

船用推进器的 势流计算方法

胡健 常欣 王超 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

船用推进器的势流计算方法

胡健 常欣 王超 编著

内 容 简 介

势流理论是一种忽略流体黏性的经典理论,在船舶水动力学中有广泛的应用。基于该理论,螺旋桨的水动力计算方法已经从升力线方法、升力面方法发展到三维边界元方法。本书介绍了势流理论的基本概念,及其在船舶推进器研究中的应用。全书内容包括升力线方法、升力面方法及面元法的数值实现过程及其在螺旋桨定常水动力性能、非定常水动力性能、空泡性能及螺旋桨设计中的应用。本书还对吊舱推进器、导管桨等特殊类型推进器的水动力性能进行了研究。

本书适合作为工科及理科高等院校高年级本科生、研究生的教材,也适合作为教师 and 广大科技工作者从事科学研究的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

船用推进器的势流计算方法/胡健,常欣,王超编著.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2015. 10
ISBN 978-7-5661-1156-2

I. ①船… II. ①胡… ②常… ③王… III. ①船舶推进-推进器-位势流动-计算方法 IV. ①U661.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 255699 号

选题策划 夏飞洋

责任编辑 张玮琪

封面设计 恒润设计

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 787mm×1 092mm 1/16
印 张 12.75
字 数 328 千字
版 次 2015 年 10 月第 1 版
印 次 2015 年 10 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

船用推进器能够吸收主机功率并将其部分转换成有用功,推动船舶航行,是舰船的主要构成部分之一。当船舶推进器运转时,推进器所受到的流体反作用力是船舶推进力的主要来源,因此研究船舶推进器的水动力性能时,首要考虑的因素是流体力学问题。该问题主要可以用势流理论和黏流理论解决。势流理论忽略了流体的黏性,从而将复杂的 Navier - Stokes 方程简化为拉普拉斯方程,附加一定的边界条件,能够得到势流问题的唯一解。相比于黏流理论,用势流理论解决船舶推进的水动力学的特点在于算法简单可靠且易于编程。利用势流理论解决船舶推进器水动力学的合理性还在于其尺寸相对较小,同时又以非常高的转速运转,此时的雷诺数足够大,以至于我们可以忽略流体的黏性。本书详细阐述了势流理论的基本概念,探讨了船舶推进器的水动力学模型,介绍了求解积分方程的数值离散方法,探讨了用势流理论解决船舶推进器水动力学问题的基本思路。

本书以理想流体假设为前提,专注于利用势流理论解决船舶推进器水动力学问题的数值计算方法。全书分为 11 章:第 1 章对船舶推进器水动力学问题进行定义和分类,并系统介绍了国内外研究现状;第 2 章介绍升力线理论;第 3 章讨论升力面理论;第 4 章讨论面元法在推进器水动力性能中的应用;第 5 章分析推进器的非定常水动力性能;第 6 章分析螺旋桨的载荷噪声;第 7 章讨论螺旋桨的空泡问题;第 8 章讨论空泡噪声问题;第 9 章讨论螺旋桨的设计问题;第 10 章讨论吊舱推进器的水动力学问题;第 11 章讨论导管桨的水动力学问题。本书着重讲解了船舶推进器水动力学问题的数值实现过程,为希望在此领域学习的学生提供了一个详细的参考资料。本书既可作为研究生相应课程的教材,又可作为本科生相关教材的参考资料,还可为从事船舶与海洋工程相关专业工作的科技人员提供一些参考。本书第 4、5、6、7、8、10、11 章由胡健编著,第 1、2 章由常欣编著,第 3、9 章由王超编著。

另外需要指出的是船舶推进器的水动力学问题十分庞大,涉及很多复杂物理现象,例如其中我们最为关注的是空泡噪声和螺旋桨设计问题。本书仅给出了解决这些问题的基本思路,具体的数值计算过程目前尚不成熟,在很大程度上依赖于水动力实验结果。这些问题非常值得我们进一步地深入探讨。

本书的出版获得了工信部“高效混合对转推进系统及节能装置示范应用开发”项目和国家自然科学基金(Nos. 51579052, 11302057, 11102048)的支持。由于作者水平有限,加之撰写时间紧迫,书中定有不当之处,敬请读者批评指正。

编著者

2015 年 8 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 螺旋桨升力线和升力面理论	1
1.3 面元法预报螺旋桨水动力性能	3
1.4 螺旋桨空泡性能预报	4
1.5 空泡噪声	5
1.6 螺旋桨载荷噪声	7
1.7 螺旋桨设计方法	8
1.8 导管桨	8
1.9 吊舱推进	9
1.10 本书的主要工作	11
第2章 螺旋桨的升力线理论	13
2.1 升力线理论简介	13
2.2 螺旋桨的旋涡模型	14
2.3 螺旋桨涡系的诱导速度及诱导因子	14
2.4 螺旋桨的推力和转矩计算	20
第3章 螺旋桨的升力面理论	23
3.1 概述	23
3.2 叶片区内的涡系模型及离散化	23
3.3 尾流区内的涡系模型及离散化	25
3.4 局部坐标系的确定	26
3.5 环量分布及源汇分布	27
3.6 诱导速度及合速度的计算	28
3.7 叶片拱弧面形状的确定	32
3.8 水动力计算	34
第4章 面元法预报螺旋桨的定常水动力性能	37
4.1 面元法概述	37
4.2 积分方程的建立	38
4.3 螺旋桨的几何形状表达	39
4.4 积分方程的数值解法	39
4.5 数值计算结果	42
4.6 影响计算结果的几个参数	44
4.7 本章小结	49

第5章 螺旋桨非定常水动力性能研究	50
5.1 基本公式	50
5.2 数值计算过程	51
5.3 数值计算结果	54
5.4 流场中螺旋桨诱导脉动压力的计算方法	60
5.5 算例和结果	63
5.6 本章小结	65
第6章 螺旋桨载荷噪声计算	66
6.1 引言	66
6.2 Lighthill 声学相似原理与 FW-H 方程	66
6.3 FW-H 方程的时域解	68
6.4 螺旋桨噪声预报算例	70
6.5 本章小结	76
第7章 螺旋桨空泡性能预报	77
7.1 概述	77
7.2 计算原理	77
7.3 数值求解方法	80
7.4 数值计算结果	82
7.5 螺旋桨空泡形态的试验研究	85
7.6 螺旋桨空泡形态的软件模拟	87
7.7 本章小结	93
第8章 空泡噪声计算方法	94
8.1 单空泡动力学模型	94
8.2 双空泡动力学模型	96
8.3 噪声模型	97
8.4 常微分方程的数值求解	98
8.5 节单空泡溃灭过程分析	101
8.6 双空泡模型溃灭过程的分析	110
8.7 本章小结	117
第9章 螺旋桨设计	118
9.1 升力线设计方法	118
9.2 非线性升力线理论	122
9.3 升力线理论设计实例	129
9.4 基于升力面方法的螺旋桨设计	132
9.5 升力面理论设计实例	143
第10章 吊舱式推进器	147
10.1 概述	147
10.2 拖式吊舱推进器敞水性能研究	147
10.3 船后吊舱推进器的水动力性能研究	153
10.4 附鳍吊舱推进器的水动力性能分析	158

第 11 章 导管螺旋桨的水动力性能	165
11.1 导管螺旋桨定常性能预估	165
11.2 导管螺旋桨定常面元法	166
11.3 普通螺旋桨与导管螺旋桨性能对比	169
11.4 导管螺旋桨定常性能计算结果	174
11.5 导管参数对导管螺旋桨性能的影响	182
11.6 本章小结	185
参考文献	186

第1章 绪论

1.1 概述

近年来,随着现代探测设备和武器(导弹、鱼雷、水雷)向高精度、远距离发展,舰船的暴露和被命中率大幅提高,生存力和战斗力受到严重威胁。舰船隐身技术逐渐受到重视,世界上相继出现隐身舰和安静型舰艇,从舰船性能方面来提高其隐蔽性,同时增加防护和对抗能力。舰船隐身技术就是为了降低舰船的暴露率,提高本舰对目标的发现、跟踪和打击力而采取的技术和措施,以减少舰船物理场特征信号。在舰船隐身技术中,强调减小舰船辐射噪声和声波反射能力的声隐身技术占有重要位置,其原理是通过系统地应用多种技术来控制舰船声场,改变舰船声目标特性,并通过水声对抗等来降低对方声呐探测设备的发现概率和距离,降低对方声自导水中兵器的攻击力,同时也提高本舰对目标的发现、跟踪和打击力。因此,声隐身技术是提高现代舰船的生存力和战斗力的有效手段。

目前,在水下探测设备中,声呐在各国舰船和水下攻击武器(音响水雷、音响自导鱼雷等)中应用最为普遍,这主要是基于声波在水中衰减率低的特点。为了降低舰船被对方声呐发现的概率,就应该尽可能地降低舰船的噪声源(机械噪声源、螺旋桨噪声源、水动力噪声源等)的辐射噪声。水下噪声的发生机理是当流体流过固壁表面时,引起物体的不规则振动,此振动会向外辐射噪声;当流速进一步增大时,固壁表面产生空化,在壁表面形成气液两相流动,此时的辐射噪声会急剧增大,因此空化噪声是舰船高速运行时的主要噪声源。

随着科学技术的发展,各种新型船、高性能船相继出现,现代船舶不断地向大型化、高速化发展,船舶主机功率也不断增加,从而对船舶推进器的性能的要求也越来越高。由于船尾伴流的非均匀性,螺旋桨在运转过程中,往往难以避免桨叶上出现非定常的空泡,从而引起强烈的辐射噪声,该噪声作为舰船的三大主要噪声源之一,大大削弱了舰船的隐身性能。研究表明,弱辐射噪声降低 10 dB,在 1 000 ~ 5 000 Hz 的频率范围内,声呐的探测距离会降至原来的 30% ~ 50%;在 5 000 ~ 10 000 Hz 的范围内,声呐的探测距离会降至原来的 60% ~ 70%,因此如何降低螺旋桨噪声成为了螺旋桨设计中迫切需要解决的问题。

1.2 螺旋桨升力线和升力面理论

船舶螺旋桨理论研究的目的是采用流体力学的理论方法来解决螺旋桨理论设计和性能计算问题。在不同的理论发展阶段,螺旋桨研究的理论模型主要有升力线理论、升力面理论和面元法。

螺旋桨的广泛应用和不断发展,要求人们从理论上对其作用原理做出解释,并寻求设计效率更高的螺旋桨的途径。如果从 1865 年英国学者兰肯(Rankine)^[1]提出螺旋桨轴向动量理论算起,螺旋桨理论的发展已经有一百多年的历史。

早期的螺旋桨理论分为两派,一派以动量定理为基础,由水的动量变化推算螺旋桨的

推力,这种理论称为动量理论;而另一派则注重于螺旋桨叶元体受力的研究,他们利用翼型在风洞的实验结果分析叶元体的作用力,然后将其结果在螺旋桨半径方向积分求出推力和效率,这种理论称为叶元体理论。这两种理论分别在 19 世纪下半叶到 20 世纪初发展,虽然互无联系,各能自圆其说,但两者互有抵触。从实用角度来看,它们的利用价值不大,但是在解释螺旋桨的工作原理上有一定作用。

随着飞机机翼的气体动力学的研究发展,机翼理论研究的成果开始应用于螺旋桨,尽管机翼理论中的数学模型和不少基本概念都可移植到螺旋桨理论中去,但是由于螺旋桨在直进的同时还在旋转,并要考虑桨叶之间的影响、桨毂的作用、船舶伴流的影响、后置舵的干扰等因素,在理论处理上就更为复杂。

1907 年伦切斯特(Lanchester)^[2]首先引入将机翼简化为附着涡及其向后泄出的涡片的概念。此后,俄国的儒科夫斯基(Joukowski)通过弗莱姆(Flamm)的实验^[3]和普朗特(Prandtl)的模型^[4,5]提出了在理想流体中螺旋桨能量损失最小的条件,该条件常被用来求解最佳环量分布问题。

苏联认为儒科夫斯基建立了螺旋桨环流理论,而西方国家则认为螺旋桨环流理论的研究起始于贝茨^[6]的工作。

1929 年哥尔斯坦(Goldstein)^[7]提出了著名的哥尔斯坦因子,并求解了贝兹的最佳环量分布,而此前普朗特只是用近似处理方法求解了这一问题。在早期的升力线理论中希尔(Hill)^[8]、冯·曼能(Van Manen)^[9]、埃克哈特-摩根(Eckhardt-Morgen)^[10]等都是用哥尔斯坦因子及贝茨条件来进行螺旋桨的设计计算的。1968 年约翰逊(Johnson)^[11]还用其求解正问题,该方法由于计算工作量小,可以用手工进行计算而得以推广,但这种理论只对均匀来流中的螺旋桨才是精确的。对于一般的在非均匀来流中运转的螺旋桨,只是一种近似方法。勒伯斯(Lerbs)^[12]1952 年发表的有关诱导因子法的理论是对升力线理论的重大发展,他解决了径向非均匀伴流中具有任意环量分布的螺旋桨的设计问题和水动力性能计算问题,随着计算机的发展与普及,这种方法在 20 世纪 60 年代得到了广泛的应用,取代了哥尔斯坦因子法。

由于升力线理论利用一根附着涡替代桨叶的作用,没有直接考虑桨叶的形状和物面边界条件,它是一种较粗糙的方法,只适用于轻载荷螺旋桨及中载荷螺旋桨。

1944 年琴采尔-鲁德维格(Ginzel-Ludwig)^[13]首先发表了适用于宽叶螺旋桨的升力面理论,由于计算工作量很大,直到 20 世纪 60 年代电子计算机得到广泛应用之后才快速发展起来。1961 年考克斯(Cox)^[14]对琴采尔的方法做了改进。1961 年卞保琦^[15]的方法对升力面理论设计螺旋桨做出了很大改进,该方法将涡处理为连续分布的,用函数或级数形式来表示,适用于任意形式的弦向涡分布,并可以求出整个拱弧线的形状及攻角。但该方法中没有计入桨叶厚度的影响,对于有纵倾和大侧斜变螺距的桨会引起较大的误差。1960 年英格里斯(English)^[16]基于机翼理论中福尔克纳(Falkner)的思想,用涡格法来计算螺旋桨的设计问题,这是离散化的处理方法。克尔文(Kerwin)等^[17-19]对用离散化方法解螺旋桨的性能计算问题及设计问题做出了重要贡献,克尔文的方法考虑了桨叶厚度的影响,并适用于具有纵倾和侧斜的变螺距螺旋桨。1973 年卡明斯(Cummings)^[20]将模式函数配置法应用于解螺旋桨的性能计算问题。

1960 年斯伯兰博格(Sparenberg)^[21]首先提出用加速度势来建立螺旋桨的升力面理论,1962 年花岗达郎(Hanaoka)^[22]用加速度势建立了非定常螺旋桨的升力面理论,后由查克纳

斯(Tsakonas)等^[23,24]形成了较完整的用加速度势解螺旋桨的定常及非定常问题的方法,其优点是不涉及尾涡的形状,但需对欧拉运动方程进行近似处理。

1963年山崎隆介(Yamazaki)^[25]利用涡片与平面偶极分布等价的原理建立了应用偶极分布的升力面理论。此外,尼尔森(Nelson)^[26]、中岛康吉(Nakashima)^[27]、汉德森(Handerson)^[28]等人也在螺旋桨升力面理论方面做出了有意义的工作。如果将桨叶面所有附着涡集中到一根涡线上,其强度沿径向变化,相邻两附着涡涡线段间有自由涡泄出,该计算模型即为升力线模型。20世纪50年代至今,螺旋桨定常水动力性能理论方法基本上以升力线、升力面和面元法为主。1952年,Lerbs^[12]发表文章,他提出了诱导因子法,从理论上解决了升力线理论求解螺旋桨的性能计算问题。特别对于中等负荷螺旋桨,能够得到准确结果,但是由于当时手工计算量过大,直到20世纪60年代该方法才被广泛应用。1968年Morgan^[29]等人计算了螺旋桨升力面修正因子,并将该因子引入螺旋桨升力线理论中,进一步提高了升力线方法预报螺旋桨性能的计算精度。1961年,卞保琦^[15]首次提出升力面计算模型,并将其应用螺旋桨定常水动力性能的计算,取得良好效果,此后很多学者进行了该方面的研究,如Yamazaki^[25],Van^[30]等人。升力面理论不论在计算中等负荷还是重负荷螺旋桨定常性能方面都取得了良好的效果。

1.3 面元法预报螺旋桨水动力性能

由于升力面理论将螺旋桨叶片简化为厚度为零的升力面,在该面上而不是在真实物面上满足物面边界条件,因此尽管利用升力面理论可以较准确地预报螺旋桨的水动力性能,并可设计螺旋桨的升力面,但对于螺旋桨叶面压力分布、桨后流场等的预报不够精确,不能满足螺旋桨更进一步的水动力性能的研究。

1964年汉斯-史密斯(Hess Smith)^[31]首先将面元法应用于无升力体的流体动力的计算,这是一种在更大程度上依赖于数值算法和计算机能力的理论分析方法。1974年蒙瑞诺^[32](Morino)成功地将其应用于机翼及其与机身的组合体的空气动力性能的计算分析,提出了一套有效的数值算法,特别是面元的影响函数的计算方法,至今仍被广泛应用。20世纪80年代,面元法被引入到螺旋桨理论当中,并产生了计算分析船舶螺旋桨的不同种类的面元法。美国麻省理工大学(MIT)的克尔文、肯纳斯(Kinnas)和李(Lee)等^[33,34]发展了一整套计算分析普通螺旋桨、导管螺旋桨、大侧斜螺旋桨的源汇和偶极子的混合分布面元法。山崎寿(Yamazaki)和池田光尚(Ikehata)^[35]提出了涡分布的面元法,又被称为表面涡格法。另外,小山鸿一(Koyama)^[36]、星野辙二(Hoshino)^[33,37,38]等都完成了非常有价值的研究工作。

1.3.1 螺旋桨定常水动力性能

20世纪70年代,面元法被应用到螺旋桨的定常水动力性能的预报,其中以Kerwin^[33], Lee^[34], Yamazaki^[35], Koyama^[36], Hoshino^[38]为代表。和升力线理论、升力面理论相比,面元法的优势在于不对桨叶形状做任何简化,计算模型更为完善,随着理论研究的深入,越来越多的学者利用该方法研究螺旋桨。

国内对螺旋桨定常水动力性能的研究也基本上以升力线、升力面和面元法为主。叶永兴^[39]首次采用升力线方法计算了螺旋桨的水动力性能,此后不少学者^[40,41]进行了该方面

的研究。20 世纪 80 年代,国内开始采用升力面理论作为螺旋桨定常水动力性能的计算工具。董世汤^[42,43]等人在其著作和文章中系统地研究了升力面理论在螺旋桨性能预报中的应用,并对边值问题做了精细化的处理;陈家栋^[44]在用升力面理论计算螺旋桨定常水动力性能时考虑了涡分离的影响,使计算模型更为完善;王国强^[45]根据涡和偶极等价的原理,用非线性涡格法计算了螺旋桨的定常水动力性能;黄胜^[46]在著作中详细介绍了升力、线升力面、面元法在螺旋桨定常水动力性能中的应用。20 世纪 90 年代,面元法被应用到螺旋桨定常水动力性能预报中,代表人物有苏玉民^[47]、雄鹰^[48]等人,苏玉民在文章和著作中详细介绍了面元法积分公式的推导、积分方程的离散、影响系数的计算等关键问题;雄鹰对螺旋桨的等压库塔进行了改进,大大改善了计算时的收敛性。

1.3.2 螺旋桨非定常水动力性能

船舶螺旋桨工作于船后的伴流中,由于伴流的不均匀性,螺旋桨旋转时,在不同时刻桨叶的相对来流不同,导致了桨叶的受力随着时间变化,此时螺旋桨的水动力性能变成了非定常问题。

国外对螺旋桨非定常问题的研究于 20 世纪 60 年代就已开始,代表人物是 Tsakonas^[23,49-53],他的研究主要是使用升力面方法,首先是研究了小螺距角情况下的螺旋桨非定常水动力性能,随着研究的深入,Tsakonas 又改进了螺旋桨尾涡的螺旋面,修正了计算模型,并用该方法解决桨舵干扰的非定常问题,Kerwin^[19]做了相同的研究,并改进了原有的计算方法,使得计算精度有了很大提高。20 世纪 80 年代至今,面元法逐渐成为研究该问题的主要方法,代表人物主要有 Kayama^[36]、Hoshino^[37]、Kinnas^[54,55]等人,Hoshino 将积分方程建立在所有桨叶上同时求解,Kinnas 为了减少计算时间和计算机的存储量,将积分方程建立在一个桨叶上,其他桨叶上的未知数均由该桨叶的计算结果按一定时间步长迭代求解,同时在某些问题中用线性分布取代尾涡面上第一个面元偶极子强度的常值分布,以避免数值求解过程的时间步长过于敏感。Belibassakis^[56,57]采用涡分布的以速度为基本变量的面元法分析了螺旋桨的非定常水动力性能,得到的计算结果和 Hoshino 的计算结果基本相同,但该方法计算量大,且在计算影响系数时,为了不产生奇异结果,对面元的划分形式要求很大。其他研究螺旋桨非定常性能的学者主要有 Maruo^[58]、Murakami、Ando^[59]和 Kinnas^[54,55]等。

国内对螺旋桨非定常水动力性能的研究从 20 世纪 90 年代开始,也基本上经历了升力面方法和面元法两个过程,且计算过程和国外基本类似,陈家栋^[60]、王国强^[61]、董世汤^[62]用升力面方法预报了螺旋桨非定常水动力性能;唐登海^[63]、苏玉民^[64]、谭廷寿、雄鹰等用面元法预报了螺旋桨的非定常水动力性能。其中,谭廷寿采用了频域方法,其他学者均采用了时域方法。

1.4 螺旋桨空泡性能预报

螺旋桨叶片上的空泡是螺旋桨诱导的振动和噪声的主要原因,特别是随着船舶向大型化和高功率方向发展,该问题日益突出。同时由于船体所引起的强烈伴流会使螺旋桨的空泡形状产生剧烈变化,大大增加了振动和噪声的幅值。因此如何正确预报桨叶上空泡的特性成为当前大家所关注的热点问题。

Lee^[65,66]用升力面方法和面元法分别计算了螺旋桨的空泡问题和二维水翼的局部空泡问题。Yuasa^[67]根据三维理论用涡格法计算了螺旋桨的空泡问题。Uhlman^[68]用奇点分布的方法求解了水翼的局部空泡问题。Kinnas^[69], Kim^[65,70,71]采用面元法预报了螺旋桨的空泡性态。

在计算螺旋桨空泡时,一般预先假设空泡发生点的位置,一般采用桨叶导边作为空泡发生点的位置,或采用弦长的2%,5%处作为空泡发生点的位置。Oossannen^[72]认为空泡发生于绕流边界层中层流分离处或在无分离时层流到湍流的转变处。对于空泡末端的封闭模型一般是认为空泡末端厚度为零,但是Rowe^[73]认为这种封闭模型存在空泡表面速度为常数和尾驻点速度为零的矛盾,因此Uhlman^[74]建立一种新型的计算模型,将空泡末端终止于某一断面,但是由于空泡末端断面的存在,使得空泡表面和桨叶湿表面交界处产生了一个几何形状的跳跃,所以该种模型仍不完善,后又有人提出了开式模型,即空泡末端不封闭,但是由于该模型在空泡末端产生了复杂的气液两相流动,没有明确的边界,在应用边界元方法计算时,在空泡末端积分方程的边界条件无法确定。在螺旋桨空泡的计算中还有一个比较重要的问题就是收敛性问题,Kinnas^[75-77]和Fine^[78]用基于速度势的面元法计算了空泡问题,认为该方法比基于速度的面元具有更好的收敛性,Achkinadze^[79,80]利用人工变分方法和面元法相结合,用于求解螺旋桨的空泡,大大提高了计算的收敛性。

1.5 空泡噪声

空泡现象是一种复杂的多相流问题,它是指流体中压力下降到水的饱和蒸汽压以下时产生的爆发式的汽化现象。一般认为空化核在流体的负压区内膨胀,当空化核半径大于临界半径时会产生空泡^[81]。在流体的正压区内空泡迅速溃灭,产生高速射流。高速射流对附近流场中固壁面的连续冲击会产生空蚀现象(常见于船用螺旋桨等流体机械),同时空泡的溃灭还会产生辐射噪声。空泡噪声与空泡溃灭之间存在着密切的联系,这种联系是上述两个方面研究的基本依据,因而也是研究人员关注的重点。

对于螺旋桨,空泡周期性的生长和溃灭不但会对桨叶产生空蚀,影响其水动力性能,而且往往伴随有较强烈的尾部振动,并产生辐射噪声,这种振动可能是人们能够听到的(若频率为16~20 000 Hz),也可能是听不见的(如频率在上述范围以外),但会被声呐探测器所接收,影响了舰船的隐身性能。此外,螺旋桨空泡在脱落后会使水面舰船尾部出现白色尾迹。白色尾迹的存在使得对方的卫星监测系统很容易发现并定位水面舰船,与此同时,很多鱼雷也通过侦测螺旋桨空泡的辐射噪声来进行制导。

自从人们意识到空泡溃灭的剧烈程度与空泡可能造成的破坏直接相关后,空泡动力学就一直成为流体力学中的一个研究热点。对空泡溃灭及空化噪声的研究手段主要有理论研究、数值计算和实验。下面对这三方面的研究进展及最新动态做一简单的回顾。

20世纪初,英国物理学家Baron Rayleigh从理论上对空泡现象进行了最初的探索,并且在1917年建立了不可压缩流场中球形空泡的运动方程。原始的Rayleigh方程并没有考虑黏性、表面张力和液体的可压缩性等因素,导致在气泡半径较小时会得出错误的结果。此后,许多学者基于不同的影响因素针对Rayleigh方程做出了改进,如Plesset^[82], Cole^[83], Noltingk, Neppiras^[83], Gilmore^[84]等。

对于形状为准球形的气泡,Plesset&Prosperetti^[85]求解了处于无黏且不可压缩流场中的

偏离球状不大的准球形气泡的运动方程;Plesset 和 Chapman^[82]从理论上分析了刚性壁面气泡塌陷的形态,并比照了 Lauterborn 和 Bolle^[86]的实验结果,结果良好吻合。Fujikawa 和 Akamatsu 又考虑了泡内水蒸气的冷凝,热传导和温度的不连续性等因素,他们发现在气泡半径恢复膨胀时,气泡壁将产生压力波^[87]。对于规则的圆环状气泡,Chahine 和 Genoux 研究出了一种渐进分析法,可以用来描述环状气泡在无黏、不可压缩流场中的运动。对于空泡所造成破坏效应,很多学者也试图提出理论予以解释。Gilmore, Hickling^[88]等人证明了空泡溃灭过程会产生冲击波,这样的冲击波可以对邻近的壁面造成疲劳破坏。Naude 和 Ellis^[89]提出空泡溃灭会产生一种“微波流”作用在附近的固壁面上,随后更多的学者,如 Lauterborn 和 Bolle, Shima 和 Nakjima 等也对这一现象提供了更多的理论支持,其中, Fujikawa 和 Akamatsu 通过实验证明空泡溃灭会在近壁面产生脉动压力。在国内,黄继汤针对表面张力对空泡溃灭过程的影响进行了研究^[90]。研究发现表面张力的作用加剧了空泡溃灭过程中的体积脉动中半径减小的过程,但是对半径增大的过程有阻碍作用。许卫新研究了在外界脉动压力场作用下的空泡运动特性,发现空泡的溃灭过程具有很明显的非线性特征^[91]。

20 世纪 70 年代起,随着计算机技术的发展,学者开始利用计算机对气泡问题进行数值模拟。空泡问题属于自由边界问题,可以用有限元法(Finite Element Method)或者边界元法(Boundary Element Method)进行研究。有限元法需要对整个流域进行网格划分,而边界元法仅对流域的边界,具体到空泡问题就是空泡表面,进行网格划分,从而简化了问题,因此边界元方法比有限元方法的运用更加广泛。边界元方法最大的优点是将问题简化成一维问题,大大减少了计算时间。但边界元方法也有自身的缺陷,例如求解黏性流体时的局限性、流体常被假设为势流等。

边界元法求解空泡动力学的基本思想:已知空泡表面的速度势,利用格林函数可以得到空泡表面的法向速度,然后再利用速度势差分法得到切向速度,从而得到空泡表面的全速度。

Plesset 和 Chapman 在 1971 年利用 MAC 方法对空泡溃灭中的射流问题进行了计算,Blake 和 Gibson 利用边界元方法计算分析了空泡在固壁面附近的 Bjerknes 效应^[92]。Wang 利用轴对称的边界积分法对不同距离、浮力参数条件下自由面附近的气泡进行了模拟^[93]。Brujan 引入了涡面模型解决了环状气泡的双连通域的问题^[94]。Klaseboer 与 Khoo 利用边界元方法研究了计及系统能量损失时空泡的膨胀和溃灭^[95]。加州理工大学 Brennen 对球形云雾状空泡所产生的冲击波进行了数值计算^[96]。研究发现,云雾状空泡在溃灭时会生成向内传播的激波,激波的传播同时伴有强烈的压力脉动,向泡外的远场辐射。研究结果也为云雾状空泡的强噪声的巨大的破坏势提供了合理的解释。

在国内,上海交通大学鲁传敬、戚定满提出了混合边界元法(Mixed Boundary Element Method),并用这种方法对不同条件下(固壁面和自由面处)的空泡溃灭过程及其产生的辐射噪声进行了数值计算^[97]。该方法用 Laplace 方程来代替近场的波动方程,将动边界问题转化为静边界问题,既保留了非线性的特征又减少了计算量。此外,鲁传敬、戚定满还对典型的空泡溃灭的噪声谱特性进行了研究^[98]。程晓俊采用回射流气泡模型,采用边界积分法进行了二维水翼的空泡预报^[99]。卢家才提出了气液两相流的湍流模型,并通过数值计算竖直上升的两相流,得到了流场的含气量的变化^[100]。胡影影利用流体体积法(Volume of Fluid)数值模拟了空泡在接近和远离固壁面时的溃灭过程^[101]。

1.6 螺旋桨载荷噪声

国外对螺旋桨噪声问题的研究是从对直升机旋翼和空气动力学的研究开始的。Epstein^[102]在1953年提出螺旋桨的噪声及节能减排的研究,开始了对直升机螺旋桨噪声的研究,他回顾了螺旋桨的声理论中的基本概念,将实验和理论进行了对比,并给出了亚音速和超音速条件下的尖端速度条件。对这个问题的声学 and 空气动力学方面的最新分析研究结果进行了总结。噪音的强度和一些建议的设计与现有的频谱给出了比较宽松的暂定标准。在1969年,Ffowcs Williams 和 Hawkings^[103]给出了FW-H方程,奠定了螺旋桨噪声计算的基础。

1978年Farassat, F. Brown 和 T. J.^[104]提出一种新的预测直升机旋翼和螺旋桨噪声的方法,描述了控制方程和计算技巧。方法中给出了声压随时间变化的谱及厚度和载荷噪声谱,它可以用电脑计算而不受先前噪声预报方法的限制。此外,对计算机程序的输入通常可用或适合进行实验测量。该程序可被用于研究减小对公共产生滋扰的直升机旋翼或螺旋桨的噪声。

1981年Farassat, F.^[105]又提出了叶片的旋转噪声线性声学计算公式,它统一了当时的很多的公式,用来计算直升机机翼和螺旋桨离散谱噪声,给出了紧凑和非紧凑解,非紧凑解是基于FW-H方程的解,紧凑解是取非紧凑解的极限。1982年Farassat, F接着给出了螺旋桨噪声的优化解,现有的用于预报螺旋桨噪声的解法是由一个统一的方法得出,这个方法是基于FW-H方程。Farassat讨论了FW-H方程的推导和Green方程的解法,并引用了很多例子和广义函数。对声学理论和线性升力面理论中的时域方法进行了重点分析,并获得了新的适用成果。

Hanson在1983年提出可压缩螺旋桨空气动力学和噪音螺旋面理论,该理论的声学分支包括非线性源项,扩大和统一频域噪声理论可以追溯到Gutin。对于空气动力学的应用,表明结果满足跨声速的小展弦比和小厚度比的线性化临界条件,能够得到在为下洗功能的厚度积分方程的形式和稳态和非稳态负荷分布。

1985年Hanson又提出螺旋桨噪声的近场频域理论,近场噪声方程是由空气动力学的飞机螺旋桨表面理论和噪声理论发展而来的,包括厚度、定常载荷和四级子源。除了薄翼理论和忽略径向源,方程是精确的。通过与先前公布的远场理论比较,证明了远场方程的几个有用的特征将被保留,尤其是叶片范畴作为一个相位滞后效应。

1994年A. S. Lyrantzis在Journal of Fluids Engineering中发表了使用Kirchhoff方法计算声辐射,并对Kirchhoff公式做了全面的分析。Kirchhoff积分方程声辐射方程的基础是控制面S在外面的波动方程。控制面S是假设包括所有的非线性效应和流动噪声源。因此,只需要表面积为远场声计算。一个数值计算流体力学方法可用于在近场流场解的评价,从而Kirchhoff公式已经扩展到任意、移动、变形分段连续的表面。可用Kirchhoff方法进行审查和做出的各种声学应用。

2002年H. Seol等结合螺旋桨面元法与FW-H方程对螺旋桨无空泡噪声进行了详细的计算,采用边界元法来分析螺旋桨的流场,将随时间变化的压力值作为FW-H方程的输入数据。同时也计算了导管螺旋桨的噪声,通过边界元法来考虑声音的缺损和散射效应,控制方程是基于声压是线性化的假设。在计算声音是散射时,将声场分为已知的入射部分

和未知的散射部分来计算。给出了单桨和导管螺旋桨在非均匀流场中的远场声压,结果显示,导管对螺旋桨远场声压的影响很小,导管螺旋桨与单桨远场声压的指向性基本一致。

1.7 螺旋桨设计方法

新型叶剖面的开发始于20世纪80年代,Eppler^[106]提出了非线性剖面的设计方法,设计新剖面,此后他又和Shen等人合作,在此基础上对该方法进行了初步改善^[107],其他学者在新剖面设计中做了大量工作,如Lee^[108]等人采用了指定翼型表面压力分布的方法,用面元法来设计叶剖面。1995年,Avhadiev^[109]对叶剖面的空泡斗进行了研究,提出用给定空泡斗的方法设计叶剖面的思想。实验证明,新剖面的空泡斗的宽度比传统剖面更宽,具有更良好的空泡性能,能够延缓空泡的发生。Yamaguchi^[110]等人把新剖面的设计方法应用到螺旋桨的设计中,并发表了多篇论文,他们的应用显示了空泡性能的改善和噪声的降低。Lee^[111]等人提出了另一种基于典型剖面的螺旋桨设计过程,即用某个典型剖面作为母型,将其应用到所有剖面,以避免出现每个桨叶半径剖面都要设计的困难。此后,Kuiper发展了非均匀流场中螺旋桨的设计方法,通过计算非均匀流场中某个剖面的运转曲线,并将其与该剖面在定常情况下的二元空泡斗相比较,判断其空泡特性。

国内从20世纪70年代起对螺旋桨设计方法已经历了几代更新,目前主要以升力面(Lifting Surface Method)方法为主,其基本思想是在给定的弦长、厚度、侧斜、纵斜和环量径向分布的情况下,设计螺旋桨的拱弧面和径向螺距分布,其中环量的径向分布一般由升力线初始设计模块根据推力要求计算得到。其代表人物有王国强^[112]、陈家栋^[113]、董世汤^[114,115]和黄胜^[116]等人,现在比较新的关于螺旋桨设计的博士论文有苏玉民^[117]、周伟新^[118]、谭廷寿^[119]的博士论文,谭廷寿博士主要讨论了非均匀流场中螺旋桨的设计方法非均匀流中螺旋桨剖面的设计,苏玉民博士则主要讨论了基于升力体理论(原文直译)的螺旋桨设计方法。周伟新博士主要讨论了水面舰船螺旋桨设计系统的建立,着重点在于如何提高螺旋桨的空泡性能。

1.8 导管桨

随着螺旋桨理论的发展,人们开始注意导管螺旋桨,并开始对其进行深入的理论研究。在初期的研究中,人们使用鼓动盘来代替桨叶,而导管上则将其简化为一个圆柱面,并在上面分布奇点系来模拟导管的厚度和载荷,为便于计算,进一步将流动简化为轴对称问题,这种处理方法的好处是将导管完全线性化了。1972年,Ryan和Glover^[120]使用了一种新的方法来避免导管问题的线性化,他们采用了表面涡分布法,这种方法源于二维理论并结合了修正后升力线理论,使其更加符合导管理论,并将这种方法在三个导管螺旋桨上进行了验证。

1986年, Van Houten^[121]采用了升力面方法来计算导管桨的性能,分析了导管螺旋桨在轴对称流动中水动力性能,并特别关注了导管间隙对水动力性能的影响。

1987年,Kerwin J等^[33]发展了面元法来分析计算导管螺旋桨的水动力性能。首次将此方法应用于二维机翼和带有桨毂的轴对称流动,并将结果与精确解进行了对比。他们讨论了在使用面元法求解导管螺旋桨中可能遇到的困难,展示了典型收敛之后得到的解,给出

的解包括了螺旋桨和导管上全部的力、环量分布和桨叶及导管上的弦向压力分布情况。他们的研究在导管螺旋桨的研究历史上具有里程碑的作用:(1)最先使用面元法对导管螺旋桨进行计算;(2)把诱导速度作为来流的一部分来考虑螺旋桨和导管的相互影响;(3)把桨毂和导管看出一部分来考虑;(4)在用面元法来求解导管时采用了库塔条件。

1990年 Kinnas S. A. 等^[54]提出了一种解非均匀流中导管螺旋桨的一种时域方法,严格控制桨叶随边在每个时间步长都符合等压库塔条件。该方法采用非定常升力面法来求解螺旋桨,采用基于势流理论的面元法来求解导管。将螺旋桨假设为时域范围内的涡格,并考虑导管对螺旋桨的影响。这种方法在计算非定常导管螺旋桨性能方面非常有效,尤其是在分析已知几何形状的导管螺旋桨的不同进流情况下。

在国内,也有很多学者致力于导管螺旋桨的研究。1986年,冯金章^[62]提出理论方法以计算任意形状导管中推进器的非定常性能,用偶极子、源汇的奇点来代表物面。用迭代法来求相互作用。为了简化定常分析,看为一个转动导管模型,用时间和空泡迭代来处理较普遍的非定常相互作用流场。沈国鉴^[122]根据轴向圆筒内对称叶剖面螺旋桨系列的模型试验结果,求得与SSPS-626螺旋桨系列相组合的侧推力装置的特性,给出以槽管直径和叶轮转速为参数的螺旋桨功率与侧推力器能发出的侧向力之间的关系曲线,该曲线可供功率从几十到几千千瓦,直径0.25~2.25米范围的船舶侧推力装置的参考。

1997年,杨晨俊、王国强^[123]发表了导管螺旋桨定常性能理论计算一文。文章中给出了计算在均匀流中导管螺旋桨的定常水动力性能的数值预报方法,即求解螺旋桨时采用升力面方法,求解导管怎采用面元法来计算,通过迭代求解来考虑导管与螺旋桨的相互影响。为了减少计算量,螺旋桨对导管的诱导速度采用周向平均值,从而使导管周围的非定常流动简化为定常轴对称流动。并将该方法应用于对JD简易导管桨系列的计算,将数值模拟的值与试验值进行了对比,得到较为满意的结果。2002年,张建华、王国强^[124]计算了导管调距桨的定常性能,他们引入了一种修正的尾涡模型来代替螺旋桨尾涡的扭曲和脱落。同年,他们又对导管螺旋桨的非定常性能进行了计算^[125]。同样使用非定常升力面方法来计算螺旋桨,使用非定常面元法来求解导管;采用修正的螺旋桨尾涡模型来模拟导管螺旋桨尾涡的扭曲和脱落。简化处理后的泄出涡能够大幅度减少计算时间,使用该方法计算导管螺旋桨的非定常性能。

使用升力面理论来求解螺旋桨,由于升力面方法不能满足真实的物面边界条件,因此对螺旋桨叶面压力分布预报不够精确。2006年,王国强、刘小龙^[126]给出了基于速度势的非定常面元法来计算导管螺旋桨的定常和非定常性能的方法。导管和螺旋桨均使用非定常面元来进行求解,满足真实的物面边界条件,能够给出较为满意的水动力性能预报结果。2009年,解学参^[127]采用面元法计算了导管桨中螺旋桨和导管的诱导速度,计算了导管桨内部的流场情况,并详细分析了导管是如何影响螺旋桨流场的。

1.9 吊舱推进

随着永磁电机技术的日趋成熟,使推进电动机安装在水下箱体内直接驱动螺旋桨成为可能,这改变了传统的“柴油机+开放式传动机构+螺旋桨”的推进方式,采用推进电机直接或间接驱动螺旋桨,实现了能量的非机械传递方式。和常规推进器相比,吊舱推进器有很多优点。

在性能研究方面,现有文献^[130]基于已有的螺旋桨升力面理论计算方法和无升力体面元法,建立了 POD 推进器定常水动力性能的势流理论计算方法,对拖式、推式及双桨式 POD 推进器分别进行了计算和试验比较,并分析了吊舱在桨盘面处的诱导速度分布和螺旋桨载荷分布等^[131]。与试验结果的比较表明,该方法可以较好地预报拖式及推式 POD 推进器的定常水动力性能。进而,又对 POD 推进器的尾涡模型进行了研究,进一步提高了定常水动力性能的计算精度。Chicherin 等应用 RANS 求解器对吊舱和支架阻力预报的尺度效应进行了研究^[132]。Ohashi 和 Hino 应用 Navier - Stokes 求解器 SURF 和非结构网格技术预报了对转式 POD 推进船舶的水动力性能^[133]。Achkinadze 等以改进的基于速度的面元法^[134]为基础,建立了 POD 推进器的水动力性能计算方法,并对拖式与推式 POD 推进器的水动力性能进行了数值计算。该文用 CFD 软件数值模拟了船体的尾流场并取出了 3 个剖面上所需点的轴向、径向、切向的流场速度。将船尾伴流的 CFD 计算方法和吊舱推进器水动力性能的 SPM 方法相结合,分析船尾伴流对吊舱推进器水动力性能的影响。

吊舱式推进器是近年发展起来的一种新型的船舶推进系统,是目前船舶推进系统研究开发领域引人瞩目的焦点。吊舱推进器主要由支架、吊舱和螺旋桨等部件构成。吊舱通过支架悬挂在船体下面,舱体内置电机直接驱动舱体前端和(或)后端的螺旋桨。其设计思想的革命性在于,它把螺旋桨驱动电机置于一个能 360°回转的吊舱内,悬挂在船下,集推进装置和操舵装置于一体,省去了通常所使用的推进器轴系和舵^[135]。吊舱推进器可以节省船体内大量的空间,从而极大地增加了船舶设计、建造和使用的灵活性,因而具有广阔的市场应用前景和极高的军事应用价值^[136,137]。随着对吊舱推进器研究的不断深入,人们逐渐用加装附体的方法来改善吊舱推进器的水动力性能。常见的是在吊舱舱体或支架上安装鳍形装置。据相关资料分析,吊舱推进器的中鳍可以改善螺旋桨的来流,提高螺旋桨的效率,而尾鳍可以消除侧向力并回收螺旋桨的能量^[138,139]。文中用面元法研究附鳍吊舱所产生的绕流场,以此为基础预报吊舱推进器的定常水动力性能,并进一步分析了鳍对螺旋桨性能的影响。

吊舱推进器将电动机放置在船体尾部下面的吊舱中,电动机和螺旋桨直接相连,主机和电动机只需用电缆相连。吊舱推进装置具有体积小、质量小、附加阻力小、效率高和空泡性能更佳的优点,装备吊舱推进装置的舰船能获得更高的空泡起始航速,能改善振动及噪声性,从而提高舰船的总体性能,有利于舰船更好地发挥其作战性能^[135,137,140]。

随着对吊舱推进器研究的不断深入,人们发现舱体和支架的阻力是一个不能忽略的因素,该阻力使吊舱推进器的推力、效率等低于敞水螺旋桨,为此常用加装附体的方法来改善吊舱推进器的水动力性能,常见的是在吊舱舱体或支架上安装鳍形装置^[138,139]。

文中用面元法研究附鳍吊舱所产生的绕流场,并以此为基础预报吊舱推进器的水动力性能,进一步分析了鳍对螺旋桨性能的影响。

目前世界上吊舱式电力推进器系统^[141]主要有 Azipod^[142], SSP, Mermaid 和 Dolphin4 种,各具特色。在性能研究方面,国外正式发表的文献不多^[143,144], HSVA 及 MARIN 开展了水动力性能的研究,HSVA 还进行了试验研究,包括伴流测量、空泡观察、噪声测试等;在该领域的研究,国内尚处于起步阶段,海军装备研究院、哈尔滨工程大学、上海交通大学等单位进行了吊舱推进器的水动力性能试验并对其水动力性能进行了理论方法研究^[132,133]。

本章节基于单桨拖式吊舱推进器进行了水动力性能的研究。考虑吊舱对螺旋桨水动力性能的影响并对尾涡模型做了相应改进。