

团 体 标 准

T/CSNAME 209—2026

船舶轮缘推进装置敞水性能试验方法

Testing methods of open water performance of ship rim-driven thruster

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：广州海工船舶设备有限公司、武汉理工大学、湖北东湖实验室。

本文件主要起草人：欧阳武、刘报、邱湘瑶、陈海龙、刘湘明、靳栓宝、孙方旭。



船舶轮缘推进装置敞水性能试验方法

1 范围

本文件规定了船用轮缘推进装置敞水性能试验方法的试验目的、试验要求、试验过程、试验结果计算、试验结果评定和试验报告。

本文件适用于有毂、无毂式轮缘推进装置水力部件敞水试验以及轮缘推进装置整机推力测试。

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。

CB/Z 816-2019 螺旋桨模型敞水试验方法

GB/T 36580-2018 船舶螺旋桨空泡脉动压力模型试验方法

3 术语和定义

CB/Z 816-2019界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

船舶轮缘推进装置 ship rim-driven thruster

将驱动电机与螺旋桨集成一体化，通过电机转子带动整个环状轮缘及桨叶旋转，从而产生推力的船舶推进装置。

3.2

敞水性能 open water performance

指轮缘推进装置在均匀、无界、不受船体影响的流场中工作时的水动力性能。

3.3

假毂 dummy propeller boss

用来代替推进器模型，以模拟其摩擦阻力和扭矩的回转体，其重量与推进器模型大致相等的桨毂。

3.4

净推力/扭矩 net thrust/torque

指推进器产生的总推力/扭矩减去假毂旋转时的阻力后得到的有效推力/扭矩。

4 试验目的

通过试验提供轮缘推进装置推进性能预报必要的敞水性征曲线，验证轮缘推进装置设计计算的敞水水动力特性，得到轮缘推进装置不同几何参数对其水动力性能的影响规律，建立轮缘推进装置水力部件设计图谱，为轮缘推进装置优化设计提供试验依据。

5 试验要求

5.1 试验环境

整个试验过程中试验水池水体的温度变化应控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，且温度分布均匀；应使用清洁的自来水或淡水，水中不应含有明显的气泡、杂质、藻类或油污等。水池流量精度应控制在1%试验段横截面积以内。

5.2 试验模型

5.2.1 推进器直径在试验设备试验直径允许的范围内进行 1:1 的桨模试验。当无满足直径范围的情况

下,可采用缩比的推进器进行试验,推进器的缩尺比范围控制在1:0.5至1:5之间。

5.2.2 轮缘推进器敞水试验的雷诺数应大于国际船模试验水池会议建议的敞水试验的雷诺数($Re_{cr}=5.0 \times 10^5$),雷诺数 Re 按公式(1)计算。

$$Re = C_{0.75} [V_A^2 + (0.75\pi \cdot n \cdot D)^2]^{1/2} / \nu \dots \dots \dots (1)$$

式中:

$C_{0.75}$ —— 0.75半径处螺旋桨叶切面的弦长,单位为米(m);

D —— 推进器螺旋桨的直径,单位为米(m);

V_A —— 推进器进速,单位为米每秒(m/s);

n —— 推进器螺旋桨的转速,单位为转每秒(r/s);

ν —— 水的运动粘度;单位为平方米每秒(m^2/s)。

5.2.3 用于系列实验的轮缘推进器桨叶直径 $D \geq 0.2$ m;电机功率 $P \geq 1$ kW。

5.2.4 轮缘推进器样机系统完整,导管、叶片、轮缘无损伤,表面光洁、连续,过渡均匀光滑,导管、叶片、轮缘表面粗糙度 R_a 为 $1.6 \mu m$,其余部位表面粗糙度 R_a 为 $3.2 \mu m$ 。

5.2.5 测试对象为无毂式轮缘推进器模型、有毂式轮缘推进器模型和轮缘推进器整机。

5.2.6 测量螺旋桨和导管直径时,应均匀选取6个以上的点测量直径,测量转角以叶面参考系为 0° ,宜每隔 5° 一个测点,直至边缘,模型应满足以下要求:

- 螺旋桨直径偏差为 ± 0.1 mm;
- 弦长偏差为 ± 0.1 mm,或 $\pm 0.5\%$ 的偏差,可取其大者;
- 螺距偏差为 $\pm 0.5\%$;
- 桨叶厚度偏差 $\pm 3\%$;
- 导管直径偏差为 ± 0.15 mm;
- 导管长度偏差为 ± 0.2 mm。

5.2.7 导管顶部应安装流线型接口,并与连接杆相连吊装于试验台架上,二者之间应光滑过渡。

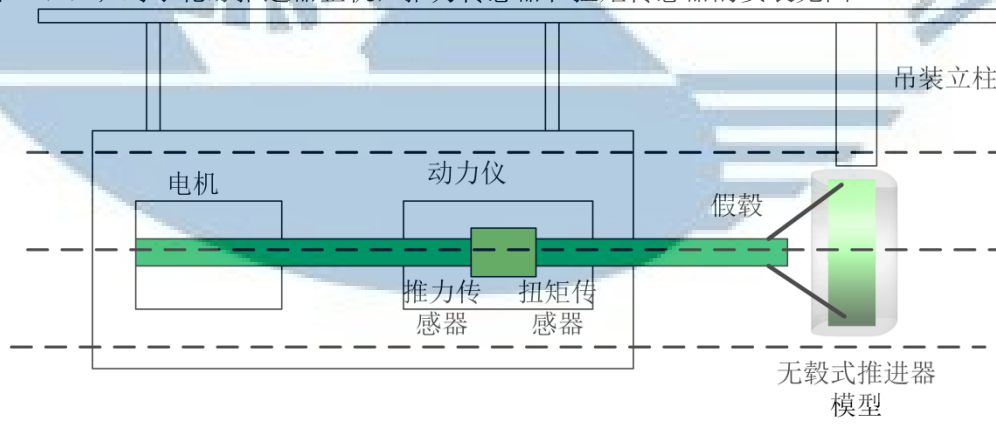
5.2.8 轮缘推进器的轴中心线应沉没在水表面下大于1.5倍导管外径处,外伸于流线形敞水箱前敞水轴的长度应使推进器位于箱前的距离大于导管外径的4倍。

5.2.9 应加工一个没有推进器但形状、尺寸与安装部件相同的装置,采用铜或不锈钢材料,为修正安装部件摩擦损失和修正推进器总推力。

5.3 试验设备及仪器

5.3.1 测试仪器包括驱动电机、敞水动力仪、测力天平(可测推力和扭矩)等。驱动电机的转速控制精度在 $\pm 1\%$ 以内,敞水动力仪和测力天平的量程根据测试对象的最大推力和转矩确定,宜在最大量程的 $1/2$ 至 $2/3$ 之间,仪器测量精度在量程的 0.1% 以内。

5.3.2 对于有毂、无毂式轮缘推进器水力部件测试。对于有毂式和无毂式轮缘推进器,分别采用两种不同形式的假毂。对于无毂式和有毂式轮缘推进器水力部件,推力传感器和扭矩传感器的安装分别见图1(a)和图1(b);对于轮缘推进器整机,推力传感器和扭矩传感器的安装见图2。



循环水槽

a) 无毂式

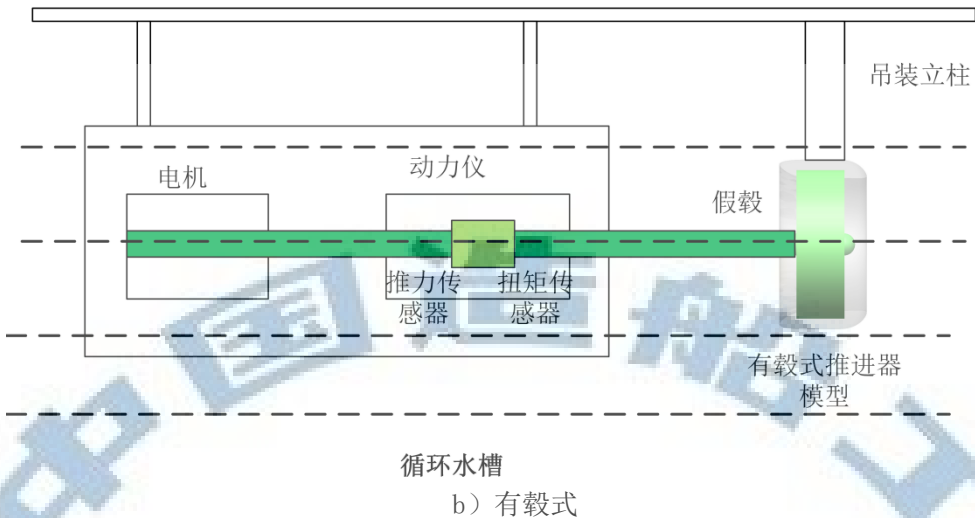


图1 轮缘推进器水力部件测试方案示意图

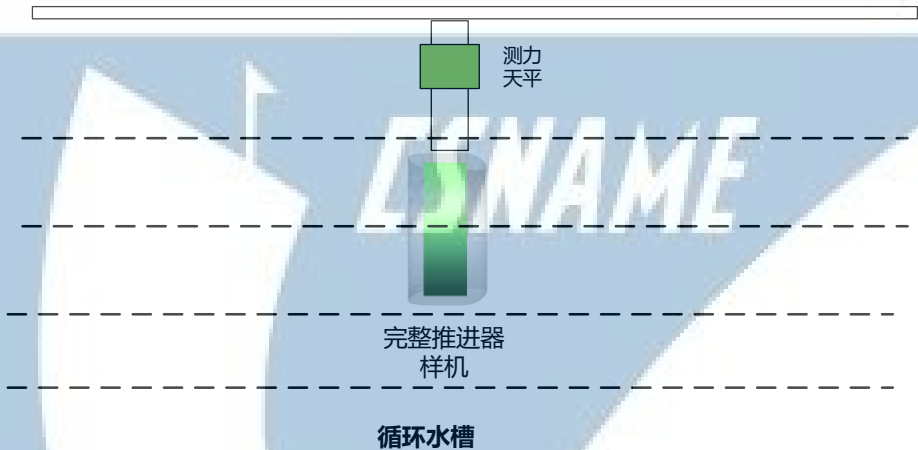


图2 轮缘推进器整机测试方案示意图

- 5.3.3 动力仪应进行静校验和动校验。电测动力仪的测量元件应进行标定，求出输出量与力及扭矩的关系量。变频器应能如实显示真实的电流和电压值。试验前，数据采集设备应进行调试。
- 5.3.4 对于轮缘推进器整机测试。轮缘推进器测力天平置于导管连接杆与试验工装之间，通过该仪器测量出推进器整机运转时发出的推力和吸收的扭矩，通过电机变频器获得电机的转速，即螺旋桨的转速。水温计应放在推进器模型的轴线浸深处。
- 5.3.5 测力天平应确定零点以及输出量与测试量之间的线性度。
- 5.3.6 试验用仪器仪表应符合 GB/T 36580—2018 中 4.2 的规定，处于有效期内满足测试的量程和精度要求。电源应满足试验要求。

6 试验过程

6.1 试验注意事项

- 6.1.1 检查轮缘推进器和测力天平的安装是否正确、稳固，螺旋桨的旋向是否正确。
- 6.1.2 每次试验要待水面平静方可进行。
- 6.1.3 应在水流速度和推进器转速稳定的情况下记录读数。
- 6.1.4 试验区应离整流段足够远的距离，保证流场的不均匀度在 5% 以内。
- 6.1.5 试验结束后拆除推进器后再做一次测力天平零点校核，一切正常即可进行数据处理。
- 6.1.6 每次试验要低速启动推进器的转速，观察推进器的运行状态是否稳定，电机是否过热。对每一

个测点，在同一瞬间，测量下列数据：

- 轮缘推进器模型的转速 n ，单位为转每秒（r/s）；
- 推进器进速 V_A ，单位为米每秒（m/s）
- 推力读数 T ，单位为牛（N）；
- 扭矩读数 Q ，单位为牛米（N·m）；
- 变频器电压 U /电流 I /频率 f ，单位为伏/安/赫兹（V/A/Hz）。

6.2 轮缘推进器模型试验

6.2.1 整机测试

6.2.1.1 用等转速方法进行试验，根据被试验推进器模型的临界雷诺数、仪器量程及拖车速度选取适当的转速。总体试验流程图如图3和图4所示。

6.2.1.2 动力仪置于流线形敞水箱体内，通过该仪器测量出推进器运转时发出的推力，吸收的扭矩和螺旋桨的转速。动力仪包含驱动电机、推力传感器和扭矩传感器，在测试轮缘推进器水力部件性能时，由驱动电机带动螺旋桨转动，所产生的推力和消耗的扭矩可由推力传感器和扭矩传感器获取；在整机试验时，由测力天平获取推进器产生的总推力。水温计应放在推进器模型的轴线浸深处。

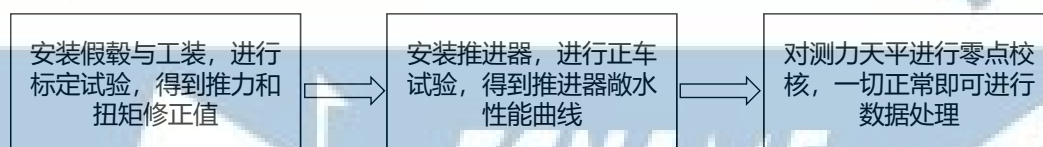


图3 轮缘推进器水力部件测试流程

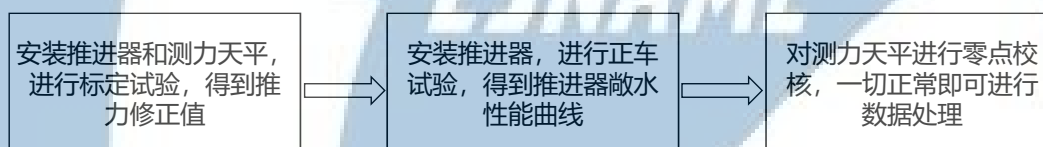


图4 轮缘推进器整机测试流程

6.2.2 标定试验

对于有毂、无毂式轮缘推进器水力部件测试。在动力仪敞水轴端，装上被试推进器的假毂、推进器吊装部分，敞水轴应沉浸在试验所需的深度，让动力仪按所选定的试验转速运转，将此时输出调整为零，即消除了轴系等摩擦阻力的损失。然后调节来流速度，测出不同进速下的推力和扭矩修正值并做出曲线。

6.2.3 正车试验

取下假毂，安装轮缘推进器，保持转速不变，调节水流速度，作为推进器敞水性能第一象限即正车状态的试验，在进速 V_A 等于 0 至推力 T 等于 0 的范围进行试验，在规定的速度范围内测量点取 15 个左右，在推进器设计点附近可以加密。

6.3 轮缘推进器整机试验

6.3.1 标定试验

对于轮缘推进器整机测试。将测力天平安装在导管连接杆和试验工装中间，浸没深度应与试验所需深度相同，将此时测力天平的输出调整为零，即消除了连接杆和试验工装等摩擦阻力的损失，然后调节来流速度，测出不同进速下的推力修正值并做出曲线。

6.3.2 正车试验

安装轮缘推进器模型，保持转速不变，调节水流速度，作为推进器敞水性能第一象限即正车状态的试验，一般在进速 V_A 等于 0 至推力 T 小于 0 的范围进行试验，在规定的速度范围内测量点取 15 个左右，在推进器设计点附近可以加密。

7 试验结果计算

7.1 试验结果可按公式（4）～（7）表达：

$$J = V_A / (n \cdot D) \cdots \cdots \cdots (2)$$
$$K_T = T / (\rho \cdot n^2 \cdot D^4) \cdots \cdots \cdots (3)$$
$$K_Q = Q / (\rho \cdot n^2 \cdot D^5) \cdots \cdots \cdots (4)$$
$$\eta = (J / 2\pi) / (K_T / K_Q) \cdots \cdots \cdots (5)$$

式中：
 J —— 轮缘推进器进速系数；
 K_T —— 轮缘推进器推力系数；
 K_Q —— 轮缘推进器扭矩系数；
 η —— 轮缘推进器敞水效率；
 T —— 轮缘推进器发出的净推力，单位为牛（N）；
 Q —— 轮缘推进器发出的净推力，单位为牛米（N·m）；
 V_A —— 推进器进速，单位为米每秒（m/s）；
 n —— 推进器螺旋桨的转速，单位为转每秒（r/s）；
 D —— 推进器螺旋桨的直径，单位为米（m）；
 ρ —— 池水密度，单位为千克每立方米（kg/m³）。

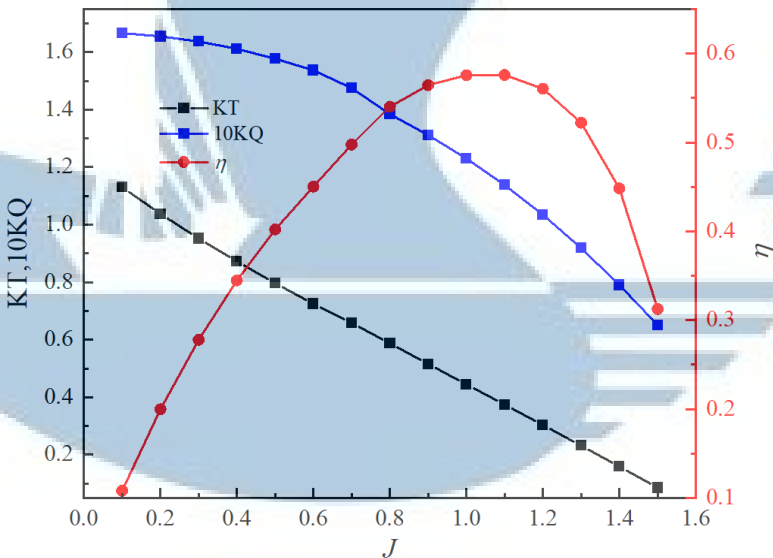
7.2 按照公式（3）修正推进器推力，确定轮缘推进器的净推力。

$$T = T_T + \Delta T \cdots \cdots \cdots (6)$$

式中：
 T —— 轮缘推进器发出的净推力，单位为牛（N）；
 T_T —— 测力天平测得的总推力；单位为牛（N）；
 ΔT —— 吊装工具推力的修正值，单位为牛（N）； ΔT 的值随推进器进速 V_A 而变化。

7.3 原始数据按表 A1 进行计算，对测量点计算 K_T 和 K_Q ，用光滑后的推力系数 K_T 和扭矩系数 K_Q 计算推进器的敞水效率 η_0 。

7.4 轮缘推进器的敞水性征曲线应按图 5 的形式表达。



注：KT为轮缘推进器的推力系数；KQ为轮缘推进器的扭矩系数； η 为轮缘推进器的敞水效率；J为轮缘推进器的进速系数。

图5 轮缘推进器敞水性征曲线

8 试验结果评定

根据图5的曲线，检查测试点的连线是否光滑，趋势是否合理。并在试验的进速范围内容，重复试验2~3点，计算KT, KQ值，若重复性偏差在±1%以内，则本次试验有效。在试验报告中，应给出相应的误差分析，包括：

- a) 进速系数误差 U_j ，如公式（4）所示：

$$U_j = (\sigma_1^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_7^2)^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

- b) 推力系数误差 U_T ，如公式（5）所示：

$$U_T = (\sigma_2^2 + 4\sigma_4^2 + 16\sigma_5^2 + \sigma_6^2 + \sigma_7^2)^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

- c) 转矩系数误差 U_Q ，如公式（6）所示：

$$U_Q = (\sigma_3^2 + 4\sigma_4^2 + 25\sigma_5^2 + \sigma_6^2 + \sigma_7^2)^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

- d) 敞水效率误差 U_η ，如公式（7）所示

$$U_\eta = (U_T^2 + U_Q^2 + U_j^2)^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

σ_1 ——水流速度测量误差；

σ_2 ——测力天平推力测量误差；

σ_3 ——测力天平转矩测量误差；

σ_4 ——转速测量误差；

σ_5 ——推进器尺寸直径误差；

σ_6 ——池水密度测量误差；

σ_7 ——环境条件误差；

U_j ——进速系数误差；

U_T ——推力系数误差；

U_Q ——转矩系数误差；

U_η ——敞水效率误差；

9 试验报告

试验报告参考附录B，的主要内容包括：

- 摘要；
- 引言；
- 试验装置与方法；
- 试验结果；
- 试验结果；
- 结论；
- 参考文献与附录。

附 录 A
(资料性)
敞水试验记录表

表A.1 敞水试验记录表

敞水试验记录表格式见图A.1。

推进器编号			毂径比		使用仪器			
试验编号			桨叶数 Z		水温 ($^{\circ}\text{C}$)			
缩尺比			旋向		密度 (kg/m^3)			
桨模直径 D			导管内径		日期			
螺距比 P/D			导管外径		计算			
盘面比 A_e/A_0			导管长度		校对			
序号	进速 (m/s)	转速 (r/min)	推力 (N)	扭矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$)	电流 (A)	电压 (V)	功率 (kW)	效率
1								
2								
3								
4								
...								

图A.1 敞水试验记录表

附录 B
(资料性)
试验报告模板

试验报告模板见图B.1。

委托单位：承试单位（水池）：
报告编号：
试验日期：
撰写日期：
报告版本号：
摘要：简要概述试验目的、主要方法、关键发现（如推力/扭矩特性、效率、空化初生特征）和核心结论。
- 关键词：轮缘推进器、敞水试验、水动力性能、推力系数、扭矩系数、效率等。

1. 引言

1.1 背景与目的：
1.2 依据标准：

2. 试验装置与方法

2.1 试验对象：详细描述轮缘推进器模型的几何参数（直径、桨叶数、盘面比、轮缘间隙等）及加工材料。附上清晰的照片或图纸。
2.2 试验设施：介绍试验水池（如拖曳水池或空化水筒）的主要尺寸、水流速度范围、测量设备等。注明水的温度、密度等环境参数。
2.3 测试系统：列出主要测量仪器（推力/扭矩仪、转速传感器、压力传感器、流速仪等）的型号、精度和标定信息。
2.4 试验方法：说明试验工况（进速系数J的变化范围）、数据采集流程、重复性保证措施等。

3. 试验结果

3.1 数据表格：以表格形式列出原始数据或整理后的数据（如进速V、转速n、推力T、扭矩Q等）。
3.2 特性曲线图：绘制推力系数（KT）、扭矩系数（KQ）和敞水效率（ η ）随进速系数（J）变化的曲线图。

4. 分析与讨论

4.1 结果分析：对特性曲线进行解读，分析推进器的性能特点（如效率峰值位置，与非轮缘推进器的差异等）。
4.2 不确定性分析：评估试验误差的主要来源（如测量仪器误差、水流均匀性、模型加工误差等），并进行简要的不确定度评估。
4.3 与设计预期/参考数据对比：将试验结果与理论计算、CFD模拟结果或类似产品的公开数据进行对比，分析差异原因。

5. 结论

5.1 总结：简明扼要地总结试验的主要发现和结论。
5.2 建议：根据试验结果，提出对推进器设计改进的建议，或为实船应用提供操作建议。

6. 参考文献与附录

6.1 参考文献：列出所有引用的标准、文献和资料。
6.2 附录：可放入详细的原始数据记录、仪器证书、模型图纸等补充材料。

图 B.1 试验报告模板

