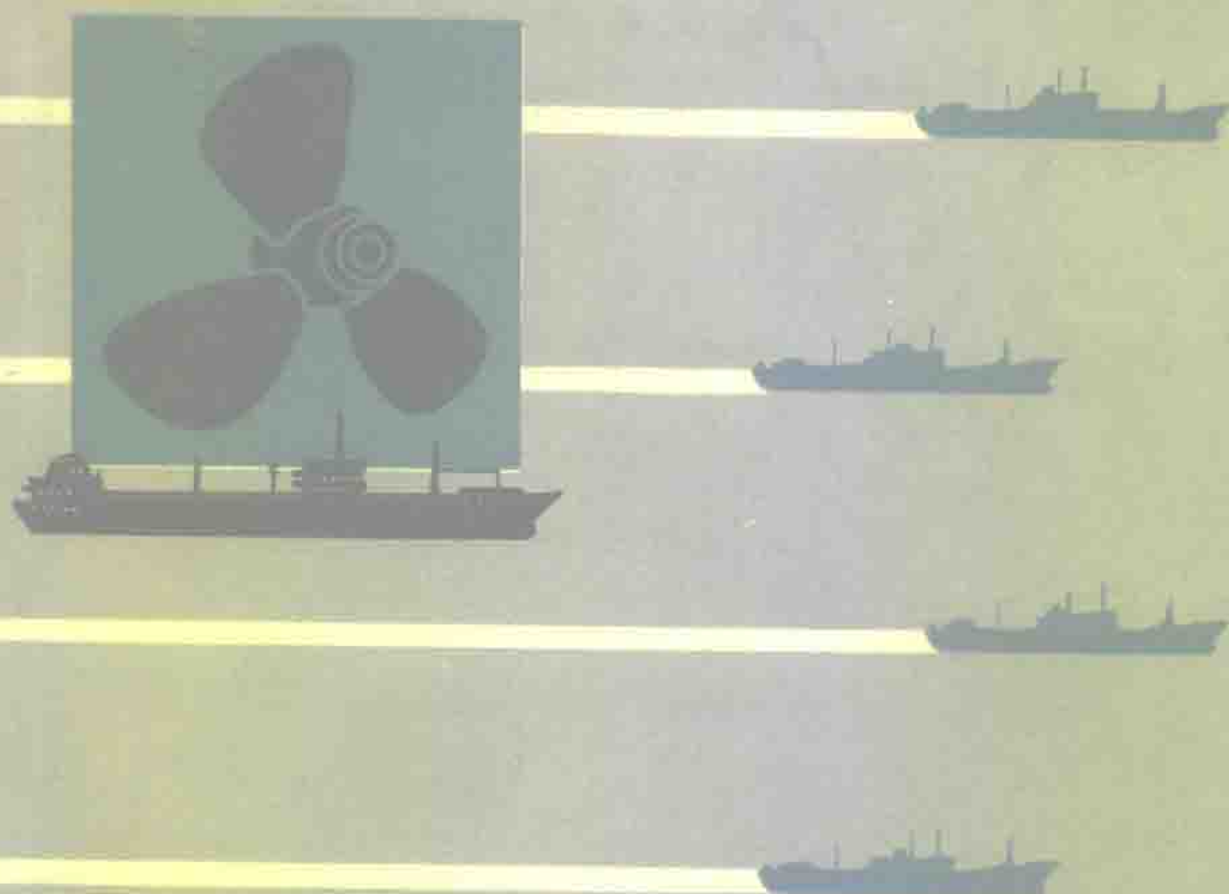




船用螺旋桨设计

广东工学院造船系编写组 编

船用螺旋桨设计

广东工学院造船系编写组 编

人 民 交 通 出 版 社

1976年·北京

内 容 提 要

本书结合中、小船厂的实际需要,叙述按图谱设计船用螺旋桨的基本原理和方法,重点是设计方法。书中介绍了B型、AU型、SSPA型和对称型等设计图谱及其应用,介绍了我国工人创造的关刀型螺旋桨设计特点,还介绍了螺旋桨的简化设计方法。书中对螺旋桨的工作原理着重于概念的分析,不作复杂的数学推导,比较通俗易懂。书中还叙述了螺旋桨的制造工艺和导管螺旋桨设计方法,同时对可调螺距和隧道螺旋桨以及其他推进形式作了简要说明。本书附录中收集了上述各种方法的常用设计图谱共82幅,还简要地介绍了估算船舶有效马力的近似方法。

本书主要供中、小船厂设计人员和有关工人阅读,也可作为水运院校有关专业的教学参考书。

船用螺旋桨设计

广东工学院造船系编写组 编

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第006号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 17.5 字数: 393千

1976年10月 第1版

1976年10月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—9,700册 定价(科三): 1.40元

毛 主 席 语 录

人的正确思想，只能从社会实践中来，只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来。

马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业，干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

前 言

在毛主席无产阶级革命路线的指引下,几年来,我们参加了一些船舶设计训练班的教学工作,同时也参加了一些中、小船舶的设计和建造实践。这使我们了解到,广大造船工人和技术人员特别是地、县和公社所属船厂的同志们,迫切需要一本比较实用的关于船舶螺旋桨的专门书籍,以了解螺旋桨的工作原理和解决常用螺旋桨的设计问题。这本书就是为了适应这种需要而编写的。

本书的主要任务在于阐明按图谱设计船用螺旋桨的基本原理和方法,同时提供必要的资料供设计工作中使用。全书共分五章。第一章叙述螺旋桨的几何形状,以便读者获得感性认识。第二章论述螺旋桨的工作原理,主要讨论螺旋桨在敞水、船后和空泡等不同条件下的工作特性,同时讨论主机马力的传递、螺旋桨强度计算方法和斜流对螺旋桨工作的影响等;着重回答螺旋桨为什么会产生推力,它与螺旋桨的几何特征、运动特性有何关系,以及不同工作条件对螺旋桨特性的影响等问题,从而使感性认识上升为理性认识。

无产阶级认识世界的目的,是为了能动地改造世界。因此,在第三章中详细地讨论了设计螺旋桨时应考虑的一般问题,如螺旋桨的直径、螺距、转速、盘面比和叶形等,并说明螺旋桨设计图谱的形成、各种计算系数的意义和应用图谱的方法,介绍了B型、AU型、SSPA型和对称型等螺旋桨设计图谱的特点及其应用。关刀型螺旋桨是我国工人创造的一种螺旋桨型式,在华南地区中、小船舶中已有比较广泛的应用,书中对其设计特点作了介绍。这一章还把《螺旋桨的简化设计》作为具有相对独立性的一节介绍出来,以便在某些情况下简便地确定螺旋桨诸要素。第三章是本书的重点,围绕着“怎样设计好一个螺旋桨”这个中心问题,通过设计实例,使读者掌握设计螺旋桨的方法,进一步理解螺旋桨的工作原理。

第四章叙述螺旋桨的制造工艺,介绍螺旋桨的材料、造型、铸造和验收等内容,同时说明螺距板的设计和玻璃钢螺旋桨的制造工艺。

第五章略述船用特种推进器,主要说明按图谱设计导管螺旋桨的方法,对其他推进形式如可调螺距和隧道螺旋桨等也作了简要介绍。

要设计好螺旋桨,必须确切地知道船舶的航速与阻力的关系,为此,附录中简要地介绍了船舶有效马力的估算方法。鉴于已出版书籍中的图谱比较零散,使用不便,本书附录中收集了上述各种方法的常用设计图谱共82幅,以满足一般设计工作的需要。

本书的编写大纲曾征求过广州地区部分船厂的意见,初稿完成后曾送请文冲船厂、汕头航运局船厂等单位的工人和技术人员审阅,又征求了上海交通大学、华中工学院等有关高等院校部分教师的意见,所有这些,都给了编写工作以很大帮助,我们谨在此致以深切的谢意。

本书是在我院和系教育革命组以及船体教研组的领导下集体编写的,许多同志参加了绘图和审稿工作,工程画制图教研组协助描绘了部分插图,最后由张佐厚、胡志安统一整理和校订。

由于我们学习马列著作和毛主席著作不够,理论水平较低,经验不足,错误之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

1973年10月

目 录

第一章 螺旋桨的几何形状	1
§1 船舶推进器的作用	1
§2 桨叶的形成和螺旋桨各部分名称	1
§3 桨叶轮廓和切面几何特性	4
第二章 螺旋桨基本工作原理	7
§1 翼型切面的水动力特性	7
§2 螺旋桨在敞水中的水动力特性	10
§3 螺旋桨试验	16
§4 船后螺旋桨水动力特性	22
§5 主机马力及其传递	30
§6 螺旋桨空泡问题	34
§7 螺旋桨的强度计算	42
§8 螺旋桨的斜流、振动、谐鸣和噪音	49
第三章 螺旋桨设计	54
§1 设计螺旋桨时应考虑的一些因素	54
§2 B型螺旋桨设计图谱及其应用	60
§3 AU型螺旋桨设计图谱及其应用	96
§4 SSPA型螺旋桨设计图谱及其应用	106
§5 对称型螺旋桨设计图谱及其应用	112
§6 关刀型螺旋桨设计特点	124
§7 螺旋桨的简化设计	132
第四章 螺旋桨制造工艺	143
§1 螺旋桨材料	143
§2 铸模的造型	146
§3 毛坯的浇铸	153
§4 螺旋桨测量、加工和验收	157
§5 玻璃钢螺旋桨的制造	160
第五章 特种推进器	164
§1 可调螺距螺旋桨	164
§2 导管螺旋桨	167
§3 隧道螺旋桨	179
§4 其他形式推进器	184
附录一 船舶有效马力的估算	190
附录二 各种系数和效率的数值范围	211
附录三 主要符号一览表	211
附录四 螺旋桨设计图谱	215

第一章 螺旋桨的几何形状

为了了解船舶螺旋桨是怎样设计的,首先必须知道船舶螺旋桨是什么样的,它有什么作用,它的各部分名称是什么,几何形状有什么特点。这一章就专门回答这些问题。

§ 1 船舶推进器的作用

在祖国密如蛛网的江河和辽阔的湖海上,来往如梭的大小船舶,满载着广大工农兵和各种货物,为社会主义革命和社会主义建设日夜奔忙。这些船舶,有的用机器带动螺旋桨推动前进,有的则借助风力推帆前进。带动螺旋桨的船用机器称为船舶主机。常用的主机有柴油机、涡轮机和蒸汽机。主机的作用是产生机械力以带动螺旋桨,就象风力推帆一样。推动船舶航行的设备如螺旋桨和帆,称为船舶推进器,而机械力和风力称为能源。没有能源,船舶就没有能量输入,船舶就不能产生前进的能力。如果没有螺旋桨或帆,虽有机械力和风力,船舶也不能前进。可见,能源和推进器是船舶推进的两个重要因素,而推进器的作用就是把能源转变为推船前进的推力。

本书所讨论的主要是螺旋桨,因为它是目前船用推进器中效率比较高、制造比较方便、应用最广的一种,其他推进形式则因其原理大多与螺旋桨相仿,故只作简单介绍。

船用螺旋桨主要用来解决船舶的推进问题。它除了产生推力使船前进或拖带驳船和其他东西一起前进外,还用来使船后退,还可作为辅助的操纵工具协助船舶回转(多桨船)。简言之,船用螺旋桨的主要功用就是使船舶前进和后退,有时也协助船舶回转。

§ 2 桨叶的形成和螺旋桨各部分名称

螺旋桨在船舶上的应用是在船用蒸汽机出现之后,开始于十九世纪三十年代,到十九世纪六十年代,已成为海船的主要推进形式。

最初的螺旋桨就象螺丝钉一样,由螺纹绕轴一、二圈构成。后经运转发现,若取螺纹(或螺旋面)的一段而不是整圈,效率反而提高。经过一百多年的生产实践,才形成今天这个样子(图1-1),现在仍在不断演进中。

螺旋桨通常由桨叶和桨毂两部分组成,见图1-2,常用的有三叶和四叶,个别也有两叶和五叶甚至六叶的。桨叶是产生推力的,从船后向船首看到的一面称为叶面,另一面称为叶背。从螺旋桨后面看,靠前面的一边称为导边,顺车转动时,它领先与水接触,靠后面的一边称为随边。桨叶与桨毂相连的地方称为叶根,远离桨毂的一端称为叶梢。

桨毂是固定桨叶和连接桨轴的锥形体,它不产生推力。为了减小水的阻力,在桨毂后边加一整流罩,与桨毂形成一光顺的流线形体,称为毂帽。

螺旋桨旋转时,叶梢的轨迹形成一个圆,称为梢圆。梢圆的直径称为螺旋桨直径,用 D 表示;直径的一半称为螺旋桨半径,用 R 表示。梢圆的面积称为盘面积,以 A 表示,显然

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2.$$

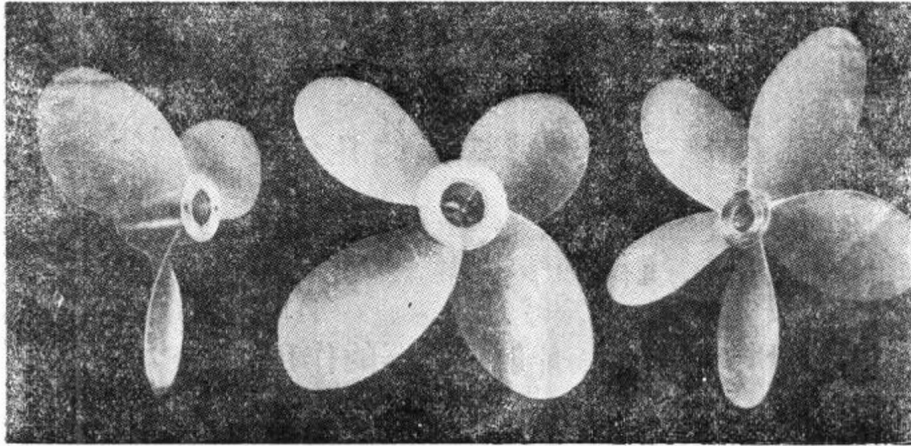


图1-1 螺旋桨外观

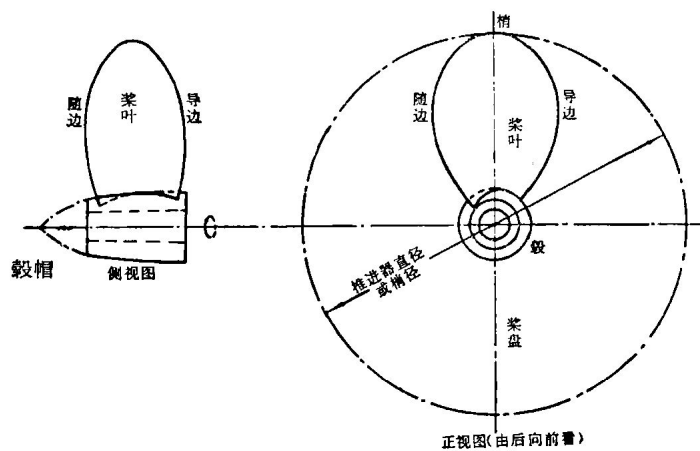


图1-2 螺旋桨各部分名称

从船尾向船首看，螺旋桨在顺车时沿顺时针方向转动的称为右旋，沿逆时针方向转动的称为左旋。对于双桨船，往舷外方向转动的称为外旋，反之称内旋。通常采用外旋，以防止水上浮物被卷入而卡住桨叶。

我们都拧过螺丝钉，只要按顺时针转动，螺丝钉就沿着螺丝孔前进。为什么螺钉能沿螺孔前进呢？原来螺纹是由沿螺钉中心轴倾斜的螺旋面构成的，没有螺旋面，转动时螺钉就不能前进。螺旋桨也一样，桨叶是螺旋面的一部分，它在水中转动，就象螺钉在螺孔中转动一样。水相当于螺母，不过它会滑动，更加复杂。那么，螺旋面是怎样形成的呢？在图1-3中，

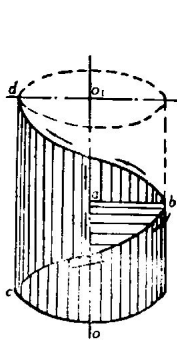


图1-3 螺旋面的形式

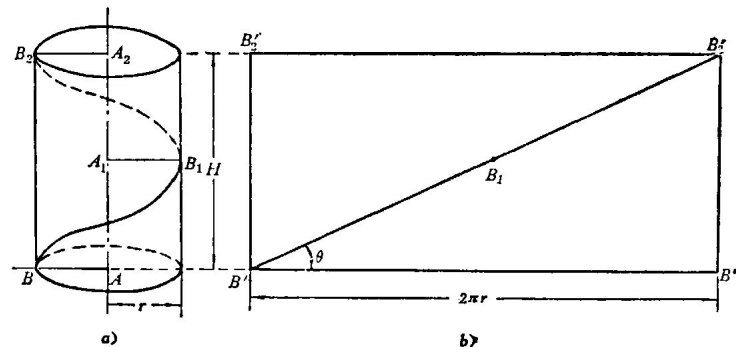


图1-4 螺旋线展开

直线 ab 与固定轴 oo_1 成一定角度。若使直线 ab 以等速度绕轴线 oo_1 旋转，同时以等速度沿 oo_1 向上移动，则直线 ab 在空间走过的轨迹所形成的曲面就是一个螺旋面。线段 ab 称为母线，母线绕行一周所上升的距离称为螺距，常以 H 表示。

母线上任一点运动的轨迹为一螺旋线。若顺轴线方向去看，螺旋线为一圆弧。若从垂直于轴线方向去看，螺旋线为一正弦曲线。同一螺旋线上的任何一点与固定轴 oo_1 间的距离是不变的。因此，若以螺旋线所在半径为半径作一圆柱面（圆柱中心线即轴 oo_1 ），则螺旋线将被包含在圆柱面中。若把圆柱面展开，螺旋线就变成直角三角形 $B'B_2''B''$ 的斜边，见图 1-4。三角形的底边就是圆柱面的周长 $2\pi r$ ，垂边就是螺旋线的螺距 H 。此三角形称为螺距三角形。角 θ 称为螺距角，从图中可知：

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{H}{2\pi r}$$

在制造螺旋桨时，螺距板就是螺距三角形的一部分，因桨叶仅取螺旋面的一部分，故螺距板也只取螺距三角形的一部分就已足够，以免浪费，便于施工（详见第四章 §2）。

图 1-5 表示桨叶是从螺旋面取一部分而形成的。由于桨叶承受螺旋桨的推力，故必须有一定的厚度，图中黑影部分即表示桨叶厚度。螺旋桨的螺距指的是螺旋面的螺距 H ，为了比较和研究，不同的螺旋桨，往往采用无因次的相对尺度，即螺距比，就是螺距 H 与直径 D 之比 $\frac{H}{D}$ 。螺距比是表征螺旋桨几何特性的一个重要因素， $\frac{H}{D}$ 愈大，桨叶对桨轴的倾斜度也愈大，也就是从螺旋桨后面看去，导边愈向左移动，随边则随之愈向右移动。一般船用螺旋桨的螺距比在 0.4~1.6 之间。当主机马力大、转速低、螺旋桨直径小时，要求较高的螺距比。

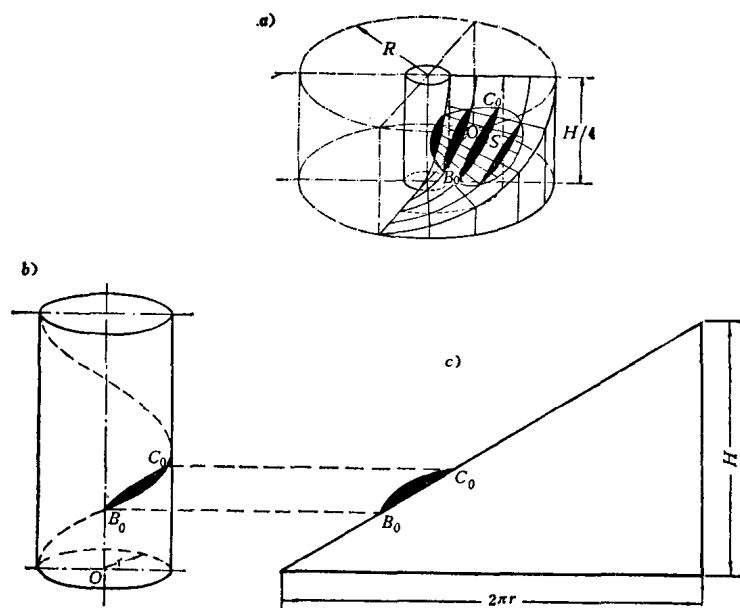


图1-5 桨叶的形成

桨叶不同半径处的螺旋线螺距相等者，称为径向等螺距螺旋桨或简称等螺距螺旋桨。不同半径处的螺距不等者称为（径向）变螺距螺旋桨。通常叶根的螺距较小，逐渐向叶梢增加，有直线递增的，也有曲线递增的，前者制造比较方便，后者则比较困难。

变螺距螺旋桨通常以 $0.7R$ 处 或 $\frac{2}{3}R$ 处 (R 表示螺旋桨半径) 的螺距代表螺旋桨螺距, 记作 $H_{0.7R}$ 或 $H_{\frac{2}{3}R}$ 。这两种螺旋桨不同半径处的螺旋线展开情况如图 1-6 所示。

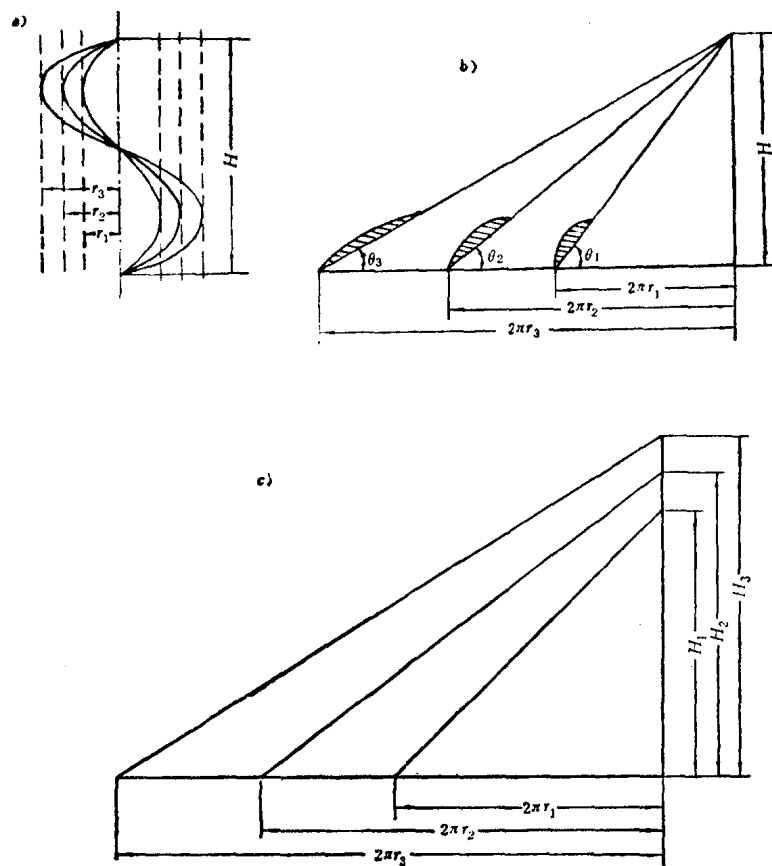


图1-6 桨叶不同半径处螺旋线展开
a)、b)等螺距桨叶; c)径向变螺距桨叶

§ 3 桨叶轮廓和切面几何特性

桨叶是螺旋面的一部分, 如何确定这一部分呢? 即如何确定桨叶的轮廓形状呢? 认识来源于实践, 经过劳动人民长期生产和使用螺旋桨的经验以及科学工作者的科学实验, 逐步形成一些比较好的叶形。现在常用的有图 1-7 所示的几种。归纳起来, 有对称形 (图中左边) 和非对称形 (图中右边) 两类; 或分为宽叶梢和窄叶梢两类。

在绘制桨叶轮廓时, 需要一条基准线来量度桨叶尺寸。因叶面是由母线运动的轨迹构成的, 故通常以叶根处中点的母线作为基准线, 或叫辐射参考线 (图 1-8 中的 OU)。母线为斜线时, 参考线也倾斜于桨轴 (图 1-8 中 c)。

辐射参考线与桨毂表面的交点至桨轴中心线的距离叫做桨毂半径, 其二倍即为毂径, 常以 d 表示。毂径与螺旋桨直径之比称为毂径比, 以 $\frac{d}{D}$ 表示。一般毂径比 $\frac{d}{D} = 0.16 \sim 0.20$, 也有低至 0.125 的。它与桨轴承受的扭矩和桨毂材料有关。

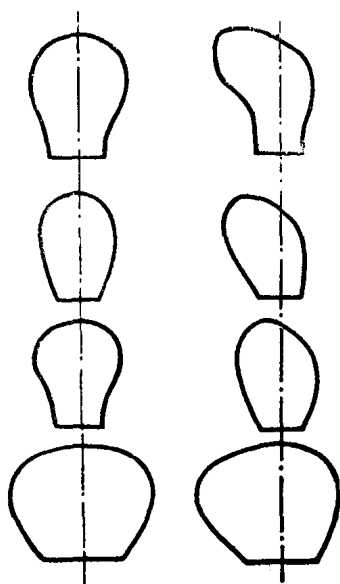


图1-7 桨叶外形轮廓

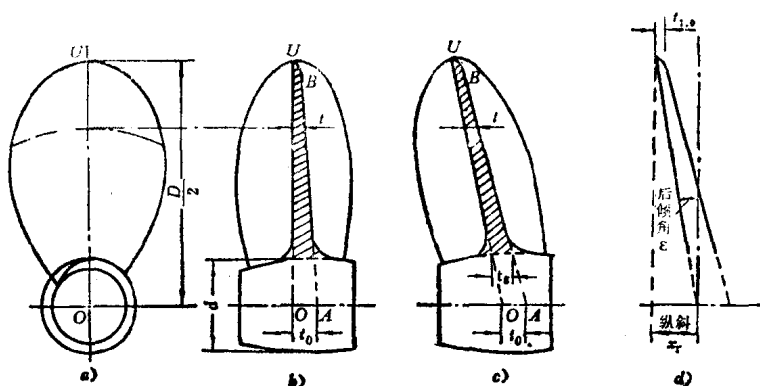


图1-8 螺旋桨图
a)正视图; b)、c)侧视图; d)后倾

设想有一个半径为 r 的圆柱面 (其中心与桨轴中心重合) 与桨叶相切, 切得的截面称为桨叶切面。顺桨轴方向看, 切面是半径为 r 的圆弧的一部分, 并非直线。把桨叶不同半径处的切面最大厚度画在辐射参考线的右边, 并把它们连成曲线, 此曲线称为最大厚度线 (图1-8b、c)。最大厚度线表示不同半径处切面最大厚度沿半径方向的分布情况, 但并不表明最大厚度沿圆周方向的位置, 切面最大厚度通过强度计算确定。

辐射参考线和最大厚度线的延长线与桨轴中心线交点间的距离 OA 称为假想厚度 (因实际是不存在的), 用 t_0 表示。假想厚度与螺旋桨直径 D 之比称为厚度分数 $\frac{t_0}{D}$ 。辐射参考线 OU 与最大厚度线在桨毂表面相交点间的距离叫做叶根最大厚度。其所以要引用假想厚度, 是因为叶根最大厚度随桨毂的大小而异, 但假想厚度却与毂径大小无关, 因而更便于比较分析。

母线向后倾斜者称为后倾, 用后倾角 ϵ 表示 (图1-8d), 一般 $\epsilon = 5 \sim 15^\circ$ 。

桨叶切面一般有二类: 机翼型和弓型, 如图1-9所示, 图中是展开后的切面。切面两端点间的距离 b 称为切面弦宽, 又称切面弦长, 两端点的连线称为弦线, 它是螺旋线展开的一部分, 是衡量切面螺距和攻角 (见第二章) 的基准。切面最大厚度用 t 表示。

弓型切面的最大厚度在弦的中间, 即 $\frac{b}{2}$ 处。机翼型切面最大厚度约在离导边三分之一弦宽处, 即约在 $\frac{b}{3}$ 处。桨叶各切面的最大厚度位置不是一成不变的, 象第三章将要介绍的B型螺旋桨, 其叶根切面是机翼型, 叶梢切面是弓型, 中间是过渡形式, 最大厚度位置由叶根切面的35%弦宽处过渡到叶梢切面的50%弦宽处。

最大厚度与弦宽之比称为厚度比, 用 δ 表示, 即

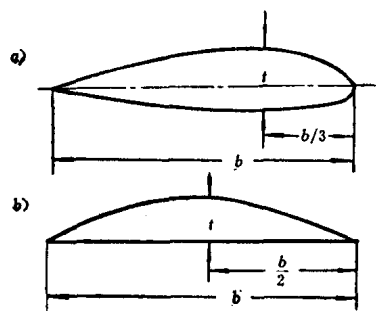


图1-9 桨叶切面
a)机翼型切面; b)弓型切面

$$\delta = \frac{t}{b}$$

δ 表示切面的肥瘦程度, δ 大说明切面厚而窄。切面厚度的中线称为拱线, 见图 1-10, 拱线与弦线的最大距离称为拱度 m_x , 拱度 m_x 与弦宽 b 之比 $\frac{m_x}{b}$ 称为拱度比, 它表明切面拱起或下凹程度。

螺旋桨的作图方法将在第三章讲述。这里先说明伸张面积和投射面积两个概念。

桨叶在垂直于桨轴轴线平面上的投影轮廓称为投射轮廓。投射轮廓所包含的面积 (图 1-11) 称为投射面积, 整个螺旋桨的投射面积以 A_p 表示, 投射面积 A_p 与盘面积 A 之比称为投射面积比。

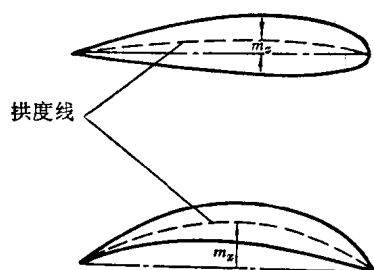


图1-10 切面拱线

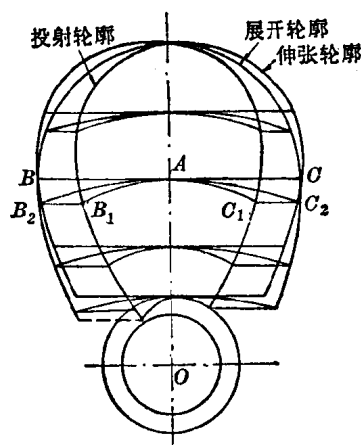


图1-11 投射轮廓和伸张轮廓

设想有许多与桨叶同轴的不同半径圆柱面与桨叶相切, 则可得到不同半径的切面。将这些切面伸直 (图 1-12), 并放在相应半径的位置上 (图 1-11), 把其端点画成轮廓, 称为伸张轮廓。伸张轮廓所包含的面积称为伸张面积。螺旋桨伸张面积等于各桨叶伸张面积之和, 以 A_s 表示。若 A_s 与盘面积 A 之比称为盘面比 a_s , 则

$$a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{4A_s}{\pi D^2}$$

盘面比表示桨叶面积在以 D 为直径的圆面积里充实的程度。

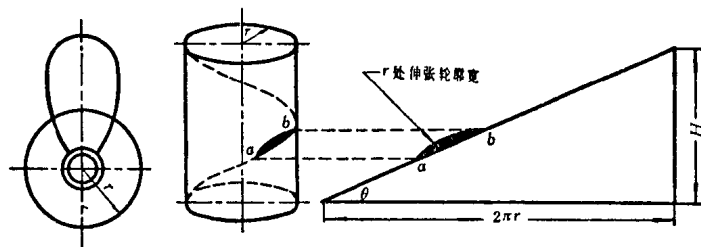


图1-12 切面伸张宽度

把桨叶在平面上展开即得展开轮廓。但实际上桨叶是个扭曲面, 不能在平面上精确地展开, 这里只指近似展开而已。螺旋线在展开面上为一平面曲线, 如图 1-11 中的 B_2AC_2 曲线。曲线 B_2AC_2 的实长等于螺旋线的伸张长 BAC 。螺旋桨各叶展开轮廓所包含面积之和称为展开面积, 用 A_z 表示。 A_z 与 A_s 相近, 两者中任何一个与盘面积之比, 都可称为盘面比。

第二章 螺旋桨基本工作原理

我们从第一章中知道了螺旋桨的大致形状和各部分名称，初步了解了螺旋桨是什么样的。然而，为什么螺旋桨要做成那个样子？它为什么能产生推力？推力与螺旋桨的几何特征、运动状态有什么关系？这一章将讨论这些问题。

为了方便起见，我们暂置船体于不顾，先讨论不受船体尾流影响的单独的螺旋桨性能即所谓敞水螺旋桨性能，然后再讨论螺旋桨置于船后时的性能；同时还要讨论螺旋桨的空泡特性和强度计算。

§1 翼型切面的水动力特性

许多同志都看过飞机的机翼、电风扇的叶片、螺旋桨的桨叶、船的舵以及轴流泵的叶片等，这些东西都有两个共同点，一是它们都是片状物体，形如鸟翼；另一个是它们都工作在流体（水或空气等）中，并产生某种力。为了便于研究它们在流体中的特性，常常撇开它们各自的特殊性，而把它们共同的东西抽出来，这就构成了所谓翼型。翼型就是翼（机翼）或叶（桨叶、叶片等）切面的形式，通常把翼弦（相当于桨叶宽）当作有限的，而把翼展（相当于桨叶的径向尺度）当作无限的，即把它看作一个二因次（平面）问题来研究。因为翼展是无限长的，所以任一切面在相同运动状况下的特性也是相同的，因此可以拿出任一切面来研究。由于机翼最具有代表性，故在流体力学中常把它当作一个重要内容加以研究。

螺旋桨的工作是靠桨叶向后拨水来实现的，桨叶外形就象一个椭圆形的机翼，见图2-1。我们可以把桨叶的作用看作无数个叶元体作用的总和。所谓叶元体，就是半径分别为 r 和 $(r+dr)$ 的圆弧所截取的一小段桨叶。而叶元体的作

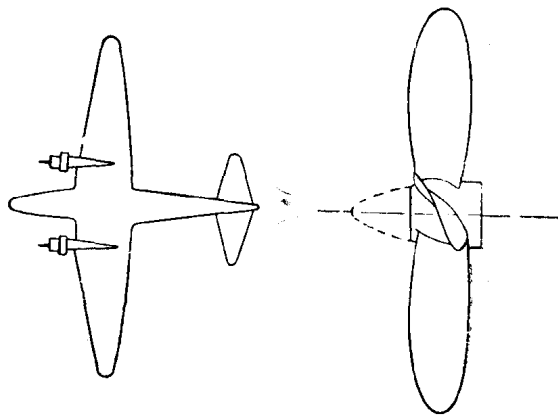


图2-1 螺旋桨桨叶和机翼

用又可看作一个无限长（二因次）的机翼的一小段（翼弦为 b ，翼展为 dr ）的作用。于是，我们就可把流体力学中机翼理论的某些结果应用于螺旋桨桨叶，然后再考虑它的特殊性，如长度是有限的（三因次问题），有旋转运动等。所以，我们研究螺旋桨工作原理时，先从认识机翼切面水动力特性入手。

设有一机翼（图2-2中只画出有限长）以匀速 W 和某一不大的攻角 α_k （攻角系指切面弦线与运动方向之夹角），在静止的流体中作

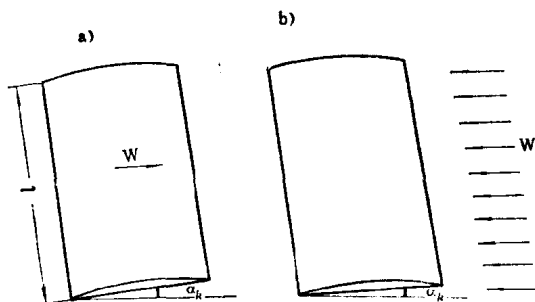


图2-2 机翼运动的转换
a) 机翼运动，水流静止；b) 机翼静止，水流运动

直线运动,如图 2-2a)所示。为了研究方便,我们可以把机翼看作静止不动,而水以均匀的速度 W 向机翼冲来,如图 2-2b)所示,这样效果是一样的。

当流体以速度 W 和攻角 α_k 流向机翼时,在机翼下表面(翼面)流速降低,而上表面(翼背)的流速增加。根据流体力学的伯努利定理,机翼下表面的压力将较流体远前方的压力大,而翼背处的流体压力将较远前方流体压力小。这样,翼面和翼背就形成了压力差,这种压力差的合力就形成方向向上的上举力 Y ,如图 2-3 所示,企图把机翼举起,故称为举力或升力。飞机起飞并在空中飞行而不会掉下来,就是靠这种力支持的。对螺旋桨来说,把桨叶看作机翼,当它运转时,同样产生一个垂直于流速的举力,这举力在船舶运动方向上的分力便形成推力并推船前进。

在实际流体中存在着粘性,机翼还受到摩擦阻力和涡旋阻力(压阻力)的作用,这两个力通称为翼型阻力,用 X 表示,它作用在平行于流速的方向上,如图 2-3 所示。这样,举力 Y 和阻力 X 就组成了作用于机翼的总的流体动力 F_0 。通常,流体动力合力 F_0 的作用点 O 称为压力中心,它表示压力分布的趋向。

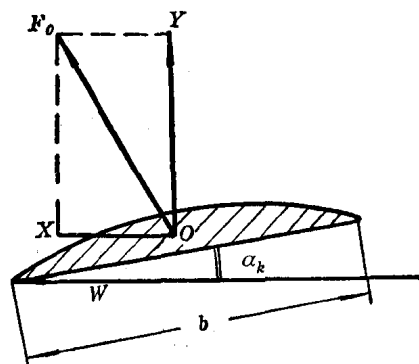


图2-3 机翼上的作用力

根据广泛的试验和理论上的研究,举力 Y 和阻力 X 与动压力 $\frac{1}{2}\rho W^2$ 和机翼的面积 S 成正比,这样便得到下式:

$$Y = C_y \frac{1}{2} \rho W^2 S \quad (2.1)$$

$$X = C_x \frac{1}{2} \rho W^2 S \quad (2.2)$$

或写成

$$C_y = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho W^2 S} \quad (2.3)$$

$$C_x = \frac{X}{\frac{1}{2} \rho W^2 S} \quad (2.4)$$

式中: C_y ——机翼的举力系数;

C_x ——机翼的阻力系数;

ρ ——流体密度,公斤-秒²/米⁴;

W ——流速,米/秒;

S ——机翼面积,即 bl , 米², 其中 b 为弦宽, l 为翼展。

阻力系数 C_x 与举力系数 C_y 之比称为阻举比,以 ϵ 表示:

$$\epsilon = \frac{C_x}{C_y} \quad (2.5)$$

它就是阻力与举力之比,比值 ϵ 愈小,机翼性能愈好, ϵ 的最小值所对应的攻角称为最佳攻

角, 用 α_{opt} 表示。

系数 C_y 和 C_x 与机翼的展弦比 $\left(\frac{l}{b}\right)$ 、切面形状和攻角 α_k 有关, 对于一定几何形状的机翼, 则仅取决于攻角 α_k 。图 2-4 示出 C_y 和 C_x 随攻角 α_k 变化的两条曲线, 从图中可以看出:

1. 举力系数 C_y 随攻角 α_k 的增加而增加。在攻角较小的范围内, 它们成直线关系; 当攻角达到某一临界值 α_{kp} 后, C_y 反而下降, 这是由于这时产生涡流、原来流线遭到破坏的缘故。所以设计螺旋桨时, 攻角不宜过大。

2. 当攻角 $\alpha_k = 0$ 时, 举力系数 C_y 并不为零, 而是某一正值。就是说当流体顺着弦线方向流向机翼时, 举力 Y 并不等于零。这是由于机翼存在拱度所造成的。当流体顺着某一负攻角 α_0 (图 2-5) 流向机翼时, 举力系数 C_y 才等于零, 此方向称为无举力方向, α_0 称为无举

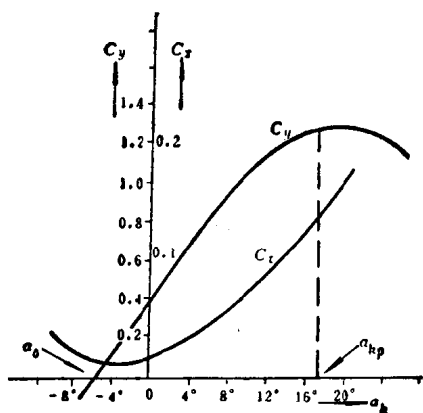


图2-4 C_y 和 C_x 与 α_k 的关系

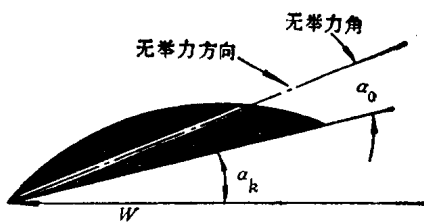


图2-5 无举力角

力角。显然, α_0 随拱度大小而定, 可按下列式计算:

$$\alpha_0 = 90 \frac{m_x}{b} \text{度 (机翼型切面)}$$

$$\alpha_0 = 100 \frac{m_x}{b} \text{度 (弓型切面)}$$

这里 m_x 为切面拱度, b 为弦宽。

3. 阻力系数 C_x 也随 α_k 而变, 在零攻角前后, 其变化比较平缓, 但随着攻角的增加而迅速增大。从图 2-4 可以看出, 阻力系数 C_x 要比举力系数小得多。

4. 从图 2-6 可知, 当举力系数 C_y 和厚度比 δ 一定时, 机翼型切面的阻举比 ε 的最小值比弓型切面的要小, 故机翼型切面的效率较高。其次, 弓型的 ε 最小值范围很窄, 而机翼型的 ε 最小值范围很宽, 即其最佳攻角 α_{opt} 范围较广 (因 C_y 正比于 α_k), 故机翼型切面对于负荷变化大、与船体配合要求高的螺旋桨有意义。再次, 对于同一翼型, 厚度比大, 则阻举比 ε

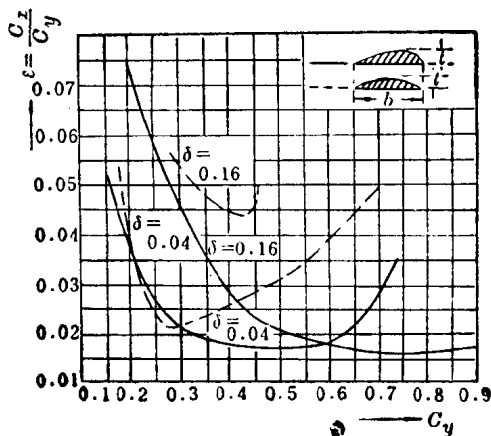


图2-6 不同切面的阻举比

也大,但考虑厚度比时,应从强度、空泡等出发,一般桨叶在 $0.6R$ 处的厚度比大约为 $3 \sim 6\%$ 。最后,在举力系数(或攻角)不大的情况下,厚度比较小时,机翼型切面和弓型切面性能相差不大(图中在 $C_y < 0.3$, $\delta = 0.04$ 范围),故桨叶梢部采用弓型切面对防止空泡现象有利而性能又不会受到大的影响。

§ 2 螺旋桨在敞水中的水动力特性

大家知道,一般螺旋桨装在船后,流体经过船体时要受到影响,其速度和方向与船前面的流体比较都不相同;另一方面,螺旋桨的工作对船体的阻力也有影响,如何考虑它们之间的相互影响问题将在 § 4 讨论。这里先撇开船体对螺旋桨的影响,单独地来研究螺旋桨在流体中作转动和前进运动时的水动力特性,因这时流体未受任何干扰,故称“敞水”。

一、敞水螺旋桨的运动分析

运动是力的一种表现形式,所以要研究任何力,首先必须研究运动。相对静止乃是运动的一种特殊形态。我们在讨论螺旋桨的水动力特性时也从运动开始。

1. 运动的相对性

整个自然界,从最小的东西到最大的东西,都处于不休止的运动和变化中,所以物体的运动是绝对的。然而,正如恩格斯所指出:“运动应当从它的反面即从静止找到它的量度……。”为了研究运动的物体,可以假定另一个与它相关的物体是相对静止的。

一个旅客坐在一艘航行的轮船上,他有没有运动呢?我们说也有也没有。说他在运动,是指这位旅客相对于陆地(把岸边作为静止看待)在运动,其运动速度就是轮船的速度;说他没有运动,是指他相对于船是静止的,旅客看到船上静止的东西就象我们在陆地上看到静止的东西一样,这就是运动的相对性。根据这个道理,我们可以把航行于静水中的船看作静止的,而水流则以同样的速度流向船来;把螺旋桨相对于静水的转动看作是静止的,水流则相对于螺旋桨在转动。这在研究问题的效果上是一样的。

2. 螺旋桨的转速和进速

螺旋桨主要靠转动而产生推力,也靠转动来吸收主机的功率。因此转动是螺旋桨的重要运动形式之一。我们在半径 r 处截一切面并展开之,如图 2-7 阴影所示。当螺旋桨转动时,此切面也跟着转动,若螺旋桨转速为 n ,则该切面的旋转线速度为切面所在半径圆周长的 n 倍,即 $2\pi rn$ 。因切面上任一点转一周的长度为 $2\pi r$,每秒钟转 n 周的速度自然等于 $2\pi rn$ 。这一速度用一线段来表示其大小,见图 2-7。至于它的方向,则与螺旋桨转向相同并在垂直于旋转轴的平面内,在图上应垂直于轴中心线。我们讲螺旋桨的转动是相对于静止的水说的,相反,若我们站在桨叶切面上来看水,则水在转动,其转动线速度也等于 $2\pi rn$,其方向则恰好与螺旋桨转向相反,在图上用垂直于轴线并向左边的箭头表示。旋转运动又称为切向运动或周向运动。

螺旋桨除了转动之外,还要跟船一

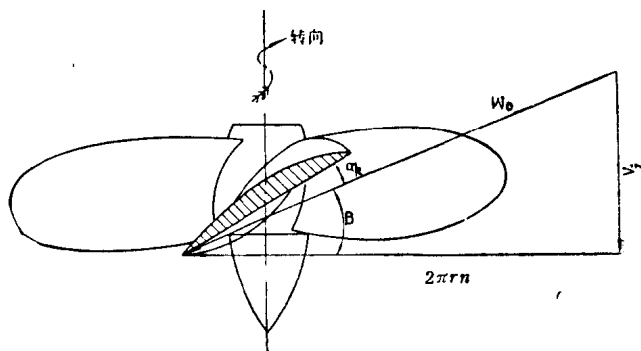


图2-7 速度三角形

起运动, 如果它相对于水的前进速度是 V_j (米/秒), 则水相对于螺旋桨的流动速度也为 V_j , 但方向相反。图 2-7 中所画的是水流方向, 速度 V_j 称为螺旋桨的进速, 它与切面位置无关。在螺旋桨轴线方向上的运动称为轴向运动。

把半径 r 处的切面旋转线速度 $2\pi rn$ 和进速用矢量表示并用 W_0 代表其合速度, 便得到图 2-7 中的速度三角形。我们知道, 几个分速度的作用与由这些分速度合成的合速度的作用相同。所以, 可用 W_0 来代替 $2\pi rn$ 和 V_j 的作用。这样, 半径 r 处的切面就同机翼切面一样, 仅受到迎流速度 W_0 的作用, 机翼理论便可引用到螺旋桨的研究中来。

3. 切向诱导速度和轴向诱导速度

螺旋桨在水中旋转和前进的时候, 水并不是静止不动的, 而是滚滚向后, 又有转动, 又有浪花, 还有隆隆的响声。这种尾流的轴向运动、旋转运动、浪花、声响等都消耗着来自主机的能量。然而, 什么是主要运动呢? 仍然是水流的轴向运动和切向运动。

若将螺旋桨置于深水中作旋转和轴向运动, 则会没有浪花现象, 这时与这种现象有关的声响也不复存在, 但尾流仍然有向后和旋转运动。由于螺旋桨的运转, 使水流产生运动, 这种运动的速度通称为诱导速度。其中, 由于桨叶推水而使水流得到的向后的轴向速度称为轴向诱导速度, 桨叶在旋转方向使水流得到的周向速度称为切向诱导速度。轴向诱导速度用 u_a 表示, 其方向与螺旋桨前进方向相反。切向诱导速度用 u_t 表示, 其方向与螺旋桨旋转方向相同。为了便于理解, 可以把诱导速度看作流体被桨叶推动 (轴向) 和带动 (切向) 所引起的速度。

必须注意, 上面讲的速度 V_j 和 $2\pi rn$ 是螺旋桨的运动速度, 不是水的运动速度, 只不过若把螺旋桨当作静止, 水流好象以进速 V_j 和转速 $2\pi rn$ 流向半径 r 处的切面一样, 实际并不如此。如果我们站在岸边看水, 这时螺旋桨远前方的水并不运动, 而诱导速度是桨叶运转引起螺旋桨附近的水的运动速度, 在岸边或船尾部都可以见到这种诱导运动, 这两者必须严格区别。

水流的诱导速度 u_a 和 u_t 并不是在水质点开始与桨叶接触时就达到最大值的, 而是逐渐增加的。可以证明, 螺旋桨盘面处 (桨叶导边与随边之中央) 的诱导速度等于尾流远后方最大诱导速度的一半; 若远后方的轴向和切向诱导速度分别用 u_a 和 u_t 表示, 则盘面处的相应诱导速度就是 $\frac{u_a}{2}$ 和 $\frac{u_t}{2}$ 。

实际上, 螺旋桨尾流的速度场 (速度分布) 是怎样的呢? 有人曾作过测定, 结果表明, 对于四叶、盘面比为 0.4、螺距比为 0.8 的 B 型螺旋桨, 尾流情况大致如下。在垂直于桨轴的尾流平面上 (距螺旋桨的旋转面为 $0.5R$ 处, 进速系数 $J=0.6$), 诱导速度 u 的等值线 (线上诱导速度相等) 基本上是绕着桨轴中心的同心圆, 这说明诱导速度分布的对称性。在沿桨叶半径方向上, 轴向诱导速度 u_a 在 $0.5R$ 处达到最大值 (为螺旋桨进速 V_j 的 50%) 并向两端 (桨毂和叶梢) 渐减, 至叶梢处接近于零; 切向诱导速度 u_t 则以 $0.3R$ 处为最大值 (达到 V_j 的 27%) 并向叶梢缓慢减小, 至 $0.9R$ 处开始迅速减小, 在接近叶梢处为零。在桨轴方向上, 切向诱导速度几乎一直保持常值; 当进速系数 $J=0.4$ 时, 轴向诱导速度也保持常值, 但当 J 较大时, 在距螺旋桨旋转面 $0.5R$ 以内, 要比后面尾流的数值大 (与理论不一致)。但这两个速度在离开旋转面一个直径的距离以后都保持常值。结果还表明, 诱导速度随进速系数 J 的增加而减小。

4. 速度多角形