

团 体 标 准

T/CSNAME 207—2026

水下航行器静水升阻力和俯仰力矩测定试验方法

Test procedures for determining lift, drag and pitching moment of underwater vehicles in still water

2026 - 04 - 30 发布

2026 - 07 - 30 实施

中国造船工程学会 发 布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国造船工程学会船舶标准化专业委员会提出。

本文件由中国造船工程学会归口。

本文件起草单位：哈尔滨工业大学（威海）、山东船舶技术研究院、上海交通大学、武汉理工大学、崂山实验室、深之蓝海洋科技股份有限公司。

本文件主要起草人：何广华、鞠晓群、刘双、栾政晓、包艳、陈辰、孙亮、孙超、刘奇、王毅、刘德丽。



水下航行器静水升阻力和俯仰力矩测定试验方法

1 范围

本文件规定了水下航行器静水升阻力和俯仰力矩测定试验的试验准备、试验流程、试验结果处理、试验数据分析和试验报告等内容。

本文件适用于自主水下航行器、遥控水下航行器等水下航行器静水升阻力和俯仰力矩测定试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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。

GB/T 27418—2017 测量不确定度评定和表示

CB/Z 216—2008 潜艇模型阻力、自航试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

4 试验目的

试验旨在为水下航行器的阻力与推进性能评估、操纵性预报及设计优化提供准确、可靠的基准数据。

5 试验准备

5.1 试验场地

5.1.1 边界要求

模型的浸没深度与模型长度之比不小于0.28；模型安装中心（轴）线离池底距离与模型长度之比不小于1.0；水池宽度与模型最大宽度之比不小于12。

5.1.2 尺度与平直度要求

水池测试段长度应满足模型加速至稳态、稳态测量及减速所需的距离。拖车轨道应平直，其直线度误差应满足相关计量要求。

5.1.3 环境要求

水池应具备有效的消波设备，池水清洁，无风和流的影响。

试验环境温度应保持稳定，宜控制在20℃±5℃范围内。试验过程中应记录环境温度及水温，若温度波动超出允许范围，应在试验报告中注明并评估其对试验结果的影响。

5.2 试验设备

5.2.1 拖车

5.2.1.1 拖车应能按试验要求设定并保持稳定的拖曳速度，在稳态数据采集段，其速度控制精度应不低于设定速度的±0.5%。

5.2.1.2 拖车运行应平稳，无明显横向摆动或垂向跳动。

5.2.2 测力传感器

应使用经计量检定/校准合格的多分力测力传感器，其精度、量程应满足以下要求：

- a) 传感器最小量程不应大于试验最小预期载荷的 50%；
- b) 传感器最大量程不应小于试验最大预期载荷的 120%；
- c) 传感器精度等级应不低于 0.5 级（即非线性、迟滞、重复性误差均不超过满量程的 $\pm 0.5\%$ ）。

5.2.3 支撑系统（剑杆）

5.2.3.1 设计要求

剑杆应采用流线型设计，使其对流场的干扰最小，并应符合以下要求：

- a) 外形宜采用 NACA 00XX 系列对称翼型或水滴形，其展弦比应不小于 5:1；
- b) 头部应为半椭圆形，尾部应为尖楔形，收缩角不宜大于 15° ；
- c) 与模型和拖车的连接处应使用整流罩实现光滑过渡，不得有台阶或空腔；
- d) 外表面应光滑，粗糙度 R_a 值不应大于 $1.6\ \mu\text{m}$ ；

5.2.3.2 验证要求

剑杆设计阶段宜采用 CFD 方法进行流场仿真验证；试验阶段应对其干扰进行量化评估与修正，扣除方法可按照 CB/Z 268-2018 潜艇操纵性水动力模型试验方法。

5.2.3.3 配置要求

试验时剑杆的长度应使模型的相对浸深满足 5.1.1 的要求。对于常规模型，采用单剑杆连接；如模型尺寸或惯性较大，应采用双剑杆、双传感器的连接方式，前剑杆与模型的连接处一般位于模型重心。

5.2.4 温度传感器

应使用精度不低于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的温度传感器，水温测量应在试验正式开始前 1 小时内完成，测量位置应在测试段模型浸没处的横截面上，至少布置 3（水平方向）*3（深度方向）个测点，取算术平均值作为最终值。

5.2.5 试验模型

试验模型应通过加装激流丝、提高试验速度、选用大尺度模型等手段，促使模型试验在紊流状态下进行，并使模型雷诺数大于临界雷诺数。临界雷诺数可通过参考经验值、试验测量、计算流体动力学（CFD）模拟等手段来确定。激流丝的安装位置通常距艏柱 5% 模型总长处，在某些低流速（低雷诺数）试验中，第一道激流丝可能不足以有效触发转捩，需安装第二道激流丝，确保边界层能在此区域之前完全转变为紊流，第二道激流丝位置通常距艏柱 25% 模型总长处。试验模型的缩尺比应根据试验目的、水池尺寸及模型加工精度综合确定，缩尺比推荐范围为 1:10~1:50，对于特别大型或小型水下航行器，可适当超出该范围，但应在试验报告中说明其合理性。

5.3 模型安装

5.3.1 通用要求

5.3.1.1 预埋法兰盘

模型内预埋与传感器连接的法兰盘，其与模型主体连接处应有足够的强度。法兰盘的中心线应在模型中纵剖面内，法兰盘的尺寸和孔位根据适配的传感器而定。

5.3.1.2 部件连接

传感器、剑杆与模型应可靠连接。安装时应确保剑杆仅与传感器接触，模型处于无纵倾、无偏转状态，位于水池中心且与轨道中心线平行。

5.3.1.3 压载固定

用于压载和调倾的压块应可靠固定。

5.3.1.4 浮态调整

试验前应在水池中调整模型的重力与浮力，使其在水中为零浮力或重力略大于浮力状态。

5.3.2 姿态控制

5.3.2.1 单剑杆安装

通过剑杆绕自身轴转动改变模型的漂角，通过传感器下方不同的安装孔位改变模型的攻角，如图1所示。

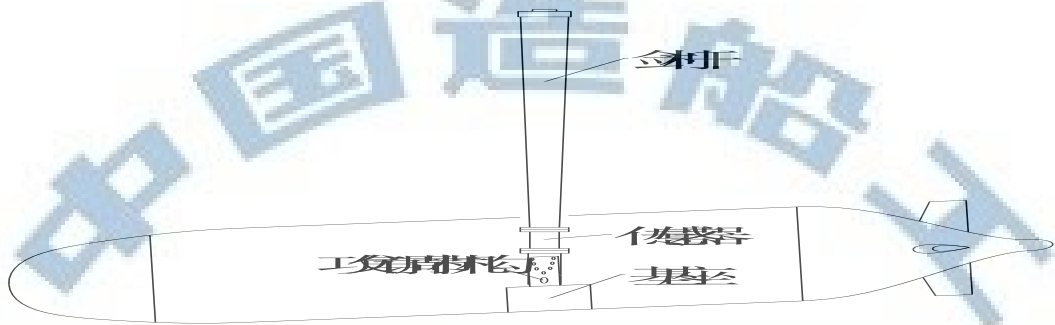


图1 单剑杆安装方式

5.3.2.2 双剑杆安装

模型的姿态可由剑杆运动控制。通过后剑杆上下移动使模型绕前剑杆转动设定模型的攻角，通过后剑杆绕前剑杆水平转动设定模型的漂角，如图2所示。

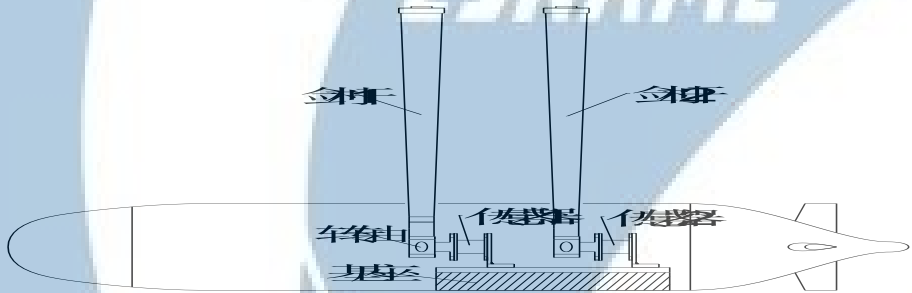


图2 双剑杆安装方式

5.3.2.3 5.3.2.3 上述漂角和攻角的调节方式可供参考，试验中具体的调节方式可以根据模型结构来确定，应确保角度准确和整体结构稳定。

5.3.3 单阻力测量

若仅需测量水下航行器模型的阻力，宜采用如图3所示的线牵引式阻力测量方法。该方法通过钢丝绳将模型阻力传递至拉线阻力仪进行测量，尤其适用于高速工况，可有效避免测力传感器因过载或冲击而损坏。

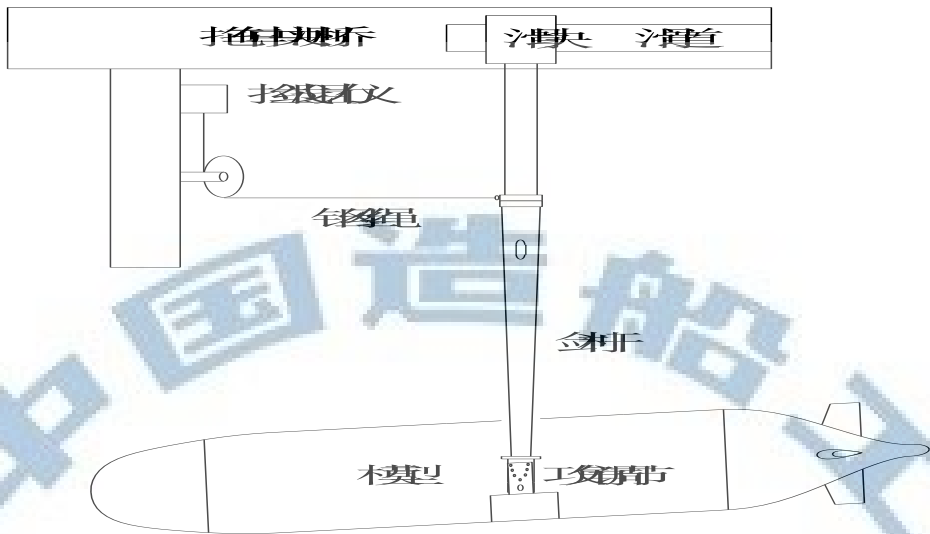


图3 线牵引式阻力测量方法

6 试验流程

6.1 试验流程见图 4。

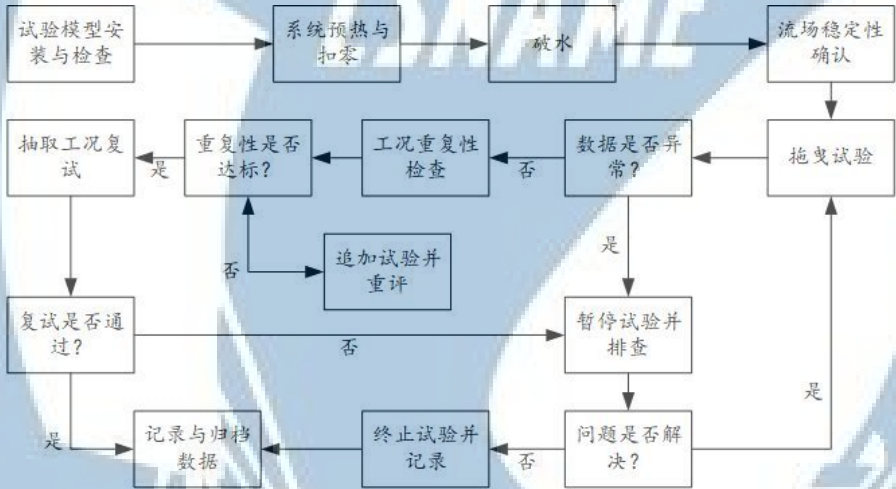


图4 试验流程图

- 6.2 将试验模型通过剑杆与测力传感器可靠连接，紧固所有连接部件，防止试验中出现松动。安装时应注意传感器受力情况，防止传感器过载损坏。
- 6.3 所有测试仪表（包括但不限于测力传感器、数据采集系统、拖车速度编码器）的预热时间不应少于 30 min，并应在无载荷状态下对整个测试系统进行“扣零”操作。零点漂移超过满量程的± 0.1% 时，应查明原因并重新校准。
- 6.4 测试前应将模型以低于最低试验速度的速度预拖一至二次（破水），检查测试设备的运转情况，消除影响因素。
- 6.5 前后两次非连续拖曳试验之间，应有足够的时间间隔以便消除前次余波及残流的影响。试验人员应视线平行于水面，从水池测试段侧方进行观察，直至由前次试验产生的所有规则性、方向性波纹完全消失，整个水面仅呈现均匀、细碎、无固定方向的毛细波动。
- 6.6 一般认为，稳定的拖曳速度即是模型相对静水的航速。模型处于稳定流态下，同时记录模型的升力、阻力和俯仰力矩。

6.7 试验速度的选择应覆盖亚临界、临界及超临界流态。傅汝德数 (Fr) 范围宜为 0.7 至 1.5, 并确保在高速段模型的剩余阻力系数变化趋于平稳。针对特定工作速度范围的航行器, 可根据其设计工况调整 Fr 范围, 但应包含临界 Fr 数 (Fr≈1.0) 附近的工况。

6.8 有条件的水池, 可采用水下摄像机记录模型水下姿态和流场的变化情况。

6.9 每个工况下进行三次试验, 检查结果的重复性, 如有异常 (偏差大于 5%) 应追加一次试验, 并剔除异常数据后计算平均值。试验结束前应在试验工况中抽取 2~4 个进行复试, 检查试验结果的重复性。

6.10 试验过程中, 应随时监控试验结果有无异常。发现异常后, 应立即暂停试验, 排查原因, 若原因不明或虽已知原因但无法现场采取纠正措施, 且异常情况有可能影响试验结果的准确性, 应停止试验并将异常情况记录备查。

6.11 数据记录应采用统一的表格, 除记录原始的升力、阻力、俯仰力矩数据外, 应在备注中明确注明航速、攻角、浸深、水温、有无附体等关键信息, 确保后期可准确溯源和录入“水下航行器试验原始数据”表。

7 试验结果处理

7.1 试验数据整理

7.1.1 以试验结果为依据给出“阻力—速度”、“升力—速度”、“俯仰力矩—速度”曲线, 试验数据点应清晰标出, 采用最小二乘法或三次样条函数进行数学光顺。光顺后的曲线应通过物理合理性检验 (如阻力曲线单调递增), 并标注光顺方法及不确定度范围。原始数据须作为附录备查。

7.1.2 原始测量数据应按照附表 A.1 要求进行记录。

7.1.3 模型在不同水温条件下的试验结果比较时, 应统一修正至 15℃。修正方法如下:

- 利用试验温度下测得的阻力数据计算模型的剩余阻力系数, 并假定该系数与 15℃ 下的剩余阻力系数相等;
- 15℃ 下的摩擦阻力系数应根据 15℃ 对应的运动粘性系数进行计算;
- 15℃ 下模型的总阻力系数由上述剩余阻力系数与 15℃ 下的摩擦阻力系数求和得到。

7.1.4 试验受池壁影响明显的, 应考虑阻塞修正, 可参考 ITTC 推荐的经验公式进行修正。

7.2 无因次量计算

为简化数据分析, 对各物理量进行无因次变换。

阻力系数见公式 (1), 升力系数见公式 (2), 俯仰力矩系数见公式 (3)。

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 S L} \quad (3)$$

式中:

D ——阻力, 单位为牛 (N);

L ——升力, 单位为牛 (N);

M ——俯仰力矩, 单位为牛米 (N·m);

V ——速度, 单位为米/秒 (m/s);

L ——参考长度, 通常取模型总长, 单位为米 (m);

ρ ——水密度, 单位为千克/立方米 (kg/m³);

S ——参考面积, 通常取模型的湿表面积, 单位为平方米 (m²)。

在报告系数时, 应明确说明所使用的参考面积和参考长度。

7.3 不确定度分析

试验结束后, 应提供试验结果的不确定度分析, 不确定度分析参照 GB/T 27418—2017 的规定进行。

7.4 实艇阻力换算

试验报告中如需提供实艇阻力换算，可参照CB/Z 216—2008。

8 试验数据分析

8.1 数据质量评估

8.1.1 重复性判定

试验结果的重复性应满足6.9（即试验流程中重复性检查）的要求。若任一工况下有效试验数据与平均值的偏差超过 $\pm 5\%$ ，则应视为该组数据重复性不合格。对于重复性不合格的工况，应分析原因，并追加试验或重新进行该组试验。

8.1.2 趋势合理性分析

经光滑处理后的水动力系数曲线应具有明确的物理意义和合理的变化趋势，判定条件如下：

- a) 阻力—速度曲线：在试验速度范围内，阻力系数曲线应呈现连续、单调的变化趋势，无明显异常跳变点；
- b) “升力—速度”曲线与“俯仰力矩—速度”曲线：其变化趋势应符合该类型水下航行器的基本流体动力学规律。例如，在固定攻角下，升力及俯仰力矩随速度的变化应平滑、连续。

8.2 不确定度评估

试验报告宜包含对主要测量结果（如阻力系数、升力系数）的不确定度评估，可参照GB/T 27418—2017。不确定度来源应包括但不限于：

- a) 测量系统不确定度（如传感器、数据采集系统的精度）；
- b) 重复性试验引入的随机不确定度（A类评定）；
- c) 安装偏差（如攻角、漂角设置误差）引入的系统不确定度（B类评定）。

9 试验报告

试验报告内容参考附录B。

附录 A
(资料性)
水下航行器试验原始数据

水下航行器试验原始数据应按表A.1要求记录。

表A.1 试验原始数据

模型名称		试验类型	
委托单位		试验单位	
模型编号		试验编号	
模型长度		试验日期	
模型缩尺比		试验水域水温	
模型材质		试验水域密度	
攻角		漂角	
附体情况		浸没深度	
试验仪器		传感器量程与精度	
试验数据			
$V\ (m/s)$	$D\ (N)$	$L\ (N)$	$M\ (N\cdot m)$

附录 B
(资料性)
试验报告模版

试验报告应客观、准确、完整地记录全部试验过程与结果，其内容应包括以下方面：

a)报告概述

1.报告名称、编号、委托单位、试验单位、试验日期、地点。

2.试验目的与依据。

b)试验对象与设施

1.试验模型：名称、编号、几何外形描述（可附图纸或照片）、缩尺比、主要尺度、附体情况、表面处理状态。

2.试验设施：拖曳水池名称及主要尺寸（长×宽×水深）。

3.测试系统：主要仪器设备（如测力传感器、数据采集系统、拖车速度控制系统）的名称、型号、量程、精度等。

c)试验条件

1.环境参数：试验水域水深、水温、密度。

2.安装参数：模型浸没深度、攻角范围、剑杆配置（如长度、直径、外形）。

3.工况矩阵：详细的试验速度和攻角组合列表。

d)试验方法

1.简述试验流程，包括模型安装、系统校准、预拖曳、数据采集过程。

2.说明为减少剑杆干扰、阻塞效应等所采用的数据修正方法。

3.说明试验数据的重复性验证方案及结果。

e)试验结果与数据处理

1.以表格形式提供各工况下经修正后的原始数据或最终结果，至少包括：航速、升力系数、阻力系数、俯仰力矩系数。

2.提供经光顺处理后的“阻力—速度”、“升力—速度”、“俯仰力矩—速度”关系曲线图。图中应清晰标示试验数据点。

3.说明所采用的数据光顺方法。

4.给出试验结果的不确定度评估。

f)结论

对试验结果的总体性描述，确认试验是否达到预定目标。

g)附录

1.试验原始数据记录（可作为备查文件）。

2.传感器校准证书复印件。

3.模型主要尺度图。

4.试验现场照片或示意图。

5.异常情况记录（如有）。

图B.1 试验报告模版