船体强度与结构设计

戴天授 编

国防工业出版社

前　言

本书系根据1986年全国大、中专造船专业统编教材会议通过的"船体强度与结构设计"大纲以及1986年本教材审纲会议所修订的编写提纲编写的。本书是中国船舶工业总公司教材编审室组织编写的统编教材。可供中等专业学校船舶设计与制造专业使用。

本课程是一门专业主课。根据"比较完整、比较系统的技术员的专业技能教育和不甚完整、不甚系统的专业理论教育相结合"原则，并从学员毕业后的具体工作要求出发，确定本课程的主要内容为：船体总纵强度的基本理论和传统计算方法以及依据我国现行《钢质海船入级与建造规范》设计船中部0.4L区域结构的实用方法、包括型材剖面优化设计方法等二个部分。

鉴于以往同类教材理论性内容较深、较多、较全，但缺乏按规范进行民船设计的情况，本教材在理论部分着重编写了基本的主干内容，在应用部分着重编写了船体结构设计的实用方法和联系生产实际的设计实例。这二部分内容所用学时数的比例是3∶7。

本书由哈尔滨船舶工程学院夏剑晖副教授主审。其中的第一章、第二章和第四章书稿由夏剑晖副教授审查；其中的第三章书稿由哈尔滨船舶工程学院祝修本教授审查。他们对书稿提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心感谢。

本书编写过程还得到上海船舶工业公司培训中心、职工大学、职工中专及镇江船舶学院、上海船舶设计研究院和江南造船厂、求新造船厂等单位的支持和帮助，在此一并表示谢意。

由于编者的学识水平和教学经验有限，编写专业教材的经验不足，书中不当和错误之处在所难免，希望广大读者和使用本教材的兄弟学校师生提出批评和指正。

编　者

目 录

绪　论

船舶是重要的水上交通运输工具，也是科学研究、渔业生产以及旅游活动的有力工具。为了充分发挥船舶在四化建设中的作用，船舶除了应具备良好的航行性能和工作性能外，还必须具有足够的强度，以保证船体结构在正常使用过程和一定的寿命周期中不被破坏和不产生过大的变形。

一、本课程的内容、目的和基本要求

本课程是一门专业主课，它包括船体强度与结构设计两方面的内容。在船体强度方面主要介绍船体总纵强度的基本理论和传统计算方法；在结构设计方面主要介绍船体结构的规范设计方法，其中包括船体型材剖面的优化设计。

学习本课程的目的是为了理解船体总强度的基本理论，了解它的计算方法，并初步掌握依照《钢质海船入级与建造规范》进行船体中部结构设计计算的实用方法。为在今后工作中进一步分析和解决船体结构的实际问题打下基础。

学习本课程应达到下列基本要求：

（1）明确船舶静置在波浪上的总纵弯矩是由静水弯矩和波浪附加弯矩组成的，并学会静水弯矩的计算方法。

（2）理解船体总纵强度的基本理论和计算方法。

（3）学会船体型材的剖面要素计算，初步掌握型材剖面优化设计的方法。

（4）初步掌握《钢质海船入级与建造规范》对总纵强度的要求，并在学完本课程后，通过课程设计，具有根据规范设计船体中部结构构件的能力。

二、设计船体结构的二种方法

船体结构设计的方法，通常是指采用“强度标准”设计与采用“建造规范”设计这二种方法。前者又被称为“计算设计”方法。其实质就是依据规定的外力和内力计算方法以及“强度标准”，选择适当的结构型式和构件尺寸。它的计算工作量较大，但近年来，由于电子计算机的应用和结构优化设计理论的发展，可以加快采用“强度标准”设计的计算过程，并使船体结构设计的最优化成为可能。“强度标准”设计方法对军船、民船均可使用，但主要还是用于军船设计。对于大批民用船舶来讲，长期来，主要是根据验船部门颁布的有关《建造规范》来设计构件尺寸和连接形式的。所谓“规范方法”设计，就是把钢船建造规范对船体强度的要求、对结构布置、钢材性质和构件尺寸的规定作为设计的准则，也就是以船舶登记入级的检验准则作为船体结构设计的最低要求。所以民船是采用“规范方法”设计的。

用“规范方法”设计船体结构时，只要根据船舶的主尺度以及它们和结构布置的关系，就能从《规范》中查得构件尺寸或构件所要求的剖面模数〔W〕的简化公式。从而通过设计计算来求得构件尺寸和连接形式。例如，我国《钢质海船入级与建造规范》规定

船底纵骨所要求的剖面模数〔W〕的计算公式为

$$〔W〕=11.5Csdl^2 \quad (\text{cm}^3)$$

式中 s ——纵骨间距，m；

d ——吃水，m；

l ——纵骨跨距，m，但不小于1.5m；

C ——系数，有中间垂直撑柱时为0.52；无中间垂直撑柱时为1.0。

经计算求得〔W〕之值后，再按强度条件

$$W \geqslant 〔W〕$$

就可设计出船底纵骨的剖面尺寸。

这样的结构设计是方便、实用的。但设计的合理程度主要取决《规范》拟定的水平。因此《规范》应不断地根据科学的新发展和积累的新经验加以补充和修订。如我国在1973年《规范》、1979年修订《规范》的基础上，制订了1983年《规范》，而后又在1986年对《规范》进行了修订，使《规范》拟定的水平不断地得到提高。

本课程所讲述的船体总纵强度基本理论，它不但是“计算设计”法的基础，而且也是“规范方法”设计的基础。事实上船体强度包括总纵强度与局部强度二个方面，但根据编写提纲的规定，关于局部强度的基本理论在本课中不作专门的介绍，然而在《规范》设计中，既体现总强度对构件尺寸的要求，又体现局部强度对构件尺寸的要求。所以在这里，有必要简单地介绍一下总强度和局部强度的概念。

三、总强度和局部强度的概念

船体强度作为一门学科，它的任务是研究船体结构在外力作用下的变形规律以及其抵抗破坏的能力。因此下面以静水漂浮为例，先来分析船舶的总体变形，如图 0-0-1 所示：

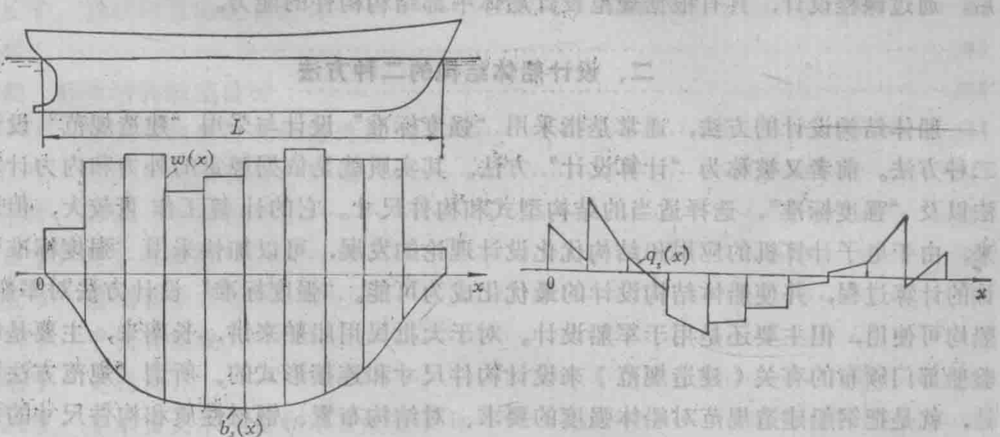

图0-0-1 静水中的重力、浮力及载荷分布

船舶漂浮在静水中，处于平衡状态，则作用在船体上的浮力等于船的重量，且重心和浮心在同一铅垂线上。取坐标原点在尾垂线处，并取坐标轴中的 x 轴沿船长方向，竖轴向下，并假定船的单位长度的重量为 $w(x)$，船的总重量为 W，船长为 L，则

$$W=\int_0^L w(x)\mathrm{d}x \tag{0-0-1}$$

船舶重心纵向坐标

$$x_g=\frac{1}{W}\int_0^L xw(x)\mathrm{d}x \tag{0-0-2}$$

同样，若作用在船的单位长度上的浮力为$b_s(x)$，总浮力为B_s，则

$$B_s=\int_0^L b_s(x)\mathrm{d}x \tag{0-0-3}$$

浮心纵向坐标

$$x_b=\frac{1}{B_s}\int_0^L x\cdot b_s(x)\mathrm{d}x \tag{0-0-4}$$

根据平衡条件得

$$\int_0^L w(x)\,\mathrm{d}x=\int_0^L b_s(x)\mathrm{d}x \tag{0-0-5}$$

$$\int_0^L xw(x)\mathrm{d}x=\int_0^L xb_s(x)\mathrm{d}x \tag{0-0-6}$$

由于$w(x)$和$b_s(x)$的分布规律通常是不相同的，所以它们的差值$q_s(x)$即为作用在船体的分布载荷

$$q_s(x)=w(x)-b_s(x) \tag{0-0-7}$$

在分布载荷$q_s(x)$的作用下，船体将发生总体性的纵向弯曲变形(简称总纵弯曲)。

下面再来分析船体的局部变形。除了上面的总体变形外，船体局部的结构及其组成构件由于受到局部载荷的作用，也将发生局部性的变形。

例如，装载货物的甲板和内底板，在局部载荷——货物重量的作用下，将发生局部性弯曲变形（见图0-0-2)。

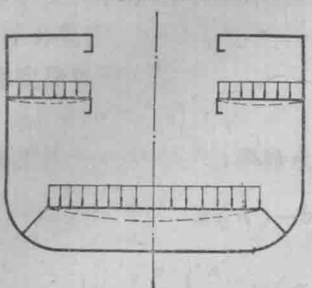

图0-0-2　货物重量引起的船体局部变形

又如，上层露天甲板受到打上甲板的波浪的水压力的作用，也将发生局部性弯曲变形；此外，船首底部在风浪中受到波浪砰击动压力的作用，也将发生局部变形如挤压、剪切、弯曲等。

再如，舱室可能破损，使水密舱壁受到破损水压作用而发生局部变形；液体舱室灌注液体时可能受偶然性液压（即灌至注入管或排气管顶端时的压力）的作用而发生局部性弯曲变形（见图0-0-3)。

这里，值得强调的是，除了上述船体结构发生的局部变形外，还有一种与总纵弯曲同时产生的局部弯曲变形。例如取船体中部二个横舱壁之间的船底板架来看，在舱外浮力$b(x)$与舱内载重$p(x)$作用下也要发生弯曲变形（见图0-0-4）。这类与总纵弯曲同时产生的局部弯曲是全船性的（即每个隔舱都产生这类局部弯曲），因此，其应力应与总纵弯曲应力迭加，属船体总纵强度问题。而在上述其它局部载荷作用下船体局部结构所发生的局部变形，其载荷及应力分布大多只具有局部的性质，因此只属于船体局部强度问题。

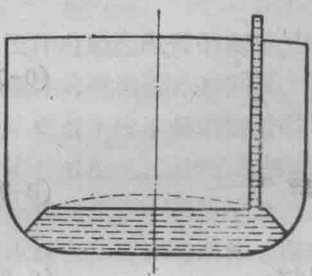

图0-0-3　灌至注入管或排气管顶端的液压引起的船体局部变形

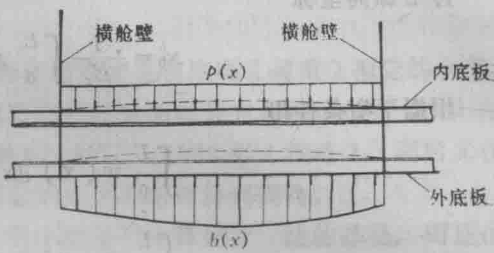

图0-0-4　与总纵弯曲同时产生的局部弯曲

于是，我们定义船体总纵强度与局部强度如下：

船体结构所具有的抵抗总纵弯曲变形（包括纵向总弯曲与局部弯曲）与破坏的能力称为船体总纵强度，有时简称为船体总强度。

船体局部结构及其组成构件所具有的抵抗本身的局部变形与破坏的能力称为船体局部强度。

至于船体总强度与局部强度的定量分析，我们将具体地在本课程的各章节里加以展开和说明，并应用它们进行船体结构的规范设计。

第一章　船体总纵弯曲时的切力和弯矩计算

从船舶结构力学观点看，船舶可以看作是一处于重力和浮力作用下，两端完全自由的直梁。此外，在船体上还作用着船舶摇摆时的惯性力及水阻力。

在船舶前进方向上，由螺旋桨推力和前进运动所受的水阻力这一对平衡力系的作用，造成在船体横剖面上的纵向压应力很小，因此在计算时可不考虑。

我们主要考虑沿着垂向作用于船体上的力：重力和浮力。这些力沿船长按各种规律分布，且在每一个剖面上都不一定平衡。因此，整个船体沿着垂向将产生纵方向（即船长方向）的弯曲变形——总纵弯曲变形，在船体横剖面上就会产生切力（即剪力）和弯矩。

计算船体总纵弯曲时的切力和弯矩，一般可分下列两种情况：

（1）船舶处在静水中，由于每一横剖面上的重力和浮力不平衡而产生的静水切力和静水弯矩；

（2）船舶静置在波浪上，由于每一横剖面上的重力和波浪形式的静浮力不平衡而产生的静合成切力和静合成弯矩。

在静合成切力和静合成弯矩中，一部分是静水切力和静水弯矩，另一部分是波浪水面相对于静水面变形而造成的浮力沿船长的增量（也称附加浮力）所产生的附加切力和附加弯矩。

第一节　静水切力和弯矩计算

如绪论所述，当船舶在静水中受到沿船长分布的单位长度重量（又称重量集度）$w(x)$ 和单位长度浮力（又称浮力集度）$b_s(x)$ 作用时，由前面的图 0-0-1 可见，沿船长分布的单位长度载荷（又称载荷集度）为

$$q_s(x)=w(x)-b_s(x)$$

则沿船长作用在船体梁任一 x 横剖面上的静水切力和静水弯矩分别是

$$N_s(x)=\int_0^x q_s(x)\mathrm{d}x=\int_0^x [w(x)-b_s(x)]\mathrm{d}x \tag{1-1-1}$$

$$M_s(x)=\int_0^x N_s(x)\mathrm{d}x=\int_0^x\int_0^x [w(x)-b_s(x)]\mathrm{d}x\mathrm{d}x \tag{1-1-2}$$

这是根据载荷$q_s(x)$、切力$N_s(x)$和弯矩$M_s(x)$之间的微分关系

$$\frac{\mathrm{d}N_s(x)}{\mathrm{d}x}=q_s(x)$$

$$\frac{\mathrm{d}M_s(x)}{\mathrm{d}x}=N_s(x)$$

并对上式进行积分而得

$$\int_0^x dN_s(x)=\int_0^x q_s(x)\mathrm{d}x$$

$$\int_0^x \mathrm{d}M_s(x)=\int_0^x N_s(x)\mathrm{d}x$$

左端应用牛顿-莱布尼兹公式积分得

$$N_s(x)-N_s(0)=\int_0^x q_s(x)\mathrm{d}x$$

$$M_s(x)-M_s(0)=\int_0^x N_s(x)\mathrm{d}x$$

其中，$N_s(0)$ 和$M_s(0)$ 分别是船体梁左端横剖面上的初始切力和初始弯矩。由于船体梁的两端完全自由，所以

$$N_s(0)=0; \quad M_s(0)=0$$

于是得到形如（1-1-1）和（1-1-2）的公式。

公式（1-1-1）和公式（1-1-2）可分别改写成

$$N_s(x)=\int_0^x w(x)\mathrm{d}x-\int_0^x b_s(x)\mathrm{d}x \tag{1-1-3}$$

$$M_s(x)=\int_0^x\int_0^x w(x)\mathrm{d}x\,\mathrm{d}x-\int_0^x\int_0^x b_s(x)\mathrm{d}x\mathrm{d}x \tag{1-1-4}$$

显见，为了计算静水切力$N_s(x)$和静水弯矩$M_s(x)$，首先应该计算$w(x)$和$b_s(x)$，从而合成得$q_s(x)$，然后运用近似积分（即数值积分）法分别计算$N_s(x)$和$M_s(x)$；也可以先将计算的$w(x)$和$b_s(x)$逐次进行数值积分，直接按式（1-1-3）和(1-1-4) 合成而得$N_s(x)$和$M_s(x)$。

一、重量曲线$w(x)$的计算

重量集度$w(x)$在实际上不是用解析式表示的，而是用船舶在某一装载状态（满载：出港、到港；压载：出港、到港）下，全船的总重量沿船长的分布曲线——重量曲线$w(x)$表示的。

船舶的总重量包括空船重量与载重量。

空船重量就是与空载排水量相对应的重量。即除了载重量以外的船的全部重量（也可称作船舶固定重量）。一般包括：船体钢料、木作舾装、机电设备等各部分的重量。

载重量包括以下各项：货物、旅客及行李，燃料、滑油及炉水，船员及其行李，粮食和淡水，备品及供应品等。

重量曲线$w(x)$的计算有下述二种方法：

（一）矩形法

计算前，必须有表示重量及重心位置的重量表和确定重量分布范围的船体纵剖面图。

通常将船舶重量按20个理论站距分布（民船的理论站号从船尾至船首编排），用每段理论站距间重量作出阶梯形曲线，并以此来代替重量曲线。由于每段理论站距间的重量按矩形分布，故可称矩形法。

在作阶梯形重量曲线时，应使每一项重量的重心在船长方向的坐标不变，其重量的分布范围与实际占据的范围需大致对应，而每一理论站内的重量则当作是均匀的。最终，重量曲线下所包含的面积应等于船体重量，该面积的形心纵向坐标与船体重心的纵向坐

标相同。

为了使船舶总重量沿船长按阶梯形分布，并且每一项重量的重心在船长方向坐标不变，则需要介绍单项重量按矩形分布的方法及计算公式。

这里主要介绍如何把集中载荷或一定长度上的分布载荷，转化为等价的每一理论站距间的矩形分布载荷的方法。

所谓等价原则指的是“静力相当”，即要求转化前后重量相等、重心位置不变。

1．把集中载荷转化为等价的每一理论站距间的矩形分布载荷的方法

设集中载荷P作用于$i\sim i+1$站距内（见图1-1-1(a)），其重心位置用a $\left(a\leqslant\dfrac{\Delta L}{2}\right)$表示，试将其化为分布在两相邻站距上的矩形分布载荷。

设转化后每一站距上矩形分布载荷为p_1和p_2（见图1-1-1(b)）。

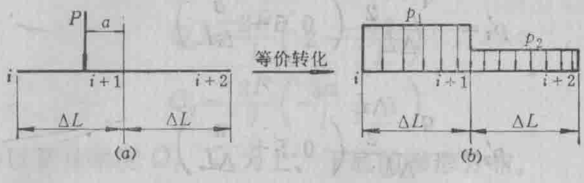

图1-1-1　集中载荷化矩形分布载荷

根据转化前后重量相等、重心位置不变的条件，可得如下方程组：

$$\left.\begin{aligned}&(p_1+p_2)\cdot\Delta L=P\\&p_1\cdot\Delta L\cdot\frac{\Delta L}{2}-p_2\cdot\Delta L\cdot\frac{\Delta L}{2}=P\cdot a\end{aligned}\right\}\tag{1-1-5}$$

解之即得

$$\left.\begin{aligned}p_1&=\frac{P}{\Delta L}\left(0.5+\frac{a}{\Delta L}\right)\\p_2&=\frac{P}{\Delta L}\left(0.5-\frac{a}{\Delta L}\right)\end{aligned}\right\}\tag{1-1-6}$$

例题〔1-1〕　某船的第一货舱载重量为$P=650$ kN，分布在第7～9二个理论站间。重心在7～8站间，且距第8站的距离$a=2$m。理论站间距$\Delta L=7$m。试求等价转化为每一理论站间距上矩形分布载荷$p_{7\sim8}$和$p_{8\sim9}$。

解　运用（1-1-6）公式可得

$$p_{7\sim8}=\frac{P}{\Delta L}\left(0.5+\frac{a}{\Delta L}\right)=\frac{650}{7}\left(0.5+\frac{2}{7}\right)=72.96\text{kN/m}$$

$$p_{8\sim9}=\frac{P}{\Delta L}\left(0.5-\frac{a}{\Delta L}\right)=\frac{650}{7}\left(0.5-\frac{2}{7}\right)=19.90\text{kN/m}$$

2．把一定长度上的分布载荷转化为等价的每一理论站距间的矩形分布载荷的方法

设均布在二个站距之间部分长度$\left(\text{如图 1-1-2 中的}\dfrac{3}{2}\Delta L\right)$上的均布载荷为$q$（见图1-1-2($a$)）。试求等价转化为每一站距上的矩形分布。

设转化后每一站距上矩形分布载荷为p_1和p_2（见图1-1-2(b)）。

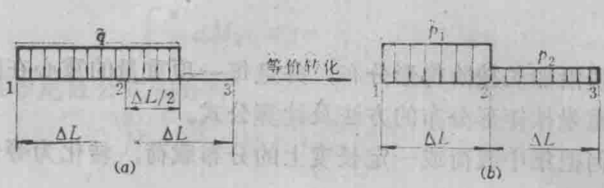

图1-1-2　部分长度的重量集度化矩形分布载荷

根据转化前后重量相等、重心位置不变的条件，只要把 2 ～ 3 站距间的均布载荷 q 当作集中力 $P=q\cdot\frac{\Delta L}{2}$，并等价转化为在二个站距上的矩形分布，再与 1 ～ 2 站距间的均布载荷 q 迭加即可。

设 P 转化后每一站距上的矩形分布载荷分别为 p_1' 及 p_2'，则由公式（1-1-6）得

$$p_1'=\frac{q\cdot\frac{\Delta L}{2}}{\Delta L}\left(0.5-\frac{a}{\Delta L}\right)$$

$$p_2'=\frac{q\cdot\frac{\Delta L}{2}}{\Delta L}\left(0.5+\frac{a}{\Delta L}\right)$$

其中　$a=\frac{\Delta L}{4}$

$$\therefore\quad \begin{cases} p_1'=\frac{1}{8}q \\ p_2'=\frac{3}{8}q \end{cases}$$

于是所求的为

$$p_1=q+\frac{1}{8}q=\frac{9}{8}q$$

$$p_2=\frac{3}{8}q$$

长期来，是用上述矩形法来计算并绘制成阶梯形的船体重量曲线 $w(x)$ 的。可是，随着电子计算机的发展和应用，近年来，船舶设计院（所）及造船厂的设计室已普遍地采用电算方法来求切力和弯矩。在电算方法中，一般都采取将每项重量在其分布区域内改为梯形分布。现将这种转化方法介绍如下。

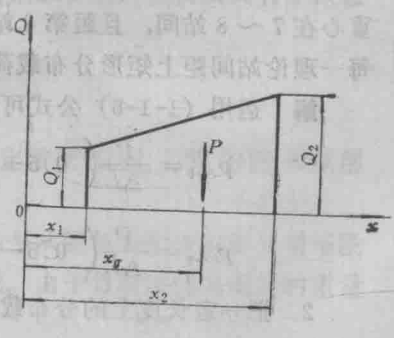

图1-1-3　分项重量化梯形分布

（二）梯形法

计算前，必须给出二组重量表，一组是船舶固定重量，一组是装载重量。其中每个重量单元由四个参数组成，即单元重量，重心纵向距舯值，分布范围前后端所在肋位号（如果落在肋位间，则取在最邻近的肋位上）。

设有如图1-1-3所示的分项重量 P，其重心位置为 x_g，分布范围起始点和终止点的

位置分别为x_1和x_2。

试将P在x_1～x_2范围内等价转化为梯形分布。

设在梯形的两端点处的重量集度分别为Q_1和Q_2，则根据梯形分布的重量应该与P相等，且重心位置相同的要求，可得

$$\begin{cases} \dfrac{(Q_1+Q_2)(x_2-x_1)}{2}=P \\ Q_1(x_2-x_1)\dfrac{x_2-x_1}{2}+(Q_2-Q_1)\dfrac{x_2-x_1}{2}\cdot\dfrac{2(x_2-x_1)}{3}=P(x_g-x_1) \end{cases} \tag{1-1-7}$$

解方程组（1-1-7），并令

$$x_g-x_1=a$$
$$x_2-x_1=l$$

即可求得

$$Q_1=\frac{2P}{l}\left(2-\frac{3a}{l}\right) \tag{1-1-8}$$

$$Q_2=\frac{2P}{l}\left(\frac{3a}{l}-1\right) \tag{1-1-9}$$

如此，P即转化为以重量集度Q_1、Q_2为上、下底的梯形分布。

改为梯形分布后，根据所采用的电算方法，再决定是否要将此分布改为在每一肋位上为矩形的分布。若要改，则可取每个肋位中点处的$w_中$值改为等积矩形，而忽略对重心位置的影响（影响极小，可以忽略）。各项重量都改为矩形分布之后，再迭加即可得到在各个肋位上为矩形的重量分布曲线。当然也可直接由梯形分布求各站距上的N_{ip}及M_{ip}，而不再作全船的重量分布曲线。

关于空船重量的分布可分两种情况：

第一种情况，当空船重量有详细资料时，则这部分重量也可看成是若干项重量单元的组成，并可按照公式（1-1-8）、公式（1-1-9）计算出每项重量单元的梯形分布。

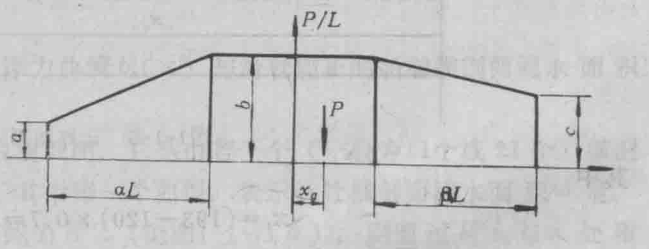

图1-1-4　空船重量的三段分布

第二种情况，当空船重量中船体结构主体钢材重量详细分布尚未确定而只有估算的重量、重心时，可将这重量作为三段分布，前后段为梯形，中段为矩形（见图1-1-4）。

图1-1-4中，系数α、β、a、b、c之值，可根据重量统计资料确定，或采用下列公式计算：

$$\left.\begin{aligned} \alpha&=\beta=\frac{1}{3} \\ b&=1.17\sim1.20 \\ a&=3-2b-\frac{54}{7}\cdot\frac{x_g}{L} \\ c&=3-2b+\frac{54}{7}\cdot\frac{x_g}{L} \end{aligned}\right\} \tag{1-1-10}$$

式中　L——船长，这里取垂线间长；

x_g——主体钢料重量的重心距船中的距离；

b——根据方形系数 C_b 确定：

当 $C_b>0.75$ 时，取 $b=1.17$；

当 $C_b<0.70$ 时，取 $b=1.20$；

当 $0.70<C_b<0.75$ 时，b 由插值法求得。

图1-1-4所示的主体钢料重量分布规律，并不一定对每条船都适合，但在没有其它重量统计资料时，也可作为参考。

例题〔1-2〕 某35000吨散货船，在满载装煤出港的装载情况下，第一货舱重量单元的重量为55110kN，重心距船中120号肋位是69.7m，分布范围的起始肋位是193号，终止肋位是227号。该范围内的肋距 $s=700$mm。

试在该范围内用梯形重量分布代替实际重量分布。

解 作梯形分布的计算模型示意图（见图1-1-5）。

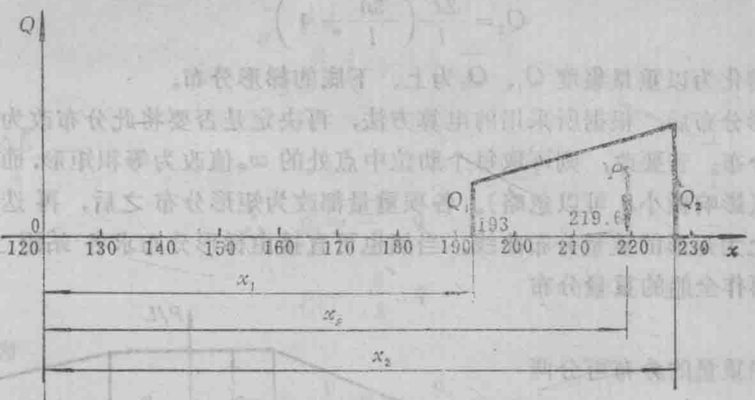

图1-1-5　计算图形

其中

$$x_1=(193-120)\times 0.7=51.1\text{m}$$

$$x_g=69.7\text{m}$$

$$x_2=(227-120)\times 0.7=74.9\text{m}$$

$$P=55110\text{kN}$$

则

$$a=x_g-x_1=69.7-51.1$$
$$=18.6\text{m}$$

$$l=x_2-x_1=74.9-51.1=23.8\text{m}$$

于是，由公式（1-1-8）及（1-1-9）得

$$Q_1=\frac{2P}{l}\left(2-\frac{3a}{l}\right)=\frac{2\times 55110}{23.8}\left(2-\frac{3\times 18.6}{23.8}\right)$$

$$=-1598\text{kN/m}\ （与图示方向相反）$$

$$Q_2=\frac{2P}{l}\left(\frac{3a}{l}-1\right)=\frac{2\times 55110}{23.8}\left(\frac{3\times 18.6}{23.8}-1\right)=6229\text{kN/m}$$

检验：

$$\because \quad \frac{(Q_1+Q_2)(x_2-x_1)}{2}=\frac{(6229-1598)(74.9-51.1)}{2}=55110\text{kN}=P$$

$\therefore$ Q_1、Q_2 是所求梯形分布两端点处的重量集度。

二、浮力曲线 $b_2(x)$ 的计算

沿船长分布的单位长度的浮力 $b_s(x)$ 与单位长度的重量 $w(x)$ 一样，在实际上不是用解析式表示的，而是用船舶在某一装载状态（满载：出港、到港；压载：出港、到港）下，浮力沿着船长的分布曲线——浮力曲线 $b_s(x)$ 表示的。

船舶的浮力曲线，是指船舶在某一装载状态下，即在某一水线 WL 下，沿着船长所受到的单位长度的浮力 $b_s(x)$。

如图 1-1-6 所示，在距离船中为 x 的横剖面处，取 1 单位长度的浸水体积 v，设它的左边的横剖面浸水面积为 $\omega(x)$，考虑到在 1 单位长度内横剖面浸水面积变化不大，则

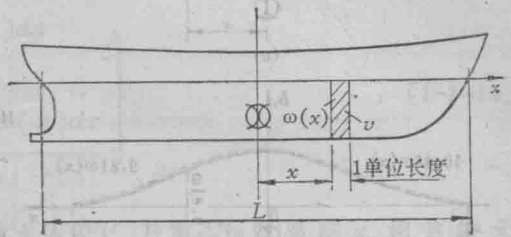

图1-1-6 单位长度的浮力

$$v=\omega(x)\cdot 1 \tag{1-1-11}$$

那末，在这 1 单位长度上，船舶所受到的浮力 $b_s(x)$ 为

$$b_s(x)=\gamma\cdot v=\gamma\cdot\omega(x) \tag{1-1-12}$$

式中 γ——舷外水的重度，淡水 $\gamma=9.81\text{kN/m}^3$（1 tf/m^3）海水 $\gamma=10.06\text{kN/m}^3$（$1.025\text{tf/m}^3$）。

从式（1-1-11）可知，船舶的浮力曲线 $b_s(x)$ 与沿着船长的船舶横剖面浸水面积曲线 $\omega(x)$ 成线性关系。

如图1-1-7所示，是船舶的邦戎曲线图，它是由若干个（一般为11个或 21 个）横剖面的面积曲线 $\omega=f(d)$ 所组成。其中每一个曲线，表示该处横剖面浸水面积 ω 值。

若已知船舶的吃水为 d 时的水线为 WL（见图1-1-7(a)），则通过 WL 与 x 处垂线的交点 c，作水平线交曲线于 e，量其水平距离 $\overline{ce}$ 即得 x 处的横剖面浸水面积 $\omega(x)$。

$\because$ 船舶的浮力曲线 $b_s(x)$ 与横剖面浸水面积曲线 $\omega(x)$ 成线性关系

$\therefore$ 当 $\gamma=9.81$（舷外水是淡水）时

$$b_s(x)=9.81\omega(x)$$

即图1-1-7(b) 所示的 $9.81\omega(x)$，就是船舶在水线 WL 下的浮力曲线；

当 $\gamma=10.06$（舷外水是海水）时

$$b_s(x)=10.06\omega(x)$$

即图1-1-7（b）所示的虚线，就是船舶在水线 WL 下的浮力曲线。

同样道理，不论水线 WL 是倾斜的，还是波形的，都可以利用邦戎曲线图作出对应的浮力曲线。

从上述可知，为了求得船舶在某一装载状态下的浮力曲线，必须在事先确定船舶在

静水中的平衡位置，即船舶在静水中的吃水线 WL 的位置。那末，该如何确定呢？一般可分二种情况进行讨论：

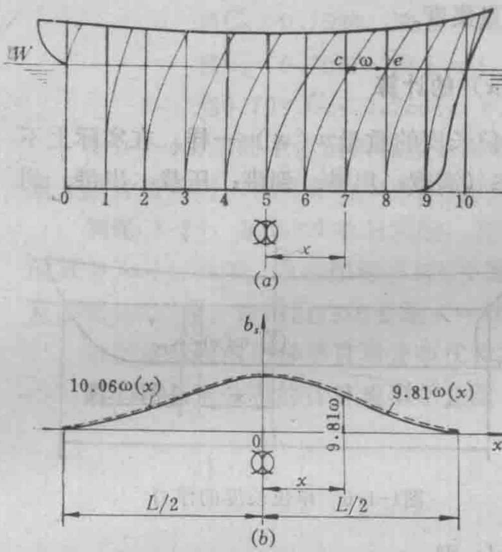

图1-1-7　浮力曲线的作法

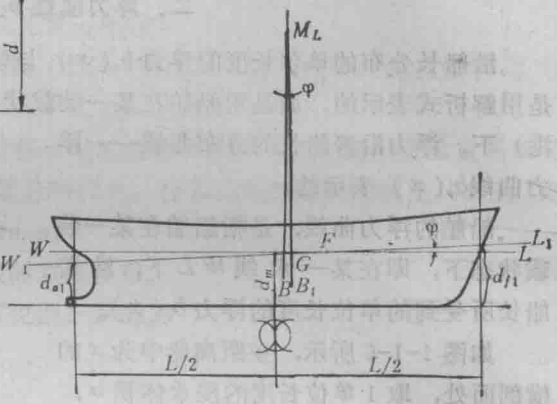

图1-1-8　$x_b \neq x_g$ 的情况

第一种情况，船舶在静水中处于正浮状态，即船舶既无纵倾又无横倾的状态。这时，只要根据已知的船舶在某一装载状态下的总重量 W（即排水量 Δ_0），在该船舶的静水力曲线图上，就可求得在相应排水量 Δ_0 下的平均吃水 d_m，因为正浮状态时，首尾没有吃水差，因此就可在邦戎曲线上作出吃水为 d_m 的水线 WL，进而就能求得对应的浮力曲线。

第二种情况，即一般情况下，船舶在静水中实际位置并非正浮状态（正浮状态是一种特殊状态），这时，可采用近似方法，逐步求得首吃水 d_f 与尾吃水 d_a，从而得到船舶的实际水线 $W'L'$ 的位置，进而也可求得对应的浮力曲线。这种逐步近似计算的过程如下：

由已知的某一计算工况（即某一装载状态）下的总重量 W（$W=\gamma\cdot V_0$，V_0 为相应于 W 的排水体积）和重心纵向坐标 x_g，在该船舶的静水力曲线图上，求得相应的平均吃水 d_m，再求得浮心纵向坐标 x_b 和该水线面面积 A 及漂心纵向坐标 x_f 以及纵稳心半径 $R\left(R=Z_{ml}-Z_b\text{ 或 }R=\dfrac{I_{yf}}{V}\right.$，$Z_{ml}$ 是纵稳心 M_L 的垂向坐标，Z_b 是浮心 B 的垂向坐标，I_{yf} 是正浮水线面面积对通过漂心的纵倾轴 oy 的面积惯性矩，V 是正浮水线 WL 下的排水体积$\Big)$。

如图1-1-8所示，此时，一般将有 $x_b \neq x_g$。相对于正浮状态，船舶将发生纵倾以使船舶在静水中达到平衡状态，并得到船舶的首吃水 d_{f1} 和尾吃水 d_{a1} 以及实际水线 W_1L_1 的位置。记纵倾角为 φ，且令首倾为正，那末，纵倾后的首吃水 d_{f1} 和尾吃水 d_{a1}，可用下列近似公式求得第一近似时的首、尾吃水：

$$\left.\begin{aligned} d_{f1} &= d_m + \left(\frac{L}{2} - x_f\right) \cdot \mathrm{tg}\varphi \\ d_{a1} &= d_m - \left(\frac{L}{2} + x_f\right) \cdot \mathrm{tg}\varphi \end{aligned}\right\} \tag{1-1-13}$$

其中$\mathrm{tg}\,\varphi = \frac{x_g - x_b}{R}$，$R$是纵稳心半径。

将d_{f1}和d_{a1}之值，在邦戎曲线上作出对应的第一近似水线W_1L_1，从而得到各站吃水d_i及所对应的浸水面积ω_i。利用数值积分，可计算出排水体积V_1和浮心纵向坐标x_{b_1}的第一近似值：

$$\left.\begin{aligned} V_1 &= \int_0^L \omega(x)dx \\ x_{b_1} &= \frac{\int_0^L x \cdot \omega(x)dx}{V_1} \end{aligned}\right\} \tag{1-1-14}$$

若求得的这两个数值V_1、x_{b_1}与给定的排水体积V_0及重心纵向坐标x_g相差较大时，则必须作第二近似计算。此时，可按下式确定新的首、尾吃水

$$\left.\begin{aligned} d_{f2} &= d_{f1} + \frac{V_0 - V_1}{A} + \left(\frac{L}{2} - x_f\right)\frac{x_g - x_{b1}}{R} \\ d_{a2} &= d_{a1} + \frac{V_0 - V_1}{A} - \left(\frac{L}{2} + x_f\right)\frac{x_g - x_{b1}}{R} \end{aligned}\right\} \tag{1-1-15}$$

式中　d_{f1}、d_{a1}——第一次近似计算的首、尾吃水；

d_{f2}、d_{a2}——第二次近似计算的首、尾吃水；

$\frac{V_0 - V_1}{A}$——船舶将上浮或下沉某个值；

A——水线面积。

上式的意义相当于对第一次近似计算得到的船舶位置作进一步的修正。由于排水体积不等，故第二次调整时，船舶将上浮或下沉$\frac{V_0 - V_1}{A}$之值；其次，由于浮心与重心纵向坐标不一致，船舶也将产生某种程度的纵倾。

一般说来，若浮心与重心的纵向坐标之差不超过船长L的0.1%，排水量与给定的船舶重量之差不超过排水量Δ的0.5%，则认为调整好了。由此而产生的弯矩最大误差大致不超过$5\%M_{max}$。接着就应根据最后第K次确定的首、尾吃水及对应的吃水线W_KL_K求出浮力分布曲线。

上述逐步近似求平衡水线W_KL_K的过程，称为在静水中调整倾差。计算过程通常用表格进行，见表1-1-1。

根据最后第K次近似计算得到的水线W_KL_K，利用邦戎曲线图求得各理论站处浸水面积ω_i后，即可作出浮力曲线。这里需注意的是，对应于矩形法作出的阶梯形重量曲线而言，还应化为在每个站距间为矩形的浮力曲线（见图1-1-9），以便在每一个站距上与阶梯形重量曲线迭加成载荷曲线。

表1-1-1 船舶平衡位置计算

1	2	3	4	5	6
理论站号	力臂系数 k	第一次近似计算		第二次近似计算	
		横剖面浸水面积 ω (m^2)	力矩函数 $k\omega=(2)\times(3)$	横剖面浸水面积 ω (m^2)	力矩函数 $k\omega=(2)\times(5)$
0	−10	$\omega_0/2$			
1	−9	ω_1			
⋮	⋮	⋮			
19	9	ω_{19}			
20	10	$\omega_{20}/2$			
Σ		Σ_3	Σ_4		

$$V=\Delta L\cdot\Sigma_3\quad x_b=\Delta L\frac{\Sigma_4}{\Sigma_3}$$

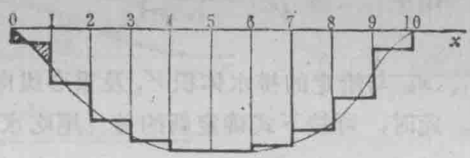

图1-1-9 阶梯形浮力曲线

由图1-1-9可得出每一站距间分布浮力的合力——浮力为

$$B_{ij}=\frac{\omega_i+\omega_j}{2}\cdot\Delta L\cdot\gamma \tag{1-1-16}$$

式中 B_{ij}——i 与 j 站距间的浮力，kN(tf)；

ω_i、ω_j——分别为 i 与 j 站上横剖面浸水面积，m^2；

ΔL——i 与 j 站距间的距离，m；

γ——舷外水的重度，kN/m^3 (tf/m^3)；

三、载荷曲线$q_s(x)$、切力曲线$N_s(x)$及弯矩曲线$M_s(x)$的计算

(一) 载荷曲线 $q_s(x)$ 的计算

重量曲线$w(x)$和浮力曲线$b_s(x)$之差值$q_s(x)$称为载荷曲线。

如图1-1-10所示是对应于矩形法的第 i 理论站与第 $i+1$、第 $i+2$ 理论站间的重量曲线$w(x)$与浮力曲线$b_s(x)$合成而得的载荷曲线$q_s(x)$，i 取0，1，2，…，N。

显然，当 $w(x)>b_s(x)$ 时，$q_s(x)$ 的方向与$w(x)$一致，则作在坐标纵方向轴即 x 轴的上方；反之作在 x 轴的下方。

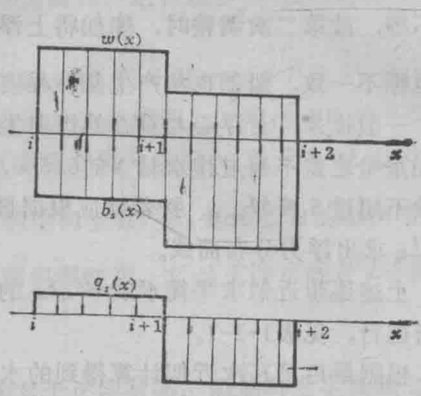

图1-1-10 载荷曲线$q_s(x)$的作法

载荷曲线有两点性质：

(1) 沿着船长分布的整个载荷曲线与轴线之间所包含的面积之和为零，即