

垂荡双气室振荡水柱波能装置水动力特性研究¹⁾郭权势^{*,†} 邓争志^{*,†} 王晓亮^{**} 程鹏达^{††,2)}^{*}(中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司,长沙 410014)[†](浙江大学海洋学院,浙江舟山 316021)^{**}(北京理工大学宇航学院,北京 100081)^{††}(中国科学院力学研究所,北京 100190)

摘要 振荡水柱(OWC)波能转换装置因其结构简单、便于安装维护等特点,被公认为最具应用前景的波能转换技术.本研究以垂荡式双气室 OWC 波能转换装置为研究对象,借助开源代码平台 OpenFOAM 及基于 interFoam 求解器开发的造/消波工具箱 waves2Foam,采用流体体积法(VOF)捕捉自由面和六自由度(6DOF)动网格求解器模拟垂荡运动响应,数值研究在不同入射规则波作用下,前后气室相对宽度、弹簧弹性系数对装置捕能宽度比及水动力特性的影响规律.通过与已有的固定情况下的双气室 OWC 装置结果对比,并通过对比自由衰减运动响应验证动网格技术,揭示了本研究中数值模型的合理性和有效性.计算结果表明,较宽的后气室结构布置有利于双气室振荡水柱装置在垂荡状态下的波能提取;前后气室宽度比为 1/2 时,垂荡式双气室 OWC 装置在测试波频段具有最优的捕能宽度比;相较于固定状态,垂荡装置的后气室在中高波频段有着更高的捕能宽度比;装置前后气室内水柱与 OWC 装置垂荡运动间存在的相位差使得气室内水面相对振幅和相对压强在测试波频段存在多峰值现象,进一步发现装置通过垂向弹簧进行相位控制,可显著拓宽高效频谱带,实现较大的捕能宽度比.

关键词 波浪能, 振荡水柱, 水波动力学, 捕能宽度比, 动网格

中图分类号: O353 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-072

HYDRODYNAMICS OF A DUAL-CHAMBER OWC WAVE ENERGY CONVERTER IN HEAVING MOTION¹⁾

Guo Quanshi^{*,†} Deng Zhengzhi^{*,†} Wang Xiaoliang^{**} Cheng Pengda^{††,2)}^{*}(Power China Zhongnan Engineering Co. Ltd, Changsha 410014, China)[†](Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China)^{**}(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)^{††}(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The oscillating water column (OWC) wave energy conversion device have been recognized as the most promising wave energy conversion technology due to the advantages of its simple structure, convenient assembly and easy maintenance. A heave-only dual-chamber OWC device was numerically investigated by a well-developed open

2021-02-19 收稿, 2021-08-09 录用, 2021-08-09 网络版发表.

1) 国家自然科学基金(11802313, 12032005), 国家重点研发计划(2018YFC150 5504)和水能资源利用关键技术和湖南省重点实验室开放基金(PKLHD201707)资助项目.

2) 程鹏达, 助理研究员, 主要研究方向: 环境流体力学, 水环境灾害预防和治理. E-mail: pdcheng@imech.ac.cn

引用格式: 郭权势, 邓争志, 王晓亮, 程鹏达. 垂荡双气室振荡水柱波能装置水动力特性研究. 力学学报, 2021, 53(9): 2515-2527

Guo Quanshi, Deng Zhengzhi, Wang Xiaoliang, Cheng Pengda. Hydrodynamics of a dual-chamber owc wave energy converter in heaving motion. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(9): 2515-2527

source software OpenFOAM coupled with a wave generation and absorption toolbox Waves2Foam. The volume of fluid (VOF) method tracking the water-air interface and the six-degree-freedom (6DOF) Dynamic Mesh solver duplicating the heave motion of the OWC device were employed to examine the influences of the relative width of the front and rear chambers and the spring elastic coefficient on the energy capture width ratio and hydrodynamic characteristics of the device under the actions of different incident regular waves. Through comparing the present results with the existing ones of a fixed dual-chamber OWC wave energy converter, and examining the free-decay motion of a cylinder, the rationality and effectiveness of the present numerical model has been revealed. The results show that the wider rear chamber can make for the extraction of wave energy of the dual-chamber OWC in heave motion. The heave-only dual-chamber OWC device can improve the device performance as the relative width ratio of the front and rear chambers is 1/2, and the rear chamber has larger capture width ratio in the middle and high frequency wave bands, compared with that of the fixed one. Multiple-peak values of the relative water surface elevation and the relative pressure occur in the whole test wave frequency bands due to the phase gap between the dual-chamber OWC device and the water columns in the front and rear chambers. In addition, it is found that by adjusting the spring stiffness coefficient, the wave-frequency bandwidth of high-efficiency can be significantly broadened and larger energy capture width ratio can be achieved.

Key words wave energy, oscillating water column, wave hydrodynamics, energy capture width ratio, dynamic mesh

引言

人类日益增长的能源需求不仅导致了不可再生能源如煤炭、石油、天然气临近枯竭,还加剧了全球环境的恶化.为了解决这一问题,人类开始寻找绿色可再生替代能源^[1-2].全球海洋能最具有潜力,能源提取的选择范围最广,其中包括波浪、潮汐和洋流、海洋热能、盐度梯度、海洋生物能和海底地热能等^[3-4].振荡水柱(oscillating water column, OWC)波能转换装置,凭借其简单的结构^[5]和较高的捕能宽度比被视为最具前途的技术之一^[6-7].通常情况下,振荡水柱由两部分构成,一部分是浸没在水下底部开孔的空心结构,另一部分是安装在空心结构上端的透平系统用来转换能量,也被称为动力输出系统(PTO)^[8-9].OWC装置的墙体厚度、吃水深度、气室数量及宽度等参数极大影响着装置的转换性能,许多学者采用理论分析、数值模拟或物理试验的方法对这些参数的影响机制进行了广泛地研究.如 Rezanejad 等^[10]采用匹配特征函数展开法和边界积分方程法,研究分析了台阶式海底地形的存在对 OWC 装置能量转换效率的影响,发现在 OWC 装置下方布置尺寸合理的台阶地形,能有效提升装置性能. Deng 等^[11]利用特征函数展开法对带有 V 型通道的 OWC 装置进行了理论分析,结果发现 V 型通道能够显著提升 OWC 装置的波能转换效率并提出在实际海况中 V 型通道的最佳开口角度范围

为 $\pi/2 \sim 3\pi/4$, V 型通道最佳长度为 1 ~ 1.5 倍水深. Luo 等^[12]应用计算流体力学软件 Fluent,数值模拟研究了前墙吃水深度和前墙厚度对波能转换效率的影响,探究了波浪非线性效应对 OWC 装置性能的影响规律,结果发现随着波浪波高的增大,装置波能转换效率降低. Bouali 和 Larbi^[13]应用商业流体力学软件 CFX,探究了 PTO 模型、装置几何形状及入射波况对 OWC 装置转换效率的影响,结果发现 OWC 装置的前墙吃水深度对 OWC 的工作性能有显著地影响,在吃水深度最优配置下,气室内气柱的体积大小和底部倾角对效率的影响不大. Ning 等^[14]通过物理试验的方式探究了一系列参数对 OWC 装置的水动力特性的影响,研究结果发现当开孔率接近于 0.66%,入射波长 λ 相对于气室的宽度 B 接近于 2 时,会出现“静水现象”,装置的波能提取效率接近于 0. 王鹏等^[15]利用模型试验的方法,实验研究了底部加水平板的 OWC 装置的水动力性能的影响,发现合理布置水平底板能有效提升振荡水柱式防波堤的阻波性能且水平底板的存在加剧了系统的能量耗散,提高了系统在长波区间的阻挡性能.

为进一步提升 OWC 装置的捕获效率,一种具有两个气室的 OWC 装置的概念被提出. Rezanejad 等^[16]采用匹配特征函数展开法在线性波理论的基础上对置于台阶型底面上的固定式双气室 OWC 装置进行了理论分析,发现阶梯型的地面能够在较宽的频域范围内显著提升双气室 OWC 装置的性能.

He 等^[17] 试验探究了不同的墙体吃水、水深变化、气室宽度对一种两端带有气室的浮动式箱式防波堤水动力性能的影响, 发现较小的前墙吃水能显著提高前气室的波能转换效率, 且装置前气室在波浪能转换方面发挥着主要的作用, 后气室仅仅是一个补充. 同时发现水深变化对装置的波能转换效率有着较小的影响. Ning 等^[18-20] 基于势流理论和时域高阶边界元法对一种固定在岸堤上, 共用一个空气透平的双振荡水柱 OWC 装置进行了数值模拟研究, 发现波长与气室内水面高度的正相关性, 并通过物理试验探究了固定式的传统双气室 OWC 装置的水动力特性, 发现波能转换效率随前墙吃水深度的增加而降低. Wang 等^[21] 提出一种由一个岸式固定气室和一个可垂荡运动的离岸气室组成的新型双气室 OWC 装置, 并利用开源软件 OpenFOAM 和 VOF 方法对该装置的水动力特性进行了数值模拟研究, 发现较小的前后气室宽度比和较浅的前 OWC 装置的后墙吃水更有助于系统在更宽波频带进行高效运行. Elhanafia 等^[22] 对双气室 OWC 装置的几何构型和 PTO 阻尼等参数对装置转换效率的影响进行了系统的数值研究, 提出了一组满足双气室 OWC 装置最优性能下的最佳设计参数. 但该研究没有考虑双气室 OWC 装置在更宽波浪频率范围内的水动力性能, 也没有考虑该装置在垂荡响应情况下的效率优化机制.

在实际应用中, 为获得更多的波浪能量, OWC 装置更倾向于往离岸区域布置运行^[23]. 在水深较浅的离岸区域, OWC 装置多采用桩基结构进行支撑, 由于技术和成本的制约, OWC 装置不可能完全固定在水面上, 上下垂荡运动在所难免^[24], 因此很有必要探究双气室 OWC 装置在垂荡响应情况下的水动力特性和效率优化机制. 当前研究聚焦于这一点, 基于开源流体力学代码平台 OpenFOAM, 借助 waves-2Foam 工具箱进行造/消波, 采用动网格技术数值模拟研究了不同入射波下, 前后气室宽度比和锚固弹簧的弹性系数对垂荡式双气室 OWC 装置系统的水动力性能的影响规律, 以期在实际工程中垂荡式双气室 OWC 波能装置的设计提供参考依据.

1 数学模型

1.1 控制方程

借助基于 OpenFOAM 中 interFoam 求解器开发

的 waves2Foam 工具箱, 通过有限体积法离散求解雷诺平均纳维-斯托克斯方程 (RANS) 来数值模拟研究波浪 OWC 装置相互作用的水动力学问题. 在二维不可压缩黏性流体的假设下, 流体流动需满足质量守恒方程和动量守恒方程

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p^* - \mathbf{g} \mathbf{X} \cdot \nabla \rho + \nabla \mathbf{U} \cdot \nabla \mu_{\text{eff}} + \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (2)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \rho \nu_{\text{turb}} \quad (3)$$

其中 \mathbf{U} 代表速度矢量, ρ 是流体的密度, p^* 表示流体压力, \mathbf{g} 是重力加速度矢量, \mathbf{X} 是笛卡尔坐标系中的位置矢量, $\sigma \kappa \nabla \alpha$ 表示考虑表面力的添加项: σ 和 κ 分别表示表面张力系数和界面曲率, μ_{eff} 是有效动力黏性系数, μ 是分子动力黏度系数, ν_{turb} 为湍流运动黏性系数.

论文通过定义每个离散单元内空气和水的体积分数, 利用 VOF (volume of fluid) 法^[25] 捕捉空气-水的交界面, 体积分数满足对流方程即

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \Phi) = 0 \quad (4)$$

其中 Φ 代表单元内水的体积分数, $\Phi = 1$ 说明单元内充满水, $\Phi = 0$ 说明单元内充满空气, $0 < \Phi < 1$ 说明单元内水气共存, 属于自由液面单元. 为保证解的真实性, Φ 的取值范围必须满足 $\Phi \in [0, 1]$, 同时应尽可能少的进入数值耗散, 为了保证这一点, OpenFOAM 中引入人工压缩项来提高解的精度^[26]. 因此式 (4) 可以改写为

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \Phi) + \nabla \cdot U_r \Phi (1 - \Phi) = 0 \quad (5)$$

式中 U_r 是水气界面压缩速度, 该压缩项只在水气界面处起作用^[27]. 为确保 Φ 的有界性, 在 OpenFOAM 中采用 MULES (multidimensional universal limiter with explicit solution)^[28] 显式求解算法.

因此, 整个计算域内流体的混合密度 ρ 和黏性系数 μ 可用体积分数 Φ 加以权重表示, 即

$$\rho = \Phi \rho_w + (1 - \Phi) \rho_a \quad (6)$$

$$\mu = \Phi \mu_w + (1 - \Phi) \mu_a \quad (7)$$

其中 ρ_w 和 ρ_a 分别表示水和空气的密度, μ_w 和 μ_a 分

别表示水和空气的分子黏性系数。

1.2 数值算法

OpenFOAM 基于二阶精度有限体积法的框架发展了一系列插值格式对单元体中心点上的物理量进行空间时间积分求解^[29]。本研究中 Navier-Stokes 方程的时间项求解采用隐式欧拉格式, 对流项求解采用 Gauss Limited Linear 1 格式, 黏性扩散项求解采用线性修正格式, 其余项采用线性插值。为了更精确捕捉自由面, 对新引进的界面压缩项采用 Gauss Interface Compression 格式, 体积分方程中的对流项采用 Gauss MUSCL 求解。速度压力场采用 PIMPLE 算法求解。PIMPLE 算法是非迭代的瞬态 PISO (pressure implicit with splitting of operator) 算法和迭代的稳态 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equation) 算法的结合, 核心思想是将每个时间步内看成稳态流动, 用 SIMPLE 稳态算法求解, 用 PISO 算法进行时间步进。

1.3 造波与消波

Waves2Foam 通过在一定计算区域内设置理论目标波浪速度和自由高程的方法进行造波, 通过在数值波浪水槽两端设置松弛域, 可同时实现造波与消波功能^[30]。松弛函数的表达式如下

$$\alpha_{re}(\chi_{re}) = 1 - \frac{\exp(\chi_{re}^{3.5}) - 1}{e - 1}, \quad \chi_{re} \in [0, 1] \quad (8)$$

$$\mathbf{U}_o = \alpha_{re}\mathbf{U}_{num} + (1 - \alpha_{re})\mathbf{U}_{ana} \quad (9)$$

式中, \mathbf{U}_o 为波浪水质点速度, α_{re} 为松弛因子, χ_{re} 为松弛域的折合距离, 在数值水槽入口边界 (inlet) 和出口边界 (outlet) 取值为 1, 在松弛域与非松弛域交界处取值为 0, \mathbf{U}_{num} 为求解控制方程得到的速度数值解, \mathbf{U}_{ana} 为根据斯托克斯波理论得到的波浪水质点的速度解析解, \mathbf{U}_{ana} 的水平 and 垂直速度分量的表达式如下

$$u_x = \frac{H\omega \cosh[k(z+h)]}{2\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (10)$$

$$u_z = \frac{H\omega \sinh[k(z+h)]}{2\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (11)$$

自由表面高程 η_i 的表达式为

$$\eta_i(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (12)$$

式中, u_x 和 u_z 分别为波浪水质点的水平速度分量和垂直速度分量, H 为入射波波高, ω 为满足频散关系的圆频率, k 为波数, x 和 z 分别为波浪水质点水平方向运动距离和垂直方向运动距离, h 为水深, t 为时间。

2 捕能宽度比计算

OWC 装置捕能宽度比与装置气室内水柱振荡及气室内外压强差随时间的变化直接相关。本文用顶部开孔模型来模拟 PTO 阻尼系统, 将顶部开孔的宽度与气室顶部宽度之比定义为开孔率, 开孔率选取 $e = 1\%$ 。本文装置的墙体厚度相对于气室宽度是极小量, 因此在 OWC 模型里墙体厚度选取 10 mm, OWC 装置其他参数信息见表 1。

OWC 装置在一个完整波浪周期 T 的作用下平均转换的波浪能为

$$E_{OWC} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} P_a(t) q(t) dt \quad (13)$$

对做垂荡运动的 OWC 装置有

$$a_{OWC}^y(t) = \left[\iint_{S_p} P(t) dS + P_a(t) S_a - \tilde{K} \eta_{OWC}(t) - m_{OWC} g \right] / m_{OWC} \quad (14)$$

其中, OWC 装置所受的力为

$$F = \iint_{S_p} P(t) dS + P_a(t) S_a - \tilde{K} \eta_{OWC}(t) - m_{OWC} g \quad (15)$$

式中, $a_{OWC}^y(t)$ 为 OWC 装置垂荡运动加速度, $P(t)$ 为 OWC 装置底面受到的压强, $q(t)$ 为开孔处空气流率, S_p 为 OWC 装置底部受力面积, P_a 为气室内外压强差, S_a 为 OWC 装置气室顶部面积, \tilde{K} 为弹簧系数, $\eta_{OWC}(t)$ 为 OWC 装置垂荡位移, m_{OWC} 为 OWC 装置质量 (本文中所有研究工况保证初始状态 OWC 装置的重力与浮力相等), g 为重力加速度。

水柱运动和 OWC 装置垂荡运动均处在同一惯性参考系中, 规定竖直向上的方向为正方向。于是, 开孔处空气流率可表示为

$$q(t) = [\dot{\eta}(t) - \dot{\eta}_{OWC}(t)] bw \quad (16)$$

因此, 式 (13) 可改写成

$$E_{OWC} = \frac{bw}{T} \int_t^{t+T} P_a(t) [\dot{\eta}(t) - \dot{\eta}_{OWC}(t)] dt \quad (17)$$

式中, η 为气室内水面的垂直振荡高程, $\dot{\eta}(t)$ 为水柱的垂直振荡速度, $\dot{\eta}_{OWC}(t)$ 为结构垂荡速度, b 为气室内水平宽度, w 为水槽宽度 (二维问题中 $w = 1$), T 为入射波周期。

基于线性波理论, 单位宽度入射波含有的能流密度为

$$P_{inc} = \frac{\rho_w g A_i^2 \omega}{4k} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (18)$$

式中, A_i 代表入射波振幅。

因此 OWC 装置捕能宽度比 ξ 可表示为

$$\xi = \frac{E_{OWC}}{P_{inc} \cdot w} \quad (19)$$

垂荡式双气室 OWC 装置共有前后两个气室, 因此总的捕能宽度比为

$$\xi_{total} = \xi_{front} + \xi_{rear} \quad (20)$$

式中, ξ_{front} 为前气室捕能宽度比, ξ_{rear} 为后气室捕能宽度比, ξ_{total} 为垂荡式双气室 OWC 装置总的捕能宽度比。

3 模型验证

3.1 数值波浪水槽

本研究采用结构化网格对计算域进行离散。计算域的长度等于 10 倍波长, 左右两端各设置 2 倍波

长的松弛域区用来吸收反射波, 值得注意的是, 本研究根据不同周期的波浪调整计算域的长度使之保持 10 倍波长, 以保证在入射波与被结构物反射回来的波互相干扰前收集到稳定的 6 个周期的波浪数据。该计算域的水深 0.5 m, 空气部分高度为 0.5 m, 在水气交界面上下 2 倍波高区域进行加密以防止波浪沿程衰减。对于每个周期入射波, 始终保证计算域的长度为 10 倍波长, 因此大大节省了计算资源, 每套网格数量大约 11 万左右, 采用 28 核服务器分块并行运算, 每个工况计算用时约 12 小时。

图 1 为本研究中垂荡式双气室 OWC 装置数值设置示意图, 结构物前墙吃水深 $d_1 = 0.06$ m, 中墙吃水深度和后墙吃水深度都为 0.25 m, 两个气室固定总宽度 $b_1 + b_2 = 0.3$ m, 装置在静止水面以上高度 $d_4 = 0.15$ m, 前后气室开孔率 e_1 和 e_2 都取 1%。 A_i 为入射波波幅, 取 0.02 m, 波浪周期 T 取 1 ~ 1.9 s, 具体设置见表 1。设置 14 个波高监测点 ($G1 \sim G2$) 来监测不同位置处水面振荡, 在前后气室的开孔正下方 0.01 m 处分别设置两个压力监测点 ($s1 \sim s2$) 用来监测气室内压强变化。

在 OpenFOAM 中, 数值波浪水槽共存在 5 个边界, 如图 2 所示, 最左侧为入口边界, 即造波边界, 最右侧为出口边界, 顶部为空气边界, 底部为床面边界, 前后两侧定义为侧壁边界。对于二维问题, 因此侧壁边界为空边界。边界条件是控制方程有确定解的前提, 对于任何问题, 都需要给定边界条件, 边界条件的处理直接影响计算结果的精度。表 2 为本文数值模型选择的边界条件。

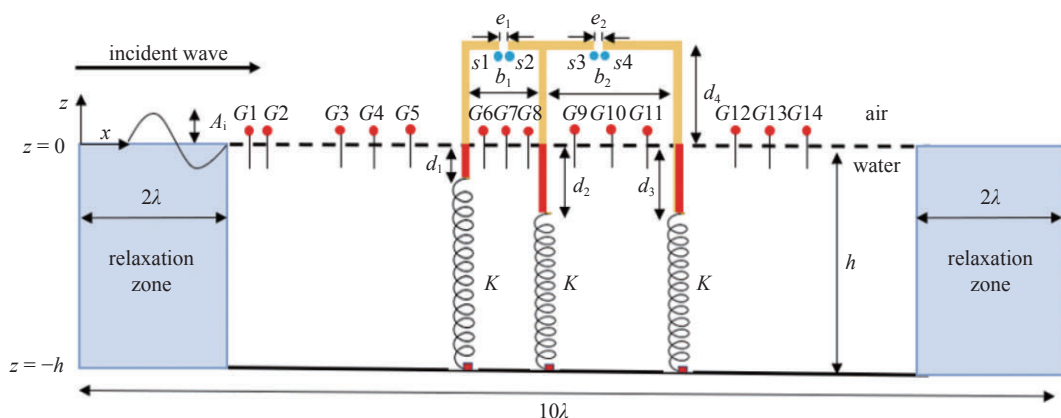


图 1 垂荡式双气室 OWC 装置数值设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an offshore heave-only dual-chamber OWC system

表 1 本研究所使用的波浪参数

Table 1 Wave parameters in this study

T_s	$\omega^2 h/g$	h/m	H/m	λ/m	H/λ
1	2.01215	0.5	0.04	1.5130	0.026438
1.1	1.66294	0.5	0.04	1.7813	0.022456
1.2	1.39733	0.5	0.04	2.0483	0.019528
1.3	1.19062	0.5	0.04	2.3118	0.017303
1.4	1.02661	0.5	0.04	2.5712	0.01557
1.5	0.89429	0.5	0.04	2.8265	0.014152
1.6	0.78600	0.5	0.04	3.0781	0.012995
1.7	0.69625	0.5	0.04	3.3266	0.012024
1.8	0.62103	0.5	0.04	3.5722	0.011198
1.9	0.55738	0.5	0.04	3.8153	0.010484

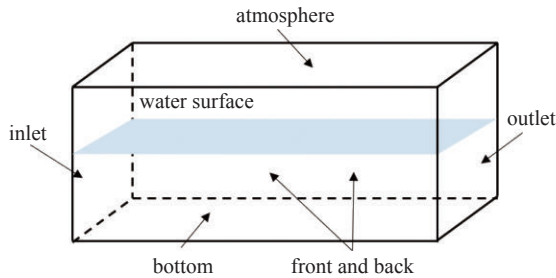


图 2 数值波浪水槽边界示意图

Fig. 2 Setup of the numerical wave tank

表 2 数值波浪水槽边界条件设置

Table 2 Boundary conditions of numerical wave tank

Boundary	Velocity field	Pressure field	Volume phase field
inlet	wave velocity	zero gradient	wave alpha
bottom	fixed value (0,0,0)	zero gradient	zero gradient
atmosphere	pressure inlet outlet velocity	total pressure	inlet outlet
outlet	fixed value (0,0,0)	zero gradient	zero gradient
front and back	empty	empty	empty

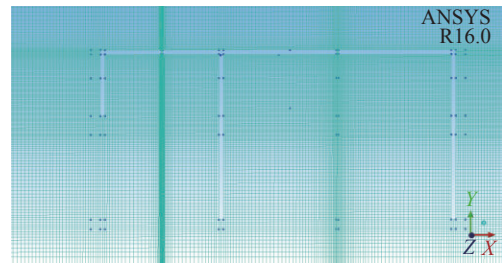
3.2 网格收敛性验证

对于波浪与结构物相互作用而言, 结构物附近的网格分辨率对其水动力性能的数值计算结果有着很大影响, 特别是在结构物尖角附近^[31-32]. 为了精确的捕捉流体在结构物尖角处的流场信息并在求解的精度及计算时间上取得平衡, 本研究对结构物附近的网格进行收敛性分析以求得最佳的网格划分策略.

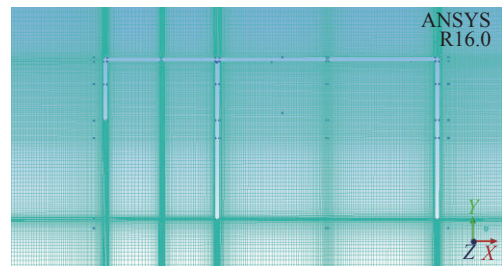
本研究采用 Elhanafia 等^[22] 提到的结构与工况

进行网格收敛性验证. 在水深 $h = 1.5\text{ m}$, 波高 $H = 0.05\text{ m}$, 波浪周期 $T = 1.9\text{ s}$, 无量纲弹簧弹性系数为 0 的条件下, 在结构物附近划分了 3 种不同分辨率的网格进行求解验证. 为了有效避免波浪传播过程中沿程衰减的影响, 采用 Deng 等^[33] 的建议, 在单位波长方向划分 100 个网格、单位波高方向划分的 15 个网格的策略. 为了有效避免相邻离散单元的尺寸差距过大造成的数值误差, 网格从结构物细化区域到波浪传播区域采用 1.05 的比例进行渐变处理. 图 3 为结构物周围网格划分示意图. 其中粗糙网格、中等网格、细密网格结构物周围最小尺寸分别为 0.006 m , 0.002 m 和 0.001 m .

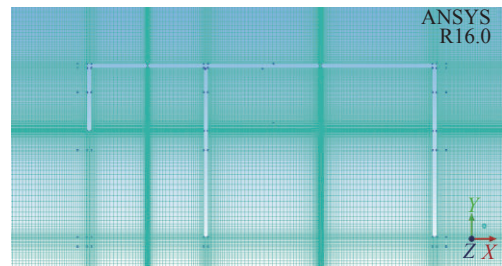
图 4 为不同分辨率网格的气室内水面振幅与压强差历时曲线. 由图 4 可知, 对于压强和波面监测数据, 除了波峰和波谷外, 3 组网格的差异不大, 说明了



(a) 粗糙网格
(a) Coarse mesh



(b) 中等网格
(b) Medium mesh



(c) 细密网格
(c) Fine mesh

图 3 结构物周围不同粗细网格

Fig. 3 Different spatial resolutions around the dual-chamber OWC system

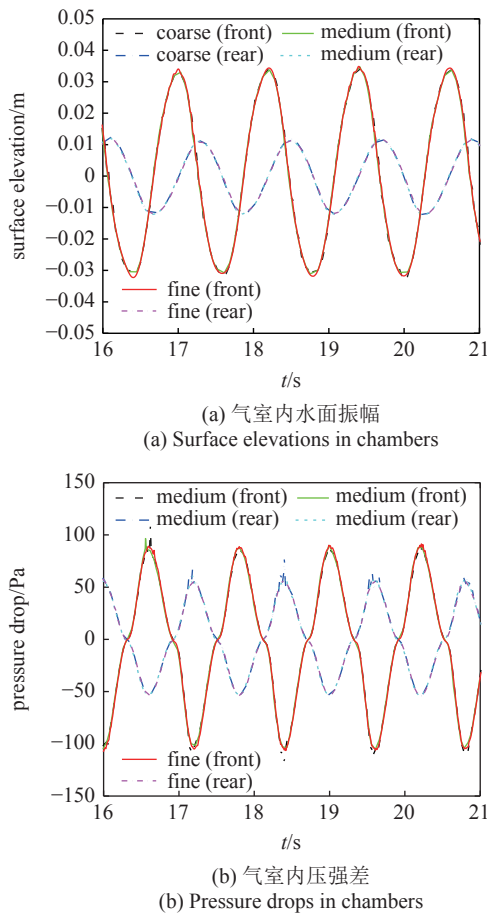


图 4 不同分辨率网格的气室内水面振幅与压强差历时曲线
Fig. 4 Convergence tests of surface elevations and pressure drops in the chambers for grids with different resolutions

双气室 OWC 装置周围计算区域的网格收敛, 表 3 为以细密网格条件下的数值结果作为计算依据的粗糙、中等网格分辨率对应的前后气室内压强与水面振幅的标准均方根误差, 结果表明, 对于中等网格, 检测结果最大误差小于 1%, 满足精度要求. 此后采用中等网格分辨率即加密区网格大小为 0.002 m 作

表 3 不同分辨率网格条件下气室内波面和压强差标准均方根误差

Table 3 NRMSE of surface elevations and pressure drop under different spatial resolutions around the dual-chamber OWC system

Grid resolution	NRMSE/%			
	front chamber		rear chamber	
	water surface	pressure drop	water surface	pressure drop
coarse	0.735	5.443	0.371	6.417
medium	0.279	0.537	0.131	0.763
fine	-	-	-	-

为网格划分方案进行计算.

3.3 求解器 WaveDyMfoam 的验证

本研究采用耦合了六自由度 (6DOF) 运动方程和动网格技术的 WaveDyMfoam 求解器对波浪与结构物相互作用造成的结构物升沉运动进行数值计算, 为了确保计算结果的真实性和有效性, 有必要与 Luo 等^[34] 的研究数据进行对比验证. 图 5 为模型示意图, 其中, λ 为入射波长, A_i 为入射波幅, η_b 为结构物偏离静止水位的升沉幅值, B 为结构物底部宽度. 图 6 为本研究与 Luo 等^[34] 对比验证结果. 纵坐标 η_b/A_i 表示结构运动振幅相对于入射波幅的值, 横坐标 $\omega^2 B/(2g)$ 表示对周期进行无量纲化处理. 可以看出, 除个别点出现偏差外, 其余点吻合良好, 经测算最大误差率小于 5%, 说明该 waveDyMfoam-6DOF 求解器能较为准确地模拟波浪与浸水式浮动 OWC 装置相互作用现象.

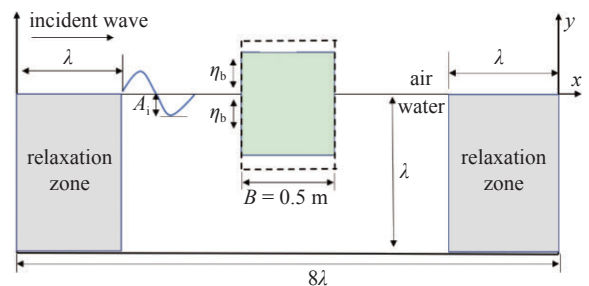


图 5 波浪与浮动式结构物相互作用示意图^[34]
Fig. 5 Sketch diagram of heave-only box^[34]

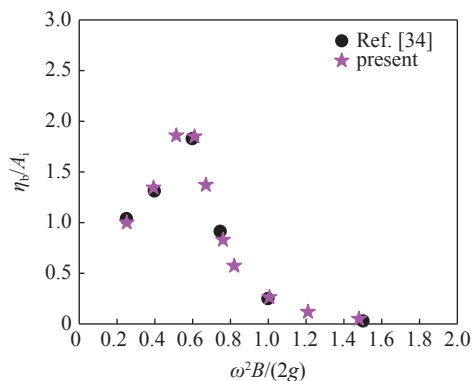


图 6 结构物相对振幅 η_b/A_i 的比较
Fig. 6 Relative heave amplitude η_b/A_i comparison of heave-only box

3.4 捕能宽度比计算方法验证

本研究的重点是预测垂荡式双气室 OWC 装置的捕能宽度比, 因此将捕能宽度比的计算结果与以往的结果作对比验证显得至关重要.

与 Elhanafia 等^[22]研究的固定式双气室 OWC 装置数值模型进行对比验证 (见图 7). 基本参数如下: 水深 $h = 1.5$ m, 结构物墙体吃水深度 d_1, d_2 和 d_3 分别为 0.025 m, 0.3 m 和 0.3 m, 气室宽度 b_1 和 b_2 分别为 0.3 m 和 0.6 m, 前后气室开孔率 e_1 和 e_2 都取 1%. A_i 为入射波波幅, 取 0.025 m, 波浪周期 T 取 0.9 ~ 1.9 s. 图 8 为当前研究与 Elhanafia 等^[22]对比验证结果. 结果表明当前计算结果与论文结果吻合较好, 进一步验证了本研究所用的捕能宽度比的计算方法是可靠的.

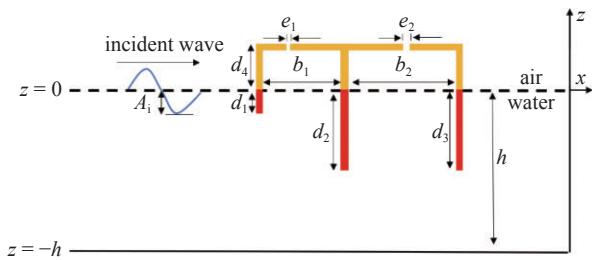


图 7 Elhanafia 等^[22]研究的双振荡水柱 OWC 装置示意图
Fig. 7 Schematic diagram of the dual-chamber device proposed by Elhanafia et al.^[22]

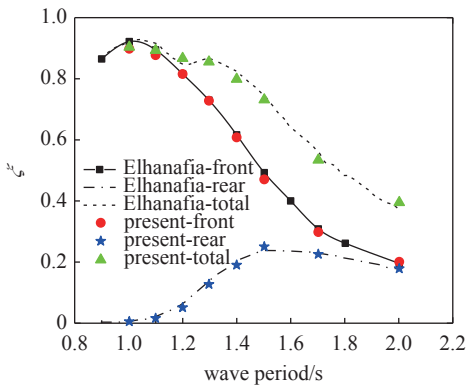


图 8 当前研究与 Elhanafia 等^[22]捕能宽度比对比
Fig. 8 Comparison of energy capture width ratio ξ between the present and Elhanafia's results^[22]

4 结果讨论

OWC 装置的工作原理是利用进入气室内的波浪使气室内水柱发生振荡进而压缩气室内的气体使其做功. 气室内气体所获得的能量是通过气室内水柱升沉运动转换而来的. 这里采用气室内的水面振幅表征气体做功量, 故定义气室内水面振幅 η 与入射波波幅 A_i 的比值 η/A_i 为相对波高来衡量装置的波能转换效果.

值得一提的是, 在实际工程中, 垂荡式双气室 OWC 装置采用桩支撑结构体系, 只允许装置在竖直方向往复运动, 底部设置锚固系统能够降低竖直运动响应对系统的不利影响, 提高系统作业稳定性. 在数值模拟中, 在模型底部设置线性弹簧来模拟锚固系统并对弹性系数进行无量纲化处理, 即

$$K = \frac{\tilde{K}}{\rho g s_d} \tag{21}$$

式中, s_d 为装置底部投影面积.

4.1 相对气室宽度对捕能宽度比的影响

OWC 装置的气室宽度对装置的性能提升有很大影响. 因此垂荡式双气室 OWC 装置的前后气室宽度比对装置的水动力特性的影响被首先考虑. 保持总的气室宽度不变 ($b_1 + b_2 = 0.3$ m), 研究了前气室 (b_1) 和后气室 (b_2) 5 个宽度比的影响, 即 $b_1/b_2 = 0.2, 0.5, 1, 2, 5$. 其余几何参数设置见表 4. 值得一提的是, 这里将气室宽度与水深做无量纲化处理, 定义 b_1/h 为相对气室宽度 (b_1 为前气室宽度, h 为水深, 本研究中 $h = 0.5$ m). 同样, 定义 η_{OWC}/A_i 为相对垂荡位移 (η_{OWC} 为 OWC 装置振幅).

图 9 揭示了相对气室宽度对 OWC 装置气室内相对波高与 OWC 装置相对位移的影响规律. 在给

表 4 不同气室宽度参数设置

Table 4 Cases for different front (b_1) and rear (b_2) chamber widths

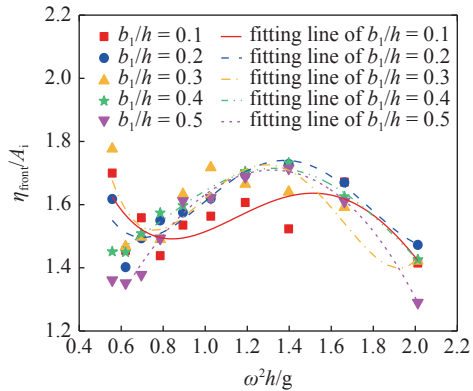
Geometric parameters ($e_1 = e_2 = 1\%$)							
d_1 /m	d_2 /m	d_3 /m	h /m	b_1	b_2	b_1/b_2	b_1/h
0.06	0.25	0.25	0.5	0.05	0.25	0.2	0.1
0.06	0.25	0.25	0.5	0.1	0.2	0.5	0.2
0.06	0.25	0.25	0.5	0.15	0.15	1	0.3
0.06	0.25	0.25	0.5	0.2	0.1	2	0.4
0.06	0.25	0.25	0.5	0.25	0.05	5	0.5

定波浪频率下, 各曲线有着相似的变化趋势. 随着波频的增加前气室内相对波高先减小再增大随后继续减小, 在中波频段出现较大值. 这是因为高频波作用下 OWC 装置相对位移较小 (见图 9(c)), 短波被大量反射. 后气室内相对波高在测试波频段内与前气室有着相似的规律 (见图 9(b)), OWC 装置相对垂荡位

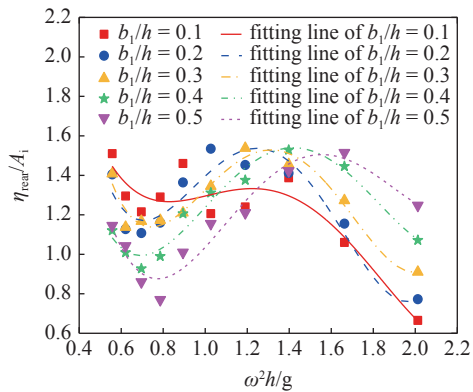
移随波浪频率的变化也呈现先减小在增大随后继续减小的规律 (见图 9(c)). 同时发现, 不同的相对气室宽度在中波频段对前期室内相对波高影响不大, 但在低频段和高波频段影响较大. 以上分析说明一个合理的较小的前气室宽度有助于垂荡式双气室 OWC 装置对短波能量的提取.

由图 9(b) 可知, 相对气室宽度对后气室内相对波高的影响较为明显, 随着相对气室宽度的增加, 后气室内相对波高最大值开始由中波频段向高波频段移动, 且在高波频段气室内水柱运动的越来越剧烈. 这说明, 较宽的后气室有利于垂荡式双气室 OWC 装置对中、长波能量的提取.

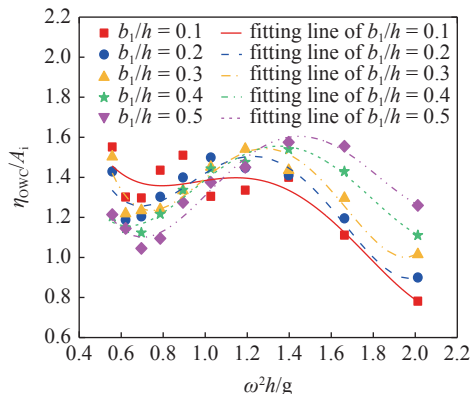
图 10 为相对气室宽度对垂荡式双气室 OWC 装置气室相对压强、气室内水面振荡运动与 OWC 垂荡运动相位差的影响规律. 由图 10(a) 和图 10(c) 可知, 对于确定的相对气室宽度, 在中、高波频段气



(a) 前气室相对波高
(a) Relative surface elevations in the front chamber



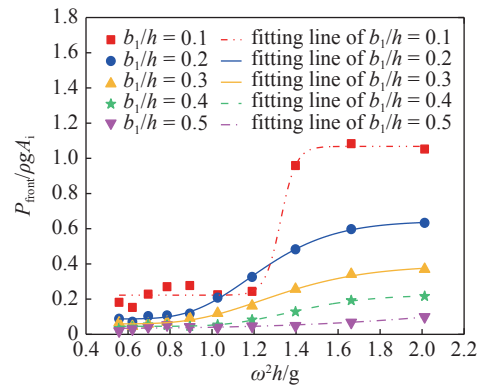
(b) 后气室相对波高
(b) Relative surface elevations in the rear chamber



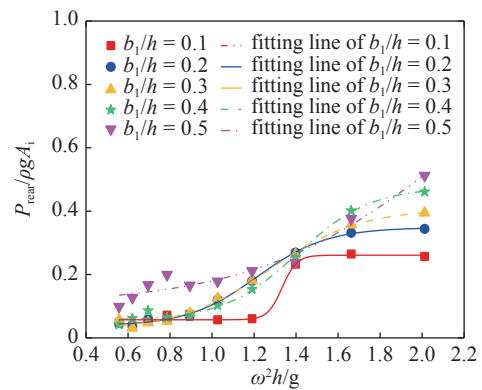
(c) OWC 装置相对垂荡位移
(c) relative heave amplitude of dual-chamber OWC device

图 9 相对气室宽度对 OWC 装置气室内相对波高与 OWC 装置相对垂荡幅度的影响

Fig. 9 Relative surface elevations of the front and rear chamber and the relative dual-chamber OWC device heave amplitude against different relative chamber length b_1/h



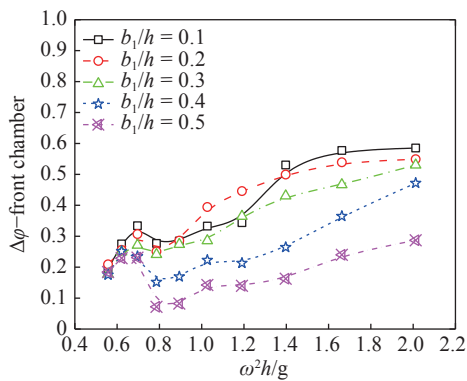
(a) 前气室压强
(a) Relative pressure drop in the front chamber



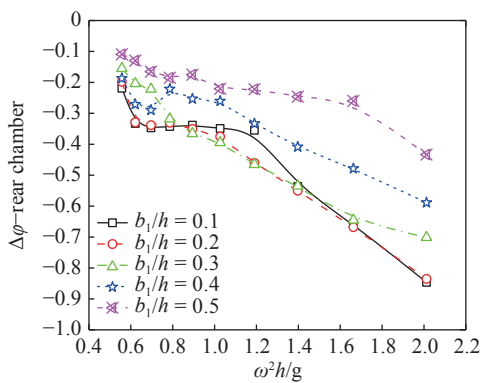
(b) 后气室压强
(b) Relative pressure drop in the rear chamber

图 10 相对气室宽度对垂荡式双气室 OWC 装置前后气室相对压强、前后气室内水面振荡与 OWC 自身垂荡相位差的影响

Fig. 10 Relative pressure drops and the phase difference between the oscillating water column in the chambers and OWC oscillation motion as a function of the dimensionless frequency ω^2h/g for different relative chamber length b_1/h



(c) 前气室内水柱与 OWC 振荡相位差
(c) Phase difference between the front oscillating water column and OWC oscillation motion



(d) 后气室内水柱与 OWC 振荡相位差
(d) Phase difference between the rear oscillating water column and OWC oscillation motion

图 10 相对气室宽度对垂荡式双气室 OWC 装置前后气室相对压强、前后气室内水面振荡与 OWC 自身垂荡相位差的影响 (续)

Fig. 10 Relative pressure drops and the phase difference between the oscillating water column in the chambers and OWC oscillation motion as a function of the dimensionless frequency $\omega^2 h/g$ for different relative chamber length b_1/h (continued)

室内相对压强随入射波频的变化与相位差的绝对值随入射波频的变化较一致, 都是随着波频的增加而增加, 且相位差的绝对值越大, 气室内相应的相对压强越大, 在高波频段 ($\omega^2 h/g \geq 1.6$) 相对压强达到最大值, 尽管在此波频段前气室内相对波高较小 (见图 9(a)).

在低波频段 ($\omega^2 h/g \leq 0.9$) 内, 虽然 OWC 装置相对位移与气室内相对波高都较大, 但由于相位差绝对值较小, 所以该频率段内, 相应的气室内压强较小. 这说明由于相位差的存在, 气室内剧烈的水面振荡并不一定导致气室内较大的压强变化, 相位差的绝对值也是除气室内水柱的振荡幅度外影响前气室内相对压强的重要因素. 对于确定的波频段, 相对气室宽度的变化对气室内振荡水柱与 OWC 垂荡的相位差有很大影响. 基本呈现的规律是相位差随着相

对气室宽度的增加而减小. 同时发现, 对于前气室而言, 较小的相对气室宽度对应着较大的相位差和气室内较大的相对压强, 这说明, 在一个周期内, 前气室宽度越小, 气室内水柱振荡运动就越领先于 OWC 装置的垂荡运动, 相应的气室内相对压强越大. 从图 10(b) 和图 10(d) 可知, 对于固定的相对气室宽度, 后气室内相对压强和相位差绝对值随着入射波频的增加而增大, 且较大的相对气室宽度对应着较小的相位差绝对值和气室内较大的相对压强. 这说明, 在一个周期内, 后气室宽度越大, 气室内水柱振荡运动就越滞后于 OWC 装置的垂荡运动, 后气室内相应的相对压强越小.

总的来说, 对于垂荡式双气室 OWC 装置而言, 保持气室总宽度的不变, 增大前气室的宽度, 会降低前气室内相对压强, 提高后气室内的相对压强, 前后气室存在相互制约的关系. 这种制约是通过改变装置垂荡运动与气室内水柱振荡运动的相位差实现的.

图 11 揭示了相对气室宽度对垂荡式双气室 OWC 装置气室捕能宽度比的影响规律. 由图 11(a) 可知, 相对气室宽度对前气室的波能提取效率在中、高波频段 ($\omega^2 h/g \geq 1.0$) 有着较大的影响. 随着相对气室宽度从 0.5 减小到 0.2, 前气室的捕能宽度比在中短波区间逐渐增大, 高效频率带逐渐拓宽. 随着相对气室宽度继续减小到 0.1, 前气室波能提取效率开始降低. 同时发现, 相对气室宽度对前气室捕能宽度比的影响主要集中在中高波频段, 对低波频段几乎没有影响. 同时发现在低波频段 ($\omega^2 h/g < 1.0$) 捕能宽度比接近为 0, 这是因为中、长波基本都透射过了前气室, 更少的波能进入前气室. 同样, 相对气室宽度对后气室捕能宽度比的影响规律同前气室相似 (见图 11(b)). 值得注意的是在高波频段, 后气室捕能宽度比与前气室最大比值为 0.9 ($b_1/h = 0.2$ 时), 这说明对于垂荡式双气室 OWC 装置, 由于多重共振体系以及它们之间相位差的存在, 后气室与前气室在波能转换上承担着同样重要的作用, 特别是在中、高波频段. 相对气室宽度对装置总的捕能宽度比的影响有着同前后气室类似的规律 (见图 11(c)), 装置在中、短波作用下能转换更多的波浪能. 总的来说, 对于垂荡式双气室 OWC 装置, 后气室比前气室宽的结构布置使装置能够有较大的捕能宽度比和较宽的高效频率带. 在本研究中, 最佳的前后气室宽度比为 $b_1/b_2 = 1/2$, 也即相对气室宽度 b_1/h 为 0.2 时, 垂荡

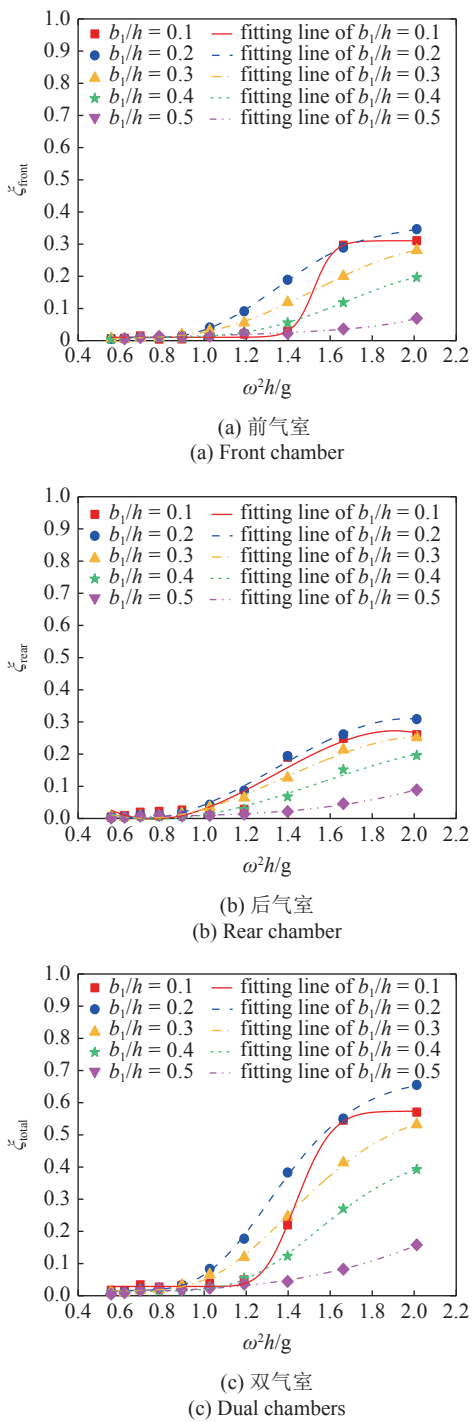


图 11 相对气室宽度对垂荡式双气室 OWC 装置气室捕能宽度比的影响

Fig. 11 Capture width ratio of the heave-only dual OWCs for relative chamber lengths b_1/h

式双气室 OWC 装置有着最宽的高效频率带和最大的捕能宽度比, 相似的结论在 Wang 等^[21] 也提到过.

4.2 无量纲弹性系数对转换效率的影响

本研究考虑了 $K = 0, 1, 2, 4$ 和 8 这 5 个无量纲弹簧弹性系数, 通过与 $K = \infty$, 即固定式 OWC 装置

数据的对比, 深入探究无量纲弹簧弹性系数对垂荡式双气室 OWC 装置捕能宽度比的影响规律. 弹簧弹性系数主要是通过影响双气室 OWC 装置的垂荡幅度和气室内水柱振荡运动与装置自身垂荡运动的相位差来影响气室内水柱的振幅和压强变化进而影响整个装置的捕能宽度比.

图 12 为无量纲弹簧弹性系数 K 对垂荡式双气

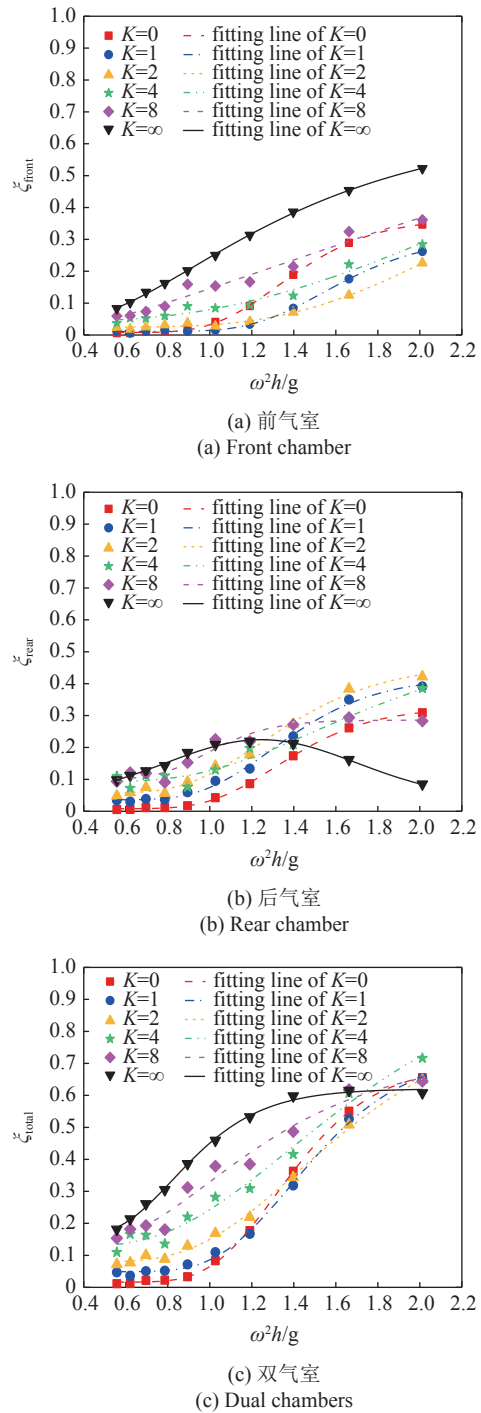


图 12 无量纲弹簧弹性系数 K 对垂荡式双气室 OWC 装置各气室捕能宽度比的影响

Fig. 12 Capture width ratio of the heave-only dual OWCs for different K

室 OWC 装置各气室捕能宽度比的影响. 由图 12(a) 可知, 对于前气室, 装置固定时 ($K = \infty$) 比运动时 ($K \neq \infty$) 有着更大的捕能宽度比和较宽的高效频率带. 值得注意的是当 $K \leq 4$ 时, 弹性系数的增加会明显降低前气室捕能宽度比, 当 $K \geq 4$ 时, 弹性系数的增加显著拓宽前气室高效频率带, 提高捕能宽度比. 这是因为通过调节弹簧弹性系数改变了气室内水柱振荡运动与 OWC 自身垂荡运动的相位差, 进而改变了气室内压强的变化从而影响了气室捕能宽度比. 由图 12(b) 可知, 当装置固定时, 后气室的捕能宽度比随着波频的增加而先增大后降低, 而装置运动时, 各曲线有着相似的变化趋势, 都随着波频的增加而增大. 装置运动时后气室在中高波频段 ($\omega^2 h/g \geq 1.0$) 有着更大的捕能宽度比和较宽的高效频率带, 这说明垂荡式双气室 OWC 装置的后气室在中高波频段比固定的装置有着更好工作性能, 能俘获更多的波能. 由图 12(c) 可知, 垂荡式双气室 OWC 装置总的波浪能转换效率在低中波频段 ($\omega^2 h/g \leq 1.6$) 随着 K 的增大而增大, 在高波频段 ($\omega^2 h/g > 1.6$) 却有着与前气室相似的规律. 同时发现随着波频的增加, 各曲线对应的总的捕能宽度比逐渐增大, 高效频率带宽逐渐向中波频段 ($1.0 < \omega^2 h/g < 1.6$) 拓宽.

5 结论

(1) 相对气室宽度对垂荡式双气室 OWC 装置的前后气室以及总的捕能宽度比有着较大的影响, 合理的布置前后气室宽度比有利于装置捕能宽度比的提升. 后气室比前气室宽的结构布置使得垂荡式双气室 OWC 装置有着更宽的高效频率带和最大的捕能宽度比. 在本研究中, 最佳的前后气室宽度比 1 : 2.

(2) 通过改变 OWC 装置的垂荡幅度和气室内水柱振荡运动与 OWC 装置垂荡运动的相位差, 弹簧的弹性系数可显著影响垂荡式双振荡水柱 OWC 装置的捕能宽度比. 较大的弹性系数能够显著拓宽垂荡式 OWC 装置的高效频率带和提高在低、中波频段的捕能宽度比, 但会少量降低装置在高波频段的波能捕获性能. 本研究中当 $K = 8$ 时, 垂荡式双气室 OWC 装置有着最宽的高效频率带: $0.9 < \omega^2 h/g < 2.0$ 和相对较大的捕能宽度比 $\xi_{\text{total}} = 68\%$.

(3) 垂荡式双气室 OWC 装置的后气室与前气室在波能转换上承担着同样重要的作用. 当弹性系数

$1 \leq K \leq 4$, 后气室相较于前气室在中高波频段可转换更多的波浪能, 后前气室最大波能转换比达到了 1.87. 同时由于多共振机制 (前后气室内水柱的振荡运动和 OWC 装置垂荡运动) 以及它们之间相位差的存在, 气室内剧烈的水柱振荡不一定造成剧烈压强变化, 气室内压强的变化由气室内水面振幅和水柱振荡于 OWC 装置垂荡运动的相位差共同主导. 致谢: 本研究得到浙江大学舟山校区高性能计算中心的支持.

参 考 文 献

- 1 Rusu E, Onea F. A review of the technologies for wave energy extraction. *Clean Energy*, 2018, 2(1): 10-19
- 2 Liu C. A tunable resonant oscillating water column wave energy converter. *Ocean Engineering*, 2016, 116: 82-89
- 3 聂隆锋, 赵西增, 张志杭等. 基于 VPM-THINC/QQ 模型的波浪高保真模拟. *力学学报*, 2019, 51(4): 1043-1053 (Nie Longfeng, Zhao Xizeng, Zhang Zhihang, et al. High-fidelity simulation of wave propagation based on VPM-THINC/QQ Model. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(4): 1043-1053 (in Chinese))
- 4 Liu Y, Li Y, He F, et al. Comparison study of tidal stream and wave energy technology development between China and some western countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 701-716
- 5 Evans DV. Wave-power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 114(1): 481-499
- 6 Evans DV. The oscillating water column wave-energy device. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 1978, 22(4): 423-433
- 7 Sheng W. Wave energy conversion and hydrodynamics modelling technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 109: 482-498
- 8 Evans DV, Porter R. Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device. *Applied Ocean Research*, 1995, 17(3): 155-164
- 9 Falcão AFO, Henriques JCC. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*, 2016, 85: 1391-1424
- 10 Rezanejad K, Bhattacharjee J, Guedes Soares C. Stepped sea bottom effects on the efficiency of nearshore oscillating water column device. *Ocean Engineering*, 2013, 70: 25-38
- 11 Deng Z, Huang Z, Law AWK. Wave power extraction from a bottom-mounted oscillating water column converter with a V-shaped channel. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2014, 470: 20140074
- 12 Luo Y, Nader J, Cooper P, et al. Nonlinear 2D analysis of the efficiency of fixed oscillating water column wave energy converters. *Renewable Energy*, 2014, 64: 255-265
- 13 Bouali B, Larbi S. Sequential optimization and performance prediction of an oscillating water column wave energy converter. *Ocean Engineering*, 2017, 131: 162-173
- 14 Ning D, Wang R, Zou Q, et al. An experimental investigation of hy-

- drodynamics of a fixed OWC wave energy converter. *Applied Energy*, 2016, 168: 636-648
- 15 王鹏, 邓争志, 王辰等. 振荡水柱式防波堤的水动力特性. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(12): 2335-2341 (Wang Peng, Deng Zhengzhi, Wang Chen, et al. Hydrodynamic characteristics of oscillating water column type breakwater. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(12): 2335-2341 (in Chinese))
- 16 Rezanejad K, Bhattacharjee J, Guedes Soares C. Analytical and numerical study of dual-chamber oscillating water columns on stepped bottom. *Renewable Energy*, 2015, 75: 272-282
- 17 He F, Leng J, Zhao X. An experimental investigation into the wave power extraction of a floating box-type breakwater with dual pneumatic chambers. *Applied Ocean Research*, 2017, 67: 21-30
- 18 Ning D, Wang R, Chen L, et al. Experimental investigation of a land-based dual-chamber OWC wave energy converter. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 105: 48-60
- 19 Ning D, Wang R, Zhang C. Numerical simulation of a dual-chamber oscillating water column wave energy converter. *Sustainability*, 2017, 9(9): 1599
- 20 Ning D, Zhou Y, Zhang C. Hydrodynamic modeling of a novel dual-chamber OWC wave energy converter. *Applied Ocean Research*, 2018, 78: 180-191
- 21 Wang C, Deng Z, Wang P, et al. Wave power extraction from a dual oscillating-water-column system composed of heave-only and on-shore units. *Energies*, 2019, 12(9): 1742
- 22 Elhanafi A, Macfarlane G, Ning D. Hydrodynamic performance of single-chamber and dual-chamber offshore-stationary oscillating water column devices using CFD. *Applied Energy*, 2018, 228: 82-96
- 23 Hsieh M, Lin IH, Dorrell DG, et al. Development of a wave energy converter using a two chamber oscillating water column. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(3): 482-497
- 24 Deng Z, Wang C, Wang P, et al. Hydrodynamic performance of an offshore-stationary OWC device with a horizontal bottom plate: Experimental and numerical study. *Energy*, 2019, 187: 115941
- 25 Hirt CW, Nichols BD. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 1979(39): 201-225
- 26 Weller HG. The development of a new flame area combustion model using conditional averaging//Thermo-Fluids Section Report TF 9307, Imperial College of Science, Technology and Medicine, 1993
- 27 Rusche H. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions. [PhD Thesis]. London: University of London, 2002
- 28 Kuz'min D, Lohner R, Turek S. Flux-corrected Transport: Principles, Algorithms, and Applications (Google eBook). 2005: 301
- 29 Iturrioz A, Guanache R, Lara JL, et al. Validation of OpenFOAM® for oscillating water column three-dimensional modeling. *Ocean Engineering*, 2015, 107: 222-236
- 30 Jacobsen NG, Fuhrman DR, Fredsøe J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, 70(9): 1073-1088
- 31 Deng Z, Wang C, Yao Y, et al. Numerical simulation of an oscillating water column device installed over a submerged breakwater. *Journal of Marine Science and Technology*, 2020, 25(1): 258-271
- 32 王辰, 邓争志, 茆大炜. 台阶式地形上双垂板透空系统的水动力学特性. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(2): 336-346 (Wang Chen, Deng Zhengzhi, Mao Dawei. Hydrodynamic performance of two vertical plates penetrating system mounted over stepped bottom. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(2): 336-346 (in Chinese))
- 33 Deng Z, Wang C, Wang C, et al. Wave scattering by twin surface-piercing plates over a stepped bottom: trapped wave energy and energy loss. *China Ocean Engineering*, 2019, 33(4): 398-411
- 34 Luo Y, Wang Z, Peng G, et al. Numerical simulation of a heave-only floating OWC (oscillating water column) device. *Energy*, 2014, 76: 799-806