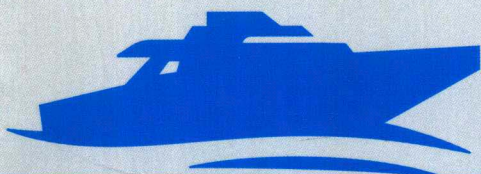




“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



Chuanbo Jiegou Lixue



# 船舶结构力学

(第2版)

■ 吴梵 等 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

“十二五”普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 船舶结构力学

(第2版)

吴梵 朱锡 梅志远 朱凌 吕岩松 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做了简要介绍。为便于读者学习,每章附有一定数量的习题,书末有习题答案或提示。

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/吴梵等编著. —2版. —北京:国防工业出版社, 2016.3

ISBN 978-7-118-10596-4

I. ①船… II. ①吴… III. ①船舶-结构力学 IV. ①U661.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第054739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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 24 $\frac{3}{4}$  字数 566 千字

2016年3月第2版第1次印刷 印数1—3000册 定价 62.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 第2版 前言

本书第1版于2010年9月问世后,得到国内同行广泛关注和好评,2014年入选教育部“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。现根据学科发展和国家级规划教材要求,对第1版进行了全面修订,主要内容包括:

(1) 第2章内容顺序做了调整,先介绍船舶结构力学基本计算模型,再介绍建模的一般原则,并补充了双层甲板板架计算模型。

(2) 第3章改为“单跨梁的横向弯曲”,重新修改补充了例题,注意前后呼应,系统性更强;针对轴向压力推导复杂弯曲梁的微分方程,强调轴向压力下的复杂弯曲状态在船舶结构中是常出现的危险的状态。

(3) 采用能量泛函求极值-变分法的直接方法来讲解能量法,使学生对能量法有更深入的理解。

(4) 将连续梁独立成一章,与后续的刚架、板架并列,构成杆系结构。

(5) 在第5章平面刚架结构中补充了弹性固定端的实际概念,给出了杆件刚度矩阵的初步概念,为后面介绍有限元法打下了基础。

(6) 删去了原5.4节多根主向梁、数根交叉构件的板架计算内容,原因是现在工程上多采用有限元法求解此类结构,不再使用传统的近似方法。

(7) 在第10章结构稳定性中,新增了压杆中性平衡微分方程的推导,对10.3节连续压杆的稳定性计算,摒弃过时的图解法,改为用数值迭代方法求解超越方程。

(8) 在第11章有限元法基础及应用中,新增11.3节“稳定性问题的有限元方法”。

(9) 将原“杆件的扭转”改为“大开口船舶弯扭强度基础”,重新编写。

(10) 书末补充了部分习题答案或提示。

本书由吴梵主编,参与编著工作的有海军工程大学吴梵教授、朱锡教授、梅志远副教授、吕岩松副教授和武汉理工大学朱凌教授等。具体分工为:吴梵(第1章、第3章的3.5节、第5章的5.4.4节、第7章、第8章、第9章、第10章的10.2节~10.3节及10.5节~10.7节和附录),朱锡(第2章、第5章、第10章的10.1节和10.4节),梅志远(第3章的3.1节~3.4节、第4章、第6章、第11章的11.1节~11.2节和11.4节),朱凌(第12章),吕岩松(第11章的11.3节和书末习题答案)。全书由吴梵统稿。

本书第1版承蒙郭日修教授指导和审阅,今年郭老以91岁高龄又仔细审阅了这次的修订稿,提出了很多建设性的宝贵意见,在此特向郭老致以崇高的敬意和衷心感谢!

张二、刘春正、毛开仁、陈长海等同志承担了本书的打印、校对、习题复验和绘图工作，在此一并表示诚挚的感谢。

限于编著者水平，本版难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者  
2015年10月

# 第1版 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9.5~9.7节)、朱锡(第2章、第4章、第9章的9.1~9.4节)、梅志远(第3章、第5章、第10章),全书由吴梵统稿。

郭日修教授作为本书的主审,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打字、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

第 1 章 绪论	1
1.1 船舶结构力学的研究内容和学科体系	1
1.1.1 船舶结构力学的任务和研究内容	1
1.1.2 船舶结构力学学科体系和本书所涉及的内容	2
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
第 2 章 船舶结构力学计算模型的建立	11
2.1 船舶结构力学基本计算模型简介	11
2.2 船舶结构力学建模的一般原则	12
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 船体梁和骨架梁计算模型	13
2.3.3 船舶结构的刚架计算模型	16
2.3.4 船舶结构的板架计算模型	16
2.4 船体骨架梁带板计算	18
习题	18
第 3 章 单跨梁的横向弯曲	20
3.1 直梁及微曲梁弯曲理论	20
3.1.1 坐标系与符号规定	20
3.1.2 梁弯曲基本假设	21
3.1.3 梁弯曲基本微分方程式	21
3.2 纯弯曲单跨梁的求解	25
3.2.1 初参数法及边界条件	26
3.2.2 叠加原理与梁的弯曲要素表	34
3.2.3 剪力对梁弯曲挠度的影响	37
3.3 弹性基础梁的求解	42
3.3.1 弹性基础梁的弯曲微分方程式的解	43
3.3.2 弹性基础梁的计算	44
3.4 复杂弯曲梁的求解	46
3.4.1 复杂弯曲梁的微分方程式	47
3.4.2 微分方程式的解及边界条件	48

3.4.3	梁复杂弯曲的计算	50
3.5	能量法解梁弯曲问题	53
3.5.1	梁的应变能计算	54
3.5.2	泛函与变分的概念	56
3.5.3	虚功原理和势能驻值原理	58
3.5.4	瑞利-里兹法	60
	习题	64
<b>第4章</b>	<b>连续梁</b>	<b>68</b>
4.1	概述	68
4.2	力法的基本知识	69
4.2.1	力法的基本原理	69
4.2.2	力法求解的基本步骤	71
4.3	自由支持在刚支座上连续梁的计算	72
4.4	自由支持在独立弹性支座上的连续梁的计算	75
4.5	阶梯形变截面梁的计算	78
	习题	80
<b>第5章</b>	<b>平面刚架</b>	<b>82</b>
5.1	刚架的一般概念	82
5.1.1	刚架的分类	82
5.1.2	平面刚架的承载特点	82
5.1.3	对称刚架的简化处理	83
5.2	不可移结点简单刚架	84
5.2.1	不可移结点简单刚架计算与分析	84
5.2.2	弹性固定端的实际概念	87
5.3	不可移结点复杂刚架	89
5.3.1	位移法基本原理	90
5.3.2	例题	93
5.4	可移结点刚架的计算	96
5.4.1	位移法的基本方程(续)——一般情况	96
5.4.2	位移法解可移结点刚架举例	99
5.4.3	杆件刚度矩阵的初步概念	101
	习题	102
<b>第6章</b>	<b>平面板架</b>	<b>104</b>
6.1	概述	104
6.2	简单板架计算	105
6.2.1	力法求解简单板架	105
6.2.2	位移法求解简单板架	108
6.3	多根主向梁、一根交叉构件的板架的计算	110



习题 .....	116
<b>第7章 弹性力学基础</b> .....	119
7.1 弹性力学的基本概念和基本假设 .....	119
7.1.1 基本假设 .....	119
7.1.2 基本概念 .....	120
7.2 弹性力学基本方程 .....	124
7.2.1 平衡微分方程 .....	124
7.2.2 应力边界条件 .....	126
7.2.3 几何方程 .....	126
7.2.4 应变协调方程 .....	127
7.2.5 物理方程 .....	129
7.3 弹性力学问题的基本解法及一般原理 .....	130
7.3.1 位移法解弹性力学问题 .....	131
7.3.2 应力法解弹性力学问题 .....	132
7.3.3 弹性力学的一般原理 .....	133
7.4 弹性力学平面问题 .....	134
7.4.1 平面应力问题与平面应变问题 .....	134
7.4.2 平面应力问题的基本方程 .....	135
7.4.3 平面应变问题的基本方程 .....	137
7.4.4 应力函数解法 .....	138
7.4.5 例题——用应力函数解悬臂梁的弯曲 .....	140
习题 .....	143
<b>第8章 薄板的弯曲</b> .....	145
8.1 概述 .....	145
8.1.1 基本概念 .....	145
8.1.2 基本假设 .....	146
8.1.3 基本方程 .....	147
8.2 长矩形薄板的柱面弯曲 .....	148
8.3 薄板小挠度弯曲 .....	158
8.3.1 薄板挠曲面微分方程式 .....	158
8.4 矩形薄板小挠度弯曲问题的解析解 .....	164
8.4.1 四边自由支持矩形薄板的纳维叶解 .....	164
8.4.2 一对边自由支持矩形薄板的列维解法 .....	168
8.4.3 应用叠加原理的解法 .....	172
8.5 薄板小挠度弯曲问题的能量解法(里兹法) .....	174
*8.6 薄板的大挠度弯曲 .....	178
8.6.1 几何关系 .....	178
8.6.2 弹性关系 .....	180

8.6.3	平衡关系 .....	182
习题	.....	185
<b>第9章</b>	<b>圆柱形薄壳的弯曲</b> .....	<b>188</b>
9.1	概述 .....	188
9.2	闭合的圆柱壳的弯曲微分方程及其通解 .....	188
9.2.1	基本概念和假设 .....	188
9.2.2	受力分析 .....	189
9.2.3	壳带的弯曲微分方程 .....	191
9.2.4	微分方程的解 .....	192
9.3	在均匀外压下环肋圆柱壳弯曲问题的解 .....	193
9.3.1	边界条件 .....	194
9.3.2	应力和位移计算 .....	195
习题	.....	200
<b>第10章</b>	<b>舰船结构的稳定性</b> .....	<b>201</b>
10.1	概述 .....	201
10.2	轴向压杆的稳定性计算 .....	203
10.2.1	中性平衡法 .....	203
10.2.2	能量法 .....	208
10.2.3	非弹性稳定性 .....	210
10.3	连续压杆的稳定性 .....	213
10.3.1	在刚性支座上连续压杆的稳定性 .....	213
10.3.2	在中间弹性支座上连续压杆的稳定性 .....	215
10.3.3	弹性基础上单跨压杆的稳定性 .....	219
10.4	甲板板架的稳定性计算 .....	220
10.4.1	只有一根纵桁的甲板板架 .....	220
10.4.2	具有两根或两根以上交叉构件的甲板板架 .....	221
10.5	矩形薄板的稳定性计算 .....	225
10.5.1	板屈曲的特点 .....	225
10.5.2	中性平衡法求板的弹性屈曲载荷 .....	226
10.5.3	能量法求解板的弹性屈曲载荷 .....	233
10.6	板的后屈曲强度 .....	237
10.6.1	单向均匀受压简支板的后屈曲强度 .....	238
10.6.2	板的极限载荷与有效宽度 .....	242
10.7	圆环在均匀外压作用下的稳定性计算 .....	245
习题	.....	247
<b>第11章</b>	<b>有限元法基础及应用</b> .....	<b>251</b>
11.1	有限元法基本原理 .....	251
11.1.1	结构离散化 .....	251

11.1.2	单元位移模式与形函数	252
11.1.3	单元刚度矩阵	255
11.1.4	结构刚度矩阵	257
11.1.5	外载荷的移置	260
11.1.6	有限元法的实施步骤与注意事项	262
11.1.7	算例分析	262
11.2	有限元法基本单元	266
11.2.1	等截面梁单元	266
11.2.2	平面应力矩形单元	272
*11.2.3	板-壳单元	278
11.3	稳定性问题的有限元方法	282
11.3.1	压杆稳定性问题的有限元法	283
11.3.2	受面内载荷作用下板的稳定性问题有限元法	285
11.4	结构分析有限元软件在船舶设计领域的应用	286
11.4.1	CAE技术的发展历程与结构分析有限元软件现状	286
11.4.2	应用实例	289
<b>第12章</b>	<b>大开口船舶弯扭强度基础</b>	<b>296</b>
12.1	概述	296
12.2	等截面直杆的圣维南扭转	298
12.2.1	基本关系	299
12.2.2	应力函数	300
12.2.3	扭矩及扭矩常数	301
12.2.4	椭圆形截面直杆的扭转	302
12.2.5	狭长矩形截面直杆的自由扭转	303
12.3	薄壁杆件的自由扭转	304
12.3.1	开口薄壁杆件的自由扭转	304
12.3.2	闭口薄壁杆件的自由扭转	306
12.4	开口薄壁杆件的约束扭转	312
12.4.1	基本概念	312
12.4.2	约束扭转的扭角微分方程式	313
12.5	简单船体剖面的约束扭转	315
12.5.1	约束扭转翘曲正应力	316
12.5.2	约束扭转翘曲剪应力	318
12.5.3	确定扇性坐标	319
12.5.4	Kollbrunner 和 Hajdin 修正的薄壁梁理论	325
12.6	多闭室船体薄壁梁剖面特性参数计算	327
12.6.1	剖面剪切中心位置计算	328
12.6.2	圣维南扭转刚度 $GI_t$ 的计算	331

12.6.3 约束扭转刚度 $EI_{\omega}$ 的计算 .....	332
习题 .....	333
附录 .....	337
附录 A 单跨梁的弯曲要素表 .....	337
附录 B 弹性基础梁的弯曲要素表及辅助函数 .....	345
附录 C 单跨梁复杂弯曲的弯曲要素表及辅助函数 .....	358
附录 D 船用球扁钢截面要素 .....	363
附录 E 矩形平板的弯曲要素 .....	364
附录 F 在中间弹性支座上连续压杆的稳定性曲线 .....	366
习题答案 .....	369
参考文献 .....	382

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 船舶结构力学的研究内容和学科体系

### 1.1.1 船舶结构力学的任务和研究内容

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的作用,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。船舶结构力学为船舶结构设计提供理论基础和分析计算方法。

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<sup>[1]</sup>:

(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,也可近似地看作静载荷,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、薄壁结构在压应力或剪应力状态下失稳的临界载荷和失稳后的力学行为。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,或受剪应力作用(如薄板)时,会在内部压应力或剪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的结构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,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。结构疲劳

和断裂理论就是研究在给定载荷谱下的结构使用寿命以及控制疲劳、断裂的方法。

### 1.1.2 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,船舶结构力学的学科体系如图 1-1 所示。

杆和杆系,包括梁、微曲梁、连续梁、平面刚架、平面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和基础理论,弹性力学和塑性力学是结构力学的理论基础。

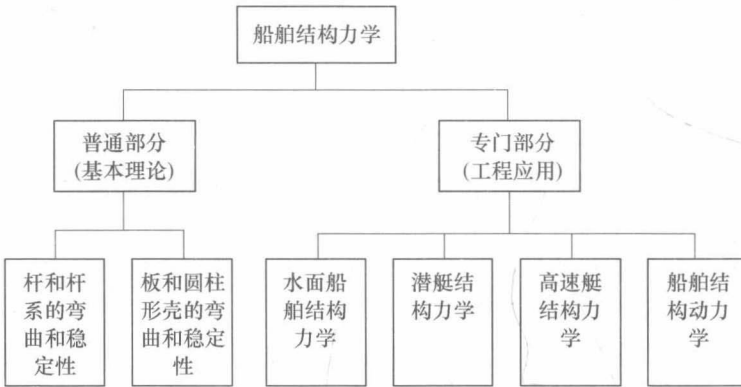


图 1-1 船舶结构力学的学科体系

本书作为“船舶结构力学”课程的教材,其主要内容是船舶结构力学学科的一般部分,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<sup>[2]</sup>

#### 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,便有原始的船——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,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。应用过去建造木船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轻的造船工程师 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了“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”建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(图 1-2)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。И. Г. 布勃诺夫于 1910 年任海军学院教授。他在海军学院和彼得堡工业学院任教一直到 1919 年去世。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—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。



图 1-2 И. Г. 布勃诺夫

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的。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(第1~9章和第13、14章);②直梁和微曲梁的纵-横弯曲与稳定性(第10~12章);③平面杆系的弯曲与稳定性(第12,15~18章);④刚性板的弯曲与稳定性(第19~22章);⑤柔性板的弯曲(第23~25章)。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和1914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,所以他生前只出版了第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》(下面简称《补充教程》)讲义,该书有19章,包括:①许用应力(第1~4章);②船体总强度(第5~9章);③船体底部、舱壁、甲板构架的强度(第10~14章);④船体板的强度(第15~17章);⑤铆钉连接强度(第18~19章)。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。

И. Г. 布勃诺夫英年早逝,1919年去世时年仅47岁。《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,展示了它的基本内容。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,仅靠这三本专著是不够的,需要在“船舶结构力学”领域做更多的更深入的工作。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(图1-3)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,在俄罗斯海军服务,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。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

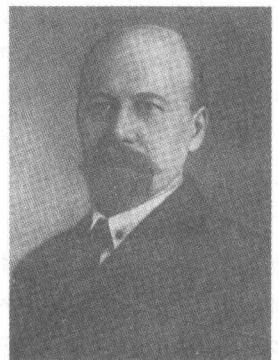


图1-3 П. Ф. 帕普科维奇



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

令人惋惜的是П. Ф. 帕普科维奇1946年去世,他未能看到自己的专著《船舶结构力学》第Ⅰ部卷2的出版。

《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,他的三本《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50~60印张(16开本,800~1000页),堪称皇皇巨著。П. Ф. 帕普科维奇《船舶结构力学》专著的出版获得了造船界的普遍赞誉。该专著于1946年获得苏联国家奖(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”的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“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(图1-4)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—1912年在俄罗斯海军工程学校任教。1920—1934年在海军学院任教。1945—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—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

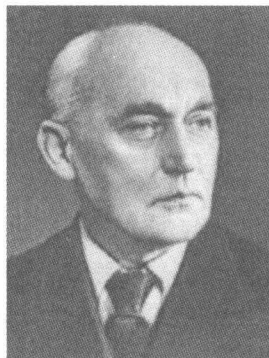


图1-4 Ю. А. 希曼斯基