

双浮体波浪能转换装置中重心布置对波浪能吸收影响分析*

王晓明, 尚建忠, 张志雄

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:提出一种基于横摇运动的双浮体波浪能转换装置,利用水面浮体与水下浮体之间的相对横摇运动实现对波浪能的吸收。在保持水下浮体稳定的前提下,水面浮体的横摇运动决定了整个装置对波浪能吸收情况。水面浮体的横摇运动受其横摇固有频率的影响,主要是重心布置。为了合理选择水面浮体的重心位置,采用数值分析的方法对箱型浮体在长峰不规则波下的工作情况进行分析,讨论重心布置对波浪能吸收的影响以及对PTO参数选择的影响。结果表明,重心的布置可改变波浪能吸收的频段,重心布置越低,可吸收的波浪能频段越广,越有利于波浪能的吸收。

关键词:间横摇运动;双浮体波浪能转换装置;长峰不规则波;重心布置

中图分类号:TK01 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)04-0056-06

Effect of G. C arrangement on the power absorption in a two-body rolling WECS

WANG Xiaoming, SHANG Jianzhong, ZHANG Zhixiong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A two-body rolling wave energy conversion system (WECS) is proposed. The system utilizes the rolling difference between the upper buoy and the lower one. On the basis of the lower buoy's stability, the rolling of the upper buoy determines the wave energy absorption. The buoy's rolling is determined by its natural frequency, which is mainly affected by the G. C position arrangement. Therefore, numerical simulation is applied. A box-shaped buoy is selected as the upper buoy, and the system working in long crest wave with ten conditions is analyzed, in order to find out how the G. C position arrangement influences the wave energy absorption and the PTO damping selection. The results show that G. C position arrangement does affect the wave energy absorption by changing the natural frequency, and a lower G. C. position can enlarge the frequency range, and can absorb more wave energy.

Key words: rolling; two body WECS; long crest wave; G. C position arrangement

目前,各式各样的小型水下/水面移动设备主要采用携带电池的方法供能,或者利用太阳能和温差能等可再生能源的转换提供能量^[1]。波浪能作为一种储量大且存在广泛的海洋能源,其为移动设备供能的可行性及其相关技术的研究在国内外已经逐步开展起来。沈阳自动化所利用惯性摆作为波浪能吸收载体,对水中无源机器人的能量自主获取进行研究;作者所在单位研制了一种基于二自由度惯性摆的波浪能装置,拟为海洋机器人提供能量;中国科技大学研制了一种多关节仿生机器鱼,利用波浪驱动关节发电。美国海军资助研制一种改进的声纳浮标 AN/SSQ-101,拟采用类鱼鳍的结构吸收波浪能,从而延长浮标的工作时间;中国科学院广州能源研究所已研制的机械波力航标灯,可长时间支持航标灯工作^[2-6]。

目前,用于小型的水面/水下移动设备的波浪能转换装置和样机多采用内置的形式,以保证良好的密封性和安全性。但同时,内置式的波浪能装置对波浪能的吸收受到空间的约束,难以对低频段的波浪实现较好的吸收。

双浮体波浪能转换装置利用浮体之间的相对运动实现对波浪能的吸收,目的是解决大深度海域处的波浪能利用问题^[7]。相比于内置式的波浪能转换装置,双浮体装置直接受波浪的作用,可较好地吸收波浪能。

为此,根据双浮体装置的基本原理,作者提出了一种基于横摇运动的双浮体波浪能转换装置:以水下浮体作为稳定参考系,以水面浮体作为波浪响应载体,利用二者之间的相对横摇运动,实现对波浪能的吸收。在所提出的基于横摇运动的双

* 收稿日期:2013-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875254)

作者简介:王晓明(1984—),男,黑龙江鸡西人,博士研究生,E-mail:wxm_506@163.com;

尚建忠(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:jianzhongshang@gmail.com

浮体波浪能转换装置中,水下浮体作为稳定参考系,受到波浪作用较小。因此,水面浮体在波浪下的横摇运动响应是决定整个波浪能装置的波浪能吸收能力的关键。

水面浮体的横摇运动响应主要受到其横摇固有频率的影响。横摇固有频率受到重心位置、吃水深度以及外形的影响。本文以水面浮体重心位置的设计作为研究对象,采用数值分析的方法,对双浮体装置在随机不规则波浪下的工作情况进行研究,并重点讨论重心位置对双浮体装置的波浪能吸收能力和能量输出装置(PTO, Power take-off)的选择的影响。

1 基于横摇运动的双浮体波浪能转换装置的基本原理

双浮体波浪能转换装置是振动浮体式波浪能装置的一种^[7-8],主要是为了解决在水面与水下距离很大的海域波浪能利用问题。一般来说,双浮体装置主要由两部分组成:起到参考系作用的浮体和具有较大运动响应的浮体,二者之间形成的相对运动作为此类装置的能量来源。

根据上述基本原理,作者提出了一种基于横摇运动的双浮体波浪能转换装置,主要利用水面浮体和水面浮体之间形成的相对横摇运动,原理如图1所示。

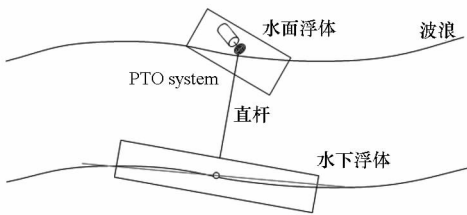


图1 基于横摇运动的双浮体装置的基本原理
Fig.1 Basic principle of two body rolling system

如图2所示,双浮体波浪能转换装置主要包括两个部分,水面浮体和水面浮体,二者通过PTO装置连接。PTO装置的连接特点在于:通过刚性杆与水下浮体连接,可沿刚性杆上下移动,但无法旋转;与水面浮体之间可相对转动。PTO装置为波浪能转换装置的输出装置,包括单向轴承、增速机构、发电机和二次电池,以及充放电控制系统等。

在双浮体波浪能装置中,水面浮体作为主要的波浪能吸收载体,在波浪作用下产生强烈的横摇响应;而水下浮体作为波浪能吸收的参考体,在水下保持较好的稳定性,尤其是在横摇自由度上保持稳定。浮体之间形成的相对转动通过轴输入

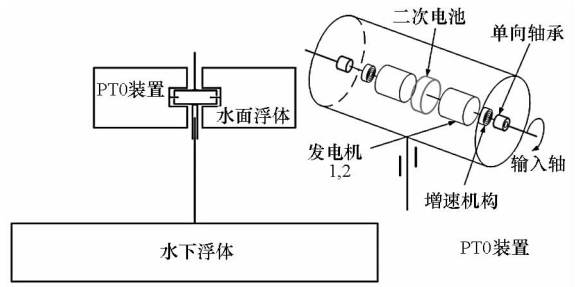


图2 双浮体波浪能转换装置的基本结构
Fig.2 Basic structure of two body rolling system

至PTO中。为了充分地利用形成的往复运动,该装置安装了两套发电系统,并配套采用布置旋向相反的两个单向轴承,分别对顺时针和逆时针方向产生的横摇运动进行吸收,因而提高了对波浪能的吸收。

2 双浮体波浪能转换装置的数学模型

2.1 双浮体波浪能装置的数学模型

一般地,船舶受到的水动力横摇力矩被认为与其相对运动有关^[9]。推而广之,浮体的横摇运动模型可表示为

$$I_x \ddot{\Theta} = -\delta I_x \cdot (\ddot{\Theta} - \ddot{\alpha}) - D(\dot{\Theta} - \dot{\alpha}) - R(\Theta - \alpha) \quad (1)$$

其中, Θ 为浮体的绝对横摇角度; α 为水面波倾角; I_x 为浮体的固有横摇转动惯量, δI_x 为附加横摇转动惯量; D 表示浮体横摇过程中的阻尼力矩, R 则表示横摇恢复力矩。

双浮体波浪能转换装置的数学模型可表示为

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\Phi}_1 + \delta I_1 \cdot (\ddot{\Phi}_1 - \ddot{\alpha}_1) \\ = -D(\dot{\Phi}_1 - \dot{\alpha}_1) - R(\Phi_1 - \alpha_1) - M_p + M_{21} \\ I_2 \ddot{\Phi}_2 + \delta I_2 \cdot (\ddot{\Phi}_2 - \ddot{\alpha}_2) \\ = -D(\dot{\Phi}_2 - \dot{\alpha}_2) - R(\Phi_2 - \alpha_2) + M_p + M_{12} \end{cases} \quad (2)$$

其中,下标1、2分别代表水面浮体和水面浮体, M_p 为PTO产生的相对力矩, M_{ij} 表示二者之间的相互作用。

2.2 模型简化

水面浮体和水面浮体在波浪的作用下均会产生横摇运动。水下浮体部分作为整个波浪能转换装置的参考系,要求具有良好的稳定性,即对波浪的响应较小。这一要求通常可以通过合理的设计得到实现,如增大浮体的面积、增大浮体所处的深度等方式降低浮体的横摇固有频率。

在此前提下,双浮体装置所能获得的相对横

摇角度取决于水面浮体的横摇运动响应。因此,本文做出假设,令

$$\Phi_2 = 0, \dot{\Phi}_2 = 0, \ddot{\Phi}_2 = 0$$

因此,双浮体波浪能转换装置可简化为“水面浮体 + PTO 装置”,根据文献[10],本文令 PTO 装置的数学模型为 $M_p = gB_p\dot{\Phi}_1$, 则

$$I_1\ddot{\Phi}_1 + \delta I_1 \cdot (\ddot{\Phi}_1 - \ddot{\alpha}_1) = -D(\dot{\Phi}_1 - \dot{\alpha}_1) - R(\Phi_1 - \alpha_1) - gB_p\dot{\Phi}_1 \quad (3)$$

其中, B_p 表示为 PTO 的阻尼系数。

除却下标,令 $\theta = \Phi - \alpha$, 则上述方程可变为

$$\begin{cases} \Phi = \theta + \alpha \\ (I + \delta I)\ddot{\theta} + D(\dot{\theta}) + R(\dot{\theta}) = -[I\ddot{\alpha} + gB_p(\dot{\theta} + \dot{\alpha})] \end{cases} \quad (4)$$

波浪能装置的平均功率可表示为

$$\bar{E}_a = \frac{1}{T} \int_0^T |-B_p \cdot g \cdot \dot{\Phi}^2| dt \quad (5)$$

2.3 非线性模型分析

浮体在横摇过程中具有非线性,主要来源于横摇阻尼力矩的非线性和恢复力矩的非线性。

恢复力矩是浮体在横摇过程中,促使其自动恢复平衡的力矩,主要与横摇角度相关,一般可表示为^[11]

$$R(\theta) = \Delta g \cdot GZ(\theta) \quad (6)$$

其中, Δ 为排水质量, $GZ(\theta)$ 为恢复力臂。恢复力臂表征着横摇过程中浮体的浮心与重心之间的水平距离。类似于船舶,浮体的恢复力臂主要通过绘制其恢复力臂曲线(即静稳性曲线)来获取,通过数据拟合,可以获得一个奇次幂的多项表达式,即

$$GZ(\theta) = \sum_n C_{2n-1} \theta^{(2n-1)} \quad (7)$$

通常取前三项作为研究。

横摇阻尼力矩是浮体在横摇过程中与流体之间的相互作用,与其横摇速度有关,一般可以表示为^[11]

$$D(\dot{\theta}) = g(B_L\dot{\theta} + B_N\dot{\theta}|\dot{\theta}|) \quad (8)$$

其中, B_L, B_N 为横摇阻尼系数。横摇阻尼系数无法通过理论计算获得,只能凭借经验公式或者船模试验获取。国际船模试验池会议(ITTC)给出了一般情况下的横摇阻尼的获取方法^[12]。

结合上述非线性分析,可得到简化后的双浮体波浪能转换装置的数学模型为

$$\begin{cases} \Phi = \theta + \alpha \\ (I + \delta I)\ddot{\theta} + g(B_L\dot{\theta} + B_N\dot{\theta}|\dot{\theta}|) + \sum_n C_{2n-1}\theta^{(2n-1)} \\ = -[I\ddot{\alpha} + gB_p(\dot{\theta} + \dot{\alpha})] \end{cases} \quad (9)$$

进一步地,模型可变化为

$$\begin{cases} \Phi = \theta + \alpha \\ \ddot{\theta} + (b_L\dot{\theta} + b_N\dot{\theta}|\dot{\theta}|) + \sum_n m_{2n-1}\theta^{(2n-1)} \\ = -[u\ddot{\alpha} + b_p(\dot{\theta} + \dot{\alpha})] \end{cases} \quad (10)$$

式中, $u = \frac{I}{(I + \delta I)}$, $b_L = \frac{B_L g}{(I + \delta I)}$, $b_N = \frac{B_N g}{(I + \delta I)}$, $b_p = \frac{B_p g}{(I + \delta I)}$, $m_{2n-1} = \frac{\Delta g C_{2n-1}}{(I + \delta I)}$ 均为对应的等效系数。

为了浮体吸收波浪能的能力,本文引入功率密度,定义为平均功率与总的转动惯量之比,即 $p_l = \bar{E}_a / (I + \delta I)$, 因此,简化后的双浮体装置的可吸收的波浪能能量密度为

$$p_l = \frac{b_p}{T} \int_0^T (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 dt \quad (11)$$

从式(11)中可以看出,装置可获取的波浪能主要决定于 PTO 装置的阻尼系数选择和水面浮体的横摇运动响应情况。后者则受到水面浮体固有频率的影响,其固有频率可表达为

$$\omega_b = \sqrt{\frac{\Delta g C_1}{(I + \delta I)}} \quad (12)$$

这意味着水面浮体的横摇运动受到恢复力臂的影响,尤其是系数 C_1 的影响。对于 C_1 , 有如下表示:

$$C_1 = \left. \frac{d(GZ)}{d\theta} \right|_{\theta=0} \quad (13)$$

即 C_1 代表着恢复力臂曲线在零点处的斜率。

对于一个外形确定的浮体,其恢复力矩主要受到浮体重心的布置和吃水的影响。本文就浮体重心的布置对双浮体波浪能转换装置的影响展开分析。

3 数值计算与结果分析

在已经建立的数学模型基础上,本文采用数值分析的方法,以长峰不规则波为对象,对双浮体装置在随机不规则波浪下的工作情况进行研究,并重点讨论重心位置对双浮体装置的波浪能吸收能力和能量输出装置选择的影响。

3.1 基本参数

图 3 给出了单个箱型水面浮体算例的几何特征,其中, L 为单浮体的长度(图中未展示), B 为单浮体的宽度, d 为单浮体的高度, z_g 为单浮体的初始重心高度, T_0 为单浮体的初始吃水深度。表 1

给出了箱型水面浮体的基本尺寸。

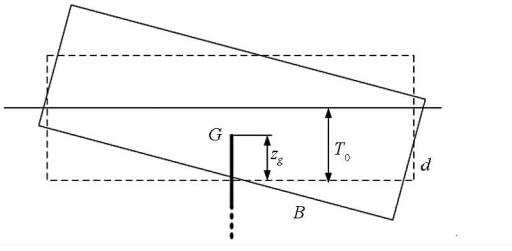


图 3 水面浮体的几何特征

Fig. 3 Geometric characteristics of the upper buoy

浮体的转动惯量来源于埃杜尔公式,表示为

$$I = \frac{\Delta}{12} (B^2 + 4z_g^2) \quad (14)$$

附加转动惯量是随着横摇角度变化的,难以通过理论计算准确得出,只能通过试验和经验获取。船舶中附加转动惯量大致占船体转动惯量的 10% ~ 30%,因此,本文选择附加转动惯量为浮体自身转动惯量的 20%,即 $\delta I = 0.2I$ 。

表 1 水面浮体的总体尺寸

Tab. 1 Dimensions of the upper box-shaped buoy

总体尺寸	长度 L	宽度 B	高度 d
	2m	1m	1m

重心布置的影响主要体现在装置对波浪能吸收量和 PTO 阻尼系数的选择上,为此,本文根据重心的布置情况选择了 10 种工况,如表 2 所示。

表 2 依据重心位置划分的 10 种工况

Tab. 2 Ten working conditions according to G. C position arrangement

工况序号	重心位置 z_g	吃水深度 T_0
C1	$z_g = 0.25d$	$T_0 = 0.50d$
C2	$z_g = 0.26d$	
C3	$z_g = 0.28d$	
C4	$z_g = 0.30d$	
C5	$z_g = 0.33d$	
C6	$z_g = 0.35d$	
C7	$z_g = 0.37d$	
C8	$z_g = 0.39d$	
C9	$z_g = 0.41d$	
C10	$T_0 = 0.50d$	

重心布置直接影响了浮体横摇过程中的稳性情况,即浮体的恢复力臂,图 4 给出了各个工况下浮体的恢复力臂曲线。可以看出,随着重心位置的升高,浮体的恢复力臂减小,稳性下降, C_1 值也

在逐渐减小。

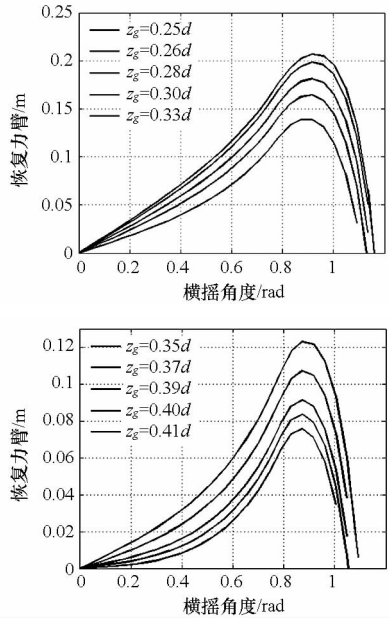


图 4 10 种工况下的恢复力臂曲线

Fig. 4 The righting arm curves under 10 conditions

重心布置也同样影响了浮体横摇的固有频率,图 5 给出了 10 种工况下的横摇固有频率。根据式 (12),随着重心位置上移, C_1 逐渐减小。水面浮体的横摇固有频率逐渐减小。

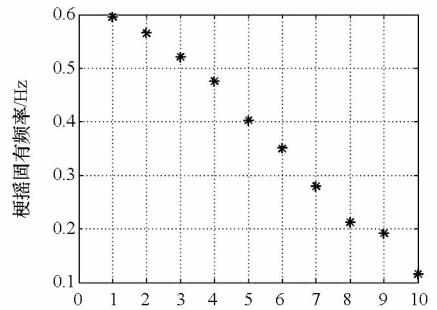


图 5 10 种工况下简化模型的横摇固有频率

Fig. 5 Natural frequencies of the upper buoy under 10 working conditions

3.2 不规则波浪的数值模拟

实际的海面总是呈现出极不规则的波浪,为了接近实际情况,本文采用长峰不规则波作为研究对象,采用 P-M 波能谱获取不规则波浪的能量谱密度模拟,并模拟波倾角。

P-M 谱的基本形式为^[13]

$$S_{\xi}(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \quad (15)$$

式中, $A = 8.10 \times 10^{-3} g^2$, $B = 3.11/h_{1/3}^2$, $h_{1/3}$ 为有义波高。因此,不规则波的波倾角可表示为有限单元波的波倾角叠加进行模拟,即有

$$\alpha = \sum_{n=1}^N \alpha_n = \sum_{n=1}^N \frac{\omega_n^2}{g} \sqrt{2S_{\xi}(\omega_n) \Delta\omega} \cos(\omega_n t + \varepsilon_n) \quad (16)$$

其中, ω_n 为各个单元波的圆频率, ε_n 为初相角, 可表示为 $(0, 2\pi)$ 之间均匀分布的随机变量。本文以 $h_{1/3} = 1\text{m}$ 的长峰不规则波作为讨论, 其时间历程如图 6 所示。

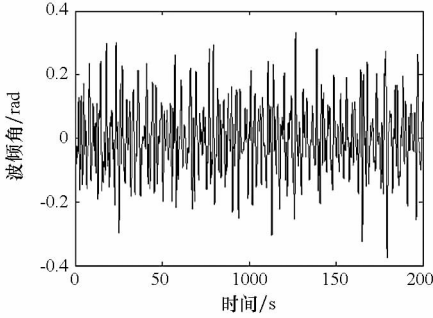


图 6 长峰不规则波的时间历程

Fig. 6 Time history of long crest wave

3.3 结果分析

水面浮体的重心布置影响着其横摇运动响应, 进而影响了装置的波浪能吸收能力以及 PTO 阻尼系数的选择。本文选取等效 PTO 阻尼系数 b_p 在 $0.25 \sim 1.75$ 的范围内变化, 并以 0.05 作为计算间隔, 讨论各种工况下装置的波浪能吸收能力以及 PTO 阻尼选择对波浪能吸收的影响。

图 7 展示了装置对波浪能的吸收情况。其中“o”为离散点, “—”为数值拟合获得的曲线。可以看出, 整体上该装置对波浪能的吸收能力是随着重心的升高而逐渐减弱的。同时可以看出, 在各种重心布置下, 装置中均存在最佳的 PTO 阻尼, 使得波浪能吸收达到最大。具体体现在: (1) 当重心位置在 $0.25d$ 到 $0.33d$ 之间, 能量密度随着 PTO 阻尼的增加而呈现出先增后减的趋势, 与此对应的最佳 PTO 阻尼是随着重心位置的升高而逐渐减小的; (2) 当重心位置在 $0.35d$ 到 $0.39d$ 之间时, 能量密度则随着 PTO 阻尼的增加而逐渐减小, 装置则在最小 PTO 阻尼时获得最大的能量密度; (3) 当重心位置为 $0.40d$ 与 $0.41d$ 时, 能量密度随着 PTO 阻尼的增加而逐渐增大, 装置则在最大 PTO 阻尼时获得最大的能量密度。

浮体在固有频率较高时, 在波浪下横摇响应较为剧烈, 装置可获得的波浪能也就相对较多, 见图 7(a) ~ 7(e); 随着固有频率的减小, 浮体的横摇运动逐渐减弱, 只能通过减小 PTO 阻尼的方式来增加其横摇运动, 见图 7(f) ~ 7(h); 当固有频

率减小到 0.2Hz 以下时, 浮体的横摇运动微弱, 调整 PTO 阻尼难以改变浮体的横摇幅值, 但可以通过增大 PTO 阻尼, 提高装置对波浪能的吸收。

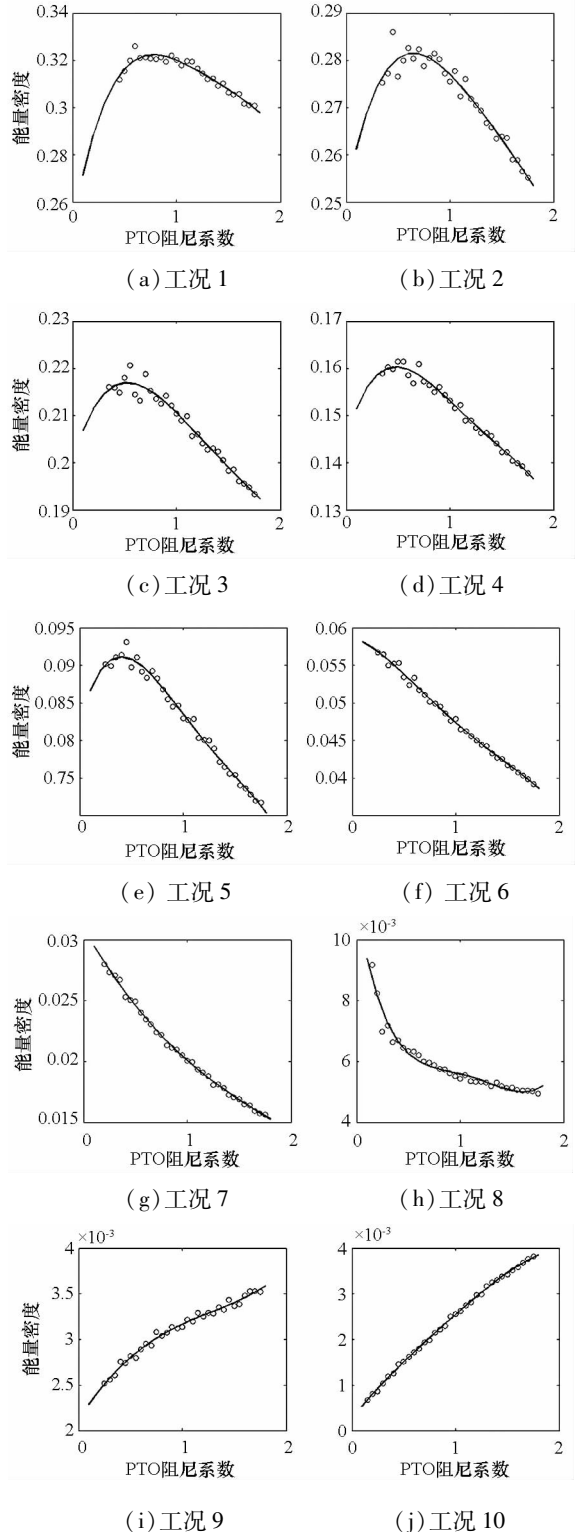


图 7 10 种工况下装置的波浪能吸收情况

Fig. 7 Power absorption of the system under the working conditions

结合图 5 和图 7, 可以看出, 具有较大的横摇固有频率 (即 C_1 较大) 的浮体可以获得相对较多的波浪能, 这一结论可以通过对横摇角能谱的分

析获得证实。

图8给出了等效PTO阻尼系数为0.45时,各个工况下横摇角能谱的情况。可以看出,当浮体的重心位置较低时,装置的横摇角能谱涵盖的频率范围相对较广,其数值也相对较大,表明了水面浮体在具有更大的固有频率可以实现更多的吸收。

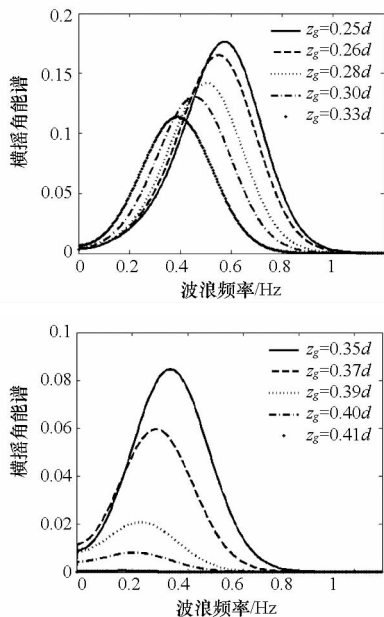


图8 10种工况下的横摇角能谱

Fig. 8 Energy spectrum of rolling angle under 10 working conditions

4 结论

为解决小型海洋工作平台的能量供给问题为背景,本文提出并设计了一种基于横摇运动的双浮体波浪能转换装置。在对该装置的数学模型建立和简化的基础上,采用数值分析的方法,对双浮体波浪能转换装置在长峰不规则波下的工作情况进行分析,并得到以下结论:

(1) 水面浮体的固有频率受到其重心布置的影响,且随着重心高度的降低,水面浮体的固有频率逐渐增大。

(2) 双浮体波浪能转换装置的波浪能吸收受到水面浮体横摇固有频率的影响。水面浮体固有频率的增大,拓宽了装置可吸收波浪的频段,有利于对波浪能的吸收。

重心布置显著地影响着双浮体波浪能转换装置对波浪能吸收,这为接下来的装置优化与研制提供了理论基础。

参考文献 (References)

- [1] Wang X M, Shang J Z, et al. Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles[J]. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 2012, 16:1958 - 1970.
- [2] 张颖,董再励,吴成东,等. 基于惯性摆的波能系统研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(4):394 - 400.
ZHANG Ying, DONG Zaili, WU Chengdong, et al. Research on the wave energy system based on inertial pendulum system [J]. *Acta Energiane Solaris Sinica*, 2007, 28(4): 394 - 400. (in Chinese)
- [3] 王晓明,高建忠,罗自荣,等. 二自由度波能转换装置动力学建模[J]. *机械设计与研究*, 2010, 26(5): 50 - 53.
WANG Xiaoming, SHANG Jianzhong, LUO Zirong, et al. Dynamic modeling of a 2-dofs wave-power translating device, machine design and research[J]. 2010, 26(5): 50 - 53. (in Chinese)
- [4] 董二宝,颜钦,张世武. 基于波浪能获取的多关节仿生机器鱼能源自给系统[J]. *机器人*, 2009, 31(6):501 - 505.
DONG Erbao, YAN Qin, ZHANG Shiwu, et al. Self-Powered system of articulated bionic robotic fish using wave energy harvesting[J]. *ROBOT*, 2009, 31(6): 501 - 505. (In Chinese)
- [5] Mark K. Micro ocean renewable energy. [EB/OL] [2011 - 11 - 12] <http://www.ericgreeneassociates.com>.
- [6] 中国科学院广州能源所. 机械式波力发电浮标:中国, 01255296, [P]. 2002 - 6 - 26.
- [7] Jonathan Falnes. Wave-energy conversion through relative motion between two single-mode oscillating bodies [J]. *Transactions of the ASME*, 1999, 121: 32 - 38.
- [8] Anto' nio F. de O. Falcão. Wave energy utilization: A review of the technologies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14: 899 - 918.
- [9] M Eissa a, A. F. El-Bassiouny. Analytical and numerical solutions of a non-linear ship rolling motion [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2003, 134:243 - 270.
- [10] 吴必军,吝红军,游亚文,等. 振荡型波浪能转换装置中两种优化方法研究 [J]. *太阳能学报*, 2010, 31(6): 769 - 774.
WU Bijun, LIN Hongjun, YOU Yage, etc. Study on two optimizing methods of oscillating type wave energy conversion devices[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2010, 31(6): 769 - 774. (in Chinese)
- [11] M Taylan. The effect of nonlinear damping and restoring in ship rolling[J]. *Ocean Engineering*, 2000, 27: 921 - 932.
- [13] ITTC Recommended procedures-numerical estimation of rolling damping [EB/OL] [2011 - 11 - 12]. <http://itc.sname.org/>
- [14] 吴秀恒,张乐文,王仁康. 船舶操纵性与耐波性[M]. 北京:人民交通出版社,1988.
WU Xiuheng, ZHANG Lewen, WANG Renkang, et al. The ship maneuverability and seakeeping [M]. Beijing: People Communication Publication, 1988. (in Chinese)