

跷跷板式波浪能装置阵列发电性能分析

赵江滨^{1,2}, 范梦雨¹, 金勇¹, 周建辉³

1. 武汉理工大学能源与动力工程学院, 武汉 430063

2. 国家水运安全工程技术研究中心可靠性与新能源研究所, 武汉 430063

3. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430064

摘要 波浪蕴含着巨大的能量,也具有较大的破坏作用。提出了一种跷跷板式的波浪能发电装置,采用双浮筒型的水面浮子结构形式,在水下设置垂直阻尼板。波浪激励浮子产生横摇运动,利用浮子与水下阻尼板的相对摇荡运动发电,结构简单,运行可靠。利用 ANSYS-AQWA 水动力分析软件计算了标准单体、大面积单体和多体阵列的发电性能,结果显示,在周期 6.28 s,波高 2 m 的海况下,跷跷板装置具有每平方米上百瓦的发电能力,具有显著的应用前景。

关键词 波浪能发电装置;发电性能;海洋能

海洋波浪蕴含着巨大的能量,能被开发利用发电,也具有较大的破坏作用。波浪能量来源于风力,在风和水体自重的共同作用下形成波浪运动,因此海洋波浪又称为风浪、重力波。波浪能储量大、分布广、功率密度高,受到各国的广泛重视。波浪的大小取决于风速、风的作用距离以及水面大小,世界上最丰富的波浪能资源出现在南/北纬度 30°~60°(西风带)的大洋东面,年平均能流密度可达 20~100 kW/m,中国大部分领海的年平均能流密度有 2~7 kW/m^[1],南海部分海域可达 3~20 kW/m^[2]。

波浪能发电技术已有逾百年的历史,装置形式多种多样,有关专利多达数千项^[3]。根据波浪能发电装置(wave energy converter, WEC)的原理和结构形式的差异,波浪能捕获技术可大致分为振荡水柱式,压力差式、筏式、点吸收式等振荡浮子式,以及越浪式和摆式等结构形式;从其几何布置与波浪传播方向的关系,有点吸收型、衰减型(attenuator)和截止型(terminator)3 种类型^[4-9]。

浮式防波堤可以抵御外海波浪,一般由水面漂浮堤体和锚泊设备组成^[10-12],江苏科技大学的嵇春

收稿日期:2020-10-12;修回日期:2020-12-21

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51579197);工业和信息化部高技术船舶科研项目(201622)

作者简介:赵江滨,副教授,研究方向为波浪能发电、海洋机器人,电子信箱:zhaojiangbin@whut.edu.cn

引用格式:赵江滨, 范梦雨, 金勇, 等. 跷跷板式波浪能装置阵列发电性能分析[J]. 科技导报, 2021, 39(6): 35-41; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.06.004

艳等^[11-12]设计了一种以双圆柱浮筒为浮子堤体结构,辅以防浪网和防浪球的浮式防波堤。有学者提出了成本共享的思路,将波浪能发电装置与现有海上结构物集成,一方面可以降低建设成本,另一方面也可以增加装置的稳定性。其中将波浪能发电装置与近岸防波堤进行集成具有较高的可行性和适用性^[13],He等^[14]将振荡水柱式波浪能转换装置与浮式防波堤进行集成,Ning等^[15]、赵玄烈^[16]、刘崇期等^[17]研究了浮子式波浪能发电装置与有桩柱约束等类型的浮式防波堤组成的集成,在合适的波频范围条件下可以获得较高的能量捕获率和较好的消波效果。张恒铭等^[18]、孙红来^[19]、范亚宁等^[20]也研究

了与浮式防波堤集成一体的波浪能发电技术。

为了在浮式防波堤上捕获波浪能发电,课题组独立提出了一种跷跷板式的波浪能发电装置^[21-22],采用与防波堤相同的双浮筒水面浮子结构形式,在水下增设垂直阻尼板,利用波浪推动下的水面浮体横摇运动发电,结构简单,运行可靠,可以单独运行,也可以组成阵列,还便于与浮式防波堤模块互联集成,且不产生过大的运动约束力。早在1980年,法国人获得了类似的发明专利^[23],如图1所示,但此后未见深入的研究与应用。本研究利用水动力学分析软件 ANSYS-AQWA 计算跷跷板装置及其阵列的发电性能。

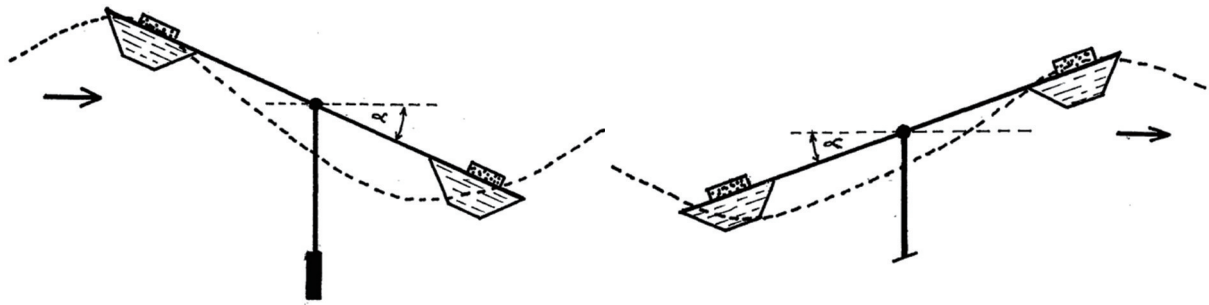


图1 法国跷跷板式波浪能发电装置专利

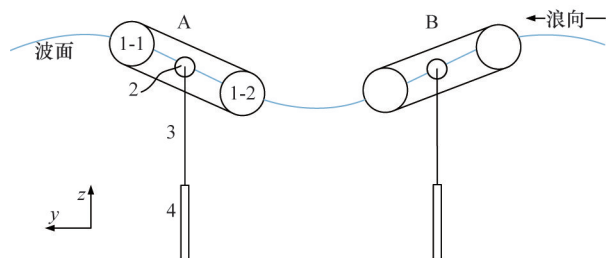
1 跷跷板式波浪能发电装置

跷跷板式的浮式波浪能发电装置结构示意图如图2所示。发电机舱2与浮筒1-1和1-2固连,内置动力输出发电PTO(power take off)系统(包括传动系统与发电机),PTO基座与发电机舱固连。连接杆3上接传动PTO输入轴,下接竖直阻尼板4,选择其长度,使得阻尼板4能够避免海面波浪的影响。阻尼竖板可选择方形薄平板,具有较大的面积,法向(水平)运动时会产生巨大的水体阻力,切向(垂向)运动则几无阻碍,为顺应式结构,组成阵列时有利于减小装置间的约束作用力。

跷跷板式装置双浮筒浮于波浪表面,选择右手坐标系, z 轴垂直向上, y 轴沿着波浪传播方向为正。在波浪作用下,双浮筒产生横摇振荡运动,利用双浮筒和阻尼板之间的夹角变化产生电力。

图2中的A和B显示了发电装置处于不同波浪坡面时的运动姿态,在其交替变换过程中产生电力。

采用 ANSYS-AQWA 水动力学分析软件进行计算。该软件基于边界元法开发,其理论基础为势流理论,该计算方法为目前最为成熟的水动力学计算方法之一,是目前对波能转换装置特别是振荡浮



1-1—左浮筒;1-2—右浮筒;2—发电机舱;
3—连接杆;4—竖直阻尼板

图2 跷跷板式波浪能发电装置结构与工作状态

子式装置开展水动力学分析的主要手段^[24]。AQWA 还集成了 Morison 单元,如细长管 (tube) 和碟形单元 (disc),能够考虑到水体黏性效应产生的作用力。

计算对象为图 3 所示的跷跷板发电装置,称为标准单体装置 S1,其浮子和阻尼板的几何参数数值如表 1 所示。选定的水面浮子工况为半浮状态,即静水时水线面通过浮筒轴心。选定的波浪参数、浮体质量分布以及代表发电装置的阻尼系数,见表 1。跷跷板装置的宽度 B 固定,可沿长度 L 方向扩展。 L 沿着波峰方向,相当于迎浪宽度。

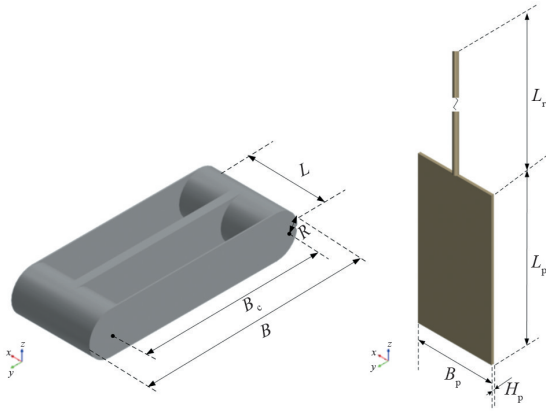


图 3 跷跷板波浪发电装置几何尺寸

表 1 跷跷板式发电装置计算参数

| 序号 | 物理量 | 取值 | 备注 |
|----|-----------------|------|----------------------|
| 1 | 浮筒长度 L/m | 3 | |
| 2 | 浮筒半径 R/m | 0.8 | |
| 3 | 浮筒中心距 B_c/m | 6.4 | |
| 4 | 浮子型宽 B/m | 8 | |
| 5 | 水面浮子排水量 D/kg | 7848 | 半浮状态 |
| 6 | 水面浮子质量 M/kg | 3848 | 轻浮体 |
| 7 | 阻尼板厚度 H_p/m | 0.1 | |
| 8 | 阻尼板宽度 B_p/m | 3 | |
| 9 | 阻尼板长度 L_p/m | 6 | |
| 10 | 连杆长度 L_r/m | 22 | |
| 11 | 阻尼板排水量 D_p/kg | 1845 | 铁质阻尼板最大允许质量 14502 kg |
| 12 | 阻尼板质量 M_p/kg | 5845 | |

数值计算的海况采用线性规则波 (Airy 波),其参数见表 2,设定海水深度为 50 m,波浪周期为

6.28 s,波高为 2 m。波浪沿着 y 轴正向入射,如图 2 所示。

跷跷板装置采用对称的锚链布置,标准单体 S1 的锚链布置如图 4 所示,其位置参数见表 3。

表 2 数值计算参数

| 序号 | 名称 | 数值 | 备注 |
|----|---|--------|-------|
| 1 | 海水深度 d/m | 50 | |
| 2 | 波浪周期 T/s | 6.28 | 线性规则波 |
| 3 | 波浪波长 λ/m | 61 | |
| 4 | 波浪高度 H/m | 2 | |
| 5 | PTO 阻尼系数 $B_{PTO}/(N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1})$ | 400000 | |

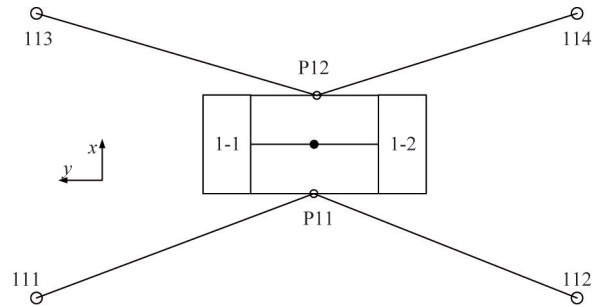


图 4 跷跷板标准单体装置 S1 锚链布置

表 3 跷跷板标准单体装置 S1 锚链位置参数

| 序号 | 符号 | 位置/m | 备注 |
|----|-----|-----------------|---------|
| 1 | P11 | (-1.5, 0, 0) | 浮子锚链导缆孔 |
| 2 | P12 | (1.5, 0, 0) | |
| 3 | 111 | (-25, 50, -50) | 海底锚点 |
| 4 | 112 | (-25, -50, -50) | |
| 5 | 113 | (25, 50, -50) | |
| 6 | 114 | (25, -50, -50) | |

经过计算,选定的 PTO 等效阻尼系数 B_{PTO} 为 $400000 N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$,此时具有较大的发电功率。AQWA 计算数据如图 5、图 6 所示。图 5 显示,浮子水平位移 y 和阻尼板垂向位移 z 随波浪频率振荡,阻尼板水平位移 y 以较低的频率振荡。图 6 显示了浮子和阻尼板的角速度,两者之间的角速度差异驱动 PTO 系统产生电力。

利用式 (1) 和式 (2) 计算发电功率

$$P_{WEC} = B_{PTO} V_r^2 \quad (1)$$

$$V_r = V_{\text{FLOATER}} - V_{\text{PLATE}} \quad (2)$$

式中, P_{WEC} 为浪能发电装置瞬时功率; B_{PTO} 为 PTO 等效阻尼系数; V_r 为浮子和阻尼板的相对角速度;

V_{FLOATER} 为浮子的角速度; V_{PLATE} 为水下阻尼板的角速度。选取运动稳定后的数据进行计算, 可得跷跷板标准单体装置 S1 的平均发电功率为 3860.78 W。

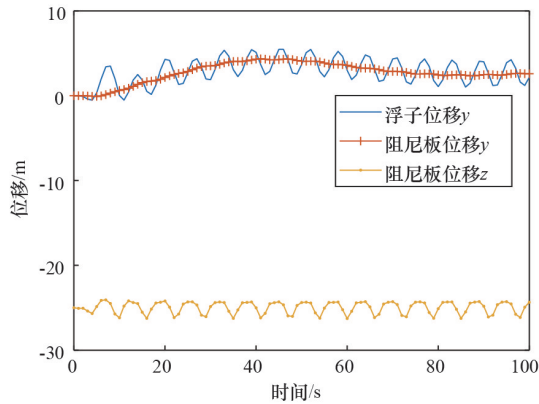


图5 跷跷板单体装置S1位移

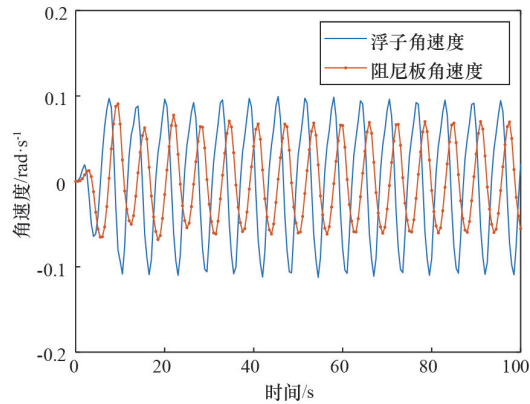
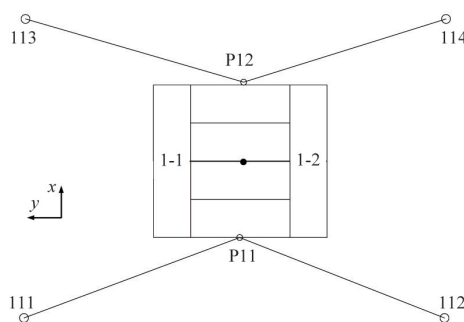


图6 跷跷板单体装置S1角速度

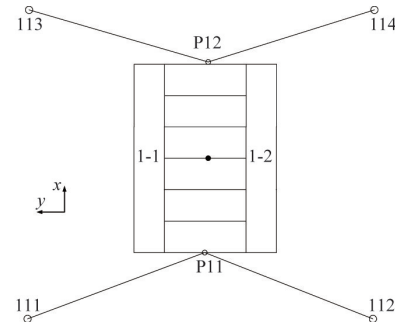
2 跷跷板装置大面积单体和阵列发电性能

分别研究2倍和3倍面积的单体装置和阵列的发电性能, 其结构示意图和锚链布置分别如图7所

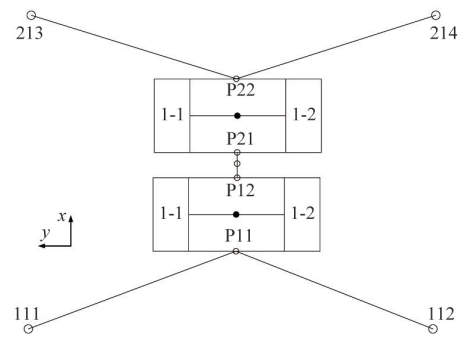
示。大面积单体结构共用一套PTO装置, 其PTO阻尼系数和水下阻尼板的面积同步增大, 例如如图7(a)所示的2倍单体装置PTO阻尼系数为 800000 $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$, 水下阻尼板的宽度设置为 6 m。双体和三体阵列装置之间采用万向节连接, 允许相互之



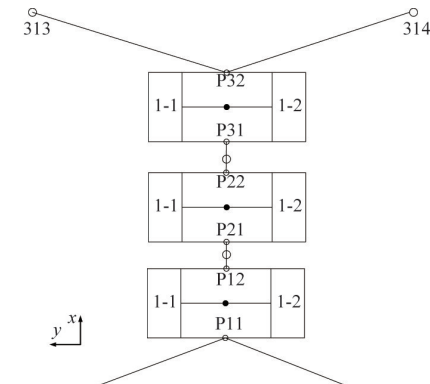
(a) 2倍单体S2



(b) 3倍单体S3



(c) 双体阵列ZL2



(d) 三体阵列ZL3

图7 2倍和3倍面积的单体装置和阵列

间的 R_x 、 R_y 运动,限制相对 R_z 运动;各单体之间相对独立,其单体结构的PTO和 underwater 阻尼板参数设置与标准单体 S1 装置相同。

大面积单体和阵列的水面浮子,以及海底锚点沿着 x 轴对称布置,各位置点定义见表 4。

通过数值计算的方法,分别研究了 5 套装置的

发电性能,结果见表 5。数据显示,大面积单体装置的单位面积发电性能显著下降,幅度接近 10%;多体阵列装置的发电能力则略有提高(0.36%~2.7%),其代价是显著增大了的迎浪宽度(8.33%~11.11%),其实际的捕获宽度比反而显著下降。

有限水深条件下,线性规则波单位宽度平均波

表4 跷跷板装置大面积单体和阵列的锚点布置

| 序号 | 符号 | 位置/m | | | | 备注 |
|----|-----|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | | 二倍单体 S2 | 三倍单体 S3 | 双体阵列 ZL2 | 三体阵列 ZL3 | |
| 1 | P11 | (-4.5, 0, 0) | (-7.5, 0, 0) | (-1.5, 0, 0) | (-1.5, 0, 0) | |
| 2 | P12 | (1.5, 0, 0) | (1.5, 0, 0) | (1.5, 0, 0) | (1.5, 0, 0) | |
| 3 | P21 | | | (2, 0, 0) | (2, 0, 0) | 浮子 锚链 导缆孔 |
| 4 | P22 | | | (5, 0, 0) | (5, 0, 0) | |
| 5 | P31 | | | | (5.5, 0, 0) | |
| 6 | P32 | | | | (8.5, 0, 0) | |
| 7 | 111 | (-28, 50, -50) | (-31, 50, -50) | (-25, 50, -50) | (-25, 50, -50) | |
| 8 | 112 | (-28, -50, -50) | (-31, -50, -50) | (-25, -50, -50) | (-25, -50, -50) | |
| 9 | 113 | (25, 50, -50) | (25, 50, -50) | | | |
| 10 | 114 | (25, -50, -50) | (25, -50, -50) | | | 海底 锚点 |
| 11 | 213 | | | (28.5, 50, -50) | | |
| 12 | 214 | | | (28.5, -50, -50) | | |
| 13 | 313 | | | | (32, 50, -50) | |
| 14 | 314 | | | | (32, -50, -50) | |

表5 跷跷板装置发电性能

| 项目 | 标准单体 S1 | 二倍单体 S2 | 三倍单体 S3 | 双体阵列 ZL2 | 三体阵列 ZL3 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|--------------------|-------------------------------|
| 阻尼系数/(N·m·s·rad ⁻¹) | 400000 | 800000 | 1200000 | 400000 (单体) | 400000 (单体) |
| 单体功率/W | 3860.78 | 6996.31 | 10467.65 | 3878.46 3874.89 | 3965.71 3944.89 3915.79 |
| 单体 功率系数 | 1.00 | 1.81 | 2.71 | 1.0045 1.0036 | 1.027 1.021 1.014 |
| 等面积 功率系数 | 1 | 0.905 | 0.9033 | 1.0045 1.0036 | 1.027 1.021 1.014 |
| 单位面积功率/W | 160.86 | 145.75 | 145.38 | 161.52 | 164.25 |
| 捕获宽度比/% | 5.228 | 4.737 | 4.725 | 4.846 | 4.804 |

能流密度为^[24-26]

$$P_{\text{wave}} = \frac{\rho g^2 T H^2}{32\pi} \tanh(kd) \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \quad (3)$$

式中, k 为波数; P_{wave} 单位为 W/m。

捕获宽度 CW (capture width) 为

$$CW = \frac{P_{\text{WEC}}}{P_{\text{wave}}} \quad (4)$$

式中, 捕获宽度 CW 的单位为 m。

捕获宽度比 CWR (capture width ratio), 即波浪能装置发电效率定义为

$$CWR = \frac{CW}{L_{\text{WEC}}} \quad (5)$$

式中, L_{WEC} 为装置长度, 也就是跷跷板装置占据的波峰线宽度, 表 5 中 5 套装置的取值分别为 3、6、9、6.5、10 m。

计算表 5 中的捕获宽度比, 结果显示, 多体阵列的捕获宽度比略优于大面积单体, 提高约 0.1 个百分点。所有装置的单位面积捕获功率为 150 W 左右, 考虑传动系统与发电机的效率损失, 其功率也可达 100 W 以上, 具有显著的实用价值。

3 结论

跷跷板式波浪能装置结构简单, 运动行程大, 外力约束小, 便于组成阵列, 以及与浮式防波堤集成, 运行可靠性高, 有利于在大风浪恶劣海况下生存。跷跷板装置具有优良的发电性能, 可通过增大单体面积, 或者组成阵列的方式大幅度地提高发电能力。单体装置及阵列装置的单位面积发电性能优于大面积单体装置, 可解释为波浪水动力三维效应的作用。跷跷板装置可为海上浮式平台、离岸海岛、AUV 编队等提供电力, 具有良好的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 游亚戈, 盛松伟, 吴必军. 海洋波浪能发电技术现状与前景[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 北京: 中国海洋学会, 2011: 9-16.
- [2] 罗续业, 夏登文. 中国海洋能近海重点区资源特性与评估分析[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
- [3] 叶寅, 王坤林, 张亚群, 等. 波浪能装置蓄能稳压系统数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(8): 30-35.
- [4] 刘伟民, 刘蕾, 陈风云, 等. 中国海洋可再生能源技术进展[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 27-39.
- [5] Scruggs J, Jacob P. Harvesting ocean wave energy[J]. Science, 2009, 323(5918): 1176-1178.
- [6] Falco A. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 899-918.
- [7] Ruiz M T. Dynamics and hydrodynamics for floating wave energy converters[D]. Lisbon, Portugal: Instituto Superior Técnico, 2010.
- [8] Khaligh A, Onar O C. Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010: 223-303.
- [9] Macnicoll M T, Thiagarajan K P, Rohrer J. Modeling of the Efficiency of a Semisubmerged Ocean Wave Energy Converter[J]. Marine Technology Society Journal, 2013, 47(4): 177-186.
- [10] Williams A N, Abul-Azm A G. Dual pontoon floating breakwater[J]. Ocean Engineering, 1997, 24(5): 465-478.
- [11] 陈翔. 新型浮式防波堤的设计与性能分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.
- [12] 郭宇婵. 浮式防波堤耦合水动力分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.
- [13] 毛艳军, 马小舟. WEC-透空式防波堤集成装置能量转换效率研究[J]. 海岸工程, 2020, 39(1): 44-52.
- [14] He F, Huang Z. Hydrodynamic performance of pile-supported OWC-type structures as breakwaters: An experimental study[J]. Ocean Engineering, 2014, 88: 618-626.
- [15] Ning D, Zhao X, Goteman M, et al. Hydrodynamic performance of a pile-restrained WEC-type floating breakwater: An experimental study[J]. Renewable Energy, 2016, 95: 531-541.
- [16] 赵玄烈. 浮式防波堤—波浪能装置集成系统的水动力特性和能量输出特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [17] 刘崇期, 陈兵, 康海贵. 具有波浪能转换功能的浮式防波堤性能研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(7): 1117-1122.
- [18] 张恒铭, 周斌珍, 陈中飞, 等. 浮式防波堤兼作波浪能发电装置的防波特性和波能转换特性研究[C]//第二十九届全国水动力学研讨会论文集. 上海: 《水动力学研究与进展》编辑部, 2019: 1028-1033.
- [19] 孙红来. 浮式防波堤与波浪能发电一体化装置设计及

- 水动力性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- [20] 范亚宁, 彭伟, 郑金海. 多功能型波浪能装置研究进展[J]. 可再生能源, 2018, 36(4): 617-625.
- [21] 崔天宇, 赵江滨, 周建林, 等. 双浮筒式波浪能发电装置的浮体运动及水动力性能分析[J]. 舰船科学技术, 2018(10): 99-104.
- [22] 周建林, 赵江滨, 朱风绅, 等. 跷跷板式波浪能发电装置运动及载荷分析[J]. 中国修船, 2019, 32(2): 22-26.
- [23] Perrier R, Laborderie A. 海洋能源捕获与转换: 法国 2467999[P]. 1980-09-05.
- [24] 刘延俊, 王伟, 陈志, 王冬海, 等. 波浪能发电装置浮体形状参数对俘能性能影响[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(6): 1-8.
- [25] Van Der Jagt J. A methodology for assessing power performance of Wave Energy Converters, applied to a quasi-rigid submerged pressure differential device[D]. Delft: Delft University of Technology, 2018.
- [26] Neill S P, Hashemi M R. Fundamentals of ocean renewable energy: Generating electricity from the sea[M]. London: Academic Press, 2018: 107-140.

The performance of seesaw type wave energy converters array

ZHAO Jiangbin^{1,2}, FAN Mengyu¹, JIN Yong¹, ZHOU Jianhui³

1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China
2. Reliability and Renewable Energy Institute, National Engineering Research Center for Water Transport Safety (WTS), Wuhan 430063, China
3. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract The waves contain a enormous energy for exploitation and also involve great forces for destruction. A seesaw-type wave energy converter is proposed for exploitation of the huge energy, with a double-pontoon floater structure, and a vertical damping plate underwater. Waves drive the floater to produce a roll motion, and the relative rotation motion of the floater and the underwater damping plate is used to generate electricity. The structure is simple and reliable. The ANSYS-AQWA hydrodynamic analysis software is used to numerically calculate the power generation performances of the standard module, the large-area modules and the multi-body arrays. It is shown that with the linear wave of 6.28 s in period and 2 m in wave height, the seesaw device generates a power over one hundreds of watts per square meter, and could be adopted in many applications.

Keywords wave energy converter; power generation performance; ocean energy ●



(责任编辑 刘志远)