

# 中华人民共和国船舶行业标准

FL 1905

CB/Z 268—2002

---

## 潜艇操纵性水动力模型试验方法

Method for performing captive-model test of submarine maneuverability

2002—11—20 发布

2003—02—01 实施

---

国防科学技术工业委员会 发布

## 前 言

本指导性技术文件由中国船舶重工集团公司提出。

本指导性技术文件由中国船舶工业综合技术经济研究院归口。

本指导性技术文件起草单位：中国船舶重工集团公司第七研究院第七〇二研究所、海军驻七〇二所军事代表室。

本标准主要起草人：吴宝山、何春荣、马向能、李 斌。

# 潜艇操纵性水动力模型试验方法

## 1 范围

本指导性技术文件规定了潜艇水下（深水状态）操纵性水动力的拘束模试验方法。  
本指导性技术文件适用于潜艇水下（深水状态）操纵性水动力拘束模试验。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本指导性技术文件的引用而成为本指导性技术文件的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本指导性技术文件，然而，鼓励根据本指导性技术文件达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本指导性技术文件。

GJB/Z 110 潜艇操纵性预报指南

## 3 符号

GJB/Z 110确立的符号适用于本标准。

## 4 一般要求

### 4.1 试验坐标系

模型试验坐标系取右手直角坐标系 $oxyz$ ，坐标原点 $o$ 取在艇体全排水量重心或艇体轴线上重心（浮心）所处的横截面处， $x$ 轴平行于艇体基线、指向艇艏， $y$ 轴指向艇体右舷， $z$ 轴指向艇体底部。

### 4.2 潜艇模型标准空间运动方程

描述潜艇模型空间六自由度运动的标准数学模型，一般采用艇体坐标系描述，具体表达形式见GJB/Z 110。

### 4.3 测量参数

#### 4.3.1 水动力分量

模型试验测量作用于潜艇模型的六个水动力分量，即沿 $x$ 轴的纵向力 $X$ 、沿 $y$ 轴的横向力 $Y$ 、沿 $z$ 轴的垂向力 $Z$ 、绕 $x$ 轴的横滚力矩 $K$ 、绕 $y$ 轴的俯仰力矩 $M$ 、绕 $z$ 轴的转舵力矩 $N$ ，并按公式（1）进行无量纲化：

$$\left. \begin{aligned} X' &= \frac{X}{\frac{1}{2}\rho L^2 U^2} \\ Y' &= \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho L^2 U^2} \\ Z' &= \frac{Z}{\frac{1}{2}\rho L^2 U^2} \\ K' &= \frac{K}{\frac{1}{2}\rho L^3 U^2} \\ M' &= \frac{M}{\frac{1}{2}\rho L^3 U^2} \\ N' &= \frac{N}{\frac{1}{2}\rho L^3 U^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

## 4.3.2 水动力系数

潜艇水下操纵性约束模试验测定标准空间运动方程中除阻力系数 ( $X'_{uu}$ )、推力系数 ( $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ ) 和附加质量系数之外的各项水动力系数。阻力系数和推力系数可由快速性水下模型试验确定; 附加质量系数可由势流理论方法计算确定或由拖曳水池中平面运动机构约束模试验确定。

## 4.4 模型

试验模型根据原型型线图按比例制作, 长度一般应不小于4m。模型的结构强度和刚度应能承受水下试验。模型艇体及附体可采用优质木材、玻璃钢或铝合金等金属材料制作, 螺旋桨模型一般用铜、铝合金、巴氏合金等金属材料制作。

试验模型一般采用单支杆和双支杆两种腹支撑方式, 支杆对模型试验结果的影响应加以扣除。

## 4.5 试验相似律

一般要求进行带螺旋桨模型试验, 应满足试验速度的雷诺数  $R_{Re}$  大于  $1.0 \times 10^7$ , 螺旋桨进速系数  $J$  与实船设计工况点或模型自航点相等。当采用代用桨模型时, 代用桨模型与设计桨模型的推力应相等。

## 4.6 模型试验状态参数范围

4.6.1 模型试验可分为水平面运动水动力试验、垂直面运动水动力试验和空间运动水动力试验三类。

4.6.2 模型试验的状态参数范围应涵盖潜艇正常机动条件下的各种工况。一般情况下, 模型试验的攻角  $\alpha$  变化范围为  $-12^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$ , 漂角  $\beta$  变化范围为  $-12^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$ ; 对于“十”字型舰布局的潜艇, 模型试验的围壳舵(或舵升降舵)角  $\delta_b$  变化范围为  $-25^\circ \leq \delta_b \leq 25^\circ$ , 舰升降舵角  $\delta_s$  变化范围为  $-35^\circ \leq \delta_s \leq 35^\circ$ , 方向舵角  $\delta_r$  变化范围为  $-35^\circ \leq \delta_r \leq 35^\circ$ 。模型试验的横倾角  $\phi$  变化范围与艇型有关, 可取为  $-16^\circ \leq \phi \leq 16^\circ$ 。模型试验的回转角速度和纵倾角速度变化范围由艇型和试验设备的试验能力确定, 但角速度上限应接近或大于潜艇正常机动的上限值。

## 4.7 试验设备

用于操纵性模型试验的实验设备主要为低速风洞、旋臂水池、拖曳水池、平面运动机构等。对于操纵性预报用的水动力系数的测量按表1的规定选取相应的试验设备进行模型试验。水动力分量可用六分力天平测量。

表1 水动力试验设备

序号	水动力系数	试验设备			备注 (其他方法)
		风洞(拖曳水池)	旋臂水池	平面运动机构	
1 纵向力系数					
1.1	$X'_{qq}$	—	√	—	用理论计算值近似
1.2	$X'_{rr}$	—	√	—	用理论计算值近似
1.3	$X'_{rp}$	—	√	—	用理论计算值近似
1.4	$X'_{\dot{u}}$	—	—	—	理论计算
1.5	$X'_{vr}$	—	√	—	用理论计算值近似
1.6	$X'_{wq}$	—	√	—	用理论计算值近似
1.7	$X'_{uu}$	—	—	—	快速性试验
1.8	$X'_{vv}$	√	—	—	—
1.9	$X'_{ww}$	√	—	—	—
1.10	$X'_{\delta, \dot{\delta}}$	√	—	—	—

表 1 (续)

序号	水动力系数	试验设备			备注 (其他方法)
		风洞(拖曳水池)	旋臂水池	平面运动机构	
1.11	$X'_{\delta_r \delta_s}$	√	—	—	—
1.12	$X'_{\delta_b \delta_b}$	√	—	—	—
1.13	$a_i$	—	—	—	快速性试验
1.14	$b_i$	—	—	—	快速性试验
1.15	$c_i$	—	—	—	快速性试验
2 侧向力系数					
2.1	$Y'_{\delta}$	—	—	√	理论计算
2.2	$Y'_{\delta}$	—	—	√	理论计算
2.3	$Y'_{ r }$	—	√	—	—
2.4	$Y'_{pq}$	—	√	—	用理论计算值近似
2.5	$Y'_{qr}$	—	√	—	—
2.6	$Y'_{ r }$	—	√	—	—
2.7	$Y'_{\delta}$	—	—	√	理论计算
2.8	$Y'_{vq}$	—	√	—	—
2.9	$Y'_{wp}$	—	√	—	用理论计算值近似
2.10	$Y'_{wr}$	—	√	—	—
2.11	$Y'_r$	—	√	—	—
2.12	$Y'_p$	—	√	√	—
2.13	$Y'_{ r \delta_r}$	—	√	—	—
2.14	$Y'_{ r }$	—	√	—	—
2.15	$Y'_{v r }$	√	—	—	—
2.16	$Y'_\delta$	√	—	—	—
2.17	$Y'_v$	√	—	—	—
2.18	$Y'_{vw}$	√	—	—	—
2.19	$Y'_{\delta_r}$	√	—	—	—
2.20	$Y'_{v\delta_r}$	√	—	—	—
3 垂向力系数					
3.1	$Z'_{\delta}$	—	—	√	理论计算
3.2	$Z'_{pp}$	—	√	—	用理论计算值近似
3.3	$Z'_{rr}$	—	√	—	—
3.4	$Z'_{rp}$	—	√	—	用理论计算值近似
3.5	$Z'_{q q }$	—	√	—	—
3.6	$Z'_{\delta}$	—	—	√	理论计算

表 1 (续)

序号	水动力系数	试 验 设 备			备注 (其他方法)
		风洞 (拖曳水池)	旋臂水池	平面运动机构	
3.7	$Z'_{vr}$	—	√	—	—
3.8	$Z'_{vp}$	—	√	—	用理论计算值近似
3.9	$Z'_q$	—	√	—	—
3.10	$Z'_{ q \delta_s}$	—	√	—	—
3.11	$Z'_{ w q }$	—	√	—	—
3.12	$Z'_*$	√	—	—	—
3.13	$Z'_w$	√	—	—	—
3.14	$Z'_{ w w }$	√	—	—	—
3.15	$Z'_{ w }$	√	—	—	—
3.16	$Z'_{wv}$	√	—	—	—
3.17	$Z'_{vr}$	√	—	—	—
3.18	$Z'_{\delta_s}$	√	—	—	—
3.19	$Z'_{w\delta_s}$	√	—	—	—
3.20	$Z'_{\delta_b}$	√	—	—	—
3.21	$Z'_{w\delta_b}$	√	—	—	—
4 横倾力矩系数					
4.1	$K'_{\mathcal{R}}$	—	—	√	理论计算
4.2	$K'_{\mathcal{R}}$	—	—	√	理论计算
4.3	$K'_{gr}$	—	√	—	用理论计算值近似
4.4	$K'_{py}$	—	√	—	用理论计算值近似
4.5	$K'_{ p p }$	—	√	—	—
4.6	$K'_{r p }$	—	√	—	—
4.7	$K'_p$	—	√	√	—
4.8	$K'_r$	—	√	—	—
4.9	$K'_{\mathcal{R}}$	—	—	√	理论计算
4.10	$K'_{wv}$	—	√	—	用理论计算值近似
4.11	$K'_{wp}$	—	√	—	用理论计算值近似
4.12	$K'_{wr}$	—	√	—	用理论计算值近似
4.13	$K'_s$	√	—	—	—
4.14	$K'_v$	√	—	—	—
4.15	$K'_{ v v }$	√	—	—	—
4.16	$K'_{vw}$	√	—	—	—
4.17	$K'_{\delta_s}$	√	—	—	—
4.18	$K'_{v\delta_s}$	√	—	—	—

表1 (续)

序号	水动力系数	试验设备			备注 (其他方法)
		风洞(拖曳水池)	旋臂水池	平面运动机构	
5 纵倾力矩系数					
5.1	$M'_{\phi}$	—	—	√	理论计算
5.2	$M'_{pp}$	—	√	—	用理论计算值近似
5.3	$M'_{rr}$	—	√	—	用理论计算值近似
5.4	$M'_{rp}$	—	√	—	用理论计算值近似
5.5	$M'_{q v }$	—	√	—	—
5.6	$M'_{\delta_2}$	—	—	√	理论计算
5.7	$M'_{vr}$	—	√	—	—
5.8	$M'_{vp}$	—	√	—	用理论计算值近似
5.9	$M'_q$	—	√	—	—
5.10	$M'_{ q \delta_2}$	—	√	—	—
5.11	$M'_{ w q}$	—	√	—	—
5.12	$M'_w$	√	—	—	—
5.13	$M'_w$	√	—	—	—
5.14	$M'_{w w }$	√	—	—	—
5.15	$M'_{ w }$	√	—	—	—
5.16	$M'_{wv}$	√	—	—	—
5.17	$M'_{vv}$	√	—	—	—
5.18	$M'_{\delta_3}$	√	—	—	—
5.19	$M'_{w\delta_3}$	√	—	—	—
5.20	$M'_{\delta_b}$	√	—	—	—
5.21	$M'_{w\delta_b}$	√	—	—	—
6 转舵力矩系数					
6.1	$N'_{\phi}$	—	—	√	理论计算
6.2	$N'_{\phi}$	—	—	√	理论计算
6.3	$N'_{pq}$	—	√	—	用理论计算值近似
6.4	$N'_{qr}$	—	√	—	用理论计算值近似
6.5	$N'_{r l }$	—	√	—	—
6.6	$N'_{\phi}$	—	—	√	理论计算
6.7	$N'_{rr}$	—	√	—	—
6.8	$N'_{wp}$	—	√	—	用理论计算值近似
6.9	$N'_{wq}$	—	√	—	用理论计算值近似
6.10	$N'_p$	—	√	√	—

表 1 (续)

序号	水动力系数	试验设备			备注 (其他方法)
		风洞(拖曳水池)	旋臂水池	平面运动机构	
6.11	$N'_r$	—	√	—	—
6.12	$N'_{ r s}$	—	√	—	—
6.13	$N'_{ r r}$	—	√	—	—
6.14	$N'_s$	√	—	—	—
6.15	$N'_v$	√	—	—	—
6.16	$N'_{v v }$	√	—	—	—
6.17	$N'_{vw}$	√	—	—	—
6.18	$N'_{\delta_s}$	√	—	—	—
6.19	$N'_{v\delta_s}$	√	—	—	—

5 风洞模型试验方法

5.1 试验模型的安装

试验模型通常采用双支杆支撑的安装方式,前支杆一般位于试验坐标原点处,见图1。应通过调节模型配重的方法使模型的重心靠近试验坐标系的原点。一般情况下应在支杆外加装导流罩减小支杆对模型水动力的干扰。

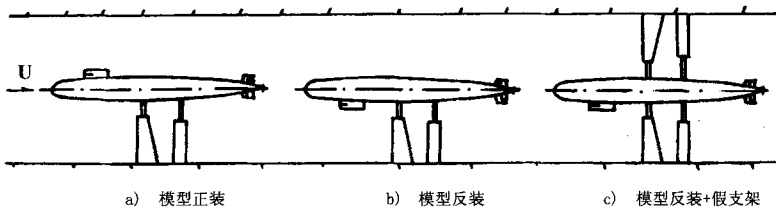


图1 风洞模型安装示意图

5.2 模型姿态的控制

5.2.1 模型的姿态可由支杆运动控制。通过后支杆上下移动使模型绕前支杆转动设定模型的攻角 $\alpha$ ,通过后支杆绕前支杆水平转动设定模型的漂角 $\beta$ 。

5.2.2 模型相对运动速度在艇体坐标系的三个分量按公式(2)计算,其无量纲表达式由公式(3)表述:

$$\left. \begin{aligned} u &= U \cos \beta \cos \alpha \\ v &= -U \sin \beta \\ w &= U \cos \beta \sin \alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$



$$\left. \begin{aligned} u' &= \frac{u}{U} = \cos \beta \cos \alpha \\ v' &= \frac{v}{U} = -\sin \beta \\ w' &= \frac{w}{U} = \cos \beta \sin \alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$U$ ——风洞中风速, 单位为米每秒 (m/s)。

5.2.3 测力传感器通常为外置的塔式机械六分力天平或内置的盒式六分力应变天平。试验前后应对测力天平进行静校验或标定, 确保测试数据有效可靠。

### 5.3 标准试验工况

#### 5.3.1 水平面试验

水平面试验包括单独变漂角试验、单独变方向舵角试验和耦合变漂角变方向舵角试验, 试验工况及试验测定的水动力系数见表2。耦合变漂角变方向舵角试验可固定舵角变漂角, 也可固定漂角变舵角。

表2 风洞模型试验测定的水动力系数

序号	试验工况	测定的水动力系数	
		线性系数	非线性系数
1	水平面变漂角	$Y'_v, K'_v, N'_v$	$X'_{\delta_r}, Y'_{ \eta }, Z'_{vw}, K'_{ \eta }, M'_{vw}, N'_{ \eta }$
2	水平面变方向舵角	$Y'_{\delta_r}, K'_{\delta_r}, N'_{\delta_r}$	$X'_{\delta_r, \delta_s}$
3	水平面耦合变漂角变方向舵角	—	$Y'_{v\delta_r}, K'_{v\delta_r}, N'_{v\delta_r}$
4	垂直面变攻角	$Z'_w, M'_w$	$X'_{ww}, Z'_{w \eta }, Z'_{ \eta }, Z'_{ww}, M'_{w \eta }, M'_{ \eta }, M'_{ww}$
5	垂直面变围壳舵角	$Z'_{\delta_b}, M'_{\delta_b}$	$X'_{b\delta_b}$
6	垂直面变舰升降舵角 (舰升降舵)	$Z'_{\delta_s}, M'_{\delta_s}$	$X'_{\delta_s, \delta_s}$
7	垂直面耦合变攻角变围壳舵角 (舰升降舵)	—	$Z'_{w\delta_b}, M'_{w\delta_b}$
8	垂直面耦合变攻角变舰升降舵角	—	$Z'_{w\delta_s}, M'_{w\delta_s}$
9	空间耦合变漂角变攻角	—	$Y'_{vw}, K'_{vw}, N'_{vw}$

#### 5.3.2 垂直面试验

垂直面试验包括单独变攻角试验、单独变围壳舵角 (舰升降舵) 试验、单独变舰升降舵角试验及耦合变攻角变舵角试验, 试验工况及试验测定的水动力系数见表2。耦合变攻角变舵角试验可固定舵角变攻角, 也可固定攻角变舵角。

#### 5.3.3 空间试验

空间试验为耦合变漂角变攻角试验, 试验测定的水动力系数见表2。空间试验可固定漂角变攻角, 也可固定攻角变漂角。

#### 5.3.4 支杆干扰试验

风洞模型试验前, 应进行支杆干扰试验, 扣除模型安装支杆对模型水动力的影响量。支杆干扰试验可采用风洞气动力试验通用的三步法, 即模型反装、模型反装加镜像支架和模型正装 (见图1)

三步试验测定支杆干扰量。支杆干扰试验的试验工况为水平面变漂角试验、垂直面变攻角试验和空间试验，应与相应的模型正装试验工况一致。

支杆干扰量按公式（4）计算，模型水动力分量按公式（5）修正：

$$\Delta F = F_c - F_b \dots\dots\dots (4)$$

$$F = F_a - \Delta F \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- $\Delta F$ ——由支杆引起的对水动力分量的影响值；
- $F_c$ ——反装加镜像支杆状态下测得的水动力分量；
- $F_b$ ——反装支杆状态下测得的水动力分量；
- $F_a$ ——正装支杆状态下测得的水动力分量；
- $F$ ——经对支杆影响修正后的单独作用在模型上的水动力分量。

5.4 试验数据处理

5.4.1 试验数据修正

正装支杆状态下测得的水动力分量应按公式（5）扣除支杆干扰量，并按公式（6）进行无量纲化和风洞阻塞修正：

$$\left. \begin{aligned} X' &= \frac{X}{\frac{1}{2} \rho L^2 U^2 (1+\epsilon)^2} \\ Y' &= \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho L^2 U^2 (1+\epsilon)^2} \\ Z' &= \frac{Z}{\frac{1}{2} \rho L^2 U^2 (1+\epsilon)^2} \\ K' &= \frac{K}{\frac{1}{2} \rho L^3 U^2 (1+\epsilon)^2} \\ M' &= \frac{M}{\frac{1}{2} \rho L^3 U^2 (1+\epsilon)^2} \\ N' &= \frac{N}{\frac{1}{2} \rho L^3 U^2 (1+\epsilon)^2} \\ \epsilon &= \frac{A_M}{4A_w} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- $\epsilon$ ——风洞阻塞修正系数；
- $A_M$ ——模型在零姿态角时的迎风面积，单位为平方米（m<sup>2</sup>）；
- $A_w$ ——风洞试验段的横剖面积，单位为平方米（m<sup>2</sup>）。

5.4.2 数据回归分析

经无量纲化处理和修正后的水动力数据根据潜艇标准运动方程按公式（7）～公式（12）进行回归分析，得到相应的水动力系数值。

$$\left. \begin{aligned} X' &= X'_{uu} u'^2 + X'_{uv} v'^2 + X'_{ww} w'^2 \\ &\quad + X'_{\delta_r} u'^2 \delta_r^2 + X'_{\delta_b} u'^2 \delta_b^2 + X'_{\delta_s} u'^2 \delta_s^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$Y' = Y'_s u'^2 + Y'_v u' v' + Y'_{|v|} v' \left| (v'^2 + w'^2)^{1/2} \right| + Y'_{vw} v' w' + Y'_{\delta_r} u'^2 \delta_r + Y'_{\delta_s} u' v' \delta_s \quad \left. \vphantom{Y'} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$Z' = Z'_u u'^2 + Z'_w u' w' + Z'_{|w|} w' \left| (v'^2 + w'^2)^{1/2} \right| + Z'_{|u|} u' \left| w' \right| + Z'_{vw} \left| w' (v'^2 + w'^2)^{1/2} \right| + Z'_{vv} v'^2 + Z'_{\delta_s} u'^2 \delta_s + Z'_{\delta_b} u'^2 \delta_b + Z'_{w\delta_s} u' w' \delta_s + Z'_{w\delta_s} u' w' \delta_s \quad \left. \vphantom{Z'} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$K' = K'_s u'^2 + K'_v u' v' + K'_{|v|} v' \left| (v'^2 + w'^2)^{1/2} \right| + K'_{vw} v' w' + K'_{\delta_r} u'^2 \delta_r + K'_{\delta_s} u' v' \delta_s \quad \left. \vphantom{K'} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$M' = M'_s u'^2 + M'_w u' w' + M'_{|w|} w' \left| (v'^2 + w'^2)^{1/2} \right| + M'_{|u|} u' \left| w' \right| + M'_{vw} \left| w' (v'^2 + w'^2)^{1/2} \right| + M'_{vv} v'^2 + M'_{\delta_s} u'^2 \delta_s + M'_{\delta_b} u'^2 \delta_b + M'_{w\delta_s} u' w' \delta_s + M'_{w\delta_s} u' w' \delta_s \quad \left. \vphantom{M'} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$N' = N'_s u'^2 + N'_v u' v' + N'_{|v|} v' \left| (v'^2 + w'^2)^{1/2} \right| + N'_{vw} v' w' + N'_{\delta_r} u'^2 \delta_r + N'_{\delta_s} u' v' \delta_s \quad \left. \vphantom{N'} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

回归分析可采用最小二乘法分步进行。具体步骤如下：

- 由单平面试验数据求取线性水动力系数。根据表 2 中线性水动力系数对应的试验工况，由小攻角 ( $\pm 3^\circ$ )、小漂角 ( $\pm 3^\circ$ )、小舵角 ( $\pm 10^\circ$ ) 范围内的五点以上数据，求取相应的线性水动力系数。回归分析的表达式仅取公式 (8) ~ 公式 (12) 中的零次项 (如  $Z'_u u'^2$  等) 和相应的线性项；
- 由单平面试验数据求取相应的非线性水动力系数。固定线性系数后，按公式 (7) ~ 公式 (12) 的表达形式，由单平面试验数据的全部攻角、漂角或舵角范围的试验结果求取非线性系数；
- 固定由 a) 和 b) 确定的水动力系数，按公式 (7) ~ 公式 (12) 的表达形式，由空间试验结果确定其他非线性水动力系数；
- 潜艇的零次项水动力系数 (如  $Z'_u$  等) 一般较小，可取为各试验工况下零状态水动力试验值的平均值。 $Y'_s$ 、 $N'_s$  一般可取为零。

## 6 旋臂水池模型试验方法

### 6.1 试验模型安装

试验模型一般采用单支杆腹支撑安装方式，支杆位于试验坐标系的原点处。在支杆外加装导流罩减小支杆对模型水动力的干扰。

### 6.2 模型姿态控制

模型姿态由支杆运动控制。水平面试验时，模型可采用指挥室围壳朝下的倒装方式，通过支杆绕自身轴转动改变模型运动的漂角  $\beta$ 。垂直面试验时，模型可采用侧装方式 (一般右舷朝下)，通过支杆绕自身轴转动改变模型运动的攻角  $\alpha$ 。空间试验时，可采用倒装和侧装两种方式。模型倒装时，通过支杆侧向倾斜设定模型的横倾角  $\phi$ ，通过支杆前后倾斜设定模型的攻角  $\alpha$ ，实现耦合变漂角、攻角和横倾角；模型侧装时也可耦合变攻角、漂角和横倾角。

模型运动合速度在艇体坐标系中的三个线速度分量表达式见公式 (2) 和公式 (3)。

### 6.3 模型运动角速度确定

6.3.1 模型试验一般进行五个试验半径的正转、反转试验 (以顺时针旋转为正转)。试验半径通过旋臂上的拖车移位设定。对于不同的试验半径，模型的线速度应保持不变，旋臂旋转角速度按公式 (13) 确定。

$$\Omega = \pm U / R \dots\dots\dots (13)$$

式中：

$\Omega$ ——旋臂旋转角速度，单位为弧度每秒（rad/s）；

$U$ ——模型线速度，单位为米每秒（m/s）；

$R$ ——试验半径，单位为米（m）；

正负号分别与正转、反转相对应。

6.3.2 模型倒装时的运动角速度按公式（14）确定，模型侧装时的运动角速度按公式（15）确定，其无量纲表达式见公式（16）。

$$\left. \begin{aligned} p &= \Omega \sin \alpha \\ q &= -\Omega \cos \alpha \sin \phi \\ r &= -\Omega \cos \alpha \cos \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

$$\left. \begin{aligned} p &= -\Omega \sin \beta \\ q &= \Omega \cos \beta \cos \phi \\ r &= -\Omega \cos \beta \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

$$\left. \begin{aligned} p' &= pL/U \\ q' &= qL/U \\ r' &= rL/U \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

6.3.3 测力传感器一般可采用水密型内置式六分力应变天平。试验前应对天平进行标定，试验后应进行复校，确保测试数据有效可靠。

6.4 模型惯量校验

试验前应对模型进行惯量校验，包括模型称重、重心位置测定和转动惯量测定。惯量校验时，模型的非水密部分应充满水，通过调节模型配重的方法使模型的重心与试验坐标系原点重合。试验中应记录模型质量的变化，并及时对与模型质量有关的试验参数作相应的修正，试验后应进行模型质量和惯量的复校，确保测试数据有效可靠。

6.5 标准试验工况

6.5.1 水平面试验

水平面试验包括变漂角变角速度试验和变方向舵角变角速度试验，试验工况及试验测定的水动力系数见表3。

6.5.2 垂直面试验

垂直面试验包括变攻角变角速度试验和变舰升降舵角变角速度试验，试验工况及试验测定的水动力系数见表3。

6.5.3 空间试验

空间试验包括模型倒装时耦合变攻角变漂角变角速度试验和耦合变横倾角变漂角变角速度试验、模型侧装时耦合变漂角变攻角变角速度试验和耦合变横倾角变攻角变角速度试验，试验工况及测定的水动力系数见表3。空间试验时宜将支杆导流罩拆除，但应通过支杆干扰试验扣除无导流罩时支杆对模型水动力导数的影响，保证空间试验的数据精度。

6.5.4 支杆干扰试验

旋臂水池单平面试验中的支杆干扰一般可忽略不计。空间试验无导流罩时，支杆的干扰可采用光艇体模型试验测定，支杆干扰试验的试验工况及测定的水动力见表4。

支杆干扰量按公式（17）计算：

$$\left. \begin{aligned} \Delta F(\alpha, r) &= F_{NT}(\alpha, r) - F_T(-\beta, r) \\ \Delta F(\beta, q) &= F_{NT}(\beta, q) - F_T(-\alpha, q) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$\Delta F(\alpha, r), \Delta F(\beta, q)$ ——由支杆引起的对水动力分量的影响值;

$F_{NT}(\alpha, r), F_{NT}(\beta, q)$ ——无导流罩状态下的水动力分量;

$F_T(-\beta, r), F_T(-\alpha, q)$ ——有导流罩状态下的水动力分量。

表3 旋臂水池模型试验测定的水动力系数

序号	试验工况		测定的水动力系数	
			线性项	非线性项
1	水平面变漂角变角速度试验		$Y'_r, K'_r, N'_r$	$X'_{rr}, X'_{vr}, Y'_{r r}, Y'_{q r}, Z'_{rr}, Z'_{vr}, K'_{r r}, M'_{rr}, M'_{vr}, N'_{r r}, N'_{v r}$
2	水平面变方向舵角变角速度试验		—	$Y'_{ r \delta}, N'_{ r \delta}$
3	垂直面变攻角变角速度试验		$Z'_q, M'_q$	$X'_{qq}, X'_{wq}, Z'_{w q}, Z'_{q q}, M'_{q q}, M'_{w q}$
4	垂直面变展升降舵角变角速度试验		—	$Z'_{ q \delta}, M'_{ q \delta}$
5	空间水动力试验	模型倒装	变攻角变漂角变角速度试验	$X'_{pr}, Y'_p, Y'_{p p}, Y'_{wp}, Z'_{pr}, K'_p, K'_{p p}, K'_{wp}, M'_{pr}, N'_p, N'_{p p}, N'_{wp}, Y'_{wr}, K'_{wr}, N'_{wr}$
		模型侧装	变漂角变攻角变角速度试验	$Y'_{pq}, Y'_{wp}, Z'_{pp}, Z'_{vp}, K'_{pq}, K'_{wp}, M'_{pp}, M'_{vp}, N'_{pq}, N'_{wp}, Y'_{vq}, K'_{vq}, N'_{vq}$
		模型倒装	变横倾变角速度试验	$Y'_{qr}, K'_{qr}, N'_{qr}$
		模型侧装		

表4 旋臂水池支杆干扰试验工况及测定的水动力

序号	试验工况		水动力
1	支杆无导流罩	变攻角变角速度光艇体试验 (倒装状态)	$F_{NT}(\alpha, r)$
2		变漂角变角速度光艇体试验 (侧装状态)	$F_{NT}(\beta, q)$
3	支杆带导流罩	变攻角变角速度光艇体试验 (侧装状态)	$F_T(\alpha, q)$
4		变漂角变角速度光艇体试验 (倒装状态)	$F_T(\beta, r)$

## 6.6 试验数据处理

### 6.6.1 试验数据修正

试验测得的水动力应扣除模型的离心力和离心力矩,空间运动试验还应扣除支杆干扰的影响值,然后再按公式(1)进行无量纲化处理。

### 6.6.2 数据回归分析

将无量纲化处理后的各试验方案的水动力系数按公式(18)~公式(23)进行回归处理,得到运动方程中各水动力系数。

$$\left. \begin{aligned} X' &= X'_{uu} u'^2 + X'_{vv} v'^2 + X'_{rr} r'^2 + X'_{vr} v' r' \\ &+ X'_{\delta, \delta} u'^2 \delta_r^2 + X'_{ww} w'^2 + X'_{qq} q'^2 \\ &+ X'_{wq} w' q' + X'_{pr} p' r' + X'_{\delta, \delta} u'^2 \delta_s^2 + X'_{\delta, \delta} u'^2 \delta_b^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

$$\left. \begin{aligned}
 Y' = & Y'_0 u'^2 + Y'_v u' v' + Y'_{v|v} v'|v'| + Y'_{v|r} v'|r'| + Y'_r u' r' \\
 & + Y'_{r|r} r'|r'| + Y'_{\delta_s} u'^2 \delta_s + Y'_{r|\delta_s} u' r' \delta_s + Y'_{p'} u' p' \\
 & + Y'_{p|p} p'|p'| + Y'_{wp} w' p' + Y'_{pq} p' q' + Y'_{qr} q' r' \\
 & + Y'_{wr} w' r' + Y'_{vq} v' q'
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

$$\left. \begin{aligned}
 Z' = & Z'_0 u'^2 + Z'_{vv} v'^2 + Z'_{rr} r'^2 + Z'_{vr} v' r' \\
 & + Z'_{w} u' w' + Z'_{ww} w'^2 + Z'_{w|w} w'|w'| + Z'_{w|u} u' w' \\
 & + Z'_{q} u' q' + Z'_{q|q} q'|q'| + Z'_{w|q} w' q' \\
 & + Z'_{q|\delta_s} u' q' \delta_s + Z'_{\delta_s} u'^2 \delta_s + Z'_{\delta_s} u'^2 \delta_b \\
 & + Z'_{pp} p'^2 + Z'_{vp} v' p' + Z'_{pr} p' r'
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

$$\left. \begin{aligned}
 K' = & K'_0 u'^2 + K'_v u' v' + K'_{v|v} v'|v'| + K'_r u' r' \\
 & + K'_{r|r} r'|r'| + K'_{\delta_s} u'^2 \delta_s + K'_p u' p' + K'_{p|p} p'|p'| \\
 & + K'_{wp} w' p' + K'_{pq} p' q' + K'_{qr} q' r' \\
 & + K'_{wr} w' r' + K'_{vq} v' q'
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

$$\left. \begin{aligned}
 M' = & M'_0 u'^2 + M'_{vv} v'^2 + M'_{rr} r'^2 + M'_{vr} v' r' \\
 & + M'_{w} u' w' + M'_{ww} w'^2 + M'_{w|w} w'|w'| + M'_{w|u} u' w' \\
 & + M'_{q} u' q' + M'_{q|q} q'|q'| + M'_{w|q} w' q' \\
 & + M'_{q|\delta_s} u' q' \delta_s + M'_{\delta_s} u'^2 \delta_s + M'_{\delta_s} u'^2 \delta_b \\
 & + M'_{pp} p'^2 + M'_{vp} v' p' + M'_{pr} p' r'
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

$$\left. \begin{aligned}
 N' = & N'_0 u'^2 + N'_v u' v' + N'_{v|v} v'|v'| + N'_{v|r} v'|r'| + N'_r u' r' \\
 & + N'_{r|r} r'|r'| + N'_{\delta_s} u'^2 \delta_s + N'_{r|\delta_s} u' r' \delta_s + N'_p u' p' \\
 & + N'_{p|p} p'|p'| + N'_{wp} w' p' + N'_{pq} p' q' + N'_{qr} q' r' \\
 & + N'_{wr} w' r' + N'_{vq} v' q'
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

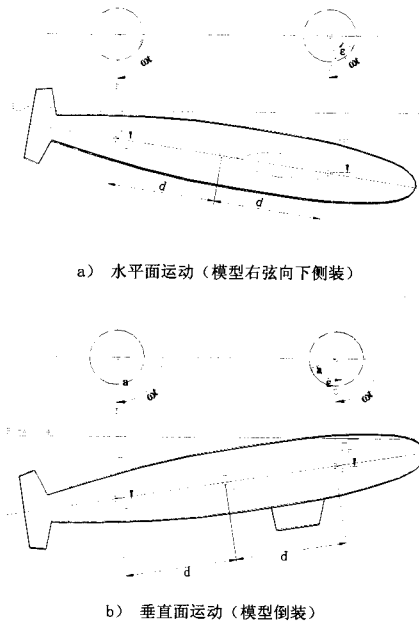
操纵性评估时可使用下列两种方法处理得到水动力系数值:

- a) 使用小漂角 (±3°)、小攻角 (±3°) 和小角速度 (最大三个试验半径的正反转) 的试验结果, 利用公式 (18) ~ 公式 (23) 中有关线性项进行线性回归。该套水动力系数包括表 3 中第一和第三行中所列的线性项, 进行稳定性等操纵性指标的计算。
- b) 使用试验漂角或试验攻角为零度的试验结果回归得到有关线性和非线性旋转导数; 然后在固定旋转导数的基础上, 使用对应试验方案所有试验数据, 利用公式 (18) ~ 公式 (23) 整体回归得到方程中其他有关线性、非线性和耦合水动力导数; 最后在固定单平面水动力导数基础上, 由空间试验结果通过整体回归得到空间水动力导数。该方法与所有试验数据的回归相关系数较高, 可用于单平面和空间运动计算。

7 平面运动机构模型试验方法

7.1 试验模型的安装

试验模型一般可用双支杆腹支撑安装方式, 平面运动机构前、后支杆通过应变式水密传感器与模型连接, 两支杆相对于模型坐标原点等距离分布。水平面运动和横摇运动时, 模型可采用侧装方式 (一般右舷朝下), 见图2a); 作垂直面运动时, 模型可采用倒装方式, 见图2b)。



a) 水平面运动 (模型右弦向下侧装)

b) 垂直面运动 (模型倒装)

图2 平面运动机构模型安装示意图

## 7.2 模型姿态控制

7.2.1 模型姿态可由支杆运动控制。

7.2.2 测力传感器一般采用水密型内置式四分力应变天平。试验前应对天平进行标定, 试验后应进行复校, 确保测试数据有效可靠。

## 7.3 模型惯量校验

试验前应对模型进行惯量和重心校验, 包括测定模型绕 $x$ 轴惯性距 $I_x$ 、绕 $y$ 轴惯性距 $I_y$ 、船体绕 $z$ 轴惯性距 $I$ 和模型重量, 同时通过调节模型配重的方法使模型的重心与模型坐标原点重合。校验时, 模型的非水密部分应充满水。试验中应记录模型质量变化并及时对与模型质量有关的试验参数作相应的修正, 试验后应进行模型质量和惯量复校, 确保测试数据有效可靠。

## 7.4 标准试验工况

### 7.4.1 水平面试验

#### 7.4.1.1 纯横荡试验

平面运动机构作纯横荡试验时, 模型应侧装, 前后两支杆振幅应相等, 相位应一致, 作同步正弦运动, 模型偏航角应始终保持为零。一般通过纯横荡运动求取加速度系数 $Y'_{\dot{\alpha}}$ 、 $K'_{\dot{\alpha}}$ 、 $N'_{\dot{\alpha}}$ 。试验时, 支杆振幅应不小于 40 mm, 频率在 0.1 Hz~0.5 Hz 范围内, 取五至六个频率进行试验, 试验工况及试验测定的水动力系数见表 5。

#### 7.4.1.2 纯艏摇试验

平面运动机构作纯艏摇试验时，模型应侧装，前后两支杆应保持恒定相位差，使模型原点纵轴始终保持与原点轨迹相切，原点处漂角应始终保持为零。一般通过纯艏摇试验求取角加速度系数  $Y'_{\alpha}$ 、 $K'_{\alpha}$ 、 $N'_{\alpha}$ 。试验时，支杆振幅应不小于40 mm，频率在0.1 Hz~0.5 Hz范围内，取五至六个频率进行试验，试验工况及试验测定的水动力系数见表5。

#### 7.4.2 垂直面试验

##### 7.4.2.1 纯升沉试验

平面运动机构作纯升沉试验时，模型应倒装，前后两支杆振幅应相等，相位应一致，作同步正弦运动，模型纵倾角始终保持为零。一般通过纯升沉运动求取加速度系数  $Z'_{\delta}$ 、 $M'_{\delta}$ 。试验时，支杆振幅应不小于40 mm，频率在0.1 Hz~0.5 Hz范围内，取五至六个频率进行试验，试验工况及试验测定的水动力系数见表5。

##### 7.4.2.2 纯俯仰试验

平面运动机构作纯俯仰试验时，模型应倒装，前后两支杆应保持恒定相位差，使模型原点纵轴始终保持与原点轨迹相切，原点处攻角应始终保持为零。一般通过纯俯仰试验求取角加速度系数  $Z'_{\phi}$ 、 $M'_{\phi}$ 。试验时，支杆振幅应不小于40 mm，频率在0.1 Hz~0.5 Hz范围内，取五至六个频率进行试验，试验工况及试验测定的水动力系数见表5。

#### 7.4.3 纯横摇试验

平面运动机构作纯横摇试验时，模型应侧装，模型以速度U拖航，前后两支杆应固定，攻角、漂角均为零，模型作周期性横摇。一般通过纯横摇试验求取横摇水动力系数  $Y'_p$ 、 $K'_p$ 、 $N'_p$ 和加速度系数  $Y'_{\alpha}$ 、 $K'_{\alpha}$ 、 $N'_{\alpha}$ 。试验时，横摇幅度应不小于4°，频率在0.1 Hz~0.3 Hz范围内，取五至六个频率进行试验，试验工况及试验测定的水动力系数见表5。

纯横摇试验可采用两种方法实现，一是通过第三根支杆的振荡带动模型运动；二是模型内置横摇驱动设备带动模型运动。使用模型内置横摇驱动设备的方法，避免因增加支杆带来的模型水动力干扰。

表5 平面运动机构试验测定的水动力系数

序号	试验工况	测定的水动力系数
1	水平面纯横荡	$Y'_{\alpha}$ 、 $N'_{\alpha}$ 、 $K'_{\alpha}$
2	水平面纯艏摇	$Y'_r$ 、 $N'_r$ 、 $K'_r$
3	垂直面纯升沉	$Z'_{\delta}$ 、 $M'_{\delta}$
4	垂直面纯俯仰	$Z'_{\phi}$ 、 $M'_{\phi}$
5	纯横摇	$K'_p$ 、 $K'_p$ 、 $N'_p$ 、 $N'_p$ 、 $Y'_p$ 、 $Y'_p$

#### 7.5 试验数据处理

##### 7.5.1 数据处理

将试验测得的力和力矩，经支杆干扰修正后，通过变积性积分法得到天平各力和力矩的正弦分量和余弦分量，对各力和力矩按公式(1)进行无量纲化。

在模型试验中一般应在每一频率(或振幅)测定三至五个标准周期，分离出每一周期内的正弦分量和余弦分量，避免偶然误差。

##### 7.5.2 水动力表述形式

平面运动机构的水动力按公式(24)~公式(28)表述，它与标准运动方程相对应。



$$Y = \left. \begin{aligned} & \left( \frac{1}{2} \rho L^4 Y'_{\dot{x}} - m x_G \right) \dot{x} + \left( \frac{1}{2} \rho L^3 Y'_r - m \right) ur + \left( \frac{1}{2} \rho L^3 Y'_{\dot{x}} - m \right) \dot{x} \\ & + \left( \frac{1}{2} \rho L^2 Y'_v \right) uv + \left( \frac{1}{2} \rho L^3 Y'_p \right) up + \left( \frac{1}{2} \rho L^4 Y'_{\dot{x}} + m z_G \right) \dot{x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

$$Z = \left. \begin{aligned} & \left( \frac{1}{2} \rho L^4 Z'_{\dot{x}} + m x_G \right) \dot{x} + \left( \frac{1}{2} \rho L^3 Z'_q + m \right) uq + \left( \frac{1}{2} \rho L^3 Z'_{\dot{x}} - m \right) \dot{x} \\ & + \left( \frac{1}{2} \rho L^2 Z'_w \right) uw + Z_* \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

$$K = \left. \begin{aligned} & \left( \frac{1}{2} \rho L^5 K'_{\dot{x}} - I_x \right) \dot{x} + \left( \frac{1}{2} \rho L^4 K'_p \right) up + K_\phi + \frac{1}{2} \rho L^5 K'_{\dot{x}} \dot{x} \\ & + \left( \frac{1}{2} \rho L^4 K'_r + m z_G \right) ur + \left( \frac{1}{2} \rho L^4 K'_{\dot{x}} + m x_G \right) \dot{x} + \left( \frac{1}{2} \rho L^3 K'_v \right) uv \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

$$M = \left. \begin{aligned} & \left( \frac{1}{2} \rho L^5 M'_{\dot{x}} - I_y \right) \dot{x} + \left( \frac{1}{2} \rho L^4 M'_q - m x_G \right) uq + M_\theta \\ & + \left( \frac{1}{2} \rho L^4 M'_{\dot{x}} + m x_G \right) \dot{x} + \left( \frac{1}{2} \rho L^3 M'_w \right) uw + M_* \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

$$N = \left. \begin{aligned} & \left( \frac{1}{2} \rho L^5 N'_{\dot{x}} - I_z \right) \dot{x} + \left( \frac{1}{2} \rho L^4 N'_r - m x_G \right) ur + \left( \frac{1}{2} \rho L^4 N'_{\dot{x}} - m x_G \right) \dot{x} \\ & + \left( \frac{1}{2} \rho L^3 N'_v \right) uv + \left( \frac{1}{2} \rho L^4 N'_p + m x_G \right) up + \frac{1}{2} \rho L^5 N'_{\dot{x}} \dot{x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

### 7.5.3 数据分析方法

将每种运动形式的运动方程代入公式(24)~公式(28),各水动力系数将成为正弦项和余弦项的系数,与平面运动机构试验测得各力的正弦分量和余弦分量相对应。扣除惯性和惯性力矩,利用对应试验工况下测得的频率、振幅、周期的正弦分量和余弦分量,作整体线性回归,可求出表5所列的相应的水动力系数。