



中国船级社

液舱晃荡载荷及构件尺寸评估指南

2014

实施日期：2014年7月1日

目录

第 1 节 一般规定	1
1.1 一般要求	1
1.2 适用范围	1
1.3 参数及符号定义	1
第 2 节 晃荡载荷计算	4
2.1 一般规定	4
2.2 晃荡谐振范围	4
2.3 船体运动固有周期	5
2.4 液舱内液体的运动固有周期	5
2.5 计算高度	7
2.6 晃荡运动及其载荷	7
2.7 晃荡载荷应用	10
第 3 节 晃荡载荷下液舱构件尺寸评估	12
3.1 一般要求	12
3.2 水平一晃荡载荷下液舱结构尺寸评估	12
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	24
附录 1: 晃荡载荷直接计算	31
1 基本原理	31
2 晃荡计算程序	31
附录 2: 应用示例	34
1 船型数据	34
2 晃荡水平判断	34
3 晃荡载荷计算	35
4 边界尺度计算	37

第 1 节 一般规定

1.1 一般要求

1.1.1 本指南规定了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 晃荡载荷的计算方法应满足本指南第 2 节要求。

1.1.3 液舱区域船体构件应满足本指南第 3 节要求。

1.2 适用范围

1.2.1 本指南适用于油船、化学品船、薄膜型液化天然气运输船（LNG 船）、散货船、矿砂船等。

1.2.2 本指南适用于所有液货舱、压载舱及容积大于 100m^3 的其他液舱，但不适用于散货船用作压载的干货舱。

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。

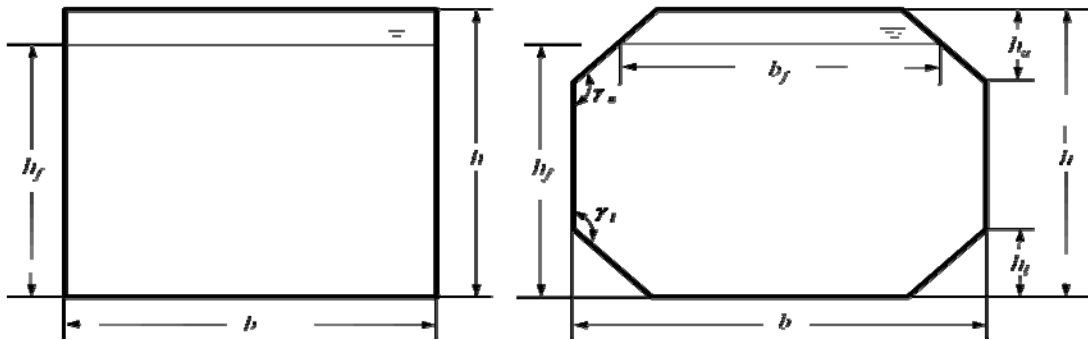


图 1.3.1 (1) 典型液舱横剖面

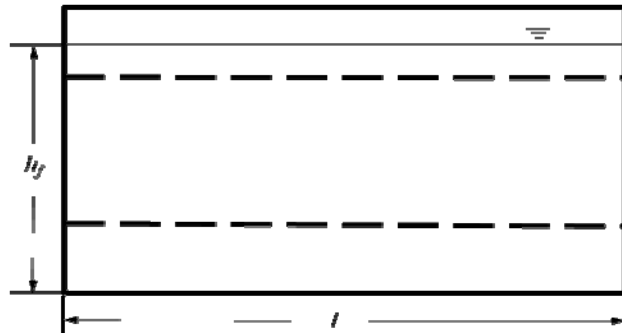


图 1.3.1 (2) 典型液舱纵剖面

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
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

B ——船宽

D ——型深

d ——吃水

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平均吃水, m;

V ——航速, kn;

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, 为适用时的 ρ_w 或 ρ_L ;

σ_{yd} ——材料屈服应力, N/mm^2 ;

K ——材料系数, 按 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 5 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 本章中，除特殊说明外，采用的坐标系取右手坐标系，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自由运动而产生的晃荡载荷的计算方法。

2.1.2 经 CCS 认可，晃荡模型试验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。

2.2 晃荡谐振范围

2.2.1 晃荡载荷计算涉及到的工况、横摇回转半径 k_r 及初稳性高 GM 值见表 2.2.1。

计算工况表

表 2.2.1

装载状态	k_r	GM
满载	0.35B	取装载手册中所有工况的最小值，且不得大于 0.12B
压载	0.45B	取装载手册相应工况下的最大值，且不得小于 0.33B

2.2.2 当液舱运动固有周期 T 满足 $0.8T_{bal} < T < 1.2T_{full}$ 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} 分别为压载和满载吃水条件下的船体运动固有周期。

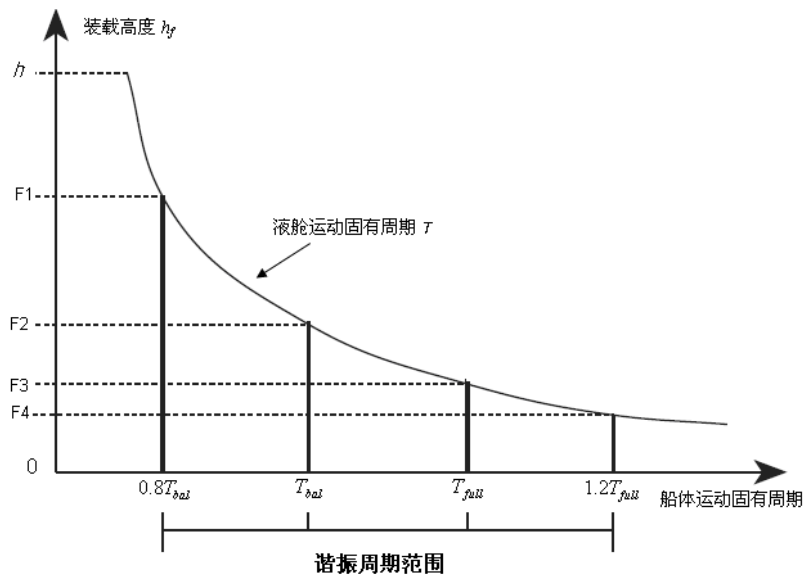


图 2.2.2 液舱谐振周期范围示意图

2.3. 船体运动固有周期

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：

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

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

2.4 液舱内液体的运动固有周期

2.4.1 液舱有效晃荡长度

对于含内部构件的液舱，有效晃荡长度定义如下：

(1) 纵向有效晃荡长度 l_s

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

式中， n_{WT} 为液舱内横向制荡舱壁的数目；

α_{WT} 为横向制荡舱壁系数， $\alpha_{WT} = \frac{A_{O_{WT}}}{A_{tk-t-h}}$

α_{wf} 为横向强框架系数， $\alpha_{wf} = \frac{A_{O-wf-h}}{A_{tk-t-h}}$ ；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：

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

$A_{O_{WT}}$ 为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} 为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} 为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} 为液舱内横向强框架的数目，不包括制荡舱壁。

(2) 横向有效晃荡宽度 b_s

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

式中, n_{WL} 为液舱内纵向制荡舱壁的数目;

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

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

A_{OWL} 为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} 为液舱纵剖面在所考虑的装载高度以下的总面积, m^2 ;

$A_{O-grd-h}$ 为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。

2.4.2 液舱有效装载高度

对于含内部构件的液舱, 有效装载高度定义如下:

(1) 纵向有效装载高度 h_l

$$h_l = h_f - h_{l1} [n / (n + 4)]^{1/2} - 0.45 h_{l2} \quad m$$

其中, h_{l1} 为舱底横向构件的高度, m , 如图 2.4.2 所示;

h_{l2} 为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 , 如图 2.4.2 所示;

n 为舱底横向构件数目;

(2) 横向有效装载高度 h_b

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

其中, h_{b1} 为舱底纵向构件的高度, m , 如图 2.4.2 所示;

h_{b2} 为非密闭横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 , 如图 2.4.2 所示;

m 为舱底纵向构件数目；

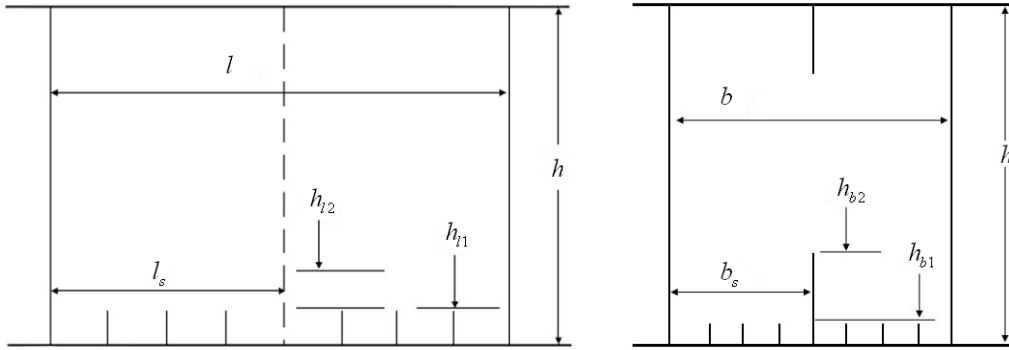


图 2.4.2 舱底构件示意图

2.4.3 液舱有效深度

对于含内部构件的液舱，液舱有效深度定义如下：

$$\text{液舱纵向有效深度： } H_l = h - h_{i1} [n / (n + 4)]^{1/2} - 0.45h_{i2} \quad \text{m}$$

$$\text{液舱横向有效深度： } H_b = h - h_{b1} [m / (m + 4)]^{1/2} - 0.45h_{b2} \quad \text{m}$$

2.4.4 液舱内液体晃荡运动周期

纵向晃荡运动周期：

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

横向晃荡运动周期：

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

2.5 计算高度

2.5.1 满舱的计算高度一般为 $0.05h$ 至 $0.95h$ ，计算步长为 $0.05h$ 。

2.5.2 部分装载的计算高度一般为 $0.05h$ 至 $0.95h$ ，计算步长为 $0.05h$ ，但不包括装载手册限制的装载高度。

2.6 晃荡运动及其载荷

2.6.1 根据液舱中晃荡运动和载荷的特点将晃荡运动及其载荷分为水平一、水平二、水

平三。

2.6.2 水平一晃动运动为静态或准静态过程，水平一晃动载荷 p_1 按下式计算：

$$\text{横向晃动载荷： } p_1 = p_0 + p_s = \rho g(h_f - z) + \rho g h_{T1} \quad \text{kN/m}^2$$

$$\text{纵向晃动载荷： } p_1 = p_0 + p_s = \rho g(h_f - z) + \rho g h_{L1} \quad \text{kN/m}^2$$

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

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

z 为舱底到舱壁计算点处距离，且不大于 h_f ，m；

θ 和 ϕ 分别为横摇和纵摇角，按下列公式计算：

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

$$\phi = 1350 f_p L^{-0.94} \left\{ 1.0 + \left(\frac{2.57}{\sqrt{gL}} \right)^{1.2} \right\} \quad \text{deg}$$

其中， $f_p = 1.0$ ；

$f_{BK} = 1.2$ ，无舦龙骨的船舶

$f_{BK} = 1.0$ ，有舦龙骨的船舶

2.6.3 水平二晃动载荷 p_2 按下式计算：

(1) 横向晃动载荷

$$p_2 = p_0 + p_s = \rho g(h_f - z) + \rho g h_{T2} \quad \text{kN/m}^2$$

式中：

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

h_f 为舱内液体充装高度，m；

z 为舱底到舱壁计算点处距离，且不大于 h_f ，m；

$$\alpha = h_f / b_s ;$$

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

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

$$\delta = T_r / T_y ;$$

当 $b_s \leq 0.56B$ 时,

$$a = 0.06b_{slh} / B - 0.0104 ; \quad b = 8.43 ; \quad c = 26.6a ; \quad d = -2.32$$

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

$$p_2 = p_0 + p_s = \rho g(h_f - z) + \rho g h_{L2} \quad \text{kN/m}^2$$

式中:

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

h_f 为舱内液体充装高度, m;

z 为舱底到舱壁计算点处距离, 且不大于 h_f , m;

$$\alpha = h_f / l_s ;$$

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

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

$$\delta = T_p / T_x ;$$

$$k_L = \begin{cases} -0.021L + 4.15 & L < 150\text{m} \\ = 1.0 & L \geq 150\text{m} \end{cases}$$

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,

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

2.6.4 水平三晃荡运动为动态放大过程, 该水平下晃荡运动引起的载荷包括静载荷和动载荷, 其中动载荷计及冲击载荷。按附录 1 计算水平三晃荡载荷 p_3 , 如采用其他方法, 需经 CCS 认可。

2.7 晃荡载荷应用

2.7.1 所有液舱均应考虑 2.5 规定的装载计算高度。

2.7.2 所有液舱均应计算晃荡运动水平一下的晃荡载荷, 符合晃荡运动水平二的液舱均应计算晃荡运动水平一和二下的晃荡载荷; 符合晃荡运动水平三的液舱均应计算晃荡运动水平一、二和三下的晃荡载荷。

2.7.3 当液舱满足 $l_s \leq 0.13L$ 或 $b_s \leq 0.56B$ 时, 且液舱运动固有周期处于谐振周期范围(图 2.2.2)内, 则需按下述要求计算水平二晃荡载荷及船体运动固有周期:

(1) 横向运动: 当液舱有效晃荡宽度 $b_s \leq 0.56B$, 且液舱横摇运动周期 T_y 处于谐振周期范围内时, 需计算横向运动下水平二晃荡载荷

(2) 纵向运动: 当液舱有效晃荡长度 $l_s \leq 0.13L$, 且液舱纵摇运动周期 T_x 处于谐振周期范围内时, 需计算纵向运动下水平二晃荡载荷

(3) 上述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 $F_1 \leq h_f < F_2$ 时, 船体运动固有周期取 T_{bal} ;
- ② 若装载高度 h_f 满足 $F_2 < h_f \leq F_3$, 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;
- ③ 若装载高度 h_f 满足 $F_3 \leq h_f \leq F_4$, 船体运动固有周期取 T_{full} 。

2.7.4 当液舱满足 $l_s > 0.13L$ 或 $b_s > 0.56B$ 时, 应根据船舶运动周期与谐振周期范围的关系分别考虑水平二和水平三晃荡载荷及其船舶运动周期:

(1) 横摇运动: 液舱有效晃荡宽度 $b_s > 0.56B$, (1) 当液舱横摇运动周期 T_y 不处于谐振周期范围内, 需计算横摇运动下水平二晃荡载荷; (2) 当液舱横摇运动周期 T_y 处于谐振周期范围内, 需计算横摇运动下水平三晃荡载荷。

(2) 纵摇运动：液舱有效晃荡长度 $l_s > 0.13L$ ，(1) 当液舱纵摇运动周期 T_x 不处于谐振周期范围内时，需计算纵摇运动下水平二晃荡载荷；(2) 当液舱纵摇运动周期 T_x 处于谐振周期范围内，需计算横摇运动下水平三晃荡载荷。

(3) 上述横摇运动或纵向运动相对应的船舶运动周期按如下规定：

② 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 $h_f > F_1$ ，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 $F_1 \leq h_f \leq F_4$ ，用于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；

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、扶强材和主要支撑构件；
- (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。

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）范围内的强框架。

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) 距纵舱壁 $0.25b_s$ 或第一个纵桁间距（取小者）范围的横向周界上的板和扶强材；
- (5) 上述（4）范围内的桁材。

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，应考虑不同船型的液舱腐蚀增量。

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：

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

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 ——计算点处水平一下晃荡载荷, 见 2.6.2;

C_a ——板的许用弯曲应力系数:

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

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:

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

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, $kN \cdot m$ 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:

$$t_{net} = 0.0158 b_p \sqrt{\frac{p_1}{C_a \sigma_{yd}}} \text{ mm}$$

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： —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。	纵向加强筋板	0.9	0.5	0.8
	横向或垂向加强筋板	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：

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

式中：

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：

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

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： —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。	纵向加强筋板	0.85	1.0	0.75
	横向或垂向加强筋板	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

3.2.3 液舱水密边界上的主要支撑构件

(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：

$$Z_{net} = 1000 \frac{p_1 S l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s \sigma_{yd}} \quad \text{cm}^3$$

式中：

p_1 ——水平桁材高度处的水平一下晃荡载荷，见 2.6.2；

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：

$$A_{net} = 10 \frac{f_{shr} p_1 S l_{shr}}{C_t \tau_{yd}} \quad \text{cm}^2$$

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；

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；

(2) 垂直桁材

液舱边界板上的垂直桁材的净剖面模数 Z_{net} 应不小于：

$$Z_{net} = 1000 \frac{\beta p_1 S l_{bdg}^2}{f'_{bdg} C_s \sigma_{yd}} \quad \text{cm}^3$$

式中：

p_1 ——垂直桁材底部的水平一下晃荡载荷，见 2.6.2；

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；

$$f'_{bdg} = 60 \frac{l_{bdg}^2}{d_1^2} \left(\frac{l_{bdg}}{2l_{bdg} + 3(l_{bdg} - d_1)} \right), \text{ 对于垂直桁材顶部；}$$

$$f'_{bdg} = \frac{60}{\beta} \left(\frac{l_{bdg}^2}{10(l_{bdg} - d_1)l_{bdg} + 3d_1^2} \right), \text{ 对于垂直桁材底部；}$$

$$\beta = d_1 / l_{bdg} ;$$

其中，横向晃荡运动时， $d_1 = h_f + h_{T1}$ ，且不大于 l_{bdg} ；纵向晃荡运动时： $d_1 = h_f + h_{L1}$ ，

且不大于 l_{bdg} 。

液舱边界板上垂直桁材的净剪切面积 A_{net} 应不小于：

$$A_{net} = 10 \frac{\beta f'_{shr} p_1 S l_{shr}}{C_t \tau_{yd}} \quad \text{cm}^2$$

式中：

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；

$$\beta = d_1 / l_{shr} ;$$

其中，横向晃荡运动时， $d_1 = h_f + h_{T1}$ ，且不大于 l_{bdg} ；纵向晃荡运动时： $d_1 = h_f + h_{L1}$ ，

且不大于 l_{bdg} 。

$$f'_{shr} = \frac{1}{20} \frac{d_1^2}{l_{shr}^2} \left(3 + 2 \frac{l_{shr} - d_1}{l_{shr}} \right), \text{ 对于垂直桁材顶部;}$$

$$f'_{shr} = \frac{1}{20} \left(10 - \frac{3d_1^2}{l_{shr}^2} - \frac{2(l_{shr} - d_1)d_1^2}{l_{shr}^3} \right), \text{ 对于垂直桁材底部;}$$

3.3 水平二晃荡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:

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

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 ——计算点处水平二下晃荡载荷, 见 2.6.3;

C_a ——板的许用弯曲应力系数:

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

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:

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

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， $\text{kN}\cdot\text{m}$ ，
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：

$$t_{net} = 0.0158 b_p \sqrt{\frac{P}{C_a \sigma_{yd}}} \quad \text{mm}$$

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 0.75。

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：

$$Z_{net} = \frac{p_2 s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s \sigma_{yd}} \quad \text{cm}^3$$

式中：

s ——扶强材间距， mm ；

l_{bdg} ——扶强材的有效弯曲跨距， m ；

p_2 ——计算点处水平二下晃荡载荷，见 2.6.3；

C_s ——许用弯曲应力系数：

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

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

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。

3.3.3 液舱水密边界上主要支撑构件

(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:

$$Z_{net} = 1000 \frac{p_2 S l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s \sigma_{yd}} \quad \text{cm}^3$$

式中:

p_2 ——水平桁材高度处水平二下晃荡载荷, 见 2.6.3;

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:

$$A_{net} = 10 \frac{f_{shr} p_2 S l_{shr}}{C_t \tau_{yd}} \quad \text{cm}^2$$

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

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。

(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:

$$Z_{net} = 1000 \frac{S l_{bdg}^2}{C_s \sigma_{yd}} \left(\frac{p_s}{f_{bdg}} + \frac{\beta p_0}{f'_{bdg}} \right) \quad \text{cm}^3$$

式中:

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分, 见 2.6.3;

p_0 ——垂直桁材底部位置的静水压力, 见 2.6.3;

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；

$$f'_{bdg} = 60 \frac{l_{bdg}^2}{h_f^2} \left(\frac{l_{bdg}}{2l_{bdg} + 3(l_{bdg} - h_f)} \right), \text{ 对于垂直桁材顶部；}$$

$$f'_{bdg} = \frac{60}{\beta} \left(\frac{l_{bdg}^2}{10(l_{bdg} - h_f)l_{bdg} + 3h_f^2} \right), \text{ 对于垂直桁材底部；}$$

$$\beta = h_f / l_{bdg}。$$

液舱边界板上的垂直桁材的净剪切面积 A_{net} 应不小于：

$$A_{net} = 10 \frac{Sl_{shr}}{C_t \tau_{yd}} (f_{shr} P_s + \beta f'_{shr} P_0) \quad \text{cm}^2$$

式中：

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；

$$\beta = h_f / l_{shr}；$$

$$f_{shr} = 0.5；$$

$$f'_{shr} = \frac{1}{20} \frac{h_f^2}{l_{shr}^2} \left(3 + 2 \frac{l_{shr} - h_f}{l_{shr}} \right), \text{ 对于垂直桁材顶部；}$$

$$f'_{shr} = \frac{1}{20} \left(10 - \frac{3h_f^2}{l_{shr}^2} - \frac{2(l_{shr} - h_f)h_f^2}{l_{shr}^3} \right), \text{ 对于垂直桁材底部}$$

3.3.4 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：

$$t_{net} = 0.0158 \alpha_p S \sqrt{\frac{P_s}{C_a \sigma_{yd}}} \quad \text{mm}$$

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 2.6.3;

C_a ——板的许用弯曲应力系数:

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

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:

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

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) 扶强材

制荡舱壁上的扶强材的净剖面模数 Z_{net} 应不小于:

$$Z_{net} = \frac{P_s s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s \sigma_{yd}} \text{ cm}^3$$

式中:

P_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分, 见 2.6.3;

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:

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

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

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

式中:

p_s —— 水平二晃荡载荷中的动载荷成分, 见 2.6.3;

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:

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

式中:

p_s —— 水平二晃荡载荷中的动载荷成分, 见 2.6.3;

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;

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：

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

式中：

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分，见 2.6.3；

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：

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

式中：

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分，见 2.6.3；

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；

$f_{shr} = 0.5$ 。

3.3.5 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：

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

式中：

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分，见 2.6.3；

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, 一般取作防倾肘板的间距,

m;

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分, 见 2.6.3;

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:

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

式中:

p_s ——水平二晃荡载荷中的动载荷成分, 见 2.6.3;

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:

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

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。

3.4 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

液舱边界板的净厚度应不小于:

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

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, 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 2.6.4;

C_a ——板的许用弯曲应力系数, 取 1.0;

C_d ——板能力修正系数, 取 1.2。

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:

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

式中:

p_3 ——计算点处的冲击压力, 见 2.6.4;

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;

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:

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

式中:

p_3 ——水平桁材高度处的冲击压力, 见 2.6.4;

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。

液舱边界板上水平桁材的净剪切面积 A_{net} 应不小于：

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

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 2.6.4；

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。

(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：

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

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 2.6.4；

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：

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

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：

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

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 2.6.4;

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:

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

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 2.6.4.;

C_a ——板的许用弯曲应力系数, 取 1.0;

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:

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

式中:

p_3 ——计算点处的冲击压力, 见 2.6.4;

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;

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:

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

式中:

p_3 ——水平桁材高度处的冲击压力, 见 2.6.4;

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。

液舱内制荡舱壁上水平桁材的净剪切面积 A_{net} 应不小于:

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

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 2.6.4;

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。

(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：

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

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 2.6.4；

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：

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

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：

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

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 2.6.4；

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:

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

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 2.6.4;

C_a ——板的许用弯曲应力系数, 取 1.0;

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:

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

式中:

p_3 ——计算点处的冲击压力, 见 2.6.4;

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;

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：

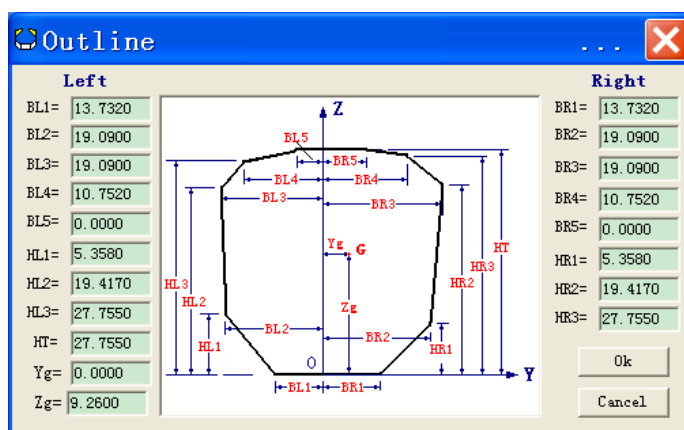
- (1) 流体是不可压缩的粘性流体；
- (2) 流体运动存在自由表面，且舱内流体在运动过程中不损失；
- (3) 不考虑温度的变化。

2 晃荡计算程序

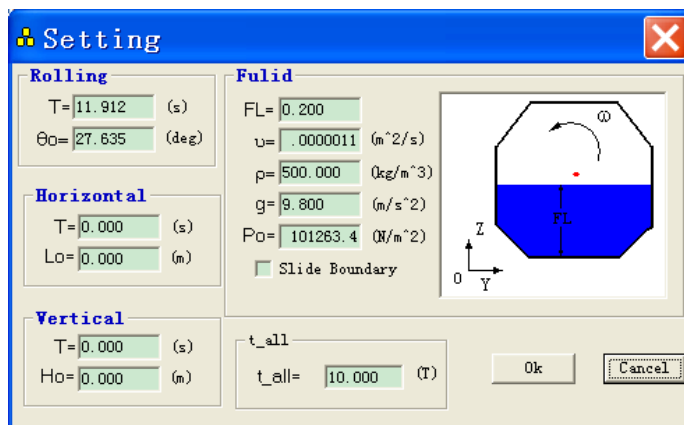
采用 CCS 晃荡直接计算软件对晃荡载荷及运动进行计算。本附录给出了软件输入、输出的示例及建模的基本要求，具体操作参见程序使用手册。

(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

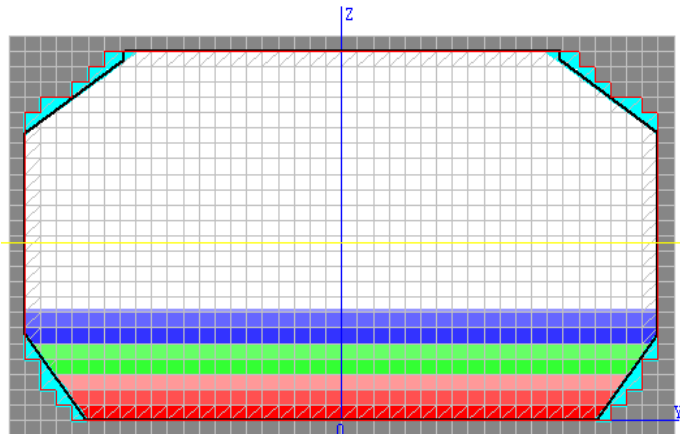
软件的输出可包括测点的速度、加速度时历数据，以及动力放大后的压力时历数据。

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
t-step	t/T	(9:1)	U	V	Au	Av	(10:5)	U	V
(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
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
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	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	0.045	0	1.67E+05	1.81E-03	2.44E-04	2.60E-02	2.24E-03	1.09E+05	6.20E-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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
28	0.255	0.02	1.66E+05	-1.80E-03	-1.97E-03	-5.70E-02	-2.12E-02	1.08E+05	1.00E-02

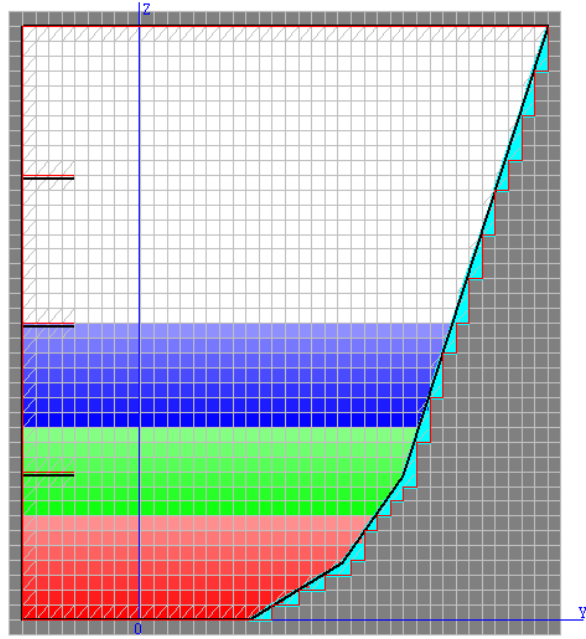
附图 A3 计算结果输出

(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。



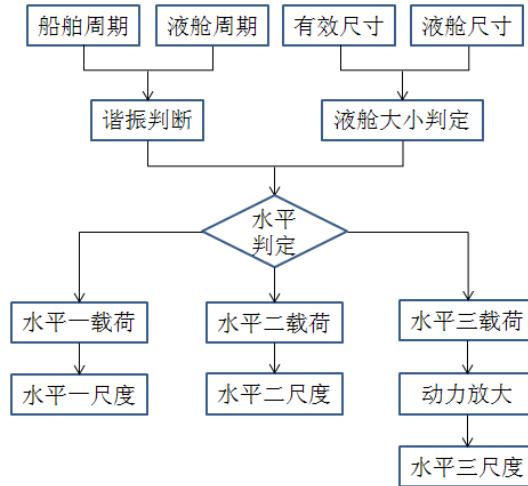
附图 A4 晃荡计算网格示意图



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 A1。下面以某 2.7 万吨油船及某大液舱横向晃荡为例，说明计算流程。



附图 A1 计算流程

1 船型数据

2.7 万吨油船主尺度见表 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
满 载 GM	m	3.5
压 载 GM	m	5.86

2 晃荡水平判断

2.1 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

2.2 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

表 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 2.2

表 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		

根据晃荡水平划分衡准，10%、15%与 20%为水平二晃荡，其余装载率为水平一晃荡。

3 晃荡载荷计算

3.1 水平一晃荡载荷

根据水平一计算公式，得水平一计算载荷（不含静压头）为

$$h_{level1} = 2.164m$$

$$P_{level1} = 21.74kPa$$

3.2 水平二晃荡载荷

根据水平二计算公式，得水平二计算载荷（不含静压力）见表 3.1

表 3.1 水平二晃荡载荷

装载率	压头/m	压力/kPa
10%	3.45	34.67
15%	6.67	67.06
20%	7.40	74.43

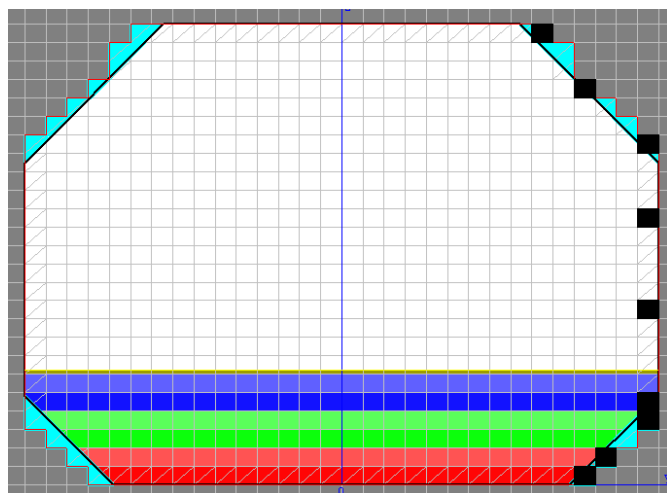
3.3 水平三晃荡载荷

以某液舱横向晃荡为例，计算水平三压力。液舱形式、网格划分及监测点设置如附图

A2，参数设置见表 3.2，以板为例， p_3 的结果见表 3.3。

表 3.2 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/m ³	0.5
T	激励周期	s	11.9
θ	激励幅值	deg	27.6



附图 A2 液舱示意图

表 3.3 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
86%	1.000	0
98%	1.000	0

4 边界尺度计算

根据水平一、水平二晃荡载荷下液舱构件评估方法，以舱壁板厚为例，得横舱壁板厚见表 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

根据水平三晃荡载荷下液舱构件评估方法，以舱壁板厚为例，得纵舱壁板厚见表 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