

船舶系列丛书

# 船舶结构力学



CHUANBO  
JIEGOU LIXUE

吴梵 朱锡 梅志远 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 船舶结构力学

吴梵 朱锡 梅志远 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以船舶结构系统采用的单跨梁、连续梁、弹性基础梁、平面刚架、平板架、薄板、圆柱形薄壳等各种基本结构形式为讨论对象,首先介绍了船舶结构力学基本计算模型,然后系统详细地介绍了如何将复杂的船舶结构简化成力学计算模型。在此基础上,按照不同的结构形式,由简到繁,系统介绍了各种基本结构形式的力学特性、弯曲和稳定性问题的计算方法,使计算方法和分析、研究不同结构形式的力学特性结合起来。本书还对有限元法的基本原理、目前在舰船结构设计领域中广泛应用的大型通用有限元软件作了简要介绍。

本书可作为高等院校船舶与海洋工程专业及相关专业的教材或参考书,并可供从事船舶设计、制造领域工作的科技人员学习或参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

船舶结构力学 / 吴梵,朱锡,梅志远编著. —北京:  
国防工业出版社,2010.9

ISBN 978-7-118-07047-7

I. ①船... II. ①吴... ②朱... ③梅... III. ①船舶-  
结构力学 IV. ①U661.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 176958 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 100048)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 21 字数 479 千字

2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 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

1909年И. Г. 布勃诺夫在彼得堡工学院开设“船舶结构力学”课程,1912年、1914年,И. Г. 布勃诺夫的两卷本《船舶结构力学》相继出版,这标志着一门新学科——“船舶结构力学”诞生。从此,“船舶结构力学”成为俄罗斯高等学校船舶工程专业一门主要的专业理论课,至今已百年。

“船舶结构力学”传入我国也是从高等学校船舶工程专业开设“船舶结构力学”课程开始的。1951年大连海军学校(海军工程大学前身)组建造船工程系,这是国内第一个以军舰设计制造为专业的造船工程系。他们参考苏联相应学校造船系的教育计划,设置“船舶结构力学”课程,组建“船舶结构力学”教研室,聘请苏联专家来校指导开设这门新课。这是“船舶结构力学”在我国传播的开始。此后,军事工程学院、上海交通大学等校造船系也相继开设这门课。

作为我国高校使用的“船舶结构力学”教材,20世纪50年代初,使用的是苏联专家针对我国高校学制(四年制)编写的讲义;50年代后期,我国高校工科改为五年制,上海交通大学率先采用苏联的“船舶结构力学”教科书,翻译出版后,被国内高校广泛采用,1966年开始“文化大革命”,高校停课,“船舶结构力学”课停开;1977年高校恢复本科生教育,“船舶结构力学”重新开课。为满足教学需要,“全国造船专业教材委员会”组织国内高校协作编写了一套造船专业课教材,其中有1980年出版的《船舶结构力学》,被各高校造船专业广泛采用作为教科书至今。该书以“力法”、“位移法”、“能量法”、“矩阵法”、“平面问题的有限元法”、“板弯曲的有限元法”等结构力学各种计算方法作为主要内容和编写主线,依次展开论述,占书的主要篇幅。从多年来教学中使用该书的情况看,由于该书以计算方法为主要内容,使学习者认为:结构力学的基本理论就是“力法”、“位移法”等各种计算方法。《船舶结构力学》教科书给学生造成这样的认识是不是该课程所期望的?这是值得商榷的。这里有两个问题需要思考。

“什么是结构力学?”“结构力学”也称为“结构理论”,是分析、研究结构物的力学特性的学科。结构物的力学特性是:结构物在外力作用下,发生变形,产生应力,形成内力、内力矩以抵抗外力。这是结构物固有的特性,因此,人们也称它为“结构特性”(Structural Behavior)。人们学习结构力学的目的,是认识、掌握结构物的力学特性,在此基础上,能利用、发挥结构物的力学特性,创造性地构思、设计出满足使用要求的、合理的、力学特性优越的结构物。例如潜艇耐压艇体采用环肋圆柱壳,正是充分利用、发挥这种轴对称结构抵抗静水外压的优越的力学特性。

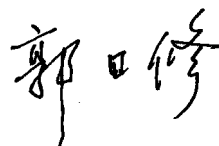
“计算方法在‘结构力学’中处于什么地位?”人们认识、掌握结构物的力学特性,是通过分析、计算结构物在外力作用下产生的变形和应力;力法、位移法、能量法等经典的计算

方法和近代发展起来的矩阵法、有限元法等,都是用来分析、计算结构物在外力作用下的变形和应力的方法,是“结构力学”教科书的重要内容。但是“结构力学”的目的是分析、研究结构物的力学特性,而“力法”、“位移法”等各种计算方法是用来分析、研究结构物的力学特性的手段。要把结构力学的目的和达到这一目的的手段区别开来。如果一本《结构力学》教科书把“力法”、“位移法”等各种计算方法作为主要内容和编写主线,以学生学习、掌握这些计算方法能对结构物进行计算为目的,这样的安排似不妥。

И. Г. 布勃诺夫在其《船舶结构力学》专著的前言中写道,“船舶结构力学”是“展示结构力学中与计算船体结构相关的那个分支。”这样,作为“结构力学”的一个分支的“船舶结构力学”,是分析、研究船舶结构系统的力学特性的学科,船舶结构系统是一个庞大、复杂的系统,为研究方便,“船舶结构力学”分为两部分:①基本理论:分析、研究船舶结构系统的构件/部件的力学特性,包括梁、平面刚架、平板架、薄板、圆柱形薄壳等各种结构形式的弯曲和稳定性;②专门问题:分析研究船舶结构系统整体的力学特性,包括水面船舶结构力学、潜艇结构力学等。有学者把基本理论部分称为船舶结构力学、把专门问题部分称为船体强度。

海军工程大学吴梵、朱锡、梅志远等同志,从事“船舶结构力学”教学多年,深感现在使用的《船舶结构力学》教科书出版已30年,有重新编写一本新教科书的必要。因此,他们合作编著一本《船舶结构力学》(基本理论)教科书,以惠学子。他们基于海军工程大学开展“船舶结构力学”教学几十年的经验和他们自己多年的教学实践,以及基于对“船舶结构力学”的认识,把《船舶结构力学》教科书的编写定位为:以船舶结构系统采用的各种基本结构形式为讨论对象,以分析、研究各种基本结构形式的力学特性为主要内容,按照不同的结构形式,由简到繁,按单跨梁、连续梁、弹性基础梁、平面刚架、平板架、薄板、圆柱形薄壳等依次展开论述;在论述各种不同的结构形式时,介绍适合于分析这种结构形式的计算方法(如力法、位移法),使计算方法和分析、研究不同结构形式的力学特性结合起来;在介绍计算方法时,着重介绍计算方法的基本原理,然后通过例题和适当的作业题,帮助学生掌握计算方法及其应用。鉴于“有限元方法”已成为广泛应用的解船舶结构力学问题的有效的数值方法,编者专列一章,并简单介绍一些当前广泛应用的有限元通用程序。

在这样的理念指引下,吴梵等同志投入大量时间和精力编著本书,反复修改,数易其稿,力求提高书的质量。本人阅读了他们编著的书稿,有些地方还和作者展开过讨论,本人赞赏吴梵等同志编写本书的理念、内容的选择、安排以及编写方法。本人认为这本书是对《船舶结构力学》教科书的改革,是一次有益的尝试。它将引导学生深入学习、认识、掌握船舶结构各种基本结构形式的力学特性,并深入理解、掌握主要的结构计算方法;引导学生在此基础上,能充分利用、发挥不同结构形式的力学特性,创造性地构思、设计出满足使用要求的、合理的、力学特性优越的船舶结构。期盼这本《船舶结构力学》教科书将培养出船舶结构设计、建造领域众多的创新型人才。



2010年5月于海军工程大学

# 前 言

本书为海军高等院校重点教材,是以舰船与海洋工程专业本科学员为教学对象编写的。本书针对舰船结构特点,重视船舶结构力学的基本概念、基本理论和基本方法,着力吸收船舶结构力学领域最新研究成果,在内容编排上有以下特点:

(1)船舶结构力学计算模型的建立是结构分析的前提和分析成败的关键,本书系统详细地介绍了如何将复杂的舰船结构简化成力学计算模型,使学生学会从复杂的舰船结构问题中抓住力学本质,将结构简化成计算模型,便于计算。

(2)以船舶典型结构、构件为经线,以结构力学计算方法为纬线,注重介绍结构的功能和受力特征,将船舶结构力学的基本概念、基本理论和基本方法融入对具体的船舶结构的分析中,使读者通过本书的学习掌握船舶结构分析和计算方法。

(3)不仅包含水面舰艇强度所需的结构力学知识,同时兼顾了潜艇强度所需的结构力学知识,为学生后续学习水面舰艇和潜艇强度课程奠定了较为全面的基础。

本书不仅可作为海军院校舰船与海洋工程专业的教材,也可作为普通高等院校船舶与海洋工程专业及相关专业的教材或参考书,并可供从事船舶设计、制造领域工作的科技人员学习或参考。

本书由吴梵教授、朱锡教授、梅志远副教授编著,吴梵主编。具体分工为:吴梵(第1章、第6章、第7章、第8章、第11章和第9章的9.5节~9.7节)、朱锡(第2章、第4章、第9章的9.1节~9.4节)、梅志远(第3章、第5章、第10章),全书由吴梵统稿。

作为本书的主审,郭日修教授仔细审阅了本书的第1稿、第2稿、第3稿和第4稿,在此特向郭日修教授表示衷心的感谢。

宋世伟、朱红英、王伟和邱家波等同志承担了本书的录入、校对和绘图工作,在此特向他们表示诚挚的感谢。

限于编著者水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者  
2010年6月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 船舶结构力学的研究内容和学科体系 .....	1
1.2 船舶结构力学的建立和在中国的传播与发展 .....	2
1.2.1 船舶结构力学的建立 .....	2
1.2.2 船舶结构力学在中国的传播与发展 .....	6
<b>第 2 章 船舶结构力学计算模型的建立</b> .....	10
2.1 船舶结构力学计算模型建立的一般原则 .....	10
2.2 船舶结构力学基本计算模型 .....	10
2.3 船舶结构力学基本计算模型的建立 .....	12
2.3.1 结构计算模型的边界支承条件 .....	12
2.3.2 骨架梁计算模型 .....	13
2.3.3 船舶结构的刚架计算模型 .....	14
2.3.4 船舶结构板架计算模型 .....	15
2.4 舰艇船体骨架梁带板计算 .....	16
习题 .....	17
<b>第 3 章 梁的弯曲</b> .....	18
3.1 直梁及微曲梁弯曲理论 .....	18
3.1.1 坐标系与符号规定 .....	18
3.1.2 梁弯曲的基本假设 .....	19
3.1.3 梁弯曲的基本微分方程式 .....	19
3.2 单跨梁的弯曲 .....	23
3.2.1 初参数法及边界条件 .....	23
3.2.2 叠加原理与梁的弯曲要素表 .....	30
3.2.3 剪力对梁弯曲挠度的影响 .....	34
3.3 连续梁 .....	38
3.3.1 概述 .....	38
3.3.2 力法的基本概念 .....	39
3.3.3 自由支持在刚性支座上连续梁的计算 .....	41
3.3.4 自由支持在独立弹性支座上的连续梁的计算 .....	45
3.3.5 阶梯形变截面梁的计算 .....	48
3.4 弹性基础梁 .....	49
3.4.1 概述 .....	49

3.4.2	弹性基础梁的弯曲微分方程式的解 .....	50
3.4.3	弹性基础梁的计算 .....	52
3.5	梁的复杂弯曲 .....	54
3.5.1	概述 .....	54
3.5.2	梁复杂弯曲的微分方程式 .....	54
3.5.3	微分方程式的解及边界条件 .....	55
3.5.4	梁复杂弯曲的计算 .....	57
3.6	能量法的基本原理 .....	61
3.6.1	梁的应变能计算 .....	61
3.6.2	虚功原理和势能驻值原理 .....	63
3.6.3	瑞利-里兹法 .....	65
	习题 .....	68
<b>第4章</b>	<b>平面刚架的计算</b> .....	<b>72</b>
4.1	刚架的一般概念 .....	72
4.2	不可移节点简单刚架的计算 .....	74
4.3	不可移节点复杂刚架的计算 .....	77
4.4	可移节点刚架的计算 .....	81
	习题 .....	86
<b>第5章</b>	<b>平面板架的计算</b> .....	<b>88</b>
5.1	概述 .....	88
5.2	简单板架计算 .....	89
5.2.1	力法求解简单板架 .....	89
5.2.2	位移法求解简单板架 .....	92
5.3	多根主向梁、一根交叉构件的板架的计算 .....	94
5.4	多根主向梁、数根交叉构件的板架的计算 .....	99
	习题 .....	104
<b>第6章</b>	<b>弹性力学基础</b> .....	<b>107</b>
6.1	弹性力学的基本概念和基本假设 .....	107
6.1.1	基本假设 .....	107
6.1.2	基本概念 .....	108
6.2	弹性力学的基本方程 .....	112
6.2.1	平衡微分方程 .....	112
6.2.2	应力边界条件 .....	114
6.2.3	几何方程 .....	114
6.2.4	应变协调方程 .....	115
6.2.5	物理方程 .....	117
6.3	弹性力学问题的基本解法及一般原理 .....	118
6.3.1	位移法解弹性力学问题 .....	119
6.3.2	应力法解弹性力学问题 .....	120



6.3.3 弹性力学的一般原理 .....	121
6.4 弹性力学平面问题 .....	122
6.4.1 平面应力问题与平面应变问题 .....	122
6.4.2 平面应力问题的基本方程 .....	123
6.4.3 平面应变问题的基本方程 .....	125
6.4.4 应力函数解法 .....	126
6.4.5 例题 .....	127
习题 .....	131
<b>第7章 薄板的弯曲</b> .....	<b>133</b>
7.1 概述 .....	133
7.1.1 基本概念 .....	133
7.1.2 基本假设 .....	134
7.1.3 基本方程 .....	135
7.2 长矩形薄板的柱面弯曲 .....	136
7.3 薄板小挠度弯曲 .....	145
7.4 矩形薄板小挠度弯曲问题的解 .....	150
7.4.1 四边自由支持矩形薄板的纳维叶解 .....	150
7.4.2 一对边自由支持矩形薄板的列维解法 .....	154
7.4.3 应用叠加原理的解法 .....	158
7.5 薄板小挠度弯曲问题的能量解法(里兹法) .....	160
*7.6 薄板的大挠度弯曲 .....	163
7.6.1 概述 .....	163
7.6.2 矩形板大挠度弯曲的基本方程 .....	163
习题 .....	170
<b>第8章 圆柱形薄壳的弯曲</b> .....	<b>173</b>
8.1 概述 .....	173
8.2 闭合的圆柱壳的弯曲微分方程及其通解 .....	173
8.2.1 基本概念和假设 .....	173
8.2.2 受力分析 .....	174
8.2.3 壳带的弯曲微分方程 .....	176
8.2.4 微分方程的解 .....	177
8.3 在均匀外压下环肋圆柱壳弯曲问题的解 .....	178
8.3.1 边界条件 .....	179
8.3.2 应力和位移计算 .....	180
习题 .....	184
<b>第9章 舰船结构的稳定性</b> .....	<b>185</b>
9.1 概述 .....	185
9.2 轴向压杆的稳定性计算 .....	187
9.2.1 中性平衡法 .....	187

9.2.2	能量法 .....	191
9.2.3	非弹性稳定性 .....	193
9.3	连续压杆的稳定性计算 .....	195
9.3.1	在刚性支座上连续压杆的稳定性 .....	195
9.3.2	在中间弹性支座上连续压杆的稳定性 .....	196
9.3.3	弹性基础上单跨压杆的稳定性 .....	200
9.4	甲板板架的稳定性计算 .....	201
9.4.1	只有一根纵桁的甲板板架 .....	201
9.4.2	具有两根或两根以上交叉构件的甲板板架 .....	202
9.5	矩形薄板的稳定性计算 .....	206
9.5.1	板屈曲的特点 .....	206
9.5.2	中性平衡法求板的弹性屈曲载荷 .....	207
9.5.3	能量法求解板的弹性屈曲载荷 .....	212
9.6	板的后屈曲强度 .....	216
9.6.1	单向均匀受压筒支板的后屈曲强度 .....	217
9.6.2	板的极限载荷与有效宽度 .....	221
9.7	圆环在均匀外压作用下的稳定性计算 .....	224
	习题 .....	226
<b>第 10 章</b>	<b>舰艇结构中的有限元法 .....</b>	<b>229</b>
10.1	杆系矩阵法 .....	229
10.1.1	基本概念 .....	229
10.1.2	杆元刚度矩阵 .....	231
10.1.3	结构刚度方程 .....	234
10.1.4	结构刚度方程的求解 .....	239
10.2	平面应力问题有限元法 .....	245
10.2.1	基本概念 .....	245
10.2.2	常应变三角形平面单元 .....	247
10.2.3	结构刚度矩阵 .....	250
10.2.4	外载荷的处理 .....	253
10.2.5	算例 .....	254
10.2.6	矩形单元的分析与应用 .....	258
*10.3	板弯曲问题的有限元法 .....	264
10.3.1	矩形板单元的位移函数 .....	264
10.3.2	单元应变与内力 .....	266
10.3.3	单元刚度矩阵 .....	267
10.3.4	载荷处理 .....	267
10.4	结构分析有限元软件在船舶设计领域的应用 .....	268
10.4.1	CAE 技术的发展历程与结构分析有限元软件现状 .....	269
10.4.2	应用实例 .....	271

习题	274
<b>第 11 章 杆件的扭转</b>	<b>278</b>
11.1 等截面直杆的圣维南扭转	278
11.1.1 基本关系	278
11.1.2 应力函数	280
11.1.3 扭矩及扭矩常数	280
11.1.4 椭圆形截面直杆的扭转	281
11.1.5 狭长矩形截面直杆的自由扭转	283
11.2 开口薄壁杆件的自由扭转	284
11.3 闭口薄壁杆件的自由扭转	285
11.3.1 单闭室截面	285
11.3.2 多闭室截面	290
11.4 开口薄壁杆件的约束扭转	291
11.4.1 基本概念	291
11.4.2 约束扭转的扭角微分方程式	292
习题	293
<b>附录</b>	<b>295</b>
附录 A 单跨梁的弯曲要素表	295
附录 B 弹性基础梁的弯曲要素表及辅助函数	303
附录 C 单跨梁复杂弯曲的弯曲要素表及辅助函数	314
附录 D 船用球扁钢截面要素	318
附录 E 矩形平板的弯曲要素	319
附录 F 在中间弹性支座上连续压杆的稳定性曲线	322
<b>参考文献</b>	<b>323</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 船舶结构力学的研究内容和学科体系

### 1. 船舶结构力学的任务和主要内容

船舶是人类建造的最庞大、最复杂的钢结构物,受到最复杂多变的环境载荷作用,船舶结构设计计算无疑是当代最复杂的工程结构设计计算。

船舶结构力学是研究外载荷对船舶结构作用的效应和船舶结构承载能力的学科,是固体力学中结构力学的一个分支。

船舶结构力学的任务是:

- (1) 研究在外载荷作用下船舶结构中的应力、应变和位移等的规律。
- (2) 确定船舶结构承载能力。
- (3) 研究和发展新型船舶结构。

船舶结构力学的研究内容包括:

(1) 结构静力学。研究在静载荷作用下结构的响应,主要研究弯曲问题。静载荷是指不随时间变化的外加载荷。变化较慢的载荷,也可近似地看做静载荷,这样可以简化理论分析和设计计算。结构静力学是结构力学其他分支学科的基础。

(2) 结构动力学。研究在动载荷作用下结构动态特性和响应,动载荷是指随时间而改变的载荷,包括周期性载荷作用下的稳态响应和短时载荷作用下的瞬态响应。在动载荷作用下,结构内部的应力、应变及位移也必然是时间的函数。结构动力学同结构静力学的主要区别在于它考虑结构因振动而产生的惯性力和阻尼力,而同刚体动力学之间的主要区别在于要考虑结构因变形而产生的弹性力。

(3) 结构稳定性理论。研究细长、薄壁结构在压应力状态下失稳的临界载荷和失稳后的行为。现代船舶中大量使用细长型和薄壁结构,如细杆、薄板和薄壳。它们受压时,会在内部压应力远小于屈服极限的情况下发生失稳(破损或屈曲),即结构产生过大的变形,从而降低以至完全丧失承载能力。结构稳定性理论中最重要的内容是确定结构的失稳临界载荷。

(4) 结构疲劳和断裂理论。研究结构在交变载荷作用下出现疲劳,以及采用高强度材料的结构在载荷作用下由于内部裂纹扩展而引起断裂破坏的规律和控制方法。船舶结构内部不可避免地存在裂纹(特别是在焊缝处),裂纹的存在与扩展造成结构的失效形式大致可分为两种:其一是裂纹发展到临界裂纹而产生失稳扩展,引起结构的整体断裂破坏,造成灾难性的后果;其二是由于疲劳裂纹的数量和裂纹长度的累加,使得船舶结构对外部环境载荷的抗力逐步衰减,最终使结构的抗力低于环境载荷效应而产生失效。结构断裂和疲劳理论就是研究在给定载荷谱下的结构使用寿命的问题。

## 2. 船舶结构力学学科体系和本书所涉及的内容

根据船舶结构力学的研究内容和船舶结构的几何特点,船舶结构力学学科体系如图 1-1 所示。

杆和杆系,包括梁、微曲梁、连续梁、平面刚架、平板架和薄壁梁等结构;板壳包括薄板、薄壳、加筋板和加筋壳等结构;它们是船舶结构的构件或部件。普通部分,不仅适用于船舶,也适用于其他工程结构,如飞机、桥梁等,是船舶结构力学的基础理论。专门部分各分支也称为船舶强度,如水面船舶强度、潜艇强度、高性能艇强度。随着新型船舶、新型结构、新材料、新工艺的出现,船舶结构力学将会出现新的内容和分支。

在固体力学领域中,材料力学给结构力学提供了必要的基本知识,弹性力学和塑性力学是结构力学的理论基础。

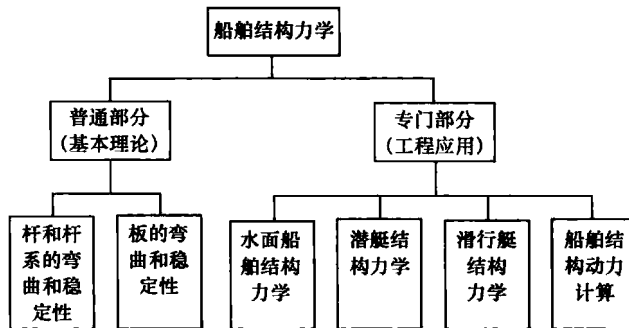


图 1-1 船舶结构力学的学科体系

本书是为“船舶结构力学”课程提供教材,其主要内容是船舶结构力学学科和普通部分,包括结构的静力分析和稳定性分析,船舶结构力学其他分支的内容,则在“舰艇强度”、“船体振动学”等相关课程介绍。

学习船舶结构力学的目的是使我们深刻认识、掌握船舶结构系统(构件和结构整体)的结构特性,充分灵活地利用结构系统的特性,设计出符合结构物使用要求的、合理的、高效的船舶结构系统(结构物)。

## 1.2 船舶结构力学的建立和在中国的传播与发展

### 1.2.1 船舶结构力学的建立

#### 1. “船舶结构力学”学科创建的时代背景

船舶是历史悠久的交通工具,自有人类活动,便有人类的船——独木舟。随着人类文明进步,逐渐发展为木板船、帆船,直到可以在海洋航行的大型风帆船,尽管经历几千年的发展,但用木材造船却没有改变。木船的建造,凭工匠的经验,代代相传,没有形成理论。到 19 世纪后期,钢材取代木材成为建造海船的材料。钢材的应用,使船舶的主尺度不断增大,波浪诱导载荷因此大大增加。为提高船体抵抗波浪载荷的能力,必须增大船体构件的尺寸,但构件尺寸究竟增大多少才适度,却没有估算的方法。尺寸增大过度,会增大船体结构的自重,降低船舶的有效装载能力。因此,寻求船体强度与结构自重之间的平衡点

成为船舶建造亟需解决的课题。应用过去木船建造的经验是不能解决这个课题的,需要建立新的学科、提出新的方法,需要一门类似于当时计算桥梁结构的“结构力学”才能解决这个课题,这对于军用舰船尤为重要、迫切。这个课题,受到俄罗斯海军一位年青的造船工程师 И. Г. 布勃诺夫的高度关注。他参加过军舰设计建造,参加过船模试验池的研究工作,从事过高校教学工作。经过长期实践和潜心研究,И. Г. 布勃诺夫于1909年在彼得堡工业学院开设“船舶结构力学”课程;1912年和1914年先后出版两卷本专著——《船舶结构力学》第I部和第II部。这些活动,标志着“船舶结构力学”这一新的学科的诞生,这是一门计算船体结构强度的新学科。不幸的是,И. Г. 布勃诺夫英年早逝,1919年去世时年仅47岁。布勃诺夫创建新学科的工作,不得不由他的两位杰出的学生 П. Ф. 帕普科维奇和 Ю. А. 希曼斯基继承。经过师生两代人约半个世纪的辛勤耕耘,到20世纪50年代,“船舶结构力学”成为一门具有自身的学科体系、理论严谨、内容充实、应用性强的技术科学,有力地支撑了船舶结构设计,促进了造船科学技术的发展。

## 2. И. Г. 布勃诺夫(1872—1919)——“船舶结构力学”的创建者、奠基人



И. Г. 布勃诺夫

И. Г. 布勃诺夫1887年进入喀琅施塔得“海军技术学校”(后称为“海军工程学校”)机械系,1888年转入该校造船系,1891年毕业。为进一步深造,И. Г. 布勃诺夫进入“海军学院”造船系,1896年以优异成绩毕业,留学院任教。20世纪初,他和著名的数学家、力学家、造船专家 А. Н. 克雷洛夫一起组建彼得堡工业学院造船系,1904年起,И. Г. 布勃诺夫在该院任教,1909年任教授。1910年,И. Г. 布勃诺夫任海军学院教授。他在海军学院和彼得堡工业学院任教一直工作到1919年他去世。他一生除从事教学工作外,还长期从事舰船设计建造工作。在他的领导下,曾对1910年—1914年建造完成的一艘

“塞瓦斯托波尔”型战舰进行了完整的强度计算,这在世界上是第一次,这艘战舰服役后曾经历多次战争的考验。他还设计建造了俄罗斯潜艇“海豚号”(1902年)和“雪豹号”(1912年),并对艇体强度进行了计算,他被认为是世界上设计计算作战潜艇的第一人。И. Г. 布勃诺夫于1900年起参加俄罗斯船模试验水池的工作,1908年任试验水池主任,直到1914年。

1909年,И. Г. 布勃诺夫在彼得堡工业学院造船系开设“船舶结构力学”课程,这是世界上第一次在高等学校讲授“船舶结构力学”,И. Г. 布勃诺夫是经过长期的、充分的准备才开设这一新课程,有人说,布勃诺夫自1896年开始任教即为开设这一过去未曾有过的新课程着手准备。彼得堡工业学院将И. Г. 布勃诺夫讲课的讲义石印出版。1912年和1914年,И. Г. 布勃诺夫先后出版了“船舶结构力学”第I部和第II部两本专著,这是国际学术领域前所未有的专著。И. Г. 布勃诺夫开设“船舶结构力学”课程和专著的出版,标志着“船舶结构力学”这门新学科的创立。И. Г. 布勃诺夫在专著的前言中写道,“船舶结构力学”的任务是“展示结构力学中与计算船体结构相关的那个分支,并指出它的应用——用来确定各种船体结构必要的尺寸以保证船体强度”。在这里,И. Г. 布勃诺夫指出:①“船舶结构力学”是结构力学的一个(新的)分支;②“船舶结构力学”的内容包括基本理论部分(与结构力学其他分支有共性)和工程应用部分(计算船体结构强度)。《船舶结构力学》第I部和第II部共25章,包括:①静定梁和超静定梁的横向弯曲(§1-9和

§ 13 - 14); ②直梁和微曲梁的纵—横弯曲与稳定性( § 10 - 12); ③平面杆系的弯曲与稳定性( § 12, § 15 - 18); ④刚性板的弯曲与稳定性( § 19 - 22); ⑤柔性板的弯曲( § 23 - 25)。可以看出,这两部专著的内容是“船舶结构力学”的基本理论,未涉及船体强度(船体总强度和局部结构强度)的内容。И. Г. 布勃诺夫开始著述《船舶结构力学》时,计划是三部,第 I 部第 II 部即 1912 年和 1914 年出版的专著,第 III 部是“船体强度”(船体总强度和局部结构强度),有人称它为“狭义的船舶结构力学”。但 1914 年第 II 部出版后,爆发了第一次世界大战,俄罗斯也陷入战争,第 III 部的著述工作,И. Г. 布勃诺夫未能进行,1919 年 И. Г. 布勃诺夫逝世,所以他生前只出版第 I 和第 II 两部专著。所幸 1909 年彼得堡工业学院曾石印出版了他的一本《船舶结构力学补充教程》讲义,该书有 19 章,包括: ①许用应力( § 1 - 4); ②船体总强度( § 5 - 9); ③船体底部、舱壁、甲板构架的强度( § 10 - 14); ④船体板的强度( § 15 - 17); ⑤铆钉连接强度( § 18 - 19)。这本《补充教程》的内容,应当是 И. Г. 布勃诺夫生前没有来得及编著出版的《船舶结构力学》第 III 部的内容。《补充教程》后来收入 1956 年出版的《И. Г. 布勃诺夫选集》。《选集》为 16 开本,《补充教程》占 116 页。

《船舶结构力学》第 I 部、第 II 部及《补充教程》为建立“船舶结构力学”这一新学科打下了基础——规定了学科的名称、任务,构建了学科体系的框架、展示了学科的基本内容。船舶制造传统上是靠经验,对于船舶(尤其是军用船舶)这样大型、结构复杂的运载工具,要使人们从传统的经验中走出来接受“船舶结构力学”理论和计算方法,仅靠这 3 本专著是不够的,需要在“船舶结构力学”领域做更多更深入的工作。好在 И. Г. 布勃诺夫培养了大批优秀学生,其中最突出的是 П. Ф. 帕普科维奇和 Ю. А. 希曼斯基,他们继承了 И. Г. 布勃诺夫的工作,在老师所开创的领域里做了大量出色的、卓有成效的工作。

### 3. П. Ф. 帕普科维奇(1887—1946)——集“船舶结构力学”基本理论之大成



П. Ф. 帕普科维奇

П. Ф. 帕普科维奇 1911 年毕业于彼得堡工业学院造船系,获工程师学位。在学院学习期间,师从 И. Г. 布勃诺夫学习“弹性力学”和全部“船舶结构力学”课程,并师从 А. Н. 克雷洛夫学习“船舶振动”课程。П. Ф. 帕普科维奇对这些课程表现出极大的兴趣,钻研很深。从学院毕业后,在俄罗斯海军服役,长时间在造船厂及船舶设计和科研机构工作,曾参加“塞瓦斯托波尔”型战舰的建造。1916 年起,在彼得堡工业学院造船系任教,1918 年起在该学院讲授“船舶结构力学”全部课程,以及“弹性力学”和“船舶振动”课程,直到 1946 年。1920 年,П. Ф. 帕普科维奇开始在海军学院任教,担任该学院船舶结构力学教研室主任,直到 1946 年。1930 年,П. Ф. 帕普科维奇参与组建列宁格勒造船学院,并担任该学院船舶结构力学教研室主任、教授。1933 年,П. Ф. 帕普科维奇被选为苏联科学院通讯院士。1935 年,获技术科学博士学位。是海军少将工程师。从 20 世纪 30 年代末到 40 年代,他在“船舶结构力学”方面的专著陆续出版,主要有:

《弹性力学》1939

《船舶结构力学》第 II 部,1941

《船舶结构力学》第 I 部,卷 1,1945

《船舶结构力学》第 I 部,卷 2,1947

《船舶结构力学》第 I 部(卷 1、卷 2)包括杆和杆系(梁、刚架、平面板架)的弯曲。第 I 部中有应用“弹性基础梁”理论解圆柱形薄壳,以及肋骨圆环的强度等内容,这些内容是潜艇强度的基础。《船舶结构力学》第 II 部包括柔性杆和杆系的稳定性,板的弯曲和稳定性。П. Ф. 帕普科维奇是天才的理论家,他的 3 本《船舶结构力学》专著,全面、系统地阐述了“船舶结构力学”的基本理论,内容丰富、理论严谨、解析精辟,可谓集“船舶结构力学”基本理论之大成。每一本专著都厚达 50 印张~60 印张(16 开本,800 页~1000 页),堪称皇皇巨著。П. Ф. 帕普科维奇《船舶结构力学》专著的出版获得造船界的普遍赞誉。该专著于 1946 年获苏联国家奖(斯大林奖金一等奖)。该专著不仅是《船舶结构力学》基本理论的巨著,对结构力学的其他分支(如飞机结构力学)也有重要的理论和应用价值。遗憾的是,П. Ф. 帕普科维奇生前没有来得及写出《船舶结构力学》在工程应用方面的专著,即一般称为“船舶结构力学”专门部分的专著。所幸 П. Ф. 帕普科维奇生前发表了 130 多篇学术论文,广泛讨论了“船舶结构力学”的专门问题,他的学生将论文整理,编辑出版了两本论文集:

П. Ф. 帕普科维奇船舶强度论文集,1956

П. Ф. 帕普科维奇船舶振动论文集,1960

这两本论文集反映了 П. Ф. 帕普科维奇对《船舶结构力学》专门问题的贡献,是他编写的《船舶结构力学》专著的有力补充。

#### 4. Ю. А. 希曼斯基(1883—1962)——使“船舶结构力学”的工程应用丰富多彩



Ю. А. 希曼斯基

Ю. А. 希曼斯基 1905 年毕业于海军工程学校,毕业后从事造船工作,曾参与“奥查科夫号”(Очаков)巡洋舰的建造。后入海军学院深造,于 1910 年毕业。他先后在波罗的海造船厂和北方造船厂从事军用舰船设计建造工作,曾参与建造“彼得罗巴夫洛夫”号巡洋舰和“塞瓦斯托波尔”型战列舰。1910 年—1912 年在俄罗斯海军工程学校任教,1920 年—1934 年在海军学院任教。1945 年—1950 年在列宁格勒造船学院任教,主持船舶结构力学教研室工作。1925 年—1962 年,Ю. А. 希曼斯基在船舶工业科学研究院工作,这是他一生的主要工作岗位。1953 年当选为苏联科学院院士。

Ю. А. 希曼斯基对“船舶结构力学”的贡献卓著,尤其是“船舶结构力学”的工程应用。他在“船舶结构力学”领域的主要著作有:

《造船工程师手册》(与他人合作),1916

《甲板炮装置下加强结构计算》,1932

《板的弯曲》,1934

《造船手册》,1934(卷 2,卷 3——船舶结构力学)

《入坞及下水的船体强度计算》,1946

《潜艇结构力学》,1948

《船体间断构件的设计》,1948

《船舶结构动力计算》,1949

《造船论文集》,1954

《滑艇艇强度计算》(有中译本,军事工程学院出版,1957)



《船舶结构力学手册》,卷1,卷2,1958;卷3,1960

这些专著表明:IO. A. 希曼斯基的工作着力于“船舶结构力学”的工程应用——应用“船舶结构力学”基本理论解决船舶结构强度问题。他既研究像潜艇、滑艇这样有特殊性能、特殊用途和特殊结构的舰船的强度计算,也研究船舶在设计、建造中一些专门的强度问题,如甲板炮装置下的加强结构、人坞和下水、间断构件设计等的强度问题。特别是他将研究领域由船舶结构静力学拓展到船舶结构动力计算,探讨冲击载荷作用下(如水下爆炸、炮弹冲击等)船舶结构的动力强度问题,给“船舶结构力学”开拓了新的研究领域。这些专著都是前所未有的,是 IO. A. 希曼斯基对这些问题从事开创性研究所取得的成果。他处理船舶结构力学问题有自己的风格——力求用尽可能简单的数学工具来处理船舶结构强度问题,使得出的计算方法、公式简单实用,能方便地应用于船舶结构设计计算。正是由于 IO. A. 希曼斯基的卓越贡献,使“船舶结构力学”的工程应用(“船舶结构力学”专门部分)丰富多彩。《船舶结构动力计算》一书曾获苏联国家奖(斯大林奖金一等奖)。1958年—1960年出版的3卷本《船舶结构力学手册》,将当时“船舶结构力学”取得的关于计算各种类型船舶结构强度的方法和公式汇集起来,以《手册》的形式出版,极大地方便船舶设计建造人员查阅、应用。这也标志着“船舶结构力学”这一新学科的建成。

1958年和1960年由美国海军主办首届和第二届舰船结构力学学术讨论会,1961年国际船舶结构会议(ISSC)成立,使船舶结构力学在国际上广泛传播。20世纪60年代以后,电子计算机、数值方法和测试技术的巨大进步以及在船舶结构力学领域的广泛使用,极大地提高了船舶结构力学的分析、计算能力,使船舶结构力学迅速发展。

## 1.2.2 船舶结构力学在中国的传播与发展

船舶结构力学在中国的传播和发展是新中国成立以后开始的,大致可分3个阶段:第一阶段,20世纪50年代初至60年代初;第二阶段,60年代初至70年代后期;第三阶段,70年代后期至21世纪初。

### 1. 第一阶段——广泛传播

船舶结构力学在中国传播是从20世纪50年代初高等学校造船专业开设“船舶结构力学”课程开始的,传播方式是高校组建船舶结构力学教研室,配备教师,聘请苏联专家指导,制定教学大纲,翻译俄文教材,组织讲课,培养造船专业学生学习、掌握船舶结构力学学科。1951年,大连海军学校(海军工程大学前身)造船系率先开设“舰船结构力学”课程,教研室负责人为郭日修,聘请苏联专家索洛比扬科。1953年,军事工程学院海军工程系造船科开设此课程,教研室负责人为李维扬,苏联专家阿尔巴。1954年大连工学院造船系、1955年上海交通大学造船系均开设此课程(前者于1955年初迁沪与后者合并),教研室负责人为陈铁云,苏联专家先后是普拉夫金和帕斯诺夫。大连海军学校采用的教材是索洛比扬科为该校专门编写的,由该校翻译出版;军事工程学院造船科开始也采用海军学校的教材,另外,还翻译一些苏联船舶结构力学专著,如西曼斯基的《滑艇结构力学》等;上海交通大学在50年代中后期翻译了苏联高等教育部审定的船舶结构力学教科书,有考洛特金《杆件与杆系的弯曲与稳定性》、《板与圆筒形壳的弯曲与稳定性》及库尔久莫夫《船舶强度》、《船舶振动》,这些翻译的苏联教科书后被我国高校造船专业广泛采用。