

# 第1章

# 船体梁总纵弯曲的外力 计算

华南理工大学  
焦甲龙



# § 1 船体梁受力与变形





船体总纵强度计算中，通常将船体理想化为一变断面的**空心薄壁梁**(简称**船体梁**)，并从整体上进行研究。船体梁在外力作用下沿其纵向铅垂面内所发生的弯曲，称为**总纵弯曲**。船体梁抵抗总纵弯曲的能力，称为**总纵强度**(简称纵强度)。



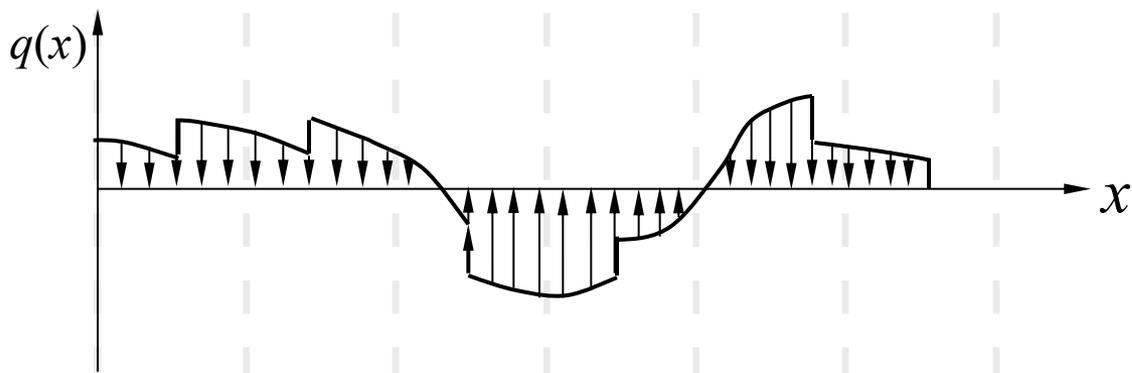
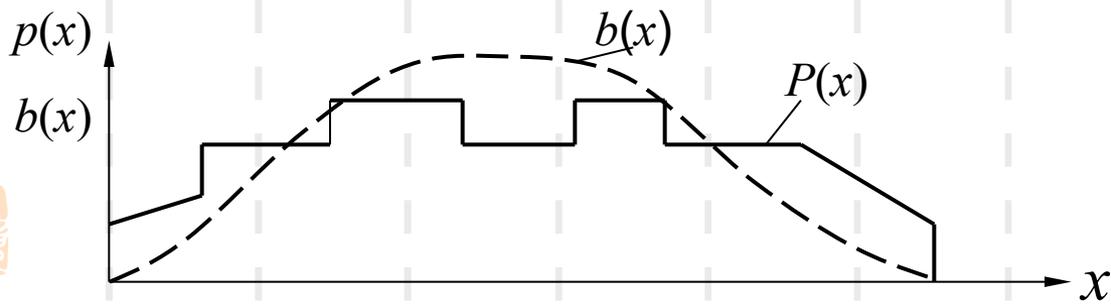
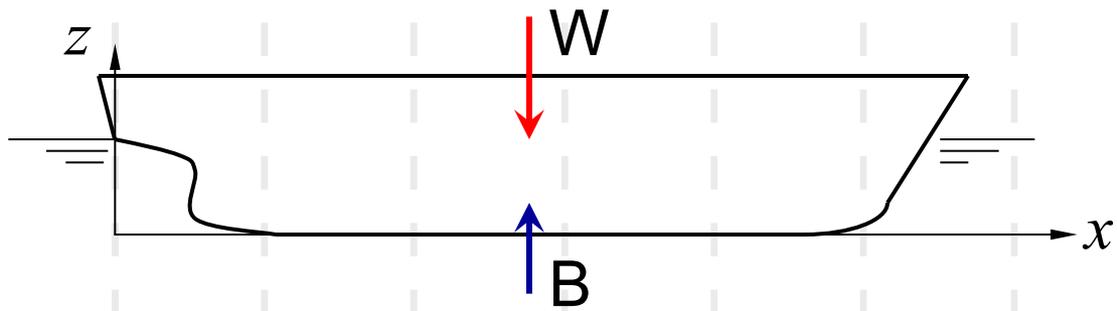
# 1. 船体梁的受力特征

船体总纵强度计算的传统方法是将船舶静置在波浪上，求船体梁横剖面上的剪力和弯矩以及相应的应力，并将它与许用应力相比较以判断船体强度。

船舶在波浪上航行时，虽然作用在船体结构上的外力相当复杂，但实践证明，**重力与浮力**是引起船体梁总纵弯曲的主要外力(如图)。



# 吉 祥 知 道



全船总的重力和浮力是大小相等、方向相反，并且作用在同一铅垂线上，即全船处于静力平衡状态，但对沿船长的任一区段它们是不平衡的。假定重力沿船长的分布为 $p(x)$ ，浮力沿船长的分布为 $b(x)$ ，则引起船体梁总纵弯曲的载荷为

$$q(x) = p(x) - b(x)$$

根据梁理论，作用在船体梁横剖面上的剪力和弯矩为：

$$\begin{cases} N(x) = \int_0^x q(x) dx \\ M(x) = \int_0^x \int_0^x q(x) dx dx \end{cases}$$



## 载荷、剪力和弯矩符号规定：

与船舶结构力学中直梁弯曲规定相同，即载荷 $q(x)$ 向下为正，剪力 $N(x)$ 左下右上为正，弯矩 $M(x)$ 左逆右顺为正。

## 2. 载荷、剪力、弯矩计算的一般步骤

计算作用在船体梁上的剪力和弯矩，需首先计算重力和浮力沿船长的分布。对某计算状态，重量沿船长的分布状况是不变的。而船舶在波浪中的浮力沿船长的分布 $b_w(x)$ 为船舶在静水中的浮力分布 $b_s(x)$ 和由于波浪而产生的附加浮力分布 $\Delta b(x)$ 之和，即

$$b_w(x) = b_s(x) + \Delta b(x)$$



于是，作用在船体梁上的载荷、剪力和弯矩为：

$$q(x) = p(x) - b_w(x)$$

$$N(x) = \underbrace{\int_0^x [p(x) - b_w(x)] dx}_{\text{静水剪力 } N_s(x)} + \underbrace{\int_0^x [-\Delta b(x)] dx}_{\text{波浪附加剪力 } N_w(x)} = N_s(x) + N_w(x)$$

静水剪力  $N_s(x)$

波浪附加剪力  $N_w(x)$

$$M(x) = \underbrace{\int_0^x N_s(x) dx}_{\text{静水弯矩 } M_s(x)} + \underbrace{\int_0^x N_w(x) dx}_{\text{波浪附加弯矩 } M_w(x)} = M_s(x) + M_w(x)$$

静水弯矩  $M_s(x)$

波浪附加弯矩  $M_w(x)$

## 注意:

(1)静水剪力和静水弯矩 是由静水浮力引起, 主要取决于船体浸入水中部分的形状, 是一个确定性的静态量, 可由静水平衡计算求得。

(2)波浪附加剪力、波浪附加弯矩是由波浪产生的附加浮力引起的, 简称**波浪剪力**和**波浪弯矩**。因波浪附加浮力是动态的、随机的, 其计算相当复杂。传统的方法, 都是将船舶静置于标准波浪上, 即假想船舶以波速在波浪的传播方向上航行, 此时船与波的相对速度为零。这样求得的波浪附加浮力是静态的, 对应的波浪附加剪力和波浪附加弯矩分别称为**静波浪剪力**和**静波浪弯矩**。

## 计算船体梁所受到的剪力和弯矩步骤:

- (1) 计算重量分布曲线  $p(x)$ ;
- (2) 计算静水浮力曲线  $b(x)$ ;
- (3) 计算静水载荷曲线  $q_s(x)$ ;
- (4) 计算静水剪力及弯矩  $N_s(x)$ ,  $M_s(x)$ ;
- (5) 计算静波浪剪力及弯矩  $N_w(x)$ ,  $M_w(x)$ ;
- (6) 计算总剪力和总纵弯矩

$$\begin{cases} N(x) = N_s(x) + N_w(x) \\ M(x) = M_s(x) + M_w(x) \end{cases}$$



吉祥

§ 2

重量曲线



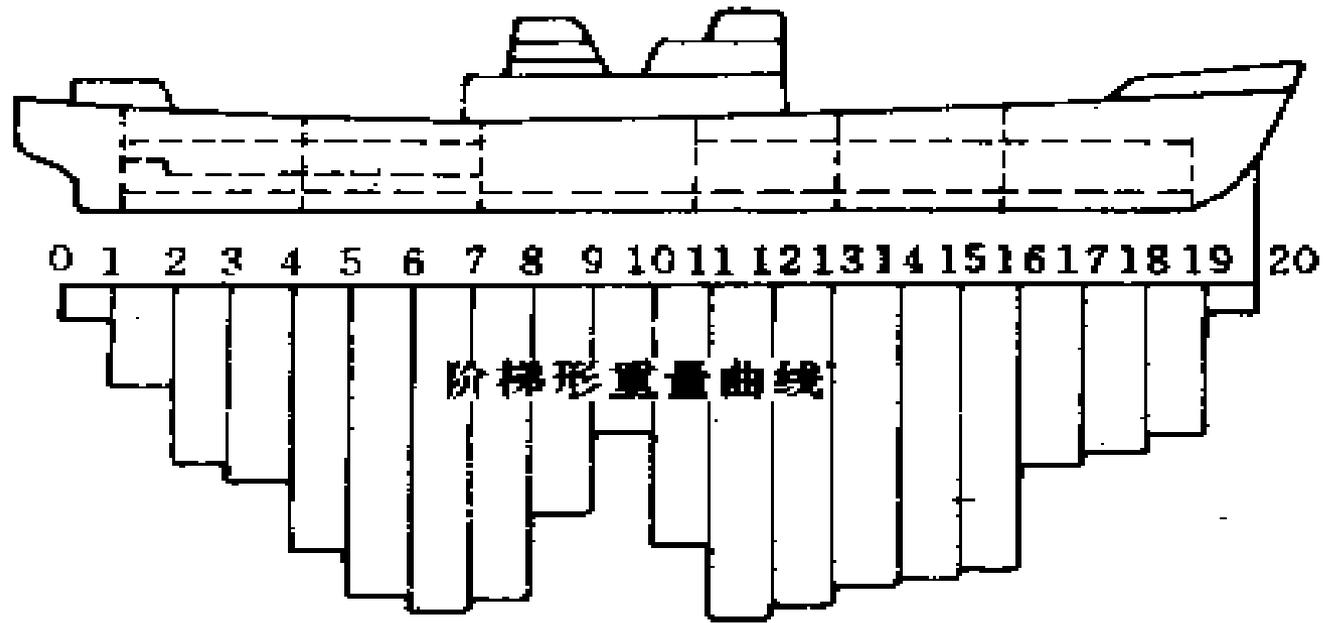
船舶在某一计算状态下，描述全船重量沿船长分布状况的曲线，称为重量曲线。绘制重量曲线时，必须要有表明：

(1)各项重量及其重心位置的重量、重心明细表；

(2)以及确定各项重量纵向分布范围的船体纵中剖面图。

以上表格及图统称为重量重心资料。

绘制重量曲线的方法，是将船舶的各项重量按静力等效原则分布在相应的船长范围内。再逐项迭加即可得重量曲线。在手工计算中，通常将船舶重量按**20**个理论站站距分布(民船的理论站号从船尾至船首，军船则是从船首至船尾编排)，每个理论站距内的重量可以认为均匀分布，从而作出阶梯形重量曲线，并以此来代替真实的重量分布曲线(如图)。



按该方法求得的重量曲线与实际情况仍有差别，但不会对剪力和弯矩的计算带来明显的误差。所以，这种绘制重量曲线的方法是足够精确的，但计算工作非常繁琐。



# 1. 重量分类与分布原则

## 1) 重量分类

### (1) 按变动分

**不变重量**：船体结构、感装设备、机电设备等各项固定重量。

**变动重量**：货物、燃油、淡水、粮食、旅客、压载等各项可变重量。

### (2) 按分布分

**总体性重量**：即沿船体梁全长分布的重量。  
包括：主体结构、油漆和索具等。

**局部性重量**：即沿船长其一区段分布的重量。  
如货物、燃油、淡水、粮食、机电设备、舾装设备等各项重量。



## 2)重量分布原则

对各项重量的分布规律处理时，必须遵循**静力等效原则**，即

(1)保持重量的大小不变，即要使近似分布曲线所围的面积等于该项实际重量；

(2)保持重量重心的纵向坐标不变，即应使近似分布曲线所围的面积形心纵坐标与该项重量的重心纵坐标相等；

(3)近似分布曲线的范围与该项重量的实际分布范围相同或大体相同。

**最终，应使重量曲线所围成的面积等于全船的重量，该面积的形心纵向坐标与船舶重心的纵向坐标相同。**

### 3)局部重量分布的计算方法

局部重量系指分布在部分船长上的重量，如某机电设备、燃油和淡水等。通常有以下几种情况。

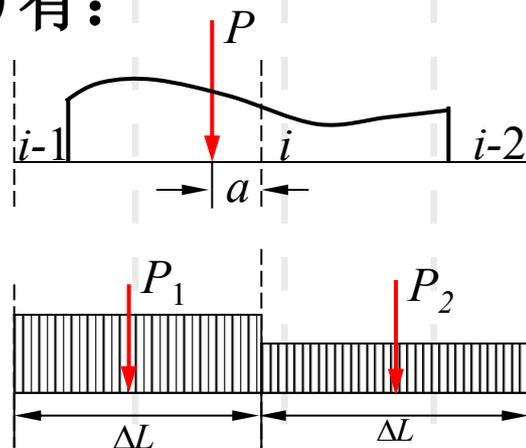
#### (1) 分布在两个理论站距内的重量

如图所示，根据分布规则(1)、(2)有：

$$\begin{cases} P_1 + P_2 = P \\ (1/2)(P_1 - P_2)\Delta L = P \times a \end{cases}$$

由此可得

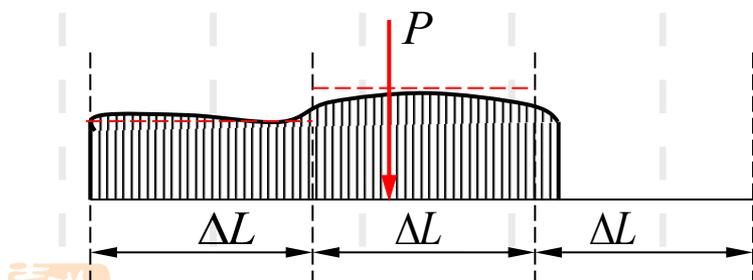
$$\begin{cases} P_1 = P\left(\frac{1}{2} + \frac{a}{\Delta L}\right) \\ P_2 = P\left(\frac{1}{2} - \frac{a}{\Delta L}\right) \end{cases}$$



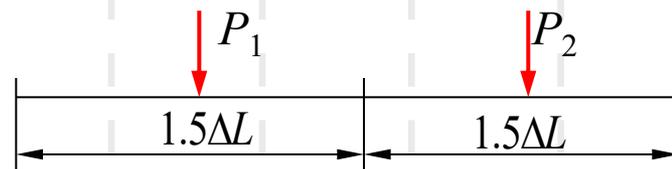
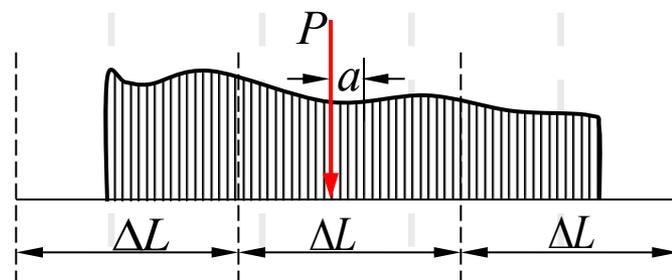
然后将 $P_1$ 和 $P_2$ 除以理论站距长度 $\Delta L$ ，即可得到该项重量在两个理论站距内的分布载荷强度 $p_1$ 和 $P_2$ 。

## (2) 分布在三个站距内的载荷

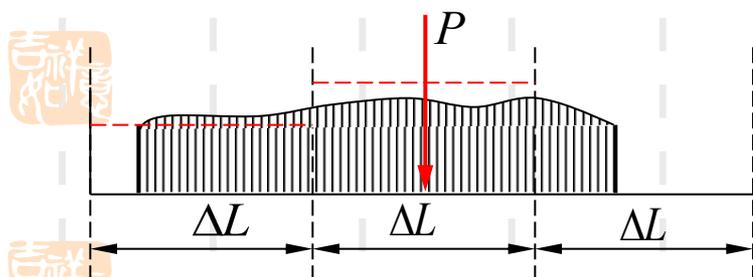
分布在三个站距内的载荷有如下图所示的三种情况：



(a)



(c)



(b)

因为根据静力等效原则，只能列出二个方程式，一般是根据具体情况，采用图(a)、(b)、(c)的假定分布规律进行分布。其中，对于(a)和(b)情况，可以比较简单地利用静力等效原则直接列出二个方程式，从而求得不同理论站距内的分布载荷强度；

对于(c)情况可以如下进行：第一步，以  $1.5\Delta L$  代替  $\Delta L$ ，用式(1)求  $P_1$ 、 $P_2$ ；

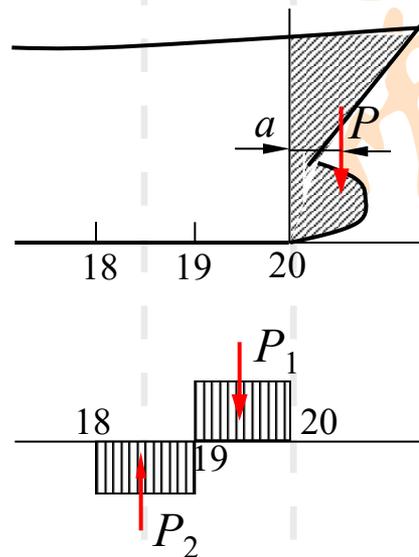
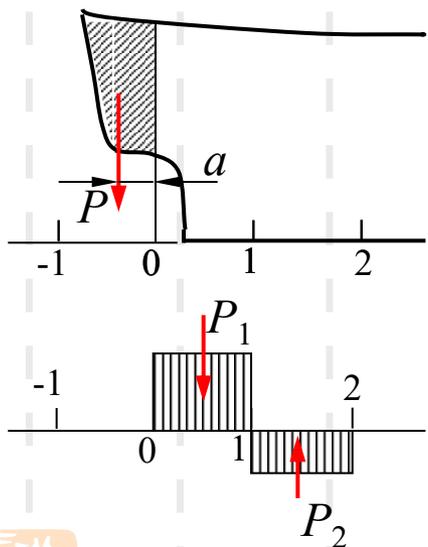
第二步，直接利用式(1)将  $P_1$  和  $P_2$  分别向其相邻的两个理论站距内分布；

第三步，对中间理论站距迭加来自  $P_1$  和  $P_2$  的相应分配值，最后，将各理论站距内分配得到的重量分别除以  $\Delta L$ ，则得到相应理论站距内的分布载荷强度。

### (3)首、尾理论站外的重量

有些船舶在首、尾理论站之外有相当长的延伸部分。如尾突出体或球鼻首，其重量可能超过空船重量的1%，且突出部分超过理论站距一半之多。把首、尾理论站之外的重量移到相邻的两个理论站距内时，根据静力等效原则不改变其重量大小及其对船中的力矩大小，故不致引起船中部弯矩的变化。

具体按下图的方法进行分布。



根据条件

$$\begin{cases} P = P_1 - P_2 \\ P \times a = \left(\frac{3}{2}P_1 - \frac{1}{2}P_1\right)\Delta L \end{cases}$$

可得

$$\begin{cases} P_1 = P\left(\frac{3}{2} + \frac{a}{\Delta L}\right) \\ P_2 = P\left(\frac{1}{2} + \frac{a}{\Delta L}\right) \end{cases}$$

对于在更长范围内分布的重量，均可按上述方法处理，计算时只要将理论站距 $\Delta L$ 用分布范围内的等分段长度代替即可。如，在4个理论站距内分布的重量，用分段长度 $2\Delta L$ 代替理论站 $\Delta L$ 距。

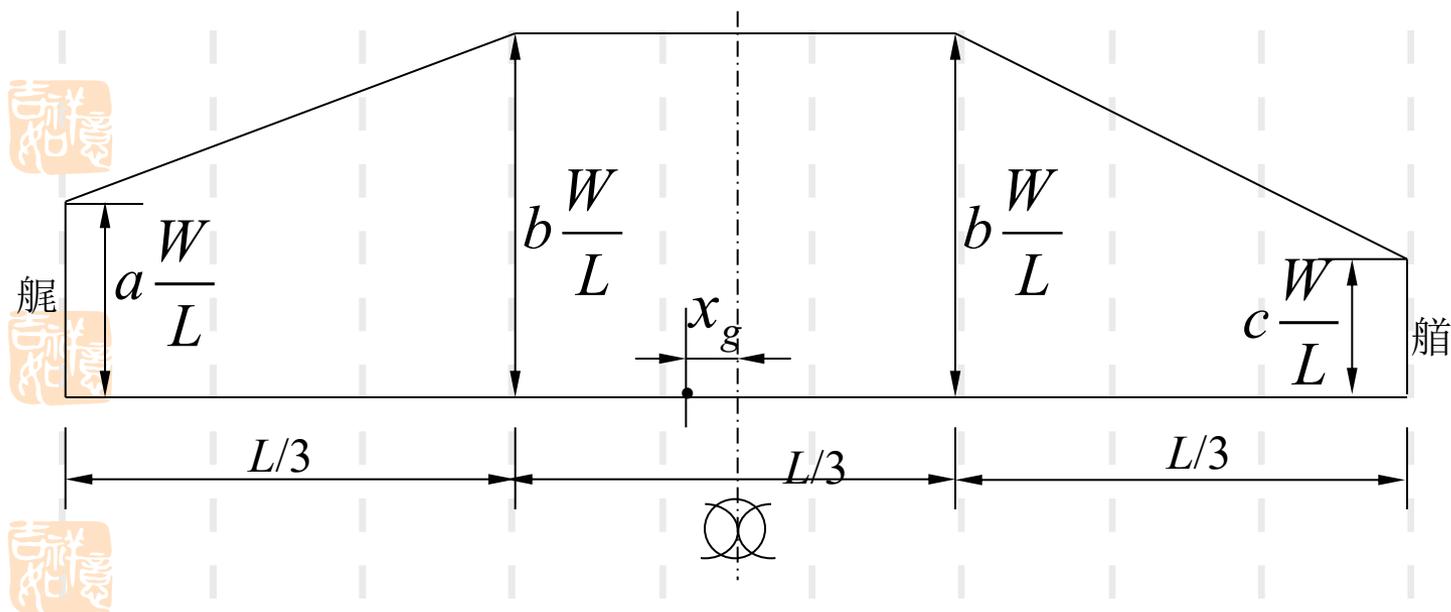
桅杆、绞车及横舱壁等集中重量，亦应在相应的适当站距内分布。如果该项重量不超过船舶重量的1%，则可认为其均匀分布在相应理论站距内。

## 4)总体重量的分布

船体重量的分布是绘制重量曲线的主要项目之一。由于在船体详细的结构设计完成之前就需要用到，此时，仅知道总的重量和重心的纵向坐标，因此就更需要用近似的、理想化的分布曲线来代替其真实的分布。几种常用的空船重量曲线的绘制方法有：**梯形法**、**围长法**、**库求莫夫法**、**抛物线法**等。

## (1) 梯形法

一些船舶往往中部丰满，两端尖瘦，且中部具有平行中体，所以可以将船体和舾装重量近似地用图所示曲线表示。即平行中体部分用均匀的重量分布，而两端部分用两梯形分布(通常为简化计算，三部分的长度均为船长的 $1/3$ )。



根据梯形面积等于船体及舾装的总重量 $W$ ，面积形心的纵向坐标与实际重量重心的纵向坐标一致的条件，可求得梯形形状参数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 之间的关系为：

$$\begin{cases} 4b + a + c = 6 & \text{(重量相等)} \\ a - c = \frac{108}{7} \times \frac{x_g}{L} & \text{(形心与重心位置一致)} \end{cases}$$

$x_g$ —船体重心距船中的距离(中后为正)，m；

$L$ —船长，m。

根据资料统计：

(1)瘦型船 $b=1.195$

$$\begin{cases} a = 0.61 + \frac{54}{7} \times \frac{x_g}{L} \\ c = 0.61 - \frac{54}{7} \times \frac{x_g}{L} \end{cases}$$

(2)肥型船 $b=1.174$

$$\begin{cases} a = 0.652 + \frac{54}{7} \times \frac{x_g}{L} \\ c = 0.652 - \frac{54}{7} \times \frac{x_g}{L} \end{cases}$$

## (2) 围长法

假设船体结构单位长度重量与该剖面围长成比例。该方法适用于船主体结构重量的分布。如船体结构中的纵向连续构件：甲板、外板、内底板、龙骨、纵桁以及横向的肋骨、肋板、横梁等的总重量，可以按与剖面围长（包括甲板）成比例地分布。设距尾垂线 $x$ 剖面处的单位长度的重量为 $w(x)$ ，则

$$w(x) = \frac{W_h l(x)}{A} \quad (\text{kN/m})$$

$W_h$ —船舶主体结构的总重量，kN；

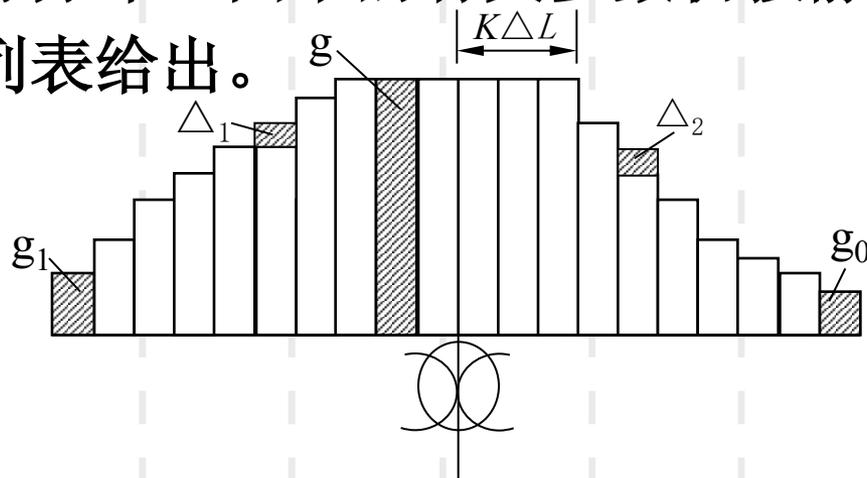
$l(x)$ — $x$ 剖面处包括甲板的围长，m；

$A$ —整个主船体的表面积， $\text{m}^2$ 。

### (3) 库求莫夫法

船体的重量分布用下图所示的阶梯形曲线表示。对具有纵

通发达上层建筑的大、中型客船，上层建筑结构重量亦可包括在内进行分布。图中的有关参数仍按静力等效原则求取，具体结果列表给出。



参数	$K$	$g$	$g_0$	$g_1$	$\Delta_0$	$\Delta_1$
肥型船	4	$1.18 \frac{G}{20}$	$(0.666 - 0.365\alpha) \frac{G}{20}$	$(0.666 + 0.365\alpha) \frac{G}{20}$	$\frac{g - g_0}{6}$	$\frac{g - g_1}{6}$
瘦形船	3	$1.18 \frac{G}{20}$	$(0.730 - 0.333\alpha) \frac{G}{20}$	$(0.730 + 0.333\alpha) \frac{G}{20}$	$\frac{g - g_0}{7}$	$\frac{g - g_1}{7}$

$$\alpha = \frac{x_g}{\Delta L}, \quad \Delta L = \frac{L}{20}$$

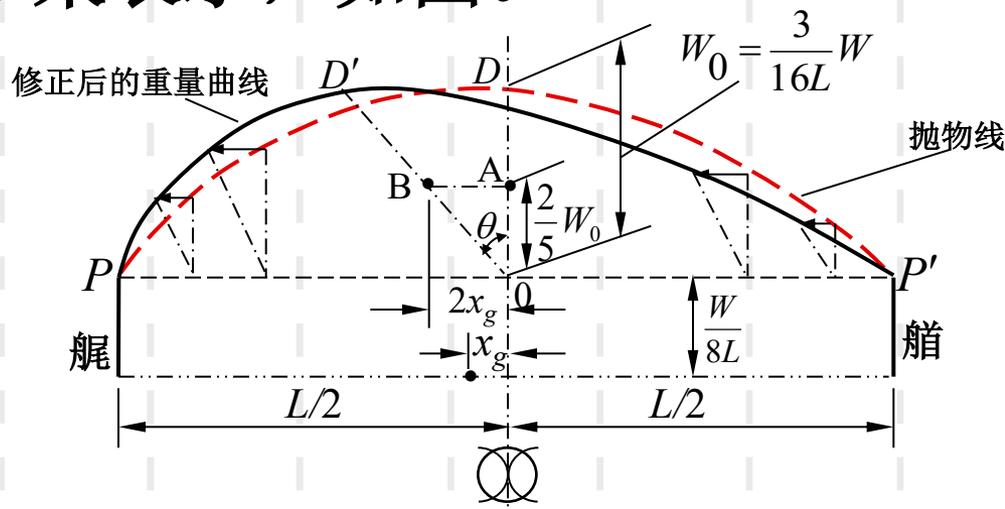
$x_g$ —船体重心距船中的距离(中后为正), m;

$L$ —船长, m;  $G$ —整个船体的重量, Kn;

$K$ —平行中体一半长度为  $\Delta L$  的倍数。

#### (4) 抛物线法

假定船体和舾装品构成的重量曲线, 可用抛曲线和矩形之和采表示, 如图。



这种分布曲线对于无平行中体的船比较适合。作重量曲线时，把船体和舾装总重量的一半作为均匀分布；另一半按抛物线分布，则距船中处的单位长度的重量按下式计算

$$w(x) = \frac{W}{L} \{0.5 + 0.75[1 - (2x/L)^2]\} \quad (\text{kN/m})$$

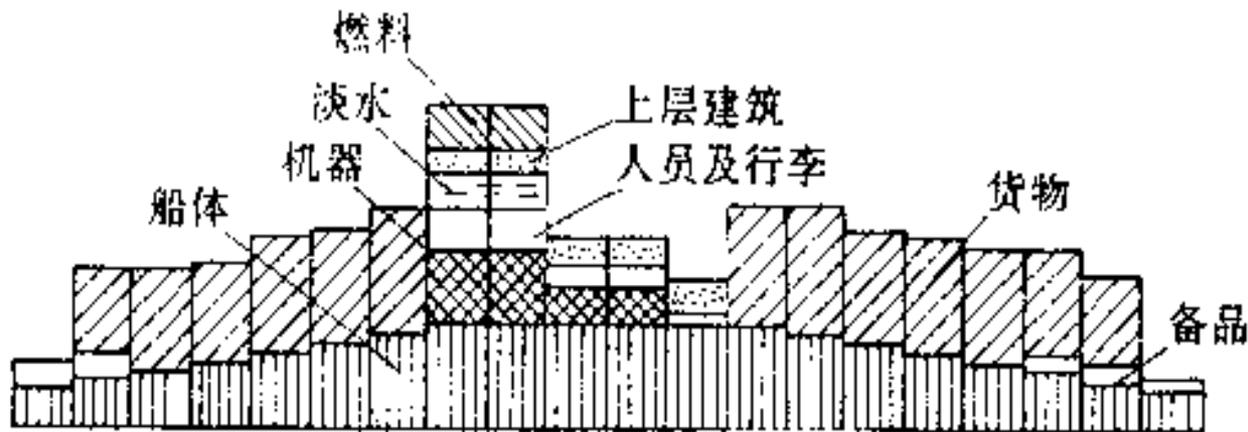
其中， $W$ —船体和舾装重量总和(kN/m)，  
 $L$ —船长(m)。

用该式求得的重量曲线，首尾是对称的。但一般船体重心并不在船中，因此须对上述重量曲线进行修正。修正方法如上图所示。(1)假定重心在中后 处，取 $OA=2W_0/5$ ， $OD=W_0(=3W/16L)$ ；(2)将A点沿水平方向移动到B点，令 $AB=2x_g$ ，从抛物线顶点D沿水平方向作直线，并与OB延长线交于 $D'$ ，则 $D'$ 点即为修正后的重量曲线的顶点。

由  $PP'$  线上其它各点作  $OB$  的平行线，并与由抛物线上相应的顶点所作的水平线相交，则由各交点连成的曲线即为修正后的重量曲线。因为新抛物线下的面积重心在中后  $2x_g$  处，所以整个图形的重心在中后  $x_g$  处。

**注意：**用以上各种近似方法绘制的重量曲线，只能与实际的重量分布规律基本相符，如有准确的资料，需进行修正。而对于形状复杂的特种船舶，则上述方法均不适用。

在船体详细结构设计完成之后，可沿船长选取若干个横剖面，计算其单位长度的重量，采用表格进行汇总计算，从而可得到如下图所示的较为精确的船体结构的重量分布曲线。



吉祥

§ 3

# 静水剪力 和弯矩计算

吉祥

吉祥

吉祥

吉祥

吉祥

吉祥



静水剪力和弯矩的计算为载荷的一次积分和二次积分，可按手工计算的方法采用计算机程序来完成。

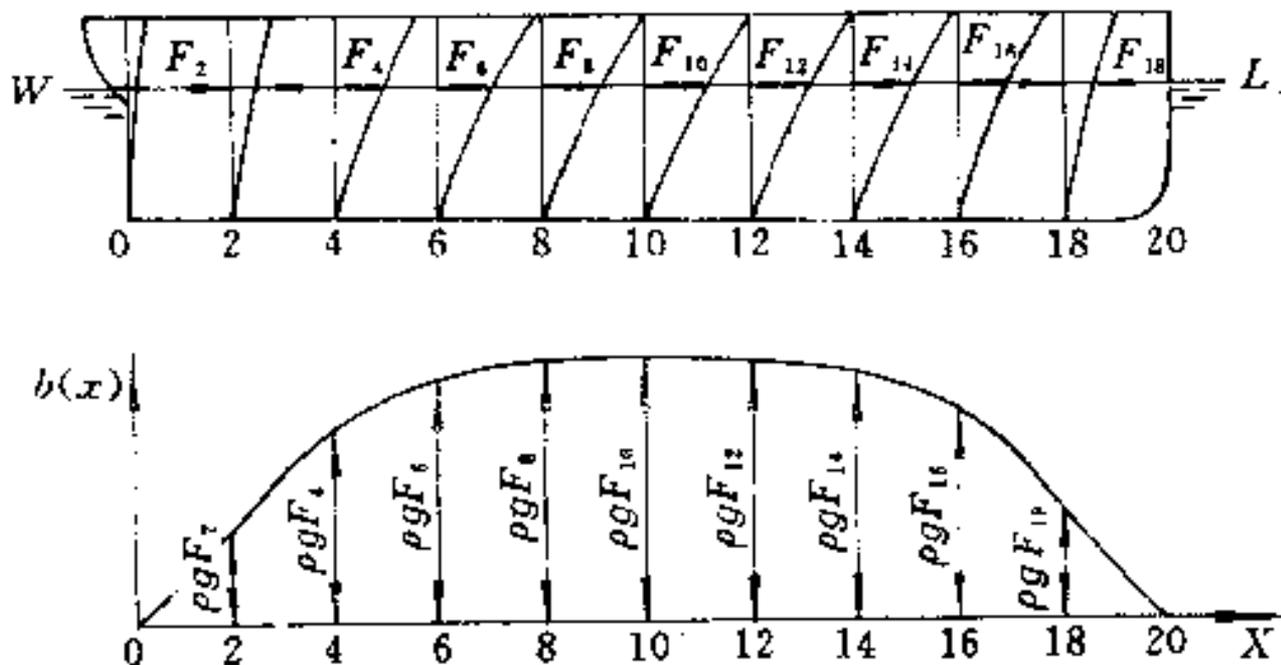
### 1. 浮力曲线

描述船舶在某装载情况下，浮力沿船长分布状况的曲线称为浮力曲线。浮力曲线的纵坐标为作用在船体梁上单位长度的浮力值，与纵向坐标轴所围成的面积等于作用在船体上的浮力 $b(x)$ ，该面积的形心纵向坐标即为浮心的纵向位置。浮力曲线可按邦戎曲线求得。



## (1) 求浮力曲线的方法

下图为利用邦戎曲线求得的静水力曲线。



图中， $F_i$ 为水线 $W-L$ 各站的横剖面面积， $\rho g F_i$ 为各站的排水面积，将这些排水面积曲线连接成的光滑曲线即为浮力曲线 $b(x)$ 。

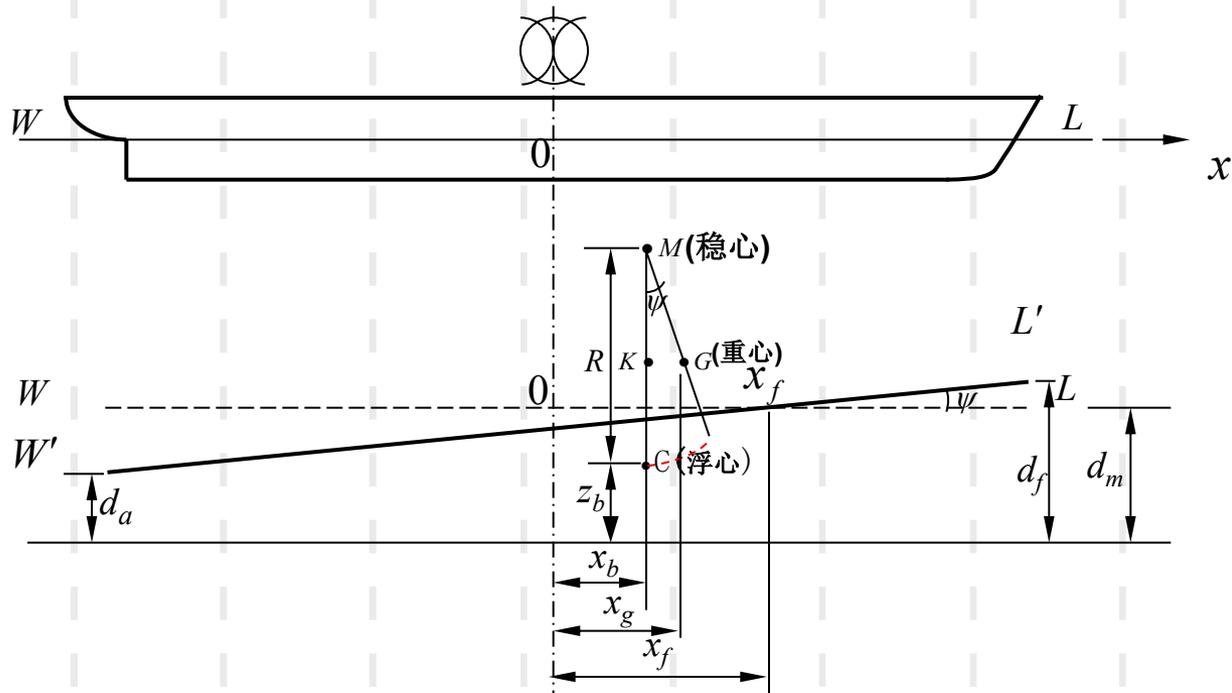
## 2. 静水平衡计算

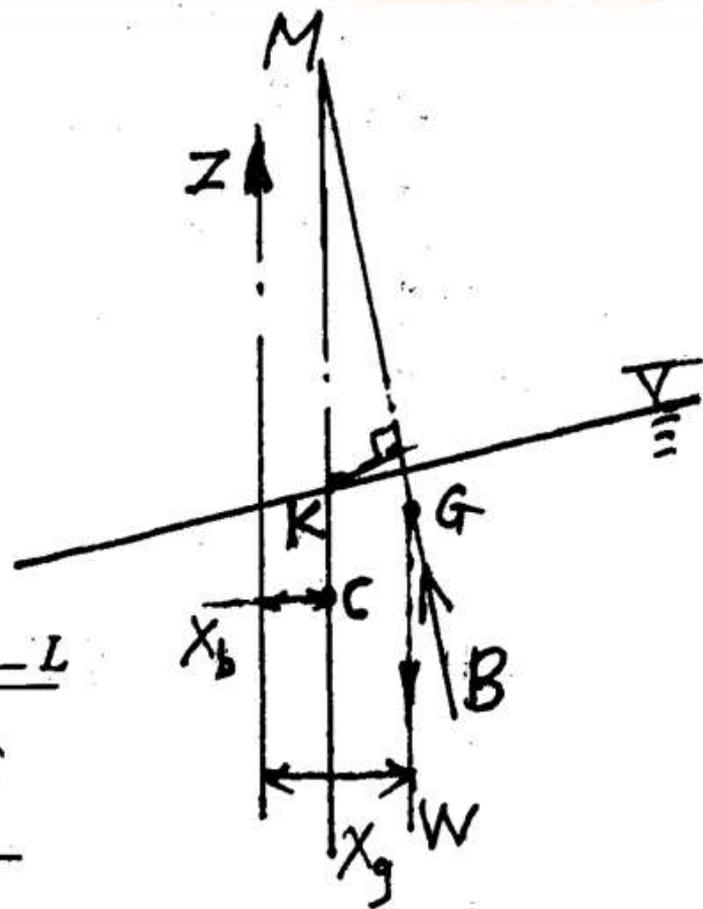
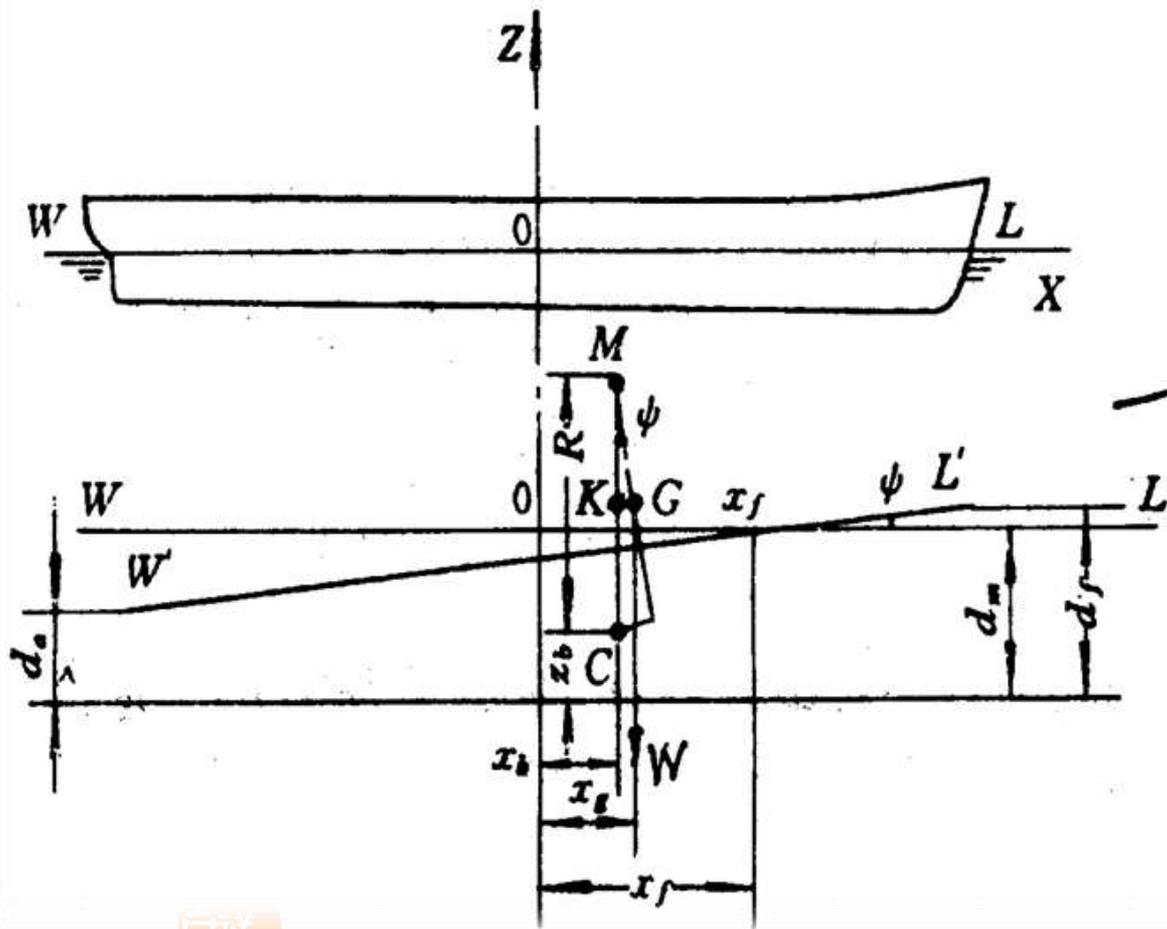
进行静水平衡计算，目的是确定船舶在静水中的首、尾吃水。因此，进行静水平衡计算时，采用下述逐步近似法和需利用邦戎曲线、静水力曲线反船舶的重量重心等资料。具体步骤为：

(1) 首先根据给定的计算状态的船舶排水量 $M$ (重量 $W=Mg$ )，从静水力曲线图上查得5个数据：

- 平均吃水 $d_m$ (m)，
- 浮心距船中的距离 $x_b$ (中前为正，m)，
- 纵稳心半径 $R$ (m)，
- 水线面面积 $A$ ( $m^2$ )，
- 水线面漂心距船中的距离 $x_f$ (中前为正，m)。

(2)若浮心与重心的纵向坐标之差不超过船长的0.05%~0.1%，  
则可认为船舶已处于平衡状态。



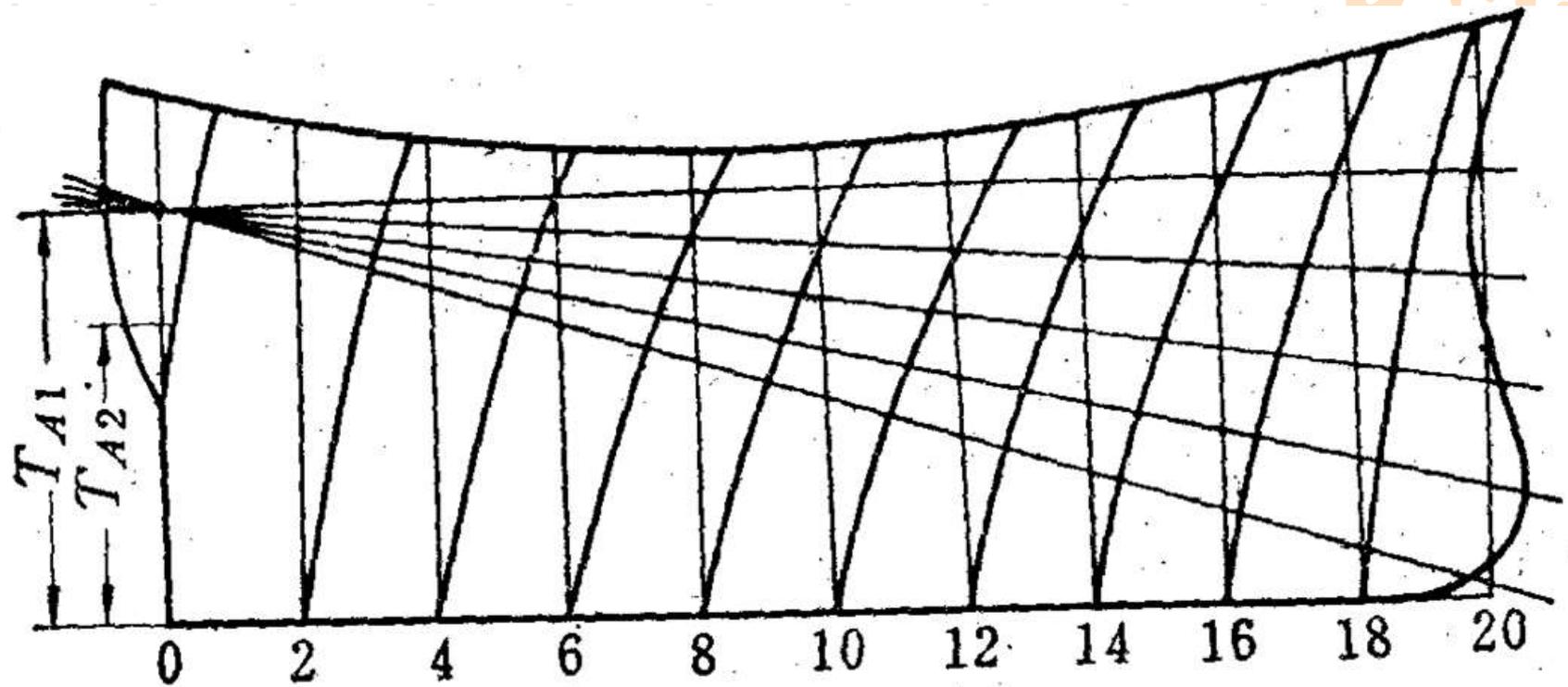


通常船在静水中并非处于首尾吃水相等的平浮状态，因此为了求得船的实际平衡位置，须进行纵倾调整。设纵倾角为 $\psi$ (首下沉为正)，由于实船的 $R \gg \overline{KG}$  故可近似取 $R - \overline{KG} \approx R$ ，因而有 $\tan\psi \approx \psi \approx (x_g - x_b)/R$ ，如图所示。

第一次近似计算时，根据船舶纵倾后的首尾吃水与上述各要素之间具有下列近似关系

$$\begin{cases} d_{f1} = d_m + \left(\frac{L}{2} - x_f\right) \frac{x_g - x_b}{R} & \text{首吃水} \\ d_{a1} = d_m - \left(\frac{L}{2} + x_f\right) \frac{x_g - x_b}{R} & \text{尾吃水} \end{cases}$$

首、尾吃水确定以后，利用邦戎曲线求出对应于该吃水线时的浮力分稍，同时计算出总浮力 $B_1$ 及浮心纵向坐标 $x_{b1}$ 的第一次近似计算值。若求得的这两个数值不满足上述精度要求，则应作第二次近似计算。



邦戎曲线



(3)第二次近似计算需对第一次近似计算得到的船舶浮态作进一步的修正，即应消除浮力与重量的不等，船舶将上浮或下沉的值和由于浮心和重心的纵向位移不一致，船舶将进一步纵倾一定值。第二次近似计算可按下式确定新的首、尾吃水：

$$\left\{ \begin{aligned} d_{f2} &= d_{f1} + \frac{W - B_1}{\rho g A} + \left( \frac{L}{2} - x_f \right) \frac{x_g - x_{b1}}{R} \\ d_{a2} &= d_{a1} + \frac{W - B_1}{\rho g A} - \left( \frac{L}{2} + x_f \right) \frac{x_g - x_{b1}}{R} \end{aligned} \right.$$

消除浮力与  
重力不等

消除浮心与重心纵  
向位置不一致

$\rho$ —水的密度， $g$ —重力加速度。

平衡计算需一直要进行到满足

$$\begin{cases} \left| \frac{W - B_i}{w} \right| \leq (0.1 \sim 0.5)\% \\ \left| \frac{x_c - x_{bi}}{L} \right| \leq (0.05 \sim 0.1)\% \end{cases}$$

上式要求才终止。此处 $B_i$ 、 $x_{bi}$ 分别为最后计算得到的总浮力和浮心纵向坐标。虽然最终计算结果并未真正达到平衡，但这种不平衡所产生的弯矩最大误差不会超过最大弯矩值的5%。

当以上计算采用手算时，应按表格进行。静水平衡计算完成各，则可作出浮力曲线。此时，作用于 $(i, i+1)$ 理论站距内的浮力

$$B_i = \rho g (F_i + F_{i+1}) \Delta L / 2$$

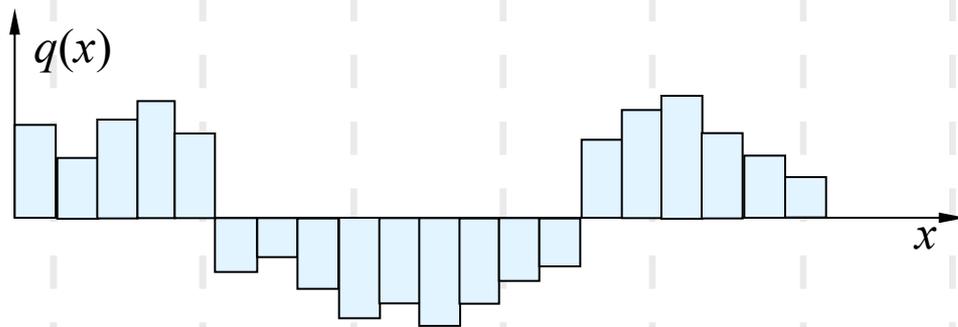
$F_i$ 、 $F_{i+1}$ 分别为最后一次确定的第 $i$ 理论站及第 $i+1$ 理论站的浸水面积。

### 3. 载荷曲线

在某计算状态下的载荷曲线，等于重量曲线纵坐标与浮力曲线纵坐标之差，用 $q(x)$ 表示，即

$$q(x) = p(x) - b(x)$$

当 $p(x) > b(x)$ 时， $q(x)$ 为正值，并画在纵向坐标轴的上方，反之为负，画在纵向坐标轴的下方。下图为采用表格计算时的阶梯形载荷曲线。





## 载荷曲线的特点:

- (1) 由于重力等于浮力, 因此载荷曲线与纵轴之间所围成的面积之和应等于零;
- (2) 由于浮心与重心在同一铅垂线上, 所以该面积对纵轴上任意点的静力矩亦为零。

即:

$$\int_0^L q(x)dx = \int_0^L p(x)dx - \int_0^L b(x)dx = W - B = 0$$

$$\int_0^L q(x)x dx = \int_0^L p(x)x dx - \int_0^L b(x)x dx = Wx_q - Bx_b = 0$$

载荷曲线特点, 表明作用在船体梁上的所有外力是平衡的。在进行剪力和弯矩的计算之前, 应当对载荷曲线的这些性质进行检验, 以判断船舶是否已处于所要求的平衡位置, 或是在哪里发生了计算错误, 以免造成不必要的计算返工。同样, 载荷曲线的计算可采用表格计算。

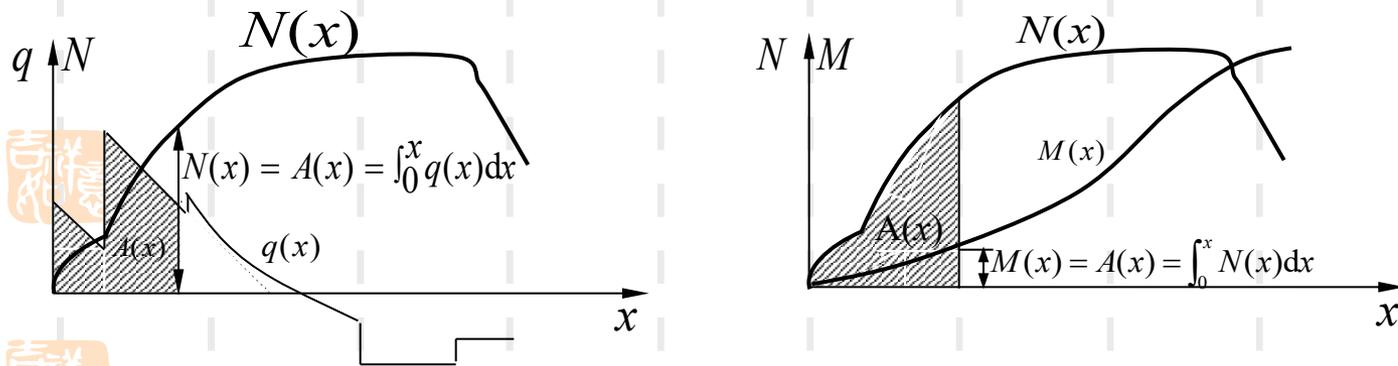


# 4. 静水剪力和弯矩曲线

船体梁在静水中所受到的剪力和弯矩沿船长分布状况的曲线分别称为静水剪力曲线和静水弯矩曲线。作用在船体梁任意剖面上的静水剪力和弯矩用下式计算：

$$\begin{cases} N(x) = \int_0^L q(x) dx \\ M(x) = \int_0^L N(x) dx = \int_0^L \int_0^L q(x) dx dx \end{cases}$$

载荷、剪力和弯矩之间的关系如下图：



# 剪力和弯矩曲线的特点:

- (1) 因船体两端是完全自由的, 故首、尾端点处的剪力和弯矩应为零, 即剪力和弯矩曲线在端点处是封闭的。
- (2) 由载荷、剪力和弯矩之间的微分关系知, 零载荷点与剪力的极值点相对应, 零剪力点与弯矩的极值相对应。
- (3) 由于两端的剪力为零, 即弯矩曲线在两端的斜率为零, 所以弯矩曲线在两端与纵坐标轴相切。  
在计算过程中, 可利用这些性质来检查计算结果是否正确。

# 计算精度与修正

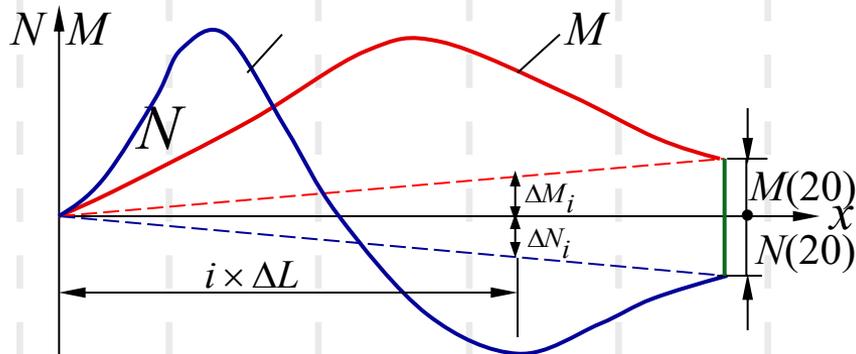
由于计算误差的累积，端点处剪力和弯矩为零的条件一般很难达到。通常计算的精度要求：

$$\frac{N(L)}{|N_{\max}|} \leq \begin{cases} 0.05 & (\text{民船}) \\ 0.01 & (\text{军船}) \end{cases}, \quad \frac{M(L)}{|M_{\max}|} \leq \begin{cases} 0.05 & (\text{民船}) \\ 0.01 & (\text{军船}) \end{cases}$$

如果精度不满足要求，则需复查或重新计算。

端点的不封闭值只须用如图所示的一根直线将剪力曲线和弯矩曲线封闭起来，并对各理论站的剪力和弯矩按线性比例关系进行修正就可以了。如，第*i*站剪力和弯矩的修正值为：

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_i &= -\frac{i}{20} N(20) \\ \Delta M_i &= -\frac{i}{20} M(20) \end{aligned} \right\}$$



## 4. 计算状态选取

对于一艘船舶的总纵强度计算，其计算状态并不是唯一的。船舶建造规范(或有关强度标准)对常规船舶的计算状态都作了具体规定；特殊用途船、超规范船，其计算状态需计算者进行判断。因此，计算状态的选取是总纵强度外力计算中应审慎考虑的问题。

我国钢质海船入级和建造规范规定：选取**满载：出港、到港；压载：出港、到港**；以及装载手册中所规定的各种工况，作为计算状态。

军舰主要是对**正常排水量**进行计算，但当按**满载排水量**计算得到的最大弯矩超过前者计算值的10%时，则应以后者作为校核总纵强度的计铎弯矩。

对所选取的各种计算状态分别进行计算，求出静水弯矩的最大值或各计算状态静水弯矩的**包络线**，作为总纵强度计算的静水弯矩。

## 5. 船体挠度、货物分布对静水弯矩的影响

### (1) 船体挠度对静水弯矩的影响

上述浮力曲线的计算，是在假定船体梁不发生变形的前提下进行的。实际上，船体梁在载荷的作用下产生总纵弯曲变形。因此，当船体梁处于中拱状态时，其中部浮力减小，而两端部浮力增大(相对于不考虑船体变形而言)，于是中拱弯曲程度减弱；反之，当船体处于中垂状态时，中部浮力增加，两端部浮力减少，于是中垂弯曲趋于平缓。由此可见，船体挠度对静水弯矩的影响是有利的。

一般情况下，海船的刚度比较大，船体梁变形对静水弯矩的影响较小；而内河船，由于 $L/D$ 较大，船体“较软”，因此总纵弯曲变形对静水弯矩的影响较大。

## (2) 货物分布对静水弯矩的影响

静水弯矩主要取决于重量沿船长的分布，而货物是变动重量中最大的项目，常常有某些分布和组合使得船体梁上的弯矩值过大。因此，装卸程序不当就可能在船体剖面上引起很大的静水弯矩，甚至导致船体的破坏。

对于内河船舶，为了避免在船体剖面上引起不应有的过大弯矩，一般应采用货物自首至尾(或自尾至首)的连续装卸顺序。

对于海船(特别是散货舱)，由于种种原因，有的船会装满，而一些船会空舱。满、空货舱的不合理分布会导致产生过大的剪力和弯矩，因此，货船的装卸手册都制定了由总纵强度要求所规定的各种装载情况下的配载图，以便船体结构处于较低的应力状态下工作。重要的是，将满、空货舱分散且间隔安排，而不是集中在一起。

吉祥

# § 4 波浪引起的 附加剪力与弯矩

吉祥

吉祥

吉祥

吉祥

吉祥

吉祥

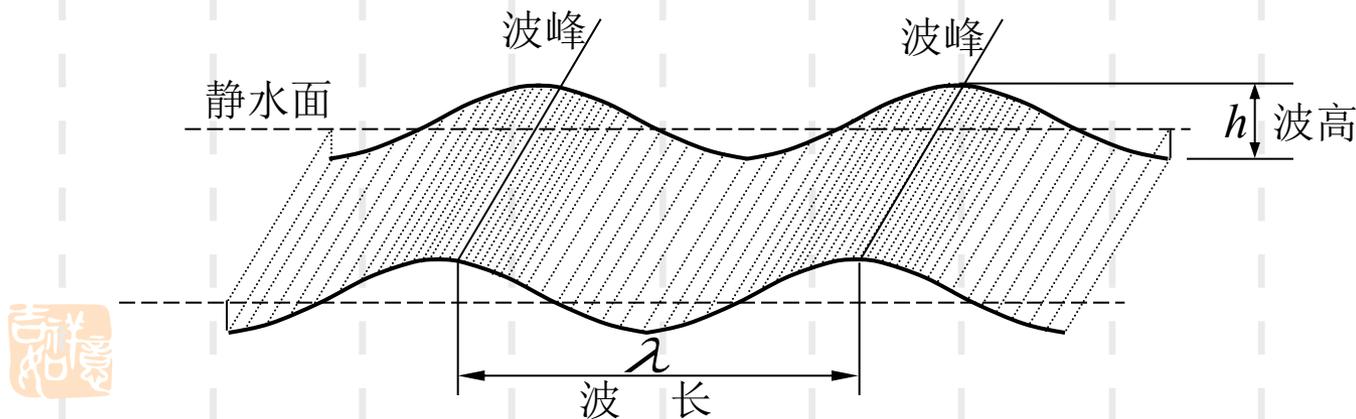
船舶由静水进入波浪时，重量曲线 $p(z)$ 并未改变，但水线面发生了变化，因此浮力曲线将重新分布。波浪下浮力曲线相对静水状态的浮力增量是引起静波浪剪力和弯矩的载荷。因此，静波浪弯矩与船型、波浪要素以及船舶与波浪的相对位置有关。

## 1. 传统的标准计算方法

对给定船型，静波浪弯矩主要取决于(1)波浪要素、(2)波浪与船舶的相对位置。

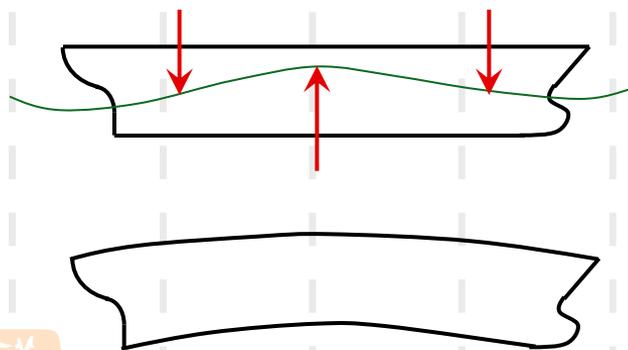
波浪要素包括波形、波长、波高。目前得到最广泛应用的是坦谷波理论。

坦谷波为如图所示的二维波，其曲线形状的特点是：**波峰陡峭，波谷平坦，波浪轴线上的剖面面积不相等**，故称谓坦谷波。

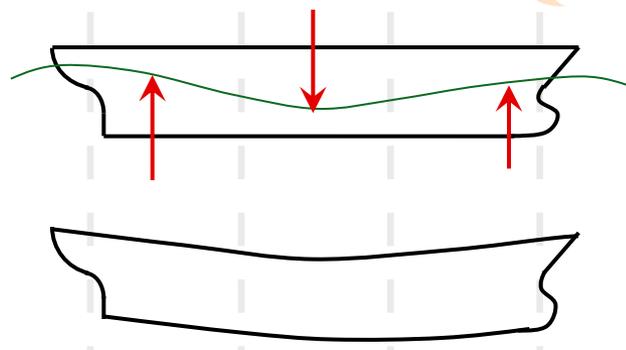


船舶在航行中所遇到的波浪是随机的、不断变化的。计算的波浪要素及船舶在波浪上的危险位置的选择则主要是考虑可能引起较大的静波浪弯矩。

当船舶静置在波浪上的位置发生变化时，船体剖面上的弯矩也将发生变化。当波峰或波谷船中时，浮力相对于静水线的改变最为明显，如下图。



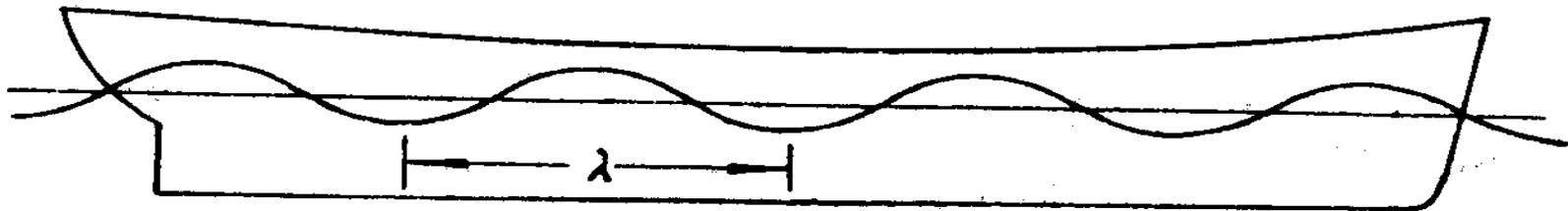
中 拱



中 垂

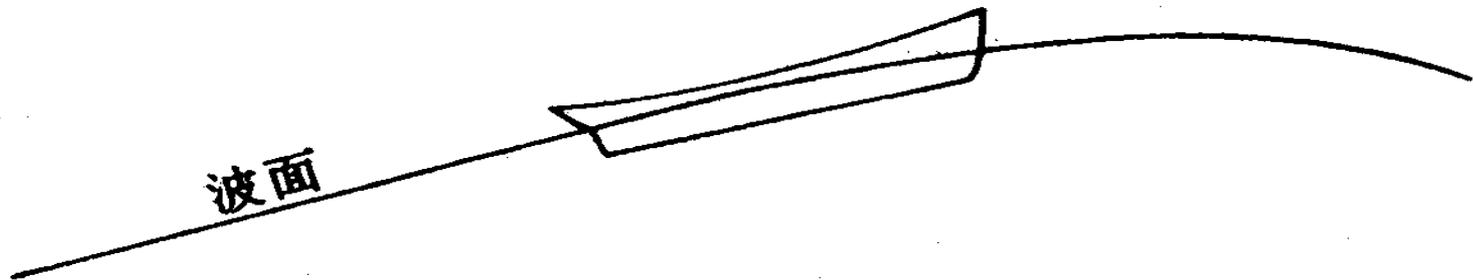
因此在船中剖面会产生最大的波浪弯矩。但是，计算表明，在其它剖面中的最大弯矩并不发生在波峰或波谷在船中时。





$$\lambda \ll L$$

(a)



$$\lambda \gg L$$

(b)

计算分析表明，当船舶静置在波浪上时，在波长稍大于船长时才得到最大的波浪弯矩，但此时的弯矩与波长等于船长时的弯矩相差不大。所以，在实际计算时，取计算波长等于船长，并且规定按波峰在船中和波谷在船中两种典型状态进行计算。

前苏联标准中均以假定性确定外力的方法为依据，即把船舶静置在波长等于船长、波高按一定关系式选定的波浪上，来计算船体受到的总纵弯曲力矩。在1958年和1962修改的标准中，计算波高按船长由下式确定：

$$\begin{cases} h = \frac{L}{30} + 2 & (\text{m}) & L \leq 120\text{m} \\ h = \frac{L}{20} & (\text{m}) & L > 120\text{m} \end{cases}$$

1958年标准

$$\begin{cases} h = 0.64\sqrt{L} - 1 & (\text{m}) & L \leq 120\text{m} \\ h = 6 & (\text{m}) & L > 120\text{m} \end{cases}$$

1962年标准

在军船设计中，波高 $h$ 按下列公式确定：

$$h = \begin{cases} \frac{\lambda}{20} & \text{当 } \lambda \geq 120\text{m时} \\ \frac{\lambda}{30} + 2 & \text{当 } 60\text{ m} \leq \lambda \leq 120\text{m时} \\ \frac{\lambda}{20} + 1 & \text{当 } \lambda \leq 60\text{m时} \end{cases}$$

传统的标准计算方法可归纳如下：

(1)将船舶静置于波浪上，即假想船以波速在波浪上的传播方向上航行，船与波浪处于相对静止状态。

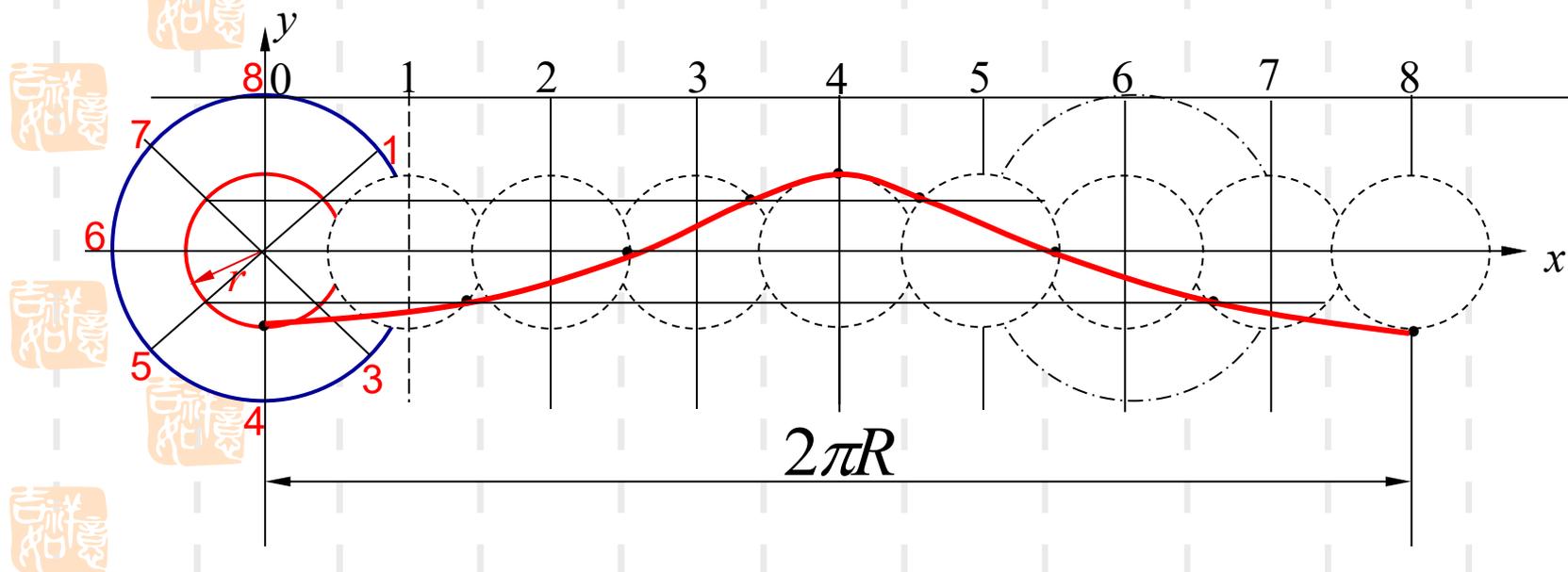
(2)以二维坦谷波作为标准波形，计算波长等于船长(内河船舶斜置于一个波长上)，计算波高按有关规范或强度标准选取。

(3)取波峰及波谷位于船中两种状态分别进行计算。

由于确定计算波高时具有很大的主观性、故传统的船舶总纵强度计算带有假定性，因此计算过分精确并没有太大意义。

## 2. 坦谷波形的绘制方法

若以半径为 $R$ 的圆盘，沿直线 $AB$ 滚动时，圆内一距圆心为 $r$ 的定点 $P$ 所描绘的轨迹，即为一坦谷波曲线。坦谷波曲线绘制方法具体如图所示。将波长分为8等分，分别以各等分点 $o_1, o_2, \dots, o_8$ 为中心，半波高 $r$ 为半径，顺次旋转 $45^\circ$ ，记下 $P_0, P_1, \dots, P_8$ 各点位置，用光滑曲线便为一坦谷波曲线。



由上图可写出坦谷波的波面方程为：

$$\begin{cases} x = \frac{\lambda}{2\pi} \theta + r \sin \theta \\ y = -r \cos \theta \end{cases}$$

$\theta$ —圆盘滚动时的转角； $y$ —波面距波浪轴线的垂向坐标；  
 $x$ —与 $\theta$ 或 $y$ 相对应的纵向坐标。





### 3. 静置波浪时剪力及弯矩计算

船舶静置于坦谷波上的附加剪力和弯矩计算为：

$$\begin{cases} N(x) = -\int_0^x b(x)dx = -\int_0^x [b_w(x) - b_s(x)]dx = -\int_0^x \rho g [F_w(x) - F_s(x)]dx = -\int_0^x \rho g \Delta F(x)dx \\ M(x) = -\int_0^x \int_0^x b(x)dx = -\int_0^x \int_0^x \rho g \Delta F(x)dx \end{cases}$$

$\rho$ —水的密度； $g$ —重力加速度；

$b_w(x)$ —船舶在波浪中的浮力曲线；

$b_s(x)$ —船舶在静水中的浮力曲线；

$F_w(x)$ —船舶在静水中各理论站横剖而的浸水面积；

$F_s(x)$ —在波浪上各理论站横剖面的浸水面积。



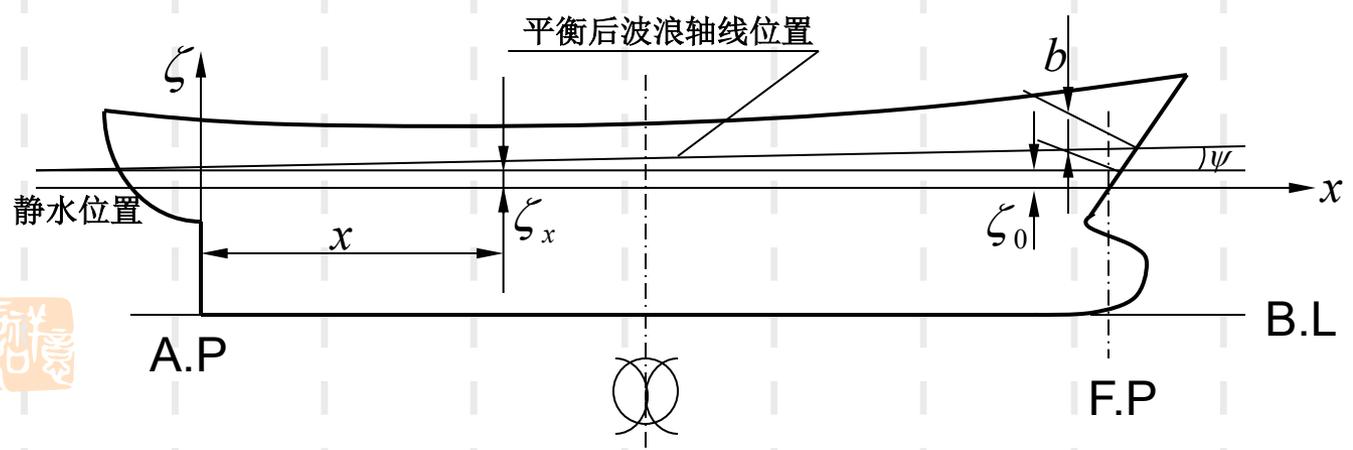
船舶静置在波浪上也应满足重力等于浮力和重心与浮心的纵向坐标处于同一铅垂线上的静力平衡条件。因此船舶在波浪中的浮力变化量必须满足以下条件：

$$\begin{cases} \int_0^L \Delta b(x) dx = 0 \\ \int_0^L [x \times \Delta b(x)] dx = 0 \end{cases}$$

由此可见，为求静波浪剪力和弯矩，首先必须确定船舶在波浪上的平衡位置。现假定船舶静置在波浪上，尾垂线处较静水时下沉  $\zeta_0$  值(下沉为正)，纵倾角变化为  $\psi$  (首下沉为正)。则在距尾垂线  $x$  处剖面下沉或上浮的距离为：

$$\zeta_x = \zeta_0 + x\psi$$

于是，求船舶在波浪上的平衡位置，归结为求波浪轴线的位置  $\zeta_0$  和  $\psi$ ，如下图所示。



确定船舶静置在波浪上的方法

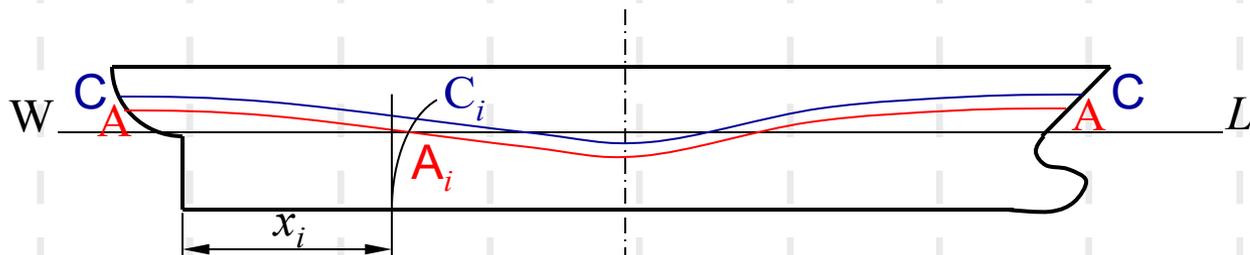
- 逐步近似法(适用于小船、内河船和军船等)
- 直接法(麦卡尔法，利用邦戎曲线确定船在波浪上的平衡位置，适用于大型船舶)



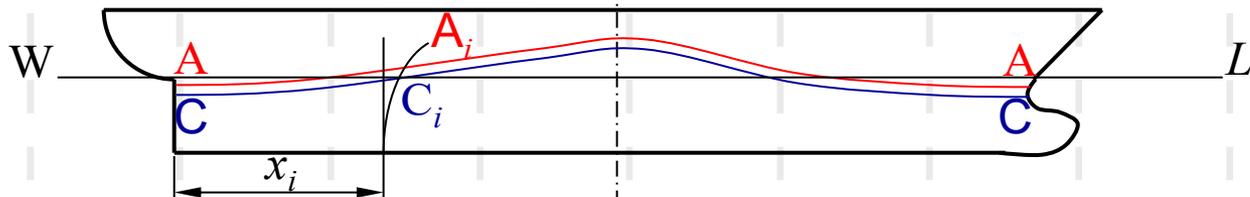
直接法计算步骤为：

(1)使坦谷波轴线与静水线重合，得到波峰在中或波谷在中的波形线A—A(如图)；

波谷在船中



波峰在船中



(2)在船各理论站上利用邦戎曲线量出各理论站剖面与A—A波形的交点 $A_i$ 的剖面积 $F_{A_i}$ (如图)；





(5) 利用平衡条件，即排水量和浮心位置与静水中相等的条件

$$\begin{cases} \int_0^L F_C(x) dx = V \\ \int_0^L F_C(x) \times x dx = V \times x_b \end{cases}$$

式中：  $V$  是静水中的排水体积；

$x_b$  为船舶在静水中的浮心至尾垂线的距离。

将  $F_{Ci}$  代入上式，可得：

$$\int_0^L F_{Ax}(x) dx + \int_0^L \frac{F_B(x) - F_A(x)}{\varepsilon} (\zeta_0 + x\psi) dx = V$$

$$\int_0^L F_{Ax}(x) \frac{x}{L} dx + \int_0^L \frac{F_B(x) - F_A(x)}{\varepsilon} \frac{x}{L} (\zeta_0 + x\psi) dx = V \frac{x}{L}$$



现令：

$$\Sigma'_2 = \int_0^L F_A(x) dx,$$

$$\Sigma'_3 = \int_0^L F_A(x) \frac{x}{L} dx$$

$$\Sigma'_5 = \int_0^L [F_B(x) - F_A(x)] dx,$$

$$\Sigma'_6 = \int_0^L [F_B(x) - F_A(x)] \frac{x}{L} dx$$

$$\Sigma'_7 = \int_0^L [F_B(x) - F_A(x)] \frac{x^2}{L^2} dx$$

则平衡条件可写为

$$\begin{cases} \Sigma'_2 + \frac{\zeta_0}{\varepsilon} \Sigma'_5 + \psi \frac{L}{\varepsilon} \Sigma'_6 = V \\ \Sigma'_3 + \frac{\zeta_0}{\varepsilon} \Sigma'_6 + \psi \frac{L}{\varepsilon} \Sigma'_7 = V \frac{x_b}{L} \end{cases}$$

从上述方程组可解出未知数 $\zeta_0$ 和 $\psi$ 值。当用表格计算时，上式可改写为：

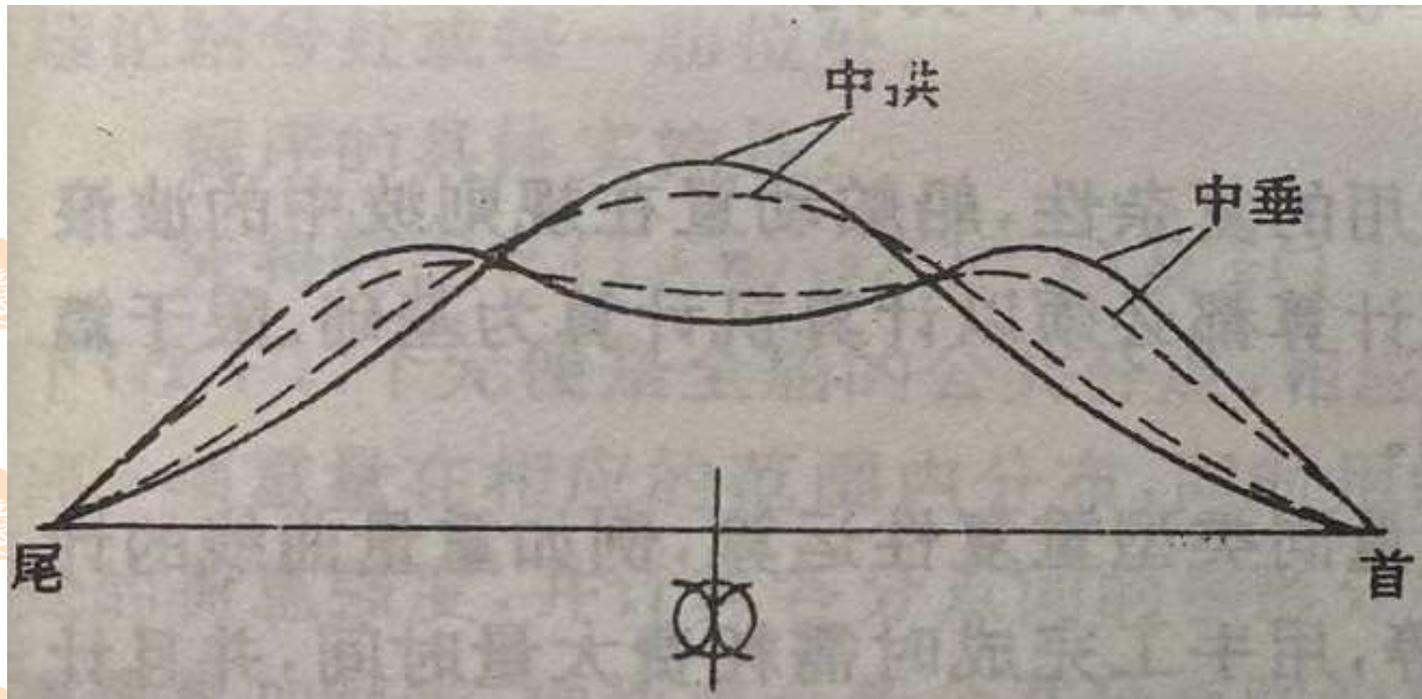
$$\begin{cases} \Sigma_2 + \frac{\zeta_0}{\varepsilon} \Sigma_5 + \frac{b}{\varepsilon} \frac{\Sigma_6}{L} = \frac{V}{\Delta L} \\ \Sigma_3 + \frac{\zeta_0}{\varepsilon} \Sigma_6 + \frac{L}{\varepsilon} \frac{\Sigma_7}{20} = \frac{V \times x_b}{(\Delta L)^2} \end{cases}$$

式中 $\Delta L = L/20$ ， $b \approx \psi L$ ， $\Sigma_i$  为计算表格中各栏数值积分值。

如果在实际计算时，出现波面超出甲板的情况，则应按书中的处理方法处理。

## 4. 波浪浮力的修正（史密斯修正）

在上述波浪弯矩计算中，作用在船体上的浮力是按静水压力计算的，即作用在船体上的水压力与该点离开波面的距离成正比。但是根据坦谷波理论，波面下的水压力并不等于波浪表面上的静水压力。在波峰附近波面下的水压力较静水压力小；在波谷附近则较静水压力大。



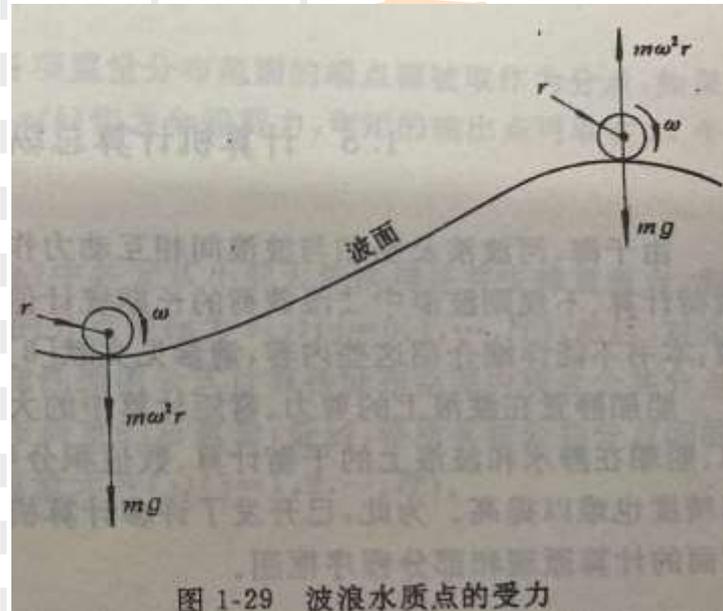
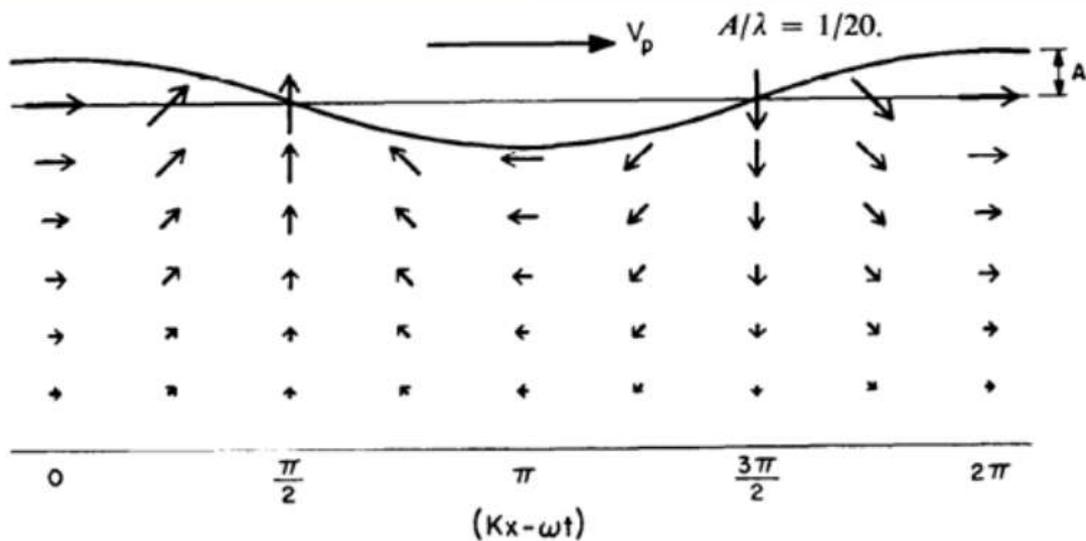
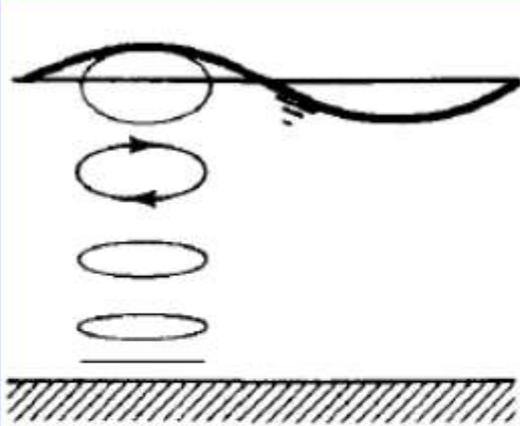
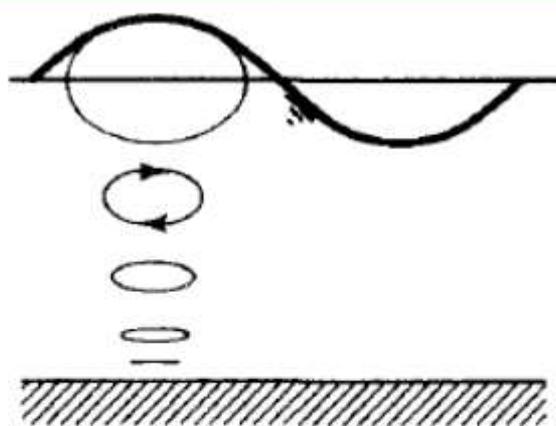


图 1-29 波浪水质点的受力



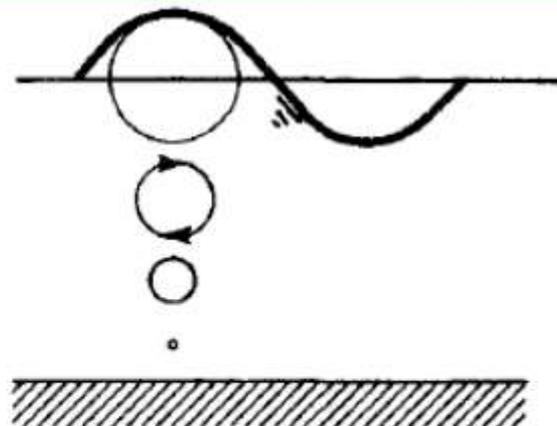
$$kh < \frac{\pi}{10}$$

$$\left(\frac{h}{L} < \frac{1}{20}\right)$$



$$\frac{\pi}{10} < kh < \pi$$

$$\left(\frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}\right)$$



$$kh > \pi$$

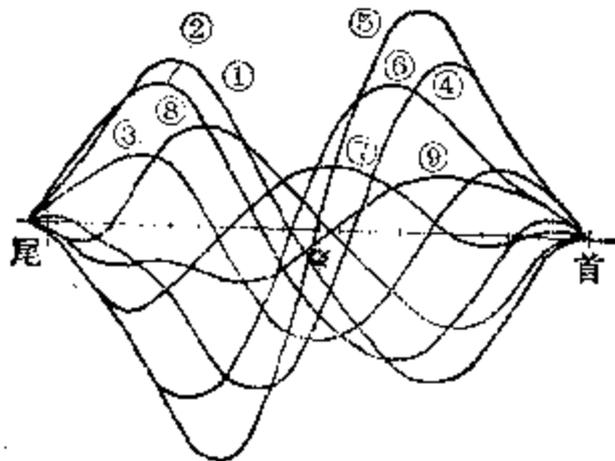
$$\left(\frac{h}{L} > \frac{1}{2}\right)$$

# 5. 总纵弯矩计算

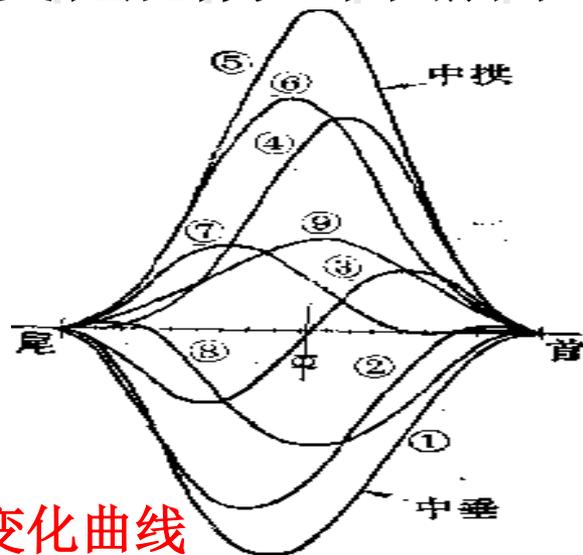
$$M(\text{总纵弯矩}) = M_s(\text{静水弯矩}) + M_w(\text{波浪附加弯矩})$$

因此，**总纵弯矩的最大值为校船体总纵强度的计算弯矩。**

波峰或波谷在船中时，中剖面的总纵弯矩为最大值，如果当波峰或波谷与船舶的相对位置改变时，其他剖面是否可能出现比标准计算时更大的弯矩值呢？当波峰从首垂线移动到尾垂线过程中总纵弯矩和剪力的变化规律如下图所示。



剪力变化曲线



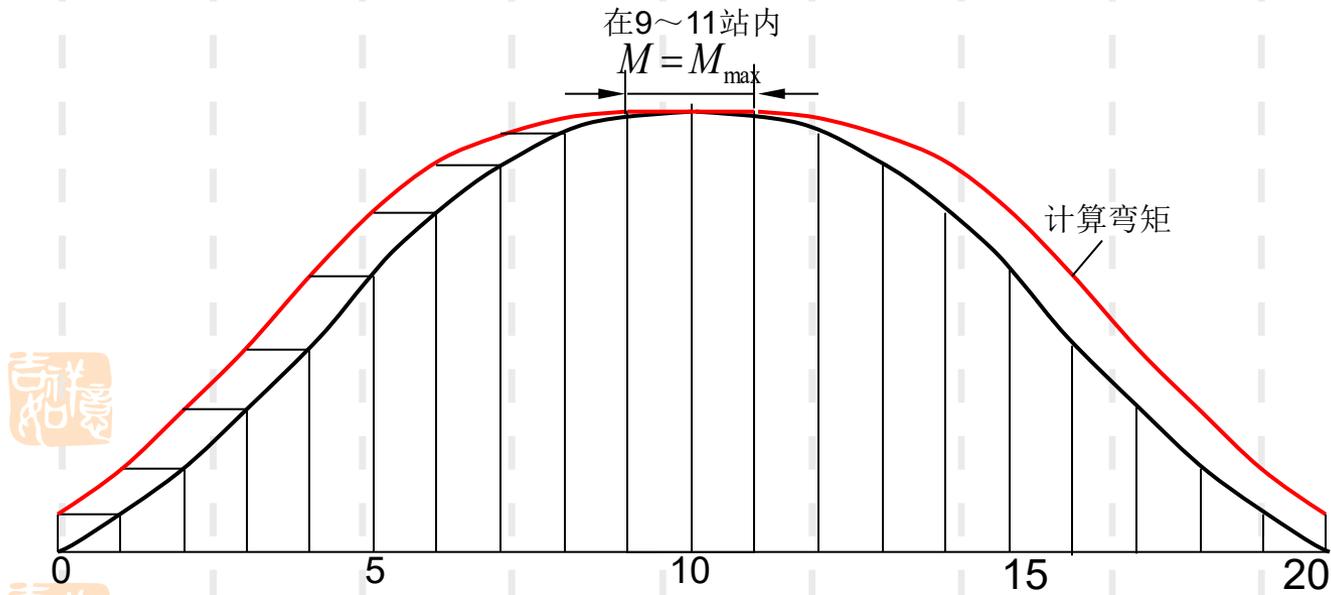
弯矩变化曲线

由上图可知，一般中拱和中垂状态时，最大剪力和最大弯矩都比其他相对位置时的最大剪力和最大弯矩大。但是，并不是所有剖面上的剪力和弯矩位都是这两种状态时为最大。因此，对于非船中的其他剖面，应选用修正后的计算弯矩值。

如果有了船与波浪各种相对位置时的弯矩曲线，则可做出这些曲线的包络线，则可按包络线取计算剖面的弯矩。但这样计算的工作量太大。

实际计算是在中拱及中垂状态的总纵弯矩曲线画出后，将各剖面的弯矩曲线顶点分别向首尾方向水平移动5%船长，然后依次将其他各站的弯矩曲线顶点也向两端移动5%船长，连接各点则得到实用的计算弯矩曲线图。

校核计算的弯矩曲线如下图



吉祥

# § 5 弯矩与剪力估算

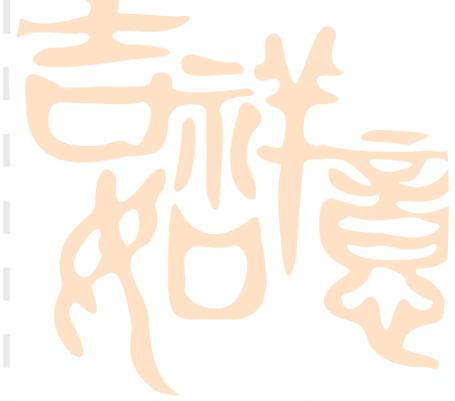


船体总纵弯曲外力的传统计算方法，计算工作量大，重复运算多，因此很适于计算机计算。但是，无论是表格计算还是计算机计算，都必须具备完整的原始资料，如船舶砂性能资料、重量重心资料等。

这些资料只有在船舶设计的后期阶段才能提供，然而许多情况往往要求在设计的初期就要对船体总纵弯曲外力的大致范围进行判断。这时外力的近似估算公式是很右用的。其中，又以弯矩的近似估算尤为重要。

外力的近似估算公式是由大量型船详细的资料统计分析而成的，一般均受船型、主尺度及航区等条件修限制。因此在运用近似公式时应注意其适用范围。

# 1. 弯矩的近似计算



## 1) 最大静水总纵弯矩

基于单跨梁的力学模型，作用在船体梁的最大静水总纵弯矩为：

$$M_{\max} = \frac{\Delta \times L}{C_M} \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$



$\Delta$ —计算状态下的排水量，kN； $L$ —船长，m；

$C_M$ —取决于船型、航区等因素的弯矩系数，如



190.2m，浮力16450kN的浮力，中垂时， $C_m=37.8$ ，

中拱时， $C_m=116.0$ 。



## 2) 最大静水弯矩

1973年《海船规范》中建议计算船中静水弯矩的公式为

$$M_s = \frac{1}{2} [(W \times m_h + W_m \times x_m + \sum P_i \times x_i) - \Delta C_\Delta \times L]$$

$W_h$ —包括舾装设备重量在内的船体重量, kN;

$m_h$ —与机型有关的船体的前半体和后半体重量对船中力矩之和的相当力臂, m;

$W_m$ —机舱设备重量(包括管系、轴系、螺旋桨在内), kN;

$x_m$ —机舱设备重量重心距船中纵向距离的绝对值, m;

$P_i$ —第*i*舱装载重量, kN;

$x_i$ —第*i*舱装载重量重心距船中纵向距离的绝对值, m;

$C_\Delta$ —前半体和后半体浮力对船中力矩和的相当力臂系数, 可根据方形系数 $C_b$ 选取;

$\Delta$ —在计算状态下船舶的浮力, Kn。



### 3).规范中的波浪弯矩近似公式

各船级社的规范对标准船型都给出了以船舶主尺度表示的波浪弯矩近似计算公式。我国《海船规范》及《钢质海船入级与建造规范修改通报》公式为：

自船中后 $0.1L$ 到船中前 $0.15L$ ，各横剖面的波浪弯矩为：

$$\begin{cases} M_w(+)=190KL^2BC_b \times 10^{-3} & (\text{kN}\cdot\text{m}) & (\text{中拱}) \\ M_w(-)=-110KL^2B(C_b+0.7) \times 10^{-3} & (\text{kN}\cdot\text{m}) & (\text{中垂}) \end{cases}$$

$L$ —船长， $\text{m}$ ； $B$ —船宽， $\text{m}$ ； $C_b$ —船舶在设计夏季载重水线下的方形系数，但不小于 $0.60$ ； $K$ —系

数： $K = \begin{cases} 10.75 - [(300 - L) / 100]^{3/2}, & (90\text{m} \leq L \leq 300\text{m}) \\ 0.412L + 4, & (L < 90\text{m}) \end{cases}$

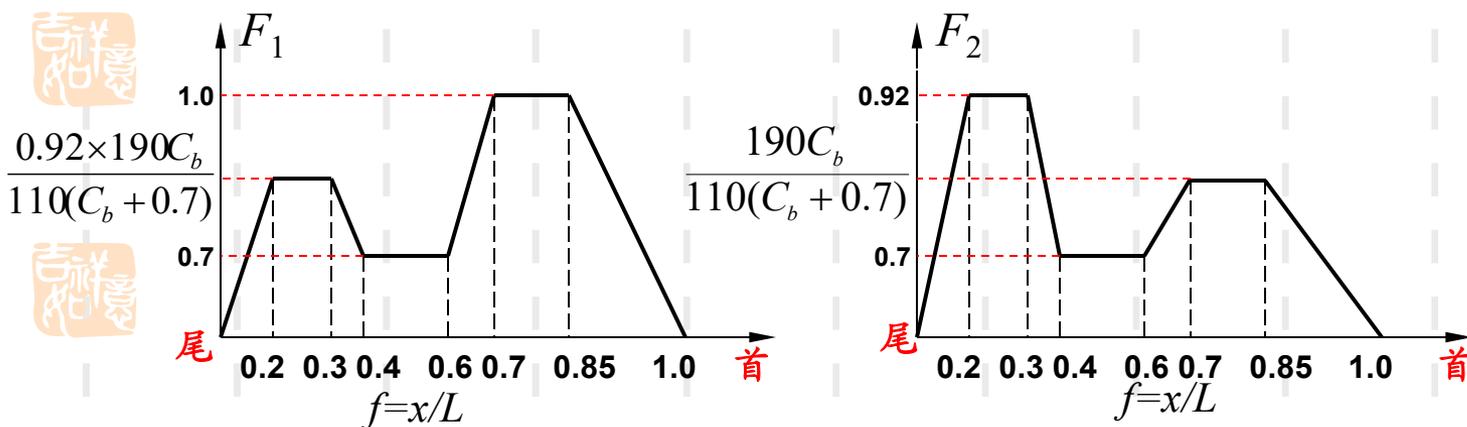


## 2. 剪力近似计算公式

根据《海船规范》，作用在船体梁各横剖面上的波浪剪力的近似设计值公式为：

$$\begin{cases} N(+) = 30F_1KLB(C_b + 0.7) \times 10^{-2} & (\text{kN}) \\ N(-) = -30F_2KLB(C_b + 0.7) \times 10^{-2} & (\text{kN}) \end{cases}$$

$F_1$ 、 $F_2$ 为剪力分布系数，按下图确定。



对在沿海水域航行的船舶，波浪剪力 $N_w$ 可降低**10%**；对在遮蔽水域航行的船舶，波浪剪力 $N_w$ 可降低**15%**。

# 作业

吉祥如意

一长方形浮码头，长25m，宽5m，深3m，空载时吃水1m（淡水）。当中部10m范围内承受布载荷时，吃水增加到2m。假定船体质量沿船长均匀分布，试作出该载荷条件下的浮力曲线、载荷曲线、静水剪力和弯矩曲线，并求出最大剪力和最大弯矩值。

吉祥

吉祥

吉祥

吉祥