

带随机载荷振荡浮子式波能转换结构的 参数优化设计与功率响应分析*

王德莉¹, 杨雯¹, 韦玮¹, 裴海清², 徐伟³

- (1. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055;
2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072;
3. 西北工业大学 数学与统计学院, 西安 710072)

摘要: 振荡浮子式波能转换结构是波浪能发电系统的一类核心做功单元, 它的研建对于我国沿海地区发展、海洋平台建设等方面的供电瓶颈技术推进上具有重大意义. 为研究其机械构型、参数设计、俘能机制, 该文建立了多自由度波能转换结构耦合运动模型. 通过对粒子群等智能算法进行优化, 克服了多自由度迭代规模过大以及局部最优解困境等问题, 丰富了算法功能, 定性及定量测算了波能转换结构在二/四自由度、线性/非线性阻尼、两场结构尺寸参数调控下的振荡及俘能效果. 验证了多自由度、非线性阻尼等振控条件的俘能优势, 同步探寻此类结构的动力学行为规律、参数优化设计及俘能机制高效路径. 引入随机载荷以优化模型精度并做进一步探索, 总结了噪声差异引致结构俘能效果的作用规律. 为实际工程中波浪能转换结构的有效应用模式发展了新思路.

关键词: 振荡浮子式波能转换结构; 耦合模式; 算法优化; 动力学响应; 参数设计; 随机载荷
中图分类号: O322; O324 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450201

Parameter Optimization Design and Power Response Analysis of Oscillating Buoy Wave Energy Converters With Random Loads

WANG Deli¹, YANG Wen¹, WEI Wei¹, PEI Haiqing², XU Wei³

- (1. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P.R.China;
2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P.R.China;
3. School of Mathematics and Statistics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P.R.China)

Abstract: The oscillating buoy wave energy converter is a kind of core working unit of wave energy power generation system, and its development is of significances for breaking the power supply bottlenecks in coastal area development and offshore platform construction of in China. Then the coupled motion model for multi-DOF wave energy conversion structures was built to investigate its mechanical configuration, parameter design and

* 收稿日期: 2024-07-10; 修订日期: 2024-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(12372033;12002250); 陕西数理基础科学研究项目(22JSQ029)

作者简介: 王德莉(1990—), 女, 教授, 博士(通讯作者. E-mail: dlwang@xauat.edu.cn);

杨雯(2002—), 女, 硕士生(E-mail: wyang08042@163.com);

裴海清(1990—), 男, 副教授, 博士(E-mail: hqpei@nwpu.edu.cn).

引用格式: 王德莉, 杨雯, 韦玮, 裴海清, 徐伟. 带随机载荷振荡浮子式波能转换结构的参数优化设计与功率响应分析[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(12): 1515-1529.

energy capture mechanism. Through optimization of the intelligent algorithms such as the particle swarm algorithm, the problems of the too large multi-DOF iteration scale and the local optimal solution dilemma were overcome, the functions of the algorithm were enriched, and the oscillation and energy capture effects of the wave energy converter based on 2D/4D, linear/nonlinear damping and structure dimension parameters in 2 scenarios, were qualitatively and quantitatively evaluated. The capture energy advantages of vibration control conditions of multi-DOF and nonlinear damping, were verified, and the dynamic behavior law, the parameter optimization design and the efficient path of energy capture mechanism were explored simultaneously. Random loads were introduced to optimize the accuracy of the model, and the effects of noise differences on the energy capture were refined. The work provides a new idea for the effective application mode of wave energy conversion structure in practical engineering.

Key words: oscillating buoy wave energy converter; coupling mode; algorithm optimization; dynamic response; parameter design; random load

0 引言

为缓解传统能源供需紧张关系,应对环境污染问题,国内外一直有许多学者致力于可再生清洁能源的研究^[1-2].我国海洋领土辽阔,重视海洋能技术发展是缓解我国能源紧缺问题的有效途径^[3].在以往认知中,海浪带来的作用常为负面的,恶劣的海况将严重威胁人们的生命财产安全^[4].但实际上,海浪蕴含的巨大能量可用于发电,帮助边远海岛、海洋平台等突破电力困局,还可以为无人艇、水下航行器等提供移动充电^[5-11].波浪能转换(wave energy conversion, WEC)结构作为波浪能发电系统的核心做功单元,它的研建对于推进沿海地区能源结构转型、服务海洋生态文明建设具有重要意义^[12].

WEC结构从不同角度可分为多种形式,如按波能吸收类型,可分为衰减式、点吸收式等^[1].世界上第一个实现海洋部署的用于海上浮标供电的WEC装置是后来振荡水柱WEC结构的雏形^[5-6].早期的“爱丁堡鸭”号^[7-8]有着能量转换效率优势,是后来Pelamis(海蛇)等机器提高技术的基础^[9].近年来,我国在波浪能发电领域持续突破,“南鲲”号^[10]作为首台兆瓦级漂浮式WEC装置成功水试,“合作者”号^[11]搭载多种海洋生态监测仪顺利启用.

振荡浮子式^[13]WEC结构为典型的点吸收式^[14]结构,具有可灵活布置、易于阵列化扩展等优点,一直是学者们的研究热重点,另外规则波/非规则波^[15]、共振/非共振、线性/非线性取力器(power take-off, PTO)^[16]阻尼^[17]等条件对该结构的能量转换效率影响显著. Shi等^[18]基于25年的数据集,对中国东邻海波浪能进行了评价,对WEC与实际海况相适性提供了参考.曾维鸿团队^[19]提出了一种新型局部无网格配点法,为波浪传播力学行为研究提供了数值参考.刘高与其合作者们^[20]基于虚拟激励法建立了计算结构风-浪耦合随机响应的分析方法. Lan等^[21]和Wu^[22]以两个弱耦合、强非线性机械振荡器为例,阐述了随机激励下多自由度^[23]强非线性系统在共振与非共振情形的可靠性指标.孙诣博与其合作者们^[24]基于Hamilton原理搭建了噪声激励下非线性系统动力学模型,并采用路径积分法进行了动态响应分析. Chen等^[25]和Bittner等^[26]将稳态过程的随机谐波函数表示扩展到非稳态过程,并搭建了随机激励下动态系统的可靠性评估及响应分析框架.但如何提高WEC结构的能量利用率仍是各国学者们长期面临的问题.另外,WEC结构的机械构型、参数设计、俘能机制都直接影响着波浪能利用规模,加之实际海况的复杂性,目前此类随机载荷下WEC结构的动力学行为研究尚不明晰,亟待开展.

受现有成果所提供的分析方法及控制模拟等理论及实验结果驱动,本研究以一类多自由度振荡浮子式WEC结构为例,聚焦于有界/窄带随机激励下WEC结构俘能优化问题,通过计算机模拟计算等技术深入探讨其动力学响应规律、俘能机制等,可为实际工程中WEC结构的参数优化设计及俘能效果提升提供参考.

1 振荡浮子式波能转换结构

1.1 工作原理

利用Nomad Sculpt软件建立振荡浮子式WEC结构模型,如图1所示.其由浮子(float)、振子(oscillator)

及 PTO(包括弹簧(spring)、阻尼器(damper))组成,其中,振子、中轴(central bracket)及 PTO 密封在浮子内部;浮子分为圆柱和圆锥壳体,质量分布均匀;壳体连接处是隔层,以支撑中轴安装;振子为圆柱体,固定在中轴之上,和中轴底座通过 PTO 系统连接,PTO 下方通过扭转弹簧及旋转阻尼器与底座连接,使得 WEC 结构具备纵摇自由度。

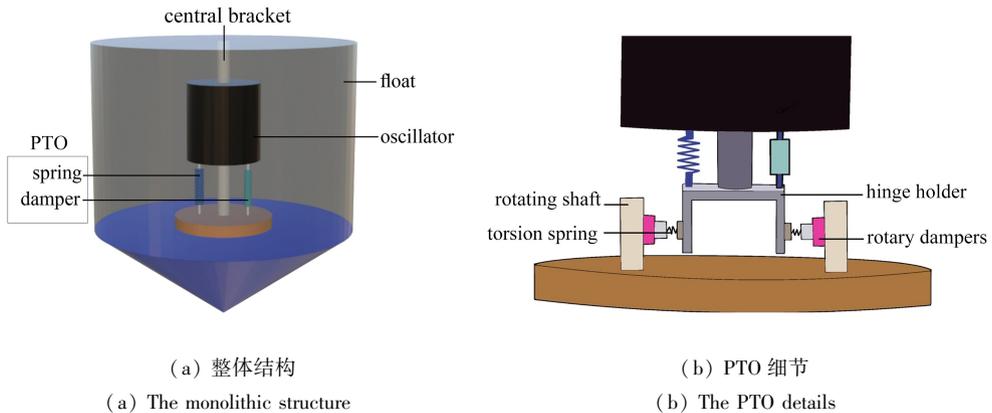


图 1 振荡浮子式 WEC 结构概念图

Fig. 1 Conceptual diagram of the oscillating-buoy WEC structure

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同。

在波浪载荷下,浮子在垂荡与纵摇方向振动并激励振子,两者形成二自由度的耦合运动,进而振子部分在垂荡方向的线性往复运动驱动 PTO,PTO 系统通过转轴架(hinge holder)、扭转弹簧(torsion spring)、旋转阻尼器(rotary dampers)、转轴(rotating shaft)部分将其转换为单向旋转运动以驱动发电机稳定发电,实现机械能向电能的转化。

1.2 模型假设及参数

为确保建模及计算的合理性,做出如下假设:

- 1) 假设海水是无黏且无旋的;浮子、振子、中轴、转轴均为刚体,不发生弹性形变。
- 2) 不考虑中轴、底座、隔层、PTO 的质量和其他各种摩擦。

本文给出两组场景参数样例以支撑后续计算机仿真实验,旨在为实际工程提供参考,该结构的尺寸参数及环境参数设置如表 1 所示,参数 II 中的结构尺寸由参数 I 等比例放大得到。

表 1 WEC 结构尺寸及环境参数设置

Table 1 WEC structure sizes and environmental parameters

parameter	value of parameter I	value of parameter II
float mass m_1 /kg	4 866	9 732
float bottom radius r_1 /m	1	2
float cylinder height H_1 /m	3	6
float cone height ($H_2 - H_1$) /m	0.8	1.6
oscillator mass m_2 /kg	2 433	4 866
oscillator radius r_2 /m	0.5	1
oscillator height h /m	0.5	1
sea water density ρ /(kg/m^3)	1 025	1 025
gravitational acceleration g /(m/s^2)	9.8	9.8
spring stiffness k_0 /(N/m)	80 000	80 000
spring original length l_0 /m	0.5	1
torsional spring stiffness k_r /($\text{N}\cdot\text{m}$)	250 000	250 000

1.3 应力分析

为对结构的动力学响应进行数学刻画,本文设置结构静止在海水中时为初始时刻,并以此时的静波浪平面线为 x 轴,垂直于 x 轴且穿过结构的中轴为 y 轴,建立平面直角坐标系,WEC 结构振态如图 2 所示。

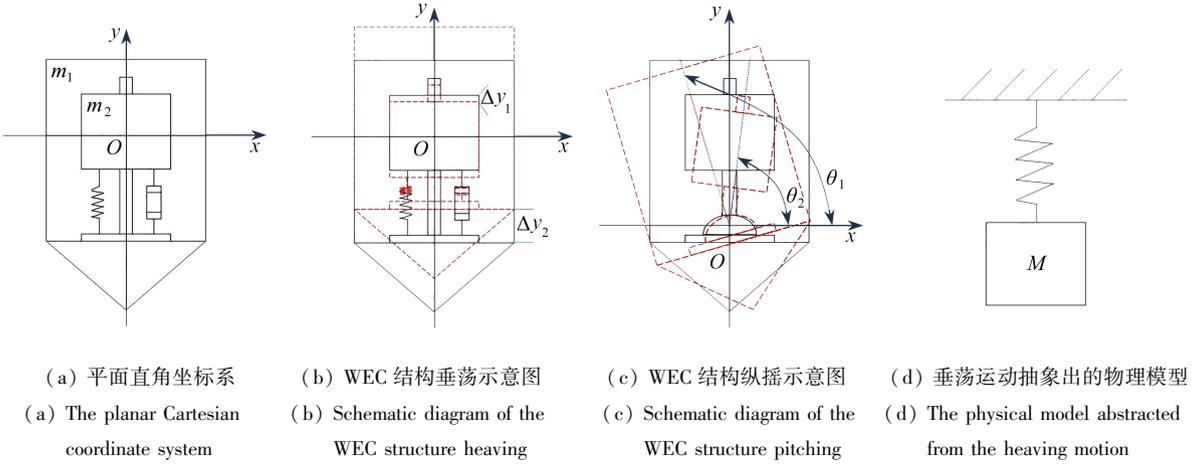


图2 WEC 结构模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the WEC structural model

将浮子受力情况抽象成物理模型,对结构做受力分析:

$$F = \rho g V = Mg = \begin{cases} \frac{1}{3} \rho g \pi (H \tan \theta) 2H, & 0 \leq H \leq H_1, \\ \rho g \pi (H - H_1) + F_z, & H_1 < H \leq H_2, \end{cases} \quad (1)$$

其中, ρ 为海水的密度, V 为浮子平衡状态下的吃水体积, M 为结构整体质量, F 为浮子整体受到的浮力, θ 为圆锥部分半顶角, H 为浮子吃水深度, F_z 为圆锥部分受到的浮力, H_1 和 H_2 分别为圆锥和浮子高度。

浮子在垂荡(纵摇)时受到水使其恢复平衡位置的力称为静水恢复力(矩),表达式为

$$\begin{cases} \text{heave: } F_s = Mg - F = k_1 x_1, \\ \text{pitch: } M_s = k_s \theta_1, \end{cases} \quad (2)$$

其中, F_s 为静水恢复力, k_1 为等效弹簧刚度, x_1 为浮子垂荡位移, M_s 是静水恢复力矩, k_s 是静水恢复力矩系数, θ_1 是浮子纵摇转角(图 2(c))。

同时,浮子在波浪兴起作变速运动时受到波浪阻止其摇荡的合力,表达式为

$$\begin{cases} \text{heave: } F_e = m_e \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1, \\ \text{pitch: } M_e = J_e \ddot{\theta}_1 + c_2 \dot{\theta}_1. \end{cases} \quad (3)$$

其中, m_e 为附加质量, c_1 为兴波阻尼系数, J_e 为附加转动惯量, c_2 为纵摇兴波阻尼系数。

而在结构内部,垂荡方向驱动 PTO 系统进行做功输出的阻尼力为

$$F_d = c_3 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2), \quad (4)$$

其中, x_2 为振子垂荡位移, c_3 为阻尼系数,分为线性与非线性。线性指阻尼系数为线性变化的定值;非线性指阻尼系数为非线性变化受振子-浮子相对速度和比例系数调控的幂,即

$$c_3 = \lambda_1 |\dot{x}_1 - \dot{x}_2|^{\lambda_2}, \quad 0 \leq \lambda_1 \leq 100\,000, \quad 0 \leq \lambda_2 \leq 1. \quad (5)$$

此外,本研究中 WEC 结构所受波浪激励力有确定性周期激励和耦合随机扰动相调制的有界激励两种情况,分别是

$$\begin{cases} \text{design wave method: } f \cos(\omega t), \\ \text{bounded random load: } \eta(t) = F_s \cos X(t), \quad \dot{X}(t) = \Omega_s + v \zeta(t), \end{cases} \quad (6)$$

其中, f 为激励振幅, ω 为波浪频率, $\eta(t)$ 为由随机相位调制的负载, F_s 为激励振幅, Ω_s 为波浪频率, v 为随机扰动的强度因子, $\zeta(t)$ 为单位强度的 Gauss 噪声,是 Wiener 过程的形式导数。

将浮子看作由圆柱面、圆锥面和顶面(依次记作 a、b、c)三块组成,其纵摇转动惯量分别计算再求和:

$$J_1 = J_a + J_b + J_c. \quad (7)$$

纵荡方向驱动 PTO 系统进行做功输出的扭矩为

$$\begin{cases} \text{torsion spring: } M_r = k_r(\theta_1 - \theta_2), \\ \text{rotary dampers: } M_d = c_4(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2), \end{cases} \quad (8)$$

其中, θ_2 为振子纵摇转角(图 2(c)), k_r 为刚度, M_r 为扭矩, c_4 为旋转阻尼系数, M_d 为旋转阻尼器的扭矩。

2 设计波法下 WEC 结构俘能机制研究

2.1 WEC 结构耦合运动模型

基于应力分析,根据 Newton 定律对 WEC 结构整体和振子部分受力分析,得出二自由度(二自由度是指振子和浮子两部分的自由度,它们是相互耦合的关系,垂荡运动相互影响)WEC 结构耦合运动模型:

$$\begin{cases} f\cos(\omega t) = (m_1 + m_e)\ddot{x}_1 + k_1x_1 + c_1\dot{x}_1 + c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2), \\ m_2\ddot{x}_2 = k_2(x_1 - x_2) + c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - m_2g. \end{cases} \quad (9)$$

四自由度在二自由度基础上耦合了纵摇条件,通过对力和力矩的耦合分析,建立四自由度的微分方程组,最后利用差分法进行仿真.四自由度 WEC 结构耦合运动模型如下:

$$\begin{cases} L\cos(\omega t) = (J_1 + J_e)\ddot{\theta}_1 + k_s\theta_1 + c_2\dot{\theta}_1 + m_2\ddot{x}_2\sin\theta_1\sin(\theta_2 - \theta_1)(3 - s_0), \\ f\cos(\omega t) = k_1x_1 + c_1\dot{x}_1 + (m_2\ddot{x}_2\sin\theta_1)\sin\theta_1 + (m_1 + m_e)\ddot{x}_1, \\ J_2\ddot{\theta}_2 = k_r(\theta_1 - \theta_2) + c_4(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - (l_0 - \Delta y + l)m_2g\cos\theta_1, \\ m_2\ddot{x}_2\sin\theta_1 = k_2(x_1 - x_2)\sin\theta_1 + c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - (1 - \sin\theta_1)m_2g. \end{cases} \quad (10)$$

PTO 系统输出的核心在于垂荡方向的做功,即 PTO 阻尼在振子线性往复运动中所产生的功率,有效做功力即阻尼力^[27].故稳态阶段一个周期内的平均功率如下:

$$\text{damper: } P_T = \frac{1}{T} \int_0^T P_1 dt = \frac{1}{T} \int_0^T c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 dt, \quad 0 \leq c_3 \leq 100\,000, \quad (11)$$

$$\text{rotary dampers: } P_r = \frac{1}{T} \int_0^T P_r dt = \frac{1}{T} \int_0^T c_4(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)^2 dt, \quad 0 \leq c_4 \leq 100\,000, \quad (12)$$

其中 P_1, P_r 为两种阻尼器的输出功率。

2.2 WEC 结构动力学响应模拟

有阻尼的受迫垂荡固有周期应该被认为是一个常数,与运动的幅值无关,只取决于物体材料等内在属性^[27].所以如果波浪激励力始终存在,那么浮子在简谐波作用下的简谐运动就会保持,且振动频率近似等于波浪频率.针对此模型中的微分方程组,采用差分法求其数值解.基于 PTO 阻尼系数线性/非线性条件,对振子与浮子的时间历程分别进行仿真模拟,得出各时间点结构的位移与速度,本小节分为二/四自由度两部分对现象进行描述。

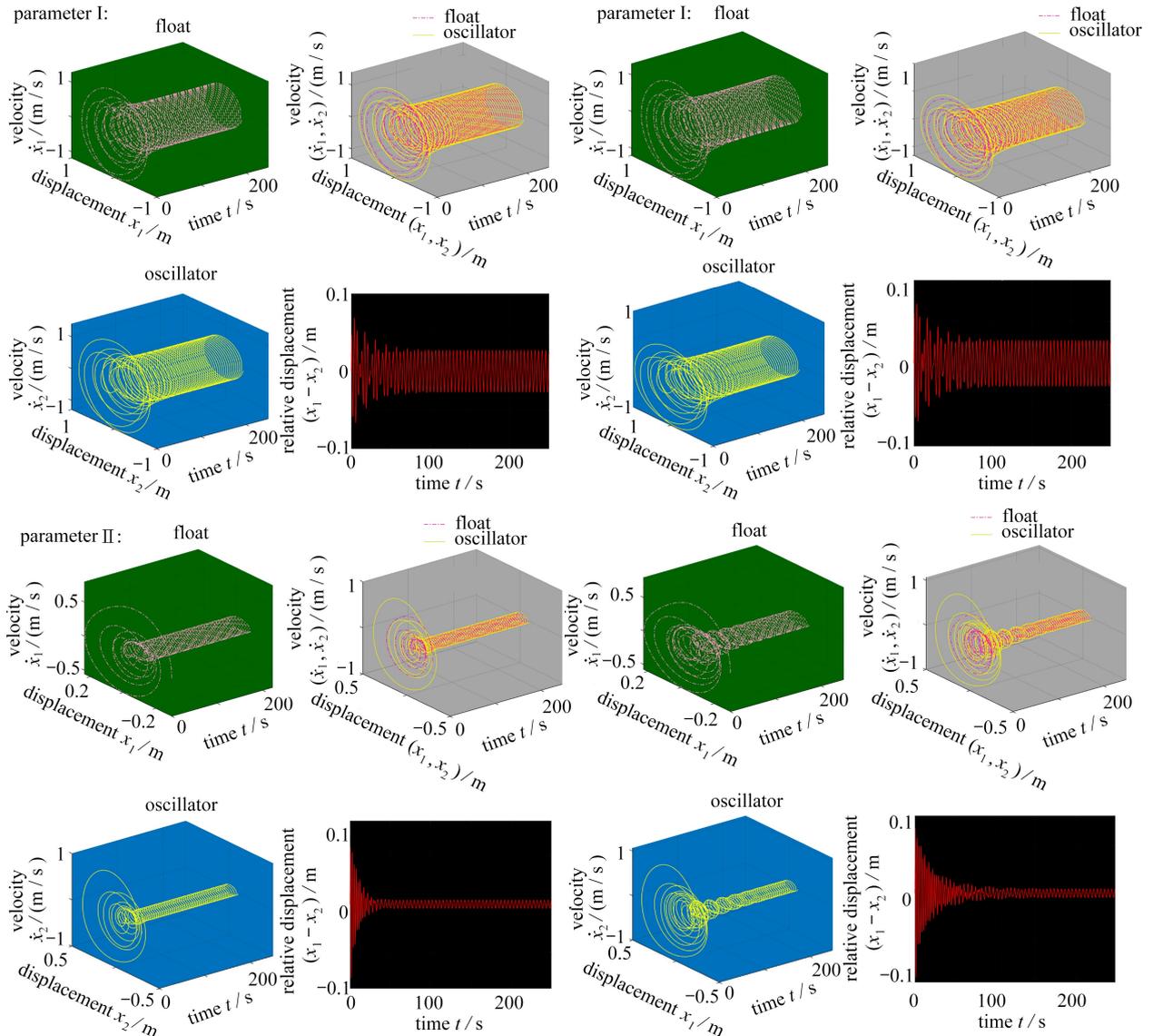
① 二自由度 WEC 结构

线性阻尼系数值取 10 000,非线性阻尼系数值中系数取 10 000、指数取 0.5,波浪频率取 1.4 rad/s,经时间离散得到 WEC 结构动力学响应指标.线性/非线性阻尼系数调控下 WEC 结构的时间历程及浮子-振子相对垂荡位移,如图 3 所示。

参数 I 中,可以得到 WEC 系统在简谐波波浪激励作用下的垂荡运动确属受迫振动,当受迫振动达到稳定后,它的振动频率等于波浪激励力的频率,而与 WEC 结构的固有频率无关;WEC 结构做受迫振动的振幅由波浪激励力频率和 WEC 结构的固有频率共同决定.同时线性/非线性调控下的系统时程几乎一致,这是因为当波浪激励远离共振频率时,非线性阻尼系数的指数选取对振态时程影响非常小,仅在接近共振频率时产生显著差异,如参数 II 中改变固有频率后,系统时程有明显差异^[27].参数 I 中选取波浪频率为 1.7 rad/s 时差异亦明显.另一方面,相对于线性阻尼调控,非线性阻尼下 WEC 结构达到稳态所耗费的时间更长,分数阶非线性阻尼条件受相对速度影响导致阻尼系数相对更小,进而阻尼力更小,导致达到稳态时间更长。

参数 II 中,对比于参数 I 下的 WEC 结构动力学响应指标,当环境参数不变而结构尺寸参数扩大一倍后,WEC 结构垂荡的振幅显著降低,WEC 结构的固有频率与波浪频率相差过大,以致于速度、位移、输出功率都大幅度降低.这表明在实际工程中,为优化俘能,应充分考虑实际海况的差异,对 WEC 结构的尺寸参数

应有不同设计。



(a) 线性阻尼系数调控

(b) 非线性阻尼系数调控

(a) Linear damping coefficient control

(b) Nonlinear damping coefficient control

图3 WEC结构三维时间历程图及浮子-振子相对垂荡位移

Fig. 3 The 3D time history diagram of the WEC structure and the float-oscillator relative heaving displacement

② 四自由度 WEC 结构

波浪频率取 1.7 rad/s , 考虑线性阻尼调控, 同样利用差分法编程求解得到 WEC 结构垂荡/纵摇的时间历程及振子-浮子相对位移, 如图 4 所示。

参数 I 中, 在耦合纵摇方向后, 垂荡-纵摇耦合运动下 WEC 结构垂荡位移、速度先下降后增大, 100 s 后到达稳态, 位移振幅在 0.7 m 以内, 速度振幅在 1 m/s 以内。纵摇的频率最终达到稳态呈现出规律, 这点和垂荡一致。也即考虑更多自由度后结构最终也将趋向稳态, 且频率不变, 这由波浪激励决定。另一方面, 纵摇角位移振幅在 5° 以内, 角速度振幅在 $7^\circ/\text{s}$ 以内, 纵摇较弱, 这除了与波浪激励力有关外, 还取决于 WEC 结构质量、扭转弹簧的刚度等, 调节扭转弹簧刚度的数值发现这是影响角位移的一个重要因素, 与实际情况相符。WEC 结构到达稳态后, 振子和浮子几乎接近, 但这不代表两者可以看作同相位运动, 由振子-浮子相对纵摇角位移变化, 可知两者角位移有一定偏差, 稳定阶段呈现出规律性。

参数 II 中, 耦合纵摇方向后 WEC 结构垂荡响应振幅显著减小, 这与二自由度条件下的结论恰好相同,

是由结构固有频率的改变引起的。同时纵摇响应同样在一定时间后呈现稳性规律,但纵摇振幅并未显著减小,这表明耦合更多自由度的振动不能视作简单受迫振动而以固有频率和波浪频率的关系做判断。

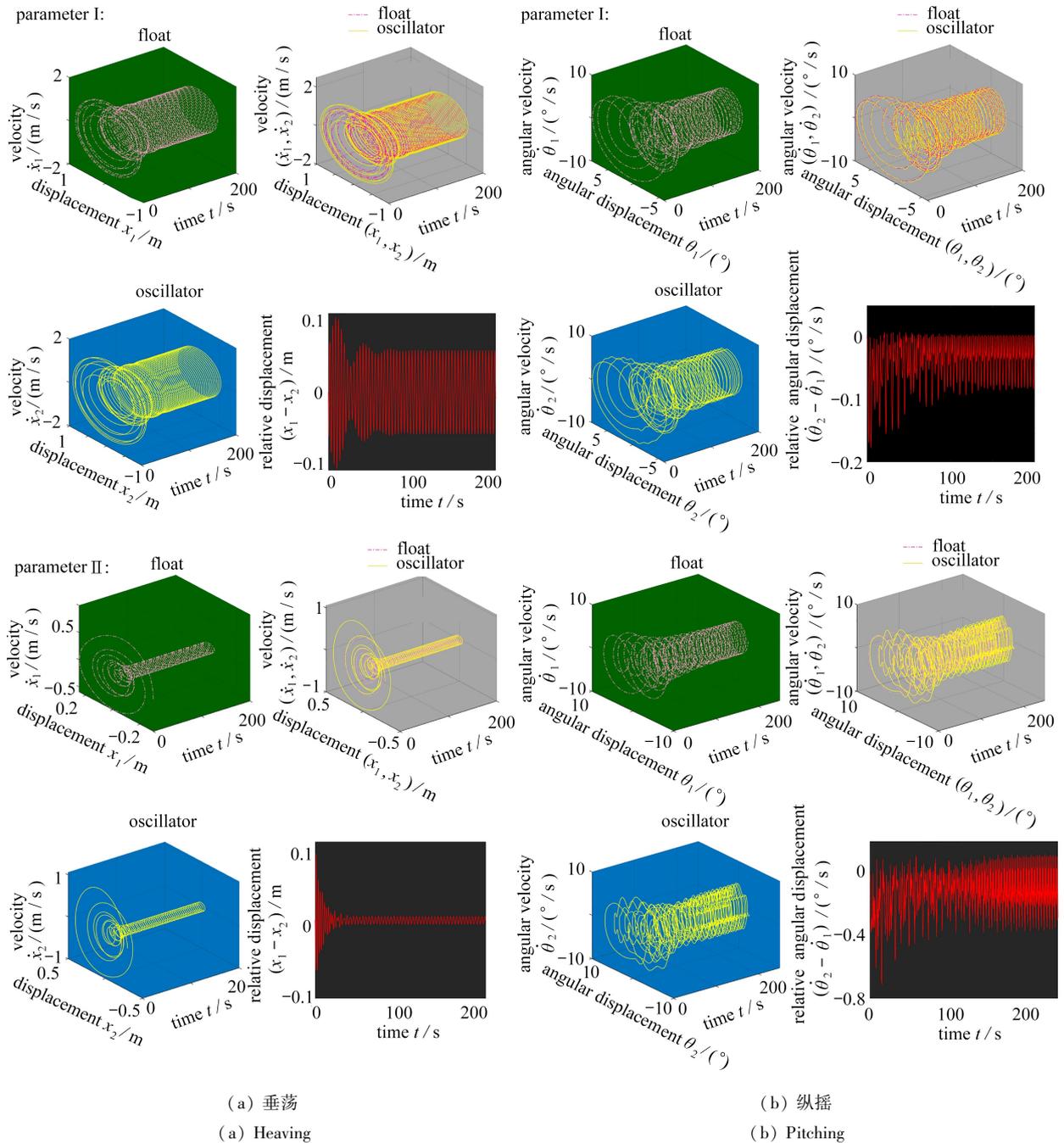


图 4 WEC 结构三维时间历程图及振子-浮子相对位移

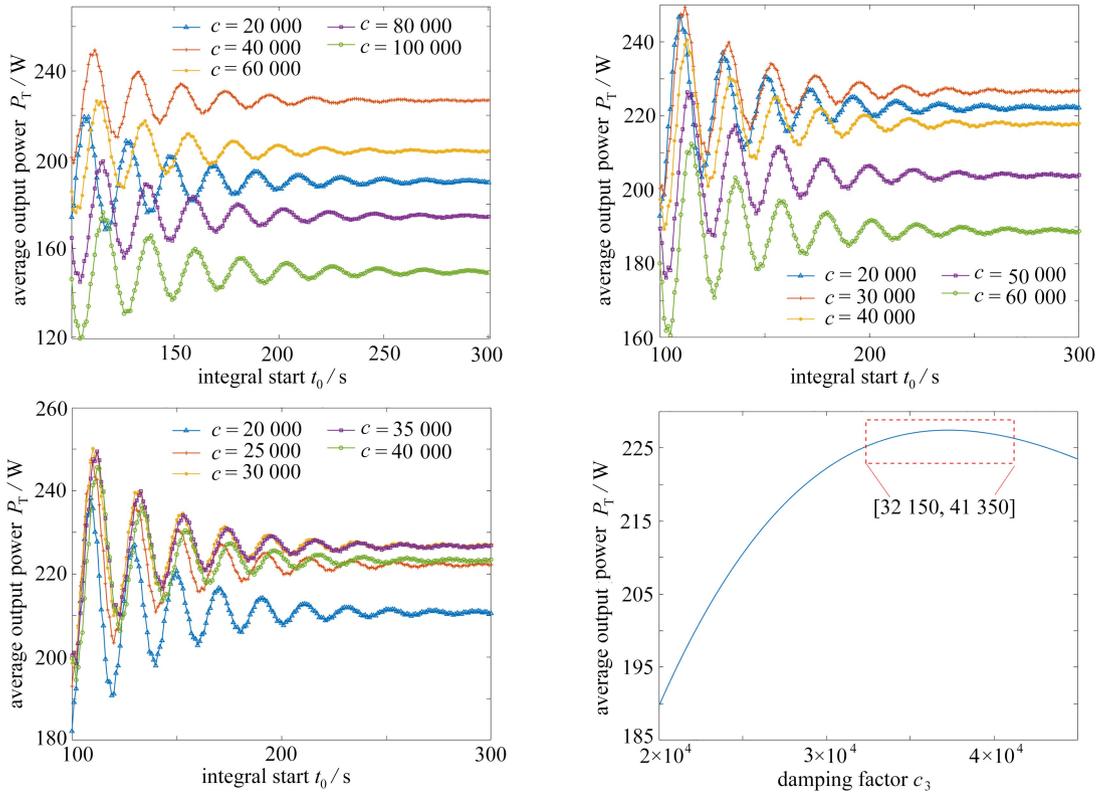
Fig. 4 The 3D time history diagram of the WEC structure and the oscillator-float relative displacement

2.3 阻尼调控 WEC 结构俘能优化

本小节有关俘能优化的研究分为线性/非线性两部分开展。

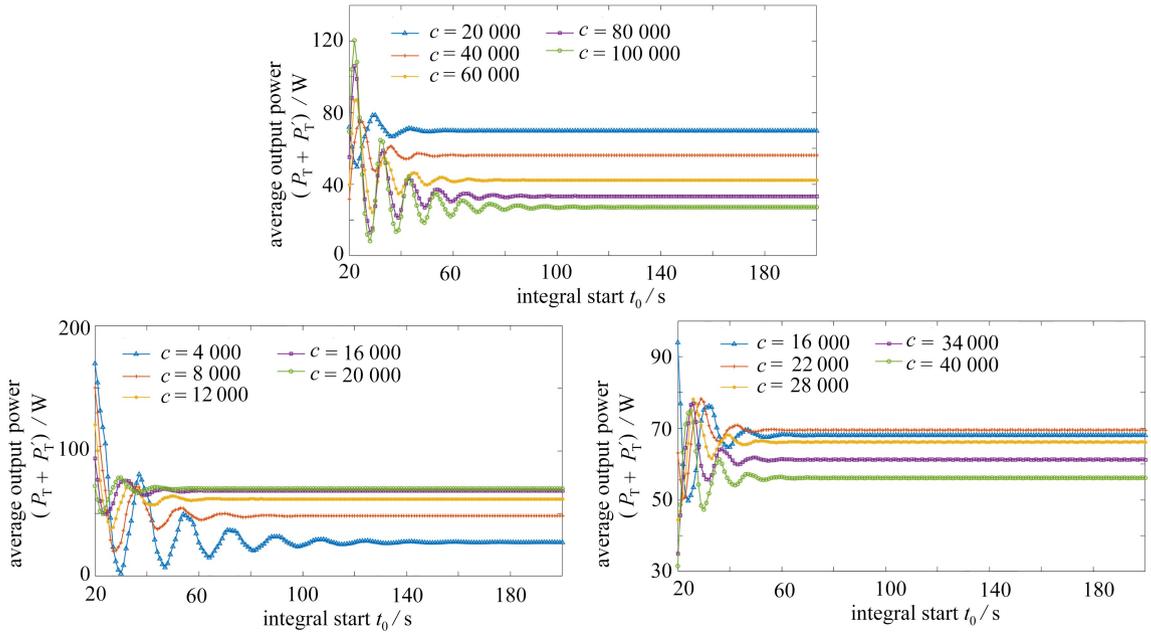
① 线性阻尼系数

二自由度:以参数 I 为例,波浪频率取 2.2 rad/s ,由图 3 可知,浮子与振子垂荡在 100 s 后大致趋向于稳定。为进一步确定输出功率稳定区间,本文从 100 s 起,每间隔 1 s 作为起始时刻,计算每个起始时刻下对应的平均输出功率,用 MATLAB 绘制出阻尼系数不同取值下,平均输出功率随起始时间变化的图像,并根据峰值曲线不断缩小最优阻尼系数的取值范围,参数 II 同理,如图 5 所示。



(a) 参数 I

(a) Parameter I



(b) 参数 II

(b) Parameter II

图5 最优阻尼系数范围搜索过程

Fig. 5 The search process for the range of optimal damping coefficients

对图5分析,(参数 I)主要可得到两个结论:1) 最优阻尼系数取值范围为20 000~40 000;2) 针对图示各个功率输出的情况,均在280 s后显著趋于平稳,故本文假定280 s时输出功率达到平稳状态是具有普适性且合理的.平均输出功率应在系统处于稳态时讨论,则将积分起始时间取为280 s,绘制平均输出功率随

线性阻尼系数在 20 000~45 000 上变化的图像,它显然是一个单峰图像,则可利用一维搜索的黄金分割法求解最优值.黄金分割法用于单峰函数区间上求极小值的一种方法,本文做了一定改善,如图 6 所示,用于单峰函数区间上求极大值.两者原理一致:将含最优阻尼系数的区间逐步缩小,直至区间长度趋于零.经黄金分割法得最佳阻尼系数为 37 260 N·s/m,对应最大平均输出功率为 226 W.

对于参数 II,算法设计一致,最优阻尼系数范围锁定在 [16 000, 28 000],且最终得到最佳阻尼系数为 20 584 N·s/m,对应最大平均输出功率为 69.80 W.对比于参数 I 的情况,结合其 WEC 结构动力学响应特征,可知,将结构尺度参数扩大一倍且环境参数保持不变的情况下,稳定阶段的平均输出功率不超过 80 W,即在海况条件不变的情况下,结构尺寸参数选取的不合适将严重制约俘能效果.

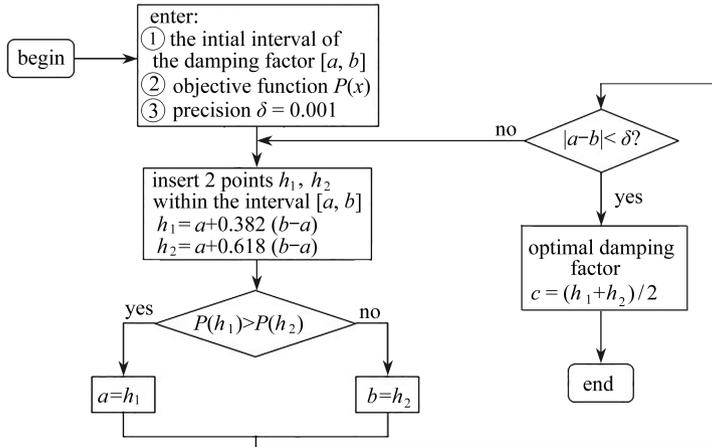


图 6 修缮后黄金分割法思维流程图

Fig. 6 The revised golden section thinking flow chart

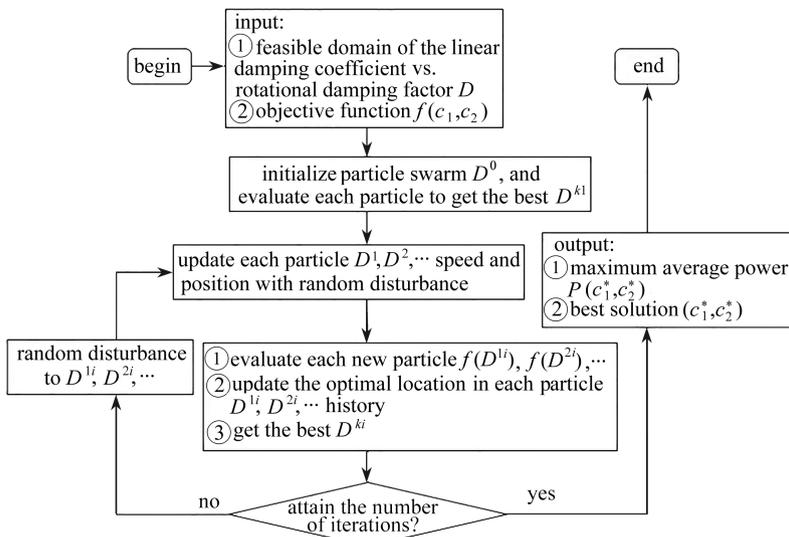


图 7 改良 PSO 算法思维流程图

Fig. 7 Improved PSO algorithm thinking flow chart

四自由度:以参数 I 为例,波浪频率取 1.9 rad/s.算法遍历规模过大,普通计算机难以实现求解,故选择采用粒子群算法进行求解.它从初始随机解出发,经过多次迭代进行寻优.在实际计算中,通过此算法是否能取得全局最优解取决于初始随机解的选取,即如果初始解选取的不合适,则最终只能求得局部最优解.为克服这一问题,本文在粒子群算法的基础上引入遗传算法的“变异”环节,进而得到全局最优解^[28].结合因子变异的改良粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法设计思路,如图 7 所示.

算法迭代过程如图 8 所示,可知,经过近 400 次迭代后最大平均输出功率趋于稳定,从而得到最优解.最

大输出功率为 322 W, 对应旋转阻尼器和直线阻尼器的阻尼系数分别为 $45\ 383\ \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$, $59\ 346\ \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$. 可见, 耦合纵摇方向后, WEC 结构的俘能水平有一定优化, 表明纵摇方向同样可以做功用于系统发电. 实际上除垂荡方向以外, 纵摇等一些自由度的运动也可做功用于发电, 实际工程中考虑多自由度的 WEC 结构俘能, 更接近原结构, 同时能有效提高能量捕获. 代换求解得出两个最优阻尼系数 $c_1 = 59\ 346$, $c_2 = 45\ 383$, 控制波浪频率为唯一变量, 进一步探究波浪频率对输出功率的影响. 指定波浪频率在 $1\sim 3$ 之间, 以 0.01 为步长, 遍历搜索, 得到最大平均输出功率随波浪频率变化函数关系图, 如图 9 所示. 分析可知波浪频率近似在 $1.9\ \text{rad/s}$ 时, 平均功率取得极大值, 结构的固有频率接近外界施加的波浪频率, 共振时能量捕获率会提高, 反向验证了算法的有效性.

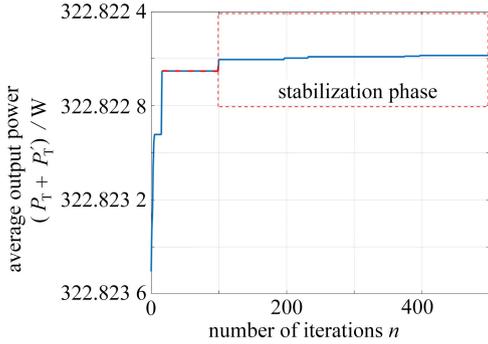


图 8 改良优化算法迭代过程

Fig. 8 The iterative process of the improved optimization algorithm

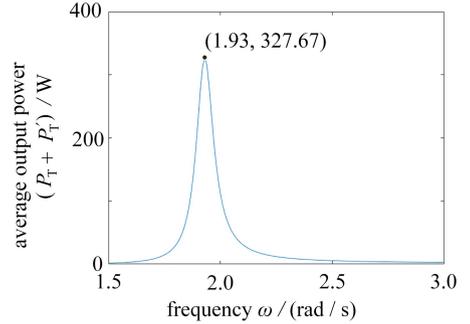


图 9 最大平均输出功率随波浪频率变化

Fig. 9 The maximum average output power vs. the wave frequency

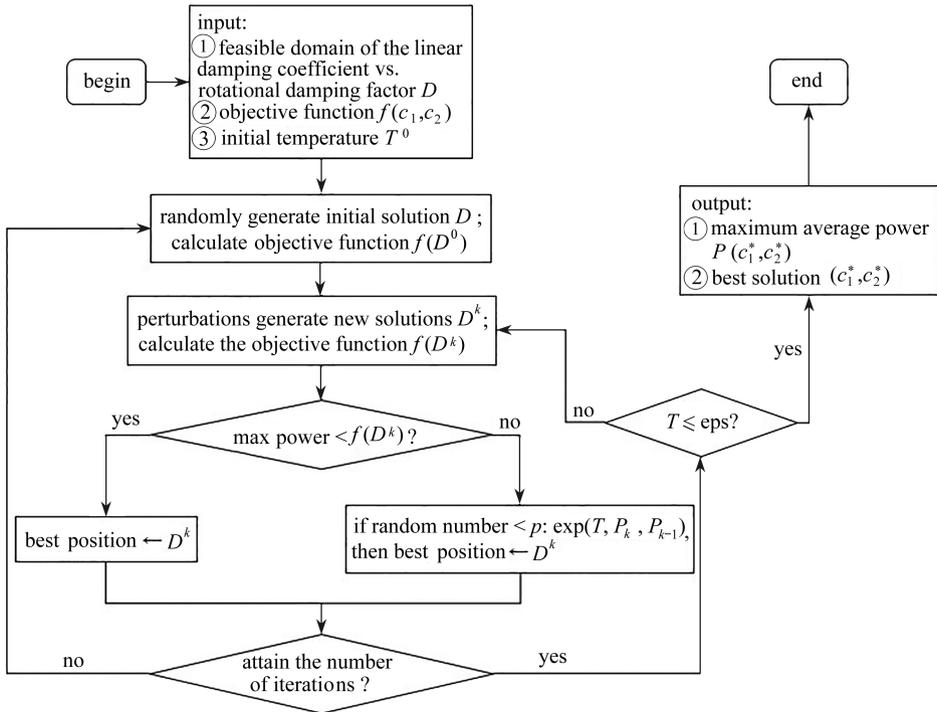


图 10 模拟退火算法思维流程图

Fig. 10 The simulated annealing algorithm thinking flow chart

② 非线性阻尼系数

在实际求解时, 对于非线性 PTO 阻尼系数共引入两个参量: 比例系数、指数. 若为了保证计算精度较高, 较于线性 PTO 阻尼系数的情况将极大地扩增遍历算法的规模. 考虑到采用遍历算法规模不宜过大, 而智能算法结果可能不够精准, 于是我们做了二自由度下非线性 PTO 阻尼的研究, 引入模拟退火算法对该模型进

行寻优,算法设计思路如图 10 所示.

经算法得到最优解:最大输出功率为 208.86 W,对应比例系数为 24 530 N·m·s,幂指数为 0.175.

3 随机载荷下 WEC 结构俘能机制研究

在实际的自然界中,波浪都是瞬息万变的,初观似乎杂乱无章,但经过学者们大量统计和仔细分析观测数据后,发现海浪其实具备统计学规律,可以利用概率统计观点对其开展研究.

3.1 随机载荷下二自由度 WEC 结构耦合运动模型

随机噪声(背景噪声)是由时间上随机产生的大量起伏扰动积累而造成,同时其值在给定瞬间内不能预测.一般来讲,某随机过程中的一个样本是不能代表随机过程总体的,但如果将海浪看作是一个平稳随机过程,并且具有各态历经性,在这种情况下是可以代表的.向波浪激励力中引进随机扰动是一种处理随机环境载荷的有效方式^[4],本文将 Gauss 噪声引入 WEC 结构受到的波浪激励力中,以作为随机激励来优化 WEC 结构动力学模型^[21-26].

考虑 WEC 结构仅做垂荡运动,核心动力学方程是一致的,区别于负载部分,则随机载荷下二自由度 WEC 结构耦合运动模型建立为

$$\begin{cases} \eta(t) = F_s \cos X(t), \dot{X}(t) = \Omega_s + \nu\zeta(t), \\ \eta(t) = (m_1 + m_e)\ddot{x}_1 + k_1x_1 + c_1\dot{x}_1 + c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2), \\ m_2\ddot{x}_2 = k_2(x_1 - x_2) + c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - m_2g. \end{cases} \quad (13)$$

随机载荷下二自由度 WEC 结构平均输出功率为

$$P_T = \frac{1}{T} \int_0^T c_3 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 dt. \quad (14)$$

3.2 随机载荷下 WEC 结构动力学响应

在探究随机载荷下 WEC 结构的动力学响应指标前,应先明确本文引入随机扰动——Gauss 噪声的生成以及随机载荷引起波面的变化情况,如图 11 所示.

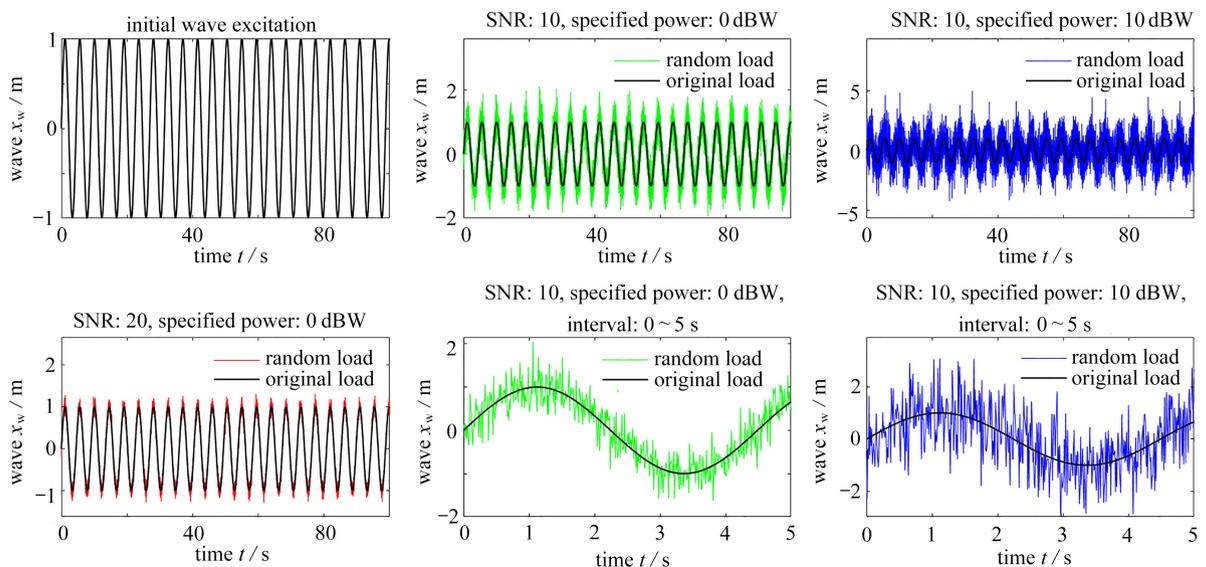
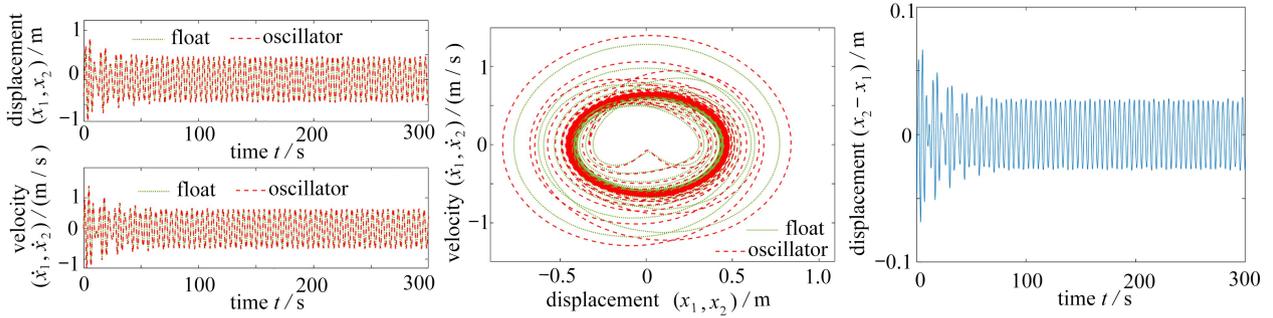


图 11 不同强度随机载荷引起波面趋势的对比

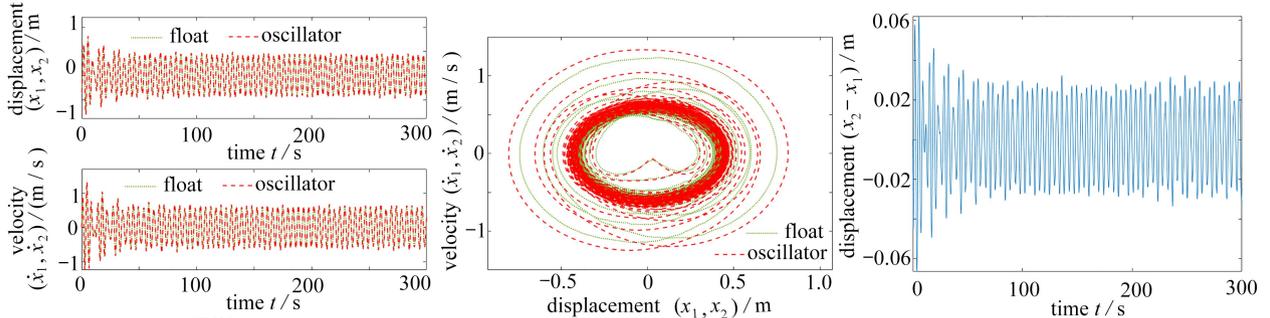
Fig. 11 Comparison of wave surface trends caused by random loads of different intensities

以参数 I 为例,线性阻尼系数取 10 000,利用差分法离散微分方程组,求得模型数值解.对振子与浮子的动力学响应指标进行仿真实验,得出各时间点两者位移与速度的时间历程.不同强度随机载荷下 WEC 结构的时间历程、状态相空间演化以及振子-浮子相对垂荡位移如图 12 所示.

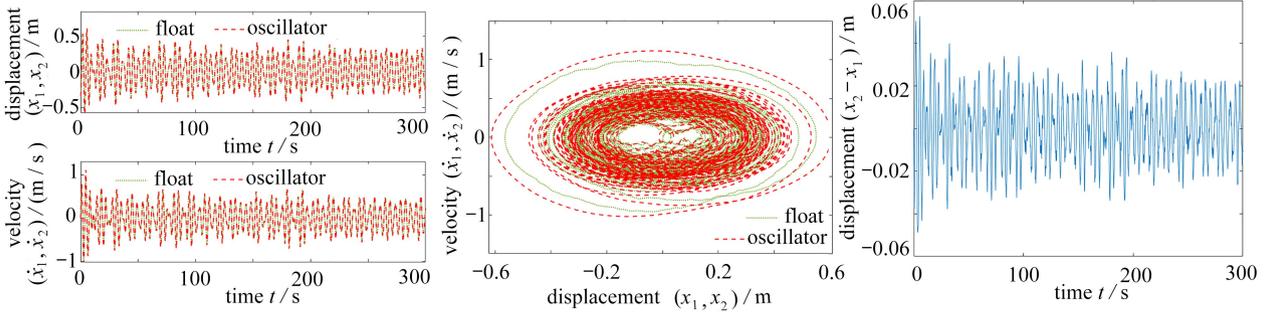
noise intensity is 20 dBW :



noise intensity is 30 dBW :



noise intensity is 40 dBW :



(a) 垂荡时间历程图

(b) 状态相空间演化

(c) 振子-浮子相对垂荡位移

(a) Time histories of heaving

(b) Phase space evolution of system states

(c) The relative heaving displacement of the oscillator-float

图 12 不同噪声强度下 WEC 结构的动力学响应特征

Fig. 12 Dynamic response characteristics of the WEC structure at different noise intensities

分析图 12 得到:随机载荷下的 WEC 结构动力学响应特征看似杂乱无章,但在一定噪声强度范围内,结构响应应保持确定性特征,而超出这一范围,由状态相空间演化可知极限环发生扩散但在一定时间后同样会呈现出稳性特征.另一方面,结构响应的频率是不变的,因为所引进的随机扰动实质是对相位的改变,波浪激励的频率并未发生变化,也即在添加 Gauss 噪声后证明了简谐波下频率由激励力决定这一结论.

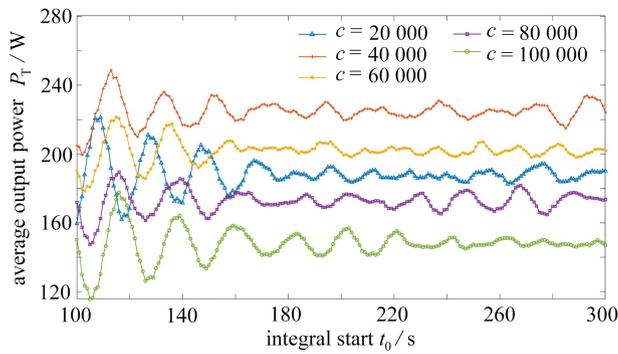
3.3 随机载荷下 PTO 调控 WEC 结构俘能优化

本小节针对 PTO 线性阻尼系数调控 WEC 结构俘能优化做出研究.

以参数 I 为例,由图 12 可知,浮子与振子垂荡在 100 s 后大致趋向于稳定(或呈现规律).为进一步确定输出功率稳定区间,本小节从 100 s 起,每间隔 1 s 作为起始时间,计算每个起始时间下对应的平均输出功率.用 MATLAB 绘制出不同强度随机载荷下,阻尼系数取值 20 000,40 000,60 000,80 000,100 000 时,平均输出功率随起始时间变化的图像,如图 13 所示.

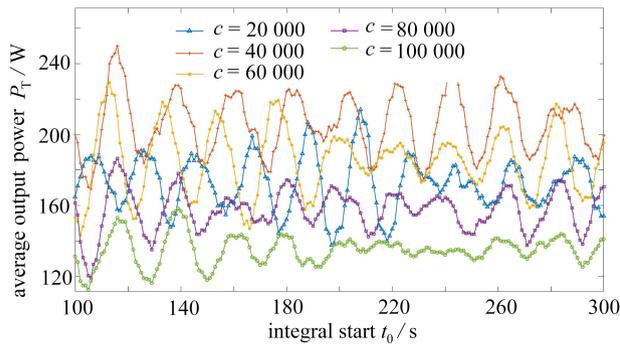
通过对图 13 的分析,得到以下结论:1) 随着噪声强度的增加,平均输出功率逐渐呈现出无序性,使得最大输出功率的计算遇到挑战;2) 当噪声达到一定强度,可能导致阻尼系数的选取对输出功率影响将降低甚至无影响,但这可能与一贯认知有所出入,也为我们进一步的研究指明了方向.通过本板块探索启示了应在充分掌握随机载荷下 WEC 结构的动力学行为规律后,对最大平均输出功率进行探究,而由图中探索可推

测,此时的输出功率也将相应降低。



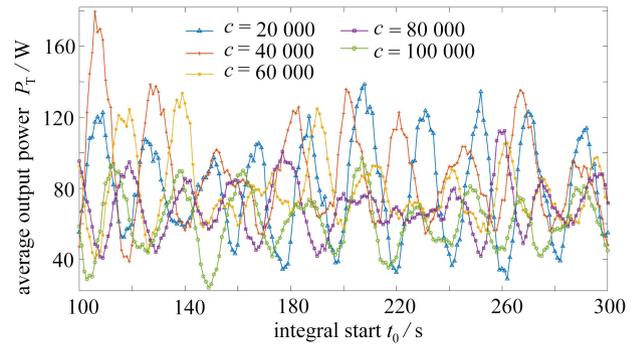
(a) 噪声强度: 20 dBW

(a) Noise intensity: 20 dBW



(b) 噪声强度: 30 dBW

(b) Noise intensity: 30 dBW



(c) 噪声强度: 40 dBW

(c) Noise intensity: 40 dBW

图 13 不同噪声强度下不同阻尼系数对应平均输出功率随起始时间变化

Fig. 13 The average output power vs. the starting time corresponding to different damping coefficients under different noise intensities

4 结 论

本文对振荡浮子式 WEC 结构进行了探究,分别针对设计波法/随机载荷下结构于垂荡/垂荡-纵摇条件下的动力学响应、最优输出功率和相应参数进行了演化分析并求解。主要结论如下:

1) 振动响应:振荡浮子式 WEC 结构在窄带激励下的垂荡运动属有阻尼受迫振动,但是耦合更多自由度后不能当作简单受迫振动而仅以固有频率和波浪频率是否相等来做判断。俘能水平:耦合更多自由度、非线性阻尼调控、结构尺寸参数选取合理等均可显著提升系统功率输出,因而在实际工程中,应充分考虑实际海况的差异,对 WEC 构型进行相应优化。

2) 本研究所利用的改良黄金分割法与改良 PSO 算法既丰富了原算法本身的功能,并能在一定程度上克服了仅能计算极小值与初始解选取不合理无法得到全局最优解的缺陷,是行之有效的方法。

3) 随机载荷下振荡浮子式 WEC 结构的动力学响应特征看似杂乱无章,但在一定时间后会呈现出稳性特征且频率是不变的。随着噪声强度的增加,平均输出功率逐渐呈现出无序性,但当噪声增到一定强度,可导致阻尼系数选取对输出功率影响降低,结合随机动力学理论进行分析,此时的输出功率也将相应降低,指出了我们工作进一步的研究方向。

参考文献 (References):

- [1] 路晴,史宏达. 中国波浪能技术进展与未来趋势[J]. 海岸工程, 2022, 41(1): 1-12. (LU Qing, SHI Hongda. Progress and future trend of wave energy technology in China[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 41(1): 1-12. (in Chinese))

- [2] GALLUTIA D, FARD M T, SOTO M G, et al. Recent advances in wave energy conversion systems: from wave theory to devices and control strategies[J]. *Ocean Engineering*, 2022, **252**: 111105.
- [3] 崔琳, 李蒙, 白旭. 海洋可再生能源技术现状与发展趋势[J]. 船舶工程, 2021, **43**(10): 22-33. (CUI Lin, LI Meng, BAI Xu. Current status and development trend of marine renewable energy technology[J]. *Ship Engineering*, 2021, **43**(10): 22-33. (in Chinese))
- [4] WANG D L, PEI H Q, YAO J T, et al. Memory feedback signals in nonlinear coupled pitch-roll ship motions under narrow-band stochastic excitations[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, **192**: 110220.
- [5] 蒋志杰. 单、双自由度直驱式波浪发电系统研究与控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2022. (JIANG Zhijie. Research and control of single double DOF direct-drive wave generation system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [6] HENRIQUES J C C, GOMES R P F, GATO L M C, et al. Testing and control of a power take-off system for an oscillating-water-column wave energy converter[J]. *Renewable Energy*, 2016, **85**: 714-724.
- [7] LI H F, SUN X W, ZHOU H. Wave energy: history, implementations, environmental impacts and economics [C]//2nd International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering (CONF-MCEE 2022). USA: SPIE, 2022.
- [8] JIANG Y C, PENG Y H, SUN Y, et al. Design and testing of a mechanical power take-off system for rolling-type wave energy converter[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing: Green Technology*, 2021, **8**(5): 1487-1499.
- [9] THOMSON R C, CHICK J P, HARRISON G P. An LCA of the Pelamis wave energy converter[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, **24**(1): 51-63.
- [10] 莫丽平, 卜育才. 波浪能发电装置的鹰式吸波浮体研究[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2023, **46**(6): 15-21. (MO Liping, BU Yucai. Sharp eagle wave absorbing floats of wave power generation device[J]. *Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute*, 2023, **46**(6): 15-21. (in Chinese))
- [11] 吴明东, 盛松伟, 张亚群, 等. 海洋波浪能浮标发展现状及前景[J]. 新能源进展, 2021, **9**(1): 42-47. (WU Mingdong, SHENG Songwei, ZHANG Yaqun, et al. Development status and prospect of ocean wave energy buoy[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2021, **9**(1): 42-47. (in Chinese))
- [12] 刘吉臻, 马利飞, 王庆华, 等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考[J]. 中国工程科学, 2021, **23**(1): 149-159. (LIU Jizhen, MA Lifei, WANG Qinghua, et al. Offshore wind power supports China's energy transition [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, **23**(1): 149-159. (in Chinese))
- [13] 贺彤彤. 锚泊浮台波浪能供电装置设计优化与水动力性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2019. (HE Tongtong. Design optimization and hydrodynamic performance study of wave energy power supply device for mooring platform[D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese))
- [14] 李永国, 覃灿, 郑丁健, 等. 点吸式直驱波浪能转换装置优化方法综述[J]. 世界科技研究与发展, 2023, **45**(3): 349-364. (LI Yongguo, QIN Can, ZHENG Dingjian, et al. Review on optimization methods of point absorption direct drive wave energy generator[J]. *World Sci-Tech R&D*, 2023, **45**(3): 349-364. (in Chinese))
- [15] LIANG S G, LU K, WANG H M. Research on laboratory test method of wave energy converter wave-wire conversion ratio in irregular waves[J]. *Energies*, 2023, **16**(2): 1001.
- [16] SHENG W A, LEWIS A. Power takeoff optimization to maximize wave energy conversions for oscillating water column devices[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, **43**(1): 36-47.
- [17] CAI Y Q, HUO Y Q, SHI X Y, et al. Numerical and experimental research on a resonance-based wave energy converter[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, **269**: 116152.
- [18] SHI X L, LIANG B C, DU S T, et al. Wave energy assessment in the China East Adjacent Seas based on a 25-year wave-current interaction numerical simulation[J]. *Renewable Energy*, 2022, **199**: 1381-1407.
- [19] 曾维鸿, 傅卓佳, 汤卓超. 超水槽动力特性数值模拟的新型局部无网格配点法[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(4): 392-400. (ZENG Weihong, FU Zhuojia, TANG Zhuochao. A novel localized meshless collocation method for numerical simulation of flume dynamic characteristics[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(4): 392-400. (in Chinese))

- [20] 刘高, 陈上有, 刘天成, 等. 跨海特大型桥梁风-浪耦合作用的随机振动分析[J]. 应用数学和力学, 2017, **38**(1): 75-89.(LIU Gao, CHEN Shangyou, LIU Tiancheng, et al. An analysis method for wind-wave coupling induced random vibration of sea-crossing super-large bridges[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(1): 75-89.(in Chinese))
- [21] LAN J, WU Y J. First-exit problem of MDOF strongly nonlinear oscillators under wide-band random excitations without internal resonances[J]. *Acta Mechanica*, 2017, **228**(1): 175-186.
- [22] WU Y J. Dynamical reliability of internally resonant or non-resonant strongly nonlinear system under random excitations[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, **118**: 767-780.
- [23] 顾兴远, 牛玉博, 郑阳, 等. 新型双体波浪能转换装置多自由度耦合水动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2024, **43**(4): 207-214.(GU Xingyuan, NIU Yubo, ZHENG Yang, et al. A study on multi-degree-of-freedom coupled hydrodynamic characteristics of a novel two-body wave energy converter[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, **43**(4): 207-214.(in Chinese))
- [24] 孙诣博, 魏莎, 丁虎, 等. 基于路径积分法的输液管道随机动态响应分析[J]. 力学学报, 2023, **55**(6): 1371-1381.(SUN Yibo, WEI Sha, DING Hu, et al. Stochastic dynamic response analysis of pipe conveying fluid based on the path integral method[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, **55**(6): 1371-1381.(in Chinese))
- [25] CHEN J B, KONG F, PENG Y B. A stochastic harmonic function representation for non-stationary stochastic processes[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, **96**: 31-44.
- [26] BITTNER M, BROGGI M, BEER M. Efficient reliability analysis of stochastic dynamic first-passage problems by probability density evolution analysis with subset supported point selection[J]. *Engineering Structures*, 2024, **312**: 118210.
- [27] 张万超, 周亚辉, 周效国. 振荡浮子式波能转换装置动力输出系统特性研究[J]. 振动与冲击, 2020, **39**(11): 38-44.(ZHANG Wanchao, ZHOU Yahui, ZHOU Xiaoguo. Power take-off mechanism analysis of oscillating-buoy wave energy converter[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, **39**(11): 38-44.(in Chinese))
- [28] 王德莉, 李霁, 杨雯, 等. 振荡浮子式波能装置的功率计算分析及参数设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, **45**(2): 406-414.(WANG Deli, LI Ji, YANG Wen, et al. Power calculation analysis and parameter design of an oscillating float wave energy device[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, **45**(2): 406-414.(in Chinese))