



中国船级社

# 邮轮异形结构直接计算指南

**2025**

2025年4月1日生效

北京

# 说明

现代邮轮上，大量采用了类似于陆地建筑的结构，这些不同于常规船舶结构的异形结构满足特色需求、功能需求和艺术设计需求。但是海洋环境的特殊性导致异形结构载荷可能大于陆上，船体结构的变形对异形结构连接产生影响，异形结构会对船舶运动有响应，而异形结构本身没有固定的形式。针对这些问题，通过对邮轮异形结构类型、结构特点、载荷特性进行分析，并开展了陆地建筑规范适用性研究，以及考虑不同类型结构间相互响应，编制了《邮轮异形结构直接计算指南》。

本指南给出了邮轮异形结构直接计算评估要求。主要评估局部设计载荷和/或总体设计载荷的作用下邮轮异形结构强度，主要技术要点包括：

1.对固连在邮轮上的钢质网格结构（含网架结构、网壳结构和桁架结构等）和相连的船体结构，给出其强度评估方法，包括屈服和整体稳定性评估。

2.给出固连在邮轮上的铝合金网格结构和相连的船体结构使用阶段时的强度评估方法，包括屈服和整体稳定性评估。

3.给出邮轮大型娱乐设施支撑结构的强度评估方法，包括屈服、屈曲评估。

对网格结构局部细化和网格结构连接节点，给出了局部结构细化有限元分析的要求和方法。

# 目录

<b>第 1 章 通则</b> .....	<b>2</b>
1.1 一般规定 .....	2
1.2 符号及定义 .....	2
<b>第 2 章 钢质网格结构强度直接计算</b> .....	<b>4</b>
2.1 一般要求 .....	4
2.2 有限元建模 .....	4
2.3 计算工况与载荷 .....	5
2.4 边界条件 .....	8
2.5 强度衡准 .....	9
2.6 网壳的稳定性计算 .....	10
<b>第 3 章 铝合金网格结构强度直接计算</b> .....	<b>12</b>
3.1 一般要求 .....	12
3.2 材料性能 .....	12
3.3 强度衡准 .....	13
3.4 稳定性计算 .....	13
<b>第 4 章 邮轮大型娱乐设施支撑结构强度评估</b> .....	<b>14</b>
4.1 一般要求 .....	14
4.2 有限元建模 .....	14
4.3 计算载荷 .....	14
4.4 边界条件 .....	14
4.5 强度衡准 .....	15
<b>第 5 章 结构细化分析</b> .....	<b>16</b>
5.1 一般要求 .....	16
5.2 网格结构局部细化分析 .....	16
5.3 网格结构连接节点分析 .....	17

# 第 1 章 通则

## 1.1 一般规定

1.1.1 本指南给出了异形结构直接计算评估要求。异形结构系指不同于常规船舶结构形式或布置的新颖结构，包括但不限于非常规横骨架式、纵骨架式和混合骨架式结构，或非连续、非平面布置等结构，如钢质空间网格结构和铝合金空间网格结构（含网架结构、曲面网壳结构和立体桁架结构），以及大型娱乐设施的支撑结构。

1.1.2 本指南适用于局部设计载荷和/或总体设计载荷的作用下邮轮异形结构强度的评估。

1.1.3 不同于本指南要求的计算方法、评定标准，如能提供相应的试验、理论依据、使用经验或公认标准，并经 CCS 同意，可以作为替代和等效方法。

1.1.4 本指南中有限元模型基于结构的建造尺寸。

## 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 空间网格结构：按一定规律布置的杆件、构件通过节点连接而构成的空间结构，包括网架、曲面型网壳以及立体桁架等。

1.2.3 网架结构：按一定规律布置的杆件通过节点连接而形成的平板型或微曲面型空间杆系结构，网架结构可采用双层或多层形式。典型网架结构如下 1.2.3 (a) ~ (c) 示图。

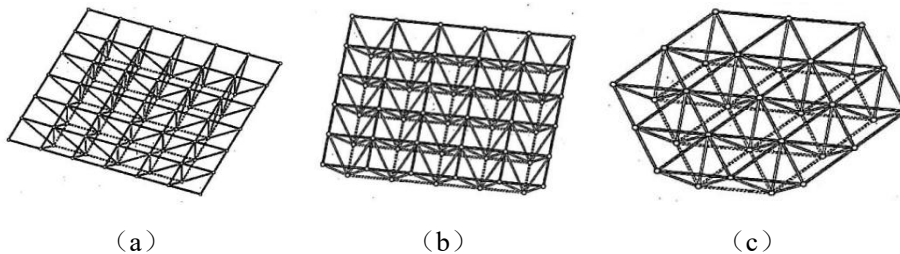


图 1.2.3 网架结构示意图

1.2.4 曲面网壳结构：按一定规律布置的杆件通过节点连接而形成的曲面状空间杆系或梁系结构，可采用单层或双层形式，也可采用局部双层形式。包括球面、圆柱面、双曲抛物面、椭圆抛物面等曲面形式，或各种组合曲面形式。典型网壳结构如下 1.2.4 (a) ~ (d) 示图。

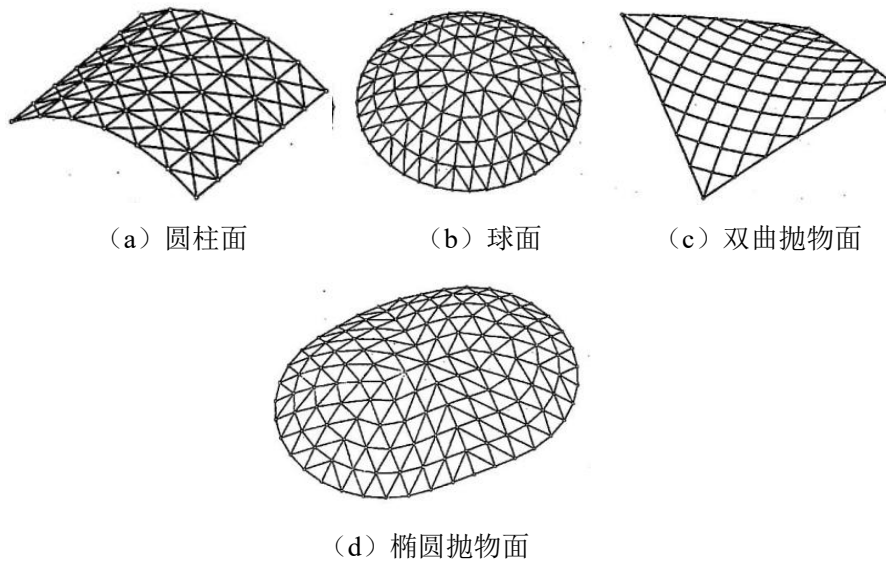


图 1.2.4 曲面网壳结构示意图

1.2.5 立体桁架结构：由上弦杆、腹杆与下弦杆构成的横截面为三角形或四边形的格构式桁架。上弦杆、下弦杆指的是桁架上、下外围的杆件，桁架上弦杆和下弦杆之间的杆件称为腹杆。立体桁架可采用直线或曲线形式。

1.2.6 相当应力(von Mises 应力) $\sigma_e$ ，应按下式计算：

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

式中： $\sigma_x$ ——单元  $x$  方向的应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$\sigma_y$ ——单元  $y$  方向的应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$\tau_{xy}$ ——单元  $xy$  平面的剪应力， $\text{N/mm}^2$ 。

1.2.7 上层建筑有效度：可定义为上层建筑实际应力与线性假定应力的比值，具体参见《邮轮局部结构直接计算指南》1.2.4。

## 第 2 章 钢质网格结构强度直接计算

### 2.1 一般要求

2.1.1 本章给出了固连在邮轮上的钢质网格结构的强度评估要求，且钢质网格结构作为船体结构的一部分。包括屈服强度计算和整体稳定性计算。

2.1.2 空间网格结构屈服强度评估的应力和位移可按弹性力学理论计算，网壳结构的整体稳定性计算应考虑结构的非线性影响。

2.1.3 网架、双层网壳和立体桁架可采用空间杆系有限元法进行计算，单层网壳应采用空间梁系有限元法进行计算。

### 2.2 有限元建模

2.2.1 分析网架结构和双层网壳，可假定节点为铰接，杆件只承受轴向力。分析立体管桁架时，当杆件的节点间长度与截面高度（或直径）之比不小于 12（主管）和 24（支管）时，也可假定为铰接。分析单层网壳时，应假定节点为刚性，杆件除承受轴向力外，还承受弯矩、扭矩、剪力等。

2.2.2 网格结构模型范围可根据实际布置情况予以确定，包括整个网格结构，以及网格结构所在的甲板结构及向下延伸一层甲板、横向至左右两舷、前后延伸 1/2 个网格结构区域长度或至相邻横舱壁。

2.2.3 单元和有限元网格应满足下列要求：

（1）船体板及主要支撑构件的腹板采用板单元模拟，骨材及主要支撑构件的面板采用梁单元模拟；

（2）模型一般可采用纵骨间距大小的有限元网格尺寸；

（3）板单元的长宽比通常应不超过 3。模型中应尽可能减少使用三角形板单元；在可能产生高应力或高应力梯度的区域内，板单元的长宽比应尽可能接近 1，并应避免使用三角形单元。

（4）一般地，网架、双层网壳和立体桁架结构采用杆单元，单层网壳结构采用梁单元。

（5）网格结构与周边连接结构之间的连接节点自由度及其关联情况应根据实际的连接形式和受力特点进行合理模拟。

## 2.3 计算工况与载荷

### 2.3.1 设计载荷

- (1) 船体梁载荷；
- (2) 局部设计载荷。

### 2.3.2 船体梁载荷

- (1) 施加船体梁载荷时需考虑表 2.3.2 所列载荷工况。

载荷工况 表 2.3.2

工况	描述
1	最大垂向弯矩工况
2	最小垂向弯矩工况

(2) 当不进行整船有限元分析时，船体梁载荷可通过在模型端面中和轴与剖面中心线交点上施加垂向弯矩来实现。垂向弯矩按如下方法计算：

- 1) 通过总纵强度计算，在许用垂向静水弯矩和垂向波浪弯矩联合作用下得到模型各纵向构件上的弯曲应力。计算中，当网格结构位于上层建筑时，上层建筑有效度取 80%；当网格结构位于主船体内时，上层建筑有效度取 50%。
- 2) 将各个纵向构件上总纵弯曲力（总纵弯曲力为总纵弯曲应力与对应构件面积之积）对该横剖面中和轴的力矩进行积分获得网格结构横剖面的垂向弯矩。
- (3) 当进行整船有限元分析时，网格结构采用子模型法，船体梁载荷可通过在边界节点施加强迫位移。

### 2.3.3 局部设计载荷

- (1) 永久载荷

- 1) 结构自重

结构自重的标准值可按结构构件的设计尺寸与材料单位体积的自重计算确定。

- 2) 网格结构覆盖材料自重

网格结构表面不参与有限元建模，但其表面覆盖的玻璃或者其它材料应按实际材料特性进行计算自重，并加载于有限元模型上。

- (2) 可变载荷

- 1) 网格表面活动载荷

网格的表面，一般不上人，表面活动载荷标准值常取为  $q=0.5 \text{ kN/m}^2$ 。

- 2) 风载荷

垂直于网格结构表面上的风载荷标准值，应按下列规定确定：

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad \text{kN/m}^2$$

式中：  $w_k$  ——风载荷标准值，  $\text{kN/m}^2$ ；

$\beta_z$  ——高度  $z$  处的风振系数；

$\mu_s$  ——风载荷体型系数；

$\mu_z$  ——风压高度变化系数；

$w_0$  ——基本风压，  $\text{kN/m}^2$ 。

其中  $\beta_z$ 、 $\mu_s$ 、 $\mu_z$  和  $w_0$  参照《建筑结构荷载规范》GB50009-2012 选取，当无航线风载荷数据时，按邮轮停靠港口城市中设计载荷最大的城市数据选取。通常大型结构应进行风洞试验模拟，较柔结构应注意风振。

### 3) 雪载荷

网格结构水平投影面上的雪载荷标准值，应按下列规定确定：

$$s_k = \mu_r s_0 \quad \text{kN/m}^2$$

式中：  $s_k$  ——雪载荷标准值，  $\text{kN/m}^2$ ；

$\mu_r$  ——网格结构积雪分布系数；

$s_0$  ——基本雪压，  $\text{kN/m}^2$ 。

其中  $\mu_r$ 、 $s_0$  参照《建筑结构荷载规范》GB50009-2012 选取，当无航线雪载荷数据时，按邮轮停靠港口城市中设计载荷最大的城市数据选取。

### 4) 由船舶运动引起的惯性载荷

网格结构应考虑由船舶运动引起的惯性载荷，船舶运动加速度见《邮轮局部结构直接计算指南》2.3.2 (6)、(7)、(8)。

### 5) 其他载荷

若网格结构还承受其他载荷，也应予以考虑。如当网格结构位于船首较低位置时，航行时应考虑首部上浪载荷。

## 2.3.4 计算工况

### (1) 航行工况

应考虑船体梁载荷、永久载荷、风载荷、雪载荷和船舶惯性载荷等的组合，载荷组合  $S_d$  按照下式要求施加。

$$S_d = \gamma_G \sum_{j=1}^2 G_j + \gamma_{Q1} \gamma_{L1} Q_1 + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \gamma_{Li} \psi_i Q_i$$

式中： $\gamma_G$ ——永久荷载的分项系数，按照表 2.3.4（1）要求选取；

$\gamma_{Q_i}$ ——第  $i$  个可变荷载  $Q_i$  的分项系数，其中  $\gamma_{Q_1}$  为工况中主导的可变荷载  $Q_1$  的分项系数，按照表 2.3.4（1）要求选取；

$\gamma_{L_i}$ ——第  $i$  个可变荷载考虑使用年限的调整系数，取为 1.0，其中  $\gamma_{L_1}$  为工况中主导的可变荷载  $Q_1$  考虑设计使用年限的调整系数；

$\psi_i$ ——第  $i$  个可变荷载  $Q_i$  的组合系数，除风荷载取 0.6 外，其它可变荷载取 0.7；

$G_j$ ——第  $j$  个永久荷载；

$Q_i$ ——第  $i$  个可变荷载，此处为除网架表面活动荷载外的其它可变荷载；

$Q_1$ ——工况中主导的可变荷载，可以依次以各可变荷载作为  $Q_1$ 。

荷载的分项系数 表 2.3.4（1）

荷载类型	分项系数
船体梁荷载	1.0
永久荷载	1.3
风荷载	1.5
雪荷载	1.5
船舶惯性荷载	1.0
其他荷载	1.0 或 1.3 <sup>(1)</sup>

（1）注：其他荷载的分项系数选取，应根据荷载的确定性程度来选取，如果荷载确定，组合系数取 1.0，否则取为 1.3。

## （2）港口工况

应考虑永久荷载、活动荷载、风荷载和雪荷载等的组合，其中活动荷载和雪荷载不同时发生。荷载组合  $S_d$  按照下式要求施加。

$$S_d = \gamma_G \sum_{j=1}^2 G_j + \gamma_{Q_1} \gamma_{L_1} Q_1 + \sum_{i=2}^n \gamma_{Q_i} \gamma_{L_i} \psi_i Q_i$$

式中： $\gamma_G$ ——永久荷载的分项系数，按照表 2.3.4（2）要求选取；

$\gamma_{Q_i}$ ——第  $i$  个可变荷载  $Q_i$  的分项系数，其中  $\gamma_{Q_1}$  为工况中主导的可变荷载  $Q_1$  的分项系数，按照表 2.3.4（2）要求选取；

$\gamma_{L_i}$ ——第  $i$  个可变荷载考虑使用年限的调整系数，取为 1.0，其中  $\gamma_{L_1}$  为工况中主导的可变荷载  $Q_1$  考虑设计使用年限的调整系数；

$\psi_i$ ——第  $i$  个可变载荷  $Q_i$  的组合系数，除风载荷取 0.6 外，其它可变载荷取 0.7；

$G_j$ ——第  $j$  个永久载荷；

$Q_i$ ——第  $i$  个可变载荷；

$Q_1$ ——工况中主导的可变载荷，可以依次以各可变载荷作为  $Q_1$ ；

载荷的分项系数 表 2.3.4 (2)

载荷类型	组合系数
船体梁载荷	1.0
永久载荷	1.3
活动载荷	1.5
风载荷	1.5
雪载荷	1.5
其他载荷	1.0 或 1.3 <sup>(1)</sup>

(1) 注：其他载荷的组合系数选取，应根据载荷的确定性程度来选取，如果载荷确定，组合系数取 1.0，否则取为 1.3。

## 2.4 边界条件

2.4.1 模型的边界条件如下：

(1) 当不进行整船有限元分析时，网格结构模型两端的连接情况见表 2.4.1 (1) 和表 2.4.1 (2)。两端剖面纵向构件的节点与剖面的独立点刚性连接，可在模型后端面的独立点上施加船体梁载荷。独立点为两端剖面中和轴与剖面中心线的交点，刚性连接的相关性见表 2.4.1 (1)。两端剖面的独立点固定情况见表 2.4.1 (2)。

两端刚性连接情况 表 2.4.1 (1)

模型两端纵向连续构件节点	位移			转角		
	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
所有纵向构件	RL	RL	RL	-	-	-
RL 表示与独立点刚性连接的相关联的自由度						

独立点的支撑情况 表 2.4.1 (2)

独立点	位移			转角		
	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
后端面独立点	固定	-	-	-	-	-

前端面独立点	固定	固定	固定	固定	固定	固定
--------	----	----	----	----	----	----

(2) 当进行整船有限元计算分析时,在网格结构模型边界节点上施加整船有限元计算结果中对应的节点位移作为网格结构的边界条件。

## 2.5 强度衡准

2.5.1 应对网格结构和相邻的甲板结构、上层建筑侧壁及纵壁结构、舱壁结构进行屈服强度评估。

2.5.2 船体结构屈服强度衡准见表 2.5.2 (1), 网格结构的屈服强度衡准见表 2.5.2 (2)。

船体结构屈服强度衡准 表 2.5.2 (1)

船体结构	载荷类型	许用应力 (N/mm <sup>2</sup> )		
		纵向应力	剪切应力	相当应力
甲板横梁和甲板纵桁 腹板	仅局部载荷	-	0.35R <sub>eH</sub>	0.75 R <sub>eH</sub>
甲板横梁和甲板纵桁 面板	仅局部载荷	0.52 R <sub>eH</sub>	-	-
甲板纵桁	局部载荷+船体 梁载荷	200/K	-	220/K
其他构件		-	110/K	220/K

注: K 为材料系数, R<sub>eH</sub> 为材料屈服应力, N/mm<sup>2</sup>。

网格结构屈服强度衡准 表 2.5.2 (2)

网格结构	许用应力 (N/mm <sup>2</sup> )	
	轴向应力	最大组合应力 <sup>(1)</sup>
网架、双层网壳、 立体桁架	R <sub>eH</sub> /1.1	-
单层网壳	-	R <sub>eH</sub> /1.1

(1) 注: 最大组合应力=杆件轴向应力+弯曲正应力, R<sub>eH</sub> 为材料屈服应力, N/mm<sup>2</sup>。

2.5.3 空间网格结构在永久载荷和可变载荷作用下的最大挠度值应不超过表 2.5.3 中的许用挠度值。

空间网格结构的许用挠度值 表 2.5.3

结构体系	挠度值
网架、双层网壳、 立体桁架	l/250

单层网壳	$l/400$
------	---------

$l$ : 空间网格结构的跨距。

## 2.6 网壳的稳定性计算

2.6.1 单层网壳以及厚度小于跨度 1/50 的双层网壳均应进行稳定性计算。

2.6.2 进行网壳稳定性计算时，模型边界上应施加整船有限元计算结果中对应的节点位移。

2.6.3 网壳的稳定性可按考虑几何非线性的有限元法（即载荷-位移全过程分析）进行计算，分析中可假定材料为弹性，也可考虑材料的弹塑性。对于大型和形状复杂的网壳结构宜采用考虑材料弹塑性的全过程分析方法。全过程分析的迭代方程可采用下式：

$$K_t \Delta U^{(i)} = F_{t+\Delta t} - N_{t+\Delta t}^{(i-1)}$$

式中： $K_t$ —— $t$ 时刻结构的切线刚度矩阵；

$\Delta U^{(i)}$ ——当前位移的迭代增量；

$F_{t+\Delta t}$ —— $t+\Delta t$ 时刻外部所施加的节点载荷向量；

$N_{t+\Delta t}^{(i-1)}$ —— $t+\Delta t$ 时刻相应的杆件节点内力向量。

2.6.4 球面网壳的全过程分析可按满跨均布载荷进行，圆柱面网壳和椭圆抛物面网壳除应考虑满跨均布载荷外，尚应考虑半跨活载分布的情况。

2.6.5 进行网壳全过程分析时应考虑初始几何缺陷（即初始曲面形状的安装偏差）的影响，初始几何缺陷分布可采用结构的最不利或最可能发生的屈曲模态，其缺陷最大计算值可按网壳跨度的 1/300 取值。

2.6.6 按照本节 2.6.3 至 2.6.5 进行网壳全过程分析求得的第一个临界点处的载荷值，可作为网壳的稳定极限承载能力。网壳稳定容许承载力  $Q_{UD}$ （载荷取标准值）应等于网壳稳定极限承载力除以安全系数  $K$ 。当按弹塑性全过程分析时，安全系数可取为 2.0；当按弹性全过程分析、且为单层球面网壳、柱面网壳和椭圆抛物面网壳时，安全系数  $K$  可取为 4.2。

2.6.7 对于承载能力极限状态，应按载荷的基本组合，并从下列载荷组合中取最不利的工况，来满足以下衡准：

$$\gamma_G \sum_{j=1}^2 G_j + \gamma_{Q_1} \gamma_{L_1} Q_1 + \sum_{i=2}^n \gamma_{Q_i} \gamma_{L_i} \psi_i Q_i \leq Q_{UD}$$

式中： $\gamma_G$ ——永久载荷的分项系数，按照表 2.6.7 要求选取；

$\gamma_{Q_i}$ ——第  $i$  个可变载荷  $Q_i$  的分项系数，其中  $\gamma_{Q_1}$  为工况中主导的可变载荷  $Q_1$  的分项系数，按照表 2.6.7 要求选取；

$\gamma_{L_i}$ ——第 i 个可变荷载考虑使用年限的调整系数，取为 1.0，其中  $\gamma_{L1}$  为工况中主导的可变荷载  $Q_1$  考虑设计使用年限的调整系数；

$\psi_i$ ——第 i 个可变荷载  $Q_i$  组合系数，除风荷载取 0.6 外，其它可变荷载取 0.7；

$G_j$ ——第 j 个永久荷载；

$Q_i$ ——可变荷载，此处为除网架表面活动荷载外的其它可变荷载；

$Q_1$ ——工况中主导的可变荷载，此处为除网架表面活动荷载外的其它可变荷载，可以依次以各可变荷载作为  $Q_1$ ；

$Q_{UD}$ ——网壳结构的稳定容许承载力，按 2.6.6 确定。

荷载的分项系数 表 2.6.7

荷载类型	分项系数
永久荷载	1.3
风荷载	1.5
雪荷载	1.5
船舶惯性荷载	1.0
其他荷载	1.0 或 1.3 <sup>(1)</sup>

(1) 注：其他荷载的分项系数选取，应根据荷载的确定性程度来选取，如果荷载确定，组合系数取 1.0，否则取为 1.3。

## 第3章 铝合金网格结构强度直接计算

### 3.1 一般要求

3.1.1 本章适用于固连在邮轮上的铝合金网格结构的强度评估。

3.1.2 除本章规定外，铝合金网格结构强度应满足第2章的有关要求。

3.1.3 铝合金空间网格结构应进行屈服强度和整体稳定性评估。

3.1.4 铝合金空间网格结构宜进行防连续倒塌设计，重要结构可进行防连续倒塌计算，有关规定可参见《建筑结构抗倒塌设计规范》（CECS 392:2014）。

### 3.2 材料性能

3.2.1 铝合金材料应满足 CCS《材料与焊接规范》的有关要求。

3.2.2 铝合金材料的弹塑性应力—应变关系按如下规定进行计算。

(1) 铝合金的弹塑性应力—应变关系应按下列式计算：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{R_{p0.2}}\right)^n$$

式中： $\varepsilon$ ——应变；

$E$ ——铝合金材料的弹性模量，按 CCS《钢规》第2篇第1章 1.3.5 取值；

$\sigma$ ——应力，N/mm<sup>2</sup>；

$R_{p0.2}$ ——铝合金最小可保证的屈服应力，N/mm<sup>2</sup>，见 CCS《钢规》第2篇第1章 1.3.5 取值。

$n$ ——硬化系数，取  $0.1 R_{p0.2}$ 。

(2) 受力分析中，应根据常用材料应力-应变曲线图（图 3.2.2）进行计算。

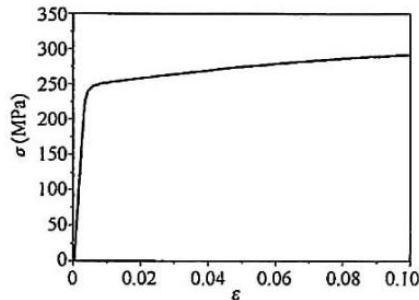


图 3.2.2 材料应力—应变曲线示意图

### 3.3 强度衡准

3.3.1 应对网格结构和相邻的甲板结构、上层建筑侧壁及纵壁结构、舱壁结构进行屈服强度评估。

3.3.2 船体结构屈服强度衡准见第 2 节表 2.5.2(1)，网格结构的屈服强度衡准见表 3.3.2。

铝合金网格结构屈服强度衡准 表 3.3.2

网格结构	许用应力 (N/mm <sup>2</sup> )	
	轴向应力	最大组合应力
网架、双层网壳、 立体桁架	$\sigma_{sw}/1.1$ <sup>(1)</sup>	-
单层网壳	-	$\sigma_{sw}/1.1$ <sup>(1)</sup>

注：(1)  $\sigma_{sw}$  (N/mm<sup>2</sup>): 对于铝材，取  $R'_{lim}$ ，见 CCS《钢规》第 2 篇第 1 章 1.3.5 取值。

3.3.3 空间网格结构在永久载荷和可变载荷作用下的最大挠度值应不超过表 3.3.3 中的许用挠度值。

铝合金空间网格结构的容许挠度值 表 3.3.3

结构体系	挠度值
网架、双层网壳、 立体桁架	$l/250$
单层网壳	$l/400$

$l$ : 空间网格结构的跨距

### 3.4 稳定性计算

3.4.1 单层或双层网壳结构应进行整体稳定性计算。

3.4.2 在进行网壳结构稳定性分析时，可采用材料弹性几何非线性有限元法。

3.4.3 进行铝合金网壳结构稳定性计算时，模型边界上应施加整船有限元计算结果中对应的节点位移。

3.4.4 进行网壳全过程分析时应考虑初始几何缺陷（即初始曲面形状的安装偏差）的影响。几何缺陷的模式可根据一致模态法确定，缺陷最大计算值可取最小跨度的 1/300 取值。

3.4.5 网壳稳定容许承载力  $Q_{UD}$ （载荷取标准值）应等于网壳稳定极限承载力除以安全系数  $K$ 。同时计入几何非线性和材料非线性的影响时，铝合金单层网壳结构的整体稳定系数  $K$  应大于 2.4。

3.4.6 对于承载能力极限状态，应按载荷的基本组合，并从所有载荷组合中选取最不利的工况，来满足相应的衡准要求，衡准要求同 2.6.7。

## 第 4 章 邮轮大型娱乐设施支撑结构强度评估

### 4.1 一般要求

4.1.1 本章适用于邮轮大型娱乐设施支撑结构的强度评估。

4.1.2 在进行支撑结构和基座的强度校核时，应尽可能采用三维有限元模型进行分析，本章强度衡准适用于三维有限元分析模型。

4.1.3 如用交叉梁系或板梁组合模型，则模型简化应合理，计算结果应提交 CCS 审核。

4.1.4 本章强度评估基于线弹性理论。

### 4.2 有限元建模

4.2.1 单元和有限元网格应满足下列要求：

(1) 网格应足够精细以尽可能真实地表示结构几何形状。

(2) 船体板及主要支撑构件的腹板采用板单元模拟，骨材及主要支撑构件的面板采用梁单元模拟；

(3) 板单元的长宽比通常应不超过 3。模型中应尽可能减少使用三角形板单元；在可能产生高应力或高应力梯度的区域内，板单元的长宽比应尽可能接近 1，并应避免使用三角形单元。

4.2.2 采用局部立体结构模型(以下简称局部模型)，以基座有效作用平面矩形( $a \times b$ )形心为中心，向四周分别扩展至少一倍的该矩形相对应的长、宽距离( $3a \times 3b$ )。垂向从基座面扩展至甲板之下的第一个平台甲板或至少  $D/4$  处( $D$  为型深)。如按上述方法框取的模型边界上未设置结构的主要支撑构件，则模型应再延伸直至边界落在结构的主要支撑构件上。若边界条件或模型范围的大小对中心区域的计算结果较为敏感，则应再适当扩大局部模型的取用范围，以不影响中心区域的计算结果为原则。

### 4.3 计算载荷

4.3.1 评估基于设备供应商提供的设计载荷值进行，但校核的载荷应不小于 120%安全工作负荷，对于承受起升载荷的娱乐设施，不得小于 160%安全工作负荷。

### 4.4 边界条件

4.4.1 如按上述有限元建模方法框取的模型边界，边界条件可考虑简支或固支。

## 4.5 强度衡准

4.5.1 承受起升载荷的娱乐设施支撑结构衡准如下。

(1) 各种工况下, 承受起升载荷的娱乐设施支撑结构和基座的计算应力应不大于表 4.5.1 中的许用值。

许用应力 表 4.5.1

单元类型	正应力	剪应力	相当应力
交叉梁系	$0.67R_{eH}$	$0.39R_{eH}$	
板元			$0.8R_{eH}$

注:  $R_{eH}$  为材料屈服应力,  $N/mm^2$ 。

(2) 对于承受起升载荷的娱乐设施, 同时还应按 CCS《钢规》第 2 篇第 1 章第 5 节 1.5.9 规定进行支撑结构屈曲强度评估, 构件的标准减薄厚度取 1.0mm, 最小屈曲安全因子取 1.0。

4.5.2 其它娱乐设施支撑结构许用应力见表 4.5.2。

许用应力 表 4.5.2

单元类型	正应力	剪应力	相当应力
交叉梁系	$1.00R_{eH}$	$0.6R_{eH}$	
板元			$1.00R_{eH}$

注:  $R_{eH}$  为材料屈服应力,  $N/mm^2$ 。

## 第 5 章 结构细化分析

### 5.1 一般要求

5.1.1 本章给出了网格结构局部细化和网格结构连接节点有限元分析的要求和方法。

5.1.2 网格结构局部细化模型或网格连接节点可以嵌套在网格结构有限元模型中，也可以采用子模型/独立模型进行分析。

### 5.2 网格结构局部细化分析

5.2.1 网格结构局部细化分析应至少包含如下区域：

- (1) 按第 2、3 章要求计算的应力大于 75%许用应力的结构非连续区域；
- (2) 按第 2、3 章要求计算的应力大于 85%许用应力的开孔区域；
- (3) 结构模型不足以反映结构连接处局部形状细节的区域。

5.2.2 细化模型结构建模要求：

- (1) 细化模型应使关注区域的应力不会受到边界条件的显著影响。
- (2) 细化区域应以板单元建模，避免三角形单元和畸变单元的使用，单元长宽比应接近 1，细化网格尺寸应不大于  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ，且细化模型保持良好的结构过渡。

5.2.3 模型的边界条件和载荷按如下规定：

- (1) 模型如果采用独立子模型，在其边界上应施加网格结构模型计算给出的位移。
- (2) 细化的局部模型中，局部区域承受的局部设计载荷应施加于模型上。

5.2.4 船体结构的屈服强度衡准见表 5.2.4。

船体结构屈服强度衡准

表 5.2.4

船体结构	载荷类型	许用应力 (N/mm <sup>2</sup> )			
		平均正应力 <sup>①</sup>	平均剪切应力 <sup>①</sup>	平均相当应力 <sup>①</sup>	相当应力
甲板横梁腹板	仅局部载荷	-	0.35R <sub>eH</sub>	0.75 R <sub>eH</sub>	R <sub>eH</sub>
甲板纵桁腹板	仅局部载荷	-	0.35R <sub>eH</sub>	0.75 R <sub>eH</sub>	-
甲板横梁和甲板纵桁面板	仅局部载荷	0.52 R <sub>eH</sub>	-	-	-
甲板纵桁	局部载荷+船体梁载荷	200/K	-	220/K	1.25 R <sub>eH</sub>
其他构件		-	110/K	220/K	1.35 R <sub>eH</sub>

注①：平均应力为下图 5.2.4 中 a、b、c 所示区域内的单元平均应力，但不得对不连续性结构进行平均。

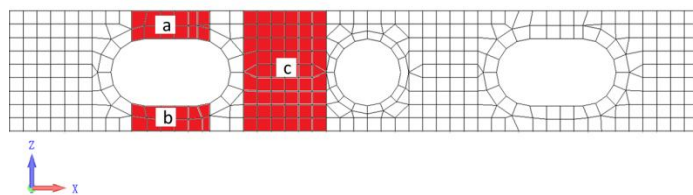


图 5.2.4 开孔平均应力区域

### 5.3 网格结构连接节点分析

5.3.1 网格结构中的主连接节点，应以合适的单元网格尺寸尽量模拟出该处结构。如果构件厚度有变化或者使用铸钢件，可以用实体单元来模拟，如果厚度没有变化，诸如桁架管件，可以用壳单元模拟。网格结构连接节点模型可参见下图 5.3.1 所示。

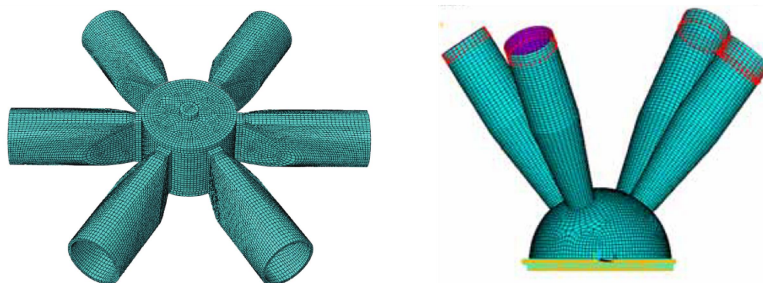


图 5.3.1 网格结构连接节点模型

5.3.2 网格结构节点模型，可以施加边界强迫位移，也可合理的限制刚体位移。在合理限制刚体位移时，载荷施加力和弯矩。载荷施加示意图 5.3.2 所示。

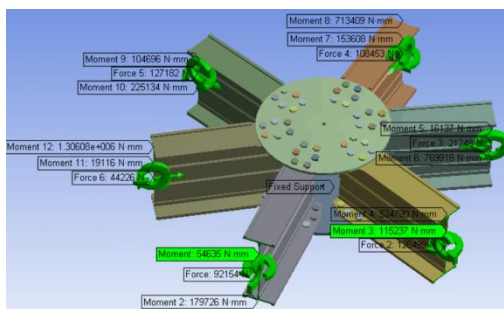


图 5.3.2 载荷施加示意图

5.3.3 网格结构节点许用应力，应使用单元的相当应力进行校核，衡准见表 5.3.3。

网格结构屈服强度衡准

表 5.3.3

网格结构	相当应力 (N/mm <sup>2</sup> )
钢质网格	$R_{eH}$
铝合金网格	$\sigma_{sw}^{(1)}$

注：(1)  $\sigma_{sw}$  (N/mm<sup>2</sup>): 对于铝材，取  $R'_{lim}$ ，见 CCS《钢规》第 2 篇第 1 章 1.3.5 取值。 $R_{eH}$  为材料屈服应力，N/mm<sup>2</sup>。