

浮式风机平台与多波浪能转换装置混合系统的设计与水动力性能分析

胡俭俭, 周斌珍*, 刘品, 解光慈, 孙科, 耿敬

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨, 150001, Email: zhoubinzen@hrbeu.edu.cn)

摘要: 基于势流理论, 建立了浮式风机平台—波浪能浮子的混合系统耦合运动频域数值模型, 其中浮子与平台之间通过能量输出系统 (power take off (PTO)) 连接。采用高阶边界元方法计算耦合水动力系数, 并对浮子辐射阻尼进行黏性修正; 根据某一典型海况, 对柱形波能装置的尺寸及布置方式进行优化设计; 考虑最优 PTO 阻尼, 研究不同设计的混合系统发电功率及功率体积比的变化规律。结果表明: 势流无黏性修正结果与黏性修正后的结果在共振频率处差别较大, 且随着圆柱直径吃水比的减小而增加, 证明了黏性对垂荡式波浪能浮子的重要性; 整个混合系统的最优发电功率随着圆柱形波浪能浮子直径吃水比的增大而增大, 而功率体积比差别较小。

关键词: 浮式风机平台; 波浪能转换器; 最佳 PTO 阻尼; 混合系统; 黏性修正

1 引言

风能和波浪能的深海技术仅处于发展的早期阶段, 特别是由于设计、安装、运行和维护费用高昂而面临巨大的挑战。将海上风机平台与波浪能装置结合具有多种益处: 可以提高每平方米的能量产出; 共享系泊系统、电力基础设施等, 可以降低项目的整体经济成本; 稳定的波浪能发电可以补偿海上风电的间歇性^[1-2]。

基于势流频域理论, 对波浪能浮子进行黏性修正, 研究了多浮体垂荡式波浪能装置的耦合水动力及能量转换特性。采用无量纲方法根据给定的海洋风浪环境设置波能浮子的固有频率, 然后以混合系统总波浪功率及整体经济效益作为标准对 PTO 阻尼、物体尺寸等方面进行优化。

2 浮式平台和波浪能装置混合系统

本文将 Marine Innovation & Technology 公司设计的 Windfloat 半潜式三角形浮式风机平

基金项目: 国家自然科学基金-中英国际合作重点项目(51761135013); 国家自然科学基金青年基金(51409066); 工信部高技术船舶专项第二期(201622)

台^[3]作为案例进行研究，选用典型的圆柱形浮子作为波浪能浮子；图 1 为具有 PTO 系统的浮式风机平台和多个垂荡型波浪能浮子的混合发电系统的示意图。圆柱形浮子的半径和吃水分别为 r 和 d ，两个相邻浮子之间的距离为 L_1 ，平台柱形浮筒与相邻浮子之间的距离是 L_2 。为减小参数，初步设计时， L_1 设置为 $4r$ ， L_2 需要大于 $(R + 2r)$ ；因此，桁架一侧的浮子最大数量 NL 取整数 $(L-2R) / 4r$ 。

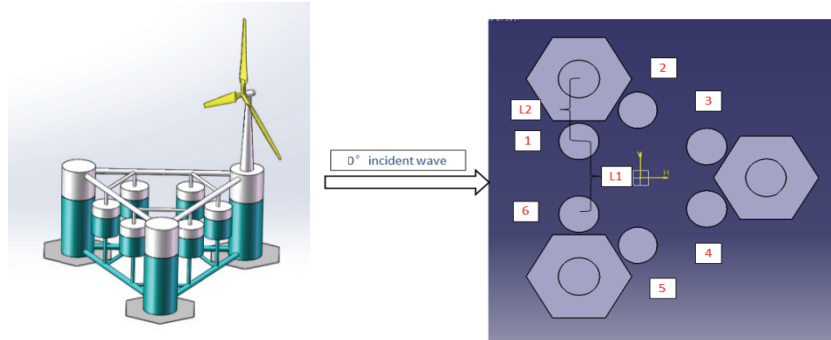


图 1 浮动风风机平台和多个垂荡 WEC 的混合系统

通过实地研究，得到了中国山东省海域的波浪环境，波高 H_i 和波周期 T_i 的联合概率分布 S_i 在表 1 中给出。平均波周期为 $T = 4.94s$ ($\omega = 1.27rad / s$)，平均波高为 $H = 0.84m$ ，将用于 WEC 的初始设计。

表 1 山东海域波高 H 和波周期 T_i 的联合概率分布 S_i

$H(m) \backslash T(s)$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	sum
0.25	0.00	0.03	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
0.5	0.00	3.43	12.27	4.91	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	21.07
1	0.00	1.93	14.88	21.85	11.22	2.36	0.43	0.33	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00	53.12
1.5	0.00	0.03	0.56	3.50	5.53	3.73	0.88	0.39	0.26	0.20	0.00	0.00	0.00	15.08
2	0.00	0.00	0.03	0.43	2.03	2.29	0.88	0.16	0.46	0.10	0.00	0.07	0.00	6.44
2.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.88	0.92	0.23	0.00	0.10	0.07	0.00	0.00	2.55
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.36	0.20	0.03	0.00	0.00	0.00	0.07	1.05
3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.16
4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
sum	0.00	5.43	27.90	30.68	19.56	9.65	3.63	1.57	0.88	0.46	0.10	0.07	0.07	100

3 数学模型

与波浪能浮子相比,平台的运动相对较小,为了减少初始设计的变量,假设平台固定。由于每个浮子仅做垂荡自由度方向的运动,第*i*个浮子的运动方程为:

$$\left[-\omega^2(m_i + \mu_{ii} + \mu_{vis,i}) - i\omega(\lambda_{ii} + b_{opt,i} + \lambda_{vis,i}) + (k_{opt,i} + C_i)\right]z_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N (-\omega^2\mu_{ij} - i\omega\lambda_{ij})z_j = F_{ex,i} \quad (1)$$

式中,水动力系数采用高阶边界元计算, $\mu_{vis,i}$ 和 $\lambda_{vis,i}$ 黏性效应可以通过自由衰减实验进行修正^[4]。 m 为质量, μ_{ii} 和 λ_{ii} 分别为第*i*个物体垂荡自由度上附加质量和辐射阻尼, $b_{opt,i}$ 为第*i*个物体的发电阻尼, $k_{opt,i}$ 为第*i*个物体的PTO刚度, C_i 为第*i*个物体的垂向恢复力, z_i 为第*i*个物体与平台相对位移, $F_{ex,i}$ 为波浪激振力。

第*i*个物体的垂荡固有频率可写为^[5]:

$$\omega_{n,i} = \sqrt{\frac{k_i + c_i}{m_i + \mu_{ii}(\omega_{n,i})}} \quad (2)$$

对于仅具有单一运动自由度的单体,第*i*个物体的最佳阻尼系数 $b_{opt,i}$ 可写为^[5]:

$$b_{opt,i} = \sqrt{\frac{((m_i + \mu_{ii})\omega^2 - (k_{pto,i} + c_i))^2}{\omega^2} + \lambda_{ii}^2} \quad (3)$$

由第*i*个浮子产生的功率 $P_i(\omega)$ 和浮子阵列的总功率 $P_{total}(\omega)$ 为:

$$P_i(\omega) = \frac{1}{2}\omega^2 b_{pto} |z_i|^2; \quad P_{total}(\omega) = \sum_{i=1}^N P_i(\omega) \quad (4)$$

本文考虑浮子质量等于排开水的重量,引入年总波浪功率 $P_{total}(\text{year})$ 和年单位体积发电功率 $P_{av}(\text{year})$ 来评估目标海域波浪能浮子的能量捕获性能,:

$$P_{total(\text{year})} = \sum_{j=1}^M \left(\frac{H_j}{2}\right)^2 \times P_{total}(T_j, H_j) \times S_j; \quad P_{av(\text{year})} = \frac{P_{total(\text{year})}}{V_{total}} \quad (5)$$

采用浮子的吃水*d*作为无量纲典型参数,对下列参数进行无量纲化有

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \frac{r}{d}; \quad \bar{m}_i = \frac{m_i}{\rho g \pi r^2 d} = 1; \quad \bar{c}_i = \frac{c_i}{\rho g \pi r^2} = 1 \\ \bar{\lambda}_{ij} &= \frac{\lambda_{ij}}{\rho \pi r^2 \sqrt{gd}}; \quad \bar{\mu}_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\rho \pi r^2 d}; \quad \bar{\omega} = \frac{\omega}{\sqrt{g/d}} \end{aligned} \quad (6)$$

给定 $2r/d$ 的无量纲固有频率可以通过该情况下的无量纲附加质量确定:

$$\bar{\omega}_{n,i}(2r/d) = \sqrt{\frac{1}{1 + \bar{\mu}_{ii}(\bar{\omega}_{n,i}(2r/d))}} \quad (7)$$

根据无量纲固有频率与有量纲固有频率的关系, 可得:

$$d = g \left(\frac{\bar{\omega}_n(2r/d)}{\omega_p} \right)^2 \quad (8)$$

因此, 对于给定的波浪环境 ω_p , 可以根据式(8), 获得圆柱形浮子的一系列吃水深度 d 和半径 r 。接着根据总功率 P_{total} 和单位体积发电功率 P_{av} 对浮子的尺寸做进一步优化选择。

4 数值结果与讨论

根据上述浮子设计与布置原则, 计算黏性修正前后的发电功率及功率体积比, 得到图 3。图 3 表明对于较细长的浮子, 修正后的总功率 P_{total} 在共振频率处的峰值显著降低, 对于扁胖型的浮子, 在考虑黏性校正之后共振频率处峰值略微降低。随着 $2r/d$ 的增加, 总波浪发电功率 P_{total} 几乎在所有波浪频率处增加。

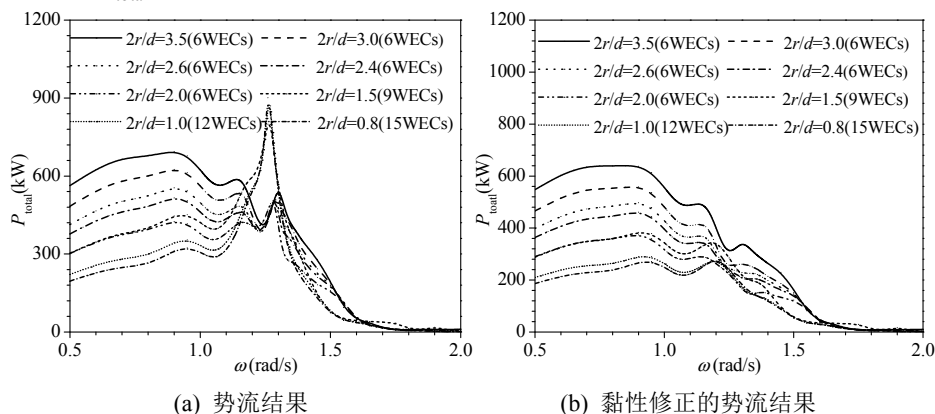


图 3 不同浮子 (WEC) 布局情况下总波浪发电功率比较

式(6)中单位体积波浪发电功率 P_{av} 被引入作为经济效率的标准。较小的 P_{av} 代表更高的经济效率。每单位体积波浪发电功率 P_{av} 在图 4(a)和(b)中给出。如图 4(a)所示, 基于势流理论计算的单位体积发电功率 P_{av} 的变化与图 3(a)中的总发电功率 P_{total} 相似。在考虑黏性校正之后, 随着 $2r/d$ 增加, P_{av} 的峰值在共振频率处较小, 而在低频区域中较大。

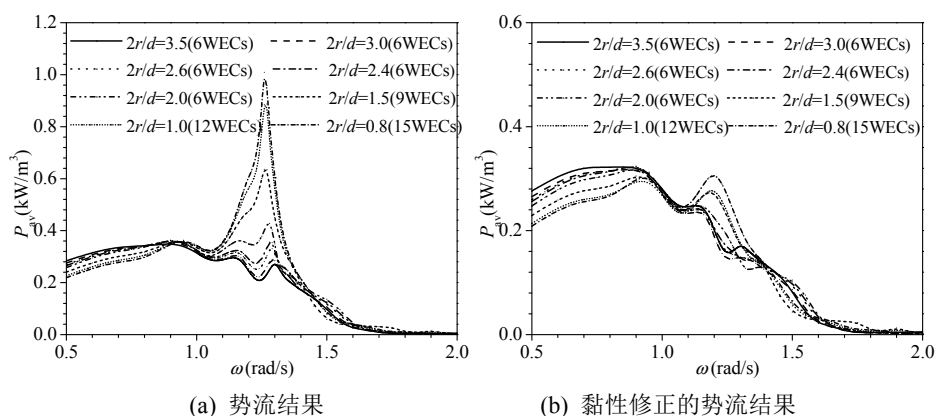


图4 不同浮子(WEC)布局情况下总波浪发电功率体积比比较

图5表示了一年中波浪发电总功率 $P_{total}(\text{year})$ 和每单位体积发电功率 $P_{av}(\text{year})$ 黏性校正的势流理论结果。可以看出，随着 $2r/d$ 的增加，波浪发电总功率 $P_{total}(\text{year})$ 显著增加，而单位体积发电功率 $P_{av}(\text{year})$ 非常接近。这意味着浮子的不同布局之间的差异在经济效率方面非常小，而较扁胖型的浮子在该海况下可以获得更高的总波浪能量 $P_{total}(\text{year})$ 。

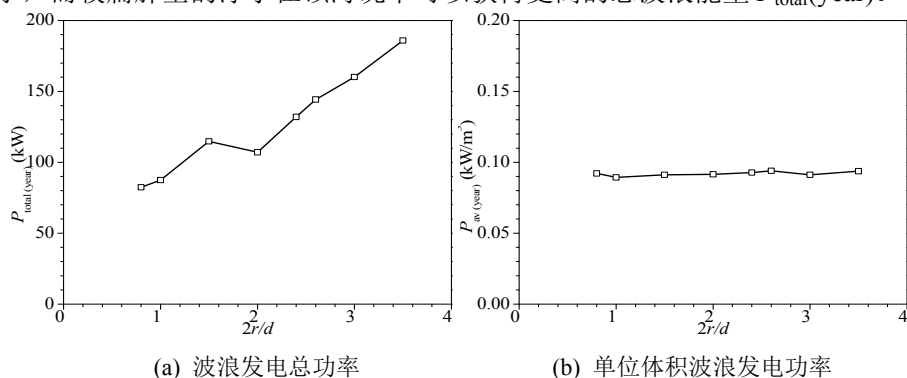


图5 基于特定海域总波浪发电功率和单位体积发电功率在不同浮子布置方式下的变化规律

5 结论

(1) 势流无黏性修正结果与黏性修正后的结果在共振频率处差别较大，且随着圆柱直径吃水比的减小而增加，证明了黏性对垂荡式波浪能浮子的重要性。

(2) 整个混合系统的最优发电功率随着圆柱形波浪能浮子直径吃水比的增大而增大，而功率体积比差别较小。

本文基于给定的工作海况，建立了一整套波能装置设计与选型优化的计算流程，对混合系统的设计具有重要指导作用。

参 考 文 献

- 1 Astariz S, Perez-collazo C, Abanades J, Iglesias G. Co-located wave-wind farms: Economic assessment as a function of layout. *Renew. Energy*, 2015, 83: 837-849.
- 2 Cradden L, Kalogeri C, Barrios IM, Galanis G, Ingram D, Kallos G, Multicriteria site selection for offshore renewable energy platforms. *Renew. Energy*, 2016, 87: 791-806.
- 3 Roddier D, Cermelli C, Aubault A, Weinstein A. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 2010, 2(3):53.
- 4 Lee H, Poguluri S K, Bae Y H. Performance analysis of multiple wave energy converters placed on a floating platform in the frequency domain. *Energies*, 2018, 11, 406.
- 5 Journee J M J, Massie W W. *Offshore hydromechanics*. First Edition. Delft University of Technology, 2001.
- 6 Sun S Y, Sun S L, Wu G X. Fully nonlinear time domain analysis for Hydrodynamic performance of an oscillating wave surge converter. *China Ocean Eng*, 2018, 32(5): 582-592.

Optimal design and performance analysis of a hybrid system of floating wind platform and multiple wave energy converters

HU Jian-jian, ZHOU Bin-zhen*, LIU Pin, XIE Guang-ci, SUN Ke, GENG Jing

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin ,150001 Email:

zhoubinzhen@hrbeu.edu.cn)

Abstract: Based on the potential flow theory, this paper establishes a frequency domain numerical model of the coupled system of a floating wind platform and several floating wave energy converters, in which the floats and the platform are connected by the power take off. The high order boundary element method is used to calculate the coupled hydrodynamic coefficient, and the viscous radiation damping is corrected. According to a typical sea condition, the size and layout of the cylindrical wave energy converters are optimized. Considering the optimal PTO damping, the variation of power generation and power to volume ratio of the hybrid system with different designs are studied. The results show that the non-viscous correction of the potential flow and the results of the viscous correction are different at the resonance frequency, and increase with the decrease of the ratio of the draft diameter of the cylinder, which proves the importance of the viscosity to the heave wave energy float. The optimal power generation of the entire hybrid system increases with the increase of the ratio of the diameter of the cylindrical wave energy float, and the variation of wave power to volume ratio is small.

Key words Floating wind platform; Wave energy converter; Optimal PTO damping; Hybrid system; Viscous correction.