

引用格式: 王广大, 毛筱菲. 水上机场助航波能灯浮标的波能俘获优化[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(6): 15-21.

WANG G D, MAO X F. Optimization of wave energy capture of wave-powered navigational lighting buoys of seadromes [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(6): 15-21.

水上机场助航波能灯浮标的波能俘获优化

王广大¹, 毛筱菲^{1,2}

1 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063

2 高性能舰船技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430063

摘要: [目的] 为了对水上机场波能灯浮标进行设计优化, 以工作于沿海水上机场的阵列式助航波能灯浮标为研究对象, 提出一种小型阵列式浮标的优化设计方法。[方法] 基于三维势流理论, 计算浮标的垂荡运动响应, 在满足最佳能量转换部分(PTO)阻尼匹配的情况下, 得到使能量俘获宽度比最大的浮标直径吃水比和浮标间距, 然后对单个浮标的能量俘获进行短期预报, 并在此基础上结合实际海况对阵列式浮标的能量俘获进行长期预报, 分别讨论浮标直径、吃水和浮标间距对阵列式浮标能量俘获的影响。[结果] 结果表明, 当单个浮标直径吃水比为2.4~2.6时, 能量俘获宽度比最大; 阵列浮标间距越小, 阵列式助航波能灯浮标的能量俘获宽度比越大。[结论] 所做的工作可为阵列式波浪能发电装置的设计优化提供一定的参考和建议。

关键词: 阵列式浮标; PTO阻尼; 能量俘获宽度比; 水上机场

中图分类号: P743.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2017.06.003

Optimization of wave energy capture of wave-powered navigational lighting buoys of seadromes

WANG Guangda¹, MAO Xiaofei^{1,2}

1 School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 Key Laboratory of High Performance Ship Technology of Ministry of Education, Wuhan 430063, China

Abstract: [Objectives] This paper proposes an optimized design for wave-power navigational lighting buoys of seadromes. [Methods] Based on the theory of three-dimensional potential flow, the buoyant motion response of a buoy is calculated. A type of array of wave-power navigational lighting buoys located in an offshore seadrome is proposed, and a procedure for the design optimization of its component buoys is presented. Matching the best Power Take-Off (PTO) damping, the diameter to draft ratio and array distance with the best energy capture width ratio are acquired, and the energy capture for the short-term forecast of the buoy array is accomplished. On this basis, combined with the actual sea conditions, energy capture for the long-term forecast of an individual buoy is accomplished. The influence of the buoy diameter, buoy draft and array distance on the energy capture width ratio is discussed. [Results] The results show that the energy capture width ratio is at its greatest when the diameter to draft ratio is between 2.4-2.6; the smaller the distance between array buoys, the greater the energy capture width of each buoy. [Conclusions] The results can provide a reference and suggestions for the optimization of the design of wave energy generation for arrays buoy.

Key words: array buoy; PTO damping; energy capture width ratio; seadrome

收稿日期: 2017-05-11

网络出版时间: 2017-11-28 11:12

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2014BAC01B02)

作者简介: 王广大, 男, 1992年生, 硕士生。研究方向: 船舶与海洋工程水动力性能。

E-mail: 1014119127@qq.com

毛筱菲(通信作者), 女, 1962年生, 教授。



0 引言

水上机场建设对于通用航空的发展有着较为重要的意义。在沿海港湾水上机场建设过程中,往往布置有一些具有指示功能的助航灯浮标,通常分布于港湾航道和机场跑道的两侧,并且浮标之间设有一定的间距,形成阵列式浮标,这类浮标往往尺度不会太大。处于海域中的灯浮标需要从海岸架设线路来输送电力,如果将其设计成振荡浮子式波浪能转换装置,则可以实现灯浮标的自发电功能以供其自身的电力需求,这对水上机场的建设,尤其是偏僻海域灯浮标的电力输送来说具有重要意义。

振荡浮子式波浪能转换装置是采用一个放在水域中的浮子来作为波浪能的吸收载体,然后将浮子吸收的能量通过能量转换部分(Power Take-Off, PTO)转换为电能的能源设备^[1]。振荡浮子式波浪能装置具有建造难度小、效率较高等优点,适合大规模发电布置,其中阵列式布置是对振荡浮子式波浪能装置的一种有效应用。但因大规模带来的安装问题和发电稳定性等问题,导致目前阵列式波浪能发电装置的应用并不多,但阵列式浮标仍然是振荡浮子式波浪能装置的研究趋势。与单个浮子相比,阵列式布置由于浮子之间存在相互干扰,所以在进行数值模拟分析时往往需要考虑浮子间距对整体能量俘获的影响。

国内外已有很多关于阵列式波浪能发电装置的研究。Ringwood等^[2]针对振荡浮子式波浪能装置的整个系统,用WAMIT进行装置计算分析,包括浮子外形和PTO的配置在内,均进行了方案优化,并讨论了浮子布置方式对波浪能俘获的影响。何光宇等^[3]针对一种阵列式波浪能发电装置进行水动力分析,讨论了尺度和浪向对阵列式波浪能发电装置发电稳定性的影响。勾艳芬等^[4]对简易阵列式波浪能发电装置进行了试验研究,证明该装置在没有二次转换的情况下仍能保证发电稳定性并提高能量转换效率。顾煜炯等^[5]针对一种阵列式波浪能发电装置的水动力性能进行研究并开展了海上试验,为进一步优化装置提供了基础。可以看到,现有的振荡浮子式波浪能发电装置多数是针对较深海域波浪能的俘获和利用,有着大型化的发展趋势且通常仅用于波能发电,而对于浅海海域,振荡浮子式波浪能装置往往应用较少,且由于浅水海域的风浪特性,装置要求小型化的设计。目前有关小型化阵列式波浪能发电装置的优化研究工作较少,本文将首次以工作于浅海海域

的水上机场助航阵列浮标为研究对象,对灯浮标的波浪能俘获进行优化。将浮标阵列简化成原型为振荡浮子式波浪能装置进行波浪能俘获研究。浮标通过垂荡运动俘获波浪能,经能量转换装置转化为电能以供其自身发电。基于工程设计要求,提出一种能量俘获的优化方法,以能量俘获宽度比为俘获能力的指标,分析浮标外形和浮标间距对阵列式助航波浪能灯浮标俘获波浪能的影响,并对能量俘获宽度比进行长期预报,以实现阵列式助航波浪能灯浮标的能量俘获最大化,为此类阵列式波浪能灯浮标的进一步优化和设计以及水上机场的建设研究提供一定的参考。

1 装置介绍

图1所示为水上机场阵列浮标分布示意图。根据水上机场建设要求,要求最小浮标间距为10 m,以作为灯浮标实际作业时不发生碰撞的安全距离。水上机场所处海域水深为5.5 m,并且波浪条件较为缓和;浮标为小型灯浮标,单个浮标的结构示意图如图2所示^[6]。浮标的基本外形可视为圆柱形,通过连杆与能量转换装置相连并系泊于海底,采用直接驱动式发电机作为装置的能量转换部分,浮标在波浪中产生垂向运动,经连杆带动发电机发电,产生的电能供自身浮标信号灯发光。

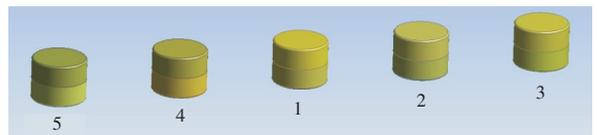


图1 阵列浮标分布示意图

Fig.1 Arrangement of array-buoy

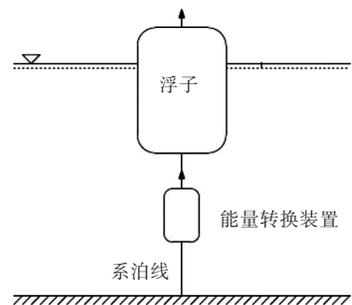


图2 单个装置结构示意图

Fig.2 Schematic of single wave energy converter

2 浮标运动方程

本文主要讨论浮标垂向运动对波浪能的俘获。浮标在波浪中的运动基于三维势流理论求解,浮标的垂向运动方程为

$$(M + M_a)\ddot{Z} + N\dot{Z} + CZ = F_w \quad (1)$$

式中: Z 为垂向位移; M 为浮体质量; M_a 为附加质量; N 为阻尼系数; C 为静水恢复力项系数; F_w 为波浪激励力。

由于能量转换部分的存在对浮标产生了作用力 F_{PTO} , 由文献[7-8]可知, 当直接驱动式发电机作为波能装置的能量转换部分项时, 仅PTO阻尼力对波浪能的转换有贡献, 可以作为线性阻尼项处理, 则能量转换系统作用于浮标的阻尼力为

$$F_{PTO}(\omega) = -b_1 \dot{Z}(\omega) \quad (2)$$

式中: b_1 为PTO阻尼系数; ω 为频率。

频域内的垂荡运动方程为

$$[-\omega^2(M + M_a(\omega)) + i\omega(b_1 + N_1(\omega)) + \rho g A_w]Z(\omega) = F_w(\omega) \quad (3)$$

式中: N_1 为垂荡阻尼系数; ρ 为海水密度; g 为重力加速度; A_w 为浮标水线面面积。令 $H(\omega)$ 为浮标垂荡运动频率响应函数, 则有

$$H(\omega) = \frac{F_w(\omega)/A}{-\omega^2(M + a_m(\omega)) + i\omega(b_1 + R(\omega)) + \rho g A_w} \quad (4)$$

式中: A 为入射波波幅; a_m 为垂荡附加质量; R 为垂荡固有阻尼系数。垂荡运动频率响应函数可由三维势流理论计算软件AQWA进行数值求解。

3 能量俘获

3.1 能量俘获宽度比

在研究阵列式波浪能发电装置的能量俘获能力时, 引入了能量俘获宽度比作为衡量波能装置俘获波浪能的指标, 以对工作海域的阵列式波浪能发电装置能量俘获进行长期预报。能量俘获宽度比(CWR)是描述波能装置能量俘获效率的重要参数, 为浮标对能量的俘获功率与浮标宽度内波浪输入功率之比^[9]:

$$CWR = \frac{P}{DQ} \quad (5)$$

式中: P 为波浪中装置的能量俘获功率; Q 为浮标宽度内波浪输入的功率; D 为浮标宽度, 即浮标的直径。波浪输入功率 Q 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, 波浪能量输运为^[9]

$$Q = \rho g \int_0^{\infty} v_g(\omega, h) S(\omega) d\omega = \rho g \sum_{i=1}^N v_g(\omega_i, h) S(\omega) \Delta\omega_i \quad (6)$$

式中: v_g 为波群速度; $S(\omega)$ 为海浪谱密度; ω_i 为离散求解时第 i 个频率; h 为水深。

$$v_g(\omega, h) = \frac{g}{2\omega} \tanh(kh) \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (7)$$

式中, k 为波数。装置的能量俘获功率 P_i 为^[8]

$$P_i = \frac{1}{2} b_1 |\dot{Z}_i|^2 \quad (8)$$

式中, $|\dot{Z}_i|$ 为浮标在第 i 个频率波浪中时垂荡运动的速度幅值, 通过求解运动方程得到。能量转换系统阻尼系数 b_1 为常数, 与外界波浪频率无关。浮标的总俘获功率表达式如下:

$$P = \sum_{i=1}^m P_i = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} b_1 |\dot{Z}_i|^2 \quad (9)$$

式中, m 为波浪频率总数。

3.2 最佳PTO阻尼系数

不同的PTO阻尼对应于浮标的俘获功率也不同。由式(5)可以看出, 俘获功率与PTO阻尼系数 b_1 成线性关系, 与垂荡运动速度呈平方关系, 在求取最佳PTO阻尼系数时, 可通过设置一系列的PTO阻尼系数值 b_1 , 分别代入浮标运动方程求解得到垂荡运动速度, 代入式(5)得到每个阻尼系数 b_1 下的能量俘获功率。对于确定尺度下的浮标, 最佳PTO阻尼系数往往是一个确定值^[8]。图3给出了浮标直径 $D=2.8$ m, 吃水 $d=1.5$ m时能量俘获功率随PTO阻尼系数变化的曲线, 其中曲线峰值对应的横坐标即为最佳PTO阻尼系数, 峰值对应的纵坐标则为在最佳PTO阻尼下可俘获的最大功率。

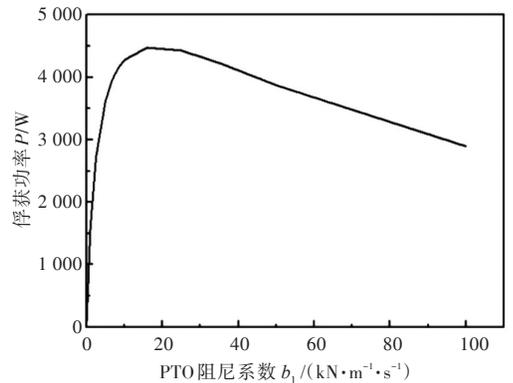


图3 浮标俘获功率随PTO阻尼系数 b_1 变化的曲线 ($D=2.8$ m, $d=1.5$ m)

Fig.3 Variation of power capture with respect to PTO damping coefficient b_1 when diameter is $D=2.8$ m and draft is $d=1.5$ m

3.3 能量俘获的预报

阵列式浮标长期工作于海域中, 要对装置的能量俘获进行预报, 就必须对海域的长期海况进行监测和统计, 结合实测海况数据或波浪散布图等进行短期和长期预报。对于单个浮标或者阵列浮标, 能量俘获宽度比的长期预报可参照如下公式:

$$CWR = \sum_{n=1}^N p_n \cdot CWR_n \quad (10)$$

式中: p_n 为各海况出现的概率; CWR_n 为第 n 个海

况下的能量俘获宽度比,可由式(5)得到; N 为典型海况数量。

3.4 优化流程

建立如图4所示的阵列浮标优化流程。该方法可针对不同的海域,结合实际海域的海况条件对能量俘获宽度比进行预报。在优化阵列浮标时,首先选择单个浮标的外形尺度,分别计算各海况下不同尺度浮标的垂荡运动能量俘获宽度比,对单个浮标的能量俘获进行短期预报,进而结合海域的波浪散布图或其他实测波浪数据,对阵列浮标的能量俘获进行长期预报,选出满足工程需要的最佳尺度,包括直径和吃水(或直径吃水比)。

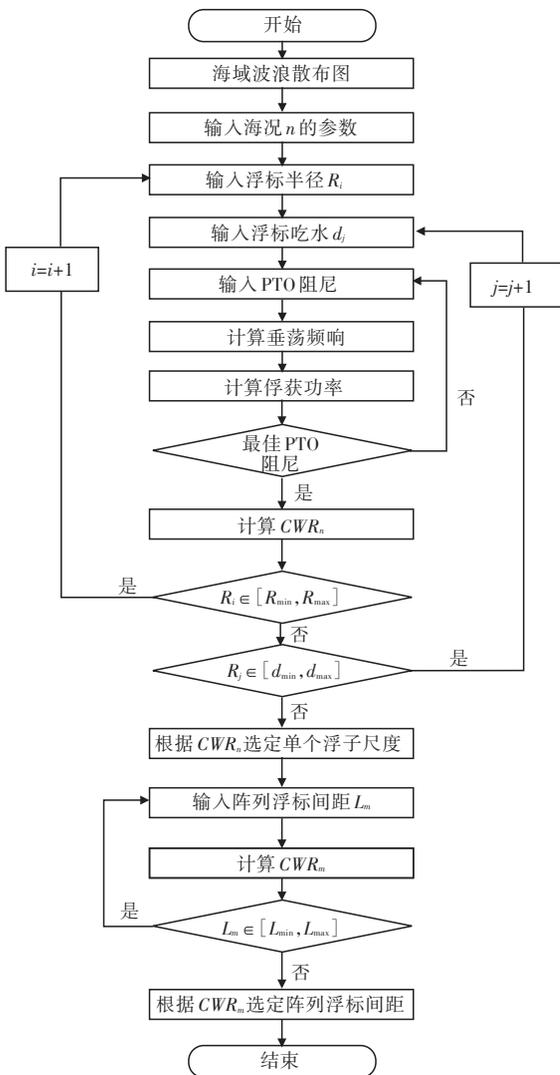


图4 阵列浮标尺度设计优化流程

Fig.4 Design optimization process for main dimensions of array buoy

在完成单个浮标尺度优化的基础上,对阵列式浮标进行间距调整,对阵列式浮标的总能量俘获宽度比进行短期和长期预报,以实现能量俘获宽度比最大化。

4 数值模拟与分析

4.1 模型参数设置

阵列浮标的排列方式为5个浮标排列。在对单个浮标的外形进行优化时,讨论不同直径吃水比(直径吃水比 $D/d=1.2\sim 6.0$)下的能量俘获宽度比,并分别讨论直径和吃水对浮标能量俘获宽度比的影响,得到最佳尺度;在完成单个浮标外形优化的基础上,通过分别计算各浮标间距(10~14 m)下阵列式波能发电装置的能量俘获宽度比,对比分析得到最佳间距值。其中,直径吃水比的参数变化值如表1所示。

表1 直径和吃水参数变化值

直径 D/m	吃水 d/m
2.0, 2.4, 2.8, 3.0, 3.2, 3.6, 4.0	1.0
4.0	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0

4.2 工作海域海况

工作海域的海况通常以波浪散布图的形式来表示,需要对常年的海浪数据参数进行实时测量统计,在缺少实际海况实测资料的情况下,也可以采用海域主要成分波浪参数以及出现的概率来表示。沿海海域的波浪条件较为平稳,水上机场一般都选址在风浪较小的海域^[10]。在表2所示的几种典型海况下,分别计算装置的能量俘获宽度比,并结合各海况^[11]出现的概率进行长期预报。

表2 工作海域海况

海况	有义波高 $H_{1/3}/m$	过零周期 T_z/s	出现的概率/%
1	0.35	3.6	12
2	0.36	4.0	13
3	0.24	3.2	14
4	0.27	2.8	20
5	0.30	3.0	17
6	0.22	4.3	16
其余	—	—	< 8

4.3 直径吃水比对能量俘获宽度比的影响

在表2所给出的海域海况下,计算各直径吃水比下浮标装置的能量俘获宽度比 CWR ,如图5所示。从图中可以看出,在最佳PTO阻尼系数下,能量俘获宽度比随着浮标直径吃水比的增加呈先增大后减小的趋势,并且在直径吃水比达2.4~2.6时能量俘获宽度比达到最大。

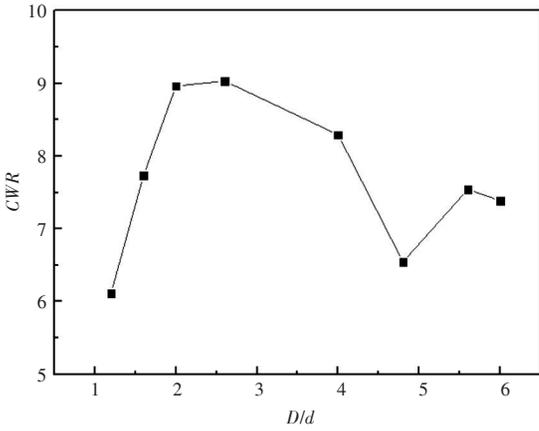


图5 能量俘获宽度比随直径吃水比变化的曲线

Fig.5 Variation of energy capture width ratio with respect to diameter draft ratio

4.4 浮标直径对能量俘获的影响分析

为了研究浮标直径对能量俘获宽度比的影响,对吃水 $d=1$ m 时不同直径下的俘获功率 P 进行计算,俘获功率随 PTO 阻尼系数 b_1 变化的曲线如图6所示。从图6可以看到,直径越大的浮标对应的最佳 PTO 阻尼系数越大,在保证最佳 PTO 阻尼系数的情况下,浮标的总俘获功率也越大。

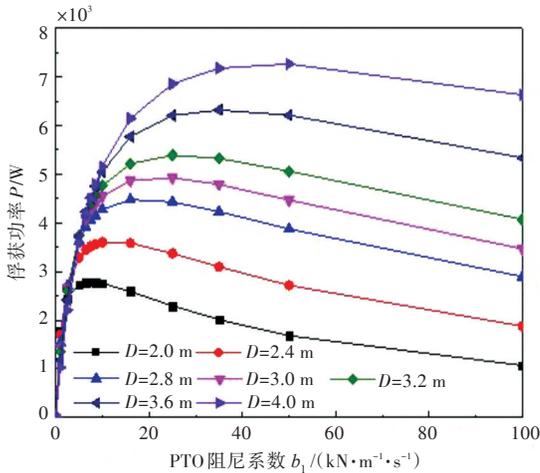


图6 吃水为 1.0 m 时不同直径尺度下俘获功率随阻尼系数 b_1 的变化曲线

Fig.6 Variation of power capture with respect to PTO damping coefficient b_1 in different diameters when draft $d=1.0$ m

图7所示为在满足最佳 PTO 阻尼系数的情况下,当吃水 $d=1$ m 时不同直径浮标的能量俘获宽度比随外界波浪周期 T 的变化曲线。图中的曲线峰值表示在该尺寸下,浮标在峰值对应的波浪周期下可以实现的最大的波浪能吸收。不同直径的浮标,其峰值会随直径的减小而减小。通过对能量俘获宽度比的短期预报可以看出,当外界波浪周期 $T > 3$ s 时,装置的直径尺度越大,能量俘获宽度比越大。而在波浪周期 $T < 3$ s 时,直径小的浮标对波浪能的俘获要稍大一些。

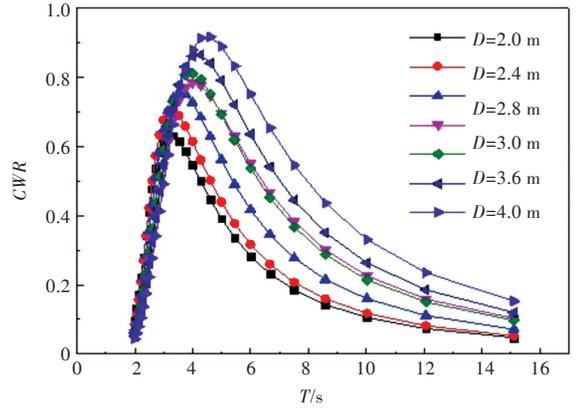


图7 吃水为 1.0 m 时不同直径尺度下能量俘获宽度比随外界波浪周期的变化曲线

Fig.7 Variation of energy capture width ratio with respect to wave period in different diameters when draft $d=1.0$ m

结合图6和图7可以看出:对于小直径尺度下的浮标,俘获能量的高低主要依靠最佳 PTO 阻尼系数的大小,即在式(8)中,PTO 阻尼系数 b_1 占主导作用。在保证同一吃水下,直径越大的浮标其能量俘获效率越高。

4.5 浮标吃水对能量俘获的影响分析

同样,对直径 $D=4$ m 时不同吃水下的浮标俘获功率 P 进行计算。俘获功率随 PTO 阻尼系数 b_1 变化的曲线如图8所示。从图8中可以看出,吃水越大的浮标对应的最佳 PTO 阻尼系数越小,在保证最佳 PTO 阻尼系数的情况下浮标总俘获功率也越小。图9所示为在满足最佳 PTO 阻尼系数的情况下,直径 $D=4$ m 时不同吃水浮标的能量俘获宽度比随外界波浪周期 T 的变化曲线。对于不同吃水深度的浮标,其峰值随吃水的增加而增加。通过对能量俘获宽度比的短期预报可以看出:当外界波浪周期 $T=4.2\sim 6$ s 时,吃水越大,能量俘获宽度比越大。而对于如沿海这种波浪条件较为平缓的情况(周期 $T < 4$ s 时),小吃水对能量俘获来说反而有利。

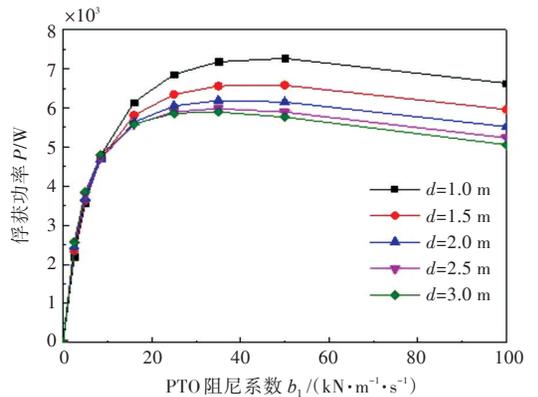


图8 不同吃水下俘获功率随阻尼 b_1 变化的曲线($D=4$ m)

Fig.8 Variation of power capture with respect to PTO damping coefficient b_1 in different drafts when diameter $D=4.0$ m

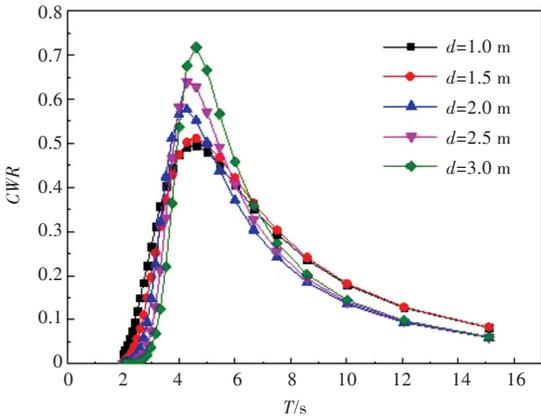


图9 不同吃水下能量俘获宽度比随外界波浪周期变化的曲线($D=4.0\text{ m}$)

Fig.9 Variation of energy capture width ratio with respect to wave period in different drafts when diameter $D=4.0\text{ m}$

结合图8和图9可知,在外界波浪周期 $T < 4\text{ s}$ 或 $T > 6\text{ s}$ 的情况下,在同一直径下,最佳PTO阻尼系数还是占据主导地位,但在外界波浪周期 $T < 4\text{ s}$ 的情况下,在式(8)中,作为平方项的垂荡速度部分影响较大。

4.6 浮标间距对能量俘获的影响

图10所示为阵列式波能发电装置中的各浮标(图1中所示浮标号)在表2所示工作海域海况条件下能量俘获宽度比随浮标间距的变化曲线。从中可以看出:在该海域海况条件下,3号装置的俘获宽度比是随浮标间距的增加而增大;而其余浮标则是呈先下降后上升的趋势,其中2号装置在浮标间距为13.0 m时俘获宽度比达到最小,1号装置在浮标间距为12.0 m时达到最小,4号和5号装置的俘获宽度比在浮标间距为12~13 m时存在最小值,而最大值则均在浮标间距为10.0 m时。

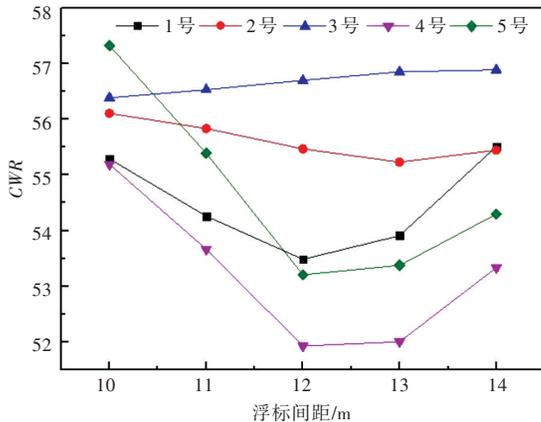


图10 每个浮标的能量俘获宽度比随浮标间距的变化曲线
Fig.10 Variation of energy capture width ratio of each buoy with respect to distance between array-buoy

图11所示为阵列式浮标的总能量俘获宽度比随浮标间距的变化曲线。从中可以看出,在

海域海况下,随着浮标间距的增加,阵列浮标的总能量俘获宽度比呈先下降后上升的趋势,且最小值出现在浮标间距为12~13 m之间。在浮标间距为10~12 m时,为了保证俘获宽度比最大,浮标间距越小越好,即浮标间距越小,浮标之间的相互作用越明显,对能量俘获越有利。对能量俘获宽度比的计算是基于表2所示工作海域的现有海况下得到的,海况条件不同,俘获能力最高的浮标间距也不一样。

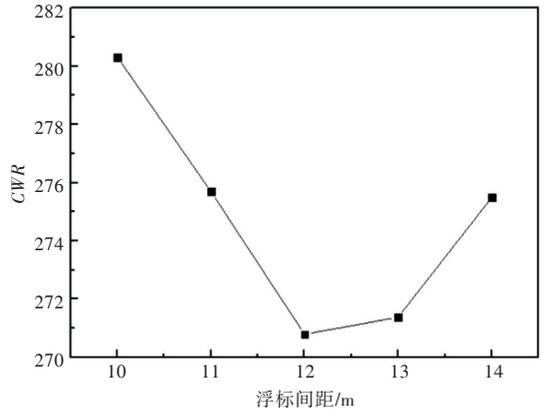


图11 阵列式浮标的总能量俘获宽度比随浮标间距的变化曲线

Fig.11 Variation of total energy capture width ratio of array-buoy with respect to distance between buoy

5 结论

本文对一种应用于水上机场海域的助航波能浮标的水动力设计进行了优化,分别讨论了浮标直径和吃水以及浮标间距对浮标能量俘获大小的影响,为阵列式波能发电装置的设计和 optimization 提供了参考,对水上机场建设中灯浮标设计具有一定的参考意义。文章主要得到以下结论:

1) 为实现能量俘获的最大化,浮标的最佳直径吃水比应在2.4~2.6之间(由于直径和吃水会随不同工程的要求尺寸设置不同,故本文给出的直径吃水比在进行灯浮标设计时可以作为参考),并且在满足水上机场建设的工程要求基础上,阵列灯浮标间距为10 m时能量俘获最佳。

2) 对单个浮标而言,浮标的直径越大,对应的最佳PTO阻尼系数值越大,俘获效率越高;浮标吃水越大,对应的最佳PTO阻尼系数越小。沿海海域的波浪主要为短波,波浪周期较小,而吃水较小的浮标的能量俘获宽度比反而更高。

3) 对阵列式浮标发电装置而言,浮标间距越小,浮标间的相互作用对垂荡运动的影响反而较为明显,且对能量俘获有利。阵列式浮标用于水上机场时,在满足工程要求的基础上,浮标间距为

10 m时阵列式浮标的能量俘获宽度比最大。

参考文献:

- [1] 姚琦,王世明,胡海鹏.波浪能发电装置的发展与展望[J].海洋开发与管理,2016,33(1):86-92.
YAO Q, WANG S M, HU H P. On the development and prospect of wave energy power generation device [J]. Ocean Development and Management, 2016, 33 (1):86-92 (in Chinese).
- [2] RINGWOOD J V, BACELLI G, FUSCO F. Control, forecasting and optimisation for wave energy conversion [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47 (3) : 7678-7689.
- [3] 何光宇,杨绍辉,何宏舟,等.阵列式波浪能发电装置的水动力分析[J].水力发电学报,2015,34(2):118-124.
HE G Y, YANG S H, HE H Z, et al. Hydrodynamic analysis of array-type device of wave energy generation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34 (2):118-124 (in Chinese).
- [4] 勾艳芬,叶家玮,李峰.阵列振荡浮子式波能转换装置试验[J].广东造船,2007(2):1-3.
GOU Y F, YE J W, LI F. Investigation on the array oscillating buoy wave power device [J]. Guangdong Shipbuilding, 2007(2):1-3 (in Chinese).
- [5] 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 (in Chinese).
- [6] BABARIT A, HALS J, MULIAWAN M J, et al. Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters [J]. Renewable Energy, 2012, 41 : 44-63.
- [7] OSKAMP J A, ÖZKAN-HALLER H T. Power calculations for a passively tuned point absorber wave energy converter on the Oregon coast [J]. Renewable Energy, 2012, 45:72-77.
- [8] GOGGINS J, FINNEGAN W. Shape optimisation of floating wave energy converters for a specified wave energy spectrum [J]. Renewable Energy, 2014, 71: 208-220.
- [9] 程正顺,杨建民,胡志强,等.直接驱动浮子式波浪能转换装置频域模拟研究[J].太阳能学报,2014,35(7):1304-1310.
CHENG Z S, YANG J M, HU Z Q, et al. Frequency domain modeling and analysis of a direct drive point absorber wave energy converter [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(7) : 1304-1310 (in Chinese).
- [10] 郭晓平,葛春景.关于水上机场建设有关问题的探讨[J].中国民用航空,2015(12):50-51.
GUO X P, GE C J. The discussion on seadrome construction [J]. China Civil Aviation, 2015 (12) : 50-51 (in Chinese).
- [11] 周宇英,李炳强,蔡宗举,等.陀螺式波浪能发电装置浮子运动及载荷分析[J].船海工程,2016,45(3):90-98.
ZHOU Y Y, LI B Q, CAI Z J, et al. Study on motion and load of the floater in top-shaped wave power generation device [J]. Ship & Ocean Engineering, 2016, 45(3):90-98 (in Chinese).