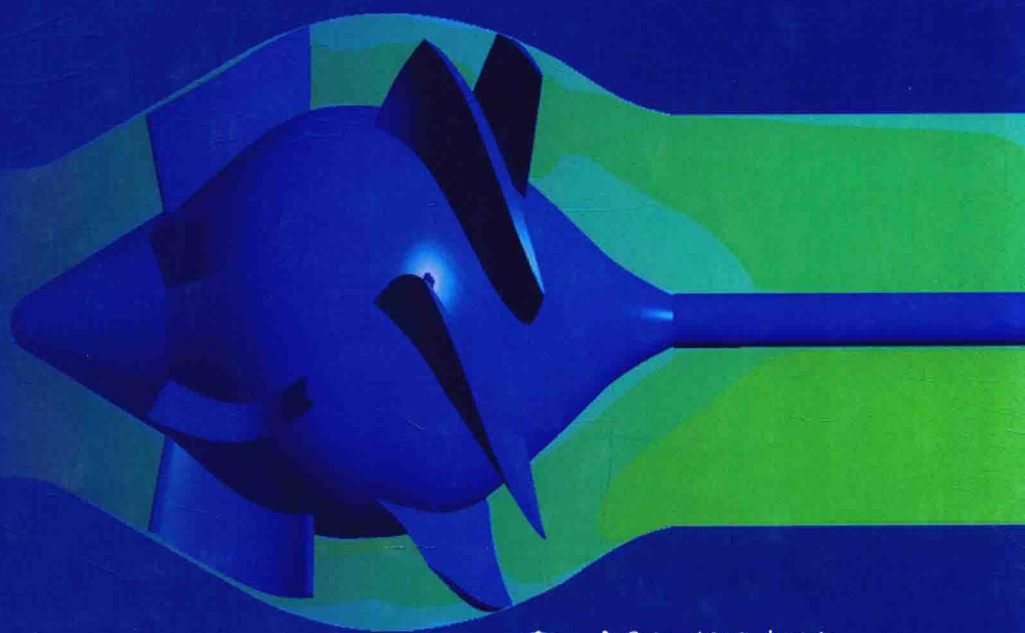


# 喷水推进泵及 泵装置水动力特性

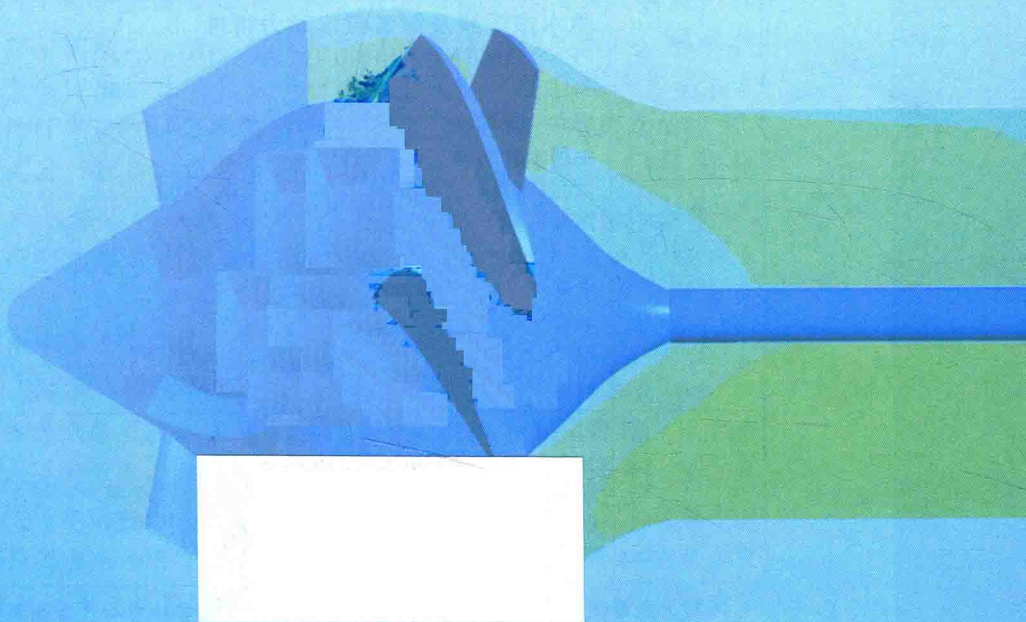
成立 罗灿 李尚红 刘必伟 顾巍 夏臣智 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 喷水推进泵及 泵装置水动力特性

成立 罗灿 李尚红 刘必伟 顾巍 夏臣智 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书介绍了喷水推进泵及泵装置的水动力特性,优化了格栅、进水流道、喷口等部件,着重从流动和水力特性等方面阐述格栅、进水流道、推进泵、喷口等部件对水动力特性的影响,并较为系统地介绍了喷水推进泵及泵装置的汽蚀空化特性。

本书可供水利、船舶、机械、海洋、动力等相关专业的师生、工程技术人员和科研人员阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

喷水推进泵及泵装置水动力特性 / 成立等著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2017.12  
ISBN 978-7-5170-6131-1

I. ①喷… II. ①成… III. ①喷水推进器—水动力学  
IV. ①U664.34

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第300303号

书 名	喷水推进泵及泵装置水动力特性 PENSHUI TUIJINBENG JI BENGZHUANGZHI SHUIDONGLI TEXING
作 者	成立 罗灿 李尚红 刘必伟 顾巍 夏臣智 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10印张 237千字
版 次	2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷
定 价	88.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

21世纪是海洋世纪，海洋中蕴藏着丰富的自然资源。我国不仅拥有960万 $\text{km}^2$ 的陆地面积，还拥有300万 $\text{km}^2$ 的海洋领土。我国海岸线绵长，北起渤海湾，南至南中国海。随着我国经济发展和国力提升，如何有效保障我国领海主权、资源和远洋贸易安全是放在我们面前急需解决的课题和挑战。我国造船业的发展与目标紧密相关，需要放在战略的层面上考虑和发展。

中华人民共和国成立以来，我国造船业发展迅速，特别是进入21世纪，我国制造业的全面爆发，也带动了造船业进入了新的发展轨道。截至2014年，我国生产船舶的市场份额已居世界第一，国际船舶制造呈现出中、日、韩三国鼎立局面。但依然要清醒地认识到，我国的造船技术水平与发达国家还有较大差距，亟待提升。为此，我国政府制定了《中国制造2025》，文件指出“十二五”期间，中国高端设备制造主要着眼于基础零部件和关键元器件，“十三五”期间则主要聚焦在高端设备方面，其中“海洋工程设备及高技术船舶”赫然在列。

根据工作原理，船舶有多种分类，其中存在这样一类特殊船舶——喷水推进船舶。它不同于螺旋桨推进船舶，而是通过将水流高速喷出产生的反作用力推动船舶航行。喷水推进泵装置将水流从船底引入，通过推进泵进行加速喷出，用动量变化获得推力。它具有传动机构简单、水下噪声低、操纵性好等优点，因此在高速船艇中得到了越来越广泛的应用，可军用，也可民用。目前，该装置的先进技术控制在北欧、澳洲、北美和日本等濒海发达地区和国家的手中，并对我国进行了一定技术封锁。作者对近期的研究成果进行了整理，完成了本书的内容。重点介绍喷水推进泵装置水力优化，分析装置性能，从而丰富和推动喷水推进装置学术与应用研究水平提升。

本书的研究对象、研究内容和相关结论如下：

(1) 喷水推进泵装置进水流道参数化建模。实现参数化建模可以大大缩短研究周期，提高效率，但喷水推进泵装置进水流道参数众多，独立几何参数与关联几何参数关系复杂。针对这个问题，提出了UG NX建模平台联合ICEM CFD网格划分平台的解决办法。首先在UG NX建模平台中关联13个参数完成进水流道参数化建模与喷泵装配，然后在ICEM CFD中研究进水流道网格划分技巧，最后提出了以ANSYS WB为平台的一体化网格划分和以块方式网格划分两种方法，并给出网格划分实例。

(2) 喷水推进泵装置进水流道水力优化。进水流道是将船底水吸入推进泵的过流通道，其水力性能对喷水推进泵装置抗空化性能和振动与噪声性能影响显著。单独考虑进水流道，分析了进速比  $IVR$ 、航速流动参数与长度、倾角及唇角构造几何参数对进水流道水力性能的影响，总结其流动特性，获得优化方案。具体结论如下：①低  $IVR$  时进水流道不易空化，出流均匀性能较差；高  $IVR$  时进水流道空化严重，出流均匀性能较好；在  $IVR$  为 0.83~0.94 工况下综合水力性能优良；②进水流道水力性能的优劣与航速有一定相关性，并受到航速的限制；航速越大，进水流道出流均匀性能有所提高，但其空化范围越广；③改变进水流道长度，长度不够会引起漩涡等不良流态，进水流道长度为  $6.38D$  时综合性能较佳；④改变进水流道入流倾角，倾角在  $30^\circ\sim 35^\circ$  时，水力性能较佳，出流均匀性较好，超出此范围，进水流道内部大面积空化，水力性能下降，当倾角为  $35^\circ$  时水力性能最优；⑤改变进水流道唇角构造，壁面压力随着唇角构造变化影响较大，唇角越尖锐，进水流道抗空化性能越好。进水流道优化方案几何参数分别为：长度  $L$  为  $6.38D$ ，入流倾角  $\alpha$  为  $35^\circ$ ，上缘唇角  $4^\circ$ 。

(3) 喷水推进泵段水力性能。作为喷水推进泵装置的核心部件，推进泵的性能一直是人们关注的对象。采用数值模拟获得了装置性能，并与实验结果进行对比，二者吻合度很好，数值模拟结果可信。考虑推进泵的实际运行情况，对原实验推进泵进行了改进，并通过计算，获得了修改后的推进泵在不同流量工况点下的水力性能。研究表明，在小流量工况时，推进泵段内流态较差；在设计流量工况时，流态逐步变好；在大流量工况时，泵内流态较好。借此，也进一步凸显了数值模拟在研发和生产中周期短的优势。

(4) 喷水推进泵装置喷口水力性能。喷口是喷水推进泵装置产生推力的重要部件，可分为矢量和非矢量两类。本书以非矢量常规喷口展开研究，根据其几何特征，分别从喷口面积、形状和出口过渡段形式 3 个方面进行数值模拟分析。结果表明：①当喷口面积为推进泵段叶轮室出口面积的 0.15 倍时，装置推力最大；②在最大推力对应喷口面积条件下，对比分析椭圆形、方形和倒角方形喷口的性能发现，方形与椭圆形长短轴比值大小对装置性能影响较小，倒角方形的长宽比对装置的性能影响较小，喷口为圆形时，可获得最大推力，且水力性能较好；③喷口曲线过渡段形式为直线渐缩过渡时，其对应系统推力及水力性能均优于其他形式。

(5) 基于喷水推进泵装置的进水流道水力优化。考虑到进水流道在无喷泵情况下无法获得喷水推进泵装置推力、系统效率等水力性能，因此，基于整体喷水推进泵装置与实际情况更为接近。进水流道在装配喷泵情况下，分析了航速、转速流动参数与长度、倾角几何参数对泵装置水力性能的影响，获得进水流道不同参数范围。基于 CFD 优化喷水推进泵装置进水流道流动参数。随着航速、转速的增大，喷水推进泵装置系统效率先增大后减小，推力一直增大；在航速 10m/s、转速  $n/n_a$  为 2.71 系统效率达到最高点；在最优工况下，喷水推进泵装置内部流态良好，出流均匀性较佳。首先，改变进水流道长度；缩短长度，喷水推进泵装置推力、系统效率下降，但幅度很小；长度不是影响喷水推进泵装置水力性能的关键几何参数。最后，改变进水流道倾

角；随着倾角降低，喷水推进泵装置推力没有提高；在倾角  $25^\circ$  出现漩涡等不良流态，泵装置系统效率最小；倾角是影响喷水推进泵装置水力性能关键几何参数之一。因此，研究表明进水流道在长度  $6D$  左右、倾角在  $27^\circ \sim 35^\circ$  及唇角构造尖锐等几何参数下，泵装置水力性能较佳，评价指标变化较小。

(6) 喷水推进泵装置整体水力性能。喷水推进泵装置在不同工况具有不同的特性，为此建立了包括进水流道、推进泵、喷口和船底水体的整体喷水推进泵装置，得到全场数据，对装置的水力性能、推力特性和内流特性等进行了分析。发现：①随着泵转速增大，装置推力和进速比均增大，进水流道所受压力分布逐渐变的均匀，流道出水管处所受压力逐步变小；②流道进口断面到方变圆断面的水力损失占进水流道总损失的比例最大，随着流量的增大，该比例减小，其他分段的水力损失占流道总损失的比例则随流量的增大变大；③喷水推进泵装置的轴向力会随着流量的增大而减小；④小流量工况下，叶槽出口处有展向涡发生，所取剖面上有径向涡的发生，并且叶顶附近由于压差的存在可见明显的泄漏涡，随着流量的增大，这些涡都逐渐缩小直至消失。

(7) 喷水推进泵装置进口格栅水力优化。我国近海监控数据表明，塑料等表面漂浮杂物越来越多，航行环境不断恶化，不利于喷水推进泵装置的正常运行，需要考虑装设格栅等防护措施，开展格栅性能的研究十分必要。但是格栅性能的影响因素很多，着重分析了安装角、流量等与装置性能间的关系，得到一系列成果如下：①最优工况下，安装角为  $0^\circ$  时，推进泵扬程最高，随着安装角的增加，扬程变小，与  $0^\circ$  相比， $20^\circ$  的推进泵扬程下降了  $2.64\%$ ，但在该安装角下，装置扬程仍略高于无格栅装置，约为  $0.31\%$ ；②在小流量工况 ( $0.33Q_{\text{BEP}}$ ) 到最优工况 ( $Q_{\text{BEP}}$ ) 的过程中，各格栅安装角下的推进泵效率相差很小，各流量效率曲线基本重合；随着流量的进一步增加，在  $1.17Q_{\text{BEP}}$  处，安装角为  $20^\circ$  的格栅方案效率比其他方案略大，该差值在大流量工况 ( $1.33Q_{\text{BEP}}$ ) 下达到最大，为  $3.6\%$ ；③各安装角度下，推进泵的水力性能基本相当；④综合考虑不同安装角下喷水推进泵装置的内流场特性、推力性能和水力性能，安装角为  $5^\circ$  时，整体性能较其他安装角方案优越，拟将  $5^\circ$  作为格栅的推荐安装角。

(8) 喷水推进泵装置空化性能。在某些特殊工况下，如“低航速、高转速”会产生空化问题。空化会导致推进泵轴功率增大或流量、扬程、效率下降与推力减小等现象，同时泵内还会导致噪声、振动，影响喷水推进装置系统效率。本书基于 CFD 数值模拟方法对喷水推进泵及泵装置的水力性能和空化进行模拟、预测和分析。研究结果对改善喷水推进泵装置抗空化性能和在运行中避免空化发生提供了理论依据，对进一步提高喷水推进泵装置的水力性能，改进喷水推进泵装置设计有一定实际意义和应用价值。由于分析泵内空化不能完全反映泵装置空化特性，因此需对整个喷水推进泵装置进行 CFD 空化模拟研究。通过分析不同工况下推进泵段叶轮的空化形式、空化发生区域和发展趋势以及空化对推进泵扬程、效率的影响，预测推进泵叶轮空化性能。数值计算表明，装置进水结构使得叶轮进口的流态出现不均匀分布，导致叶轮空化区域产生不规则变化，降低了推进泵装置有效空化余量，使其空化性能降低。当空化余量

小于 1.15m 时，进水口唇部、传动轴上下方弯曲连接段和扩散段均发生空化。为了更准确分析不同流道形式和运行工况对喷水推进泵装置空化特性的影响，选取了 3 个不同形式流道对喷水推进泵装置进行 CFD 空化模拟，分析不同进速比（*IVR*）下喷水推进泵装置的空化性能。计算结果显示，*IVR* 大于 1.29 时，喷水推进泵装置内空化性能较好；当 *IVR* 小于 1.29 时，随着进速比的减小装置内空化区域范围逐渐扩大，表明高转速低航速下泵装置空化性能较差。进水流道高度的增加，导致喷水推进泵的安装高度增大，有效空化余量减小，抗空化性能下降。

在本书写作过程中，得到了刘超、汤方平、周济人、张俊桂、杨华、金燕、杨帆等领导、老师的关心和帮助，并提出了许多中肯意见，对著者启发很大。苏叶平、商邑楠、袁红彦参与完成相关课题研究工作，在此一并表示衷心感谢。

本书相关研究成果得到了国家自然科学基金（51779214）、江苏省高校优势序列学科建设工程、江苏省青蓝工程中青年学术带头人项目、江苏省青年自然科学基金项目（BK20170507）、江苏省六大人才高峰计划（2015-JXQC-007）、江苏省产学研前瞻性联合项目（BY2015061-12）、江苏省水利重点项目（2016035）、江苏省高等学校自然科学研究面上项目（17KJD580003）、江苏省博士后科研资助计划（1701189B）、盐城 515 领军人才计划、扬州大学拔尖人才计划、扬州大学科技创新培育基金（2017CXJ047）、扬州大学博士后基金资助。

作者  
2017 年 9 月

# 符号表

$u$	$X$ 方向速度	$\alpha$	边界层影响系数
$v$	$Y$ 方向速度	$H$	扬程
$w$	$Z$ 方向速度	$Q$	流量
div	散度	$P$	静压
$p$	压力	$T$	扭矩
$F_{x,y,z}$	体积力	$N$	功率
$\rho$	密度	$g$	重力加速度
$\tau$	黏性剪切力	$n$	转速
$\nu_t$	紊动黏性系数	$A_{\text{叶出}}$	叶轮室出口面积
$Q_t$	湍动能	$a/b$	长短轴比、长宽比
$\mu_t$	湍流黏度	$\eta_c$	系统推进效率
$D$	进水流道出口直径	$K_l$	管道损失系数
$D_1$	泵轴直径	$v_{\text{out}}$	喷口轴向速度
IVR	进速比	$F_T$	推力
$v_{\text{pump}}$	流道出口速度	$H_{f(n-m)}$	水力损失
$v_s$	航速	$P_m, P_n$	断面总压
$V_u$	速度分布均匀度	$n, m$	断面号
$\theta$	加权平均角	$F'$	相对轴向力
$\bar{u}_a$	平均轴向速度	$Q'$	相对流量
$u_{ai}$	各单元轴向速度	$v_{\text{in}}$	流道进口流速
$u_{ti}$	各单元横向速度	$P_{\text{in}}$	推进泵进口总压
$m$	单元数	$P_{\text{out}}$	推进泵出口总压
$C_p$	压力系数	$V_{\text{an}}$	法向速度分布均匀度
$P_{\text{ref}}$	参考压力	$v_n$	平均法向速度
$\eta_{\text{inlet}}$	流道效率	$A_{\text{nozzle}}$	喷口面积
$E_{\text{inlet}}$	进口总能	$v_{\text{out}}$	喷口速度
$E_{\text{Capture/Area}}$	断面 1A 总能量	$\gamma$	格栅安装角
$L$	流道长度	$P_V$	汽化压强
$\sigma$	空泡表面张力	$P_{\text{local}}$	进口断面总压
NPSHa	有效空化余量	Span	翼展
$p_{\infty}$	环境压力	$\omega$	伴流系数
$\varepsilon$	湍动能耗散	$\varepsilon_c$	进水流道损失系数

# 目录

## Contents

### 前言

<b>第 1 章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 研究目的及意义	1
1.2 喷水推进泵装置组成	1
1.3 国内外研究进展	2
<b>第 2 章 流场数值模拟基本理论与方法</b>	<b>6</b>
2.1 控制方程	6
2.2 控制方程离散	7
2.3 湍流模型	8
2.4 网格剖分	10
2.5 边界条件设置	12
2.6 求解设置	12
2.7 本章小结	13
<b>第 3 章 喷水推进泵装置进水流道参数化建模</b>	<b>14</b>
3.1 UG NX 软件参数化及装配技术	14
3.2 ICEM CFD 网格划分技术	15
3.3 喷水推进泵装置进水流道参数化建模	15
3.4 喷水推进泵装置进水流道网格参数化	17
3.5 喷水推进泵装置网格划分实例	18
3.6 网格无关性分析	20
3.7 本章小结	21
<b>第 4 章 喷水推进泵装置进水流道水力优化</b>	<b>22</b>
4.1 引言	22
4.2 数学模型及计算网格	22
4.3 边界条件设置	23
4.4 进水流道优化目标函数	23
4.5 流动参数优化	25
4.6 几何参数优化	33
4.7 本章小结	42

<b>第 5 章 喷水推进泵叶轮水力性能和流动特性</b>	<b>44</b>
5.1 引言	44
5.2 试验用泵段水力性能数值模拟	44
5.3 推进泵段水力性能数值模拟	48
5.4 本章小结	53
<b>第 6 章 喷口对喷水推进泵装置水力性能的影响</b>	<b>55</b>
6.1 研究方案	55
6.2 喷口尺寸对喷水推进泵装置性能影响	56
6.3 喷口形状对喷水推进泵装置水力性能影响	62
6.4 喷口出口段过渡曲线形式对装置性能影响	69
6.5 不同航速下对泵装置的性能影响	71
6.6 不同喷口形式不同工况下泵装置的水力性能	74
6.7 本章小结	75
<b>第 7 章 基于喷水推进泵装置的进水流道水力优化</b>	<b>77</b>
7.1 数学模型及计算网格	77
7.2 边界条件设置	78
7.3 喷水推进泵装置优化目标函数	78
7.4 流动参数优化	79
7.5 几何参数优化	82
7.6 本章小结	86
<b>第 8 章 喷水推进泵装置水力性能和流动特性</b>	<b>87</b>
8.1 计算域及网格	87
8.2 边界条件	89
8.3 计算结果分析	89
8.4 本章小结	99
<b>第 9 章 喷水推进泵装置进水格栅水力特性</b>	<b>101</b>
9.1 计算模型及数值模拟	101
9.2 水力性能评判指标	102
9.3 结果分析	103
9.4 本章小结	106
<b>第 10 章 喷水推进泵叶轮空化特性</b>	<b>107</b>
10.1 计算模型	107

10.2	求解设置 .....	108
10.3	计算结果及分析 .....	109
10.4	本章小结 .....	127
<b>第 11 章</b>	<b>喷水推进泵装置空化性能 .....</b>	<b>129</b>
11.1	静压型进水口对推进泵装置空化性能影响 .....	129
11.2	不同形式流道喷水推进泵装置空化特性 .....	133
11.3	本章小结 .....	142
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>143</b>

### 1.1 研究目的及意义

喷水推进 (waterjet propulsion) 泵装置是一种有别于螺旋桨推进的新型特种动力装置。喷水推进的推力是通过推进水泵喷出水流的反作用力来获得的, 并通过操纵舵及倒车装置分配和改变喷流的方向来实现船舶的操纵。各国针对喷水推进泵装置的推力、功率、效率等的理论计算、喷水推进性能的仿真研究、装置模型试验和海上试验、喷水推进器与船体的相互作用和喷水推进泵装置的总体设计和选配等方面进行了大量的研究和试验, 使得喷水推进泵装置在滑翔艇、穿浪艇等高性能舰船上得到了广泛的应用。并且随着研究的广泛和深入, 又陆续出现了很多新型的喷水推进器及装置。由于社会发展需求及人们生活水平的提高等因素, 现有喷水推进泵装置在速度、效率、适用性等方面的研究设计还存在许多不足, 其性能还有待进一步提高, 因此改进喷水推进泵装置水力性能显得非常有研究价值和意义。

本书基于 CFD 数值模拟方法对喷水推进泵及泵装置的水力性能及空化进行模拟、预测和分析。研究结果对进一步提高喷水推进泵装置的水力性能和稳定性, 改进喷水推进泵装置设计有一定学术意义和应用价值。

### 1.2 喷水推进泵装置组成

喷水推进泵装置主要由进水流道、推进泵、喷口及倒车装置组成<sup>[1]</sup> (图 1.1)。

#### 1. 进水流道

进水流道是喷水推进泵装置的主要构成部件之一, 其功能是将船底的水传递给推进泵, 它的性能会直接影响到整个喷水推进系统的性能。进水流道的吸水端在船舶底部, 为了避免一些漂浮杂物进入泵内, 影响泵的性能, 在进水流道吸水口处一般均装有格栅。对进水流道进行设计时, 要求其在任何工况下都产生较高效率, 并具有出流均匀、流动损失

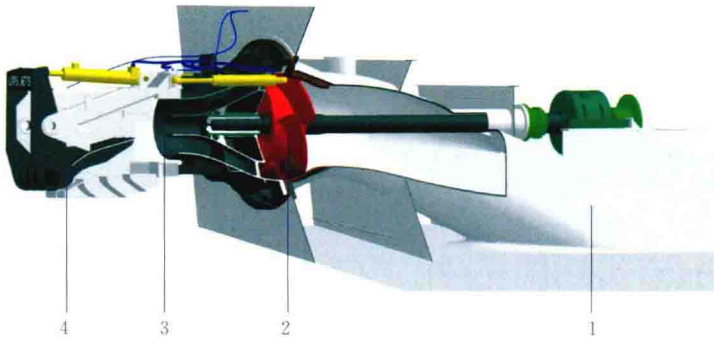


图 1.1 喷水推进泵装置示意图

1—进水流道；2—推进泵；3—喷口；4—倒车装置

小以及适应变工况能力强等特性。其影响因素主要有进速比、边界层影响系数、管道损失系数等<sup>[2]</sup>。

## 2. 推进系

推进泵是喷水推进系统核心部件，常采用混流泵和轴流泵泵型，由叶轮、导叶体、进口段和出口段四部分组成。其主要作用是将旋转机械能转换为被抽送液体的动能、势能和压能。在实际应用中，一般对泵的要求有：抗汽蚀性较好、效率高等。

## 3. 喷口

因喷水推进泵装置需要喷口将推进泵产生的机械能转换为动能等，因此喷口的主要作用是将水流喷出以产生推力。喷口主要有两种形状，外收缩型和内收缩型。当前，大部分采用外收缩型喷口<sup>[3]</sup>。另外，矢量型喷口已被研制出来，主要可分为箱型矢量喷口和球面矢量喷口两种<sup>[4]</sup>。由于喷口是在高压、高交变力环境下工作，因此对喷口部分的密封性、强度、耐腐蚀性及使用可靠性等性能方面均有较高的要求。

## 4. 倒车装置

操舵倒车装置主要是船体用来倒车和转弯用的。其性能好坏会直接影响喷水推进装置操控性能。该机构由操舵喷口、倒车扁斗上颚、倒车序斗下颚及液压油缸等部件组成。船舶转变航向主要是通过液压油缸的作用，使两边的舷进行左右转动而实现的。

# 1.3 国内外研究进展

1661年，英国人图古德和海斯最早发明了喷水推进泵装置。20世纪80年代末至今，由于喷水推进技术的优越性，有更多高速渡船和商用船舶以及军用舰船采用喷水推进泵装置。国内外学者对喷水推进装置进行了大量的试验研究和数值模拟研究。

## 1.3.1 试验研究

Jong - Woo Ahn<sup>[5]</sup>为检验所设计的混流泵，使用泵的测试装置进行试验和分析，以验证CFD预报的性能，并进行了空泡水筒试验，测量结果与CFD软件预报的结果吻合良好。T. E. Taylor和R. W. Kimball<sup>[6]</sup>应用耦合升力面和RANS方法设计了一个新的喷水推

进泵,同时制造了一个泵的模型,并在麻省理工学院进行船舶水动力试验。J. L. Roberts 和 G. L. Walker<sup>[7]</sup>做了关于“边界层对平进口喷水推进泵装置吸水的影响”的试验研究,试验在闭式循环风洞中进行。Terwisga<sup>[8]</sup>对船体、进口和射流之间复杂的相互作用进行了研究,并采用喷水推进器来驱动滑行船体进行模型试验。汤方平<sup>[9]</sup>等通过三维紊流数值计算和模型试验研究后导叶对轴流泵整体性能的影响,研究显示,叶轮和导叶之间的轴向间隙为某一值时,后导叶对叶轮性能几乎没有影响。

### 1.3.2 数值模拟研究

20世纪90年代计算流体力学(CFD)商用软件出现,由于其模拟计算结果与试验结果较为一致,并且具有成本低、易操作等特点,所以在喷水推进器的设计和研究方面得到了广泛的应用;瓦锡兰公司的 N. W. H. Bulten 和 R. Verbeek<sup>[10]</sup>用商业 CFD 软件对整个喷水推进系统进行了数值计算和结果分析,用 MFR 方法计算得到的推力和力矩值与瓦锡兰公司内部计算喷水推进泵装置推力和力矩的方法得到的结果吻合较好。

为了提高喷水推进泵装置的效率以及增强其广泛应用性,部分学者专门针对于喷水推进泵装置的某一部分开展了较为深入的模拟研究,主要包括以下几个方面。

#### 1. 喷水推进器整体水动力性能影响因素

胡健<sup>[11]</sup>等为了提高喷水推进器的水动力性能,用数值方法研究了不同参数对喷水推进水动力性能的影响计算结果说明,对叶数、叶片安装角、轮毂比等进行优化选择可以大大地提高喷水推进器的水动力性能;孙存楼<sup>[12]</sup>等为进一步深入研究喷水推进器的性能,讨论了计算流体力学作为一种先进手段在喷水推进器设计和性能分析中的应用。借助 CFD 工具,可在模型试验之前对喷水推进器的设计进行深入分析和优化设计,还可完成性能预报。

黄斌<sup>[13]</sup>等为了解决喷水推进船在各种工况下喷泵工作在气蚀区的问题,利用 Simulink 与 MFC (Microsoft Foundation Class) 集成的方法开发出了可用于制定喷水推进泵装置在回转、加速等工况下,避免喷泵在空化区运行的工作制的仿真程序;刘承江<sup>[14]</sup>等采用计算流体动力学(CFD)方法模拟了某典型喷水推进器和螺旋桨周围流场,得到流场随进速比的变化规律;刘承江<sup>[15]</sup>等采用 CFD 方法对喷水推进器进行性能预报与分析,确定喷水推进器性能数值预报所需流场控制体的大小;丁江明<sup>[16]</sup>等采用结构化网格与非结构化网格相结合的方式划分了喷水推进系统的流场区域,采用稳态多参考系方法进行了数值计算。计算结果表明,采用 CFD 手段计算和分析喷水推进系统包括推力在内的各项性能指标是可行的。

#### 2. 进水流道水力特性及优化

近年来,Verbeek 和 Butlen, Hu 和 Zangeneh<sup>[16]</sup>提出一些关于平进口性能的研究,作为 AMECRC 喷水推进研究项目的一部分;Robert 和 Seil<sup>[17]</sup>主持了平进口流动的数值研究;刘润闻<sup>[18]</sup>等应用 CFD 技术对平进口式喷水推进系统的三维流动进行了数值模拟。数值分析结果表明,进水管入口唇角位置适当靠前且唇缘相对尖锐有利于改善进水管道的流动性能;汤苏林<sup>[19]</sup>等应用流体计算软件 FLUENT 计算了椭圆形平进水口喷水推进器进水管内流场,并研究了 IVR 对流场的影响和不同 IVR 情况下产生气穴现象的可能性;

Svensson 曾就平进口的喷水推进器导致船尾静压升高这一现象进行过研究；魏应三<sup>[20]</sup>等对某平进口式喷水推进器进水流道，在其纵向总长度、宽、高给定的条件下，建立了倾角不同的 6 种流道模型。

丁江明<sup>[21]</sup>等提出了喷水推进器进水流道的一种参数化设计方法。将流道几何的参数化建模与流体动力性能的数值计算联合使用能够实现综合流体动力性能优良的进水流道的快速设计。该参数化设计方法用于某喷水推进艇进水流道改进设计时取得了良好效果；吴民权<sup>[22]</sup>等提出了设计低损失进口管道的一些原则；孙存楼<sup>[23]</sup>考虑了船体边界层对进口动量和来流动能的影响，并用数学方法表示了这些影响。

### 3. 推进泵水力性能及优化

常书平<sup>[24]</sup>等基于 Matlab - Simulink 平台开发了一套混流式喷水推进泵参数化水力设计程序，能快速优质完成混流式喷水推进泵设计时轴面投影图绘制、过流面积检查、流网绘制和逐点积分法叶片绘型等环节；杨琼方<sup>[25]</sup>等通过联合数值模拟求得设计转速下泵扬程-流量和效率-流量曲线和泵相似定理，计算得到混流式喷水推进泵量纲为 1 的特性曲线。进一步由计算流体动力学（CFD）计算得到空化条件下泵扬程和效率随吸口比转速变化的修正函数曲线；杨琼方<sup>[26]</sup>等以典型 CAD 软件 UG 为工具，完成某种混流式喷水推进泵的几何建模，应用计算流体动力学程序对上述模型进行数值计算。在设计工况和非设计工况下计算所得该混流泵性能参数均与设计所提供值有较好的一致性；曾文德<sup>[27]</sup>等针对混流式喷水推进器采用数值方法研究其流体动力性能并分析内部流场特性。

吴刚<sup>[28]</sup>等针对喷水推进轴流泵的叶轮受力进行了较为详尽的分析，并分别推出了等环量和变环量设计下的强度校核公式，可供设计人员使用；靳栓宝<sup>[29]</sup>等在一定的流量、转速和扬程下，分析叶轮水动力性能的主要几何参数，再采用升力法对叶轮进行水力设计。最后用 CFD 方法进行数值模拟计算。计算结果表明：水力效率和扬程均满足设计要求。宋少雷<sup>[30]</sup>等基于 Navier - Stokes 方程组和标准  $k-\epsilon$  湍流模型，采用 SIMPLEC 算法对喷水推进轴流泵流场进行数值模拟，预测泵的效率及扬程，并分析不同工况下泵内部压力场、速度场的分布情况；刘承江<sup>[31]</sup>等采用 CFD 方法对某喷水推进双级轴流泵流体动力性能进行预报，通过与实验结果的对比确认了该方法的可信性。计算结果表明，改进后导叶的整流性能得到改善；叶方明<sup>[32]</sup>等研究了带后置导叶的喷水推进轴流泵的三维流场，模拟结果表明，导叶出口面上轴向速度与圆周速度的分布不均匀。另外，李晓晖<sup>[33]</sup>等介绍了一种采用容积式液压泵进行喷射推进的新型喷水推进器的基本原理和结构特点，并对这种新型喷水推进器的应用做了预测和探索。

### 4. 喷口

王长涛<sup>[34]</sup>等研究了通过控制泵转速控制喷水推进系统推力。指出在阀控模式下，在喷水泵特性曲线不变的前提下，喷口截面积决定了产生推力的大小，且具有极值点（仿真曲线中当喷口直径为某一值时可以得到最大推力）；在泵控模式下，保持喷口截面积不变的前提下，喷水泵的特性曲线决定了推力的大小，即喷水泵的转速决定了推力的大小。李慧敏<sup>[35]</sup>等通过吹风试验结果，取喷口形状的过渡曲线为双扭曲线，则实际的水力损失很小，初估可以忽略不计；金平仲<sup>[3]</sup>等通过理论推导得出了喷口的最佳喷射方向，探讨了最佳喷口形状以及分析了可调面积喷口的应用；胡德生<sup>[36]</sup>等采用船模斜拖试验获取平移操

纵时船体水动力特性变化规律,然后求解喷水推进器在各种航速、转速、倒车斗位置以及喷口转向角条件下的推力。高双<sup>[4]</sup>利用推力矢量模型和船舶运动模型,分析了喷口角度变化和水泵转速变化对船舶纵向推力损失和转向力矩损失的影响,得到不同推力、不同喷口转角与船舶的转向速度、横倾角度和航速变化的关系,通过限制转向过程中的横倾角度,给出船舶安全机动时的喷口转动角度。

#### 5. 倒车操控研究

丁江明<sup>[37]</sup>等建立了一个基于 Matlab/Simulink 软件的喷水推进双体船回转操纵性数学模型。孙存楼<sup>[38]</sup>等为预防喷水推进器在空化状态工作,对喷水推进船转弯、加速及部分推进器工作时的性能进行了研究;李冬荔<sup>[39]</sup>等针对黏性流场中船舶操纵性能预报问题,采用 FLUENT 动网格技术以及后处理系统,实现了对大型船舶操纵相关水动力特性进行数值计算。

#### 6. 新型喷水推进器研发

杨萍<sup>[40]</sup>等利用行星轮系设计一种适用于工作在浅水区域的小型快速水下机器人及某些水上小型舰船的高效喷水推进器机构。运用 Pro/E 中的动态机构分析及仿真模块对推进装置进行动态分析,验证推进装置运动学分析的正确性和推进器工作原理的可行性。美国海军已服役的 2 艘新型濒海战斗舰“独立号”“自由号”都选用了喷水推进,新型驱逐舰的演示舰 Sea-Jet 也选用了一种先进的全浸式喷水推进器——AWJ-21<sup>[41]</sup>。

近年来,俄罗斯、美国等国家研制出一些能满足特殊性能的新型喷水推进泵装置,具有代表性的有:俄罗斯研制机构研制的有较大沉深并装有防护罩的通气喷水推进器;美国设计的能在较高的吸入比转速下运行的轴流诱导轮喷水推进器;Bill Lawson 主持研发的用于船长小于 9.15m 的救生船用舷外式推进装置和韩国釜山国立大学的 M. C. Kim 等人员为两栖轮式车辆设计了吊舱式喷水推进器等。据瑞典 MJP 喷水推进器公司近日报道:第一艘配套新的 MJP650CSUI 喷水推进器的法国 EDA-R 登陆艇最近已经成功交付法国海军。

综上所述,由于喷水推进泵装置具有效率高、噪声小等优点,被广泛应用于高速艇和舰船上。国内外学者开展了喷水推进泵装置试验、优化设计数值模拟研究,取得了应用于实践的成果。

## 第 2 章

# 流场数值模拟基本理论与方法

在本书中，数值模拟研究的主要对象喷水推进泵装置是较为复杂的区域，通常借助于数值解，也即为把计算域内的有限个离散的节点上的变量求解出来。这就需要将方程组和计算域进行离散化处理。离散化方法有多种，且方法的不同会直接影响到计算结果，这就要涉及离散方法的选取以及数值模拟方法的选取。另外，不同的湍流模型所针对问题的重点不同，因此需进行湍流模型的比较和选取。

### 2.1 控制方程

所有流体的流动过程都要遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒三大定律。流体流动的控制方程是一组由连续性方程、运动方程和能量方程构成的微分方程，它们反映了流动过程严格遵守质量守恒、动量守恒、能量守恒的物理本质。

#### 2.1.1 连续性方程

在数值模拟喷水推进泵装置喷泵时，流动须遵循质量守恒定律。该定律可简单地描述为： $dt$  时间内流出微元体的净质量，一定等于在同一时间间隔内该微元体由于密度变化造成的净减质量。方程表示如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

式中： $\rho u$ 、 $\rho v$ 、 $\rho w$  分别为沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标方向微分原体表面单位面积的质量流量，并取流出为正号。

在定常条件下，式 (2.1) 又可表示为

$$\operatorname{div}(\rho \bar{v}) = 0 \quad (2.2)$$

即任意时刻流进和流出微元体的体积流量总和等于零。

#### 2.1.2 动量方程

如前所述，动量方程反映了流动过程中动量守恒的性质。根据牛顿第二定律，微元体