



矿砂船船体结构强度直接计算指南

(~~2016~~[2020](#) 修改通报)

中国船级社

2019.12

编写说明

根据 2016 版指南实船设计与审图应用情况反馈，以及我社对矿砂船的研究成果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) 含水矿砂要求的舱段直接计算补充要求。
- 9) ~~矿砂船船体结构疲劳强度评估补充要求。~~

目录

第 1 章 总则	5
第 2 章 载荷工况	6
第 3 章 货舱区域直接强度分析.....	9
第 4 章 屈曲强度评估	12
第 5 章 整船有限元强度评估	14
附录 2.....	15
装载含水矿砂时舱段有限元计算要求.....	16
附录 3.....	16
矿砂船船体结构疲劳强度评估要求.....	16

第 1 章 总则

1.1 一般规定

~~1.1.3 货舱区域船体主要结构疲劳强度评估本指南附录 3 的相关要求。船长 250m 及以上的矿砂船，按 CCS《波激振动和砰击颤振对船体结构疲劳强度影响计算指南》要求应特殊考虑波激振动对船体结构疲劳强度的影响。~~

1.1.4 1.1.3 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 1.1.4 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：

1.2.1 单位制定义

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

第 2 章 载荷工况

2.2 动载荷工况

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。

表中，

f_{lp-OSA} : OSA 工况的扭矩纵向分布系数，取为：

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

$$f_{lp-OSA} = -(0.2 + 0.3f_T)(11.5f_{xL} - 5.6),$$

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

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

2.4 船体梁载荷

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/遮蔽水域的许用静水弯矩和许用静水剪力，[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。](#)并且不小于 2.4.2.2 和 2.4.2.3 要求的值。

2.4.2.2 中拱和中垂的静水弯矩值应 [可](#)按以下公式计算。

2.4.3.2

f_{nl-vh} 和 f_{nl-vs} : [\[3.4.2 2.4.3.1\]](#)定义的考虑非线性影响的系数。

2.5 外部载荷

2.5.3 海水外部动压力

2.5.3.1 HSM 载荷工况的水动压力

式中：

$P_{W,WL}$: 所考虑动载荷工况水线处的水动压力， kN/m^2 。

$P_{W,WL} = P_W$ ，[当 \$y = B_x/2\$ 和 \$z = T_{LC}\$ 时。](#)

2.6 内部载荷

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。

ρ_{ST} : 钢材密度, 取为 ~~7.8~~ 7.85, t/m³。

2.7 装载工况

2.7.2 装载工况

2.7.2.2 对于装载手册中未设计多港装载的船舶, 多港口 1 (MP1)、多港口 2 (MP2)、多港口 3(MP3)、多港口 4(MP4)、多港口 5(MP5)、多港口 6(MP6)、多港口 7(MP7)、多港口 8(MP8)、多港口 9(MP9)可不校核。

适用于船中货舱区域的有限元载荷组合

表 2.7.2.1

13-2	<u>多港-8</u> (如适用) ⁽⁵⁾		T_{MPLC} (4)	100%	100% <u>SAG</u> ⁽⁵⁾	<u>BSP-1P</u> <u>BSR-1P</u> <u>OST-1P</u>
			T_{MPLC} (4)	100%	100% <u>HOG</u> ⁽⁵⁾	<u>HSM-2</u> <u>FSM-2</u> <u>BSR-1P</u> <u>OST-1P</u>
13-3	<u>多港-9</u> (如适用) ⁽⁵⁾		T_{MPLC} (4)	100%	100% <u>SAG</u> ⁽⁵⁾	<u>BSP-1P</u> <u>BSR-1P</u> <u>OST-1P</u>
			T_{MPLC} (4)	100%	100% <u>HOG</u> ⁽⁵⁾	<u>HSM-2</u> <u>FSM-2</u> <u>BSR-1P</u> <u>OST-1P</u>

注:

- (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) T_{MPLC} 装载手册中连舱装载的最小吃水。

(5) 装载手册如有时，则评估该工况。

适用于最艮货舱区域的有限元载荷组合

表 2.7.2.2

12-2	<u>多港-7</u> <u>(如适用)⁽¹⁾</u>		T_{MPLC} <u>(4)</u>	<u>100%</u>	<u>80%</u> <u>SAG</u>	<u>BSP-1P</u> <u>BSR-1P</u> <u>OST-1P</u>
<p>注：</p> <p>(1) 装载手册如有时，则评估该工况。</p> <p>(2) 港内 4~6 为取得 EL100 的矿砂船应校核的工况。</p> <p>(3) 港内 MAX SFLC 工况原则上以机舱前舱壁为剪力调整目标位置。</p> <p>(4) <u>T_{MPLC} 装载手册中连舱装载的最小吃水。</u></p>						

适用于最首货舱区域的有限元载荷组合

表 2.7.2.3

12-2	<u>多港-7</u> <u>(如适用)⁽¹⁾</u>		T_{MPLC} <u>(4)</u>	<u>100%</u>	<u>60%</u> <u>SAG</u>	<u>BSP-1P</u> <u>BSR-1P</u> <u>OST-1P</u>
<p>注：</p> <p>(1) 装载手册如有时，则评估该工况。</p> <p>(2) 港内 4~8 位取得 EL100 的矿砂船应校核的工况。</p> <p>(3) 港内 MAX SFLC 工况原则上以前舱壁为剪力调整目标位置。</p> <p>(4) <u>T_{MPLC} 装载手册中连舱装载的最小吃水。</u></p>						

第 3 章 货舱区域直接强度分析

3.1 结构建模

3.2.1 目标和范围

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
- [机舱区域](#)

3.2.3 模型范围

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。
- 如果目标货舱与相邻舱段的长度比超过 1:1.5，应将相邻货舱适当截取部分作为模型延伸区域，载荷计算相应的舱室参数与装载参数应按实际截取的部分取值。
- [目标货舱与相邻舱室的比例超过 1:0.5，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。并对拉伸区域结构建模应符合 3.2.3.6 的要求。](#)

3.2.3.4 对于最首货舱模型，位于首部中间位置处的横剖面向前至模型端部的船体线型可以使用简化的几何建模。[可以由首部中间位置处的横剖面向前拉伸至模型端部或拉伸至与首货舱长度相当处。](#)

3.3.2 载荷施加

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 要求对首货舱的首尖舱或尾货舱的机舱进行拉伸至实船船长之外时，对延伸区域的外部压力，取规范船长端部处单元的压力，沿船长方向做等值延伸处理。](#)

3.3.3 船体梁载荷

3.3.3.2 船体梁垂向目标弯矩

M_{v-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。
对于按照第 3 章 3.2.3.2 要求对首货舱的首尖舱或尾货舱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。

3.3.3.4 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

- 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。
对于按照第 3 章 3.2.3.2 要求对首货舱的首尖舱或尾货舱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。

3.3.4.9 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 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:

$$f(i) = -M_{v-targ}(i) + M_{v-FEM}(i) + M_{lineload}(i) + M_{y-aft} \cdot \left(2 \frac{X_i - X_{aft}}{X_{fore} - X_{aft}} - 1 \right)$$
$$f(i) = M_{v-targ}(i) - M_{v-FEM}(i) - M_{lineload}(i) - M_{y-aft} \cdot \left(2 \frac{X_i - X_{aft}}{X_{fore} - X_{aft}} - 1 \right)$$

3.4 分析衡准

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间应力, 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_{axial} 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：

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

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： $\lambda_y = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_y}$ $\lambda_y = \frac{|\sigma_a|}{R_y}$

σ_{vm} ：Von Mises 应力， N/mm^2 。

σ_{axial} σ_a ：杆或梁单元的轴向力， N/mm^2 。

R_y ：材料的屈服极限，取 ~~$R_y = 220/t$~~ $R_y = 220/K$

3.5 局部结构强度分析

3.5.4.3 细化网格许用应力衡准应满足以下要求：

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

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

其中：

λ_f ：细化网格屈服利用因子。

一般情况下对于壳单元： $\lambda_f = \frac{\sigma_{vm}}{R_y}$

一般情况下对于杆单元： $\lambda_f = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_y}$ $\lambda_f = \frac{|\sigma_a|}{R_y}$

σ_{vm} ：Von Mises 应力， N/mm^2 。

σ_{axial} σ_a ：杆单元的轴向应力， N/mm^2 。

第 4 章 屈曲强度评估

4.3 屈曲能力

4.3.1 符号说明

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。

4.3.4 支杆、支柱和横撑材

(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：

① 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；

~~a. 对于中货油舱室的横撑材：在连接横撑材水平桁的右舷和左舷纵舱壁的纵骨翼板面板间距离；~~

~~b. 对于边舱的横撑材：在连接横撑材水平桁的纵舱壁的纵骨翼板面板至内壳板之间的距离；~~

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。

第 5 章 整船有限元强度评估

5.4 整船载荷施加与惯性平衡

5.4.1 外部水压力

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：

$$p_s = \rho_s g (T_{LC} - z)$$

$$p_s = \rho g (T_{LC} - z)$$

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[临近](#)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”。

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：

$$\sigma \leq [\sigma]$$

$$\sigma_{vm} < R_y$$

式中： σ 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/mm²；

$[\sigma]$ R_y ——许用应力，N/mm²，按下式计算：

$$[\sigma] = 220/K \quad \text{N/mm}^2$$

$$R_y = 220/K \quad \text{N/mm}^2$$

K ——材料系数。

附录 2

装载含水矿砂时舱段有限元计算要求

2.2 液化矿砂的载荷与计算工况

2.2.2 计算工况

2.2.2.2 表 2.2.2.1 中所列计算工况为船中货舱区域的计算工况，其它区域货舱的计算工况可参照进行。

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% ⁽⁴⁾ HOG	HSM-2 FSM-2
3	多港-2		$0.83 T_{sc}$	100%	100% SAG	HSM-1 FSM-1 BSP-1P
				100%	100% ⁽⁴⁾ HOG	HSM-2 FSM-2
4	多港-3 ⁽²⁾		$\frac{T_{MPLC}}{(1)}$	100%	100% SAG ⁽²⁾	HSM-1 FSM-1 BSP-1P
				100%	100% HOG ⁽²⁾	HSM-2 FSM-2
5	多港-4 ⁽²⁾		$\frac{T_{MPLC}}{(1)}$	100%	100% SAG ⁽²⁾	HSM-1 FSM-1 BSP-1P
				100%	100% HOG ⁽²⁾	HSM-2 FSM-2

(1) T_{MPLC} 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。

附录 3

矿砂船船体结构疲劳强度评估要求

3.1 一般规定

3.1.1 本附录适用于矿砂船船体结构疲劳强度评估。

3.1.2 本附录未作规定者应参照 CCS《船体结构疲劳强度指南》的相关要求。

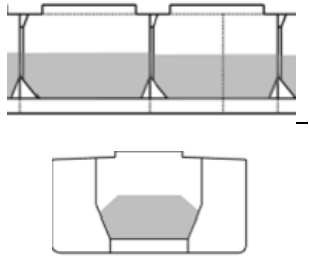
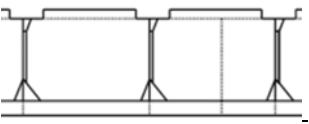
3.1.3 一般选择货舱区域关键位置的船体结构节点进行疲劳强度评估。对于矿砂船，其校核部位至少包括：

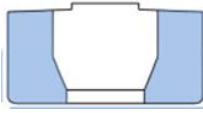
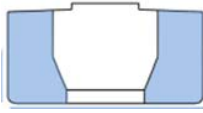
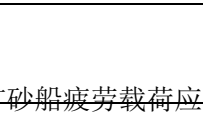
- (1) 纵骨（船底、舷侧、甲板及内壳）与横向强框架的连接部位；
- (2) 纵骨（船底、舷侧、甲板及内壳）与横舱壁的连接部位；
- (3) 内壳纵舱壁与内底板连接处；
- (4) 内底板与底墩连接处；
- (5) 内壳纵舱壁折角（如有时）。

3.2 工况与载荷

3.2.1 矿砂船的疲劳评估装载工况为均匀满载工况、正常压载工况及最大压载工况（如有时），具体要求见表 3.2.2。

疲劳评估装载工况 表 3.2.1

疲劳评估 装载工况	装载模式	吃水	静水弯矩修正系数 C_{sw}	货舱载荷量 $M(t)$	干散货密 ρ_c (t/m^3)	时间分配系数 α
均匀满载		满载吃水	0.8 (中垂)	M_H	设计允许的最大货物密度	0.5
正常压载		轻压载吃水	0.6 (中拱)	—	—	0.35, 如无确切的数据, 正常压载和最

						大压载各占0.175
最大压载 (如有时)	 	压载工况的 最大吃水	0.65 (中垂)	—	—	

3.2.2 矿砂船疲劳载荷应参考 CCS《船体结构疲劳强度指南》第 2 章散货船的相关要求进行计算。矿砂船疲劳评估时运动计算所采用的 k_r 和 GM 除非在装载手册中提供，否则可以按以下规定选取：

矿砂船的 k_r 和 GM 表 3.2.2

疲劳评估装载工况	k_r	GM
满载工况	$0.35B$	$0.12B$
正常压载工况	$0.45B$	$0.33B$
最大压载工况	$0.40B$	$0.25B$

3.3 简化应力分析

3.3.1 简化应力分析方法适用于矿砂船纵骨端部连接节点的疲劳强度评估。矿砂船简化应力分析应按 CCS《船体结构疲劳强度指南》第 4 章的相关要求进行计算。

3.4 有限元热点应力分析

3.4.1 有限元热点应力分析方法适用于矿砂船焊接节点与非焊接节点的疲劳强度评估。矿砂船有限元热点应力分析应按 CCS《船体结构疲劳强度指南》第 5 章的相关要求进行计算。

3.4.2 在有限元应力分析时，每一计算工况分为总体载荷工况与局部载荷工况，热点应力应由总体载荷工况与局部载荷工况的应力合成得到，应按下式计算：

$$\sigma_C = f_{ch} \sigma_{HG} + C_{VT} f_{cl} \sigma_L \quad \text{N/mm}^2$$

式中： σ_{HG} ——总荷载工况下的热点应力， N/mm^2 ；

σ_L ——局部荷载工况下的热点应力， N/mm^2 ；

f_{ch} 、 f_{cl} ——腐蚀修正系数，见 CCS《船体结构疲劳强度指南》第 1 章 1.6.1；

C_{VT} ——船型修正系数，对于矿砂船，按下述要求确定：

$C_{VT}=0.6$ ，对于矿砂船内底板与底墩连接处的热点；

$C_{VT}=0.9$ ，对于矿砂船的其他热点。