

# 不同地形下单浮子集成装置水动力性能研究

端 臣<sup>1</sup>, 李雪艳<sup>1,2</sup>, 程 志<sup>1</sup>, 解晓敏<sup>1</sup>, 谢 天<sup>1</sup>, 战 超<sup>1</sup>, 王 庆<sup>1</sup>

(1. 鲁东大学 海岸研究所, 山东 烟台 264025; 2. 鲁东大学跨海工程研究院, 山东 烟台 264025)

**摘要:** 为探讨不同地形特征对单浮子集成装置水动力特性的影响, 本文基于黏性计算流体动力学理论, 应用 Star-CCM+软件建立二维数值波浪水槽, 研究了规则波作用下受不同地形影响的单浮子式防波堤与波能转换装置集成系统的水动力性能。结果表明: 在低频区, 不同地形下单浮子集成系统的波能转换效率均大于无地形影响下单浮子集成系统的波能转换效率; 在高频区, 浮子无法及时响应高频波, 浮子与波浪异向运动, 对于大部分情况, 不同地形下集成装置的波能转换效率和透反射系数均小于无地形影响下集成系统的相应参数。地形坡度、宽度和高度对单浮子集成装置水动力性能影响不显著。

**关键词:** Star-CCM+; 单浮子集成系统; 波能转换器; 地形; 水动力性能

中图分类号: P741 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)03-0048-12

DOI: 10.11759/hyxx20210727001

在海洋蕴藏的资源中, 波浪能以其分布范围广, 能量储备多等优点已得到世界各国的广泛关注。波浪能发电是开发利用波浪能的重要方式。振荡浮子式波能转换器是一种转换效率较高的波能转换装置(Wave energy converter, 简称 WEC), 但其建造成本高、维修困难等缺点导致波浪能发电的成本远高于传统的热力发电(如煤炭, 天然气)和其他可再生能源<sup>[1-2]</sup>。浮式防波堤主要通过反射和耗散波浪进行消波, 由于波浪能量密度高, 防波堤会受到巨大的环境压力载荷, 所以将浮式防波堤与 WEC 共同安装也有助于减少作用在防波堤上的冲击力, 提高装置的生存能力, 使其能够在更强的波浪条件下工作。单浮子集成系统是浮式防波堤-WEC 集成系统的研究热点。

单浮子集成系统主要由一个浮式防波堤组成, 该防波堤同时也是一个带有动力输出(Power Take Off, 简称 PTO)系统的波能转换装置。前人的研究大部分采用的是物理模型试验和势流理论的方法, Ning 等<sup>[3]</sup>对垂直桩约束的浮箱型防波堤水动力性能进行了物理模型试验研究; Zhao 等<sup>[4]</sup>和 Ning 等<sup>[5]</sup>分别建立了单浮箱和双浮箱单浮子集成系统模型, 采用线性势流理论和匹配特征函数展开技术研究集成系统的水动力性能及其影响因素。但是线性势理论忽略了黏性的影响进而高估运动响应和波能转换效率。

计算流体力学(CFD)方法加入了黏性的影响, 可以处理强烈的非线性现象。Chen 等<sup>[6]</sup>采用单元粒子

法对垂直桩约束波浪能型浮式防波堤的水动力性能进行了数值研究, 并对浮式防波堤形状的优化进行研究。Madhi 等<sup>[7]</sup>研究了一种底部形状为 Berkeley Wedge 型的非对称底部形状单浮子集成装置, 它将能量捕获效率提高至 96.34%。Chen 等<sup>[8]</sup>发现锥形底部的浮子比方形底部的黏性阻尼小而大大提高了的能量转化效率, 指出了浮子形状对集成装置的重要性。Reabroy 等<sup>[9]</sup>通过数值模拟和实验研究了固定防波堤-非对称 WEC 集成系统的水动力和波能捕获效率, 结果表明, WEC 的最大转换效率为 37.6%。Zhang 等<sup>[10]</sup>基于黏性计算流体动力学理论, 使用 CFD 软件 Star-CCM+建立了二维数值波浪水槽, 研究了方形底、三角形底、Berkeley Wedge 和三角形加挡板底四种不同底型的单浮子集成系统的水动力性能。结果表明: 具有不对称底部的浮子被发现具有更高的转换效率和更好的波衰减性能, 特别是对于伯克利楔形底部和三角形挡板底部。三角形挡板底部浮子的几何形状比 Berkeley Wedge 更简单, 实现了和 Berkeley Wedge 类似的波衰减和能量提取特性, 最

收稿日期: 2021-07-27; 修回日期: 2021-09-27

基金项目: NSFC-山东联合基金项目(U1706220, U1806227), 国家自然科学基金项目(51709140, 41901006, 41471005)

[Foundation: NSFC-Shandong Joint Fund Project, Nos. U1706220, U1806227; Foundation: National Natural Science Foundation of China, Nos. 51709140, 41901006, 41471005]

作者简介: 端臣(1996—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事港口海岸及近海工程研究, E-mail: 1294229656@qq.com; 李雪艳(1980—), 通信作者, 博士, 副教授, E-mail: yanzi03@126.com



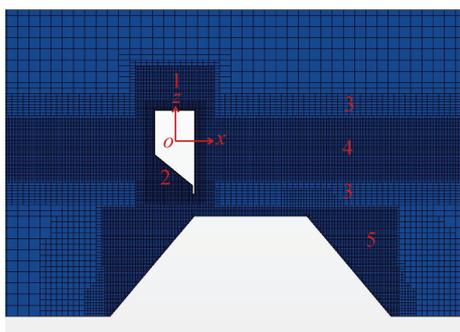


图 2 波浪水槽网格剖分示意图

Fig. 2 Mesh generation diagram of the wave tank model

表 1 受地形影响下单浮子集成系统网格尺寸

Tab. 1 Mesh size detail with the single-floater integrated system under the influence of a terrain

网格尺寸/m	
液面加密、地形表面加密、 运动加密和重叠网格区	液面过渡区
$\Delta z=0.025, \Delta x=0.05$	$\Delta z=0.05, \Delta x=0.1$

地形模型是实际岛礁地形<sup>[14]</sup>简化成等腰梯形。如图 3 所示, 单个岛礁地形的坡度被定义为垂直高度与水平距离的比率, 即坡度  $i=2h_1/(b-a)$ ,  $\theta=\arctan(i)$ 。

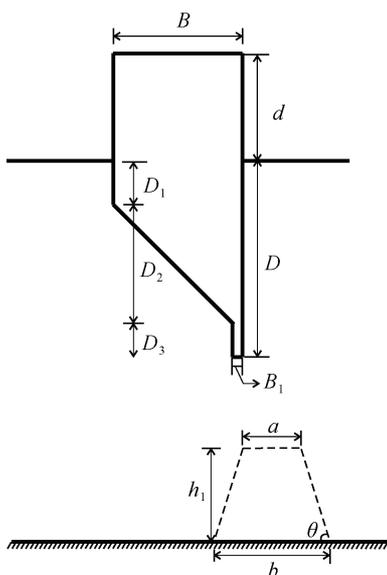


图 3 三角形加挡板浮子与地形尺寸示意图(单位: m)

Fig. 3 Schematic diagram of the triangular-baffle bottom floater and the terrain (Unit: m)

### 1.3 工况设计

在本文中, 入射波高  $H_i$  和水深  $h$  保持不变, 波

周期  $T$  范围是 1.34~2.39 s, 参数详情见表 2。

表 2 模拟参数

Tab. 2 Simulation parameters

名称/单位	符号	数值
水深/m	$h$	3
波周期/s	$T$	1.34~2.39
波浪频率/(rad·s <sup>-1</sup> )	$\omega$	2.63~4.69
入射波高/m	$H_i$	0.5

数值模拟情况见表 3, 根据数值模拟重点的不同, 本模拟研究可归纳为 3 种情况。1、2 和 3 属于第一种情况, 3 种不同类型的地形具有相同的宽度( $b$ )和高度( $h_1$ ), 但坡度( $i$ )不同; 4、5 和 6 属于第二种情况, 3 种不同类型的地形具有相同的高度( $h_1$ )和坡度( $i$ ), 但宽度( $b$ )不同; 7、8、1 和 9 属于第三种情况, 4 种不同类型的地形具有相同的宽度( $b$ )和坡度( $i$ ), 但高度( $h_1$ )不同; 同时与无地形影响下单浮子集成系统的水动力特性进行比较分析。

表 3 不同地形情况

Tab. 3 Different terrain conditions

名称 序号	坡度 $i$	地形宽度 $b$ /m	地形高度 $h_1$ /m
1	1.2	5	1.5
2	1	5	1.5
3	0.75	5	1.5
4	1.2	5	1.5
5	1.2	4	1.5
6	1.2	3	1.5
7	1.2	5	0.9
8	1.2	5	1.2
9	1.2	5	1.8

## 2 数值参数计算方法

### 2.1 反射系数和透射系数的求解

单浮子集成系统的透射系数  $K_t$  和反射系数  $K_r$  分别表征了浮子的防波性能和波浪反射性能, 两者定义的表达式分别为

$$K_t = H_t / H_i, \quad (1)$$

$$K_r = H_r / H_i, \quad (2)$$

其中,  $H_t$  为透射波高,  $H_r$  为反射波高,  $H_i$  为入射波高。

由于波浪传播过程中遇到障碍物会发生反射, 反射波与入射波会进行叠加, 无法直接得到反射波高, 因此本文采用“两点法”<sup>[11]</sup>将反射波高和入射波高进行分离, 得到反射波高。而本文使用的数值模型采取了消波的措施, 在波浪透射过装置后不再产生反射, 因此透射波高可直接求得。

## 2.2 耗散系数和运动响应的求解

浮子的运动响应定义为浮子运动幅值  $H_{RAO}$  与入射波高  $H_i$  的比值, 表达式为

$$\zeta = H_{RAO} / H_i, \quad (3)$$

在波浪与浮子相互作用时, 波浪能有一部分透过浮子, 有一部分反射了回去, 除此之外, 还有一部分以涡等其他的形式存在, 这部分能量以耗散系数来表达, 其表达式为

$$K_d = 1 - K_r^2 - K_t^2 - \eta_c. \quad (4)$$

## 2.3 共振频率和最优阻尼的求解

固有频率  $\omega_n$  的定义为使惯性力和恢复力相互抵消时物体的自然频率, 其表达式为<sup>[15]</sup>

$$\omega_n = \sqrt{\frac{c_{pto} + c_z}{m + a_z}}. \quad (5)$$

单个浮子的线性最优阻尼系数  $b_{opt}$  的表达式<sup>[15]</sup>

$$b_{opt} = \sqrt{\frac{((m + a_z)\omega^2 - (c_{pto} + c_z))^2}{\omega^2} + b_z^2}, \quad (6)$$

其中  $a_z$  和  $b_z$  分别为附加质量和辐射阻尼,  $c_z = \rho g A_w$  为恢复力系数,  $c_{pto}$  为 PTO 系统的刚度系数,  $m$  为浮体质量,  $\omega$  为波浪频率。

## 2.4 转换效率的求解

波浪能转换装置的发电性能通过转换效率  $\eta_c$  衡量, 表达式为

$$\eta_c = E_p / E_w \quad (7)$$

其中,  $E_p$  为波浪装置的平均波浪能转换速率,  $E_w$  为入射波的平均能量流动速率。

当波浪能转换装置的浮子只做垂荡运动时, 平均波浪能转换速率  $E_p$  的表达式为<sup>[15]</sup>

$$E_p = \frac{1}{mT} \int_t^{t+mT} MV dt = \frac{b_{pto}}{mT} \int_t^{t+mT} V^2 dt, \quad (8)$$

其中,  $m$  为波浪周期个数,  $T$  为波浪周期,  $t$  为时间,  $M$  为浮子质量,  $V$  为浮子的运动速度。

线性波的平均能量流动速率  $E_w$  的表示式为<sup>[3]</sup>

$$E_w = \frac{1}{16} \frac{\rho g H_i^2 \omega D_y}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right), \quad (9)$$

其中,  $\rho$  为水密度,  $g$  为重力加速度,  $H_i$  为入射波高,  $h$  为水深,  $D_y$  波浪能装置纵向宽度,  $k$  为波数。

## 3 数值模型验证

### 3.1 收敛性

选择了一个受坡度  $i=1.2$ ,  $b=5$  m,  $h_1=1.2$  m 地形影响下的底型三角形加挡板单浮子集成系统进行网格和时间收敛性研究。其中入射波高  $H_i=0.5$  m, 水深  $h=3.0$  m。在波频率  $\omega=3.57$  rad/s 时最佳动力输出阻尼  $b_{opt}=8.2$  kg/s 的情况下, 如表 4 所示, 研究了 5 个不同网格和不同时间步长的模型(表示为模型 1-5)。

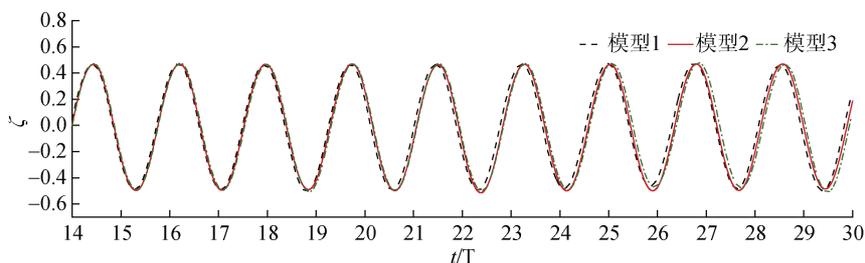
表 4 受地形影响下单浮子集成系统时间步长和网格尺寸的收敛性研究

Tab. 4 Time step and mesh size details for convergence study with a single-floater integrated system under the influence of a terrain

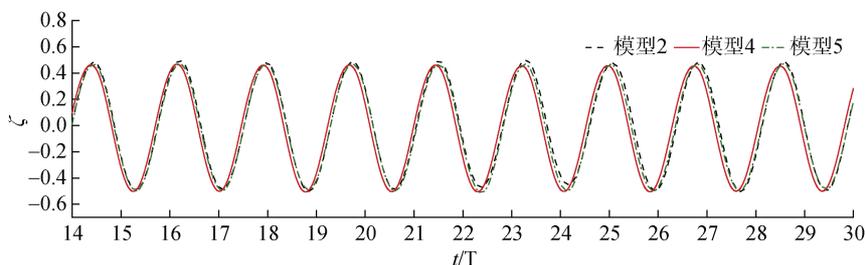
模型	时间步长 / s	网格尺寸 / m	
		液面加密、地形表面加密、运动加密和重叠网格区	液面过渡区
1	$\Delta t = T/500$	$\Delta z = H_i/20, \Delta x = H_i/10$	$\Delta z = H_i/10, \Delta x = H_i/5$
2	$\Delta t = T/1\ 000$	$\Delta z = H_i/20, \Delta x = H_i/10$	$\Delta z = H_i/10, \Delta x = H_i/5$
3	$\Delta t = T/2\ 000$	$\Delta z = H_i/20, \Delta x = H_i/10$	$\Delta z = H_i/10, \Delta x = H_i/5$
4	$\Delta t = T/1\ 000$	$\Delta z = H_i/40, \Delta x = H_i/20$	$\Delta z = H_i/20, \Delta x = H_i/10$
5	$\Delta t = T/1\ 000$	$\Delta z = H_i/10, \Delta x = H_i/5$	$\Delta z = H_i/5, \Delta x = 2H_i/5$

图 4 比较了受坡度  $i=1.2$ ,  $b=5$  m,  $h_1=1.2$  m 地形影响下的三角形加挡板浮子在不同网格和时间步长下的垂荡运动。图 4a 显示模型 2 与模型 1 和模型 3 差异不大, 当  $t/T > 18$  时, 模型 1 与模型 2、3 的相位差与振幅差开始拉大。在图 4b 中观察到模型 2 和 5 不匹配, 当  $t/T > 14$

时, 相位差和振幅差逐渐拉大。模型 2 和模型 4 之间仅观察到微小的差异, 当  $t/T > 18$  时, 相移  $\Delta(t/T)$  大于 0.08, 并且对于模型 4 观察到几乎 4% 的幅度差异。结果表明, 网格  $\Delta z = H_i/20, \Delta x = 2\Delta z$ , 时间步长  $\Delta T = T/1\ 000$  的模型 2 充分收敛。因此, 模型 2 适用于以下情况。



(a) 时间步长收敛性研究



(b) 网格尺寸收敛性研究

图 4 当  $T=1.76$  s、 $H_1=0.5$  m 时, 受地形影响单浮子集成系统垂荡运动的收敛性研究

Fig. 4 Convergence study with the single-floater integrated system for heave motion when  $H_1 = 0.5$  m at  $T = 1.76$  s

图 5 给出了在不同水槽长度下, 受坡度  $i=1.2$ ,  $b=5$  m,  $h_1=1.2$  m 地形影响下三角形加挡板底部单浮子集成系统的垂荡运动, 其中波高  $H_1/h = 0.167$ ,  $h=3$  m, 波周期  $T = 1.76$  s。当  $Lx=5\lambda$  时, 与  $Lx=6\lambda$  和  $Lx=9\lambda$  相比,

当  $t/T > 16$  时, 有着明显的 6.6% 左右的振幅差异, 相位差相差不大, 而  $Lx=6\lambda$  和  $Lx=9\lambda$  的结果在波峰和波谷之间仅存在微小差异; 当  $t/T > 22$  时,  $Lx=9\lambda$  的衰减的比  $Lx=6\lambda$  要大。因此,  $Lx=6\lambda$  被认为足够长以模拟这种情况。

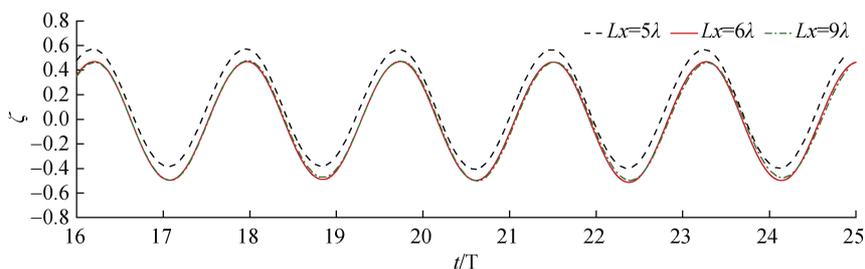


图 5 水槽长度对受地形影响单浮子集成系统垂荡运动收敛性研究

Fig. 5 Convergence study with the single-floater integrated system for heave motion by tank length  $Lx$

为保证模型的入射波满足要求, 本文也对水槽中波面衰减情况进行了研究。图 6 给出了空水槽情况下沿波浪传播方向的波高分布, 模型水深  $h=3$  m, 入射波高  $H_1=0.5$  m, 周期为  $T=1.76$  s。由图 6 可知, 波浪沿传播方向衰减很小, 波高最大衰减仅为 3.5%, 因此本文所用数值水槽模型的造波能力满足要求。

### 3.2 与试验结果比较

为了验证当前的 CFD 模型的准确性, 对 Ning 等<sup>[3]</sup>文章中实验进行了模拟, 矩形防波堤宽度为 0.8 m, 高度为 0.6 m, 吃水深度 0.2 m, 入射波高为  $H_1=0.2$  m, 静止水深为  $h=1$  m, 没有地形影响。图 7 比较了当前 CFD

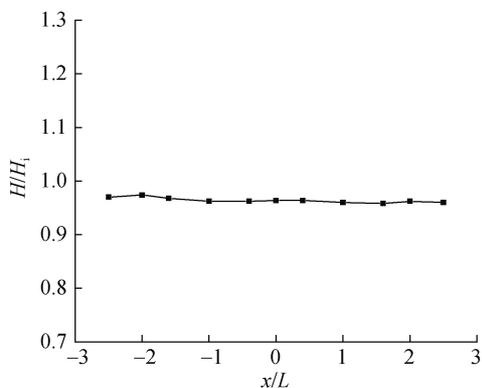


图 6 空水槽的波浪高度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the wave height in an empty tank

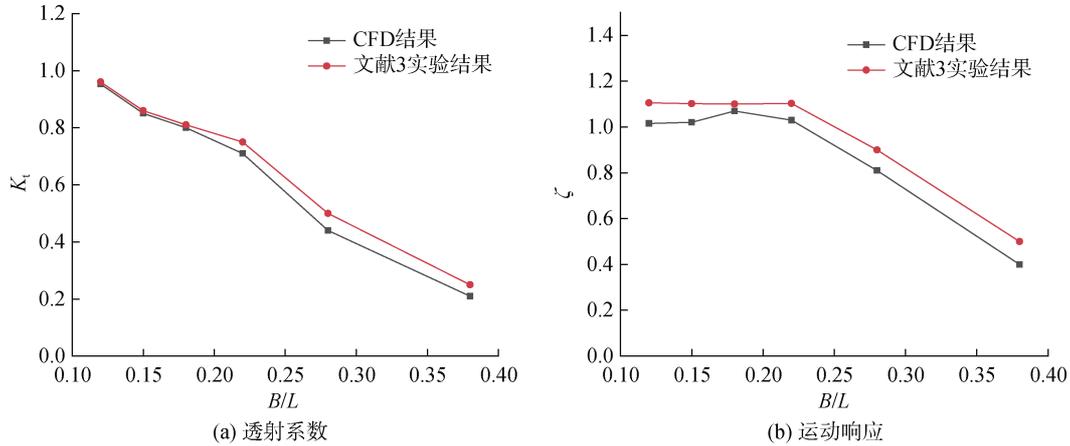


图 7 CFD 结果与 Ning 等<sup>[3]</sup>实验结果之间的透射系数  $K_t$  和运动响应  $\zeta$  的比较

Fig. 7 Result comparison of transmission coefficient  $K_t$  and motion response  $\zeta$  between CFD and the experiment of Ning et al<sup>[3]</sup>

结果和 Ning 等<sup>[3]</sup>的实验结果。CFD 结果与 Ning 等<sup>[3]</sup>的实验结果显示了类似的趋势，透射系数的差异不大。而由于防波堤和桩承系泊之间的摩擦等产生的附加因素影响导致 CFD 运动响应结果和 Ning 等<sup>[3]</sup>实验结果之间有较小的差异。但是，两者结果展现了良好的一致性，验证了当前 CFD 模型的准确性。

### 3.3 最优阻尼验证

Ning 等文章中<sup>[3]</sup>表明 PTO 阻尼对波能转换效率  $\eta_e$  影响很大。本节以受坡度  $i=1.2$ ,  $b=5$  m,  $h_1=1.2$  m 地形影响下的底部形状为三角形加挡板单浮子集成系统为例，对最优阻尼系数进行了验证。波浪频率设置为  $\omega_n=3.57$  rad/s, 入射波高  $H_1=0.5$  m, PTO 阻尼系数分别取  $b/b_{opt}=0.7, 0.90, 1.0, 1.1, 1.2$ 。图 9 给出了不同 PTO 阻尼影响下受地形影响的单浮子集成系统的转换效率  $\eta_e$ 。

由图 8 可知，当  $b/b_{opt}=1$  时，即 PTO 阻尼为最优阻尼时，三角形加挡板模型的转换效率  $\eta_e$  是最高的。所以，为获得良好的波衰减性能和波能转换效果，对所有模拟都选择最优 PTO 阻尼。

## 4 数值结果分析和讨论

### 4.1 坡度对水动力性能的影响

如图 9 所示，本节研究地形坡度( $i$ )的变化对单浮子集成系统水动力性能的影响。入射波高  $H_1=0.5$  m, 水深  $h=3.0$  m, 模拟中使用的地形模型，除坡度( $i$ )外，长度( $b$ )和高度( $h_1$ )参数相同，为了适应水槽长度同时减少计算量，地形宽度  $b$  确定为 5 m, 地形高度为  $h_1=1.5$  m, 坡度( $i$ )分别是 1.2、1、0.75，对应表 3 的序号 1、2、3。

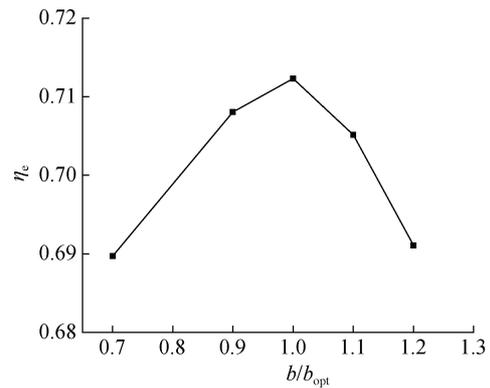


图 8 受地形影响下单浮子集成系统的波能转换效率  $\eta_e$  随 PTO 阻尼系数的变化

Fig. 8 Variations in  $\eta_e$  versus the PTO damping coefficient of the single-float integrated system under the influence of a terrain

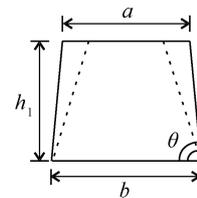


图 9 地形宽度与高度不变，坡度变化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the terrain width with unchanged height and changed slope

图 10 显示了无地形和在 3 个不同坡度地形影响下底部形状为三角形加挡板单浮子集成系统的透射系数  $K_t$ , 反射系数  $K_r$ , 垂荡运动响应  $\zeta$ , 转换效率  $\eta_e$  和耗散系数  $K_d$  随波频率的变化。图 11 显示了在共振频率和最佳 PTO 阻尼的情况下，无地形与受 3 个不同坡度地形影响下浮子周围的涡度场。

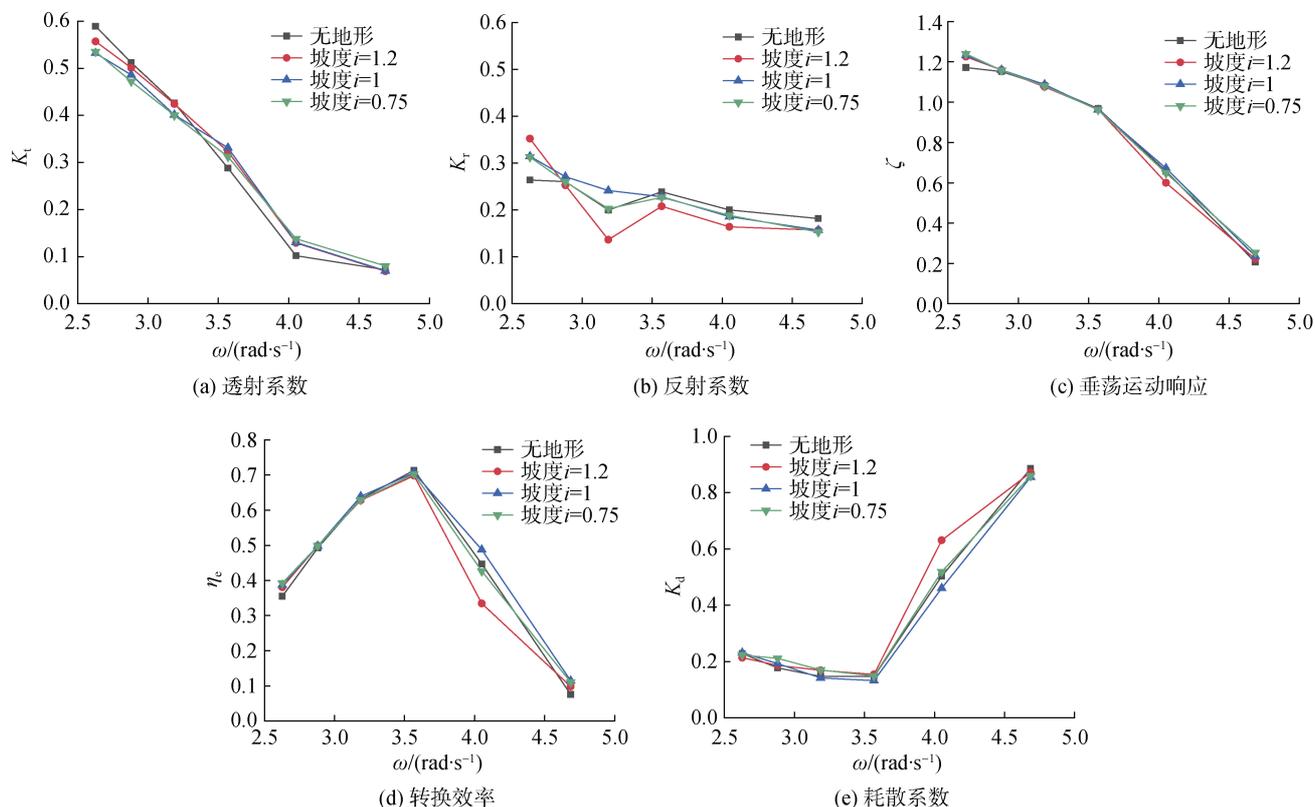


图 10 在最优 PTO 阻尼下, 无地形和三种不同坡度地形下单浮子集成系统的  $K_t$ ,  $K_r$ ,  $\zeta$ ,  $\eta_e$  和  $K_d$  随  $\omega$  的变化情况  
 Fig. 10 Under the optimal PTO damping,  $K_t$ ,  $K_r$ ,  $\zeta$ ,  $\eta_e$ , and  $K_d$  change with  $\omega$  for the single-float integrated system with no terrain and three different slope terrains

由图 10a 可知, 4 种情况下透射系数都随着波频率的增加而减小, 说明单浮子集成系统和有地形影响的单浮子集成系统均对低频率波的衰减要弱于高频率波; 另外可以看出有地形影响下浮子的整体透射系数要小于只有单个浮子的情况, 这是由于地形的存在增加了旋涡的产生, 如图 10e 所示耗散掉更多的波浪能, 图 11 中, 可以看出地形边上有涡旋脱落, 从侧面说明了地形的存在耗散了一部分波浪能。

当  $2.5 < \omega < 3.5$  rad/s 时, 如图 10a、b, 有地形影响的反射系数基本均大于单个浮子的反射系数, 而且坡度越大, 透射系数越小, 反射系数也大, 说明了地形越陡峭反射的波浪越多。当  $3.57 < \omega < 5$  rad/s 时, 三种不同坡度的地形影响下透射、反射系数差异不大, 这是由于高频波无法响应陡峭的地形坡度, 证实了地形坡度的变化对高频波影响不大<sup>[16]</sup>。

如图 10c、d、e 所示, 垂荡运动响应均随着波频率的增加而减小, 在  $2.5 < \omega < 3.5$  rad/s 低频区间内, 有地形影响下的浮子运动响应大于无地形情况, 使得这一区间的转化效率也相应地大于无地形影响的情况, 这是因为在低频区, 浮子会随着波浪一起运动;

与此同时, 波浪被地形抬起导致更大的垂荡运动, 加剧了浮子的运动响应从而提高了单浮子集成装置的波能转换效果, 而在  $3.57 < \omega < 5$  rad/s 高频区, 由于惯性的作用, 浮子无法及时响应高频率波浪, 从而导致了浮子对波浪的异向运动, 波能更多地被耗散掉, 地形的影响使得浮子的运动响应小于无地形影响的情况, 坡度越大, 运动响应越小。转化效率均是在共振频率处到达最大值且没有地形影响时的转化效率最大, 最大为 71%; 从图 10e 中可以看出共振频率处坡度越大, 耗散系数越大, 消耗的波浪能越多, 也侧面证实了地形越陡峭耗散的波能越多。

同时, 图 11 中也可以看出地形的周围存在一定的涡旋, 再加上浮子与地形之间相互作用使得更多的能量被耗散, 波能转换效率降低。

## 4.2 宽度对水动力性能的影响

在 4.1 节中, 坡度的变化的同时地形上部宽度发生了改变, 可能会对结果有一定的影响, 所以需要研究地形的宽度 ( $a$ 、 $b$ ) 对单浮子集成系统水动力性能的影响。



图 11 有无地形影响下浮子周围涡度场  
Fig. 11 Vorticity field around the floaters under the influence of a terrain

如图 12 所示, 入射波高  $H_i=0.5$  m, 水深  $h = 4$  m 和 3 m, 相应的  $a$  为 2.5 m、1.5 m 和 0.5 m, 坡度为  $i=1.2$ , 地形高度为  $h_1=1.5$  m, 对应表 3 的序号 4、5、6。

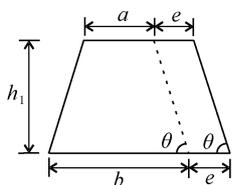


图 12 坡度与高度不变, 宽度变化示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the unchanged terrain slope and height and changed width

如图 13a, 3 种不同宽度地形下的浮子透射系数

均小于没有地形影响下的透射系数, 3 种不同地形的浮子的透射系数曲线非常接近。结果表明, 地形宽度对集成系统的消波性能影响不大, 最主要的原因就是浮子与地形之间的相互作用导致了湍流和涡流, 当波浪通过浮子与地形之间的间隙时, 湍流和涡流可以耗散掉和更多的波浪能量, 而地形宽度的影响与集成系统和地形之间的相互作用相比很弱, 可以忽略不计。从图 13b 地形影响下的反射系数整体大于无地形情况, 不同宽度地形影响下的反射系数差别很小。

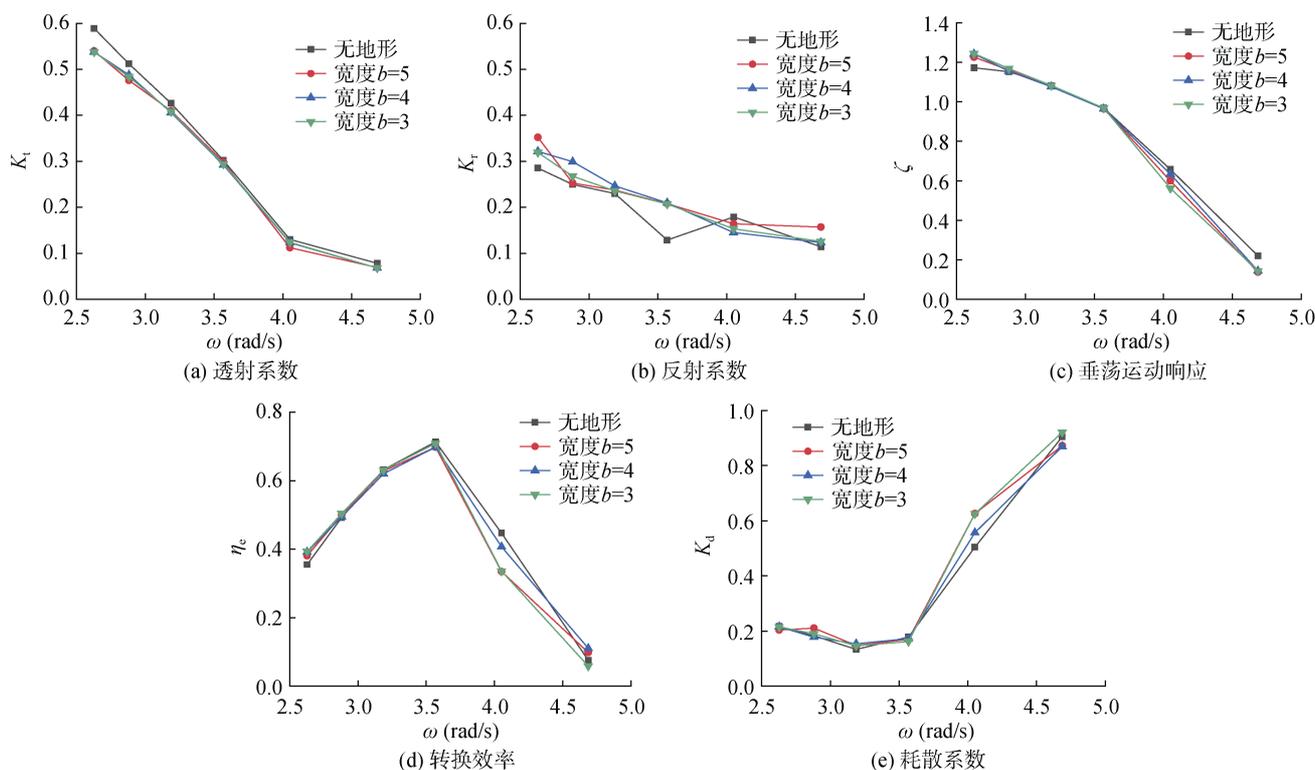


图 13 在最优 PTO 阻尼下, 无地形和 3 种不同宽度地形下单浮子集成系统的  $K_t$ ,  $K_r$ ,  $\zeta$ ,  $\eta_e$  和  $K_d$  随  $\omega$  的变化情况  
Fig. 13 Under optimal PTO damping,  $K_t$ ,  $K_r$ ,  $\zeta$ ,  $\eta_e$ , and  $K_d$  change with  $\omega$  for the single-float integrated system with no terrain and three different width terrains

图 13d 中, 无地形和 3 种不同宽度地形下的波能转换效率依然是在共振频率处达到最大值, 没有地形影响下的转换效率最大; 如图 13c 在低频区, 长周期情况下, 浮子与波浪同相运动, 波浪在通过浮子与地形之间的间隙时被抬升加剧了浮子的垂荡运动, 3 种宽度地形的运动响应很接近, 说明地形宽度对低频区浮子的运动响应影响不大, 也相应地对如图 13d 低频区波能转换效率差异不明显; 到了高频区, 地形的存在, 浮子对高频波浪来不及响应, 浮子与波浪异相运动, 使得波浪通过间隙时, 波能耗散量更大, 印证了上一节的结论。

### 4.3 高度对水动力性能的影响

由 4.1 节可知, 地形的存在可以加剧浮子的运动响应, 提高集成系统的转换效率, 如图 14 所示, 本节研究地形高度 ( $h_1$ ) 的变化对单浮子集成系统水动力性能的影响。入射波高  $H_1=0.5$  m, 水深  $h=3.0$  m, 数值实验中使用的地形模型, 除高度 ( $h_1$ ) 外, 宽度 ( $b$ ) 和坡度 ( $i$ ) 参数相同。地形宽度  $b$  确定为 5 m, 坡度  $i=1.2$ 。为了避免浮子撞击地形, 地形高度 ( $h_1$ ) 分别确定为 1.8、1.5、1.2 和 0.9 m, 对应表 3 的 9、1、8、7。

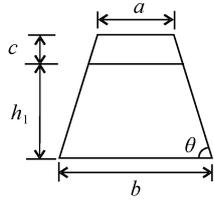


图 14 坡度与宽度不变, 高度变化示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the unchanged terrain slope and width and changed height

从图 15a 可以看出, 受 4 个不同高度地形影响下浮子的透射系数  $K_t$  依然小于无地形情况下, 且在低频区地形高度越高, 透射系数越小, 当地形高度为 1.8 m 时, 透射系数相比于无地形情况最大减少了 38.8%。图 16b 也反映出了地形越高整体的反射系数越大。图 15e 也从侧面证实了地形高度越高, 浮子和地形之间湍流和涡流作用更强, 波浪通过时耗散掉了更多的能量, 透过浮子的波浪就更小。

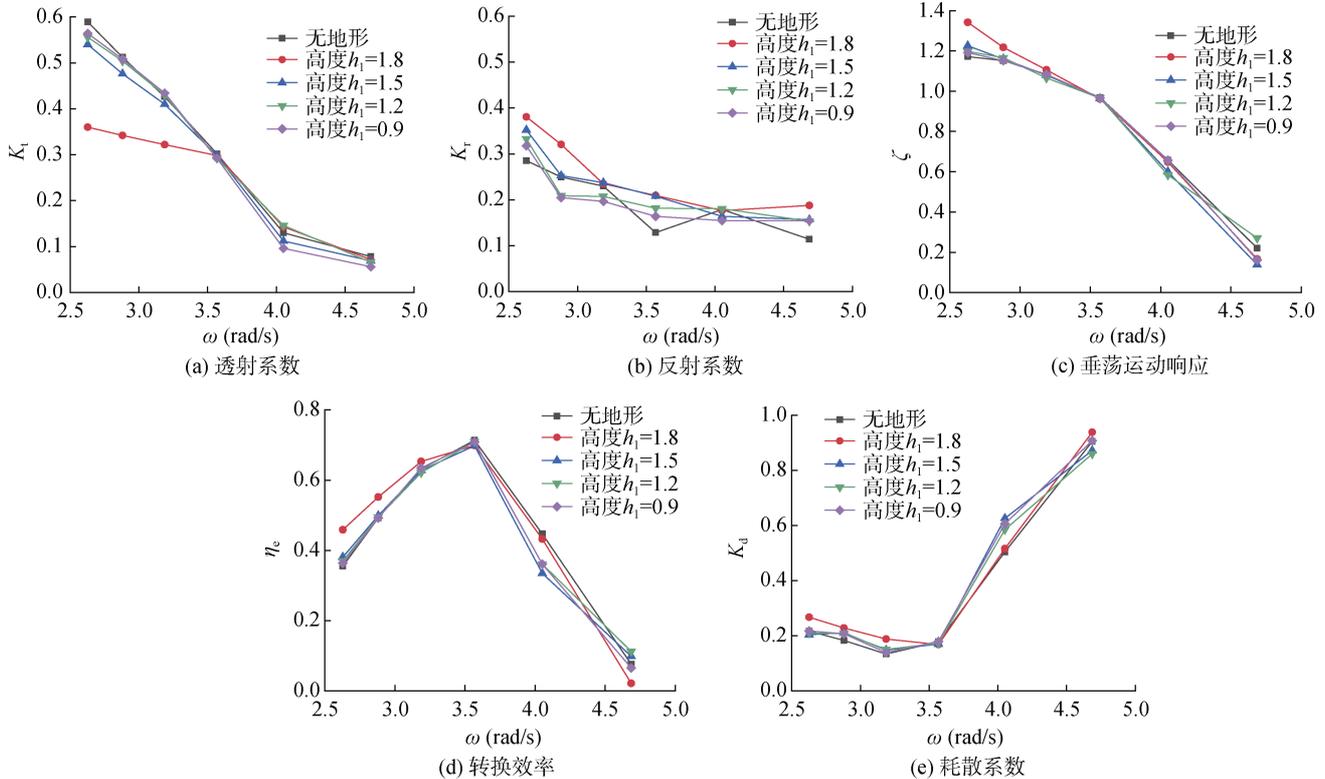


图 15 在最优 PTO 阻尼下, 无地形和 4 种不同高度地形下单浮子集成系统的  $K_t$ ,  $K_r$ ,  $\zeta$ ,  $\eta_e$  和  $K_d$  随  $\omega$  的变化情况  
 Fig. 15 Under optimal PTO damping,  $K_t$ ,  $K_r$ ,  $\zeta$ ,  $\eta_e$ , and  $K_d$  change with  $\omega$  for the single-float integrated system with no terrain and four different terrain heights

如图 15c、d 所示,  $2.5 < \omega < 3.5$  rad/s 区间里地形越高, 浮子的运动响应越大, 当地形高度为 1.8 m 时, 运动响应相比于无地形情况最大增加了 12.6%, 转化效率也随之增大; 转换效率  $\eta_e$  依然共振频率处达到最大值, 无地形情况下为最大。在  $2.5 < \omega < 3.5$  rad/s 高频区间内的有地形影响的浮子运动响应均小于无地形情况。

## 5 结论

本文采用 Star-CCM+ 讨论了不同坡度、宽度和高度海底地形情境下, 单浮子集成系统水动力特性和波能转换效率。主要结论如下:

1) 有海底地形情境下的单浮子集成系统消浪性能优于无地形情境时。在高频区, 地形坡度对波浪透射系数的影响较小, 而地形高度对其影响较为显著。地形高度越高, 透射系数越小; 在低频区, 地形坡度对波浪透射系数的影响较大, 地形坡度越陡, 耗散波能越高, 透射系数越小, 地形高度越矮, 透射系数越大; 在高频区和低频区, 地形宽度对波浪透射系数的影响均较弱。

2) 地形高度对单浮子集成系统的垂荡运动影响较大。在高频区, 其波能转换效率减弱, 地形高度越高, 转换效果越差; 在低频区, 其波能转换效率增加, 地形高度越高, 转换效果越好。

3) 有无地形两种情境下,单浮子集成系统的波能转换效率均在共振频率处达到最大值,无地形情境下的波能转换效率较有地形情境下时更大。

4) 底型为三角形加挡板的单浮子集成装置适合安装在波浪频率较小,地形高度合适但坡度较小的礁石区域。

#### 参考文献:

- [1] 张恒铭, 胡俭俭, 周斌珍, 等. 波能装置与浮式防波堤集成系统的水动力性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(8): 1117-1122.  
ZHANG Hengming, HU Jianjian, ZHOU Binzhen, et al. Hydrodynamic performance of integrated system of wave energy device and floating breakwater[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(8): 1117-1122.
- [2] FALNES J. A review of wave-energy extraction[J]. Marine Structures, 2007, 20(4): 185-201.
- [3] NING Dezhi, ZHAO Xuanlie, GÖTEMAN M, et al. Hydrodynamic performance of a pile-restrained WEC-type floating breakwater: An experimental study[J]. Renewable Energy, 2016, 95: 531-541.
- [4] ZHAO Xuanlie, NING Dezhi, ZHANG Chongwei, et al. Hydrodynamic investigation of an oscillating buoy wave energy converter integrated into a pile-restrained floating breakwater[J]. Energies, 2017, 10(5): 715.
- [5] NING Dezhi, ZHAO Xuanlie, ZHAO Ming, et al. Analytical investigation of hydrodynamic performance of a dual pontoon WEC-type breakwater[J]. Applied Ocean Research, 2017, 65: 102-111.
- [6] CHEN Qiang, ZANG Jun, BIRCHALL Jonathan, et al. On the hydrodynamic performance of a vertical pile-restrained WEC-type floating breakwater[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 414-425.
- [7] MADHI F, SINCLAIR M E, YEUNG R W. The "Berkeley Wedge": an asymmetrical energy-capturing floating breakwater of high performance[J]. Marine Systems & Ocean Technology, 2014, 9(1): 5-16.
- [8] CHEN Zhongfei, ZHOU Binzhen, ZHANG Liang, et al. Geometrical evaluation on the viscous effect of point-absorber wave-energy converters[J]. China Ocean Engineering, 2018, 32(4): 443-452.
- [9] REABROY R, ZHENG Xiongbo, ZHENG Liang, et al. Hydrodynamic response and power efficiency analysis of heaving wave energy converter integrated with breakwater[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 1174-1186.
- [10] ZHANG Hengming, ZHOU Binzhen, CHRISTOPHER V, et al. Hydrodynamic performance of a floating breakwater as an oscillating-buoy type wave energy converter[J]. Applied Energy, 2020, 257: 113-996.
- [11] NALLAYARASU S, CHEONG H F, SHANKAR N J. Estimation of incident and reflected waves in regular wave experiments[J]. Ocean Engineering, 1995, 22(1): 77-86.
- [12] MARQUES MACHADO F M, LOPES A M G, FERREIRA A D, et al. Numerical simulation of regular waves: Optimization of a numerical wave tank[J]. Ocean Engineering, 2018, 170: 89-99.
- [13] VOLKNER S, BRUNSWIG J, RUNG T. Analysis of non-conservative interpolation techniques in overset grid finite-volume methods[J]. Computers and Fluids, 2017, 148: 39-55.
- [14] CUI Jie, CHEN Xin, GUO Jiangting, et al. Experimental study on the hydrodynamic performance of rectangular floating breakwater influenced by reef areas[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(3): 266-276.
- [15] 孙士艳. 非线性规则波中波能转换装置的水动力特征与能量转化效率研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.  
SUN Shiyuan. Research on the hydrodynamic characteristics and energy conversion efficiency of the wave energy conversion device in the nonlinear regular wave[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [16] CUI Jie, LIU Hui, DENG Xiaokang, et al. An experimental study on hydrodynamic performance of a box-floating breakwater in different terrains[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020, 25(4): 991-1009.
- [17] FENTON J D. A fifth-order stokes theory for steady waves[J]. Journal of Waterway Port, Coast Ocean Engineering, 1985, 111(2): 216-234.
- [18] ZHANG Hengming, DING Xincheng, ZHOU Binzhen, et al. Hydrodynamic performance of wave energy conversion floating breakwater[J]. Journal of Marine Science and Application, 2019, 18(1): 64-71.
- [19] 陈阳. 岛礁地形影响下浮式防波堤运动响应特性及消波效果研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.  
CHEN Yang. Research on the motion response characteristics and wave suppression effects of floating breakwaters under the influence of island and reef topography[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018.
- [20] 陈彧超. 岛礁环境下的波浪运动研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.  
CHEN Yuchao. Research on wave motion in island and reef environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [21] 冷彦霖. 多体浮式防波堤的水动力性能及系泊系统分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.  
LENG Yanlin. Hydrodynamic performance and mooring system analysis of multi-body floating breakwater[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.

# Hydrodynamic performance of a single-floater integrated system in different terrain conditions

DUAN Chen<sup>1</sup>, LI Xue-yan<sup>1, 2</sup>, CHENG Zhi<sup>1</sup>, XIE Xiao-min<sup>1</sup>, XIE Tian<sup>1</sup>, ZHAN Chao<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>

(1. Coast Institute, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. Institute of Sea-Crossing Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)

**Received:** Jul. 27, 2021

**Key words:** Star-CCM+; the single-floater integrated system; wave energy converter; terrain; hydrodynamic performance

**Abstract:** A two-dimensional numerical model was established using the Star-CCM+ software-based viscous computational fluid dynamics theory to investigate the hydrodynamic performance of a single-floater integrated system in different terrains under regular waves. The results indicate that in low frequency areas, the wave energy conversion efficiency of the single-floater integrated system under different terrains is greater than that of the single-floater integrated system without a terrain. In the high-frequency region, the floater cannot respond to high-frequency waves on time and moves in various directions because of the waves. In most cases, the wave energy conversion efficiency and the transmission and reflection coefficients of the integrated device under different terrains are less than the corresponding parameters of the integrated system without the influence of a terrain. The slope, width, and height of the terrain have no significant influence on the hydrodynamic performance of the single-floater integrated device.

(本文编辑: 赵卫红)