

团体标准

T/QME 0014-2024

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

2024-11-29 发布

2024-11-29 实施

青岛市机械电子工程学会 发布

目 次

前 言 III

引 言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 1

5 测试场 2

5.1 总则 2

5.2 初始选址 2

5.3 水深测量 3

5.4 海流测量 3

5.5 潮高测量 3

5.6 波浪模型 3

5.7 投放前的波浪观测 4

5.8 场址调查的后续工作 4

6 测量一般要求 4

6.1 概述 4

6.2 比较方法 4

6.3 样本时长与间隔 5

6.4 同时性 5

6.5 数据记录 5

7 波浪观测 6

7.1 概述 6

7.2 仪器布设 6

7.3 仪器种类 6

7.4 波浪浮标锚固 7

7.5 仪器标定与校准 7

7.6 波浪数据的分析与展示 7

8 气象观测 7

8.1 概述 7

8.2 风速与风向测量 7

9 波浪能装置的功率输出测量 8

9.1 概述 8

9.2 用于电力输出的波浪能装置定义 8

9.3 仪器与标定 8

T/QME 0014-2024

9.4 波浪能装置功率数据处理 8

10 测试性能指标的计算 8

10.1 概述 8

10.2 工作性能对参量的敏感性 9

10.3 实测功率矩阵 9

10.4 俘获宽度 9

11 报告撰写要求 10

11.1 报告的目的 10

11.2 报告内容 10

11.3 报告频次 11

附录 A 谱数据与非谱数据 12

A.1 谱数据 12

A.2 非谱数据 13

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、山东大学、青岛科技大学、青岛市机械电子工程学会。

本文件主要起草人：史宏达、刘臻、李坚、刘延俊、邓乾、崔莹、董晓晨、孙慧慧、姜春宇、许传礼、李博洋、薛钢、邓芳、王登帅、管传勇、魏丽华。

本文件为首次编制。

引言

本文件提出的方法适用于在实海况条件下进行测试的波浪能装置，主要针对研发阶段的波浪能装置测试。本文件中的波浪能装置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。

波浪能装置海上性能测试与评价的主要目的如下：

- 提供一种不同海况条件下波浪能装置能量输出的测量方法和评价体系；
- 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，可采用本文件进行波浪能装置能量输出的前期评估。

通过开展上述工作，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。本文件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，上述准则适用于深水场址及浅水场址，特殊形式的波浪能装置测试评估也可参照执行。

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。

本文件采用推荐方法获得可靠的、充分的测试结果用以评估波浪能装置的工作性能，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

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（包括修改单）适用于本文件。

GB/T 33543.1 海洋能术语 第1部分：通用

GB/T 37551 海洋能 波浪能、潮流能和其他水流能转换装置术语

GB/T 39571 波浪能资源评估及特征描述

GB/Z 40295 波浪能转换装置发电性能评估

GB/Z 42153 波浪能转换装置预样机测试规程

3 术语和定义

GB/T 33543.1、GB/T 37551、GB/T 39571、GB/Z 40295、GB/Z 42153等规范性引用文件中界定的术语和定义适用于本文件。

4 符号

f ：频率

Δf ：频率增量或间隔

i ：频率或谱值编号（角标）

S_i ：频谱中对应的第*i*个频率的波幅方差密度

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} : 全向波能功率

$\text{Var}(P)$: 波能方差

τ : 样本时长

P_{net} : 单向波能

Θ : 能均方向角

UI : 单向标号

L : 俘获宽度

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_{net} ）

5 测试场

5.1 总则

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。

波浪的时间分布特征与潮流及风速有关，潮流影响需在流速达到特征波群速的10%以上时予以考虑；此外，风速及风向也通过影响波浪的生成、传播和能量分布等，影响着波浪的时空分布特征。

5.2 初始选址

5.2.1 概述

应对选址位置进行初步评估。选址位置应位于常浪向无明显遮挡的海域，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选址位置，后续详细调查工作将在本章中详述。

5.2.2 深水测试场选址

深水测试场址应具备悬链式或张力式锚定泊位，其水深通常大于特征波长二分之一。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。深水测试场范围内的海流流速应一致且不宜大于2 m/s。

注：深水测试场址折射现象相对不明显，在此条件下的测试结果具备较高的可信度。

5.2.3 浅水测试场选址

浅水测试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装置，水深通常小于特征波长的二分之一。测试场应位于浅水区并具备规则的地形坡降，同时应包含使波浪产生聚集或分散的突变地形特征。

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性能评估。

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，相关预测将准确易行。

5.3 水深测量

应开展测试场水深测量工作。测量范围应略大于选址范围，以用于开展波浪与潮流模型的网格绘制工作。

水深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 km范围，且至少距岸5 km。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

海流测量应在选址范围内不少于一个点位开展，测量时间不少于30天。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

潮高测量应在选址位置开展，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 波浪模型

5.6.1 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5.6.2至5.6.6所述。

5.6.2 波谱

波谱应采用公认的半经验公式，如PM（Pierson-Moskowitz）谱或JONSWAP（Joint North Sea Wave Project）谱。单峰的谱形式可用于本文件中所涉及的方向谱与频谱，应充分考量波浪方向分布函数等相关谱参数或参考相关规范。

5.6.3 波周期

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，则应考虑累计出现频率大于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。

5.6.4 波高

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出现频率大于 95%的情况。

5.6.5 波向

有代表性的波浪方向均应考虑。

5.6.6 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；
- 含无潮点的区域。

5.7 投放前的波浪观测

对于浅水区的底铰链型波浪能装置，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，并借此获得能量传递函数。

注：冬季是波浪能资源最为丰富的季节，大浪天数多且海洋气象条件稳定，为波浪观测提供了显著、可靠且全面的数据基础，因此，建议观测工作在冬季展开。

5.8 场址调查的后续工作

5.8.1 另选深水区测试场

深水区测试场的水深通常应大于波长的二分之一。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，则应另行选择场址。

5.8.2 另选浅水区测试场

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二分之一。通常要求测试地点远离装置数百米。若5.6节或5.7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%，则应另行选择场址。

6 测量一般要求

6.1 概述

工作性能评估应包括波浪场的能量样本与波浪能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，装置能量与波浪能量评估方法将在第7、9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7、10章）。

6.2.2 测试时长

性能评价测试的时长主要考虑如下几点：

- 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；
- 测试过程可能会受到有效波高、功率周期、平均波向、方向分布、频谱宽度等不同参数的影响；
- 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：除了有效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 h，相邻样本采样开始时间间隔宜为1 h。上述措施可保证统计准确性与数据代表性，但需保证所采用数据均为有效可用。

6.4 同时性

波浪能装置与环境波浪功率样本重叠时长应大于15 min。若一组样本出现缺失，则重叠时长宜延长至1 h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与相应的数据记录（或无数据记录）。文件信息应包括波浪场与波浪能装置数据的测量、处理与记录细节，还应包括测试人员信息、测试装置型号及其计量检验合格证书。文档应便于理解且易于查询检索。

数据记录的内容应主要考虑以下几点：

- 数据记录应从1 h时长的波浪条件与装置功率输出数据样本中获得，并标记记录开始时间；
- 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。

缺失记录应依据相邻且记录时长超过1 h的数据记录进行补充生成。

——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、9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9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。频率表应覆盖0.04 Hz至0.5 Hz范围，并可根据观测系统的不同进行适当调整。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。

除方向谱外，以下变量也应进行记录或计算：

- 功率谱（可记录于方向谱中）；
 - 全向功率或总功率；
 - 方向分解功率；
 - 平均功率方向（由正北向记）；
 - 有效波高、功率周期，0 阶谱矩周期。
- 具体内容详见第7章。

7 波浪观测

7.1 概述

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，但对于功率分析而言频域分析更为适用。

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。

7.2 仪器布设

7.2.1 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。

7.2.2 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；
- 仪器应位于装置的侧面或前面。

7.2.3 浅水测试场

浅水区的仪器应布设至足够水深以保证测量的准确性。为防止出现波浪破碎、反射、泥沙悬停及其他非线性影响，测波装置的水深要求大于10 m。

当装置位于浅水区时，需有效评估装置与装置投放前测波点之间的波浪变化。

7.2.4 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。

7.3 仪器种类

波浪观测仪器主要用于长期定点观测，主要分为漂浮式和固定式两种。

漂浮式仪器多为随波性浮子，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，也可以是质点跟随型浮子用以测量水面升沉高度。

常用的固定式仪器为声学多普勒流速剖面仪（ADCP），可用于短时观测且适宜于浅水区应用（10 m 水深）。

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

浅水区对仪器波向测量的要求较小。对于极浅水深，宜采用压力式传感器。

7.4 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，浮子需要水下附体进行辅助锚固。

7.5 仪器标定与校准

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标定标准。

7.6 波浪数据的分析与展示

7.6.1 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。

7.6.2 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；
- 方差谱与功率谱的频率列表；
- 功率、平均方向、波高与周期等；
- 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。

7.6.3 谱数据与非谱数据

谱数据与非谱数据的分析详见附录A。

8 气象观测

8.1 概述

风速与风向的观测对于开敞环境下的陆基或近岸测试场是有必要进行的。相关记录应根据测试场的运行有计划的进行。

8.2 风速与风向测量

8.2.1 概述

气象观测主要用于单一或阵列式波浪能装置的工作性能评价。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，宜开展风速与风向观测。

8.2.2 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标定，可提供电流/电压输出以供自动数据记录之用。

8.2.3 仪器安置

风速计与风向标应安装在方圆300 m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10 m。若上述高度难以满足，则不应小于4 m。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20 km，则需采用浮子式漂浮式固定。

8.2.4 数据记录与处理

进行风速风向测量的目的在于获取以1 h为间隔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 min平均的风速标量与矢量值及风向记录模式，采集间隔为10 min。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 波浪能装置的功率输出测量

9.1 概述

波浪能装置应以交流电形式进行功率输出（包括系统输出与发电机的功率输出），主要采用的是平均功率输出（包括均方差）的1小时时长样本。样本采集应每24 h进行一次，每次采样时长为1 h。功率应按照2 Hz频率处理，功率信号应进行滤波处理。平均值、方差、每小时样本的最大与最小值均应记录。

9.2 用于电力输出的波浪能装置定义

功率输出的测量均在装置输出端进行。电力处理系统不在装置内部的，在进行性能评估时也应定义为装置的一部分。

9.3 仪器与标定

功率转换器的测量误差应等于或小于装置装机容量的5%。

电流变送器的测量误差也应等于或小于5%并应进行标定。标定工作应满足GB 1208等标准要求。

功率转换器的工作范围应足以覆盖所有正、负峰值。

9.4 波浪能装置功率数据处理

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

10 测试性能指标的计算

10.1 概述

对于波浪能装置而言，最直接的海上性能测试评价指标为装置的输出功率，相关信息可参考第9章。本节给出的主要性能指标为波浪能装置的实测功率矩阵及俘获宽度。

本规范主要针对采用不同技术的波浪能装置在产品开发阶段的应用，测试的结果将为波浪能装置的技术评定提供一定的参考。

10.2 工作性能对参量的敏感性

外海的波浪功率主要取决于有效波高与能量周期，装置的工作性能主要受上述两参数影响。此外，平均波向、方向分布、频谱宽度等变量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。若有太多影响装置工作性能的变量，则需考察各变量之间的关联关系，相关信息可参照第6、9章。

10.3 实测功率矩阵

实测功率矩阵为有效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。该矩阵可给出装置在整个测试期间的整体描述。建议网格按0.5 m间隔划分显著波高、1.0 s间隔划分能量周期，也可根据当地波候进行调整。

10.4 俘获宽度

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，他们的比值被称为俘获宽度，该比值没有表征效率的含义或指代装置的任何尺寸，记作：

$$L = \frac{P_{WECS}}{P_{SEA}} \dots\dots\dots (1)$$

该比值主要受到有效波高与能量周期的制约，其数值发生波动的标准误差约为14%，通过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，即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，则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。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。

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

其中，psd为功率谱密度。简便起见，可对 v_1 进行相同的假设，即 $v_1 \approx 200$ 。

由此，平均值非常接近一个定值，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，选择 P_{omni} 或 P_{nett} 取决于测试装置的类型，单个装置宜采用 P_{omni} 。在浅水区考虑反射的影响，宜采用 P_{nett} 。

10.4.2 俘获宽度矩阵的细分

若10.2条中提到的研究发现方向与谱型等要素对俘获宽度有明显影响，或俘获宽度的波动性较强，则需对俘获宽度的矩阵进行细分。

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，宜根据潮流变化特征进行相应的调整。

10.4.4 俘获宽度矩阵的展示

俘获宽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，有效波高的纵坐标间隔为0.5 m，能量周期的横坐标间隔为1.0 s。

11 报告撰写要求

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条提到的报告目的有关）。

11.2.2 装置与仪器的投放过程

包括但不限于以下内容：

- a) 测试场选址的相关介绍；
- b) 测试人员、选用设备、测试时长、测试要求等；
- c) 波浪观测仪器的投放、回收与丢失；
- d) 波浪能装置的投放、回收等；
- e) 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。

11.2.3 报告期内的环境条件观测

包括但不限于如下内容：

- a) 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；
- b) 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；
- c) 有效波高-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，平均功率与总功率均需给出；
- d) 有效波高-跨零周期的散点图。表征主要参量发生变化的二元直方图，通常是给出等深线型式；
- e) 特定方向范围内的波浪能分量；

- f) 包含质量控制与谱分析的初步数据分析结果;
- g) 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;
- f) 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 min平均与1 h平均)。

11.2.4 报告期内的波浪能装置功率输出

包括但不限于如下内容:

- a) 装置有效数据的时段与缺乏有效数据的时段;
- b) 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;
- c) 10.3 条中描述的功率矩阵。

11.2.5 报告期内的俘获宽度数据

本节给出的是整个测试过程的主要数据性结果。包括但不限于如下内容:

- a) 俘获宽度矩阵;
- b) 俘获宽度波动性矩阵;
- c) 分项数据矩阵;
- d) 其他相关矩阵。

11.2.6 评价结论

按照评价目的及测试内容, 给出性能测试评价结论。

11.3 报告频次

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

附录 A
(规范性)
谱数据与非谱数据

A.1 谱数据

对于谱数据，以下变量需进行记录。角标 i 应从 1 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 0.04 Hz 线性覆盖至 0.5 Hz。

频率间隔 Δf_i ，频谱估计中频率的间隔。文件中应包含相应信息以保证频谱估计中的频率间隔计算。频率间隔通常不应大于 0.01 Hz，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，并能以足够精度满足频谱组成部分分析的需要。

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 ：

$$P_i = \rho g S_i v_g(f_i) \dots\dots\dots (\text{A. 1})$$

每组频率对应的功率（能流），单位为 kW/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。对于纵横摇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 $(\theta)_i$ ，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：

$$\theta = \text{ATAN2}(B_1, A_1)(+2\pi)$$

注：ATAN2 为第四角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：

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

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

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

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：

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

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：

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

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：

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

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：

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

样本时长 τ ，方向分布模型中根据第一谐波按如下公式计算：

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

其中 F 为正则函数。

方向传播系数 $(s_1)_i$ 应按照如下公式各频率逐一计算：

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

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：

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

其中， $C_2 = \sqrt{A_2^2 + B_2^2}$ 。

A. 2 非谱数据

对于非谱数据，如下变量需进行记录：

方差谱谱矩 m_n ，由 $n=-1$ 至 2 进行计算：

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

有效波高 H_s ，由谱矩计算得：

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

平均跨零周期 T_z ，按如下公式计算：

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

能量周期 T_e ，能量周期的定义按下式计算：

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

谱宽参数 ν ，谱宽系数按下式计算：

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

能均谱宽参数（功率权重） ν_p ，按下式计算：

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

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。

全向波能功率 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：

$$P_{omni} = \sum_{i=1}^N P_i \Delta f_i \dots\dots\dots (A. 18)$$

波能方差 $Var(P)$ ，全向波能的方差值应按下式计算：

$$Var(P) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i^2 \Delta f_i \dots\dots\dots (A. 19)$$

分向波能 P_{nett} ，按照方向分解的波能，按下式计算：

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

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

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

功率加权平均方向 θ_p ，按照方向分解功率加权的方向矢量，按下式计算：

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

单向系数 UI ，单向性系数按下式计算：

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