

“十二五”国家重点图书出版规划项目
黑龙江省精品图书出版工程

特种推进器及 附加整流装置

——王超 郭春雨 常欣 编著

TEZHONG TUIJINQI
JI FUJIA ZHENGLIU ZHUANGZHI



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

特种推进器及附加整流装置

王 超 郭春雨 常 欣 编著
黄 胜 主审

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

全书综合介绍了近年来有关特种推进器及附加装置方面的研究成果,对于有关的理论基础和节能原理作了详尽的推导和说明,并结合工程设计和试验的结果,介绍节能效果及设计后应注意的一些问题。

本书可作为船舶与海洋工程专业学生教材使用,也可供专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

特种推进器及附加整流装置/王超,郭春雨,常欣
编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2013. 2
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0539 - 4

I. ①特… II. ①王… ②郭… ③常… III. ①推进器 -
研究 ②推进器 - 整流器 - 研究 IV. ①V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 025479 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 15. 25
字 数 378 千字
版 次 2013 年 5 月第 1 版
印 次 2013 年 5 月第 1 次印刷
定 价 32. 00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

节能、减排和降噪是现在船舶发展的大趋势,在 MEPC 58 次会议上,IMO 通过的新造船能效公式(EEDI)计算导则将统一强制实施。此强制措施的推出,势必将提高船舶的设计标准和水平,对船机桨配合要求更高。各种类型的船舶,依据其使用对象、工作环境等的不同,对推进装置的要求也各不相同。为了顺应各类船舶的任务特点,完善和开发各种特种推进装置是大势所趋。

全书共分四章,第一章主要介绍推进器及附加装置的发展历程,使读者对船舶推进器有总体上的了解;第二章简要讲解了推进器的主要设计方法及性能预报方法,使读者可以获知针对船舶推进器可采用的主要研究手段;第三、四章分别针对各种特种推进器及附加装置进行详细地论述,使读者可以更系统地了解各设备的基本构架、发展历程、理论基础及实际应用情况等。

本书以黄胜教授编著的《船舶推进节能技术与特种推进器》为蓝本,对其内容进行了新的分类、整理,并补充了一些其他特种推进器及附加装置的相关内容。全书回顾了近年来有关特种推进器及附加装置方面的研究成果,将国内外科研机构和学者发表的研究报告及论文结合我校的研究成果粗加整理,组成新的体系予以介绍。本书的相关内容在近几年已作为我校的研究生教材使用,这次又作了补充修改。同时,作者在叙述中力求内容系统全面,在文字方面尽量做到通俗易懂,期望可以满足本科生以及其他层次读者的学习要求。

本书主要内容由王超编写,3.5 节由解学参编写,3.7 节由常欣编写,3.8 节由于凯编写,4.4 节由郭春雨编写,何苗博士也为本书编写做了许多工作。全书由王超统稿。

本书的出版得益于哈尔滨工程大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(创新团队)项目的大力支持。同时,在本书出版过程中,得到哈尔滨工程大学出版社的支持和帮助,使得该书能在较短时间内出版。

由于作者所阅读文献不多、水平有限,难免有错误和不当之处,敬请有关专家学者予以指正。

编 者

2012 年 8 月于哈尔滨工程大学

目 录

第 1 章 船舶推进器的发展历程	1
1.1 概述	1
1.2 船舶推进器的产生与发展	1
1.3 船舶推进装置的分类	5
1.4 船舶推进器的应用及前景	8
第 2 章 推进器设计及性能预报方法	9
2.1 概述	9
2.2 推进器设计研究	9
2.3 推进器性能预报方法	12
第 3 章 特种推进器	17
3.1 竖轴摆线推进器	17
3.2 侧向槽道推进器	26
3.3 部分浸水推进器	40
3.4 喷水推进器	45
3.5 吊舱推进器	55
3.6 Z 型传动全回转推进器	73
3.7 全方位推进器	87
3.8 仿生推进器	98
3.9 无梢涡螺旋桨(TVF)	108
3.10 导管螺旋桨	115
3.11 串列螺旋桨	129
3.12 对转螺旋桨	136
3.13 磁流体推进器	143
3.14 可调螺距螺旋桨	154
3.15 波浪推进器	165
3.16 其他特种推进器	174
第 4 章 附加整流装置	175
4.1 螺旋桨后自由旋转助推叶轮	175
4.2 固定式反应鳍类	186
4.3 毂帽鳍	191
4.4 舵附推力鳍	195
4.5 扭曲舵	205
4.6 舵球	215
4.7 其他节能装置	226
参考文献	227

第1章 船舶推进器的发展历程

1.1 概 述

近些年,随着国际上石油价格飞涨,能源短缺,能源问题已成为世界各国政府、实业界和科技部门密切关注的问题。船舶作为交通运输中载运量比例最大的载运工具,随着物流业的进一步发展,其发挥着越来越重要的作用。但船舶作为能耗大户,节能装置的开发研究还很不充分,节能潜力巨大,相关研究具有重要的现实意义。与新兴的信息产业相比,船舶工业与航运业是一个十分传统的行业。传统行业如何适应可持续发展战略的要求,并维护自身行业微薄的利润率,是一个非常艰巨的任务。有“工业血液”之称的石油价格居高不下,给本来就不景气的传统行业带来了更大的冲击。因此,为了减少船舶的营运成本,提高经济效益和社会效益,船舶节能是一个不容忽视的问题。船舶的节能技术改造,可减少船舶的运输成本,提高企业的利润率,给企业带来更高的经济效益,是一项十分有意义的工作。节能问题的研究已经成为我国国民经济发展中的长期战略任务之一,船舶节能技术的研究与开发备受关注。船舶节能装置的研发有利于提高我国船舶设计制造领域在国际上的地位,同时也是目前国际船舶界提出的“船舶节能减排”方面重要的研发目标。

同时,随着现代探测设备和武器(导弹、鱼雷、水雷)向高精度、远距离发展,舰艇(特别是潜艇)的暴露和被命中率大幅提高,生存力和战斗力受到严重威胁。比如我国某舰在航速 18 kn 时就出现严重空泡,噪声级高达 190 多分贝,不仅会影响舰上工作人员的工作和休息,而且大大降低了该舰的战斗力及生存能力。舰艇辐射噪声一直是衡量舰艇战斗力及生存能力的主要性能之一,它已经成为其最主要的作战性能指标。在舰艇的辐射噪声源的组成中,螺旋桨噪声占极其重要的位置。舰艇航行中,螺旋桨一旦发生空泡,在几千赫兹以上的中高频段主要是螺旋桨空泡噪声。随着空泡的发展,螺旋桨空泡噪声成为潜艇总噪声中最主要的成分。在低航速,螺旋桨未发生空泡前,以舰艇机械噪声为最高,螺旋桨噪声次之,但噪声级相差不是很大。而随着机械工业的发展,机械设计安装的精密化,浮筏等隔振减振装置的使用,机械噪声降低趋势明显,螺旋桨噪声也相应日渐突出。因此,开展基于某种设计目的的特种推进装置研究将具有重要的军事意义。

1.2 船舶推进器的产生与发展

由螺旋面的旋转获得轴向推力的原理很早就被发现了,我国东晋时期(公元 314—420 年)就有利用螺旋状的“竹蜻蜓”做成飞车的记载,后来传入欧洲。

1483 年意大利的杰出艺术家、科学家达·芬奇提出了直升旋翼的设想,并绘制了草图(图 1-1)。开始了人们将这一原理用于直升机,后来试图用于船舶推进。

蒸汽机问世后与明轮配合推进船舶,获得了比较满意的效果,但是随着蒸汽机技术的进步,转速提高,结构趋轻型化,明轮日益暴露出发动机与推进器的不协调,为发展螺旋桨

提出了需求。必须指出,螺旋桨能在蒸汽机时代发展较快有三个背景:

(1)古代的车轮,即欧洲所谓的“桨轮”,配合蒸汽机,将原来桨轮的一列直叶板斜装于一个转毂上,构成了螺旋桨的雏形;

(2)古代的风车,随风转动可以输出扭矩,反之,在水中,输入扭矩转动风车,水中风车就有可能推动船运动;

(3)在当时,已经使用了好几个世纪的阿基米德螺旋泵,能在水平或垂直方向提水,螺旋式结构能打水。这一事实,成为后期设计研发推进器的重要启迪。

伟大的英国科学家虎克在 1683 年成功地采用了风力测速计的原理来计量水流量,与此同时,他提出了新的推进器——虎克螺旋桨(图 1-2)推进船舶,为船舶推进器的发展作出了重大贡献。

1752 年,瑞士物理学家伯努利第一次提出了螺旋桨比在它问世以前存在的各种推进器优越的报告。他设计了具有双导程螺旋的推进器,安装在船尾舵的前方。1764 年,瑞士数学家欧拉研究了能代替帆的其他推进器,如桨轮(明轮)、喷水推进,也包括了螺旋桨。

潜水器和潜艇在水面下活动,传统的桨、帆无法应用,笨重庞大的明轮也难适应。于是第一个手动螺旋桨,不是用在船上,而是作为潜水器的推进工具。1775 年,独立前的美国的戴维·布什内尔(David Bushnell)制作的木质潜水器“海龟”(Turtle),它被称为军用潜艇的元祖,曾经炸毁了一艘英国帆船,其形状如图 1-3 所示,具有两个(上下、前后方向)手动的螺旋状的推进器并配有舵,因此可以在水下作三维运动。

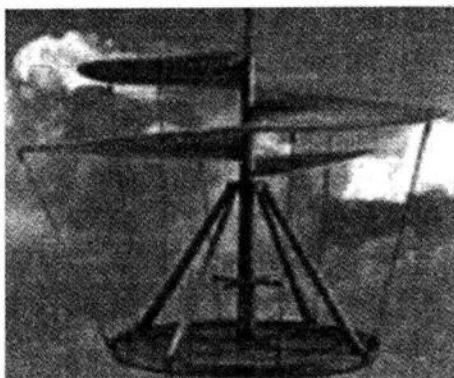


图 1-1 达·芬奇提出直升旋翼的设想

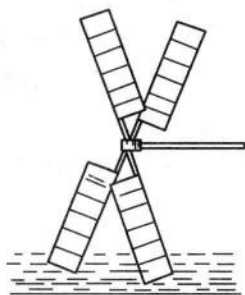


图 1-2 虎克螺旋桨

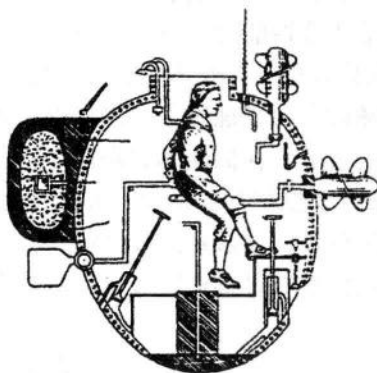


图 1-3 “Turtle”潜水器的手动螺旋推进器

蒸汽机问世为船舶推进器提供了新的良好动力,推进器顺应蒸汽机的发展,成为船舶推进的最新课题。

第一个试验动力驱动螺旋桨的是美国人斯蒂芬,他在 1804 年建造了一艘 7.6 m 长的小船,用蒸汽机直接驱动,在哈德逊河上做第一次试验航行,试验中发现发动机不行,于是换

上瓦特蒸汽机,试验航速是4 kn,最高航速曾达到8 kn。

斯蒂芬螺旋桨有4个风车式桨叶,它锻制而成,和普通风车比较,它增加了叶片的径向宽度,为在试验中能选择螺距与转速的较好配合,桨叶做成螺距可以调节的结构。在哈德逊河上两个星期的试验航行中,螺旋桨改变了几个螺距值,但是试验的结果都不理想,性能远不及明轮。这次试验使他明白,在蒸汽机这样低速的条件下,明轮的优越性得到了充分发挥,它的推进效率高于螺旋桨是必然的结论。

在斯蒂芬以后,研究螺旋桨的人很多,如1805年列雷的8叶风车式螺旋桨,分别装设在船的左、右两舷,英国1816年双叶螺旋桨专利,1824年法国道尔曼风车式座轴反转螺旋桨等。著名的“利物浦”号的风车式螺旋桨(图1-4),它是伦敦杰塞夫·泰勒1838年的专利。

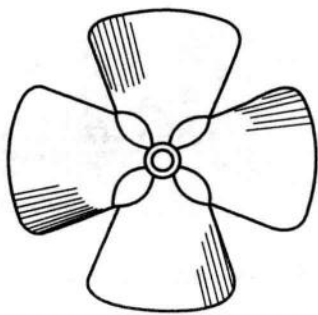


图1-4 “利物浦”螺旋桨

阿基米德螺旋的引入,最早见于1803年,1829年有英国的阿基米德螺旋桨的专利。在19世纪30年代,瑞典的前任军官约翰·爱立信和英国工程师弗兰西斯·佩蒂特·史密斯两人都设计过用螺旋桨推进的船。他们从古希腊人那儿得到启发。古希腊人使用阿基米德螺旋,即用一种“瓶塞钻”状装置来提水。佩蒂特·史密斯的试验是成功的,但不完全符合他的意向。他建造了一艘有木制螺旋桨的船,螺旋桨的一部分突然折断了。使他惊奇的是,用变短的螺旋桨,这船反而走得更快。因此他便建造了另一艘船——“阿基米德”,该船于1838年下水,并在此基础上于1840~1841年建造了一些民用的螺旋桨。1843年,英国海军在“雷特勒”号舰上,第一次以螺旋桨代替明轮,随后由史密斯设计了20艘螺旋桨舰,参加了对俄战争,史密斯成为著名人物。

1843年,美国海军建造了第一艘螺旋桨船“浦林西登”号,它是由舰长爱列松设计,在爱列松的积极推广下,美国相继建造了41艘民用螺旋桨船,最大的排水量达2 000 t。

尽管英、美等国取得了一些成功,但是螺旋桨用作船舶推进还有很多问题,如在木壳船上可怕的振动,在水线下的螺旋桨轴轴承磨损,桨轴密封,推力轴承等。

佩蒂特·史密斯的工作受到工程师艾萨姆巴德·金多姆·布鲁内尔的关注,布鲁内尔那时正在建造一艘巨大的汽船“大不列颠号”。布鲁内尔本打算在“大不列颠号”上使用明轮推进器,但他在观看了“阿基米德号”后就改进为使用螺旋桨推进器。与那个时期的许多船一样,“大不列颠号”既有帆又有蒸汽机(如图1-5所示)。顺风时,船很快扬帆,把燃料节省下来,以便风平浪静时或刮逆风时使用。布鲁内尔的大船在1845年第一次横渡了大西洋。人们目睹了它的成功后,采用螺旋桨推进器的船就越来越普及了。图1-6为“大不列颠号”在1846年搁浅时的图片,其巨大的船体和螺旋桨推进器都清晰可见。虽有这次事故,但总体来说这艘船是非常成功的。从此,其他许多船也很快以装有高效率的螺旋桨推进器而自豪。

1845年,一艘明轮船和一艘用螺旋桨推进的船参加了一次激战,有螺旋桨的船轻易地取得了胜利。

随着技术的进步,螺旋桨的缺陷一个一个地被弥补,随着蒸汽机转速的提高,愈来愈多的螺旋桨在船上取代明轮。到1858年,“大东方号”装有当时世界上最大的螺旋桨,它的直

径有 7.3 m, 质量达 36 t, 转速每分钟 50 转。当时, 推进器标准不再具有权威性, 由于螺旋桨的推进效率接近明轮, 而且它具有许多明轮无法竞争的优点, 明轮逐步在海船上消失。

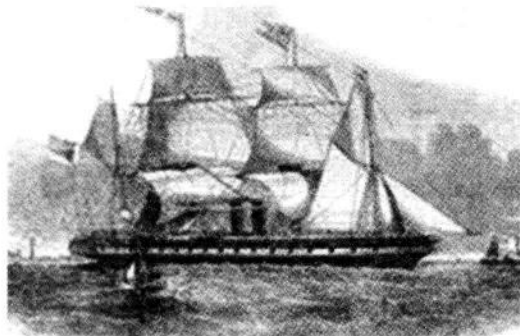


图 1-5 布鲁内尔设计的汽船“大不列颠号”

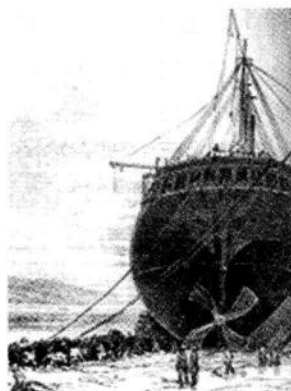


图 1-6 “大不列颠号”船体及螺旋桨

在科学技术发展过程中, 许多机械装置的性能在人们还不太清楚的时候, 就已经广泛使用了。但是人们在不理解它的物理规律和没有完整的理论分析以前, 这些装置很难达到它的最佳性能。螺旋桨也不例外, 直到 1860 年, 虽然它在海船上已经成为一枝独秀, 但是它的成就全都是依靠多年积累的经验。螺旋桨的进步, 只依靠专家们的直观推理, 已经不能满足船舶技术的发展需要, 更有待科学家对其流体动力特性作出完整的解释, 这就促进了螺旋桨理论的发展。

螺旋桨的理论研究, 在船舶技术发展过程中, 比任何一个专业领域都做得多, 从经验方法过渡到数字化设计, 再进而应用计算机技术进行螺旋桨最优化的设计。一个好的螺旋桨其设计是非常重要的, 模型试验也起着主要的作用。

由于我国自 19 世纪中叶沦为半殖民地, 因此对近代螺旋桨的发展很少有贡献。解放后, 我国造船事业得到新发展, 对螺旋桨技术也进行了大量设计、研究工作, 为各类舰船配上了大量自己设计制造的螺旋桨。值得一提的是“关刀桨”的问世, 它是我国在螺旋桨技术发展中的一大创造。在 20 世纪 60 年代, 广州文冲船厂一位名叫周挺的师傅, 他根据自己几十年制作螺旋桨的经验, 把螺旋桨的桨叶轮廓作成《三国演义》中关公的 82 斤重大刀的式样, 并形象地叫它“关刀桨”(图 1-7)。“关刀桨”曾在一些船上试验航行, 提高了船的航速, 更奇的是螺旋桨的振动却大大地减弱了。在当时的长江 2 000 马力 (1 470 kW) 拖轮和华字登陆艇上使用, 都取得了良好的效果。这一成就, 吸引了许多造船界人士。1973 年, 在上海首先作了“关刀桨”敞水试验研究, 同时还提供了设计图谱。

世界著名造船国家今天开发的“大侧斜”螺旋桨, 如图 1-8 所示是在客渡船上采用的大侧斜螺旋桨, 该桨直径 5.1 m, 轴功率 15 640 kW, 船航速为 23.2 kn; 化学品船上采用的大侧斜螺旋桨, 该桨直径 6.2 m, 轴功率 10 400 kW, 船航速 16.7 kn; 护卫舰上采用的大侧斜低噪音螺旋桨, 该桨直径 4.2 m, 轴功率 19 123 kW, 船航速 31.6 kn; 某巡洋舰上采用的低噪音低振动大侧斜螺旋桨, 该桨直径 1.6 m, 轴功率 2 030 kW, 船航速 24.5 kn。它们和“关刀桨”非常相似, 其重要特征是振动、噪声小, 这也是“关刀桨”所具有的特点。

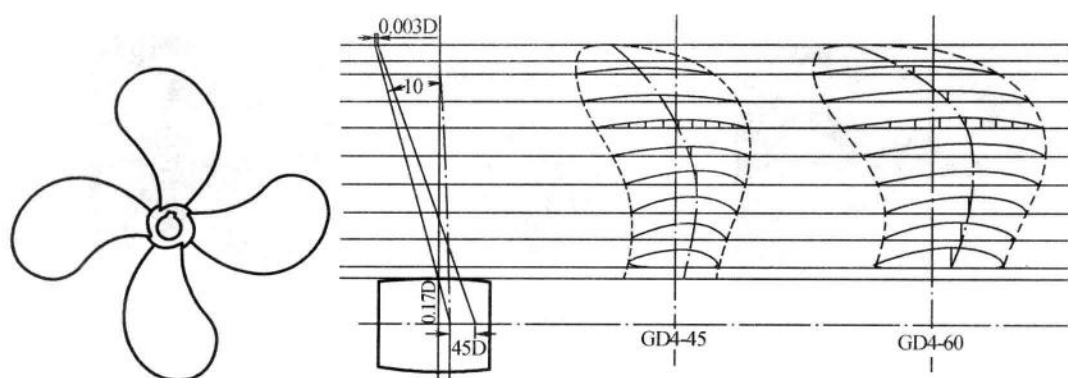


图 1-7 关刀桨

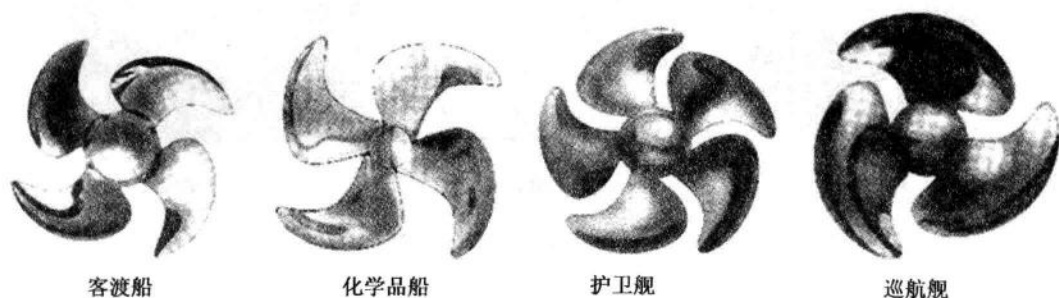


图 1-8 大侧斜螺旋桨的应用

在螺旋桨的发展过程中,还出现了许多螺旋桨同族的推进方式,如导管螺旋桨、可调螺距螺旋桨和空气螺旋桨等。普通(常规)螺旋桨在船舶上应用很广泛,主要是它的结构较简单而效率也较高。但是,应该注意到当前对于普通螺旋桨的开发研究,已经到了非常艰难的地步,即使要取得很小的改进(例如效率提高1%)也要付出相当大的努力。在改善伴流场、减少振动、提高效率以及使用条件限制等情况下,靠单纯的普通螺旋桨来解决,有时是很困难的。因此,当前人们已经将很大一部分精力花在开展特种推进装置方面的研究。

1.3 船舶推进装置的分类

从减少船舶螺旋桨能量损耗和使用条件方面来看,船舶推进装置的发展主要在以下方面^[1]:

(1) 推进器主体。在普通螺旋桨基础上按不同的使用情况演变,例如,可调螺距螺旋桨、串列螺旋桨、对转螺旋桨、导管螺旋桨、无梢涡螺旋桨或端板螺旋桨,以及低转速大直径螺旋桨、大侧斜螺旋桨等,如图 1-9 所示。

(2) 在普通螺旋桨前面安装附件装置(有人称它为 Haas 型),例如,安装前置固定叶轮(反应鳍)、前置导管、补偿(伴流)导管、导流器(鳍)等,如图 1-10 所示。

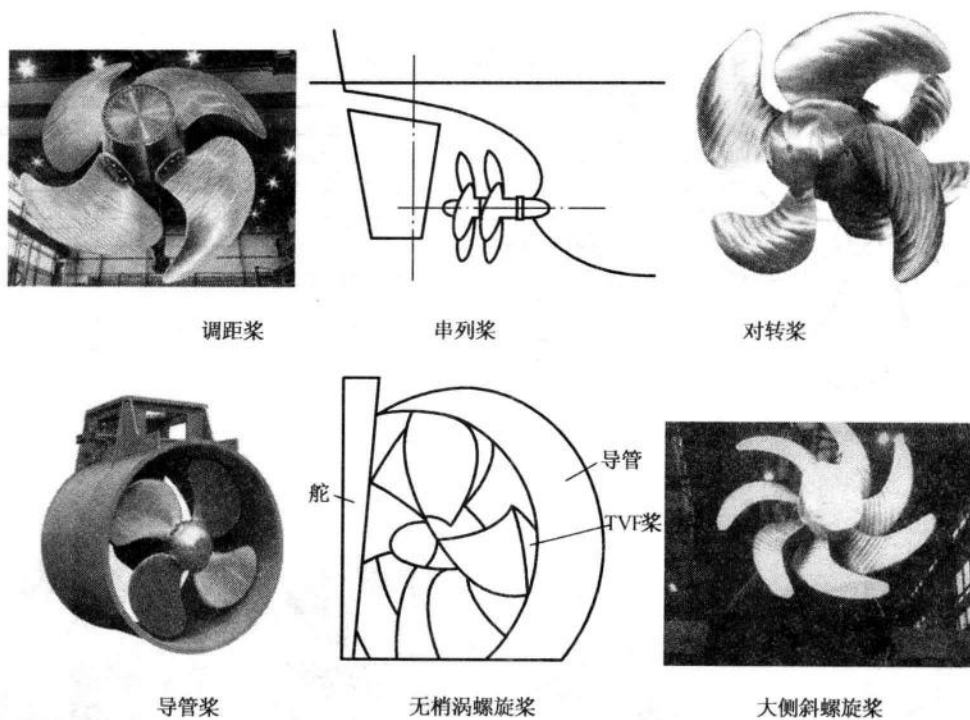


图 1-9 各种特种推进器

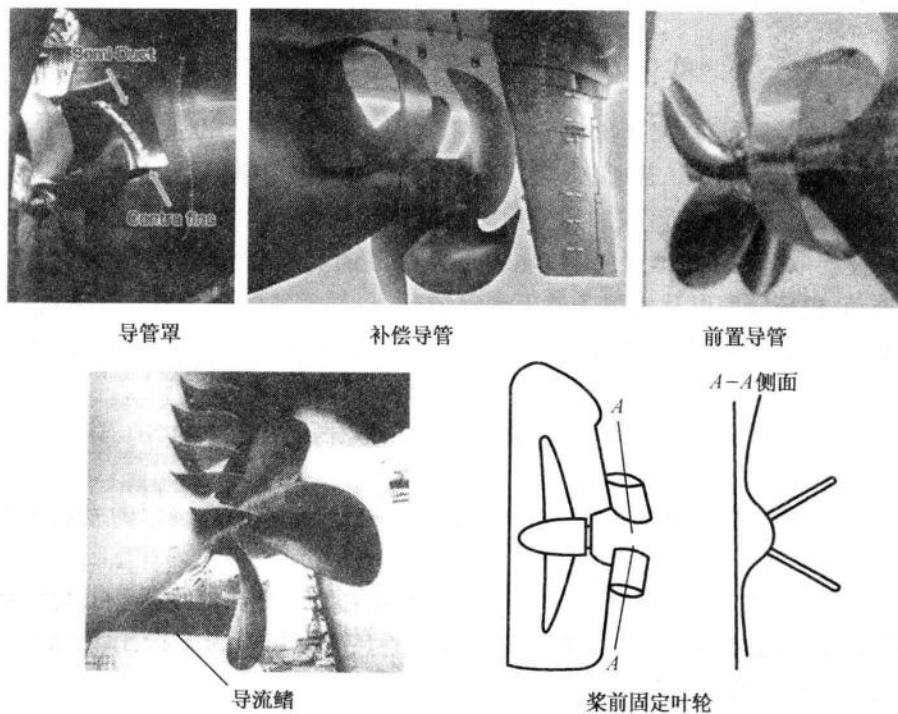


图 1-10 各种桨前附加装置

(3)在普通螺旋桨后面安装附件装置(有人称它为 Wagner 型),例如,安装后置固定叶轮(反应鳍)、后置自由叶轮(导轮)、舵推力鳍、毂帽鳍等,如图 1-11 所示。

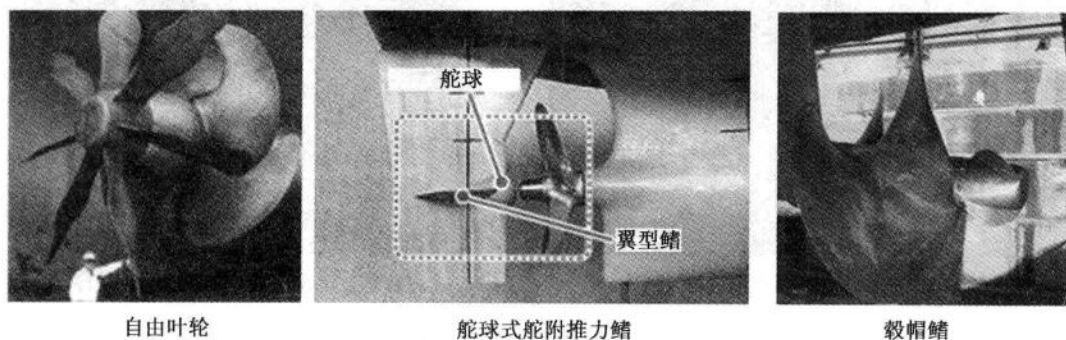


图 1-11 各种桨后附加装置

(4)利用大自然中取之不尽的能源或资源条件,例如风力推进、波能推进以及超导电磁推进等,如图 1-12 所示。

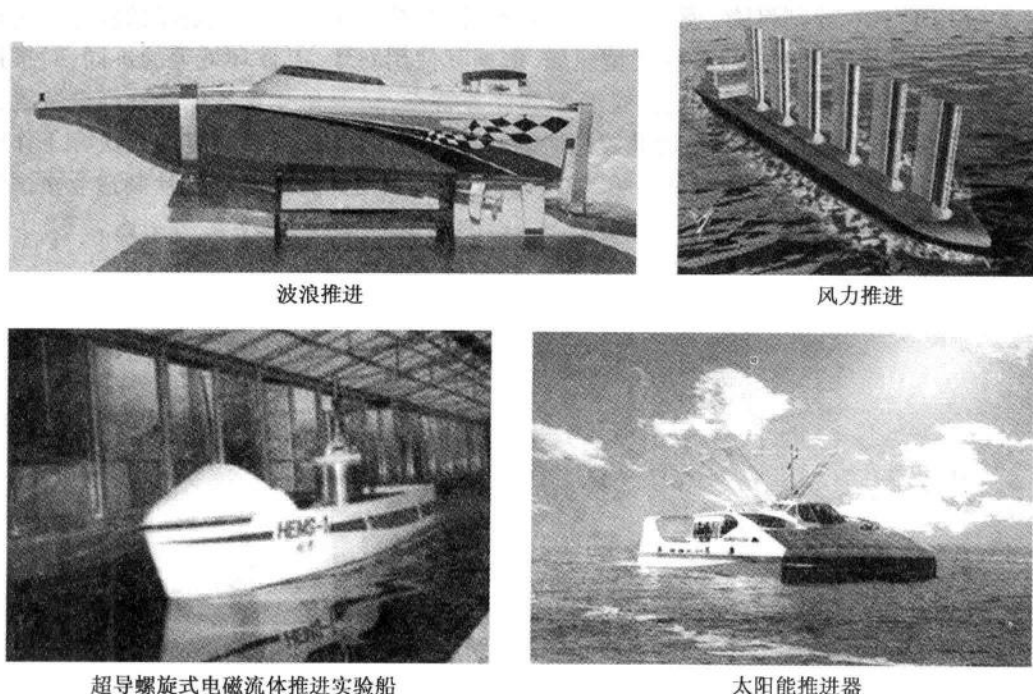
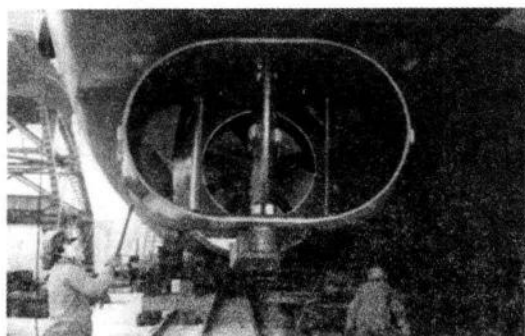
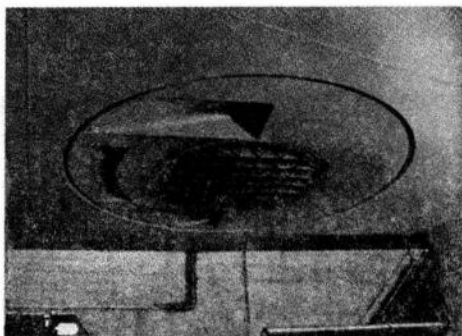


图 1-12 自然能源推进装置

(5)根据使用条件的发展形势,例如喷水推进器、螺环推进器、螺杆推进器等。由于当今高速喷水推进器效率已经可以与普通螺旋桨比拟甚至更高,因此喷水推进器的应用已经很普遍,图 1-13 所示为喷水推进装置。



708所设计的喷水推进器



肖特尔公司设计的喷水推进器 (SPJ)

图 1-13 喷水推进装置

1.4 船舶推进器的应用及前景

节能、减排和降噪是现在船舶发展的大趋势,在 MEPC 58 次会议上 IMO 通过的新造船能效公式(EEDI)计算导则将统一强制实施。强制措施的推出,势必将提高船舶的设计标准和水平,对船机配合要求更高。各种类型船舶,依据其使用对象、工作环境等的不同,对推进装置的要求也各不相同,为了顺应各类船舶的任务特点,完善和开发各种特种推进装置是大势所趋。我国船舶推进器及节能装置的研究和开发潜力巨大,开展该方面的研究工作既符合目前国际船舶界提出的“绿色船舶”发展新理念,又可提高我国船舶设计制造业在国际上的竞争能力。

第2章 推进器设计及性能预报方法

2.1 概 述

本章主要介绍推进器常规的设计方法(图谱设计、升力线设计、升力面设计、面元法设计)和性能预报方法(升力面、面元法、试验手段、CFD方法)。

2.2 推进器设计研究

螺旋桨设计是整个船舶设计中的一个重要组成部分。在船舶线型初步设计完成后,通过有效马力的估算或船舶助力试验,得出该船的有效马力曲线。在此基础上,要求我们设计一个效率最佳的螺旋桨,既能达到预定的航速,又能使消耗的主机马力最小;或者当主机已选定,要求设计一个在给定主机条件下使船舶能达到最高航速的螺旋桨。目前设计船用螺旋桨的方法有两种,即图谱设计法和环流理论设计法。图谱设计法在船厂及部分研究院所一直都在沿用,环流理论方法也得到了较广的发展和应用^[2]。

2.2.1 螺旋桨图谱设计法

图谱设计法就是根据螺旋桨模型敞水试验绘制成专用的各类图谱来进行设计。用图谱方法设计螺旋桨不仅计算方便,易于为人们所掌握,而且如选用图谱适宜,其结果也比较满意,是目前应用比较广的一种设计方法。应用图谱设计螺旋桨虽然受到系列组型的限制,但此类资料日益丰富,已能包括一般常用螺旋桨的类型。

螺旋桨图谱设计经过多年的发展,目前已经形成很多系列,不过许多只是同一试验资料的不同表达,有的仅仅是螺旋桨的形式不同,此外,不同的图谱适用的对象也有很大不同,如果不加以注意特定船舶的特点和要求,螺旋桨设计就有可能失败。现在广泛使用的螺旋桨设计图谱主要有B- δ 型和K-J型两种^[2]。B- δ 型图谱在实践中被大量使用,并表现出良好的适应性,K-J型的应用则远不如B- δ 型图谱广泛,但是有时在设计高速军舰的螺旋桨时会用到。B- δ 型图谱设计又根据所采用的图谱不同分为AU型螺旋桨图谱设计、荷兰楚思德B型螺旋桨图谱设计和高恩图谱螺旋桨设计三种。

(1) AU型螺旋桨图谱设计是目前最为常用的螺旋桨设计方法,其模型试验结果是以 $K_T, 10K_Q - J$ 的敞水特征曲线形式发表的(如图2-1),此类螺旋桨的性能比较优良,尤其适用于高速军舰。

(2) 荷兰楚思德B型螺旋桨设计所采用的B型图谱是由荷兰瓦根宁船模试验池根据B型螺旋桨模型系列试验结果所绘制的,具有很长的历史,已经经过了几次修改,一般在商船中广泛应用。

采用荷兰楚思德 B 型螺旋桨图谱设计出的螺旋桨,即 B 型螺旋桨,其叶形梢部较宽,略有侧斜,纵斜角为 15° 后倾,根部切面为机翼形,梢部为弓形。四叶螺旋桨系列的螺距从 $0.6R$ 处至叶梢处为等螺距,自 $0.6R$ 向叶根逐渐递减,至叶根处减少 20%,其余各系列均为等螺距分布。

(3) 高恩螺旋桨模型的系列试验发表于 1953 年英国造船年刊中。模型的几何特征是:三叶、椭圆形展开轮廓、弓形切面、等螺距和无纵斜。桨叶的展开面积比为: $0.20 \sim 1.10$,螺距比 P/D 的范围为 $A_d/A_0 < 0.8$ 时, $P/D = 0.4 \sim 2.0$; 当 $A_d/A_0 \geq 0.8$ 时, $P/D = 0.6 \sim 2.0$,毂径比为 0.2 ,叶厚比为 0.06 。

2.2.2 螺旋桨理论设计方法

2.2.2.1 升力线设计

螺旋桨升力线理论设计是螺旋桨理论设计中的基本组成部分,虽然在螺旋桨的性能预报中已经很少用升力线理论,但是在螺旋桨设计领域,对于已有的螺旋桨设计理论而言,螺旋桨的主要几何参数和水动力性能参数都是在升力线设计阶段确定的,同时升力线理论也是后续的升力面理论发展的基础。图 2-2 为螺旋桨的升力线基本模型。

用升力线理论来设计螺旋桨的过程大概可以分为以下步骤^[3]:

(1) 根据最佳环量分布原理或者给定环量的分布形式可以得到满足设计条件要求的设计螺旋桨水动力螺距角和每个计算剖面的环量。据此可以得到每个计算剖面处的水动力螺距角和升力系数。

(2) 接着步骤(1)得到的水动力螺距角和升力系数,选择相应的桨叶剖面 and 叶剖面攻角。在升力线理论体系中,选择桨叶剖面 and 叶剖面攻角是从已有的翼型系列试验资料或理论计算资料中选取的。

(3) 一般选择翼型有如下要求:具有较低的阻升比,以减少由于黏性而引起的效率损失;能较好地抑制或推迟空泡的发生。

从升力线理论设计螺旋桨的步骤可以看出,要将升力线理论设计的螺旋桨成功应用,实际关键在于选择合适的翼型剖面。因此就需要一种试验资料齐全且被广泛采用具有确切把握的成熟翼型为其提供设计依据,故而剖面的选择多采用 Naca16 或者 Naca66 剖面。一般采用 $a = 0.8$ 的拱弧线,因为它在理想流体及黏性流体中的压力分布相差不多。在实际

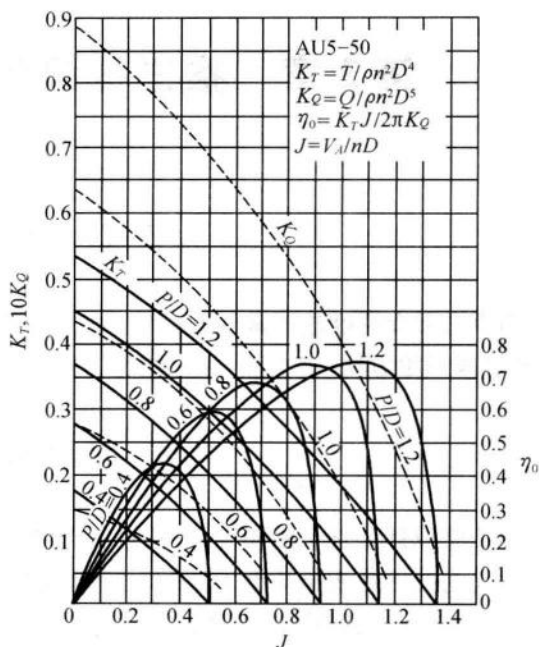


图 2-1 AU5-50 $K_T, 10K_Q - J$ 图谱

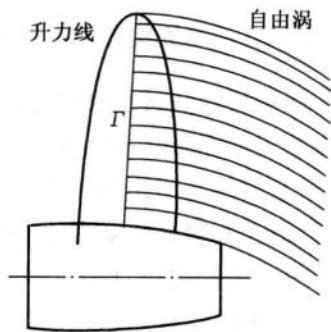


图 2-2 螺旋桨的升力线模型

应用中又考虑到 Naca66 剖面尾缘太薄,因而修改成抛物线尾部,称为 Naca66mod。根据压力分布计算,发现此种剖面导边处出现小的吸力峰,不利于空泡,因此又有了后来在此基础上修改的 NSRDC - Naca66mod 剖面。在选取的翼型确定后根据其二维特性求出叶剖面的弦长、攻角、拱度和厚度。在确定这些剖面参数的时候用到了大量的根据经验、试验得到的数据,因此其设计也只能针对特定的有完整试验数据的翼型,并不能满足人们对于不同设计条件多样化的要求,因此升力线设计已经从 20 世纪 60 年代开始逐步被更先进的升力面设计方法所取代。但是在进行升力面设计之前,通常仍须先采用升力线理论设计以确定一些必要的参数,为升力面的设计计算做准备。升力面理论设计主要是通过满足拱弧面的物面边界条件来确定螺旋桨的螺距分布和拱弧面形状,所以升力线理论的设计存在的价值是显而易见的。

2.2.2.2 升力面设计

升力面理论设计螺旋桨早期采用的是连续涡分布的设计方法。最初由 1961 年的卞保琦提出。后来英格利希把涡网格法用来解螺旋桨问题,即用离散的、形成网络的涡线来近似地代替涡的连续分布,但主要是对均匀流、最佳环量分布、无纵斜的情况。而克尔文在 1973 年发表的方法,则可适用于轴对称非均匀来流、任意环量分布、有纵斜和大侧斜的情况。用离散化来代替连续分布,这是数值计算中采用的一种方法。对于如何选取网络的分布和如何选取控制点,使解最好地收敛于精确解,是数值计算技巧问题。图 2-3 为螺旋桨的升力面模型。

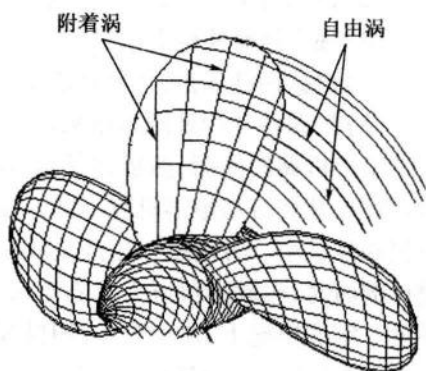


图 2-3 螺旋桨的升力面模型

船舶螺旋桨升力面理论是以在螺旋桨叶片拱弧面上连续分布的附着涡来替代叶片的作用,该涡片称为螺旋桨的附着涡片,即升力面^[4]。在升力面上各点处均有自由涡泄出,自由涡的方向应沿当地的流线方向形成三维的尾涡区域。进一步假设附着涡分布在桨叶各剖面的弦线所组成的参考面上,则自由涡也在参考面所在的螺旋面上,这样由附着涡面和自由涡面形成了螺旋桨升力面模型。由在参考面上分布的源汇替代桨叶厚度的影响,利用拱弧面上的运动学边界条件,建立基本积分方程。由于在应用升力面理论设计之初,还不知道螺旋桨的螺距分布,故参考面是未知的,同时叶宽分布、环量分布、尾涡的螺距角分布、厚度分布等均是未知的,所以应先选取最接近的数值作为一次近似,然后再进行迭代。最好的近似值就是取自升力线理论的计算结果,一般取升力线理论的尾涡螺距角、环量分布、叶宽分布和叶厚分布作为一次近似。升力面理论计算后,可以得到叶剖面的弦线、叶宽分布及环量分布,然后看它们是否满足设计要求。如不能满足要求,则可重新做参考面再继续迭代。

2.2.2.3 面元法设计

面元法(Surface Panel Method)又称边界元方法(Boundary Element Method),是被广泛应用于船舶螺旋桨的理论分析和计算方法。面元法的基本思想利用格林公式将任意封闭物体表面的速度势表示成为分布于物体表面上的源汇、涡或偶极等奇点的诱导速度势的积分,求解时将物体表面离散化为一系列小的面元,在面元上取控制点,并假设面元上的奇点的分布形式,利用物面和无穷远处的边界条件及库塔条件求得数值解。显然,方法中面元

的分布和边界条件的满足都取决于确定的物体表面,而螺旋桨的设计问题正是要在已知运转条件和设计要求的情况下,确定螺旋桨的形状,因此,应用面元法的基本原理,推导出设计螺旋桨的解析方法几乎是不可能的,但以面元法为基础,采用逐次近似的数值迭代处理方法,可以解决设计问题。哈尔滨工程大学苏玉民教授编写的《船舶螺旋桨理论》中给出了基于面元法设计螺旋桨的具体过程,下面作一简要介绍。

一般在螺旋桨的设计问题中,给出要求的船速 V_A ,主机的转速即螺旋桨的转速 n ,伴流分数 w ,推力减额分数 t ,推力负荷系数 C_T 或功率负荷系数 C_P 等条件,根据这些条件、船尾的外形及振动方面的要求,可以确定螺旋桨的直径 D 和叶数 Z ,并可预估盘面比,适当选择桨叶的轮廓,也可选取由升力线理论、升力面理论或图谱设计的螺旋桨作为原型桨。数值设计步骤如下^[4]:

(1) 根据设计条件确定设计桨的主要参数,选取一个设计原型桨。

(2) 计算各桨叶切面的空泡数。

(3) 确定螺旋桨应有的最佳环量分布 $G_{opt}(r)$ 。

(4) 根据设计规范,计算螺旋桨各叶片应有的厚度。

(5) 根据各叶片处的厚度和环量设计螺旋桨叶剖面的形状。这里,应用上述条件设计三维矩形机翼的剖面,然后将其应用于桨叶,由于桨叶的形状与矩形机翼不同,且为扭曲的,所以,其绕流与矩形机翼不同。在同样的剖面 and 攻角的情况下,桨叶剖面的环量较矩形机翼的环量小。方法中根据经验取所要求环量的两倍设计剖面。为了尽可能地避免空泡,设计剖面时,选取平顶压力分布形式。设计剖面的攻角与桨叶剖面的螺距角和拱度有关,环量一定的情况下,攻角较小,则拱度较大,因而,设计剖面时应选取适当的攻角。

(6) 由上一步设计的桨叶各半径处的剖面及攻角构成设计螺旋桨。

(7) 应用面元法预报设计螺旋桨的敞水性能,压力分布及环量分布 $G(r)$ 。

(8) 比较设计螺旋桨的环量分布与最佳环量分布,通常它们是不相等的,定义修正因子为

$$\delta G(r) = \frac{G_{opt}(r) - G(r)}{G_{opt}(r)} \quad (2-1)$$

由下式调整设计螺旋桨叶片各剖面的几何攻角

$$\alpha^k(r) = \alpha^{k-1}(r) [1 + \delta G(r)] \quad (2-2)$$

即调整螺旋桨的螺距角分布,重新预报螺旋桨的环量分布,如环量分布与最佳环量分布在允许的精度内达到一致,则进行下一步计算,否则,根据(2-2)式调整攻角进行迭代计算。

(9) 对上一步计算得到的螺旋桨进行空泡校核计算和强度校核计算,如空泡条件和强度条件都得到满足,则该桨即为所求设计螺旋桨;如某个条件不满足,则修改相应的参数,从第4步开始进行迭代计算。

按上述设计步骤,经多次数值迭代计算,可以最终得到满足设计要求的螺旋桨。

2.3 推进器性能预报方法

2.3.1 理论预报

用于螺旋桨性能理论计算的力学模型主要有升力线理论、升力面理论和面元法三类。