

船舶操纵

周东平 主编
陆志材 主审



人民交通出版社

船舶操纵

CHUANBO

CAOZONG

周东平 主 编

陆志材 主 审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分八章。第一章为船舶操纵基础,讲述舵的性能、车的性能。第二章为船舶操纵性能,讲述船舶定常回转性、船舶追随性和航向稳定性以及船舶停船性能。第三章为外力对操船的影响,讲述风、流、受限水域对操船的影响,以及船舶间的相互作用。第四章为锚泊操纵,讲述锚地及锚泊方式的选择,以及锚泊操纵的方法、要领及守锚措施。第五章为系离泊操纵,讲述缆和拖船的作用,靠离码头、浮筒的基本方法及运用实例。第六章为大风浪操纵,讲述大风浪中船舶摇荡运动以及大风浪中的操船要领。第七章为特殊水域船舶操纵,讲述在狭水道、运河、珊瑚礁区域、冰区等特殊情况下的操船要领。第八章为海难时的应急操船,讲述船舶在碰撞、搁浅、触礁、火灾、海上搜寻与救助及海上拖带时的处置方法及操船要点。

本书可作为海运大专院校船舶驾驶专业的教科书,也可供船员培训、其它有关部门如引航、海事处理、安全监督等行业人员参考之用。

船 舶 操 纵

周东平 主 编

陆志材 主 审

责任编辑:曹忠铨 钱悦良

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

上海教育印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:12 字数:300千

1996年8月第1版 1996年8月第1次印刷

印数:1—2100 定价:16元

ISBN7-114-02415-0

U. 01683

前 言

随着船舶日趋大型化、高速化和专门化,船舶操纵从理论到实践越来越为各方面所重视。**IMO** 及所属“海上安全委员会”(MSC)曾先后发布的几份有关船舶操纵性的决议和文件,尤其 1993 年 **IMO** 第十八次大会通过的“船舶操纵性临时标准”,均试图以法规形式规定船舶操纵性要求。另一方面,在实际操船中,鉴于操船失误是海事频发的重要原因,船舶驾驶人员也愈加重视将操船经验和操船定量化结合起来。本书就是为适应这种发展的需要而编写的。

本书依据海船驾驶本科专业教学大纲,结合国家港监局对该门课程的考试大纲的要求,并参考 **STCW** 公约而编写的。在编写中,作者吸收了国内外有关操纵理论和实践方面的最新研究成果,力求做到对理论概念、公式数据论述正确,前后统一。另外在编写中还注重将操纵性理论与操船实践紧密结合。

本书由周东平主编,陆志材主审。第一、二、三、四、六章由周东平编写;第五、七章由杲庆林编写;第八章由龚雪根编写。

由于编者水平有限,书中定有缺点和错误之处,望读者批评指正。

目 录

第一章 船舶操纵基础	1
第一节 船舶操纵系统概述.....	1
第二节 舵的性能.....	2
第三节 阻力和推力.....	7
第四节 主机功率和船速	12
第五节 螺旋桨致偏作用	15
第二章 船舶操纵性能	22
第一节 船舶操纵性能概述	22
第二节 船舶定常回转性	24
第三节 船舶操纵性指数	33
第四节 船舶航向稳定性	38
第五节 舵效	41
第六节 船舶惯性与停船性能	43
第七节 实船操纵性试验	51
第三章 外力对操船的影响	59
第一节 风的影响	59
第二节 流的影响	69
第三节 受限水域的影响	72
第四节 船间相互作用	78
第五节 富余水深及航道宽度	81
第四章 锚泊操纵	84
第一节 锚的用途	84
第二节 锚抓力与出链长度	85
第三节 拖锚淌航	89
第四节 锚地	89
第五节 接近泊地操船及锚泊方式选定	92
第六节 锚泊操纵	93
第七节 偏荡、绞缠、走锚及相应措施	99
第五章 系离泊操纵	104
第一节 缆的运用.....	104
第二节 拖船的运用.....	107
第三节 <u>靠离码头</u>	115
第四节 系离浮筒.....	127
第五节 港内掉头.....	132

第六节 船间靠离要点·····	134
第七节 超大型船舶的操纵·····	135
第六章 大风浪操纵 ·····	138
第一节 海浪的知识·····	138
第二节 风浪中的船舶摇荡运动·····	140
第三节 大风浪中操船·····	148
第七章 特殊水域船舶操纵 ·····	155
第一节 狭水道中的船舶操纵·····	155
第二节 运河中的船舶操纵·····	156
第三节 珊瑚礁水域的操纵·····	158
第四节 冰区操纵·····	160
第八章 海难时的应急操船 ·····	165
第一节 碰撞后的处置·····	165
第二节 搁浅和触礁后的处置·····	168
第三节 船舶火灾后的处置·····	174
第四节 人命救助操船·····	175
第五节 海上拖带遇难船·····	178
第六节 海上搜寻与救助·····	182

第一章 船舶操纵基础

第一节 船舶操纵系统概述

以船舶在营运活动过程中,从港口 A 航行至港口 B 这一航次为例来考虑,船舶操纵的任务根据不同操船环境,可大致分成三个阶段,即大洋中的操船,沿岸操船,浅窄水道及港内操船。

大洋航行时,船舶沿预定航线进行保向操船,很少与他船进行会遇避让,主要问题是大洋航行中遇有大风浪时,船舶应根据风浪强度和本船在风浪中的操纵性能(即耐波性),采取妥善适当的操船措施,以减轻船舶摇荡,减小波浪对船体的冲击力,保证船体强度,防止船舶过大横倾而引起货物移位或导致船舶倾覆。

沿岸航行时,来往船舶较多,需经常改向进行避让操纵。驾驶人员应根据海上环境的具体情况 & 本船具体操纵性能(尤其是旋回性、停船性和改向性)区别不同情况实施避让。尤其在紧急情况或其它特殊情况下(如能见度不良等),应考虑是减速避让、满舵避让,或车舵结合避让,哪种方法更为有效。

浅窄水道及港内航行时,由于水域受限、水深较浅、船舶密度大,给船舶操纵与避让带来困难。尤其对于大型船舶,高速航行时易出现浅水效应、侧壁效应、船间相互作用及浪损,这些现象船速越高,越为明显。为了安全起见,对航速都有严格限制,船舶应减速航行,包括船舶在接近泊地时,均应及早淌航。但在低速状态下,船舶舵效变差,受风流影响大,尤其在风流较强时,可能出现无法控制船舶的局面。因此,船舶在狭水道或港内行驶时,应借助车、舵、锚、侧推器以及拖船,充分考虑外界环境对操船的影响,作出操船方案决策。

在如图 1-1 所示的操船系统示意图中,船舶操纵系统应由人、船舶和操船环境三个子系统组成。在人/船/环境系统中,操船者就是在一定外界环境条件下,利用船舶本身或其他手段如车、舵、锚、缆、拖船等,以保持或改变船舶运动状态为目的而进行的必要观察、判断、指挥、实施等,总称为船舶操纵(shiphandling)。

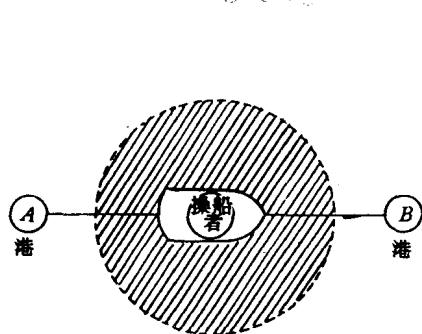


图 1-1

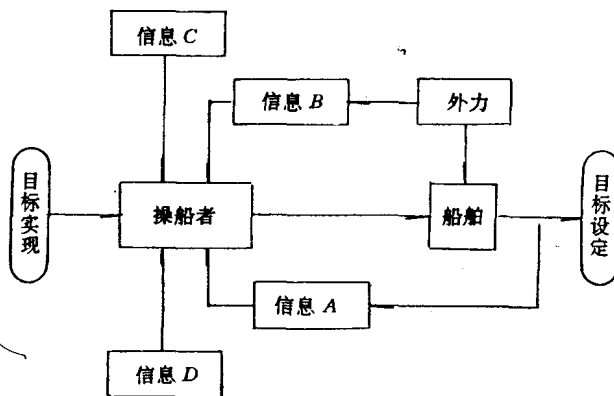


图 1-2

船舶驾驶人员作为人/船/环境系统的主要组成部分,通过大量信息的掌握和处理,向船舶输入指令,保持或改变船舶运动状态以达到预定的操纵目的。因此,在这个系统中掌握信息对操船是极其重要的。从船舶操纵过程来看,驾驶人员所需的信息如图 1—2 所示。

由图可知,这些信息包括以下内容:

信息 A:本船的运动状态(当时的船位、航向、航速、转速及其变化趋势等);

信息 B:自然环境(风、流、浪涌等情况);

信息 C:航行环境(包括交通环境如他船动态、大小、密度等;航道环境如航道的水深、可航宽度、碍航物以及助航设施、航行支援系统等);

信息 D:操船手册(包括本船的操纵性能、有关法规等)。

操纵船舶需要足够的信息,但有了足够信息后能否正确操船,尚需驾驶人员对信息进行分析 and 处理。处理信息的流程如图 1—3 所示。

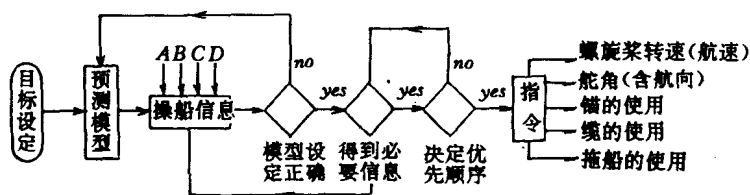


图 1—3

在设定操船目标(如靠离泊、锚泊、航行等具体操船任务)之后,操船者应根据船舶操纵的通常作法,结合自己多年经验所得,制定适合本船和当时环境情况的较为合理的操船方案。然后对所得到的信息与制定的方案进行比较,若有不符合,对方案进行修订,接着再继续预测下一步的情况,并将最有效的信息放在最优先的位置,然后再根据这一信息向船发出适当的指令。

第二节 舵的性能

舵是船舶操纵的重要设备之一,是船舶控制方向的重要手段。舵的作用是操某一舵角后利用水流对舵的作用力使船舶保持或改变其航向或进行旋回。

一、舵力(单独舵)

将舵单独地全部没入水中并使之前进,或者将舵放在有均匀流的水中,使舵与水流成某一角度,即保持某一舵角时,如图 1—4 所示,舵叶上将会受到水动力作用,通常将作用于舵上的水动力称为舵力 P_R (rudder force)。

舵力 P_R 是由垂直于舵叶纵剖面的正压力 P_N 和平行于舵叶纵剖面的切向分力 P_T (摩擦力)的合力。由于摩擦力 P_T 极小,所以舵力与舵力正压力

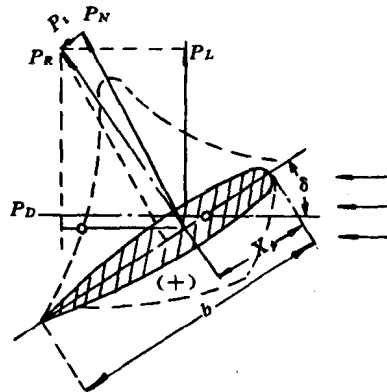


图 1—4

P_N 几乎相等,而且舵力方向也近似垂直于舵叶纵剖面。因此在实际估算时,可用舵的正压力 P_N 代替舵力 P_R 的大小和方向。

若将舵力按平行于和垂直于舵的前进方向进行分解,则可分解成垂直于舵的前进方向的分力 P_L ,称为升力(lift),以及平行于舵的前进方向的分力 P_D ,称为舵的阻力(drag)。 P_L 的作用是使舵产生舵力转动转矩,而 P_D 则与前进方向相反,增加了前进的阻力,降低运动速度。因此,作为舵的性能,最好是升力大,阻力小。升力与阻力之比称为升阻比,是衡量舵性能的一个尺度。

舵力的大小及其作用中心位置,受舵的面积、外形、尺度比、剖面形状和舵角以及前进速度等所左右。舵力的大小,基于实测有很多计算式,常可采用 Beaufoy 公式:

$$P_N = 58.85gA_RV_R^2 \cdot \sin\delta$$

式中: P_N ——敞水试验中,平板舵正压力(N);

A_R ——舵叶浸水面积(m^2);

V_R ——舵与水相对运动速度(m/s);

δ ——舵角或水对舵的冲角($^\circ$);

g ——重力加速度(m/s^2)。

舵的正压力 P_N 的作用点位置距舵的前端的水平距离 X_P ,可用 Jössel 公式计算:

$$X_P = (0.195 + 0.305\sin\delta) \cdot b$$

式中: b ——平板舵的宽度(m)。

以上计算舵的正压力 P_N 大小及作用点位置的公式,是在敞水试验中,用一矩形薄板(平板舵)垂直浸入水中进行拖曳试验得出的。实际上由于现代船舶大都采用流线型舵,形状和截面不一,而且舵是安装在船尾,受到船体以及螺旋桨流的影响。要估算船尾舵的舵力就很复杂,但上述用于计算舵力中心位置的公式稍经修正,仍可适用于船尾舵。

二、影响舵力大小的因素

1. 船尾舵的舵力

舵安装在船尾时,由于受到船体和螺旋桨作用的影响,其性能与单独舵不同。在船尾的舵要受到船体与舵的相互干扰、船舶前进时的伴流及螺旋桨流的影响,同时船舶旋回时还受到斜流的影响。

1) 舵与船体之间的相互干扰

船舶操一舵角后,则舵叶两侧所产生的压力差将波及到尾部船体两侧,类似于增加了舵叶面积,增加了舵力。同时,当舵安装在船尾时,船体对舵本身的效率也会有影响,因此,船体与舵之间是相互干扰的。

根据 Gawn 的研究,这种舵与船体之间的流体力学上的相互干扰的结果,将使舵力比单独舵时提高约 20%~30%。而船尾钝材越大,舵与船尾越靠近,间隙越小,舵力增加越明显。

2) 伴流的影响

船在水中运动时,船体周围有一部分追随船舶运动的水流称伴流(wake current),或称追迹流。伴流方向与船舶运动方向相同者称为正伴流;反之,则称为负伴流。

伴流按其产生原因可分成三种:

(1)摩擦伴流:由于水有粘性,所以当船运动时,沿船体表面形成水层,界层内的水与船舶运动方向相同,属正伴流,此即摩擦伴流。摩擦伴流在紧贴船身处最大,与船速同值,自船

身向外急剧减小,离船体不远处,迅即消失。如图 1-5 所示。

(2)势伴流:船在水中运动时,不断把运动前方的水排开,在运动的后方留下空隙,运动后方的水就不断地流来填补这个空隙,形成了势伴流。前后的势伴流为正伴流,而中部舷侧处则为负伴流。如图 1-6 所示。

(3)兴波伴流:船在运动时会形成兴波,波浪是水质点在外力作用下所形成的波动运动,在深水中,波浪的水质点以一定的速度作轨圆运动,其波形以某一速度传播开去,而水质点本身并不随波形移动。水质点的轨圆运动方向,当处于波峰时与波的传播方向相同,为正伴流,处于波谷时则与波的传播方向相反,为负伴流。

由此可见,在船体各处,其伴流的大小和方向不尽相同。伴流在船舶首尾方向的分布是:当船舶前进时,伴流的大小与厚度自首至尾逐渐扩大,船首处为零,而最大值位于船尾附近。船在倒航时则尾部伴流为零。此外,伴流分布还呈现近大远小,上天下小,左右对称的特点。即紧贴船身处,速度大,近似等于船速,离船体越远,则伴流越小;伴流在船尾分布是,沿中纵剖面呈左右对称;近水面处伴流速度大,随水深增加,伴流减小。

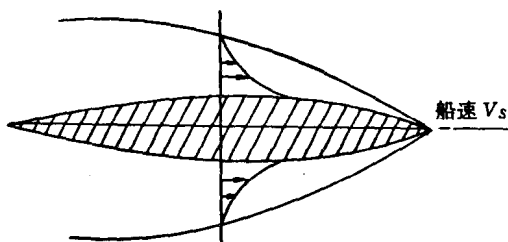


图 1-5

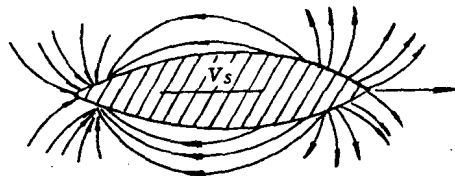


图 1-6

船舶前进中,船尾伴流为正伴流,与船舶前进方向一致,从而降低了舵叶对水相对速度,使舵力下降。单车单舵船因伴流影响,其舵力将降至单独舵舵力的一半以下(约 40%),即伴流可使舵力减少 60% 左右。

在船舶驶向泊地的过程中停车,尤其对于肥大型船($B/d \geq 3$, B 为船宽, d 为吃水),刚停车时虽然船舶还有相当大的余速,却因过强的伴流影响而使舵力减小,舵效变差,甚至出现无舵效的情况。

3)螺旋桨排出流的影响

螺旋桨正车工作时,船舶操一舵角,则螺旋桨排出流作用在舵叶上,提高了舵叶与水的相对速度,舵力增大。这种排出流的影响,对单车单舵船来说,则几乎可以抵消伴流的不利影响;而双车单舵船,由于舵设置在双车的居中位置,排出流不作用在舵叶上,故排出流对舵力几乎不产生作用,但同时又受到伴流的不利影响,因此对双车单舵船的综合影响是,其舵力只有单独舵时的 40%~60%,这对操船是不利的。双车单舵船在靠离泊过程中,由于排出流不作用于舵叶上,船速又较低,几乎没有舵效,因而必须借助双车采取不同转速和改变旋转方向来达到回转的目的。

螺旋桨正转时使舵叶相对于水的速度增加,其流速增加的比例是随推进器滑失的增大而增加。因此,滑失增加,舵力增大。其增加的比例近似为:

$$\Delta P = K' S_1^{1.5}$$

式中: ΔP ——舵力增加率;

S_r ——滑失比;

K' ——比例常数。

即滑失增加时,舵力大体上以滑失的 1.5 次方的比例增加。关于滑失的概念将在本章第三节中介绍。

在向泊地航进中的船舶减速操纵或者系泊操纵中,采用主机停车一进车、停车一进车的操作方法,既能有效发挥舵力,又能尽量抑制船速。

综合船尾舵受伴流、排出流的影响,日本的冈田、藤井等人给出了实验表达式:

$$P_N = \frac{1}{2} \rho_w A_R V_S^2 (1 - \omega) (1 + 3.6 S_r^{1.5}) \frac{6.13 \lambda}{\lambda + 2.25} \sin \delta$$

式中: V_S ——船速(m/s);

ω ——伴流系数;

λ ——舵的纵横比;

S_r ——滑失比;

ρ_w ——水的密度;

P_N ——舵的正压力(9.8N)。

伴流系数 ω (wake factor)为伴流速度与船速之比,一般 $\omega = 0.4$ 。

螺旋桨倒车旋转时,排出流不作用于舵叶,而是打在船尾部,对舵力不起作用。此时在船尾由后向前流动的吸入流作用在舵叶上,若操一舵角,将增加舵速,从而增加舵力。但是,吸入流速度很小,故舵效极差或不起作用,只有在船舶有相当大的后退速度时,舵速增加,才能够产生一定的舵力。

4) 旋回中舵叶处的有效流入角减小

船舶在以一定舵角 δ_0 旋回时,船舶一开始依然保持直航,舵叶处有效流入角 δ_e 等于机械舵角 δ_0 。当船舶进入旋回,一方面船舶绕旋回中心进行回转,舵叶处存在漂角 β ,船尾的水流从推进器和舵的斜前方流来,使舵叶处水流有效流入角减小 β 度;另一方面,在回转同时船体绕自身的转心 P 自转,使得舵叶附近的水流对舵的实际冲角,即有效流入角 δ_e 又进一步减小 γ 度,即 $\delta_e = \delta_0 - \beta - \gamma$ 。如图 1-7(a)、(b)所示。因此,在船舶旋回中,舵叶处水流有效流入角较机械舵角小,若所操舵角为 35° 时,其有效舵角会减小 $10^\circ \sim 13^\circ$ 。因此,要求具有良好舵效的超大型船舶,常以 40° 舵角作为满舵旋回的最大舵角,以期旋回中舵力能进一步增加。

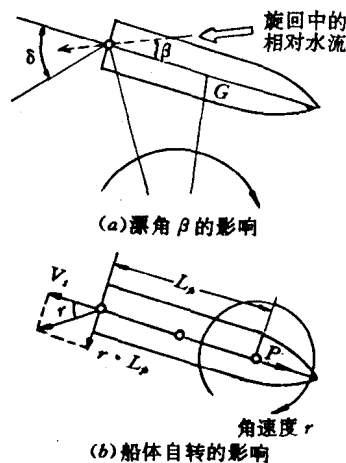


图 1-7

2. 使舵力减小的流体现象

舵力是由于舵叶迎流面和背流面压力差而产生的。可是,由于流体作用,在舵的周围产生涡流,该涡流会降低舵的升力,提高舵的阻力。两面的压力差变化,使得舵力急剧下降。产生这种涡流作用的流体现象主要有以下几种:

1) 失速现象(stall)

当舵叶处于某一攻角时,由于舵叶周围流线从舵叶后面的边缘分离,在其附近产生涡

流,如图 1-8 所示。涡流使升力 P_L 急降,阻力 P_D 急增,升阻比大大降低,使得舵效降低。这一现象称为失速现象。

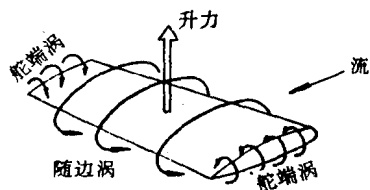


图 1-8

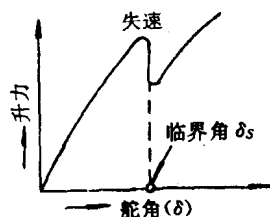


图 1-9

如图 1-9 所示,随着舵角 δ 的逐渐增大,升力 P_L 也相应地逐渐增大。当舵角达到某一舵角 δ_s 时,若舵角再增大,则升力便急剧地减小,出现失速现象。出现失速现象时的舵角 δ_s 称为失速舵角或临界舵角(critical angle)。在敞水单独舵的情况下,失速角一般为 20° 左右。舵安装在船尾使失速角延迟至 30° 左右。

2) 空泡现象(cavitation)

当使用大舵角或舵的前进速度相当大时,特别是舵的剖面形状之前端的曲率大时,在舵的背流面压力下降至或接近于该温度下的汽化压力时,在舵的背流面将产生空泡现象,除对舵金属表面有剥蚀性外,将使升力减小。但空泡现象不象失速现象那样显著。

3) 空气吸入现象(aeration)

在舵的背面吸入空气、产生涡流,使能力下降的现象,称为空气吸入现象。在舵接近水面或一部分露出水面(即空船航行时)且速度较大的情况下,容易发生此现象。

3. 舵的尺度、形状等因素对舵力的影响

1) 舵叶纵横比的影响

舵高 h 与舵宽 b 的比值称为纵横比 λ , 又称展弦比(aspect ratio)。

根据实验结果可知, $\frac{h}{b}$ 越小, 即舵宽大、舵高小时, 从舵叶迎面流来的水流就会从舵的上端和下端进入舵的背流面, 形成涡流, 在相同舵角下, 舵力也就越小; $\frac{h}{b}$ 越大, 即狭而高的舵, 则水流从舵叶上下端进入舵的背流面就少, 舵力就大。如图 1-10 所示。因此, λ 值越大, 小舵角时就能够得到较大的升力, 从而提高了小舵角的保向性。但另一方面, λ 过大, 升力增大过快, 将引起过早的失速, 临界舵角变小, 这对大舵角回转运动带来不利。

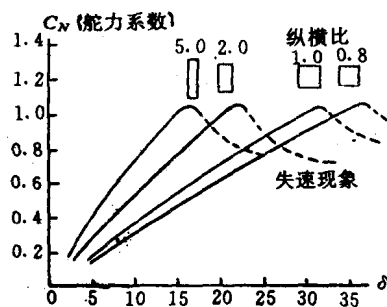


图 1-10

此外,舵安装到船尾,增大舵面积,提高展弦比要受到构造上的限制,即舵高受到吃水的限制,而舵宽受到船尾形状的限制;当然,舵宽还影响到转舵力矩的大小,所以也受到舵机功率的限制。因此,在实船上安装的舵,其纵横比一般多选择在 $1.4 \sim 1.9$ 范围内。

2) 舵剖面形状的影响

舵剖面的形状以流线型为佳,并为多数船舶所采用。为了探讨流线型舵的剖面形状对舵

力的影响,取剖面形状的最大厚度 e 与舵面的宽度 b 之比来加以比较,称 $\frac{e}{b}$ 为厚度比 δ 。根据 Jacobs 的研究结果,厚度比 $\frac{e}{b}$ 在 0.12~0.18 范围内舵升力最大且阻力小,这样的厚度最为合适。流线型舵的最大厚度位于距前缘 30% 舵宽处。

3) 舵外形的影响

在实际应用的普通舵的范围内,舵外形对舵力的影响并不显著,确切地说,这种影响只有当舵安装在船尾时,船尾与舵的间隙较大时,才会产生一些不利的影响。

第三节 阻力和推力

一、船舶阻力(resistance)

船舶在水面上航行时,受到空气和水的阻力,这种与船体运动方向相反的流体作用力称为船体阻力。

船舶阻力按其形成的性质可分为空气阻力和水阻力。空气对水线以上的船体的阻力称为空气阻力,水对水线以下的船体的阻力称为水阻力。

船舶阻力按其特征可将船舶阻力分为基本阻力 R_0 和附加阻力 ΔR 两部分。即 $R=R_0+\Delta R$ 。

基本阻力是新出坞的裸船体(不包括突出于裸船体之外的附属体如舵、龙骨、轴支架等所增加的阻力)在平静水面深水中行驶时水对船体的作用力。基本阻力由摩擦阻力 R_f 、兴波阻力 R_w 和涡流阻力 R_e 构成。兴波阻力和涡流阻力通常可称为剩余阻力 R_r 。在平静的深水中船模试验测定的阻力即为基本阻力。

94 摩擦阻力 R_f (frictional resistance):当船体运动时,由于水的粘性,在船体周围水和船体湿表面积之间产生摩擦阻力。

兴波阻力 R_w (wave-making resistance):船舶在水面前进时产生船行波,沿船体周围的水的流速和压力发生变化,在船首出现高波峰、船尾出现低波峰,压力增高;船中出现低谷,水位下降,压力降低,这种沿着船体首尾方向由于兴波而构成压力差所产生的阻力称为兴波阻力。

涡流阻力 R_e (eddy-making resistance):在船体表面形状急剧变化之处产生漩涡,这种漩涡形成的阻力称为涡流阻力。由于这种阻力与船体的形状和对水流的位置有关,所以又称形状阻力。

对于给定的船舶,基本阻力 R_0 的大小与吃水 d 、航速 V_s 有关。当航速 V_s 一定时,基本阻力随吃水的增加而增加;当吃水 d 一定时,基本阻力随航速的提高而增加,在航速较低时,基本阻力增加较为缓慢,与航速近似成线性变化,而航速较高时,基本阻力明显增加,约与船速的平方成正比。其原因不仅是由于摩擦阻力增加,而且因为兴波阻力约比例于航速的 4~6 次方,涡流阻力约比例于航速的平方。基本阻力中各阻力占总阻力的比重是不同的,由于它们随航速的变化率不同,所以所占比重也随航速而变,在一般商船速度范围内,摩擦阻力所占比重最大,约占总阻力的 70%~80%,低速时所占比重更多;随着船速提高,兴波阻力所占比重增大;而涡流阻力一般不足 10%,优良船型可在 5% 以下,短宽肥大型船该阻力所占比重较大。估算时,一般将 3 级风以下的空气阻力计入基本阻力。

附加阻力 ΔR 由污底阻力 R_f 、附体阻力 R_A 、空气阻力 A_x 、汹涛阻力 R_R 、浅水附加阻力 R_s 组成。

附加阻力所占总阻力的比重大小,决定于风浪大小、船体污底轻重以及航道浅窄情况。其中空气阻力在无风时约占基本阻力的 2%~3%,顶风 4~5 级时,为 10%~15%,风力达到 8~9 级时,为 30%~40%。

二、推力

1. 推进器

船舶航行中受到阻力作用,为了使船能保持一定的速度前进,必须提供给一定的推力,以克服其所受的阻力。船舶将主机发出的功率转换为推船运动的功率产生推力,推动船舶运动的推进工具总称为推进器(propeller)。推进器的种类很多,目前海船应用最多的是螺旋桨,其它种类的推进器还有明轮(paddle wheel)、平旋式推进器(cycloidal propeller)、喷水推进器(jet propulsion)和 Z 形推进器(schottel propeller)。

目前使用的螺旋桨(screw propeller)大多是固定式螺距螺旋桨 FPP(fixed pitch propeller);现在有些船舶也开始采用可调螺距螺旋桨(controllable pitch propeller),可变螺距螺旋桨(英文缩写 CPP)是通过调节桨叶的螺距角来进行停车、正车或倒车操纵,以适应船舶的各种航行状态。CPP 不需要改变螺旋桨的旋转方向和转速就可达到换向目的,所以停船性能良好。但这种螺旋桨结构较为复杂,维修保养较为困难。

船舶大多装有一只螺旋桨,称为单桨船。单桨船的螺旋桨,按其旋转方向可分为右旋式和左旋式两种。所谓右旋式,是指当螺旋桨正车旋转时,从船尾往船首看,螺旋桨作顺时针旋转,倒车时作逆时针旋转;反之,称为左旋式。多数商船采用右旋式。

有些船舶为了操纵上的特殊要求装有两只螺旋桨,左右各一,称为双桨船。双桨船的螺旋桨,按其旋转方向可分为外旋式和内旋式两种。所谓外旋式,是指开进车时,左舷螺旋桨左转,右舷螺旋桨右转;反之,称为内旋式。一般双桨船大多采用外旋式,而 CPP 双桨船则多采用内旋式。

2. 螺旋桨的推力

在主机驱动下,螺旋桨正车旋转时推水向后,而被推的水给桨叶一个反作用力,这个反作用力在船首方向的分量就是推船前进的推力 T (thrust)。倒车时,则水对桨叶产生一个指向船尾的反作用力,称为倒车推力或称为拉力。

螺旋桨转动时引起其前后水的流动,其中流向螺旋桨盘面的水流称为吸入流(suction current);离开螺旋桨盘面的水流称为排出流(discharge current)。吸入流的特点是流速较慢,范围较广,水流流线几乎相互平行;排出流的特点是流速较快,范围较小,水流旋转激烈(如图 1-11 所示)。正车时,吸入流从船尾吸入,排出流作用于船尾舵上(双车单舵船例外);而倒车时,位置相反。

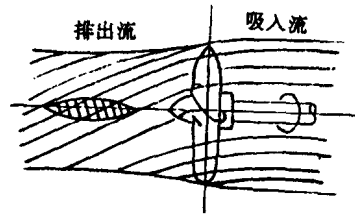


图 1-11

螺旋桨产生推力的工作原理如同飞机机翼产生升力和阻力的机翼原理一样。螺旋桨的桨叶如同是一个扭曲的机翼。桨叶朝舵的一面是一个螺旋面,在螺旋面上距桨轴半径为 r 处用一柱面切割桨叶后,所得的截面称为叶剖面(blade section),柱面与桨叶的交线 EGF 是一条螺旋线,如图 1-12(a)所示。将叶剖面展开后,如图 1-12(b)所示,则可将桨叶剖面的旋

转前进运动转换成平面运动,这样便于理解螺旋桨的工作原理。通过分析一个叶剖面所产生的单元推力(微推力) dT 和单元转矩(微转矩) dM_Q ,就可计算出整个桨叶乃至整个螺旋桨所产生的总推力 T 和总转矩 M_Q 。

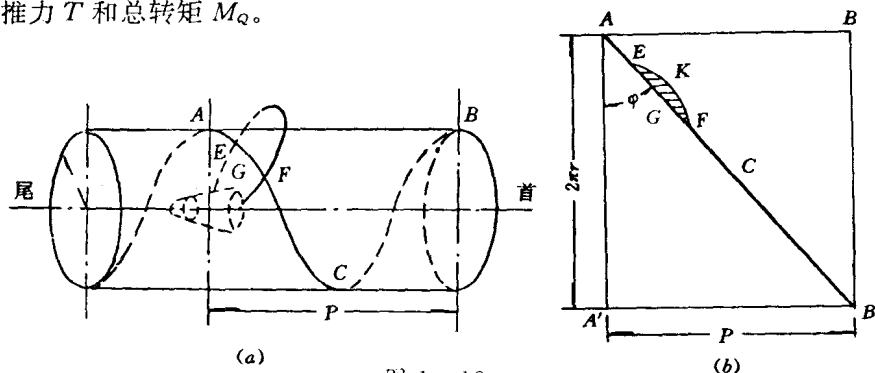


图 1-12

图 1-12(b)中 $\triangle A'B'A$ 称为叶剖面的几何三角形,其中 $A'B'$ 为螺距 P (pitch), AA' 为周长 $2\pi r$, 而 $\angle B'AA'$ 称为半径 r 处叶剖面的螺距角 φ 。螺距角的大小对螺旋桨工作时的效能有显著影响。由图(b)可知:

$$\tan \varphi = \frac{P}{2\pi r}$$

显然,当螺距 P 为定值时,则桨叶上不同半径 r 处的螺距角 φ 是不同的。对于整个螺旋桨,则用螺距比 $\frac{P}{D}$ (pitch ratio) 来表征其螺距角,其中 D 为螺旋桨直径。 $\frac{P}{D}$ 和 D 是螺旋桨重要的几何要素。

1) 系泊时螺旋桨的推力

船舶在静水中系泊时,由于船速 $V_s = 0$ 。若不计船体对螺旋桨的影响,则此时螺旋桨的进速 $V_A = 0$ 。当以转速 n 转动螺旋桨时,则在半径 r 处叶剖面与水的相对速度 U_r 仅为切向速度,即: $U_r = n \cdot 2\pi r$ 。此时叶剖面的冲角 α 即为螺距角 φ , 如图 1-13 所示。故微升力 dL 垂直于 U_r , 此时微升力全部成为推船前进的微推力 dT , 即 $dT = dL$; 相应的微阻力 dD 平行于 U_r , 此时微阻力全部成为微转矩 dQ , 即 $dQ = dD$; 而微转矩乘其半径 r , 即为必须克服的微转矩 dM_Q , 即 $dM_Q = dQ \times r$ 。上述公式是作用于一薄片桨叶上的推力和转矩, 作用于整个螺旋桨上的推力和转矩则为 T 和 M_Q , 故系泊时螺旋桨在一定转速 n 条件下除产生推力 T 外, 还

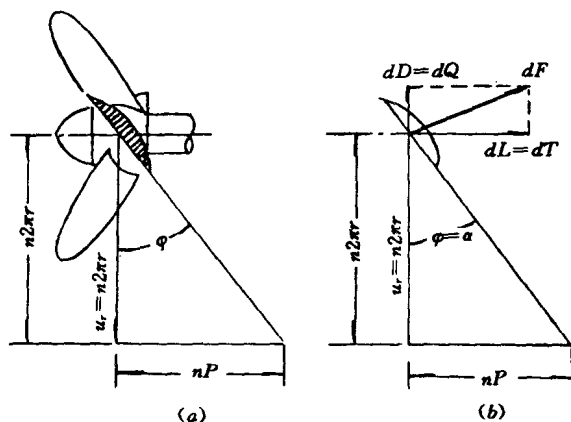


图 1-13

必须克服对应的转矩 M_Q 。这就要求主机在转速 n 条件下,产生大于 M_Q 的主机转矩,用来克服 M_Q 和主机及轴系的摩擦损失。

2) 航行时螺旋桨的推力

系泊和航行时螺旋桨在运动特征上的差别在于:系泊时叶剖面只有旋转运动;而船舶航行时,一方面作旋转运动,半径为 r 处的叶剖面,若转速为 n ,则旋转时的切线速度 $V_r = n \cdot 2\pi r$;另一方面还有跟随船一起前进的运动,设螺旋桨进速为 V_A ,因此,叶剖面相对于水的运动速度 U_r 就是进速 V_A 与旋转切线速度 $2\pi rn$ 的矢量合成。如图 1-14(a) 所示。

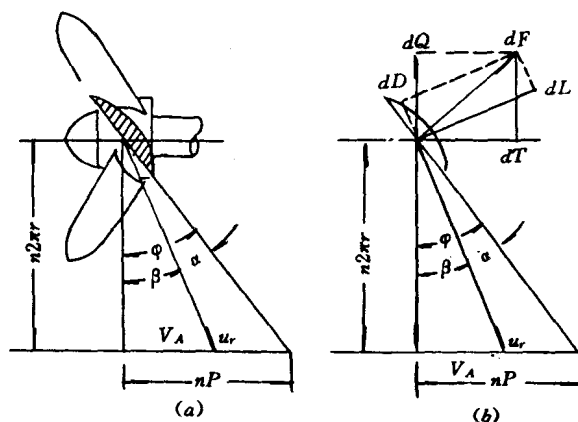


图 1-14

由于螺旋桨在水中工作,不同于螺母在刚体中运动,所以常会产生滑脱现象。即螺旋桨旋转一周前进的路程(称为进程) h_A 较螺距 P 为小。同样,螺旋桨旋转 n 转后(n 为转速),螺旋桨的进速 V_A 较理论上前进速度 $n \cdot P$ 小。在图 1-14(a) 中,进速 V_A 所对应的角度称为进程角 β ;滑失速度(理论前进速度 nP 与进速 V_A 之差)所对应的角度称为叶剖面的冲角 α ;由于理论前进速度所对角度为螺距角 φ ,因此

$$\varphi = \alpha + \beta$$

当叶剖面以冲角 α 、速度 U_r 与水作相对运动时,将会产生如图 1-14(b) 所示的与水流相对运动方向垂直的微升力 dL ($dL \perp U_r$) 和平行于水流相对运动方向的微阻力 dD ($dD \parallel U_r$)。根据理论推导的结果可知, dT 和 dD 的大小与 U_r^2 成正比,叶剖面与水相对运动速度 U_r 越大,微升力 dL 和微阻力 dD 越大;在一定范围内,冲角 α 越大, dL 、 dD 值也越大。

由微升力 dL 和微阻力 dD 合成的叶剖面所受的水动力 dF ,如按螺旋桨轴向和与之垂直的方向加以分解,即可得出沿轴向的分量,也就是指向船首方向的微推力 dT ,以及垂直于轴向的分量,即旋转微转矩 dQ ,如图 1-14(b) 中所示。因此,叶剖面转动时所受到的微转矩 dM_Q 为微转矩 dQ 乘以半径 r ,即

$$dM_Q = dQ \times r$$

将各个剖面的推力 dT 和转矩 dM_Q 从桨轴至叶梢进行积分,即得到作用于一片桨叶上的推力和转矩,再乘上桨叶数,便可求出整个螺旋桨所产生的推力和转矩。其表达式如下:

$$T = \rho n^2 D^4 K_T$$

$$M_Q = \rho n^2 D^5 K_Q$$

式中 ρ 为海水密度; K_T 为推力系数; K_Q 为转矩系数; D 为螺旋桨的直径; n 为螺旋桨转速。

对于给定的船舶,其螺旋桨产生推力和转矩的大小决定于转速 n 、船速 V_s 和螺旋桨轴在水中的沉深 h 。当船速 V_s 一定时,推力 T 与转速 n^2 成正比,转矩 M_Q 也与转速 n^2 成正比;当转速 n 一定时,则如果相应方向的船速 V_s 越低,推力 T 就越大,转矩 M_Q 也越大。同理,当转速 n 一定时,随着船速 V_s 的提高,螺旋桨推力 T 逐渐下降,即航行时推力小于系泊时推力,这是螺旋桨流体动力特性的一个重要变化规律。即在转速一定的条件下,螺旋桨的推力 T 是随船速的提高而降低,前面已述船体的阻力 R 却是随船速提高而增大的,从这里也可看出推力和阻力之间的关系:当推力 $T > \text{阻力 } R$ 时,船舶作加速行驶运动;当推力 $T = \text{阻力 } R$ 时,船舶作等速行驶运动;当推力 $T < \text{阻力 } R$ 时,船舶作减速行驶运动。船舶从静止状态中开车,如果马上要求达到较高的船速,则必须开高转速,此时主机的转矩超过额定转矩,会使主机超负荷工作,容易造成损坏主机,机舱操作人员也必然不愿意这样做。正确的操作应是,在开车时先开低转速,随着船速的增加,逐渐加大转速,这就需要有一个逐渐加速的过程,才能达到所要求的船速。

在一般情况,螺旋桨正车时产生推力,倒车时产生拉力。由于螺旋桨结构和主机结构方面的原因,在相同的转速、航速条件下,倒车给出的拉力比正车给出的推力低,一般船舶仅达60%~70%左右,大型船舶就更小,只有30%~40%。

3. 滑失(slip)和滑失比(slip ratio)

如果螺旋桨不是在水中运动,而是在刚性的介质中运动,像螺杆在螺母中运动一样,那么旋转一周后,它在轴线方向上移动的一段距离等于它的螺距 P 。实际上螺旋桨是在水中工作,所以常会发生滑脱现象,即在旋转一周后前进的路程 h_A 较螺距 P 为小。同样,若螺旋桨转速为每秒 n 转,则螺旋桨的前进速度 $V_A(\text{m/s})$ 比理论上应能前进的速度 nP 小。

螺距 P 与进程 h_A 之差,称为真滑失 $S(\text{real slip})$ 。即

$$S = P - h_A$$

螺旋桨理论上应能前进的速度 nP 与推进器实际对水的速度 V_A 之差,称为滑失速度,也可简称为真滑失 S 。见图1-14(a)。其表达式为

$$S = nP - V_A$$

真滑失与螺距 P 之比,称为真滑失比 $S_r(\text{real slip ratio})$ 。也可将真滑失比定义为滑失速度与理论上应以前进的速度 nP 之比。即

$$S_r = \frac{P - h_A}{P} = 1 - \frac{h_A}{P}$$

或

$$S_r = \frac{nP - V_A}{nP} = 1 - \frac{V_A}{nP}$$

当螺旋桨紧靠船后,由于船体伴流 W_A 的影响,故螺旋桨对水速度 $V_A = V_s - W_A$,若用船速 V_s (即螺旋桨的绝对速度)代替上述各式中的 V_A ,则

$$S' = nP - V_s$$

$$S'_r = \frac{nP - V_s}{nP} = 1 - \frac{V_s}{nP}$$

S' 称为虚滑失(apparent slip), S'_r 称为虚滑失比(apparent slip ratio)。

船舶前进时存在伴流,螺旋桨对水速度 $V_A < V_s$ 。例如: $V_s = 10\text{kn}$, $W_A = 2.7\text{kn}$,则船后螺旋桨的 $V_A = 7.3\text{kn}$;若将螺旋桨安装在船的远后方(相当于单独螺旋桨),则 $W_A = 0$, $V_A = 10\text{kn}$,这时螺旋桨的进程角 β 比船后螺旋桨的进程角为大,而其冲角 α 则后者小于前者。故