

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD45-2023



中国船级社

汽车运输船舶船体结构指南

2023

2024年1月1日生效

北京

简要编写说明

为满足汽车运输船大型化和轻量化设计的发展需求，在梳理和总结近年来业界反馈和审图经验的基础上，结合最新的科研项目研究成果，对原《车辆运输船舶船体结构指南》2010进行了全面修订，主要内容如下：

- (1) 基于多层连续甲板的布置特点，修改强力甲板和骨架的要求。
- (2) 在科研项目成果基础上，转化纳入新的车辆甲板要求。
- (3) 根据船型结构特点，修改舷侧外板和骨架的要求及首外飘区域的结构要求。
- (4) 引入双层底高度折减因子，修改双层底结构要求。
- (5) 根据船型进水工况特点，修改水密舱壁结构要求。
- (6) 根据科研成果，修改车辆跳板、活动车辆甲板等滚装通道设备的要求。
- (7) 在重新梳理适用范围和校核目标的基础上，对第7节和第8节直接计算要求进行修改和调整，将大型汽车船的横摇工况纳入整船强度分析。
- (8) 将原节点细化分析要求与疲劳分析要求协调。
- (9) 将原《疲劳强度指南》中汽车运输船的内容纳入本指南，对疲劳节点选取进行更全面和明确的说明，明确采用整船有限元模型和分析方法，评估左右横摇工况对结构的累积损伤。

目录

第 1 节 一般规定	1
1.1 适用范围	1
1.2 附加标志	1
1.3 图纸资料	1
1.4 布置及结构形式	1
1.5 船体结构强度直接计算和疲劳强度评估	1
1.6 符号	2
第 2 节 总纵强度	3
2.1 一般要求	3
2.2 波浪载荷	3
2.3 船体梁弯曲强度	4
2.4 船体梁剪切强度	4
2.5 船体梁屈曲强度	4
第 3 节 甲板结构	6
3.1 一般要求	6
3.2 强力甲板	6
3.3 车辆甲板	6
3.4 甲板室	11
3.5 车辆舱内甲板主要构件的结构细则	12
第 4 节 舷侧结构	13
4.1 一般要求	13
4.2 舷侧外板	13
4.3 舷侧肋骨	14
4.4 船首舷侧结构的砰击加强	15
第 5 节 双层底、支柱、水密舱壁和深舱	16
5.1 一般要求	16
5.2 车辆舱内支柱的设计载荷	16
5.3 双层底	16
5.4 水密舱壁和深舱	17
第 6 节 滚装通道设备	19
6.1 尾门和舷门	19
6.2 车辆跳板	19
6.3 可收放的活动车辆甲板	19
6.4 活动式车辆坡道	20
第 7 节 货舱区结构强度直接计算	21
7.1 一般要求	21
7.2 舱段结构模型化	21
7.3 运动及加速度	22
7.4 计算工况	22
7.5 边界条件	25
7.6 屈服强度评估	26
7.7 屈曲强度校核	27
第 8 节 整船结构强度直接计算	28
8.1 一般要求	28
8.2 整船结构模型化	28
8.3 装载	28
8.4 工况与载荷	29
8.5 模型平衡及边界条件	30
8.6 许用应力	31

8.7 屈曲强度校核	31
第 9 节 疲劳强度	32
9.1 一般要求	32
9.2 评估的结构细节	32
9.3 结构模型化	33
9.4 装载工况与载荷工况	33
9.5 疲劳参考应力计算	34
9.6 疲劳评估	34
附录 1: 疲劳载荷计算	36
1 一般规定	36
1 一般要求	36
2 动载荷工况	38
1 一般要求	39
2 疲劳评估的动载荷工况	40
3 船舶运动和加速度	42
1 一般要求	43
2 船舶运动和加速度	43
3 任意位置处的加速度	46
4 外部载荷	48
1 海水压力	48
5 内部载荷	50
1 液体压力	51
2 货物载荷	52
3 除货舱区以外的非露天甲板和平台载荷	52

第 1 节 一般规定

1.1 适用范围

1.1.1 本指南适用于船长 90m 及以上、专门设计和制造用于运输商品车辆的钢质海上航行的汽车运输船。

1.1.2 对于本指南无规定者，应符合 CCS《钢质海船入级规范》(以下简称《钢规》)第 2 篇第 1 章、第 2 章和第 9 章的有关要求。

1.2 附加标志

1.2.1 对符合本指南规定的汽车运输船，授予附加标志：Car Carrier。

1.3 图纸资料

1.3.1 应按《钢规》第 2 篇第 9 章第 1 节 9.1.3 的要求提交相关的图纸资料。

1.4 布置及结构形式

1.4.1 船体结构布置应符合《钢规》第 2 篇第 1 章第 12 节的有关规定。

1.4.2 船体的基本结构形式应为具有多层甲板和双层底的结构，也可在干舷甲板以下设置左右边舱。

1.4.3 强力甲板和船底一般应为纵骨架式。

1.4.4 从强力甲板至最低一层车辆甲板间，一般应设置局部横舱壁或强肋骨和强横梁组成的横向强框架。横向强框架一般应设置在与船底实肋板的同一平面内，间距一般应不超过 4 个肋距和 3.6m 的小者。

1.4.5 汽车运输船设有尾门跳板，一般还设有一个或两个舷门跳板。

1.5 船体结构强度直接计算和疲劳强度评估

1.5.1 应按本指南第 7 节和第 8 节进行船体结构强度直接计算并提交 CCS。

1.5.2 应按本指南第 9 节，对船体结构相关细节进行疲劳强度校核并提交 CCS。

1.6 符号

1.6.1 如无特殊说明，本指南符号定义同《钢规》第 2 篇。

第 2 节 总纵强度

2.1 一般要求

2.1.1 除本节规定外，船体梁的总纵强度应满足《钢规》第 2 篇第 2 章第 2 节的要求。

2.2 波浪载荷

2.2.1 波浪弯矩和波浪切力应按《钢规》第 2 篇第 2 章第 2 节 2.2.3 计算。

2.2.2 在计算中垂波浪弯矩 $M_w(-)$ 时，其中垂弯矩分布系数 M 应按下式计算的 C_f 值确定：

$$C_f = \frac{0.2V}{\sqrt{L}} + \frac{A_d - A_w}{Lh_f}$$

式中： V ——最大服务航速，kn；

L ——船长，m。

A_d ——离首垂线 $0.2L$ 之前，干舷甲板以上的第 1 层甲板在水平面上的投影面积， m^2 ；

A_w ——夏季载重线吃水处离首垂线 $0.2L$ 之前的水线面面积， m^2 ；

h_f ——在首垂线处从夏季载重线量至干舷甲板以上的第 1 层甲板边线处的垂直距离，m。

(1) 当 $C_f < 0.4$ 时，中垂弯矩分布系数 M 按《钢规》第 2 篇第 2 章第 2 节 2.2.3.1 确定；

(2) 当 $C_f \geq 0.50$ 时，距尾端 $0.65L$ 范围内的中垂弯矩分布系数 M 按《钢规》第 2 篇第 2 章第 2 节 2.2.3.1 确定；距尾端 $0.65L \sim 1.0L$ 范围内的中垂弯矩分布系数 M 按表 2.2.2 确定；

(3) 对于 C_f 和 x 的中间值， M 应采用线性内插法求得。

中垂弯矩分布系数 M 表 2.2.2

距尾端距离 x	0.65L	0.75L	1.0L
M	1.0	0.8	0

2.3 船体梁弯曲强度

2.3.1 船体梁弯曲强度应满足《钢规》第2篇第2章第2节2.2.5的要求。

2.4 船体梁剪切强度

2.4.1 设计者应提供船体梁沿船长各剖面的许用静水切力 $\bar{F}_s(+)$ 和 $\bar{F}_s(-)$ 。

2.4.2 船体梁许用正、负静水切力包络线 \bar{F}_s ，应大于装载手册中给出的任一航行工况下最严重的船体梁正、负静水切力。装载工况见《钢规》第2篇第2章第2节2.2.2。

2.4.3 对于单舷侧结构的汽车运输船，舷侧外板上的剪切应力 τ 可按式计算：

$$\tau = \left| \left(\bar{F}_s + F_w \right) \left(\frac{1000q_v}{t} \right) \right| \quad \text{N/mm}^2$$

式中： \bar{F}_s ——许用静水切力，kN；

F_w ——波浪切力，kN；

t ——计算点处舷侧外板的厚度，mm；

q_v ——板的剪流，按下式计算：

$$q_v = 0.5 \left(\frac{S}{I} \right) \cdot 10^{-1} \quad \text{mm}^{-1}$$

其中： S ——静矩， cm^3 ，如计算点在水平中和轴以上时，为通过计算点的水平线以上的所有连续纵向构件对水平中和轴的静矩，如计算点在水平中和轴以下时，则为通过计算点的水平线以下的所有连续纵向构件对水平中和轴的静矩；

I ——计算横剖面对水平中和轴的惯性矩， cm^4 。

2.4.4 许用剪切应力 $[\tau] = 110/K$ ， N/mm^2 ，其中 K 为材料系数。

2.5 船体梁屈曲强度

2.5.1 船长大于等于90m的船舶，受船体梁弯曲压应力和剪切应力的板格及纵向构件，应按《钢规》第2篇第2章第2节2.2.7的要求校核屈曲强度。

2.5.2 在屈曲强度校核时，标准减薄厚度应符合表2.5.2的要求。

标准减薄厚度

表 2.5.2

结构	标准减薄厚度(mm)
(1) 干舷甲板以下的板格及纵向构件; (2) 液舱边界; (3) 液舱内的构件	按《钢规》第 2 篇第 2 章第 2 节表 2.2.7.4 的要求。
(1) 干舷甲板以上的舷侧外板; (2) 作为强力甲板的上层建筑甲板的露天部分板格。	0.5
(1) 作为强力甲板的上层建筑甲板的非露天部分; (2) 货舱内的车辆甲板。	0

2.5.3 工作压应力 σ 应按《钢规》第 2 篇第 2 章第 2 节 2.2.5.5 计算。对船体梁中和轴以上的构件，应取 \overline{M}_s 和 M_w 的中垂弯矩值。对中和轴以下的构件，应取中拱弯矩值。

2.5.4 如在所有装载情况下均为中拱的静水弯矩，则在 2.5.3 的计算中，设计合成中垂弯矩 \overline{M}_s 取最小的中拱静水弯矩。

2.5.5 工作剪切应力 τ 按本节 2.4.3 计算。

第3节 甲板结构

3.1 一般要求

3.1.1 本节要求适用于强力甲板、车辆甲板和甲板室甲板。对于其他甲板应满足《钢规》第2篇第2章的有关要求。

3.1.2 甲板结构的主要构件尺度应按本指南第7节或第8节的要求由直接计算法确定，但其结构细则应满足本节3.5的要求。

3.2 强力甲板

3.2.1 强力甲板的最小厚度为6mm。

3.2.2 强力甲板边板应满足以下要求：

(1) 船中0.4L区域内，强力甲板边板宽度应不小于：

$$b=800+5L \text{ mm, 但也不必大于 } 1800\text{mm}$$

式中： L ——船长，m。

(2) 强力甲板边板在端部的宽度，应不小于船中部宽度的65%。

(3) 强力甲板边板厚度，应不小于强力甲板厚度。

3.2.3 强力甲板的纵骨剖面模数应不小于按下式计算所得之值：

$$W = 3.6s l^2 K + 0.015s l L K \quad \text{cm}^3$$

式中： L ——船长，m；计算时取值不必大于200m；

s ——纵骨间距，m；

l ——纵骨跨距，m；

K ——材料系数。

3.3 车辆甲板

3.3.1 对于非露天车辆甲板，其甲板厚度应不小于5.5mm。

3.3.2 对于非露天车辆甲板，轮印载荷作用下的甲板厚度应不小于下式计算值：

$$t = 54.8 \beta_c \frac{k_2}{k_1} \sqrt{\frac{p_1 c s}{C_p R_{eH}}} + 1.0 \quad \text{mm}$$

式中： β_c ——长宽比修正系数，取为：

$$\beta_c = \begin{cases} 0.35 \ln \frac{l}{s} + 0.76, & \frac{l}{s} \leq 2 \\ 1, & \frac{l}{s} > 2 \end{cases};$$

k_1 ——沿骨材方向影响系数，取为：

$$k_1 = \begin{cases} -3.426\left(\frac{a}{s}\right)^3 + 8.042\left(\frac{a}{s}\right)^2 - 6.547\left(\frac{a}{s}\right) + 3.08, & \frac{a}{s} \leq 1 \\ -0.022\left(\frac{a}{s}\right)^3 + 0.169\left(\frac{a}{s}\right)^2 - 0.462\left(\frac{a}{s}\right) + 1.463, & 1 < \frac{a}{s} < 3; \\ 1, & \frac{a}{s} \geq 3 \end{cases}$$

k_2 ——垂直骨材方向影响系数，取为：

$$k_2 = \begin{cases} 0.0272\left(\frac{b}{s}\right)^2 - 0.1849\frac{b}{s} + 0.4165, & \frac{b}{s} \leq 1 \\ -0.0285\left(\frac{b}{s}\right)^3 + 0.1851\left(\frac{b}{s}\right)^2 - 0.3596\frac{b}{s} + 0.4717, & 1 < \frac{b}{s} \leq 3; \\ 0.2887, & \frac{b}{s} > 3 \end{cases}$$

a ——计算轮印长度，见表 3.3.2，m；

b ——计算轮印宽度，见表 3.3.2，m；

c ——系数，取 b 且不大于 s ，m；

s ——板格宽度，见表 3.3.2，m；

l ——板格长度，见表 3.3.2，m；

e ——轮印间隙，见表 3.3.2，m；

p_1 ——板计算轮印载荷，见表 3.3.2，取为：

$$p_1 = \lambda \frac{P_1}{ab} \times 9.81 \text{ kPa}$$

式中： P_1 ——轮印承重，t。

λ ——动载系数，取为：

$$\lambda = 1 + \frac{a_v}{g}, \text{ 航行工况;}$$

$$\lambda = 1.10, \text{ 在港工况;}$$

a_v —— 垂向合成加速度, 见《钢规》第2篇第1章1.5.2.2;

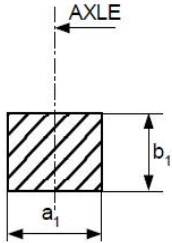
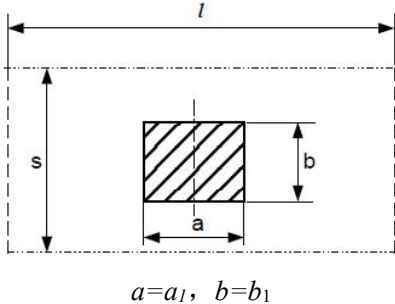
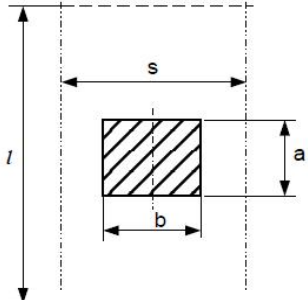
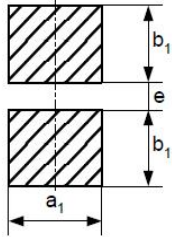
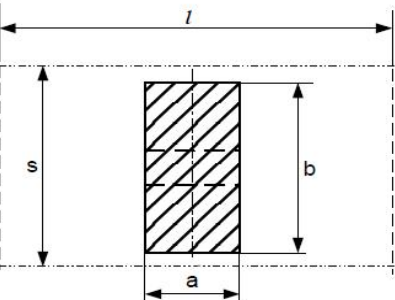
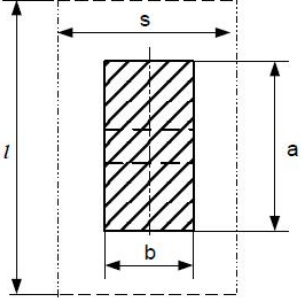
C_p —— 板的许用弯曲应力系数, 取为:

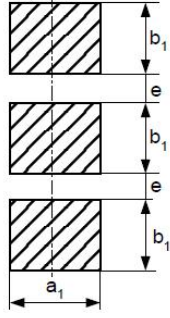
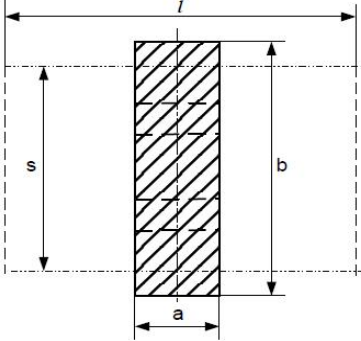
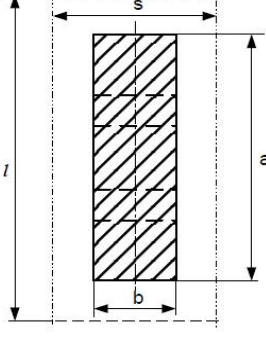
$$C_p = 1.0, \text{ 航行工况;}$$

$$C_p = 0.9, \text{ 在港工况。}$$

轮印载荷面积定义

表 3.3.2

轮印数目	轮印尺寸	轮轴垂直于骨材时的载荷面积	轮轴平行于骨材时的载荷面积
单轮印		 <p style="text-align: center;">$a = a_1, b = b_1$</p>	 <p style="text-align: center;">$b = a_1, a = b_1$</p>
双轮印	 <p style="text-align: center;">$e < b_1$</p>	 <p style="text-align: center;">$a = a_1, b = 2b_1 + e$</p>	 <p style="text-align: center;">$b = a_1, a = 2b_1 + e$</p>

轮印数目	轮印尺寸	轮轴垂直于骨材时的载荷面积	轮轴平行于骨材时的载荷面积
三轮印	 <p style="text-align: center;">$e < b_1$</p>	 <p style="text-align: center;">$a = a_1, b = 3b_1 + 2e$</p>	 <p style="text-align: center;">$b = a_1, a = 3b_1 + 2e$</p>

注：为简化计算，可将多轮印载荷面积等效为一个单轮印载荷面积，其中等效载荷面积为原多轮印载荷面积加上各轮印之间空隙，并按等效载荷面积中心与板格中心重合的方式进行处理。

3.3.3 对于非露天车辆甲板，轮印载荷作用下的甲板骨材剖面模数应不小于下式计算值：

$$W = \frac{1000k_1k_npcd\ell}{k_2C_sR_{eH}} \text{ cm}^3$$

式中： k_1 ——沿骨材方向影响系数，取为：

$$k_1 = \begin{cases} 0.07\left(\frac{a_1}{\ell}\right)^2 - 0.188\frac{a_1}{\ell} + 0.185, & \frac{a_1}{\ell} \leq 1 \\ 0.0103\left(\frac{a_1}{\ell}\right)^3 - 0.0855\left(\frac{a_1}{\ell}\right)^2 + 0.221\frac{a_1}{\ell} - 0.08, & 1 < \frac{a_1}{\ell} < 3.5; \\ 0.0833, & \frac{a_1}{\ell} \geq 3.5 \end{cases}$$

k_2 ——垂直骨材方向影响系数，取为：

$$k_2 = \begin{cases} 0.156\left(\frac{b_1}{s}\right)^2 + 0.045\frac{b_1}{s} + 1.02, & \frac{b_1}{s} \leq 1 \\ -0.062\left(\frac{b_1}{s}\right)^3 + 0.522\left(\frac{b_1}{s}\right)^2 - 1.382\frac{b_1}{s} + 2.09, & 1 < \frac{b_1}{s} < 3.5; \\ 1, & \frac{b_1}{s} \geq 3.5 \end{cases}$$

a_1, b_1 ——单个轮印尺寸，见表 3.3.2；

p_2 ——骨材计算轮印载荷，取为：

$$p_2 = \lambda \frac{P_2}{a_1 b_1} \times 9.81 \text{ kPa}$$

式中： P_2 ——单个轮印承重，t。

λ ——动载系数，取为：

$$\lambda = 1 + \frac{a_v}{g}, \text{ 航行工况；}$$

$\lambda = 1.10$ ，在港工况；

a_v ——垂向合成加速度，见《钢规》第2篇第1章1.5.2.2；

c ——系数，取 b_l 且不大于 s ，m；

d ——系数，取 a_l 且不大于 l ，m；

l ——骨材跨距，m；

s ——骨材间距，m；

k_n ——多轮印修正系数，取为：

$$k_n = k_a \cdot k_b；$$

k_a ——沿骨材方向的多轮印修正系数，取为：

沿骨材方向轮印个数为1时， $k_a = 1$ ；

$$\text{沿骨材方向轮印个数为2时，} k_a = \begin{cases} 1.52 \left(\frac{e_l}{l} \right)^2 - 2.76 \frac{e_l}{l} + 2, & 0 < \frac{e_l}{l} < 0.5 \\ 1, & \frac{e_l}{l} \geq 0.5 \end{cases}；$$

$$\text{沿骨材方向轮印个数为3时，} k_a = \begin{cases} 2 \left(\frac{e_l}{l} \right)^2 - 5 \frac{e_l}{l} + 3, & 0 < \frac{e_l}{l} < 0.5 \\ 1, & \frac{e_l}{l} \geq 0.5 \end{cases}；$$

垂直骨材方向轮印个数为1时， $k_b = 1$ ；

$$\text{垂直骨材方向轮印个数为 2 时, } k_b = \begin{cases} -0.71\left(\frac{e_s}{s}\right)^2 - 0.05\frac{e_s}{s} + 2, & 0 < \frac{e_s}{s} < 1.15 \\ 1, & \frac{e_s}{s} \geq 1.15 \end{cases};$$

$$\text{垂直骨材方向轮印个数为 3 时, } k_b = \begin{cases} -0.8\left(\frac{e_s}{s}\right)^2 - 1.2\frac{e_s}{s} + 3, & 0 < \frac{e_s}{s} < 1 \\ 1, & \frac{e_s}{s} \geq 1 \end{cases};$$

e_l ——沿骨材方向轮印间距, m;

e_s ——垂直骨材方向轮印间距, m; 如图 3.3.3 所示。

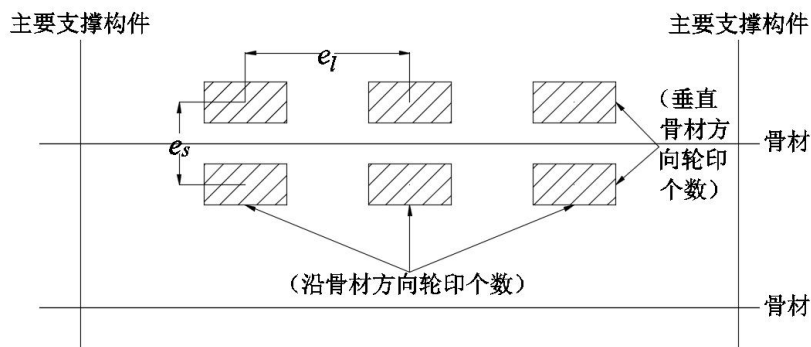


图 3.3.3 轮印间距示意图

C_s ——骨材的许用弯曲应力系数, 取为:

$$C_s = 0.95, \text{ 航行工况;}$$

$$C_s = 0.85, \text{ 在港工况。}$$

3.4 甲板室

3.4.1 甲板室甲板的最小厚度为 5mm, 其中露天部分最小厚度为 6mm。

3.4.2 甲板室纵骨或横梁, 以及纵桁或强横梁的尺寸应满足《钢规》第 2 篇第 2 章第 17 节 2.17.5 的要求, 其中计算压头 h 按下列选取:

在第一层: 0.9m;

在第二层: 0.6m;

在第三、四层：0.45m；

在第五层及以上：0.25m。

3.5 车辆舱内甲板主要构件的结构细则

3.5.1 主要构件的布置应确保结构的有效连续性,避免剖面或高度的突然变化。当构件在舱壁或其他主要构件的两侧对接时,应保证其位置在同一直线上。

3.5.2 主要构件的腹板厚度 t_w 应不小于:

$$t_w = \frac{S_w}{100} \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}} \text{ mm, 但不小于 7mm}$$

式中: S_w —— 腹板上加强筋的间距或无加强筋的腹板高度, mm;

R_{eH} —— 主要构件腹板的屈服强度, N/mm²。对于高强度钢,若在直接计算中,取较低强度等级的屈服应力仍能满足板屈曲校核要求,则可取较低强度等级的屈服应力计算。

3.5.3 主要构件的面板厚度应不小于主要构件的腹板厚度。

3.5.4 主要构件的腹板高度一般应不小于次要构件穿过处切口高度的 2 倍。当超过此限值时,应设置领板。但在任何情况下,主要构件的腹板高度应不小于次要构件穿过处切口高度的 1.6 倍。

3.5.5 主要构件的防倾肘板设置应满足《钢规》第 2 篇第 1 章 1.2.5.4 条的要求。

3.5.6 主要构件腹板上在下述位置的切口应设置领板:

- (1) 支柱的上下端处;
- (2) 预计承受集中载荷处;
- (3) 靠近端部肘板趾端处;
- (4) 本节 3.5.4 条的要求。

第4节 舷侧结构

4.1 一般要求

4.1.1 舷侧结构的主要构件尺寸应按本指南第7节或第8节的要求由直接算法确定。

4.2 舷侧外板

4.2.1 干舷甲板以下的舷侧外板板厚应不小于按下列两式计算所得之值：

$$t_1 = 15.8s \sqrt{\frac{P_{hs} + P_{hd}}{C_p R_{eH}}} + 1.5 \quad \text{mm}$$

$$t_2 = (0.035L + 6) \sqrt{K} \quad \text{mm}$$

式中：s —— 板格宽度，m；

P_{hs} 、 P_{hd} —— 见《钢规》第2篇第1章第5节1.5.3，其中吃水 d_I 取结构吃水；

C_p —— 舷侧为横骨架式时取为 $0.76-0.9|\sigma_b|/R_{eH}$ ，纵骨架式时取为 $0.76-0.45|\sigma_b|/R_{eH}$ ；

σ_b —— 船底处总纵应力，N/mm²；

R_{eH} —— 外板屈服强度，N/mm²；

L —— 船长，m；

K —— 材料系数。

当外板作为液舱边界时，其厚度应额外增加1mm。

4.2.2 从干舷甲板至干舷甲板以上2.3m处的舷侧外板，应满足以下要求：

(1) 首垂线向后0.075L范围内，应符合《钢规》第2篇第2章第17节2.17.4.2(1)首楼的舷侧外板要求，其余区域应符合《钢规》第2篇第2章第17节2.17.4.2(2)桥楼和尾楼的舷侧外板要求。

(2) 本指南第2节对船体梁弯曲强度、剪切强度和屈曲强度的要求。

4.2.3 从干舷甲板以上2.3m处至强力甲板的舷侧外板，应满足以下要求：

(1) 《钢规》第2篇第2章第17节2.17.3.1甲板室围壁的要求。

(2) 本指南第2节对船体梁弯曲强度、剪切强度和屈曲强度的要求。

4.2.4 强力甲板以下、干舷甲板以上的舷侧外板除应符合本节 4.2.2 和 4.2.3 的要求外，还应不小于下列公式计算所得之值：

$$t = t_F - (Z - D_F)(0.24 + 0.006L) \sqrt{\frac{sK}{s_b}} \quad \text{mm}$$

式中： t_F ——干舷甲板处舷侧外板的厚度，mm；

Z ——计算点距基线的高度，m，计算点应取为板列在型深方向的中点，但不大于板列下沿向上 1.5m；

L ——船长，m；

D_F ——计量至干舷甲板处的型深，m；

s ——骨材间距，m，计算时取值不小于 s_b ；

s_b ——骨材标准间距，m；

K ——材料系数。

4.3 舷侧肋骨

4.3.1 干舷甲板以下的舷侧肋骨的剖面模数应不小于按下列两式计算所得之值：

$$W_1 = \frac{1100(P_{hs} + P_{hd})sl^2}{7.2R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

$$W_2 = 0.58sLLK \quad \text{cm}^3$$

式中： P_{hs} 、 P_{hd} ——同 4.2.1；

s ——肋骨间距，m；

l ——肋骨跨距，m；

R_{eH} ——肋骨屈服强度；

L ——船长，m；

K ——材料系数。

4.3.2 干舷甲板上第 1 层上层建筑，其舷侧肋骨的剖面模数应不小于按下列公式计算所得之值：

(1) 自首垂线向后 0.075L 区域内：

$$W = 0.9(0.7 + \frac{4d}{D_F})sdlK\sqrt{D_F} \quad \text{cm}^3$$

$$W = 0.89sLLK \quad \text{cm}^3$$

式中：L——船长，m；但计算时取值不必大于200m；

D_F ——计量至干舷甲板处的型深，m；

d ——吃水，m；

s ——肋骨间距，m；

l ——肋骨跨距，m，即在舷侧量得的甲板间高，计算时取值应不小于2.3m；

K ——材料系数。

(2) 其余区域：

$$W = 0.55(0.7 + \frac{4d}{D_F})sdl^2K \quad \text{cm}^3$$

$$W = 0.32sLLK \quad \text{cm}^3$$

式中：L、 D_F 、 d 、 s 、 l 及 K 见本条(1)。

4.3.3 干舷甲板以上第2层及以上各层上层建筑，其舷侧肋骨剖面模数除应满足《钢规》第2篇第2章第17节2.17.3.2的要求外，还应不小于按下式计算所得之值：

$$W = 11sl^2K \quad \text{cm}^3$$

式中： s 、 l 及 K 见4.3.1(1)。

4.4 船首舷侧结构的砰击加强

4.4.1 船首舷侧结构应按《钢规》第2篇第7章第8节的要求予以砰击加强，并符合4.4.2和4.4.3的规定。

4.4.2 外飘角 α 的定义见《钢规》第2篇第9章第4节9.4.3.1。

4.4.3 对于横骨架式舷侧肋骨，其剖面模数 W 和腹板面积 A ，应不小于按下列各式计算所得之值：

$$W = 1.89sh_s l^2 K \quad \text{cm}^3$$

$$A = 0.27b_{r2} l sh_s K \quad \text{cm}^2$$

式中各参数定义见《钢规》第2篇第7章第8节7.8.3.1。

第 5 节 双层底、支柱、水密舱壁和深舱

5.1 一般要求

5.1.1 除本节有规定者外，双层底、支柱、水密舱壁和深舱结构应分别满足《钢规》第 2 篇第 2 章第 6、10、12、13 节的要求。

5.1.2 车辆舱内的支柱不应选用管形支柱或空心矩形剖面的支柱，且支柱的下端可仅设沿船长方向的肘板。

5.2 车辆舱内支柱的设计载荷

5.2.1 支柱所受的载荷 P_c 应按下列式计算：

$$P_c = p_d ab + P_0 \quad \text{kN}$$

式中： a —— 支柱所支持的甲板面积的平均长度，m；

b —— 支柱所支持的甲板面积的平均宽度，m；

P_0 —— 上方支柱所传递的载荷，kN；

p_d —— 甲板设计均布载荷，kN/m²。

5.3 双层底

5.3.1 按《钢规》第 2 篇第 2 章第 6 节 2.6.2.1 计算双层底高度要求时， h_0 应不小于按下式计算所得之值：

$$h_0 = 22.5B + 42d + 300 \quad \text{mm}$$

5.3.2 按《钢规》第 2 篇第 2 章第 6 节计算双层底实肋板和纵桁板厚时，可根据实际双层底高度进行折减，折减系数 $f_{db} = h_0/h_a$ ，但取值应不小于 0.9，式中 h_0 见本节 5.3.1， h_a 为实际双层底高度。

5.3.3 外底纵骨的剖面模数应不小于按下式计算所得之值：

$$W = \frac{92(P_{hs} + P_{hd})s l^2}{0.9R_{eH} - |\sigma_b|} \quad \text{cm}^3$$

式中： P_{hs} 、 P_{hd} —— 同 4.2.1；

s —— 纵骨间距，m；

l —— 纵骨跨距, m;

R_{eH} —— 纵骨屈服强度, N/mm²;

σ_b —— 船底处总纵应力。

5.4 水密舱壁和深舱

5.4.1 构成舱室水密边界的板, 其厚度应不小于按下式计算所得之值:

$$t = 15.8s \sqrt{\frac{10\Delta z}{1.15R_{eH} - C_{PF}|\sigma_b|}} + 1.5 \quad \text{mm}$$

式中: s —— 板格宽度, m;

Δz —— 自板格下沿至最深破舱平衡水线的最小垂直距离, m;

R_{eH} —— 板的屈服强度, N/mm²。

C_{PF} —— 对于纵骨架式纵向构件, $C_{PF} = 0.25|D_F - z|/D_F$; 对于横骨架式

纵向构件, $C_{PF} = 0.5|D_F - z|/D_F$; 对于横向构件, $C_{PF} = 0$;

z —— 板格下沿距基线的垂直距离, m;

D_F 和 σ_b 定义见第 4 节。

5.4.2 构成舱室水密边界处的骨材, 其剖面模数应不小于按下式计算所得之值:

$$W = \frac{920\Delta z s l^2}{1.15R_{eH} - C_{PS}|\sigma_b|} \quad \text{mm}$$

式中: Δz —— 自骨材跨距中点至最深破舱平衡水线的最小垂直距离, m;

s —— 骨材间距, m;

l —— 骨材跨距, m;

R_{eH} —— 骨材的屈服强度, N/mm²。

C_{PS} —— 对于纵骨架式纵向构件, $C_{PS} = 0.5|D_F - z|/D_F$, 对于横骨架式纵

向构件和横向构件, $C_{PS} = 0$;

z —— 骨材跨距中点距基线的垂直距离, m;

D_F 和 σ_b 定义见第 4 节。

5.4.3 对于未设溢流管的液舱, 其空气管高度不得低于破舱平衡水线高度, 且应分别按 5.4.1 和 5.4.2 校核构成该舱室水密边界的板和骨材的尺寸, 其中 Δz 取为空气管顶距计

算点的垂直距离。

第 6 节 滚装通道设备

6.1 尾门和舷门

6.1.1 尾门和舷门应满足《钢规》第 2 篇第 9 章第 5 节的要求。

6.2 车辆跳板

6.2.1 车辆跳板的板和骨材应满足第 3 节 3.3 的要求。

6.2.2 对于车辆跳板的主要支撑构件应按如下要求进行强度校核：

- (1) 跳板处于放下状态；
- (2) 1.1 倍的设计载荷以最不利的位置作用于跳板上，同时考虑跳板的自身重量；
- (3) 许用相当应力 $[\sigma_e]=180/K$ N/mm²

式中： K ——材料系数。

6.2.3 应对受压的主要支撑构件进行屈曲强度校核。

6.2.4 车辆跳板与船体结构连接处的铰链应满足《钢规》第 2 篇第 9 章 9.6.3 的要求。

6.3 可收放的活动车辆甲板

6.3.1 对于可收放的活动车辆甲板的板和骨材应满足第 3 节 3.3 的要求。

6.3.2 在航行中使用，用于评估活动车辆甲板主要支撑构件的载荷取为：

$$p = (m_s + p_d)(g + a_v) \quad \text{kN/m}^2$$

式中： m_s ——甲板自重，t/m²；

p_d ——甲板设计均布载荷，t/m²；

g ——重力加速度，取 9.81 m/s²；

a_v ——垂向合成加速度，见《钢规》第 2 篇第 1 章 1.5.2.2。

6.3.3 用于评估活动甲板主要支撑构件的衡准取为：

许用相当应力 $[\sigma_e]=220/K$ kN/m²

式中： K ——材料系数。

6.3.4 应对受压的主要支撑构件进行屈曲强度校核。

6.4 活动式车辆坡道

6.4.1 活动式车辆坡道应满足本节 6.2 的有关要求。

6.4.2 活动式车辆坡道如在航行中作为车辆甲板使用，还应满足本节 6.3 的要求。

第 7 节 货舱区结构强度直接计算

7.1 一般要求

7.1.1 本节给出了汽车运输船货舱区结构强度直接计算的要求。

7.1.2 舱段直接计算用于货舱区主要构件在典型装载工况下的强度评估。主要构件包括：

- (1) 甲板结构；
- (2) 舷侧结构；
- (3) 双层底结构；
- (4) 舱壁结构；
- (5) 半舱壁结构；
- (6) 支柱。

7.1.3 横摇工况下的船体结构强度评估采用 8.2 的整船有限元模型进行，但当满足下述条件之一时，可采用本节的舱段模型进行评估：

- (1) 干舷甲板以上仅有 2 层车辆甲板，且抗横摇构件沿船长均匀分布；
- (2) 船长小于 120 米，且抗横摇构件沿船长均匀分布。

7.1.4 批准的装载手册中应包含横摇强度评估采用的装载工况。

7.2 舱段结构模型化

7.2.1 有限元模型的横向和垂向范围：整个船宽和型深。有限元模型的最小纵向范围：

- (1) 当货舱区采用均匀布置的半舱壁设计时，模型应包括半舱壁及前后 1/2 个半舱壁间距；
- (2) 当货舱区采用无半舱壁、有支柱设计时，模型应包括 1/2+1+1/2 个支柱间距；
- (3) 当货舱区采用无半舱壁、无支柱设计时，模型应包括 3 个强框架间距。

7.2.2 舱段模型一般应取中部典型货舱区。如其他区域的车辆舱船体结构与船中区域明显不同，还应对这些区域进行建模分析。

7.2.3 确定模型范围时应考虑坡道的布置情况。根据坡道布置情况，可以扩大模型的纵向范围，或采用整船模型。

7.2.4 有限元模型基于船舶的建造尺寸，有限元的单元选择和网格划分应满足《钢规》

第2篇第1章第5节1.5.6.3和1.5.6.4的要求。

7.3 运动及加速度

7.3.1 船舶的运动和加速度根据《钢规》第2篇第1章第5节1.5.2的规定计算。

7.4 计算工况

7.4.1 货舱区结构强度直接计算工况见表7.4.1。

表7.4.1 舱段有限元计算工况

工况	描述	吃水	外部载荷	内部载荷
1	满载工况	T _{SC}	静水+波浪压力	车辆甲板设计 均布载荷
2	压载工况	T _{BL}	静水+波浪压力	液舱静压力
3	局部重载工况	T _{SC}	静水+波浪压力	车辆甲板轮印 载荷
4 ⁽¹⁾	横向非均匀装载	T _{SC}	静水+波浪压力	车辆甲板设计 均布载荷
5 ⁽¹⁾	纵向非均匀装载	T _{SC}	静水+波浪压力	车辆甲板设计 均布载荷
6	进水工况	T _{DM}	静水压力	进水压力
7 ⁽²⁾	横摇工况	T _{SC}	静水压力（横倾）	车辆甲板设计 均布载荷
(1) 当设计明确禁止非均匀装载时，可不计算工况4和工况5。 (2) 当进行整船直接计算时，可不计算工况7，见7.1.3。				

7.4.2 满载工况的载荷包括车辆甲板的重力及惯性力、车辆的重力及惯性力、海水静压力和海水动压力。

(1) 作用在车辆甲板上的垂向均布压力为：

$$p_v = (g + a_v)(p_d + m_s) \quad \text{kN/m}^2$$

式中：p_d —— 甲板设计均布载荷，t/m²；

m_s —— 车辆甲板的自重载荷, t/m^2 , 但应不小于 $0.1t/m^2$;

g —— 重力加速度, 取 $9.81, m/s^2$;

a_v —— 垂向合成加速度, m/s^2 , 见《钢规》第 2 篇第 1 章第 5 节 1.5.2。

(2) 舷外水压力包括静水压力和波浪附加压力, 其中船底及舷侧的静水压力由吃水确定, 本工况的吃水取满载吃水。波浪附加压力的分布和取值如图 7.4.2 所示, 其中 C 的定义和取值见《钢规》第 2 篇第 2 章第 2 节 2.2.3.1。

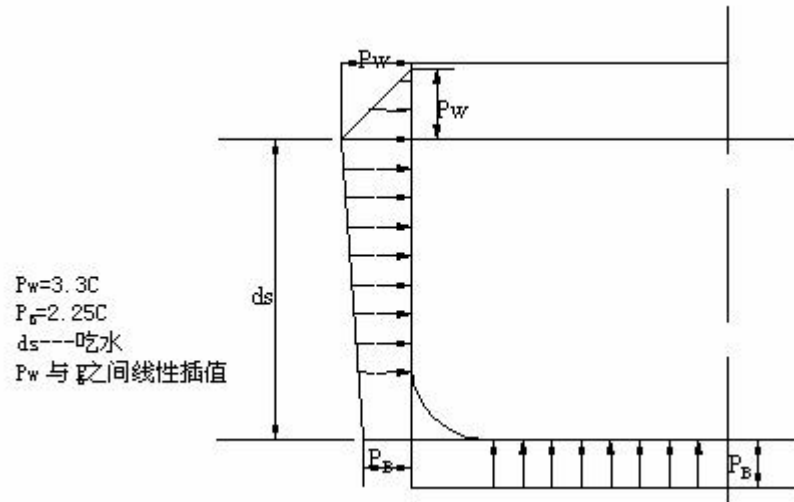


图 7.4.2 舷侧及船底波浪压头分布

7.4.3 压载工况的载荷包括甲板结构自重, 海水静压力和海水动压力。

(1) 甲板结构自重仅包括静态载荷, 可通过重力场的形式施加, 也可通过压力的形式施加。

(2) 舷外水压力包括静水压力和波浪附加压力, 其中静水压力由吃水产生, 本工况的吃水取压载吃水。波浪附加压力的分布和取值如图 7.4.2 所示。

(3) 对于双层底的压载水舱和燃油舱, 根据实际的装载情况施加相应的静压力。

7.4.4 局部重载工况应考虑装载重型车辆时对强横梁对不利的装载。车辆甲板的载荷包括甲板自重及轮印载荷两部分, 其中甲板自重按下式计算并以压力形式施加至模型上:

$$p_v = (g + a_v)m_s \quad \text{kN/m}^2$$

轮印载荷按下式计算, 并以节点力的形式施加到模型上:

$$F_v = (g + a_v)P_p \quad \text{kN}$$

式中: P_p —— 轮印承重, t 。

7.4.5 横向非均匀装载的甲板载荷和舷外水压力计算公式同满载工况，但甲板设计均布载荷的作用区域仅在强横梁的一个跨距内，吃水取结构吃水。图 7.4.5 给出了有一排支柱时的压力作用的区域，在阴影区作用满载工况的车辆压力，在其他区域没有车辆压力。当车辆舱有两排支柱时，需分别考虑载荷作用区位于支柱之间，和位于支柱与舷侧之间两种情况。

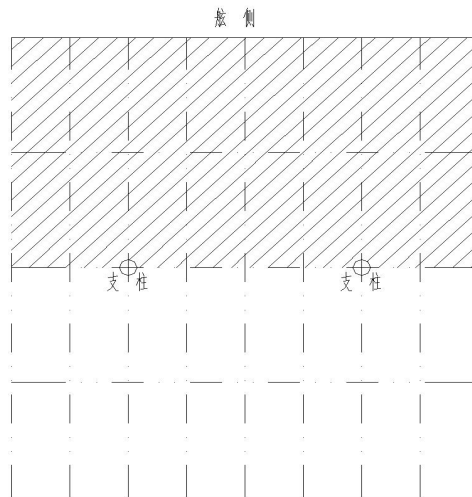


图 7.4.5 横向非均匀工况的压力作用区域

7.4.6 纵向非均匀装载的甲板载荷和舷外水压力计算公式同满载工况，但甲板设计均布载荷的作用区域为前后相邻支柱间的甲板区域，吃水取结构吃水。图 7.4.6 给出了车辆压力的作用区域。

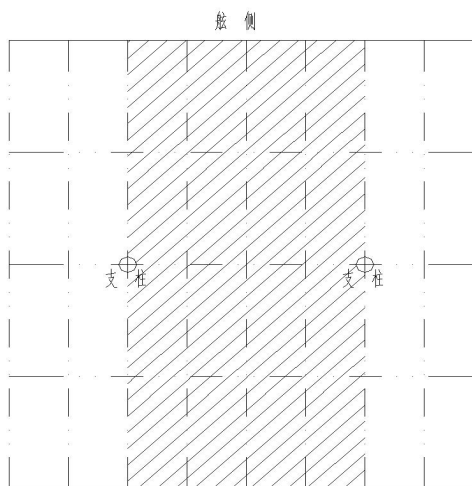


图 7.4.6 纵向非均匀工况的压力作用区域

7.4.7 进水工况用于评估水密周界（水密甲板）的结构强度。所评估的水密甲板上不应有车辆或货物载荷。静水压力根据最深破舱平衡水线计算。

7.4.8 横摇工况用于评估横摇时的船体结构强度。当采用本节的舱段模型进行横摇工况下的强度分析时，载荷见 8.4.3。

7.5 边界条件

7.5.1 对于工况 1 至工况 6，采用如下边界条件（见图 7.5.1 和表 7.5.1）：

- (1) 干舷甲板与外板两条交线上的各节点，约束 Z 向位移。
- (2) 干舷甲板与左舷外板交线的前后端两个节点，约束 Y 向位移。
- (3) 干舷甲板与外板两条交线的后端两个节点，约束 X 向位移。
- (4) 船底和甲板纵桁前后端节点，约束绕 Y 轴的转动。

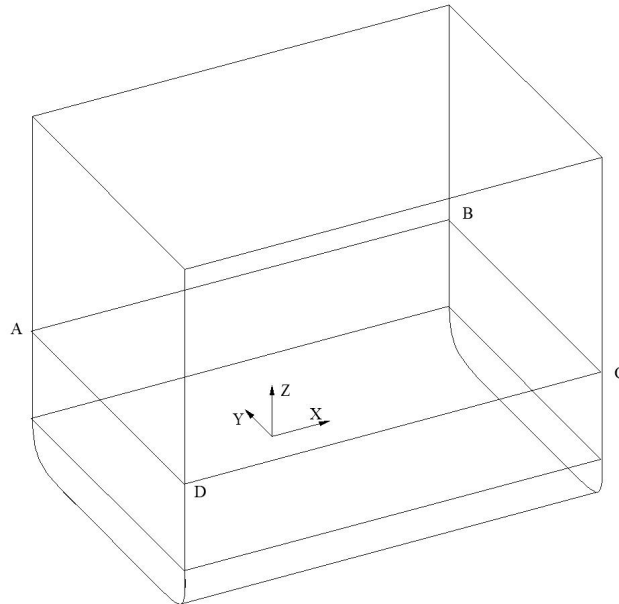


图 7.5.1 工况 1 至工况 6 边界条件施加位置

工况 1 至工况 6 边界条件

表 7.5.1

约束	$\delta_x = 0$	$\delta_y = 0$	$\delta_z = 0$	$\theta_y = 0$
作用区域	点 A、D	点 A、B	线 AB, CD	各纵桁两端

7.5.2 对于工况 7，采用如下边界条件（见图 7.5.2 和表 7.5.2）：

- (1) 内底板的后端各节点，约束 X 方向的位移。
- (2) 内底的一舷的边线处各节点，约束 Y 方向的位移。
- (3) 舷侧外板前后端各节点，约束 Z 方向的位移。
- (4) 船底和甲板纵桁前后端节点，约束绕 Y 轴的转动。

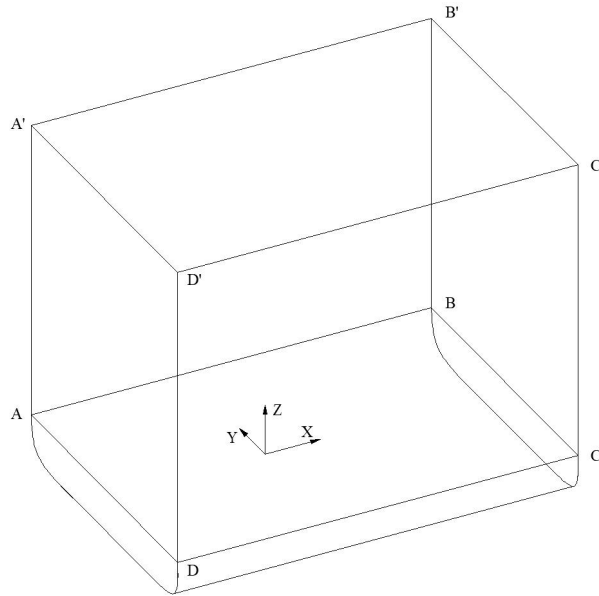


图 7.5.2 工况 7 边界条件施加位置

工况 7 边界条件

表 7.5.2

约束	$\delta_x = 0$	$\delta_y = 0$	$\delta_z = 0$	$\theta_y = 0$
作用区域	线 AD	线 AB	线 AA', BB', CC', DD'	各纵桁两端

7.6 屈服强度评估

7.6.1 结构评估范围为模型中部区域，应包括半舱壁框架、支柱强框架及普通强框架等。对于典型的有限元模型，评估范围见图 7.6.1。

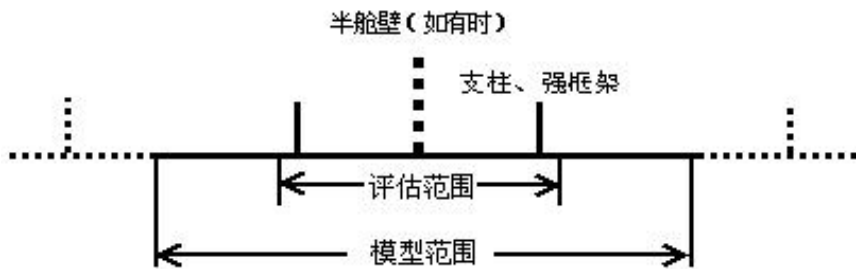


图 7.6.1 有限元评估范围

7.6.2 评估时，板单元应力取单元中点中面处的 von Mises 相当应力，梁单元取轴向应力的绝对值。

对于甲板纵桁，许用应力为： $[\sigma_e] = 220 / K$

对于其他结构，许用应力为： $[\sigma_e]=235/K$

式中： K ——材料系数。

7.7 屈曲强度校核

7.7.1 对于船体结构板格，应根据直接计算的应力结果按《钢规》第9篇第8章第4节的要求进行屈曲强度校核，标准减薄厚度按本指南第2节2.5.2确定，许用屈曲利用因子取0.95。

7.7.2 经CCS认可，也可采用其他屈曲强度计算方法。

第 8 节 整船结构强度直接计算

8.1 一般要求

8.1.1 本节给出了采用整船有限元模型进行横摇工况下船体结构强度评估的要求。

8.2 整船结构模型化

8.2.1 在横摇时，抵抗横向载荷的构件包括横向强框架，局部舱壁，船首尾处的舱壁。整船有限元模型应包括船长、船宽和基线至顶甲板范围内的船体结构，并准确描述所有抵抗横向载荷的船体结构。有限元模型的网格尺寸及单元要求见 7.2.4。

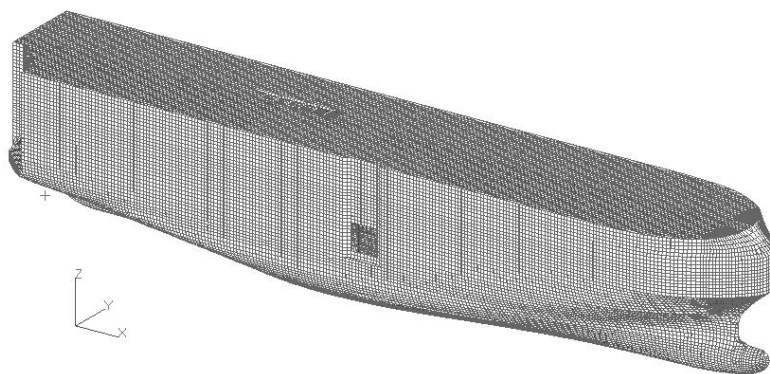


图 8.2.1 汽车运输船整船有限元模型

8.3 装载

8.3.1 应选取横摇力矩最大的装载工况进行横摇载荷计算。横摇力矩按下式计算：

$$M_x = \sum_{i=1}^n (m_{ci} + m_{si}) a_{yi} z_i \quad \text{kN} \cdot \text{m}$$

式中： n —— 干舷甲板以上甲板层数；

m_{ci} —— 干舷甲板以上第 i 层甲板装载的车辆质量， t ；

m_{si} —— 干舷甲板以上第 i 层甲板自身的质量， t ；

a_{yi} —— 干舷甲板以上第 i 层甲板处的横向加速度，根据钢规第 2 篇第 1 章第 5 节 1.5.2.2 (6) 计算；

z_i —— 干舷甲板以上第 i 层甲板距离干舷甲板的高度， m 。

8.3.2 由于高处的装载对于横摇力矩的贡献更大，可能出现的最恶劣的装载工况可通过如下方法确定：从最上层车辆甲板按其设计能力依次向下装载，直至仅能满足稳性要求为止。

8.3.3 当活动甲板不承载时，其质量应计入所停留位置（如其上一层甲板）的甲板自重。

8.4 工况与载荷

8.4.1 横摇工况包括向左摇和向右摇两个工况。

8.4.2 可通过水动力分析计算波浪载荷，具体方法如下：

(1) 根据选取的装载，对整船有限元模型的质量分布进行调整（可调整模型质量特性，也可通过在软件工具中定义装载），作为水动力分析的质量分布；

(2) 选取船中顶甲板高度处的横向加速度作为载荷参数，对各浪向和频率开展水动力分析，横摇阻尼设定为 5%。

(3) 在横浪工况下选取横向加速度的传递函数幅值最大者，由此确定设计波的浪向，频率和相位；

(4) 根据《钢规》第 2 篇第 1 章第 5 节 1.5.2.2 (6) 计算船中顶甲板高度处的横向加速度，并结合传递函数得到设计波的波幅；

(5) 根据 (3) 和 (4) 确定的设计波得出横摇工况的波浪载荷，并与静水载荷合成后得到强度分析载荷。

8.4.3 当不进行水动力分析时，根据规范公式计算载荷。载荷包括车辆和船体结构的自重、车辆和船体结构的横向惯性力和舷外水压力，见图 8.4.3。

(1) 各车辆甲板的横向均布载荷按下式计算：

$$p_t = (p_c + m_s)a_t \quad \text{kN/m}^2$$

式中： p_c —— 车辆甲板装载， t/m^2 ，根据 8.3 给出的装载确定；

m_s —— 见第 7 节 7.4.2。

a_t —— 横向合成加速度， m/s^2 ，见《钢规》第 2 篇第 1 章第 5 节 1.5.2.2 (6)，根据甲板高度计算。

(2) 车辆和船体结构自重根据装载施加。

(3) 舷外水压力为满载吃水下的最大横摇角对应的静水压力。最大横摇角根据《钢规》第 2 篇第 1 章第 5 节 1.5.2 的规定计算。

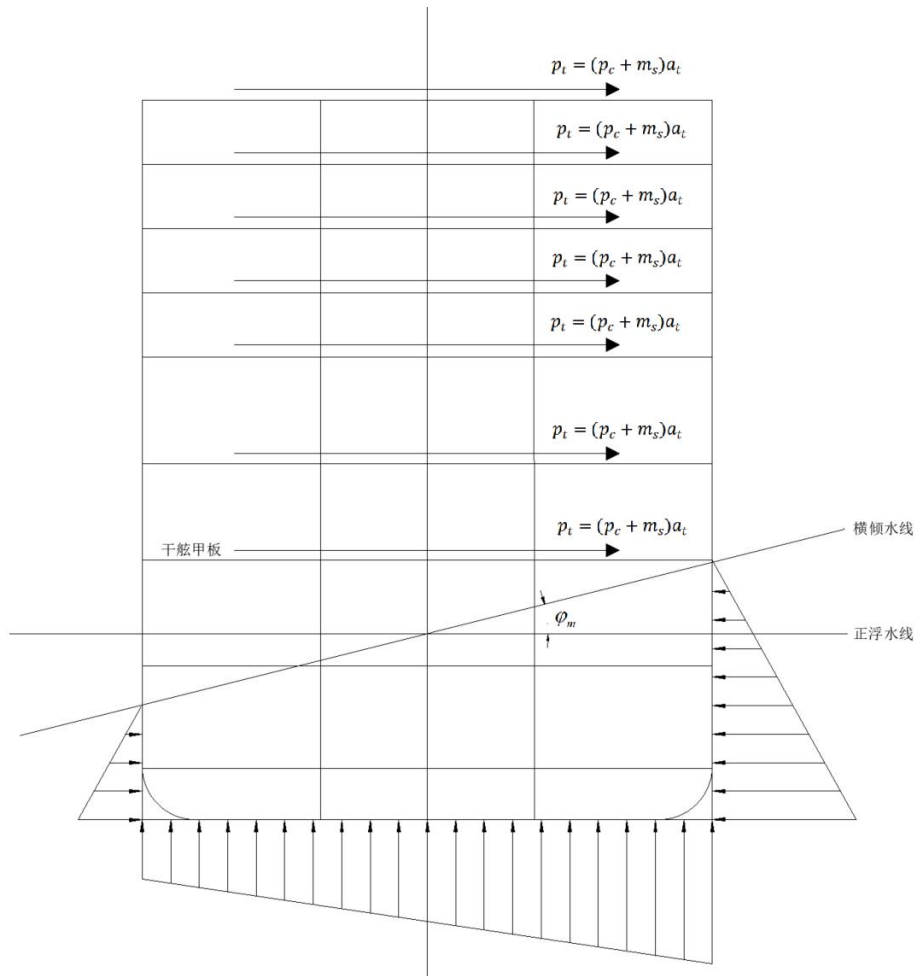


图 8.4.3 横摇工况规范载荷

8.5 模型平衡及边界条件

8.5.1 当采用 8.4.3 的规范载荷进行分析时，依次采用以下步骤使模型达到平衡状态：

- (1) 调整吃水，使模型中的垂向力达到平衡。
- (2) 调整横倾角并重新计算舷外水压力分布，见 8.4.3 (3)，使模型中的水平力达到平衡。
- (3) 检查垂向力的平衡情况，垂向不平衡力应不大于排水量的 1%。如不满足应进一步调整吃水。
- (4) 检查横向力的平衡情况，横向不平衡力应不大于排水量的 1%。如不满足应进一步调整横倾角。
- (5) 检查浮心与重心的纵向位置，二者误差应不超过船长的 1%。如不满足应调整纵倾角。

(6) 通过施加力矩消除模型中绕 X 轴的不平衡力矩。可通过在干舷甲板与外板交线的各节点上施加左右舷方向相反的 Z 向节点力产生平衡力矩。

8.5.2 整船直接计算的位移边界条件见表 8.5.2 和图 8.5.2。

边界约束及其施加位置

表 8.5.2

约束	$\delta_x = 0$	$\delta_y = 0$	$\delta_z = 0$
作用位置	点 2	点 1、点 2	点 2、点 3、点 4

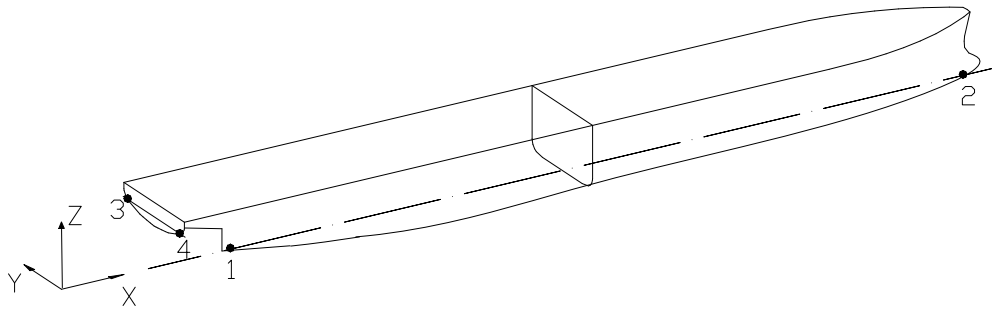


图 8.5.2 整船分析边界条件示意图

8.6 许用应力

8.6.1 结构评估范围为全船范围内的抵抗横摇的构件，包括半舱壁框架、支柱强框架及普通强框架等。

8.6.2 屈服强度评估时板单元取单元中点中面处的 von Mises 相当应力，梁单元取轴向应力的绝对值。许用应力为： $[\sigma_e] = 220 / K$

式中： K ——材料系数。

8.7 屈曲强度校核

8.7.1 屈曲强度要求见本指南 7.7。

第9节 疲劳强度

9.1 一般要求

9.1.1 本节适用于汽车运输船结构细节的疲劳强度评估。

9.1.2 疲劳评估采用线性累积损伤模型，应采用等效设计波的简化应力分析法和整船有限元应力分析法进行疲劳强度评估。

9.1.3 作为替代方法，有限元疲劳评估也可按 CCS《基于谱分析的船体结构疲劳强度评估指南》进行。

9.1.4 规范的准静态波浪载荷基于北大西洋波浪环境。由 10^{-2} 超越概率水平的等效设计波 (EDW) 概念确定。如船舶主要营运于非北大西洋波浪环境时，环境因子 f_e 可取 0.8。

9.1.5 建模中采用建造厚度，简化应力分析中，腐蚀修正系 f_c 数按《船体结构疲劳强度指南》，有限元应力分析中，腐蚀修正系数 f_c 取 1.0。

9.1.6 本节未有规定者，应满足 CCS《船体结构疲劳强度指南》相关要求。

9.2 评估的结构细节

9.2.1 应采用简化应力分析法，对船中 0.5L 范围内进行疲劳评估校核的关键结构细节为：

- (1) 纵骨与横舱壁的端部连接处；
- (2) 纵骨与肋板或强框架的端部连接处。

9.2.2 应采用整船有限元方法对下述主要约束横向变形的构件进行疲劳评估：

- (1) 纵舱壁、内底板与横向强框架的连接处；
- (2) 甲板强横梁面板与舷侧强肋骨面板连接处；
- (3) 支柱与甲板强横梁面板连接处；
- (4) 支柱、内底板与实肋板连接处；
- (5) 横舱壁处的支柱与车辆甲板相交处；
- (6) 机舱前端壁与主甲板的连接处；
- (7) 横舱壁开口角隅处；
- (8) 机舱棚与舱壁甲板连接处；
- (9) 楼梯/电梯围壁与舱壁甲板连接处；

- (10) 其他刚性结构（如风管壁）与甲板的连接处；
- (11) 其他高应力区域。

9.3 结构模型化

9.3.1 有限元热点应力分析方法适用于焊接节点与非焊接节点的疲劳强度评估，考虑了焊接节点的结构不连续性，但不包括焊趾处的切口效应。

9.3.2 基于有限元应力分析的疲劳强度校核采用精细网格分析进行，可将精细网格模型嵌入有限元模型中进行分析；也可采用包括局部精细网格区域的子模型，边界条件由整船有限元模型分析得到。

9.3.3 疲劳强度评估采用的整船建模要求见第 8 节 8.2。

9.3.4 节点的细化要求见《船体结构疲劳强度指南》第 5 章 5.2。

9.3.5 模型平衡及边界条件见第 8 节 8.5。

9.4 装载工况与载荷工况

9.4.1 疲劳强度分析中一般考虑的装载工况为满载工况和正常压载工况，时间分配系数见表 9.4.1。设计方也可提交时间分配系数由 CCS 认可。

时间分配系数 表 9.4.1

装载工况	时间分配系数
满载	0.5
正常压载	0.5

9.4.2 满载时，应从装载手册中选取对横摇工况最恶劣的满载工况。

9.4.3 疲劳分析中载荷工况应考虑向左摇和向右摇两种工况，可通过水动力分析计算疲劳载荷，也可采用规范载荷。

9.4.4 通过水动力分析计算疲劳载荷的具体方法见第 8 节 8.4.2，其中载荷的超越概率水平取 10^{-2} 。一般地，选取横向加速度最大的工况作为疲劳分析的主导载荷工况。

9.4.5 当采用规范载荷分析时，载荷应包括车辆和船体结构的自重、车辆和船体结构的水平惯性力和舷外水压力，见附录 1 疲劳载荷计算。

9.5 疲劳参考应力计算

9.5.1 疲劳参考应力为用于疲劳评估的相关应力，即：

- (1) 考虑平均应力和厚度影响修正的焊趾处的最大热点主应力。
- (2) 考虑母材表面处理、平均应力影响、厚度影响和材料强度修正的自由边局部应力。

9.5.2 基于有限元分析的热点应力范围与热点平均应力计算方法见《船体结构疲劳强度指南》第 5 章 5.5。

9.5.3 疲劳参考应力范围的计算见《船体结构疲劳强度指南》第 3 章 3.3。

9.6 疲劳评估

9.6.1 设计 S-N 的曲线存活概率为 97.7%，适用于最小屈服强度不大于 390N/mm² 的普通钢和高强度钢，对最小屈服强度高于 390N/mm² 的钢材或具有改善疲劳性能的钢材，使用的 S-N 曲线应特殊考虑。

9.6.2 对焊接节点，应采用 D 曲线评估其疲劳强度；对母材自由边，应采用 C 曲线评估其疲劳强度。

9.6.3 每种疲劳装载工况(k)的疲劳损伤按下式计算：

$$D_k = \frac{N_D \alpha_k}{K} \frac{S_{D(k)}^m}{(\ln N_L)^{m/\xi_k}} \mu_k \Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi_k} \right)$$

式中：

N_D —— 设计疲劳寿命内船舶经历的波浪循环总次数，取为：

$$N_D = 31.557 \times 10^6 (f_0 T_{DF}) \cdot \frac{2.3kr}{\sqrt{GM}}$$

f_0 —— 考虑海上航行时间的因子，不包括装卸货、维修等时间， $f_0=0.85$ 。

T_{DF} —— 设计疲劳寿命，由设计者规定。

α_k —— 各装载工况时间分配系数，见表 9.4.1。

$S_{D(k)}$ —— 对应超越概率水平 10^{-2} 的疲劳参考应力范围，N/mm²。

N_R —— 与超越概率 10^{-2} 对应的循环次数。

$N_R=100$ 。

ξ_k —— Weibull 形状参数， $\xi_k=1$ 。

$\Gamma(x)$ —— 完整 Gamma 函数。

K —— 设计 S-N 曲线常数，见表 9.6.3。

$\mu_{(k)}$ —— 计入 S-N 曲线斜率 m 变化的系数。

$$\mu_{(k)} = 1 - \frac{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_{(k)}\right) - v_{(k)}^{-\Delta m/\xi} \cdot \gamma\left(1 + \left(\frac{m + \Delta m}{\xi}\right), v_{(k)}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$$

$$v_{(k)} = \left(\frac{\Delta\sigma_q}{\Delta\sigma_{FS,(k)}}\right)^\xi \ln N_R$$

- $\gamma(a,x)$ —— 不完整 Gamma 函数。
 m —— S-N 曲线的斜率倒数，取为 3。
 $\Delta\sigma_q$ —— 设计 S-N 曲线在循环次数 $N=10^7$ 时，两线段交点处的应力范围值，N/mm²，见表 9.6.3。
 Δm —— $N=10^7$ 循环处 S-N 曲线斜率倒数的变化。
 $\Delta m = 2$

两线段交点处的应力范围值

表 9.6.3

S-N 曲线	K	$\Delta\sigma_q$
C	3.464×10^{12}	70.2305
D	1.520×10^{12}	53.3680

9.6.4 结构节点的总累积损伤度应按下式计算：

$$D = \sum D_k$$

式中： D_k ——结构节点在各装载工况下的累积损伤度，见本节 9.6.3。

9.6.5 在设计寿命内，结构节点的总累积损伤度应满足下式要求：

$$D \leq 1$$

附录 1： 疲劳载荷计算

1 一般规定

1 一般要求

1.1 应用

1.1.1 应用范围

本附录给出了疲劳评估的设计载荷。

1.1.2 等效设计波

与每一动载荷工况相关的动载荷基于等效设计波概念。等效设计波概念是对船舶施加了一组协调的动载荷，使得指定的主导载荷响应等同于要求的长期响应值。

1.1.3 疲劳评估的概率水平

疲劳评估系指对应于 10^{-2} 概率水平载荷的疲劳评估。

1.1.4 动载荷分量

每一动载荷工况计算得到的所有动载荷分量是同时发生的。

1.1.5 疲劳评估载荷

每一个疲劳评估的设计载荷场景由一个静+动 (S+D) 载荷工况组成，静载荷和动载荷取决于所考虑的装载工况。

1.2 定义

1.2.1 坐标系

船舶的几何尺寸、载荷以及载荷效应按下述右手坐标系定义（见图 1.2.1）。

原点：船舶对称纵剖面、船长 L 尾垂线和基线的相交处；

X 轴：纵向轴，向前为正；

Y 轴：横向轴，向左为正；

Z 轴：垂向轴，向上为正。

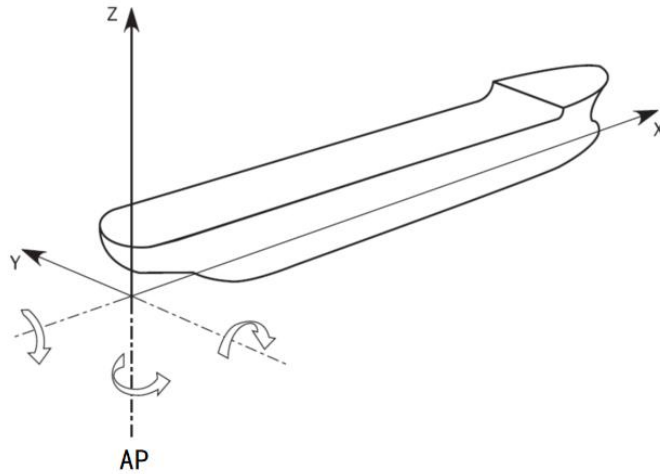


图 1.2.1 参考坐标系

1.2.2 船舶运动符号约定

船舶运动是相对于图 1.2.2 所示的船舶重心 (COG) 来定义的, 其中:

- 正的纵荡为沿 X 轴方向的平动 (向前为正);
- 正的横荡为沿 Y 轴方向的平动 (向左舷为正);
- 正的垂荡为沿 Z 轴方向的平动 (向上为正);
- 正的横摇是绕通过重心的纵轴的正向旋转 (右舷向下, 左舷向上为正);
- 正的纵摇是绕通过重心的横轴的正向旋转 (艏向下, 艉向上为正);
- 正的艏摇是绕通过重心的垂向轴的正向旋转 (艏向左舷, 艉向右舷为正)

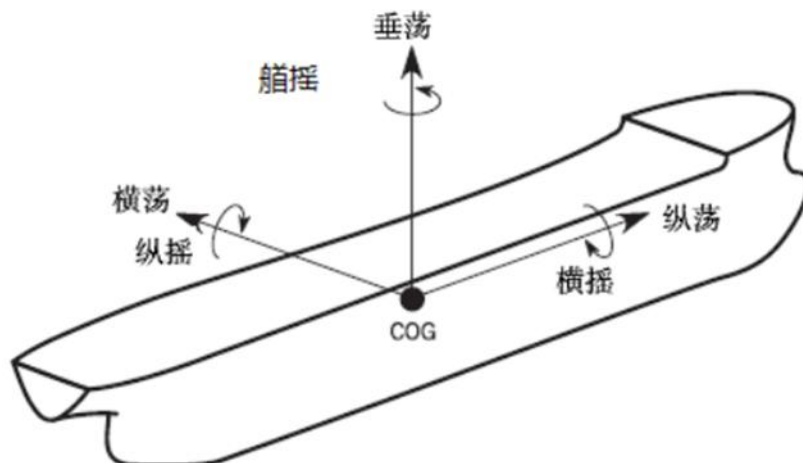


图 1.2.2 正向运动定义

2 动载荷工况

符号

a_{surge} , $a_{pitch-x}$, a_{sway} , a_{roll-y} , a_{heave} , a_{roll-z} , $a_{pitch-z}$: 加速度分量, 定义见本附录第 3 节。

f_{xL} —— 载荷计算点的 X 坐标与 L 的比值, 取为:

$$f_{xL} = \frac{x}{L}, \text{ 但不小于 } 0.0, \text{ 不大于 } 1.0$$

f_{TL} —— 某一装载工况吃水与 L 的比值, 取为:

$$f_{TL} = \frac{T_{LC}}{L}$$

f_{lp} —— 和沿船长纵向位置相关的系数, 取为:

$$f_{lp} = 1, \text{ 对于 } x/L \leq 0.4$$

$$f_{lp} = -1, \text{ 对于 } x/L \geq 0.6$$

f_{lp} 的中间值通过线性插值得到。

WS —— 上风舷, 船舶暴露于来浪的一侧。

LS —— 下风舷, 船舶远离来浪的被遮蔽的一侧。

M_{wv} —— 垂向波浪弯矩, kNm。

Q_{wv} —— 垂向波浪剪力, kN。

M_{wh} —— 水平波浪弯矩, kNm。

Q_{wh} —— 水平波浪剪力, kN。

LCF —— 动载荷工况组合系数。

C_{wv} —— 应用于垂向波浪弯矩的载荷组合系数。

C_{Qw} —— 应用于垂向波浪剪力的载荷组合系数。

C_{wH} —— 应用于水平波浪弯矩的载荷组合系数。

C_{QH} —— 应用于水平波浪剪力的载荷组合系数。

C_{xS} —— 应用于纵荡加速度的载荷组合系数。

C_{xP} —— 应用于由纵摇加速度产生的纵向加速度的载荷组合系数。

C_{xG} —— 应用于纵摇运动产生的纵向加速度的载荷组合系数。

C_{yS} —— 应用于横荡加速度的载荷组合系数。

C_{YR} ——应用于由横摇加速度产生的横向加速度的载荷组合系数。

C_{YG} ——应用于由横摇运动产生的横向加速度的载荷组合系数。

C_{ZH} ——应用于垂荡加速度的载荷组合系数。

C_{ZR} ——应用于由横摇加速度产生的垂向加速度的载荷组合系数。

C_{ZP} ——应用于由纵摇加速度产生的垂向加速度的载荷组合系数。

θ ——横摇角，(°)，定义见本附录第3节2.1.1。

φ ——纵摇角，(°)，定义见本附录第3节2.1.2。

ω_R ——横摇角频率，取为：

$$\omega_R = \frac{2\pi}{T_\theta}, \text{ rad/s}$$

T_R ——横摇周期无量纲系数，取为：

$$T_R = T_\theta \sqrt{g/L}$$

T_θ ——横摇周期，定义见本附录第3节2.1.1。

1 一般要求

1.1 动载荷工况定义

1.1.1 下列等效设计波（EDW）为被用于疲劳评估的动载荷工况：

（1）BSR 载荷工况：

BSR-1P 和 BSR-2P：分别为波浪来自左舷时横摇运动最小（左舷向下）和最大（左舷向上）的横浪等效设计波。

BSR-1S 和 BSR-2S：分别为波浪来自右舷时横摇运动最大（右舷向下）和最小（右舷向上）的横浪等效设计波。

1.2 应用

1.2.1 动载荷工况应用于如下的结构评估：

（1）疲劳评估：

- 简化应力分析涵盖的结构节点。
- 有限元应力分析涵盖的结构节点。

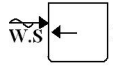
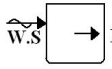
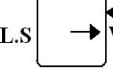


2 疲劳评估的动载荷工况

2.1 动载荷工况描述

2.1.1 表 2.1.1 给出了对应于疲劳评估应考虑的第一个动载荷工况的船舶运动响应和总体载荷。

疲劳评估中用于 BSR 载荷工况的船舶响应

表 2.1.1

载荷工况	BSR-1P	BSR-2P	BSR-1S	BSR-2S
等效设计波	BSR		BSR	
浪向	横浪			
作用	横摇最大			
垂向波浪弯矩	-	-	-	-
垂向波浪剪力	-	-	-	-
水平波浪弯矩	右舷受拉	左舷受拉	左舷受拉	右舷受拉
水平波浪剪力	-	-	-	-
波浪扭矩	-	-	-	-
纵荡	-	-	-	-
纵荡加速度	-	-	-	-
横荡	向右舷	向左舷	向左舷	向右舷
横荡加速度				
垂荡	向下	向上	向下	向上
垂荡加速度				
横摇	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上
横摇加速度				
纵摇	-	-	-	-
纵摇加速度	-	-	-	-

2.2 动载荷组合系数

2.2.1 用于疲劳评估的总体载荷及惯性载荷分量的载荷组合系数 LCF 的定义见

表 2.2.1: BSR 载荷工况的载荷组合系数。

疲劳评估中用于BSR载荷工况的载荷组合系数

表2.2.1

载荷分量		LCF	BSR-1P	BSR-2P	BSR-1S	BSR-2S
船体梁 载荷	M_{wv}	C_{wv}	0	0	0	0
	Q_{wv}	C_{Qw}	0	0	0	0
	M_{wh}	C_{WH}	$1.3-16f_{TL}$	$16f_{TL}-1.3$	$16f_{TL}-1.3$	$1.3-16f_{TL}$
	Q_{wh}	C_{QH}	0	0	0	0
纵向加 速度	a_{surge}	C_{XS}	0	0	0	0
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0	0	0	0
	$gsin\phi$	C_{XG}	0	0	0	0
横向加 速度	a_{sway}	C_{YS}	$0.74-1.72 \omega_R$	$1.72 \omega_R-0.74$	$1.72 \omega_R-0.74$	$0.74-1.72 \omega_R$
	a_{roll-y}	C_{YR}	1	-1	-1	1
	$gsin\theta$	C_{YG}	-1	1	1	-1
垂向加 速度	a_{heave}	C_{ZH}	$0.8-11.8f_{TL}$	$11.8f_{TL}-0.8$	$0.8-11.8f_{TL}$	$11.8f_{TL}-0.8$
	a_{roll-z}	C_{ZR}	1	-1	-1	1
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0	0	0	0

3 船舶运动和加速度

符号

a_0 ——加速度参数，取为：

$$a_0 = (1.58 - 0.47C_b) \left(\frac{2.4}{\sqrt{L}} + \frac{34}{L} - \frac{600}{L^2} \right)$$

T_θ ——横摇周期，s，定义见本节 2.1.1。

θ ——横摇角，(°)，定义见本节 2.1.1。

T_φ ——纵摇周期，s，定义见本节 2.1.2。

φ ——纵摇角，(°)，定义见本节 2.1.2。

R ——船舶摇摆运动中心的垂向坐标，m，取为：

$$R = 6.7322e^{0.0419D}，\text{对于满载工况}$$

$$R = 0.9858D^{0.7733}，\text{对于压载工况}$$

a_{roll-y} ——横摇引起的横向加速度，m/s²，定义见本节 3.3.2。

$a_{pitch-x}$ ——纵摇引起的纵向加速度，m/s²，定义见本节 3.3.1。

a_{roll-z} ——横摇引起的垂向加速度，m/s²，定义见本节 3.3.3。

$a_{pitch-z}$ ——纵摇引起的垂向加速度，m/s²，定义见本节 3.3.3。

f_T ——某一装载条件下吃水与结构吃水的比，取为：

$$f_T = \frac{T_{LC}}{T_{SC}}，\text{但取不小于 0.5。}$$

T_{LC} ——所考虑载荷工况的船中处的吃水，m。

f_{BL} ——船宽与规范船长的比，取为：

$$f_{BL} = \frac{B}{L}$$

x, y, z ——所考虑点在本附录第 1 节 1.2.1 所定义的坐标系下的 X, Y, Z 坐标，m。

x_G ——船舶重心的纵向坐标，m，应取为：

$$x_G = 0.55C_{b-LC}^{0.37}L，\text{当 } C_{b-LC}=C_b \text{ 时}$$

$$x_G = 0.51C_{b-LC}^{0.14}L，\text{当 } C_{b-LC}=C_{b-BAL} \text{ 时}$$

C_{b-LC} ——所考虑装载工况的方形系数，定义见表 2.1.1。

C_{w-LC} ——所考虑装载工况的水线面系数，定义见表 2.1.1。

f_{fa} ——疲劳系数，应取为：

$$f_{fa} = 0.9$$

f_{nl} ——非线性系数，取为 1.0。

1 一般要求

1.1 定义

1.1.1 假定船舶运动和加速度是正弦变化的。本节公式定义的运动值为单幅值，即峰值到谷值高度的一半。

2 船舶运动和加速度

2.1 船舶运动

2.1.1 横摇运动

横摇周期 T_{θ} , s, 取为：

$$T_{\theta} = \frac{2.3\pi k_r}{\sqrt{gGM}}$$

横摇角 θ , ($^{\circ}$), 取为：

$$\theta = \frac{9000(1.25 - 0.025T_{\theta})f_p f_{BK}}{(B + 75)\pi}$$

式中：

f_p ——系数，取为：

$$f_p = f_{RO} f_{fa} (0.24 - 5.56 f_T B \times 10^{-4}), \text{ 对于疲劳评估}$$

f_{RO} ——航行因子，取为：

$$f_{RO} = 0.78$$

f_{BK} ——取为：

$$f_{BK} = 1.2, \text{ 无舦龙骨的船舶}$$

$$f_{BK} = 1.0, \text{ 有舦龙骨的船舶}$$

$$f_{BK} = 0.8, \text{ 对于有主动式减摇装置的船舶}$$

k_r ——所考虑装载工况的横摇回转半径，m，应取表 2.1.1 中的值。

GM ——所考虑装载工况的初稳性高度，应取表 2.1.1 中的值。

k_r 值和 GM 值 **表 2.1.1**

装载条件	T_{LC}	k_r	GM	C_{b-LC}	C_{W-LC}
满载工况	T_{SC}	0.35B	实际值	C_b	C_W
压载工况	T_{BAL}	0.45B	实际值	C_{b-BAL}	C_{W-BAL}

2.1.2 纵摇运动

纵摇周期 T_φ ，s，取为：

$$T_\varphi = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_\varphi}{g}}$$

式中—— $\lambda_\varphi = 0.6(1 + f_T)L$

纵摇角 φ ，(°)，取为：

$$\varphi = 1350f_{nl}f_p f_\varphi L^{0.94} \left\{ 1.0 + \left(\frac{2.57}{\sqrt{gL}} \right)^{1.2} \right\}$$

式中：

f_p ——系数，取为：

$$f_p = f_{RO}f_{fa} \left[(0.34 - 0.05f_T) - (3.7 - 2.59f_T)L \times 10^{-4} \right], \text{ 对于疲劳评估}$$

f_{RO} ——航行因子，取为：

$$f_{RO} = 0.78$$

f_φ ——系数，取为：

$$f_\varphi = 2.27 - 1.38C_{W-LC}, \text{ 对于疲劳评估}$$

2.2 船舶重心处加速度

2.2.1 纵荡加速度

由纵荡产生的纵向加速度，m/s²，取为：

$$a_{surge} = 0.2f_p f_{s1} f_{nl} a_0 g$$

式中：

f_p ——系数，取为：

$$f_p = f_{fa} (0.26 - 1.11f_T L \times 10^{-4}) \quad , \quad \text{对于疲劳评估}$$

f_{s1} ——系数，取为：

$$f_{s1} = 22.3f_{TL} + 0.3, \quad \text{对于疲劳评估的满载工况}$$

$$f_{s1} = 35.2f_{TL} + 0.81, \quad \text{对于疲劳评估的压载工况}$$

2.2.2 横荡加速度

由横荡产生的横向加速度， m/s^2 ，取为：

$$a_{sway} = 0.3f_p f_{s2} f_{nl} a_0 g$$

式中，

f_p ——系数，取为：

$$f_p = f_{fa} \left[(0.28 - 0.02f_T) - (9.6 - 5.1f_T) B \times 10^{-4} \right], \quad \text{对于疲劳评估}$$

f_{s2} ——系数，取为：

$$f_{s2} = 2.16 - 5.98f_{TL}, \quad \text{对于疲劳评估}$$

2.2.3 垂荡加速度

由垂荡产生的垂向加速度， m/s^2 ，取为：

$$a_{heave} = f_p f_{s3} f_{nl} a_0 g$$

式中：

f_p ——系数，取为：

$$f_p = f_{fa} \left[(0.34 + 0.09f_T) - (1.86 + 2.59f_T) L \times 10^{-4} \right], \quad \text{对于疲劳评估}$$

f_{s3} ——系数，取为：

$$f_{s3} = 1.25 - 1.62f_{BL}, \quad \text{对于疲劳评估}$$

2.2.4 横摇加速度

横摇加速度， a_{roll} ， rad/s^2 ，取为：

$$a_{roll} = f_p f_{s4} \theta \frac{\pi}{180} \left(\frac{2\pi}{T_\theta} \right)^2$$

式中：

θ ——采用 f_p 等于 1.0 计算的横摇角

f_p ——系数，取为：

$$f_p = f_{fa} (0.24 - 6.67 f_T B \times 10^{-4}), \text{ 对于疲劳评估}$$

f_{s4} ——系数，取为：

$$f_{s4} = 1.0, \text{ 对于疲劳评估}$$

2.2.5 纵摇加速度

纵摇加速度， a_{pitch} ， rad/s^2 ，取为：

$$a_{pitch} = f_p f_{s5} f_{nl} \left(\frac{3.1}{\sqrt{gL}} + 1.0 \right) \varphi \frac{\pi}{180} \left(\frac{2\pi}{T_\varphi} \right)^2$$

式中：

φ ——采用 f_p 等于 1.0 计算的纵摇角

f_p ——系数，取为：

$$f_p = f_{fa} \left[(0.42 - 0.05 f_T) - (9 + 2 f_T) L \times 10^{-5} \right], \text{ 对于疲劳评估}$$

f_{s5} ——系数，取为：

$$f_{s5} = 5.75 - 6.87 f_{BL}^{0.2} C_{b-LC}^{0.2}, \text{ 对于疲劳评估的满载工况}$$

$$f_{s5} = 3.72 - 4.75 f_{BL}^{0.2} C_{b-LC}^{0.5}, \text{ 对于疲劳评估的压载工况}$$

3 任意位置处的加速度

3.1 一般规定

3.1.1 用于获得任意位置惯性载荷的加速度基于船舶固定坐标系定义。因此 3.2 和 3.3 定义的加速度值包括了由瞬时的横摇角和纵摇角产生的重力加速度分量。

3.1.2 用于本附录第 2 节定义的动载荷工况的加速度在 3.2 给出。

3.2 动载荷工况的加速度

3.2.1 一般规定

用于本附录第 2 节定义的动载荷工况的加速度在 3.2.2 到 3.2.4 给出。

3.2.2 纵向加速度

用于动载荷工况的任意一点的纵向加速度， m/s^2 ，取为：

$$a_X = -C_{XG} g \sin \varphi + C_{XS} a_{surge} + C_{XP} a_{pitch} (z - R)$$

3.2.3 横向加速度

用于动载荷工况的任意一点的横向加速度， m/s^2 ，取为：

$$a_y = C_{YG}g \sin \theta + C_{YS}a_{sway} - C_{YR}a_{roll}(z - R)$$

3.2.4 垂向加速度

用于动载荷工况的任意一位置处的垂向加速度， m/s^2 ，取为：

$$a_z = C_{ZH}a_{heave} + C_{ZR}a_{roll}y - C_{ZP}a_{pitch}(x - x_G)$$

3.3 加速度包络值

3.3.1 纵向加速度

任意位置处的纵向加速度包络值， a_{x-env} ， m/s^2 ，取为：

$$a_{x-env} = 0.7 \sqrt{a_{surge}^2 + \left[\frac{L}{325} (g \sin \varphi + a_{pitch-x}) \right]^2}$$

式中：

$a_{pitch-x}$ ——由纵摇产生的纵向加速度， m/s^2

$$a_{pitch-x} = a_{pitch}(z - R)$$

3.3.2 横向加速度

任意位置处的横向加速度包络值， a_{y-env} ， m/s^2 ，取为：

$$a_{y-env} = \sqrt{a_{sway}^2 + (g \sin \theta + a_{roll-y})^2}$$

式中：

a_{roll-y} ——由横摇产生的横向加速度， m/s^2

$$a_{roll-y} = a_{roll}(z - R)$$

3.3.3 垂向加速度

任意位置处的垂向加速度包络值， a_{z-env} ， m/s^2 ，取为：

$$a_{z-env} = \sqrt{a_{heave}^2 + \left(\left(0.3 + \frac{L}{325} \right) a_{pitch-z} \right)^2 + (1.2a_{roll-z})^2}$$

式中：

$a_{pitch-z}$ ——由纵摇产生的垂向加速度， m/s^2

$$a_{pitch-z} = a_{pitch}(x - x_G)$$

a_{roll-z} ——由横摇产生的垂向加速度， m/s^2

$$a_{roll-z} = a_{roll} y$$

4 外部载荷

符号

λ ——波长，m。

B_x ——所考虑横剖面在水线处的型宽，m。

f_{yB} ——载荷计算点 Y 坐标与 B_x 的比，取为：

$$f_{yB} = \frac{|2y|}{B_x}, \text{ 但不大于 } 1.0, \text{ 且 } B_x = 0.0 \text{ 时 } f_{yB} = 0.0。$$

f_{yB1} ——载荷计算点 Y 坐标与 B 的比，取为：

$$f_{yB1} = \frac{|2y|}{B}, \text{ 但不大于 } 1.0。$$

C_s ——波浪系数

$$C_s = 10.75 - \left(\frac{300-L}{100} \right)^{1.5}, \text{ 对于 } 90\text{m} \leq L \leq 300\text{m} \text{ 的船舶}$$

$P_{W,WL}$ ——所考虑动载荷工况水线处的水动压力，kN/m²。

$$P_{W,WL} = P_W, \text{ 当 } z = T_{LC} \text{ 时。}$$

h_w ——等效于水线处压力的水压头，m，取为：

$$h_w = \frac{P_{W,WL}}{\rho g}$$

1 海水压力

1.1 总压力

1.1.1 外板上任意载荷点的外部总压力 P_{ex} ，kN/m²，应由每一个动载荷工况得到，取为：

$$P_{ex} = P_s + P_w, \text{ 但不小于 } 0。$$

式中：

P_S ——静水压力, kN/m^2 , 定义见 1.2。

P_W ——水动压力, kN/m^2 , 定义见 1.3。

1.2 静水压力

1.2.1 任意载荷点的静水压力, P_S , kN/m^2 , 由表 1.2.1 中得到, 参见图 1.2.1。

静压力 P_S		表 1.2.1
位 置	静水压力, P_S , kN/m^2	
$z \leq T_{LC}$	$\rho g(T_{LC} - z)$	
$z > T_{LC}$	0	

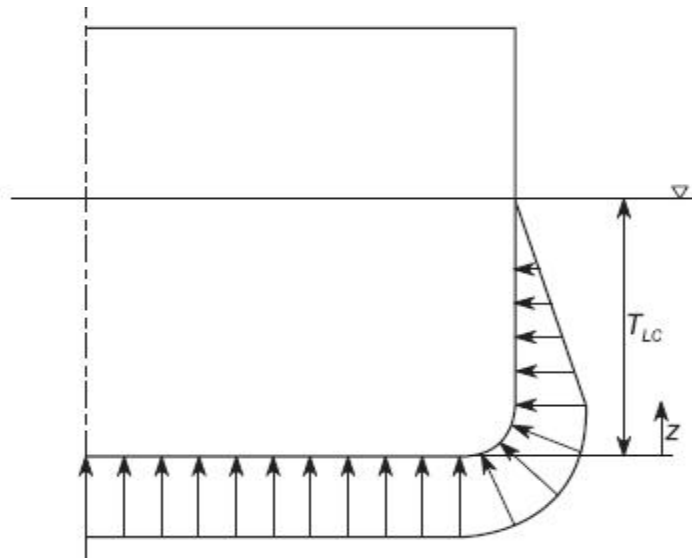


图 1.2.1 静水压力, P_S

1.3 用于疲劳评估的外部动压力

1.3.1 一般要求

用于疲劳静+动(F: S+D)设计载荷场景的外板上任意载荷点的外部总压力 P_{ex} , kN/m^2 , 应由每一个疲劳动载荷工况得到, 取为:

$$P_{ex} = P_S + P_W \quad , \text{ 但不小于 } 0。$$

式中:

P_S ——静压力, kN/m^2 , 定义见 1.2。

P_W ——动压力, kN/m², 定义见 1.4.2 至 1.4.8。

1.3.2 用于 BSR 载荷工况的水动压力

用于 BSR-1 和 BSR-2 载荷工况的任一载荷点的水动压力 P_W , kN/m², 应从表 1.4.4 中得到。

用于 BSR 载荷工况的水动压力 表 1.4.4

载荷工况	水动压力, kN/m ²		
	$z \leq T_{LC}$	$T_{LC} < z \leq 2h_W + T_{LC}$	$z > 2h_W + T_{LC}$
BSR-1P	$P_W = \max(P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \frac{1}{2}\rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0$
BSR-2P	$P_W = \max(-P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$		
BSR-1S	$P_W = \max(P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$		
BSR-2S	$P_W = \max(-P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$		

其中:

对于 BSR-1P 和 BSR-2P,

$$P_{BSR} = 10y \sin \theta + 0.88 f_p C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}} (f_{yB1} + 1)$$

对于 BSR-1S 和 BSR-2S,

$$P_{BSR} = -10y \sin \theta + 0.88 f_p C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}} (f_{yB1} + 1)$$

f_p ——系数, 取为:

$$f_p = f_{fa} [(0.21 + 0.04 f_T) - (12 f_T - 2) B \times 10^{-4}]$$

λ ——动载荷工况的波长, m , 取为:

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T_\theta^2$$

5 内部载荷

符号

本节未定义的符号, 参见第 1 章第 4 节。

Z_{top} ——不包括小舱口的液舱最高点的 Z 坐标, m 。

ρ_L ——液舱的液体密度， t/m^3 ，但不小于：

$\rho_L=0.98$ ，对于燃油

$\rho_L=1.025$ ，对于其他液体

f_β ——浪向修正系数，取为：

$f_\beta=1.0$

1 液体压力

1.1 应用

1.1.1 用于疲劳评估的压力

液舱边界任一载荷点的内部液体压力， kN/m^2 ，应取为：

$$P_{in} = P_{ls} + P_{ld}，\text{但不小于 } 0。$$

式中：

P_{ls} ——液舱内液体产生的静压力， kN/m^2 ，定义见 1.2。

P_{ld} ——液舱内液体产生的动压力， kN/m^2 ，定义见 1.3。

1.2 液体静压力

1.2.1 用于疲劳评估的液体静压力

用于疲劳评估的液舱内液体产生的静压力 P_{ls} ， kN/m^2 ，应取为：

$$P_{ls} = \rho_L g(z_{top} - z)，\text{对于所有液舱（压载舱、燃油舱及其他液舱）}$$

1.3 液体动压力

1.3.1 由液舱内液体产生的动压力 P_{ld} ， kN/m^2 ，应取为：

$$P_{ld} = [f_\beta \rho_L a_z (z_0 - z) + a_x (x_0 - x) + a_y (y_0 - y)]$$

x_0 ——参考点 X 坐标， m 。

y_0 ——参考点 Y 坐标， m 。

z_0 ——参考点 Z 坐标， m 。

参考点取为液舱顶部边界所有点中使 V_j 的值最大对应的点。

$$V_j = a_x (x_j - x_G) + a_y (y_j - y_G) + (a_z + g)(z_j - z_G)$$

式中：

x_j ——液舱顶部第 j 个点的 X 坐标, m。

y_j ——液舱顶部第 j 个点的 Y 坐标, m。

z_j ——液舱顶部第 j 个点的 Z 坐标, m。

2 货物载荷

2.1 货物载荷

作用在车辆甲板上的载荷应按下列各式进行计算

$$X \text{ 方向: } P_X = -Pa_X \quad \text{kN/m}^2$$

$$Y \text{ 方向: } P_Y = -Pa_Y \quad \text{kN/m}^2$$

$$Z \text{ 方向: } P_C = -f_zPg - Pa_Z \quad \text{kN/m}^2$$

式中: P ——车辆甲板的实际装载载荷, t/m² ;

a_X 、 a_Y 、 a_Z ——货舱内车辆重心的加速度, m/s²

f_z ——车辆甲板的垂向静载荷系数, 应按下列各式计算:

$$f_z = \cos\theta, \text{ 对于 R1P、R1S、R2P、R2S 工况}$$

式中: θ ——最大横摇角, 见本附录 2.3.1;

3 除货舱区以外的非露天甲板和平台载荷

3.1 应用

3.1.1 一般要求

3.2 和 3.3 定义的载荷适用于非露天甲板, 起居甲板和平台。

3.2 分布载荷产生的压力

3.2.1 如果甲板上载有分布载荷, 应考虑由此分布载荷产生的静压力和动压力。

静分布载荷应由设计者定义, 但起居甲板不小于 3 kN/m², 其他甲板和平台不小于 10 kN/m²。

分布载荷产生的压力 P_{dl} , kN/m², 应由动载荷工况的包络值获得, 取为:

$$P_{dl} = P_{dl-s} + P_{dl-d}, \text{ 但不小于 } 0。$$

式中:

P_{dl-s} —— 由分布载荷产生的静压力, kN/m²。

P_{dl-d} —— 由分布载荷产生的动压力, kN/m², 应取为:

$$P_{dl-d} = f_{\beta} \frac{a_{z-env}}{g} P_{dl-s}$$

a_{z-env} —— 所考虑载荷位置动载荷工况的垂向加速度包络值, m/s², 见本附录第 3 节 3.3.3。

3.3 单元载荷产生的集中力

3.3.1 如果内部甲板上承载单元载荷, 应考虑静力和动力。集中载荷的力 F_U , kN, 应由动载荷工况的包络值获得, 取为:

$$F_U = F_{U-s} + F_{U-d}, \text{ 但不小于 } 0。$$

式中:

F_{U-s} —— 单元载荷产生的静力, kN, 应取为 $F_{U-s}=m_U g$ 。

F_{U-d} —— 单元载荷产生的动力, kN, 应取为 $F_{U-d}=m_U f_{\beta} a_{z-env}$ 。

m_U —— 承载单元载荷的质量, t。

a_{z-env} —— 所承载单元载荷重心动载荷工况的垂向加速度包络值, m/s², 见本附录第 3 节 3.3.3。