

# 振荡浮子式波能转换装置阵列的物理模型水池试验

何则辰<sup>1,2</sup>, 张崇伟<sup>1,2\*</sup>, 宁德志<sup>1,2</sup>, 赵俊渝<sup>3</sup>, 何东<sup>3</sup>, 杨海师<sup>3</sup>

1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024

2. 大连理工大学海洋可再生能源研究中心, 大连 116024

3. 重庆齿轮箱有限责任公司, 重庆 402263

**摘要** 振荡浮子式波能转换装置在防波堤上进行阵列化布置时, 各装置的浮子获能体之间会发生复杂的水动力相互作用, 影响装置的运动和发电性能。开展物理水池试验, 研究了防波堤前振荡浮子式波能装置阵列的水动力响应特性, 着重分析了不同波浪条件下浮子尺寸和分布间距对装置运动性能和发电功率的影响规律。研究发现, 在所考虑的参数范围内, 相同波况条件下, 小半径浮子波能装置的发电功率更高; 窄频带波浪环境中, 小间距布置有利于产生更大的功率峰值, 且入射波高对装置的发电功率有显著影响。

**关键词** 波浪能; 振荡浮子; 防波堤; 海洋能; 水池试验

波浪能是蕴藏在海洋中的一种重要的可再生能源, 受地理位置约束少、分布广泛且储量丰富。有效开发利用波浪能资源, 可为海洋离岸工程结构、仪器设备及偏远岛屿供电, 从而降低远海作业对化石能源的依赖、减少远程输电的成本<sup>[1]</sup>。振荡浮子式波能转换装置是一类重要的波浪能利用装置, 具有环境适应性强、易于阵列化布置等优点, 在

波浪能开发领域被广泛重视<sup>[2-4]</sup>。振荡浮子式波能转换装置通过浮子获能体纵荡、垂荡和横摇等多种形式的运动来吸收波浪能, 进而经过功率输出系统的转换得到电能。为了提升振荡浮子式波能装置的功率提取性能, 许多学者就其能量提取方式<sup>[5-6]</sup>、浮子几何形状和尺寸<sup>[7-8]</sup>等进行了改进和优化。采用阵列化布置时, 振荡浮子式波能装置的获能体之

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501904); 国家自然科学基金项目(51709038, 51679036); 中国博士后科学基金项目(2018M630289, 2019T120209); 中央高校基本科研业务费专项(DUT19RC(4)027)

作者简介: 何则辰, 博士研究生, 研究方向为波浪能水动力, 电子信箱: 1916702668@qq.com; 张崇伟(通信作者), 副教授, 研究方向为海洋工程水动力, 电子信箱: chongweizhang@dlut.edu.cn

引用格式: 何则辰, 张崇伟, 宁德志, 等. 振荡浮子式波能转换装置阵列的物理模型水池试验[J]. 科技导报, 2021, 39(6): 47-52; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.06.006

间会发生复杂的水动力相互作用,不同形状、尺寸、数量、间距和布局等参数如何影响装置阵列的发电性能,是一个重要的研究课题。

对于岛屿开发等离岸海洋工程建设,防波堤结构必不可少,其作用主要是减小掩护水域平稳的波浪强度<sup>[9]</sup>。将波能装置集成于防波堤主要有两大优势,一是利用波能装置吸收波浪能量,从而使入射波高衰减,这符合防波堤的实际要求;二是可以降低波能装置的建造成本,使得多个工程可以成本和空间共享,从而实现波能装置的多元化和综合利用<sup>[4]</sup>。McIver等<sup>[10]</sup>、Mavrakos等<sup>[11]</sup>及Schay等<sup>[12]</sup>研究了防波堤前的点吸收式波能装置,发现防波堤的存在可使浮子获能体的提取功率明显增大。Seo等<sup>[13]</sup>提出一种安装于沉箱式防波堤前侧槽中的浮子式波能装置,利用流体的垂向共振来驱动浮子做垂向运动进而实现做功产能。Martinelli等<sup>[14]</sup>提出了将浮子式波能装置(ShoWED)安装于浮箱式防波堤迎浪侧的概念,试验表明该集成系统的波浪能俘获效率可达26%,该混合结构可以实现发电和保护码头双重目的。Zhao等<sup>[15]</sup>试验研究了由固定和浮动双方箱组成的防波堤型波能系统,改善了单浮筒防波堤式波能系统的能量转换性能。Zhang等<sup>[16]</sup>研究了不同底部形状的浮式防波堤的水动力性能,并将其作为振荡浮子式波能转换装置,该组合式浮式防波堤和波量转换系统可为海上电力供应和海岸保护提供一个经济有效的解决方案。Konispoliatis等<sup>[17]</sup>对直立式防波堤前垂荡运动的浮子阵列的功率提取进行了理论研究,结果表明:阵列的效率取决于装置与壁面的距离、装置阵列的布局 and 入射波的角度。Zhang等<sup>[18]</sup>通过数值模拟研究发现:合理利用防波堤等结构的波浪聚焦原理,可以有效增加波能装置的俘获能量。

由于浮子获能体的运动形式对功率提取影响较大,本研究考虑纵摇运动的浮子式波能转换装置与直立式防波堤的集成系统,通过物理模型水池试验模拟,研究直立式防波堤前振荡浮子式波能装置阵列的水动力响应特性,着重分析不同波浪条件下浮子尺寸和分布间距对波能装置运动性能和发电功率的影响规律。

## 1 水池试验设置

考虑防波堤前布置有4个振荡浮子式波能装置的情形,其中振荡浮子式波能装置由重庆齿轮箱有限责任公司生产制作,水池试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开展。试验水池长40 m、宽24 m、深1.2 m,最大工作水深0.8 m。水池一端装有低高频、长短周期复合推板造波机,造波机通过控制70块板宽为0.34 m的造波板来生成预期波浪,最大波高达0.25 m。水池另一端为消波岸。试验设置水深 $h=0.6$  m、波高 $H=0.08$ 和 $0.1$  m、波数范围 $k=1.0\sim 3.0$   $\text{m}^{-1}$ 、波长范围 $6.28\sim 2.09$  m。

物理水池试验的布置形式如图1所示。图1中防波堤模型为直墙式,堤长12 m、高1 m、宽0.6 m。波能装置通过支架固定于防波堤迎浪侧,波浪中圆筒形浮子获能体通过齿轮齿条结构与发电机主体相连,浮子中心到防波堤迎浪面的距离为0.48 m,各浮子仅作纵摇运动。浮子随浪转动而驱动发电机,将波浪能量转换为电能,发电机型号为FF-100W/200rpm/DC28V。试验涉及3种型号的浮子获能体,各型号浮子的尺寸、质量及吃水等参数见表1。考虑3种浮子间距方案,即 $D=1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.0$  m。

采用倾角位移传感器测量浮子运动的角位移,传感器型号为YGQ300-D(量程 $0\sim 360^\circ$ ,精度 $\pm$

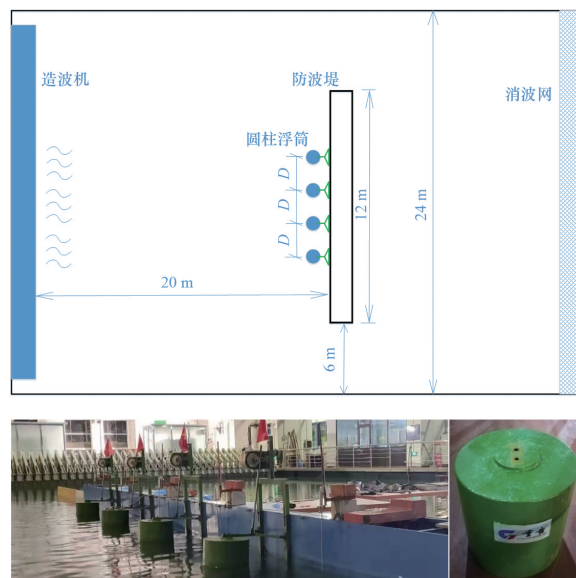


图1 水池试验布置及现场

表1 浮子获能体的物理/几何参数

浮子编号	质量/kg	半径/m	高/m	吃水深度/m
1#	7.41	0.15	0.3	0.13
2#	10.58	0.2	0.3	0.1
3#	14.23	0.25	0.3	0.08

0.1°)。采用四通道直流电表测量发电功率,电表型号为SIRAX BM1450。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮子半径的影响

考虑半径对单个浮子获能体角位移幅值、发电功率和俘获宽度比的影响。俘获宽度比等于单个波能装置发电功率与浮子宽度范围内入射波功率之比,表示波能装置的发电效率。设置浮子间距为 $D=2.0$  m,波高为 $H=0.08$  m。由图2可知,对于3种不同尺寸和质量的浮子,在相同入射波数条件下,较小尺寸和质量的浮子的角位移幅值更大;在 $k=1.0\sim 1.75$   $\text{m}^{-1}$ 的波数范围内,不同浮子的角位移整体偏大,平均角位移超过 $10^\circ$ ;  $k>1.75$   $\text{m}^{-1}$ 时,浮子角位移幅值随入射波数的增加而逐渐减小,且较大尺寸和质量的浮子的角位移幅值衰减速率更大。图3、图4分别给出了不同尺寸的浮子所对应的发电功率和俘获宽度比情况。由图3、图4可知:具有较小尺寸和质量的浮子产生的发电效率更高;  $k<1.75$   $\text{m}^{-1}$ 时,发电功率和效率随波数的增加呈现波动上升的趋势;在波数 $k=1.75$   $\text{m}^{-1}$ 时,波能装置的发电功率最大,可达 $3.72$  W,俘获宽度比接近于 $1.0$ ;  $k$

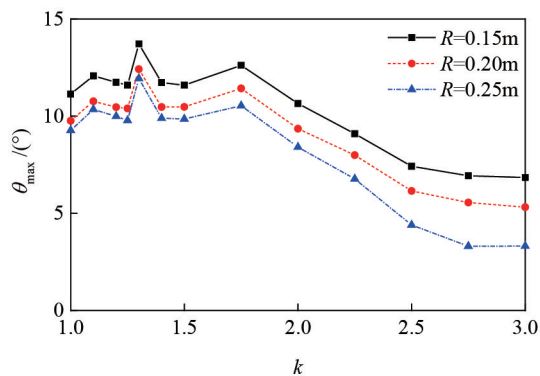


图2 浮子半径对浮子角位移幅值的影响

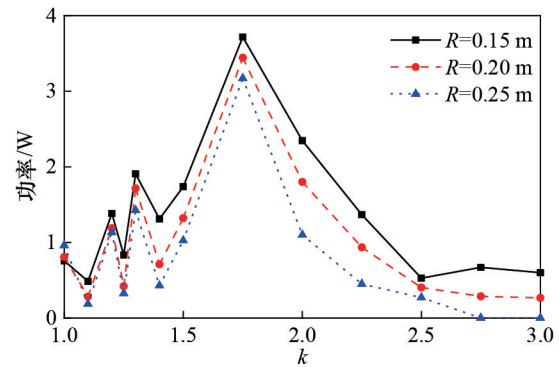


图3 浮子半径对发电功率的影响

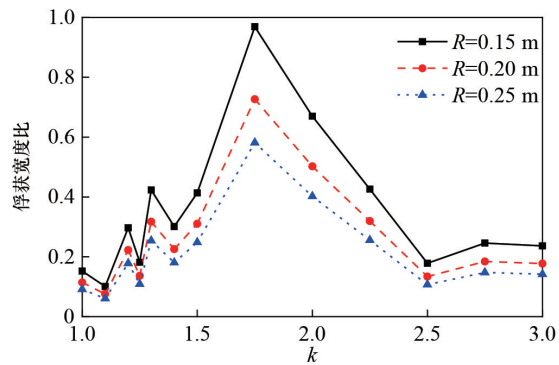


图4 浮子半径对俘获宽度比的影响

$>1.75$   $\text{m}^{-1}$ 时,发电功率随波数的增加而减小,至 $k>2.50$   $\text{m}^{-1}$ 时,波能装置的发电功率维持在一个较低水平,不再出现大幅变化。

### 2.2 浮子间距的影响

考虑装配有2#浮子的波能装置,在波高 $H=0.08$  m条件下测试间距对浮子运动和发电功率的影响。如图5所示,浮子间距对浮子角位移幅值的影响有限,可以发现:小波数范围 $k=1.0\sim 1.75$   $\text{m}^{-1}$ ,小间距布置下浮子获能体的角位移略大;而大间距在中等波数范围角位移偏大。小间距情况对应的角位移幅值-波数曲线整体略显“高瘦”。图6给出了不同间距条件下波能装置的发电功率。对比3种不同间距的情况, $k=1.75$   $\text{m}^{-1}$ 时各装置发电功率均达到最大值,大间距 $D=2$  m条件下最大功率和发电效率都较大;不同波数条件下,浮子间相互作用效应使得间距对发电功率影响较为明显;整个波数范围内,小间距布置装置的发电功率较小。该现象

意味着:波能转换装置的间距对阵列相互作用效应影响较为明显,小间距布置时浮子获能体间的水动力相互作用较强,但对宽频带波浪功率的提取并不十分有利;而较大间距布置时,有益的相互作用可以使装置能更好地适应宽频带波浪环境,并吸收更大的功率。由于不同入射波数下单宽入射功率与浮子宽度与布置间距无关,俘获宽度比的变化规律与功率结果一致,如图7所示。

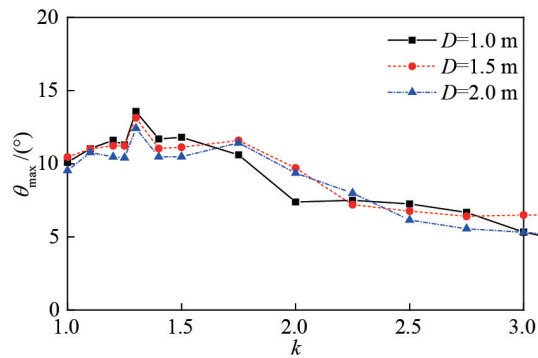


图5 浮子间距对浮子角位移幅值的影响

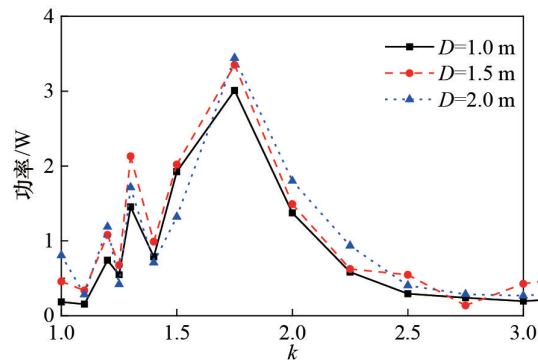


图6 浮子间距对发电功率的影响

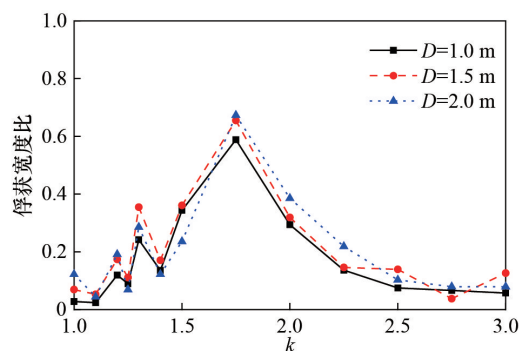


图7 浮子间距对俘获宽度比的影响

### 2.3 波高的影响

考虑装配有2#浮子的波能装置在采用小间距  $D=1$  m 布置的情况,对比不同波高 ( $H=0.08$  m 和  $H=0.10$  m) 条件下,浮子的角位移幅值响应和装置的发电功率。图8显示,波高较大时,浮子角位移幅值整体更大,且在大波数时波高的影响更为明显; $H=0.10$  m 条件下,浮子的最大角位移幅值可超过  $15^\circ$ 。图9、图10分别对比了两种波高条件下,装置发电功率和发电效率随波数的变化。由图9、图10可见,整体上更大的入射波高对应着更大的发电功

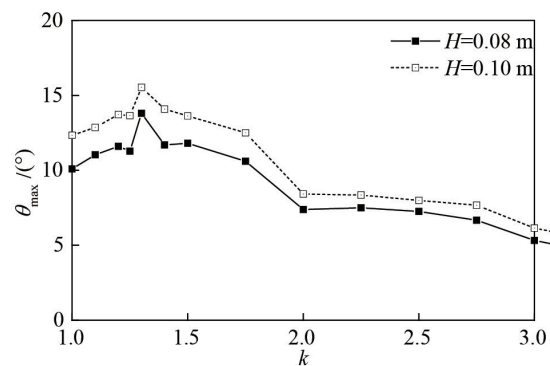


图8 波高对浮子角位移幅值的影响

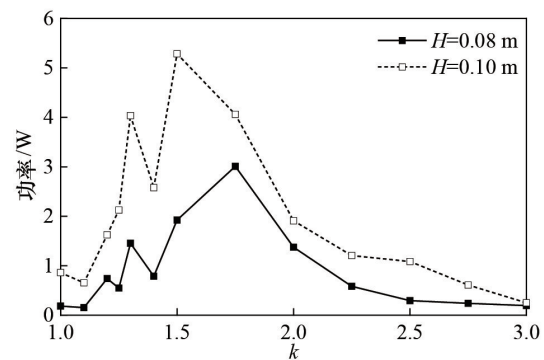


图9 波高对发电功率的影响

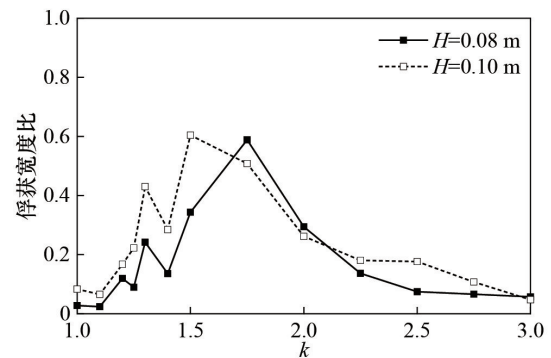


图10 波高对俘获宽度比的影响

率和发电效率,但 $k=1.75$ 、 $2.0\text{ m}^{-1}$ 时大波高条件下的俘获宽度比反而小于小波高条件下的测量值。另外,波高 $H=0.10\text{ m}$ 时最大功率超过 $5\text{ W}$ ,且不同波高下得到最大功率的波数不同。

### 3 结论

通过开展物理模型水池试验,研究了防波堤前振荡浮子式波能转换装置阵列的水动力响应特性,着重分析了不同波浪条件下浮子尺寸和分布间距对波能装置运动性能和发电功率的影响规律。研究发现,在所考虑的参数范围内:(1)相同波况条件下,具有较小尺寸和质量浮子的角位移幅值更大,发电效率更高且发电功率更大;(2)入射波波数较大时,浮子角位移幅值和装置发电功率均随入射波波数的增加而减小;(3)浮子间距对运动位移影响有限,但不利的相互作用使得小间距布置下的发电功率较小,整体上大间距布置方式更有平均优势;(4)更大的入射波高下装置的发电功率更大,但部分波数下的发电效率会降低。

#### 参考文献(References)

- [1] 史宏达, 王传崑. 我国海洋能技术的进展与展望[J]. 太阳能, 2017, 30(3): 30-37.
- [2] Zheng S, Zhang Y. Analytical study on wave power extraction from a hybrid wave energy converter[J]. Ocean Engineering, 2018, 165: 252-263.
- [3] 郑思明. 筏式波浪能海水淡化装置的水动力性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [4] 赵玄烈. 浮式防波堤-波浪能装置集成系统的水动力特性和能量输出特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [5] Babarit A. Impact of long separating distances on the energy production of two interacting wave energy converters[J]. Ocean Engineering, 2010, 37: 718-729.
- [6] Ning D, He Z, Gou Y, et al. Near trapping effect on wave-power extraction by linear periodic arrays[J]. Sustainability, 2019, doi: 10.3390/su12010029.
- [7] Zhang W C, Liu H X, Zhang L, et al. Hydrodynamic analysis and shape optimization for vertical axisymmetric wave energy converters[J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(6): 954-966.
- [8] Götteman M. Wave energy parks with point-absorbers of different dimensions[J]. Journal of Fluids & Structures, 2017, 74: 142-157.
- [9] 徐炬平. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [10] McIver P, Evans D V. An approximate theory for the performance of a number of wave-energy devices set into a reflecting wall[J]. Applied Ocean Research, 1988, 10: 58-65.
- [11] Mavrakos S A, Katsounis G M, Nielsen K, et al. Numerical performance investigation of an array of heaving wave power converters in front of a vertical breakwater[C]//Proceedings of The International Offshore and Polar Engineering Conference. Toulon: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004: 238-245.
- [12] Schay J, Bhattacharjee J, Guedes Soares C. Numerical modelling of a heaving point absorber in front of a vertical wall[C]//Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Nantes, France: ASME, 2013, doi: 10.1115/omae2013-11491.
- [13] Seo J H, Park W S, Lee J W. Performance analysis of OWC-MB hybrid wave energy harvesting system attached at caisson breakwater[J]. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 2015, 35: 589-597.
- [14] Martinelli L, Ruol P, Favaretto C, et al. Hybrid structure combining a wave energy converter and a floating breakwater[C]//Proceedings of The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2016.
- [15] Zhao X L, Ning D Z. Experimental investigation of breakwater-type WEC composed of both stationary and floating pontoons[J]. Energy, 2018, 155: 226-233.
- [16] Zhang H, Zhou B, Vogel C, et al. Hydrodynamic performance of a floating breakwater as an oscillating-buoy type wave energy converter[J]. Applied Energy, 2020, 257: 113996.
- [17] Konispoliatis D N, Mavrakos S A. Wave power absorption by arrays of wave energy converters in front of a vertical breakwater: A theoretical study[J]. Energies, 2020, doi: 10.3390/en13081985.
- [18] Zhang C, Ning D. Hydrodynamic study of a novel breakwater with parabolic openings for wave energy harvest[J]. Ocean Engineering, 2019, 182: 540-551.

## Experimental study of an array of oscillating buoy wave energy converters in wave tank

HE Zechen<sup>1,2</sup>, ZHANG Chongwei<sup>1,2\*</sup>, NING Dezhi<sup>1,2</sup>, ZHAO Junyu<sup>3</sup>, HE Dong<sup>3</sup>, YANG Haishi<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. Offshore Renewable Energy Research Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

3. Chongqing gear box Co., Ltd., Chongqing 402263, China

**Abstract** When an array of oscillating buoy wave energy converters is deployed in front of the breakwater, there will be complex hydrodynamic interactions between the buoy absorbers of each converter. This interaction can affect the buoys' motion and the corresponding power generation properties. In this paper, physical experiments are carried out in the wave tank to investigate the hydrodynamic characteristics of an array of oscillating buoy wave energy converters in front of the breakwater. The effects of the buoys' dimension and spacing on the motion and the power generation of each device are analyzed under different wave conditions. It is found that the wave energy converter with a smaller buoy has a higher power generation capability in the considered cases. A smaller spacing arrangement may not lead to a larger power. The incident wave height has a significant effect on the power generation.

**Keywords** wave energy; oscillating buoy; breakwater; ocean energy; wave tank experiment ●



(责任编辑 刘志远)