

基于波浪能的浮式装备随体供电技术研究

郑雄波¹, 荆丰梅², 何邦琦¹, 周双红¹

(1. 哈尔滨工程大学 数学科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 北京石油化工学院 机械工程学院, 北京 102617)

摘要 随着我国海洋开发向深远海方向发展, 各类海洋装备长时间工作于深远海域, 能源供给极不方便, 迫切需要一种便捷的能源供给方式。针对上述需求, 提出了一种可内置于海洋浮式装备的波浪能转换装置, 以海洋浮式装备为载体, 依靠载体在波浪作用下的垂荡运动获取波浪能, 由于惯性波浪能转换装置的振子在弹簧的作用下产生振动, 驱动动力输出(PTO)系统做功, 将波浪能转换为电能。基于流体力学基本原理, 建立了浮体与波浪能装置的耦合运动学模型和能量转换数学模型, 分析不同参数对RAO和CWR的影响。通过优化分析, 本文所提出的基于惯性原理的双共振波浪能转换装置能量转换效率最高可达45%以上, 可有效地应用于海洋浮式装备, 具有可观的应用前景。

关键词 波浪能; 随体供电; 浮式装备

中图分类号 O325 : TK79 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2020)03-0236-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.03.011

Research on Built-in Power Supply Technology of Floating Equipment Based on Wave Energy

ZHENG Xiongbo¹, JING Fengmei², HE Bangqi¹, ZHOU Shuanghong¹

(1. Department of Mathematical Sciences, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Department of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract With marine development of China extending to deep-sea and open sea, all kinds of marine equipment are operated in deep sea and open sea for a long time, which causes the extremely inconvenience of energy supply, and hence there is an urgent need for a convenient method of energy supply. In response to the above requirement, this paper proposes a wave energy converter that can be built into marine floating equipment. The converter system uses marine floating equipment as a carrier, and relies on the heave motion of the carrier under the action of waves to obtain wave energy. The vibrator of the inertial wave energy converter generates vibration under the action of the spring, and drives the power output(PTO) system to work and convert the wave energy into electric energy. Based on the principle of fluid mechanics, a coupled kinematics model of floating body and wave energy converter and a mathematical model of energy conversion are established, and the influences of different parameters on RAO and CWR are analyzed. Through optimization analysis, the energy conversion efficiency of the double resonance wave energy converter based on inertia principle is up to 45%, which prove that the system can be effectively applied to marine floating equipment and has considerable application prospects.

Key words wave energy; built-in power supply; floating equipment

0 引言

随着我国海洋强国战略的有序推进, 海洋开发逐渐向深远海方向发展^[1], 无人船、深海潜器、水下航行器、海洋观测浮标等各种新型的海洋装备也陆续进入人们的视野, 并为我国的海洋开发做出了重要贡献^[2]。电能是支持海洋装备长期稳定工作和运行的基础^[3]。目前主要采用柴油机或太阳能与蓄电池组合供电的方式。受到海洋装备的空间和重量限制, 海洋装备不能过多地携带柴油, 柴油机供电的方式需要定期补充柴油, 给装备的能源补给造成了很大的困难。同时装备的空间也限制了太阳能或单纯蓄电池的供电能力^[4]。随着海洋开发的不断深入, 亟需一种新型电力能源补给方式。

波浪能作为一种储藏丰富、分布广泛的清洁能源, 为海洋装备提供了一种新型能源供给方式, 国内外研究人员在这方面做了大量的探索, 以寻求利用波浪能为增加海洋装备功能的解决方案。方子帆^[5]等人设计了一种摆式发电装置, 该装置可安装于水下航行器内部, 在波浪作用下, 航行器进行运动并使位于其内部的波浪能装置摆动, 通过减速器, 将不连续的往复摆动变为持续的圆周运动并驱动旋转发电机做功, 将波浪能转化为电能。丁文俊^[6]等人提出了一种基于晃动摆的波能发电系统, 晃动摆直接安装于永磁发电机的转子之上, 通过晃动摆的惯性作用带动转子运动, 完成波浪能的捕获。Bracco G^[7]等人提出了一种惯性波浪能发电装置 (ISWEC), 装置位于封闭的浮体内部, 通过类陀螺仪装置的惯性作用驱动 PTO 系统, 将机械能转化为电能。赵江滨^[8]等人提出了一种振动能量收集装置, 摆板形状的波浪捕获装置安装于外壳的两侧, 通过传动轴与内部传动装置相连。受波浪作用, 波能捕获装置随波浪做振荡运动, 通过传动系统带动发电机发电。Chen F^[9]等人提出了一种应用在低水流密度海域工作的密闭浮标波能转换装置, 并研究了质量对运动

响应振幅的影响。Yang C^[10]等人研究了半沉入浮标和沉入式浮标对波能转换效率的影响。Shu-Ting H^[11]等人提出了一种三自由度波能转换装置, 包括纵荡、垂荡以及纵摇, 并分别计算了不同自由度的最大能量转换效率。

本文结合海洋装备自身的结构和运动特性, 以海洋浮式装备为载体, 提出了一种基于惯性原理的内置式波浪能转换装置的设计方案, 针对该装置的能量转换性能进行了分析与优化, 获得了振子质量、弹簧刚度、阻尼等参数对装置能量转换效率的影响规律。研究表明, 基于惯性原理的双共振波浪能转换装置具有较高的能量转换效率, 可有效地应用于海洋浮式装备供电。

1 波浪能随体供电装置设计研究

本文提出的一种基于惯性原理的内置式波浪能转换装置以海洋浮式装备为载体, 依靠载体在波浪作用下的垂荡的运动获取波浪能, 由于惯性波浪能转换装置的振子在弹簧的作用下产生振动, 驱动动力输出 (PTO) 系统做功, 将波浪能转换为电能。装置原理如图 1 所示。

如图 1 (a) 所示, 本文所设计的内置式波浪能装置质量块、支撑结构、传动机构、以及 PTO 系统组成。质量块即为装置的振子, 为装置的运动部件; 支撑结构主要包括顶板、运动导轨和地板, 支撑装置的主要部件; 传动机构由导向轮、V型轮和结题轮组组成, 用于将振子的运动传递给 PTO 系统, PTO 系统包括弹簧和发电机, 弹簧用于调节系统的刚度系数以优化振子的运动性能, 使系统以最大的效率输出能量。如图 1 (b) 所示, 波浪能装置内置于浮式装备内部, 浮式装备既是波浪能装置的载体, 同时亦为装置的获能浮子, 浮子、振子以及 PTO 系统构成双共振系统。当波浪作用于浮式装备时, 浮式装备做六自由度运动, 其垂荡运动激励内部振子振动将波浪能转化为振子的机械能, 振子驱动 PTO 系统做功将机械能转换为电能。

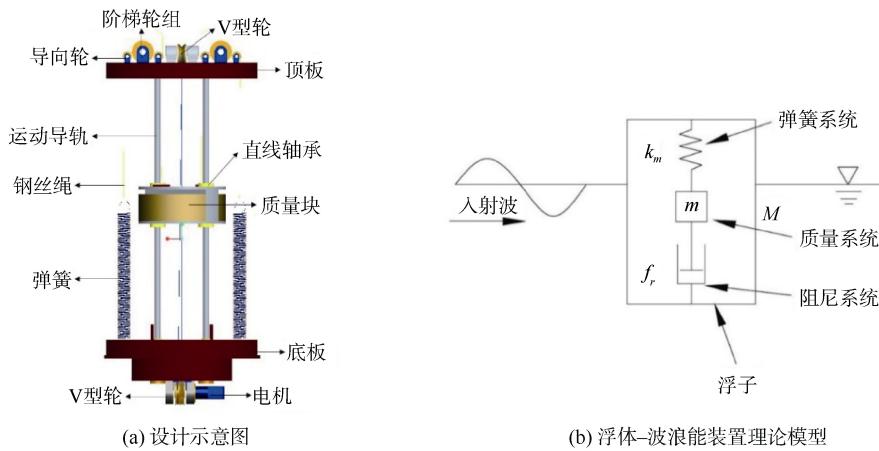


图 1 内置式波浪能装置设计原理图

Fig. 1 Design schematic diagram of built-in wave energy device

2 波浪能随体供电装置的能量转换数学模型

根据上述内置式波浪能装置的工作原理假设作用于浮体的波浪为线性规则波，且流场内流体为无粘、无旋、不可压缩的理想流体的假设下，针对垂荡运动，利用牛顿第二定律可得浮标的耦合运动方程为^[12]

$$\begin{cases} (M-m)\ddot{x}_f = f_e + f_r + f_h - f_{\text{PTO}} \\ m\ddot{x}_m = f_{\text{PTO}} \end{cases} \quad (1)$$

PTO 作用力为

$$f_{\text{PTO}} = -C\dot{x}_r - kx_r \quad (2)$$

式中： M 是浮体总质量， m 为内部振子的质量，因此 $M-m$ 是浮子质量； C 为 PTO 系统的阻尼系数； k 为弹簧的刚度系数； x_f 和 x_m 分别是浮子和内部振子在大地坐标系下的运动， \ddot{x}_f 是浮子运动加速度， \ddot{x}_m 是内部振子运动加速度； $x_r = -x_f + x_m$ 是内部质量块和外部浮体之间的相对运动； f_e 是垂

$$[Z] = \begin{bmatrix} -\omega^2(M-m+\mu) + (B+k) + i\omega(\lambda+C) & -k - i\omega C \\ -k - i\omega C & -\omega^2m + k + i\omega C \end{bmatrix} \quad (5)$$

波能平均输出功率可用 PTO 阻尼系数 C 和相对运动幅值 \hat{x}_r 表示

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T C|\dot{x}_r|^2 dt = \frac{1}{2}\omega^2 C|\hat{x}_r|^2 \quad (6)$$

装置的能量转换效率通过下面的公式进行计算：

$$\text{CWR} = \frac{P}{DP_\omega} \quad (7)$$

荡自由度波浪激励力； f_r 是辐射波浪力； f_h 是静水恢复力； f_{PTO} 是内部 PTO 系统和浮子之间的相互作用力。

设 \hat{x}_f 和 \hat{x}_m 是浮子和内部振子运动的复幅值， F 为单位波幅的波浪激励力， A 为波浪波幅， B 为恢复力系数，则可得基于垂荡的耦合运动方程的矩阵形式

$$\begin{bmatrix} M-m+\mu & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_f \\ \hat{x}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda+C & -C \\ -C & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_f \\ \dot{\hat{x}}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B+k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AF e^{-i\omega t} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

求解上述方程并定义浮子与振子相对运动的垂向响应振幅（RAO）为

$$\text{RAO} = \left| \frac{\hat{x}_r}{A} \right| = \left| \frac{\hat{x}_m - \hat{x}_f}{A} \right| = \left| \frac{F}{[Z]} \right| \left| \frac{\omega^2 m}{[Z]} \right| \quad (4)$$

其中

式中： P 是波能转换系统的平均输出功率； P_ω 是单位宽度内波浪的功率； D 是俘获宽度。由微幅波理论，线性规则波条件下 P_ω 可由下式计算^[13]

$$P_\omega = \frac{1}{16} \rho g H^2 \frac{\omega}{k_0} [1 + \frac{2k_0 d}{\sin h 2k_0 d}] \quad (8)$$

式中： ρ 为海水密度； H 为波高； ω 入射波圆频率； k_0 为波数； d 为水深。由能量转换效率的解析

式可以发现, 决定该波浪能装置能量转换性能的因素主要包括由内部质量块质量 m 和浮体质量 M , 弹簧的刚度系数 k 、PTO 的阻尼系数 C 、波浪圆频率 ω , 波幅 A 。以下针对上述因素分析装置的能量转换性能。

3 波浪能随体供电装置能量转换性能分析

本文中规则圆柱形浮体作为研究对象, 圆柱半径 6 m、高 10 m。浮体与波浪能转换装置的总质量为 510 000 kg。本文采用基于势流理论的频域水动力算法计算外部圆柱形浮体的水动力系数。由式(4)和(7)可知, 在浮体形状、总质量一定的情

况下, RAO 和 CWR 只受内部振子质量 m 、弹性刚度系数 k 与 PTO 阻尼 C 的影响。因此本文主要研究振子质量 m 、弹簧刚度系数 k 、PTO 系统阻尼系数 C 与浮体质量 M 、回复力系数 B 和波浪阻尼系数 μ 之间的关系对波浪能装置运动和能量转换性能的影响规律。

保持弹簧刚度系数、PTO 系统阻尼系数 C 与浮体回复力系数 B 和波浪阻尼系数 μ 的比值不变, 其中 $k=0.2B$, $C=\mu$, 改变振子的质量, 研究振子质量与浮体总质量的比值对装置运动性能和能量转换性能的影响规律, RAO 和 CWR 曲线如图 2 所示。

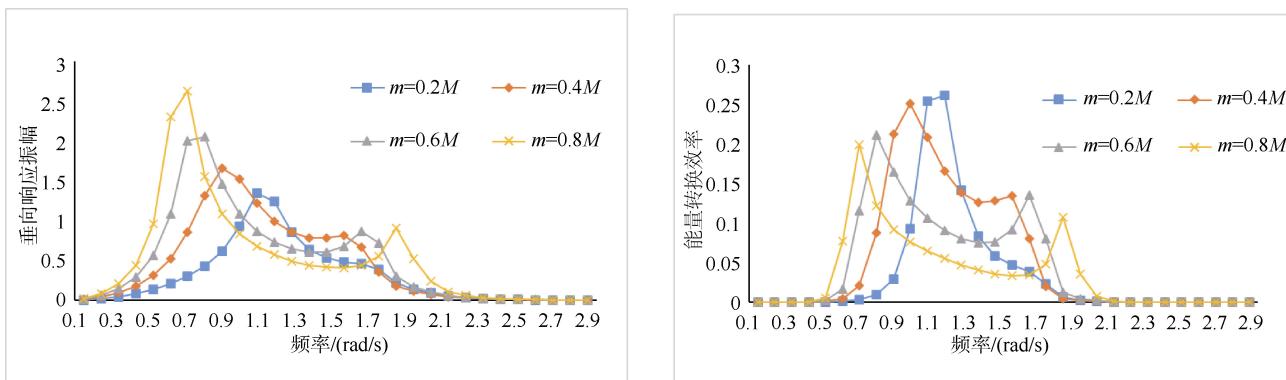


图 2 $k=0.2B$, $C=\mu$, 不同 m 情况下的 RAO 和 CWR 曲线
Fig. 2 RAO and CWR curves under different m when $k=0.2B$, $C=\mu$

由图 2 可以看出, 令弹性系统刚度系数 k 与 PTO 阻尼 C 固定, 随着频率逐渐增大, RAO 呈振荡趋势。 $m=0.8M$ 时, 浮体的运动 RAO 曲线呈现 2 个波峰, 分别在频率为 0.7 rad/s 和 1.9 rad/s 处达到极大值。随着振子质量 m 减小, RAO 最大值逐渐减小, 且双共振系统逐渐演变为单共振系统。 $m=0.2M$ 时, RAO 曲线呈先增后减趋势, 在频率为 1.1 rad/s 时达到极大值。随着振子质量 m 增加, 由单共振系统变为双共振系统, 并且极大值逐渐变小。 $m=0.2M$, 频率 1.2 rad/s 时, CWR 达到最大值。但有效波频范围较窄, 适合单一海况, $m=0.4M$ 时, 有效波频明显增加, 适用于较为复杂的海况。在上述刚度系数和阻尼系数条件下, 通过改变振子质量, 装置的能量转换效率最大可

达 25%以上。

保持振子质量 m 、PTO 系统阻尼系数 C 与浮体总质量 M 和波浪阻尼系数 μ 的比值不变, 其中 $m=0.4M$, $C=\mu$, 改变弹簧的刚度系数, 研究弹簧刚度系数与浮体回复力系数的比值对装置运动性能和能量转换性能的影响规律, RAO 和 CWR 曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 令振子质量 m 与 PTO 阻尼 C 固定, 随着频率逐渐增大, RAO 呈振荡趋势, 增大 PTO 系统阻尼 C 不能使系统由双共振演变为单共振, 但会导致 2 个共振频率增大, 且 RAO 最大值逐渐减小; 随着频率逐渐增大, CWR 呈振荡趋势。当 $k=0.4B$, 频率为 1.1 rad/s 时, CWR 为最大值, 但有效波频范围较窄; $k=0.2B$ 时, 有效波

频范围较宽，可以捕获更多频率的波浪，但能量捕获效率稍低。在上述振子质量和 PTO 阻尼系数条件下，通过改变弹簧刚度系数，装置的能量转换效率最大可达 35%左右。

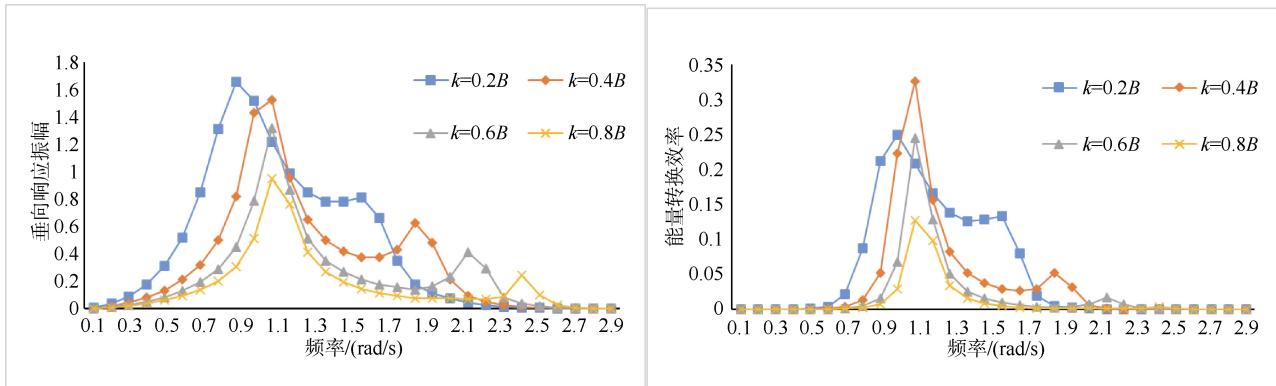


图 3 $m = 0.4M$, $C = \mu$, 不同 k 情况下的 RAO 和 CWR 曲线
Fig. 3 RAO and CWR curves under different k when $m=0.4M$, $C=\mu$

保持振子质量 m 、弹簧刚度系数 k 与浮体总质量 M 和浮体回复力系数 B 的比值不变，其中 $k = 0.2B$, $m=0.4M$ ，改变 PTO 阻尼系数，研究

PTO 阻尼系数与浮体波浪阻尼系数的比值对装置运动性能和能量转换性能的影响规律，RAO 和 CWR 曲线如图 4 所示。

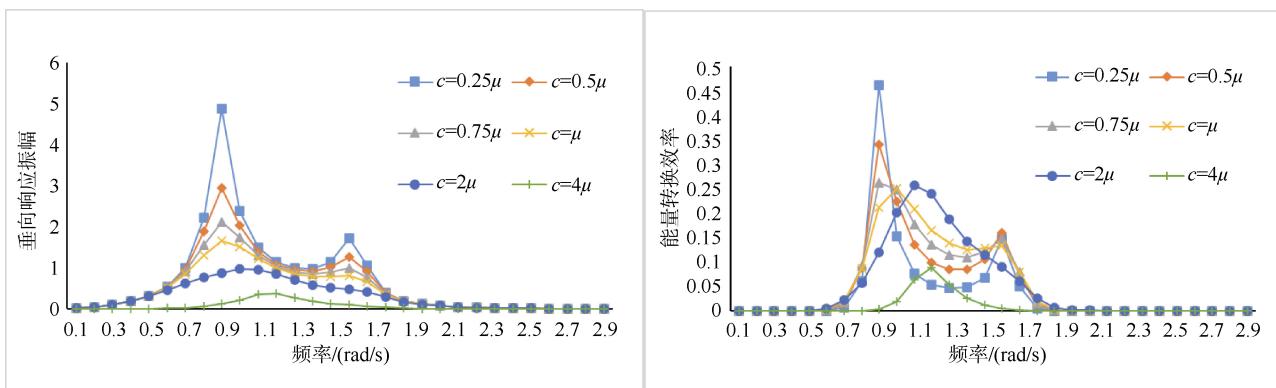


图 4 $k = 0.2B$, $m = 0.4M$, 不同 C 情况下的 RAO 和 CWR 曲线
Fig. 4 RAO and CWR curves under different C when $k=0.2B$, $m=0.4M$

由图 4 可以看出，令振子质量 m 与弹性系统刚度系数 k 固定，在 PTO 系统的阻尼较小时，浮体的 RAO 呈振荡变化趋势，可明显看出有 2 个共振频率，且共振频率基本保持不变，阻尼越小，RAO 最大值越大；在 PTO 系统的阻尼较大时，双共振系统逐渐变为单共振系统。在 PTO 系统的阻尼较小时，CWR 呈振荡变化的趋势；在 PTO 阻尼系数较大时，CWR 呈先增后减的趋势；随着 PTO 系统的阻尼增大，CWR 的最大值在逐渐减小。在上述

振子质量和弹簧刚度系数条件下，通过改变 PTO 阻尼系数可以发现：在 $C = 0.25\mu$ ，频率为 0.9 rad/s 时，装置的能量转换效率最大，可达到 45%；有效波频范围为 $0.84 \sim 0.97 \text{ rad/s}$ ，平均能量转换效率为 30%。

4 结束语

本文结合海洋装备自身的结构和运动特性，以海洋浮式装备为载体，提出了一种基于惯性原理的

内置式波浪能转换装置的设计方案, 针对该装置的能量转换性能进行了分析与优化, 获得了振子质量、弹簧刚度、阻尼等参数对装置能量转换效率的影响规律。研究表明: 在装置形状、总质量固定的情况下, RAO 和 CWR 只受内部振子质量 m 、弹簧刚度系数 k 与 PTO 阻尼 C 的影响。内部振子质量从小增大会使装置由单共振系统逐渐变为双共振系统; 弹簧刚度系数增大会导致共振频率向高频方向移动; 在 PTO 阻尼较小的情况下, 改变 PTO 阻尼, 不会改变共振频率, 在 PTO 阻尼较大的情况下, 双共振系统会变成单共振系统。通过优化分析可知: 本文所提出的基于惯性原理的双共振波浪能转换装置具有较高的能量转换效率, 最高能量转换效率可达 45% 以上, 在有效频率范围内, 平均能量转换效率可达 30%, 可有效地应用于为海洋浮式装备供电。

参考文献

- [1] 于海斌. 海洋强国需要水下机器人[J]. 机器人产业, 2017 (1): 42-45.
- [2] 孙涛, 赵江滨, 严新平, 等. 基于 AUV 的波浪能发电技术研究现状与展望[J]. 中国航海, 2016, 39 (4): 24-28, 65.
- [3] 孙承亮, 赵江滨, 崔天宇, 等. AUV 动力电池技术的应用现状及展望[J]. 船舶工程, 2017 (7): 69-74.
- [4] 任丽彬, 桑林, 赵青, 等. AUV 动力电池应用现状及发展趋势[J]. 电源技术, 2017, 41 (6): 952-955.
- [5] 方子帆, 葛旭甫, 何孔德, 等. 无人水下航行器摆式发电装置设计与研究[J]. 中国机械工程, 2018, 29 (19): 42-47.
- [6] 丁文俊, 宋保维, 毛昭勇, 等. 浅水域探测型无人水下航行器波浪能发电系统设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51 (2): 141-147.
- [7] BRACCO G, GIORCELLI E, MATTIAZZO G. ISWEC: A gyroscopic mechanism for wave power exploitation[J]. Mechanism & Machine Theory, 2011, 46 (10): 1411-1424.
- [8] 赵江滨, 袁成清, 严新平, 等. 一种振动能量收集装置: 中国, CN201410481711.5[P]. 2014-12-17.
- [9] CHEN F, DUAN D R, ZHANG H, et al. Study on hydrodynamic performance of the sealed-buoy wave energy converter[C]/IOP Conference Series: Earth and Environmental science. Sanya: IOP, 2018.
- [10] YANG C, ZHANG Y L. Numerical study of hydrodynamic behavior and conversion efficiency of a two-buoy wave energy converter[J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30 (2): 235-248.
- [11] HUANG S T, Dong X C. Capture performance of a multi-freedom wave energy converter with different power take-off systems[J]. China Ocean Engineering, 2019, 33 (3): 288-296.
- [12] 戴遗山, 段文洋. 船舶在波浪中运动的势流理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [13] DEAN R B. Water wave mechanics for engineers and scientists[M]. Singapore: World Science Publishing Company, 1984.

(责任编辑: 张曼莉)