

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD16-2020

矿砂船船体结构强度直接计算指南
2020

生效日期：2020 年 7 月 1 日

中国船级社

北京

编写说明

为适应工业界对大型矿砂船的开发和设计的需要，配合国家开展大型矿砂船船型开发研究的计划，由原国防科工委立项，经造船工程学会委托，中国船级社在 2009 年基于我社《钢质海船入级规范》、《双舷侧散货船结构强度直接计算指南》、《油船结构直接计算分析指南》、《船体结构疲劳强度指南》等规范及指南的基础上研究编写了大型矿砂船结构强度直接计算指导性文件。根据多型矿砂船的审图、入级反馈，我社重新修订了该指导性文件，于 2014 年颁布了《矿砂船船体结构强度直接计算指南（2014）》。

随着矿砂船船型越来越大型化，对强度评估提出了更加全面、更加先进的要求，因此在 2014 版指南的基础上，对舱段直接计算的评估范围扩展到整个货舱区和机舱区域、载荷与工况、模型边界与载荷调整、屈曲评估方法、疲劳强度分析方法、矿砂含水对结构强度的影响和整船有限元等要求，结合 CSR 规范和 GBS 研究成果进行了适用性研究和实船验证，根据研究结果升级形成 2016 版指南。

根据 2016 版指南实船设计与审图应用情况反馈，对相关内容进行了修订，形成 2020 版指南。

本指南的主要内容包括：

1）规定了指南的适用范围、船型定义、符号；

2）规定了波浪载荷和计算工况；

3）舱段直接计算的建模要求、分析范围、船体梁调整和许用衡准；

4）细化网格详细应力评估的部位、建模要求和许用衡准；

5）屈曲强度评估板格定义、属性定义、屈曲能力和强度衡准

6）整船直接计算的建模要求、工况定义、载荷计算及应力衡准；

7）机舱舱段直接计算的建模、载荷、船体梁调整和许用衡准；

8）装载含水矿砂时舱段有限元直接计算的补充要求。

目录

第 1 章　总则 1

1.1　一般规定 1

1.2　定义 2

1.3　构件尺寸 5

第 2 章　载荷工况 6

2.1　一般要求 6

2.2　动载荷工况 6

2.3　船舶运动和加速度 14

2.4　船体梁载荷 17

2.5　外部载荷 23

2.6　内部载荷 38

2.7　装载工况 46

第 3 章　货舱区域直接强度分析 56

3.1　一般要求 56

3.2　结构建模 57

3.3　有限元载荷组合 63

3.4　强度评估 80

3.5　细化强度评估 84

第 4 章　屈曲强度评估 86

4.1　一般要求 86

4.2　板格类型 88

4.3　屈曲能力 96

4.4　强度衡准 115

附录 A 参考应力计算方法 118

A.1.1　一般规定 118

A.1.2　基于应力的方法 118

A.1.3　参考应力 119

附录 B 板格的屈曲因子和折减因子 122

B.1.1 符号说明 122

B.1.2 平面板格 122
B.1.3 曲面板格 122

第 5 章 整船有限元强度评估 134

5.1 一般规定 134
5.2 模型要求 135
5.3 水动力载荷计算 136
5.4 整船载荷施加与惯性平衡 140
5.5 强度评估衡准 143

附录 1 144

机舱结构强度直接计算 144

1.1 一般要求 144
1.2 结构建模 144
1.3 载荷 145

附录 2 149

装载含水矿砂时舱段有限元计算要求 149

2. 1 一般规定 149
2. 2 液化矿砂的载荷与计算工况 149
2. 3 有限元模型 152
2. 4 评估区域与衡准 152
2. 5 屈曲强度评估 153

第 1 章　总则

1.1　一般规定

1.1.1 本指南适用于船长 150 米及以上，整个货舱区域内通常建有单甲板、两道纵向舱壁和双层底、仅有中间货舱主要用于运输矿砂货物的无限航区、自航式矿砂船船体结构强度直接计算评估。矿砂船典型横剖面图见 1.1.1。

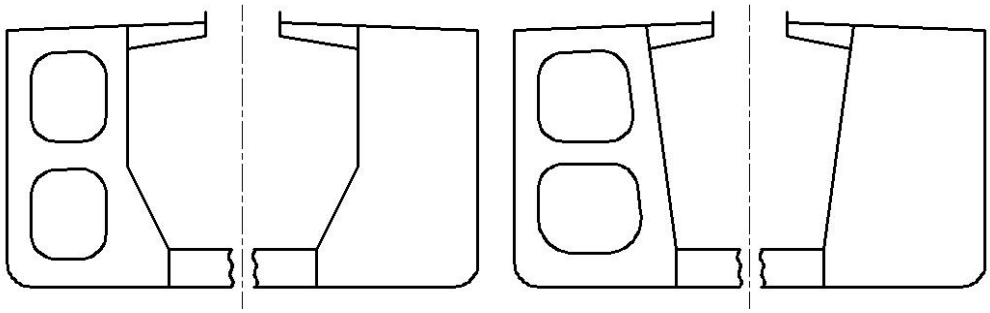


图 1.1.1 矿砂船典型横剖面

1.1.2 本指南给出了矿砂船货舱区域和机舱区域主要构件的强度评估要求，舱段屈服强度、细化强度、屈曲强度、整船的强度评估方法和含水矿砂的舱段补充要求。

1.1.3 货舱区域直接强度分析见第 3 章，整船有限元强度评估见第 5 章，机舱结构强度直接计算见附录 1，装载含水矿砂时舱段有限元计算附加工况见附录 2。

1.1.4 直接计算可采用适用的通用程序，如使用非通用程序时，送审单位还应提供所采用的计算机程序可靠性说明的文件。

1.1.5 应将直接计算技术文件提交 CCS，供相关图纸审核时参考。直接计算技术文件应包括：

（1）所使用的图纸清单；

（2）结构有限元模型的详细描述；

（3）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）板格的屈曲分析和结果；

（11）显示满足或不满足强度标准的结果表格输出；

（12）必要时，对结构的建议修改方案，包括修改后的应力评估和屈曲特性。

1.2 定义

1.2.1 单位制定义

质量：吨（t）；

长度：米(m)；

时间：秒(s)；

力：牛顿(N)或千牛顿(kN)；

应力：牛顿/毫米 ^{2}（N/mm^2）；

压力：千牛/米 ^{2}（kN/m^2）。

1.2.2 符号规定

L——规范船长，m；与 CCS《钢质海船入级规范》（以下简称《钢规》）第 2 篇第 1 章第 1 节的定义相同；

B——型宽，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；

T——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——船舶按其设计在营运中以最深航行吃水、螺旋桨最大转速（RPM）和发动机的响应最大持续功率（MCR）所保持的最大航速，，kn；

g——重力加速度，$g=9.81m/s^2$；

C_w——波浪系数,按下式计算：

$$C_w = 10.75 - \left(\frac{300-L}{100}\right)^{1.5}，对于 90 \le L \le 300 的船舶$$

$$C_w = 10.75，对于 300 < L \le 350 的船舶$$

$$C_w = 10.75 - \left(\frac{L-350}{150}\right)^{1.5}，对于 350 < L \le 500 的船舶$$

ρ——海水密度，$\rho=1.025t/m^3$；

σ_{vm}——Von Mises 应力（N/mm²），$\sigma_{vm}=\sqrt{\sigma_x{}^2+\sigma_y{}^2-\sigma_x\sigma_y+3\tau_{xy}{}^2}$；

σ_x——单元 x 方向的应力（N/mm²）；

σ_y——单元 y 方向的应力（N/mm²）；

τ_{xy}——单元 xy 平面的剪应力（N/mm²）；

σ_l——船体梁纵向的应力（N/mm²）；

σ_a——梁单元轴向应力（N/mm²）；

σ_w——船体梁横向或垂向的应力（N/mm²）；

τ——腹板总深度的平均剪应力（N/mm²）；

K——材料系数，见《钢规》第 2 篇第 1 章第 3 节；

E——材料弹性模量。对钢材，$E = 2.06\times10^5$ N/mm²；

v——材料泊松比。对钢材，v= 0.3；

T_{LC}：所考虑载荷工况的船中处的吃水，m。

f_T：某一装载条件下吃水与结构吃水的比，取为：

$$f_T=\frac{T_{LC}}{T_{SC}}$$，但不小于 0.5。

f_p：设计载荷设定所对应的强度评估系数，取为：

$f_p = 1.0$，对于航行工况设计载荷设定

$f_p = 0.4$ ，对于在港设计载荷设定

R：船舶摇摆运动中心的垂向坐标，m，取为：

$$R=\min\left(\frac{D}{4}+\frac{T_{LC}}{2},\frac{D}{2}\right)$$

1.2.3 船舶的几何尺寸、运动、加速度和载荷系根据下列右向坐标系统，见图 1.2.3。

(1) 原点：船舶对称纵剖面、规范船长 L 尾端和基线的相交处；

(2) X 轴：纵向轴，向前为正；

(3) Y 轴：横向轴，向左为正；

(4) Z 轴：垂向轴，向上为正。

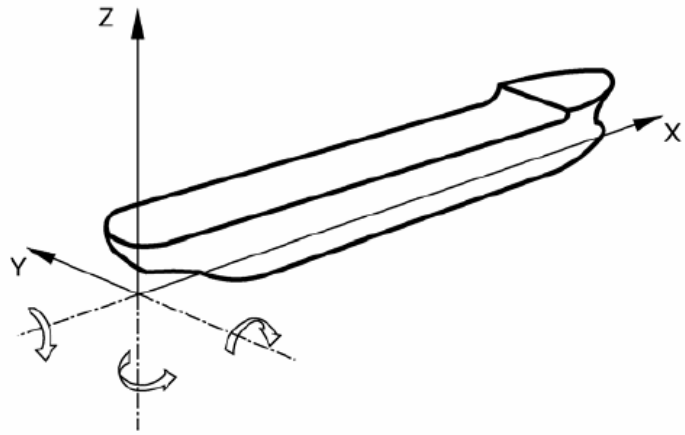


图 1.2.3 参照坐标系

1.2.4 船舶运动规定如下，见图 1.2.4。

(1) 纵荡（surge）为沿 x 轴正向的平动，向前为正；

(2) 横荡（sway）为沿 y 轴正向的平动，向左舷为正；

(3) 垂荡（heave）为沿 z 轴正向的平动，向上为正；

(4) 横摇（roll）是对通过重心的纵轴的正向旋转，右舷向下，左舷向上为正；

(5) 纵摇（pitch）是对通过重心的横轴的正向旋转，艏向下，艉向上为正；

(6) 艏摇（yaw）是对通过重心的垂向轴的正向旋转，艏向左舷，艉向右舷为正。

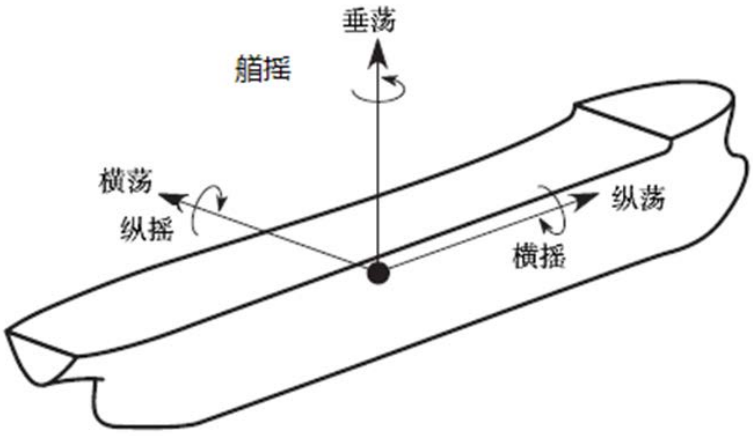


图 1.2.4 正向运动定义

1.2.5 船体梁载荷符号约定按以下要求，见图 1.2.5。

(1) 垂向弯矩 Msw 和 Mwv 在强力甲板产生拉应力（中拱弯矩）时为正，在底部产生拉应力（中垂弯矩）时为负。

(2) 垂向剪力 Qsw 和 Qwv 在所考虑的横剖面之后作用的合力向下或在所考虑的横剖面之前作用的合力向上时为正。

(3) 水平弯矩 Mwh 在右舷产生拉伸应力时为正，在左舷产生拉伸应力时为负。

(4) 扭矩 Mwt 在所考虑的横剖面之后合力矩沿绕 x 轴的负方向或在横剖面之前合力矩沿 x 轴的正方向时为正。

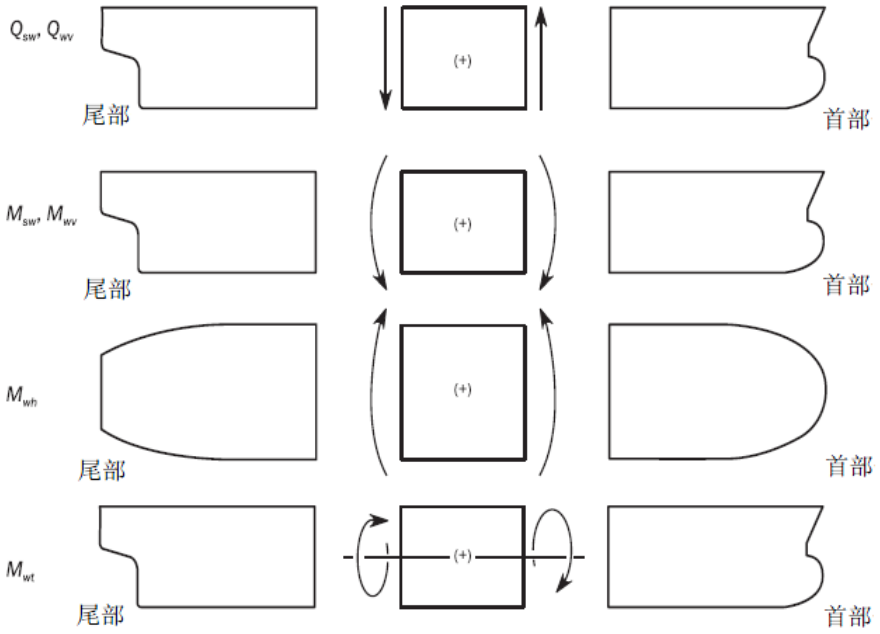


图 1.2.5 船体梁载荷符号约定

1.3 构件尺寸

1.3.1 除另有规定外，本指南直接计算中的构件指的是建造厚度，不考虑船东附加厚度。

第 2 章　载荷工况

2.1　一般要求

2.1.1 本章给出了用于矿砂船直接强度评估的设计载荷与装载工况。

2.1.2 强度评估指的是对载荷对应于 10^{-8} 概率水平的强度衡准。

2.1.3 强度评估的每一个设计载荷设定由一个静载荷工况（S）或者一个静+动载荷工况（S+D）组成，这里静载荷和动载荷基于所考虑的载荷工况。

2.1.4 载荷工况各载荷参数计算按以下要求进行：

（1）动载荷工况定义在本章 2.2；

（2）船体运动与加速度在本章 2.3；

（3）船体梁载荷在本章 2.4；

（4）外部载荷在本章 2.5；

（5）内部载荷在本章 2.6；

（6）装载工况在本章 2.7。

2.2　动载荷工况

2.2.1 以下等效设计波用于生成结构强度评估的动载荷工况。

2.2.1.1 HSM 载荷工况：

HSM-1 和 HSM-2：分别为垂向波浪弯矩在船中处最小和最大的迎浪等效设计波。

2.2.1.2 HSA 载荷工况：

HSA-1 和 HSA-2：分别为垂向加速度在艏部最大和最小的迎浪等效设计波。

2.2.1.3 FSM 载荷工况：

FSM-1 和 FSM-2：分别为垂向波浪弯矩在船中处最小和最大的随浪等效设计波。

2.2.1.4 BSR 载荷工况：

BSR-1P 和 BSR-2P：分别为波浪从左舷过来时横摇运动最小（此时左舷向下）和横摇运动最大（此时左舷向上）的横浪等效设计波。

BSR-1S 和 BSR-2S：分别为波浪从右舷过来时横摇运动最大（此时右舷向下）和横摇运动最小（此时右舷向上）的横浪等效设计波。

2.2.1.5 BSP 载荷工况：

BSP-1P 和 BSP-2P：分别为左舷船中水线处水动压力最大和最小的横浪等效设计波。

BSP-1S 和 BSP-2S：分别为右舷船中水线处水动压力最大和最小的横浪等效设计波。

2.2.1.6 OST 载荷工况：

OST-1P 和 OST-2P：分别为波浪从左舷过来时距船尾 0.25L 处扭矩最小和最大时的斜浪等效设计波。

OST-1S 和 OST-2S：分别为波浪从右舷过来时距船尾 0.25L 处扭矩最大和最小时的斜浪等效设计波。

2.2.1.7 OSA 载荷工况：

OSA-1P 和 OSA-2P：分别为波浪从左舷过来时纵摇加速度最小和最大时的斜浪等效设计波。

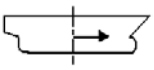
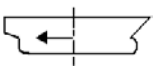
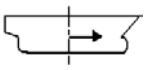
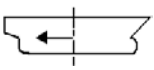
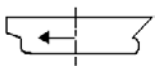
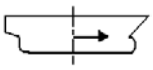
OSA-1S 和 OSA-2S：分别为波浪从右舷过来时纵摇加速度最大和最小时的斜浪等效设计波。

注 1： 1 和 2 对应每一个等效设计波最大或最小的主导载荷分量。

注 2：P 和 S 分别对应于上风舷为左舷和右舷。

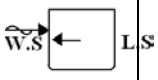
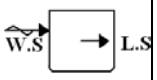
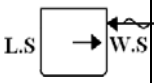
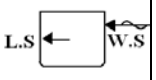
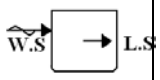
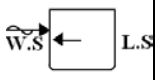
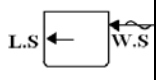
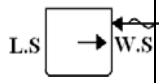
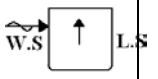
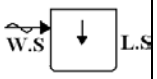
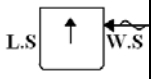
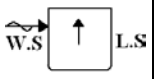
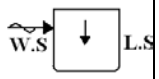
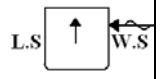
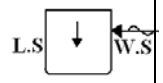
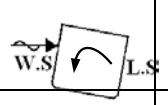
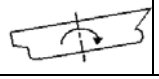
2.2.2 每一个动载荷工况的船舶响应和总体载荷见表 2.2.2.1~2.2.2.3。

强度评估中用于HSM、HSA和FSM载荷工况的船舶响应　　表2.2.2.1

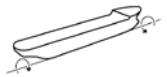
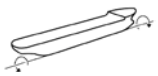
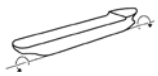
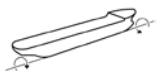
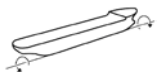
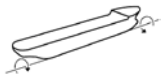
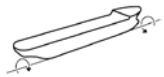
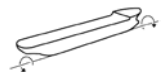
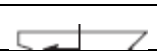
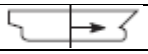
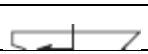
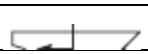
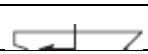
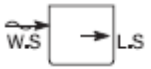
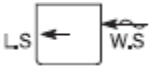
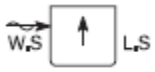
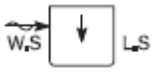
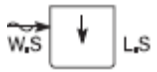
载荷工况	HSM-1	HSM-2	HSA-1	HSA-2	FSM-1	FSM-2
等效设计波	HSM		HSA		FSM	
浪向	迎浪		迎浪		随浪	
作用	垂向弯矩最大		垂向加速度最大		垂向弯矩最大	
垂向波浪弯矩	中垂	中拱	中垂	中拱	中垂	中拱
垂向波浪剪力	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部
水平波浪弯矩	-	-	-	-	-	-
波浪扭矩	-	-	-	-	-	-
纵荡	向艉	向艏	向艉	向艏	向艏	向艉
纵荡加速度						
横荡	-	-	-	-	-	-
横荡加速度	-	-	-	-	-	-
垂荡	向下	向上	向下	向上	-	-
垂荡加速度					-	-
横摇	-	-	-	-	-	-

横摇加速度	-	-	-	-	-	-
纵摇	艏向下	艏向上	艏向下	艏向上	艏向上	艏向下
纵摇加速度						

强度评估中用于BSR和BSP载荷工况的船舶响应 **表2.2.2.2**

载荷工况	BSR-1P	BSR-2P	BSR-1S	BSR-2S	BSP-1P	BSP-2P	BSP-1S	BSP-2S
等效设计波	BSR		BSR		BSP		BSP	
浪向	横浪				横浪			
作用	横摇最大				水线处压力最大			
垂向波浪弯矩	中垂	中拱	中垂	中拱	中垂	中拱	中垂	中拱
垂向波浪剪力	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部
水平波浪弯矩	右舷受拉	左舷受拉	左舷受拉	右舷受拉	右舷受拉	左舷受拉	左舷受拉	右舷受拉
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	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	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	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上
横摇加速度								
纵摇	-	-	-	-	艏向下	艏向上	艏向下	艏向上
纵摇加速度	-	-	-	-				

强度评估中用于 OST 和 OSA 载荷工况的船舶响应表 **2.2.2.3**

载荷工况	OST-1P	OST-2P	OST-1S	OST-2S	OSA-1P	OSA-2P	OSA-1S	OSA-2S
等效设计波	OST				OSA			
浪向	斜浪				斜浪			
作用	扭矩最大				纵摇加速度最大			
垂向波浪弯矩	中垂	中拱	中垂	中拱	中拱	中垂	中拱	中垂
垂向波浪剪力	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部
水平波浪弯矩	左舷受拉	右舷受拉	右舷受拉	左舷受拉	右舷受拉	左舷受拉	左舷受拉	右舷受拉
波浪扭矩								
纵荡	向艏	向艉	向艏	向艉	向艏	向艉	向艏	向艉
纵荡加速度								
横荡	-	-	-	-	向左舷	向右舷	向右舷	向左舷
横荡加速度	-	-	-	-				
垂荡	向下	向上	向下	向上	向上	向下	向上	向下
垂荡加速度								
横摇	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上
横摇加速度								
纵摇	艏向上	艏向下	艏向上	艏向下	艏向上	艏向下	艏向上	艏向下
纵摇加速度								

2.2.3 等效设计波的载荷组合系数 LCF，即总体载荷及惯性载荷分量的载荷组合系数定义见表 2.2.3.1~表 2.2.3.3。

强度评估中用于 HSM、HSA 和 FSM 载荷工况的载荷组合系数　　表 2.2.3.1

载荷组合		LCF	HSM-1	HSM-2	HSA-1	HSA-2	FSM-1	FSM-2
船体梁载荷	M_{WV}	C_{WV}	-1	1	-0.7	0.7	-0.4f_T-0.6	0.4f_T+0.6
	Q_{WV}	C_{QW}	-1.0f_{lp}	1.0f_{lp}	-0.6f_{lp}	0.6f_{lp}	-1.0f_{lp}	1.0f_{lp}
	M_{WH}	C_{WH}	0	0	0	0	0	0
	M_{WT}	C_{WT}	0	0	0	0	0	0
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	0.3-0.2f_T	0.2f_T-0.3	0.2	-0.2	0.2-0.4f_T	0.4f_T-0.2
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	-0.7	0.7	-0.4f_T -0.4	0.4f_T +0.4	0.15	-0.15
	gsinφ	C_{XG}	0.6	-0.6	0.4f_T+0.4	-0.4f_T-0.4	-0.2	0.2
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	0	0	0	0	0	0
	a_{roll-y}	C_{YR}	0	0	0	0	0	0
	gsinθ	C_{YG}	0	0	0	0	0	0
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	0.5f_T-0.15	0.15-0.5f_T	0.4f_T-0.1	0.1-0.4f_T	0	0
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0	0	0	0	0	0
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	-0.7	0.7	-0.4f_T-0.4	0.4f_T+0.4	0.15	-0.15

强度评估中用于BSR和BSP载荷工况的载荷组合系数　　表2.2.3.2

载荷组合		LCF	BSR-1P	BSR-2P	BSR-1S	BSR-2S
船体梁载荷	M_{WV}	C_{WV}	0.1-0.2f_T	0.2f_T -0.1	0.1-0.2f_T	0.2f_T -0.1
	Q_{WV}	C_{QW}	(0.1-0.2f_T) f_{lp}	(0.2f_T -0.1) f_{lp}	(0.1-0.2f_T) f_{lp}	(0.2f_T -0.1) f_{lp}
	M_{WH}	C_{WH}	1.2-1.1f_T	1.1f_T -1.2	1.1f_T -1.2	1.2-1.1 f_T
	M_{WT}	C_{WT}	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
	gsinφ	C_{XG}	0	0	0	0
横向加	a_{sway}	C_{YS}	0.2-0.2f_T	0.2f_T -0.2	0.2f_T -0.2	0.2-0.2f_T

速度	a_{roll-y}	C_{YR}	1	-1	-1	1
	gsinθ	C_{YG}	-1	1	1	-1
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	0.7-0.4f_T	0.4f_T-0.7	0.7-0.4f_T	0.4f_T-0.7
	a_{roll-z}	C_{ZR}	1	-1	1	-1
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0	0	0	0

载荷组合		LCF	BSP-1P	BSP-2P	BSP-1S	BSP-2S
船体梁载荷	M_{WV}	C_{WV}	0.3-0.8f_T	0.8f_T-0.3	0.3-0.8f_T	0.8f_T-0.3
	Q_{WV}	C_{QW}	(0.3-0.8f_T) f_{lp}	(0.8f_T-0.3) f_{lp}	(0.3-0.8f_T) f_{lp}	(0.8f_T-0.3) f_{lp}
	M_{WH}	C_{WH}	0.7-0.7f_T	0.7f_T -0.7	0.7f_T -0.7	0.7-0.7f_T
	M_{WT}	C_{WT}	0	0	0	0
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	0	0	0	0
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0.1-0.3f_T	0.3f_T -0.1	0.3f_T -0.1	0.1-0.3f_T
	gsinφ	C_{XG}	0.3f_T -0.1	0.1-0.3f_T	0.3f_T -0.1	0.1-0.3f_T
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	-0.9	0.9	0.9	-0.9
	a_{roll-y}	C_{YR}	0.3	-0.3	-0.3	0.3
	gsinθ	C_{YG}	-0.2	0.2	0.2	-0.2
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	1	-1	1	-1
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0.3	-0.3	-0.3	0.3
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0.1-0.3f_T	0.3f_T-0.1	0.1-0.3f_T	0.3f_T-0.1

强度评估中用于 OST 和 OSA 载荷工况的载荷组合系数　　表 2.2.3.3

载荷组合		LCF	OST-1P	OST-2P	OST-1S	OST-2S
船体梁载荷	M_{WV}	C_{WV}	-0.3-0.2f_T	0.3+0.2f_T	-0.3-0.2f_T	0.3+0.2f_T
	Q_{WV}	C_{QW}	(-0.35-0.2f_T)f_{lp}	(0.35+0.2f_T)f_{lp}	(-0.35-0.2f_T)f_{lp}	(0.35+0.2f_T)f_{lp}
	M_{WH}	C_{WH}	-0.9	0.9	0.9	-0.9
	M_{WT}	C_{WT}	-$f_{lp\text{-}OST}$	$f_{lp\text{-}OST}$	$f_{lp\text{-}OST}$	-$f_{lp\text{-}OST}$
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	0.1f_T -0.15	0.15-0.1f_T	0.1f_T -0.15	0.15-0.1f_T
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0.7-0.3f_T	0.3f_T -0.7	0.7-0.3f_T	0.3f_T -0.7

	gsinφ	C_{XG}	0.2f_T-0.45	0.45-0.2f_T	0.2f_T-0.45	0.45-0.2f_T
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	0	0	0	0
	a_{roll-y}	C_{YR}	0.4f_T-0.25	0.25-0.4f_T	0.25-0.4f_T	0.4f_T-0.25
	gsinθ	C_{YG}	0.1-0.2f_T	0.2f_T-0.1	0.2f_T-0.1	0.1-0.2f_T
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	0.2f_T-0.05	0.05-0.4f_T	0.2f_T-0.05	0.05-0.4f_T
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0.4f_T-0.25	0.25-0.4f_T	0.25-0.4f_T	0.4f_T-0.25
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0.7-0.3f_T	0.3f_T-0.7	0.7-0.3f_T	0.3f_T-0.7

载荷组合		LCF	OSA-1P	OSA-2P	OSA-1S	OSA-2S
船体梁载荷	M_{WV}	C_{WV}	0.75-0.5f_T	-0.75+0.5f_T	0.75-0.5f_T	-0.75+0.5f_T
	Q_{WV}	C_{QW}	(0.6-0.4f_T) f_{lp}	(-0.6+0.4f_T) f_{lp}	(0.6-0.4f_T) f_{lp}	(-0.6+0.4f_T) f_{lp}
	M_{WH}	C_{WH}	0.55+0.2f_T	-0.55-0.2f_T	-0.55-0.2f_T	0.55+0.2f_T
	M_{WT}	C_{WT}	-f_{lp-OSA}	f_{lp-OSA}	f_{lp-OSA}	-f_{lp-OSA}
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	0.1f_T -0.45	0.45-0.1f_T	0.1f_T -0.45	0.45-0.1f_T
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	1.0	-1.0	1.0	-1.0
	gsinφ	C_{XG}	-1.0	1.0	-1.0	1.0
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	-0.2 -0.1f_T	0.2+0.1f_T	0.2+0.1f_T	-0.2 -0.1f_T
	a_{roll-y}	C_{YR}	0.3-0.2f_T	0.2f_T -0.3	0.2f_T -0.3	0.3-0.2f_T
	gsinθ	C_{YG}	0.1f_T-0.2	0.1-0.2f_T	0.2-0.1f_T	0.1f_T-0.2
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	-0.2f_T	0.2f_T	-0.2f_T	0.2f_T
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0.3-0.2f_T	0.2f_T-0.3	0.2f_T-0.3	0.3-0.2f_T
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	1.0	-1.0	1.0	-1.0

表中，

f_{xL} ：载荷点的 x 坐标与 L 的比值，取为：

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

f_T ：某一装载工况吃水与结构吃水的比，定义见第 1 章第 2 节。

f_{lp} ：和沿船长纵向位置相关的系数，取为：

$f_{lp}=1.0$ ，对于 $x/L\le 0.5$

$f_{lp} = -1.0$，对于 $x/L > 0.5$

$f_{lp\text{-}OST}$: OST 工况的扭矩纵向分布系数，取为：

$f_{lp\text{-}OST} = 5f_{xL}$，对于 $x/L < 0.2$

$f_{lp\text{-}OST} = 1.0$，对于 $0.2 \le x/L < 0.4$

$f_{lp-OST} = -7.6f_{xL} + 4.04$，对于 $0.4 \le x/L < 0.65$

$f_{lp-OST} = -0.9$，对于 $0.65 \le x/L < 0.85$

$f_{lp-OST} = 6f_{xL} - 6$，对于 $0.85 \le x/L$

$f_{lp\text{-}OSA}$：OSA 工况的扭矩纵向分布系数，取为：

$f_{lp-OSA} = -(0.2 + 0.3f_T)$，对于 $x/L < 0.4$

$f_{lp-OSA} = (0.2 + 0.3f_T)(11.5f_{xL} - 5.6)$，对于 $0.4 \le x/L < 0.6$

$f_{lp-OSA} = 1.3(0.2 + 0.3f_T)$，对于 $0.6 \le x/L$

2.3 船舶运动和加速度

2.3.1 船舶运动

2.3.1.1 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，(º)，取为：

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

式中：

f_{BK}：取为：

f_{BK} = 1.2，无舭龙骨的船舶

f_{BK} = 1.0，有舭龙骨的船舶

k_r：所考虑装载工况的横摇回转半径，m，除非在装载手册中提供，否则应取表 2.3.1.1 中的值。

GM：所考虑装载工况的初稳性高度，除非在装载手册中提供，否则应取表 2.3.1.1 中的值。

K_r 值和 GM 值的建议值 **表 2.3.1.1**

装载条件(1)		T_{LC}	k_r	GM
满载工况	均匀轻货	T_{SC}	0.25B	0.12B
	均匀重货		0.25B	0.25B
重压载工况		T_{BAL-H}	0.40B	0.25B
正常压载工况		T_{BAL}	0.40B	0.33B

（1） 对于吃水大于等于 0.9T_{SC} 的多港装载工况，k_r 值和 GM 值除非在装载手册中提供，否则应从最适当的满载工况中选取。

（2） 对于吃水在 T_{BAL-H} 和 0.9T_{SC} 间的多港装载工况，k_r 值和 GM 值除非在装载手册中提供，否则应根据实际的吃水由重压载工况和最适当的满载工况线性插值得到。

（3） 对于吃水小于 T_{BAL-H} 的多港装载工况，k_r 值和 GM 值应取重压载工况所采用的值。

2.3.1.2 纵摇运动

纵摇周期 T_φ，s，取为：

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

这里：

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

纵摇角 φ，(°)，取为：

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

2.3.2 船舶重心处加速度

2.3.2.1 加速度参数

a 船舶加速度参数，取为：

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

2.3.2.2 纵荡加速度

由纵荡产生的纵向加速度，m/s^2，取为：

$$a_{surge} = 0.2\, f_p a_0 g$$

2.3.2.3 横荡加速度

由横荡产生的横向加速度，m/s2，取为：

$$a_{sway} = 0.3 f_p a_0 g$$

2.3.2.4 垂荡加速度

由垂荡产生的垂向加速度，m/s^2，取为：

$$a_{heave} = f_p a_0 g$$

2.3.2.5 横摇角加速度

横摇角加速度，a_{roll}， rad/s^2，取为：

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

式中：

θ：采用 f_p 等于 1.0 计算的横摇角

2.3.2.6 纵摇角加速度

纵摇角加速度，a_{pitch}， rad/s^2，取为：

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

式中：

φ：采用 f_p 等于 1.0 计算的纵摇角

2.3.3 用于动载荷工况的加速度

2.3.3.1 纵向加速度

用于每个动载荷工况的任意一点的纵向加速度，m/s^2，取为：

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

2.3.3.2 横向加速度

用于每个动载荷工况的任意一点的横向加速度，m/s^2，取为：

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

2.3.3.3 垂向加速度

用于每个动载荷工况的任意一位置处的垂向加速度，m/s^2，取为：

$$a_Z = C_{ZH} a_{heave} + C_{ZR} a_{roll} y - C_{ZP} a_{pitch}\left(x - 0.45L\right)$$

2.3.4 加速度包络值

2.3.4.1 纵向加速度

任意位置处的纵向加速度包络值，$a_{x\text{-}env}$，m/s²，取为：

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

式中：

$a_{pitch\text{-}x}$：由纵摇产生的纵向加速度，m/s²

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

2.3.4.2 横向加速度

任意位置处的横向加速度包络值，$a_{y\text{-}env}$，m/s²，取为：

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

式中：

$a_{roll\text{-}y}$：由横摇产生的横向加速度，m/s²

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

2.3.4.3 垂向加速度

任意位置处的纵向加速度包络值，$a_{z\text{-}env}$，m/s²，取为：

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

式中：

$a_{pitch\text{-}z}$：由纵摇产生的垂向加速度，m/s²

$$a_{pitch-z} = a_{pitch}\left(x - 0.45L\right)$$

$a_{roll\text{-}z}$：由横摇产生的垂向加速度，m/s²

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

2.4 船体梁载荷

2.4.1 通则

2.4.1.1 用于静（S）设计载荷设定的船体梁载荷应取自[2.4.2]定义的静水载荷。

2.4.1.2 用于静加动（S+D）设计载荷设定的船体梁载荷应由每一个动载荷工况获得，应

取为[2.4.2]定义的静水载荷和[2.4.3]定义的动载荷之和。

2.4.2 船体梁垂向静水载荷

2.4.2.1 设计者应提供航行工况和在港的许用静水弯矩和许用静水剪力，在港的中拱或中垂许用静水弯矩/剪力应不小于航行工况的中拱或中垂许用静水弯矩/剪力加上 2.4.3.1 和 2.4.3.2 所规定的波浪弯矩/剪力的 50%。在设计初期，如没有确切的数值时，航行工况的许用静水弯矩可按 2.4.2.2 进行计算。

2.4.2.2 中拱和中垂的最小静水弯矩值应 可按以下公式计算。

中拱状态：

$$M_{sw-h-min} = f_{sw}\left(171C_wL^2B(C_B+0.7)10^{-3} - M_{wv-h-mid}\right)$$

中垂状态：

$$M_{sw-s-min} = -0.85\,f_{sw}\left(171C_wL^2B(C_B+0.7)10^{-3} + M_{wv-s-mid}\right)$$

式中：

$M_{wv\text{-}h\text{-}mid}$：用于强度评估的中拱状态垂向波浪弯矩，定义见[2.4.3.1]，f_p 和 f_m 取 1.0。

$M_{wv\text{-}s\text{-}mid}$：用于强度评估的中垂状态垂向波浪弯矩，定义见[2.4.3.1]，f_p 和 f_m 取 1.0。

f_{sw}:沿船长的分布系数，见图 2.4.2.2，取为：

f_{sw} = 0.0，对于 $x \le 0$，

f_{sw} = 0.15，对于 $x = 0.1L$，

f_{sw} = 1.0，对于 $0.3L \le x \le 0.7L$，

f_{sw} = 0.15，对于 $x = 0.9L$，

f_{sw} = 0.0，对于 $x \ge L$

位于其间的 f_{sw} 值通过线性插值得到。

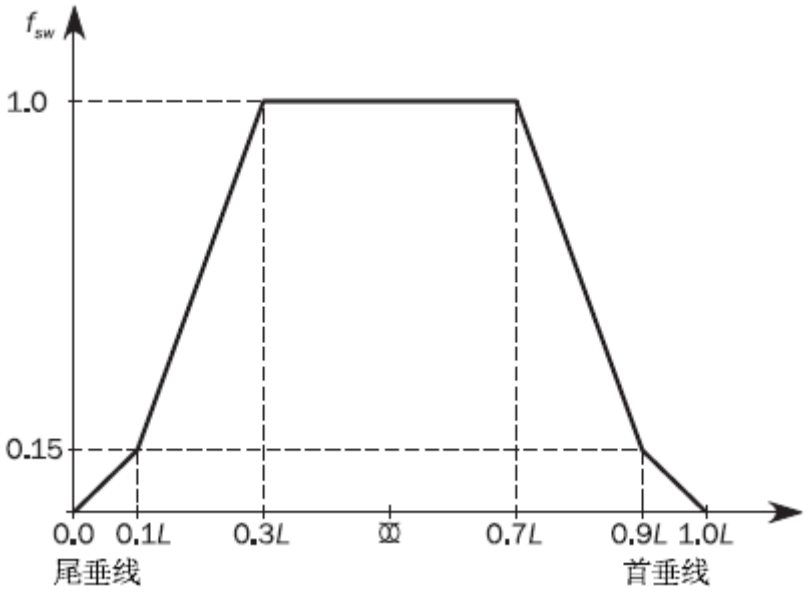


图 2.4.2.2 分布系数 f_{sw}

2.4.3 船体梁动载荷

2.4.3.1 任一纵向位置的垂向波浪弯矩，kNm，应取为：

中拱状态：

$$M_{wv-h} = 0.19 f_{nl-vh} f_m f_p C_w L^2 B C_B$$

中垂状态：

$$M_{wv-s} = -0.19 f_{nl-vs} f_m f_p C_w L^2 B C_B$$

式中：

f_{nl-vh}：对中拱考虑非线性影响的系数，取为：

f_{nl-vh} = 1.0 对强度评估

f_{nl-vs}：对中垂考虑非线性影响的系数，取为：

$$f_{nl-vs} = 0.58\frac{(C_B + 0.7)}{C_B}$$

f_m：垂向波浪弯矩沿船长的分布系数，取为：

f_m = 0.0 ，对于 $x \le 0$

f_m = 1.0 ，对于 $0.4L \le x \le 0.65L$

f_m = 0.0 ，对于 $x \ge L$

位于其间的 f_m 之值通过线性插值得到（见图 2.4.3.1）

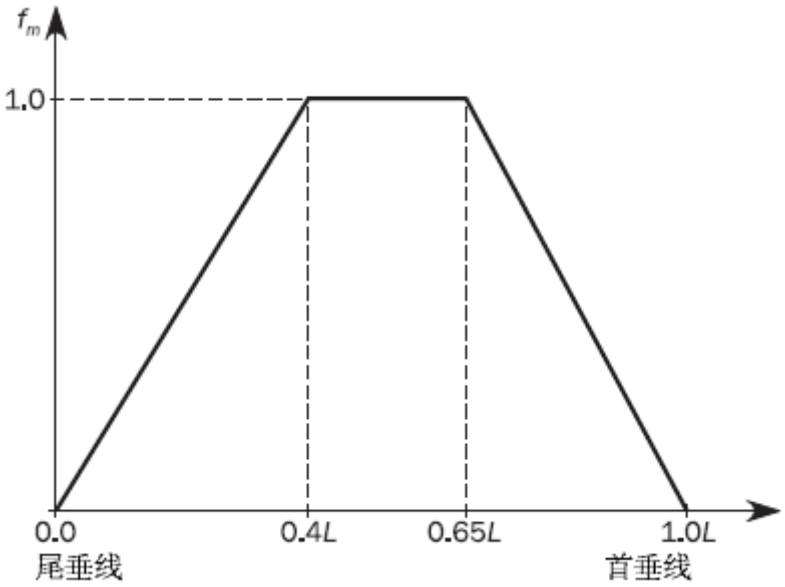


图 2.4.3.1 分布系数 f_m

2.4.3.2 任意纵向位置的垂向波浪剪力，kN，取为：

$$Q_{wv-pos} = 0.52 f_{q-pos} f_p C_w LBC_B$$

$$Q_{wv-neg} = -0.52 f_{q-neg} f_p C_w LBC_B$$

式中：

$f_{q\text{-}pos}$：正波浪剪力沿船长的分布系数，取为：

$f_{q\text{-}pos}$ = 0.0，对于 $x \le 0$

$f_{q\text{-}pos}$ = $0.92 f_{nl-h}$，对于 $0.2L \le x \le 0.3L$

$f_{q\text{-}pos}$ = 0.7，对于 $0.4L \le x \le 0.6L$

$f_{q\text{-}pos}$ = $1.0 f_{nl-s}$，对于 $0.7L \le x \le 0.85L$

$f_{q\text{-}pos}$ = 0.0，对于 $x \ge L$

位于其间的 $f_{q\text{-}pos}$ 之值通过线性插值得到（见图 2.4.3.2）。

$f_{q\text{-}neg}$：负波浪剪力沿船长的分布系数，取为：

$f_{q\text{-}neg}$ = 0.0，对于 $x \le 0$

$f_{q\text{-}neg}$ = $0.92 f_{nl-s}$，对于 $0.2L \le x \le 0.3L$

$f_{q\text{-}neg}$ = 0.7，对于 $0.4L \le x \le 0.6L$

$fq\text{-}neg$ = $1.0 f_{nl-h}$，对于 $0.7L \le x \le 0.85L$

$fq\text{-}neg = 0.0$，对于 $x \geq L$

位于其间的 $f_{q\text{-}neg}$ 之值通过线性插值得到（见图 2.4.3.3）。

$f_{nl\text{-}vh}$ 和 $f_{nl\text{-}vs}$：[2.4.3.1]定义的考虑非线性影响的系数。

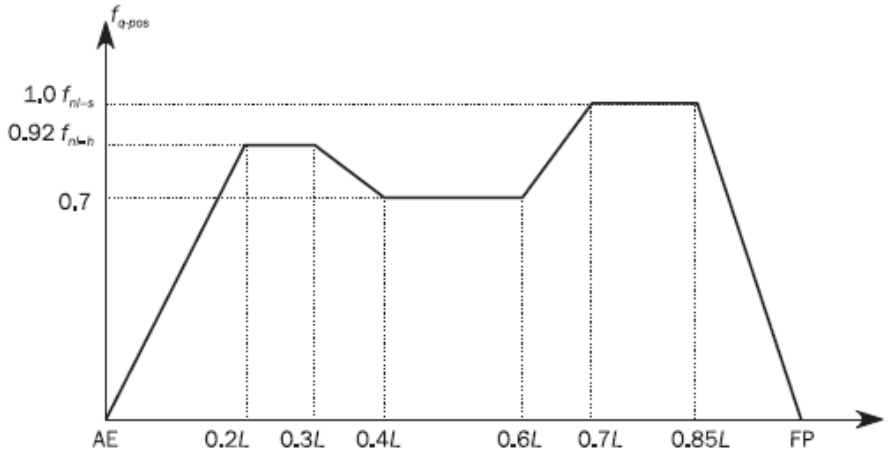


图 2. 4. 3. 2 正垂向剪力分布系数 $f_{q\text{-}pos}$

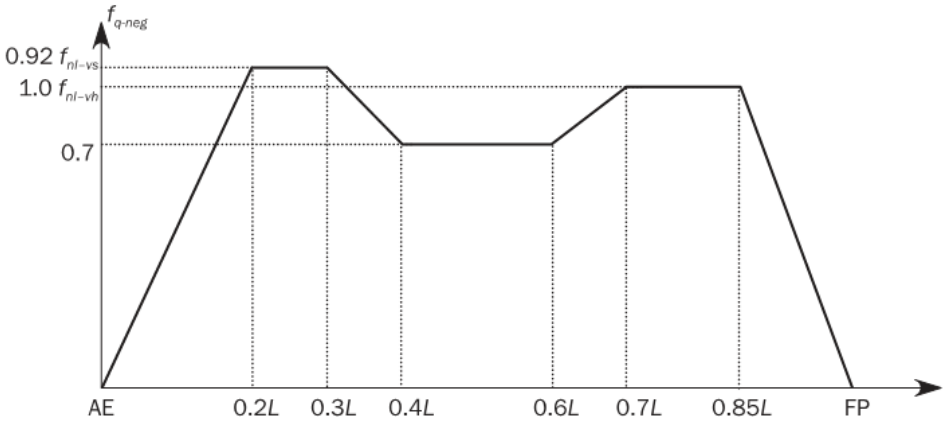


图 2.4.3.3 负垂向剪力分布系数 $f_{q\text{-}neg}$

2.4.3.3 任一纵向位置的水平波浪弯矩 M_{wh}，kNm，应取为：

$$M_{wh} = f_{nlh} f_p \left(0.31 + \frac{L}{2800}\right) f_m C_w L^2 T_{LC} C_B$$

式中：

f_{nlh}：非线性影响系数，取为：

f_{nlh}= 0.9，对于强度评估

f_m： [2.4.3.1]定义的分布系数。

2.4.3.4 任一纵向位置相对于基线的波浪扭矩 M_{wt}，kNm，应取为：

$$M_{wt} = f_p\left(M_{wt1} + M_{wt2}\right)$$

式中：

$$M_{wt1} = 0.4 f_{t1} C_w \sqrt{\frac{L}{T_{LC}}} B^2 D C_B$$

$$M_{wt2} = 0.22 f_{t2} C_w L B^2 C_B$$

f_{t1}, f_{t2}：分布系数，取为：

f_{t1}=0，对于 $x < 0$

$f_{t1} = \left|\sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right)\right|$，对于 $0 \le x \le L$

f_{t1}=0，对于 $x > L$

f_{t2}=0，对于 $x < 0$

$f_{t2} = \sin^2\left(\frac{\pi x}{L}\right)$，对于 $0 \le x \le L$

f_{t2}=0，对于 $x > L$

2.4.4 动载荷工况的船体梁载荷

2.4.4.1 应用于本章第 2.2 节定义的每一个动载荷工况的垂向波浪弯矩 $M_{wv\text{-}LC}$，kNm，定义见表 2.4.4.1。

应用于动载荷工况的垂向波浪弯矩　　表 2.4.4.1

载荷组合系数	$M_{wv\text{-}LC}$
$C_{WV} \ge 0$	$f_\beta C_{WV} M_{wv-h}$
$C_{WV} < 0$	$f_\beta C_{WV} \lvert M_{wv-s} \rvert$

式中：

f_β：浪向修正系数，取为：

f_β=0.8 用于极限波浪载荷设计载荷设定的 BSR 和 BSP 载荷工况

f_β=1.0 用于极限波浪载荷设计载荷设定的 HSM、HAS、FSM、OST 和 OSA 载荷工况

C_{WV}：垂向波浪弯矩的动载荷组合系数，取为本章第 2.2 节给出的值。

$M_{wv\text{-}h}$, $M_{wv\text{-}s}$：考虑了所考虑设计载荷设定的垂向中拱波浪弯矩和中垂波浪弯矩，定义见[2.4.3.1]。

2.4.4.2 应用于本章第 2.2 节定义的每一个动载荷工况的垂向波浪剪力 $Q_{wv\text{-}LC}$，kN，定义见表 2.4.4.2。

应用于动载荷工况的垂向波浪剪力　　表 2.4.4.2

载荷组合系数	$Q_{wv\text{-}LC}$
$C_{QW} \geq 0$	$f_\beta C_{QW} Q_{wv-pos}$
$C_{QW} < 0$	$f_\beta C_{QW} \lvert Q_{wv-neg} \rvert$

式中：

f_β：浪向修正系数，取值按 2.4.4.1。

C_{QW}：垂向波浪剪力的动载荷组合系数，取为本章第 2.2 节给出的值。

$Q_{wv\text{-}pos}$, $Q_{wv\text{-}neg}$：考虑了所考虑设计载荷设定的垂向波浪正剪力和垂向波浪负剪力，定义见[2.4.3.2]。

2.4.4.3 应用于本章第 2.2 节定义的每一个动载荷工况的水平波浪弯矩 $M_{wh\text{-}LC}$，kNm，取为：

$$M_{wh-LC} = f_\beta C_{WH} M_{wh}$$

式中：

f_β：浪向修正系数，取值按 2.4.4.1。

C_{WH}：水平波浪弯矩的动载荷组合系数，取为本章第 2.2 节给出的值。

M_{wh}：考虑了适当的设计载荷设定的水平波浪弯矩，定义见[2.4.3.3]。

2.4.4.4 应用于第 4 章第 2 节定义的每一个动载荷工况的波浪扭矩 $M_{wt\text{-}LC}$，kNm，取为：

$$M_{wt-LC} = f_\beta C_{WT} M_{wt}$$

式中：

f_β：浪向修正系数，取值按 2.4.4.1。

C_{WH}：波浪扭矩的动载荷组合系数，取为本章第 2.2 节给出的值。

M_{wt}：考虑了适当的设计载荷设定的波浪扭矩，定义见[2.4.3.4]

2.5　外部载荷

2.5.1 海水总压力

2.5.1.1 用于静（S）设计载荷设定的外板上任意一点的外部压力 P_{ex}，kN/m^2，取为：

$P_{ex} = P_S$，但不小于 0。

2.5.1.2 用于静+动（S+D）设计载荷设定的外板上任意一点的外部总压力 P_{ex}，kN/m²，应由每一个动载荷工况得到，取为：

$$P_{ex} = P_S + P_W$$，但不小于 0。

式中：

P_S：静水压力，kN/m²，定义见[2.5.2]。

P_W：水动压力，kN/m²，定义见[2.5.3]。

2.5.2 静水压力

2.5.2.1 任意一点的静水压力，P_S，kN/m²，应从表 2.5.2.1 中得到，同时参见图 25.2.1。

静水压力 P_S **表 2.5.2.1**

位置	静水压力，P_S，kN/m²
$z \le T_{LC}$	$\rho g(T_{LC} - z)$
$z > T_{LC}$	0

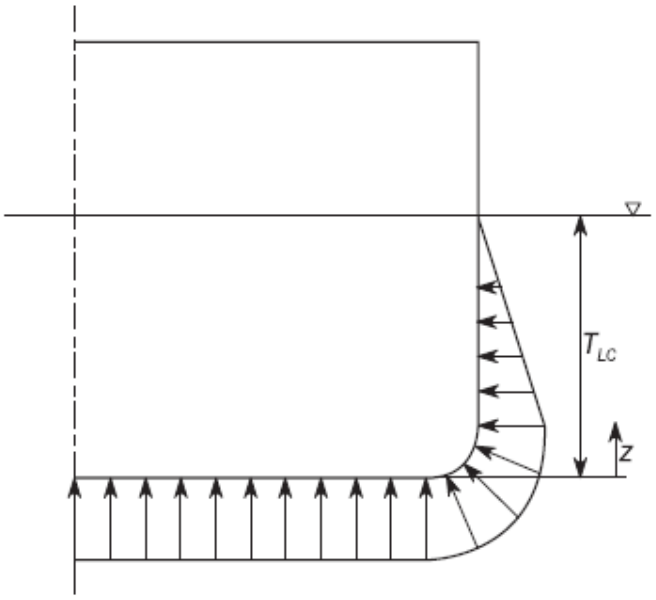


图 2.5.2.1 静水压力，P_S

2.5.3 海水外部动压力

2.5.3.1 HSM 载荷工况的水动压力

用于 HSM-1 和 HSM-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m²，应从表 2.5.3.1 中得到，同时参见图 2.5.3.1 和图 2.5.3.2。

用于 HSM 载荷工况的水动压力 **表 2.5.3.1**

	水动压力，kN/m²

载荷工况	$z \le T_{LC}$	$T_{LC} < z \le h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
HSM-1	$P_W = \max(-P_{HS}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0$
HSM-2	$P_W = \max(P_{HS}, \rho g(z - T_{LC}))$		

式中：

$P_{W,WL}$： 所考虑动载荷工况水线处的水动压力，kN/m^2。

$P_{W,WL} = P_W$ ， $z = T_{LC}$ 时。

h_W： 等效于水线处压力的水压头，m，取为：

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

$$P_{HS} = f_p f_{nl} f_h k_a k_p f_{yz} C_w \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{nl}：非线性影响系数，取为：

- 对于极限海况设计载荷设定

f_{nl} = 0.7，在 f_{xL}= 0.0 处

f_{nl} = 0.9，在 f_{xL}= 0.3 处

f_{nl} = 0.9，在 f_{xL}= 0.7 处

f_{nl} = 0.6，在 f_{xL}= 1.0 处

中间值由线性插值获得。

f_{yz}：周长分布系数，取为：

$$f_{yz} = \frac{z}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

f_{yB}：载荷计算点 Y 坐标与 B_x 的比，取为：

$f_{yB} = 0.0$，但不大于 1.0

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

f_{yB1}：载荷计算点 Y 坐标与 B 的比，取为：

$f_{yB} = \frac{|2y|}{B}$，但不大于 1.0。

B_x：所考虑横剖面在水线处的型宽，m。

f_h：系数，取为：

$$f_h = 3.0(1.21 - 0.66 f_T)$$

k_a：沿船舶纵向的幅值系数，取为：

$$k_a = (0.5 + f_T)\left\{\left(3 - 2\sqrt{f_{yB}}\right) - \frac{20}{9} f_{xL}\left(7 - 6\sqrt{f_{yB}}\right)\right\} + \frac{2}{3}(1 - f_T) \quad ，对于\ f_{xL} < 0.15$$

$$k_a = 1.0 \quad ，对于\ 0.15 \le f_{xL} < 0.7$$

$$k_a = 1 + (f_{xL} - 0.7)\left\{\left(\frac{40}{3} f_T - 5\right) + 2(1 - f_{yB})\left[\frac{18}{C_B} f_T (f_{xL} - 0.7) - 0.25(2 - f_T)\right]\right\}，对于\ f_{xL} \ge 0.7$$

λ：动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.6(1 + f_T)L$$

k_p：由表 2.5.3.2 得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

用于 HSM 载荷工况的 k_p 值　　表 2.5.3.2

f_{xL}	0	$0.3 - 0.1 f_T$	$0.35 - 0.1 f_T$	$0.8 - 0.2 f_T$	$0.9 - 0.2 f_T$	1.0
k_p	$-0.25 f_T (1 + f_{yB})$	-1	1	1	-1	-1

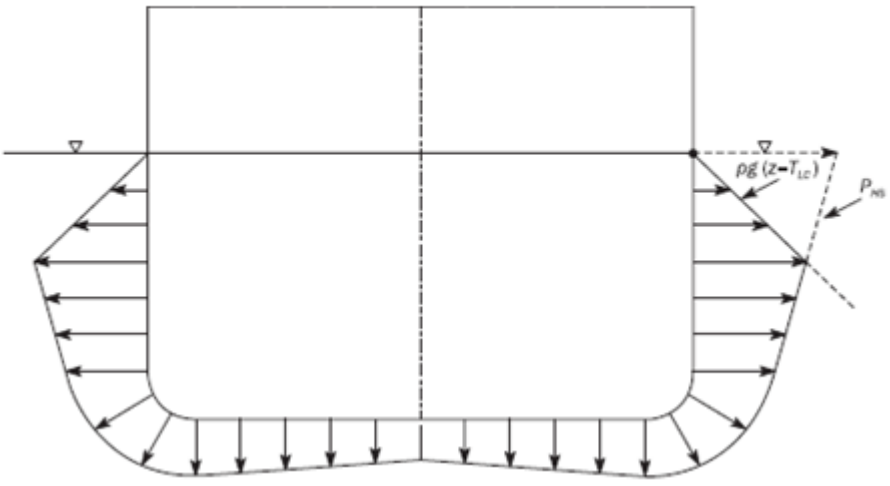


图 2.5.3.1 HSM-1，HSA-1 和 FSM-1 载荷工况船中处动压力横向分布

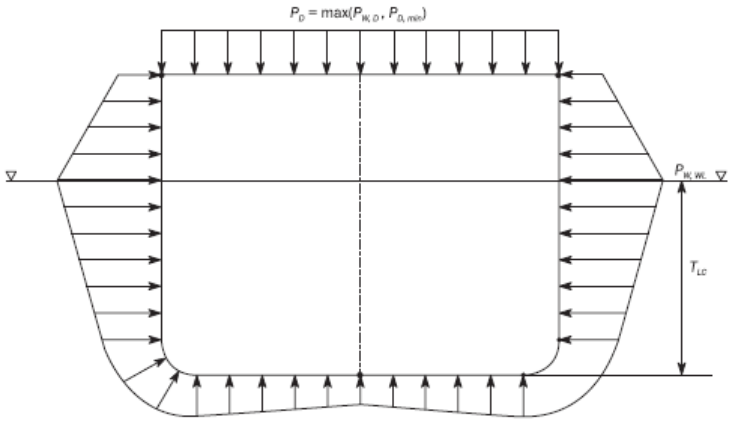


图 2.5.3.2 HSM-2，HSA-2 和 FSM-2 载荷工况船中处动压力横向分布

2.5.3.2 HSA 载荷工况的水动压力

用于 HSA-1 和 HSA-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m²，应从表 2.5.3.3 中得到，同时参见图 2.5.3.1 和图 2.5.3.2。

用于 HSA 载荷工况的水动压力　　表 2.5.3.3

	水动压力，kN/m²		
载荷工况	$z \le T_{LC}$	$T_{LC} < z \le h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
HSA-1	$P_W = \max(-P_{HS}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0$
HSA-2	$P_W = \max(P_{HS}, \rho g(z - T_{LC}))$		

式中：

$$P_{HS} = f_p f_{nl} f_h k_a k_p f_{yz} C_w \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{nl}：非线性影响系数，按 2.5.3.1 中的定义取值。

f_{yz}：周长分布系数，取为：

$$f_{yz} = \frac{z}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

f_h：系数，取为：

$$f_h = 2.4(1.21 - 0.66 f_T)$$

k_a：沿船舶纵向的幅值系数，按 2.5.3.1 中的定义取值。

λ：动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.6(1 + f_T)L$$

k_p：由表 2.5.3.4 得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

用于 HSA 载荷工况的 k_p 值　　表 2.5.3.4

f_{xL}	0	$0.3-0.1f_T$	$0.5-0.2f_T$	$0.8-0.2f_T$	$0.9-0.2f_T$	1.0
k_p	$1.5-f_T-0.5f_{yi}$	-1	1	1	-1	-1

2.5.3.3 FSM 载荷工况的水动压力

用于 FSM -1 和 FSM-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m²，应从表 2.5.3.5 中得到，同时参见图 2.5.3.1 和图 2.5.3.2。

用于 FSM 载荷工况的水动压力　　表 2.5.3.5

	水动压力，kN/m²		
载荷工况	$z \le T_{LC}$	$T_{LC} < z \le h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
FSM-1	$P_W = \max\left(-P_{FS}, \rho g\left(z-T_{LC}\right)\right)$	$P_W = P_{W,WL} - \rho g(z-T_{LC})$	$P_W = 0$
FSM-2	$P_W = \max\left(P_{FS}, \rho g\left(z-T_{LC}\right)\right)$		

:式中：

$$P_{FS} = f_p f_{nl} f_h k_a k_p f_{yz} C_w \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{nl}：非线性影响系数，取为：

$f_{nl} = 0.9$ 对于极限海况设计载荷设定

f_{yz}：周长分布系数，取为：

$$f_{yz} = \frac{z}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

f_h：系数，取为：

$$f_h = 2.6$$

k_a：沿船舶纵向的幅值系数，取为：

$k_a = 1+\left(3.75-2f_T\right)\left(1-5f_{xL}\right)\left(1-f_{yB}\right)$ ，对于 $f_{xL} < 0.2$

$k_a = 1.0$，对于 $0.2 \le f_{xL} < 0.9$

$k_a = 1+20\left(1-f_{yB}\right)\left(f_{xL}-0.9\right)$，对于 $f_{xL} \ge 0.9$

λ：动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.6\left(1+2/3\, f_T\right)L$$

k_p：由表 2.5.3.6 得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

用于 FSM 载荷工况的 k_p 值　　表 2.5.3.6

f_{xL}	0	$0.35-0.1f_T$	$0.5-0.2f_T$	0.75	0.8	1.0
k_p	$-0.75-0.25f_{yB}$	-1	1	1	-1	$-0.75-0.25f_{yB}$

2.5.3.4 BSR 载荷工况的水动压力

用于 BSR -1 和 BSR-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m²，应从表 2.5.3.7 中得到，同时参见图 2.5.3.3 和图 2.5.3.4。

用于 BSR 载荷工况的水动压力　　表 2.5.3.7

	水动压力，kN/m²		
载荷工况	$z \le T_{LC}$	$T_{LC} < z \le h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
BSR-1P	P_W =max (P_{BSR} , □$g(z-T_{LC})$)	$P_W = P_{W,WL}$ -□$g(z-T_{LC})$	$P_W = 0$
BSR-2P	P_W = max (-P_{BSR} , □$g(z-T_{LC})$)		
BSR-1S	P_W = max (P_{BSR} , □$g(z-T_{LC})$)		
BSR-2S	P_W = max (-P_{BSR} , □$g(z-T_{LC})$)		

式中：

对于 BSR-1P 和 BSR-2P，

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

对于 BSR-1S 和 BSR-2S，

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

f_{nl}：非线性影响系数，取为 $f_{nl} = 1.0$

λ：动载荷工况的波长，m，取为：

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

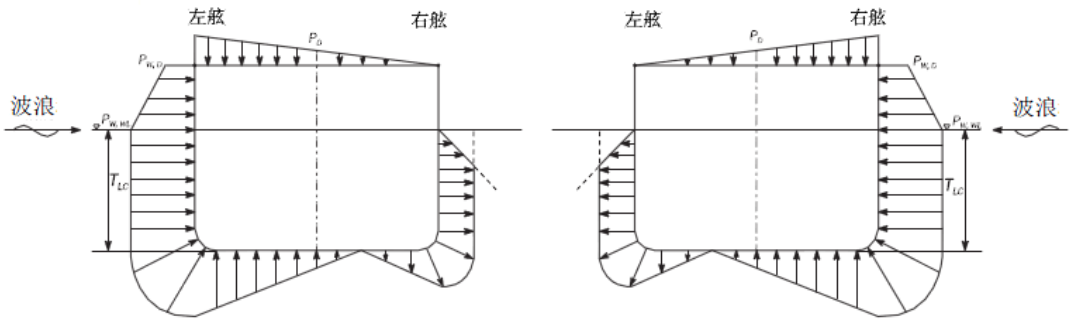


图 2.5.3.3 BSR-1P（左）和 BSR-1S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

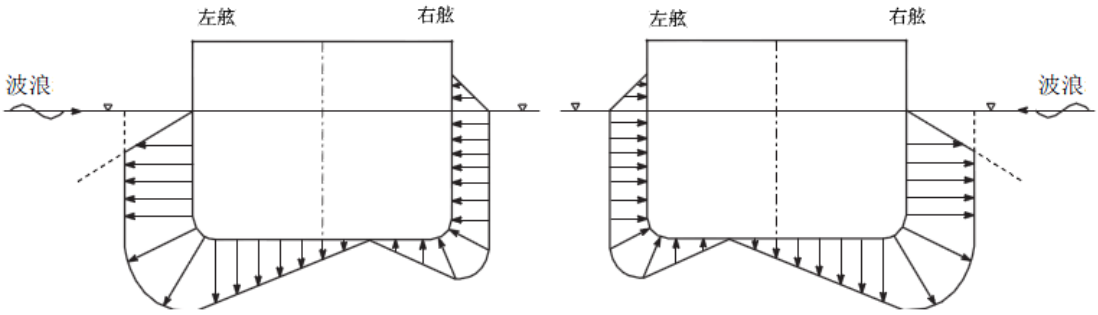


图 2.5.3.4 BSR-2P（左）和 BSR-2S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

2.5.3.5 BSP 载荷工况的水动压力

用于 BSP -1 和 BSP-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m^2，应从表 2.5.3.8 中得到，同时参见图 2.5.3.5 和图 2.5.3.6。

用于 BSP 载荷工况的水动压力　　表 2.5.3.8

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

式中：

$$P_{BSP} = 4.5 f_\beta f_p f_{nl} f_{yz} C_w \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

λ：动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.2(1 + 2 f_T) L$$

f_{yz}：周长分布系数，由表 2.5.3.9 得到。

用于 BSP 载荷工况的周长分布系数 f_{yz}　　表 2.5.3.9

横向位置	BSP-1P，BSP-2P	BSP-1S，BSP-2S
$y \geq 0$	$f_{yz} = 2\dfrac{z}{T_{LC}} + 2.5 f_{yB} + 0.5$	$f_{yz} = \dfrac{2}{3}\dfrac{z}{T_{LC}} + \dfrac{1}{2} f_{yB} + 0.5$
$y < 0$	$f_{yz} = \dfrac{2}{3}\dfrac{z}{T_{LC}} + \dfrac{1}{2} f_{yB} + 0.5$	$f_{yz} = 2\dfrac{z}{T_{LC}} + 2.5 f_{yB} + 0.5$

f_{nl}：非线性影响系数，取为：

- 对于极限海况设计载荷设定

  f_{nl} = 0.6，在 f_{XL}= 0.0 处

  f_{nl} = 0.8，在 f_{XL}= 0.3 处

  f_{nl} = 0.8，在 f_{XL}= 0.7 处

  f_{nl} = 0.6，在 f_{XL}= 1.0 处

  中间值由线性插值获得。

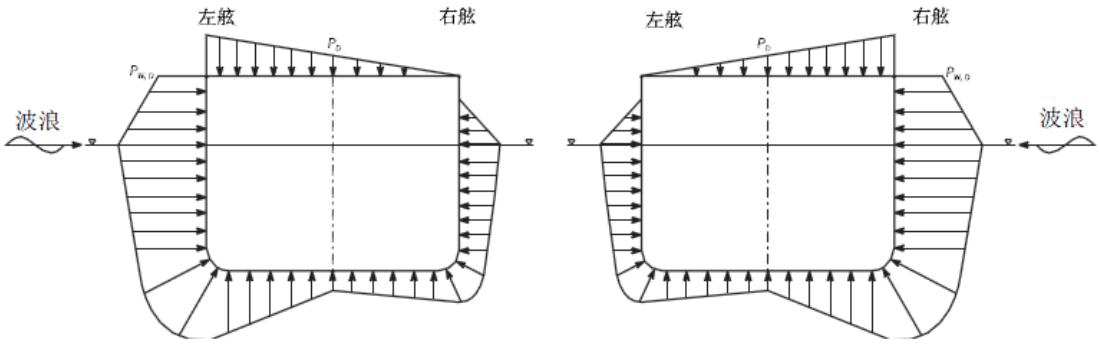


图 2.5.3.5　BSP-1P（左）和 BSP-1S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

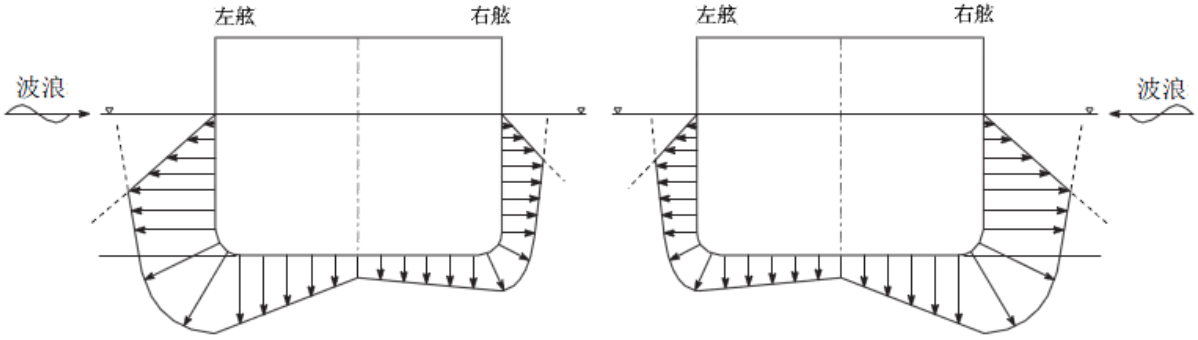


图 2.5.3.6　BSP-2P（左）和 BSP-2S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

2.5.3.6 OST 载荷工况的水动压力

用于 OST -1 和 OST-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m²，应从表 2.5.3.10 中得到，同时参见图 2.5.3.7 和图 2.5.3.8。

用于 OST 载荷工况的水动压力　　表 2.5.3.10

	水动压力，kN/m²		
载荷工况	$z \leq T_{LC}$	$T_{LC} < z \leq h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
OST-1P	P_W =max (P_{OST}, $\rho g(z\text{-}T_{LC})$)	$P_W = P_{W,WL}$ -□$g(z\text{-}T_{LC})$	$P_W = 0$
OST--2P	P_W = max (-P_{OST}, $\rho g(z\text{-}T_{LC})$)		

OST--1S	$P_W = \max(P_{OST}, \rho g(z-T_{LC}))$		
OST--2S	$P_W = \max(-P_{OST}, \rho g(z-T_{LC}))$		

式中：

$$P_{OST} = 1.38 f_p f_{nl} k_a k_p f_{yz} C_w \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{yz}：周长分布系数，由表 2.5.3.11 得到。

f_{nl}：非线性影响系数，取为 $f_{nl} = 0.8$

λ：动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.45L$$

用于 OST 载荷工况的周长分布系数 f_{yz}　　表 2.5.3.11

横向位置	OST-1P，OST-2P	OST -1S，OST -2S
$y \geq 0$	$5\frac{z}{T_{LC}} + 3.5 f_{yB} + 1.5$	$1.5\frac{z}{T_{LC}} + 1.5$
$y < 0$	$1.5\frac{z}{T_{LC}} + 1.5$	$5\frac{z}{T_{LC}} + 3.5 f_{yB} + 1.5$

k_a：沿船舶纵向的幅值系数，由表 2.5.3.12 获得

用于 OST 载荷工况的 k_a 值　　表 2.5.3.12

横向位置	纵向位置	OST-1P，OST-2P	OST -1S，OST -2S
$y \geq 0$	$f_{xL} \leq 0.2$	$1.0 + 3.5(1 - f_{yB})(1 - 5 f_{xL})$	$1.0 + [3.5 - (4 f_T - 0.5) f_{yB}](1 - 5 f_{xL})$
	$0.2 < f_{xL} \leq 0.8$	1.0	1.0
	$f_{xL} > 0.8$	1.0	$1.0 + 4(1 - f_T)(5 f_{xL} - 4) f_{yB}$
$y < 0$	$f_{xL} \leq 0.2$	$1.0 + [3.5 - (4 f_T - 0.5) f_{yB}](1 - 5 f_{x}$	$1.0 + 3.5(1 - f_{yB})(1 - 5 f_{xL})$
	$0.2 < f_{xL} \leq 0.8$	1.0	1.0
	$f_{xL} > 0.8$	$1.0 + 4(1 - f_T)(5 f_{xL} - 4) f_{yB}$	1.0

k_p：由表 2.5.3.13 得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

用于 OST 载荷工况的 k_p 值　　表 2.5.3.13

横向位置	f_{xL}	OST-1P; OST-2P	OST-1S; OST-2S
$y \geq 0$	0.0	1.0	1.0

	0.2	1.0	$1.0+(0.75-1.5f_T)f_{yB}$
	0.4	-1.0	$-1.0+(1.75-0.5f_T)f_{yB}$
	0.5	-1.0	$-1.0+(1.75-0.5f_T)f_{yB}$
	0.7	$-0.1+(1.6f_T-1.5)f_{yB}$	$-0.1+(0.25-0.3f_T)f_{yB}$
	0.9	$0.8+0.2f_{yB}$	$0.8-(0.9f_T+0.85)f_{yB}$
	1.0	$-1.0+f_{yB}$	$-1.0+(0.5-0.5f_T)f_{yB}$
$y<0$	0.0	1.0	1.0
	0.2	$1.0+(0.75-1.5f_T)f_{yB}$	1.0
	0.4	$-1.0+(1.75-0.5f_T)f_{yB}$	-1.0
	0.5	$-1.0+(1.75-0.5f_T)f_{yB}$	-1.0
	0.7	$-0.1+(0.25-0.3f_T)f_{yB}$	$-0.1+(1.6f_T-1.5)f_{yB}$
	0.9	$0.8-(0.9f_T+0.85)f_{yB}$	$0.8+0.2f_{yB}$
	1.0	$-1.0+(0.5-0.5f_T)f_{yB}$	$-1.0+f_{yB}$

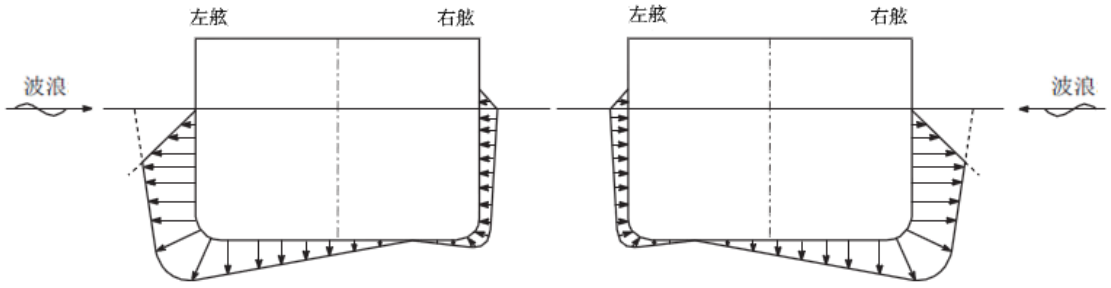


图 2.5.3.7 OST-1P（左）和 OST-1S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

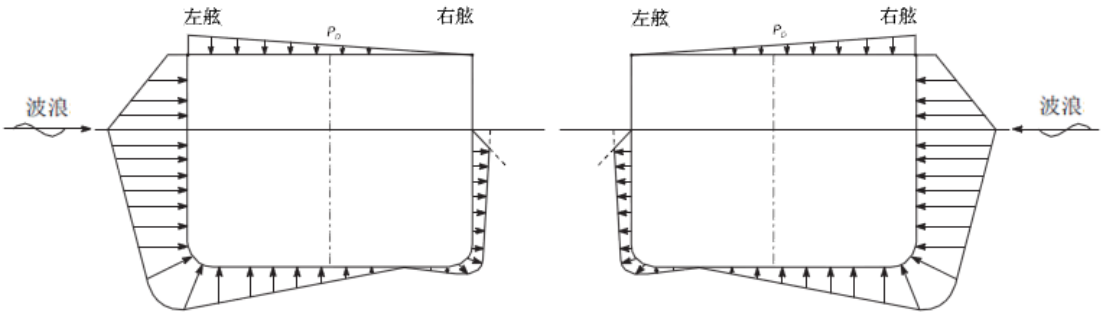


图 2.5.3.8 OST-2P（左）和 OST-2S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

2.5.3.7 OSA 工况的水动压力

用于 OSA-1 和 OSA-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m^2，应从表 2.5.3.14 中得到，同时参见图 2.5.3.9 和图 2.5.3.10。

用于 *OSA* 载荷工况的水动压力　　表 2.5.3.14

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

式中：

$$P_{OSA} = 0.81 f_p f_{nl} k_a k_p f_{yz} C_w \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}} (1 + 0.5 f_T)$$

λ：动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.7L$$

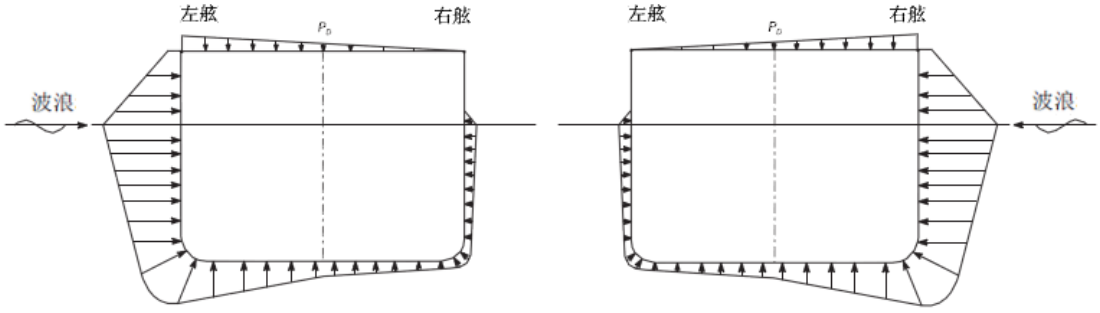


图 2.5.3.9 OSA-1P（左）和 OSA -1S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

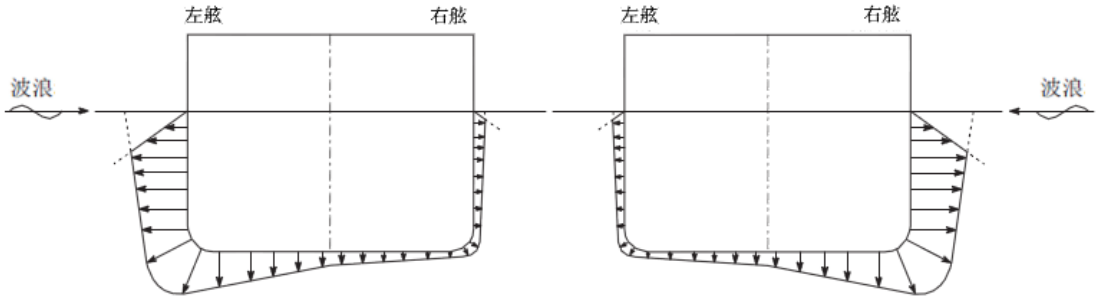


图 2.5.3.10 OSA -2P（左）和 OSA -2S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

f_{nl}：非线性影响系数，取为：

f_{nl} = 0.5，在 f_{xL}= 0.0 处

f_{nl} = 0.8，在 f_{xL}= 0.3 处

f_{nl} = 0.8，在 f_{xL}= 0.7 处

f_{nl} = 0.6，在 f_{xL}= 1.0 处

中间值由线性插值获得。

f_{yz}：周长分布系数，由表 2.5.3.15 得到。

用于 OSA 载荷工况的周长分布系数 f_{yz}　　表 2.5.3.15

横向位置	OSA-1P，OSA-2P	OSA -1S，OSA -2S
$y \geq 0$	$5.5\frac{z}{T_{LC}}+5.3f_{yB}+2.2$	$0.9\frac{z}{T_{LC}}+0.4f_{yB}+2.2$
$y < 0$	$0.9\frac{z}{T_{LC}}+0.4f_{yB}+2.2$	$5.5\frac{z}{T_{LC}}+5.3f_{yB}+2.2$

k_a：沿船舶纵向的幅值系数，由表 2.5.3.16 获得

k_p：由表 2.5.3.17 得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

用于 OSA 载荷工况的 k_a 值　　表 2.5.3.16

横向位置	纵向位置	OST-1P，OST-2P	OST -1S，OST -2S
$y \geq 0$	$f_{xL} \leq 0.2$	$1.0+3(2-f_T)(1-5f_{xL})(1-f_{yB})$	$1.0+3(2-f_T)(1-5f_{xL})$ $+\{(28f_{xL}-5)$ $+3f_T(1-5f_{xL})\}f_{yB}$
	$0.2 < f_{xL} \leq 0.5$	1.0	$1.0+(1-2f_{xL})f_{yB}$
	$0.5 < f_{xL} \leq 0.8$	1.0	$1.0+1.5(2f_{xL}-1)f_{yB}$
	$f_{xL} \geq 0.8$	$1.0+(f_{xL}-0.8)(1-f_{yB})A$	$1.0+\{1.5(2f_{xL}-1)$ $-(f_{xL}-0.8)A\}f_{yB}$ $+(f_{xL}-0.8)A$
$y < 0$	$f_{xL} \leq 0.2$	$1.0+3(2-f_T)(1-5f_{xL})$ $+\{(28f_{xL}-5)$ $+3f_T(1-5f_{xL})\}f_{yB}$	$1.0+3(2-f_T)(1-5f_{xL})(1-f_{yB})$
	$0.2 < f_{xL} \leq 0.5$	$1.0+(1-2f_{xL})f_{yB}$	1.0
	$0.5 < f_{xL} \leq 0.8$	$1.0+1.5(2f_{xL}-1)f_{yB}$	1.0

	$f_{xL} \geq 0.8$	$1.0+\{1.5(2f_{xL}-1)$ $-(f_{xL}-0.8)A\}f_{yB}$ $+(f_{xL}-0.8)A$	$1.0+(f_{xL}-0.8)(1-f_{yB})A$
式中： $A=22-15f_T+3[22(f_{xL}-0.8)-0.25(2-f_T)]$			

用于 OSA 载荷工况的 k_p 值　　表 2.5.3.17

横向位置	f_{xL}	OSA-1P; OSA-2P	OSA-1S; OSA-2S
$y \geq 0$	0.0	$0.75-0.5f_{yB}$	0.75
	0.2	$f_T-0.25+(1.25-f_T)f_{yB}$	$f_T-0.25+(0.35f_T-0.47)f_{yB}$
	0.4	1.0	$1.0+(2.7f_T-3.2)f_{yB}$
	0.5	$1.25-0.5f_T+(0.5f_T-0.25)f_{yB}$	$1.25-0.5f_T+(2.7f_T-3.2)f_{yB}$
	0.6	$1.5-f_T+(f_T-1.07)f_{yB}$	$1.5-f_T+(2.68f_T-3.19)f_{yB}$
	0.85	$0.5f_T-1.25+(0.25-0.5f_T)f_{yB}$	$0.5f_T-1.25+(0.2-0.1f_T)f_{yB}$
	1.0	$0.5f_T-1.25+(0.25-0.5f_T)f_{yB}$	$0.5f_T-1.25+(0.2-0.1f_T)f_{yB}$
$y < 0$	0.0	0.75	$0.75-0.5f_{yB}$
	0.2	$f_T-0.25+(0.35f_T-0.47)f_{yB}$	$f_T-0.25+(1.25-f_T)f_{yB}$
	0.4	$1.0+(2.7f_T-3.2)f_{yB}$	1.0
	0.5	$1.25-0.5f_T+(2.7f_T-3.2)f_{yB}$	$1.25-0.5f_T+(0.5f_T-0.25)f_{yB}$
	0.6	$1.5-f_T+(2.68f_T-3.19)f_{yB}$	$1.5-f_T+(f_T-1.07)f_{yB}$
	0.85	$0.5f_T-1.25+(0.2-0.1f_T)f_{yB}$	$0.5f_T-1.25+(0.25-0.5f_T)f_{yB}$
	1.0	$0.5f_T-1.25+(0.2-0.1f_T)f_{yB}$	$0.5f_T-1.25+(0.25-0.5f_T)f_{yB}$

2.5.4 露天甲板上浪压力

2.5.4.1 用于静+动（S+D）设计载荷设定的露天甲板上任意一点由于上浪载荷产生的外部动压力，P_D，kN/m²，应根据每一个动载荷工况获得，并按 2.5.4.3 和 2.5.4.4 的定义取值。用于静（S）设计载荷设定的露天甲板上任意一点由于上浪载荷产生的外部动压力为零。

2.5.4.2 如果露天甲板设有挡浪板，挡浪板之后露天甲板的上浪压力不允许进行折减。

2.5.4.3 HSM，HSA，FSM 载荷工况

对于 HSM，HSA 和 FSM 载荷工况，露天甲板任何一点的外部压力 P_D，kN/m²，应由下式得出，见图 2.5.3.1 和图 2.5.3.2：

$$P_D = \chi P_W$$

式中：

$P_W = P_{W,D}$，但不应小于 $P_{D\text{-}min}$。

$P_{W,D}$：[2.5.3]定义的 HSM，HSA 和 FSM 载荷工况在露天甲板边得到的压力，kN/m²。

$P_{D\text{-}min}$：由表 2.5.4.1 中的公式的得到的最小的露天甲板压力，kN/m²，应取为：

- 对于根据第 3 章进行的货舱分析，$P_{D\text{-}min}$=0.0
- 对于其他情况，$P_{D\text{-}min}$ 的定义见表 2.5.4.1

χ：表 2.5.4.2 中定义的系数。

HSM，HSA 和 FSM 载荷工况露天甲板上的最小压力　　表 2.5.4.1

位置	露天甲板上的最小压力 $P_{D\text{-}min}$, kN/m²	
	$L_{LL} \geq 100$m	L_{LL}<100m
$x_{LL} / L_{LL} \leq 0.75$	34.3	14.9 + 0.195 L_{LL}
$x_{LL} / L_{LL} > 0.75$	$34.3 + (14.8 + a(L_{LL} - 100))\left(4\frac{x_{LL}}{L_{LL}} - 3\right)$	$12.2 + \frac{L_{LL}}{9}\left(5\frac{x_{LL}}{L_{LL}} - 2\right) + 3.6\frac{x_{LL}}{L_{LL}}$

式中:

a: 系数, 取为：

a=0.356　对于 A 型，B-60 型 B-100 型干舷的船舶

a=0.0726　对于 B 型干舷的船舶

x_{LL}: 从干舷船长 L_{LL} 尾端量得的载荷点的 X 坐标。

露天甲板上的压力系数　　表 2.5.4.2

露天甲板位置	φ
干舷甲板	1.00
上层建筑甲板，包括首楼甲板	0.75
第 1 层甲板室	0.56

第 2 层甲板室	0.42
第 3 层甲板室	0.32
第 4 层甲板室	0.25
第 5 层甲板室	0.20
第 6 层甲板室	0.15
第 7 层甲板室及以上	0.10

2.5.4.4 BSR，BSP，OST 和 OSA 载荷工况

对于 BSR，BSP，OST 和 OSA 载荷工况，露天甲板任何一点的外部压力 P_D，kN/m²，应由露天甲板左舷甲板边和右舷甲板边的压力线性插值得到（见图 2.5.3.3，图 2.5.3.5，图 2.5.3.8 和图 2.5.3.9）：

$$P_{D,stb} = \chi P_{W,D-stb}$$

$$P_{D,pt} = \chi P_{W,D-pt}$$

式中：

$P_{W,D\text{-}stb}$：[2.5.3]定义的 BSR，BSP，OST 和 OSA 载荷工况在右舷甲板边处得到的压力。

$P_{W,D\text{-}pt}$：[2.5.3]定义的 BSR，BSP，OST 和 OSA 载荷工况在左舷甲板边处得到的压力。

χ：表 2.5.4.2 定义的系数。

2.6 内部载荷

2.6.1 液体引起的压力

2.6.1.1 用于静（S）设计载荷设定的作用在液舱或压载舱边界任一载荷点的内部液体压力，kN/m²，应取为：

$$P_{in} = P_{ls}，\text{但不小于 } 0.$$

2.6.1.2 用于静+动（S+D）设计载荷设定的作用在液舱或压载舱边界任一载荷点的内部液体压力，kN/m²，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/m²，定义见[2.6.1.3]

P_{ld}：液舱内液体产生的动压力，kN/m²，定义见[2.6.1.4]

2.6.1.3 液舱和压载货舱内液体产生的静压力 P_{ls}，kN/m²，应取为：

$$P_{ls} = \rho_L g\left(z_{top} - z + 0.5h_{air}\right)$$

式中，

h_{air}：液舱舱顶的空气管或溢流管高度，m。

2.6.1.4 由液舱或压载货舱内液体产生的动压力 P_{ld}，kN/m²，应取为

$$P_{ld} = f_\beta \rho_L [a_Z(z_0 - z) + a_X(x_0 - x) + a_Y(y_0 - y)]$$

式中：

l_{fs}：液舱顶部长度或压载货舱舱口围长度，m。

b_{top}：液舱顶部宽度或压载货舱舱口围宽度，在舱室中部量取，m。

x_0：参考点 X 坐标。

y_0：参考点 Y 坐标。

z_0：参考点 Z 坐标。

参考点取为液舱或压载货舱顶部边界所有点中使 V_j 的值最大对应的点。

$$V_j = a_X\left(x_j - x_G\right) + a_Y\left(y_j - y_G\right) + \left(a_Z + g\right)\left(z_j - z_G\right)$$

式中：

x_j：液舱或压载货舱顶部第 j 个点的 X 坐标。

y_j：液舱或压载货舱顶部第 j 个点的 Y 坐标。

z_j：液舱或压载货舱顶部第 j 个点的 Z 坐标。

2.6.2 干散货舱特性

2.6.2.1 矿砂船干散货舱的主要几何参数见图 2.6.2.1。

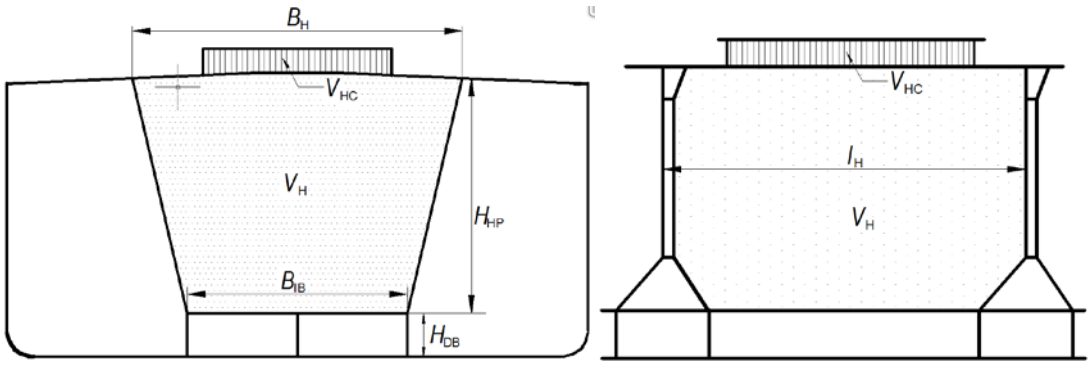


图 2.6.2.1 矿砂船货舱参数定义

B_H：货舱宽度，m，量自货舱中部纵舱壁顶部与主甲板连接处，见图 2.6.2.1。

l_H：横舱壁间在中纵剖线处的货舱长度，m，如设置槽型舱壁，应从槽条对应肋位量取。

B_{IB}：量自货舱中部内底宽度，m，见图 2.6.2.1。

D_1：船中处从基线到干舷甲板边的距离，m。

h_C：货物高度，m，取为内底至散货上表面的垂直距离。

h_{DB}：中纵剖线处的双层底高度，m，量自货舱中部，见图 2.6.2.1。

h_{HP}：所考虑货舱中部从中纵剖线处的内底至顶边舱与内壳上交点的垂直距离，m，见图 2.6.2.1。

V_{Full}：达到舱口围顶部的干散货舱容积，m^3，取为：

$$V_{Full} = V_H + V_{HC}$$

V_H：向上达到主甲板和舱口围相交水平面的货舱容积，m^3，不包括舱口围板所包围的容积，见图 2.6.2.1。

V_{HC}：舱口围体积，m^3，为从主甲板和舱口围侧板相交的水平面到舱口围顶部的部分，由船中货舱决定，见图 2.6.2.1。

V_{TS}：底凳体积，m^3，为横舱壁底凳在货舱长度 l_H 和底边舱内侧之间的体积。

x_G, y_G, z_G：基于第 1 章第 1 节[1.2.3]定义的坐标系下的舱室重心，对于液舱或者装满（即 V_{Full}）时的干散货舱，取为舱室型心，对于未装满的干散货舱，应按按如下取值：

x_G, y_G：干散货舱的型心的 X 和 Y 坐标。

$$z_G = h_{DB} + h_{C-cl}/2$$

z_C：基线到载荷计算点对应的货物上表面的高度，m，取为：

$$z_C = h_{DB} + h_C。$$

α：所考虑的板与水平面之间的夹角，(°)。

Ψ：散货（视为已排干和已移动过的）假定的休止角，(°)，取为：

Ψ= 30°，对于一般情况

Ψ = 35°，对于铁矿砂

Ψ = 25°，对于水泥

K_C：系数，取为：

$K_C = \cos^2\alpha + (1-\sin\psi)\sin^2\alpha$ 对内底、底边舱、横舱壁和纵舱壁、底凳、垂直顶凳。

$K_C = 0$ 对上甲板和倾斜顶凳。

ρ_C：干散货货物密度，t/m^3。

ρ_L：液舱和干散货压载舱的液体密度，t/m^3。

ρ_{ST}：钢材密度，取为 7.85，t/m^3。

2.6.2.2 装满和部分装的干散货舱定义如下：

a）装满货舱

干散货密度使货舱能够装载至舱口围顶部，如图 2.6.2.2 所示。

货物上表面及它在货舱内的有效高度 h_C 应根据[2.6.2.3]决定。

b）部分装货舱

干散货密度使货舱不能够装载至舱口围顶部，如图 2.6.2.3 和图 2.6.2.4 所示。

货物上表面及它在货舱内的有效高度 h_C 应根据[2.6.2.4]决定。

2.6.2.3 装满货舱干散货上表面定义

对于[2.6.2.2]定义的装满货舱，包括非棱柱型货舱，货物有效的上表面为中纵剖面处内底向上 h_C 的一个等效的水平面。

h_C 的值由船中货舱的长度中点处计算得到，它在整个货舱区域保持不变，应由以下决定：

$$h_C = h_{HPU} + h_0$$

式中：

$$h_0 = \frac{S_A}{B_H}$$

$$S_A = S_0 + \frac{V_{HC}}{\ell_H}$$

S_0：从顶边舱与舷侧外板或内壳（视具体情况而定）下交点至主甲板与舱口围焦点的阴影面积，m^2，由船中货舱决定，见图 2.6.2.2。

H_{HPU}：内底量至顶凳下沿的垂直距离，m。

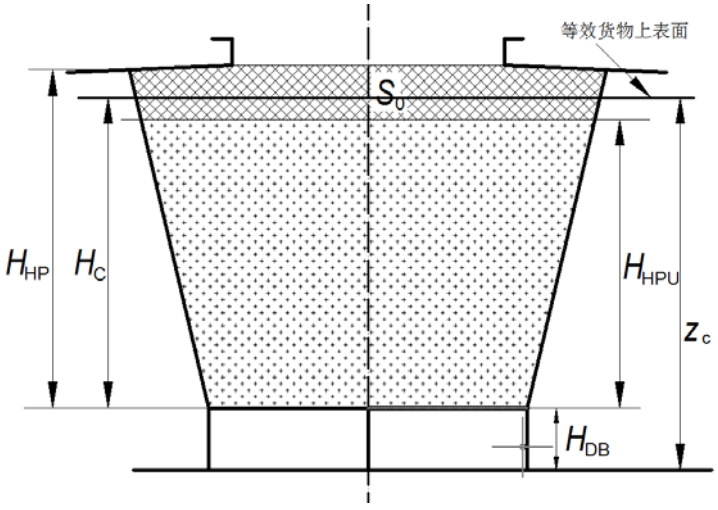


图 2.6.2.2 装满货舱有效货物上表面定义

2.6.2.4 部分装货舱干散货上表面定义

对于[2.6.2.2]定义的未装满货舱，包括非棱柱型货舱，货物有效的上表面由三部分组成。

内底板之上 h_C 高度处宽度为 $B_H / 2$ 的水平面

在中部水平面两侧和外壳或内壳之间，见图 2.6.2.3，或者可能为中部水平面两侧和底边舱斜板之间，见图 2.6.2.4，为 $\psi / 2$ 度的斜面。

h_C 的值由所考虑货舱的长度中点处计算得到，它在整个货舱长度范围内保持不变，应由以下决定：

对于 $|y| \leq \frac{B_H}{4}$：$h_C = h_{C-CL}$

对于 $\frac{B_H}{4} < |y| \leq \frac{B_2}{2}$：$h_C = h_{C-CL} - \left(|y| - \frac{B_H}{2}\right)\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)$

对于 $|y| > \frac{B_2}{2}$：$h_C = 0$

式中：

h_1：，高度，m，取为：

$$h_1 = \frac{M}{\rho_C \cdot B_H \ell_H} - \left(\frac{B_H + B_{IB}}{2B_H}\right)h_{HPL} - \frac{3}{16}B_H \tan\frac{\Psi}{2} + \frac{V_{TS}}{B_H \ell_H}$$

对于 $h_1 \geq 0$，见图 2.6.2.3：

$$h_{C-CL} = h_{HPL} + h_1 + h_2$$

$$h_2 = \frac{B_H}{4}\tan\frac{\Psi}{2}$$

$$B_2 = B_H$$

对于 $h_1 < 0$，见图 2.6.2.4：

$$h_{C-CL} = h_{11} + h_{22}$$

$$h_{11} = h_{HP}\left(\frac{B_2 - B_{IB}}{B_H - B_{IB}}\right)$$

$$h_{22} = \left(\frac{B_2}{2} - \frac{B_H}{4}\right)\tan\frac{\Psi}{2}$$

$$B_2=\sqrt{\frac{\frac{1}{l_H}\left(\frac{M}{\rho_C}+V_{TS}\right)+\frac{1}{2}\left(\frac{h_{HP}\cdot B_{IB}^2}{B_H-B_{IB}}\right)+\frac{B_H^2}{16}\tan\frac{\Psi}{2}}{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{h_{HP}}{B_H-B_{IB}}\right)+\frac{1}{2}\tan\frac{\Psi}{2}\right]}}$$

$h_{C\text{-}CL}$：中纵剖线处的货物表面高度，m，见图 2.6.2.3 和图 2.6.2.4。

B_2 ：货物最大宽度，m，见图 2.6.2.3 和图 2.6.2.。

M：货舱装载货物重量，t。

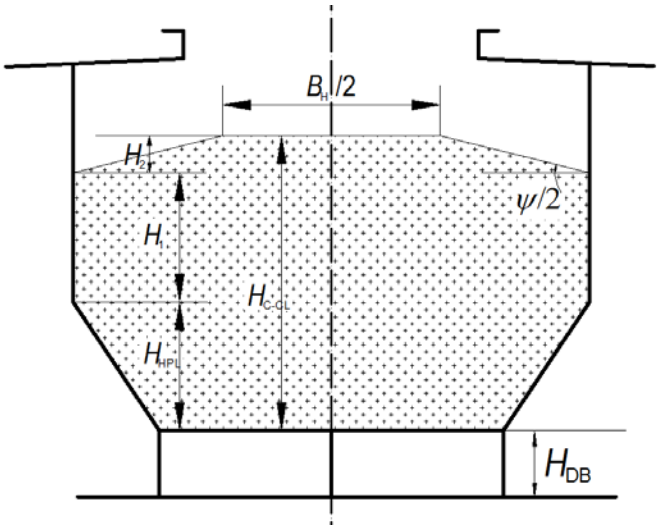


图 2.6.2.3 部分装载货舱 $h_1 \geq 0$ 时有效货物上表面定义

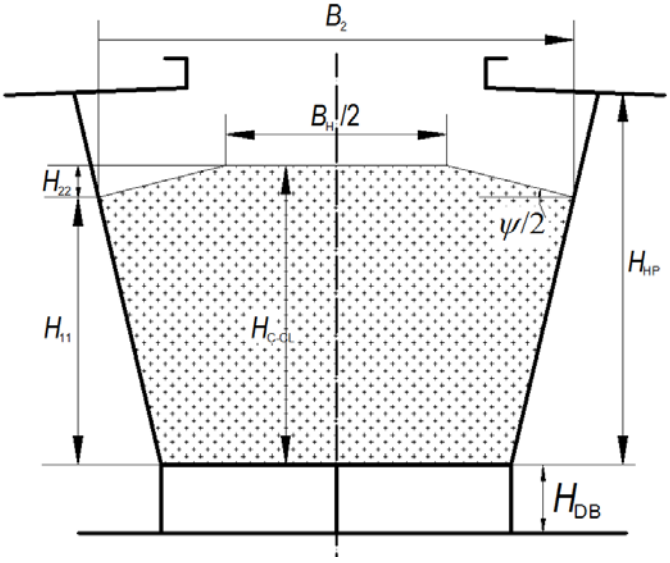


图 2.6.2.4 部分装载货舱 $h_1 < 0$ 时有效货物上表面定义

2.6.2.5 有限元应用

有限元分析中用到的干散货压力应按如下的过程：

a）决定货物高度 h_C，装满货舱根据[2.6.2.3]，部分装货舱根据[2.6.2.4]；

b）根据[2.6.3.2]定义的静压力和[2.5.2]定义的静剪切分布力决定对应的静载荷，并应用于有限元模型；

c）计算实际的货物质量 M_{actual}，t；

d）决定有效的货物密度：

$$\rho_{eff} = \frac{M}{M_{actual}} \rho_C$$

e）用 ρ_{eff} 替代 ρ_C 计算最终的压力分布和剪切载荷。

2.6.3 干散货压力

2.6.3.1 作用于货舱边界任一点由干散货产生的总压力，kN/m²，应取为：

$P_{in} = P_{bs}$ 用于完整工况强度评估的第 2 章第 7 节定义的静（S）设计载荷设定。

$P_{in} = P_{bs} + P_{bd}$ 用于完整工况强度评估定义的静+动（S+D）设计载荷设定。

但不小于 0。

式中：

P_{bs}：干散货产生的静压力，kN/m²，定义见[2.6.3.2]。

P_{bd}:：干散货产生的惯性动压力，kN/m²，定义见[2.6.3.3]。

决定在[2.6.3.2]和 [2.6.3.3]中定义的用于有限元分析的静压力和动压力时，应该用 ρ_{eff} 替代 ρ_C。

2.6.3.2 干散货静压力

由干散货产生的静压力 P_{bs}，kN/m²，应取为：

$$P_{bs} = \rho_C g K_C (z_C - z)$$ 但不小于 0。

2.6.3.3 干散货动压力

任一载荷工况由干散货产生的动压力 P_{bd}，kN/m²，应取为：

对于 $z \le z_C$， $P_{bd} = f_\beta \rho_C \left[0.25 a_X (x_G - x) + 0.25 a_Y (y_G - y) + K_C a_Z (z_C - z) \right]$

对于 $z > z_C$， $P_{bd} = 0.0$

2.6.4 干散货剪切载荷

2.6.4.1 对于舱段有限元强度评估，当载荷计算点的 $z \le z_C$ 时，除[2.6.3]定义的干散货压力外，以下的剪切载荷压力应被考虑：

- 对于静（S）设计载荷设定：[2.6.4.2]的定义由于重力作用于底边舱斜板和底凳板的静剪切载荷。

- 对于静+动（S+D）设计载荷设定：以下的动剪切载荷压力：

  $P_{bs\text{-}s}$ + $P_{bs\text{-}d}$ 用于底边舱斜板和底凳板，定义见[2.6.4.3]

  $P_{bs\text{-}dx}$ 用于内底板纵向，定义见[2.6.4.4]

  $P_{bs\text{-}dy}$ 用于内底板横向，定义见[2.6.4.4]

- 对于整船设计载荷设定，应考虑 x,y 方向加速度产生剪切载荷对斜板的作用，见[2.6.4.5]。

决定在[2.6.4.2]~ [2.6.4.5]中定义的用于有限元分析剪切载荷时，应该用 ρ_{eff} 替代 ρ_C 。

2.6.4.2 底边舱斜板、倾斜纵舱壁和底凳板上的静剪切载荷

由干散货重力作用于底边舱斜板、倾斜纵舱壁和底凳板产生的静剪切载荷压力 $P_{bs\text{-}s}$，（沿板向下为正），kN/m^2，应取为：

$$P_{bs-s} = \rho_C g \frac{(1-K_C)(z_C - z)}{\tan\alpha}$$

2.6.4.3 底边舱斜板和底凳板上的动剪切载荷

任一动载荷工况由干散货力作用于底边舱斜板或倾斜纵舱壁和底凳板产生的动剪切载荷压力 $P_{bs\text{-}d}$，（沿板向下为正），kN/m^2，应取为：

$$P_{bs-d} = f_\beta \rho_C a_Z \frac{(1-K_C)(z_C - z)}{\tan\alpha}$$

2.6.4.4 用于有限元分析的沿内底板的动剪切载荷

任一动载荷工况由干散货力作用于内底板产生的纵向方向（向艏为正）的动剪切载荷压力 $P_{bs\text{-}dx}$，kN/m^2，应分别取为：

$$P_{bs-dx} = -0.75 f_\beta \rho_C a_X h_C$$

任一动载荷工况由干散货力作用于内底板产生的横向方向（向左舷为正）的动剪切载荷压力 $P_{bs\text{-}dy}$，kN/m^2，应分别取为：

$$P_{bs-dy} = -0.75 f_\beta \rho_C a_Y h_C$$

2.6.4.5 对于整船有限元强度评估，考虑载荷平衡的要求，对内底板、底边舱斜板或倾斜纵舱壁、底凳斜板上应考虑 x、y 方向加速产生的摩擦力。任意斜板上的摩擦力按以下要求计算：

a）板的水平方向：

$$P = -0.75\rho_C a_X h_C \cos\alpha \cdot \cos\alpha_X - 0.75\rho_C a_Y h_C \cos\alpha \cdot \cos\alpha_Y$$

b）板的垂直内底方向：

$$P = -0.75\rho_C a_X h_C \sin\alpha_X - 0.75\rho_C a_Y h_C \sin\alpha_Y$$

式中：α_X 为斜板水平方向 X 方向的夹角，α_Y 为斜板水平方向与 Y 方向的夹角

2.7 装载工况

2.7.1 强度评估设计载荷设定

2.7.1.1 主要的设计载荷设定在表 2.7.1.1 中给出。

主要设计载荷设定　　表 2.7.1.1

设计载荷设定			在港和实验	航行工况下的极限载荷
载荷分量			静 (S)	静 + 动 (S+D)
船体梁载荷	*VBM*		$M_{sw\text{-}p}$	$M_{sw} + M_{wv\text{-}LC}$
	HBM		-	$M_{wh\text{-}LC}$
	VSF		$Q_{sw\text{-}p}$	$Q_{sw} + Q_{wv\text{-}LC}$
	TM		-	$M_{wt\text{-}LC}$
局部载荷	P_{ex}	上浪	-	P_D
		船体外壳	P_S	$P_S + P_W$
	P_{in}	压载舱	$Max（P_{ls}，P_{ST}）$	$P_{ls} + P_{ld}$
		其他充装液体的舱室		
		货舱	P_{bs}	$P_{bs} + P_{bd}$

2.7.2 装载工况

2.7.2.1 舱段有限元屈服强度典型计算工况的选取按照表 2.7.2.1~2.7.2.3 的要求。

2.7.2.2 对于装载手册中设计有多港装载的船舶，应进行多港工况校核，根据实际装载模式，从“多港-1”~“多港-9”中选取对应的工况。

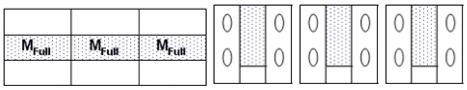
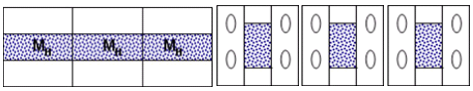
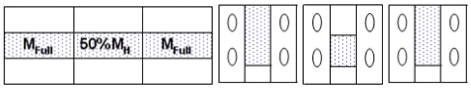
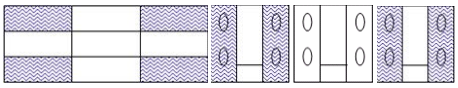
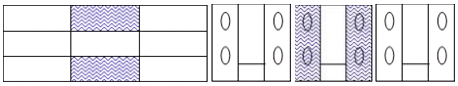
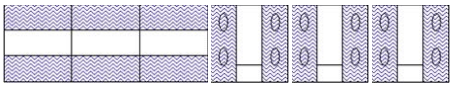
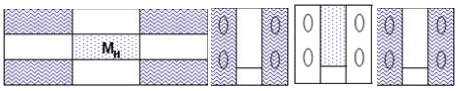
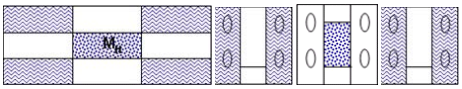
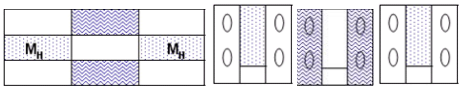
2.7.2.3 除表 2.7.2.1~表 2.7.2.3 规定的典型工况，还应考虑装载手册中其他特殊装载工况。

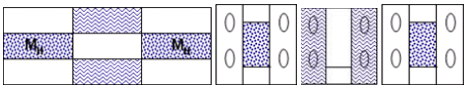
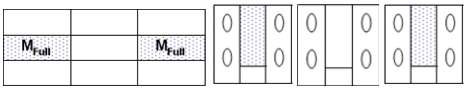
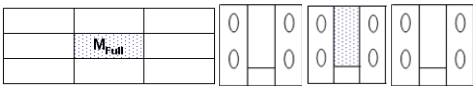
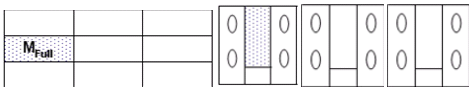
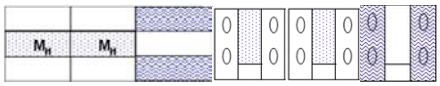
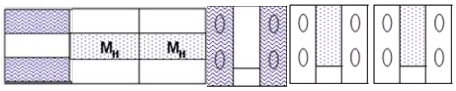
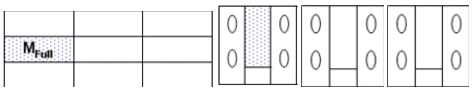
2.7.2.4 对于拟取得 EL100 附加标志的船舶，应补充快速装载过程中的港内工况；如快速装载手册中存在更为严重的其它装载工况，也应进行结构强度直接计算。

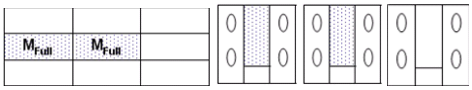
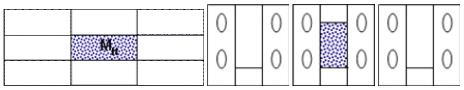
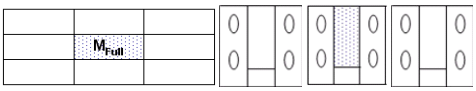
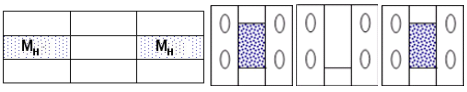
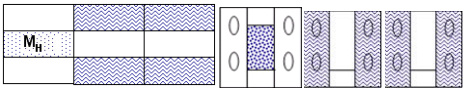
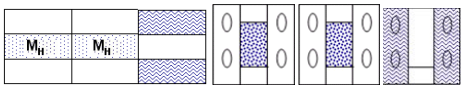
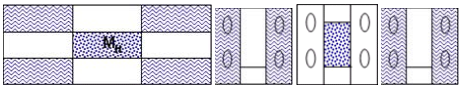
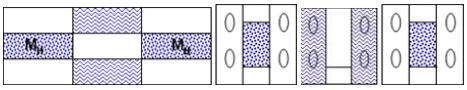
2.7.2.5 对于多港工况，实际装载手册中如吃水值比 0.67*T*s 和 0.75*T*s 更危险时，应取实际吃水值。

适用于船中货舱区域的有限元载荷组合　　表 2.7.2.1

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况

1	均匀满载 - 轻货		T_{SC}	100%	100% SAG	HSM-1 BSP-1P OST-1P
2	均匀满载 - 重货		T_{SC}	100%	100% SAG	BSP-1P OST-1P
3	非满载		T_{SC}	100%	0	BSP-1P
				100%	100% SAG	HSM-1
4	压载-1		T_{BAL-N}	100% MAX SFLC	100% Hog	HSM-2 FSM-2
				100%	100% Hog	BSR-1P OST-1P
5	压载-2		T_{BAL-N}	N/A	100% Hog	FSM-2 BSR-1P OST-1P
6	压载-3		T_{BAL-H}	100%	100% SAG	HSM-1 BSR-1P BSP-1P
7	多港-1		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P OST-1P
				100%	100% HOG	HSM-2 FSM-2 OST-2P
8	多港-2		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P OST-1P
				100%	100% Hog	HSM-2 FSM-2 OST-2P
9	多港-3		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	HSM-1 BSP-1P OST-1P
				100%	100% Hog	HSM-2 FSM-2 OST-2P

10	多港-4		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	HSM-1 BSP-1P OST-1P
				100%	100% Hog	HSM-2 FSM-2 OST-2P
11	多港-5		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	BSP-1P OST-1P
				100% MAX SFLC	100% HOG	HSM-2 FSM-2
				100%	100% HOG	OST-2P
12	多港-6		0.67 T_{SC}	100%	100% SAG	BSP-1P OST-1P
				100% MAX SFLC	100% SAG	HSM1 FSM1
13	多港-7		0.67 T_{SC}	100%	100% SAG	BSP-1P BSR-1P OST-1P
				100%	100% HOG	HSM-2 FSM-2 BSR-1P OST-1P
14	多港-8 (4)		T_{MPLC}	100%	100% SAG (4)	BSP-1P BSR-1P OST-1P
			T_{MPLC}	100%	100% HOG (4)	HSM-2 FSM-2 BSR-2P OST-2P
15	多港-9 (4)		T_{MPLC}	100%	100% SAG (4)	BSP-1P BSR-1P OST-1P
			T_{MPLC}	100%	100% HOG (4)	HSM-2 FSM-2 BSR-2P OST-2P
16	港内-1		0.67 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A

17	港内-2		0.67 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% Hog	N/A
18	港内-3		0.67 T_{SC}	100% MAX SFLC	100% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
19	港内 4		0.67 T_{SC}	100% MAX SFLC	100% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
20	港内 5		0.83 T_{SC}	100% MAX SFLC	100% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
21	港内 6		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
22	港内 7		0.83 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
23	港内 8		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
24	港内 9		0.83 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A

注释：

（1） 静水剪力 100%MAX SFLC 为剪力调整工况。

（2） 静水剪力 100%为剪力判断工况，按照第 3 章的判断要求进行。

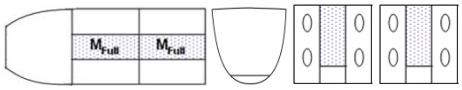
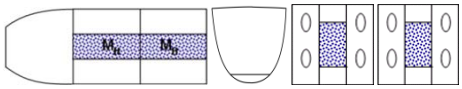
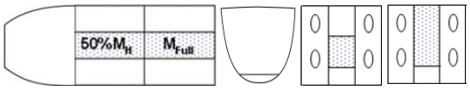
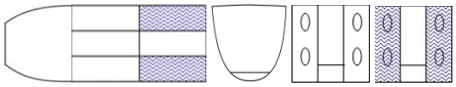
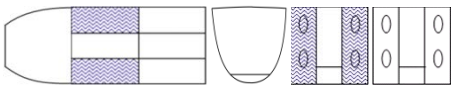
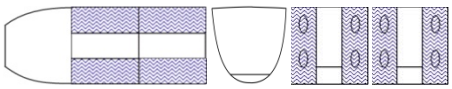
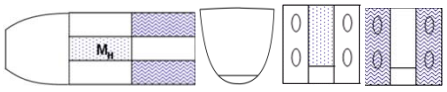
（3） 港内 4~9 工况为取得 EL100 附加标志的矿砂船应校核的工况。

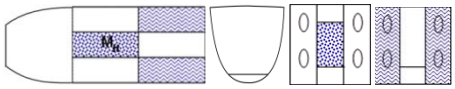
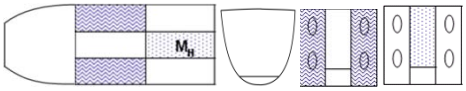
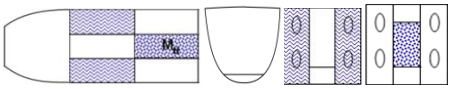
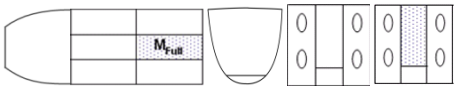
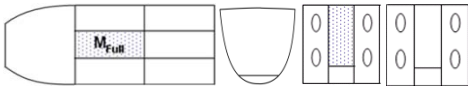
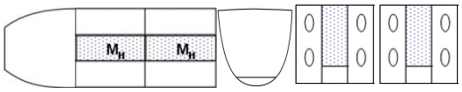
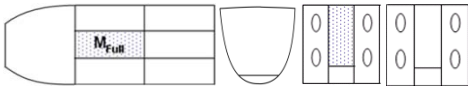
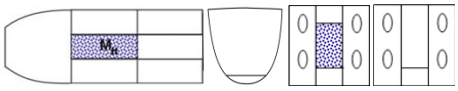
（4） 装载手册如有时，则评估该工况。

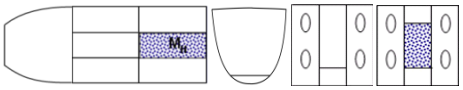
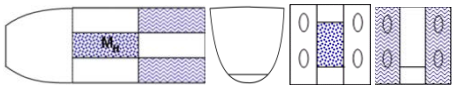
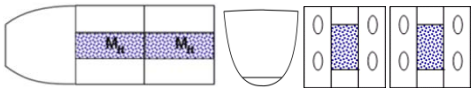
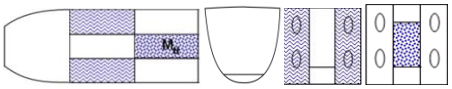
（5） 表中，T_{SC}—结构吃水，T_{BAL-N}—正常压载吃水，取装载手册中压载工况最小吃水，T_{BAL-H}—重压载吃水，取装载手册中重压载工况最大吃水，T_{MPLC}—装载手册中连舱装载的最小吃水，*HOG—中拱，HAG—中垂，—重货，—轻货，—压载水。*

（6） M_H:装载手册中最大吃水时货舱内货物装载量;M_{FULL}:货舱内均匀满载装至舱口围时的货物重量,数值取为 Max（M_H /V_{FULL},1.0）VFULL，且不小于 M_H；V_{FULL}：货舱体积。

适用于最艉货舱区域的有限元载荷组合 **表 2.7.2.2**

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
1	均匀满载 - 轻货		T_{SC}	100%	80% SAG	FSM-1 BSP-1P OST-1P OSA-1P
2	均匀满载 - 重货		T_{SC}	100%	80% SAG	FSM-1 BSP-1P OST-1P
3	非满载		T_{SC}	100%	100%	FSM-1 BSP-1P OST-1P
4	压载-1(1)		T_{BAL-N}	100%	100% Hog	HSM-2 FSM-1 BSP-1P OST-1P OSA-1P
5	压载-2(1)		T_{BAL-N}	100%	100% SAG	FSM-1 BSR-1P OST-1P
6	压载-3(1)		T_{BAL-H}	100%	100% SAG	HSM-1 BSR-1P BSP-1P
7	多港-1		0.75 T_{SC}	100%	50% SAG	HSM-1 BSP-1P OST-1P
				100%	50% HOG	HSM-1 OST-1P

8	多港-2		0.75 T_{SC}	100%	50% SAG	HSM-1 BSP-1P OSA-1P
				100%	50% Hog	HSM-1 OST-1P
9	多港-3		0.75 T_{SC}	100%	50% SAG	FSM-1 OST-1P
				100%	50% Hog	FSM-1 BSP-1P OSA-1P
10	多港-4		0.75 T_{SC}	100%	50% SAG	FSM-1 OST-1P
				100%	50% Hog	FSM-1 BSP-1P OSA-1P
11	多港-5		0.67 T_{SC}	100%	30% SAG	FSM-1 OST-1P
				100%	30% Hog	FSM-1 BSP-1P OSA-1P
12	多港-6		0.67 T_{SC}	100%	60% HOG	BSP-1P
				100% MAX SFLC	30% HOG	HSM-2
				100% MAX SFLC	0	HSM-1
13	多港-7 (1)		T_{MPLC}	100%	80% SAG	BSP-1P BSR-1P OST-1P
14	港内-1		0.67 T_{SC}	100% MAX SFLC	50% SAG	N/A
				100%	100% Hog	N/A
15	港内-2		0.67 T_{SC}	100% MAX SFLC	50% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A

16	港内-3		0.83 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	50% HOG	N/A
17	港内-4		0.83 T_{SC}	100%	50% SAG	N/A
				100%	50% HOG	N/A
18	港内-5		0.83 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	50% HOG	N/A
19	港内 6		0.83 T_{SC}	100%	50% SAG	N/A
				100%	50% HOG	N/A

注：

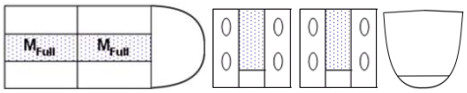
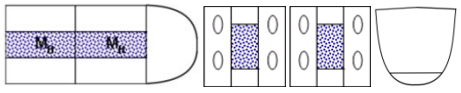
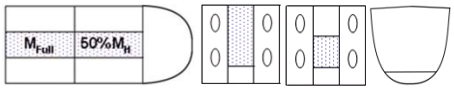
（1） 装载手册如有时，则评估该工况。

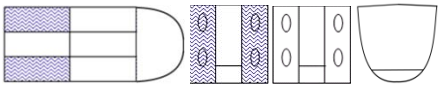
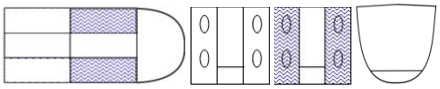
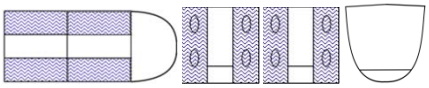
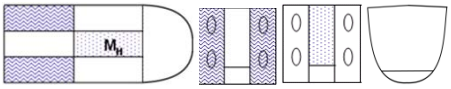
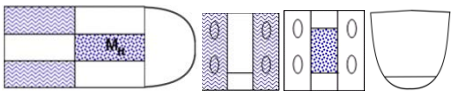
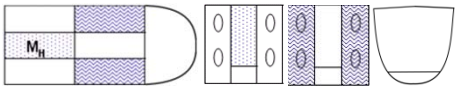
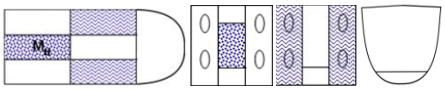
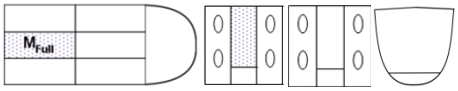
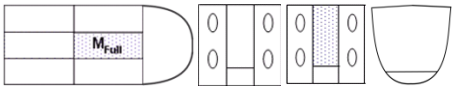
（2） 港内 4~ 6 为取得 EL100 的矿砂船应校核的工况。

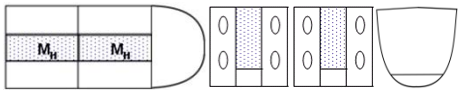
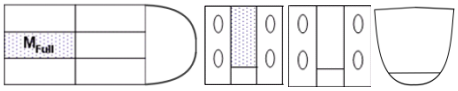
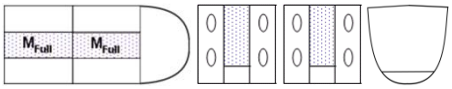
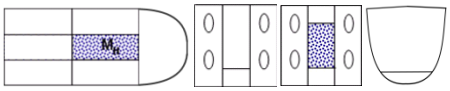
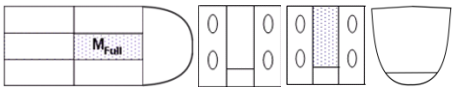
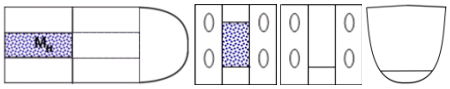
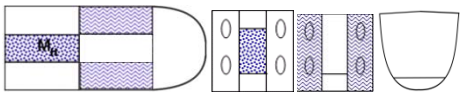
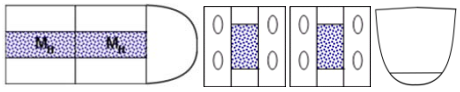
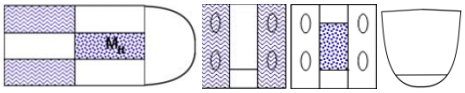
（3） 表中，T_{SC}—结构吃水，T_{BAL-N}—正常压载吃水，取装载手册中压载工况最小吃水，T_{BAL-H}—重压载吃水，取装载手册中重压载工况最大吃水，T_{MPLC}—装载手册中连舱装载的最小吃水，*HOG—中拱，HAG—中垂，* *—重货，* *—轻货，* *—压载水。*

（4） M_H:装载手册中最大吃水时货舱内货物装载量;$M_{FULL:}$ 货舱内均匀满载装至舱口围时的货物重量,数值取为 Max（M_H /V_{FULL},1.0）V_{FULL}，且不小于 M_H；V_{FULL}：货舱体积。

适用于最首货舱区域的有限元载荷组合　　表 2.7.2.3

号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
1	均匀满载 - 轻货		T_{SC}	100%	60% SAG	HSM-1 BSP-1P OST-1P OSA-2P
2	均匀满载 - 重货		T_{SC}	100%	60% SAG	HSM-1 BSP-1P OST-1P OSA-2P
3	非满载		T_{SC}	100%	60% SAG	HSM-1 BSP-1P OSA-2P

4	压 载 -1(1)		T_{BAL-N}	100%	100% Hog	HSM-1 HSM-2 BSP-1P BSR-1P OSA-2P
5	压 载 -2(1)		T_{BAL-N}	100%	100% Sag	HSM-1 BSP-1P BSR-1P OSA-2P
6	压 载 -3(1)		T_{BAL-H}	100%	100% SAG	HSM-1 BSP-1P BSR-1P OSA-2P
7	多港-1		$0.75T_{SC}$	50%	100% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P OSA-2P
8	多港-2		$0.75T_{SC}$	50%	100% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P OSA-2P
9	多港-3		$0.75T_{SC}$	100%	50% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P OSA-2P
10	多港-4		$0.75T_{SC}$	100%	50% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P OSA-2P
11	多港-5		$0.83T_{SC}$	100%	60% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P OSA-2P
12	多港-6		$0.67T_{SC}$	100% 100% MAX SFLC	60% HOG 60% HOG	BSP-1P OST-2P OSA-2P HSM-2

				100% MAX SFLC	0	HSM-1
13	多港-7 (1)		T_{MPLC}	100%	60% SAG	BSP-1P BSR-1P OST-1P
14	港内-1		0.67T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
15	港内-2		0.67 $_{SC}$	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% Hog	N/A
16	港内-3		0.67T_{SC}	100% MAX SFLC	100% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
17	港内 4		0.67T_{SC}	100% MAX SFLC	100% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
18	港内 5		0.83T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
19	港内 6		0.75T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
20	港内 7		0.83T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
21	港内 8		0.75T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A

注：

（1） 装载手册如有时，则评估该工况。

（2） 港内 4~8 位取得 EL100 的矿砂船应校核的工况。

（3） 表中，T_{SC}—结构吃水，T_{BAL-N}—正常压载吃水，取装载手册中压载工况最小吃水，T_{BAL-H}—重压载吃水，取装载手册中重压载工况最大吃水，T_{MPLC}—装载手册中连舱装载的最小吃水，*HOG—中拱，HAG—中垂，*  *—重货，*  *—轻货，*  *—压载水。*

（4） M_H:装载手册中最大吃水时货舱内货物装载量;M_{FULL}: 货舱内均匀满载装至舱口围时的货物重量,数值取为 Max（M_H/V_{FULL},1.0）V_{FULL}，且不小于 M_H；V_{FULL}：货舱体积。

第 3 章　货舱区域直接强度分析

3.1　一般要求

3.1.1 对于船长在 150 米及以上的矿砂船，应基于三维有限元分析进行货舱区主要构件的直接强度评估。

3.1.2 有限元分析包括以下两个部分：

3.1.2.1 评估船体梁纵向构件、主要支撑构件和舱壁的货舱舱段分析。

3.1.2.2 评估局部结构细节的详细应力水平的细化网格分析。

3.1.3 采用有限元方法进行强度评估，验证尺寸是否符合本章规定的验收衡准：

3.1.3.1 根据第 3 章 3.2~3.4 要求进行舱段结构分析。

3.1.3.2 根据第 3 章 3.5 要求进行局部结构分析。

3.1.4 舱段结构强度直接计算分析的流程图见图 3.1.4。

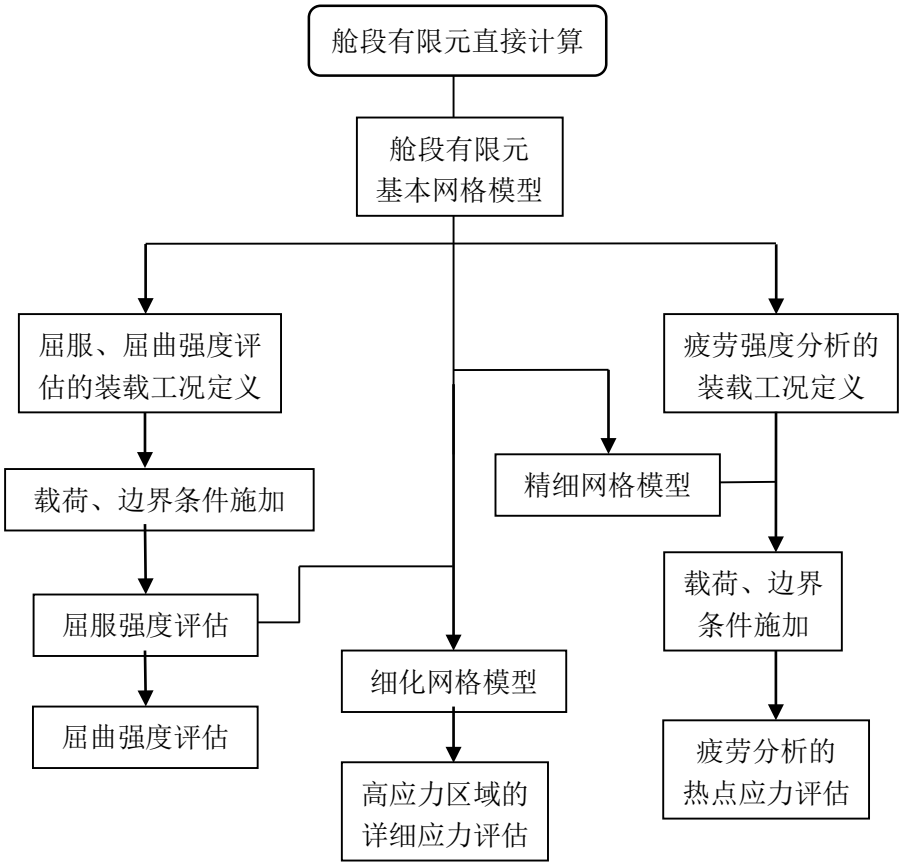


图 3.1.4 舱段有限元直接计算流程

3.1.4 使用的单元类型

3.1.4.1 结构评估基于三维结构模型的线性有限元分析。在有限元分析中，通常使用的单元类型如表 3.1.4.1 所示。

单元类型 **表 3.1.4.1**

单元类型	描述
杆（或桁架）单元	线单元，仅具有轴向刚度，且沿单元长度其横剖面积不变
梁单元	线单元，具有轴向刚度、扭转刚度、双向剪切和弯曲刚度，且沿单元长度其属性不变
壳（或板）单元	板单元，具有面内刚度和面外弯曲刚度，且厚度不变

3.1.4.2 一般认为两节点的线单元和四节点的壳单元对于表达船体结构已经足够。本章中有关网格的要求是基于使用上述单元建立有限元模型的条件下给出的。当然，也可以使用更高阶的单元。

3.2 结构建模

3.2.1 目标和范围

3.2.1.1 舱段结构强度分析用来对货舱区域的纵向船体梁构件、主要支撑结构和舱壁的尺寸进行评估。本节规定了对于货舱结构强度分析的要求。

3.2.1.2 进行有限元结构评估和载荷施加的货舱区域包括以下货舱范围。货舱范围据船长和舱室布置的不同可能有所不同。

- 船中货舱区域
- 最首货舱
- 最尾货舱

3.2.1.3 三个货舱长度的有限元模型的中间舱定义为中舱进行有限元分析。对于最首货舱和最尾货舱的评估，中舱分别指最首货舱和最尾货舱。

3.2.1.4 对于每个货舱，应采用第 2 章第 7 节定义的适用于相应货舱的有限元载荷组合，按照本章要求进行尺寸评估。

3.2.2 应建模的构件

3.2.2.1 所有主要纵向和横向结构均应建模，包括：

- 外壳
- 甲板
- 内底板
- 双层底实肋板和纵桁
- 横向和垂向强框架
- 舱口围板
- 水平桁材
- 横向和纵向舱壁结构
- 其它主要支撑构件
- 其它计入船体梁强度的结构构件

3.2.2.2 结构上的所有板和骨材，包括腹板骨材，均应建模。对主要支撑构件强度起作用且其尺寸不小于[3.2.4.1]中定义的典型网格尺寸（s×s）的肘板应建模。

3.2.3 模型范围

3.2.3.1 除最首货舱模型和最尾货舱模型外，货舱有限元模型沿纵向应覆盖三个货舱长度。模型两端应包括横舱壁。当设置槽型型舱壁时，模型前后端部还应包括槽型横舱壁凳结构，以及压载舱横舱壁的水平桁结构。

3.2.3.2 最首货舱和最尾货舱应尽量位于有限元模型的中间，如下所述：

- 最首货舱段：自第 2 货舱后舱壁至最前端的加强环或强框架所在的横剖面，该加强环框架或强框架从基线至强力甲板保持连续。
- 最尾货舱段：自机舱后舱壁至第 N-1 货舱的前舱壁，其中 N 指货舱的数量或由首至尾数的货舱或货舱组编号。
- 如果相邻货舱长度大于等于 1.5 倍目标货舱长度，应将相邻货舱适当截断，使相邻舱室的舱长与目标货舱长度相当。
- 如果相邻舱室长度小于等于 0.7 倍目标货舱长度，如首货舱与首尖舱，则应对相邻舱室进行合理的拉伸，如对首尖舱以其舱长中间位置横剖面，向首拉伸至与目标舱长度相当。对拉伸区域结构建模应符合 3.2.3.6 的要求。

3.2.3.3 一般情况下，有限元模型应表达船体外壳的几何形状。对于船中货舱区域，如果中舱是棱柱形，有限元模型可以是棱柱形的。

3.2.3.4 对于最首货舱模型，如果相邻首尖舱的长度小于等于 0.7 倍最首货舱长度，则位于首尖舱中间位置处的横剖面向前至模型端部的船体线型应使用简化的几何建模——由首尖舱中间位置处的横剖面向前拉伸至与首货舱长度相当处。如果相邻首尖舱的长度大于 0.7 倍最首货舱长度，则可考虑按照实际结构建模或者由首尖舱中间位置处的横剖面向前拉伸至首垂线处。以上两种情况，舱段模型的端部边界条件均应施加于最首端面处。

3.2.3.5 对于最尾舱模型，位于机舱中间向后的船体外壳可以使用简化几何建模。可以由机舱中间剖面向后拉伸至后舱壁。

3.2.3.6 如果船体外壳使用拉伸的方法建模，应将对应处所（首部或机舱处所）中间位置的横剖面的几何属性沿简化模型进行复制。拉伸部分的横向强框架与首部或机舱的横向强框架的属性相同，并保持纵向构件的连续性。

3.2.3.7 船舶的左舷和右舷都应建模。

3.2.3.8 船舶的全深范围内都应建模，如有时，包括上甲板上的主要支撑构件、管隧、首楼和/或舱口围板。机器处所的上层建筑或甲板室以及挡浪板不要求建模。

3.2.4 有限元模型要求

3.2.4.1 选择单元类型应按照以下原则：

（1）承受侧向载荷的扶强材使用梁单元，不承受侧向载荷的扶强材可使用杆单元。

（2）船体的内外壳板、强框架、纵桁、肋板、平面舱壁桁材、肋骨等的高腹板以及槽型舱壁和壁凳用板单元模拟。建模中应尽可能使用少使用三角形单元，特别是高应力区域和开孔周围、肘板连接处和折角连接处等应力梯度大的区域，应避免使用三角形单元。

（3）板单元长宽比应不超过 3，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。

3.2.4.2 有限元网格应尽可能遵从结构中骨材的实际排列方式，以表示骨材之间的实际板格，具体划分时应按照以下原则：

（1）船底板、舷侧外板、甲板、纵舱壁、内底板，横向每相邻两个纵骨之间为一个单元，沿纵向，单元长度应不大于纵骨间距的两倍；对于边舱横舱壁、制荡舱壁，每相邻垂直扶强材之间为一个单元；横框架、垂直桁材、撑材和水平桁材上，每相邻腹板加强筋之间为一单元。

（2）双层底纵桁和肋板、甲板强横梁、边舱强框架及其水平桁、边舱横撑材沿腹板高度至少划分 3 个网格。如果腹板高度较小，则可以划分两个网格，但在腹板每两个相邻加强筋之间至少为一个网格，且与相邻构件的网格匹配。

（3）边舱强框架的网格应描述强框架上开孔的实际形状；对主要支撑构件的大肘板自由边的曲率应准确描述，以避免由于几何不连续导致不真实的高应力。

（4）槽形舱壁和壁凳应用壳单元建模，模型应包括壁凳隔板和壁凳板上的内部纵向、垂向加强筋，槽条面板、腹板的壳单元网格应遵循壁凳的骨材间距。

（5）以梁单元建模的骨材，应与实际结构位置匹配，弯曲中心或者剪切中心偏移方向与带板法线方向一致，并与板单元协调。

（6）不连续加强筋应按连续加强筋建模，即削斜端部处的腹板高度折减可以不用建模。

（7）主要支撑构件的腹板加强筋应建模。当加强筋布置与主要有限元网格不一致时，调整线单元至最近的节点，但调整的距离应不超过该加强筋间距的 0.2 倍，按此调整后得到的计算应力和屈曲利用因子不进行修正。大肘板、甲板横梁和平行于翼板的水平桁上的屈曲加强筋应建模。这些加强筋可以使用杆单元建模。

（8）主要支撑构件腹板上表达开孔和人孔的方法应根据表 3.2.4.1 的要求。

主要支撑构件腹板上开孔的表达　　表 3.2.4.1

衡准	建模结果
$h_0/h < 0.5$且$g_0 < 2.0$	开孔不需建模
人孔	人孔应按开孔几何尺寸判断，通过去除适当的单元进行建模
$h_0/h \geq 0.5$或$g_0 \geq$	开孔应建模

2.0	

其中：

$$g_0 = \left(1 + \frac{l_0^2}{2.6(h-h_0)^2}\right)$$

l_0: 平行于主要支撑构件腹板方向的开孔长度，m，如图 3.2.4.1 所示。对于间距d_0小于$0.25h$的连续开孔，l_0取所有开孔跨过的长度，如图 3.2.4.2 所示。

h_0: 平行于腹板高度方向的开孔高度，m，如图 3.2.4.1 和图 3.2.4.2 所示。

h: 开孔处主要支撑构件的腹板高度，m，如图 3.2.4.1 和图 3.2.4.2 所示。

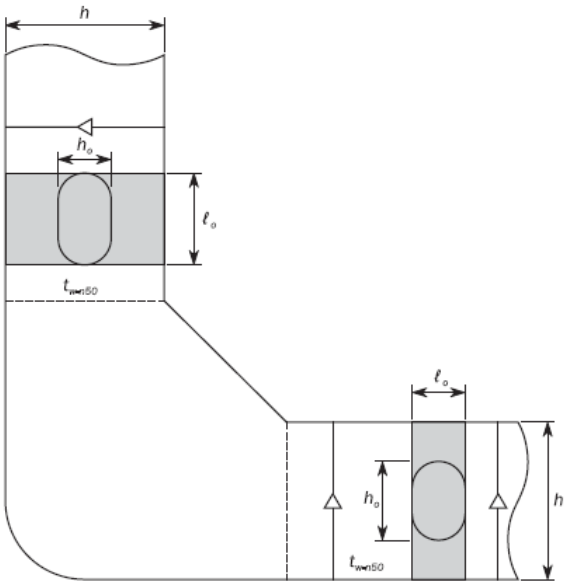


图 3.2.4.1 腹板上的开孔

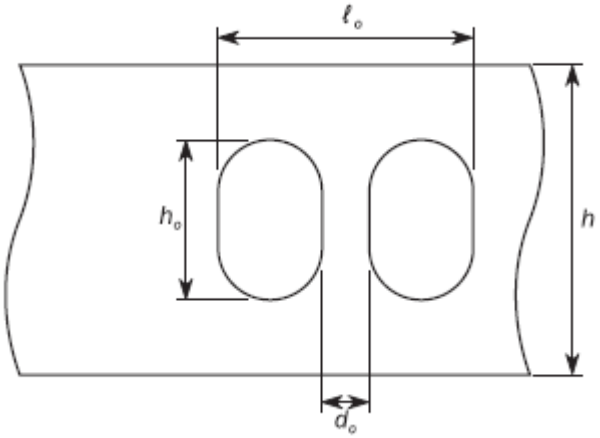


图 3.2.4.2 $d_0 < h/4$的连续开孔的长度l_0

3.2.4.3 结构尺寸采用船舶建造厚度，应充分反应基于强度原因的加强，但对于船东的特殊设计要求的尺寸或加强不予考虑。

3.2.4.4 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。

3.2.5 边界条件

3.2.5.1 本节所规定的所有边界条件都基于第 1 章第 2 节定义的总体坐标系。

3.2.5.2 本节所规定的所有边界条件适用于货舱区域的舱段有限元模型分析。

3.2.5.3 边界条件包括模型端部的刚性连接、单点约束和端部梁。刚性连接将模型端部的纵向构件的节点连接到中纵剖面上中和轴处的独立点上。边界条件应施加在舱段有限元模型的端部，除最首货舱外的边界条件见表 3.2.5.1。对于最首货舱分析，施加在舱段有限元模型端部的边界条件见表 3.2.5.2。

非最首货舱的模型端部边界条件　　表 3.2.5.1

位置	平移			转动		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
后端						
独立点	—	固定	固定	M_{T-end}	—	—
横剖面	—	刚性连接	刚性连接	刚性连接	—	—
	端部梁，见[3.2.5.4]					
前端						
独立点	—	固定	固定	固定	—	—
中剖面和内底板的交点	固定	—	—	—	—	—
横剖面	—	刚性连接	刚性连接	刚性连接	—	—
	端部梁，见[3.2.5.4]					
注 1：[—]表示不需施加约束（自由） 注 2：见图 3.2.5.1						

最首舱段模型的端部边界条件　　表 3.2.5.2

位置	平移			转动		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
后端						
独立点	—	固定	固定	固定	—	—

中剖面和内底板的交点	固定	—	—	—	—	—
横剖面	—	刚性连接	刚性连接	刚性连接	—	—
	端部梁，见[3.2.5.4]					
前端						
横剖面	—	刚性连接	刚性连接	刚性连接	—	—
独立点	—	固定	固定	M_{T-end}	—	—

注 1：[—]表示不需施加约束（自由）

注 2：见图 3.2.5.1

注 3：前端的边界条件应施加在最前端的从基线至强力甲板保持连续的加强环框架或强框架上。

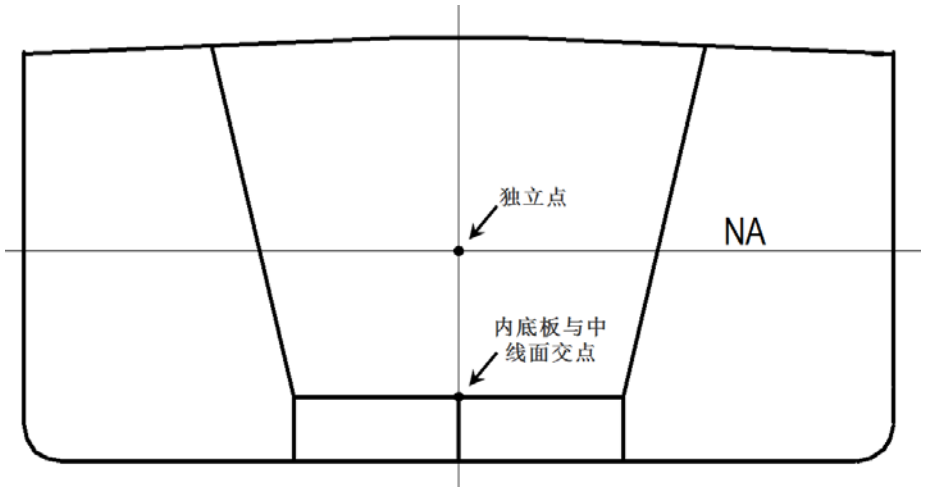


图 3.2.5.1 施加于模型端面的边界条件

3.2.5.4 应在模型两个端面上所有的纵向连续结构和舱口间甲板板上建立端部约束梁。图 3.2.5.2 是一个典型矿砂船端面的端部约束梁的示例。

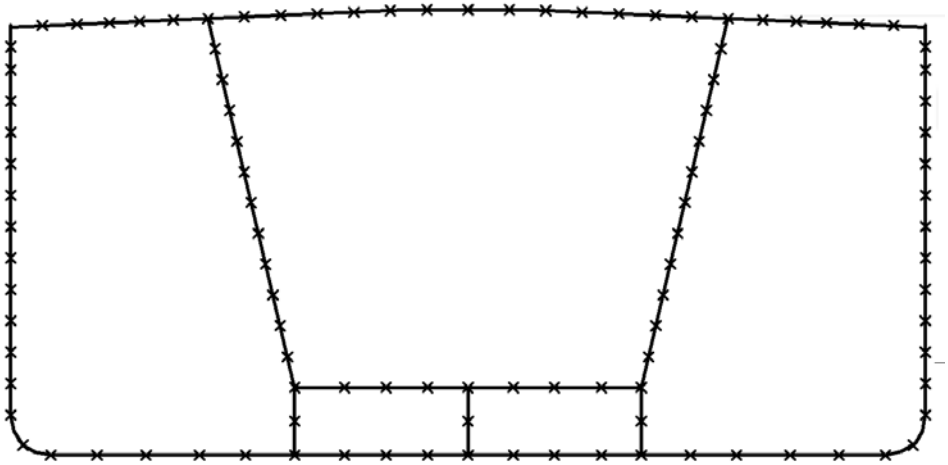


图 3.2.5.2 端部约束梁

3.2.5.5 每个端面内的所有梁单元的属性应相同，首端和尾端端面的梁的属性应按照以下

要求分别计算：

- 剖面惯性矩：$I_{yy} = I_{zz} = I_{xx}(J) = 1/25$倍的首/尾端横剖面基于有限元模型的船体梁垂向惯性矩。
- 横剖面面积：A_y和$A_z = 1/80$倍的首/尾端横剖面基于有限元模型的横剖面积。

其中：

I_{yy}：	梁的局部坐标系下关于 Y 轴的惯性矩，m^4
I_{zz}：	梁的局部坐标系下关于 Z 轴的惯性矩，m^4
$I_{xx}(J)$：	扭转惯性矩，m^4
A_y：	梁的局部坐标系下 Y 方向的剪切面积，m^2
A_z：	梁的局部坐标系下 Z 方向的剪切面积，m^2

3.3 有限元载荷组合

3.3.1 设计载荷组合

3.3.1.1 有限元载荷组合定义为装载模式、吃水、静水弯矩和剪力与给定的动载荷工况组合。

3.3.1.2 对于舱段结构强度分析，应根据不同货舱区域选取第 2 章第 7 节定义的设计载荷组合。

3.3.1.3 第 2 章第 7 节规定的每个设计载荷组合由一个装载模式和第 2 章第 2 节中给出的动载荷工况组成。每一个载荷组合都要求施加结构自重、内部压力、外部压力和船体梁载荷。航行工况需同时施加静载荷分量和动载荷分量（S+D）。港内工况只需施加静载荷分量。

3.3.1.4 如果设计者定义的装载工况未被第 2 章第 7 节给出的载荷组合覆盖，这些附加装载工况应根据第 2 章和本章的程序要求进行评估。

3.3.2 载荷施加

3.3.2.1 船体结构的重量应计入静载荷中，但动载荷中不应计入。钢材密度应按第 2 章第 6 节选取。

3.3.2.2 除非本节中另有规定，弯矩和剪力的符号应与第 2 章第 1 节中定义的符号约定一致。

3.3.2.3 每个载荷工况的外部压力应根据第 2 章第 5 节计算。外部压力包括海水静压力、波浪压力和上浪压力。对于按照第 3 章 3.2.3.2 要求对首货舱舱段的首尖舱或尾货舱舱段的机舱进行拉伸至实船船长之外时，延伸区域的外部压力取规范船长端部处单元的压力，沿船长方向做等值处理。

3.3.2.4 内部压力应对于每个载荷工况，根据第 2 章第 6 节的规定计算第 2 章第 7 节表中的各设计载荷分项。内部压力包括干货和液货的静压力、压载水和其它液体静压力、压力释放阀设定压力以及由于加速度引起的干货、液货、压载水和其它液体的动压力。

3.3.2.5 在单元形心处计算的压力值作为常量施加在受压面的壳单元上，例如，承受外部压力的外壳和甲板，承受内部压力的舱室边界。另外，也可以将在单元节点处计算得到的压力在单元范围内按线性分布施加在单元上。

3.3.3 船体梁载荷

3.3.3.1 每个装载工况都有其相应的船体梁载荷，其中，船体梁剪力和弯矩应按照[3.3.4]规定的程序施加，船体梁扭矩应按照[3.3.5]规定的程序施加。船体梁载荷是船体梁静水载荷和第 2 章第 7 节定义的船体梁波浪载荷的组合。对于每一个要求的有限元载荷组合，船体梁波浪载荷应使用第 2 章第 2 节规定的载荷组合因子（LCF）计算。

3.3.3.2 船体梁垂向目标弯矩

对于给定的有限元载荷组合，在某一纵向位置的船体梁垂向目标弯矩$\mathrm{M_{v\text{-}targ}}$，kNm，按下式计算：

$$\mathrm{M}_{v-targ} = C_{BM-LC}M_{sw} + M_{wv-LC}$$

其中：

$\mathrm{C_{BM\text{-}LC}}$：对应载荷组合的许用静水弯矩百分比，见第 2 章第 7 节。

$\mathrm{M_{sw}}$：航行工况和港内工况下指定纵向位置处的许用静水弯矩，kNm，定义分别见第 2 章 2.4.2。

$\mathrm{M_{wv\text{-}LC}}$：动载荷工况下的垂向波浪弯矩，kNm，计算方法见第 2 章 2.4.3。

$\mathrm{M_{v\text{-}targ}}$：取值如下：

- 船中货舱区域：对于第 2 章第 7 节定义的每个有限元载荷组合，取每个舱段的中舱范围内的最大船体梁弯矩。
- 船中货舱区域以外：所要考虑的有限元模型中所有横框架和横舱壁的弯矩值。当按照第 3 章 3.2.3.2 要求对首货舱舱段的首尖舱或尾货舱舱段的机舱进行拉伸至实船船长之外时，对于超出规范船长的延伸区域，各个强框架处目标弯矩值取为 0。

根据第 2 章第 7 节的表给定的有限元载荷组合，$\mathrm{C_{BM\text{-}LC}M_{sw}}$和$\mathrm{M_{wv\text{-}LC}}$同时取中垂状态或中拱状态。

3.3.3.3 船体梁目标剪力

对于给定的有限元载荷组合，中舱后舱壁和前舱壁处的船体梁目标剪力$\mathrm{Q_{targ\text{-}aft}}$和$\mathrm{Q_{targ\text{-}fwd}}$由下式确定：

- $\mathrm{Q_{fwd}} \geq \mathrm{Q_{aft}}$：

$$\mathrm{Q}_{targ-aft} = C_{SF-LC} \cdot Q_{sw-neg} - \Delta Q_{swa} + f_{\beta}\left|C_{QW}\right|Q_{wv-neg}$$

$$Q_{targ-fwd} = C_{SF-LC} \cdot Q_{sw-pos} + \Delta Q_{swf} + f_\beta |C_{QW}| Q_{wv-pos}$$

- $Q_{fwd} < Q_{aft}$：

$$Q_{targ-aft} = C_{SF-LC} \cdot Q_{sw-pos} - \Delta Q_{swa} + f_\beta |C_{QW}| Q_{wv-pos}$$

$$Q_{targ-fwd} = C_{SF-LC} \cdot Q_{sw-neg} + \Delta Q_{swf} + f_\beta |C_{QW}| Q_{wv-neg}$$

其中：

Q_{fwd}, Q_{aft}：中舱前舱壁和后舱壁位置处由于局部载荷分别产生的垂向剪力，kN，定义见[4.4.7]。

C_{SF-LC}：中舱前舱壁和后舱壁位置处由于局部载荷分别产生的垂向剪力，kN，定义见[4.4.7]。

Q_{sw-pos}，Q_{sw-neg}：航行和港内工况时在任意纵向位置的正许用静水剪力的负许用静水剪力，kN。

ΔQ_{swf}：所考虑的有限元装载模式，前舱壁处的剪力修正值，kN，取值如下：

$$\Delta Q_{swf} = \text{Min}(|\Delta Q_{mdf}|_{Mid}, |\Delta Q_{mdf}|_{Fwd})$$

其中：$$\Delta Q_{mdf} = C_d \alpha \left(\frac{M}{B_H l_H} - \rho T_{LC,mn} \right)$$

C_d ------分布系数，取作：

对于所考虑货舱的后端舱壁，除最后端货舱，$C_d = -1$；

对于所考虑货舱的前端舱壁，除最前端货舱，$C_d = 1$；

对于所考虑货舱的内部，C_d 按线性分布；

对于货舱的中间位置，$C_d = 0$；

对于最前端货舱的前端舱壁，$C_d = 0$

对于最后端货舱的后端藏壁，$C_d = 0$

其它位置处，C_d 线性分布

α ——系数，取做：$\alpha = g\, l_0 b_0 \Big/ \left(2 + \varphi \frac{l_0}{b_0} \right)$

M ——货舱内所考虑横剖面在所考察的装载工况下的质量，t。M 包括内底平面部分

下方的压载水和燃油质量，不包括舱壁凳部分；

B_H ——货舱宽度，m；

l_H ——货舱长度，m；

l_0, b_0 ——分别为所考虑货舱的双层底平面部分的长度和宽度，m；b_0 应在货舱中间的船体横剖面量取；

$\varphi = 1.38 + 1.55g\frac{l_0}{b_0}$，但不大于 3.7

$T_{LC,mh}$ ——吃水，m，在所考虑货舱中间的船体横剖面处，自基线垂直量至所考虑装载工况的水线；

ΔQ_{CF} ——满舱的剪力修正量；

ΔQ_{CE} ——空舱的剪力修正量；

ΔQ_{swa}：对于考虑的有限元装载模式，后舱壁处的剪力修正值，kN，取值如下：

以下两个位置处计算所得的ΔQ_{mdf}的绝对值的小者：中舱的后舱壁、后舱的前舱壁，计算公式如下所示，其中ΔQ_{mdf}的定义见上式定义：

$$Q_{swa} = \mathrm{Min}(|\Delta Q_{mdf}|_{Mid}, |\Delta Q_{mdf}|_{Aft})$$

f_β：浪向因子，见第 2 章第 4 节。

C_{QW}：垂向波浪剪力的载荷组合因子，见第 2 章第 2 节。

Q_{wv-pos}，Q_{wv-neg}：正向和负向的垂向波浪剪力，kN，见第 2 章第 4 节[3.2.1]。

$Q_{targ-aft}$和$Q_{targ-fwd}$应在所考虑的中舱的后舱壁和前舱壁处取得。

3.3.3.4 船体梁水平目标弯矩

船体梁水平目标弯矩，M_{h-targ}，kNm，对于给定的有限元载荷组合，取值如下：

$$M_{h-targ} = M_{wh-LC}$$

其中：

M_{wh-LC}：所考虑的动载荷工况的水平波浪弯矩，kNm，按照第 2 章第 4 节[3.5.4]计算。

M_{wh-LC}的取值如下：

- 船中货舱区域：所考虑货舱的中间位置的计算值。
- 船中货舱区域以外：所要考虑的有限元模型中所有强框架和横舱壁的弯矩值。当按

照第 3 章 3.2.3.2 要求对首货舱舱段的首尖舱或尾货舱舱段的机舱进行拉伸至实船船长之外时，对于超出规范船长的延伸区域，各个强框架处目标弯矩值取为 0。

3.3.3.5 船体梁目标扭矩

对于动载荷工况 OST 和 OSA 在目标位置处的船体梁目标扭矩，$M_{wt\text{-}targ}$，kNm，取值如下：

$$M_{wt-targ} = M_{wt-LC}(x_{targ})$$

其中：

$M_{wt-LC}(x)$：在x位置处计算的动载荷工况OST和OSA（定义见第2章第4节[3.5.5]）的波浪扭矩，kNm。

x_{targ}：船体梁扭矩的目标位置，按如下确定：

船中货舱区域：

如果$x_{mid} \leq 0.531L$：中舱后舱壁。

如果$x_{mid} > 0.531L$：中舱前舱壁。

船中货舱区域以外：使下述公式取得最小值的中舱的横舱壁处

$$\frac{M_{wt-LC}(x_{bhd})}{|M_{wt-LC}(x_{bhd})|} \cdot [M_{wt-LC}(x_{bhd}) - M_{T-FEM}(x_{bhd})]$$

x_{mid} ：中间舱舱中心处的 X 坐标，m。

x_{bhd}：中间舱前舱壁或后舱壁的 X 坐标，m。

对于非 OST 和 OSA 的动载荷工况，船体梁扭矩，$M_{wt\text{-}targ}$，在中舱的中点处应调整为 0。

3.3.4 船体梁载荷调整

3.3.4.1 通则

[3.3.4]给出的程序描述了如何对三舱段有限元模型的船体梁水平弯矩、垂向剪力和垂向弯矩分布进行调整，使其在要求的位置达到要求的目标值。船体梁载荷的目标值在[3.3.3]中定义。

船体梁剪力的目标位置在中舱的横舱壁处。最终调整后得到的目标位置处的船体梁剪力不应超过船体梁目标剪力。

通常，船体梁弯矩的目标位置在中间舱的中心。如果最大弯矩不在中舱舱中心处，则最终调整后的中舱范围内最大弯矩应不超过船体梁目标弯矩。

3.3.4.2 局部载荷分布

使用以下局部载荷计算船体梁剪力和弯矩：

a) 舱段模型全长范围内的船体结构钢材重量分布（静载）。船体结构钢材重量基于建造厚度有限元模型，与舱段有限元模型一致。

b) 货物和压载水重量（静载）。

c) 海水静压力、波浪动压力以及上浪压力（如适用）。对于港内工况，只需施加海水静压力。

d) 航行工况的货物和压载的动载荷。

上述局部载荷施加到有限元模型后，可以通过有限元加载程序得到有限元节点力。将每个纵向站位上的三维节点力累加生成局部载荷一维分布。纵向站位位于横舱壁/横框架处以及根据舱段模型网格尺寸要求位于横框架间的有限元模型典型纵向节点位置处。任何用于结构细节建模的中间节点不能作为计算局部载荷分布的纵向站位。处于纵向站位前后 1/2 站距范围内的节点力都应累加至该站上。应对于垂向和水平节点力分别累加，得到第 i 站处的合成的垂向和水平局部载荷：f_{vi}和f_{hi}。

3.3.4.3 局部载荷产生的船体梁力和弯矩

假定模型两端简支，通过局部载荷分布得到船体梁载荷的纵向分布。模型两端的支反力和每个纵向站位处由局部载荷产生的船体梁剪力和弯矩可由下式确定：

$$R_{V_fore} = -\frac{\sum_j (x_i - x_{aft}) f_{vi}}{x_{fore} - x_{aft}} \qquad R_{V_aft} = \sum_i f_{vi} + R_{V_fore}$$

$$R_{H_fore} = \frac{\sum_j (x_i - x_{aft}) f_{hi}}{x_{fore} - x_{aft}} \qquad R_{H_aft} = -\sum_i f_{hi} + R_{H_fore}$$

$$F_l = \sum_i f_{li}$$

$$Q_{V_FEM}(x_j) = R_{V_aft} - \sum_i f_{hi} \qquad \text{当} x_i < x_j \text{时}$$

$$Q_{H_FEM}(x_j) = R_{H_aft} \mp \sum_i f_{hi} \qquad \text{当} x_i < x_j \text{时}$$

$$M_{V\text{-}FEM}(x_j) = (x_j - x_{aft}) R_{V_aft} - \sum_i (x_j - x_i) f_{vi} \qquad \text{当} x_i < x_j \text{时}$$

$$M_{H\text{-}FEM}(x_j) = (x_j - x_{aft}) R_{H_aft} + \sum_i (x_j - x_i) f_{hi} \qquad \text{当} x_i < x_j \text{时}$$

其中：

R_{V_aft}、R_{V_fore}、R_{H_aft}、R_{H_fore}：在后端和前端处的垂向和水平的反作用力，kN。

x_{aft}：尾端支撑处的 X 坐标，m；

x_{fore}：首端支撑处的 X 坐标，m；

f_{vi}：纵向站位 i 处的合成垂向局部载荷，定义见[3.3.4.2]，kN；

f_{hi}：纵向站位 i 处的合成水平局部载荷，定义见[3.3.4.2]，kN；

f_{li}：纵向站位 i 处的合成纵向局部载荷，定义见[3.3.4.2]，kN；

x_j：所考虑的纵向站位 j 处的 X 坐标，m；

x_i：纵向站位 i 的 X 坐标，m。

$Q_{V_FEM}(x_j)$、$Q_{H_FEM}(x_j)$、$M_{V-FEM}(x_j)$、$M_{H-FEM}(x_j)$：由施加在有限元模型中的局部载荷在纵向站位x_j处产生的垂向和水平剪力(kN)和弯矩(kNm)。支座反力的符号约定是正的支反力产生正剪力。

3.3.4.4 纵向不平衡力

对于模型中的总净纵向力F_l不等于 0 的情况，应在 X 方向平移自由度δ_x被约束的模型一端施加纵向反力$(F_x)_j$，这可以通过对船体梁弯曲有效的所有纵向构件上施加分布的纵向轴向节点力来实现，如下所示：

$$(F_x)_j = \frac{F_l}{A_x}\frac{A_j}{n_j}$$

其中：

$(F_x)_j$：施加于第 j 个单元的一个节点上的轴向力，kN；

F_l：模型中净纵向力的和，定义见[3.3.4.3]，kN；

A_j：第 j 个单元的剖面积，m^2；

A_x：首端面的剖面积，m^2。

$$A_x = \sum_j A_j$$

n_j：横剖面上第 j 个单元的节点数，对于梁单元$n_j = 1$，对于 4 节点壳单元$n_j = 2$

3.3.4.5 船体梁剪力调整程序

本要求定义的船体梁剪力调整程序适用于第 2 章第 7 节定义的所有有限元载荷组合。对于第 2 章第 7 节载荷组合表中未直接覆盖的载荷组合应逐个考虑。

以下两种方法应用于剪力调整：

- 方法 1（M1）：在中舱的一个舱壁上进行剪力调整，见[3.3.4.6]。
- 方法 2（M2）：在中舱的两个舱壁上进行剪力调整，见[3.3.4.7]。

对于所考虑的有限元载荷组合，应按如下方法选择适用的方法：

- 对于最大剪力载荷组合（MAX SFLC），如果使用方法 1 对表 3.3.4.1 中定义的舱壁进行剪力调整后，另一个舱壁处的剪力不超过目标值，则使用方法 1 进行剪力调整，否则使用方法 2 进行调整。
- 对于其它剪力载荷组合：
  - 如果剪力值在两个舱壁处均小于或等于目标值则不需进行剪力调整。
  - 如果剪力值在一个舱壁处超过目标值且使用方法 1 进行剪力调整后另一个舱壁处的剪力值不超过目标值，则使用方法 1 进行调整，否则使用方法 2 进行调整。
  - 如果两个舱壁处的剪力值均超过目标值则使用方法 2 进行调整。

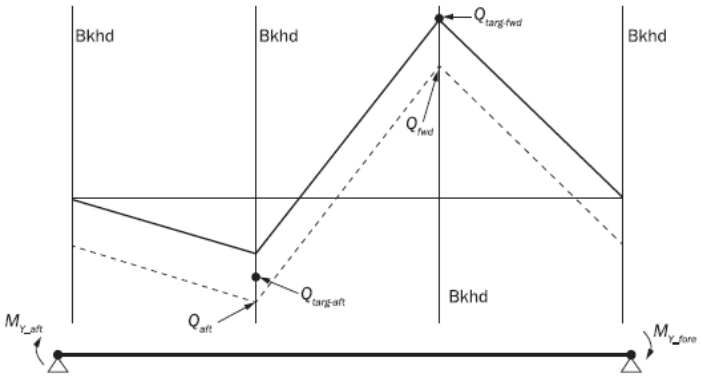
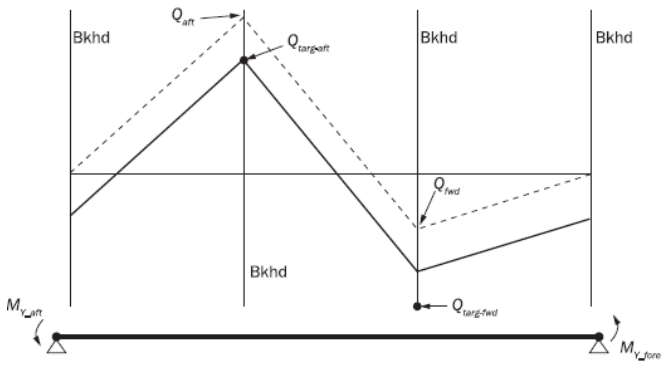
“最大剪力载荷组合”在第 2 章第 7 节的载荷组合表中使用“Max SFLC”标示。非最大剪力载荷组合即为“其它剪力载荷组合”。这些载荷组合在第 2 章第 7 节的载荷组合表中没有标示。

剪力调整的中舱舱壁位置 **表 3.3.4.1**

设计装载工况	舱壁位置	$M_{wv\text{-}LC}$	Q_{fwd} 状态	需进行剪力调整的中舱舱壁
航行工况	$X_{b-aft} > 0.5L$	<0（中垂）	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Fwd
			$Q_{fwd} \le Q_{aft}$	Aft
		>0（中拱）	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Aft
			$Q_{fwd} \le Q_{aft}$	Fwd
	$X_{b-fwd} < 0.5L$	<0（中垂）	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Aft
			$Q_{fwd} \le Q_{aft}$	Fwd

		>0 （中拱）	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Fwd
			$Q_{fwd} \leq Q_{aft}$	Aft
	$X_{b-aft} \leq 0.5L$和$X_{b-fwd} \geq 0.5L$	-	-	Fwd 和 Aft
港内工况和试验工况	任意位置	-	-	Fwd 和 Aft
Fwd：前舱壁；Aft：后舱壁。				

方法 1 通过施加垂向弯矩M_{Y_aft}和M_{Y_fore}进行垂向剪力调整　　表 3.3.4.2

垂向剪力图	中舱目标位置
	前舱壁
	后舱壁
调整后的垂向剪力 局部载荷产生的垂向剪力	

3.3.4.6 在一个舱壁上进行剪力调整的方法 1

在中舱的下述横舱壁位置的剪力调整值由下列公式取得：

- 后舱壁

$$M_{Y_aft} = M_{Y_fore} = \frac{(X_{fore} - X_{aft})}{2}(Q_{targ-aft} - Q_{aft})$$

- 前舱壁

$$M_{Y_aft} = M_{Y_fore} = \frac{(X_{fore} - X_{aft})}{2}(Q_{targ-fwd} - Q_{fwd})$$

其中：

$M_{Y_aft,}M_{Y_fore}$：为使船体梁垂向剪力发生如表 3.3.4.2 所示的调整而据[3.3.4.10]在首端和尾端施加的垂向弯矩，kNm。符号按有限元模型的轴向确定；

Q_{aft}：局部载荷产生的在中舱后舱壁位置处X_{b_aft}的垂向剪力值，kN，按[4.4.3]计算的局部载荷合力；由于垂向剪力在横舱壁位置处不连续，Q_{aft}是中舱后舱壁前后位置处最大的剪力绝对值。

Q_{fwd}：局部载荷产生的在中舱前舱壁位置处X_{b_fwd}的垂向剪力值，kN，按[3.3.4.3]计算的局部载荷合力；由于垂向剪力在横舱壁位置处不连续，Q_{fwd}是邻接中舱前舱壁前后站位处的最大的剪力绝对值。

3.3.4.7 在两个舱壁上进行垂向剪力调整的方法 2

在中舱的两个横舱壁处要求的剪力调整值应采用以下要求：

- 模型端部的垂向弯矩M_{Y_aft}，M_{Y_fore}，
- 为得到横舱壁位置处的垂向剪力ΔQ_{aft}和ΔQ_{fwd}，如表 3.3.4.4 所示的在横框架位置处施加垂向载荷。

表 3.3.4.3 展示了由垂向弯矩和垂向载荷进行的剪力调整应用示例。

$$M_{Y_aft} = M_{Y_fore} = \frac{(X_{fore} - X_{aft})}{2}(Q_{targ-fwd} - Q_{fwd})$$

$$M_{Y_aft} = \frac{X_{fore} - X_{aft}}{2} \cdot \frac{Q_{targ-fwd} - Q_{fwd} + Q_{targ-aft} - Q_{aft}}{2}$$

$$M_{Y_fore} = M_{Y_aft}$$

$$\Delta Q_{fwd} = \frac{Q_{targ-fwd} - Q_{fwd} - (Q_{targ-aft} - Q_{aft})}{2}$$

$$\Delta Q_{aft} = -\Delta Q_{fwd}$$

其中：

$M_{Y_aft,}M_{Y_fore}$：为进行船体梁垂向剪力调整而按[3.3.4.10]在前端和后端施加的垂向弯矩，kNm。符号与有限元模型坐标轴方向一致；

Q_{aft}：中舱后舱壁处的剪力调整值，KN；

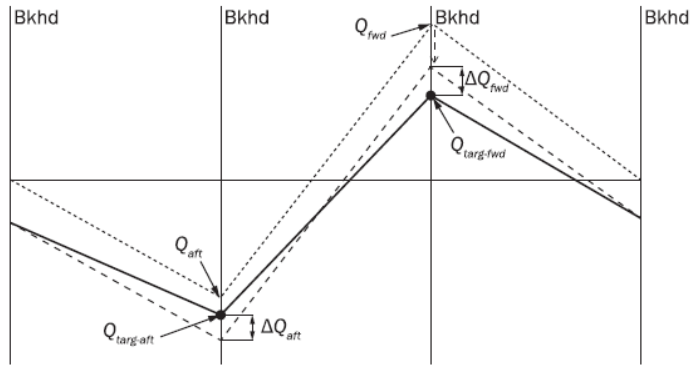
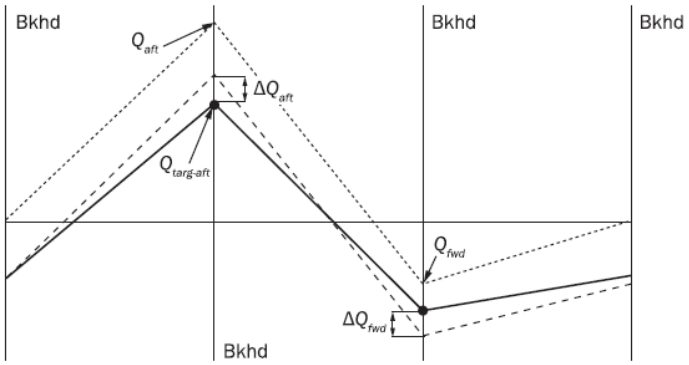
Q_{fwd}：中舱前舱壁处的剪力调整值，KN。

上述横舱壁位置处的剪力调整值，ΔQ_{aft}和ΔQ_{fwd}，应通过在如表 3.3.4.4 所示横框架位置处施加垂向力的方式得到。横框架的位置对应于实肋板的位置。垂向修正载荷不应施加在有限元模型的任何的水密横舱壁上、任何前货舱之前的横框架和后货舱之后的横框架上。

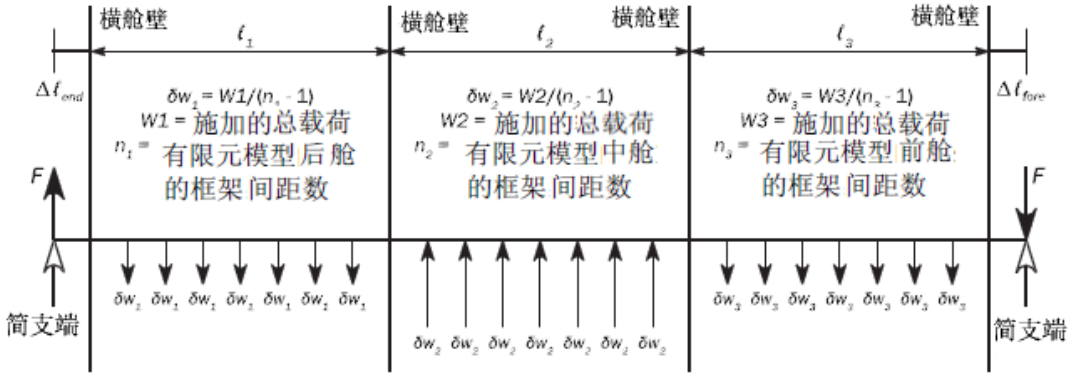
用于在增加/减小横舱壁处剪力的而施加在每一个横框架上的垂向力可以按照表 3.3.4.4 进行计算。对于非均匀的框架间距，分布于每个横框架上的垂向力的量可以按照表 3.3.4.5 计算。

通过施加垂向载荷调整的目标剪力和要求剪力表 **表 3.3.4.3**

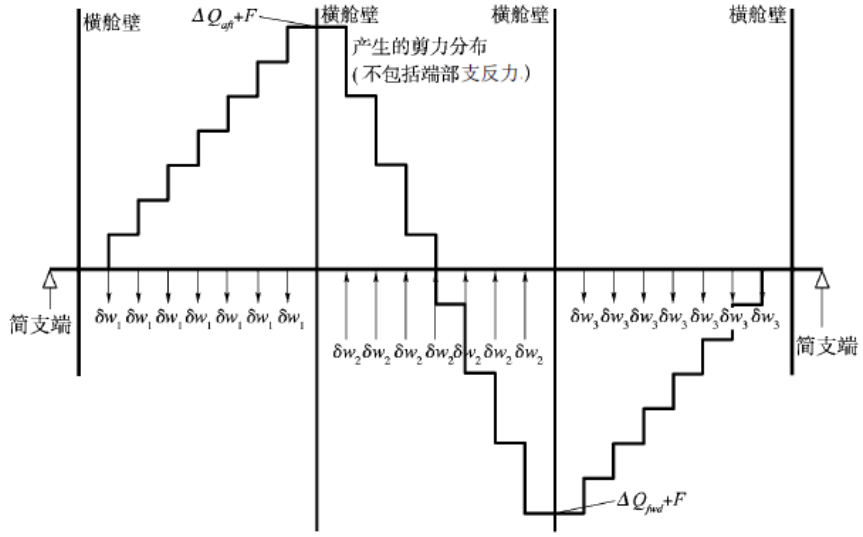
垂向剪力图	后舱壁	前舱壁

	剪力目标值	剪力目标值
	$Q_{targ-aft}$ (-ve)	$Q_{targ-fwd}$ (+ve)
	$Q_{targ-aft}$ (+ve)	$Q_{targ-fwd}$ (-ve)
——— 两次调整后的垂向剪力 - - - - - - - - 使用M_{Y-aft}和M_{Y-fore}调整后的垂向剪力 ---------- 局部载荷产生的剪力		
注 1：-ve 指负向。 注 2：+ve 指正向。		

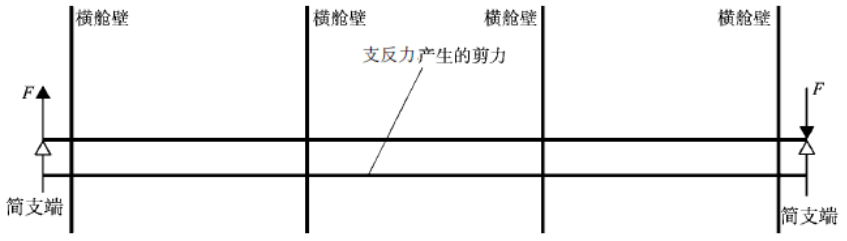
框架处垂向调整力的分布和结果剪力分布　　表 3.3.4.4



注：横舱壁框架处不加载
最尾舱后端横舱壁和最首舱前端横舱壁之外的框架不加载
F 为支承端产生的反作用力



由于在框架处调整垂向力产生的剪力分布



注：$F = 0$ if $\ell_1 = \ell_3$ and $\Delta\ell_{fore} = \Delta\ell_{end}$，且载荷关于模型长度中点对称

注 1：符号定义见表 8。

用于垂向剪力调整的垂向载荷计算公式　　表 3.3.4.4

$\delta w_1 = \dfrac{\Delta Q_{aft}(2l - l_2 - l_3) + \Delta Q_{fwd}(l_2 + l_3)}{(n_1 - 1)(2l - l_1 - 2l_2 - l_3)}$	$F = 0.5\left(\dfrac{W1(l_2 + l_1) - W3(l_2 + l_3)}{l}\right.$
$\delta w2 = \dfrac{(W1 + W3)}{(n_2 - 1)} = \dfrac{(\Delta Q_{aft} - \Delta Q_{fwd})}{(n_2 - 1)}$	

$$\delta w3 = \frac{-\Delta Q_{fwd}(2l - l_1 - l_2) - \Delta Q_{aft}(l_1 + l_2)}{(n_3 - 1)(2l - l_1 - 2l_2 - l_3)}$$

其中：

l_1： 模型后货舱长度。

l_2： 模型中货舱长度。

l_3： 模型前货舱长度。

ΔQ_{aft}： 中舱后舱壁处要求的剪力调整值，参见[4.4.7],KN。

ΔQ_{fwd}： 中舱前舱壁处要求的剪力调整值，参见[4.4.7], KN。

F： 由于在框架处施加垂向力而引起的端部反作用力，KN。

$W1$： 平均分布于有限元模型后舱的垂向力的和，$(n_1 - 1)\delta w_1$，KN。

$W2$： 平均分布于有限元模型中舱的垂向力的和，$(n_2 - 1)\delta w_2$，KN。

$W3$： 平均分布于有限元模型前舱的垂向力的和，$(n_3 - 1)\delta w_3$，KN。

n_1： 有限元模型后舱框架间距数。

n_2： 有限元模型中舱框架间距数。

n_3： 有限元模型前舱框架间距数。

δw_1： 分布力，作用在有限元模型后舱框架处，KN。

$\delta w2$： 分布力，作用在有限元模型中舱框架处，KN。

$\delta w3$： 分布力，作用在有限元模型前舱框架处，KN。

Δl_{end}： 有限元模型后舱后舱壁距后端的距离。

Δl_{fore}： 有限元模型前舱前舱壁距前端的距离。

l： 包括超出端部舱壁以外部分在内的有限元模型的总长：$= l_1 + l_2 + l_3 + \Delta l_{end} + \Delta l_{fore}$

注 1：公式中载荷、载力以及剪力调整的正方向与表 3.3.4.2 和表 3.3.4.3 中的一致。

注 2:：W1 + W3＝W2

注 3：上述公式仅适用于在各自舱内具有等框架间距的情况。各舱的长度和框架间距可以不相同。

对于在各个舱内存在不均匀的框架间距的情况，按照表 3.3.4.4 使用平均框架间距l_{av-i}计算平均框架分布载荷$\delta w_{av\text{-}i}$，其中$i = 1,2,3$代表各个舱。然后，$\delta w_{av\text{-}i}$按下式重新分布至不均匀的框架上：

$$\delta w_i^k = \delta w_{av\text{-}i} \frac{l_{av\text{-}i}^k}{l_{av\text{-}i}}$$ k=1,2,…,$n_i - 1$，对于货舱 i 的每个框架，$i = 1,2,3$

其中：

l_{av-i}： 平均框架间距，在货舱 i 中使用l_i/n_i计算得到，其中$i = 1,2,3$。

l_i：　货舱 i 的长度，m，其中$i=1,2,3$，定义见表 3.3.4.4。

n_i：　货舱 i 中的框架间距数，，其中$i=1,2,3$，定义见表 3.3.4.4.

δw_{av-i}：　在货舱 i 内，按表 3.3.4.4 使用平均框架间距l_{av-i}计算得出的平均一致框架间距（m）分布力，其中$i=1,2,3$。

δw_i^k：　在货舱 i 内不均匀框架 k 上的分布力，kN。

l_{av-i}^k：　在货舱 i 内对于每个框架 k 的等效框架间距按下式取，m，其中 k=1,2,…，n_i-1。

$$l_{av-i}^k = l_i^1 - \frac{l_{av-i} l_i^1}{l_i^1 + l_i^{n_i}} + \frac{l_i^2}{2}$$　对于货舱 i 中的 k=1(第一个框架)

$$l_{av-i}^k = \frac{l_i^k}{2} + \frac{l_i^{k+1}}{2}$$　对于货舱 i 中的 k=2,3,…,n_i-2

$$l_{av-i}^k = l_i^{n_i} - \frac{l_{av-i} l_i^{n_i}}{l_i^1 + l_i^{n_i}} + \frac{l_i^{n_i-1}}{2}$$　对于货舱 i 中的 k=n_i-1(最后一个框架)

l_i^k：　货舱 i 中框架 k-1 和框架 k 间的间距，m。

对于均匀框架间距要求的垂向力δw_i和非均匀框架间距所要求的垂向力δw_i^k应通过剪流分布方法施加到指定的剖面上。如将垂向力δw_i施加至框架剖面，在单元中点处计算的剪流q_f为：

$$q_{f-k} = \frac{\delta w_i}{I_y} Q_k$$

其中：

q_{f-k}：在横框架的第 k 个单元的中点处计算的剪流，N/mm；

δw_i：第 i 货舱每个横框架上的分布力，见表 3.3.4.4，N，其中$i=1,2,3$；

I_y：船体梁横剖面惯性矩，mm^4；

Q_k：关于累积剖面积中性轴的一次矩，mm^3，计算公式如下，其中累积剖面积由剖面的自由端（剪应力自由端）开始至剪流q_{f-k}的点s_k：

$$Q_k = \int_0^{S_k} z_{neu} t \ ds$$

z_{neu}：由积分点 s 至垂向中性轴垂向距离；

t：横剖面积分点处的板厚度，mm。

横框架处第 j 个有限元网格点处的分布剪力，F_{grid}可以通过该点处连接单元的剪流按下式获得：

$$F_{j-grid} = \sum_{k=1}^{n} q_{f-k} \frac{l_k}{2}$$

其中：

l_k：　横框架上连接到节点 j 的第 k 个单元的长度，mm。

n： 连接到节点 j 的单元总数。

剪流在横剖面上具有方向，因而分布力F_{grid}是一个向量力。对于垂向船体梁剪力修正，需将使用上述剪流方法计算的垂向力分量和水平力分量施加至横剖面。

3.3.4.8 调整船中货舱区域的垂向和水平弯矩的程序

对于需要达到垂向弯矩目标值的情况，应在舱段有限元模型的两端施加一个附加的垂向弯矩，以便在模型中间舱达到此目标值。端部垂向弯矩按下式计算：

$$M_{v-end} = M_{v-targ} - M_{v-peak}$$

其中：

M_{v-end}： 据[4.4.10]应施加于有限元模型两端的附加垂向弯矩，kNm。

M_{v-targ}： 中拱（正）或中垂（负）垂向弯矩，定义见[3.3.3.2]，kNm。

M_{v-peak}： 中舱范围内的最大或最小弯矩，kNm，这些弯矩是由[3.3.4.3]中描述的局部载荷和[3.3.4.5]中为剪力调整产生的。
如果$M_{v\text{-}peak}$为中拱（正）弯矩，则$M_{v\text{-}peak}$取最大值，如果$M_{v\text{-}peak}$为中垂（负）弯矩，则$M_{v\text{-}peak}$取最小值。$M_{v\text{-}peak}$的计算基于简支梁模型，具体计算

$$M_{v-peak} = Extremum\left\{M_{v_FEM}(x) + M_{lineload} + M_{Y_aft}\left(2\frac{x - x_{aft}}{x_{fore} - x_{aft}} - 1\right)\right\}$$

$M_{v_FEM}(x)$： 由于[3.3.4.3]中所述的局部载荷而引起的x位置处的垂向弯矩，kNm。

M_{Y_aft}： 端部弯矩，kNm，如下述取值：
使用方法 1：按[3.3.4.6]取值。
使用方法 2：按[3.3.4.7]取值。
其它情况：$M_{Y_{aft}}$=0

$M_{lineload}$： 由于在框架处按方法 2 施加垂向线载荷而产生的x位置处的垂向弯矩，kNm，按下式计算：

$M_{lineload} = -(x - x_{aft})F - \sum_i (x - x_i)\,\delta w_i$，当$x_i < x$时

F： 由于如表 7 所示的在横框架处施加的垂向力产生的模型端部支反力，kN。

x： 中间舱横框架的x坐标，m。

δw_i： 为产生要求的剪力而在横框架i处施加的垂向力。

对于需要达到水平弯矩目标值的情况，应在舱段有限元模型的两端施加一个附加的水平弯矩，以便在模型中舱内达到目标值。附加水平弯矩按下式计算：

$$M_{h-end} = M_{h-targ} - M_{h-peak}$$

M_{h-end}： 据[4.4.10]应施加于有限元模型两端的附加水平弯矩，kN。

M_{h-targ}： 水平弯矩，见[3.3.3.4]。

M_{h-peak}： 由[3.3.4.3]中描述的局部载荷在中舱范围内产生的最大或最小水平弯矩，kNm。
如果为正（右舷处于受拉状态），则$M_{h\text{-}peak}$取最大水平弯矩，如果

$M_{h\text{-}targ}$为负（左舷处于受拉状态），则$M_{h\text{-}targ}$取最小水平弯矩。$M_{h\text{-}peak}$的计算基于简支梁模型，如下式：$M_{h-peak} = Extremum\{M_{H_FEM}(x)\}$

$M_{H_FEM}(x)$：　由 [3.3.4.3]中所述的局部载荷引起的x位置处的水平弯矩，kNm。

垂向和水平弯矩应在中舱整个舱长范围内进行计算以便确定每一个最大/最小弯矩所在的位置和值。

3.3.4.9 调整船中货舱区范围外的垂向和水平弯矩的程序

如[3.3.3.2]所述，为了在每一个框架和横舱壁位置处达到船体梁垂向目标值，垂向弯矩调整值m_{vi}应如图 19 所示，施加在有限元模型的强框架和横舱壁位置上。在每个纵向位置 i 处的垂向弯矩调整值应按下式计算：

$$f(i) = M_{v-targ}(i) - M_{v-FEM}(i) - M_{lineloaad}(i) - M_{Y-aft}.\left(2\frac{X_{i-}X_{aft}}{X_{fore} - X_{aft}} - 1\right)$$

$$m_{vi} = \frac{f(i) + f(i+1)}{2} - \sum_{j=0}^{i-1} m_{vj}$$

$$m_{v-end} = -\sum_{j=0}^{n_t} m_{vj}$$

其中：

i：　对应于第 i 站的索引，由尾端面从 1 开始至n_t。

n_t：　施加垂向调整弯矩m_{vi}的纵向站位总数。

m_{vi}：　应施加于处于站位 i 处的横框架或横舱壁上的垂向弯矩调整值，kNm。

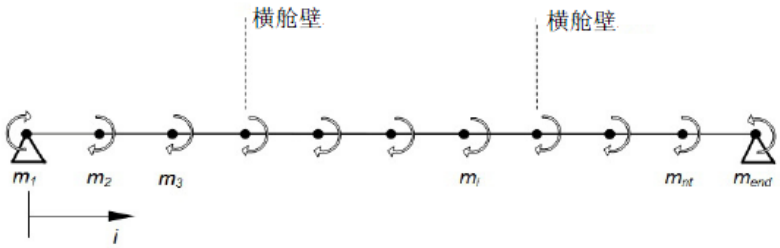
m_{v-end}：　施加在模型首端面n_t+1 站位处的垂向弯矩调整值，kNm。

m_{vj}：　求和参数，按如下取值：
$m_{v0} = 0$当 $j=0$
$m_{vj} = m_{hi}$当 $j=i$

$M_{v-targ}(i)$：　站位 i 处要求的垂向目标弯矩，kNm，按[3.3.3.2]计算。

$M_{v-FEM}(i)$：　局部载荷在站位 i 处产生的垂向弯矩分布，kNm，按[3.3.4.3]计算。

$M_{lineload}(i)$：　为进行垂向剪力修正而施加的线载荷在站位 i 处产生的垂向弯矩，kNm，见[3.3.4.8]。



此图中m_{hi}可以替换为m_{vi}

图 3.3.4.1 船中货舱区外的弯矩调整

为了在[3.3.3.4]中定义的每个横框架和横舱壁位置处达到船体梁水平目标弯矩，应在有限元模型的横框架和横舱壁位置处施加水平弯矩调整值m_{hi}，如图 3.3.4.1 所示。在每个纵向

位置 i 处的水平弯矩调整值应按下式计算：

$$f(i) = M_{h-targ}(i) - M_{H-FEM}(i)$$

$$m_{\mathrm{hi}} = \frac{f(i) + f(i+1)}{2} - \sum_{j=0}^{i-1} m_{hj}$$

$$m_{h-end} = -\sum_{j=0}^{n_t} m_{hj}$$

其中：

i：　　弯矩调整值m_{hi}的纵向位置。

n_t：　　施加水平调整弯矩m_{hi}的纵向站位总数。

m_{hi}：　　应施加于处于站位 i 处的横框架或横舱壁上的水平弯矩调整值，kNm。

m_{h-end}：　　施加在模型首端面n_t+1 站位处的水平弯矩调整值，kNm。

m_{hj}：　　求和参数，按如下取值：

$m_{h0} = 0$当 $j=0$

$m_{hj} = m_{hi}$当 $j=i$

$M_{h-targ}(i)$：　　站位 i 处要求的水平目标弯矩，kNm，按[4.3.4]计算。

$M_{H-FEM}(i)$：　　局部载荷在站位 i 处产生的水平弯矩分布，kNm，按[4.4.3]计算。

垂向和水平弯矩调整值，m_{vi}和m_{hi}，应施加在有限元模型的所有横框架和横舱壁位置处。调整值通过在船体梁纵向有效抗弯单元上施加纵向轴向节点力实现，如[3.3.4.10]所述。

3.3.4.10 在有限元模型上施加弯矩调整值

应在所考虑的横剖面上分布纵向轴向节点力于剖面的所有船体梁纵向有效抗弯单元上，以此达到在所考虑的舱段模型横剖面上施加所要求的垂向和水平弯矩调整值。

- 对于垂向弯矩：

$$(\mathrm{F_x})_i = \frac{M_v}{I_{y-n50}} \frac{A_i}{n_i} z_i$$

- 对于水平弯矩：

$$(\mathrm{F_x})_i = \frac{M_h}{I_{z-n50}} \frac{A_i}{n_i} y_i$$

其中：

M_v：　　施加在模型所考虑剖面上的垂向弯矩调整值，kNm。

M_h：　　施加在模型端部所考虑剖面上的水平弯矩调整值，kNm。

$(\mathrm{F_x})_i$：　　施加在第 i 个单元节点上的轴向力，kN。

I_y：　　船体梁在所考虑的横剖面处关于其水平中性轴的垂向惯性矩，m^4。

I_z：　　船体梁在所考虑的横剖面处关于其垂直中性轴的垂向惯性矩，m^4。

z_i：　　中性轴至第 i 单元横剖面形心处的垂向距离，m。

y_i：　　中性轴至第 i 单元横剖面形心处的横向距离，m。

A_i：　　第 i 个单元的横剖面积，m^2。

n_i：　　横剖面上第 i 个单元的节点数，对于梁单元，$n_i = 1$，对于壳单元，$n_i = 2$。

对于非模型端部的横剖面，应使用所考虑横剖面向前和向后的相应的第 i 个单元的剖面积的平均值。

3.3.5 调整船体梁矩扭矩的程序

3.3.5.1 通则

本子条款描述了调整有限元舱段模型的船体梁扭矩分布以使在目标位置处达到目标扭矩的程序。船体梁扭矩目标值在[3.3.3.5]中给出。

3.3.5.2 局部载荷产生的扭矩

由于局部载荷在纵向站位 i 处产生的扭矩，$M_{T\text{-}FEMi}$，kNm，使用下述公式确定：

$$M_{T-FEMi} = \sum_k [f_{hik}(z_{ik} - z_r)] - \sum_k (f_{vik} y_{ik})$$

其中：

M_{T-FEMi}：　局部载荷在纵向站位 i 处产生的累积扭矩，kNm。

z_r：　扭转参考点的垂向坐标，取$z_r = 0$。

f_{hik}：　纵向站位 i 处节点 k 的水平节点力，kN。

f_{vik}：　纵向站位 i 处节点 k 的垂向节点力，kN。

y_{ik}：　纵向站位 i 处节点 k 的 Y 坐标，m。

z_{ik}：　纵向站位 i 处节点 k 的 Z 坐标，m。

M_{T-FEM0}：　局部载荷在有限元模型尾端处（对于最首货舱是首端）产生的累积扭矩，kNm，按下式取值：

$M_{T-FEMO} = \sum_k [f_{h0k}(z_{0k} - z_r)] - \sum_k (f_{v0k} y_{0k}) + R_{H_fwd} \cdot (z_{ind} - z_r)$ 对于最首货舱模型

$M_{T-FEMO} = \sum_k [f_{h0k}(z_{0k} - z_r)] - \sum_k (f_{v0k} y_{0k}) + R_{H_aft} \cdot (z_{ind} - z_r)$ 对于其它货舱模型

R_{H_fwd}　前端处的水平反作用力，定义见[3.3.4.3]。

R_{H_aft}：　尾端处的水平反作用力，kN，定义见[3.3.4.3]。

z_{ind}：　独立点的垂向坐标，m，定义见[3.2.5]。

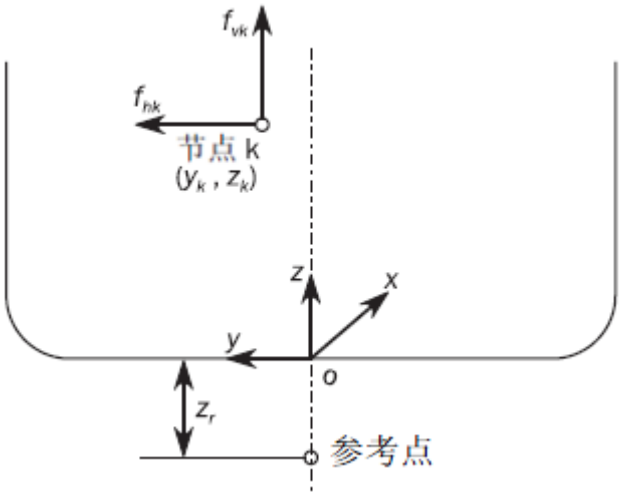


图 3.3.5.1 站位扭矩的力和作用位置

3.3.5.3 船体梁扭矩

船体梁扭矩，$M_{T\text{-}FEM}(x_j)$，kNm，通过由尾端面（对于最首货舱是首端面）开始累积每一站上的扭矩得到，如下式所示：

$$\mathrm{M}_{T-FEM}(x_j) = \sum_i M_{T-FEMi}$$

- 对于最首舱段模型，$x_i \geq x_j$
- 其它情况：$x_i < x_j$

其中：

$\mathrm{M}_{T-FEM}(x_j)$：　纵向站位x_j处的船体梁扭矩，kNm。

x_j：　纵向站位j处的 X 坐标，m。

扭矩分布在[3.3.5.2]中给出，在每一个纵向站位处有一个陡变。

3.3.5.4 调整船体梁扭矩至目标值的程序

船体梁扭矩应通过在模型尾端面（对于最首货舱是首端面）的独立点上施加船体梁扭矩M_{T-end}（kNm）来调整，如下式所示：

$$M_{T-end} = M_{wt-targ} - M_{wt}(x_{targ})$$

其中：

x_{targ}：　船体梁扭矩目标位置处的 X 坐标，m，定义见[3.3.3.5]。

$M_{wt-targ}$：　在目标位置处应达到的船体梁目标扭矩，kNm，详见[3.3.3.5]。

$M_{wt}(x_{targ})$：　目标位置处由于局部载荷产生的船体梁扭矩，kNm。

由于在每个纵向站位处船体梁扭矩分布有陡变，船体梁扭矩应据目标位置处前和后的值来确定：对于正扭矩取最大值，对于负扭矩取最小值。

3.4　强度评估

3.4.1 评估区域

3.4.1.1 针对验收衡准的结果验证应在中舱长度范围内进行，包括中舱完整的槽型舱壁结构（完整的底凳和顶凳）、压载舱横舱壁水平桁，如图 3.4.1.1 所示。其中对于首舱舱段模型，评估范围前端至首舱防撞舱壁。

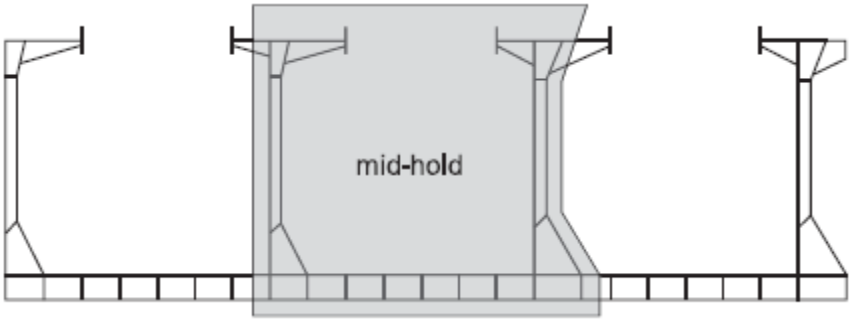


图 3.4.1.1 评估区域的纵向范围

3.4.1.2 评估区域中的下述结构构件应按[3.4.2]中的衡准进行验证：

- 所有船体梁纵向结构构件，
- 所有主要支撑构件和中舱内的舱壁，
- 所有横舱壁的组成结构构件，如：
- 凳结构及与其相连的纵桁和双层底实肋板，以及局部纵桁
- 边舱平面舱壁的水平桁及其相连的横向结构
- 组成机器处所前端横舱壁的所有结构构件和此横舱壁之后 15%的最尾货舱舱长范围内的所有船体梁纵向结构构件。

3.4.2 屈服强度评估

3.4.2.1 对于[3.4.1.2]中定义的所有结构构件板，其 von Mises 应力σ_{vm}（N/mm^2）应基于壳单元的膜正应力和剪应力。应采用单元中心的中面应力，如下式：

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

其中：

σ_x，σ_y：　单元膜正应力，N/mm^2。

τ_{xy}：　单元剪应力，N/mm^2。

3.4.2.2 对于梁单元和杆单元，轴向应力σ_a（N/mm^2）应只基于轴向力计算。轴向应力应采用单元长度中点处的应力。

3.4.2.3 粗网格应力衡准

目标舱船体结构单元应符合以下衡准：

$$\lambda_y \leq \begin{matrix} 1.0 & S+D \\ 1.0 & S \end{matrix}$$

其中：

λ_y：　屈服利用因子。

一般情况下，对于板单元：$\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{R_y}$。

一般情况下，对于杆单元或梁单元：$\lambda_y = \frac{|\sigma_a|}{R_y}$

σ_{vm}：　Von Mises 应力，N/mm^2。

σ_a：　　杆或梁单元的轴向力，N/mm^2。

R_y：　　许用应力，取$R_y = 220/K$，N/mm^2。

3.4.2.4 对于主要支撑构件翼板，应采用轴向应力进行屈服衡准校核。

3.4.2.5 对于应进行细化网格分析的区域，如果其舱段有限元分析中该区域的单元 Von Mises 应力超过了验收衡准，则细化网格分析中，在等效于舱段有限元分析模型网格尺寸面积范围内的平均 Von Mises 应力应满足上述屈服衡准。

3.4.2.6 开孔处的屈服利用应子应进行剪应力修正，除 3.4.2.7 要求之外，腹板开孔处的单元剪切应力应根据下式对其因剪切面积的损失进行修正。用于计算按屈服衡准进行验证的单元的 Von Mises 应力应为修正后的单元剪切应力。

$$\tau_{cor} = \frac{h\, t_{mod0}}{A_{shr}} \tau_{elem}$$

其中：

τ_{cor}：　　修正后的单元剪切应力，N/mm^2。

h：　　开孔处桁材腹板高度，mm，如表 1 所示。对于开孔几何已建模的情况，h取桁材腹板高度减去已建模开孔高度后的高度。

t_{mod}：　　开孔处的腹板建模厚度，mm。

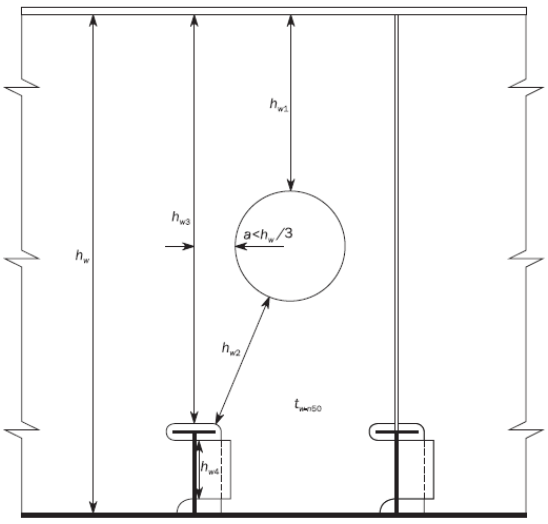
A_{shr}：　　腹板的有效剪切面积，mm，应取腹板面积减去因开孔（包括骨材开孔）损失的面积后的面积，按下式计算：

$$A_{shr} = (h_w + t_f + t_p)t_w$$

式中，t_f：主要支撑构件面板厚度，mm，

t_p：支撑构件所在位置船体板厚度，mm，

h_w：减去开孔之后的腹板高度，计算方式见下图：

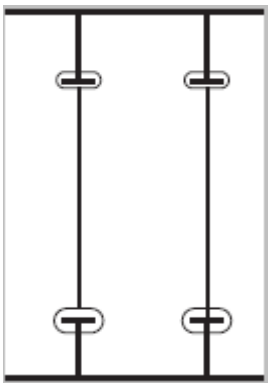
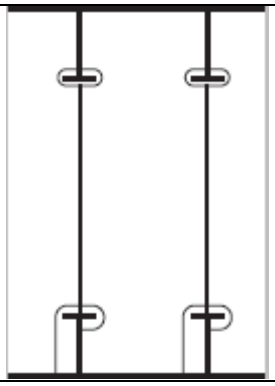
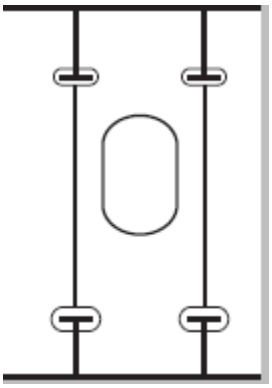


τ_{elem}：　　修正前的单元剪切应力，N/mm^2。

3.4.2.7 开孔剪应力修正的免除

对于表 3.4.2.1 中列出的情况，若其λ_y/C_r符合[3.4.2.3]中的衡准，则不要求进行开孔的单元剪应力修正。

剪切修正的免除　　**表 3.4.2.1**

标识	图形	建模剪切面积与有效剪切面积的差占有效剪切面积的百分比 $\frac{A_{FEM}-A_{shr}}{A_{shr}}\cdot 100\%$	屈服衡准折减因子，c_r
安装有补板或领板的局部支撑骨材的上下开孔		$<15\%$	0.85
安装有补板或领板的局部支撑骨材的上开孔		$<20\%$	0.80
开孔处，安装有领板的局部支撑骨材的上开孔		$<40\%$	0.60
A_{shr}：腹板的有效剪切面积，mm^2，应取腹板面积减去所有开孔面积和骨材通焊孔的面积后的面积。			

3.5 细化强度评估

3.5.1 一般要求

3.5.1.1 货舱区主要构件详细应力评估应按照本节要求进行。

3.5.2 评估部位

3.5.2.1 规定的部位应进行细化网格有限元分析。

3.5.2.2 规定的部位，如果在舱段模型分析中相当应力超出 90%许用应力时，则应进行细化网格有限元分析。细化的部位为：

（a）纵舱壁与内底板相交处；

（b）纵舱壁折角处；

（c）纵舱壁与甲板相交处；

（d）槽型横舱壁与底凳相交处；

（e）底凳与内底相交处；

（f）舱口角隅处；

（g）平面横舱壁水平桁的趾端；

（h）平面横舱壁垂直扶强材与甲板纵骨、外底纵骨相交处；

（i）高应力区域开孔处。

3.5.3 有限元模型

3.5.3.1 舱段整体模型应按照 3.2.2 节要求进行。

3.5.3.2 采用子模型方法细化时，子模型的最小范围是：子模型的边界对应于相邻主要支撑构件所在的位置。

3.5.3.3 细网格区域的网格尺寸应不大于50×50mm。

3.5.3.4 细化网格区域的范围应由校核区域向各个方向延伸不少于 10 个单元。网格密度由细网格区域至细网格模型的边界应保持光滑过渡。

3.5.4.5 细网格区域中的所有板应使用壳单元表示。细网格区域中的单元长宽比应尽可能接近 1。在细网格区域中应避免网格密度变化和三角形单元的使用。在任何情况下，细网格模型中的单元的长宽比都不应超过 3。应避免使用单元角度小于 45 度和大于 135 度的扭曲单元。细网格区域中的骨材应使用壳单元建模。细网格区域外的骨材可以使用梁单元建模。

3.5.4 细化网格强度标准

3.5.4.1 使用 Von Mises 应力σ_{vm}作为参考应力，Von Mises 应力的计算基于壳单元中心点处的膜正应力和剪应力。应使用单元的中面应力进行评估。

3.5.4.2 最大许用应力基于[3.5.3]中所规定的50×50mm的网格尺寸。如果使用了更小的网格尺寸，可以用等效于要求的网格尺寸的范围内使用面积加权 Von Mises 应力方法计算所

得的应力与许用应力做对比。用于平均的单元的所有边界必须完全落在要求的范围之内。平均应力应基于单元中心点的应力计算，不应使用通过内插/外插方法得到的应力值。应力平均不应跨越结构不连续处和对接焊接结构处进行。

3.5.4.3 细化网格应力衡准如下：

$$\lambda_f \le 1.7 \quad \text{对于非临近焊缝单元}$$

$$\lambda_f \le 1.5 \quad \text{对于临近焊缝单元}$$

其中：

λ_f： 细化网格屈服利用因子。

对于壳单元：$\lambda_f = \dfrac{\sigma_{vm}}{R_y}$

对于杆单元：$\lambda_f = \dfrac{|\sigma_a|}{R_y}$

σ_{vm}： Von Mises 应力， N/mm^2。

σ_a： 杆单元的轴向应力， N/mm^2。

第 4 章　屈曲强度评估

4.1　一般要求

4.1.1　一般规定

(1) 本章给出了用于局部支撑构件、主要支撑构件及其他构件，如支柱、槽形舱壁和肘板的屈曲和极限强度评估的方法和衡准。

(2) 对于各结构构件，其特征屈曲强度应取最不利/临界的屈曲失效模式。

(3) 除另有规定外，本章中对结构构件的要求都是基于从总厚度中扣除标准减薄厚度t_r后的尺度，其中，t_r的定义见 4.1.5(1)。

(4) 本章中将压应力、剪应力取为正值，拉应力取为负值。除另有规定外，本章中的应力都是指修正后的应力σ_A，σ_A的定义见 4.1.5(2).

(5) 由本章得到的屈曲能力给出了结构极限能力的下限估计值，或者不遭受较大永久变形时板格所能承受的最大载荷。

(6) 本章在屈曲能力评估中利用了板的弹性后屈曲实际效应，并考虑到了结构部件之间，如板和加强筋之间的载荷重新分布。对于较柔性的结构，基于该方法计算给出的能力值通常会高于理想弹性屈曲能力（最小特征值）。允许较柔性加筋板结构部件发生弹性屈曲隐含说明了在较高的屈曲利用水平下将会发生大的弹性挠曲且面内刚度会降低。

(7) 经 CCS 同意，也可接受按照其他技术标准进行屈曲校核的方法及结论。

4.1.2　适用范围

（1） 本章加筋板和槽形板结构的屈曲评估，应根据下面的要求实施：

① 4.2 节用于加筋/非加筋板格、槽形舱壁结构的有限元屈曲分析要求；

② 4.3 节用于计算板、加强筋、支杆、支柱和横撑材、槽形舱壁结构的屈曲能力；

③ 4.4 节提供了加筋/非加筋板格、支杆、支柱和横撑材、槽形舱壁结构的屈曲评估衡准。

（2） 加强筋

本章中提到的加强筋的屈曲评估适用于沿着屈曲板格长边方向的加强筋。

（3） 加大加强筋

用作永久通道（PMA）的加大加强筋（包括设有或未设腹板加强筋），如适用，应满足本章中给出的屈曲分析要求。

4.1.3　评估方法

考虑不同的边界条件类型，应按照下面两种方法之一进行屈曲评估：

（1） 方法 A：受到周围结构/邻接板的约束作用，基本板格的所有边界都强迫保持直线(但可以在面内各方向上做自由移动)。

（2） 方法 B：由于边界处的面内刚度较小和/或没有周围结构/邻接板的约束作用，基本板格的边界不必强迫保持直线。

4.1.4 屈曲利用因子

屈曲利用因子 η 定义为施加的载荷和对应的极限能力或屈曲强度之比。

对于组合载荷，屈曲利用因子 η_{act} 定义为施加的等效应力和对应的屈曲能力之比，即：

$$\eta_{act} = \frac{W_{act}}{W_u} = \frac{1}{\gamma_c} \tag{4.1}$$

式中：W_{act} 施加的等效应力；

W_u 等效屈曲能力；

γ_c 结构发生失效时的应力倍增因子，定义见本章 4.3 节。

对于每一种典型的失效模式，对应的板格能力应基于施加的应力组合，然后按照比例增大或者减小应力直至垮塌进行计算。

图 4.1.4 描述了一个结构构件在 σ_x、σ_y 应力作用下的屈曲能力和屈曲利用因子。

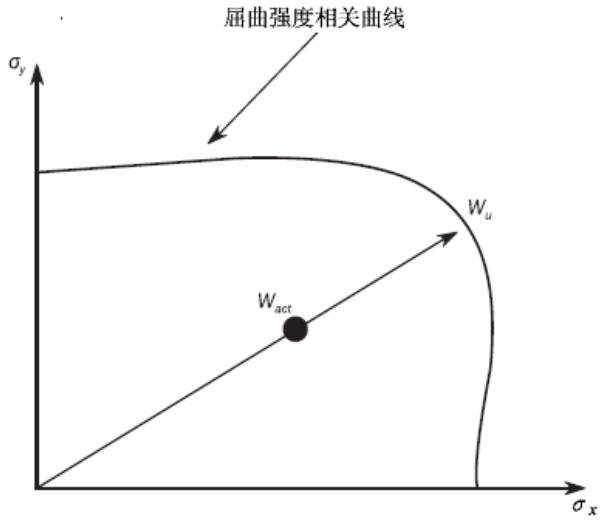


图 4.1.4 屈曲能力和屈曲利用因子示例

4.1.5 厚度折减和应力修正

（1） 厚度折减

在本章中，所有板格和加强筋等结构都应扣除适当的标准减薄厚度 t_r，如表 4.1.5 所示。

标准减缩厚度，用来计算临界屈曲应力 **表 4.1.5**

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

（2） 应力修正

在进行屈曲评估时，应基于舱段或整船有限元计算得到的应力（包括正应力、剪应力），并进行如下修正

$$\sigma_A = \frac{\sigma t}{t - t_r} \tag{4.2}$$

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 4.1.5 中所列的标准减薄厚度。

4.1.6 整船有限元分析的屈曲评估要求

对于整船有限元分析，应基于以下两个步骤进行验证性的屈曲评估：

（1）对一些关键结构区域（重点包括舱段有限元分析中发现的屈曲利用因子较高的区域，如屈曲利用因子大于衡准的 95%以上）进行屈曲评估，并满足相关的衡准要求。如不满足，应在相应结构位置处进一步扩大评估区域进行屈曲评估，直至对整船结构进行屈曲评估，并满足相关的衡准要求。

（2）对于相关结构的整船有限元屈曲评估结果，应与相应的舱段有限元屈曲评估结果进行比较。如整船有限元屈曲评估给出的屈曲利用因子较舱段评估的高很多（如 20%以上，且屈曲利用因子大于衡准的 95%），也应在相应结构位置处进一步扩大评估区域进行屈曲评估，直至对整船结构进行屈曲评估，并满足相关的衡准要求。

此外，对于舱段有限元评估区域以外的结构区域，在整船有限元分析中应进行屈曲评估。

4.2 板格类型

4.2.1 符号说明

η_{all} ——许用屈曲利用因子，定义见本章 4.4.1。

α ——板格的长宽比，定义见本章 4.3 节。

4.2.2 一般规定

（1）适用条件

本节要求适用于直接强度分析中承受正应力、剪应力和侧向压力的结构构件的屈曲评估。

（2）结构单元

船体结构中的板架应模拟成加筋或非加筋板格，并根据板格所处位置和加筋布置情况，合理选用本章 4.1.3 中定义的方法 A 或方法 B 进行评估。如对于船体中的一些典型结构，应根据表 4.2.2 和图 4.2.2(1)～图 4.2.2(4)进行板格定义和评估方法选择。

结构单元的板格定义和评估方法　　表 4.2.2

结构单元	评估方法	常规板格定义
纵向结构，见图 4.2.2(1)		
纵向加筋板格 外壳板 甲板 内壳 底边舱斜板 纵舱壁	SP-A	长度：强框架之间 宽度：主要支撑构件(PSM)之间
与纵舱壁对齐或与底边舱斜板相连的双层底纵桁	SP-A	长度：强框架之间 宽度：整个腹板高度
不与纵舱壁对齐或与底边舱斜板相连的双层底纵桁腹板	SP-B	长度：强框架之间 宽度：整个腹板高度
双壳边舱内，与底边舱斜板相连的纵向平台板	SP-A	长度：强框架之间 宽度：整个腹板高度
双壳边舱内，不与底边舱斜板相连的纵向平台板	SP-B	长度：强框架之间 宽度：整个腹板高度
单壳纵桁腹板	UP-B	局部加强筋 / 面板 /PSM 之间
横向结构，见图 4.2.2(2)		
甲板横向桁材腹板，包括肘板	UP-B	局部加强筋 / 面板 /PSM 之间
双壳边舱横隔板	SP-B	长度：整个腹板高度 宽度：主要支撑构件之间
所有不规则的加筋板格，如底边舱和舭部处的腹板板格	UP-B	局部加强筋 / 面板 /PSM 之间
双层底肋板	SP-B	长度：整个腹板高度 宽度：主要支撑构件之间
垂直桁材，包括肘板	UP-B	垂直桁材加强筋 / 面板 /PSM 之间
横撑材腹板	UP-B	垂直桁材加强筋 / 面板 /PSM 之间
横舱壁，见图 4.2.2(3)		
所有规则的舱壁加筋板格，包括与常规加强筋垂直的次要屈曲加强筋(如短梁)	SP-A	长度：主要支撑构件之间 宽度：主要支撑构件之间
所有不规则的舱壁加筋板格，如底边舱和舭部处的腹板板格	UP-B	局部加强筋 / 面板之间
舱壁水平桁腹板，包括肘板	UP-B	局部加强筋 / 面板之间
舱口间甲板，见图 4.2.2(4)		
顶 / 底凳，包括加强筋	SP-A	长度：隔板之间 宽度：凳的边长
凳的隔板	UP-B	局部加强筋 / 面板 /PSM 之间
舱口间甲板	SP-A	局部加强筋 / PSM 之间
注：①SP 和 UP 分别表示加筋板格和非加筋板格；		

②A 和 B 分别表示方法 A 和方法 B。

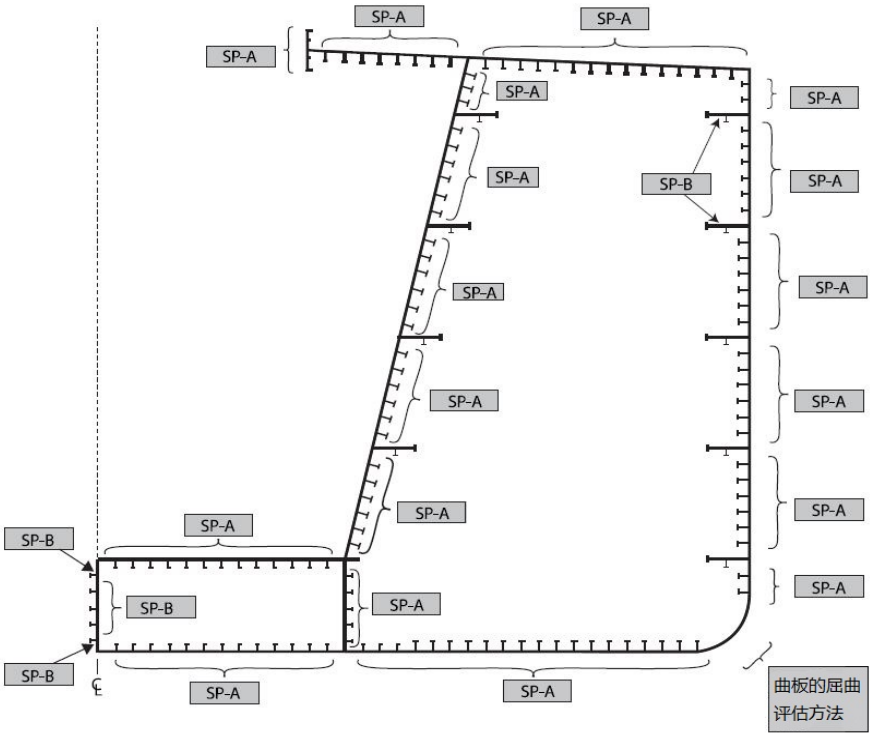


图 4.2.2(1)　典型矿砂船的纵向板格

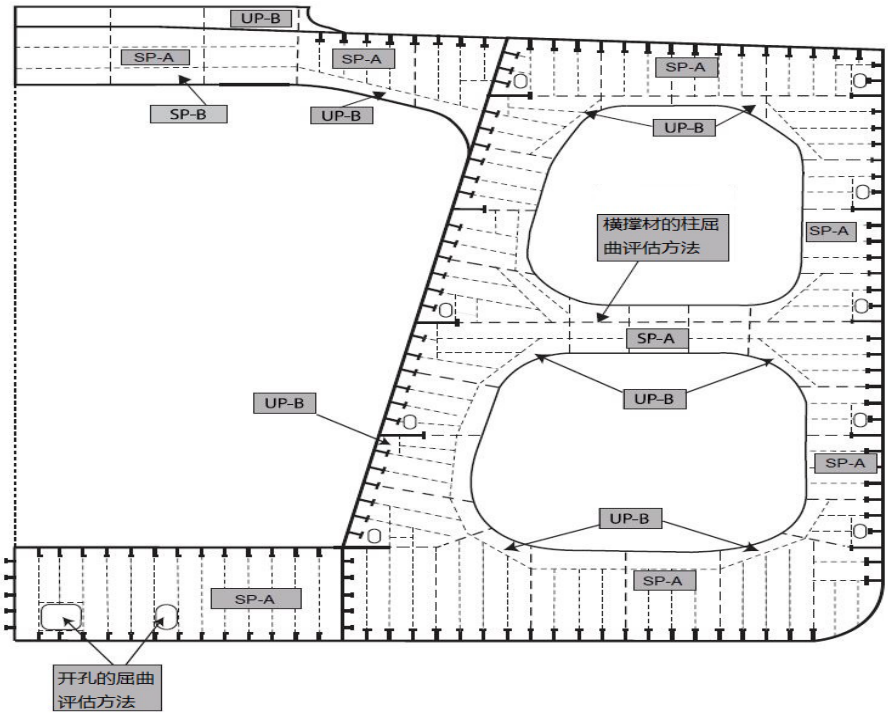


图 4.2.2(2)　典型矿砂船的横向强框架

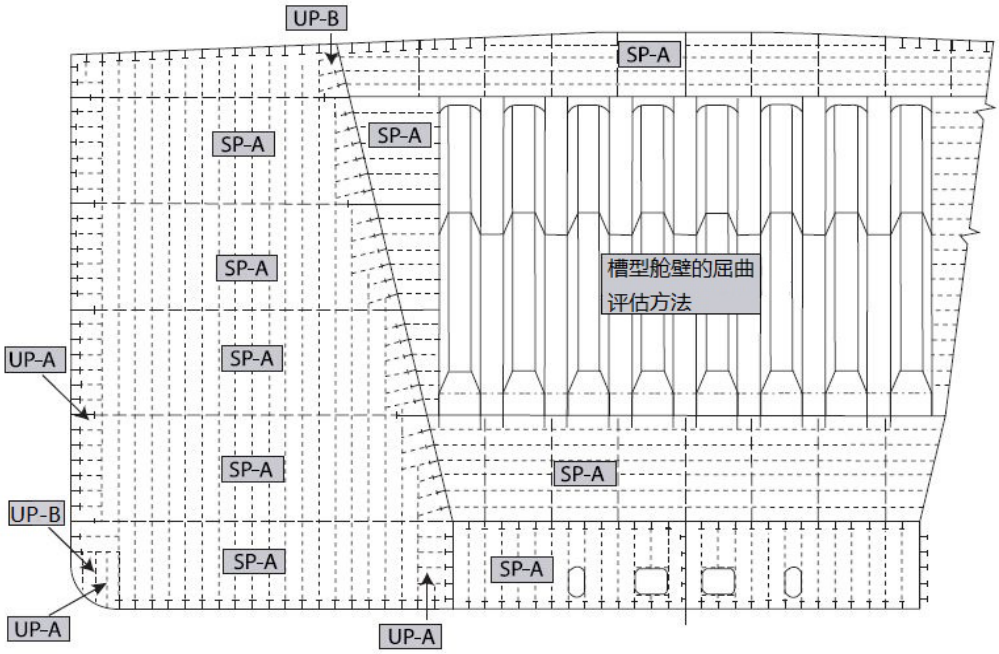


图 4.2.2(3)　典型矿砂船的横舱壁

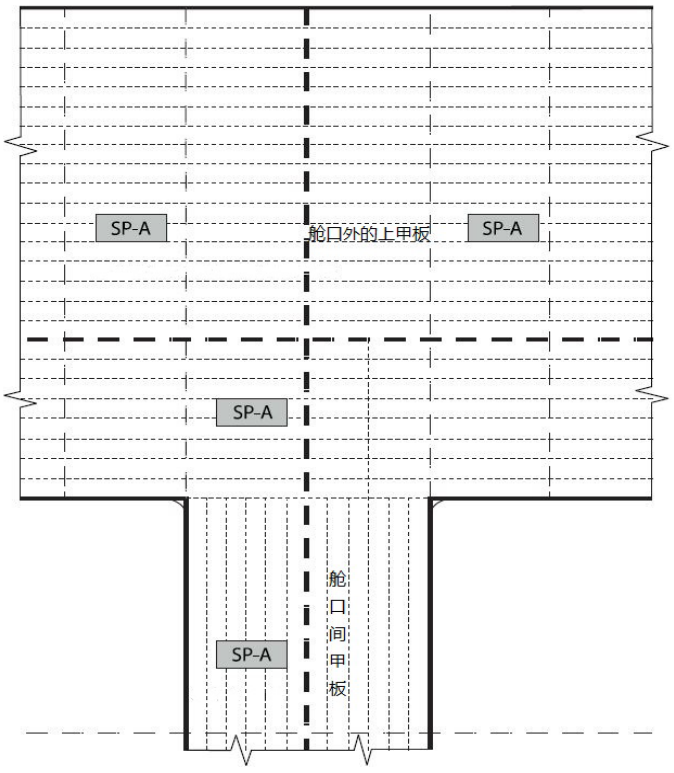


图 4.2.2(4)　槽形舱壁及舱口间甲板

4.2.3　加筋/非加筋板格

（1）加筋板格的理想化

① 为了表征整体屈曲行为，每一个加强筋连同带板应模拟成一个加筋板格，其尺寸范围定义见表 4.2.2。

② 如果一个加筋板格内的加强筋属性或者加强筋间距有变化，则应对该板格的所有构造，即对每一个加强筋和加强筋间的板分别进行计算。计算位置处的板厚、加强筋属性和加强筋间距假设应用于整个板架。

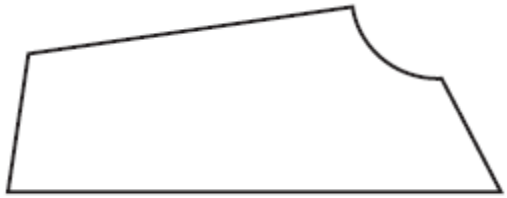
（2）非加筋板格的理想化

在强框架、水平桁材和肘板处，板格的几何形状(即由腹板加强筋/面板围成的边界)有可能为非矩形形状。对此，应分别根据和 4.2.3(2)①和 4.2.3(2)②将非规则几何形状和三角形形状的板格定义为等效的矩形板格后，再进行屈曲评估。

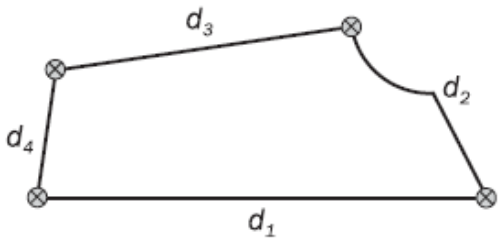
① 几何形状非规则板格的模拟

对于几何形状非规则的非加筋板格，为了进行屈曲评估，应根据下面的步骤理想化为等效板格:

a. 确定板格多边形边界上的最接近直角(90°)的四个角。

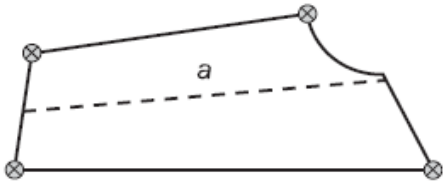


b. 计算角与角之间沿板格多边形边界的距离，即端点之间所有直线线段的总和。



c. 确定总长度最小的对边，即 d_1+d_3 和 d_2+d_4 的最小值；

d. 在选定的对边的中点作连线(中点定义为距一端点为一半距离的点)。该线定义了能力模型的纵向。其长度定义为该能力模型的长度 a 。



e. 短边长度 b ，mm，应取为：

$$b = A / a$$

式中:

A ——板的面积，mm^2；

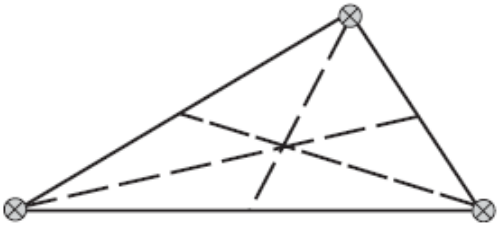
a——上面步骤 d 中定义的长度，mm。

f. 直接强度分析得到的应力，应先转化到等效矩形板格的局部坐标系统中，再用于屈曲评估。

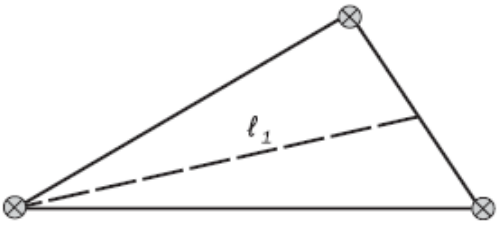
② 三角形板格的模拟

对于三角形形状的非加筋板格，为了进行屈曲评估，应根据下面的步骤理想化为等效板格。

a. 画出如下所示的中线



b. 找出最长的中线。该中线的长度设为l_1，mm，则由其定义了能力模型的纵向。

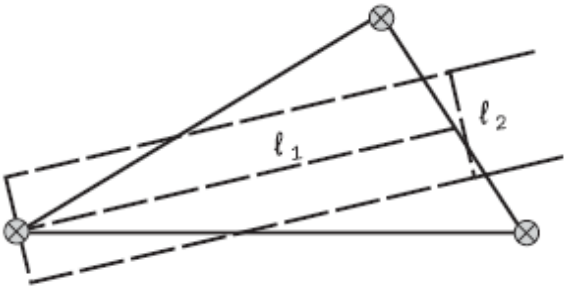


c. 模型的宽度l_2，mm，取为

$$l_2 = A / l_1$$

式中:

A——板的面积，mm^2



d. 等效矩形板格的短边长度 b 和长边长度 a，mm，取为：

$$b = \frac{l_2}{C_{tri}}$$

$$a = l_1 C_{tri}$$

式中:

$$C_{tri} = 0.4\frac{l_2}{l_1} + 0.6$$

e. 直接强度分析得到的应力，应先转化到等效矩形板格的局部坐标系统中，再用于屈曲评估。

（3）板格的平均厚度

如果板格内厚度不均匀，屈曲评估时应采用下面的加权平均板厚：

$$t_{avr} = \frac{\sum_1^n A_i t_i}{\sum_1^n A_i} \qquad (4.3)$$

式中：

A_i ——第 i 个板单元的面积；

t_i ——第 i 个板单元的厚度；

n ——构成屈曲板格的有限单元个数。

（4）板格的屈服应力

板格的屈服应力 R_{eH_P} 取为板格内所有单元的屈服应力的最小值。

（5）参考应力

应力分布应取自直接计算分析，并将实际应力按照 4.1.5(2)进行修正后施加到屈曲模型上。参考应力用本章附录 A 中的参考应力计算方法得到。

（6）侧向压力

施加在直接计算分析中的侧向压力也应该施加到屈曲评估中。如果在由几个有限板单元构成的屈曲板格范围内所施加的侧向压力不为常数，则应根据下面的公式计算得到一个平均侧向压力，N/mm^2

$$P_{avr} = \frac{\sum_1^n A_i P_i}{\sum_1^n A_i} \qquad (4.4)$$

式中：

A_i ——第 i 个板单元的面积，mm^2；

P_i ——第 i 个板单元的侧向压力，N/mm^2；

n ——屈曲板格内有限单元的个数。

4.2.4 槽形舱壁

（1） 屈曲失效模式

对于槽形舱壁，应对其如下三种屈曲失效模式进行评估：

① 槽条的整体柱屈曲，适用情况应参照表 4.2.4 的要求；

② 槽条翼板的屈曲；

③ 槽条腹板的屈曲。

针对槽形舱壁的整体柱屈曲应用　　表 4.2.4

	槽条方向	
	水平	垂直
纵舱壁	有要求	当承受局部垂向力(如起重机载荷)的时候有要求
横舱壁	有要求	

（2）参考应力

① 对于每个槽条翼板和腹板，都应进行屈曲评估；

② 应采用单元中心的膜应力，并将实际应力按照 4.1.5(2)进行修正后用于屈曲评估；

③ 平行于槽条方向的最大正应力应取为如下两个应力的最大值：

a. 在距离槽形舱壁端部 b/2 处平行于槽条方向的正应力；

b. 在槽条中部区域平行于槽条方向的正应力；

由于距离槽条端部很近的区域具有较大的应力梯度，因此在进行屈曲校核时对于应力取值点采用了 b/2 位置处的代表应力，而不是局部的高应力。

如果槽条端部安装有卸货板，则对于端部位置处平行于槽条方向的正应力，应取为按照如下方法定义位置处的应力值：首先，分别找出卸货板和翼板(或腹板)在各自宽度方向的中线，并求得其交点；然后在沿着翼板(或腹板)宽度方向中线上，距离该点 b/2 位置处即为取值点。对于一些典型结构的示例如图 4.2.4(1)和图 4.2.4(2)所示。

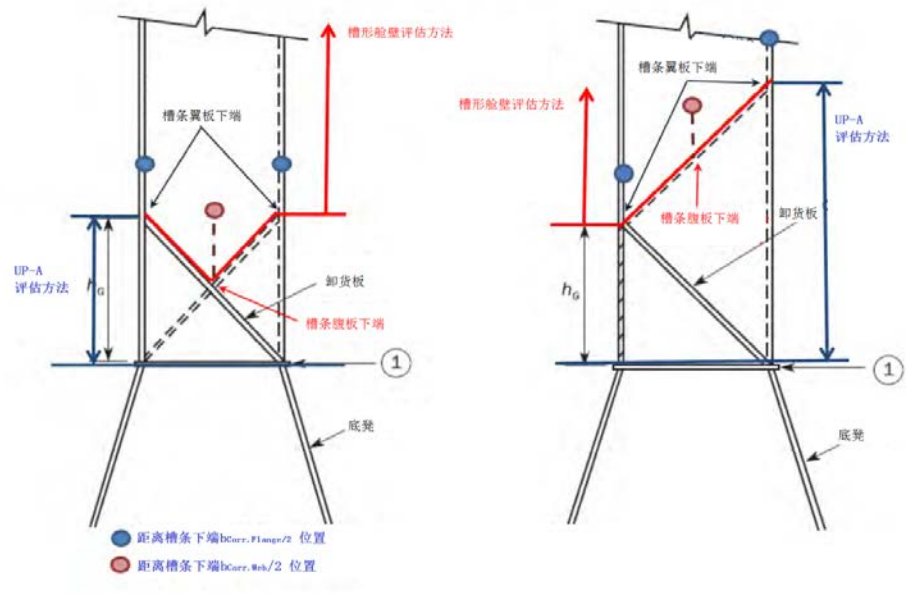


图 4.2.4(1) 对于对称和非对称卸货板在 b/2 的读取点

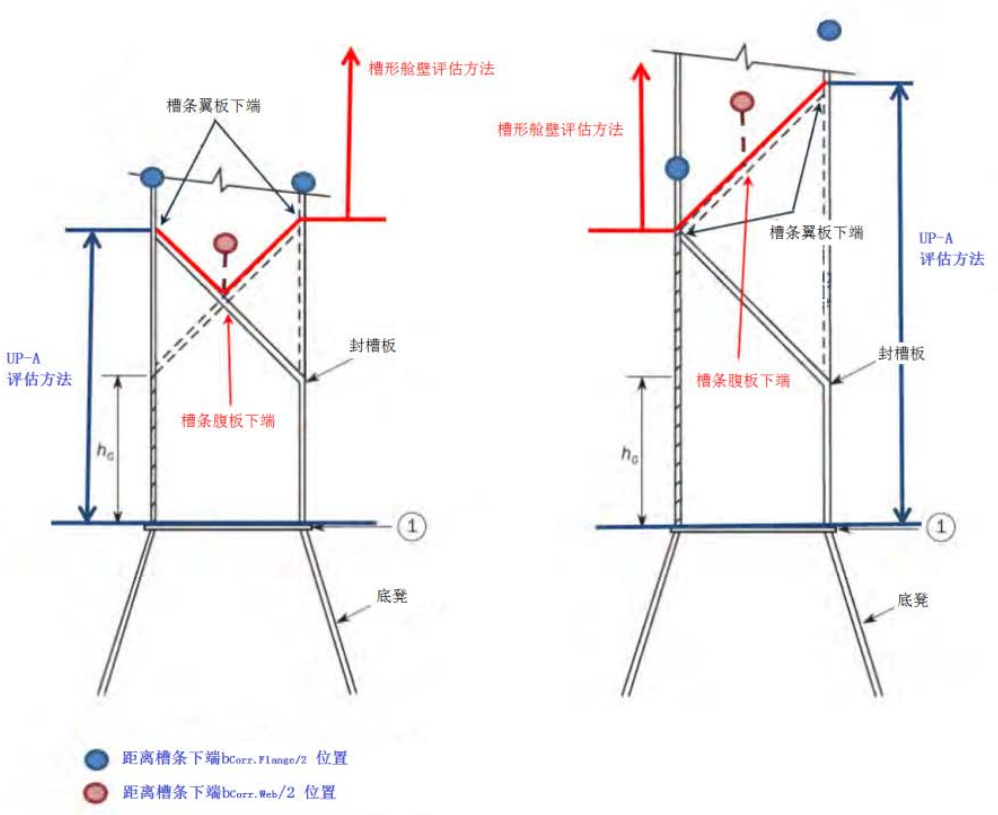


图 4.2.4(2) 对于对称和非对称卸货板/封槽板在 b/2 的读取点

最大剪应力是指槽条翼板(或腹板)上在上述针对正应力所定义的取值位置处的最大值。

面内应力 σ_x、σ_y 和剪应力 τ 应取为槽条翼板或腹板上所考虑位置处沿着宽度方向的单元应力的平均值。

如果距离端部 b/2 处的应力值不能从有限单元中直接得到，则该位置处的应力应针对该区域内的单元通过插值得到。这一插值应针对距离槽条端部 3b 范围内的单元，在从翼板或腹板宽度方向中线量起、距离槽条端部或者卸货板(如安装)的交界位置 b/2 处插值得到。平行于槽条方向的面内应力 σ_x、σ_y 应根据本章附录 A 的 A.1.3(1)插值得到。

在 b/2 处的剪应力应在最接近 b/2 处的单元通过线性插值得到。

为了该要求的应用，给出此处所指 b 的定义如下：

b——所计算的翼板(或腹板)的宽度。

④ 如果翼板采用了一种以上的板厚，则对于每个不同的板厚区域，都应该得到其最大应力，并分别进行屈曲评估。

4.3 屈曲能力

4.3.1 符号说明

A_s ——加强筋（不包括带板）的横截面积，mm^2。

a——板格长边长度，见本章附录 B 表 B.1.2，mm。

b——板格短边长度，见本章附录 B 表 B.1.2，mm。

d——如本章附录 B 表 B.1.3 中曲板板格，平行于圆柱轴一边的长度，mm。

b_{eff} ——加强筋的有效带板宽度，mm，定义见 4.3.3(3)⑤。

$b_{eff\,1}$ ——不考虑剪滞效应的加强筋有效带板宽度，mm，取为：

$$b_{eff\,1}=\begin{cases}C_x b & 当\quad \sigma_x>0\\ b & 当\quad \sigma_x\le 0\end{cases}$$

C_x ——对于所考虑的板格，附录 B 表 B.1.2 工况①所定义的折减因子。

b_f ——加强筋的翼板宽度，mm。

b_1, b_2 ——所考虑的加强筋每一侧的板格宽度。

e_f ——从带板到翼板中心的距离，mm，如图 4.3.1 所示，取为：

$$e_f=\begin{cases}h_w & 对扁钢\\ h_w-0.5t_f & 对球扁钢\\ h_w+0.5t_f & 对角钢和T型材\end{cases}$$

F_{long} ——4.3.3(2)④中定义的系数。

F_{tran} ——4.3.3(2)⑤中定义的系数。

h_w ——加强筋的腹板高度，mm，如图 4.3.3(1)所示。

l_s ——加强筋跨距，mm，等于主要支撑构件之间的间距。

R ——曲板板格的半径，mm。

R_{eH_P} ——板材料的最小屈服应力，N/mm^2

R_{eH_S} ——加强筋材料的最小屈服应力，N/mm^2

S——分项安全因子，取为：

S=1.1，对于承受局部集中载荷（如舱口盖上的集装箱载荷、基座）的露天结构；

S=1.15，对于舱口围板、内底板、纵舱壁板、加筋横舱壁（如有时）和横舱壁的顶凳和底凳侧板上的加强筋；

S =1.0，对于其他结构。

t_p ——板格的厚度，mm。

t_w ——加强筋的腹板厚度，mm。

t_f ——加强筋的翼板厚度，mm。

x 轴——平行于矩形屈曲板格长边方向的局部坐标轴。

y 轴——垂直于矩形屈曲板格长边方向的局部坐标轴。

α ——本章附录 B 表 B.1.2 中定义的板格长宽比，取为：

$$\alpha=\frac{a}{b}$$

β ——系数，取为：

$$\beta=\frac{1-\psi}{\alpha}$$

ω ——系数，取为：

$\omega = Min(3;\alpha)$

σ_x ——施加在板格边缘上沿 x 轴方向的应力，N/mm²。

σ_y ——施加在板格边缘上沿 y 轴方向的应力，N/mm²。

σ_1 ——最大应力，N/mm²

σ_2 ——最小应力，N/mm²

σ_E ——弹性屈曲参考应力，N/mm²，定义为：

（1）用于根据 4.3.3(2)①计算板格极限状态时

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t_p}{b}\right)^2$$

（2）用于 4.3.3(2)⑥曲板板格时

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t_p}{d}\right)^2$$

τ ——施加的剪应力，N/mm²。

τ_c ——剪切屈曲强度，N/mm²，定义见 4.3.3(2)③。

ψ ——边缘应力比，定义为

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

γ ——作用在载荷上的应力倍增因子，当该因子使得载荷达到相关方程成立时，$\gamma = \gamma_c$。

γ_c ——失效时的应力倍增因子。

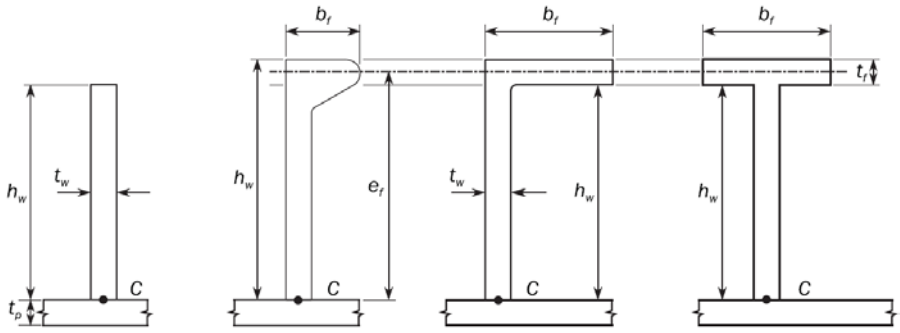


图 4.3.1 加强筋横截面

4.3.2 通则

（1） 本节给出了用于确定板格、加强筋、主要支撑构件、支杆、支柱、横撑材和槽形舱壁屈曲能力的方法。

（2） 应用本节规范时，施加在结构部件上的应力 σ_x、σ_y 和 τ 的定义参见本章 4.2.3(5)和 4.2.4(2)。

（3） 极限屈曲能力

计算极限屈曲能力，首先要施加实际的应力组合，然后再按比例增加或者减小应力，直

到 4.3.3(1)、4.3.3(2)、4.3.3(3)④中定义的相关方程等于 1.0 为止。

（4） 屈曲利用因子

结构部件的屈曲利用因子为其不同屈曲模式得到的利用因子的最大值。

（5） 侧向压力

在屈曲强度评估中，侧向压力应视为常数。

4.3.3 板和加强筋

（1）整体加筋板格的屈曲能力

加筋板格弹性极限状态应基于以下相关方程

$$\frac{P_Z}{c_f}=1 \tag{4.5}$$

式中：c_f 和 P_Z 的定义见本条(3)④。

（2） 板的屈曲能力

① 板的极限状态

板的极限状态分析应基于下面的相关方程

$$\begin{gathered}\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_x S}{\sigma_{cx}}\right)^{e_0}-B\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_x S}{\sigma_{cx}}\right)^{e_0/2}\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_y S}{\sigma_{cy}}\right)^{e_0/2}+\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_y S}{\sigma_{cy}}\right)^{e_0}+\left(\frac{\gamma_{c1}|\tau|S}{\tau_c}\right)^{e_0}=1\\ \left(\frac{\gamma_{c2}\sigma_x S}{\sigma_{cx}}\right)^{2/\beta_p^{0.25}}+\left(\frac{\gamma_{c2}|\tau|S}{\tau_c}\right)^{2/\beta_p^{0.25}}=1 \quad \text{对}\sigma_x\ge 0\\ \left(\frac{\gamma_{c3}\sigma_y S}{\sigma_{cy}}\right)^{2/\beta_p^{0.25}}+\left(\frac{\gamma_{c3}|\tau|S}{\tau_c}\right)^{2/\beta_p^{0.25}}=1 \quad \text{对}\sigma_y\ge 0\\ \frac{\gamma_{c4}|\tau|S}{\tau_c}=1\end{gathered} \tag{4.6}$$

由此得到：

$$\gamma_c=\min(\gamma_{c1},\gamma_{c2},\gamma_{c3},\gamma_{c4}) \tag{4.7}$$

式中：

σ_x,σ_y ——施加在板格边界上的正应力，N/mm^2，定义见 4.3.3(2)⑦；

τ ——施加在板格边界上的剪应力，N/mm^2；

σ_{cx} ——沿着与屈曲板格长边平行的方向的极限屈曲应力，N/mm^2，定义见 4.3.3(2)③；

σ_{cy} ——沿着与屈曲板格短边平行的方向的极限屈曲应力，N/mm^2，定义见 4.3.3(2)③；

$\gamma_{c1},\gamma_{c2},\gamma_{c3},\gamma_{c4}$ ——对于上面每一个不同极限状态在失效时的应力倍增因子。γ_{c1} 和 γ_{c2} 仅分别在 $\sigma_x\ge 0$ 和 $\sigma_y\ge 0$ 成立时才考虑；

B ——如表 4.3.3(1)中给出的系数。

e_0 ——如表 4.3.3(1)中给出的系数。

β_p ——板的长细比参数，定义为：

$$\beta_p = \frac{b}{t_p}\sqrt{\frac{R_{eH_P}}{E}}$$

系数 B 和 e_0 的定义　　表 4.3.3(1)

施加的应力	B	e_0
$\sigma_x \geq 0$ 且 $\sigma_y \geq 0$	$0.7-0.3\beta_p/\alpha^2$	$2/\beta_p^{0.25}$
$\sigma_x < 0$ 或 $\sigma_y < 0$	1.0	2.0

② 参考细长度

参考细长度定义为

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_{eH_P}}{K\sigma_E}} \tag{4.8}$$

K ——屈曲因子，定义见本章附录 B 表 B.1.2 和表 B.1.3。

③ 极限屈曲应力

板格的极限屈曲应力，N/mm^2，为：

$$\begin{aligned}\sigma_{cx} &= C_x R_{eH_P}\\ \sigma_{cy} &= C_y R_{eH_P}\end{aligned} \tag{4.9}$$

受剪板格的极限屈曲应力，N/mm^2，为:

$$\tau_c = C_\tau \frac{R_{eH_P}}{\sqrt{3}} \tag{4.10}$$

式中:

C_x, C_y, C_τ ——折减因子，定义见本章附录 B 表 B.1.2。

对于 4.3.3(2)①中的第一个方程，当 $\sigma_x < 0$ 或 $\sigma_y < 0$ 时，折减因子应取为：$C_x = C_y = C_\tau = 1$

对于其他情况：

a. 对 SP-A 和 UP-A，应采用如下 c_1，根据本章附录 B 表 B.1.2 计算 C_y

$$c_1 = \left(1-\frac{1}{\alpha}\right) \geq 0$$

b. 对 SP-B 和 UP-B，应采用如下 c_1，根据本章附录 B 表 B.1.2 计算 C_y

$$c_1 = 1$$

c. 对于槽形舱壁的槽条，应采用如下 c_1，根据本章附录 B 表 B.1.2 计算 C_y

$$c_1 = \left(1-\frac{1}{\alpha}\right) \geq 0$$

板的边界条件应视为简支，参见本章附录 B 表 B.1.2 中的工况①②和⑮。如果板的边界条件与简支相差很大，可以在船级社同意的前提下，根据本章附录 B 表 B.1.2 的不同工况，

采用更恰当的边界条件。

④ 修正因子 F_{long}

修正因子 F_{long} 依赖于屈曲板格长边边缘上的加强筋类型，其定义参见表 4.3.3(2)。对于具有不同边缘加强筋的板格，应采用 F_{long} 的平均值。对于表 4.3.3(2)中以外的加强筋类型，c 值应得到船级社认可。在该情况下，只要能够用非线性有限元分析通过屈曲强度校核对其进行确认，且船级社也认为合适，则选用的 c 值可大于表 4.3.3(2)中给出的数值。

修正因子 F_{long} **表 4.3.3(2)**

<table>
<tr><td colspan="3">结构单元类型</td><td>F_{long}</td><td>c</td></tr>
<tr><td colspan="3">非加筋板</td><td>1.0</td><td>N/A</td></tr>
<tr><td rowspan="6">加筋板</td><td colspan="2">两端都不固支的加强筋</td><td>1.0</td><td>N/A</td></tr>
<tr><td rowspan="4">两端固支的加强筋</td><td>扁钢(1)</td><td rowspan="4">如果 $\frac{t_w}{t_p}>1$，则 $F_{long}=c+1$；
如果 $\frac{t_w}{t_p}\le 1$，则 $F_{long}=c\left(\frac{t_w}{t_p}\right)^3+1$</td><td>0.1</td></tr>
<tr><td>球扁钢</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td>角钢</td><td>0.4</td></tr>
<tr><td>T 型材</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td>刚度较大的桁材(如底肋板)</td><td>1.4</td><td>N/A</td></tr>
<tr><td colspan="5">注：t_w 为腹板厚度，mm，且不按照 4.3.3(3)②中的定义进行修正。</td></tr>
</table>

⑤ 修正因子 F_{tran}

修正因子 F_{tran} 应取为 1.0。

⑥ 曲板板格

对于 $R/t\le 2500$ 的曲板板格，其极限状态适用下面的要求。否则，应适用 4.3.3(2)①给出的板的极限状态要求。

曲板板格的极限状态分析应基于下面的相关方程：

$$\left(\frac{\gamma_c\sigma_{ax}S}{C_{ax}R_{eH_P}}\right)^{1.25}-0.5\cdot\left(\frac{\gamma_c\sigma_{ax}S}{C_{ax}R_{eH_P}}\right)\left(\frac{\gamma_c\sigma_{tg}S}{C_{tg}R_{eH_P}}\right)+\left(\frac{\gamma_c\sigma_{tg}S}{C_{tg}R_{eH_P}}\right)^{1.25}+\left(\frac{\gamma_c\tau\sqrt{3}S}{C_{\tau}R_{eH_P}}\right)^{2}=1.0 \qquad (4.11)$$

式中：

σ_{ax} ——施加在曲板板格上的轴向应力，N/mm²。对于轴向拉应力情况，应取为 $\sigma_{ax}=0$；

σ_{tg} ——施加在曲板板格上的切向应力，N/mm²。对于环向拉应力情况，应取为 $\sigma_{tg}=0$；

C_{ax},C_{tg},C_{τ} ——曲板板格的屈曲折减因子，定义见本章附录 B 表 B.1.3。

对祛曲板板格，其应力倍增因子 γ_c 应不小于将其伸展为平面板格且按照 4.3.3(2)①所给出的 γ_c 值。

⑦ 施加在板格上的正应力

施加在板格上用于 4.3.3(2)①中板格能力计算的正应力 σ_x 和 σ_y，N/mm²，应取为：

对于有限元分析，见本章 4.2.3(5)中的参考应力定义；

对于交叉梁系分析，其应力是根据梁理论得到，应根据下式计算得到：

$$\sigma_x = \frac{\sigma_{xb} + \nu\sigma_{yb}}{1-\nu^2}$$
$$\sigma_y = \frac{\sigma_{yb} + \nu\sigma_{xb}}{1-\nu^2} \qquad (4.12)$$

式中：

σ_{xb}, σ_{yb}——根据交叉梁系分析得到的分别沿着所连接带板的 x 和 y 方向的应力，N/mm²；

τ——用于 4.3.3(2)①板格能力计算的剪应力，N/mm²，取作：

对于有限元分析，本章 4.3.3(3)④中定义的参考剪应力；

对于交叉梁系分析，所连接屈曲板格的剪应力 $\tau = 0$。

（3）加强筋的屈曲能力

① 屈曲模式

应对下列屈曲模式进行校核：

a. 加强筋失效导致的屈曲失效(SI)；

b. 附连板失效导致的屈曲失效(PI)；

② 扁钢的腹板厚度

为计及局部侧向变形引起的刚度降低，对于扁钢加强筋，在 4.3.3(3)④中计算其截面积 A_s、模量 Z 和惯性矩 I 时应该采用以下定义的有效腹板厚度，mm：

$$t_{w_red} = t_w\left(1-\frac{2\pi^2}{3}\left(\frac{h_w}{s}\right)^2\left(1-\frac{b_{eff1}}{s}\right)\right) \qquad (4.13)$$

③球扁钢的理想化

球扁钢应视为等效的角钢，等效的角钢剖面尺寸，mm，通过下列公式得到：

$$h_w = h'_w - \frac{h'_w}{9.2} + 2$$
$$b_f = \alpha\left(t'_w + \frac{h'_w}{6.7} - 2\right)$$
$$t_f = \frac{h'_w}{9.2} - 2$$
$$t_w = t'_w$$

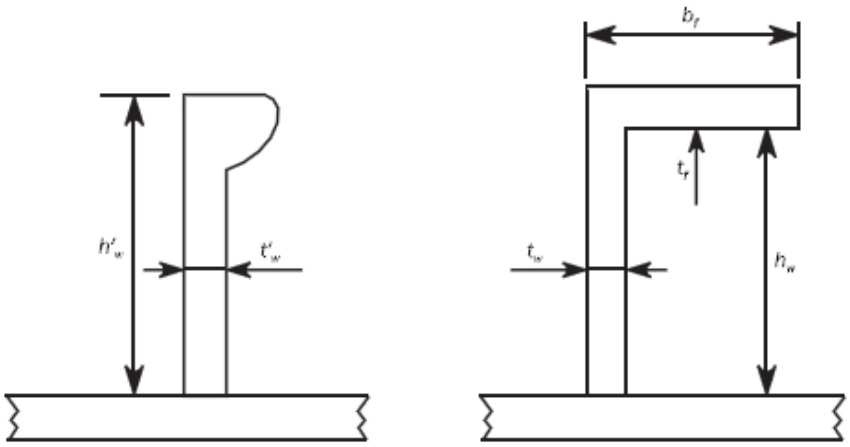
式中：

h'_w，t'_w——球扁钢的高度和厚度，mm，如图 4.3.3(3)所示。

α——系数，取为：

$$\alpha = 1.1 + \frac{(120 - h_w')^2}{3000} \qquad \text{对 } h_w' \le 120$$

$$\alpha = 1.0 \text{ 对 } h_w' > 120$$



球扁钢　　等效角钢

图 4.3.3(3)球扁钢等效为角钢

④ 极限屈曲能力

当 $\sigma_a + \sigma_b + \sigma_w > 0$ 时，加强筋的极限屈曲能力应根据以下相关方程进行校核:

$$\frac{\gamma_c \sigma_a + \sigma_b + \sigma_w}{R_{eH}} S = 1 \qquad (4.14)$$

式中:

σ_a——加强筋跨中位置处施加在加强筋及其带板上的有效轴向应力，N/mm²：

$$\sigma_a = \sigma_x \frac{st_p + A_s}{b_{eff1} t_p + A_s}$$

σ_x——施加在加强筋及其带板上的名义轴向应力，N/mm²

a. 对于有限元分析，σ_x 是指将带板中沿着加强筋轴向方向的应力按 4.3.3(2)⑦的定义修正后的有限元应力；

b. 对于交叉梁系分析，σ_x 是指作用在所连接屈曲板格 x 方向的应力。

R_{eH}——给定的材料最小屈服应力，N/mm²

a. 对于加强筋导致的失效(SI)，$R_{eH} = R_{eH_S}$

b. 对于带板导致的失效(PI)，$R_{eH} = R_{eH_P}$

σ_b——加强筋的弯曲应力，N/mm²

$$\sigma_b = \frac{M_o + M_1}{1000Z}$$

Z——加强筋的剖面模数，包括根据 4.3.3(3)⑤定义的带板有效宽度，cm^3

a. 对于加强筋导致的失效(SI)，取加强筋翼板顶部计算的剖面模数；

b. 对于带板导致的失效(PI)，取带板上计算的剖面模数；

C_{PI} ——带板导致的失效模式的压力系数：

a. 如果侧向压力施加在加强筋背侧，则 $C_{PI}=1$；

b. 如果侧向压力施加在与加强筋同侧，则 $C_{PI}=-1$；

C_{SI} ——加强筋导致的失效模式的压力系数

a. 如果侧向压力施加在加强筋背侧，则 $C_{SI}=-1$；

b. 如果侧向压力施加在与加强筋同侧，则 $C_{SI}=1$；

M_1——由于侧向压力 P 引起的弯矩，N-mm，

a. 对于连续加强筋

$$M_1 = C_i \frac{|P| s l_s^2}{24 \cdot 10^3}$$

b. 对于削斜的加强筋

$$M_1 = C_i \frac{|P| s l_s^2}{8 \cdot 10^3}$$

P ——侧向压力，kN/m^2，指本章 4.2.3(6)中定义的带板平均压力；

C_i ——压力系数：

a. 对于加强筋导致的失效(SI)，$C_i = C_{SI}$；

b. 对于带板导致的失效(PI)，$C_i = C_{PI}$；

M_0——由于加强筋的侧向变形 w 引起的弯矩，N-mm

$$M_0 = F_E \left(\frac{P_z w}{c_f - P_z} \right)，且 c_f - P_z > 0$$

F_E ——加强筋的理想弹性屈曲力，N

$$F_E = \left(\frac{\pi}{l_s} \right)^2 EI \cdot 10^4$$

I ——加强筋的惯性矩，cm^4，包括按 4.3.3(3)⑤要求的带板有效宽度。I 应符合下面的要求：

$$I \geq \frac{s t_p^{\ 3}}{12 \cdot 10^4}$$

t_p——板厚，mm，定义为所考虑的加强筋一侧基本板格的厚度；

P_z ——由带板上的应力 σ_x、σ_y、τ 引起的，作用在加强筋中间跨距位置处的名义侧向压力，N/mm^2,

$$P_z = \frac{t_p}{s} \left(\sigma_{xl} \left(\frac{\pi s}{l_s} \right)^2 + 2c\gamma\sigma_y + \sqrt{2}\tau_1 \right)$$

$$\sigma_{xl}=\gamma\sigma_x\left(1+\frac{A_s}{st_p}\right)$$

$$\tau_1=\gamma|\tau|-t_p\sqrt{R_{eH_P}E\left(\frac{m_1}{a^2}+\frac{m_2}{b^2}\right)}\geq 0$$

σ_y ——作用在屈曲板格边缘上沿着 y 轴方向的应力，N/mm²，但不小于 0；

a. 对于有限元分析，σ_y 是指根据 4.3.3(3)⑥中定义，在带板中沿着与加强筋垂直方向的修正后的应力；

b. 对于交叉梁系分析，σ_y 是指作用在所连接屈曲板格 y 方向的应力。

τ ——施加的剪应力，N/mm²

a. 对于有限元分析，τ 是指根据本章 4.2.3(5)定义的带板中的参考剪应力；

b. 对于交叉梁系分析，所连接屈曲板格的剪应力 $\tau=0$ 。

m_1, m_2 ——系数，取值如下：

$$\begin{cases} m_1=1.47 \quad m_2=0.49 & \text{当} \quad \alpha\geq 2 \\ m_1=1.96 \quad m_2=0.37 & \text{当} \quad \alpha<2 \end{cases}$$

c ——考虑带板中垂直于加强筋轴线方向应力影响的系数，取为：

$$c=\begin{cases} 0.5(1+\psi) & \text{当} \quad 0\leq\psi\leq 1 \\ \dfrac{1}{2(1-\psi)} & \text{当} \quad \psi<0 \end{cases}$$

ψ ——根据本章附录 B 表 B.1.2 中定义的工况②的边缘应力比。

w ——加强筋的变形，mm，取为：

$$w=w_0+w_1$$

w_0 ——假定的缺陷，mm，一般可取为：

a. 一般情况，$w_0=l_s/1000$；

b. 对两端削斜的加强筋，考虑加强筋导致的失效(SI)

$w_0=-w_{na}$

c. 对两端削斜的加强筋，考虑带板导致的失效(PI)

$w_0=w_{na}$

w_{na} ——带板中点至计及 4.3.3(3)⑤定义的带板有效宽度的加强筋中和轴的距离。

w_1 ——由侧向载荷 P 导致的加强筋在其跨距中点处的变形，mm。如为均布载荷，w_1 可取为:

a. 一般情况，$w_1=C_i\dfrac{|P|sl_s^4}{384\cdot 10^7 EI}$；

b. 对于两端削斜的加强筋，$w_1=C_i\dfrac{5|P|sl_s^4}{384\cdot 10^7 EI}$

c_f ——加强筋提供的弹性支撑，N/mm²，取为：

$$c_f = F_E\left(\frac{\pi}{l_s}\right)^2(1+c_p)$$

$$c_p = \frac{1}{1+\frac{0.91}{c_{xa}}\left(\frac{12I}{s\,t_p^{\,3}}10^4-1\right)}$$

c_{xa}——系数，取为

a. 如果 $l_s \geq 2s$，则 $c_{xa} = \left[\frac{l_s}{2s}+\frac{2s}{l_s}\right]^2$；

b. 如果 $l_s < 2s$，则 $c_{xa} = \left[1+\left(\frac{l_s}{2s}\right)^2\right]^2$

σ_w——扭转变形引起的应力，N/mm^2，取为：

a. 对于加强筋导致的失效(SI)

$$\sigma_w = Ey_w\left(\frac{t_f}{2}+h_w\right)\Phi_0\left(\frac{\pi}{l_s}\right)^2\left(\frac{1}{1-\frac{0.4R_{eH_S}}{\sigma_{ET}}}-1\right)$$

b. 对于带板导致的失效(PI)

$$\sigma_w = 0$$

y_w——从加强筋横截面中心到加强筋翼板自由边缘的距离，mm，取为：

a. 对扁钢，$y_w = \frac{t_w}{2}$；

b. 对角钢和球扁钢，$y_w = b_f - \frac{h_w t_w^2 + t_f b_f^2}{2A_s}$；

c. 对 T 型材，$y_w = \frac{b_f}{2}$

Φ_0——系数，取为：

$$\Phi_0 = \frac{l_s}{h_w}10^{-3}$$

σ_{ET}——扭转屈曲参考应力，N/mm^2

$$\sigma_{ET} = \frac{E}{I_p}\left(\frac{\varepsilon\pi^2 I_\omega 10^2}{l_s^2}+0.385I_T\right)$$

I_p——加强筋关于点 C 的极惯性矩，cm^4，按表 4.3.3(3)定义，点 C 如图 4.3.1 所示

I_T——加强筋的圣维南惯性矩，cm^4，按表 4.3.3(3)定义。

I_ω——加强筋关于点 C 的剖面扇形惯性矩，cm^6，按表 4.3.3(3)定义，点 C 如图 4.3.1 所示

ε——固定度，取为:

$$\varepsilon = 1 + \frac{\left(\frac{l_s}{\pi}\right)^2 10^{-3}}{\sqrt{I_\omega \left(\frac{0.75s}{t_p^3} + \frac{e_f - 0.5t_f}{t_w^3}\right)}}$$

A_w ——腹板面积，mm²。

A_f ——翼板面积，mm²。

典型横截面的惯性矩 **表 4.3.3(3)**

横截面特性	扁钢(1)	球扁钢、角钢和 T 型材
I_P	$\frac{h_w^3 t_w}{3 \cdot 10^4}$	$\left(\frac{A_w (e_f - 0.5t_f)^2}{3} + A_f e_f^2\right) 10^{-4}$
I_T	$\frac{h_w t_w^3}{3 \cdot 10^4}\left(1 - 0.63\frac{t_w}{h_w}\right)$	$\frac{(e_f - 0.5t_f) t_w^3}{3 \cdot 10^4}\left(1 - 0.63\frac{t_w}{e_f - 0.5t_f}\right)$ + $\frac{b_f t_f^3}{3 \cdot 10^4}\left(1 - 0.63\frac{t_f}{b_f}\right)$
I_ω	$\frac{h_w^3 t_w^3}{36 \cdot 10^6}$	对球扁钢和角钢：$\frac{A_f e_f^2 b_f^2}{12 \cdot 10^6}\left(\frac{A_f + 2.6A_w}{A_f + A_w}\right)$ 对 T 型材：$\frac{b_f^3 t_f e_f^2}{12 \cdot 10^6}$
注(1)：t_w 为腹板厚度，mm，本表不用于 4.3.3(3)②中定义的 t_{w_red}。		

⑤ 有效带板宽度

加强筋的有效带板宽度 b_{eff}，mm，应取为：

$$b_{eff} = \begin{cases} \min\left(C_x b, \chi_s s\right) & \text{当} \quad \sigma_x > 0 \\ \chi_s s & \text{当} \quad \sigma_x \le 0 \end{cases} \tag{4.15}$$

式中，χ_s 为有效宽度系数，取为：

$$\chi_s = \begin{cases} \min\left[\frac{1.12}{1 + \frac{1.75}{\left(\frac{l_{eff}}{s}\right)^{1.6}}}; 1.0\right] & \text{当} \quad \frac{l_{eff}}{s} \ge 1 \\ 0.407\frac{l_{eff}}{s} & \text{当} \quad \frac{l_{eff}}{s} < 1 \end{cases}$$

l_{eff} ——加强筋有效长度，mm，取为：

a. 对于两端固支的加强筋 $l_{eff} = \frac{l_s}{\sqrt{3}}$；

b. 对于一端简支、一端固支的加强筋 $l_{eff} = 0.75l_s$；

c. 对于两端简支的加强筋 $l_{eff} = l_s$；

⑥ 针对加强筋能力的有限元修正应力

当根据本章 4.2.3(5)和 4.2.4(2)有限元分析得到的参考应力 σ_x 和 σ_y 都是压应力时，应根据下列公式进行修正:

如果 $\sigma_x < \nu\sigma_y$，则：

$$\sigma_{xcor} = 0$$

$$\sigma_{ycor} = \sigma_y$$

如果 $\sigma_y < \nu\sigma_x$，则：

$$\sigma_{xcor} = \sigma_x$$

$$\sigma_{ycor} = 0$$

对于其他情况，则：

$$\sigma_{xcor} = \sigma_x - \nu\sigma_y$$

$$\sigma_{ycor} = \sigma_y - \nu\sigma_x$$

（4）主要支撑构件

① 开口处腹板

开口处主要支撑构件腹板的屈曲评估应基于轴向压应力和剪切应力的联合作用。

与开口两边邻接的腹板应视为单独的非加筋板格，如表 4.3.3(4)所示。

应采用 4.3.3(2)的相关方程，且：

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{av} \\ \sigma_y &= 0 \\ \tau &= \tau_{av} \end{aligned} \qquad (4.16)$$

式中:

σ_{av} ——按本章附录 B 表 B.1.2 中的工况①及②或③，所考虑腹板区域内的加权平均压应力，N/mm^2；

在应用表 4.3.3(4)时，加权平均剪应力应取为：

a. 如果模型中建立了主要支撑构件上开口的模型，则

τ_{av} ——所考虑腹板面积，如表 4.3.3(4)中的 P1、P2、P3 上的加权平均剪切应力，N/mm^2。

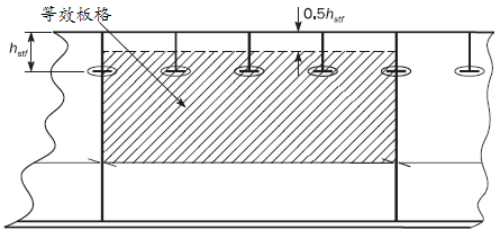
b. 如果模型中没有建立主要支撑构件上开口的模型，则

τ_{av} ——表 4.3.3(4)中给出的加权平均剪切应力，N/mm^2。

② 开口处腹板的折减因子

与开口两边邻接的腹板板格的折减因子 C_x 或 C_y 与 C_τ 组合，应按表 4.3.3(4)所示选取。

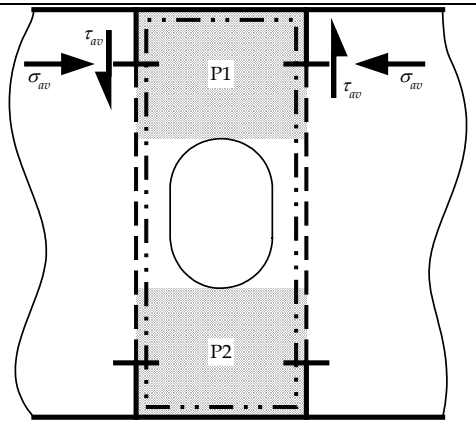
③ 主要支撑构件的腹板有与之垂直的加强筋穿过，则应根据图 4.3.3(4)将其理想化为等效板格。

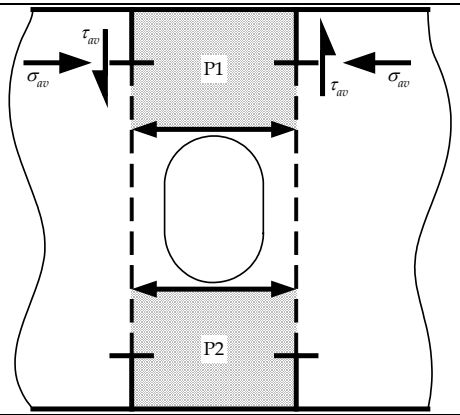
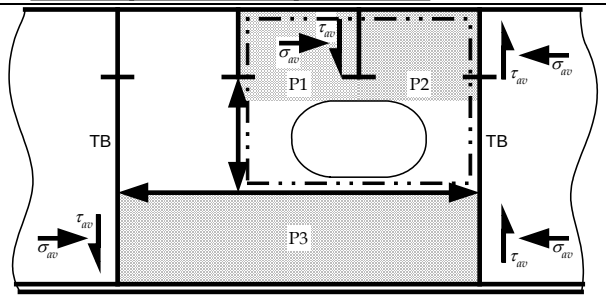


注：板格宽度的修正也适用于其他开孔构造，只要腹板和翼板至少与穿过加强筋的一侧相连。

图 4.3.3(4) 主要支撑构件腹板的理想化

屈曲折减因子 **表 4.3.3(4)**

构形		C_x， C_y	C_τ	
			在支撑构件上开口已建模	在支撑构件上开口未建模
(a) 边缘未加强		对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按本章附录 B 表 B.1.2 中的工况③或⑥选取，且板边应力比取 ψ＝1.0。	对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按本章附录 B 表 B.1.2 中的工况⑱或⑲选取。	对于本章附录 B 表 B.1.2 中的工况⑰适用的情况，P1 和 P2 区域应采用共同的折减因子，按工况⑰选取，且 $\tau_{av}=\tau_{av}(web)$； 对于本章附录 B 表 B.1.2 中的工况⑰不适用的情况，P1 和 P2 区域应采用各自的折减因子，按工况⑱或⑲选取，且 $\tau_{av}=\tau_{av}(web)h/(h-h_0)$

(b) 边缘有加强		对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按本章附录 B 表 B.1.2 选取，且为： C_x，按工况①；或 C_y，按工况②。 且板边应力比取 ψ＝1.0。	对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按本章附录 B 表 B.1.2 中的工况⑮选取	对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按本章附录 B 表 B.1.2 中的工况⑮选取，且 $\tau_{av} = \tau_{av}(web)h/(h-h_0)$
(c) 腹板上开口示例		板格 P1 和 P2 应按照(a)评估；板格 P3 应按照(b)评估		
	注：1. 腹板开口处屈曲评估应考虑的板格如图中阴影所示，编号为 P1、P2 等。			
	式中：h 开口处主要支撑构件腹板的高度，m； h_0 沿着腹板深度方向测量的开口的高度，m； $\tau_{av}(web)$ 表 4.3.3(4)中在腹板上用点划线标识的矩形区域的加权平均剪应力，N/mm^2；			

4.3.4 支杆、支柱和横撑材

(1) 屈曲利用因子

对于轴向受压的支杆、支柱和横撑材，其屈曲利用因子 η 应取为：

$$\eta = \frac{\sigma_{av}}{\sigma_{cr}}$$

式中：σ_{av} 构件中的平均压应力，N/mm²

σ_{cr} 最小临界屈曲应力，N/mm²，取为：对

① $\sigma_{cr} = \sigma_E$， 对$\sigma_E \le 0.5R_{eH_S}$

② $\sigma_{cr} = \left(1 - \frac{R_{eH_S}}{4\sigma_E}\right) R_{eH_S}$， 对$\sigma_E > 0.5R_{eH_S}$

σ_E 最小弹性受压屈曲应力，N/mm²，对各个屈曲模式分别给出，见 4.3.4(2)至(4)。

R_{eH_S} 规定的材料最小屈服应力，N/mm²。对于组合构件，应采用规定的材料最小屈服应力的小者。

(2) 弹性柱屈曲应力

轴向受压构件的弹性柱屈曲应力σ_{EC}，N/mm²，应取为：

$$\sigma_{EC} = \pi^2 E f_{end} \frac{I}{A\ell_{pill}^2} 10^{-4}$$

式中：I 横截面的最小惯性矩，cm⁴

A 构件的横截面积，cm²

ℓ_{pill} 构件的长度，m，取为：

② 对于支柱和支杆：构件的无支撑长度；

② 对于横撑材：在连接横撑材水平桁的纵舱壁的纵骨或纵桁面板至外板纵骨或纵桁面板之间的距离；

f_{end} 端部约束因子，取为：

①对于支柱和支杆：

$f_{end} = 1.0$，两端铰支；

$f_{end} = 2.0$，一端铰支，另一端固定；

$f_{end} = 4.0$，两端固定；

② 对于横撑材

$$f_{end} = 2.0$$

如支柱的端部装设有效的肘板，则可视为固定。该肘板应由比支柱弯曲刚度大的构件支持

(3) 弹性扭转屈曲应力

轴向受压构件的弹性扭转屈曲应力σ_{ET}，N/mm²，取为：

$$\sigma_{ET} = \frac{GI_{sv}}{I_{pol}} + \frac{\pi^2 f_{end} Ec_{warp}}{I_{pol}\ell_{pill}^2} 10^{-4}$$

式中：I_{SV} 圣维南惯性矩，cm⁴，对于一些横截面示例参见表 4.3.4。

I_{pol} 关于横截面剪切中心的极惯性矩，cm⁴，

$$I_{pol} = I_y + I_z + A(y_0^2 + z_0^2)$$

c_{warp} 翘曲常数，cm⁶，对于一些横截面示例参见表 4.3.4。

ℓ_{pill} 构件的长度，m，定义见本章 4.3.4(2)。

y_0 相对于横截面形心的剪切中心位置 y 坐标，cm，对于一些横截面示例参见表 4.3.4。

z_0 相对于横截面形心的剪切中心位置 z 坐标，cm，对于一些横截面示例参见表 4.3.4。

A 横截面积，cm²，定义见本章 4.3.4(2)。

I_y 关于 y 轴的惯性矩，cm⁴。

I_z 关于 z 轴的惯性矩，cm⁴。

(4) 弹性扭转/柱屈曲应力

对于形心和剪切中心不重合的横截面，应校核扭转和柱屈曲模式之间的相互作用。对应于轴向受压的弹性扭转/柱屈曲应力σ_{ETF}应取为：

$$\sigma_{ETF} = \frac{1}{2\varsigma}\left[(\sigma_E + \sigma_{ET}) - \sqrt{(\sigma_E + \sigma_{ET})^2 - 4\varsigma\sigma_E\sigma_{ET}}\right]$$

式中：ς 系数，为：

$$\varsigma = 1 - \frac{\left(y_0^2 + z_0^2\right)A}{I_{pol}}$$

y_0 相对于横截面形心的剪切中心位置，cm，定义见本章 4.3.4(3)；

z_0 相对于横截面形心的剪切中心位置，cm，定义见本章 4.3.4(3)；

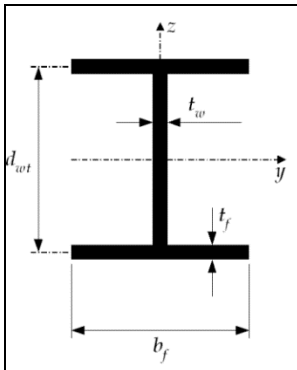
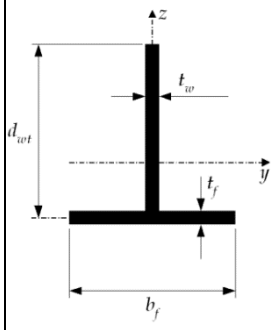
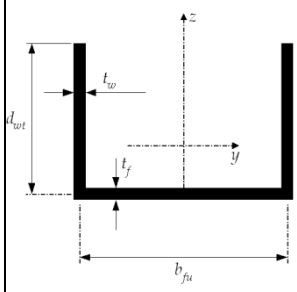
A 横截面面积，cm^2，定义见本章 4.3.4(2)。

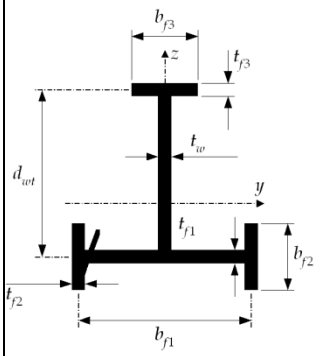
I_{pol} 关于横截面剪切中心的极惯性矩，cm^4，定义见本章 4.3.4(3)；

σ_{EC} 弹性柱屈曲应力，定义见本章 4.3.4(2)；

σ_{ET} 弹性扭转屈曲应力，定义见本章 4.3.4(3)；

典型横截面属性 **表 4.3.4**

	$I_{sv} = \frac{1}{3}\left(2b_f t_f^3 + d_{wt} t_w^3\right)10^{-4}$ cm⁴
	$c_{warp} = \frac{d_{wt}^2 b_f^3 t_f}{24}10^{-6}$ cm⁶
	$I_{sv} = \frac{1}{3}\left(b_f t_f^3 + d_{wt} t_w^3\right)10^{-4}$ cm⁴
	$y_0 = 0$ cm $z_0 = -\frac{0.5 d_{wt}^2 t_w}{d_{wt} t_w + b_f t_f}10^{-1}$ cm $c_{warp} = \frac{b_f^3 t_f^3 + 4 d_{wt}^3 t_w^3}{144}10^{-6}$ cm⁶
	$I_{sv-net50} = \frac{1}{3}\left(b_{fu} t_f^3 + 2 d_{wt} t_w^3\right)10^{-4}$ cm⁴
	y0 = 0 cm $z_0 = -\frac{d_{wt}^2 t_w 10^{-1}}{2 d_{wt} t_w + b_f t_f} - \frac{0.5 d_{wt}^2 t_w 10^{-1}}{d_{wt} t_w + b_{fu} t_f / 6}$ cm $c_{warp} = \frac{b_{fu}^2 d_{wt}^3 t_w \left(3 d_{wt} t_w + 2 b_{fu} t_f\right)}{12\left(6 d_{wt} t_w + b_{fu} t_f\right)}10^{-6}$ cm⁶

<table>
<tr><td rowspan="3">
</td><td>$$I_{sv}=\frac{1}{3}\left(b_{f1}t_{f1}^3+2b_{f2}t_{f2}^3+b_{f3}t_{f3}^3+d_{wt}t_w^3\right)10^{-4}$$ cm⁴</td></tr>
<tr><td>$y_0 = 0$ cm
$$z_o=z_s-\frac{(b_{f3}\,d_{wt}\,t_{f3}+0.5d_{wt}^2\,t_w)10^{-1}}{d_{wt}\,t_w+b_{f1}\,t_{f1}+2b_{f2}\,t_{f2}+b_{f3}\,t_{f3}}$$ cm
$$c_{warp}=\left(I_{f1}\,z_s^2+\frac{I_{f2}\,b_{f1}^2}{200}+I_{f3}\left(\frac{d_{wt}}{10}-z_s\right)^2\right)$$ cm⁶
$$I_{f1}=(\frac{\left(b_{f1}-t_{f2}\right)^3 t_{f1}}{12}+\frac{b_{f2}\,t_{f2}\,b_{f1}^2}{2})10^{-4}$$ cm⁴
$$I_{f2}=\frac{b_{f2}^3\,t_{f2}}{12}10^{-4}$$ cm⁴
$$I_{f3}=\frac{b_{f3}^3\,t_{f3}}{12}10^{-4}$$ cm⁴
$$z_s=\frac{I_{f3}\,d_{wt}}{I_{f1}+I_{f3}}10^{-1}$$ cm</td></tr>
<tr><td colspan="2">注（1）：所有尺寸单位为 mm；
注（2）：给出了几种典型横截面的属性，其他类型横截面的属性应根据直接计算确定。</td></tr>
</table>

4.3.5　槽形舱壁

槽形舱壁的面板和腹板的屈曲利用因子应基于组合面内应力和剪应力计算。

应根据 4.3.3(2)①给出的相关曲线，并采用下列系数：

$$\alpha = 2$$

$$\psi_x = \psi_y = 1$$

4.4　强度衡准

4.4.1　许用屈曲利用因子

对于船体结构中的一般结构构件，其许用屈曲利用因子 η_{all} 的定义如表 4.4.1 所示。

许用屈曲利用因子 η_{all}　　**表 4. 4. 1**

结构部件	η_{all}，许用屈曲利用因子
板和加强筋 加筋和非加筋板格 开口处腹板	1.0
支杆、支柱、横撑材	0.75

4.4.2　加筋/非加筋板格

如果板格结构单元满足下面的衡准，则认为其具有可接受的屈曲强度。

（1）UP-A 方法

UP-A 方法的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{UP-A} \le \eta_{all} \tag{4.17}$$

式中：

η_{UP-A}——根据本章 4.3.3(2)中定义的方法 A 计算得到的板的最大屈曲利用因子。

（2）UP-B 方法

UP-B 方法的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{UP-B} \le \eta_{all} \tag{4.18}$$

式中:

η_{UP-B}——根据本章 4.3.3(2)中定义的方法 B 计算得到的板的最大屈曲利用因子。

（3）SP-A 方法

SP-A 方法的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{SP-A} \le \eta_{all} \tag{4.19}$$

式中:

η_{SP-A}——加筋板格的最大屈曲利用因子，取为下列各项的最大值：

① 本章 4.3.3(1)中定义的整体加筋板屈曲能力；

② 根据本章 4.3.3(2)中定义的方法 A 计算得到的板的屈曲能力；

③ 本章 4.3.3(3)中定义的加强筋的屈曲强度，且对于加强筋两侧的基本板格，分别单独考虑其属性(厚度、尺寸)、4.2.3(6)中定义的侧向压力和参考应力。

注: 只有当本章 4.3.3(1)中定义的整体加筋板屈曲能力满足后才进行加强筋的屈曲能力检查。

（4）SP-B 方法

SP-B 方法的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{SP-B} \le \eta_{all} \tag{4.20}$$

式中:

η_{SP-B}——加筋板格的最大屈曲利用因子，取为下列各项的最大值：

① 本章 4.3.3(1)中定义的整体加筋板屈曲能力；

② 根据本章 4.3.3(2)中定义的方法 B 计算得到的板的屈曲能力；

③ 本章 4.3.3(3)中定义的加强筋的屈曲强度，且对于加强筋两侧的基本板格，分别单独考虑其属性(厚度、尺寸)和参考应力。

注: 只有当本章 4.3.3(1)中定义的整体加筋板屈曲能力满足后才进行加强筋的屈曲能力检查。

（5）开口处腹板

主要支撑构件的开口处腹板应满足以下衡准：

$$\eta_{opening} \le \eta_{all} \tag{4.21}$$

式中:

$\eta_{opening}$ ——本章 4.3.3(4)及 4.1.4 中定义的开口处腹板的最大屈曲利用因子。

4.4.3 支杆、支柱和横撑材

支杆、支柱和横撑材的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{Pillar} \le \eta_{all}$$

式中：η_{Pillar} 本章 4.3.4(1)中定义的支杆、支柱和横撑材的最大屈曲利用因子。

4.4.4 槽型舱壁

（1）整体柱屈曲

槽形舱壁在轴向压应力作用下的整体屈曲失效模式应针对柱屈曲(如水平槽形舱壁和承受局部垂向力的垂直槽形舱壁)进行校核。

对于每一个由 1/2 面板+1 个腹板＋1/2 面板构成的槽条单元，如图 4.4.4 中灰色区域所示的单个槽条，应满足以下衡准：

$$\eta_{Overall} \le \eta_{all}$$

式中：$\eta_{Overall}$ 根据本章 4.3.4(1)和 4.3.4(2)定义的最大整体柱屈曲利用因子，且将支柱的无支撑长度取为槽条的长度。

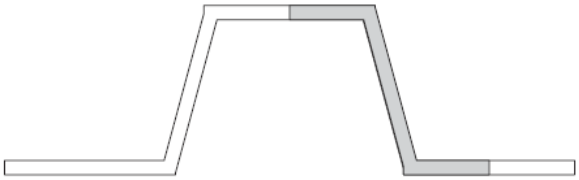


图 4.4.4 槽条单元示意图

关于端部约束因子 f_{end}，如果凳的宽度超过了槽深的 2 倍，则取为与端部固支相对应的值，否则应取为与简支相对应的值。

（2）局部屈曲

对于槽形舱壁的每一个翼板和每一个腹板，其屈曲强度都应满足以下衡准：

$$\eta_{Corr} \le \eta_{all} \tag{4.22}$$

式中:

η_{Corr} ——根据本章 4.3.5 及 4.1.4 定义的每一个面板或每一个腹板的最大屈曲利用因子，注意应考虑下面的两种应力组合：

① 平行于槽条方向的正应力 σ_x 达到最大值，以及该位置处相应的剪应力 τ 和垂直于槽

条方向的正应力σ_y；

②剪应力τ达到最大值，以及该位置处相应的分别平行于和垂直于槽条方向的两个正应力σ_x，σ_y；

屈曲评估中应选取长宽比为 2，并采用最大压应力或者剪应力位置处的构件厚度分别评估，见 4.2.4(2)④。

附录 A 参考应力计算方法

A.1.1 一般规定

（1）符号说明

a——本章 4.3.1 中定义的板格长边长度，mm。

b——本章 4.3.1 中定义的板格短边长度，mm。

A_i——屈曲板格中第 *i* 个板单元的面积，mm^2。

n——屈曲板格中的板单元数。

σ_{xi}——作用在在屈曲板格短边方向，在第 i 个板单元的形心位置沿着 x 方向的应力，N/mm^2。

σ_{yi}——作用在屈曲板格长边方向，在第 i 个板单元的形心位置沿着 y 方向的应力，N/mm^2。

ψ——边缘应力比，定义见本章 4.3.1。

τ_i——屈曲板格第 i 个板单元形心位置处的实际膜剪应力，N/mm^2。

A.1.2 基于应力的方法

（1）本附录给出了一种根据线性最小二乘法计算屈曲板格边缘应力的方法。该方法称为应力法。参考应力是指将板单元中心处的应力变换到所考虑屈曲板格局部坐标系下的应力分量。

（2）定义

规则板格是指形状为矩形的板格。非规则板格是指不规则的板格，详见本章 4.2.3(2).

（3）应力施加

① 规则板格

如果一个规则板格满足如下条件，则其参考应力应按照 A.1.3(1)针对规则板格的定义进行选取：

a. 在规则板格长边 a 的每 1/3 部分中，都至少包括一个板单元的形心；

b. 在沿着板格的局部 x 坐标方向，该单元的形心与相邻的 1/3 板格部分中的至少一个单元形心的距离应不小于 a/4。

否则，其参考应力应按照 A.1.3(2)针对非规则板格的定义进行选取。

② 非规则板格和曲板板格

非规则板格的参考应力应按照 A.1.4 的定义进行选取。

A.1.3 参考应力

（1） 规则板格

① 纵向应力

作用在屈曲板格短边上的纵向应力 σ_x 应根据如下方法进行计算：

对于板的屈曲校核，将 $\sigma_x(x)$ 的分布假设为如下二阶多项式曲线形式：

$$\sigma_x = Cx^2 + Dx + E$$

应力 $\sigma_x(x)$ 的最佳拟合曲线可以考虑将各个单元的面积作为加权因子的面积加权平方差 Π 为最小得到：

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n} A_i \left[\sigma_{xi} - (Cx^2 + Dx + E)\right]^2$$

上式中的未知系数 C、D 和 E 应使得 Π 分别对 C、D 和 E 的第一阶偏导数为零，即

$$\frac{\partial \Pi}{\partial C} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i x_i^2 \left[\sigma_{xi} - (Cx_i^2 + Dx_i + E)\right] = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial D} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i x_i \left[\sigma_{xi} - (Cx_i^2 + Dx_i + E)\right] = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial E} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i \left[\sigma_{xi} - (Cx_i^2 + Dx_i + E)\right] = 0$$

未知系数 C、D 和 E 可以通过联立求解上述方程组得到。

$$S_{X1} = \frac{1}{b}\int_0^b \sigma_x(x)dx = \frac{b^2}{3}C + \frac{b}{2}D + E$$

$$S_{X2} = \frac{1}{b}\int_{a-b}^{a} \sigma_x(x)dx = \left(a^2 - ab + \frac{b^2}{3}\right)C + \left(a - \frac{b}{2}\right)D + E$$

如果 $-D/2C < b/2$ 或者 $-D/2C > a - b/2$，则 S_{X3} 应予以忽略。否则，S_{X3} 应取为：

$$S_{X3} = \frac{1}{b}\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sigma_x(x)dx = \frac{b^2}{12}C - \frac{D^2}{4C} + E$$

上式中，

$$x_{\min} = -\frac{b}{2} - \frac{D}{2C}$$

$$x_{\max} = \frac{b}{2} - \frac{D}{2C}$$

纵向应力应为：

$$\sigma_x = \max(S_{X1}; S_{X2}; S_{X3})$$

边缘应力比应为：

$$\psi_x = 1$$

对于加强筋的屈曲评估，作用在附连板短边上的应力 $\sigma_x(x)$ 应为：

$$\sigma_x = \frac{\sum_1^n A_i \sigma_{xi}}{\sum_1^n A_i}$$

应力 σ_x 的边缘应力比等于 1.0。

② 横向应力

施加在屈曲板格长边上的横向应力 σ_y，应通过对所考虑屈曲板格内的所有单元的横向应力进行插值计算到短边边缘上得到。

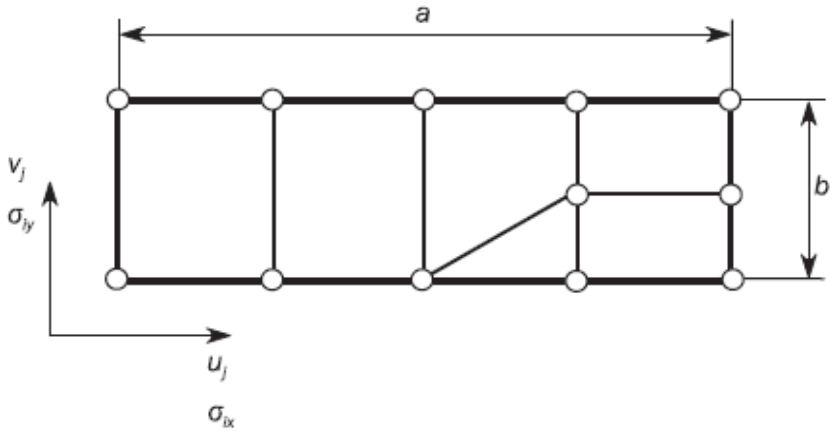


图 A.1.3 屈曲板格

$\sigma_y(x)$ 的分布假设为直线，即

$$\sigma_y(x) = A + Bx$$

$\sigma_y(x)$ 的最佳拟合曲线应通过最小二乘法，考虑将各个单元的面积作为加权因子的面积加权平方差 Π 为最小得到

$$\Pi = \sum_{i=1}^n A_i \left[\sigma_{yi} - (A + Bx_i)\right]^2$$

未知数 A 和 B 应使得 Π 分别对 A 和 B 的第一阶偏导数为零。

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A} = 2\sum_{i=1}^n A_i \left[\sigma_{yi} - (A + Bx_i)\right] = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial B} = 2\sum_{i=1}^n A_i x_i \left[\sigma_{yi} - (A + Bx_i)\right] = 0$$

求解上述两个方程，可以得到未知数 A 和 B 如下：

$$\begin{cases} A = \dfrac{\left(\sum_{i=1}^n A_i \sigma_{iy}\right)\left(\sum_{i=1}^n A_i x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n A_i x_i \sigma_{iy}\right)}{\left(\sum_{i=1}^n A_i\right)\left(\sum_{i=1}^n A_i x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i\right)^2} \\ B = \dfrac{\left(\sum_{i=1}^n A_i\right)\left(\sum_{i=1}^n A_i x_i \sigma_{iy}\right) - \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n A_i \sigma_{iy}\right)}{\left(\sum_{i=1}^n A_i\right)\left(\sum_{i=1}^n A_i x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i\right)^2} \end{cases}$$

$$\sigma_y = \max(A, A + Ba)$$

如果 $\sigma_y \geq 0$，则 $\psi_y = \dfrac{\min(A, A + Ba)}{\max(A, A + Ba)}$

如果$\sigma_y < 0$，则$\psi_y = 1$

③ 剪应力

剪应力τ应采用面积加权平均方法，根据下式计算得到：

$$\tau = \frac{\sum_{1}^{n} A_i \tau_i}{\sum_{1}^{n} A_i}$$

（2）非规则板格和曲板板格

参考应力包括纵向、横向应力和剪应力都应采用面积加权平均方法，根据下式计算得到：

$$\sigma_x = \frac{\sum_{1}^{n} A_i \sigma_{xi}}{\sum_{1}^{n} A_i}$$

$$\sigma_y = \frac{\sum_{1}^{n} A_i \sigma_{yi}}{\sum_{1}^{n} A_i}$$

$$\tau = \frac{\sum_{1}^{n} A_i \tau_i}{\sum_{1}^{n} A_i}$$

边缘应力比为：

$$\psi_x = 1$$

$$\psi_y = 1$$

附录 B 板格的屈曲因子和折减因子

B.1.1 符号说明

参见本章 4.3.1 中的定义。

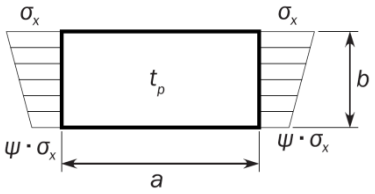
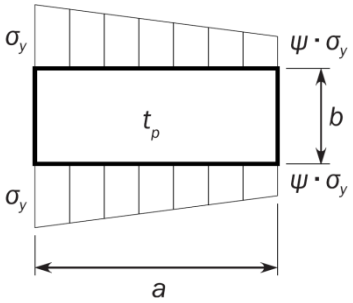
B.1.2 平面板格

平面板格的屈曲因子和折减因子计算公式见表 B.1.2。

B.1.3 曲面板格

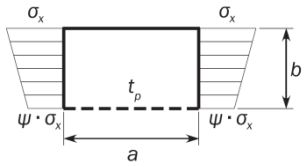
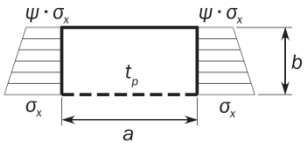
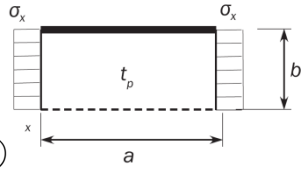
对于满足 $R/t_p \le 2500$ 条件的曲面板格的屈曲因子和折减因子计算公式见表 B.1.3。

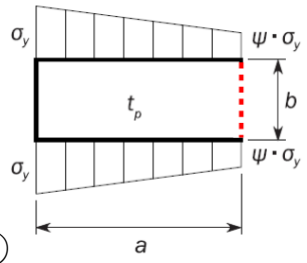
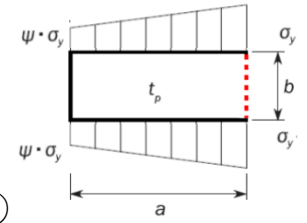
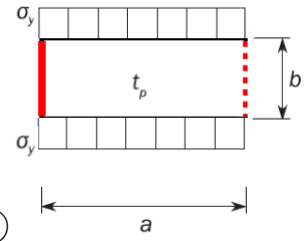
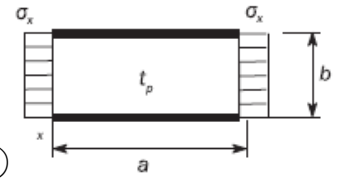
平面板格的屈曲因子和折减因子 **表 B.1.2**

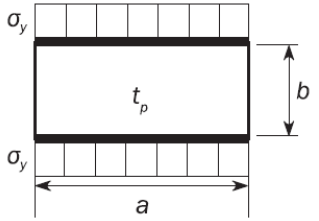
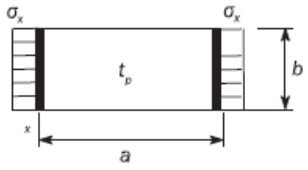
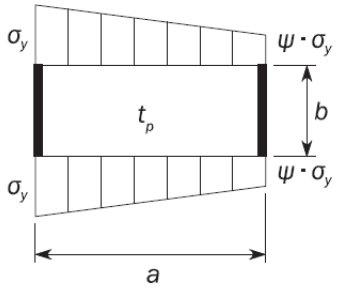
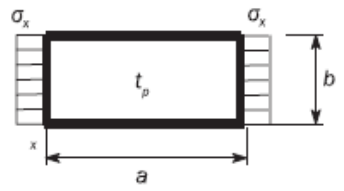
<table>
<tr><th>工况</th><th>应力比 ψ</th><th>长宽比 α</th><th>屈曲因子 K</th><th>折减因子 C</th></tr>
<tr><td rowspan="3">①

</td><td>$1 \ge \psi \ge 0$</td><td colspan="2">$K_x = F_{long}\dfrac{8.4}{\psi + 1.1}$</td><td rowspan="3">当 $\sigma_x \le 0$ 时，$C_x = 1$；
当 $\sigma_x > 0$ 时：
$C_x = 1$ 对 $\lambda \le \lambda_c$
$C_x = c\left(\dfrac{1}{\lambda} - \dfrac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对 $\lambda > \lambda_c$
其中：
$c = (1.25 - 0.12\psi) \le 1.25$
$\lambda_c = \dfrac{c}{2}\left(1 + \sqrt{1 - \dfrac{0.88}{c}}\right)$</td></tr>
<tr><td>$0 > \psi > -1$</td><td colspan="2">$K_x = F_{long}\left[7.63 - \psi(6.26 - 10\psi)\right]$</td></tr>
<tr><td>$\psi \le -1$</td><td colspan="2">$K_x = F_{long}\left[5.975(1-\psi)^2\right]$</td></tr>
<tr><td rowspan="3">②

</td><td rowspan="3">$1 \ge \psi \ge 0$</td><td colspan="2">$K_y = F_{tran}\dfrac{2\left(1 + \dfrac{1}{\alpha^2}\right)^2}{1 + \psi + \dfrac{(1-\psi)}{100}\left(\dfrac{2.4}{\alpha^2} + 6.9 f_1\right)}$</td><td rowspan="3">当 $\sigma_y \le 0$ 时，$C_y = 1$；
当 $\sigma_y > 0$ 时：
$C_y = c\left(\dfrac{1}{\lambda} - \dfrac{R + F^2(H-R)}{\lambda^2}\right)$
其中：
$c = (1.25 - 0.12\psi) \le 1.25$
$R = \lambda(1 - \lambda/c)$ 对 $\lambda < \lambda_c$
$R = 0.22$ 对 $\lambda \ge \lambda_c$
$\lambda_c = 0.5c(1 + \sqrt{1 - 0.88/c})$</td></tr>
<tr><td>$\alpha \le 6$</td><td>$f_1 = (1-\psi)(\alpha - 1)$</td></tr>
<tr><td>$\alpha > 6$</td><td>$f_1 = 0.6(1 - \dfrac{6\psi}{\alpha})(\alpha + \dfrac{14}{\alpha})$
但不大于 $14.5 - \dfrac{0.35}{\alpha^2}$</td></tr>
</table>

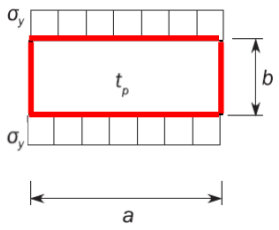
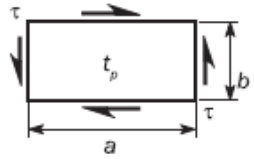
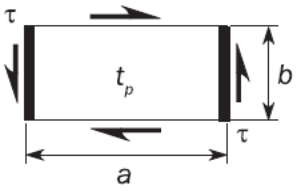
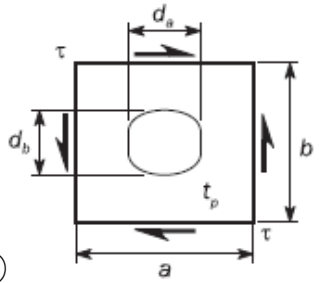
<table>
<tr>
<td rowspan="4"></td>
<td rowspan="4">$1-\frac{4\alpha}{3}\le\psi<0$</td>
<td colspan="2">$K_y=\frac{200F_{tran}\left(1+\beta^2\right)^2}{(1-f_3)(100+2.4\beta^2+6.9f_1+23f_2)}$</td>
<td rowspan="4">$F=\left(1-\left(\frac{K}{0.91}-1\right)\Big/\lambda_p^2\right)c_1\ge 0$
$\lambda_p^2=\lambda^2-0.5$ 且 $1\le\lambda_p^2\le 3$
$c_1=1$ 的定义见 4.3.3(2)③。
$H=\lambda-\frac{2\lambda}{c(T+\sqrt{T^2-4})}\ge R$
$T=\lambda+\frac{14}{15\lambda}+\frac{1}{3}$</td>
</tr>
<tr>
<td>$\alpha>6(1-\psi)$</td>
<td>$f_1=0.6(\frac{1}{\beta}+14\beta)$
但不大于$14.5-0.35\beta^2$
$f_2=f_3=0$</td>
</tr>
<tr>
<td>$3(1-\psi)\le\alpha\le 6(1-\psi)$</td>
<td>$f_1=\frac{1}{\beta}-1$
$f_2=f_3=0$</td>
</tr>
<tr>
<td>$1.5(1-\psi)\le\alpha<3(1-\psi)$</td>
<td>$f_1=\frac{1}{\beta}-(2-\omega\beta)^4-9(\omega\beta-1)(\frac{2}{3}-\beta)$
$f_2=f_3=0$</td>
</tr>
</table>

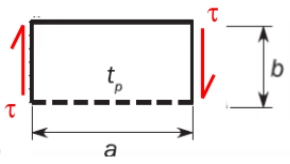
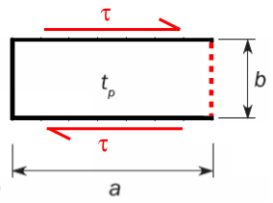
		$1-\psi \le \alpha < 1.5(1-\psi)$	如果 $\alpha > 1.5$，则 $f_1 = 2\left(\frac{1}{\beta} - 16\left(1-\frac{\omega}{3}\right)^4\right)(\frac{1}{\beta}-1)$ $f_2 = 3\beta - 2$； $f_3 = 0$ 如果 $\alpha \le 1.5$，则 $f_1 = 2\left(\frac{1.5}{1-\psi}-1\right)\left(\frac{1}{\beta}-1\right)$ $f_2 = \frac{\psi(1-16f_4^2)}{1-\alpha}$； $f_3 = 0$ $f_4 = \left[1.5 - Min(1.5;\alpha)\right]^2$	
		$0.75(1-\psi) \le \alpha < (1-\psi)$	$f_1 = 0$ $f_2 = 1 + 2.31(\beta-1) - 48\left(\frac{4}{3}-\beta\right)f_4^2$ $f_3 = 3f_4(\beta-1)\left(\frac{f_4}{1.81}-\frac{\alpha-1}{1.31}\right)$ $f_4 = \left[1.5 - Min(1.5;\alpha)\right]^2$	

<table>
<tr><td></td><td>$\psi < 1-\frac{4\alpha}{3}$</td><td colspan="2">$K_y = 5.972F_{tran}\frac{\beta^2}{1-f_3}$
式中，
$f_3 = f_5\left(\frac{f_5}{1.81}+\frac{1+3\psi}{5.24}\right)$
$f_5 = \frac{9}{16}\left[1+Max(-1;\psi)\right]^2$</td><td></td></tr>
<tr><td>③

</td><td>$1 \ge \psi \ge 0$</td><td colspan="2">$K_x = \frac{4(0.425+1/\alpha^2)}{3\psi+1}$</td><td rowspan="3">$C_x = 1$　　对$\lambda \le 0.7$
$C_x = \frac{1}{\lambda^2+0.51}$　　对$\lambda > 0.7$</td></tr>
<tr><td></td><td>$0 > \psi > -1$</td><td colspan="2">$K_x = 4(0.425+1/\alpha^2)(1+\psi)$
$-5\psi(1-3.42\psi)$</td></tr>
<tr><td>④

</td><td>$1 \ge \psi \ge -1$</td><td colspan="2">$K_x = \left(0.425+\frac{1}{\alpha^2}\right)\frac{3-\psi}{2}$</td></tr>
<tr><td>⑤

</td><td>-</td><td>$\alpha \ge 1.64$</td><td>$K_x = 1.28$</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>$\alpha < 1.64$</td><td>$K_x = \frac{1}{\alpha^2}+0.56+0.13\alpha^2$</td></tr>
</table>

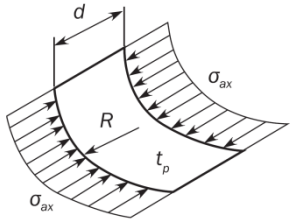
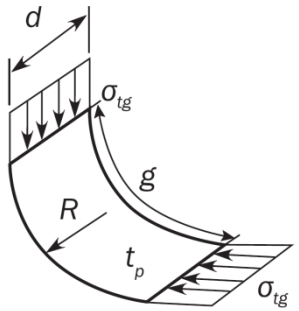
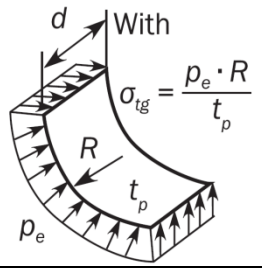
⑥ 	$1\geq\psi\geq 0$	$K_y=\dfrac{4(.425+\alpha^2)}{(3\psi+1)\alpha^2}$ $K_y=\dfrac{4(0.425+\alpha^2)}{(3\psi+1)\alpha^2}$	$C_y=1$ 对$\lambda\leq 0.7$ $C_y=\dfrac{1}{\lambda^2+0.51}$ 对$\lambda>0.7$
	$0>\psi\geq -1$	$K_y=4\left(0.425+\alpha^2\right)(1+\psi)\dfrac{1}{\alpha^2}-5\psi(1-3.42\psi)\dfrac{1}{\alpha^2}$	
⑦ 	$1\geq\psi\geq -1$	$K_y=\left(0.425+\alpha^2\right)\dfrac{3-\psi}{2\alpha^2}$	
⑧ 	--	$K_y=1+\dfrac{0.56}{\alpha^2}+\dfrac{0.13}{\alpha^4}$	
⑨ 	—	$K_x=6.97$	$C_x=1$ 对$\lambda\leq 0.83$ $C_x=1.13\left(\dfrac{1}{\lambda}-\dfrac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda>0.83$

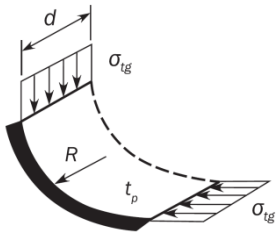
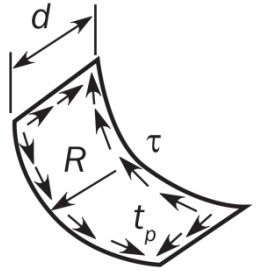
⑩ 	—	$K_y = 4 + \frac{2.07}{\alpha^2} + \frac{0.67}{\alpha^4}$		$C_x = 1$　对$\lambda \le 0.83$ $C_x = 1.13\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda > 0.83$
⑪ 	—	$\alpha \ge 4$	$K_x = 4$	$C_x = 1$　对$\lambda \le 0.83$ $C_x = 1.13\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda > 0.83$
		$\alpha < 4$	$K_x = 4 + 2.74\left[\frac{4-\alpha}{3}\right]^4$	
⑫ 	-	K_y 与工况②中的相同。		如果$\alpha < 2$，则$C_y = C_{y2}$； 如果$\alpha \ge 2$，则 $C_y = \left(1.06 + \frac{1}{10\alpha}\right) C_{y2}$； 上式中，$C_{y2}$是指根据工况②计算的$C_y$。
⑬ 	—	$\alpha \ge 4$	$K_x = 6.97$	$C_x = 1$　对$\lambda \le 0.83$ $C_x = 1.13\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda > 0.83$
		$\alpha < 4$	$K_x = 6.97 + 3.1\left[\frac{4-\alpha}{3}\right]^4$	

⑭ 	—	$K_y=\frac{6.97}{\alpha^2}+\frac{3.1}{\alpha^4}\left(\frac{4-1/\alpha}{3}\right)^4$	$C_y=1$ 对$\lambda\le 0.83$ $C_y=1.13\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda>0.83$
⑮ 	—	$K_\tau=\sqrt{3}\left[5.34+\frac{4}{\alpha^2}\right]$	$C_\tau=1$ 对$\lambda\le 0.84$ $C_\tau=\frac{0.84}{\lambda}$ 对$\lambda>0.84$
⑯ 	—	$K_\tau=\sqrt{3}\left[5.34+Max\left[\frac{4}{\alpha^2};\frac{7.15}{\alpha^{2.5}}\right]\right]$	
⑰ 	—	$K_\tau=K_{\tau case15}r$ $K_{\tau case15}$是指按工况⑮计算得到的K_τ r=开口折减因子，取作： $r=\left(1-\frac{d_a}{a}\right)\left(1-\frac{d_b}{b}\right)$ $\frac{d_a}{a}\le 0.7$ 且 $\frac{d_b}{b}\le 0.7$	

⑱ 	—	$K_\tau=\sqrt{3}\left(0.6+\frac{4}{\alpha^2}\right)$	$C_\tau=1$ 对$\lambda\le 0.84$ $C_\tau=\frac{0.84}{\lambda}$ 对$\lambda>0.84$
⑲ 	—	$K_\tau=8$	
边缘的边界条件：- - - - - - - - - - - - 板边缘自由 ；　　————————板边缘简支;　　▬▬▬▬ 板边缘夹紧			
注(1)：表中列出的是一般工况，其中的应力分量(σ_x,σ_y)应理解为在局部坐标系中。			

具有 $R/t_p \le 2500$ 的曲面板格的屈曲因子和折减因子 **表 B.1.3**

工况	长宽比	屈曲因子K	折减因子 C
1  	$\frac{d}{R} \le 0.5\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = 1 + \frac{2}{3}\frac{d^2}{Rt_p}$	对于一般性应用： $C_{ax} = 1$ 对 $\lambda \le 0.25$ $C_{ax} = 1.233 - 0.933\lambda$ 对 $0.25 < \lambda \le 1$ $C_{ax} = 0.3/\lambda^2$ 对 $1 < \lambda \le 1.5$ $C_{ax} = 0.2/\lambda^2$ 对 $\lambda > 1.5$ 对于单个曲面区域，如其边界由平面板格所围的舷列板，则 $C_{ax} = \frac{0.65}{\lambda^2} \le 1.0$
	$\frac{d}{R} > 0.5\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = 0.267\frac{d^2}{Rt_p}\left[3 - \frac{d}{R}\sqrt{\frac{t_p}{R}}\right] \ge 0.4\frac{d^2}{Rt_p}$	
2a  	..	$K = \frac{d}{\sqrt{Rt_p}} + 3\frac{(Rt_p)^{0.175}}{d^{0.35}}$	对于一般性应用： $C_{tg} = 1$ 对 $\lambda \le 0.4$ $C_{tg} = 1.274 - 0.686\lambda$ 对 $0.4 < \lambda \le 1.2$ $C_{tg} = \frac{0.65}{\lambda^2}$ 对 $\lambda > 1.2$ 对于单个曲面区域，如其边界由平面板格所围的舷列板，则 $C_{tg} = \frac{0.8}{\lambda^2} \le 1.0$
2b  	$\frac{d}{R} > 1.63\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = 0.3\frac{d^2}{R^2} + 2.25\left(\frac{R^2}{dt_p}\right)^2$	

p_e 是指外部压力，N/mm²。			
3 	$\frac{d}{R} \le \sqrt{\frac{R}{t_p}}$	..	同工况 2a
	$\frac{d}{R} > \sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = 0.3\frac{d^2}{R^2} + 0.291\left(\frac{R^2}{dt_p}\right)^2$	
4 	$\frac{d}{R} \le 8.7\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = \sqrt{3}\sqrt{28.3 + \frac{0.67d^3}{R^{1.5}t_p^{1.5}}}$	$C_\tau = 1$ 对 $\lambda \le 0.4$ $C_\tau = 1.274 - 0.686 \cdot \lambda$ 对 $0.4 < \lambda \le 1.2$ $C_\tau = \frac{0.65}{\lambda^2}$ 对 $\lambda > 1.2$
	$\frac{d}{R} > 8.7\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = \sqrt{3}\frac{0.28d^2}{R\sqrt{Rt_p}}$	
边缘的边界条件：- - - - - - - - - - - -　板边缘自由;　————————板边缘简支;　**━━━━━━━━**　板边缘夹紧			

第 5 章　整船有限元强度评估

5.1　一般规定

5.1.1 对于船长在 350 米及以上的矿砂船，应进行整船结构强度直接计算。对于船长在 300 米及以上的矿砂船，可采用整船结构直接计算方法对其货舱区主要结构的强度进行评估。

5.1.2 对拟采用直接计算法进行整船主要结构总体强度（不包括扭转强度）评估的矿砂船，其计算模型、载荷工况及载荷计算、强度衡准应符合本指南的规定。

5.1.3 本章采用右手直角坐标系，原点设在目标船纵中剖面内尾垂线和基线相交处：

- x 轴：纵向轴，从船艉指向船艏为正；
- y 轴：横向轴，从中心线向左舷为正；
- z 轴：垂向轴，从基线向上为正。

5.1.4 整船结构强度有限元直接计算流程见图 5.1.4。

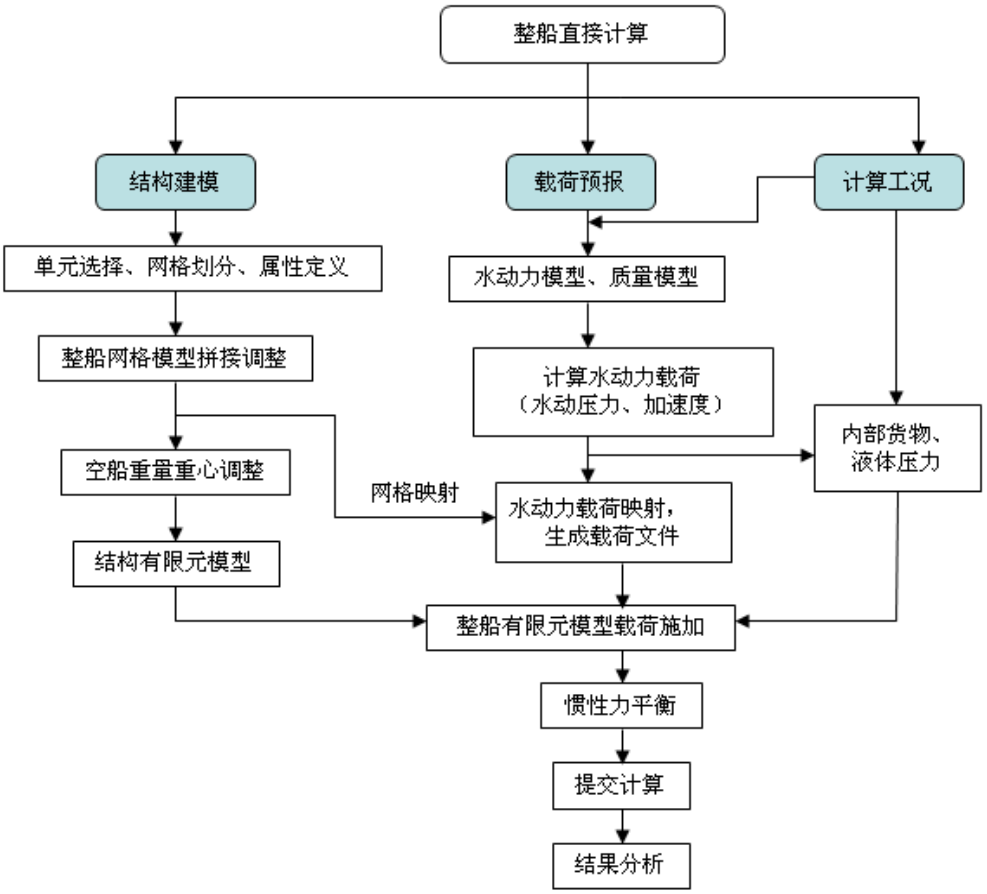


图 5.1.4　整船结构直接计算流程图

5.2 模型要求

5.2.1 水动力计算模型

整船水动力计算模型应准确反映船体几何形状特征外，合理地表达船体的质量及其分布信息。然后通过浮态调整，使得计算模型的排水量、纵倾角和首尾吃水均与装载手册一致，并将误差控制在排水量的±1％和首尾纵倾±5cm 之内。

5.2.2 有限元模型范围

整船三维有限元模型应覆盖整个船长、船宽范围的船体结构，包括所有的船体主要构件，如甲板结构、舷侧结构、双层底结构、横舱壁、内壳纵舱壁、艏艉结构等；机舱内主机、上层建筑、尾轴等可以作适当简化处理；小肘板、小开口或开孔可忽略。典型矿砂船整船有限元模型如图 5.2.2 所示。

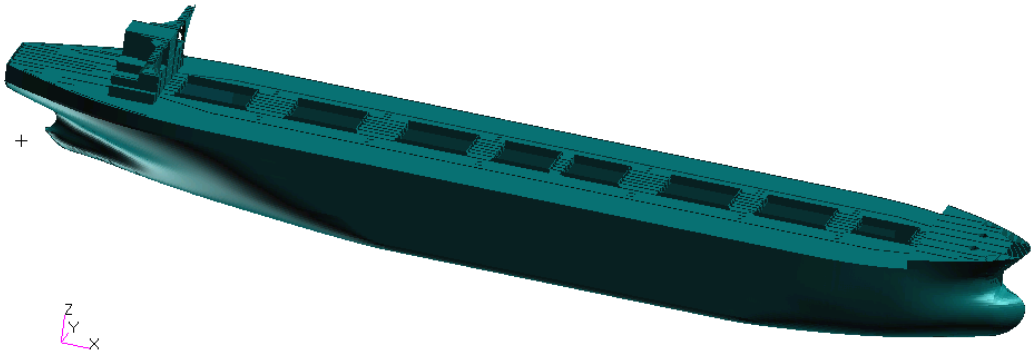


图 5.2.2 典型矿砂船整船有限元模型

5.2.3 有限元建模

5.2.3.1 选择单元类型应符合本指南 3.1.4 的要求。主机、大型设备，可采用集中质量单元建模。轴向受拉压作用的支柱可采用杆单元建模。

5.2.3.2 有限元网格划分原则应符合本指南 3.2.4 的要求。对货舱区域以外结构，还应符合以下要求：

（1）货舱以外区域，若采用横骨架式的甲板、平台、外板，以相邻两个横骨之间为一个网格，宽度方向不能大于两个横骨间距，并且与相邻构件网格协调；其他主要构件板单元的网格划分，参照货舱区网格划分方法，以骨材、加强筋的实际位置作为网格划分依据，对构件连接区域、型线变化大的区域，可适当进行局部调整。

（2）艏尖舱、艉尖舱及机舱，以简化或等效处理方式建模，应满足计算精度要求。并且考虑剪切工况中最大剪力位置出现在艏艉区域时，应保证该区域网格与货舱区具有相同的精度。

5.2.4 空船重量、重心调整

5.2.4.1 整船模型以舱段进行属性定义，保证整船质量分布应与船舶静水浮态相匹配。总重力与总浮力的误差不超过排水量的 0.0001 倍。且质心与浮心的纵坐标误差不大于 0.0025L，

横向坐标误差不大于 0.001B。

5.2.4.2 调整方法

（1）对于舾装、建模引起的差异，可以通过修改材料密度进行调整；

（2）对于大型设备，如主机等，可采用虚拟梁单元或集中质量单元等方法进行调整。

5.2.5 细化网格模型

5.2.5.1 整船有限元计算下列区域应力结果超过 5.5.1 规定的许用应力的 95%时，则应予以细化网格分析：

（1）双层底、边压载舱内的横向主要支撑构件；

（2）横舱壁与底凳的连接处、底凳与内底的连接处；

（3）内底与内壳纵舱壁的连接部应力最大处；

（4）甲板舱口角隅处。

5.2.5.2 细化分析模型可采用本指南 3.5.3.2 的两种方法。

5.2.5.3 细化网格划分应满足本指南 3.5.3 的要求。

5.3 水动力载荷计算

5.3.1 计算工况

5.3.1.1 每一计算工况由装载工况和波浪载荷工况组成。

5.3.1.2 分别选取装载手册中典型装载下中拱、中垂最大静水弯矩和静水剪力最大的工况作为装载工况，一般应计算的装载工况见表 5.3.1.2，同时还应考虑装载手册中可能出现的其他更不利的装载工况。

装载工况　　表 5.3.1.2

工况	选取条件
满载	（1）中垂状态； （2）最大垂向静水弯矩或剪力； （3）最大、中间、最小载货密度。
正常压载	（1）中拱状态； （2）最大垂向静水弯矩或剪力。
重压载 （如有时）	（1）中垂状态； （2）最大垂向静水弯矩或剪力。
多港 （如有时）	（1）中拱或中垂状态； （2）最大垂向静水弯矩或剪力； （3）最大、中间、最小载货密度。

5.3.1.3 在上述装载工况基础上叠加相应的波浪载荷工况，波浪载荷工况应分别考虑以下载荷控制参数：

（1）垂向波浪弯矩；

（2）垂向波浪剪力（静水剪力最大处）；

（3）船首垂向加速度（计算点取 1 货舱前舱壁与中纵线面的交线顶端）；

（4）船首横向加速度（计算点同（3））；

（5）最大横摇角。

5.3.2 工况组合

5.3.2.1 根据本章 5.3.1.2 和 5.3.1.3 确定的装载工况和波浪载荷工况，得到计算工况组合见表 5.3.2.1。

计算工况 **表 5.3.2.1**

波浪载荷控制参数 / 装载工况	满载	正常压载	重压载（如有时）	多港（如有时）
垂向波浪弯矩	适用	适用	适用	-
垂向波浪剪力	适用	适用	适用	适用
船首垂向加速度	适用	适用	适用	适用
船首横向加速度	适用	适用	适用	适用
最大横摇角	-	适用	-	适用

5.3.3 水动力分析

5.3.3.1 波浪载荷预报的技术流程如图 5.3.3.1 所示，主要包括水动力计算模型建立、等效设计波确定以及运动、载荷预报。

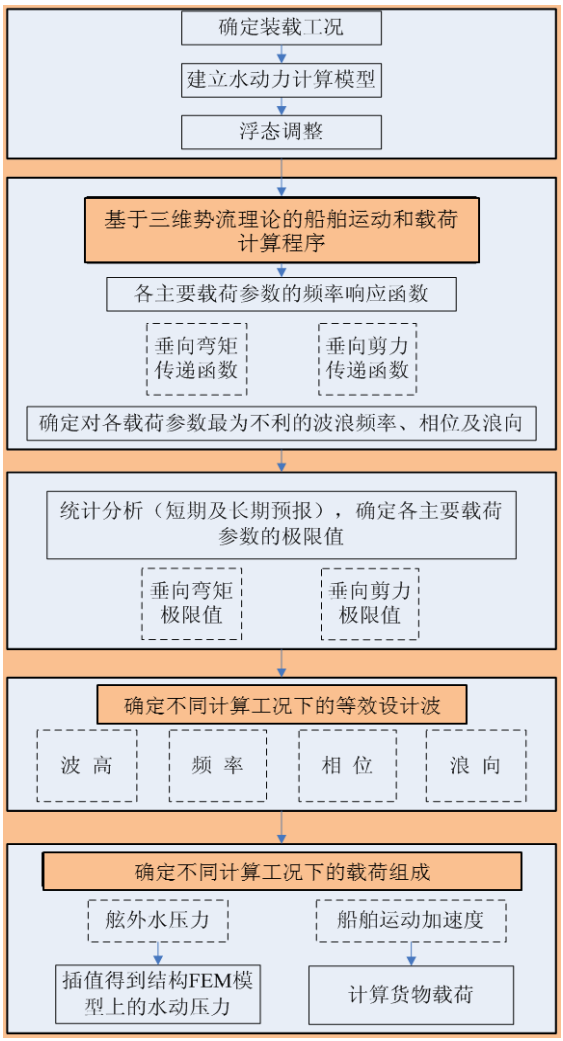


图 5.3.3.1 矿砂船波浪载荷计算技术流程图

5.3.3.2 波浪载荷传递函数

（1）通过三维船舶运动和载荷计算程序，得到不同浪向下载荷控制参数的频率响应函数，其中关于浪向、频率和航速等输入参数须满足如下规定：

- 计算所取浪向角应不少于 7 个，包括 0°、30°、60°、90°、120°、150°和 180°；
- 所取的波浪频数为 20～30，范围从 0.2～1.5 rad/s，步长取为 0.05 rad/s；
- 计算航速取为零航速。

（2）根据每个载荷控制参数在不同浪向下的频率响应函数曲线，可以搜索得到在频率响应函数达到最大值时的浪向、频率（即波长）和相位组合参数，用于后续等效设计波确定。

5.3.3.3 长期预报极值

（1）对于无限航区，波浪散布图取 IACS Rec.34 提供的北大西洋标准波浪统计资料；

（2）在波浪载荷的短期与长期预报中，均采用 PM 波浪谱，短峰波扩散函数取余弦函数的平方；

（3）载荷控制参数极值根据其传递函数通过长期预报得到，一般取 10^{-8} 的超越概率；

（4）考虑到极限海况下的营运实践经验，对于船首垂向加速度、横摇角进行预报时，可取 $10^{-6.5}$ 的超越概率。

5.3.3.4 等效设计波的确定

等效设计波通过浪向角、波幅、波长及相位来定义。

（1）浪向

等效设计波的浪向即为载荷控制参数的频率响应函数的最大值出现时的浪向。

（2）波幅

等效设计波的波幅由载荷控制参数的长期预报极值和频率响应函数的峰值来确定，由下式计算：

$$a_W = \frac{L_j}{A_j}$$

式中：

a_W ——波幅，m；

L_j ——载荷控制参数基于一定概率水平下可能出现的长期极限值；

A_j ——载荷控制参数的频率响应函数的最大值；

j ——载荷控制参数编号；

（3）波长

等效设计波的波长由频率响应函数达到最大值时的频率确定，可由下式计算：

$$\lambda = (2\pi g)/\omega_a^2$$

式中：

λ ——设计波波长，m；

g ——重力加速度；

ω_a ——载荷控制参数频率响应函数最大值对应的波浪频率，rad/s。

（4）相位

载荷控制参数达到极值的时刻由频率响应函数达到最大值时的相位确定，可由下式计算：

$$t_j = \frac{n\pi + \frac{\pi}{2} - \varepsilon_j}{\omega_a}$$

式中：

ω_a ——载荷控制参数频率响应函数最大值对应的波浪频率，rad/s；

ε_j ——载荷控制参数频率响应函数最大值对应的相位，rad；

n ——0 或 1。

5.3.4 运动和载荷预报

根据等效设计波，进行船舶的各种载荷成份（运动加速度、舷外水动压力）的预报。

5.3.4.1 加速度

加速度的计算常常表示为复数，或者表示为幅值和相位两个实数。由加速度的幅值和相位，计算点上的加速度可以由下式得到：

$$A_t = (a_i)(a_W)\sin(\omega_a t_j + \varepsilon_i)$$

式中：

A_t ——船体任意计算位置处的瞬时加速度

a_i ——加速度频率响应函数的幅值

a_W ——设计波波幅

ε_i ——加速度频率响应函数的相位；

t_j ——为载荷控制参数取最大值时的时刻。

5.3.4.2 水动压力计算及加载

根据等效设计波，计算载荷控制参数达到最大值时（如垂向弯矩）的水动压力分布，并利用插值算法，得到结构有限元模型外表面上的水动压力分布，如 5.3.4.2 图所示。

设计波下的波浪压力计算公式为：

$$p_i = (A_i)(a_W)\sin(\omega_a t_j + \varepsilon_i)$$

式中：

p_i ——船体任意计算位置处的压力；

A_i ——波浪压力频率响应函数的幅值；

a_W ——设计波波幅；

ε_i ——加速度频率响应函数的相位；

t_j ——为载荷控制参数取最大值时的时刻。

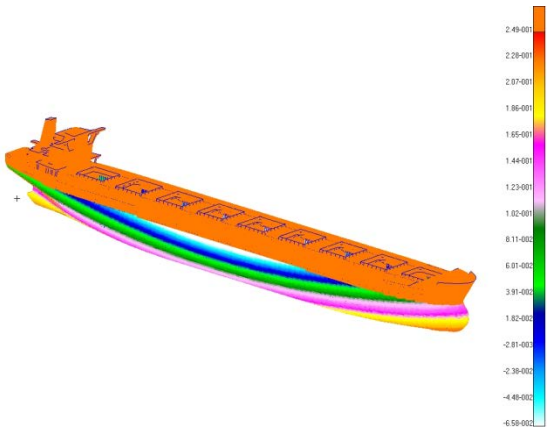


图 5.3.4.2 舷外水动压力示意图

5.4 整船载荷施加与惯性平衡

5.4.1 外部水压力

5.4.1.1 外部水压力包括静水压力和波浪水动压力。

5.4.1.2 外部静水压力按计算工况的吃水，作用在船体外部湿表面，公式如下：

$$p_S = \rho g(T_{LC} - z)$$

式中：ρ——海水密度，取 1.025 t/m^3；

g ——重力加速度；

T_{LC}——所考虑装载工况下的吃水，m；

z——载荷点的垂向坐标，m，且应不大于 T_{LC}。

5.4.1.3 波浪水动压力应按 5.3.3 规定的计算方法求得，并施加于船体外壳单元上。

5.4.2 内部载荷

5.4.2.1 矿砂船的内部载荷包括货舱内货物载荷、液舱内部载荷及空船惯性力。

5.4.2.2 货物载荷的计算和加载应满足本指南第 2 章 2.6 的要求，其中加速度应按本章 5.3.4.1 计算。

5.4.2.3 液舱内部载荷的计算和加载应满足本指南第 2 章 2.6 的要求，其中加速度应按本章 5.3.4.1 计算。

5.4.2.4 空船惯性力指仅由船体结构质量（不包括货物、压载水等质量）组成的质量模型与节点运动加速度相乘求得的惯性力。

5.4.3 载荷的惯性平衡

5.4.3.1 各节点上惯性力的施加及整船有限元模型的外力动态平衡可以通过加载及动平衡调整来实现。整船动平衡调整的一般处理流程如图 5.4.3.1 所示。

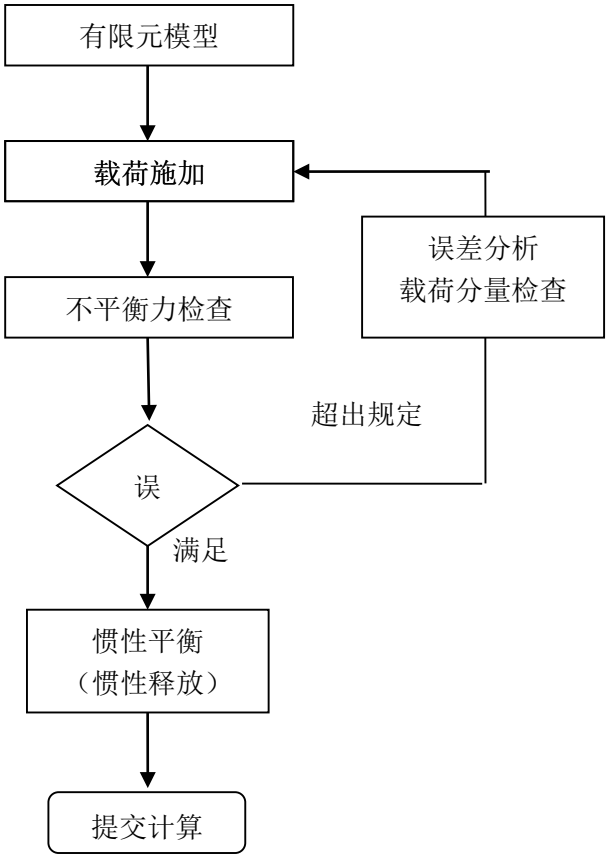


图 5.4.3.1 整船动平衡调整的一般处理流程

5.4.3.2 对每一个计算工况，在完成整船载荷加载后应计算和检查模型在 x、y 和 z 轴三个方向上的不平衡力的大小。在迎浪工况下，各个方向上的不平衡力应不超过排水量的 1%；对于横浪和斜浪工况，不平衡力应不超过排水量的 2%。

5.4.4 约束条件

5.4.4.1 整船动态平衡调整后，计算模型已处于自由动态平衡状态，为消除刚体位移，应对模型施加 6 个自由度的边界约束。

5.4.4.2 采用惯性释放功能进行结构强度分析时，通过设定参考点进行边界约束，如图 5.4.4.2 所示，一般将邻近船中位置的实肋板与纵中剖面相交处（节点 1）选取为“虚支座”。

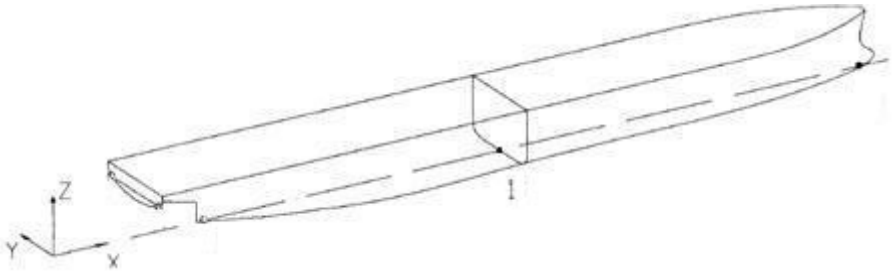


图 5.4.4.2 参考点位置示意图

5.5 强度评估衡准

5.5.1 屈服强度衡准

5.5.1.1 屈服强度衡准如下：

$$\sigma_{vm} \leq R_y$$

式中：σ_{vm}——对应于骨材间距网格区域的板单元中心的 Von Mises 相当应力，或梁单元的轴向应力，N/mm^2；

R_y——许用应力，N/mm^2，按下式计算：

$$R_y = 220/K \quad \text{N/mm}^2$$

K ——材料系数。

5.5.1.2 细化网格尺寸为 50mm×50mm 时，细化网格模型的应力衡准应取为整船有限元许用应力的 1.6 倍。

5.5.2 屈曲强度衡准

5.5.2.1 屈曲强度校核参照本指南第 4 章 4.1.6 对船体结构的屈曲强度校核的规定。

附录 1

机舱结构强度直接计算

1.1 一般要求

1.1.1 适用范围

1.1.1.1 本附录适用于船长 350 米及以上的超大型矿砂船的机舱结构强度直接计算。

1.1.1.2 机舱结构强度直接计算适用于对以下结构的强度评估：

1）机舱区域内的船体梁纵向构件；

2）机舱区域内的横向构件；

3）机舱区域内的其他主要支撑构件。

1.2 结构建模

1.2.1 模型范围

1.2.1.1 机舱结构强度直接计算采用三舱段模型，一般包括艉部、机舱及与机舱相邻的最艉货舱，如图 1.2.1。对于最艉货舱特殊布置的矿砂船，模型范围另行考虑。

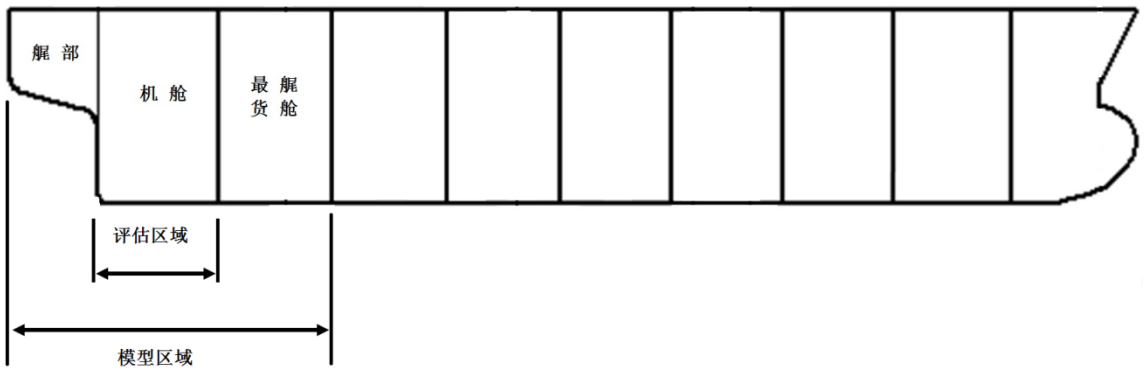


图 1.2.1 机舱结构强度直接计算模型范围

1.2.2 建模要求

1.2.2.1 机舱模型应根据实际的船体结构进行建模，位于主甲板以上的上层建筑、甲板室及烟囱等结构可不建模，但需要考虑自重对舱段模型的影响。

1.2.2.2 机舱应参照第 3 章[3.2]规定的货舱区结构建模要求进行建模。

1）单元尺寸要求，见第 3 章[3.2.2.2]；

2）有限元单元类型要求，见第 3 章[3.2.4.1]；

3）有限元建模要求，见第 3 章[3.2.4.2]；

4）结构尺寸要求，见第 3 章[3.2.4.3]。

1.2.3 边界条件

1.2.3.1 对于机舱结构强度直接计算，边界条件见表 1.2.3.1。

机舱模型端部边界条件 **表 1.2.3.1**

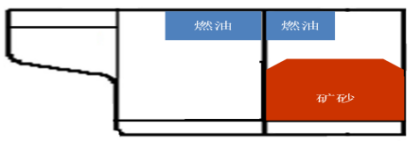
位置		平移			转动		
		δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
模型前端：纵向构件节点		固定	-	固定	-	固定	固定
		端部梁（见第 3 章[3.2.5.5]					
模型后端：	独立点（总纵剖面中和轴高度处）	-	固定	-	固定	M_{T-end}	-
	纵向构件节点	刚性连接	刚性连接	刚性连接	-	-	-
独立点（机舱前舱壁处总纵剖面与内底的交点）		-	固定	-	-	-	-
注释： （1）[-]表示不施加约束； （2）刚性连接指将模型端部纵向构件的节点与相应独立点连接； （3）M_{T-end} 见[1.3.2.5]。							

1.3 载荷

1.3.1 载荷工况组合

1.3.1.1 机舱结构强度直接计算需考核表 1.2.3.1 中的载荷工况组合。若矿砂船三舱段范围内有特殊舱室布置或装载手册定义了特殊的装载工况，应另行考虑。

机舱舱段直接计算载荷工况组合 **表 1.2.3.1**

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力 C_{SF_LC}	静水弯矩 C_{BM_LC}	设计波（见第 2 章[2.2.1]）
1	满载出港		T_{SC}	100%	100%	HSM-2 BSP-2P
2	满载到港		T_{SC}	100%	100%	HSM-2 BSP-2P

3	压载到港		T_{BAL}	100%	100%	HSM-2 BSP-2P

1.3.1.2 在每种载荷工况组合中，适用于的载荷包括：

1）海水载荷，见第 2 章[2.5.1]；

2）矿砂载荷，见第 2 章[2.6.3]；

3）压载水、燃油及其他大型液舱内部载荷，见[2.6.1]；

4）非露天甲板及平台均布载荷产生的压力P_{dl}，kN/m^2,计算公式如下，

$$P_{dl}=\left(1-f_{\beta}\frac{a_{z-env}}{g}\right)P_{dl-s}$$

其中：

f_{β}：浪向修正系数，见第 2 章[2.4]；

a_{z-env}：垂向加速度包络值，见第 2 章[2.3.4.3]，m/s^2；

P_{dl-s}：局部静压力，kN/m^2。

5）机舱内重型机器产生的集中载荷F_U，KN，计算公式如下：

$$F_U=\left(1+f_{\beta}\cdot a_{z-env}\right)m_U$$

其中：

m_U：机器重量，t。

6）船体及上建，只考虑静载荷。若主甲板以上上层建筑、甲板室及烟囱结构为建模，其自重可以按照均布载荷的形式施加在支此类结构的上甲板支撑强构件上。

1.3.2 船体梁目标载荷调整

1.3.2.1 每一工况组合下，船体梁垂向弯矩及剪力均应调整至目标值。步骤为先调整垂向剪力，再调整垂向弯矩。

1.3.2.2 船体梁目标剪力的位置应取在机舱区域的每个强框架处，包含机舱前后舱壁，并在机舱区域往外延伸两个强框架。每档强框架处的目标剪力Q_{targ}为：

$$Q_{t\mathrm{arg}}=C_{SF_LC}\cdot Q_{sw}+f_{\beta}\cdot C_{QW}\cdot Q_{wv}$$

其中：

$C_{\mathrm{SF_LC}}$：静水剪力系数，见表 1.2；

Q_{sw}：航行工况下，许用静水剪力，kN；

C_{QW}：波浪剪力组合系数，见第 2 章[2.2.3]；

Q_{wv}：航行工况下，波浪剪力，见第 2 章[2.4.3.2]，kN;

1.3.2.3 船体梁目标垂向弯矩的位置应取在机舱前壁处，且目标垂向弯矩$M_{\mathrm{v-targ}}$为：

$$M_{v-\mathrm{targ}} = C_{BM_LC} \cdot M_{sw} + f_{\beta} \cdot C_{WV} \cdot M_{wv}$$

其中：

C_{BM_LC}：静水弯矩系数，见表 1.2；

M_{sw}:航行工况下，许用垂向弯矩，kN.m；

C_{WV}：波浪弯矩组合系数，见第 2 章[2.2.3]；

M_{wv}:航行工况下，波浪弯矩，见第 2 章[2.4.3.1]，kN.m；

1.3.2.4 为了使船体梁剪力达到目标值，需在 1.3.2.2 中定义的强框架处施加垂向剪力调整值Q_{i}。参照第 3 章[3.3.4.7]，Q_{i}通过剪流分布法施加到相应的横剖面上。目标剪力调整见图 1.3.2.4。

$$Q_1 = Q_{targ-1} - Q_{fem-1}$$
$$Q_i = Q_{targ-i} - Q_{fem-i} - \sum_{j<i} Q_j$$

其中：

Q_{i}：第 i 强框架处的剪力调整值，kN;

Q_{targ-i}：第 i 强框架处的目标剪力值，见[1.3.2.2]，kN；

Q_{fem-i}：第 i 强框架处局部载荷产生的剪力值，kN。

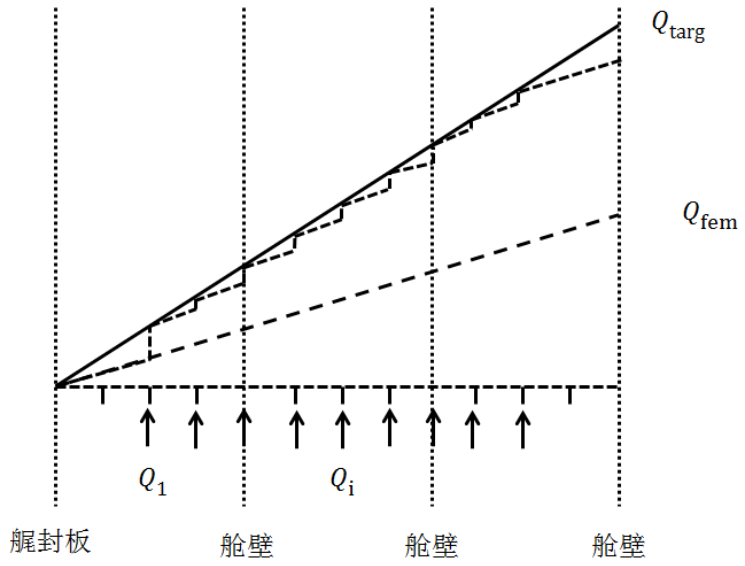


图 1.3.2.4 船体梁目标剪力调整

1.3.2.5 为了使船体梁垂向弯矩在目标位置处达到目标值，需在模型端部施加调整弯矩M_{T-end}。目标垂向弯矩调整见图 1.3.2.5

$$M_{T-end} = M_{v-targ} - M_{fem} - \sum Q_i \cdot l_i$$

其中：

M_{T-end}：模型端部的垂向弯矩调整值，kN.m；

$M_{v-\mathrm{targ}}$：垂向弯矩目标值，见[1.3.2.3]，kN.m；

M_{fem}：机舱前壁处局部载荷产生的垂向弯矩，kN.m；

Q_{i}：第 i 强框架处的剪力调整值，见[1.3.2.4]，kN;

l_i：第 i 强框架距离模型尾端的距离，m。

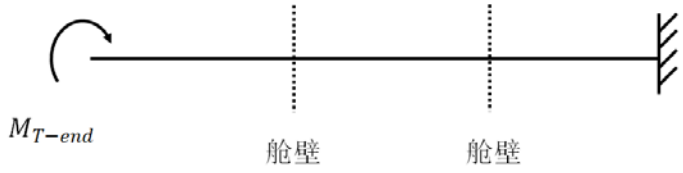


图 1.3.2.5： 船体梁目标弯矩调整

1.4 分析衡准

1.4.1 评估区域

1.4.1.1 评估区域见图 1.2.1.1 机舱主要构件应按照[1.4.2]及[1.4.3]的要求进行屈服及屈曲强度评估。

1.4.2 屈服强度评估

1.4.2.1 机舱主要构件的屈服强度评估应按照第 3 章[3.4.2]的相关要求进行。

1.4.3 屈曲强度评估

1.4.3.1 机舱主要构件的屈曲强度评估参照第 4 章的相关要求进行。

附录 2

装载含水矿砂时舱段有限元计算要求

2.1 一般规定

2.1.1 适用范围

2.1.1.1 对于装载矿砂的矿砂船，因含水率变化引起结构强度有限元分析按本节要求进行。

2.1.1.2 应对船中、最首、最尾货舱进行含水率影响下的舱段有限元屈服强度和屈曲强度分析。

2.1.2 适用条件

2.1.2.1 当矿砂含水率低于适运水分极限（TML）时，可将矿砂看做干矿砂状态，按本指南要求进行有限元直接计算评估。

2.1.2.2 当矿砂含水率高于适运水分极限（TML）时，可将矿砂看做液化状态，应按本节要求进行强度评估。

2.2 液化矿砂的载荷与计算工况

2.2.1 载荷

2.2.1.1 矿砂液化状态下舱段有限元计算考虑载荷有货物静、动压力，压载水和燃油静、动压力，舷外水静、动压力和船体梁载荷。

2.2.1.2 液化矿砂静压力按下式计算：

$$P_{bs} = \rho_C g K_C \left(h_C - z\right)$$

式中，

ρ_C ------液化矿砂密度，不考虑含水率对密度的影响；

K_C ------载荷系数，液化矿砂取 1.0；

h_C -----液化矿砂装载高度，按照装载工况下装载量 M，货物面水平计算。

2.2.1.3 液化矿砂动压力按下式计算：

$$P_{bd} = \rho_C \left[a_X \left(x_G - x\right) + a_Y \left(y_G - y\right) + K_C a_Z \left(h_C - z\right) \right]$$

式中，

ρ_C、K_C、h_C 按上面静压力公式取值。

x_G、y_G 为舱室重心，按指南第 2 章第 2 节定义。

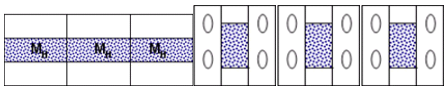
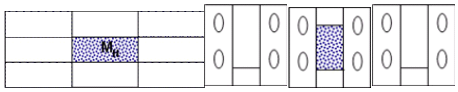
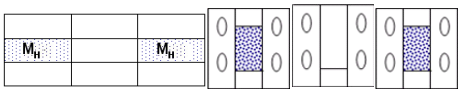
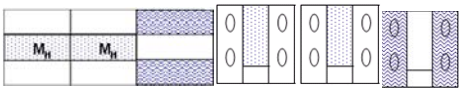
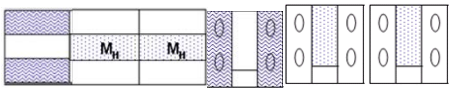
a_X、a_Y、a_Z 为舱室重心处加速度，按本指南第 2 章第 2 节定义。

2.2.1.4 各个工况下舷外水静、动压力，压载水和然后静、动压力、船体梁载荷按第 2 章要求定义。

2.2.2 计算工况

2.2.2.1 液化矿砂状态下舱段有限元典型计算工况见表 2.2.2.1~2.2.2.3。如装载手册中存在本附录表 2.2.2.1~2.2.2.3 中计算工况以外的更为严重的其他装载工况，也应对此装载工况进行结构强度直接计算。

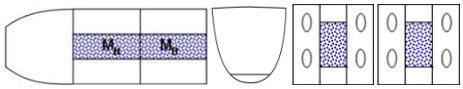
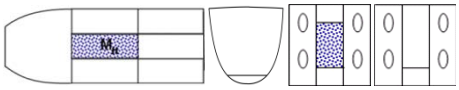
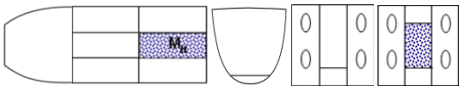
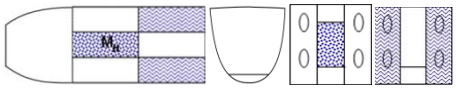
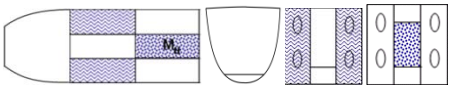
适用于船中区域的液化矿砂舱段直接计算工况 **表 2.2.2.1**

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
1	均匀满载 - 重货		T_{SC}	100%	100% SAG	HSM-1 BSP-1P
2	多港-1		0.67 T_{SC}	100%	100% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P
				100%	100% HOG	HSM-2 FSM-2
3	多港-2		0.83 T_{SC}	100%	100% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P
				100%	100% HOG	HSM-2 FSM-2
4	多港 -3(2)		T_{MPLC} (1)	100%	100% SAG(2)	BSP-1P BSR-1P OST-1P
			T_{MPLC} (1)	100%	100% HOG(2)	HSM-2 FSM-2 BSR-2P OST-2P
5	多 港 -4(2)		T_{MPLC} (1)	100%	100% SAG(2)	BSP-1P BSR-1P OST-1P

			T_{MPLC} (1)	100%	100% HOG(2)	HSM-2 FSM-2 BSR-2P OST-2P

（1）TMPLC 装载手册中连舱装载的最小吃水。
（2）装载手册如有时，则评估该工况。
（3）其它注释见第 2 章第 7 节

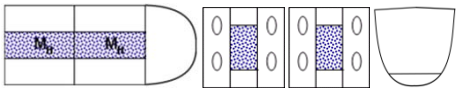
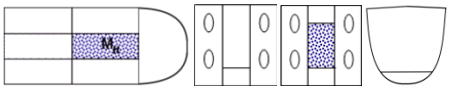
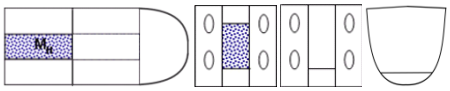
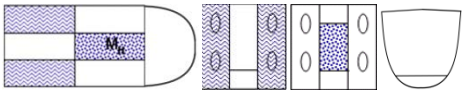
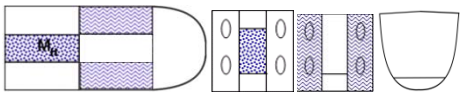
适用于最尾货舱的液化矿砂舱段直接计算工况 **表 2.2.2.2**

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
1	均匀满载-重货		T_{SC}	100%	80% SAG	FSM-1 BSP-1P OST-1P
2	多港-1		0.67 T_{SC}	100%	60% HOG	HSM-1 BSP-1P
3	多港-2		0.67 T_{SC}	100% 100%	30% SAG 30% HOG	FSM-1 OST-1P FSM-1 BSR-1P OSA-1P
4	多港-3(1)		0.75 T_{SC}	100%	50% SAG	HSM-1 BSP-1P OSA-1P
5	多港-4(1)		0.75 T_{SC}	100% 100%	50% SAG 50% HOG	FSM-1 OST-1P FSM-1 BSR-1P OSA-1P

（1）装载手册如有时，则评估该工况。
（2）其它注释见第 2 章第 7 节

适用于最首货舱的液化矿砂舱段直接计算工况 **表 2.2.2.3**

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况

1	均匀满载 - 重货		T_{SC}	100%	60% SAG	HSM-1 BSP-1P OST-1P OSA-2P
2	多港-1		0.67 T_{SC}	100%	60% HOG	HSM-1 BSP-1P OST-2P OSA-2P
3	多港-2		0.83 T_{SC}	100%	60% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P OSA-2P
4	多 港 -3(1)		0.75 T_{SC}	50%	100% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P OSA-2P
5	多 港 -4(1)		0.75 T_{SC}	100%	50% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P OSA-2P
（1）装载手册如有时，则评估该工况。 （2）其它注释见第 2 章第 7 节						

2. 3 有限元模型

2.3.1 模型范围

2.3.1.1 与指南第 3 章第 2 节要求一致，采用三舱段模型，模型长度覆盖完整三个舱段。

2.3.2 单元网格

2.3.2.1 按照指南第 3 章第 2 节要求。

2.3.3 边界条件

2.3.3.1 按照指南第 3 章第 2 节要求。

2. 4 评估区域与衡准

2.4.1 评估区域

2.4.1.1 货物液化状态下货舱结构强度评估，应对以下结构区域重点关注：

（1） 压载舱强框架
（2） 纵舱壁下部区域
（3） 槽型舱壁及底凳
（4） 水平桁

2.4.2 评估衡准

2.4.2.1 强度评估衡准按照指南第 3 章第 4 节。

2.5 屈曲强度评估

2.5.1 基于舱段有限元的屈曲强度评估应按照本指南第 4 章要求进行。