ICS 19.020

CCS K85

T/CSEE XXXX—YYYY

团体标准

漂浮式风电系统缩比模型水池试验规范Specification for scale model basin tests of floating offshore wind turbines

（征求意见稿）

发 布

20XX—XX—XX实施

20XX—XX—XX发布

中国电机工程学会

目 次

[前 言 3](#_Toc181785999)

[1 范围 4](#_Toc181786000)

[2 规范性引用文件 4](#_Toc181786001)

[3 术语和定义 4](#_Toc181786002)

[4 基本规定 5](#_Toc181786025)

[4.1 一般规定 5](#_Toc181786026)

[4.2 试验流程 6](#_Toc181786027)

[4.3 试验资料记录及整理 6](#_Toc181786028)

[5 模型设计、制造、安装与调试 7](#_Toc181786029)

[5.1 模型设计原则 7](#_Toc181786030)

[5.2 模型制造要求 8](#_Toc181786031)

[5.3 模型安装要求 9](#_Toc181786032)

[5.4 试验测试要求 9](#_Toc181786033)

[6 环境条件模方法及精度要求 9](#_Toc181786034)

[6.1 风的模拟方法及精度要求 10](#_Toc181786035)

[6.2 波浪模拟方法及精度要求 10](#_Toc181786036)

[6.3 海流模拟方法及精度要求 11](#_Toc181786037)

[7 试验内容 11](#_Toc181786038)

[7.1 总体要求 11](#_Toc181786039)

[7.2 试验要求 11](#_Toc181786040)

[8 试验报告编写 12](#_Toc181786041)

[8.1 报告编写、审查及资料归档 12](#_Toc181786042)

[8.2 试验数据分析 13](#_Toc181786043)

[8.3 试验结果的表达 13](#_Toc181786044)

[附　录　A 14](#_Toc181786045)

[附　录　B 15](#_Toc181786046)

[附　录　C 16](#_Toc181786047)

前 言

本文件按照《中国电机工程学会标准化管理办法》、《中国电机工程学会标准化管理办法实施细则》的要求，依据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。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会海上风电专业委员会技术归口并解释。

本文件起草单位：中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、中国船舶科学研究中心、大连理工大学、国电投、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、东方电气风电股份有限公司、运达能源科技集团股份有限公司、浙江大学、中国船级社、上海勘测设计研究院、上海交通大学、金风科技股份有限公司、华能吉林发电有限公司、华能广东汕头海上风电有限责任公司、华能海上风电科学技术研究有限公司。

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

本文件执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条1 号，100761，网址：http：//www.csee.org.cn，邮箱：cseebz@csee.org.cn）。

漂浮式风电系统缩比模型水池试验规范

1. 范围

本规范规定了漂浮式海上风电系统全物理模型试验的设计原则、模型制造调试、环境条件模拟、试验工况、试验结果的分析和表达。

本规范适用于单立柱式（SPAR）、半潜式(Semi-submersible)、张力腿式(TLP)和驳船式（Barge）等漂浮式风电系统的全物理缩比模型水池试验。

1. 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/Z 44047 漂浮式海上风力发电机组设计要求

GB/T 18451.1 风力发电机组 设计要求

CB/T 3471 风、浪、流联合作用下浮式系统模型试验规程

CB/Z 808 海洋平台模型试验规程

CCS 海上浮式风机平台指南2021

ITTC 7.5-02-07-03.1 Recommended Procedures and Guidelines—Floating Offshore Platform Experiments

ITTC 7.5-02-07-03.8 Recommended Procedures and Guidelines—Model Tests for Offshore Wind Turbines

DNV-ST-0119 Floating wind turbine structures

DNV-RP-0286 Coupled analysis of floating wind turbines

1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

* 1.

物理模型 physical model

将研究对象按一定相似准则或相似条件缩制而成的实体模型。

* 1.

全物理模型试验 full physical model test

采用真正的风浪流环境条件对物理模型进行加载而开展的模型试验。

* 1.

自由衰减试验 free decay test

将物理模型移动到偏离其静水平衡位置而后释放使其自由运动的试验。

* 1.

流载荷测试试验 current load tests

将物理模型固定于测力架上在拖曳水池中进行拖曳或在风洞中进行吹风的试验。

* 1.

静态偏移试验 static offset tests

将物理模型人为在某一自由度施加一系列位移并测试系泊系统回复力的试验。

* 1.

锤击试验 hammer tests

将物理模型人为施加一冲击载荷测试物理模型在冲击载荷下响应的试验。

* 1.

风电机组性能测试试验 wind turbine performance tests

将风电机组塔筒根部固定，测试风电机组在系列定常风下性能的试验。

* 1.

规则波测试试验 regular wave tests

将物理模型放置在海洋工程水池中测试物理模型在规则波下响应的试验。

* 1.

白噪声测试试验 white noise tests

将物理模型放置在海洋工程水池中测试物理模型在白噪声波下响应的试验。

* 1.

不规则波测试试验 irregular wave tests

将物理模型放置在海洋工程水池中测试物理模型在不规则波下响应的试验。

* 1.

风浪流联合测试试验wind-wave-current tests

将物理模型放置在海洋工程水池中测试物理模型在风浪流联合下响应的试验。

1. 基本规定
	1. 一般规定

4.1.1漂浮式风电系统全物理缩比模模型水池试验应根据试验任务目的及要求编写物理模型试验大纲，试验大纲具体内容可参考附录A。

4.1.2宜在模型试验开展前进行数值模拟计算，确保模型试验参数设置的科学性，同时为测量设备的选型提供支撑。

4.1.3漂浮式风电系统全物理水池模型试验可辅助开展风洞模型试验和拖曳水池试验，测试风电机组载荷、漂浮式基础风载荷和流载荷。

4.1.4漂浮式风电系统全物理水池模型试验应测量波高、风速、漂浮式基础的6自由度刚体运动、锚链张力，宜同步测量塔筒顶部6自由度载荷、塔筒底部6自由度载荷、机舱加速度等物理量。

4.1.5测量仪器设备应尽量保证轻量化，并尽量减少对模型质量分布及动态响应的影响。

4.1.6 漂浮式风电系统全物理缩比模型水池试验流程宜参考图4.1-1。



图1 漂浮式风电系统全物理水池模型试验设计流程图

* 1. 试验流程

4.2.1应根据工程需求、漂浮式风电系统设计参数、拟布放海域环境参数等基本资料、试验工况、所选试验场地尺寸等条件选择合适的缩尺比，并开展试验模型制作及采集仪器设备选型，明确测量参数及测点布置。

4.2.2试验前期应开展模型质量与刚度等属性的校核、各类测试设备的安装与调试等准备工作，包括但不限于造波机、造流机、造风设备的调试与标定以及仪器设备防水保护。

4.2.3正式试验阶段应依据研究内容和工况设计开展漂浮式风电系统全物理模型试验，采集试验数据并保存。试验数据与数值计算存在较大差异时应排除原因并进行复现性校核。

4.2.4 对试验数据进行处理，并完成试验报告的编写。

* 1. 试验资料记录及整理

4.3.1 试验人员应接受相关安全培训，严格执行实验室仪器设备操作规程。

4.3.2物理模型试验全程应做好记录，随测随记。试验数据命名及保存应条理清晰，相关文件资料应及时整理、校核并装订。

4.3.3 试验数据原始文件、数据处理过程文件及最终结果应分别保存并形成目录，同时进行备份。

4.3.4试验数据有问题或误差较大时，应及时分析原因，排除问题并重做相应工况试验，确保试验数据有效性与完整性。

4.3.5试验数据处理结果宜以图表形式进行展示。

1. 模型设计、制造、安装与调试
	1. 模型设计原则

5.1.1对于水动力模拟占主导的模型试验，宜满足弗劳德数（Froude number）相似准则，弗劳德数相似满足公式(1)：

 $V\_{m}/\sqrt{gL\_{m}} = V\_{s}/\sqrt{gL\_{s}}$ (1)

5.1.2对于气动力模拟占主导的模型试验，宜满足雷诺数（Reynolds number）相似准则，雷诺数相似满足公式(2)：

 𝐿𝑚𝑉𝑚/𝜈 = 𝐿𝑠𝑉𝑠/𝜈 (2)

5.1.3在水池模型试验中宜优先采用弗劳德数相似的缩尺准则。若模型试验在淡水海洋工程水池中开展，模型试验应考虑水的密度修正，可取密度修正因子𝛾为1.025。

5.1.4 漂浮式基础模型（包含压载）设计应满足以下原则

a)几何尺寸、重心位置应满足弗劳德数相似准则，模型和实型物理量之间的转化关系满足公式(3)：

*L*𝑚 = *L*𝑠 /𝜆(3)

b)质量应满足弗劳德数相似准则，模型和实型物理量之间的转化关系满足公式(4)：

*W*𝑚 = *W*𝑠 / 𝛾𝜆3 (4)

c)转动惯量应满足弗劳德数相似准则，模型和实型物理量之间的转化关系满足公式(5)：

*J* 𝑚 = *J* 𝑠 / 5 (5)

5.1.5 风电机组模型设计应满足以下原则

a)宜满足推力相似准则。风轮模型气动推力相似满足公式(6)：

*T*𝑚 = *T*𝑠 /𝛾𝜆3(6)

b)宜满足叶尖速比（TSR）相似准则。叶尖速比相似满足公式(7)：

𝛺𝑚𝑅𝑚/𝑉𝑤𝑚 = 𝛺𝑠𝑅𝑠/𝑉𝑤𝑠 (7)

c)模型的质量、重心位置应满足弗劳德数相似准则，模型和实型物理量之间的转化关系满足公式(3)(4)。

5.1.6 塔筒模型设计应满足以下原则

a)宜遵循结构刚度相似准则。结构刚度相似满足公式(8)：

(𝐸𝐼)𝑚 = 𝐸𝑠𝐼𝑠 / 𝛾𝜆5 (8)

b) 当塔筒模型结构刚度相似无法满足时，塔筒模型的设计应满足一阶自振频率相似。频率相似满足公式(9)：

*f*𝑚 = *fs*·𝜆0.5 (9)

c) 塔筒模型的高度、重心位置、质量应满足弗劳德数相似准则，模型和实型物理量之间的转化关系满足公式(3)(4)。

5.1.7 系泊系统模型设计应满足以下原则

a) 系泊缆长度、导缆点与锚点的位置坐标应满足几何相似准则，模型和实型物理量之间的转化关系满足公式(3)：

b)系泊缆湿重应满足弗劳德相似准则，模型和实型物理量之间的转化关系满足公式(4)：

c)系泊缆刚度应满足弗劳德相似准则，模型和实型物理量之间的转化关系满足公式(10)：

(*EA*)𝑚 = (*EA*)𝑠 / 𝛾𝜆3 (10)

其中，𝜆为几何缩尺比，𝛾为密度修正因子，𝐸为缆绳的杨氏模量，*A*为缆绳的截面面积，角标*m*和*s*分别表示模型值和实型值。

d)系泊力应满足弗劳德相似准则，模型和实型物理量之间的转化关系满足公式(11)：

*F*𝑚 = *F*𝑠 / 𝛾𝜆3 (11)

* 1. 模型制造要求

5.2.1 漂浮式基础模型制造要求：

a) 漂浮式基础模型的几何尺寸误差不应超过±3%；

b) 漂浮式基础模型的质量误差不应超过±3%，重心位置误差不应超过±5%，惯性半径误差不应超过±5%；

c) 应为模型中压载物的安装与调节提供足够的空间；

d) 漂浮式基础模型表面应光洁，在水中不渗水、不变形。

5.2.2 风电机组模型制造要求：

a) 对满足几何相似的叶片，风电机组叶片模型的叶片长度、弦长等误差不应超过±2%；

b) 风电机组叶片模型的质量误差不应超过±5%，重心位置误差不应超过±5%；

c) 风轮整体重心偏离其旋转轴线的距离不应超过风轮直径的±1%。

5.2.3 系泊系统模型制造要求

a) 系泊系统系泊缆的长度误差不应超过±3%；

b) 系泊系统系泊缆的预张力误差不应超过±5%；

c) 系泊系统系泊缆的刚度误差不宜超过±5%。

5.2.4漂浮式基础模型制造完成后宜开展静水倾斜测试：

a) 静水倾斜测试检验内容一般包括纵摇及橫摇两个方向的刚度；

b) 可用量角仪或光学测量仪器等角度测量设备进行风机模型的角度测量；

c) 若使用量角仪，应确保仪器安装位置光滑且水平；

d) 宜使用施加重物的方式进行静水倾斜测试，通过重物的质量、布置位置、以及风机模型的角度得到模型的静水刚度。

5.2.5风电机组模型制造完成后应开展塔筒锤击试验：

a) 塔筒锤击测试验内容一般包括塔筒前后及侧向的一阶固有频率；

b) 塔筒锤击测试中塔筒应与地面刚性固定，宜在塔筒底部安装测力仪，在塔筒顶部安装加速度传感器；

c) 塔筒锤击测试中应迅速敲击塔筒顶端以模拟脉冲载荷，通过测力仪记录塔基弯矩的时间历程数据；

d) 塔筒锤击测试中通过对弯矩或加速度时间历程数据进行谱分析获得塔筒结构的固有频率。

5.2.6风电机组模型制造完成后应开展风电机组性能测试试验：

a) 风电机组性能测试试验内容一般包括风电机组在不同定常风速下的推力、转速、桨距角测试；

b) 风电机组性能测试试验中应保持塔筒底部与水平地面刚性固定；

c) 风电机组性能测试试验中应在塔筒顶部安装六分力传感器测试塔筒顶部剪力和弯矩；

d) 风电机组性能测试试验中宜在机舱内安装扭矩传感器测试风轮转速；

e) 风电机组性能测试试验中应至少测试9组定常风，测试风速应包括切入风速、额定风速和切出风速，测试风速还应包括水池试验工况测试的风速。

* 1. 模型安装要求

5.3.1 应统筹安排以下试验模型及设备的安装位置：造风系统、造波机、造流装置、风电机组模型、漂浮式基础模型、系泊系统模型、浪高仪、风速仪、流速仪等。

5.3.2 应合理设计漂浮式风机模型各个结构之间的连接方式，包括：叶片与轮毂、轮毂与机舱、机舱与塔架、塔架与平台、平台与系泊系统，系泊系统与水池底部等。

5.3.3 应合理设计传感器与试验模型之间的安装方式。

* 1. 试验测试要求

5.4.1 应对试验中用于测试物理量的传感器设备进行选型与调试。

5.4.2 所选传感器的量程应满足所测物理量的量程要求，所选传感器的分度值应与测量值具有合理的比例关系。测量参数以及测量精度建议如下表所示：

表1 试验中用于测试的物理量

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 测量参数 | 单位 | 精度 |
| 1 | 波高 | m | ±1% |
| 2 | 风速 | m/s | ±0.1m/s±1.5%测量值 |
| 3 | 流速 | m/s | ±1mm/s±0.5%测量值 |
| 4 | 三自由度加速度 | m/s2 | ±1% |
| 5 | 系泊力 | N | ±1% |
| 6 | 6自由度载荷 | N、N·m | ±1% |
| 7 | 纵荡 | m | ±0.1% |
| 横荡 | m | ±0.1% |
| 垂荡 | m | ±0.1% |
| 横摇 | ° | ±0.1% |
| 纵摇 | ° | ±0.1% |
| 艏摇 | ° | ±0.1% |

1. 环境条件模方法及精度要求
	1. 风的模拟方法及精度要求

6.1.1漂浮式风电系统模型试验应配备造风装备与相关气压传感器、风速计等。

6.1.2造风装备通流截面应覆盖风电机组风轮扫掠面积，造风装备安装位置宜确保距离静水面一定距离。

6.1.3应开展风质量评估试验，风质量评估试验中测风点位于与来流风垂直的同一平面内且各测风点的测量应同步开始。

6.1.4在风模拟中，宜根据风电机组的试验要求和实际情况，选取相应风谱，设计相应的试验方案。

6.1.5平均风速的模拟误差应小于±5%，造风角度误差不应大于±3°，同时应校验风载荷模拟的重复性。

* 1. 波浪模拟方法及精度要求

6.2.1考虑比尺关系、空间限制等因素选择水池或水槽作为波浪场地，场地内应配备消波装置。

6.2.2造波设备与造风设备同时工作的试验工况，应注意尽量避免由造风设备产生的涡流及非预期的风激波。

6.2.3应开展造波质量评估试验，造波质量评估试验中测浪点应涵盖试验模型安装位置且测量时间不小于10分钟。

6.2.4完成一次造波试验，应待水面较平静后，再进行下一次试验。

6.2.5造波试验时，浪向角宜从下列角度中选取：0°、30°、45°、60°、90°、120°、135°、150°、180°。

6.2.6规则波的模拟应符合以下规定：

a)试验波高选取应保证波浪线性，波长的个数宜少于12个，范围以尽量能够获得较完整的频率响应曲线为宜，并在共振点附近宜适当加密试验点；

b)规则波试验时间应保证至少10个波浪周期，采样频率不低于20Hz；

c)波高的模拟误差应小于±10%，周期的模拟误差应小于±5%。

6.2.7长峰不规则波模拟应符合以下规定：

a)风、浪、流联合模拟，应先造风、流，待风速和流速达到预定值并稳定后再造波，并应以联合作用下的实测波浪谱作为标准，也可用单独波浪实测谱作为标准；

b)应模拟实测波谱，当无实测波谱资料时，可按国际拖曳水池会议(ITTC)推荐的双参数谱或联合北海波浪计划提出的JONSWAP谱模拟；

c)长峰不规则波的瞬时波面高度的概率分布应符合正态分布；

d)水池实测谱与目标谱的波谱形状相近；

e)谱值的误差应满足在>0.1时，谱值；

f)峰频应满足；

g)有义波高应满足;

h)在造波频率范围内，对于一般试验，成分波个数应大于或等于50个，对二阶非线性系统，成分波个数应根据系统特性决定；

i)波谱的高频截止频率应大于峰频的三倍；

j)长峰不规则波模拟时应至少安装两个浪高仪，一个置于模型安装位置，在正式试验时移走，另一个与前一个并排安装，用来测量测试信号的波浪相位。

6.2.8短峰不规则波模拟可参照长峰不规则波模拟进行，谱值、峰频、有义波高允许误差参照长峰不规则波模拟要求，还应满足以下要求：

a)水池实测方向谱与目标方向谱的波谱形状相近，主浪向误差宜小于±5°；

b)短峰波测量的浪高仪阵列中各个浪高仪之间的最佳间距应根据实际波长的范围确定，宜安装在主要波长（约1/10～1/2）的范围。

6.2.9白噪声波模拟可参照长峰不规则波模拟要求，还应满足以下要求：

a)白噪声波截断频率应尽量满足试验要求频率范围；

b)模拟时间对应原型时间不小于3h，采样频率不低于20Hz。

6.2.10在试验场地满足的情况下，设计模型时宜采用较小的模型比尺。

* 1. 海流模拟方法及精度要求

6.3.1海流模拟中应配备必要的流速流向测量仪器，流速流向测量仪可按下列条件选用：

a)根据试验目的和流速范围选用旋桨流速仪、超声多普勒流速仪、粒子成像流速仪或激光流速仪等测量流速设备；

b)大面积表面流速、流态测量宜选用流场测量系统；

c)流速、流向测量仪器的选型应满足量程和精度要求。

6.3.2在模型安装位置，应校验水池中整个宽度方向或足够大宽度方向流的均匀性。

6.3.3平均流速应在模型满载吃水一半的深度进行测量，并在模型安装位置平行方向多处位置测量。平均流速的模拟误差宜小于10%，造流角度误差宜小于4°，同时应校验流载荷模拟的重复性。

6.3.4流载荷也可采用等效力进行模拟。可在拖曳水池中基于基础模型的拖曳试验得到等效流载荷。在包含海流的试验中，将等效流载荷施加在基础吃水一半位置处。

1. 试验内容
	1. 总体要求

7.1.1试验内容应包含：

a) 自由衰减试验；

b) 静态偏移试验；

c) 系列规则波试验或白噪声试验；

d) 单一外部条件下的试验；

e) 风、浪、流联合条件下的试验。

7.1.2 试验内容可包含：

a) 风电机组故障状态；

b) 单一锚链破断状态。

7.1.3试验工况应根据漂浮式风电系统设计要求确定，宜包含正常发电工况、极端环境工况。

* 1. 试验要求

7.2.1 自由衰减试验通常在静水条件下开展，人为在某一自由度施加非零初始位移而后释放。

a) 自由衰减试验应包含系泊状态下的试验和自由漂浮状态下的试验；

b) 系泊状态下的自由衰减应包含漂浮式基础纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇6个自由度；

c) 自由漂浮状态下的自由衰减宜包含漂浮式基础垂荡、横摇、纵摇3个自由度；

d) 开展漂浮式基础某一自由度自由衰减试验时，应仅在该自由度将漂浮式基础人为施加非零初始位移，保证其他自由度初始位移为零；

e) 开展某一自由度自由衰减试验时，宜在该自由度将漂浮式基础人为施加小、中、大等多组初始位移值测量；

f）可开展漂浮式风电系统在定常风及系列规则波下的自由衰减试验。

7.2.2 静态偏移试验测试试验在静水条件下开展，人为在某一自由度施加系列非零初始位移并同步测量反力。

a) 静态偏移试验应包括纵荡和横荡自由度测试，宜开展其他自由度测试；

b) 系泊系统在某一自由度的静态偏移试验应在测试自由度的正位移和负位移方向均开展测试，量程范围应覆盖漂浮式风电模型的最大位移范围；

c) 系泊系统在某一自由度的静态偏移试验应确保漂浮式风电系统模型仅在该自由度产生位移，其他自由度位移为0；

d) 系泊系统在某一自由度的静态偏移试验宜同步测试系泊缆的张力。

7.2.3规则波与白噪声试验中应测试漂浮式风电模型在不同方向角下的漂浮式基础六自由度运动。

a)浪向角数量及具体度数应根据平台的水动力仿真敏感性分析确定。

b)应开展漂浮式风电系统在自由漂浮状态、完整系泊和完整系泊有风三个状态下的规则波与白噪声试验。

7.2.4单一外部条件试验主要包含纯风工况试验和纯波浪工况试验，并应符合以下规定：

a) 纯风工况试验至少应包含切入风速、额定风速、切出风速条件下的正常作业工况与极端条件下的生存工况；

b) 纯波浪工况试验宜应包含适用海域的一年一遇及五十年一遇波高和对应的波浪周期。试验中应包括不同浪向的工况，可按照需求从规则波与白噪声试验的浪向角中选取。

7.2.5风浪流联合条件试验应包含正常发电状态、停机状态。

a) 正常发电状态主要测试漂浮式风电系统在切出风速及以下正常工作状态的性能，应至少包括切入风速工况、额定风速工况与切出风速工况；

b) 停机状态主要测试漂浮式风电系统在切出风速以上时停机状态的性能，应使用五十年一遇的海况条件与设计最大风速，应开展不同风浪夹角的试验。

7.2.6宜使用五十年一遇海况条件测试单一锚链破断状态下漂浮式风电系统响应。

1. 试验报告编写
	1. 报告编写、审查及资料归档

8.1.1 试验报告的编写应完整描述项目概况、试验内容、试验条件、试验结果分析及相应结论。

8.1.2 完成试验报告后应对报告格式、内容进行审查。

8.1.3完成漂浮式风电系统全物理缩比模型水池试验后，原型资料、试验资料、试验模型及报告、验收或鉴定证明材料等应按照《科学技术研究档案管理规定》或其他相关规定整理归档。

* 1. 试验数据分析

8.2.1 对规则波试验结果进行统计分析，应求取8~10个周期的平均波高和平均运动幅值，计算各参数频率响应传递函数。

8.2.2 白噪声试验结果可采用频域分析方法，通过运动响应谱和波能谱分析计算各参数频率响应传递函数。

8.2.3不规则波试验结果可采用时域分析方法，依据不规则波、运动响应或系泊力记录的时间历程作统计分析，计算平均值、有义值、最大值等。

8.2.4不规则波试验结果频域分析时可采用相关函数（B-T）法或快速傅立叶（FFT）法获得波能谱，并计算各响应谱的各阶矩、谱峰频率等特征值。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。

8.2.5短峰波试验数据分析，波浪可采用扩展的极大似然法或贝叶斯法分析，通过对浪高仪阵列的数据进行谱分析，计算有义波高、平均周期、平均浪向及方向谱。运动响应、系泊力数据分析可参照8.2.3和8.2.4进行。

* 1. 试验结果的表达

8.3.1 模型加工精度的表达：

模型加工精度结果一般包括模型的质量、重心、几何尺寸等数据的理论值和实测值及相对误差。

8.3.2自由衰减试验结果的表达：

自由衰减试验结果一般包括衰减曲线、自振周期、阻尼比等数据。

8.3.3静态偏移试验测试结果的表达：

静态偏移试验测试结果应给出不同偏离位移下系泊系统的回复力曲线，宜给出不同偏离位移下系泊缆张力曲线。

8.3.4风电机组推力测试结果的表达：

风电机组推力测试结果应给出不同风速下风电机组的推力曲线。

8.3.5 规则波/白噪声试验结果的表达形式包括:

a）规则波/白噪声试验结果应以幅值响应算子（RAO）的形式给出，将不同的波浪频率作为横轴，RAO作为纵轴，即可得到 RAO 曲线。

b）也可采用无因次化形式展示规则波/白噪声试验试验结果，线运动由波幅进行无因次化，角运动由波倾角进行无因次化，加速度无因次化形式为L/(*gζa*)，式中L为特征长度。结果基于横坐标*ω*(L/*g*)1/2或*ωe*(L/*g*)1/2进行绘制。

8.3.6 不规则波试验结果一般包括波浪、运动响应、系泊力等数据。长峰不规则波、短峰不规则波试验结果表达可参考《水面船模耐波性试验规程》。

8.3.7 试验报告可参考附录B编写。

附　录　A

（资料性）

符号定义

*A*为缆绳的截面面积

𝐸为杨氏模量

*F*为系泊缆的系泊力

*f*为塔筒一阶自振频率

𝑔为重力加速度

𝐼为结构的截面惯性矩

*J*为模型转动惯量

𝐿表示特征线尺度

角标m表示模型

𝑅为风轮半径

角标s表示实型

*T*为风轮模型所受气动推力

𝑉表示特征速度

𝑉𝑤为来流风速

*W*为模型质量

𝜈表示流体的运动粘度

𝛺为风轮旋转角速度

𝛾为密度修正因子

𝜆为几何缩尺比

附　录　B

（资料性）

漂浮式风电系统缩比模型水池试验大纲

漂浮式风电系统缩比模型水池试验大纲应包括以下内容：

1. 项目概况、任务目的及要求、任务内容
2. 漂浮式风电系统拟布放海域环境参数等基本资料
3. 漂浮式风电系统试验环境模拟试验设备
4. 漂浮式风电系统试验模型设计及制作
5. 漂浮式风电系统试验测量仪器设备及误差要求
6. 漂浮式风电系统试验内容及工况设计
7. 漂浮式风电系统试验计划进度、预期目标及相应成果
8. 漂浮式风电系统试验安全措施

附　录　C

（资料性）

漂浮式风电系统缩比模型水池试验报告模板

漂浮式风电系统缩比模型水池试验报告可参考以下章节安排进行编排：

1.引言

1.1简介

1.2试验目的

1.3报告结构

2.符号约定

2.1通用约定

2.2符号约定

2.2.1坐标系

2.2.2环境方向

3.环境条件模模拟

3.1试验场地介绍

3.2造波系统介绍

3.2.1白噪声

3.2.2波谱

3.3造风系统介绍

3.3.1风轮平面风场测量

3.3.2风场校核

3.3.3Kaimal风谱

3.3.4阵风

3.4造流系统介绍

4.模型

4.1通用

4.2风电机组模型

4.3塔筒模型

4.4漂浮式基础模型

4.5系泊系统模型

5.测量和数据采集

5.1通用

5.2流力系数

5.3实测变量

5.4测量仪器

5.5数据采集

5.6衍生变量

5.6.1漂浮式基础运动转换

5.6.2推力惯性修正

5.6.3加速度计算

5.6.4预张力计算

5.6.5风轮叶尖速、推力系数和功率系数

6.试验步骤

6.1传感器校准

6.2重量分布

6.3流载荷测试工况

6.4静态测试工况

6.5自由衰减工况

6.6规则波下测试工况

6.7不规则波下测试工况

6.8海流下测试工况

7.数据处理与结果展示

7.1缩尺比系数

7.2数据分析-流载荷测试

7.3自振周期和阻尼值

7.4统计分析

7.5响应幅值算子

7.6自振周期和运动衰减测试

7.7数据可视化

7.7.1照片

7.7.2视频

7.8数据存储

8.试验概览

8.1流载荷测试

8.2静态测试

8.3自由衰减测试

8.4风电机组性能测试

8.5规则波测试

8.6白噪声测试

8.7单独风测试

8.8单独流测试

8.9风浪联合测试

8.10风浪流联合测试

8.11风电机组偏航过程下测试

8.12风电机组变桨过程下测试

9.结果分析和讨论

9.1流载荷测试结果分析

9.2敲击试验

9.3固定风电机组测试

9.4变桨速度控制测试

9.5静态工况测试

9.6自由衰减测试

9.7运动响应分析

9.7.1响应幅值算子

9.7.2漂浮式基础重心处运动

9.7.3加速度响应

9.8锚链张力分析

9.9最大砰击载荷

9.10风电机组偏航过程下测试

9.11风电机组变桨过程下测试

10.结论

附表

附图

试验照片