

船舶螺旋桨理论

CHUANBO LUOXUANJIANG LILUN

● 苏玉民 黄胜 编著



哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

船舶螺旋桨理论/苏玉民,黄胜编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2003

ISBN 7-81073-514-4

I. 船… II. ①苏…②黄… III. 船用螺旋桨-理论 IV. U664.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 068290 号

内 容 简 介

本书主要介绍船舶螺旋桨理论研究和数值计算方法。全书共分五章,第一章介绍船舶螺旋桨的基础理论和船舶螺旋桨理论的发展;第二章介绍机翼理论,它是螺旋桨理论的预备知识;第三、四、五章分别为船舶螺旋桨的升力线理论、升力面理论和面元法,这三章分别以不同的理论为基础,解船舶螺旋桨的性能预报和设计问题。

本书可作为船舶与海洋工程专业的研究生教材或本科生的选修课参考教材,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。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话:(0451)82519328 邮编:150001
新华书店经销
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 12.25 字数 304 千字

2003年10月第1版 2003年10月第1次印刷

印数:1—1 000册

定价:18.00元

前 言

现代舰船对船舶推进装置的要求不断提高,不仅要求其有较高的效率,而且要求其振动更小、噪声更低。目前船舶螺旋桨推进器的数量仍占船舶推进装置的绝大多数,所以研究船舶螺旋桨的性能,设计性能优良与船体和主机配合良好的螺旋桨,对提高现代舰船的综合性能有非常重要的意义。由于螺旋桨的几何形状及工作原理等方面的特点,多年来已经形成了一些独特的研究方法及理论,如螺旋桨的动量理论、叶元体理论、升力线理论、升力面理论等。近 20 多年来,随着科学技术的不断进步和计算机的广泛应用,在船舶螺旋桨理论研究方面也取得了长足的进展,不但原有的理论、方法得到了发展和完善,还出现了新的更加有效的理论研究方法,即面元法。本书在系统地介绍传统的船舶螺旋桨理论的基础上,将近年来船舶螺旋桨研究领域的新进展介绍给读者。

全书共分五章,第一章介绍船舶螺旋桨理论的发展及动量理论、叶元体理论等螺旋桨基础理论;第二章介绍机翼理论,它是螺旋桨理论的基础,许多螺旋桨理论中的概念和方法是由机翼理论发展而来的;第三章介绍船舶螺旋桨升力线理论,包括利用升力线理论预报船舶螺旋桨的水动力性能和设计船舶螺旋桨的方法;第四章为船舶螺旋桨升力面理论,主要介绍解船舶螺旋桨的定常和非定常性能预报与设计问题的升力面方法;第五章为面元法在船舶螺旋桨研究中的应用,包括面元法的基本原理、船舶螺旋桨的定常和非定常水动力性能的计算分析、船舶螺旋桨尾流场的分析、面元法在船舶螺旋桨理论设计中的应用等。

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课程的参考教材,还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。

由于作者水平有限,书中定有不当之处,敬请批评指正。

编著者

2003 年 5 月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 船舶螺旋桨理论的研究内容	1
第二节 船舶螺旋桨理论的发展	2
第三节 船舶螺旋桨动量理论	4
第四节 船舶螺旋桨叶元体理论	6
第二章 机翼理论	9
第一节 二维翼型及翼型系列	9
第二节 机翼的流体动力特性	13
第三节 解二维机翼的保角变换法	18
第四节 薄翼理论	23
第五节 翼型的空泡特性	28
第六节 三维机翼的旋涡理论	31
第七节 用面元法解三维机翼的绕流问题	35
第八节 机翼的理论设计	37
第九节 非定常机翼的涡系	44
第三章 船舶螺旋桨升力线理论	45
第一节 螺旋桨的旋涡模型	45
第二节 螺旋桨涡系的诱导速度及诱导因子	48
第三节 螺旋桨推力和转矩的计算	59
第四节 用升力线理论求解螺旋桨的水动力性能	62
第五节 最佳环量分布问题	68
第六节 用诱导因子法求解最佳环量分布	72
第七节 利用变分法求解最佳环量分布	75
第八节 任意给定环量分布形式的螺旋桨设计	80
第九节 螺旋桨桨叶剖面的选择	82
第十节 桨毂的影响	87
第四章 船舶螺旋桨升力面理论	90
第一节 概 述	90
第二节 螺旋桨几何形状的数学表达	90
第三节 螺旋桨边界条件的简化	94
第四节 源汇及涡分布的诱导速度	101
第五节 用升力面理论求解螺旋桨的水动力性能	110
第六节 用升力面理论求解设计问题	124
第七节 连续涡分布的升力面理论设计方法	126
第八节 离散化涡分布的升力面理论设计方法	130

第九节	用偶极子分布解螺旋桨升力面的水动力计算问题·····	136
第十节	解螺旋桨升力面问题的加速度势方法·····	141
第十一节	非定常螺旋桨升力面的涡模型·····	144
第十二节	用涡分布法解非定常螺旋桨升力面问题·····	146
第五章	面元法在船舶螺旋桨研究中的应用·····	152
第一节	面元法概述·····	152
第二节	格林公式·····	153
第三节	解无升力体绕流的汉斯 - 史密斯(Hess - Smith)方法·····	155
第四节	解有升力问题的面元法·····	157
第五节	螺旋桨水动力性能的数值分析·····	159
第六节	数值计算中的几个问题·····	163
第七节	应用面元法计算螺旋桨的尾流场·····	168
第八节	应用面元法计算分析螺旋桨非定常水动力性能·····	170
第九节	面元法在螺旋桨理论设计中的应用·····	177
第十节	其他种类的面元法简介·····	179
参考文献	·····	187

第一章 绪 论

第一节 船舶螺旋桨理论的研究内容

船舶螺旋桨是现代船舶应用最为广泛的推进器,除单独工作的普通螺旋桨外,还有一些以螺旋桨为主体的组合式船舶推进器,如导管螺旋桨、对转螺旋桨、串列螺旋桨等,它们占据了现代船用推进器的绝大多数。它们就是船舶螺旋桨理论的主要研究对象。

研究船舶螺旋桨的目的是要解决下述两类问题:

1. 根据给定的螺旋桨的几何形状和运转条件,预报螺旋桨的水动力系数、桨叶面上的压力分布及桨周围的诱导速度场等,即所谓螺旋桨性能预报问题或正问题。
2. 根据给定的螺旋桨的运转条件,以及对螺旋桨的水动力性能的设计要求,设计出符合设计条件的效率最佳的螺旋桨的几何形状,即所谓螺旋桨设计问题或逆问题。

从研究方法来看,对船舶螺旋桨的研究可分为两个方面,即实验研究与理论研究。实验研究通过螺旋桨的模型试验对螺旋桨的性能进行研究,为螺旋桨设计提供参考,并为理论研究提供实验验证。如通过螺旋桨的敞水试验研究其水动力性能;通过螺旋桨的自航试验及其与敞水试验的比较研究螺旋桨与船体间的相互干扰;通过螺旋桨的空泡试验研究其空泡性能、脉动压力、辐射噪声等。另一方面,利用大量的螺旋桨系列模型试验结果,绘制成螺旋桨设计图谱,形成以模型试验结果为基础的螺旋桨设计方法。这样螺旋桨的性能预报问题 and 设计问题都通过实验研究得到了解决。

理论研究是用流体力学的理论方法来解决螺旋桨的性能预报问题和设计问题。与一般的机翼相比,螺旋桨的叶片的展弦比很小,平面形状不规则,并且是扭曲的,螺旋桨边旋转边前进,桨叶之间相互影响,桨叶与桨毂之间、螺旋桨与船体、螺旋桨与舵间也存在干扰,可见螺旋桨的几何形状及运转条件非常复杂,运用流体力学的理论方法解螺旋桨问题具有相当的难度,求解中必须针对螺旋桨的特点,对某些问题进行特殊处理。随着对螺旋桨的理论研究的不断发展和深入,先后出现了一些专用于船舶螺旋桨的研究方法和理论,如螺旋桨动量理论、螺旋桨叶元体理论、升力线理论、升力面理论、面元法等,由这些理论方法可以解决螺旋桨的性能预报问题和设计问题,但它们的计算和设计结果的精度及应用范围各不相同,正是由这些理论方法组成了船舶螺旋桨理论。

螺旋桨在水中工作时,在其周围引起扰动速度,习惯地称其为螺旋桨的诱导速度。在螺旋桨理论中,根据螺旋桨的诱导速度的大小,有不同的处理方法,一种是完全不计诱导速度,这显然只适用于诱导速度很小的螺旋桨,即所谓轻载荷螺旋桨;另一种是考虑了轴向和周向诱导速度的影响,但忽略了径向诱导速度对尾涡面的影响,将尾涡线看成是半径不变的螺旋涡线,它适用于诱导速度不可忽略的所谓中载荷螺旋桨,采用这种处理方法的理论曾得到广泛应用,被称为中载荷螺旋桨理论;还有一种处理方法,就是考虑到诱导速度的各种影响,对于诱导速度很大的所谓重载荷螺旋桨,如应用中载荷螺旋桨理论将会引起较大误差时,就必须采用这种方法。但这样处理将使问题极其复杂,通常需要引入某些局部的近似处理,使问

题得到简化。

第二节 船舶螺旋桨理论的发展

由螺旋面的旋转获得轴向推力的原理很早以前就被发现了,我国古代的人们发明了“竹蜻蜓”,后传入欧洲。东晋时期(317—420)的《抱朴子》中,就有人们设想用这种竹蜻蜓的原理做成飞车的有关记载。

1483年意大利杰出的艺术家、科学家达·芬奇提出了直升旋翼的设想(图1-1),并绘制了草图。

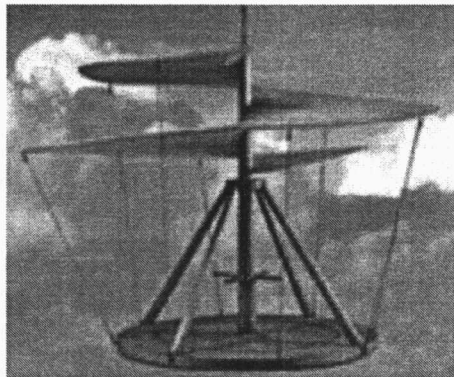


图1-1 达·芬奇的设想

早期人们只是试图将这一原理应用于飞行器,即直升飞机。渐渐地人们也开始试图将其应用于船舶的推进,特别是蒸汽机发明之后,发明家们为蒸汽动力船舶设计了各种推进器,并纷纷进行实船试验,1752年俄国彼得堡科学院院士伯努利(Bernoulli)设计的双螺纹蜗杆形螺旋推进器就是具有代表性的设计之一,然而限于当时的工业水平和蒸汽机性能,推进效果并不理想,螺旋推进器还不能取代明轮。1836年,“史密斯”号船用木制单螺纹蜗杆形螺旋推进器,以8节的航速航行了400海里。该船在试航中,推进器由于碰撞而损伤,而航速却出人意料地增加了。这次试航对螺旋桨推进器的形成起到了极大的推进作用。此后,螺旋推进器的形状不断改善,桨叶螺旋面逐渐缩短,桨叶形状日趋完善,逐渐形成了结构简单、高效率的螺旋桨推进器,并在19世纪中叶以后得到广泛的应用。

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历了100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。这两种理论在19世纪下半叶到20世纪初分别发展,互无联系,虽然都能自圆其说,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。

随着研究飞机机翼的气体动力学的发展,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(Joukovski)^[3]在弗莱姆(Flamm)的实验^[4]和普朗特

(Prandtl) 的模型^{[5],[6]} 的基础上,开始创立无限叶数环流理论。1919年,贝茨(Betz)^[7] 发表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。

前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的工作。

1929年,哥尔斯坦(Goldstein)^[8] 提出了著名的哥尔斯坦因子,并求解了贝茨的最佳环量分布,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)^[9]、冯·曼能(Van Manen)^[10]、埃克哈特-摩根(Eckhardt - Morgen)^[11] 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)^[12] 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)^[13] 1952年发表的有关诱导因子法的工作,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,60年代这种方法得到了广泛的应用,取代了哥尔斯坦因子法。

由于升力线理论由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(Ginzler - Ludwig)^[14] 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)^[15] 对琴采尔的方法做了改进;同年,卞保琦^[16] 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)^[17] 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^{[18]-[20]} 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)^[21] 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)^[22] 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)^[23] 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^{[24],[25]} 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。

山崎隆介(Yamazaki)^[26] 1962年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)^[27]、中岛康吉(Nakashima)^[28]、汉德森(Handerson)^[29] 等也在螺旋桨升力面理论方面做出了有意义的工作。

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,不能胜任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)^[30] 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^[31] (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。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^{[32], [33]} 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)^[34] 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)^[35]、星野辙二 (Hoshino)^{[36]-[38]} 等都完成了非常有价值的研究工作。

第三节 船舶螺旋桨动量理论

螺旋桨动量理论是将动量定理的基本原理应用于螺旋桨, 研究其作用力与水流的关系, 由水流速度的改变, 求得桨的水动力性能。根据应用动量定理时的螺旋桨简化模型, 分为理想推进器理论和理想螺旋桨理论。

一、理想推进器理论

理想推进器理论不考虑螺旋桨引起的水流的旋转运动, 将螺旋桨看做是只向后推水, 以获得推力的推进器, 并假设^[39]:

1. 水为不可压缩的理想流体;
2. 推进器为轴向尺度为零的作用盘, 水可自由通过, 并可吸收外来功率推水向后;
3. 在盘面上水流速度和压力均匀分布。

考虑在均匀来流 V_A 中的螺旋桨, 其理想推进器模型的工作原理如图 1-2 所示。AA₁ - BB₁ - CC₁ 为过盘面的流管, 螺旋桨在盘面处和远后方引起的速度变化分别为 u_{a1} , u_a , 称为螺旋桨的诱导速度。根据动量定理, 作用在流体上的力, 即作用盘的推力等于单位时间内流体动量的增量。单位时间流经盘面的流体质量为 $m = \rho A_0 (V_A + u_{a1})$, 故有

$$T_i = \rho A_0 (V_A + u_{a1}) u_a = m u_a \quad (1-1)$$

其中 A_0 为盘面积。在盘面前、盘面和盘面后分别应用伯努利方程有

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_A^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho (V_A + u_{a1})^2 \quad (1-2)$$

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho (V_A + u_a)^2 = p'_1 + \frac{1}{2} \rho (V_A + u_{a1})^2 \quad (1-3)$$

p_0, p_1, p'_1 分别为桨盘远前方、尽前方、尽后方的压力, 理想推进器推力 T_i 即为盘面前后的压力差

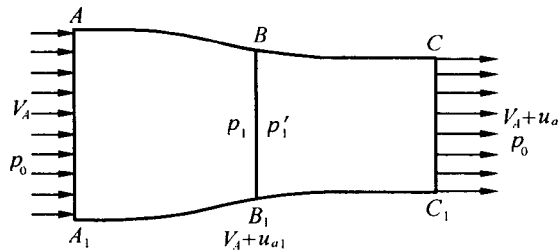


图 1-2 作用盘与流管

$$T_i = (p'_1 - p)A_0 = \rho A_0 \left(V_A - \frac{1}{2} u_a \right) u_a \quad (1-4)$$

比较(1-1)式和(1-4)式得

$$u_{a1} = \frac{1}{2} u_a \quad (1-5)$$

可见,理想推进器盘面处的诱导速度为远后方的诱导速度的一半。

推进器的有效功率为 $V_A T_i$, 而推进器消耗的功率使流经盘面的流体的动能增加, 盘面前后动能增量为

$$\frac{1}{2} (V_A + u_a)^2 - \frac{1}{2} m V_A^2 = m u_a \left(V_A + \frac{1}{2} u_a \right) = T_i \left(V_A + \frac{1}{2} u_a \right) \quad (1-6)$$

则理想推进器的效率为

$$\eta_{iA} = \frac{T_i V_A}{T_i \left(V_A + \frac{1}{2} u_a \right)} = \frac{V_A}{V_A + \frac{1}{2} u_a} \quad (1-7)$$

在式(1-4)中解出 u_a , 并代入(1-7)式得

$$\eta_{iA} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \sigma_T}} \quad (1-8)$$

其中 $\sigma_T = \frac{T_i}{\frac{1}{2} \rho A_0 V_A^2}$ 为推进器的负荷系数。由上式可见,理想推进器的效率取决于负荷系数,

负荷系数愈小,效率愈高,而负荷系数又与推进器的推力和盘面积有关。

二、理想螺旋桨理论

理想推进器理论没有考虑螺旋桨的旋转作用,而螺旋桨正是以旋转运动来吸收主机功率的,并在产生轴向诱导速度 u_a 的同时产生周向诱导速度 u_i 。设周向诱导速度是均匀的,这相当于假设螺旋桨有无限多个叶片,若设流体为理想流体,则在桨盘前周向诱导速度为零,在桨盘面紧后方,水流由于桨的作用而获得周向诱导速度,此后因再无外力矩作用于水流,如果不计尾流的收缩变形,该速度将保持到远后方。

现对螺旋桨应用动量矩定理,考虑在速度为 V_A 的均匀来流中以转速 $\omega = 2\pi n$ 转动的螺旋桨,仍假设螺旋桨为零厚度的作用盘,如图 1-3, u_{i1} 和 u_i 分别表示桨盘上和桨盘后的周向诱导速度,单位时间流过盘面上 dr 段圆环的流体质量为

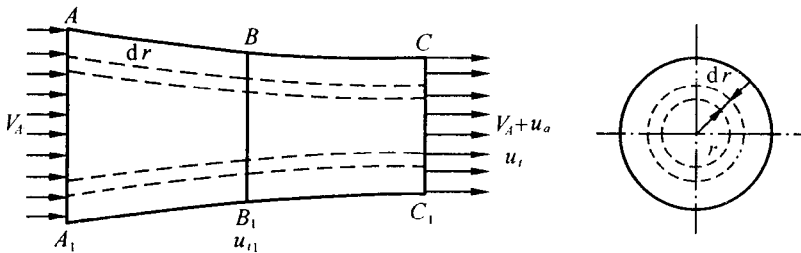


图 1-3 动量矩定理

$$dm = \rho dA_0 \left(V_A + \frac{1}{2} u_a \right) \quad (1-9)$$

它在桨盘面前后的动量矩之差即为桨作用于这些流体的扭矩 dQ

$$dQ = dmru_i - 0 = dmru_i \quad (1-10)$$

以 dF_i 表示螺旋桨单位时间作用于 dm 的切向力, 则有

$$dF_i = dQ/r = dm u_i \quad (1-11)$$

由能量守恒定理知, dm 的旋转能量的改变等于切向力单位时间所做的功, 即

$$dF_i u_{i1} = \frac{1}{2} dm u_i^2 \quad (1-12)$$

由此得

$$u_{i1} = \frac{1}{2} u_i \quad (1-13)$$

可见盘面上的周向诱导速度等于盘面后任意位置的周向诱导速度的一半。

$d\omega r$ 圆环面积吸收的功率 $\omega r dF_i$ 完全消耗于水中, 使 dm 的动能增加, 因此

$$\omega r dF_i = dm u_a \left(V_A + \frac{1}{2} u_a \right) + \frac{1}{2} dm u_i^2 \quad (1-14)$$

将(1-11)式代入(1-14)式得

$$\frac{u_a}{u_i} = \frac{\omega r - \frac{u_i}{2}}{V_A + \frac{u_a}{2}} \quad (1-15)$$

这是一个重要结论, 其物理意义为远后方的诱导速度的合速度与盘面处的合速度正交。

螺旋桨 $d\omega r$ 圆环面积所作的有用功为 $dT_i V_A$, 这样该圆环的理想效率为

$$\eta_i = \frac{dT_i V_A}{dF_i \omega r} = \frac{dm u_a V_A}{dm u_i \omega r} = \frac{u_a V_A}{u_i \omega r} \quad (1-16)$$

将(1-15)式代入(1-16)式得

$$\eta_i = \frac{V_A}{V_A + \frac{u_a}{2}} \cdot \frac{\omega r - \frac{u_i}{2}}{\omega r} = \eta_{iA} \eta_{i\tau} \quad (1-17)$$

式中, η_{iA} 即为理想推进器效率, 也称为理想螺旋桨的轴向诱导效率; $\eta_{i\tau}$ 称为理想螺旋桨的周向诱导效率

$$\eta_{i\tau} = \frac{\omega r - \frac{u_i}{2}}{\omega r} \quad (1-18)$$

上述效率是螺旋桨 r 处圆环的效率, 当各个半径处的上述效率相等时, 它才是整个理想螺旋桨的效率。

第四节 船舶螺旋桨叶元体理论

叶元体理论是将螺旋桨叶沿径向分割成多个称为叶元体的小段, 在做了一系列假设的

前题下,利用机翼理论的有关知识分析叶元体的受力,以及螺旋桨的水动力性能。

一、叶元体的速度多角形

如图 1-4,在螺旋桨叶片 r 处取一叶元体,厚度为 dr ,设螺旋桨的进速和旋转角速度分别为 V_A 和 $\omega = 2\pi n$,桨后的轴向诱导速度和周向诱导速度为 u_a 、 u_i ,则叶元体的进流速度如图 1-5 的速度多角形所示, V_R 为螺旋桨的进流速度、旋转速度、轴向及周向诱导速度的合速度; β 为进角、 β_i 为水动力螺距角、 θ 为螺旋桨的螺距角、 α_k 为叶元体的攻角。

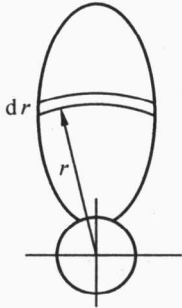


图 1-4 叶元体

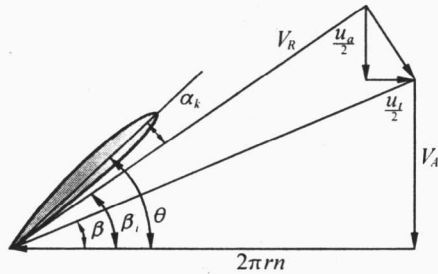


图 1-5 速度多角形

二、螺旋桨的水动力性能

将叶元体看做是一段二维机翼,则叶元体的受力为二维机翼的升力 dL 和阻力 dD ,如图 1-6 所示。叶元体所产生的推力和切向力为

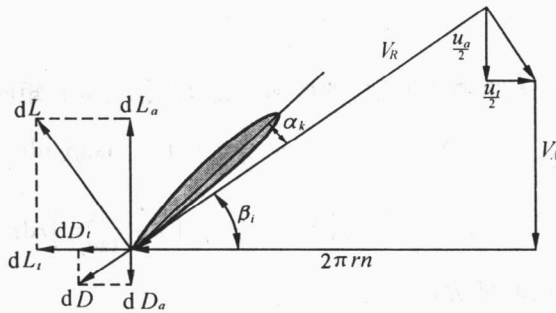


图 1-6 叶元体的受力

$$\begin{cases} dT = dL_a - dD_a = dL \cos \beta_i - dD \sin \beta_i \\ dF = dL_t + dD_r = dL \sin \beta_i + dD \cos \beta_i \end{cases} \quad (1-19)$$

根据儒科夫斯基定理,叶元体上的升力与进速及环量有以下关系

$$dL = \rho V_R \Gamma(r) dr \quad (1-20)$$

将(1-20)式及用阻升比表示的阻力 $dD = \epsilon dL$ 代入(1-19)式得

$$\begin{cases} dT = \rho\Gamma(r) V_R \cos\beta_i (1 - \varepsilon \tan\beta_i) dr \\ dF = \rho\Gamma(r) V_R \sin\beta_i \left(1 + \frac{\varepsilon}{\tan\beta_i}\right) dr \end{cases} \quad (1-21)$$

由图 1-6 可见

$$\begin{cases} V_R \cos\beta_i = \omega r - \frac{1}{2} u_t \\ V_R \sin\beta_i = V_A + \frac{1}{2} u_a \end{cases} \quad (1-22)$$

将(1-22)式代入(1-21)式,并考虑到叶元体扭矩 $dQ = rdF$ 得

$$\begin{cases} dT = \rho\Gamma(r) \left(\omega r - \frac{1}{2} u_t\right) (1 - \varepsilon \tan\beta_i) dr \\ dQ = \rho\Gamma(r) \left(V_A + \frac{1}{2} u_a\right) \left(1 + \frac{\varepsilon}{\tan\beta_i}\right) r dr \end{cases} \quad (1-23)$$

这样,叶元体的效率为

$$\eta_{0r} = \frac{V_A dT}{\omega dQ} = \frac{V_A}{V_A + \frac{1}{2} u_a} \cdot \frac{\omega r - \frac{1}{2} u_t}{\omega r} \cdot \frac{1 - \varepsilon \tan\beta_i}{1 + \frac{\varepsilon}{\tan\beta_i}} = \eta_{iA} \cdot \eta_{iT} \cdot \eta_e \quad (1-24)$$

显然,叶元体的效率包含轴向诱导效率 η_{iA} 和周向诱导效率 η_{iT} ,另一项为叶元体的结构效率 η_e

$$\eta_e = \frac{1 - \varepsilon \tan\beta_i}{1 + \frac{\varepsilon}{\tan\beta_i}} \quad (1-25)$$

由叶元体的速度多角形,可以找到进角 β 及水动力螺距角 β_i 与速度的关系,叶元体的效率又可表示为

$$\eta_{0r} = \frac{\tan\beta}{\tan\beta_i} \cdot \eta_e \quad (1-26)$$

将(1-23)式沿径向积分,并乘以叶数,则得到螺旋桨的推力和转矩的表达式为

$$\begin{cases} T = \rho Z \int_{R_h}^R \Gamma(r) \left(\omega r - \frac{1}{2} u_t\right) (1 - \varepsilon \tan\beta_i) dr \\ Q = \rho Z \int_{R_h}^R \Gamma(r) \left(V_A + \frac{1}{2} u_a\right) \left(1 + \frac{\varepsilon}{\tan\beta_i}\right) r dr \end{cases} \quad (1-27)$$

根据螺旋桨的工作原理,其推进效率为

$$\eta_0 = \frac{TV_A}{2\pi nQ} \quad (1-28)$$

叶元体理论解明了螺旋桨的推力和转矩的生成原理,将水动力性能与螺旋桨的几何特征和运转条件联系起来,显然比动量定理更加合理。

第二章 机翼理论

螺旋桨的桨叶剖面一般都是机翼型,虽然螺旋桨叶的结构及运动方式有所不同,但是它们产生流体动力的机理是相同的,基本原理和数学力学模型都有共同之处,广义地可以将螺旋桨叶看做是扭曲的螺旋运动的三维机翼。事实上,研究螺旋桨的许多理论和方法是从研究机翼的基础理论和方法发展而来的。另外,在用升力线理论或升力面理论设计螺旋桨时,也要利用由机翼理论及实验研究提供的性能优良的系列翼型。下面简要介绍机翼的有关知识和机翼理论。

第一节 二维翼型及翼型系列

一、翼型参数

普通的机翼形状如图 2-1 所示,取图中的 xoy 直角坐标系。为了准确地描述翼型的几何特征,首先定义^[40]:

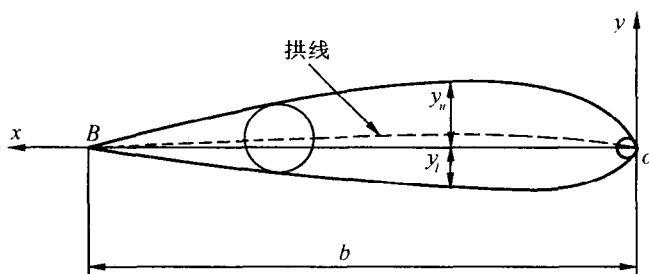


图 2-1 二维翼型

1. 拱线(中弧线、平均线) 翼剖面内切圆圆心之连线(有时也近似地取为翼剖面上下表面间垂向线段中点的连线);

2. 前缘点 拱线的前端点 o ;

3. 后缘点 拱线的后端点 B ;

4. 翼弦 连接前后缘点的线段 oB 。

表征翼型的几何参数有(图 2-2):

1. 弦长 b 翼弦的长度;

2. 拱度 f 或 y_f 拱线偏离弦线的距离,偏离的最大距离为最大拱度 f_m ;

3. 厚度 t 与翼剖面某点对应的内切圆之直径称为在这一点上的翼厚,有时近似地取过该点的垂线在上下表面间的长。翼剖面内切圆直径中最大值称为翼型厚度 t_m ,半厚度为 y_i ;

4. 最大厚度位置 x_t 最大内切圆圆心的横坐标;
5. 最大拱度位置 x_f 拱线偏离弦线的最大位置处的横坐标;
6. 前缘半径 r_t 翼剖面前缘内切圆之半径;
7. 后缘角 2τ 翼剖面后缘上、下周线间的夹角。

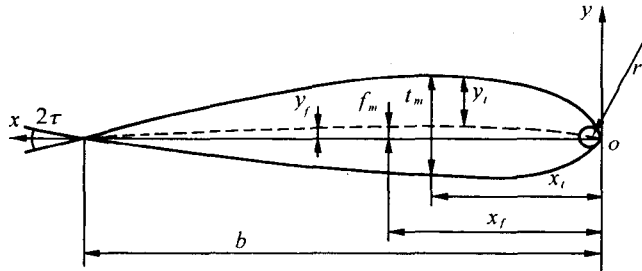


图 2-2 翼型参数定义

在科学研究和工程实践中,还经常以弦长 b 为特征长度进行无因次化,应用无因次坐标 $\bar{x} = x/b$ 及以下无因次参数:

相对厚度(厚度比)	$\bar{t} = \frac{t}{b}$
相对拱度(拱度比)	$\bar{f} = \frac{f}{b}$
相对厚度位置	$\bar{x}_t = \frac{x_t}{b}$
相对拱度位置	$\bar{x}_f = \frac{x_f}{b}$
相对前缘半径	$\bar{r}_t = \frac{r_t}{b}$

二、翼型系列

从 1884 年 Phillips 用实验证明具有拱度的翼型比平板翼有利以来,翼型的发展经历了 100 多年的历史。到 1910 年儒可夫斯基创立翼型理论之前,还主要依赖实验研究,后来在理论指导下,结合实验开发出了多种优良的翼型系列,其中较著名的有:

Göttingen 大学 1919 年开发的 Göttingen387 型

美国 1922 年开发的 Clark - Y 型

Munk1924 年以薄翼理论为基础进行系列实验研制的 M6、M 12 型

Glauert1929 年用同样方法开发的 RAF 型

Kopocmeneb 在前苏联中央流体动力研究所研制的 Эслеро 翼型

美国 NASA 的 Langley 研究中心研制的 GAW 翼型

然而,最成功的例子还是美国国家航空咨询委员会 NACA(National Advisory Committee for Aeronautics) 研制的 NACA 翼型^[41],这种翼型自 1932 年开始发表四字系列,至今已经发展成为各国公认的优秀系列,现在所使用的低速翼型大多是在此系列基础上改进的,螺旋桨理

论设计中常使用的 NACA16 及 NACA66mod 就是其中的两种。

最初的 NACA 四字翼型系列由 108 个翼型构成,其代号表达形式为

$$\begin{array}{ccc} \text{NACA} & & \\ & 4 & 4 & 12 \\ & \bar{f}_m = 4\% & \bar{x}_f = 40\% & \bar{t}_m = 12\% \end{array}$$

其中,第一位数字代表相对拱度 \bar{f}_m 的百分数;第二位数字代表相对拱度位置 \bar{x}_f 的百分数的十分之一;第三、四位数字代表相对厚度 \bar{t}_m 的百分数。系列中 \bar{f}_m 分别取 2%、4%、6%, \bar{x}_f 分别取 20%、30%、40%、50%、60%、70%, \bar{t}_m 分别取 6%、9%、12%、15%、18%、21%, 组合成一个完整的系列,其最大厚度位置 $\bar{x} = 0.3$, 前缘半径 $\bar{r}_i = 1.1019\bar{t}_m^2$, 拱度是由两段抛物线在最大拱度处光滑连接而成,厚度分布取之当时的优秀翼型 Clark - Y 型及 Gottingen387 型。

实验表明,NACA 四字翼型的拱线分布并不理想,因而重新设计拱线,开发了五字系列,拱线仍由两条曲线光滑连接,曲率由前向后渐减,在最大拱度位置稍后处减为零,从该处开始向后为直线型。后来又发展了改进的四、五字系列。五字系列的代号表达形式为

$$\begin{array}{ccc} \text{NACA} & & \\ & 2 & 30 & 12 \\ & C_L = 2 \times 1.5/10 & \bar{x}_f = 30/2\% & \bar{t}_m = 12\% \\ & = 0.30 & = 15\% & \end{array}$$

其中,第一位数的 3/2 是翼型设计升力系数的 10 倍;第二、三位数的一半是相对拱度位置的百分数;第四、五位数是相对厚度的百分数。

普通的 NACA 翼型最大厚度位置 $\bar{x}_t = 0.3$ 过于偏前,若将其后移到 0.4 ~ 0.7 左右,将导致最低压力点后移,从而延长层流段,并降低摩擦阻力,这种翼型被称为层流翼型或低阻翼型。1939 年,杰考伯斯(Jacobs) 等发表了层流翼型的第一系列,其特点是前缘半径小,后缘角较大,它被广泛地应用于空气螺旋桨和中负荷船用螺旋桨,表达形式如下

$$\begin{array}{ccc} \text{NACA} & & \\ & 1 & 6 & - & 2 & 12 \\ & \text{代表一系列} & \text{对称翼型零升力时最} & & \text{设计升力系数为} & \text{相对厚度为} \\ & & \text{小压力点的位置为 0.6} & & C_L = 0.2 & \bar{t}_m = 12\% \end{array}$$

以后出现的二至五系列,在表面光滑的情况下设计升力系数对应的阻力系数较小,但翼表面粗糙时阻力增加较大,因而未被推广应用。

此后发展的六系列是一种较为成功的层流翼型,它的拱线和厚度被分开设计,厚度由西奥道森(Theodorsen) 所提供的方法决定,拱线的形状按图 2-3 所示的载荷分布设计,从前缘到 a 点载荷均匀分布,从 a 点到后缘载荷线性降低到零,其整个翼型系列及表达方式又分如下几种

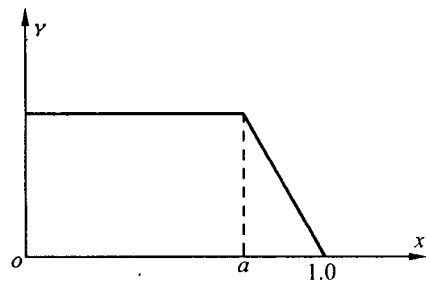


图 2-3 载荷分布

$$\begin{array}{ccc} 1. \text{NACA} & & \\ & 6 & 5 & 2 & 2 & 15 & a = 0.5 \\ & \text{六系列} & \text{对称翼型零攻角时} & \text{有利升力系数的} & \text{设计升力系数} & \text{相对厚度为} & \\ & & \text{最低压力点位置为 0.5} & \text{范围为 } C_L \pm 0.2 & C_L = 0.2 & \bar{t}_m = 15\% \end{array}$$

$$2. \text{NACA } 65_2 - 218 \quad a = 0.5$$

意义与前表达方式相同,只是用下标代替了第三个数字,这是在上述翼型基础上增减厚

度改进而成的。

3. NACA 65₍₃₁₈₎ - 217

这种翼型的厚度是从某翼型按比例换算得来的,下标中的 3 代表有利升力系数的范围,18 是原翼型的厚度,17 为该翼型的实际厚度。

4. NACA 64₁ A₂₁₂

这也是改进的六系列翼型,其上下翼面在 $\bar{x} = 0.8 \sim 1.0$ 范围为直线。

后来还出现了七系列层流翼性,一、六、七系列翼型都得到了比较广泛的应用。

在螺旋桨理论设计中,较常采用的是 NACA16 和 NACA66 对称翼型加 $a = 0.8$ 的拱线。由于 NACA66 的尾缘太薄,强度不够,故在实际应用中将其改为抛物线型,此即为 NACA66 - mod 型,又由于该翼型在导边存在较大的吸力峰,易产生空泡,美国舰船研究发展中心将其导边做了修改,形成了 NSRDC - NACA66 - mod 翼型。表 2 - 1 给出了上述翼型的型值。

表 2 - 1

$\frac{x}{b}$	NACA $a = 0.8$ $\frac{y_l}{f_m}$	NACA16 $\frac{y_l}{t}$	NACA66 - mod $\frac{y_l}{t}$	NSRDC - NACA66 - mod $\frac{y_l}{t}$
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.012 5	0.091	0.107 7	0.115 5	0.104 4
0.025	0.159	0.150 4	0.153 0	0.146 6
0.05	0.271	0.209 1	0.209 5	0.206 6
0.075	0.363	0.252 7	0.254 0	0.252 5
0.10	0.448	0.288 1	0.292 0	0.290 7
0.20	0.680	0.338 7	0.400 2	0.400 0
0.30	0.883	0.451 4	0.463 7	0.463 7
0.40	0.901	0.487 9	0.495 2	0.495 2
0.45	0.988	0.492 1	0.500 0	0.500 0
0.50	1.000	0.500 0	0.496 2	0.496 2
0.60	0.978	0.486 2	0.465 3	0.465 3
0.70	0.889	0.439 1	0.403 5	0.403 5
0.80	0.703	0.349 9	0.311 0	0.311 0
0.90	0.359	0.209 8	0.187 7	0.187 7
0.95	0.171	0.117 9	0.114 3	0.114 3
1.00	0.0	0.010 0	0.033 3	0.033 3

Clark - Y 翼型也是应用较为广泛的标准翼型,Clark - Y 型及改进的 Clark - YM - 15 型、Clark - YM - 18 型的形状尺寸由表 2 - 2 给出。