

船体强度计算与结构分析

前 言

本书是在《船体强度计算与结构设计》教材的基础上,并结合多年来的教学实践进行编写的。其主要对象是已具有高等数学和工程力学的基础知识而未曾学习过船舶结构力学的船舶工程专业专业的专科生和非设计专业的本科生,计划学时 100 学时左右。根据教学大纲的要求,删除部分章节的讲授,可供有关职工大学、电视大学和各种专修班使用,亦可供船舶工程技术人员工作参考之用。

本书的特点是通俗易懂、图文并茂,例题、习题齐全配套、实用性强。在内容的取舍、系统和阐述方面都较旧教材有许多新特点。全书共分两篇。第一篇为船体强度计算,内容包括总纵强度、局部强度和稳定性的常规计算方法,在第二章局部强度计算中系统地阐述了进行船体结构内力计算的各种力学方法。如位移法、力法、能量法、矩阵法。加强了强度计算的理论基础。第二篇为船体结构设计,以内河船为主要对象,按 ZC《内规》(91)为基本依据,比较全面地介绍了船体结构各组成部分的骨材、板材的设计方法。本篇介绍的结构设计的方法原理也适用于所有船舶的船体结构。

本书编写的具体分工如下:第一篇绪论、第一、第二章由冯杏娣完成;第三、七、八章由杨平完成;第二篇概论、第四、五、六章由阮先政完成;第九、十章由吴卫国完成,最后由冯杏娣统稿。

本书的编写得到船舶海洋工程系领导、船舶结构力学教研室全体同志及设计、原理兄弟教研室的支持和帮助,晏焕平副教授在百忙之中审阅了全部书稿并提出了许多宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢。

由于我们学识水平和教学经验有限,书中不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

1994 年 3 月

目 录

第一篇 船体强度计算	1
绪论	1
第一章 船体总纵强度	3
1.1 概述	3
1.2 静水弯矩计算	5
1.3 波浪附加弯矩计算	15
1.4 计算机计算剪力和弯矩	31
1.5 船体总纵弯矩与剪力的近似估算	33
1.6 船体总纵弯曲应力的第一次近似计算	36
1.7 总纵强度标准	42
1.8 船体极限弯矩	53
1.9 船体挠度	54
1.10 船体总纵强度计算示例	58
习题	77
第二章 船体结构局部强度	79
2.1 概述	79
2.2 单跨梁的计算	92
2.3 船体多跨连续梁的强度计算	102
2.4 船体肋骨刚架的强度计算	108
2.5 船体板架强度计算	130
2.6 结构分析能量原理	138
2.7 结构矩阵分析法	152
2.8 船体板的强度计算	177
	186
	190
	190
	192
	200
	204
	206
	214
	217
	217
	226
	226

4.2	型材的强度要求及剖面几何要素计算	229
4.3	对型材剖面的其它要求	282
4.4	船体骨架设计方法	237
第五章	船体外板及甲板板的设计	243
5.1	船体外板设计概述	243
5.2	《内规》对外板的一般规定	244
5.3	甲板板设计概述	247
5.4	《内规》对甲板板的一般规定	252
第六章	船底结构设计	257
6.1	概述	257
6.2	内河船横骨架式单底结构	260
6.3	内河船纵骨架式单底结构	264
6.4	内河船横骨架式双底结构	265
6.5	内河船纵骨架式双底结构	268
第七章	舷侧结构设计	273
7.1	概述	273
7.2	舷侧结构的型式	273
7.3	舷侧骨材及其节点连接	276
7.4	舷侧骨材的尺寸计算	278
7.5	计算示例	281
第八章	甲板结构设计	283
8.1	概述	283
8.2	甲板结构的型式	283
8.3	甲板骨材及其节点连接	284
8.4	支柱及桁架结构	286
8.5	甲板骨材的尺寸计算	287
8.6	舱口支持结构	292
8.7	计算示例	302
第九章	舱壁结构设计	304
9.1	概述	304
9.2	平面舱壁	307
9.3	槽形舱壁	313
第十章	首尾及其他结构设计	317
10.1	首部结构	317
10.2	尾部结构	322
10.3	首尾柱及尾轴架	326
10.4	主机座结构	341
10.5	上层建筑结构	345
10.6	舷墙、护舷材、舳龙骨	352
第二篇习题		356

附录.....	358
附录 A 单跨梁的弯曲要素表.....	358
附录 B 单跨梁复杂弯曲的弯曲要素表及辅助函数.....	367
附录 C 压杆的临界应力曲线及修正系数.....	372
附录 D 在中间弹性支座上连续压杆的稳定性曲线.....	373
附录 E 矩形板的稳定性计算公式.....	375
附录 F 板材规格与型号.....	377
附录 G 型材规格与型号.....	381
参考书目.....	430

第一篇 船体强度计算

绪 论

船体强度是研究船体结构安全性的科学。所谓安全性是指船体结构在正常使用过程中以及在一定的使用年限内具有不破坏、不产生过大的变形和不丧失稳定性的能力,以保证船舶能正常地工作。

由于船体是一个复杂的空间结构、受力又相当复杂,人们通过长期的生产实践,分析了船体受力和变形的主要特征,认为在考虑船体强度问题时,可以将其分为总强度与局部强度来研究。

首先把船体当作一根变截面的空心薄壁梁(船体梁)来研究。这时将船体梁(Ship hull girder)静置于静水中或波浪上,从整体上研究其变形规律及抵抗破坏的能力,称为总强度。由于船体主要是纵弯曲变形,而船体沿纵向像梁一样弯曲称为总纵弯曲,船体抵抗总纵弯曲的能力称为总纵强度,所以长期以来认为总强度就是指总纵强度。当然这种按简单梁的理论来研究船体的总纵强度只是一种初步的计算。在1874年10月,内河船“玛丽(Mary)”号在横渡大西洋时折断沉没,1877年威廉·约翰按初步计算方法对这条船进行了强度计算,结果表明该船不至于折断,经进一步分析研究,发现在总弯曲时船体的受压构件(主要是某些船体板)往往会因受压过度而失稳,这样就大大降低了船体抵抗总纵弯曲的能力。因此他第一次提出了对初步总强度计算方法修正的见解。认为在研究船体总强度的时候,必须要考虑受压构件是否有失稳现象,并要分析构件失稳以后的应力再分配问题,这样才能使船体强度计算更接近于实际。另外船在航行时,并不是正对着波浪的运动方向,经常会有船与波斜交的情况。船在斜浪航行,就导致船体发生扭转变形,因此也就存在船体的扭转强度问题。近若干年来随着诸如集装箱船之类具有甲板长大开口船舶的出现,因其仓口特别大,船体的抗扭刚度相对较低,因此其扭转强度问题不容忽视。

船体因总强度不足而发生破坏事故在世界航行史上是屡见不鲜的。但有些船尽管没有折断,可是在风浪中因总体变形过大而不能正常营运,研究这类问题称为船体刚度。它亦属于船体总强度范畴。

其次,除了总强度外,组成船体的各部分结构(如船侧板架、甲板板架、船底板架等)及其组成的构件(如船底板架中的纵骨、纵桁等)还有组成肋骨框架的横梁、肋骨、肋板等横向构件也会因局部荷重(货物及水压力等)和(或)船体梁应力而发生变形或受到破坏。研究这类强度问题通常称为局部强度。

此外,从多年来发生的船舶海损事故又告诉人们,大多数海损事故都是因为船上舱口角隅等处的应力集中而引起的。应力集中引起裂缝,可蔓延到甲板甚至舷侧,严重的可以导致整条船折断。因而如何减少应力集中问题同样也是船体强度中的重要问题。应力集中是船体结构不连续而引起的,除了仓口角隅以外,船体上层建筑端部以及内河船舷侧开的波门及其它结构

不连续的地方也都会发生应力集中,应力集中问题以及上层建筑问题(又称间断构件问题)等等,都属于局部强度范畴。

在一般情况下,船体强度计算应包括下述内容:

- (1)确定作用在船体或各个结构上的载荷大小及性质,即所谓外力问题;
- (2)确定结构剖面中的应力与变形,即结构的响应分析(亦称载荷效应分析);称为内力问题;
- (3)确定合适的强度标准,并检验强度条件,即所谓许用应力问题。

这三部分内容是一个整体,但在校核某一船体结构强度时,常规的步骤是:预先选定某一强度标准,然后按标准的规定确定外载荷,并计算在此受力下结构的应力与变形(响应),最后利用结构剖面中的计算应力 σ 与许用应力 $[\sigma]$ 相比较,即利用条件

$$\sigma \leq [\sigma]$$

来检验强度是否足够。该法的特点是将计算中的有关参数都取为单一的确定值。

但在实际船体强度计算中必须处理许多不确定性。首先,作用于船体的载荷具有很大的变动性和随机性,特别是波浪引起的载荷;其次是材料性能,如屈服极限,疲劳极限的不确定性;此外,如建造质量(它对结构强度的影响特别大),分析计算中的简化、假设、近似等。因此结构的安全性本来是概率性的,在结构强度计算中,只有运用概率方法才能充分揭示作用在船体上的随机外力的真象和结构材料在随机载荷作用下的破坏机理。

由于船体结构本身及其环境条件和相互作用的复杂性,在船舶结构工程中概率方法的应用仍处于初步阶段。目前在船舶的建造规范中对常规船舶,波浪载荷仍以传统形式表达,但应用了随机性波谱理论以及一定概率水平预报;而对于超过限制的船舶,则明确规定了一种半概率的“直接算法”作为补充,即对波浪载荷运用概率方法进行长期预报,但对船体结构的承载能力仍用许用应力的确定性方法。

本书的内容仍以常规的确定性方法为基础。即在考虑总强度问题时,将其静置于波浪上,把动力作为静力来处理,在进行局部强度内力计算时又按结构的受力变形特点将复杂的空间结构处理成为各种典型结构(如连续梁、刚架、板架等)来计算,在进行强度衡准时按预先确定的许用应力值比较。

以上所说的强度衡准方法实际上是一种比较强度,因为在目前的科学水平上,即使进入电子计算机时代,我们还是不能准确计算出船体结构中的真实应力。若把这个应力与结构材料的屈服极限进行比较来决定是否满足强度是毫无实际意义的。这个计算应力值只能同经过航行实践证明强度没有问题的船舶,按同样计算方法求得的应力按安全要求制订出来的许用应力值进行比较,因此许用应力的选取与外力的确定和内力的计算是相一致的,即选取什么样的外力,用怎样的方法计算内力,就应取与之相应的许用应力标准,决不能任意选取。

许用应力标准的制订是一项十分复杂而又艰巨的工作,它所考虑的因素很多,一般应考虑到船舶的类型、结构的重要性,荷重的性质、计算的可靠性、承造厂的施工质量与工艺水平、船舶使用年限、营运条件、腐蚀情况、材料的机械性能、国家的经济政策等等因素。目前我国已制订了一些强度标准,但还不完备,世界其它国家的强度标准我国是认可的,可以借用。

第一章 船体总纵强度计算

1.1 概 述

在船体总纵强度计算中,通常将船体梁静置于波浪上,并从整体上进行研究。本章主要讨论船体梁上外力的确定,内力计算以及强度标准选取与强度衡准。

1.1.1 船体梁的受力与变形特征

船舶在从建造到报废的一生中,要经历建造、下水、航行、进坞修理等许多工作状态,其中航行状态是经常性的工作状态,船体结构的型式及合理的结构尺寸均由这一工作状态决定。其它状态对船舶一生来说是短暂的,其对总纵强度的特殊要求可以采取一些临时性的加强措施来保证。在航行状态中,船舶还可能发生意外的碰撞、搁浅事故等,这毕竟是极少出现的特殊情况,也不能按此来作为衡准总纵强度的标准。只有正常的航行状态是最经常、最一般的状态,应当选取为总纵强度计算的工作状态。

船舶在波浪中航行,船体受到的外力是很复杂的,主要有重力、浮力、推力、阻力、摇摆时的惯性力等,其中推力和阻力使船体受到的纵向压缩力是很小的,在船体强度研究中可忽略不计,摇摆时的惯性力只有在研究动力影响时才予以考虑,考虑船舶静置于波浪上船体受到的外力只有重力与浮力。

对于整个船体来说,重力与浮力应是大小相等,方向相反,并且重心与浮心作用在同一铅垂线上,只有这样,船舶才能平衡。但对于沿船长某一区段来说,作用在其上的重力与浮力并不相等,若重力沿船长按 $P(x)$ 分布,浮力沿船长按 $b(x)$ 分布,则它们的差值就构成了作用在船体梁上的分布荷重 $q(x)$ (如图 1-1 所示)。

$$q(x) = p(x) - b(x) \quad (1.1.1)$$

利用梁的理论可知作用在船体上的剪力 $N(x)$ 和弯矩 $M(x)$ 是

$$N(x) = \int_0^x q(x) dx \quad (1.1.2)$$

$$M(x) = \int_0^x N(x) dx = \int_0^x \int_0^x q(x) dx dx \quad (1.1.3)$$

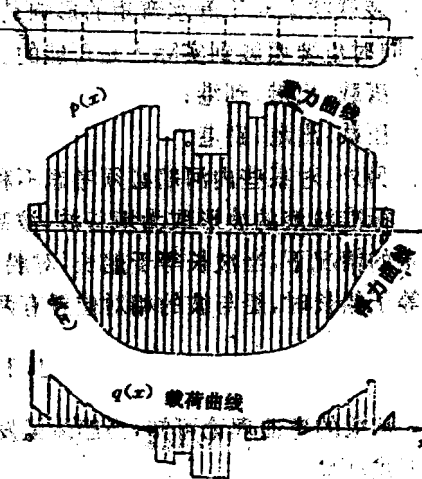


图 1-1

船体梁在外力作用下同时亦会发生如图 1-2 所示的变形。中部上拱,两端下垂的弯曲变形状态称为中拱状态(Hogging condition),反之,中部下垂,两端上翘的弯曲变形状态称为中垂状态(Sagging condition)。船舶在波浪上航行时,若波峰在船舫,则会产生严重的中拱;波谷在船舫时,则会产生严重的中垂。每一条船这两种变形在航行

中都会出现,故计算总纵强度时往往两种情况都需要考虑。

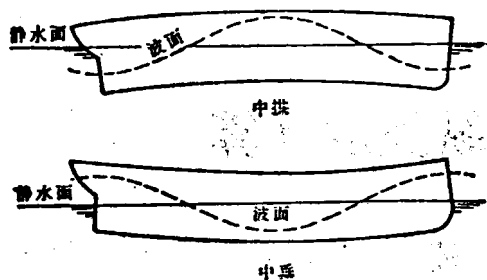


图 1-2

上述提及的载荷、剪力、弯矩、变形的符号法则按如下规定:载荷 q 以向下为正,剪力以左断面上向下为正,右断面上向上为正,弯矩以使船体发生中拱变形为正,反之为负。

1.1.2 标准计算方法

目前船体总纵强度计算中的常规方法是将船体梁静置于波浪上,求出总纵弯曲力矩以及相应的总纵弯曲应力,并将它与许用应力进行比较以判定船体的强度,所谓将船静置于波浪上就是假

想船舶以波速在波浪的前进方向上航行,此时船与波的相对速度为零。这样就可以认为船体是在重力和浮力作用下静平衡于波浪上的一根梁。由于重力和浮力沿船长的分布规律不一样,使船体梁作用有载荷,于是在船体梁断面上产生了剪力和弯矩。作用在船体梁断面上的弯矩通常写成下列形式。

$$M = M_s + M_w$$

式中: M ——船体梁静置于波浪上的总纵弯矩;

M_s ——船体梁在静水中的弯矩,在既定船型时,只与重量及其沿船长的分布有关;

M_w ——船体梁静置于波浪上的波浪附加弯矩,其值的大小与波形范围内的船体外形和波浪要素有关。

显然,总纵弯矩的大小与装载状态和波浪要素有密切关系,由于选取的装载状态和波浪要素不同,弯矩值可能在很大的幅度内变化。因此,必须假定一个标准的波浪要素和装载状态,这样才能有一个统一的比较基础。

装载状态对于静水弯矩的影响是主要的。作为计算状态,原则上应该选取最不利的装载情况,同时也要照顾到实际上是可能的。一般应考虑下述的装载情况:

满载,出港、到港;

压载,出港、到港。

另外,对某些内河船必须考虑不利的装卸过程作为计算状态。

标准波浪的波形取为坦谷波,波高对海船随船长而变化,对内河船按航区来决定,在波高一定的情况下,当波长等于船长,对船体最为不利,因此取波长等于船长作为标准计算状态。波长等于船长时,船与波的相对位置有两种,一种是波峰在中,另一种是波谷在中。

1.1.3 总强度校核步骤

从梁的弯曲理论可知,当船体梁发生总纵弯曲变形时,船体横断面上的总纵弯曲正应力可按下式计算

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot Z \quad (1.1.4)$$

式中: M ——计算剖面上的弯矩

I ——计算剖面绕水平中和轴的惯性矩;

Z ——计算应力点至中和轴的距离

为了保证船体具有足够的强度,船体断面上的最大正应力 $\sigma_{\max}$ 不应超过许用应力 $[\sigma]$ 值,因此一般按下列步骤进行总纵强度校核:

- (1) 计算重量分布曲线 $p(x)$;
- (2) 计算静水浮力曲线 $b_s(x)$;
- (3) 计算静水中载荷分布曲线 $q_s(x) = P(x) - b_s(x)$
- (4) 计算静水弯矩

$$M_s = \int_0^x \int_0^x q_s(x) dx^2;$$

- (5) 计算波浪附加弯矩 M_w ;
- (6) 计算合成弯矩 $M = M_s + M_w$;
- (7) 计算船体梁剖面模数 $W_{\min}$;

$$(8) \text{ 计算总纵弯曲应力 } \sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{\min}};$$

(9) 选取许用应力 $[\sigma]$, 进行总纵强度校核, 若 $\sigma_{\max} \leq [\sigma]$, 则总纵强度满足, 否则总纵强度不满足。上述计算一般在表格中进行。下面按此基本步骤分别具体说明。

1.2 静水弯矩计算

船在静水中处于平衡位置时, 必须满足下述两个条件: 作用在船体上的浮力等于船的重量; 重心和浮心在同一铅垂线上。图 1-1 画出了船舶的重力与浮力沿船长的分布曲线, 其中 $p(x)$ 为重力分布曲线, $b(x)$ 为浮力分布曲线。船体的总重量为

$$P = \int_0^L p(x) dx \quad (1.2.1)$$

船舶受到的总浮力为

$$B = \int_0^L b(x) dx \quad (1.2.2)$$

船舶重心的纵向坐标(以船舶尾垂线处为坐标原点)为

$$x_s = \frac{1}{P} \int_0^L x \cdot p(x) dx \quad (1.2.3)$$

船舶的浮心纵向坐标为

$$x_b = \frac{1}{B} \int_0^L x \cdot b(x) dx \quad (1.2.4)$$

根据平衡条件得

$$\int_0^L P(x) dx = \int_0^L b(x) dx \quad (1.2.5)$$

$$\int_0^L x \cdot P(x) dx = \int_0^L x \cdot b(x) dx \quad (1.2.6)$$

式中 L ——船长;

$p(x)$ ——重量分布曲线, 表示作用在船的单位长度上的重量;

$b(x)$ ——浮力分布曲线, 表示作用在船的单位长度上的浮力。

船舶的重力分布与浮力分布规律一般是不同的, 其差值 $q(x)$ 即为作用在船体梁上的载荷强度。由式(1.1.1)、(1.1.2)、(1.1.3)可知, 要计算静水弯矩, 必须先作出重量分布曲线 $p(x)$

和浮力分布曲线 $b(x)$ ，然后求得载荷曲线 $q(x)$ 再进行积分计算。

1.2.1 重量曲线

船舶在某一装载状态下，描述全船的重量沿船长的分布状况的曲线称为重量曲线。绘制重量曲线时，必须具备表明船舶各部分重量及重心位置的重量重心表和可以确定各部分重量分布范围的船体纵剖面图(总布置图)。

绘制重量曲线的方法通常是将船舶重量按 20 个理论站距分布(民船的理论站号从船尾至船首，军舰则是从首至尾编排)，将每一理论站距内的重量当作是均匀分布的，用每段理论站间的重量作出阶梯形曲线，并以此来代替重量曲线(见图 1-3)。作阶梯形重量曲线时，应注意重量分布原则：(1)应使分布后的重量大小与该项实际重量相等，即分布后重量曲线所包含的面积应等于该项重量；(2)分布后的重心纵向坐标保持不变，即分布后曲线下的图形面积之形心纵向坐标与该项重量的重心纵向坐标相同；(3)重量的分布范围与该项重量的实际占据范围要大致对应。

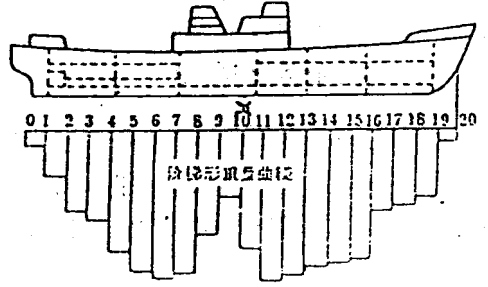


图 1-3 阶梯形重量曲线

上述绘制重量曲线的方法具有足够的精度，但工作非常烦琐，在设计初始阶段难以采用。为了简化计算，往往采用近似方法绘制重量曲线，具体是先分别绘出总体重量曲线和局部重量曲线，然后合成为船舶在某装载状态下的船体重量曲线。

一、按在理论站距内均布的阶梯形分布

1. 局部性重量的分布

局部性重量即沿船长某一段分布的重量。一般包括货物、燃油、淡水、粮食、机舱设备、舳装设备等。可采用上面的分布原则将其分配在相应的理论站距内。

(1) 分布在两个理论站内的局部重量

如图 1-4 所示，局部重量为 P ，其重心距 i 站为 a ，将其分布在 i 站的前后两个理论距内，成为一阶梯曲线，该曲线下的面积应等于局部重量 P ，其形心纵向坐标值应等于局部重量重心的纵向坐标值。根据这一原则，可求出分布在两个理论站距内的荷重 P_1 和 P_2 的大小

$$\begin{cases} P_1 + P_2 = P \\ P_1 \frac{\Delta L}{2} - P_2 \cdot \frac{\Delta L}{2} = P \cdot a \end{cases}$$

从而解得

$$\begin{cases} P_1 = P \left(0.5 + \frac{a}{\Delta L} \right) \\ P_2 = P \left(0.5 - \frac{a}{\Delta L} \right) \end{cases} \quad (1.2.7)$$

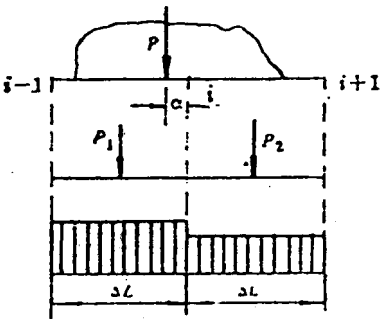


图 1-4

式中 $\Delta L = \frac{L}{20}$ (L ——计算船长)。

将 P_1 和 P_2 除以理论站距长度 ΔL ，即可得该项重量在两个理论站距内的载荷强度 p_1 和 p_2 。

(2) 分布在三个理论站距内的局部重量

这种情况可以分两步进行, 第一步将 $3\Delta L$ 分为间距为 $1.5\Delta L$ 的两个间距, 直接用公式(1.2.7)求得 P_1 、 P_2 的大小及其重心位置(这时公式中的 ΔL 用 $1.5\Delta L$ 代入), 第二步再将 P_1 和 P_2 分别向其相邻的两个理论站距内分布, 从而求得 P'_1 、 P'_2 及 P''_1 、 P''_2 , 最后迭加即得三个理论站距的相应分配重量 P'_1 、 $P'_1'' + P'_2''$ 、 P'_2 。将各站内的重量分别除以 ΔL , 即得到相应站距内的荷重强度, 如图 1-5 所示, 分布在三个理论站距内的局部重量也可以按图 1-6 那样分两种情况处理。

第一种情况: 局部重量跨三个站距, 但是主要集中在两个相邻的站距内(图 1-6a)这时可将该项重量在两个站距内分布。

第二种情况, 局部重量跨三个站距, 并在起始与终了站内分布的重量区域相差不多(图 1-6b), 则按三个站距来分布。其方法实际上与分布两个理论站距的局部重量是一样的。

(3) 首、尾理论站外的重量分布

有些船舶在首、尾垂线之外有相当长的延伸部分, 且该部分的重量可能超过空船重量的 1%, 对这类重量应该按图 1-7 的办法进行分布, 把首、尾垂线之外的重量移到相邻的两个理论距内, 但不改变该项重量的大小及其重心纵向坐标, 虽然其分布范围与实际不符, 但不致引起中部弯矩的变化。根据平衡条

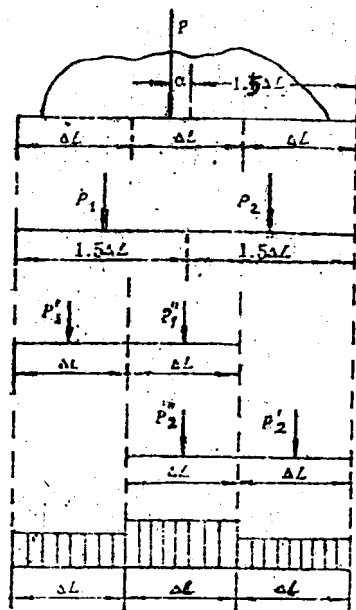
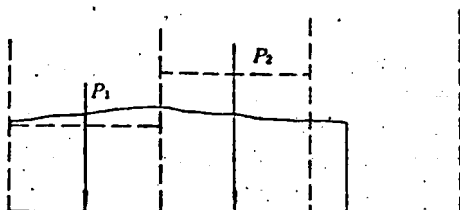
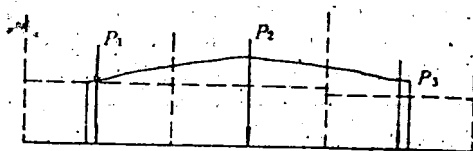


图 1-5



a)



b)

图 1-6

件得

$$\begin{cases} P = P_1 - P_2 \\ P \cdot a = P_2 \cdot \frac{3}{2} \Delta L - P_1 \frac{\Delta L}{2} \end{cases}$$

由此可得

$$\begin{cases} P_1 = P \left(\frac{3}{2} + \frac{a}{\Delta L} \right) \\ P_2 = P \left(\frac{1}{2} + \frac{a}{\Delta L} \right) \end{cases} \quad (1.2.8)$$

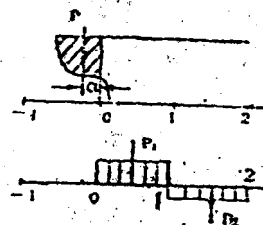


图 1-7

如果首、尾部分伸出首、尾垂线的长度小于 ΔL , 且重量 $p < \frac{P}{100}$, 则可直接分配在相邻的站距内。

对于在 $4\Delta L$ 、 $6\Delta L$ 等偶数个理论站距内分布的情况,可按式(1.2.7)计算,但式中的 ΔL 分别应以 $2\Delta L$ 、 $3\Delta L$ 等代入。对于其它情形可根据具体情况、按平衡条件灵活处理。

2. 总体重量的分布

(1)油漆、索具及全船性分布的旅客、船员等重量:

这类重量可按式(1.2.7)进行分布,式中的 ΔL 以 $10\Delta L$ 代入,其分布如图 1-8 所示。

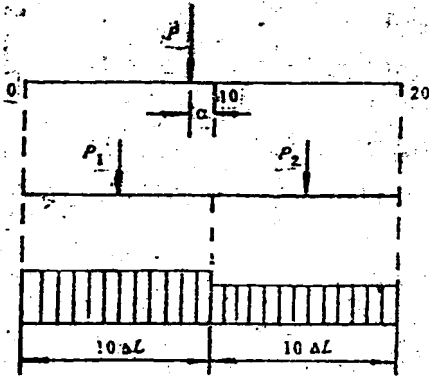


图 1-8

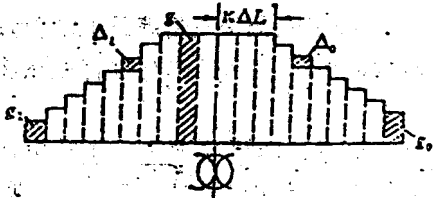


图 1-9

(2)主体钢料:这里介绍一种库久莫夫方法,这种方法是根据海船的主体钢料重量分布统计而成的。对于具有纵通上层建筑的内河大、中型客货轮,连同上层建筑结构重量在内,亦可采用该方法作近似分布。具体的阶梯形曲线如图 1-9 所示,有关参数见表 1-1。

表 1-1

参数 K	g	g_0	g_1	Δ_0	Δ_1
肥型 4	$1.18 \frac{G}{20}$	$(0.666 + 0.365a) \frac{G}{20}$	$(0.666 - 0.365a) \frac{G}{20}$	$\frac{g - g_0}{6}$	$\frac{g - g_1}{6}$
瘦型 3	$1.18 \frac{G}{20}$	$(0.73 + 0.333a) \frac{G}{20}$	$(0.73 - 0.333a) \frac{G}{20}$	$\frac{g - g_0}{7}$	$\frac{g - g_1}{7}$

其中: $a = \frac{x_g}{\Delta L}$;

x_g ——船主体重心距中的距离(舳前为正),m;

$\Delta L = \frac{L}{20}$;

G ——主体重量,T。

方型系数 $C_b \geq 0.70$ 且具有平行中体的船舶为肥型船; $C_b < 0.7$ 的船为瘦型船。

二、按梯形规律分布

1. 局部性重量

如有某项重量为 W_i ,重心纵向坐标为 x_{gi} ,沿船长分布的前缘坐标为 x_{fi} 后缘坐标为 x_{hi} ,如按图 1-10 所示的梯形分布,关键是要求出梯形的前后缘荷重强度坐标值 W_{fi} 、 W_{hi} 与上述已知的四个参数的关系。同样由平衡条件,根据重量相等,重心不变的原则列出下面两个方程:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}(W_{fi} + W_{hi}) \cdot l_i = W_i \\ \frac{1}{2}l_i^2 W_{fi} + \frac{l_i}{2} \cdot \frac{2l_i}{3}(W_{fi} - W_{hi}) = W_i(x_{fi} - x_{hi}) \end{cases}$$

由此解得

$$\begin{cases} W_{fi} = \frac{2W_i}{l_i} \left[-1 + \frac{3(x_{gi} - x_{ai})}{l_i} \right] \\ W_{ai} = \frac{2W_i}{l_i} \left[2 - \frac{3(x_{gi} - x_{ai})}{l_i} \right] \end{cases} \quad (1.2.9)$$

其中 $l_i = x_{fi} - x_{ai}$ 为重量分布长度。

2. 总体重量

有些船舶往往是中部丰满, 两端尖瘦, 且中部具有平行中体, 所以可以把船体和舾装重量近似地用梯形曲线表示, 如图 1-11 所示。

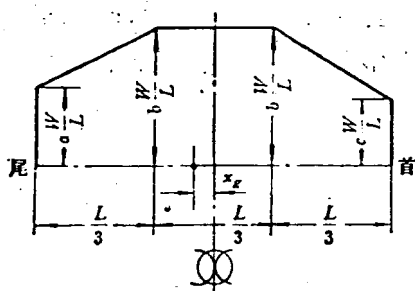


图 1-11 梯形分布重量曲线

根据梯形面积等于船体与舾装的总重量 W , 面积形心与重心一致的原则列方程组, 可求得梯形形状参数 a 、 b 、 c 之间的关系为

$$\begin{cases} 4b + a + c = 6 \\ a - c = \frac{108}{7} \cdot \frac{x_g}{L} \end{cases} \quad (1.2.10)$$

式中 x_g ——船体重心距中的距离(中后为正), m ;
 L ——船长, m 。

根据统计资料, 对于瘦型船舶 $b=1.195$, 于是由式

(1.2.10) 可求得

$$\begin{cases} a = 0.61 + \frac{54}{7} \cdot \frac{x_g}{L} \\ C = 0.61 - \frac{54}{7} \cdot \frac{x_g}{L} \end{cases} \quad (1.2.11)$$

对于肥型船 $b=1.174$, 则

$$\begin{cases} a = 0.652 + \frac{54}{7} \cdot \frac{x_g}{L} \\ C = 0.652 - \frac{54}{7} \cdot \frac{x_g}{L} \end{cases} \quad (1.2.12)$$

在有关书籍与手册中还能见到一些其它的近似方法, 在此不一一赘述。

应当指出用各种近似方法绘制的重量曲线, 只能与实际的重量分布曲线基本符合, 如果有更准确的资料, 则应对上述方法进行修正。其次, 对于形状复杂的特种船舶, 上述均不适用。

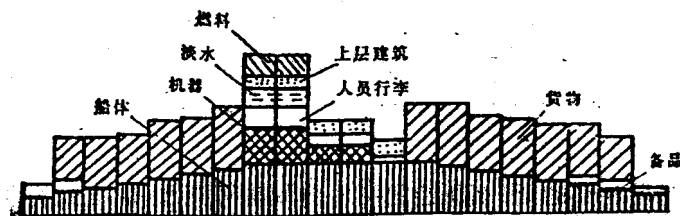


图 1-12 某装载状态下的重量曲线

将总体重量及各项局部性重量分布的垂向坐标值在其对应的理论站内予以迭加,则得到船舶在该工况下的重量分布曲线,如图 1-12 所示。

实际计算采用表格进行,见表 1-2

表 1-2 重量分布汇总表

序 号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
站 重 量 项 目 距	船 体 重 量	机 装 设 备	轮 机 电 气	(1)空 +船 (2)重 +量 (3)	船 员	旅 客	粮 食 及 行 李	货 物	燃 油 及 水	(5)装 ~载 (9)重 总量 和	(4)总 +重 (10)量 强度	(11)总 ×重 ΔL量	力 臂 因 素	(12)对 ×中 (13)力 ×距 ΔL
	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN		
0-1													-9.5	
1-2													-8.5	
⋮													⋮	
18-19													8.5	
19-20													9.5	
Σ														

$$W = \sum (12) \quad \text{kN} \quad x_g = \sum (14) / \sum (12) = \text{m}$$

1.2.2 浮力曲线

船舶在某一装载状态下,浮力沿船长分布状态的曲线称为浮力曲线。其垂向坐标表示作用于船体梁单位长度上的浮力值,浮力曲线与纵向坐标所包围的面积等于作用于船体梁上的浮力,该面积的形心纵向坐标即为浮心纵向位置,绘制浮力曲线需要利用船舶静水力曲线和邦金曲线。当船舶的浮态确定后,便能在邦金曲线上得到各站在确定浮态下的横剖面浸水面积,从而绘出沿船长分布的横剖面面积曲线,该曲线的垂向坐标值乘以水的比重便得到浮力曲线。由此可见,绘制浮力曲线的关键是确定浮态。

1. 船舶处于正浮状态

如果在等于船舶重量的排水量下,在静水力曲线上求出的船舶浮心纵向坐标与已知的船舶重量的重心纵向坐标一致,则该船处于正浮状态,这时首、尾吃水即平均吃水,可在静水力曲线上直接查取。然后将相应的吃水线画在邦金曲线上(图 1-13),便可求出各站横剖面在吃水线下的面积,这样就不难画出横剖面面积曲线和浮力曲线了(图 1-13)。

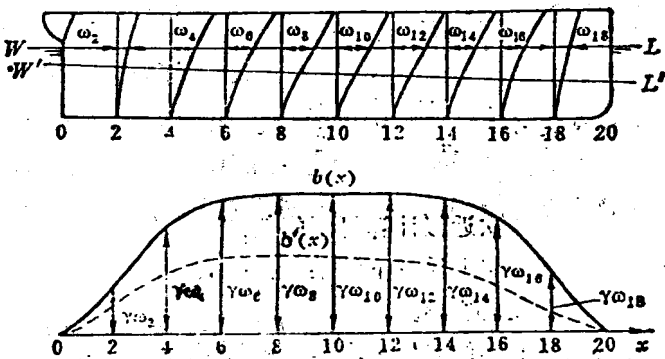


图 1-13

如果重量曲线是阶梯形的,那么所绘的浮力曲线也可用图 1-14 的方法改画成阶梯形曲线,使浮力均匀地分布在每一理论站内。此时作用于每一理论站内的浮力等于:

$$b_{i-j} = r(\omega_i + \omega_j) \cdot \frac{\Delta L}{2}$$

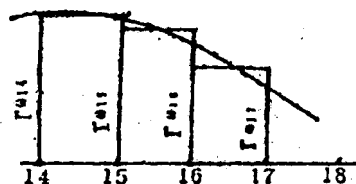
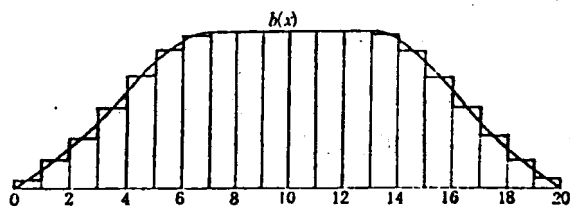


图 1-14

式中 ω_i ——第 i 理论站之浸水面积;
 ω_j ——第 j 理论站之浸水面积;
 $j=i+1$;
 r ——水的比重。

2. 船舶处于纵倾状态

由于船舶在静水中通常并非处于正浮状态,为了求得船舶的实际平衡位置,必须进行纵倾调整。调整之后,浮力应等于船舶重量,浮心纵向坐标与重心纵向坐标一致。纵倾调整方法有解析法和逐步近似法二种。调整船舶在静水中的纵倾时,用逐步近似法比较方便。当然,调整船舶在波浪上的纵倾时,也是行之有效的。

进行纵倾调整时,应具备船舶静水力曲线,邦金曲线,船舶重量重心资料。

第一次近似计算时,可先假定船舶是正浮的,这时可由静水力曲线求出相应于给定排水量下的平均吃水 d_m , 浮心纵向坐标 x_b , 水线面漂心坐标 x_f 以及纵稳心半径 R 。对于具有纵倾的船舶,浮心纵向坐标 x_b 已知的船舶重心纵坐标值 x_g 必然不一致,根据图 1-15,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

$$\begin{aligned} \text{首吃水} \quad d_{f1} &= d_m + \left(\frac{L}{2} - x_f \right) \frac{x_g - x_b}{R} \\ \text{尾吃水} \quad d_{a1} &= d_m - \left(\frac{L}{2} + x_f \right) \frac{x_g - x_b}{R} \end{aligned} \quad (1.2.13)$$

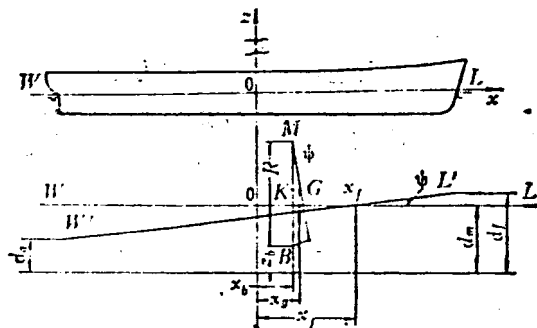


图 1-15 确定船舶纵倾后的吃水

注意到实船的 $R \gg KB$, 故在上述中近似取 $R - KB \approx R$ 。

确定了首尾吃水后,利用邦金曲线求出相应于该吃水线的浮力曲线,于是第一次近似计算出排水体积 V_1 和浮心纵向坐标 x_{b1} 。若求得的这两个数值与给定的排水体积 V_0 及重心纵向坐标 x_g 相差不大时,即满足下述关系式

$$\left. \begin{aligned} |V_0 - V_1| &\leq 0.5\% V_0 \\ |x_g - x_{b1}| &\leq 0.1\% L \end{aligned} \right\} \quad (1.2.14)$$

则认为船舶处于平衡状态,否则必须进行第二次近似计算。此时,可按下式确定新的首尾吃水

$$\left. \begin{aligned} d_{f2} &= d_{f1} + \frac{V_0 - V_1}{A} + \left(\frac{L}{2} - x_f \right) \frac{x_g - x_{b1}}{R} \\ d_{a2} &= d_{a1} + \frac{V_0 - V_1}{A} - \left(\frac{L}{2} + x_f \right) \frac{x_g - x_{b1}}{R} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.15)$$

式中 A ——水线面面积； V_0 ——给定的排水体积。

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某个值，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。

照此计算，若还不能满足关系式(1.2.14)，还需进行第三次近似计算，直至满足平衡条件。一般来说，进行二次近似计算就能达到平衡要求。纵倾调整后，应根据最后一次确定的首尾吃水求出浮力分布曲线。上述的近似计算过程是在表 1-3 中进行的。

表 1-3 船舶在静水中的平衡计算

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 $k \cdot \omega = (2) \times (3)$	横剖面浸水面积 ω m^2	力矩函数 $k \cdot \omega = (2) \times (5)$
0	-10	$\frac{\omega_0}{2}$			
1	-9	ω_1			
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$			
19	9	ω_{19}			
20	10	$\frac{\omega_{20}}{2}$			
Σ		Σ_3	Σ_4		
$V = \Delta L \Sigma_3 \quad x_b = \Delta L \frac{\Sigma_4}{\Sigma_3}$					

1.2.3 静水剪力、弯矩曲线

1. 载荷曲线

在某计算状态下，描述引起船体梁总纵弯曲的载荷沿船长分布状况的曲线称为载荷曲线。

若以重量曲线 $p(x)$ 为正，浮力曲线 $b(x)$ 为负，迭加即得载荷曲线，正值画在坐标轴的上方，负值画在坐标轴的下方(见图 1-1)。载荷曲线有如下两个性质：

- (1) 载荷曲线与轴之间所含面积之和为零，
- (2) 面积对纵轴上任一点的静力矩等于零。

这两个性质实际上就是体现了浮力与重力相等，浮心纵向坐标与重心纵坐标值一致的两个船舶在水中的平衡条件。即

$$\begin{aligned} \int_0^L q(x) dx &= \int_0^L p(x) dx - \int_0^L b(x) dx = 0 \\ \int_0^L x \cdot q(x) dx &= \int_0^L x p(x) dx - \int_0^L x \cdot b(x) dx = 0 \end{aligned}$$

2. 剪力、弯矩曲线

由于载荷曲线是阶梯形分布，所以用矩形近似积分法进行计算。在材料力学中知道，梁上某一截面上的剪力在数值上等于该截面一边(左边或右边)所有横向力的代数和。这种计算在表 1-4 中第(7)栏中自上而下求和即可实现。例如(参见图 1-16)：第 1 站处的剪力 $N_1 = q_{0-1}$ ；第