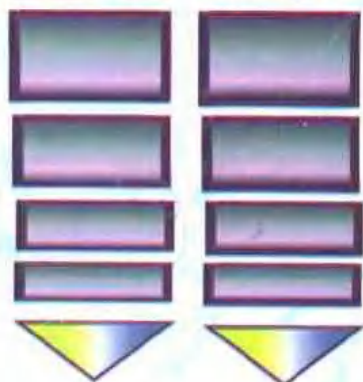


船舶操纵



李 勇
邱振良

主编
主审



人民交通出版社

船 舶 操 纵

chuanbo caozong

李 勇 主编

邱振良 主审

人民交通出版社

船舶操纵

李 勇 主编

邱振良 主审

版式设计:周 园 责任校对:尹 静 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

新世纪印刷厂印刷

开本:850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张:13.125 字数:345 千

1999 年 10 月 第 1 版

1999 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—2100 册 定价:30.00 元

统一书号:15114·0350

内 容 提 要

《船舶操纵》分两篇十章。第一篇船舶操纵基本原理,包括船、桨、舵的工作原理,船舶操纵性,影响船舶操纵性能的因素等。第二篇实船操纵,包括抛、起锚操纵,掉头操纵,系离泊操纵,船队操纵,高速船操纵,特殊情况下船舶操纵和船舶应急操纵等。

本教材作为内河或河海兼顾的船舶驾驶专业、引航专业学生的教材,也可供船舶驾驶员、船长、引航员、港航监督人员参考。



本教材根据海洋、内河船舶驾驶专业的课程、专科船舶操纵课教学大纲及 1997 年海船船员适任考试大纲(根据 1978 年/1995 年海员培训、发证和值班标准国际公约要求制订)和 1994 年内河船舶船长、驾驶员考试大纲编写的。教材编写注意吸收国内外有关船舶操纵理论和实践方面的最新研究成果;注意江海直达船舶驾驶员的要求,融入了内河船舶操纵理论和实践方面的要点;注意将船舶操纵性理论与操船实践的紧密结合。

教材由李勇主编,邱振良主审。绪论、第一、二、四章由李勇编写;第三章由徐周华编写;第五、六、七、八章由郭国平编写;第九、十章由季永青编写。

限于编者水平,教材中差错和疏漏在所难免,恳切希望读者提出宝贵意见,以期修改提高。

编 者

1999 年 2 月

目 录

绪论.....	1
---------	---

第一篇 船舶操纵基本原理

第一章 船、桨、舵的工作原理.....	3
第一节 船体运动时的水动力.....	3
第二节 螺旋桨工作原理.....	7
第三节 舵的工作原理	16
第四节 船、桨、舵效应横向力	48
第二章 船舶操纵性	71
第一节 船舶启动、制动性能.....	73
第二节 船舶操纵性指数	84
第三节 航向稳定性能	96
第四节 船舶回转性能.....	103
第三章 影响船舶操纵性能的因素.....	124
第一节 浮态对船舶操纵性的影响.....	124
第二节 风对船舶操纵性的影响.....	127
第三节 流对船舶操纵性的影响.....	139
第四节 受限水域对船舶操纵性的影响.....	143

第二篇 实 船 操 纵

第四章 抛、起锚操纵	155
第一节 锚的工作原理.....	155
第二节 抛锚操纵.....	163
第三节 起锚操纵.....	176
第四节 锚泊中船舶偏荡、走锚及其措施	180

第五章 船舶掉头操纵	185
第一节 船舶掉头.....	186
第二节 常用掉头操纵方法.....	191
第六章 船舶系、离泊操纵	199
第一节 系泊设施.....	199
第二节 缆的运用.....	204
第三节 港作拖船及其运用.....	210
第四节 船舶驶靠操纵.....	220
第五节 船舶驶离操纵.....	238
第六节 系、离浮筒操纵	247
第七节 其他情况下的系、离泊操纵	254
第七章 船队操纵	261
第一节 概述.....	261
第二节 吊拖船队的操纵.....	265
第三节 顶推船队的操纵.....	295
第八章 高速船操纵	326
第一节 滑行船操纵.....	326
第二节 水翼船的操纵.....	332
第三节 气垫船的操纵.....	339
第九章 特殊情况下船舶操纵	346
第一节 大风浪中船舶操纵.....	346
第二节 冰区船舶操纵.....	360
第三节 受限水域船舶操纵.....	364
第十章 船舶应急操纵	373
第一节 船舶碰撞.....	373
第二节 搁浅与触礁.....	376
第三节 救火、救生与弃船	387
第四节 重要工属具及机器损坏时的措施.....	392
第五节 海上拖带.....	397
第六节 海上搜寻与救助.....	403
参考文献	411

绪 论

船舶操纵是指船舶驾引人员根据船舶操纵性能和外界客观条件,按照有关法规要求,正确运用操纵设备,使船舶按照驾引人员的意图保持或改变船舶运动状态的操作。船舶操纵课是船舶驾驶专业的主要专业课,它包括船舶操纵基本原理和实船操纵。船舶操纵基本原理是实船操纵的理论基础,只有全面理解这些内容及其相互间的关系,才能掌握船舶运动规律,正确地操纵船舶。

船舶操纵性是船舶操纵基本原理的重要内容。我国对船舶操纵性研究起始于 50 年代末、60 年代初,目前对作用于船体上的流体动力和船舶几何要素之间关系,以及与船舶运动要素之间关系的研究,如船、桨、舵效应横向力,船舶操纵性指数 K 、 T 值,船舶操纵性标准等方面获得了大量成果。随着计算机应用科学的日益成熟,使船舶操纵性研究得到进一步的发展,并由定性分析逐步过渡到定量分析,特别是对特种船舶(超大型船舶、浅吃水船舶、高速船舶、大型顶推船队),或在特殊情况下(大风浪、受限水域等)的船舶操纵性研究有了突破性的进展。

船舶操纵是技术性很强的工作,如果没有理论指导,不掌握船舶运动的规律性,必然使实船操纵存在盲目性而导致事故。近年来,船舶操纵性理论研究重视与实船操纵技术相结合,使实船操纵由过去单纯凭经验逐渐过渡到由理论和经验共同指导下的操作。而且,理论与实践相结合也是研究操纵性的方向和趋势。

船舶操纵涉及到人、船舶和操船环境。我们把船舶操纵作为一个大系统,这个大系统由人、船舶和操船环境三个小系统构成,如图 0-1-1 所示。该系统中,船舶驾引人员是主要组成部分,他们通过掌握和处理大量信息,将操船指令输入船舶,使船舶保持或改变运动状态而达到预期的目的。船舶驾引人员所需信息如图 0-1-2 所示。信息包括:



图 0-1-1 船舶操纵系统

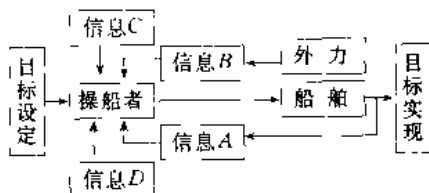


图 0-1-2 操船信息图

(1)信息 A, 本船运动状态, 包括当时的船位、航向、航速、主机转速及其变化趋势等。

(2)信息 B, 自然环境, 包括风、流、浪涌等外界因素。

(3)信息 C, 航行环境, 包括他船大小、动态、船舶密度; 航道水深、宽度、碍航物, 以及助航标志、航行保障系统等。

(4)信息 D, 操船手册, 包括本船操纵性能, 有关法规, 如避碰规则、港章等。

船舶驾引人员对上述信息进行分析处理后, 作出操船指令 (图 0-1-3)。

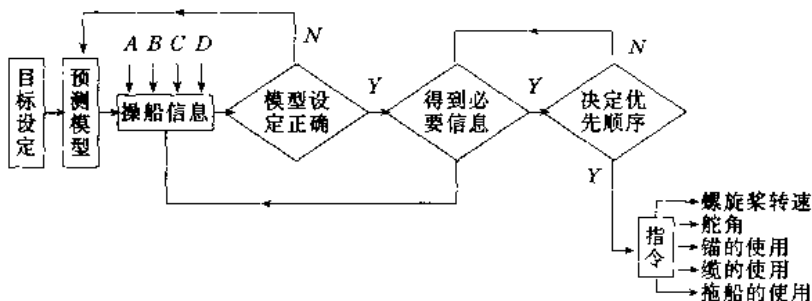


图 0-1-3 信息处理流程图

船舶发生碰撞、搁浅、触礁和火灾事故后, 应采取正确的应急操纵措施。在这种复杂的操船环境中, 船舶驾引人员应该沉着、果断、机智、灵活地分析和处理信息, 作出正确的操船指令, 确保人员安全、船舶安全、货物安全和环境安全。

第一篇 船舶操纵基本原理

第一章 船、桨、舵的工作原理

第一节 船体运动时的水动力

船舶运动时,将受到各运动方向上水的作用力,该力称为水动力合力 R_0 ,其作用点 O 称为水动力合力作用点,简称水动力作用点。通常 R_0 为空间矢量(图 1-1)。

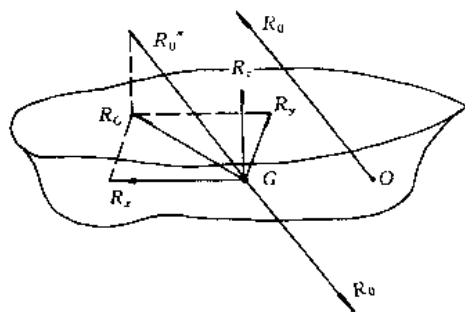


图 1-1

根据力平移原理,在船舶重心 G 处引入与 R_0 平行、等值且方向相反的一对力 R'_0 和 R''_0 。将 R''_0 投影到船舶附近的坐标系中,则得到 R_x 、 R_y 、 R_z ,通过分析水动力合力 R_0 对船舶作用的结果如下:

(1) 水动力 R_x 、 R'_0 形成的力偶矩使船舶绕 x 轴横摇,当与横倾复原力矩平衡时,船舶便保持固定的横倾。

(2) 水动力 R_y 、 R'_0 形成的力偶矩使船舶绕 y 轴纵摇,当与纵

倾复原力矩平衡时,船舶便保持固定的纵倾。

(3)水动力 R_x 、 R'_0 形成的力偶矩使船舶绕 z 轴转动,船舶偏离原航向。

(4)分力 R_x 与船舶运动方向相反,当船舶作匀速直线运动时, R_x 为阻力;当船舶作变速直线运动时, R_x 由水阻力和惯性力组成。

(5)分力 R_y 使船舶产生横移运动。

(6)分力 R_z 与船舶运动方向相垂直,称为动浮力,它与静浮力之和等于船舶的重力。

由于船舶操纵运动主要是考虑平面运动情况,一般不考虑 R_z ,把空间矢量 R_0 视为平面矢量 R_G 。因此,通常水动力合力是指 R_G 力。 R_G 由 R_x 与 R_y 合成,当船舶没有横移运动时, R_G 即为 R_x 。

一、船舶匀速运动时水的作用力

船舶作匀速运动时,使水的质点获得加速度,而在船体微湿表面积 dS 上受到微水动力 ΔR_G , ΔR_G 可分解为法向压力 ΔR_p 和切向应力 ΔR_τ ,作用在整个船体湿表面积 S 上的切向应力 ΔR_τ 称为摩擦阻力 R_f ,法向压力 ΔR_p 称为压差阻力 R_r (又称剩余阻力),压差阻力中包括涡流阻力 R_e 和兴波阻力 R_w 。船体阻力 R_b 的组成为: $R_b = R_f + R_e + R_w$ 。

(一)摩擦阻力

船舶运动时,由于水的粘度,产生紧贴船体运动、具有一定厚度的摩擦伴流,其速度由紧贴船体为零逐渐向外增大,直到边界层与来流速度一致,则边界层内形成速度梯度。由于速度梯度的存在,船舶受到作用力中沿船体运动方向的分力,就是摩擦阻力。

影响摩擦阻力的因素为:船体长度、船体湿表面积、船体表面的光洁程度、流体密度。表面光洁船体的摩擦阻力可按下式估算:

$$R_f = \rho_w g C_f [1 + 0.0043(15 - t)] S V_s^{1.825}$$

式中: R_f ——摩擦阻力, N;

ρ_w ——水的密度(海水标准值 104.5,淡水为 102.0), $\text{kg} \cdot / \text{m}^3$;

C_f ——摩擦阻力系数, $C_f = 0.1392 + \frac{0.258}{2.68 + L}$;

其中: L ——船长, m ;

t ——水温, $^{\circ}\text{C}$;

g ——重力加速度;

S ——船体湿表面积, m^2 ;

V_s ——船速, m/s 。

摩擦阻力在低速时占总阻力的 70% ~ 80%, 是总阻力的主要成份

(二) 涡流阻力

由于水流存在粘性, 造成船体曲度骤变处(如船尾部处)常产生旋涡; 而旋涡处的水压力下降, 改变了沿船体表面的压力分布情况, 导致船舶首尾形成压力差而产生的阻力称为涡流阻力。涡流阻力 R_c 可用下式表达:

$$R_c = \frac{1}{2} \rho_w \cdot S \cdot C_c \cdot V_s^2$$

式中: C_c ——涡流阻力系数。

涡流阻力大小与流体水质点在船后部的速度变化, 即速度梯度有很大关系。船舶中横剖面之后尾部急剧收缩, 涡流阻力大。通常船舶水下部分呈流线型, 因此, 涡流阻力在总阻力中所占百分比比较小。

(三) 兴波阻力

船舶在水中运动时, 船体周围的水形成兴波。由于兴波产生, 改变了船体表面的压力分布情况, 出现船首高波峰, 压力增加; 船中波谷、船尾低波峰压力降低(图 1-2), 形成了首尾压力差。由兴波引起的压力分布改变所产生的阻力称为兴波阻力。

兴波阻力 R_w 可用下式表述:

$$R_w = \frac{1}{2} \rho_w \cdot S \cdot C_w \cdot V_s^2$$

式中: C_w ——兴波阻力系数, $C_w \propto Fr$;

$$Fr \text{——弗劳德数, } Fr = \frac{V_s}{\sqrt{gL}}。$$

由此可见, R_w 与船速的 6 次方成正比。因此, 随着船速的提高, R_w 将急剧增大。

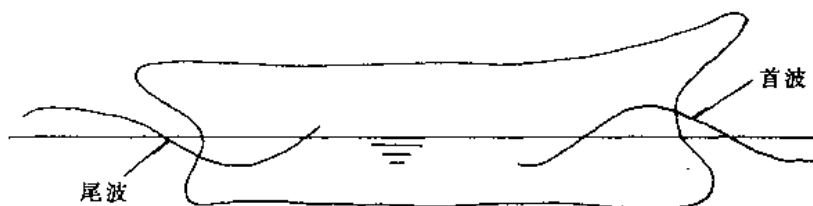


图 1-2

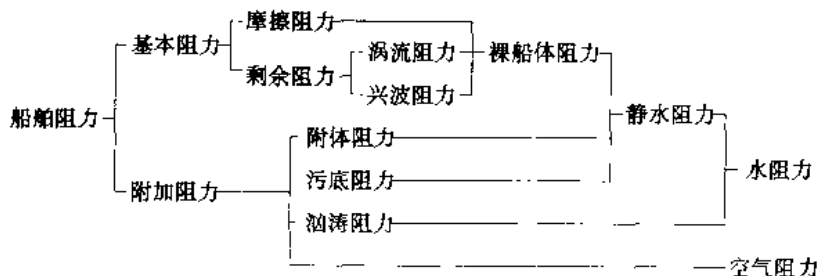
摩擦阻力、涡流阻力和兴波阻力在一般船不同速度段中占总阻力的百分比如表 1-1 所列。

船舶阻力中各种阻力所占比例

表 1-1

阻 力		速 度	低 速	中 速	高 速
		Fr	<0.2	$0.2 \sim 0.4$	$0.4 \sim 0.6$
各种阻力百分比	R_f		70%	50%	35%
	R_e		20%	15%	10%
	R_w		10%	35%	55%

上面分析了船体阻力, 即基本阻力。另外, 还有附加阻力 ΔR , 它包括污底阻力 ΔR_f , 附体阻力 ΔR_a , 空气阻力 A_x , 汹涛阻力 ΔR_r , 浅水附加阻力 ΔR_s 。因此船舶总阻力 $R_x = R_0 + \Delta R$, 即



基本阻力中还包括 3 级风以下的空气阻力。

船舶作匀速直线运动受到水的作用力主要是裸船体阻力。船舶设计主要考虑的是前进状态；而船舶用相同速度前进或后退，后退时的阻力大于前进时的阻力。

二、船舶变速运动时水的作用力

船舶变速运动包括加速运动和减速运动。我们以加速运动为例来说明船舶变速运动时水的作用力。船舶变速运动时，除水阻力 R_x 之外，还受到惯性力作用。后者的产生是由于船舶在水中作加速运动，除克服船体惯性力外，还带动其周围一部分水作加速运动，这一部分可视为船体增加了部分质量。船舶在水中作加速运动受到的惯性力为：

$$F = (m + m') \cdot \frac{dV}{dt}$$

式中， m 为船体质量， $m \cdot \frac{dV}{dt}$ 则为船体质量惯性力， m' 为附加质量， $m' \cdot \frac{dV}{dt}$ 为惯性水动力。

惯性水动力具有方向性，船体横向运动的附加质量就比纵向运动的附加质量大得多。

由于船体开始回转运动时存在角加速度，因此船舶会受到惯性力矩 M_J 的作用：

$$M_J = (J + \Delta J) \cdot \dot{\omega}$$

式中： $\dot{\omega}$ ——船体回转时的角加速度， $1/s^2$ ；

J ——船体回转惯量；

$J \cdot \dot{\omega}$ ——船体质量惯性矩；

ΔJ ——为附连水质量惯性矩。

如果不考虑外界因素，船舶所受的惯性水动力、惯性水动力矩的大小，主要取决于船舶排水量、船体线型、浮态和船舶运动状态。

第二节 螺旋桨工作原理

船舶是由推进器产生推力，使其克服阻力而运动的。推进器

是指把能源(主机)发出的功率转换为推船运动功率的专用装置或系统。推进器种类很多,有明轮、平旋推进器、Z型推进器、喷水推进器、超导推进系统和螺旋桨等,目前应用最广泛的推进器是螺旋桨。

螺旋桨分为等螺距螺旋桨、变螺距螺旋桨、固定螺距螺旋桨(FPP)和可调螺距螺旋桨(CPP)等不同种类。螺旋桨常安装在船尾。在船尾部中线处装一只螺旋桨的船为单桨船;船尾左右各装一只螺旋桨为双桨船。单桨船按螺旋桨旋转方向分右旋式和左旋式两种。右旋式螺旋桨是指当螺旋桨正转时,由船尾朝船首方向看,螺旋桨作顺时针旋转,反转时作逆时针旋转;反之则为左旋式螺旋桨。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。外旋式两桨正转时,左舷螺旋桨左转,右舷螺旋桨右转;反之为内旋式。一般固定螺距的双桨船采用外旋式,可调螺距的双桨船采用内旋式。

一、螺旋桨的推力和转矩

当船舶处于对水静止状态时,螺旋桨在船舶主机的驱动下,正转时产生推力,反转时产生拉力。螺旋桨旋转时,产生螺旋桨流(图1-3)。

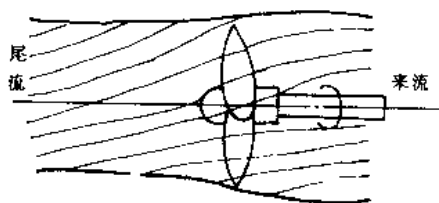


图 1-3 螺旋桨流

螺旋桨流分为来流和尾流。来流是指流向螺旋桨盘面的水流,其特点是:范围较宽,流速较慢,流线几乎相互平行。尾流是指流离螺旋桨盘面的水流,其特点是:范围较窄,流速较快,流线具有螺旋性,且旋转激烈。

(一)螺旋桨产生推力和转矩的基本原理

螺旋桨的桨叶是一种扭曲的机翼,朝向船体的桨叶面是一个螺旋面。图 1-4 所示是距桨轴半径为 r 处的螺旋桨叶切面速度多边形。该叶切面以螺旋桨的进速 V_p 前进,同时以转速 n 旋转,旋转角速度为 $2\pi n$,叶切面处的切线速度为 $2\pi nr$ 。

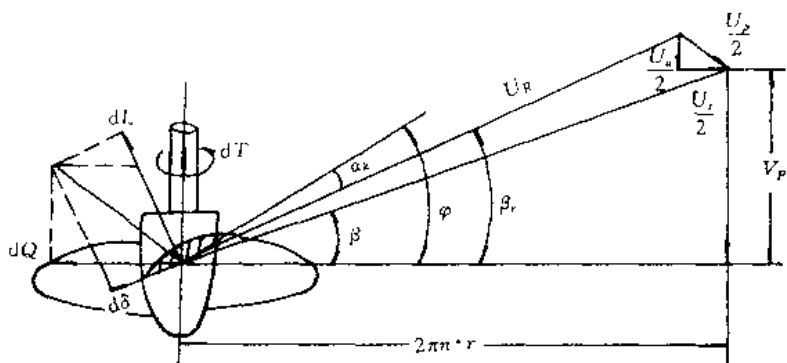


图 1-4

此外,螺旋桨旋转时在螺旋桨盘面处还存在轴向诱导速度 U_a 和切向诱导速度 U_t 。 U_a 的方向与 V_p 的方向相反, U_t 方向与螺旋桨的转向相同。桨叶切面的复杂运动最后可归纳为似水流以合成速度 U_R 、冲角 α_k 流向桨叶切面,叶切面上将产生与水流方向垂直的微升力 dL 和与水流方向相反的微阻力 dD ,其表达式为:

$$dL = \frac{1}{2} \cdot g\rho_w \cdot C_L \cdot b \cdot dr \cdot U_R^2$$

$$dD = \frac{1}{2} \cdot g\rho_w \cdot C_D \cdot b \cdot dr \cdot U_R^2$$

式中: $b \cdot dr$ ——叶切面迎水的微面积, m^2 ;

U_R ——叶切面相对于水的运动速度, m/s ;

C_L ——升力系数;

C_D ——阻力系数。

dL 与 dD 的矢量和为叶切面的微水动力 dP ,将 dP 分解为轴向上的分力 dT 和微旋转阻力 dQ (相应的微阻矩 $dM_Q = dQ \cdot r$)。将各个叶切面微推力 dT 和微旋转阻矩 dM_Q 从桨轴至叶梢

进行积分并乘以桨叶数 Z , 便可得到螺旋桨整体产生的推力 T 和旋转阻力矩 M_Q :

$$T = Z \int_{\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} dT = Z \int_{\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \left(\frac{dT}{dr} \right) dr$$

$$M_Q = Z \int_{\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} dM_Q = Z \int_{\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \left(\frac{dM_Q}{dr} \right) dr$$

经积分、推导可得到:

$$T = g \cdot \rho_w \cdot K_T \cdot n^2 \cdot D^4 \quad \text{N}$$

$$M_Q = g \cdot \rho_w \cdot K_{M_Q} \cdot n^2 \cdot D^5 \quad \text{Nm}$$

式中: K_T ——推力系数;

K_{M_Q} ——旋转阻力力矩系数;

n ——螺旋桨转速, 1/s;

D ——螺旋桨直径, m。

(二) 滑失和滑失比

设螺旋桨的转速为 n , 进速为 V_p , 则其旋转一周在轴向所前进的实际距离 $h_p = \frac{V_p}{n}$ 称为进程。螺距 P 与进程 h_p 之差称为滑失。滑失与螺距 P 之比为滑失比。螺旋桨理论前进速度 $n \cdot P$ 与螺旋桨实际对水速度 V_A 之差为滑失速度。滑失速度与螺旋桨理论前进速度 $n \cdot P$ 之比也为滑失比:

$$S_r = \frac{P - h_p}{P} = \frac{n \cdot P - V_p}{n \cdot P} = 1 - \frac{V_p}{n \cdot P}$$

如果用船速 V_s 代替 V_p , 则成为虚滑失和虚滑失比

$$S'_r = \frac{n \cdot P - V_s}{n \cdot P} = 1 - \frac{V_s}{n \cdot P}$$

滑失比 S_r 值与船舶运动状态、桨的转速与方向有密切关系。如果船舶前进时, 螺旋桨正转, 船舶后退时, 螺旋桨反转, $S_r < 1$; 如果船舶进(退)速度越低, 而螺旋桨正(反)转的转速又很高, 使 V_p/nP 值很小, 则 $S_r \rightarrow 1$; 如果船舶前进时, 螺旋桨反转, 或船舶后