

海军工程大学学术专著出版基金资助

国家自然科学基金青年基金（51209212，51306205）资助

喷水推进器 空化及其监测

⚓ 刘承江 苏永生 段向阳 王永生 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

海军工程大学学术专著出版基金资助

国家自然科学基金青年基金(51209212, 51306205)资助

喷水推进器空化及其监测

刘承江 苏永生 段向阳 王永生 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要结合作者 10 余年来在喷水推进器空化性能及空化监测方面的理论与试验研究工作,介绍喷水推进器空化及其监测方面的相关知识。全书共 12 章,前 3 章主要介绍喷水推进、空化和数值计算方法相关理论知识;第 4~7 章主要介绍喷水推进器空化性能数值分析及试验验证;第 8~12 章主要介绍空化监测方面的内容,包括实船空化测量系统设计、空化特征提取方法等内容,并列举了实船空化监测案例。全书以理论为指导,注重理论与试验相结合,充分发挥数值模拟的优势,弥补理论与试验难以全面研究空化的不足。本书具有较强的针对性和专业性,既可作为相关领域专业技术人员、高校师生、科研院所设计人员的参考书,也可以作为相关专业研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

喷水推进器空化及其监测/刘承江等编著. —北京:国防工业出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-118-11109-5

I. ①喷… II. ①刘… III. ①喷水推进器—空化 ②喷水推进器—监测 IV. ①U664.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 281278 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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16¼ 字数 372 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 89.00 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

前 言

喷水推进是有别于螺旋桨推进的一种特殊推进方式。基于高速时推进效率高、抗空化能力强、机动性和操纵性优异、水下辐射噪声低、适合浅水航行等特点,喷水推进在高速高性能船舶上得到广泛应用。近几十年来,随着喷水推进设计技术、计算机模拟技术以及测控技术的不断进步,喷水推进器已实现产品系列化,并向大型化方向发展,其应用领域也从小型、高速船舶向大、中型及更宽广航速范围的船舶发展。美国 21 世纪最先进的战斗舰艇之一的濒海战斗舰采用了喷水推进技术,该舰排水量达 2800 多吨,设计航速为 45 节。国内从事喷水推进技术研究的人员较少,研究力量较弱,大多数喷水推进器依赖于进口。随着国内经济的发展和众多需求的牵引,我国也必将有更多的军舰和民船采用喷水推进技术。

喷水推进器抗空化能力强、水下辐射噪声低、可降低船体振动的特点都涉及喷水推进器的空化性能,所以空化性能是喷水推进器性能的一个重要方面,对其空化性能的研究是喷水推进器研究中的一项重要内容。由于西方发达国家的技术封锁,包括空化性能在内的喷水推进器许多性能的设计和特征参数等作为其核心技术,在产品销售过程中均没有直接提供,而国内在这些方面可直接参考的公开资料也很少。本书作者近 10 年来在喷水推进器空化性能数值计算、试验研究及空化监测等方面做了大量工作,借助于数值模拟方法和测试测量技术积累并形成了一些研究成果。作者将这些成果总结成书,望能抛砖引玉,激发有志者加入到该领域的研究中来。

全书以理论为指导,注重理论与试验相结合,充分发挥数值模拟的优势,以数值计算和试验为主要方法和手段,分析喷水推进器空化性能,确定空化监测方法,弥补理论分析难以全面研究空化的不足。本书共分 12 章,第 1 章由王永生教授和讲师刘承江、苏永生博士共同完成,主要概述喷水推进的发展、工作原理、特点、性能预报方法和空化监测现状及发展趋势等;第 2 章由刘承江和苏永生共同完成,主要介绍了空化产生机理、危害和喷泵空化特征提取方法及空化监测机理;第 3~7 章由刘承江完成,主要介绍喷水推进器空化性能数值分析和喷泵空化性能试验,重点在于借助数值计算方法和计算结果分析喷水推进器的推进特性和空化特性,并与螺旋桨性能进行对比;第 8~11 章由苏永生完成,主要介绍空化模拟试验平台与实船空化测量系统设计、空化特征提取方法、空化强度故障识别分类研究及评估和空化监测阈值的确定方法;第 12 章由工程师段向阳博士完成,主要列举了实船空化监测案例。

在书稿撰写过程中,得到了海军工程大学各级领导和同事的关心和帮助,给予了政策和时间上的保障。感谢华中科技大学张克危教授、武汉大学龙新平教授、武汉理工大学毛筱菲教授和丁江明副教授在百忙之中抽出宝贵时间审查了本书的初稿并提出了宝贵意见。感谢海军工程大学学术专著出版基金和国家自然科学基金(青年基金)的资助。

本书具有很强的针对性和实用性,既可作为从事相关领域研究的工程技术人员、设计人员、管理人员的参考书,又可作为高等院校、科研院所相关专业的技术参考资料。由于作者水平有限,书中必有不妥之处,殷切恳请读者、同行批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 喷水推进概述	1
1.1.1 喷水推进发展简史	1
1.1.2 喷水推进器的组成和工作原理	6
1.1.3 喷水推进的特点	7
1.1.4 喷水推进器推进性能预报方法	11
1.1.5 喷水推进器性能图谱	12
1.2 空化研究现状	15
1.2.1 空化理论的发展	15
1.2.2 空化流动的数值模拟方法	16
1.2.3 空化初生与空化噪声	18
1.2.4 CFD 方法在空化流动模拟中的应用	19
1.3 喷水推进器性能数值预报研究现状	21
1.3.1 喷泵性能数值研究	21
1.3.2 进水流道性能的数值研究	22
1.3.3 喷水推进器性能数值预报研究	22
1.3.4 喷水推进器空化性能研究	24
1.4 空化监测的研究现状	24
1.4.1 空化监测试验研究	24
1.4.2 空化特征提取信号处理技术研究	27
1.4.3 喷水推进泵空化监测技术	30
1.5 喷水推进器空化监测技术的若干问题和发展趋势	31
1.5.1 喷水推进器空化监测技术的若干问题	31
1.5.2 喷水推进器空化监测技术的发展趋势	32
第2章 空化理论及监测机理分析	34
2.1 空化产生的机理和条件	34
2.2 空化的阶段、类型和危害	35
2.2.1 空化的阶段	35
2.2.2 空化的类型	35
2.2.3 空化的危害	36
2.3 喷水推进泵空化特征提取常用方法	36
2.4 空化监测机理	38
第3章 数值计算方法及其在空化流动数值模拟中的应用	40
3.1 计算流体力学	40
3.2 湍流模拟与湍流模型	40

3.2.1	雷诺时均数值模拟方法	41
3.2.2	大涡模拟方法	44
3.2.3	分离涡模拟	45
3.3	多相流模拟与空化模型	46
3.3.1	基于密度的空化模型	47
3.3.2	基于压力的空化模型	47
3.4	绕二维水翼空化流动数值模拟与模型评价	50
3.4.1	空化流动稳态计算	50
3.4.2	空化初生最大应力判据	59
3.4.3	空化流动瞬态模拟	62
3.5	喷水推进器空化流动数值模拟简介	69
第4章	喷水推进器推进性能数值计算	70
4.1	数值方法校验	70
4.1.1	喷水推进双级轴流泵水力性能数值计算与分析	70
4.1.2	主冷却剂泵水动力性能数值模拟与分析	81
4.1.3	泵喷推进器水动力性能数值模拟与分析	86
4.2	喷水推进器数值模型与校验	89
4.2.1	喷泵数值计算与模型校验	89
4.2.2	喷水推进器敞水性能数值模型与校验	93
4.2.3	装船后喷水推进器推进性能数值模拟与校验	102
第5章	喷水推进器空化性能数值计算与分析	109
5.1	数值模型校验	109
5.1.1	湍流模型的评价	110
5.1.2	空化模型评价	111
5.1.3	对临界压力的考虑	111
5.2	喷泵空化性能数值计算与分析	111
5.2.1	相似定律及其应用	112
5.2.2	喷泵空化性能曲线及其应用	113
5.2.3	来流不均匀性对喷泵空化性能的影响	116
5.3	喷水推进器空化性能数值计算与分析	120
5.3.1	计算结果	120
5.3.2	空化性能分析	121
5.4	空化限制线的确定	124
5.4.1	空化限制线上若干工况的计算	125
5.4.2	空化限制线的确定	126
5.5	瞬态模拟与分析	131
5.5.1	设计点工况瞬态计算	131
5.5.2	严重空化工况瞬态计算结果	133
第6章	喷水推进泵空化性能试验	135
6.1	试验泵水力模型的设计	135
6.2	试验泵及测试段的结构设计	137
6.3	试验内容	139

6.3.1	运转试验	139
6.3.2	水力性能试验	140
6.3.3	汽蚀性能试验	140
6.4	试验结果与分析	141
6.5	空化性能数值预报	145
第7章	喷水推进器与螺旋桨特性的差异	155
7.1	敞水性能的差异	155
7.1.1	叶元体与叶片受力	155
7.1.2	喷水推进器和螺旋桨流场数值模拟	156
7.1.3	流场与工作特性分析	159
7.1.4	小结	161
7.2	空化性能的差异	161
7.2.1	喷水推进器流场数值模拟	161
7.2.2	喷水推进器发生空化的条件分析	162
7.2.3	喷水推进器空化数	164
7.2.4	小结	166
第8章	空化模拟试验平台与实船空化测量系统设计	167
8.1	概述	167
8.2	实验室空化模拟试验平台设计	167
8.2.1	试验平台的结构组成和工作原理	167
8.2.2	试验平台的空化模拟原理和方法	168
8.2.3	数据采集和分析	169
8.3	实船空化测量系统设计	170
8.3.1	实船测试硬件介绍	170
8.3.2	采集系统架构介绍	170
8.4	基于 LabVIEW 软件的测试系统	172
第9章	空化特征提取方法的研究	174
9.1	基于高阶导数的空化特征提取研究	174
9.1.1	高阶导数的计算	175
9.1.2	高阶导数提取脉冲特征研究	175
9.1.3	试验研究	176
9.1.4	小结	179
9.2	空化振动信号调制特征分析及提取方法研究	179
9.2.1	包络技术和相关分析原理	180
9.2.2	空化信号的解调技术仿真研究	182
9.2.3	试验研究	187
9.2.4	小结	192
第10章	空化强度故障识别分类研究及评估	194
10.1	基于时序分析的空化故障识别研究	194
10.1.1	时间序列分析的原理	194
10.1.2	离心泵运行工况的建模	196
10.1.3	空化残差方差值的特征识别	197

10.2	空化故障识别的时域分析研究	197
10.2.1	时域特征选择	197
10.2.2	空化故障时域特征识别及评估	199
10.2.3	试验研究	200
10.3	最小二乘支持向量机分类研究	202
10.3.1	最小二乘支持向量分类机	203
10.3.2	最小二乘支持向量分类算法	205
10.3.3	空化信号强度仿真	207
10.3.4	试验研究	208
10.4	小结	212
第 11 章	空化监测阈值的确定方法研究	213
11.1	声压规律曲线的描述	213
11.2	离心泵空化监测阈值的试验研究	214
11.2.1	离心泵空化监测频段的选择	215
11.2.2	NPSH ₃ 值的判别	216
11.2.3	离心泵空化监测思路	217
11.2.4	离心泵空化监测阈值的确定研究	218
11.3	喷水推进泵空化监测阈值的试验研究	221
11.3.1	喷水推进泵空化监测参数的选取	221
11.3.2	喷水推进泵空化监测频段的选择	221
11.3.3	喷水推进泵空化监测阈值的确定研究	229
第 12 章	实船空化监测案例	234
12.1	传感器的安装	234
12.2	空化转速与空化限制线	235
12.3	空化在线监测特征阈值的确定	237
12.4	实船喷水推进泵空化在线监测	240
参考文献		245

第1章 绪论

1.1 喷水推进概述

1.1.1 喷水推进发展简史

喷水推进器的演变可追溯到1661年的一项专利,之后它主要经历了以下几种结构类型的演变:早期的喷射推进器、液压泵推进器、间歇式喷水推进器、底板式喷水推进器、艉板式喷水推进器和舷外式喷水推进器。尽管船舶喷水推进比船舶螺旋桨推进早诞生19年,但在很长一个时期里它不如螺旋桨推进应用那么广泛和普遍。近几十年来,随着理论水平、泵设计水平的提高和喷水推进船应用的增多,喷水推进逐渐被人们接受,并不断挑战一直处于统治地位的螺旋桨推进,发展成为目前在高性能舰船上广泛应用的先进的推进技术。经过300多年的演变,现代主要应用的喷水推进器有艉板式、底板式和舷外式3种类型,其中艉板式喷水推进器应用最为广泛。

1. 早期的喷水推进

1661年,英国人图古德和海斯发明了一项专利,该专利采用一种特别的方法迫使水流通过船舶底部或两舷使船舶航行,这是喷水推进的雏形。该专利较英国人胡克发明螺旋桨要早19年。但在随后近70年中,喷水推进技术处于停滞不前的状况。直到1730年,艾伦首先将蒸汽机同喷水推进器结合在一起。他的设想是在船体内产生蒸气并将其引到船尾,在水下喷射蒸气来推动船舶前进。模型试验证实了他的设想是可行的。美国人卢姆赛第一次将喷水推进器成功地应用于蒸汽机船上,他被公认为世界上第一艘喷水推进船的开创者。该船通过装在船内龙骨上的管道吸水,在蒸汽泵作用下将水从船尾喷出产生推力。1787年该船试航,但航速只有2节(kn)。

2. 液泵式喷水推进

由于管道长,摩擦损失大,往复式蒸汽机驱动容积泵的功效低等原因,早期的喷水推进在效率上难以同明轮和螺旋桨相匹敌。直到1839年,英国人鲁思凡申请了一项液泵式喷水推进的专利。鲁思凡喷水推进系统(图1.1)从船首的开口吸水,通过管道与安装在船舶中部的离心泵相连,离心泵将水流加速,通过管道将水从两舷紧贴或稍高于水面喷出。鲁思凡喷水推进系统的核心是一台大型离心泵,该推进系统随后被多艘船舶所选用。

3. 间歇式喷水推进

费区1790年发明了一项专利,被认为是间歇式喷水推进器(图1.2)。该专利设想将水从船首引入,经过单向阀输入锅炉内加热达到一定压力后,顶开出口单向阀向船尾喷射。锅炉冷却时形成的真空又可将水从船外吸入。该过程周而复始,可推动船舶前进。但多次实践证明,该方法无法产生足够大的功率和较高的效率。

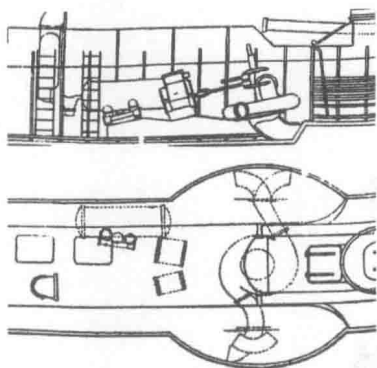


图 1.1 鲁思凡喷水推进系统

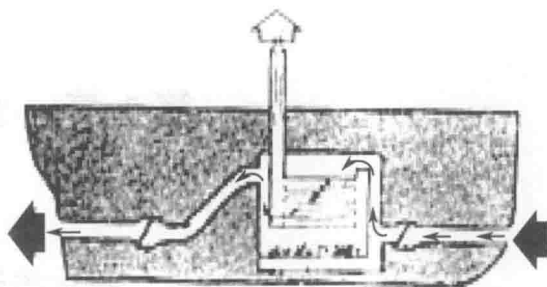


图 1.2 费区发明的喷水推进系统

1976 年，美国人佩恩和纽豪研制了一种现代化的蒸汽水脉冲喷水推进器。该推进器每秒能完成 4 个循环过程，在模型试验中获得了令人满意的推力和效率，给间歇式喷水推进的发展注入了一线生机。

佩恩和纽豪斯还设计了一种以柴油机为动力的间歇式喷水推进器（图 1.3）。这种推进器的最基本形式是将柴油机和推进器组合在一起，直接利用柴油机活塞向下的垂直运动将水从喷口喷出，这种方法可省去柴油机的曲轴以及推进器的叶轮，大大减轻推进装置的重量，简化推进器结构。如果能够克服振动以及阀门设计中的一些问题，这种推进装置在当时可以说是较为耐用而高效的推进器。

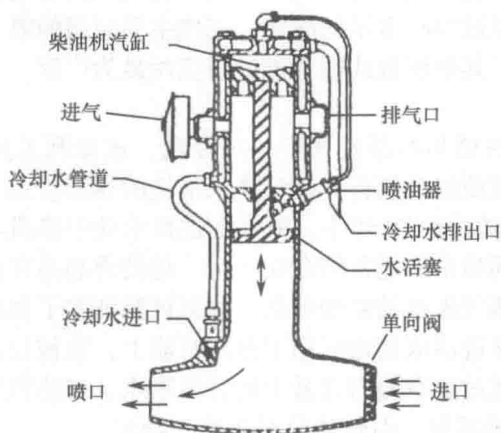


图 1.3 佩恩和纽豪斯发明的喷水推进装置

4. 底板式喷水推进

第一次世界大战期间，英国研制了两艘用于执行特殊任务的试验船。该试验船安装了专门设计的喷水推进器，喷水推进器委托英国皇家工程师吉尔设计。他在设计中引入了一些新构思，这些新构思在今天的喷水推进器上大多仍然可以看到。这种喷水推进器（图 1.4）将泵和管路结合为小巧的弯管状系统，安装在船体底板上。该装置具有斜倾的进水管、轴流式推进泵，泵叶轮安装在水平布置的驱动轴上。该喷水推进器的另一大特点是配置了组合式倒航机构，当该机构伸出船外时，水流被折转向船首方向喷射，产生倒车力。

第一次世界大战后，吉尔继续从事喷水推进设计，他的推进装置和倒航机构最终获得了英国专利。1920 年前后，位于伦敦的吉尔推进器公司设计开发了一系列底板式喷

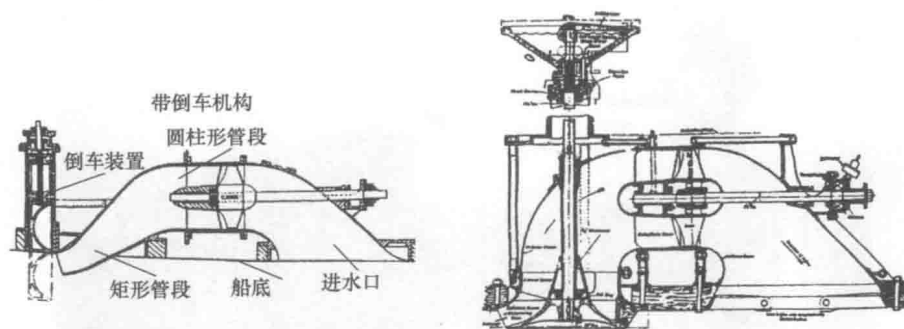


图 1.4 带有操舵倒航机构的底板式喷水推进器

水推进装置，功率范围从 3 马力到 100 马力，可应用于 3.65 ~ 36.5m 长的各类船舶。

40 多年后，德国的推进器制造商肖特（Schottel）公司加入底板式喷水推进的生产行列。其后，底板式喷水推进的发展方向有了很大的改变。肖特公司的喷水推进器是一种特殊形式的喷水推进器，也称为泵喷射推进器，其核心部件是一个离心泵（图 1.5）。离心泵工作时，泵叶轮将水从船底进水口吸入，进水口隔栅用于防止外界杂物进入泵内，保护推进器。在叶轮作用下，被吸入的水流获得能量，随后进入泵的扩压涡壳，将动能转换成压能，最后将水流从安装在船底板上的喷口与船体呈 15° 喷出而产生推力。喷口方向在船底板上可进行 360° 方向旋转。工作原理如图 1.6 所示。肖特泵喷射推进器结构紧凑，机动性好，在极浅水域效能优越，因此在浅吃水船舶和两栖车辆上得到了较广泛的应用。目前该类推进器的最大功率可达 3400kW。

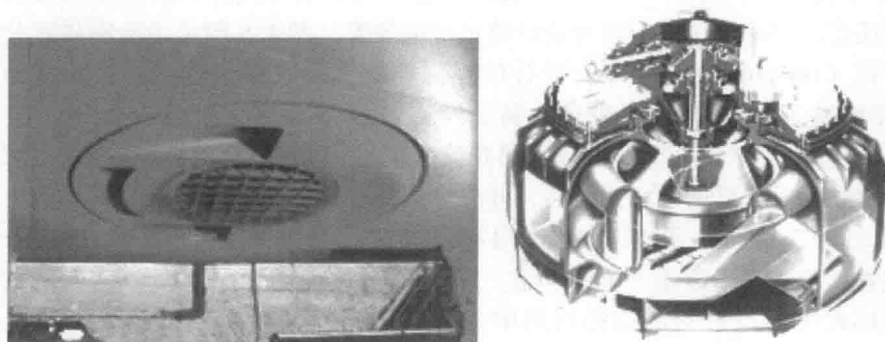


图 1.5 肖特公司底板式喷水推进器

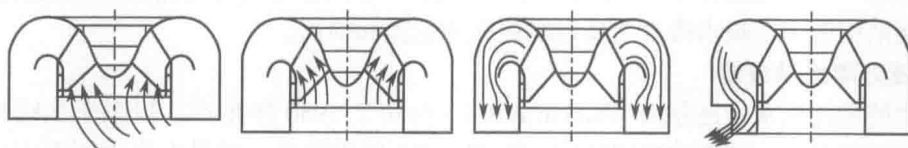


图 1.6 肖特公司底板式喷水推进器工作原理

2005 年 Wartsila 公司开发的喷水推进器也属于底板式喷水推进器，该推进器用于驱动美国海军的海岸驳运船，其结构如图 1.7 所示。水流途径推进泵后经 S 形的管道从船底向后喷出，船底外的喷口在转向机构的控制下可做 360° 旋转，实现转向和倒车操纵。

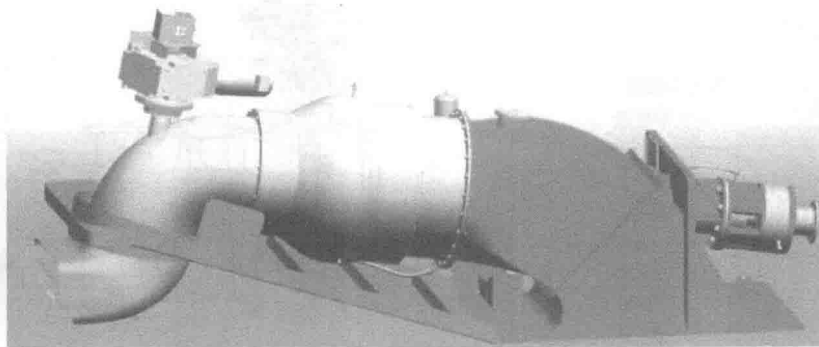


图 1.7 Wartsila 公司设计的底板式喷水推进器

5. 尾板式喷水推进器

20 世纪 50 年代, 哈密尔顿 (Hamilton) 根据喷水推进小船在新西兰激流航道中航行所得的经验, 在船尾安装了类似吉尔推进器的喷水推进装置, 将吸入的水流紧贴水面从尾板开口处喷向舷外。由于水柱喷射在空气中, 喷射阻力小, 水流能获得较高喷射速度。该推进器通过安装在船底平面上的进水流道将水引到轴流式叶轮, 在进口处还装有格栅以防杂物吸入。喷口穿过尾板处于尾板外。喷口上装有可偏转的箱形舵, 通过操纵杆可控制喷射水流向左右舷偏折。但哈密尔顿并不是 50 年代早期唯一研制尾板式喷水推进装置的人。有资料表明, 苏联在 1954 年建造了安装两台尾板式喷水推进器的快艇, 主要航行于河流上游的激流和浅水支流中。

到 50 年代后期, 新西兰哈密尔顿喷水推进公司开始为汽艇和渡船提供喷水推进装置, 同时还会同其他公司一起联合设计喷水推进装置。图 1.8 所示为哈密尔顿公司和英国道蒂公司 (Dowty) 1959 年联合设计的一款尾板式喷水推进器, 驱动功率为 248 马力^①, 用于推进一客船, 该船的航速达到了 34 节。

继 50 年代哈密尔顿公司和道蒂公司在喷水推进领域的开拓性工作之后, 两家公司开始各自独立开发自己的喷水推进器, 并逐渐提高了推进器的单泵功率和性能。道蒂公司 (现为 Ultra Dynamics 公司) 在过去的 40 多年里已经为各种船舶提供了 15000 多台喷水推进装置, 其中大多数用于军用舰船。自那时起, 全世界范围内不断有新的制造厂商加入到艉板式喷水推进器制造的行列中。其中 Castoldi 公司于 1958 年, PPjet 公司在 1972 年, Riva Lips 公司在 1975 年, KaMeWa 公司在 1980 年, 川崎重工在 1987 年, AHj 公司在 1988 年, Kvaerner 在 1990 年, Ulstein 公司在 1992 年纷纷开始喷水推进装置的生产, 并逐渐构成当今喷水推进主要以艉板式为主流的局面。

6. 舷外喷水推进器

最早的舷外喷水推进器由 Kenneth & Co. 公司于 1950 年生产, 但限于当时的技术水平该推进器没有大范围的推广应用。20 世纪 90 年代前后, 世界上出现了多家生产该类推进器的厂家, Johnson 公司是其中较出名的厂家。图 1.9 为 Johnson 公司一型舷外喷水推进装置的整体结构, 发动机通过垂直驱动机构驱动下方水平布置的喷水推进器。推进器结构如图 1.10 所示, 叶轮外装配了外壳, 水流从前方吸入往后喷射产生推力, 推

^① 1 马力 = 735.5 瓦 (W)。

进器可绕着垂直驱动机构做 360° 旋转从而实现船舶机动。舷外喷水推进器在小型娱乐艇上作为主推进器有着广泛的应用，有时还作为船艇备用的应急动力。

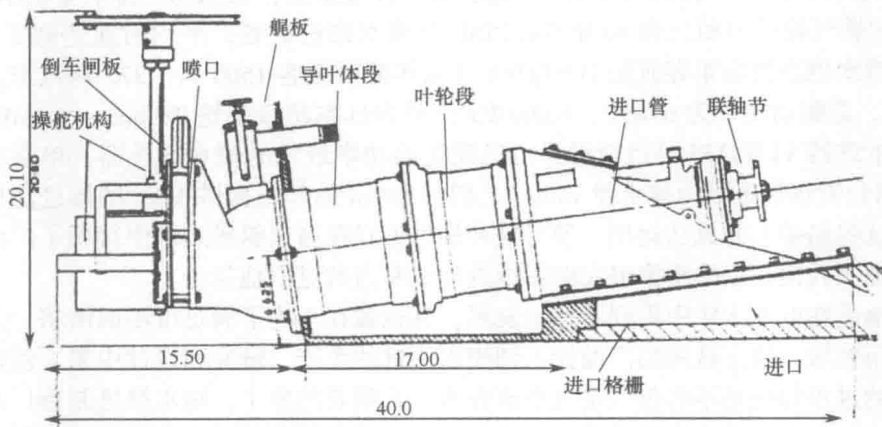


图 1.8 哈密尔顿公司和道蒂公司联合研制的喷水推进器



图 1.9 Johnson 公司 Dura Jet 推进装置

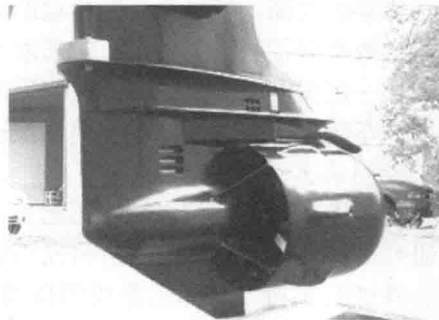


图 1.10 Dura Jet 推进装置局部结构

另外，中国船舶工业集团公司第 708 研究所在 20 世纪 80 年代开发的喷水推进组合体也属于舷外喷水推进器的一种。该喷水推进组合体集推进和操纵为一体，由喷水推进泵和组合舵两大部分组成，布置在船尾舷外，如图 1.11 所示，它比较适合于重负荷大中型运输船和工程船。该推进器设计新颖、推进效率高、船舶操纵性好，具有极强的变工况适应能力。

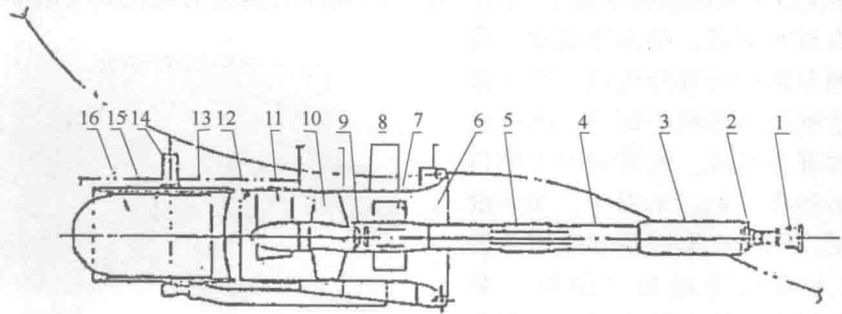


图 1.11 喷水推进组合体结构组成

- 1—联轴节；2—密封装置；3—出轴组合；4—舵轴管；5—泵轴；6—泵壳；7—轴支架；8—观察孔；9—密封；10—动叶轮；11—导叶体；12—喷口；13—舵托；14—舵杆；15—舵壳；16—中舵。

喷水推进原本认为只适用于高速小型船舶,但随着喷水推进装置单泵功率的逐渐增大,越来越多的排水量超过 1000t 的高速客渡船采用了喷水推进。Destriero 号在 1992 年打破了横渡大西洋最短时间的记录,该船采用铝合金制造,长 68m,排水量 1376t,由 14.7MW 的燃气轮机驱动三台 KaMeWa125SII 型喷水推进装置,平均时速达到了 53kn。新一代的喷水推进高速车客渡船如 STENA 号双体船可载客 1500 人、375 辆汽车,时速高达 40kn,总驱动功率为 69MW。KaMeWa 公司为日本超级邮轮 Techno-Superliner 提供的喷水推进器 VLWJ235 是目前世界上已建造的功率最大的喷水推进器,单泵功率达 27MW,两台喷水推进器为排水量 14500t、船长 140m 的邮轮提供 37kn 的推进速度。喷水推进在这些船舶上的成功运用,使得这种推进方式在高速船舶运输中得到了广泛的认可,同时也大大提高了喷水推进在船舶推进领域有力的竞争地位。

喷水推进在近几十年中得到迅速的发展,其根源在于为了满足市场的需求。为了开拓新的应用领域,越来越多的厂商投入到喷水推进的生产、研究和设计中来,使得喷水推进技术的进步和提高不再仅仅是几个研究者、发明者的事了。喷水推进制造厂商们主要在以下 4 个方面为喷水推进技术的突飞猛进和广泛应用做出了卓有成效的贡献:①可供选用的喷水推进装置的尺寸、功率和推力都显著增大;②进流管道、叶轮和喷口等关键部件设计质量的提高,特别是计算机辅助流体设计技术(CFD)的广泛采用,使得喷水推进的推进效率有了很大的提高;③采取了一些切实有效的措施,使得早期喷水推进的一些缺陷在一定程度上得到了弥补,如采取了防止电化腐蚀的措施、研制了操纵性能优异的转向倒车装置等;④开发了使喷水推进器的转向、倒车操作同主机转速进行优化联控的电子控制系统。

喷水推进技术在国内的发展和应用起步于 20 世纪 70 年代。1973 年中国船舶工业集团第 708 研究所成立了高速喷水推进研究小组,一年后就研究设计出用轴流泵推进的内河巡逻艇,并试航成功。这标志着我国高速喷水推进发展时期的到来。2002 年后,海军工程大学也开始从事舰船喷水推进技术的研究,并掌握了高性能喷水推进器的设计方法。该单位已先后设计了 3 型喷水推进器,均成功进行了海试,超过设计指标。

1.1.2 喷水推进器的组成和工作原理

喷水推进装置通常由原动机、传动装置和喷水推进器等设备组成。图 1.12 所示为艉板式喷水推进装置的结构布置示意图。图 1.13 所示为典型的艉板式喷水推进器的结构图,它由进水流道、喷水推进泵、喷口和转向倒车机构四部分组成。喷水推进泵是喷水推进器的核心部件,由叶轮和导叶体两部分组成。通常情况下喷口与导叶体铸造在一起。本书中,如果没有专门说明,则喷水推进泵和喷口两者的组合称为喷水推进泵(简称“喷泵”)。转向倒车机构由转向机构和倒车机构两部分组成,分别实现转向和倒车功能。



图 1.12 喷水推进装置的结构布置示意图

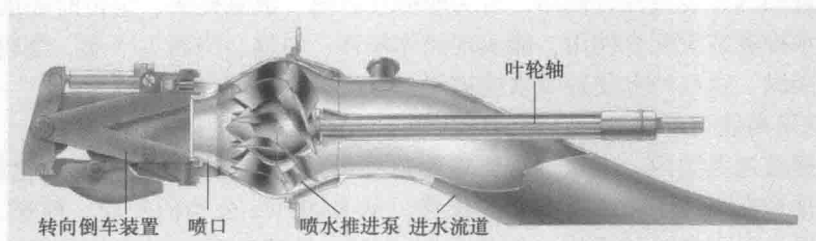


图 1.13 喷水推进器结构图

喷水推进器的基本工作原理是：水流从船底经进水水道进入喷水推进器，喷泵的叶轮对水流做功，将原动机的机械能转换为水流的动能和势能。叶轮出口水流速度既有轴向分量又有周向分量，而只有轴向分量对推力的产生起作用。导叶体便起到将周向分量转换为轴向分量的作用，即整流作用。导叶体出口水流经收缩的喷口加速后，向船尾高速喷出。此高速射流产生的反作用力（推力）推动船体前进。操纵转向和倒航机构改变喷射水流的方向可实现船体的转向和倒航。

1.1.3 喷水推进的特点

1. 优点

与螺旋桨推进相比，喷水推进具有多方面的优点，归纳起来主要有以下几个方面。

1) 喷水推进船具有优良的机动性和操纵性

喷水推进船的转向通过在水平方向改变喷口射流的方向来实现，提供的转向力矩大，船体转向运动反应快捷。只要喷水推进泵在运转，无论船速高低，操纵转向装置都能得到较大的转向力。而螺旋桨推进船依靠舵装置实现转向操作，船体转向运动对舵角变化的反应相对较慢，且依赖于航速的高低，低速时舵效变差，零航速状态时无论舵角多大也无法提供转向力。图 1.14 所示为喷水推进艇的船尾喷射流及回转操纵过程艇体运动轨迹。

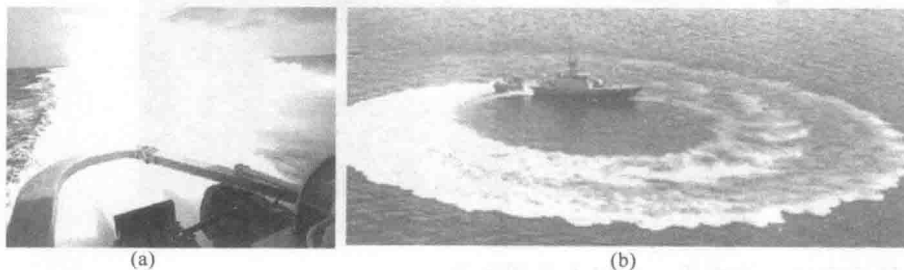


图 1.14 喷水推进艇的船尾喷射流 (a) 及回转操纵 (b)

喷水推进船进行倒车操纵时，轴系无需反转，只需操纵喷水推进器的倒车装置使水流由向后喷射折转为向前喷射。喷水推进器的这种倒车方式使喷水推进船比螺旋桨推进船具有更大的倒车能力。倒车过程可无级调节，操纵简单，倒车效果明显。定距桨推进船紧急倒航时要经历降转速、刹轴、反向启动或轴系反转以及反转加速等一系列过程，调距桨推进船的倒航操纵需经历降转速、调螺距、加速等过程，因此相对于喷水推进船来说，传统螺旋桨推进船从全速正航紧急倒车至全速倒航过程，时间长，滑行距离远。

转向装置和倒车装置配合使用,可为船体在转向、离靠码头、定位时提供 360° 的推力。多套喷水推进装置配合使用,能实现船体横移、斜移、绕码头平动、绕码头转动等复杂的机动操纵。这些特点使得喷水推进船具有优越的机动性和操纵性。

2) 能满足高航速要求,且高速时推进效率比螺旋桨推进高

在中高速航速范围内,喷水推进比螺旋桨推进的效率更高,而且抗空化能力更强,这使得喷水推进在高速船领域具有明显优势。据 KaMeWa 公司的经验,航速 28kn 以下的船舶往往适合采用螺旋桨推进,航速为 28~30kn 的船舶采用螺旋桨推进或喷水推进都可取,而航速在 30kn 以上的船舶采用喷水推进往往更占优势。近些年, Wartsila 公司称喷水推进已经在 25kn 左右的船舶上与螺旋桨竞争市场。

3) 抗空化能力强

对于喷水推进船,推进泵的叶轮处于管道中,水流从进水口吸入经过进水流道的整流作用后趋于均匀,大大减小了流动不均匀所导致的振动。喷泵叶轮在较均匀的流场中工作,加之它又能有效地利用来流冲压,使其在高速范围内较螺旋桨有更好的抗空泡性能。

4) 振动小,水下辐射噪声低

对于螺旋桨推进船,螺旋桨处于船后不均匀的伴流场中,叶片转动过程遇到周期性的载荷变化,对船体产生了水动激振力。此外,轴系倾角的存在造成螺旋桨在旋转过程中切向速度也发生周期性变化,这也是一种不受欢迎的振源。

较小的船体振动、良好的抗空泡性能以及管道对泵内水噪声的屏蔽作用,使得喷水推进船的水下噪声较小。船体振动小给船上工作人员和乘客提供了安静的环境,较小的水下辐射噪声使得喷水推进在各国海军猎扫雷舰艇和隐身舰艇上的应用越来越多。图 1.15 所示的瑞典 Visby 级全隐身护卫舰采用喷水推进正是利用了这些特点。



图 1.15 采用喷水推进的瑞典 Visby 级全隐身护卫舰

5) 适应变工况能力强,主机不易超负荷

螺旋桨船航行时,由于螺旋桨在船底外流场工作,航速变化对螺旋桨进流影响极大,从而造成航速对螺旋桨负载会产生较大的影响。在低航速、高转速时,很容易引起原动机超负荷。而喷水推进器置于船体内部,从船底吸入的水流进入推进泵前受到了进水流道的整流作用。喷水推进泵吸入的水流相对比较均匀,泵吸收的功率主要由泵转速决定,受航速变化的影响不大,主机不易超负荷。即使在系泊工况,主机仍能达到较高转速。在工况多变的船舶上,喷水推进能充分利用主机功率,延长主机寿命。

6) 喷水推进器安装在船内, 船外附体少, 阻力小

和螺旋桨船相比, 喷水推进船的船底比较光顺, 少了螺旋桨、舵、尾轴和尾轴支架等突出部件, 船外附体阻力较小。图 1.16 所示为螺旋桨船和喷水推进船的船尾结构。在高航速情况下, 喷水推进附体阻力小的特点更加明显, 船的总推进效率要高于螺旋桨推进, 所以一般情况下, 设计航速大于 30kn 的船舶倾向于选用喷水推进。



图 1.16 螺旋桨船和喷水推进船的船尾结构

由于船底下方没有附体, 喷水推进船的吃水较浅, 在浅航道中的适航能力优于螺旋桨推进船。除了内河浅吃水船外, 海岸游览艇、登陆艇以及水陆两栖坦克大都采用喷水推进, 这也是利用喷水推进船吃水浅这一特点。海岸游览艇采用喷水推进可以往浅水地区游移而不必担心打坏叶轮, 同时平整光滑的艇体不会伤及水中人员。观鲸船采用喷水推进也是考虑到喷水推进船没有裸露在外的旋转机械, 安全性好, 对海洋生物伤害小的特点。水陆两栖坦克和装甲车由于需要在各种河床和岸滩情况下机动, 所以主要靠喷水推进来实现水中推进。图 1.17 是浅水中航行的喷水推进巡逻艇, 图 1.18 是采用喷水推进的观鲸船。



图 1.17 浅水中航行的喷水推进巡逻艇

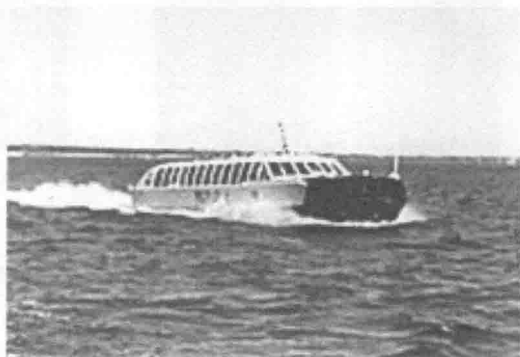


图 1.18 喷水推进观鲸船

7) 动力装置比较简单, 消除了复杂的传动机构

由于能充分地利用来流动能以及流道的整流作用, 喷水推进器的抗空化能力较强, 推进泵能在较高的转速下工作, 这使得齿轮箱减速比较小, 某些场合甚至可省去减速齿轮箱。传动机构的重量轻, 效率高, 费用低。

8) 推进装置部套化, 便于安装和配套

推进装置实现部套化, 在生产和使用上有很大的方便性。在制造上可以进行大批量生产, 有利于专业化、标准化, 提高质量, 降低成本; 在使用时配套和安装都很方便,