ICS 07.060；27.180
CCS F14

HY

中 华 人 民 共 和 国 海 洋 行 业 标 准

HY/T XXXXX—XXXX
代替 XX/T

振荡体式波浪能发电装置实验室测试方法

The testing method of oscilating body wave energy devices in laboratory

（报批稿）

XXXX－XX－XX 发布　　XXXX－XX－XX 实施

中华人民共和国自然资源部　　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。

本文件中华人民共和国自然资源部提出。

本文件由全国海洋标准化技术委员会海域使用及海洋能开发利用分技术委员会（TC283/SC1）归口。

本文件起草单位：国家海洋技术中心、天津大学。

本文件主要起草人：路宽、李健、王花梅、韩林生、宋雨泽、白志刚。

振荡体式波浪能发电装置实验室测试方法

1 范围

本文件规定了振荡体式波浪能发电装置实验室测试的试验模型、试验条件、测量仪器、试验程序、试验数据处理、试验报告等内容。

本文件适用于振荡体式波浪能发电装置论证阶段和方案阶段的实验室测试。

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。

JTJ/T 234-2001 波浪模型试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

振荡体式波浪能发电装置 oscillating body wave energy devices

利用波浪往复驱动装置运动，通过液压或机械驱动发电机发电的装置。

3.2

论证阶段 concept stage

通过理论论证、数值模拟和必要的原理性试验，初步证明技术可行性的工作阶段。

3.3

方案阶段 prototype stage

对模型样机的结构、子系统、技术指标等方面进行分析，并对主要零部件、子系统或模型样机进行必要的试制以及陆上模拟海况试验，以初步确定技术方案和装置性能的工作阶段。

3.4

动力输出装置 power take-off device；PTO

将能量捕获装置的运动转换为可利用能量形式的物理部件。

[来源：GB/T 33543.1-2017,定义2.10]

3.5

捕获宽度 capture length

波浪能发电装置的水动力功能部件所捕获的波浪能与单位迎波宽的入射波能之比。
[来源：GB/T 33543.1-2017,定义4.2.2]

3.6

捕获宽度比 capture length ratio

捕获宽度与波浪能发电装置迎浪宽度之比。

4 试验模型

4.1 试验模型的相似比尺

试验模型的相似比尺宜满足以下要求：

a) 试验模型采用正态模型；

b) 试验模型的相似比尺按照表 1 确定。对于“动力”部分，应考虑海水密度影响。

表1 模型相似比尺

特性	参数	弗劳德比尺	雷诺比尺
几何	长度	λ	λ
	面积	λ^2	λ^2
	流量	λ^3	λ^3
环境	波高和波长	λ	λ
	波周期	$\lambda^{0.5}$	λ^2
	波频率	$\lambda^{-0.5}$	λ^{-2}
	功率密度（单位长度）	$\lambda^{2.5}$	λ^4
运动	位移	λ	λ
	角位移	1	1
	速度	$\lambda^{0.5}$	λ^{-1}
	角速度	$\lambda^{-0.5}$	λ^{-2}
	加速度	1	λ^{-3}
	角加速度	λ^{-1}	λ^{-4}
	流量	$\lambda^{2.5}$	λ
动力	质量	λ^3	λ^3
	力	λ^3	1
	扭矩	λ^4	λ
	压强	λ	λ^{-2}
	功率	$\lambda^{3.5}$	λ^{-1}

	刚度	λ^2	λ^{-1}
	阻尼	$\lambda^{2.5}$	λ
注：λ为模型长度比尺。			

4.2 试验模型的相似准则

试验模型的相似准则应满足以下要求：

a) 固定式装置模型应满足几何相似，与稳定性试验有关的模型，还应满足质量、重心位置相似；
b) 漂浮式装置模型应满足几何相似、结构相似、重心相似、惯性矩相似和自摇周期相似。漂浮式装置模型的锚泊系统应满足质量和弹性相似；
c) 风、波浪、水流与装置相互作用的模型，应满足重力相似。当粘滞力起主导作用时，应考虑雷诺数的影响；
d) 当同一模型不能同时满足弗劳德相似和雷诺相似时，应根据模型主导作用力的类型来选择水动力相似准则；
e) 当无法对 PTO 进行完全缩尺时，宜采用可表征动力-运动特征（力-速度、扭矩-角速度等）的 PTO 替代，模型的设计应考虑替代构件的静摩擦或滞后效应的影响。

4.3 试验模型的制作

4.3.1 论证阶段试验模型的制作

振荡体式波浪能发电装置论证阶段的试验模型在制作时宜满足以下要求：

a) 宜采用理想化的实体模型；锚泊系统的设计应通过反复试验选择合适的材料；对于简单的悬链系统，宜直接针对长度与质量进行缩尺；
b) 模型及其构件的几何允许偏差为±5%，且应控制在±10 mm 以内；重心位置允许偏差为±5 mm，质量允许偏差为±1%，转动惯量允许偏差为±5%；
c) 当锚泊系统不属于捕获和能量转换系统的组成部分时，可简化锚泊系统；
d) PTO 采用简化的方式进行模拟，应设置阻尼，阻尼在适当设置范围内进行调节；
e) 模型组装时应避免出现尖锐的边缘或狭小的缝隙，避免粘性力不正常的放大。

4.3.2 方案阶段试验模型的制作

振荡体式波浪能发电装置方案阶段的试验模型在制作时宜满足以下要求：

a) 宜采用与原型相近的实体模型，模型的材料宜与原型相同，模型比尺宜采用试验水槽或水池允许的最大比尺；
b) 模型及其构件的几何允许偏差为±3%，且应控制在±5 mm 以内；重心位置允许偏差为±2 mm，质量允许偏差为±1%，转动惯量允许偏差为±5%；
c) 锚泊系统应满足力学特性相似；
d) PTO 控制机制应可以反映原型的运动和动力；
e) 模型组装时应满足 4.3.1 e）的要求。

5 试验条件

振荡体式波浪能发电装置论证阶段的实验室测试宜在波浪水槽中进行，方案阶段的实验室测试宜在波浪水池中进行，水槽或水池的试验条件宜满足以下要求：

a) 水槽的有效段长度宜大于 10 倍波长，宽度宜大于 0.5 m；

b） 水池的有效段长度宜大于 10 倍波长，模型距离池壁的宽度应不小于模型迎浪宽度的 3 倍；
c） 水槽或水池的首尾端宜设置消波装置，消除 90%以上的反射波。对于试验模型造成的二次反射波宜采用主动消波技术进行消除；
d） 水槽造波设备应具有规则波与不规则波的模拟能力；
e） 水池造波设备应具有规则波与单向不规则波的模拟能力，宜具有多向不规则波模拟能力；
f） 水槽或水池造波时，规则波平均波高的允许偏差为±5%，波周期的允许偏差为±5%；不规则波有效波高的允许偏差为±5%，有效周期或谱峰周期的允许偏差为±5%；波能谱总能量的允许偏差为±10%；
g） 水槽或水池的试验区应具备必要的试验操作空间，为测量传感器、锚泊系统等试验部件的安装提供便利条件。

6 测量仪器

振荡体式波浪能发电装置实验室测试的试验仪器包括波高仪、姿态测量系统、测力系统、数据采集系统、功率分析仪等，测量仪器的指标应满足以下要求：

a） 波高仪在满量程条件下 2 h 内零漂允许偏差为±5%，线性允许偏差为±2%；
b） 宜采用非接触六自由度测量系统进行姿态的测量；论证阶段测试的位移测量准确度应在装置主尺寸的 10%以内；方案阶段测试的位移测量准确度应在装置主尺寸的 1%以内；
c） 测力系统的自振频率应大于被测参数最高频率的 10 倍，概念设计阶段测力系统的测量线性允许偏差应为±10%；原理样机阶段测力系统的线性允许偏差应为±5%；
d） 数据采集器的采样频率宜为 50 Hz～100 Hz，如果考虑局部冲击力、最大系泊力等载荷条件时，则宜采用 1kHz 以上的采样频率；
e） 宜采用功率分析仪进行电气参数的测量，准确度的级别为 0.5 级或更高，满刻度量程至少应满足发电装置额定功率的 5%～200%；
f） 测量仪器应经过检定或校准，检定或校准证书应在有效期内。对不具备检定或校准条件的测量仪器，宜通过比对方法保证其有效性。

7 试验程序

7.1 试验准备

振荡体式波浪能发电装置实验室试验前应满足以下要求：

a） 试验使用的所有传感器都应进行静态标定，如果在动态中使用的传感器，还应明确其响应时间和动态特性；
b） 应在装置模型布放前对其重心、压载物和惯性矩进行验证，确定其在水槽或水池中的位置；
c） 论证阶段应对锚泊系统进行标定，调整静水预张力以符合要求；应对 PTO 的受力与运动的关系进行标定；应测量与捕获能量有关的所有自由度的运动和受力；对于固定式装置，力传感器与发电装置模型宜采用单自由度连接；对于漂浮式装置，应测量主入射波方向系泊力；应在发电装置模型的正面和侧面至少安装 2 个波高仪；
d） 方案阶段应对系泊缆静态受力进行标定，同时要记录不同传感器之间耦合影响的数值；应对 PTO 受力与运动的关系与理论值进行对比，使其具有代表性；应测量模型及锚泊系统所有自由度的运动与受力；对于固定式装置，传感器与装置应采用六自由度连接；对于漂浮式装置，应测量全部系泊缆的受力；应针对论证阶段需要进一步验证的内容进行单独的监测；应在发电装置的正面、侧面与背面至少安装 4 个波高仪；

e） 试验前宜制定安全计划，明确试验人员分工，必要时应进行安全培训，确保试验顺利进行。

7.2 试验过程

振荡体式波浪能发电装置试验过程应满足以下要求：

a） 试验前确认各个传感器的数据采集功能，对造波设备进行全面检查，根据工况调整设备参数；
b） 应先进行装置的姿态验证试验，再开展与捕获能量有关的自由度衰减试验，计算固有周期；宜开展自由状态和带锚泊系统两种情况的衰减试验，以确定系泊系统对装置发电性能的影响；
c） 当进行波浪试验时，应在造波前对传感器进行归零处理，根据需要调整模型迎浪面，模型稳定后开始造波，待波浪稳定后开始数据采集；
d） 论证阶段和方案阶段应开展规则波试验和单向不规则波试验，试验应综合考虑波高、波周期、波谱等因素的组合，规则波单次试验波个数不少于 10 个，不规则波单次试验波个数不少于 150 个；
e） 方案阶段宜采用布放海域实测波浪谱开展试验，如未获得实测谱，宜对波浪的频率分布和方向分布进行分析，采用合适的波浪谱进行试验；
f） 方案阶段生存性试验应以五十年一遇的海况作为基本极限海况条件，时间应不小于 3 h；
g） 同步测量波浪和输出电气参数；
h） 应等水面平静后再进行下次试验，间隔时间宜不小于 5 min；
i） 试验完成后，应及时进行数据整理与分析，必要时进行补充试验。

7.3 试验数据采集

振荡体式波浪能发电装置的数据采集应在试验稳定的条件下进行，应采集波浪、功率、速度、姿态等数据参数，采集时应满足以下要求：

a） 规则波试验的波浪数据采集时间间隔应小于平均波周期的 1/20。在波浪稳定条件下，连续采集的波浪个数应不少于 10 个，取其平均值作为代表值，每组试验不少于 3 次；
b） 不规则波试验的波浪数据采集时间间隔应小于有效波周期的 1/20。在波浪稳定条件下，连续采集的波浪个数不应少于 150 个，并应按 JTJ/T 234-2001 附录 A 的规定计算波高和波周期的统计特征值。必要时，应计算波高和波周期的经验频率分布，进行波浪谱分析；
c） 波高和波周期分析应采用上跨零点法，并应设阈值；
d） 电气数据采集宜与波浪数据采集同步；
e） 数据取值应与仪器测量精度相匹配，应汇总原始资料并存储试验数据。

8 试验数据处理

振荡体式波浪能发电装置实验室测试的试验数据处理时应进行数据可靠性检查，并去除异常值，数据处理的计算公式为：

a） 规则波的输入功率密度计算方法见公式（1）：

$$P_{\text{regular}}=\frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (1)$$

式中：

P_{regular} ——规则波下单位宽度能流密度，单位为瓦每米（W/m）；

ρ ——水密度，单位为千克每立方米（kg/m^3）；

g ——重力加速度，单位为米每平方秒（m/s^2）；

H ——波高，单位为米（m）；

T ——波周期，单位为秒（s）。

b) 不规则波的输入功率时域计算方法见公式（2）：

$$P_{\text{irregularT}}=\frac{\rho g^2 H_s^2 \overline{T}}{64\pi} \quad \cdots\cdots (2)$$

式中：

$P_{\text{irregularT}}$ ——不规则波下时域方法计算的单位宽度能流密度，单位为瓦每米（W/m）；

ρ ——水密度，单位为千克每立方米（kg/m^3）；

g ——重力加速度，单位为米每平方秒（m/s^2）；

H_s ——有效波高，单位为米（m）；

$\overline{T}$ ——平均周期，单位为秒（s）。

c) 不规则波的输入功率频域计算方法见公式（3）：

$$P_{\text{irregularS}}=\frac{\rho g^2 H_{m0}^2 T_{02}}{64\pi} \quad \cdots\cdots (3)$$

式中：

$P_{\text{irregularS}}$ ——不规则波下频域方法计算的单位宽度能流密度，单位为瓦每米（W/m）；

ρ ——水密度，单位为千克每立方米（kg/m^3）；

g ——重力加速度，单位为米每平方秒（m/s^2）；

H_{m0}—— 由零谱矩得到的有效波高，单位为米（m）；

T_{02} —— 由二阶谱矩得到的平均周期，单位为秒（s）；

d) 捕获宽度计算方法见公式（4）：

$$C_W=\frac{P}{P_W} \quad \cdots\cdots (4)$$

式中：

C_W ——捕获宽度，单位为米（m）；

P ——单位宽度输出功率，单位为瓦每米（W/m）。

P_W ——单位宽度输入功率，单位为瓦每米（W/m）。

e） 捕获宽度比计算方法见公式（5）：

$$R_W = \frac{C_W}{D_L} \qquad (5)$$

式中：

R_W ——捕获宽度比；

C_W ——捕获宽度，单位为米（m）；

D_L ——迎浪宽度，单位为米（m）。

9 试验报告

振荡体式波浪能发电装置实验室试验报告宜包括以下内容：

a） 试验的背景与目的；
b） 发电装置模型、实验室与试验设施的介绍；
c） 试验内容和技术要求，包括日期、地点、试验人员、测量仪器的选型和布置、试验设备等；
d） 试验的布局设计与工况设计；
e） 试验过程；
f） 试验数据列表；
g） 试验数据分析结果；
h） 结论。

参 考 文 献

[1] GB/T 20001.4-2015 标准编写规则 第4部分：试验方法标准
[2] GB/T 33442-2016 海洋能调查仪器设备通用技术条件
[3] GB/T 33543.1-2017 海洋能术语 第1部分：通用
[4] CB/T 3675-2016 水面船模耐波性试验规程
[5] DL/T 5244-2010 水电水利工程常规水工模型试验规程
[6] QX/T 73-2007 风电场风测量仪器检测规范
[7] IEC 60688-2012 Electrical measuring transducers for converting A.C. and D.C. electrical quantities to analogue or digital signals
[8] IEC 62600-103-2018 Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 103: Guidelines for the early stage development of wave energy converters - Best practices and recommended procedures for the testing of pre-prototype devices