

圆柱形振荡浮子式波浪能吸收装置 水动力性能数值计算与分析

王 帝, 夏 可, 万德成

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院海洋工程国家重点实验室, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 本文就圆柱形振荡浮子式波浪能收集装置的水动力学特性展开研究。采用基于开源平台OpenFOAM开发的船舶与海洋工程CFD求解器——naoe-FOAM-SJTU, 对圆柱式发电装置在规则波作用下的运动性能进行了数值模拟。根据振荡浮子式发电装置的特点, 分析了圆柱形浮体的波浪响应, 并与试验进行对照。分别模拟了单个浮体和两个浮体在波浪中运动情况, 并对两个浮体的相互作用进行了分析, 比较了在不同条件下浮体运动特点。引入阻尼效应, 来模拟发电机对于圆柱形浮体在波浪中运动的影响, 并对理论波浪能转化效率进行了探讨。

关键词: 波浪能发电; naoe-FOAM-SJTU求解器; 波浪载荷; 波浪能转化效率

在全球化石能源消耗量逐渐增多的背景下, 新型可再生能源作为一种替代方案越来越受到各国政府以及研究者的关注。其中, 波浪能作为一种绿色无污染的可再生能源, 对波浪能收集装置的研究已经开展了很多年。但是时至今日, 尽管曾经有很多波浪能装置的模型提出, 但是波浪能发电装置的整体发展程度仍然比较低。造成这种情况的因素很多, 其中波浪能本身特性和波浪能收集装置目前的特点是主要的制约因素。波浪能广泛分布于自然界中, 但是有着密度低、不稳定的特点, 尚不具备大规模开采的条件。同时现有的很多波浪能收集装置对系泊系统要求比较高。单独的波浪能发电系统成本较高, 同时, 波浪能收集装置的稳定性成为制约波浪能大规模应用的瓶颈, 很多设计精巧的装置虽然波浪能收集效率很高, 但是其可靠性很差, 在实际海况恶劣的风浪条件下容易被破坏。这些因素的作用, 使得波浪能的开采利用, 目前仍远远落后于风能的利用。

虽然曾经有很多波浪能吸收装置被开发出来, 特别是著名的点头鸭式波浪能吸收装置^[1], 对于波浪能的吸收效率峰值达到了惊人的 80%, 但是复杂的结构和高昂的制造成本限制了其大规模推广。目前, 很多研究的方向更偏向于结构简单的点吸收装置, 特别是圆柱体装置^[2]。

分离式的圆柱形浮体一般作为海洋工程的防波装置^[3]。圆柱体水平放置于水面上, 并垂直于波浪方向。当波浪到达浮体时, 部分能量被反射, 还有部分能量转化为圆柱形浮体的动能, 使浮体随着波浪运动而运动。如果设计浮体能够吸收足够的能量并转换为电能, 那么浮体在承担防波功能的同时, 还可以承担发电作用。

对于波浪能点吸收装置已经有了很多的研究。Ringwood 和 Butler^[4]分析了一种波浪能点吸收装置, 发现当阻尼系数比较小时, 波浪能转化效率随着波浪频率的增加而减小, 当阻尼系数比较大时则恰好相反。Nolan 等^[5]使用数值方法分析出了使垂荡浮子波浪能转化效率达到最高的阻尼系数。Pastor 和 Liu^[6]使用试验和数值模拟方法, 分析了波浪能点吸收装置, 发现浮子直径越大, 波浪能吸收量越多。Bing Chen 等^[7]通过试验和数值计算方法, 对于单个和两个浮体波浪能吸收装置的特性进行了计算和分析。本文将参考 Bing Chen 等的文章, 对于两个浮体波浪能吸收装置的特性进行进一步研究。

一个好的设计可以兼顾效率和生产成本, 使圆柱形发电装置发挥最大的效果。为了使设计更为合理, 对于圆柱浮体波浪响应的研究是很有必要的。

本文应用了由开源 CFD 计算软件 OpenFOAM 开发的船舶海洋工程求解器——naoe-FOAM-SJTU, 对

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300), 上海市船舶工程重点实验室基金项目(K2015-11), 以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目课题(2016-23/09)资助

圆柱形浮体在波浪中的响应进行了模拟，计算结果与试验结果相吻。然后，本文对比分析了不同阻尼系数下单个浮体和两个浮体的运动情况和受力情况，发现了浮体在波浪中带阻尼运动的规律。最后，本文计算了圆柱浮体的波浪能转化效率，分析了单个浮体和两个浮体波浪能发电效率的变化特点。为点吸式波浪能发电装置的设计提供了一定的参考。

1 数值计算方法

1.1 控制方程

不可压、黏性流体的一般控制方程为

$$\nabla U = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial p U}{\partial t} + \nabla [\rho(U - U_g)U] = -\nabla p_d - g x \nabla \rho + \nabla (\mu \nabla U) \tag{2}$$

式中： U 表示流场速度； U_g 表示网格节点速度； p_d 为流场动压力，其数值等于总压力与静水压力的差； g 表示重力加速度； ρ 表示流体密度； μ 表示动力黏性系数。

本文在对分离涡计算中使用了 $k-\omega$ SST 湍流模型，在近壁面使用了壁面函数。离散方法采用了有限体积法(FVM)，速度压力耦合求解采用了 PISO 算法。自由面捕捉使用了流体体积法(VOF)。

1.2 物体运动方程

圆柱浮体只有垂直方向的运动，其运动方程为

$$m\ddot{z} + C\dot{z} = G + F_w \tag{3}$$

式中， m 为圆柱质量， \dot{z} 和 \ddot{z} 分别代表垂荡运动的速度和加速度， C 为阻尼系数， G 为圆柱的体积力， F_w 包括波浪力和静水浮力。 $C\dot{z}$ 这一项包括发电机负载、传动装置阻力和发电损耗等等。本文将改变阻尼系数 C 的值，以研究在不同阻尼系数下，圆柱形浮体在波浪中的运动响应情况和受力情况。

1.3 造波理论

本文的造波使用的是由 OpenFOAM 开发的造波模块 waves2foam^[8]进行模拟预报。根据试验所使用的波浪参数，可以发现所有的波浪条件均属于 Stokes 二阶波范围，因此本文造波使用斯托克斯二阶波理论进行造波，其近似解为

$$\phi = \varepsilon\phi_1 + \varepsilon^2\phi_2 \tag{4}$$

式中： ε 为摄动参数， ϕ_1 和 ϕ_2 分别为一阶和二阶解。

Waves2foam 通过改变速度入口边界条件产生波浪。其中松弛区的控制方程为：

$$\alpha_R(x_R) = 1 - \frac{\exp(x_R^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1} \text{ for } x_R \in [0, 1] \tag{5}$$

式中： α_R 为松弛因子，为距离函数 x_R 的函数。其变化趋势如图 1 所示。

松弛因子 α_R 的影响为

$$\phi = \alpha_R\phi_{computed} + (1 - \alpha_R)\phi_{target} \tag{6}$$

式中： ϕ 为自由面速度或者流体液相参数。

从图 1 可以看到，在入口处，波浪强度会从 0 开始增大并保持稳定，而在出口处则会从最大值减小为 0，这样，入口处和出口处的松弛区实际就构成了数值水池的造波区和消波区。

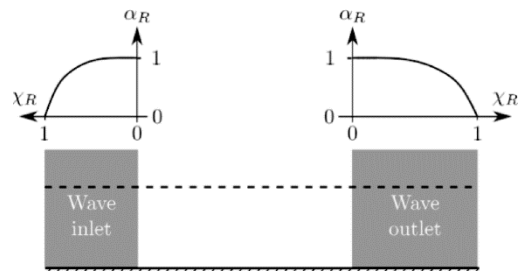


图 1 变量 α_R 在入口和出口松弛区中变化情况

2 数值模型与试验布置

2.1 计算模型与试验模型

圆柱形浮体装置的数值模型如图 2 所示，其试验装置如图 3 所示，试验水池长 60 m，宽 4 m，深 2.4 m。在水池的一侧有活塞式波浪发生装置，另一侧则是消波滩。圆柱形浮体模型由有机玻璃制成，长 1 m，直径为 0.2 m。圆柱体由铁杆固定住，保证其仅在垂直方向有自由度。试验在大连理工大学的海岸和近海工程国家重点实验室完成^[7]。

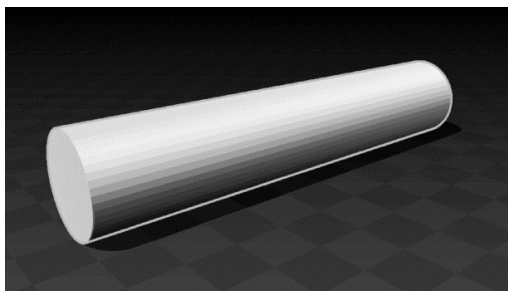


图 2 单圆柱浮体模型



图 3 试验装置

2.2 计算网格与计算域

使用 OpenFOAM 中的求解器 snappyHexMesh^[9]提取物体表面网格，形成计算模拟网格。总网格量在 150 万左右。

图 4 表示本文使用的总计算域大小，计算域网格保证在浮体前有一个波长的长度，在浮体后有两到三个波长的长度，从而保障波浪的充分演化。图 5 和图 6 分别为单圆柱和双圆柱浮体及其附近网格分布情况。

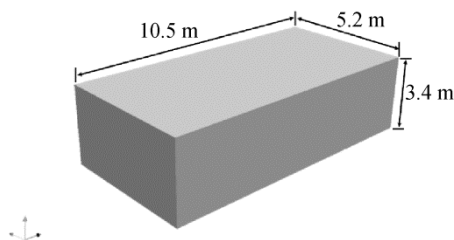


图 4 计算域尺度

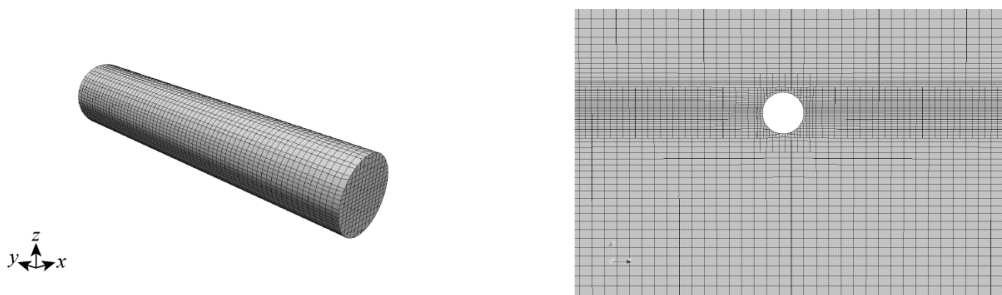


图 5 单圆柱浮体网格分布

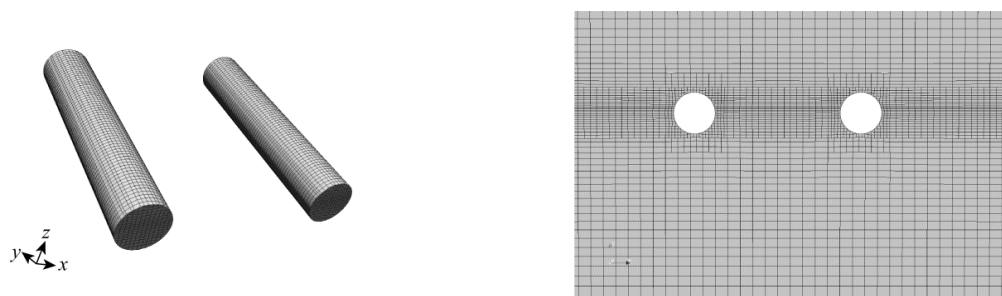


图 6 双圆柱浮体网格分布

2.3 主要计算工况

主要计算工况如表 1 所示，其中本文选取的与试验对照工况为 1 号工况，即无阻尼的单浮体算例，以验证数值计算方法的准确性。另外，其它几个算例的结果也将与 Chen et al.^[7]的结果进行对比，从而分析不同计算方法对于结果的影响。

表 1 主要计算工况

算例编号	波高 H/m	周期 T/s	波长 L/m	浮体数	直径 D/m	质量 m/kg	阻尼系数 $C/N (m s^{-1})$
							0
2							100
3				1			300
4							400
5	0.1	1.5	3.35		0.2	15.7	500
6							0
7							100
8				2			300
9							500

3 结果与分析

3.1 计算结果与试验对比

本文就 1 号工况与 Chen 等人所做的试验和二维 CFD 结果进行对比。与试验对比可以验证 CFD 计算的准确性，为后续的计算与分析提供支持。计算与试验对比结果的时历曲线如图 7 所示。从图中看出，使用 naoeFOAM 进行的三维计算结果与试验吻合良好，相比于原文章的二维 CFD 计算的结果数值更为准确，精确度更高。这证明了三维 CFD 结果的准确性。同时，也观察到三维计算结果出现了与试验不一致的情况，其峰值处与试验有一定的错开。这主要是为了贴合实际情况，本文使用 waves2foam 斯托克斯二阶波，而实际试验中造波为线性波，这造成了两者波形上出现了细微的差别。总体而言，三维计算结果与试验结果吻合很好，可以进行进一步的分析计算。图 8 为稳定时刻的流场图像。

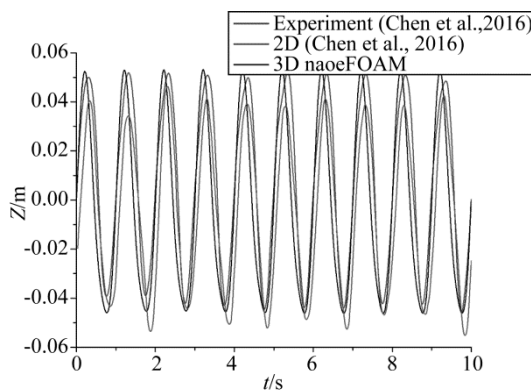


图 7 单圆柱无阻尼位移时历曲线对比

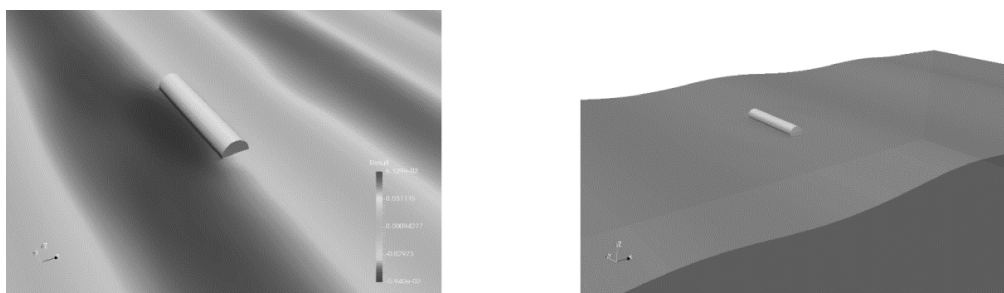


图 8 单圆柱无阻尼稳定时刻流场

相比于三维 CFD 结果，Chen^[7]等所进行的二维计算结果出现了幅值有偏差，以及造波不稳定的情况。图 9 反映了直径 0.2 m 的单个浮体在阻尼系数为 400 N/(m/s)，波高 0.1 m，波浪周期 1.5 s 情况下三维计算和二维计算垂直方向位移时历曲线。从曲线中可以看出，二维结果比三维结果整体上偏下一些，但是整体相似程度比较高。出现这种偏差的原因可能是二维计算没有考虑到浮体长度的影响，波浪实际上会从浮体两侧通过，并对浮体运动产生一定影响。

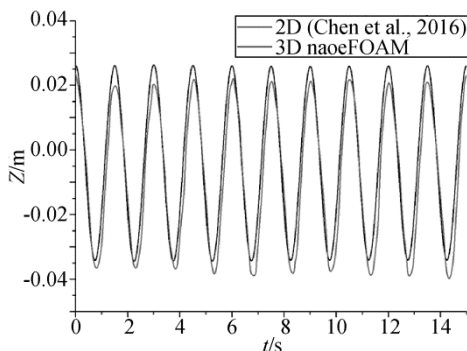


图 9 单圆柱阻尼系数 400N/(m/s)时历曲线对比

3.2 单个浮体在波浪中响应分析

浮体装置运动情况对于设计动力输出十分重要，浮体在波浪中的位移和速度影响到液压系统的设计和选择。图 10 和图 11 分别反映了单个浮体在不同阻尼系数下位移和速度情况。其中 Z_m 为位移的幅值，其值等于一个周期中浮体位移最大值与位移最小值的差。 H 为波高。 C' 为阻尼的无量纲值

$$C' = C \cdot T / m \tag{7}$$

V_{Zmax} 为垂直方向最大速度， V_{Z0max} 为水质点最大速度。

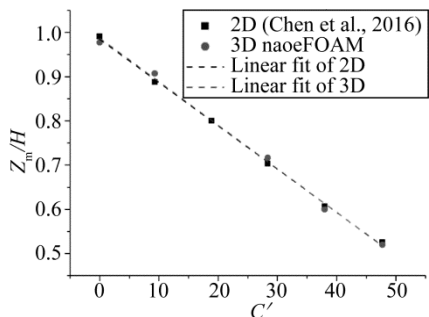


图 10 单圆柱位移幅值随阻尼变化曲线图

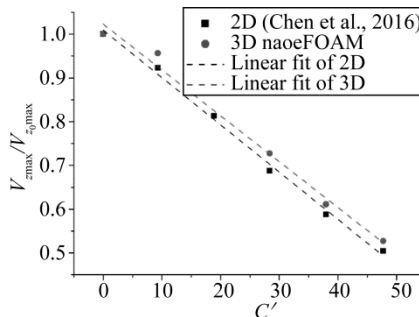


图 11 单圆柱垂直速度随阻尼变化曲线

从图 10 中可以看到，不带阻尼时 Z_m 值稍微小于 1，随着阻尼值的增加， Z_m 值随之线性化减小。速度变化与位移变化趋势是类似的。比较 2D 计算结果和 3D 计算结果，发现两者基本趋势是一致的，3D 计算结果在速度上普遍偏大一些。

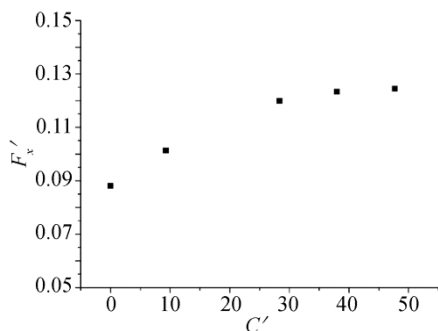


图 12 单圆柱水平受力随阻尼变化曲线图

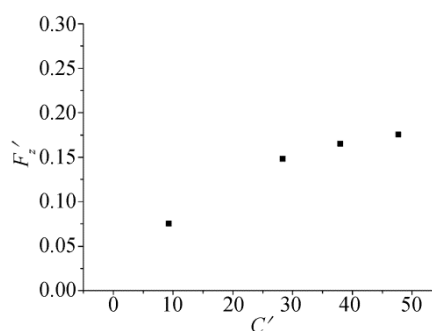


图 13 单圆柱垂直受力随阻尼变化曲线

图 12 和图 13 分别表现了浮体水平受力和垂直受力随着阻尼系数的变化情况，其中 F'_x 和 F'_z 为水平方向和垂直方向受力的无因次量。

$$F'_x = F_x / \rho g V F'_z = F_z / \rho g V \tag{8}$$

从图像可以看到，浮体所受的水平方向和垂直方向力均随着阻尼的增大而增大。由位移曲线可以看到，阻尼系数越大位移越小，因此可以判断，浮体受力的增加主要平衡了阻尼的增加，两者综合作用对于浮体而言是减小的。同时也可以看到，浮体受力并不是均匀增加的。这也就意味着，可能存在某个点，使浮体受力与阻尼可以达到一定程度的平衡，这对于设计浮体外部结构和内部液压结构有着重要的参考意义。

3.3 双浮体在波浪中的响应

在实际的应用中，往往会出现多个浮体并排发电的情况，此时各个浮体之间也会存在着一定的相互影响。文中选取两个浮体的情况，对于双浮体在波浪中的响应情况进行了模拟。

图 14 反映了双圆柱之间相互干扰情况，可以从图中看出，双圆柱之间流场干扰情况比较明显，由于第一个圆柱对波浪的作用，使第二个圆柱处的波浪出现了明显的不同。同时第一个圆柱前侧的波面也由于第二个圆柱的干扰出现了变化。

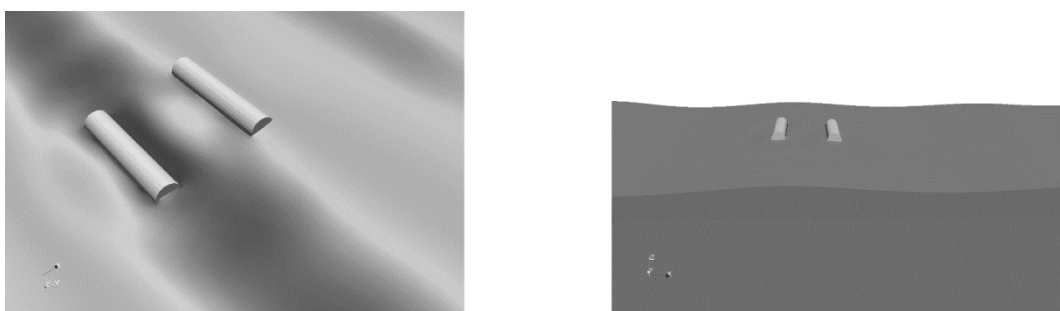


图 14 两圆柱相互干扰流场

图 15 和图 16 分别反映了双浮体在波浪中位移和速度随着阻尼变化的情况。从图可以看出 1) 两圆柱波浪位移幅值对于阻尼有着明显的线性关系，均随着阻尼系数的增大而明显减小；2) 两圆柱对于波浪响应出现了明显的差别。不同阻尼系数下第二个圆柱变化幅度更大，这反映了圆柱之间的相互干扰对于位移幅值的影响。图中两圆柱速度也出现了明显的差别。但是相比于位移幅值，速度对于阻尼变化线性比较差，速度与阻尼值的线性关系尚需进一步的验证。

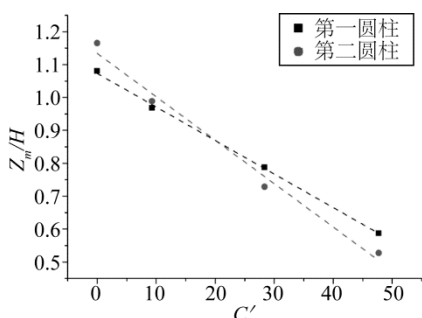


图 15 双圆柱垂直方向位移幅值随阻尼变化曲线

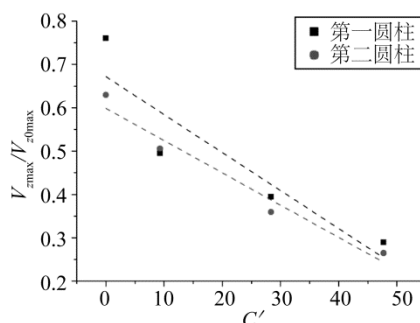


图 16 双圆柱垂直速度随阻尼变化曲线

图 17 和图 18 反映了双圆柱和单元柱在不同阻尼下的受力对比情况。其中单圆柱在水平力上均大于双圆柱的情况，第一个圆柱所受的水平力又大于第二个圆柱。这反映了两圆柱相互作用对于水平力的影响，两圆柱所受的水平力均有所减小。而在垂直方向上，三个圆柱差别并不明显，基本没有受到圆柱间的相互作用影响。

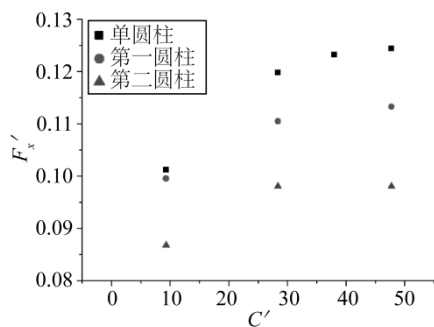


图 17 单圆柱双圆柱水平方向受力对比

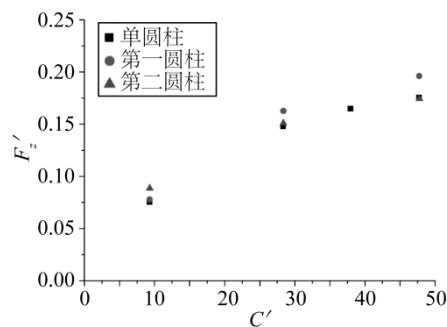


图 18 单圆柱双圆柱垂直方向受力对比

3.4 波浪能转化效率分析

对于波浪能收集装置来讲，波浪能转化效率是关键指标。当浮体在波浪中运动时，浮体吸收波浪的能量可以分为两个部分，一部分能量转化为浮体的动能，使浮体能够随波运动，最终通过与波浪的相互作用传播出去。另一部分能量克服阻力做功，这一部分能量将转化为电能保存下来，其公式为

$$P_0(t) = |F_{damp} \cdot \dot{z}| = |C\dot{z} \cdot \dot{z}| \tag{9}$$

式中： \dot{z} 是圆柱体的速度， C 为阻尼系数，在 t_1 到 t_2 这段时间的转化波浪能可以表示为

$$\overline{P_0} = \int_{t_1}^{t_2} P_0(t) dt / (t_2 - t_1) \tag{10}$$

式中：只有部分能量可以最终转化为电能，其他能量都会以各种形式耗散掉。根据 Toyota^[10]等人的成果，单位宽度的波浪能由下面公式得到

$$P_{wave} = \frac{\pi}{2kT} \rho g \left(\frac{H}{2} \right) \left(1 + \frac{2k}{\sin 2k} \right) \tag{11}$$

波浪能转化效率为

$$\eta = \frac{\overline{P_0}}{P_{wave}} \tag{12}$$

图 19 反映了单个圆柱和两个圆柱在不同阻尼系数下的波浪能转化效率。对于同一种圆柱，随着阻尼系数的增加，能量转化效率先增加后减小。因此，对于同一种圆柱而言，存在某个理想的阻尼系数可以使得波浪能转化效率达到最高。将单个圆柱与两个圆柱的情况进行对比，可以发现，当阻尼系数比较小时，单个圆柱的波浪能转化效率与两个圆柱各自的转化效率相差不大，随着阻尼系数的提高，单个圆柱的效率比两圆柱各自效率高了很多，但仍低于两圆柱的总效率。两圆柱之间进行对比，可以发现两圆柱效率在阻尼系数较低的情况下相差不大，在阻尼系数比较高的情况，第一个圆柱效率比第二个圆柱效率更高。

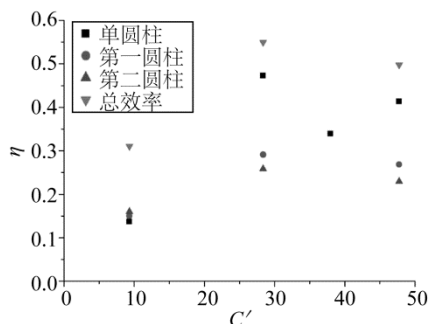


图 19 波浪能转化效率对比

4 结 语

使用基于 OpenFOAM 开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，通过对单个圆柱浮体和两个圆柱浮体在波浪中的数值模拟，分析计算了其波浪响应情况和能量转化效率。首先对于单个浮体在波浪中的响应进行了分析，与试验和参考文献进行了时域曲线的对比，通过对比发现，计算结果与试验结果吻合良好，为进一步

计算提供了依据；然后对于不同阻尼情况的单个圆柱、两个圆柱分别进行了数值模拟计算。通过计算结果可以看出，单个浮体的位移和速度与阻尼系数存在着很强线性关系，两个浮体的位移与阻尼系数仍存在着很强的线性关系，而速度与阻尼的关系需要进一步验证。通过对于浮体受力的研究可以发现，圆柱浮体的受力随着阻尼系数的增加而增大，其中双浮体在水平力上存在着相互影响关系，在垂直方向相互影响并不显著。最后，计算了不同阻尼系数下波浪能转化效率，比较了单个浮体和多个浮体波浪能转化效率的特点，发现存在一个理想的阻尼系数使得波浪能转化效率达到最高。对于圆柱浮体波浪能吸收装置的特点进行了计算与分析，为未来的波浪能装置设计工作提供了一定的参考。

参考文献:

- [1] Salter S H. Wave power[J]. Nature 249 (5459), 1974. 720–724.
- [2] Kofoed J P. Hydraulic Evaluation of the DEXA Wave Energy converter. Aalborg University, 2009.
- [3] Ozeren Y, Wren D G, Altinakar M, et al, Experimental investigation of cylindrical floating breakwater performance with various mooring configurations[J]. J. Waterw. Port. Coast. Ocean. Eng., 2011, 137(6): 300–309.
- [4] Ringwood J, Butler S. Optimisation of a wave energy converter. CAMS 2004, 155–160.
- [5] Nolan G A, Ringwood J V, Leithead W, et al. Optimal damping profiles for a heaving buoy wave-energy converter [C]//Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference Proceedings, vol.2005. 1, 477–485. ISSN 1098-6189.
- [6] Pastor J, Liu Y. Power absorption modeling and optimization of a point absorbing wave energy converter using numerical method [J]. Energy Resour. Technol. 2014, 136 (2): 021207.
- [7] Chen B, Ning D, Liu C, et al. Wave energy extraction by horizontal floating cylinders perpendicular to wave propagation[J]. Ocean Engineering, 2016, 121:112-122.
- [8] OpenFOAM. Mesh generation with the snappyHexMesh utility. 2013. Available from: <http://www.openfoam.org/docs/user/snappyHexMesh.php#x26-1510005.4>.
- [9] Niels G J, David R.F, Jorgen F., A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM®. Available from: <https://www.researchgate.net/publication>.
- [10] Toyota K, Nagata S, Imai Y, et al. Experiments and numerical analysis on conversion efficiency of floating pendulum wave energy converter in regular wave[C]//Proceedings of the 23rd International Offshore Polar Engineering vols. 2013, (1): 552–559.

垂荡浮子间歇射流提升装置水动力行为的数值研究

马琳, 邹威, 高成岩, 尹则高

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 垂荡式波浪浮子射流装置是将底层水体向表层提升, 促进海洋水体垂向混合的装置。建立了垂荡浮子间歇射流提升装置水动力行为的二维数学模型, 对浮子的垂荡位移、速度和进出口流量的时间变化过程进行了计算分析, 发现浮子的垂荡位移、速度和射流流量呈周期性变化, 浮子的垂荡位移小于入射波波高, 浮子上行位移小于下行位移。浮子射流流量呈周期性变化, 进、出水口流出流量峰值比较接近, 进水口进水流量的峰值大约为流出流量峰值的2倍左右, 进水口流入的流量大于出水口流出的流量; 进水口流入流量和流出流量(漏水)都较大, 两者的差值与出水口流量的差值一致, 遵守质量守恒定律。研究结果可以为垂荡式波浪浮子射流装置的工程应用提供一定的参考依据。

关键词: 波浪能; 水体交换; 数学模型; 间歇射流提升装置

随着社会的快速发展和对能源需求的增加, 可再生能源受到了越来越多的关注。海洋面积占地球总面积的71%, 蕴藏着丰富的波浪能。振荡浮子是开发利用波浪能的重要方式之一。勾艳芬等^[1]基于室内试验的方法, 分析了一种简易浮子波能转换装置的稳定性, 并探讨了波浪激励作用与能量转换效率的关系。邹健^[2]模拟了振荡浮子在三维数值水槽中的运动特性, 探究了波浪能转化率与波浪参数和装置自身几何等参数的相关性。李仕成^[3]对振荡浮子波能转换装置的各个参数进行了数值优化, 与振荡水柱式波能转换装置的性能进行了比较, 发现振荡浮子波能转换装置的效率较高。Shi等^[4]开展了垂荡浮子发电装置的物理模型实验, 指出当其工作效率达到最大时, 液压系统的阻尼可以实现最优值。

受全球气候变化和水体富营养化的影响, 海洋易发生水体分层现象, 该现象减弱了深表层水体物质交换的能力。由于大气氧输入和床沙中氮、磷等无机物的厌氧分解影响, 水体表层的溶解氧浓度较高, 而底层的溶解氧浓度较低; 且深层富含营养盐的水体也无法到达表层, 严重影响生态环境的平衡发展。近年来, 一些学者提出利用工程措施, 改进深表层水体交换和物质传输的能力。Cong等^[5]利用液压枪对底层水体进行掺气增氧, 增进上下层水体的垂向混合, 解决了汾河水库冬季因水面温度过低引起的底层缺氧, 氨氮增加的问题; 相比于传统的氨氮水处理方法, 汾河水库出水口的氨氮浓度降低了95%, 底层水体的溶解氧浓度能够维持在3 mg/L。Antonini等^[6]利用斜坡式越浪浮体结构, 进行上、下层水体交换的研究。Antonini等^[7]开展了直立空心浮子作用下上下层水体交换的概念模型研究和数值计算工作, 分析了装置的相对振幅和波能捕获效率与入射波参数的相关性。杨显祥等^[8]将传统池塘养鱼的方法与循环水流养鱼的方法进行对比, 发现水体处于循环状态时, 可以促进水体垂向的混合, 使上、中、下层水体中的溶解氧处于平衡状态, 控制下层水体中有害无机物的浓度, 优化水体的自动调节作用。章武首^[9]研究了扬水曝氧器的提水和充氧性能, 探究了装置各部分参数与其提水能力的关系, 并得到曝氧区氧传质系数的数学表达式。

上述学者对波浪能的开发利用做了大量的计算分析和试验工作, 推动了波浪能的开发利用进程。但这些装置的波能转化效率较低, 实际工程的推广应用还存在较大困难; 而对于促进水体垂向混合交换和氧传输的工程技术研究方面, 大部分利用生物、化学及鼓风机曝气等物理方式, 存在装置结构复杂, 运行成本高, 易产生二次污染等缺点。以垂荡浮子间歇射流提升装置的水动力行为为研究对象, 利用VOF技术建立二维平面数值波浪水槽, 模拟浮子与波浪的相互作用, 研究水体垂荡时浮子的垂荡位移、速度和射流量的时程变化规律, 研究结果可以为装置的开发和工程应用提供技术基础和参考依据。

基金项目: 国家自然科学基金(51579229); 海洋工程国家重点实验室(上海交通大学)开放课题(1602)

通信作者: 尹则高, (1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋能开发利用装置的水动力学的研究。E-mail: yinzegao@ouc.edu.cn

1 数学模型

1.1 二维数值波浪运动控制方程

二维数值波浪运动控制方程由连续性方程、动量方程、紊动动能方程和耗散率方程组成。利用 VOF 方法追踪自由波面。

笛卡尔坐标系下，描述流体质量守恒的连续方程二维形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中： u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的分量； ρ 为流体密度； t 为时间。

RANS 形式的动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) - \mu(x) u_i \quad (2)$$

式中： μ 是动力黏性系数； μ_t 为紊动黏性系数； $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ ； C_μ 为系数， $C_\mu = 0.09$ ； p 为压力， k 和 ε 分别为紊动动能和紊动耗散率。

k 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中： G_k 表示由层流速度梯度而产生的紊动动能， G_b 是由浮力产生的紊动动能， α_k 和 α_ε 是对应紊动动能和紊动耗散率的反向有效普朗特数， μ_{eff} 是有效动力黏性系数， $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ， $C_{3\varepsilon} = \tanh(\frac{v}{u})$ 。

VOF 方法是追踪水气界面常用的方法之一。该方法主要是利用水体体积分数 $F(x, y, t)$ 求解重构运动的自由液面。体积分数控制方程如下。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial u F}{\partial x} + \frac{\partial v F}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

耦合求解上述式 (1) ~ (5)，即可求得 u 、 v 、 p 、 K 、 ε 和 F 。

1.2 浮子垂荡运动控制方程

单自由度的浮子模型可以简化为质量-阻尼系统，当浮子在波浪作用下做垂荡运动时，受到惯性力、回复力、阻尼力和波浪力的共同作用^[10]，根据牛顿第二定律，可以建立浮子运动的垂向受力平衡表达式：

$$\ddot{z} + \xi \dot{z} + n^2 z = n^2 X_0 A \cos \omega t \quad (6)$$

式中： ξ 为浮子垂荡运动阻尼系数， $\xi = (C + C_0) / m$ ，其中 C 为机械阻尼系数， C_0 为水的垂荡阻尼系数， m 为浮子质量； n 为浮子垂荡运动固有频率； X_0 为波幅修正系数； A 为波幅； ω 为波浪频率。

1.3 装置工作原理

提出的垂荡浮子间歇射流提升装置结构如图 1 所示。主要由波浪作用下可以垂荡的浮子、活塞杆和活塞，以及固定的水舱，进水口、出水口以及与水舱连接的单向阀构成。当波面上升时，浮子带动活塞及活塞杆向上运动，此时单向出水阀关闭，水舱内的压强小于进水口外的压强，单向进水阀打开，下层水体被吸入水舱内；当波面下降时，浮子在重力的作用下带动活塞和活塞杆向下运动，此时单向进水阀关闭，水舱内的压强大于出水口外的压强，单向出水阀打开，水舱内水体经出水管压入表层水体；完成了一次下层水体向上层提升输移的过程，有利于破坏水体的分层和下层营养物质的提升。

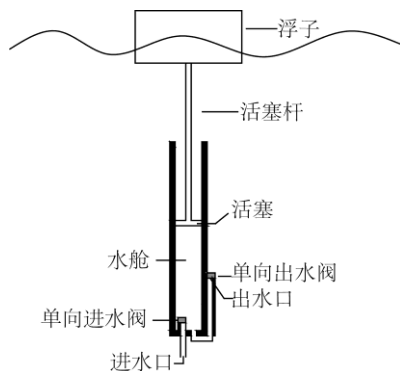


图1 装置结构示意图

2 计算结果与分析

2.1 二维数值波浪水槽的建立及自由波面验证

基于 Flow3D 软件，建立二维数值波浪水槽。水槽包括三个区域：前端造波区，工作区和尾端消波区。其中水槽的上部分为气体区域，下部分为水体区域。在数值波浪水槽的造波区利用波浪边界实现函数造波功能。在尾端消波区利用多孔介质消除二次反射波。

为了验证波浪水槽的有效性，对无浮子作用时的规则波波面的变化进行计算，其中水槽长 20 m，高 1.0 m，水深 $h=0.5$ m，入射波高 $H=0.08$ m，入射周期 $T=2$ s，并与 $x=9$ m 处波面高度的理论值进行比较，如图 2 所示。由图 2 可以看出，波形稳定后，波面高度的计算值与理论值的相对误差在 5% 内，计算结果比较可靠。

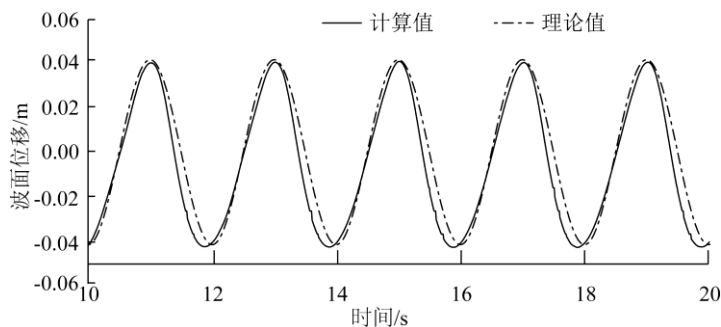


图2 波面验证曲线

利用验证后的数学模型对长 22 m，高 1.4 m，水深 $h=1.0$ m 的水槽内，规则波入射波高 $H=0.18$ m，入射周期 $T=1.5$ s，长 0.4 m，高 0.2 m，密度为 500 kg m^{-3} 的长方形浮子垂荡运动进行了计算。为了精确观测浮子的运动形态，对浮子周围的网格进行局部加密，网格尺寸为 0.01 m，局部加密网格尺寸为 0.005 m。

2.2 典型时刻流速分布

图 3 给出了垂荡浮子间歇射流装置在波峰与波谷时刻的流速矢量。

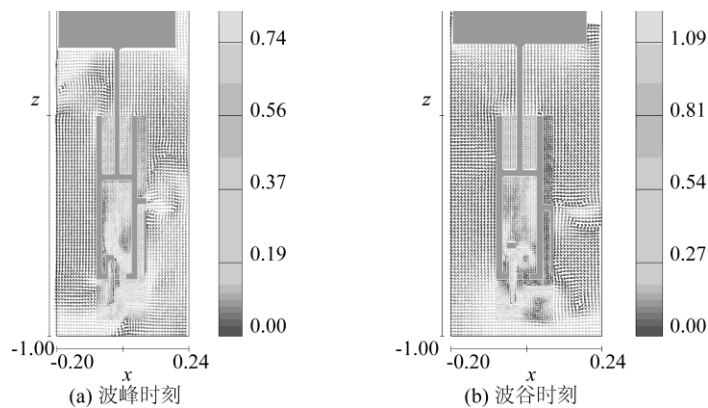


图3 垂荡浮子间歇射流装置速度矢量图 (m/s)

可以看出,在波峰时刻,单向进水阀开启,单向出水阀关闭,水体从进水口流入水舱;波谷时刻,单向进水阀关闭,单向出水阀开启,水体从出水口流出。

2.3 浮子的垂荡位移

浮子的垂荡位移随时间的变化如图4所示,以浮子运动稳定后横坐标 $15\text{ s} < t < 20\text{ s}$ 范围内的浮子垂向位移为例进行分析。可以看出浮子的垂荡位移呈周期性变化,周期与入射波周期一致,浮子随波性相对较好。具体来说,浮子的位移小于波高,这是由于浮子通过垂向振荡,将下层水体提升至上层,在这个过程中吸收波浪能对外做功,导致浮子的位移要小于波面变化的位移;另一方面,浮子下行位移大于上行对应值,可能原因是进水口与浮子的垂向距离和压差较大,导致进水过程的向上位移较小;出水口与浮子的垂向距离和压差较小,导致出水过程的向下位移较大。

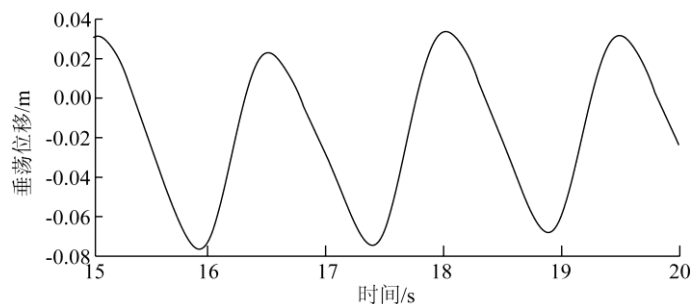


图4 垂荡位移历时曲线

2.4 浮子的垂荡速度

图5给出了浮子垂荡速度随时间的变化曲线。可以看出,浮子垂荡速度随时间呈周期性变化,周期与入射波周期一致。与浮子的垂荡位移对应,在15 s、16.4 s、18 s、19.5 s左右时,浮子的上行位移达到最大值,在15.9 s、17.3 s、18.9 s左右时,浮子的下行位移达到最小值,对应浮子的垂荡速度都约为0 m/s;在16.2 s、17.7 s、19.2 s左右时,上行速度达到最大。

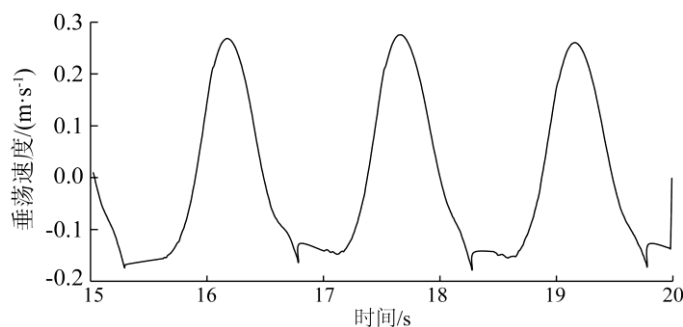


图5 浮子的垂荡速度(上行为正,下行为负)

2.5 浮子射流流量

进、出水口处的流量随时间的变化如图6所示,其中定义流出流量为正,流入流量为负。可以看出,进、出水口处的流量变化随时间也呈周期性变化,周期与入射波周期基本一致。15.9~16.5 s时段内,浮子上行并达到最大位移,即装置处于进水状态;而流量在16.0~16.1 s很短的时段内产生负值,这是因为出水口单向阀无法瞬间完成关闭,实际上是一个渐变的过程,单向阀关闭的瞬间在出水口会出现进水现象,但是此负流量的数值较小,存在的时间较短,对流出效率的影响基本可以忽略;16.1~16.6 s,进水口流量为零,即进水口的单向阀处于关闭状态;15~15.9 s,浮子下行并达到最大位移,即装置处于排水的过程;而在15~15.6 s时产生负值,进水口单向阀的关闭是物理仿真的过程,不是瞬时的变化,因此进水口单向阀的关闭在时间上存在一定的滞后,导致出现负流量,即进水口会出现一定程度的漏水现象;16.1~16.8 s,出水口流量为零,即出水口单向阀处于关闭状态。从图6还可以看出,进、出水口的流出流量峰值比较接近,进水口流入流量的峰值大约为流出峰值的2倍左右,进水口流入的流量大于出水口流出的流量;进水

口的流入流量和流出流量(漏水)都较大,两者的差值与出水口流量的差值一致,遵守质量守恒。

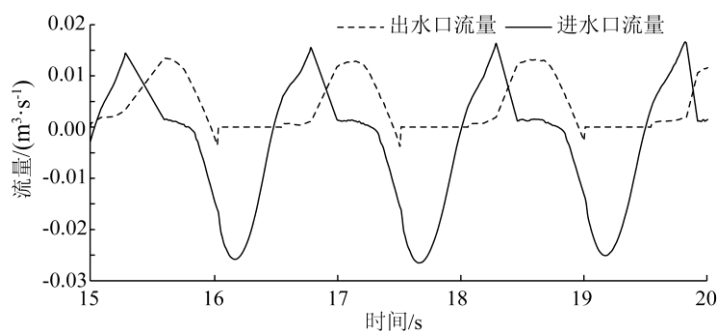


图6 出、进水口处流量的时程曲线

3 结 语

建立了规则波作用下垂荡浮子间歇射流提升装置的二维水动力数学模型,并开展了相关计算分析工作,结果发现如下内容。

1) 浮子的垂荡位移和速度呈周期性变化,垂荡浮子的位移小于入射波波高,浮子上行位移小于下行位移。

2) 浮子射流流量呈周期性变化,进、出水口的流出流量峰值比较接近,进水口流入流量的峰值大约为流出峰值的2倍左右,进水口流入的流量大于出水口流出的流量;进水口的流入流量和流出流量(漏水)都较大,两者的差值与出水口流量的差值一致,遵守质量守恒。

需要注意的是本文建立的垂向射流浮子装置是基于室内实验的尺度进行的,而实际海洋中的波浪环境更为复杂,需进一步深入研究;另一方面,本文建立了垂荡浮子间歇射流的二维水动力学模型,没有考虑波浪绕射等方面的影响,三维数学模型的开发是后续的重要研究内容。

参考文献:

- [1] 勾艳芬,叶家玮,李峰,等. 振荡浮子式波浪能转换装置模型试验[J]. 太阳能学报, 2008(04): 498-501.
- [2] 邹健. 振荡浮子波能利用效率与影响参数的数值模拟研究[D]. 哈尔滨, 2014.
- [3] 李仕成. 振荡浮子式波浪能转换装置性能的实验研究 [D]. 大连, 2006.
- [4] Shi H, Cao F, Liu Z, et al. Theoretical study on the power take-off estimation of heaving buoy wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2016, 86: 441-448.
- [5] Cong H, Huang T, Chai B. A New Mixing-Oxygenating Technology for Water Quality Improvement of Urban Water Source and its Implication in a Reservoir[J]. RENEWABLE ENERGY, 2009, 34(9): 2054-2060
- [6] Antonini A, Lamberti A, Archetti R. Oxyflux, an Innovative Wave-Driven Device for the Oxygenation of Deep Layers in Coastal Areas: A Physical Investigation[J]. COASTAL ENGINEERING, 2015, 104: 54-68
- [7] Antonini A, Lamberti A, Archetti R. CFD Investigations of Oxyflux Device, an Innovative Wave Pump Technology for Artificial Downwelling of Surface Water[J]. Applied Ocean Research, 2016, 61: 16-31.
- [8] 杨显祥,孙龙生,叶金明,等. 池塘循环流水养鱼对水体环境的影响[J]. 现代农业科技, 2017 (3): 220-222.
- [9] 章武首. 扬水曝气器曝气室的充氧提水性能研究[D].西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [10] 张亮,国威,王树齐. 一种点吸式波浪能装置水动力性能优化[J].哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 117-121.