

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2023.02.011

点吸收式波浪能发电装置姿态特性分析

赵智坤^{1,2}, 王项南¹, 张浦阳², 夏海南¹

(1. 国家海洋技术中心, 天津 300112; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 点吸收式波浪能发电装置是一种最简单的振荡体式波浪能发电装置, 但其安装成本高、生存能力较差。本文针对点吸收式波浪能发电装置的姿态稳定性问题, 开展了其在波浪作用下的运动姿态和发电功率之间的关系研究。首先介绍了点吸收式波浪能发电装置的工作原理; 然后, 根据我国南海海域的自然资源条件, 划定波况范围, 利用相似理论在实验室中模拟波浪参数, 选定工况, 建立模型, 设计测量系统, 开展物理模型试验; 最后, 利用试验结果分析了发电装置的最佳发电周期、波高对装置发电功率的影响, 装置姿态对发电功率的影响等。本文为点吸收式波浪能发电装置设计及测试提供了参考。

关键词: 点吸收式波浪能发电装置; 模型试验; 运动姿态; 发电功率

中图分类号: P743.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2023) 02-0087-07

现如今, 人类社会已经进入新能源时期, 全球能源需求在不断显著增加, 据估计, 2040 年全球能源消耗将比 2010 年高 30% 左右^[1]。然而, 《世界能源发展报告 2021》指出, 2020 年全球石油储量下降, 天然气产量下降, 煤炭消费量波动性加强^[2]。可见, 在不久的将来, 传统的化石能源将很难满足人类社会的发展需求, 持续不断加大可再生能源的开发利用迫在眉睫。

海洋能是一种典型的可再生清洁能源, 其中波浪能是由海面吸收了风能后生成的波浪中所蕴含的一系列动能和势能的总称^[3], 具有储能大、能量密度高、对环境影响小等优点^[4]。而针对不同环境条件的所开发的各种类型的波浪能发电装置为高效合理利用波浪能提供了媒介。按照能量的捕获方式, 目前大部分装置可以归纳为振荡水柱式、振荡体式 and 越浪式三大类^[5-7]。其中, 点吸收式波浪能发电装

置隶属于振荡体式波浪能发电装置, 主要利用振荡浮子在波浪力作用下的升沉运动收集波浪能, 具有结构灵活, 体量较小, 适应多种水深工作环境, 不受波浪方向影响, 易于和各种平台相结合的特点^[8], 目前在国内外已得到广泛研究与应用。

点吸收式波浪能发电装置按照波浪能传递方式又可分为机械式、水压式、液压式、直驱式和磁流体式^[9]。其中, 液压式波浪能发电装置主要利用液压缸、蓄能器、液压马达等装置来完成波浪能的传递, 由波浪能转化为动能带动液压缸活塞做往复运动, 再由动能转化为液压能带动旋转发电机发电, 最终转化为电能, 目前最新的发电装置包括美国的 Electric Buoy、爱尔兰的 Wave Bob、山东大学研发的 120 kW 漂浮液压式点吸收波浪发电装置^[5]。该类型装置采用的液压传动技术可以实现柔性传输、蓄能稳压并提高电能质量, 近年来已逐渐成为点吸

收稿日期: 2022-11-16

基金项目: 自然资源部业务化项目 (N3230NY10)

作者简介: 赵智坤 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口海岸工程与海洋可再生能源开发利用。E-mail: slgk20zzk@tju.edu.cn

通讯作者: 王项南 (1965—), 男, 学士, 正高级工程师, 主要从事海洋观测及海洋可再生能源开发利用技术研究。E-mail: notckj@vip.sina.com

收式波浪能发电装置的主流发展方向^[9]。直驱式点吸收波浪能发电装置具有结构简单、转换效率高、等优点^[10]，得到广泛研究和应用。CLIFTON P C J 等^[11]提出了波浪能非接触转换装置原理图，制作的额定功率 10 kW 原型样机在美国俄勒冈州纽波特进行了海试；POLINDER H 等^[12]提出了阿基米德波浪摆 (Archimedes Wave Swing, AWS)，下部结构在海底固定，在 2004 年进行海上试验，试验结果表明该装置易损坏且水下维修困难，需要较高的制造精度。美国 OPT (Ocean Power Technologies) 公司研制了 Power Buoy 海试装置，于 2006 年在英国北部完成了 6 次海试^[13]。中国科学院广州能源研究所研制了“哪吒 1 号”直驱式海试装置，并在我国南海海域进行海试，设计发电功率为 10 kW，受潮流影响小，海试时输出最高电压为 381 V^[14]。但是在试验过程中，对于发电装置运动姿态对发电功率的影响，目前国内外开展的研究较少。

本文以一种直驱式点吸收式波浪能发电装置模型为研究对象，在实验室水槽中进行物理模型试验，研究其运动姿态对发电功率的影响，从而提高波浪能发电装置功率测试分析评价结果的科学性、准确性，为装置的实验室测试与分析评价工作提供参考。

1 发电原理

点吸收式又称单浮体式，是最简单的振荡体式波浪能发电装置。外形通常设计为一个圆柱形浮体，能够捕捉来自多个方向的波浪^[5]。直驱式点吸收式波浪能发电装置由振荡浮子、直线发电机和水下附体三部分组成。装置布放在指定海域后，由于浮子与水下附体的固有周期不同，随同一波浪周期下的运动响应也不同，因此在波浪作用下，浮子与水下附体发生相对运动，将波浪能转化为动能，再通过浮子运动带动装置内直线发电机作往复直线运动，从而将动能转化为电能，实现波浪能发电，如图 1 所示。这种直驱式能量转换机械系统的优点是直接发电不需要传输，减少中间环节，降低了设计复杂性和维护成本^[16]。

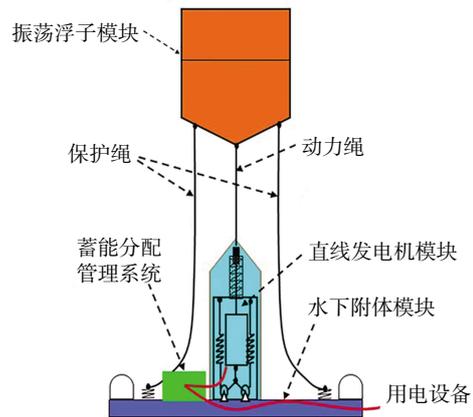
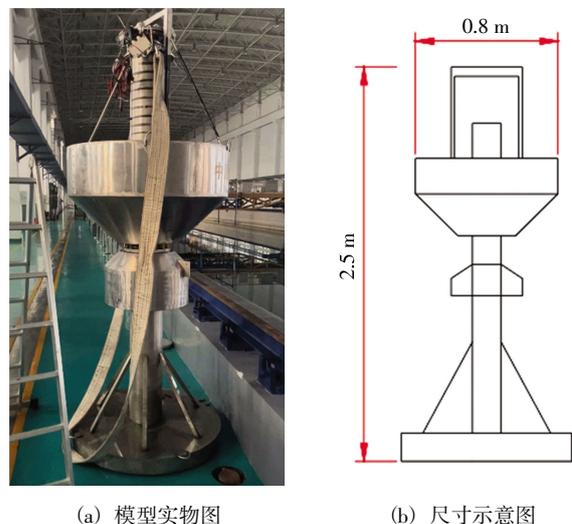


图 1 点吸收式发电装置原理图

2 试验相似比尺

装置布放于我国南海海域，波浪能资源丰富，适合资源的开发和转化。布放区域大波波高范围为 0.5 ~ 1.7 m，月平均大波波高为 1.36 m；周期范围为 2.6 ~ 5.7 s，平均周期为 4.9 s^[17]。国家海洋技术中心海洋动力环境实验室的多功能水槽长 130 m、宽 18 m、深 6 m，试验时水深 4.52 m。造波系统可以实现的波高范围为 0.02 ~ 0.25 m，波周期范围为 1 ~ 5 s。综合以上实海况条件、试验室水槽尺寸和造波能力等因素，选取试验相似比尺为 1 : 6，得到缩尺后的发电装置模型如图 2 所示。模型发电功率 100 W，总长为 2.5 m，迎浪宽度为 0.8 m。装置模型顶端圆筒轴上安装 6 个 5 W 的 LED 灯泡作为负载，



(a) 模型实物图

(b) 尺寸示意图

图 2 点吸收式波浪能发电装置模型

在试验过程中灯泡的亮暗程度和时长可作为装置发电效果的直观指标。

3 测量系统

本次试验需要获取的测试数据包括: 装置模型的倾角等六自由度参数 (包括 3 个方向的运动加速度和转角)、波高、浮子的相对位移和装置模型的发电功率。为达到试验目的, 试验中设计了一套独特专用的测量系统, 使用的测量仪器包括波高传感器、拉线位移传感器、六自由度加速度和倾角传感器, 以及功率分析仪, 性能参数如表 1 所示, 测量原理示意图如图 3 所示。在该测量系统中, 造波机按照设计工况进行造波, 形成波浪输入条件, 波浪在经过装置时, 浮子和浮体均产生运动, 波高传感

表 1 测试仪器的性能参数

测量仪器名称	性能参数	数量
波高传感器	量程: 0~0.6 m	1
	精度: 0.2% F.S	
倾角传感器	量程: 0°~±90	1
	精度: ±0.1°	
	响应频率: 100 Hz 数据输出速率: 0.1~100 Hz	
加速度传感器	量程: ±2/±4/±8/±16 g 可选 响应频率: 100 Hz	1
拉线位移传感器	有效量程: 0~1 200 mm 精度: 0.02% F.S	1
高精度功率分析仪	电压量程: 15/30/60/150/300/600/1 500 V	1
	电流量程: 取决于选用的额定传感器	
	频率范围: 0.5~5 000 Hz	
	电压精度: ±0.05% rdg, ±0.05% F.S	
	电流精度: ±0.05% rdg, ±0.05% F.S 有功功率精度: ±0.05% rdg, ±0.05% F.S	

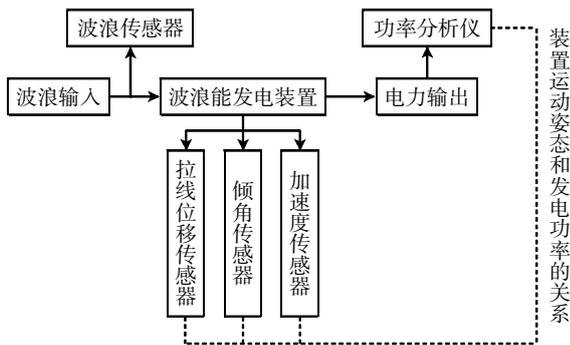


图 3 测量原理示意图

器用于测量模型前的波高与波周期, 拉线位移传感器用于测量浮子的运动位移, 六自由度加速度和倾角传感器用于测量模型的垂荡、纵摇等六自由度的运动姿态, 装置在波浪作用下产生浮子运动并发电, 实现电力输出, 功率分析仪用于测量装置模型的发电功率等参数, 布置情况如图 4 所示。同时, 为保证时间上各传感器采集数据同步对应, 所有传感器的采集频率设为 10 Hz, 便于后续数据处理和分析。

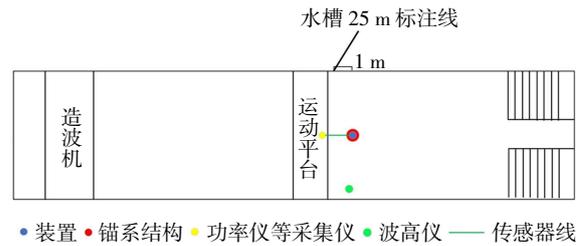


图 4 测量仪器布置图

4 试验

4.1 模型布放

在模型底部粘贴浮块, 进行模型的预下水试验, 将模型静浮于水面, 调整模型的重心至预定吃水位置, 并调整模型能够正浮于水面。对于各采集测量仪器, 首先需检查各个传感器的质量, 并逐一进行标定, 使之符合试验使用要求; 然后将标定好的传感器按照测量系统设计要求的位置进行安装。标定的传感器包括: 波高传感器、拉线位移传感器、造波系统。对于波高传感器的标定, 需要用量筒对波高传感器的 K 、 C 值进行率定, 连接采集系统后, 选取不少于 4 个水深值进行测量, 分别获取波高采集系统的读数, 以读数为输入值, 水深值为输出值, 进行曲线拟合, 算得波高传感器的 K 、 C 值, 从而完成标定。

对于传感器的安装, 需要满足位置准确稳定的要求, 且尽量不对波浪能发电装置的运动造成影响。其中, 拉线位移传感器用来测量浮子延圆筒轴运动的轴向相对位移, 所以一端布置在与浮子为一体的顶部钢架上, 另一端布置在装置圆筒轴顶部的圆盘上, 两端均用专用的强力粘胶和扎带进行固定, 确保传感器安全稳固且不会发生移动。对于六自由度加速度传感器和倾角传感器, 为确保测量获

取数据方便,将二者水平叠放在圆筒轴顶部的圆盘上,注意与拉线位移传感器保持一定的距离,确保互相不受影响的同时稳定发挥测量作用,同样用专用强力粘胶进行固定。在负载端连接电流传感器与电压测量夹,另一端与功率分析仪连接,用于测量装置模型的发电功率。各传感器的安装位置如图5所示。同时将标定好的波高传感器安装在与装置在同一水平线上的水槽一侧,便于准确测量同一时刻流经装置的波高。

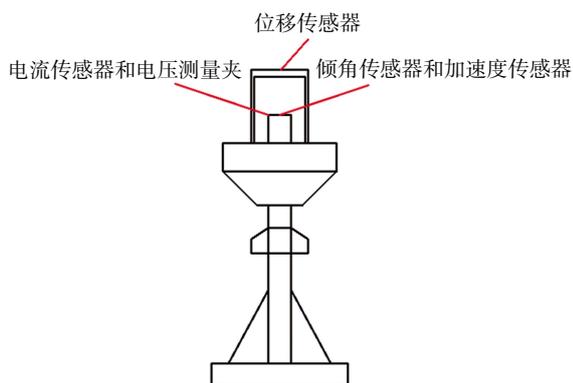


图5 传感器安装示意图

由于试验想要研究装置模型在波浪作用下的运动姿态,但又需要限制模型的漫漂运动范围,所以需要设计合理的锚系系统,使装置模型在一定范围内做自由姿态运动。水深为4.2 m,装置模型在静水中的吃水为2 m,通过计算,采用“4+1”模式的缆绳,锚系结构的一端用4条1.2 m长的缆绳分别与装置模型底部4个挂钩相连;另一端则用一条1 m长的缆绳与500 kg的秤砣状重物相连,重物无需在水底固定;中间采用挂钩将两部分缆绳进行连接,形成完整的锚系结构。

4.2 静水试验和规则波试验

首先让模型在静水中处于平衡状态,然后分别使其横倾、纵倾至某一角度,随后突然放开,模型便会在静水中绕平衡位置做自由横摇衰减运动,直至最后静止并稳定于原来的平衡位置。垂荡与之类似,将其下沉至某一深度,释放约束,使其做自由垂荡衰减运动,直至装置恢复到平衡静止状态。通过布放在装置上的加速度与倾角传感器实时测量该装置模型的横摇、纵摇和垂荡过程并记录。得到装置在水中的自由衰减数据。

规则波试验按照工况表来进行,工况表的设定

需要基本覆盖与该模型对应装置所在的现场环境中的基本波浪要素。根据海域有效波高和周期的分布,以及实验室造波条件,试验选取的造波范围为波高0.1~0.25 m,周期为1.2~2.3 s。本次试验共拟定28组规则波工况。具体试验流程为:检查水面平稳,装置模型基本静浮于水面;输入波高和波周期等参数,造波机进行造波,同时打开采集仪器进行数据的采集;装置在波浪作用下开始产生运动并发电,得到各个传感器的采集数据,初步检查数据无误后,完成本组试验;待水面基本平静,开始下一组试验。

5 试验结果分析

5.1 最佳周期的确定

在28组规则波工况中,通过分析第1、3、6、9、13、17、22、25组,研究波高为0.1 m,不同周期下的装置发电功率,以第3组为例,可以看到装置的发电功率最大值超过10 W,多数功率稳定在6~8 W,如图6所示。得出各组的平均发电功率如表2所示。其中,第17组的平均功率最大为2.13 W,周期在2.0~2.2 s范围内装置可以保持较大发电功率,而周期为2.3 s时平均功率值下降,得出装置在选取波况范围内的最佳周期为2.1 s。

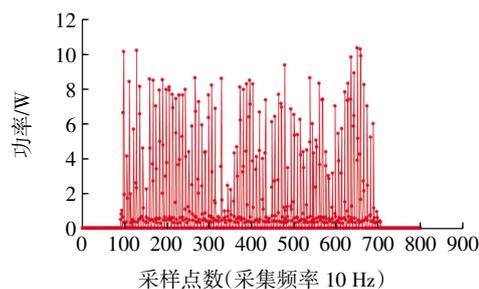


图6 第3组装置发电功率

表2 波高为0.1 m的各组平均发电功率

组号	周期/s	平均功率/W
1	1.2	不发电
3	1.5	1.66
6	1.8	1.11
9	1.9	0.81
13	2.0	2.11
17	2.1	2.13
22	2.2	2.02
25	2.3	0.99

5.2 波高对装置发电功率的影响

第 17 ~ 21 组的波况参数和平均发电功率如表 3 所示, 即研究装置在最佳周期 2.1 s 时, 不同波高下的装置发电功率及姿态对发电功率的影响, 得出最佳周期下的平均功率随波高变化如图 7 所示, 可以得出在研究波况范围内, 处于最佳周期时, 装置发电功率随波高增大而增大。

表 3 最佳周期下的各组平均发电功率

组号	波高/m	周期/s	平均功率/W
17	0.10		2.13
18	0.13		5.12
19	0.16	2.1	5.61
20	0.20		7.88
21	0.25		10.25

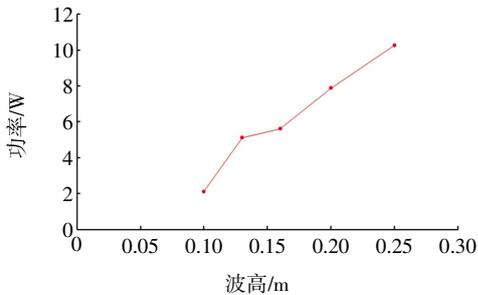


图 7 最佳周期下的平均功率随波高的变化

5.3 装置姿态对发电功率的影响

描述装置在水中的姿态有很多变量, 本次试验主要研究的是以装置迎浪方向倾角为代表的装置姿态对发电功率的影响。结果发现, 在最佳周期下, 装置的运动姿态可分为两种, 即小波最佳周期下的运动姿态和大波最佳周期下的运动姿态。分别为以 17 和 19 组为例。

对于 17 组, 在波高为 0.1 m 的小波作用下, 装置整体保持水平, 浮子随波浪上下运动, 装置倾角范围为 $-0.5^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 。平均发电功率为 2.09 W。同时把倾角小于 2° 的情况成称为“平稳发电状态”。对于 19 组, 此时平均波高为 0.16 m 的大波, 装置整体开始向随波方向倾斜一定的角度, 并随波进行摆动, 浮子在此姿态下延轴上下运动, 装置倾角范围为 $0^{\circ} \sim 3.5^{\circ}$, 以 0.5° 为一个区间, 分别对每个区间的装置发电功率取平均值, 得到装置倾角与发电功率的关系如图 8 所示。在平稳发电状态, 装置功率为 10.10 W, 倾角范围为 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 时, 装置功率为 9.03 W, 发电功

率为正常状态的 89.4%, 小于 90%, 称此时的状态为“受倾角较小影响的发电状态”。

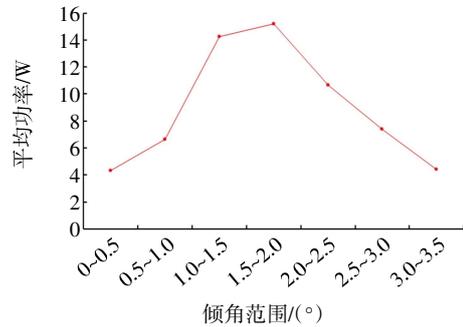


图 8 装置倾角与发电功率的关系

此外, 装置的运动姿态还有第 3 种, 即由于装置倾斜过大而导致浮子运动不畅, 出现卡顿的状态, 发生这种情况的原因是给定工况波高大于 0.23 m 或者周期处于非最佳周期且波高大于等于 0.15 m, 如第 11、12、26、27、28 组出现了上述情况, 各组参数如表 4 所示。

表 4 出现卡顿状态的各组波况参数

组号	波高/m	周期/s
11	0.16	1.9
12	0.20	1.9
26	0.15	2.3
27	0.20	2.3
28	0.25	2.3

6 结 论

本文针对一种典型的点吸收式波浪能发电装置, 进行物理模型试验, 对其在波浪作用下的运动姿态和发电功率之间的关系进行研究, 得出如下结论。

(1) 本次试验的点吸收式波浪能发电装置模型的最佳周期为 2.1 s, 在实际海域条件下可以取得良好的发电效果。

(2) 处于最佳周期时, 装置发电功率随波高增大而增大, 且保持稳定增长率, 说明在该海域海况范围内, 装置发电功率可以保持较高水平。

(3) 装置的运动姿态对发电功率的影响可以分为两种: 一是当倾角小于 2° 时, 为平稳发电状态, 装置整体平稳, 微小摆动, 此时倾角对发电功率的影响可以忽略不计; 二是倾角范围为 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 时, 装

置由于大波的作用一定角度受浪方向的倾斜,发电功率小于正常状态的90%。

(4) 当大波导致倾角更大时,会出现浮子卡顿现象,此时发电功率大大降低,装置无法正常工作,甚至可能会破坏装置结构,造成经济损失。实海况条件下应用时,应提前充分做好试验和测试准

备工作,从而避免这种情况出现。

本文成果为波浪能发电装置的实验室测试与分析评价工作提供参考。今后可进一步研究不规则波条件下装置运动姿态对发电功率的影响,更好地模拟实际海况,提高现场测试分析的准确性。

参考文献:

- [1] BIRDSALL C. The outlook for energy: A view to 2040[J]. Mineralol Technik, 2013, 9: 1-10.
- [2] GOULDT, 王晓波. 加快中国和世界实现碳中和的步伐——《2021年世界能源展望》洞见[J]. 中国投资(中英文), 2022, 538(Z1): 62-65.
- [3] 冯士筌, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [4] 唐泽成. 点吸收式波浪能发电装置水动力性能研究与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [5] FALCO A F D. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 899-918.
- [6] MELO A B, BHUYAN G. 2008 annual report on ocean energy systems[R]. Sicilia, Italy: IEA-OES, 2009.
- [7] ENERGY A. Marine energy challenge, oscillating water column wave energy converter[R]. Oak Ridge, USA: Department of Energy, 2005.
- [8] ZHANG D H, LI W, LIN Y G. Wave energy in China: Current status and perspectives[J]. Renewable Energy, 2009, 28(3): 126-132.
- [9] 杨绍辉, 何宏舟, 李晖, 等. 点吸收式波浪能发电技术的研究现状与展望[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(3): 8-16.
- [10] 刘春元, 余海涛, 胡敏强, 等. 永磁直线发电机在直驱式波浪发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 90-98.
- [11] CLIFTON P C J, MCMAHON R A, KELLY H. Design and commissioning of a 30 kW direct drive wave generator[C]//5th IET International Conference on Power Electronics. Machines and Drives. Brighton: IET, 2010: 1-6.
- [12] POLINDER H, DAMEN M E C, GARDNER F. Linear PM generator system for wave energy conversion in the AWS[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 583-589.
- [13] PRUDELL J, STODDARD M, AMON E, et al. A permanent-magnet tubular linear generator for ocean wave energy conversion[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(6): 2392-2400.
- [14] 吴必军, 刁向红, 王坤林, 等. 10 kW 漂浮点吸收直线发电波力装置[J]. 海洋技术, 2012, 31(3): 68-73.
- [15] 张伟. 液压波浪能发电装置稳定性及控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [16] 刘延俊, 武爽, 王登帅, 等. 海洋波浪能发电装置研究进展[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 63-75.
- [17] 夏海南, 王项南, 李强, 等. 波浪能发电装置现场测试中波浪参数比测分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 251-255.

Analysis of Attitude Characteristics of Point Absorption Wave Energy Generation Device

ZHAO Zhikun^{1,2}, WANG Xiangnan¹, ZHANG Puyang², XIA Hainan¹

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Point absorption wave energy generation device is the simplest oscillating body wave energy generator, but its installation cost is high and its viability is poor. The relationship between the motion attitude and power generation under wave action is studied for the attitude stability of point absorption wave energy generation device in this paper. Firstly, the working principle of the point absorption wave power generation device is introduced; then, according to the natural resource conditions in the South China Sea, the wave condition range is delineated, the wave parameters are simulated in the laboratory using similar theory, the working conditions are selected, the model is established, the measurement system is designed, and the physical model tests are carried out; finally, the optimal power generation period of the power generation device, the influence of wave height on the power generation power of the device, and the influence of the attitude of the device on the power generation power are analyzed using the test results. Finally, we analyzed the optimal power generation period, the effect of wave height on power generation, and the effect of device attitude on power generation. This paper provides a reference for the design and testing of point absorption wave energy generation devices.

Key words: point absorption wave energy generation device; model test; motion attitude; power generation