

## 目 次

前言 .....	I
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 符号、代号和缩略语 .....	2
5 资源评估等级和流程 .....	3
6 数据收集 .....	5
7 数值模拟 .....	8
8 测量—关联—预测 .....	14
9 数据分析 .....	14
10 资源评估技术报告 .....	18
附录 A (资料性附录) 本标准与 IEC TS 62600-101: 2015 相比的结构变化情况 .....	22
附录 B (资料性附录) 本标准与 IEC TS 62600-101:2015 的技术性差异及其原因 .....	23
附录 C (资料性附录) 敏感性分析方法 .....	27
附录 D (资料性附录) 海浪模型 .....	29
附录 E (资料性附录) 近岸波浪能资源 .....	31
附录 F (资料性附录) 波浪能资源图表示例 .....	33
附录 G (规范性附录) 测量不确定度评定 .....	35
附录 H (资料性附录) 长期不确定度实例 .....	36
参考文献 .....	39

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用重新起草法修改采用 IEC TS 62600-101:2015《海洋能 波浪能、潮流能和其他水流感转换装置 第 101 部分:波浪能资源评估及特征描述》。

本标准与 IEC TS 62600-101:2015 相比在结构上有较多调整,附录 A 中列出了本标准与 IEC TS 62600-1:2015 的章条编号对照一览表。

本标准与 IEC TS 62600-101:2015 相比存在技术性差异,这些差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线(|)进行了标示,附录 B 中给出了相应技术性差异及其原因的一览表。

本标准做了下列编辑性修改:

- 将标准名称改为《波浪能资源评估及特征描述》;
- 增加了附录 D“海浪模型”;
- 修改了 IEC TS 62600-101:2015 中附录 A 中 A.2、A.4 和表 A.1;
- 修改了 IEC TS 62600-101:2015 中附录 C“长期不确定度计算示例”;
- 增加了附录 F“波浪能资源图表示例”;
- 修改了参考文献。

本标准由全国海洋能转换设备标准化技术委员会(SAC/TC 546)提出并归口。

本标准起草单位:国家海洋技术中心、河海大学、中国科学院广州能源研究所、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、国家海洋标准计量中心、中国长江三峡集团有限公司、集美大学。

本标准主要起草人:姜波、吴国伟、彭伟、张运秋、赵建春、汪小勇、徐春红、张田田、方叙洲、张榕、袁静、丁杰、张继生、蔡丽、林琳、彭雯。



# 波浪能资源评估及特征描述

## 1 范围

本标准规定了波浪能资源评估等级和流程、数据收集、数值模拟、测量—关联—预测法、数据分析和资源评估技术报告编写。

本标准适用于规划选址、可行性研究和设计开发三个阶段的波浪能资源评估。

本标准不适用于极端海况条件下的波浪能资源评估。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 4883 数据的统计处理和解释 正态样本离群值的判断和处理

GB 12327 海道测量规范

GB/T 27418 测量不确定度评定和表示(GB/T 27417—2017,ISO/IEC Guide 98-3:2008,MOD)

JTS 145 港口与航道水文规范

ASME V&V 20 计算流体力学与传热学的验证与确认标准(Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer)

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**规划选址 reconnaissance**

对研究海域的波浪能资源的数量、质量、分布和开发利用状况等进行的调查和评估以及对各建设地点及其经济性进行的初步比较。

注:规划选址资源评估适用于大范围海域的资源评估,通常为某区域内的第一次资源评估。

### 3.2

**可行性研究 feasibility**

对拟建工程的建设条件做进一步调查、勘测、分析、比较,研究技术可行性、经济合理性以及建设必要性。

注:可行性研究资源评估适用于在设计开发资源评估前,提高规划选址资源评估的准确度。

### 3.3

**设计开发 design and development**

根据工程总装机规模,制定的详细工程设计方案。

注:设计开发资源评估适用于小范围海域,通常为某一具体项目最终的、也是最详细的资源评估,通常包括波浪能装置的布置、建筑物设计、施工方法以及投资优化等工作。

### 3.4

**测量—关联—预测法 Measure-Correlate-Predict method;MCP**

将测量位置短期数据与参考位置同期数据建立关联模型来预测测量位置长期数据的方法。

注:测量位置指资源评估的目标站位;参考位置是指具有长期实测数据的站位。

## 4 符号、代号和缩略语

下列符号、代号和缩略语适用于本文件。

$b(e_p)$ : 参数  $p$  的加权平均系统误差

$c_g$ : 群速度, 单位为米每秒(m/s)

$c_{g,i}$ : 第  $i$  个组成波对应的群速度, 单位为米每秒(m/s)

$d$ : 方向系数

$e_p$ : 参数  $p$  的相对误差

$f_i$ : 第  $i$  个组成波的频率, 单位为赫兹(Hz)

$f_{ij}$ : 表格单元( $i, j$ )所占全部海况的比例, 以百分数(%)表示

$f_p$ : 谱峰频率, 单位为赫兹(Hz)

$g$ : 重力加速度, 单位为米每二次方秒( $m/s^2$ )

$H_{m0}$ : 有效波高的谱估计值, 单位为米(m)

$h$ : 水深, 单位为米(m)

$I$ : 整数部分

$J$ : 全方向波浪能流密度, 单位为瓦每米(W/m)

$J_{ij}$ : 表格单元( $i, j$ )的平均波浪能流密度, 单位为瓦每米(W/m)

$J_\theta$ :  $\theta$  方向的波浪能流密度, 单位为瓦每米(W/m)

$J_{\theta_{\max}}$ :  $\theta$  方向的波浪能流密度最大值, 单位为瓦每米(W/m)

$k_i$ : 第  $i$  个组成波对应的波数, 单位为每米( $m^{-1}$ )

$L_{ij}$ : 表格单元( $i, j$ )的捕获长度, 单位为米(m)

MCP: 测量-关联-预测法(Measure-Correlate-Predict method)

MV( $p$ ): 参数  $p$  的月变化统计

$m_n$ : 谱的  $n$  阶矩, 单位为二次方米每  $n$  次方秒( $m^2/s^n$ )

$N$ : 参数数目

$n$ : 谱矩的阶

$p$ : 资源特征值

$p_{Dk}$ : 观测得到  $k$  时刻的特征值

$p_{Mk}$ : 数值模拟得到  $k$  时刻的特征值

$p_{\max}$ : 参数  $p$  月平均值的最大值

$p_{\min}$ : 参数  $p$  月平均值的最小值

$R$ : 小数部分

$S_i$ : 第  $i$  个组成波的谱密度, 单位为二次方米每赫兹( $m^2/Hz$ )

$S_{ij}$ : 第  $i$  个组成波、 $j$  方向的谱密度, 单位为二次方米每赫兹弧度 [ $m^2/(Hz \cdot rad)$ ]

$T_{02}$ : 平均跨零周期的谱估计值, 单位为秒(s)

$T_e$ : 能量周期, 单位为秒(s), 也可写为  $T_{-10}$

$T_p$ : 谱峰周期, 单位为秒(s)

$T_z$ : 平均跨零周期, 单位为秒(s)

$u_C$ : 组合不确定度

$u_D$ : 测量不确定度

$u_{LT}$ : 长期不确定度

$u_M$ : 模拟不确定度

WEC:波浪能转换装置(wave energy converter)  
 WMI:测波仪(wave measuring instrument)  
 $w_{ij}$ :表格单元( $i, j$ )误差的权重  
 $\hat{w}_{ij}$ :表格单元( $i, j$ )误差的标准化权重  
 $\delta$ :正向分量累积因子  
 $\Delta f_i$ :谱密度的第  $i$  个组成波的频率间隔,单位为赫兹(Hz)  
 $\Delta \theta_j$ :谱密度  $j$  方向的角宽度,单位为弧度(rad)  
 $\epsilon_0$ :谱宽度  
 $\theta$ :波浪传播方向,单位为度( $^\circ$ )  
 $\theta_p$ :谱峰波向,单位为度( $^\circ$ )  
 $\theta_{j_{\max}}$ :波浪能流密度最大值的方向,单位为度( $^\circ$ )  
 $\mu$ :均值  
 $\mu_\theta$ :平均方向  
 $\mu_{ij}(e_p)$ :表格单元( $i, j$ )中参数  $p$  的系统相对误差  
 $\rho$ :海水密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $\sigma$ :标准差  
 $\sigma(e_p)$ :加权平均随机误差  
 $\sigma_{ij}(e_p)$ :表格单元( $i, j$ )中参数  $p$  的随机相对误差  
 $\varphi$ :地理纬度,单位为弧度(rad)

## 5 资源评估等级和流程

### 5.1 资源评估等级

按规划选址、可行性研究和设计开发三个阶段将波浪能资源评估等级分为 3 级,见表 1。

表 1 资源评估等级

资源评估等级	阶段
1 级	规划选址
2 级	可行性研究
3 级	设计开发

随着评估等级的提高,宜改进波谱模型,以有效降低资源评估的不确定度。可通过以下方式降低不确定度:

- 使用更适合的具有准确物理理论基础的模型(见表 5~表 7);
- 模型在频率、波向、时间和空间上采取适宜的离散化;
- 使用更准确的边界条件和源项(风场、流场等);
- 获取更多的观测结果用于模型验证;
- 模拟更长的时间。

### 5.2 资源评估及特征描述流程

波浪能资源评估及特征描述流程见图 1。

依据资源评估的等级选择适宜的评估方法。1 级资源评估可采用下列方法之一:

- a) 分析符合 1 级资源评估规定的已有海况参数记录；
  - b) 分析符合 1 级资源评估规定的由数值波浪传播模型生成的方向谱；
  - c) 按第 8 章的要求应用 MCP 方法。
- 2 级、3 级资源评估应采用下列方法之一：
- a) 分析符合 2 级、3 级资源评估规定的由数值波浪传播模型生成的方向谱；
  - b) 按第 8 章的要求应用 MCP 方法。

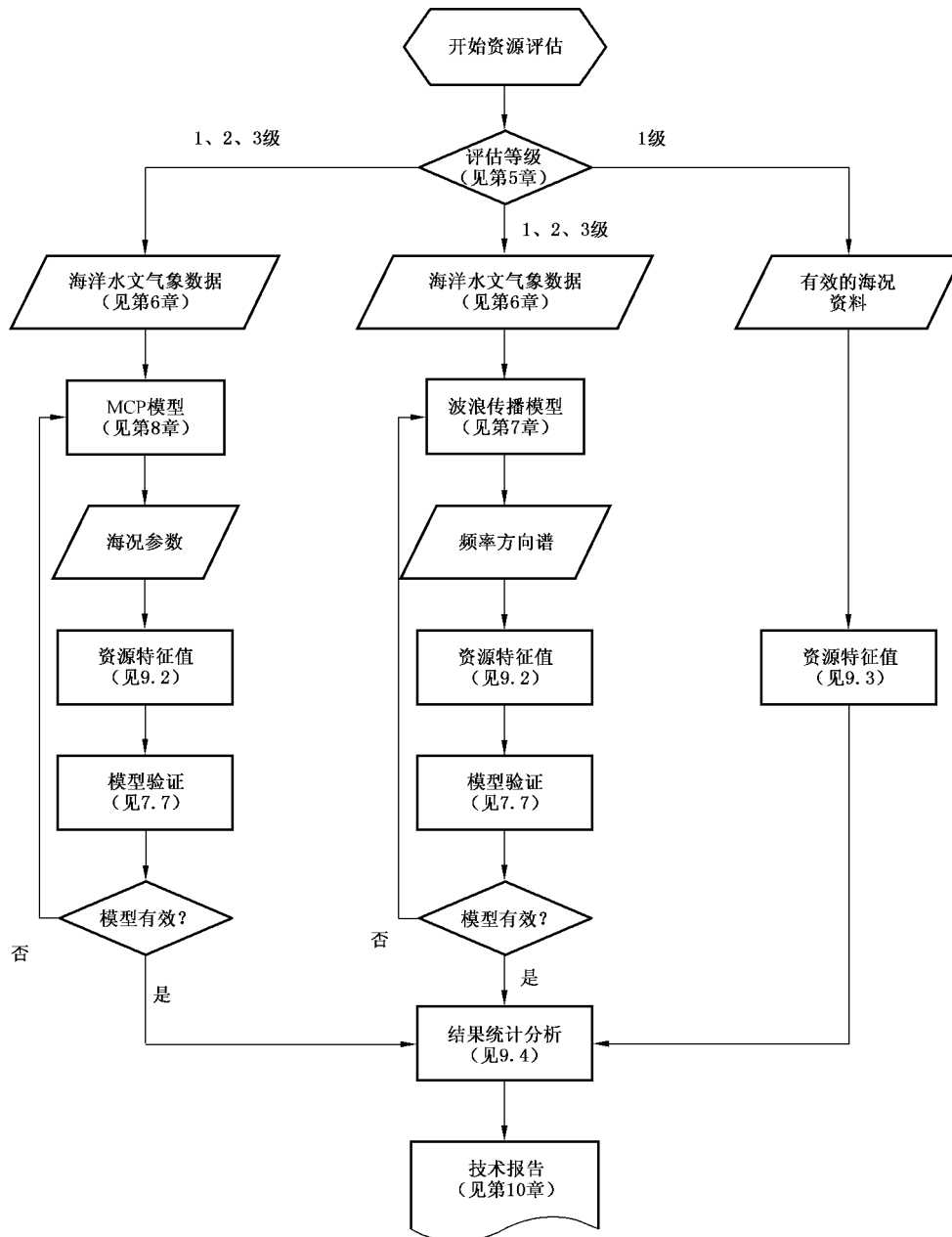


图 1 波浪能资源评估及特征描述流程图

用于生成方向谱的波浪数值模型应符合资源评估等级要求(见表 5~表 7),应采用实测数据对数值模型、边界条件和源项(风场、流场等)进行验证和评估。

## 6 数据收集

### 6.1 概述

应概述研究区域内影响波浪能资源的要素,分析确定哪些要素将被用于资源评估。要素应至少包括研究区域、水深数据、历史波浪数据、波浪测量、风数据、潮汐潮流数据、其他流数据、海冰和其他环境条件、 $\rho$  和  $g$ 。

### 6.2 研究区域

研究区域是指进行波浪能资源评估和特征描述的目标区域。应明确给出研究区域,并概述研究区域的主要地形特征和海洋水文特征,对影响波浪传播和波候的特征应着重描述。若利用数值模拟方法来评估波浪能资源,应给出明确的模型区域范围;若用 MCP 方法来评估波浪能资源,研究区域则简化为一个或几个离散的站位。

注:模型区域可能因边界条件的原因大于研究区域范围。

### 6.3 水深数据

应描述模拟区域的水深地形,并绘制等深线图。利用水深数据建立数字高程模型,以应用于波浪传播模型。

水深测量应按 GB 12327 有关规定进行。不同资源评估等级的主测线间距和联络测线间距见表 2。在海底地形起伏较大的海区,应加密测线,加密的程度以能完善地反映海底地形变化为原则。

表 2 水深测线网调查中的测线间距要求

资源评估等级	主测线间距 m	联络测线间距 m
1 级	5 000	50 000
2 级	500	2 500
3 级	50	250

在水深小于 30 m 时,水深测量准确度应优于 0.3 m;在水深大于 30 m 时,水深测量准确度应优于水深值的 1%。

### 6.4 历史波浪数据

应收集研究区域历史波浪数据和波况研究报告。历史波浪数据主要来源于已有的数值模拟、观测、资源评估或波候研究。其主要作用可包括:

- a) 对分析波浪能资源的季节变化和年际变化、风暴发生频次、多模态波浪系统中的优势模态、谱型和主波向变化等提供关键性描述;
- b) 作为数值模型的边界条件,具体要求应符合 7.3 的规定;
- c) 进行 1 级资源评估的主要数据来源,具体要求应符合 6.5 的规定;
- d) 用于数值模型验证,具体要求应符合 6.5 的规定。

若历史数据采用的是不同于本标准规定的参数,应进行相应的转化,数据转化的方法应进行验证。应按照 9.5 中的规定计算并分析历史数据的不确定度。



## 6.5 波浪测量

### 6.5.1 目的

波浪测量的目的如下：

- a) 对研究区域波浪资源评估采用的数值模型进行验证(见 7.7)；
- b) 支撑 MCP 方法应用；
- c) 可作为数值模型边界条件(见 7.3),用于边界条件和模型验证的数据应相互独立。

1 级资源评估,应测量波高和波周期 2 个要素,单台、无波向参数的 WMI 即可满足测量需要。

2 级、3 级资源评估应测量波高、波周期和波向 3 个要素。

### 6.5.2 WMI 选择

WMI 应满足表 3 的规定。波浪观测采样频率应不小于 2 Hz,记录时间长度宜不少于 1 024 s,1 级、2 级资源评估至少每 3 h 观测一次,3 级资源评估至少每 1 h 观测一次。

表 3 波浪观测的准确度

资源评估等级	波高 m	波周期 s	平均波向 (°)
1 级	$\pm 15\% \times \text{测量值}$	$\pm 0.5$	—
2 级	$\pm 10\% \times \text{测量值}$	$\pm 0.5$	$\pm 10$
3 级	$\pm 10\% \times \text{测量值}$	$\pm 0.5$	$\pm 5$

注：“—”表示 1 级资源评估平均波向无准确度要求。

注：有许多种单点仪器或仪器阵列可用于直接测量频率谱和方向谱。频率谱通常利用固定点波面记录通过特殊的谱估计方法得到,目前常用的频率谱估计方法有相关函数法、周期图法和最大熵法(MEM)等。方向谱通常由阵列仪器、单点仪器或这两种结合构成复合阵量。仪器阵列是指将仪器布成一阵列来同步测量各点的波面位移。单点仪器测量是在单点用浮标同步测量波面位移和波面斜率;或用压力-流速测量仪同步测量压力和流速。目前常用的方向谱估计方法有傅里叶(Fourier)级数法、最大似然法(MLM)、扩展本证矢法和贝叶斯(Bayesian)法等。

### 6.5.3 仪器检定/校准

WMI 应在检定/校准有效期内使用。仪器检定/校准周期一般不超过 1 年。若检定/校准结果不满足表 3 的规定,则该仪器不应使用。凡在使用过程中经过维修的仪器,应重新检定/校准。

### 6.5.4 仪器布放

若条件允许,宜在 WEC 布放位置选取至少一个站位进行波浪测量,否则,站位宜选择平均水深与 WEC 布放位置相近的位置。观测站不宜布放在靠近岛礁、海床凸起或碎波区等波浪能空间梯度较为陡峭的区域。

应按仪器供应商的用户手册进行布放。

漂浮式测量仪器应减小由锚系系统导致的误差。对于依靠感知自由表面下动态压力及水质点速度测量的仪器,其传感器应放置于接近自由表面的位置,以精确测量频率高达 0.5 Hz 的波分量。若仪器在多个位置感知波特性,应优化位置以减小误差。

### 6.5.5 数据备份

为避免因仪器故障或丢失导致数据缺失,宜在一个站位布放不少于 2 台 WMI。即使没有发生仪器故障或丢失,也可为数值模型提供多个验证。

### 6.5.6 观测数据分析

观测数据异常值可利用仪器供应商提供的筛选法或按 GB/T 4883 的规定进行剔除。应利用由仪器供应商提供的配套软件或按 JTS 145 的规定进行波浪频率谱和方向谱估计。

注:目前常用的波浪频率谱估计方法有相关函数法和周期图法,此时得到的为粗谱,为改善谱估计的质量,需对粗谱进行平滑,主要平滑方式有频域平滑、时域分段平滑和这两种方式的结合。常用的方向谱估计方法有 Fourier 级数法、Bayesian 法、MLM、最大熵法(MEM)等。

## 6.6 风数据

应描述整个模拟区域的风向、风速,包括数据来源和验证方法。数据来源包括实测数据和数值模拟,模拟风场应经过实测数据的有效性验证。若可用风数据的分辨率低于表 4 中的规定,可使用插值法、外推法和变换法进行数据处理,风场的海拔高度应与波谱模型要求相符。数据处理方法和流程需明确描述并论证。

表 4 风数据的分辨率

资源评估等级	时间分辨率 h	空间分辨率 km
1 级	3	100
2 级	3	50
3 级	1	10

## 6.7 潮汐潮流数据

应描述模拟区域由潮汐引起的水位波动,包括数据来源和验证方法。这些水位波动对波浪传播可能产生的影响应予以评价。利用敏感性分析(参见附录 C)或其他分析方法来评估水位波动对波浪传播可能产生的影响,如采用的是新方法则应经过行业内专家评审。如在研究区域中影响显著的范围大于表 C.2 的规定,则需要在波浪传播模型中增加随时间变化的水位场。

注:多数情况下,可用一个平均值描述整个模拟区域每个时间步长的水位。

应描述模拟区域的潮流,包括数据来源和验证方法。利用敏感性分析(参见附录 C)或其他分析方法来评估潮流对波浪传播产生的影响,如采用的是新方法则应经过行业内专家评审。如在研究区域中影响显著的范围大于表 C.2 的规定,则需要在波浪传播模型中增加随时间变化的潮流场。

若需要进行水位测量和/或潮汐潮流数值模拟,应描述其方法和预期不确定度。

## 6.8 其他流数据

应描述模拟区域的西边界流、河口径流等其他流,包括数据来源和验证细节,其流速和流向的分辨率应与其时空变化相符。数据来源包括现场观测和经观测值验证的数值模拟。利用敏感性分析(参见附录 C)或其他分析方法来评估流对波浪传播可能产生的影响,如采用的是新方法则应经过行业内专家评审。如在研究区域中影响显著的范围大于表 C.2 的规定,则需要在波浪传播模型中增加随时间变化的流场。

### 6.9 海冰和其他环境条件

在某些海域,波况会季节性地受到海冰和其他环境条件影响。应收集和描述模拟区域和周边有关海冰的季节性覆盖数据和其他环境数据,包括冰覆盖数据的来源。利用敏感性分析(参见附录 C)或其他分析方法来评估海冰和其他环境条件的影响力,如采用的是新方法则应经过行业内专家评审。如在研究区域中影响显著的范围大于表 C.2 的规定,则需要在波浪传播模型中增加海冰和其他环境条件。

在波谱模型中增加海冰和其他环境条件的方法和程序应予以说明并进行调试。

### 6.10 海水密度

应确定研究区域的表层  $\rho$ 。若研究区域  $\rho$  季节变化明显,应考虑  $\rho$  的季节变化。 $\rho$  可按下列方法得到:

- a) 直接测量;
- b) 利用温度和盐度测量值进行估算;
- c) 参考以往的研究成果。

若研究区域  $\rho$  季节变化不明显,可取常数  $1\ 025\ \text{kg/m}^3$ 。

### 6.11 重力加速度

$g$  应按下列两种方法之一计算:

- a) 标准重力,  $9.806\ 65\ \text{m/s}^2$ ;
- b)  $9.806\ 12 - 0.025\ 865 \times \cos(2\varphi) + 0.000\ 058 \times \cos^2(2\varphi)$ 。

## 7 数值模拟

### 7.1 概述

数值模拟应通过实测数据验证,必要时通过调整模型参数,使模拟结果与实测数据的误差符合表 9~表10 中要求,模拟数据分析方法见第 9 章。边界条件和强迫风场应来源于一个更大范围的经过验证的数值模拟结果或海洋水文气象观测资料。

### 7.2 波谱模型技术要求

表 5~表 7 规定了波谱模型(参见附录 D)的技术要求。

表 5 波谱模型的边界条件

资源评估等级	参数边界 <sup>a, b</sup>	混合边界 <sup>a, c</sup>	谱边界 <sup>d</sup>
1 级	可	可	宜
2 级	不应	可	宜
3 级	不应	不应	宜
注 1:“宜”表示“宜使用此边界条件”。 注 2:“可”表示“可使用此边界条件”。 注 3:“不应”表示“不应使用此边界条件”。			
<sup>a</sup> 宜选择合适的谱型和方向分布函数。 <sup>b</sup> 参数边界是以波高和波周期等参数定义的边界条件。 <sup>c</sup> 混合边界是以带波向参数的波浪谱定义的边界条件。 <sup>d</sup> 谱边界是以方向谱定义的边界条件。			

表 6 波谱模型包括的物理过程

资源评估等级	风生浪 <sup>a</sup>	白冠耗散	四波相互作用 <sup>a</sup>	水深诱导的波浪破碎	底摩擦	三波相互作用 <sup>b</sup>	绕射 <sup>c,d</sup>	折射	海冰影响	水位变化	波浪反射	波-流相互作用	波浪增水 <sup>e</sup>
1 级	应	应	应	可	可	可	应	应	应	应	应	可	可
2 级	应	应	应	应	应	应	应	应	应	应	应	可	可
3 级	应	应	应	应	应	应	应	应	应	应	应	可	可

注 1：“应”表示“应包括此项物理过程”。

注 2：“可”表示“可包括此项物理过程”。

<sup>a</sup> 风生浪和四波相互作用的重要性依赖地理范围的大小,对于小区域这些要素可不包含。

<sup>b</sup> 在浅水情况下,三波相互作用比较重要;若研究区域无浅水区,可不考虑三波相互作用。

<sup>c</sup> 在研究区域有海岛、岬等障碍物时,绕射比较重要;若研究区域无障碍物时,可不考虑绕射。

<sup>d</sup> 波浪谱模型的绕射是基于相位平均估算得出的,在网格空间分辨率较低的区域可能误差较大。

<sup>e</sup> 海岸附近波浪能转换宜考虑波浪增水。

表 7 波谱模型包括的数值方法

资源评估等级	第三代波谱模型	缓坡/抛物线/椭圆模型 <sup>a</sup>	球坐标系 <sup>b</sup>	非定常解	输出参数的空间分辨率 <sup>c</sup> m	输出参数的时间分辨率 <sup>c</sup> h	频率分区数	波向分区数
1 级	宜	可	应	可	5 000	3	25	24
2 级	宜	可	可	可	500	3	25	36
3 级	宜	可	可	可	50	1	25	48

注 1：“应”表示“应包括此项数值方法”。

注 2：“宜”表示“宜包括此项数值方法”。

注 3：“可”表示“可包括此项数值方法”。

<sup>a</sup> 海岸附近波浪能转换宜使用缓坡/抛物线/椭圆模型。

<sup>b</sup> 球坐标系的使用依据地理范围和方向分辨率,若地理范围较小可不使用球坐标系。

<sup>c</sup> 边界条件、风场、水深地形、模型网格/时间步长的分辨率应能满足正确反映此区域内的波浪能条件变化尺度。

模型输出的频率范围宜覆盖 0.04 Hz~0.5 Hz,为更合理地反映风生浪、白冠耗散等物理现象,频率可增加到 2.0 Hz。

波谱模型宜输出不少于 10 年的海况数据,并按 9.5 中的要求进行波浪资源评估的不确定度评定。

利用历史资料进行波浪能资源评估应符合本标准的要求,按 7.7 的规定记录模型配置情况并验证其有效性。

气候变化、人类活动或其他因素,有可能会引起波浪能 10 年以上的变化。因为气候变化的复杂性及其对波浪能影响的不可预报性,研究中宜假定波浪能资源是稳定的,除非有明确的证据表明确实存在显著的气候变化,同时应明确说明并进行合理性证明。

### 7.3 边界条件

边界条件数据来源应为下列之一：

- a) 海洋水文气象观测数据；
- b) 更大范围的波谱模型后报数据；
- c) 上述两种数据相结合。

若边界条件数据来源于观测数据，应剔除错误和无效数据，任何已知的系统误差也应消除。观测数据时间跨度宜超过 10 年并且数据合格率达到观测总量的 70% 以上。数据使用前应按照设备供应商或数据采集者提供的方法对错误或无效数据进行剔除。任何已知的偏差在使用前也应去除。海洋水文气象数据的采集和分析宜采取前后一致的方法。当采用两组或两组以上仪器采集数据时应特别注意这一点。若边界条件数据来源于波谱模型后报数据，时间跨度宜超过 10 年且通过实测数据的有效性验证。若可能，在使用模拟数据构建边界条件前，应消除数据中的系统误差。

若边界条件数据来源于观测数据和波谱模型后报数据结合使用，应说明其合理性。例如，用模拟数据弥补观测数据空白；若观测数据无波向，则模拟数据可增加波向信息。

若边界条件由参数形式定义，缺失数据可利用 MCP 方法（见第 8 章）进行估算。利用 MCP 方法时，缺失数据可由其他地点的观测数据或者数值模拟数据进行估计，所用的数据应通过评估。进行缺失数据估算的 MCP 方法应进行验证。

为简化波浪模型边界条件，宜将开边界设置在波况较为一致的区域或具有合适数据的区域。理想状态下，可使用位于离岸边界上多个地点的可信波浪数据构建空间上变化的边界条件。对于 2 级、3 级资源评估，可使用前面低级别评估结果构建边界条件，3 级评估宜使用 2 级评估的结果构建边界条件。

注：使用低级别评估结果构建高级别评估边界条件时，可能导致将低级别评估中的误差引入高级别的评估中。

应评估模型离岸边界上波浪条件的均匀性，并构建空间上变化的边界条件用以表示所有波浪条件的变化。应使用敏感性分析（参见附录 C）或其他分析方法来评估空间上变化的边界条件的重要性。若此要素在研究区域内的影响显著，则需将空间上变化的边界条件纳入波浪传播模型中。对无遮蔽近岸场址进行 3 级评估时，宜保证设置于深水区的离岸边界上波浪条件在小范围内空间变化最小，但因预测的准确度要求增加仍需检查边界的准确度。若模拟或观测数据分辨率低于模型分辨率，可采用插值法计算边界条件。

### 7.4 近岸波浪能资源模拟

当评估海域包括波浪破碎频繁发生的较浅水域时，模型应包括波浪非线性相互作用和有限水深波浪破碎的物理项。更多有关近岸波浪能资源的说明参见附录 E。

### 7.5 波浪能发电装置阵列对波浪能资源的影响

在 WEC 阵列位置已知情况下，波谱模型宜考虑 WEC 阵列对波浪传播的影响。模型中任何有关 WEC 阵列的影响都应明确说明，并进行合理性证明。

当 WEC 阵列未布放情况下采集了用以验证模型的数据时（见 7.7），则波谱模型的验证中不应包括 WEC 阵列影响。

### 7.6 模型调参与校正

模型调参指调整模型参数或设定（例如底摩擦等波浪成长或耗散项）以提高模型预测的准确度；然而，不应为提高模型准确度而采用不合理的参数值。

模型校正指调整模型输出使之与实测数据更为一致。实测数据也可用于模型的校正以提高模型预测的准确度，用于模型校正的实测数据应与验证数据（见 7.7）不同。若使用了模型校正，应说明并给出



详细的校正方法及模型不确定度。

测量数据也可用于数值模型的校正,以提高模型预测的准确度。校正模型包括根据函数对模型输出进行修改,这一函数源自原始模型输出与测量数据子集之间的差异。如果使用模型校正,则应报告这一情况,并附上所用校正函数的详细信息以及模型不确定度的变化。模型校正所用测量数据所处的时间段应与验证数据集所处的时间段不同,且没有重叠。

7.7 模型验证

7.7.1 概述

应利用观测数据对波谱模型进行有效性验证,应对波谱模型进行准确波浪能资源预测的能力进行评估和确认。数值模拟结果宜用一个或多个 WEC 附近的观测站数据进行验证,观测站位与 WEC 位置之间海域应开阔,波型、波向一致。技术报告应描述观测站位、数据来源和每个数据集的属性(见 10.3)。

所有用于验证波谱模型的观测数据应符合 6.5 的规定。

7.7.2 验证数据要求

每个验证数据都是在特定时间和地点的单一海况观测值。验证数据集则是特定地点所有验证数据的集合。为了便于验证,验证数据集应被构造为反映不同海况发生频率的全方位有效波高-平均周期散点表(见附录 F 中表 F.1)。为了减少潜在的自相关性误差,代表表格单元的验证数据应由一个最小时间间隔(宜为 6 h)的观测数据中提取出来。若波浪能资源特征具有明显的季节变化,验证数据集时间跨度应超过 1 年。应记录每个月观测数据的合格率,若每连续三个月的合格率低于 70%,应特别标注。对于数据合格率低于 70%的验证数据集宜用同期的其他观测数据替代。

注:最小时间间隔 6 h 为经验值。若能证明更小的时间间隔内数据点间无序列相关,则可使用更小的时间间隔。

验证数据覆盖应符合表 8 中规定。

表 8 验证数据覆盖要求

资源评估等级	代表表格单元中最少有效数据 个	最小覆盖率 %
1	3	90
2	5	90
3	5	95

最小覆盖率(如 95%)并不代表至少 95%的表格单元都应体现在验证数据集中,而是表示代表性表格单元发生频率的总和应不低于 95%

7.7.3 验证的程序

应按 9.2 中规定进行波浪能资源特征值计算。

模拟值与观测值之间的  $e_p$  应按公式(1)计算:

$$e_p = \begin{bmatrix} (p_{M1} - p_{D1}) / p_{D1} \\ \vdots \\ (p_{Mk} - p_{Dk}) / p_{Dk} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

波向参数(见 9.2.6)不计算相对误差。

相对误差分为  $\mu_{ij}(e_p)$  和  $\sigma_{ij}(e_p)$ 。 $\mu_{ij}(e_p)$  定义为表格单元  $(i, j)$  相对误差的平均值(见 9.4.2);  $\sigma_{ij}(e_p)$  定义为表格单元  $(i, j)$  相对误差的标准差(见 9.4.3)。

注 1: 特征参数  $p \in [\text{有效波高, 平均周期, } \dots]$ , 省略号表示可能需要更多参数。

注 2: 误差产生的原因有很多, 包括仪器准确度、校正错误、采样变化等。

$w_{ij}$  应按公式(2)计算:

$$w_{ij} = L_{ij} J_{ij} f_{ij} \dots\dots\dots (2)$$

若 WEC 未定型,  $L_{ij}$  取常数 1。

$\hat{w}_{ij}$  应按公式(3)计算:

$$\hat{w}_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{ij} w_{ij}} \dots\dots\dots (3)$$

$b(e_p)$  应按公式(4)计算:

$$b(e_p) = \sum_{ij} \hat{w}_{ij} \mu_{ij} \dots\dots\dots (4)$$

$\sigma(e_p)$  应按公式(5)计算:

$$\sigma(e_p) = \sum_{ij} \hat{w}_{ij} \sigma_{ij} \dots\dots\dots (5)$$

注 3: 使用加权平均误差的意义是验证模型结果与有效波高-平均周期散点表间的差异。

数值模拟结果应满足表 9~表 10 中要求。

结果报告(见 10.3)应包括数值模拟验证过程和结果。若因为缺少合适波浪数据或其他原因造成数值模拟结果不能成功验证, 应清晰表明“暂定”标签。这种情况下, 结果报告应说明暂定状态的原因。

表 9 加权系统误差要求

评估等级	有效波高	平均周期
1	10%	10%
2	5%	5%
3	2%	2%

表 10 加权随机误差要求

评估等级	有效波高	平均周期
1	15%	15%
2	10%	10%
3	7%	7%

验证流程图见图 2, 每个验证站位应重复使用此流程。

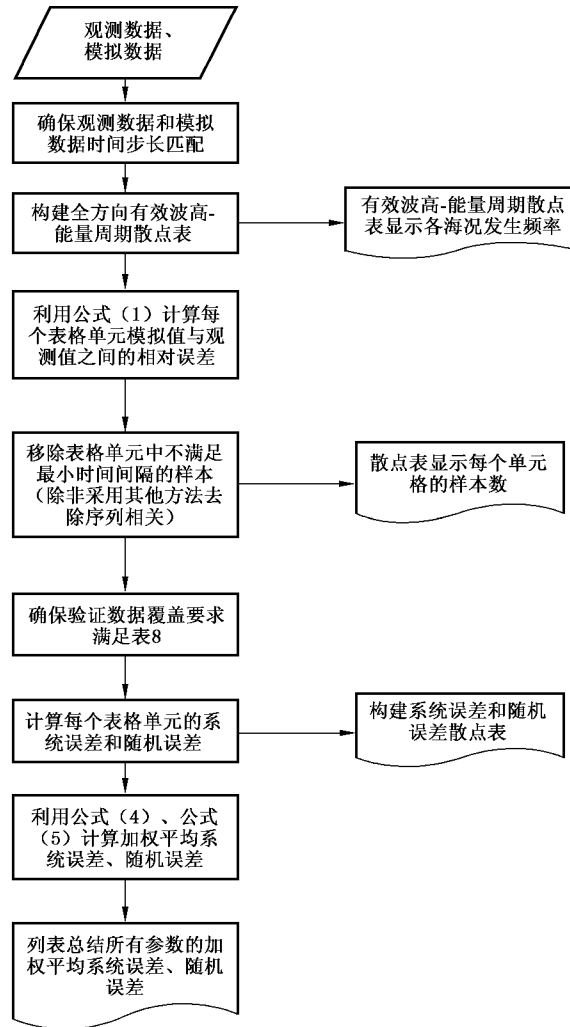


图2 验证流程图

#### 7.7.4 验证范围

验证范围定义为成功验证点周边海域,即有效波高误差符合表9和表10中规定。应界定并记录波浪能资源的验证范围。

注1: 验证范围的确定需要做出一些近似和假设,并没有一个明确的程序。

若验证范围利用不确定度传播来计算,宜按照ASME V&V 20的规定。为了减小计算负担,不确定度传播可利用有代表性海况的加权数据集完成,有代表性海况和权重的选取应进行证明并记录。水深、海流和底摩擦系数等参数宜考虑不确定度传播。不确定度可通过经验估计或观测获取,无论哪种方法都应进行证明并记录,同时记录不确定度参数的量值。为了使验证范围以外的参数变异不影响验证范围内的计算,宜进行不确定度标准化处理。

注2: 使用不确定度传播估计验证范围的前提是假设用于表示波浪传播过程的方程是正确的。

注3: 用于确定验证范围的数值模型包含所有与波浪演化相关的源项很重要——即使这些源项在模型验证中并未被要求。例如,当验证点在开放海域,但验证范围需包括一处绕射影响波浪资源显著的区域。

若验证来自MCP方法(见第8章),则验证范围仅为验证点。

所有确定验证范围的方法都应进行证明并记录于技术报告(见10.3)。

注4: 需要注意数值模型在验证范围外的输出可能和在验证范围内同样准确,甚至更准确;当然,其准确度在未经验证前不得而知。



## 8 测量—关联—预测

### 8.1 概述

MCP方法可用于1级、2级和3级资源评估,预测的资源特征值应符合7.7的规定。对于2级和3级资源评估,应使用测量位置和参考位置的方向谱,并按9.2中的规定计算资源特征值;对于1级资源评估,使用频率谱就足够,使用方向谱则更优。使用MCP方法时,测量位置和参考位置处资源特征值应具有强相关性。

### 8.2 MCP方法技术要求

当使用MCP法时,符合下列要求:

- a) 应记录参考位置和测量位置的坐标、数据来源以及资源特征值的有效性。对于长期数据应满足波浪数值模型中对边界条件的技术要求(见7.3)。
- b) 所有测量数据的观测和分析应符合6.5的要求,资源特征值的计算方法见第9章。
- c) 应使用测量位置和参考位置的同期波浪数据计算资源特征值。
- d) 应使用同期数据集的子集建立相关函数,宜选用相关性最大的函数对测量位置长期数据进行预测,选用的相关函数和函数建立方法(包括选用的数据集),应记录并证明其合理性。
- e) 特征参数集的评估应描述MCP测量位置的波况,它是由相关性函数以及MCP参考位置的长期波浪数据产生的。
- f) MCP方法评估使用的验证数据集应与建立相关函数的数据集相互独立,验证数据集宜代表测量位置处所有海况,且应满足7.7的要求;一般情况下,当验证数据集中的所有元素与建立相关函数的数据集获取时间间隔超过24h,认为两者是独立的。
- g) 预测数据的有效性应通过对比测量位置处预测数据和验证数据来计算。验证数据应符合7.7的规定。
- h) 结果报告应记录使用MCP方法评估波浪能资源的结果,包括结果的推导、有效性和不确定度(见10.6)。若无法验证预测值有效性,资源评估的结果应标记为“暂定”。

注: MCP方法在风能资源评估中应用较广泛,但在波浪能资源评估方面仍没有一种普适性的相关函数。每种相关函数都有各自的优点和不足,选用函数时主要取决于准确度要求以及站点和资源的特定特征。此外,多数情况下,相关函数是专门针对风能资源评估构建的。MCP方法尚未广泛应用于波浪能资源评估,不宜规定使用哪种相关性函数。在开展更多的针对波浪能资源评估的MCP方法研究获取更多经验后,这一现状将可能改变。

## 9 数据分析

### 9.1 概述

对海况数据进行分析,得出与WEC运行相关的特征值。若可得到波浪谱,应按9.2的规定分析波浪能资源特征值。对于1级评估,若只能获得海况特征值,可按9.3的规定分析波浪能资源。若无方向信息可用,波浪能资源评估中按方向分布的能量和相关特征值可省略。

描述某一独立的海况特征应包括下列参数:

- $J$  ;
- 特征波高;
- 特征波周期;

- $\epsilon_0$ ;
- $\theta_{j\max}$ ;
- $d$ 。

上述参数的不确定度应予以量化,第 10 章列出了这些参数的时空变化说明。

若针对特定 WEC 进行资源调查,敏感性分析所需特征参数可能会多于上述参数。在这种情况下,宜对这些特征量进行计算,并存档。

## 9.2 利用二维波浪谱进行特征描述

### 9.2.1 波浪谱

海况应利用每个网格点的波浪方向谱进行特征描述。若方向谱无法获取,宜利用频率谱对海况进行特征描述。 $S_i$  可按公式(6)计算:

$$S_i = \sum_j S_{ij} \Delta\theta_j \quad \dots\dots\dots(6)$$

部分海况参数是利用  $m_n$  计算的,  $m_n$  应按公式(7)计算:

$$m_n = \sum_i f_i^n S_i \Delta f_i \quad \dots\dots\dots(7)$$

### 9.2.2 全方向波浪能流密度

$J$  可按公式(8)计算:

$$J = \rho g \sum_{i,j} c_{g,i} S_{ij} \Delta f_i \Delta\theta_j \quad \dots\dots\dots(8)$$

$c_{g,i}$  可按公式(9)计算:

$$c_{g,i} = \frac{\pi f_i}{k_i} \left(1 + \frac{2k_i h}{\sinh 2k_i h}\right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

对于常深度水域,弥散关系可按公式(10)计算:

$$(2\pi f_i)^2 = g k_i \tanh k_i h \quad \dots\dots\dots(10)$$

### 9.2.3 特征波高

$H_{m0}$  可按公式(11)计算:

$$H_{m0} = 4 \sqrt{m_0} \quad \dots\dots\dots(11)$$

注:  $H_{m0} \neq H_s = H_{1/3}$ ;波浪观测的有效波高  $H_s (H_{1/3})$ ,是将不规则波列中的波高由大到小依次排列,其中最大的三分之一波高的平均值。

### 9.2.4 特征波周期

首选的特征波浪周期是  $T_e$ ,此外,可计算  $T_e$  和  $T_p$ 。

$T_e$  应按公式(12)计算:

$$T_e \equiv T_{-10} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$T_p$  可按公式(13)计算:

$$T_p = 1/f_p \quad \dots\dots\dots(13)$$

$T_p$  对谱型表现出强灵敏性,因而,不宜用  $T_p$  来评估波浪能资源。 $T_p$  通常用于 WEC 响应周期设计。

$T_z$  可按公式(14)计算:

$$T_z \cong T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad \dots\dots\dots(14)$$

9.2.5 谱宽度

$\epsilon_0$  可按公式(15)计算:

$$\epsilon_0 = \sqrt{\frac{m_0 m_{-2}}{m_{-1}^2} - 1} \dots\dots\dots (15)$$

9.2.6 方向分解波浪能流密度

9.2.6.1  $\theta$  方向波浪能流密度

$J_\theta$  可按公式(16)计算:

$$J_\theta = \rho g \sum_{i,j} c_{g,i} S_{ij} \Delta f_i \Delta \theta_j \cos(\theta - \theta_j) \delta \begin{cases} \delta = 1, \cos(\theta - \theta_j) \geq 0 \\ \delta = 0, \cos(\theta - \theta_j) < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (16)$$

$J_\theta$  的最大值记为  $J_{\theta_{jmax}}$ , 表示  $\theta$  方向上传播的  $J$  的最大值。

注 1: 只有在分解方向具有正贡献的  $J$  才对方向分解  $J$  有贡献值。

注 2: 计算  $\theta$  的余弦时, 角度需转换为弧度。

9.2.6.2 最大波浪能流密度方向

定义  $J_\theta$  的最大值对应的方向为  $\theta_{jmax}$ 。

注:  $\theta_p$  与  $f_p$  相关,  $\theta_{jmax}$  和  $\theta_p$  之间可能存在显著的差异。

由于  $\theta_p$  高度不稳定, 也无法代表波浪能传播方向, 因此不宜使用  $\theta_p$  来评估波浪能资源。

9.2.6.3 方向系数

$d$  可按公式(17)计算:

$$d = \frac{J_{\theta_{jmax}}}{J} \dots\dots\dots (17)$$

9.2.7 波浪系统分解

给定时间和地点的波浪场可分解为一系列波浪系统, 这些波浪系统由海面某处正在发生或已经发生的风引起。测量和模拟获得的波谱分解可用于分析构成主体波浪场的不同波浪系统。可分别计算这些分解波浪系统的特征参数, 并通过这些特征参数来估算不确定度(见 9.5)。这种方法将增加模型验证结果的可信度。若波浪能资源评估中采用波浪系统分解, 所使用的方法和结论应记录在资源评估技术报告(见 10.3)。

9.3 使用海况特征值进行波浪能评估

可采用海况特征值进行 1 级资源评估。表征海况的特征值一般包括特征波高、特征周期以及可能的特征方向。波浪谱型的选择宜基于当地波浪数据分析, 并且应报告和验证。

注 1: 对于 P-M 谱,  $T_e = 1.20 T_z = 0.857 T_p$ 。

注 2: 对于 Wallops 和 JONSWAP 谱,  $T_e \cong T_{1/3}$ 。

$J$  可按公式(18)估算:

$$J = \frac{\rho g}{16} c_g(T_e, h) H_{m0}^2 \dots\dots\dots (18)$$

$\epsilon_0$  应基于假设的谱型进行计算。

如果没有可用的方向信息, 则波浪资源评估中可以忽略方向分解的  $J$  及其相关参数。

9.4 结果统计分析

9.4.1 常规数据

应计算所有波浪能资源特征值的年、月统计值,应至少包括下列统计值:

- $\mu$ ;
- $\sigma$ ;
- 中值或第 50 百分位数;
- 第 10 百分位数;
- 第 90 百分位数;
- 最大值;
- 最小值;
- $MV(p)$ 。

9.4.2 均值

参数  $p$  的  $\mu$  应按公式(19)进行计算( $\mu_\theta$  除外):

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N p_K \dots\dots\dots (19)$$

$\mu_\theta$  可通过公式(20)计算:

$$\mu_\theta = \arctan \left[ \frac{\sum_{K=1}^N p_i \sin(\theta_K)}{\sum_{K=1}^N p_i \cos(\theta_K)} \right] \dots\dots\dots (20)$$

注:当角度从  $360^\circ$ 到  $0^\circ$ 变化时, $\theta_{jmax}$ 的平均值需谨慎计算。

9.4.3 标准差

$\sigma$  应按公式(21)进行计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{K=1}^N (p_K - \mu)^2} \dots\dots\dots (21)$$

9.4.4 百分位数

参数  $p$  有  $N$  个数据,由小到大排列为  $p[1]$ 、 $p[2]$ …… $p[N]$ ,与第  $x$  百分位数临近的排列序数为  $I$ ,小数部分为  $R$ ,  $I$ 、 $R$  可根据公式(22)进行计算,其中  $0 < R < 1$ :

$$N \frac{x}{100} + \frac{1}{2} = I + R \dots\dots\dots (22)$$

$p$  的第  $x$  百分位数可按公式(23)计算:

$$\text{第 } x \text{ 百分位} = p[I] + R(p[I+1] - p[I]) \dots\dots\dots (23)$$

第 50 百分位数也指中位数。

示例:

$H_{m0}$  序列分别为 1.5 m、1.3 m、1.6 m、1.4 m、1.8 m 和 2.1 m,求该序列第 90 百分位数。

解:

将  $H_{m0}$  由小到大排列如下:

$p[1] = 1.3; p[2] = 1.4; p[3] = 1.5;$

$p[4] = 1.6; p[5] = 1.8; p[6] = 2.1。$

将  $N=6; x=90$  代入公式(22),得:

$$6 \times \frac{90}{100} + \frac{1}{2} = 5.9 = I + R$$

将  $I=5; R=0.9$  代入公式(23),得:

第 90 百分位 =  $p[5] + R[p[6] - p[5]] = 1.8 + 0.9 \times (2.1 - 1.8) = 2.1 \text{ m}$

#### 9.4.5 月变化

MV( $p$ )可按公式(24)进行计算:

$$MV(p) = P_{\max} - P_{\min} \dots\dots\dots (24)$$

#### 9.5 资源评估的不确定度

不确定度评定的目的是量化波浪资源评估的不确定度。波浪资源评估中至少应考虑表 11 中所列出的不确定度类别,并在资源评估技术报告中写明。

测量不确定度(见附录 G)应描述与测量的波浪数据相关的所有不确定因素,而这些波浪数据是用于资源评估时数值模型验证或 MCP 法使用;这包括与测量物理环境有关的不确定度和从测量数据导出谱和海况特征特征值的不确定度。模拟不确定度应描述基于资源评估的波谱模型输出和/或 MCP 法输出结果的不确定因素。长期不确定度(参见附录 H)与研究区域内波候的长期变化、数值模拟或分析所选取的周期相关,该周期并不能完全反映研究区域内的长期波候或波浪能项目生命周期内的波候。

在适当的情况下,应按 GB/T 27418、ASME V&V 20 中的规定计算不确定度。用于计算波浪资源评估不确定度的所有方法,程序和假设应通过验证并给出明确的报告。

注:资源评估的不确定度计算是非常复杂的,目前没有明确的程序适用于本标准。

表 11 不确定度的类别

符号	类别
$u_D$	测量不确定度
$u_M$	模拟不确定度
$u_{LT}$	长期不确定度
$u_C$	组合不确定度

### 10 资源评估技术报告

#### 10.1 概述

资源评估技术报告应记录评估工作的具体方法和主要结论。报告内容应包含波浪能资源在研究区域内的空间变化特征和指定站点处的时间变化特征。资源评估技术报告宜按 10.3 的规定进行编写。同时,应建立研究成果数据库。

#### 10.2 研究站点的选择

应在研究区域内选择一些指定站点作为研究站点。若采用 MCP 方法,应将所有测量位置作为研究站点;若采用波浪数值模拟方法,研究站点位置宜与建模使用的网格点位置保持一致。对于这些研究站点,应在报告中对其波浪能资源特征值进行更为详细的描述。

注:通常在波浪资源评估中会有一个以上的研究站点。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/02511313113012013>