前墙结构对 OWC 气室捕能效果影响的 数值研究

曲 铭,于定勇*,王世林,康 骁

(中国海洋大学 工程学院,山东 青岛 266100)

摘 要:基于不可压缩黏性流体理论和 VOF(Volume of Fluid)方法建立了二维数值波浪水槽模型,将模拟波形与 波浪理论值进行对比,分析了模型可靠性,并利用该模型研究了 5 种不同前墙结构 OWC 气室在不同波高、周期时 的出气口速度和气室内空气压强。基于模拟结果,从波能一动能转换效率和气室内空气压强角度分析了前墙结构 对 OWC 气室的捕能效果的影响。结果表明:对于传统的直立型 OWC 气室,采用合适的前墙结构可有效提高 OWC 气室的捕能效果;相比三角截面(20D型,30D型)和矩形(Y型)截面前墙,采用椭圆截面(20TY型,30TY型) 的前墙结构的捕能效果更优,且在周期较大(1.6 和 1.8 s)时其作用更显著,其波能一动能转换率相对 Y型前墙结 构气室平均提升 37%;5 种前墙结构不同的气室中,20TY 型和 30TY 型前墙结构气室的捕能效果最优。 关键词:波浪能转换;计算流体动力学;VOF方法;二维数值波浪水槽;振荡水柱式发电装置

中图分类号:P743.2 文献标识码:A 文章编号:1002-3682(2020)02-0111-08

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.02.005

引用格式:曲铭,于定勇,王世林,等. 前墙结构对 OWC 气室捕能效果影响的数值研究[J]. 海岸工程, 2020, 39 (2): 111-118. QU M, YU D Y, WANG S L, et al. Numerical study on the influence of front wall structure on energy capture effect of OWC chamber[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(2): 111-118.

振荡水柱式发电装置(Oscillating Water Column,OWC)有结构简单以及性能稳定的特点,是波浪能领域研究的重点之一。国内外的相关学者在振荡水柱式发电装置领域已进行了若干的研究^[1-10]。较早提出振荡水柱发电装置波能转换的理论的是 Evans^[11],通过频域线性波的理论将振荡水柱气室内自由液面的运动进行了简化;Heath^[12]考虑了从浮标到并网发电系统的 OWC 系统的历史,给出了有关商业开发中其他OWC 系统进展报告;Xu 等^[13]通过试验和理论方法研究了具有二次功率输出(Power Take Off, PTO)模型的 OWC 装置的发电效率;史宏达等^[14]设计了沉箱防波堤兼作岸式 OWC 波能装置,在此基础上,秦辉等^[15]设计了一种带收缩水道的沉箱防波堤和 OWC 波能发电装置相结合的复合结构形式;温鸿杰^[16]使用了 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)方法重演了气室内外的自由液面形态以及气室前墙附近涡旋的生成、发展和耗散过程,发现了直立式气室前墙外侧易产生较大的涡旋;郑艳娜等^[17]进行了振荡水柱装置前墙形状对能量转化效率影响的数值模拟,在直立式的前墙的不同位置底部和两侧分别增设了直径 0.500 和 1.125 m 的 2 种半圆,认为前墙底端两侧增加半圆可以较好地提升转化效率,从转化效率的角度得出了对传统直立式前墙结构的改进可提高气室的捕能效果的结论,但仅涉及了增设半圆的前墙结构,没有对前墙结构形式变化对气室捕能效果的影响进行研究讨论。

已有的有关振荡水柱发电装置的研究,缺少针对前墙结构截面形式不同对气室捕能效果影响的探讨。 为研究前墙结构对气室捕能效果的影响,本文提出了椭圆和三角两种气室前墙截面形式,通过改变角度得到 5种不同的气室前墙结构,并结合传统矩形前墙通过数值模拟从波能一动能转换效率和气室内空气压强两

资助项目:国家自然科学基金项目——桩基环保型防波堤的基础理论与设计方法(51739010)

(李 燕 编辑)

收稿日期:2019-11-26

作者简介:曲 铭(1995-),男,硕士研究生,主要从事海洋动力与结构物方面研究. E-mail: 1054197472@qq.com

^{*} 通讯作者:于定勇(1964-),男,教授,博士,主要从事海洋动力与结构物和岸滩作用方面研究. E-mail: dyyu01@126.com

个角度,研究了前墙结构截面形式对 OWC 气室捕能效果的影响。

1 数值水槽

1.1 数学模型

本文利用 Flow-3D 软件,以 N-S 方程为基本控制方程建立二维数值波浪水槽,紊流模型为 RNG k-ε 模型,并采用 VOF 方法处理自由液面。需要注意的是本模型为二维数值模型,流体不会在 y 方向产生流动。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 , \qquad (1)$$

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_{\rm F}} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_{\rm F}} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad , \qquad (2) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_{\rm F}} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{cases}$$

式中: V_{F} 为流体流动部分的体积; A_{x} 、 A_{y} 、 A_{z} , f_{x} 、 f_{y} 、 f_{z} 和 G_{x} 、 G_{y} 、 G_{z} 为模拟流体流动各个方向的面积、黏滞加速度和重力加速度;p 为在流体微元上的作用压力; ρ 为流体密度。

紊动能 $k_{\rm T}$ 方程和 $\epsilon_{\rm T}$ 方程:

$$\frac{\partial k_{\rm T}}{\partial t} + \frac{1}{V_{\rm F}} \left(u A_x \frac{\partial k_{\rm T}}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_{\rm T}}{\partial x} + w A_z \frac{\partial k_{\rm T}}{\partial z} \right) = P_{\rm T} + G_{\rm T} + DIff_{\rm T} - \varepsilon_{\rm T} , \qquad (3)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{T}}}{\partial t} + \frac{1}{V_{\mathrm{F}}} \left(uA_{x} \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{T}}}{\partial x} + vA_{y} \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{T}}}{\partial x} + wA_{z} \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{T}}}{\partial z} \right) = \frac{\mathrm{CDIS} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{T}}}{k_{\mathrm{T}}} \cdot (P_{\mathrm{T}} + \mathrm{CDIS} \cdot G) + DIff_{\mathrm{T}} - \mathrm{CDIS} \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{T}}^{2}}{k_{\mathrm{T}}}, \quad (4)$$

式中: P_{T} 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_{T} 是由于浮力引起的湍动能 k 的产生项,对于不可压缩流体取为 0;CDIS 为紊动参数,默认取值为 0。

1.2 数值水槽的建立和验证

二维水槽的结构示意图见图 1,水槽右端为阻尼消波段,左边界为造波边界(Wave Boundary),右边界为 透浪边界(Outflow),上下边界分别为压力边界和边界墙(Specified Pressure 和 Wall)。通过设计监测点得 到水槽内波高,并与理论值进行对比验证(图 2),可以看出模拟值与理论波形基本吻合,说明该模型可以较 准确地模拟线性波浪。



2 OWC 气室数值模拟

2.1 模型建立

取重力相似准则即弗雷德准则设计模型,根据试验水槽的尺寸和模型设计,长度比λ_L=20。试验水深 为 600 mm。试验中,气室前布置探测点用以检测堤前波高,出气口中心位置布置探测点1个,用以获取出 气口空气流速。气室内顶部布置探测点1个,用以获取气室内空气压强。试验选用5个具有不同前墙结构 的模型(图 3 和图 4)。其中,20D 和 30D 型的气室前墙截面分别为 20°和 30°的三角;20TY 和 30TY 型的气 室前墙截面分别是端点连线与长轴夹角为 20°和 30°的 1/4 椭圆。



2.2 模拟工况

模拟主要是研究前墙结构不同的经典 OWC 气室在不同波要素下的捕能效果,共设置 5 种模型(Y 型、20TY 型、20D 型和 30D 型)。模拟所用的波浪要素参考青岛董家口港区附近海况,实际比例下周期选用 5,6,7 和 8 s 四种,波高选取 2,3,4 和 5 m 四种,水深取 12 m,根据比尺换算即为 4 种波高(0.10, 0.15,0.20 和 0.25 m)、4 种周期(1.1,1.3,1.6 和 1.8 s)共 80 个工况在水深 0.6 m 的情况下进行模拟。

2.3 分析方法

水体受到外力的作用运动形成波浪,波浪本身具有动能和势能。一个波长(L)范围内单位宽度波锋线 长度的波浪势能(E_p)公式为

$$E_{\rm p} = \int_{0}^{L} \int_{0}^{\eta} \rho g z \, \mathrm{d}x \, \mathrm{d}z = \int_{0}^{L} \frac{\rho g}{2} \eta^{2} \, \mathrm{d}x \,, \tag{5}$$

式中,H 为波高,L 为波长, ρ 为液体密度。微幅波中,自由表面高度 $\eta = \frac{H}{2} \sin(kx - \sigma t)$,带人式(5)可得:

$$E_{\rm p} = \frac{1}{16} \rho g H^2 L \,, \tag{6}$$

一个波长范围内单位宽度波锋线长度的波浪动能(Ek)公式为

$$E_{k} = \int_{0}^{L} \int_{-h}^{\eta} \frac{\rho}{2} (u^{2} + \bar{\omega}^{2}) dx dz, \qquad (7)$$

在微幅波中, Ek 可表示为

$$E_{k} = \int_{0}^{L} \int_{-h}^{0} \frac{\rho}{2} (u^{2} + \bar{\omega}^{2}) dx dz, \qquad (8)$$

式中,u为水平速度分量, w为垂直速度分量,h为水深。根据势流理论可得:

$$E_{k} = \frac{1}{16} \rho g H^{2} L , \qquad (9)$$

故一个波长范围内的总波能(E)为

$$E = E_{k} + E_{p} = \frac{1}{8}\rho g H^{2} L_{o}$$
(10)

气室内气液相互作用,波浪能量转换为空气动能,出气口空气动能 E。为

$$E_{o} = \frac{1}{2}mv^{2} = \frac{1}{2}\rho_{k}BTv^{3}, \qquad (11)$$

式中, ρ_k 为气体密度, m 为气体质量, u 为气体速度, B 为气室出口宽度, T 为周期。

根据式(10)与式(11)知,气室的波能一动能转换率(η_e)^[6]为

$$\eta_{e} = \frac{E_{o}}{E} = \frac{\frac{1}{2}\rho_{k}BTv^{3}}{\frac{1}{8}\rho_{g}H^{2}L} = \frac{4\rho_{k}BTv^{3}}{\rho_{g}H^{2}L}$$
(12)

3 结果分析

3.1 各周期下不同模型的转换效率

各周期下不同模型的转换效率随波高的变化见图 5。由图 5 可见,在各周期下,20TY 型和 30TY 型前 墙气室的转换效率明显较高,且在周期为 1.1 和 1.3 s时 20TY 型的转换效率高于 30TY 型。在周期 1.3 和 1.6 s时,30D型的转换效率优于 Y型,1.8 s时低于 Y型;各工况下 20D型前墙气室的转换效率相对于 Y型 没有明显优势。在周期 1.8 s的情况下,波高 0.20 m时,20D型、30D型前墙气室的转换效率分别为 Y型的 1.07 倍和 0.92 倍,而 20TY 型、30TY 型前墙气室的转换效率分别为 Y型的 1.46 倍和 1.61 倍,波高 0.10 m 时 30TY 型前墙气室的转换效率高于 Y型前墙气室 90%。各工况下 20TY 型、30TY 型前墙气室的转换效 率相对 Y型前墙结构气室平均提升了 37%。





3.2 4种周期下不同模型的气室内压强

在4种周期下不同模型的气室内空气压强随波高的变化见图 6。由图 6 可见 20TY 型和 30TY 型前墙 气室的气室内压强较高,且在周期为 1.1 和 1.3 s 时 20TY 型的转换效率高于 30TY 型,在周期为 1.6 和 1.8 s 则反之。在周期 1.3 和 1.6 s 时,30D 型的气室内压强高于 Y 型,1.8 s 时低于 Y 型。各工况下 20D 型的气室 内压强与 Y 型的差距很小。



Fig.6 The air pressure amplitudes in the air chambers of different models in different periods

4 结 论

在数值水槽中进行了模拟研究,研究了5种不同前墙结构 OWC 气室在不同波高、周期时的出气口速度 和气室内空气压强。基于模拟结果从波能一动能转换效率和气室内空气压强角度分析了前墙结构对 OWC 气室的捕能效果的影响,得到了以下结论:

1)对前墙结构进行改进可以有效地提高 OWC 气室的捕能效果,前墙结构对捕能效果的影响在周期较 大时更为显著;

2)5种结构中 20TY 型和 30TY 型前墙的气室捕能效果较好,其波能一动能转换率相对 Y 型前墙结构气室 最多提升 90%,平均提升 37%;在周期为 1.1 和 1.3 s时 20TY 型的捕能效果优于 30TY 型,在周期为 1.6 和 1.8 s则反之;在周期 1.3 和 1.6 s时,30D 型的捕能效果优于 Y 型,而 20D 型相对于 Y 型没有明显优势。

参考文献(References):

- [1] HUANG Y, SHI H, LIU D, et al. Study on the breakwater caisson as oscillating water column facility[J]. Journal of Ocean University of China, 2010, 9(3): 244-250.
- [2] SIMONETTI I, CAPPIETTI L, ELSAFTI H, et al. Evaluation of air compressibility effects on the performance of fixed OWC wave energy converters using CFD modelling[J]. Renewable Energy, 2018, 119: 741-753.
- [3] NING D Z, YU Z, ZHANG C W. Hydrodynamic modeling of a novel dual-chamber OWC wave energy converter[J]. Applied Ocean Research, 2018, 78: 180-191.
- [4] HUHZ, DENGZZ, YAOYM, et al. Theoretical and numerical studies of off-shore oscillating water column wave energy device[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(2): 325-335. 胡杭辉,邓争志,姚炎明,等. 离岸式振荡水柱波能装置的 理论及数值研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(2): 325-335.
- [5] LIU Z, ZHAO H Y, CUI Y. Effects of rotor solidity on the performance of impulse turbine for OWC wave energy converter[J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(5): 663-672.
- [6] SHI H D, JIAO J H, LIU Z, et al. Study on capture effect of air chamber of caisson breakwater as OWC under irregular waves[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(1): 141-148. 史宏达, 焦建辉, 刘臻, 等. 不规则波作用下 OWC 沉箱气室捕能效果研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(1): 141-148.
- [7] CHIU Y F, LEE H H, LIN C Y, et al. Study on a caisson based OWC wave energy converting system[C]//WANG Z F. Proceedings of International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy, Budapest University of Technology and Economics. Chongqing: Atlantis Press, 2015: 610-613.
- [8] LEE H H, CHIU Y F, LIN C Y, et al. Parametric study on a caisson based OWC wave energy converting system [C] // LEE H H. Proceedings of the 6th World Congress on Engineering and Technology (CET 2016). Shanghai: Scientific Research Publishing, 2016: 213-219.
- [9] LÜ R C. design and study on wave energy devices integrated into comb-type breakwater [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. 吕若辰. 梳式防波堤兼作波能发电装置的设计与研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [10] JIJN, LIUZ, JILQ. 3D Numerical simulation for oscillating water column chamber in wave-power convertor[J]. Coastal Engineering, 2011, 30(2): 7-13. 纪君娜, 刘臻, 纪立强. 振荡水柱波能发电装置气室的三维数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2011, 30(2): 7-13.
- [11] EVANS D V, PORTER R. Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device[J]. Applied Ocean Research, 1995, 17 (3): 155-164.
- [12] HEATH T V. A review of oscillating water columns[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society London, Series A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences), 2011, 370(1959): 235-245.
- [13] XU C, HUANG Z, DENG Z. Experimental and theoretical study of a cylindrical oscillating water column device with a quadratic power take-off model[J]. Applied Ocean Research, 2016, 57: 19-29.
- [14] SHI H D, YANG G H, LIU Z. Study on new cassion breakwater as OWC[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(9): 142-146. 史宏达,杨国华,刘臻. 新型沉箱防波堤兼作岸式 OWC 波能装置的设计及稳定性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(9): 142-146.
- [15] QIN H, WANG Y X, WANG G Y. On caisson breakwater with contracted channel and OWC modeling[J]. Port & Waterway Engineering, 2013, 2013(8): 52-56, 62. 秦辉, 王永学, 王国玉. 带收缩水道的沉箱防波堤兼 OWC 装置结构形式的研究[J]. 水运工程, 2013, 2013(8): 52-56, 62.
- [16] WEN H J. SPH simulation of hydrodynamic characteristics of OWC wave energy conversion device[C]// DOU X P. Chinese Society of Ocean Engineering. Proceedings of the 18th China Ocean (Ashore) Engineering Symposium. Beijing: Ocean Press, 2017: 333-338. 温鸿 杰. OWC 式波能转换装置水动力特性的 SPH 模拟[C]// 中国海洋工程学会. 窦希平. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集 (上). 北京:海洋出版社, 2017: 333-338.
- [17] ZHENG Y N, LIU D X, CHEN C P, et al. Numerical simulation on influence of front wall shape of oscillating water column on energy conversion efficiency[J]. China Offshore Platform, 2018, 33(4): 38-44. 郑艳娜, 刘德兴, 陈昌平, 等. 振荡水柱装置前墙形状对能量转 化效率影响的数值模拟[J]. 中国海洋平台, 2018, 33(4): 38-44.

Numerical Study on the Influence of Front Wall Structure on Energy Capture Effect of OWC Chamber

QU Ming, YU Ding-yong, WANG Shi-lin, KANG Xiao

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the incompressible viscous fluid theory and the VOF (Volume of Fluid) method, a two-dimensional numerical wave flume model is established. The reliability of the model is analyzed by comparing the simulated wave form with the theoretical values. By using this model, the air outlet speed and air pressure of the OWC air chambers with 5 types of front wall structures are studied under the conditions of different wave heights and wave periods. Based on the simulated results, the influence of the front wall structures on the energy-capture effect of the OWC chamber is analyzed in term of wave energykinetic energy conversion efficiency and air pressure in the OWC chamber. The results show that for the traditional upright OWC chamber, the energy capture effect can be improved effectively if suitable front wall structures are adopted. Compared with the front wall which has a triangular section (e.g. 20D-type and 30D-type) or a rectangular section (e.g. Y-type), the front wall with an elliptical section (e.g. 20TYtype and 30TY-type) can make the OWC chamber have a better energy capture effect. Especially when the wave period is larger (e.g. 1.6 s and 1.8 s) the function of this structure is more prominent. The wave energy-kinetic energy conversion rate in the OWC chamber with such front wall structure can be increased by an average of 37% compared to the chamber with the Y-type front wall structure. Among the five types of front wall structures, the 20TY-type and 30TY-type front wall structures make the energy capture effect of the OWC chamber optimal.

Key words: wave energy conversion; CFD; VOF method; two-dimensional numerical wave flume; OWC Received: November 26, 2019