

近岸反射对波浪能装置水动力特性影响的解析研究

张洋, 李明伟, 赵玄烈, 耿敬

(哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨, 150001, E-mail: zhyangchanges@hrbeu.edu.cn)

摘要: 本研究通过解析方法分析近岸反射对浮式防波堤-波浪能转化装置集成系统的水动力性能和能量俘获特性的影响。基于线性势流理论, 建立频域内水动力参数和波能俘获效率的表达式, 利用波能流守恒定律验证解析模型的正确性。通过分析直墙与方箱间不同间距, 重点探讨小间距窄缝下和大间距情况下, 近岸反射对集成系统反射系数、透射系数、波能俘获效率的影响, 并揭示其影响机理, 为实际工程应用提供参考。

关键词: 波浪能转化装置; 解析方法; 近岸反射; 波能俘获效率

1 引言

波浪能具有可再生、无污染、储量大等优点, 转化装置主要包括: 振荡水柱式、点吸式、越浪式。但是高造价和运维成本、可靠性差、低转化效率和发电稳定性差等缺点一直阻碍了装置的推广与应用。防波堤作为海岸建筑物, 具有消波防浪效果, 将波浪能装置集成到已有海工建筑物, 可实现二者成本共享, 增强装置的生存能力, 为波能装置的工程化应用提供途径。

Hsu 和 Zheng^[1-2]利用解析方法和边界元方法分析近岸全反射下方箱绕射和辐射问题; Elchahal 等^[3]开展了近岸局部反射下不同间距下锚固方箱的透射波高变化趋势, 发现在特殊间距发生共振现象; Evans 和 Porter⁴探讨了直墙前横摇薄板的水动力特性, 发现 $kl \approx n\pi$ 出现晃荡共振模式, 但是未深入分析直墙反射对装置的水动力性能影响。Michele 与 Sarkar 等⁵⁶分析了直墙前单摇板式和阵列摇板式波浪能发电装置的水动力特性和能量输出特性, 发现特定距离下产生不同共振模态, 并产生不利或有利影响, 但是在近岸反射条件下可以获得更高的波能俘获效率。

上文提到的工作主要是研究近岸反射下运动响应或横摇模式下波能装置性能, 但是关于近岸反射对浮式防波堤—振荡浮子波能转化装置理论研究尚未见报道。本文基于线性势流理论, 开展近岸全反射对垂荡运动下浮式防波堤—振荡浮子波能转化装置集成系统的水动力特性和能量输出特性。

2 数学模型

近岸反射下波浪和与浮式防波堤一波能转化装置相互作用的理想化示意图见图 1，选取二维笛卡尔坐标系，原点位于方箱中心轴与静水面交点处， x 轴沿水平面，指向岸线， z 轴垂直向上，水深 h_1 ，方箱与直墙间距离 D ，方箱宽度 $2a$ ，吃水 d_1 。方箱假设仅在垂荡方向运动，质量项 $M=2\rho ad_1$ ，刚度项 $K=2\rho ga$ ，其中 ρ 、 g 为水密度和重力加速度。波浪沿 x 轴方向正向入射，入射波高为 H ，波长为 L ，波幅为 A ($H=2A$)。

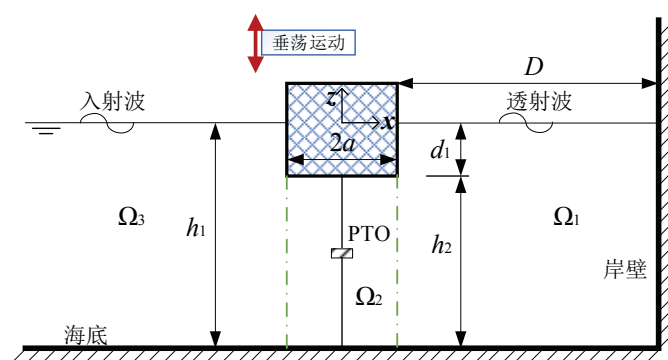


图 1 近岸反射下波浪和与浮式防波堤一波能转化装置相互作用示意图

流域分成 3 个子流域 Ω_1 、 Ω_2 、 Ω_3 ，考虑简谐波，将空间速度势中时间因子分离：

$$\phi(x, z, t) = \text{Re}[\Phi(x, z)\exp(-i\omega t)] \quad (1)$$

式中： Re 表示对变量取实部； ω 为波浪运动角频率； $\Phi(x, z)$ 为复速度势，满足二维拉普拉斯方程。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

对于垂荡运动下空间速度势 Φ ，由入射势 Φ_I 、绕射势 Φ_D 、辐射势 Φ_R 组成，其中 Φ_I 可表示为：

$$\Phi_I = -\frac{igA \cosh[k(z+h_1)]}{\omega \cosh(kh_1)} \exp(ikx) \quad (3)$$

对于集成系统辐射问题，假设方箱垂荡响应幅值 ζ 较小，辐射势表示 $\Phi_R = -i\omega\zeta\varphi_R(x, z)$ 。空间速度势 $\varphi_R(x, z)$ 满足边界条件：

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \varphi_R}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \varphi_R &= 0 \quad (z=0, x < -a \text{ or } a < x < D+a) \\
 \frac{\partial \varphi_R}{\partial z} &= 0 \quad (z = -h_1) \\
 \frac{\partial \varphi_R}{\partial z} &= 1 \quad (z = -d_1, |x| \leq a) \\
 \frac{\partial \varphi_R}{\partial z} &= 0 \quad (-d_1 < z < 0, x = \pm a) \\
 \frac{\partial \varphi_R}{\partial x} &= 0 \quad (-h_1 < z < 0, x = D+a) \\
 \varphi_R &\text{ outgoing; finite value, } x \rightarrow -\infty
 \end{aligned} \tag{4}$$

对于集成系统绕射问题，满足以下边界条件：

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Phi_D}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi_D &= 0 \quad (z=0, x < -a \text{ or } a < x < D+a) \\
 \frac{\partial \Phi_D}{\partial z} &= 0 \quad (z = -h_1) \\
 \frac{\partial \Phi_D}{\partial z} &= -\frac{\partial \Phi_I}{\partial z} \quad (z = -d_1, |x| \leq a) \\
 \frac{\partial \Phi_D}{\partial z} &= -\frac{\partial \Phi_I}{\partial z} \quad (-d_1 \leq z \leq 0, x = \pm a) \\
 \frac{\partial \Phi_D}{\partial x} &= -\frac{\partial \Phi_I}{\partial x} \quad (-h_1 \leq z \leq 0, x = a+D) \\
 \Phi_D &\text{ outgoing; finite value, } x \rightarrow -\infty
 \end{aligned} \tag{5}$$

各流域下绕射势和速度势的频域表达式、附加质量 μ 、阻尼系数 λ 、波浪激振力 F_z 可由文献 2 中得出。根据浮体运动方程，PTO 阻尼 λ_{PTO} 下垂荡响应幅值 ζ 表示为：

$$\zeta = F_z / (-\omega^2(M + \mu) - i\omega(\lambda + \lambda_{\text{PTO}}) + K) \tag{6}$$

波能俘获效率 η 是衡量波浪能转化装置的性能指标，为 $\eta = P_{\text{capture}}/P_{\text{incident}}$ ，其中 P_{incident} 为入射波功率， P_{capture} 为最佳 PTO 阻尼 λ_{optimal} 下波浪能转化装置的吸收功率。反射系数 K_r 及小间距下窄缝内相对波高为 A_g/A 表示：

$$K_r = |(\Phi_D - i\omega\zeta\varphi_R) / \Phi_I|_{x=-\infty} \tag{10}$$

$$A_g / A = |(\Phi_I + \Phi_D - i\omega\zeta\varphi_R) / \Phi_I|_{x=a+D/2} \tag{11}$$

3 解析模型验证

基于势流理论框架下波能流守恒定律，假设结构尺寸 $B=6.0$ m， $h_1=10$ m， $d_1=3.0$ m， $D=5.0$ m，振荡浮子波能转化装置的 PTO 阻尼为最佳阻尼值（图 2）。在理论求解中，选取

前 25 项计算结果。反射系数和波能俘获效率满足 $K_r^2 + \eta = 1$ ，验证了解析模型的正确性。

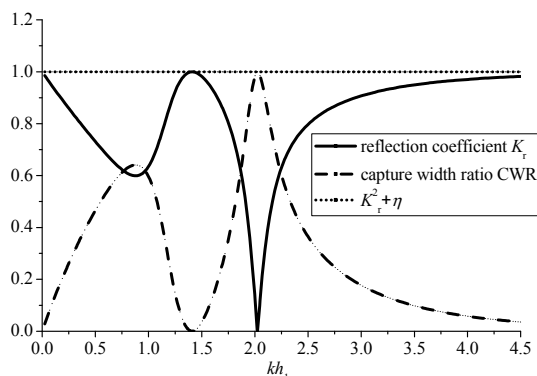


图 2 最佳阻尼下各个参量变化趋势

4 结果分析与讨论

4.1 小间距下水动力特性

分别设置不同间距 $D=2.0\text{ m}$ 、 3.0 m 、 4.0 m ，PTO 阻尼为最佳阻尼值。如图 3 和图 4 所示，在窄缝条件下，发生波浪共振，即活塞共振，并随着间距的增大，进入窄缝间水体质量增加，共振频率向低频区移动，共振波高减小，与文献 7 中的物模试验的变化规律基本一致；在活塞共振模式下，提高了波能俘获效率；当入射波下使方箱处于入射波与反射波叠加的波节位置，方箱保持静止不动，发生全反射现象。同时波能俘获效率存在尖锐的峰值，即入射波与方箱运动发生共振 ($\omega_{\text{incident}} = \sqrt{K/(M+\mu)}$)。

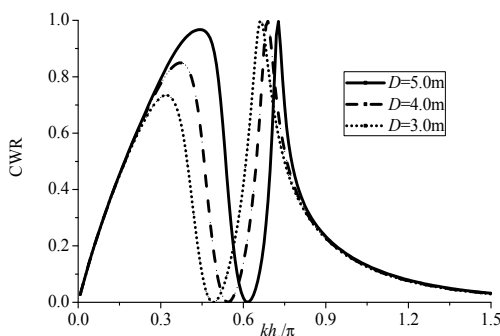


图 3 小间距下波能俘获效率

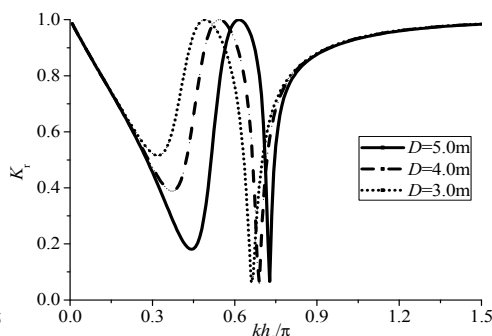


图 4 小间距下反射系数

4.2 大间距下水动力特性

设置大间距下透射系数 $K_t = |H_s / H|$ ， H_s 为靠近直墙前波高。假定入射波要素不变，设置间距 $10 \sim 90\text{ m}$ 。如图 5 至图 8 可知，各个参量出现周期性振荡，峰谷值存在原因与之前分析一致。近岸建筑物前的波面变化幅值与入射波差别不大，但方箱与直墙之间距离满足 $kD \approx (n+0.5)\pi$ ($n=0, 1, \dots$) 附近处会发生剧烈变化，共振波高可达到入射波高的 2.5 倍，并

随着入射频率的增大而增大。

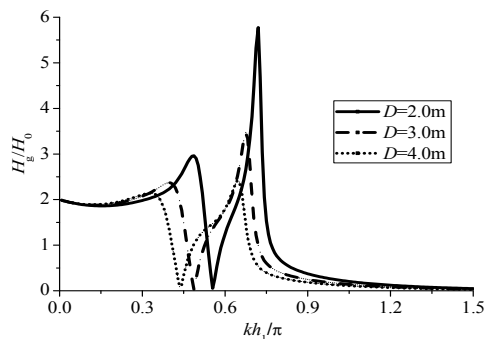


图5 小间距内相对波高

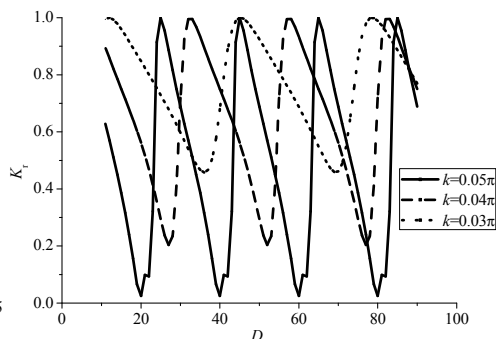


图6 大间距下反射系数

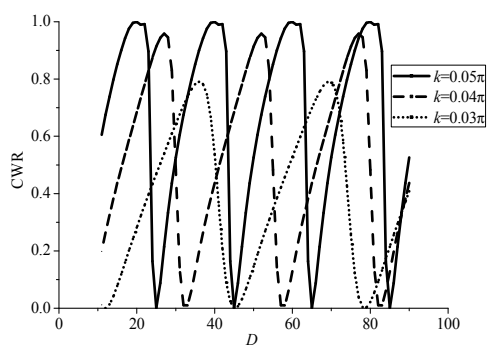


图7 大间距波能俘获效率

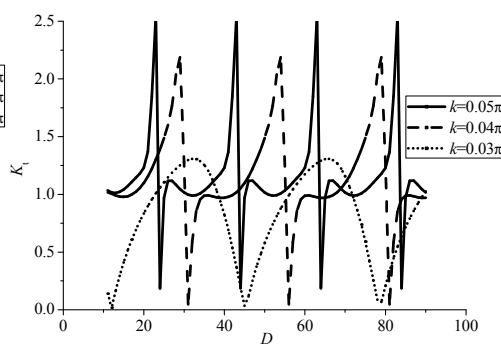


图8 透射系数

5 结论

(1) 小间距下，集成系统与直墙间水面变化和窄缝共振现象相似，并在活塞共振模式下，波浪能转化效率达到峰值；由于振荡浮子的捕能效果，窄缝内共振波高较小。

(2) 大间距下，俘获宽度比随间距增加呈现周期性变化，在 $kD \approx n\pi$ 附近出现多阶晃动模式，波能俘获效率接近于 1.0；在 $kD \approx (n+0.5)\pi$ 附近透射系数变化剧烈，波能俘获效率为 0，应在实际工程中有效规避该现象发生。

参考文献

- 1 Hsu H H., Wu Y C. The hydrodynamic coefficients for an oscillating rectangular structure on a free surface with sidewall[J]. Ocean Engineering, 1997, 24(2):177-199.
- 2 Zheng Y H, Shen Y M, Tang J. Radiation and diffraction of linear water waves by an infinitely long

- submerged rectangular structure parallel to a vertical wall[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(1):69-82.
- 3 Elchahal G, Younes R, Lafon P. The effects of reflection coefficient of the harbour sidewall on the performance of floating breakwaters[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(11-12):1102-1112.
 - 4 Evans D V, Porter R. Hydrodynamic characteristics of a thin rolling plate in finite depth of water[J]. Applied Ocean Research, 1996, 18(4):215-228.
 - 5 S. Michele, P. Sammarco, M. D'Errico, The optimal design of a flap gate array in front of a straight vertical wall: Resonance of the natural modes and enhancement of the exciting torque. Ocean Engineering, 2016, 118, 152–164.
 - 6 Sarkar D, Renzi E, Dias F. Effect of a straight coast on the hydrodynamics and performance of the Oscillating Wave Surge Converter[J]. Ocean Engineering, 2015, 105:25-32.
 - 7 谭雷. 多体海洋结构间窄缝内流体共振的试验和数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

Influence of costal reflection on the hydrodynamic characteristics of the wave energy converter device: an analytical study

ZHANG Yang, LI Ming-wei, ZHAO Xuan-lie, GENG Jing

(College of shipbuilding engineering, Harbin Engineering University, 150001, E-mail:

zhyangchanges@hrbeu.edu.cn)

Abstracts: In this paper, the effect of the sidewall reflection on the hydrodynamic performance and energy conversion efficiency of a floating breakwater-WEC system is evaluated theoretically. The hydrodynamic characteristics and the energy conversion performance of the floating system is modelled in frequency domain based on linear potential flow theory. The validation is conducted using the rule of energy conservation. By analyzing different clearances between the straight wall and the WEC, the influence of costal reflection on the reflection coefficient, transmission coefficient and wave energy conversion efficiency of the integrated system is discussed in close proximity and the long distance. The influence mechanism is revealed, which provides a reference for engineering application.

Key words: wave energy converter device analytical solution; coastal reflection; wave energy extraction