

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230467

多浮子式波能装置水动力学性能研究

张颖男, 彭伟

(河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为降低波浪能发电成本, 优化波能装置性能, 提出一种兼作防波堤的多浮子式波能装置, 并通过物理模型试验, 探究其水动力学性能。通过控制变量法探究不同动力输出负载阻尼和波浪条件作用下装置附近液面变化、浮子动态响应及装置能量转换情况, 分析装置波浪能俘获与防浪消波性能。试验结果表明, 装置可以很好地起到防波堤的作用, 试验平均透射率为 0.48, 传递到装置后侧的波浪能量小于入射波的 1/4。同时, 通过合理配置动力输出负载阻尼, 波能装置可有效转换波浪能, 在 $0.64 \leq kh \leq 1.39$ 范围内实现能量转换效率大于 20%。

关键词: 波浪能; 波能装置; 防波堤; 水动力学性能; 试验研究

中图分类号: TV139.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)08-0204-05

1 引言

波浪能作为一种典型海洋可再生能源, 由于其分布广泛、能流密度大等特点而受到广泛关注^[1]。然而, 过高的建造和维护成本限制了波浪能装置的发展, 如何使装置更具经济性成为波能开发面临的主要问题之一。另一方面, 由于防波堤和波浪能装置工作位置相近且功能互补, 将二者耦合设计逐渐成为波浪能研究的热点^[2]。NING D 等^[3]提出了一种竖直桩固定型浮式防波堤, 通过物理模型试验的方法研究其波浪能转换和防浪消波性能; ZHOU B 等^[4]基于线性势流理论研究了两个相互平行的抛物线弧形浮式防波堤的水动力学性能, 讨论了防波堤间的最优间距和连接方式; 刘崇期等^[5]利用计算流体力学方法, 对兼具波能转换功能的双浮式防波堤开展研究, 结果表明双浮子的能量转换效率是单浮子效率的两倍以上。现有研究中波能装置通常利用单浮子或两个相距较远的浮子进行能量捕获, 针对紧凑排布多浮子进行能量捕获的波能装置并不多见。对此, 本文利用三个浮子阵列排布提出一种兼作防波堤的多浮子式波能装置, 并通过物理模型试验

探究该装置的水动力学性能, 以期为工程实践提供参考。

2 物理模型试验

2.1 模型设计

本研究的波能装置由 3 个大小相同且相互靠近的箱式浮子组成, 浮子由固定框架限制只能进行垂荡运动, 适用场景为近海区域, 并根据常见浮式箱式结构确定尺寸。波浪入射时, 浮体垂向振荡并带动动力输出 (PTO) 系统进行能量转换。装置中多个浮子的吃水深度不同, 浮子顶面可近似为弧形曲面, 有利于大波入射时的防浪消波^[6]。具体地, 各浮子由于运动相位不同, 顶面形成碎波斜面, 诱导波浪变形耗散能量。同时, 三浮子设计能有效增大装置在垂向上的拦截面积, 减少波浪透射。根据我国附近海域能观察到的主要波浪周期范围及造波机可造波的范围, 模型试验采用 1:10 的几何相似比例。浮子模型采用尼龙板 PP 材质 (密度为 0.91 g/cm^3), 几何尺寸及布置形式见图 1。

模型试验中, PTO 系统由磁粉制动器和电流控制器组成, 具体可参见文献[3]。电流控制器可

收稿日期: 2023-03-28, **修回日期:** 2023-04-28

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4200700)

作者简介: 张颖男(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为港航海工结构及其与环境相互作用, E-mail: zyn_hhu2022@163.com

通讯作者: 彭伟(1983-), 男, 博士、副教授, 研究方向为海洋可再生能源开发, E-mail: pengwei@hhu.edu.cn

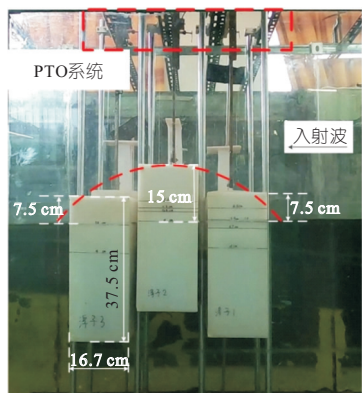


图 1 多浮子式波能装置物理模型

Fig. 1 Physical model of multi-float wave energy converter

持续稳定地向磁粉制动器输出 0~4 A 的电流,磁粉制动器根据输入电流(也称控制电流)的大小产生近似库仑力的阻尼力。浮子的垂向振荡运动通过齿条与动力输出轴上齿轮的啮合转化为输出轴的旋转运动,并使用扭矩传感器由联轴器与动力输出轴相连,记录动力输出轴上的瞬时 PTO 负载阻尼。

2.2 试验设置

物理模型试验在河海大学港建楼实验室进行,试验水槽长 50.00 m、宽 1.00 m、深 1.50 m,中间由玻璃墙隔出 0.5 m 宽的水槽区域进行二维模型试验。水槽的一端安装有推板式造波机,另一端安装有用来减少波浪反射的消波器。

为保证试验过程中不受造波机和消波器反射干扰,物理模型安装在水槽靠中间位置。在浮子中心线上,沿波浪传播方向布置 6 根波高计,用来记录造波机附近、装置前后的自由液面变化。浮子上方分别布置相互独立的动力输出装置(参见文献[3]),并安装激光传感器记录浮子的运动响应,具体布置形式及仪器安装位置见图 2(部分尺寸未按比例画出)。

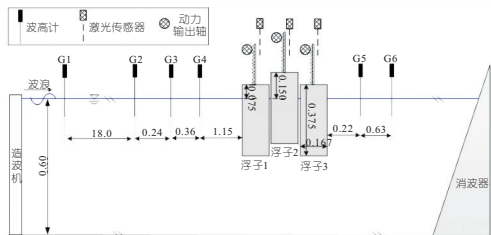


图 2 多浮子式波能装置模型试验装置安装示意图(单位:m)

Fig. 2 Sketch of the experimental setup for the multi-float WEC

物理模型试验均在规则波中进行,水深 h 为 0.60 m,波周期 T 、波高 H 和 PTO 阻尼设置见表 1。PTO 阻尼大小由电流控制器输入的控制电流 I_c 决定,控制电流 I_c 为 0、0.04、0.09、0.13、0.18、0.22、0.26、0.31 A 时,对应的 PTO 阻尼力矩分别为 0、0.33、0.65、0.98、1.31、1.63、1.96、

表 1 试验组次

Tab. 1 Test conditions

类别	h/m	T/s	H/cm	I_c/A
均一	0.6	1.0~2.6(间隔 0.2)	9.8	0.09; 0.26
阻尼	0.6	1.2; 1.8; 2.4	9.8	0; 0.04; 0.13; 0.18; 0.22; 0.31
非均一	0.6	1.0~2.6(间隔 0.2)	9.8	I_{func}
阻尼	0.6	1.2; 1.8; 2.4	6.5; 13.1; 16.3	I_{func}

2.29 N·m。本文三浮子的阻尼负载分为均一阻尼和非均一阻尼两种类型,采用均一阻尼时,三浮子的控制电流相等;采用非均一阻尼时,浮子 1、2、3 的控制电流不等,分别为 0.26、0.18、0.09 A (由 I_{func} 表示)。

2.3 试验数据分析

对波高计 G2、G3、G4 采集到的数据进行频域分析,利用两点法分离入射波高 H_i 和反射波高 H_r ,进一步得到反射系数 K_r :

$$K_r = H_r/H_i \quad (1)$$

其次,利用快速傅里叶变换将 G5 采集到的时序列数据分解成一系列不同波频的分量,再将这些波分量具有的波浪能叠加求和得到透射波能量 E_t ,从而计算透射系数 K_t :

$$K_t = \sqrt{E_t/E_i} \quad (2)$$

其中 $E_i = 0.125\rho g H_i^2$ 式中, E_i 为入射波能量; ρ 为水的密度,取 1 000 kg/m³; g 为重力加速度,取 9.81 m/s²。

再次,能量损耗系数 K_{loss} 计算公式为:

$$K_{loss} = 1 - K_r^2 - K_t^2 \quad (3)$$

值得注意的是,能量损耗 K_{loss} 包括由粘滞性引起的能量损失和 PTO 模块捕获转换的能量。

给定浮子宽度 B_b ,则入射波功率 P_{wave} 为:

$$P_{wave} = \frac{1}{16}\rho g H_i^2 B_b \frac{L}{T} \left(1 + \frac{4\pi h}{L} \sinh \frac{4\pi h}{L}\right) \quad (4)$$

式中, B_b 为浮子宽度,取 0.46 m; L 为入射波波长。

单个浮子的瞬时输出功率为 PTO 阻尼力与浮子垂向速度的乘积,而 PTO 阻尼力可以由扭矩传感器测得的数据除以齿轮节距半径(5.0 cm)获得。进一步兼作防波堤的多浮子式波能装置的总平均功率 P_{out} 为:

$$P_{out} = P_{a1} + P_{a2} + P_{a3} \quad (5)$$

式中, P_{a1} 、 P_{a2} 、 P_{a3} 分别为浮子 1、2、3 的平均输出功率。

最后,计算波浪能转换装置的能量转换效率 K_e 来评估装置的波浪能提取性能:

$$K_e = P_{out}/P_{wave} \quad (6)$$

3 结果与讨论

3.1 自由液面波动

图 3 为典型波况下波能装置前后的自由水面变化过程。波浪在装置前侧发生反射,产生驻波现象,G4 靠近驻波波腹位置,因此波面呈现出明显的振幅增大现象。相对地,G2 位置振幅变化不大,但是非线性明显加强,波峰变陡,波谷变平坦,且出现二次波峰。非线性的增强表明入射波和波能装置相互作用过程中,产生了强烈的波浪变形。由于三浮子特殊的布置形式,入射波在装置顶部发生浅水变形乃至破碎,同时浮子 1 顶部部分水体回流,流体一结构物的相互作用过程复杂,波浪能量由低阶向高阶波传递,自由液面表现出很强的非线性。在这个过程中,大部分的波浪能量被捕获或耗散,传递到波能装置后方水域的能量不到 30%,表明提出的装置具有良好的防浪消波能力。

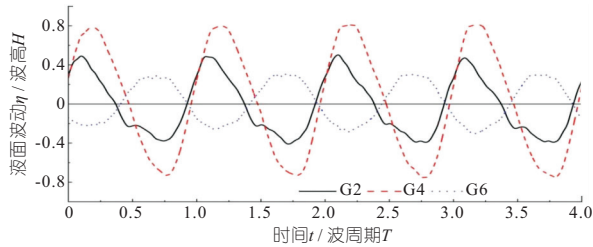


图 3 装置前后自由液面变化过程
($T=1.8\text{ s}$, $H=9.8\text{ cm}$, $I_c=I_{\text{func}}$)
Fig. 3 Free surface change around the device
($T=1.8\text{ s}$, $H=9.8\text{ cm}$, $I_c=I_{\text{func}}$)

3.2 浮子的动态响应

图 4 为装置在代表波况下运行时各浮子的垂向位移和 PTO 阻尼力矩。值得注意的是,图 4 中数据均已扣除初始值。尽管三个浮子位置相近,由图 4(a)可知,三者的垂向位移存在很大差别。浮子 2 由于重量最小,易于在波浪的作用下加速和减速,具有相对较大的垂荡幅度。同时,三个浮子的 PTO 阻尼互不相同(见表 1 中的 I_{func}),浮子 1 所受 PTO 阻尼力是浮子 3 所受 PTO 阻尼的近 3 倍,所以尽管波浪先到达浮子 1 位置,其垂向振荡幅度仍最小。进一步观察图 4(a)中浮子 1 的

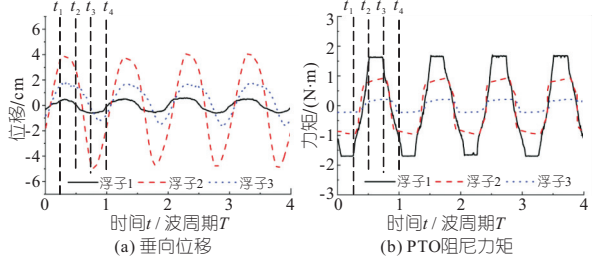


图 4 浮子的垂向位移及 PTO 阻尼力矩
($T=1.8\text{ s}$, $H=9.8\text{ cm}$, $I_c=I_{\text{func}}$)

Fig. 4 Vertical displacement and PTO damping torque of floats ($T=1.8\text{ s}$, $H=9.8\text{ cm}$, $I_c=I_{\text{func}}$)

运动可以发现,在波峰和波谷处均出现平坦段,此时 PTO 阻尼力大于作用在浮子 1 上的波浪激振力和重力之和,使其速度和加速度均接近于 0。

探究阻尼力矩随浮子垂向位移的变化,有助于分析浮子的动态响应。 t_1 时刻,浮子到达最高位置,速度趋近于零,而加速度趋近负方向的最大值。由于浮子运动趋势的改变,PTO 阻尼力也逐渐变化,并在 t_2 时刻达到最大值。此时,浮子运动速度接近最大值,跨过平衡位置向最低点回落。在 t_3 时刻,浮子运动速度再次趋近于零,加速度达到正向最大值,PTO 阻尼力也随之开始改变方向。同时,由图 4(b)可知,本研究中采用的 PTO 系统可准确模拟发电机发电过程中的安培力变化情况。

3.3 PTO 阻尼的影响

图 5 为三种代表周期波况下 PTO 阻尼对装置水力性能的影响。由图 5(a)可知,中长周期波(1.8 s 或 2.4 s)作用下入射波反射率随 PTO 阻尼增加而同步增大。在 PTO 阻尼更大时,浮子的运动受到限制,其工作模式趋近于沉箱防波堤,反射率较大。对于短周期波来说,浮子自身重力可提供足够的稳定性,因而反射系数较高,受 PTO 阻尼影响不大。相对地,如图 5(b)所示,PTO 阻尼力对波浪透射的影响更加复杂。装置后方的透射波能量由浮式结构下方通过的能量和浮子振荡运动辐射的能量两部分组成^[3]。随着波周期的增大,透射系数 K_t 也随之增大,浮子有足够的时间被波浪驱动,更多的能量透射至装置后侧;而在入射波周期较小时,浮子的垂向振荡幅度较小,更多的能量被反射回来波方向。

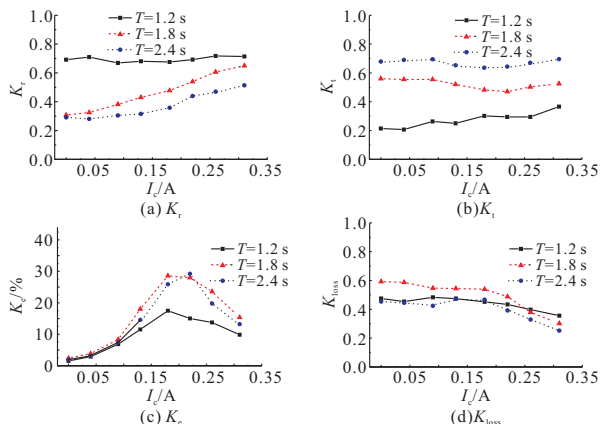


图 5 反射系数 K_r 、透射系数 K_t 、能量转换效率 K_e 和波浪能损失率 K_{loss} 随控制电流 I_c 的变化

Fig. 5 Variations of reflection coefficient K_r , transmission coefficient K_t , energy conversion efficiency K_e and wave energy loss rate K_{loss} with excitation current I_c

如图 5(c)所示,波浪能转换效率 K_e 随着控

制电流的增加呈现先增大后减小的趋势。装置瞬时输出功率为浮子速度和阻尼力的乘积。当控制电流过大时,浮子的垂向振荡受到限制,即使阻尼力较大,波浪能转换效率仍减小。在三种不同周期波况下,转换效率均在控制电流 I_c 在 0.18~0.22 A 之间时达到峰值,且随着波浪周期的增加, K_e 峰值出现在更高的 PTO 阻尼力处,最优 PTO 阻尼在长周期波入射时略大于短波入射的情况,与 NING D 等^[3]的结论一致。波周期为 2.4 s,控制电流为 0.22 A 时,波浪能转换效率 K_e 达到最大(29.24%)。进一步地,由图 5(d)可知,当 PTO 阻尼力非常小($I_c=0$ A)时,波浪和浮体之间的相互作用很剧烈,大部分入射能量被耗散,能量损失率在 0.45~0.60 之间。在中长周期波情况下,随着 I_c 的增大,浮子由于更大的 PTO 阻尼力垂向振荡幅度变小,更多的能量被反射,能量损失率也有所减小。

3.4 波周期的影响

图 6 为三种不同负载条件下,装置水动力性能与相对水深 kh 的关系(k 为波数, h 为水深,波周期越大, kh 越小)。分析可知,当浮子所受波浪力较大时,较大的负载阻尼力有利于提高装置的能量转换效率。因此,引入一种新的控制电流设置方案 $I_c = I_{func}$, PTO 阻尼设置为浮子 1~3 依次减小。

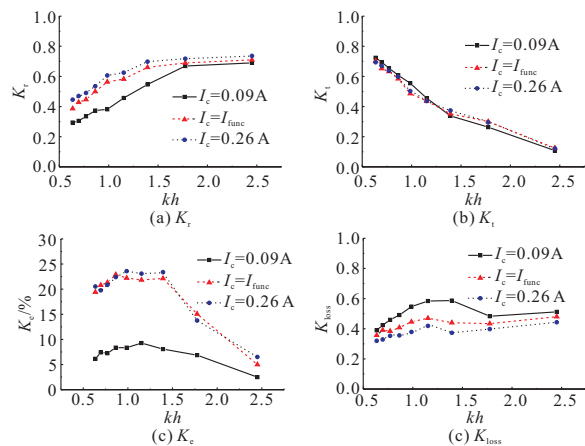


图 6 不同负载条件下反射系数 K_r 、透射系数 K_t 、能量转换效率 K_e 和波浪能损失率 K_{loss} 随相对水深 kh 的变化
 Fig. 6 Variations of reflection coefficient K_r , transmission coefficient K_t , energy conversion efficiency K_e and wave energy loss rate K_{loss} with relative water depth kh

由图 6(a)可知,随着入射波频率的增加,波浪的反射逐渐增强,最大可达 0.74。当波浪频率较大时,三种负载条件下的反射率相近;当入射波频率较小时, $I_c=0.26$ A、 $I_c=I_{func}$ 两种情况下反射系数更高。这是由于在这两种负载组合下,浮

子 1 所受的 PTO 阻尼力相同,而对于装置整体的波浪反射性能,浮子 1 起到至关重要的作用。在图 6(b)中,透射系数 K_t 随着波浪频率的增长迅速降低。在图示试验组次中, K_t 的平均值为 0.48,这意味着仅有不到 25% 的能量传递到装置后方,该装置可以较为有效地防浪消波。如图 6(c)所示,能量转换效率 K_e 随着波浪频率的增加呈现先增大后减小的趋势。当波浪频率较小时,波浪对装置的垂向激振力较大,有利于装置摄取波浪能量。当波浪频率进一步增大时,波浪与装置的相互作用复杂,更多的能量被粘性耗散,装置的能量转换效率有所下降。 $I_c=0.26$ A、 $I_c=I_{func}$ 情况下,能量转换效率类似,浮子 1 处的波浪能量较大,对于装置的总体能量转换效率起决定性作用。且在这两种负载条件时,装置在 $0.70 \leq kh \leq 1.15$ 的波况条件下的 K_e 均高于 20%,相较于单浮子装置有更宽的有效频率宽度,可以较好地提取波浪能量。图 6(d)显示,随着波浪频率的增加,能量损失率整体呈增长趋势,在中等频率波时 K_{loss} 迅速下降,而粘性耗散变化不大,因此 K_{loss} 有略微下降。

分别对三个浮子的能量转换效率进行对比分析,从图 7 可看出,在不同负载条件下,浮子 2 的能量转换效率均远高于浮子 1、3,对于装置整体的 K_e 起决定性作用,其次是浮子 1,浮子 3 的 K_e 较小。这是因为浮子 2 的吃水较小、质量较轻且不易出现顶部越浪现象,且波浪传至浮子 3 处能量已被削弱。同时,注意到当 $I_c=I_{func}$ 时,浮子 2 的能量转换效率较 $I_c=0.26$ A 时更大,这是因为此时较少能量被浮子 1 提取,更多能量到达浮子

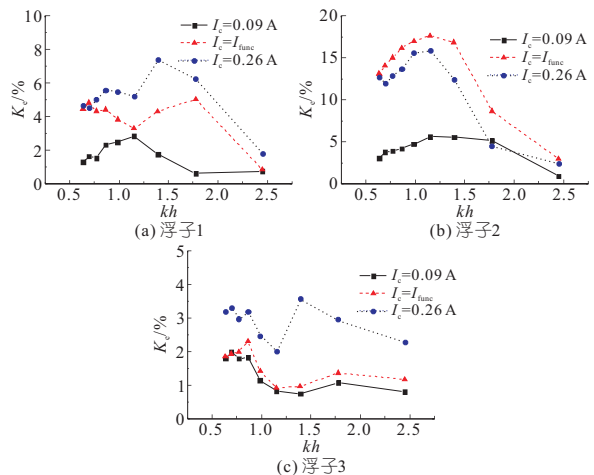


图 7 不同负载条件下浮子 1、2、3 能量转换效率 K_e 随相对水深 kh 的变化
 Fig. 7 Variations of transmission coefficient K_e for float 1, float 2, float 3 with relative water depth kh

2 处。

3.5 波高的影响

如图 8(a)、(b)所示,随着波高的增大,波浪更易在装置顶部发生越浪和破碎,浮子的垂向振荡也更为复杂,波浪反射减弱,反射系数 K_r 有所下降,但对装置后的透射波浪影响不大,透射系数 K_t 变化很小。由图 8(c)可知,周期为 1.8 s 时的波浪能转换效率较大,因为此时波周期更接近于装置的共振周期,更多的波浪能被转化提取。同时,随着波高的增大波陡也相应增大,波浪容易在装置顶部发生破碎,波浪与装置的相互作用产生更多的粘性损失,使得波浪能转换效率随之降低,而图 8(d)中的波浪能损失率随之增加。

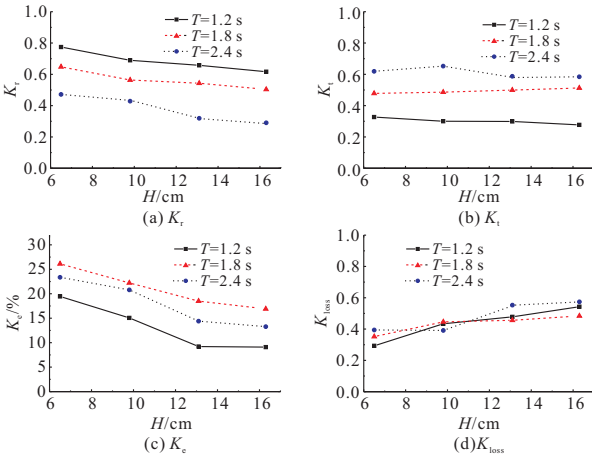


图 8 反射系数 K_r 、透射系数 K_t 、能量转换效率 K_c 和波浪能损失率 K_{loss} 随入射波高 H 的变化

Fig. 8 Variations of reflection coefficient K_r , transmission coefficient K_t , energy conversion efficiency K_c and wave energy loss rate K_{loss} with wave height H

4 结论

a. 所提新型装置可以同时实现波浪能转换和防浪消波的功能。本装置的设计可增大装置在垂向上的拦截面积,有效减少波浪透射;在中长周期波中 K_c 可达到 20% 以上,有效地实现波浪能转化。

b. 随着 PTO 阻尼的增大, K_c 呈现先增大后减小的趋势,且最优 PTO 阻尼随入射波周期增大有略微增大。根据波况等条件调整适宜的 PTO 阻尼,可使装置达到更高的能量转换效率和更好的防浪效果。

参考文献:

- [1] 史宏达,刘臻. 海洋波浪能研究进展及发展趋势[J]. 科技导报, 2021, 39(6): 22-28.
- [2] ZHAO X L, NING D Z, ZOU Q P, et al. Hybrid floating breakwater-WEC system: A review[J]. Ocean engineering, 2019, 186: 106126.
- [3] NING D, ZHAO X, GÖTEMAN M, et al. Hydrodynamic performance of a pile-restrained WEC-type floating breakwater: An experimental study [J]. Renew energy 2016, 95: 531-541.
- [4] ZHOU B, ZHENG ZHI, JIN PENG, et al. Wave attenuation and focusing performance of parallel twin parabolic arc floating breakwaters[J]. Energy, 2022, 260: 125-164.
- [5] 刘崇期,陈兵,胡涛. 兼具波浪能转换功能的双浮式防波堤性能研究[J]. 水运工程, 2019(7): 44-48.
- [6] 谢世楞,李炎保,吴永强,等. 圆弧面防波堤波浪力初步研究[J]. 海洋工程, 2006, 24(1): 14-18.

Study on Hydrodynamic Performance of Multi-float Wave Energy Converter

ZHANG Ying-nan, PENG Wei

(Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To decrease the costs associated with wave energy conversion and improve the performance of wave energy converters (WECs), a multi-float WEC that also serves as a breakwater is proposed, and its hydrodynamic performance is explored through physical model tests. The control variable method was used to investigate the free water surface, the dynamic response of the floats, and the energy conversion of the device under different PTO damping loads and wave conditions. These tests allowed for an analysis of the wave energy capture, as well as the device's ability to prevent and dissipate waves. The test results show that the device functions well as a breakwater, with an average transmittance of 0.48 under typical test conditions, meaning that less than a quarter of the wave energy is transmitted to the rear of the device. Moreover, the device can effectively convert wave energy, with K_c exceeding 20% within the range of $0.64 \leq kh \leq 1.39$ under suitable PTO loads.

Key words: wave energy; wave energy converter; breakwater; hydrodynamic performance; experimental investigation