



指导性文件
GD 20-2021

中国船级社

邮轮整船直接计算指南

2021

2021年8月1日生效

北 京

目 录

第 1 章 总则	1
1.1 一般规定	1
1.2 符号及定义	1
1.3 方法与流程	2
第 2 章 整船直接计算	4
2.1 整船有限元模型	4
2.2 计算工况与子工况	6
2.3 载荷与边界条件	8
2.4 应力修正	15
2.5 强度评估	18
第 3 章 细化分析	22
3.1 一般规定	22
3.2 细化模型	22
3.3 工况及载荷	24
3.4 强度衡准	24

第 1 章 总则

1.1 一般规定

1.1.1 本指南适用于船长 150 米及以上的邮轮。

1.1.2 本指南第 2 章为整船直接计算，给出了采用包络值方法进行整船直接计算，评估船体结构主要构件强度的方法。整船直接计算得到的变形或应力也将用于细化分析。

1.1.3 本指南第 3 章为细化分析，给出了对侧壁开口及过渡肘板等应力集中区域进行细化分析，评估其屈服及疲劳强度的方法。

1.2 符号及定义

1.2.1 除非另有说明，本指南符号与 CCS《钢质海船入级规范》（以下称《钢规》）第 2 篇中的符号定义一致。

1.2.2 由于邮轮一般无静水中垂状态，本指南采用最大和最小描述船体梁载荷的两个极端状态。其中，最大静水弯矩对应装载的最大中拱状态，最小静水弯矩对应装载的最小中拱状态。本指南中动载荷的超越概率为 10^{-8} 。

1.2.3 规范船长 L 的首端（FE）是首柱前端至夏季载重线吃水水线的垂线；规范船长的尾端（AE）是距离首端 L 处至夏季载重线吃水水线的垂线。

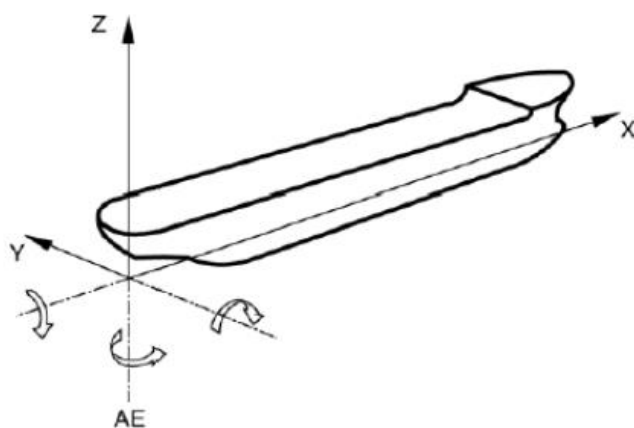


图 1.2.3 坐标系定义

1.2.3 除非另有说明，本指南采用如下右手笛卡尔坐标系：

- 原点：船舶中纵剖面、 L 尾端和基线的相交处；

- X 轴：纵向轴，向船首为正；
- Y 轴：横向轴，向左舷为正；
- Z 轴：垂向轴，向上为正。

1.3 方法与流程

1.3.1 本指南的整船分析方法为“规范载荷法”，也称“包络值方法”。该方法要求船长各个剖面位置弯矩和剪力均达到其最大值或最小值。

1.3.2 图 1.3.2 给出了整船分析的流程。其中左侧流程为强度评估流程，为分析的主线，依次完成流程图中的各步骤。如果强度不满足要求则需返回，修改设计后重新进行评估。右侧流程通过结构分析及计算得到应力修正所需要的应力传递函数。“嵌入法”的细化分析与整船分析流程相同。

1.3.3 子模型方法的细化分析流程图见 1.3.3，利用整船分析的位移结果对子模型加载，继而完成强度评估流程。子模型也应进行右侧传递函数工况的加载和分析，以得到各单元的应力传递函数。

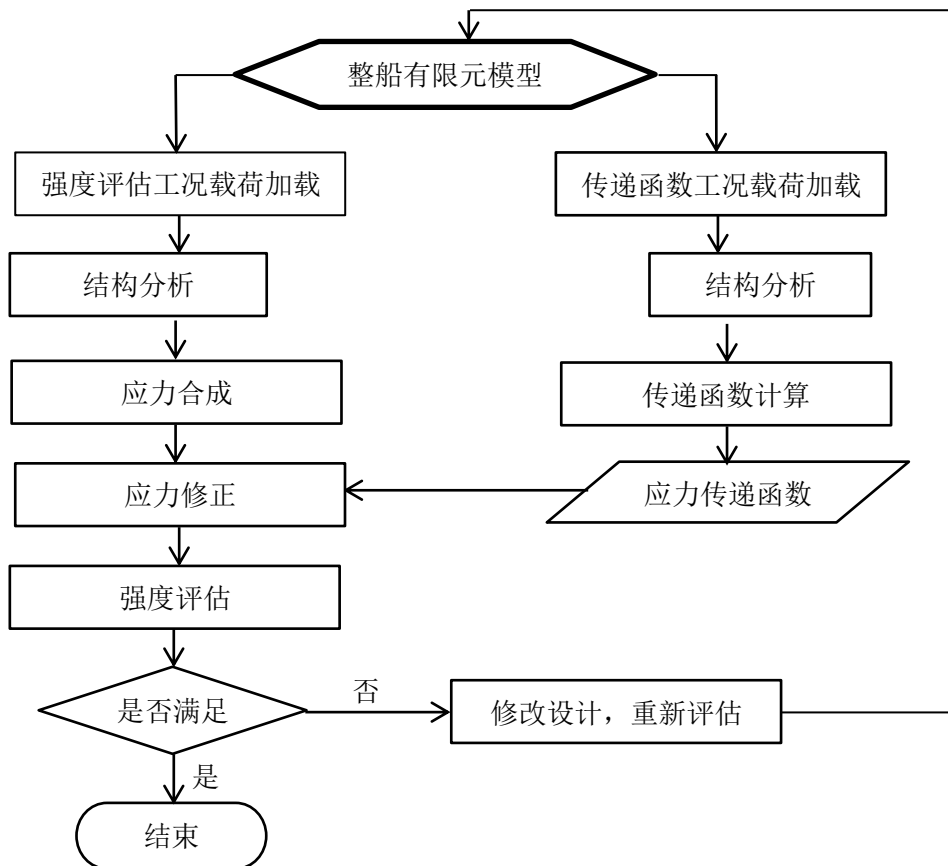


图 1.3.2 整船分析流程

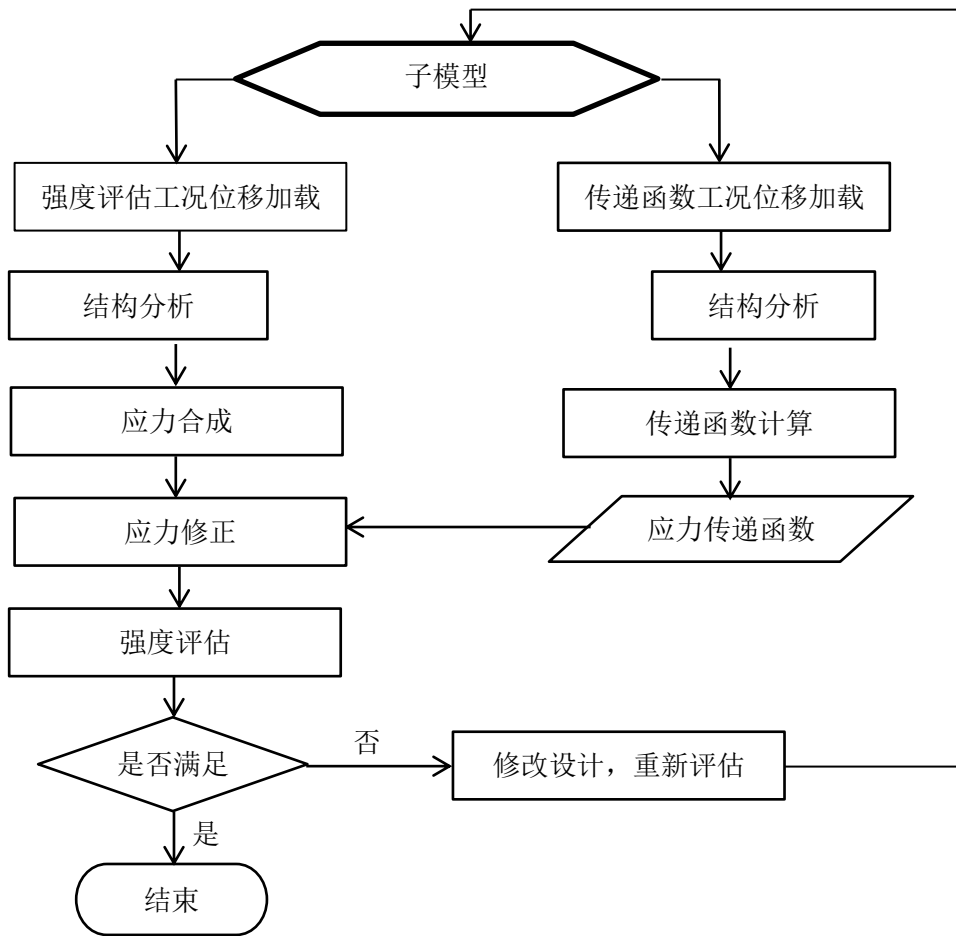


图 1.3.3 子模型分析流程

第 2 章 整船直接计算

2.1 整船有限元模型

2.1.1 模型范围

2.1.1.1 应采用三维有限元模型模拟整船的船体结构，模型应包括主船体结构、上层建筑与甲板室结构。局部支撑及加强结构，如肘板、锚系泊设备下加强结构等可不模拟。见图 2.1.1.1。

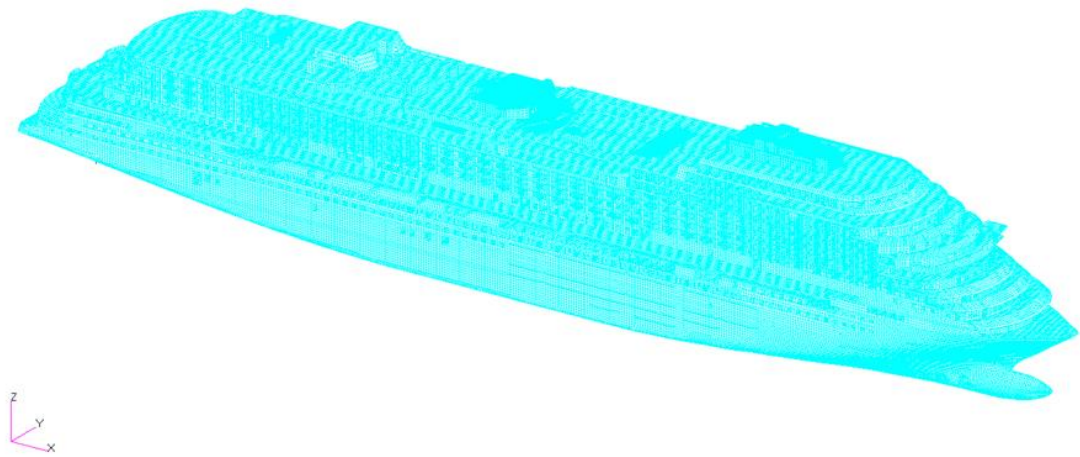


图 2.1.1.1 整船有限元模型

2.1.2 单元与网格

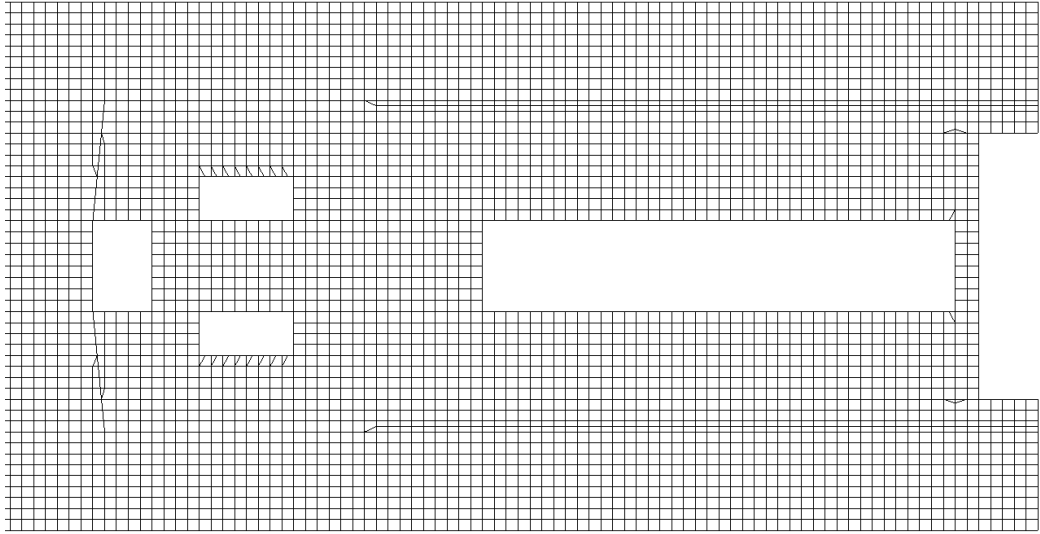
2.1.2.1 采用板单元模拟船体板及主要支撑构件的腹板，采用梁单元模拟次要构件及主要构件的面板。应力集中位置应尽量避免使用三角形单元。板单元的尺寸为骨材间距：在宽度及高度方向上为纵骨间距，在纵向上将强框架间的板单元分成若干个单元，使得单元的边长比接近 1。见图 2.1.2.1 (1) 和图 2.1.2.1 (2)。

2.1.2.2 在实肋板高度方向上，至少布置 3 个板单元。甲板主要构件的腹板高度方向可布置一个单元。

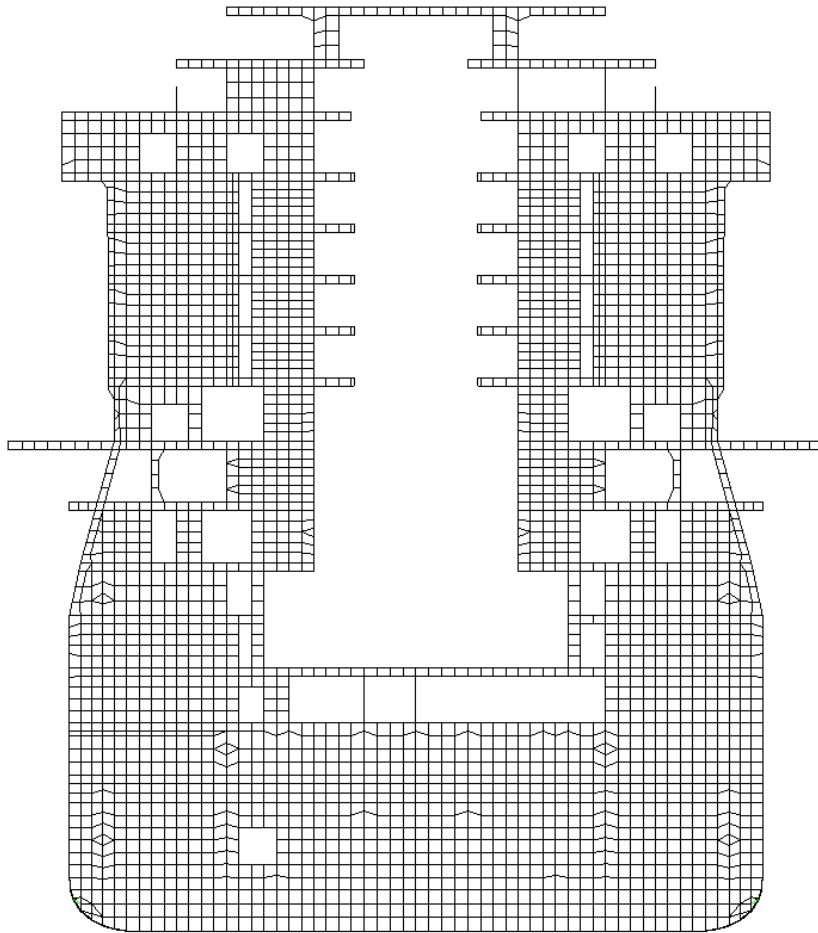
2.1.2.3 应在模型中对船体上大的开口及门窗开口进行建模，以准确模拟船体梁的弯曲和剪切刚度及应力分布。图 2.1.2.3 给出了舷侧的有限元网格布置，为了准确模拟开孔的尺寸，并使单元有合理的边长比，门窗开口区域采用了比主船体区域更小的网格。

2.1.2.4 模型采用建造尺寸，但应扣除船东自愿增加的厚度。

2.1.2.5 支柱一般采用梁单元模拟。当采用板单元模拟支柱时，需要通过虚拟梁单元得到支柱边缘的应力。



2.1.2.1 (1) 甲板平面有限元网格



2.1.2.1 (2) 横舱壁有限元网格

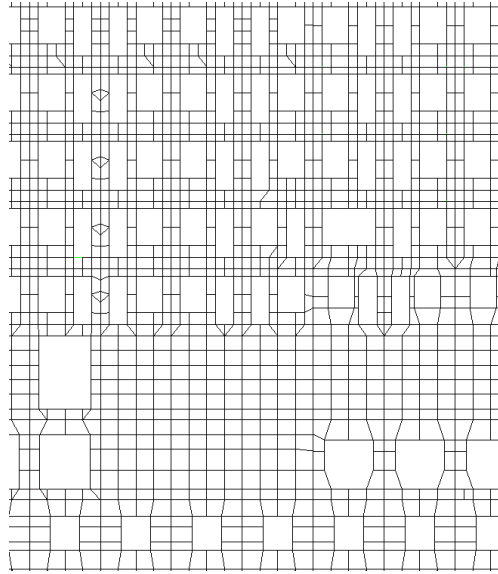


图 2.1.2.3 门窗开口区域网格

2.1.3 质量特性

2.1.3.1 为了施加重力载荷，需要对有限元模型的材料密度分区域进行调整，或设置质量单元，使模型的质量分布与设计装载一致。STA(+)和 SAT(-)子工况下的剖面弯矩和剪力应与其相应的装载计算结果一致。

2.1.3.2 深舱中的液体的质量可通过设置在周界上的质量点来模拟，质量点应建在板单元交线的节点上，以消除集中应力。重型设备的质量通过能反映其质特性的单元来模拟，并与船体以合理的方式连接。

2.2 计算工况与子工况

2.2.1 计算工况

2.2.1.1 整船分析包括 6 种计算工况，LC1~LC6，见表 2.2.1.1。每个计算工况由若干子工况组成，计算工况的应力结果由子工况的应力结果合成。载荷、边界条件和浮态调整的详细说明见 2.3。

2.2.1.2 LC1 和 LC2 分别校核在中拱和中垂状态下的船体结构强度。载荷包括船体梁载荷及局部载荷。

2.2.1.3 LC3 和 LC4 分别校核在船中区域剪力最大和最小时的船体结构强度。载荷包括静水剪力和波浪剪力。

2.2.1.4 LC5 和 LC6 校核在横摇工况下船体结构强度。主要载荷为重力、舷外水压力和横摇惯性力。

计算工况	子工况	载荷成分	边界条件	浮态调整
LC1 中拱	STA(+) 静水中拱	空船重量, 最大中拱装载重量, 静水压力	BC1	✓
	WB(+) 波浪中拱	波浪剪力 (中拱) 波浪弯矩 (中拱)	BC1	-
	PRE(+) 波峰压力	波浪动压力 (波峰)	BC2	-
LC2 中垂	STA(-) 静水中垂	空船重量, 最小中拱装载重量, 静水压力	BC1	✓
	WB(-) 波浪中垂	波浪剪力 (中垂) 波浪弯矩 (中垂)	BC1	-
	PRE(-) 波谷压力	波浪动压力 (波谷)	BC2	-
LC3 船中剪力 (+)	STA(+) 静水中拱	空船重量 最大中拱装载重量, 静水压力	BC1	✓
	SHEAR(+) 船中正剪力	波浪剪力 (正)	BC1	-
LC4 船中剪力 (-)	STA(-) 静水中垂	空船重量 最小中拱装载重量, 静水压力	BC1	✓
	SHEAR(-) 船中负剪力	波浪剪力 (负)	BC1	-
LC5 横摇-向左	ROLL(P) 向左横摇	横摇状态下的舷外水压力 重力及横摇惯性力	BC3	-
LC6 横摇-向右	ROLL(S) 向右横摇	横摇状态下的舷外水压力 重力及横摇惯性力	BC3	-

2.2.2 子工况

2.2.2.1 子工况包括计算工况中的某一组特定载荷 (如波浪弯矩), 子工况有对应的边界条件, 可独立进行结构分析, 得到单元应力。

2.2.2.2 STA(+)
为最大中拱静水子工况, 由装载手册中静水弯矩最大的装载确定其载荷。载荷成分包括静水压力, 空船及装载的重力, 及上述局部载荷产生的船体梁静水弯矩和静水剪力。

2.2.2.3 STA(-)
为最小中拱静水子工况, 由装载手册中静水弯矩最小的装载确定其载荷。

载荷成分同 STA(+)

2.2.2.4 WB(+)为波浪中拱子工况，载荷为中拱波浪弯矩和中拱波浪剪力。WB(-)为波浪中垂子工况，载荷为中垂波浪弯矩和中垂波浪剪力。两个子工况总纵载荷的目标值分别见 2.3.3.2 和 2.3.3.3，实际值见 2.3.4.2。

2.2.2.5 PRE(+)和 PRE(-)为局部波浪压力子工况，分别为波峰和波谷，载荷见 2.3.1.2。

2.2.2.6 SHEAR(+)和 SHEAR(-)为船中部波浪剪力子工况，波浪剪力在船中 0.4L-0.6L 范围内分别达到最大值和最小值，其目标值和实际值分别见 2.3.3.4 和 2.3.4.3。

2.3 载荷与边界条件

2.3.1 局部载荷

2.3.1.1 舷外海水静压力按下式计算：

$$p_{hs} = \rho_w g(d_1 - z) \quad \text{kN/m}^2, \quad z \leq d_1$$

$$= 0 \text{ kN/m}^2, \quad z > d_1$$

式中： ρ_w ——海水密度，取 1.025t/m^3 ；

d_1 ——计算工况下的吃水，m；

z ——计算点至基线的垂向距离，m。

2.3.1.2 工况 LC1 和 LC2 的波浪动压力见表 2.3.1.2，其中正值表示波峰，指向船内，用于 LC1，与 2.3.1.1 的静压力相叠加；负值表示波谷，指向船外，用于 LC2，抵消 2.3.1.1 的静压力。表中 C 的定义见 2.3.3.2，波浪动压力参见图 2.3.1.2。

波浪动压力

表 2.3.1.2

高度 z (m) 范围	波峰 (kN/m ²)	波谷 (kN/m ²)
$d_1 < z \leq d_1 + 0.33C$	$3.3C - 10(z - d_1)$	0
$0 \leq z \leq d_1$	$2.25C + 1.05zC/d_1$	$\text{Max}(-2.25C - 1.05zC/d_1, \rho g(z - d_1))$

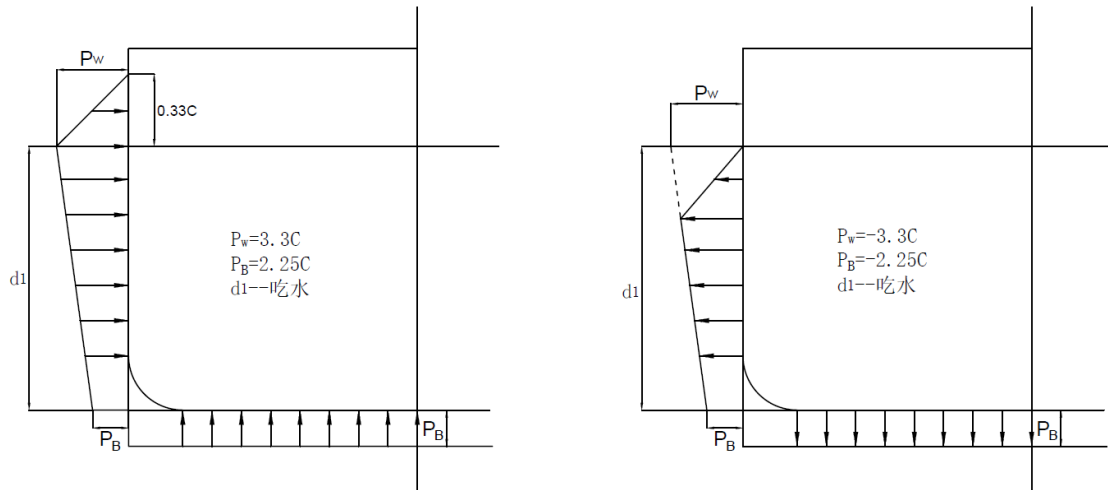


图 2.3.1.2 波浪动压力

2.3.1.3 横倾工况 LC5 和 LC6 的舷外海水压力根据 2.3.1.1 的公式计算，计算时考虑横倾引起的船舶浮态变化，横倾角计算方法见《钢规》第 2 篇第 1 章 1.5.2。

2.3.1.4 重力载荷根据装载确定。整船有限元模型应准确模拟空船及装载的质量分布，并通过加速度场施加重力。

2.3.1.5 横倾工况的水平惯性力采用加速度场加载，水平加速度的计算方法见《钢规》第 2 篇第 1 章 1.5.2。

2.3.2 总纵载荷

2.3.2.1 总纵载荷是整船分析的主要载荷，在船长的各剖面位置达到其最大/最小值：对于静水弯矩和剪力，取许用值；对于波浪弯矩和剪力，取规范值。上述弯矩和剪力，以及静水和波浪合成后的弯矩和剪力，均称为总纵载荷的“目标值”。结构强度评估采用基于总纵载荷目标值的应力结果，目标值的具体规定见 2.3.3。

2.3.2.2 总纵载荷的目标值为包络值，整船直接计算中难以在所有剖面同时达到目标弯矩和目标剪力。分析时采用 2.3.4 的方法施加接近总纵载荷目标值的弯矩和剪力，此时施加在模型上的弯矩和剪力称为“实际值”。

2.3.2.3 由于载荷的实际值与目标值不完全一致，应通过应力传递函数计算该差异产生的应力，并据此对实际值的应力结果进行修正，得到目标值的应力结果，用于强度评估。应力修正方法见 2.4.1。

2.3.3 总纵载荷目标值

2.3.3.1 静水弯矩和剪力的目标值为许用值，由设计方提供。LC1 和 LC2 的静水弯矩目标值曲线分别为最大许用弯矩曲线和最小许用弯矩曲线。在设计方提供的如图 2.3.3.1 所示的静水许用剪力曲线中，A1-A4 曲线为最大许用剪力曲线，B1-B4 为最小许用剪力曲线，各工况静水剪力目标值见表 2.3.3.1。

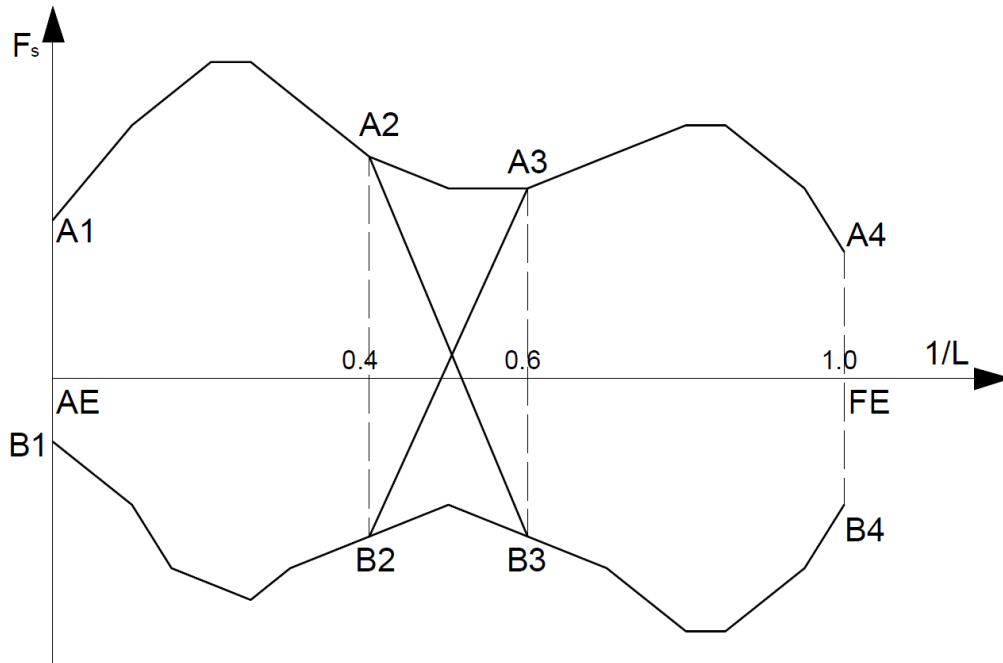


图 2.3.3.1 静水许用剪力曲线

各工况静水剪力目标值曲线

表 2.3.3.1

工况	LC1	LC2	LC3	LC4
目标剪力曲线	A1-A2-B3-B4	B1-B2-A3-A4	A2-A3	B2-B3

2.3.3.2 LC1 中的中拱波浪弯矩 $M_W(+)$ 和 LC2 中的中垂波浪弯矩 $M_W(-)$ 按下列两式计算：

$$M_W(+) = 0.19MCL^2BC_b \quad kN.m$$

$$M_W(-) = -0.11MCL^2B(C_b + 0.7) \quad kN.m$$

式中：M —— 弯矩分布系数，见图 2.3.3.2；

L —— 船长，m；

B —— 船宽，m；

C_b —— 方形系数，取值不小于 0.60；

C —— 波浪系数，按下列各式计算：

$$C = 10.75 - \left(\frac{300-L}{100}\right)^{3/2} \quad \text{当 } 90 \leq L \leq 300\text{m 时；}$$

$C = 10.75$ 当 $300\text{m} < L < 350\text{m}$ 时;

$C = 10.75 - \left(\frac{L-350}{150}\right)^{3/2}$ 当 $350\text{m} \leq L \leq 500\text{m}$ 时。

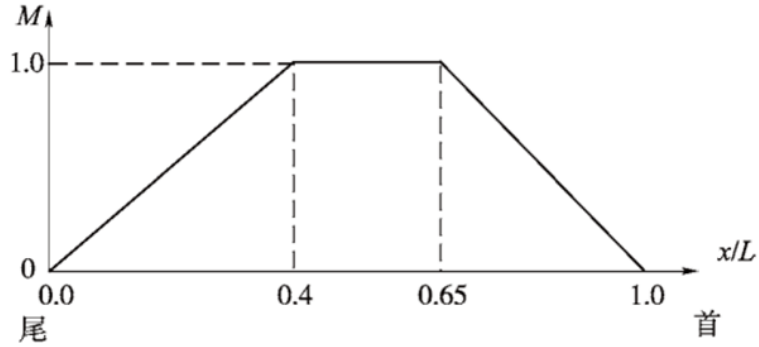


图 2.3.3.2 波浪弯矩沿船长的分布

2.3.3.3 LC1 中的中拱波浪剪力 $F_W(+)$ 和 LC2 中的中垂波浪剪力 $F_W(-)$ 分别按下式计算:

$$F_W(+) = 0.3F_1CLB(C_b + 0.7) \text{ kN}$$

$$F_W(-) = 0.3F_2CLB(C_b + 0.7) \text{ kN}$$

式中: F_1, F_2 ——剪力分布系数, 见图 2.3.3.3 (1) 和图 2.3.3.3 (2)。

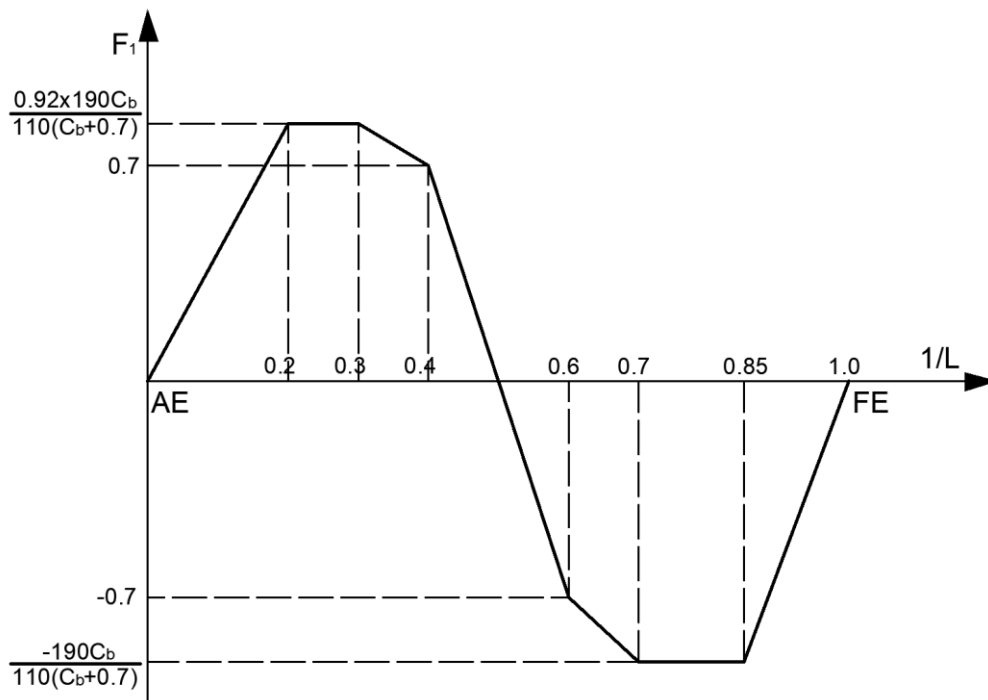


图 2.3.3.3 (1) 中拱波浪剪力分布系数 F_1

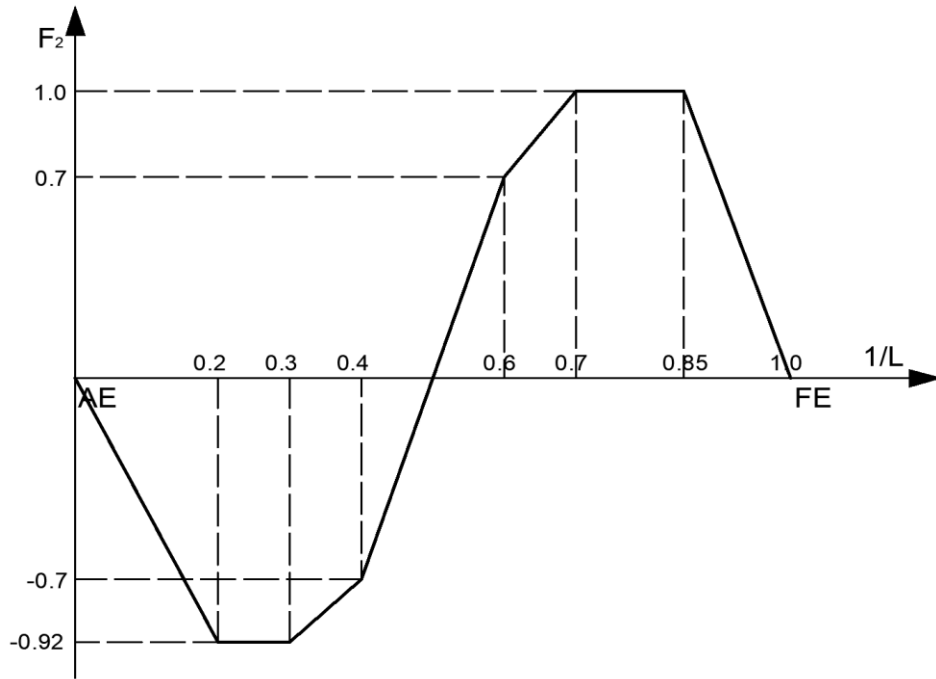


图 2.3.3.3 (2) 中垂波浪剪力分布系数 F_2

2.3.3.4 LC3 中的船中 0.4L-0.6L 区域最大剪力 $F_W(M+)$ 和 LC4 中的船中区域最小剪力 $F_W(M-)$ 按下式计算:

$$F_W(M+) = 0.21CLB(C_b + 0.7) \quad kN \quad (LC3)$$

$$F_W(M-) = -0.21CLB(C_b + 0.7) \quad kN \quad (LC4)$$

2.3.4 总纵载荷实际值

2.3.4.1 通过对模型中的重力和浮力载荷沿船长进行积分得到静水弯矩和静水剪力, 计算结果应与装载计算给出的弯矩和剪力有良好的一致性。

2.3.4.2 波浪弯矩和波浪剪力通过沿船长施加分布力进行加载。对于 LC1 和 LC2, 波浪弯矩沿船长的分布由下式给出:

$$BM_1(x) = M_W(a_1x^5 + a_2x^4 + a_3x^3 + a_4x^2) \quad kN.m$$

对上式求导得到波浪剪力沿船长的分布如下:

$$SF_1(x) = \frac{M_W}{L_0} (5a_1x^4 + 4a_2x^3 + 3a_3x^2 + 2a_4x) \quad kN$$

进一步求导得到对应的分布力:

$$P_1(x) = \frac{M_W}{L_0^2} (20a_1x^3 + 12a_2x^2 + 6a_3x + 2a_4) \quad kN/m$$

式中: M_W ——船中波浪弯矩, $kN.m$, 见 2.3.3.2;

L_0 ——整船模型总长, m ;

x ——计算点在整船模型中的相对坐标, 模型尾端为 0, 模型首端为 1;

$$a_1 = \frac{z_{22} - z_{12}}{z_{11}z_{22} - z_{21}z_{12}}$$

$$a_2 = \frac{z_{11} - z_{21}}{z_{11}z_{22} - z_{21}z_{12}}$$

$$a_3 = -3a_1 - 2a_2$$

$$a_4 = 2a_1 + a_2$$

其中: $z_{11} = \gamma_1^5 - 3\gamma_1^3 + 2\gamma_1^2$

$$z_{12} = \gamma_1^4 - 2\gamma_1^3 + \gamma_1^2$$

$$z_{21} = \gamma_2^5 - 3\gamma_2^3 + 2\gamma_2^2$$

$$z_{22} = \gamma_2^4 - 2\gamma_2^3 + \gamma_2^2$$

式中: γ_1 —0.4L 位置在整船模型中的相对坐标, 根据下式计算:

$$\gamma_1 = \frac{\alpha + 0.4}{\alpha + \beta + 1}$$

γ_2 —0.65L 位置在整船模型中的相对坐标, 根据下式计算:

$$\gamma_2 = \frac{\alpha + 0.65}{\alpha + \beta + 1}$$

其中: α —船长尾端 (AE) 之后的模型长度相对于船长的比值;

β —船长前端 (FE) 之前的模型长度相对于船长的比值。

2.3.4.3 船中剪力工况 LC3 和 LC4 的波浪剪力由下列两式给出, 其中的剪力分布系数 F_3 和 F_4 取值见表 2.3.4.3。

$$F_W(LC3) = 0.3F_3CLB(C_b + 0.7) \text{ kN}$$

$$F_W(LC4) = 0.3F_4CLB(C_b + 0.7) \text{ kN}$$

剪力分布系数

表 2.3.4.3

x	F_3	F_4
0	0	0
0.1L	-0.56	0.56
0.2 L	-0.56	0.56
0.4 L	0.7	-0.7
0.6 L	0.7	-0.7
0.8 L	-0.56	0.56
0.9 L	-0.56	0.56
1.0 L	0	0

2.3.4.4 为了施加 2.3.4.2 的波浪弯矩和剪力，对分布力 P_1 沿船长在每个强框架范围内进行积分，得到该范围内的力，并将其分散施加在强框架与外板交线的各个节点上。图 2.3.4.4 给出了一个加载的示例（局部）。2.3.4.3 的波浪剪力采用同样方法施加。

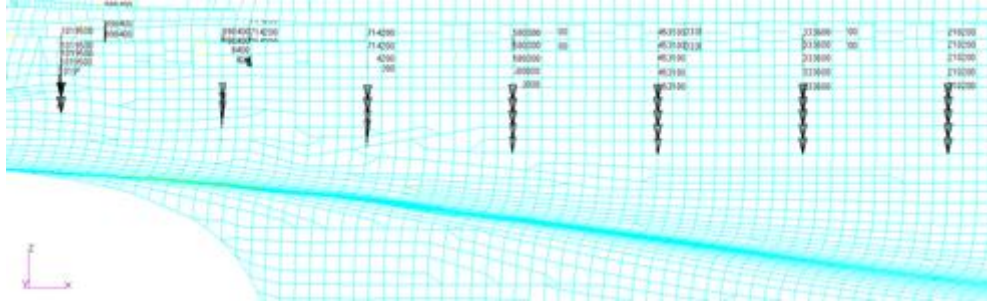


图 2.3.4.4 船体梁载荷加载方式

2.3.4.5 可以采用其他的加载方式在整船有限元模型上加载波浪弯矩和剪力。为此需要给出所采用方法的详细说明，并取得 CCS 同意。

2.3.5 边界条件及平衡

2.3.5.1 整船分析包括 BC1、BC2 和 BC3 共 3 种位移边界条件，用于不同的子工况，二者对应关系见表 2.2.1.1。

2.3.5.2 BC1 边界条件约束模型的刚体位移，参见图 2.3.5.2：船底平板龙骨在船尾（点 1）y 向位移为零；船首（点 2）处 x 向，y 向与 z 向位移为零；舱壁甲板与尾封板交线材两端节点（点 3，点 4）z 向位移为零。

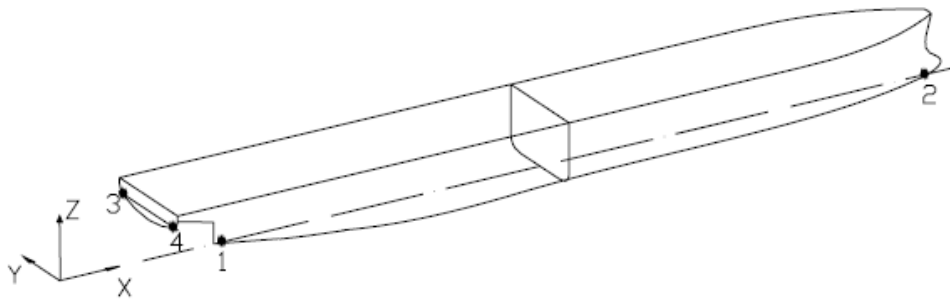


图 2.3.5.2 边界条件示意图

2.3.5.3 BC2 边界条件的位移约束见表 2.3.5.3。BC2 还需在强框架与外板交线的节点上施加与该处局部载荷大小相同，方向相反的反力，避免局部载荷引起船体梁弯曲。

BC2 边界条件

表 2.3.5.3

约束	$\delta_x = 0$	$\delta_y = 0$	$\delta_z = 0$
作用位置	点 2	点 1, 2	舱壁甲板边线上所有节点

2.3.5.4 横摇工况中，施加边界条件 BC3 如下：

- (1) 强框架与舷侧外板交线上各节点，约束 z 向位移；
- (2) 中纵剖面和平板龙骨的交线上所有节点，约束 y 向位移；
- (3) 点 2 位置约束 x 向位移。

2.3.5.5 对于 STA(+)和 STA(-)两个装载工况，应对其重力和浮力的平衡进行检查，并根据需要调整船舶的浮态，使总力达到平衡。平衡要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 节 1.5.7.6。

2.4 应力修正

2.4.1 应力修正方法

2.4.1.1 根据目标单元所在剖面位置弯矩/剪力实际值与目标值的差异，采用载荷-应力传递函数对应力进行修正，得到目标值下的应力：

$$\sigma_x = \sigma_{x-FEM} + f_{mx}\Delta M + f_{qx}\Delta Q$$

$$\sigma_y = \sigma_{y-FEM} + f_{my}\Delta M + f_{qy}\Delta Q$$

$$\tau_{xy} = \tau_{xy-FEM} + f_{mxy}\Delta M + f_{qxy}\Delta Q$$

$$\sigma_a = \sigma_{a-FEM} + f_{ma}\Delta M + f_{qa}\Delta Q$$

式中： σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 、 σ_a ——载荷目标值下的应力，分别为 x 方向应力，y 方向应力，剪切应力及梁单元轴向应力；

σ_{x-FEM} 、 σ_{y-FEM} 、 τ_{xy-FEM} 、 σ_{a-FEM} ——根据总纵载荷实际值分析得到的应力；

f_{mx} 、 f_{my} 、 f_{mxy} 、 f_{ma} ——弯矩-应力传递函数，即目标单元所在剖面的单位船体梁弯矩在单元内产生的应力，计算方法见 2.4.3；

f_{qx} 、 f_{qy} 、 f_{qxy} 、 f_{qa} ——剪力-应力传递函数，即目标单元所在剖面的单位船体梁剪力在单元内产生的应力，计算方法见 2.4.3；

ΔM 、 ΔQ ——目标单元所在剖面弯矩和剪力目标值与实际值之差。

2.4.1.2 强度评估中所使用的板单元的相当应力、纵向应力、最大剪应力根据按 2.4.1.1

修正后的应力进行计算。

2.4.1.3 如果模型中的弯矩和剪力实际值达到或超过目标值，也可不进行应力修正。

2.4.2 传递函数工况与载荷

2.4.2.1 通过弯曲工况和剪切工况的应力结果计算载荷-应力传递函数，两个工况中仅包含船体梁载荷，见图 2.4.2.1。

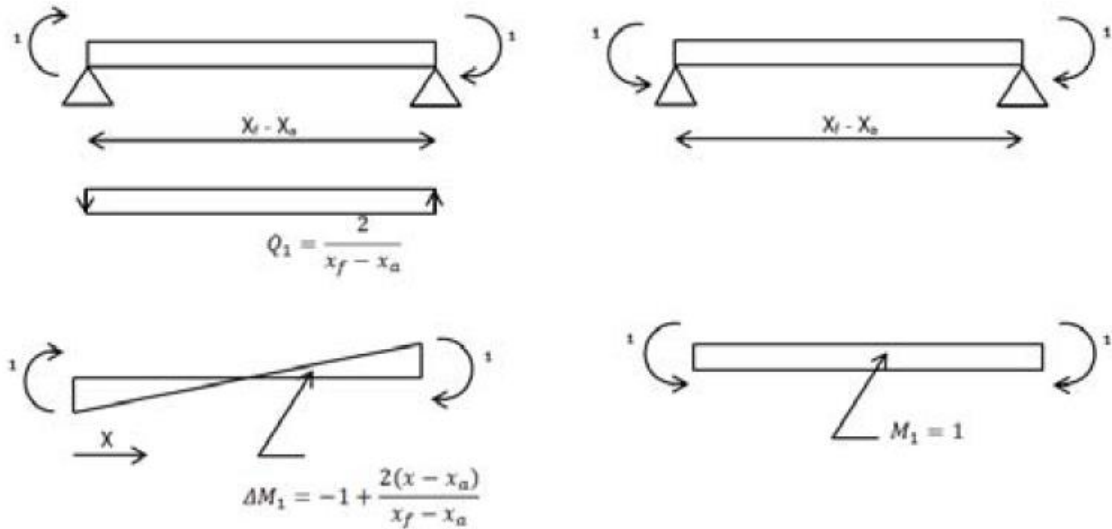


图 2.4.2.1 计算传递函数的剪切工况（左）和弯曲工况（右）

2.4.2.2 剪切工况载荷为：船体梁两端施加单位弯矩，两端弯矩的方向相同。该工况下在船体内产生的剪力为：

$$Q_1(x) = \frac{2}{x_f - x_a}$$

沿船长的弯矩分布为：

$$M_1(x) = -1 + \frac{2(x - x_a)}{x_f - x_a}$$

式中：\$x_f, x_a\$——船首尾施加弯矩处的坐标；

\$x\$——单元所在剖面位置的坐标。

2.4.2.3 弯曲工况载荷为：船体梁两端施加单位大小的弯矩，船首为 1，船尾为-1。该工况下在船体内产生的剪力为：

$$Q_2(x) = 0$$

沿船长的弯矩分布为：

$$M_2(x) = 1$$

2.4.2.4 上述两个工况的边界条件如下：在模型首尾端创建两个独立节点，模型规范船长两端剖面上主甲板以下纵向构件的节点通过 MPC 与独立点连接，三个线位移一致。约束后端独立点的 x、y、z 方向的线位移及绕 x 轴的转动；约束前端独立点 y、z 方向的线位移。各工况中的弯矩也通过上述两个独立点施加。

2.4.3 传递函数的计算

2.4.3.1 单元中的应力由船体梁弯矩和剪力引起，基于线性理论，对于剪切工况有：

$$\sigma_{1x} = f_{mx}M_1 + f_{qx}Q_1$$

$$\sigma_{1y} = f_{my}M_1 + f_{qy}Q_1$$

$$\tau_{1xy} = f_{mxy}M_1 + f_{qxy}Q_1$$

对于弯曲工况有：

$$\sigma_{2x} = f_{mx}M_2 + f_{qx}Q_2$$

$$\sigma_{2y} = f_{my}M_2 + f_{qy}Q_2$$

$$\tau_{2xy} = f_{mxy}M_2 + f_{qxy}Q_2$$

式中： σ_{1x} 、 σ_{1y} 、 τ_{1xy} ——剪切工况目标单元的三个应力成分，x 方向应力，y 方向应力及剪切应力；

σ_{2x} 、 σ_{2y} 、 τ_{2xy} ——弯曲工况目标单元的三个应力成分，x 方向应力，y 方向应力及剪切应力；

f_{qx} 、 f_{qy} 、 f_{qxy} ——剪力-应力传递函数；

f_{mx} 、 f_{my} 、 f_{mxy} ——弯矩-应力传递函数。

分别联立每个应力成分的公式，根据上述六个方程可以得到 6 个传递函数如下：

$$f_{mx} = \frac{Q_2\sigma_{1x} - Q_1\sigma_{2x}}{Q_2M_1 - Q_1M_2}$$

$$f_{qx} = \frac{M_2\sigma_{1x} - M_1\sigma_{2x}}{Q_1M_2 - Q_2M_1}$$

$$f_{my} = \frac{Q_2\sigma_{1y} - Q_1\sigma_{2y}}{Q_2M_1 - Q_1M_2}$$

$$f_{qy} = \frac{M_2\sigma_{1y} - M_1\sigma_{2y}}{Q_1M_2 - Q_2M_1}$$

$$f_{mxy} = \frac{Q_2\tau_{1xy} - Q_1\tau_{2xy}}{Q_2M_1 - Q_1M_2}$$

$$f_{qxy} = \frac{M_2\tau_{1xy} - M_1\tau_{2xy}}{Q_1M_2 - Q_2M_1}$$

2.4.3.2 采用同样的方法可以得到梁单元轴向应力的传递函数如下：

$$f_{ma} = \frac{Q_2\sigma_{1a} - Q_1\sigma_{2a}}{Q_2M_1 - Q_1M_2}$$

$$f_{qa} = \frac{M_2\sigma_{1a} - M_1\sigma_{2a}}{Q_1M_2 - Q_2M_1}$$

式中： σ_{1a} 、 σ_{2a} ——目标单元分别相应于剪切工况和弯曲工况下的轴向应力；

f_{qa} ——剪力-应力传递函数；

f_{ma} ——弯矩-应力传递函数。

2.5 强度评估

2.5.1 强度评估范围

2.5.1.1 根据表 2.2.1.1 工况分析得到应力，并按照 2.4.1 的方法修正后进行船体结构强度评估。

2.5.1.2 应对船体结构的外板、内底板、甲板板、舱壁板、上层建筑的侧壁和甲板，及主要支撑构件进行强度评估。

2.5.2 屈服强度

2.5.2.1 船体结构的屈服强度衡准见表 2.5.2.1。其中板单元应力取单元中心处的中面应力。

船体结构屈服强度衡准

表 2.5.2.1

船体结构	工况	许用应力		
		纵向应力	剪切应力	相当应力
船底板，内底板	LC1、LC2、LC3、 LC4	210/K	—	220/K
船底纵桁		210/K	—	220/K
实肋板		—	110/K	220/K
其他纵向构件		175/K	110/K	220/K
横向结构	LC5、LC6	—	$0.35R_{eH}$	$0.75R_{eH}$

注 1. LC3 和 LC4 工况仅校核 0.4L-0.6L 之间的船体结构。
注 2. K 为材料系数。

2.5.3 支柱强度

2.5.3.1 支柱强度衡准见表 2.5.3.1。

支柱强度衡准

表 2.5.3.1

支柱	衡准
受拉	$\sigma_{axial} \leq 0.6R_{eH}$ $\sigma_{axial} + \sigma_{bending} \leq 0.84R_{eH}$ $\tau \leq 0.47R_{eH}$
受压	$\sigma_{axial} \leq 0.8\sigma_{crit}$ $\sigma_{axial}/\sigma_{crit} + \sigma_{bending}/R_{eH} \leq 0.84$ $\tau \leq 0.47R_{eH}$
<p>注 1. σ_{crit} 为支柱的临界屈曲应力，根据下式计算：</p> $\sigma_{crit} = \frac{R_{eH}}{1 + \frac{R_{eH}}{E} \left(\frac{L_E}{\pi r}\right)^2}$ <p>式中：L_E ——支柱有效长度，取 0.8 倍支柱长度； r ——支柱的最小弯曲惯性半径。</p> <p>注 2. $\sigma_{bending}$ 为支柱内的最大弯曲应力，根据下式计算：</p> $\sigma_{bending} = \sigma_{extreme} - \sigma_{axial} $ <p>式中：$\sigma_{extreme}$ ——支柱剖面上最大/最小应力，在剖面边缘得到； σ_{axial} ——支柱轴向应力，在剖面形心处得到。</p>	

2.5.4 屈曲强度

2.5.4.1 除本节有规定外，屈曲评估应按照《钢规》第 9 篇第 1 部分第 8 章的有关要求进行。屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta \leq \eta_{all}$$

式中： η ——最大屈曲利用因子；

η_{all} ——许用屈曲利用因子，见表 2.5.4.4。

2.5.4.2 评估构件能力时，应扣除标准减薄厚度。各部位的标准减薄厚度见表 2.5.4.2。

标准减薄厚度

表 2.5.4.2

构件	减薄厚度 (mm)
液舱周界与船体外板	1.0
露天甲板	0.5
其他结构	0.0

2.5.4.3 考虑腐蚀影响，根据下式对工作应力进行修正：

$$\sigma_A = \frac{\sigma t}{t - 0.5t_r} \quad N/mm^2$$

式中： σ_A ——修正后的工作应力；

σ ——计算得到的工作应力；

t ——模型中的板厚；

t_r ——标准减薄厚度，见表 2.5.4.2。

2.5.4.4 屈曲评估的许用屈曲利用因子见表 2.5.4.4。

许用屈曲利用因子

表 2.5.4.4

构件	工况	屈曲利用因子
纵向结构	LC1、LC2、LC3、LC4	1.0
横向结构		0.9
横向结构	LC5、LC6	1.0

2.5.4.5 邮轮船体结构的加筋/非加筋板格的屈曲评估方法见表 2.5.4.5。

船体结构的板格类型及评估方法

表 2.5.4.5

序号	结构	评估方法
1	船体外板 内底 纵舱壁及其下船底纵桁 甲板	SP-A
2	船底纵桁	SP-B
3	上层建筑侧壁及纵壁 上层建筑甲板	SP-A

4	甲板纵桁，纵舱壁水平桁腹板	UP-B
5	开口周围不规则板格	UP-B
6	横舱壁其下实肋板	SP-A
7	实肋板	SP-B
8	甲板强横梁，横舱壁桁材腹板	UP-B
9	舱壁、实肋板等处不规则板格	UP-B
注：板格长度一般取纵骨或加强筋跨距，宽度取纵骨或加强筋间距。		

第 3 章 细化分析

3.1 一般规定

3.1.1 目标

3.1.1.1 在第 2 章整船直接计算的基础上,按本章要求对船体结构中的应力集中区域进行细化分析。

3.1.2 评估区域

3.1.2.1 应对以下区域进行细化分析:

- (1) 上层建筑端肘板;
- (2) 舷侧门窗开孔;
- (3) 舷侧大开口,如登乘平台的入口;
- (4) 其他高应力集中区域。

3.1.2.2 对上述各细化区域均应进行屈服强度评估,对开口角隅还应进行疲劳强度评估。

3.1.3 分析方法

3.1.3.1 一般采用独立的细化模型对 3.1.2.1 规定的评估区域进行评估,将整船得到的位移作为边界条件施加到独立模型上,并将其它载荷映射到独立模型上,即“子模型法”。也可在整船模型中对局部结构进行细化分析,即“嵌入法”。

3.2 细化模型

3.2.1 子模型范围及边界

3.2.1.1 子模型应有足够的范围,不会因为边界条件引起评估区域的应力失真。一般应将模型边界设置在强框架、纵桁及甲板位置处。

3.2.1.2 子模型的网格在边界处应与整船模型匹配,以准确传递整船分析的位移结果。

3.2.2 单元及网格要求

3.2.2.1 在细化模型中采用板单元模拟船体板、主要构件的腹板,采用梁单元模拟次要构件及主要构件的面板。目标细化区域 500 毫米以内的次要构件,应采用板单元进行模拟。

3.2.2.2 细化区域的单元网格尺寸应满足如下要求:

(1) 单元尺度应能模拟船体结构的局部几何形状，从而反应局部应力集中情况，给出准确的应力，一般可采用 50mmX50mm 的网格；

(2) 沿开孔角隅边缘，每 90 度圆心角内的单元数量不应小于 8 个；

(3) 为了得到开口角隅的边缘应力，应沿板厚边缘建立虚拟梁单元，单元的高度与板厚相等，其横截面积为 1mm^2 。

图 3.2.2.2 (1) 给出了门窗开口区域的模型示例。图 3.2.2.2 (2) 为开口角隅处哑元的示例。

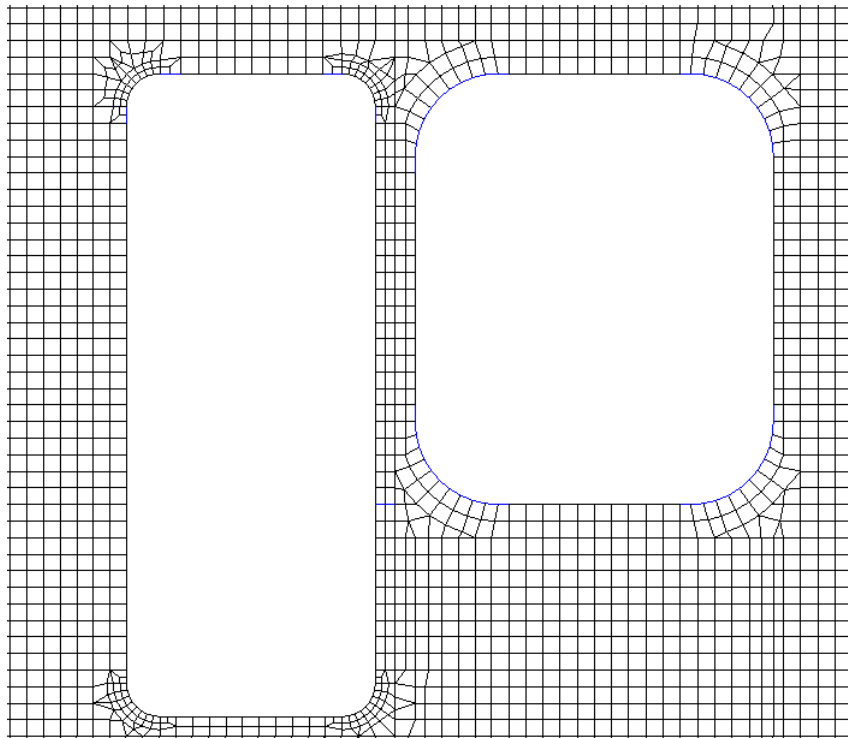


图 3.2.2.2 (1) 门窗开口的细化网格



图 3.2.2.2 (2) 开口角隅处的虚拟梁单元

3.3 工况与载荷

3.3.1 工况

3.3.1.1 细化分析工况与整船分析工况相同，应包括应力传递函数工况，并在进行强度评估前根据 2.4.1 方法对应力进行修正。

3.3.2 载荷

3.3.2.1 当采用子模型方法时，将整船分析的位移结果施加到子模型边界上以传递总体载荷，并施加子模型范围内的局部载荷，如压力、重力和惯性力。

3.4 强度衡准

3.4.1 屈服强度

3.4.1.1 细化区域的应力衡准见表 3.4.1.1。

许用应力

表 3.4.1.1

位置	应力成分	许用应力
细化区域	板单元相当应力	1.35R _{eH}
注：当单元小于 50mmx50mm 时，采用相当范围内所包含单元的平均应力		

3.4.2 疲劳强度

3.4.2.1 对于开口角隅，采用虚拟梁单元的轴向应力，按下式计算应力范围， S_D ：

$$S_D = \text{MAX} \{ |\sigma_{LC1} - \sigma_{LC2}|, |\sigma_{LC3} - \sigma_{LC4}|, |\sigma_{LC5} - \sigma_{LC6}| \}$$

式中： $\sigma_{LC1} \sim \sigma_{LC6}$ ——目标单元在各工况下的轴向应力。

3.4.2.2 对于应力范围进行如下修正：

$$S'_D = f_m f_t f_c S_D$$

式中： $f_m = \frac{1200}{965 + R_{eH}}$ ；

f_t ——板厚修正系数，计算方法见《船体结构疲劳强度指南》第3章3.3.3；

f_c ——腐蚀修正系数，取1.05。

3.4.2.3 疲劳损伤按下式计算：

$$D_{TOTAL} = \frac{N_D \alpha}{K} \frac{S_D'^m}{(\ln N_L)^{m/\xi}} \mu_k \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

式中： N_D ——船舶在 20 年营运期间的载荷循环总次数，取 0.65×10^8 ；

α ——船舶在航系数，取 0.85；

N_L ——载荷谱回复周期的循环次数，取为 10^8 ；

K ——S-N 曲线参数，见表 3.4.2.3；

S_D' ——修正后的工作应力范围，N/mm²；根据 3.4.2.2 计算；

ξ ——Weibull 分布形状参数，按下式计算：

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

其中： L ——船长，m；

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

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

$$f = 1 \quad \text{当 } D < z \text{ 时；}$$

当计算点在横舱壁上时， $f = 0.92$ ；

D ——型深，m；

d_1 ——计算工况的吃水，m；

z ——计算点距基线的高度，m。

$$\mu_k = 1.0 - \frac{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi_k}, \nu_k\right) - \nu_k^{-\frac{\nabla m}{\xi_k}} \gamma\left(1 + \frac{m + \nabla m}{\xi_k}, \nu_k\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi_k}\right)}$$

$$\nu_k = \left(\frac{S_q}{S_{D(k)}}\right)^{\xi_k} \ln N_L$$

m ——S-N 曲线反斜率，见表 3.4.2.3；

∇m ——S-N 曲线两段反斜率差，见表 3.4.2.3；

$\gamma(x, \nu)$ ——不完全 GAMMA 函数值，应按下式计算：

$$\gamma(x, v) = \int_0^v u^{x-1} e^{-u} du$$

Γ ——完全 GAMMA 函数值，应按下式计算：

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} u^{x-1} e^{-u} du$$

S_q ——S-N 曲线二线段的交点处的应力范围值，见表 3.4.2.3；

S-N 曲线参数

表 3.4.2.3

S-N 曲线	K	S_q	m	∇m
C	3.464×10^{12}	70.2305	3	2
D	1.520×10^{12}	53.3680	3	2

3.4.2.4 疲劳强度应满足：

$$D_{TOTAL} \leq 1$$

如果设计疲劳寿命超过20年，则疲劳强度应满足：

$$D_{TOTAL} \leq 20 / FL$$

式中：FL ——设计疲劳寿命，年，取值范围：25，30，35，40。