

指导性文件
GD21-2020



中 国 船 级 社

液舱晃动载荷及构件尺寸评估指南

2020

2020 年 9 月 1 日生效

总体说明

晃荡及结构响应问题一直是 LNG 运输船、化学品运输船等液货船重要关注的技术问题之一。2014 年，中国船级社首次发布了《液舱晃荡载荷及构件尺寸评估指南》。基于近几年审图经验积累和客户反馈，CCS 对晃荡水平判定、晃荡载荷计算、衡准、腐蚀等问题进行深入研究，完善了指南的相关要求，形成了晃荡指南 2020 版。

目 录

第 1 节 一般规定	1
1.1 一般要求	1
1.2 晃荡评估术语及相关规定	1
1.3 参数及符号定义	2
第 2 节 晃荡载荷计算	5
2.1 一般规定	5
2.2 晃荡运动水平判定	5
2.3 船体运动参数	7
2.4 液舱内液体的运动参数	8
2.5 晃荡载荷计算	11
第 3 节 晃荡载荷下液舱构件尺寸评估	14
3.1 一般要求	14
3.2 水平一晃荡载荷下液舱结构尺寸评估	15
3.3 水平二晃荡载荷下液舱结构尺寸评估	17
3.4 水平三晃荡载荷下液舱结构尺寸评估	25
附录 1 晃荡载荷直接计算	32
1 基本原理	32
2 晃荡计算程序	32
附录 2 应用示例	35
1 船型数据	35
2 晃荡水平判断	36
3 晃荡载荷计算	37
4 边界尺寸计算	39

第 1 节 一般规定

1.1 一般要求

1.1.1 本指南规定了船舶液舱晃荡载荷的计算方法，以及液舱区域船体构件在晃荡载荷作用下的评估要求和方法。

1.1.2 本指南适用于油船、化学品船、液化气体船等液货船及散货船、矿砂船、干货船等船舶的液货舱、压载舱及其他允许自由液面移动的液舱。

1.1.3 其他船舶及液舱也可以参照本指南对其晃荡载荷下的构件尺寸进行评估。

1.2 晃荡评估术语及相关规定

1.2.1 **晃荡谐振**：系指船舶运动固有周期与液舱内液体晃荡运动固有周期接近时产生共振，并导致液舱内液体出现明显的液面变化及载荷增加的现象。

1.2.2 **晃荡运动水平**：表征液舱内液体晃荡运动的剧烈程度及晃荡载荷大小。根据船舶与液舱晃荡谐振运动的判定准则，将其划分为水平一晃荡运动、水平二晃荡运动及水平三晃荡运动三个等级。

(1) 水平一晃荡运动为静态或准静态过程，该水平下晃荡运动引起的载荷以静载荷为主。

(2) 水平二晃荡运动为晃荡运动的初始动态过程，该水平下晃荡运动引起的载荷包括静载荷和动载荷，但动载荷尚未达到冲击载荷形式，不产生动态放大。

(3) 水平三晃荡运动为晃荡运动的动态放大过程，该水平下晃荡运动引起的载荷包括静载荷和动载荷，其中动载荷是主要载荷，达到冲击载荷的作用形式。

1.2.3 **装载高度**：系指液舱中液体的充装高度。针对含内部构件的液舱，用于晃荡评估的装载高度一般为 $0.1h$ 至 $0.9h$ (h 见 1.3.1)；针对无内部构件的光滑液舱，用于晃荡评估的装载高度一般为 $0.05h$ 至 $0.95h$ 。用于晃荡评估的装载高度不包括装载手册限制的装载高度，计算步长应不大于 $0.05h$ 。

1.2.4 **净尺寸**：按本指南进行尺寸评估时，构件采用的是总提供尺寸（建造尺寸）减去相关腐蚀增量 t_c （见 3.1.6）后得到的净提供尺寸，且净提供尺寸应大于或等于要求尺寸。当用于船体梁弯曲应力计算时，相关构件采用的是总提供尺寸（建造尺寸）减去 $0.5t_c$ 后的净提供尺寸。

1.3 参数及符号定义

1.3.1 典型液舱的几何形状如图 1.3.1 所示，基本参数的定义见表 1.3.1。

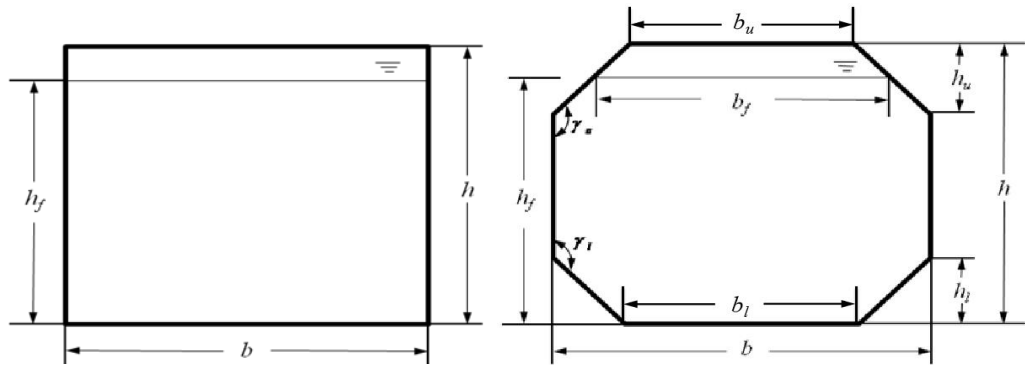


图 1.3.1 (1) 典型液舱横剖面

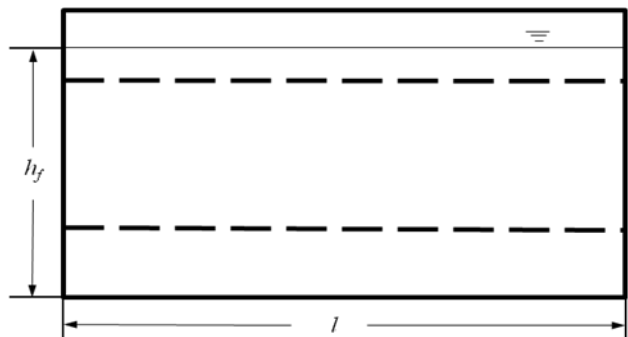


图 1.3.1 (2) 典型液舱纵剖面（平面舱壁）

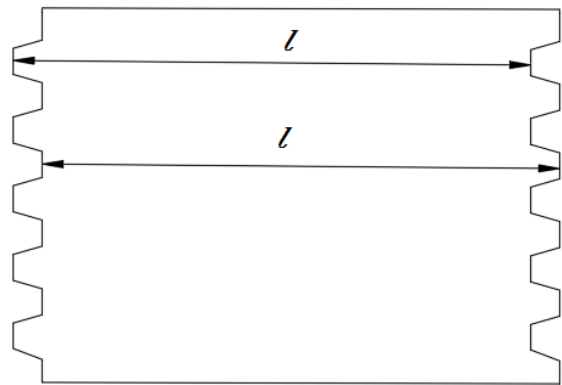


图 1.3.1 (3) 典型液舱俯视图（槽形舱壁）

液舱几何参数定义			表 1.3.1
序号	变量	定义	单位
1	l	舱长	m
2	b	舱宽	m
3	b_u	舱顶宽	m

序号	变量	定义	单位
4	b_l	舱底宽	m
5	h	舱高	m
6	h_f	装载高度	m
7	b_f	对应装载高度下的液舱宽度	m
8	l_f	对应装载高度下的液舱长度	m
9	h_u	上斜面高度	m
10	γ_u	上斜面角度	deg
11	h_l	下斜面高度	m
12	γ_l	下斜面角度	deg

1.3.2 符号规定

(1) 以下符号规定与 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 1 节的定义相同：

L ——船长，m；

B ——船宽，m；

D ——型深，m；

d ——吃水，m；

C_b ——方形系数，但取值不小于 0.6。

(2) 除非特别说明，下列符号在本指南中的规定如下：

d_i ——船舶所考虑装载工况下的吃水，m；

g ——重力加速度， $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ；

ρ_w ——海水密度， 1.025 t/m^3 ；

ρ_L ——液化天然气密度， 0.50 t/m^3 ；

ρ ——液体密度， t/m^3 ，为适用时的 ρ_w 或 ρ_L 或其他液体的密度；

T_r ——横向船体运动固有周期，s，按本指南第 2 节 2.3.1 计算；

T_p ——纵向船体运动固有周期，s，按本指南第 2 节 2.3.2 计算；

l_s ——纵向有效晃荡长度，m，按本指南第 2 节 2.4.1 相关要求计算；

b_s ——横向有效晃荡长度，m，按本指南第 2 节 2.4.1 相关要求计算；

T ——液舱内液体晃荡运动固有周期，s，按本指南第 2 节 2.4.3 相关要求计算；

R_{eH} ——材料屈服强度， N/mm^2 ，按 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 3

节规定；

K ——材料系数, 按 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 3 节规定;

E ——材料弹性模量, 对钢材, $E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 或 $E=2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$;

ν ——材料泊松比, 对钢材, $\nu=0.3$;

k_r ——所考虑装载工况的横摇回转半径, m;

GM ——所考虑装载工况的初稳性高度(经自由液面修正后), m。

1.3.3 除特殊说明外, 本指南采用的坐标系统取右手坐标系, 即:

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

第 2 节 晃荡载荷计算

2.1 一般规定

2.1.1 本节给出了由于船舶运动导致液舱内液体晃荡运动而产生的晃荡载荷的计算方法。

2.1.2 经 CCS 认可，液舱晃荡模型试验及数值仿真的结果可作为晃荡设计载荷。

2.1.3 若设计方提供横摇回转半径 k_r 、船体运动固有周期 T_r 、 T_p 的确定值，经 CCS 认可后可直接作为输入值。

2.1.4 除特别说明外，本节所述晃荡运动及载荷应包含横向晃荡和纵向晃荡两个方向。

2.2 晃荡运动水平判定

2.2.1 晃荡运动水平判定及载荷计算涉及到的船舶装载工况、吃水 d_i 、横摇回转半径 k_r 及初稳性高 GM 值见表 2.2.1。

装载工况表 表 2.2.1

编号	工况	吃水 d_i	k_r	GM
LC1	满载工况	最大满载吃水 ⁽¹⁾	$0.35B$	$0.12B^{(2)}$
LC2	部分装载工况 ⁽³⁾	$0.67d$	$0.39B$	$0.24B$
LC3	压载工况	最小压载吃水 ⁽⁴⁾	$0.45B$	$0.33B^{(5)}$
LC4	部分压载工况 ⁽⁶⁾	$0.6d$	$0.40B$	$0.25B$
注： (1) 吃水 d_i 取装载手册中所有满载工况的最大值，且不小于 $0.9d$ ； (2) 如果装载手册中有明确数值，则 GM 取装载手册中所有满载工况的最小值，且不大于 $0.12B$ ； (3) 部分装载工况仅用于水平三晃荡计算。应基于 $0.67d$ 吃水确定该工况的 k_r 和 GM ，如装载手册中存在其他部分装载工况，可按吃水对 LC1 和 LC2 的取值采用线性插值计算相应 k_r 和 GM ； (4) 吃水 d_i 取装载手册中所有压载工况的最小值，且不大于 $0.6d$ ； (5) 如果装载手册中有明确数值，则 GM 取装载手册中所有压载工况的最大值，且不小于 $0.33B$ ； (6) 部分压载工况仅用于水平三晃荡计算。应基于 $0.6d$ 吃水确定该工况的 k_r 和 GM ，如装载手册中存在其他部分压载工况，可按吃水对 LC3 和 LC4 的取值采用线性插值计算相应 k_r 和 GM 。				

2.2.2 选取 1.2.3 规定的液舱装载高度 h_f 进行晃荡运动水平的判定。当液舱内液体晃荡运动固有周期 T 满足 $0.7T_{bal} < T < 1.2T_{full}$ 时，该液舱处于晃荡谐振范围，如图 2.2.2 所示。其中， T_{bal} 和 T_{full} 分别为表 2.2.1 中 LC3 压载工况和 LC1 满载工况下的船体运动固有周期，按 2.3 进行计算； F_i 为各船体运动固有周期对应的装载高度。

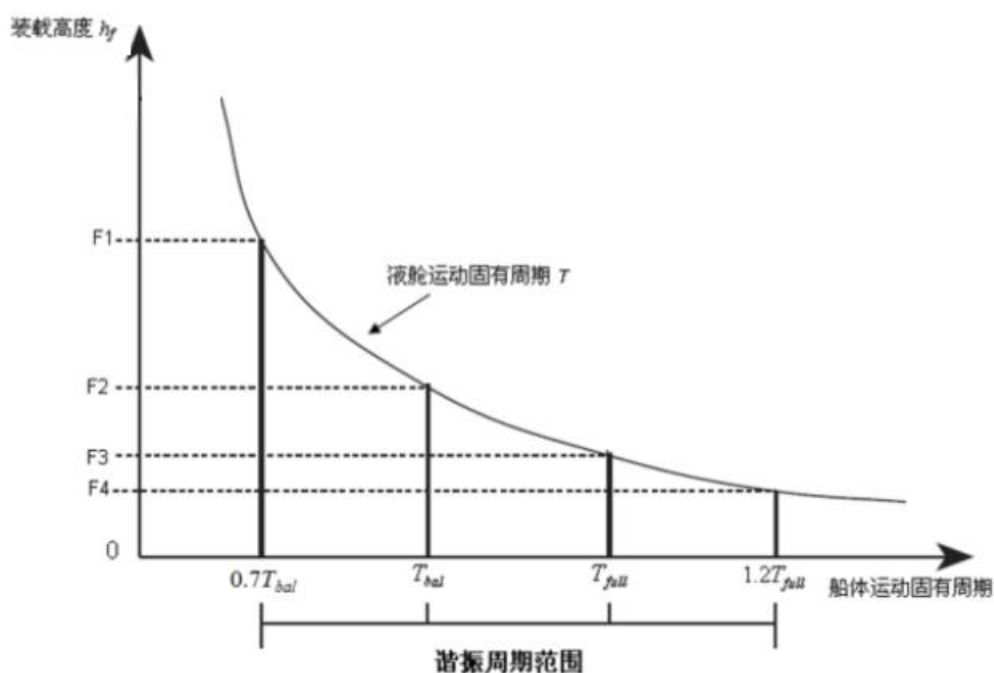


图 2.2.2 液舱谐振周期范围示意图

2.2.3 晃荡运动水平判断准则如下：

(1) 纵向晃荡运动：当液舱满足 $l_s \leq 0.13L$ 且液舱纵向晃荡运动固有周期不处于谐振周期范围内时，只需考虑水平一的晃荡运动；当液舱满足 $l_s \leq 0.13L$ 且液舱纵向晃荡运动固有周期处于谐振周期范围内或液舱满足 $l_s > 0.13L$ 且液舱纵向晃荡运动固有周期不处于谐振周期范围内时，考虑水平二的晃荡运动；当满足 $l_s > 0.13L$ 且液舱纵向晃荡运动固有周期处于谐振周期范围内时，考虑水平三的晃荡运动。纵向晃荡运动水平判断见表 2.2.3 (1)。

纵向晃荡运动水平

表 2.2.3 (1)

液舱有效晃荡长度	液舱纵向晃荡运动固有周期	晃荡运动水平
$l_s \leq 0.13L$	非谐振	水平一
	谐振	水平二
$l_s > 0.13L$	非谐振	水平二
	谐振	水平三

(2) 横向晃荡运动：当液舱满足 $b_s \leq 0.56B$ 且液舱横向晃荡运动固有周期不处于谐振周期范围内时，只需考虑水平一的晃荡运动；当液舱满足 $b_s \leq 0.56B$ 且液舱横向晃荡运动固有周期处于谐振周期范围内或液舱满足 $b_s > 0.56B$ 且液舱横向晃荡运动固有周期不处于谐振周期范围内时，考虑水平二的晃荡运动；当满足 $b_s > 0.56B$ 且液舱横向晃荡运动固有周期处于

谐振周期范围内时，考虑水平三的晃荡运动。横向晃荡运动水平判断见表 2.2.3（2）。

横向晃荡运动水平

表 2.2.3（2）

液舱有效晃荡宽度	液舱横向晃荡运动固有周期	晃荡运动水平
$b_s \leq 0.56B$	非谐振	水平一
	谐振	水平二
$b_s > 0.56B$	非谐振	水平二
	谐振	水平三

2.3 船体运动参数

2.3.1 船体横摇周期 T_r ，按下式计算：

$$T_r = \frac{2.3\pi k_r}{\sqrt{gGM}} \quad \text{s}$$

2.3.2 船体纵摇周期 T_p ，按下式计算：

$$T_p = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_\phi}{g}} \quad \text{s}$$

式中， $\lambda_\phi = 0.6(1 + f_T)L$ ， $f_T = \frac{d_i}{d}$ 。

2.3.3 横摇角 θ 按下式计算：

$$\theta = \frac{9000(1.25 - 0.025T_r) f_\gamma f_{BK}}{(B + 75)\pi} \quad \text{deg}$$

式中， T_r ——船体横摇周期，s；按 2.3.1 计算时，一般应取表 2.2.1 规定的 LC1 满载工况、LC3 压载工况计算得到的最小值；

f_γ ——航区系数，航区定义见《钢质海船入级规范》第 1 篇第 2 章 2.1.3。对于无限航区： $f_\gamma = 1.0$ ；对于 1 类航区： $f_\gamma = 0.9$ ；对于 2 类航区： $f_\gamma = 0.85$ ；对于 3 类航区： $f_\gamma = 0.8$ 。

f_{BK} ——系数，对无舦龙骨的船舶： $f_{BK} = 1.2$ ；对有舦龙骨的船舶： $f_{BK} = 1.0$ ；对有主动式减摇装置的船舶， $f_{BK} = 0.8$ 。

2.3.4 纵摇角 ϕ 按下列公式计算：

$$\varphi = 1350 f_{\gamma} L^{-0.94} \left[1.0 + \left(\frac{2.57}{\sqrt{gL}} \right)^{1.2} \right] \quad \text{deg}$$

式中, f_{γ} ——同 2.3.3。

2.3.5 按 2.2.3 的判定, 当液舱满足 $l_s \leq 0.13L$ 或 $b_s \leq 0.56B$ 时, 用于水平二晃荡载荷计算的船体运动固有周期应符合下列规定:

- (1) 若装载高度 h_f 满足 $F_2 < h_f \leq F_1$, 船体运动固有周期取 T_{bal} ;
- (2) 若装载高度 h_f 满足 $F_4 \leq h_f < F_3$, 船体运动固有周期取 T_{full} ;
- (3) 若装载高度 h_f 满足 $F_3 \leq h_f \leq F_2$, 船体运动固有周期取装载高度 h_f 所对应的液舱运动固有周期。

2.3.6 按 2.2.3 的判定, 当液舱满足 $l_s > 0.13L$ 或 $b_s > 0.56B$ 时, 用于水平二和水平三晃荡载荷计算的船体运动固有周期应符合下列规定:

- (1) 若装载高度 h_f 满足 $h_f > F_1$, 用于水平二晃荡载荷计算的船舶运动周期取 T_{bal} ;
- (2) 若装载高度 h_f 满足 $h_f < F_4$, 用于水平二晃荡载荷计算的船舶运动周期取 T_{full} ;
- (3) 若装载高度 h_f 满足 $F_4 \leq h_f \leq F_1$, 用于水平二和水平三晃荡载荷计算的船舶运动周期取装载高度 h_f 所对应的液舱固有周期。

2.4 液舱内液体的运动参数

2.4.1 液舱有效晃荡长度和宽度

- (1) 对于含内部构件的液舱, 纵向有效晃荡长度 l_s 按下式计算:

$$l_s = \frac{(1 + n_{WT} \alpha_{WT})(1 + f_{wf} \alpha_{wf}) l_f}{(1 + n_{WT})(1 + f_{wf})} \quad \text{m}$$

式中, n_{WT} ——液舱内横向制荡舱壁的数目;

$$\alpha_{WT} \text{——横向制荡舱壁系数, } \alpha_{WT} = \frac{A_{OWT}}{A_{tk-t-h}}$$

$$\alpha_{wf} \text{——横向强框架系数, } \alpha_{wf} = \frac{A_{O-wf-h}}{A_{tk-t-h}}; \text{ 当液舱形状沿长度变化或设有不同形状}$$

的横向强框架时, α_{wf} 取液舱内所有强框架的加权平均值, 即:

$$\alpha_{wf} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{A_{O-wf-h_i}}{A_{tk-t-h_i}}}{n_{wf}}$$

A_{OWT} ——制荡舱壁处横剖面开口在所考虑装载高度以下的总面积， m^2 ；

A_{tk-t-h} ——液舱横剖面在所考虑的装载高度以下的总面积， m^2 ；

A_{O-wf-h} ——强框架处横剖面开口在所考虑的装载高度以下的总面积， m^2 ；

$$f_{wf} = n_{wf} / (1 + n_{WT});$$

n_{wf} ——液舱内横向强框架的数目，不包括制荡舱壁。

(2) 对于含内部构件的液舱，横向有效晃荡宽度 b_s 按下式计算：

$$b_s = \frac{(1 + n_{WL} \alpha_{WL})(1 + f_{grd} \alpha_{grd}) b_f}{(1 + n_{WL})(1 + f_{grd})} \quad m$$

式中， n_{WL} ——液舱内纵向制荡舱壁的数目；

$$\alpha_{WL} \text{——纵向制荡舱壁系数，} \alpha_{WL} = \frac{A_{OWL}}{A_{tk-L-h}};$$

$$\alpha_{grd} \text{——桁材系数，} \alpha_{grd} = \frac{A_{O-grd-h}}{A_{tk-L-h}};$$

A_{OWL} ——制荡舱壁处纵剖面开口在所考虑装载高度以下的总面积， m^2 ；

A_{tk-L-h} ——液舱纵剖面在所考虑的装载高度以下的总面积， m^2 ；

$A_{O-grd-h}$ ——纵剖面开口在所考虑的装载高度以下的总面积， m^2 ；

$$f_{grd} = n_{grd} / (1 + n_{WL});$$

n_{grd} 为液舱内纵桁的数目，不包括纵向制荡舱壁。

(3) 对于不含内部构件的光滑液舱，纵向有效晃荡长度 l_s 取为对应装载高度下的液舱长度 l_f ，横向有效晃荡宽度 b_s 取为对应装载高度下的液舱宽度 b_f 。如光滑液舱内部布置有货舱围护系统，则有效晃荡长度和宽度计算时可考虑扣除货舱围护系统的厚度。

2.4.2 液舱有效装载高度

(1) 对于含内部构件的液舱，纵向有效装载高度 h_l 按下式计算：

$$h_l = h_f - h_{t1} [n / (n + 4)]^{1/2} - 0.45 h_{t2} \quad m$$

式中, h_{l1} ——舱底横向构件的高度, m, 如图 2.4.2 (1) 所示;

h_{l2} ——非密闭横舱壁最低开口处到舱底横向构件上沿 (或舱底, 如果没有舱底横向构件) 的距离, m, 且应取不小于 0, 如图 2.4.2 (1) 所示;

n ——舱底横向构件数目;

(2) 对于含内部构件的液舱, 横向有效装载高度 h_b 按下式计算:

$$h_b = h_f - h_{b1} [m / (m + 4)]^{1/2} - 0.45 h_{b2} \quad \text{m}$$

式中, h_{b1} ——舱底纵向构件的高度, m, 如图 2.4.2 (2) 所示;

h_{b2} ——非密闭纵舱壁最低开口处到舱底纵向构件上沿 (或舱底, 如果没有舱底纵向构件) 的距离, m, 且应取不小于 0, 如图 2.4.2 (2) 所示;

m ——舱底纵向构件数目;

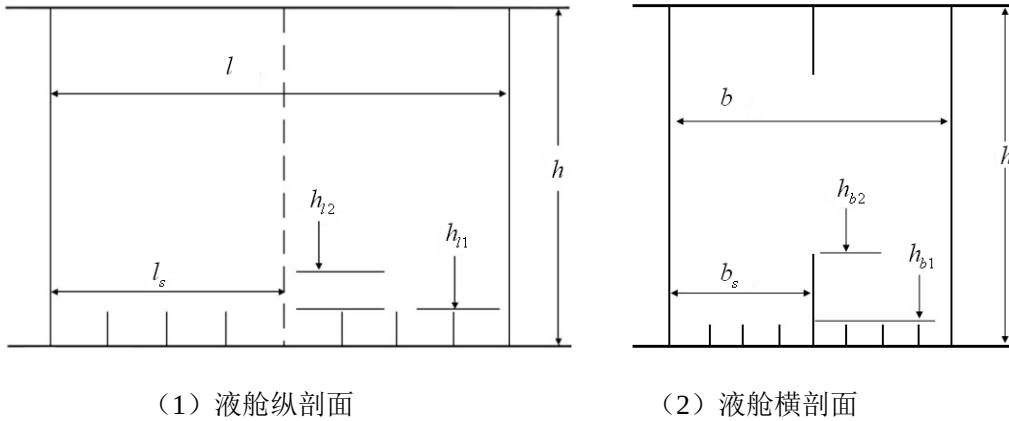


图 2.4.2 舱底构件示意图

(3) 对于不含内部构件的光滑液舱, 液舱有效装载高度为对应的装载高度 h_f 。如光滑液舱内部布置有货舱围护系统, 则液舱有效装载高度计算时可考虑扣除货舱围护系统的厚度。

2.4.3 液舱内液体晃动运动固有周期

纵向晃动运动固有周期:

$$T_x = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g\pi}{l_s} \tanh\left(\frac{\pi h_l}{l_s}\right)}} \quad \text{s}$$

横向晃动运动固有周期:

$$T_y = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g\pi}{b_s} \tanh\left(\frac{\pi h_b}{b_s}\right)}} \quad \text{s}$$

2.5 晃荡载荷计算

2.5.1 水平一晃荡载荷 p_1 沿舱室高度方向线性分布，按下列各式计算：

横向晃荡载荷： $p_1 = \rho g(h_f - z + h_{T1}) \quad \text{kN/m}^2$ ，且不小于 20 kN/m^2 ；

纵向晃荡载荷： $p_1 = \rho g(h_f - z + h_{L1}) \quad \text{kN/m}^2$ ，且不小于 20 kN/m^2 ；

式中， $h_{T1} = \frac{b}{2} \tan\left(\frac{\pi\theta}{180}\right)$ ，取值不大于 $h - h_f$ ，m；

$h_{L1} = \frac{l}{2} \tan\left(\frac{\pi\varphi}{180}\right)$ ，取值不大于 $h - h_f$ ，m；

z ——舱底到计算点处距离，m。

2.5.2 水平二晃荡载荷 p_2 按下式计算：

$$p_2 = p_0 + p_s \quad \text{kN/m}^2$$

式中： p_0 为水平二晃荡载荷的静载荷成分，按下式计算：

$$p_0 = \rho g(h_f - z) \quad \text{kN/m}^2，\text{且不小于 } 0；$$

其中， z ——舱底到计算点处距离，m

p_s 为水平二晃荡载荷的动载荷成分，分别按下列各式计算：

(1) 横向晃荡载荷

$$p_s = \rho g h_{T2} \quad \text{kN/m}^2$$

式中：

$$h_{T2} = \theta \cdot b_s \left[a \cdot \frac{4\alpha\gamma + \beta}{b(\delta - 1)^2 + d(\delta - 1) + 1} + c\gamma \frac{h_f}{h} \left(1 - \frac{h_f}{h} \right) \right] \quad \text{m}$$

$$\alpha = h_f / b_s；$$

$$\beta = 0.91\alpha^2 - 2.77\alpha + 1.05；$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 b_s}{g T_r^2}；$$

$$\delta = T_r / T_y ;$$

当 $b_s \leq 0.56B$ 时,

$$a = 0.06b_s / B - 0.0104; \quad b = 8.43; \quad c = 26.6a; \quad d = -2.32;$$

当 $b_s > 0.56B$ 时,

$$a = 0.0146; \quad b = 21.24; \quad c = 0.274; \quad d = -4.73;$$

(2) 纵向晃荡载荷

$$p_s = \rho g h_{L2} \quad \text{kN/m}^2$$

式中:

$$h_{L2} = \varphi \cdot l_s \left[a \cdot \frac{4\alpha\gamma + \beta}{b(\delta - 1)^2 + d(\delta - 1) + 1} + c\gamma \frac{h_f}{h} \left(1 - \frac{h_f}{h} \right) \right] \frac{1}{k_L} \quad \text{m}$$

$$\alpha = h_f / l_s ;$$

$$\beta = 0.91\alpha^2 - 2.77\alpha + 1.05 ;$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 l_s}{g T_p^2} ;$$

$$\delta = T_p / T_x ;$$

$$k_L = -0.021L + 4.15 \quad L < 150\text{m};$$

$$= 1.0 \quad L \geq 150\text{m};$$

当 $l_s \leq 0.13L$ 时,

$$a = -0.19l_s / L + 0.044; \quad b = a / (79.7a^2 - 2.38a + 0.0169);$$

$$c = 1608a^2 - 33.7a + 0.35; \quad d = 0.015b^2 - 0.494b - 0.495;$$

当 $l_s > 0.13L$ 时,

$$a = 0.03; \quad b = 20.4; \quad c = 0.34; \quad d = -4.08。$$

2.5.3 水平二晃荡载荷的静成分沿舱室高度方向线性分布, 动成分沿舱室高度方向平均分布, 如图 2.5.3 所示。

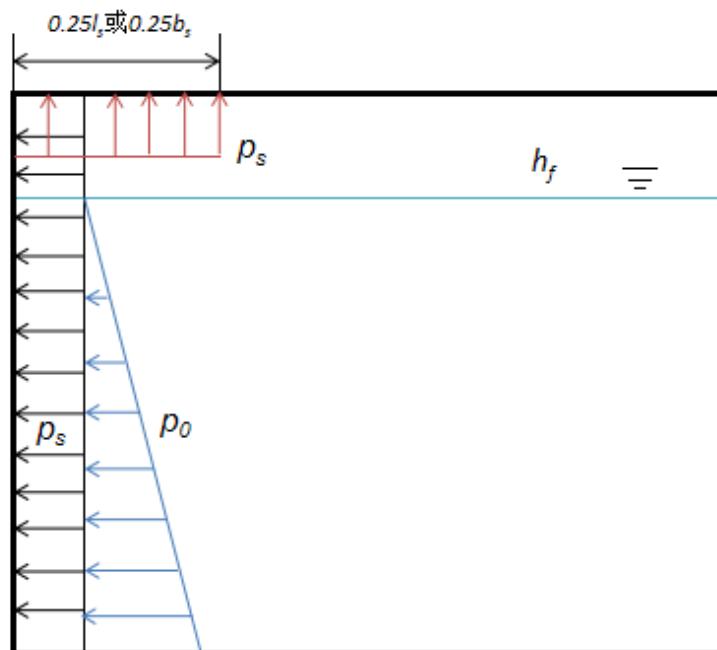


图 2.5.3 水平二晃荡载荷分布示意图

2.5.4 水平三晃荡载荷 p_3 应按附录 1 进行计算，如采用其他数值分析方法，需经 CCS 认可。相关计算参数输入时，应符合以下要求：

（1）当目标液舱为液货舱时，可选取表 2.2.1 规定的 LC2 部分装载工况对应的横摇角或纵摇角作为液舱激励参数；

（2）当目标液舱为压载舱时，可选取表 2.2.1 规定的 LC4 部分压载工况对应的横摇角或纵摇角作为液舱激励参数；

（3）一般选取 0.7~1.2 倍的液舱运动固有周期作为液舱激励参数。

2.5.5 晃荡载荷应用还应符合如下要求：

（1）水平一、二晃荡载荷计算时不与空气管压力叠加；当舱室设计压力超过 25 kN/m^2 时，超出部分应与水平一、二晃荡载荷叠加。

（2）当含内部构件的液舱装载高度不超过舱底构件的高度 h_{l1} 或 h_{b1} 时或按 2.4.2 计算得到 h_l 或 h_b 不大于 0 时，晃荡评估可不予考虑。

（3）当含内部构件的液舱装载高度不超过 $0.2h$ 时，水平二晃荡载荷仅考虑至舱壁最上缘，水平三晃荡评估可不予考虑。

（4）当无内部构件的光滑液舱装载高度不超过 $0.1h$ 时，水平二晃荡载荷仅考虑至舱壁最上缘，水平三晃荡评估可不予考虑。

第 3 节 晃荡载荷下液舱构件尺寸评估

3.1 一般要求

3.1.1 本节规定了液舱结构在晃荡载荷作用下的尺寸要求。

3.1.2 应对下列构件进行晃荡载荷下的尺寸评估：

- (1) 构成液舱边界的板、扶强材；
- (2) 液舱内制荡舱壁上的板和扶强材；
- (3) 液舱内主要支撑构件腹板、腹板加强筋；
- (4) 液舱内主要支撑构件的防倾肘板。

3.1.3 对以下结构应进行纵向运动晃荡载荷下的尺寸评估：

- (1) 横向水密舱壁；
- (2) 横向制荡舱壁；
- (3) 横向水密舱壁或制荡舱壁上的桁材；
- (4) 距横向舱壁 $0.25l_s$ 或第一个强框架间距（取小者）范围的液舱纵向周界上的板和扶强材；
- (5) 上述（4）范围内的主要支撑构件（如有时）。

3.1.4 对以下结构应进行横向运动晃荡载荷下的尺寸评估：

- (1) 纵向水密舱壁；
- (2) 纵向制荡舱壁；
- (3) 纵向水密舱壁或制荡舱壁上的水平桁和垂直桁；
- (4) 距纵向舱壁 $0.25b_s$ 或第一个纵桁间距（取小者）范围的液舱横向周界上的板和扶强材；
- (5) 上述（4）范围内的主要支撑构件（如有时）。

3.1.5 所有液舱均应进行水平一晃荡载荷下的尺寸评估；符合晃荡运动水平二的液舱均应进行水平一和二晃荡载荷下的尺寸评估；符合晃荡运动水平三的液舱均应进行水平一、二和三晃荡载荷下的尺寸评估。

3.1.6 本节所有液舱结构评估均基于净尺寸，除另有规定外，应考虑不同船型的液舱腐蚀增量 t_c ，见表 3.1.6。

用于晃荡评估的腐蚀增量 t_c

表 3.1.6

构件类型		腐蚀增量 t_c (mm)
压载舱内 (含边界板)	所有构件	2.0
液货舱内 (含边界板)	内底板	2.0
	其他构件	1.5
其他暴露于空气或干舱内的构件		1.0

注：（1）对于压载舱与液货舱共有的周界板，取为 2.0mm；

（2）对于 CSR 船，应按《钢质海船入级规范》第 9 篇的相关要求确定腐蚀增量；

（3）对于采用不锈钢材料或位于无腐蚀环境的液舱结构，腐蚀增量取为 0.5mm。

3.2 水平一晃荡载荷下液舱结构尺寸评估

3.2.1 构成液舱边界的板

（1）承受水平一晃荡载荷的液舱边界板的净厚度应不小于：

$$t_{net} = 0.0158 \alpha_p s \sqrt{\frac{p_1}{C_a R_{eH}}} \text{ mm}$$

式中：

α_p ——板格长宽比的修正因子：

$$\alpha_p = 1.2 - \frac{s}{2100 l_p}, \text{ 但应不大于 } 1.0;$$

s ——扶强材间距，mm；

l_p ——板格长度，应取主要支撑构件的间距 S ，m；

p_1 ——计算点处水平一晃荡载荷，见 2.5.1；

C_a ——板的许用弯曲应力系数：

$$C_a = \beta_a - \alpha_a \frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}, \text{ 但不大于 } C_{a-\max}$$

α_a ， β_a ， $C_{a-\max}$ 为许用弯曲应力因子，取值见表 3.2.1；

σ_{hg} ——载荷计算点处的船体梁弯曲应力，按下式计算：

$$\sigma_{hg} = \left(\frac{(z - z_{NA-net50}) M_{sw-perm-sea}}{I_{v-net50}} \right) \times 10^{-3} \quad \text{N/mm}^2$$

z —— 载荷计算点处的垂向坐标， m；

$z_{NA-net50}$ —— 从基线到水平中和轴的距离， m；

$M_{sw-perm-sea}$ —— 航行工况下计算位置处的船体梁中拱和中垂许用静水弯矩， kN·m，

取中拱和中垂弯矩的最大值；

$I_{v-net50}$ —— 计算纵向位置处的船体梁净剖面垂向惯性矩， m⁴；

(2) 若液舱边界板为槽形舱壁，其腹板和面板净厚度 t_{net} 应不小于：

$$t_{net} = 0.0158 b_p \sqrt{\frac{p_1}{C_a R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

式中：

b_p —— 腹板或面板的宽度， mm；

p_1 —— 计算点处水平一晃动载荷，见 2.5.1；

C_a —— 板的许用弯曲应力系数，取为 0.75。

表 3.2.1 许用弯曲应力因子

结构构件		β_a	α_a	$C_{a-\max}$
液货舱区域的纵向强力构件，包括但不限于： — 甲板； — 平面纵舱壁； — 水平槽形纵舱壁； — 液货舱区域的纵桁和水平桁。	纵向加筋板	0.9	0.5	0.8
	横向或垂向加筋板	0.9	1.0	0.8
其他强力构件，包括： — 垂直槽形纵舱壁； — 平面横舱壁； — 槽形横舱壁； — 横向水平桁和强框架； — 液货舱区域以外的液舱边界板和主要支撑构件的板。		0.8	0	0.8

3.2.2 液舱边界板上的扶强材

液舱边界板上扶强材的净剖面模数 Z_{net} 应不小于：

$$Z_{net} = \frac{p_1 s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \text{ cm}^3$$

式中:

p_1 ——计算点处水平一晃动载荷, 见 2.5.1;

s ——扶强材间距, mm;

l_{bdg} ——扶强材的有效弯曲跨距, m;

C_s ——许用弯曲应力系数:

$$C_s = \beta_s - \alpha_s \frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}, \text{ 但不大于 } C_{s-\max}$$

α_s , β_s , $C_{s-\max}$ 为许用弯曲应力因子, 取值见表 3.2.2;

f_{bdg} ——弯矩因子:

$f_{bdg} = 12$, 两端固支的扶强材, 通常适用于所有连续的扶强材;

$f_{bdg} = 8$, 一端或者两端简支水平扶强材, 通常适用于不连续的扶强材。

表 3.2.2 扶强材许用弯曲应力因子表

结构构件		β_s	α_s	$C_{s-\max}$
液货舱区域的纵向强力构件, 包括但不限于: —甲板纵骨; —纵舱壁扶强材; —液货舱区域的纵桁和水平桁上的加强筋。	纵向骨材	0.85	1.0	0.75
	横向或垂向骨材	0.7	0	0.7
其他强力构件, 包括: —横舱壁扶强材; —横向水平桁和强框架上的加强筋; —液货舱区域以外的液舱边界板上的扶强材和主要支撑构件上的加强筋。		0.75	0	0.75

3.3 水平二晃动载荷下液舱结构尺寸评估

3.3.1 构成液舱边界的板

(1) 液舱边界板的净厚度应不小于:

$$t_{net} = 0.0158 \alpha_p s \sqrt{\frac{p_2}{C_a R_{eH}}} \text{ mm}$$

式中：

α_p ——板格长宽比的修正因子：

$$\alpha_p = 1.2 - \frac{s}{2100l_p}, \text{ 但应不大于 } 1.0;$$

s ——扶强材间距，mm；

l_p ——板格长度，应取主要支撑构件的间距 S ，m；

p_2 ——计算点处水平二晃荡载荷，见 2.5.2；

C_a ——板的许用弯曲应力系数：

$$C_a = \beta_a - \alpha_a \frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}, \text{ 但不大于 } C_{a-\max}$$

α_a ， β_a ， $C_{a-\max}$ 为许用弯曲应力因子，取值见表 3.3.1；

许用弯曲应力因子

表 3.3.1

结构构件		β_a	α_a	$C_{a-\max}$
液货舱区域的纵向强力构件，包括， 但不限于： —甲板； —平面纵舱壁； —水平槽形纵舱壁； —液货舱区域的纵桁和水平桁。	纵向加筋板	1.05	0.5	0.9
	横向或垂向加筋板	1.05	1.0	0.9
其他强力构件，包括： —垂直槽形纵舱壁； —平面横舱壁； —槽形横舱壁； —横向水平桁和强框架； —液货舱区域以外的液舱边界板和主要支撑构件的板。		0.95	0	0.95

σ_{hg} ——载荷计算点处的船体梁弯曲应力，按下式计算：

$$\sigma_{hg} = \left(\frac{(z_0 - z_{NA-net50}) M_{sw-perm-sea}}{I_{v-net50}} \right) \times 10^{-3} \quad \text{N/mm}^2$$

z_0 ——载荷计算点处的垂向坐标，m；

$z_{NA-net50}$ ——从基线到水平中和轴的距离，m；

$M_{sw-perm-sea}$ ——航行工况下计算位置处的船体梁中拱和中垂许用静水弯矩，kN·m，

取中拱和中垂弯矩的最大值；

$I_{v-net50}$ ——计算纵向位置处的船体梁净剖面垂向惯性矩， m^4 。

(2) 若液舱边界板为槽形舱壁，其腹板和面板净厚度 t_{net} 应不小于：

$$t_{net}=0.0158b_p\sqrt{\frac{p_2}{C_aR_{eH}}} \quad mm$$

式中：

b_p ——腹板或面板的宽度， mm ；

C_a ——板的许用弯曲应力系数，取 0.85。

3.3.2 液舱边界板上的扶强材

液舱边界板上扶强材的净剖面模数 Z_{net} 应不小于：

$$Z_{net}=\frac{p_2s{l_{bdg}}^2}{f_{bdg}C_sR_{eH}} \quad cm^3$$

式中：

s ——扶强材间距， mm ；

l_{bdg} ——扶强材的有效弯曲跨距， m ；

p_2 ——计算点处水平二晃荡载荷，见 2.5.2；

C_s ——许用弯曲应力系数：

$$C_s=\beta_s-\alpha_s\frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}, \text{ 但不大于 } C_{s-max}$$

α_s ， β_s ， C_{s-max} 为许用弯曲应力因子，取值见表 3.3.2；

f_{bdg} ——弯矩因子：

$f_{bdg}=12$ ，两端固支的扶强材，通常适用于所有连续的扶强材；

$f_{bdg}=8$ ，一端或者两端简支的水平扶强材，通常适应于不连续的扶强材。

扶强材许用弯曲应力因子表

表 3.3.2

结构构件		β_s	α_s	$C_{s-\max}$
液货舱区域的纵向强力构件，包括但不限于： —甲板纵骨； —纵舱壁扶强材； —液货舱区域的纵桁和水平桁上的加强筋。	纵向骨材	0.95	1.0	0.85
	横向或垂向骨材	0.8	0	0.8
其他强力构件，包括： —横舱壁扶强材； —横向水平桁和强框架上的加强筋； —液货舱区域以外的液舱边界板上的扶强材和主要支撑构件上的加强筋。		1.0	0	0.85

3.3.3 液舱内制荡舱壁

(1) 制荡舱壁板

制荡舱壁板的净厚度应不小于：

$$t_{net} = 0.0158 \alpha_p s \sqrt{\frac{p_s}{C_a R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

式中：

α_p ——板格长宽比的修正因子：

$$\alpha_p = 1.2 - \frac{s}{2100 l_p}, \quad \text{但应不大于 } 1.0;$$

s ——扶强材间距，mm；

l_p ——板格长度，应取主要支撑构件的间距 S ，m；

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分，见 2.5.2；

C_a ——板的许用弯曲应力系数：

$$C_a = \beta_a - \alpha_a \frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}, \quad \text{但不大于 } C_{a-\max}$$

α_a ， β_a ， $C_{a-\max}$ 为许用弯曲应力因子，取值见表 3.2.1；

σ_{hg} ——载荷计算点处的船体梁弯曲应力，按下式计算：

$$\sigma_{hg} = \left(\frac{(z_0 - z_{NA-net50}) M_{sw-perm-sea}}{I_{v-net50}} \right) \times 10^{-3} \quad \text{N/mm}^2$$

z_0 ——载荷计算点处的垂向坐标， m；

$z_{NA-net50}$ ——从基线到水平中和轴的距离， m；

$M_{sw-perm-sea}$ ——航行工况下计算位置处的船体梁中拱和中垂许用静水弯矩， kN·m，

取中拱和中垂弯矩的最大值；

$I_{v-net50}$ ——计算纵向位置处的船体梁净剖面垂向惯性矩， m⁴。

(2) 扶强材

制荡舱壁上的扶强材的净剖面模数 Z_{net} 应不小于：

$$Z_{net} = \frac{p_s s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

式中：

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分， 见 2.5.2；

s ——扶强材间距， mm；

l_{bdg} ——扶强材的有效弯曲跨距， m；

C_s ——许用弯曲应力系数：

$$C_s = \beta_s - \alpha_s \frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}, \quad \text{但不大于 } C_{s-\max}$$

α_s ， β_s ， $C_{s-\max}$ 为许用弯曲应力因子， 取值见表 3.3.2；

f_{bdg} ——弯矩因子：

$f_{bdg} = 12$ ， 两端固支的扶强材， 通常适用于所有连续的扶强材

$f_{bdg} = 8$ ， 一端或者两端简支的水平扶强材， 通常适应于不连续的扶强材。

(3) 水平桁材

液舱内制荡舱壁上的水平桁材净剖面模数 Z_{net} 应不小于：

$$Z_{net} = 1000 \frac{p_s s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

式中:

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分, 见 2.5.2;

S ——主要支撑构件的间距, m;

l_{bdg} ——主要支撑构件的有效弯曲跨距, m;

f_{bdg} ——弯矩因子:

$f_{bdg} = 12$, 适用于两端固支, 承受均布载荷的主要支撑构件;

C_s ——许用弯曲应力系数, 取 0.7。

液舱内制荡舱壁上的水平桁材的净剪切面积 A_{net} 应不小于:

$$A_{net} = 10 \frac{f_{shr} p_s S l_{shr}}{C_t \tau_{eH}} \quad \text{cm}^2$$

式中:

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分, 见 2.5.2;

f_{shr} ——剪力因子:

$f_{shr} = 0.5$, 适用于两端固支, 承受均布载荷的主要支撑构件;

l_{shr} ——主要支撑构件的有效剪切跨距, m;

$\tau_{eH} = R_{eH} / \sqrt{3} \quad \text{N/mm}^2$;

C_t ——许用剪切应力系数, 取 0.7。

(4) 垂直桁材

液舱内制荡舱壁上的垂直桁材的净剖面模数 Z_{net} 应不小于:

$$Z_{net} = 1000 \frac{p_s S l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

式中:

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分, 见 2.5.2;

S ——主要支撑构件的间距, m;

l_{bdg} ——主要支撑构件的有效弯曲跨距, m;

C_s ——许用弯曲应力系数, 取 0.7;

$f_{bdg}=12$ ，适用于两端固支，承受均布载荷的主要支撑构件。

液舱内制荡舱壁上的垂直桁材的净剪切面积 A_{net} 应不小于：

$$A_{net}=10\frac{f_{shr}p_sSl_{shr}}{C_t\tau_{eH}} \quad \text{cm}^2$$

式中：

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分，见 2.5.2；

S ——主要支撑构件的间距，m；

l_{shr} ——主要支撑构件的有效剪切跨距，m；

C_t ——许用剪切应力系数，取 0.7；

$$\tau_{eH}=R_{eH}/\sqrt{3} \quad \text{N/mm}^2；$$

$$f_{shr}=0.5。$$

3.3.4 液舱内主要支撑构件

(1) 液舱内主要支撑构件的腹板净厚度 t_{net} 应不小于：

$$t_{net}=0.0158\alpha_p s \sqrt{\frac{p_s}{C_a R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

式中：

α_p ——板格长宽比的修正因子：

$$\alpha_p=1.2-\frac{s}{2100l_p}，\text{ 但应不大于 }1.0；$$

s ——扶强材间距，mm；

l_p ——板格长，板格长边上的局部支撑构件间的平均间距，一般取为防倾肘板的间距，

m；

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分，见 2.5.2；

C_a ——板的许用弯曲应力系数，计算公式见表 3.2.1；

(2) 液舱内主要支撑构件腹板加强筋的净剖面模数 Z_{net} 应不小于：

$$Z_{net} = \frac{p_s s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

式中：

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分，见 2.5.2；

s ——扶强材间距，mm；

l_{bdg} ——扶强材的有效弯曲跨距，m；

C_s ——许用弯曲应力系数：

$$C_s = \beta_s - \alpha_s \frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}, \text{ 但不大于 } C_{s-\max}$$

α_s ， β_s ， $C_{s-\max}$ 为许用弯曲应力因子，取值见表 3.2.2；

f_{bdg} ——弯矩因子：

$f_{bdg} = 12$ ，两端固支的扶强材，通常适用于所有连续的扶强材；

$f_{bdg} = 8$ ，一端或者两端简支的水平扶强材，通常适应于不连续的扶强材。

(3) 主要支撑构件的防倾肘板

防倾肘板有效长度 d 范围内的防倾肘板根部净剖面模数 Z_{net} 和扣除开孔和切口后的净剪切面积 A_{net} 应不小于：

$$Z_{net} = \frac{1000 P_s s_{trip} h^2}{2 C_s R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

$$A_{net} = 10 \frac{P_s s_{trip} h}{C_t \tau_{eH}} \quad \text{cm}^2$$

式中：

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分，见 2.5.2；

s_{trip} ——防倾肘板之间或防倾肘板与其他主要支撑构件或舱壁之间的平均间距，m；

h ——防倾肘板的高度，m，见图 3.3.4。

C_s ：防倾肘板的许用弯曲应力系数，取 0.75

C_t ：防倾肘板的许用剪切应力系数，取 0.75

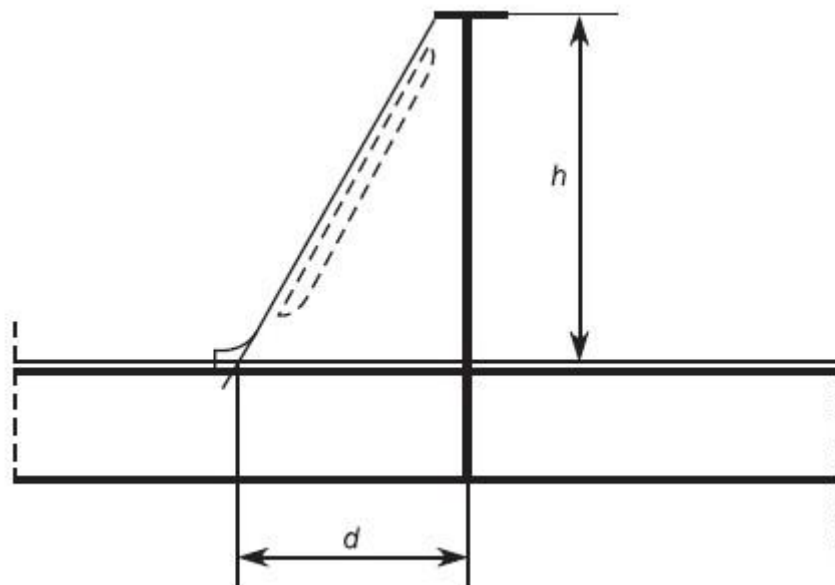


图 3.3.4 防倾肘板有效长度

3.4 水平三晃荡载荷下液舱结构尺寸评估

3.4.1 液舱水密边界上的板

(1) 液舱边界板的净厚度应不小于：

$$t_{net} = \frac{0.0158\alpha_p s}{C_d} \sqrt{\frac{p_3}{C_a R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

式中：

α_p ——板格长宽比的修正因子：

$$\alpha_p = 1.2 - \frac{s}{2100l_p}, \quad \text{但应不大于 } 1.0;$$

s ——扶强材间距，mm；

l_p ——板格长，取主要支撑构件或板格间断构件的间距，m；

p_3 ——计算点处的冲击压力，见 2.5.4；

C_a ——板的许用弯曲应力系数，取 1.0；对 CSR 油船，取 1.05；

C_d ——板能力修正系数，取 1.2。

(2) 若液舱边界板为槽形舱壁，其腹板和面板净厚度 t_{net} 应不小于：

$$t_{net} = \frac{0.0158b_p}{C_d} \sqrt{\frac{p_3}{C_a R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

式中:

b_p ——腹板或面板的宽度, mm;

C_a ——板的许用弯曲应力系数, 取 0.9; 对 CSR 油船, 取 0.95;
其他定义同上。

3.4.2 液舱水密边界上的扶强材

承受冲击压力的液舱边界板上的扶强材的净塑性剖面模数 Z_{P-net} 应不小于:

$$Z_{P-net} = \frac{p_3 s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

式中:

p_3 ——计算点处的冲击压力, 见 2.5.4;

s ——扶强材间距, mm;

l_{bdg} ——扶强材的有效弯曲跨距, m;

C_s ——许用弯曲应力系数, 取 0.9; 对 CSR 油船, 取 0.95;

f_{bdg} ——弯矩因子, 取 16。

3.4.3 液舱边界板上主要支撑构件

(1) 水平桁材

液舱边界板上水平桁材的净剖面模数 Z_{net} 应不小于:

$$Z_{net} = 1000 \frac{p_3 S l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

式中:

p_3 ——水平桁材高度处的冲击压力, 见 2.5.4;

S ——主要支撑构件的间距, m;

l_{bdg} ——主要支撑构件的有效弯曲跨距, m;

f_{bdg} ——弯矩因子, $f_{bdg} = 12$, 适用于两端固支, 承受均布载荷的主要支撑构件;

C_s ——许用弯曲应力系数, 取 0.7; 对 CSR 油船, 取 0.75。

液舱边界板上水平桁材的净剪切面积 A_{net} 应不小于:

$$A_{net} = 10 \frac{f_{shr} p_3 S l_{shr}}{C_t \tau_{eH}} \quad \text{cm}^2$$

式中:

f_{shr} ——剪力因子: $f_{shr} = 0.5$, 适用于两端固支, 承受均布载荷的主要支撑构件;

p_3 ——水平桁材高度处的冲击压力, 见 2.5.4;

S ——主要支撑构件的间距, m;

l_{shr} ——主要支撑构件的有效剪切跨距, m;

$$\tau_{eH} = R_{eH} / \sqrt{3} \quad \text{N/mm}^2;$$

C_t ——许用剪切应力系数, 取 0.7; 对 CSR 油船, 取 0.75。

(2) 垂直桁材

液舱边界板上垂直桁材的净剖面模数 Z_{net} 应不小于:

$$Z_{net} = 1000 \frac{p_3 S l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

式中:

p_3 ——垂直桁材上的冲击压力, 取冲击作用范围内数值计算结果的最大值, 见 2.5.4;

S ——主要支撑构件的间距, m;

l_{bdg} ——主要支撑构件的有效弯曲跨距, m;

C_s ——许用弯曲应力系数, 取 0.7; 对 CSR 油船, 取 0.75;

对于垂直桁材顶部:

$$f_{bdg} = 12 \frac{l_{bdg}^4}{(l_{bdg} - b)^3 (l_{bdg} + 3b)};$$

对于垂直桁材底部:

$$f_{bdg} = 12 \frac{l_{bdg}^4}{(l_{bdg} - b)^2 (l_{bdg}^2 + 2b l_{bdg} + 3b^2)};$$

b ——冲击载荷作用区域顶部距垂直桁材有效跨距顶部的距离。

液舱边界板上垂直桁材的净剪切面积 A_{net} 应不小于:

$$A_{net} = 10 \frac{f_{shr} p_3 S l_{shr}}{C_t \tau_{eH}} \quad \text{cm}^2$$

式中:

p_3 ——垂直桁材上的冲击压力，取冲击作用范围内数值计算结果的最大值，见 2.5.4；

S ——主要支撑构件的间距，m；

l_{shr} ——主要支撑构件的有效剪切跨距，m；

$$\tau_{eH} = R_{eH} / \sqrt{3} \quad \text{N/mm}^2;$$

C_t ——许用剪切应力系数，取 0.7；对 CSR 油船，取 0.75；

对于垂直桁材顶部：

$$f_{shr} = \frac{(l_{bdg} - b)^3 l_{bdg} - 0.5(l_{bdg} - b)^4}{l_{bdg}^4};$$

对于垂直桁材底部：

$$f_{shr} = \frac{(l_{bdg} - b)l_{bdg}^3 - (l_{bdg} - b)^3 l_{bdg} + 0.5(l_{bdg} - b)^4}{l_{bdg}^4};$$

b ——冲击载荷作用区域顶部距垂直桁材有效跨距顶部距离。

3.4.4 液舱内制荡舱壁

(1) 制荡舱壁板

制荡舱壁板的净厚度应不小于：

$$t_{net} = \frac{0.0158 \alpha_p s}{C_d} \sqrt{\frac{p_3}{C_a R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

式中：

α_p ——板格长宽比的修正因子：

$$\alpha_p = 1.2 - \frac{s}{2100 l_p}, \quad \text{但应不大于 1.0};$$

s ——扶强材间距，mm；

l_p ——板格长，取主要支撑构件或板格间断构件的间距，m；

p_3 ——计算点处的冲击压力，见 2.5.4；

C_a ——板的许用弯曲应力系数，取 1.0；对 CSR 油船，取 1.05；

C_d ——板能力修正系数，取 1.2。

(2) 制荡舱壁扶强材

制荡舱壁上扶强材的净塑性剖面模数 Z_{p-net} 应不小于：

$$Z_{p-net} = \frac{p_3 s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \text{ cm}^3$$

式中:

p_3 ——计算点处的冲击压力, 见 2.5.4;

s ——扶强材间距, mm;

l_{bdg} ——扶强材的有效弯曲跨距, m;

C_s ——许用弯曲应力系数, 取 0.9; 对 CSR 油船, 取 0.95;

f_{bdg} ——弯矩因子, 取 16。

(3) 水平桁材

液舱内制荡舱壁上水平桁材的净剖面模数 Z_{net} 应不小于:

$$Z_{net} = 1000 \frac{p_3 S l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \text{ cm}^3$$

式中:

p_3 ——水平桁材高度处的冲击压力, 见 2.5.4;

S ——主要支撑构件的间距, m;

l_{bdg} ——主要支撑构件的有效弯曲跨距, m;

f_{bdg} ——弯矩因子: $f_{bdg} = 12$, 适用于两端固支, 承受均布载荷的主要支撑构件;

C_s ——许用弯曲应力系数, 取 0.7; 对 CSR 油船, 取 0.75。

液舱内制荡舱壁上水平桁材的净剪切面积 A_{net} 应不小于:

$$A_{net} = 10 \frac{f_{shr} p_3 S l_{shr}}{C_t \tau_{eH}} \text{ cm}^2$$

式中:

f_{shr} ——剪力因子:

$f_{shr} = 0.5$, 适用于两端固支, 承受均布载荷的主要支撑构件;

p_3 ——水平桁材高度处的冲击压力, 见 2.5.4;

S ——主要支撑构件的间距, m;

l_{shr} ——主要支撑构件的有效剪切跨距, m;

$$\tau_{eH} = R_{eH} / \sqrt{3} \quad \text{N/mm}^2;$$

C_t ——许用剪切应力系数，取 0.7；对 CSR 油船，取 0.75。

(4) 垂直桁材

液舱内制荡舱壁上垂直桁材的净剖面模数 Z_{net} 应不小于：

$$Z_{net} = 1000 \frac{p_3 S l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

式中：

p_3 ——垂直桁材上的冲击压力，取冲击作用范围内数值计算结果的最大值，见 2.5.4；

S ——主要支撑构件的间距，m；

l_{bdg} ——主要支撑构件的有效弯曲跨距，m；

C_s ——许用弯曲应力系数，取 0.7；对 CSR 油船，取 0.75；

对于垂直桁材顶部：

$$f_{bdg} = 12 \frac{l_{bdg}^4}{(l_{bdg} - b)^3 (l_{bdg} + 3b)} ;$$

对于垂直桁材底部：

$$f_{bdg} = 12 \frac{l_{bdg}^4}{(l_{bdg} - b)^2 (l_{bdg}^2 + 2b l_{bdg} + 3b^2)} ;$$

b ——冲击载荷作用区域顶部距垂直桁材有效跨距顶部距离。

液舱内制荡舱壁上垂直桁材的净剪切面积 A_{net} 应不小于：

$$A_{net} = 10 \frac{f_{shr} p_3 S l_{shr}}{C_t \tau_{eH}} \quad \text{cm}^2$$

式中：

p_3 ——垂直桁材上的冲击压力，取冲击作用范围内数值计算结果的最大值，见 2.5.4；

S ——主要支撑构件的间距，m；

l_{shr} ——主要支撑构件的有效剪切跨距，m；

C_t ——许用剪切应力系数，取 0.7；对 CSR 油船，取 0.75；

$$\tau_{eH} = R_{eH} / \sqrt{3} \quad \text{N/mm}^2;$$

对于垂直桁材顶部：

$$f_{shr} = \frac{(l_{bdg} - b)^3 l_{bdg} - 0.5(l_{bdg} - b)^4}{l_{bdg}^4};$$

对于垂直桁材底部:

$$f_{shr} = \frac{(l_{bdg} - b)l_{bdg}^3 - (l_{bdg} - b)^3 l_{bdg} + 0.5(l_{bdg} - b)^4}{l_{bdg}^4};$$

b ——冲击载荷作用区域顶部距垂直桁材有效跨距顶部距离。

3.4.5 液舱内主要支撑构件

(1) 主要支撑构件的腹板净厚度 t_{net} 应不小于:

$$t_{net} = \frac{0.0158\alpha_p s}{C_d} \sqrt{\frac{p_3}{C_a R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

式中:

α_p ——板格长宽比的修正因子:

$$\alpha_p = 1.2 - \frac{s}{2100l_p}, \quad \text{但应不大于 } 1.0;$$

s ——扶强材间距, mm;

l_p ——板格长, 取主要支撑构件或板格间断构件的间距, m;

p_3 ——计算点处的冲击压力, 见 2.5.4;

C_a ——板的许用弯曲应力系数, 取 1.0; 对 CSR 油船, 取 1.05;

C_d ——板能力修正系数, 取 1.2。

(2) 液舱内主要支撑构件腹板加强筋的净塑性剖面模数 Z_{P-net} 应不小于:

$$Z_{P-net} = \frac{p_3 s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

式中:

p_3 ——计算点处的冲击压力, 见 2.5.4;

s ——扶强材间距, mm;

l_{bdg} ——扶强材的有效弯曲跨距, m;

C_s ——许用弯曲应力系数, 取 0.9; 对 CSR 油船, 取 0.95;

f_{bdg} ——弯矩因子, 取 16。

附录 1 晃荡载荷直接计算

1 基本原理

本附录采用流体体积法对液货舱的晃荡载荷进行直接计算，假定如下：

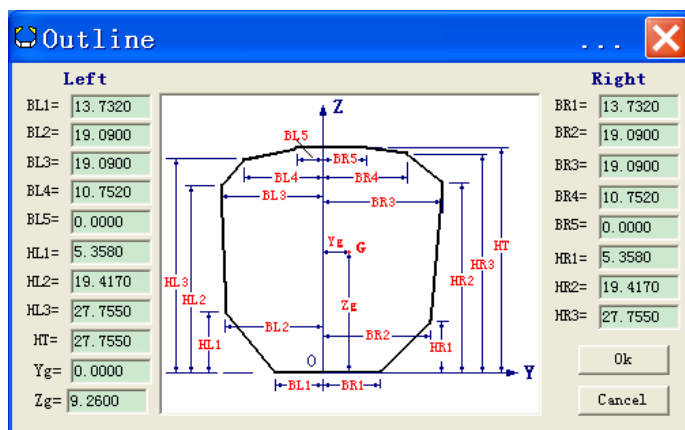
- (1) 流体是不可压缩的粘性流体；
- (2) 流体运动存在自由表面，且舱内流体在运动过程中不损失；
- (3) 不考虑温度的变化。

2 晃荡计算程序

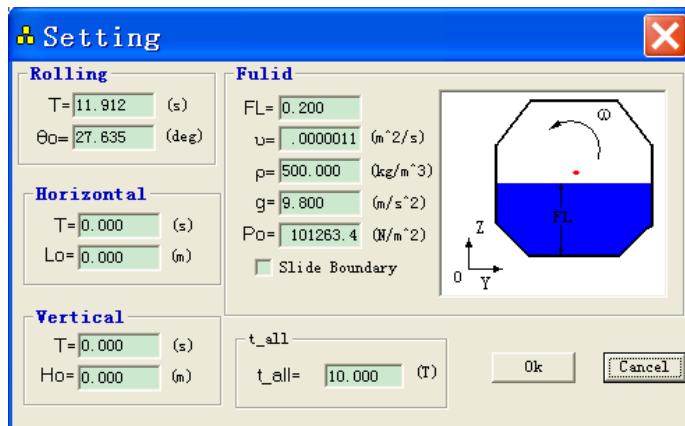
采用 CCS 晃荡直接计算软件对晃荡载荷及运动进行计算。本附录给出了软件输入、输出的示例及建模的基本要求，具体操作参见程序使用手册。

(1) 输入

软件的输入包括目标液舱的几何尺寸（如附图 A1 所示）和激励参数（如附图 A2 所示）。



附图 A1 液舱几何尺寸设置



附图 A2 液舱激励参数设置

(2) 输出

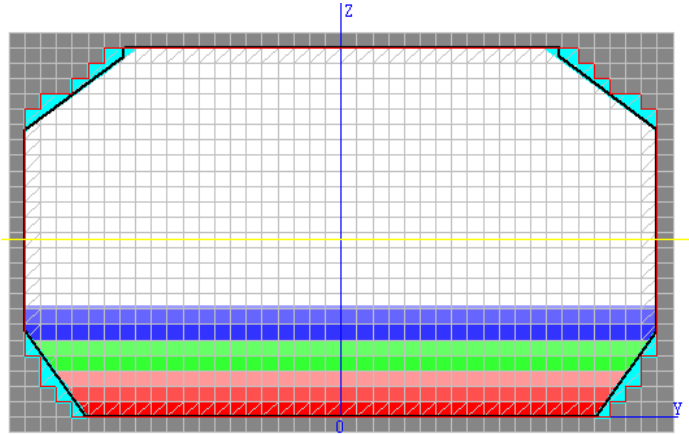
软件的输出可包括测点的速度、加速度时历数据，以及动力放大后的压力时历数据。

连接		排序/刷新		数据工具		公式显示				
A2		fx (s)								
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	t-step	t/T	(9:1)	U	V	Au	Av	(10:5)	U	V
2	(s)	null	(15.575:1.525)	m/s	m/s	m/s ²	m/s ²	(20.025:13)	m/s	m/s
3	0.005	0	1.68E+05	5.13E-04	8.29E-05	5.13E-02	8.29E-03	1.09E+05	1.64E-03	2.1E-03
4	0.015	0	1.68E+05	9.11E-04	1.42E-04	3.98E-02	5.94E-03	1.09E+05	2.93E-03	4.1E-03
5	0.025	0	1.68E+05	1.25E-03	1.88E-04	3.43E-02	4.54E-03	1.09E+05	4.10E-03	6.1E-03
6	0.035	0	1.67E+05	1.55E-03	2.21E-04	3.00E-02	3.36E-03	1.09E+05	5.19E-03	7.1E-03
7	0.045	0	1.67E+05	1.81E-03	2.44E-04	2.60E-02	2.24E-03	1.09E+05	6.20E-03	9.1E-03
8	0.055	0	1.67E+05	2.03E-03	2.55E-04	2.21E-02	1.12E-03	1.09E+05	7.14E-03	1.1E-02
9	0.065	0	1.67E+05	2.22E-03	2.55E-04	1.81E-02	6.18E-06	1.09E+05	8.00E-03	1.1E-02
10	0.075	0	1.67E+05	2.36E-03	2.44E-04	1.42E-02	-1.11E-03	1.09E+05	8.79E-03	1.1E-02
11	0.085	0.01	1.67E+05	2.46E-03	2.22E-04	1.02E-02	-2.23E-03	1.09E+05	9.50E-03	1.1E-02
12	0.095	0.01	1.67E+05	2.52E-03	1.88E-04	6.28E-03	-3.35E-03	1.09E+05	1.01E-02	1.1E-02
13	0.105	0.01	1.67E+05	2.55E-03	1.44E-04	2.32E-03	-4.47E-03	1.09E+05	1.07E-02	1.1E-02
14	0.115	0.01	1.67E+05	2.53E-03	8.77E-05	-1.65E-03	-5.59E-03	1.09E+05	1.12E-02	1.1E-02
15	0.125	0.01	1.67E+05	2.47E-03	2.07E-05	-5.62E-03	-6.71E-03	1.09E+05	1.16E-02	1.1E-02
16	0.135	0.01	1.67E+05	2.38E-03	-5.76E-05	-9.60E-03	-7.83E-03	1.09E+05	1.19E-02	1.1E-02
17	0.145	0.01	1.67E+05	2.24E-03	-1.47E-04	-1.36E-02	-8.95E-03	1.09E+05	1.22E-02	1.1E-02
18	0.155	0.01	1.67E+05	2.07E-03	-2.48E-04	-1.76E-02	-1.01E-02	1.09E+05	1.24E-02	1.1E-02
19	0.165	0.01	1.67E+05	1.85E-03	-3.60E-04	-2.16E-02	-1.12E-02	1.09E+05	1.25E-02	1.1E-02
20	0.175	0.01	1.67E+05	1.59E-03	-4.83E-04	-2.56E-02	-1.23E-02	1.08E+05	1.25E-02	1.1E-02
21	0.185	0.01	1.67E+05	1.30E-03	-6.17E-04	-2.96E-02	-1.34E-02	1.08E+05	1.25E-02	1.1E-02
22	0.195	0.01	1.66E+05	9.63E-04	-7.63E-04	-3.36E-02	-1.46E-02	1.08E+05	1.24E-02	1.1E-02
23	0.205	0.01	1.66E+05	5.86E-04	-9.20E-04	-3.76E-02	-1.57E-02	1.08E+05	1.22E-02	1.1E-02
24	0.215	0.01	1.66E+05	1.70E-04	-1.09E-03	-4.16E-02	-1.68E-02	1.08E+05	1.19E-02	1.1E-02
25	0.225	0.01	1.66E+05	-2.86E-04	-1.27E-03	-4.57E-02	-1.79E-02	1.08E+05	1.15E-02	9.1E-03
26	0.235	0.01	1.66E+05	-7.83E-04	-1.46E-03	-4.97E-02	-1.91E-02	1.08E+05	1.11E-02	8.1E-03
27	0.245	0.02	1.66E+05	-1.32E-03	-1.66E-03	-5.37E-02	-2.02E-02	1.08E+05	1.06E-02	6.1E-03
28	0.255	0.02	1.66E+05	-1.00E-03	-1.97E-03	-5.70E-02	-2.12E-02	1.08E+05	0.99E-02	4.1E-03

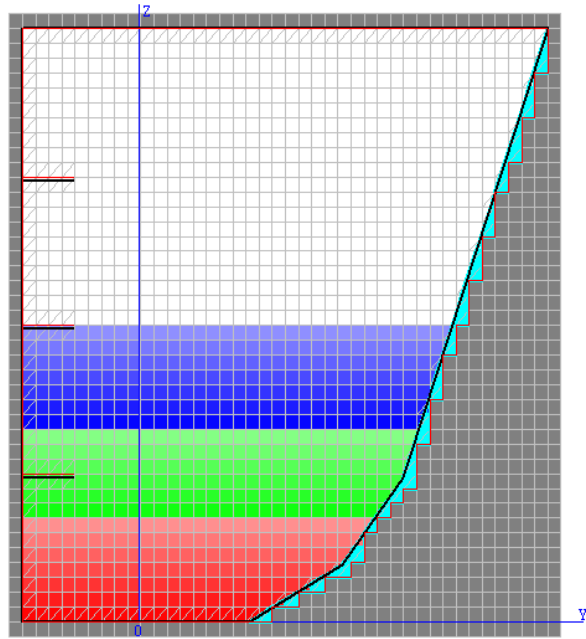
附图 A3 计算结果输出

(3) 建模原则

- ① 边界划分应尽量接近实际液舱几何外形，Z 坐标轴应尽量设置在液舱水平方向的中间区域，如附图 A4 所示；
- ② 通过输入构件的端点坐标来添加内部构件，网格划分时应尽量使内部构件靠近网格边界，内部构件处的压力输出方法同普通固壁边界，如附图 A5 所示；
- ③ 网格划分时应尽量使边长比接近 1。



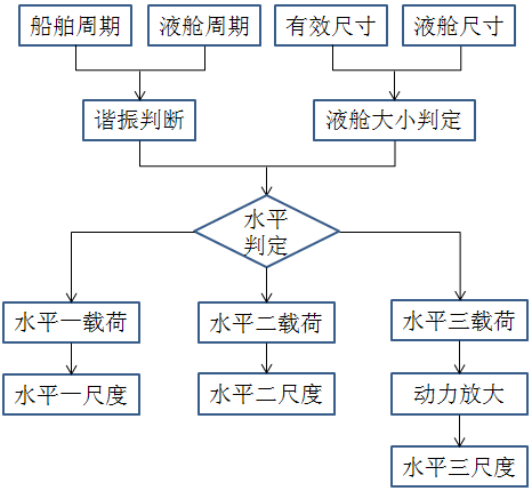
附图 A4 晃荡计算网格示意图



附图 A5 建模及网格划分示意

附录 2 应用示例

液舱晃荡载荷计算及尺度评估流程可分为三步，如附图 B1。下面以某 2.7 万吨油船及某薄膜型 LNG 船为例，说明计算流程。



附图 B1 计算流程

1 船型数据

1.1 某 2.7 万吨油船主尺度及液舱主要参数见表 1.1

表 1.1 2.7 万吨油船主尺度

参 数	单位	数值
船 长	m	168
船 宽	m	27
满载吃水	m	9.2
压载吃水	m	6.4
方形系数	-	0.84
设计航速	knot	14
舱 长	m	21.6
舱 宽	m	11.62
舱 高	m	12.42

1.2 某薄膜型 LNG 船主尺度及液舱主要参数见表 1.2

表 1.2 某薄膜型 LNG 船主尺度

参 数	单位	数值
船 长	m	266
船 宽	m	43.5
满载吃水	m	12.3
压载吃水	m	9.4

2 晃荡水平判断

2.1 某 2.7 万吨油船纵向晃荡

2.1.1 液舱大小判断

$$l/L=0.129 < 0.13$$

根据液舱大小判断衡准，属于小液舱

2.1.2 谐振程度判断

满载和压载工况下船舶运动周期与幅值计算结果见表 2.1.2(1)

表 2.1.2(1) 船舶运动周期与幅值

满载		压载	
周期/s	幅值/°	周期/s	幅值/°
11.36	11.33	10.46	11.33

不同装载率下液舱固有周期计算结果见表 2.1.2(2)

表 2.1.2(2) 不同装载率下液舱固有周期

装载率	周期/°	装载率	周期/°
5%	17.52	55%	6.04
10%	12.44	60%	5.90
15%	10.23	65%	5.79
20%	8.94	70%	5.70
25%	8.09	75%	5.62
30%	7.48	80%	5.56
35%	7.03	85%	5.51
40%	6.69	90%	5.47
45%	6.42	95%	5.43
50%	6.21		

根据晃荡水平判定衡准，10%~30%为水平二晃荡，其余装载率为水平一晃荡。

2.2 某薄膜型 LNG 船横向晃动

2.2.1 液舱大小判断

$$b_s/B = 0.87 > 0.56$$

根据液舱大小判断衡准，属于大液舱

2.2.2 谐振程度判断

通过计算满载和压载工况下船舶运动周期与不同装载率下液舱固有周期结果，并根据晃动水平判定衡准，在不限制装载的情况下，10%~70%装载率为水平三晃动。

3 晃动载荷计算

3.1 某 2.7 万吨油船纵向晃动

3.1.1 水平一晃动载荷

根据水平一计算公式，得到水平一计算载荷由于液面上升增加的计算压头和载荷为

$$h_{level1} = 2.164m$$

$$P_{level1} = 21.74kPa$$

3.1.2 水平二晃动载荷

根据水平二计算公式，得到水平二计算载荷（不含静压力）见表 3.1.2。

表 3.1.2 水平二晃动载荷

装载率	压头/m	压力/kPa
10%	3.45	34.67
15%	6.67	67.06
20%	7.40	74.43
25%	6.34	63.72
30%	5.61	56.38

3.2 某薄膜型 LNG 船

3.2.1 水平一晃动载荷

根据水平一计算公式，得到水平一计算载荷。

3.2.2 水平二晃动载荷

根据水平二计算公式，得到水平二计算载荷。

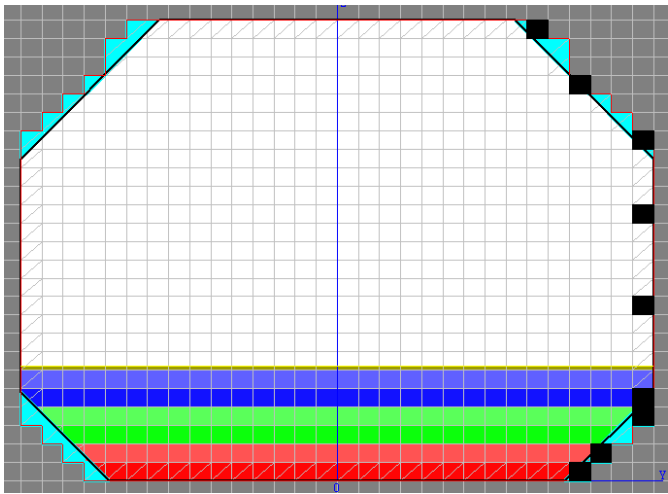
3.2.3 水平三晃动载荷

以某薄膜型 LNG 船液舱 25%装载率下的横向晃动为例，计算水平三压力。液舱形式、

网格划分及监测点设置如附图 B2, 参数设置见表 3.2.3(1), 以板为例, p_3 的结果见表 3.2.3(2)。

表 3.2.3(1) 液舱尺度与运动参数

参数	定义	单位	数值
l	舱长	m	47.7
b	舱宽	m	38.2
h	舱高	m	27.8
hu	顶边舱斜板高度	m	8.3
γ_u	顶边舱斜板角度	deg	135
hd	底边舱斜板高度	m	5.4
γ_b	底边舱斜板角度	deg	135
fl	装载率	-	25%
ρ	液体密度	t/m3	0.5
T	激励周期	s	11.9
θ	激励幅值	deg	27.6



附图 B2 液舱示意图

表 3.2.3(2) 水平三压力计算结果

测点高度	放大系数	压力/kPa
2%	1.007	201.1
6%	1.000	194.2
14%	1.052	231.8
18%	1.074	270.8
38%	1.000	250.5
58%	1.099	153.8
74%	1.000	70.6

测点高度	放大系数	压力/kPa
86%	1.000	0
98%	1.000	0

4 边界尺寸计算

4.1 某 2.7 万吨油船纵向晃动

根据水平一、水平二晃动载荷下液舱构件评估方法，以舱壁板厚为例，得到横舱壁板厚见表 4.1。

表 4.1 横舱壁板计算结果

计算高度 (m)	槽形横舱壁面板板厚 (mm)	槽形横舱壁腹板板厚 (mm)
0	14.8	13.9
0.509	14.5	13.6
2.068	13.5	12.7
4.57	11.8	11.1
6.729	11.3	10.6
10.237	11.3	10.6

4.2 某薄膜型 LNG 船横向晃动

根据水平三晃动载荷下液舱构件评估方法，在 25%装载率下，以舱壁板厚为例，得到纵舱壁板厚要求值见表 4.2。

表 4.2 水平三横舱壁板计算结果

计算高度	内壳板板厚 (mm)
2%	11.6
6%	11.4
14%	11.5
18%	12.4
38%	12.0
58%	9.4
74%	6.4
86%	0.0
98%	0.0