

ICS XX. XXX. XX

CCS XXX

团 体 标 准

T/QME XXXX-2024

波浪能装置海上性能测试与评价 技术标准

Technical Standards for Offshore Performance Testing and
Evaluation of Wave Energy Devices

(征求意见稿)

2024-XX-XX 发布

2024-XX-XX 实施

青岛市机械电子工程学会 发布

目次

前言 III

引言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 2

5 测试场 2

6 测量—总则 5

7 波浪能装置的功率输出测量 6

8 波浪观测 7

9 气象观测 12

10 工作性能指标的计算 12

11 报告 14

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》的规定编写。

本文件的发布机构不承担识别可能涉及的相关专利的责任。

本文件由崂山国家实验室提出。

本文件由青岛市机械电子工程学会归口。

本文件起草单位：崂山国家实验室、中国海洋大学、XXX。

本文件主要起草人：史宏达、刘臻、李坚、XXX。

本文件为首次编制。

引 言

本标准提出的方法适用于在开敞海域进行测试的波浪能转换装置（系统）。此文件中的波浪能转换装置（系统）专指通过利用外海风生波浪进行电力转换并通过海底电缆传送至陆上电网的系统。

目前波浪能发电仍处于产业化前端，开敞海域的装置测试数据仍较少。本文件内容主要针对研发阶段的装置测试，并收集更多外海实测数据，积累更多测试经验。

波浪能装置工作性能评价的主要目的如下：

- 提供一种不同海况条件下波浪能转换装置能量输出的测量方法；
- 提供一种针对上述测量结果的报告通用模板；
- 若测试海域的波浪能资源数据充足，可采用本标准进行波浪能转换装置能量输出的预评估。

通过开展上述工作，装置开发人员可开展波浪能装置的实际能量输出状况与预期设计的比较。此外，本标准的制定也有利于波浪能产业的健康有序发展。

本文件中提出的测试步骤是为了使按照该方法测试获得的性能评价具备可移植性，即外海测试场获得的结果可用于波浪能装置在未来拟投放地点性能的预测。对波浪能装置而言，上述准则适用于深海或较深海域，而对于近岸或靠岸的波浪能装置，上述测试步骤及结果不具有可移植性。因此，特殊形式的波浪能装置需采用专门的测试评估方法，不在本文件中赘述。

波浪能装置海上性能测试与评价技术标准

1 范围

本文件主要针对投放于外海测试场的漂浮式波浪能装置（悬链式锚泊或张紧式锚泊）与底铰链锚固的波浪能装置，不适用于封闭式的波浪水池或海湾。

本文件建议针对拟定型的波浪能装置使用，并采用推荐方法获得可靠的、充分的测试结果用以评估装置的工作性能。本文件也可针对原型或大比尺模型装置开展功能验证性测试。

2 规范性引用文件

本文件使用过程中需参考下列国际规范标准：

- 国际电工学会 IEC60068-8 换能器规范；
- 国际电工学会 IEC60044-1 电流传输规范；
- 国际电工规范 IEC60044-2 电压传输规范。

3 术语和定义

本文档中将使用的术语、定义与符号如下。

3.1 波浪能转换装置（系统）

利用风生波浪动力转换生成电力并通过电缆传输至陆上电网的系统。

3.2 波候波长

投放海域水深下功率周期对应的正弦波长。

注1：该定义用以提供投放水深条件下的参考长度；

注2：功率周期是指装置投放海域波浪能谱最大能量范围对应的波浪周期。

3.3 波浪能

水波中的时均能流。

3.4 单向波能

通过平行于波能线单位长度的时均能流。

3.5 全向波能

通过单位直径圆环的时均能流。

3.6 单一方向波能

多向波浪场中各向波浪投影至某一方向上的时均能流。

注 1：该定义是指垂直于某投影方向单位宽度上的时均能流；

注 2：能流密度的单位为千瓦/米，kW/m。

4 符号

f ：频率

Δf ：单位增量或间隔

i ：频率或谱值编号（角标）

S_i ：频谱中对应的第*i*个频率的波幅谱密度

P_i ：频谱中对应的第*i*个频率的能量谱密度

v_g ：波群速度

ρ ：海水密度

g ：重力加速度

A_1, B_1, A_2, B_2 ：归一化谐波

θ ：均方向角

σ_1 ：一次谐波的方向分布

σ_2 ：二次谐波的方向分布

γ ：方向分布的偏斜度

δ ：方向分布的峰度

s_1 ：一次谐波分布标号

s_2 ：二次谐波分布标号

m_n ：n阶谱矩

H_s ：有效波高

H_{m0} ：0阶谱矩波高

T_z ：平均跨零周期

T_e ：能量周期

ν ：谱宽参数

ν_p ：能均谱宽参数

P_{omni} ：全向波能

$\text{Var}(P)$ ：波能方差

D ：样本时长

P_{nett} ：单向波能

Θ ：能均方向角

UI ：单向标号

P_{WECs} ：波能转换装置（系统）的电力输出

P_{SEA} ：外海波能（等于 P_{omni} 或 P_{nett} ）

5 测试场

5.1 总则

波浪的重要特征是随机性，因此摒除测试场的时空分布特征对于合理选择测试场具有重要意义。波浪能装置工作性能评价对场地的选择不同于装置投产阶段追求个别的资源丰富地区。本章的主要内容是介绍如何识别测试场的波浪时空分布特征。

波浪的空间分布特征中的水深通常小于四分之一倍的波长，水平方向的尺度则要数倍于特征波长。

波浪的时间分布特征则与潮流有关。潮流会通过影响能量传递率进而改变波浪群速。潮流还可能影响波浪的绕射并带来其空间分布的变化。上述影响需在流速达到特征波群速的10%以上时予以考虑。上述速度值多在潮汐变化周期内的特定时刻出现，其总体影响可增加预测的不确定性。

5.2 初始选址

5.2.1 概述

选址应对备选地点进行初步评估。备选场址首先在常浪向无明显遮挡，深水场址与浅水场址的选择将在5.2.2与5.2.3中描述。

一旦初步评估确定了备选场址，后续需详细调查工作将在本章中详述。

5.2.2 备选深水场址

深水场址应具备悬链式或张力式锚定泊位，其水深通常不大于特征波长的1.5倍。海底地形应平坦为宜，不应包含使波浪产生聚集或分散的突变地形。测试场范围内的流速应一致且不宜大于2m/s。

注：深水场址折射现象相对不明显，因此在此条件下的测试结果具备较高的可信度。

5.2.3 备选浅水场址

浅水场址通常服务于采用底铰链式或短张力锚型式的浅水波浪能转换装置。水深通常小于特征波长的四分之一。测试场应位于浅水区、地形坡降规则，应包含使波浪产生聚集或分散的突变地形。

对于沿岸线布置的波浪能装置，其工作性能的评价较为困难。建议采用数学模型与现场实测相结合的方法开展相关资源的评估。

注：浅水区的波浪更容易受到折射现象的影响。若海底地形自岸向海中均匀坡降，相关预测将较为准确易行。例如，与波浪能装置相同水深处的观测数据可直接应用于相关计算评估，深水区的波浪观测数据则需要进行修正，简单地形的修正可得到较为准确的结果。

5.3 水深测量

测试场区域的水深应开展测量工作。测量范围应略大于备选场址范围，以用于开展波浪与潮流模型的网格绘制工作。

注：测量范围与网格划分与数学模型有关。网格应在各个方向上均扩展5公里范围，且至少距岸5公里。对于波浪折射模型，网格应适应地形与范围的突变。对于衍射模型，网格间距应数倍小于波长，波浪模型的网格宜适用于潮流模型。

5.4 海流测量

海流测量应在备选场址内不少于一个点位开展。测量时间不少于30天。采样应至少覆盖水体上升的半个周期。对于构建数学模型而言，采样应尽量覆盖尽可能大的范围。通过分析可得潮流与余流的相关信息。

5.5 潮高测量

潮高测量应在备选场址开展，测量时间不少于30天。通过分析可得潮流与余流的变化信息。

5.6 海流数学模型

为了更好的了解海流的空间分布特征，建议构建或使用计算机模拟数学模型。在潮流主导的水域，应采用潮流数学模型。对于其他海流影响明显的海区，上述影响应在数学模型中考虑。

5.7 波浪模型

5.7.1 概述

波浪数学模型应至少具备模拟以下物理过程的功能：

- 海岛或其他陆域掩护；
- 水深地形变化引起的折射；
- 岸滩反射与海岛或其他陆域反射；
- 底摩阻；
- 波流相互作用（包括海流引起的折射）；
- 波浪破碎与白帽。

输入的波浪条件取决于波浪谱与海流型式，取值范围如5.7.2至5.7.6所述。

5.7.2 波谱

波谱应采用公认的半经验公式，如PM谱或JONSWAP谱。单峰的谱形式可用于本文档中所涉及的方向谱与频谱，应充分考量方向分布函数等相关谱参数或参考相关规范。

5.7.3 波周期

功率周期取值时应考虑如下要点：

- 相关海域能量矩阵中能量最大的区域；
- 对于长期工况，则应考虑累计频率大于 95%的情况。

注：长期工况可用于检查波浪折射的影响，若确实存在上述影响，则应考虑较短的周期值。

5.7.4 波高

波高取值时应考虑如下要点：

- 相关海域能量矩阵中能量最大的区域；
- 对于长期工况，则应考虑功率周期累计频率大于 95%的情况。

5.7.5 波向

有代表性的波浪方向均应考虑。

5.7.6 海流

海流影响应考虑如下几种情况：

- 无海流状况（平潮）；
- 大潮平均高潮的最大落潮流速；
- 大潮平均高潮的最大涨潮流速；
- 含有无潮点的区域。

5.8 投放前的波浪观测

对于浅水区的底铰链型波浪能装置而言，摸清装置投放区域的波浪条件较为困难。因此，投放前应在投放点开展波浪观测以便于验证数学模型的准确性。上述验证工作可通过测波点与投放位置的比较进行，并藉此获得能量传递函数。建议观测工作在冬季展开。

5.9 场址调查的后续工作

5.9.1 深水区转移

深水区测试场的水深通常应大于四分之一倍波长。若波浪模型预测结果显示测试场附近的波浪场具有较为明显的时空特征变化，则应进行转移。

5.9.2 浅水区转移

该内容适用于底铰链式或张紧式装置锚固系统，所处水深小于特征波长的四分之一倍。由于该类装置的投放海域的波浪能资源较难评估，因此通常要求测试地点远离装置数百米。若5.7节或5.8节的数学模型预测发现明显的折射、反射等现象导致能量变化超过5%，则应对水深进行相应修正。

6 测量—总则

6.1 概述

工作性能评估应包括波浪场的能量样本与装置电力输出结果的评价。本章将给出开展上述工作的基本规则，具体的装置能量与波浪能量评估方法将在第7、8章中给出。

6.2 比较方法

6.2.1 概述

波浪能装置与波浪观测设备应置于无明显波能分布变化及海流影响的区域。装置与设备均应置于相同的水域，但受波浪传播随机性的影响，在对两组随机数据样本进行比较时应进行统计学处理（详见第8、10章）。

6.2.2 测试时长

性能评价测试的时长较难给出，主要应考虑如下几点：

- 应保证采集到足够多的数据以构建测试场海域的能量评估矩阵；
- 除了显著波高与功率周期外，测试过程可能会受到不同参数的影响；
- 测试时长应保证覆盖描述波浪能装置工作时限的波高散布图。

注1：采样长度样本的方差估计在10.4条注中给出，数据增加后上述估计可被修正。

注2：除了显著波高与功率周期外的装置参数敏感性分析将在10.2条给出。

6.3 样本时长与间隔

理论上每组样本宜不小于1.5小时，相邻样本采样开始时间间隔宜为1小时。上述措施可保证统计的准确性与数据代表性，但需保证所采用数据均为有效可用的。

6.4 同时性

波浪能装置与环境波浪功率样本重叠时长不宜小于15分钟。若按照上一节内容进行数据采集，上述要求易达到。若一组样本出现缺失，则重叠时长宜延长至1小时以保证采集到足够数量的样本数据。

6.5 数据记录

6.5.1 概述

数据记录应按月保存在相应的文档中。文档应包括一个文件头与相应的数据记录（或无数据记录）。按月归档非强制性要求，但经验表明采用该间隔较为方便。

文件头信息应包括波浪场与装置数据的测量、处理与记录细节。文档应便于理解且易于查询检索。数据记录应从1小时时长的波浪条件与装置功率输出数据样本中获得。

数据记录应标记记录开始时间。

数据进行记录与处理时应进行质量检查，相应结果宜作质量控制标记。

数据记录的标称时刻序列宜列出。波浪场与装置数据需按各自序列归档于最接近的标称时刻。缺失记录应根据大于1.5小时记录时长最临近的数据记录生成补充。

数据记录宜采用ASCII码格式。

装置与波浪场数据记录内容分别在6.5.2与6.5.3条给出，并在第7、8章详述。

6.5.2 波浪能装置数据

每组数据均应包括以kW为单位的电力功率时间历程测量值。若无，则应根据相关变量进行计算获得。平均、最大、最小功率与标准差应计算并记录。具体内容详见第7章。

6.5.3 波浪场数据

每组数据的方向谱宜按照纵横摇波浪浮标或等效系统输出格式记录，如常浪向的频率表。理想的频率表应覆盖0.04Hz至0.5Hz范围，并可根据观测系统的不同进行适当的调整。部分系统的方向谱为矢量波数的函数，该频谱建议转换为频率表型式。

除方差谱外，以下变量还应进行记录或计算：

- 功率谱：单位频率功率出现频率列表（单位：kW/m/Hz）。该数值可记录于方向谱中；
- 全向功率或总功率：按频率统计的功率总和（单位：kW/m）；
- 方向分解功率：按照方向统计的功率总和（单位：kW/m）；
- 平均功率方向（由正北向记）；
- 显著波高、功率周期，0阶谱矩周期。

具体内容详见第7章。

7 波浪能装置的功率输出测量

7.1 概述

波浪能装置的功率输出（包括系统输出与辅助电机的功率输出）应以交流电网频率形式，主要采用的是平均功率输出（包括均方差）的一小时时长样本。为了对装置功率输出开展更为细致的研究，样本采集应每24小时进行一次。功率应按照2Hz频率处理，功率信号应进行滤波处理。除了平均与方差值外，每小时样本的最大与最小值也应记录在案。

7.2 用于电力输出的波浪能装置定义

通常功率输出的测量均在装置输出端进行，但有些装置的电力处理系统不在装置内部。上述电力处理系统在进行性能评估时也应定义为装置的一部分。对于遥控式的功率转换器，则应视转换器的输出端

为装置的输出端。由于电缆或其他部件引起的功率损失需进行相应的调整计算。进行上述计算的方法则应在文件头中进行描述并辅以相应的文档说明。

7.3 仪器与率定

功率转换器的测量精度应等于或小于装置装机容量的5%。

电力变送器也应等于或小于5%并应进行率定。率定工作应满足如下技术标准要求：

- 国际电工学会 IEC60068-8 换能器规范；
- 国际电工学会 IEC60044-1 电流传输规范；
- 国际电工规范 IEC60044-2 电压传输规范。

功率转换器的工作范围应足以覆盖所有正、负峰值。低电流会导致电流变送器输出结果出现非线性变化，因此需进行正确的规定。

7.4 波浪能装置功率数据处理

1小时样本记录的装置输出功率的平均值与标准差应进行计算与记录。其他质量控制数据也应根据需要进行记录。

8 波浪观测

8.1 波浪场说明

通常，波浪场可表征为由一组不同方向、频率及相位的波列共同组成。每组波列均满足线性波理论与方程，而波浪场为高斯随机过程。波浪可由方向谱描述，并提供波高的频率与方向分布特征。方向谱包含了波浪场统计特征的所有内容，包括能量的传递过程。时域分析对某些应用非常重要，但对于功率分析频率分析更适用。

注：高斯模型被认为是能够较为成功重现波浪变化性的模型。该变化性是指在某点处观察到的波浪可被视为由较大的范围内生成并传播的波浪随机组成，上述波浪在此期间经过持续的细小变化。由于上述研究基于连续的生成条件，因此其自然条件下的变化性往往高于高斯模型。

因此，某组1000秒波浪观测样本将区别于下一组1000秒的样本，而再下一组样本则有可能与第一组相似。据计算，30分钟样本的标准差约为平均值的10%，而1小时的标准差则下降到7%，上述计算均通过波谱理论计算公式获得。其他通过连续记录估计功率并直接计算变化性的方法并不适用，因为样本长度不可能无限大以保证计算获得准确的功率。

样本不仅有时间部分变化，空间分布变化也很明显。装置点处的波浪条件与同时刻的测波点处的波浪一定不同，这对装置工作性能评估非常重要。假设上述时空变化性等效，如波浪场的遍历性特征，我们原则上可量化装置工作性能评估的准确性。

8.2 仪器布设

8.2.1 概述

仪器应与波浪能装置足够近以保证两者所处区域的波候相同，但距离应保证不受装置折射或遮蔽效应影响。

8.2.2 深水测试场

假设初始场址调查未发现明显的波型变化，则仪器布设需满足下述要求：

- 仪器与装置的水深应相同；

- 仪器与装置应位于主要波向的同侧，例如：装置的侧面或前面；
- 装置与仪器间夹角不应大于 20 度。

注：对最小夹角的规定是关于两方面要求的一个简洁表达：测波点与装置间的最小距离与装置最大水平方面角的要求。

8.2.3 浅水测试场

多数情况下浅水区的仪器应布设至足够水深以保证测量的准确性。多数测波装置的水深要求为10m，但在5m的浅水区则会出现波浪破碎、反射、泥沙悬停及其他非线性影响。

当装置位于浅水区时，波浪的快速空间变形将会出现，因此需有效评估装置与装置投放前测波点之间的波浪变化，需采用的功率传递函数应按照5.7与5.8节计算。

8.2.4 测波仪器数量

对于波浪能量均有贡献的多个方向的波列，宜按需要布置多组测波仪器。

注：上述情况多出现在海岛类的测试场。

8.3 仪器种类

波浪观测仪器主要功能是在单一位置进行数月至数年的波浪观测。因此，最合适的观测仪器为固定位置的类型。该类型可靠性高，可进行在线数据记录与自动传输。

浅水区的准确测试较有难度，波浪场极易受到反射影响且波浪易于破碎。此外，波向范围较深水区更小，因此在浅水区对仪器波向测量的要求较小。

注：最常用的仪器类型为随波性浮子。该类浮子既可以是纵横摇式浮子用以测量水面升沉与坡度，也可以为质点跟随型浮子用以测量水面升沉与轨道运动。

另一类固定式仪器为声学多普勒流速剖面仪（ADCP）。该类仪器可用于短时观测且适宜于浅水区应用（10m水深）。仪器多为底部固定式，采用向水面传送声能脉冲的方式工作。声能受到水中粒子（浮游生物或泥沙粒子）作用发生散射后被仪器接收到。水体发生运动则回传信号发生多普勒频移，可用于计算剖面流速。

遥感系统可用于近岸测试系统（近岸至离岸数公里），称为X波段雷达。该仪器可用于测量半平方公里范围内的高解析度方向谱。

对于极浅水深，则宜采用压力式传感器。

8.4 波浪浮标锚固

波浪浮标应进行锚固且可对波浪运动产生反应，同时保证大浪条件下的生存性。对于深水区以及石质海底，特别是高流速区，浮子可能需要水下附体进行辅助锚固。由于浮标较为脆弱，因此需采取措施进行保护以保证浮子生存。保护措施应包括投放标记浮子并广泛宣传波浪浮标的投放情况。

8.5 仪器规格与率定

所有波浪测量仪器均应具有较高的准确性及信号丢失率。仪器需具备可追溯的率定标准，数据应主要包括方向、水面坡度、位置位移与采样频率。

对于ADCP系统，测量单元深度与速度测量的准确性都应进行验证，这是由于仪器是全淹没的，ADCP的数据恢复方式需提前进行考虑。

仪器的数据分析系统应能够提供方向谱数据，格式如8.6.3所示。

8.6 波浪数据的分析与展示

8.6.1 概述

本节内容主要列出在数据记录中所需的信息，以便进行工作性能评估。各变量的定义也将在本节给出。

8.6.2 样本数据记录的信息内容

样本应按标称时刻归档。当某个标称时刻对应的文档缺失时，则应创建一个专门格式的“无数据”文档。

样本数据记录应包含以下内容：

- 日期与时间标识；
- 深度，以 m 计。若潮差导致波浪群速增长超过 5%，则考虑潮差影响的实际深度作为测试场的深度。除此之外，可采用平均水深。
- 关于包含方向特征的方差谱与功率谱信息的频率列表；
- 数个可获得的参数，包括功率、平均方向、波高与周期；
- 质量控制标示。

注：关于谱数据与非谱数据：由于数据的基本处理与表述方法均是基于频域范围的，以保证所有数据均是可追溯的。当按频率形式记录时，即称为谱数据，否则为非谱数据。后续章节主要依据的为谱数据。

8.6.3 谱数据

以下变量需进行记录。角标 i 应从 1 遍历至 N ， N 为谱预估的数量。

频率 f_i ：理论上频率列表范围应从 0.04Hz 线性覆盖至 0.5Hz。频率间隔通常不应大于 0.01Hz，但在谱峰与低频区可适当减小。若频率间隔非线性，如指数分布，间隔应进行合理设计以足够精度满足频谱组成部分分析的需要。

频率间隔 Δf_i ，频谱估计中频率的间隔。此外，文件头中也应包含相应信息以保证频谱估计中的频率间隔计算。

方差谱 S_i ，每组频率均应给出波浪幅值的方差密度，单位为 m^2/Hz 。

功率谱：

$$P_i = \rho g S_i v_g(f_i) \dots\dots\dots (1)$$

每组频率对应的功率（能流）以长度与频率表征的密度形式表示，单位为 $kW/m/Hz$ 。

归一化角谐波 $(A_1, B_1, A_2, B_2)_i$ ，不同变量方向分布傅里叶级数的复变角谐波应按照每组频率记录。对于纵横要波浪浮标或等效系统则需进行复变调谐。当出现更多角谐波时，均应记录在案。

平均方向 $(\theta_1)_i$ ，按正北方向计的平均角度应根据第一角谐波在各组频率上给出：

$$\theta_1 = \text{ATAN} 2(B_1, A_1)(+2\pi)$$

注：ATAN2 为第四象限的反正切计算符号。

方向性系数（与模型无关），一系列表征方向性分布的系数需被计算并用于报告。如下的中心谐波系数按如下公式定义，但无需记录：

$$M_1 = C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$M_2 = \frac{A_2(A_1^2 - B_1^2) + 2A_1B_1B_2}{A_1^2 + B_1^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$N_2 = \frac{B_2(A_1^2 - B_1^2) - 2A_1A_2B_2}{A_1^2 + B_1^2} \dots\dots\dots (4)$$

方向分布（与模型无关） $(\sigma_1)_i$ ，波谱的方向分布均方根角度，由第一谐波计算而得，应按照频率逐一计算记录：

$$\sigma_1 = \sqrt{2(1 - M_1)} \dots\dots\dots (5)$$

方向分布（与模型无关） $(\sigma_2)_i$ ，波谱的方向分布均方根角度，由第二谐波计算而得，应按照频率逐一计算记录：

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{2}(1 - M_2)} \dots\dots\dots (6)$$

偏斜度（与模型无关） γ_i ，方向分布的偏斜度应按照频率逐一计算记录：

$$\gamma = -\frac{2\sqrt{2}N_2}{(1 - M_2)^{3/2}} \dots\dots\dots (7)$$

峰度（与模型无关） δ_i ，方向分布的峰度应按照频率逐一计算记录：

$$\delta = \frac{3 - 4M_1 + M_2}{2(1 - M_1)^2} \dots\dots\dots (8)$$

方向传播系数 $(s_1)_i$ ，方向分布模型中根据第一谐波按如下公式计算：

$$D(\theta) = F(s) \cos^{2s} \frac{(\theta - \theta_1)}{2} \dots\dots\dots (9)$$

其中 F 为正则函数。方向传播系数应按照如下公式各频率逐一计算：

$$s_1 = \frac{C_1}{1 - C_1} \dots\dots\dots (10)$$

方向传播系数 $(s_2)_i$ ，方向分布模型中根据第二谐波按如下公式计算：

$$s_2 = \frac{1 + 3C_2 + \sqrt{1 + 14C_2 + C_2^2}}{1 - C_2} \dots\dots\dots (11)$$

其中， $C_2 = \sqrt{A_2^2 + B_2^2}$ 。

8.6.4 非谱数据

如下变量需进行记录：

方差谱频数矩 m_n ，由 $n = -1$ 至 2 进行计算：

$$m_n = \sum_{i=1}^N s_i f_i^n \Delta f_i \dots\dots\dots (12)$$

显著波高 H_s ，由谱矩计算得：

$$H_s = H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \dots\dots\dots (13)$$

平均跨零周期 T_z ，按如下公式计算：

$$T_z = T_{0,2} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \dots\dots\dots (14)$$

能量周期 T_e ，能量周期的定义按下式计算：

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \dots\dots\dots (15)$$

谱宽系数 ν ，谱宽系数按下式计算：

$$\nu = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \dots\dots\dots (16)$$

谱宽系数（功率权重） ν_p ，按下式计算：

$$\nu_p = \sqrt{\frac{m_{-1} m_1}{m_0^2} - 1} \dots\dots\dots (17)$$

该系数与 ν 相似，但由 S/f 计算得到。在深水区表征功率谱正则回转半径。

全向功率 P_{omni} ，频谱中的全部功率，不考虑方向，计算可得全部频率范围内的功率值：

$$P_{\text{omni}} = \sum_{i=1}^N p_i \Delta f_i \dots\dots\dots (18)$$

波能方差 $\text{Var}(P)$ ，全向波能的方差值应按下式计算：

$$\text{Var}(P) = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^N p_i^2 \Delta f_i \dots\dots\dots (19)$$

分向波能 P_{nett} ，按照方向分解的波能，按下式计算：

$$P_{\text{nett}} = \sqrt{P_N^2 + P_E^2} \dots\dots\dots (20)$$

$$P_N = \sum_{i=1}^N p_i (A_1)_i \Delta f_i \dots\dots\dots (21)$$

$$P_E = \sum_{i=1}^N p_i (B_1)_i \Delta f_i \dots\dots\dots (22)$$

功率加权平均方向 θ_p ，功率加权的平均方向，按照方向分解功率加权的方向矢量，按下式计算：

$$\theta_p = \text{ATAN2}(P_N, P_E)(+2\pi) \dots\dots\dots (23)$$

单向系数 UI ，单向性系数按下式计算：

$$UI = \frac{P_{\text{nett}}}{P_{\text{omni}}} \dots\dots\dots (24)$$

9 气象观测

9.1 概述

全套的气象观测不必开展,但风速与风向的观测对于开敞环境下的陆基或近岸测试场还是有必要进行的。相关记录应根据测试场的运行有计划的进行。

9.2 风速与风向测量

9.2.1 概述

气象观测将主要用于单一或阵列式波浪能装置的工作性能后报评价中。上述工作常需要风速风向用于包括涌浪在内的海况分析。在测试阶段,若能开展风速与风向观测也将是非常有帮助的。

9.2.2 仪器选择

风速计与风向标应能够适应海洋环境下的长期运行,并应按照专业标准进行生产制造与率定,可提供电流/电压输出以供自动数据记录之用。

9.2.3 仪器安置

风速计与风向标应安装在方圆300m内无障碍的场地内的杆顶。竖杆的高度按规范要求不宜小于10m。若上述高度难以满足,则不应小于4m。仪器安置地点应为近岸陆基。

若测试场满足上述要求则在原址进行安装。若测试场离岸超过20km,则需采用浮子式漂浮式固定。

9.2.4 数据记录与处理

进行风速风向测量的目的是按小时间隔的时长为1小时的平均风速时间序列值,并配合波浪与装置数据测量。由于风的间歇性,应适当的减小采样频率。

建议采用10分钟平均的风速标量与矢量值及风向记录模式,采集间隔为10分钟。1小时数据可由上述样本计算获得,单位采用m/s,方向自正北向计。

9.3 温度、压力与湿度观测

可根据装置开发者的要求进行观测。

10 工作性能指标的计算

10.1 概述

本节给出的方法主要利用波浪功率与装置输出功率评估波浪能装置的工作性能。

尽管波浪能仍处于产业化的前端,本规范主要针对采用不同技术的产品开发阶段的波浪能装置。测试的结果将提供技术与经济上的可信内容。

10.2 工作性能对参量的敏感性

由于外海实测操作的经验较少,因此现有方法也处于摸索阶段。由于外海的波浪功率主要取决于显著波高的平方与能量周期,因此现有方法也是基于上述两者的。其他变量包括平均波向,方向分布、频谱宽度等对不同装置工作性能的敏感度也有所不同。对于浅水区的底铰链式装置,水深(潮流或其他长时变量)将变得非常重要。尽管如此,关联上述变量与工作性能的实测数据仍太少。若有太多影响工作

性能的变量，则上述关联关系需进行考察，相关信息可查阅第6、9章。开展这项工作的目的是降低工作性能评价中的不确定性。

10.3 实测功率矩阵

该方法已成为展示装置工作性能的通用方法：显著波高与能量周期的双变量直方图，每个网格上均包含在相关海况条件下的装置平均输出功率。与传统表征方法比较起来，该方法可给出装置在整个测试期间整体的描述。建议网格按0.5m间隔划分显著波高、1.0s间隔划分能量周期，也可根据当地波候进行调整。

注：该方法一个不明显的劣势在于统计过程。由于海况的高度不确定性，海洋能装置的功率输出依赖于多个要素，部分要素未知或了解不深，因此明确每个网格上的不确定性非常重要。但网格中的功率值分布变化却不明显，这是由于他们的变化高度依赖显著波高及（特别是）能量周期。每个网格上装置输出功率变化与波浪功率变化基本是一致的。

另一个劣势是波浪功率没能展示出来。理想化的工作性能是在明确已知的波功率条件下所测量到的装置输出功率。除了深水外，波功率并非显著波高与能量周期的一个简单函数，因此即使忽略上述可变性，功率也难以被唯一定义。

10.4 捕获长度

本文件中提到的工作性能为装置功率输出与波功率的比值。波功率的单位为kW/m，装置输出功率的单位为kW，因此他们的比值为“长度”，该比值也就被称为捕获长度，该比值没有表征效率的含义或指代装置的任何尺寸，记作：

$$L = \frac{P_{WECs}}{P_{SEA}} \dots\dots\dots (25)$$

由于该比值主要受到显著波高与能量周期的制约，因此比值不会发生较为剧烈的变化。尽管比值的定义明确，但其数值仍有可能发生波动，标准误差约为14%。因此有必要构建另一个对应的独立矩阵以表征该数值的标准差。

注： L 是由两个随机变量决定的比值。尽管其统计规律尚未明确且会随着装置的不同而发生变化，波功率为卡方分布，也就是说装置输出功率也为卡方分布的数值。为了简便起见，假设装置输出功率为卡方分布，那么 L 也为 F 分布，其平均值与变化率可表征为：

$$\mu = \frac{v_2}{v_2 - 2}$$

$$\sigma^2 = \frac{2v_2^2(v_1 + v_2 - 2)}{v_1(v_2 - 2)^2(v_2 - 4)}$$

其中， v_1 ， v_2 分别为装置功率与波功率的自由度数。我们可通过计算功率的标准差，从波功率估计中获得自由度的影响。

$$v_2 = \frac{1}{(psd)^2} = \frac{1}{(0.07)^2} \approx 200$$

简便起见，我们可对 v_1 进行相同的假设，即 $v_1 \approx 200$ 。

那么平均值则非常接近一个定值，正则标准误差约为14%。通常，矩阵中包含 n 阶比值 L 的估计，则误差可降低的倍数为 $\sqrt{n}$ 。

10.4.1 对全向功率或沿方向分解功率的选择

对于深水测试场，无论选择 P_{omni} 还是 P_{nett} 都取决于测试装置的类型，但总体来说，单个装置宜采用 P_{omni} 。此外，在浅水区由于考虑了反射的影响，因此宜采用 P_{nett} 。

10.4.2 捕获长度矩阵的细分

若10.2节中提到的研究发现方向与谱型等要素对捕获长度有明显影响，或捕获长度的波动性较强，则需对捕获长度的矩阵进行细分。例如需包含数组矩阵，一组用以描述平均波向的影响，其他的对非方向性要素进行描述。细分的矩阵也需要配合非确定性分析。虽然上述内容对装置开发者更有意义，但对未来装置使用者而言了解工作性能中的不确定性仍非常有帮助。

10.4.3 潮流影响

潮流的影响在第5章中已讨论过，其对测试装置的定位也非常重要。若可能应根据潮流变化特征进行相应的调整。

10.4.4 捕获长度矩阵的展示

捕获长度与不确定性分析的矩阵应采用显著波高与能量周期的二元直方图表示。一般的，显著波高的纵坐标间隔为0.5m，能量周期的横坐标间隔为1.0s。

11 报告

11.1 报告的目的

采用报告制度的主要目的如下：

- 对测试计划的执行状况按时进行汇报；
- 当测试数据增加后，对装置性能评估的内容进行更新；
- 在测试结束时，提供一份最终的测试报告。

11.2 报告内容

11.2.1 概述

报告应包括全部或部分以下内容（与11.1节提到的报告目的有关）。

11.2.2 装置与仪器的投放过程

主要应包括以下内容：

- a) 波浪观测仪器的投放、回收与丢失；
- b) 观测期内的波浪观测内容：包括仪器投放与回收日期、数据丢失的时段；
- c) 装置投放的相关记录，功率记录的开始与结束日期，以及装置运行过程中的变化。
- d) 装置有效数据的时段与缺乏有效数据的时段。

11.2.3 报告期内的波浪观测

本部分应包括如下内容：

- e) 波功率时间序列图。应包括按方向分解与全向波功率。时间分辨率应能够较为全面展示报告期内波功率整体情况，而不仅是数页难以理解的图表。例如，时均功率要优于按小时给出的数据。
- f) 显著波高-能量周期矩阵（表征各网格的按方向分解波浪能状况）。可使用波功率云图以帮助理解，平均与总功率均需给出。
- g) 显著波高-跨零周期的散点图。表征主要参量发生比例的二元直方图，通常是给出等深线型式。
- h) 特定方向范围内的波浪能分量。

- i) 包含质量控制与谱分析的初步数据分析结果。

11.2.4 报告期内的波浪能装置功率输出

本部分内容仍可使读者对装置功率输出的整体情况有所了解：

- a) 装置功率的时间序列。将装置输出功率与波功率绘制在一张图上更有利于判断；
- b) 10.3 节中描述的功率矩阵。

11.2.5 报告期内的风速风向信息

若报告中需要风速与风向信息，则应包含下列内容：

- a) 给出有效观测数据日期与时刻的时间序列以及数据缺失情况；
- b) 风速风向的月均统计数据，包括平均风速、风向与最大风速（10 分钟平均与 1 小时平均）。

11.2.6 报告期内的捕获长度数据

本节给出的是整个测试过程的主要数据性结果。主要应包含以下内容：

- a) 捕获长度矩阵；
- b) 捕获长度波动性矩阵；
- c) 分项数据矩阵；
- d) 其他相关矩阵。

11.3 报告频次

报告频次取决于项目进行到哪个阶段。初始阶段建议增加报告频次，后续可定期进行报告。测试结束，建议给出一个整合报告。
