

点头鸭式波浪能采集装置的数值模拟

李 晖^{1,2,3}, 何宏舟^{1,2,3}, 杨绍辉^{1,2,3}, 梁 杰⁴, 杜宏瑞¹

(1. 集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省能源清洁利用与开发重点实验室, 福建 厦门 361021; 3. 福建省清洁燃烧与能源高效利用工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 4. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为优化波浪能采集装置, 以 FLUENT 软件为平台, 建立了“点头鸭”和波浪水槽模型, 对“点头鸭”在稳态均匀流和非稳态规则波作用下的水动力学特性进行了数值仿真。水槽中的规则波采用推板造波的方式生成, 自由水面的追踪采用 VOF 方法确定。模拟得到了两种水流环境中“点头鸭”在受来流冲击时, 鸭体所在区域的压力分布、速度分布以及鸭体所受波浪力的变化规律。结果表明, 在均匀来流环境下, 来流速度越大, 鸭体所受波浪力越大, 且随攻角增大而增大的趋势越发明显; 在规则波环境下, 鸭体所受波浪力近似呈周期性变化, 其大小与攻角角度有明显关系, 但并非呈单调变化。在所研究的工况中, 攻角为 60° 时, 鸭体所受的波浪力最大, 此时“点头鸭”装置具有最大的可发机械能。

[关键词] 点头鸭式波浪能采集装置; 波浪能; 数值模拟

[中图分类号] TK 79

Numerical Simulation on Salter Duck Wave Energy Converter

LI Hui^{1,2,3}, HE Hong-zhou^{1,2,3}, YANG Shao-hui^{1,2,3}, LIANG Jie⁴, DU Hong-rui¹

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Cleaning Energy Utilization and Development, Xiamen 361021, China;

3. Cleaning Combustion and Energy Utilization Research Center of Fujian Province, Xiamen 361021, China;

4. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: With FLUENT software as platform, the Salter Duck and wave flume was modeled and the hydrodynamic characteristics of the “duck” working in steady uniform flow and unsteady regular wave were obtained through numerical simulation. The regular wave in the flume was generated by the way of pushing plate and the free water surface was determined by VOF method. The pressure distribution, velocity distribution and the variation of the wave forces in the region of the duck body were obtained by simulating two kinds of water environment. The results show that, in a uniform flow, with the increase of the incoming flow velocity, the wave force acting on the duck body increases and the trend of wave force increasing with the attack angle becomes more obvious. Under the wave environment the wave force is close to a periodic variation, and its value has significant relationship with the attack angle, but is not a monotonic variation. Under the working conditions of the research, wave force obtains the maximum value when the attack angle is 60° and at this

[收稿日期] 2016-01-26

[修回日期] 2016-02-29

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51409118); 国家自然科学基金资助项目(51209104); 福建省自然科学基金资助项目(2014J05062, 2016J01247); 福建省海洋与渔业厅项目(201412190001); 福建省教育厅面上项目(JA13184)

[作者简介] 李晖(1974—), 女, 副教授, 博士, 从事海洋可再生能源开发与利用及工程热物理研究。E-mail: judy.lh@163.com.

point the “Salter Duck” device has the largest mechanical energy for power generation. The results have reference value for the optimization design of wave energy converters.

Keywords: salter duck WEC; wave energy; numerical simulation

0 引言

海水中蕴藏着巨大的波浪能，全球可利用的波浪能高达 $20 \times 10^9 \text{ kW}^{[1]}$ 。在当前能源危机的大背景下，世界各海洋大国均十分重视波浪能的研究利用，尤其是波浪能发电系统的研究开发。波浪能采集装置（wave energy converter, WEC）是波浪能发电系统中最关键的部分，百年来关于 WEC 的发明专利超过千项^[2]。在众多类型的 WEC 中，由英国爱丁堡大学 Salter 教授^[3]提出的点头鸭式 WEC 以其设计精巧、采能高效而著称，作为目前世界上效率最高的波浪能采集技术，其应用前景十分广阔。

一些国内外学者已对点头鸭式 WEC 进行了研究。Mynett 等^[4]对二维正弦波中运行的点头鸭装置特性进行了分析，认为在理想运行条件下，点头鸭 WEC 的波浪能转换效率接近 90%。Serman 等^[5]对不规则波作用下的“点头鸭”性能进行了研究，结果表明，在不规则波作用下该 WEC 的效率要低很多。史瑞静等^[6]对“点头鸭”的稳态绕流进行了数值模拟，认为在均匀来流作用下鸭体的压力随着攻角的增大呈抛物线形分布，但该研究中涉及的“点头鸭”鸭体外形设计较为随意，且未考虑波浪环境下点头鸭的工作情况。程友良等^[7]研究了规则波作用下“点头鸭”的水动力学特性，认为“点头鸭”对波浪能的利用随攻角变化而变化。已有的研究仅关注“点头鸭”的波浪能转换效率，对鸭体各部位的受力情况分析不足，且尚未有文献同时对均匀来流和波浪来流下“点头鸭”的工作情况进行综合分析。

鉴于此，本文严格按照“点头鸭”的原始设计，建立了较完备的几何模型；采用 FLUENT 软件，对“点头鸭”在均匀来流和波浪来流下的水动力学特性进行了二维数值模拟。在均匀来流情况下，改变来流速度和水流冲击鸭体时的攻角，对比研究不同情况下鸭体各部位的受力情况及其水动力学特性；在波浪来流情况下，保持波浪状态不变而改变攻角，研究不同攻角下鸭体所受波浪力的大小。综合分析两种水流环境下鸭体的水动力学仿真结果，以期找到点头鸭式 WEC 采集波浪能的一般规律。

1 “点头鸭”及数值水槽的模型建立

1.1 “点头鸭”模型的建立

点头鸭式 WEC 是一种经过缜密推理设计出来的，具有特殊外形的波浪能采集装置，其结构如图 1 所示。它由一连串浮于水面相互运动的凸轮组成，三维工作图如图 1a 所示，每一个凸轮的形状和运行特性酷似鸭的运动。单个点头鸭装置的横截面轮廓如图 1b 所示，其形状呈鸭蛋形，前端为迎浪面（即图 1b 所示的鸭嘴、鸭颈及鸭腹），面积较小；其后部为背浪面（图 1b 所示的鸭尾及鸭背），面积较大；水下部分为圆弧形，圆心在转动轴心处。入射波浪的动压力推动鸭体绕轴旋转，而流体静压力的改变又使鸭体做上升和下沉的往复运动。在波浪运动的一个周期内，这两种压力所产生的运动是同相位的，因而“点头鸭”就能将波浪的动能和位能同时收集利用并通过液压等方式转化出去。

本次模拟研究的“点头鸭”鸭尾处圆弧半径取 150 mm，其余部分的轮廓曲线按照文献 [8] 的步骤依

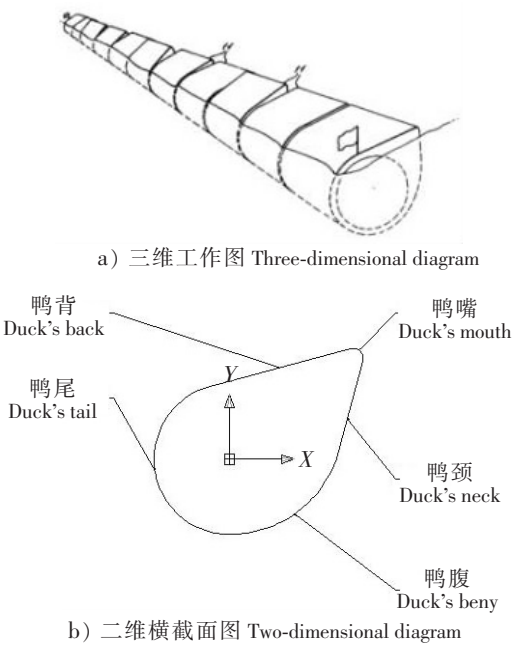


图 1 点头鸭式 WEC
Fig.1 Salter duck WEC

次作出。本文中来流攻角定义为水流冲击鸭体迎浪面时,鸭背(直线)与 X 轴正向的夹角。当鸭背与水面平行时,攻角为 0° ;当鸭体绕转轴发生逆时针转动,鸭嘴扬起,攻角变大。点头鸭工作时,鸭体会随来流的冲击不断绕转轴做上下“点头”运动,这就是“点头鸭”的由来。为了维持鸭体的周期性“点头”动作,点头鸭工作时攻角不宜过大,本文取鸭体最大工作攻角为 60° 。

1.2 数值水槽模型的建立

本次研究的数值水槽长 10 m,高 1.5 m,水深为 0.85 m;“点头鸭”鸭尾的圆弧圆心置于水槽的中心,如图 2 所示。在进行均匀来流的数值模拟时,水槽右侧为均匀来流的速度进口。在进行波浪环境的数值模拟时,水槽右侧为用于造波的推板,波浪由右向左推进。

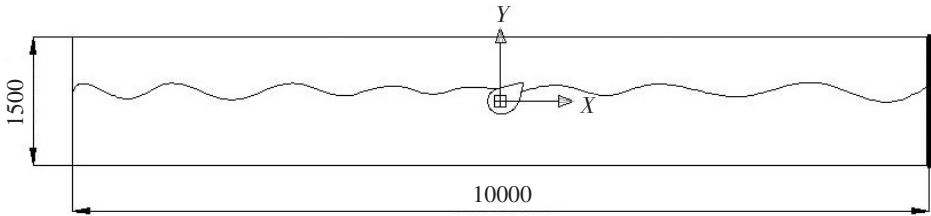


图 2 水槽物理模型(单位:mm)
Fig.2 Physical model of water flume (unit:mm)

本文采用的推板造波法,其原理是设定水槽边界为动边界,以此作为推板,给定其水平运动方程。由于推板按运动方程水平运动,挤压带动周围流体运动,造成整个水槽内流体按照近似波浪运动的规律,从而达到模拟相应波浪的目的。

1.3 网格划分及边界条件的设立

由于“点头鸭”鸭体轮廓的不规则性,网格划分时对鸭体周围区域采用三角形网格局部加密的处理方法,其余计算区域则采用规则矩形网格,如图 3 所示。

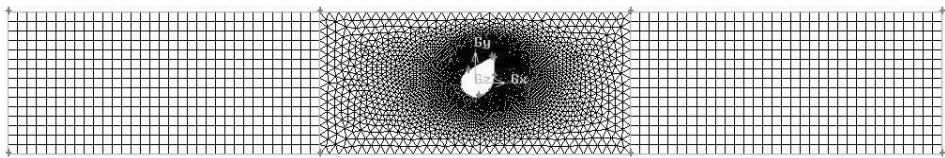


图 3 模型的网格划分
Fig.3 Grid generation of the model

边界条件定义如下:均匀来流时,设定水槽右侧为速度进口,左侧为自由出流,鸭体表面及数值水槽上下边壁均为壁面;波浪环境时,除设定水槽上部为压力出口外,其他均设定为壁面。

2 控制方程

一般流体问题的求解需要考虑连续性方程、动量方程和能量方程,由于热量变化在本文的研究中影响较小,因此在模拟计算中可不考虑能量方程,只需要求解连续性方程和动量方程即可。

连续性方程: $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y = 0$ 。

动量方程: $\partial u/\partial t + u\partial u/\partial x + v\partial u/\partial y = f_x - (1/\rho)\partial p/\partial x + (\mu/\rho)(\partial^2 u/\partial x^2 + \partial^2 u/\partial y^2)$; $\partial v/\partial t + u\partial v/\partial x + v\partial v/\partial y = f_y - (1/\rho)\partial p/\partial y + (\mu/\rho)(\partial^2 v/\partial x^2 + \partial^2 v/\partial y^2)$ 。

其中: u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的速度分量; f_x 、 f_y 分别为 x 、 y 方向上的单位质量力分量; p 、 ρ 、 μ 分别为流体的压强、密度和动力粘度。

在模拟波浪环境时,本文采用 VOF 方法来跟踪自由表面的波动,获取水和空气两相流交界面的参数。VOF 求解方法的原理是:将流体区域划分为许多个单元格,利用单元格内流体体积分数的不同,对每个单元格内每相的动量方程进行单独的求解。

3 均匀来流下的模拟结果分析

在均匀来流下，本文将模拟不同来流速度和不同攻角下“点头鸭”的水动力学特性。如前所述，“点头鸭”工作时攻角不宜过大，因此模拟中取 0°、15°、30°、60° 四种攻角。来流速度的取值则根据实际海况等级的划分情况进行选取，0-9 级海况分别称为无浪、微浪、小浪、轻浪、中浪、大浪、巨浪、狂浪、狂涛、怒浪。微浪情况下波浪波峰的推进速度很小，故本文取其对应的 0.5 m/s 作为最小来流速度；点头鸭装置一般安装于靠近海岸线的近海，其工作时的最大海浪等级为巨浪，故取巨浪对应的波峰推进速度 10.0 m/s 作为最大来流速度，模拟中取 0.5、1.0、5.0、10.0 m/s 四种来流速度。

3.1 来流速度对“点头鸭”水动力学特性的影响

在攻角为 30° 时，四种来流速度下鸭体周围的速度矢量分布和压力分布如图 4 所示。

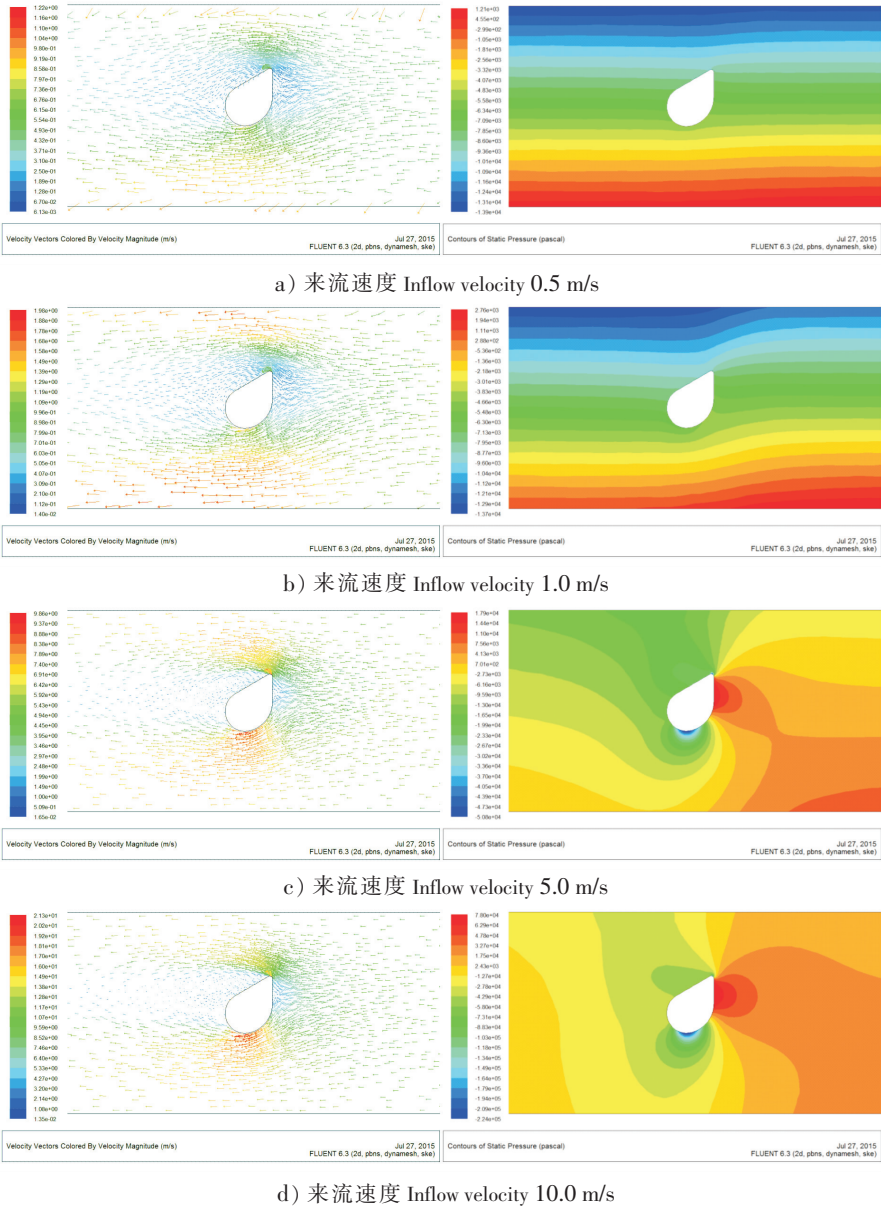


图 4 30°攻角下鸭体周围的速度及压力分布 (左图为速度矢量分布,右图为压力分布)
Fig.4 Velocity and pressure distribution around the duck body when attack angle is 30°
(the left is velocity vector distribution and the right is pressure distribution)

由图4的速度矢量分布图可见, 来流由右向左冲向鸭体, 受到鸭体阻碍后, 速度急剧下降, 绕流鸭体后在鸭体背后形成涡流区。因此, 在迎浪面(鸭颈)和背浪面(鸭背及鸭尾处)均形成了速度较小区域, 前者是由于鸭体的阻碍作用造成, 而后者则是由于涡流区而产生。而由压力分布云图可见, 来流速度较小时, 鸭体周围压强变化缓和, 而来流速度较大时, 鸭体周围压强变化较剧烈, 且迎浪面所受压力要远高于背浪面。这是因为, 根据能量守恒方程, 流体在冲击鸭体时, 由于鸭体的阻碍作用, 流体速度急剧下降, 动能旋即转变为压力势能, 从而引起鸭体迎浪面的压力急剧增加; 而粘性流体流经鸭体表面时产生的绕流脱体作用, 使得鸭体背面产生涡流区, 从而使得该处压强降低甚至出现负压。这样, 整个装置的迎浪面与背浪面形成压力差, 该压力差推动装置绕中心轴向波浪前进的方向转动。

对比四种来流速度下鸭体周围压力的变化, 可知来流速度越大, 迎浪面处的压力越大, 在攻角为 30° 时, 鸭颈部是整个鸭体受压最大的部位, 在来流速度为 10.0 m/s 时, 局部压力可高达 0.78 MPa 。因此在设计“点头鸭”发电装置时, 鸭体迎浪面需采用坚固的耐压材料。

3.2 攻角角度对“点头鸭”所受波浪力的影响

如前文所述, “点头鸭”鸭体迎浪面所受压力要远高于背浪面, 两者之间的压力差推动装置绕中心轴向波浪前进的方向转动。由于“点头鸭”鸭体外形的特殊设计, 不同攻角下鸭体迎浪面和背浪面的压力分布不同。图5显示了来流速度为 10.0 m/s 时, 不同攻角下鸭体周围的压力分布情况。从图5可以看出, 随着攻角的增大, 迎浪面上高压区域逐渐由鸭嘴向鸭腹移动, 且高压区域有增大的趋势, 同时, 背浪面由于涡流区变化也呈现出压力分布的明显不同。这意味着攻角角度对“点头鸭”所受的波浪力有重要影响。

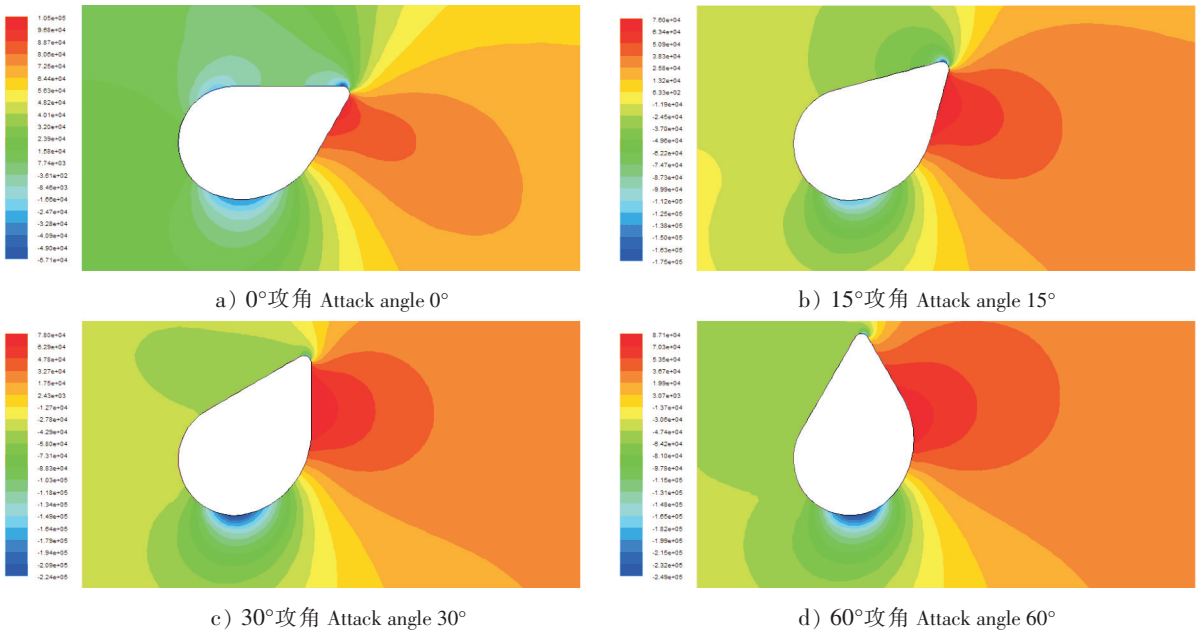


图5 不同攻角下鸭体周围的压力分布

Fig.5 Pressure distribution around the duck body with different attack angles

以鸭颈和鸭腹为迎浪面, 鸭背和鸭尾为背浪面, 取鸭体纵向(即垂直于纸面)尺寸为 1 m , 对迎浪面和背浪面的压强分布沿面积进行积分并求取两者之差, 即可得鸭体所受的波浪力。根据不同来流速度和不同攻角下鸭体所受波浪力的模拟计算结果得到波浪力随攻角的变化情况, 如图6所示。

由图6可见, 在低来流速度($0.5, 1.0\text{ m/s}$)下, 鸭体所受的波浪力随攻角的增大而总体减小;

而在高来流速度（5.0，10.0 m/s）下，鸭体所受的波浪力随攻角的增大而增大。仔细观察可以发现，在 0.5 m/s 流速下，波浪力随攻角增大有较明显的降低；在 1.0 m/s 流速下，波浪力随攻角增大而先是微增而后呈缓和降低；在 5.0 m/s 流速下，波浪力随攻角增大而持续增加；而在 10.0 m/s 流速下，波浪力随攻角增大而明显急剧增加。总体而言，来流速度越大，波浪力越大，且随攻角增大而增大的趋势越发明显。在 60°攻角时受到的波浪力最大，这意味着在所研究的工况下，此攻角下鸭体具有可以转换成电能的最大机械能。

4 波浪环境下的模拟结果分析

在波浪环境下，本文设定造波推板的运动规律如式（1）所示。

$$V = A_1 \times (1 - \exp(-2.03t)) \times 7.7528 \times \cos(\omega t) + A_2 \times \exp(-2.03t) \times \sin(\omega t)。$$
（1）

其中： V 为推板运动速度； ω 为推板运动频率；系数 A_1 、 A_2 和 ω 共同决定了推板所造波浪的振幅和频率。本次模拟取 A_1 为 0.037， A_2 为 2.303， ω 取 7.753。式（1）所给出的推板速度呈振荡衰减规律，根据式（1）可以模拟出如图 7 所示的规则波浪。

图 8 显示了波浪冲击不同攻角的鸭体时， $t = 5\text{ s}$ 时刻水槽内的波浪情况。由于采用同一推板进行造波，在不计反射波的影响下，不同攻角鸭体在同一时刻所遇波浪相同。

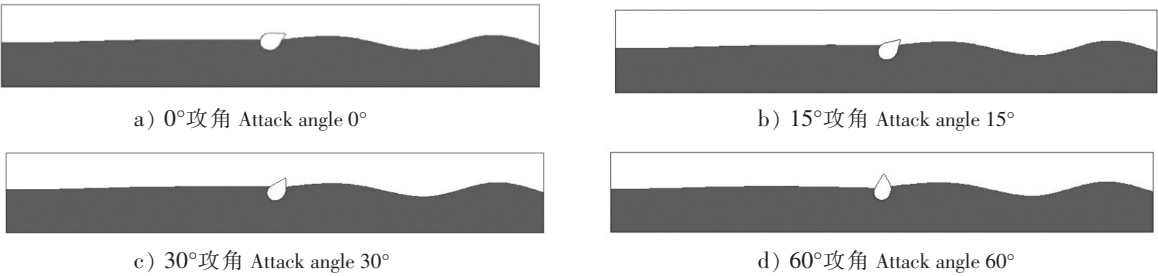


图 8 不同鸭体攻角下水槽内的波浪情况

Fig.8 Wave conditions in the flume at different attack angles

由图 8 可知，在“点头鸭”右方长 5m 的水槽中约有 2 个完整的波形，波浪通过“点头鸭”后，波形振幅减小，周期增大，接近无浪区。这是因为，鸭体在波浪作用下绕转动轴往复转动时，由于鸭尾部为圆弧形，造不出向后行进的波；又由于装置吃水较深，海水靠近表面的波难以从装置下方越过，跑到装置的后面，故鸭式装置的背后往往为无浪区。因此，波浪在经过“点头鸭”时，有相当一部分能量被装置所吸收，被吸收的波浪能转换成机械能，再转化成电能，即可对外供电。

与均匀来流下的波浪力计算方法类似，对迎浪面和背浪面的压强分布沿面积进行积分并求取两者之差，即可得鸭体所受的波浪力。由于来流为随时间变化的波浪，故波浪力将随时间而变化。图 9 所示为不同攻角下鸭体所受波浪力随时间的变化情况，其中横坐标代表时间，且从推板运动造波开始计时。

由图 9 可见，“点头鸭”上所受到的波浪力近似呈周期性变化，0°和 60°攻角时波浪力的周期性

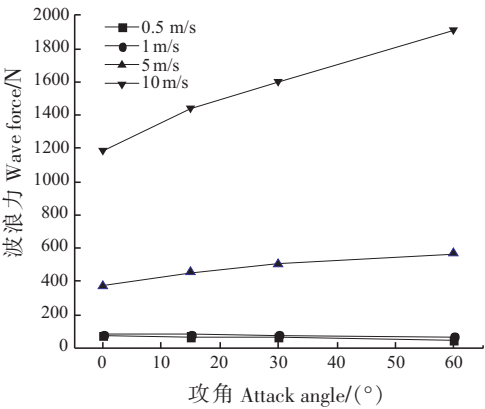


图 6 不同来流速度下单位长度鸭体所受波浪力随攻角的变化

Fig.6 Variation of wave force acting on the duck body in unit length with attack angle at different incoming flow velocities

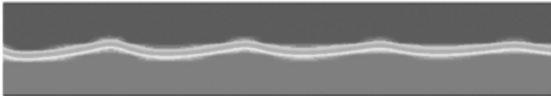


图 7 本文推板所造波浪的波形图
Fig.7 The wave pattern made by the pushing plate in this study

最为明显。周期性的变化符合点头鸭装置在规则波作用下,鸭体发生周期性“点头”运动的实际情况,在这种周期性的运动中,鸭体会绕转轴中心往复转动,输出机械能。图9还显示,鸭体所受波浪力大小与攻角角度有明显关系,但并非呈单调变化。在所研究的几种攻角角度中,0°和60°下鸭体所受波浪力要远大于15°和30°的情况,波动也比较明显。攻角为60°时,鸭体具有最大的转动动能,可以最大程度地吸收波浪能。

5 结论

点头鸭式波浪能采集装置在波浪能发电工程中具有广阔的应用前景。本文利用 FLUENT 软件,对“点头鸭”在均匀来流和波浪来流下的水动力学特性进行了数值模拟,获得如下结论:1)“点头鸭”装置工作时,其迎浪面与背浪面之间的压力差形成波浪力,推动装置绕中心轴向波浪前进方向转动;鸭颈和鸭腹部是整个鸭体受压最大的部位,设计制造时需采用坚固的耐压材料。2)在均匀来流环境下,来流速度越大,鸭体所受波浪力越大,且随攻角增大而增大的趋势越发明显。3)采用本文推板造出的波浪通过鸭体后,振幅减小,周期增大,鸭体背后几乎为无浪区,表明波浪大部分的机械能被鸭体吸收。4)在本文研究的规则波环境下,“点头鸭”上所受到的波浪力近似呈周期性变化,鸭体所受波浪力与攻角角度有明显关系,但并非呈单调变化。

综合均匀来流和波浪来流的研究结果,在所研究的几种攻角角度中,攻角为60°时,“点头鸭”鸭体所受的波浪力最大,此时点头鸭装置具有最大的可发电机械能。

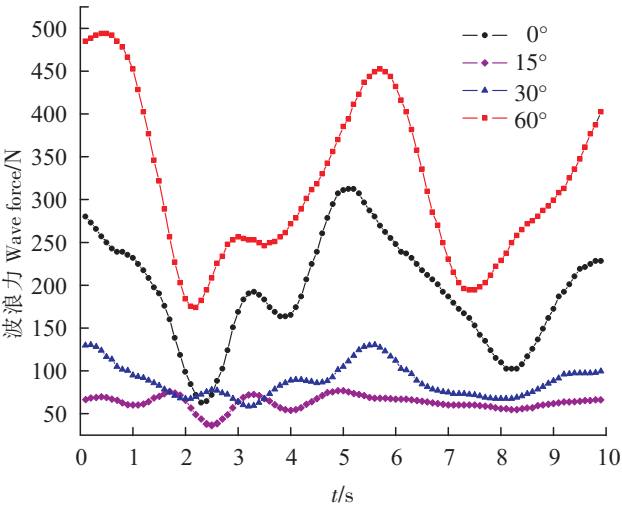


图9 不同攻角下单位长度鸭体所受波浪力随时间的变化
Fig.9 Variation of wave force acting on the duck body in unit length with time at different attack angles

[参考文献]

[1] FALNES J. A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, 2007(20): 185-201.

[2] 张丽珍, 羊晓晨, 王世明, 等. 海洋波浪能发电装置的研究现状与发展前景. *湖北农业科学*, 2011, 50(1): 161-164.

[3] SALTER S H. Wave power. *Nature*, 1974, 249: 720-724.

[4] MYNETT A, SERMAN D, MEI C. Characteristics of Salter's cam for extracting energy from ocean waves. *Applied Ocean Research*, 1979, 1(1): 13-20.

[5] SERMAN D, Mei C. Note on Salter's energy absorber in random waves. *Ocean Engineering*, 1980, 7(4): 477-490.

[6] 史瑞静, 樊小朝, 李凤婷. 波浪能发电“点头鸭”式稳态绕流数值模拟研究. *山东电力高等专科学校学报*, 2013, 16(2): 6-9.

[7] 程友良, 党岳. 波浪作用下“点头鸭”绕流的数值模拟//第二届全国海洋能学术研讨会论文集. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009: 88-93.

[8] 国家知识产权局. 影响世界的专利[2015-5-15]. <http://www.sipo.gov.cn/ztzl/ywzt/yxsjdip/bln/>.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)