

普通高等院校船舶与海洋工程“十三五”规划教材

CFD技术在船舶水动力 性能预报上的应用

沈海龙 著




HEUP 哈尔滨工程大学出版社

普通高等院校船舶与海洋工程“十三五”规划教材

CFD 技术在船舶水动力性能 预报上的应用

沈海龙 著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍舵翼、水下机器人、螺旋桨、船体、节能附体的设计和水动力性能预报方法。全书共分为 14 章,由易到难依次介绍水翼、水下机器人载体、螺旋桨、船体伴流场、桨前节能附体、船体与螺旋桨及舵相互干扰的水动力性能数值预报方法,并对导流鳍、舵球、舵球与舵附推力鳍组合水动力性能的数值与试验研究做了详细介绍。

本书可作为船舶与海洋工程专业的研究生教材或本科生教材,也可供从事船舶与海洋工程等相关专业工作的科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

CFD 技术在船舶水动力性能预报上的应用/沈海龙著

—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2018.1

ISBN 978-7-5661-1531-7

I. ①C… II. ①沈… III. ①计算流体力学—应用—船舶—水动力学—预报—研究 IV. ①U661.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 099604 号

策划编辑 史大伟

责任编辑 张玮琪

封面设计 刘长友

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 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 13.5
字 数 360 千字
版 次 2018 年 1 月第 1 版
印 次 2018 年 1 月第 1 次印刷
定 价 45.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

CFD 技术是一种重要的计算机模拟技术,它的产生可以追溯到 20 世纪 30 年代初,它是流体力学、数值计算方法以及计算机图形学三者相结合的产物。1974 年,丹麦的尼尔森(P. V. Nielsen)首次将 CFD 技术应用于空调工程,模拟室内空气流动情况,标志着 CFD 技术开始应用于分析工程中的流动问题。经过几十年的迅猛发展,这门学科已经相当成熟,各种 CFD 软件包陆续出现,并发展成为商品化软件,为工业界广泛接受,技术性能日趋完善,在流体力学和流体工程中的应用日臻成熟。而现代船舶对船体、螺旋桨、舵、翼、鳍及其他附体的要求不断提高,不仅要求其具有较好的水动力性能,而且要求其整个系统的阻力更低、效率更高、振动更小、噪声更低、节能更好。研究船舶水动力性能的传统措施主要是系列模型试验,具有周期长、费用高、风险大、人力物力投入大的特点,越来越难以适应现代船舶的设计需求,而将 CFD 技术与模型试验技术结合起来,先基于 CFD 技术开展船舶设计初期的大量选型和优化设计研究工作,待选型和优化设计工作完成并得到满意的优化设计结果后,再开展模型试验对 CFD 的研究结果进行验证,这种研究船舶水动力性能的方法是当前和今后船舶设计的趋势。本书选取船舶设计中常见的船体、螺旋桨、舵翼、潜器载体、桨前节能附体、桨后节能附体,逐步深入地介绍 CFD 技术在这些船舶结构物水动力性能数值预报上的应用。

本书共分为 14 章,第 1 章简要回顾了 CFD 技术的发展历程及其技术特点,介绍了基于 CFD 技术预报螺旋桨、船体黏性伴流场、船体与节能附体及螺旋桨的非定常干扰、船舶推进节能装置水动力性能的研究进展与现状,简要分析了船舶推进节能技术的发展动态;第 2 章以 GAMBIT 软件为例,介绍了几何模型的建模方法与网格的生成技术,讨论了几个影响计算结果的网格因素;第 3 章简要介绍了 CFD 数值计算的相关原理;第 4 章以二维翼和三维翼为例,介绍了水翼定常水动力性能和非定常水动力性能的数值预报方法,并讨论了影响计算结果的几个因素;第 5 章介绍了水下机器人载体和舵翼的设计与水动力性能的数值预报;第 6 章介绍了均匀伴流场和非均匀伴流场中螺旋桨水动力性能的数值预报方法;第 7 章介绍了肥大型船黏性伴流场的数值预报方法,并结合散货船、化学品运输船和集装箱船的试验数据对数值预报方法进行了验证;第 8 章介绍了桨前节能附体的设计及其对船体伴流场的影响,并结合伴流场流动细节分析了节能附体的节能机理;第 9 章介绍了采用 CFD 技术和面元法分别预报桨前节能附体节能效果的数值计算方法;第 10 章介绍了船体与螺旋桨及舵相互干扰的水动力性能整体求解;第 11 章、第 12 章分别介绍了基于 CFD 技术的导流鳍和舵球设计及其节能效果的预报;第 13 章介绍了舵球与舵附推力鳍组合设计及其节能效果的数值预报;第 14 章介绍了舵球与舵附推力鳍组合的节能效果模型试验。

由于著者水平有限,书中定有不当之处,敬请读者批评指正。

沈海龙
2017 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 CFD 技术简介	1
1.2 黏性流场中螺旋桨性能预报的研究进展与现状	2
1.3 船体黏性伴流场预报的研究进展与现状	3
1.4 船体与节能附体及螺旋桨非定常干扰的研究进展与现状	5
1.5 船舶推进节能装置简介	6
1.6 船舶推进节能装置的研究进展	12
1.7 船舶推进节能技术发展动态分析	13
第 2 章 几何模型的建立与网格的生成	15
2.1 GAMBIT 简介	15
2.2 几何模型的建立	16
2.3 网格的划分	18
2.4 影响计算结果的几个关键因素的讨论	21
2.5 模型的比较分析	25
第 3 章 数值计算的原理	28
3.1 数值计算的原理	28
3.2 数值计算的实现	29
3.3 数值计算的湍流模型	30
第 4 章 二维翼与三维翼的数值计算	33
4.1 翼的水动力特性	33
4.2 二维翼数值计算过程	34
4.3 二维翼定常数值计算	37
4.4 二维翼的非定常数值计算	40
4.5 三维翼数值计算的模型	45
4.6 三维翼计算模型的生成与网格的划分	46
4.7 三维翼的定常数值模拟	49
4.8 三维翼的非定常数值模拟	55
第 5 章 水下机器人载体设计与水动力性能预报	57
5.1 水下机器人主载体设计与水动力性能预报	57

5.2	舵翼设计与水动力性能预报	66
第6章	螺旋桨的水动力性能预报	74
6.1	螺旋桨数值模型的建模方法	74
6.2	螺旋桨定常及非定常模拟的旋转模型	77
6.3	网格的划分与边界条件的设置	79
6.4	均匀伴流场中螺旋桨水动力性能的预报	82
6.5	非均匀伴流场中螺旋桨非定常水动力性能的预报	83
第7章	船体伴流场的预报	87
7.1	三维船体几何模型的建模方法	87
7.2	计算域的生成及网格的划分	91
7.3	湍流模式的应用与比较	104
7.4	船体伴流场的预报方法验证算例	112
第8章	桨前节能附体对船体伴流场影响的预报	121
8.1	桨前节能附体的设计	121
8.2	桨前节能附体对船体伴流场的影响及其工作机理分析	125
8.3	节能附体设计安装以及优劣的初步判断总结	130
第9章	桨前节能附体节能效果的预报	131
9.1	桨前节能附体节能效果预报的研究思路	131
9.2	基于面元法理论的螺旋桨水动力性能预报	132
9.3	节能附体对船体伴流场影响的预报	139
9.4	节能附体节能效果的数值预报结果	140
9.5	桨前节能附体节能效果的数值预报方法	143
第10章	船体与螺旋桨及舵的干扰研究	144
10.1	船体和螺旋桨相互干扰研究	144
10.2	船桨舵相互干扰研究	154
第11章	导流鳍设计与节能效果预报	156
11.1	导流鳍的设计	156
11.2	导流鳍节能效果预报	158
11.3	导流鳍节能机理初步分析	160
第12章	舵球设计与节能效果预报	161
12.1	无节能装置船桨舵相互干扰水动力整体求解	161
12.2	节能装置节能效果的评价	164
12.3	舵球设计及节能效果预报	165

第 13 章 舵球与舵附推力鳍组合设计及节能效果预报	169
13.1 桨 - 舵组合	169
13.2 桨 - 舵 - 舵球组合	171
13.3 桨 - 舵 - 舵球 - 舵附推力鳍组合	172
13.4 船体 - 桨 - 舵 - 舵球 - 舵附推力鳍组合	176
第 14 章 舵球与舵附推力鳍组合节能效果的模型试验	178
14.1 试验相似条件	178
14.2 模型试验数据换算到实船的转换方法	181
14.3 试验模型及试验内容	184
14.4 模型试验方法	186
14.5 模型试验结果	187
参考文献	198

第 1 章 绪 论

1.1 CFD 技术简介

CFD 技术是一种重要的计算机模拟技术,其产生可以追溯到 20 世纪 30 年代初,它是流体力学、数值计算方法以及计算机图形学三者相结合的产物。1974 年,丹麦的尼尔森(P. V. Nielsen)首次将 CFD 技术应用于空调工程,模拟室内空气流动情况,标志着 CFD 技术开始应用于分析工程中的流动问题。经过几十年的迅猛发展,这门学科已经相当成熟,各种 CFD 软件包陆续出现,并发展成为商品化软件,为工业界广泛接受,性能日趋完善,应用范围不断扩大。如今,CFD 技术的应用早已超越传统的流体力学和流体工程的范畴(如航空、航天、船舶、动力、水利等)而扩展到化工、核能、冶金、建筑、环境等许多相关领域中去。CFD 通用软件以其模拟复杂流动现象的强大功能、人机对话式的界面操作以及直观清晰的流场显示引起了人们的广泛关注,得到了西方国家工业界和政府部门的有力支持。

目前,各种 CFD 通用软件的数学模型的组成都是以 Navier - Stokes 方程组和各种湍流模型为主体,针对特定的问题再加上多相流模型、燃烧与化学反应流模型、非牛顿流体模型等附加求解模型,这些附加的模型多是在主体方程组上补充一些附加源项、附加输运方程与关系式。随着应用范围的不断扩大和新方法的出现,新的模型也在增加。离散方法采用有限体积法(Finite Volume Method, FVM)或有限元法(Finite Element Method, FEM)。由于有限体积法继承了有限差分法的丰富格式,具有良好的守恒性,能像有限元法那样采用各种形状的网格以适应复杂的边界几何形状,却比有限元法简便,因此现在大多数 CFD 软件都采用有限体积法。

网格生成对 CFD 至关重要,计算网格的好坏直接影响到数值计算的可行性、收敛性以及计算精度。1974 年,Thompson 等提出采用求解椭圆型方程方法生成贴体网格,在网格生成技术的发展中起到了开创作用。随后,Steger 等又提出采用求解双曲型方程方法生成贴体网格。自 20 世纪 90 年代以来,迅速发展的非结构网格和自适应笛卡尔网格等网格生成方法,使复杂外形的网格生成技术呈现出了更加繁荣的局面。现在网格生成技术已经发展成为 CFD 的一个重要分支,它也是计算流体动力学近二十年来取得较大进展的一个领域。也正是由于网格生成技术的迅速发展,使得 CFD 技术在工程上得到广泛应用。网格生成质量对计算精度与稳定性影响极大,然而在几何形状复杂的区域上要生成好网格也是相当困难的,所以网格生成能力的强弱也是衡量 CFD 通用软件性能的一个重要指标。除了 CFD 软件自带的网格生成模块,还可采用专门的网格生成软件生成网格。CFD 通用软件包的出现和商业化,对 CFD 技术在工程运用中的推广起到了巨大的促进作用。在此之前,航空、航天一直很重视 CFD 技术,并早已研制出应用于气动设计的专业性应用软件包。但是其他方面,主要还是在学术范围内开展研究工作,真正在工程设计中的应用并不是很多。显然,CFD 技术艰难的理论背景和流体力学问题的复杂多变阻碍了它向工业界的推广,而且一般工程技术人员很难深入地了解这门学科,由专家编写的程序用起来也不容易,因为总有

多条件参数要根据具体情况以及运算过程,随时做出修改和调整,若不熟悉方法和程序,往往会束手无策。此外,前后处理也显得十分的棘手。CFD 研究成果与实际应用的结合成了一个极大的难题,这使人们对 CFD 的工程应用前景产生了质疑。在这种情况下,通用软件包应运而生。通常认为是 Spalding 主持的英国 CHAM 公司跨出了第一步,Spalding 和 Patanker 提出的 SIMPLE 算法(半隐式压力校正解法)在 20 世纪 70 年代已被广泛应用于热流问题的求解,CHAM 公司在 20 世纪 80 年代初就以该方法为基础,推出计算流体力学和传热学的商业通用软件 PHOENICS 的早期版本,这是 CFD 通用软件包的雏形,具有一定的通用性。尽管 PHOENICS 功能还不是很完善,但问世后受到了普遍欢迎。于是,在其版本不断更新的同时,新的通用软件如 FLUENT,STAR-CD,STAR CCM+ 和 CFX 等也不断问世,这些软件十分重视商业化的要求,致力于工程实际应用,并在前后处理、人机对话等方面狠下功夫,从而被工业界所认识和接受,为 CFD 技术打开了广阔的应用空间。进入 20 世纪 90 年代,更多的商业化 CFD 应用软件如雨后春笋般出现,涉及范围也越来越广。CFD 通用软件以其模拟复杂流动现象的强大功能、人机对话式的界面操作以及直观清晰的流场显示引起了人们的广泛关注,其发展在西方国家得到工业界和政府部门的大力支持。20 世纪 90 年代后期,在工程技术界还曾出现推广学习 CFD 技术的热潮,这标志着 CFD 技术终于成功走出了学术研究的象牙塔,成为工程设计的重要手段。

CFD 技术的长处是适应性强、运用广范。首先,流动问题的控制方程一般是非线性的,自变量多,计算域几何形状和边界条件复杂,很难求得解析解,而用 CFD 技术则有可能找出满足工程需要的数值解;其次,可利用计算机进行各种数值计算,例如,选择不同流动参数进行物理方程中的各项有效性和敏感性试验,从而进行方案比较;再次,它不受物理模型和试验模型的限制,省钱省时,有较多的灵活性,能给出详细和完整的资料,很容易模拟特殊尺寸、高温、有毒、易燃等真实条件和试验中只能接近而无法达到的理想条件。

CFD 也存在一定的局限性。首先,数值解法是一种离散近似的计算方法,依赖于物理上合理、数学上适用、适合于在计算机上进行计算的离散的有限数学模型,且最终结果不能提供任何形式的解析表达式,只是有限个离散点上的数值解,并有一定的计算误差;其次,它不像物理模型试验一开始就能给出流动现象并定性地描述,往往需要由原体观测或物理模型试验提供某些参数,并需要对建立的数学模型进行验证;再次,程序的编制及资料的收集、整理与正确利用,在很大程度上依赖于经验与技巧。此外,CFD 涉及大量数值计算,因此,需要较高的计算机软硬件配置。

1.2 黏性流场中螺旋桨性能预报的研究进展与现状

传统的螺旋桨理论是基于势流理论建立起来的,如升力线理论、升力面理论、面元法等,目前这类方法已经发展到相当的水平,在螺旋桨设计和性能预报中有着广泛的应用。但这类方法有其自身无法克服的缺点:第一,势流方法忽略了流动的旋涡影响,因而这类方法不能正确预报螺旋桨的流动特征,如梢涡的形成,尾涡的结构和流动分离,更不能考虑由雷诺数相差悬殊而造成的模型和实桨之间的尺度效应关系;第二,势流方法须凭经验来假设尾涡面形状;第三,势流方法在复杂船型船桨非定常干扰的预报上存在很大的困难。因

此,用 CFD 方法求解黏流场中螺旋桨的水动力性能是非常必要的。

国内外学者对黏性流场中螺旋桨的研究开始于 20 世纪 90 年代后。1987 年,Mayumi Ito 在其论文中考虑了黏性对螺旋桨敞水性能的影响。Shotaro Uto 于 1992 年研究了螺旋桨的黏性绕流场,并于 1993 年分两篇论文讨论了在黏性流场中研究螺旋桨的湍流模式问题,在 1994 年发表了一篇探讨黏性流场中螺旋桨尺度效应的问题。1995 年,KEON - JE OH 等人研究了绕螺旋桨桨轴的黏性流场。此后,得益于商业软件的推广和计算机性能的大幅提高,应用黏性流方法研究螺旋桨有了迅猛的发展,在第 22 届 ITTC 研讨会(1998 年在法国召开)达到了高潮。与此同时,为验证黏性 CFD 方法计算螺旋桨性能的准确性和可靠性,展开了大量关于螺旋桨流场的可视化试验,以便和黏性 CFD 方法得到的流动细节相比较。在 2002 年之前,国内外学者基本上是采用定常的方法研究螺旋桨的水动力性能。用非定常方法研究螺旋桨的水动力性能始于 2002 年的 Sao Funeno。此后,Takayuki Watanabe 在 2003 年使用非定常方法研究了螺旋桨的敞水性能和空泡预报,2004 年 Chen 使用基于重叠网格的动网格技术研究了螺旋桨的水动力性能,除此之外,很少有学者使用非定常方法研究黏性流场中的螺旋桨,其主要原因包括计算技术的问题和精确预报的代价问题,当然也包括所研究的问题需不需要采用这种预报精度高同时计算代价也高的方法。此后,在 2005 年,学者们在解决了黏性流场中螺旋桨的性能预报问题后,开始把目光转向桨和舵的定常干扰上来。当然,由于各种商业软件和湍流模式的差异,以及网格划分和处理螺旋桨旋转的技术各不相同,关于这方面的讨论也很多。

总结国内外学者研究黏性流场中的螺旋桨所采用的方法,可以分为定常模拟和非定常模拟两类。定常方法中根据处理螺旋桨旋转的技术又可分为单旋转坐标系模型和多运动参考坐标系模型两种。非定常方法中处理螺旋桨旋转的技术有滑移网格技术(FLUENT)和瞬态定子-转子界面技术(CFX)两种。

1.3 船体黏性伴流场预报的研究进展与现状

1978 年,在瑞典哥德堡召开的第一届国际船舶黏性阻力会议,首次涉及到船舶黏性流场的数值预报问题。1980 年,在同一地点又召开了 SSPA - ITTC 船舶边界层专题讨论会,这次会议上提供的研究成果反映了当时三维船舶边界层的研究水平。会议的主要结论是:对于占船长 75% 的前部薄边界层,简单的积分法和精细的微分法都能给出较好的结果。当时边界层的计算在航空界已经比较成熟,造船界主要是借用他们的经验。对船体而言,当时数值计算的主要特点是:

(1) 船型复杂,要在数学上准确地表达它不太容易;

(2) 在船体尾部(1/3 的船长上)边界层变厚,Prandtl 的薄边界层近似和相应的积分法不再适用,需要修正(出现所谓厚边界层)或者回到原来微分形式的动量方程(一般是 RANS 方程);

(3) 外流有兴波流场。通过船体边界层的计算,可以得到前部 2/3 船体上的摩擦阻力和傅劳德数的影响。

国内造船界,主要是沈奇心、王言英在这方面有文章发表。自 1982 年第 14 届国际船舶流体力学会议(ONR, Ann Arbor)开始,船体尾流场成为国际造船界的研究热点之一,开始是以重叠船模(不计自由面的影响)为计算对象,多数是直接求解 RANS(雷诺平均的 NS)方

程。起初还有少数作者求解 RANS 方程的简单形式(如部分抛物化 NS 方程和薄层 NS 方程),后来很快就都统一到求解完整的 RANS 方程上来。经过 1984 年的第 15 届 ONR (Hanberg)会议、1985 年的第 2 届国际船舶黏性阻力会议(Goteborg)和同年在大阪召开的国际船舶黏性流动讨论会、1986 年的第 16 届 ONR(Berkeley)会议、1989 年的第 5 届国际数值船舶流体力学会议(Hiroshima),到了 1990 年,在哥德堡召开的 SSPA-CTH-IIHR 船舶黏性流动研讨会,基于黏性流方法研究船舶达到了高潮。在 1990 年的哥德堡会议上,选择了两条船模作为计算对象,一条是 HSVA 的肥大船,试验数据是公开的;一条是其修改船型,后来成为 Dyne 船型,参加计算的有 19 个组织和机构。从事后发表的结果来看,数据都能和试验结果符合良好,但是由于测试对象是两个实际船型,流入螺旋桨浆盘面的流动受到了由船底诱发的涡的强烈影响,导致了一个兔耳形(钩状)的速度等高线,对这一点没有很好地预报。2000 年的 Gothenburg 会议则集中在 RANS 求解器的验证上,计算中包括了更加复杂的外形和复杂的环境等。很多小组的研究工作包括了自由液面、推进的影响,而研究的对象也是如 KVLCC2 油轮、KCS 集装箱船和 DTMB5414 海军战舰这样的复杂船型。2002 年,在日本福冈召开的第 24 届 ONR 会议上,Burg 等人研究了带附体并考虑自由液面和推进的实际船型这样的复杂问题,Cordier 等人还进行了实船尺度下的水面船舶流场测量工作,为数值计算结果的检验和验证提供试验数据。2005 年的东京会议包含了 KCS, KVLCC2M,DTMB5415 的伴流计算, Lee 等人还进行了船模流场的测量工作,为数值计算结果的检验和验证提供试验数据。从与会者提供的结果来看,当时的 CFD 技术已经具备了模拟黏性尾流场的能力。在这次会议上,所有参与者均求解 RANS 方程,在标称伴流的预报上,有 9 家机构提供了关于 KCS 的 11 个结果,大多数的伴流图形和横向速度矢量与试验结果吻合较好,但浆盘面的横向中心线上,轴向速度的计算结果与试验结果偏差很大;DTMB5415 的计算情况与 KCS 类似;对于 KVLCC2M,有 9 家机构提供了 13 个计算结果,关注的焦点在于浆盘面上“钩状”再现,只有部分单位能够捕捉“钩状”,这一结果表明,对于肥大船,捕捉“钩状”仍然是难题。

国内在黏性尾流场的预报研究上相对晚一些,较早展开这方面研究的是周连第,此后,朱明、李廷秋、高秋新、蔡荣泉、沈奇心等人也开展了相关的研究工作。在 2000 年的 Gothenburg 会议之后,国内对船体黏性伴流场的研究逐渐多了起来。张怀新、刘应中等人基于 CFD 技术计算了考虑自由液面的系列 60 船模的黏性伴流场;高秋新等人模拟了 DTMB5415 驱逐舰的绕流问题,并和试验值做了定性的比较;张志荣等人使用不同湍流模型来计算船体尾流场,其数值结果与试验结果吻合很好;许辉、邹早建用 Fluent 计算了小水线面双体船的尾流场,得到了合理的结果;常煜等人则阐述了多块结构化网格在含附体水面船模黏性流场数值计算中的应用;孙小江等人则使用 Shipflow 软件研究了 2 500 车滚装船阻力性能,并与试验值做了比较。可见,国内基于 RANS 预报简单船型尾流场的计算方法已经比较成熟,但是计算的精度有待提高。

总体来看,当今基于黏性流理论的计算方法有三类:直接模拟、大涡模拟和雷诺平均(RANS)。直接模拟的控制方程就是原来的 NS 方程,要求它能模拟出高雷诺数黏性流动中所包含的各种尺度的流动(或称涡),因而网格尺度要很小;大涡模拟把网格尺度以下的流动模型化或参数化(称为亚格子模型)后,计入大尺度运动的方程中去,只求解大于网格尺度的流体运动,以期减轻对网格过小的要求,这两种模拟方法到目前为止,由于计算条件的限制,还不能用于解决实际或复杂的工程问题。在实际应用上,绝大多数还是求解 RANS 方程。

1.4 船体与节能附体及螺旋桨非定常干扰的研究进展与现状

在第20届ITTC会议之前,推进委员会关于黏性流方法的评述主要还集中在螺旋桨黏性流的边界层近似上,在第20届ITTC会议上,关注的重点则主要是船桨干扰。此后,学者们在研究船桨干扰上主要采用下述方法处理:船体绕流按RANS方程计算,桨的流场和流体动力性能基本上是按升力面法或面元法计算,以鼓动盘(压力或速度跳跃)代替螺旋桨来计算桨对船体绕流的影响,或将盘面上的体积力引入船体的RANS方程,两者的相互作用由迭代法解决。而Abdel Maksoud等采用CFX-TASCflow把船体和转动中的螺旋桨一起处理,这在船桨干扰问题中当属首次,其计算网格节点数达260 000。

在黏性流场中,对船桨干扰展开研究的国内学者更少,研究方法基本上可以分为两类。第一类是用体积力模型代替螺旋桨与RANS方程耦合的方法,代表人物是周连第;第二类是周向平均的混合面方法,张志荣等人采用此方法研究了船桨定常干扰,取得了较好的结果。

在船舶节能附体的研究上,国内外的学者都根据实际需要设计了各式各样的节能装置,并做了大量模型试验研究,并且已经运用到实船上。考虑到节能效果和成本,目前国内学者在理论研究上主要集中在舵球、舵附推力鳍、补偿导管、桨前导流罩和整流鳍上。将节能装置和船桨结合起来使用CFD数值模拟方法研究其节能机理,目前国内还没有学者展开这方面的研究工作,国外在这方面的工作早已展开。

概括来说,目前国内外研究船体与节能附体及螺旋桨相互干扰的主要计算方法可分为以下四类。

(1)用体积力模型代替螺旋桨与RANS方程耦合的方法。船体与螺旋桨相互作用数值计算的原理,是将螺旋桨用体积力模型代替,即在RANS方程的右端,在螺旋桨占据的空间内附加一体积力项,此体积力可由螺旋桨性能计算程序算得,但它又取决于船后来流条件,这样需要在RANS方程计算和螺旋桨性能计算之间进行迭代。国内学者周连第等人最早采用这种方法。国外采用这种方法预报船桨干扰的学者中比较有代表性的包括:基于重叠网格的RANS方法,代表人物是Chen, Chen and Liu, Hamn Ching Chen, Sing Kwan Lee等人,他们采用求解基于重叠网格的RANS方程来计算边界层和尾流场,然后和一个计算螺旋桨的程序MPUF3A耦合来求解船桨干扰;激励盘模型(Actuator Disk Model),即通过体积力把螺旋桨诱导的加速度耦合到RANS方程中去求解船桨干扰。

(2)基于势流理论的螺旋桨模型和RANS方程的耦合求解。

(3)周向平均的混合面方法。

(4)基于商业软件的非定常方法。最早是Abdel-Maksoud等人采用CFX-TASCflow商业软件把船体和转动中的螺旋桨一起处理,然后是Lübke使用商业软件CFX5研究了KCS船模和桨模的非定常干扰问题,分别计算了网格数为27万和215万两种情况下的船桨非定常干扰问题。

1.5 船舶推进节能装置简介

按照与螺旋桨相对位置的不同,船舶推进节能装置可分为桨前节能装置和桨后节能装置。桨前节能装置主要包括前置导管、补偿导管、桨前整流鳍(导流鳍)、桨前固定叶轮、桨前自由旋转叶轮以及各种导流支架等与船尾伴流相匹配的节能装置。这些节能装置通过改善桨盘面的伴流分布,来提高推进系统的推进效率,并对桨叶表面空泡现象和船舶激振力也有改善。桨后节能装置主要包括桨后自由旋转叶轮、桨后固定导轮、毂帽鳍、舵球、舵附推力鳍、舵球鳍、襟翼舵、扭曲舵等,其通过回收利用螺旋桨尾流场中的旋转能量和涡动能来提高推进效率,实现节能。此外,近些年来还出现了多种不同节能装置的组合(包括桨前节能装置之间的组合、桨后节能装置之间的组合以及桨前节能装置与桨后节能装置的组合)构成的组合式节能装置,其充分利用不同节能装置的节能机理,使其节能效果相互叠加产生优于单个节能装置的节能效果。

无论是单个节能装置还是多个节能装置的组合,其外形特点、外形尺寸大小、产生节能效果的工作机理、设计侧重点以及在船体上的安装位置均不相同,限于篇幅,这里不一一介绍,仅选取和理论研究相关的几个节能装置加以简要介绍。

1.5.1 补偿导管

众所周知,方形系数大于0.6的船舶,艉部的水流分离不可避免,从而造成了艉部的能量损失。因此,造船工程师们在设计艉部型线时,采用了以下几种方法:

- (1)采用球尾船体;
- (2)增大螺旋桨叶梢与船底之间的距离;
- (3)减小艉部水流去流角(改进螺旋桨的进流速度场)。

这种通过改变船尾型线来改善尾流场的方法,虽然具有一定的作用,但是效果却不是十分明显。

针对上述问题,德国亚琛(Aachen)工业大学博士 Schneekluth 教授在杜伊斯堡内河船舶研究所的支持下开发了伴流补偿导管(Wake Equalizing Duct)。经过海上试航和长期使用,综合装载情况、航速和海况等因素,船舶平均节能效果为8%。由于该项技术结构简单、加工方便、价格低廉、效果良好、对船舶无不利影响(还有利于船舶增加稳性),我国国内已经有相当数量的船舶都装上了伴流补偿导管,其节能效果也很明显,补偿导管的试验模型如图 1.1 所示,安装于实船上的补偿导管如图 1.2 所示。

补偿导管主要是通过改善螺旋桨盘面处的伴流场来实现节能的,因此对存在不均匀伴流场、方形系数大于0.6的中速单桨船和双桨船都是适用的,但是对于空泡现象较为突出的高速船并不适用。对于单桨船而言,补偿导管一般安装在船尾桨前纵中剖面两侧,偏置于桨轴上方,是具有机翼型切面的环形导流装置。双桨船的伴流补偿导管的安装位置不像单桨船那样装在船尾的两侧,它们分别装在左右两个支轴架上,通过调节其与支轴架的相对位置来改善船舶性能。

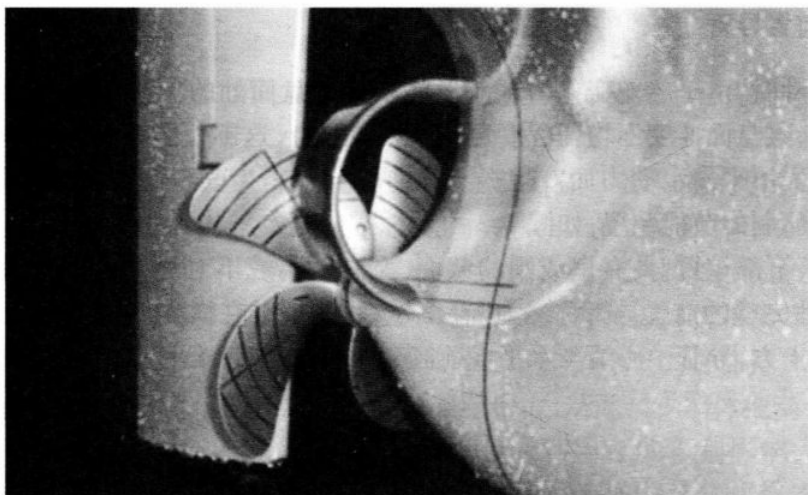


图 1.1 补偿导管模型



图 1.2 安装于实船上的补偿导管

实践表明,补偿导管具有以下作用:

- (1) 提高船后螺旋桨的效率;
- (2) 减少船尾水流分离;
- (3) 使桨盘面处的水流更为均匀,减小螺旋桨叶梢的负荷,有利于减小螺旋桨引起的振动;
- (4) 伴流补偿导管的整流作用使流向舵叶的水流比较平直,可提高舵叶的效率,改善船舶的操纵性能;
- (5) 伴流补偿导管在船尾两侧增加了面积,有利于航向稳定性;
- (6) 船模适航性比较试验表明,在规则波试验中,由于伴流补偿导管的存在,主机功率减小 3% ~ 4%,纵摇频响亦有所改善;
- (7) 冰区航行的船舶,伴流补偿导管有保护螺旋桨免受冰块损伤的作用。

1.5.2 前置导管

当船舶运动时,由于船舶变化的尾部形状使得桨盘面处的伴流不均匀(特别是方形系数较大的船舶,桨盘面速度不均匀程度可达 50% 以上),这不仅影响螺旋桨的效率,而且还会使螺旋桨遭受不平衡水动力而产生振动。前置导管是为改善船舶尾流场和提高螺旋桨的工作效率而研制的节能装置,如图 1.3 所示。它的基本结构为一管状壳体,圆形截面,收缩管上部较长,下部较短,具有扁或圆的截面,左右对称或不对称,也可以只有轴线以上的一半(通常的非完整的前置导管称之为“补偿导管”),安装在螺旋桨前、纵中剖面附近两侧,且偏置于桨轴上方,导管中心线与水平成前倾角。具体尺度、角度、外形要根据不同的船型确定。

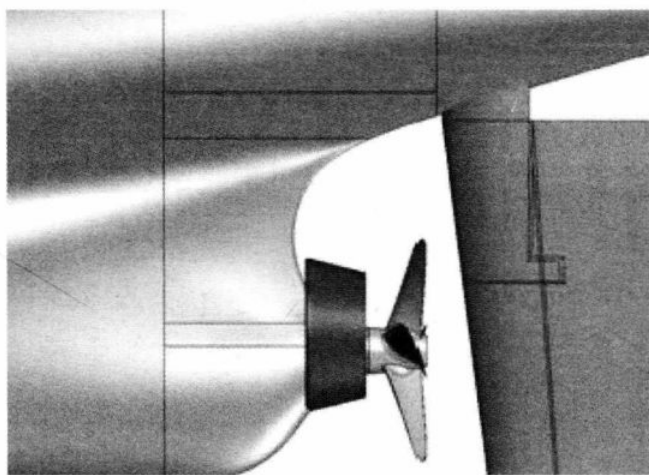


图 1.3 前置导管

前置导管最早设计于 1984 年,并由西德伯尔姆-福斯船厂安装在 7 万吨的“罗道尔夫·奥尔登道夫”船上。我国在 1985 年首次将前置导管节能装置成功地应用于 6.5 万吨散货船上,取得令人满意的效果。从第一只前置导管诞生至今,已有数以百计的实船安装了这种节能装置,一般节能效果可达 4% ~ 10%。

前置导管的节能作用主要来自以下几个方面:

(1) 单桨船螺旋桨盘面上部属于高伴流场,进速很小,因而将导管偏置于桨轴上方,用以加速螺旋桨上部流速,并使周围的水流减缓,整个盘面流速趋于均匀,改善螺旋桨的工作条件,提高推进效率,减小激振力和船体振动;

(2) 螺旋桨工作时,前置导管会促使进流产生预旋,前置导管采用左右不对称的半环组合,可改善预旋程度,进一步改善螺旋桨伴流场,提高推进效率;

(3) 前置导管的切面形状为机翼型,如同常规导管一样,设计良好的前置导管在尾流作用下自身也产生正推力,对减少推力减额产生有利影响;

(4) 改善艏部水流的分离现象,减少船舶的航行阻力;

(5) 增加舵的进流,对舵效有一定的改善作用;

(6) 不易产生叶梢空泡剥蚀。

1.5.3 桨前整流鳍

螺旋桨在水中高速旋转工作,在其周围将产生轴向、周向和径向扰动速度,这必将使螺旋桨消耗的能量分成三部分带入水流,其中由于周向和径向诱导速度带走的能量将损失掉,而且其中周向诱导速度能引起尾流的旋转,旋转不但不产生推力,反而强化水流的漩涡,进一步引起能量损失。为了减少部分能量损失,可以在桨前船体上安装导流鳍(整流鳍),通过对水流的“导引作用”,改变流向桨叶的水流方向,使其与桨叶自身的诱导速度相抵消,减少螺旋桨的周向诱导速度从而减少能量的消耗,进而提高推进效率。此外,由于导流鳍采用机翼型,周围存在水流环量,可改善附面层的分离,产生附加推力;导流鳍还可使尾流均匀化和稳定化,能减少船体阻力和螺旋桨激振力,从而减少船体振动。

由于螺旋桨工作在船体的尾流中,不可避免会受到尾流的不利影响,从而降低效率。为了改善桨前水流对螺旋桨的不利影响,德国、日本等相继研发了桨前整流鳍(导流鳍)来减少舳涡和斜流造成的螺旋桨推力与力矩的脉动。桨前整流鳍由与水流成一定攻角的鳍叶组成,通过改变水流方向来改善船舶伴流,提高螺旋桨的效率,减小震动,可提高航速或节省主机功率,节能5%左右,如图1.4所示。

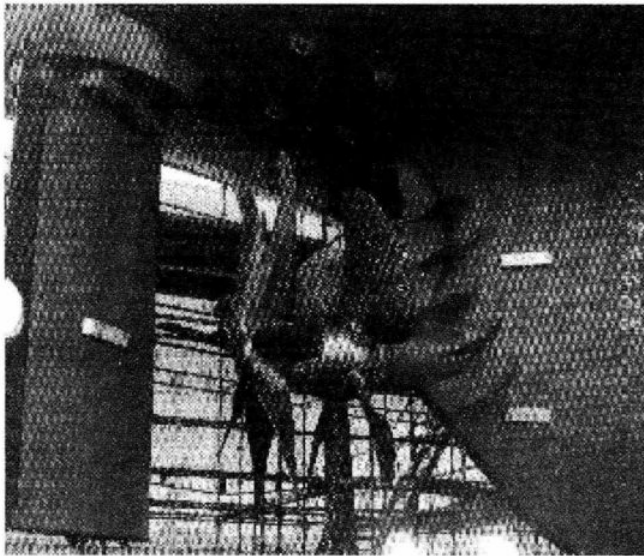


图 1.4 整流鳍

1.5.4 舵球

20世纪80年代初,日本川崎重工的科研人员在船模试验观察螺旋桨后水流流场时发现,螺旋桨后中心部位水流相当紊乱,出现了一些漩涡,为了减少部分能量损失,最简单的方法是加长螺旋桨毂帽,使桨毂长度超过螺旋桨直径的一半,便可达到十分理想的整流效果。但这一措施实际上行不通,因为这样一来,舵远离螺旋桨尾流,舵效大打折扣,给船舶操纵性带来不利影响。经过多次试验,川崎重工发现只要在舵叶的导边、螺旋桨轴线高度处、正对螺旋桨桨毂处安装一个直径约为螺旋桨轴直径1.07~1.2倍的流线型回转体(简称舵球),且靠近螺旋桨的头部接近半球体,向后延伸部分为锥体,并使球体与舵叶的流线

型光滑过渡,且在两者相贯处焊接,就能取得较好的节能效果,舵球外形如图 1.5 所示。在船模试验成功的基础上,川崎重工率先在一艘 13 万吨散货船“瑞川丸”上加装舵球,实船试航结果表明确实具有节能效果。

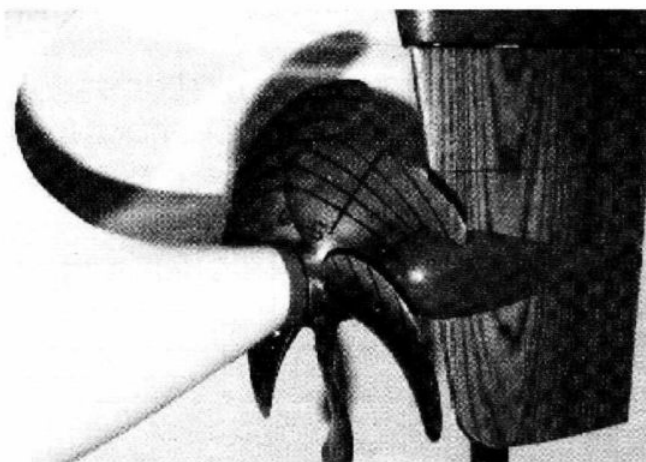


图 1.5 舵球

20 世纪 80 年代中期以后,世界各国纷纷开始研究和使用舵球节能技术。

1985 年以来,上海船舶运输科学研究所和中国船舶工业集团公司第 708 研究所亦各自独立开展舵球节能技术研究。1988 年至 1989 年间,江南造船厂为美国 LASCO 公司建造两艘 64 000 吨级巴拿马型散货船——“中国光荣”号和“中国自豪”号,该船共进行了三种装载状态下的模型试验,即对应实船吃水分别为 12.5 m, 13.1 m 及排水量为 32 000 t 的压载试航状态。每种状态下,均进行了不装舵球和安装舵球的阻力和自航试验。通过对比,在设计吃水及设计航速下功率节省达 4.45%,航速降至 12 ~ 15.5 kn 时,节能效益更好,可节能 4.82%。压载状态下舵球的节能效果稍差,12.5 kn 时为 3.88%, 14.5 kn 时为 3.27%。随后,“中国光荣”号和“中国自豪”号先后试航交船,在设计吃水航速 14.6 kn 时实测得到的节能效益分别为 8.10% 和 8.27%。交通部上海船舶研究所以一模型桨和 4 只几何相似的舵球进行组合试验,讨论了不同的桨-舵球组合间距和舵球尺度对螺旋桨效率的影响。试验表明,桨-舵球组合间距的变化对螺旋桨敞水效率的影响明显,在舵上安装舵球后一般可使螺旋桨的敞水效率提高 3% ~ 5%。

著名的船用设备制造商 Lips 于 2001 年将螺旋桨-舵-舵球整合在一起设计了一种桨-舵-舵球一体化推进装置,如图 1.6 所示。与常规船舶螺旋桨与舵各自独立不同,它在舵叶中间部位、沿螺旋桨轴线延伸方向,焊有一只呈流线型纺锤体状的舵球,此舵球使螺旋桨与舵成为一个整体,舵球最大直径要超过螺旋桨桨毂直径,看上去宛如一枚鱼雷。一艘营运于挪威沿海的快速客船 FinnmarKen 率先使用此节能装置,该船航速为 18 kn,营运于卑尔根-克覬奈斯旅游客运航线。FinnmarKen 为一艘双机双桨旅游客船,模型试验证实,与常规舵相比较,安装高效舵后,推进功率和燃油消耗可节省 5% ~ 6%,螺旋桨激振力降低 40%,螺旋桨诱导噪声级降低 5 dB。推进功率的节省是由于“伴流增益”效应所致。光滑的舵球消除了原先在螺旋桨桨毂后方发生的旋涡,使桨后尾流变得非常顺畅,尾流速度降低,螺旋桨盘面面积增加,从而提高了螺旋桨推进效率。高效舵叶单桨船尤其是船身丰满的船舶效果更好,在一艘航速 17 kn,主机功率为 6 300 kW 的运纸船上节能效益达 9% ~ 12%。