

CHUANBO CAOZONG

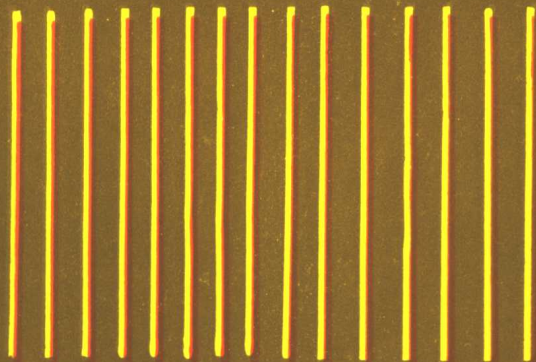


高等学校试用教材

船舶操纵

(内河船舶驾驶专业用)

武汉河运专科学校 邱振良 等编



人民交通出版社

高 等 学 校 试 用 教 材

船 舶 操 纵

CHUAN BO CAO ZONG

（内河船舶驾驶专业用）

武汉河运专科学校 邱振良等编

人 民 交 通 出 版 社

5

印数：0001—2,800册 定价：3.00元

内 容 提 要

本教材共分两篇六章。第一篇船舶操纵基本原理，包括船舶的操纵性能、船舶操纵性能的测定和影响船舶操纵性能的因素；第二篇船舶操纵，包括系、离泊操纵、船队操纵和海事与救助。

本教材为内河大专院校船舶驾驶专业、引港专业和航政专业的教材或参考书，也可供船舶驾驶员、引航员和航政监督人员参考。

前 言

本教材是根据内河船舶驾驶专业《船舶操纵》教学大纲并参考1983年长江干线轮船船长、驾驶员考试大纲编写的，计划课内学时为80学时。考虑到河海兼顾以河为主的精神，以及全日制和函授自学兼用的需要，对船舶操纵的基本原理及船舶操纵的方法作了论述。

教材第一篇的第二章、第三章由李勇、郭国平、杨亚东编写，第二篇的第三章由刘先栋编写，其余各章由邱振良编写。教材由林荣照主审，最后由邱振良统稿。

教材在编写过程中得到南京油运公司李鼎隆副总船长、王汉荣和贾义模船长的热情支持，对教材初稿提供了宝贵的修改和补充意见，特此致谢。

限于编者水平，错误与不到之处在所难免，恳切希望读者提出宝贵意见，以便修改提高。

绪 论

“船舶操纵” (Maneuver of ship) 是指驾驶员根据船舶本身的操纵性能和风、浪、水流等客观条件, 按照避碰规则的要求, 并正确运用操纵设备 (车、舵、锚、缆和辅助拖船), 使船舶按照驾驶员的意图保持或改变船舶运动状态的作业。它是船舶驾驶专业的主要专业课之一。要保证船舶 (船队) 在营运中安全地进行掉头、停泊、启航或编解队等等各项作业和处理特殊情况下的操纵, 驾驶员就必须根据船舶的操纵性能及航道上的客观条件, 运用船舶的操纵设备, 准确、迅速、安全地完成上述各种意图的操纵。

“船舶操纵” 包括船舶操纵基本原理, 系泊操纵, 编、解队操纵和特殊情况下船舶的操纵等内容。

船舶操纵性是船舶操纵的理论基础, 它与船舶的航行性能有密切关系。只有全面理解这些内容和它们之间的关系, 才能掌握船舶的运动规律, 并正确地操纵船舶。

我国对船舶操纵性的研究开始于50年代末、60年代初, 在经过相当一段时间的停滞之后, 最近几年又蓬勃地发展起来。确定作用在船体上的流体动力和船舶几何要素之间的关系, 以及与船舶运动要素之间的关系是研究操纵性能的必要条件。由于在船舶实验研究中运用了计算数学和计算机的成就, 已开始逐步地从定性分析过渡到定量分析, 为将来实现船舶操纵自动化提供了基础。

对船舶 (船队) 的操纵是通过车、舵、锚、缆和拖船来实现的, 是技术性很强的工作。如果没有理论作指导, 不把握住船舶运动的规律性, 则必然使实船操纵存在盲目性而导致失败。我国老一辈船长和引航员在操纵船舶上为我们提供了宝贵的经验, 我们应该好好学习这些经验。在学习这些经验的同时, 我们应将已掌握的理论知识对其进行分析, 从而切实掌握船舶操纵技术, 使船舶操纵这门学科不断向前发展。

避碰规则是船舶操纵的重要准则。在学习本课程时, 应与避碰规则相对照进行, 并能准确地应用到实际操船之中, 防止碰撞等海损事故的发生。

船舶发生碰撞、触礁、搁浅和火灾等事故后, 应采取正确的应急措施, 正确地操纵船舶, 确保船舶和人员的安全。在复杂的环境中, 驾驶人员应该沉着、果断、机智、灵活, 在战略上藐视它, 在战术上重视它, 抓住主要矛盾, 掌握主动权, 正确地操纵船舶。

实践是检验真理的唯一标准。在实际工作中, 不断总结成功的经验, 找出失败的原因, 发扬成绩, 纠正错误, 实事求是, 才能在操纵船舶这一领域里从必然王国逐步走向自由王国。

目 录

绪论.....	1
---------	---

第一篇 船舶操纵基本原理

第一章 船舶操纵性能.....	1
第一节 船舶操纵性能的基本概念.....	1
第二节 船、桨、舵效应横向力.....	2
第三节 舵的工作原理.....	21
第四节 船舶旋回运动.....	38
第五节 操纵性指数 K 、 T 值.....	52
第二章 船舶操纵性能的测定.....	58
第一节 操舵试验.....	58
第二节 旋回试验.....	61
第三节 Z 形操纵试验.....	66
第四节 航向稳定性试验.....	73
第五节 船速与船舶的启、制动.....	76
第三章 影响船舶操纵性能的因素.....	85
第一节 风、流对船舶操纵性能的影响.....	85
第二节 船舶浮态对船舶操纵性能的影响.....	97
第三节 船舶在浅水区中航行的特征.....	99
第四节 岸吸、岸推和船吸.....	102

第二篇 船 舶 操 纵

第一章 系、离泊操纵.....	108
第一节 抛、起锚的操纵.....	108
第二节 回转掉头的操纵.....	120
第三节 靠、离码头的操纵.....	125
第四节 船舶系、离浮筒的操纵.....	150
第五节 其它靠离操纵的介绍.....	151
第六节 大风浪天气中的系泊.....	152
第二章 船队操纵.....	157
第一节 概述.....	157
第二节 吊拖船队的操纵.....	159
第三节 顶推船队的操纵.....	180
第四节 木排队的操纵.....	202

第三章 海事与救助	207
第一节 船舶碰撞.....	207
第二节 搁浅与触礁.....	210
第三节 救火、救生与弃船.....	219
第四节 重要工属具及机件损坏时的措施.....	222
附录：书中常用代号	226

第一篇 船舶操纵基本原理

第一章 船舶操纵性能

第一节 船舶操纵性能的基本概念

船舶操纵性 (Maneuverability) 是指船体 (Hull)、螺旋桨 (Screw propeller) 和舵 (Rudder) 在水中作相对运动所产生的水动力, 使船舶保持或改变其运动状态的性能。或者说是船舶对驾驶员操纵的反应能力。它包括船舶的方向性和启、制动能力。方向性包括操纵灵活性和航向稳定性。操纵灵活性又包括回转性和航向机动性 (追随性)。

船舶回转性 (Turning quality) 是指在船体、螺旋桨和舵 (以下简称为船、桨、舵) 效应横向力作用下, 船舶的回转性能。该性能可用旋回圈诸要素或旋回性指数 K 值来衡量。回转角速度越大, 旋回圈直径越小, 回转性能越好; 否则, 反之。

航向机动性是指在船、桨、舵效应横向力作用下, 船舶改变航行方向的快慢能力, 或船舶受外力作用偏离了原航向, 用舵操纵船舶使它恢复原航向航行的快、慢能力。航向机动性的优劣, 可用操舵后船舶达到与该舵角对应稳定回转角速度所需时间的长短来衡量。

船舶操纵灵活性的优劣, 可通过中等舵角的“Z”形操纵试验和旋回试验来测定。

船舶航向稳定性 (Course stability) 是指船舶保持指定航向航行的能力。即是用正舵使船舶保持沿原航向航行的距离和时间, 或在一定的时间内船舶偏离原航向的度数来衡量; 或者为了保持船舶按指定的航向航行所需的操舵次数和所用舵角的大小等来衡量。航向机动性好的船, 其航向稳定性也较好。

船舶启动能力是指开动主机后, 船舶是否能即刻起动运行的性能。这一性能用船舶达到与主机功率相应的航速所需的时间和航行距离来衡量。

船舶制动能力是指船舶在某一航速下, 主机停车或倒车以后, 船舶对主机工况的反应能力。它用主机停车或倒车后船舶对岸相对静止所需的时间和船舶滑行距离的长短来衡量。

从船体结构角度来看, 船舶航向稳定性与回转性两者之间存在着一定的矛盾。对同一船舶而言, 改善船舶的回转性必将导致其航向稳定性变差; 反之, 若提高其航向稳定性, 必将以降低其回转性。因此, 在船舶设计和建造时, 必须抓住主要矛盾, 解决主要矛盾。对从事远洋航行的船舶而言, 因其变更航向、系离泊次数较少, 主要是保证船舶具有良好的航向稳定性, 船舶的回转性是次要的。对从事内河航行、短途航行或在狭窄、弯曲、急流航道中航行的船舶, 或在航行中频繁改变航向、系离泊次数较多的船舶, 则应保证它们具有良好的回转性, 航向稳定性是次要的。因此, 在设计船舶时, 对于前者, 主要考虑如何改善航向稳定性, 适当地考虑回转性。对于后者, 主要考虑如何改善船舶的回转性, 适当地考虑航向稳定性。利用舵设备可使航向稳定性和操纵灵活性这对矛盾得到统一。正舵时, 相当于加大尾鳍的作用, 有利于提高航向稳定性。转舵时, 将削弱尾鳍的作用, 并产生舵压力使船回转。

一般说来, 船舶操纵性的优劣与下列因素有关:

1. 船体中纵剖面两舷侧的线型是否均匀对称; 正舵时舵叶中线平面和舵杆轴线是否与中纵剖面在同一平面内, 边舵的中线平面是否与中纵剖面平行或舵叶是否对称; 螺旋桨推力轴线 (如果是双螺旋桨船则为两螺旋桨的推力合力作用线) 是否在船体的中纵剖面上等等。当船体线型、舵叶线型左右均匀对称, 舵叶中线平面和推力合力作用线在中纵剖面上, 则船舶的航向稳定性和操纵灵活性较好。否则较差。

2. 船舶浮态的变化会引起水动力作用点的位置以及回转运动时侧阻力的大小和作用点位置的变化。因而, 浮态对操纵性好坏有直接影响。长宽比大的船舶航向稳定性好, 回转性较差; 长宽比小的船舶则相反。尾鳍大的船, 航向稳定性好; 尾鳍小的船, 则相反。但尾鳍的整流作用, 可提高舵效。

3. 船舶操纵性的优劣与舵面积系数 μ 有密切关系。它由舵叶中纵剖面面积与船体中纵剖面浸水面积的百分比来表示。即:

$$\mu = \frac{A_R}{Ld} 100\%$$

式中: μ ——舵面积系数;

A_R ——舵叶侧面积;

L ——船舶垂线间长;

d ——船舶最大平均吃水。

μ 大, 方向性能好; μ 小, 方向性能则较差。

4. 船舶水线面以上建筑面积的大小、形状和分布的情况, 将引起风动力的大小和作用点的不同。从而影响船舶操纵性能。

5. 船舶的排水量以及货物的配载等等对船舶操纵性亦有影响。

6. 螺旋桨的数目、转速、转向、负荷和倒车时的螺旋桨效率等, 都影响着船舶的操纵性能。

此外, 风、浪、流以及水深等因素对船舶操纵性能亦有很大影响。由此可见, 在内河航行的船舶, 尤其是港作船舶, 为了提高船舶的操纵性能, 可采用全旋回“Z”轴导管螺旋桨、转动导流管、襟翼舵、主动舵、倒车舵、组合舵、旋转圆柱舵、转子舵和侧推器等等设备, 从而提高船舶的操纵性。

第二节 船、桨、舵效应横向力

(Transverse force of hull, screw propeller and rudder effect)

船舶操纵的基本原理是操纵技术的理论基础。实质上, 它是船体——螺旋桨——舵叶三者在工作中相互影响而产生的力学效应。这种力学效应在船舶首尾线方向上的分力, 可使船舶前进或后退; 其横向分力则使船体产生转动和平动, 或者产生反转动和反平动。从驾驶角度来说, 驾驶员应特别注意这些横向力对船舶操纵性能的影响。了解这些力效应的本质和力的大小、方向、作用点的基本概念, 这对于分析采用某一操作时, 本船可能产生的动向和趋势很有帮助, 从而改进操纵技术, 提出更合理的操纵方案。因此, 在讨论船体、螺旋桨和舵与操纵性能的关系时, 实质上就是分析船、桨、舵效应横向力对船舶操纵性能的影响。

船舶在营运时,船、桨、舵互相间的影响是通过媒介——流场传递的。流场中水流的速度和压力的变化决定着船、桨、舵之间的相互影响。流场中水流速度与压力间的关系是相互不同而又互相联系的。连续性方程和伯努利方程可以说明两者间的关系。下面对船、桨、舵效应中几个主要的横向力作一一介绍。

一、单螺旋桨船的船、桨、舵效应横向力

(一)螺旋桨水面效应横向力 (Transverse force of water surface effect of screw-propeller), 简称SWT。

为了提高推进效率,常采用较大直径的螺旋桨,使大部分船舶的螺旋桨处于临近水面的工作状态。海船空载时,常有局部桨叶露出水面的工作情况。所以螺旋桨工作时,扰动水面,混入空气,掀起波浪,引起梢涡损失。由于上桨叶离水面较近,吸入空气较多,引起水的密度下降,掀起波浪较大,梢涡损失较多,使得螺旋桨的推力和旋转阻力显著下降。下桨叶在水中较深处,混入空气较少或不混入空气,掀起波浪也较小,梢涡损失也较小,因此推力和旋转阻力较大。上、下桨叶旋转阻力不平衡,其差值产生横向力,使船舶偏转。由于此横向力是螺旋桨靠近水面工作时产生的水面物理现象,故称为螺旋桨水面效应横向力。

右旋单螺旋桨正转时,上、下桨叶的受力情况如图1-1-1所示。上桨叶的水动力小于下桨叶,势必使上桨叶的推力和旋转阻力也小于下桨叶,盘面上半部的旋转阻力小于下半部,上、下盘面旋转阻力的差额,通过桨轴作用于船尾,使右旋单螺旋桨正转时船尾向右偏转。反转时使船尾向左偏转;左旋单螺旋桨船舶尾的偏转方向则相反。

有人曾对螺距比($\frac{P}{D} = 1.0$), 滑脱比($S = 0.5$), 进速比($J = 0.5$), 螺旋桨直径($D = 0.2\text{m}$)的三叶弓背形螺旋桨模型作不同深度的系列试验。试验结果表明,螺旋桨浸沉深度 h 对推力有影响,其影响情况如图1-1-2所示。

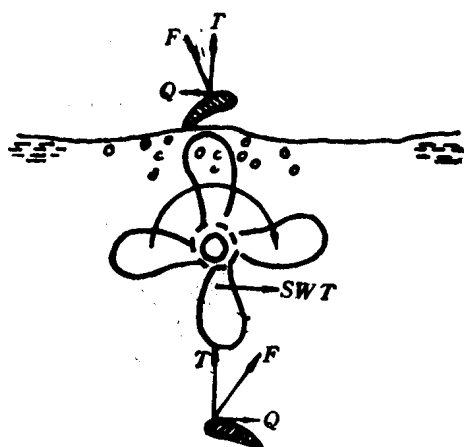


图1-1-1 水面效应横向力
F-水动力, T-推力, Q-旋转阻力, SWT-螺旋桨水面效应横向力

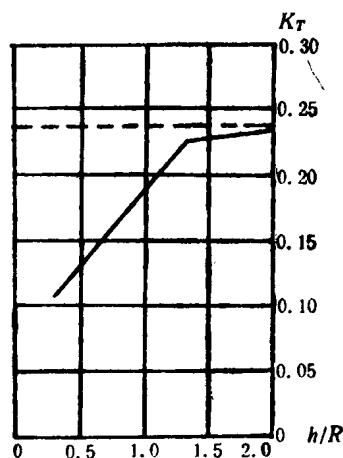


图1-1-2 h/R 与推力系数的关系曲线
 h -桨轴浸沉深度, R -螺旋桨半径, h/R -浸沉深度比, K_T -推力系数

当浸沉深度 h 与螺旋桨半径 R 之比为2时,即桨轴沉深为一个螺旋桨直径时(在螺旋桨试验中称为标准深度),可以看出螺旋桨推力不受浸沉深度的影响。即此时水面效应的影响小到可以忽略不计。当 h/R 减少时,推力系数稍微下降一些。当叶梢离水面距离小于0.3倍半

径时 ($h/R \leq 1.3$)，推力便急剧下降。其原因是吸入空气与梢涡损失急剧增加所致。这一影响以螺旋桨桨叶露出水面工作时为最严重。此时水面效应横向力也将大大增加。

通过进一步研究发现， h/R 的临界值随滑脱比 S 的减小而减小。滑脱比小，螺旋桨浸沉深度对水动力的影响较小。对同一螺旋桨来说，在转速一定的情况下，进速大时，滑脱比小。当船舶刚启动时，进速接近于零，滑脱比为1， h/R 的临界值随之增大。

根据上述试验结果，我们可以作如下的推论：

1) 船舶螺旋桨的浸沉深度如超过直径时，可不考虑螺旋桨水面效应横向力。吃水深、螺旋桨直径小的船舶属于此类情况。

2) 螺旋桨浸沉深度小于1.3倍半径时，水面效应横向力随螺旋桨浸沉深度的减小而急剧增加。船舶的螺旋桨直径较大和空载时属于此类。

3) 船舶启动时，螺旋桨负荷重，诱导速度大，滑脱比较大，对水面的扰动也大，故水面效应影响的浸沉深度临界值比1.3倍半径大些。轻负荷的螺旋桨则可比1.3倍半径小些。随着航速的增加，沿船体首部开始在水线以下部分混入的空气随水流的流动而趋向均匀，使螺旋桨盘面处的空气分布亦趋于均匀。故横向力随航速增加而减少。

4) 水面的遮蔽程度：螺旋桨正上方被船体或其它附件（如隧洞式船体的螺旋桨、导流管等）所覆盖，螺旋桨水面效应横向力将减弱，甚至消失。螺旋桨反转时，因水流从后方向螺旋桨，受船尾的遮蔽作用较差。故反转时的水面效应横向力作用比正转时显著。

5) 与螺旋桨桨叶的切面形状有关。

(二) 伴流效应横向力 (Transverse force of wake effect) 简称为WT

船舶航行中有一股随船前进的水流，这股水流称为伴流。船速与船体附近任意点的流速的差值，便是这点的伴流速度。对运输船舶来说，伴流使船体局部对水速度减少，它直接影响船体阻力；提高螺旋桨的推进效率；降低舵压力。从图1-1-3、1-1-4可知，由于在船尾螺旋桨盘面上伴流速度分布的不均匀性，导致螺旋桨上下桨叶的水动力不平衡而产生伴流效应横向力。

从图1-1-4中可以看出，船舶航行时盘面上半部伴流的平均速度较大，而盘面下半部的伴流平均速度则较小。我们知道，由于盘面附近伴流的存在，必然使流入盘面的水流速度变慢，

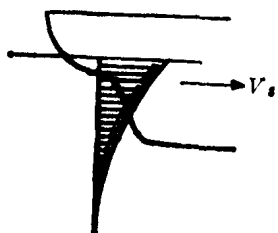


图1-1-3 伴流速度在螺旋桨盘面处的分布示意图
 V_0 —船速

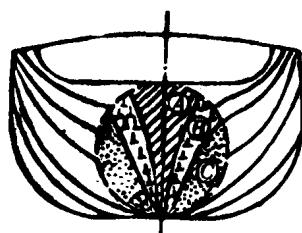


图1-1-4 V型船尾螺旋桨盘面上伴流速度分布示意图
A-伴流速度最大区；B-伴流速度较小区；C-伴流速度最小区

冲角变大，桨叶在旋转一周中遇到伴流流速时大时小，桨叶的相对水流冲角也随之变化。从叶元体速度三角形关系可以看出（图1-1-5）。有伴流影响时的冲角较无伴流影响时的大。从机翼理论可知，在某一临界冲角内，水动力的大小是随着冲角的增加而增加的。可见，螺旋桨盘面上半圆处，伴流速度大，进速小，冲角大，水动力也大；下半圆伴流速度小，进速

大，冲角小，水动力也小。其旋转阻力也是上半圆大于下半圆。这个旋转阻力的差额，构成横向力，通过桨轴作用于船尾，使船偏转，该横向力称为伴流效应横向力。右旋单螺旋桨船在航行时，伴流效应横向力推船尾向左；左旋单螺旋桨船航行时，伴流效应横向力推船尾向右。

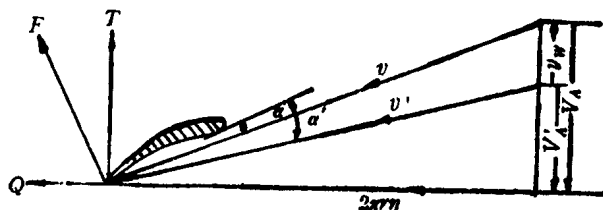


图1-1-5 伴流对叶元体冲角的影响

T -推力； F -水动力； Q -旋转阻力； V_A 、 α -无伴流影响时的进速和冲角； v_w -伴流速度； V'_A 、 α' -有伴流影响时的进速和冲角； v' 、 v -有、无伴流影响时的来流速度

伴流随着航速的增加而增加，因而伴流效应横向力也随着航速的增加而增大。当航速为零时，伴流为零，无伴流效应横向力。此时，如果舵角为零，则船尾的偏转取决于水面效应横向力。所以右旋单螺旋桨船在起动时船尾偏右。随着航速的增加，由于伴流效应横向力和尾流螺旋性效应横向力的出现使船尾偏右的现象减弱，甚至相反。船在高速前进中倒车时，因螺旋桨反转的诱导速度已向前，迫使船尾边界分离，摩擦伴流不作用在螺旋桨上，只剩势伴流的作用，伴流效应横向力将大大减小。实际上，此时螺旋桨附近已产生非常杂乱的混合紊流。故可以认为不存在伴流效应横向力。待船已倒航，舵叶位于螺旋桨的前端，因舵叶的伴流极微，它对操纵性的影响可以忽略。

伴流效应横向力的本质不在于伴流速度的大小，它取决于螺旋桨盘面内伴流分布的均匀程度。因此，若螺旋桨在深 U 型船尾工作，或者是全隧洞式船尾、导流管、以及螺旋桨位置离船体较远，都将影响伴流效应横向力，使此力减弱以至为零。在 V 型船尾后工作的螺旋桨伴流效应横向力的影响最大。

(三)尾流螺旋性效应横向力 (Transverse force of spiral effect of screw race) 简称为RST

螺旋桨工作时，流向螺旋桨盘面的水流称来流。从桨盘面流出的水流称尾流。二者统称为螺旋桨流 (Screw Current)。其中来流速度小，对船舶操纵性的影响也较小。尾流中的诱导速度经螺旋桨的充分诱导加速，流速较大，且具有螺旋性，它作用在舵或船体上，对船舶的操纵性有重要的影响。

1. 尾流速度 (Velocity of screw race)

船舶航行时尾流轴向速度 V'_A 应为进速 V_A 和轴向诱导速度 u'_A 的和。如下式：

$$V'_A = V_A + u'_A$$

式中： V_A ——进速，船体运动引起螺旋桨对水的前进（后退）速度；

u'_A ——尾流中的轴向诱导速度。

在尾流中工作的舵叶的对水相对速度等于尾流速度。因尾流中诱导速度较大，所以舵效较好。在螺旋桨转速不变的条件下，从图1-1-5可以看出，进速增加，冲角减小，水动力下降，诱导速度降低；进速减小，冲角增大，水动力上升，诱导速度增加。当进速为零时，冲角最大，推力最大，诱导速度最大。船舶（船队）通过弯曲航道或回转掉头时，为了减小旋

回圈直径，在回转过程中常采用先慢速，然后再增加转速的办法来提高诱导速度，以便使船舶在较小的航速下，舵叶上能够获得较大的对水相对速度，以增加舵压力，提高舵效。

尾流可以总体地看作管状流柱。流柱前面的横断面就是螺旋桨盘面。随着尾流的加速，后面的横断面有收缩现象，直至诱导速度不再增加，收缩现象也停止并且开始膨胀。利用尾流速度来增加舵压力的前提必须是舵位于尾流流柱之内，并且以收缩最狭处（一般在盘面后相当于螺旋桨直径距离处）流速最高。如果舵叶不在尾流流柱之内（如双桨单舵船），只有当舵转至某一角度，舵叶尾部进入尾流之内才发生作用。

2. 尾流螺旋性效应横向力

尾流中的诱导速度受螺旋桨的旋转加速作用，使流出盘面的水流不仅具有轴向诱导速度 u' ，而且也具有切向诱导速度 u'_t 。所以尾流作与螺旋桨旋转方向相同的旋转运动。如图1-1-6所示。

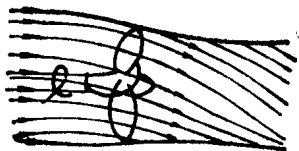


图1-1-6 螺旋桨流

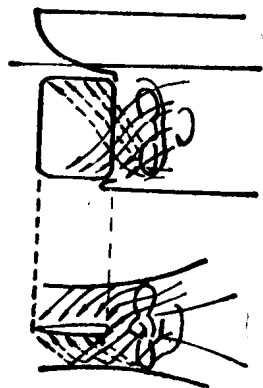


图1-1-7 右旋螺旋桨正转时尾流的螺旋状流对舵叶的冲角

尾流因受螺旋桨的诱导加速作用，形成螺旋状的水流。当螺旋桨正转时，这种水流作用在舵叶两侧；当螺旋桨反转时，这种水流作用在船尾部两侧。由于作用在舵叶和船尾两侧的水流速度、面积和冲角不均匀对称，引起作用在舵叶或船体两侧的动压力不平衡，两侧的总压力差额的横向分力称为尾流螺旋性效应横向力(RST)。现在，我们以右旋单螺旋桨单舵船为例，分析尾流螺旋性效应横向力。

螺旋桨正转时，尾流的螺旋状流线对舵叶的关系如图1-1-7所示（图中只画出经过叶梢流线对舵叶的冲角）。此时舵叶放在正舵位置。从图中可以看出，螺旋桨盘面右边部分的螺旋状流线均以一定的冲角作用于舵叶右面的下半部；盘面左边的流线作用于舵叶左面的上半部。根据模型试验，测定右旋单螺旋桨尾流对舵叶的平均冲角在舵叶上下的分布状况，得曲线图1-1-8、1-1-9。图1-1-8表示无船体影响的右旋螺旋桨尾流对舵叶的水平冲角分布曲线。图1-1-9表示有船体影响的右旋螺旋桨尾流对舵叶的水平冲角分布曲线。很明显，没有船体影响时，螺旋形尾流对舵叶的冲角分布在同一高度上左右不对称，但其上下两半的绝对值是相等的。当螺旋桨工作不受浸沉深度条件影响时，尾流流速是上下对称的。因此舵叶左右两侧所受的水动力左右相等。也就是说，此时的螺旋形尾流对舵不产生横向力。角在同一高度上左右不对称而成的对舵杆的弯矩由舵杆的强度克服。当螺旋桨在船后伴流中工作时，尾流对舵叶的水平冲角分布上下相差很多，平均冲角的增加集中在右下方。这主要是由于船尾伴流上下不均匀性和船体线型斜流的影响。这种影响使流经螺旋桨盘面向舵叶右侧下半部流



图1-1-8 无船体影响时螺旋桨尾流对舵叶的水平冲角

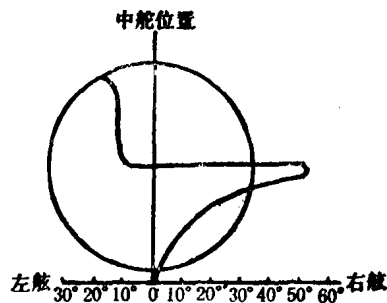


图1-1-9 船后螺旋桨尾流对舵叶的水平冲角

去的尾流速度和平均冲角大于流向舵叶左侧上半部。使舵叶两侧的水动力不平衡，从而产生推动船尾向左偏转的横向力；左旋桨船则相反。

关于尾流螺旋性效应，曾有人作过下述试验：

将右旋单桨船后的舵叶水平地平分为上下两个部分，并使之都能自由转动。当螺旋桨正转时，发现舵叶的下半部偏向左舷近 10° ，而上部只略微转向右舷。对未被分割的完整舵叶，在能自由转动的情况下进行上述试验得出，当螺旋桨正转时，整个舵叶略偏向左舷。

从上述分析和实验结果中可以看出，尾流螺旋性效应横向力，实质上是由于船尾伴流和船体线型斜流影响了螺旋桨的进速、周速、水流攻角、水动力和诱导速度，进而影响了水流对舵叶的相对速度和上、下攻角不等，导致在舵叶的左右动压力不平衡而产生的。因此，我们可以推论出并且在实践中已经得到证实的一些现象。

(1) 右旋单螺旋桨人力舵船向右转舵较向左转舵沉重一些；在同样舵角下，向右回转的旋回圈直径比向左回转的旋回圈直径小些。左旋单螺旋桨船则相反。

(2) 若螺旋桨的位置远离船体，或位于伴流分布较为均匀的船尾后部工作（如U型船尾），尾流螺旋性效应横向力将减小。

(3) 由于伴流和船体线型斜流是随着船速的增加而增加，故尾流螺旋性效应横向力在船速低时较小，并随航速的增加而增加。

(4) 在螺旋桨前、后装有整流片时，螺旋桨中的螺旋状水流运动速度将降低，此时尾流螺旋性效应横向力将有所减小。

当螺旋桨反转时，螺旋状尾流冲向船尾。如图1-1-10所示。中纵剖面右方的螺旋桨盘面流出的流线（图中只画出叶梢发出的流线）作用于船尾部的螺旋桨轴线水平面以上的右舷部分；中纵剖面左方的盘面流出的流线则作用于桨轴水平面以下的左舷部分。从图中可见，作用于右舷部分的流线与船体的交角和作用面积均大于左舷部分。因此，在船尾产生指向左舷的水动压力差，推船尾向左偏转，亦即船首向右转。由于倒车时螺旋桨水面效应横向力也是使船尾偏向左舷的，与尾流螺旋性效应横向力的方向相同。故倒车时船首右转的现象较显著。对于右旋单螺旋桨船来说，在进行靠离码头作业时对这一现象应特别注意。船舶驾驶员常常利用这种特性，采取倒车向右掉头的操纵方法，来缩小旋回圈的直径。若操正舵，倒车不停，这种船也能产生船尾向左的倒航回转运动。

螺旋桨反转时的尾流螺旋性效应横向力产生的实质与正转时不同。正转时，造成尾流对舵叶平均冲角和流速左右不等是船体伴流的不均匀性和船体线型斜流的影响所致。倒转时，造成尾流对船体平均冲角左右不等是船尾线型的影响所致，此时不存在船体伴流和船体线型

斜流的影响。因此，对于单螺旋桨船舶来说，若螺旋桨与船体距离较远，或船尾的横剖面形状上下变化不大、或螺旋桨工作于隧洞式船尾中，倒转时的螺旋桨尾流效应横向力将减弱甚至不存在。

(四)螺旋桨吸力效应横向力 (Transverse force of suction effect of screw) 简称为 SST

螺旋桨正转时，吸力面的负压引起螺旋桨前方——船体尾部的压力下降，使船舶首尾向上压力差增加，犹如产生一个将船体吸向螺旋桨的力，该力称为吸力。在船舶推进理论中称为推力减额。

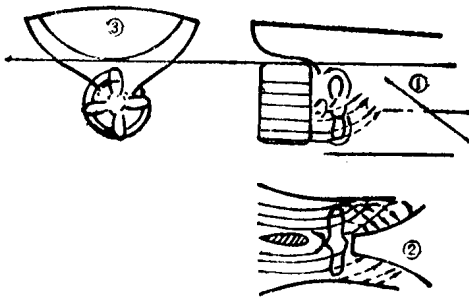


图1-1-10 倒车时螺旋桨尾流对船体的作用
SST-吸力效应横向力

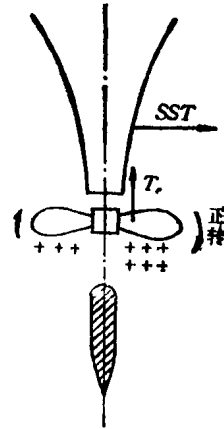


图1-1-11 吸力效应横向力 (SST)

右旋螺旋桨正转时，流入螺旋桨盘面的来流流线可认为是大致平行于前方船体表面的。在方型和U型船尾的单螺旋桨，因受到船尾线型产生的线型斜流的向上分速的影响，使螺旋桨盘面右半圆的水动力大于左半圆，产生推力偏心 T_r ，并使得吸力面的负压力在分水踵两侧出现吸力不平衡而产生压力差。由推力偏心并用力偶矩等效原理表达出来的横向力和分水踵两侧压力差的横向分力的和，称为螺旋桨吸力效应横向力 (SST)。对右旋单螺旋桨船来说，该力推船尾向右，如图1-1-11所示。对于左旋螺旋桨船来说，该力推船尾向左。一般说来，吸力效应横向力对V型船尾的作用很弱，在操纵船舶时可以不考虑。

在船舶操纵中，常发现右旋单螺旋桨船，在启动时船尾偏右现象显著，且随航速的增高而减弱。这是由于船舶在启动时，螺旋桨进速低，负荷重，水面效应横向力大，故船尾偏右现象显著；随着航速的增加，水面效应横向力下降，且出现伴流效应横向力和尾流螺旋性效应横向力，其方向与水面效应横向力方向相反，故船尾偏右现象减弱。而在启动时沿船尾流向螺旋桨的线型斜流向上分速较小，因而吸力效应横向力很小，推船尾偏右的力也较弱；随着航速的增高，线型斜流的向上分速增强，吸力效应横向力也随之增大，显然，这一客观规律与实际现象是不相符的，所以说吸力效应横向力不是右旋单螺旋桨正转时推船尾右偏的主要因素。

螺旋桨反转时，螺旋桨的负压面对舵叶产生吸力。由于此时螺旋桨的来流不受船体的影响，是平行于桨轴流向螺旋桨的。所以正舵时，因舵叶左右对称，而且舵叶厚度很小，吸力很小，可以认为不产生横向力。但是，当舵叶偏转某一个角度时，如图1-1-12所示。螺旋桨吸力面的负压所形成的低压区必然使舵叶靠螺旋桨一面的压力随之下降，而与背螺旋桨一面

之间形成一压力差额,此压力差额可视为螺旋桨对舵的吸力。吸力的横向分力即为吸力效应横向力。由图1-1-12可知,右舵时,吸力效应横向力推船尾向右;左舵时,该力推船尾向左。

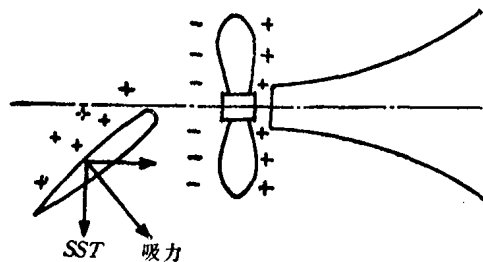


图1-1-12 螺旋桨反转时的吸力效应横向力
SST-吸力效应横向力

螺旋桨反转时,螺旋桨后面负压力区的出现必然在其周围产生一个指向盘面的压力梯度,如图1-1-13所示。水质点在这一压力梯度的作用下,产生流向盘面的吸流。由于水质点本身具有一定的惯性,吸流的产生要有一个诱导加速过程。所以,负压力的出现要比吸流的出现为早。同时,吸流在盘面的远后方流速为零,在压力梯度作用下,水质点逐渐向盘面加速。由于吸流顺压力梯度的流动,起着平衡压力差的作用。故螺旋桨盘面负压力在吸流产生之前最大,随着吸流的增强而减弱,最后稳定在一定的数值上。因此,舵叶上的吸力也随之变化,首先出现最大值,然后随吸流的产生而减小。由于吸力的产生和发展存在这一特性,而船体本身具有较大的惯性,故其横向力对船体的转动作用并不明显,因为它在克服船体的转动惯量过程中,横向力本身便减弱了。但是,吸力在吸流产生之前最大,亦即倒车一开出时最大,当出现最大值时,因其压力不是水质点的流动产生的,故它的压力中心接近舵叶的静压力中心(即形心)位置,对舵杆所形成的力矩较大,而且该力矩具有猝然性和瞬时性。人力舵船或舵机失灵而启用人力应急舵的船,如倒车前没有将舵放在正舵位置,倒车开动时因吸力作用会使舵轮向满舵方向急剧转动,反映在舵轮上的力也很大。这种现象叫做“飞舵”现象。由于飞舵现象具有猝发性,往往使操舵人员措手不及,造成人身伤害和损坏舵设备。为了人身安全和避免损坏舵设备,人力舵船或使用人力应急舵的船,在倒车前应先通知舵工把舵回到正舵位置。在安装平衡舵的船上,这一效应横向力则较小。

吸力的大小显然与螺旋桨的反转转速、倒车拉力、舵角、舵叶面积以及螺旋桨与舵叶间隙大小有关。螺旋桨反转的转速越高,舵角越大,螺旋桨与舵叶的距离越小,吸力也越大。尤其是在船舶前进的情况下倒车,吸力最大。但是,由于螺旋桨反转的功率只有正转时的60%左右,而且吸力的最大值仅出现在吸流产生前很短的一段时间内,在没有克服船的转动惯量前,吸力便因吸流产生而下降了。故吸力效应横向力对操纵性的影响不及其他横向力大。

当吸流产生后,逐渐形成从船尾后方向螺旋桨盘面流动的水流,舵叶在这种水流作用下,在舵两面产生压力差而形成舵压力,其方向与吸力的方向是相同的。但由于来流的流速是在螺旋桨盘面产生负压而形成压力梯度之后,水流速度从零开始增加,故流过舵面的流速远小于螺旋桨正转时尾流中的流速,而且来流产生之后,吸力便随之减小。故此时来流与吸力产生的舵压力大大小于螺旋桨正转时的舵压力。所以船员常说,倒车时的舵效极微或舵失灵。这时船尾的动向由其他几个横向力决定,一般右旋单螺旋桨船,倒车后船尾大多数向左偏转。在船舶产生后退运动并对水产生相对速度之后,舵压力才有所增加,产生一定的舵效,但比前进时的舵效差得多。

现在,我们再看看船舶前进中突然开倒车螺旋桨反转时的吸力作用情况。如图1-1-14所示,这时,螺旋桨盘面前压力迅速增高,螺旋桨的诱导速度沿着船壳板流向前方,迫使船尾的边界层水流分离而离开船壳板,在两个相反方向的水流之间的不连续面上产生无数漩涡。分离的界层水流绕过螺旋桨盘面之后,又被盘面的低压区吸入而成漩涡状弯曲流入盘面。漩