

# 团 体 标 准

T/CSNAME 139—2025

## 可变螺距螺旋桨液压油控制装置振动及安装刚度试验规程

Test regulations for vibration and mounting stiffness of hydraulic oil control devices  
for variable pitch propellers

2025 – 07 – 04 发布

2025 – 10 – 02 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：招商局海洋装备研究院有限公司、哈尔滨工程大学、招商局金陵船舶（南京）有限公司、嘉庚创新实验室、集美大学。

本文件主要起草人：刘建成、李磊、郭宜斌、吴灵东、李玩幽、张亮、倪世威、江锋、杨星驰、姜晨醒、张恒诚、赵国锋、王曦、徐含章。



# 可变螺距螺旋桨液压油控制装置振动及安装刚度试验规程

## 1 范围

本文件规定了可变螺距螺旋桨液压油控制装置（以下简称“控制装置”）振动及安装刚度试验的条件、步骤、数据处理等要求。

本文件适用于船舶轴系可变螺距螺旋桨液压油控制装置振动试验分析与安装刚度识别。

## 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 2298-2010 机械振动、冲击与状态监测 词汇

GB/T 11349.3-2006 振动与冲击 机械导纳的试验确定 第3部分：冲击激励法

CB/T 3853-2011 船用柴油机轴系振动测量方法

CB/T 4530-2023 船舶柴油机轴系纵振计算 第5部分：纵振当量系统的转化

## 3 术语和定义

GB/T 2298界定的术语和定义适用于本文件。

## 4 控制装置振动试验

### 4.1 试验目的

测试可变螺距螺旋桨液压油控制装置及其对应轴系扭振、纵振、横振、加速度等振动数据，评价其振动是否满足标准要求。

### 4.2 试验准备

4.2.1 每次试验时，需要相关设备的操作人员、技术人员在场，检查水、电系统的连接状态，确保不存在零火反接、无地线等情况，现场电压符合测试设备的使用要求，系统能够安全工作。

4.2.2 试验仪器连接之前，确认外壳之间是否存在电压。若存在电压，则进一步判断电压类型；若为感应电压则可以进行测试；若为真实电压则需进一步检查系统接地情况。

4.2.3 振动测点表面要求保持光洁，以保证传感器安装与测试精度。

4.2.4 试验环境条件：试验仪器应在允许的工作环境下工作，具体环境条件以各仪器的使用说明书为准。

4.2.5 试验前制定试验大纲，并经过评审。

### 4.3 试验设备

4.3.1 激励装置，一般为系统自身激励源，或者力锤、激振器等，用于激励的产生。

4.3.2 传感器，包括加速度传感器、电涡流传感器、磁电传感器，用于振动加速度、纵向位移、横向位移、轴系扭振的测量，其中加速度传感器频响范围 10–5kHz，最大量程不低于 50g，电涡流传感器量程范围 2 mm –5 mm，磁电式传感器频响范围 0–10 kHz，测量范围 0–15000 r/min（60 齿）。

4.3.3 数据采集设备，用于测试信号的采集，其中采集设备采样频率不低于 25.6 kHz，分辨率不低于 0.5 Hz。

4.3.4 数据处理设备，用于测试信号的处理。

### 4.4 试验程序

4.4.1 在发动机输出端及关注的轴段部分进行测点布置，并基于轴系及轴系条件选用磁电式传感器或光电式传感器。测点布置应满足以下要求：

- 测点应布置在振幅较大或信息丰富处，一般可布置在发动机自由端及输出端；
- 对于包含液力耦合器的轴系，液力耦合器将整个轴系分为独立的两部分，测点应布置在液力耦合器之前和之后；
- 对于多分支系统，轴系扭振测点的选择除了要注意以上单支系统的测点选择外，还要在分支点前后布置测点，如：双机单桨的轴系，应在齿轮箱前后布置测点；
- 纵振测点一般选用电涡流传感器，对于 OD Box 等非回转部件，选用加速度传感器进行信号采集；
- 若已有理论计算，应根据计算结果，在关键点处布置测点。
- 测点布置示意图见图 1。

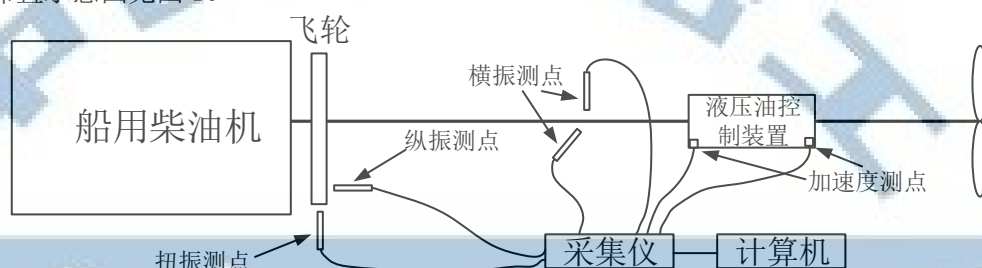


图1 测点布置示意图

注：扭振测点位于飞轮位置，垂直于轴系，探头指向飞轮中心；纵振测点位于飞轮位置，平行于轴系，探头指向飞轮平面；横振测点，两探头呈 90 度排布，测点位置位于液压油控制装置左侧光滑轴段；加速度测点位于液压油控制装置底部，四角布置或对角布置。

4.4.2 空载起机，由 0 rpm 开始进行转速跟踪，至 1.1 倍额定转速停止追踪，升速持续时间需有最低限制，一般不低于 20s，完成轴系纵振及扭振固有频率测试，对相关瞬态数据进行采集；

4.4.3 令主机分别在 50%、75%、100% 等典型负荷工况下进行强迫振动测试，对轴系纵振及扭振时域数据进行采集；

4.4.4 与升速工况测试结果进行对照，将主机负荷降至空载，升速至 1.1 倍额定转速，缓慢降速，降速持续时间需有最低限制，一般不低于 20s，完成轴系纵振及扭振固有频率测试，对相关瞬态数据进行采集；

4.4.5 为验证轴系纵振固有频率结果，采用锤击法进行轴系固有特性试验，与增减速实验结果进行对比，确认纵振共振区间。

#### 4.5 试验数据分析与记录

4.5.1 对于转速分档的稳态轴系振动测试分析，使用频谱分析，确定各测点在各档转速时的主要谐次的振幅；

4.5.2 对于升/降转速的非稳态轴系振动测试分析，使用转速跟踪的技术和方法，确定测点在各档转速时主要谐次的振幅；

4.5.3 基于模拟分析仪器进行信号分析时，分析仪器系统应满足测试需求，并保障足够的分析精度；

4.5.4 所分析的数据和参数，应在测量报告中有明确的表征和说明；

4.5.5 将测量、分析的主要数据，整理后填入扭转振动测试记录表和纵振和横振测试记录表，如附录表 A.1 和附录表 A.2 所示；

4.5.6 绘制被测点各主要谐次的振幅与应力变化曲线，确定被测位置的共振区域与共振转速区间；

4.5.7 结合理论计算值，如实测固有频率与理论计算值误差小于 5%，可根据实际测点振幅按主振型（自由振动振型）推算轴系各部件承受最大扭转应力或轴系纵/横向振动位移；

4.5.8 如实测固有频率与理论计算值差异较大，应根据测试值重新评定理论计算结果。

#### 4.6 试验结果评定

数据检验：在设备安装调试后，应用设备激振器激振进行测试，最终检验各参数测试值符合 4.5 章

节的规定要求。

#### 4.7 试验文件要求

4.7.1 所有手写记录必须使用永久性墨水（通常是黑色或蓝色），书写工整清晰。打印或电子记录需清晰可辨；

4.7.2 记录必须真实反映试验实际情况和观察结果。禁止伪造、篡改或选择性记录数据；

4.7.3 数据应在观察或操作发生时立即或尽可能接近发生时记录；

4.7.4 所有关键操作（数据录入、计算、复核、报告批准）必须由执行人亲笔签名或使用合规的电子签名，并注明日期。

#### 4.8 试验报告

试验报告应包括下列各点：

- a) 标题；
- b) 试验地点；
- c) 测试报告序号、日期、页码；
- d) 测试件之描述、状态及明确识别；
- e) 测试结果；
- f) 测试人员及报告签署人员姓名、职务与签名等识别；
- g) 其它声明；辅助数据如图表、照片等。

### 5 控制装置安装刚度试验

#### 5.1 试验目的

通过安装位置传函测试，得到控制装置安装位置刚度特性。

#### 5.2 试验条件

5.2.1 采集设备连接电压需为 220V 交流电压，且电源设施具有地线；

5.2.2 试验仪器连接之前，确认外壳之间是否存在电压，若存在电压，则进一步判断电压类型。若为感应电压则开始进行测试；若为真实电压则需进一步检查供电条件；

5.2.3 振动测点表面要求表面光洁，以保证传感器安装与测试精度；

5.2.4 试验环境条件：试验仪器应在允许的工作环境中工作，具体环境条件以各仪器的使用说明书为准；

5.2.5 试验前制定试验大纲，并经过评审。

#### 5.3 试验设备

5.3.1 测量系统，应符合以下要求：

- a) 各测量通道的性能应满足试验技术文件要求；
- b) 各测量通道应有较低的背景噪声，保证测量通道的信噪比满足结构响应信号的动态范围要求；
- c) 测量导线的质量和走向应减小对结构阻抗特性的影响。

5.3.2 传感器，应符合以下要求：

- a) 传感器灵敏度应满足试验技术文件的要求，推荐加速度传感器灵敏度范围在  $10\text{mV}/(\text{m/s}^2) \pm 0.5\text{mV}/(\text{m/s}^2)$ ；
- b) 传感器频响特性应符合试验技术文件要求，推荐加速度传感器低频特性至 1Hz；
- c) 传感器的质量对结构模态特性（特别是轻型结构）的影响应尽量小，必要时消除附加质量的影响；
- d) 传感器的安装方式应满足试验频率的范围要求；

激励系统和测量通道上的各仪器单元应由计量部门进行测定，并在有效期内使用。其它未注设备要求见本规程 4.3。

#### 5.4 试验步骤



5.4.1 为得到不同位置的频响函数，在被测表面选择适当测点进行布置，根据频响函数基本原理，选用加速度传感器和冲击型力传感器进行试验与信号采集。测点布置与试验过程一般要注意以下几点：

- a) 频响函数测量一般有力锤激励法。采用力锤激励法，除了必要的传感器之外，只需要使用一个装有力传感器的标定过的力锤进行人工敲击即可。在测量时，只需要在激励点敲击施加一个载荷力，在响应点采集该位置的振动响应信号即可，比如将三向加速度传感器放置在 OD Box 上。通常力锤的锤头选择金属、塑料或者橡胶锤头，测量频响函数时对同一激励位置敲击 3-5 次，取平均值为结果。
- b) 试验过程中采用单点激励多点响应形式，利用冲击力锤施加脉冲激励，数据采集系统结合力传感器信号和激振点处的三轴加速度传感器信号进行曲线拟合，进而识别系统的模态振动参数，所采用的试验测试系统示意图见图 2。

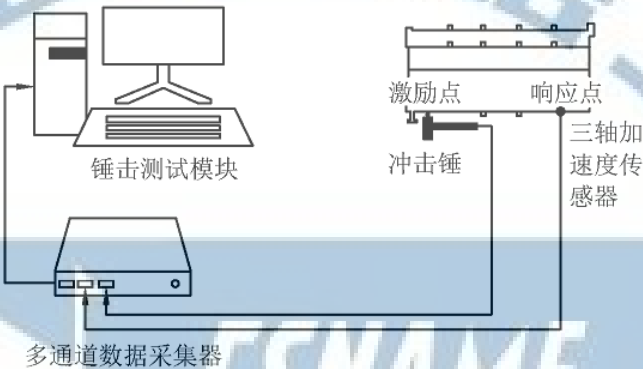


图2 试验测试系统示意图

- c) 激励点一般设置于被测点附近轴段的激励输入位置。响应点依据仿真计算的结果进行设置，一般对轴系推力轴承处，以及 OD Box 与船体连接处进行重点关注，这几处刚度参数对轴系整体动力学响应以及关键设备振动特性影响相对较大。OD Box 局部传递函数测点布置示意图见图 3。

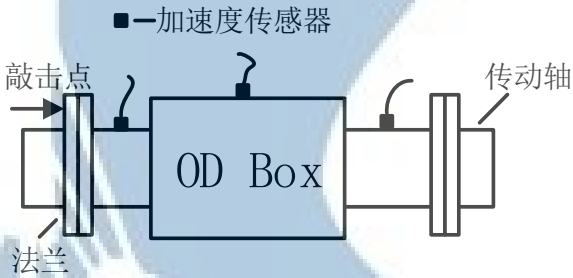


图3 OD Box 局部传递函数测试测点布置示意图

注：其中，敲击点为激励点，加速度传感器安装位置为被测点与响应点；频响函数计算由响应点与激励点计算得到。

5.4.2 试验流程

为得到OD Box局部传递函数与安装动刚度，需开展基于锤击法的传递函数测试，具体试验流程如下：

- a) 定义测试用的整体坐标系，于各个测点布置三向振动加速度传感器。测点坐标系应与力锤敲击记录的坐标系方向一致。在进行传感器固定时要确保固定位置具有足够的强度，传感器固定位置要确保有充足的空间，避免与周围构件接触，以此来保证测量数据的准确度；
- b) 保持测量工况数据时的传感器布置位置不变，用力锤在同一位置同一方向敲击 3-5 次，利用频响函数估计法获得每个激励位置到各传感器位置响应的系统频响函数。为了保证试验数据的准确度，还应关注每个频响函数对应的相干曲线，在测试时相干函数应达到 0.9 以上再进行下一组测试；

- c) 受制于设备条件, 测试带宽不高于 2000Hz, 分辨率不低于 1Hz, 且应满足所关注的频率范围;
- d) 基于测试结果, 对被测对象的局部共振点进行识别, 获取轴系局部刚度, 用于仿真分析。

## 5.5 试验数据分析与记录

5.5.1 数据预处理, 检查激励信号和传感器信号的时域波形, 确保无削波、噪声干扰或信号饱和, 去除异常数据(如双击和信号延迟), 对力信号施加力窗(矩形窗), 对响应信号施加指数窗以减少频谱泄漏, 进行多次锤击试验(通常 3-5 次), 取平均值提高信噪比;

5.5.2 传递函数(FRF)计算, 使用输入(力)和输出(响应)的傅里叶变换计算频响函数, 并计算两次试验的相干函数, 且大于 0.8 以上, 计算公式如附录公式 A.1 和 A.3 所示;

5.5.3 动刚度计算, 分析动刚度的幅值(N/m)和相位, 重点关注共振点(刚度最小)和反共振点(刚度最大), 并记录相关数据于附录表 A.3, 计算公式如附录公式 A.2 所示;

5.5.4 多次采集后, 保障单次试验模态参数一致性, 多次试验的固有频率偏差应 $\leq 5\%$ , 多测点测试时, 模态振型相关性(MAC 值)应 $> 0.9$ ;

5.5.5 测试完成后, 在目标频段内, 动刚度变化不超过设计值的 $\pm 15\%$ 。按此流程可系统评估动刚度;

5.5.6 如动刚度变化超过了设计值的 $\pm 15\%$ , 重新试验后仍未降低至 $\pm 15\%$ 内, 应根据测量值重新评定设计值, 并重复上述过程, 直至满足要求为止。

## 5.6 试验结果评定

在设备安装调试后, 应用设备激振器激振进行测试, 最终检验各参数测试值符合 5.5 章节的规定要求。

## 5.7 试验文件要求

试验文件要求同本规程 4.7。

## 5.8 试验报告

试验报告要求同本规程 4.8。

附录 A  
(资料性)  
试验数据分析与记录

A.1 试验数据记录表

A.1.1 扭转振动测试记录表 (见表A.1)

表A.1 扭转振动测试记录表

转速	测量分析转速			测点扭角幅值		备注
$N_i$ r/min	频率 $f$ Hz	测量转速 r/min	谐次	频率 $f$ Hz	扭角幅值 °	

A.1.2 纵振和横振测试记录表 (见表A.2)

表A.2 纵振和横振测试记录表

转速	测量分析转速			测点位移幅值		备注
$N_i$ r/min	频率 $f$ Hz	测量转速 r/min	谐次	频率 $f$ Hz	位移幅值 mm	

A.1.3 频响函数共振频率与峰值记录表 (见表A.3)

表A.3 频响函数共振频率与峰值记录表

测点位置	共振峰		反共振峰		动刚度 N/m
	频率 $f$ Hz	幅值	频率 $f$ Hz	幅值	
1					
2					

A.2 试验数据分析公式

A.2.1 传递函数计算公式:

$$H(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{F(j\omega)} = \frac{1}{(k - m\omega^2) + jc\omega}$$
 (A.1)

式中:  
k——刚度;  
c——阻尼;  
m——质量;  
 $\omega$ ——固有圆频率。

A.2.2 动刚度计算公式:

$$K(j\omega) = \frac{F(j\omega)}{X(j\omega)} = -m\omega^2 + jc\omega + k$$
 (A.2)

式中:  
k——刚度;  
c——阻尼;  
m——质量;



$\omega$ ——固有圆频率。

A. 2. 3 相干函数计算公式：

$$r_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)} \tag{A. 3}$$

式中：  
 $P_{xx}(f)$ ——第一次试验的信号的自功率谱；  
 $P_{yy}(f)$ ——在次试验的信号的自功率谱；  
 $P_{xy}(f)$ ——两次试验信号的互功率谱。

