

海军级重点教材

舰艇强度

朱锡 吴梵 编著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

舰艇强度

朱锡 吴梵 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

舰艇强度 / 朱锡, 吴梵编著. —北京: 国防工业出版社, 2005.3

ISBN 7-118-03797-4

I. 舰... II. ①朱...②吴... III. 船体强度
IV. U661.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 007910 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 23¼ 538 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 31.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

序

舰艇强度,包括水面舰艇强度和潜艇强度,通常是指舰艇结构的静力强度,是舰艇诸多性能中最重要的几项基本性能之一。水面舰艇总纵强度不足,舰体会在风浪中折断;潜艇强度不足,艇体会在深水压力作用下崩坍,这都将带来灾难性后果。因此,舰艇强度不足,舰艇自身难保,遑论作战?!

舰艇强度是在舰艇设计阶段赋予的,在舰艇建造阶段生成的。在舰艇设计阶段,工程师根据舰艇的使命、任务,活动的海域和舰艇的主尺度、排水量、总布置,对所设计舰艇的总体和局部进行分析,选择适当的材料和合理的结构形式,确定构件必需的、最小的尺寸,进行结构设计。在舰艇建造阶段,经过严格的建造工艺和质量控制,建造成舰艇。舰艇从此具有为完成其使命、任务所必需的结构强度。可以说,舰艇强度是“先天”赋予的,一旦形成,便难以改变。因此,工程师对舰艇结构设计必须非常慎重地进行分析、计算和抉择。

《舰艇强度》是一门学科。它的任务是研究舰艇可能遭受的载荷,舰艇结构的应力、变形和稳定性的计算理论和方法,舰艇结构的强度标准以及舰艇结构的承载能力。其研究的目的是为舰艇结构设计提供理论和计算方法,以保证在材料消耗最少的情况下,舰艇结构具有足够的强度、刚度和稳定性,满足舰艇服役期间对舰体结构的使用性能和寿命的要求。

1912年—1914年,俄罗斯学者 И.Г.布勃诺夫出版专著《舰艇结构力学》I、II卷,为舰艇结构力学学科奠定了基础。这一学科的内容有两部分:①基础理论,包括弹性理论、塑性理论、杆系结构力学、板壳理论和结构稳定性理论;②专门问题,包括水面舰艇结构力学、潜艇结构力学和舰艇结构动力学(振动、冲击)。“专门问题”是应用舰艇结构力学的基础理论研究水面舰艇和潜艇的总体及其局部结构的强度、刚度和稳定性的计算理论和计算方法。舰艇结构力学学科的建立,使舰艇结构设计由经验设计走上基于力学理论进行分析、计算的合理设计的道路。

舰艇结构力学学科建立后,在20世纪上半叶取得迅速发展。苏联/俄罗斯高等学校的造船专业都开设“船舶结构力学”、“舰船强度”和“舰船振动”等系列课程作为该专业的主干课程,并且出版了多种这方面的专著和教材。我国高等学校开设“舰船结构力学”系列课程始于1951年大连海军学校(海军工程大学的前身)舰船工程系。为开设这一系列课程,该校翻译出版了《舰船结构力学》教材5卷,包括杆系结构力学、薄板理论和结构稳定性理论、水面舰艇结构力学、潜艇结构力学、舰船振动学。此后几年,国内其他高等学校的船舶设计制造专业也相继开设了这方面的课程。20世纪下半叶,国内出版过多种翻译的和国内学者编写的《船舶结构力学》、《水面舰船强度》和《潜艇强度》等教材。

时至今日——21世纪之初,审视“舰艇强度”教材的现状,我们发现“舰艇强度”教材正处于青黄不接的状态。有的水面舰船强度和潜艇强度教材出版至今已20多年,在造船

科学技术迅速发展的今天,这些教材显得陈旧了,已不能适应当前开展舰艇强度课程教学和指导舰艇结构设计的需要,必须要有新的教材来接替。

朱锡博士和吴梵博士从事舰艇强度的教学和研究工作多年。他们总结自己的教学和研究工作的经验,参考前人的有关著作和大量文献资料,以现行的《舰船通用规范》、《水面舰艇结构设计计算方法》和《潜艇结构设计计算方法》为指导,合作编写《舰艇强度》一书,较全面、系统地论述我国现行的水面舰艇和潜艇结构强度的理论和计算方法,以之作为舰船工程专业的“舰艇强度”课程的教材。在 21 世纪之初,编写这样一本教材,是适时的、必要的,对于高等学校舰艇工程专业组织实施舰艇强度课程的教学是大有裨益的,对于舰艇设计单位从事结构设计的专业人员,也是很有参考价值的。我乐观其成,爰为之序。

郭日修

前 言

本书为海军高等院校重点教材。本书是以舰船工程专业《舰艇强度课程教学大纲》为依据编写的。随着我国海军现代化建设的不断发展,舰艇(包括水面舰艇和潜艇)的设计与建造已成为我国海军和船舶工业的主要任务之一,因此本书不仅可作为海军工程技术院校舰船工程专业的教材,同时也可作为普通高等学校船舶与海洋工程专业的教材或参考书。本书内容适合于舰船工程专业本科生 50 学时~80 学时的教学需要,并适合于从事舰船工程领域工作的相关科技人员自学或参考的需要。

本书在编写过程中,作者力求突出以下几个方面:

① 力求保证全书内容的系统性和完整性。根据舰船工程专业教学改革“宽口径”的要求,《舰艇强度》的教学内容包含水面舰艇强度和潜艇强度两大部分,为此本书第 1 篇为水面舰艇强度,第 2 篇为潜艇强度。

② 力求反映舰艇强度设计计算的最新研究成果和方法。为了使学员或自学者通过本书的学习,能尽快掌握水面舰艇强度和潜艇强度的设计计算方法,本书突出了与最新的舰船规范所规定的舰艇强度设计要求相一致。

③ 为了便于教学,本书还配有较为详细的思考题和习题。

本书第 1 篇水面舰艇强度,共 6 章(第 1 章~第 6 章)由朱锡教授编著,主要参考了王杰德、杨永谦教授编著的《船体强度与结构设计》(国防工业出版社 1995 年 4 月第 1 版)和 GJB4000—2000《舰船通用规范》。第 2 篇潜艇强度,共 7 章(第 7 章~第 13 章)和 1 个附录(附录 A),由吴梵副教授编著,主要以许辑平教授等编著的《潜艇强度》(国防工业出版社 1980 年 12 月第 1 版)为基础,由于该书是国内潜艇强度方面的经典教材,承许辑平教授同意,将书中至今仍然适用的部分保留,根据 GJB4000—2000《舰船通用规范》和 GJB/z21—2001《潜艇结构设计计算方法》对有关章节做了较大修改,并新增锥—柱结合部结构、导弹舱结构和非耐压船体结构的强度计算方法等内容。

本书编著过程中,得到了郭日修教授、冯文山教授、熊鹰教授的大力支持和帮助,有关资料得到了骆东平教授的大力支持和帮助。本书由海军工程大学郭日修教授主审,并提出了许多宝贵意见。朱红英同志承担了全书的打字和绘图工作,袁建红同志参加了第 1 篇的绘图及校对工作,陈昕同志和黄晓明同志参加了第 2 篇的绘图及校对工作。对此一并表示诚挚的感谢。

由于编著者知识结构和水平有限,本书在内容上或编排上肯定会有很多不足之处,希望广大读者批评指正。

编著者

目 录

绪论	1
第 1 篇 水面舰艇强度	
第 1 章 船体总纵强度校核计算方法	6
1.1 船体总纵强度概述	6
1.2 船体总纵强度外力计算方法概述	7
1.3 船体总纵强度内力计算方法概述	13
1.4 船体强度标准	18
习题	22
第 2 章 船体局部强度校核计算方法	23
2.1 船体局部强度外力确定	23
2.2 船体局部强度内力计算方法	34
2.3 船体局部强度校核衡准	53
习题	55
第 3 章 船体总纵强度外力计算	58
3.1 重力分布曲线	58
3.2 静水浮力曲线	63
3.3 载荷曲线、静水剪力、弯矩曲线	65
3.4 静置波浪附加剪力和弯矩计算	67
3.5 剪力和弯矩计算步骤	73
习题	79
第 4 章 船体总纵弯曲内力计算	81
4.1 船体总纵弯曲应力第 1 次近似计算	81
4.2 船体梁构件稳定性检验及失稳折减	83
4.3 船体总纵弯曲应力第 2 次及更高次计算	91
4.4 总纵强度问题中的应力合成	93
4.5 船体总纵弯曲剪应力计算	96
4.6 船体挠度计算	98
4.7 船体极限弯矩计算	100
习题	102
第 5 章 船体结构强度计算中的有限元方法	106
5.1 结构有限元分析的基本知识	106

5.2 船体结构局部强度计算的有限元模型	117
习题	126
第6章 滑行艇强度计算方法	127
6.1 滑行艇总纵弯曲的外力计算	127
6.2 滑行艇艇体总纵强度计算	139
6.3 滑行艇艇体局部强度计算	142
习题	148

第2篇 潜艇强度

第7章 作用在潜艇耐压艇体上的外力	150
7.1 潜艇艇体的受力	150
7.2 耐压艇体计算载荷的确定	153
习题	156
第8章 耐压船体强度计算方法	157
8.1 概述	157
8.2 圆柱壳的弯曲微分方程及其通解	158
8.3 一般环肋圆柱壳的应力计算	162
8.4 带有中间支骨的圆柱形耐压船体结构应力计算	171
8.5 圆锥形耐压船体结构应力计算	176
8.6 锥—柱结合型耐压船体结构应力计算	178
习题	183
第9章 耐压船体的稳定性计算	187
9.1 概述	187
9.2 一般环肋圆柱壳在舱段内的总稳定性公式	189
9.3 耐压圆柱壳的各类稳定性公式及其简化	190
9.4 圆锥壳的各类稳定性公式	197
9.5 环肋锥—柱结合壳的稳定性概述	207
9.6 耐压壳理论临界压力的修正	212
习题	219
第10章 其他耐压船体结构强度和稳定性计算方法	222
10.1 椭圆形耐压指挥室强度和稳定性计算	222
10.2 耐压液舱的强度和稳定性计算	231
习题	258
第11章 潜艇舱壁的强度和稳定性计算	262
11.1 潜艇舱壁的作用与分类	262
11.2 平面舱壁的计算	262
11.3 旋转壳的有限元法	280
11.4 内部球面舱壁的应力计算	296
11.5 端部球面舱壁的应力计算	300

11.6 球面舱壁的稳定性	303
习题	307
第 12 章 潜艇结构开孔加强计算	308
12.1 平板上开孔的强度计算	308
12.2 环肋圆柱壳上开孔加强计算	309
12.3 导弹舱开口加强计算	320
12.4 其他部分的开口加强计算	321
习题	324
第 13 章 非耐压船体结构强度计算方法	325
13.1 概述	325
13.2 典型基本结构的强度和稳定性计算	326
13.3 艏端结构计算	334
13.4 艉端结构计算	336
13.5 舷间非耐压液舱结构计算	337
13.6 上层建筑结构计算	340
13.7 指挥室围壳结构计算	351
13.8 内部液舱结构计算	353
13.9 内部平台结构计算	353
习题	355
附录 A 计及带板型材剖面的相当剪切面积和弹塑性剖面模数计算方法	358
A.1 计及带板型材剖面的相当剪切面积	358
A.2 塑性剖面模数	358
A.3 计及带板型材的弹塑性剖面模数	360

绪 论

一、舰艇强度的主要任务与作用

舰艇强度就其字面含意是指舰艇船体结构在各种外载荷作用下不发生超过允许限度的变形或破坏的能力,是舰艇船体结构的固有特性。为了使舰艇在各种正常载荷作用下能安全使用,在较大偶然载荷作用下仍能保持舰艇船体结构的完整性,舰艇船体结构必须具有足够的强度。

舰艇强度作为一门学科,它是舰艇船体结构强度科学的简称,是研究和确定舰艇船体结构强度的方法体系。其主要任务是建立舰艇船体结构强度的理论预报方法,并在舰艇建造前对船体结构进行强度计算和评价,从而作为船体结构设计的重要依据。

那么,为什么要研究船体结构强度呢?我们知道舰艇船体结构是舰艇的基础,并为舰艇上各种武器装备、机械设备和人员提供装载平台和生活工作场所;另一方面舰艇在服役期间,船体结构会受到各种外力的作用,如设备、人员、油水以及结构自身的重力,船体排开外水的浮力,波浪冲击力,舰艇运动所产生的惯性力,以及碰撞、触礁、搁浅和爆炸冲击等偶然作用力等,在这些外力作用下,船体结构会产生多大的变形,是否会产生塑性变形或断裂破坏,这对于造船工程师来说是必须给予回答的问题,否则舰艇下水或服役期间就可能产生船毁人亡的事故。大量海损事故的发生,促使造船工程师们对船体强度的计算方法进行深入和全面的研究,并逐步形成了目前较为通用的船体结构强度科学。

研究船体强度除了保证舰艇安全,防止海损事故的发生以外,另一个重要作用是为设计出重量轻、经济性好的船体结构提供设计计算方法。舰船作为运载平台,其装载能力是其重要性能之一,如果舰艇船体结构尺寸过大,造成结构自身重量过大,无法装载必需的武器装备和机械设备,即使船体结构强度再好,也不能满足舰艇总体性能的要求。

综上所述,舰艇船体结构强度科学的主要作用是:为设计出既能保证结构强度,又具有重量轻、经济性好的船体结构提供设计计算方法。

二、舰艇强度的主要研究内容及其研究方法

舰艇强度研究的内容可从以下3个不同角度加以分解,一是从研究的主体可归纳为水面舰艇强度和潜艇强度。水面舰艇强度和潜艇强度在设计载荷(所承受的外力)和内力计算方法方面存在较大差异,如水面舰艇所受外力主要以弯曲载荷为主,并由重力、浮力和波浪冲击力大小确定,而潜艇所受外力主要以深水静水压力为主;水面舰艇船体结构应力计算主要采用结构力学的梁和板的弯曲理论为主,潜艇艇体结构应力计算主要采用板壳理论。因而水面舰艇强度和潜艇强度是舰艇强度所研究的两个不同方面。

舰艇强度的研究内容又可归纳为舰艇船体结构整体强度(或总体强度)和局部强度。以水面舰艇船体结构强度为例,对大量的海损事故的分析统计表明,船体结构在波浪中整

体弯曲(总纵弯曲、横向弯曲)或扭转破坏是舰艇结构整体破坏的主要形式,为此皮兹克(Pietzker)、埃特伍德(Attwood)等提出了船体梁的概念,主要是便于船体结构总纵弯曲的研究。船体梁又称等值梁,它是由所有参与总纵弯曲的纵向连续构件组成,船体梁不仅阐明了甲板、船底和舷侧在总纵弯曲中的作用和应力水平,而且将不参与纵向弯曲的横向骨架和横舱壁分离出来,简化了计算。与此类似,船体结构横向弯曲通常研究由甲板横梁,舷侧肋骨和底部肋板组成的横向框架结构的弯曲或研究以横舱壁为腹板结构,以甲板和底部为翼板的横向单元组合结构的弯曲问题。船体结构整体扭转强度的研究是将船体结构简化为等值薄壁梁的自由扭转或约束扭转问题。对舰艇而言,由于其船体较为细长,加上横向舱壁较多(由生命力抗沉性要求),因此,舰艇船体结构的整体强度以总纵弯曲强度为主,而横向强度和扭转强度大多不予考虑。

舰艇船体结构的另一主要破坏形式为局部结构破坏,它是由局部载荷引起的局部结构响应和变形造成的,归于局部强度问题。水面舰艇结构局部强度主要包括:甲板结构强度、舷侧结构强度、船底结构强度、舱壁结构强度、桅杆结构强度、尾轴架结构强度等。局部强度主要特点是仅考虑局部结构对载荷的响应,其应力不考虑与总强度问题的应力叠加。局部强度又分为板的强度、纵骨(骨架梁)强度和板架强度。

事实上,无论是水面舰艇强度,还是潜艇强度,或是整体强度与局部强度,除了由于研究对象的不同,而在研究方法上有所区别以外,其具体的研究步骤基本上是一致,即首先要确定被研究结构的受力,只有载荷明确,才能进一步研究结构的变形和应力。其次是计算结构的变形和应力,研究在确定的外载荷情况下的结构响应。最后是要解决如何判断结构在该外载荷作用下是否安全的问题,给出强度衡量参数及相应的强度衡准或阈值。从该意义上说,舰艇强度的研究内容可分解为3大问题,即外力问题、内力问题和强度标准(衡准)问题。

外力问题主要研究结构的受力状况及其确定方法。舰艇所受外力主要有重力、浮力、静水压力、波浪冲击力、砰击力,根据不同研究结构及其强度要求,其外力选取种类也不同。例如,水面舰艇船体结构总纵强度主要考虑由于舰艇重力与浮力沿纵向分布不同所形成的垂向分布载荷,该载荷形成对船体的总纵弯曲力矩和垂向剪切力,从而使船体结构产生纵向弯曲变形。潜艇耐压壳体强度则主要考虑深潜状态的静外水压力,而分布载荷产生的总纵弯矩是次要的。目前水面舰艇在波浪中的总纵弯曲力矩的计算最为复杂,并有多种计算分析方法,如静置波浪理论、动置波浪理论和随机波浪载荷理论等。静置波浪理论是在假设波速与船速相同的基础上,由重力和浮力分布经理论计算确定船体结构所受的载荷、剪力和弯矩。动置波浪理论考虑了船体在波浪上摇荡运动因素和水的动压力作用,并以“切片法”为理论基础,计算规则波浪上船体的波浪弯矩。该方法计算十分复杂,现规范采用经验修正公式为主。随机波浪载荷是通过研究不规则波浪船体弯曲力矩的分布特征,来确定弯曲力矩超过某特征值 M_1 的概率。

内力计算目前主要有3种方法,一是经典的理论计算方法,它以结构力学和弹性力学为基础,通过对舰艇船体结构进行力学建模来计算。如水面舰艇总纵强度力学模型为变断面等值梁(船体梁),计算方法为考虑失稳和局部弯曲应力修正的薄壁梁的弯曲理论;潜艇耐压壳体强度力学模型为带肋圆柱壳,计算方法为薄壳理论;而局部强度力学模型多为板、梁和板架,计算方法为结构力学的梁和板的弯曲理论。

内力计算的另一种方法为数值计算,一般为有限元法,也有半解释的其他数值计算方法,如样条元法、有限差分法等。在实际工程中,结构强度的内力计算已越来越多地采用有限元法进行,这主要受益于计算机的快速发展和有限元商用构件的开发。较为有代表性的成熟的结构分析软件有:Sap 系列软件(包括 Sap-5、Sap-80、SuperSap 等)、Ansys 软件和 MSC 系列软件(包括:Patran、Nastran、Dytran 等)。采用有限元法进行船体结构强度计算的优越性是可以进行更为复杂的,甚至是整船的结构应力计算分析,并可模拟真实载荷,考虑结构的弯、剪、扭综合受力及其应力叠加,可同时计算结构总体应力和局部应力。有限元法的局限性在于其计算精度和准确性依赖于软件的正确性和结构单元划分的粗细程度以及计算中的参数选取等。

内力计算的第 3 种方法是概率分析方法,通过研究结构的尺寸分布函数和材料强度分布函数,以及建造质量的随机性,来确定结构的可靠性和失效概率。

强度标准问题的研究主要是通过对外载荷种类、内力计算的精度以及建造质量的可靠程度的研究,结合实船实验测试结果和海损事故分析等经验,选取和制定合理的强度衡量参数和阈值。根据结构强度衡量参数的不同,强度标准分为危险应力法、许用应力法、极限弯矩法和失效概率法等。

三、舰艇强度的研究与发展历史

1. 水面舰艇

舰艇总纵强度是水面舰艇强度研究与发展过程的主线。早在 18 世纪中叶,欧拉在“横摇和纵摇时舰艇各部分承受的外力”一文中研究了作用于舰艇各部分的外力,并指出舰艇弯曲是这些力引起的主要变形。就是说船体应该作为一根梁来研究它的弯曲变形。但是应用梁的弯曲理论来研究船体总强度的具体计算方法,经过了大约一百年后,到 19 世纪中叶才逐步发展起来,成为船体静置在波浪上的总纵强度计算的标准方法。这种标准总纵强度计算方法就是现在应用的总纵弯曲应力的第 1 次近似算法。符合标准状态计算的船体强度,可相互直接进行比较。

1874 年 10 月内河船“Mary”号在横渡大西洋时折断沉没。1877 年威廉·约翰(W. John)对这艘船进行了强度计算和分析。照通常方法计算,该船舷边角铁的最大应力是 138.4N/mm^2 ,船底板是 101.5N/mm^2 。然而当时的一些大船,也达到了这样的应力范围,那为什么这条船会破裂呢?于是他第 1 次提出了对标准纵强度计算方法作修正的见解。考虑到甲板板受压发生皱折的影响,其有效的截面积应该进行折减,这和现在应用的纵弯曲应力第 2 次近似计算的方法基本上是一致的。

经过折减后计算所得的舷边角铁的应力达到 246.0N/mm^2 。可以认为船是由舷边角铁屈服后引起甲板破裂而折断沉没的。他还认为即使像“Mary”号这样薄的铁板船(甲板板厚约 5mm,外板 6mm,龙骨板和舷边甲板约 8mm),只要它的甲板的受压稳定性能保证,也不致折断沉没。

这种考虑甲板受压皱折的有效面积折减方法,对船体强度计算是一个很大的发展。从理论上讲,船体强度的第 1 次近似计算,应用梁理论考虑了船体梁的主要变形特征,把空心薄壁结构的船体作为实心梁一样来计算,所以有“等值梁”的概念来适应这种理论。所谓等值梁就是把船体横剖面上各处的剖面积(如甲板、内外底板、纵桁、纵骨、船侧等的

剖面)集中放在横剖面上的中心线上的原高度处,这样就形成了复杂的近似于工字型材的剖面。但是船体是薄壁结构,受压板材可能会发生皱折,使得剖面强度减弱,剖面强度减弱又将使压应力增加,以致折减更多的面积,所以需要进行第2次及更多次的近似强度计算。

可是威廉·约翰的这个修正强度计算方法,并未得到足够重视。例如1905年拜尔斯(Biles)教授在关于“狼”号试验结果的分析报告中,没有利用因受压皱折的影响进行剖面折减的强度计算,只是用的所谓标准强度计算方法。他把实测结果与计算结果的差异归之于铆接接头的滑移影响。将船体结构的弹性模量 E_s 和构成结构的材料的弹性模量 E 取得不同。得出 $E_s \approx 0.7E$ 后,则从计算弯矩进行各式积分所得的挠度和实测的挠度大约相符。按计算弯矩,根据公式

$$\sigma = \frac{M}{I} Z$$

求得的各点应力,与从实际测量的应变 e 根据公式

$$\sigma = E_s e$$

所得的应力很相近。

И.Г. 布勃诺夫在威廉·约翰的基础上,进一步完善了总强度的第2次近似计算方法,也就成为现今所应用的标准方法。该方法不仅适用于纵骨架式船体的强度计算,也适用于横骨架式的船体强度计算。

A.H. 克雷洛夫在1896年发表的“船舶在波浪上纵摇新理论及由此运动产生的应力”及在1898年发表的“航行中船体所受的应力”文中,第1次提出船舶在波浪中摇荡运动和船体的弯矩、剪力计算方法。根据这一方法所进行的计算,得出作用于船体上的弯矩比用静置在波浪上的方法所得的弯矩小很多,这可归之于摇荡时附加质量的影响,减小了作用于船体上的附加力。

船体航行于斜浪中或装载不对称引起船体的扭转。G. 威德勒(G. Vedeler)在1924年发表的“关于船体扭转”论文中提出了计算方法。只是近若干年来出现了甲板上有长大舱口的矿石船和集装箱船等,计算扭转强度才成为必要。

近年来概率方法成为研究工程问题的有力工具。而作用于船体的荷重,特别是波浪荷重有很大的随机性。很明显应该用概率方法来研究船体强度问题。

1953年 St. 丹尼斯(Denis)和 W.J. 皮尔逊(Pierson)在“紊乱的波浪中船体的运动”一文中假定了不规则波浪是由无数的频率连续变化的正弦成分波浪组成。1954年由 E.V. 刘易士(Lewis)进行了船体模型试验。结果表明将波谱理论用于不规则波上的船体强度计算是切实可行的。

1955年柯尔文-克洛可夫斯基(Korvin-Kroukovsky)提出了切片理论,并应用于船舶摇荡计算。1958年贾可布斯(Jacobs)使用这个理论计算船体的波浪弯矩。

概率方法现已广泛地用于船体强度问题的研究,除了波浪弯矩外,诸如船底砰击、甲板上浪、艏外飘砰击、结构破坏性分析以及结构设计等问题,使船体强度问题得到进一步发展,理论与实际更能密切地结合。

2. 潜艇

潜艇耐压艇体的传统结构形式是环肋圆柱壳,两端为球壳,在直径不同的圆柱壳间以

环肋圆锥壳过渡。耐压艇体内部以舱壁分隔成若干舱段。从结构力学的观点来看,潜艇壳体是一个中空的变截面梁。这种梁与水面舰艇船体的不同之处在于不仅应当有充分的总纵强度,以平衡沿其长度分布的重力和浮力,还应当有充分的总横向强度,以承受潜艇在最大潜深处巨大的静水压力。

潜艇耐压艇体在深水静压力作用下,有多种可能的破坏模式,即耐压艇体壳板可能因应力过大而对称屈服、肋骨间壳板失稳、整个舱段失稳、在刚性构件和结合壳部位断裂、在框架肋骨或舱壁处断裂等。由于潜艇耐压艇体结构的工作条件和破坏形式不同于水面舰艇船体结构,因此其强度计算要求采用完全不同于水面舰艇结构力学中已被充分证明了的方式和方法。

对于潜艇强度的研究,历来是围绕这些基本结构形式展开的。

壳体理论早在 19 世纪中叶就已经建立,弗留盖(W. Flügge)在他的专著《壳体中的应力》一书中对此有详细论述。关于壳体的稳定性,M. 列维(Levy)在 1884 年导出了均匀外压力作用下圆环的稳定性公式,对无支撑柱体弹性失稳,冯·密西斯(Von Mises)给出了最好的解释,温登伯格(Windenbug)求出了最小失稳压力的近似公式。

但是,真正意义上的潜艇是在第一次世界大战以后才逐渐研制成功并得到大量建造的,“潜艇强度”作为一门专门的学科在 20 世纪 20 年代至 50 年代得到最大发展。1948 年,苏联西曼斯基(Ю. А. ШИМАНСКИЙ)院士出版了专著《潜艇结构力学》,该书系统讲述了潜艇耐压艇体的强度计算方法。

潜艇耐压艇体强度计算的方式和方法,除本身的纯理论根据,即解一般结构力学领域的新问题以外,还要求对这些问题进行实验检查,目的在于确定理论公式的可靠程度和在公式中引用相应的实际系数以及确定设计压力和容许应力的合适标准。英国海军“舰艇结构研究所”以坎德内克(S. kandrick)为首的一批专家,从 20 世纪 50 年代开始,对耐压艇体结构的行为,进行了深入的理论探讨和试验研究,积累了大量的试验资料。

随着各种新材料在潜艇结构中应用和有限元方法等新方法的出现,“潜艇强度”这门学科一直在不断发展和完善。

第 1 篇 水面舰艇强度

第 1 章 船体总纵强度校核计算方法

1.1 船体总纵强度概述

将船舶静置在波浪上,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,这是迄今为止船体总纵强度计算中的主要方法。所谓将船静置在波浪上,就是假想船舶以波速在波浪的前进方向上航行,此时船体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。船体梁在这个载荷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。

作用在船体断面上的弯矩通常写成下列形式:

$$M = M_s + M_\omega \quad (1-1)$$

式中 M ——船舶静置在波浪上的总纵弯矩;

M_s ——船舶在静水中的弯矩,在既定船型时,只与重力及其船长的分布有关;

M_ω ——船舶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外形和波浪要素有关。

显然,总纵弯矩的大小与波浪要素和装载状态密切相关。由于选取波浪要素和装载状态的不同,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。

标准波浪的波形取为坦谷波,计算波长等于船长,波高则随船长而变化。计算总纵弯矩时按两种极端情况进行,一为波峰在船中,波谷在首尾,此时船中部浮力较大,首尾处浮力较小,船舶处于中拱状态;另一情况为波谷在船中,波峰在首尾,船中浮力较小,两端浮力较大,船舶处于中垂状态,如图 1-1 所示。《舰船通用规范》规定计算中不计及史密斯修正,取波长等于舰艇设计水线长,即 $\lambda = L$,计算波高按式(1-2)确定:

$$h = 1.75 + 3.94\left(\frac{L}{100}\right) - 0.30\left(\frac{L}{100}\right)^2 \quad (1-2)$$

式中 h ——计算波高(m);

L ——设计水线长(m)。

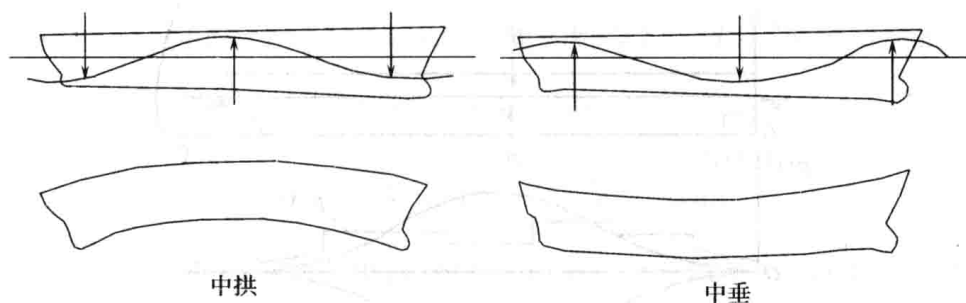


图 1-1 船体梁的弯曲状态

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,同时也要照顾到在实际上是可能的。

《舰船通用规范》规定排水型舰艇(除两栖作战舰艇)应按舰艇正常排水量进行计算,两栖作战舰艇应按正常排水量和超载排水量状态下进行计算,典型超载排水量计算之静水弯矩和剪力有较大变化时,还应计算该状态波浪弯矩和剪力。

从梁的弯曲理论可知,当船体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:

$$\sigma = \frac{M}{I} Z \quad (1-3)$$

式中 M ——计算断面上的弯矩;

I ——横断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,即

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \quad (1-4)$$

如果某新设计的船满足上述要求,则认为该船的总纵强度是足够的。

上述的计算方法,是对所有船进行强度计算的标准计算方法。换言之,所有船的强度是在同一个计算原理的基础上进行比较。而作为比较标准的许用应力,则是以大量安全航行的船体总纵弯曲应力计算、海损事故的纵强度分析以及实船测量所得的大量应力数据为基础,并按照安全要求制定出来的。许用应力值的选择与结构的应力计算方法有关,因此,用标准计算方法判断船体强度乃是一种比较强度,并不是船体的真正强度。这种方法的优点是简单、方便,其不足之处在于没有准确考虑表征船体强度诸因素的变动性和随机性。

1.2 船体总纵强度外力计算方法概述

1.2.1 静水弯矩计算

舰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力;重心和浮心在同一铅垂线上。取坐标原点在艏垂线处, X 轴沿船长方向,竖轴为 Z 轴,向上为正(见图 1-2)并假定船的单位长度的重力为 $w(x)$,船的重力为 W ,船长为

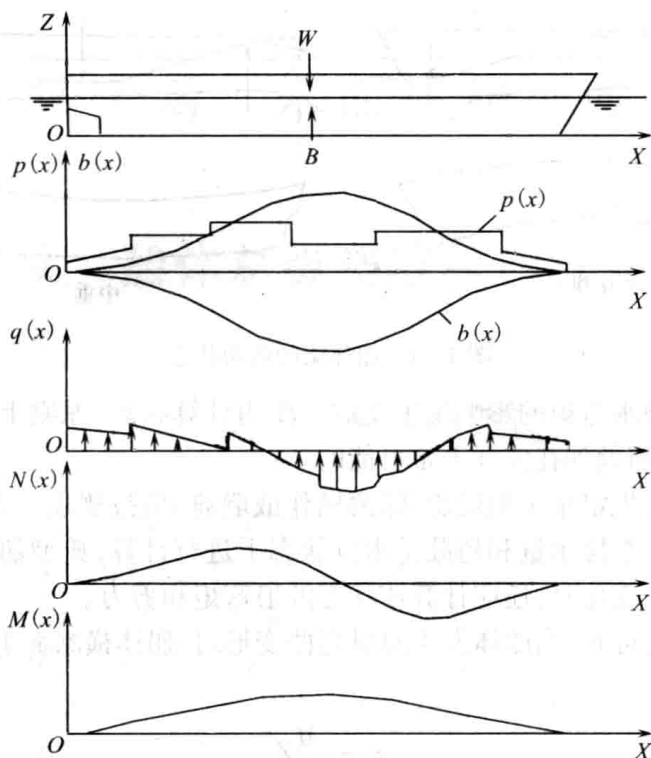


图 1-2 引起船体梁弯曲的外力

L , 则

$$W = \int_0^L w(x) dx \quad (1-5)$$

船舶重心纵向坐标

$$x_g = \frac{1}{W} \int_0^L xw(x) dx \quad (1-6)$$

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 , 则:

$$B = \int_0^L b_s(x) dx \quad (1-7)$$

浮心的纵向坐标

$$x_b = \frac{1}{B} \int_0^L xb_s(x) dx \quad (1-8)$$

根据平衡条件得

$$\int_0^L w(x) dx = \int_0^L b_s(x) dx \quad (1-9)$$

$$\int_0^L xw(x) dx = \int_0^L xb_s(x) dx \quad (1-10)$$

能满足式(1-9)和式(1-10)的 $w(x)$ 和 $b_s(x)$ 可能有许多种组合。一般情况下 $w(x)$ 和 $b_s(x)$ 的分布规律是不同的, 其差值 $q(x)$ 即为作用在船体梁上的载荷强度:

$$q(x) = w(x) - b_s(x) \quad (1-11)$$