



中华人民共和国国家标准

GB/T 37303.6—2019/ISO 13643-6:2017

船舶和海上技术 船舶操纵性 第6部分:模型试验特殊要求

**Ships and marine technology—Manoeuvring of ships—
Part 6: Model test specials**

(ISO 13643-6:2017, IDT)

2019-03-25 发布

2019-10-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会



目 次

前言	Ⅲ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 测试相关的物理量	2
5 一般试验条件	15
6 试验 6.1:平面运动试验	15
6.1 总则	15
6.2 描述	17
6.3 平面运动试验的结果分析和表述	17
6.4 平面运动试验的表示	24
7 试验 6.2:圆周运动试验	25
7.1 总则	25
7.2 描述	25
7.3 圆周运动试验的结果分析和表述	25
7.4 圆周运动试验的表示	26
8 试验 6.3:斜拖或流场试验	27
8.1 总则	27
8.2 描述	28
8.3 斜拖或流场试验的结果分析和表述	28
8.4 斜拖或流场试验的表示	28
9 试验 6.4:风洞试验	30
9.1 总则	30
9.2 描述	30
9.3 试验的结果分析与表述	31
9.4 风洞试验的表示	31

前 言

GB/T 37303《船舶和海上技术 船舶操纵性》分为 6 个部分：

- 第 1 部分：基本概念、量与试验条件；
- 第 2 部分：回转和偏航纠正；
- 第 3 部分：航向稳定性和操舵；
- 第 4 部分：停船、加速和横移；
- 第 5 部分：潜水艇特殊要求；
- 第 6 部分：模型试验特殊要求。

本部分为 GB/T 37303 的第 6 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用 ISO 13643-6:2017《船舶和海上技术 船舶操纵性 第 6 部分：模型试验特殊要求》。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 37303.1—2019 船舶和海上技术 船舶操纵性 第 1 部分：基本概念、量与试验条件 (ISO 13643-1:2017, IDT)。

本部分由全国海洋船标准化技术委员会(SAC/TC 12)提出并归口。

本部分起草单位：中国船舶工业综合技术经济研究院、上海外高桥造船有限公司、中国船舶重工集团公司第七〇二研究所、中国船舶工业集团公司第七〇八研究所。

本部分主要起草人：刘刚、李军、韩阳、孙耀刚、朱佳帅、刘小健、封培元。

船舶和海上技术 船舶操纵性

第6部分:模型试验特殊要求

1 范围

GB/T 37303 的本部分规定了模型试验特殊要求的符号和术语,并提供水面船舶和潜水艇做平面运动、圆周运动、斜拖或流场系统等船模试验来确定水动力和力矩的指南,以及风洞试验的符号、术语和指南。本部分结合 ISO13643-1 使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

ISO 13643-1 船舶和海上技术 船舶操纵性 第1部分:基本概念、量与试验条件(Ships and marine technology—Manoeuvring of ships—Part 1: General concepts, quantities and test conditions)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

平面运动试验 planar motion test

通过操纵性试验来确定水动力和水动力力矩,以含有横向速度、横向加速度,以及分别相对于 z 轴和 y 轴的角速度和角加速度的函数关系式来表达。

3.2

圆周运动试验 circular motion test

通过操纵性试验来确定水动力和水动力力矩,对于水面船舶主要以相对于 z 轴的角速度的函数关系式来表达,对于潜水艇则主要以相对于 z 轴或 y 轴的角速度来表达。

3.3

斜拖或流场试验 oblique towing or flow test

在拖曳水池、循环水槽或风洞中进行的操纵性试验,通过操纵性试验确定力和力矩与漂角和操纵装置角度之间的函数关系,对于潜水艇,确定力和力矩与攻角和水平舵角度之间的函数关系。

3.4

风洞试验 wind tunnel test

通过试验确定船舶水上部分空气动力和力矩与相对风速之间的函数关系。

注:风洞也可用来做船体水下部分的试验。

3.5

操纵装置 manoeuvring device

用于操纵船舶的舵、全回转推进器、水平舵、直翼推进器或其他等效系统。

4 测试相关的物理量

测试相关的物理量见表1。一般量和概念按 ISO 13643-1。

表 1 试验相关物理量

符号	计算机兼容代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
A_{LV}	ALV	m^2	水线以上侧面积	见 ISO 13643-1
A_{XV}	AXV	m^2	水线以上横投影面积	设计水线以上的横投影,通常不包括索具、栏杆等
AP	AP	—	艏垂线	见 ISO 13643-1
a_0	AOPMM	m	模型运动的位移幅度	—
C	CWI	N	横向力	垂直于相对风向的力
C_C	CC	1	横向力系数	$2C/e_A V_{WRA}^2 A_{LV}$
C_D	CD	1	阻力系数	$2D/e_A V_{WRA}^2 A_{LV}$
C_{DAX}	CDAX	1	阻力系数	$2D/e_A V_{WRA}^2 A_{LV}$, 相对横截面
C_K	CK	1	横摇力矩系数	$2K/e_A V_{WRA}^2 A_{LV} L_{OA}$
C_N	CN	1	绕 z 轴力矩系数	$2N/e_A V_{WRA}^2 A_{LV} L_{OA}$
C_X	CX	1	纵向力系数	$2X/e_A V_{WRA}^2 A_{LV}$
C_{XAX}	CXAX	1	纵向力系数	$2X/e_A V_{WRA}^2 A_{LV}$, 相对横截面
C_Y	CY	1	侧向力系数	$2Y/e_A V_{WRA}^2 A_{LV}$
D	DWI	N	阻力	相对风方向的力
DWL	DWL	—	设计水线	见 ISO 13643-1
FP	FP	—	艏垂线	见 ISO 13643-1
F_T	FTWI	N	合力	分别为 $\sqrt{C^2 + D^2}$ 和 $\sqrt{X^2 + Y^2}$
F_n	FN	1	傅汝德数	见 ISO 13643-1
F_{n0}	FN0	1	(参考)傅汝德数	V_0 / \sqrt{gL}
\overline{GM}	GM	m	横稳性高	见 ISO 13643-1
H_{LM}	HLM	m	水线以上侧面积的平均高度	A_{LV}/L_{OA}
I_{xx}	IXX	kgm^2	模型 x 轴的惯性矩	见 ISO 13643-1
I_{yy}	IYY	kgm^2	模型 y 轴的惯性矩	见 ISO 13643-1
I_{xz}	IZX	kgm^2	模型的惯性积	见 ISO 13643-1
I_{zz}	IZZ	kgm^2	模型 z 轴的惯性矩	见 ISO 13643-1
K	MX	Nm	横摇力矩	相对随船坐标系 x 轴的力矩
$K_{\phi stat}$	DKDPST	$Nmrad^{-1}$	—	$\frac{\partial K}{\partial \phi} \big _{V=0}$ 来自静态试验或计算

表 1 (续)

符号	计算机兼容 代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
K'	MXS	1	无量纲横摇力矩	针对潜艇 $\frac{K}{\frac{\rho}{2}L^3V^2}$ 其中 K 为 $(u, v, w, p, q, r, v, \dot{w}, \dot{p}, q, \dot{r}, \phi, \theta)$ 的函数
				仅限水面船舶 $\frac{K}{\frac{\rho}{2}L^3V_0^2}$ 其中 K 为 $(V_0, \Delta u, v, w, p, q, r, v, \dot{w}, \dot{p}, q, \dot{r}, \phi, \theta)$ 的函数
K'_{in}	MXINS	1	无量纲横摇力矩同相部分	$\frac{2}{nT} \int_t^{t+nT} K'(t) \sin \omega t dt$
K'_{out}	MXOUTS	1	无量纲横摇力矩正交部分	$\frac{2}{nT} \int_t^{t+nT} K'(t) \cos \omega t dt$
K'_p	DKDPS	1	—	$\left. \frac{\partial K'}{\partial p'} \right _{K'=\hat{K}_0}$
$K'_{\dot{p}}$	DKDPTS	1	—	$\left. \frac{\partial K'}{\partial \dot{p}'} \right _{K'=\hat{K}_0}$
$K'_{\ddot{p}}$	DKDP3TS	1	—	$\left. \frac{\partial K'}{\partial \ddot{p}'} \right _{K'=\hat{K}_0}$
K'_r	DKDRS	1	K' 相对 r' 在 原点处斜率	$\left. \frac{\partial K'}{\partial r'} \right _{K'=\hat{K}_0}$
$K'_{\dot{r}}$	DKDRTS	1	—	$\left. \frac{\partial K'}{\partial \dot{r}'} \right _{K'=\hat{K}_0}$
K'_v	DKDVS	1	K' 相对 v' 在 原点处斜率	$\left. \frac{\partial K'}{\partial v'} \right _{K'=\hat{K}_0}$
$K'_{\dot{v}}$	DKDVTS	1	—	$\left. \frac{\partial K'}{\partial \dot{v}'} \right _{K'=\hat{K}_0}$
\hat{K}'_{pq}	MXPQS	1	表征 K' 对 $p'q'$ 的无量纲系数	—
\hat{K}'_r	MXRS	1	表征 K' 与 $F_{\infty}r'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{K}'_{ur}	MXURS	1	表征 K' 与 $u'r'$ 函数的无量纲系数	针对潜艇
\hat{K}'_{uu}	MXUUS	1	表征 K' 与 u'^2 函数的无量纲系数	针对潜艇
$\hat{K}'_{u\delta R}$	MXUUDRS	1	表征 K' 与 $u'^2\delta_R$ 函数的无量纲系数	针对潜艇

表 1 (续)

符号	计算机兼容代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
$\hat{K}_{uu\delta\delta R}$	MXUUDR3S	1	表征 K' 与 $u'^2\delta_R^3$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{K}'_{uv}	MXUVS	1	表征 K' 与 $u'v'$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{K}_{uv\delta R}$	MXUVDRS	1	表征 K' 与 $u'v'\delta_R$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{K}'_v	MXVS	1	表征 K' 与 $F_{n0}v'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{K}'_{vvv}	MXV3S	1	表征 K' 与 $v' \left v' \right \sqrt{v'^2 + w'^2} F_{n0}$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{K}'_{v v}$	MXVVAS	1	表征 K' 与 $v' \sqrt{v'^2 + w'^2}$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{K}'_{v\delta R}$	MXVDRS	1	表征 K' 与 $F_{n0}v'\delta_R$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{K}'_{wp}	MXWPS	1	表征 K' 与 $w'p'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{K}'_{wr}	MXWRS	1	表征 K' 与 $w'r'$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{K}'_{\Delta u}$	MXDUS	1	表征 K' 与 $\Delta u'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{K}'_{\Delta uv}$	MXDUVS	1	表征 K' 与 $\Delta u'v'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{K}'_{\Delta\Delta u}$	MXDU2S	1	表征 K' 与 $(\Delta u)^2$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{K}'_{\delta R}$	MXDRS	1	表征 K' 与 $F_{n0}^2\delta_R$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{K}'_{\delta\delta\delta R}$	MXDR3S	1	表征 K' 与 $F_{n0}^2\delta_R^3$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{K}'_0	MX0S	1	攻角为 α , 漂角为 β , 操纵装置和水平角为 0° 时表征 K' 的无量纲系数	—
\hat{K}'_ϕ	MXOPHS	1	无量纲横摇振荡系数	—
L	L	m	船长	参考船长(见 ISO 13643-1)
L_{OA}	LOA	m	总长	平行于设计水线的最后端至最前端的长度, 包括永久舾装
M	MY	Nm	y 轴力矩	相对随船坐标系
MA	MAX	—	主轴线	见 ISO 13643-1
$M_{\theta stat}$	DMDTST	Nmrad ⁻¹ s	—	$\frac{\partial M}{\partial \theta} \Big _{v=0}$ 来自静态试验或计算
M'	MYS	1	y 轴无量纲力矩	针对潜水艇: $\frac{M}{\frac{\rho}{2} L^3 V^2}$ 其中 M 为 $(u, v, w, p, q, r, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}, \phi, \theta)$ 的函数 针对水面船舶: $\frac{M}{\frac{\rho}{2} L^3 V_0^2}$ 其中 M 为 $(V_0, \Delta u, v, w, p, q, r, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}, \phi, \theta)$ 的函数

表 1 (续)

符号	计算机兼容代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
M'_{in}	MYINS	1	y 轴无量纲力矩的同相部分	$\frac{2}{nT} \int_t^{t+\pi T} M'(t) \sin \omega t dt$
M'_{out}	MYOUTS	1	y 轴无量纲力矩的正交部分	$\frac{2}{nT} \int_t^{t+\pi T} M'(t) \cos \omega t dt$
M'_q	DMDQS	1	M' 相对 q' 在原点处斜率	$\left. \frac{\partial M'}{\partial q'} \right _{M'=\hat{M}'_0}$
$M'_\dot{q}$	DMDQTS	1	—	$\left. \frac{\partial M'}{\partial \dot{q}'} \right _{M'=\hat{M}'_0}$
$M'_{\ddot{q}}$	DMDQ3TS	1	—	$\left. \frac{\partial M'}{\partial \ddot{q}'} \right _{M'=\hat{M}'_0}$
M'_w	DMDWS	1	M' 相对 w' 在原点处斜率	$\left. \frac{\partial M'}{\partial w'} \right _{M'=\hat{M}'_0}$
$M'_\dot{w}$	DMDWTS	1	—	$\left. \frac{\partial M'}{\partial \dot{w}'} \right _{M'=\hat{M}'_0}$
M'_θ	DMDTHS	rad^{-1s}	—	$\left. \frac{\partial M'}{\partial \theta} \right _{M'=\hat{M}'_0}$
\hat{M}'_{pp}	MYPPS	1	表征 M' 对 p'^2 函数的无量纲系数	—
\hat{M}'_{pr}	MYPRS	1	表征 M' 对 $p'r'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{M}'_q	MYQS	1	表征 M' 对 $u'q'$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{M}'_{ q }$	MYQQAS	1	表征 M' 对 $q' q' $ 函数的无量纲系数	—
$\hat{M}'_{ q \delta s}$	MYQADSS	1	表征 M' 对 $u' q' \delta s$ 函数的无量纲系数	—
\hat{M}'_{rr}	MYRRS	1	表征 M' 对 r'^2 函数的无量纲系数	—
\hat{M}'_{uu}	MYUUS	1	表征 M' 对 u'^2 函数的无量纲系数	—
\hat{M}'_{vp}	MYVPS	1	表征 M' 对 $u'p'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{M}'_{vr}	MYVRS	1	表征 M' 对 $v'r'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{M}'_w	MYWS	1	表征 M' 对 $u'w'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{M}'_{ww}	MYWWS	1	表征 M' 对 $ w' \sqrt{v'^2 + w'^2}$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{M}'_{w w }$	MYWWAS	1	表征 M' 对 $w' \sqrt{v'^2 + w'^2}$ 函数的无量纲系数	—

表 1 (续)

符号	计算机兼容代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
$\hat{M}'_{ w }$	MYWAS	1	表征 M' 对 $u' w' $ 函数的无量纲系数	—
$\hat{M}'_{ w q}$	MYWAQS	1	表征 M' 对 $q' \sqrt{v'^2 + w'^2}$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{M}'_{\delta B}$	MYDBS	1	表征 M' 对 $u'^2 \delta_B$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{M}'_{\delta S}$	MYDSS	1	表征 M' 对 $u'^2 \delta_S$ 函数的无量纲系数	—
\hat{M}'_0	MY0S	1	当攻角 α 、漂角 β 、操纵装置以及平面角为 0° 时, 表征 M' 的无量纲系数	—
\hat{M}'_θ	MYOTHS	1	对 y 轴的无量纲振荡系数	—
m	MA	kg	模型质量	—
N	MZ	Nm	对 z 轴力矩	相对随船坐标系
$N_{\phi \text{ dyn}}$	DNDPDYS	rad^{-1}s	—	$\left. \frac{\partial N'}{\partial \phi} \right _{N'=\hat{N}'_0} = -\frac{N_{\phi \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^3 V^2}$
$N_{\phi \text{ stat}}$	DNDPST	$\text{Nmrad}^{-1}\text{s}$	—	$\left. \frac{\partial N}{\partial \phi} \right _{V=0}$ 来自静力试验或计算
N'	MZS	1	对 z 轴无量纲力矩	<p>潜水艇专有:</p> $\frac{N}{\frac{\rho}{2} L^3 V^2}$ <p>其中 N 为 $(u, v, w, p, q, r, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}, \phi, \theta)$ 的函数</p> <p>仅限水面船舶:</p> $\frac{N}{\frac{\rho}{2} L^3 V_0^2}$ <p>其中 N 为 $(V_0, \Delta u, v, w, p, q, r, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}, \phi, \theta)$ 的函数</p>
N'_{in}	MZINS	1	对 z 轴无量纲力矩同相位部分	$\frac{2}{nT} \int_t^{t+nT} N'(t) \sin \omega t dt$
N'_{out}	MZOUTS	1	对 z 轴无量纲力矩正交部分	$\frac{2}{nT} \int_t^{t+nT} N'(t) \cos \omega t dt$

表 1 (续)

符号	计算机兼容代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
N'_p	DNDPS	1	—	$\left. \frac{\partial N'}{\partial p'} \right _{N'=\hat{N}_0}$
$N'_{\dot{p}}$	DNDPTS	1	—	$\left. \frac{\partial N'}{\partial \dot{p}'} \right _{N'=\hat{N}'_0}$
$N'_{\ddot{p}}$	DNDP3TS	1	—	$\left. \frac{\partial N'}{\partial \ddot{p}'} \right _{N'=\hat{N}_0}$
N'_r	DNDRS	1	N' 对 r' 在点处的斜率	$\left. \frac{\partial N'}{\partial r'} \right _{N'=\hat{N}_0}$
$N'_{\dot{r}}$	DNDRTS	1	—	$\left. \frac{\partial N'}{\partial \dot{r}'} \right _{N'=\hat{N}_0}$
N'_v	DNDVS	1	N' 对 v' 在点处的斜率	$\left. \frac{\partial N'}{\partial v'} \right _{N'=\hat{N}_0}$
$N'_{\dot{v}}$	DNDVTS	1	—	$\left. \frac{\partial N'}{\partial \dot{v}'} \right _{N'=\hat{N}_0}$
\hat{N}'_{pq}	MZPQS	1	表征 N' 对 $p'q'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{N}'_{qr}	MZQRS	1	表征 N' 对 $q'r'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{N}'_r	MZRS	1	表征 N' 对 $F_{n0}r'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{N}'_{ r }$	MZRRAS	1	表征 N' 对 $ r' $ 函数的无量纲系数	—
$\hat{N}'_{r\delta R}$	MZRDDS	1	表征 N' 对 $F_{n0}r'\delta_R^2$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{N}'_{ r \delta R}$	MZRADS	1	表征 N' 对 $F_{n0} r' \delta_R$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{N}'_{ur}	MZURS	1	表征 N' 对 $u'r'$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{N}'_{ur\delta R}$	MZURDDS	1	表征 N' 对 $u'r'\delta_R^2$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{N}'_{u r \delta R}$	MZURADS	1	表征 N' 对 $u' r' \delta_R$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{N}'_{uu}	MZUUS	1	表征 N' 对 u'^2 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{N}'_{u\delta R}$	MZUUDS	1	表征 N' 对 $u'^2\delta_R$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{N}'_{uu\delta R}$	MZUUD3S	1	表征 N' 对 $u'^2\delta_R^3$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{N}'_{uv}	MZUVS	1	表征 N' 对 $u'v'$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{N}'_v	MZVS	1	用表征 N' 对 v' 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{N}'_{vq}	MZVQS	1	表征 N' 对 $v'q'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{N}'_{vrr}	MZVRRS	1	表征 N' 对 $F_{n0}v'r'^2$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶

表 1 (续)

符号	计算机兼容代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
$\hat{N}'_{v\omega}$	MZVVRs	1	表征 N' 对 $F_{\omega} v'^2 r'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{N}'_{v\omega\omega}$	MZV3S	1	表征 N' 对 $v'^2 \sqrt{v'^2 + \omega'^2} F_{\omega}$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{N}'_{v v }$	MZVVAS	1	表征 N' 对 $v' \sqrt{v'^2 + \omega'^2}$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{N}'_{v r }$	MZVARs	1	表征 N' 对 $r' \sqrt{v'^2 + \omega'^2}$ 函数的无量纲系数	—
\hat{N}'_{wp}	MZWPS	1	表征 N' 对 $\omega' p'$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{N}'_{\omega r}$	MZWRS	1	表征 N' 对 $\omega' r'$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{N}'_{\Delta u}$	MZDUS	1	表征 N' 对 $\Delta u'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{N}'_{\Delta u v}$	MZDUVS	1	表征 N' 对 $\Delta u' v'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{N}'_{\Delta \Delta u}$	MZDU2S	1	表征 N' 对 $(\Delta u')^2$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{N}'_{\delta R}$	MZDRS	1	表征 N' 对 $F_{\omega}^2 \delta_R$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{N}'_{\delta \delta \delta R}$	MZDR3S	1	表征 N' 对 $F_{\omega}^2 \delta_R^3$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{N}'_0	MZ0S	1	当攻角 α , 漂角 β , 操纵装置以及平面角为 0° 时, 表征 N' 的无量纲系数	—
\hat{N}'_{ϕ}	MZOPHS	1	对 z 轴的无量纲振荡系数	—
n	N	1	—	傅里叶积分阶数
	NWI	1	指数	—
p	OMX	rads^{-1a}	横摇速度	$-V/R \sin \theta_s$ 绕 x 轴角速度
p'	OXS	1	无量纲横摇速度	pL/V_0
\dot{p}	OXRT	rads^{-2a}	横摇加速度	绕 x 轴角加速度
\dot{p}'	OXRTS	1	无量纲横摇加速度	$\dot{p}L^2/V_0^2$
\ddot{p}	OXR3T	rads^{-4a}	横摇速度三阶导数	—
\ddot{p}'	OXR3TS	1	横摇速度无量纲三阶导数	$\ddot{p}L^4/V_0^4$
q	OMY	rads^{-1a}	绕 y 轴角速度	基于随船坐标系
q'	OYS	1	绕 y 轴无量纲角速度	qL/V_0
\dot{q}	OYRT	rads^{-2a}	绕 y 轴角加速度	基于随船坐标系
\dot{q}'	OYRTS	1	绕 y 轴无量纲角加速度	$\dot{q}L^2/V_0^2$

表 1 (续)

符号	计算机兼容 代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
$\ddot{\ddot{q}}$	OYR3T	$\text{rads}^{-4\text{a}}$	绕 y 轴角速度三阶导数	—
$\ddot{\ddot{q}}'$	OYR3TS	1	绕 y 轴角速度无量纲三阶导数	$\ddot{\ddot{q}} L^4/V_0^4$
R	RCM	m	圆周运动半径	—
R_{RA}	RNA	1	雷诺数	$V_{\text{WRA}} L_{\text{OA}}/\nu_{\text{A}}$
R_{r0}	RN0	1	(参考)雷诺数	$V_0 L/\nu$
r	OMZ	$\text{rads}^{-1\text{a}}$	绕 z 轴角速度	$V/R \cos\phi_{\text{S}} \cos\theta_{\text{S}}$, 基于随船坐标系
r'	OZS	1	绕 z 轴无量纲角速度	rL/V_0
\dot{r}	OZRT	$\text{rads}^{-2\text{a}}$	绕 z 轴角加速度	基于随船坐标系
\dot{r}'	OZRTS	1	绕 z 轴无量纲角加速度	$\dot{r} L^2/V_0^2$
T	TIP	s	振荡周期	—
u	VX	$\text{ms}^{-1\text{b}}$	纵向速度	基于随船坐标系
u_0	VX0	ms^{-1}	纵向相对速度	—
u'	VXS	1	沿 x 轴无量纲速度	u/V_0
V	V	$\text{ms}^{-1\text{b}}$	模型速度	$\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$
V_{WR}	VWREL	$\text{ms}^{-1\text{b}}$	相对风速	见 ISO 13643-1
V_{WRA}	VWRELA	$\text{ms}^{-1\text{b}}$	参考速度: 在参考高度 z_{0A} 处的相对风速	实船尺度下通常取水面上 10 m 处
V_{WT}	VWABS	$\text{ms}^{-1\text{b}}$	实际风速	见 ISO 13643-1
V_{WTA}	VWABSA	$\text{ms}^{-1\text{b}}$	参考速度: 在参考高度 z_{0A} 处的实际风速	实船尺度下通常取水面上 10 m 处
V_0	V0	$\text{ms}^{-1\text{b}}$	参考速度	$\sqrt{u_0^2 + v^2 + w^2}$
V'	VS	$\text{ms}^{-1\text{b}}$	无量纲速度	V/V_0
v	VY	$\text{ms}^{-1\text{b}}$	横向速度	$V(\sin\phi_{\text{S}}\cos\beta \sin\theta_{\text{S}} - \sin\beta\cos\phi_{\text{S}})$ 沿 y 轴方向速度
v'	VYS	1	无量纲横向速度	v/V_0

表 1 (续)

符号	计算机兼容代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
\dot{v}	VYRT	ms^{-2}	横向加速度	相对于随船坐标系
\dot{v}'	VYRTS	1	无量纲横向加速度	$\dot{v}L/V_0^2$
WL	WL	—	水线	见 ISO 13643-1
w	VZ	ms^{-1b}	垂向速度	$V(\sin\phi_s \sin\beta + \cos\phi_s \cos\beta \sin\theta_s)$ 沿 z 轴方向速度
w'	VZS	1	无量纲垂向速度	w/V_0
\dot{w}	VZRT	ms^{-2}	垂向加速度	沿 z 轴方向加速度
\dot{w}'	VZRTS	1	无量纲垂向加速度	$\dot{w}L/V_0^2$
X	FX	N	纵向力	见 ISO 13643-1
X'	FXS	1	无量纲纵向力	$\frac{X}{\frac{\rho}{2}L^2V_0^2}$
\hat{X}'_{qq}	FXQQS	1	表征 X' 对 q'^2 函数的无量纲系数	—
$\hat{X}'_{q q }$	FXQQAS	1	表征 X' 对 $q' q' $ 函数的无量纲系数	—
\hat{X}'_{rr}	FXRRS	1	表征 X' 对 r'^2 函数的无量纲系数	—
\hat{X}'_{uu}	FXUUS	1	表征 X' 对 u'^2 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{X}'_{uu\delta\delta R}$	FXUDDRS	1	表征 X' 对 $u'^2\delta_R^2$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{X}'_{vr}	FXVRS	1	表征 X' 对 $v'r'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{X}'_{vv}	FXVVS	1	表征 X' 对 v'^2 函数的无量纲系数	—
\hat{X}'_{wq}	FXWQS	1	表征 X' 对 $w'q'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{X}'_{ww}	FXWWS	1	表征 X' 对 w'^2 函数的无量纲系数	—
$\hat{X}'_{\Delta u}$	FXDUS	1	表征 X' 对 $\Delta u'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{X}'_{\Delta\Delta u}$	FXDU2S	1	表征 X' 对 $(\Delta u')^2$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{X}'_{\Delta\Delta\Delta u}$	FXDU3S	1	表征 X' 对 $F_{\infty}(\Delta u')^3$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{X}'_{\delta\delta B}$	FXDB2S	1	表征 X' 对 $u'^2\delta_B^2$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{X}'_{\delta\delta R}$	FXDR2S	1	表征 X' 对 $F_{\infty}^2\delta_R^2$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{X}'_{\delta\delta S}$	FXDS2S	1	表征 X' 对 $u'^2\delta_S^2$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{X}'_0	FX0S	1	当攻角 α 、漂角 β 、操纵装置和平面角为 0° 时, 表征 X' 的无量纲系数	—

表 1 (续)

符号	计算机兼容代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
x_F	XFO	m	压力中心纵向位置	N/Y
x_G	XG	m	模型重心纵向位置	见 ISO 13643-1
Y	FY	N	横向力	见 ISO 13643-1
$Y_{\phi \text{ stat}}$	DYDPST	N rad ^{-1s}	—	$\left. \frac{\partial Y}{\partial \phi} \right _{V=0}$ 来源于静态试验或计算
Y'	FYS	1	无量纲横向力	针对潜水艇: $\frac{Y}{\frac{\rho}{2} L^2 V^2}$ 其中 Y 为 $(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}, \phi, \theta)$ 的函数
				仅限水面船: $\frac{Y}{\frac{\rho}{2} L^2 V_0^2}$ 其中 Y 为 $(V_0, \Delta u, v, w, p, q, r, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}, \phi, \theta)$ 的函数
Y'_{in}	FYINS	1	无量纲横向力同相部分	$\frac{2}{nT} \int_t^{t+nT} Y'(t) \sin \omega t \, dt$
Y'_{out}	FYOUTS	1	无量纲横向力正交部分	$\frac{2}{nT} \int_t^{t+nT} Y'(t) \cos \omega t \, dt$
Y'_p	DYDPS	1	—	$\left. \frac{\partial Y'}{\partial p'} \right _{r=\hat{r}_0}$
$Y'_\dot{p}$	DYDPTS	1	—	$\left. \frac{\partial Y'}{\partial \dot{p}'} \right _{r=\hat{r}_0}$
$Y'_{\ddot{p}}$	DNDP3TS	1	—	$\left. \frac{\partial Y'}{\partial \ddot{p}'} \right _{r=\hat{r}_0}$
Y'_r	DYDRS	1	过原点 Y' 对 r' 的斜率	$\left. \frac{\partial Y'}{\partial r'} \right _{r=\hat{r}_0}$
$Y'_\dot{r}$	DYDRTS	1	—	$\left. \frac{\partial Y'}{\partial \dot{r}'} \right _{r=\hat{r}_0}$
Y'_v	DYDVS	1	过原点 Y' 对 v' 的斜率	$\left. \frac{\partial Y'}{\partial v'} \right _{r=\hat{r}_0}$
$Y'_\dot{v}$	DYDVTS	—	—	$\left. \frac{\partial Y'}{\partial \dot{v}'} \right _{r=\hat{r}_0}$

表 1 (续)

符号	计算机兼容 代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
Y'_ϕ	DYDPHIS	$\text{rad}^{-1\text{a}}$	—	$\left. \frac{\partial Y'}{\partial \phi} \right _{Y'-\hat{Y}_0}$
$Y'_{\phi \text{dyn}}$	DNDPDYS	$\text{rad}^{-1\text{a}}$	—	$\left. \frac{\partial Y'}{\partial \phi} \right _{Y'-\hat{Y}_0} - \frac{Y_{\phi \text{stat}}}{\frac{\rho}{2} L^2 V^2}$
\hat{Y}'_{pq}	FYPQS	1	表征 Y' 对 $p'q'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Y}'_{qr}	FYQRS	1	表征 Y' 对 $q'r'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Y}'_r	FYRS	1	表征 Y' 对 $F_{n0}r'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{Y}'_{ r }$	FYRRAS	1	表征 Y' 对 $ r' $ 函数的无量纲系数	—
$\hat{Y}'_{r\delta R}$	FYRDDS	1	表征 Y' 对 $F_{n0}r'\delta_R^2$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{Y}'_{ r \delta R}$	FYRADS	1	表征 Y' 对 $F_{n0} r' \delta_R$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{Y}'_{ur}	FYURS	1	表征 Y' 对 $u'r'$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{Y}'_{ur\delta R}$	FYURDDS	1	表征 Y' 对 $u'r'\delta_R^2$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{Y}'_{u r \delta R}$	FYURADS	1	表征 Y' 对 $u' r' \delta_R$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{Y}'_{uu}	FYUUS	1	表征 Y' 对 u'^2 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{Y}'_{uu\delta R}$	FYUUDS	1	表征 Y' 对 $u'^2\delta_R^2$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{Y}'_{uu\delta\delta R}$	FYUUD3S	1	表征 Y' 对 $u'^2\delta_R^3$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{Y}'_{uv}	FYUVS	1	表征 Y' 对 $u'v'$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
$\hat{Y}'_{u v \delta R}$	FYUVADS	1	表征 Y' 对 $u' v' \delta_R$ 函数的无量纲系数	针对潜水艇
\hat{Y}'_v	FYVS	1	表征 Y' 对 $F_{n0}v'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{Y}'_{vq}	FYVQS	1	表征 Y' 对 $v'q'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Y}'_{vrr}	FYVRRS	1	表征 Y' 对 $F_{n0}v'r'^2$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{Y}'_{v r }$	FYVRAS	1	表征 Y' 对 $ r' \sqrt{v'^2 + w'^2} \frac{ v' }{v'}$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Y}'_{vur}	FYVVRS	1	表征 Y' 对 $F_{n0}v'^2r'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{Y}'_{vuv}	FYV3S	1	表征 Y' 对 $F_{n0}v'^2 \sqrt{v'^2 + w'^2}$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{Y}'_{v v }$	FYVVAS	1	表征 Y' 对 $v' \sqrt{v'^2 + w'^2}$ 函数的无量纲系数	—

表 1 (续)

符号	计算机兼容 代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
\hat{Y}'_{vw}	FYVWS	1	表征 Y' 对 $v'w'$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{Y}'_{ v \delta_R}$	FYVADS	1	表征 Y' 对 $F_{v0} v' \delta_R$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{Y}'_{wp}	FYWPS	1	表征 Y' 对 $w'p'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Y}'_{wr}	FYWRS	1	表征 Y' 对 $w'r'$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{Y}'_{\Delta u}$	FYDUS	1	表征 Y' 对 $\Delta u'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{Y}'_{\Delta uv}$	FYDUVS	1	表征 Y' 对 $\Delta u'v'$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{Y}'_{\Delta u^2}$	FYDU2S	1	表征 Y' 对 $(\Delta u')^2$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{Y}'_{δ_R}	FYDRS	1	表征 Y' 对 $F_{v0}^2\delta_R$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
$\hat{Y}'_{\delta\delta\delta R}$	FYDR3S	1	表征 Y' 对 $F_{v0}^2\delta_R^3$ 函数的无量纲系数	仅限水面船舶
\hat{Y}'_0	FY0S	1	当攻角 α 、漂角 β 、操纵装置和平面角为 0° 时,表征 Y' 的无量纲系数	—
\hat{Y}'_ϕ	FYOPHS	1	横向运动振荡无量纲系数	—
Z	FZ	N	垂向力	见 ISO 13643-1
Z'	FZS	1	无量纲垂向力	<p>针对潜水艇: $\frac{Z}{\frac{\rho}{2}L^2V^2}$ 其中 Z 为 $(u,v,w,p,q,r,\dot{v},\dot{w},\dot{p},\dot{q},\dot{r},\phi,\theta)$ 的函数</p> <p>针对潜水艇: $\frac{Z}{\frac{\rho}{2}L^2V_0^2}$ 其中 Z 为 $(V_0,\Delta u,v,w,p,q,r,\dot{v},\dot{w},\dot{p},\dot{q},\dot{r},\phi,\theta)$ 的函数</p>
Z'_{in}	FZINS	1	无量纲垂向力同相部分	$\frac{2}{nT} \int_t^{t+nT} Z'(t) \sin \omega t dt$
Z'_{out}	FZOUTS	1	无量纲垂向力正交部分	$\frac{2}{nT} \int_t^{t+nT} Z'(t) \cos \omega t dt$
Z'_q	DZDQS	1	过原点 Z' 对 q' 的斜率	$\left. \frac{\partial Z'}{\partial q'} \right _{Z'=Z_0}$

表 1 (续)

符号	计算机兼容 代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
Z'_q	DZDQTS	1	—	$\left. \frac{\partial Z'}{\partial q} \right _{z'=z_0}$
Z'_w	DZDWS	1	过原点 Z' 对 w' 的斜率	$\left. \frac{\partial Z'}{\partial w'} \right _{z'=z_0}$
$Z'_\dot{w}$	DZDWTS	1	—	$\left. \frac{\partial Z'}{\partial \dot{w}} \right _{z'=z_0}$
\hat{Z}'_{pp}	FZPPS	1	表征 Z' 对 p'^2 函数的无量纲系数	—
\hat{Z}'_{pr}	FZPRS	1	表征 Z' 对 $p'r'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Z}'_q	FZQS	1	表征 Z' 对 $u'q'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Z}'_{rr}	FZRRS	1	表征 Z' 对 r'^2 函数的无量纲系数	—
\hat{Z}'_{uu}	FZUUS	1	表征 Z' 对 u'^2 函数的无量纲系数	—
\hat{Z}'_{vp}	FZVPS	1	表征 Z' 对 $v'p'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Z}'_{vr}	FZVRS	1	表征 Z' 对 $v'r'$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Z}'_w	FZWS	1	表征 Z' 对 $u'w'$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{Z}'_{w q }$	FZWQAS	1	表征 Z' 对 $\frac{w' q' }{ w' } \sqrt{v'^2 + w'^2}$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Z}'_{ww}	FZWWS	1	表征 Z' 对 $ w' \sqrt{v'^2 + w'^2}$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{Z}'_{w w }$	FZWVAS	1	表征 Z' 对 $w' \sqrt{v'^2 + w'^2}$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{Z}'_{ w }$	FZWAS	1	表征 Z' 对 $u' w' $ 函数的无量纲系数	—
$\hat{Z}'_{\delta B}$	FZDBS	1	表征 Z' 对 $u'^2 \delta_B$ 函数的无量纲系数	—
$\hat{Z}'_{\delta S}$	FZDSS	1	表征 Z' 对 $u'^2 \delta_S$ 函数的无量纲系数	—
\hat{Z}'_0	FZ0S	1	当攻角 α 、漂角 β 、操纵装置和平面角为 0° 时, 表征 Z' 的无量纲系数	—
z	Z	m	垂向坐标	见 ISO 13643-1
z_F	ZFO	m	压力中心垂向位置	$-K/Y$
z_G	ZG	m	模型重心垂向位置	见 ISO 13643-1

表 1 (续)

符号	计算机兼容 代码	国际单位	概念	
			术语	描述或解释
z_{0A}	Z0A	m	相对高度	—
α	ALFA	rad ^a	攻角	见 ISO 13643-1
β	BET	rad ^a	漂角	见 ISO 13643-1
Δu	DVX	m s ⁻¹	纵荡速度	$u - u_0$
$\Delta u'$	DVXS	1	无因次纵荡速度	$\Delta u / V_0$
δ_B	ANB	rad ^a	艏平面角	见 ISO 13643-1
δ_R	ANRU	rad ^a	操纵角	见 ISO 13643-1
δ_S	ANS	rad ^a	艉平面角	见 ISO 13643-1
θ_S	TRIMS	rad ^a	纵倾角	见 ISO 13643-1
θ_0	TH0PMM	rad ^a	纵摇振幅	—
ν_A	VKAI	m ² s ⁻¹	空气运动黏性	—
ρ_A	RHOAI	kgm ⁻³	空气密度	—
ρ	RHOWA	kgm ⁻³	水密度	—
ϕ_S	HEELANG	rad ^a	横倾角	见 ISO 13643-1
ϕ_0	PH0PMM	rad ^a	横摇振幅	—
Ψ	PSIH	rad ^a	航向	见 ISO 13643-1
Ψ_{WR}	PSIWREL	rad ^a	相对风向	见 ISO 13643-1
Ψ_0	PS0PMM	rad ^a	艏摇振幅	—
ω	OMN	s ⁻¹	角速度	$2\pi/T$
^a 使用度(°)作为角度单位。 ^b 使用节(kn)作为航速单位。				

5 一般试验条件

除 ISO 13643-1 规定的一般试验条件外,还应符合以下条件:
对于潜水艇的模型试验,应采取适当措施消除水面和池底效应。

6 试验 6.1:平面运动试验

6.1 总则

基本试验条件应满足 ISO 13643-1 及第 5 章中所列内容。

一般来说,船舶模型通过合适的力及扭矩仪固定在平面运动机构上。对于水面船舶的操纵性模拟仅存在三个自由度(x 、 y 、 Ψ),确保船模能够自由纵倾、升沉及可能的横倾。

对于潜水艇,通常使用两根垂向振荡的支杆来拖曳和振荡模型。根据试验采用的两种连接方式可分垂直面试验和水平面试验。对于垂直面试验,可使用一根支杆穿过围壳与正装的模型相连,或使用两根支杆与倒装的模型相连以避免支杆和围壳之间的干扰。对于水平面试验,将模型旋转 90° ,通常用支杆连接到模型的侧面(腹支撑),或从船尾用一根支杆进行连接(尾支撑)。

在横荡试验及潜水艇的横摇试验中,应测量下述数据:

—— x 轴力矩, K (横荡试验中,仅在模型被限制横倾情况下);

—— z 轴力矩, N ;

——纵向力, X ;

——侧向力, Y 。

潜水艇试验关于 y 轴:

—— y 轴力矩, M ;

——垂向力, Z 。

水面船模型试验存在水面波尺度效应,模型和实船的傅汝德数 F_{n0} 应保持一致。对应黏性的尺度效应,雷诺数 R_{n0} 无法保持一致,但应保证模型达到充分发展的湍流状态(临界雷诺数 R_{nc})。应在艏部安装激流装置。

因为控制面和螺旋桨会影响水动力系数,两者都应在模型上安装。对特定问题,应使用裸船体进行试验。

对于水面船舶模型,模型重量 m 对应排水体积 ∇ 。对于潜水艇模型,压载应调整到量和位置与实际情况一致。很难将其调整到真实浮态的精确状态。因此,精确的模型重量状态(正浮力或负浮力)应通过倾斜试验确定,轴向力对纵倾角的改变等同于多余的浮力。

稳性相关导数 $Y_{\phi\text{stat}}$ 、 $K_{\phi\text{stat}}$ 和 $N_{\phi\text{stat}}$,对于潜水艇还有 $M_{\theta\text{stat}}$,以及重心坐标 x_G 和 z_G 由倾斜试验(静态)确定或通过计算。

模型惯性矩 I_{xx} 、 I_{yy} 和 I_{zz} 及潜水艇 I_{yy} ,由在空气中振荡试验来确定。对于潜水艇,进行空气中的振荡试验时,应密封所有模型开口。但进行拖曳试验时,模型的这些位置应充分进水。

在线性理论中,水面船舶和潜水艇的定常运动出现小偏离时,比较实际的做法是求出水动力导数。这些导数允许指定放大的流体力 and 力矩幅值。海事文献中提及的导数往往是“慢变运动导数”,这用来确定船舶在 y 轴和 z 轴上小运动的水动力稳定性。

平面运动的理论计算基于振荡参数,振荡参数更适用于使用平面运动机构的船模试验。振荡参数由频率决定。如果振荡运动的频率非常小,则近似于慢变运动导数。

平面运动机构(PMM)本质上是一个水面船舶模型和潜水艇模型在水池被拖曳时的振荡装置。这个机构允许从流体分离出在 y (或 z)轴的纯旋转和在 z (或 y)轴方向上的纯平移运动,也能生成耦合运动。运动物体的坐标系中被提及的运动微分方程可直接和间接的求得各种旋转和加速度的导数,并测量力和力矩同相正交的部分。力和力矩的线性方程式描述了整体的运动,初始平衡条件可以写为:

侧向力:

$$Y = \left(\frac{\rho L^4}{2} Y'_r + m x_G \right) \dot{r} + \left(\frac{\rho L^4}{2} Y'_\phi + m z_G \right) \dot{\phi} + \frac{\rho L^3}{2} Y'_\rho V_0 \dot{\rho} + \left(\frac{\rho L^3}{2} Y'_r - m \right) V_0 r + \left(\frac{\rho L^3}{2} Y'_\phi - m \right) \dot{v} + \frac{\rho L^2}{2} (Y'_v V_0 v + Y'_0 V_0^2 + Y'_{\phi\text{dyn}} V_0^2 \phi) + Y_{\phi\text{stat}} \phi$$

..... (1)

x 轴力矩(在横荡或横摇试验中,模型被限制横倾时):

$$K = \left(\frac{\rho L^5}{2} K'_\phi - I_{xx} \right) \dot{\phi} + \left(\frac{\rho L^5}{2} K'_r - I_{xx} \right) \dot{r} + \left(\frac{\rho L^4}{2} K'_r - m z_G \right) V_0 r$$

$$+ \left(\frac{\rho L^4}{2} K'_{\dot{v}} + m z_G \right) \dot{v} + \frac{\rho L^3}{2} (K'_v V_v + K'_0 V_0^2 + K'_{\phi \text{ dyn}} V_0^2 \phi) + K_{\phi \text{ stat}} \phi$$

..... (2)

Z 轴力矩:

$$N = \left(\frac{\rho L^5}{2} N'_{\dot{r}} - I_{xx} \right) \dot{r} + \left(\frac{\rho L^5}{2} N'_{\dot{p}} + I_{xx} \right) \dot{p} + \frac{\rho L^4}{2} N'_p V_0 \dot{p} + \left(\frac{\rho L^4}{2} N'_r - m x_G \right) V_0 r$$

$$+ \left(\frac{\rho L^4}{2} N'_{\dot{v}} - m x_G \right) \dot{v} + \frac{\rho L^3}{2} (N'_v V_0 v + N'_0 V_0^2 + N'_{\phi \text{ dyn}} V_0^2 \phi) + N_{\phi \text{ stat}} \phi$$

..... (3)

对于潜水艇,采用下述附加公式:

垂向力:

$$Z = \left(\frac{\rho L^4}{2} Z'_{\dot{q}} + m x_G \right) \dot{q} + \left(\frac{\rho L^3}{2} Z'_{\dot{w}} - m \right) \dot{w} + \left(\frac{\rho L^3}{2} Z'_q + m \right) V_0 q + \frac{\rho L^2}{2} (Z'_w V_0 w + Z'_0 V_0^2)$$

..... (4)

Y 轴力矩:

$$M = \left(\frac{\rho L^5}{2} M'_{\dot{q}} + I_{yy} \right) \dot{q} + \left(\frac{\rho L^4}{2} M'_{\dot{w}} + m x_G \right) \dot{w} + \left(\frac{\rho L^4}{2} M'_q - m x_G \right) V_0 q$$

$$+ \frac{\rho L^3}{2} (M'_w V_0 w + M'_0 V_0^2) + M_{\theta \text{ stat}} \theta$$

..... (5)

应考虑非线性相关性及其各自导数,尤其是在进行任意操纵的数值模拟时,并运用合适的数值模拟运算法则。不包含加速度或角速度的量(运动方程中引用的 \hat{Y}'_0 、 \hat{Y}'_{vw} 和 $\hat{Y}'_{v|v|}$)的特性和数值可直接由斜拖试验或流场试验获得(见第 8 章)。包含角速度及其他关于 x 轴的角运动的量(包含 \hat{Y}'_{vq} 、 $\hat{Y}'_{v|r|}$ 、 \hat{Y}'_{wv} 、 \hat{Y}'_{qv} 和 $\hat{Y}'_{r|r|}$)可由圆周运动试验直接得到特性和数值(见第 7 章)。

注:非线性导数或系数的类型极大程度依赖于选用的数学仿真算法。

6.2 描述

调整特定试验参数:

- 位移幅度 a_0 、模型运动和幅度 Ψ_0 、 z 轴的摆动或幅度 ϕ_0 、 x 轴的摆动;
- 摆动周期 T 及相应角速度 ω 。

拖车拖着平面运动机构以给定的恒定速度 V_0 前进,并在此运动基础上,对平面运动机构叠加周期性运动。根据实船或模型的自航点设定螺旋桨转速。

对小幅振荡的船,恒定拖车速度即能满足。对由 $xy\Psi$ -副拖车实现大幅振荡的船,可叠加沿水池纵向大振荡运动,以确保模型速度恒定。

模型振荡运动要足够近似于单频谐振,频率要足够低,使合适的振荡系数近似于慢运动导数,这一点很重要。

针对特定的非线性项,一些平面运动系统能实现更复杂的轨迹。

6.3 平面运动试验的结果分析和表述

6.3.1 水平面运动试验

水平平面方向平面运动机构和模型见图 1。

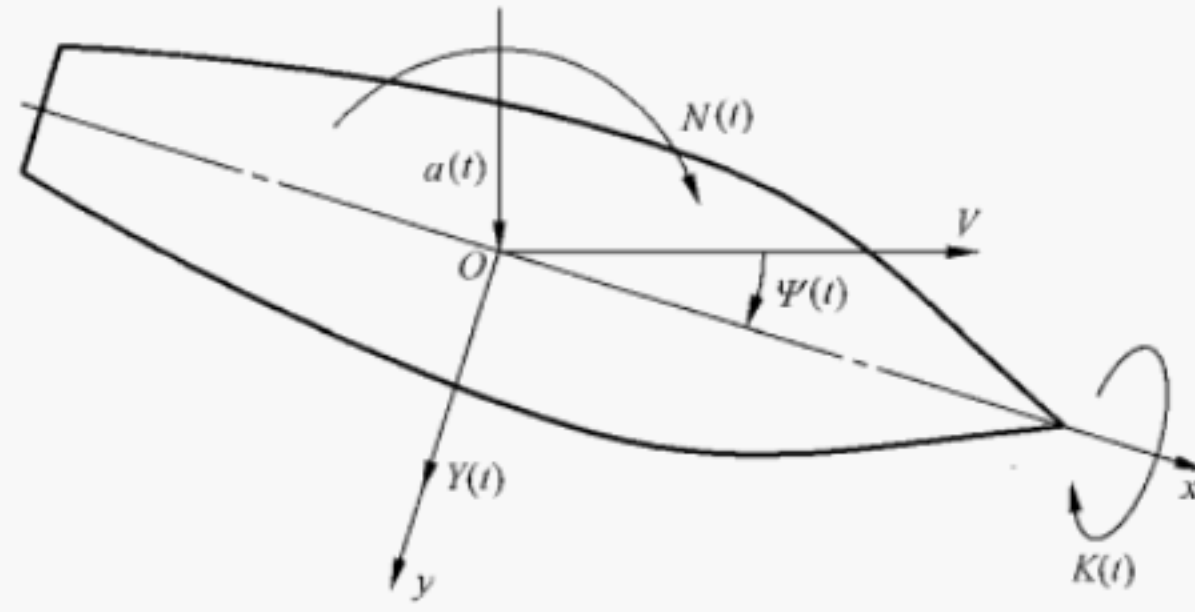


图1 水平平面方向平面运动机构和模型

如果模型向前运动叠加小幅度正弦平面运动，

$$a(t) = a_0 \sin \omega t \text{ 和 } \Psi(t) = \Psi_0 = 0$$

则可得出下列导数：

$$Y'_v = \frac{m}{\frac{\rho}{2} L^3} + \frac{\partial Y'_{in}}{\partial \left(\frac{\omega^2 a_0 L}{V_0^2} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (6)$$

$$Y'_v = \frac{\partial Y'_{out}}{\partial \left(\frac{\omega^2 a_0}{V_0} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (7)$$

$$N'_v = \frac{m x_G}{\frac{\rho}{2} L^4} + \frac{\partial N'_{in}}{\partial \left(\frac{\omega^2 a_0 L}{V_0^2} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (8)$$

$$N'_v = \frac{\partial N'_{out}}{\partial \left(\frac{\omega a_0}{V_0} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (9)$$

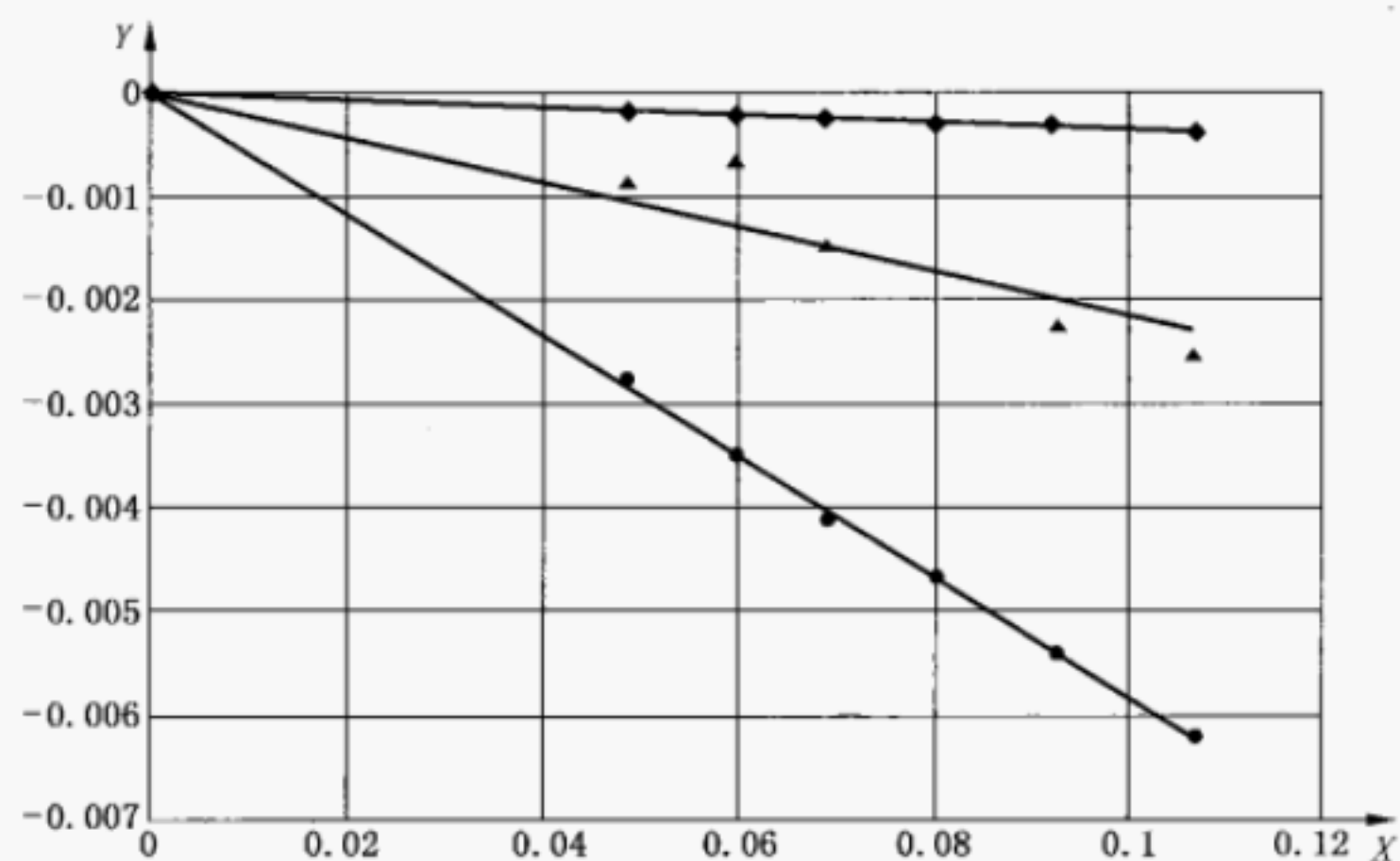
如果测量横摇力矩：

$$K'_v = \frac{m z_G}{\frac{\rho}{2} L^4} + \frac{\partial K'_{in}}{\partial \left(\frac{\omega^2 a_0 L}{V_0^2} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (10)$$

$$K'_v = - \frac{\partial K'_{out}}{\partial \left(\frac{\omega a_0}{V_0} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (11)$$

力和力矩的同相及正交部分与各自对应无量纲运动幅值参数 $\omega^2 a_0 L / V_0^2$ 和 $\omega a_0 / V_0$ 随角速度 ω 、速度 V_0 、振幅 a_0 变化(见图2和图3)。线性拟合曲线的斜率用来确定水动力导数。

注：首先选用斜拖或流场试验的结果(见第8章)，这些最简单、最直接的试验所获得的导数更为可靠。



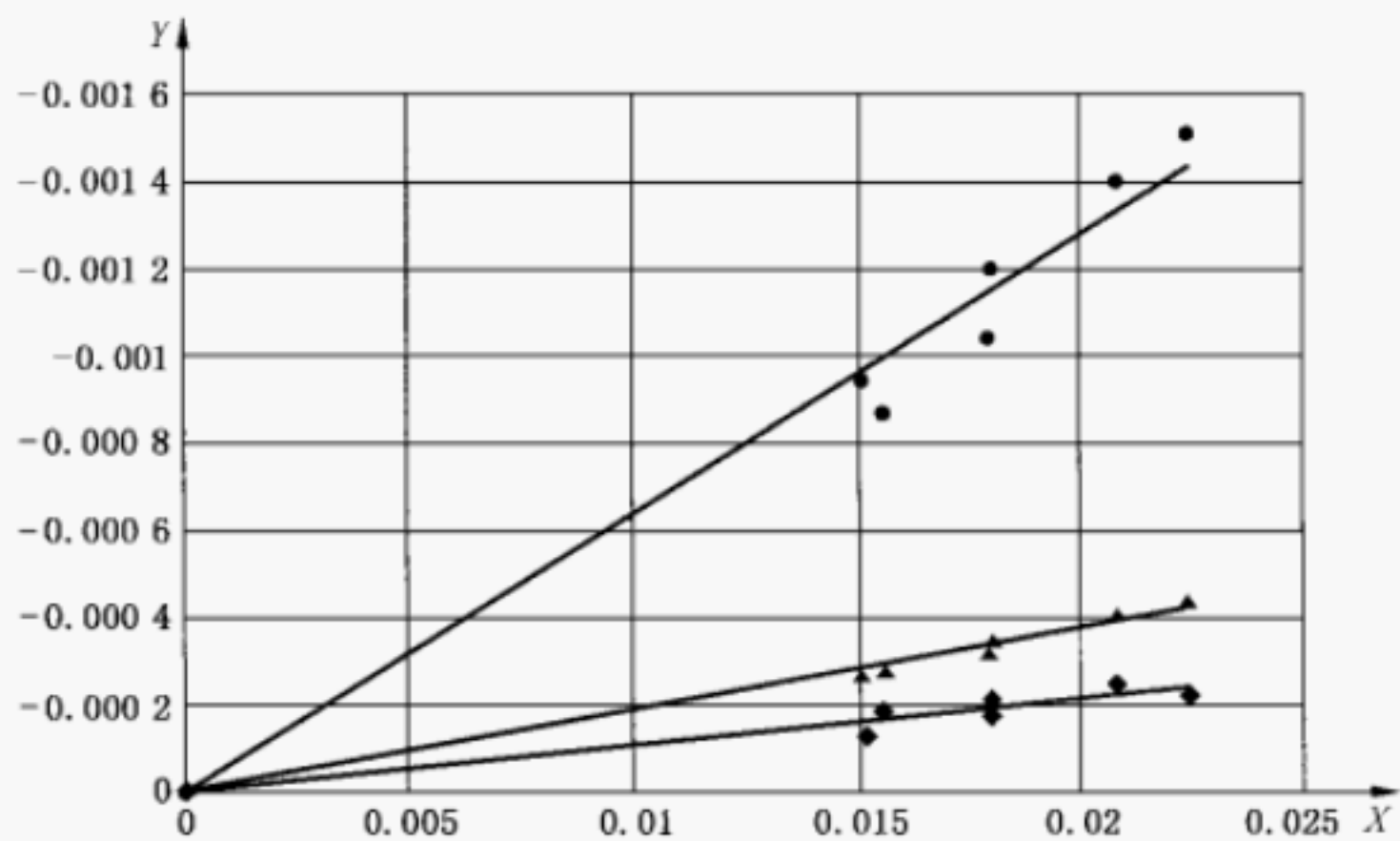
说明:

- — Y'_{in} ;
- ◆ — $10 \times K'_{in}$;
- ▲ — $100 \times N'_{in}$;

X ——无量纲线性加速度参数 $\omega^2 a_0 L / V_0^2$;

Y ——无量纲横向力、横摇力矩、 z 轴力矩系数的同相部分。

图 2 无量纲侧向力、横摇力矩、 z 轴力矩系数的同相部分随无量纲线性加速度幅度的变化情况



说明:

- — Y'_{out} ;
- ▲ — N'_{out} ;
- ◆ — $100 \times K'_{out}$;

X ——无量纲线性速度参数 $\omega a_0 / V_0$;

Y ——无量纲侧向力、横摇力矩的正交部分,和 z 轴力矩系数(相对于运动 90° 反相)。

图 3 无量纲侧向力、横摇力矩的正交部分及 z 轴力矩系数(相对于运动 90° 反相)随无量纲线性速度幅度的变化情况

如果模型向前运动叠加小幅度 z 轴正弦曲线旋转运动,

$$a(t) = \Psi_0 V_0 \cos \omega t$$

$$\Psi(t) = \Psi_0 \sin \omega t$$

则可得出下列导数:

$$Y'_r = \frac{mx_G}{\frac{\rho}{2}L^4} + \frac{\partial Y'_{in}}{\partial \left(\frac{\omega^2 \Psi_0 L^2}{V_0^2} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (12)$$

$$Y'_r = \frac{m}{\frac{\rho}{2}L^3} + \frac{\partial Y'_{out}}{\partial \left(\frac{\omega \Psi_0 L}{V_0} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (13)$$

$$N'_r = \frac{I_{zz}}{\frac{\rho}{2}L^5} + \frac{\partial N'_{in}}{\partial \left(\frac{\omega^2 \Psi_0 L^2}{V_0^2} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (14)$$

$$N'_r = \frac{mx_G}{\frac{\rho}{2}L^4} + \frac{\partial N'_{out}}{\partial \left(\frac{\omega \Psi_0 L}{V_0} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (15)$$

如果横摇力矩已经测得:

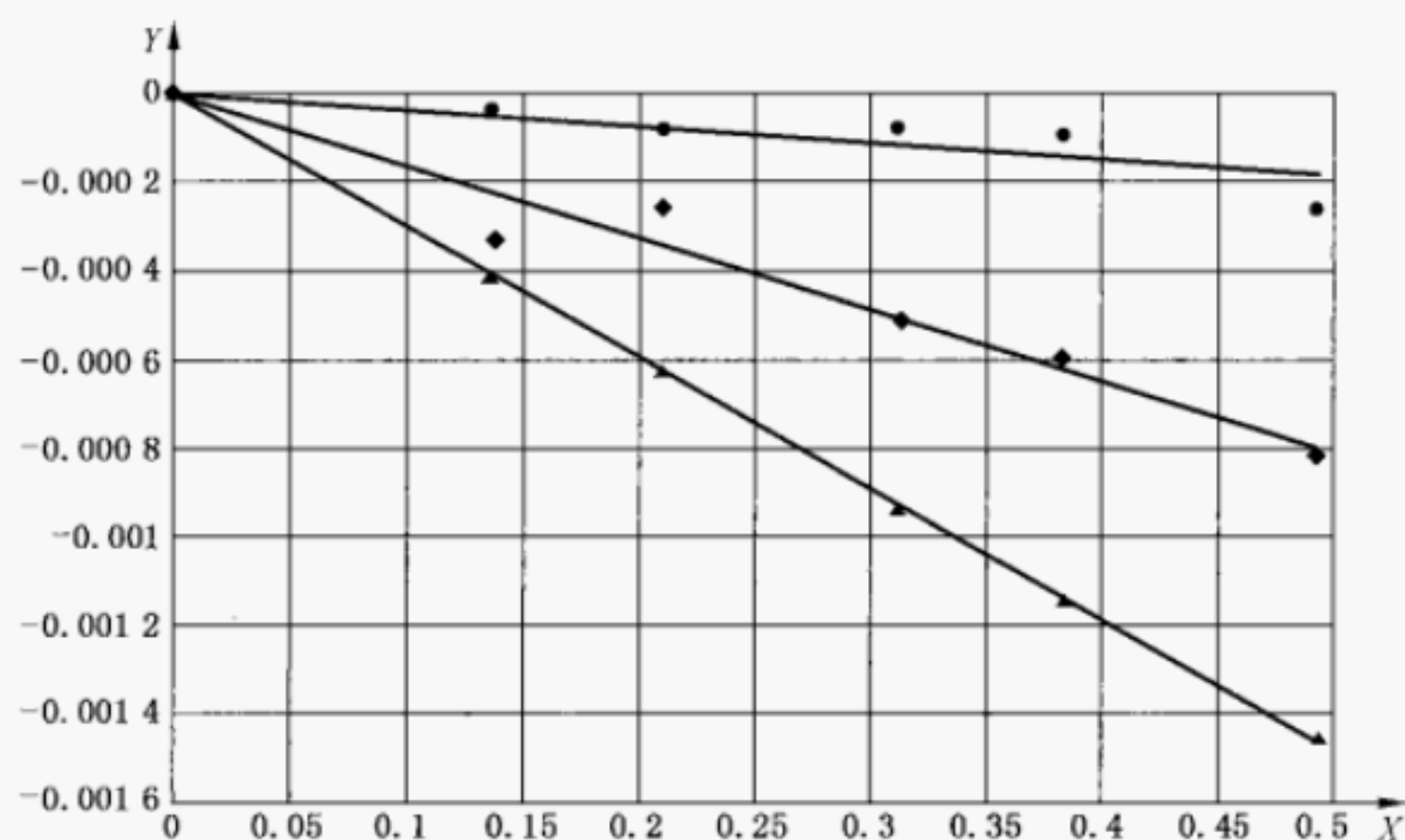
$$K'_r = \frac{I_{zz}}{\frac{\rho}{2}L^5} + \frac{\partial K'_{in}}{\partial \left(\frac{\omega^2 \Psi_0 L^2}{V_0^2} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (16)$$

$$K'_r = \frac{mz_G}{\frac{\rho}{2}L^4} - \frac{\partial K'_{out}}{\partial \left(\frac{\omega \Psi_0 L}{V_0} \right)} \Big|_{\omega=0} \dots\dots\dots (17)$$

力和力矩的同相及正交部分与对应无量纲运动幅度的参数和分别绘制出来,随角速度 ω 、速度 V_0 或幅度 Ψ_0 的改变而改变(见图 4 和图 5),线性拟合曲线的斜率用来确定水动力导数。

将同相位的力和力矩的积分部分与无因次的运动参数幅值 $\omega^2 \Psi_0 L^2 / V_0^2$ 和 $\omega \Psi_0 L / V_0$ 分别绘制成曲线,这些曲线将因角速度 ω 、速度 V_0 或幅值 Ψ_0 的变化而不同(见图 4 和图 5)。由线性曲线拟合可得到用于确定水动力导数的曲线斜率。

注:从平面运动试验得到的曲率导数可能会比圆周运动试验得到的更准确(见第 7 章),因为如果使用旋转臂或类似的机构,得到回转半径是有限的。



说明:

• — Y'_{in} ;

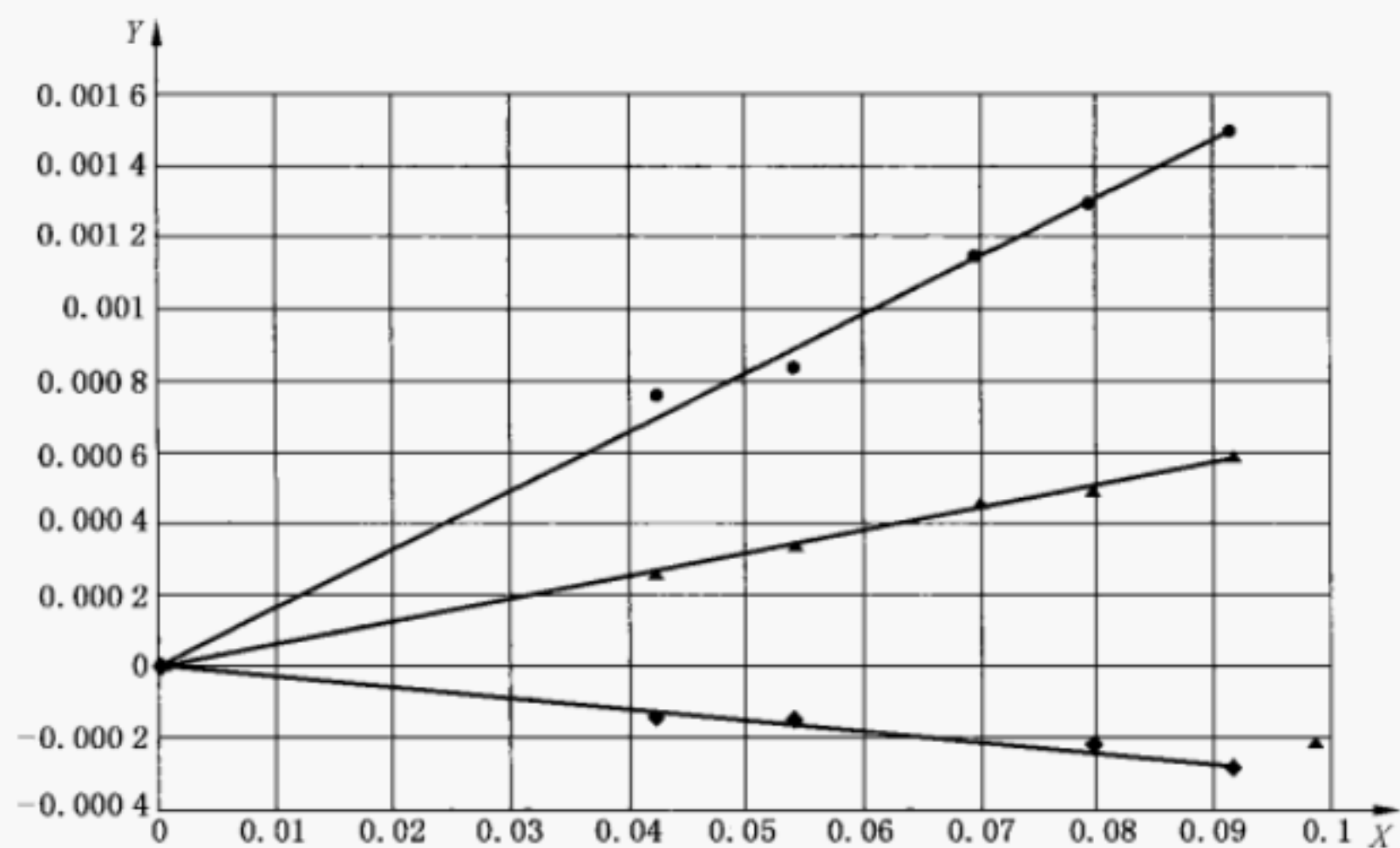
▲ — N'_{in} ;

◆ — $100 \times K'_{in}$;

X ——无量纲角加速度参数 $\omega^2 \Psi_0 L^2 / V_0^2$;

Y ——无量纲侧向力、横摇力矩及 z 轴力矩系数的同相部分。

图 4 无量纲侧向力、横摇力矩、 z 轴力矩系数的同相部分随无量纲角加速度幅度的变化情况



说明:

• — Y'_{out} ;

▲ — N'_{out} ;

◆ — $100 \times K'_{out}$;

X ——无量纲角速度参数 $\omega \Psi_0 L / V_0$;

Y ——无量纲侧向力、横摇力矩、 z 轴力矩系数的正交部分。

图 5 无量纲侧向力、横摇力矩、 z 轴力矩系数(相对于运动 90° 反相)的正交部分随无量纲角速度幅度的变化情况

6.3.2 垂直平面运动试验(仅限潜水艇)

平面运动机构及垂直方向模型见图 6。

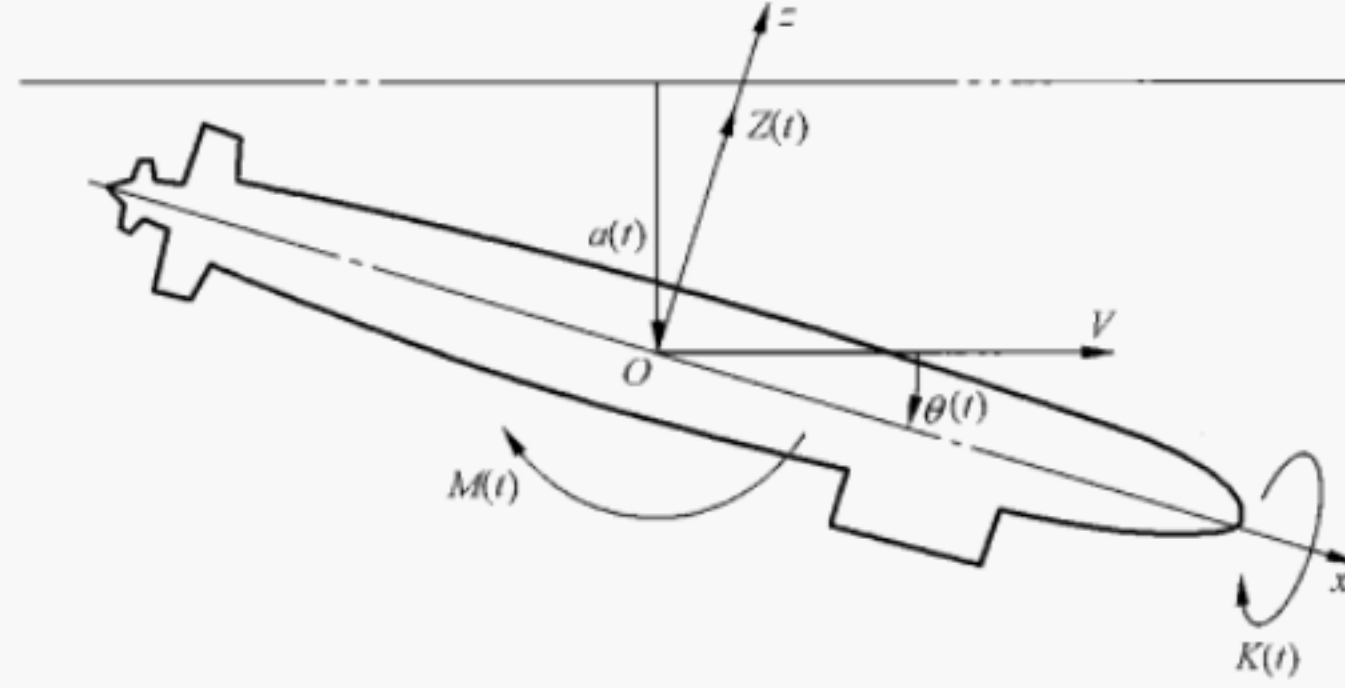


图 6 平面运动机构及垂直方向模型(模型侧转以避免导流罩和安装支柱之间的干扰)

如果模型向前运动叠加沿 z 轴方向的小幅度正弦运动,则可得出下列导数:

$$Z'_{\dot{w}} = \frac{m}{\frac{\rho}{2}L^3} + \frac{\partial Z'_{\text{in}}}{\partial \left(\frac{\omega^2 a_0 L}{V_0^2} \right)} \Big|_{\omega=0} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$Z'_w = \frac{\partial Z'_{\text{out}}}{\partial \left(\frac{\omega a_0}{V_0} \right)} \Big|_{\omega=0} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$M'_{\dot{w}} = -\frac{m x_G}{\frac{\rho}{2}L^4} + \frac{\partial M'_{\text{in}}}{\partial \left(\frac{\omega^2 a_0 L}{V_0^2} \right)} \Big|_{\omega=0} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$M'_w = \frac{\partial M'_{\text{out}}}{\partial \left(\frac{\omega a_0}{V_0} \right)} \Big|_{\omega=0} \quad \dots\dots\dots (21)$$

力和力矩的同相及正交部分与相应无量纲运动幅度参数 $\omega^2 a_0 L^2 / V_0^2$ 和 $\omega a_0 / V_0$, 随角速度 ω 、速度 V_0 或幅度 a_0 的变化而变化(见图 2 和图 3)。线性拟合曲线的斜率常用来确定水动力导数。

如果模型向前运动叠加绕 y 轴的小幅度正弦旋转运动,可得出下列导数:

$$Z'_{\dot{q}} = -\frac{m x_G}{\frac{\rho}{2}L^4} + \frac{\partial Z'_{\text{in}}}{\partial \left(\frac{\omega^2 \theta_0 L^2}{V_0^2} \right)} \Big|_{\omega=0} \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$Z'_q = -\frac{m}{\frac{\rho}{2}L^3} - \frac{\partial Z'_{\text{out}}}{\partial \left(\frac{\omega \theta_0 L}{V_0} \right)} \Big|_{\omega=0} \quad \dots\dots\dots (23)$$

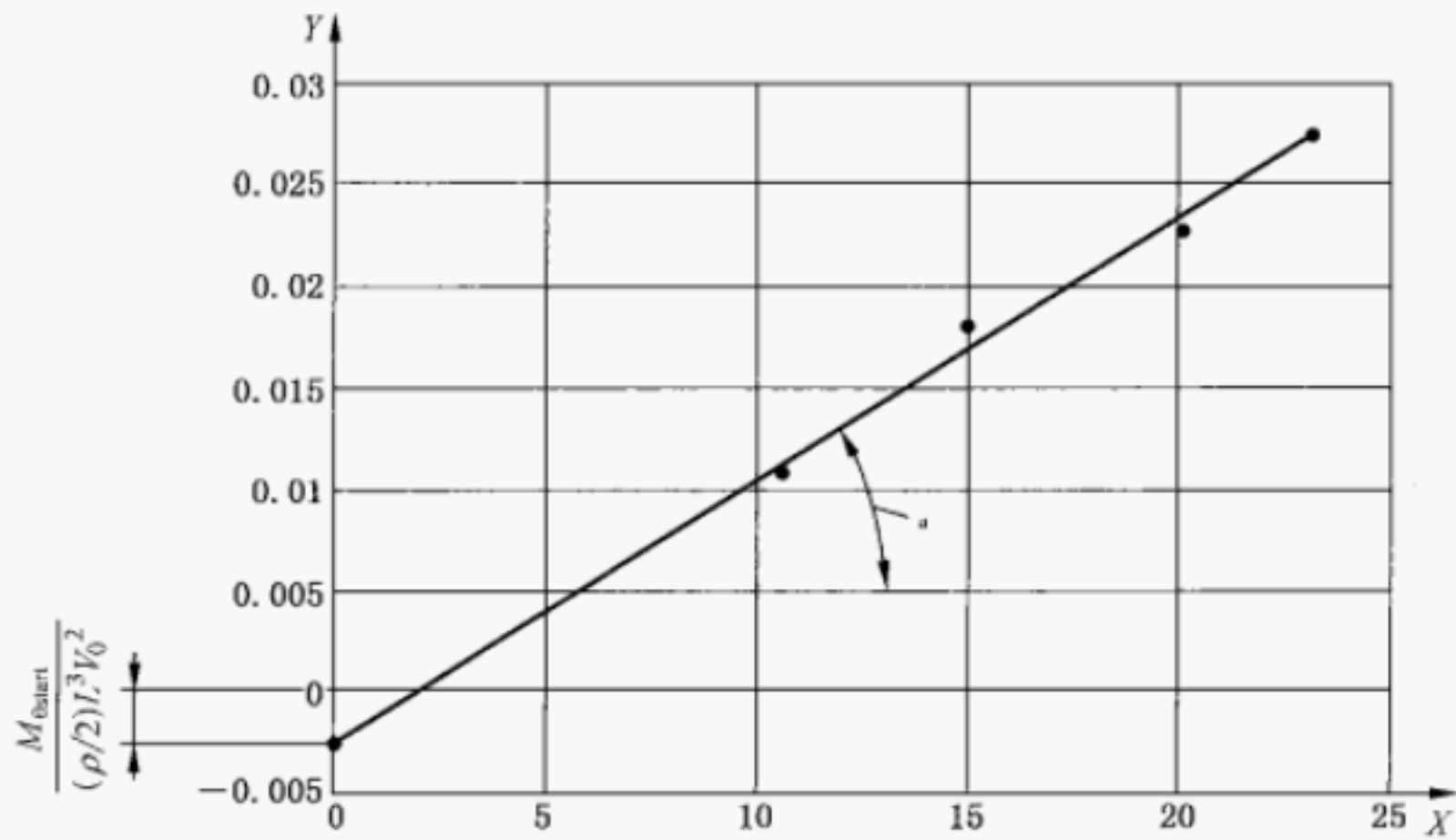
$$\tilde{M}'_{\dot{\theta}} = \frac{I_{yy}}{\frac{\rho}{2}L^5} \frac{\omega^2 L^2}{V_0^2} - \frac{M'_{\text{in}}}{\theta_0} = \frac{M_{\theta \text{stat}}}{\frac{\rho}{2}L^3 V_0^2} - M'_{\dot{q}} \frac{\omega^2 L^2}{V_0^2} + M'_{\ddot{q}} \frac{\omega^4 L^4}{V_0^4} + \dots \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$M'_q = \frac{m x_G}{\frac{\rho}{2}L^4} + \frac{\partial M'_{\text{out}}}{\partial \left(\frac{\omega \theta_0 L}{V_0} \right)} \Big|_{\omega=0} \quad \dots\dots\dots (25)$$

力和力矩的同相及正交部分与相应无量纲运动幅度参数 $\omega^2 \theta_0 L^2 / V_0^2$ 和 $\omega \theta_0 / V_0$, 随角速度 ω 、速度

V_0 或幅度 θ_0 的变化而变化(见图 7)。线性拟合曲线的斜率常用来确定水动力导数。由 \widetilde{M}'_θ 和 $\omega^2 L^2/V_0^2$ 拟合得到的线性曲线可获得慢运动导数 $\frac{M_{\theta \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^3 V_0^2}$ 和 \widetilde{M}'_θ 。(见图 7)。

$M_{\phi \text{ stat}}$ 对应于皮重试验测量值,并且与模型 gm GM等同。



说明:
 X —— $\omega^2 L^2 / V_0^2$;
 Y —— y 轴无量纲振荡系数 \widetilde{M}'_θ ;
 α $\arctan\left(-M'_\theta \frac{\text{length scale of } M'_\theta \text{ axis}}{\text{length scale of } \omega^2 L^2 / V_0^2 \text{ axis}}\right)$

图 7 y 轴无量纲振荡系数 \widetilde{M}'_θ 与 $\omega^2 L^2 / V_0^2$ 图

6.3.3 x 轴角运动试验(横摇)

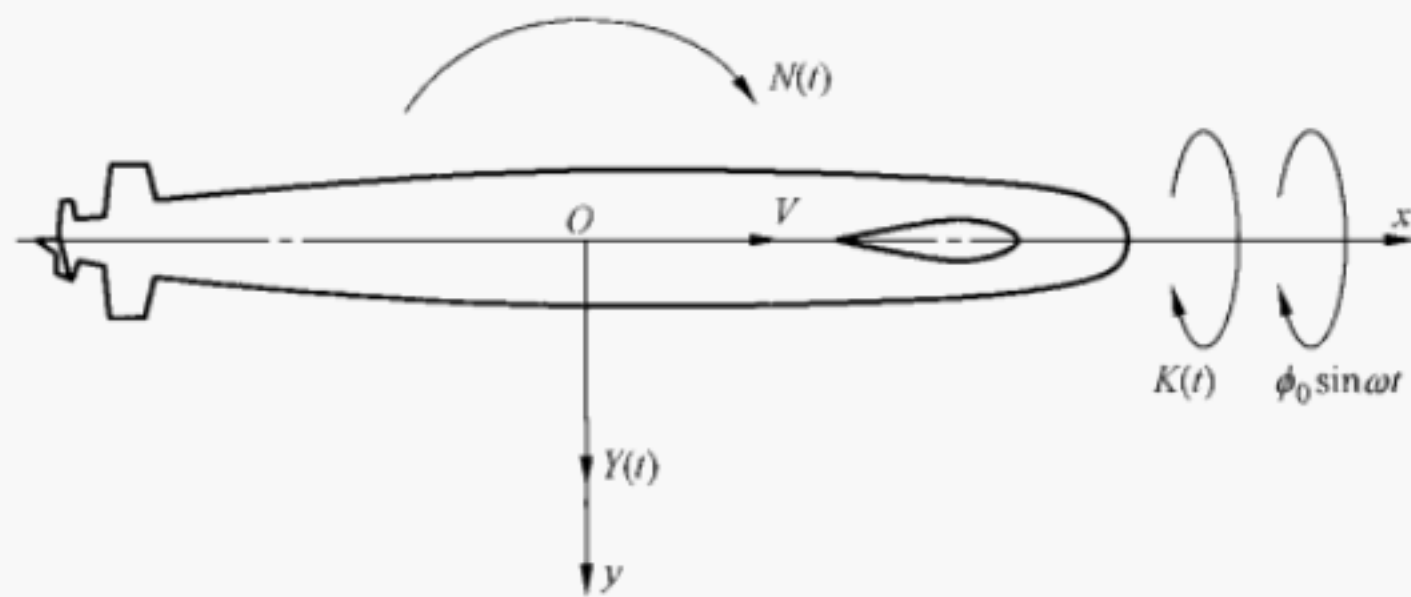


图 8 平面运动机构和潜水艇模型来确定横摇系数

对横摇试验,潜水艇模型固定在水平模式(见图 8)。模型在水池下面拖曳时模型装置的排水量应保持不变。

强制旋转如下:

$$\phi(t) = \phi_0 \sin \omega t$$

同时得到:

$$\dot{Y}'_{\phi} - \frac{Y_{\phi \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^2 V_0^2} = \frac{m z_G}{\frac{\rho}{2} L^4} \frac{\omega^2 L^2}{V_0^2} - \frac{Y'_{\text{in}}}{\phi_0} - \frac{Y_{\phi \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^2 V_0^2} = Y'_{\phi \text{ dyn}} - Y'_{\dot{\phi}} \frac{\omega^2 L^2}{V_0^2} + Y'_{\ddot{\phi}} \frac{\omega^4 L^4}{V_0^4} + \dots$$

..... (26)

$$Y'_p = - \frac{\partial Y'_{\text{out}}}{\partial \left(\frac{\omega \phi_0 L}{V_0} \right)} \bigg|_{\omega=0}$$

..... (27)

$$\tilde{K}'_{\phi} - \frac{K_{\phi \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^3 V_0^2} = - \frac{I_{xx}}{\frac{\rho}{2} L^5} \frac{\omega^2 L^2}{V_0^2} - \frac{Y'_{\text{in}}}{\phi_0} - \frac{Y_{\phi \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^3 V_0^2} = K'_{\phi \text{ dyn}} - K'_{\dot{\phi}} \frac{\omega^2 L^2}{V_0^2} + K'_{\ddot{\phi}} \frac{\omega^4 L^4}{V_0^4} + \dots$$

..... (28)

$$K'_p = - \frac{\partial K'_{\text{out}}}{\partial \left(\frac{\omega \phi_0 L}{V_0} \right)} \bigg|_{\omega=0}$$

..... (29)

$$\tilde{K}'_{\phi} - \frac{K_{\phi \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^3 V_0^2} = - \frac{I_{xx}}{\frac{\rho}{2} L^5} \frac{\omega^2 L^2}{V_0^2} - \frac{Y'_{\text{in}}}{\phi_0} - \frac{K_{\phi \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^3 V_0^2} = K'_{\phi \text{ dyn}} - K'_{\dot{\phi}} \frac{\omega^2 L^2}{V_0^2} + K'_{\ddot{\phi}} \frac{\omega^4 L^4}{V_0^4} + \dots$$

..... (30)

$$N'_p = - \frac{\partial N'_{\text{out}}}{\partial \left(\frac{\omega \phi_0 L}{V_0} \right)} \bigg|_{\omega=0}$$

..... (31)

$\tilde{Y}'_{\phi} - \frac{Y_{\phi \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^2 V_0^2}$ 、 $\tilde{K}'_{\phi} - \frac{K_{\phi \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^3 V_0^2}$ 和 $\tilde{N}'_{\phi} - \frac{N_{\phi \text{ stat}}}{\frac{\rho}{2} L^3 V_0^2}$ 的线性拟合曲线(见图 7 中 \tilde{M}'_g)可得到慢运动导数,

$Y'_{\phi \text{ dyn}}$ 、 $Y'_{\dot{\phi}}$ 、 $K'_{\phi \text{ dyn}}$ 、 $K'_{\dot{\phi}}$ 、 $N'_{\phi \text{ dyn}}$ 、 $N'_{\dot{\phi}}$ 、 $Y_{\phi \text{ stat}}$ 、 $K_{\phi \text{ stat}}$ 和 $N_{\phi \text{ stat}}$ 由静态试验或计算得到。

6.4 平面运动试验的表示

6.4.1 水平平面的平面运动试验的表示(H)

基于本部分(6)试验 1(1),指定水平平面的平面运动试验(H),模型拖曳速度 $V_0 = 3 \text{ ms}^{-1}$ (03),振荡周期 $T = 6 \text{ s}$ (06),模型横荡幅度 $a_0 = 0 \text{ mm}$ (00),艏摇幅度 $\Psi_0 = 5^\circ$ (05)表示为:

平面运动试验 GB/T 37303-6.1×H/03/06/00/05

6.4.2 垂直平面的平面运动试验的表示(V)

基于本部分(6)试验 1(1),指定垂直平面的平面运动试验(V),模型拖曳速度 $V_0 = 3 \text{ ms}^{-1}$ (03),振荡周期 $T = 6 \text{ s}$ (06),模型升沉幅度 $a_0 = 10 \text{ mm}$ (10),纵摇幅度 $\theta_0 = 3^\circ$ (03)表示为:

平面运动试验 GB/T 37303-6.1×V/03/06/10/03

6.4.3 横摇运动的平面运动试验的表示(R)

基于本部分(6)试验 1(1),指定横摇运动的平面运动试验(R),模型拖曳速度 $V_0 = 3 \text{ ms}^{-1}$ (03),振荡周期 $T = 6 \text{ s}$ (06),模型横摇幅度 $\Psi_0 = 5^\circ$ (05)表示为:

平面运动试验 GB/T 37303-6.1×R/03/06/05

7 试验 6.2: 圆周运动试验

7.1 总则

除 ISO 13643-1 和第 5 章规定的一般试验条件外,还应符合下列条件:

- 船模要通过力传感器和拖曳装置固定在旋转臂的旋臂或其他圆周运动装置上。对于水面船舶的操纵性仿真仅有三个自由度(x 、 y 、 Ψ),确保船模自由纵倾、升沉及可能的横倾;
- 对某确定范围,圆周运动由 $xy\Psi$ 拖车在拖曳水池或旋臂水池实现;
- 水面船舶模型试验,由于存在表面波尺度效应,模型和实船的傅汝德数 F_{m0} 应一致。对于存在黏性的尺度效应,雷诺数 R_{m0} 无法一致时,但应保证模型试验达到充分的湍流状态(临界雷诺数 R_{m0})。艏部可采用激流装置;
- 为避免测量错误,每趟试验应在旋转臂或其他圆周运动装置的带动下,仅有一个充分旋转(包括加速阶段)。

试验过程应测量下列数据:

绕 z 轴圆周运动试验:

- 横摇力矩, K (如果横倾被限制);
- y 轴力矩, M (仅限潜水艇);
- z 轴力矩, N ;
- 纵向力, X ;
- 侧向力, Y ;
- 垂向力, Z (仅限潜水艇)。

绕 y 轴圆周运动试验(仅限潜水艇):

- y 轴力矩, M ;
- 纵向力, X ;
- 垂向力, Z 。

7.2 描述

调节特定试验参数(例如圆周运动半径 R 、横倾角 ϕ_s 、纵倾角 θ_s 、漂角 β 、舵角 δ_R 、 δ_B 和 δ_S)后,模型被外力拖曳以恒定速度 V 。进行圆周运动,使随船速度 p 、 q 、 r 、 u 、 v 、 w 趋于稳定。代替 u 的速度 $u_0 + \Delta u$ 在运动方程中对应于拆分的简单系数, u_0 应恰当选择。仅用于水面船舶时,系数取值随傅汝德数变化。

螺旋桨转速按照模型或实船的自航点设定。为消除零位偏差,应从测量读数上减去测量仪器上的皮重值和模型上的偏位角,仅留下模型上的水动力测量数据。

7.3 圆周运动试验的结果分析和表述

减去内部影响后,测量数据通常采用无量纲函数关系进行绘图。这些数据包括角速度、漂角、操纵装置角度(如图 9~图 11 所示,不同漂角下的 z 轴圆周运动试验)。对潜水艇 y 轴圆周运动试验,数据包括与攻角或水平面角度的函数。

常规计算机仿真研究用到的无量纲化系数根据标准方法由恰当的曲线拟合方程确定。无量纲曲率和控制导数由无量纲力或力矩与无量纲试验参数的构成的曲线零位处斜率确定。这些曲率导数从平面运动试验获得更为准确(见第 6 章),因为对于旋转臂或等同的试验方法,其回转半径受限。绘制无量纲化旋转臂值与回转速率时,除非其关系成直线,否则不能精确定义零点处的斜率。加速和横摇导数也只

能通过平面运动试验确定。重点说明的是,在线性运动方程中,力和力矩曲线拟合得到的一阶导数不必与一阶线性方程所采用的稳性和控制导数等同,但描述这些一阶导数与相应稳性和控制导数相同。应考虑使用不同符号和术语的情况。

在使用合适的数学仿真法则进行自由操纵的数值模拟时,应引入非线性导数。线性导数 Y'_r 、 K'_r 、 N'_r 、 Z'_q 和 M'_q 与相应的平面运动试验结果(见第 6 章)和/或斜拖试验或流场试验(见第 8 章)来确定 z 轴和 y 轴上的小力矩对应船舶的动稳性。但是,当简单的数学模型就能满足需求时,这些导数可以用来进行自动航向稳定性和/或吃水控制系统等特殊仿真。

非线性系数类型极大程度依赖于所使用的数学仿真运算法则。在第 4 章列出的系数仅作为相应评估试验的参考数据。潜水艇在深潜状态,得到傅汝德数独立的试验结果,力和力矩由纵向速度 u 确定。对于水面船舶,水动力系数由傅汝德数及相应的模型速度 V_0 确定,代替 u 的纵移速度 Δu 一般用于力和力矩方程。用于水面船舶或潜水艇的不同系数设定,应在从表 1 选择系数时考虑。

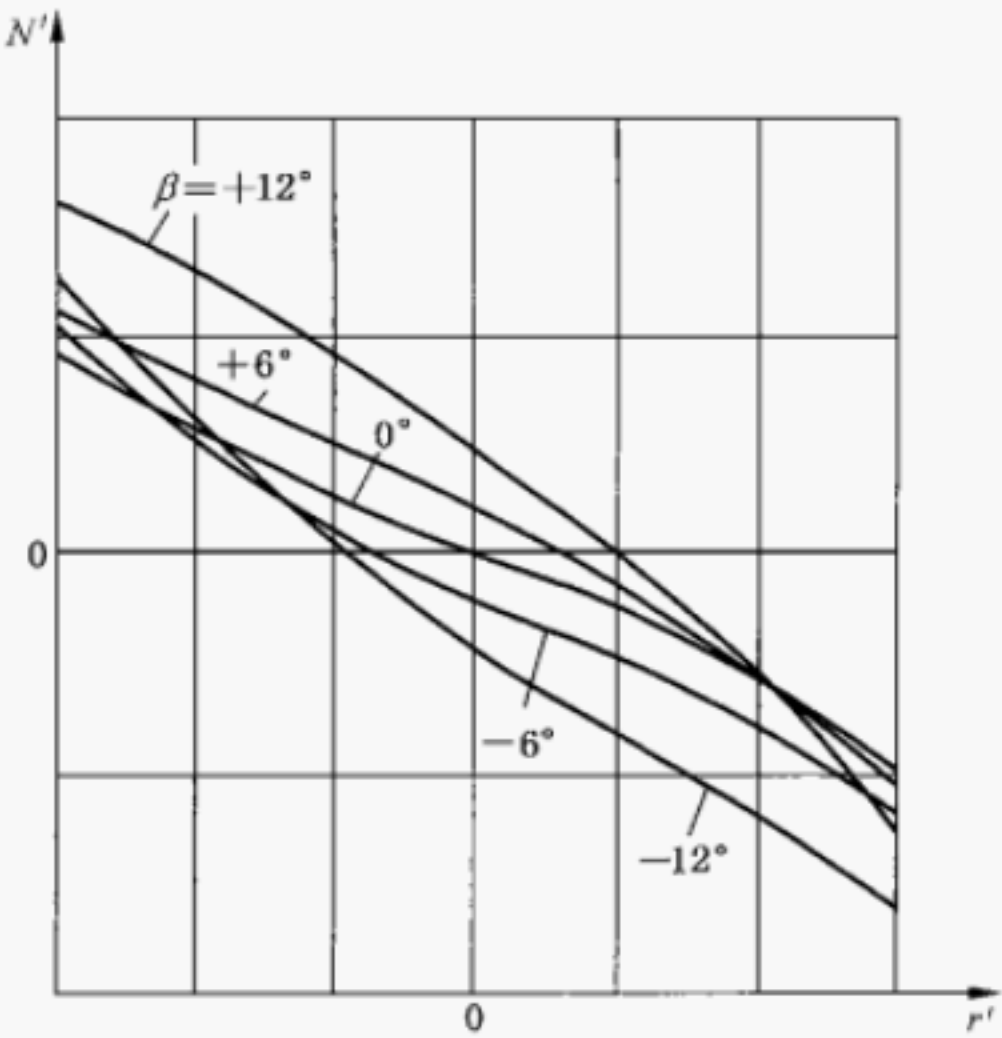
7.4 圆周运动试验的表示

按本部分(6)试验 2(2)要求,指定圆周运动试验,在 z (Z) 参考轴下,模型参考速度 $V_0 = 3 \text{ m/s}$ (03),圆周运动半径 $R = 10 \text{ m}$ (10),漂角 $\beta = 10^\circ$ (10),操纵装置角度 $\delta_R = 20^\circ$ (20)表示为:

圆周运动试验 GB/T 37303-6.2×Z/03/10/10/20

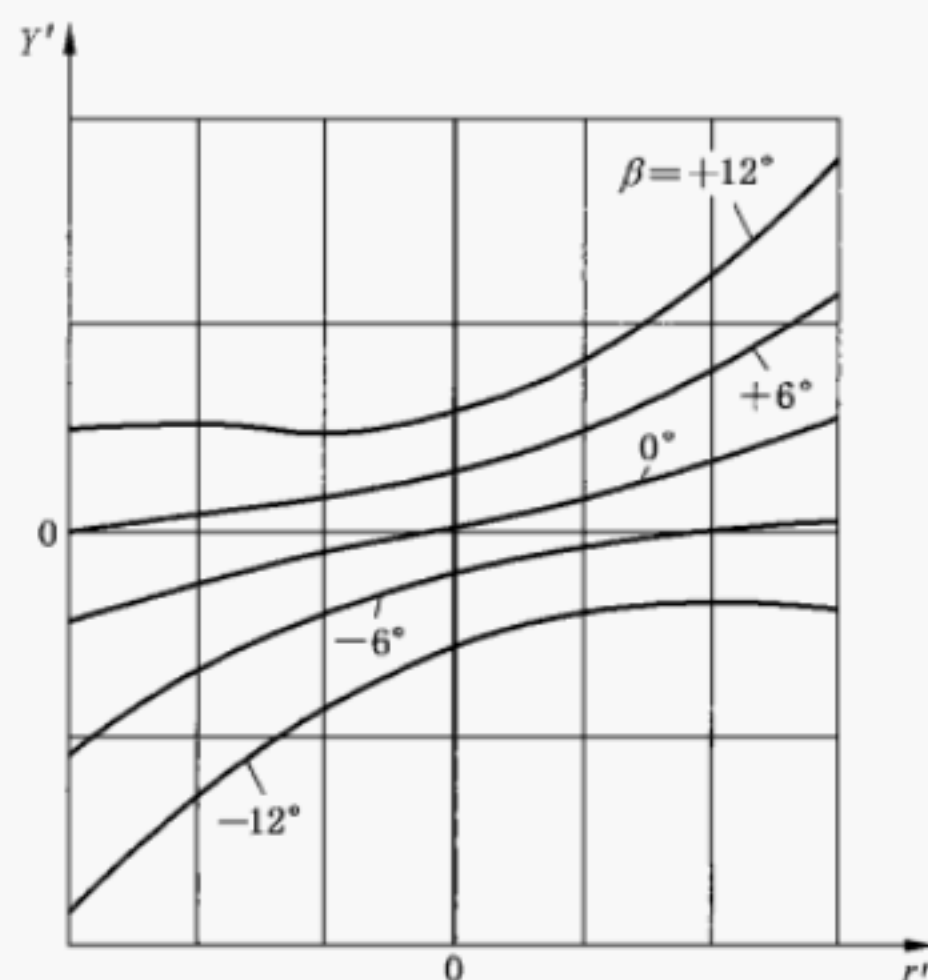
按本部分(6)试验 2(2)要求,指定圆周运动试验,在 y (Y) 参考轴下,模型参考速度 $V_0 = 3 \text{ m/s}$ (03),圆周运动半径 $R = 10 \text{ m}$ (10),纵倾角 $\theta_s = 5^\circ$ (05),尾平面角 $\delta_s = 3^\circ$ (03),艏平面角 $\delta_B = 0^\circ$ (00)表示为:

圆周运动试验 GB/T 37303-6.2×Y/03/10/05/03/00



说明:
 N' —— z 轴无量纲力矩;
 r' —— z 轴无量纲角速度。

图 9 z 轴力矩- z 轴角速度

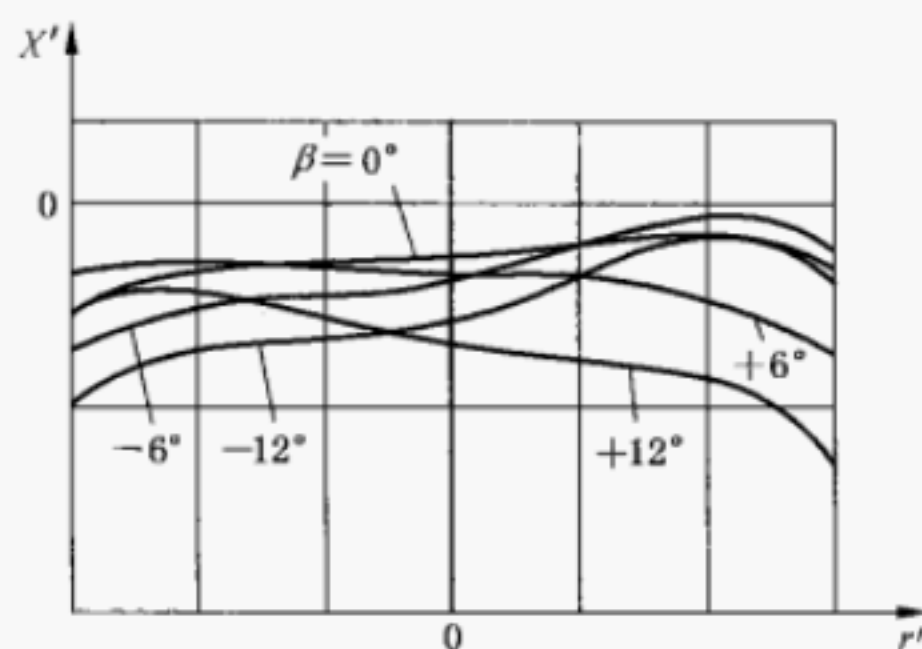


说明:

Y' ——无量纲侧向力;

r' —— z 轴无量纲角速度。

图 10 侧向力- z 轴角速度



说明:

X' ——无量纲纵向力;

r' —— z 轴无量纲角速度。

图 11 纵向力- z 轴角速度

8 试验 6.3: 斜拖或流场试验

8.1 总则

斜拖或流场试验时,漂角、攻角、操纵装置角在指定范围内应做一系列变化。

除了 ISO 13643-1 和第 5 章规定的一般试验条件外,还应符合下列条件:

- 船模通过合适的力传感器和拖曳装置与拖车固定。对于水面船舶的操纵性仿真仅仅三个自由度(x 、 y 、 Ψ),确保船模能自由纵倾、升沉及可能的横倾。
- 水面船舶模型试验,由于存在表面波尺度效应,模型和实船的傅汝德数 F_{n0} 应保持一致。由于存在速度的尺度效应,雷诺数 R_{n0} 无法一致时,应保证模型试验达到充分的湍流状态(临界雷

诸数 R_{n0})。必要时艏部可采用激流装置。

试验过程应测量下列数据:

试验中模型绕 z 轴旋转:

- 横摇力矩, K (如果横摇被限制);
- y 轴力矩, M (仅限潜水艇);
- z 轴力矩, N ;
- 纵向力, X ;
- 侧向力, Y ;
- 垂向力, Z (仅限潜水艇)。

试验中模型绕 y 轴旋转(仅限潜水艇):

- y 轴力矩, M ;
- 纵向力, X ;
- 垂向力, Z 。

8.2 描述

调节特定试验参数(例如漂角 β 、操纵装置角 δ_R 、潜水艇的攻角 α 、舵角 δ_B 或 δ_S)后,模型被外力拖曳以恒定速度 V_0 进行直线运动。螺旋桨转速按实船或模型自航点设定。为消除零位偏差,应从测量读数上减去测量仪器上的皮重值和模型上的偏位角,仅留下模型上的水动力测量数据。

在试验稳定阶段,测量时间至少 25 s。

8.3 斜拖或流场试验的结果分析和表述

测试数据大多数按照无量纲函数关系进行绘图。这些试验参数包括漂角 β 、操纵装置角(图 12~图 14 显示了不同操纵装置角的漂角与 y 轴方向速度 v 的关系)。对于潜水艇,这些参数包括纵倾角、攻角 α 和水平面角。

常规计算机仿真研究用到的无量纲化系数根据标准方法由恰当的曲线拟合方程确定。无量纲动稳性和控制导数由无量纲力或力矩与无量纲试验参数构成的曲线零位处斜率确定。这些曲率导数最好从平面运动试验获得(见第 6 章),因为平面运动更为简单和直接,测得的水动力导数更为可靠。重点说明的是,在线性运动方程中,力和力矩曲线拟合一阶系数通常不必与相应的稳性和控制导数等同。应考虑使用不同符号和术语的情况。

在使用合适的数学仿真法则进行自由操纵的数值模拟时,应引入非线性导数。线性导数 Y'_v 、 K'_v 、 N'_v 、 Z'_v 和 M'_v 与相应的平面运动试验结果(见第 6 章)和/或圆周运动试验(见第 7 章)来确定 z 轴和 y 轴上的小圆周运动对应船舶的动稳性。当简单的数学模型就能满足需求时,这些导数可以用来做自动航向稳定性和/或吃水控制系统等特殊仿真。

非线性系数类型很大程度上依赖于应用的数学仿真运算法则。表 1 列出的系数应仅作为恰当试验评估的参考数据。潜水艇在深潜状态时,傅汝德数以及力和力矩的独立试验结果由纵向速度 u 确定。对于水面船舶,水动力系数由傅汝德数和相应的模型速度 V_0 确定,代替纵荡速度 u 的 Δu 一般用于力和力矩方程。用于水面船舶或潜水艇的不同系数设定,应在从表 1 选择系数时考虑。

8.4 斜拖或流场试验的表示

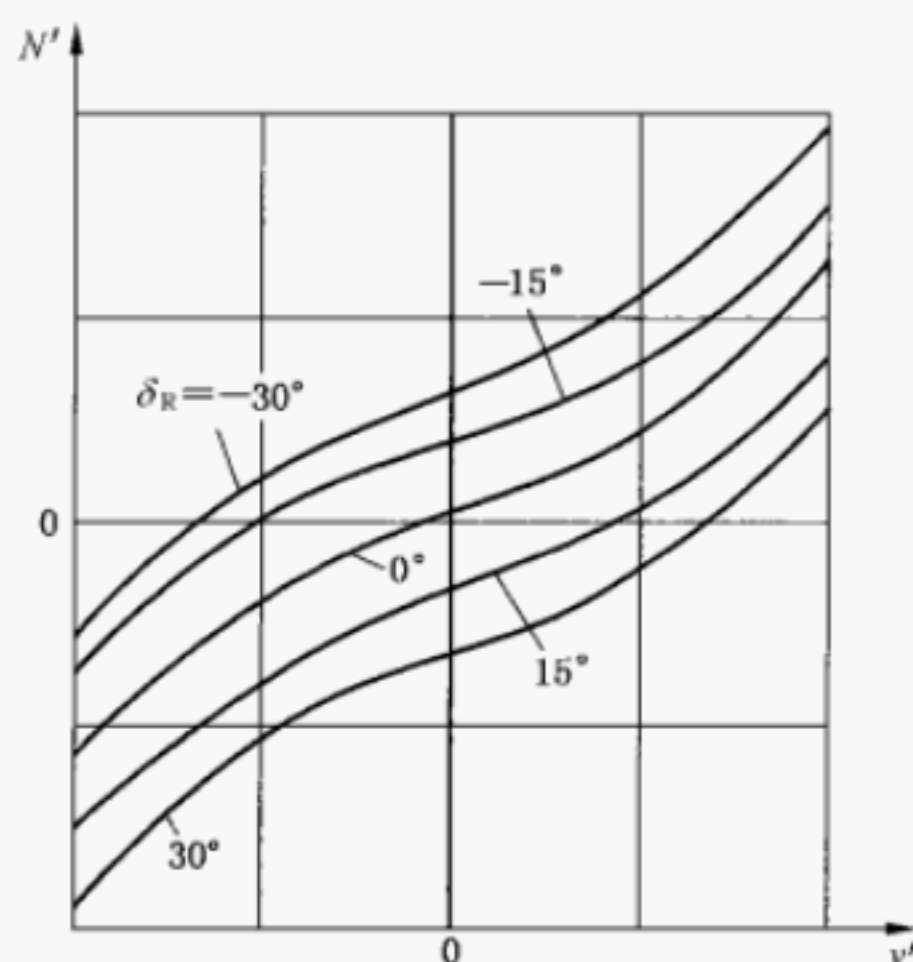
按本部分(6),试验 3(3)要求,指定斜拖试验系列(T),模型绕 z 轴(Z)旋转,模型速度 $V_0 = 3 \text{ m/s}$ (03),漂角 $\beta =$ 从 0° 到 15° ,每 3° 间隔递增,(00:03:+15),攻角 α 范围从 0° 到 0° ,每 0° 间隔递增(00:00:00) (即攻角不发生变化),操纵装置角 δ_R 范围从 -30° 到 $+30^\circ$,每 10° 间隔增加($-30:10:+30$)表示为:

斜拖试验 GB/T 37303-6.3×Z/03/00:03: +15/00:00:00/−30:10: +30/T

按本部分(6), 试验 3(3)要求, 指定斜流场试验系列(F), 模型绕 z 轴 (Z) 旋转, 模型速度 $V_0 = 3 \text{ m/s}$ (03), 漂流角 $\beta =$ 从 0° 到 15° , 每 3° 间隔递增, (00:03: +15), 攻角 α 范围是从 0° 到 0° , 每 0° 间隔递增 (00:00:00) (即攻角不发生变化), 操纵装置角 δ_R 范围从 -30° 到 $+30^\circ$, 每 10° 间隔增加 ($-30:10: +30$) 表示为:

斜流场试验 GB/T 37303-6.3×Z/03/00:03: +15/00:00:00/−30:10: +30/F

注: 试验中模型绕 y 轴旋转(仅限潜水艇), 则 Y 取代 Z 。操纵装置角由艏平面角和艉平面角代替。



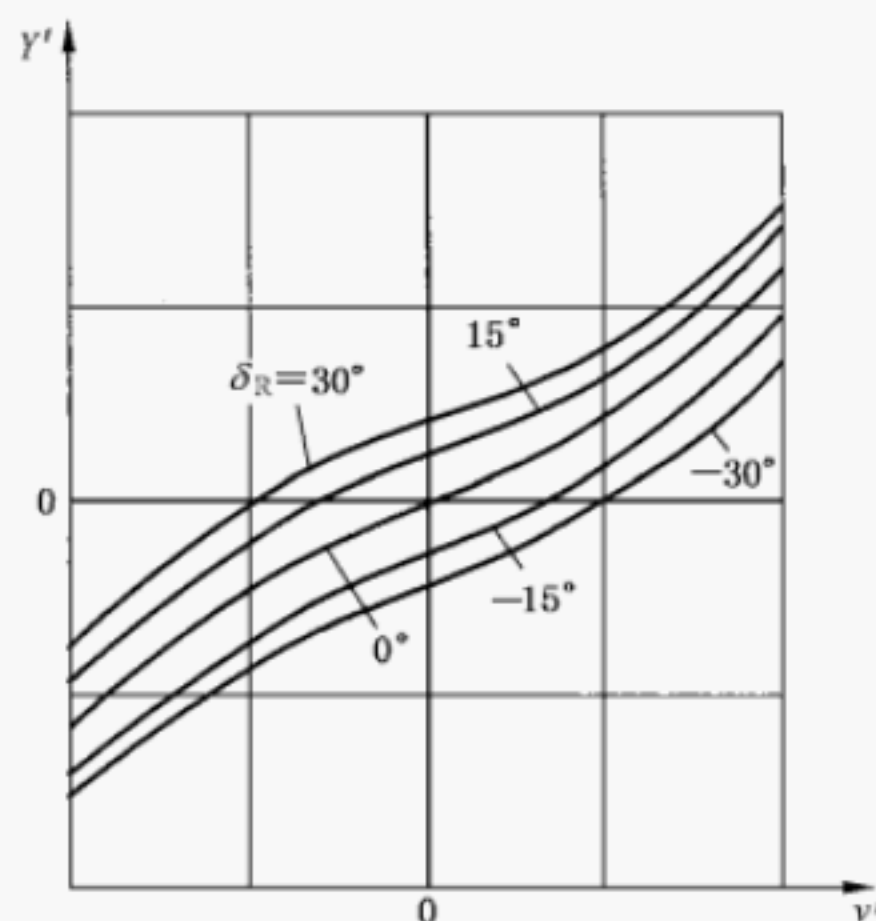
说明:

N' —— z 轴无量纲力矩;

v' —— 无量纲侧向速度;

δ_R —— 操纵装置角度。

图 12 z 轴力矩-侧向速度



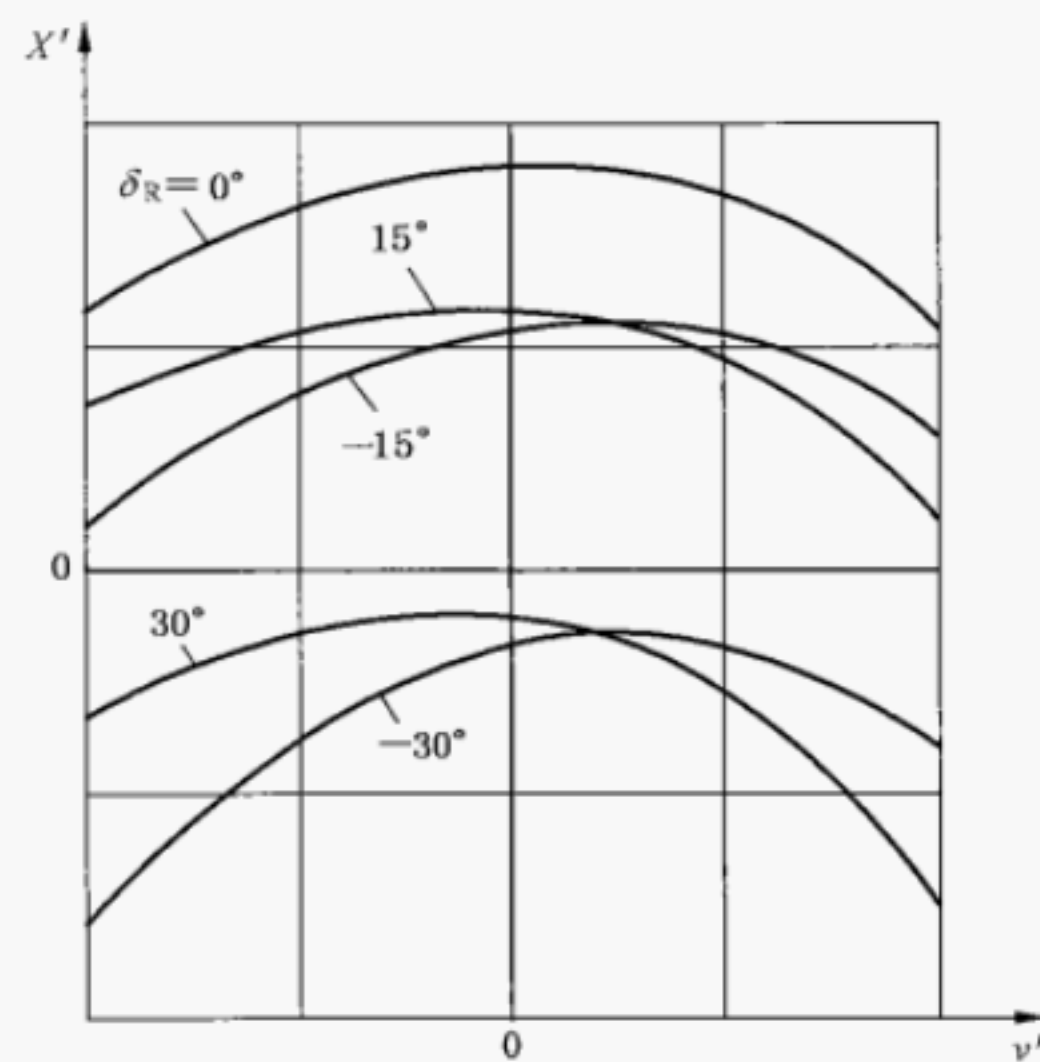
说明:

Y' —— 无量纲侧向力;

v' —— 无量纲侧向速度;

δ_R —— 操纵装置角度。

图 13 侧向力-侧向速度



说明：
 X' ——无量纲纵向力；
 v' ——无量纲侧向速度；
 δ_R ——操纵装置角度。

图 14 纵向力-侧向速度

9 试验 6.4: 风洞试验

9.1 总则

除 ISO 13643-1 和第 5 章规定的一般试验条件外,还应符合下列条件：

- 船模水上部分通过天平安装在表征水面的可旋转的转盘上,同时可改变角度来实现相对风向角变化；
- 风洞试验包含一系列单独试验。对于 xz 平面对称船舶,相对风向角从 0° 到 180° 范围内变化,对于 xz 平面非对称船舶,角度从 0° 到 360° 范围内变化。对于对称性船舶的复核,可考虑测量 180° 和 360° 之间的几个角度。

试验过程应测量下列数据：

- 横摇力矩, K (如果需要)；
- 艏摇力矩, N ；
- 阻力, D ；
- 横向力, C 。

为确保试验结果与雷诺数无关,应重复至少两个其他雷诺数来验证。

9.2 描述

船模应在均匀流场或速度梯度流场中进行试验。相对风由船速引起的均匀流场叠加而成,具有梯度测试的真实风场通常在均匀流场中进行。测试速度梯度按式(32)进行计算。

$$\frac{V_{WT}}{V_{WTA}} = \left(\frac{z_0}{z_{0A}} \right)^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots (32)$$

对于海面上的实际风速,可以近似看作对数关系,取 $n=10$ 。对于实船,通常取 $z_{0A}=-10\text{ m}$ 。

9.3 试验的结果分析与表示

试验数据通常按照相对风向 Ψ_{WR} (图 15~图 20) 的无量纲函数关系进行绘图。相对风速的动态压力和水线以上侧向面积 A_{LV} 用作参考数据,阻力 D 、纵向力 X 同样也与水线以上侧投影面积 A_{XV} 相关。

若横向力 C 和阻力 D 在试验中测量,则纵向力 X 和侧向力 Y 可通过式(33)和式(34)得到。

$$X = C \sin \Psi_{WR} - D \cos \Psi_{WR} \quad \dots\dots\dots (33)$$

$$Y = C \cos \Psi_{WR} - D \sin \Psi_{WR} \quad \dots\dots\dots (34)$$

风压中心坐标 x_F 和 z_F 可由 x 轴和 z 轴的力矩按式(35)和式(36)分别计算得到。

$$x_F = N/Y \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$z_F = -K/Y \quad \dots\dots\dots (36)$$

9.4 风洞试验的表示

根据本部分(6)试验 4(4)指定的风洞试验,实船风速为 $V_{WR}=20\text{ m/s}$,相对风向范围从 0° 到 180° ,每 15° 间隔增加(000/15/180)表示为:

风洞试验 GB/T 37303-6.4 \times 20/000:15:180

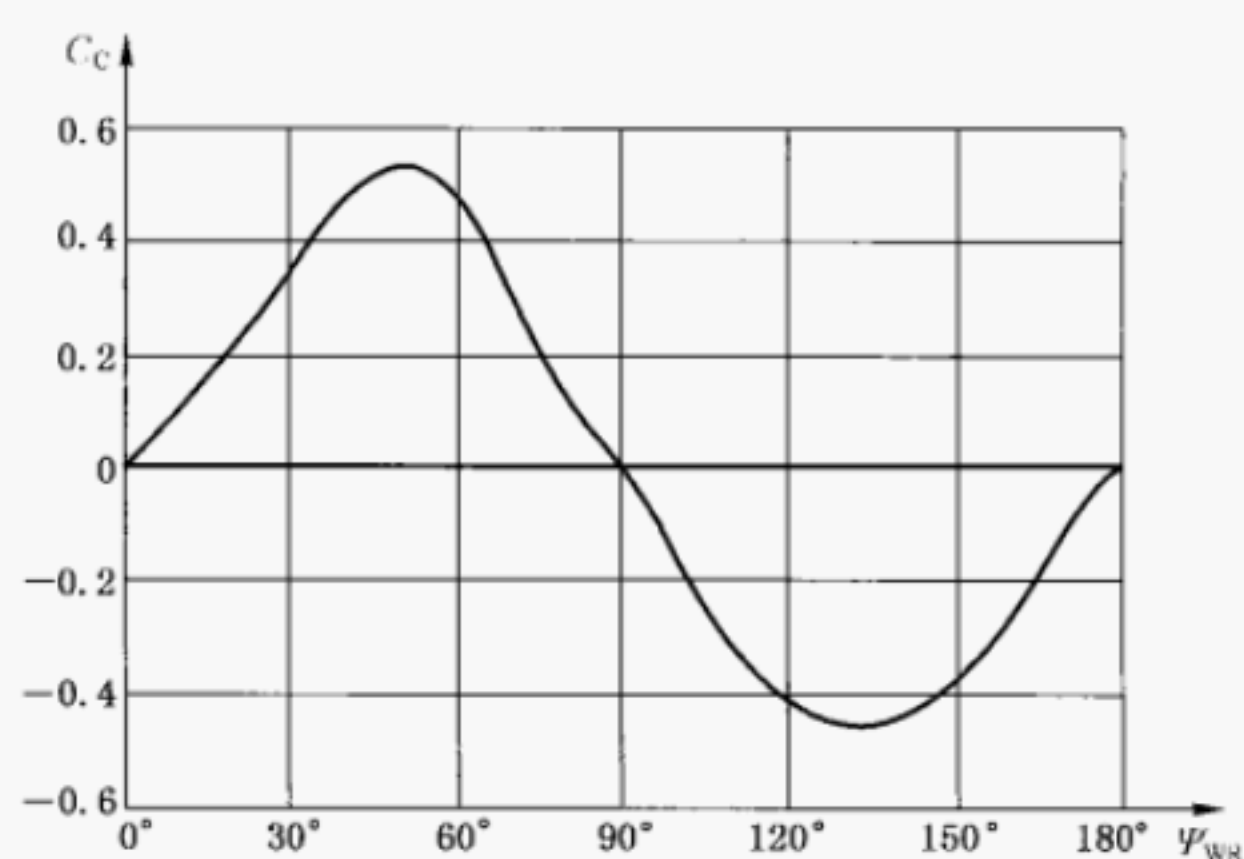


图 15 横向力系数与相对风向

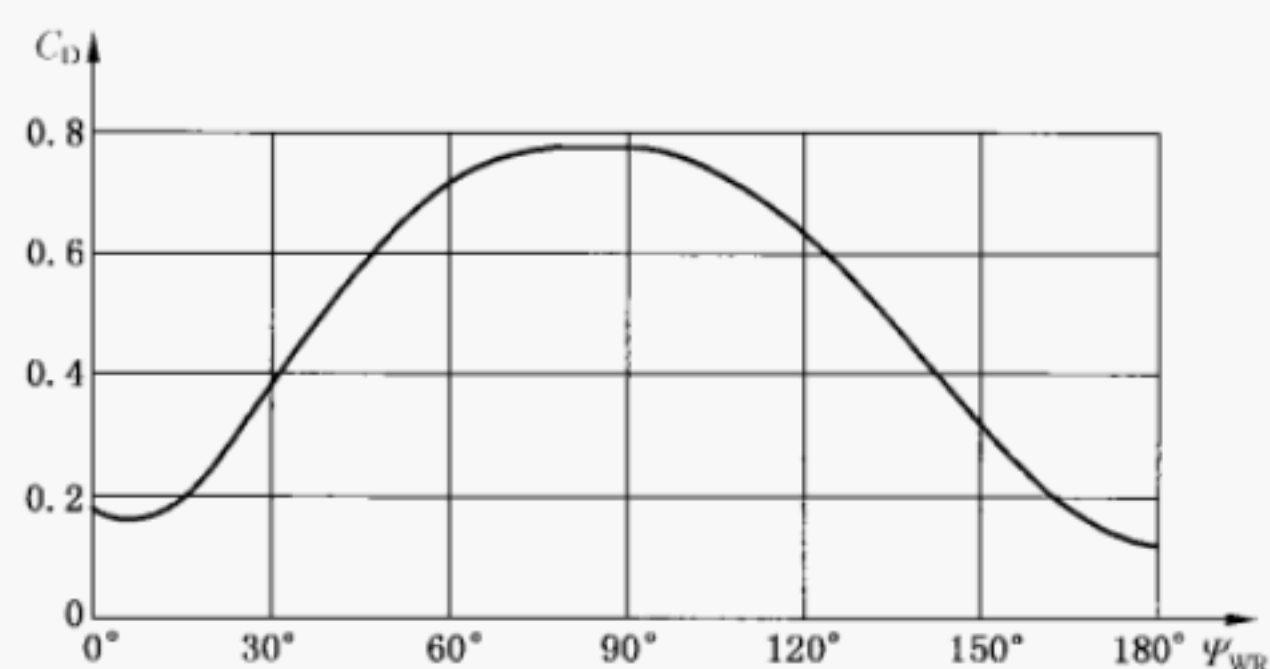


图 16 阻力系数与相对风向

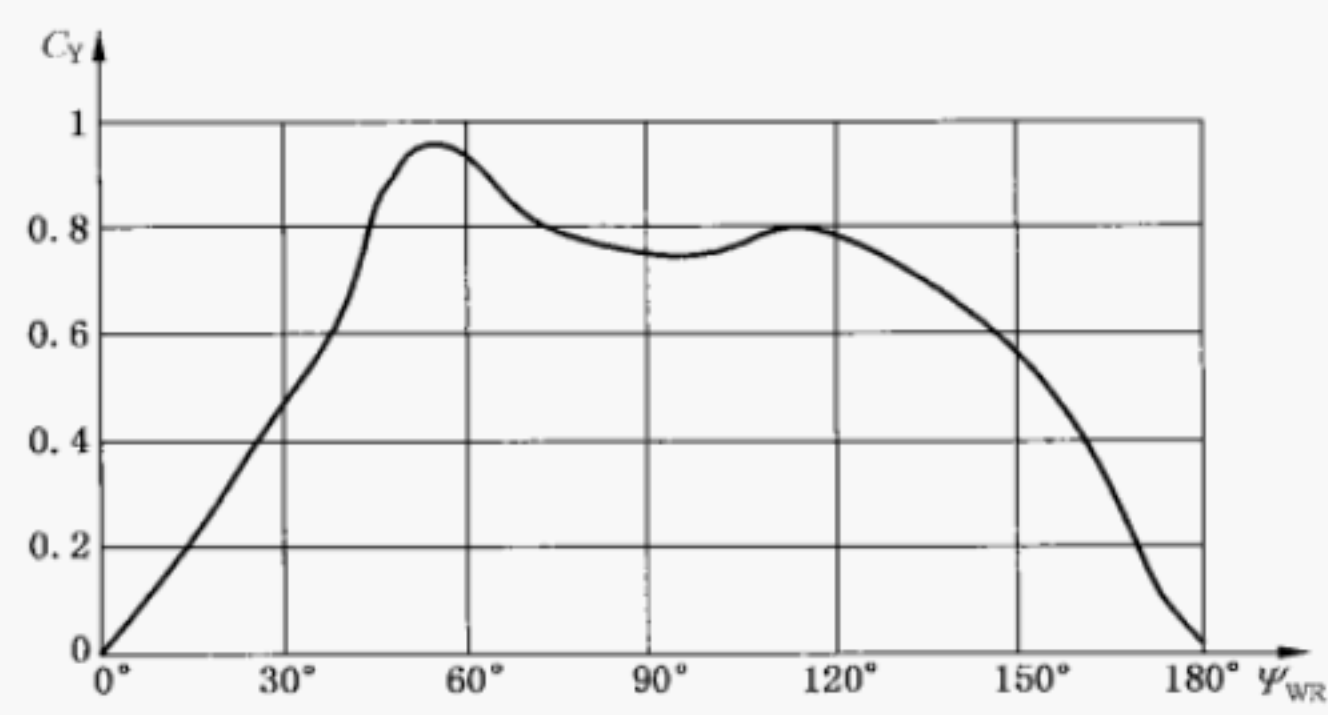


图 17 侧向力系数与相对风向

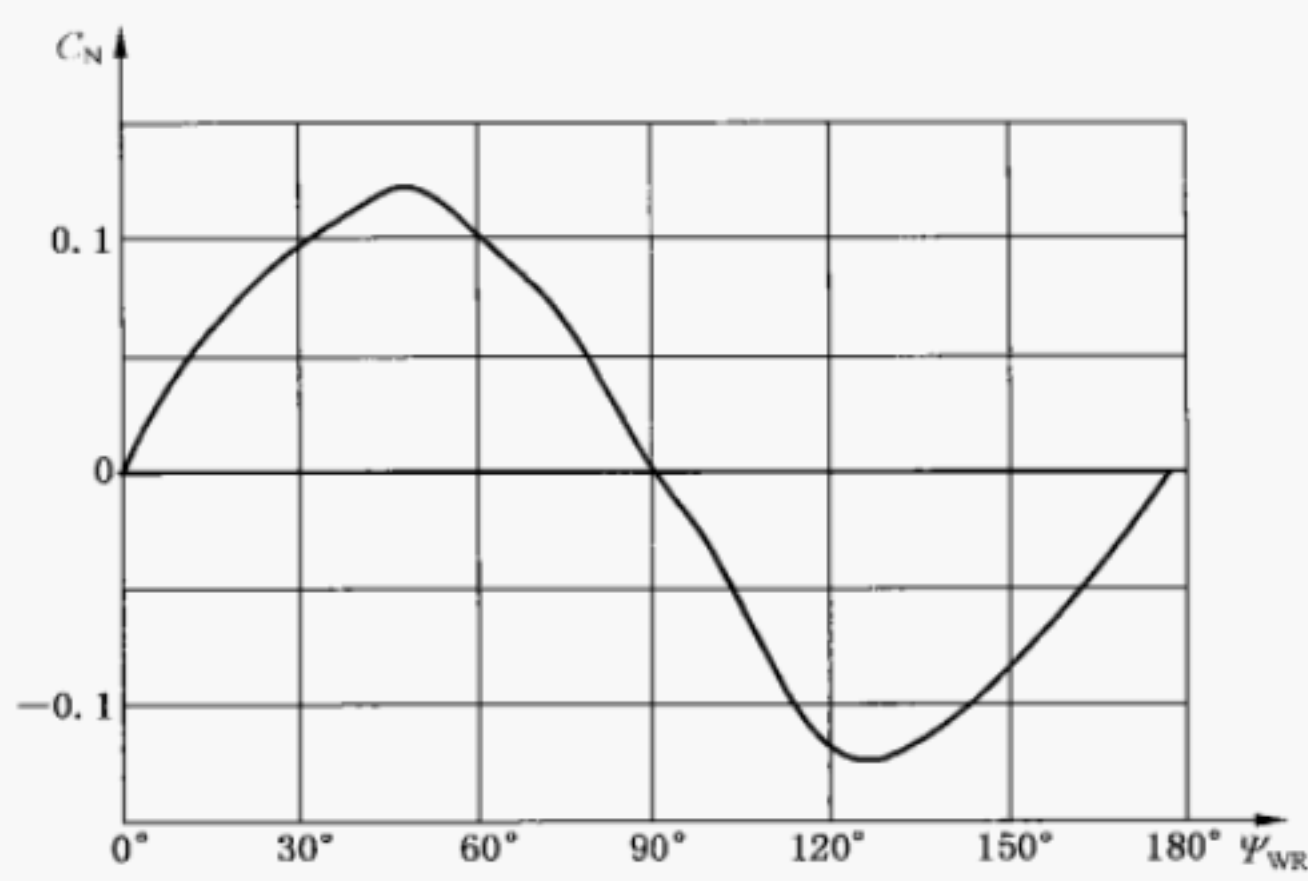


图 18 艏摇力矩系数与相对风向

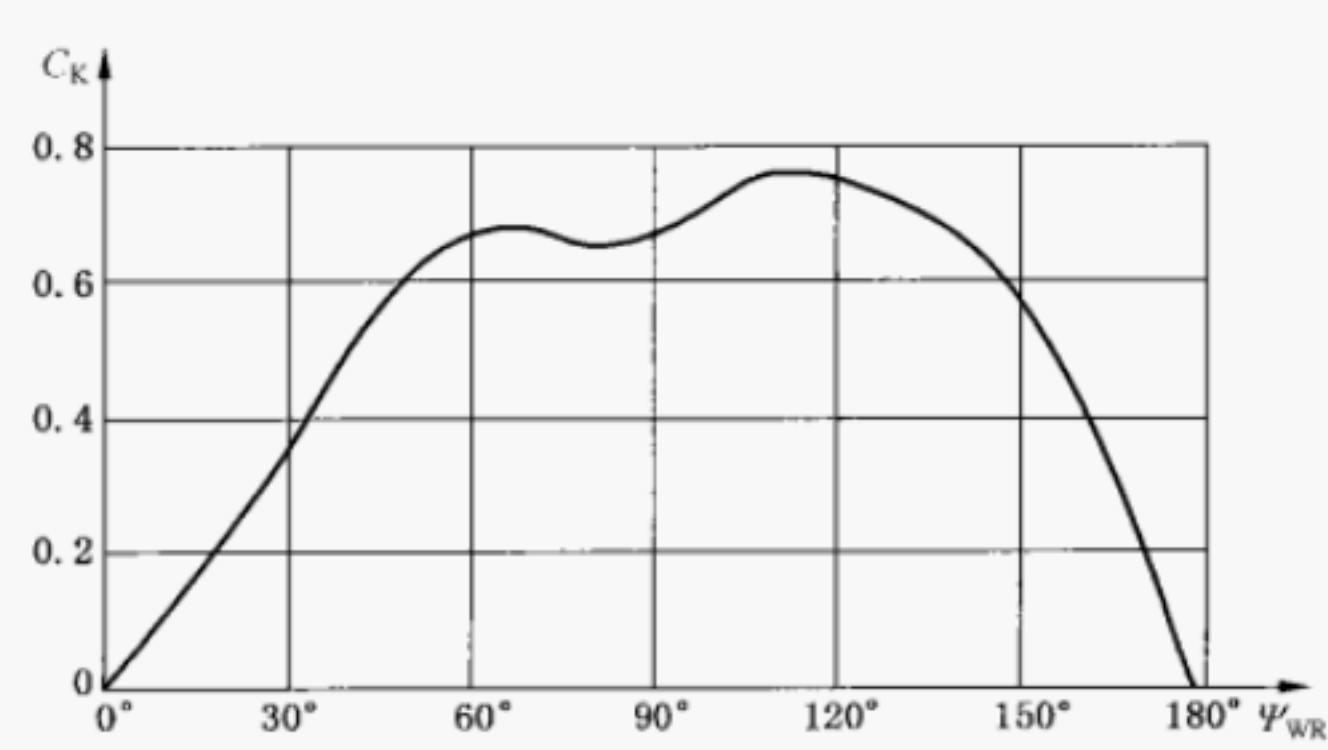


图 19 横摇力矩系数与相对风向

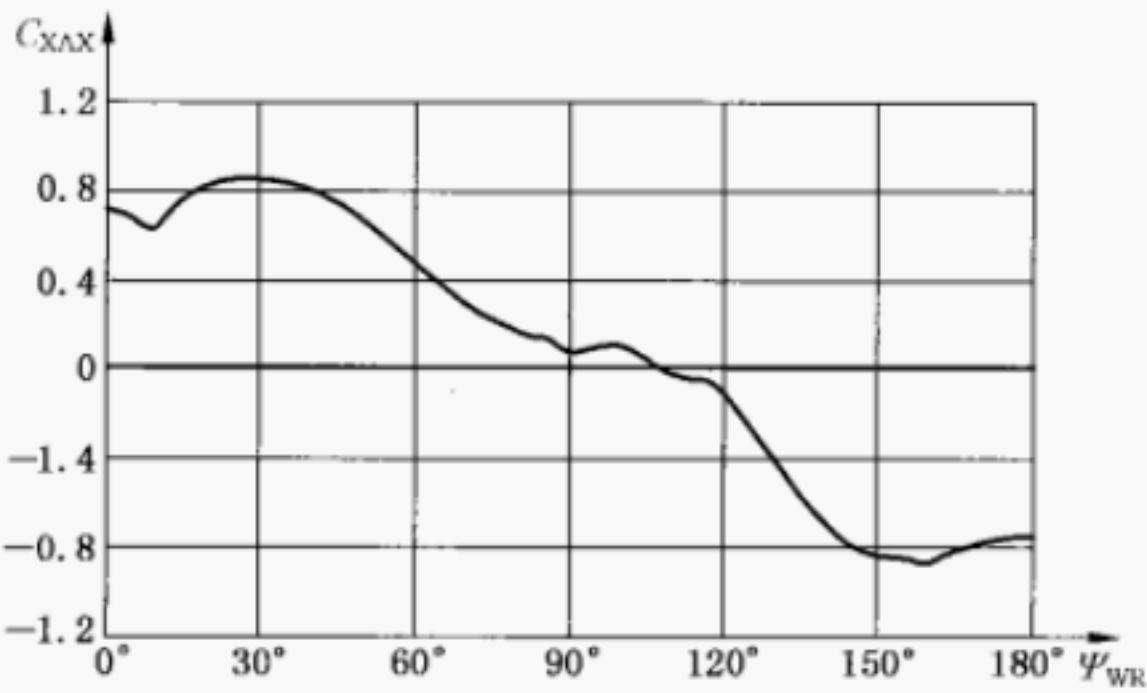


图 20 船舶水线以上横截面相关的纵向力系数与相对风向

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准

船舶和海上技术 船舶操纵性

第 6 部分：模型试验特殊要求

GB/T 37303.6—2019/ISO 13643-6:2017

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 2.5 字数 66 千字
2019 年 3 月第一版 2019 年 3 月第一次印刷

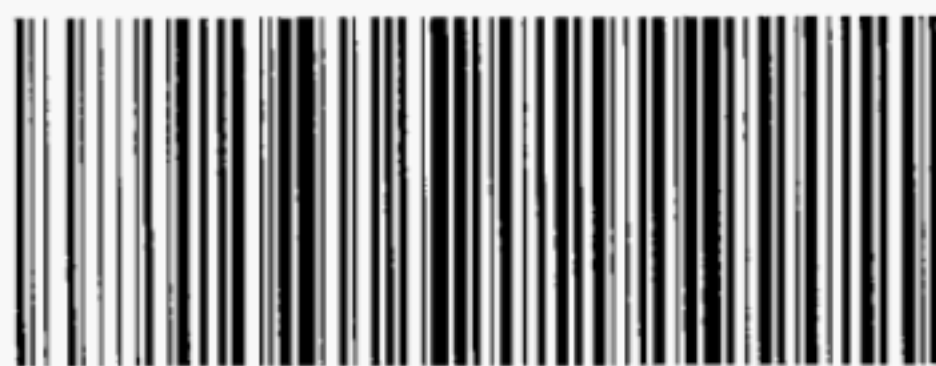
*

书号: 155066 · 1-61275 定价 36.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107



GB/T 37303.6-2019