



指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD 03-2011

中 国 船 级 社

车辆运输船舶船体结构指南
GUIDELINES FOR HULL STRUCTURE
OF VEHICLE CARRIERS

2010



人民交通出版社

China Communications Press



指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD 03-2011

中 国 船 级 社

车辆运输船舶船体结构指南
GUIDELINES FOR HULL STRUCTURE
OF VEHICLE CARRIERS

2010

北 京

责任编辑：李晓明 董 芳



中国船级社

车辆运输船舶船体结构指南
GUIDELINES FOR HULL STRUCTURE OF
VEHICLE CARRIERS

2010

人民交通出版社出版发行
(100011 北京安定门外外馆斜街3号)
上海新华印刷有限公司印刷

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：2.6 字数：145千

2011年7月 第1版

2011年7月 第1版 第1次印刷
印数：0001～1000册 定价：60元
统一书号：15114·1625

CCS

统一书号：15114·1625

定价：60 元

出版说明

在《车辆运输船舶船体结构指南》2008（试行版）2年多的试运行期间，受到业界的广泛关注，并收到大量用户的反馈意见，本指南结合反馈意见和车辆运输船大型化发展的需求，在《车辆运输船舶船体结构指南》2008（试行版）的基础上进行了论证、修改与补充和完善。

本指南在《车辆运输船舶船体结构指南》2008（试行版）的基础上，在舱段有限元分析方面更加详细地阐述了舱段建模的要求，修改了结构许用应力标准，对屈曲校核的区域作了补充与修改；在整船强度直接计算方面，修改了整船结构建模的网格尺寸要求，增加了迎浪和斜浪计算工况以及屈曲强度校核的要求，同时增加了对迎浪工况和斜浪中船体运动与载荷计算的说明。

考虑到车辆运输船舶船体结构连接节点处的高应力特性，本指南中增加了对应力集中区域的局部有限元细化分析要求，提出了有限元细化筛选原则、有限元细化建模方法和细化结构强度衡准。

中国船级社

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	定义.....	2
1.5	布置及结构形式.....	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.....	5
2.6	船体梁剖面特性计算.....	7
2.7	局部构件尺寸的折减系数.....	9
第3节	甲板结构	11
3.1	一般要求.....	11
3.2	强力甲板.....	11
3.3	装载轮式车辆的车辆甲板.....	12
3.4	可收放的活动车辆甲板.....	12
3.5	车辆坡道.....	13
3.6	车辆舱内甲板主要构件的结构细则.....	14
第4节	舷侧结构	15
4.1	一般要求.....	15
4.2	舷侧外板.....	15
4.3	干舷甲板以上的舷侧肋骨.....	18
4.4	船首舷侧结构的砰击加强.....	18
第5节	支柱	19
5.1	一般要求.....	19
5.2	车辆舱内的支柱.....	19
第6节	尾门跳板和舷门跳板	20
6.1	尾门跳板.....	20
6.2	舷门跳板.....	20
第7节	货舱区域结构强度直接计算	21
7.1	一般要求.....	21
7.2	结构建模.....	21

7.3	运动及加速度.....	22
7.4	计算工况.....	25
7.5	边界条件.....	28
7.6	许用应力.....	28
7.7	屈曲强度校核.....	29
第8节	整船强度直接计算.....	30
8.1	一般要求.....	30
8.2	结构建模.....	30
8.3	载荷工况.....	31
8.4	计算载荷.....	31
8.5	边界条件.....	31
8.6	许用应力.....	32
8.7	屈曲张度校核.....	32
第9节	局部结构连接区域细化分析.....	33
9.1	一般要求.....	33
9.2	细化区域.....	33
9.3	结构建模.....	35
9.4	细化子模型的边界条件和载荷.....	35
9.5	结果评估和验收衡准.....	35
附录1	车辆运输船波浪诱导运动与载荷计算方法.....	36
附录2	板格屈曲强度校核的简化公式法.....	39

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轮式商品车辆的钢质海上航行的车辆运输船。

1.1.2 车辆运输船设有尾门跳板，一般还设有一个或两个舷门跳板。

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

1.2 附加标志

1.2.1 对符合本指南规定的车辆运输船，授予附加标志：Car Carrier。

1.3 图纸资料

1.3.1 除《钢规》第2篇第2章第1节所规定的图纸资料外，还应将下列图纸资料提交CCS批准：

- (1) 跳板结构图及强度计算书；
- (2) 尾门和舷门结构图及其主要结构、紧固和支持装置强度计算书；
- (3) 可收放的活动车辆甲板的结构图和强度计算书；
- (4) 车辆坡道结构图和强度计算书；
- (5) 货舱区结构强度直接计算书；
- (6) 整船强度直接计算书（如适用时）。

1.3.2 应将下列图纸资料提交CCS备查：

- (1) 总布置图；
- (2) 型线图或型值表；

- (3) 肋骨型线图;
- (4) 舱容图;
- (5) 船体及设备说明书;
- (6) 载运车辆的轮印布置及载荷、轴载荷等与设计载荷有关的数据资料;
- (7) 车辆装载布置图。

1.4 定 义

1.4.1 **船长 $L(m)$** :沿夏季载重线,由首柱前缘量至舵杆中心线的长度。如果夏季载重线总长大于等于首柱前缘量至舵杆中心线的长度, L 不得小于夏季载重线总长的96%,且不必大于97%。

1.4.2 **最小型深 $D_f(m)$** :在船长中点处,自平板龙骨上缘至舷侧干舷甲板横梁上缘之间的垂直距离。

1.4.3 **最大服务航速(kn)**:船舶在夏季载重线吃水时持续使用的设计最大航速。

1.5 布置及结构形式

1.5.1 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。

1.5.2 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。

1.5.3 强力甲板和船底一般应为纵骨架式。

1.5.4 从强力甲板至最低一层车辆甲板间,应设置局部横舱壁或强肋骨和强横梁组成的横向强框架。横向强框架应设置在船底实肋板平面内,间距应不超过4个肋距或3.6m(取小者)。

第2节 总纵强度

2.1 一般要求

2.1.1 除本节规定者外，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。如方形系数小于0.6，在计算时方形系数取0.6。

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；

(3) 当 $C_f \geq 0.50$ 时，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(3)确定。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(3)

C_f	距尾端距离 x		
	$0.65L$	$0.75L$	$1.0L$
0.4	1.0	0.714	0
≥ 0.5	1.0	0.8	0

2.3 船体梁弯曲强度

2.3.1 设计者应提供船体梁沿船长各剖面的许用中拱静水弯矩 $\overline{M}_s(+)$ 和许用中垂静水弯矩 $\overline{M}_s(-)$ 。

2.3.2 船体梁许用中拱和中垂静水弯矩包络线 \overline{M}_s ，应包络住装载手册中给出的任一航行工况下所计算的最严重的中拱和中垂静水弯矩。装载工况见《钢规》第2篇第2章第2节2.2.2。

2.3.3 船体梁应满足《钢规》第2篇第2章第2节2.2.5.1和2.2.5.2对船中最小剖面模数 W_0 和船中剖面对水平中和轴的惯性矩 I 的要求。

2.3.4 船体梁的各横剖面在强力甲板和平板龙骨处对水平中和轴的剖面模数 W 应不小于按下式计算所得之值：

$$W = \frac{|\overline{M}_s + M_w|}{[\sigma]} \times 10^3 \quad \text{cm}^3$$

式中： \overline{M}_s ——许用静水弯矩，kN·m；

M_w ——波浪弯矩，kN·m；

$[\sigma]$ ——船体梁许用弯曲应力，N/mm²，按下述要求确定：

$[\sigma] = 175/K$ ，船中0.4L区域；

$[\sigma] = 125/K$ ，船端0.1L区域；

其余区域用线性内插法求得，其中 K 为材料系数。

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 $\overline{F}_s(+)$ 和 $\overline{F}_s(-)$ 。

2.4.2 船体梁许用正、负静水切力包络线 \overline{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 船体梁许用正、负静水切力包络线 \overline{F}_s ，应满足下述要求：

$$\overline{F}_s(+)\leq F_a - F_w(+)$$

$$\overline{F}_s(-)\geq -F_a - F_w(-)$$

式中： F_w ——波浪切力，kN；

F_a ——船体梁剪切强度能力，kN，按2.4.4计算。

2.4.4 船体梁剪切强度能力 F_a 按下式计算，取对船体梁剪切能力有贡献的所有板单元中的最小值：

$$F_a = \frac{[\tau]t_j}{1000q_v} \quad \text{kN}$$

式中： t_j ——第 j 个板格的厚度，mm；

许用剪切应力 $[\tau]=110/K$ ，N/mm²；

q_v ——板的剪流，按下式计算：

$$q_v = f_1 \left(\frac{S}{I} \right) \cdot 10^{-1} \quad \text{mm}^{-1}$$

f_1 ——系数，对于图2.4.4所示的船体横剖面类型， $f_1 = 0.5$ ；

S ——静矩，cm³，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，cm⁴。

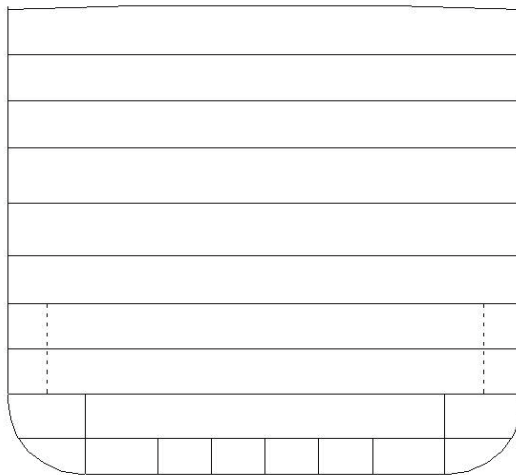


图2.4.4

2.4.5 船体梁剪切强度能力 F_a 也可采用基于薄壁剪流理论确定，计算时的许用剪切应力 $[\tau]$ 见2.4.4。

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 应按下列两式计算，并取大者：

$$\sigma = \frac{|\overline{M}_s + M_w|}{W_c} \times 10^3 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\sigma = \frac{30}{K} \quad \text{N/mm}^2$$

式中： \overline{M}_s —— 许用静水弯矩，kN·m；

M_w —— 波浪弯矩，kN·m， M_w 应取为：

对许用中拱静水弯矩，用 $M_w(+)$ 计算；

对许用中垂静水弯矩，用 $M_w(-)$ 计算；

W_c —— 计算点处的船体梁剖面模数，cm³；

K —— 材料系数。

2.5.4 对中和轴以上的构件，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。

2.5.5 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 $|\overline{M}_s + M_w|$ 应为规范要求的中垂波浪弯矩 $M_w(-)$ 扣除最小的中拱静水弯矩，但应不小于 $0.9M_w(-)$ 。

2.5.6 工作剪切应力 τ 应按下列两式计算，并取大者：

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

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

式中: \overline{F}_s —— 许用静水切力, kN;

F_w —— 波浪切力, kN; F_w 应取为:

对许用正静水切力, 用 $F_w(+)$ 计算;

对许用负静水切力, 用 $F_w(-)$ 计算;

t —— 计算点处板的厚度, mm;

q_v —— 板的剪流, 见2.4.4。

2.6 船体梁剖面特性计算

2.6.1 在基线以上任何垂向位置 Z , 船体梁横剖面对其水平中和轴的剖面模数 W 按下式计算:

$$W = \frac{I}{|Z - Z_{NA}|} \times 10^{-2} \quad \text{cm}^3$$

式中: I —— 船体梁横剖面对其水平中和轴的惯性矩, cm^4 ;

Z —— 计算点至基线的距离, m;

Z_{NA} —— 船体梁横剖面的水平中和轴至基线的距离, m。

2.6.2 强力甲板及其以下所有在 $0.4L$ 区域内连续的纵向构件的剖面积, 均可计入船体梁剖面模数。强力甲板以上可计入舷顶列板伸出强力甲板的部分和连续的舷边角钢的剖面积。

2.6.3 在船体梁剖面模数的计算中, 应用如下的开口定义:

(1) 大开口指开口长度(首尾方向)超过2.5m和/或宽度超过1.2m的开口。

(2) 小开口指除上述大开口外的开口, 如人孔、减轻孔等。

(3) 独立开口指在船的横向/垂向间隔不小于1m的开口。

2.6.4 在计算船体梁剖面模数时, 以下开口或其阴影区的剖面积应扣除:

(1) 大开口;

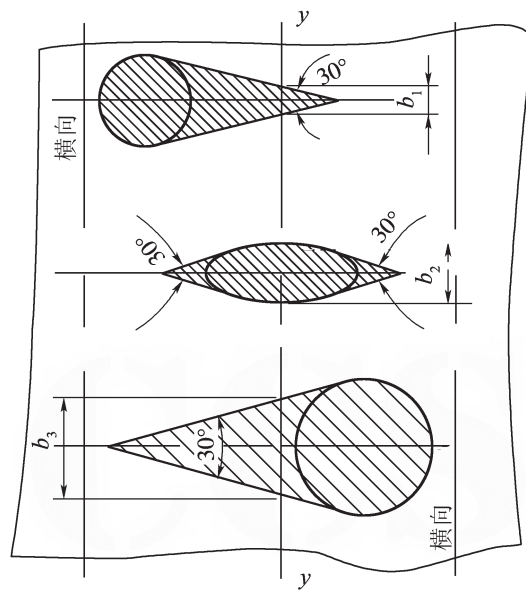
(2) 非独立的小开口。

2.6.5 独立的多个小开口只要其同一横剖面上的宽度或阴影区宽度 (见图2.6.5)的总和 b_c 符合下式要求时, 则在计算船体梁剖面模数时, 不必扣除其剖面积:

$$b_c \leq 0.06(B_1 - \Sigma b)$$

式中: B_1 ——计算剖面处的船宽, m;

Σb ——计算剖面处按2.6.4规定应扣除的开口宽度的总和, m。



在y-y剖面处小开口宽度之和为 $b_c = b_1 + b_2 + b_3$

图2.6.5

2.6.6 若纵骨或纵桁的开孔(如减轻孔、流水孔、焊缝处的单个扇形孔)高度不超过腹板高度的25%(但对扇形孔深度最大不超过75mm)时, 则在计算船体梁剖面模数时不必扣除其剖面积。

2.6.7 按图2.6.7确定开口、非连续甲板、纵舱壁和舷侧外板的非有效面积, 表示非有效面积的阴影区是通过画两条与船纵轴成15°的斜线获得。

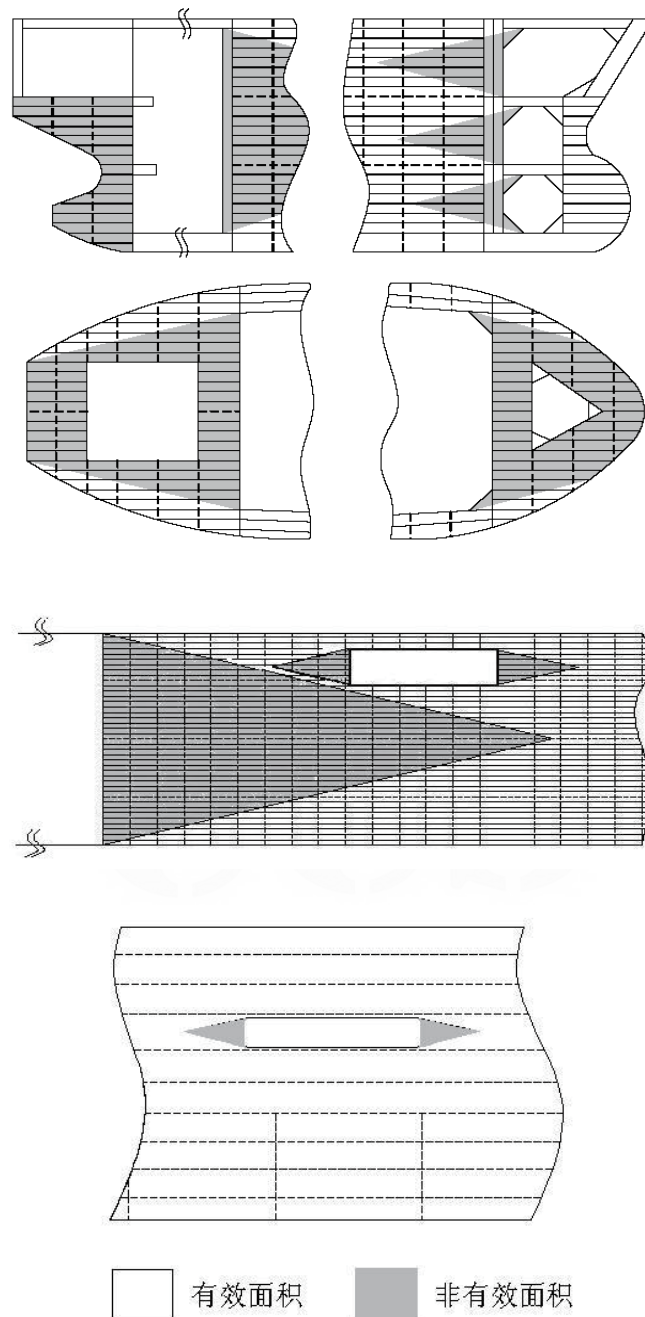


图2.6.7

2.7 局部构件尺寸的折减系数

2.7.1 当强力甲板处和平板龙骨处的最大总纵弯曲压应力小于许用弯曲应力 $[\sigma]$ 时，可取适宜的折减系数 F_d 和 F_b ，以减小局部构件的尺寸，但应符合以下条件：

$$F_d \geq \frac{\sigma_d}{[\sigma]}$$

$$F_b \geq \frac{\sigma_b}{[\sigma]}$$

式中： σ_d ——强力甲板处的总纵弯曲压应力，N/mm²，按2.5.3计算；
 σ_b ——平板龙骨处的总纵弯曲压应力，N/mm²，按2.5.3计算；
[σ]——船体梁许用弯曲应力，N/mm²，见2.3.4。

2.7.2 对于外板和甲板，折减系数 F_d 和 F_b 应不小于0.7。

2.7.3 对于骨材，折减系数 F_d 和 F_b 应不小于0.8。

CCS

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和车辆舱内的车辆甲板。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3.6的要求。

3.2 强力甲板

3.2.1 强力甲板的厚度 t 应符合下列要求：

- (1) 强力甲板露天部分的最小厚度为6.5mm；
- (2) 对于围蔽于甲板室内的强力甲板非露天部分的最小厚度为6mm；
- (3) 露天强力甲板的厚度 t 应不小于按下列公式计算所得之值：

$$t = (0.02L + 4.5) \sqrt{\frac{s_1 K}{s_b}} \quad \text{mm}$$

$$t = 8s \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}} + 1 \quad \text{mm}$$

式中： L ——船长，m；计算时取值不必大于100m；

s ——甲板纵骨间距，m；

s_1 ——甲板纵骨间距，m，计算时取值应不小于 s_b ；

s_b ——甲板纵骨的标准间距，m；

K ——材料系数；

R_{eH} ——材料的屈服应力，N/mm²。

- (4) 对于围蔽于甲板室内的强力甲板非露天部分的厚度可按本条(3)的要求减1mm。

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：

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

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：

$$W = 1.13sl^2K + 0.52sLK \quad \text{cm}^3$$

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。

3.2.4 强力甲板的纵骨最小惯性矩I按下述计算，且带板宽度等于纵骨间距的80%：

$$I = 1.43Al^2 \frac{R_{eH}}{235} \quad \text{cm}^4$$

式中：l —— 纵骨跨距，m；

A —— 连同带板的纵骨剖面积，cm²；

R_{eH} —— 材料的屈服应力，N/mm²。

3.3 装载轮式车辆的车辆甲板

3.3.1 对于仅用于装载轮式车辆的非露天车辆甲板，其甲板厚度可按《钢规》第2篇第2章第21节2.21.2.1(1)的要求减薄1.5mm，但不小于5.5mm。

3.3.2 对于仅用于装载轮式车辆的甲板，甲板纵骨或横梁的剖面模数应能满足轮印载荷对扶强材最不利的情况，许用弯曲应力为100/K，N/mm²(K为材料系数)，假定两端为刚性固定。

3.4 可收放的活动车辆甲板

3.4.1 可收放的活动车辆甲板（以下简称活动车辆甲板）一般设计为板架结构。

3.4.2 为保证活动车辆甲板的支持构件应有足够强度，应根据活动车辆甲板承受的实际载荷(包括其自重)对下述支点处的零件或构件进行强度校核：

(1) 软支点：如对于链条和钢丝绳等零件，许用载荷为1/5破断载荷；

(2) 硬支点:

$$\text{许用弯曲应力 } [\sigma] = 85/K \quad \text{N/mm}^2$$

$$\text{许用剪切应力 } [\tau] = 43/K \quad \text{N/mm}^2$$

$$\text{许用相当应力 } [\sigma_e] = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 108/K \quad \text{N/mm}^2$$

式中: K —— 材料系数。

(3) 应对受压构件进行屈曲校核。

3.4.3 活动车辆甲板板的厚度应按3.3计算。

3.4.4 活动车辆甲板的扶强材, 其剖面模数 W 应不小于按下式计算所得之值;

$$W = 1.39CPIK \quad \text{cm}^3$$

式中: C —— 系数, 见表3.4.4;

P —— 最大单根车轴载荷, t;

l —— 扶强材跨距, m;

K —— 材料系数。

系数 C

表3.4.4

扶强材跨距/轮距	0.1	0.2	0.3	0.4	≥ 0.5
C	15.4	14.6	13.35	11.8	10.1

注: 表中轮距为同一轴上两端的最外侧两轮的距離。

3.4.5 对于活动车辆甲板桁材的尺寸, 可按下列衡准由直接计算法确定(载荷取静载荷):

$$\text{许用弯曲应力 } [\sigma] = 128/K \quad \text{N/mm}^2$$

$$\text{许用剪切应力 } [\tau] = 64/K \quad \text{N/mm}^2$$

$$\text{许用相当应力 } [\sigma_e] = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 160/K \quad \text{N/mm}^2$$

$$\text{挠度} \quad f \leq l/400 \quad \text{mm}$$

式中: K —— 材料系数;

l —— 桁材支撑点之间的距离, mm。

3.5 车辆坡道

3.5.1 车辆坡道应符合3.3装载轮式商品车辆的车辆甲板的有关要求。

3.6 车辆舱内甲板主要构件的结构细则

3.6.1 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。

3.6.2 主要构件的腹板厚度 t_w 应不小于:

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

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} —— 材料的屈服应力, N/mm²。

3.6.3 主要构件的面板厚度应不小于主要构件的腹板厚度。

3.6.4 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2.5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2倍。

3.6.5 主要构件应设置间距不大于3m的防倾肘板。在支柱的上下端和预计承受集中载荷其他部位也应设置防倾肘板。在主要构件端肘板的趾端处,如腹板高度与其厚度之比大于55时, 也应设置防倾肘板或加强筋。防倾肘板的高度应伸至主要构件的面板, 宽度应不小于其高度的40%; 当主要构件面板的宽度在桁材的任一側大于180mm时, 防倾肘板应能支持面板。防倾肘板的厚度 t_b (mm)应不小于 $(5+0.025L)$, 但不必大于主要构件的腹板厚度, 其中 L 为船长。当防倾肘板的自由边长 l_b (m)大于 $0.06t_b$ 时, 则防倾肘板应有面板或折边, 其面板或折边的截面积 A (cm²),一般应不小于 $10l_b$ 。

3.6.6 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3.6.4条的要求。

第4节 舷侧结构

4.1 一般要求

4.1.1 干舷甲板以上，舷侧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。

4.1.2 干舷甲板下的舷侧骨架应满足《钢规》第2篇第2章第7节的有关要求，但计算压头可量计至于舷甲板边线。主要构件还应按本指南第7节或第8节的要求由直接计算法进行校核。

4.2 舷侧外板

4.2.1 舷侧外板系指从舳列板至强力甲板处的外板。

4.2.2 船中 $0.4L$ 区域内，与强力甲板连接的最高一列舷侧外板的宽度应不小于：

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

式中： L ——船长，m。

4.2.3 干舷甲板以下，舷侧为横骨架式时，船中部 $0.4L$ 区域内舷侧外板厚度 t 应不小于下述 t_1 和 t_2 中的较大者：

(1) t_1 应按下述公式计算：

$$t_1 = 0.073sE^{-1}(L+110)\sqrt{\frac{F_d}{K}} \text{ mm, 对于船体横剖面中和轴以上部分}$$

$$t_1 = 0.072sE^{-1}(L+110)\sqrt{\frac{F_b}{K}} \text{ mm, 对于船体横剖面中和轴以下部分}$$

式中： s ——肋骨间距，m，计算时取值应不小于肋骨的标准间距；

L ——船长，m，计算时取值不必大于200m；

F_d ——折减系数，见2.7；

F_b ——折减系数，见2.7；

K ——材料系数；

$E = 1 + \frac{s^2}{S^2}$ ，其中， S 为舷侧纵桁间距，m；当无舷侧纵桁时， $E = 1$ 。

(2) t_2 应按下述公式计算：

$$t_2 = 4.2s\sqrt{(d+h_2)K} \text{ mm, 距基线} 3D_F/4 \text{以上}$$

$$t_2 = 6.3s\sqrt{(d+h_1)F_b K} \text{ mm, 距基线} D_F/4 \text{以下}$$

式中: s 、 K 和 F_b 同本条(1);

d ——吃水, m;

$h_2 = 0.5C$, 计算时取不大于 $0.36d$;

$h_1 = 0.26C$, 计算时取不大于 $0.2d$;

C ——系数, 见《钢规》第2篇第2章第2节2.2.3.1。

距基线 $D_F/4$ 至距基线 $3D_F/4$ 区域内, 由上述计算所得之值用内插法求得。

4.2.4 干舷甲板以下, 舷侧为纵骨架式时, 船中部 $0.4L$ 区域内舷侧外板厚度 t 应不小于下述 t_1 和 t_2 中的较大者:

(1) t_1 应按下述公式计算:

$$t_1 = 0.06s(L+110)\sqrt{\frac{F_d}{K}} \text{ mm, 对于船体横剖面中和轴以上部分}$$
$$t_1 = 0.06s(L+110)\sqrt{\frac{F_b}{K}} \text{ mm, 对于船体横剖面中和轴以下部分}$$

式中: F_d 、 F_b 和 K 同4.2.3 (1);

s ——纵骨间距, m, 计算时取值应不小于纵骨的标准间距;

L ——船长, m, 计算时取值不必大于190m;

(2) t_2 应按下述公式计算:

$$t_2 = 4.2s\sqrt{(d+h_2)K} \text{ mm, 距基线} 3D_F/4 \text{ 以上}$$
$$t_2 = 5.4s\sqrt{(d+h_1)F_b K} \text{ mm, 距基线} D_F/4 \text{ 以下}$$

式中: s 和 F_b 同本条(1); K 、 d 、 h_2 和 h_1 同4.2.3 (2)。

距基线 $D_F/4$ 至距基线 $3D_F/4$ 区域内, 由上述计算所得之值用内插法求得。

4.2.5 当干舷甲板以下的舷侧外板由于局部强度的需要而采用高强度钢时, 在按本节4.2.3(1)和4.2.4(1)计算 t_1 中材料系数 K 可取1, 但在总纵强度校核时这部分舷侧外板应作为低碳钢计入。

4.2.6 干舷甲板以下, 船中部 $0.4L$ 区域内的舷侧外板厚度还应不小于按下式计算所得之值, 并应使船中部 $0.4L$ 区域外的舷侧板厚度能逐渐向端部舷侧外板厚度过渡:

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

式中: L ——船长, m;

K ——材料系数。

4.2.7 干舷甲板以下，离船端0.1L区域内的舷侧外板厚度 t 应不小于按下式计算所得之值：

$$t = (0.035L + 6) \sqrt{\frac{sK}{s_b}} \quad \text{mm}$$

式中： L ——船长，m；

s ——肋骨或纵骨间距，m，计算时取值应不小于 s_b ；

s_b ——肋骨或纵骨的标准间距，m；

K ——材料系数。

4.2.8 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0.1L范围内，应符合《钢规》第2篇第2章第17节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节桥楼和尾楼的舷侧外板要求。

(2) 本指南第2节2.3、2.4和2.5对船体梁弯曲强度、剪切强度和屈曲强度的要求。

4.2.9 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节甲板室围壁的要求。

(2) 本指南第2节2.3、2.4和2.5对船体梁弯曲强度、剪切强度和屈曲强度的要求。

4.2.10 强力甲板以下、干舷甲板以上的舷侧外板除应符合本节4.2.8和4.2.9的要求外，还应不小于下列公式计算所得之值：

$$t = t_F - (Z - D_F)(0.24 + 0.0012L) \sqrt{\frac{sK}{s_b}} \quad \text{mm}$$

$$t = 0.7 \sqrt{(L + 50)K} \quad \text{mm}$$

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；

L ——船长，m；

D_F ——最小型深，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 干舷甲板以上的舷侧肋骨

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

(1) 自首垂线向后 $0.1L$ 区域内：

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

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

式中： L ——船长，m；但计算时取值不必大于230m；

D_F ——最小型深，m；

d ——吃水，m；

s ——肋骨间距，m；

l ——肋骨跨距，m，即为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：

$$W = 0.8\left(0.7 + \frac{4d}{D_F}\right)sdLK\sqrt{D_F} \quad \text{cm}^3$$

$$W = 0.54sLLK \quad \text{cm}^3$$

式中： L 、 D_F 、 d 、 s 、 l 及 K 见本条（1）。

4.3.2 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 W 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：

$$W = 0.44sLLK \quad \text{cm}^3$$

式中： L 、 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。

第5节 支 柱

5.1 一 般 要 求

5.1.1 本节要求适用于车辆舱内的支柱。对于其他支柱应满足《钢规》第2篇第2章第10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。

5.2 车 辆 舱 内 的 支 柱

5.2.1 支柱所受的载荷 P 应按下列式计算：

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

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 ——设计均布载荷，kN/m²；对于强力甲板， p_d 应不小于3.2kN/m²。

5.2.2 支柱的剖面积 A 应不小于按下式计算所得之值：

$$A = \frac{KP}{12.26 - 5.10 \frac{l}{r\sqrt{K}}} \quad \text{cm}^2$$

式中： P ——支柱所受的载荷，kN；

l ——支柱的有效长度，m，为支柱全长的0.8倍；

r ——支柱剖面的最小惯性半径，cm；

K ——材料系数，但取值应不小于0.72。

5.2.3 支柱还应满足《钢规》第2篇第2章第10节2.10.3的要求。

5.2.4 支柱端部的结构加强：

(1) 应保证支柱上下端处的结构能合理地承受和传递载荷。支柱的上端应与由有效肘板支持的板相连接，支柱的两端应设置加厚板。

(2) 应将支柱设置在实肋板上或桁材上，并应在实肋板或桁材上设置垂直加强筋。当支柱的间距较大时，应将支柱设置在实肋板与桁材的交叉点上，如不设在交叉点上则应在支柱下面设置局部肋板或局部桁材。在支柱下面的肋板和桁材上不准开设人孔或减轻孔。

第6节 尾门跳板和舷门跳板

6.1 尾门跳板

6.1.1 尾门跳板应满足《钢规》第2篇第9章第5节尾门的要求和第6节车辆跳板的要求。

6.2 舷门跳板

6.2.1 舷门跳板应满足《钢规》第2篇第9章第5节舷门的要求和第6节车辆跳板的要求。

CCS

第7节 货舱区域结构强度直接计算

7.1 一般要求

7.1.1 货舱区域的主要支撑构件应按本节的要求进行强度直接计算评估。

7.1.2 本计算的目的在于评估货舱区域主要支撑构件在典型局部载荷工况下的强度。主要结构包括：

- 甲板结构
- 舷侧结构
- 双层底结构
- 舱壁结构
- 半舱壁结构（如有时）
- 支柱

7.2 结构建模

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

- (1) 当货舱区域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) 当货舱区域采用无半舱壁、有支柱设计时，模型应包括1/2+1+1/2个支柱间距；
- (3) 当货舱区域采用无半舱壁、无支柱设计时，模型应包括3个强框架间距。

7.2.2 有限元的单元选择和网格划分应遵循以下原则：

- (1) 模型网格一般为纵骨间距，主要支撑构件（包括实肋板、强横梁、纵桁、强肋骨、支柱等结构）的腹板用板单元模拟，面板用梁单元、杆单元或板单元模拟。
- (2) 承受侧向载荷的骨材使用梁单元；不承受侧向载荷的骨材可以使用杆单元。
- (3) 板应以四节点板单元建模，且应尽可能避免使用三角形单元，特别是高应力区域和开孔周围、肘板连接处和折角连接处这些应力梯度大的区域。

(4) 板单元长宽比应不超过4，在可能产生高应力或高应力梯度的区域，板单元的长宽比应尽可能接近1。

图7.2.2给出了一个车辆船货舱区有限元模型的示例，仅显示左舷部分。

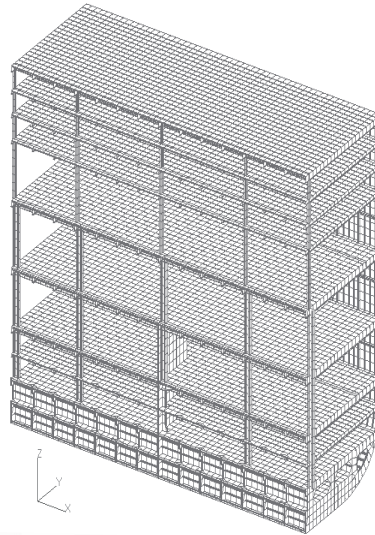


图7.2.2有限元模型（仅显示左舷）

7.2.3 有限元模型的坐标系取右手坐标系，即

- x方向为沿船长方向，以向船首方向为正；
- y方向为沿船宽方向，以向左舷方向为正；
- z方向为沿船体的垂向，以基线向上为正。

7.2.4 模型采用结构的建造厚度。

7.3 运动及加速度

7.3.1 船舶运动时的摇摆周期和摇摆角应按下列各式计算：

7.3.1.1 横摇周期 T_R 应按下式计算：

$$T_R = 2k_r / \sqrt{GM}$$

式中： k_r ——横摇转动半径，m，没有确切数值时，可按下式估算：

$$k_r = 0.39B$$

其中： B ——船宽

GM ——满载出港工况下的初稳性高度，没有确切数值时，可按下列式估算：

$$GM = 0.07B$$

其中： B ——船宽，m。

7.3.1.2 最大横摇角 φ_m 应按下列式计算，但不必大于0.523：

$$\varphi_m = k \frac{62.5 - 1.25T_R}{B + 75} \quad \text{rad}$$

式中： T_R ——见7.3.1.1；

B ——船宽；

k ——系数，应按下列各式取值：

$k = 1.2$ 无舦龙骨的船舶；

$k = 1.0$ 有舦龙骨的船舶；

$k = 0.8$ 具有减摇装置的船舶。

7.3.1.3 纵摇周期 T_p 应按下列式计算：

$$T_p = 1.8\sqrt{L/10}$$

式中： L ——船长，m。

7.3.1.4 最大纵摇角 ψ_m 应按下列式计算，但不必大于0.14：

$$\psi_m = 0.25a_0/C_b \quad \text{rad}$$

式中： C_b ——方形系数；

a_0 ——加速度系数，应按下列式计算：

$$a_0 = 3SC/L + C_v V/\sqrt{L}$$

式中： $C_v = \sqrt{L}/50$ ，取不大于0.2；

L ——船长，m；

V ——最大服务航速；

C ——系数，应按下列各式计算：

$$C = 0.0412L + 4 \quad \text{当 } L < 90\text{m 时；}$$

$$C = 10.75 - \left[\frac{(300 - L)}{100} \right]^{1.5} \quad \text{当 } 90 \leq L \leq 300\text{m 时；}$$

S ——航区系数，应按下列各式取值：

$S = 1.00$ ，无限航区；

$S = 0.95$ ，1类航区；

$S=0.90$, 2类航区;

$S=0.85$, 3类航区。

7.3.2 船舶运动时的加速度应按下列各式计算:

7.3.2.1 横荡加速度 a_y 应按下列各式计算:

$$a_y = 3a_0 \quad \text{m/s}^2$$

式中: a_0 ——见7.3.1.4。

7.3.2.2 升沉加速度 a_z 应按下列各式计算:

$$a_z = 7a_0 / \sqrt{C_b} \quad \text{m/s}^2$$

式中: a_0 , C_b 见7.3.1.4。

7.3.2.3 横摇角加速度 a_r 应按下列各式计算:

$$a_r = \varphi_m (6.28/T_R)^2 \quad \text{rad/s}^2$$

式中: T_R ——横摇周期, 按7.3.1.1计算;

φ_m ——最大横摇角, rad, 按7.3.1.2计算。

7.3.2.4 纵摇加速度 a_p 应按下列各式计算:

$$a_p = \psi_m (6.28/T_P)^2 \quad \text{rad/s}^2$$

式中: T_P ——纵摇周期, 按7.3.1.3计算;

ψ_m ——最大纵摇角, rad, 按7.3.1.4计算。

7.3.2.5 横向合成加速度 a_t 应按下列各式计算:

$$a_t = \sqrt{a_y^2 + [a_r(z - z_{rp}) + 10 \sin \varphi_m]^2} \quad \text{m/s}^2$$

式中: a_y ——横荡加速度, 见7.3.2.1;

a_r ——横摇角加速度, 见7.3.2.3;

φ_m ——最大横摇角, 见7.3.1.2;

z ——计算点到基线的垂向距离;

z_{rp} ——横摇转动轴和纵摇转动轴到基线的垂向距离, 按下列两式计算, 取小者:

$$z_{rp1} = \frac{D}{4} + \frac{d}{2} \quad \text{m}$$

$$z_{rp2} = \frac{D}{2} \quad \text{m}$$

式中: D ——型深, m;

d ——吃水, m。

7.3.2.6 垂向合成加速度 a_v 应按下列两式计算，取大者：

$$a_{v1} = \sqrt{a_z^2 + a_r^2 y^2} \quad \text{m/s}^2$$

$$a_{v2} = \sqrt{a_z^2 + a_p^2 (x - 0.45L)^2} \quad \text{m/s}^2$$

式中： a_z ——升沉加速度；
 a_r ——横摇角加速度；
 a_p ——纵摇角加速度；
 x ——计算点到尾垂线的纵向距离；
 y ——计算点到中剖面的横向距离；
 L ——船长。

7.4 计算工况

7.4.1 货舱区强度分析的有限元计算工况见表7.4.1。

舱段有限元计算工况

表7.4.1

工况	描述
1	满载工况
2	压载工况
3	横摇工况
4*	横向非均匀装载
5*	纵向非均匀装载

注*：当无多港口装卸时，可免除工况4和工况5。

7.4.2 满载工况

本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。

作用在车辆甲板上的垂向压力为

$$P_v = (g + 0.5a)(P + m_s) \quad \text{kN/m}^2$$

式中： P ——车辆甲板的设计载荷， t/m^2 ；
 m_s ——车辆甲板的自重载荷， t/m^2 ，但应不小于0.1；
 g ——重力加速度，取 9.81m/s^2 ；
 a_v ——垂向合成加速度，见7.3.2.6。

对于装载卡车等大车的甲板，还需考虑轮轴载荷对应的工况

$$P_v = (g + 0.5a_v)Q_{\text{II}}$$

式中： Q_w ——多根轮轴同时作用在一根强横梁上时的质量，t；

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，本工况的吃水取结构吃水。波浪附加压力的分布和值如图7.4.2所示，其中 C 见7.3.1.4。

对不同的评估部位，应取该区域最大的 a_x 。

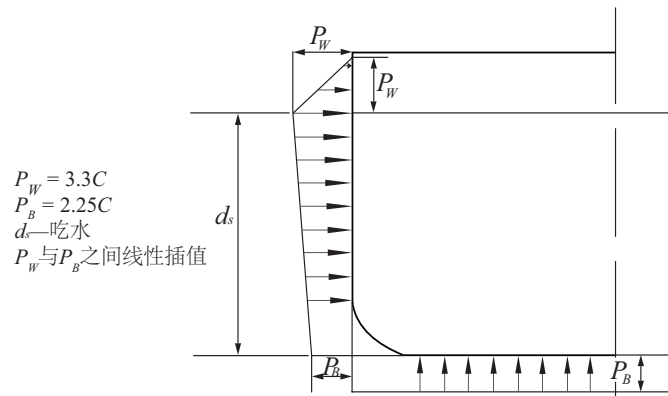


图7.4.2 车辆运输船舷侧及船底波浪压头分布

7.4.3 压载工况

本工况载荷包括甲板结构自重，海水静压力和海水动压力。甲板结构自重仅包括静态载荷，可通过重力场的形式施加，也可以面压力的形式施加，但都应真实反映甲板的实际重量。

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。波浪附加压力和大小如图7.4.2所示。

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静压力，如果为空舱则不应施加压力。

7.4.4 横摇工况

横摇工况下的结构强度分析的载荷包括：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静压力。车辆和船体结构的重力和水平惯性力按下式计算：

$$P_v = (P + m_s)g$$

$$P_t = (P + m_s)a_t$$

式中： a_t ——横向合成加速度，见7.3.2.5。

舷外水压力为结构吃水下的最大横摇角对应的静水压力。最大横摇角根据7.3.1.2的规定计算。

7.4.5 横向非均匀装载

本工况的垂向载荷和水压力同工况1，但车辆甲板上压力的作用区域仅在强横梁的一个跨距内。图7.4.5给出了压力作用的区域，在阴影区作用工况1的车辆压力，在其他区域没有车辆压力。

该工况下的舷外水压力同工况2。

7.4.6 纵向非均匀装载

本工况的垂向载荷和水压力同工况1，但车辆甲板上压力的作用区域仅两根支柱间的甲板区域。图7.4.6中的阴影给出了车辆压力的作用区域。

该工况下的舷外水压力同工况2。

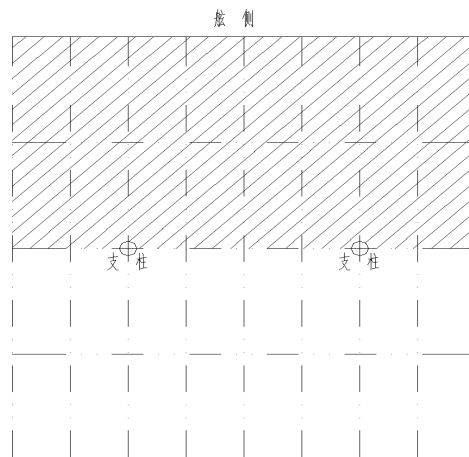


图7.4.5 横向非均匀工况的压力作用区域

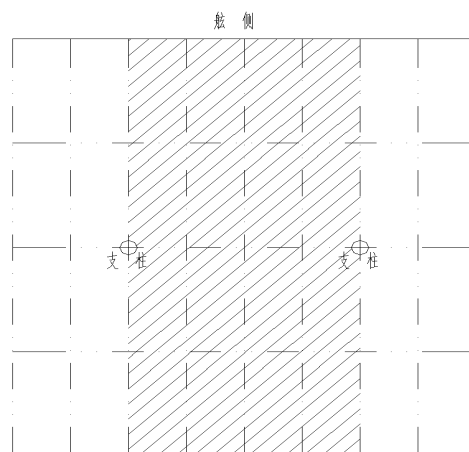


图7.4.6 纵向非均匀工况的压力作用区域

7.5 边界条件

7.5.1 各工况采用相同的边界条件，用以约束刚体位移，并约束载荷产生的不平衡力。具体的位置见表7.5.1和图7.5.1。

7.5.2 为了约束模型的纵向位移，在内底板的一端约束x方向的位移。

7.5.3 为了约束模型的横向位移，在内底的一舷的边线处约束y方向的位移。

7.5.4 为了约束模型的垂向位移，在舷侧的两端约束其z方向的位移。通过上述位移约束，可以控制模型的转动刚体位移。

7.5.5 为了模拟与模型相邻构件的约束，在船底和甲板纵桁前后端处，约束其绕y轴的转动。

各工况下的边界条件

表7.5.1

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

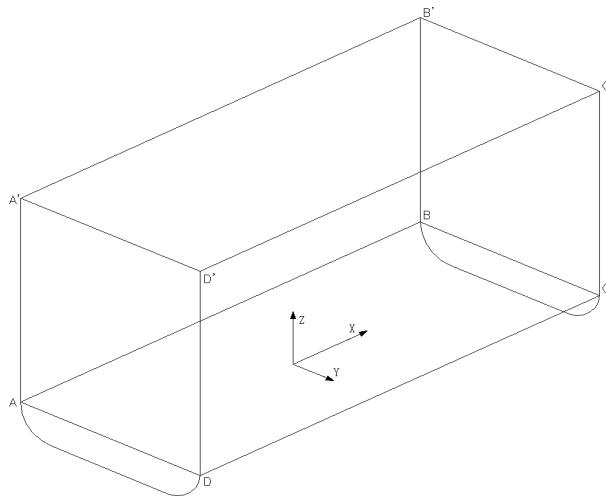


图7.5.1 施加边界条件的位置

7.6 许用应力

7.6.1 有限元的结果评估范围应基于模型中部区域，应包括半舱壁框架、支柱强框架及普通强框架等，见图7.6.1。

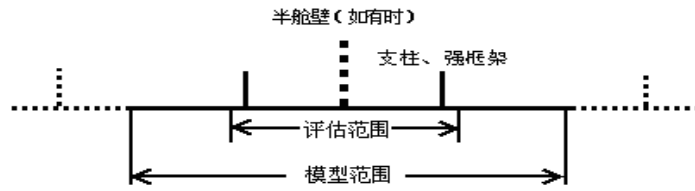


图7.6.1 有限元评估范围

7.6.2 各工况下的许用应力标准为：

许用剪切应力： $[\tau] = 100/K \text{ N/mm}^2$ ；

许用相当应力： $[\sigma_e] = 190/K \text{ N/mm}^2$ ；

梁单元和杆单元的许用应力： $[\sigma] = 190/K \text{ N/mm}^2$ 。

7.7 屈曲强度校核

7.7.1 应对模型中部区域的下列结构进行屈曲强度校核，屈曲安全因子 λ 应不小于1.0：

- (1) 横舱壁板和半舱壁板；
- (2) 强横梁、强肋骨、实肋板；
- (3) 甲板纵桁；
- (4) 船底板、内底板。

7.7.2 单向、双向压缩应力、剪应力等的各向组合及其相关性应包括在屈曲计算中。

7.7.3 板格屈曲计算时，一般部位板厚扣除腐蚀余量1.0mm，车辆舱内部构件的腐蚀余量应不低于0.5mm。

7.7.4 屈曲安全因子 λ 应按附录2中的方法或其他公认的屈曲校核方法求解。

第8节 整船强度直接计算

8.1 一般要求

8.1.1 本节给出了整船强度直接计算的方法，目的在于校核车辆运输船在迎浪、横浪和斜浪工况下主要构件的强度。

8.1.2 对于具有以下情况的车辆运输船应进行全船有限元计算：

- (1) 装载量超过5000车或 $L > 180\text{m}$ 的大型车辆运输船；
- (2) 具有非常规结构设计方案的车辆运输船，如，非均匀设置半舱壁、甲板强横梁和强肋骨横向不在同一平面上的设计等；
- (3) CCS认为有必要进行全船有限元分析的车辆运输船。

8.2 整船建模

8.2.1 全船模型应包括整个船长、船宽和型深。全船模型单元网格尺寸取骨材间距，建模原则见7.2。图8.2.1给出了一条汽车运输船的全船模型。

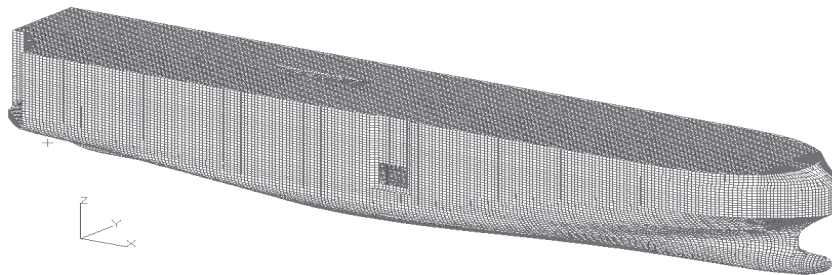


图8.2.1 汽车运输船的全船有限元模型。

8.2.2 为了进行水动力分析并直接施加波浪载荷，有限元模型应能模拟船舶的实际质量、质心和质量惯性矩。可将模型分成若干部分，并调整各部分的材料密度来模拟钢料、舾装和小的设备的质量。大的设备，压载水和货物采用质量单元来模拟，质量单元可建在相应的结构上，也可通过虚拟结构和实际结构进行连接。

8.2.3 全船质量模型应与船舶静水浮态相匹配。总重力与总浮力的误差不大于 $\frac{1}{10000} \cdot \Delta$ ，其中 Δ 为相应吃水时的型排水量，t；质心与浮心的纵坐标误差不大于 $\frac{1}{4000} \cdot L$ ，其中 L 为船长，m；横坐标误差不大于 $\frac{1}{1000} \cdot B$ ，其中 B 为船宽，m。

8.3 载 荷 工 况

8.3.1 每一种计算工况由静水载荷工况和波浪载荷工况组成。

8.3.2 根据装载手册选取以下满载静水工况作为计算工况：

- (1) 静水弯矩最大的满载工况；
- (2) 重心高度最大的满载工况；
- (3) CCS或设计单位认为需要考虑的其他恶劣工况。

8.3.3 分别基于上述静水工况的吃水和质量分布，用概率统计方法计算设计波参数如：波向、波长、波高和相位等，由设计波决定船体波浪载荷，详见附录1。

8.3.4 计算工况由静水工况和波浪载荷工况的不同组合组成，对于车辆运输船，应计算的工况如下：

计 算 工 况

表8.3.4

	波浪工况	船中最大垂向波浪弯矩	最大横摇角	L/4横剖面处最大扭矩
静水工况				
满载工况		计算工况1	计算工况2	计算工况3

8.4 计 算 载 荷

8.4.1 计算载荷包括静力和波浪诱导动力载荷两部分。静态载荷包括浮力和重力，通过压力场和重力场来施加。波浪诱导动力载荷包括波浪动压力和相应的运动惯性力，通过波浪载荷与运动直接计算得到并施加在全船有限元模型上。

8.5 边 界 条 件

8.5.1 经过波浪载荷直接计算得到的外载荷和惯性载荷是对应的，计算模型处于自由动态平衡状态。为消除刚体位移，在船体的相应节点施加6个线位移约束，如表8.5.1和图8.5.1所示。

边界约束及其施加位置

表8.5.1

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

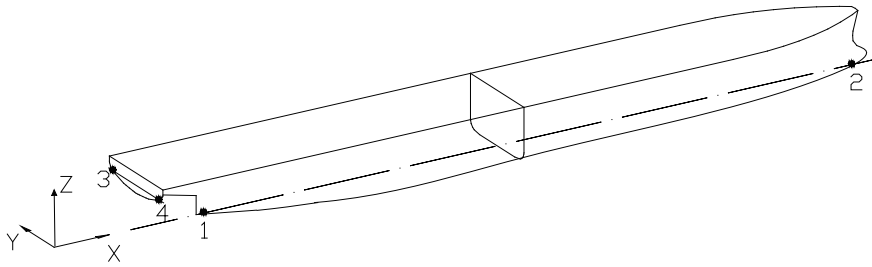


图8.5.1 边界条件示意图

8.6 许用应力

8.6.1 整船强度直接计算中应力取单元中点处的中面应力，许用应力为：

许用剪切应力： $[\tau] = 100/K \text{ N/mm}^2$ ；

许用相当应力： $[\sigma_e] = 190/K \text{ N/mm}^2$ 。

8.7 屈曲强度校核

8.7.1 应至少对船底板、内底板、舷侧外板、实肋板、船底纵桁和车辆甲板进行屈曲强度校核，屈曲安全因子 λ 应不小于1.0。

8.7.2 单向、双向压缩应力、剪应力等的各向组合及其相关性应包括在屈曲计算中。

8.7.3 板格屈曲计算时，一般部位板厚扣除腐蚀余量1.0mm，车辆舱内部构件的腐蚀余量应不低于0.5mm。

8.7.4 屈曲安全因子 λ 应按附录2中的方法或其他公认的屈曲校核方法求解。

第9节 局部结构连接区域细化分析

9.1 一般要求

9.1.1 本节给出了局部结构连接区域细化有限元分析的要求和方法，以评估结构连接节点处局部高应力区域的强度。

9.1.2 如有限元船体模型不足以反映结构连接处局部几何形状时，可用细化模型分析表明该处构件尺度满足要求。

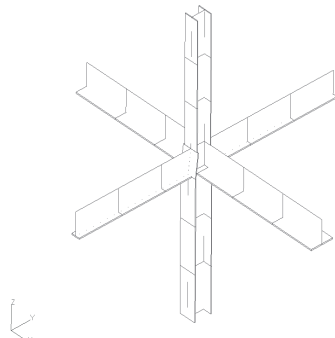
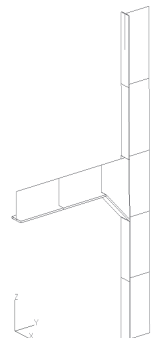
9.1.3 局部结构细化分析针对不同构件的连接部位进行，需要进行细化分析的区域按9.2的规定确定。

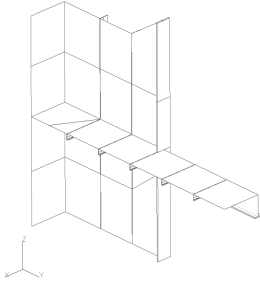
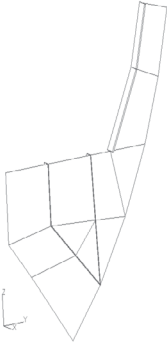
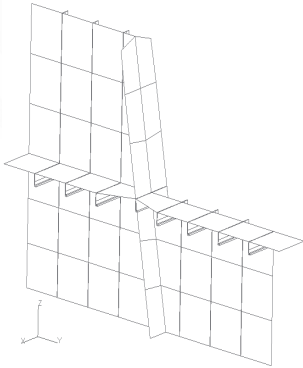
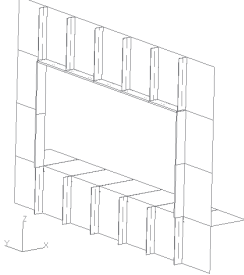
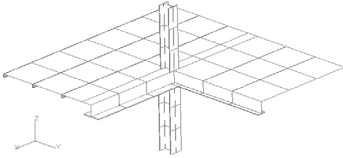
9.2 细化区域

9.2.1 对于表9.2.1所列关注区域，按照本指南第7节和第8节要求进行的结构计算等效应力大于80%许用应力时，应进行细化分析。

应关注的典型细化区域

表 9.2.1

构件	关注区域	图示
主要构件	支柱与甲板强横梁和甲板纵桁的连接区域	
	甲板强横梁与强肋骨的连接区域	

	甲板强横梁与半舱壁的连接区域	
	强肋骨与实肋板的连接区域	
舱壁	半舱壁与横舱壁的过渡区域	
	横舱壁上的开口区域	
甲板	车辆甲板上坡道开口的角隅区域	

9.2.2 除9.2.1表列关注区外的其他构件连接区，按本指南第7节和第8节计算的等效应力大于90%许用应力时，应进行细化分析。

9.3 结构建模

9.3.1 细化模型范围

局部有限元模型应使关注区域的应力不会受到边界条件和载荷的显著影响，细化模型的边界应与船体结构中的主要支承构件（比如肋板和桁材）相一致。

9.3.2 细化模型网格要求

细化区域应以壳单元建模，避免三角形单元和畸变单元的使用，单元长宽比应接近1，细化网格尺寸应不大于50 mm×50 mm，细化网格区域在所有方向上应不少于10个单元，且细化模型保持良好的结构过渡。

9.3.3 细化方法

细化模型可以包含在整体模型中进行直接计算，也可采用单独的子模型进行分析。

9.4 细化子模型的边界条件和载荷

9.4.1 边界条件

细化模型如果采用独立局部子模型，其边界上应施加强制位移，其数值取自整体模型计算给出的对应位置处的位移。

9.4.2 载荷

局部细化区域承受的局部载荷应施加于细化模型上。

9.5 结果评估和验收衡准

9.5.1 最大许用应力应基于50 mm×50 mm的网格尺寸，如使用更小的网格密度时，可用与上述网格尺寸面积相当的单元平均von Mises应力进行校核。

$$\sigma_{vm} \leq \lambda[\sigma_e]$$

其中： σ_{vm} —— 板单元的Von Mises相当应力，N/mm²；

λ —— 系数，临近焊缝的单元取1.5，其他取1.7；

$[\sigma_e]$ —— 许用应力，N/mm²，见7.6或8.7相应的许用应力。

附录1 车辆运输船波浪诱导运动与载荷计算方法

1 一般规定

- 1.1 船舶运动及波浪载荷用二维线性切片理论程序CCS006SR-96或其他三维线性程序计算；
- 1.2 波浪载荷一般应在满载状态下进行，也可以根据需要在其他的装载状态下进行；
- 1.3 按船舶零航速计算波浪载荷；

2 载荷控制参数及其统计分析

2.1 主要载荷控制参数：

- (1) 对于最大船体横摇运动，取波浪诱导横摇角为载荷控制参数；
- (2) 对于船中最大垂向波浪弯矩，取船中剖面波浪诱导弯矩为载荷控制参数；
- (3) 斜浪状态下，取 $L/4$ 横剖面处最大扭矩为载荷控制参数。

2.2 计算主要控制参数的频率响应函数，波浪搜索的输入参数按下列规定：

- (1) 所取的波浪频率数应不少于20，波浪角频率的取值范围为0.1至1.5；
- (2) 计算所取浪向角不应少于7个，包括 0° （顶浪）、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 、 180° （随浪）；
- (3) 计算采用的横摇阻尼不大于0.07倍的临界阻尼；
- (4) 计算上述规则波单位波高时的载荷控制参数的幅值响应，得到频率响应函数曲线组，图2.2给出频率响应函数曲线组的典型形态示例，每一条曲线对应一个浪向。

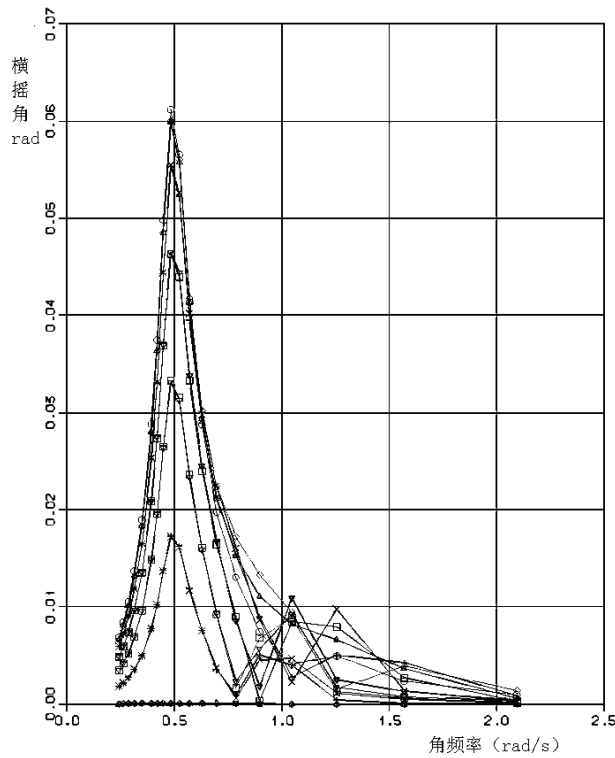


图2.2 频率响应函数示例

2.3 横摇角的长期预报值:

- (1) 使用IACS推荐的波浪散布图 (IACS Rec.No.34) 描述海洋波浪的随机分布;
- (2) 设定波浪能量分布按照P-M谱, 波浪诱导运动与载荷统计计算采用P-M波浪谱:

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

式中: ω —— 波浪角频率, rad/s;

$H_{\frac{1}{3}}$ —— 有义波高, m;

T_2 —— 波浪跨零周期, s;

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

θ —— 组合波与主浪向之间的夹角, rad。

- (3) 横摇角的长期预报值取 $10^{-6.5}$ 超越概率, 其他取 10^{-8} 超越概率。

3 设计波参数确定

3.1 设计波入射方向由载荷控制参数频率响应函数曲线确定，通常情况下：迎浪工况时，设计波入射方向一般取为 0° ；横浪工况时，设计波入射方向一般取为 90° ；斜浪工况时，设计波入射方向一般取为 45° 。

3.2 取频率响应函数曲线组最大峰值对应的波频 ω_a 为设计波频率；

3.3 设计波波幅按下式计算：

$$a_w = \frac{L}{A}$$

式中： a_w ——设计波波幅；

A ——响应函数的峰值；

L ——载荷控制参数的长期预报值。

3.4 设计波相位

取载荷控制参数响应值与静水载荷组合最大时的相位为计算相位。

4 设计波上的波浪诱导运动和压力计算

4.1 波浪诱导运动和压力按3规定的设计波方向、波频和波幅进行计算。

4.2 取3.4给出的相位的压力和惯性力作为有限元模型的计算载荷。

附录2 板格屈曲强度校核的简化公式法

1 临界屈曲应力及弹塑性修正

1.1 短边受压及弯曲板格弹性临界屈曲应力 σ_{xcr_e} 定义如下:

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

式中: k_x ——短边受压及弯曲屈曲系数, 按本附录表1.1(a)计算, 其中: σ_{x1} 、 σ_{x2} 见本附录2.2;

C_1 ——边界约束系数, 见表1.1(b);

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, $\nu = 0.3$;

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。

1.2 长边受压及弯曲板格弹性临界屈曲应力 σ_{ycr_e} 定义如下:

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

式中: k_y ——长边受压及弯曲屈曲系数, 按本附录表1.1(a)计算, 其中: σ_{y1} 、 σ_{y2} 见本附录2.2;

其中: l ——板格的长边长度, mm;

C_2 ——边界约束系数, 见本附录表1.1(b);

y ——定义为板格短边轴向;

其余符号同1.1。

1.3 受剪切板格弹性临界屈曲应力 τ_{cr_e} 定义如下:

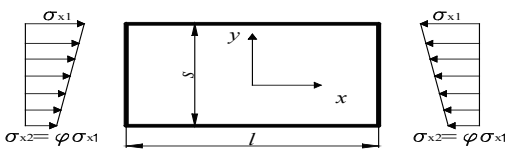
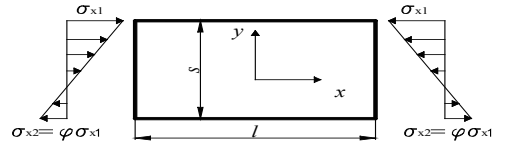
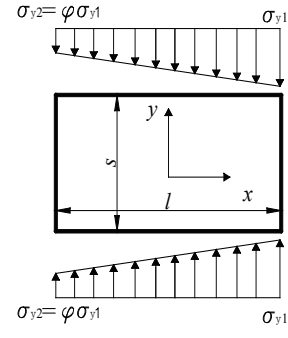
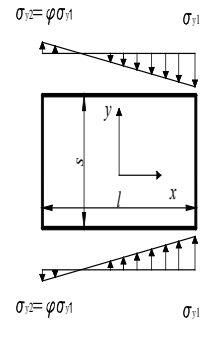
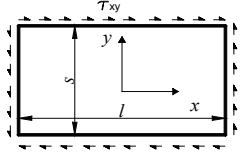
$$\tau_{cr_e} = k_t C_1 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \quad \text{N/mm}^2$$

式中: k_t ——剪切屈曲系数, 按本附录表3.1.1(a)计算, 其中: τ_{xy} 见本附录2.2;

其余符号同1.1、1.2。

板格屈曲系数

表1.1(a)

板格受压及弯曲和剪切力学模型		屈曲系数
短边 受载	 <p>其中: $0 \leq \phi \leq 1$</p>	$k_x = \frac{8.4}{\phi + 1.1}$
	 <p>其中: $-1 \leq \phi < 0$</p>	$k_x = 7.6 - 6.4\phi + 10\phi^2$
长边 受载	 <p>其中: $0 \leq \phi \leq 1$</p>	$k_y = \left[1 + \left(\frac{s}{l} \right)^2 \right]^2 \frac{2.1}{\phi + 1.1}$
	 <p>其中: $-1 \leq \phi < 0$</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		$k_t = 5.34 + 4 \left(\frac{s}{l} \right)^2$

板格边界约束系数 C_1 、 C_2

表1.1(b)

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

1.4 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：

$$\sigma_{xcr} = \begin{cases} \sigma_{xcr_e} & \text{当 } \sigma_{xcr_e} \leq \frac{R_{eH}}{2} \\ R_{eH} \left(1 - \frac{\sigma_S}{4\sigma_{xcr_e}}\right) & \text{当 } \sigma_{xcr_e} > \frac{R_{eH}}{2} \end{cases}$$

$$\tau_{cr} = \begin{cases} \tau_{cr_e} & \text{当 } \tau_{cr_e} \leq \frac{\tau_S}{2} \\ \tau_S \left(1 - \frac{\tau_S}{4\tau_{cr_e}}\right) & \text{当 } \tau_{cr_e} > \frac{\tau_S}{2} \end{cases}$$

式中： σ_{xcr} 、 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；

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，见本附录1.1、1.2、1.3；

R_{eH} ——材料屈服强度，N/mm²；

τ_S —— $\frac{R_{eH}}{\sqrt{3}}$ 。

2 屈曲强度衡准

2.1 复合应力作用下的板格屈曲强度按下式校核：

$$\lambda \geq [\lambda]$$

式中： λ ——为板格中板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，按本附录表2.1计算；

$[\lambda]$ ——为板格屈曲安全因子，见本指南表2.1。如模型采用细网格时， λ 值可适当放宽，但应征得本社同意；

σ_{x1} 、 σ_{y1} 、 τ_{xy} —— 见2.2;

σ_{xcr} 、 σ_{ycr} 、 τ_{cr} —— 见1.4;

l 、 s 符号同1.2、1.1。

2.2 本附录表中的 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，计算时应按板格边中面应力的平均值（取两个对边节点的平均值）计入； τ_{xy} 为平均剪应力。 σ_{x1} 、 σ_{x2} 、 σ_{y1} 、 σ_{y2} 、 τ_{xy} 如表1.1(a)图中所示。

2.3 按2.2算得的X轴、Y轴的工作应力 σ_{x1} 、 σ_{y1} 、 τ_{xy} 在计算时取绝对值计入。若 σ_{x1} 、 σ_{y1} 的计入结果为拉应力时，该应力分量取为零。

λ 计算值

表2.1

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	$\frac{1}{(1+k_1)} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_{x1}}$	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_1^2)}} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_{x1}}$
X轴压缩+剪切	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_2^2)}} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_{x1}}$	
Y轴压缩+剪切	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_3^2)}} \frac{\sigma_{ycr}}{\sigma_{y1}}$	
双向压缩+剪切	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_1^2+k_2^2)}} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_{x1}}$	

其中： $k_1 = \frac{\sigma_{y1}/\sigma_{ycr}}{\sigma_{x1}/\sigma_{xcr}}$ ， $k_2 = \frac{\tau_{xy}/\tau_{cr}}{\sigma_{x1}/\sigma_{xcr}}$ ， $k_3 = \frac{\tau_{xy}/\tau_{cr}}{\sigma_{y1}/\sigma_{ycr}}$ 。