

军队“2110工程”三期建设教材

舰船新型推进系统

JIANCHUAN XINXING TUIJIN XITONG

| 王永生 刘承江 苏永生 杨琼方 魏应三 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

舰船新型推进系统

王永生 刘承江 苏永生 杨琼方 魏应三 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍了本世纪我海军舰船刚使用或拟选用的新型推进技术及推进系统,如喷水推进、方位推进、电力推进、直翼推进、泵喷推进、常规潜艇 AIP 和小堆、气垫推进等,主要内容包括定义、基本组成、总体结构、工作原理、特点及特性、工程应用、工程实例。

作者所在的舰船推进新技术研究室 2002 年开始从事喷水推进研究,2007 年开始从事泵喷推进研究,有些研究成果编入了本书。

本书可作为理工科高等院校船舶、轮机工程等学科的本科生和研究生参考,也可作为从事舰船、动力装置、推进装置设计、建造、维修、使用的科研人员、管理人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

舰船新型推进系统/王永生等编著. —北京:国防工业出版社,2014.12
ISBN 978-7-118-09904-1

I. ①舰… II. ①王… III. ①军用船—推进系统
IV. ①U674.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 282654 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)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 27 字数 517 千字
2014 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

20 世纪我国海军各型舰船绝大多数采用螺旋桨推进装置,且基本上都是机械推进。改革开放以后,随着国家的强盛和海军使命任务的变化,自行研制和从国外引进或选用了某些舰船推进新技术,如喷水推进、方位推进、常规潜艇不依赖空气的推进系统 AIP、泵喷推进、气垫推进。

本书主要介绍本世纪以来我国海军舰船刚使用或拟采用的新型推进技术及相应的推进系统,如喷水推进、方位推进、电力推进、直翼推进、泵喷推进、常规潜艇 AIP 和小堆、气垫推进等,内容包括每型推进系统的定义(概念)、基本组成、总体结构、工作原理、特点及特性、工程应用、工程实例。

本书第 1、6 章由刘承江讲师(博士)编写,第 2~4 章由王永生教授编写,第 5 章由苏永生讲师(博士)编写,第 7 章由杨琼方讲师(博士)编写,第 8 章由魏应三讲师(博士)编写。第 1 章第 7 节由王永生、付建博士编写。全书由王永生统稿。

作者所在的舰船推进新技术研究室从 2002 年开始进行喷水推进研究,2007 年又开始泵喷推进研究,从所承担的多个科研项目中已积累了较为丰富的研究成果并编入了本书,这就构成了本书中作者的原创成分。例如研究室目前发表喷水推进学术论文已超过百篇,也深入进行了泵喷推进性能和噪声性能的计算和分析。

书中选用了多种文献中的各种图片、表格和公式,在此作者衷心感谢这些图片、表格和公式的原作者。

因作者学识和水平受限,书中存在错误和不当之处,敬请各位读者批评指正。联系电话:027-65461036(地方线)。

作 者

2014 年 7 月 25 日

目 录

第 1 章 喷水推进装置	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 喷水推进基本工作原理	8
1.1.3 喷水推进的优缺点	8
1.1.4 喷水推进在海军舰船上的应用	13
1.2 喷水推进器基本组成与结构	20
1.2.1 进水流道	22
1.2.2 喷水推进泵	23
1.2.3 转向倒车机构	26
1.2.4 典型喷水推进器介绍	30
1.3 喷水推进基本理论与性能分析	40
1.3.1 理想喷水推进器性能	40
1.3.2 考虑能量损失的喷水推进器性能	42
1.3.3 喷水推进器与船体相互作用	45
1.4 喷水推进器特性	47
1.4.1 进水流道性能	47
1.4.2 喷水推进泵性能	54
1.4.3 喷水推进器推进性能曲线	58
1.4.4 喷水推进器空化性能	60
1.5 “船—泵—机”匹配	74
1.5.1 船体阻力特性	74
1.5.2 喷水推进器特性	75
1.5.3 柴油机特性	78
1.5.4 “船—泵—机”的匹配	79
1.5.5 喷水推进器推进性能曲线在匹配中的应用	80
1.6 喷水推进器的设计方法简介	83
1.6.1 进水流道参数化设计	83
1.6.2 喷水推进泵三元设计	89

1.6.3 喷水推进器性能预报与分析	93
1.7 喷水推进器水下辐射噪声研究	102
1.7.1 喷水推进器水下辐射噪声概述	102
1.7.2 流场计算	103
1.7.3 喷水推进器的噪声源强分布计算	107
1.7.4 喷水推进器水下辐射噪声的声学边界元计算	109
1.7.5 喷水推进器水下辐射噪声的声学有限元计算	113
1.7.6 进水流道声传播特性的计算和分析	119
1.7.7 喷水推进器水下辐射噪声与螺旋桨的比较	128
1.8 喷水推进器主要厂商	129
1.8.1 瑞典 KaMeWa 公司	129
1.8.2 瑞典 MJP 公司	136
1.8.3 芬兰 Wartsila 公司	139
1.8.4 新西兰 Hamilton 公司	142
1.8.5 其他喷水推进器厂商	145
1.9 喷水推进器与螺旋桨的比较	145
参考文献	148
第2章 方位推进器	153
2.1 概述	153
2.2 机械式方位推进器	153
2.3 电力式方位推进器	155
2.3.1 吊舱机械结构	156
2.3.2 吊舱电气结构	158
2.4 ABB 公司的方位推进器	158
2.4.1 标准型吊舱	159
2.4.2 紧凑型吊舱	161
2.4.3 对转式吊舱推进	164
2.4.4 世界上第一艘安装 CRP - Azipod 的滚装客轮	165
2.5 劳斯莱斯 - 阿尔斯通联合开发的“美人鱼”牌吊舱推进器	176
2.5.1 技术特点	176
2.5.2 Mermaid 应用实例	185
2.6 肖特 - 西门子联合开发的吊舱推进器	190
2.7 海豚牌吊舱推进器	193
2.8 吊舱小结	196
参考文献	197

第3章 直翼推进器及其推进装置	199
3.1 VSP 的工作原理	199
3.1.1 基本结构	199
3.1.2 桨叶的角摆动	200
3.1.3 零推力工况	200
3.1.4 法线相交定律及桨叶角度曲线	201
3.1.5 有推力工况	202
3.1.6 推力大小和 $0^\circ \sim 360^\circ$ 方向的控制	204
3.1.7 桨叶绝对运动轨迹	205
3.1.8 本节小结	207
3.2 VSP 推进器的结构	207
3.2.1 VSP 的控制结构	207
3.2.2 VSP 的机械结构	208
3.3 VSP 推进装置	220
3.3.1 推进器	221
3.3.2 传动设备	223
3.3.3 原动机	224
3.3.4 机桨匹配的基本情况	224
3.3.5 VSP 和对转桨(Z型推进器)推进效率的比较	225
3.3.6 VSP 推进装置的多种形式	225
3.4 使用 VSP 推进装置的各种船舶	228
3.4.1 客船	228
3.4.2 浮吊	230
3.4.3 海军舰船	231
3.4.4 首尾同型渡船	237
3.4.5 福伊特拖拉机船	238
3.4.6 VSP 其他应用	240
参考文献	241
第4章 新型联合动力装置	242
4.1 联合动力装置概念	242
4.1.1 引言	242
4.1.2 联合动力装置的定义	243
4.2 新型联合动力装置	249
4.2.1 新型联合动力装置的前身之一	

——Katana ex ECO 豪华游艇	249
4.2.2 保持喷水推进航速记录的 DESTRIERO 客轮	252
4.2.3 民船上首例混合推进——ISOLA DI STROMBOLI 车客渡轮	252
4.2.4 舰艇新型联合动力装置的诞生——MEKO A-200 轻型护卫舰 CODAG + WARP	253
参考文献	263
附录一 本章采用变量的含义	264
附录二 F124 型护卫舰联合动力装置中的交叉齿轮箱	264
第5章 舰船电力推进系统	270
5.1 概述	270
5.2 舰船电力推进系统的分类	271
5.3 舰船电力推进的组成和特点	274
5.3.1 舰船电力推进的组成	275
5.3.2 舰船电力推进系统的优缺点	276
5.4 国外舰船电力推进系统的发展动态	278
5.5 国外舰船电力推进系统的相关案例	280
参考文献	288
第6章 常规潜艇 AIP 和小堆推进	289
6.1 常规潜艇 AIP	289
6.1.1 常规潜艇 AIP 的由来	289
6.1.2 常规潜艇 AIP 的定义	290
6.1.3 常规潜艇 AIP 系统的分类与组成	292
6.1.4 常规潜艇 AIP 系统简介	293
6.1.5 AIP 系统的关键技术	296
6.1.6 AIP 潜艇发展历史、现状和前景	298
6.2 闭式循环柴油机 AIP 系统	303
6.2.1 CCD-AIP 系统的定义	303
6.2.2 CCD-AIP 系统的组成和功用	304
6.2.3 CCD-AIP 系统的工作原理	304
6.2.4 CCD-AIP 系统的特点	307
6.2.5 CCD-AIP 系统的研发与应用	308
6.3 斯特林发动机 AIP 系统	310
6.3.1 SE-AIP 系统的定义	310
6.3.2 SE-AIP 系统的组成与结构	311
6.3.3 SE-AIP 系统的工作原理	314

6.3.4	SE - AIP 系统的特点	316
6.3.5	SE - AIP 系统的研发与应用	317
6.4	闭式循环汽轮机 AIP 系统	321
6.4.1	CCST - AIP 系统的定义	321
6.4.2	CCST - AIP 系统的组成与结构	322
6.4.3	CCST - AIP 系统的工作原理	322
6.4.4	CCST - AIP 系统的特点	323
6.4.5	CCST - AIP 系统的研发与应用	324
6.5	燃料电池 AIP 系统	325
6.5.1	FC - AIP 系统的定义	326
6.5.2	FC - AIP 系统的组成与结构	326
6.5.3	FC - AIP 系统的工作原理	327
6.5.4	FC - AIP 系统的特点	329
6.5.5	FC - AIP 系统的研发与应用	331
6.5.6	加拿大燃料电池单制艇的构想	335
6.5.7	新颖的燃气轮机潜艇 SSGT	337
6.6	小堆推进	339
6.6.1	SSN - AIP 系统的定义	339
6.6.2	SSN - AIP 系统的组成与结构设计	340
6.6.3	SSN - AIP 系统的工作原理	343
6.6.4	SSN - AIP 系统的特性	343
6.6.5	SSN - AIP 系统的特点	345
6.6.6	SSN - AIP 系统的研发与应用	346
6.7	各种 AIP 系统的比较	348
6.8	常规潜艇 AIP 的发展	351
	参考文献	356
第 7 章	核潜艇和鱼雷的泵喷推进	359
7.1	泵喷推进器的概念、结构和工作原理	359
7.1.1	泵喷推进器概念和基本结构	359
7.1.2	泵喷推进器工作原理	360
7.1.3	泵喷推进器的优缺点	361
7.2	泵喷水动力性能的理论分析	361
7.3	优化泵喷水动力性能的设计方法	365
7.4	泵喷水动力性能的数值分析	368

7.5	泵喷推进器在国内外海军舰艇上的应用	372
7.5.1	泵喷在国外潜艇和鱼雷上的应用现状	372
7.5.2	国内泵喷研究概况和应用前景	376
	参考文献	377
第8章	气垫推进	379
8.1	气垫船的基本概念	379
8.1.1	气垫船产生的背景	379
8.1.2	气垫船的定义、组成、原理	379
8.1.3	气垫船的类型与特点	380
8.1.4	气垫船的结构与材质	383
8.1.5	气垫船的典型军事用途	385
8.1.6	气垫的垫升原理	386
8.2	气垫船的阻力	388
8.2.1	气垫船阻力的分类	388
8.2.2	波浪阻力	389
8.2.3	空气形状阻力	391
8.2.4	空气动量阻力	392
8.2.5	空气动量差阻力	392
8.2.6	围裙阻力	393
8.3	气垫船的推进装置	393
8.3.1	气垫船推进装置的结构形式	393
8.3.2	气垫船的主机	395
8.3.3	气垫船的推进器	395
8.3.4	气垫船的传动装置	403
8.3.5	气垫船的垫升动力系统	404
8.4	气垫船在世界各国的应用现状	405
8.4.1	美国	406
8.4.2	俄罗斯	413
8.4.3	英国	416
8.4.4	中国	416
	参考文献	421

第 1 章 喷水推进装置

1.1 喷水推进概述

1.1.1 喷水推进发展简史

船舶喷水推进的诞生要比螺旋桨早 19 年。在 300 多年的发展历程中,按时间顺序大致经历了液泵式喷水推进、间歇式喷水推进、底板式喷水推进、尾板式喷水推进和舷外喷水推进 5 个阶段。从目前在船舶上的应用情况看,尾板式喷水推进已成为喷水推进的首选,应用最为广泛。

现代喷水推进器的起源可以追溯到 1661 年的一项专利,通过以后无数次的改进和应用,今天在高速、高性能舰船上广泛应用。

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。该专利比英国人胡克发明螺旋桨早 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,艾伦首先将蒸汽机与喷水推进器结合在一起。他的设想是:在船体内产生蒸汽并将其引到船尾,在水下喷射蒸汽来推动船舶前进。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 2kn。

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选用。

3. 间歇式喷水推进

美国人约翰·菲奇 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。

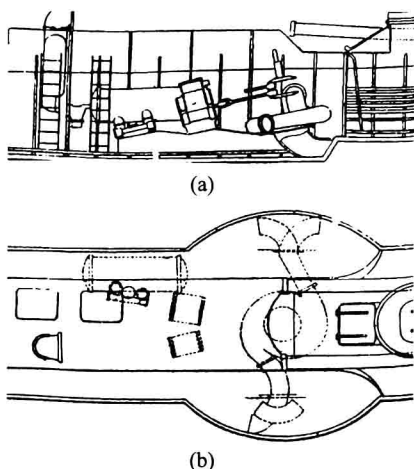


图 1-1 鲁思凡喷水推进系统

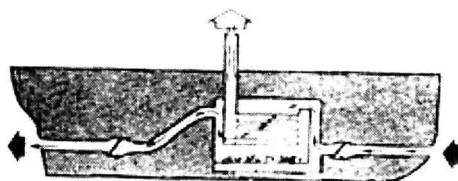


图 1-2 约翰·菲奇发明的喷水推进系统

1976 年,美国人佩恩和纽豪斯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四个循环过程,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是较为耐用且高效的推进器。

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,这些构思在今天的喷水推进器上仍然可以看到。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流道、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车机构,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。

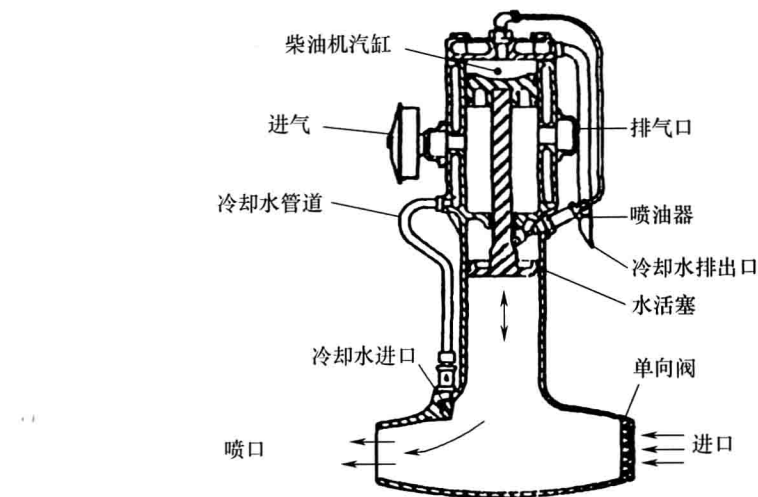


图 1-3 佩恩和纽豪斯发明的喷水推进装置

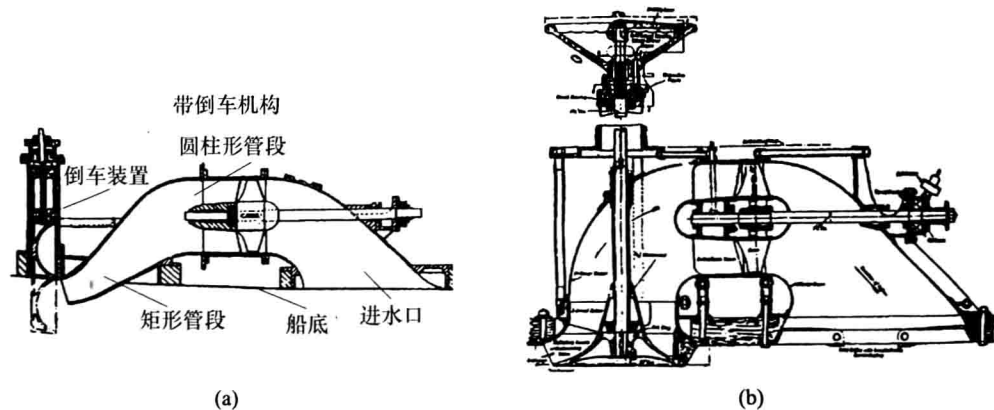


图 1-4 带有操舵倒车机构的底板式喷水推进器

第一次世界大战后,吉尔继续从事喷水推进设计,他的推进装置和倒车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水推进装置,功率范围为 3 ~ 100hp (1hp = 735.7W),可应用于长 3.65 ~ 36.5m 的各类船舶。

40 多年后,德国的推进器制造商肖特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成 15°角喷出而产生推力。喷口方向在船底板上可进行 360°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。

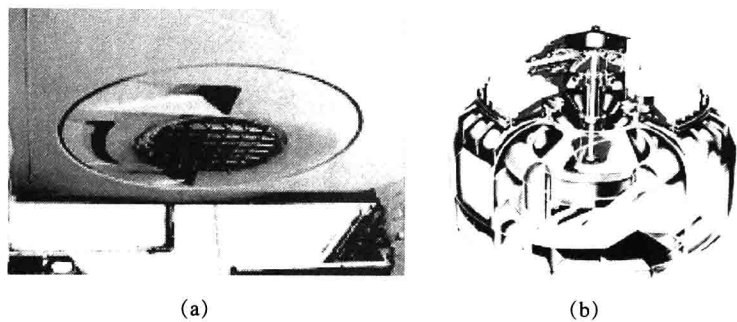


图 1-5 肖特公司底板式喷水推进器

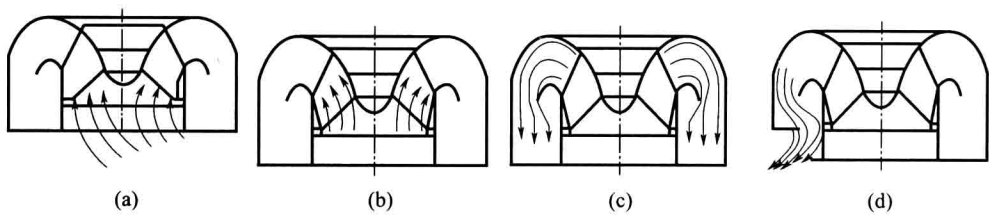


图 1-6 肖特公司底板式喷水推进器工作原理

2005 年,Wartsila 公司开发的一型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。

5. 尾板式喷水推进

20 世纪 50 年代,哈密尔顿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。

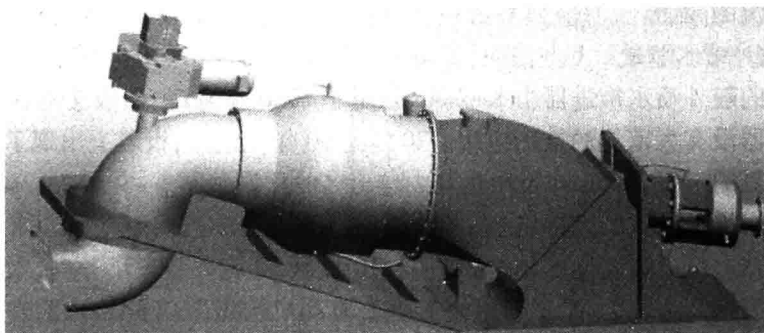


图 1-7 Wartsila 公司为美国海军设计生产的一型底板式喷水推进器

到 20 世纪 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 为哈密尔顿公司和英国道蒂公司 1959 年联合设计的一款尾板式喷水推进器,驱动功率为 248hp,用于推进一客船,该船的航速达 34kn。

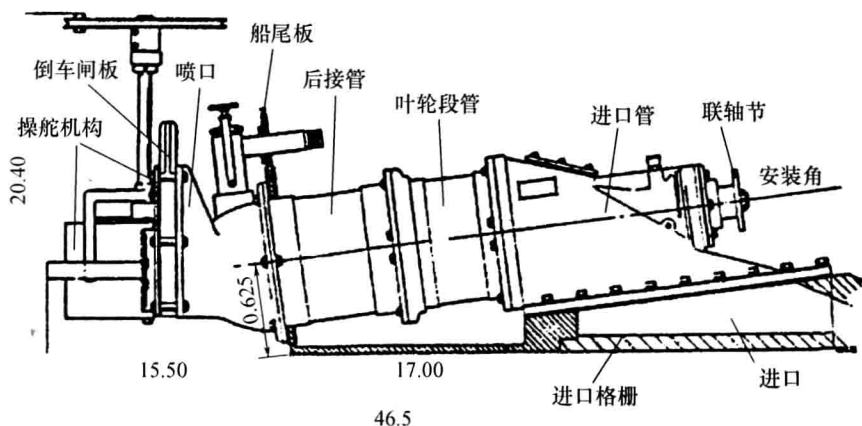


图 1-8 哈密尔顿公司和道蒂公司联合研制的喷水推进器

继 20 世纪 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尾板式喷水推进器制造的行列中。其中,Cas-

toldi 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船尾板式为主流的局面。

6. 舷外喷水推进

最早的舷外喷水推进器由 Kenneth 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。推进装置局部结构如图 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 1-9 Johnson 公司 Dura Jet 推进装置

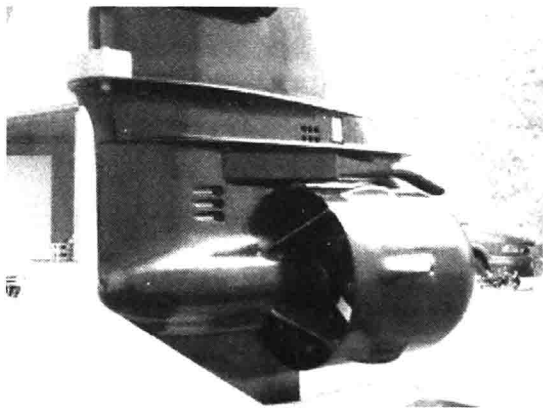


图 1-10 Dura Jet 推进装置局部结构

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、船舶操纵性好以及具有极强的变工况适应能力。

喷水推进原本被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 KaMeWa125S II 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,汽车375辆,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、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。

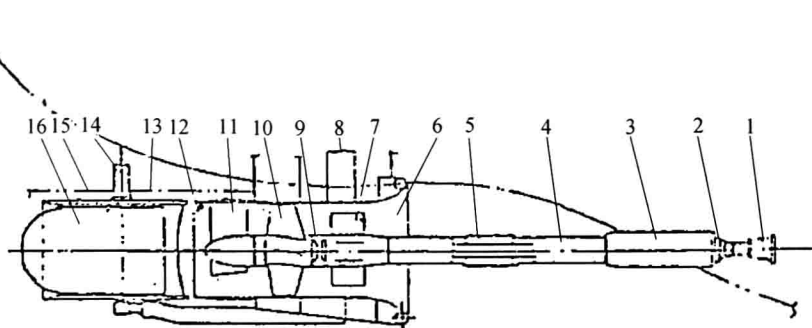


图1-11 喷水推进组合体结构

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

喷水推进在近几十年来得到迅速发展,其根源在于为了满足市场的需求。为开拓新的应用领域,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。喷水推进制造厂商们主要在四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,特别是计算流体动力学(CFD)技术的广泛采用,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。