

## 舰艇坐坞船体结构强度计算方法

### 1 范围

#### 1.1 主题内容

本指导性技术文件规定了舰艇坐坞船体结构总纵强度、局部强度和坞墩强度计算的方法。

#### 1.2 适用范围

本指导性技术文件适用于水面舰艇坐坞船体结构强度计算。

### 2 引用文件

本章无条文。

### 3 定义

#### 计算站 calculating station

将艏艉龙骨墩之间的距离  $n$  等分(通常  $n$  为 20),每一等分点称为一个计算站。 $n - 1$  个等分点加上艏艉端点共  $n + 1$  个站,依次称为 0 号计算站、1 号计算站、……、 $n$  号计算站。

### 4 一般要求

4.1 为确保坐坞船体结构强度,在单一建造或批量建造的首制舰艇(含改进型首制舰艇)坐坞前,应进行坐坞强度计算。

4.2 舰艇坐坞船体结构强度计算时,所需的数据、资料一般如下:

- a) 进坞搁置图;
- b) 弯矩和剪力计算书;
- c) 船体理论站处剖面惯性矩;
- d) 基本结构图。

4.3 计算中只考虑龙骨墩的支撑作用。

4.4 计算过程中要绘制坐坞时船体挠曲线、龙骨墩反力曲线、弯矩与剪力曲线。

4.5 应进行船体总纵强度、局部强度和墩木强度校核。

### 5 详细要求

#### 5.1 计算载荷的确定

5.1.1 舰艇坐坞重量按舰艇正常排水量的重量,扣除弹药、燃油及喷气燃料的重量。

5.1.2 将舰艇理论站内的重量转换为计算站内的重量,见图 1。

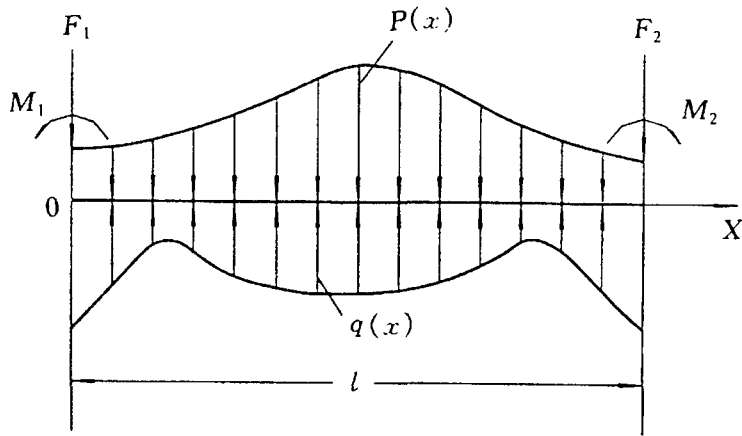
#### 5.2 龙骨墩刚度计算

5.2.1 龙骨墩许用应力和横纹弹性模量  $E$  按表 1:

表 1

MPa

项 目	材 料	
	松 木	硬 木
许用应力	2.45	3.92
横纹弹性模量	98	392



$P(x)$  ——计算站上的舰艇坐坞重量, N/cm;  
 $q(x)$  ——龙骨墩反力, N/cm;  
 $F_1, F_2$  ——首、尾计算站上的集中力, N;  
 $M_1, M_2$  ——首、尾计算站上的集中力矩, N·m。

图 1

5.2.2 单个坞墩的刚性系数

5.2.2.1 单一材料的坞墩刚性系数  $K$  按式(1)计算:

$$K = \frac{E}{h}bc \times 10^2 \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- $K$  ——坞墩刚性系数, N/cm;
- $E$  ——墩木横纹弹性模量, MPa;
- $b$  ——墩木宽度, cm;
- $c$  ——墩木长度, cm;
- $h$  ——墩木总高度, cm。

5.2.2.2 混合墩的刚性系数  $K$  可分别计算单一材料的  $K_i$  值, 然后按以下二种情况计算:

a) 两种材料混合墩的刚性系数  $K$  按公式(2)计算:

$$K = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \dots\dots\dots (2)$$

b) 三种材料混合墩的刚性系数  $K$  按公式(3)计算:

$$K = \frac{K_1 K_2 K_3}{K_1 K_2 + K_2 K_3 + K_1 K_3} \dots\dots\dots (3)$$

5.2.2.3 一般规格墩木(30cm×30cm×100cm)的  $K$  值可按表 2 选取。

表 2

N/cm

项 目	坞墩结构	材 料	
		松 木	硬 木
刚性系数 $K$	全木墩(高 150cm)	$K \approx 19.6 \times 10^4$	$K \approx 78.4 \times 10^4$
	钢—木墩, 垫木高 50cm	$K \approx 58.5 \times 10^4$	$K \approx 235.2 \times 10^4$
	水泥—木墩, 垫木高 25cm	$K \approx 117.6 \times 10^4$	$K \approx 470.4 \times 10^4$

5.2.3 龙骨墩单位长度刚性系数

龙骨墩单位长度刚性系数  $k$  按公式(4)计算。

$$k(x) = \frac{K}{d} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$k(x)$  ——龙骨墩单位长度刚性系数, N/cm<sup>2</sup>;

$K$  ——单个坞墩的刚性系数, N/cm;

$d$  ——龙骨墩间距, cm。

### 5.3 坞墩载荷校核

坞墩载荷按公式(5)、公式(6)计算,其值应不大于 0.98MPa。

$$Q_1 = \frac{P}{S_1} \times 10 \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_2 = \frac{P}{2S_2} \times 10 \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$Q_1$  ——龙骨墩单位面积上承受的载荷, MPa;

$Q_2$  ——每侧边墩单位面积上承受的载荷, MPa;

$P$  ——坐坞时船体重量, kN;

$S_1$  ——龙骨墩受压面积, cm<sup>2</sup>;

$S_2$  ——每侧边墩受压面积(投影面积), cm<sup>2</sup>。

### 5.4 舰艇坐坞挠曲线和龙骨墩反力的确定

#### 5.4.1 舰艇坐坞挠曲线的确定

舰艇坐坞时,一般不考虑船底有限抗弯刚度,将船体视为一根置于变刚度弹性基础上的变截面梁,梁的挠曲线按公式(7)确定,船体梁静平衡条件按公式(8)确定。

$$E \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ I(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] = P(x) - k(x) \cdot y(x) \dots\dots\dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \int_0^l k(x) \cdot y dx &= \int_0^l p(x) dx + F_1 + F_2 = P_0 \\ \int_0^l k(x) \cdot y \cdot x dx &= \int_0^l p(x) x dx + F_2 \cdot l + M_2 - M_1 = M_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$I(x)$  ——船体剖面惯性矩, cm<sup>4</sup>;

$P(x)$  ——船体重量分布载荷, N/cm;

$k(x)$  ——龙骨墩刚性系数, N/cm<sup>2</sup>;

$y(x)$  ——龙骨墩长度上的船体挠曲线, cm。

$l$  ——位于龙骨墩上的部分船体的长度, m;

$P_0$  ——坐坞时舰艇重量, kN;

$M_0$  ——船体重量相对坐标原点的力矩, kN·m。

#### 5.4.2 龙骨墩反力的计算

龙骨墩反力按公式(9)计算。

$$q(x) = k(x) \cdot y(x) \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$q(x)$  ——龙骨墩反力, N/cm;

$k(x)$  ——龙骨墩单位长度刚性系数, N/cm<sup>2</sup>;

$y(x)$  ——船体梁挠曲线, cm。

### 5.5 船体剪力与弯矩计算

船体的剪力按公式(10)计算,弯矩按公式(11)计算。

$$N(x) = F_1 + \int_0^x [p(x) - q(x)] \cdot x dx \dots\dots\dots (10)$$

$$M(x) = M_1 + \int_0^x N(x) \cdot x dx \dots\dots\dots (11)$$

式中:

$N(x)$  ——计算站上的船体剪力, N;

$M(x)$  ——计算站上的船体弯矩, N·m。

### 5.6 龙骨墩墩木强度校核

龙骨墩墩木上的压力强度不得超过墩木材料的许用应力,其值按公式(12)确定:

$$\sigma = \frac{q(x)a}{bc} \times 10^{-2} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$\sigma$  ——龙骨墩墩木的压力强度, MPa;

$q(x)$  ——龙骨墩反力, N/cm;

$b$  ——平板龙骨的宽度, cm;

$c$  ——龙骨墩木的长度, cm;

$a$  ——两龙骨墩之中心间距, cm。

### 5.7 船体总纵强度校核

将坐坞时船体的最大剪力、弯矩与静置在波浪上时船体相应位置的剪力、弯矩相比较,若前者均小于后者,则坐坞时的船体总纵强度满足要求,否则按公式(13)、公式(14)、公式(15)进行计算校核。

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_1} \leq 0.6\sigma_s \dots\dots\dots (13)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_2} \leq 0.6\sigma_s \dots\dots\dots (14)$$

$$\tau = \frac{N_{\max}S}{It} \leq 0.3\sigma_s \dots\dots\dots (15)$$

式中:

$\sigma_{\max}$  ——上甲板或底部距中和轴最远点的正应力, MPa;

$W_1$  ——上甲板距中和轴最远点的剖面模数,  $\text{mm}^2 \cdot \text{m}$ ;

$W_2$  ——底部距中和轴最远点的剖面模数,  $\text{mm}^2 \cdot \text{m}$ 。

$\tau$  ——被校核剖面的剪应力, MPa;

$I$  ——被校核剖面对中和轴的惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;

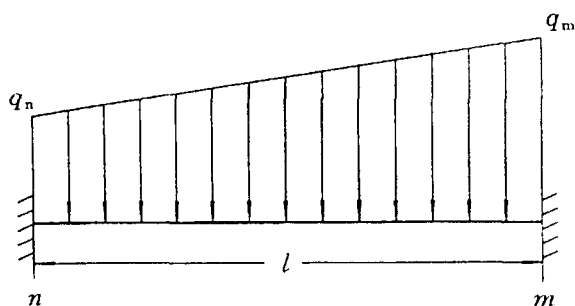
$S$  ——被校核剖面对中和轴的面积矩,  $\text{mm}^3$ ;

$t$  ——等值梁腹板的总厚度, mm。

### 5.8 船体局部强度和稳定性校核

#### 5.8.1 中内龙骨弯曲强度校核

5.8.1.1 最大弯矩处、两横舱壁之间的中内龙骨可作为两端刚性固定承受梯形载荷的等断面单跨梁校核其强度,见图2。



$m, n$  ——主横舱壁或者次舱壁所在位置的船体肋位号;  
 $q_m$  ——  $m$  号肋位处的龙骨墩单位长度上的反力值, N/cm;  
 $q_n$  ——  $n$  号肋位处的龙骨墩单位长度上的反力值 N/cm。

图 2

5.8.1.2 支座反力和弯矩按公式(16)、公式(17)、公式(18)、公式(19)计算:

$$R_m = \frac{1}{2} q_n l + \frac{7}{20} (q_m - q_n) \dots\dots\dots (16)$$

$$R_n = \frac{1}{2} q_n l + \frac{3}{20} (q_m - q_n) \dots\dots\dots (17)$$

$$M_m = \frac{1}{12} q_n l^2 + \frac{1}{20} (q_m - q_n) l^2 \dots\dots\dots (18)$$

$$M_n = \frac{1}{12} q_n l^2 + \frac{1}{30} (q_m - q_n) l^2 \dots\dots\dots (19)$$

式中:

$R_m$  ——  $m$  号肋位处支座反力, N;

$R_n$  ——  $n$  号肋位处支座反力, N;

$M_m$  ——  $m$  号肋位处支座弯矩, N·m;

$M_n$  ——  $n$  号肋位处支座弯矩, N·m。

5.8.1.3 中内龙骨应力应满足公式(20)、公式(21)的要求:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} \leq 0.8 \sigma_s \dots\dots\dots (20)$$

$$\tau_{\max} = \frac{NS}{It} \leq 0.4 \sigma_s \dots\dots\dots (21)$$

式中:

$M$  ——  $M_m, M_n$  中最大值, N·m;

$W$  ——相应于最大弯矩剖面的最小剖面模数,  $\text{mm}^2 \cdot \text{m}$ ;

$N$  ——  $R_m, R_n$  中最大值, N;

$S$  ——中内龙骨剖面对中和轴的面积矩,  $\text{mm}^3$ ;

$I$  ——中内龙骨剖面对中和轴的惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;

$t$  ——梁腹板厚度, mm。

5.8.2 中内龙骨腹板垂向压缩强度校核

5.8.2.1 中内龙骨腹板受力如图 3 所示:

5.8.2.2 腹板的负荷按公式(22)计算。

$$P_{\text{lk}} = \sigma_{\max} \cdot \alpha \cdot \left( l_p - \frac{\alpha}{2} \right) \dots\dots\dots (22)$$

式中:

- $P_{bk}$  —— 相应于最大压强处的中内龙骨上的负荷, N;
- $\sigma_{max}$  —— 龙骨墩反力最大压强, MPa;
- $a$  —— 平板龙骨半宽, mm;
- $l_p$  —— 平板龙骨负荷区长度(两肋板间距), mm。

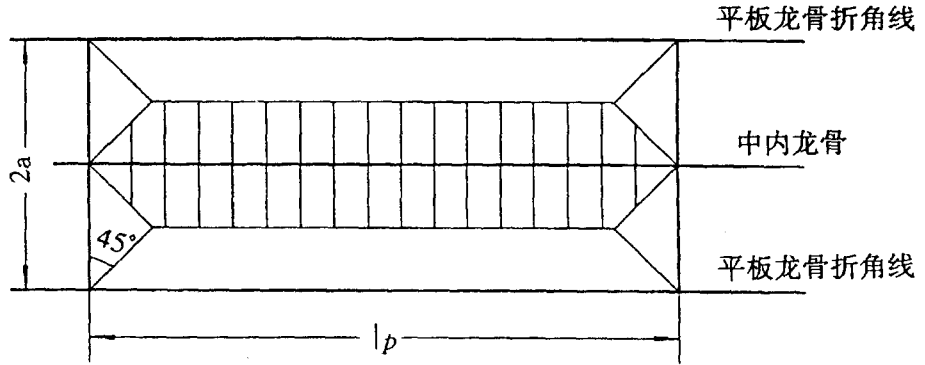


图 3

5.8.2.3 中内龙骨腹板压缩应力按公式(23)计算。

$$\sigma_k = \frac{P_{bk}}{t \cdot l_p} \dots\dots\dots (23)$$

式中:

- $\sigma_k$  —— 中内龙骨腹板压缩应力, MPa;
- $t$  —— 中内龙骨腹板厚度, mm。

5.8.2.4 中内龙骨腹板压缩稳定性校核

中内龙骨腹板为自由支持在刚性周界上且横向受压的平板, 其欧拉应力可按公式(24)计算:

$$\sigma_E = 19.6 \times \left[ \frac{100 \cdot t}{c} \right]^2 \dots\dots\dots (24)$$

式中:

- $\sigma_E$  —— 中内龙骨腹板欧拉应力, MPa;
- $t$  —— 中内龙骨腹板厚度, mm;
- $c$  —— 中内龙骨腹板短边长度, mm。

5.8.2.5 中内龙骨腹板压缩稳定性储备系数应满足公式(25)。

$$L = \frac{\sigma_E}{\sigma_k} \geq 1.5 \dots\dots\dots (25)$$

式中:

- $K$  —— 中内龙骨压缩稳定性储备系数;
- $\sigma_E$  —— 中内龙骨腹板欧拉应力, MPa;
- $\sigma_k$  —— 中内龙骨腹板压缩应力, MPa。

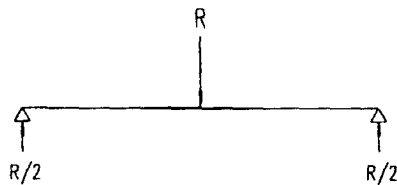


图 4

### 5.8.3 船体横舱壁总横强度校核

船体横舱壁总横强度,按自由支持在舷侧板上的梁计算,跨距为校核处的主横舱壁宽度。中内龙骨与舱壁的节点处承受图4所示的集中力  $R$  作用,其应力按公式(26)、公式(27)、公式(28)、公式(29)校核。

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq 0.6\sigma_s \dots\dots\dots (26)$$

$$\tau_{\max} = \frac{F_{s,\max}}{A} \leq 0.3\sigma_s \dots\dots\dots (27)$$

$$P_E = \sum \tau_E \cdot t_i \cdot b_i \dots\dots\dots (28)$$

$$K = \frac{2R_E}{R} \geq 1.5 \dots\dots\dots (29)$$

式中:

$M_{\max}$  ——由龙骨反力与舷侧反力所引起的舱壁中间剖面内的弯矩,  $N \cdot m$ ;

$W$  ——舱壁中间剖面的剖面模数,此时可计入宽度等于舱壁半宽  $1/3$  的附连翼板(甲板和船底板),  $mm^2 \cdot m$ ;

$F_{s,\max}$  ——计算剖面内的剪力,  $N$ ;

$A$  ——计算剖面的面积,  $mm^2$ ;

$\tau_E$  ——舱壁板的欧拉剪应力,  $N/mm^2$ ;

$t_i, b_i$  ——分别为各列舱壁板的厚度和宽度,  $mm$ ;

$P_E$  ——欧拉力,  $N$ ;

$K$  ——稳定性储备系数。

### 5.8.4 舱壁板强度校核

5.8.4.1 舱壁板强度校核时,中内龙骨反力由坐坞竖桁以剪应力形式传递给舱壁板,载荷沿竖桁高度按三角形分布。作用于最大应力剖面(即坐坞竖桁的下端)的力按公式(30)计算:舱壁板最大正应力按公式(31)计算:

$$P_x = \frac{R}{h^2} \cdot x^2 \dots\dots\dots (30)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{P_x}{b \cdot t} \leq 0.8\sigma_s \dots\dots\dots (31)$$

式中:

$R$  ——集中力,  $N$ , 见图5;

$h$  ——离船底最近一层甲板距平板龙骨的高度,  $m$ ;

$x$  ——离船底最近一层甲板距计算点的高度,  $m$ ;

$b$  ——舱壁板宽度,  $mm$ ;

$t$  ——舱壁板厚度,  $mm$ 。

5.8.4.2 坐坞竖桁处舱壁板的欧拉应力  $\sigma_E$  应满足公式(32)。

$$\sigma_E \geq \sigma_{\max} \dots\dots\dots (32)$$

### 5.8.5 舱壁扶强材稳定性校核

坐坞竖桁的稳定性,可作为一端自由支持、一端刚性固定的杆校核,见图6。欧拉力  $P_E$  按公式(33)计算,稳定性储备系数  $K$  应满足公式(34)要求。

$$P_E = \frac{2\pi^2 EI}{l^2} \dots\dots\dots (33)$$

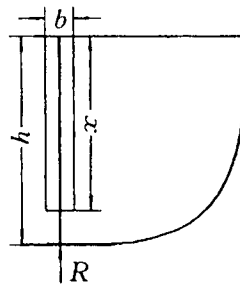


图 5

$$K = \frac{P_E}{R} \geq 1.5 \dots\dots\dots (34)$$

式中:

$l$  ——坐坞竖桁的高度,cm;

$R$  ——集中力,N。



图 6

**附加说明:**

本指导性技术文件由中国船舶重工集团公司提出。

本指导性技术文件由中国船舶重工集团公司标准化研究中心归口。

本指导性技术文件由中国船舶重工集团公司七院七〇一研究所负责起草。

本指导性技术文件主要起草人:滕树生、杨 龙、段 宏、顾文瑾、蒋学敏、李 俊。

本指导性技术文件计划项目号:9CZ09。