

船舶与海洋工程系列
CHUANBO YU HAIYANG GONGCHENG XILIE



桨舵干扰性能 预报的理论与方法

● 郭春雨 王 超 常 欣◎编著 黄 胜◎主审



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

船舶与海洋工程系列
CHUANBO YU HAIYANG GONGCHENG XILIE



桨舵干扰性能 预报的理论与方法

●郭春雨 王超常 欣◎编著 黄胜◎主审



YZLI0890116901

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

本书共分五章,介绍了舵的分类、发展历史及其存在的意义;着重讲解了桨舵干扰性能的主要预报方法——桨舵干扰性能的理论预报方法、桨舵干扰性能的实验方法及计算流体力学方法(CFD)在桨舵干扰性能预报中的应用。同时,还简略介绍了部分特种舵的结构类型、研发历史、应用现状及性能预报方法。本书可以使读者获知船用舵的发展历史,掌握桨舵干扰性能预报的主要方法等内容。

本书可供高等院校相关专业本科和研究生学习使用,也可以作为广大工程技术人员学习船用舵的特征和相关设计的指导书。

图书在版编目(CIP)数据

桨舵干扰性能预报的理论与方法 / 郭春雨,王超,常欣
编著. — 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.5

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0120 - 4

I. ①桨… II. ①郭… ②王… ③常… III. ①船用
舵-尾流干扰-研究 IV. ①U661.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 072756 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 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 5.5
字 数 124 千字
版 次 2011 年 5 月第 1 版
印 次 2011 年 5 月第 1 次印刷
定 价 12.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

船舶航行性能的优劣在很大程度上取决于其周围流场的状态,作为船舶推进装置的螺旋桨和作为船舶操纵装置的舵均位于船舶尾部,而且距离较近,其相互干扰作用是明显的,这种干扰直接影响着船体周围的流场,从而也直接改变了船舶的阻力、螺旋桨的运转条件和舵效的发挥。因此,船体-螺旋桨-舵之间的相互影响成为造船工作者十分关心的问题。

由于船体-螺旋桨-舵之间的相互干扰问题十分复杂,至今尚不能准确地用理论计算和试验统计的方法预报其对船体周围流场的影响。在以往的船舶设计中都是将其分开,分别利用理论计算和系列实验图谱进行工程设计,然后粗糙地计入相互影响予以修正。这种方法已不应用于现在科学发展的需求。目前,虽然有些国内外学者致力于把船体、螺旋桨和舵作为一个组合体来研究其水动力性能,但并未达到实用的阶段。

近年来,随着计算机技术的推广普及和计算方法的发展,计算流体力学(CFD)技术取得了蓬勃发展。在船舶性能预报方面也进行了广泛的推广,特别是在船舶阻力、推进性能方面的应用较为突出。采用黏性 CFD 技术预报船后螺旋桨及舵前螺旋桨性能为分析评估螺旋桨性能、螺旋桨优化设计提供了一种快捷、有效的方法。目前许多研究机构、高校及船厂已经将 CFD 技术应用于船用推进器复杂的流场计算分析、性能预报之中,且取得了不小的成就。

本书以黄胜教授编著的《桨舵干扰的理论实验研究》为蓝本,对其内容进行了新的分类、整理,并加入了对桨舵干扰性能研究的近期成果。全书回顾了近年来有关船体-螺旋桨-舵之间的相互干扰方面的研究成果,将国内外科研发机构和学者发表的研究报告及论文结合我校的研究成果,组成新的体系予以介绍。本书的相关内容在近几年已作为教材供我校相关专业的研究生学习使用,这次又作了补充修改。本书着重从理论、试验以及计算流体力学方法三个方面分别介绍了桨舵相互干扰特性预报的理论基础和方法,使学习者可以较全面地了解和掌握桨舵之间的相互匹配问题。

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

编者

2011年1月

第一章 绪论

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 舵存在的意义及其分类	1
第三节 预报桨舵干扰性能的主要方法	5
第二章 预报桨舵干扰性能的理论方法	9
第一节 概述	9
第二节 船舶尾流场的理论计算	9
第三节 桨后尾流场的理论计算	12
第四节 舵的诱导速度场研究	18
第五节 舵的存在对螺旋桨性能的影响	23
第三章 桨舵干扰性能的试验研究	25
第一节 概述	25
第二节 船舶尾流场的试验研究	25
第三节 螺旋桨的尾流场测试	26
第四节 舵的诱导速度测试	31
第五节 典型的桨后舵水动力性能试验	33
第六节 桨舵参数的改变对桨后舵性能的影响试验研究	34
第四章 CFD 技术在桨舵干扰性能预报中的应用	37
第一节 概述	37
第二节 雷诺时均 N-S 方法的基本理论	37
第三节 数值计算的前处理	41
第四节 数值计算结果分析	44
第五章 特种舵与螺旋桨的相互干扰性能研究	47
第一节 概述	47
第二节 襟翼舵的桨后性能	47
第三节 反应舵的桨后性能	53
第四节 喷流舵的桨后性能	56
第五节 舵附推力鳍的桨后性能	65
参考文献	75

二、舵的分类

从帆船时代的简单平板舵到今天的流线型舵,舵得到不断改进,现在普通舵和特种舵已有十几种类型。近期,随着船舶相关行业的发展,还出现了一些兼有舵设备功能的推进设

第一章 绪 论

第一节 概 述

快速性和操纵性都是船舶航行的重要性能,而作为船舶推进装置的螺旋桨和作为船舶操纵装置的舵一直都是造船学者的重要研究对象。船舶舵设备是人类驾驶船舶的工具,通过它,驾驶者可以按照自己的意志控制航向。船舶操纵性的优劣除取决于船舶的主尺度、形状等因素外,还和所采用的操纵装置有很大的关系。舵是一种十分重要的船舶操纵装置,它的作用是改变船舶行驶的方向或使船舶按预定的航线行驶。舵由于性能优越、结构简单、操作方便而作为船舶的操纵装置已有几千年的历史。

螺旋桨和舵都布置在船后,而且距离比较近,因此存在着相互干扰。由于这种干扰,作用在螺旋桨上的水动力不仅与其本身的要素、船体要素有关,而且与其后方的舵也有密切的关系。同时,由于舵工作在螺旋桨的尾流中,作用在其上的水动力也与敞水舵的情形不同。从节能的角度看,积极利用桨舵的有利干扰可以提高推进效率;从操纵性和耐波性的角度看,螺旋桨尾流对于利用舵控制航向和减摇都有较大的作用。因此,对船、桨、舵的相互干扰进行研究有十分重要的意义。

第二节 舵存在的意义及其分类

一、舵存在的意义

舵是船舶的一种十分重要且不可缺少的专用舾装设备,用以改变和保持船舶航行方向。可以想象,如果船没有舵,或舵失灵,船舶将在大海里任凭风浪摆布。无主动航向的船不仅不能保证航行的安全,而且很难到达目的地。

舵是置于船尾部、螺旋桨后面的能转动的平板或是剖面为机翼型的板,它是舵手(驾驶人员)用来保持或改变船舶在水中运动方向的专用设备。舵有两大功能:一是保持船舶预定航向的能力,称为航向稳定性;二是改变船舶运动方向的能力,称回转性。通常把二者统称为船舶的操纵性。舵主要由舵叶和舵杆组成,舵叶的作用是产生水压力,舵杆的作用是转动舵叶和保证舵叶具有足够的强度。舵的作用原理是当水流以某冲角冲至舵叶上时,产生流体动力,此作用力通过舵杆传递至船体,从而迫使船舶转向,达到调整航向的目的。

二、舵的分类

从帆船时代的简单平板舵到今天的流线型舵,舵得到不断改进,现在普通舵和特种舵已有十几种类型。近期,随着船舶相关行业的发展,还出现了一些兼有舵设备功能的推进设

备。舵的种类很多,分类的方法也很多,下面按支承情况、舵杆轴线位置、剖面形状进行分类,具体介绍如下:

1. 舵按支承情况分为

- (1) 多支承舵——与船体尾柱连接的舵钮在 3 个以上的舵;
- (2) 双支承舵——只有上舵承和下舵承的舵;
- (3) 半悬挂舵——下舵承的位置在舵的半高处的舵;
- (4) 悬挂舵——完全悬在舵杆上的舵。

2. 舵按舵杆轴线位置分为

- (1) 不平衡舵——舵叶全部位于舵杆轴线之后的舵;
- (2) 平衡舵——舵杆轴线位于舵叶前缘后边一定距离的舵;
- (3) 半平衡舵——一般半悬挂舵为半平衡舵。

平衡舵的舵压中心至舵杆轴线的距离小,故转舵力矩小,但舵在水流作用下易摆动;不平衡舵的舵杆轴线在舵叶导边处,故有较大的转舵力矩;半平衡舵上半部为不平衡式,下半部为平衡式。如图 1-1 所示。

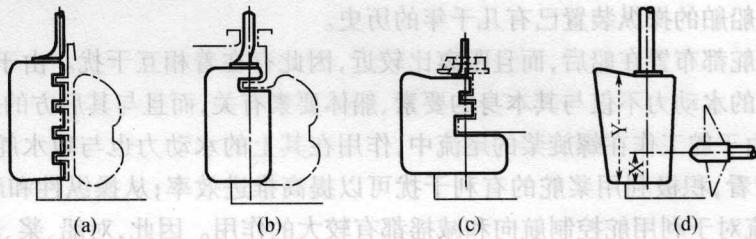


图 1-1 普通舵

(a) 不平衡舵、多支承; (b) 平衡舵、多支承; (c) 半平衡舵、半悬式; (d) 平衡舵、悬式

3. 舵按剖面形状分为

- (1) 平板舵——仅用一块平板做成的最简单的舵;
- (2) 改良型平板舵——在平板舵上装以木质板,其外形与流线型舵相似的舵;
- (3) 流线型舵——舵的翼剖面是机翼型的舵,如果带有固定舵柱的就称为固定舵柱型流线型舵;

(4) 反应舵——是将流线型平衡舵以螺旋轴为界,按一定流程进行上下扭曲后的舵,这种舵可以提高推进效率 4% ~ 6% 左右。

舵的剖面类型如图 1-2 所示。平板舵结构简单,多应用于帆船上;流线型舵的舵叶由水平与垂直隔板为骨架,并用钢板包成空心,其阻力小、升力大,被广泛应用。

以上介绍的舵均为普通舵,据有关资料统计,约 70% ~ 80% 的船都采用流线型普通舵,支承或双支承的流线型平衡舵多用于大型及超大型海船;半平衡流线型悬挂舵多用于中小型船;平板舵仅用在非自航船或小艇上。为了提高船舶的推进效率,改善操纵性能,特别是提高船在低速航行时的操

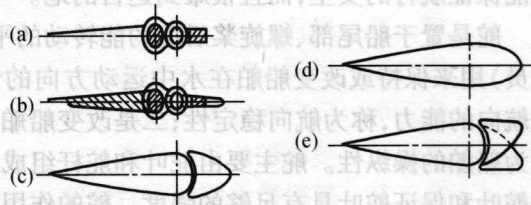


图 1-2 舵的剖面类型

(a) 平板舵; (b) 改良型平板舵; (c) 固定舵柱型流线型舵; (d) 流线型舵; (e) 反应舵

纵性,而对普通舵进行开发,或者将普通舵与别的设备组合成具有特种型式的特种舵。如主动舵、整流帽舵、襟翼舵、转子舵等。

(1) 主动舵 在普通流线型舵的中部后缘处加装一个带有导流管的小螺旋桨,此桨由装在舵体内的潜水电机或液压马达驱动,舵和桨产生的力改变船的航向,如图 1-3 所示。船舶转舵时,转向螺旋桨随舵转动,在舵剖面的中线方向上产生推力,船舶回转力比普通舵大。该种舵最大的特点是在低速或倒航时仍具有良好的操纵性,而且能提高船的回转性能。另外,仅用主动舵即可保持一定航速,所以其还具有低速推进装置的功能。

(2) 整流帽舵 在普通舵(一般是流线型舵)的适当位置加装一个外形为对称机翼剖面的回转体或近似于椭圆形的整流帽,如图 1-4 所示。整流帽填充了通常是涡流低压区的空间,使得螺旋桨后部的乱流得到改善。这样不仅能提高推进效率,还能降低船尾的震动,在一般舵上加装整流帽后,可以增加航速 0.3~0.5 kn。

(3) 襟翼舵 将舵叶做成主舵和子舵两部分,子舵即襟翼舵,如图 1-5 所示。当主舵转动一个角度时,子舵相对主舵再转动另一个角度。这样可明显地提高舵效,改善操纵性能。此种舵的缺点是结构和制造过程较为复杂。

(4) 转子舵 在普通舵的前缘装一高速旋转的圆柱,圆柱的高速旋转会产生一股侧向流,此流既提高舵的升力、增加绕舵的环流,又增加升力,从而明显地提高船的回转性能,此种舵多被回转性能要求高的船采用。

保证船舶操纵性除依靠绝大多数船所采用的舵外,一部分船还利用推进设备,这些设备经过科学合理地组合后,便有了舵的功能。常用的有转动导流管装置、Z 型推进器、喷水推进器、摆线推进器等。

(1) 转动导流管装置 所谓导流管,是固定在螺旋桨外的一种剖面为机翼型的环状体,可提高推进效率。若将导流管装在转动的舵杆上,便成了转动导流管,它不仅仍有固定导流管提高推进效率的能力,而且能代替舵,起到操纵船舶的作用。导流管兼作舵叶,不仅具有减少涡流、提高螺旋桨推进效率等优点,还能减少独立舵系装置的舵叶舵杆设备,增加舵效,在任何舵角情况下能基本保持螺旋桨效率。随着技术的发展,带有稳向叶的转动导流管出现,如图 1-6 所示。它是将推进装置和舵有机地组合在一起,从而更加明显地提高效率。

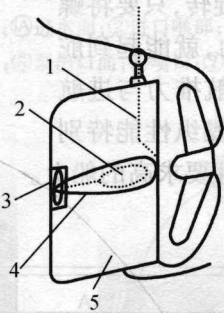


图 1-3 主动舵结构

1—电缆;2—小型发电机;3—螺旋桨;
4—封闭流线型腹板;5—舵叶

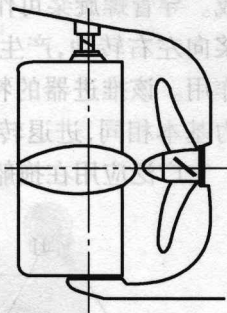


图 1-4 整流帽舵结构

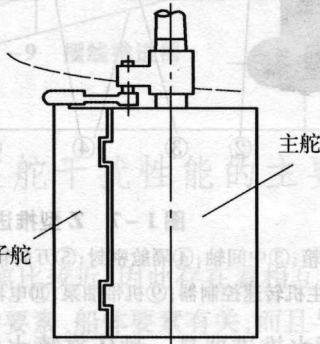


图 1-5 襟翼舵结构

该装置在推轮和拖轮以及操纵性要求高的船上得到了较广泛的应用。但导流管的自重较大,运行中受到的外界力复杂,因而,相对一般流线型舵叶,它的装配质量、工艺要求更高。

(2) Z 型推进器 Z 型推进器是一种舵桨合一的特种推进器,如图 1-7 所示。主要由上下两对锥齿轮、导管螺旋桨及传动系统等组成。导管螺旋桨可作 360 度旋转,只要将螺旋桨向左右转动,产生侧向推力,就能起到舵的作用。该推进器的特点是退航推力与进航推力基本相同,进退转换迅速,操纵性能特别好。它广泛应用在拖船和操纵性要求高的船上。

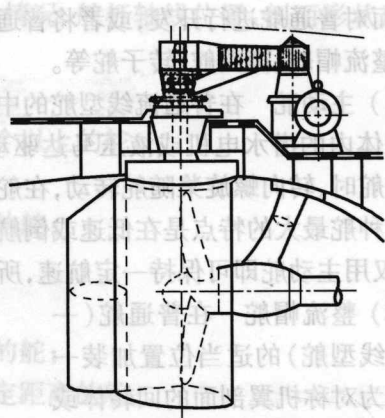


图 1-6 有稳向叶的转动导流管装置

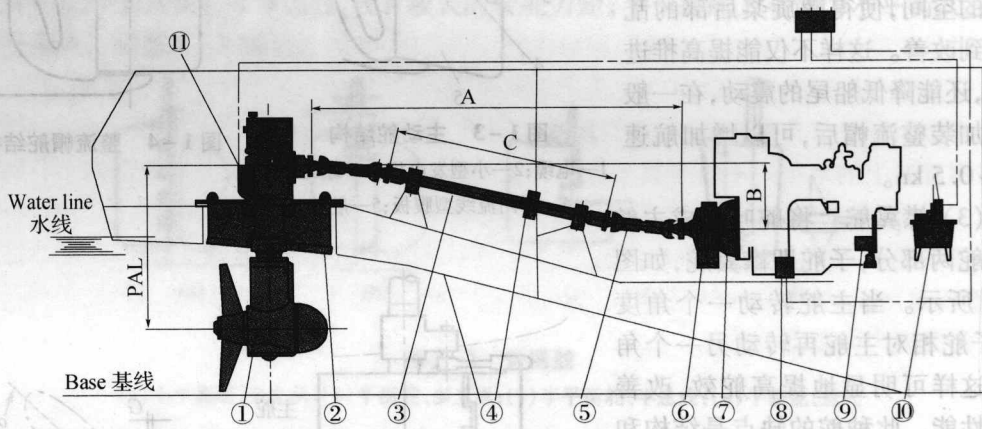


图 1-7 Z 型推进器

- ①螺旋桨;②井箱;③中间轴;④隔舱密封;⑤万向轴;⑥液压离合器;⑦高弹性连接轴
⑧主机转速控制器;⑨机带油泵;⑩电器控制箱;⑪液压马达

(3) 喷水推进器 喷水推进器是一种依靠喷水的反作用力而产生推力的推进装置,它主要由吸管、推进泵、整流器及喷嘴等组成,如图 1-8 所示。它的工作过程是:通过装在船内的推进水泵将水吸入船内,水经过整流加压后,由喷嘴向船后喷出。水的反作用力即推力,如果改变喷出水的方向,推力可转换成舵力,起到舵的作用。喷水推进器的特点是结构简单、工作可靠、维修方便,但推进效率低。喷水推进器主要用在浅吃水和超浅吃水的船上。

(4) 摆线推进器 该推进器与通常的螺旋桨运动形式不一样,它的每个叶片都垂直装在船尾底部(也有在中部、前部的)可旋转的圆盘上,并能绕垂直轴作水平方向的旋转和自转,如图 1-9 所示。推力可以是任何方向的,当推力是左右方向时,推力就是舵力,起到舵的作用。该推进器的特点是:主机无须反转,操纵性能特别好,但是推力小,推进效率低,结构复杂。摆线推进器仅用在特种船舶和操纵性能要求特别高的船上。

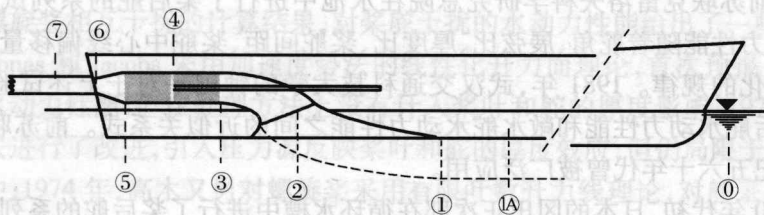


图 1-8 喷水推进器布置

①自由来流;②进口切线点;③进口喉面;④叶轮与导叶的交界面;⑤泵出口面;⑥喷口;⑦收缩截面

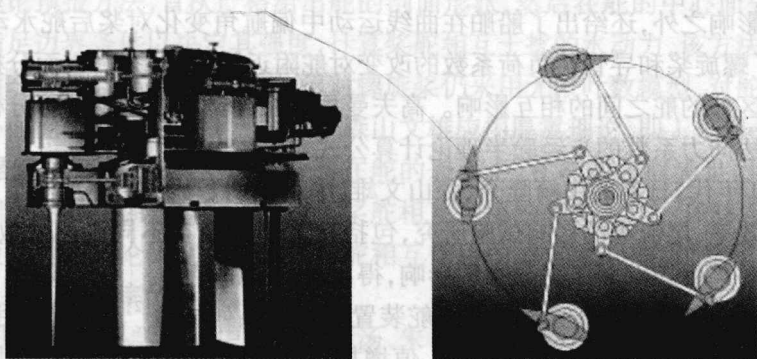


图 1-9 摆线推进器

第三节 预报桨舵干扰性能的主要方法

螺旋桨和舵都布置在船后,而且距离比较近,因此存在着相互干扰。由于这种干扰,作用在螺旋桨上的水动力不仅与其本身的要素、船体要素有关,而且与其后方的舵也有密切的关系。同时,由于舵工作在螺旋桨的尾流中,作用在其上的水动力性能也与敞水舵的情形不同。从节能的角度看,积极利用桨舵的有利干扰可以提高推进效率;从操纵性和耐波性的角度看,螺旋桨尾流对于利用舵控制航向和减摇都有较大的作用。因此,桨舵的相互干扰研究有十分重要的意义。下面就研究桨舵干扰性能的主要方法分别进行介绍。

一、试验方法

尽管人们很早就关注桨舵的相互干扰问题,但由于问题的复杂性,20 世纪 60 年代以前,对螺旋桨与舵的水动力性能相互干扰的研究大都采用试验方式。1933 年 2 月,日本的山县昌夫在日本造船协会论文集上发表了关于推进器与舵相互作用的试验研究的讲演稿;1935 年 12 月的日本造船学会会报上刊登了志波久光的“Some Experiments on the Interaction Between Propeller and Rudder”的研究论文;1950 年 11 月,谷口中在日本造船学会论文集中发表了关于自航模尾流测量及在反应舵上的应用的研究结果;这些都是桨舵干扰的早期研究^[1]。

1953年,前苏联克雷洛夫科学研究总院在水池中进行了桨后舵的系列试验研究,给出了桨后舵水动力性能随着舵角、展弦比、厚度比、桨舵间距、桨舵中心线偏移量、螺旋桨负荷系数等参数变化的规律。1981年,武汉交通科技大学的钟国平对于上述试验资料加以分析,建立了桨后舵水动力性能和敞水舵水动力性能之间的近似关系式。前苏联的系列试验结果在20世纪五六十年代曾被广泛应用。

20世纪60年代初,日本的冈田正次郎在循环水槽中进行了桨后舵的系列试验研究,除了给出各参数的变化对桨后舵水动力性能影响的变化规律外,还给出了螺旋桨的尾流流向对舵的来流角沿着舵展方向变化及操舵速度的影响。

20世纪70年代初,前苏联的高夫曼在风洞中对螺旋桨和导管螺旋桨进行了桨后舵的系列试验研究。他除了分析舵角、桨舵间距、螺旋桨和导管桨负荷系数等参数变化对桨后舵水动力性能的影响之外,还给出了船舶在曲线运动中偏航角变化对桨后舵水动力性能的影响,并且分析了螺旋桨和导管桨负荷系数的改变对舵附近流场的影响,进而分析了螺旋桨尾流区内和尾流区外的舵之间的相互影响。高夫曼根据系列试验的结果进行分析、整理,给出了计算桨后舵法向力系数的半经验半理论计算公式。

20世纪80年代,日本的山崎隆介、森山文雄、中武一明、马场荣一等进行了舵对螺旋桨的推力、转矩、效率、尾流等的影响试验研究,包括有无船体及在不同进速系数下,桨舵间距等参数的改变对桨后舵剖面压力分布的影响,得出了有效的结果。

1988年,原西德内河船研所对单桨双舵装置进行了系列试验^[2],试验表明:当舵角较小(小于 45°)时,随着两舵间距离的减小, C_D 值增加。当舵角较大(大于 45°)时,则相反。对于 C_L 值,当舵角较大(大于 45°)时,双舵装置能达到最大,与单舵装置所能达到的 C_L 值几乎没有差别。2003年,日本东京大学就两桨两舵推进系统从操纵性的角度进行了模型试验。

我国对桨舵干扰的试验研究十分关注,进行比较系统研究的主要是中国舰船研究院702所和武汉交通科技大学。702所在空泡筒中试验的螺旋桨是Ka系列导管桨,舵是倒车舵的菱形舵型式。武汉交通科技大学在循环水槽中试验的螺旋桨是B4-55型桨,舵为NACA流线型舵。哈尔滨工程大学也在拖曳水池进行了桨后节能助推反应舵的试验,测试了三对桨舵组合体的桨舵干扰问题。

赵育杰^[4]对喷流舵进行了试验研究,分析了喷口分别取尾中和尾侧两种喷流位置时在改变喷流动量系数和舵角工况下升力性能、阻力性能的异同。

2003年,国内708研究所曾从操纵性的角度就某艇采用单桨单舵还是单桨双舵进行了模型试验^[5]。试验表明:就某艇而言,单桨单舵比单桨双舵的性能更为优越。1991年,上海交通大学也曾从操纵性的角度对双桨双舵船进行了拘束模型试验^[6]。

二、理论预报方法

桨舵干扰的理论研究工作内容一般包括船、桨、舵的尾流场理论计算及相互干扰,桨后舵水动力性能理论计算,舵前桨水动力性能理论计算,船、桨、舵组合体水动力性能理论计算等。桨舵干扰的理论可分为定常理论和非定常理论两种。

1950年11月,日本造船(株)技术研究所的冈田正次郎提出了用无限叶数升力线理论计算螺旋桨,并用升力线理论计算舵的方法来计算桨后舵的水动力性能;1961年,日本学者高木又男应用升力线理论对螺旋桨和舵的干扰问题进行理论研究后提出了桨后舵的设计方

法;1965年,德国学者 W. H. Isay 发表了采用升力面理论的 Weissinger 模型不计入厚度影响时平板舵和螺旋桨相互干扰的计算结果,对桨舵干扰的水动力性能给出了一些定性的分析;1968年,Tsakonas 和 Jacobs 采用加速度势法的线性化升力面理论,首次预报了桨舵相互作用的非定常水动力性能,但在处理方法上没有计入桨叶和舵的厚度影响;1972年,Tsakonas 对其计算方法进行了改进,引入压力源反映桨叶和舵的厚度效应,但仍局限于线性化理论的薄翼方法之中;1974年,高木又男对螺旋桨采用有限叶数升力线理论,对舵采用升力线理论方法计算了桨后舵的法向力系数并考虑了偏航角的影响;1974年,日本森正彦用动量理论计算螺旋桨尾流,对舵采用机翼理论中的环量椭圆分布方法推导了桨后舵法向力计算公式。

20世纪80年代以后,升力面理论得到了较快的发展。1980年,中武一明在以往关于螺旋桨与舵相互干扰的研究结果进行分析比较的基础上,发展了一个螺旋桨与舵相互干扰的水动力性能理论预报方法,首次严格给出舵的剖面形状,然后在舵的中心面分布源、汇、涡,在舵的表面满足边界条件以决定其强度,计算桨舵相互干扰的水动力,该方法虽然计入了舵厚度的影响而改进了以往的计算结果,但对螺旋桨仍采用无限叶数模型,对舵的处理仍把奇点分布在中心面上而没有突破薄翼假设。森山文雄应用厚翼理论,即 J. L. Hess 的面源元法处理工作在螺旋桨后方的舵,把奇点分布在舵的表面上,在舵的表面满足边界条件的情况下,求解了桨舵相互干扰的水动力,促进了桨舵相互作用的研究工作。1988年,池田光尚应用非定常数值升力面理论研究了螺旋桨和舵相互作用的非定常问题,讨论了舵对螺旋桨流入速度、推力、转矩及效率的影响。

在国内,中国船舶科学研究中心的董世汤、朱自理首先对舵采用厚翼理论,对螺旋桨采用薄翼理论,预报了桨舵的相互干扰的非定常水动力性能^[7]。武汉的王德询运用升力面理论处理桨,用有限基本解的涡环栅格法处理舵,分别预报了桨舵的相互干扰的定常和非定常水动力性能^[8]。上海交通大学的张建华、王国强、蒋少剑则对桨采用非定常涡格法,对舵采用基于速度势的非定常面元法,在时域范围内研究了桨舵的相互干扰问题^[9]。

另外,国内外还有不少人从节能角度研究舵附舵球、推力鳍等变形舵以及桨后助推叶轮(固定或自由旋转)、桨毂帽鳍,各种安装位置与形状的套管与螺旋桨的相互影响,这些也属于桨舵干扰的范畴^{[10][11]}。哈尔滨工程大学的黄胜教授及其研究生也在这方面做了大量工作。黄胜、虞海军^[12]用升力面理论方法计算了螺旋桨后襟翼舵水动力性能;黄胜、聂云凌等^[13]在1992年对反应舵的理论设计方法和试验进行了研究;黄胜、董国祥等^[14]采用升力面理论对助推节能扭曲舵进行了研究;郭春雨、黄胜等^[15]首次采用面元法对处于均匀流和非均匀流中的螺旋桨与舵附推力鳍相互干扰水动力性能进行了计算;覃新川、黄胜^{[16][17]}首次用螺旋桨面元理论的方法研究了单桨双舵和四桨双舵的相互干扰问题。

三、CFD 技术的数值预报

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics)是近年来的一门热门学科,它最早于20世纪70年代诞生在美国,但是在近几年才得到较广泛的应用。它是建立在经典流体动力学与数值计算方法基础之上的一门新型独立学科,与计算机技术的发展密切相关。CFD 技术经过近几十年的发展,已经在势流兴波阻力研究、船体的黏性绕流、螺旋桨的性能计算、船舶耐波性和船舶操纵性等方面取得了很大进展。在船舶行业,CFD 技术的重要性正在逐渐得到重视。在最近几届的国际拖曳水池会议(ITTC)上^[18],各性能委员会对 CFD 的发展予以了重点关注,对螺旋桨、舵相互干扰的模拟计算也在逐渐开展。

郭春雨等^[15]采用面元法理论并用计算流体力学软件 Fluent 对螺旋桨与舵附推力鳍组合体系统进行了理论计算,对影响推力鳍助推效率的主要参数进行了比较系统、全面的变尺度研究。焦雅丽^[19]采用 Fluent 软件模拟了两个不同喷口位置的喷流舵在若干喷流动量系数和不同舵角下的流场,并将计算结果与喷流舵模型试验数据进行比较与分析,得出喷流舵在零攻角时也能通过喷流产生较大升力,并且各攻角下的升力系数和零攻角下的升/阻比在加入喷流后都有显著增加,在有攻角时的升/阻比没有较大降低的结论。吴宝山,潘子英等^[20]利用 CFD 计算得到的潜艇组合翼舵水动力在小舵角下的非线性特性,值得在今后的模型试验方案、试验数据分析与结果表达、实船预报等研究中予以特别关注。单铁兵^[61]利用 CFD 软件分别计算了裸船体和附体船桨盘面处的三向速度比随角度变化的分布情况;计算了三向平均速度比沿径向的分布情况;计算了平均轴向、切向以及径向速度比随 Fr 数的变化情况。计算结果显示,随着 Fr 的增大,船舶内外桨盘面处的平均轴向速度比增加。王超^[21]利用滑移网格技术在螺旋桨与固定舵之间引入交互界面,并利用三维 Navier-Stokes 方程和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,计算分析了桨舵干扰的水动力性能问题,对影响桨舵干扰性能的主要因素分别进行了分析。

四、结论

对于桨舵干扰性能的研究工作,我国从 20 世纪 80 年代才开始起步,与国外相比存在一定的差距。目前,国外在船体-螺旋桨-舵三位一体的水动力性能方面已经进行了相关的研究工作,国内的研究人员应该多学习国外先进经验,提高个人知识积累,才有望赶上或接近国外的研究步伐。本书着重从理论、试验以及计算流体力学方法三个方面分别介绍了桨舵相互干扰特性预报的理论基础和方法,以使学习者可以较全面地了解和掌握桨舵之间的相互匹配问题。

第二章 预报桨舵干扰性能的理论方法

第一节 概 述

桨舵干扰的理论研究工作内容一般包括船、桨、舵的尾流场理论计算及相互干扰, 桨后舵水动力性能理论计算, 舵前桨水动力性能理论计算, 船、桨、舵组合体水动力性能理论计算等。桨舵干扰性能预报的方法经历了动量理论、升力线理论、升力面理论以及面元法理论。本章主要对各种预报方法在船舶尾流场、桨后尾流场、舵的诱导速度场以及舵的存在对螺旋桨性能影响等方面进行介绍。

第二节 船舶尾流场的理论计算

一、船后伴流的计算

非轴对称船尾流场中伴流的分布十分复杂, 轴向伴流以及其他的速度 $\omega_N(r, \varphi)$ 和速度成分不仅随径向变化, 而且随周向变化。

在初步设计阶段, 只利用近似公式去估算伴流分数。本科生用的推进教材中介绍的泰勒公式、汉歇尔公式、巴甫米尔公式、越智重信公式、霍尔特洛泼公式、商赫公式等一般都是根据某类或某几类船舶的试验结果归纳而成, 其适用性有一定的范围。因此设计者要根据船型特点选择。

具有代表性的公式是荷兰试验水池提供的适用于各种海船的霍尔特洛泼伴流分数计算公式。

对于单螺旋桨船:

$$w = C_9 C_V \frac{L}{T_A} \left[0.0661875 + 1.21756 C_{11} \left(\frac{C_V}{1 - C_{p1}} \right) \right] + 0.24558 \sqrt{\frac{B}{L(1 - C_{p1})}} - \frac{0.09726}{0.95 - C_p} + \frac{0.11434}{0.95 - C_B} + 0.75 C_{stern} C_V + 0.002 C_{stern} \quad (2-1)$$

对于双桨船:

$$w = 0.3095 C_B + 10 C_V C_B - 0.23 D / \sqrt{BT} \quad (2-2)$$

上述两式中:

B ——船宽;

T ——平均吃水;

D ——螺旋桨直径;

T_A ——在尾垂线处的吃水;

L ——实船水线长度;

C_p ——菱形系数;

C_B ——方形系数;

C_V ——黏性阻力系数,按式(2-3)计算。

$$C_V = (1+k)C_F + C_A \quad (2-3)$$

式中 C_F ——摩擦阻力系数,按 1957ITTC 公式计算;

C_A ——实船-船模相关系数,按式(2-4)计算。

$$C_A = 0.006(l+100)^{-0.16} - 0.00205 + 0.003\sqrt{L/7.5}C_B^4C_2(0.04 - C_4) \quad (2-4)$$

$$\text{当 } T_F/L \leq 0.04 \quad C_4 = T_F/L$$

$$\text{当 } T_F/L > 0.04 \quad C_4 = 0.04$$

式中 T_F ——首吃水;

C_2 ——考虑球首对兴波阻力的影响参数,按(2-5)计算。

$$C_2 = \exp(-1.89\sqrt{C_3}); C_3 = \frac{0.54A_{BT}^{1.5}}{[BT(0.31\sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B)]} \quad (2-5)$$

式中 A_{BT} ——球首横剖面面积(以水线面与首柱相交处计算);

h_B —— A_{BT} 面积中心在基线以上的高度;

C_9 ——与系数 C_8 有关的系数,定义如下:

$$\text{当 } B/T_A < 5 \text{ 时, } C_8 = BS/(LDT_A)$$

$$\text{当 } B/T_A > 5 \text{ 时, } C_8 = S(7B/T_A - 25)/[LD(B/T - 3)]$$

式中 S ——船的总湿面积(包括附体),定义为

$$S = L(2T + B)\sqrt{C_M}(0.453 + 0.4425C_B - 0.2862C_M - 0.003467B/T + 0.3696C_{WP}) + 2.38A_{BT}/C_B$$

式中 C_M ——船中横剖面系数;

C_{WP} ——水线面面积系数。

$$\text{当 } C_8 < 28 \text{ 时, } C_9 = C_8$$

$$\text{当 } C_8 > 28 \text{ 时, } C_9 = 32 - 16/(C_8 - 24)$$

C_{11} 为系数,由下式确定:

$$\text{当 } T_A/D < 2 \text{ 时, } C_{11} = T_A/D$$

$$\text{当 } T_A/D > 2 \text{ 时, } C_{11} = 0.083333(T_A/D)^3 + 1.33333$$

C_{P1} 为由下式定义的系数:

$$C_{P1} = 1.45C_P - 0.315 - 0.0225L_{cb} \quad (2-6)$$

式中 L_{cb} ——0.5L 前的纵向浮心位置,以 L 的百分数计。

霍尔特洛泼伴流分数计算公式比较复杂,但编程后,计算并不困难,而且比较实用。

二、船舶尾流数值计算

1. 船舶直线航行时的流场

船舶运动中最简单的操船状态是船舶在不打舵等速直线航行时的状态。已有许多造船工作者研究关于流场的理论计算方法。早在 20 世纪 40 年代,Guilloton 就发表了关于 Michell 型薄船型的流线计算方法^[23]。如图 2-1 所示为日本造船学者神中龙雄在 20 世纪 60 年代发表的“船体周围的流线计算方法”中给出的计算结果^[24]。这种计算方法除了假定流体的非黏性、非压缩性外,还把自由表面作为固壁对待,而不考虑伴随船体前进所引起的兴波,

并且为了适应细长体理论,假定船体十分细长,显然这个计算结果是近似的。

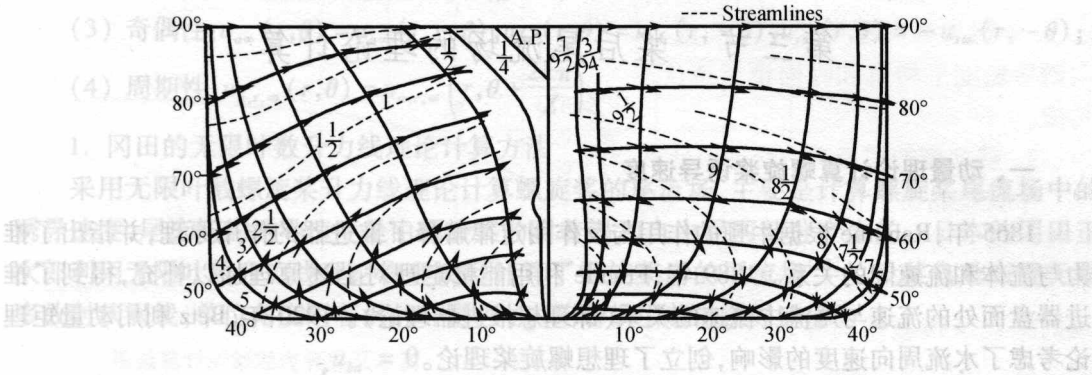


图 2-1 神中龙雄计算的船体周围的流线分布

如图 2-1 所示,在船舶的各横剖面上,船体的后部和前部流线完全不同,在船体尾部水流从船底向水面流动,而在船的前部则完全相反。如图 2-2 所示为在船舶的不同水线面上船体周围的流线情况,在船首尾处的水流具有向前的速度,即产生正的伴流,而在舷侧处的水流具有向后的速度,为负伴流。流线在离船身不远处即迅速分散。

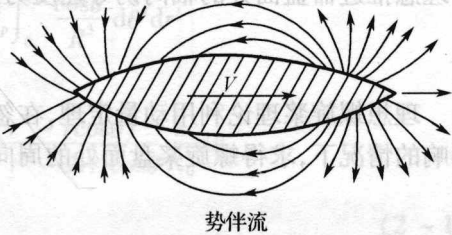


图 2-2 不同水线面上船体周围的流线分布

2. 船体斜航时的流场

在船舶操纵性研究中,要采用流体动力模型预报船体运动情况,这就需要计算或观察船体周围的流场,目前一般还未采用黏性流体力学的方法,而是用分析流体动力成分求取流体动力的实用化方法来处理。在理论计算上,从船体流出的三元分离自由涡流层可用若干离散涡系表示,图 2-3 和图 2-4 分别表示日本松本宪洋等对油船流线的计算结果和观察结果^[25]。

如图 2-3 和图 2-4 所示,在操纵运动中,船尾流场的左右分布是不对称的,在船体背面一侧的涡旋较强。

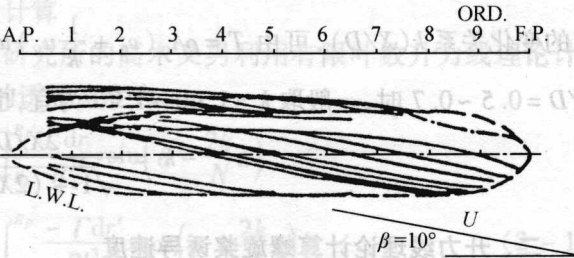


图 2-3 油船流线分布计算结果($\beta = 10^\circ$)

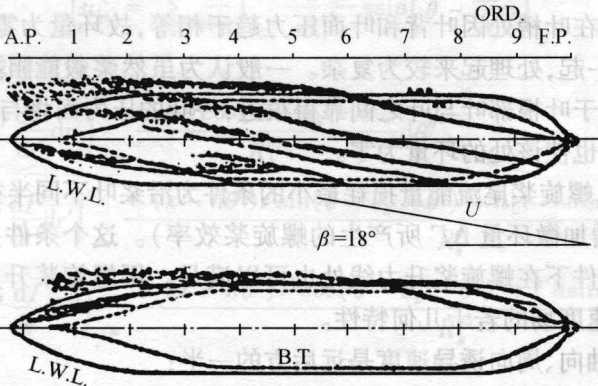


图 2-4 油船流线分布观察结果($\beta = 18^\circ$)

第三节 桨后尾流场的理论计算

一、动量理论计算螺旋桨诱导速度

1865年, Rankine 根据牛顿的作用与反作用定律解释了推进器的作用原理, 并指出了推力与流体和流速间的关系。1889年, Froude 利用能量定理对上述原理加以补充, 得到了推进器盘面处的流速与尾流中流速的关系(即理想推进器理论)。1920年, Betz 利用动量矩理论考虑了水流周向速度的影响, 创立了理想螺旋桨理论。

理想推进器理论利用单位时间通过推进器流管中流体的动量变化及伯努利方程, 得出了理想推进器盘面处的轴向诱导速度为远后方一半的结论:

$$u_{al} = \frac{u_{a\infty}}{2} \quad (2-7)$$

理想螺旋桨理论利用动量定理, 在忽略了水质点因旋转运动引起的离心力和尾流收缩影响的情况下, 求得螺旋桨盘面处的周向诱导速度为远后方的一半:

$$u_{ul} = \frac{u_{l\infty}}{2} \quad (2-8)$$

对于螺旋桨后方任一盘面处 CC_1 , 该处的诱导速度为 u_a , 而螺旋桨远前方盘面 AA_1 流速为 v_0 , 压力为 p_0 , 则螺旋桨的推力等于单位时间内动量的变化:

$$T = \rho A_0 (v_0 + u_a) u_a \quad (2-9)$$

u_a 与 u_{al} 的关系可由诱导速度的增率 k 推定, 日本的久保尚博给出 k 的范围随桨后距离的变化关系 $k(X/D)$, 可由 $T = \rho A_0 (v_0 + \frac{1}{k} u_a) u_a$ 近似解得。冈田认为在通常舵的位置 $X/D = 0.5 \sim 0.7$ 时, 一般取 $k = 1.60 \sim 1.75$ 为宜, 也可采用下列公式近似计算。

$$k = \frac{2X/D}{\sqrt{1 + (2X/D)^2}} \quad (2-10)$$

二、升力线理论计算螺旋桨诱导速度

船舶螺旋桨的升力线模型是用一根附着涡及一组自由涡来代替螺旋桨叶。升力线的环量沿半径方向变化, 在叶梢处因叶背和叶面压力趋于相等, 故环量为零而不产生升力; 在叶根处因与桨毂连在一起, 处理起来较为复杂。一般认为虽然桨毂能阻挡压力面和吸力面之间的压力抵消, 但由于叶根部叶与叶之间靠得很近, 一叶的压力面将与相邻叶片之吸力面发生压力的抵消, 因此也使该处的环量为零。

根据 Betz 条件, 螺旋桨尾流能量损耗最小的条件为沿桨叶不同半径处的 k 值相等(k 值为半径 r 处元体增加微环量 $\Delta\Gamma$ 所产生的螺旋桨效率)。这个条件只适用于螺旋桨远后方流场, 但在一定条件下在螺旋桨升力线处也可以满足。用螺旋桨升力线理论就可以得出对称螺旋桨诱导速度场的若干几何特性。

(1) 桨盘处的轴向、周向诱导速度是远后方的一半:

$$u_a = \frac{1}{2} u_{a\infty}, \quad u_l = \frac{1}{2} u_{l\infty}$$