

波能分析及在珠江口波力试验电站初步设计中的应用

张 小 刚

(中国科学院广州能源研究所)

提要 本文结合珠江口波力试验电站初步设计的实例, 介绍和探讨了利用波浪观测记录进行波能估算、分析及应用的方法。

作为波浪力发电站设计的第一步, 对站址海域的波能及其分布进行估算和分析极为重要。通过这项工作, 为合理选择能量转换系统的设计参数提供依据, 使所设计的波力电站在实海中具有优良性能的必要条件。

一、波能分析的特点

1. 着眼于平均的波能分布

波能分析的目的是为波能转换系统选择合理的设计波况(系统最佳工作状态所对应的波况), 确定工作区间和计算收到能量。因此, 与一般海洋工程中的波浪统计和分析有所不同。波能分析所关心的不是罕见的特大波浪, 而是平均的波能分布。要避免过高估计波能, 在一般海洋工程设计中, 将波浪力估计得略微偏大, 是偏于安全的保守做法。在波能分析中则恰恰相反, 波能估算得偏高, 将导致所设计的波能转换系统不易达到出力的要求。必须按不规则波考虑才能准确地估计出力。波能分析的对象应当是波浪的能量而不是波面积上的能量。

2. 设计原则多样化

依据波能分析的结果进行波能转换系统设计的原则会随用户要求和设计思想的不同而不同。例如, 对以尽量多攫取能量为目标的波力电站, 在设计时力图使系统在能量分布集中的区域有较高效率; 而对航标灯用波力发电装置等希望尽可能少地处于不工作状态的系统, 则

要求其进入工作状态的起动力波况尽可能小, 以保证有足够的工作时间保证率。

二、波浪资料的初步统计

一般来说, 若能有站址的海域自记波面记录资料是较为理想的, 这样便于采用谱分析方法计算波能, 数据也较为完整。但目前我国各海洋站尚未普及波浪自记记录, 在珠江口波力试验电站初步设计中所依据的“海浪观测记录月报表”(海表-3)是当地海洋站利用岸用光学测波仪, 每日08, 11, 14, 17时定时人工观测海浪的记录。为方便起见, 本文将海表-3中每次观测所得的周期、波高分别称为观测周期 $T_{\text{观}}$ 和观测波高 $H_{\text{观}}$ 。根据观测方法^[1], $T_{\text{观}}$ 相当于上跨零点平均周期 \bar{T} , $H_{\text{观}}$ 相当于1/10大波平均波高 $H_{1/10}$ 。

应当指出, 所谓观测周期和观测波高只是代表一定不规则波的波况特征波要素, 与规则波要素不同, 它们并不说明正好存在一个波高为 $H_{\text{观}}$ 、周期为 $T_{\text{观}}$ 的波浪。

沿用通常的波浪统计方法进行以下初步统计: 特征波要素的统计; 波型的统计; 波高玫瑰图及波浪散布图。

三、波能的计算

1. 波功率计算公式

根据线性海浪理论可以得到, 单位波峰宽

度的平均波功率(能流密度)为:

$$P = \rho g \int_0^{\infty} S(\omega) \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\text{sh}2kh} \right) \cdot \frac{g}{\omega} \text{th}kh d\omega \quad (1)$$

式中, $S(\omega)$ 为海浪能量谱, h 为水深。波数 k 与频率 ω 之间有色散关系 $\omega^2 = kg \text{th}kh$ 。对于无限水深, 波功率公式为:

$$P = \frac{\rho g^2}{2} \int_0^{\infty} \frac{1}{\omega} S(\omega) d\omega \quad (2)$$

海浪谱可以通过对定点自记波面记录进行谱分析得到。但对“海表-3”这样的资料, 无法直接套用式(1)或式(2)。为此, 引入

$$m_j = \int_0^{\infty} \omega^j S(\omega) d\omega,$$

称做 $S(\omega)$ 的 j 阶矩。则式(2)可写为:

$$P = \frac{\rho g^2}{2} m_{-1} = \frac{\rho g^2}{2} m_0 \frac{m_{-1}}{m_0}$$

在承认波高符合瑞利分布的假定下, 零阶矩

$$m_0 = \frac{1}{8} H_{rms}^2 = \frac{1}{5.1^2} H_{1/10}^2,$$

H_{rms} 为均方根波高。定义

$$T_{-1,0} = 2\pi \frac{m_{-1}}{m_0},$$

称“能量平均周期”, 于是有:

$$P = \frac{\rho g^2}{32\pi} H_{rms}^2 T_{-1,0} \\ = \frac{\rho g^2}{104\pi} H_{1/10}^2 T_{-1,0}$$

实际上, $T_{-1,0}$ 与经过训练的观测者人工观测到的平均周期符合最好^[3], 因此, 可近似用 $T_{观}$ 代替 $T_{-1,0}$ 进行计算, 于是得到:

$$P \approx 0.3 H_{1/10}^2 T_{观} \quad (\text{kw/m}) \quad (3)$$

这样, 便可直接利用海表-3的数据。

2. 年平均波功率与年总波能

将全年“海表-3”上每一次观测的数据代入式(3), 并全部累加起来, 除以观测次数, 便得单位宽度上的年平均波功率 \bar{P} 。在该电站

海域, $\bar{P} = 3.9 \text{ kw/m}$ 。

也有人直接用特征波要素的年均值计算年平均波功率。但从数学不等式

$$\left(\sum_{i=1}^n H_i / n \right)^2 < \sum_{i=1}^n H_i^2 / n$$

证明, 这样得到的结果必然过小。实际上, 在本电站海域用 $H_{观}$ 和 $T_{观}$ 的年均值计算得的单宽波功率仅为 3 kw/m , 误差几乎达 $1/4$ 。

“海表-3”的数据全部是在白天观测的, 若假定在夜晚, 海浪全年总的统计特征与白天基本相同, 则将 \bar{P} 乘上一年的小时数 8760 , 便得到单位宽度上年总波能 $W = 3.4 \text{ 万 kw} \cdot \text{h/m}$ 。

3. 波能分布

某一波况下的波功率乘以一年中该波况出现的时间, 就是一年中该波况所具有的波能 E 。由此, 仿照波浪散布图的方法, 可绘得反映波能随波况分布情况的波能分布图, 在以 $H_{观}$ 和 $T_{观}$ 为纵横座标的图纸上, 按一定的波高、周期间隔将所要表现的波况范围划分为许多表格, 并在各方格中填写入对应的波况所具有的波能数值(图1)。此外, 根据图1还可分别绘得波能关于波功率的分布曲线(图2)和波功率保证率及保证时间曲线(图3)。

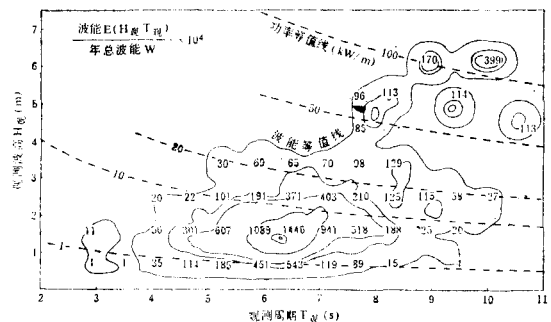


图1 波能分布

Fig.1 Distribution of wave energy

4. 波能利用区间

波能转换系统的工作范围是受限制的, 波浪太小或太大都不能正常工作, 使得一部分波能无法利用。为方便地找出波能利用区间和波能利用率, 可由波能分布衍生出一系列辅助图

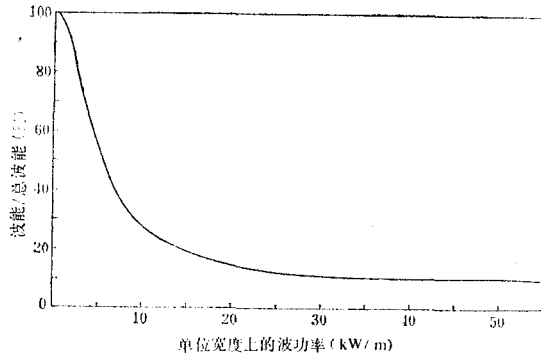


图2 波能相对于波功率的累积
Fig.2 Integral wave energy versus wave power

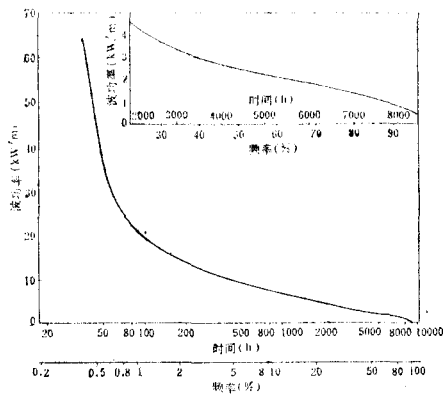


图3 波功率累积分布
Fig.3 Integral distribution of wave power

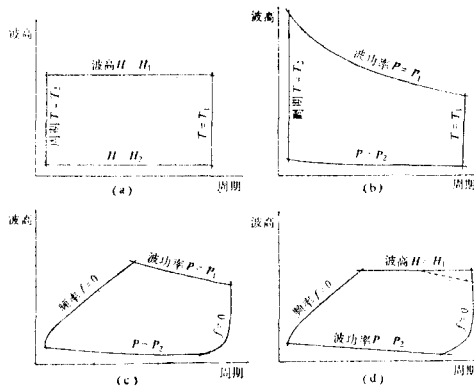


图4 波能利用区间的形式
Fig.4 Some forms of the utilizable wave energy region

线。它们或可直接着眼于波浪的大小；如，波能与波高限度的关系及波能与周期限度关系；或可考虑使系统开始进入工作状态的最小起动

功率；或反映装机功率的限制；或者从其它方面的限制考虑。从这些图线能组合成多种不同形式的波能利用区间，可根据装置的具体特点和设计思想确定。图4为其中的4种形式。对于珠江口波力试验电站，在气室输出功率达到使空气透平进入工作转速的起动功率时开始发电，输出功率超过装机容量许可的功率上限时，采取气室放气以降低输入功率的措施，以保证发电机在额定功率范围内运行，直到波高超过机组安全运行所允许的上限时停止工作。因此，其波能利用区间的形式如图4。

四、设计波况的初选

设计波况的确定方法取决于一定的设计思想和波能转换系统的运行特性（反过来，系统性能也受制于设计波况）。在本电站，以尽可能多地获得能量为目标，若已知以波况（H，T）为变量，以设计波况（H_设，T_设）为参变量的系统效率函数η（H，T，H_设，T_设），便可在波能利用区间D内根据波能分布求出年收到能量：

$$W_{收}(H_{设}, T_{设}) = \iint_D \eta(H, T, H_{设}, T_{设}) E(H, T) dHdT$$

并最终找出使W_收为最大的最佳设计波况。但在目前，我们对整个系统性能了解得还很少，因此，在珠江口波力试验电站初步设计中，作为第一步近似，将设计波况选择在波能利用区间的重心，即H_观 = 1.5m，T_观 = 6.5s的波况上，相应的波功率P_设 = 4.4kw/m。由于较大波浪具有较大能量，将系统设计点选择在能量分布的重心，兼顾波功率较大但出现频率较低和功率小而频率高的波况，显然比简单地选择在频率最高处更为合理。

五、发电能力

1. 基本负载保证率与纳波宽度

很多情况下，用户要求有一定的基本负载保证率（或保证时间），即收到功率不低于基

本负载的频率(或时间)。对于波力航标灯,这是主要的设计因素,而对波力电站,则影响纳波宽度——在本电站为气室口宽。当用户有0.2kw的负载要求的85%的保证率时,则保证率为85%的单宽波动功率为1.12 kw/m。因远离设计波况,此时系统综合效率较低(约5%)。再考虑到10%的线路损失,则每m波宽供给用户的电功率为0.056kw/m。所以气室口宽 $b \geq 0.2/0.056 = 3.97\text{m}$,取 $b = 4\text{m}$ 。

2. 年发电能力

珠江口波力试验电站,在设计波况下的综合效率为29.4%,发电机输出功率约5kw。为充分利用波能,电站装机容量应大于5kw。确定装机规模要涉及多种因素,包括用户需求、投资能力、发电成本、系统性能和政策性

要求等等。其中,年发电量是方案选择时需考虑的因素之一。

对波浪分析的目的在于着眼于其能量利用。本文结合珠江口波力试验电站的工作,提出自己的见解和做法,有待电站建成后的验证。

参 考 文 献

- [1] 国家海洋局, 1979。海滨观测规范。
- [2] 合田良实, 永井康平, 1974。波浪の统计性质に関する调查・解析。港湾技术研究所报告, 第13卷第1号, 第3—37页。
- [3] Chryssotomidis, C. and M. C. Oakes, 1974. Selection of Wave Spectra for Use in Ship Design, Proceedings of the International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis 2: 217—234.

WAVE ENERGY ANALYSIS AND ITS APPLICATION IN THE PRELIMINARY DESIGN OF A PILOT WAVE POWER STATION AT THE ZHU- JIANG RIVER ESTUARY

Zhang Xiaogang

(Guangzhou Institute of Energy Conversion, Academia Sinica)

Abstract

Through estimating and analysing the wave energy and its distribution in site, the wave energy analysis provides a base for rational selecting design parameters of energy conversion system of the wave power station.

In this paper, the method of wave energy estimation and analysis using observed wave data is presented and approached, relating the preliminary design of a pilot wave power station at the Zhujiang River Estuary.