

文章编号: 1007-7294(2024)05-0689-08

# 自适应双稳态浮子式波浪能发电装置 在不规则波中的能量捕获性能研究

李扬<sup>1</sup>, 张显涛<sup>1,2</sup>, 肖龙飞<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学重庆研究院, 重庆 401135)

**摘要:** 传统双稳态波能装置已被证实可以在规则波中可以通过添加“自适应”特性, 来解决由阱内振荡引起的低能量吸收问题。本文以自适应双稳态浮子式波浪能发电装置为研究对象, 探讨装置在不规则波中的能量捕获性能情况。通过四阶龙格库塔法数值求解装置的运动控制方程, 探究在不同装置参数下, 自适应双稳态浮子式波浪能发电装置和传统双稳态浮子式波浪能发电装置以及线性浮子式波浪能发电装置的能量捕获性能表现。结果表明, 选取适当的装置参数可以使自适应双稳态浮子式波浪能发电装置显著提升能量捕获性能, 而且与线性和常规双稳装置相比, 更适应于实际海况中波浪能量捕获。

**关键词:** 波浪能; 自适应双稳态; 能量捕获性能

**中图分类号:** TV131.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.05.005

## Power capture performance of the adaptive bistable point absorber wave energy converter in irregular waves

LI Yang<sup>1</sup>, ZHANG Xian-tao<sup>1,2</sup>, XIAO Long-fei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Chongqing Research Institute, Shanghai Jiao Tong University, Chongqing 401135, China)

**Abstract:** Conventional bistable wave energy devices have been demonstrated in regular waves by adding adaptive properties to solve the problem of low energy absorption caused by the intrawell oscillation. The power capture performance of an adaptive bistable float wave energy converter (WEC) in irregular waves was studied. The motion equations were established and solved numerically by the fourth-order Runge-Kutta method. The power capture performance of adaptive bistable WEC, conventional bistable WEC and linear WEC was investigated under different device parameters. The results show that with proper device parameters, the adaptive bistable WEC can significantly improve the energy capture performance, and is more suitable for wave energy capture in actual sea conditions than linear and conventional bistable devices.

**Key words:** wave energy; adaptive bistable; power capture performance

收稿日期: 2023-12-27

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2023NSCO-MSX0432)

作者简介: 李扬(1989-), 男, 博士研究生;

张显涛(1990-), 男, 博士, 助理教授, 通讯作者, E-mail: zhxt@sjtu.edu.cn;

肖龙飞(1972-), 男, 博士, 教授。

## 0 引言

目前,越来越多的国家将海洋能源视为一种重要且有前景的资源<sup>[1]</sup>,其中波浪能作为一种重要的可再生海洋能源,受到了持续关注。目前,有振荡水柱式、推摆式、聚波蓄能式、振荡浮子式等多种波浪能发电装置形式,其中振荡浮子式的发展前景较广<sup>[2]</sup>,但如何提高波浪能转换器的能量捕获效率是一个关键问题,传统线性波浪能转换器的主要缺点之一是在波浪频率偏离共振频率时的性能较差<sup>[3]</sup>,而在真实海况中,波浪的频率是会实时变化的,这就导致了装置的低效率<sup>[4]</sup>。为了提高波能转换效率,目前已有的一种解决方案是对控制策略进行优化,已提出的一些新型的控制算法有反应控制<sup>[5]</sup>、随机最优控制<sup>[6]</sup>、锁定控制<sup>[7]</sup>、离合控制<sup>[8]</sup>、模型预测控制<sup>[9]</sup>等。基于数值或实验结果,这些控制算法起到了增强波能转换装置的能量捕获效率的作用。然而,此处有一个不可或缺的前提条件:需要对入射波的整体信息进行预测<sup>[10]</sup>。Zhang等<sup>[11]</sup>研究了预测偏差对控制的影响,也表明对波浪激励力进行可靠预测对于控制策略至关重要,同时,相位预测偏差显著影响控制性能,会降低控制的效率。该问题的另一种可能解决方案是应用非线性能量捕获机制,该机制不需要对入射波的整体信息进行预测。非线性能量捕获机制的研究,大致分为两个阶段。首先,研究人员基于两个对称的斜弹簧、环形磁铁、被动气动机械组件等组件提出了多种非线性能量捕获机制的实现形式<sup>[12-15]</sup>,他们的结果表明,与线性参照装置相比,这些基于非线性能量捕获机制的波浪能发电装置的能量捕获效率更高,我们将此类非线性能量捕获机制称为“传统”双稳态机制。但是,双稳态系统中都存在“势垒”,代表的是双稳态系统非稳定平衡位置处的势能大小,也意味着双稳态系统需要从一个稳定平衡态跨越到另外一个稳定平衡态需要的能量大小,双稳态系统势函数代表双稳态系统在弹簧形变过程中的势能大小,非线性系统随时间的势函数以及势垒是一定的,当入射波的振幅较小时,传统的双稳态系统可能会被困在一个阱中,难以跨越势垒,仅发生小幅值运动,导致能量捕获效率变差。为了解决这个问题,本文提出“自适应”双稳态机制,这是一种具有随时间变化势垒的双稳态系统,即使在入射波的振幅较小时,也能自动调整势垒以实现阱间振荡,可实现提供负刚度的大幅值运动,对于能量性能是有益的。已有研究表明,这种自适应双稳态装置通过选取适当的装置参数,在规则波中的表现优于线性装置和传统双稳态装置<sup>[2]</sup>。为了进一步研究自适应双稳态浮子式波浪能发电装置的特性,本文选取更接近真实海况的不规则波,研究该装置是否同样可以通过选取适当的装置参数,取得优于线性装置和传统双稳态装置的表现。

## 1 自适应双稳态浮子式波浪能发电装置

自适应双稳态波浪能发电装置基于非线性能量捕获机制,装置在线性系统基础上增加两个主弹簧和两个辅助弹簧,辅助弹簧的一端固定,另一端与主弹簧通过滑轮进行连接。去掉辅助弹簧和滑轮,将主弹簧直接与固定点连接,就是其对应的传统双稳态系统<sup>[14]</sup>。自适应双稳态装置与传统双稳态装置最大的不同在于使用了辅助弹簧。

如图1所示,装置的半球形浮子通过刚性杆连接到动力输出装置,其阻尼为 $C$ ,主弹簧刚度系数为 $K/2$ ,原始长度为 $l_0$ ,两个辅助弹簧的刚度系数为 $K_1$ ,当主弹簧和辅助弹簧都处于其原始长度时,两个滑块之间距离的 $1/2$ 为 $l_1$ ,定义弹簧组合参数 $\gamma_1 = l_1/l_0$ 。自适应双稳态系统(即两个主弹簧)的势函数为

$$U(t) = \frac{1}{2} K \left( \sqrt{z(t)^2 + l(t)^2} - l_0 \right) \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} K \left( \sqrt{z(t)^2 + l(t)^2} - l_0 \right) \frac{l(t)}{\sqrt{z(t)^2 + l(t)^2}} = K_1 (l_1 - l(t)) \quad (2)$$

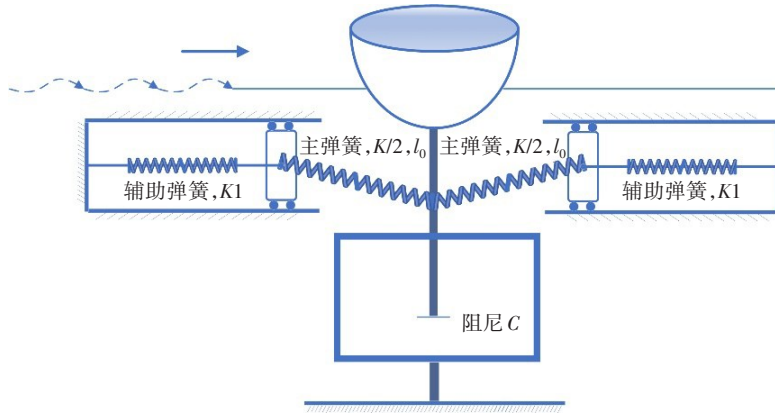


图1 自适应双稳态浮子式波浪能发电装置示意图

Fig.1 Schematic of a point absorber WEC with a novel adaptive bistable power capture mechanism

Zhang 等在文献[2]中对其进行了分析:对于传统的双稳态系统,  $\gamma_1$  值越小, 势垒越高,  $\gamma_1$  的每个值对应于势函数的特定形状, 而对于自适应双稳态系统, 给定的位移  $z(t)$  对应于给定的  $\gamma(t)$  (其定义为在  $t$  时刻两个滑块之间距离的一半与主弹簧的原始长度之比), 自适应双稳态系统具有了“时变”特性, 其势函数在不同时刻可以取到不同的  $\gamma_1$  值。因此, 具有相同  $\gamma_1$  值的自适应双稳态系统的势垒可能低于传统双稳态系统的势垒。

## 2 数学模型

根据 Cummins 等<sup>[6]</sup>在 1962 年提出的应用到船舶在波浪上运动响应的时域方程理论来求解非线性波浪能发电装置在规则波中的响应。文献[2]中得到自适应双稳态浮子式波浪能发电装置的运动控制方程为

$$(M + A(\infty))\ddot{z}(t) + \int_0^t \Gamma(t - z)\dot{z}(\tau) d\tau + C\dot{z}(t) + \rho g \pi R^2 z(t) + K \left( 1 - \frac{l_0}{\sqrt{l(t)^2 - z(t)^2}} \right) z(t) = f_E(t) \quad (3)$$

$$\Gamma(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (4)$$

$$f_E(t) = \sum H \sqrt{\frac{2g^3 \rho B(\omega)}{\omega^3}} (\omega_i t + \varphi_i) \quad (5)$$

本文使用 JONSWAP 谱来生成随机不规则波时历<sup>[10]</sup>, 其能量密度方程为

$$S_\xi(\omega) = \frac{320H_{1/3}^2}{T_p^4} \cdot \omega^{-5} \exp \left\{ \frac{-1950}{T_p^4} \cdot \omega^{-4} \right\} \cdot \gamma^4 \quad (6)$$

上式中,  $\rho$  为液体密度,  $g$  为重力加速度,  $R$  为浮体半径,  $M$  为浮体质量,  $K$  为主弹簧刚度,  $l_0$  为主弹簧初始长度,  $l(t)$  为滑块到刚性杆的水平距离,  $C$  为发电机阻尼,  $z(t)$  为浮体竖直方向的位移,  $\dot{z}(t)$  为浮体竖直方向的速度,  $\ddot{z}(t)$  为浮体在竖直方向的加速度,  $A(\infty)$  为当  $\omega = \infty$  时所产生的附加质量(对于竖直的半球体来说, 一般取  $A(\infty) = 0.5M$ )。

能量捕获装置在一段时间内捕获能量的总量可以用平均捕获功率来表示:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T C\dot{z}(t)^2 dt \quad (7)$$

式中,  $T$  为所计算的时长,  $t_0$  为开始计算平均捕获功率的时刻, 这里  $T = 600 \text{ s}$ ,  $t_0 = 60 \text{ s}$ 。

为便于分析,在本文中,对变量进行了无量纲化,无因次变量(用符号\*表示)定义如下:

$$\begin{aligned}
 t^* &= t/\sqrt{R/g}, \quad z^*(t^*) = z(t)/R, \quad l^*(t^*) = l(t)/R, \\
 l_0^* &= l_0/R, \quad l_1^* = l_1/R, \quad \gamma(t^*) = \frac{l^*(t^*)}{l_0^*}, \quad \gamma_1 = l_1^*/l_0^*, \quad K^* = K/\rho g \pi R^2, \\
 K_1^* &= K_1/\rho g \pi R^2, \quad C^* = \frac{C}{\frac{2}{3} \pi R^3 \rho w \sqrt{g/R}}, \quad \omega^* = \frac{\omega}{\sqrt{g/R}}, \quad P^* = \frac{10000 \sqrt{\frac{R}{g}}}{t} \int_0^{\frac{t}{\sqrt{\frac{R}{g}}}} \frac{Cz(t)^2}{\frac{2}{3} \pi R^5 \rho w \sqrt{g/R}} dt
 \end{aligned} \tag{8}$$

无量纲计算后得到双稳态振荡波浪能发电装置的运动方程为

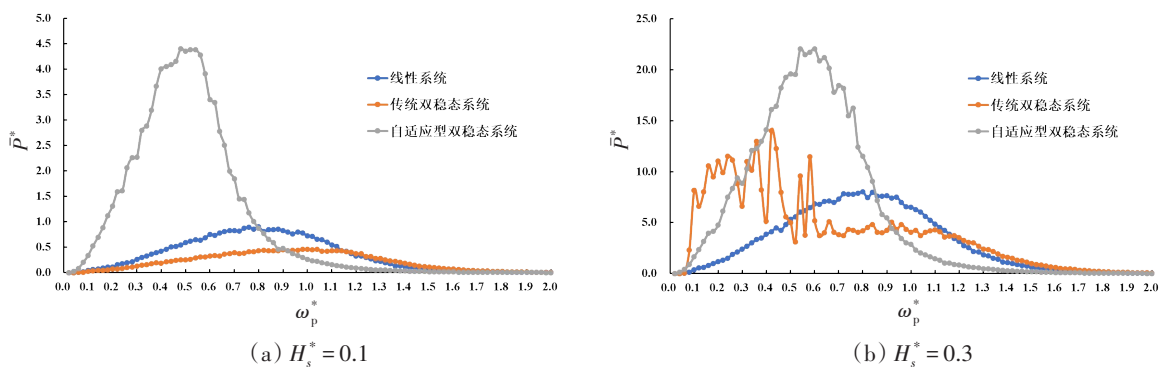
$$\begin{aligned}
 (1 + A^{(0)}(\infty))z^{*2} + \int_0^t \Gamma(t)^* \cdot \dot{z}^* d(t^*) + C^* \dot{z}^* + 1.5z^* + 1.5K^* \cdot \left(1 - \frac{l_0^*}{\sqrt{l(t^*)^{*2} - z(t^*)^{*2}}}\right) \cdot z^* = \\
 \sum \sqrt{\frac{3}{\pi}} \cdot \left(\frac{B_j^{(0)}}{\omega_j^{*2}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot A_j^* \cdot \cos(\omega_j^* t^* + \varphi_i)
 \end{aligned} \tag{9}$$

通过四阶龙格库塔法数值求解装置的运动控制方程,可得位移 $z(t)$ 及速度 $\dot{z}(t)$ ,再将速度代入式(7)可计算出对应的平均功率 $\bar{P}^*$ 。

### 3 结果与讨论

本章主要研究带有线性系统、传统双稳态系统和自适应双稳态系统的浮子式波浪能发电装置功率捕获性能,以平均功率 $\bar{P}^*$ 随谱峰频率 $\omega_p^*$ 变化曲线为参照,重点考虑环境参数及装置参数的影响。考虑的环境参数为谱峰频率 $\omega_p^*$ 和有义波高 $H_s^*$ ,考虑的装置参数为:(1) 弹簧组合参数 $\gamma_1^*$ ;(2) 装置阻尼 $C^*$ ;(3) 主弹簧原长 $l_0^*$ 。

如图2所示,当环境参数 $H_s^*$ 改变时,带有线性系统、传统双稳态系统和自适应双稳态系统的浮子式波浪能发电装置功率捕获性能表现出了很大差异。当 $H_s^* = 0.5$ 时,自适应双稳态装置虽然比线性装置表现出色,但相对于传统双稳态装置并没有优势。但随着有义波高 $H_s^*$ 的降低,自适应双稳态装置的优势逐步显现,特别是当 $H_s^* = 0.1$ 时,自适应双稳态装置的能量捕获宽度和最大值都占优。鉴于此,后续讨论将主要基于 $H_s^* = 0.1$ 时(低有义波高)的工况,进一步研究装置参数改变是否会影响装置能量捕获性能。同时在图2中可以看出,在低有义波高的工况下,自适应型双稳态装置的优势主要体现在谱峰频率较低的区域,但在谱峰频率较高时,自适应双稳态装置能量捕获性能较低,所以后续的讨论也主要基于低谱峰频率的工况。这里选取装置的两个主要参数进行研究:弹簧组合参数 $\gamma_1^*$ ,装置阻尼 $C^*$ ,主弹簧原长 $l_0^*$ 。



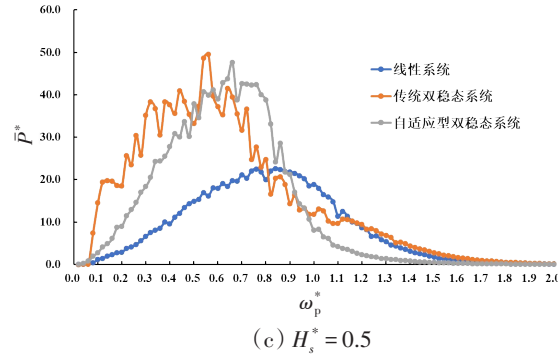


图2 带有线性系统、传统双稳态系统和自适应双稳态系统的浮子式波浪能发电装置功率捕获性能( $K_1^* = 0.5, K^* = 0.5, l_0^* = 0.5, \gamma_1^* = 0.1, C^* = 0.35$ )

Fig.2 Power capture performance of a linear WEC, a conventional bistable WEC and an adaptive bistable WEC ( $K_1^* = 0.5, K^* = 0.5, l_0^* = 0.5, \gamma_1^* = 0.1, C^* = 0.35$ )

弹簧组合参数  $\gamma_1^*$  对装置性能的影响如图3所示。从图中可以看出,  $\gamma_1^*$  的改变会对带有线性系统、传统双稳态系统和自适应双稳态系统的浮子式波浪能发电装置功率捕获性能造成较大影响。当  $\gamma_1^*$  较小 ( $\gamma_1^* = 0.05$ ) 时, 传统双稳态系统的表现很差, 在各个谱峰频率时的表现都不如线性装置, 而自适应双稳态装置在低谱峰频率 ( $\omega_p^* < 0.76$ ) 时的优势非常明显, 但在高谱峰频率区域, 自适应双稳态装置没有任何优势。随着  $\gamma_1^*$  增大, 自适应双稳态装置的表现越来越差, 特别是当  $\gamma_1^* = 0.5$  时, 自适应双稳态装置在低频区域不如传统双稳态系统, 在高频区域则不如线性装置。因此, 在设计自适应双稳态装置时, 需要选取较小的弹簧组合参数  $\gamma_1^*$ 。

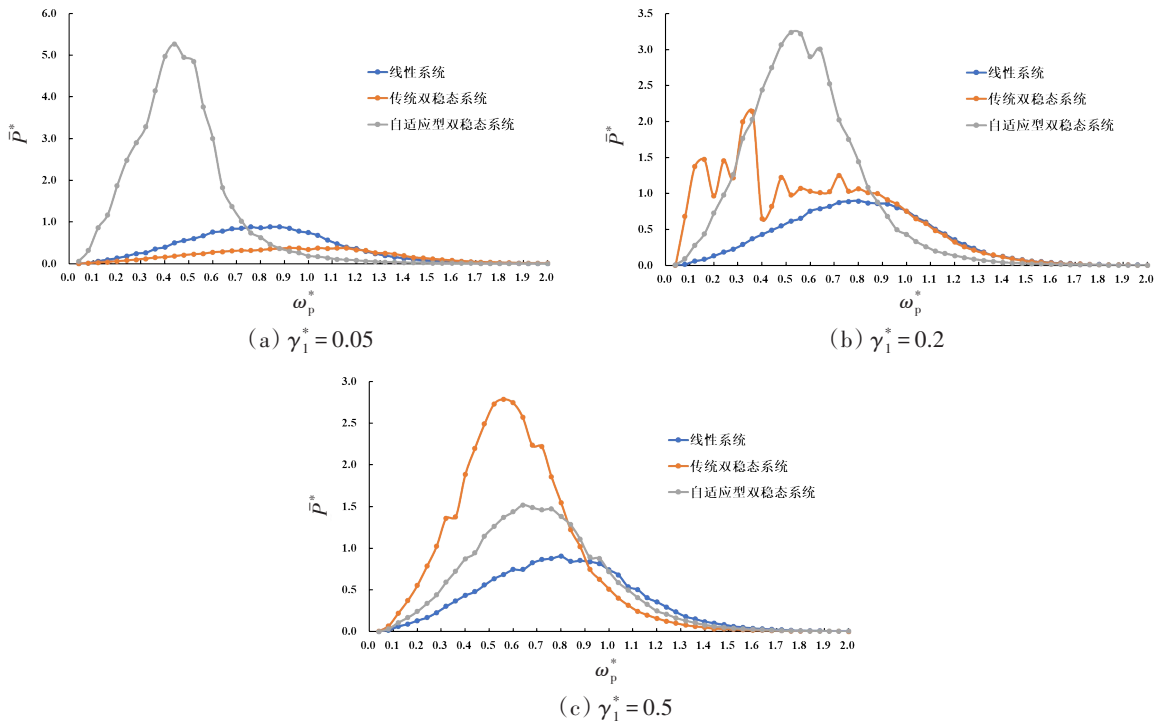


图3 弹簧组合参数  $\gamma_1^*$  对装置性能的影响 ( $K_1^* = 0.5, K^* = 0.5, l_0^* = 0.5, C^* = 0.35$ )

Fig.3 Effect of the nonlinear parameter  $\gamma_1^*$  on the power capture performance ( $K_1^* = 0.5, K^* = 0.5, l_0^* = 0.5, C^* = 0.35$ )

图4展示了装置阻尼  $C^*$  对装置性能的影响。当  $C^*$  较小 ( $C^* = 0.1$ ) 时, 自适应双稳态装置在谱峰频率较低时的表现虽然优于线性装置, 但相较于传统双稳态装置有一定差距; 在谱峰频率较高时, 虽然

优于传统双稳态装置,但却比线性装置要差。随着  $C^*$  增大,传统双稳态装置的表现越来越差,甚至不如线性装置,而自适应双稳态装置的优势逐步显现,当  $C^* = 0.5$  时,装置在低频区域( $\omega_p^* < 0.8$ )表现十分出色,最高值(4.75147)是线性装置最高值(0.96)的4.9倍,但在高频区域的表现却不如其他两种装置。随着  $C^*$  进一步增大,当  $C^* = 1$  时,三种类型装置的整体表现并没有表现出较大差异,自适应双稳态装置的性能反而有所下降。因此,对于阻尼相对较大的装置,应当优先选择自适应双稳态装置,但同样存在一个最优阻尼值,使得自适应双稳态装置获得最佳性能,小于或大于该值的阻尼都会降低装置性能。

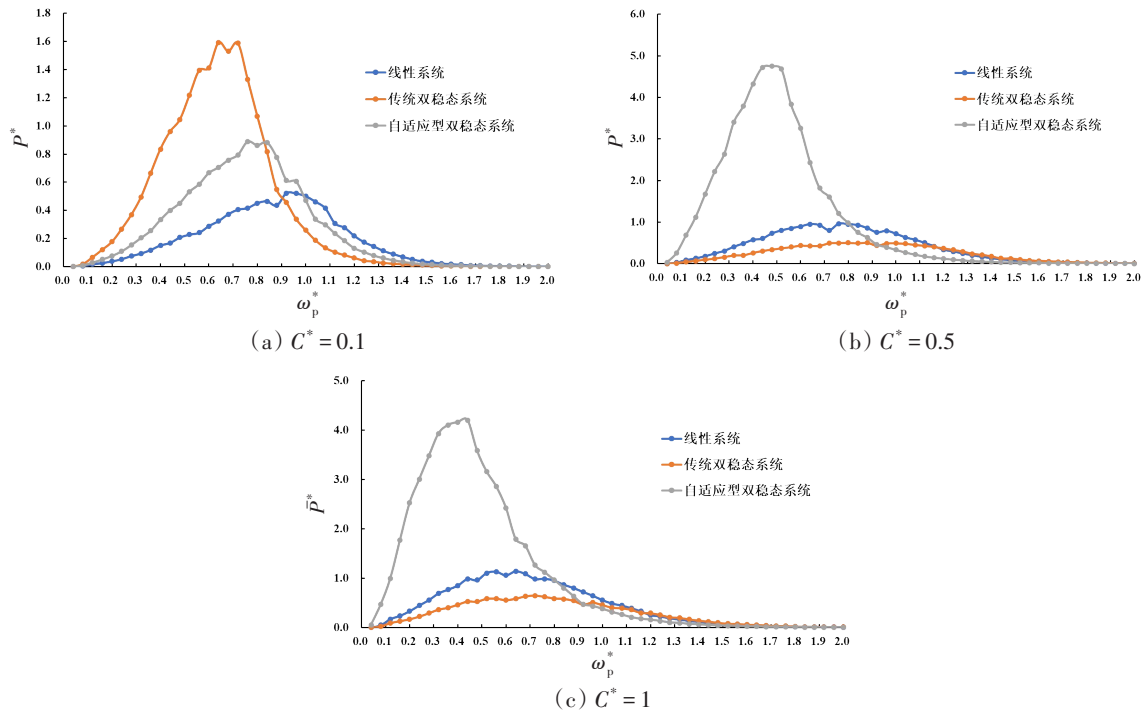
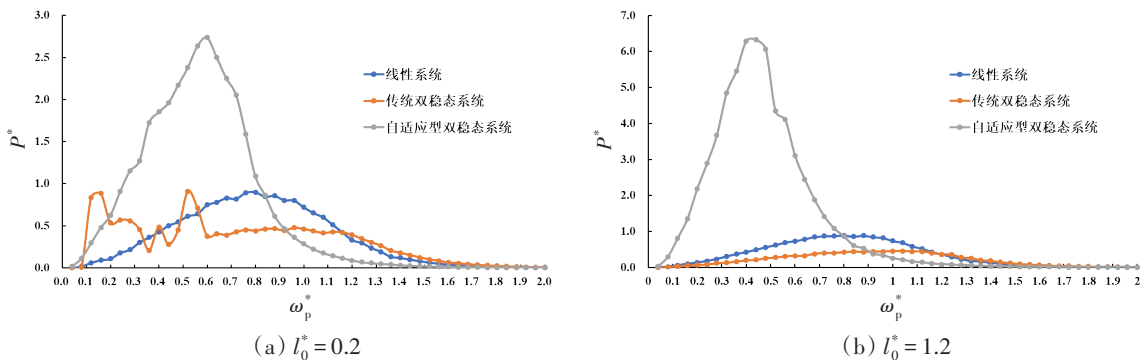


图4 装置阻尼  $C^*$  对装置性能的影响( $K_1^* = 0.5, K^* = 0.5, l_0^* = 0.5, \gamma_1^* = 0.5$ )

Fig.4 Influence of damping coefficient  $C^*$  of the PTO systems on the power capture performance ( $K_1^* = 0.5, K^* = 0.5, l_0^* = 0.5, \gamma_1^* = 0.5$ )

主弹簧原长  $l_0^*$  对装置性能的影响如图5所示。从图中可以看出,主弹簧原长  $l_0^*$  变化时,自适应双稳态装置在低频区域( $\omega_p^* < 0.8$ )相对于传统双稳态装置和线性装置均有较为明显的优势,当  $l_0^*$  逐渐增大,自适应双稳态装置的优势会逐步扩大,但在高频区域,主弹簧原长  $l_0^*$  的变化并不能对自适应双稳态装置带来明显改善,其表现依然不如其他两种装置。但当  $l_0^*$  从1.2增大到2时,三种类型装置的整体表现并没有表现出较大差异,自适应双稳态装置的性能也几乎没有影响。因此,在一定范围内适当增大主弹簧原长  $l_0^*$ ,可提升自适应双稳态装置的性能。



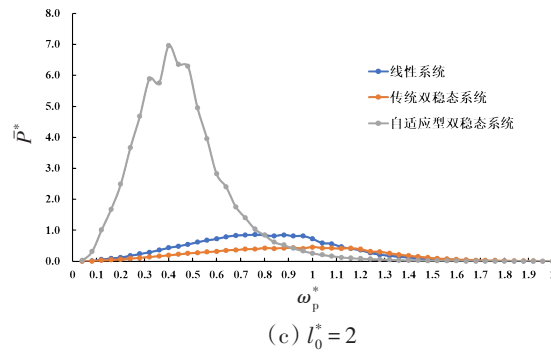


图5 主弹簧原长  $l_0^*$  对装置性能的影响 ( $K_1^* = 0.5, K^* = 0.5, C^* = 0.5, \gamma_1^* = 0.5$ )

Fig.5 Effect of the original length of the main spring  $l_0^*$  on the power capture performance ( $K_1^* = 0.5, K^* = 0.5, C^* = 0.5, \gamma_1^* = 0.5$ )

## 4 结 论

本文以自适应双稳态浮子式波浪能发电装置为研究对象,建立了装置的运动控制方程并通过四阶龙格库塔法进行数值求解,探究了在有义波高  $H_s^*$ 、弹簧组合参数  $\gamma_1^*$ 、装置阻尼  $C^*$ 、主弹簧原长  $l_0^*$  四个参数下,自适应双稳态浮子式波浪能发电装置和其对应的传统双稳态浮子式波浪能发电装置以及线性浮子式波浪能发电装置的能量捕获性能表现,得到如下结论:

(1) 在不规则波的有义波高较小时,自适应双稳态装置相比于线型装置和传统双稳态装置能量捕获性能更高,这些优势集中体现在谱峰频率较低的区域,但在谱峰频率较高时,自适应双稳态装置能量捕获性能较低。在真实海况中,波浪提供的激励以低频激励为主,高频阶段提供的能量较少,这使得装置对海况的适应性更高,特别是可以适应低能量密度海域以及海况变化较大的海域。

(2) 装置参数的改变会对自适应双稳态装置能量捕获性能造成较大影响:

- (a) 在一定范围内,弹簧组合参数  $\gamma_1^*$  增大会降低自适应双稳态装置能量捕获性能;
- (b) 在一定范围内,存在一个最优装置阻尼  $C^*$ ,使得自适应双稳态装置获得最佳能量捕获性能;
- (c) 在一定范围内,主弹簧原长  $l_0^*$  增大会提高自适应双稳态装置能量捕获性能。

本文的研究结论主要明确了自适应双稳态装置相较于其对应的传统双稳态装置以及线性装置的优势参数区间,为后续研究自适应双稳态装置的参数设计提供依据。

## 参 考 文 献:

- [1] Falco, António F de O. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 899-918.
- [2] Zhang X, Tian X, Xiao L, et al. Application of an adaptive bistable power capture mechanism to a point absorber wave energy converter[J]. Applied Energy, 2018, 228: 450-467.
- [3] Xiao X, Xiao L, Peng T. Comparative study on power capture performance of oscillating-body wave energy converters with three novel power take-off systems[J]. Renewable Energy, 2017, 103: 94-105.
- [4] 肖晓龙, 肖龙飞, 李 扬. 基于非线性能量捕获机制的直驱浮子式波浪能发电装置研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 156-162.  
Xiao X, Xiao L, Li Y. A directly driven floater type wave energy converter with nonlinear power-take-off mechanism in irregular waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 156-162. (in Chinese)
- [5] Anderlini E, Forehand D, Bannon E, et al. Reactive control of a two-body point absorber using reinforcement learning[J]. Ocean Engineering, 2018, 148: 650-658.

- [6] Sun T, Nielsen S R K. Stochastic optimal control of a heave point wave energy converter based on a modified LQG approach [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 154: 357–366.
- [7] Wu J, Yao Y, Zhou L, et al. Real-time latching control strategies for the solo duck wave energy converter in irregular waves [J]. *Applied Energy*, 2018, 222: 717–728.
- [8] Zhang X T, Yang J M, Xiao L F. Declutching control of a point absorber with direct linear electric PTO systems[J]. *Ocean Systems Engineering*, 2014, 4(1): 63–82.
- [9] Son D, Yeung R W. Optimizing ocean-wave energy extraction of a dual coaxial-cylinder WEC using nonlinear model predictive control[J]. *Applied Energy*, 2017, 187: 746–757.
- [10] Nguyen H N, Tona P. Short-term wave force prediction for wave energy converter control[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 75(6): 26–37.
- [11] Zhang X, Yang J, Zhao W, et al. Effects of wave excitation force prediction deviations on the discrete control performance of an oscillating wave energy converter[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2016, 11(4): 351–368.
- [12] 肖龙飞, 肖晓龙, 杨立军, 等. 非线性直驱浮子式波浪能发电装置: CN205714565U[P]. 2016.  
Xiao L, Xiao X, Yang L, et al. Non-linear direct-drive float type wave power generation device: CN205714565U[P]. 2016. (in Chinese)
- [13] 肖龙飞, 邓博贤, 李 扬, 等. 一种弹簧双稳态直驱浮子式波浪能发电装置: CN108119294A[P]. 2018.  
Xiao L, Deng B, Li Y, et al. Spring bistable direct-drive float type wave power generation device: CN108119294A[P]. 2018. (in Chinese)
- [14] Zhang X T, Yang J M, Xiao L F. An oscillating wave energy converter with nonlinear snap-through power-take-off systems in regular waves[J]. *China Ocean Engineering*, 2016, 30(4): 565–580.
- [15] Todalshaug J H, Ásgeirsson G S, Hjálmarsson E, et al. Tank testing of an inherently phase-controlled wave energy converter [J]. *International Journal of Marine Energy*, 2016, 15: 68–84.
- [16] Cummins W E. The impulse response function and ship motions[R]. Washington DC: David Taylor Model Basin, 1962.