

# 基于风电场海域海况的波能浮子阵列发电功率优化

刘品<sup>✉</sup>, 韩荣贵, 任重进, 吕琳琳

( 明阳智慧能源集团股份有限公司, 广东 中山 528400 )

**摘要:** [目的] 为了响应国家集约用海, 发展清洁能源, 助力碳中和, 对海上风电-波浪能装置多能融合模式进行初步分析, 对波能浮子进行优化设计, 以获得更高的功率输出。[方法] 依据势流理论, 对漂浮式风机平台-波能浮子阵列进行仿真计算, 分析浮子的外形尺寸和固有周期对浮子的输出功率的影响。[结果] 仿真结果表明: 同一固有周期下, 波能浮子越扁平, 波能浮子阵列的总发电功率越大, 且浮子的经济性差异很小。对于海况下, 不同固有周期的波能浮子阵列经济性差异较大, 因此要综合分析考虑。[结论] 在已知海域海况条件下, 可以通过对波能浮子固有周期和外形尺度进行优化设计, 使波能浮子获得更高的功率输出, 提高单位海域能量产出。

**关键词:** 风浪耦合; 波能浮子; 势流理论; 固有频率; 最优发电功率

中图分类号: TK89; P743.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)01-0139-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Power Optimization of Wave Energy Converter (WEC) Array Based on Sea Conditions of a Wind Farm

LIU Pin<sup>✉</sup>, HAN Ronggui, REN Zhongjin, LÜ Linlin

( Mingyang Smart Energy Group Limited, Zhongshan 528400, Guangdong, China )

**Abstract:** [Introduction] In order to respond to the national initiative of intensive sea use, develop clean energy, and contribute to carbon neutralization, a preliminary analysis was conducted on the multi-energy integration mode of offshore wind power and wave energy devices, and the WEC was optimized to achieve higher power output. [Method] Based on potential flow theory, the floating fan platform - WEC array was simulated to analyze the influence of the dimension and the inherent period of the WEC on the output power of the WEC. [Result] The simulation results show that under the same inherent period, the flatter the WEC is, the greater the total power of the WEC array is, and the economic difference of the WEC is small. For sea conditions, the economic difference of WEC array under different inherent periods is great, so it should be considered comprehensively. [Conclusion] In the known sea conditions, the inherent period and the dimension of WECs can be optimized to achieve higher power output and increase energy output per unit sea area.

**Key words:** wind and wave coupling; WEC; potential flow theory; inherent period; optimal power

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

随着全球化石能源枯竭和温室效应的加剧, 开发和利用新型可再生能源迫在眉睫, 而海洋中蕴含丰富的可再生能源, 其中风能和波浪能以其能量储备多, 能量密度高, 分布广泛成为各国研究的重点。对于单一形式海洋能源开发存在效率低成本高的难

题, 而海洋多能互补发电技术有望解决这一难题。为了助力碳中和, 发展清洁可再生能源, 多能互补联合开发, 实现立体用海, 集约用海, 资源利用最大化, 将波能浮子 WEC (Wave Energy Converter) 阵列与海上浮式风机平台结合, 两者共享支撑平台、系泊系统和电缆传输系统降低成本支出, 联合开发海上风能

收稿日期: 2022-04-28 修回日期: 2022-09-05

基金项目: 广东省海洋经济创新发展区域示范专项项目“高性能 6.0 MW 海上风电海洋工程装备的研发及产业化”(2018YFB1501100)

和波浪能,提高能源利用率,节约用海空间<sup>[1-3]</sup>。

史玉涛等人<sup>[4]</sup>对阵列式波浪能发电原理、系统构成及工程应用实例进行了梳理分类,认为阵列式波浪能发电可以实现大规模发电、连续稳定电能输出。周斌珍等人<sup>[5]</sup>研究了风浪联合发电系统水动力学数值模拟方法,包括线性频域、线性时域、势流非线性方法,以及基于 Navier-Stokes 方程的黏性方法等,从计算效率上看,线性频域方法最优。胡缘等人<sup>[6]</sup>通过仿真实验显示,在相同海况条件下,漂浮平台对于浮子的振荡响应有一定的影响,从而影响装置整体的波浪能采集效率。顾煜炯等人<sup>[7]</sup>通过数值仿真和海况试验,表明进行合理优化布置的阵列浮子对多浮体波浪能发电装置系统的稳定高效功率输出有很大作用。王洪<sup>[8]</sup>提出了一种新型浮式风浪能混合利用系统概念设计。胡俭俭等人<sup>[9]</sup>设计了一种浮式风机平台与多波能装置耦合系统,并进行了频域研究,发现不同阵列布置下,浮子直径吃水比越大,能量俘获性能越好,同时浮子的加入,使平台纵摇力矩减小。

因此本文以波能浮子阵列-浮式风机平台集成系统为研究对象,考虑最优 PTO(能量俘获系统 Power Take Off)阻尼条件下,对波浪能装置进行水动力分析和俘获功率优化。探究在基于海上风电场实测波浪条件下波能浮子阵列发电功率优化,不同的波能装置外形尺寸和固有周期对波浪能装置输出功率的影响并考虑浮子的经济性。

## 1 波浪能装置-浮式风机平台集成几何模型

### 1.1 浮式风机平台和波浪能装置几何参数

本文选择水线面面积小、稳定性好、作业水深范围广、能够很好地适应我国的海域特点的 OC4-deepC 半潜平台与波能浮子结合<sup>[10-11]</sup>,如图 1 所示。

波浪能装置选择典型的圆柱形的点吸式作为研究对象。点吸式波浪能装置具有转换效率高、建造成本低、输出电能稳定、易于平台结合的优点<sup>[12-14]</sup>。

因此本文以波浪能浮子阵列-漂浮式风机平台集成系统(如图 2 所示)为研究对象,通过水动力计算软件 SESAM-HydroD 建立频域分析模型,得到水动力系数附加质量、辐射阻尼、波浪激振力等,利用 Python 二次开发,考虑最优 PTO 阻尼条件下,求解多体耦合运动方程,探究在目标海域波浪情况下,波

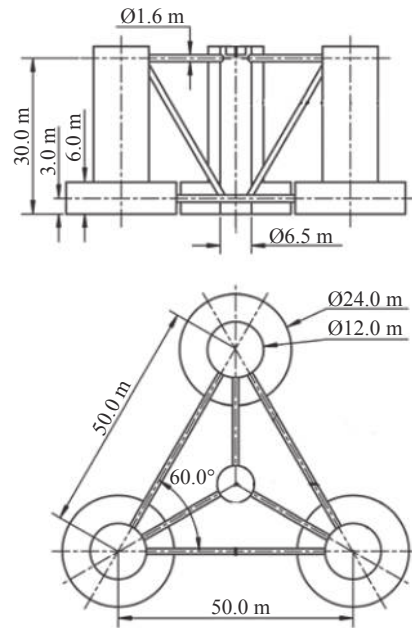


图 1 OC4-deepC 平台参数

Fig. 1 OC4-deepC platform parameter

能浮子外形尺寸和共振周期对集成系统发电功率的影响。目前仅考虑平台与波能浮子阵列间的耦合作用,尚未考虑风机的影响。

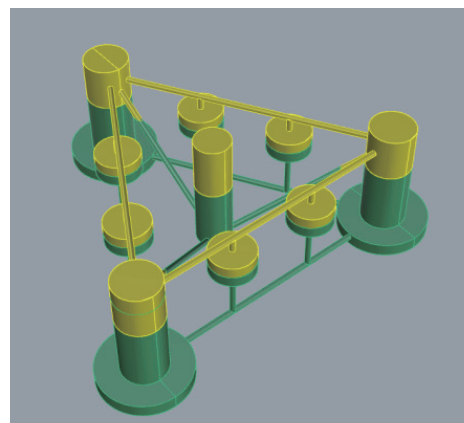


图 2 波能浮子阵列-漂浮式平台集成系统

Fig. 2 Integrated system of WEC array - floating platform

### 1.2 目标海域波浪情况数据

本文选择广东省某风电场海域为波能阵列-浮式平台集成系统布设目标海域,对该海域观测到的波浪数据进行整理和统计分析,该风电场海域的波浪分布情况如表 1 所示,由表 1 可知,该海域波浪主要波高 1.0~3.0 m,主要波浪周期集中在 3.0~7.0 s,占整个波浪周期的 99% 以上,平均波浪周期  $T=4.69$  s。

表 1 广东某风电场海域波高  $H_j$  与波周期  $T_j$  联合概率分布  $S_j$   
 Tab. 1 Joint probability distribution  $S_j$  of wave height  $H_j$  and wave period  $T_j$  in a wind farm in Guangdong

H/m	T/s													Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
12.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
11.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
10.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
9.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002
9.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.000	0.006
8.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.003
8.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000	0.005
7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.007
7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.006	0.007	0.002	0.000	0.000	0.018
6.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.013	0.003	0.000	0.000	0.000	0.024
6.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.012	0.019	0.002	0.001	0.000	0.000	0.035
5.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.023	0.014	0.003	0.001	0.000	0.000	0.048
5.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.010	0.050	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.072
4.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.050	0.053	0.020	0.003	0.001	0.000	0.000	0.133
4.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.131	0.032	0.013	0.003	0.001	0.001	0.000	0.198
3.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.112	0.191	0.026	0.010	0.004	0.001	0.002	0.001	0.350
3.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.610	0.158	0.028	0.011	0.005	0.002	0.003	0.002	0.840
2.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.937	2.571	0.186	0.040	0.013	0.013	0.007	0.003	0.000	3.770
2.0	0.000	0.000	0.000	0.081	11.280	3.651	0.266	0.095	0.049	0.027	0.006	0.000	0.000	15.460
1.5	0.000	0.000	0.000	13.400	22.790	2.190	0.535	0.135	0.020	0.001	0.000	0.000	0.000	39.080
1.0	0.000	0.000	2.023	30.060	5.503	1.567	0.228	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	39.380
0.5	0.000	0.000	0.158	0.250	0.140	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.570
Total	0.000	0.000	2.181	43.790	40.690	10.750	1.763	0.510	0.206	0.081	0.025	0.008	0.004	100.000

## 2 数值分析模型

### 2.1 基础理论和计算方法

由于 OC4-DeepC 平台固有周期远离风电场海域的谱峰周期, 其垂荡运动相对于波能浮子来说很小, 因此本文考虑将平台固定, 波能浮子仅沿支撑杆件做垂荡运动。基于以上假设, 建立波能浮子阵列中第  $i$  个浮子的运动方程:

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

采用专业软件 HydroD 计算式 (1) 中的水动力系数  $a_{ii}$ 、 $b_{ii}$ 、 $a_{ij}$ 、 $b_{ij}$  及  $F_{ex,i}$ 。

式中:

$a_{ii}$ 、 $b_{ii}$  ——第  $i$  个浮子的垂荡运动产生的附加质

量、辐射阻尼;

$a_{ij}$ 、 $b_{ij}$  ——第  $j$  个浮子的运动对第  $i$  个浮子产生的附加质量、辐射阻尼;

$m_i$ 、 $C_i$ 、 $F_{ex,i}$  ——第  $i$  个浮子的质量、恢复力和波浪激振力;

$\omega$ 、 $z_i$ 、 $z_j$  ——频率、第  $i$ 、 $j$  个浮子的垂荡运动幅值。

采用单个波能装置的线性最优阻尼  $B_{opt}$ :

$$B_{opt,i} = \sqrt{\frac{((m_i + a_{ii})\omega^2 - C_i)^2}{\omega^2} + b_{ii}^2} \quad (2)$$

第  $i$  个浮子在最优 PTO 阻尼下的俘获功率  $P_i(\omega)$  为:

$$P_i(\omega) = \frac{1}{2} \omega^2 B_{opt,i} |z_i|^2 \quad (3)$$

联合 (1)~(3), 求解得到波能阵列的第  $i$  个浮子的

垂荡运动响应  $z_i$  和俘获功率  $P_i$ 。

波能阵列的发电功率  $P_{total}(T)$  为:

$$P_{total}(T) = \sum_{i=1}^N P_i(T) \quad (4)$$

为了更简单衡量波能浮子的经济性,引入公式

(5) 波能阵列的功率体积比  $P_{av}(T)$ :

$$P_{av}(T) = \frac{P_{total}(T)}{\rho V_{total}} \quad (5)$$

式中:

$N$  ——浮子个数(个);

$V_{total}$  —— $N$ 个浮子总体积( $m^3$ ),  $P_{av}$  越小,则代表经济性更好,这里假定单位体积的波能装置的成本是一致的。

### 2.2 模型验证

定义相互作用因子  $q_{mean}$ , 用于衡量相互作用对波浪能浮子 WEC(Wave Energy Converter)阵列中功率吸收的影响。其定义为耦合波浪能浮子阵列 WEC 总功率与单个单独放置波浪能浮子 WEC 的功率的  $N$  倍的比值:

$$q_{mean}(T) = \frac{P_{total}(T)}{N \times P_{isolated}(T)} \quad (6)$$

式中:

$P_{isolated}(T)$  ——单个单独放置波浪能浮子 WEC 的最优发电功率(kW)。

通过模拟文献中 Bellew 的  $5 \times 1$  半球形 WEC 阵列来验证 HydroD 频域模型<sup>[13]</sup>, 如图 3 所示。图 3 为最优 PTO 阻尼下  $5 \times 1$  半球形 WEC 阵列的相互作用因子  $q_{mean}$  的对比图, 可以看出, 通过 HydroD 建立的频域分析模型数值结果与已发表文献结果吻合良好, 验证了模型的正确性。

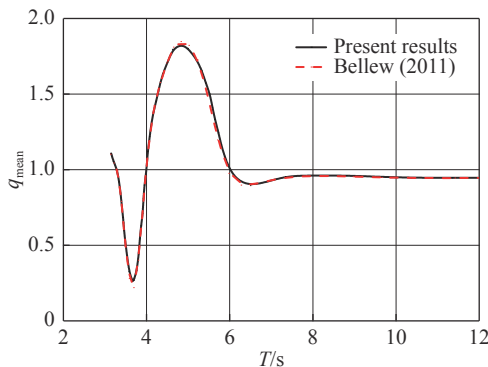


图 3 相互作用因子  $q_{mean}$  的对比图

Fig. 3 Comparison diagram of interaction factor  $q_{mean}$

### 2.3 波能阵列装置尺寸优化设计

HU 等人<sup>[15]</sup> 采用无量纲原则推导出无量纲固有频率与固有频率的关系式, 指定固有频率  $\omega_p$  可得到随直径吃水比  $2r/d$  变化的圆柱形浮子的吃水  $d$ ; 即可以根据已知海况计算指定固有频率下, 不同直径吃水比  $2r/d$  的圆柱形波浪能浮子 WEC 的吃水深度  $d$ 。

$$d = g \left( \frac{\bar{\omega}_n \left( \frac{2r}{d} \right)}{\omega_p} \right)^2 \quad (7)$$

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (8)$$

基于目标海域的波浪特征, 波浪周期主要集中在 3.0~7.0 s, 其中 4.0~5.0 s 波浪周期占比 80% 以上, 因此假定目标海域的平均波浪  $T=4.69$  s 为波能浮子固有周期  $T_p$ , 根据无量纲原则, 计算得到一系列  $2r/d$  对应的浮子吃水  $d$  和半径  $r$ 。

设计浮子间圆心距  $L_1=4r$ , 波浪能浮子 WEC 与平台浮筒间间距  $L_2 \geq R+3r$ , 选择最多可布置波浪能浮子数  $N=6$  的浮子进行水动力分析, 探究不同直径吃水比的波浪能浮子 WEC 的发电性能和经济性, 波浪能浮子 WEC 具体参数见表 2, 布置方式如图 4 所示。

表 2 波能浮子几何参数

Tab. 2 Geometric parameters of WEC

$2r/d$	$r$	$d$	$L_1$	$L_2$
1.6	2.80	3.50	11.20	19.40
1.8	3.05	3.39	12.20	18.90
2.0	3.29	3.29	13.14	18.43
2.2	3.51	3.19	14.04	17.98

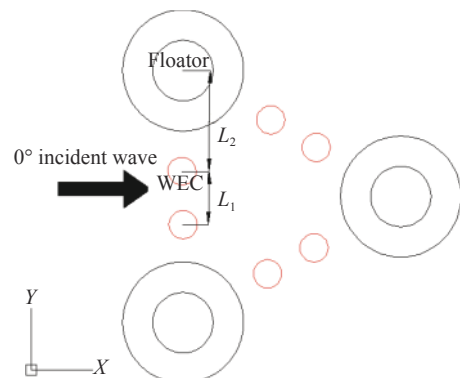


图 4 波能浮子 (WEC) 布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of WEC arrangement

### 2.4 规则波下波能浮子发电功率分析

在水动力分析软件 HydroD 建立平台和浮子的耦合模型, 进行频域分析得到平台-浮子的水动力系数, 同时考虑单个浮子公式最优  $B_{opt}$ , 求解运动方程 (1), 得到各个浮子的垂向响应  $Z$ , 带入公式 (3)(4) 得到各个浮子的发电功率  $P_i$  和浮子的总发电功率  $P_{total}$ 。

图 5 反映了不同  $2r/d$  下波能浮子阵列总发电功率  $P_{total}$  随波浪周期变化关系。由图可知, 同一  $2r/d$  的波能浮子阵列的总发电功率  $P_{total}$  随着波浪周期的增加而先增加后减小。同时, 随着浮子  $2r/d$  的增加浮子的总发电功率  $P_{total}$  峰值是逐渐增加, 频带宽度也略有增加。

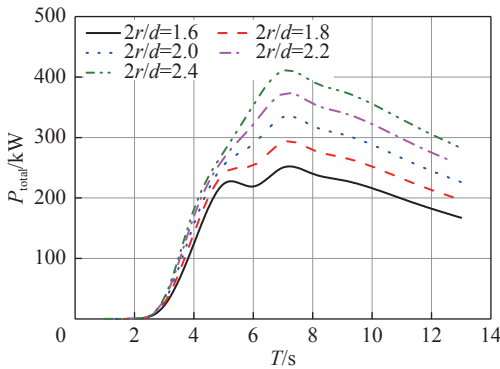


图 5 总发电功率  $P_{total}$  随周期变化关系

Fig. 5 Change of total power  $P_{total}$  over wave period

图 6 反映了不同  $2r/d$  下波能浮子阵列的功率体积比  $P_{av}$  随周期的变化关系。由图可知, 在 2~4 s 范围内, 浮子的功率体积比基本一致, 在 4~6 s 范围内, 浮子的功率体积比随着  $2r/d$  的增大而减小, 6 s 之后则随着浮子的  $2r/d$  的增大而增大, 因此说明在不同的周期范围内浮子的功率体积比变化趋势是不同的。

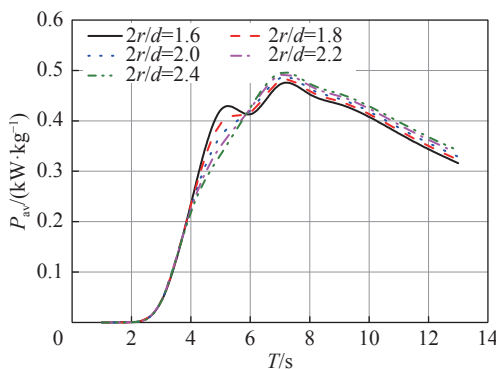


图 6 总发电功率体积比  $P_{av}$  随周期变化关系

Fig. 6 Change of total power-to-volume ratio  $P_{av}$  over wave period

因此在对不同的海域下, 浮子的外形尺寸优化时, 需要综合考虑浮子的发电性能和经济性。

### 2.5 海况下波能浮子发电功率分析

计算目标海况下的年总发电功率, 引入年总波浪功率  $P_{total(year)}$  和年单位体积比  $P_{av(year)}$  用来评估风电场海域内波能浮子的能量捕获性能:

$$P_{total(year)} = \sum_{j=1}^M \left( \frac{H_j}{2} \right)^2 \times P_{total}(T_j) \times S_j \quad (9)$$

$$P_{av(year)} = \frac{P_{total(year)}}{\rho V_{total}} \quad (10)$$

式中:

$S_j$  ——不同周期、波高情况下的联合概率分布;

$H_j$  ——波高分布 (m);

$T_j$  ——周期分布 (s);

$\rho$  ——海水密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), 取  $1025 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

图 7 反映了风电场海域海况下波能浮子阵列年总发电功率  $P_{total(year)}$  和年单位体积比  $P_{av(year)}$  随  $2r/d$  变化关系。由图可知, 风电场海域海况下波能阵列年总发电功率  $P_{total(year)}$  随着  $2r/d$  增大而逐渐增加, 而年单位体积比  $P_{av(year)}$  变化较小, 说明在不同  $2r/d$  的波能阵列之间造价的差异非常小。说明考虑到波能浮子阵列-平台系统的发电性能和经济效益, 应选用  $2r/d$  更大的 WEC 与平台相结合。

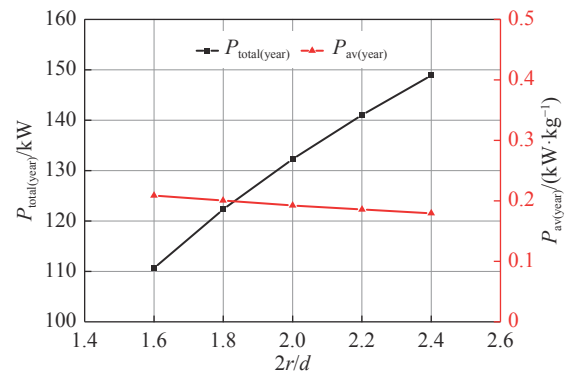


图 7 海况下波能浮子阵列总发电功率 (功率体积比)

Fig. 7 Total power (power-to-volume ratio) of WEC array in sea conditions

### 2.6 海况下对波能浮子阵列固有周期分析

因为波能浮子主要在固有周期附近工作, 对波能浮子阵列的总发电功率有很大影响, 因此考虑改变波能阵列的固有周期  $T_p$ , 探索适合风电场海域的

波能浮子固有周期。通过公式 (4) 分别计算共振周期  $T_p=3.50\text{ s}$ ,  $4.00\text{ s}$ ,  $4.50\text{ s}$  和  $4.69\text{ s}$  的浮子半径  $r$ , 吃水  $d$ , 并按布置原则布置。通过前面的验证发现直径吃水比  $2r/d$  越大波能阵列的发电功率越高, 因此选择浮子数  $N=6$  的阵列中波能浮子  $2r/d$  较大的 4 组进

行研究。探究不同固有周期  $T_p$  的波能阵列在风电场海域海况的年总发电功率  $P_{\text{total}(\text{year})}$  和年单位体积比  $P_{\text{av}(\text{year})}$ 。表 3 列出来不同共振周期  $T_p$  下, 波能浮子阵列相关性能参数。 $2r/d$  越大, 则说明浮子越扁平。

表 3 海况下波能浮子阵列性能参数

Tab. 3 Performance parameters of WEC array in sea conditions

$T_p/\text{s}$	$2r/d$	$r/\text{m}$	$d/\text{m}$	$P_{\text{total}(\text{year})}/\text{kW}$	$P_{\text{av}(\text{year})}/[\text{W}\cdot(\text{kg})^{-1}]$
3.5	4.0	3.09	1.54	145.9	51%
	4.5	3.30	1.47	157.8	51%
	5.0	3.50	1.40	168.3	51%
	5.5	3.67	1.34	176.7	51%
4.0	3.2	3.54	2.21	216.3	40%
	3.4	3.67	2.16	221.6	39%
	3.5	3.73	2.13	223.8	39%
	3.6	3.80	2.11	226.3	38%
4.5	1.8	3.05	3.39	122.3	20%
	2.0	3.29	3.29	132.3	19%
	2.2	3.51	3.19	141.1	19%
	2.4	3.72	3.10	148.9	18%
4.7	1.4	2.75	3.94	108.3	19%
	1.6	3.04	3.80	112.6	17%
	1.8	3.31	3.68	127.6	16%
	2.0	3.57	3.57	131.7	15%

由表可知, 同一固有周期下, 波能浮子阵列的年总发电功率  $P_{\text{total}(\text{year})}$  随着  $2r/d$  的增大而增大, 但年单位体积比  $P_{\text{av}(\text{year})}$  变化较小。对比不同固有周期下, 固有周期  $T_p$  越小, 浮子的  $2r/d$  越大, 浮子越扁平, 相对的浮子的功率体积比也越大, 即浮子的经济性越好。而波能浮子阵列的功率输出则是随着固有周期  $T_p$  的增大, 先增大后减小, 即在  $T_p=4.0\text{ s}$  时的年总发电功率  $P_{\text{total}(\text{year})}$  明显大于其他固有周期。综合考虑波能浮子的发电功率和经济性,  $T_p=4.0\text{ s}$  时总发电功率  $P_{\text{total}(\text{year})}$  最大达 226 kW, 明显大于其他固有周期, 同时相比于  $T_p=3.5\text{ s}$  时,  $P_{\text{total}(\text{year})}$  增加了约 30%, 而  $P_{\text{av}(\text{year})}$  减小了约 10%, 故收益增加大于成本增加。综上, 该风电场海域海况下  $T_p=4.0\text{ s}$  时波能阵列固有周期最优。

### 3 结论

通过对波能浮子阵列的浮子外形尺寸的优化和

固有周期的分析对比, 得出以下结论:

1) 同一固有周期下, 波能浮子越扁平, 发电功率越大, 且功率体积比变化很小。这说明在某一确定的固有周期下, 选择越扁平的波能浮子, 波能阵列的功率输出越大, 且经济性相近。

2) 对于某一固定的海况, 可以通过对波能浮子的固有周期进行优化, 来获得更大的功率输出。但浮子的经济性会随着固有周期  $T_p$  的增大而降低, 因此在考虑波能浮子与海上风电融合项目时, 应综合考虑功率输出和经济性两方面, 并根据对应海域海况对波能浮子应进行定制化设计。

3) 本文中将波能浮子阵列与海上浮式风机平台结合, 波能浮子阵列仅相对于平台做垂向运动的单自由度下的能量输出。通过对波能浮子阵列外形尺寸和固有周期进行优化分析, 探索在某一固定海况下的波能浮子阵列最优的功率输出, 同时考虑了波能浮子阵列的经济性。希望对波浪能与海上风机的

融合发展提供一些新想法。

#### 参考文献:

- [1] 王世明, 李泽宇, 于涛, 等. 多能互补海洋能集成发电技术研究综述 [J]. *海洋通报*, 2019, 38(3): 241-249. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2019.03.001.  
WANG S M, LI Z Y, YU T, et al. A review of research on multi-energy complementary ocean energy integrated power generation technology [J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(3): 241-249. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2019.03.001.
- [2] 薛彩霞. 海洋能多能互补独立发电系统控制技术研究 [D]. 天津: 国家海洋技术中心, 2014.  
XUE C X. Research on control technology of multi-energy hybrid isolated power system based on ocean energy [D]. Tianjin: National Ocean Technology Center, 2014.
- [3] 张毅强. 适合与风力发电结合的波浪能及海流能共同发电型式探讨 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(2): 60-64.  
ZHANG Y Q. Research on common generation type of wave energy and ocean current energy in conjunction with wind power generation [J]. *Southern Energy Construction*, 2018, 5(2): 60-64.
- [4] 史玉涛, 刘艳娇, 赵凌志. 阵列浮子式波浪能发电技术研究概述 [J]. *能源与环境*, 2021(2): 12-14. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2021.02.005.  
SHI Y T, LIU Y J, ZHAO L Z. Overview of array floater wave power generation technology [J]. *Energy and Environment*, 2021(2): 12-14. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2021.02.005.
- [5] 周斌珍, 胡俭俭, 谢彬, 等. 风浪联合发电系统水动力学研究进展 [J]. *力学学报*, 2019, 51(6): 1641-1649. DOI: 10.6052/0459-1879-19-202.  
ZHOU B Z, HU J J, XIE B, et al. Research progress in hydrodynamics of wind-wave combined power generation system [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(6): 1641-1649. DOI: 10.6052/0459-1879-19-202.
- [6] 胡缘, 杨绍辉, 何宏舟, 等. 半潜式多浮体波浪能发电装置的水动力性能分析 [J]. *水力发电学报*, 2019, 38(9): 91-101. DOI: 10.11660/slfjdx.20190910.  
HU Y, YANG S H, HE H Z, et al. Hydrodynamic performance analysis of semi-submersible multi-body wave power plant [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(9): 91-101. DOI: 10.11660/slfjdx.20190910.
- [7] 顾煜炯, 谢典, 耿直. 阵列浮子式波浪能发电装置的水动力性能分析 [J]. *水力发电学报*, 2016, 35(8): 114-120.  
GU Y J, XIE D, GENG Z. Hydrodynamic analysis of wave power generation devices of array buoy type [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(8): 114-120.
- [8] 王淇. 一种新型浮式风浪能混合利用系统概念设计与性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.  
WANG Q. The concept design and performance analysis of a new type floating hybrid wind-wave system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [9] 胡俭俭, 周斌珍, 刘品, 等. 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 [C]//吴有生, 邵雪明, 王军. 第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集(下册). 北京: 海洋出版社, 2019: 1012-1017.  
HU J J, ZHOU B Z, LIU P, et al. Optimal design and performance analysis of a hybrid system of floating wind platform and multiple wave energy converters [C]//WU Y S, SHAO X M, WANG J. Proceedings of the 30th National Conference on Hydrodynamics & 15th National Congress on Hydrodynamics. Beijing: Ocean Press, 2019: 1012-1017.
- [10] ROBERTSON A, JONKMAN J, MASCIOLA M, et al. Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4 [R]. Golden: NREL, 2014.
- [11] 张亮, 邓慧静. 浮式风机半潜平台稳性数值分析 [J]. *应用科技*, 2011, 38(10): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1009-671X.2011.10.004.  
ZHANG L, DENG H J. Numerical analysis on stability of the semi-submersible platform of floating wind turbines [J]. *Applied Science and Technology*, 2011, 38(10): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1009-671X.2011.10.004.
- [12] ZHOU B Z, HU J J, SUN K, et al. Motion response and energy conversion performance of a heaving point absorber wave energy converter [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2020, 8: 553295. DOI: 10.3389/fenrg.2020.553295.
- [13] 张恒铭. 波能装置与浮式防波堤集成系统的水动力特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2019.000141.  
ZHANG H M. Study on hydrodynamic characteristics of integrated system of wave energy converter and floating breakwater [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2019.000141.
- [14] ZHANG H M, ZHOU B Z, VOGEL C, et al. Hydrodynamic performance of a dual-floater hybrid system combining a floating breakwater and an oscillating-buoy type wave energy converter [J]. *Applied Energy*, 2020, 257: 114212. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114212.
- [15] HU J J, ZHOU B Z, VOGEL C, et al. Optimal design and performance analysis of a hybrid system combining a floating wind platform and wave energy converters [J]. *Applied Energy*, 2020, 269: 114998. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114998.

#### 作者简介:



刘品

刘品 (第一作者, 通信作者)

1990-, 女, 河南商丘人, 工程师, 哈尔滨工程大学水利工程专业硕士, 主要从事波浪能开发利用技术研究工作(e-mail)liupin@mywind.com.cn。

#### 韩荣贵

1982-, 男, 辽宁鞍山人, 高级工程师, 哈尔滨工程大学船舶与海洋工程专业硕士, 主要从事船舶与海洋平台水动力分析方向研究工作(e-mail)hanronggui@mywind.com.cn。

#### 任重进

1989-, 男, 山东菏泽人, 工程师, 哈尔滨工程大学船舶与海洋结构物设计制造专业硕士, 主要从事海上浮式结构物总体设计方向研究工作(e-mail)renzhongjin@mywind.com.cn。

#### 吕琳琳

1989-, 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 工程师, 哈尔滨工程大学船舶与海洋工程专业硕士, 主要从事海工结构物总体设计技术方向研究工作(e-mail)lvlinlin@mywind.com.cn。

(编辑 李辉)