



中国船级社

基于非线性有限元方法的邮轮船体梁极限
强度评估指南
2025

2025 年 4 月 1 日生效

北京

说明

为保证船体结构以及船上人员的安全，需要对邮轮的船体梁极限强度特别是碰撞/搁浅后的残存强度进行评估，以确定结构设计的安全余量。由于邮轮具有多层连续甲板的结构特点，与其他船型相比，甲板之间的剪切强度相对不足，船体梁在弯曲过程中由于剪切变形的存在，不满足平截面假定；此外，邮轮上层建筑各层甲板参与总纵强度的有效性难以确定。基于理想单元的 Smith 方法不适用于邮轮船体梁极限承载能力的计算评估，因此有必要开展适用于大型邮轮极限强度评估的一般性方法和分析工具研究。

非线性有限元分析是目前最先进的结构分析方法之一，可以模拟材料的非线性以及屈曲大变形的失效模式，因此该方法被认为是目前评估船体梁极限强度有效和合适的工具。虽然非线性有限元是一种强大的数值分析工具，但应用不当可能会产生不可靠且不一致的结果。CCS 对船体梁极限强度非线性有限元方法进行了研究，具体包括：

- （1）研究 Smith 方法在船体梁极限强度计算方面的理论基础及其应用于邮轮的局限性；
- （2）研究船体梁极限强度相关的影响因素，包括侧向载荷、有限元模型范围、单元类型、网格尺寸、边界条件、初始缺陷等；
- （3）研究基于舱段或整船真实边界条件的局部非线性子模型方法，在减小非线性计算模型网格数量的同时准确考虑计算区域以外结构的边界效应，准确计及邮轮上层建筑纵向构件的有效性。

根据上述研究成果制定了该指南，涵盖了使用非线性有限元分析的主要技术问题，给出了船体梁极限强度非线性有限元计算方法的详细规定和一般性的使用建议。该方法不仅适用于邮轮船体梁的极限强度计算，也适用于其他船型或局部板架结构的极限强度计算。

目录

第 1 章 通则	3
1.1 一般规定	3
1.2 符号及名词术语定义	3
1.3 适用范围	3
第 2 章 有限元建模及计算	5
2.1 一般规定	5
2.2 分析模型	6
2.3 单元类型	7
2.4 网格质量及大小	7
2.5 材料特性	8
2.6 加筋板的初始几何缺陷	8
2.7 载荷	11
2.8 边界条件	13
2.9 整体模型与局部模型的分析步骤	14
2.10 碰撞和搁浅损伤范围	15
2.11 极限承载能力的计算	17
第 3 章 船体梁极限强度校核	18
3.1 一般规定	18
3.2 船体梁极限强度衡准	18
3.3 船体梁残存强度衡准	18
附录 A: 非线性有限元方法及使用建议	19
A.1 一般规定	19
A.2 非线性有限元的载荷增量迭代求解	19
A.3 迭代算法的选取	19
A.4 非线性分析类型的选择	19
A.5 载荷工况与重启动分析技术	20

第 1 章 通则

1.1 一般规定

1.1.1 本指南提供了邮轮船体梁极限强度评估的非线性有限元方法，适用于评估完整的船体梁极限强度和破损后(碰撞/搁浅)船体梁的残存强度。一般性的规定和使用建议也适用于其他船型或局部板架结构的极限强度计算。

1.1.2 可采用基于一个横框架间距或舱段的局部模型进行船体梁极限强度和船体梁残存强度计算，采用局部模型时需要适当考虑分析模型范围之外的结构对分析结果的影响。

1.2 名词术语定义

1.2.1 结构非线性：有限元数值分析中离散结构的刚度用其刚度矩阵 K 来表征，当结构处于静力平衡时， K 将外部节点载荷矢量 f 与节点位移矢量 u 联系起来，可用公式表示为： $f=Ku$ 。当结构的刚度随载荷变化而变化时，该结构就被称为非线性结构。非线性的来源有材料非线性，边界非线性和几何非线性。

1.2.2 材料非线性：高应变时，材料发生屈服，部分应变不可恢复，载荷与响应呈非线性关系。

1.2.3 边界非线性：在分析过程中边界条件发生变化，例如撞击、接触等，即产生边界非线性问题。

1.2.4 几何非线性：几何非线性发生在梁和壳等具有大位移和大转角结构中，大变形使结构形状发生变化，从而引起所施加的载荷效应和结构刚度随结构瞬时几何形状而发生改变。

1.2.5 增量迭代求解：求解非线性方程组追踪平衡路径的有效方法为增量迭代法，该方法将总载荷分解为一系列较小的增量步，对于每个载荷增量，通过执行多次迭代，在数值公差范围内收敛找到相应载荷增量步的位移增量。通过载荷步中的一个或多个线性分析来近似施加载荷和节点位移之间的非线性关系。

1.2.6 载荷-位移曲线：在分析各种结构极限承载能力时，通常会绘制作用在结构上的主要载荷与适当选择的结构变形之间的关系，这类曲线通常称为载荷-位移/缩短($P-\Delta$)曲线。典型船体梁垂向弯矩与转角 θ 的 $P-\Delta$ 曲线如图 1.2.6 所示。

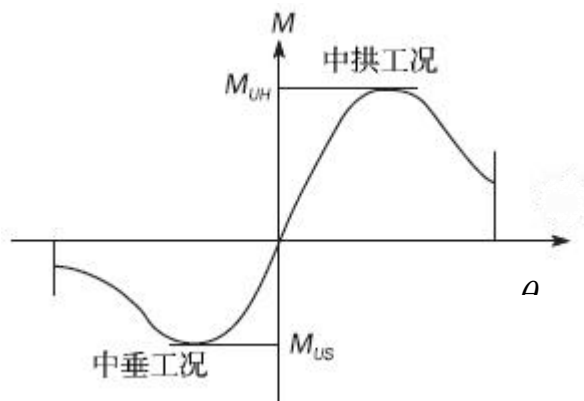


图 1.2.6 船体梁垂向弯矩-转角曲线

1.2.7 坐标系

本指南采用右手坐标系，规定如下：

- (1) X 方向为船体的纵向，向船首方向为正；
- (2) Y 方向为船体的横向，向左舷为正；
- (3) Z 方向为船体的垂向，向上为正；
- (4) 坐标原点定义为船舶中纵剖面、规范船长 L 尾端和基线的相交处。

1.3 应提交以下图纸和技术文件：

- (1) 所使用的图纸/资料及清单;
- (2) 分析计算报告以及必要的电子数据文件, 包括:
 - ① 所使用的通用有限元软件介绍;
 - ② 有限元结构模型及其相关属性的图形或详细描述, 包括坐标系、模型范围、单元类型、网格划分、节点数量、单元数量等;
 - ③ 材料特性、初始几何缺陷与边界条件的详细描述;
 - ④ 侧向载荷的详细描述(如有时);
 - ⑤ 船体梁构件失效顺序的详细描述;
 - ⑥ 碰撞和搁浅损伤范围假定的详细描述;
 - ⑦ 到达极限状态时和垮塌失效后的结构模型变形和应力云图(基于 *Von-Mises* 应力准则);
 - ⑧ 船体梁中部剖面的载荷-位移曲线, 应包含明显的载荷下降段。

第 2 章 有限元建模及计算

2.1 一般规定

2.1.1 船体梁极限强度非线性有限元方法应考虑以下因素：

- (1) 几何非线性特性；
- (2) 材料非线性特性；
- (3) 初始缺陷(板和加强筋的几何不平整度)；
- (4) 同步作用的载荷，应包括：
 - ① 舷外静水压力和海水动压力；
 - ② 船体梁剪力；
 - ③ 船体梁弯矩；
- (5) 边界条件；
- (6) 屈曲模式之间的相互影响；
- (7) 结构构件(如板、加强筋、桁材等)之间的相互作用；
- (8) 后屈曲能力；
- (9) 船体梁中受压过载导致的结构永久/屈曲破坏(双层底效应或类似情况)。

2.1.2 船体梁极限强度的评估基于船体构件的净尺寸，扣除的尺寸取 CCS《邮轮规范》第 2 章第 2 节表 2.2.7.2 规定值的 0.5 倍。

2.1.3 应按板和加强筋的中面尺寸建立有限元模型。如图 2.1.3 所示，加强筋尺寸的等效公式为：

$$\begin{aligned} h'_w &= h_w + t_p/2 + t_f/2 \\ b'_f &= b_f - t_w/2 \end{aligned}$$

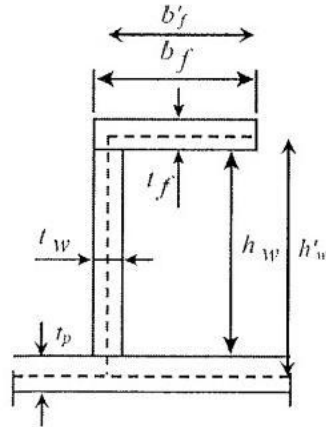


图 2.1.3 加强筋的等效尺寸

2.1.4 球扁钢可取为等效的剖面组合进行建模，如图 2.1.3 所示，

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

式中： h'_w 、 t'_w ——球扁钢的净高度和净厚度，mm，如图 2.1.4 所示；

α ——系数，取为：

$$\alpha = 1.1 + \frac{(120 - h'_w)^2}{3000}, \text{ 对于 } h'_w \leq 120$$

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

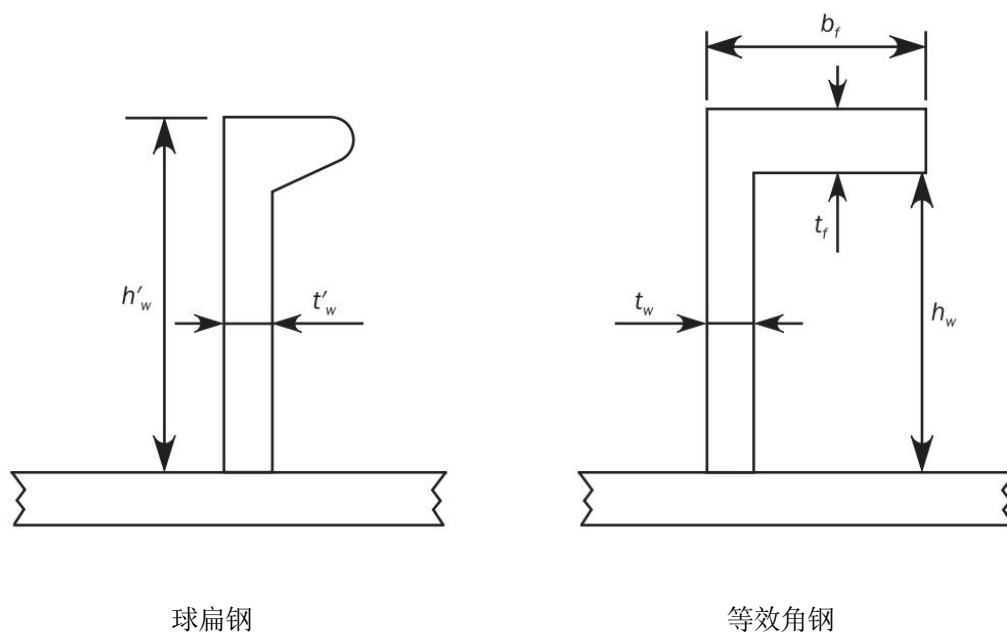


图 2.1.4 球扁钢的等效尺寸

2.2 分析模型

2.2.1 极限强度计算模型包括整体模型和局部模型。

2.2.2 整体模型采用线弹性分析，为局部计算模型提供边界条件。整体模型建议采用全船结构模型，如图 2.2.2 所示。如果船体结构从船底到最高层甲板之间的区域具有连续的横舱壁，整体模型的纵向也可取两个横舱壁之间（包括横舱壁），横向取整个船宽，垂向取外底板到最高层甲板之间的范围。

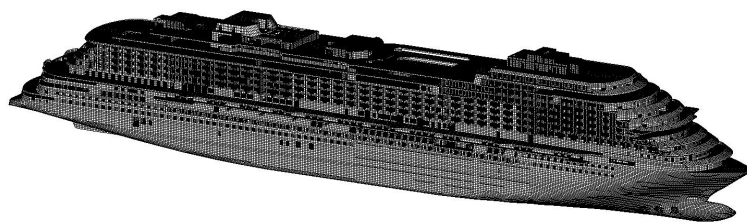


图 2.2.2 整体模型示例

2.2.3 局部模型为关注区域的非线性有限元分析模型：

（1）对于完整状态下的船体梁极限强度分析，局部模型的纵向范围至少取一个横向强框架间距（模型的前后端为横强框，前后端的横强框结构不必包含在局部模型中），横向范围取整个船宽，垂向取外底板到最高层甲板之间的范围，如图 2.2.3 所示。

（2）对于破损状态下的船体梁残存强度分析，局部模型的纵向范围至少覆盖破损区域，并向前后端各延伸一个强框架间距（模型的前后端为横强框，前后端的横强框结构不必包含在局部模型中），横向范围取整个船宽，垂向取外底板到最高层甲板之间的范围。

- (3) 局部模型应包括模型范围内的所有纵向连续构件、横向构件以及局部加强筋。
- (4) 可以根据结构和载荷的对称性，减小模型范围。例如结构模型左右舷对称，且载荷也是左右对称的，横向可选取中纵剖面至任意一舷的模型范围进行计算。

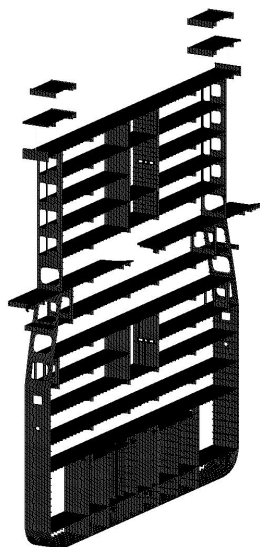


图 2.2.3 完整状态下船体梁极限强度分析局部模型示例

2.2.4 有限元模型应计及船体结构中的人孔和减轻孔。

- (1) 整体模型可通过扣除单元的形式模拟开孔，腹板上开孔高度小于一半的开孔可以不建。
- (2) 局部模型纵向构件上的人孔及连续减轻孔应按实际形状和尺寸建模。

2.3 单元类型

2.3.1 板和主要支撑构件应采用 4 节点壳单元。加强筋腹板采用 4 节点壳单元，加强筋的翼板和主要支撑构件腹板上的加强筋，可采用梁单元模拟。

2.4 网格质量及大小

2.4.1 整体线性分析模型的网格大小应满足下述要求：

- (1) 每相邻纵骨间一个单元。在纵向，单元长度不应大于 2 倍的纵骨间距且主要支撑构件间至少应有三个单元；
- (2) 平面横舱壁上每相邻骨材间一个单元；
- (3) 横向强框架、横撑和水平桁材上每相邻腹板加强筋之间一个单元；
- (4) 双层底纵桁、实肋板、横向强框架、垂向强框架以及横舱壁水平桁材沿其高度方向至少 3 个单元；
- (5) 单元的长宽比一般应小于 3。

2.4.2 局部非线性分析模型的网格大小应满足下述要求：

- (1) 板：两根相邻加强筋之间划分 6-8 个单元；
- (2) 加强筋腹板：腹板高度方向划分 3-6 个单元；
- (3) 加强筋翼板：如采用壳单元时，角钢和球扁钢的翼板宽度方向至少划分 1 个单元，T 型材的翼板宽度方向至少划分 2 个单元；
- (4) 主要支撑构件腹板：若腹板上有加强筋，加强筋间的腹板至少划分 3 个单元；若腹板上没有加强筋，腹板至少划分 6 个单元；
- (5) 主要支撑构件翼板：翼板宽度方向至少划分 4 个单元；
- (6) 按照 (1) - (5) 要求对细化分析模型进行网格划分，还应确保网格尺寸不大于 $50mm \times 50mm$ ；

2.4.3 局部非线性有限元分析的单元网格质量应满足下述要求：

- (1) 单元长宽比，单元最长边与最短边之比，接近 1；
- (2) 偏斜角，单元对边中线连线的夹角与直角的偏差，一般小于 30 度；
- (3) 翘曲角度，表示单元平面外扭曲的参数，一般小于 5 度；
- (4) 单元内角，一般大于 45 度，小于 135 度；
- (5) 雅可比行列式，表示单元与理想形状之间的偏差，一般大于 0.6；
- (6) 应尽量避免使用三角形单元。

2.5 材料特性

2.5.1 对于船体梁极限承载能力计算，推荐采用双线性和各向同性硬化的材料模型。材料的双线性应力-应变曲线如图 2.5.1 所示，具体参数如下：

- (1) 弹性模量 $E=206000 \text{ N/mm}^2$ ；
- (2) 屈服后模量 $ET=1000 \text{ N/mm}^2$ ；
- (3) 泊松比 $\nu=0.3$ ；
- (4) 屈服强度 ReH 。

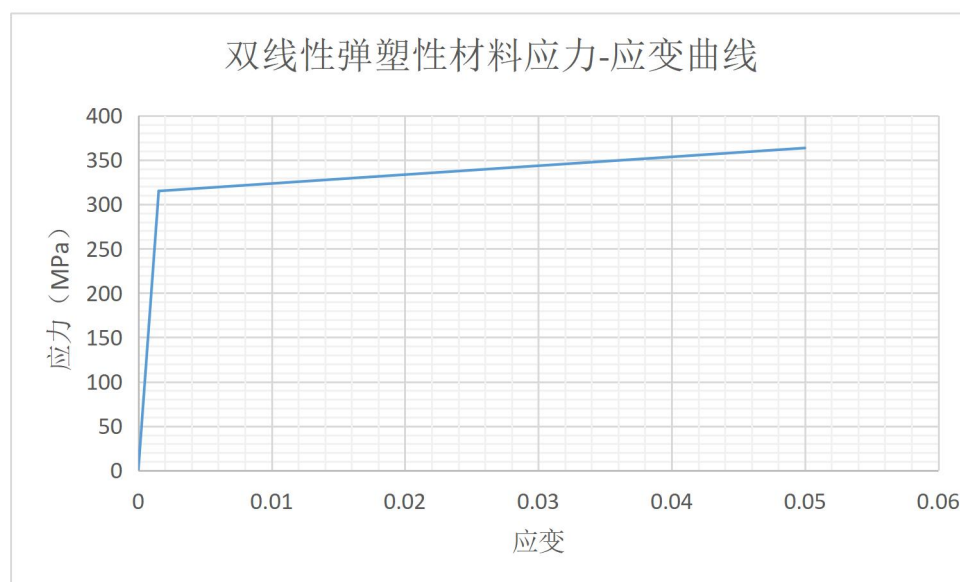


图 2.5.1 材料的应力应变曲线示意图

2.6 加筋板的初始几何缺陷

2.6.1 在船舶建造过程中会产生几何缺陷（如形状不均匀、偏心和局部缺陷）和残余应力等初始缺陷。对初始缺陷敏感的结构，初始缺陷的形状和大小会对结构的极限承载能力及其垮塌模式产生重大影响。典型加筋板及其几何参数如图 2.6.1 所示，其中：

- a ——强框架间距，mm；
- B ——加筋板宽度，mm；
- s ——纵骨材间距，mm；
- h_w ——腹板高度，mm。

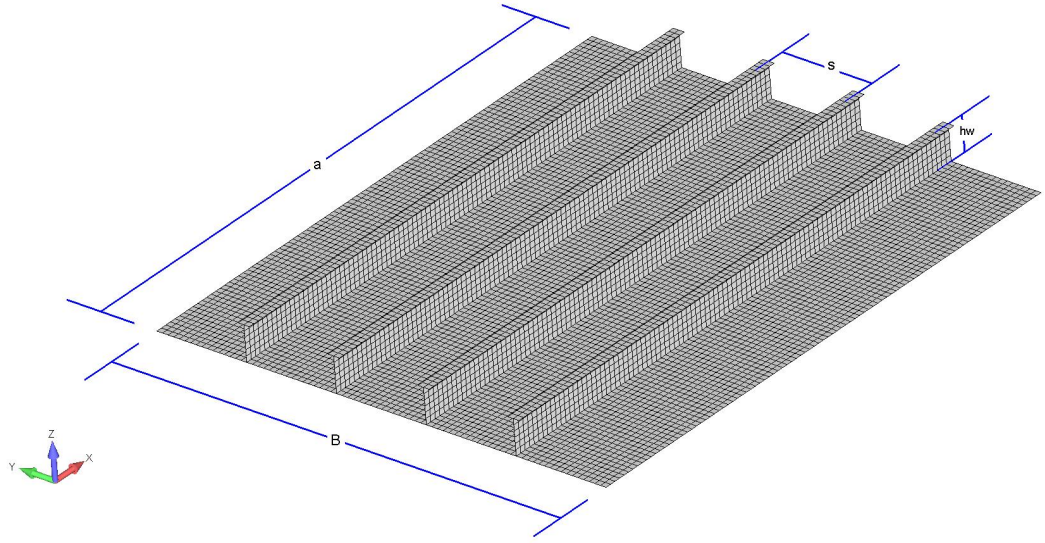


图 2.6.1 典型加筋板及其几何参数示意图

2.6.2 初始缺陷通常施加在结构中容易发生屈曲的部分。对于船体梁极限强度评估，中垂工况时应在甲板结构上施加初始缺陷；中拱工况时应在底部结构上施加初始缺陷。

2.6.3 初始缺陷仅施加在局部非线性模型上。

2.6.4 根据构件不同，初始缺陷包括以下不同层级：

- (1) 强框架间加筋板（板和加强筋）的整体缺陷；
- (2) 加强筋之间板的局部缺陷；
- (3) 加强筋腹板的局部缺陷；
- (4) 加强筋的侧倾缺陷。

2.6.5 通常可以采用以下不同方法来处理初始缺陷：

- (1) 将测量到的初始缺陷通过偏移节点的方式直接施加到有限元模型上，这是处理几何缺陷最准确的方法；
- (2) 根据屈曲特征值分析得到的屈曲模态线性叠加到有限元模型上，见 2.6.6；
- (3) 直接在有限元模型节点上施加初始缺陷，见 2.6.7。

2.6.6 屈曲模态叠加法首先执行线性屈曲特征值分析，按照一致模态法选取 2.6.4 中 4 种不同缺陷对应的屈曲模态，将整体屈曲模态和局部屈曲模态进行缩放和叠加，得到计算所需的初始缺陷。在屈曲模态计算时应施加相应的边界条件，以获得真实的屈曲模式。

2.6.7 直接施加初始缺陷的方法是基于三角函数的缺陷模式，通过偏移结构节点来描述初始缺陷。缺陷以板单元局部坐标下节点的 z 向位移给出。不同层级的初始缺陷描述见 2.6.4，并按以下公式计算。

- (1) 强框架间加筋板的整体缺陷，如图 2.6.7.1 所示：

$$W_{SP} = \frac{a}{1000} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{B}$$

- (2) 板的局部缺陷，如图 2.6.7.2 所示：

$$W_P = \frac{s}{200} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{s}$$

- (3) 加强筋腹板的局部缺陷，如图 2.6.7.3 所示：

$$W_{web} = \frac{h_w}{200} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{h_w}$$

(4) 加强筋侧倾缺陷, 如图 2.6.7.4 所示:

$$W_{Trip} = \frac{a}{1000 h_w} \sin \frac{\pi x}{a}$$

(5) 将上述 (1) - (4) 中的缺陷叠加, 得到加筋板的初始缺陷, 如图 2.6.7.5 所示。

上式中:

m ——板的屈曲模态数, 取满足式 $a/s \leq \sqrt{m(m+1)}$ 的最小整数;

x, y ——板的局部坐标值, x 为沿加筋板或加强筋纵向的坐标值, y 为沿加筋板横向或加强筋高度方向的坐标值。

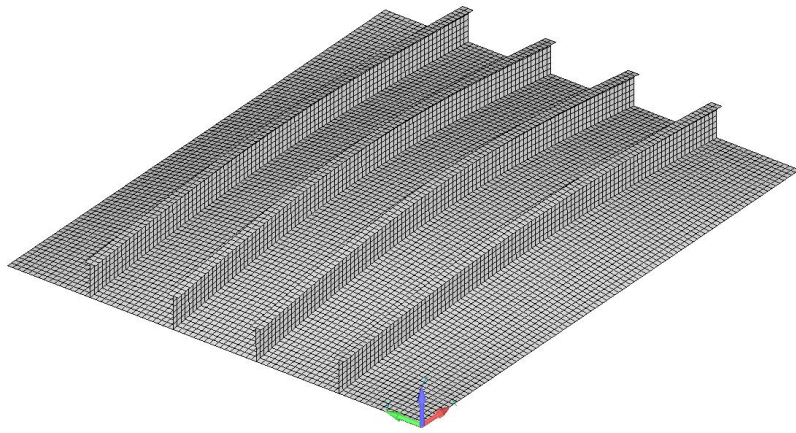


图 2.6.7.1 强框架间加筋板的整体缺陷示意

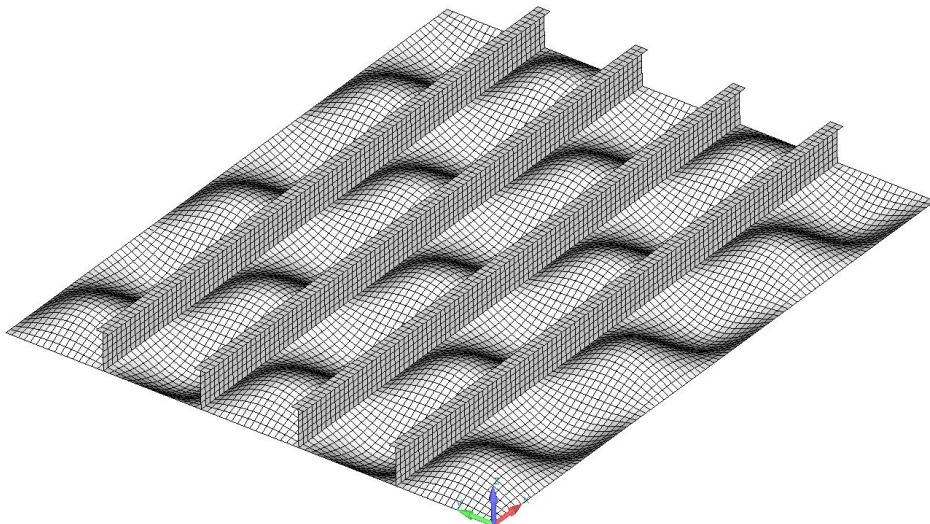


图 2.6.7.2 板的局部缺陷示意

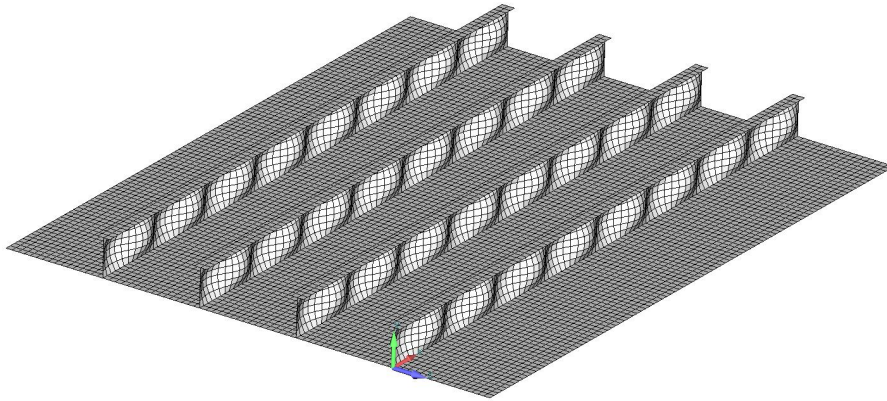


图 2.6.7.3 加强筋腹板的局部缺陷示意

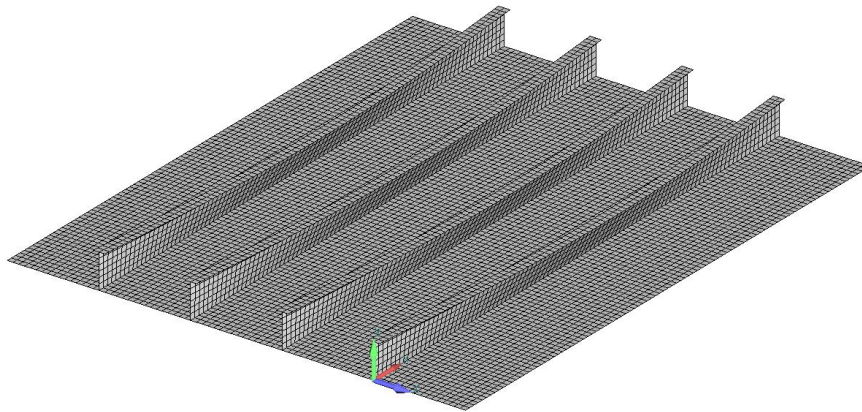


图 2.6.7.4 加强筋的侧倾缺陷示意

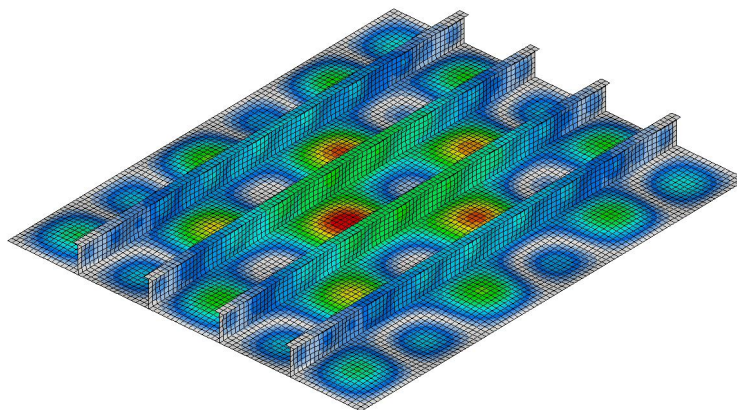


图 2.6.7.5 加筋板的综合缺陷示意

2.7 载荷

2.7.1 载荷包括总体载荷（船体梁载荷）和局部载荷。

2.7.2 总体载荷包括船体梁剪力和弯矩，通过在整体模型上施加波浪压力和分布节点力的形式，在非线性的目标区域达到船体梁载荷目标值。船体梁载荷可按照 CCS《邮轮整船直接计算指南》的方法施加，也可采用其他等效方法（如水动力载荷直接计算）施加。如果整体分析采用局部舱段模型，可参照 CCS《钢质海船入级规范》第 2 分册第 1 章第 5 节的有关要求施加局部载荷并进行

船体梁载荷调整。

2.7.3 在船体梁极限承载能力非线性计算过程中应逐步放大船体梁载荷，直至船体梁达到极限承载能力。

2.7.4 局部非线性模型上需要施加的局部载荷主要为舷外水压力，包括静水压力（见 2.7.5）和海水动压力（见 2.7.6）。局部模型上的局部载荷在非线性计算中保持不变，即局部载荷不随船体梁载荷逐步放大。

2.7.5 任一点的舷外静水压力 p_s ， kN/m^2 ，按下式计算，其分布见图 2.7.5。

$$\begin{aligned} p_s &= \rho g(T_{LC} - Z) \quad , \quad \text{当 } Z \leq T_{LC} \\ p_s &= 0 \quad , \quad \text{当 } Z > T_{LC} \end{aligned}$$

式中： T_{LC} ——所考虑工况的船中吃水， m

ρ ——海水密度，取 1.025t/m^3 ；

Z ——计算点至基线的垂向距离， m 。

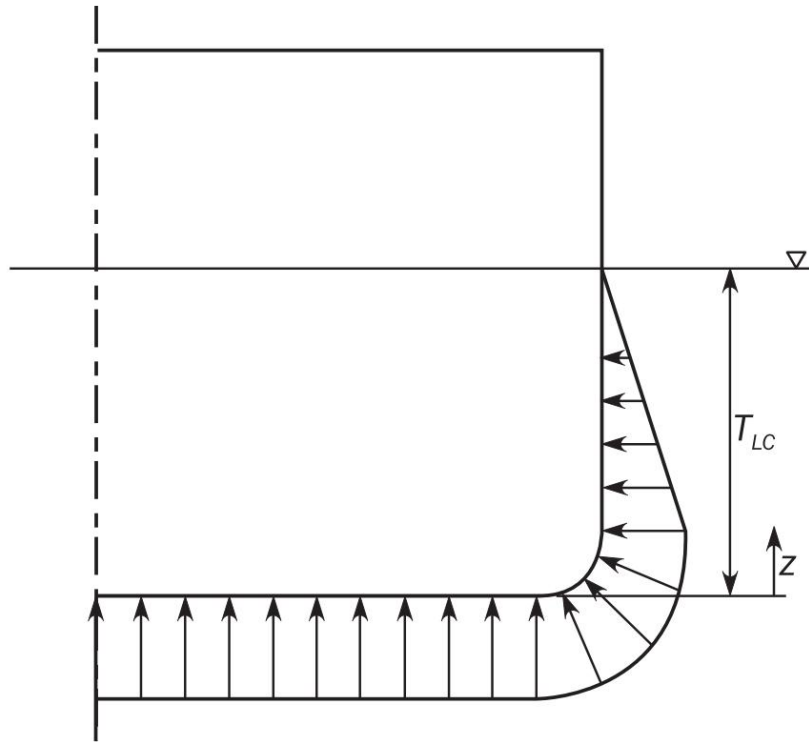


图 2.7.5 静水压力 p_s 示意图

2.7.6 海水动压力

（1）舷侧水线处的海水动压力 P_{WL} ， kN/m^2 ，应按下式计算：

$$P_{WL} = 2B^{0.66} + 3CC_b + 0.4T_{LC}$$

式中： B ——船宽， m ；

C_b ——方形系数；

C ——系数，见 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 2 章第 2 节 2.2.3.1。

（2）船底边缘处（艏部）的海水动压力 P_{BS} ， kN/m^2 ，应按下式计算：

$$P_{BS} = P_{WL} - 1.2T_{LC}$$

式中： P_{WL} 、 T_{LC} ——见本条（1）。

（3）船底中纵剖面处的海水动压力 P_{BC} ， kN/m^2 ，应按下式计算：

$$P_{BC} = 0.5(P_{WL} - 1.2T_{LC})$$

式中： P_{WL} 、 T_{LC} ——见本条（1）。

（4）水线面以下任意点的海水动压力 p_W ， kN/m^2 ，应按下式计算：

$$p_W = P_{WL} + (P_{BS} + P_{WL})(1 - \frac{Z}{T_{LC}}) + (P_{BC} - P_{BS})(1 - \frac{2Y}{B})$$

式中： P_{WL} ——按本条(1)计算；

P_{BS} ——按本条(2)计算；

P_{BC} ——按本条(3)计算；

B ——船宽，m；

T_{LC} ——计算工况下的吃水，m；

Y ——计算点至纵中剖面的横向距离，m；

Z ——计算点至基线的垂向距离，m。

（5）水线面以上舷侧外板上任意点的海水动压力 P_{hd} ， kN/m^2 ，应按下式计算：

$$P_{hd} = P_{WL} - 10(Z - T_{LC}) \quad , \quad \text{当 } T_{LC} < Z \leq T_{LC} + \frac{P_{WL}}{10} \text{ 时}$$

$$P_{hd} = 0 \quad , \quad \text{当 } T_{LC} + \frac{P_{WL}}{10} < Z \text{ 时}$$

式中： P_{WL} ——按本条（1）计算；

T_{LC} ——计算工况下的吃水，m；

Z ——计算点至基线的垂向距离，m。

（6）露天甲板的上浪载荷 P_{wdk} ， kN/m^2 ，应按下式计算，且不小于零：

$$P_{wdk} = P_{WL} - 10(Z_{dk} - T_{LC})$$

式中： P_{WL} ——按本条（1）计算；

T_{LC} ——计算工况下的吃水，m；

Z_{dk} ——露天甲板至基线的垂向距离，m。

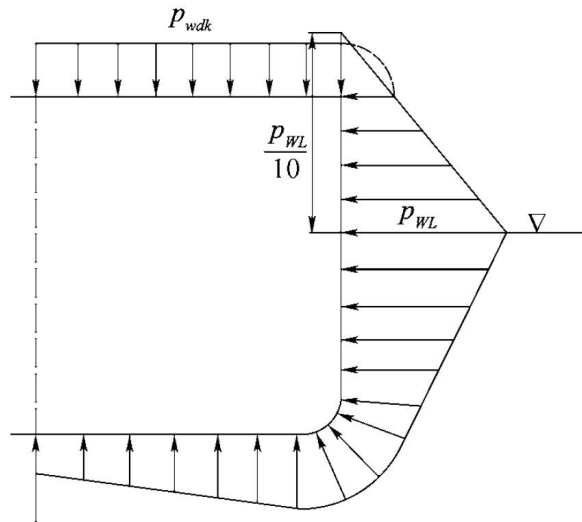


图 2.7.6 舷外海水动压力示意图

2.8 边界条件

2.8.1 对于整体分析采用整船有限元模型的情况，边界条件约束模型的刚体位移，参见图 2.8.1，具体如下：

（1）船底平板龙骨在船尾（图 2.8.1 中的点 1 位置）约束 Y 方向位移，即： $\delta_y = 0$ ；

- (2) 船首（图 2.8.1 中的点 2 位置）约束 3 个方向的线位移，即： $\delta_x = \delta_y = \delta_z = 0$ ；
- (3) 舱壁甲板与尾封板交线处两端节点（图 2.8.1 中的点 3 和点 4 位置）约束 Z 方向位移，即： $\delta_z = 0$ 。

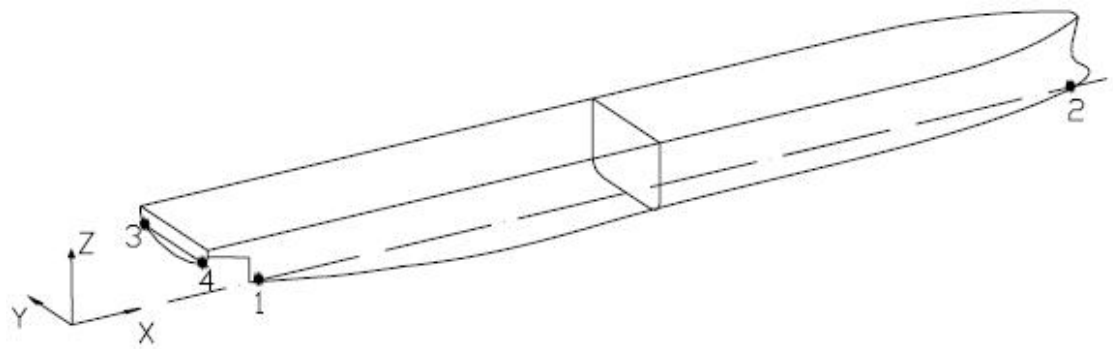


图 2.8.1 整船模型边界条件示意图

2.8.2 对于整体分析采用局部舱段模型的情况，采用如下边界条件，见表 2.8.2。

- (1) 在模型前后两端横剖面的中和轴交点处，分别建立独立点 A 和 B；
- (2) 两个独立点分别与模型前后端面节点的 x、y、z 方向位移以及绕 y 轴的转角以 MPC 单元建立关联；
- (3) 约束独立点 A 的 x、y 和 z 方向线位移以及绕 x 轴转角，约束独立点 B 的 y 和 z 方向线位移。

局部舱段有限元模型的边界条件 表2.8.2

位置	位移约束			转角约束		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
端面 A	Link	Link	Link	-	Link	-
端面 B	同端面 A					
独立点 A	Cons.	Cons.	Cons.	Cons.	-	-
独立点 B	-	Cons.	Cons.	-	-	-

注：① Cons. ——表示位移约束；

② Link——端面节点与独立点的自由度相关联。

2.9 整体模型与局部模型的分析步骤

- 2.9.1 对整体模型进行线性静力分析，将整体模型的刚度和载荷缩聚到整体模型与局部模型的交界面节点上，并将节点刚度和载荷施加到局部模型对应的节点上。
- 2.9.2 如果局部模型和整体模型在交界面上没有网格过渡，则在局部模型的交界面上采用约束方程，将边界上与整体模型不匹配的节点与相邻的匹配节点建立线性位移约束关系，确保交界面上节点位移的协调。
- 2.9.3 考虑材料非线性和几何非线性，计算局部非线性模型在总体载荷和局部载荷作用下的非线性响应。计算过程中保持局部载荷不变，逐步放大总体载荷，直至达到船体梁的极限承载能力。
- 2.9.4 整体模型与局部模型的计算分析流程如图 2.9.4 所示。

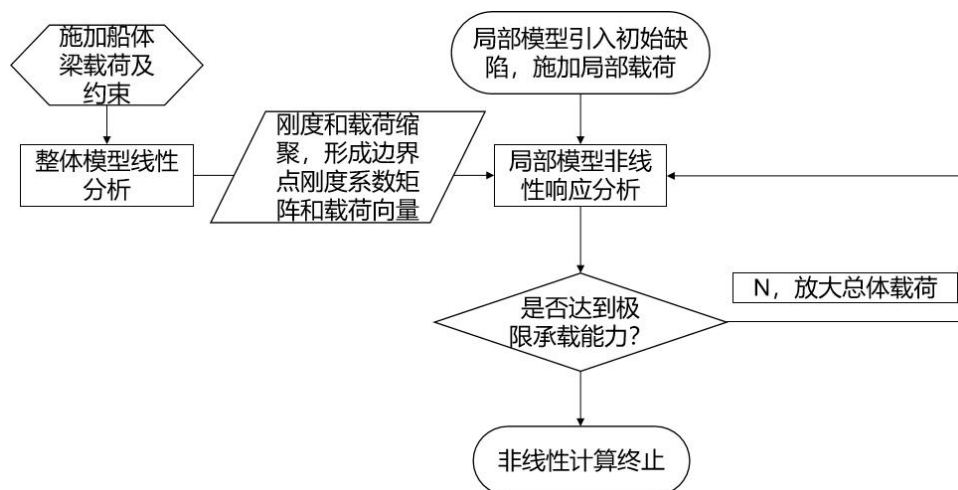


图 2.9.4 极限承载能力计算流程

2.10 碰撞和搁浅损伤范围

2.10.1 碰撞损伤的范围见 2.10.4 的规定，搁浅损伤的范围见 2.10.5 的规定。

2.10.2 当内底和内壳纵舱壁到船体外板的距离大于损伤范围时，在有限元模型中应保留内底板和内壳舱壁板及其附属的骨材。

2.10.3 当加强筋与板的连接处不在损伤范围之内时，在有限元模型中应保留加强筋单元。

2.10.4 对所考虑的横剖面进行碰撞损伤评估时，损伤发生在一个舷侧，损伤范围见表 2.10.4，示意图如图 2.10.4。

模型中的碰撞损伤范围

表 2.10.4

损伤范围	单壳	双壳
高度, h	$0.75D$	$0.60D$
深度, d	$B/16$	$B/16$
长度, l	强框架间距	强框架间距

注①:高度方向的损伤范围从强力甲板边线上缘下移 1m 处开始向下量取,邮轮强力甲板的定义见 CCS《邮轮规范》。

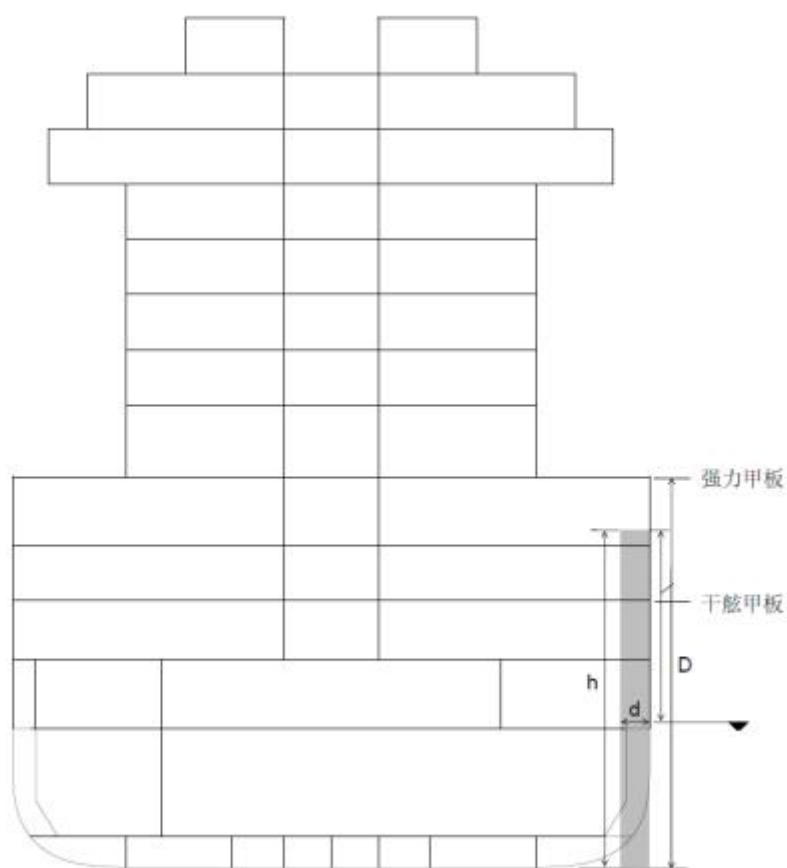


图 2.10.4 碰撞破损范围示意图

2.10.5 对所考虑的横剖面进行搁浅损伤评估时，损伤发生在船底最不利的横向位置，损伤范围见表 2.10.5，示意图如图 2.10.5 所示。

模型中的搁浅损伤范围 表 2.10.5

高度方向损伤范围， h	取 $B/20$ 和 $2m$ 的小者
宽度方向损伤范围， b	$0.60B$
长度方向损伤范围， l	强框架间距

注①：高度方向的损伤范围从船舶基线处量起。

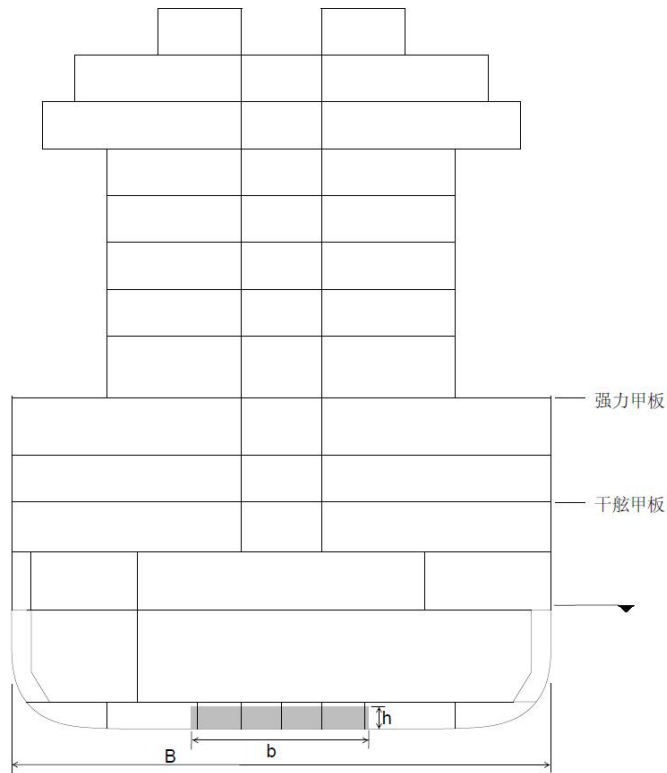


图 2.10.5 搁浅破损范围示意图

2.10.6 碰撞或搁浅的损伤范围也可由船东/设计单位提出，并取得 CCS 的同意。

2.11 极限承载能力的计算

2.11.1 局部模型施加侧向载荷，并保持不变，再逐步增加船体梁载荷，当载荷-位移曲线达到极值点，且受压结构发生明显的失效变形时，该极值点的弯矩即为船体梁的极限承载能力。

2.11.2 局部模型扣除 2.10 规定的碰撞或搁浅损伤范围的构件，按 2.11.1 计算出的极值点弯矩即为船体梁的残存极限承载能力。

第3章 船体梁极限强度校核

3.1 一般规定

3.1.1 本章提供了船体梁极限强度的评估方法，包括：

- (1) 航行工况完整状态下船体梁极限强度，见 3.2；
- (2) 航行工况破损后（碰撞/搁浅）船体梁残存强度，见 3.3。

3.1.2 船体梁极限承载能力系指船体梁垂向弯矩 M 与剖面转角 θ 曲线的弯矩极值 M_{UH} (中拱) 和 M_{US} (中垂)，见图 1.2.3。

3.2 船体梁极限强度衡准

3.2.1 船体梁任一横剖面处的极限承载能力应满足以下准则：

$$\gamma_S M_S + \gamma_W M_W \leq \frac{M_U}{\gamma_R}$$

式中：

M_S ——船体梁计算横剖面的许用静水弯矩，kN-m，见CCS《邮轮规范》第2章2.2.2；

M_W ——船体梁计算横剖面的波浪弯矩，kN-m，见CCS《邮轮规范》第2章2.2.3；

M_U ——船体梁计算横剖面的船体梁极限承载能力，kN-m，按本指南第2章的方法计算；

γ_S ——静水弯矩的分项安全因子， $\gamma_S = 1.0$ ；

γ_W ——波浪弯矩的分项安全因子， $\gamma_W = 1.2$ ；

γ_R ——船体梁弯曲极限能力的分项安全因子， $\gamma_R = \gamma_M \cdot \gamma_{DB}$ ；

γ_M ——计及材料、几何、强度不确定性的分项安全因子， $\gamma_M = 1.1$ ；

γ_{DB} ——计及双层底弯曲效应的分项安全因子，对于中拱工况，如局部计算模型中施加了海水压力， γ_{DB} 可取为1.0，否则 γ_{DB} 取1.1；对于中垂工况， γ_{DB} 取1.0。

3.3 船体梁残存强度衡准

3.3.1 碰撞/搁浅破损后船体梁任一横剖面处的残存极限承载能力应满足以下准则：

$$\gamma_{SD} M_S + \gamma_{WD} M_W \leq \frac{M_{UD}}{\gamma_{RD}}$$

式中：

M_S ——船体梁计算横剖面的许用静水弯矩，kN-m，见CCS《邮轮规范》第2章2.2.2；

M_W ——船体梁计算横剖面的波浪弯矩，kN-m，见CCS《邮轮规范》第2章2.2.3；

M_{UD} ——碰撞/搁浅破损后船体梁计算横剖面的残余极限承载能力，kN-m，按本指南第2章的规定扣除损伤范围内的构件后计算得到；

γ_{SD} ——破损后静水弯矩的分项安全因子， $\gamma_{SD} = 1.1$ ；

γ_{WD} ——破损后波浪弯矩的分项安全因子， $\gamma_{WD} = 0.67$ ；

γ_{RD} ——碰撞/搁浅破损后船体梁残存极限能力的分项安全因子， $\gamma_{RD} = 1.0$ 。

附录 A：非线性有限元方法及使用建议

A. 1 一般规定

A. 1.1 本附录对非线性有限元计算的相关方法和术语进行介绍，并提供一般性的指导和使用建议。

A. 1.2 随着有限元计算软件和数值分析技术的发展，可能会出现本附录未提及的非线性有限元分析技术和方法，本附录的目的并不是限制用户对新方法的使用。

A. 2 非线性有限元的载荷增量迭代求解

A. 2.1 非线性分析的主要特点是需要采用载荷增量和迭代来获得数值解。一般是将载荷（包括强迫位移载荷）分为一系列较小的增量，对于每一个载荷增量，求解器开始执行迭代求解，当解的误差小于设定公差时停止迭代，表明该载荷增量步的解是收敛的，并执行下一个载荷增量，直至完成所有载荷增量步的计算求解。

A. 2.2 载荷或时间步长的增量大小对非线性计算的效率和准确性具有显著影响。载荷增量大小和迭代次数是互相影响的，一般来说载荷增量越大，需要迭代的次数就越多。载荷增量过小会降低计算效率，且不会显著提高计算精度。由于迭代算法具有有限的收敛半径，过大的载荷增量可能会造成解的不收敛。非线性分析的主要问题是：如何从载荷增量和迭代的可选项中，选择最有效的方法。

A. 2.3 许多商业非线性有限元程序中的载荷增量由软件自动控制，用户仅需指定第一步载荷增量的大小。对于大多数非线性问题，采用自动载荷增量就足够了。手动载荷增量控制仅在极少数无法通过任何方式实现收敛的情况下使用。

A. 3 迭代算法的选取

A. 3.1 非线性问题常用的三种算法为：

- (1) 用于静态或动态隐式分析的牛顿-拉夫森 (N-R) 算法，见 A. 3. 2；
- (2) 改进的牛顿-拉夫森 (Quasi N-R) 算法，见 A. 3. 3；
- (3) 仅适用于静态分析的弧长法，见 A. 3. 4；

A. 3.2 牛顿-拉夫森算法是非线性有限元最流行的迭代方法，该方法具有二次收敛性。该算法在每次迭代时更新切线刚度，尽可能减小残差，确保解的快速收敛。

A. 3.3 改进的牛顿-拉夫森算法与牛顿-拉夫森算法类似，区别在于对载荷增量步内的所有迭代使用不变的切向刚度。因此不必在每次迭代时重新计算刚度，大大减少了计算工作量。然而，改进的 N-R 算法通常需要更多的迭代才能达到与 N-R 方法相当的精度，从而抵消了刚度矩阵保持不变所带来的效率增加。

A. 3.4 牛顿法是基于给定载荷增量，通过迭代得到收敛解。弧长算法在求解时将载荷增量视为附加未知数，同时求解载荷和位移。由于载荷增量是由系统的平衡解决定的，因此该方法可以用于求解结构后屈曲极限强度问题。

A. 3.5 针对不同的分析类型（静态非线性或动态非线性分析）、载荷控制类型（力或强制位移载荷）以及结构预期的非线性响应，需要选择合适的迭代方法。一般性的建议如下：

- (1) 当使用载荷控制的静态分析时，牛顿法通常无法找到载荷-位移曲线中的最高点，这是因为该算法依赖于正切刚度，在曲线的最高点处，系统的切向刚度变为 0 或负值，此时结构开始释放能量以保持平衡，而载荷还在增加，系统因找不到相应的解而中断计算。
- (2) 当使用位移控制的静态分析时，牛顿法可以追踪载荷-位移曲线中的最高点及其之后的解。
- (3) 弧长法适用于高度非线性不稳定问题的静态分析，由于载荷和位移是同时求解的，因此该方法能够追踪整个载荷-位移曲线。需要注意的是，如果载荷包括强迫位移，则弧长法不适用。

A. 4 非线性分析类型的选择

A. 4.1 对于船体梁极限承载能力的计算，可采用以下非线性分析类型：

(1) 静态分析，见 A. 4. 2；

(2) 准静态分析，见 A. 4. 3-A. 4. 5；

A. 4.2 在静态分析过程中，载荷或位移会逐渐施加，对于每一个载荷增量，使用迭代算法找到静态平衡方程的解，静态分析不考虑惯性效应。

A. 4.3 准静态分析是一种动态分析，该方法特别适合当静态分析无法收敛时使用，其目的是通过引入最小化的惯性效应，消除结构的不稳定行为，以获得载荷-位移曲线的极值和下降段。由于该方法引入了惯性效应，对于船体梁的极限承载能力计算，需要尽量减少惯性载荷的影响，通常采用以下方法来减小系统的惯性效应：

(1) 尽可能减小计算初始阶段和结束阶段的载荷变化率，可采用平滑阶跃函数来施加载荷或位移。平滑阶跃函数将载荷变化率从初始阶段由零逐渐增长到最大值，在分析结束阶段将载荷变化率又逐渐减小到零。典型的载荷平滑阶跃函数可取为如下形式，见图 A. 4. 3.

$$f(t) = 0.5[\sin(\pi t - \pi/2) + 1]$$

(2) 由于惯性效应与结构的质量成正比，可以通过改变材料密度的方式来减小系统惯性效应的影响，一般建议将材料密度减小一个数量级。随着单元质量的减小，显式分析的临界时间增量也随之减小，会增加显式分析的求解时间，但不会对隐式分析造成影响。

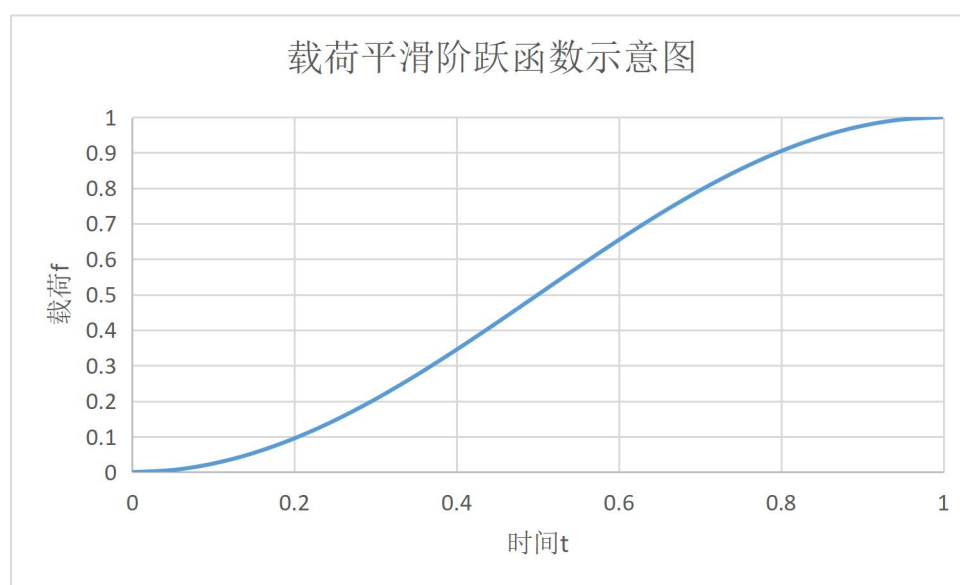


图 A.4.3 载荷平滑阶跃函数示意图

A. 4.4 应比较系统的动能和内能来验证准静态方法用于极限强度分析的合理性，一般而言，应保证动能始终低于应变能的 5%。

A. 4.5 除了检查系统动能和内应变能的占比之外，还可通过检查载荷-位移曲线线性部分的斜率是否与线性静态分析的结果是否一致来进一步验证准静态分析的合理性和准确性。

A. 5 载荷工况与重启动分析技术

A. 5.1 在线性分析中，不同载荷工况是相互独立的，代表不同的载荷条件。在非线性分析中，载荷工况是相互关联的，上一个载荷工况最终的几何变形和材料应变结果是下一个载荷工况的初始条件，因此非线性分析的结构响应、极限承载能力以及垮塌顺序取决于载荷路径或加载顺序。

A. 5.2 对于船体梁极限承载能力的计算评估，建议按照结构实际发生的顺序将载荷施加到结构上，即首先施加静态载荷（包括局部压力载荷、重力载荷和船体梁静态载荷），然后逐渐施加动态的环境载荷，直到达到目标或结构崩溃。

A. 5.3 由于非线性分析与载荷路径相关，计算过程中如果需要对某个载荷工况的计算参数进行修

改或者由于意外导致计算中断，则需要重新计算所有载荷工况，非常耗时。重启动分析技术能够将已完成的计算结果保存在外部介质上，后续可在已有分析结果的基础上继续分析（不同载荷工况、载荷增量以及收敛参数等）。对于计算时间比较长的计算模型，建议设置重启动。