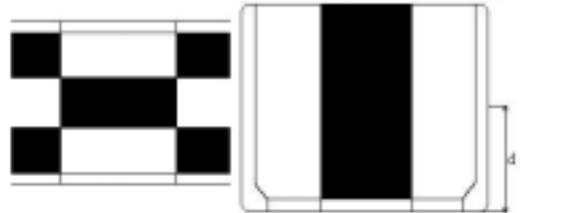
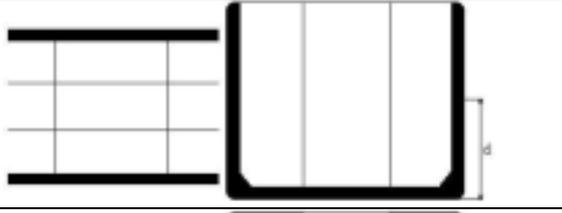
7.1 一道纵舱壁油船计算工况

计算工况	局部载荷	总体载荷	装载图
1	$d=ds$	静水弯矩+波浪弯矩	
2	$d=ds$	静水弯矩+波浪弯矩	
3	$d=ds$	静水弯矩+波浪弯矩	
4	$d=0.35D$	静水弯矩	
5	$d=0.35D$	静水弯矩	
6	$d=ds$	静水弯矩+波浪弯矩	
7	$d=0.25D$	静水弯矩	

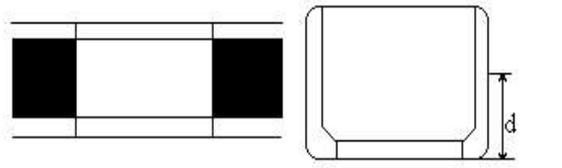
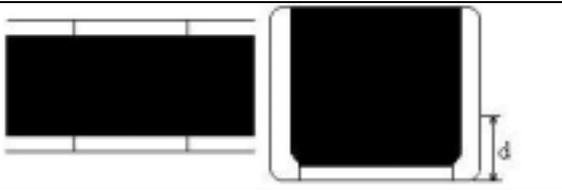
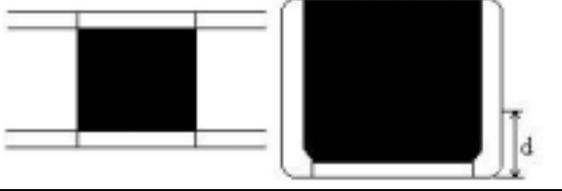
8	$d=db$	静水弯矩+波浪弯矩		
9*	$d=db$	静水弯矩+波浪弯矩		

7.2 两道纵舱壁油船计算工况

计算工况	局部载荷	总体载荷	装载图	
1	$d=ds$	静水弯矩+波浪弯矩		
2	$d=ds$	静水弯矩+波浪弯矩		
3	$d=ds$	静水弯矩+波浪弯矩		
4	$d=0.25D$	静水弯矩		
5	$d=0.25D$	静水弯矩		
6	$d=0.35D$	静水弯矩		

7	$d=0.5D$	静水弯矩	
8	$d=db$	静水弯矩+波浪弯矩	
9*	$d=db$	静水弯矩+波浪弯矩	
10*	$d=db$	静水弯矩+波浪弯矩	

7.3 无纵舱壁油船计算工况

计算工况	局部载荷	总体载荷	装载图
1	$d=ds$	静水弯矩+波浪弯矩	
2	$d=ds$	静水弯矩+波浪弯矩	
3	$d=0.35D$	静水弯矩	
4	$d=db$	静水弯矩+波浪弯矩	

5	$d=d_b$	静水弯矩+波浪弯矩	
---	---------	-----------	--

注：
 d_b —对应工况的压载吃水，m；
 d_s —设计结构吃水，m；
 静水弯矩和波浪弯矩：见 5.3 节
 工况* 为附加工况

第8章 强度标准

- 8.1 板单元采用中面应力，梁单元采用轴向应力。
- 8.2 对应于标准工况主要构件的应力一般不超过表 8.1 中给出的值。
- 8.3 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。
- 8.4 平均剪应力 τ 系指主要构件的腹板深度范围内的平均剪应力。
- 8.5 对于应力集中和形状很差的单元应力可以不采纳。

表 8.1 最大许用应力

结构分类	许用应力			
	N/mm^2 ^e	N/mm^2 ^l	N/mm^2 ^w	N/mm^2
甲板	220/k	210/k	145/k	—
内、外底	220/k	210/k	145/k	—
内外壳板，纵舱壁	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
符号				
$e \text{—组合相当应力和 von Mises 应力, } = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$ 式中： σ_x —单元 x 方向的应力 σ_y —单元 y 方向的应力 τ_{xy} —单元 xy 平面的剪应力 表中： l —船体梁纵向的应力 w —船体梁横向或垂向的应力 τ —剪应力，对于纵桁和肋板腹板总深度的平均剪应力 k —材料换算系数				
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9章 平板屈曲检查

9.1 一般规定

9.1.1 对于纵桁和主要横向构件的腹板的各种应力成分均应校核平板屈曲，对于主要构件的带板也应考察其平板屈曲，如甲板、舷侧、内壳和纵横向舱壁板等。

9.1.2 平板屈曲计算基于表 9.1.1 中给出的标准减缩厚度。

9.1.3 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。

9.1.4 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。

9.1.5 在屈曲计算中，所必需的最小屈曲安全系数 如表 9.1.2 所示。

表 9.1.1 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 1.5m 以内	甲板和舷侧板	1.0
	纵舱壁和内壳	2.0
	包括横舱壁在内的内部结构 见说明 1	2.0
其他部位	舷侧板	1.0
	纵舱壁和内壳	1.0
	包括横舱壁在内的内部结构 见说明 1	1.0
说明： 对于没有涂层的油舱，如果没有安装惰性气体系统，则板厚减缩应增加 1mm。		

表 9.1.2 平板屈曲安全因子

结构	屈曲安全因子
双层底纵桁	1.1
单层底纵桁	1.0
甲板、舷侧、内底、纵横舱壁板等	1.0
横向构件的腹板，如船中肋骨、舱壁水平和垂向扶强材腹板	1.1
符号	
=临界屈曲应力/实际应力	

9.2 计算方法

可选用下列两种计算方法的任意一种：

9.2.1 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 9.1.1 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， σ_x 、 σ_y 、 τ_{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 9.2.1，9.2.2。

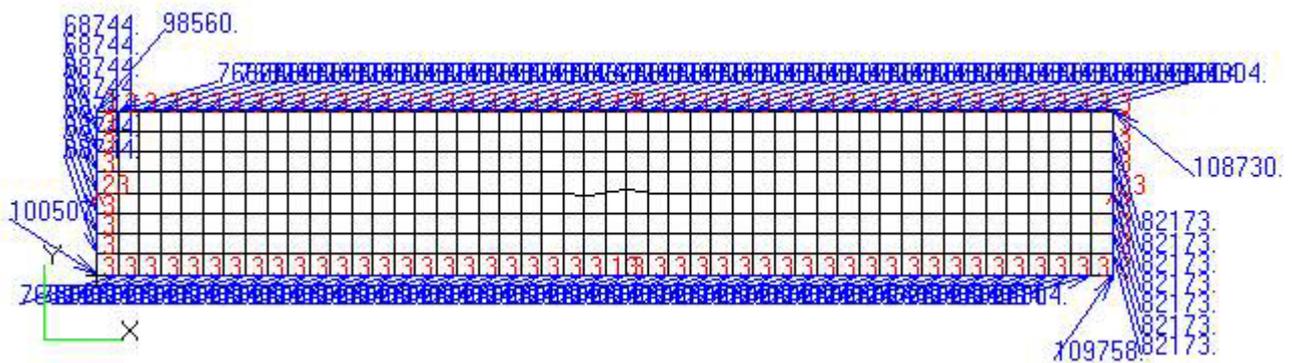


图 9.2.1 施加双向压力和剪力模型

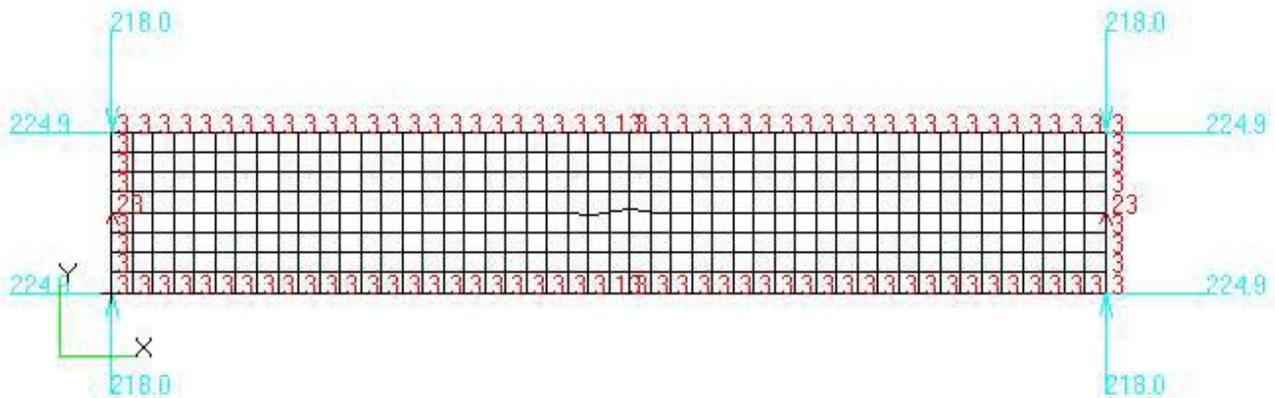


图 9.2.2 施加双向压力模型

注：1. 边界约束，图 9.2.1 和 9.2.2 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 9.2.2 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 9.1.4 中定义的边界约束系数，其结果应不小于表 9.1.2 中的安全因子。

9.2.2 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 9.1.1 的标准减薄厚度进行应力修正：

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

式中： σ_A ——屈曲计算中的工作应力；

σ ——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 9.1.1 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 σ_{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 9.2.1 计算；

C_1 ——边界约束系数，见表 9.2.2；

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 9.2.1 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 ≤ 1</p>	$k_x = \frac{8.4}{\varphi + 1.1}$
	<p>其中：-1 ≤ 0</p>	$k_x = 7.6 - 6.4\varphi + 10\varphi^2$
长边受压	<p>其中：0 ≤ 1</p>	$k_y = \left[1 + \left(\frac{s}{l} \right)^2 \right]^2 \frac{2.1}{\varphi + 1.1}$
	<p>其中：-1 ≤ 0</p>	$k_y = 1.909(1 + \varphi) \left[1 + \left(\frac{s}{l} \right)^2 \right]^2 - k_p \varphi + 10\varphi(1 + \varphi) \left(\frac{s}{l} \right)^2$ <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 9.2.2 板格边界约束系数 C_1 、 C_2

边界情况	C_1	C_2	
		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 σ_{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 9.2.1 计算；

C_2 ——边界约束系数，见本附录表 8.2.1；

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 τ_{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 9.2.1 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：

σ_{xcr_e} 、 σ_{ycr_e} 、 τ_{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 、 、 ；

s ——材料屈服强度，N/mm²；

$$s \text{——} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}。$$

(3) 屈曲强度校核

按表 9.2.3 计算板格在复合应力作用下的临界屈曲应力与计算的实际压应力之比 应不小于表 9.1.2 中的安全因子。

σ_x 、 σ_y 、 τ_{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 9.2.3 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： σ_{x1} 、 σ_{y1} 分别为板格边所受对应 X 轴、Y 轴工作应力中的较大值； σ_{x2} 、 σ_{y2} 为对应的另一较小值，计算时 σ_x 、 σ_y 应按板格边中面应力的平均值计入； τ_{xy} 为平均剪应力。 σ_{x1} 、 σ_{x2} 、 σ_{y1} 、 σ_{y2} 、 τ_{xy} 如表 9.2.1 中所示。

σ_{xcr} 、 σ_{ycr} 、 τ_{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