

文章编号: 0254-0096(2014) 07-1304-07

直接驱动浮子式波浪能转换装置频域模拟研究

程正顺, 杨建民, 胡志强, 肖龙飞

(上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 基于线性波理论, 仅考虑浮体的垂荡运动, 并假设能量输出系统是线性的, 建立直接驱动的浮子式波浪能转换装置频域运动方程, 获取该系统的频率响应函数, 推导该系统能量俘获宽度在规则波和随机波浪条件下的表达式, 研究浮体形状、频率响应函数、能量输出系统阻尼系数及海洋波浪条件对能量俘获宽度的影响。数值算例结果表明: 系统固有频率与波谱谱峰频率越接近, 频率响应函数的幅值越大, 能量输出系统的阻尼系数越大, 则系统的能量俘获宽度越大。

关键词: 波浪能转换装置; 频域模拟; 能量俘获宽度; 影响因素

中图分类号: P751

文献标识码: A

0 引 言

近年来, 全球能源供求的紧张和 CO₂ 减排的要求极大刺激了海洋波浪能转换科学技术的发展, 文献[1]介绍了多种样式的波浪能转换装置及其在全球范围的分布情况。按照波浪能转换的基本工作原理, 波浪能转换装置可分为振荡浮子式、收缩波道式和振荡水柱式; 文献[2]对这 3 类波浪能转换装置的工作原理和具体应用均做了阐述。

浮子式波浪能装置是一种简单的波浪能转换装置。它利用一个或多个浮子为吸收波浪能的载体, 通过浮子的垂荡、横荡或纵荡, 将波浪能通过机械装置或液压装置转换出去后, 驱动发电机发电或直接驱动线性发电机发电。对于直接驱动线性发电机的发电方式, 由于采用线性发电机, 减少了能量转换过程中的中间步骤, 降低了机械的复杂性, 便于维护, 但同时由于线性发电机产生电能的频率和幅值均较低, 电能输运至电网的复杂程度将增加^[1]。

许多学者都曾研究过直接驱动线性发电机的浮子式波浪能转换装置的性能。文献[3]详细讨论了浮子式波浪能转换装置的能量俘获宽度的性质, 并研究了能量输出中控制对俘获宽度的影响。文献[4]推导了柱状浮体的水动力系数, 并通过模型试验获取了波浪能转换系统的转换效率。文献[5]研究了

频域内振荡浮子与线性发电机间的耦合运动, 但仅定性讨论了系统能量俘获宽度的影响因素, 未曾推导频域内系统能量俘获宽度的表达式。

本文采用线性理论, 在仅考虑浮子做垂荡运动的情况下, 假设能量输出系统是线性的, 建立直接驱动的浮子式波浪能转换装置频域运动方程, 获取该系统的频率响应函数, 推导波浪能转换系统在规则波和随机波浪条件下的能量俘获宽度, 并详细讨论能量输出系统阻尼系数、浮体形状及频率响应函数等对能量俘获宽度的影响。

1 浮子运动方程

本文考虑一种使用线性发电机的波浪能转换装置, 振荡浮子为圆柱体, 通过缆索与置于下方的发电机相连。通常, 振荡浮子具有六自由度运动, 但考虑到发电机主要有振荡浮子的垂荡运动驱动, 因而本文的研究仅考虑浮子的垂荡运动。图 1 为波浪能转换系统的示意图。

假定流体为无旋不可压的理想流体, 浮子的运动幅度较小, 因而可采用线性理论来分析此问题。根据牛顿第二定律, 振荡浮子的运动方程可表示为:

$$M\ddot{z}(t) = f_{\text{PTO}}(t) + f_{\text{buoy}}(t) \quad (1)$$

式中, M 、 $\ddot{z}(t)$ —— 振荡浮子的质量和加速度; $f_{\text{PTO}}(t)$ —— 能量输出系统作用于浮子上的力;

收稿日期: 2012-04-20

基金项目: 中海油-上海交大深水工程技术研究中心课题(GKZD010023)

通信作者: 杨建民(1958—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事海洋工程水动力学方面的研究。jmyang@sjtu.edu.cn

$f_{\text{buoy}}(t)$ ——作用在浮子上的水动力。为简化分析模型, 本文忽略作用在浮子上的粘性力和系泊力。文献[6, 7]研究表明作用在浮子上的粘性力很小, 与波浪力和能量输出系统的作用力相比可忽略。对于松弛式系泊的浮子式波浪能装置, 文献[8, 9]研究发现系泊力对浮子吸收波浪能的影响很小。

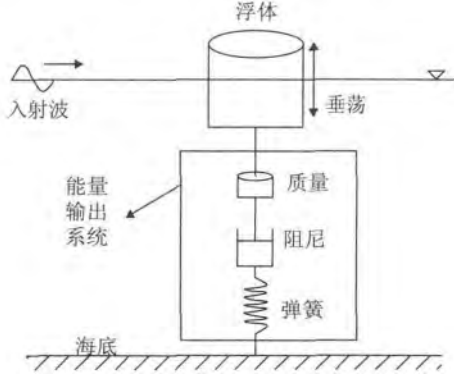


图1 波浪能转换系统

Fig. 1 The schematic of the wave energy converter system

对式(1)进行傅里叶变换, 可获得频域内浮子的运动方程, 即:

$$M\ddot{Z}(j\omega) = F_{\text{PTO}}(j\omega) + F_{\text{buoy}}(j\omega) \quad (2)$$

式中 j ——虚数单位; $Z(j\omega)$ ——浮子的垂荡运动位移。显然有 $\dot{Z}(j\omega) = j\omega Z(j\omega)$ 和 $\ddot{Z}(j\omega) = -\omega^2 Z(j\omega)$ 。本文假定能量输出系统是线性的, 能量输出系统的反作用力 $F_{\text{PTO}}(j\omega)$ 包括惯性力、阻尼力和弹性力, 其中仅有阻尼力对波浪能转换有贡献。惯性力和初始静弹性力组成垂直向下的合力, 当该合力足够大时, 可使缆索始终保持张紧, 从而保证浮子与发电机的同步。假设能量输出系统的质量、阻尼系数和

$$[-\omega^2(M + M_{\text{PTO}} + m(\omega)) + j\omega(R_{\text{PTO}} + R(\omega)) + \rho g A_w + K_{\text{PTO}}]Z(j\omega) = f_{\text{RAO}}(j\omega)a(\omega) \quad (10)$$

令:

$$H(j\omega) = \frac{f_{\text{RAO}}(j\omega)}{[-\omega^2(M + M_{\text{PTO}} + m(\omega)) + j\omega(R_{\text{PTO}} + R(\omega)) + \rho g A_w + K_{\text{PTO}}]} \quad (11)$$

式中, $H(j\omega)$ ——浮体垂荡运动的频率响应函数, 表示了浮体垂荡运动位移与入射波幅值间的关系。 $m(\omega)$ 、 $R(\omega)$ 、 $f_{\text{RAO}}(j\omega)$ 均为频率的函数, 可用三维线性势流理论频域计算软件 WAMIT^[10] 进行数值求解。因此式(10)可写为:

$$Z(j\omega) = H(j\omega)a(\omega) \quad (12)$$

当 $|H(j\omega)|$ 达到极大值时, 入射波与浮体间发生共振, 浮体运动达到最大, 此时的共振频率 ω_n 为:

弹性系数分别可表示为 M_{PTO} 、 R_{PTO} 和 K_{PTO} , 则 $F_{\text{PTO}}(j\omega)$ 可表示为:

$$F_{\text{PTO}}(j\omega) = -M_{\text{PTO}}\ddot{Z}(j\omega) - R_{\text{PTO}}\dot{Z}(j\omega) - K_{\text{PTO}}Z(j\omega) \quad (3)$$

作用在浮子上的水动力 F_{buoy} 可分为 3 部分:

$$F_{\text{buoy}}(j\omega) = F_e(j\omega) + F_r(j\omega) + F_h(j\omega) \quad (4)$$

式中, $F_e(j\omega)$ ——波浪激励力; $F_r(j\omega)$ ——辐射力; $F_h(j\omega)$ ——静水恢复力。 $F_h(j\omega)$ 正比于浮体的垂荡位移, 即:

$$F_h(j\omega) = -\rho g A_w Z(j\omega) \quad (5)$$

式中, A_w ——浮体水线面面积。波浪激励力 $F_e(j\omega)$ 和辐射力 $F_r(j\omega)$ 可分别表示为:

$$F_e(j\omega) = j\omega\rho \iint_S (\phi_i + \phi_d) n_3 dS \quad (6)$$

$$F_r(j\omega) = j\omega\rho \iint_S \phi_r n_3 dS \quad (7)$$

式中, ρ ——水的密度; S ——浮体湿表面面积; n_3 ——单位垂向法向量; ϕ_i ——入射波速度势; ϕ_d ——绕射速度势; ϕ_r ——垂荡辐射速度势。 ϕ_d 和 ϕ_r 可分别通过求解绕射问题和辐射问题得到。在频域内, 波浪激励力 F_e 与入射波幅 $a(\omega)$ 存在以下关系:

$$F_e(j\omega) = f_{\text{RAO}}(j\omega)a(\omega) \quad (8)$$

式中, $f_{\text{RAO}}(j\omega)$ ——单位波高时的波浪激励力。相似的, 辐射力 $F_r(j\omega)$ 也可表示为:

$$F_r(j\omega) = -[R(\omega) + j\omega m(\omega)]\dot{Z}(j\omega) \quad (9)$$

式中, $R(\omega)$ ——垂荡势流阻尼; $m(\omega)$ ——垂荡附加质量。

将式(3)~式(5)、式(8)和式(9)代入式(2), 可得频域内振荡浮子的运动方程:

$$[-\omega^2(M + M_{\text{PTO}} + m(\omega)) + j\omega(R_{\text{PTO}} + R(\omega)) + \rho g A_w + K_{\text{PTO}}]Z(j\omega) = f_{\text{RAO}}(j\omega)a(\omega) \quad (10)$$

$$H(j\omega) = \frac{f_{\text{RAO}}(j\omega)}{[-\omega^2(M + M_{\text{PTO}} + m(\omega)) + j\omega(R_{\text{PTO}} + R(\omega)) + \rho g A_w + K_{\text{PTO}}]} \quad (11)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g A_w + K_{\text{PTO}}}{m + M + M_{\text{PTO}}}} \quad (13)$$

2 能量俘获宽度计算

能量俘获宽度是描述波浪能转换装置能量转换效率的重要参数, 它定义为波浪能转换装置吸收能量平均功率 P_{buoy} 与波浪能量输运 Q_{wave} 的比值, 即:

$$C_w = \frac{P_{\text{buoy}}}{Q_{\text{wave}}} \quad (14)$$

波浪能量输运为单位宽度波峰所包含的能量,其定义见 2.3 节。推导能量俘获宽度与随机波浪知识密切相关,这里先简要介绍有关内容。

2.1 随机波浪

假设随机海浪为各态历经的平稳随机过程,则随机波浪可表示为大量正弦波浪的线性叠加,即:

$$\begin{aligned} \zeta(x, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \\ &\approx \sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \end{aligned} \quad (15)$$

式中, N ——足够大的正整数; ω_i ——第 i 个单元波的频率; ε_i ——第 i 个单元波的随机相位, ε_i 在 $[0, 2\pi]$ 随机均匀分布; k_i ——第 i 个单元波的波数, k_i 与 ω_i 间满足色散关系:

$$(\omega_i)^2 = g k_i \tanh(k_i h) \quad (16)$$

式中 g ——重力加速度; h ——水深。

a_i 为第 i 个单元波的波幅, a_i 可由给定的波谱 $S(\omega)$ 确定, 即:

$$a_i = \sqrt{2S(\omega_i) \Delta\omega_i} \quad (17)$$

式中, $\Delta\omega_i$ ——相邻频率间的频率间隔, 当 $i = 1$ 时, $\Delta\omega_i = \frac{(\omega_{i+1} - \omega_i)}{2}$, 当 $i = N$ 时, $\Delta\omega_i = \frac{(\omega_i - \omega_{i-1})}{2}$,

当 $i \in (2, 3, \dots, N-1)$ 时, $\Delta\omega_i = \frac{(\omega_{i+1} - \omega_{i-1})}{2}$ 。

本文研究中选定的波谱为 JONSWAP 谱, 由有义波高 $H_{1/3}$ 和谱峰频率 ω_p 表示的 JONSWAP 谱为:

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \frac{5H_{1/3}^2 \omega_p^4}{16\omega^5} (1 - 0.287 \ln \gamma) \cdot \\ &\exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \gamma^{\exp\left[-\frac{(\omega/\omega_p-1)^2}{2\sigma^2}\right]} \end{aligned} \quad (18)$$

式中, γ ——形状参数, 其均值为 $\gamma = 3.3$; ω ——波浪频率; σ ——波谱参数, 当 $\omega \leq \omega_p$ 时, $\sigma = 0.07$, 当 $\omega > \omega_p$ 时, $\sigma = 0.09$ 。在波谱给定后, 即可按照等分频率的方法对给定频率范围进行划分, 即可生成随机波浪。

2.2 波浪能转换装置吸收能量平均功率

浮子在频率为 ω_i 的规则波中运动时, 其垂荡运动可表示为:

$$z_i(t) = |H(j\omega_i)| a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i + \sigma_i) \quad (19)$$

式中, $|H(j\omega_i)|$ ——传递函数的幅值; σ_i ——传递函数的相位差。

在 $[0, t]$ 内, 波浪能转换装置吸收能量平均功率可表示为:

$$P_{\text{buoy}} = \frac{1}{t} \int_0^t R_{\text{PTO}} \dot{z}^2(t) dt \quad (20)$$

将式(17)、式(19)代入式(20), 可获得波浪能转换装置在规则波中吸收能量平均功率, 为:

$$P_{\text{buoy}}(\omega_i) = R_{\text{PTO}} |H(j\omega_i)|^2 S(\omega_i) \Delta\omega_i \quad (21)$$

因此, 在给定海浪条件下, 该波浪能转换装置吸收能量平均功率为:

$$P_{\text{buoy}} = R_{\text{PTO}} \sum_{i=1}^N |H(j\omega_i)|^2 S(\omega_i) \Delta\omega_i \quad (22)$$

2.3 波浪能量输运

波浪能量输运是指单位时间内穿过垂直于波浪传播方向的单位宽度截面的能量。根据线性波理论, 频率为 ω_i 的规则波的波浪能量输运为^[11]:

$$Q_{\text{wave}}(\omega_i) = \frac{\rho g}{2} v_g(\omega_i, h) a_i^2 \quad (23)$$

式中, a_i ——规则波波幅; $v_g(\omega_i, h)$ ——波群速, 定义为:

$$v_g(\omega_i, h) = \frac{g}{2\omega_i} \tanh(k_i h) \left[1 + \frac{2k_i h}{\sinh(2k_i h)} \right] \quad (24)$$

其中, ω_i 和 k_i 满足色散关系式(16)。

将式(17)代入式(23), 可得:

$$Q_{\text{wave}}(\omega_i) = \rho g v_g(\omega_i, h) S(\omega_i) \Delta\omega_i \quad (25)$$

因此, 随机波浪的波浪能量输运可表示为:

$$\begin{aligned} Q_{\text{wave}} &= \rho g \int_0^\infty v_g(\omega, h) S(\omega) d\omega \\ &= \rho g \sum_{i=1}^N v_g(\omega_i, h) S(\omega_i) \Delta\omega_i \end{aligned} \quad (26)$$

式(26)表明随机波浪的波浪能量输运由波谱和水深决定。对于本文选定的 JONSWAP 谱, 波浪能量输运可表示为有义波高 $H_{1/3}$ 、谱峰周期 T_p 和水深 h 的函数, $T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}$ 。图 2 为水深 40m 时不同有义波高和谱峰周期条件下波浪能量输运的等高线图。

2.4 能量俘获宽度

将式(21)和式(25)代入式(14), 可计算该系统在规则波条件下的能量俘获宽度, 即:

$$C_W(\omega_i) = \frac{P_{\text{buoy}}(\omega_i)}{Q_{\text{wave}}(\omega_i)} = \frac{R_{\text{PTO}}(|H(j\omega_i)|\omega_i)^2}{\rho g v_g(\omega_i, h)} \quad (27)$$

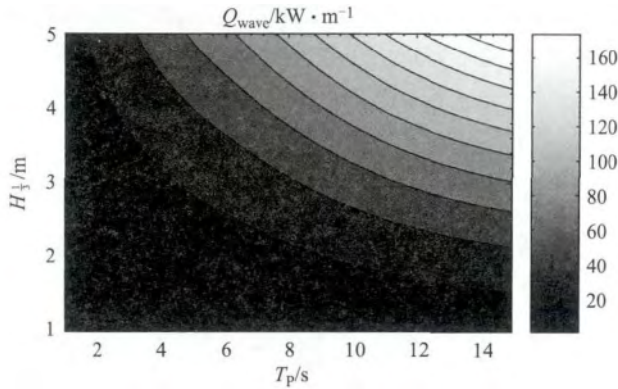


图2 水深40 m时不同有义波高和谱峰周期条件下波浪能量运输的等高线图

Fig. 2 Wave energy transport as a function of significant wave height and peak period in a water depth of 40 m

将式(22)和式(26)代入式(14),可计算该系统在随机波浪条件下的能量俘获宽度,即:

$$C_W = \frac{R_{\text{PTO}} \sum_{i=1}^N (|H(j\omega_i)|\omega_i)^2 S(\omega_i) \Delta\omega_i}{\rho g \sum_{i=1}^N v_g(\omega_i, h) S(\omega_i) \Delta\omega_i} \quad (28)$$

比较分析式(27)和式(28),可发现:规则波条件下,该系统的能量俘获宽度仅取决于浮子的频率响应函数 $H(j\omega_i)$ 、能量输出系统的阻尼系数 R_{PTO} 和水深;在随机波浪条件下,该系统的能量俘获宽度除受上述因素影响外,还与随机波浪的波谱有关。

3 数值模拟及结果分析

波浪的能量正比于周期和波幅的平方根,在40~100 m水深范围内,波浪的周期和波幅均较大,是布置波浪能转换装置较理想的水深范围^[12]。在更浅的水深范围内,由于波浪与海底的摩擦和波浪破碎,致使波浪能量的损失较大;在更深的范围,布置波浪能转换装置的可行性和经济性较差。因此,在本文的研究中选取的水深为40 m。

假定柱体吃水为2 m,半径分别为2、3、4和5 m,利用WAMIT软件可计算各柱体的水动力系数。计算中选取的频率数量为60个,范围为0.05~3.00 rad/s。柱体的附加质量、势流阻尼及一阶波浪力的幅值和相位角如图3所示,此处仅展示柱体垂荡方向的结果,因为本文仅考虑柱体的垂荡运动。

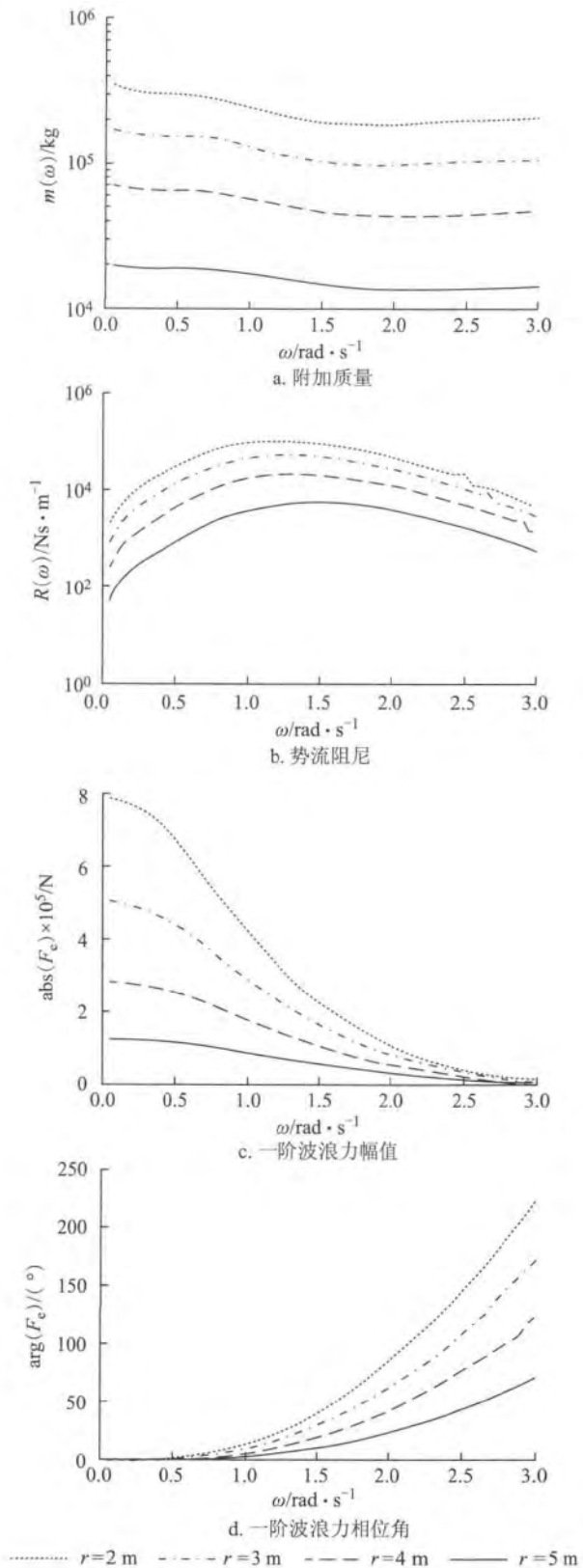


图3 柱体的附加质量、势流阻尼、一阶波浪力幅值和相位角
Fig. 3 The added mass, radiation damping, amplitude and phase angle of the first order wave force of the heaving cylinders

3.1 频率响应函数对能量俘获宽度的影响

根据式(11) 计算浮子的频率响应函数需已知能量输出系统的质量、阻尼系数和弹性系数。对于直线发电机, 动子做直线运动, 能量输出系统的质量即为动子的质量, 与浮子质量相比可忽略。假定能量输出系统的阻尼系数和弹性系数分别为 $R_{PTO} = 4 \text{ kNs/m}$ 和 $K_{PTO} = 3 \text{ kN/m}$, 计算该浮子的频率响应函数, 结果如图4所示。频率响应函数幅值的峰值点对应的频率即为该系统的固有频率, 可看出: 在频率较小时, 频率响应函数的幅值约为1; 在固有频率附近, 频率响应函数的幅值达到最大值; 当频率较大时, 频率响应函数的幅值趋近于零。

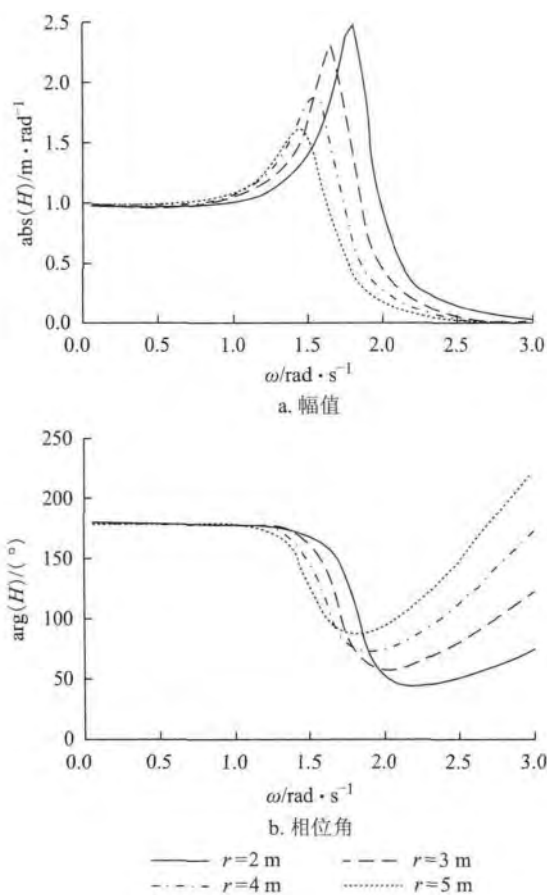


图4 频率响应函数的幅值和相位角
($R_{PTO} = 4 \text{ kNs/m}$ 和 $K_{PTO} = 3 \text{ kN/m}$)

Fig. 4 The amplitude and phase angle of the frequency response function of the cylinders with $R_{PTO} = 4 \text{ kNs/m}$ and $K_{PTO} = 3 \text{ kN/m}$

根据频率响应函数及式(27), 可计算出该系统在不同规则波条件下的能量俘获宽度, 结果如图5所示。在系统固有频率附近的频率范围内, 能量俘

获宽度较大, 在远离系统固有频率的范围内, 系统的能量俘获宽度趋近于零。造成这种变化趋势的原因是: 在较小频率范围内, 较小频率的平方导致了较小的能量俘获宽度; 在较大频率范围内, 较小频率响应函数幅值的平方造成了较小的能量俘获宽度。

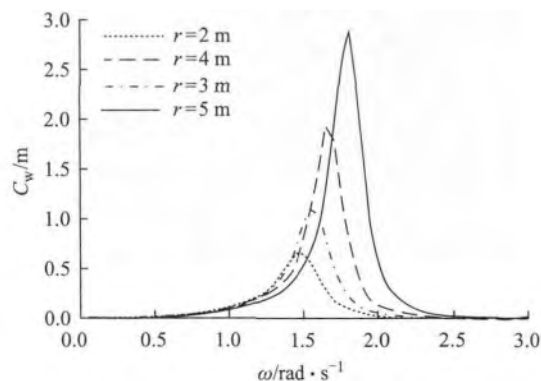


图5 规则波条件下该系统的能量俘获宽度
($R_{PTO} = 4 \text{ kNs/m}$ 和 $K_{PTO} = 3 \text{ kN/m}$)

Fig. 5 The power capture width of the cylinders in regular waves with $R_{PTO} = 4 \text{ kNs/m}$ and $K_{PTO} = 3 \text{ kN/m}$

3.2 能量输出系统阻尼系数对能量俘获宽度的影响

在随机波浪条件下, 系统的能量俘获宽度除受浮子频率响应函数的影响较大外, 也受能量输出系统和海洋波浪条件的影响。本文仅选取2种典型的海洋波浪条件进行分析:

1) 海洋波浪条件1(WC1): 波谱的谱峰频率为 1.55 rad/s , 与半径为 $r = 4 \text{ m}$ 的柱体的固有频率重合, 有义波高假设为 2 m 。

2) 海洋波浪条件2(WC2): 渤海一年一遇海洋波浪条件, 其有义波高和谱峰周期分别为 3.2 m 和 $7.9 \text{ s}^{[13]}$ 。

分别绘制上述2种典型海洋波浪的谱密度曲线, 结果如图6所示。根据式(28), 假定能量输出系统的弹性系数为 $K_{PTO} = 3 \text{ kN/m}$, 忽略其质量, 计算各柱体在不同海洋波浪条件下的能量俘获宽度, 并绘制了能量俘获宽度与能量输出系统的阻尼系数间的关系曲线, 如图7所示。可看出, 在WC1和WC2中, 能量俘获宽度均随能量输出系统阻尼系数的增加而增大。

在WC2中, 系统的能量俘获宽度较小, 其原因是波谱的谱峰频率远离系统的固有频率。对比分析图5、图6可知, 该波谱谱峰频率附近的频率对应的

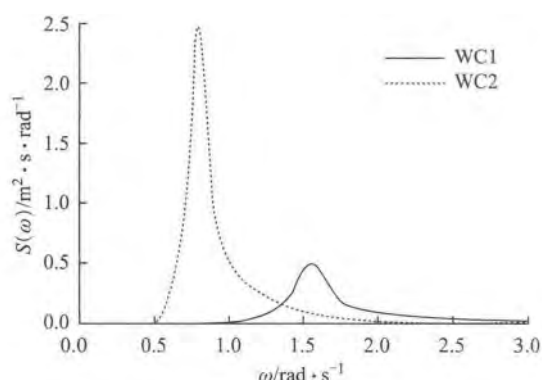


图6 海洋波浪的谱密度曲线

Fig. 6 The wave spectral density for wave climate 1 and wave climate 2

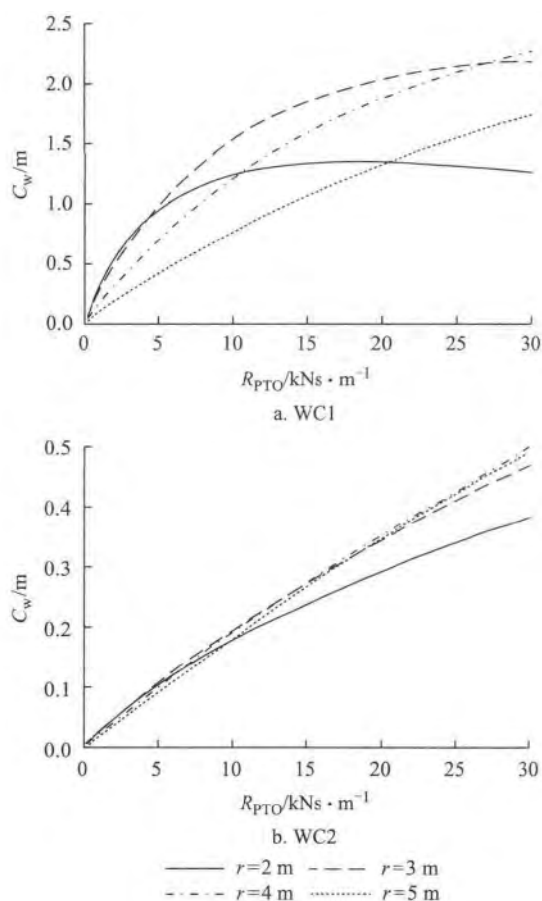


图7 能量俘获宽度与能量输出系统的阻尼系数间关系曲线

Fig. 7 Power capture width versus PTO damping coefficient for the cylinders with $K_{PTO} = 3 \text{ kN/m}$ in WC1 and WC2

的能量俘获宽度接近于零,表明该系统无法吸收该波浪的主要能量,导致系统的能量俘获宽度较小。各柱体的能量俘获宽度与能量输出系统的阻尼系数

近似呈线性关系;且在不同阻尼系数下,柱体 $r = 3 \text{ m}$ 、 $r = 4 \text{ m}$ 和 $r = 5 \text{ m}$ 的能量俘获宽度基本相等,这表明当系统的固有频率远离波谱谱峰频率时,浮子的几何形状对能量俘获宽度的影响很小。

各柱体在 WC1 中的能量俘获宽度均大于其在 WC2 中的能量俘获宽度,其原因是 WC1 中各柱体的固有频率与波谱谱峰频率均较接近。值得注意的是,当能量输出系统的阻尼系数 R_{PTO} 小于 26 kNs/m 时,尽管柱体 $r = 4 \text{ m}$ 的固有频率与波谱谱峰频率重合,但其能量俘获宽度小于柱体 $r = 3 \text{ m}$,原因是柱体 $r = 3 \text{ m}$ 的频率响应函数幅值大于柱体 $r = 4 \text{ m}$ 。

通常,系统的固有频率均大于波谱谱峰频率,分析图 4 可看出,增大柱体直径能在一定程度上减小系统的固有频率,如若使系统的固有频率接近波谱谱峰频率,从而提高能量俘获宽度,则柱体的直径将非常大,在实际应用中,这种做法的可行性和经济性均较差,提高系统能量俘获宽度的常见方法是控制浮体的运动。

4 结 论

本文在线性理论下推导了波浪能转换系统在规则波和随机波浪条件下能量俘获宽度的表达式,并通过对柱形浮体的数值计算,获得的结论如下:

- 1) 波浪能转换装置的固有频率与波谱谱峰频率越接近,则其能量俘获宽度也越大,这是提高波浪能转换装置能量俘获宽度最为直接的方法。
- 2) 波浪能转换装置的能量俘获宽度亦受其频率响应函数和能量输出系统的影响。频率响应函数的幅值越大,能量输出系统的阻尼系数越大,则能量俘获宽度也越大。
- 3) 改变浮体的几何形状可在一定程度上减小系统的固有频率,但其可行性和经济性均较低。提高系统的能量俘获宽度需采用其他方法。

[参考文献]

- [1] Cruz J. Ocean wave energy: Current status and future perspectives [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [2] de O Falcao A F. Wave energy utilization: A review of technologies [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 14(3): 899—918.
- [3] Price A A E, Dent C J, Wallace A R. On the capture width of wave energy converters [J]. Applied Ocean Research, 2009, 31(4): 251—259.

- [4] Yeung R W , Peiffer A , Tom N , et al. Design , analysis , and evaluation of the UC-Berkeley wave-energy extractor [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* , 2012 , 134(2) : 021902.
- [5] Eriksson M , Isberg J , Leijon M. Hydrodynamic modeling of a direct drive wave energy converter [J]. *International Journal of Engineering Science* , 2005 , 43 (17-18) : 1377—1387.
- [6] Lopes M F P , Hals J , Gomes R P F , et al. Experimental and numerical investigation of non-predictive phase-control strategies for a point-absorbing wave energy converter [J]. *Ocean Engineering* , 2009 , 36(5) : 385—402.
- [7] Hals J. Modeling and phase control of wave-energy converters [D]. Norway: NTNU , Trondheim , 2010.
- [8] Muliawan M , Gao Z , Moan T , Babarit A. Analysis of a two-body floating wave energy converter with particular focus on the effects of mooring systems on energy capture [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* , 2013 , 135(3) : 031902.
- [9] Vicente P C , de O Falcao A F , Justino P A P. Slack-chain mooring configuration analysis of a floating wave energy converter [A]. *Proceedings of the 26th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies* [C] , Athens , Greece , 2011.
- [10] WAMIT. WAMIT user manual version 6. 3 [EB/OL]. <http://www.wamit.com> , 2006.
- [11] Falnes J. Ocean waves and oscillating systems [M]. London: Cambridge University Press , 2002.
- [12] Scruggsand J , Jacob P. Harvesting ocean wave energy [J]. *Science* , 2009 , 323(5918) : 1176—1178
- [13] 肖龙飞 , 杨建民 , 范 模 , 等. 160kDWT FPSO 在极浅水中运动安全性研究 [J]. *船舶力学* , 2006 , 10(1) : 7—14.
- [13] Xiao Longfei , Yang Jianmin , Fan Mo , et al. Research on motions and safety performance of a 160kDWT FPSO in ultra-shallow water [J]. *Journal of Ship Mechanics* , 2006 , 10(1) : 7—14.

FREQUENCY DOMAIN MODELING AND ANALYSIS OF A DIRECT DRIVE POINT ABSORBER WAVE ENERGY CONVERTER

Cheng Zhengshun , Yang Jianmin , Hu Zhiqiang , Xiao Longfei

(State Key Lab of Ocean Engineering , Shanghai Jiao Tong University , Shanghai 200240 , China)

Abstract: Based on the linear wave theory , by assuming the power take off force (PTO) was modeled to be linear and restricting the consideration of heave motion , the equation of motion of a direct drive point absorber wave energy converter (WEC) in the frequency domain was established , and its frequency response function (FRF) was obtained. The expression of power capture width in regular and random waves were derived , the influence of buoy geometry , FRF , PTO damping coefficient and wave climate on power capture width were investigated. It is found that the smaller difference between the natural frequency and the peak frequency of the wave spectrum , the larger amplitude of the FRF , and the greater PTO damping coefficient can lead to a relatively larger power capture width.

Keywords: wave energy converter; frequency domain modeling; power capture width; influential factor