



船舶与海洋工程专业规划教材

盛振邦 主编

船舶原理（下册）

第二版

高新船舶与深海开发装备协同创新中心 组编



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

船舶与海洋工程专业规划教材

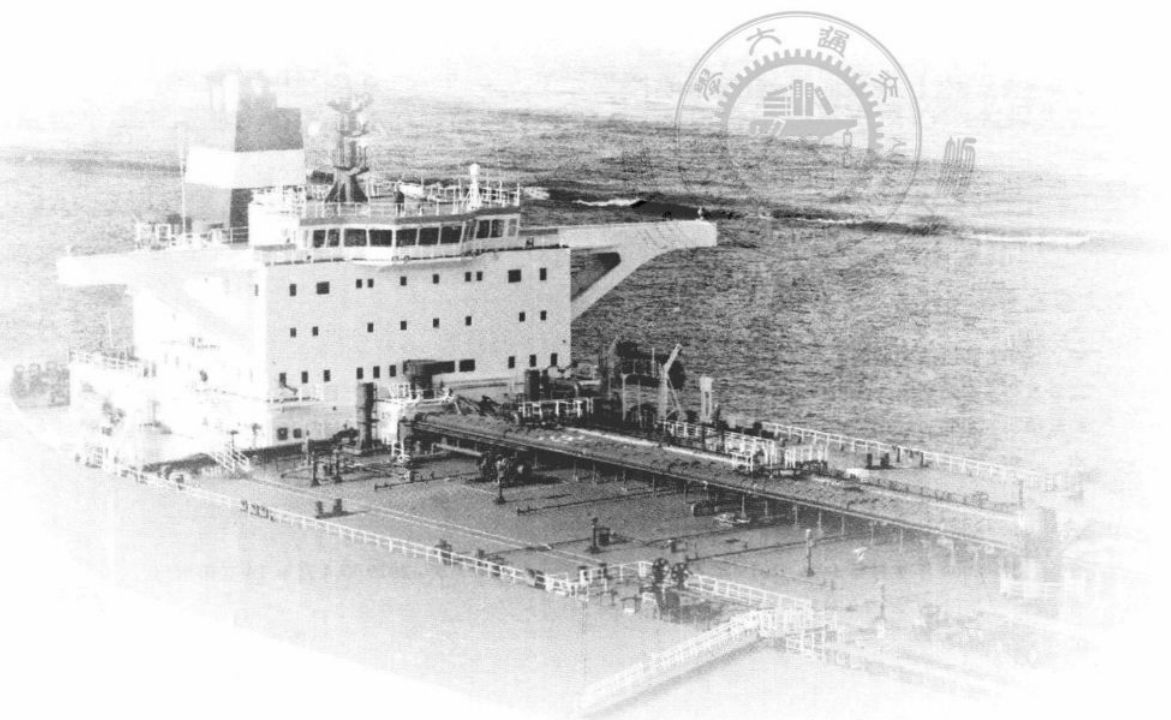
船舶原理

(下册)

第二版

盛振邦 主编

高新船舶与深海开发装备协同创新中心 组编



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

内容提要

船舶原理是以流体力学为基础探讨船舶航行性能的一门科学。全书上、下两册,共分五篇,第一篇为船舶静力学,第二篇为船舶阻力,第三篇为船舶推进,第四篇为船舶操纵,第五篇为船舶耐波性。上册由第一、二篇组成;下册由第三、四、五篇组成。

本书为下册,第三篇船舶推进以螺旋桨推进为主。除阐述螺旋桨的基本原理、几何特征、水动力性能、船体与螺旋桨的相互影响、空泡现象及桨叶强度外,着重讨论螺旋桨的图谱设计及船-机-桨的配合问题。关于螺旋桨的理论设计方法及螺旋桨的激振力等问题也做必要的介绍,此外还概略介绍了普通螺旋桨以外的特种推进装置。第四篇船舶操纵主要从船舶操纵运动的基本方程出发,分析船舶操纵的相关概念、操纵性衡准和试验方法,并介绍舵的水动力性能和舵的设计问题。第五篇船舶耐波性主要讨论船舶在风浪中的摇荡运动。因此首先从海浪的特点出发,阐述不规则波浪的统计分析和谱分析的基本理论,讨论波浪与船舶运动之间的响应关系,侧重于船舶在横浪中的横摇与顶浪中的纵摇与垂荡,并且提供了必要的实用成果、设计资料和理论计算方法;同时还介绍了船舶设计中有关耐波性的考虑和实船试验的分析方法。

本书是高等院校船舶与海洋工程专业本科生的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

船舶原理. 下册 / 盛振邦主编;盛振邦主编高新船舶与深海开发装备协同创新中心组编. —2版. —上海:上海交通大学出版社, 2019
ISBN 978-7-313-17995-1

I. ①船… II. ①盛… ②盛… III. ①船舶原理—高等学校—教材 IV. ①U661

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 216931 号

船舶原理(第二版) 下册

主 编: 盛振邦

组 编: 高新船舶与深海开发装备协同创新中心

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

印 制: 上海春秋印刷厂

开 本: 787 mm × 1092 mm 1/16

字 数: 690 千字

版 次: 2004 年 4 月第 1 版 2019 年 4 月第 2 版

书 号: ISBN 978-7-313-17995-1/U

定 价: 58.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 28

印 次: 2019 年 4 月第 14 次印刷

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: 021-33854186

第二版序

《船舶原理》自 2003 年底第一版出版至今已 14 年,期间经历 12 次印刷,供我国高等学校船舶与海洋工程专业作为教科书或教学参考用书,获得了肯定。不足之处是在 10 多年间内未做任何修订补充,深为遗憾。

2009 年左右,本书第一版主编之一刘应中教授、第三篇编著者王国强教授及第五篇编著者冯铁城教授先后谢世,其余各篇章的编著者也先后退休,一时难以组织人员对本书进行修订和补充,以致延缓了第二版的及时出版。鉴于近十几年来我国船舶工业及造船科学技术的飞速发展,本书作为教学用书,应当及时补充最新的科学技术和研究成果,以培养学生既能拥有扎实的基础知识,了解国内外的最新发展现状,又能具备分析和解决船舶航行性能相关问题的能力。为此,上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院船舶与海洋工程系精心组织、统一协调本学科在职的任课教授,对本书的第一版进行了大量细致的补充修订,完成了《船舶原理》一书的第二版。本书第二版编写的原则:一是保持原书的优点,二是补充并反映国内外在本领域的最新发展,三是力求注重对学生创新精神和实践能力的培养。

参加本书第二版编著的教师包括:胡铁牛负责第一篇船舶静力学的修订编写;张怀新,朱仁传负责第二篇船舶阻力的修订编写;杨晨俊,李巍负责第三篇船舶推进的修订编写;邹早建负责第四篇船舶操纵的修订编写;马宁,顾解忬负责第五篇船舶耐波性的修订编写。

《船舶原理》第二版终于出版问世,它将继续为我国高等学校船舶与海洋工程专业本科生提供教材或教学参考用书。书中存在的疏漏与不妥之处,殷切希望采用本书的广大师生批评指正。

盛振邦

2017 年 8 月于上海交通大学

第一版序

根据上海交通大学船舶与海洋工程专业《面向 21 世纪教学内容和课程体系的改革计划》，重新组合了整个专业的课程体系，以利于拓宽专业面和培养创新人才，将原先的“船舶静力学”“船舶阻力”“船舶推进”及“船舶操纵与摇荡”等四门课程整合为“船舶原理”。整合后的“船舶原理”是船舶与海洋工程专业一门主要的专业基础课程。本书是根据高等学校船舶与海洋工程专业本科生的教学要求编写的。

船舶原理是以流体力学为基础探讨船舶航行性能的一门科学。主要包括船舶的浮性、稳性、抗沉性、快速性(船舶阻力、船舶推进)、操纵性及耐波性。根据当今国内外对船舶原理包含内容的学科体系，本书分为五篇：第一篇船舶静力学；第二篇船舶阻力；第三篇船舶推进；第四篇船舶操纵；第五篇船舶耐波性。上海交通大学船舶流体力学研究所历来重视教材的编著，曾出版过《船舶静力学》《船舶阻力》《船舶推进》及《船舶操纵与摇荡》等全国高校统编教材，并经过多次修订再版。这些教材的优点是：叙述上力求概念清晰、层次分明、重点突出，密切结合船舶设计的需要；内容上反映本学科领域的基本内容及国内外的最新发展。因此上述教材曾多次获得过省部级优秀教材奖。为了使本书既能继承过去教材的优点，又能贯彻教学内容和课程体系的改革精神，由盛振邦和刘应中担任本书的总主编，曾编著以上教材的教授们担任各篇的分主编，目前担任本课程教学任务的教师也一起参加了编写工作。

本书分上下两册，上册包括船舶静力学和船舶阻力；下册包括船舶推进、船舶操纵和船舶耐波性。船舶静力学由盛振邦、胡铁牛负责修订编写；船舶阻力由邵世明、张怀新负责修订编写；船舶推进由王国强负责修订编写；船舶操纵由黄国梁负责修订编写；船舶耐波性由冯铁城负责修订编写。

“船舶原理”课程的主要任务是：通过各教学环节，培养学生以流体力学为基础，分析和解决船舶航行性能中有关问题的方法。为此需要特别注重创新精神和实践能力的培养。通过本课程的学习，使学生初步具有从事本领域实际工作和研究工作的能力，并为学习后续课程——船舶设计打下坚实的基础。要转变以往教学中单纯重视知识传授的教学思想，除加强对学生的创新精神和实践能力的培养外，还应重视个性教育。因此，要在总体上考虑课程建设，除编写出版教材外，对于其他教学环节都应编写出版与之配套的指导性教学文件，在教学过程中还应精心组织，诸如：编著本课程中各大型作业、课程设计及有关教学试验的指导书。由于本课程中实践环节多，计算工作量大，除为学生掌握基本理论进行少量的手工计算外，系统地编制各种计算机辅助教学软件，供学生进行大型作业、课程设计及试验数据分析处理的实际操作使用，以便了解和掌握应用计算机解决船舶原理中有关问题的能力。此外，结合本课程的教学内容，有计划、有目的地组织安排学生参加部分科研或实际试验工作；开设选修的教学试验和开放性试验，鼓励学生利用相关的设备进行探索性的试验研究等。

“船舶原理”虽是一门专业基础课程，但包含的内容相当广泛，有很强的实践性，既有许多

大型作业和课程设计,又有不少试验工作。船舶航行性能中有众多需要研究解决的问题,这为本课程教学中贯彻加强实践能力和创新精神的培养提供了广泛的领域。上海交通大学拥有船模试验池和空泡水筒及海洋工程水池等配套齐全、设施一流的船舶流体力学试验研究基地,这为本课程贯彻培养学生实践能力和创新精神提供了极为有利的条件。

本书的编写出版和与之相配套的课程建设,是“船舶原理”课程教学内容和教学方法改革的一种尝试,殷切希望广大师生在今后的教学实践中提出宝贵意见,以便不断改进。

编者

2003 年 3 月

前 言

船舶原理是研究船舶航行性能的一门科学。其中包括：

(1) 浮性——船舶在一定装载情况下浮于一定水平位置而不致沉没的能力。

(2) 稳性——在外力作用下船舶发生倾斜而不致倾覆,当外力的作用消失后仍能回复到原来平衡位置的能力。

(3) 抗沉性——当船体破损,海水进入舱室时,船舶仍能保持一定的浮性和稳性而不致沉没或倾覆的能力,即船舶在破损以后的浮性和稳性。

(4) 快速性——船舶在主机额定功率下,以一定速度航行的能力。通常包括船舶阻力和船舶推进两大部分,前者研究船舶航行时所遭受的阻力,后者研究克服阻力的推进器及其与船体和主机之间的相互协调一致。

(5) 耐波性(或称适航性)——船舶在风浪海况下航行时的运动性能。主要研究船舶的横摇、纵摇及升沉(垂荡)等习惯上统称为摇摆的运动。

(6) 操纵性——船舶在航行中按照驾驶者的意图保持既定航向的能力(即航向稳定性)或改变航行方向的能力(即回转性)。因此,船舶操纵性包括航向稳定性和回转性两部分内容。

船舶原理通常分为船舶静力学和船舶动力学两大部分。前者以流体静力学为基础,研究船舶的浮性、稳性及抗沉性等,后者以流体动力学为基础,研究船舶的阻力、推进、摇摆及操纵等。船舶阻力和推进主要研究船舶在等速直线航行时的性能,属于流体力学中的定常问题;船舶操纵性和耐波性是研究变速运动时的船舶运动,属于流体力学中的非定常问题,必须考虑惯性及附连水质量和惯性矩的影响。在船舶静力学中,主要讨论船舶的浮性、小倾角稳性(或称初稳性)、大倾角稳性及抗沉性等,此外还包括船舶纵向下水计算。在船舶阻力中,依次讨论阻力的成因、主要特性,确定阻力的方法和减小阻力的途径。对阻力相似定律、船模阻力试验、船型对阻力的影响等重要问题都进行了比较细致的探讨。此外,还扼要介绍了各类高速船舶的阻力特点。在船舶推进中,主要讨论推进器在水中运动时产生推力的基本原理及其性能的优劣(即效率高低)等问题,并对船体与推进器之间的相互作用以及船模推进试验等都进行了详细的阐述,还探讨了如何设计性能优良的推进器。快速性优良的船舶应该满足:①航行时所遭受的阻力要小,即所谓优秀船型(或称低阻船型)的选择问题;②推进器应发出足够的推力且效率要高;③推进器与船体和主机之间要协调一致。因此,船舶快速性包括阻力和推进两大部分。在船舶操纵中,从操纵运动的基本方程出发,分析船舶操纵性的基本概念,讨论操纵性的衡准和试验方法,重点介绍舵的水动力性能和舵的设计。在船舶耐波性中,主要讨论船舶摇摆运动。从不规则海浪的基本特点出发,根据统计分析理论,重点讨论船舶在风浪中的横摇与顶浪中的纵摇和垂荡。此外,对船舶设计中有关耐波性的考虑也进行了必要的介绍。

船舶设计建造部门总希望所设计建造的船舶具有优良的航行性能,用船部门(航运公司、

海军等)理所当然要求所属的各类船舶都具有优良的航行性能。概括说来,所谓优良的航行性能大体包括:船舶是否具有合理的浮态和足够的稳性,是否属低阻力的优良船型,推进器的效率是否最佳,推进器与船体及主机是否匹配,是否具有有良好的航向稳定性和回转性,在风浪中航行时是否会产生剧烈的摇摆运动以及砰击、甲板上浪及失速等。但在实际造船工作中,判断船舶是否具有优良的航行性能是有一定衡量指标的,有些指标是因考虑到航海安全而由船级社乃至国际组织规定必须满足的硬指标,有些指标则是与长期积累的优秀船型资料相比较而判定的。所有这些指标都与船舶的主要尺度、船体形状、装载情况等密切相关。因此,船舶原理中所讨论的众多问题,都是船舶设计、建造和营运乃至新型船舶的研究开发需要用到的专业基础知识。

目 录

第三篇 船 舶 推 进

第 1 章 概述	3
1-1 船舶推进器发展简史	3
1-2 功率传递及推进效率	8
第 2 章 螺旋桨几何特征	10
2-1 螺旋桨的外形及名称	10
2-2 螺旋面、螺旋线、螺旋桨的几何特征	11
第 3 章 螺旋桨基础理论	17
3-1 理想推进器理论	17
3-2 理想螺旋桨理论(尾流旋转的影响)	20
3-3 作用在桨叶上的力和力矩	23
3-4 螺旋桨水动力性能	28
第 4 章 螺旋桨模型的敞水试验	31
4-1 螺旋桨的相似定律	31
4-2 临界雷诺数及尺度效应	34
4-3 螺旋桨敞水试验及数据分析表达	37
4-4 螺旋桨模型系列试验及性征曲线组	39
第 5 章 螺旋桨与船体相互作用	42
5-1 伴流——船体对螺旋桨的影响	42
5-2 推力减额——螺旋桨对船体的影响	47
5-3 推进系数及推进效率的各种成分	49
5-4 提高推进性能的措施和节能装置	51
5-5 估算螺旋桨与船体相互影响系数的公式	56

第 6 章 螺旋桨的空泡现象 64

6-1 空泡的成因 64

6-2 叶切面的空泡现象及其对性能的影响 69

6-3 螺旋桨的空泡现象及其对性能的影响 71

6-4 螺旋桨模型的空泡试验 73

6-5 空泡校核 76

6-6 螺旋桨的噪声及谐鸣现象 82

第 7 章 螺旋桨的强度校核 85

7-1 《规范》校核法 85

7-2 分析计算法 88

7-3 桨叶厚度的径向分布 96

7-4 螺距修正 97

7-5 螺旋桨质量及惯性矩计算 100

第 8 章 螺旋桨图谱设计 104

8-1 螺旋桨的设计问题及设计方法 104

8-2 $B-\delta$ 型设计图谱及其应用 105

8-3 设计螺旋桨时应考虑的若干问题 126

8-4 船体-螺旋桨-主机的匹配问题 133

8-5 螺旋桨图谱设计举例 142

8-6 螺旋桨制图 150

第 9 章 实船推进性能 161

9-1 船模自航试验 161

9-2 实船性能预估 165

9-3 实船试航速度预报、螺旋桨与主机的配合情况 171

9-4 实船-船模相关分析 173

9-5 实船试速 175

第 10 章 特种推进器 179

10-1 导管螺旋桨 179

10-2 可调螺距螺旋桨 190

10-3 其他形式特种推进器简介 197

第 11 章 螺旋桨理论设计基础 201

11-1 螺旋桨升力线理论导言 201

11-2 螺旋涡线的速度势 212

11-3	螺旋涡线对升力线处的诱导速度	217
11-4	螺旋涡片的诱导速度	220
11-5	等螺距螺旋涡片的诱导速度的正交性	222
11-6	最佳环量分布螺旋桨设计问题	223
11-7	任意环量分布螺旋桨设计问题	234
11-8	桨叶切面的选择	236
11-9	螺旋桨升力面理论修正	244
11-10	叶型阻力	245
11-11	强度校核	248
第 12 章 螺旋桨激振力		251
12-1	概述	251
12-2	螺旋桨激振力的预估方法	255
12-3	减振措施	264
本篇附录 螺旋桨设计图谱		268
本篇参考文献		277

第四篇 船舶操纵

第 1 章 概述		281
1-1	船舶操纵性包含的内容	281
1-2	船舶操纵性的重要性	282
1-3	操纵船舶的闭环控制	283
第 2 章 船舶操纵性衡准		284
2-1	标准操纵试验及表征船舶操纵性的参数	284
2-2	IMO 船舶操纵性标准	287
2-3	船舶操纵性预报方法	288
第 3 章 船舶操纵运动方程		290
3-1	坐标系及船舶操纵运动方程	290
3-2	求取操纵运动水动力的方法	294
3-3	线性操纵运动方程及线性水动力导数	297
3-4	响应模型及 K 、 T 指数	301
第 4 章 稳定性		304
4-1	稳定性分类	304

4-2	直线稳定性的分析与判据	304
第 5 章	转首性和回转性	307
5-1	回转试验的三阶段	307
5-2	回转运动分析	307
5-3	回转过程中的伴随现象	310
第 6 章	控制装置	311
6-1	控制装置的种类	311
6-2	常规舵的几何特性及水动力特性	312
6-3	舵设计	313
第 7 章	改善船舶操纵性的措施	316
	本篇参考文献	318

第五篇 船舶耐波性

第 1 章	耐波性概述	321
第 2 章	海浪与统计分析	326
2-1	海浪概述	326
2-2	规则波的特性	327
2-3	不规则波的理论基础	330
2-4	谱分析的理论基础	339
2-5	风浪的谱密度公式	344
2-6	线性系统的响应关系	347
2-7	风级和浪级	357
第 3 章	船舶横摇	360
3-1	由线性理论确定横摇响应幅值算子	360
3-2	由模型试验确定横摇响应幅值算子	369
3-3	横摇水动力系数的确定	371
3-4	非线性横摇	382
3-5	横摇减摇装置	387
第 4 章	船舶纵摇和垂荡	399
4-1	船舶在波浪中的一般运动方程式	399

4-2 纵摇和垂荡的耦合运动计算..... 402

4-3 纵摇和垂荡运动的工程分析..... 410

4-4 斜浪中的船舶摇荡..... 416

第 5 章 船舶的耐波性设计和实船试验..... 419

5-1 船舶主要尺度和形状对耐波性的影响..... 419

5-2 船舶耐波性指标..... 422

5-3 耐波性实船试验的组织和实施..... 424

5-4 耐波性实船试验结果的数据分析..... 425

本篇参考文献..... 431

常用单位换算表..... 432

第 三 篇

船 舶 推 进

杨晨俊 李 巍 修订

第1章 概述

船在水面或水中航行时遭受阻力,其大小与船的尺度、形状及航行速度有关。为了使船舶能保持一定的速度向前航行,必须供给船舶一定的推力(或拉力),以克服其所受的阻力。作用在船上的推力是依靠能源来产生的(如人力、风力以及各种形式的发动机)。但是仅有能源还不能直接产生推力,故在船上还需要设有专门的装置或机构,把能源(发动机)发出的功率转换为推船前进的功率,这种专门的装置或机构统称为推进器,如桨、篙、橹、帆以及明轮、螺旋桨等。船舶快速性是船舶的重要性能之一。所谓快速性,是指船舶在给定主机功率情况下,在一定装载时于水中航行的快慢问题。快速性不论对民船或军舰都是很重要的问题。在船舶设计中要满足用船部门对快速性的要求,应当从下述4个方面来考虑。

- (1) 船舶于航行时所遭受的阻力要小,即所谓优良线型的选择问题。
- (2) 选择推力足够,且效率高的推进器。
- (3) 选取合适的主机。
- (4) 推进器与船体和主机之间协调一致。

本课程主要研究推进器在水中运动时产生推力的基本原理以及它的性能好坏(效率高)等问题,然后解决如何根据生产实际的要求设计出一个性能优良的推进器问题。

1-1 船舶推进器发展简史

人类开始使用船舶即须同时解决船舶的推进问题。在我国古籍文献中专门记载推进器的文字虽不多,但从船舶或航运的发展情况也可略见船舶推进发展之一斑。

在远古时代,我国已使用舟楫。在夏禹时代(公元前 2205—2198)已有“维牵”“帆”“橈”等推进工具。船在浅水中用篙撑持前进;深水中则用桨或橹,沿岸航行可用纤;进一步制作篷帆以利用风力,既省人工,且能加大船舶的尺度,航行距离也大为增加。以上所述各种推进方法经长期发展沿用至今,其中摇橹为我国所专有,帆船防横漂的披水板也系我国最早采用,以后才传至欧洲。

我国帆船航行海外的历史悠久,公元前即来往于南洋一带。据阿拉伯史家记载:在 5 世纪,中国帆船常远航至幼发拉底河畔的希拉城下,在 8、9 世纪远航至红海口的亚丁。明朝初年(15 世纪初),我国航海家郑和曾率船队七下西洋(即今南洋一带),远达非洲。在 18 世纪,我国帆船常远航至美洲西岸。

在历代史传中,有不少关于用桨轮来推进船舶的记载。各书中虽描述桨轮船航速之飞快,但无具体数据,对于推进器机构的叙述也极其简略,有待进一步考证。在汽船输入我国之前,此类桨轮船多系供军用。图 1-1 为明朝王圻所著《三才图会》中的轮船简图。鸦片战争时,我国曾有明轮军舰参加吴淞

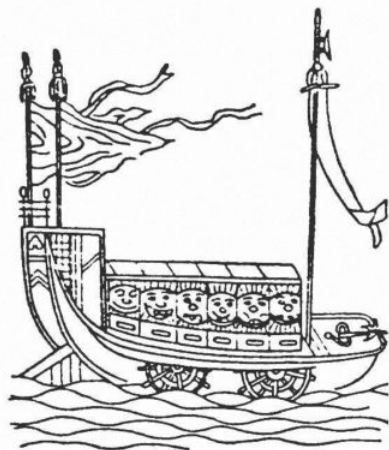


图 1-1 《三才图会》中的
轮船简图

战役,此时也有用脚踏机构转动船尾明轮的快班客船来往于上海、苏州之间。

其他各国关于用人力及风力推进船舶方法的演进过程与我国大致相似。公元前几千年,埃及、亚述、腓尼基和巴比伦就已造过装桨的船只,并用奴隶来划桨。当时长期在海上航行的大型船只,用大量的桨(50~100副)成排地装在舷侧,最大速度曾达7~8 kn。

由于船舶尺度和航行距离的不断增长,便出现了桨和帆兼用的船舶,这样可以缩减划桨人员数量,在经济上更为有利。在军舰和商船上,兼用帆-桨作为推进器延续了很长时期,至16世纪才进入纯粹用帆来推进军舰和商船的时代。18世纪中叶帆船设计有很大的发展,快速帆船在顺风条件下,航速可高达15~20 kn。但自船上开始应用蒸汽动力以后,风帆逐渐被其他形式的推进器所代替。

在蒸汽机发明以前,即已有人研究喷水推进器,并试图用以推进船舶,但由于此类推进器效率过低,经济性差,并未获得圆满效果,所以没有得到广泛的应用。

自蒸汽机发明以后,有许多人致力于船舶使用蒸汽动力的研究,其问题是使用何种推进机构最为实用,所从事设计与试验的推进器包括机动篙、机动划桨、明轮及螺旋桨等。就当时蒸汽机的性能及工业条件而言,则以明轮最为适宜。19世纪上半叶,明轮推进器有很大的发展,1830—1840年间,明轮推进器的应用最为广泛,当时明轮船极为盛行。但是,明轮作为航海船只的推进器有许多缺点,在风浪情况下,明轮的桨板会局部地或完全露出水面,致使船舶不能维持一定的航速和稳定的航向。海浪的强烈冲击常使桨板损坏,影响船舶的正常运行。此外,明轮的转速较低,不得不采用低速而笨重的主机。所以19世纪中叶以后,在海船上大多改用螺旋桨作为推进器。

关于使用螺旋桨作为船舶推进器的思想很早就已出现,各国发明家先后提出了很多螺旋推进器的设计。19世纪初期,各国竞相从事于螺旋桨的研究并试用于实际船舶,曾有人于1867年做过统计,与“发明”螺旋桨有关者不下470人。图1-2表示几种早期螺旋推进器的形式。1836年史密司号船采用木制单螺纹蜗杆形螺旋推进器[形状略似图1-2(a),但具有两全周]以8 kn的速度航行了400 n mile(海里),在试航中其推进器触物损伤了一部分,但船速反而增加。其后经多方研究改进,螺旋桨的航行成效也日益显著,故从19世纪中叶以后,螺旋桨就获得了广泛的应用。在长期的实践过程中,螺旋桨的形状不断改进,桨叶螺旋面的长度逐步减小,桨叶的形状也逐渐趋于完善。与其他类型的推进器相比,螺旋桨的构造简单,效率较高,故目前仍是军舰和商船上应用最为广泛的推进器。

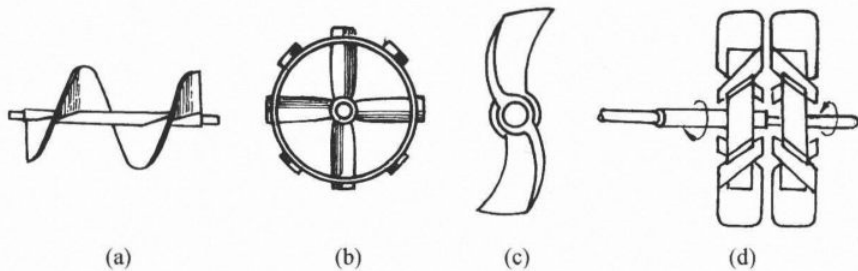


图 1-2 早期螺旋推进器的几种形式

1930年在摩托汽艇上首先使用了直叶推进器,以后经不断改善,在港口工作船和扫雷艇上的应用获得了成功,但由于构造复杂和重量大的缘故,在大型船只上至今还没有得到广泛的应用。

推进器的类型甚多,下面分别叙述常见的几种推进器,并简要地指出这些推进器的特征。