

团 体 标 准

T/CSNAME 173—2026

风流联合发电装置试验模型建立和试验规程

Experimental model establishment and test procedures for hybrid wind-tidal combined power generation device

2026 - 02 - 12 发布

2026 - 05 - 11 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：中山大学、埃米南（上海）科技有限公司、招商局海洋装备研究院有限公司、北京理工大学（珠海）、中交四航工程研究院有限公司、中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司、南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）、南方电网科学研究院有限责任公司、哈尔滨工程大学、中船黄埔文冲船舶有限公司、国家海洋技术中心、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、江苏科技大学、海斯比科技股份有限公司、蓬莱巨涛海洋工程重工有限公司。

本文件主要起草人：马勇、胡超、刘京、张旭、陈嘉豪、沈波、李磊、李营、麦研、王雪刚、王洪庆、徐刚、梁晓兵、盛其虎、张学伟、宋义彬、王耀、路宽、王花梅、任修迪、王树齐、施军、倪间池、李聪、杨化龙、上官亮。

风流联合发电装置试验模型建立和试验规程

1 范围

本文件规定了风流联合发电装置模型试验的试验目的、试验原理、试验类别、试验模型系统建立、环境参数模拟、试验前准备、试验程序、数据分析与评定、追溯或证实方法、试验报告编制要求。

本文件适用于漂浮式风流联合发电装置在系泊及非系泊状态下风、浪、流联合作用时的水池模型试验研究。

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 812—2019 海洋工程结构物耐波性试验规程

CB/T 3471—2016 风、浪、流联合作用下复式系统模型试验规程

CB/T 3675—2016 水面船舶耐波性试验规程

ITTC 7.5-02-02-01:2021 推荐程序与指南：阻力测试 (Resistance Test: ITTC Recommended Procedures and Guidelines)

ITTC 7.5-02-04-01:2024 海洋工程实验 (Ocean Engineering Tests: ITTC Recommended Procedures and Guidelines)

ITTC 7.5-02-07-02.1:2021 耐波性实验 (Seakeeping Experiments: ITTC Recommended Procedures and Guidelines)

ITTC 7.5-02-07-02.2:2008 负载与响应，基于规则波模型实验预测不规则波中的功率增加：耐波性 (Loads and Responses, Seakeeping Predicting Power Increase in Irregular Waves Based on Model Experiments in Regular Waves: ITTC Recommended Procedures and Guidelines)

ITTC 7.5-02-07-03.5:2021 带系泊线的浮动海上结构被动混合模型测试 (Passive Hybrid Model Tests of Floating Offshore Structures with Mooring Lines: ITTC Recommended Procedures and Guidelines)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

风流联合发电装置 hybrid wind-tidal combined power generation device

基于漂浮式载体，集成利用风能及潮流能发电的装置。

3.2

塔影效应 tower effect

由于风电机组塔架的阻塞作用引起的塔架后方风速降低，进而影响风机气动性能的现象。

4 试验目的

风流联合发电装置模型试验是为了验证风流联合发电装置的水动力及结构动力响应特性。主要评估风、浪、流环境载荷作用下的运动响应、结构响应、波浪爬升特性、气隙性能、波浪砰击特性、风能转换效率、潮流能转换效率及稳性控制等装置特性，为装置的实际工程设计和研发提供指导。

5 试验原理

在水池中,通过模拟风、浪、流等海洋环境条件,测试风流联合发电装置流体动力特性,包括风机气动特性、水轮机水动力特性、浮体运动响应特性、锚链张力特性等。

为准确测量装置流体动力特性,试验时应满足以下相似条件:

- 风、浪、流联合作用下风流联合发电装置系统模型试验时,装置模型除满足基本的几何相似和质量相似外,为准确测量装置流体动力响应特性,装置还应满足傅汝德数(Froude Number)相等;
- 为保证风流联合发电装置风机原型和模型之间的系统激振频率和塔影效应相似,原型和模型之间还需要满足叶尖速比相似(叶尖线速度和流体入流速度的比值);
- 为保证原型风机塔筒和模型风机塔筒之间的柔性相似,原型塔筒和模型塔筒还需要满足弹性相似。

6 试验类别

风流联合发电装置模型试验可分为以下两类:

- 波浪水池试验:测试多种环境载荷作用下装置系统整体的水动力特性和结构载荷特性;
- 拖曳阻力试验:测试风流联合发电装置模型的流体载荷特性。

7 试验模型系统建立

7.1 系统组成

试验模型系统一般包括:

- 载体平台模型;
- 风力机模型;
- 塔筒模型;
- 潮流能发电装置模型;
- 系泊系统模型。

7.2 载体平台模型

7.2.1 载体平台模型一般分为:

- 波浪试验平台;
- 阻力试验平台。

7.2.2 根据不同试验目的、试验场地和试验设备的安排,缩尺比选择应满足以下优先准则。

- 水池尺度限制:拖曳阻力试验中,避免池壁效应影响,模型总宽度与水池宽度比值参照 CB/T 3675—2016 中第 4.2.2 节;波浪水池试验中,水池尺度主要依据系泊系统而定,不同的系泊系统对水池要求对应关系参照 ITTC. 7.5-02-07-03.5:2021;
- 雷诺数效应:当研究粘性效应时,缩尺比的取值应使模型满足雷诺数相似;
- 测量精度需求:关键部件尺寸缩尺后不应小于测量仪器分辨率(如激光位移计大于等于 5 mm);
- 波浪模拟能力:缩尺比与造波机最小可生成波高之比应满足 $\lambda/H_{min} \geq 50$;
- 缩尺比一般不应低于 1:100,特殊情况下经误差分析可放宽至 1:120,但需在试验报告中说明;
- 模型与原型各物理量之间的转换关系应按 CB/T 3471—2016 中第 4 章的要求。

7.2.3 模型结构应满足下列要求:

- 平台主体各结构连接应准确,主体表面应平滑光洁,应采用易于观察的颜色(一般为中黄色)便于试验观察;
- 平台主体主尺度误差应小于 0.5 mm,且小于目标值的千分之一;
- 平台各结构型线误差应采用卡尺或三坐标测量仪进行测量,间隙误差应不超过 0.5 mm;
- 模型各结构在制作前应进行生产设计,通过数值模拟计算得到目标质量、重心位置及转动惯量,以满足试验需求并便于后续校核;

- e) 平台主体结构应保证刚度,在满压载状态下无局部变形,在水池中不会引起异常结构响应,局部结构应通过敲击试验验证,其固有频率应是试验中可能出现的激励频率上限的2倍以上,以避免共振现象影响试验结果;
 - f) 平台主体应能承受连续24 h的浸泡而不渗漏水分;若有动密封结构,总浸泡时间不少于24 h,以确保模型的水密性;
 - g) 进行拖曳阻力试验时,应保证模型与拖车固定平板的连接刚度,防止拖曳过程中的晃动。
- 7.2.4 浮式平台物理属性的测量,包括重心和转动惯量的测定,如采用摇篮式惯量架测量,则需满足以下要求:
- a) 惯量架摇篮质量小于模型目标质量的一半;
 - b) 惯量架刀口阻尼应调整至对测试结果无影响的水平;
 - c) 惯量架自身结构应满足对称式布置,重心位于几何中心;
 - d) 测量重心高度时,应采用倾斜试验方法,测量值精度高于0.1 mm;
 - e) 测量惯量时,应连续记录至少20个摇摆周期的数据,并取其算术平均值进行计算;
 - f) 测量及调整顺序应先调整重心 G_x , G_y , G_z ,再依次调整转动惯量 I_{xx} , I_{yy} 和 I_{zz} 。

7.3 风力机模型

风力机模型可根据模拟形式分为物理叶片旋转形式和高速风扇推力还原形式等。为保证试验结果准确,应满足以下要求:

- a) 风力机模型整体应满足和实型值的质量、重心相似,误差应小于3%;
- b) 旋转部件(桨毂、叶根连接件、叶片或涡扇等)应通过动平衡测试,同时质量、重心及转动惯量误差应小于3%;
- c) 考虑到风力机原型经缩尺后质量较低,推荐采用碳纤维材料制作,叶片间质量误差应小于0.1 g;
- d) 动力电机应满足轻量化要求,转速支持0 RPM~200 RPM,主轴额定转矩不低于 $2\text{ N}\cdot\text{m}$,若原型风机功率大于10 MW,模型风机主轴额定转矩不应低于 $5\text{ N}\cdot\text{m}$;
- e) 若风机模块含变桨电机,应保证试验过程中单根叶片的桨距角度稳定,变桨额定扭矩一般应不小于 $3\text{ N}\cdot\text{m}$,试验过程中桨距角偏转角度误差小于 0.1° ;
- f) 模型风机和实体风机之间需满足几何相似、质量相似、叶尖速比相似、转动惯量相似、推力相似。

7.4 塔筒模型

7.4.1 塔筒应满足刚度相似、几何相似、质量相似。

7.4.2 塔筒的顶端、中端及底端的固有频率均应满足设计要求,并且固有周期相对误差小于3%。

7.5 潮流能发电装置模型

7.5.1 潮流能模块可根据潮流能利用形式分为:水轮机、振荡翼、圆柱弛振等,其模型均应满足以下要求:

- a) 模型应满足结构刚性,在最高速水流冲击下无结构变形和损坏,叶片或结构固有频率应显著高于环境载荷频率及测量物理量频率;
- b) 模型主尺度及型线应通过三坐标检测,误差小于0.1 mm;
- c) 运动结构整体应进行动平衡检测,无偏心振动等异常现象;
- d) 叶片/运动部件应符合目标质量、重心及转动惯量要求,一般相对误差应小于3%。

7.5.2 若水池配备了造流系统,则流场模拟应满足9.3节要求。若水池未配备造流系统,则可以使用简化方法对潮流能发电装置所受流载荷进行简化模拟,简化模拟方法应能够激发平台或装置产生的关键响应模式(如横荡、纵荡、垂荡、纵摇、横摇等),从而满足系统动力学行为研究的要求,应对比简化加载下平台的运动响应与理论预期是否一致,模拟的相对误差应小于3%。

7.6 系泊系统模型

7.6.1 试验前准备模型系泊系统时,应保证模型系泊线和实体系泊线保持几何相似、质量相似、弹性相似。

7.6.2 系泊锚点的位置应按照相似准则在水池进行布局。

7.6.3 系泊系统可采用全尺寸模拟或截断系泊模拟两种方式，其中单根系泊链的刚度误差应小于 2%，整体系泊系统的刚度误差应小于 3%。

7.6.4 对单根系泊线水平刚度特性进行校核试验，试验时，在系泊线顶端施加水平外力，得到单根系泊线在不同水平外力下的张力-位移变化曲线，与目标值进行对比，相对误差应小于 5%。

8 环境参数模拟

8.1 通用要求

环境参数模拟应满足风场、流场及波浪场在空间分布、时间稳定性和关键参数误差控制等方面的精度要求，以保证模拟环境与实际设计工况的一致性，具体应参考CB/T 3675—2016中4.1的相关规定。

8.2 风场模拟

8.2.1 试验风场面积应大于风轮旋转扫略面积，二者面积之比应不小于 1.2。

8.2.2 模拟均匀风场时，风轮旋转平面范围内的风速应在时间和空间上保持均匀。试验时，需对风轮扫略平面上不同位置的风速时历进行测量，并绘制风轮扫略平面范围内的平均速度分布图和风速湍流度（又称湍流强度，是度量气流速度脉动程度的一种方法，通常用脉动速度均方根与时均速度之比来表示脉动的大小）分布图，平均风速误差低于 2%、风速湍流度应低于 15%。

8.3 流场模拟

8.3.1 当采用整体造流时，一般只需要测量和标定风流联合发电装置模型试验区迎流一侧指定位置处平均流速。如平均流速不满足设计值要求，则需进行调节。一般平均流速与设计值之间误差不超过 10%。

8.3.2 当采用局部造流时，则需要对试验区流场情况进行实时测量，包括在同一水平面上纵向流向和横向流向若干点处的流速以及流速随水深的分布情况，同时还需测量试验区某典型位置在试验持续时间内的流速随时间的变化情况，模拟的流速和湍流度误差应小于 5%。

8.3.3 试验时开启水池造流系统，待水池流速稳定后，可通过测量叶轮所受推力并与设计值进行对比，以验证流速是否满足设计值要求。如满足要求，即可进行试验。

8.4 波浪场模拟

8.4.1 对于规则波工况而言，应以波浪稳定后，浪高仪连续取得的 20 个周期数据为基准，波高及波浪周期误差不应超过 5%。

8.4.2 不规则波模拟应按照波浪谱模拟，以实测波浪谱为基准，无目标波浪谱的情况下可选择 JONSWAP 或其他进行模拟，实测谱与目标谱形状应相似，谱值、谱峰频率、有义波高误差应低于 5%。

9 试验前准备

9.1 试验大纲

风流联合发电装置模型开始前，应编制好试验大纲。试验大纲应包括但不限于下列内容：

- a) 试验目的；
- b) 试验类别；
- c) 试验模型系统；
- d) 环境参数模拟；
- e) 试验仪器；
- f) 试验前准备；
- g) 试验流程；
- h) 试验结果分析及评定等。

9.2 模型布置

9.2.1 风流联合发电装置试验前应根据设计要求的实体布置图，布置在水池中的测量区域，使得整个

系统在静水中的平衡位置符合正式试验的要求。

9.2.2 如需开展不同浪向试验，可通过调节造波机造波方向或调整模型布置方案，但应在正式试验前对布置方案做好标定。

9.2.3 如需开展不同风向和流向下的试验，按 9.2.2 的要求进行。

9.3 试验项目编号

风流联合发电装置模型试验通常要求在风、浪、流环境下进行试验，并根据实体装置的目标工作海域情况，对不同浪向、风向和流向进行组合试验。试验开始前应根据预设试验目标，对各单项试验进行编号。

9.4 测试仪器安装

9.4.1 多分力传感器、加速度传感器等矢量测量传感器安装方向应与测试物理量方向保持一致，以减小安装角度对试验结果的影响。

9.4.2 风速仪、流速仪和浪高仪在正式试验阶段，主要用于测量和标定正式试验中所要用到的风速、流速和波况。风速仪可安装在风轮盘面正前方，轮毂中心线上，距离风轮盘面距离不小于 1 倍风轮直径。流速仪可安装在潮流能发电装置正前方或侧向，以不影响流速分布为准。波高仪可根据实际情况安装在池壁或距离试验模型 3~4 倍模型长度的位置。

9.4.3 测量模型六自由度运动的光学测量系统包含红外线灯球和摄像机两部分，红外线灯球应根据测量需求安装在模型上的合适位置，安装时风轮扫略平面不可与摄像机和红外灯球连接线交叉，否则影响数据测量。

9.4.4 测试仪器接线完成后，应减小测试仪器线束干扰对试验结果的影响，必要时可制作专用线束托架，保证线缆自由承托，减少测试仪器线缆刚度、重量对试验结果的影响。

9.4.5 为了避免采集数据混淆，应对各采集信号进行唯一编号。试验过程中不可随意更改，除非出现通道损坏等意外情况。

9.5 仪表准备

9.5.1 试验所用仪表应在试验前进行检查并确认合格后方可使用，并按试验大纲的设计量程进行静标定。

9.5.2 试验期间应定期检查仪表的工作状态，并在必要时对测量参数进行重复标定。试验项目完成后，对所用仪表重新标定一次，确认各次标定系数均在合格范围内。

9.5.3 传感器在中途维修后应重新标定其系数。

9.5.4 试验开始前，应对所有采集传感器进行集中清零操作，试验过程中不应再次采零。试验过程中，若需对模型重新拆装，传感器需重新标定，并在模型安装、布置到位后，重新清零。

9.5.5 试验仪器根据不同试验特点可有不同，应包括但不限于：浪高仪、多分力传感器、加速度传感器、拉压力传感器、姿态传感器、运动捕捉系统、采集系统等；试验前所有需要用到的计量型试验仪器均需通过第三方计量机构检测，且计量报告应处于有效期内。在试验现场，试验开始前还应对所有即将使用的试验仪器标定至少三次，试验仪器应满足线性度要求，标定结果的判定系数 R^2 不低于 0.999。风流联合发电装置模型试验中采用的主要仪表及推荐量程、精度参考 CB/T 3471—2016 中 6.2 的要求，具体内容见表 1。

表1 推荐仪器仪表

序号	名称	测量参数	最大量程	精度
1	浪高仪	波高	±500mm	1%
2	风速仪	风速	25m/s	±1%FS
3	流速仪	流速	2m/s	±1%FS
4	加速度传感器	三向加速度	±9.81m/s ²	±1%FS
5	拉力传感器	系泊力	200N	±1%FS
6	非接触式运动测量系统	纵荡	±1000mm	±1mm
		横荡	±1000mm	±1mm
		垂荡	±1000mm	±1mm

表2 推荐仪器仪表（续）

序号	名称	测量参数	最大量程	精度
6	非接触式运动测量系统	横摇	$\pm 45^\circ$	$\pm 0.8^\circ$
		纵摇	$\pm 45^\circ$	$\pm 0.8^\circ$
		艏摇	$\pm 90^\circ$	$\pm 0.8^\circ$
7	六维力传感器	X	50 N	$\pm 1\%FS$
		Y	50 N	$\pm 1\%FS$
		Z	100N	$\pm 1\%FS$
		RX	5 N·m	$\pm 1\%FS$
		RY	5 N·m	$\pm 1\%FS$
		RZ	5 N·m	$\pm 1\%FS$
8	转矩传感器	转矩	$\pm 5N\cdot m$	$\pm 0.5\%FS$
9	转速传感器	转速	/	/

注：所有测量仪器应在有效检定周期内，试验前需进行零点校准和量程验证。

10 试验程序

10.1 系泊系统预张力调整

模型安装到位后，在正式试验之前，需首先对浮态进行调整，保证正浮。在系泊系统连接完毕后，还需进行预张力调节。具体实施步骤如下：

- a) 风流联合发电装置模型置于预定平衡位置，保持水面平静；
- b) 对系在模型上的系泊线进行适当张紧或松弛，观察拉力是否达到预张力设计值；
- c) 对所有系泊线逐一进行调节，如有差异，需反复微调，直至所有系泊线预张力达到预定设计值；
- d) 系泊系统调试完毕后，应进行刚度试验验证，以模型重心处为拉力点，在水平面 x （浪向）和 y 方向（与浪向垂直方向）分别拉取不同位移并读取拉线上拉力，得到系统刚度曲线，两个方向的刚度曲线应与设计值相吻合，最大误差不超过 5%。

10.2 系泊系统静水试验

10.2.1 系泊系统完成调试后，需要进一步对系泊系统在静水中进行试验，即系泊系统水平刚度校核试验，包括单根系泊线的水平刚度校核试验和整个系泊系统的水平刚度校核试验。

10.2.2 对单根系泊线的水平刚度进行校核试验，在系泊线的顶端施加水平外力，测量系泊线张力，得到单根系泊线在不同水平外力下的张力-位移变化曲线，与目标值进行对比。

10.2.3 对整个系泊系统进行水平刚度校核试验，以纵荡为例，保持整个系统处于平衡位置，然后在纵荡方向上施加水平外力，得到整个系统在不同水平外力下的张力-位移变化曲线，与目标值进行对比。

10.3 静水自由衰减试验

10.3.1 静水自由衰减试验，旨在测定风流联合发电装置在自由漂浮状态与系泊状态下的运动固有周期与阻尼特性。通过模型在受扰后的自由衰减响应特性，获取各自自由度运动固有周期和阻尼系数，为动力响应评估与数值模拟提供验证依据。

10.3.2 本试验属于静水水动力试验，用于识别结构线性阻尼特性与运动固有周期，归类为自由衰减响应类试验。本试验为指示性试验，应满足以下条件：

- a) 模型应完整安装，对应系泊/自由状态配置准确无误；
- b) 采用非接触式或高精度位移测量系统记录衰减过程中的时间历程数据；
- c) 试验应在静水环境下进行；
- d) 各自由度（纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇）应分别激发，并确保激发幅度在结构线性响应范围内；
- e) 试验应不少于三次重复激发以获取平均值，确保数据的稳定性与一致性；
- f) 所有采集数据均应换算至实型值，采用国际单位制，保存原始数据、同步记录视频、过程标记信息，确保试验可追溯性。

10.3.3 试验应使用 7.2 中定义的风流联合发电装置缩尺模型，模型必须满足以下条件：

- a) 模型应包括所有影响质量分布与浮态的关键部件；
- b) 系泊状态下应布置完整系泊系统，并经预张力校准及系泊系统刚度性能验证后方可进行试验；
- c) 模型的质量、浮态、重心位置及各主惯性参数应与原型按缩尺比后的参数相符，误差不超过 $\pm 2\%$ 。

10.3.4 试验在满足以下条件时视为完成：

- a) 模型在各激发自由度下完成三组有效自由衰减响应记录，且响应信号具有良好指数衰减趋势；
- b) 数据分析后所得固有周期与理论设计值偏差小于 $\pm 5\%$ ，阻尼比曲线稳定，重复性误差小于等于 5% ；
- c) 所有原始数据与试验工况信息已完整记录，并通过初步谱分析或曲线拟合验证其合理性。

10.4 风载荷单独作用试验

10.4.1 风载荷单独作用试验旨在获取风流联合发电装置在不同风速条件下、静水环境中所表现出的系统动态响应。试验主要测量和分析装置在风载荷作用下的六自由度运动、系泊力、风轮推力与主轴扭矩等参数。

10.4.2 本试验属于环境载荷作用类试验，更具体地归类为风载荷作用下平台运动响应试验。其主要目的是评估浮式系统在风载荷下的稳定性与能量转换性能，试验应满足以下条件：

- a) 风场模拟应具备足够的均匀性与稳定性，风速误差应小于 $\pm 5\%$ ；
- b) 风速设置应覆盖以下典型工况：低于额定风速、额定风速、切出风速及停机工况；
- c) 模型需保持在静水状态，风载荷为唯一外部激励；
- d) 实时采集试验数据；
- e) 对典型工况，重复试验次数一般不少于3次，规避随机误差；
- f) 所有采集数据均应换算至实型值，采用国际单位制，保存原始数据、同步记录视频、过程标记信息，确保试验可追溯性。

10.4.3 试验应采用与前文一致的风流联合发电装置物理模型，其风载荷配置要求如下：

- a) 风轮应为可调变桨比例风轮，并能模拟不同风速区间的运行状态（包括启停控制）；
- b) 模型应包含完整的浮体结构和系泊系统，质量与重心分布须符合原型设计，误差控制在 $\pm 2\%$ 以内；
- c) 风机控制系统应在模型中有效实现转矩控制与桨距控制，以保证风机响应的代表性；
- d) 风场生成装置应通过认证标准，提供满足试验要求的风速分布。

10.4.4 试验在满足以下条件时视为完成：

- a) 所有指定风速工况下均已完成试验，所有通道数据连续无断点；
- b) 各风速工况下的主要响应参数（位移、转矩、推力、系泊力）在重复试验中具有可复现性；
- c) 所有原始数据已记录完整，试验日志齐全，并初步完成数据拟合与处理。

10.5 规则波试验

规则波试验，旨在获得风流联合发电装置系统运动、系泊力的波频响应等。试验需要对系统运动响应、系泊力等参数进行实时测量和记录，并满足以下要求：

- a) 规则波试验时，每个工况间应待水面平静后进行下一次试验，间隔时间一般不低于5 min，余波波高不大于试验波高的 5% ；
- b) 波长个数不应小于10个，测量范围内尽量能够获得完整的频率响应曲线，在固有周期附近要对试验工况适当加密；
- c) 规则波试验采集时间应不低于10个波浪周期，采样频率不低于100 Hz。

10.6 白噪声波试验

白噪声波试验目的与规则波相同，采样时间对应实际装置工作时间不小于3 h，采样频率不低于100 Hz。

10.7 拖曳阻力试验

拖曳阻力试验,旨在获得风流联合发电装置在流作用下的阻力,可通过拖曳模拟或造流的方式,测试风流联合发电装置不同设计流速下的阻力。拖曳或局部造流测试风流联合发电装置所受流载荷时,可参照ITTC 7.5-02-02-01:2021、ITTC 7.5-02-04-01:2024。

10.8 风浪联合作用试验

10.8.1 风浪联合作用试验,旨在获得水轮机停机后,风流联合发电装置在风浪联合作用下的系统运动、风轮功率输出及载荷等性能参数;

10.8.2 本试验属于多环境耦合载荷试验,细分为风浪联合作用下的系统动态响应试验,试验重点在于考察风浪联合激励下平台的综合响应能力,试验过程中应满足以下要求:

- 风与波浪同步施加,模拟真实海况条件下的联合作用;
- 波浪场模拟按 8.4 节要求进行,根据项目需求,选择性制定规则波及不规则波工况;
- 风速选取应与波浪匹配,形成典型风浪组合工况(包括工作工况、极限工况和生存工况等);
- 水轮机处于停机状态,风轮正常运行;
- 应同步采集风轮转速和主轴扭矩、平台六自由度运动、系泊力、塔底及塔顶载荷、浮体各项传感器数据;
- 规则波工况有效试验时间应至少保证 10 个波浪周期,不规则波工况试验时间对应实际装置工作时间不小于 3 h,采样频率不低于 100 Hz,具体参照 CB/T 3471—2016 中 7.2.8、ITTC 7.5-02-07-02.1:2021 中 3.2 及 ITTC 7.5-02-07-02.2:2008。
- 所有采集数据均应换算至实型值,采用国际单位制,保存原始数据、同步记录视频、过程标记信息,确保试验可追溯性。

10.8.3 试验应采用与前文一致的风流联合发电装置物理模型,其余配置要求如下:

- 风流联合发电装置模型应具备完整风轮、浮体、系泊系统,各结构质量分布、重心与惯性参数应控制在 $\pm 3\%$ 误差范围内;
- 风轮应支持变桨与变转速控制,并能模拟正常运行状态;
- 潮流能水轮机应处于完全停机状态,不应产生额外动力或扰动;
- 风浪加载系统应可实现风场与波浪场的时空匹配和同步控制;
- 系泊系统应具备真实刚度动力特性,反映原型系统的约束与响应关系。

10.8.4 试验在满足以下条件时视为完成:

- 所有指定风浪组合工况完成试验,所有通道数据连续无断点;
- 每个工况试验时间满足规则波及不规则波工况时长要求,即 10.7.2 f),试验数据量覆盖试验观测物理量需求;
- 原始记录、数据文件、视频资料等齐备,满足后续数据追溯及分析要求。

10.9 浪流联合作用试验

10.9.1 浪流联合作用下的试验,旨在获得风机停机后,风流联合发电装置在浪流联合作用下的系统运动性能、潮流能发电装置功率输出及载荷等性能参数。

10.9.2 本试验属于多环境耦合载荷试验,细分为浪流联合作用下的潮流发电及平台响应试验,试验重点在于考察浪流联合激励下潮流能转换效率及平台的综合响应能力,试验过程中应满足以下要求:

- 风机应处于完全停机状态,风轮不转动、不提供功率输出;
- 波浪场模拟按 8.4 要求进行,应包含规则波和不规则波两类工况;
- 潮流可包括稳态匀速流和剪切流,典型流速工况包括工作工况、极限工况和生存工况等;
- 应同步测量系统运动、潮流发电装置功率、推力、转矩,系泊力等数据;
- 规则波工况有效试验时间应至少保证 10 个波浪周期,不规则波工况试验时间对应实际装置工作时间不小于 3 h,采样频率不低于 100 Hz,同 10.7.2 f);
- 所有采集数据均应换算至实型值,采用国际单位制,保存原始数据、同步记录视频、过程标记信息,确保试验可追溯性。

10.9.3 试验应采用与前文一致的风流联合发电装置物理模型,其余配置要求如下:

- 模型应包含完整潮流发电装置、浮体、系泊系统等模块,能真实反映原型动力特性与质量分布,误差控制在 $\pm 3\%$ 以内;

- b) 风轮应保持固定、静止状态，避免额外干扰；
- c) 潮流加载系统应具有匀速控制能力，最大误差不超过 $\pm 3\%$ ；
- d) 系泊系统应具备真实刚度动力特性，反映原型系统的约束与响应关系；
- e) 测量系统应支持三维运动记录与多通道同步采集。

10.9.4 试验在满足以下条件时视为完成：

- a) 所有指定浪流组合工况完成试验，所有通道数据连续无断点；
- b) 每个工况试验时间满足规则波及不规则波工况时长要求，即 10.7.2 f)，试验数据量覆盖试验观测物理量需求；
- c) 原始记录、数据文件、视频资料等齐备，满足后续数据追溯及分析要求。

10.10 风浪流联合作用试验

10.10.1 风浪流联合作用试验，旨在获得风流联合发电装置在风、浪、流三种典型海洋环境同时作用下的系统运动性能、风轮及潮流能发电装置的功率输出、各部位载荷等关键性能参数。

10.10.2 本试验为多物理场耦合载荷试验，用于验证系统在风-浪-流环境耦合作用环境下的动力学响应性能与能量获取能力，试验过程中应满足以下要求：

- a) 风、浪、流联合作用时，应先造风、流，待风速和流速达到预定值并稳定后再造波；
- b) 规则波工况有效试验时间应至少保证 10 个波浪周期，不规则波工况试验时间对应实际装置工作时间不小于 3 h，采样频率不低于 100 Hz，同 10.7.2 f)；
- c) 试验工况应涵盖代表性的典型风速、流速与波浪谱组合，包括工作工况、极限工况和生存工况等，考虑到多载荷耦合随机特性，必要时开展多组重复试验，验证试验可重复性；
- d) 所有采集数据均应换算至实型值，采用国际单位制，保存原始数据、同步记录视频、过程标记信息，确保试验可追溯性。

10.10.3 试验应采用与前文一致的风流联合发电装置物理模型，其余配置要求如下：

- a) 试验模型应为完整风流联合发电装置系统模型，包含风轮、水轮、浮体、塔架、传动系统、系泊系统等；
- b) 模型比例应遵循 Froude 相似定律，合理处理雷诺数影响，风、波、流载荷应匹配相应缩尺条件；
- c) 各环境加载系统应具备独立可调功能，支持风速/流速分布控制与方向调整；
- d) 数据采集系统需支持多通道同步采样，系统延时小、采样稳定，满足动态响应识别与频域分析需求；
- e) 所有关键参数测试点应按照标准布置，风/流功率测量应与控制系统同步记录，确保数据对应性。

10.10.4 试验在满足以下条件时视为完成：

- a) 所有指定浪流组合工况完成试验，所有通道数据连续无断点；
- b) 每个工况试验时间满足规则波及不规则波工况时长要求，即 10.7.2 f)，试验数据量覆盖试验观测物理量需求；
- c) 原始记录、数据文件、视频资料等齐备，满足后续数据追溯及分析要求。

11 数据分析与评定

11.1 分析内容

规则波工况应连续取不少于10个波浪周期进行平均计算，以得到目标值，所有不规则波试验工况都应进行时域分析，试验结果均应换算至实型值，模型值和实型值之间的物理量比尺关系见表A.1，且换算时所有单位均采用国际单位制。数据分析内容应包括且不限于：

- a) 不规则波浪谱模拟结果，包括谱分析得到的波浪功率谱和包络谱分析结果及相关参数；
- b) 不规则波浪的时历统计参数和时历曲线，包括平均值、极值、均方差等；
- c) 潮流能发电装置在不同设计流速下的测量结果；
- d) 风机载荷、机舱加速度等在不同设计风速下的测量结果；

- e) 波浪运动响应试验中各自由度下的速度、加速度、位移等，试验结果应包含各自由度运动响应 RAO 图表和详细数据；
- f) 风、流能量转换效率及局部结构部件运动响应分析；
- g) 风流联合发电装置平台在不同设计流速下的拖曳阻力；
- h) 局部构件结构应变时历分析。

11.2 评定内容

评定内容应包括：

- a) 波浪的模拟评定，包括对规则波工况中不少于 10 个周期的平均值进行评估；通过不规则波的功率谱、包络谱及时历统计参数（平均值、极值、标准差）以检验波浪模拟的准确性与稳定性；
- b) 风流联合发电装置平台的拖曳阻力评定，包括不同设计流速下的拖曳阻力值，评估平台流载荷对装置流体动力响应的影响；
- c) 潮流能装置的发电性能评定，包括根据不同设计流速下的功率、转速等实测数据，换算至实型值，评定潮流发电装置的能量获取效率和运行适应性；
- d) 风机载荷响应评定，包括基于各风速工况下的载荷和机舱加速度数据，评估风能装置的运行稳定性与载荷合理性；
- e) 风流联合发电装置模型的水动力响应评定，包括分析 6 自由度下的 RAO 曲线与运动响应数据，评定平台在波浪工况下的运动性能与响应特性；
- f) 整体系统的能量转换效率评定，包括结合风流联合工况下的发电效率，评估系统整体能量转换效果及其对平台响应的影响。

12 追溯或证实方法

12.1 追溯或证实目的

为保证试验数据的有效性、可追溯性及其评定结果的准确性，试验应明确采用可记录、可验证的追溯手段与证实方法。

12.2 追溯方法

试验过程中应对关键操作步骤、数据采集和工况设定等进行全过程记录，采用以下方式进行追溯：

- a) 过程标记与试验编号，各试验工况应设定唯一编号，并记录对应模型状态、工况参数、运行时长等信息；
- b) 录音录像记录，对试验启动、模型运动、数据采集等关键阶段进行同步录像，必要时进行语音注释和事件标记；
- c) 测量数据自动记录，所有试验信号应通过数据采集系统实时记录并生成原始数据文件，文件应包含时间戳、传感器标识及采样频率等信息；
- d) 手工或电子日志，对特殊事件（如中断、异常状态等）进行人工补充记录，并存入试验档案。

12.3 证实方法

试验数据及其评定结果应采用下列方法进行验证和确认：

- a) 规则波工况验证：
对不少于 10 个连续波浪周期的规则波数据进行平均分析，计算所得波高与周期值应与目标输入值偏差不超过 $\pm 5\%$ ，波高与波周期计算与统计方法应参照 ITTC 7.5-02-07-02.1:2021 中 3.2、ITTC 7.5-02-07-02.2:2008。
- b) 不规则波谱验证：
采用时域方法对模拟波浪进行谱分析，得到的波浪功率谱与包络谱应与设计谱形式（如 Pierson-Moskowitz 或 JONSWAP）一致，误差应在规定范围内（例如，显著波高误差不超过 $\pm 5\%$ ，主频误差不超过 $\pm 3\%$ ）。
- c) 数据换算与单位一致性验证：

所有实测数据应换算至实型值，可参照表 A.1，单位统一采用国际单位制，并标注缩放比例与换算公式。

- d) 动力响应验证：
将平台在波浪激励下的运动响应数据进行频域处理，验证各自由度的响应特性是否与理论或数值模拟趋势一致。
- e) 风流载荷响应验证：
对风速、流速分别为设计值的工况，比较风机载荷、机舱加速度、潮流能装置功率输出等与仿真或设计目标的一致性，误差控制在 $\pm 10\%$ 以内。
- f) 结构响应与能效验证：
通过应变测量时历曲线及发电功率时间历程分析，结合模型设计值和系统性能预期，证实局部结构响应合理性和风流联合能量转换效率的达成度。

13 试验报告编制要求

各项试验完成后，应编制完整的试验报告，用于记录试验过程、分析结果和评估结论。试验结果数据记录表形式可参照CB/Z 812—2019第9章的要求。试验报告应包括但不限于以下内容：

- a) 试验基本信息：
 - 1) 试验名称、试验编号、试验单位；
 - 2) 试验时间、地点、水池参数；
 - 3) 执行人员、审核人员及职责分工。
- b) 试验模型信息：
 - 1) 模型结构组成及主要参数（比例尺、质量分布、重心位置、惯性矩等）；
 - 2) 模型材料、制造精度、缩尺准则；
 - 3) 模型配置示意图（风轮、水轮机、浮体、系泊系统、传感器布置等）。
- c) 试验工况设置：
 - 1) 风、浪、流典型组合工况清单（包括风速、流速、波浪谱及方向等）；
 - 2) 工况加载顺序及造波控制参数；
 - 3) 每种工况的试验时长与重复次数。
- d) 测量系统说明：
 - 1) 所用测量仪器类型、型号、采样频率、布置位置；
 - 2) 校准方式及传感器误差范围；
 - 3) 数据同步机制与时间戳标定说明。
- e) 试验过程记录：
 - 1) 各工况试验执行流程；
 - 2) 关键试验过程图片、视频截图或录音录像信息；
 - 3) 异常情况、应急处理及补测说明。
- f) 数据处理与分析：
 - 1) 数据筛选、去噪、实型换算与单位标准化过程；
 - 2) 系统 6 自由度运动 RAO 曲线、响应时历及谱分析；
 - 3) 风轮、水轮发电性能曲线（功率—风速/流速）；
 - 4) 系泊力、载荷时历分析图及其统计指标（均值、峰值、均方根等）；
 - 5) 能量转换效率评估与系统稳定性分析。
- g) 追溯与证实方法说明：
 - 1) 追溯方法：试验过程标记、照片、视频录像、原始数据文档；
 - 2) 证实方法：通过与设计值、数值仿真或文献数据对比，验证试验数据有效性与一致性；
 - 3) 所使用的试验标准、分析规范与计算依据说明。
- h) 结论与建议：
 - 1) 各典型工况下系统响应与性能的综合评估；
 - 2) 风流联合发电装置在各工况下的适应性和安全性结论；

- 3) 后续设计优化、改进建议及可能风险预判。
- i) 附件材料：
 - 1) 原始数据表格；
 - 2) 传感器校准记录或计量证书；
 - 3) 视频文件、照片等多媒体资料；
 - 4) 报告审查意见及修改记录。



附录 A
(资料性)
物理量比尺关系

表A.1 物理量比尺关系

物理量	原型符号	模型符号	相似关系
线尺度	L_s	L_m	$L_s/L_m=\lambda$
面积	A_s	A_m	$A_s/A_m=\lambda^2$
体积	∇	∇_m	$\nabla_s/\nabla_m=\lambda^3$
周期	T_s	T_m	$T_s/T_m=\lambda^{1/2}$
频率	f_s	f_m	$f_s/f_m=\lambda^{-1/2}$
密度	ρ_s	ρ_m	$\rho_s/\rho_m=\gamma$
线速度	ρ_s	ρ_m	$\rho_s/\rho_m=\lambda^{1/2}$
线加速度	a_s	a_m	$a_s/a_m=1$
角度	ϕ_s	ϕ_m	$\phi_s/\phi_m=1$
质量（排水量）	M_s	M_m	$M_s/M_m=\gamma\lambda^3$
力	F_s	F_m	$F_s/F_m=\gamma\lambda^3$
转动惯量	J_s	J_m	$J_s/J_m=\lambda^5$
弹性系数（刚度）	K_s	K_m	$K_s/K_m=\lambda^2$
风力系数	C_s	C_m	$C_s/C_m=1$
转矩系数	T_{Qs}	T_{Qm}	$T_{Qs}/T_{Qm}=\lambda^4$
风轮推力	F_{Ts}	F_{Tm}	$F_{Ts}/F_{Tm}=\lambda^3$
风机功率	P_s	P_m	$P_s/P_m=1$