

舵翼襟用船

冯崇谦 编著

国防工业出版社

前 言

随着航运事业的发展,船舶(船队)日趋大型高速化,内河航区也不断向急流浅水航道延伸,船舶密度迅速增加。因此,对船舶操纵性要求愈来愈高。为了开创海上和内河船舶运输的新局面,提高舵效,改善船舶操纵性已成为船舶设计的重要课题。

1964年长江船舶设计院开始研究、实验船用襟翼舵,并逐渐由长江推广到全国内河、沿海多种船舶上。目前,长江已有25个船种270余艘船舶采用襟翼舵,把长江船舶操纵性提高到一个新水平,并取得显著的经济效益。船用襟翼舵已初步形成配套技术(包括船用襟翼舵舵型及主要参数的选择、水动力特性计算、船舵结构及强度、传动机构设计等方面),可为船用襟翼舵的设计提供比较可靠的依据。

为了推广、应用这方面技术,在实验及推广应用的基础上,又搜集和学习了国内外的有关资料写成《船用襟翼舵》一书。但由于编者水平有限,经验不足,书中难免有些谬误之处,望广大读者批评指正。

在实验和推广过程中,青山船厂、长航科研所、东风船厂、华中工学院、天津大学都给予很大支持。借此,致以深切的谢意。

本书全文由鲁祖荣高级工程师校审。

第一、二、三章由蔡铮工程师校核。第一章编写时,武汉水运工程学院李世谟教授曾给予审阅指导。第六章是在薛宗柏、鲁祖荣两位高级工程师的协助下译编而成。作者深表感谢。

编 者

内 容 简 介

本书共分七章，对船用襟翼舵的基本参数选择、水动力特性计算、舵叶与传动机构的结构和强度计算，以及襟翼舵应用于船舶的经济价值作了阐述。还介绍了国内实船使用中的典型结构、国外的应用现状及特种舵的新发展。

本书可供船舶科研、设计部门和船厂的技术人员参考，也可供大专院校有关专业师生参考。

船 用 襟 翼 舵

冯 崇 谦 编著

*

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张20¹/₂ 480千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷 印数： 001— 480册

ISBN 7-118-00026-4/U4 定价：10.50元

目 录

主要符号表	1	§ 4-5 舵叶主尾两体的铰接形式	115
第一章 船舵的功能		§ 4-6 主要零部件设计	148
§ 1-1 概述	5	§ 4-7 舵叶上下两端制流板的应用	163
§ 1-2 船舶操纵运动微分方程式	5	§ 4-8 襟翼舵典型结构示例	166
§ 1-3 “船-舵”与航向稳定性	10	§ 4-9 襟翼舵计算实例	192
§ 1-4 “船-舵”与回转性、应舵性	12	第五章 襟翼舵的实船试验与使用价值	
§ 1-5 操纵性衡准	15	§ 5-1 简介试验船	205
第二章 襟翼舵基本参数的选择		§ 5-2 船舶操纵性的测定与评论	208
§ 2-1 舵面积 S_p	21	§ 5-3 扭矩特性	221
§ 2-2 舵的外形	27	§ 5-4 襟翼舵对航速和横倾的影响	224
§ 2-3 舵的数目与布置	36	§ 5-5 实船使用效果和经济价值	226
第三章 襟翼舵的水动力特性计算		第六章 船用襟翼舵国外应用情况简介	
§ 3-1 舵在水流中的受力	39	§ 6-1 船用襟翼舵的试验与推广概况	236
§ 3-2 敞水中舵的水动力特性	41	§ 6-2 舵叶基本参数和传动机构	247
§ 3-3 船体伴流对舵的影响	101	§ 6-3 襟翼舵与转动导流管	249
§ 3-4 螺旋桨尾流对舵的影响	105	§ 6-4 KSR 型舵承的应用	250
§ 3-5 襟翼舵水动力特性在实船应用中的修正和计算表格	118	§ 6-5 在螺旋桨尾流中船用襟翼舵水动力特性的研究	257
§ 3-6 舵的空泡	123	第七章 特种舵	
§ 3-7 倒航时舵的水动力特性	124	§ 7-1 变翼舵	269
§ 3-8 舵机的选择	126	§ 7-2 组合舵	296
第四章 襟翼舵的结构与计算		§ 7-3 组合型转子襟翼舵	309
§ 4-1 导杆式传动机构	128	附录 单位换算表	322
§ 4-2 齿轮式传动机构	132	参考文献	323
§ 4-3 摇臂式传动机构	136		
§ 4-4 滑块式和曲柄式传动机构	143		

主要符号表

L_f ——船总长, m;	x_g ——重心纵向位置, m;
L_d ——船队总长, m;	l_p ——舵水动力中心至船舶重心的距离, m;
L_{WL} ——设计水线长, m;	l_d ——舵杆至船舶重心的距离, m;
L_{bp} ——两柱间长, m;	$\bar{l}_d$ ——舵杆至船舶重心的相对距离, m;
B_e ——船型宽, m;	D_n ——定常回转直径, m;
B_z ——船总宽, m;	$\bar{R}_n$ ——相对回转半径;
B_d ——船队总宽, m;	$\bar{D}_n$ ——相对回转直径;
H_e ——船型深, m;	ψ_e ——伴流系数;
T_e ——船吃水, m;	t ——时间, s;
T_{ep} ——平均吃水, m;	τ ——无因次时间;
T_{eH} ——首吃水, m;	λ_r ——船舶模型的缩尺比;
T_{eK} ——尾吃水, m;	H_r ——航道水深, m;
V ——船舶的排水体积, m^3 ;	C_V ——“船-舵”系统横向力系数;
Δ_e ——船舶的排水量, t;	C_M ——“船-舵”系统力矩系数;
i ——边界肋骨号数;	C_Y^{β} ——漂角引起的横向力位置导数;
δ_e ——方形系数;	C_Y^{α} ——舵角引起的横向力位置导数;
φ_e ——棱形系数;	C_Y^{ω} ——旋转引起的横向力位置导数;
β_{Σ} ——中横剖面面积系数;	C_M^{β} ——漂角引起的力矩位置导数;
σ_{Π} ——纵中剖面面积系数;	C_M^{α} ——舵角引起的力矩位置导数;
F_{Π} ——船舶纵中剖面水下面积, m^2 ;	C_M^{ω} ——旋转引起的力矩位置导数;
f_{Π} ——船舶纵中剖面尾部空缺面积, m^2 ;	$\bar{C}_1, \bar{C}_2$ ——作用在“船-舵”系统的横向力系数中包含漂角 β 的一次项和二次项的系数;
Δ_1 ——船舶的静纵倾;	M_a ——舵角引起的水动力力矩, $kgf \cdot m$;
Δ_2 ——船舶的航行纵倾;	M_{β} ——漂角引起的水动力力矩, $kgf \cdot m$;
β ——船舶的漂角, ($^{\circ}$);	M_{ω} ——阻尼力矩(或旋转力矩), $kgf \cdot m$;
β_n ——定常回转时的漂角, ($^{\circ}$);	
ψ ——船舶的航向角, ($^{\circ}$);	
ω ——船舶回转的角速度, rad/s ;	
ω_n ——定常回转时的角速度, rad/s ;	
$\bar{\omega}$ ——无因次角速度;	
θ_n ——船舶的动力横倾角, ($^{\circ}$);	
x_e ——浮心纵向位置, m;	

- λ_{11} ——船舶纵向附连质量, $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$;
 λ_{22} ——船舶横向附连质量, $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$;
 $\lambda_{\theta\theta}$ ——船舶对垂直轴的附连转动惯量, $\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$;
 I ——船舶绕垂直轴的转动惯量, $\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$;
 k_{11} ——纵向附连质量系数;
 k_{22} ——横向附连质量系数;
 $k_{\theta\theta}$ ——附连转动惯量系数;
 q, r, s —— $\beta, \bar{\omega}, \alpha$ 项的系数, 而其注脚如 q_{21} , 第一个数字“2”表示 y 方向的运动方程式, 第二个数字“1”表示 β 是一次式, r, s 的注脚皆此规律;
 m_e ——船舶质量, $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$;
 m_{ex} ——船队附连水质量, $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$;
 R_{ed} ——船队阻力, kgf ;
 S_p ——舵面积, m^2 ;
 S_{ps} ——变翼舵首部面积, m^2 ;
 S_{ps} ——变翼舵中体面积, m^2 ;
 S_{p1} ——尾翼面积, m^2 ;
 h_a ——舵的高度, m ;
 b_a ——舵的宽度, m ;
 b_s ——襟翼舵尾翼宽度, m ;
 b_{as} ——变翼舵首部宽度, m ;
 b_{ax} ——变翼舵中体宽度(弦长), m ;
 b_{as} ——变翼舵尾翼宽度(弦长), m ;
 b_g ——舵杆中心至舵导缘的距离, m ;
 b_p ——舵的水动压力中心距其导缘的距离, m ;
 b_H ——舵的水动压力中心到舵杆中心的距离, m ;
 b_R ——舵面积形心至舵杆中心线的水平距离, m ;
 μ ——舵面积系数;
 $\bar{\lambda}$ ——舵的展弦比;
 $\bar{\lambda}_\varphi$ ——有效展弦比;
 $\bar{\delta}$ ——舵翼型剖面的厚度比;
 $\delta_{\max}$ ——舵翼型剖面的最大厚度;
 $\bar{k}$ ——舵的平衡系数;
 $\bar{t}$ ——襟翼舵的尾弦比;
 $\bar{e}$ ——襟翼舵的转角比;
 $\bar{e}_z$ ——变翼舵中体的转角比;
 $\bar{e}_s$ ——变翼舵尾翼的转角比;
 α ——舵角, $(^\circ)$;
 α_φ ——实效舵角, $(^\circ)$;
 α_{kp} ——临界舵角, $(^\circ)$;
 α_s ——定常回转时的舵角, $(^\circ)$;
 β_z ——变翼舵中体的相对转角, $(^\circ)$;
 β_s ——襟翼舵舵叶主体和尾翼之间的相对转角, $(^\circ)$;
 ϕ_s ——襟翼舵尾翼的绝对转角, $(^\circ)$;
 B_w ——组合舵整流尾的宽度;
 l_w ——整流尾的长度;
 B_b ——舵叶制流板的宽度;
 l_b ——制流板的长度;
 B_{bw} ——制流板的尾部宽度;
 l_{bw} ——制流板收缩部分的长度;
 d_u ——旋转圆柱的直径, m ;
 h_u ——旋转圆柱的有效长度, m ;
 S_u ——旋转圆柱的投影面积, m^2 ;
 ω_e ——圆柱的旋转角速度, rad/s ;
 u ——旋转圆柱表面的周向速度, m/s ;
 $\bar{u}$ ——相对转速;
 n_u ——旋转圆柱的转速, s^{-1} ;
 F_y ——旋转圆柱产生的升力, kgf ;
 C_{yu} ——旋转圆柱的升力系数;
 C_{xu} ——旋转圆柱的阻力系数;
 M_u ——旋转圆柱的转矩, $\text{kgf} \cdot \text{m}$;
 N_u ——在流体中旋转圆柱消耗的总功率, kW ;
 d_H ——舵杆下舵承处的舵杆直径, m ;

- d_B ——舵杆上舵承处的舵杆直径, m;
 C ——舵的合力系数;
 C_n ——舵的法向力系数;
 C_t ——舵的切向力系数;
 C_x ——舵的阻力系数;
 C_y ——舵的升力系数;
 C_p ——舵的压力中心系数;
 C_m ——舵的扭矩系数;
 C_{ps} ——襟翼舵受力作用中心系数;
 C_{xr} ——倒航时舵的阻力系数;
 C_{yr} ——倒航时舵的升力系数;
 C_{pr} ——倒航时舵的压力中心系数;
 C_{x3} ——尾翼阻力系数;
 C_{y3} ——尾翼升力系数;
 C_{m3} ——尾翼扭矩系数;
 C'_{m3} ——尾翼扭矩系数修正值;
 C_f ——平板摩擦系数;
 K_t ——风浪及蛇航时舵扭矩附加系数;
 K_s ——变翼舵中体转动过程附加负荷系数;
 K_v ——尾翼转动过程附加负荷系数;
 χ ——舵的空泡系数;
 P ——舵的作用力的合力, kgf;
 P_n ——舵的法向力, kgf;
 P_t ——舵的切向力, kgf;
 P_x ——舵的阻力, kgf;
 P_y ——舵的升力, kgf;
 M_t ——舵杆扭矩, kgf·m;
 M_K ——舵的水动力扭矩, kgf·m;
 M_3 ——尾翼的水动力扭矩, kgf·m;
 M_f ——舵杆的摩擦扭矩, kgf·m;
 M_e ——等值弯矩, kgf·m;
 M_b ——舵杆计算断面处的弯矩, kgf·m;
 M_T ——舵杆总合成扭矩, kgf·m;
 M_{Tq} ——去舵舵杆扭矩, kgf·m;
 M_{T_h} ——回舵舵杆扭矩, kgf·m;
 T_{d1} ——变翼舵导流负推力, kgf;
 R_{1a} ——变翼舵制动舵位时的拦水阻力, kgf;
 T_s ——变翼舵的制动力, kgf;
 v_0 ——船舶航速, m/s;
 v_r ——船舶回转时的航速, m/s;
 v_e ——螺旋桨水流进速, m/s;
 v_r ——舵的水流进速, m/s;
 v_d ——导流管出口流速, m/s;
 v_t ——船舶设计拖带航速, m/s;
 v_f ——船舶设计自由航速, m/s;
 v_m ——自航模航速, 或船模水池拖速, m/s;
 D_B ——螺旋桨直径, m;
 H ——螺旋桨螺距, m;
 H/D_B ——螺距比;
 S ——螺旋桨滑脱比;
 z ——螺旋桨数;
 n_B ——螺旋桨转速, r/min;
 D_d ——导流管最小内径, m;
 D_e ——导流管出口直径, m;
 β_F ——导流管扩张系数;
 $\bar{a}_F$ ——导流管收缩系数;
 γ ——推进器的尾流效能系数;
 σ_p ——螺旋桨推力负荷系数;
 σ_k ——导流管-螺旋桨负荷系数;
 K_T ——导流管-螺旋桨推力系数;
 K_Q ——转矩系数;
 J ——进速系数;
 η_T ——导流管-螺旋桨效率;
 P_B ——螺旋桨推力, kgf;
 P_e ——导流管-螺旋桨总推力, kgf;
 T_{t0} ——系泊状态时正车推力, kgf;
 T_{pr} ——螺旋桨倒车时负推力, kgf;
 N_p ——主机持久功率, BHP;
 n_j ——主机转速, r/min;
 i_n ——主机转速减速比;
 K ——表征回转性的操纵性指数;

T ——表征航向稳定性的操纵性指数；

K' ——回转性指数的无因次值；

T' ——航向稳定性指数的无因次值；

t_s ——船舶惯性滑行时间，s；

s_s ——船舶惯性滑行距离，m；

σ_s ——材料的抗拉强度， kgf/mm^2 ；

$[\sigma]$ ——许用应力， kgf/mm^2 ；

$[\tau]$ ——许用剪切应力， kgf/mm^2 ；

Fr ——弗劳德数；

Re ——雷诺数；

ρ ——水的密度， $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ 。

第一章 船舵的功能

§ 1-1 概 述

船舶操纵性是船舶的重要航行性能之一，而操纵运动，无论是保持既定航向还是迅速实现所需要的机动，都要依靠舵操纵来完成。因此，舵对于确保航行安全和顺利完成预定的使命都是十分重要的。

船舶操纵性包括三个方面：

- a) 回转性：船舶操舵后作圆弧运动的性能。
- b) 应舵性：船舶回转初期对舵反应的能力。
- c) 航向稳定性：船舶在水平面内的运动受扰动而偏离平衡状态，当扰动完全消除后保持原航向的能力。

不同类型航区的船舶对操纵性的要求也不同，远洋船对航向稳定性要求较高，港作船或内河船则回转性要求较高，大型肥胖船则应舵性和航向稳定性都很重要。对于特殊航区的船，如我国川江船舶，为了不断地越过急流、险滩、暗礁、弯窄航道，就需要有较好的应舵性和回转性。因此，设计时应有不同的侧重。

众所周知，当船体的形状和螺旋桨决定之后，舵是影响操纵性的唯一因素。船型和主尺度的确定，需要综合考虑稳性、快速性、耐波性、船体布置等各方面的要求。除少数对操纵性有特殊要求的船舶之外，在决定主尺度时很少从操纵性需要入手。所以，对于给定的船舶，保证具有良好操纵性的任务就由舵来承担了。当然，这并不排除从操纵性着眼对船体型线，特别是尾部线型结构进行适当的改造。

舵位于船体的尾部，与船体和螺旋桨密切配合，相互影响，形成一个有机的整体。因此，在设计舵时应把船体、螺旋桨、舵作为一个组合来考虑。除了保证在各种情况下的操纵性之外，同时也应促进推进效率有所提高，多年来出现以提高推进效率为主的各种形式的舵就说明了这一点。

对于船体而言，航向稳定性和回转性是矛盾的，只能根据具体的特殊要求给予特殊考虑。

§ 1-2 船舶操纵运动微分方程式

船舶操纵运动微分方程式主要是建立船舶重心 G 的运动速度 v_0 、漂角 β （顺时针为正）及回转角速度 ω （顺时针为正）三者的关系。不考虑操舵过程中船速的变化，无因次操纵运动非线性方程式可表示为

$$\left. \begin{aligned} d\beta/d\tau + q_{21}\beta + q_{22}|\beta|\beta + r_{21}\bar{\omega} + s_{21}\alpha &= 0 \\ d\bar{\omega}/d\tau + q_{31}\beta + r_{31}\bar{\omega} + s_{31}\alpha &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中

$$\begin{aligned}
 q_{21} &= \frac{F_{\perp} L_{WL}}{2(1+k_{22})V} C_Y^{\beta} \\
 q_{22} &= \frac{F_{\perp} L_{WL}}{2(1+k_{22})V} \bar{C}_2 \\
 r_{21} &= \frac{F_{\perp} L_{WL} \bar{C}_Y^{\omega} - 2(1+k_{11})V}{2(1+k_{22})V} \\
 s_{21} &= \frac{-F_{\perp} L_{WL}}{2(1+k_{22})V} C_Y^{\alpha} \\
 q_{s1} &= \frac{-\rho F_{\perp} L_{WL}^3}{2I(1+k_{66})} C_M^{\beta} \\
 r_{s1} &= \frac{-\rho F_{\perp} L_{WL}^3}{2I(1+k_{66})} \bar{C}_M^{\omega} \\
 s_{s1} &= \frac{-\rho F_{\perp} L_{WL}^3}{2I(1+k_{66})} C_M^{\alpha}
 \end{aligned} \tag{1-2}$$

$\tau = t v_0 / L_{WL}$, $\bar{\omega} = \omega L_{WL} / v_0$ ——无因次变换。

其中 L_{WL} ——船舶设计水线长, m;

V ——船舶的排水体积, m^3 ;

$F_{\perp}$ ——船舶纵中剖面水下面积, m^2 ;

ρ ——水的密度, $kgf \cdot s^2 / m^4$;

v_0 ——船舶航速, m/s;

C_Y^{β} ——漂角引起的横向力位置导数;

C_Y^{α} ——舵角引起的横向力位置导数;

C_Y^{ω} ——旋转引起的横向力位置导数;

C_M^{β} ——漂角引起的力矩位置导数;

C_M^{α} ——舵角引起的力矩位置导数;

C_M^{ω} ——旋转引起的力矩位置导数;

$\bar{C}_Y^{\omega} = C_Y^{\omega} v_0 / L_{WL}$, $\bar{C}_M^{\omega} = C_M^{\omega} v_0 / L_{WL}$ 无因次变换;

I ——船舶绕垂直轴的转动惯量, $kgf \cdot m \cdot s^2$;

$k_{11} = \lambda_{11} / \rho V$; $k_{22} = \lambda_{22} / \rho V$; $k_{66} = \lambda_{66} / I$ 。

λ_{11} 、 λ_{22} 分别为船在 x (纵向)、 y (横向) 方向上的附连质量, λ_{66} 为船对 Z 轴(垂直轴)的附连转动惯量, 则 k_{11} 、 k_{22} 为附连质量系数, k_{66} 为附连转动惯量系数。

横向力系数 $C_Y = C_Y^{\beta} \beta + C_Y^{\alpha} \alpha + C_Y^{\omega} \omega$

力矩系数 $C_M = C_M^{\beta} \beta + C_M^{\alpha} \alpha + C_M^{\omega} \omega$

在非线形关系中, $\bar{C}_1$ 和 $\bar{C}_2$ 表示作用在“船-舵”系统的横向力系数中包含漂角 β 的一次项和二次项系数。 $\bar{C}_1 = C_Y^{\beta}$ 。

船舶操纵运动的线性方程式为

$$\frac{d^2 \beta}{d\tau^2} + 2p \frac{d\beta}{d\tau} + q\beta = -s_{21} \frac{da}{d\tau} + s\alpha \tag{1-3}$$

$$\frac{d^2 \bar{\omega}}{d\tau^2} + 2p \frac{d\bar{\omega}}{d\tau} + q\bar{\omega} = -s_{s1} \frac{da}{d\tau} + \bar{s}\alpha \tag{1-4}$$

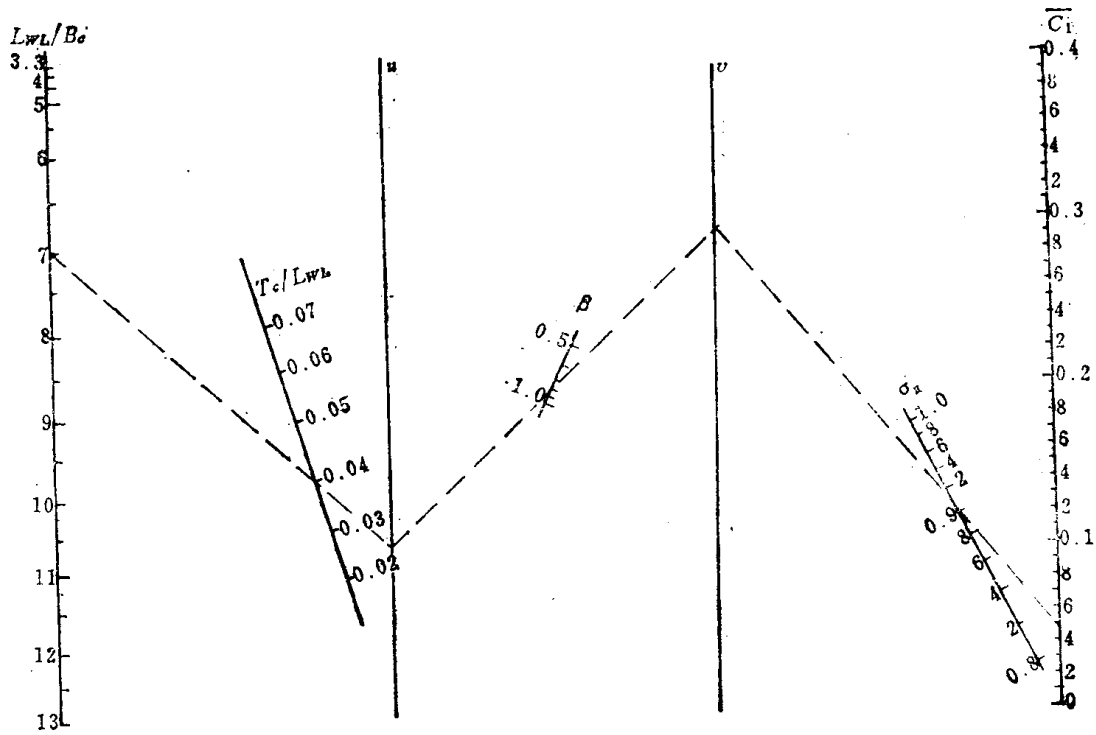


图1-1 确定系数 C_1

使用方法：(1) 由 L_{WL}/B_c 、 $T_c/L_{WL} \rightarrow u$ ，(2) 由 u 、 $B_{\text{波}} \rightarrow v$ ，(3) 由 v 、 $\sigma_D \rightarrow \overline{C}_1$ 。

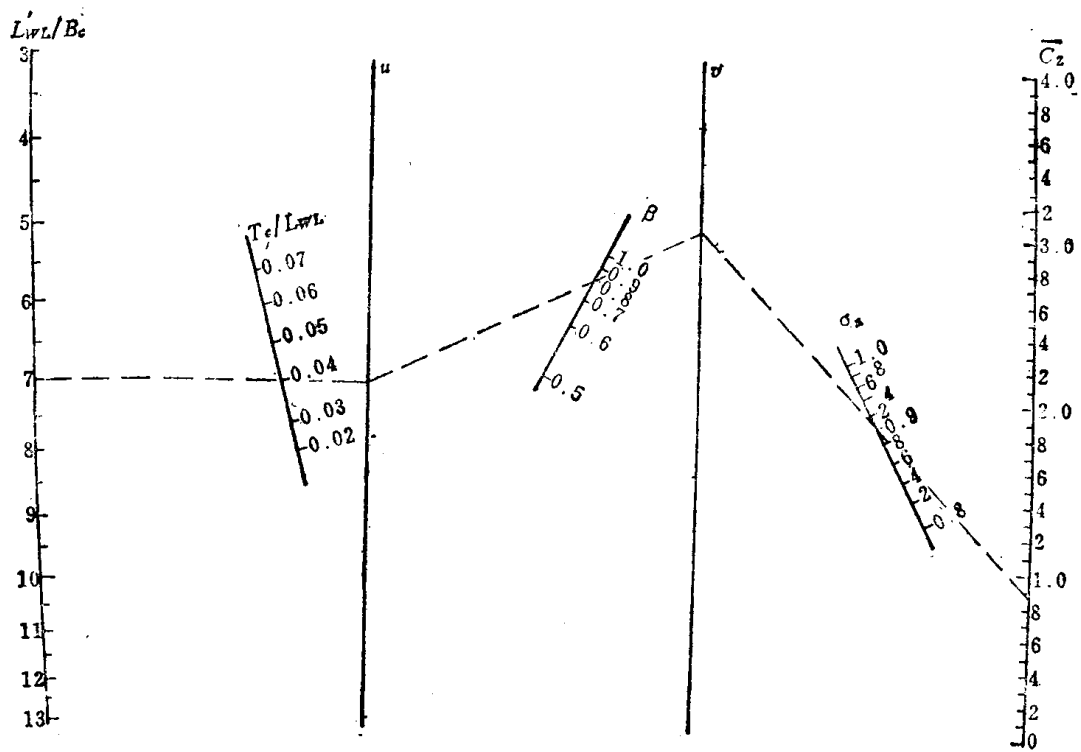


图1-2 确定系数 C_2

使用方法：(1) 由 L_{WL}/B_c 、 $T_c/L_{WL} \rightarrow u$ ，(2) 由 u 、 $B_{\text{波}} \rightarrow v$ ，(3) 由 v 、 $\sigma_D \rightarrow \overline{C}_2$ 。

式中

$$\left. \begin{aligned} 2p &= q_{21} + r_{31} \\ s &= r_{21} \cdot s_{31} - r_{31} \cdot s_{21} \\ q &= q_{21} \cdot r_{31} - q_{31} \cdot r_{21} \\ \bar{s} &= q_{31} \cdot s_{21} - q_{21} \cdot s_{31} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

由图 1-1 至图 1-4 可求出船体水动力系数 $\bar{C}_1$ 、 $\bar{C}_2$ 、 C_M^β 、 C_M^ω 之值。

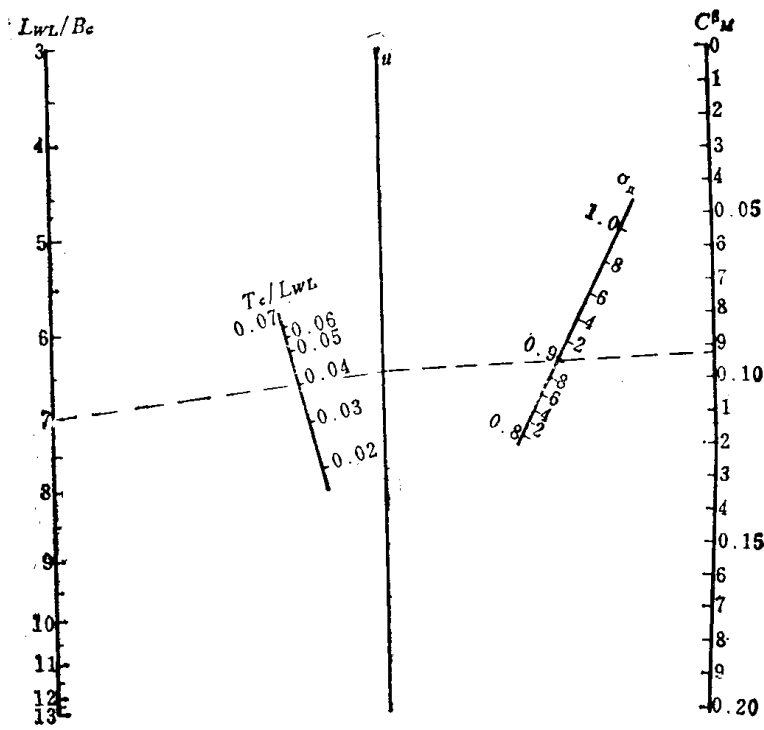


图1-3 确定力矩位置导数 C_M^β

使用方法：（1）由 L_{WL}/B_c 、 $T_c/L_{WL} \rightarrow u$ ，（2）由 u 、 $\sigma_x \rightarrow C_M^\beta$ 。

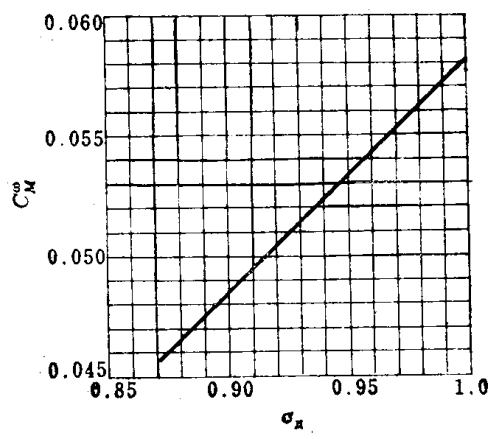


图1-4 确定力矩位置导数 C_M^ω

船纵中剖面面积系数 σ_n 取决于船体尾部形状、静纵倾、航行纵倾诸因素，故引用公式

$$\sigma_n = 1 - \frac{5}{20 - i} \cdot \frac{f_n}{L_{WL} T_{cp}} + \frac{0.03(\Delta_1 + \Delta_2)}{\bar{l}_a T_{cp} / L_{WL}} \tag{1-6}$$

式中 i ——船尾由U形肋骨剖面变为V形肋骨剖面的转变点（呆木起点处）的理论站号。若尾部全是U形（无呆木），则理论站号 i 取为底部与基线交点处的站号；

f_n ——纵中剖面尾部空缺面积；

$\bar{l}_a$ ——舵杆至船舶重心的相对距离 $\bar{l}_a = l_a / L_{WL}$ ；

Δ_1 ——船舶的静纵倾， $\Delta_1 = \frac{T_{cK} - T_{cH}}{L_{WL}}$ ， T_{cK} 为尾吃水， T_{cH} 为首吃水；

Δ_2 ——航行纵倾，由图 1-5 查得；

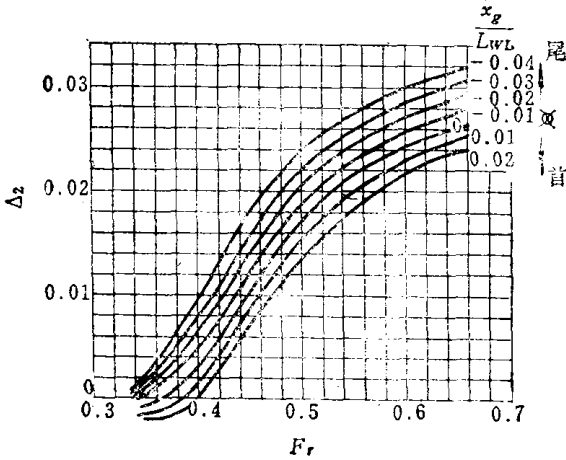


图1-5 航行纵倾 Δ_2 随 Fr 的变化

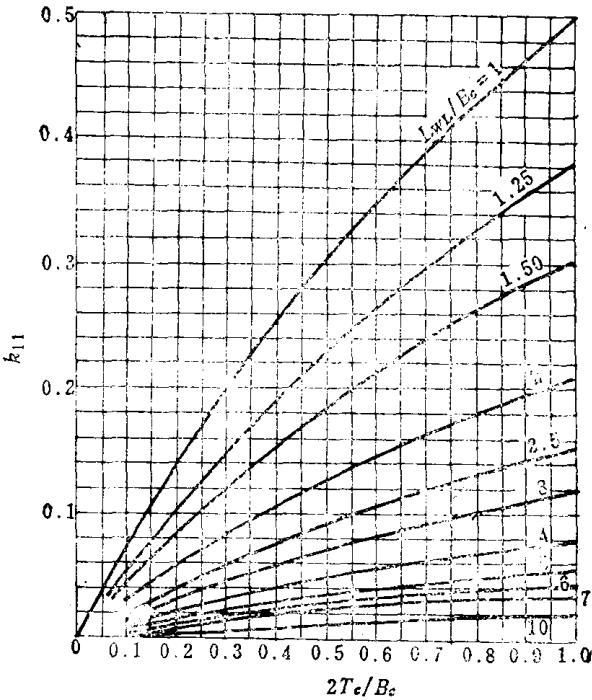


图1-6 船纵（x）向移动时的附连质量系数 k_{11}

x_g/L_{WL} ——船舶重心纵向位置与船长之比;

$Fr = v/\sqrt{gL_{WL}}$ ——弗劳德数。

由图 1-6 至图 1-8 可分别查得 k_{11} 、 k_{22} 、 k_{66} 。

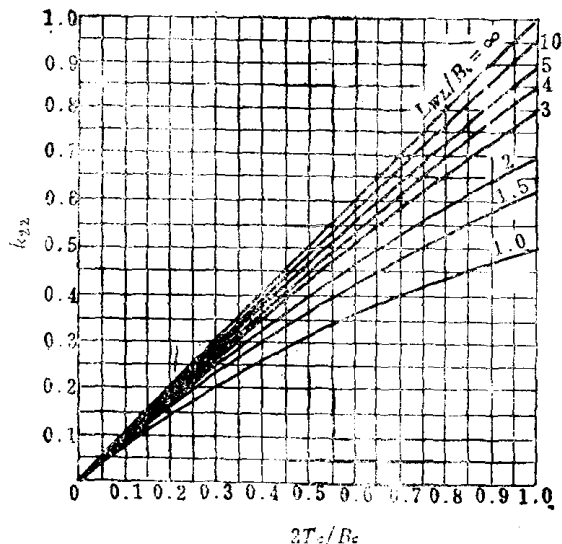


图1-7 船横 (y) 向移动时的附加质量系数 k_{22}

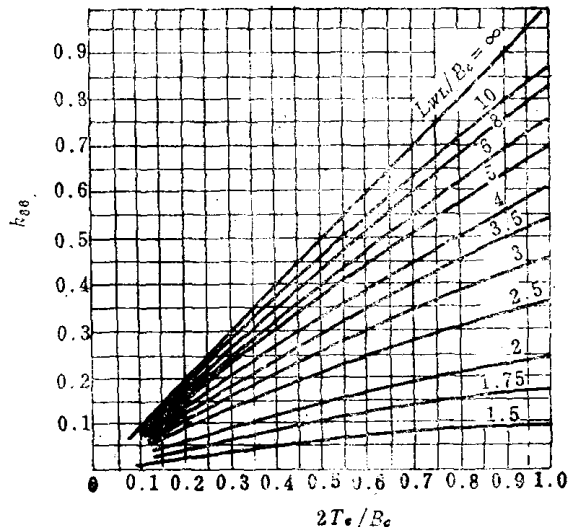


图1-8 船旋转时的附加转动惯量系数 k_{66}

§ 1-3 “船-舵”与航向稳定性

船舶保持所需的航向作直线运动的能力，称为船舶的航向稳定性。

当船作直线航行时 (舵角 $\alpha = 0$)，不可避免的会受到各种偶然因素的影响，如风、浪、水流以及作用在船体上的水动力微小变化等作用，使船舶偏离航向。如果当这些扰动动力去除后，船不操舵，舵角保持为零，即有能力自动回到原航向，则称船舶是自动稳定的。若船舶不具有自动稳定性，而靠操舵来保持航向，则称船舶具有使用稳定性。如果不能做到这一点，则船舶完全不稳定，因此它是不可操纵的，故不适于航行。

一、船舶在直线航向上的稳定性

下面研究船舶在作直线运动时对漂角 β 及航向角 ψ 扰动的动稳定性，着重分析自动稳定的条件。

因为船作直线航行，舵角 $\alpha = 0$ ， $d\alpha/d\tau = 0$ 。故可由方程式 (1-3) 导出“漂角扰动运动微分方程式”

$$\frac{d^2(\Delta\beta)}{d\tau^2} + 2p \left[\frac{d(\Delta\beta)}{d\tau} \right] + q(\Delta\beta) = 0 \quad (1-7)$$

由方程式 (1-4) 导出“角速度扰动运动微分方程式”

$$\frac{d^2(\Delta\bar{\omega})}{d\tau^2} + 2p \left[\frac{d(\Delta\bar{\omega})}{d\tau} \right] + q(\Delta\bar{\omega}) = 0 \quad (1-8)$$

航向角扰动 $\Delta\psi$ 为

$$\Delta\psi = \int \Delta\bar{\omega} d\tau \quad (1-9)$$

方程式 (1-7)、(1-8) 的通解分别为

$$\Delta\beta = C_1 e^{\lambda_1 \tau} + C_2 e^{\lambda_2 \tau} \quad (1-10)$$

$$\Delta\bar{\omega} = D_1 e^{\lambda_1 \tau} + D_2 e^{\lambda_2 \tau} \quad (1-11)$$

将 (1-11) 式代入 (1-9) 式, 得

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= \int D_1 e^{\lambda_1 \tau} d\tau + \int D_2 e^{\lambda_2 \tau} d\tau \\ \Delta\psi &= D_0 + \left(\frac{D_1}{\lambda_1} \right) e^{\lambda_1 \tau} + \left(\frac{D_2}{\lambda_2} \right) e^{\lambda_2 \tau} \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 C_1 、 C_2 、 D_0 、 D_1 、 D_2 均为常数。

λ_1 、 λ_2 是方程式 (1-7)、(1-8) 的特征方程式 $\lambda^2 + 2p\lambda + q = 0$ 的根

$$\lambda_{1,2} = -p \pm \sqrt{p^2 - q} \quad (1-13)$$

$$\text{式中 } q = k [F_{\Pi} L_{WL} C_M^{\beta} C_Y^{\bar{\omega}} - F_{\Pi} L_{WL} C_Y^{\beta} C_M^{\bar{\omega}} - 2(1 + k_{22}) V C_M^{\beta}] \quad (1-14)$$

$$k = \frac{\rho F_{\Pi} L_{WL}^2}{4I(1 + k_{22})(1 + k_{66})V}$$

分析 (1-10)、(1-12)、(1-13) 式可知, 船舶的扰动运动决定于 λ_1 和 λ_2 , 只有当两个根都为负值时, 才能当 $\tau \rightarrow \infty$, $\Delta\beta \rightarrow 0$; 则 $\Delta\psi \rightarrow D_0$ 。而 λ_1 和 λ_2 之值取决于 p 和 q , 一般船的 p 值总为正, q 的正负和大小由船型而定。故可得出:

当 $q > 0$ 时, 船受扰去除后, 将沿新的航向作直线运动, 如图 1-9 中②所示;

当 $q = 0$ 时, 船受扰去除后, 将由原直线运动变成保持一定漂角 ($\Delta\beta = C_1$) 的圆周运动, 如图 1-9 中③所示;

当 $q < 0$ 时, 船受扰去除后, 将由原直线运动变为螺旋运动, 如图 1-9 中④所示; 这一结论显然是由于忽略了非线性项而造成与实际情况不符, 因为船最终达到的将是定常回转运动。

综上所述, $q > 0$ 是船舶对漂角扰动自动稳定的充要条件; 但船舶并不具有对航向角扰动的自动稳定性。所以船在航行中要靠操舵来保持航向稳定, 即具有航向的“使用稳定性”。

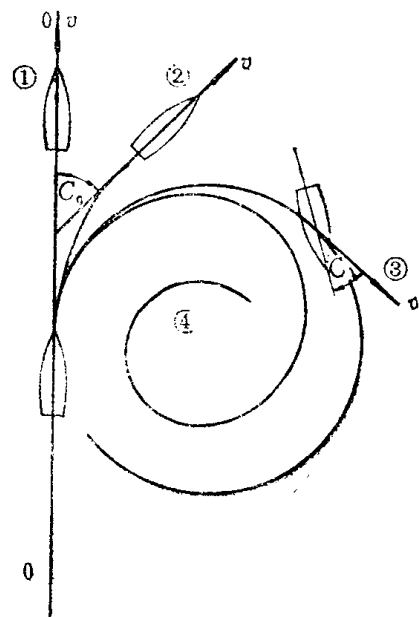


图1-9 q 值对船舶运动的影响

二、船型与航向稳定性的关系

由 (1-14) 式看出, 航向稳定性的好坏主要取决于作用在船体上的水动力方向 and 大小。一般, 横向力位置导数 $C_Y^{\bar{\omega}}$ 通常是一个很小的值, 力矩位置导数 $C_M^{\bar{\omega}}$ 是一个较大的负值, 力矩位置导数 C_M^{β} 是一个不大的负值。若增加航向稳定性, 自然希望增加力矩位置导数 $C_M^{\bar{\omega}}$ 的绝对值, 为此可增加船长, 或加大纵中剖面首尾两端的面积。同时, 力求使力矩位置导数 $C_M^{\bar{\omega}}$ 更大些, 即使水动力位置力的作用点向船尾移动, 而最有效的方法是增加纵中剖面尾部面积; 例如: 增大呆木、安装尾鳍、使船尾倾、削去前踵等, 见图 1-10。

显然，增加首部纵中剖面面积和削去前踵是矛盾的，这说明改善船舶的航向稳定性从首部着手不如从尾部着手显著。

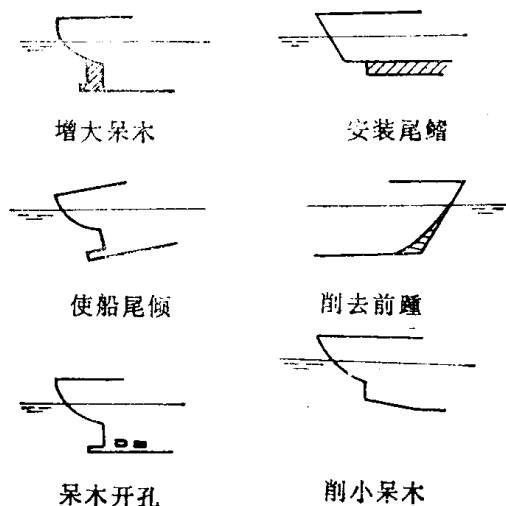


图1-10 船纵中剖面的首与尾

三、舵 的 作 用

舵装在船尾，起到呆木作用，提高了船舶的航向稳定性。当船受到外界扰动，一旦偏离了原来航向，装在船尾的螺旋桨推力方向也随之改变，使船速方向发生了变化，船沿着新的航向前进。因此，具有使用稳定性的船舶，若使船保持既定的航向，航行就必须不断操舵。根据航行中的实践经验，为了保持航向的平均操舵频率不大于每分钟4~6次，平均转舵角不超过 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ，该船亦具有较好的使用稳定性。

§ 1-4 “船-舵”与回转性、应舵性

用操舵来改变航向叫作回转。船舶的回转能力是由回转性和应舵性决定。

应舵性是指船舶回转初期对舵反应的能力。它表征了船在操舵之后改变航向的性能。操舵后船舶能迅速地进入新的航向，或者能较快地将偏离航向纠正，则该船具有良好的应舵性。

回转性和应舵性的区别在于，应舵性实质是操舵后回转力矩改变，船体反应的快慢；回转性则是指在一定的回转力矩作用下船舶作圆弧运动的能力。因此，船舶的应舵性和回转性可能同时都好，但也有应舵性好回转性不好的可能。所以船舶回转能力好的条件是既有良好的应舵性，又要有良好的回转性。

一、船舶回转运动与舵操纵的关系

直线航行的船因改变航向需要于 G_0 点开始转舵至某一舵角 α ，并保持此舵角，船舶将作曲线运动，其重心 G 的轨迹称回转曲线，见图1-11。回转运动可分为下面三个阶段。

1. 转舵阶段——机动阶段

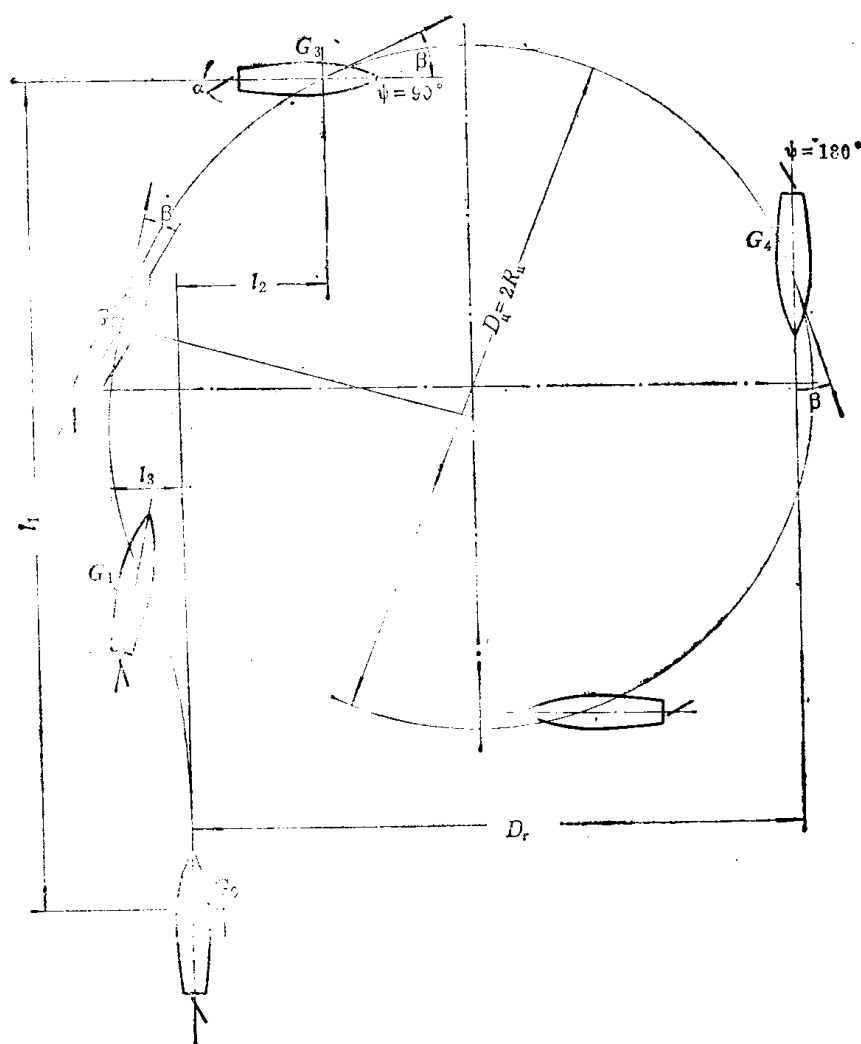


图1-11 回转曲线

由转舵开始到转舵终了，约 6~20s，为转舵阶段。此时舵的水动力由零增至 P ，并可分解为沿船速方向的分量 P_t 和垂直于船速方向的分量 P_n ，见图 1-12。 P_t 为阻力，使船速降低。 P_n 可代之以作用于 G 点的 P'_n 和力偶 $P_n - P'_n$ （即等于 $P_n l_p$ ）。所以 P_n 的作用一方面使船向左移动——“反向横移”，同时又使船顺时针方向旋转。由于船的惯性（质量 ρV 、转动惯量 I 及水的附加惯性）很大，由 P_n 和 $P_n l_p$ 引起的加速度和角加速度都很小，且转舵时间很短，所以在此阶段内船的横向位移和旋转角位移皆很小，船几乎按原航向运动。

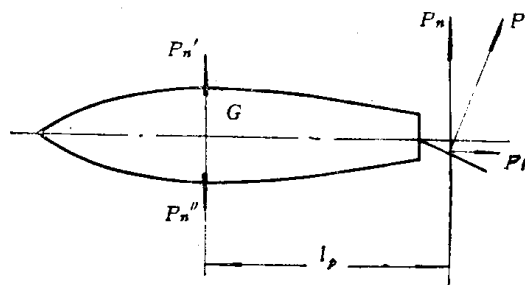


图1-12 转舵阶段水动力分析图

2. 舵角保持前期——发展阶段

转舵终止并保持舵角不变到船舶各运动要素停止改变，即船舶开始作定常运动为止，称为舵角保持前期，船舶回转运动处于发展阶段。一般，船达到定常运动约改变航向 $90^\circ \sim 100^\circ$ 。

由于船舶产生以角加速度 $d^2\psi/dt^2$ 的顺时针方向转动，逐渐使船舶形成一个漂角 β