

# U 型振荡水柱式波能装置数值模拟研究

郭宝明, 宁德志

(大连理工大学海岸和近海国家重点实验室, 大连, 116024, Email: [GuoBM@mail.dlut.edu.cn](mailto:GuoBM@mail.dlut.edu.cn))

**摘要:** 本研究采用域内源造波技术, 基于时域高阶边界元方法(HOBEM), 发展建立了完全非线性自由液面的二维波浪水槽, 采用线性气动模型模拟气室内自由液面的气体压强, 研究了固定 U 型振荡水柱式(U-OWC)波能装置的水动力特性。通过与已发表的 U-OWC 实验结果相对比, 验证本模型的准确性与可延伸性, 在此基础上模拟研究了 U-OWC 波能转换装置水下挡板长度和挡板与前墙距离对气室内气体压强, 波面位移以及水动力效率的影响。研究表明, 水动力效率随着水下挡板长度、挡板与前墙的距离的增加而增加; 水下挡板长度和挡板与前墙距离的改变基本不影响共振频率区间。

**关键词:** 非线性; 高阶边界元; U-OWC; 水动力性能

## 1 引言

由于全球能源过度开发和环境问题, 大力发展新型可再生能源已成为全人类迫切的需求, 目前, 海洋能表现出的切实可行的可替换性, 引起了许多学者的关注。其中, 波浪能作为海洋能的一部分, 虽然相比于潮汐能, 风能等经济性优势较小, 但是海波出色的波能密度仍使许多学者投入了大量精力进行研究。振荡水柱式(OWCs)是目前各国研究最多, 投资最大也最为成熟的波能装置型式, 其工作原理是波浪在气室内形成水柱, 通过水柱作用, 产生往复气流, 带动涡轮机同向转动产生电能。相比于传统的 OWC 装置, U-OWC 波能转换装置继承了 OWC 结构简单和易于安装维护的特点, 同时具有更大的特征周期和气室压强, 表现出了更加优异的水动力性能, 另一方面, 在物理特性上这样的结构设计减少了进入气室的淤泥量, 增强了结构稳定性, 目前已有学者对其进行了相关研究。Spanos, Pol D<sup>[1]</sup>等发展了一种频域方法, 采用线性统计学, 对 U-OWC 的非线性动力响应进行了研究; Thomas Vyzikas 等<sup>[2]</sup>建立物理模型, 实验研究了不同类型的 OWC, 发现 U-OWC 的水动力性能优于传统 OWC 波能转换装置。Paolo Boccotti 等<sup>[3]</sup>对比了传统 OWC 与 U-OWC 装置的优劣, 利用实验与数值模拟相结合的方式分析了极端波况下 U-OWC 波能装置的捕能效率

及其稳定性。本研究应用时域高阶边界元方法，采用线性压强模型，建立了 U-OWC 波能转换装置的二维波浪数值水槽，研究了入射波频率、水下挡板的长度、挡板前底座长度、前墙吃水、气孔宽度以及挡板与前墙的距离对气室内水动力特性的影响。

## 2 数学模型与数值方法

本研究采用 Ning 等<sup>[4]</sup>基于势流理论和时域高阶边界元方法建立的二维完全非线性波浪水槽，模拟了 U-OWC 装置的水动力特性，并与 Vyzikas 等<sup>[2]</sup>物理实验结果进行对比。研究的 U 型振荡水柱式波能转换装置如图 1 所示。

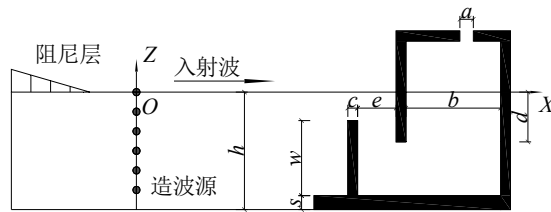


图 1 U 型振荡水柱式波能转换装置示意图

其中， $h$  代表静水深， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $l$ 、 $w$ 、 $s$  分别代表气孔宽度、气室宽度、墙体厚度、前墙入水深度、挡板与前墙的距离、挡板前底座宽度、挡板长度（从顶端到底座）、底座厚度。建立笛卡尔坐标系， $O$  点位于造波源与静水面的交点处， $OX$  代表波浪传播方向， $OZ$  竖直向上。这里假设流体是理想流体，无黏无旋且不可压缩，因此流场可用速度势  $\phi$  表示，通常满足拉普拉斯方程，然而在本研究中采用了域内源造波技术，控制方程变为泊松方程：

$$\nabla^2 \phi = q^* = 2v\delta(x_s - x) \quad (1)$$

式中， $v$  代表流体质点水平速度，本研究中采用二阶斯托克斯波解析解，造波源位于  $x_s$  处。本模拟在自由水面上满足完全非线性动力学和运动学边界条件，由于在 U-OWC 的气室内自由水面动力学边界条件加入了人工阻尼系数，同时采用了混合欧拉-拉格朗日方法更新自由液面的网格，在造波点上游设置了人工阻尼层消除反射，因此边界条件变为：

$$\begin{aligned} \frac{dX(x, z)}{dt} &= \nabla \phi - \mu_1(x)(x - x_0) \\ \frac{d\phi}{dt} &= -g\eta - \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}|\nabla \phi|^2 - \mu_1(x)\phi - \mu_2(x)\frac{\partial \phi}{\partial n} \end{aligned} \quad (2)$$

式中，物质导数  $d/dt = \partial/\partial t + v \cdot \nabla$ ， $x_0$  代表流体质点初始位置， $\mu_1(x)$  指人工阻尼层系数， $g$  表示重力常数， $\eta$  指波面位移， $P$  是波面压强，气室外部压强为零，内部由压强耦合模型得

到,  $\rho$  指流体密度,  $\mu_2(x)$ 代表气室内人工黏性系数,  $\mu_2(x)$ 通过与实验结果对比确定。 $\mu_1(x)$ 由以下方法确定:

$$\mu_1(x)=\begin{cases} \omega\left(\frac{x-x_1}{L}\right)^2, & x_1-L < x < x_1 \\ 0, & x \geq x_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\omega$  指入射波圆频率,  $L$  指人工阻尼层长度。

在波浪水槽底部、侧壁以及 U-OWC 装置结构表面流体法向速度为零:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n}=0 \quad (4)$$

时域模型初值条件设为:  $\phi|_{t=0} = \eta|_{t=0} = 0$  (5)

假定空气不可压缩, 数值模型中 U-OWC 的能量捕获功率为:

$$\begin{aligned} P_{owc} &= \frac{1}{T} \int_t^{T+t} Q(t)P(t)dt = \frac{1}{T} \int_t^{T+t} b\bar{\eta}(t)P(t)dt \\ &= \frac{1}{T} \int_t^{T+t} aU_d(t)c_{dm}U_d(t)dt \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $T$  代表波周期, 流量  $Q(t)=b\bar{\eta}(t) = aU_d(t)$ ,  $\bar{\eta}(t)$  指气室内自由表面垂直速度的时均值。

能量转化效率为  $C_w = P_{owc} / P_{inc}$

对流域内速度势函数运用格林第二积分公式, 得到边界积分方程:

$$\begin{aligned} \alpha(p_s)\phi(p_s) &= \int_{\Gamma} \phi(p_s) \frac{\partial G(p_s, p_f)}{\partial n} d\Gamma - \int_{\Gamma} G(p_s, p_f) \frac{\partial \phi(p_s)}{\partial n} d\Gamma \\ &\quad + \int_{\Omega} q^* G(p_s, p_f) d\Omega \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $\Gamma$  指整个流体计算域边界,  $\Omega$  表示整个流体域,  $p_s$  指源点,  $p_f$  指场点,  $\alpha(p_s)$  指固角系数,  $G(p_s, p_f)$  代表满足水底条件的二维简单格林函数。文中采用三节点二次单元, 将整个边界离散成曲线单元, 对于每个单元可通过数学变换成参数坐标下的等参元。在等参元内部引入形状函数, 则每点的物理量及坐标均可插值得到。

已知物面上的法向速度和自由水面上的速度势, 根据离散后的积分方程, 求得当前时刻物面上的速度势和自由水面上的法向速度后, 应用四阶龙格库塔法, 由自由水面非线性边界条件计算下一时刻的水面位置以及自由水面上的速度势, 再对自由水面和物体表面重新划分网格, 重新应用积分方程计算下一时刻的物理量, 这样周而复始, 直到结束。

### 3 U-OWC 数值模型验证

为验证数值模型的准确性，文中采用 Vyzikas 等<sup>[2]</sup>实验中 U-OWC 的装置参数，利用建立的数值模型模拟其实验。设置与实验相同的入射波高和波频率，波浪水槽总长为  $5.0\lambda$ ，在其左端设置  $1.5\lambda$  的人工阻尼层。经过网格及时间收敛性验证，水平方向网格步长为  $\lambda/30$ ，时间步长为  $T/60$ 。经过与实验结果对比，线性气动阻尼系数取为 19，人工黏性系数取为 0。

图 2 给出了 Vyzikas 等<sup>[2]</sup>的实验与本研究中数值模型 U-OWC 波能转换装置的波面位移和水动力波能转换效率的对比。物理实验中将水槽等分为三块，分别建立 3 个 U-OWC 装置并进行测试。可以看出本文数值结果与实验结果整体上吻合良好。

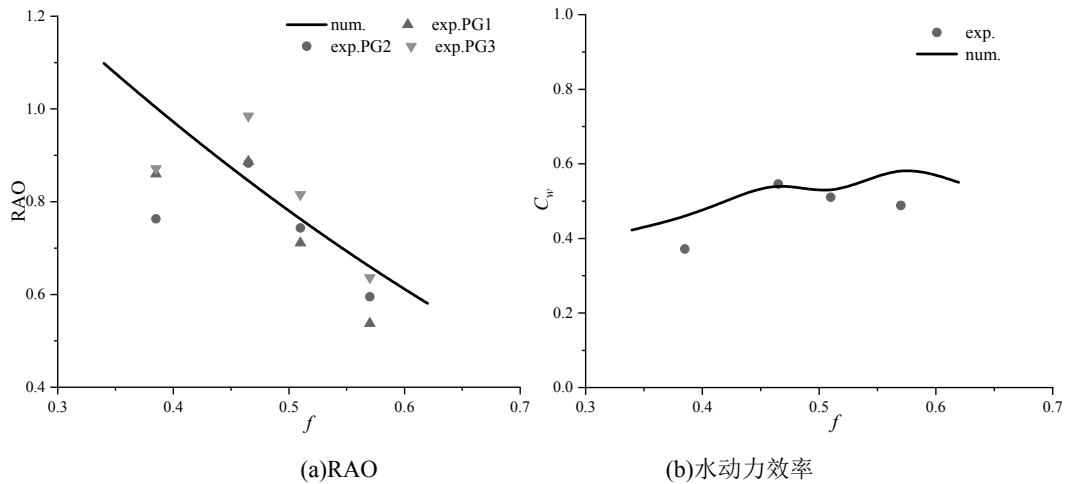


图 2 气室内波面运动 RAO 及水动力效率随波频率变化

### 4 装置参数对水动力性能的影响

保持水深 0.75m、波浪频率 0.51 和入射波幅  $A0.04m$  不变，分别分析水下挡板长度和挡板与前墙的距离对 U-OWC 装置水动力性能的影响。文中  $\eta_{\max}$  表示采用入射波幅  $A$  作无量纲化的气室内部波面位移幅值， $P_{\max}$  表示采用  $\rho g A b$  作无量纲化的气室内部气体压强幅值。图 3 给出了 3 种水下挡板长度的 U-OWC 波能转换装置的水动力效率随波频率的变化，可以看出，水下挡板长度改变能量转化效率的大小，挡板长度越大，水动力效率越高；不改变水动力效率的共振区间，3 组模拟结果共振频率都处于 0.45 附近；另一方面，在低频区，水下挡板长度对  $C_w$  影响不明显，随着向高频区移动， $C_w$  的差值逐渐增大。图 4 给出了 3 种挡板与前墙距离的 U-OWC 装置的水动力效率随波频率的变化。同样地，挡板与前墙距

离不改变共振频率区间，其大致处于 0.45 附近，也是存在高频时能量转化效率的差值更大一些的现象，另外发现，对于  $e=0.143\text{ m}$  该组结果低频时靠近  $e=0.001\text{ m}$  的结果，而在高频时接近  $e=0.5\text{ m}$  的水动力效率。

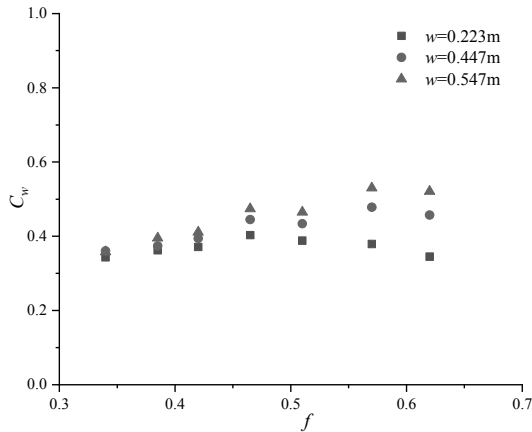


图3 挡板长度对水动力效率的影响

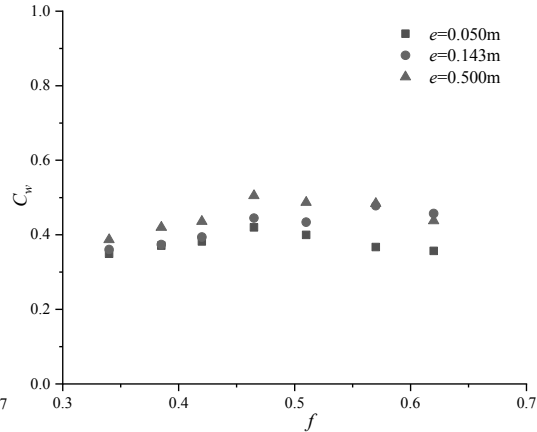


图4 挡板与前墙距离对水动力效率的影响

## 5 结论

本研究基于高阶边界元方法和域内源造波技术建立了 U-OWC 波能转换装置的非线性水动力数学模型，通过与已发表实验结果对比进行了验证。并进一步开展数值实验，研究了装置前挡板长度对装置水动力性能影响的研究，为结构优化设计提供一定参考。从研究中可以发现，适当增加挡板长度或者挡板与前墙的距离都可以提高 U-OWC 装置的水动力效率。

## 参考文献

- Spanos, Pol D, Strati, Federica M, Malara, Giovanni, et al. Nonlinear Stochastic Dynamics of an Oscillating Water Column (U-OWC) Harvester: A Frequency Domain Approach. *Meccanica dei Materiali e delle Strutture*, VI, no. 1 (2016) 203-210.
- Vyzikas T, Deshoulières, Samy, Barton M, et al. Experimental investigation of different geometries of fixed oscillating water column devices. *J. Renewable Energy*, 2017, 104:248-258.
- Boccotti P. Comparison between a U-OWC and a conventional OWC. *J. Ocean Engineering*, 2007, 34(5-6):799-805.

- 4 Ning D Z, Wang R Q, Zou Q P, et al. An experimental investigation of hydrodynamics of a fixed OWC Wave Energy Converter. *J. Applied Energy*, 2016, 168:636-648.
- 5 Ning D Z, Wang R Q, Gou Y, et al. Numerical and experimental investigation of wave dynamics on a land-fixed OWC device. *J. Energy*, 2016, 115:326-337.
- 6 宁德志,石进,滕斌, et al. 岸式振荡水柱波能转换装置的数值模拟. *J. 哈尔滨工程大学学报*, 2014(07):789-794.
- 7 Ning D Z, Shi J, Zou Q P, et al. Investigation of hydrodynamic performance of an OWC (oscillating water column) wave energy device using a fully nonlinear HOBEM (higher-order boundary element method). *J. Energy*, 2015, 83:177-188.

## Numerical investigation of a U-type oscillating water column wave energy device

GUO Bao-ming, NING De-zhi

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

Email: [GuoBM@mail.dlut.edu.cn](mailto:GuoBM@mail.dlut.edu.cn))

**Abstract:** In this paper, based on the time-domain higher-order boundary element method (HOBEM), a fully nonlinear numerical model is developed to simulate the hydrodynamic performance of a U-type OWC device. In the model, the inner-domain sources is adopted to generate incident wave and avoid the re-reflection on the inlet boundary. Meantime, a linear pneumatic model is used to determine the air pressure which is imposed on the free surface inside the chamber. the numerical model is validated by comparing with the published experimental data of U-OWC physical model. It is found that the numerical model captures well the main hydrodynamic behaviors of the U-OWC device. Then, the present model is used to study the effects of chamber geometries (including the underwater battle length and the distance between battle and front wall) on hydrodynamic performance. Numerical results indicate that the two parameters clearly change hydrodynamic performance of U-OWC device. Hydrodynamic efficiency increases with increase of the underwater battle length or distance between battle and front wall; the two parameters have no effect on resonant frequency.

**Key words:** Nonlinear; HOBEM; U-OWC; Hydrodynamic efficiency.