

高等学校统编教材

普通高等教育“九五”国家级重点教材

船舶操纵

陆志材 主 编
王逢辰 主 审

大连海事大学出版社

前 言

本书是航海类高等院校(本科)统编教材。在交通部科技教育司航海类专业教学指导委员会的统一领导下,上海海运学院、大连海事大学、武汉交通科技大学和集美航海学院等航海类高等院校的有关专业教师共同负责编写大纲,同时征求航海界知名人士洪振权、周沂、刘有钟、陈文忠等的意见,在编审、出版和征订工作中又得到交通部主管机关、航运企业、引航站和高等航海院校等单位的大力支持,得到吴国椽、陈孝烈、陆惠生、卢康恒、朱宝天、李勇、刘正江、赵月林、杲庆林等的关心和帮助。对此,一并表示衷心的感谢。

本书主要依据海洋船舶驾驶专业本科教学大纲,结合国家海事局对“船舶操纵”课程的船员考试大纲要求,并参考 1995 年 STCW 公约所规定的内容而编写的。在编写中作者吸收了国内外有关船舶操纵理论和实践方面的最新研究成果,力求做到概念清楚、理论正确、文字通顺。另外,在编写中还注重操纵性理论与操船实践紧密结合。

本书由陆志材主编,王逢辰主审。第一篇第一章船、桨、舵的性能,第二章船舶操纵性能,第四章外力对操船的影响由周东平编写;第一篇第三章锚、缆和拖轮的作用,第二篇第五章锚泊操纵,第九章海事处置及应急操船由龚雪根编写;第二篇第六章系离泊操纵,第七章大风浪中操船,第八章特殊水域中操船由陆志材编写。

由于编者水平有限,书中定有不足和错误之处,望请读者批评指正。

编 者

1999 年元月

目 录

绪 论	1
-----	---

第一篇 船舶操纵基础理论

第一章 船、桨、舵的性能	4
第一节 螺旋桨的性能	4
第二节 舵的性能	9
第三节 船、桨、舵综合效应	11
第二章 船舶操纵性能	16
第一节 船舶操纵性能概述	16
第二节 船舶运动方程和 K, T 指数	18
第三节 船舶定常旋回性	22
第四节 船舶改向性	28
第五节 船舶保向性	30
第六节 舵效	31
第七节 船舶控速性	32
第八节 实船操纵性试验	37
第三章 锚、缆和拖轮的作用	44
第一节 锚的作用	44
第二节 缆的作用	49
第三节 拖轮的作用	53
第四章 外力对操船的影响	62
第一节 流的影响	62
第二节 风的影响	66
第三节 受限水域的影响	74
第四节 波浪的影响	82

第二篇 船舶操纵实践

第五章 锚泊操纵	93
第一节 锚地与锚泊方式的选择	93
第二节 锚泊操纵	97
第三节 锚泊偏荡、走锚及其防止	101
第六章 靠离码头操纵	105
第一节 靠码头操纵	105
第二节 离码头操纵	116

第三节 系离浮筒操纵·····	125
第四节 其他情况系离泊·····	134
第五节 超大型船操纵·····	141
第七章 大风浪中操船 ·····	148
第一节 大风浪航行的准备·····	148
第二节 大风浪对空载船的影响·····	153
第三节 大风浪中操船措施·····	154
第四节 遭遇台风时的操船·····	158
第八章 特殊水域中操船 ·····	162
第一节 狭水道中操船·····	162
第二节 江河(运河)中操船·····	165
第三节 冰区操船·····	173
第九章 海事处置和应急操船 ·····	187
第一节 碰撞前后的操船与处置·····	187
第二节 搁浅与触礁前后的操船与处置·····	189
第三节 火灾与爆炸后的操船与处置·····	195
第四节 人员救助操船·····	196
第五节 设备故障与应急措施·····	199
第六节 海上搜救与拖带·····	204
参考文献·····	214

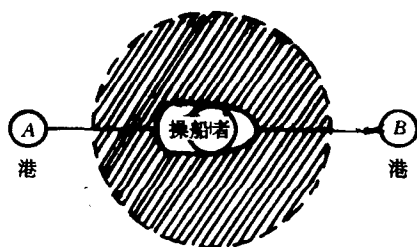
绪 论

船舶从港口 A 航行至港口 B 的整个营运活动过程中,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,浅窄水道及港内系泊操船。

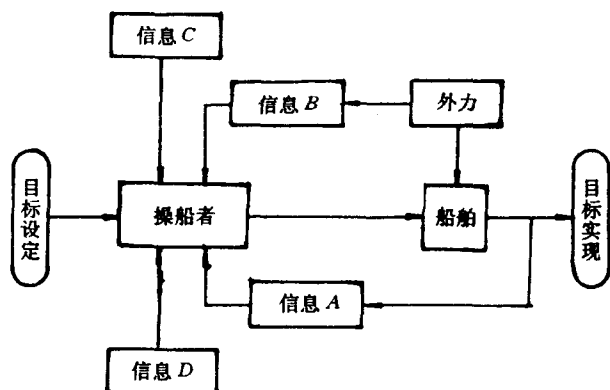
大洋航行时,船舶沿预定航线进行保向操船,其主要问题是大洋航行中遇有大风浪时,船舶应根据风浪强度和本船在风浪中的操纵性能,采取妥善适当的操船措施,以减轻船舶摇荡,减小波浪对船体的冲击力,保证船体强度,防止船舶过大横摇而引起货物移位或导致船舶倾覆。

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 & 本船具体操纵性能区别不同情况实施避让,尤其在紧急情况或其他特殊情况下(如能见度不良等),应考虑的是减速避让、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、岸壁效应、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(控制余速)。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及系离泊操纵时,应借助车、舵、锚、侧推器及拖轮,充分考虑外界环境对操船的影响,作出操船方案决策。



图绪 1 人/船/环境系统



图绪 2 船舶操纵信息

在如图绪 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、拖轮等,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)。

船舶驾驶人员作为人/船/环境系统的主要组成部分,操船者必须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绪 2 所示。

由图可知,这些信息包括以下内容:

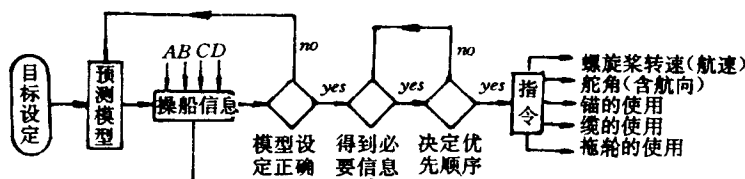
信息 A:本船的运动状态(当时的船位、航向、航速、转速及其变化趋势等);

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绪 3 所示。



图绪 3 操船信息处理流程

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,再根据这一信息向船发出适当的指令。例如某轮重载进上海港原计划准备顶流驶靠落水头高阳路码头,由于船舶顺水进黄浦江提前抵达码头边,船长必须改变原有靠泊计划,决定在码头边进行顺水抛锚掉头并直接靠码头。但当船舶抵高阳路码头前又发现该泊位的档子较拥挤,而且档子前后均有大船和并靠驳船,为了确保重载大船靠泊的安全,船长又当机立断决定前往泊位上游陆家嘴掉头区掉头后再前往高阳路码头顶流驶靠涨水头。因此,在浅窄水道和港内操船比起船舶在大洋中或沿岸航行更为复杂和艰难。作为一名操船者在整个狭水道航行和系靠码头的过程中,事先要制定周密和合理的靠泊方案,一旦在操纵过程中情况发生变化,就应随时修正计划,力求使自己的方案符合客观外界的规律性,使船舶能安全、迅速和可靠地靠妥码头,圆满地完成航次计划运输任务。

船长是操纵和管理船舶的最高决策者和指挥者,他在船舶整个营运活动的过程中是起关键和主导作用的。但由于船舶操纵是船上各工种的联合作业,全船每一个环节都必须紧密配合,确保各项操作准确、及时和无误,才能使整个操作过程运行自如并使航行和靠泊计划得以顺利执行,因此操船者除了要掌握好船性和水性外,还应摸透人性,这就是船员的技术水平、工作责任心、主观能动性和相互间的配合与协作精神,它对顺利完成航行和靠泊操作任务也是十分重要的。为此,船舶驾驶人员在大洋中操船、沿岸操船、浅窄水道及港内系离泊操船,即在船舶操纵领域中必须具备以下三方面的基本要求:

第一,必须努力学好船舶操纵基础理论知识。

船舶操纵基础理论主要是指“船性”和“水性”。所谓“船性”是指船舶内在的航行性能,即船舶的浮性(包括吃水差)、稳性、抗沉性、快速性(包括船舶阻力和推力)、摇荡性和操纵性等。各类船舶的航行性能是不同的,即使是同一艘船舶的性能也会随着船舶装载和浮态的变化而有所不同,因此要进行调查研究,查阅船舶资料和各种性能曲线、表格及其说明。此外,还要通过他人或本人多年的航海经历,在各种不同的载况下,不断地进行航行观察、性能测试和综合分析,才能得出切实可行的数据和结论,并运用到船舶操纵的实践中去。所谓“水性”是指客观外界条件,也就是指风、流、海浪、浅水、岸壁和船间相互作用等外界因素对船舶航行性能的影响。

响。古语云“识水行舟”,说的就是要了解和掌握水流(包括风浪、浅水等)的运动规律及其对船舶航行的影响,以便正确操纵船舶。除此而外还应学习有关船舶原理和水动力学等基础理论知识,因为它们又和船舶的阻力、推进和摇荡等内容都有着密切的关系,只有全面掌握这些内容和它们之间的有机联系,才能把握船舶运动的本质。

第二,在船舶操纵实践中要掌握“人性”,并正确处理好“三性”之间的关系。

所谓“人性”是指船员的性格特点和素质以及技术水平。因为船舶操纵是综合船上各工种的联合作业,而绝大部分船员都直接参与操作工作,故每项船舶操纵只有通过各方面的紧密合作,才能顺利完成。为此,一名优秀的船舶驾驶人员,尤其是船长更应了解船上每个人员的性格特征和技术素质,以便在日常和特殊情况下,如大风浪中航行、雾中航行、冰区航行、狭水道航行、港内靠离操纵和船舶遇险操纵等,能进一步调动和发挥每个船员的积极性、创造性以及集体智慧,确保船舶操纵的顺利完成。另外,在处理“船性”和“水性”的关系上,掌握水性比船性更为困难,尤其是正确掌握风、流、海浪和浅水等对船舶操纵影响的可靠数据。这些数据目前还很缺乏,要把它估算得比较正确还不是一件很容易的事情,因此有待于今后的科学研究和大量的船模和实船试验以及经验的积累等,才能逐步获得解决。

船舶驾驶人员不仅要了解和掌握本船的“三性”,而且也要了解和掌握其他船舶的“三性”,这就是知己知彼才能百战不殆。

第三,在船舶操纵实践中,必须理论联系实际,抓好“三个环节”,不断提高业务水平。

在船舶操纵实践中应抓好“三个环节”,它们是指制定航行和靠泊计划、具体执行和实施计划以及认真总结经验和教训。在航行或靠离泊位前,应详细查阅航海图书资料,整理修改和备妥本航次所需的各种海图,并结合所经海域或所靠码头的外界客观条件(风、流、海浪、水道、码头和船舶密度等)制定周密和合理的航行或靠泊计划。在具体执行计划阶段,应向有关人员布置航行和的操作计划,并提出具体要求及注意事项,同时还应做好充分的准备工作,必要时还应与有关单位取得联系,及时空出码头,备妥拖轮和带缆艇等。在具体实施靠泊计划时操船者应按靠泊的方式和步骤掌握好船位、余速和角度三个操纵要领,沉着冷静、机敏果断、及时正确地发出指令,并运用车、舵、锚、缆和拖轮等操纵手段,将船舶置于主动和有利的地位。一旦情况发生变化应随时修正计划,使自己始终立于不败之地。除此之外,还应认真总结经验,不断提高业务水平。俗话说“前车之覆,后车之鉴”。无数的海事教训都给人们积累了宝贵的经验。当然,成功的经验更应加以总结,其中最重要的一条就是对每次船舶操纵和靠离作业,都应做到有计划、有措施和有总结,做到“吃一堑,长一智”,从不断实践和总结中积累经验和改进工作,不断提高操船技艺。也就是实践—认识—再实践—再认识,不断总结经验和教训,在船舶操纵的领域中,从必然王国走向自由王国。

第一篇 船舶操纵基础理论

操纵船舶要达到安全和迅速的目的,操船者必须掌握车(桨)、舵、锚、缆和拖轮在使用中的规律性,以及风、流、波浪、浅水等自然因素对船舶运动影响的规律性。本篇叙述的内容就是有关这些方面的普遍规律。

第一章 船、桨、舵的性能

螺旋桨和舵,是船舶操纵的关键性工具,它们在操纵中的效应相互影响又各具特点,而且船、桨、舵的性能还具有综合效应。

第一节 螺旋桨的性能

一、船舶阻力

船舶航行时受到的阻力 R ,包括基本阻力 R_0 和附加阻力 ΔR 两部分,即

$$R = R_0 + \Delta R \quad (1-1)$$

1. 静水中的摩擦阻力(frictional resistance)

静水中船舶运动时由于水的粘性而产生的阻力(R_f),其大小主要与船体湿表面积、船速等因素有关。

2. 静水中的剩余阻力(residual resistance)

静水中航行时船体所受到的水阻力中,除摩擦阻力以外的部分称为剩余阻力(R_r),其中包括:

1) 兴波阻力(wave-making resistance)

是由于船舶航行中产生的船行波所构成的阻力(R_w)。

2) 涡流阻力(eddy-making resistance)

由于水的粘性使船舶航行中水线下船体表面产生漩涡,造成首尾压力差而产生的阻力(R_e)。这种阻力与船体水线下形状有关,所以又称为形状阻力。近年来建造的船舶这种阻力很小,通常将它并入兴波阻力作为剩余阻力。

以上两部分阻力(R_f 和 R_r),也就是船模试验在平静的深水状态下所测定的阻力,即基本阻力(R_0)

$$R_0 = R_f + R_r = R_f + R_e + R_w \quad (1-2)$$

基本阻力的大小与吃水、船速有关。船速一定时,基本阻力随吃水的增加而增加;吃水一定时,基本阻力随船速的提高而增加。在船速较低时,基本阻力增加较为缓慢,与船速近似成线性变化;船速较高时,基本阻力明显增加,约与船速的平方成正比。在一般商船速度范围内,摩擦阻力所占比重最大,随着船速提高,兴波阻力所占比重也将增加。

3. 空气阻力(air resistance)

船舶航行中船体水线以上部分所受到的阻力(R_a),在无风状态下空气阻力与水阻力相比,所占比重很小。船舶受风作用航行时所产生的风动压力,通常也一并计入空气阻力之中。计算方法将在第四章中介绍。

4. 船体污底阻力(fouling resistance)

船舶在航行中由于水线下船体表面锈蚀、海生物附着,导致摩擦阻力和涡流阻力增加,由此而构成的阻力(R_F)。

5. 船体附体阻力(appendage resistance)

船舶航行时由于水线下船体突出物如龙骨、推进器轴及支架、舵等的存在而导致局部摩擦阻力和涡流阻力的增加所形成的阻力(R_A)。

6. 汹涛阻力(rough water resistance)

船舶在波浪中航行时受到波浪作用产生的冲击力以及船体摇荡而产生的阻力(R_R)。在受限水域中航行时,流体作用发生变化,也将使船舶阻力明显增加。

将上述空气阻力、船体污底阻力、船体附体阻力、汹涛阻力等统称为附加阻力(ΔR)

$$\Delta R = R_a + R_F + R_A + R_R \quad (1-3)$$

附加阻力在船舶阻力中的比重大小,决定于风浪大小、船体污底轻重以及航道浅窄情况。

二、推力

1. 推进器的种类

推进船舶运动的推进工具总称为推进器(propeller)。推进器的种类很多,而且处于不断更新发展之中,很需开发具有推进效率高、船舶振动小等优点的推进器。目前使用最多的推进器是螺旋桨(screw propeller)。除此之外,推进器的种类还有 Z 形推进器(schottel propeller)、明轮(paddle wheel)、平旋式推进器(cycloidal propeller)、喷水式推进器(jet propeller)。商船使用的螺旋桨大多是固定螺距螺旋桨 FPP(fixed pitch propeller)。现在有些船舶已采用可调螺距螺旋桨 CPP(controllable pitch propeller)。

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,而被推动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,称为倒车推力或拉力。

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 1-1(a)所示为一距离螺旋桨轴心半径为 r 处的叶剖面。在船舶航行中,叶剖面一方面跟随船舶作前进运动,另一方面又作旋转运动。若螺旋桨进速为 V_A ,转速为 n ,则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。

螺旋桨在水中工作,螺旋桨旋转一周前进的路程(称为进程) h_A ,较螺距 P 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 nP 小。螺旋桨理论上应能前进的速度 nP 与推进器实际对水速度 V_A 之差称为滑失速度。进速 V_A 所对应的角度称为进程角 β ,滑失速度所对应的角度称为叶剖面的冲角 α ,理论上前进速度所对应角度称为螺距角 φ ,如图 1-1(a)所示。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 ($dD \parallel u_r$)。根据有关理论知识可知, dL 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。

微升力 dL 和微阻力 dD 合成的叶剖面所受的水动力为 dF , 由此可以求出微推力 dT 以及垂直于轴向的分量旋转微转力 dQ , 如图 1-1(b) 中所示。

由于 $dL \perp u_r$, $dD \parallel u_r$, dL 和 dT 以及 dD 和 dQ 间夹角为 β , 故有:

$$dT = dL \cos\beta - dD \sin\beta \quad (1-4)$$

$$dQ = dL \sin\beta + dD \cos\beta$$

叶剖面转动时所受到的微转矩 dM_Q 为微转力 dQ 乘以半径 r , 即

$$dM_Q = dQ \times r \quad (1-5)$$

式(1-4)和式(1-5)是作用于叶剖面上的推力和转矩,故作用于整个螺旋桨上的推力和转矩,即

$$T = Z \int_{\frac{d_0}{2}}^{\frac{D}{2}} dT \quad (1-6)$$

$$M_Q = Z \int_{\frac{d_0}{2}}^{\frac{D}{2}} dM_Q$$

式中: T 为总推力; M_Q 为总转矩; Z 为桨叶数; D 为螺旋桨直径; d_0 为桨毂直径。

3. 滑失(slip)和滑失比(slip ratio)

如果螺旋桨不是在水中运动,而是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距离等于它的螺距 P 。但因为螺旋桨是在水中工作的,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 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 (real slip), 即

$$S = P - h_A$$

螺旋桨理论上应能前进的速度 nP 与螺旋桨的前进速度 V_A 之差,称为滑失速度,也可简称为真滑失 S , 见图 1-1(a), 其表达式为

$$S = nP - V_A \quad (1-7)$$

真滑失 S 与螺距 P 之比,称为真滑失比 S_r (real slip ratio)。也可将真滑失比定义为滑失速度 S 与理论上应前进的速度 nP 之比,即

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

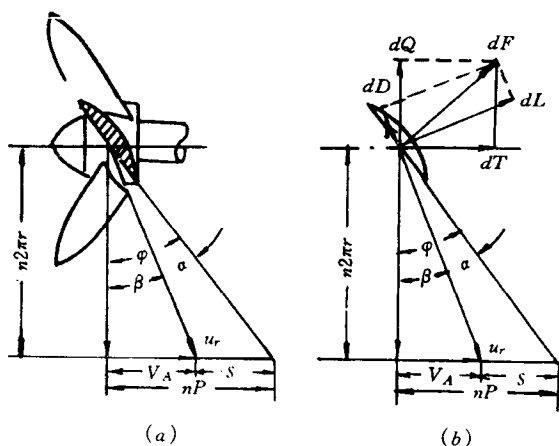


图 1-1 航行时螺旋桨的推力

$$\text{或} \quad S_r = \frac{nP - V_A}{nP} = 1 - \frac{V_A}{nP} \quad (1-8)$$

当螺旋桨紧靠船后,由于船体伴流 W_A 的影响,则螺旋桨的前进速度 $V_A = V_S - W_A$ 。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

$$S' = nP - V_S \quad (1-9)$$

$$S_r' = \frac{nP - V_S}{nP} = 1 - \frac{V_S}{nP} \quad (1-10)$$

式中: S' 称为虚滑失(virtual slip); S_r' 称为虚滑失比(virtual slip ratio)。

船舶前进时存在伴流,螺旋桨前进速度 $V_A < V_S$ 。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,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,故船后螺旋桨的推力 T 将比远后螺旋桨的推力为大。由此可见,伴流对提高螺旋桨推力是个有利因素。为了利用伴流这个有利因素,应将螺旋桨尽量设置在伴流较大的位置处。通常情况下 $S_r' < S_r$ 。但船舶静止或后退中,不管进车还是倒车,螺旋桨处由于不存在伴流,此时 $S_r' = S_r$ 。

从图 1-1(b)可知,螺旋桨工作时产生的推力大小取决于滑失(比)大小。滑失越大,冲角 α 便越大,若转速一定,则螺旋桨的推力和转矩越大。由此可见,对于给定的船舶,当转速一定时,船速越低,滑失比就越大,推力越大。当船速不变时,提高转速,滑失比增大,推力也增加。船舶在静止中系泊时用车,船速为零,滑失比 $S_r = 1$,此时推力很大。

从上述滑失比的概念可知,滑失比的大小与船舶运动状态和螺旋桨的转速有关。对于一定的船舶而言,若船舶航行时,船体污底严重、风浪越大或航行于浅窄航道中,同样转速下船速越低,滑失比就越大。若船舶浮态变化,例如吃水增加、过大的首倾,则转速相同时船速越低,滑失比越大,推力和转矩越大。因此,驾驶人员在上述条件下航行如船舶阻力较大时,应注意避免因转速过高、滑失比过大而导致主机超负荷运转。

4. 推力和阻力的关系

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 、转矩 M_Q 与转速的平方(n^2)成正比。当转速 n 一定时,随着船速 V_S 提高,推力 T 逐渐下降,因此船舶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的。前面已述,船体的阻力 R 却是随船速提高而增大的,因此根据推力、阻力与船速的关系可知,当推力 $T > \text{阻力 } R$ 时,船舶作加速运动;推力 $T = \text{阻力 } R$ 时,船舶作等速运行;推力 $T < \text{阻力 } R$ 时,船舶作减速运动。

三、主机功率与船速

主机所发出的功率,除了提供驱动螺旋桨产生相应的转矩所需要的功率以及克服主机和传动轴系摩擦所需要的功率外,还必须驱动螺旋桨产生推力,为船舶运动提供有效功率。见图 1-2 所示。

1. 功率

1) 主机功率(machinery horse power)MHP

(1) 指示功率(indicated horse power)IHP

用来表示往复式发动机汽缸内活塞所做的功。实船可通过汽缸内平均有效压力计算。蒸

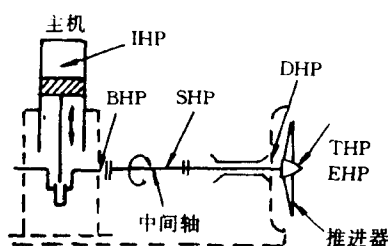


图 1-2 船用功率的名称

汽机的主机功率常用 IHP 表示。

(2) 制动功率(brake horse power)BHP

指实际能输出主机之外可加以利用的功率。柴油机的主机功率常用 BHP 表示。

(3) 轴功率(shaft horse power)SHP

根据中间轴上的转矩表来测定功率大小。对于汽轮机一类机器,因为无法测定其输出端的功率而采用轴功率 SHP 来表示。

2) 收到功率(delivered horse power)DHP

主机功率传递至主轴尾端,通过船尾轴管(stern tube)提供给螺旋桨的功率。

3) 推力功率(thrust horse power)THP

推进器在获得收到功率后,产生推船行进的功率称为推力功率。

$$THP = T \cdot V_P \quad (1-11)$$

式中: T 是推力,单位 kN; V_P 是推进器与水相对速度,单位 m/s; THP 单位 kW。

4) 有效功率(effective horse power)EHP

船舶克服阻力 R 以一定船速 V_S 行进所必需的功率。

$$EHP = R \cdot V_S \quad (1-12)$$

式中: R 单位 kN; V_S 单位 m/s; EHP 单位 kW。

2. 效率

1) 传送效率 η_T

收到功率 DHP 与主机功率 MHP 之比。由于推进轴、中间轴、船尾轴管等处的功率损失,一般 η_T 为 95%~98%。

2) 推进系数 η_P 与推进效率

有效功率 EHP 与收到功率 DHP 之比,称为推进系数(propulsive coefficient)。推进系数大小与推进器种类、数量、性能、船型、船舶大小等因素不同而有较大的变化,一般 η_P 为 60%~75%。有效功率 EHP 与主机功率 MHP 之比,称为推进效率(propulsive efficiency),该值约为 50%~70%。

通常船舶阻力与船速平方约成正比例,则主机功率与船速 3 次方约成正比,即

$$MHP \propto V^3$$

因此

$$V \propto \sqrt[3]{MHP}$$

由上式可知,提高船速则主机功率消耗大大增加。

3. 船速

1) 额定船速(rated speed)

在额定功率和额定转速条件下,船舶在可以忽略浅水影响的深水域中所能达到的静水船速,称为额定船速。额定船速是船舶在深水中可供使用的最高船速。

2) 海上船速(sea speed)

船舶在海上航行时,通常需留有适当的主机功率储备(sea margin),而采用主机海上常用功率。

主机以海上常用功率和海上常用转速运行时,所得到的静水中船速即为海上船速。

有时,在海上航行时,以节约燃料消耗、降低营运成本为目的,根据航线条件等特点而采用经济航速(economic speed)航行。一般经济航速比海上船速低。

3) 港内船速(harbour speed)

与海上航行不同,船舶在港内、狭水道或险恶水域航行时通常备车航行。备车航行时的速度,称为港内船速,或称为操纵速度(manoeuvring speed)或备车速度(stand by speed)。

通常船舶由驾驶台通过车钟指令(engine telegraph)由机舱实现各种操作。港内船速按主机转速不同通常分为前进三(full ahead)、前进二(half ahead)、前进一(slow ahead)和微速前进(dead slow ahead)四档。倒车时通常也有四档,称为后退三(full astern)、后退二(half astern)、后退一(slow astern)、微速后退(dead slow astern)。港内航行的最高船速比海上船速低,而且因船舶主机类型不同而有所差异,一般约为海上船速的 70%~80%。微速前进的转速,是主机能开出的最低转速。应注意的是,由于主机类型和船舶惯性等原因,发出车钟指令和船舶达到该指令所对应的速度之间有时间延迟。此外,确定港内船速大小时应考虑到主机性能、操纵避让需要以及有关限速规定等因素。

第二节 舵的性能

一、舵力

如图 1-3 所示,当舵单独全部没入水中并使之前进,或者将舵放在均匀流的水中,使舵叶与水流成一夹角 δ ,即保持某一舵角时,舵叶将受到水的作用力,通常将作用于舵叶上的水动力合力称为舵力(rudder force or rudder pressure)。

舵力 P_R 可分为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)两部分。因为摩擦力很小,所以舵力与正压力相近,而且舵力方向也近似垂直于舵叶纵剖面。舵力也可分解成垂直于水流方向的分力 P_L ,称为升力(lift),以及平行于水流方向的分力 P_D ,称为舵的阻力(drag)。

$$\left. \begin{aligned} P_L &= \frac{1}{2} \rho A_R V^2 C_L \\ P_N &= \frac{1}{2} \rho A_R V^2 C_N \\ P_R &= \frac{1}{2} \rho A_R V^2 C_R \\ P_D &= \frac{1}{2} \rho A_R V^2 C_D \\ P_T &= \frac{1}{2} \rho A_R V^2 C_T \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中: A_R 为舵的面积(m^2); V 为流速(m/s); ρ 为水的密度(kg/m^3); C_L, C_N, C_R, C_D, C_T 分别是升力、正压力、舵力、阻力、摩擦力的系数; P_L, P_N, P_R, P_D, P_T 分别为升力、正压力、舵力、阻力、摩擦力(N)。

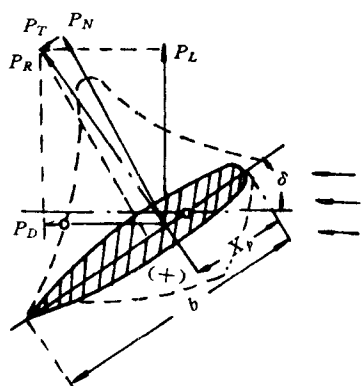


图 1-3 舵力及其分力

升力与阻力之比称为升阻比,是衡量舵性能的一个重要尺度,升阻比越大则舵力越大。图 1-4 所示的是在一定形状的舵叶条件下,升力系数 C_L 随水流入角 δ 的变化关系。开始阶段

随 δ 逐渐增大, 升力系数 C_L 也相应地逐渐增大, 当流入角达到 20° 左右(即失速角 δ_s) 时, 舵叶边缘附近产生涡流而出现急剧的失速现象, C_L 急剧减小。此外, 空泡现象和空气吸入现象等原因也使得升力减小。

舵叶面积即使相同, 但舵叶形状、剖面厚度以及舵叶纵横比对升力也会产生影响。舵叶纵横比 λ (舵高 h 与舵宽 b 的比值) 越大, 升力就大, 故在小舵角时就能得到较大的升力。但 λ 过大, 升力增加过快将会引起过早的失速, 这对大舵角回转运动带来不利影响。

舵正压力 P_N 的大小, 在给定的 ρ, A_R, V 前提下, 若知道正压力系数 C_N 即可按式(1-13)计算。 C_N 值与舵叶形状以及 δ 有关。通常表示平板舵(单板舵)上所受的总正压力 P_N 和压力中心位置 X_P , 可按下列实验公式计算:

Beaufoy 公式

$$P_N = 58.8 \rho A_R V_R^2 \sin \delta \quad (1-14)$$

式中: A_R 为舵面积(m^2), V_R 为舵速(m/s), ρ 为水的密度(kg/m^3), δ 为舵角($^\circ$), P_N 为舵的正压力(N)。

Jössel 公式

$$X_P = (0.195 + 0.305 \sin \delta) \cdot b \quad (1-15)$$

式中: b 为平板舵的宽度(m); δ 为舵角($^\circ$)。

藤井等人公式

$$P_N = \frac{1}{2} \rho A_R V_S^2 \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} \sin \delta \quad (1-16)$$

式中: A_R 为舵面积(m^2); V_S 为船速(m/s); ρ 为水的密度(1025 kg/m^3); λ 为舵的高宽比, δ 为舵角($^\circ$); P_N 为舵的正压力(N)。

二、影响舵力大小的因素(船尾舵的舵力)

1. 伴流与排出流对舵力的影响

船舶在水中运动时, 船体周围有一部分追随船舶运动的水流称为伴流(wake current), 或称为追迹流。船舶前进时, 船尾舵叶处伴流方向与船舶前进方向一致, 从而降低了舵叶对水的相对速度, 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, 为 40% 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较大余速, 却因过强的伴流影响而使舵力减小, 舵效变差。

另一方面, 螺旋桨正车工作时船舶操一舵角, 排出流作用于舵叶上提高了舵叶与水流间的相对速度, 使舵力增大。由于舵叶与水流间的相对速度增加的比例是随着推进器滑失的增大而增加, 因此舵力增加率与滑失比有下列关系

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

式中: ΔP 为舵力增加率; S_r 为滑失比; K' 为比例常数, 舵力大体上以滑失比的 1.5 次方的比例增加。

综合船尾舵受伴流、排出流的影响, 代入到单独舵正压力公式(1-14)中, 冈田和藤井等人

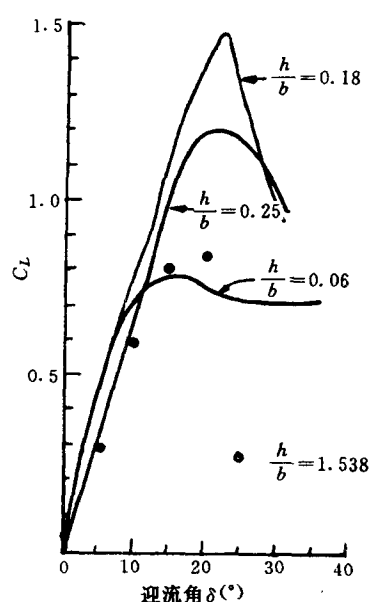


图 1-4 升力系数

得到船尾舵力表达式

$$P_N = \frac{1}{2} \rho A_R V_S^2 (1-w)^2 (1+3.6 S_r^{1.5}) \frac{6.13\lambda}{\lambda+2.25} \sin\delta \quad (1-17)$$

式中: w 为伴流系数, 即船尾舵叶处伴流速度与船速之比, 一般 $w=0.4$; ρ 为水的密度; A_R 为舵面积; V_S 为船速; S_r 为滑失比; λ 为舵的高宽比; δ 为舵角。

2. 旋回运动的影响

船舶用舵旋回时, 见图 1-5(a), (b) 所示, 由于船体的斜航运动, 一方面船舶绕旋回中心进行回转, 舵叶处存在漂角 β , 船尾两侧水流不对称, 螺旋桨流的方向将发生变化, 使舵叶处水流有效流入角 δ_e 减小 β 度; 另一方面船舶旋回时船尾绕转心 P 自转, 船尾水流存在一个切线方向速度, 使有效流入角 δ_e 又减小 γ 度, 因此船舶旋回时舵叶附近水流非常复杂。其影响结果是, 对于操同一舵角 δ_0 旋回时, 舵叶处水流有效流入角 δ_e 比初始舵角 δ_0 减小, 减小量 $\beta_r = \beta + \gamma$, 一般为船尾处漂角的一半。若所操舵角为 35° , 其有效舵角会减小 $10^\circ \sim 13^\circ$, 即有效流入角 $\delta_e = \delta_0 - \beta_r = 35^\circ - (10^\circ \sim 13^\circ) = 25^\circ \sim 22^\circ$ 。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, 以期旋回中舵力能得以提高。

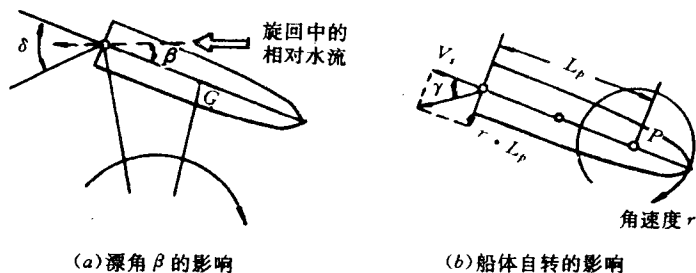


图 1-5 旋回中舵叶处有效流入角减少

第三节 船、桨、舵综合效应

螺旋桨工作时, 主要为船舶提供推力或拉力, 但螺旋桨转动时, 即使操正舵船首也会出现向左或向右的偏转现象, 这就是螺旋桨的致偏作用。这是由于桨叶所受的作用力、螺旋桨流对船体以及对舵叶的作用力左右不对称等原因而产生横向力的结果。下面以右旋式固定螺距螺旋桨(FPP)为例分析螺旋桨的致偏作用力。

一、单螺旋桨横向力

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。

1. 沉深横向力(transverse force of propeller submergence)

螺旋桨在水中旋转时, 除在船首尾方向产生推力或拉力外, 同时其叶片在横向受到水的反作用力。该横向旋转阻力大小随桨叶在水面下的深度增加而增加。沉深横向力就是由于上下桨叶旋转时受到的横向阻力不同而产生的, 见图 1-6 所示。

沉深横向力在部分桨叶露出水面时影响最大, 这是因为露出水面部分的螺旋桨工作时受到的横向阻力很小的缘故。即使桨叶不露出水面, 当沉深比小于一定值($h/D < 0.65 \sim$

0.75), 桨叶接近水面工作时, 会出现空气吸入现象, 上下桨叶所受的阻力的差值也较大, 也会产生沉深横向力, 并随着沉深比的减小明显增大。

对右旋单车船而言, 沉深横向力的作用结果是进车时推尾向右, 船首向左偏转, 倒车时使船首向右偏转。此外, 沉深横向力在船舶起动或在低速过程中加速时影响明显。

2. 吸入流引起的上升斜流作用

船舶前进时, 由于船尾部线型的影响, 从船底沿船体线型流向螺旋桨盘面的吸入流中有自下而上的斜流。由于这种斜流的作用, 右旋单车船前进中进车, 桨叶转至轴右侧向下转动时迎向上升斜流, 使得作用在桨叶上的水流相对流速增加, 推力增大; 当桨叶转至轴左侧向上转动时则相反, 推力减弱。这样使得螺旋桨总的推力中心不在桨轴中心线上而偏向右方(此现象称为推力中心偏位), 从而使船首稍向左偏转。

船舶后退时, 吸入流方向相反, 船尾不会引起上升斜流作用, 由于吸入流从船尾方向来, 此时吸入流的作用效果是稍微提高了舵速, 当操一舵角时产生一定的舵力。

3. 伴流横向力(transverse force of wake current)

船舶前进时, 船尾螺旋桨盘面处伴流流速分布规律特点是: 上大下小, 左右对称。由于伴流的这种特点, 使得螺旋桨工作时, 上部桨叶比下部桨叶进速较低, 冲角较大, 旋转阻力则增大。这种因伴流的影响而出现的上下桨叶的旋转阻力的差值而构成的横向力, 称为伴流横向力。

右旋单桨船, 前进中进车, 伴流横向力推尾向左, 首向右偏转。但总体而言, 这种偏转不明显。船舶静止和后退时, 船尾处不存在伴流, 所以没有该横向力。

4. 排出流横向力(transverse force of discharge current)

船舶前进中操正舵, 螺旋桨进车排出流以一定冲角打在舵叶的左上部和右下部, 由于受伴流的影响, 打在舵叶右下方的水流冲角要大于打在舵叶左上方的冲角, 见图 1-7 所示, 因而舵叶两侧水动力产生差异, 构成排出流横向力。该横向力推尾向左, 首向右偏转。尤其对于舵上部露出水面或舵叶形状上部面积小的情况, 首向右偏转趋势变大。

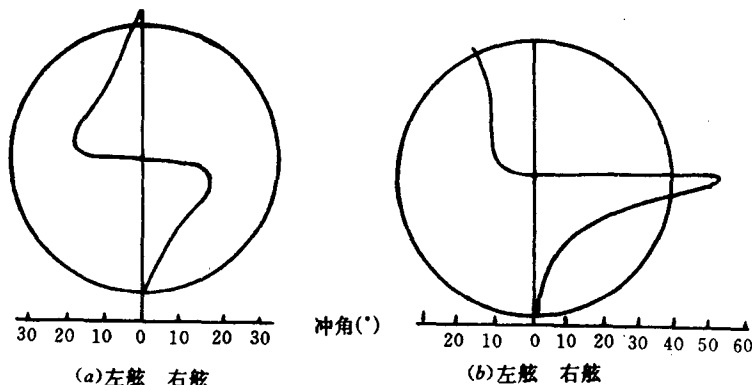


图 1-7 进车时排出流横向力

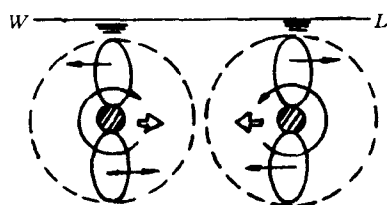


图 1-6 沉深横向力

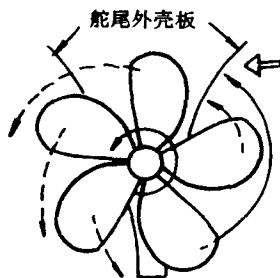


图 1-8 倒车时排出流横向力

螺旋桨倒车时排出流向前打在船尾部, 见图 1-8 所示, 打在船尾右上方的排出流对船体的

冲角和作用面积均大于作用在船尾左下方的排出流。因此,在船尾两侧产生了横向力,该力明显推尾向左,船首向右偏转。

二、右旋单桨船的舵、桨、船综合效应

1. 船舶静止状态中

静止中进车,此时因伴流横向力、推力中心偏位和排出流横向力的影响均非常微弱,主要受沉深横向力作用,使船首向左偏转。这种偏转用舵可以克服。

静止中倒车,因尾部没有伴流和上升斜流,故不存在伴流横向力和推力中心偏位的作用,沉深横向力和排出流横向力均使船首出现明显向右偏转。用舵难以克服这种偏转。

2. 船舶前进状态中

船舶前进航行时,一般商船主要受沉深横向力影响,因伴流和排出流横向力与吸入流引起的推力中心偏位产生的横向力几乎相抵。如为空船;尾吃水较浅,则沉深横向力使船首向左偏转;如重载尾吃水较深时,因沉深横向力很小,船舶偏转极小或几乎不发生偏转。不论如何,用少量舵角即可克服这种偏转。

船舶前进状态中如果开倒车,开始倒车时因倒车排出流横向力不明显,而伴流横向力和沉深横向力通常使船舶偏转方向不定。随着前进速度的降低,排出流横向力增加,船舶将出现右偏并逐渐明显。此时船舶虽仍处于前进状态中,但倒车的排出流阻碍了正常舵效,因此用舵无法克服船舶的右偏。为控制船首右转,通常是在倒车开出前先操左舵,使船先具有左转趋势来克服。

3. 船舶后退状态中

船舶如果从静止中倒车,开始船首明显右偏。随着船舶退速的提高,沉深横向力和排出流横向力都相应减弱,使船首右转减缓,偏转速度将趋于某一个稳定值。

船舶从后退状态中进车,则进车沉深横向力使原来后退状态中的首右偏减弱,而且一进车后排出流速度使舵速得以迅速提高,用舵完全可以克服首偏转。

三、FPP 船致偏作用的运用

FPP 右旋单桨船的横向力效应中最为明显的是,船舶在静止中,低速前进或后退中倒车时,均出现明显首右偏现象,而且用舵难以克服。在实际操船时应根据情况加以利用或防止。

1. 倒车后退稳首操船法

在狭窄水域或港内航道中,常常需要尽快用倒车减低前进速度或后退,但不希望船首出现过大的首右偏,则可采取如下操纵方法:前进中倒车,可在倒车前先用左舵,使船产生左转趋势后再倒车;静止中倒车,则采用操右满舵,利用吸入流和船舶后退速度增大舵速提高舵力,以减弱首右偏。但实践表明,静止中倒车的右偏比较难以克服。

2. 车舵结合缩小向右掉头水域

在无拖轮协助时,船舶可以根据当时水域大小、本身操纵性能估计自身掉头的可行性。可以车舵结合,利用倒车时首右偏的现象,采取向右掉头,缩小掉头水域。

如当时外界风流影响很小,可按下列步骤操纵,如图 1-9 所示。

1) 停车淌航至位①,右满舵,进三。由于此时滑失大,舵效好,船首右转效果好,而且船速不大,故前冲距离并不大。

2) 根据水域大小情况,适时改用退三,待船开始后退时,左满舵,则舵力、沉深横向力、倒车排出流横向力的共同作用均使船首进一步右转,如图中位②。