

# 双气室振荡水柱波能装置水动力特性研究

宁德志, 王荣泉, Mayon Robert

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连, 116024, Email: dzning@dlut.edu.cn)

**摘要:** 为了应对持续增长的能源需求和使用化石能源引发的环境问题, 世界各国都在寻求开发可再生能源。波浪能作为海洋可再生能源的一种吸引了世界各海洋国家的关注。在众多的波浪能转换技术中, 振荡水柱 (OWC) 式波能装置被广泛认可为最先进技术之一。关于在 OWC 水动力特性的研究中, 绝大部分都是基于单气室 OWC 装置, 然而该装置只有波浪频率在其共振频率附近时才是高效的。为了提高装置的能量转换效率和在更宽波频条件下吸收波能的能力, 双气室式 OWC 波能装置被提出来并进行了一定的测试。作为作者前期单气室 OWC 装置研究工作的拓展, 本研究考虑具有两个独立气室的固定式 OWC 波能装置, 并与单气室 OWC 波能装置的水动力性能进行了对比。采用实验和数值的方法对双气室 OWC 装置的水动力效率、波面变化和气室压强进行了模拟研究。数值模型是基于完全非线性高阶边界元方法, 并引入人工黏性来近似由于气室前墙诱发的水体黏性效应。模型实验在大连理工大学的波流水槽内开展。研究发现, 与单气室 OWC 装置相比, 双气室 OWC 装置能够拓宽有效频带宽度和改善水动力性能, 这些发现有助于实际工程中 OWC 波能装置的设计和应用。

**关键词:** OWC; 双气室; 水动力特性; 完全非线性; 波浪水槽

## 1 引言

随着化石能源的日益枯竭以及环境问题的日益严重, 世界各国都在寻求开发可在生能源。占地球表面 71% 的海洋拥有波浪能、潮流能、风能等多种可再生能源, 其储量巨大。波浪能作为一种优质的海洋能, 其能流密度高、储量大。在众多的波浪能转换技术中, 振荡水柱 (OWC) 式波能装置由于其结构形式和机械性能简单而被广泛认可为最先进技术之一。在近几年, 学者们关于 OWC 装置的水动力性能开展了很多研究, 但是绝大部分研究都是基于单气室结构的 OWC 波能装置。然而, 通过研究也发现, OWC 波能装置通常要在入射波浪频率和装置的共振频率接近时, 其能量转换效率才较高<sup>[1-3]</sup>。为了提高 OWC 波能装置的能量转换效率, 双气室结构 OWC 波能装置的概念被提了出来。Rezanejad 等<sup>[4]</sup>用解析和数值研究了拥有台阶地形的双气室 OWC 装置的水动力性能。Ning 等<sup>[5]</sup>研究了单 PTO

双气室 OWC 装置的水动力性能。Elhanafi 等<sup>[6]</sup>基于 CFD 模型研究了离岸固定式双气室 OWC 装置的水动力性能。Ning 等<sup>[7]</sup>试验研究了双气室 OWC 装置的水动力性能。研究发现，双气室结构能提高 OWC 装置的水动力性能，本研究将探讨具有双气室 OWC 波能装置的水动力性能，并与单气室 OWC 的水动力性能进行对比。

## 2 物理模型试验

模型试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的波流水槽中进行，水槽长 69 m，宽 2.0 m，深 1.8 m，试验布置如图 1 所示。水槽在纵向方向被薄板分成了 1.2 m 和 0.8 m 宽两部分，模型安装在 0.8 m 宽部分，距离造波板 50 m 远。试验中采用弗汝德相似准则，模型的长度比尺取为 1:20。

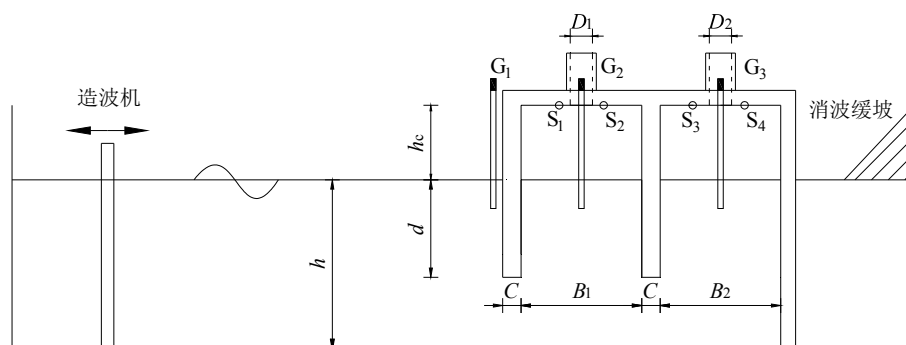


图 1 模型试验布置示意图

双气室 OWC 装置靠海和靠岸的气室分别命名为 1#气室和为 2#气室。1#和 2#气室的气孔直径分别为  $D_1$  和  $D_2$ ；1#和 2#气室的气室宽度分别  $B_1$  和  $B_2$ ；墙体的吃水深度和厚度分别为  $d$  和  $C$ 。试验中布置了 3 个浪高仪来监测不同位置的波面变化， $G_1$  布置在前墙外侧， $G_2$  和  $G_3$  分别布置在 1#和 2#气室的中心位置，其中  $G_1$  位置的浪高仪离墙面的距离为 0.02 m。在离 1#气室和 2#气室气孔中心 0.15 m 的地方分别布置了两个点压力计，用来测量气室内部的气体压强变化，气室内气体压强取气室内两个测点的平均值，即  $p_{a1} = (P_{S1} + P_{S2})/2$ ， $p_{a2} = (P_{S3} + P_{S4})/2$ ，式中： $p_{a1}$  和  $p_{a2}$  分别代表 1#气室和 2#气室内部的气体压强， $P_{S1}$  和  $P_{S2}$  分别代表 1#气室中  $S_1$  和  $S_2$  两个测点的压强值， $P_{S3}$  和  $P_{S4}$  分别代表 2#气室中  $S_3$  和  $S_4$  两个测点的压强值。采样频率设为 50 Hz，每组实验至少重复两次，取两次稳定结果的平均值作为最终试验结果。入射波波周期范围为 1.0~2.3 s，入射波幅为 0.03 m。

## 3 数值模型

本研究基于完全非线性势流理论和高阶边界元方法建立了波浪与双气室 OWC 波能装置相互作用的二维数值水槽。如图 2 所示，建立笛卡尔坐标系  $Oxz$ ，定义坐标原点  $O$  位于

静水面上,  $z$  轴竖直向上为正,  $x$  轴水平向右为正。由于是二维数值水槽, 图 2 中  $B_{O1}$  和  $B_{O2}$  分别表示 1# 和 2# 气孔的开孔宽度, 其余几何参数与图 1 中一致。

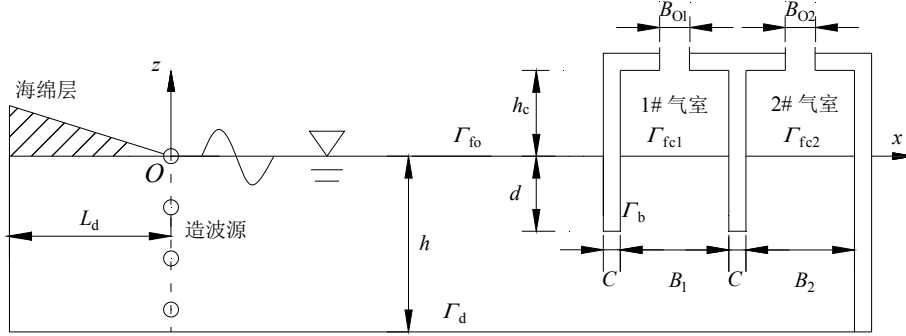


图 2 双气室 OWC 数值水槽示意图

数值模型中采用域内源造波技术产生入射波浪, 因此, 控制方程为泊松方程 (Poisson equation); 在数值水槽的左端布置了系数为  $\nu(x)$ 、长度为  $L_d$  的海绵层吸收出流波浪和反射波浪; 在 1# 和 2# 气室内部分别引入修正系数为  $\mu_1$  和  $\mu_2$  的修正阻尼项等效涡旋脱落和流动分离等黏性效应, 因此, 速度势  $\phi$  满足如下自由水面边界条件:

$$\begin{cases} \frac{dX(x, z)}{dt} = \nabla \phi - \nu(x)(X - X_0) \\ \frac{d\phi}{dt} = -g\eta + \frac{1}{2}(\nabla \phi \cdot \nabla \phi) - \frac{p_{a(1,2)}}{\rho} - \nu(x)\phi - \mu_{(1,2)} \frac{\partial \phi}{\partial n} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{X} = (x, z)$  为自由水面上水质点的瞬时位置;  $\eta$  为自由水面的铅垂位移;  $p_a$  为气室内部自由水面上的气体压强, 由气室内部的自由水面变化引起。假定其他压强与气孔处气流速度成二次关系, 可以得到气室内部的气体压强:

$$p_{a(1,2)}(t) = D_{dm(1,2)} |U_{d(1,2)}(t)| U_{d(1,2)}(t) \quad (2)$$

式中:  $D_{dm}$  为气动阻尼系数,  $U_d$  为气孔处的气流速度。气室吸收的波能可以通过下式求得:

$$P_{0(1,2)} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} Q_{(1,2)}(t) p_{a(1,2)}(t) dt \quad (3)$$

式中:  $Q$  为通过气孔的体积流量。因此, 气室的能量转换效率可以按下式求得:

$$\xi_{1,2} = \frac{P_{0(1,2)}}{P_{inc}} \quad (4)$$

式中:  $P_{inc}$  表示入射波能。双气室 OWC 装置的整体能量转换效率可以通过其两个子气室的能量转换效率求和得到  $\xi = \xi_1 + \xi_2$ 。

在数值模型中，数值水槽的长度设为 5 倍入射波波长，其中 1.5 倍波长用作海绵层；空间步长和时间步长分别设为  $\Delta x = \lambda/30$  和  $\Delta t = T/80$ 。

#### 4 结果与讨论

为了研究双气室 OWC 的水动力性能，选取如下工况进行分析：气室高度  $h_c = 0.2$  m、墙体吃水  $d = 0.20$  m、墙体厚度  $C = 0.05$  m、气室宽度比为  $B_1 : B_2 = 1 : 3$  ( $B_1 + B_2 + C = 0.70$  m)、气孔直径  $D_1 = 0.032$  m、 $D_2 = 0.055$  m (数值模型中的开孔率与试验保持一致，气孔宽度取为： $B_{O1} = 0.0010725$  m、 $B_{O2} = 0.00321755$  m)。数值模型中选取二次气动阻尼系数  $D_{dm1} = D_{dm2} = 1.0$ ，修正阻尼系数  $\mu_1 = 0$ ， $\mu_2 = 0.1$ 。

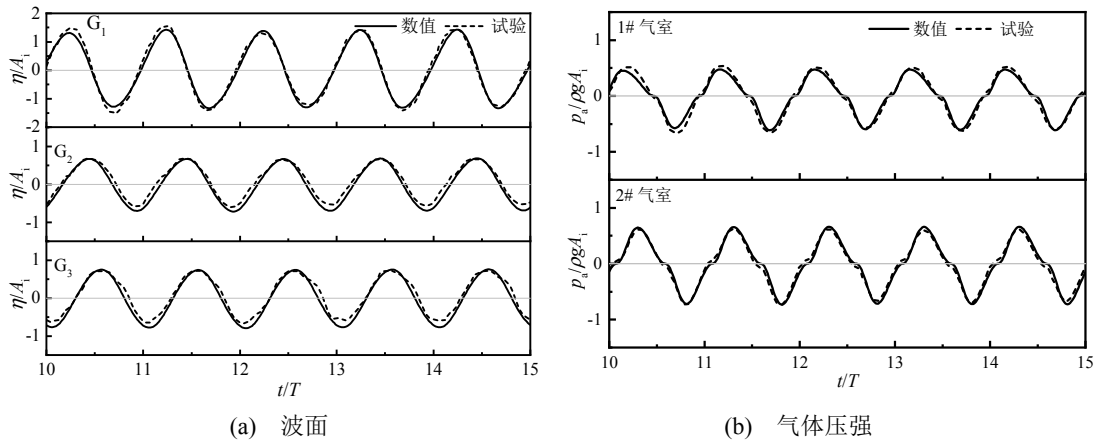


图 3 气室内外波面历程对比图 ( $B_1 : B_2 = 1 : 3, d = 0.20$  m,  $T = 1.5$  s)

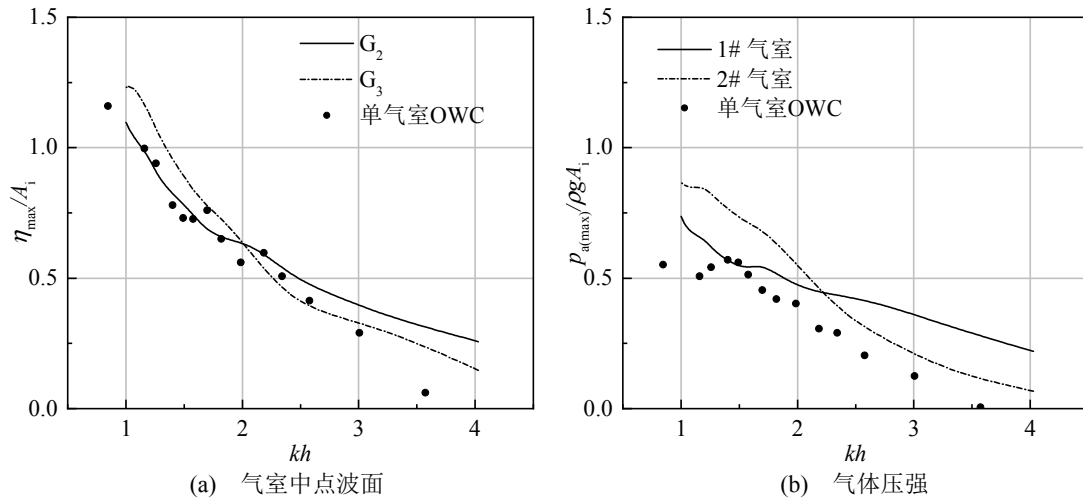


图 4 气室内气体压强时间历程对比 ( $B_1 : B_2 = 1 : 3, d = 0.20$  m)

图 3(a)和(b)分别给出了入射波周期  $T=1.5\text{s}$  时波面历程和气室内气体压强历程的数值结果与试验结果对比图。从图 3 中可以看出,数值结果与试验结果吻合良好,说明建立的数值模型是准确的。

图 4 给出了单气室和双气室 OWC 装置气室中点波面和气室内部压强最大值随  $kh$  变化情况,波面和气体压强的最大值分别用  $\eta_{\max}$  和  $p_{a(\max)}$  表示。从图 4 中可以看出,在大部分波况下,双气室 OWC 两个子气室内部的波面和压强比单气室的要大。这表明,双气室 OWC 装置内部的水柱运动要比单气室的剧烈,进而促使双气室 OWC 有更大的能量转换效率。

图 5 给出了双气室 OWC 装置与单气室 OWC 装置能量转换效率的对比。从图 5 中可以看到双气室 OWC 的整体效率比单气室 OWC 的要高,且双气室 OWC 装置的有效频带宽度比单气室 OWC 装置的也要大。

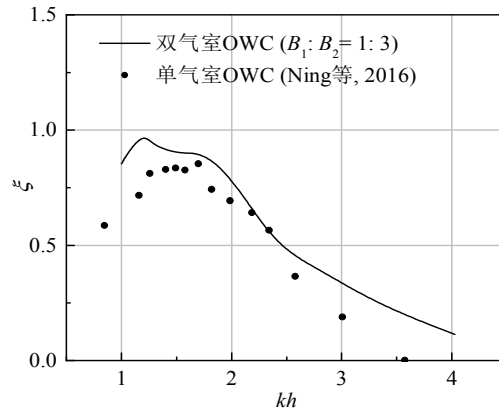


图 5 双气室 OWC 装置能量转换效率与单气室 OWC 对比

## 5 结论

通过对双气室 OWC 波能装置开展一系列数值模拟与试验研究,发现:相对于单气室结构,双气室结构的 OWC 装置能够拓宽装置的有效频带宽度和提高装置的能量转换效率,为 OWC 装置的进一步优化提供了新思路。

## 参考文献

- 1 Falcão A.F.D. Wave-power absorption by a periodic linear array of oscillating water columns. Ocean Eng. , 2002, 29(10): 1163-1186.
- 2 Morris-Thomas M.T., Irvin R.J., Thiagarajan K.P. An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of the Asme, 2007, 129(4): 273-278.
- 3 Ning D.Z., Wang R.Q., et al. An experimental investigation of hydrodynamics of a fixed OWC

- Wave Energy Converter. Appl. Energy 2016, 168: 636-648.
- 4 Rezanejad K., Bhattacharjee J., Soares C.G. Analytical and numerical study of dual-chamber oscillating water columns on stepped bottom. Renew. Energy 2015, 75: 272-282.
  - 5 Ning D., Wang R., Zhang C. Numerical Simulation of a Dual-Chamber Oscillating Water Column Wave Energy Converter. Sustainability, 2017, 9(9): 1599.
  - 6 Elhanafi A., Macfarlane G., Ning D. Hydrodynamic performance of single-chamber and dual-chamber offshore-stationary Oscillating Water Column devices using CFD. Appl. Energy 2018, 228: 82-96.
  - 7 Ning D.-Z., Wang R.-Q., et al. Experimental investigation of a land-based dual-chamber OWC wave energy converter. Renewable Sustainable Energy Rev. , 2019, 105: 48-60.

## **Hydrodynamic investigation on the dual-chamber OWC wave energy converter**

NING De-zhi, WANG Rong-quan, MAYON Robert

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024.

Email: dzning@dlut.edu.cn)

**Abstract:** To cope with the increasing energy demands and the environment problems derived from the use of fossil fuels, all countries in the world are exploring the renewable energy sources. The wave energy, one of the marine energies, has attracted international attention. The Oscillating Water Column (OWC) device is considered to be one of the most advanced technology among the diverse wave energy converters. Most of the previous hydrodynamic investigations on the OWC device were mainly focus on the single-chamber OWC, however, the single-chamber OWC device is to be an efficient absorber only when it operates at near-resonance. To improve the wave energy conversion hydrodynamic performance, the dual-chamber OWC device is designed and experimentally and numerically investigated. As an extension of the author's previous research work on the single-chamber OWC device, the hydrodynamic performance of an OWC device with two sub-chambers is experimentally and numerically investigated. The numerical model is based on the fully nonlinear potential flow theory and higher-order boundary element method, an artificial damping term is introduced to consider the viscous effects near the front wall. The physical tests were carried out in the wave-current flume in Dalian university of technology. It is found that the dual-chamber OWC device broadens the effective frequency bandwidth and performs better than the single-chamber device. these findings help to improve the design and operational performance of OWC devices.

**Key words:** OWC; Dual-chamber; Hydrodynamic; Fully nonlinear; Wave flume.