

文章编号: 1007-7294(2017)05-0533-08

鹰式波浪能发电装置水动力学性能分析及优化

张亚群^{a,b}, 游亚戈^{a,b}, 盛松伟^{a,b}, 王文胜^{a,b}

(中国科学院 a. 广州能源研究所; b. 可再生能源重点实验室, 广州 510640)

摘要: 根据牛顿第二定律,对鹰式波浪能装置多个浮体进行了力学分析,基于微波理论,通过每个浮体之间三种模态的运动耦合,建立了流体力、阻尼力、铰接力、静水回复力等内外力之间的力学方程组。通过以运动浮体为边界条件求解多个浮体的水动力学参数,代入方程组中计算求得最优外加阻尼和最优俘获宽度比,从而优化设计方案,得到此时各浮体在纵荡、垂荡和纵摇三种运动模态下的位移幅值,以及阻尼力、铰接力、液压缸运动速度等相关参数。研究成果为鹰式波浪能装置的设计及制造提供了理论参考和依据。

关键词: 鹰式波浪能发电装置; 水动力学; 俘获宽度比; 最优外加阻尼; 优化设计

中图分类号: P75 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2017.05.003

Hydrodynamic research on a Sharp Eagle Wave Energy Converter

ZHANG Ya-qun^{a,b}, YOU Ya-ge^{a,b}, SHENG Song-wei^{a,b}, WANG Wen-sheng^{a,b}

(a. Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate; b. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: According to Newton's second law, mechanical analysis of multiple floaters Sharp Eagle wave energy converter is carried out. Based on microwave theory, the movement of every buoy in three modes couples each other, and there establishes a mechanical equations which is concerned with fluid forces, wave forces, damping force, hinge force, and so on. Hydrodynamic parameters of multiple buoys are solved when taking moving buoys as boundary conditions. Then through taking hydrodynamic parameters into the equations, optimum additional damping and optimal capture width ratio are calculated out. Following design optimizing, a plenty of data is obtained, such as displacements amplitude of each buoy in three motion modes (swing, heaving, pitching), damping force, hinge force, speed of the hydraulic cylinder. Research results provide theoretical reference and basis for Sharp Eagle WEC in design and manufacture.

Key words: Sharp Eagle wave energy converter (WEC); hydrodynamics; capture width ratio; optimal outer damping; optimization design

0 引言

海洋波浪能作为一种绿色可再生能源,备受人们重视。现今,开发利用海洋波浪能发电的装置发

收稿日期: 2016-11-22

基金项目: 国家青年自然科学基金项目(41406102);海洋可再生能源专项资金(GHME2016YY01)

作者简介: 张亚群(1981-),女,博士,副研究员,E-mail:zhangyq@ms.giec.ac.cn;

游亚戈(1956-),男,研究员。

展迅速,其在外形结构上具有多样性,大致划分为以下几种:振荡水柱式、越浪式、软囊式和振荡浮子式。其中振荡浮子式波浪能装置类型多、发展快,如点吸收式、鸭式、筏式、摆式和鹰式等^[1-2]。

鹰式波浪能装置(Sharp Eagle)属于一种新型漂浮式振荡浮子式波浪能装置。目前,关于鹰式波浪能装置的研究文献较少。文献[3-4]是关于鹰式 WEC 研究工作的全面介绍,文献[5]介绍了模型试验方面的研究,文献[6]是关于波能装置状态信息采集和控制的技术方案方面的研究,文献[7-8]是关于装置的限位梁撞击破坏的损伤机理研究,其中文献[2]对鹰式 WEC 的水动力学性能进行了初步分析。

本文以鹰式 号波浪能发电装置为实例,通过分析各浮体在三个模式下的运动耦合^[9],建立单个浮体的力学模型,并列出各个作用力的数学方程;通过数值模拟得到水动力学参数,求解力学模型,逐步对鹰式波浪能装置参数设计进行优化,最终获得最优设计方案。

1 力学模型

鹰式 号波浪能装置的基本结构如图 1 所示,由鹰头吸波浮体(浮体 1)、水下附体(浮体 2)、能量转换系统和锚泊系统组成。鹰头吸波浮体通过 C 点的门型铰链安装在水下附体上。能量转换系统中的液压缸的有杆端安装于鹰头吸波浮体 A 点上,无杆端安装于水下附体 B 点上。鹰头吸波浮体的重心位于点 1,水下附体的重心位于点 2。

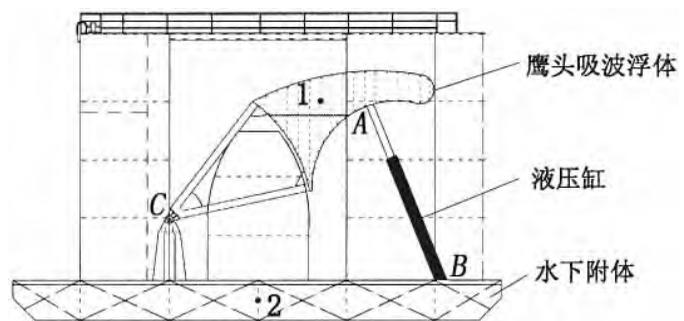


图 1 鹰式波浪能装置结构简图

Fig.1 Structure chart of Sharp Eagle WEC

假设作用在浮体 k (鹰头吸波体或水下附体, $k=1$ 或者 $k=2$) 上所受的合力为 $\vec{F}^{(k)}$, 由流体力 \vec{F}_f 、阻尼力 \vec{F}_c 、静水回复力 \vec{F}_s 、铰接力 \vec{F}_j 、静水压力和重力组成。但静水压力的

合力(即静浮力)与重力平衡,故忽略不计。鹰式波浪能发电装置在波浪中的运动有六个运动模式,为纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇(分别由 $j=1, 2, \dots, 6$ 表示)。其中纵荡、垂荡、纵摇三种运动模式对波浪能装置吸收波浪能运动影响最为显著。因此在对鹰头吸波浮体与水下附体进行水动力学运动分析时,其它方向的运动模式暂不考虑。

假设浮体 k 的质量为 $m^{(k)}$, 根据牛顿第二定律,在 j 运动模式下有

$$\vec{F}_j^{(k)}(t) = m^{(k)} \ddot{X}_j^{(k)} = -\omega^2 m^{(k)} X_j^{(k)} e^{-i\omega t} \quad (1)$$

除去时间因子,将 $F_j(t)$ 分解后,得:

$$-\omega^2 m^{(k)} X_j^{(k)} = F_{fj}^{(k)} + F_{cj}^{(k)} + F_{Jj}^{(k)} + F_{Sj}^{(k)} \quad j=1, 3, 5 \quad (2)$$

式中: $F_j^{(k)}$ 表示浮体 k 在 j 运动模式方向所受的合力或合力矩; $X_j^{(k)}$ 为浮体 k 在 j 运动模式方向的运动位移; $F_{fj}^{(k)}$ 、 $F_{cj}^{(k)}$ 、 $F_{Jj}^{(k)}$ 、 $F_{Sj}^{(k)}$ 为作用在浮体 k 上的各个力在 j 运动模式方向的分量。

1.1 流体力

作用在鹰式波浪能装置浮体 k 上的流体力可分解为:

$$\vec{F}_f^{(k)} = \vec{F}_w^{(k)} + \vec{F}_r^{(k)} \quad (3)$$

式中: \vec{F}_w 为绕射势及入射势产生的波浪激励力; \vec{F}_r 为辐射势产生的辐射力。

根据伯努利方程,浮体 k 上受到的 j 运动模式方向的波浪激励力可表示为

$$F_{wj}(k) = \iint_S i\rho\omega(\Phi_I^{(k)} + \Phi_D^{(k)})n_j ds \tag{4}$$

辐射力可以表示为：

$$F_j(k) = \iint_S i\rho\omega\Phi_j^{(k)}n_j ds = \omega^2 m_{ji}^{(k)} X_j + i\omega\mu_{ji}^{(k)} X_j \tag{5}$$

其中： $m_{ji}^{(k)} = \iint_S \rho\text{Re}(\phi_r^{j(k)})n_j ds$ ， $\mu_{ji}^{(k)} = \iint_S \rho\omega\text{Im}(\phi_r^{j(k)})n_j ds$ ($i, j=1, 3, 5$)

式中： ρ 为计算域流体密度； ω 为波浪圆频率； S 为湿表面； n_j 为浮体 k 湿表面的法线在 j 运动模式方向的投影； $m_{ji}^{(k)}$ 为 k 浮体 i 模态的运动在 j 运动模式方向引起的附加质量， $\mu_{ji}^{(k)}$ 为 k 浮体 i 模态的运动在 j 运动模式方向引起的阻尼系数。

1.2 阻尼力

阻尼力为驱动液压缸克服液压油阻力做往复运动的力，记为 \vec{F}_C 。 \vec{v}_A 为 A 点的速度矢量； \vec{v}_B 为 B 点的速度矢量； \vec{v}_{AB} 为 A 相对 B 点的速度矢量； v_{ABL} 为 \vec{v}_{AB} 在沿 A、B 两点连线方向的分量。假设 A 点的阻尼力 \vec{F}_{CA} 大小与 v_{ABL} 成正比，当 A、B 两点相对运动位移较小时， \vec{F}_{CA} 的方向始终沿 A、B 两点连线。故：

$$F_{CA} = -Cv_{ABL} \tag{6}$$

式中： C 为液压缸内压提供的外加阻尼； $v_{ABL} = \sum_{j=1,3} (v_{Aj} - v_{Bj})n_{jl}$ ， n_{jl} 为 j 方向的矢量沿着 A、B 连线方向的分量，其中 $j=1, 3$ 。

其中， v_A 在 A、B 连线的投影可表达为：

$$v_{Aj} = -i\omega[X_i^{(1)} + (1 - \delta_{2j})X_3^{(1)}R_{A1j}]，j=1, 2, 3，i=3, 5 \tag{7}$$

类推，则 B 点的速度表示如下：

$$v_{Bj} = -i\omega[X_i^{(2)} + (1 - \delta_{2j})X_3^{(2)}R_{B2j}]，j=1, 2, 3，i=3, 5 \tag{8}$$

1.3 铰接力

如图 1 所示，鹰头吸波浮体与水下附体为两个独立的浮体，两者之间通过门铰连接。无论在静水中，还是运动过程中，两者均受到铰接力 F_j 的约束作用，作用点在 C 点。由于 C 点不仅位于鹰头吸波浮体上，同时也位于水下附体上。则 C 点的速度可以同时表示为：

$$\vec{v}_C = \vec{v}_1 + \vec{\omega}_1 \times \vec{r}_{c1} \tag{9}$$

$$\vec{v}_C = \vec{v}_2 + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_{c2} \tag{10}$$

考虑鹰头吸波浮体与水下附体只在 $j=1, 3$ 运动模式受铰接力作用， $V_j = -i\omega X_j$ ，则：

$$-i\omega_l X_{1l} + \omega_l R_{C1j} = -i\omega_l X_{2l} + \omega_l R_{C2j} \quad (l=4-j) \tag{11}$$

式中： \vec{v}_1 、 \vec{v}_2 和 \vec{v}_c 分别为点 1、点 2 和点 C 的速度矢量； \vec{r}_{c1} 、 \vec{r}_{c2} 分别为点 C 与 1 点、点 C 与点 2 之间的距离矢量。

1.4 静水回复力

静水回复力 \vec{F}_{Sj} 为鹰头吸波浮体做简谐运动时排水体积变化引起的浮力变化。由于模式 j 产生的

静水回复力 \vec{F}_{sj} 可用下式计算:

$$\vec{F}_{sj} = - \int_S \rho g \eta \vec{n} ds = -\rho g A (X_j \cdot \vec{e}_3 - \eta) \quad (12)$$

式中: A 为水线面面积, 当物体完全淹没时, $A=0$ 。

1.5 最优外加阻尼计算

鹰式波浪能装置能量转换系统为液压式, 由液压缸提供阻尼力, 有效做功为克服阻尼力运动过程所做的功。阻尼力的大小, 不仅影响了能量转换系统的转换效率, 而且影响了鹰头吸波浮体俘获波浪能的功率。

一个入射波周期里, 波浪能装置克服阻尼力所做的功及得到的平均功率为:

$$w = - \int_0^T f_C \operatorname{Re} [V_{ABL} e^{-i\omega t}] dt = C \int_0^T \operatorname{Re} [V_{ABL} e^{-i\omega t}]^2 dt \quad (13)$$

$$P = \frac{w}{T} = \frac{C}{2} \{ \operatorname{Re} [V_{ABL}]^2 + \operatorname{Im} [V_{ABL}]^2 \} = \frac{C}{2} |V_{ABL}|^2 = \frac{C}{2} V_{ABL} \bar{V}_{ABL} \quad (14)$$

当平均功率取得最大值时, 阻尼力定义为最优外加阻尼, 得:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial C} \right|_{C=C_{opt}} = \frac{1}{2} \left(V_{ABL} \bar{V}_{ABL} + C \frac{\partial V_{ABL}}{\partial C} \bar{V}_{ABL} + C V_{ABL} \frac{\partial \bar{V}_{ABL}}{\partial C} \right) \Bigg|_{C=C_{opt}} = 0 \quad (15)$$

式中: V_{ABL} 与 \bar{V}_{ABL} 共轭; C_{opt} 为最优外加阻尼。

1.6 俘获宽度比计算

俘获宽度比定义为: 单位宽度的波浪能装置俘获波浪能的功率与单位宽度的来波功率的比值。通常用俘获宽度比的大小来衡量一个波浪能装置俘获波浪能的能力的强弱, 同时也为优化波浪能装置的设计的标准。

波浪能装置对应的来波功率为:

$$P_0 = \rho g H^2 \frac{\omega}{16k} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] B \quad (16)$$

由(15)式可知, 波浪能装置在最优外加阻尼力下的俘获宽度比为:

$$\eta = \frac{P_{opt}}{P_0} \quad (17)$$

式中: η 为波浪能装置最优阻尼下的俘获宽度比; P_0 为波浪能装置迎波宽度内入射波功率; g 为重力加速度; H 为入射波浪波高; k 为波数; B 为波浪能装置的迎波宽度; P_{opt} 为波浪能装置在最优外加阻尼下俘获的波浪能功率。

2 数值模拟

基于上述力学分析的基础上, 进行鹰式波浪能装置的水动力学数值模拟。按照鹰式波浪能装置预定投放海域的海况为数值模拟的试验环境, 入射波为线性规则波, 周期范围为 1-16 s, 波幅为 1 m, 方向与鹰式波浪能装置之间角度为 0° 。

2.1 波浪力分析

在单位波幅作用下, 鹰头吸波浮体及水下附体三种运动模式下受到的波浪激励力及力矩, 如图 2(a)~(c) 数据曲线所示, 前者受到的波浪激励力或力矩均比后者受到的小。

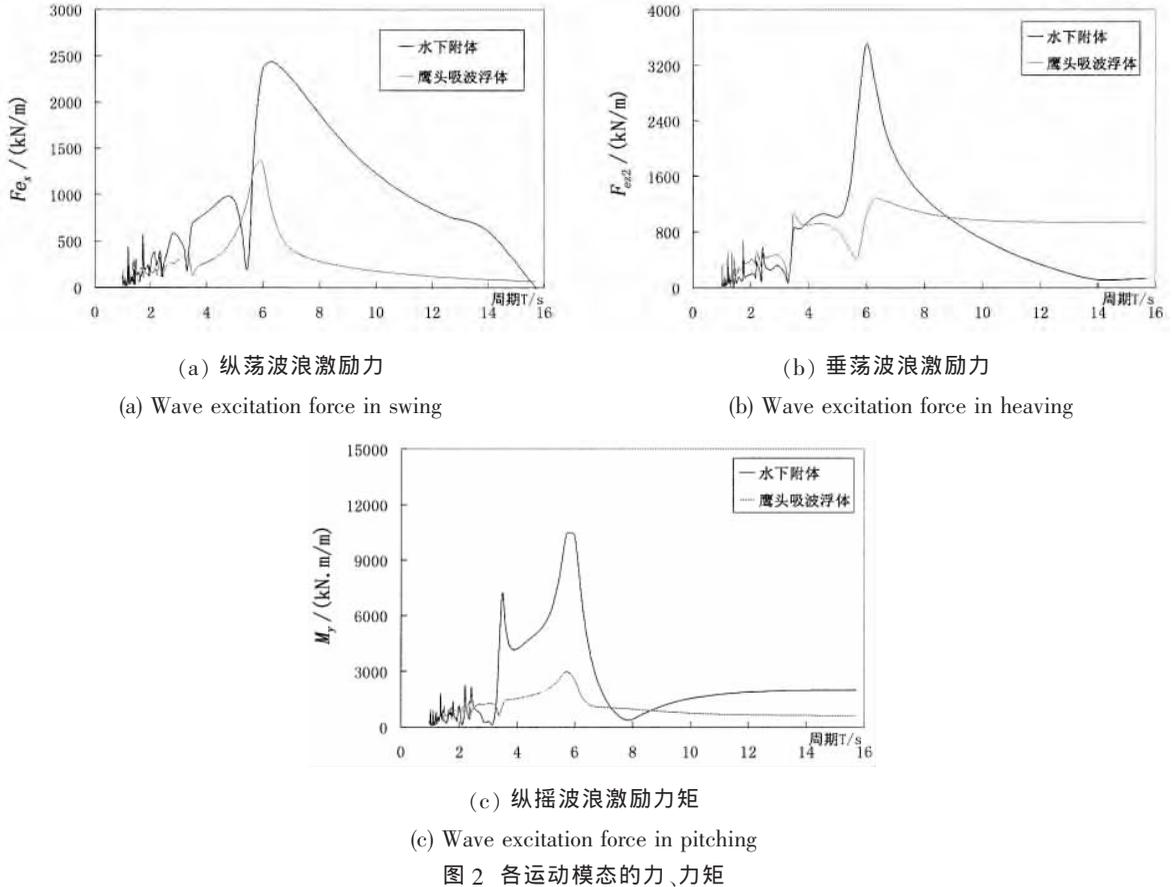


Fig.2 Force and torque in different motion modes

2.2 附加质量

图 3、图 4 分别为鹰头吸波浮体和水下附体在三种模式下运动产生的附加质量。从图中可观察到，三种运动模式下鹰头吸波浮体的附加质量均小于水下附体的附加质量。另外鹰头吸波浮体的纵摇运动、纵荡运动附加质量小，然而水下附体在这两个模式下运动的附加质量大。一般情况下，附加质量的数值大小主要是由鹰头吸波浮体和水下附体做不同运动时，提供的阻碍水质点运动的面积决定的。因此，在波浪能装置设计中，某个模式下附加质量越大，说明装置在此模式下的运动惯性越大，产生运动所需的动力越大。

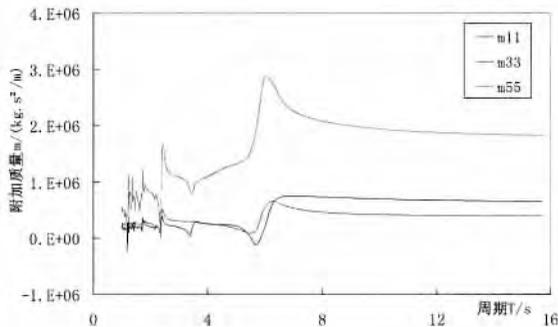


图 3 鹰头吸波浮体的附加质量

Fig.3 Added mass of the Eagle head buoy

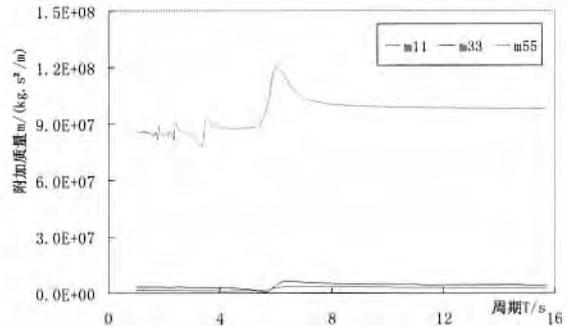


图 4 水下附体的附加质量

Fig.4 Added mass of the underwater appendage

2.3 阻尼系数

图 5、图 6 分别为鹰头吸波浮体和水下附体在三种模式下运动产生的阻尼系数。三种模式运动下，

前者产生的阻尼系数大小排序与后者相同,但数值上前者均远远小于后者。在波浪能装置设计中,阻尼系数通常表明了装置在做俘获波浪能的运动中遇到的阻力。某种模式下阻尼系数越小,则波浪能装置在做该模式运动时遇到的阻力越小;反之,当某种模式下阻尼系数越大,则波浪能装置在做该模式运动时遇到的阻力越大。例如,图 2-9 中,纵摇运动模式下,鹰头吸波浮体的阻尼系数小于水下附体的阻尼系数,则鹰头吸波浮体遇到的阻力远比水下附体小。如果两者之间的阻尼系数差值越大,那么两者纵摇运动幅度差距越大,更利于波浪能装置俘获波浪能。

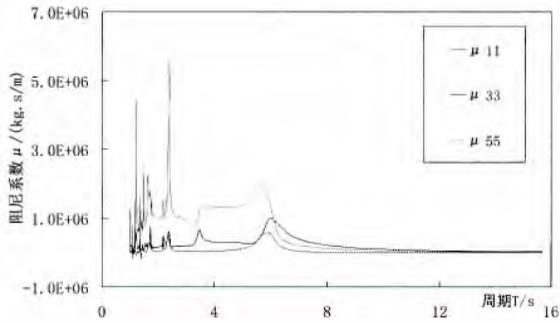


图 5 鹰头吸波浮体的阻尼系数

Fig.5 Damping coefficient of the Eagle head buoy

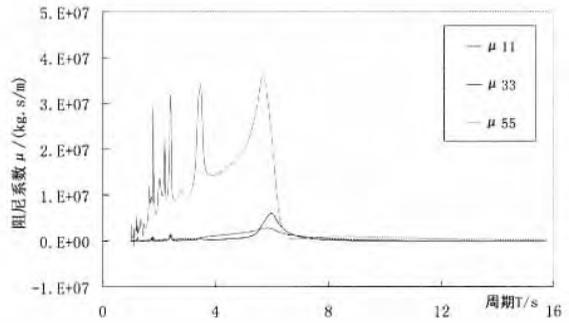


图 6 水下附体的阻尼系数

Fig.6 Damping coefficient of the underwater appendage

3 优化设计

液压缸以阻尼力做功的形式将吸收的波浪能转换为液压能。阻尼力是决定俘获宽度比的重点,而外加阻尼是确定阻尼力的关键。通过最优外加阻尼可得到最优阻尼力,从而获得最佳俘获宽度比值,保证鹰式波浪能装置能够持续地吸收波浪能并高效地转换为液压能。

(1)式中一共 6 个式子,含有 10 个未知数, $X_j^{(k)}$ ($k=1,2,j=1,3,5$), F_{C_j} ($j=1,3$), F_{F_j} ($j=1,3$), 需要首先确定最优外加阻尼,再联合(1)、(6)、(7)、(8)和(11)式,才可以解出方程组。

假设外加阻尼 $C=100\ 000\sim 800\ 000\text{ Ns/m}$, 根据上述数值模拟结果以及(15)~(17)式, 计算各周期下对应的俘获宽度比曲线如图 7 所示。从图 7 中计算得最优外加阻尼为 $C_{opt}=300\ 000\text{ Ns/m}$, 此时最优俘获宽度比曲线如图 8 所示。

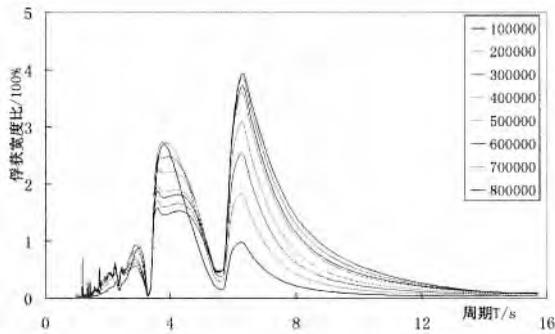


图 7 不同外加阻尼对应的俘获宽度比

Fig.7 Capture width ratio of different outer damping

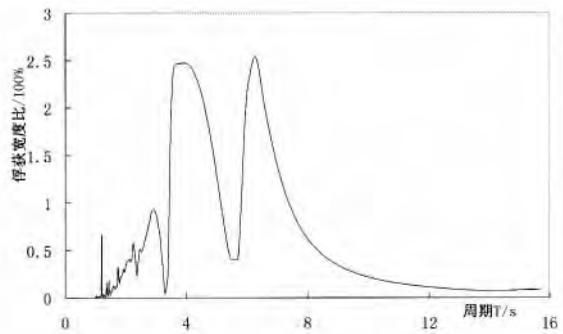


图 8 最优俘获宽度比

Fig.8 Optimal capture width ratio

根据最优外加阻尼 $C_{opt}=300\ 000\text{ Ns/m}$, 计算装置在单位幅值入射波作用下纵荡、垂荡和纵摇三种模式的运动幅值、液压缸提供的阻尼力、液压缸丝杠的运动速度、液压缸与装置铰接点上的铰接力(纵

荡方向及垂荡方向),如图 9-14 所示。

从图 9~11 观察得到,同种模态下,水下浮体的运动幅度均小于鹰头吸波浮体的运动幅度。对于鹰头吸波浮体,随着周期增大,运动幅值不断增大。对于水下附体,无论哪种运动模态下,运动幅值达到最大值后慢慢减小。在单位幅值的入射波作用下,垂荡运动模态下的最大运动位移幅值约为纵荡运动模态下的 2 倍,纵摇运动模态的最大运动角度幅值为 20.92°。

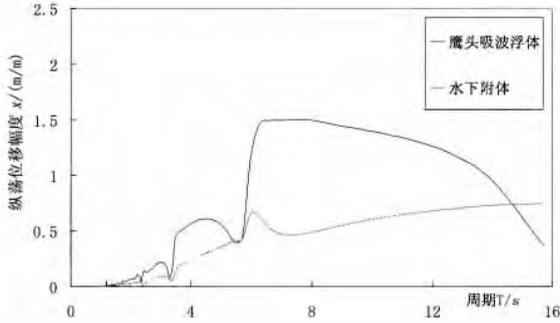


图 9 纵荡运动的位移幅值

Fig.9 Displacement amplitude in swing

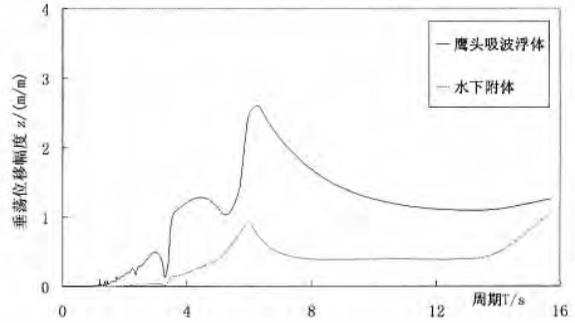


图 10 垂荡运动的位移幅值

Fig.10 Displacement amplitude in heaving

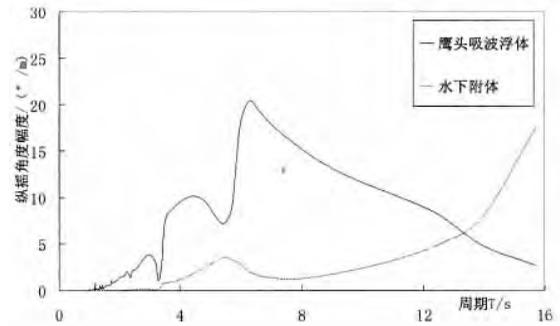


图 11 纵摇运动的角度幅值

Fig.11 Angle amplitude in pitching

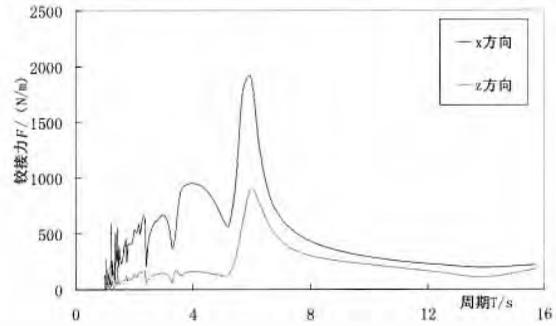


图 12 铰接力

Fig.12 Hinge force

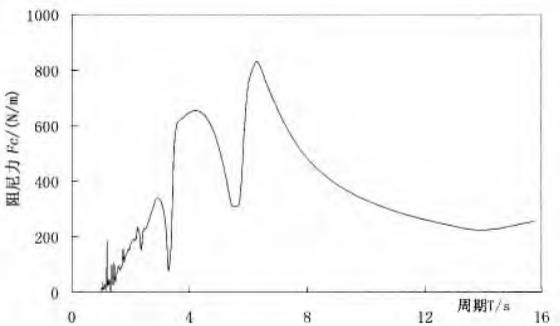


图 13 阻尼力

Fig.13 Damping force

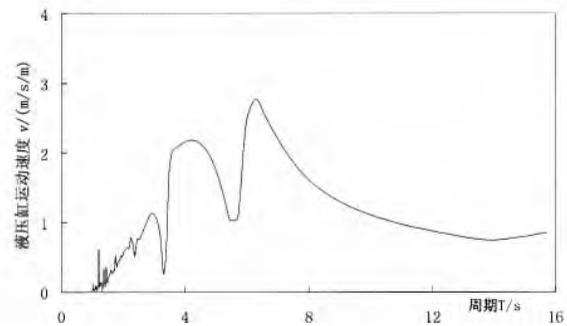


图 14 液压缸运动速度

Fig.14 Velocity of the hydraulic cylinder

图 12 描述了液压缸铰接在水下附体和鹰头吸波浮体上的铰接力。由于液压缸两个安装端点只在 x 轴、 z 轴有相对运动,则本文对这两个方向的分力进行了计算。两个方向的分力在数值上差距较小,变化趋势也基本一致,都是先增大后减小,再趋于定值。两个分力最大峰值几乎同时现在 $T=5.98$ s,此时 $F_x=1910.3$ kN, $F_z=898.3$ kN。

图 13、图 14 分别为液压缸提供最优外加阻尼下的阻尼力及对应的液压缸丝杠运动速度。最优外加阻尼力与速度之间为线性比例关系,两者随周期变化趋势一致,经历了三次先增后减。在 $T=6.28$ s 时,出现了最大阻尼力 $F_c=831.42$ kN,以及液压缸的最大运动速度 $v=2.77$ m/s。

4 结 论

本文对鹰式波浪能发电装置进行了水动力分析,建立了力学模型,通过数值模拟,获得了最优外加阻尼和最优俘获宽度比,确定了优化后的设计方案。得到以下结论,为装置的实海况样机设计提供理论参考依据:

(1) 鹰式波浪能装置对波浪频率响应范围较宽,对周期 4–8 s 的入射波表现出良好的水动力学性能。

(2) 水下附体作为稳定波浪能装置的基础结构,达到了设计效果。水下附体在做俘获波浪能的运动—纵摇运动时,受到的波浪力和波浪力矩均大于其它两种模态下的运动,但是附加质量与附加阻尼系数却大于两种模态下的数值,并且数值模拟的结果证实了水下附体各模态下运动幅值均较小。

(3) 鹰式波浪能装置可实现高效俘获波浪能。在确定最优外加固定阻尼 $C=300\ 000\ \text{Ns/m}$ 后,在入射波周期为 6.28 s 时装置最高的转换效率达到 $\eta=385\%$ 。

(4) 鹰头吸波浮体具有较强俘获波浪能的能力。当外加阻尼为最优值时,在单位幅值的入射波作用下,鹰头吸波浮体与水下附体在纵摇运动模态下的最大角度幅值差值达到 18.36° 。

参 考 文 献:

- [1] 覃 岭, 吴必军. 双圆柱形浮体波能装置振动特性分析[J]. 船舶力学, 2013, 11: 1253–1261.
Qin Ling, Wu Bijun. Oscillating properties of a wave energy device consisting of double cylindrical floats[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(11): 1253–1261. (in Chinese)
- [2] 赵海涛, 沈家法. 浮力摆式波浪能装置水动力性能的试验研究[J]. 船舶力学, 2013, 10: 1097–1106.
Zhao Haitao, Shen Jiafa. An experimental study on hydrodynamic performance of a bottom-hinged flap wave energy converter[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(10): 1097–1106. (in Chinese)
- [3] Sheng Songwei, You Yage, Wang Kunlin, Zhang Yaquin, et al. Research and development of sharp eagle wave energy converter[C]// 5th International Conference on Ocean Energy, 4 November, 2014, Halifax, Canada.
- [4] 盛松伟, 游亚戈, 王坤林, 张亚群. 10kW 鹰式波浪能发电装置研究[C]// 第二届中国海洋可再生能源发展年会暨论坛论文集. 广东广州: 国家海洋局, 2013: 378–384.
Sheng Songwei, You Yage, Wang Kunling, et al. Research on 10kW sharp eagle wave energy converter[C]// In: National Ocean Technology Center, eds. The 2th session of the China marine renewable energy development forum annual meeting proceedings. Guangdong Guangzhou: National Ocean Technology Center, 2013: 378–384. (in Chinese)
- [5] 张亚群, 盛松伟, 游亚戈, 王振鹏, 王坤林, 吝红军. 100kW 一基多体漂浮鹰式波浪能发电装置模型试验研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 04: 73–80.
Zhang Yaquin, Sheng Songwei, You Yage, et al. 2014. Experimental study on a 100 kW one-base multi-buoy floating ‘Sharp eagle’ wave energy converter[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(4): 73–80. (in Chinese)
- [6] 王坤林, 盛松伟, 游亚戈, 张亚群, 姜家强, 吝红军, 叶 寅. “鹰式一号”漂浮式波浪能装置冗余监控技术研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 04: 62–67.
Wang Kunling, Sheng Songwei, You Yage, et al. Research on the redundancy monitoring system of the ‘Sharp eagle No. 1’ floating wave energy converter[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(4): 62–67. (in Chinese)
- [7] 陈爱菊, 游亚戈, 盛松伟, 彭 雯. 鹰式波浪能装置旋转碰撞的损伤分析[J]. 新能源进展, 2014, 02: 129–134.
Chen Aiju, You Yage, Sheng Songwei, et al. Damage analysis of eagle wave energy converter in rotating-collision[J]. Advance in New and Renewable Energy, 2014, 2(2): 129–134. (in Chinese)
- [8] 陈爱菊, 游亚戈, 盛松伟, 彭 雯. 鹰式波浪能装置旋转碰撞的结构损伤过程研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 04: 6–11.
Chen Aiju, You Yage, Sheng Songwei, et al. Study on the structural damage of the eagle type wave energy converter due to the rotating-collision process[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(4): 6–11. (in Chinese)
- [9] Feng Peiyuan, Ma Ning, Gu Jiechong. Research on wave energy recovery by oscillating wings for energy efficient ship propulsion[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(9): 1021–1030.