

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2016.05.011

鸭式波浪能转换装置的水动力特性及效率研究

程友良, 赵洪嵩, 汪 辉, 白留祥

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003)

摘 要: 为了更加切合实际地研究鸭式波浪能转换装置的水动力特性及效率, 考虑了鸭式装置可绕定轴转动以及装置的附加质量和附加阻尼, 以 ANSYS14.0 软件为平台建立二维数值波浪水槽, 对装置在不同波浪条件作用下的受力情况与运动情况进行了数值模拟与分析。结果表明: (1) 在相同波高条件下, 随着波浪周期的增大, 装置受到的水动力力矩增大, 转换效率下降, 转换效率最高可达到 70%; (2) 在相同周期条件下, 随着波高的增大, 鸭式装置受到的水动力力矩也随之增加, 波浪在经过装置后波高会发生衰减; (3) 装置转换效率总体可维持在 70% 左右, 但由于波峰到达装置时会有部分波浪从其顶部越过, 随着波浪波高增大转换效率缓慢下降。为该装置的实际应用提供理论支持。

关键词: 鸭式波浪能转换装置; 水动力特性; 数值模拟; 转换效率

中图分类号: P743.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-2029(2016)05-0055-06

为应对能源危机、环境污染等问题, 世界各国都在积极进行着洁净可再生能源的开发和利用工作。作为最为清洁的能源形式之一, 海洋波浪能总量巨大。据众多学者研究估算, 全世界海洋波浪能可利用功率为 $1 \times 10^{12} \sim 10 \times 10^{12} \text{ W}^{[1-3]}$ 。在各式各样的波浪能发电装置中, 鸭式装置是一种高效的波浪能转换装置。对鸭式波浪能装置进行数值研究, 为该装置的实际应用提供理论支持, 对开发海洋波浪能、发展清洁可再生能源有重要意义。

国内外对波浪能装置进行了大量研究。鸭式波浪能装置(俗称“点头鸭”装置)首先由英国爱丁堡大学的 Stephen Salter 教授于 1974 年发明, 并对其进行了一系列研究^[4-6]。早期实验研究发现在较宽的波浪周期条件下, 鸭式实验模型的波浪能转换效率能达到 80% 以上, 但由于装置复杂、成本太高, 且未能解决系泊问题, 研究最终停滞在实验室模型阶段。2009 年, 程友良、党岳^[7]对静态不同攻角点头鸭进行了数值模拟, 但没有考虑鸭体转动和附加质量和附加阻尼以及效率。2009 年至今, 中科院广州能源所游亚戈、盛松伟等学者先后开发了 10 kW 以及

100 kW 鸭式波浪能装置。通过限制主轴运动、最优轨道设计, 以及设计与测试液压系统, 装置得到了进一步改进。其与半潜船结合, 具有转化效率高、建造投放成本低、便于托运与维护等优点^[8-11]。但是, 有必要进行更加切合实际的理论基础研究。

综上所述, 考虑到装置转动、附加质量和附加阻尼, 对鸭式波浪能装置进行数值模拟研究。首先, 建立二维数值水槽, 对其进行造波消波处理。然后, 对该鸭式装置的流固耦合模型进行数值模拟。最后, 根据结果对装置的水动力特性以及效率进行了分析。

1 数值波浪水槽的建立

使用 CFD 仿真软件 ANSYS 14.0 建立数值波浪水槽, 造波方法选择动边界造波法^[12-14], 即在波浪水池左侧设置运动边界来模拟推板造波。但是, 在水槽右边界波浪将发生反射, 为减少波浪的反射作用, 需要在数值波浪水池的尾部进行消波。消波方

收稿日期 2016-07-27

基金项目 国家自然科学基金资助项目(10672056); 海洋可再生能源专项资金资助项目(LNME2013JS01)

作者简介 程友良(1963-), 男, 教授, 博导, 主要从事流体力学、海洋波浪能和潮流能的研究。E-mail: ylcheng001@163.com

法采用源项消波法^[15],在数值水槽尾部的消波区内,使用自定义函数在动量运输方程中添加动量衰减源项,从而达到消波的目的。数值水池的结构及尺寸如图 1 所示。

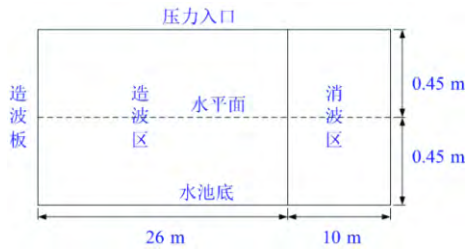


图 1 数值水池结构及尺寸

对建立好的数值波浪水槽,选取周期为 1 s,波高为 0.18 m 的波浪条件,在不同的位置设置波高监测点,将监测得到的数值波形与理论波形进行对比,从而进行造波与消波效果的验证。

通过求解一阶线性波浪得到:

$$\omega^2 = kg \tanh kd \quad (1)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (2)$$

式中 ω 为波浪的角频率, $2\pi/T$; k 为波数, $k = 2\pi/L$; T 为波浪周期; g 为重力加速度; d 为水面到水池底深度。已知水池深度和波浪周期,使用 Matlab 求解式 (1) ~ (2), 可得波长、波速等结果,将所得结果用 UDF 加载到造波板上,求解数值波形。在这里只取造波区和消波区各一点的波形与对应理论波形进行对比,如图 2~图 3 所示。

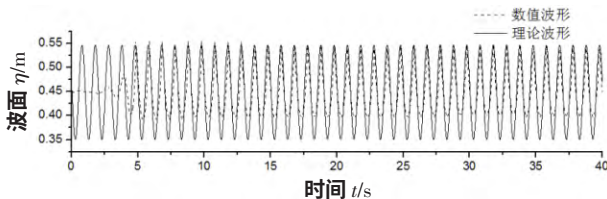


图 2 $x=3$ m 处的波形对比

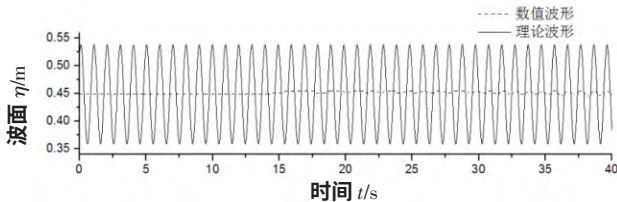


图 3 $x=27$ m 处的波形对比

由于在计算理论波形的过程中忽略了非线性项的影响,但实际波浪在传播的过程中存在衰减,且数值模拟中考虑了水的粘性、重力的影响,所以数值波形的波峰变得较尖,波谷变得较为平坦,达不到理论波浪所能到达的波谷,一阶线性波浪表现出高阶波浪的特性,这是由于数值计算的过程中考

虑了自由水面条件非线性项的原因,这样的波浪与实际物理模型相比更为贴近。在此数值水槽中,数值波形与理论波形周期的误差为 0.15%,波浪波高在波浪每传播前进 1 m 的衰减量约为 0.67%,且波浪在到达水槽右侧边界之前已经被消减完毕,该数值水槽可以用来进行数值研究。

2 鸭式装置的数值模型

数值模型基于有限元离散的不可压粘性流体 Navier-Stokes,采用二维标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,采用非稳态求解器,模型选择 Volume of Fluid 模型对自由面进行捕捉,设置重力加速度为 -9.81 m/s^2 ,装置附近加密网格用动网格技术处理。鸭式装置型线,参考 Stephen Salter 关于鸭式装置研究第二年阶段性报告^[16],如图 4 所示。鸭式装置位于造波区中心,质量为 3.91 kg,装置直径 D 为 0.1 m,转轴到水面的深度为 0.055 m,浸没深度为 0.025 m。装置附近区域采用虚面切割技术,取出临近区域单独划分网格,加密区域尺寸为 $4D \times 3D$ 。经过网格无关性验证,选取总网格数约为 176 985。

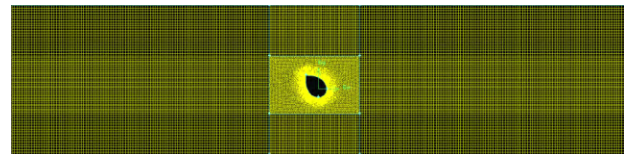


图 4 鸭式装置的网格划分

鸭式装置数值模拟采用以下控制方程:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right. \\ & \left. - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u'_i u'_j) \end{aligned} \quad (4)$$

本构方程:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} = & 2\mu \varepsilon_{ij} \\ \varepsilon_{ij} = & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

式中: ρ 为水的密度; u 为速度; u' 为脉动速度; i, j

j, k 指标取值范围是 $1, 2, 3$; p 为压力; μ 为流体动力粘度; σ_{ij} 为应力张量; ε_{ij} 为应变率张量。

鸭式装置在波浪中运动,受到水的浮力、附加质量和附加阻尼、自身重力、固定轴对其作用力以及动力输出装置对其的反作用力。在确定每一时刻装置受到的作用力 F 之后,装置作为一个刚体在该时刻外力作用下的运动也能够确定。装置在波浪中受到的作用力 F 决定了装置在波浪中的运动,同时装置的运动情况又会对装置的受力产生影响^[17]。可见,装置与波浪之间的作用是相互耦合的。附加质量与附加阻尼的求解见文献^[17]。

通过推导,鸭式装置的运动偏微分方程为:

$$(mI^2 + J)\theta'' = F_x l \sin\theta - mgl \cos\theta - F_z \cos\theta + M - M_f \quad (7)$$

式中 θ 为装置的角位移; θ'' 为装置的角加速度; m 为鸭式装置的质量; l 为质心到转轴的距离; J 为装置过质心与 y 轴平行的转动惯量; F_x, F_z 分别为波浪对装置质心作用力在 x, z 方向上的分量; M 为波浪对装置质心的力矩; M_f 为液压系统对鸭式装置的反作用力。将该运动方程通过 UDF 加载到鸭式装置上,可以动态地计算装置受到的水动力和装置自身的运动规律,实现装置与波浪的双向流固耦合计算。

3 鸭式装置水动力分析

3.1 不同周期条件下力矩分析

为了分析鸭式装置在不同周期波浪参数下的表现情况,首先选取波高为 0.05 m ,周期分别为 $T=0.7 \text{ s}, T=0.8 \text{ s}, T=0.9 \text{ s}, T=1.0 \text{ s}$ 的波浪条件进行数值模拟。根据式(1)~(2)求出对应的波长和角频率,如表1所示,选取与之对应的角频率作为装置的振荡频率,通过编译式(7)用 UDF 加载到装置上。

表1 不同周期的波浪参数

周期 T/s	0.7	0.8	0.9	1.0
角频率 $\omega/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	8.976	7.854	6.981	6.283
波长 L/m	0.763	0.992	1.238	1.491
L/D^*	7.63	9.92	12.38	14.91

* L/D 为波浪波长与鸭式装置直径之比,即无量纲波长

在相同波高不同周期条件下,波浪与鸭式装置发生作用,在同一时刻波浪相图如图5所示。可以看出,波浪在经过装置之后,波高发生明显衰减,说明波浪在经过装置的时候,大部分波浪能会被装置俘获。

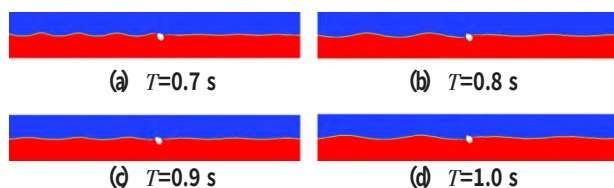


图5 不同周期波浪与鸭式装置作用相图

鸭式装置在运动一段时间后,装置的运动趋于稳定,选取不同周期条件下各4个周期对鸭式装置的水动力力矩进行分析,不同周期下鸭式装置受到的水动力力矩如图6所示。鸭式装置所受水动力力矩曲线的变化呈现出周期性,且变化周期与波浪的周期相同。装置在等波高条件下运动,受到的水动力力矩大小主要受波长的影响。由图7可以看出,随着波浪周期的增大,装置受到的最大水动力力矩增大。总体上看,装置在等波高条件下受到水动力力矩的最大值都接近于 $2.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

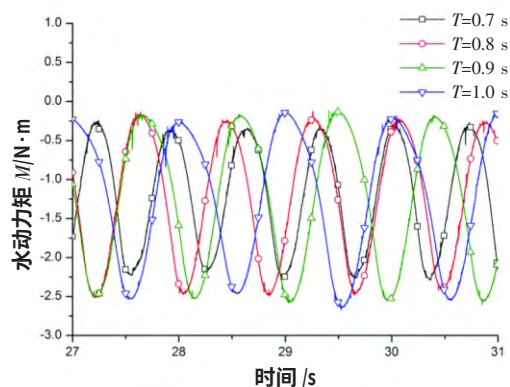


图6 不同周期波浪下装置受到的水动力力矩

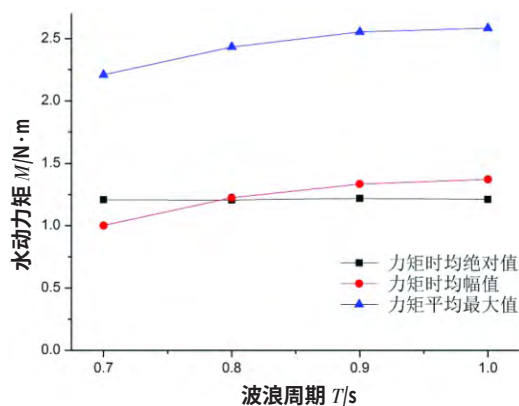


图7 不同波浪周期水动力力矩时均值的比较

3.2 不同波高条件下力矩分析

选取周期为 0.7 s ,波高分别为 $0.03 \text{ m}, 0.04 \text{ m}, 0.05 \text{ m}$ 和 0.06 m 的波浪进行数值模拟,所得结果与图5类似,不再赘述。波浪在与鸭式装置发生耦合作用后,波浪被装置吸收,尾部以后几乎为无浪区。

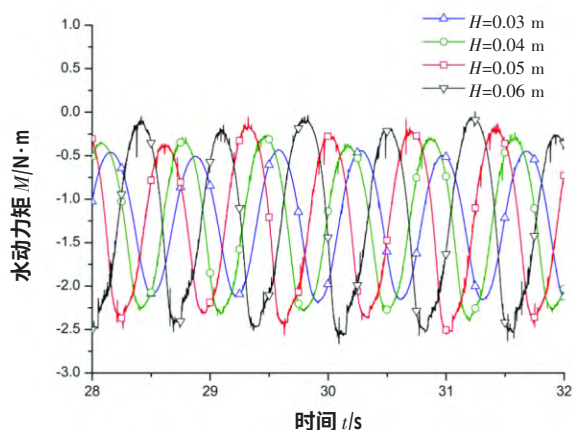


图 8 不同波高鸭式装置受到的水动力力矩

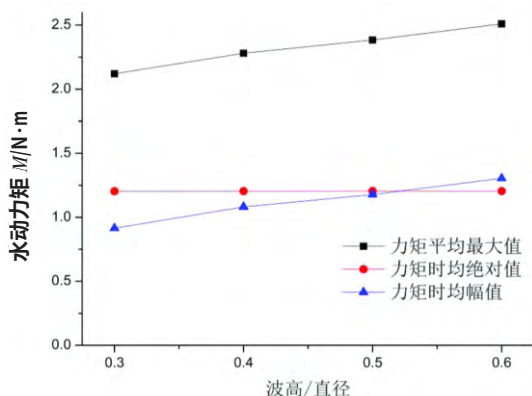


图 9 不同波高水动力力矩时均值的比较

从图 8~图 9 中可以看出,随着波高的逐渐增加,装置受到的水动力力矩的幅值也随之增加。波高越高,装置受到的水动力力矩越大,在较大水动力力矩的基础上,装置才能有更大的功率输出。在图 8 中, $H=0.06$ m 的曲线,在时间为 31.5 s 时,水动力力矩曲线波谷处有明显的突变,这是因为当波高到达一定程度时,由于装置很大一部分浸没在水中,波浪波峰到达装置后会有一部分波浪从鸭式装置的顶部越过。此时,鸭式装置水动力力矩会有突然的减小,从而造成水动力力矩发生不规则突变。

4 鸭式装置效率分析

动边界造波产生的波浪与鸭式装置相互作用。入射波携带的部分能量被鸭式装置反射回来,形成反射波,反射波与入射波相叠加;另一部分能量绕过鸭式装置继续向前传播,形成透射波;最后一部分能量被鸭式装置所俘获。在二维线性波中,一个波长所存储的波浪能总能量为:

$$E_w = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (8)$$

式中 ρ 为水的密度,取 998.2 kg/m^3 ; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 ; H 为波高, L 为波长。装置的效率为:

$$\eta = \frac{H_{in}^2 - H_{re}^2 - H_{tr}^2}{H_{in}^2} \quad (9)$$

式中 H_{in} 为入射波波高, H_{re} 为反射波波高, H_{tr} 为透射波波高。使用王永学等提出的 AM 方法进行入射波和反射波的分离^[18],需要在 $x=8$ m 和 $x=8.2$ m 处分别设置波高监测点,读取这两点的入射波与反射波叠加波高随时间的变化规律。在装置 $x=13$ m 处,以装置为对称中心,在 $x=18$ m 处设置波高监测点,用以监测绕过装置的透射波波高。将 $x=8$ m 和 $x=8.2$ m 监测到的波高方程进行线性拟合,得到规则的波高方程曲线,对两点波高方程进行 Hilbert 变换,最终可根据两点处的波面方程将入射波和反射波进行分离。

4.1 不同周期条件下效率分析

在周期分别为 0.7 s, 0.8 s, 0.9 s, 1.0 s, 波高为 0.05 m 的条件下,对装置进行效率计算。该波浪周期对应的波长分别为 0.763 m, 0.992 m, 1.238 m 和 1.491 m。在 $x=8$ m 处的波面方程进行波高分离,将分离出的入射波、反射波波高与在 $x=18$ m 处测定的透射波波高整理如表 2 所示。

表 2 不同波浪周期条件下入射波、反射波和透射波波高

波浪周期/s	0.7	0.8	0.9	1.0
入射波波高 H_{in}/m	0.047 6	0.047 7	0.047 5	0.047 6
反射波波高 H_{re}/m	0.023 2	0.021 1	0.019 8	0.017 3
透射波波高 H_{tr}/m	0.012 1	0.019 2	0.026 8	0.034 4

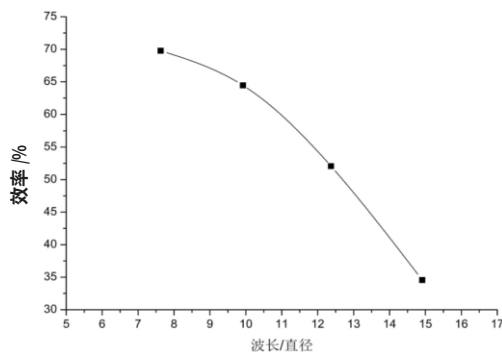


图 10 不同波浪周期条件下鸭式装置的转换效率

由波高数据根据式(8)~式(9)计算装置俘获的波浪,从而计算可得其效率。无量纲波长与效率关系如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,在本文的研究范围之内,装置的转换效率在波浪周期为 0.7 s 时,即无量纲

波长 L/D 为 7.63,具有最高的转换效率,波能俘获效率可达到 70%。原因是在此波长条件下,入射波的能量除了反射的部分外,只有很少的一部分透过装置,大部分入射波的波能都被鸭式装置吸收。随着波长的增长,入射波中所具有的能量被俘能装置反射的部分虽然有所减少,但是入射波绕过俘能装置继续向前传播的透射波部分所具有的波浪能快速增加,综合结果下导致俘能装置吸收的波浪能快速减少。当波浪周期为 1.0 s,此时波长为 1.491 m, L/D 为 14.91,装置的转换效率只有 34.56%,只为周期 0.7 s 波浪条件下 1/2。

4.2 不同波高条件下效率分析

下面对于在周期为 0.7 s,波高分别为 0.03 m, 0.04 m,0.05 m 和 0.06 m 波浪条件下的鸭式俘能装置的效率进行求解分析。在 $x=8$ m 处的波面方程进行波高分离,将分离出的入射波、反射波波高与在 $x=18$ m 处测定的透射波波高整理如表 3 所示。

表 3 不同波高条件下入射波、反射波和透射波波高

入射波波高/m	0.03	0.04	0.05	0.06
入射波波高 H_{in}/m	0.028 3	0.038 4	0.047 6	0.055 8
反射波波高 H_r/m	0.012 6	0.017 2	0.023 2	0.029 5
透射波波高 H_t/m	0.007	0.01	0.012 1	0.017 2

由波浪波高数据,根据式(2)~式(3)计算俘能装置俘获的波浪能,从而计算可得其效率。无量纲波高与效率的关系如图 11 所示。

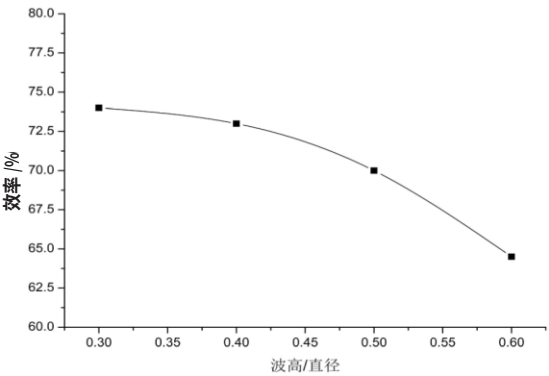


图 11 不同波高条件下鸭式装置的转换效率

从图 11 中可以看出,相同周期,即相同波长下的鸭式装置的转换效率变化不大,都在 70%左右。

但随着无量纲波高增大,鸭式俘能装置的效率有一定的下降。尤其当无量纲波高达到 0.6 时,波浪波峰到达鸭式俘能装置时会有一部分波浪会从俘能装置的顶部越过,造成俘能装置的转换效率降低。

因此,在建造和投放鸭式俘能装置的时候,必须首先考虑当地海域的波浪条件。根据波浪条件确定鸭式俘能装置的大小并进行相关验证研究以便能够获得最大的转换效率。

5 结 语

使用数值模拟对鸭式波浪俘能装置的水动力特性及效率进行了研究。首先,建立二维数值波浪水槽通过动边界造波与源项消波法,验证了数值水槽的适用性。然后,对可绕定轴转动的装置进行了数值模拟,结果表明:

(1) 在相同波高条件下,随着波浪周期的增大,鸭式装置受到的最大水动力力矩增大,转换效率降低,当周期 $T=1.0$ s,转换效率也能达到 34.56%。在鸭式装置研究范围内,在较小的周期条件下会获得较高的转换效率,在周期 $T=0.7$ s 转换效率可达 70%。

(2) 在相同波浪周期条件下,随波高增大,该装置受到的水动力力矩也随之增加,当波高超过装置半径,会有部分波浪越过装置,则造成装置水动力矩的不规则变化。

(3) 鸭式装置的转换效率总体上变化不大,可维持在 70%左右。但随着波浪波高增大,波浪波峰到达鸭式装置时会有一部分波浪从装置的顶部越过,水动力矩有不规则变化,也造成装置的转换效率降低。

虽然本文的数值研究考虑了鸭式装置能绕固定轴转动,但是,上述研究采用的波浪是一阶线性波浪,与随机的非线性波浪有差别,且并没有考虑迎波宽度对装置效率的影响。为了和实际情况更加接近,还应对随机波浪下三维漂浮鸭式装置进行进一步研究。尽管如此,还是希望本文所得结论能对鸭式波能装置的基础理论研究提供帮助。

参考文献：

- [1] 王传崑, 卢苇. 海洋能资源分析方法及储量评估[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [2] 郑崇伟, 贾本凯, 郭随平, 等. 全球海域波浪能资源储量分析[J]. 资源科学, 2013, 08: 1611-1616.
- [3] 程友良, 党岳, 吴英杰. 波力发电技术现状及发展趋势[J]. 应用能源技术, 2009, 12: 21-26.
- [4] S H Salter. Wave Power[J]. Nature, 1974, 249(249): 720-724.
- [5] S H Salter. Recent Progress on Ducks[J]. IEE Proceedings A: Science, Measurement & Technology, 1980, 127(5): 308-319.
- [6] J Lucas, J Cruz, S H Salter, et al. Update on the Modeling of a 1:33 Scale Model of a Modified Edinburgh Muck WEC [C]// Proceedings 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal, 2007.
- [7] 程友良, 党岳. 波浪作用下“点头鸭”绕流的数值模拟[C]// 第二届全国海洋能学术研讨会论文集. 中国可再生能源学会海洋能专业委员会、浙江省海洋学会、哈尔滨工程大学, 2009: 88-93.
- [8] 盛松伟. 漂浮鸭式波浪能发电装置研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.
- [9] 盛松伟, 游亚戈, 王坤林, 等. 10kW 鹰式波浪能发电装置研究 [C]// 第二届中国海洋可再生能源发展年会暨论坛, 2013: 379-384.
- [10] 张亚群, 盛松伟, 游亚戈, 等. 100kW 一基多体漂浮鹰式波浪能发电装置模型试验研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 04: 73-80.
- [11] 盛松伟, 张亚群, 王坤林, 等. 鹰式波浪能发电装置发电系统研究[J]. 可再生能源, 2015, 09: 1422-1426.
- [12] 董志, 詹杰民. 基于 VOF 方法的数值波浪水槽以及造波、消波方法研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2009, 01: 15-21.
- [13] 辛颖. Fluent UDF 方法在数值波浪水槽中的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [14] 程友良, 薛伟朋, 郭飞, 等. 椭圆余弦内波及其对墩柱作用数值模拟[J]. 海洋工程, 2013, 01: 61-66.
- [15] 李凌, 林兆伟, 尤云祥. 基于动量源方法的黏性流数值波浪水槽[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2007, 22(1): 76-82.
- [16] S H Salter. Second Year Interim Report - Study of Mechanisms for Extracting Power from Sea Waves [R]. Edinburgh Wave Power Project, University of Edinburgh, Department of Mechanical Engineering, 1976.
- [17] 白留祥. “点头鸭”波浪能装置的水动力学特性及效率研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [18] 王永学, 彭静萍, 孙鹤泉, 等. 分离入射波与反射波的解析方法[J]. 海洋工程, 2003, 01: 42-46+52.

Study on the Hydrodynamic Characteristics and Efficiency of the Duck-Like Wave Power Conversion Device

CHENG You-liang, ZHAO Hong-song, WANG Hui, BAI Liu-xiang

School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China

Abstract: In order to study the hydrodynamic characteristics and efficiency of the Nodding Duck wave power device in more practical way, a two-dimensional numerical wave tank is established based on the platform of ANSYS14.0 software. What is new is that device rotation, added mass and added damping are taken into account. The force and movement of the Duck are simulated and analyzed under different wave conditions. The simulation results show that (1) with increasing wave period under the condition of the same wave height, the maximum hydrodynamic torque of the device increases, while energy harvesting efficiency decreases, but the efficiency can reach 70%; (2) with increasing wave height under the condition of the same wave period, the hydrodynamic torque of the device also increases, with wave height obviously reduced when waves pass through the device; (3) the efficiency is generally maintained at about 70%, but some waves will climb over the top when waves reach the device, and hence, the efficiency decreases slowly with the increase of wave height. Therefore, the study presented in this paper will provide theoretical support for the practical application of the device.

Key words: duck-like wave power conversion device; hydrodynamic characteristics; numerical simulation; energy conversion efficiency