



指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD 05-2005

中国船级社

集装箱船结构强度直接计算指南
**Guidelines for Direct Strength
Analysis of Container Ship**

2005



人民交通出版社

China Communications Press



指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD 05-2005

中 国 船 级 社

集装箱船结构强度直接计算指南
Guidelines for Direct Strength
Analysis of Container Ship

2005

北 京
Beijing

出版说明

《集装箱船结构强度直接计算指南》(2005)在本社原有的《集装箱船结构强度直接计算指南》(2004版)的基础上,新增了第4章“甲板舱口角隅局部结构强度细化模型直接计算”,对大型集装箱船的甲板舱口角隅局部结构疲劳强度评估分析方法及要求作出建议和规定,包含了:船舶设计海况的描述,包括载荷工况和波浪环境的长期预报;船舶运动、波浪载荷及局部水动压力计算;在波浪海况下结构响应计算;合适的(对应的)S-N曲线选取;疲劳寿命估算,用Miner规则的累积损伤循环,与要求的疲劳寿命比较。可用于大型集装箱船及大开口多用途船的舱口角隅热点应力法疲劳强度评估。本指南在直接计算分析方面充分引入现代船舶结构分析的先进技术,如全船模型及局部精细有限元分析方法、基于热点应力的疲劳分析等,在整体技术标准上达到了国际先进水平。

中国船级社



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	2
第2章	整船强度直接计算	3
2.1	一般规定	3
2.2	有限元计算模型	3
2.3	载荷工况	5
2.4	边界条件	7
2.5	许用应力	8
第3章	货舱区域主要结构强度直接计算	9
3.1	一般规定	9
3.2	结构模型化	9
3.3	计算工况	12
3.4	边界条件	16
3.5	许用应力	18
3.6	屈曲强度校核	19
第4章	甲板舱口角隅局部结构强度细化模型直接计算	21
4.1	一般规定	21
4.2	有限元计算模型	21
4.3	载荷	25
4.4	边界条件	27
4.5	许用应力范围	27
附录1	设计波确定方法	30
附录2	板格屈曲强度	34

第1章 总 则

1.1 一般规定

1.1.1 本指南适用于中国船级社《钢质海船入级规范》（以下简称《钢规》）第2篇第7章“集装箱船”中规定的船体结构强度直接计算和《钢规》适用范围以外的非常规的集装箱船船体结构的主要构件强度的直接计算。

1.1.2 本指南给出了集装箱船整船、货舱段主要结构、甲板开口角隅局部结构在规定载荷作用下的强度评估方法。

1.1.3 船体结构的疲劳强度校核按CCS的《船体结构疲劳强度指南》进行。

1.1.4 结构模型和载荷规定应能充分反映下述结构响应：

- 纵向构件在局部载荷和总纵弯矩载荷作用下的应力；
- 主要横向构件（包括横舱壁）的应力；
- 主要构件的屈曲特性。

1.1.5 送审的直接计算技术文件应包括：

- (1) 所使用的图纸清单；
- (2) 静水载荷工况的详细说明，包括吃水、静水弯矩分布曲线；
- (3) 波浪载荷工况的详细说明，包括各工况三向（如有时）波浪载荷计算数值及分布曲线；
- (4) 各工况的惯性载荷（或加速度）的详细说明；
- (5) 结构有限元模型的详细描述；
- (6) 所使用的材料特性详细情况；
- (7) 边界条件的详细描述；
- (8) 所施加的载荷的详细情况；
- (9) 描述与载荷有关的结构模型的响应的图形和结果；
- (10) 总体和局部变形的归纳与图形；
- (11) 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；
- (12) 板的屈曲分析和结果；
- (13) 显示满足或不满足强度标准的结果表格输出；
- (14) 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。

1.1.6 对拟进行全船结构有限元分析的船，设计部门应在设计周期的早期与CCS研讨计算方案。

1.1.7 计算程序如采用不同于CCS Compass系统中所列的，则送审单位还应提供所采用的计算程序的有关说明文件，并须征得CCS同意。

1.2 定义

1.2.1 单位制

质量：吨 (t)；
长度：米(m)；
时间：秒(s)；
力：牛顿(N)或千牛顿(kN)；
应力：牛顿/毫米² (N/mm²)；
压力：千牛/米² (kN/m²)。

1.2.2 符号规定

L ——船长，m；与CCS《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同；
 B ——船宽，m；与CCS《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同；
 D ——型深，m；与CCS《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同；
 d ——吃水，m；与CCS《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同；
 C_b ——方形系数；与CCS《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同；
 V ——航速，kn；
 g ——重力加速度， $g=9.81\text{m/s}^2$ ；
 C_w ——波浪系数；
 ρ ——海水密度， $\rho=1.025\text{t/m}^3$ ；
 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_e ——von Mises应力 (N/mm²)， $=\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$ ；
 σ_l ——船体梁纵向的应力 (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 ——材料换算系数；
 E ——材料弹性模量，对钢材， $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ；
 ν ——材料泊松比，对钢材， $\nu = 0.3$ 。

1.3 构件尺寸

1.3.1 直接计算中的构件尺寸指的是建造尺寸（除屈曲评估以外），若采用净尺寸，则许用应力另作考虑。

第2章 整船强度直接计算

2.1 一般规定

2.1.1 集装箱船的结构尺寸及布置属于下列情况者，一般应采用直接计算方法对其主要结构的总体强度进行评估：

- 结构布置非常规型式、或结构尺寸超出规范规定；
- 强力甲板舱口宽度大于 $0.89B$ 。

2.1.2 对拟采用直接计算法进行全船主要结构总体强度评估的集装箱船，其计算模型、载荷工况、强度衡准、可按本指南的规定。

2.1.3 全船结构直接计算适用范围

(1) 针对集装箱船的船体抗扭强度的特殊性，评估船体主要结构在弯扭载荷联合作用下的总体强度；

(2) 为局部结构细化应力分析（如有时）提供边界条件，如：

- 机舱前端甲板开口角隅的详细应力分析；
- 包括舱口围板的上甲板开口角隅的详细应力分析；

(3) 为局部结构非常规布置区域的详细分析提供边界条件。

2.2 有限元计算模型

2.2.1 有限元模型范围

2.2.1.1 整船三维有限元模型包括整个船长、船宽范围的船体结构,包括左右舷结构在内的船体舫段、艏艉结构、机舱、上层建筑等结构的所有有效的纵向受力构件: 甲板结构、舷侧及纵舱壁结构,双层底结构。模型中还包括横向主要结构如横舱壁、肋骨框架及横向甲板条等。对局部的支撑构件如肘板等不计入模型中, 桁材、肘板的开孔忽略不计。

2.2.1.2 当结构及载荷为左右对称时,整船模型可只计入左舷(或右舷),并在纵中剖面施加左右对称条件。

2.2.2 有限元单元类型

2.2.2.1 根据结构的实际受力状态将模型中的各类结构按建造厚度离散为下列几种类型：

- 板壳元（四节点和三节点元）：
甲板、舷侧外板及船底板、内底板、船底纵桁、纵舱壁及横舱壁、肋板、边舱腹板、舷侧纵桁等。在外板特别是舭部板的单元划分时，应避免出现翘曲的四边形元，应用三角形元来模拟；
- 梁元
纵桁、横梁及水密舱壁扶强材等；
- 杆元
支柱等。

2.2.2.2 板材上的骨材等次要构件可以合并归入板单元的网格边界化为等效梁元，其截面积为合并的骨材面积之和，其剖面特性应计入等效梁与板连接的偏心设置。

2.2.2.3 单元网格尺寸控制如下：

- 纵向：双层底肋板间距为一个单元；
- 横向：纵桁间距为一个单元；
- 垂向：垂向桁材或甲板间距为一个单元。

在船中部区域单元的长宽比大致可控制在1：3，其他部位大致可控制在1：2。

2.2.3 坐标系统的确定

整船模型的总体（基本）坐标系采用右手直角坐标系，原点设在船纵中剖面内尾垂线0号肋位和基线相交处：

- x轴：沿船纵向，从船尾0号肋位处指向船首方向为正；
- y轴：沿船横向，从中心线向左舷为正；
- z轴：沿船垂向，从基线向上为正。

图2.2.1所示为一典型集装箱的整船有限元模型。

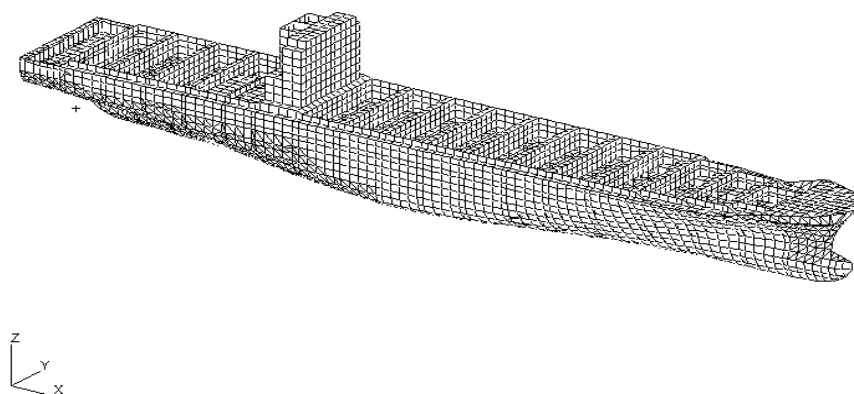


图2.2.1 一典型集装箱船全船结构有限元模型

2.3 载荷工况

2.3.1 每一计算工况由静水载荷工况和波浪载荷工况组成。

2.3.2 静水工况

2.3.2.1 静水工况根据装载手册选取，一般取产生最大静水弯矩的满载工况为静水计算工况。

2.3.2.2 静水计算工况一般应包括下列装载因素：

船舶处于正浮状态，达到或接近结构吃水。在船中区域有一40' bay为空箱，且静水弯矩在船中0.4L区域达到最大值。

2.3.3 波浪载荷工况

2.3.3.1 由3.2确定的静水工况的载荷作为波浪载荷工况的基本装载工况。

2.3.3.2 由设计波方法和程序确定波浪载荷工况的参数如：波长、波高和相位等，详见附录“设计波确定方法”。

2.3.3.3 设计波确定的波浪载荷工况应包括迎浪工况和斜浪工况。

2.3.4 计算工况

2.3.4.1 计算工况由静水工况和波浪载荷工况的不同组合组成，对集装箱船，一般应计算的工况见表2.3.4.1所列。

计算工况

表2.3.4.1

波浪状况	最大垂向波浪弯矩1	最大水平波浪弯矩2	L/2处最大扭矩3	3L/8处最大扭矩4	5L/8处最大扭矩5
静水工况					
满载工况	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5

注：① 表中各工况的波浪载荷（弯矩）均指以设计波方法模拟施加于全船模型的对应节点。

② 对于按无限航区设计的船舶,预报在其生命周期内可能经受的最大波浪载荷主要包括在世界各海域内航行时经受的海况,用出现各种周期与波高的波浪出现的概率来表达。建议采用IACS推荐的波浪散布图谱,二维或三维波浪理论计算出在波浪谱各概率水平下的长期预报值,直接计算的概率水平取最大垂向波浪弯矩预报值量级与按规范计算值相近对应的概率水平。

将船体置于确定的规则波上，波浪外载荷对船体的作用可采用设计波来模拟，而该设计波所具有的波长、相位和波高产生的载荷响应相当于长期预报值。

整船三维有限元强度直接计算过程各步骤流程见图2.3.4.1。

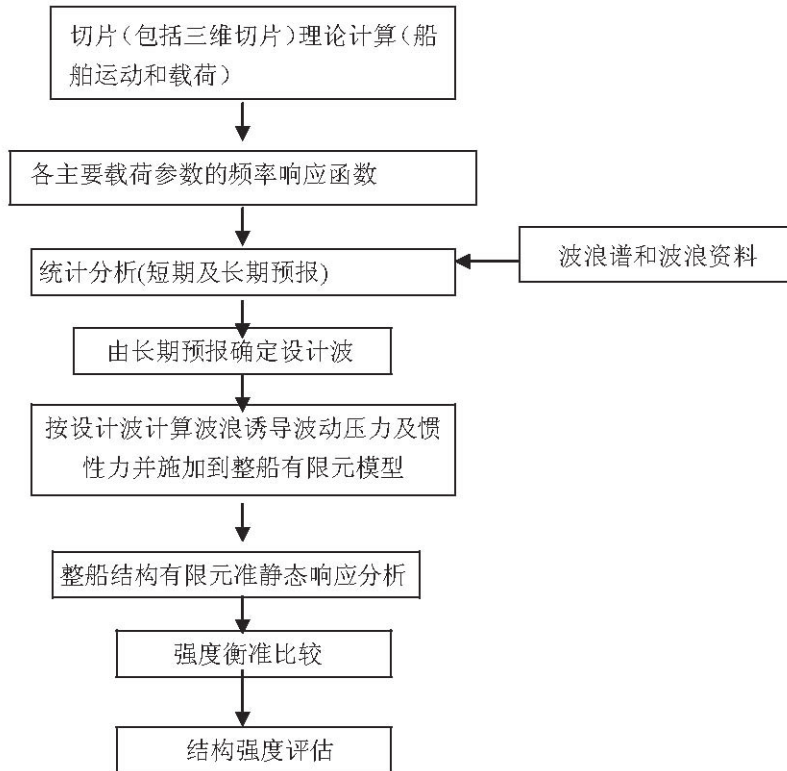


图 2.3.4.1 直接计算流程框图

2.3.5 组成上述工况中的各类载荷分量可分为以下几类：

2.3.5.1 空船重量，在有限元模型中，可将全船有限元模型沿纵向按空船重量分布曲线分成一系列区域，用控制不同的材料密度系数来实现。机器重量按其所处的区域以节点力的形式作用在对应的结构节点上。其他一些次要的设备和机器也归入到材料密度作用在不同的区域节点上。

2.3.5.2 舱内及甲板上的货物（集装箱）重量，按其载荷布置区域作用在相应的节点上。

2.3.5.3 外部静水压力，按计算工况的吃水，作用在船体外部湿表面。

2.3.5.4 波浪压力，用二维切片理论方法计算程序求得湿表面单元上的波动压力，施加于船体外壳单元上。

2.3.5.5 惯性力，由结构质量和货物质量组成的质量模型与节点运动加速度相乘求得。各节点上惯性力的施加及全船有限元模型的外力动态平衡可用“CCS/NASLOAD”——加载及动平衡调整程序来实现。

2.4 边界条件

2.4.1 全船动态平衡调整后，计算模型基本上已处于自由动态平衡状态，为消除刚体位移，在船体的相应节点施加6个线位移约束，如图2.4.1所示。

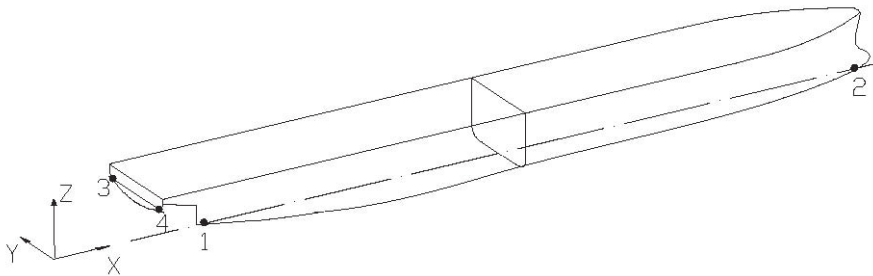


图2.4.1 边界条件示意图

2.4.2 船底平板龙骨（纵中剖面处）在船艉（图2.4.1中节点1）、船艏（图2.4.1中节点2）末端处：约束条件如下：

尾端节点1：沿横向的线位移约束，即：

$$\delta_y=0$$

首端节点2：沿纵向、横向和垂向的线位移约束，即：

$$\delta_x=\delta_y=\delta_z=0$$

2.4.3 尾封板水平桁材距纵中剖面距离相等的左（节点3）、右（节点4）各一节点处，约束条件如下：

节点3、节点4：沿垂向的线位移约束，即：

$$\delta_z=0$$

2.5 许用应力

2.5.1 板应力指的是板单元中点处的中面应力。

2.5.2 各板材（包括桁材腹板）的许用应力为：

$$[\sigma_e] = 190/k \text{ N/mm}^2$$

$$[\tau] = 100/k \text{ N/mm}^2$$

2.5.3 梁单元的许用应力为：

$$[\sigma_e] = 190/k \text{ N/mm}^2$$

2.5.4 板材在局部应力集中处的许用应力为：

$$[\sigma_e] = 235/k \text{ N/mm}^2$$

第3章 货舱区域主要结构强度直接计算

3.1 一般规定

3.1.1 货舱段的局部强度直接计算是评估（校核）货舱区域主要结构在典型局部载荷工况下的强度。主要结构包括：

- 双层底结构；
- 横向（横舱壁、强框架）结构；
- 舷侧（纵舱壁）结构。

3.1.2 结构的布置符合下列情况之一者，应进行货舱段结构直接计算：

- $B > 32.2\text{m}$ ；
- 强力甲板舱口的宽度大于 $0.85B$ 。

其中： B ——船宽，m；与《钢规》第2篇第1章第1节的定义相同。

3.2 结构模型化

3.2.1 模型化范围一般取纵向为船中货舱区域“1/2货舱+1个货舱+1/2货舱”范围，即沿纵向4个40英尺箱位的长度；垂向取型深范围；横向取船宽范围，且从左舷至右舷不计型线变化。

3.2.2 有限元模型中一般应包括横向水密舱壁和横向支持舱壁，横向支持舱壁在二个舱长模型范围内位于两端和中间。图3.2.2为一典型的舱段有限元模型（图中为左半舷模型）。

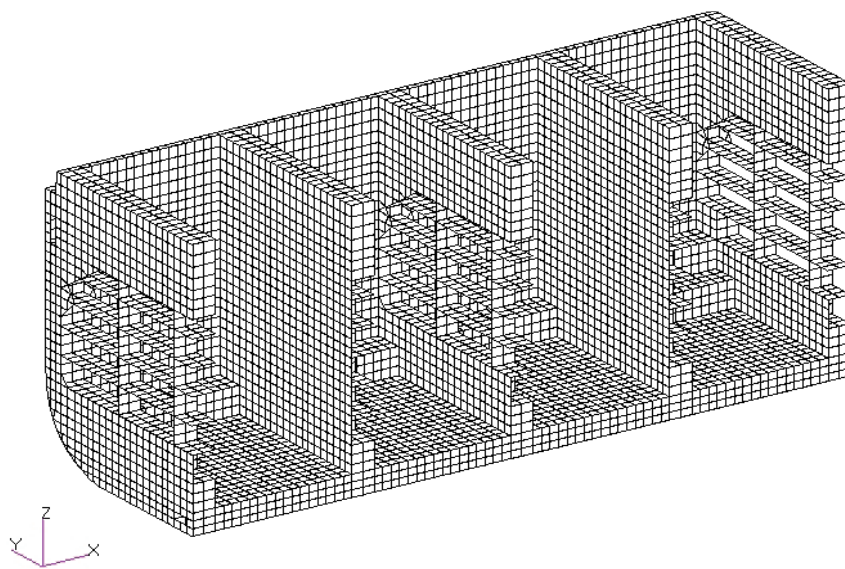


图3.2.2 典型的舱段有限元模型

3.2.3 有限元模型的坐标系取右手坐标系，即：

- x方向为船体的纵向，以向船首方向为正；
- y方向为船体的横向，以船纵中线向左舷为正；
- z方向为船体的垂向，以基线向上为正。

3.2.4 本指南中有限元模型的构件尺寸（厚度、长度等）如无特殊说明，均取图纸标定值（即建造尺寸）计入。

3.2.5 货舱区域的所有主要板材，如：外壳板、内壳板、纵桁、横舱壁结构（包括舱壁上的垂向、水平桁材腹板）等，以板单元来模拟。对于次要构件，如板材上的骨材等用梁单元来模拟，其剖面特性应计入梁与板连接的偏心设置。

3.2.6 构件的面板用杆单元来模拟，其轴向面积即为面板面积。

3.2.7 腹板上的加强筋可用杆单元来模拟，其轴向面积即为其横截面积。

3.2.8 有限元网格按以下规定划分：

- （1）沿船体横向和垂向以纵骨间距为一个单元；
- （2）沿船体纵向以肋位间距为一个单元；
- （3）沿主要构件（包括双壳间纵向平台、横向强框架、双层底纵桁和肋板、横舱壁的垂向、横向桁材等）的腹板高度方向划分为三个单元。

3.2.9 一般双壳间强框架腹板及双层底肋板上的开孔可以用删除对应位置的单元来表达，图3.2.9(1)至图3.2.9(3)所示为典型横向构件有限元模型。

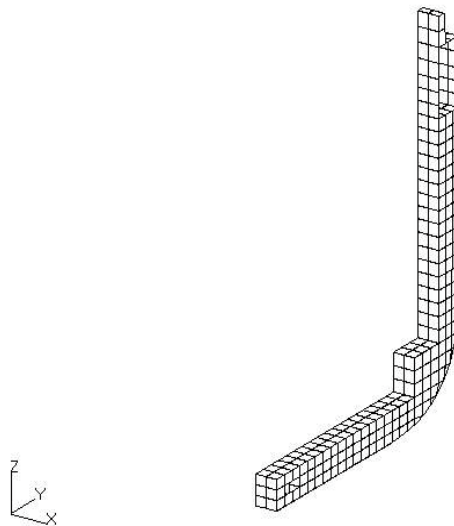


图3.2.9(1) 典型的开孔横向构件有限元模型

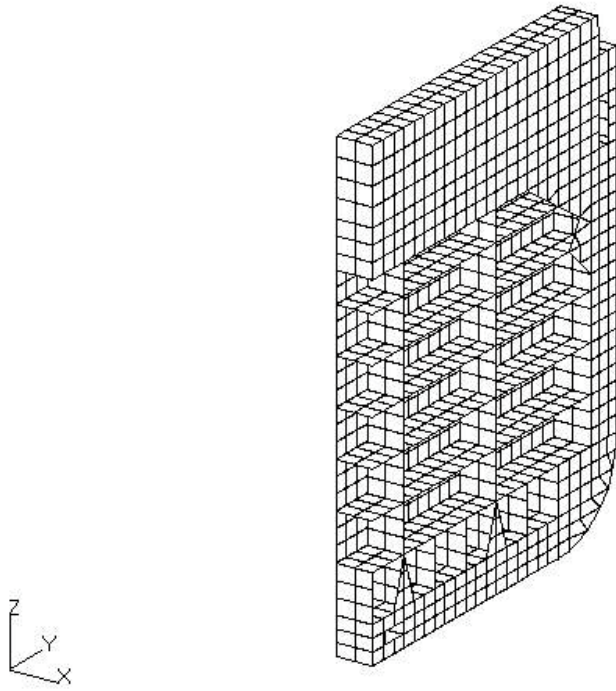


图3.2.9(2) 典型的水密横舱壁有限元模型

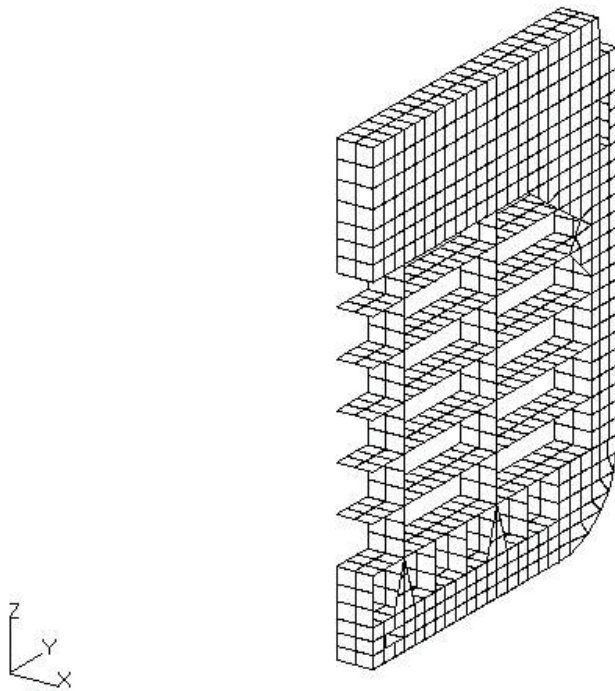


图3.2.9(3) 典型的横向支持舱壁有限元模型

3.3 计算工况

3.3.1 进行直接计算应考虑的状况如表3.3.1和图3.3.1所示。

计算工况

表3.3.1

工况描述	工况识别号	外部载荷		货物（集装箱）载荷				边界条件类型
		静水载荷	波浪载荷	货舱内		舱盖上		
中间一40ft箱位空舱	工况1 (LC1)	$d_s^{(1)}$	$P_w^{(2)}$	空舱箱位处	—	空舱上方舱盖	—	对称
	工况1G (LC1G)			其余箱位处	40ft	其余舱盖	40ft	
	工况2 (LC2)	$d_s^{(1)}$	$P_w^{(2)}$	空舱箱位处	—	空舱上方舱盖	40ft	对称
	工况2G (LC2G)			其余箱位处	40ft	其余舱盖	40ft	
	工况3 (LC3)	$d_s^{(1)}$	$P_w^{(2)}$	空舱箱位处	—	空舱上方舱盖	20ft	对称
	工况3G (LC3G)			其余箱位处	20ft	其余舱盖	20ft	
船舶横倾中间一40ft箱位空舱	工况4 (LC4)	$d_s^{(4)}$	—	空舱箱位处	—	空舱上方舱盖	—	非对称
				其余箱位处	40ft	其余舱盖	40ft	
船舶横倾	工况5 (LC5)	$d_s^{(4)}$	—	所有货舱	20ft	所有舱盖	20ft	非对称
船舶纵荡	工况6 (LC6)	—	—	所有舱内装载40ft, 由纵向加速度产生的纵向载荷		所有舱盖装载40ft, 由纵向加速度产生的纵向载荷		对称

(1) d_s ——结构吃水, m;

(2) P_w ——波峰引起的局部波浪压力, 如图3.3.5所示;

(3) 横倾工况 (LC4、LC5) 中, 取横倾角等于 300 和 $\tan^{-1}(2(D-d_s)/B)$ 中的小者;

(4) 对于舱内载荷 (20ft, 或40ft), 取集装箱的最大许用重量;

(5) 舱盖上的载荷, 取最大允许的堆重 (20ft, 或40ft);

(6) 工况6中, 舱内及舱盖上的载荷值的确定, 见3.3.7条的规定;

(7) 工况1G、1G和3G为对应工况下, 再计及总纵弯矩的载荷计算工况, 具体规定见本节3.3.2和3.3.3。

3.3.2 工况1、2、3的双层底纵桁、内底板及外板强度评估中, 除应进行局部强度校核外, 尚应考虑船体梁受到的总纵弯矩产生的应力与局部载荷产生的沿船长方向应力合成的强度校核。船体梁的总纵弯矩下的应力响应可用本《指南》规定的有限元模型来计算, 其边界约束条件见3.4.3的规定。

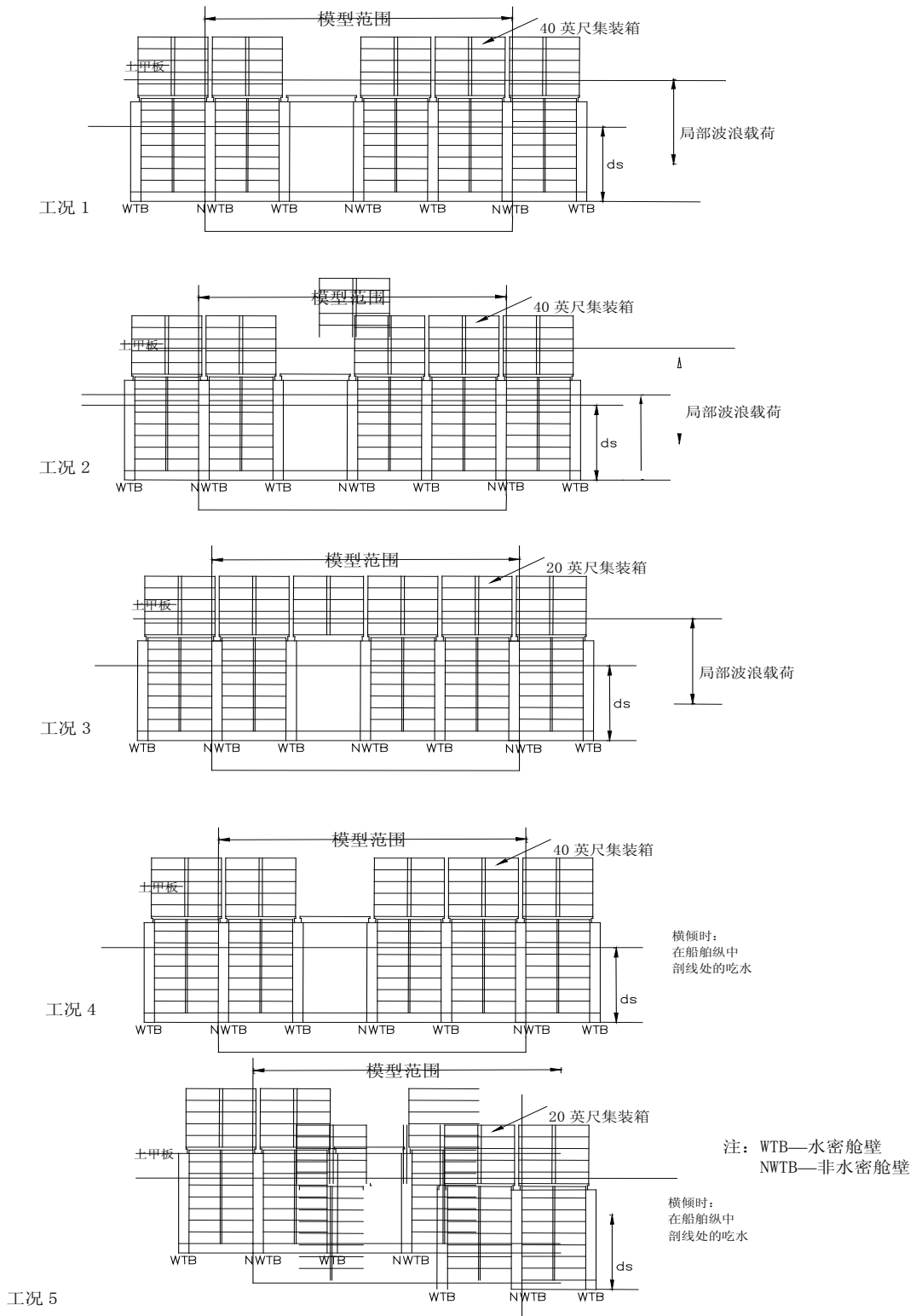


图 3.3.1 计算工况

3.3.3 船体梁的总纵弯矩包括静水弯矩和波浪弯矩，静水弯矩取装载手册所列的各装载工况下船中 $0.4L$ 区域的最大中拱弯矩，波浪弯矩（中拱）按CCS《钢质海船入级与建造规范》第2篇第2章的规定计算。

3.3.4 局部载荷工况计算中考虑的载荷分量包括如下：

- 空船重量；
- 集装箱载荷；
- 吃水引起的静水压力；
- 局部波浪载荷引起的附加压力，见3.3.5所述。
- 由船舶纵向加速度作用在集装箱上产生的纵向载荷，按3.3.7的规定计算。

3.3.5 作用于舷侧及船底的附加波浪压力见图3.3.5所示，

在水线处： $P_w = k_w \times 3C_w$ kN/m^2

在基线处： $P_B = k_B \times 1.5C_w$ kN/m^2

在舷侧顶端处： $P_S = 0$ kN/m^2

$k_w = 1.1$

$k_B = 1.5$

P_w 与 P_B 之间线性插值

C_w ——波浪系数，

$C_w = 10.75 - ((300 - L)/100)^{1.5}$ $90\text{m} \leq L \leq 300\text{m}$

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

$C_w = 10.75 - ((L - 350)/150)^{1.5}$ $350\text{m} < L \leq 500\text{m}$

$P_w = 3.3C_w$
 $P_B = 2.25C_w$
 ds ——结构吃水
 P_w 与 P_B 之间线性插值

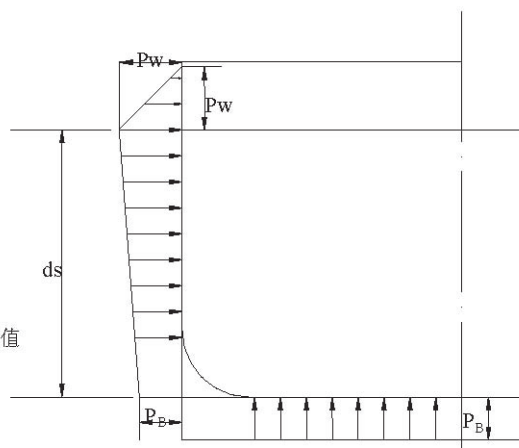


图3.3.5 集装箱船舷侧及船底波浪压头分布

3.3.6 横倾工况中（工况4、工况5），将计算模型按工况的规定，处于一静横倾角状态，计算各载荷分量。货舱内集装箱随船舶横倾产生的横向载荷分量，按其在横舱壁对应的箱角分布位置为作用点，以一组集中力作用在横舱壁上。甲板上的集装箱载荷分量，以一组沿横向分布的剪力形式，作用在横向舱口围板顶端的单元节点上。

3.3.7 由船舶纵向运动加速度作用在集装箱上引起的纵向载荷的确定

3.3.7.1 如设有箱型甲板纵桁，且甲板横向抗扭箱的跨距不超过13.0m，则工况6可不必计算。

3.3.7.2 工况6中的船舶纵向运动加速度计算按中国船级社《船体结构疲劳指南》中第3章3.4节的规定。具体如下：

纵向合成加速度 a_l 应按下式计算：

$$a_l = \sqrt{\alpha_x^2 + [\alpha_p(z - z_{rp}) + 10 \sin \psi_m]^2} \quad \text{m/s}^2$$

式中：（1） z ——计算点到基线的垂向距离，m；

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

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

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

其中： D ——型深，m；

d ——吃水，m。

（3） a_x ——纵荡加速度；应按下式计算：

$$a_x = 2a_0 \sqrt{C_b}$$

式中： C_b ——方形系数；

a_0 ——加速度系数，应按下式计算：

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

其中： $C_v = \sqrt{L} / 50$ ，取不大于0.2；

L ——船长，m；

V ——航速，kn；

C_w ——系数，按3.4.3计算。

（4） a_p ——纵摇角加速度；应按下式计算：

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

式中： T_p ——纵摇周期，s，按下式计算：

$$T_p = 1.80 \sqrt{L/10} \quad \text{s}$$

式中： L ——船长，m。

(5) ψ_m ——最大纵摇角, rad, 按下式计算, 但不得大于0.14:

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

式中: C_b ——方形系数;

a_0 ——加速度系数, 见3.3.7.2(3)。

3.3.7.3 货舱内每一集装箱纵向运动加速度产生的力按各集装箱的物理位置由集装箱对应箱角位置传递到横舱壁(或横向支持舱壁)的主要结构上。

3.3.7.4 舱盖上集装箱载荷的确定

(1) 纵向载荷, 按舱盖上堆高中点处加速度确定每舱口盖上集装箱的纵向力。由纵向力在每堆的基座处产生的力矩不计。

(2) 集装箱的层数取最大装载层数, 按装载手册或货物操作手册中集装箱允许的最大堆重和层数取值。

(3) 甲板上位于舷侧至纵向舱口围板间的集装箱载荷不计。

(4) 作用在舱盖上的纵向载荷总量的15%以分布力的形式, 作用在纵向和横向舱口围板顶部的节点上, 以模拟舱口围板处支承块由纵向运动受到的摩擦力。

(5) 其余舱盖上的85%纵向载荷, 作用在舱盖一端纵向止滑块对应(横向舱口围板顶端)的节点上。如止滑块位置未知, 则假定为舱盖后端宽度的1/2处, 如舱盖数未知, 假定每一舱口由3块舱盖覆盖。

3.4 边界条件

3.4.1 纵中剖面约束条件

3.4.1.1 结构形式、载荷均左右对称的工况(如工况1、2、3、6), 有限元计算模型横向可只取半宽(如左舷), 在纵中剖面上的所有节点施加下列左右对称约束条件(图3.4.1):

沿横向轴的线位移约束, 即: $\delta_y = 0$;

绕纵向轴的角位移约束, 即: $\theta_x = 0$;

绕垂向轴的角位移约束, 即: $\theta_z = 0$ 。

3.4.2 局部载荷工况边界条件

3.4.2.1 本节给出的边界条件适用于表3.3.1中载荷对称的有限元模型。其模型的前后端面的边界条件可按前后对称近似方法处理。

3.4.2.2 模型的前后两端平面A和B(见图3.4.1所示)内的所有节点约束如下:

端面A: 沿船纵向轴的线位移约束, 即: $\delta_x = 0$;

绕船横向轴的角位移约束，即： $\theta_y=0$ ；
 绕船垂向轴的角位移约束，即： $\theta_z=0$ 。
 端平面B：绕船横向轴的角位移约束，即： $\theta_y=0$ ；
 绕船垂向轴的角位移约束，即： $\theta_z=0$ 。

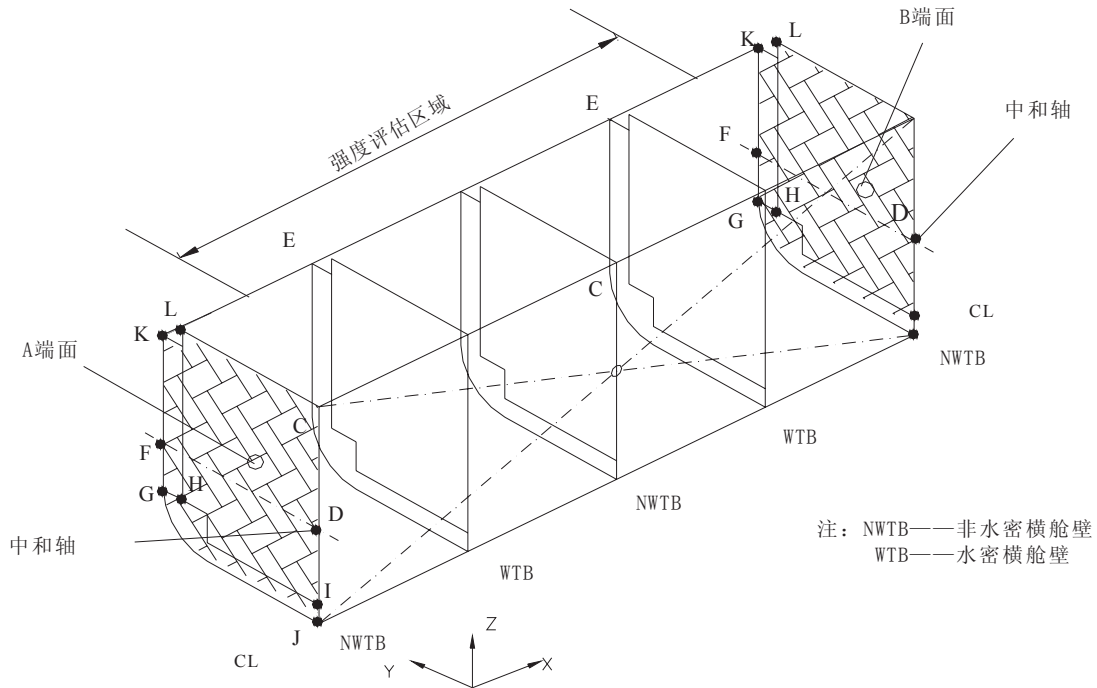


图3.4.1 计算工况的边界条件符号示意图

3.4.2.3 为消除刚体位移，前后端面A、B内，底边舱与舷侧板、纵舱壁板交点顶点K、L处，沿垂向轴的线位移约束，即： $\delta_z=0$ 。交线LH、KG上的其余节点施加两组垂向力，以减少支点处由约束产生的应力集中，即：此垂向力的总和应等于整个模型受到的货物载荷与外部水压力之和（矢量和）方向相反。

3.4.2.4 对于工况6（横舱壁施加纵向运动加速度产生的力），取模型两端（A、B端）舷侧板及纵舱壁分别在上甲板顶点K，及纵向舱口围板顶点L处垂向线位移约束，即： $\delta_z=0$ 。

3.4.3 船体梁总纵弯矩应力计算的边界条件

3.4.3.1 此边界条件仅适用于用有限元模型来计算船体梁的弯曲应力。

3.4.3.2 端平面A、B内，在船体横剖面中和轴与纵中剖面的交点D处（模型中设为独立点或主节点），施加船体梁的总纵弯矩，如有限元计算模型取半宽，则总纵弯矩取一半。

3.4.3.3 端面A、B施加平断面假定的边界条件：平面内除节点D以外的纵向连续构件上的所有节点（非独立点或从节点），施加下列自由度从属于独立点（即主节点）D的刚性连接约束条件：

沿纵向轴的线位移，即： δ_x ；

绕横向轴的角位移，即： θ_y ；

绕垂向轴的角位移，即： θ_z 。

3.4.3.4 端面A、B内的独立点（主节点）D处的约束条件如下：

绕垂向轴的角位移约束，即： $\theta_z=0$ ；

沿横向轴、纵向轴的线位移及绕纵向轴的角位移约束，即：

$\delta_y=\delta_z=\theta_x=0$ 。

3.4.3.5 端面A内的独立点D处的沿纵向轴的线位移约束，即： $\delta_x=0$ 。

3.4.3.6 为消除刚体位移，在平面A、B内中和轴与舷侧外板相交F节点处，沿垂向轴的线位移约束，即： $\delta_z=0$ 。

3.4.4 非对称载荷（工况4、工况5）的边界条件

3.4.4.1 此边界条件适用于横倾工况，载荷非对称。计算模型取横向整个船宽结构。

3.4.4.2 端面A、B分别施加前后对称条件，具体规定同3.4.2.2。

3.4.4.3 前后端面A、B内，底边舱与舷侧板、纵舱壁板交点G、H处，沿垂向轴的线位移约束，即： $\delta_z=0$ 。交线LH、KG上的其余节点施加两组垂向力，以减少支点处由约束产生的应力集中，即：此垂向力的总和应等于整个模型受到的货物载荷与外部水压力之和（矢量和）方向相反。

3.4.4.4 前后端A、B平面内，在船底纵中桁的I、J节点处，沿横向的线位移约束，即： $\delta_y=0$ 。

3.4.5 施加边界约束条件节点周围的单元，由于受边界条件的影响，其计算结果不能反映结构真实的受力情况，这些区域单元的计算结果不作校核。

3.5 许用应力

3.5.1 在应力校核中，板单元的应力指的是单元中点处的中面应力。

3.5.2 各主要构件对应校核工况下的许用应力见表3.5.2所示。

强度衡准

表3.5.2

构件名称	校核工况	许用应力 (N/mm ²)				屈曲安全因子 λ
		σ_L	σ_W	σ_e	τ	
船底外板、 内底板	LC1G、2G、3G	220/k	—	—	—	1.0
	LC1、2、3	100/k	140/k	—	—	—
双层底纵桁	LC1G、2G、3G	220/k	—	235/k	—	1.0
	LC1、2、3	100/k	—	180/k	90/k	—
双层底肋板横向强框架	LC1、2、3、4、5	—	—	180/k	90/k	1.1
舷侧板及纵舱壁	LC1G、2G、3G	—	—	—	—	1.0
	LC1、2、3、4、5	—	140/k	—	90/k	—
边舱纵向平台	LC1G、2G、3G	—	—	—	—	1.0
	LC1、2、3、4、5	100/k	—	180/k	90/k	—
横舱壁板	LC1、2、3	—	140/k	180/k	90/k	1.1
横舱壁桁材	LC1、2、3	—	140/k	180/k	—	1.1
	LC4、5	—	140/k	180/k	—	—
	LC6	—	—	85/k	—	—
甲板横向抗扭箱	LC 4、5	—	140/k	180/k	90/k	1.1
	LC6	—	—	85/k	—	—
肘板趾端部局部应力集中	LC1、2、3、4、5、6	—	—	220/k	—	—
纵骨及加强筋	同上	—	—	180/k	—	—

注：

对板单元取单元中点的中面应力（或称膜应力），按上述表内的各许用应力分量进行校核；

σ_L ——船长方向正应力；

σ_W ——船宽或船深方向正应力；

τ ——腹板总高度（或总深度）内的平均剪应力；

k ——高强度钢系数；

$\lambda = \frac{\text{复合临界屈曲应力}}{\text{计算的实际压缩应力}}$ 。

3.5.3 载荷工况6时，位于舱口围板顶端舱盖支承块处节点的单元，由于其直接承受来自舱盖载荷，其局部应力校核时的相当应力的许用值如下：

$$\sigma_e = 123/k \quad \text{N/mm}^2$$

其中： k ——高强度钢系数。

3.6 屈曲强度校核

3.6.1 对于各主要构件的板材、桁材腹板，应按表3.5.2所列的屈曲安全因子 λ 校核板格的屈曲强度。

3.6.2 本指南中的板格是指除周界以外，域中无任何骨材和加强构件的那一部分板材。在板格的屈曲计算中，仅考虑矩形板格。

3.6.3 板格屈曲计算时，板厚应取按表3.6.3所规定的标准厚度扣除后的“净”厚度。

用于屈曲强度计算的标准厚度扣除值 表3.6.3

位置	标准厚度扣除值 t_c (mm)
甲板、边舱甲板（如：第二层甲板等）	1.0
纵舱壁板（内壳板）	1.0
外板（包括船底板）、内底板	1.0
双层底及边舱内结构（桁材、肋板）	1.0
横舱壁结构（水密、非水密）	0.0
甲板横向抗扭箱	0.0

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

3.6.5 应考虑对板格按表3.6.3的标准厚度扣除使板厚减薄而引起应力的增加，且修正如下：

$$\sigma' = \sigma \frac{t}{t - t_c}$$

式中： σ' ——用于屈曲计算中的修正压缩应力；

σ ——从有限元计算得到的工作应力；

t ——有限元计算中的板厚值（建造厚度）；

t_c ——按表3.6.3所列的标准厚度扣除值。

3.6.6 表3.5.2中的 λ ，可按附录二中所示方法求解，也可按其他公认的方法得出，但应经CCS认可。

第4章 甲板舱口角隅局部结构强度细化模型直接计算

4.1 一般规定

4.1.1 本章针对集装箱船和具有甲板大开口船的甲板舱口角隅（光滑自由边缘部位）局部结构在弯扭载荷作用下，给出了基于细化有限元模型方法进行疲劳强度的评估（以下简称角隅疲劳评估）方法，本章无规定者均应按照CCS《船体结构疲劳强度指南》的有关要求。

4.1.2 本章中角隅疲劳评估的波浪载荷计算基于整船结构分析所采用的设计波方法，即由耐波性分析得到的主要载荷参数达到最大（最小）值确定动态载荷计算工况，详见本指南第2章2.3节及附录一。

4.1.3 本章疲劳损伤计算原理基于Palmgren-Miner线性累积损伤模式、S-N曲线方法、海况长期预报中的环境数据（IACS Rec.No.34 Data）等，详见CCS《船体结构疲劳强度指南》的相关章节，并基于船厂建造质量已被验船师认可。

4.1.4 本章给出的角隅疲劳评估方法为许用应力范围法，也可采用疲劳寿命（谱分析法）评估方法。

4.1.5 甲板舱口角隅区域结构采用细化有限元模型的评估位置应包括机舱前（后）端舱口角隅、第1货舱靠船首端甲板舱口角隅及一个位于船中区域包括舱口围板的上甲板舱口角隅等部位。

4.1.6 在细化有限元模型中的构件尺寸取建造尺寸，若采用净尺寸，则许用应力另行考虑。

4.2 有限元计算模型

4.2.1 局部细化有限元模型的建立应符合以下4.2.2-4.2.10要求。

4.2.2 可以将甲板舱口角隅局部结构的三维细化有限元模型独立出来，在其模型的边界节点施加由整船三维粗网格有限元分析得到的位移结果作为强迫位移边界条件进行单独分析，也可以将细化模型直接嵌入整船模型中一同进行分析。细化模型的边界在满足以下模型范围的要求下，应尽量取在结构的强支撑和强框架的结构上。

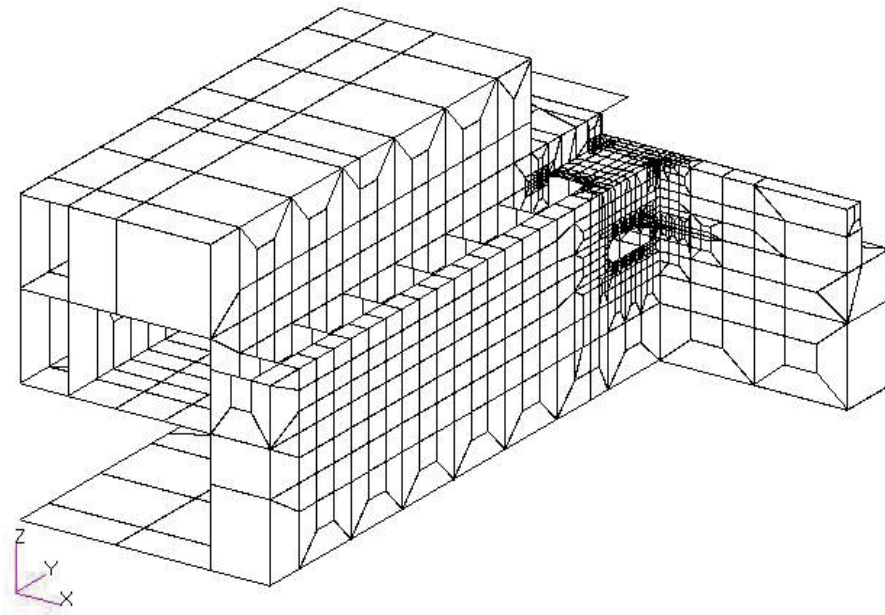


图4. 2. 2(1) 机舱前端舱壁处舱口角隅有限元模型

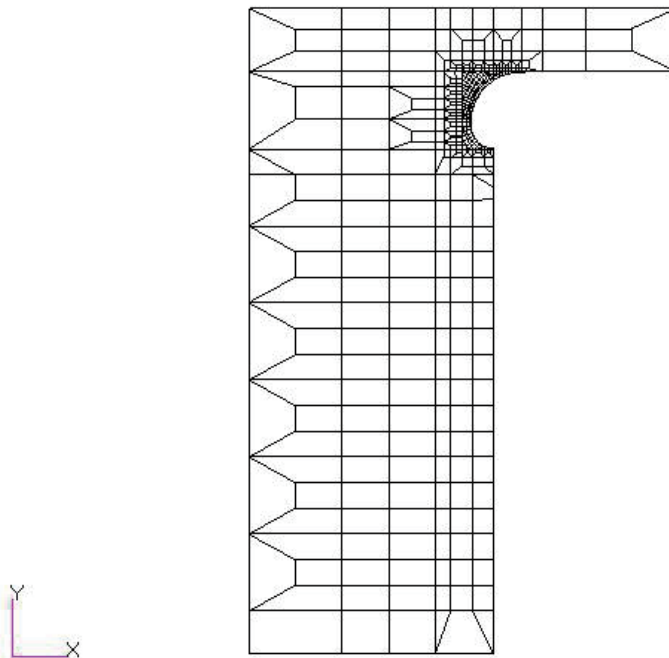


图4. 2. 2(2) 机舱前端舱壁处舱口角隅有限元模型（上甲板角隅处）

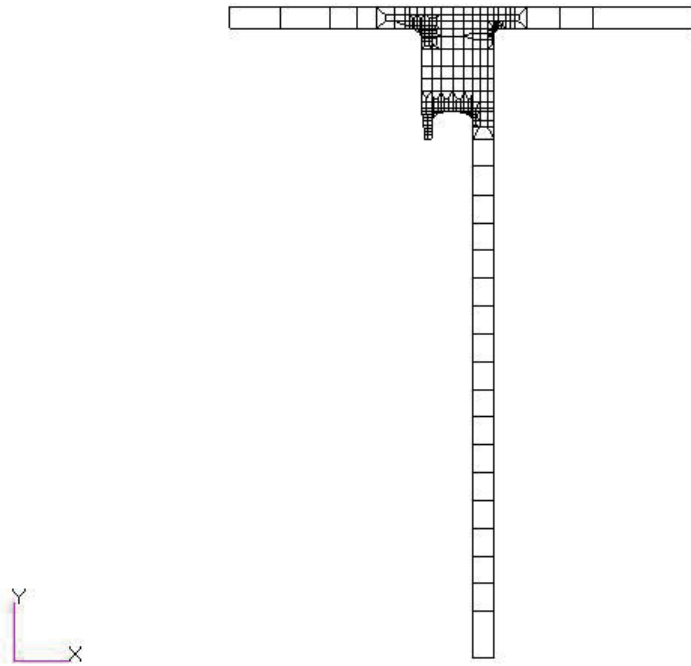


图4.2.2(3) 机舱前端舱壁处舱口角隅有限元模型（舱口围板顶板）

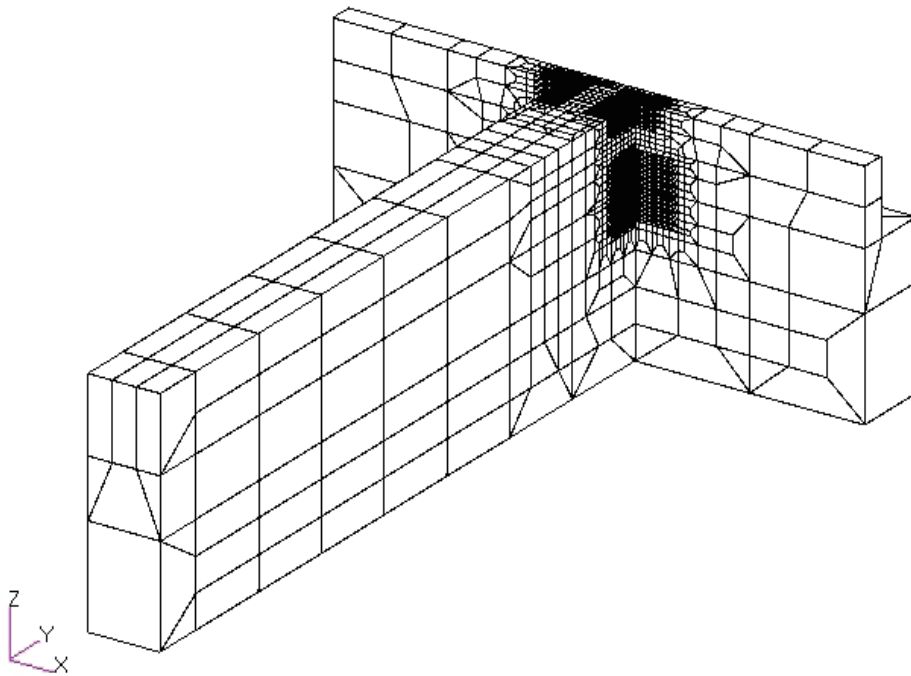


图4.2.2(4) 货舱区域处舱口角隅有限元模型

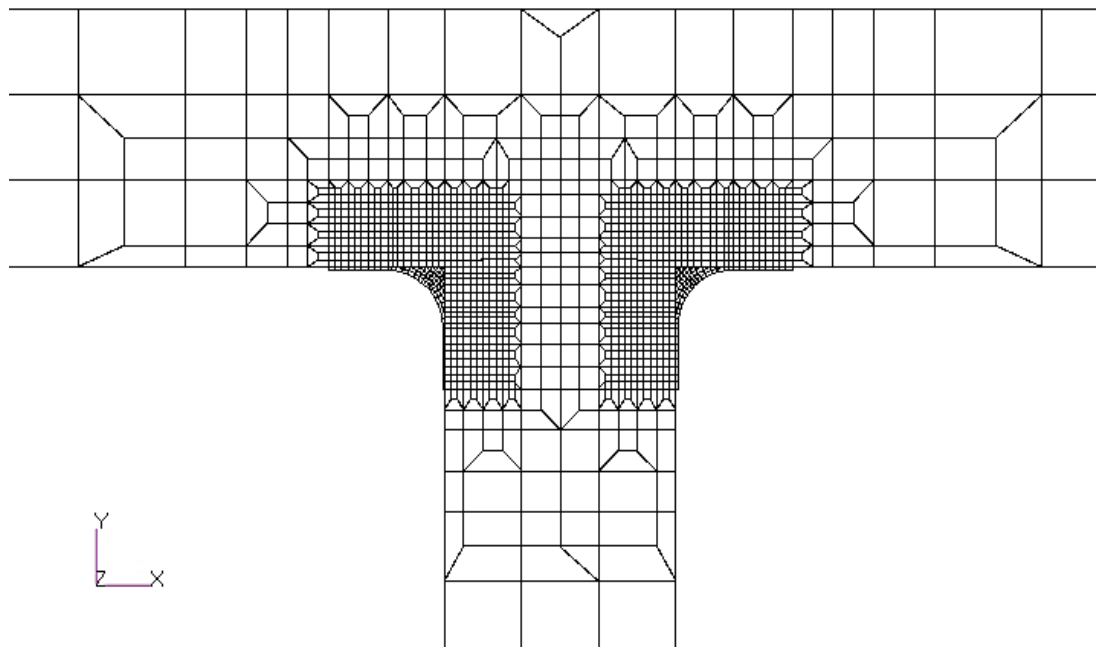


图4.2.2(5) 货舱区域舱口角隅有限元模型（上甲板角隅处放大）

4.2.3 船中区域舱口角隅局部结构有限元细化模型

4.2.3.1 船中区域三维局部细化模型部位一般选取出现最大应力或横向甲板条发生最大翘曲位移的甲板开口位置处，相应的模型范围如下：

- (1) 纵向范围取横向甲板条角隅前后各延伸半个40英尺箱位长度（即至40英尺箱位的中点）；
- (2) 垂向从上甲板以下No.2甲板（或称上甲板以下第二层平台）至舱口围顶部；
- (3) 横向从中心线至舷侧，模型包括上甲板处的舱口角隅、舱口围板顶板处角隅过渡结构，可参考图4.2.2(4)—图4.2.2(5)。

4.2.4 机舱前端舱口角隅局部结构有限元细化模型

4.2.4.1 机舱前端三维局部细化模型取左舷机舱前端舱壁处舱口角隅位置处，相应的模型范围如下：

- 纵向范围取以机舱前端横舱壁向前延伸半个40英尺箱位长度（即至40英尺箱位的中点），向后延伸的距离与向前相近似至横向强框架（一般为整船模型的横向强框架处的网格线）；

- 垂向从No.2甲板至舱口围板（一般上层建筑内至B甲板）；
- 横向从船中心线至舷侧。

4.2.4.2 模型应包括上甲板开孔结构、舱口围板顶板处圆弧过渡结构及上层建筑前端与舱口围板之间的圆弧过渡肘板，并在模型中精确描述其几何形状，详见图4.2.2(1)~图4.2.2(3)所示。

4.2.5 机舱后端舱口角隅及No.1货舱前端舱口角隅三维局部细化模型的规定与4.2.3.1相同。

4.2.6 如在整船各工况分析中，机舱后端舱口角隅部位的应力较低，则不必进行进一步的细化分析。

4.2.7 模型中主要纵向构件如上甲板、外壳板、纵舱壁及横向板材由板单元来模拟，纵骨及加强筋由梁单元来模拟。

4.2.8 模型中上甲板区域的角隅圆弧、舱口围顶板圆弧等的几何形状应在细化模型中精确反映，所有的开孔（通风系统、通道开口等）应在模型中精确描述。

4.2.9 如有限元计算程序不能给出开口角隅边缘切向应力，可采用在开口角隅边缘位置上设置虚杆单元，求解得到单元轴应力的方法，以得到角隅边缘的切向应力，并可实施于下列位置：

- (1) 上甲板及舱口围顶板沿开口角隅圆弧边缘；
- (2) 沿上层建筑至纵向舱口围板的圆弧连接肘板上边缘（如有时）。

4.2.10 局部细化模型的单元网格在模型边界处节点与整船的粗网格模型应保持一致，使得粗网格模型的位移能够直接对应传递至细化网格模型边界。

4.2.11 在细化模型中，对热点应力校核部位的板单元按板厚 \times 板厚（ $t\times t$ ）的网格大小划分，并保持该划分密度从热点应力中心向四周空间各方向扩展至少 $10t$ 距离，然后逐渐向外稀疏过渡至模型边界上，满足4.2.10之规定。

4.3 载荷

4.3.1 细化模型的载荷由模型边界节点的强迫位移和局部载荷组成，边界强迫位移取之于对应工况，由整船分析得到。

4.3.2 设计载荷工况

4.3.2.1 在按许用应力法进行疲劳强度校核时，波浪载荷所对应的超越概率水平取 10^{-8} 。装载工况取装载手册中产生最大静水弯矩时的满载工况，以主要载荷参数法确定的设计波作为波浪载荷计算工况，设计波的计算详见本《指南》第2章第2.3节及附录一“设计波确定方法”。

4.3.2.2 一般舱口角隅疲劳评估应计算的设计波载荷工况如下：

表4.3.2.2

LC1: 距艏1/2船长处垂向波浪弯矩最大时（中拱）
LC2: 距艏1/2船长处垂向波浪弯矩最小时（中垂）
LC3: 距艏1/2船长处水平波浪弯矩最大时
LC4: 距艏1/2船长处水平波浪弯矩最小时
LC5: 距艏3/8船长处波浪扭矩最大时
LC6: 距艏3/8船长处波浪扭矩最小时
LC7: 距艏1/2船长处波浪扭矩最大时
LC8: 距艏1/2船长处波浪扭矩最小时
LC9: 距艏5/8船长处波浪扭矩最大时
LC10: 距艏5/8船长处波浪扭矩最小时

4.3.2.3 由4.3.2.2所列各设计波确定的设计波载荷和静水工况施加于全船有限元模型，进行动态载荷平衡调整后，计算得到全船结构的位移和应力。整船模型在设计载荷下的变形位移示意图见图4.3.2.2。

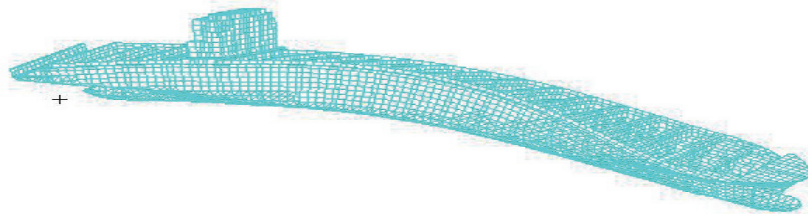


图4.3.2.2 设计波载荷工况下整船位移示意图

4.3.2.4 对于按许用应力法进行舱口角隅疲劳校核时，甲板舱口角隅边缘的动应力范围以4.3.2.1规定的各工况计算结果，按下列组合规定进行合成得到：

$\Delta\sigma_{12} = \sigma_{LC1} - \sigma_{LC2}$
$\Delta\sigma_{34} = \sigma_{LC3} - \sigma_{LC4}$
$\Delta\sigma_{56} = \sigma_{LC5} - \sigma_{LC6}$
$\Delta\sigma_{78} = \sigma_{LC7} - \sigma_{LC8}$
$\Delta\sigma_{910} = \sigma_{LC9} - \sigma_{LC10}$

其中： σ_{ij} ——组合工况i、j的角隅边缘切向动应力范围，N/mm²；
 σ_{LCi} ——计算工况i时的角隅边缘切线方向的应力值，N/mm²。

4.4 边界条件

4.4.1 载荷经动态平衡调整后的整船三维有限元粗网格分析模型施加的边界条件按第2章第2.4节的规定。

4.4.2 如舱口角隅细化网格模型不“嵌入”整体模型而单独进行分析时，应将整船模型由上述各工况计算得到该舱口角隅细化网格模型边界处的节点位移传递到细化网格模型对应的节点上，作为细网格模型的强迫位移边界条件。

4.5 许用应力范围

4.5.1 船体结构应力范围的Weibull分布

4.5.1.1 船体结构应力范围的长期分布假设为二参数Weibull分布，Weibull分布的形状参数 ξ 应按下式计算：

$$\xi = 1.45 - 0.036f \sqrt{L}$$

式中： L ——船长，m；

$$f = 1 - 0.08z/d_1 \quad \text{当 } z \leq d_1 \text{ 时；}$$

$$f = 0.92 + 0.08(z - d_1)(D - d_1) \quad \text{当 } z > d_1 \text{ 时；}$$

当计算点在横舱壁上时, $f = 0.92$;

D ——型深, m;

d_1 ——计算工况下的吃水, m;

z ——计算点距基线的高度, m。

4.5.2 设计S-N曲线的选取

4.5.2.1 S-N曲线的选取规定详见CCS《船体结构疲劳强度指南》的相关章节, 对不同的校核部位选用相应合适的S-N曲线, 对集装箱船甲板舱口角隅光滑自由边缘处的疲劳强度校核, 应选取S-N曲线中的C曲线。

4.5.3 许用应力范围

4.5.3.1 船体结构舱口角隅的疲劳强度采用许用应力范围进行校核时, Weibull分布的形状参数 ζ 应按4.5.1.1的规定计算。

4.5.3.2 根据4.5.3.1规定和对应的 ζ 值, 许用应力范围可由表4.5.3.3查得。

4.5.3.3 集装箱船的甲板舱口角隅的疲劳强度应满足下式要求:

$$\Delta\sigma \leq f_t [S_L]$$

式中: $f_t = 0.9$

$\Delta\sigma$ ——设计工况下的动应力范围, N/mm^2 , 按4.3.2.3规定计算;

$[S_L]$ ——许用应力范围, N/mm^2 , 对于甲板舱口角隅疲劳强度评估, 选取S-N曲线中的C曲线, 按形状参数 ζ 的计算值, 由表4.5.3.3查得。

许用应力范围[S_L] N/mm²

表 4.5.3.3

ξ	S-N 曲线							
	B	C	D	E	F	F2	G	W
.60	1253.57	1055.68	802.21	703.69	598.72	527.84	438.42	315.86
.61	1214.51	1022.78	777.21	681.77	580.06	511.40	424.76	306.02
.62	1177.47	991.59	753.51	660.97	562.37	495.80	411.80	296.69
.63	1142.30	961.97	731.00	641.23	545.57	480.99	399.50	287.83
.64	1108.89	933.83	709.62	622.48	529.61	466.92	387.82	279.41
.65	1077.13	907.08	689.29	604.64	514.44	453.55	376.71	271.40
.66	1046.90	881.62	669.95	587.67	500.00	440.82	366.13	263.79
.67	1018.11	857.38	651.53	571.51	486.25	428.70	356.07	256.53
.68	990.67	834.27	633.97	556.11	473.15	417.14	346.47	249.62
.69	964.50	812.24	617.22	541.42	460.65	406.13	337.32	243.02
.70	939.52	791.20	601.24	527.40	448.72	395.61	328.58	236.73
.71	915.67	771.11	585.97	514.01	437.33	385.56	320.24	230.72
.72	892.87	751.91	571.38	501.21	426.44	375.96	312.27	224.97
.73	871.06	733.54	557.42	488.96	416.02	366.78	304.64	219.48
.74	850.18	715.97	544.06	477.25	406.05	357.99	297.34	214.22
.75	830.19	699.13	531.27	466.03	396.51	349.57	290.35	209.18
.76	811.04	683.00	519.01	455.27	387.36	341.51	283.65	204.35
.77	792.67	667.53	507.26	444.96	378.58	333.77	277.22	199.73
.78	775.05	652.69	495.98	435.07	370.17	326.35	271.06	195.29
.79	758.13	638.44	485.15	425.57	362.09	319.23	265.14	191.02
.80	741.88	624.76	474.75	416.45	354.32	312.38	259.46	186.93
.81	726.26	611.60	464.76	407.68	346.86	305.81	254.00	182.99
.82	711.23	598.95	455.15	399.25	339.69	299.48	248.74	179.21
.83	696.78	586.78	445.90	391.13	332.79	293.40	243.69	175.57
.84	682.87	575.06	436.99	383.32	326.14	287.54	238.82	172.06
.85	669.47	563.78	428.42	375.80	319.74	281.90	234.14	168.68
.86	656.56	552.90	420.15	368.55	313.57	276.46	229.62	165.43
.87	644.11	542.42	412.19	361.56	307.63	271.22	225.27	162.29
.88	632.10	532.31	404.50	354.82	301.89	266.16	221.07	159.27
.89	620.51	522.55	397.09	348.32	296.36	261.28	217.01	156.35
.90	609.32	513.13	389.93	342.04	291.01	256.57	213.10	153.53
.91	598.51	504.03	383.01	335.97	285.85	252.02	209.32	150.80
.92	588.07	495.23	376.33	330.11	280.86	247.62	205.67	148.17
.93	577.98	486.73	369.87	324.44	276.04	243.37	202.14	145.63
.94	568.21	478.51	363.62	318.96	271.38	239.26	198.72	143.17
.95	558.76	470.55	357.57	313.66	266.87	235.28	195.42	140.79
.96	549.62	462.85	351.72	308.52	262.50	231.43	192.22	138.48
.97	540.77	455.39	346.06	303.55	258.27	227.70	189.13	136.25
.98	532.19	448.17	340.57	298.74	254.18	224.09	186.13	134.09
.99	523.88	441.17	335.25	294.07	250.21	220.59	183.22	132.00
1.00	515.82	434.39	330.09	289.55	246.36	217.20	180.40	129.97
1.01	508.01	427.80	325.09	285.16	242.62	213.91	177.67	128.00
1.02	500.42	421.42	320.24	280.91	239.00	210.72	175.02	126.09
1.03	493.07	415.23	315.53	276.78	235.49	207.62	172.44	124.23
1.04	485.93	409.21	310.96	272.77	232.08	204.61	169.95	122.44
1.05	478.99	403.37	306.52	268.88	228.77	201.69	167.52	120.69
1.06	472.25	397.70	302.21	265.09	225.55	198.86	165.16	118.99
1.07	465.71	392.18	298.02	261.42	222.42	196.10	162.87	117.34
1.08	459.34	386.82	293.95	257.85	219.38	193.42	160.65	115.74
1.09	453.15	381.61	289.99	254.37	216.43	190.81	158.48	114.18
1.10	447.14	376.54	286.14	250.99	213.55	188.28	156.38	112.66
1.11	441.28	371.61	282.39	247.71	210.76	185.81	154.33	111.19
1.12	435.58	366.81	278.74	244.51	208.03	183.41	152.34	109.75
1.13	430.03	362.14	275.19	241.39	205.38	181.08	150.40	108.35
1.14	424.63	357.59	271.74	238.36	202.80	178.80	148.51	106.99
1.15	419.37	353.16	268.37	235.40	200.29	176.59	146.67	105.66
1.16	414.24	348.84	265.09	232.53	197.84	174.43	144.87	104.37
1.17	409.24	344.63	261.89	229.72	195.45	172.32	143.13	103.11
1.18	404.37	340.53	258.77	226.99	193.13	170.27	141.42	101.89
1.19	399.62	336.53	255.73	224.32	190.86	168.27	139.76	100.69
1.20	394.99	332.63	252.77	221.72	188.65	166.32	138.14	99.52

设计波确定方法

1 波浪载荷计算

1.1 船舶运动及波浪载荷计算用二维线性切片理论程序CCS006SR-96或三维线性程序计算;

1.2 计算取满载和压载计算工况,也可以根据需要取其他的计算工况;

1.3 计算设计波下的船舶运动和波浪载荷响应输入参数按下列规定:

(1) 所取的波浪频率(波长)数为20~30,波浪频率范围应按波长与船长比(λ/L)范围的0.2~3选取,步长取0.1;

(2) 计算所取浪向角不应少于7个,包括0°(顶浪)、30°、60°、90°、120°、150°、180°(随浪);

(3) 计算航速取0航速。

2 统计分析

2.1 船舶在不规则波上的运动和波浪载荷响应及其短期和长期预报计算采用P-M波浪谱:

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

式中: ω ——波浪圆频率, rad/s;

$H_{\frac{1}{3}}$ ——有义波高, m;

T_2 ——波浪跨零周期, t;

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

θ ——组合波与主浪向之间的夹角, rad。

2.2 计算中所取的波浪散布图为IACS建议使用的波浪资料(IACS Rec.No.34)

3 设计波计算

3.1 设计波参数

设计波参数的定义见图3.1:

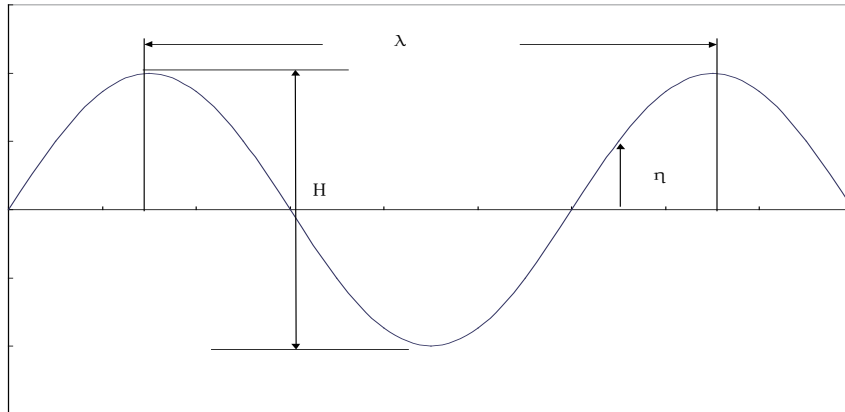


图3.1 设计波参数

图中：

- λ ——波长，相邻两个波峰间的最小距离，m；
- H ——波高，波峰到波谷间的最小距离，m；
- η ——波面，为正弦方程。

3.2 设计波的确定

3.2.1 主要载荷参数的选定：

(1) 对集装箱船整船结构评估，主要载荷参数按下列选取：

- 垂向波浪弯矩
- 水平波浪弯矩
- 波浪扭矩

(2) 主要载荷参数长期预报值的概率水平取为CCS《钢质海船入级与建造规范》(2001)第2分册第2章第2节规定的垂向波浪弯矩值相对应的概率水平。

3.2.2 计算主要载荷参数频率响应函数

应用计算程序计算出主要载荷参数在规则波不同航向角下的频率响应函数曲线。图3.2.2为频率响应函数示意图。

3.2.3 根据频率响应函数确定主要载荷参数达到极值的波浪频率 ω_a 。

3.2.4 波长的计算

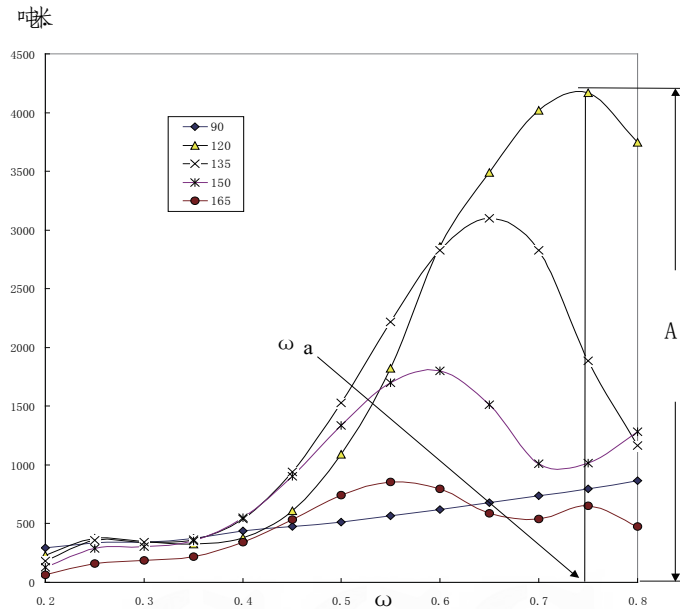


图3.2.2 频率响应函数示意图

(1) 设计波波长按下式计算：

$$\lambda = (2\pi g)/\omega_a^2$$

其中： λ ——设计波波长，m；

g ——重力加速度；

ω_a ——主要载荷参数极值对应的波浪频率，由3.2.3确定，弧度/秒。

3.2.5 波幅的计算

(1) 设计波波幅用下式进行计算：

$$a_w = \frac{L_j}{A_j}$$

其中： a_w ——设计波波幅；

A_j ——主要载荷参数的极值；

L_j ——主要载荷参数的长期预报值，概率水平按附录—3.2.1 (2) 取；

j ——主要载荷参数编号， $j=1$ 垂直波浪弯矩， $j=2$ 水平波浪弯矩， $j=3$ 波浪扭矩。

3.2.6 主要载荷参数达到极值的时刻

(1) 主要载荷参数达到极值的时刻 t_j 按下式确定:

$$t_j = (n\pi + \pi/2 - \varepsilon_j)/\omega_a$$

其中: ω_a ——主要载荷参数极值对应的波浪频率, 由附录一3.2.3确定, 弧度/秒;

ε_j ——主要载荷参数极值对应的相位角, 弧度;

j ——同附录一3.2.5;

n ——0或1, 按照波浪垂向弯矩的中拱或中垂任选。

3.2.7 波浪压力及其他载荷分量分布

(1) 设计波下的波浪压力及其他载荷分量用下式计算:

$$P_i = (A_i) (a_w) \sin (\omega_a t_j + \varepsilon_i)$$

其中: P_i ——船体任意计算位置下的波浪压力或其他载荷分量值;

A_i ——波浪压力或其他载荷分量 P_i 频率响应函数的幅值;

ε_i ——波浪压力或其他载荷分量值 P_i 对应的相位;

t_j ——主要载荷参数达到极值的时刻, 根据附录一3.2.6确定。

板格屈曲强度

1. 板格屈曲强度可选用下列两种计算方法的任意一种。
2. 方法一：用有限元方法求解板格的屈曲强度。

2.1 模型的建立

2.1.1 对选取要求进行屈曲强度校核的板格，板厚根据表3.6.3的规定进行减缩，网格的划分原则：各边不少于8个网格，尽量采用正方形网格。

2.2 载荷和边界条件

2.2.1 载荷：根据所选定的工况，取出由舱段有限元模型计算在该板格处的中面应力结果， σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} （即施加应力 Applied Stress），分别乘上未减缩前的板厚，得到相应的压力（ N_x ， N_y ， N_{xy} ），分别施加在相应的边界上，具体规定如下：

$$N_x = \sigma_x \times t_o,$$

$$N_y = \sigma_y \times t_o,$$

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

式中： t_o 为建造板厚。

2.2.2 板格之间的压应力变化较大时，可做为线形分布的载荷施加，剪应力取平均值。

2.2.3 边界条件：为约束刚体位移，选取板格四个边界中点，纵向边界中点约束x方向位

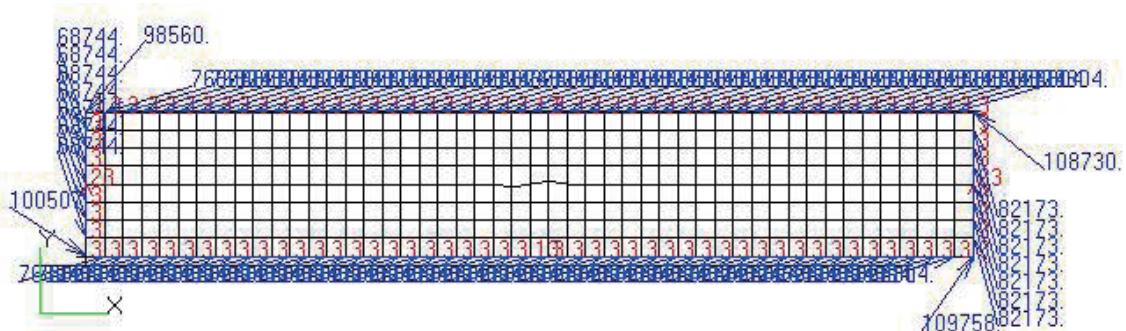


图2.2.2 (a) 施加双向压力和剪力模型

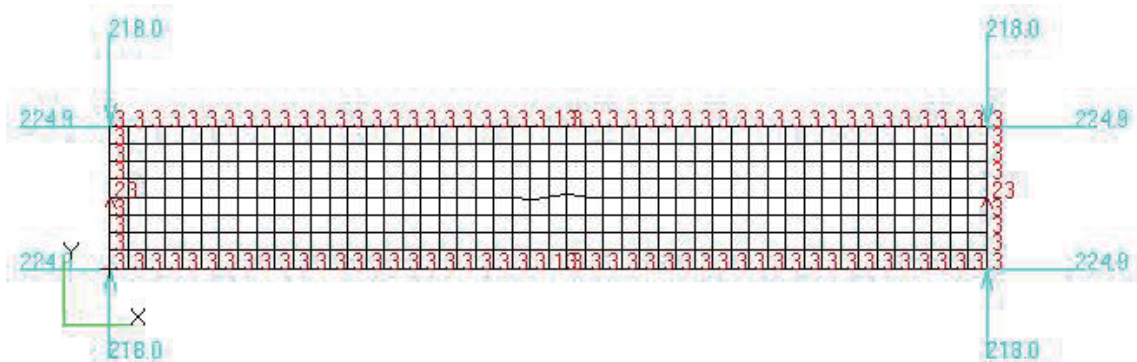


图2.2.2 (b) 施加双向压力模型

注：1. 边界约束，图2.2.2 (a) 和图2.2.2 (b) 中所示的约束均可；

2. 图2.2.2 (a) 中显示的边界载荷类型为节点压力，图2.2.2 (b) 中显示的边界载荷类型为边界压力。

2.3 屈曲强度校核

2.3.1 在计算屈曲安全因子中，中国船级社《钢质海船入级与建造规范》（2001）第2篇第2.2.7节定义的边界约束系数“C”应加以考虑。

2.3.2 MSC/PATRAN后处理中显示的系数(factor)即为临界屈曲因子 λ ，可以根据边界约束情况乘上本附录2.3.1中规定的边界约束系数，应不小于本指南表3.5.2规定的安全因子。

3. 方法二 简化公式法

3.1 临界屈曲应力及弹塑性修正

3.1.1 短边受压及弯曲板格弹性临界屈曲应力 σ_{scr-e} 定义如下：

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

式中： k_x ——短边受压及弯曲屈曲系数，按本附录表3.1.1(a)计算，其中： σ_{x1} 、 σ_{x2} 见本附录3.2.2；

C_1 ——边界约束系数，见表3.1.1(b)；

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

ν ——材料泊松比。对钢材， $\nu = 0.3$ ；

t ——板格厚度, mm;
 s ——板格的短边长度, mm。取纵骨、加强筋或扶强材间距;
 x ——定义为板格长边轴向。

3.1.2 长边受压及弯曲板格弹性临界屈曲应力 $\sigma_{y_{cr_e}}$ 定义如下:

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

式中: k_y ——长边受压及弯曲屈曲系数, 按本附录表3.1.1(a)计算, 其中: σ_{y1} 、 σ_{y2} 见本附录3.2.2;

其中: l ——板格的长边长度, mm。

C_2 ——边界约束系数, 见本附录表3.1.1(b);

y ——定义为板格短边轴向。

其余符号同3.1.1。

3.1.3 受剪切板格弹性临界屈曲应力 τ_{cr_e} 定义如下:

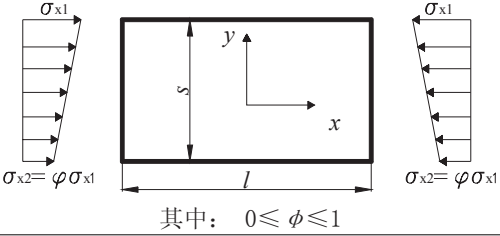
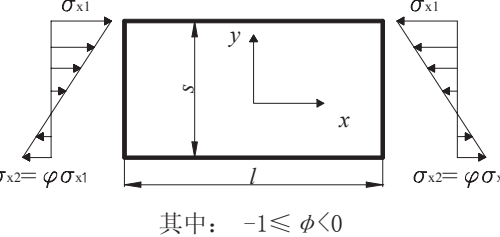
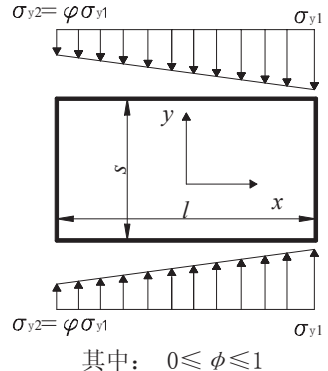
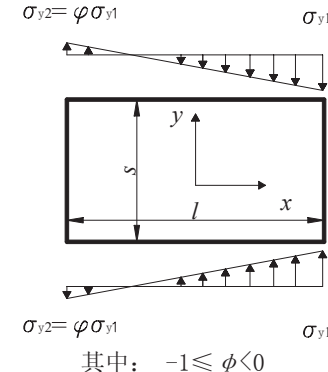
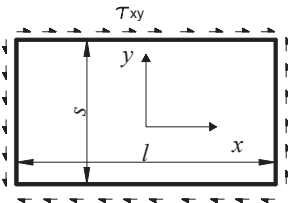
$$\tau_{cr_e} = k_t C_1 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \quad N/mm^2$$

式中: k_t ——剪切屈曲系数, 按本附录表3.1.1(a)计算, 其中: τ_{xy} 见本附录3.2.2;

其余符号同3.1.1、3.1.2。

板格屈曲系数

表3.1.1(a)

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

板格边界约束系数 C_1 、 C_2

表3.1.1(b)

边界情况	C_1	C_2	
		位于双层底或双壳之间	其他位置
角钢或T型扶强材	1.1	1.3	1.2
扁钢或球扁钢	1.0	1.2	1.1

3.1.4 应对板格的临界弹性屈曲应力进行修正，弹塑性修正公式如下：

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

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

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

σ_{xcr_e} 、 σ_{ycr_e} 、 τ_{cr_e} ——分别为板格在单轴应力作用下的X轴、Y轴的弹性临界屈曲压应力和临界屈曲剪应力，见本附录3.1.1、3.1.2、3.1.3；

σ_S ——材料屈服强度，N/mm²；

τ_S —— $\sigma_S/\sqrt{3}$ 。

3.2 屈曲强度衡准

3.2.1 复合应力作用下的板格屈曲强度按下式校核：

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

式中： λ ——为板格中板在复合应力作用下的临界屈曲应力与计算的实际压应力之比，按本附录表3.2.1计算，

其中： $[\lambda]$ ——为板格屈曲安全因子，见本指南表3.5.2。如模型采用细网格时， λ 值可适当放宽，但应征得CCS同意；

σ_{x1} 、 σ_{y1} 、 τ_{xy} ——见3.2.2;

σ_{xcr} 、 σ_{ycr} 、 τ_{cr} ——见3.1.4;

l 、 s 符号同3.1.2、3.1.1。

3.2.2 本附录表中的 σ_{x1} 、 σ_{y1} 分别为板格边所受对应X轴、Y轴工作应力中的较大值， σ_{x2} 、 σ_{y2} 为对应的另一较小值，计算时应按板格边中面应力的平均值（取两个对边节点的平均值）计入； τ_{xy} 为平均剪应力。 σ_{x1} 、 σ_{x2} 、 σ_{y1} 、 σ_{y2} 、 τ_{xy} 如表3.1.1(a)图中所示。

3.2.3 按3.2.2算得的X轴、Y轴的工作应力 σ_{x1} 、 σ_{y1} 、 τ_{xy} 在计算时取绝对值计入。若 σ_{x1} 、 σ_{y1} 的计入结果为拉应力时，该应力分量取为零。

λ 计算值

表3.2.1

板格长宽比 应力状态	$1 \leq \frac{l}{s} \leq \sqrt{2}$	$\sqrt{2} < \frac{l}{s} \leq 8$
双向压缩	$\frac{1}{(1+k_1)} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_{x1}}$	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_1^2)}} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_{x1}}$
X轴压缩+剪切	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_2^2)}} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_{x1}}$	
Y轴压缩+剪切	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_3^2)}} \frac{\sigma_{ycr}}{\sigma_{y1}}$	
双向压缩+剪切	$\frac{1}{\sqrt{(1+k_1^2+k_2^2)}} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_{x1}}$	

其中：

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