



指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD10-2003

中国船级社

河船操纵性指南

2003

北 京

中国船级社
指导性文件
河船操纵性指南

开本: 850×1168 1/32 印张: 2 字数: 43 千

2003 年 12 月 第一版

2003 年 12 月 第一版 第一次印刷

印数: 001—1000 册

目 录

第 1 章 通 则	1
1.1 一般规定	1
1.2 定义	2
1.3 操纵性预报、试验等资料的要求	5
第 2 章 河船操纵性标准	6
2.1 一般规定	6
2.2 操纵性衡准	6
2.3 非满载出港情况下操纵性参数	8
2.4 非设计编队情况下顶推船队操纵性参数	8
附录 1 舵面积	10
附录 2 操纵性计算预报	12
附录 3 操纵性自航模型试验预报	42
附录 4 实船操纵性试验	45
附录 5 改善船舶操纵性的措施	54
附录 6 驾驶室可视范围的建议	59

第1章 通 则

1.1 一般规定

1.1.1 本指南旨在向船舶设计、建造和航运部门提供内河船舶操纵性预报方法、标准和改善船舶操纵性措施的建议。

1.1.2 本指南适用于具有舵和螺旋推进器且航行于内河的下列同类新建首制排水型非高速民用船舶和本条(2)所述顶推船队,以下简称船舶(队):

(1) 船长为 50m 及以上的货运单船;

(2) 主机总功率为 883kw 及以上的推船与驳船所组成的顶推船队;

(3) 旅游船和乘客定额 100 人以上的客船;

(4) 液化气体运输船和散装危险化学品运输船。

1.1.3 除有特别说明外,本指南不适用于 J 级航段船舶。

1.1.4 对于经修理、改装和改建且本社认为可能影响其操纵性的 1.1.2 所述船舶(队)仍应满足本指南规定的标准。

1.1.5 本指南所述的操纵性系指下列性能的总和:直线稳定性、航向改变性、回转性、制动性和倒航可操性。

1.1.6 凡操纵性能符合本指南规定标准 and 要求的入级船舶,按照本社《钢质内河船舶入级与建造规范》的规定可在入级符号后加注操纵性标志“Maneuverability”。

1.1.7 本指南所规定的操纵性是以实船(队)操纵性试验进行评价的。按本指南附录 4 要求进行的实船(队)操纵性试验结果是

评定该船(队)操纵性是否符合本指南规定的依据。如果发现船舶操纵性不符合本指南规定标准,本社可要求采取补救措施。

1.1.8 如因船型特殊或航道条件等因素,认为本指南的操纵性标准为不合理或不切合实际时,经本社同意,可根据实际情况调整有关操纵性标准。

1.1.9 船舶(队)在设计送审图纸资料中应提供操纵性预报,预报可用自航模型试验预报或计算预报。自航模型试验预报见附录3,计算预报见附录2。

1.1.10 船舶(队)的预报结果应满足本指南的操纵性衡准规定,且仍应对建成的实船(队)进行操纵性试验加以验证。

1.1.11 船舶(队)操纵性参数虽符合本指南规定的衡准,但船长和驾船人员仍应注意船舶(队)及设备的正确操作与维护、气象、航道及水文条件和船舶规避等,切实做到谨慎驾驶。

1.1.12 本指南对舵面积的选取见附录1,对改善船舶操纵性的措施见附录5,对单船驾驶室可视范围的建议见附录6。

1.2 定义

1.2.1 操纵性能术语

1.2.1.1 直线稳定性——系指船舶(队)受到风、浪、流等外界微小扰动而偏离其定常直线运动,当这种扰动作用消失后,不加任何控制作用,最终能保持直线运动的性能。

1.2.1.2 航向改变性——系指船舶(队)在舵手的操纵下,改变航向快慢的性能。

1.2.1.3 回转性——系指船舶(队)在舵或其他操纵器作用下作

圆弧运动的性能。

1.2.1.4 制动性——系指船舶(队)对于惯性停船和倒车停船的响应性能。

1.2.1.5 倒航可操性——系指船舶(队)在倒车倒航情况下,依靠操舵脱离倒航回转的性能。

1.2.2 操纵性参数术语

1.2.2.1 回转直径——系指回转试验中,船舶(队)进入稳定回转阶段后的回转圆直径。

1.2.2.2 战术直径——系指回转试验中,船舶(队)首向改变 180° 时的重心位置与初始直航向间的垂直距离。

1.2.2.3 纵距——系指回转试验中,自转舵开始瞬时的船舶(队)重心位置至首向改变 90° 瞬时的重心位置沿初始直航向方向量取的距离。

1.2.2.4 横距——系指回转试验中,自转舵开始瞬时的船舶(队)重心位置至首向改变 90° 瞬时的重心位置沿垂直于初始直航向并向转舵一侧量取的距离。

1.2.2.5 平均变向角速度——系指Z形操纵试验中,从试验开始的第一次操舵瞬时起至船舶(队)转首角达到与操舵角相等瞬时止的角速度平均值。

1.2.2.6 初转期——系指Z形操纵试验中,从试验开始的第一次操舵瞬时起至船舶(队)转首角达到与操舵角相等瞬时止所经过的时间。

1.2.2.7 转首滞后——系指Z形操纵试验中,舵回复至零舵角瞬时起至船舶(队)达到最大转首角瞬时止所经过的时间。

1.2.2.8 超越角——系指Z形操纵试验中,反向操舵瞬时的船舶(队)转首角与其后出现的最大转首角之间的差。

1.2.2.9 倒车停船纵距——系指倒车停船试验中,自下倒车令瞬时的船舶(队)重心位置至船舶(队)停止运动时的重心位置沿初始航向量取的距离。

1.2.2.10 倒车停船横距——系指倒车停船试验中,自下倒车令瞬时的船舶(队)重心位置至船舶(队)停止运动时的重心位置沿垂直于初航向量取的距离。

1.2.2.11 倒车停船迹程——系指倒车停船试验中,自下倒车令瞬时起至船舶(队)停止运动止,船舶(队)重心所行经的轨迹长度。

1.2.3 操纵性试验术语

1.2.3.1 回转试验——系指测定船舶(队)回转性能的试验。

1.2.3.2 Z形操纵试验——系指操舵舵角随时间的变化似Z字形的判定船舶(队)航向改变性能的试验。

1.2.3.3 停船试验——系指籍助惯性停船或倒车停船并测定相应船舶(队)停船距离和时间以判定船舶(队)停船性能的试验。

1.2.3.4 回直试验——系指测定船舶(队)直线运动稳定性能的试验。

1.2.3.5 直线稳定性试验——系指测定船舶(队)自动直线运动性能的试验。

1.2.3.6 操舵稳定性试验——系指测定船舶(队)依靠操舵保持航向能力的试验。

1.2.3.7 倒航试验——系指测定船舶(队)在倒车倒航状态下依

靠操舵脱离倒航回转能力的试验。

1.2.3.8 低速舵效试验——系指测定船舶(队)在低速时可操纵能力的试验。

1.3 操纵性预报、试验等资料的要求

1.3.1 舵及其操纵装置的设计应满足本社《钢质内河船舶入级与建造规范》的规定及本指南规定的操纵性衡准的要求。

1.3.2 凡按本指南评定其操纵性的船舶(队)应提交下列操纵性预报、试验等有关资料:

(1) 操纵性预报资料: 自航模型试验预报或计算预报;

(2) 实船操纵性试验资料: 包括回转试验、Z形操纵试验、倒车停船试验、回直试验、直线稳定性试验和倒航试验;

(3) 1.3.3 所述的操纵手册和驾驶室挂图。

1.3.3 操纵手册是对船长考虑驾驶安全的指导。可自行编制但其内容除有针对所驾驶船舶(队)实际提出的驾驶注意事项外,还应包含操纵性数据。

第2章 河船操纵性标准

2.1 一般规定

2.1.1 按本章 2.1.2 规定的满载出港情况下的操纵性参数应满足本章 2.2 规定的操纵性衡准的要求。

2.1.2 本章衡准的操纵性参数按照附录 4 确定：

- (1) 直线稳定性——回直试验或直线稳定性试验；
- (2) 航向改变性——Z 形操纵试验；
- (3) 回转性——回转试验；
- (4) 制动性——倒车停船试验；
- (5) 倒航可操性——倒航试验。

这些试验应在不使用下述任何辅助操纵装置下进行：该辅助操纵装置在正常营运中不是连续使用，也不是随时可供使用。

2.1.3 为评价船舶（队）操纵性能，实船（队）操纵试验应符合附录 4 所规定的试验条件和试验要求。

2.2 操纵性衡准

2.2.1 操纵性衡准规定见表 2.2.1。

表 2.2.1

操纵性能	试验项目	操纵性参数	衡准标准	
			单船	顶推船队
直线稳定性	回直试验，或	r'_0	→0	→0
	直线稳定性试验	\bar{r}'_{0-3}	<0.1	<0.1 *
航向改变性	15°/15°Z 形操纵试验	\bar{r}'_{0-15}	≥0.11	≥0.28
回转性	35° 舵角的回转试验	$\frac{D}{L}$	≤3.0	≤2.5
制动性	倒车停船试验	$\frac{S_H}{L}$ *	≤3.5	≤2.0
倒航可操性	倒航试验	$\frac{\delta_r}{\delta_{max}}$ *	≤1.0	≤1.0

注：* 若作自航模型试验或计算预报确有困难，经同意后可免除自航模型试验或计算预报；如实船操纵性试验达不到本表规定值，经本社同意表列值可做适当调整。

表中： r'_0 ——无因次剩余回转角速度，回直试验舵回中后最终回转

$$\text{角速度 } r_0 \text{ 的无因次值, } r'_0 = r_0 \frac{L}{V};$$

\bar{r}'_{0-3} ——零舵角航行 3min 的无因次平均回转角速度，

$$\bar{r}'_{0-3} = \frac{\Delta C_0}{180} \cdot \frac{L}{57.3V}, \text{ 式中 } \Delta C_0 \text{ 为航向改变量, deg;}$$

\bar{r}'_{0-15} ——15°/15°Z 形操纵试验无因次平均变向角速度，首次

$$\text{操舵 } 15^\circ \text{ 瞬时起至转首角达 } 15^\circ \text{ 瞬时止的角速度平均值 } \bar{r}_{0-15} \text{ 的无因次值, } \bar{r}'_{0-15} = \frac{15^\circ/57.3^\circ L}{t V};$$

D ——回转直径,m;

S_H ——倒车停船纵距,m;

δ_r ——能使船舶(队)脱离倒航回转的最小舵角,deg;

δ_{\max} ——最大可操舵角,deg;

L ——船舶水线长,m;

V ——船舶(队)设计航速,m/s;

t ——15°/15°Z形操纵试验首次操舵15°瞬时起至转首角达15°瞬时止的时间,s。

2.3 非满载出港情况下操纵性参数

2.3.1 当船舶(队)进行满载出港情况下操纵性试验确有困难时,可近似地应用非满载出港情况下船舶(队)操纵性试验参数作修正计算,其方法如下:

$$[A_F]_s = [A_T]_s \frac{[A_F]_{m或p}}{[A_T]_{m或p}}$$

式中: A_F ——满载出港情况下的操纵性参数;

A_T ——试验情况下的操纵性参数;

s ——下标,表示实船(队)值;

m ——下标,表示船模试验预报值;

p ——下标,表示计算预报值。

2.4 非设计编队情况下顶推船队操纵性参数

2.4.1 顶推船队应取设计编队队形下的操纵性参数值衡准。

2.4.2 顶推船队过于庞大,进行设计编队的实船队操纵性试验确

有困难时,经本社同意,可采用适当减少编队驳船数后的船队操纵性参数作修正计算,其方法如下:

$$[B_F]_s = [B_T]_s \frac{[B_F]_{m或p}}{[B_T]_{m或p}}$$

式中: s, m, p ——下标,同 2.3.1;

B_F ——设计编队的操纵性参数;

B_T ——减驳后的船队试验情况下的操纵性参数。

附录 1 舵面积

1.1 一般规定

1.1.1 船舶设计中,合理选取舵面积是使所设计船具有良好操纵性的重要保证之一。

1.1.2 本附录给出内河船舶(队)的舵面积选取经验统计数值,可供设计者参考。

1.2 河船舵面积选取

1.2.1 设计船舵面积 A_R , 根据舵面积系数按下式计算:

$$A_R = \mu L d \quad \text{m}^2$$

式中: L ——船舶水线长, m;

d ——吃水, m;

μ ——舵面积系数,可参考 1.2.1.1、1.2.1.2 选取。

1.2.1.1 舵面积系数 μ 可由型船按下式计算:

$$\mu = \frac{A_{R0}}{L_0 d_0}$$

式中: A_{R0} ——型船舵面积, m^2 ;

L_0 ——型船水线长, m;

d_0 ——型船吃水, m。

1.2.1.2 舵面积系数 μ 值也可按表 1.2.1.2 选取。

表 1.2.1.2

船舶类型	舵面积系数 μ	备注
J 级航段货船	0.045~0.050	
非 J 级航段货船	0.020~0.030	
固定导管推进的推、拖船	0.105~0.150	根据船舶用途、航区(航段)取值
推、拖船	0.075~0.085	根据船舶用途、航区(航段)取值
J 级航段驳船	0.0275~0.030	
非 J 级航段驳船	0.025~0.030	
客 船	0.040~0.080	J 级航段船舶取上限值
艇(包括游艇、交通艇、公务艇)	0.040~0.055	根据船的种类、航区(段)取值

1.2.2 分节顶推船队的顶推船的舵面积 A_R 按下式计算:

$$A_R = (1.2 \sim 1.8) A_P \quad \text{m}^2$$

式中: A_P ——螺旋桨的盘面积, m^2 。

附录 2 操纵性计算预报

2.1 一般规定

2.1.1 本附录是对满载出港状态的船舶操纵性计算预报。

2.1.2 船舶初步设计阶段可用简化的经验估算方法, 对所设计船的操纵性作初估。

2.1.3 船舶详细设计阶段, 随所掌握的船体、桨和舵资料的完善, 可进行较详细的操纵性预报。

2.1.4 本附录给出操纵性计算预报, 包括经验估算和操纵运动的模拟计算, 并给出计算预报实例。

2.1.5 经验估算可预报直线稳定性和回转性; 模拟计算可预报直线稳定性、航向改变性和回转性。

2.2 经验估算

2.2.1 回转直径估算

2.2.1.1 单船回转直径 D 可按下式估算:

$$\text{当舵展弦比大于 1 时, } D = 2c \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{\nabla}{A_R} \quad \text{m};$$

$$\text{当舵展弦比小于 1 时, } D = 2c \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{\nabla}{S} \left(\frac{1}{nH_R^2} + \frac{1}{A_R} \right) \quad \text{m}.$$

式中: c ——系数, 1.0~1.4, 当舵位于尾流中时取较小值;

∇ ——船舶的排水体积, m^3 ;

S ——水线以下船纵中剖面积, m^2 ;

n ——舵的数目;

H_R ——舵高, m ;

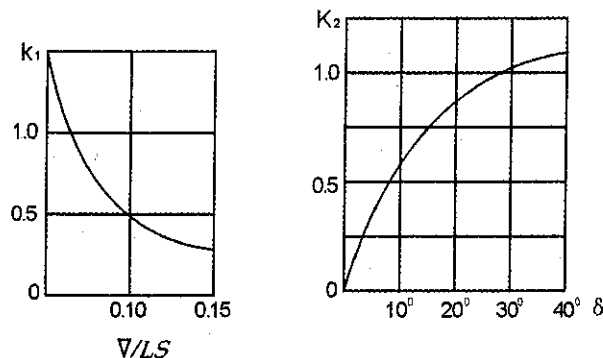


图 2.2.1.1 k_1 、 k_2 系数图

A_R ——舵面积, m^2 ;

k_1 ——系数, 由图 2.2.1.1(a)查得;

k_2 ——系数, 由图 2.2.1.1(b)查得。

图中: L ——船长, m ;

δ ——舵角, deg 。

2.2.1.2 顶推船队回转直径 D 可按下式估算:

$$\frac{D}{L_0} = K_R \left(79 \frac{d_T}{d_0} |\delta| - 99 \frac{A_R}{L_0 d_0} + 32.9 \sqrt{\frac{A_d}{L_0 d_0}} - 2.82 \frac{B_0}{L_0} + 24 \frac{d_0}{L_0} - 0.473 \right)$$

式中: A_R , δ ——同 2.2.1.1;

L_0 ——船队水线长, m;

B_0 ——船队宽, m;

d_0 ——船队吃水, m;

d_T ——推轮吃水, m;

A_d ——导管侧面积, m^2 ;

K_R ——舵效系数,普通舵取 1.0,襟翼舵取 0.50~0.75,组合舵(兼有止流板和整流尾)取 0.75~0.85,普通舵+止流板(或整流尾)取 0.85~0.95。

2.2.2 直线稳定性估算

2.2.2.1 单船直线稳定性预报可用无因次衡准数 C' 的判别来替代。若 $C' > 0$ 则船具有直线稳定性。

2.2.2.2 无因次衡准 C' 可按下式计算:

$$C' = Y'_v N'_r + N'_v [m' - Y'_r]$$

式中: $Y'_v = \frac{Y_v}{\frac{1}{2}\rho V L d} = \left[\pi \frac{d}{L} + 1.4 C_b \frac{B}{L} \right]$

$$N'_v = \frac{N_v}{\frac{1}{2}\rho V L^2 d} = -\frac{2d}{L}$$

$$Y'_r = \frac{Y_r}{\frac{1}{2}\rho V L^2 d} = \frac{\pi d}{2L}$$

$$N'_r = \frac{N_r}{\frac{1}{2}\rho V L^3 d} = -\frac{2d}{L} \left[0.54 - \frac{2d}{L} \right]$$

$$m' = \frac{m}{\frac{1}{2}\rho L^2 d}$$

其中: Y_v, Y'_v ——偏航水动力导数, $kN \cdot s \cdot m^{-1}$, 无因次偏航水动力导数;

N_v, N'_v ——偏航水动力矩导数, $kN \cdot s$, 无因次偏航水动力矩导数;

Y_r, Y'_r ——回转水动力导数, $kN \cdot s$, 无因次回转水动力导数;

N_r, N'_r ——回转水动力矩导数, $kN \cdot m \cdot s$, 无因次回转水动力矩导数;

m, m' ——船舶质量, $t, m = \rho \nabla$, 船舶无因次质量;

L ——船舶水线长, m;

B ——船舶水线宽, m;

d ——吃水, m;

C_b ——方形系数;

ρ ——水的重量密度, t/m^3 ;

V ——船舶(队)设计航速, m/s;

∇ ——同 2.2.1.1。

2.3 操纵运动模拟计算

2.3.1 坐标系

固定坐标系为 $o_0x_0y_0z_0$, 动坐标系 $oxyz$, 如图 2.3.1 所示。动坐标原点 o 通常取在船中。 ox 轴为船纵轴, 指向船首为正。 oy 轴垂直船纵剖面, 指向右舷为正。 oz 轴垂直于水线面, 以指向龙骨为正。

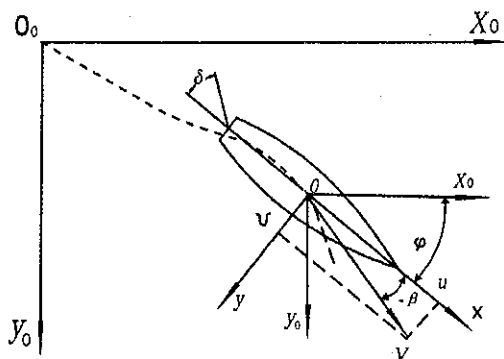


图 2.3.1 坐标系

图中: V ——同 2.2.2.2;

δ ——同 2.2.1.1;

u ——船体沿 ox 轴分速度;

v ——船体沿 oy 轴分速度;

φ ——首向角, o_0x_0 轴与 ox 轴的夹角;

β ——漂角, ox 轴与速度 V 的夹角。

2.3.2 数学模型

船舶在水平面内操纵运动方程为:

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr - x_G r^2) = X \\ m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y \\ I_Z \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) = N \end{cases}$$

式中: \dot{u}, u —— ox 轴的加速度, m/s^2 , 速度, m/s ;

\dot{v}, v —— oy 轴的加速度, m/s^2 , 速度, m/s ;

\dot{r}, r —— oz 轴的角加速度, $1/s^2$, 速度, $1/s$;

X ——船体水动力在 ox 轴向的力, kN ;

Y ——船体水动力在 oy 轴向的力, kN ;

N ——船体水动力对 oz 轴的力矩, $kN \cdot m$;

x_G ——船舶重心的纵向坐标, m ;

I_Z ——船体对 oz 轴的转动惯量, $t \cdot m^2$;

m ——同 2.2.2.2。

2.3.3 船体水动力

2.3.3.1 附连水质量计算

(1) 单船按下列公式计算:

$$\begin{cases} m_{11} = \frac{m}{100} [0.398 + 11.97C_b(1 + 3.73\frac{d}{B}) - 2.89C_b\frac{L}{B}(1 + 1.13\frac{d}{B}) + \\ \quad + 0.175C_b(\frac{L}{B})^2(1 + 0.541\frac{d}{B}) - 1.107\frac{Ld}{B^2}] \quad t \\ m_{22} = m[0.882 - 0.54C_b(1 - 1.6\frac{d}{B}) - 0.156(1 - 0.673C_b)\frac{L}{B} + \\ \quad + 0.826\frac{dL}{B^2}(1 - 0.678\frac{d}{B}) - 0.638C_b\frac{dL}{B^2}(1 - 0.669\frac{d}{B})] \quad t \\ m_{66} = \frac{mL^2}{100} [33 - 76.85C_b(1 - 0.784C_b) + 3.43\frac{L}{B}(1 - 0.63C_b)] \quad t \cdot m^2 \\ m_{26} = m_{62} = 0 \quad t \cdot m \end{cases}$$

(2) 船队按下列公式计算:

① 单驳附连水质量

$$\begin{cases} m_{11i} = \frac{2d}{L} [0.18 + 2.88(\frac{B}{L})^2] (0.624 + 0.72C_b) \cdot m & t \\ m_{22i} = \frac{3.76d}{B} \cdot \frac{C_z(1 - C_w C_z)}{C_w(1 + C_z)(2 - C_w - C_z)} \cdot m & t \\ m_{66i} = \frac{1.68d}{B} \cdot \frac{1}{1 + (\frac{B}{L})^2} \cdot \frac{2C_z(9 - C_z - 6C_w)(3 - 2C_z - 2C_w + C_w C_z)}{C_w(6 - 5C_z - 5C_w + 4C_w C_z)(9 - 9C_z + 2C_z^2)} \cdot I_z & t \cdot m^2 \end{cases}$$

②船队附连质量

$$\begin{cases} m_{11} = j_{11} \sum_{j=1}^s (\sum_{i=1}^n m_{11i})_j & t \\ m_{22} = j_{22} \sum_{j=1}^s (\sum_{i=1}^n m_{22i})_j & t \\ m_{26} = j_{22} \sum_{i=1}^s [(\sum_{i=1}^n m_{22i})_j \cdot x_j] & t \cdot m \\ m_{62} \approx m_{26} & t \cdot m \\ m_{66} = j_{66} \sum_{j=1}^s (\sum_{i=1}^n m_{66i})_j + j_{22} \sum_{j=1}^s [(\sum_{i=1}^n m_{22i})_j \cdot x_j^2] & t \cdot m^2 \end{cases}$$

式中: m, L, B, d, C_b ——同 2.2.2.2;

C_w ——水线面系数;

C_z ——纵中剖面系数;

m_{11} ——船体沿 ox 轴运动的附连水质量, t ;

m_{22} ——船体沿 oy 轴运动的附连水质量, t ;

m_{66} ——船体绕 oz 轴回转的附连水质量惯矩, $t \cdot m^2$;

m_{26}, m_{62} ——船体绕 oz 轴回转的附连水质量静矩, $t \cdot m$;

j ——横向编队行序号;

i ——纵向编队列序号;

s ——横向编队行数;

n ——纵向编队列数;

x_j ——第 j 个横向驳组的重心横向坐标 (坐标原点取

在船队重心上), m ;

m_{11i}, m_{22i} ——分别为第 i 个驳船的纵向、横向附连水质量, t ;

m_{66i} ——第 i 个驳船回转附连水质量惯矩, $t \cdot m^2$;

I_z ——回转质量惯矩, $t \cdot m^2$, 按下式计算:

$$I_z = (1 + C_b^{4.5}) \frac{m}{24} (L^2 + B^2)$$

j_{11} ——纵向编队惯性系数, 按表 2.3.3.1 取值;

j_{22}, j_{66} ——横向及回转编队惯性系数, 为:

单列式 $j_{22} = j_{66} = 1$;

双列式 $j_{22} = 0.84, j_{66} = 0.87$;

三列式 $j_{22} = 0.71, j_{66} = 0.75$ 。

表 2.3.3.1

单列船队			双列船队			
系数	T+1	T+1+1	T+1+1+1	T+2	T+2+2	T+2+2+2
j_{11}	0.90	0.74	0.61	1.49	1.25	1.14

2.3.3.2 流体粘性类力、力矩的计算

(1) 单船按下列公式计算

$$\begin{cases} X_H = C_x \cdot \frac{1}{2} \rho L d V^2 & kN \\ Y_H = (C_1 \beta + C_2 \beta |\beta| + C_3 r' + C_4 \beta |r'|) \cdot \frac{1}{2} \rho L d V^2 & kN \\ N_H = (C_5 \beta - C_6 r') \cdot \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2 & kN \cdot m \end{cases}$$

式中: $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ ——按 2.3.3.2(1)①或 2.3.3.2(1)②取值。

C_x ——船舶(队)操纵运动时,作用在船舶上流体力在 ox 方向的分量系数。可近似地取船舶(队)作匀速直航时的阻力系数;

β ——漂角, rad;

r' ——无因次角度速度, $r' = r \cdot \frac{L}{V}$;

L, d, ρ, V ——同 2.2.2.2。

① 货船的 $C_1 \sim C_6$ 按下列公式计算:

$$C_1 = 3.14 \frac{d}{L}$$

$$C_2 = 0.020 \left(\frac{B}{d} \right)^2 - 0.24 \left(\frac{B}{d} \right) + 13 \frac{d}{L} + 0.024 \frac{L}{d}$$

$$C_3 = 0.02 + 0.37(1 - \bar{\sigma}_k) - 12(1 - \bar{\sigma}_k)^2$$

$$C_4 = 0.12 + 1.2(1 - \bar{\sigma}_k)$$

$$C_5 = (5.8 \frac{d}{L} + 0.084)(1.25 - \bar{\sigma}_k)$$

$$C_6 = (15 \frac{B}{d} - 37.5)^{-1}$$

式中: L, B, d ——同 2.2.2.2;

$\bar{\sigma}_k$ ——船中至船尾区段的纵中剖面的丰满度系数。

适用范围: $0.01 \leq \frac{d}{L} \leq 0.05$; $3.5 \leq \frac{B}{d} \leq 6.0$; $0.88 \leq \bar{\sigma}_k \leq 0.96$;

$\beta \leq 0.25$; $r' \leq 0.5$ 。

② 客船的 $C_1 \sim C_6$ 按下列公式计算:

$$C_1 = 3.14 \frac{d}{L} \left(\frac{0.63}{C_p} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{L}{6B} \right)^{\frac{1}{3}} - 0.032$$

$$C_2 = 1.35 \left(\frac{d}{B} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{0.63}{C_p} \right)^{\frac{3}{2}} - 0.029$$

$$C_3 = -2k_{11} C_b \frac{B}{L}$$

$$C_4 = 0$$

$$C_5 = 1.69 \frac{d}{L} - 0.56 C_p + 0.43$$

$$C_6 = 0.44 \frac{d}{L} + 0.0375$$

式中: L, B, d, C_b ——同 2.2.2.2;

C_p ——棱形系数;

k_{11} ——系数, $k_{11} = \frac{d}{L} \left[1 + 16 \left(\frac{B}{L} \right)^2 \right] (0.225 + 0.26 C_b)$ 。

适用范围: $4 \leq \frac{L}{B} \leq 10$; $0.02 \leq \frac{d}{L} \leq 0.08$; $\frac{d}{B} \leq 0.50$;

$0.55 \leq C_p \leq 0.85$; $\beta \leq 0.5$; $r' \leq 0.9$ 。

(2) 顶推船队按下列公式计算:

$$\begin{cases} X_H = C_x \cdot \frac{1}{2} \rho L_0 d_0 V^2 & \text{kN} \\ Y_H = (C_1 \beta + C_2 \beta |\beta| + C_3 r' + C_4 \beta |r'|) \cdot \frac{1}{2} \rho L_0 d_0 V^2 & \text{kN} \\ N_H = (C_5 \beta - C_6 r' - C_7 \beta^2 r') \cdot \frac{1}{2} \rho L_0^2 d_0 V^2 & \text{kN.m} \end{cases}$$

式中: L_0, d_0 ——同 2.2.2.1

ρ, V ——同 2.2.2.2;

β, r' ——同 2.3.3.2;

C_x ——同 2.3.3.2(1);

$C_1 \sim C_7$ ——系数, 按下列公式计算:

$$\begin{cases} C_1 = C_{10} + 0.14\bar{m} \\ C_2 = C_{20} + 0.27\bar{m} \\ C_3 = -C_{30} \\ C_4 = C_{40} + 0.34\bar{m} \\ C_5 = C_{50} + 0.17\bar{n} \\ C_6 = C_{60} + 0.12\bar{n} \\ C_7 = C_{70} + 0.46\bar{n} \end{cases}$$

其中: $C_{10} \sim C_{70}$ ——与船队队形有关的系数, 按表 2.3.3.2 取值;

\bar{m}, \bar{n} ——系数, 按下列公式计算:

$$\bar{m} = l_T (t_T - 1.17)$$

$$\bar{n} = \frac{l_T (1 + l_T) (t_T - 1.17)}{2[1 + l_T (t_T - 1)]}$$

$$l_T = \frac{L_T}{L_0}$$

$$t_T = \frac{d_T}{d_0}$$

d_T ——同 2.2.1.2;

L_T ——推轮长, m。

表 2.3.3.2.2

系数	单列船队			双列船队		
	T+1	T+1+1	T+1+1+1	T+2	T+2+2	T+2+2+2
C_{10}	0.24	0.19	0.16	0.21	0.16	0.15
C_{20}	0.30	0.27	0.26	0.35	0.30	0.27
C_{30}	0.10	0.07	0.05	0.05	0.04	0.03
C_{40}	0.30	0.25	0.22	0.31	0.26	0.23
C_{50}	0.033	0.024	0.020	0.016	0.009	0.007
C_{60}	0.012	0.016	0.019	0.021	0.019	0.017
C_{70}	0.11	0.13	0.14	0.13	0.11	0.09

适用范围: $0 \leq \beta \leq 0.5$; $0 \leq r \leq 0.9$; $-0.2 \leq \bar{m} \leq 0.4$;

$-0.08 \leq \bar{n} \leq 0.08$ 。

2.3.4 船体操纵运动时螺旋桨发出的纵向推力 X_p 按下式计算:

$$X_p = (1-t) \rho n^2 D_p^4 K_T (J_p) \quad \text{kN}$$

式中: $K_T (J_p)$ ——桨的推力系数;

t ——推力减额分数;

n ——桨的转速, $1/s$;

D_p ——桨的直径, m;

J_p ——桨的进速系数, $J_p = \frac{u(1-w_p)}{nD_p}$;

w_p ——斜流中桨处伴流系数,

$$w_p = \exp[-4.0(\beta - x'_p r')^2] w_{p0}$$

其中: u ——船体沿 x 轴分速度, m/s ;

w_{p0} ——直航时桨的伴流分数;

x'_p ——桨的无因次纵向坐标, $x'_p = \frac{x_p}{L}$;

x_p ——桨的纵向坐标, m ;

β, r' ——同 2.3.3.2。

2.3.5 舵力及操舵引起的船体水动力按下列公式计算:

$$\begin{cases} X_R = -F_N \sin \delta & kN \\ Y_R = -(1 + a_R) F_N \cos \delta & kN \\ N_R = -(1 + a_R) x_R F_N \cos \delta & kN \cdot m \end{cases}$$

式中: a_R ——系数, $a_R = 0.64 C_b - 0.158$;

x_R ——舵的纵向坐标, m , 一般取 $x_R = -0.48L$;

δ ——同 2.2.1.1;

F_N ——舵的无因次法向力, kN ,

$$F_N = \frac{6.13 \lambda_R}{(\lambda_R + 2.25)} \cdot \frac{1}{2} \rho A_R V_R^2 \sin \alpha_R$$

其中: L, C_b, ρ ——同 2.2.2.2;

A_R ——同 2.2.1.1;

λ_R ——舵展弦比;

V_R ——舵处来流速度, m/s , 按 2.3.5.1 计算;

α_R ——舵有效攻角, rad , 按 2.3.5.2 计算。

2.3.5.1 舵处水流速度按下式计算:

$$V_R = V(1 - w_R) [1 + k_2 g(s)]^{1/2}$$

式中: V ——同 2.2.2.2;

V_R ——舵处水流速度的轴向分量, m/s ;

k_2 ——系数, 对左舵 $k_2 = 1.065$, 右舵 $k_2 = 0.935$;

w_R ——舵处的伴流分数, $w_R = \exp[-4.0(\beta - \frac{1}{2} r')^2] w_{R0}$;

$g(s)$ ——系数, $g(s) = \frac{\eta k [2 - (2 - k)s] s}{(1 - s)^2}$ 。

其中: w_{R0} ——直航时舵处的伴流分数;

β ——同 2.3.3.2;

η ——系数, $\eta = \frac{D_p}{H_R}$;

H_R ——同 2.2.1.1;

k ——系数, $k = \frac{0.6(1 - w_p)}{1 - w_R}$;

s ——系数, $s = 1 - \frac{u(1 - w_p)}{nP}$;

D_p, n, u ——同 2.3.4;

P ——桨的螺距, m。

2.3.5.2 舵有效攻角按下式计算:

$$\alpha_R = \frac{\pi\delta}{180} + \frac{\pi s_0}{90} - \gamma\beta_R \quad \text{rad}$$

式中: δ ——同 2.2.1.1;

s_0 ——直航时桨的滑脱比, $s_0 = 1 - \frac{V}{nP}$;

γ ——整流系数, $\gamma = c_p c_s$;

β_R ——舵处的漂角, rad, $\beta_R = \beta - 2x'_R r'$ 。

其中: c_p ——桨整流系数, $c_p = \left[1 + \frac{0.6\eta(2-1.4s)s}{(1-s)^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$;

c_s ——船体整流系数,

当 $\beta_R \leq \frac{c_{s0}}{0.45}$ 时, $c_s = 0.45\beta_R$;

当 $\beta_R > \frac{c_{s0}}{0.45}$ 时, $c_s = c_{s0}$;

c_{s0} ——常数, 瘦削船取 0.3, 肥大船取 0.7, 平均值 $c_{s0} = 0.5$;

x'_R ——舵的无因次纵向坐标, $x'_R = \frac{x_R}{L}$;

x_R ——同 2.3.5;

V, L ——同 2.2.2.2;

β, r' ——同 2.3.3.2;

n ——同 2.3.4;

P, s ——同 2.3.5.1。

2.3.6 操纵运动数值模拟

将操纵运动方程(2.3.2)中 X, Y, N 中惯性力(力矩)移至左边, 则操纵运动方程写成:

$$\begin{cases} (m+m_{11})\dot{u} - (m+m_{22})vr - (m_{26}+mx_G)r^2 = X_H + X_P + X_R \\ (m+m_{22})\dot{v} + (m+m_{11})ur + (m_{26}+mx_G)\dot{r} = Y_H + Y_R \\ (I_z+m_{66})\dot{r} + (mx_G+m_{62})(\dot{v}+ur) + (m_{22}-m_{11})uv = N_H + N_R \end{cases}$$

式中: X_H, Y_H, N_H ——船体所受流体粘性力、力矩;

X_R, Y_R, N_R ——舵力、力矩;

X_P ——桨的推力。

x_G ——船体重心纵向坐标, 同 2.3.2;

$\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r, m, I_z$ ——同 2.3.2;

m_{11}, m_{22}, m_{66} ——同 2.3.3.1;

m_{26}, m_{62} ——船体运动时绕 Z 轴的附连水静矩, 取

$$m_{26} \approx m_{62} = 0。$$

若作如下定义:

$$\begin{cases} X_H + X_P + X_R = f_1(u, v, r) \\ Y_H + Y_R = f_2(u, v, r) \\ N_H + N_R = f_3(u, v, r) \end{cases}$$

则操纵运动方程的数值解为:

表 2.3.7.1

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{f_1(u, v, r) + (m + m_{22})vr + (m_{26} + m x_G)r^2}{m + m_{11}} \\ \dot{v} = \frac{[f_2(u, v, r) - (m + m_{11})ur] (I_z + m_{66}) - [f_3(u, v, r) - (m x_G + m_{62})ur - (m_{22} - m_{11})uv] m_{26} - m x_G}{(m + m_{22})(I_z + m_{66}) - (m x_G + m_{26})(m_{62} + m x_G)} \\ \dot{r} = \frac{[f_3(u, v, r) - (m x_G + m_{62})ur - (m_{22} - m_{11})uv] (m + m_{22}) - [f_2(u, v, r) - (m + m_{11})ur] m x_G + m_{62}}{(m + m_{22})(I_z + m_{66}) - (m x_G + m_{26})(m_{62} + m x_G)} \end{cases}$$

于是船舶的各运动参数为:

$$\text{沿 OX 轴的速度: } u(t) = u(0) + \int_0^t \dot{u}(t) dt$$

$$\text{沿 OY 轴的速度: } v(t) = v(0) + \int_0^t \dot{v}(t) dt$$

$$\text{绕 OZ 轴的角速度: } r(t) = r(0) + \int_0^t \dot{r}(t) dt$$

$$\text{首向角: } \psi(t) = \psi(0) + \int_0^t r(t) dt,$$

动坐标原点 O_0 在固定坐标系中的位置:

$$\begin{cases} x_o(t) = x_o(0) + \int_0^t [u(t) \cdot \cos \psi(t) - v(t) \sin \psi(t)] dt \\ y_o(t) = y_o(0) + \int_0^t [u(t) \cdot \sin \psi(t) + v(t) \cos \psi(t)] dt \end{cases}$$

重心点 G 的轨迹:

$$\begin{cases} X_G(t) = X_o(t) - \overline{GO_0} \cos \psi \\ y_G(t) = y_o(t) - \overline{GO_0} \sin \psi \end{cases}$$

2.3.7 1000 吨货船模的操纵运动模拟计算实例

2.3.7.1 船、桨、舵的主要要素

船、桨、舵的主要要素见表 2.3.7.1。

项	目	数 据
船 体	总长 $L_{OA}(m)$	3.857
	水线长 $L(m)$	3.673
	型宽 $B(m)$	0.617
	型深 $H(m)$	0.206
	吃水 $d(m)$	0.149
	方型系数 C_b	0.79
	排水量 $m(t)$	0.265
	航速 $V(m/s)$	1.2
螺 旋 桨	桨数 N_p	2
	桨的转速 $n(1/s)$	150
	直径 $D_p(m)$	0.120
	叶片数 Z	4
	螺距 $P(m)$	0.12456
	螺距比 P/D_p	1.038
舵	舵数 N_R	2
	舵高 $H_R(m)$	0.120
	舵宽 $B_R(m)$	0.144
	制流板长 (m)	0.147
	制流板宽 (m)	0.60

2.3.7.2 船体水动力性能计算

1. 附连水质量计算:

$$m_{11} = \frac{m}{100} [0.398 + 11.97C_b(1 + 3.73\frac{d}{B}) - 2.89C_b\frac{L}{B}(1 + 11.3\frac{d}{B}) + 0.175C_b(\frac{L}{B})^2(1 + 0.541\frac{d}{B}) - 1.107\frac{Ld}{BB}]$$

$$= 0.01188 \quad (t)$$

$$m_{22} = m[0.882 - 0.54C_b(1 - 1.6\frac{d}{B}) - 0.156(1 - 0.673C_b)\frac{L}{B} + (0.826\frac{dL}{BB}(1 - 0.678\frac{d}{B}) - 0.638C_b\frac{Ld}{BB}(1 - 0.669\frac{d}{B}))]$$

$$= 0.15105 \quad (t)$$

$$m_{66} = \frac{mL^2}{100} [33 - 76.85C_b(1 - 0.784C_b) + 3.43\frac{L}{B}(1 - 0.63C_b)]$$

$$= 0.71859 \quad (t \cdot m^2)$$

$$m_{26} = m_{62} = 0 \quad (t \cdot m)$$

2. 流体粘形类力、力矩计算:

$$\bar{\sigma}_k = 0.9$$

$$C_1 = 3.14\frac{d}{L} = 0.127$$

$$C_2 = 0.020(\frac{B}{d})^2 - 0.24\frac{B}{d} + 13\frac{d}{L} + 0.024\frac{L}{d} = 0.468$$

$$C_3 = 0.02 + 0.37(1 - \bar{\sigma}_k) - 12(1 - \bar{\sigma}_k)^2 = -0.063$$

$$C_4 = 0.12 + 1.2(1 - \bar{\sigma}_k) = 0.24$$

$$C_5 = (5.8\frac{d}{L} + 0.084)(1.25 - \bar{\sigma}_k) = 0.112$$

$$C_6 = (15\frac{B}{d} - 37.5)^{-1} = 0.041$$

$$X_H = C_x \frac{\rho}{2} L d V^2 = 0.393 C_x \quad (\text{kN})$$

$$Y_H = (C_1\beta + C_2\beta|\beta| + C_3r' + C_4\beta|r'|) \frac{\rho}{2} L d V^2$$

$$= 0.05\beta + 0.184\beta|\beta| - 0.025r' + 0.095\beta|r'| \quad (\text{kN})$$

$$N_H = (C_5\beta - C_6r') \frac{\rho}{2} L^2 d V^2 = 0.162\beta - 0.059r' \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$

2.3.7.3 螺旋桨推力计算

$$w_{P_0} = 0.385$$

$$w_p = \exp[-4.0 - x'_p r'] w_{P_0} = 0.385 \exp[-4.0(\beta - x'_p r')^2]$$

$$t = 0.239 \quad (\text{商赫公式})$$

$$J_p = \frac{u(1 - w_p)}{nD_p}$$

$$K_T(J_p) \text{ 试验确定}$$

$$X_p = (1 - t) \rho n^2 D_p^4 K_T(J_p) \quad (\text{kN})$$

2.3.7.4 舵力计算

1. 舵的法向力计算:

$$\lambda_R = \frac{H_R}{B_R} = 0.83$$

$$A_R = N_R H_R B_R = 0.03456$$

$$w_{R0} = 0.390$$

$$w_R = \exp[-4.0(\beta + \frac{1}{2}r')^2] w_{R0} = 0.390 \exp[-4.0(\beta + \frac{1}{2}r')^2]$$

$$k_2 = 0.935$$

$$\eta = \frac{D_P}{H_R} = 1$$

$$k = \frac{0.6(1-w_P)}{1-w_R}$$

$$s = 1 - \frac{(1-w_P)\cos\beta}{nP}$$

$$g(s) = \frac{\eta k [2 - (2-k)s]^2}{(1-s)^2}$$

$$V_R = V(1-w_R)[1 + k_2 g(s)]^{1/2}$$

$$F_N = \frac{6.13\lambda_R}{(\lambda_R + 2.25)} \frac{\rho}{2} A_R V_R^2 \sin\alpha_R \quad (kN)$$

2. 舵的有效攻角计算:

$$s_0 = 1 - \frac{V}{nP} = 0.936$$

$$c_p = [1 + \frac{0.6\eta(2-1.4s)s}{(1-s)^2}]^{1/2}$$

$$\beta_R = \beta - 2x'_R r'$$

$$c_{s0} = 0.5$$

$$c_s = c_{s0} \text{ 或 } c_s = 0.45\beta_R$$

$$\gamma = c_p c_s$$

$$\alpha_R = \frac{\pi\delta}{180} + \frac{\pi s_0}{90} - \gamma\beta_R$$

2.3.7.2 模拟计算结果

模拟计算结果见表 2.3.7.2。

表 2.3.7.2

项 目	数 据
$\frac{D}{L}$	$\frac{D}{L} = \frac{5.5}{3.673} = 1.5 < 3.5$
\bar{r}'_{0-15}	$\bar{r}'_{0-15} = \frac{15^\circ / 57.3}{t} \cdot \frac{L}{V_0}$ $= \frac{15}{57.3 \times 2.41} \cdot \frac{3.673}{1.2}$ $= 0.33 > 0.11$
r'_0	$r'_0 = 0$

回转轨迹、15°/15°Z形操纵曲线分别见图 2.3.7(1)、2.3.7(2)所示。

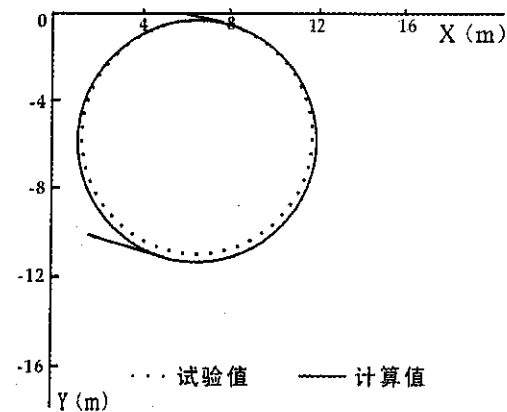


图 2.3.7(1) 1000 吨货船模 35° 操纵回转轨迹

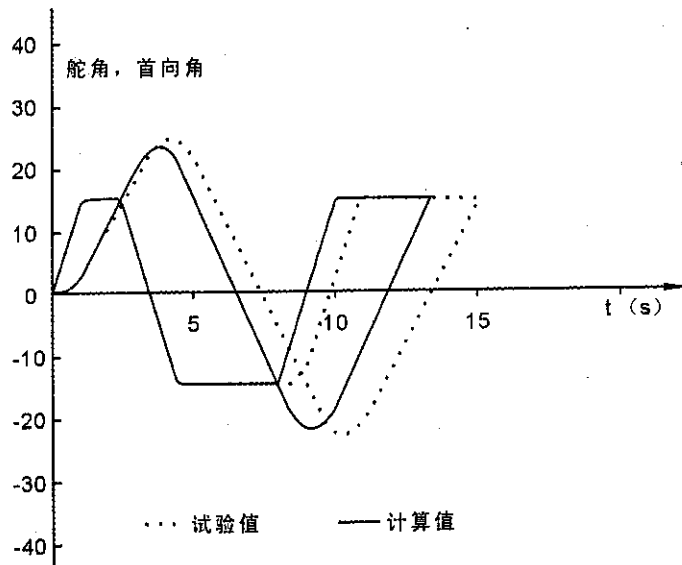


图 2.3.7(2) 1000 吨货船模 $15^\circ / 15^\circ Z$ 操舵试验和计算值

2.3.8 T+2×2 顶推船队模的操纵运动模拟计算实例

2.3.8.1 船、桨、舵的主要要素

船、桨、舵的主要要素见表 2.3.8.1

表 2.3.8.1

项 目		数 据
2500 T 半 分 节 驳	船长 L_B (m)	3.906
	型 宽 B_B (m)	0.884
	型 深 D_B (m)	0.196
	吃 水 d_B (m)	0.142
	方型系数 C_{bB}	0.873
	排水量 m_B (t)	0.236
推 轮	船长 L_T (m)	2.073
	型 宽 B_T (m)	0.573
	型 深 D_T (m)	0.185
	吃 水 d_T (m)	0.131
	方型系数 C_{bT}	0.637
	排水量 m_T (t)	0.095
船 队	船队长 L (m)	9.885
	船队宽 B (m)	1.768
	船队吃水 d (m)	142
	方形系数 C_b	0.873
	航速 V (m/s)	1.0
螺 旋 桨	桨 数 N_p	2
	桨的转速 n (1/s)	600
	直 径 D_p (m)	0.120
	叶片数 Z	4
	螺距 P (m)	0.12456
	螺距比 P/D_p	1.038
舵	舵 数 Z_R	3
	舵 高 H_R (m)	0.120
	舵 宽 B_R (m)	0.104
	制流板长(m)	0.106
	制流板宽(m)	0.60

2.3.8.2 船体水动力性能计算

1. 附连水质量计算:

1) 单个 2500T 驳船模的附连水质量:

$$m_{11i} = \frac{2d}{L} [0.18 + 2.88(\frac{B}{L})^2] (0.624 + 0.72C_b) \cdot m$$

$$= 7.039 \times 10^{-3} \quad (t)$$

$$m_{22i} = \frac{3.76d}{B} \cdot \frac{C_z(1 - C_w C_z)}{C_w(1 + C_z)(2 - C_w - C_z)} \cdot m$$

$$= 80.2872 \times 10^{-3} \quad (t)$$

$$I_z = (1 + C_b^{4.5}) \cdot \frac{m}{24} \cdot (L^2 + B^2)$$

$$= 248.3 \times 10^{-3} \quad (t \cdot m^2)$$

$$m_{66i} = \frac{1.68d}{B} \cdot \frac{1}{1 + (\frac{B}{L})^2} \cdot \frac{2C_z(9 - C_z - 6C_w C_z)(3 - 2C_z - 2C_w + C_z C_w)}{C_w(6 - 5C_z - 5C_w + 4C_w C_z)(9 - 9C_z + 2C_z^3)} \cdot I_z$$

$$= 87.94 \times 10^{-3} \quad (t \cdot m^2)$$

其中: $C_z = 0.83$, $C_w = 0.72$

2) “2×2+T” 船队的附连水质量计算:

$$j_{11} = 1.25$$

$$j_{22} = 0.84$$

$$j_{66} = 0.87$$

$$m_{11} = j_{11} \sum_{i=1}^2 (\sum_{i=1}^2 m_{11i})_j = 0.352 \quad (t)$$

$$m_{22} = j_{22} \sum_{i=1}^2 (\sum_{ij=1}^2 m_{22i})_j = 0.2698 \quad (t)$$

$$m_{26} = j_{22} \sum_{i=1}^2 [(\sum_{ij=1}^2 m_{22i})_j \cdot x_j] = 0.0701 \quad (t \cdot m)$$

$$m_{62} = m_{26} = 0.0701 \quad (t \cdot m)$$

$$m_{66} = j_{66} \sum_{i=1}^2 (\sum_{i=1}^2 m_{66i})_j + j_{22} \sum_{j=1}^2 [(\sum_{j=1}^2 m_{22i})_j \cdot x_j^2] = 0.353 \quad (t \cdot m^2)$$

2. 流体粘性类力、力矩的计算:

$$m = \frac{L_T}{L} \times (\frac{d_T}{d} - 1.17) = -0.0918$$

$$n = \frac{\frac{L_T}{L} (1 + \frac{L_T}{L}) (\frac{d_T}{d} - 1.17)}{[2(1 + \frac{L_T}{L} (\frac{d_T}{d} - 1))]} = -0.0423$$

$$C_1 = 0.16 + 0.14m = 0.147$$

$$C_2 = 0.30 + 0.27m = 0.275$$

$$C_3 = -0.041$$

$$C_4 = 0.26 + 0.34m = 0.229$$

$$C_5 = 0.009 + 0.17n = 0.00182$$

$$C_6 = 0.019 + 0.12n = 0.0139$$

$$C_7 = 0.11 + 0.46n = 0.0905$$

$$X_H = C_x \frac{\rho}{2} L d V^2 = 0.702 C_x$$

$$Y_H = (C_1\beta + C_2\beta|\beta| + C_3r' + C_4\beta|r'|) \frac{\rho}{2} L d V^2$$

$$= 0.103\beta + 0.193\beta|\beta| - 0.029r' + 0.161\beta|r'|$$

$$N_H = (C_5\beta - C_6r' - C_5\beta^2r') \frac{\rho}{2} L^2 d V^2$$

$$= 0.0126\beta - 0.0964r' - 0.6279\beta^2r'$$

2.3.8.3 螺旋桨推力计算

$$w_{p0} = 0.439$$

$$w_p = \exp[-4.0(\beta - x'_p r')] w_{p0} = 0.439 \exp[-4.0(\beta - x'_p r')^2]$$

$$t = 0.262 \text{ (商赫公式)}$$

$$J_p = \frac{u(1-w_p)}{nD_p}$$

$K_T(J_p)$ 试验确定

$$X_p = (1-t)\rho n^2 D_p^4 K_T(J_p) \quad (\text{kN})$$

2.3.8.4 舵力计算

1. 舵的法向力计算:

$$\lambda_R = \frac{H_R}{B_R} = 1.154$$

$$A_R = Z_R H_R B_R = 0.03744$$

$$w_{R0} = 0.436$$

$$w_R = \exp[-4.0(\beta + \frac{1}{2}r')^2] w_{R0} = 0.436 \exp[-4.0(\beta + \frac{1}{2}r')^2]$$

$$k_2 = 0.935 \text{ (左舵, } k_2 = 1.065; \text{右舵 } k_2 = 0.935)$$

$$\eta = \frac{D_p}{H_R} = 1$$

$$k = \frac{0.6(1-w_p)}{1-w_R}$$

$$s = 1 - \frac{u(1-w_p)\cos\beta}{nP}$$

$$g(s) = \frac{\eta k [2 - (2-k)s]^2}{(1-s)^2}$$

$$V_R = V(1-w_R)[1 + k_2 g(s)]^{\frac{1}{2}}$$

$$F_N = \frac{6.13\lambda_R}{(\lambda_R + 2.25)} \frac{\rho}{2} A_R V_R^2 \sin\alpha_R \quad (\text{kN})$$

2. 计算舵有效攻角计算:

$$s_0 = 1 - \frac{V}{nP} = 0.987$$

$$c_p = [1 + \frac{0.6\eta(2-1.4s)s}{(1-s)^2}]^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta_R = \beta - 2x'_R r'$$

$$c_{s0} = 0.5$$

$$c_s = c_{s0} \text{ 或 } c_s = 0.45\beta_R$$

$$\gamma = c_p c_s$$

$$\alpha_R = \frac{\pi\delta}{180} + \frac{\pi s_0}{90} - \gamma\beta_R$$

2.3.8.5 计算结果

模拟计算结果见表 2.3.8.5。

表 2.3.8.5

项目	数据
$\frac{D}{L_0}$	$\frac{D}{L_0} = \frac{14.5}{10.366} = 1.4 < 2.5$
\bar{r}'_{0-15}	$\bar{r}'_{0-15} = \frac{15^\circ / 57.3}{t} \cdot \frac{L_0}{V_0}$ $= \frac{15}{57.3 \times 4.42} \cdot \frac{10.366}{1.0}$ $= 0.61 > 0.28$
r'_0	$r'_0 = 0$

回转轨迹、15°/15° Z 形操纵曲线分别见图 2.3.8 (1)、2.3.8 (2) 所示。

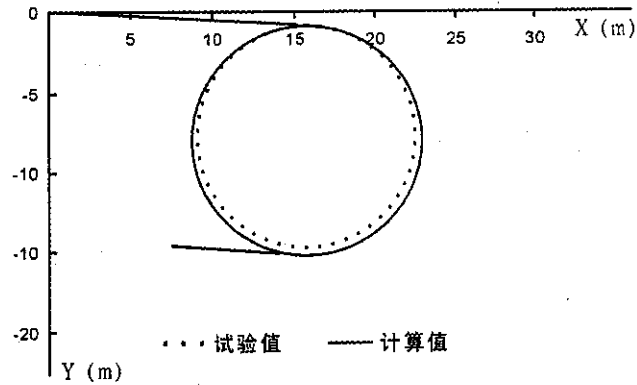


图 2.3.8(1) T+2×2 船队船模 35° 操纵回转轨迹

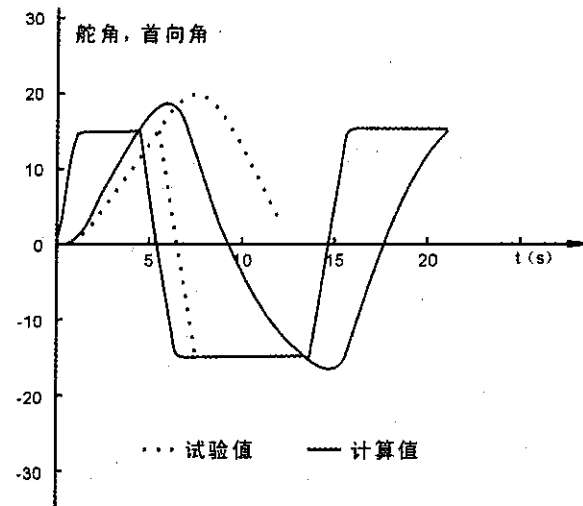


图 2.3.8(2) T+2×2 船队船模 15° / 15° Z 形操舵试验和计算值

附录 3 操纵性自航模型试验预报

3.1 一般规定

本附录所述自由自航船模（以下简称自航模型）试验预报系用于船舶设计阶段为实船操纵性预报提供依据，它较附录 2 给出的计算预报方法更为直观、可靠。

自航模型试验项目按第二章衡准规定选取所需衡准参数。

3.2 自航模型试验预报

3.2.1 自航模型、测试装置和仪器、试验环境条件应符合有关的专门要求。

3.2.2 试验的吃水状态应是根据船舶设计任务确定的满载出港状态。

3.2.3 试验项目及预报的操纵特征参数：

(1) 回转试验

- 重心（或船长中点）处定常回转直径 D ；
- 重心（或船长中点）处战术直径 D_T ；
- 纵距 A_d ；
- 横距 T_r ；
- 首向角改变 0.1° 、 90° 、 180° 、 270° 、 360° 和 540° 的时间 $t_{0.1}$ 、 t_{90} 、 t_{180} 、 t_{270} 、 t_{360} 、 t_{540} ；

(2) Z 形操纵试验

- 平均变向角速度 \bar{r} ；

——第一超越角 ψ_{ov1} ；

——第二超越角 ψ_{ov2} ；

——初转期 t_a ；

——转首滞后 T_L ；

——参数 K' 、 T' ；

(3) 停船试验

——惯性及倒车停船进程 S_T ；

——惯性及倒车停船纵距 S_H ；

——惯性及倒车停船横距 S_L ；

——自停车令及倒车令至停船的时间 t_d ；

(4) 回直试验

——回转角速度 r ；

(5) 倒航试验

——零舵角倒航定常回转角速度 r_k ；

——脱出倒航定常回转最小舵角 δ_k 。

3.2.4 船模操纵特性参数至实船操纵特性参数的换算：

(1) 距离类特性参数

$$\text{实船参数} = \frac{1}{\alpha} \times \text{船模参数}；$$

(2) 时间类特性参数

$$\text{实船参数} = \alpha^{\frac{1}{2}} \times \text{船模参数}；$$

(3) 线速度类特性参数

$$\text{实船参数} = \alpha^{\frac{1}{2}} \times \text{船模参数}；$$

(4) 角度类特性参数

实船参数 = 船模参数;

(5) 角速度类特性参数

$$\text{实船参数} = \alpha^{\frac{1}{2}} \times \text{船模参数。}$$

以上式中 α 为船模与实船的缩尺比。

例如:

回转直径	$D_s = D_m \times \frac{1}{\alpha}$
初转期	$t_{as} = t_{am} \times \alpha^{\frac{1}{2}}$
船舶航速	$V_s = V_m \times \alpha^{\frac{1}{2}}$
首向角	$\psi_s = \psi_m$
回转角速度	$r_{os} = r_{om} \times \alpha^{\frac{1}{2}}$

(以上式中下标 s 者为实船数据,下标 m 者为船模数据。)

附录 4 实船操纵性试验

4.1 概述

4.1.1 本附录提供了内河运输船舶(队)实船操纵性试验的方法和程序。

4.1.2 实船操纵性试验的项目应能对其结果按第2章要求进行操纵性衡准,并且应符合第2章2.2的要求。

4.1.3 实船操纵性试验应在记录并确认舵装置及舵机正常运行之后进行。

4.1.4 实船操纵性试验应在风力不超过蒲氏3级风、水域宽阔、平静、浪高不超过0.2m、水深不小于3倍于船舶吃水等试验条件下进行,上述试验条件应予记录;试验测量仪器应事先经校验,并在试验开始之前2min~3min开始记录。

4.1.5 试验入试航速应不小于相应85%主机最大输出功率时船速的90%,全速倒车可根据实际情况确定。

4.1.6 实船操纵性试验项目按第二章衡准规定所需衡准参数选取。

4.2 回转试验

4.2.1 试验目的

测定船舶大舵角下的回转能力。

4.2.2 试验方法及步骤

(1) 船舶在预定航向上稳定航速直航2min~3min;

- (2) 快速操舵至预定舵角 (35°或允许最大舵角) ;
- (3) 试验至首向角达 540°止;
- (4) 以相同程序反向操舵重复上述(1)~(3)的试验。

4.2.3 测量参数

连续记录回转过程中时间、船速、首向角、横倾角和回转角速度等参数。

4.2.4 试验结果

- (1) 重心或船长中点处回转运动轨迹 (如图 4.2.1 所示) ;
- (2) 定常回转直径 D ;
- (3) 战术直径 D_T ;
- (4) 纵距 A_d ;
- (5) 横距 T_r ;
- (6) 首向角改变 0.1°、90°、180°、270°、360°和 540°的时间 $t_{0.1}$ 、

t_{90} 、 t_{180} 、 t_{270} 、 t_{360} 、 t_{540} 。

- (7) 定常回转静倾角 θ ;
- (8) 最大动倾角 θ_{max} ;
- (9) 定常回转角速度 r ;
- (10) 定常回转速降 V_o/V_0 ;
- (11) 漂角 β_0 。

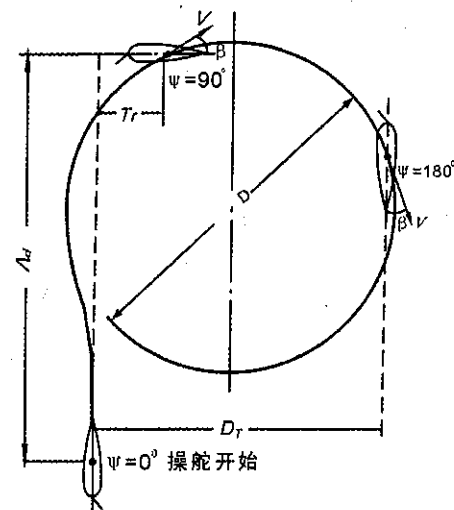


图 4.2.1 回转试验轨迹图

4.3 15°/15°Z 形操纵试验

4.3.1 试验目的

测定船舶的航向改变能力和航向保持能力。

4.3.2 试验方法及步骤

- (1) 船舶在预定航向上稳定航速直航 2min~3min;
- (2) 快速操舵至右 15°,稳住舵角;
- (3) 当首向角达右 15°时,快速反向操舵至左 15°,稳住舵角;
- (4) 当首向角偏离初始首向角达左 15°时,快速操舵至右 15°,稳住舵角;
- (5) 当首向角偏离初始首向角达右 15°时,快速操舵至左 15°,稳住舵角;

(6) 当首向角向左达初始首向角时,快速操舵回中,至此一次试验结束;

(7) 以相同程序重复上述(1)~(6)做先操左 15° 舵角的 $15^\circ/15^\circ$ Z形试验。

4.3.3 测量参数

连续记录试验过程中的时间、舵角、首向角,如图 4.3.1 所示。

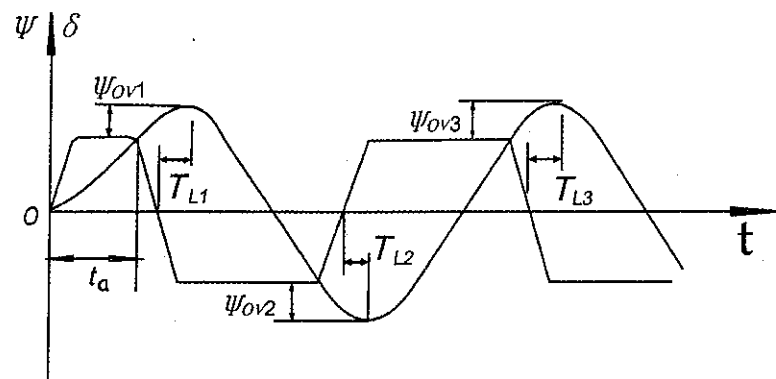


图 4.3.1 Z形操纵试验记录曲线

4.3.4 试验结果

- (1) 平均变向角速度 \bar{r}_{0-15} ;
- (2) 第一超越角 ψ_{ov1} ;
- (3) 第二超越角 ψ_{ov2} ;
- (4) 初转期 t_a ;
- (5) 转首滞后 T_L ;

4.4 停船试验

4.4.1 试验目的

测定船舶制动(应急制动)能力。

4.4.2 试验方法及步骤

- (1) 船舶在预定航向上稳定航速直航 2min~3min;
- (2) 下达停车令;
- (3) 船舶由减速前进到停船,试验结束;
- (4) 以相同方法及步骤,进行由正车直航至倒车停船的试验。

4.4.3 测量参数

连续测量时间、航迹和首向角,倒车制动还需测量倒车稳定转速。

4.4.4 试验结果

- (1) 惯性停船及倒车停船迹程 S_T ;
- (2) 惯性停船及倒车停船纵距 S_H ;
- (3) 惯性停船及倒车停船横距 S_L ;
- (4) 自停车令及倒车令至停船的时间 t_d ;

(5) 航迹曲线 (如图 4.4.1 所示)。

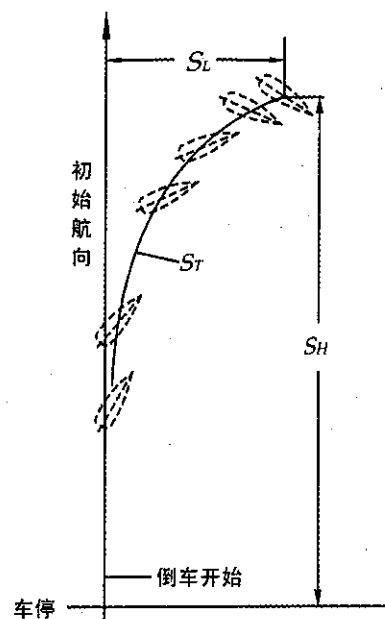


图 4.4.1 停船试验航迹曲线

4.5 回直试验

4.5.1 试验目的

测定船舶的直线运动稳定能力。

4.5.2 试验方法及步骤

- (1) 船舶在预定航向上稳定航速直航 2min~3min;
- (2) 快速操舵至右 35°, 稳住舵角;
- (3) 当船向右达稳定回转时, 快速操舵回中, 连续测量回转角速度, 直至船回到直航或进入定常回转;

(4) 以相同方法及步骤, 操左 35° 舵角重复上述(1)~(3)的试验。

4.5.3 测量参数

连续测量时间和回转角速度。

4.5.4 试验结果

回转角速度—时间即 $r-t$ 曲线, 如图 4.5.1 所示。

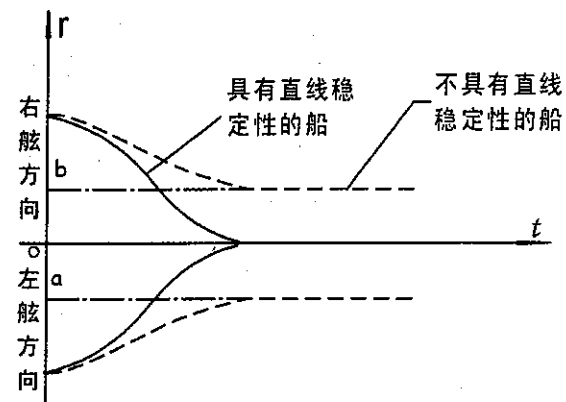


图 4.5.1 回直试验结果

4.6 直线稳定性试验

4.6.1 试验目的

测定船舶自动直线运动能力。

4.6.2 试验方法及步骤

- (1) 舵置零位, 船舶在预定航向上稳定航速直航 2min~3min;
- (2) 下达测试令;
- (3) 3min 后一次试验结束。

4.6.3 测量参数

连续记录首向角随时间的变化。

4.6.4 试验结果

正舵(舵角为零)航行 3min 的航向改变量 ΔC_0 。

4.7 操舵稳定性试验

4.7.1 试验目的

测定船舶依靠操舵保持航向的能力。

4.7.2 试验方法及步骤

- (1) 舵置零位,船舶在预定航向上稳定航速直航 2min~3min;
- (2) 下达测试令;
- (3) 操舵使船舶保持航向直航;
- (4) 3min 后一次试验结束。

4.7.3 测量参数

连续记录操舵角随时间的变化。

4.7.4 试验结果

保持航向 3min 的平均操舵角 δ_0, δ_0 由下式计算:

$$\delta_0 = \frac{\sum |\delta_i| t_i}{180}$$

式中: δ_i ——按顺序实测的操舵角,deg;

t_i ——与 δ_i 对应的操舵时间,s。

4.8 倒航试验

4.8.1 试验目的

测定船舶在倒车倒航情况下,依靠操舵脱离倒航回转的能力。

4.8.2 试验方法及步骤

- (1) 船舶在预定航向上零速待命;
- (2) 下达测试令并开倒车后退;
- (3) 船舶进入倒航回转状态后操舵使船舶脱离该回转状态,一次试验结束。

4.8.3 测量参数

连续记录操舵角随时间的变化,测量倒车稳定转速。

4.8.4 试验结果

脱离倒航回转最小操舵角 δ_0 。

4.9 低速舵效试验

4.9.1 试验目的

测定船舶在低速时的可操纵能力。

4.9.2 试验方法及步骤

- (1) 船舶在预定航向上低速航行 2min~3min;
- (2) 操最大舵角;
- (3) 改变主机转速,使达到船舶能被操纵的最小稳定转速;
- (4) 一次试验结束。
- (5) 对双螺旋桨船舶增做一正车、一倒车的回转试验(舵居中)。

4.9.3 测量参数

连续测量时间、航迹和转速。

4.9.4 试验结果

- (1) 船舶可操纵的最低主机转速;
- (2) 双桨船舶正、倒车时的回转直径。

附录 5 改善船舶操纵性的措施

5.1 概述

5.1.1 本附录主要从船型设计、增设附体、舵的选型及设计和特种操纵装置等四方面提出改善船舶操纵性的措施。在船舶初始设计阶段,根据对船舶操纵性的要求,参考这些措施进行型线设计和选择操纵装置。另外,也可针对营运船舶在航行中表现出的在操纵性方面的不足,采取相应的措施加以改善。

5.1.2 凡不满足本指南第 2 章操纵性衡准的船舶,应考虑按本附录提供的措施改善其操纵性。

5.1.3 对操纵性有特殊要求的船舶,可采用本附录提供的相关措施。

5.1.4 船舶型线对直线稳定性和回转性有不同影响,有时两者会产生矛盾,应针对具体要求作具体分析,不要过分注重其中一个性能,而使另一性能恶化。

5.2 直线稳定性和航向改变性

5.2.1 增加 $\frac{L}{B}$ 、减小方型系数 C_b 、减小修长度 $\frac{\nabla}{L^2 d}$ 、减小 $\frac{B}{d}$,均可

提高船舶的直线航行稳定性和航向改变性。

5.2.2 增大中纵剖面尾部面积,可提高直线稳定性与航向改变性,其措施有增大呆木、增大尾倾、切去前踵、倾斜首柱等。

5.2.3 船体尾部采用巡洋舰尾,与普通船尾相比,可提高直线稳

定性和航向改变性,尾部剖面采用 V 形,也可提高直线稳定性与航向改变性。

5.2.4 减少水线以上船体侧面积,并使该部分侧面积形心向尾部移动,可改善在风力作用下的船舶直线稳定性。

5.2.5 沿船纵向设置升力面,如加装尾部稳定鳍,并尽量使前形心位置后移,能有效提高船舶的直线稳定性。

5.2.6 增大舵面积,并使形心后移,可提高直线航行船舶的稳定性。

5.2.7 对双桨船舶,设置双舵并使其位于桨轴后,可提高船舶的直线稳定性。

5.3 回转性

5.3.1 增大方形系数 C_b ,增大宽度吃水比 $\frac{B}{d}$,增大修长度 $\frac{\Delta}{L^2 d}$,减少长宽比 $\frac{L}{B}$,均可提高回转性。

5.3.2 船体尾部采用 U 形船形,较 V 形船型的回转阻尼小,可改善回转性。

5.3.3 减小中纵剖面面积,如减小呆木或在呆木上开孔,可提高船舶的回转性。

5.3.4 船舶安装球首,可提高船舶的倒航回转性。

5.3.5 在一定范围内增加舵面积,可提高船舶的回转性。

5.3.6 对双桨船舶,设置双舵并使其位于桨轴后,也可提高船舶的回转性。

5.4 特种操纵装置

5.4.1 转柱舵

采用转柱舵,在船舶操纵方面有如下优点:转柱产生升力,增大转船力矩,提高回转性;推迟失速现象出现,增大临界舵角;在服务速度航行时作为普通舵使用,低速航行时启动转柱,可改善低速航行的操纵性。

转柱产生的升力与转柱长度、转柱直径、转柱的旋转速度与水流速度的比值有关。

5.4.2 主动舵

采用主动舵的船舶,操纵性极为优良,它可原地回转,在低速和停航的情况下,能发挥较大的作用;具有良好的倒航操纵性;前进时可提高航速,同时可以得到由于主机转速限制而不能达到的低速前进;在风浪中具有良好的操纵性。

主动舵适用于对操纵性要求很高的船舶或特种船舶,如推轮、拖轮、测量船、电缆敷设船等。

5.4.3 侧向推力器

侧推器使船舶具有良好的正航和倒航操纵性。装有侧推器的船通常不需要拖带便可以自动靠离码头,并具有良好的抗风能力。侧推器的效果随着航速下降而提高,故能提高船舶初始回转能力和低速、停主机淌航时的操纵性能,它适用于定位要求较高的船舶,如火车渡轮、航标船、集装箱船和工程船舶上。

为达到最高工作效率,侧推器应按实际可能尽量装在船首(或船尾)处,并注意隧道开口应尽量使其在航行中所产生的附加阻力最小。

5.4.4 襟翼舵

襟翼舵可通过主舵和襟翼转动角度不同,使流过舵的水流得到加速,临界舵角增大,从而提高舵的升力。采用襟翼舵的船,无论舵角大小,操纵性能都有所提高。

5.4.5 转动导管

采用转动导管的船,在前进时有很好的回转性,带有稳定翼的转动导管,可使船舶具有很好的直线稳定性。

转动导管适用于推轮、拖轮等。

5.4.6 Z形推进器

采用Z形推进器,能大大提高船舶的操纵性能,它适用于推轮、拖轮、消防船、补给船等。

5.4.7 推进器—正倒车舵组合装置

采用这种组合装置,可产生较大的倒车舵力及倒车转船力矩,改善倒车时的操纵性能,另外正车操纵性能也十分良好,适用于推轮、拖轮、渡船等船舶。

5.5 非常规操纵方式

5.5.1 所谓非常规操纵方式是指加、减速操纵,倒、顺车操纵,车、舵联合使用,停车或倒车加快速左右来回操舵等不常用的操纵方式。

5.5.2 加速Z形操纵和加速回转操纵,可使船舶的操纵性指数 K' 比常规操作时船舶的 K' 大, T' 则比常规操作的 T' 小;反向横距要比常规操作的大,纵距、横距、定常回转直径均比常规操作的相应值小。因此,采用向前加速变向或回转能提高船舶的回转性和直线稳定性。

5.5.3 双桨船舶采用倒顺车操纵,有导管的采用倒顺车结合异步

转动导管的操纵方式,特别是后者,可增大船舶的转船力矩,回转性能提高较多。

5.5.4 采用停车或倒车加快速左右来回操舵,增加水阻力很大,因此能加速停船,提高停船性能。

5.5.5 车舵恰当的联合使用,能产生所需方向的水动力与转船力矩达最大,从而提高船舶的各项操纵性能。

附录 6 驾驶室可视范围的建议

为了提高船舶(队)航行安全性,建议新建船舶(队)的驾驶室可视范围满足下列要求:

1. 从驾驶位置上所见的水面视域,在所有吃水、纵倾和甲板载货状态下,自船首前方至任何一舷 10° 范围内均不应有 2 倍船长以上的遮挡。

2. 在驾驶室外正横前方从驾驶位置上所见的水面视域内任何由货物、起货装置或其他障碍造成的盲视扇形区域的遮挡,应不超过 10° 。盲视区扇形区域的总和应不超过 20° 。在盲视区之间的可视扇形区域应至少 5° 。但在第 1 条中所述之视域内,每一单独的盲视区均不应超过 5° 。

3. 从驾驶位置上所见的水平视域应延伸为一个不小于 225° 的扇形区域,即从正前方至船舶任何一舷不小于 22.5° 的正横后方向。

4. 从每一驾驶翼桥所见的水平视域应延伸为一个至少为 225° 的扇面,即从船首另一侧至少 45° 经正前方,然后从正前方经 180° 至船舶相同一舷的正尾方。

5. 从主操舵位置所见的水平视域应延伸为一个从正前方至船舶每一舷至少 60° 的扇形区域。

6. 船舷应从驾驶室翼桥上可见。

7. 桥楼甲板以上的驾驶台正前窗下部边缘高度应尽可能保持低位。任何情况下该下部边缘不得成为障碍,遮挡前述的前视视域。

8. 驾驶室正前窗上部边缘应有一个水平前视范围。

9. 窗应满足下列要求:

(1) 驾驶室窗的框架应保持最低数量,且不应设置在任何工作台的正前方。

(2) 为有助于避免反射,驾驶台正前窗一般向船首倾斜,其角度不小于 10° 且不大于 25° 。

(3) 不应设置偏振及着色玻璃窗。

(4) 不管天气状况如何,在任何时候至少两个驾驶台正前窗应提供清晰的视域,此外依据驾驶室形状,附加数量的窗也应提供一个清晰的视域。