

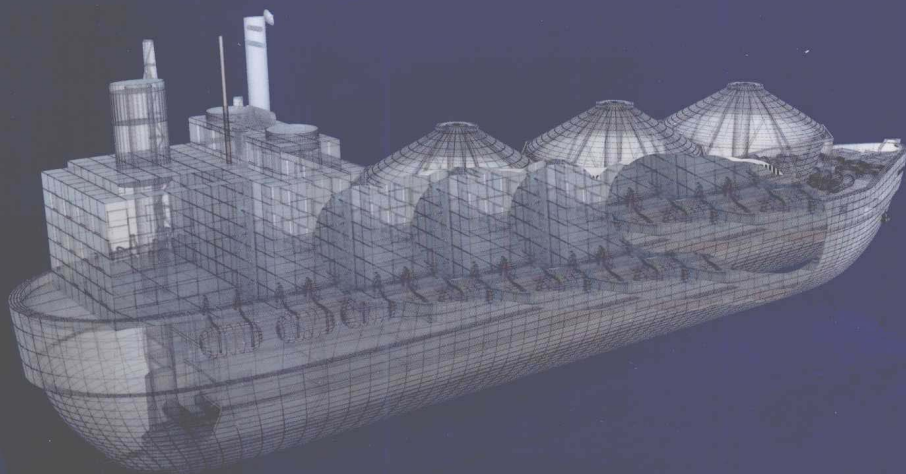


船舶与海洋工程

国家“十二五”重点图书
船舶与海洋工程专业规划教材
浙江省高等教育重点建设教材

船舶结构设计

谢永和 吴剑国 李俊来 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

国家“十二五”重点图书
船舶与海洋工程专业规划教材
浙江省高等教育重点建设教材

船舶结构设计

谢永和 吴剑国 李俊来 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书紧跟现代船舶设计技术的最新发展,在作者多年教学、科研和设计经验的基础上,特别增加了船体屈曲强度、船舶舢剖面结构优化设计、应力集中、有限元在船体结构设计中的应用以及疲劳强度等专题分析研究,更加全面、深入和系统地展现了船舶强度与结构设计的理论与方法。本书理论浅显易懂,分析细致透彻,实例资料详实,图文并茂,是近年来难得一见、适合不同读者需求、内容非常全面的船舶与海洋工程类专业教材。该书必将成为有志于从事船舶与海洋工程的广大科技人员和管理人员的良师益友。

本书共分9章,内容包括船体外载荷、船体总纵强度、船体局部强度、船体纵向扭转强度、船体结构规范法设计、船舶舢剖面结构优化设计、应力集中、有限元法在船体结构设计中的应用以及疲劳强度。

本书可供船舶与海洋工程及其相关专业、流体力学专业、航海技术专业等高年级本科生、研究生教学使用,也可作为有关专业的教师、工程师、科研人员和技术管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

船舶结构设计/谢永和,吴剑国,李俊来编著. —上海:
上海交通大学出版社,2011
(船舶与海洋工程系列)
ISBN 978-7-313-07254-2

I. 船... II. ①谢... ②吴... ③李... III. 船体
结构—结构设计 IV. U663

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 073531 号

船舶结构设计

谢永和 吴剑国 李俊来 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

浙江云广印业有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:10.25 字数:251千字

2011年11月第1版 2011年11月第1次印刷

ISBN 978-7-313-07254-2/U 定价:28.00元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0573-86577317

前 言

《船舶结构设计》是一本全面系统介绍船舶强度校核和结构设计方法的综合性技术类教材,是普通高等院校船舶与海洋工程专业学生的必修课程用书,是集专业性、理论性与实用性于一体的专业书籍。本书不仅适用于普通高等院校船舶与海洋工程专业的本科生学习,也可以作为船舶及相关领域工程技术人员的培训教材和参考书。

随着船舶科学技术的发展,船舶结构设计理论、方法和设计规范都有所改变。如何使学生通过修读教材来掌握船舶强度分析和结构设计基本知识,了解最新船舶结构规范,并将理论与实践应用紧密结合,做到深入浅出、通俗易懂,并能经受专业实践的历练,这是船舶与海洋工程专业教材编写中必须着重考虑的问题。本教材从编写到教学实践历时近十载,凝聚了船舶与海洋工程专业多位教授和专业教师们多年的心血,并结合当前地方船舶企业的生产实际,重新修订和完善了《船舶结构设计》教材。也正是基于为使读者能迅速把握现代船舶企业中船体强度和结构设计的新措施、新方法、新技术,突出船舶与海洋工程专业教材的新颖性、实用性,本教材正式出版前在浙江海洋学院进行本科教学试用已经数届,再经过多次修订与讨论,最终形成了《船舶结构设计》一书。

本书是船体强度与结构设计的总结性丛书之一,全书共分9章,主要内容包括船体外载荷、船体总纵强度、船体局部强度、船体纵向扭转强度、船体结构规范法设计、船舶舫剖面结构优化设计、应力集中、有限元法在船体结构设计中的应用以及疲劳强度。

本书第2章、第4~5章、第7章由谢永和教授编写,第1章、第3章由李俊来讲师编写,第6章、第8~9章由吴剑国教授编写,全书由谢永和教授统稿。

由于水平和经验局限,教材还会有很多缺点和不足,希望各有关高校、同行专家和广大读者提出宝贵意见,以便改进提高。

编 者

2011年11月

目 录

绪论	1
0.1 课程综述	1
0.2 课程内容	2
第 1 章 船体外载荷	4
1.1 重力分布曲线	4
1.1.1 概述	4
1.1.2 局部性重力分布	5
1.1.3 总体性重力分布	7
1.2 静水浮力曲线	8
1.2.1 浮态第 1 次近似计算	8
1.2.2 浮态第 2 次近似计算	9
1.2.3 浮力曲线计算	9
1.3 载荷、剪力及弯矩曲线	10
1.3.1 载荷曲线	10
1.3.2 静水剪力曲线与静水弯矩曲线	10
1.4 静置波浪附加剪力和弯矩计算	11
1.4.1 概述	11
1.4.2 波浪附加剪力及弯矩	12
1.4.3 波浪载荷的规范计算	15
1.5 合成弯矩与合成剪力	16
1.5.1 许用静水弯矩	16
1.5.2 许用静水剪力	17
1.6 计算实例	18
第 2 章 船体总纵强度	20
2.1 船体屈服强度	20
2.1.1 船体剖面要素	20
2.1.2 总纵弯曲正应力	21
2.1.3 总纵弯曲剪切应力	22
2.2 船体屈曲强度	22
2.2.1 板的欧拉应力	22
2.2.2 纵骨的欧拉应力	23
2.2.3 临界应力	23

2.2.4 屈曲强度校核·····	24
2.3 船体极限弯矩·····	24
2.3.1 基本概念·····	24
2.3.2 船体极限弯矩·····	25
2.4 计算实例·····	26
第3章 船体局部强度 ·····	38
3.1 计算模型·····	38
3.1.1 支座的简化·····	38
3.1.2 结构的简化·····	39
3.1.3 载荷的简化·····	39
3.2 板架计算·····	40
3.2.1 船底板架·····	40
3.2.2 甲板板架·····	43
3.2.3 舷侧板架·····	46
3.2.4 舱壁板架·····	46
3.3 计算实例·····	48
第4章 船体纵向扭转强度 ·····	50
4.1 船体在斜浪中的波浪扭矩·····	50
4.1.1 波浪扭矩产生的机理·····	50
4.1.2 波浪扭矩的理论表示·····	51
4.1.3 波浪扭矩计算的标准状态·····	52
4.1.4 斜浪波浪扭矩的规范计算·····	52
4.1.5 斜浪波浪弯矩的规范计算·····	53
4.2 甲板具有长大开口的船体扭转变形·····	54
4.2.1 自由扭转变形和翘曲变形·····	54
4.2.2 剖面扭转惯性矩计算·····	55
4.3 弯扭组合的合成正应力·····	55
4.3.1 静水弯矩 M_s 产生的正应力·····	56
4.3.2 垂向波浪弯矩产生的正应力·····	56
4.3.3 船舶处于斜浪状态时的合成应力·····	56
4.4 计算实例·····	56
第5章 船体结构规范法设计 ·····	60
5.1 规范设计的基本思路·····	60
5.1.1 规范设计步骤·····	60
5.1.2 建造规范的选用·····	61
5.1.3 结构布置的一般原则·····	61

5.1.4 船体构件设计通则	62
5.2 船体构件的基本材料	67
5.2.1 正常气温下船体结构用钢的要求	67
5.2.2 冷藏舱室结构用钢的要求	68
5.2.3 冰区航行船舶结构用钢的要求	69
5.2.4 暴露于低气温下船体结构用钢的要求	69
5.3 规范对船体纵向强度的要求	70
5.4 设计实例	71
5.4.1 船体外板与甲板	71
5.4.2 船体骨架设计	75
5.4.3 上层建筑设计	91
第6章 船舶舦剖面结构优化设计	100
6.1 概述	100
6.2 离散变量的结构优化设计	100
6.2.1 结构优化的数学模型	100
6.2.2 结构优化的方法	101
6.3 按“规范”要求的船舦剖面优化设计	101
6.3.1 建立数学模型	102
6.3.2 数学优化方法	103
6.3.3 计算实例	104
6.4 基于直接计算的船舶舦剖面结构优化	105
6.4.1 分级优化技术的基本思想	105
6.4.2 建立数学模型	106
6.4.3 设计实例	108
第7章 应力集中	109
7.1 甲板开口的应力集中	109
7.1.1 应力集中系数	109
7.1.2 甲板开口应力集中的影响因素	110
7.1.3 甲板上开口的加强	111
7.1.4 下甲板开口的加强	112
7.2 肘板的应力集中	113
7.3 上层建筑端部的应力集中	114
7.3.1 应力集中系数	114
7.3.2 端部应力集中的加强	114
第8章 有限元法在船体结构设计中的应用	118
8.1 概述	118

8.2	船体结构有限元模型	119
8.3	CSR 载荷计算	122
8.3.1	通则	122
8.3.2	船体梁载荷	122
8.3.3	载荷工况	123
8.3.4	外部压力	125
8.3.5	内部压力和力	126
8.4	边界条件	128
8.5	强度准则	128
8.5.1	屈服强度评估	129
8.5.2	主要支撑构件的挠度	129
8.6	详细应力评估	129
8.7	屈曲分析	132
8.7.1	板格屈曲模型	132
8.7.2	基本板格的屈曲衡准	133
8.7.3	基本板格应力	137
8.8	实船分析	138
8.8.1	结构有限元模型	139
8.8.2	计算工况	140
8.8.3	应力云图	141
8.8.4	屈曲计算结果分析和屈曲结果云图	142
第 9 章	疲劳强度	144
9.1	引言	144
9.2	线性累积损伤理论	145
9.2.1	Minner 线性累积损伤理论	145
9.2.2	连续型载荷谱作用下的疲劳累积损伤	145
9.3	散货船 CSR 的疲劳强度适用范围与工况	146
9.4	散货船 CSR 的疲劳强度计算	147
9.4.1	热点应力	147
9.4.2	等效热点应力范围	150
9.4.3	疲劳损伤	151
9.5	疲劳强度分析实例	152
9.5.1	标准工况	152
9.5.2	载荷计算	153
9.5.3	计算模型与结果	153
	参考文献	156

绪 论

0.1 课程综述

船舶是指航行于江河湖海的各类水上浮动式装置,担负着运输、生产、战斗及其他各种任务。为了保证船舶能很好地完成上述任务,船舶应具有良好的航行性能、工作性能和足够的强度。

船舶具有足够的强度,是指船体结构在正常的使用过程和一定的使用年限中具有不破坏或不发生过大变形的能力。由于船舶通常的工作状态是航行状态,因此设计人员应首先保证船舶在航行时具有足够的强度。

船舶结构强度计算主要是船体总纵强度计算。总纵强度计算通常是将船舶静置于静水或波浪上,通过力学方法计算沿船长方向分布的重力与浮力作用下的弯曲变形与应力。这种将船舶作为一个整体来研究的强度问题就称为船体的总纵强度。长期以来,总纵强度一直是船体强度校核的主要内容。

实际上,船体在重力和浮力的作用下,往往不仅会发生总纵弯曲变形和扭转变形,同时在局部范围内船体结构还会发生局部变形,如果局部变形超过一定的限度,也会对船体造成损坏,进而危及到船舶安全。这就要求船体局部结构必须能承受一定相应载荷、抵抗破坏的能力,这种能力就称为船体局部强度。

然而,把船舶静置于波浪上,按梁的弯曲理论来研究船舶总纵强度是初步的。随着时间的推移和对总纵强度认识的逐步深入,为了使船体强度的计算更接近于实际,还需进一步讨论和研究其他与强度有关的问题。

(1) 稳定性问题。由于船舶尺度的增大,总纵弯曲时船体受压构件(主要是中垂状态时的上层甲板)常常会在较小的应力下因其受压过度而丧失稳定性,大大降低了船体抵抗总纵弯曲变形的能力。这样,在研究船体总纵强度的时候,必须考虑受压构件是否有失稳现象,并要分析构件失稳后的应力再分配问题,才能正确地体现船体总体承载能力。

(2) 扭转强度问题。船舶并不总是迎浪航行,经常会存在斜浪航行。船舶在斜浪上航行时,船体可能会发生过大的扭转变形,因此也就需要研究船体的扭转强度问题。尤其是对那些抗扭刚度较低的船体,如大开口驳船、舱口特别大的集装箱船,扭转强度的研究显得更为重要。

(3) 应力集中问题。应力集中是由于船体结构不连续而引起的,舱口角隅、上层建筑端部、内河船舷侧开的各类通道门及其他结构不连续的部位也都会发生应力集中。

(4) 疲劳强度问题。疲劳强度是由于船体结构承受交变载荷作用下引起的,舱口角隅自由边、底边舱与内底板及横向强框架连接处、底凳斜板与双层底纵桁处内底的连接处、舷侧肋骨与底边舱连接处以及舷侧肋骨与顶边舱连接处在交变载荷作用下都容易引起疲劳破坏。

综上所述,要保证船舶安全,使船舶具有一定的强度和刚度就必须考虑总纵强度、局部强度、扭转强度、稳定性、应力集中和疲劳强度等问题。

随着造船实践经验的积累和对船体强度问题研究的日益深入,逐渐形成了专门研究船体强度的科学,即“船体强度”。为了保证船体强度,必须分析清楚作用于船体或各个构件上的载荷大小,再根据《钢质海船入级建造规范》对船体结构的要求来确定船体构件的最佳尺度,这也就是“船体结构设计”的内容。《船舶结构设计》就是专门研究船体强度与结构设计的科学,包括了船体外载荷的确定、船体结构在外力作用下的响应研究、许用应力的确定、船体强度校核以及船体构件尺度的确定等一系列问题。

0.2 课程内容

1) 船体外载荷

将船舶静置于波浪上,求出船体梁横剖面上的剪力和弯矩以及相应的应力,并将它与相应的许用应力进行比较以判定船体的强度,这是船体总纵强度计算的传统方法。本章主要介绍:总纵强度计算前必须确定船体外载荷情况,包括船体梁所受到的各类载荷、剪力和弯矩的分布特点、计算原则以及分析方法,从而理解如何计算某一装载状态下船体梁总纵弯曲的载荷、剪力和弯矩的过程。

2) 船体总纵强度

从梁的弯曲理论可知,当船体发生总纵弯曲变形时,船体横剖面上的总纵弯曲应力可用公式 $\sigma=M/W$ 计算,其中 M 为计算剖面上的弯矩, W 为剖面模数;从总纵强度计算方法可知,最终计算的总纵弯曲应力还应与相应的许用应力进行比较以判定船体的强度。本章主要围绕船体总纵强度计算,讨论了船体屈服强度、屈曲强度以及极限弯矩等内容,重点要求掌握船体总纵强度的计算过程。

3) 船体局部强度

通常在外载荷作用下,船体局部强度分析是把船体分离成板架、框架、连续梁和板来进行计算。本章主要是在船舶结构力学的基础上,运用船体结构的基础知识,在舢剖面设计基本完成,总纵强度经校核已满足要求的前提下,对局部强度进行分析。主要讨论计算模型的确定,包括支座简化、结构模型简化等内容以及对船体各类板架的局部强度计算,要求能够学会计算具体每一类板架结构的强度和稳定性问题。

4) 船体纵向扭转强度

船体在波浪中航行时,受到斜浪和不对称波浪力作用,船体会发生扭转变形。对于常规船舶来说,船体结构在满足纵向弯曲强度的条件下,扭转强度一般是可以满足安全要求的。但是,对集装箱船、大开口散货船、大开口多用途船、内河分节驳船等甲板具有长大开口的船舶来说,因为甲板上的大开口,削弱了开口区域剖面的结构强度和结构刚度,必须考虑由于扭转引起的纵向扭转强度。本章主要介绍船体波浪扭矩的计算、长大开口的船体扭转变形时的剖面扭转惯性矩计算以及扭转切应力计算等内容。要求掌握船舢剖面波浪扭矩及沿船长分布的波浪弯矩计算。

5) 船体结构规范设计法

规范设计法即根据船舶主尺度和结构形式及各种营运、施工要求,按船级社制定的《钢质海船入级建造规范》的有关规定,决定构件的布置与尺度,再进行总纵强度、局部强度与结构稳定性等校核。若有不合理之处,则修改原设计方案或按要求局部加强结构,重复校核,直至满

足。本章主要介绍规范设计的基本思路、建造规范的选用、船体构件的基本材料以及规范对船体纵向强度的要求等内容,要求熟悉和掌握船体规范设计的过程。

6) 船舫剖面结构优化设计

船舫剖面各部分的结构形式、构件尺寸及其连接方法,都集中地反映了船舶的结构概貌。船体舫部结构是保证其总纵强度的主要部分,也是船体结构重量的主要部分;因此,进行舫部剖面结构优化设计是十分有意义的。本章主要讨论了如何运用优化方法和计算机技术,在保证船体结构强度和刚度情况下,选择最佳的结构方案,使其重量最轻或成本最低等问题。

7) 应力集中

在船体结构中,构件的间断往往是不可避免的。间断构件在其剖面形状与尺寸突变处的局部范围内,应力会产生急剧增大的现象,这种现象称为应力集中。应力集中是导致结构损坏的一个重要原因,所以结构设计中必须始终注意这个问题。本章介绍了船体结构中比较突出的几个应力集中问题,包括应力集中系数、应力集中的影响因素、甲板上开口的加强、肘板的应力集中、上层建筑端部的应力集中等问题及对应力集中区域的结构设计。

8) 有限元法在船体结构设计中的应用

有限元法是一种基于变分原理把连续体离散化的数值解法,具有适应性强、效能较高等优点。应用有限元分析方法,可将船体结构离散为能精确模拟其承载模式和变形情况的有限个单元,详尽地表述船体结构的微观细节,真实地表达出各个构件间的协调关系与变化,可以求出各个核心构件或区域的实际变形与应力。这种方法是目前船体强度分析最准确、最完善的方法,也是在理性结构设计中,最能精确预报结构对载荷响应的结构分析方法。本章主要针对某一货船介绍船体结构有限元模型的建立、整船结构分析、舱段结构分析以及局部有限元分析。

9) 疲劳强度

疲劳过程一般分为裂纹的萌生(裂纹的起源阶段)和最终导致断裂的裂纹稳定扩展两个阶段。船舶结构疲劳强度评估过程,首先计算由于海洋波浪作用,船体结构产生的交变应力,然后应用疲劳理论,计算疲劳裂纹容易产生的部位即结构危险点处的疲劳损伤,得到寿命。本章主要介绍疲劳评估的几种实际操作的疲劳损伤和寿命分析方法,即基于 S-N 曲线和 Miner 准则的线性累积损伤理论和基于 Paris 的疲劳裂纹扩展理论的断裂力学方法,以及散货船 CSR 的疲劳强度计算。

第 1 章 船体外载荷

将船舶静置在波浪上,求出总纵弯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,这是迄今为止船体总纵强度计算中的主要方法。将船静置在波浪上,就是假想船舶以波速在波浪传播方向上航行,此时船与波的相对速度为零,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,简称船体梁。由于重力和浮力沿船长分布规律并不一致,故两者在每单位船长上的差额就构成作用在船体梁上的分布载荷;船体梁在这种分布载荷的作用下将发生总纵弯曲变形,并在船体梁断面上产生剪力和弯矩。

作用在船体梁断面上的总纵弯矩可用 $M=M_s+M_w$ 来计算, M_s 为船舶静置于静水中的静水弯矩, M_w 为船舶静置于波浪上的波浪附加弯矩。

装载状态对于静水弯矩的影响是主要的。作为计算状态,应该选取最不利的装载情况,同时也要考虑实际情况。一般应考虑典型装载情况:满载出港、满载到港、压载出港、压载到港。

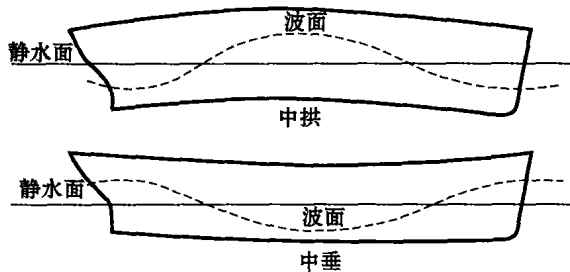


图 1-1 计算状态

1.1 重力分布曲线

1.1.1 概述

1) 重力分布曲线

在某一装载状态下,描述全船重力沿船长分布状况的曲线,称为重力分布曲线。其纵坐标表示船体梁单位长度上重力分布值,即作用于单位长度上的重力值。绘制重力分布曲线时,必须要有全船各项重力及其重心位置的计算明细表,以及确定各项重力纵向分布范围的船体中纵剖面图,即重力、重心资料。

绘制重力分布曲线的方法:将船舶的各项重力按静力等效原则分布在相应的船长范围内,再逐项叠加得到重力分布阶梯图。手工计算时,通常将船舶重力按 20 个理论站距分布(民船的理论站号从船艏至船艉,军船则是从船艉至船艏编排)。每个理论站距内的重力可以认为均匀分布,从而作出阶梯形重力分布曲线,并以此来代替真实的重力分布曲线,见图 1-2。按上述方法求得的重力分布曲线,虽然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,所以这种绘制重力分布曲线的方法是可行的。

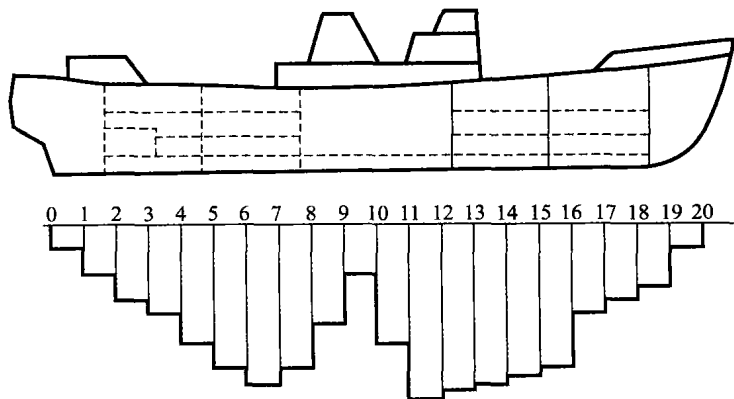


图 1-2 重力分布曲线示意图

2) 重力分类

(1) 按变动情况分。

① 不变重力——即空船重力,包括船体结构、舾装设备、机电设备等各项固定重力。

② 变动重力——即航行装载重力,包括货物、燃油、淡水、粮食、旅客、压载等各项可变重力,需根据具体航行运输任务而定。

这样划分,便于对各类工况计算,避免不必要的重复,是一种行之有效的计算措施。

(2) 按分布情况分。

① 总体性重力——即沿船体梁全长分布的重力,通常包括主体结构、油漆、索具等各项整体性重力。

② 局部性重力——即沿船长某一区段分布的重力,通常包括货物、燃油、淡水、粮食、机电设备、舾装设备等各项重力。

在实际重力分布曲线绘制过程中,首先应确定计算状态,也就是确定变动重力,再按总体性重力和局部性重力分别计算各理论站的重力分布,最后合成总的重力分布曲线;并应使重力分布曲线所围的面积等于全船的重力,该面积形心的纵向坐标与船舶重心的纵向坐标相同。

1.1.2 局部性重力分布

1) 局部性重力的分配原则

对各项局部性重力进行处理,并分配到各理论站时,必须遵循静力等效原则,具体分配原则为:

(1) 重力大小应保持不变,即要保证分配到各理论站的总重力应等于实际重力;

(2) 重力重心的纵向坐标应保持不变,即必须保证分配到各理论站的各项分布重力合成的整体重心纵向坐标与该项重力的重心纵向坐标相等;

(3) 分配到理论站的范围应与该项重力的实际分布范围相同或大致相同。

2) 局部性重力的分配方法

(1) 分布在 2 个理论站距内的重力。如图 1-3 所示,某项以任意规律分布在两个理论站距内的重力为 P ,重心距 i 站的距离为 a 。按上述分布原则(3),用 $(i-1) \sim i$ 及 $i \sim (i+1)$ 两个

理论站距内的阶梯形曲线代替真实重力分布。设两个理论站距内的重力分别为 P_1 和 P_2 ，根据分配原则(1)和(2)可得：

$$\left. \begin{aligned} P_1 + P_2 &= P \\ \frac{1}{2}(P_1 - P_2)\Delta L &= P \cdot a \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

由此可得：

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P \left(0.5 + \frac{a}{\Delta L} \right) \\ P_2 &= P \left(0.5 - \frac{a}{\Delta L} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

将 P_1 和 P_2 除以理论站距长度 ΔL ，即可得到该项重力在这两个理论站距内的分布重力。

(2) 分布在 3 个理论站距内的重力。根据静力等效原则，此时只能列出两个方程式，所以通常采用如图 1-4 所示的假定分布规律进行计算。步骤如下：

第 1 步，以 $1.5\Delta L$ 代替 ΔL ，求出 P_1 和 P_2 ；

第 2 步，将 P_1 和 P_2 分别向其相邻的两个理论站距内分布；

第 3 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力分别除以 ΔL ，便得到相应理论站距内的分布重力。

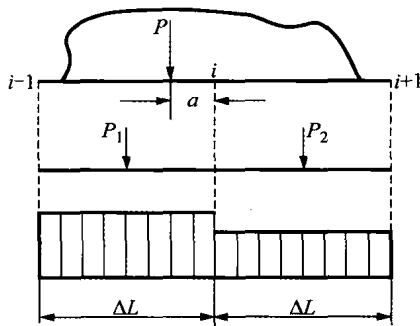


图 1-3 分布在两个理论站距内的重力

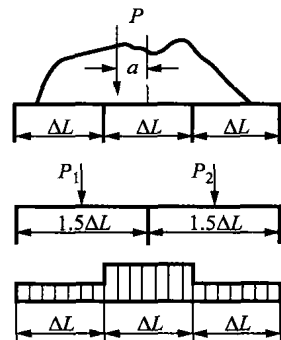


图 1-4 分布在 3 个理论站距内的重力

(3) 艏、艉理论站外的重力。有些船舶在艏、艉理论站之外有相当长的延伸部分，例如艉突出体或球鼻艏，其重力可能超过空船重力的 1%，且突出部分超过理论站距一半之多。对于这一类重力，应按如图 1-5 所示的方法进行分布。把艏、艉理论站之外的重力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力大小及其对船舫的力矩大小，即不致引起船舫弯矩的变化。根据条件：

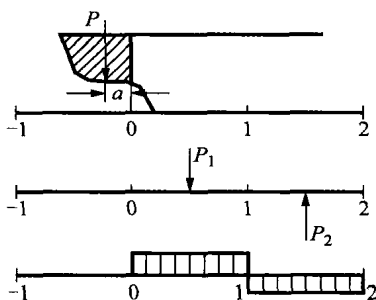


图 1-5 艉理论站外的重力

把艏、艉理论站之外的重力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力大小及其对船舫的力矩大小，即不致引起船舫弯矩的变化。根据条件：

$$\left. \begin{aligned} P_1 - P_2 &= P \\ P \cdot a &= \left(\frac{3}{2}P_2 - \frac{1}{2}P_1 \right) \Delta L \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

由此可得：

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= P \left(\frac{1}{2} + \frac{a}{\Delta L} \right) \\ P_1 &= P \left(\frac{3}{2} + \frac{a}{\Delta L} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中: a ——突出部分重心距端点站的距离, m。

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

桅杆、绞车及横舱壁等集中重力, 亦应在相应的站距内分布。如果该项重力不超过全船重力的 1%, 则可认为其均匀分布在相应理论站距内。

1.1.3 总体性重力分布

确定船体结构重力分布是绘制重力曲线的主要内容之一, 此项工作常常在详细设计完成之前就需要完成。确定船体结构重力分布只需确定全船总重力和重心纵向坐标。

1) 梯形法

一些船舶往往往艏部丰满、两端尖瘦, 且艏部具有平行中体, 所以可以将船体和舾装重力近似地用图 1-6 所示曲线表示, 即平行中体部分用均匀的重力分布, 而两端部分用两个梯形分布, 3 部分的长度均为船长的 1/3。

根据分布曲线所围的面积等于船体结构及舾装的总重力 W , 面积形心的纵坐标与实际重力重心的纵坐标一致的原则, 可求得梯形形状参数 a 、 b 、 c 之间的关系为:

$$\left. \begin{aligned} 4b + a + c &= 6 \\ a - c &= \frac{108}{7} \cdot \frac{x_g}{L} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中: x_g ——船体重心距船舳的距离(舳后为正), m;

L ——船长, m;

a ——艮部形状参数;

b ——舳部形状参数;

c ——艮部形状参数。

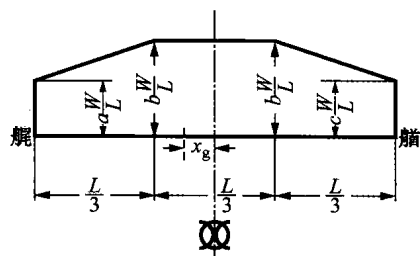


图 1-6 梯形法示意图

根据统计资料, 对瘦形船, $b=1.195$, 则:

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.61 + \frac{54}{7} \frac{x_g}{L} \\ c &= 0.61 - \frac{54}{7} \frac{x_g}{L} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

对肥形船, $b=1.174$, 则:

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.652 + \frac{54}{7} \frac{x_g}{L} \\ c &= 0.652 - \frac{54}{7} \frac{x_g}{L} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

2) 围长法

假设船体结构单位长度的重力与该横剖面围长(包括甲板)成比例。这种方法适用于船舶主体结构重力的分布。设距尾垂线 x 剖面处船体结构的单位长度的重力为 $w(x)$, 则重力分布曲线为:

$$w(x) = \frac{W_h \cdot l(x)}{A} \quad (\text{kN/m}) \quad (1-8)$$

式中: W_h ——船舶主体结构的总重力, 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, m^2 。

1.2 静水浮力曲线

船舶在某一计算状态下, 描述浮力沿船长分布状况的曲线称为静水浮力曲线。浮力曲线的纵坐标表示作用在船体梁上单位长度的浮力值, 其与横坐标轴所围的面积等于作用在船体上的浮力, 该面积的形心纵向坐标即为浮心的纵向位置。浮力曲线通常可根据邦戎曲线求得, 图 1-7 表示某计算状态下水线为 $W-L$ 时根据邦戎曲线来绘制浮力曲线。为此, 首先应进行静水平衡浮态计算, 以确定船舶在静水中的艏、艉吃水。

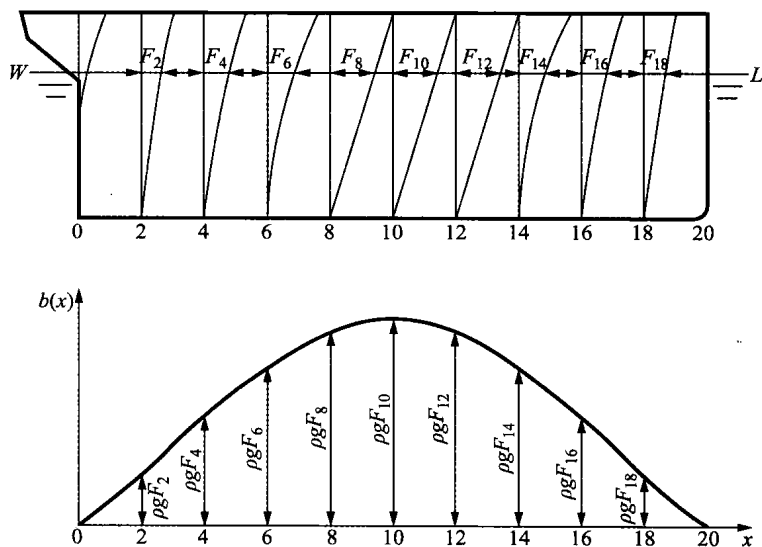


图 1-7 邦戎曲线确定浮力曲线

进行静水平衡浮态计算时, 可应用逐步近似法, 且应具有邦戎曲线、静水力曲线及船舶的重力、重心等资料。

1.2.1 浮态第 1 次近似计算

首先根据给定计算状态的船舶总重力 W , 从静水力曲线图上查得如下数据: 平均吃水 d_m , m; 浮心距船舳的距离 x_b (舳前为正), m; 纵稳心半径 R , m; 水线面面积 A , m^2 ; 漂心距船舳的距离 x_l (舳前为正), m。

若浮心与重心的纵向坐标之差不超过船长的 $0.05\% \sim 0.1\%$, 则可以认为船舶已处于平衡状态, 否则需进行纵倾调整。

设船舶纵倾角为 φ (艏下沉为正), 由于实船的 R 远大于 \overline{KC} , 故可近似取 $R - \overline{KC} \approx R$, 因而有 $\tan \varphi \approx \varphi \approx \frac{x_g - x_b}{R}$, 如图 1-8 所示。

根据图 1-8, 利用上述查得的有关参数便可确定船舶纵倾后的第 1 次近似艏、艉吃水:

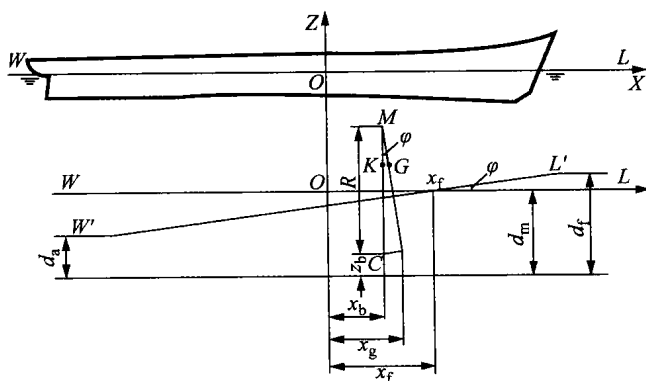


图 1-8 静水平衡计算

$$\left. \begin{aligned} d_{f1} &= d_m + \left(\frac{L}{2} - x_f\right) \frac{x_g - x_b}{R} \\ d_{a1} &= d_m - \left(\frac{L}{2} + x_f\right) \frac{x_g - x_b}{R} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

艏、艉吃水确定后,利用邦戎曲线求出对应于该吃水的浮力分布,同时计算出总浮力 B_1 及浮心纵向坐标 x_{b1} 。若求得的这两个数值不满足精度要求,则应做第 2 次近似计算。

1.2.2 浮态第 2 次近似计算

第 2 次近似计算可按式确定新的艏、艉吃水:

$$\left. \begin{aligned} d_{f2} &= d_{f1} + \frac{W - B_1}{\rho g A} + \left(\frac{L}{2} - x_f\right) \frac{x_g - x_{b1}}{R} \\ d_{a2} &= d_{a1} + \frac{W - B_1}{\rho g A} - \left(\frac{L}{2} + x_f\right) \frac{x_g - x_{b1}}{R} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中: ρ ——海水密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

A ——水线面面积, m^2 。

上式的意义在于对第 1 次近似计算得到的船舶浮态作进一步的修正,式中的第 2 项表示为消除浮力与重力的不等,船舶将上浮或下沉的值;式中的第 3 项,表示由于浮心和重心的纵向位置不一致,船舶将产生纵倾。利用式(1-10)可进行第 3 次或更高次近似计算,直到满足下述要求,即:

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{W - B_i}{W} \right| &\leq (0.1 \sim 0.5)\% \\ \left| \frac{x_g - x_{bi}}{L} \right| &\leq (0.05 \sim 0.1)\% \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

式中: B_i ——最后一次近似计算的总浮力值, kN ;

x_{bi} ——最后一次近似计算的浮心纵坐标, m 。

1.2.3 浮力曲线计算

在手工计算时,静水平衡计算可在用邦戎曲线上利用内插法进行,当静水平衡计算完成