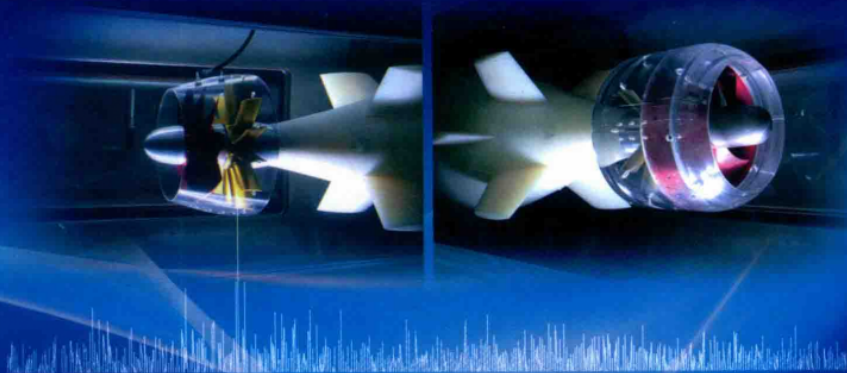


# 泵类推进器振动 和噪声控制机理

Vibration and Radiation Noise Control for  
Surface Warship and Submarine Pumpjets

杨琼方 王永生 吴杰长 著



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

## 内容提要

本书介绍了以喷水推进器和泵喷推进器为代表的舰艇泵类推进器设计及其直接辐射噪声控制技术,从泵类推进系统的应用现状以及泵与桨的差异和联系入手,首次呈现了泵类推进系统方案选型设计的“六步法”实施步骤和基于单一几何参数控制的进水流道参数化设计方法,分析了转子叶梢间隙流动特征和7叶大侧斜螺旋桨的非定常力控制要素,详细阐述了大功率等级无轴泵喷的抗空化和降噪设计成效、小功率等级无轴泵喷的降噪优化设计历程以及小功率等级机械式泵喷的线谱和宽带谱噪声控制效果,通过设计叶型、分析力到控制直接辐射噪声以及非定常力诱导的结构振动噪声这一桥梁,完整呈现了泵类推进器当前所达到的设计技术状态。

本书可供船舶与海洋工程设计人员,尤其是船舶推进系统设计人员、舰船总体设计制造以及海军官兵参考使用,也可作为船舶动力装置与噪声控制专业的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

泵类推进器振动和噪声控制机理 / 杨琼方, 王永生, 吴杰长著. — 上海: 上海交通大学出版社, 2021.11  
ISBN 978-7-313-25487-0

I. ①泵… II. ①杨… ②王… ③吴… III. ①喷水推进器—振动—研究 ②喷水推进器—噪声控制—研究 IV. ①U664.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 198395 号

## 泵类推进器振动和噪声控制机理

BENGLI TUIJINQI ZHENDONG HE ZAOSHENG KONGZHI JILI

著 者: 杨琼方 王永生 吴杰长

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

印 制: 上海万卷印刷股份有限公司

开 本: 710 mm × 1000 mm 1/16

字 数: 471 千字

版 次: 2021 年 11 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-25487-0

定 价: 98.00 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: 25.5

印 次: 2021 年 11 月第 1 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: 021-56928178

# 前言

泵类推进技术的应用是舰艇推进系统设计与发展的必经之路。从认识到要用泵类推进器,过渡到自行设计泵类推进器,最后发展为用好泵类推进器,这个过程充满艰辛。除了研制过程中历来先总体、后推进的框架定式约束外,叶型设计理论仍有不足,从叶型几何参数到空化初生、非定常力和辐射噪声性能之间的显示关联机制理论尚为空白,显著制约了泵类推进器的自主设计研发进程。

喷泵和泵喷两者共同构成了泵类推进器的应用基石。从2008年第一次接触某鱼雷引进泵喷,利用CFD计算背靠背复核其敞水性能曲线开始,到2012年第一次背靠背数值预报泵喷直接辐射噪声且接受试验测量考核,再到近十年来一直围绕泵喷开展学术研究,直至今天多型模型样机通过试验测量考核以及接受湖试测量的“打擂”检验,泵喷俨然成了本人精神家园的全部寄托和不解心结。纵使“为伊消得人憔悴”,不见应用心不回。

泱泱之言,跃然纸上,是为传承。2016年初,本人略显仓促地完成了《泵喷推进器的低噪声设计机理与设计应用》,阐述了泵喷的结构组成、水动力工作原理、叶片设计方法、后置定子式泵喷、前置定子式泵喷以及无轴驱动式集成电机泵喷(简称无轴泵喷)水力模型的设计应用与性能评价、拖曳线列阵声呐追踪典型特征信号的方法,将泵喷纳入了船舶泵类推进器的研究范畴,涵盖了泵喷与螺旋桨的水动力性能差异以及泵喷与喷泵之间的差异和联系,揭开了泵喷的神秘面纱,属于破冰之作。其焦点在于解剖了泵喷这一推进器部件,引入了叶型参数化三元逆向设计方法,完成了泵喷的水力设计和性能预报,是从无到有的阶段性成果。

从泵喷力争替换7叶桨推进的角度来看,必须首先回答艇尾构型是

否需要改变、泵喷如何布局、泵喷轴系结构振动是否依然为痛点、推力轴承是否需要改变这四个问题,这是推进器进化到推进系统的必经之路。并且,不论泵喷布置于艇尾外部、舷侧还是内部通道,核心问题都聚焦于究竟该设计什么样的叶型、能够起到多大的降噪效果、叶型设计方法是否通用这些本质。经过四年的核心技术攻关,在“十三五”装备预研重点领域基金项目、前沿创新项目和军内科研项目同时针对泵喷推进系统进行设计与试验验证的积累和沉淀下,本书得以进一步梳理完成。

本书从学术研究和工程应用的角度出发,从泵喷的选型设计入手,到进水流道的匹配设计,重点关注叶梢间隙流动,引鉴7叶大侧斜螺旋桨的非定常力控制要素,最后聚焦大功率等级无轴泵喷的抗空化和降噪设计成效、小功率等级无轴泵喷的降噪优化设计历程以及小功率等级机械式泵喷的线谱和宽带谱噪声控制效果,在建立有效设计样本、满足工程应用需求这一主线上逐步展开,理论、数据、成果齐全,展示了拥有知识产权的多个设计样本的主要测量数据,期望能够与领域内专家前辈们一起打开泵喷型号应用的大门。

作为一名学术后辈,热情和兴趣诠释着执着,心愿和质疑注释着动力。在专著撰写、修改审定和泵喷设计过程中,承蒙上海交通大学华宏星教授、黄修长副教授,华中科技大学侯国祥教授,江苏大学张德胜研究员,武汉大学季斌教授,哈尔滨工程大学王超副教授,武汉理工大学丁江明副教授,中船集团702所熊紫英高工、719所刘敏研究员,海装武汉局刘水根工程师和驻武汉地区第三军代室范明军高工和李生工程师,以及海军工程大学曾凡明教授、张明敏教授、张志宏教授等多位专家的热情帮助和大力支持,在此深表谢意!

由于作者水平有限,错误和不当之处在所难免,谨请读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章</b>	<b>概述</b> .....	1
1.1	泵类推进系统及其应用现状 .....	1
1.2	推进泵与螺旋桨在“形”和“神”上的差异 .....	2
1.3	泵类推进技术当前理论聚焦与应用拓展 .....	16
1.4	泵类推进器振动和噪声控制的技术从属范围 .....	17
<b>第 2 章</b>	<b>泵类推进系统方案选型设计</b> .....	20
2.1	选型设计需求与基本理论 .....	20
2.2	选型设计实施步骤 .....	50
2.3	本章小结 .....	58
<b>第 3 章</b>	<b>泵类推进系统进水流道参数化设计与性能分析</b> .....	61
3.1	进水流道作用与设计背景 .....	61
3.2	平进口式进水流道的参数化设计 .....	63
3.3	存在船尾上扬角和喷口下倾角时进水流道的参数化设计 .....	78
3.4	泵类推进系统进水流道流体动力性能的评价指标 .....	88
3.5	本章小结 .....	94
<b>第 4 章</b>	<b>推进泵叶梢间隙流场和空化流动的数值模拟与校验</b> .....	96
4.1	螺旋桨梢涡精细流场的数值模拟与校验 .....	96
4.2	单转子梢涡精细流场的数值模拟与校验 .....	105
4.3	推进泵叶梢泄漏涡空化流动的数值模拟与校验 .....	108
4.4	本章小结 .....	128

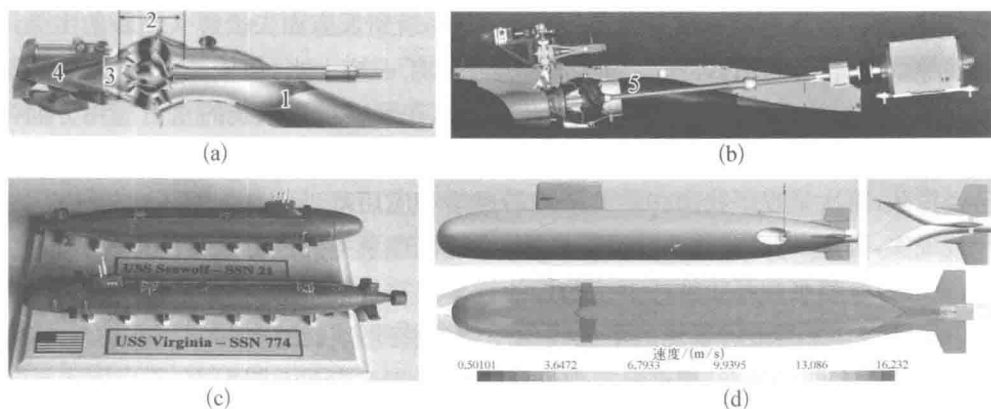
<b>第 5 章</b>	<b>军辅船 7 叶大侧斜螺旋桨低噪声设计启示与应用</b> .....	130
5.1	军辅船 7 叶大侧斜桨设计需求与设计效果 .....	130
5.2	军辅船 7 叶大侧斜桨低噪声设计关键措施与试验验证环节 .....	131
5.3	7 叶大侧斜桨低噪声设计启示与设计应用 .....	134
5.4	本章小结 .....	151
<b>第 6 章</b>	<b>水下无轴泵喷主推抗空化改进设计与降噪控制</b> .....	153
6.1	无轴泵喷模型样机对象与设计输入 .....	153
6.2	无轴泵喷叶型抗空化改进优化设计 .....	155
6.3	无轴泵喷模型样机加工与试验测量条件 .....	162
6.4	无轴泵喷模型样机试验测量结果分析 .....	167
6.5	本章小结 .....	176
<b>第 7 章</b>	<b>潜器低速重载型泵喷非定常力控制及其降噪优化设计</b> .....	177
7.1	潜器阻力预报及其泵喷推进方案选型设计 .....	177
7.2	无轴泵喷叶型三元逆向设计及其水动力和空化性能评估 .....	181
7.3	内置式无轴泵喷进水流道参数化设计与校核分析 .....	186
7.4	内置式无轴泵喷系统推进和空化性能数值预报 .....	188
7.5	内置式无轴泵喷非定常力和辐射噪声的数值预报与分析 .....	203
7.6	内置式无轴泵喷降噪优化设计 .....	212
7.7	舷侧外置式无轴泵喷降噪优化设计 .....	241
7.8	本章小结 .....	259
<b>第 8 章</b>	<b>艇尾主推机械式泵喷设计及其辐射噪声控制</b> .....	261
8.1	艇尾 7 叶桨水动力及直接辐射噪声的定量评估分析 .....	261
8.2	艇尾构型水动力优化设计及其阻力预报 .....	292
8.3	艇尾机械式泵喷设计及其推进和空化性能预报 .....	311
8.4	艇尾机械式泵喷非定常力和辐射噪声控制 .....	327
8.5	泵喷非定常力激励轴系艇尾结构振动噪声分析 .....	361
8.6	本章小结 .....	389
<b>参考文献</b>	.....	391
<b>索引</b>	.....	397

# 第1章 概述

当前,世界海军强国的主战舰艇濒海战斗舰(littoral combat ship, LCS)采用全套喷水推进器(waterjet,简称喷泵,核心是喷水推进泵),“弗吉尼亚”级、“机敏”级和“北风之神”级核潜艇采用泵喷推进器(pumpjet,简称泵喷),标志着以喷泵和泵喷为主的泵类推进器(pump-type propulsor)在舰艇高性能推进器应用方面走上了快车道,尤其以泵喷在国之重器——水下推进器上的应用引人注目。

## 1.1 泵类推进系统及其应用现状

从泵类推进器当前位于舰艇尾部的结构布局来看,无论是内部嵌入的典型舰板式喷泵还是外挂集成的先进浸没式喷泵,其结构部件中通常都包含进水水道和喷口,辅助产生喷射流,如图 1.1 所示。当泵喷外置于艇体尾部时,因艇体尾锥段可以提供自然进流,且为了抑制喷口射流噪声大小,通常会取消进水水道和喷口结构;当泵喷内嵌于艇体尾部成为内置式泵喷推进系统时,还需要为泵推进单元配置独特的进流和出流管道,形成与喷泵类似的结构外形。出于描述简便的考虑,可将



1—进水水道;2—喷水推进泵;3—喷口;4—转向倒车装置;5—集成进水水道。

图 1.1 典型泵类推进器结构布局

(a) 典型舰板式喷泵;(b) 典型浸没式喷泵;(c) 艇尾外置式泵喷;(d) 艇尾两流道内置式泵喷

以艉板式喷泵、浸没式喷泵、艇尾外置式泵喷以及内置式泵喷为代表的舰艇推进器统称为泵类推进系统,其核心推进单元均是推进泵。

当前,国际推进器厂商(如 KaMeWa 公司)所研发的大型喷泵已经能够达到水力效率 92%~93%的设计水平,设计方法已经较为完善,装船后的喷水推进系统实船快速性预报也已经控制在 1~2 kn 航速的误差范围内,即使是短暂产生不同程度空化后的寿命周期都已经能够精确预报到小时。这在给我方自主创新设计带来巨大挑战的同时,也提供了技术发展方向的参考。目前,其技术突破主要集中于:少量牺牲效率的条件下尽可能改善泵的空化性能、扩展空化区界限,适应更高的推进航速,实现小型化、轻型化的设计突破,与当前我方水面与水下泵喷设计和应用过程中重点关注的抗空化设计不谋而合,相当于间接给我方的自主研发提供了佐证案例。

大量公开文献和报道表明,在喷水推进器国际化市场应用的过程中,以 KaMeWa 和 MJP 公司为代表的喷泵厂商已经建立了完整的选型设计程序、泵设计与性能评估数值计算方法、喷水推进器装船后推进和空化性能数值预报方法、泵和进水流道模型试验测量以及喷水推进系统实尺海试的规程和标准,已经能够做到与传统的螺旋桨推进系统并驾齐驱。但是,无论是喷水推进系统还是泵喷推进系统,国内当前都还处于起步阶段。唯一已经装船应用的某快艇喷水推进系统,从其喷水推进器选型设计、喷泵产品和设计图纸引进、装船后快速性和空化性能预报,到喷水推进系统的操纵与控制集成,当时全都依赖于外方厂商完成,致使某外商掌握的该船战技术性能指标较我方众多设计与使用人员更加清楚、全面,极大限制了该船的作战使用以及对推进系统核心技术自我攻关的进展历程。并且,该公司还多次在相关学术会议场合以我方装船喷水推进系统为载体,展示、宣传其设计产品与技术实力,进一步加剧了我方在喷水推进系统研发方面失去源头创新的劣势,间接导致了“十年过后,即使当前水面船像下饺子一样下水,但依然没有一型自我研发的喷水推进系统装船问世”的窘况。此外,在泵喷推进系统的水下应用方面,联合国五大常任理事国除我国外的其余四国均已成功使泵喷推进潜艇服役,我国已经掉队,再次呈现了我国在泵类推进器理论和应用基础研究方面还比较薄弱的严峻现实,因此,有必要从选型设计开始,系统梳理泵类推进器设计的理论分析流程,完成单套喷泵和泵喷推进系统的性能设计。并且,待检验其工程适用性后,扩展应用到多套泵类推进系统的集成优化设计,最终形成指导实际泵类推进系统研发的规范性和标准,推进泵类推进系统的快速自主研发进程。

## 1.2 推进泵与螺旋桨在“形”和“神”上的差异

学术专著《泵喷推进器的低噪声设计机理与设计应用》阐述了泵喷与螺旋桨在

水动力性能方面所表现出的“径向环量分布规律不同、敞水效率曲线规律不同、轴向进流速度分布不同以及出流速度分量的能量头占比不同”等差异<sup>[1]</sup>,分析了后置定子式泵喷与典型舰板式喷泵在结构和外形上所具有的差异,但并未系统呈现出泵类推进器作为特种推进器相比于螺旋桨所具有的共性和特性,对于深入理解泵推进与桨推进在“形”和“神”上的差异尚且不够,也不利于从顶层把握最优推进器的选择和设计优化,因此,需要更加全面、深入地梳理从螺旋桨到喷泵再到泵喷的发展脉络,总结其在命名、结构组成、外形、流动特征以及性能特点上的内在关联和外在差异,从而真正把握舰艇推进器设计的本质内涵。

舰艇推进系统的核心在于推进器定型。推进器的本质任务是在指定功率限制条件下产生足够的推力,并且尽可能延迟空化产生、控制脉动压力、降低辐射噪声。从功能层次来看,推进器设计又可以细分为四个层次:水动力设计、抗空化设计、低噪声设计和声学设计。水动力设计是在给定航速和转速条件下产生尽可能大的推力、消耗尽可能小的轴功率,同时使无空化运转范围尽可能大,主要考核指标是效率;抗空化设计除了满足效率指标外,主要考核空化性能,尤其是关注延迟空化初生的设计要素应用以及抗空化裕度;低噪声设计通常将主要关注点集中于空化性能和非定常力性能,包括空化初生点、推力突降点(thrust breakdown)、空蚀强度、空化诱导的脉动压力幅值,以及轴向和侧向非定常力幅值,主要考核指标是临界空化数(或称空化斗曲线)、脉动压力和非定常力幅值;声学设计除了满足尽可能高效、尽可能延迟空化初生、尽量减小脉动压力以及推力和力矩脉动幅值外,还需要评估无空化和空化状态下低频线谱噪声谱源级以及宽带声压级的大小,以实现船体总体的声学指标目标分配。对于现代推进器设计来说,水动力设计、抗空化设计和低噪声设计三者通常交融在一起,并且当前舰艇推进器设计往往直接给定总噪声指标,使得设计本身在试凑费效比方面难度剧增、对母型设计样本的依赖剧增、对设计理论的指导及其边值问题的认识需求剧增,需要系统梳理相关知识。在当前水下大侧斜7叶桨设计难题仍未完全攻克以及泵喷设计仍聚焦于克服叶梢泄漏涡空化初生的现状下,直接实现声学设计仍有较长的路要走。

专著《泵喷推进器的低噪声设计机理与设计应用》在比较泵喷与7叶桨的差异时,阐述了“推进效率可以略高、辐射噪声更低、设计难度更大、操纵性能评估更复杂”<sup>[1]</sup>,已经从总体上给出了泵喷性能特征的形象。但是,对于不太熟悉船舶推进的学者而言,该描述仍显得过于笼统,需要进一步细化。

当前,水面船主要采用5叶大侧斜调距桨。大侧斜调距桨的螺距可调,使得一个螺旋桨相当于多个定距桨,将单桨的单个高效点扩展为一段高效区的同时,正、负螺距的转换使得在原动机转向不变且无倒车齿轮的条件下可以实现从正车到倒

车的转变。调距的根本目的是在不同航态下保证原动机与螺旋桨之间的最佳匹配,如同一航速可以由大螺距、低转速或者是小螺距、高转速来实现,变螺距等于改变螺旋桨的做功能力或者说是需求功率,从而最大限度地发挥主机的做功能力。但是,尽管螺距可调,但车令表中正常工作制显示的调距桨通常仍用作定距桨,除了考虑桨毂中液压调距机构的安全外,更重要的是桨叶偏离设计螺距后,无论是低频线谱噪声还是宽带谱噪声都会显著增加,如图 1.2 中实测某驱逐舰辐射噪声随调距桨螺距变化的曲线所示。因此,应用调距作为推进器降噪措施显然是不可取的,无论是对于螺旋桨还是泵类推进器来说均是如此。

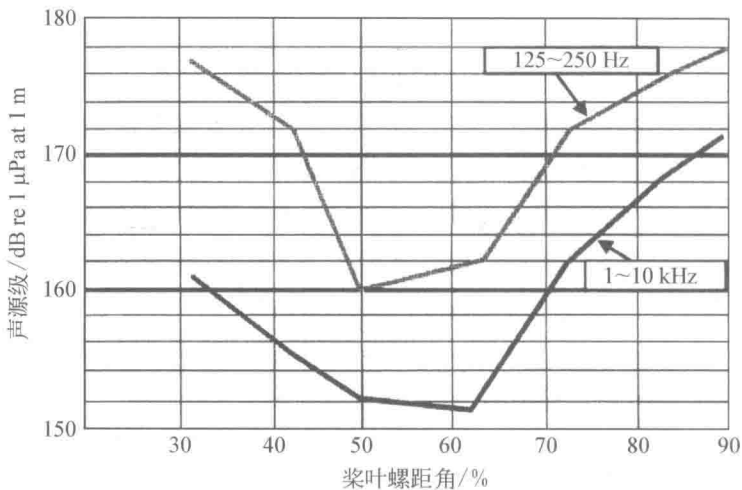


图 1.2 某驱逐舰螺旋桨调距过程中辐射噪声

从结构外形上看,螺旋桨可以视为简化轴流叶轮,比转速(用于描述泵类型的参数)非常大,可以根据流动控制的需求增加前置定子、后置定子、前后定子、翼型导管、肥厚型导管,甚至是非对称前置定子或诱导轮等结构部件。随着设计与加工制造技术的发展,当前国际推进器市场中水面船舶、无人潜器、水中兵器以及潜艇的主流推进器主要集中于螺旋桨、喷泵和泵喷三类,喷泵和泵喷又可以统称为泵类推进器。典型螺旋桨仅有单个转子部件,泵类推进器通常包含导管或轮缘、转子和定子部件。螺旋桨和泵类推进器可以联用,称为泵桨混合推进系统,如图 1.3 中南非海军 MEKO A200 护卫舰采用的 5 叶调距桨-喷泵以及某船模采用吊舱式螺旋桨-喷泵所示。

喷泵的性能特点由其结构组成和工作原理所决定。典型的艏板式喷泵由进水流道、推进泵、喷口和操舵倒航机构(也称为转向倒车装置)组成,如图 1.4 所示,国际推进器市场中著名的 KaMeWa S 系列喷泵即采用了该布置结构。推进泵是喷

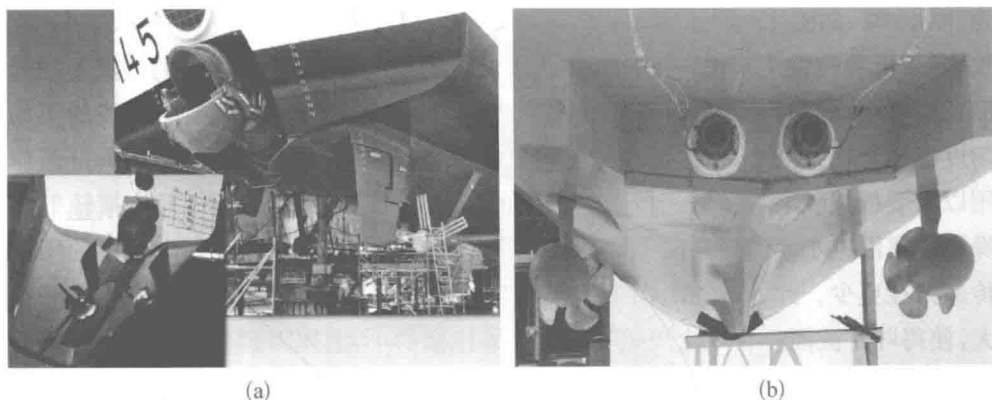
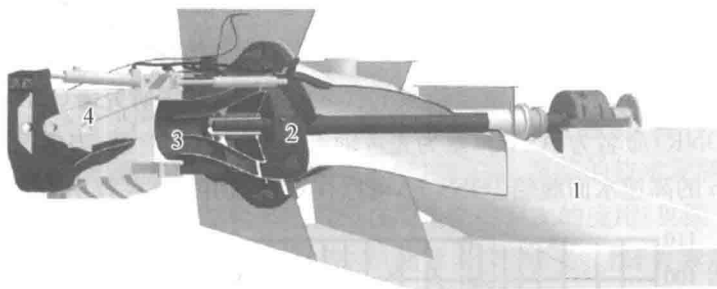


图 1.3 水面船舶泵桨混合推进系统

(a) MEKO A200 护卫舰 5 叶桨-喷泵; (b) 某船模吊舱式螺旋桨-喷泵



1—进水流道; 2—喷水推进泵; 3—喷口; 4—操舵倒航机构。

图 1.4 典型舰板式喷水推进器结构

泵中的核心部件,直接影响着喷泵的水动力和声学性能,由叶轮和导叶体组成。现代船用推进泵主要为单级混流泵或者是比转速更高的轴流泵。其中,喷口因与导叶体整体铸造,通常指定推进泵时也将喷口包含在内。进水流道为推进泵叶轮提供进流,可以在一定程度上改善进流的均匀性,也是船体外部绕流与推进泵叶栅内部流动之间的桥梁。转向倒车装置的作用是转向和倒车,通常在分析喷泵直航推进性能时不予考虑。从设计原理来看,喷泵是一种产生的推力等于通过其水流动量差的推进器,选型设计时尤其适合于动量定理。推进泵中,叶轮、导叶体和喷口三者配合设计后,可以保证喷泵具有高速、高效以及优越的抗空化性能。若与常见的单个 5 叶螺旋桨部件相比,喷泵的显著性能优势在于中高航速下效率高、抗空化能力强、辐射噪声低。首先,对于抗空化性能而言,除叶轮产生轴向推力外,导叶体和喷口也会分担推力载荷,一定程度上减小了旋转叶片承受的负载,再加上叶轮叶片数通常不少于 6 叶,综合表现为可以有效延迟旋转叶片的空泡产生,如设计航速

为 40 kn 时,如图 1.4 所示的喷泵仍远离空化区,推进泵的水力效率约为 89%。其次,对于低噪声性能来说,一方面,在进水流道的整流作用下,推进泵的进流不均匀度比桨叶小,同时,在导叶体和喷口的回收周向速度分量作用下,喷泵出流的不均匀度也显著比桨的小,产生的湍流噪声更小。另一方面,在喷泵轮缘的周向屏蔽作用以及艉板式喷泵喷口射流位于空气中的自然屏蔽作用的影响下,其直接辐射的噪声主要沿进水水道反向向船底下方辐射,较螺旋桨向水中任意方向辐射的噪声传递路径更少。此外,喷泵周向轮缘与船体结构固连,质量刚度远比单个桨叶更大,使得叶片流固耦合二次辐射噪声也显著比桨的小,上述因素共同使得喷泵辐射的噪声明显低于螺旋桨的。如图 1.5 所示的瑞典 Akustikbyran 水声研究所针对同一条船、同一主机、同一转速测试得到的喷泵与螺旋桨辐射噪声曲线比较结果,可知整个频率范围内喷泵声压级都要比螺旋桨推进约小 10 dB。此外,对于叶型设计本身来说,近十年内见著报道的最为先进的轴流外形混流式大功率密度喷泵如图 1.6 所示<sup>[2]</sup>,可视为最先进的设计样本之一。该推进泵具有轴流泵的外形和混流泵的性能特点,是紧凑式大功率密度喷泵的代表,被美国海军研究署(Office of Naval Research, ONR)命名为 AxWJ,意为先进轴流外形混流式喷泵,当前已先后应用于航速为 50 kn 的高速水面舰船 JHSS 上,可以在短期内引领喷泵技术的发展方向。

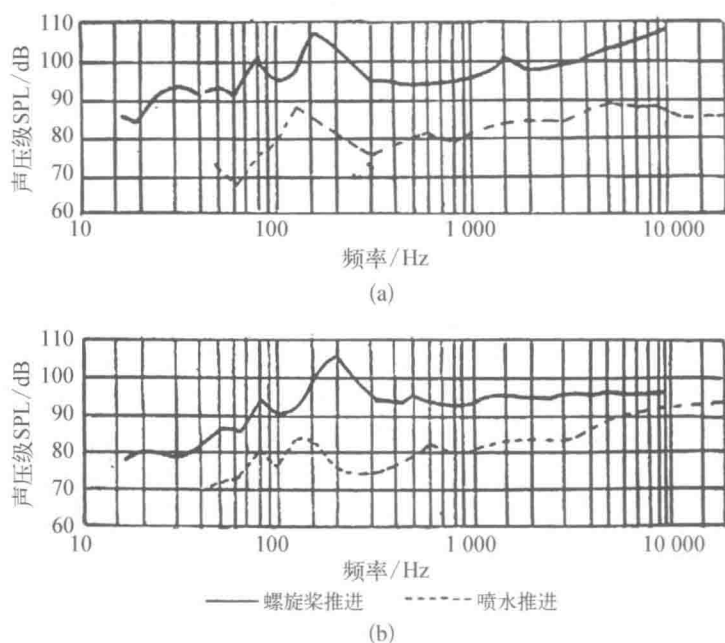


图 1.5 喷水推进与螺旋桨噪声实船测试结果比较

(a) 主机 1 500 r/min 时的声压; (b) 主机 1 700 r/min 时的声压

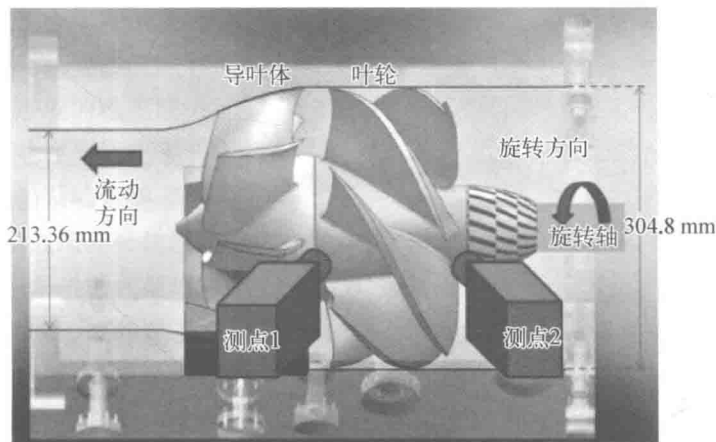
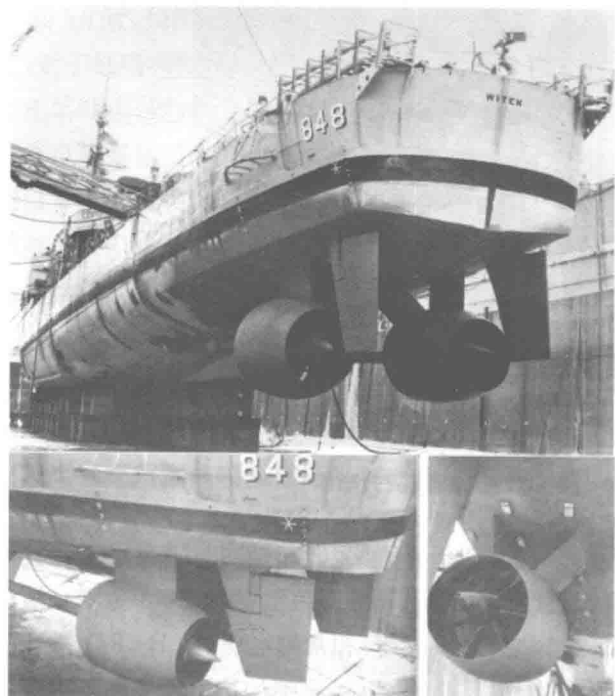


图 1.6 先进轴流外形混流式泵喷

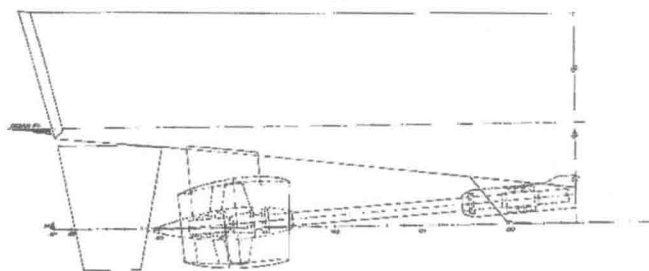
此外,若仅从外形上直观来看,泵喷类似于导管桨,但却是同时带有定子和转子叶栅的导管推进器。根据当前泵喷已经成功应用于重型鱼雷(如 MK48 鱼雷)、核潜艇(如“弗吉尼亚”级、“机敏”级和“北风之神”级核艇)和常规潜艇(俄 B-871 常规潜艇)主推以及核潜艇辅推(“弗吉尼亚”级核潜艇)的实际,泵喷的技术发展和工程应用的基调已经较为明确。若再结合泵喷曾经在反潜驱逐舰上的应用(见图 1.7)、泵喷出现在美国军方近水面潜艇战斗部[SSLW(X)项目,2003 年]的设计方案中(见图 1.8)以及泵喷拟用于多型水下无人潜器、蛙人运载器等部分案例,可知泵喷推进技术已经成为一项共性技术,其应用领域甚至可以覆盖整个船舶与海洋工程专业中的推进平台。

根据设计需求的差异,可从总体上将泵喷设计归为四大类,分别为无人水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)泵喷、自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)泵喷、鱼雷泵喷、潜艇泵喷和驱护舰泵喷。四类泵喷的考核指标权重各不相同,与之对应的关键设计要素也需要进行适应性调整。潜器泵喷的核心指标是效率和轻量化设计,通常严格限定尺寸、推力和功率,设计航速一般不超过 15 kn;鱼雷泵喷核心指标是效率和抗空化性能,并因原动机和减速比限制,通常需要限定较高的转速,且设计航速一般高于 30 kn;潜艇泵喷核心指标是辐射噪声,同时包含线谱噪声和总噪声,设计难度最大;驱护舰泵喷的核心指标是效率和中高航速下无空化,设计航速多为 25~30 kn,甚至有可能实现全航速范围内无空化产生。

当前,鱼雷和潜艇采用的传动泵喷(简称机械式泵喷)主推进器代表了泵喷叶型设计技术的极致方向,临界航速高和辐射噪声低是其显著性能特征。同时,潜艇无轴驱动式集成电机泵喷(简称无轴泵喷)辅推进器代表了泵喷水力模型与环状集成电机融合的发展方向,该集成技术甚至可以辐射到无轴喷泵方面进而应用至水



(a)



(b)

图 1.7 水面舰艇驱护舰  
泵喷推进应用

(a) 美国驱逐舰 USS Witek (DD-848, 排水量 3 400 余吨, 设计航速 36.8 kn); (b) 美国反潜护卫舰 USS Glover (FF-1098, 设计航速 27.5 kn)

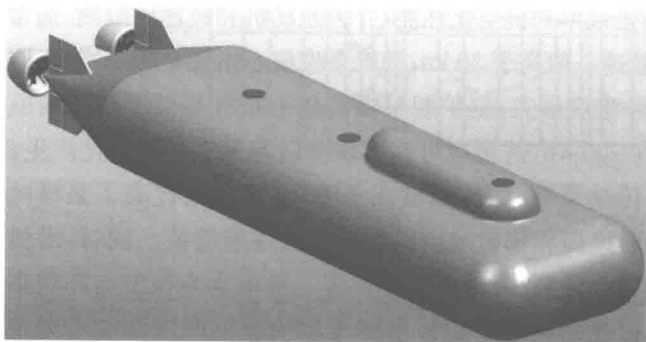


图 1.8 近水面潜艇战斗部  
双无轴泵喷推进  
[SSLW(X)、设计  
航速 12 kn]

面舰船。从工程实现上看,长期浸泡于海水中的可反转集成电机,因受限于体积、重量、绝缘密封、泥沙吹除等适装性和可靠性方面的技术障碍,短期内兆瓦级功率取得突破性进展的难度巨大,但上述局限性并不能限制百千瓦级以下中小功率等级的无轴泵喷在多样化平台上的推广应用。经过近二十年的应用经验积累,美国集成电机无轴泵喷正逐步向主推进器发展,并且很有可能直接作为下一代“俄亥俄”级改进型战略导弹核潜艇的主推进器,我国还有较长的自主设计之路要走。总的来看,无论是机械式泵喷还是无轴泵喷,两者在与艇尾构型的匹配方面都具有一定的灵活度,既可以外置于艇尾,也可以内置于艇尾,具体取决于艇体总体结构布置。泵喷内置后,无论是流场还是声场性能上的匹配,泵喷均与尾翼附体在流场和声场上解耦,但也会随之带来维修管理不便的问题,需要综合考虑。

将喷泵与泵喷两者聚焦泵类推进器后,综合结构组成、工作原理与应用特点来看,喷泵与泵喷两者之间既联系紧密,形、神皆相似,但又存在一定的差异,无论是在方案选型设计还是在具体技术设计过程中都应区别对待,以达到最佳推进系统设计的目的。例如,在相似性方面,两者都是由定子和转子叶栅结构构成的组合式推进器,都适用于涡轮机械理论,都由流经叶栅通道的流体动量差来决定推进力大小,实现推进器功能时都需要满足快速性指标、抗空化和控制辐射噪声的要求。此外,两者应用都常安装于推进载体尾部,无论是水动力还是结构方面,都与载体尾部几何存在强烈的相互作用,需要进行匹配设计。再者,两者设计叶型时都可以采用桨叶设计时用到的升力线理论/涡格升力线理论、升力面理论,或者是泵叶片设计时采用的一元升力法设计理论、S1/S2 流面二元设计理论、准三元/全三元设计理论来实现。并且,叶型设计完成后,都可以引入侧斜、增加叶片数、增加定转子之间的轴向距离、控制叶顶间隙、改变几何进流角等措施,来达到降噪优化设计的目的。而在差异性方面,已得到大量学者研究关注的,如舰板式喷泵在一定航速范围内推力减额系数为正值,与螺旋桨差异明显;再如,“海狼”级和“弗吉尼亚”级泵喷推进潜艇均采用木字形艇尾,法国“凯旋”级泵喷推进潜艇采用工字形艇尾,某型潜艇采用米字形艇尾,船坞中“弗吉尼亚”级潜艇 SSN-789 尾锥段的小端与大端直径比大于 0.35,明显区别于国内 7 叶桨推进的常规艇典型艇体尾锥段及尾翼结构配置方案。在此基础上,两者之间更多的共性与特性分析尚有待深入挖掘。结合已有工程应用和现有认识,可从应用场合、结构部件、叶型差异以及设计细节四个层面,对喷泵与泵喷两种推进器进行更为细致、准确的刻画,归纳如下:

(1) 应用场合的不同直接决定了设计理念的不同。喷泵的突出优势集中在高速高效、抗空化,如美军采用的 4 套喷泵的濒海战斗舰单体船的设计航速 47 kn、三

体船的设计航速 44 kn 均远离空化区,采用 4 套喷泵的 TSV-1X 支援舰设计航速 48 kn、HSV-2 高速多用途舰设计航速 45 kn 同样无空化,甚至采用 6 套喷泵的超高速海上补给三体船 VHSST 设计航速 60 kn 也无空化产生,这些例子将喷泵水动力效率显著高于螺旋桨的特点体现得淋漓尽致。此时,喷泵实现高效率、大功率密度以保证高速状态下的快速性指标是第一位的,对其辐射噪声大小的限制降为其次。此外,泵喷当前主要应用于鱼雷和核潜艇推进,尽管鱼雷设计航速通常大于 45 kn,但其有效功率较小,使得泵喷的功率密度并不大;并且,即使核潜艇设计航速维持在 20~25 kn,但其 80% 的巡弋航速介于 10~16 kn,辐射噪声考核航速甚至仅有 6~8 kn,使得泵喷在推进应用方面的焦点由高速、高效地满足快速性转变为满足辐射噪声性能。因此,喷泵设计的第一原则是高效和抗空化,其次是低噪声;而泵喷的设计原则主次排序是低噪声、抗空化,最后才是高效,甚至可通过适当地降低效率来优化其声学性能。当然,因实际应用中通常设计任务书给出的几项指标都必须同时达到才能满足要求,无法进行主次取舍,也不能绝对地说“喷泵就一定效率高,泵喷就一定噪声低”,显然还与使命任务、使用环境、结构布局等限制因素有关,那么该区分的主要意义更多在于推进系统水力参数选型设计时关键参数的倾向性赋值不同,如推力减额系数、伴流系数、喷口能量损失系数、喷口射流轴向抬升高度、泵水力效率、喷速比等取值差异,从而更好地完成设计。

(2) 喷泵通常包括精细化设计的进水流道和喷口,无论是内部嵌入的典型舰板式喷泵还是外挂集成的先进浸没式喷泵,均是如此。其中,进水流道的核心作用是维持泵所需的体积流量、改善推进泵的进流品质。进水流道的效率直接影响喷泵水动力效率,对其流动性能的认识不足以及设计效果不佳正是导致喷水推进器在很长一段时间内应用发展缓慢的主要原因。喷口是出口面积可调、能够用于喷泵功率系列化产品的收缩截面,通常与导叶体轮缘集成在一起,共同用于增加轴向推进力。此外,泵喷外挂于艇体尾部时通常要取消进水流道和喷口。原因是艇体尾锥段能够实现自然进流,并且泵喷出流喷速比需要进行控制,以抑制泵喷出口射流噪声大小;当泵喷内嵌入艇体尾部时,需要为推进泵配置专门的进水流道和出流管道(见图 1.9),此时,该概念图中的进流管道设计要求与喷水推进器进水流道类似,但出流管道设计要比喷水推进器中喷口截面设计更加简单,可以视为等截面喷口。因此,无法简单地用是否包含进水流道和喷口几何部件来区分喷泵和泵喷,还应结合应用需求来看。

此外,喷水推进器结构部件中通常包含操舵倒航机构,属于舵桨合一推进器,并且操舵倒航机构可以获得转向、调整倒车力的大小以及发挥操纵性能,相对于推进泵来说比较独立,设计结构时仅仅体现为推进泵的总尺寸约束着操舵倒航机

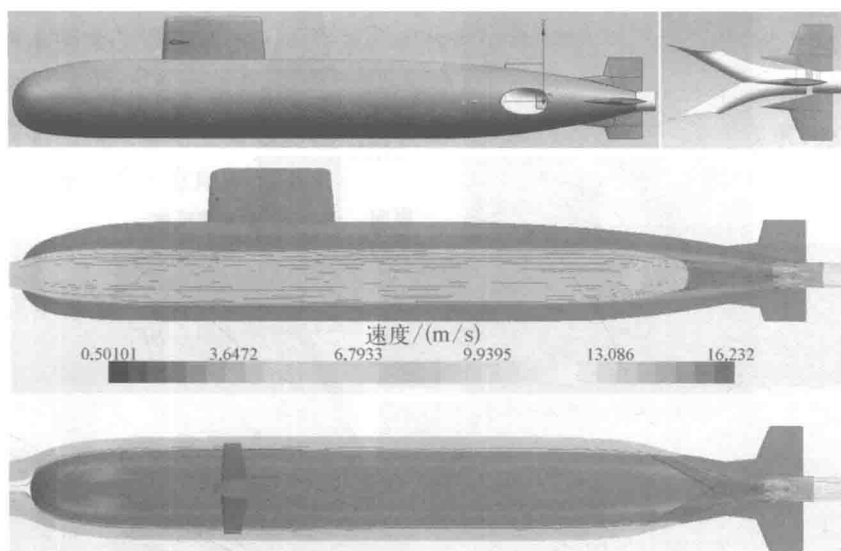


图 1.9 两流道内置式泵喷概念图及流经泵喷的速度流线

构的空间尺寸(见图 1.10)。因此,通常可以先完成推进泵设计,再考虑操舵倒航机构的设计。但是,泵喷推进器结构中无操舵倒航机构,无论是常见的鱼雷泵喷还是艇用泵喷,其操纵和机动性能保障都由艇体舵翼结构完成。因艇尾外置泵喷进流通常位于舵翼结构的尾流场中,舵翼线型以及结构位置布局均会直接影响泵喷水动力和噪声性能,因此设计时应该考虑呈螺旋迭代递进,而不能将这些因素完全割裂开来,例如,弗吉尼亚理工大学在设计新型弹道导弹核潜艇 SSBMD 的过程中,评估采用 7 叶导管桨能够获得的快速性指标后,即分析围壳舵/类星形尾翼组合结构能够获得的机动和操纵性能,并且针对舵翼尾流产生的桨叶非均匀进流对导管桨推进性能的影响进行了修正<sup>[3]</sup>。可以说,喷泵中推进泵与操舵倒航机构两者是解耦的,推进泵可以单独用作加速时的助推器而不含操舵倒航机构;但艇尾外置式泵喷推进系统中推进泵的水动力和噪声性能直接受舵翼结构、线型以及空间布局的影响,评估泵喷推进和噪声性能时需要综合考虑,或适当考虑修正量。

(3) 转子叶型差异明显。喷泵叶轮叶片通常表现为轴向“长”叶片,而泵喷转子叶片一般为“短”叶片。具体表现如下:泵喷转子轴向长度与桨相当,明显小于喷泵叶轮,使得泵喷转子叶片的径向与轴向长度之比明显大于喷泵叶轮叶片,或者说泵喷转子叶片的叶栅稠密度明显要小、叶片扭曲程度更小。原因是,一方面,泵喷转子叶片数通常多于喷泵叶轮的,且转子叶片数通常大于 7 叶,一般为 9 叶,而叶轮叶片数通常不大于 6 叶,如 KaMeWa S 系列喷泵第二代和第三代的叶轮叶片