ICS xx.xx

CCS

团体标准

T/CSO XXXX—202X

振荡浮子式波浪能转换装置全过程

能量转换效率的实验室测试方法

Laboratory testing methodology of whole-process

energy conversion efficiency of oscillating buoy

wave energy converter

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国海洋学会 发布

目  次

[前言 III](#_Toc132310416)

[引言 IV](#_Toc132310417)

[1 范围 1](#_Toc132310418)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc132310419)

[3 术语和定义、符号和缩略语 1](#_Toc132310420)

[4 测试原理 3](#_Toc132310421)

[5 仪器设备 4](#_Toc132310422)

[6 试验模型 4](#_Toc132310423)

[7 测试步骤 5](#_Toc132310424)

[8 精密度和测量不确定度 10](#_Toc132310425)

[9 质量保证和控制 10](#_Toc132310426)

[10 测试报告 10](#_Toc132310427)

[参考文献 11](#_Toc132310428)

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。

本文件由大连理工大学提出。

本文件由中国海洋学会归口。

本文件起草单位：大连理工大学、中国海洋大学、青岛理工大学、北京石油化工学院、中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院。

本文件主要起草人：宁德志、乔东生、史宏达、荆丰梅、秦明、梁海志、张崇伟、陈丽芬、闫俊、王荣泉、于通顺、刘臻、孙长平、吴松熊、雷肖。

引  言

波浪能是海洋可再生能源中最具市场化前景的清洁能源之一。近20年来，波浪能转换装置在技术上日趋完善，现正进入市场化探索与初步运营阶段。其中，本文件关注的振荡浮子式波浪能转换装置是目前众多波浪能转换装置中最为成熟的一种，其利用浮子在波浪作用下的运动，经过各级能量转换将波浪能转换成电能。

振荡浮子式波浪能转换装置全过程能量转换效率的实验室测试是衔接装置概念设计和实海况测试的必经途径，是装置研发必不可少的重要环节。通过标准化的实验室测试，形成统一标准的波浪能转换装置各级能量转换效率测试报告，可以指导完成装置可行性验证、结构选型设计等工作。

为规范振荡浮子式波浪能转换装置的实验室测试方法及具体流程，给相关研发人员提供统一的参考规范，编制《振荡浮子式波浪能转换装置全过程能量转换效率的实验室测试方法》。

振荡浮子式波浪能转换装置全过程能量转换效率的 实验室测试方法

范围

本文件规定了振荡浮子式波浪能转换装置全过程能量转换效率的实验室测试方法。

本文件适用于在实验室中开展的振荡浮子式波浪能转换装置缩尺物理模型试验。

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 33543.1—2017 海洋能术语 第1部分：通用

GB/T 37551—2019 海洋能 波浪能、潮流能和其他水流能转换装置术语

CB/T 3471—2016 风、浪、流联合作用下浮式系统模型试验规程

JTS/T 231—2021 水运工程模拟试验技术规范

SJ/T 11434—2012 功率计通用规范

术语和定义、符号和缩略语

术语和定义

GB/T 33543.1—2017，GB/T 37551—2019与CB/T 3471—2016界定的术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了其中的主要相关术语和定义。

波浪能转换装置 **wave energy converter; WEC**

捕获波浪能量并将其转化为其他形式能量的装置。

[GB/T 37551—2019，定义4.2.1]

振荡浮子式波浪能转换装置 **oscillating buoy wave energy converter; OB**

利用波浪往复驱动浮子运动，再通过液压或机械驱动发电机发电的装置。

[GB/T 37551—2019，定义4.2.6]

转换效率（从资源到电缆） **conversion efficiency（resource to wire）**

海洋能发电系统整体发电效率的量度。

注1：转换效率由海洋能发电系统的输出电功率与海洋能资源的入射功率之比来计算。

注2：对于波浪能发电系统，转换效率（从资源到电缆）有时也称为波浪到电缆的转换效率。

注3：转换效率通常针对在较长的时间段进行计算。

[GB/T 37551—2019，定义4.1.6]

能量提取系统 **power take-off; PTO**

将能量俘获装置的运动转换为如电能等可利用的能量形式的机械部件的集成。

[GB/T 37551—2019，定义4.1.12]

缩尺比 **scale ratio**

模型和实体所有各项相应的线性尺度之比。

[CB/T 3471—2016，定义3.1.1]

一级转换 **primary conversion**

利用能量俘获装置将海洋能转换为机械能的过程。

[GB/T 33543.1—2017，定义2.11]

二级转换 **secondary conversion**

将能量俘获装置的机械能转换为旋转动能的过程。

[GB/T 33543.1—2017，定义2.12]

三级转换 **tertiary conversion**

将二级转换所得到的能量通过发电机或其他设备转换成电能或其他有用的能量形式的过程。

[GB/T 33543.1—2017，定义2.13]

波浪谱 **wave spectrum**

波浪能量相对于频率的分布，反应海浪的内部特性。

注：波浪谱也称为波浪频谱，包括频谱和方向谱。频谱是指波浪的能量相对于频率的分布；方向谱是指波浪的能量相对于频率和波浪传播方向的分布。

[GB/T 37551—2019，定义2.1.22]

JONSWAP谱 **JONSWAP spectrum**

表示为风速和风区长度的函数，是基于“联合北海波浪计划”（Joint North Sea Wave Project，JONSWAP）而开发的双参数谱。

注1：JONSWAP谱是在Picrson-Moskowitz谱中引入谱峰升高因子后的改进形式。

注2：JONSWAP谱存在不同的参数化方法，通常将其表达为有效波高和谱峰周期的函数。

[GB/T 37551—2019，定义2.1.22.2]

缩略语

下列缩略语适用于本文件。

PTO：能量提取系统；

Fr：Froude数；

F.S.：传感器满量程；

ITTC：国际拖曳水池会议；

FFT：快速傅立叶变换。

测试原理

振荡浮子式波浪能转换装置的能量转换过程一般宜分为一级波能俘获、二级能量转换和三级电能转换三个过程。

应根据其实际能量传递过程进行具体分级，并开展全过程能量转换测定。

仪器设备

物理造波水池：水池宽度>5倍模型最大尺寸，水池消波段须有效抑制波浪反射。

浪高仪：全量程>3倍最大波高，分辨率≤0.2mm，准确度≤±0.1%F.S。

位移传感器：分辨率≤0.03%F.S，准确度≤±0.05%F.S。

拉压力传感器：分辨率≤±0.1%F.S，准确度≤±0.5%F.S。

扭矩转速传感器：分辨率≤±0.1%F.S，准确度≤±0.25%F.S。

功率分析仪：准确度≤±0.03%F.S。

试验模型

根据目标海域波浪环境特征，结合装置尺寸与试验条件，确定物理模型水池试验缩尺比，一般情况下缩尺比不宜小于1:30。

可采用缩微模型PTO系统或通过设计等效阻尼系统来实现原型PTO系统的作用规律相似。

试验模型满足如下相似条件：

* + 1. 几何相似，即要求模型和原型的几何形状相似。
		2. 重力相似，即保证模型和原型的Fr相等。

 (1)

* + 1. PTO作用规律相似，即保证模型和原型PTO系统的能量转换效率一致。

实验室模型各物理量应按表1给出的物理量比尺关系对原型进行缩尺设计或计算。

表1 物理量比尺关系

|  |  |
| --- | --- |
| 物理量 | 比尺关系 |
| 长度 |  |
| 面积 |  |
| 体积 |  |
| 时间 |  |
| 密度(水) |  |
| 线速度 |  |
| 线加速度 |  |
| 角度 |  |
| 角速度 |  |
| 质量 |  |
| 力 |  |
| 扭矩 |  |
| 功率 |  |
| 功 |  |
| 注： *L*p——原型长度，*L*m——模型长度，*A*p——原型面积，*A*m——模型面积，*V*p——原型体积，*V*m———模型体积，*t*p——原型时间长度，*t*m——模型时间长度，——原型密度，——模型密度，*v*p——原型线速度，*v*m——模型线速度，*a*p——原型线加速度，*a*m——模型线加速度，——原型角度，——模型角度，——原型角速度，——模型角速度，*M*p——原型质量，*M*m—模型质量，*F*p——原型力，*F*m——模型力，*T*p——原型扭矩，*T*m——模型扭矩，*P*p——原型功率，*P*m——模型功率，*W*p——原型功，*W*m——模型功，重力加速度。 |

测试步骤

测试工作程序



图2 测试与评估过程

波浪能装置整体缩尺协调

* + 1. 实验室模型各物理量应按表1给出的物理量比尺关系对原型进行缩尺设计或计算。
		2. 系统测试前，应开展规则波和不规则波的波面时程生成试验，波高、周期需按照Fr相似准则模拟。
		3. 发电机的选型配置应以功率为主要指标，并满足Fr相似准则。

测量仪器标定

* + 1. 确定传感器量程，以及输出模拟信号量程。
		2. 将传感器全量程（测量范围）分成若干等间距点。
		3. 根据传感器量程分点情况，由小到大逐渐输入标准量值，记录与各输入值对应的输出值。
		4. 将标准量值由大到小依据分点情况依次递减输入，记录与各输入值对应的输出值。
		5. 按7.5.3—7.5.4所述过程，对传感器进行正反行程往复循环多次测试（一般不应少于3次），记录输入输出测试数据。
		6. 对测试数据进行分析处理，确定传感器的特性指标。

PTO的标定

* + 1. 系统测试前，应先开展PTO的加载和标定测试试验。
		2. PTO模型输入端连接加载装置，输出端连接发电机和电子负载。
		3. 通过加载装置模拟浮子模型在波浪作用下的运动响应并将其作为PTO模型的输入，输入PTO模型的运动响应与原型浮子的运动响应之间应满足Fr相似准则。
		4. 须同步测量PTO模型与加载装置之间的相互作用力、PTO模型与发电机之间的相互作用力、发电机的线速度/转速，保证模型与原型的这三组物理量均满足表1所示的比尺关系。
		5. 应同步测量PTO与发电机之间的相互作用力及相对运动速度，包括适用于旋转型发电机的扭矩*T*g和转速*R*g、适用于直线型发电机的拉压力*F*g和直线运动速度*v*g。

模型制作与测试校验

* + 1. 模型制作满足6.3节相似条件。
		2. 试验前应调整模型的重心位置/惯量，使其满足和原型的相似关系，误差要求可参见CB/T 3471—2016。

规则波试验的数据测量与采集

* + 1. 规则波的波高模拟误差应小于±5%，周期模拟误差应小于±5%。
		2. 规则波试验工况时，试验时长应保证至少10个波浪周期，取其平均值作为代表值，每组试验不应少于3次。
		3. 对规则波试验结果进行统计分析，求取至少10个周期的平均波高和平均运动幅值，分析出各参数频率响应传递函数，或者采用谐波分析方法。
		4. 正式测试时，应同步测量浮子在规则波和不规则波试验工况激励下与PTO之间的相互作用力/力矩*F*B及对应自由度下浮子运动的速度/角速度*v*B，同时还应分别测量波浪能转换装置前方和两侧的波面时程。
		5. 规则波试验的采样频率一般为20Hz~50Hz，对于力和力矩的数据采集频率应高于波浪数据的采集频率，有破碎波冲击力时采集频率不应小于1kHz。

不规则波试验的数据测量与采集

* + 1. 不规则波宜模拟波能装置工作海域的实测波谱；无实测波谱时，可按ITTC推荐的双参数谱或JONSWAP谱模拟；必要时，应模拟波列和波群。
		2. 不规则波的有效波高模拟误差应小于±5%，有效周期或谱峰周期的模拟误差应小于±5%，波能谱总能量的模拟误差应小于±10%。
		3. 不规则波试验工况时，试验时长所对应原型不小于3h，并应按JTS/T 231—2021的规定计算各采样参数的波高和波周期的统计特征值，必要时，可计算波高和波周期的经验频率分布或进行谱分析，每组试验不应少于3次。
		4. 不规则波试验的采样频率一般为20Hz~50Hz，对于力和力矩的数据采集频率应高于波浪数据的采集频率，有破碎波冲击力时采集频率不应小于1kHz。
		5. 不规则波试验结果可采用时域分析方法，依据波面、位移、速度等测试参数记录的时间历程作统计分析，求得平均值、有义值、最大值等统计值。
		6. 不规则波试验结果频域分析时可采用自相关函数法或FFT法计算波能谱，并可求出各响应谱的各阶矩、谱峰频率等各种特征值。在需要进行滤波时，应采用滤波器或数字滤波以尽量减小相移为准则。
		7. 正式测试时，应同步测量发电机输出端的电流*I*g、电压*U*g**。**

一级能量转换过程的输出功率计算公式

* + 1. 规则波的入射波浪能量*P*0

  (2)

式中，

*L*e——波浪能转换装置浮子的有效迎浪宽度；

*ρ*——液体密度；

*g*——重力加速度；

*C*——波浪运动的相速度；

*A*——波浪幅值；

*k*——波浪的波长；

*d*——水深。

* + 1. 不规则波的入射波浪能量*Q*0

  (3)

式中，

*N*——组成波个数。

* + 1. 浮子的输出功率***P***1

 (4)

式中，

若浮子做纵荡、横荡和垂荡运动：

***F***B——由拉压传感器测得的浮子所受的拉压力，

***v***B——由六分量仪浮子运动的速度；

若浮子做纵摇、横摇和回转运动：

***F***B——由扭矩转速传感器测得的浮子所受的力矩，

***v***B——由扭矩转速传感器测得的浮子运动角速度。

二级能量转换过程的输出功率计算公式

* + 1. 二级能量转换过程中的输出功率由发电机前段输入量测量计算得到，应按旋转型发电机和直线型发电机分别考虑，当装备多个发电机时，须考虑全部发电机的总输出功率。
		2. 旋转型发电机单机功率

 (5)

式中，

——二级能量转换输出功率；

——由扭矩转速传感器测得的扭矩；

——由扭矩转速传感器测得的转速。

* + 1. 直线型发电机单机功率

 (6)

式中，

——由拉压力传感器测得的拉压力；

——由位移传感器计算得到的速度。

三级能量转换过程的输出功率

 (7)

式中，

——三级能量转换输出功率；

——由功率分析仪测得的电压；

——由功率分析仪测得的电流。

一级能量转换效率*η*1

（规则波），或（不规则波） (8)

二级能量转换效率*η*2

 (9)

三级能量转换效率*η*3

 (10)

全过程能量转换效率*η*

 (11)

精密度和测量不确定度

每次试验前，应保证水面平静，方可进行下一次试验。

每个试验工况结束后，应及时分析试验数据，若发现测试结果个别测点数据异常或突变，应进行重复性试验。

质量保证和控制

波面、位移、速度、加速度、角度、角速度、角加速度、力、力矩、扭矩、发电机转速/线速度、电流、电压、功率等数据应同步采集，以保证数据采集过程中不会出现相位差。

试验中应对整个模型试验进行全程录像，对于关键部位需进行专门全程录像并和数据采集同步进行，以便进行试验数据对比验证。

测试报告

试验研究的测试报告应包括主报告和数据报告。

主报告是整个试验项目最为重要的关键性研究成果文件，数据报告作为主报告的附件，汇总各个单项试验数据分析的结果。

主报告应包含以下内容：试验名称、试验目的及要求、试验内容和相似准则、试验设备及仪器介绍、模型制作及海洋环境条件模拟方法及注意事项、试验过程与方法及注意事项、试验数据的采集与分析、结果分析与建议。

参 考 文 献

1. GB/Z 40295—2021 波浪能转换装置发电性能评估
2. DL/T 5244—2010 水电水利工程常规水工模型试验规程
3. JJF 1094—2002 测量仪器特性评定
4. IEC TS 62600—100:2012 Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 100: Electricity producing wave energy converters - Power performance assessment
5. IEC TS 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
6. 7.5-02-07-03.7—2021 ITTC Recommended Procedures Guidelines: ITTC Wave Energy Converter Model Test Experiments

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_