

振荡浮子式波能装置波浪爬升特性试验

于通顺^{1,2,3}, 唐渔滢¹, 黄淑亭⁴

1. 中国海洋大学工程学院, 青岛 266100

2. 山东省海洋工程重点实验室, 青岛 266100

3. 青岛市海洋可再生能源重点实验室, 青岛 266100

4. 山东大学海洋研究院, 青岛 266237

摘要 复杂海洋环境下振荡浮子式波能装置与波浪相互作用过程中, 浮子迎浪侧会发生波浪爬升等非线性现象, 严重时波浪会越过浮子顶部, 这对波能装置的发电效率及工作性能产生不利影响。设计并进行了规则波作用下垂荡浮子迎浪侧波浪爬升特性的物理模型试验, 探讨了波浪周期、常数PTO(能量摄取, power take-off)阻尼以及不同周期下改变常数阻尼对波浪爬升特性的影响。研究表明, 波浪周期较大和PTO阻尼较小时, 有利于降低浮子迎浪侧的波浪爬升幅度; 波浪周期较小时, 改变PTO阻尼对迎浪侧的波浪爬升幅度影响较小。

关键词 海洋能; 波能装置; 波浪能发电; 振荡浮子

在传统能源储备量日益缩减且对环境造成严重破坏的背景下, 人类将目光逐步转向了约占地球表面积71%的海洋, 海洋不仅拥有丰富的矿产资源, 更拥有源源不断的动力资源^[1], 开发海洋可再生能源具有重大意义。海洋可再生能源通常是指海洋特有的依附于海水的潮汐能、潮流能、波浪能、温差能和盐差能等, 其中波浪能又因开发难度低、获取方式简单等优势, 被认为是品质最高的海洋能^[2]。世界上众多海洋大国都十分重视波浪能技术的开发利用, 尤其是欧美等一些发达国家处于领先地

位^[3], 在相关政策和项目的扶持下, 中国的波浪能利用技术也取得了长足的进步^[4]。

与大型风力发电机不同, 吸收能量方式的差异、所处位置(海岸线、近岸、离岸)以及水深状况的不同会导致波浪能发电装置种类繁多, 最常见的波浪能发电装置可以归纳为3类, 即振荡浮子式、振荡水柱式和越浪式^[5]。振荡浮子式波浪能发电装置因具有效率高、成本低、可靠性好等优点, 在众多的波能发电装置中脱颖而出。据不完全统计, 中国目前开发的波浪能装置有50余个, 其中23个采用振

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501905); 国家自然科学基金项目(52071304); 山东省重点研发计划项目(2019GHY112044)

作者简介: 于通顺, 副教授, 研究方向为海上风能、波浪能开发利用, 电子信箱: tshyu707@ouc.edu.cn

引用格式: 于通顺, 唐渔滢, 黄淑亭. 振荡浮子式波能装置波浪爬升特性试验[J]. 科技导报, 2021, 39(6): 42-46; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.06.005

荡浮子式^[6]。振荡浮子式波浪能发电装置的研究和开发虽已取得了一系列的进展和成果^[7-10],但如何保障振荡浮子装置在复杂海洋环境中的长期安全稳定运行仍然是一个巨大的挑战。

目前关于振荡浮子式波浪能发电装置的研究往往着眼于3个方面,即波能俘获效率的研究^[7-8]、浮子形状的优化设计^[9]以及浮子位移、速度等水动力性能的探究^[10-11],对于振荡浮子装置周围的水动力过程及其对浮子运行性能的影响关注较少。在复杂的海洋环境中,波浪与浮子相互作用时会产生对浮子侧壁的拍击、浮子前侧波浪爬升等非线性现象。一旦浮子前侧波浪爬升越过浮子顶部时,浮子的发电效率将受到很大影响。因此,开展振荡浮子式波浪能发电装置前侧波浪爬升过程及爬升特征的研究很有必要。

本研究以振荡浮子式波浪能发电装置为研究对象,通过设计并进行物理模型试验,探求不同工况下振荡浮子装置前侧的波浪爬升特征。在物理模型试验中通过限制浮子的纵荡、纵摇等其他5个自由度方向上的运动,重点考察规则波作用下自由垂荡运动以及考虑能量摄取系统(PTO系统)时垂荡运动浮子周围的波浪爬升特性,为振荡浮子设计中避免波浪爬升引发效率降低提供理论支持。

1 物理模型试验设计

1.1 模型比尺的确定

基于中国海域多年的平均波高和周期,以及波浪水池尺度、造波能力以及装置的几何尺寸等条件的考量,模型试验中的长度比尺选定为 $\lambda_L=4$ 。设模型与原型重力相似,根据Froude数相似确定时间

比尺为 $\lambda_T = \lambda_L^{1/2} = 2$,原型与模型的速度比尺为 $\lambda_U = \lambda_L^{1/2} = 2$ 。

1.2 试验设置

物理模型试验在山东省海洋工程重点实验室的平面水池中开展,该水池长60 m,宽36 m,最大工作水深1.5 m。水池前端设有低惯量伺服电机推板式造波机,可按预定要求生成规则波、椭圆余弦波、随机波等多种波浪,水池后端斜坡及两端边壁上均设有消波用的多孔介质。试验中振荡浮子波能装置模型置于距造波机25 m处,左侧距边壁6 m。为保证试验过程中波浪条件的准确性,在浮子迎浪方向的前后侧分别布置了波高传感器,具体位置如图1所示。试验中采用圆柱形振荡浮子模型,浮子半径 $r=0.4$ m,高 $h=0.4$ m,静止时浮子的吃水深度 $\lambda=0.12$ m。在试验过程中,水深 $d=1$ m,波高 $H=0.2$ m。

浮子安装在1个由4根立柱组成的稳定支撑框架上,如图2所示。装置采用磁粉制动器模拟常数PTO阻尼系统,提供可控的常数阻尼。浮子的运动轨迹采用NDI Optotrak Certus三维测量系统进行测量,可以得到浮子的实时位置数据。另外,在模型试验中,为了清晰观测波浪与浮子耦合作用时的波浪爬升等非线性现象,同时采用2台高清摄像机从不同角度进行全程拍摄。

1.3 试验内容及工况设计

该试验利用限位环限制浮子其他5个自由度方向上的运动,只研究浮子做单自由度垂荡运动时的波浪爬升特性。为更好地考察波浪周期和液压系统对单自由度垂荡运动浮子上波浪爬升的影响,设计了以下两类工况:无阻尼时,周期 T 设置为

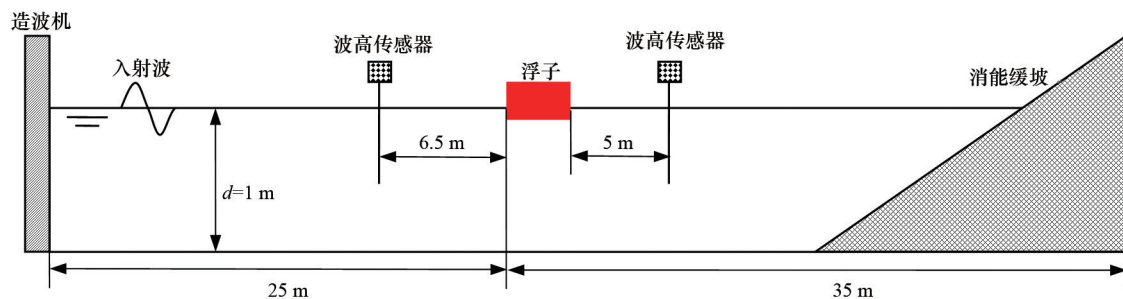


图1 试验水池布置



图2 浮子装置试验模型

1.4、1.6、1.8、2.0 s,其他波浪要素不改变;研究单独阻尼作用时,波浪周期固定为2.0 s,常数PTO阻尼值通过改变磁粉制动器激磁电流进行调整;研究周期和阻尼共同作用时,周期 T 设置为1.6、1.8、2.0 s。

浮子与波浪相互作用过程比较剧烈,浮子周围的水体会发生飞溅,为避免飞溅水体对波高传感器数据的影响,试验通过高清摄像机记录浮子前侧波浪爬升过程,利用波浪爬升高度与浮子高度的比例关系确定浮子前侧波浪爬升数值。试验过程中主要获取的是浮子迎浪侧的湿面高度,其幅值用 R 表示,如图3所示。将浮子上的净湿面高度 $R^*=R-\lambda$ 定义为波浪在浮子上的最大爬升高度,其无因次最大波浪爬升值取为 $R^*/(H/2)$ 。

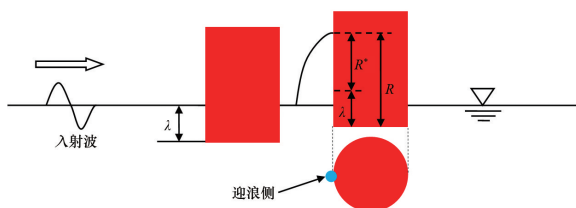


图3 垂荡运动浮子迎浪侧波浪爬升

2 试验结果分析

2.1 周期对波浪爬升的影响

根据文献[12]可知,在无PTO阻尼作用下,浮子随规则波做单自由度垂荡运动时,垂荡运动的振幅会随着周期的增大而增大,这是由于入射波周期较小时,波浪本身所具有的总能量较小,垂荡运动

的浮子吸收的能量也较少。图4给出了垂荡运动的浮子在无阻尼状况下无因次最大波浪爬升值随波浪周期的变化规律。可以看出,浮子在垂荡自由度上的波浪爬升随波浪周期的增大而减小,这与浮子垂荡运动的振幅变化规律相反。这是因为波浪周期较大时,浮子的运动位移也较大,即消耗在浮子运动上的波浪能量也较大,因此使得波浪剩余能量即波浪在浮子上的爬升较小;波浪周期较小时,消耗在浮子运动上的能量也较小,导致波浪在浮子上的爬升较大。波浪周期越小,浮子前侧波浪爬升高度越大,因此浮子顶部发生越浪的可能性也越大。在实际海况下,当波浪周期较小时,为避免越浪风险,需适当增加浮子高度。

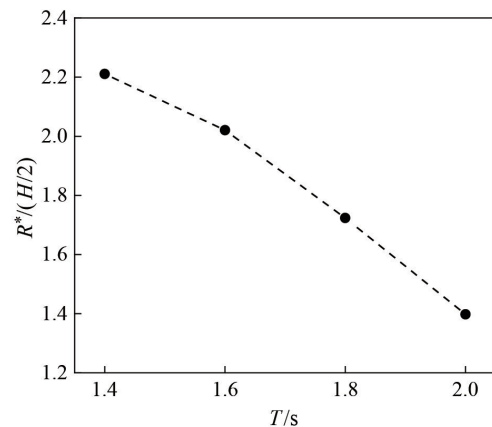


图4 浮子迎浪侧无因次最大波浪爬升随波浪周期的变化

2.2 PTO阻尼对波浪爬升的影响

根据文献[12]可知,加入常数PTO阻尼之后,浮子在垂荡自由度上运动振幅随常数PTO阻尼的增大而减小,常数PTO阻尼越大,垂荡运动的振幅变化越显著。图5给出了浮子在施加常数PTO阻尼下,做垂荡运动的浮子迎浪侧无因次最大波浪爬升随常数PTO阻尼的变化规律。其中对垂荡自由度的磁粉制动器,选择激磁电流为0.1、0.15、0.2、0.25 A,将其对应的输出转矩除以齿轮半径(36 mm),得到对应的PTO阻尼为36.1、66.9、97.2、126.4 N。由图5可以看出,浮子做单自由度垂荡运动时,PTO阻尼使得浮子的垂荡运动受到阻碍,导致波浪与浮子相互作用更加剧烈,因此波浪在浮子

上的爬升幅度随着阻尼增大有明显上升的趋势。

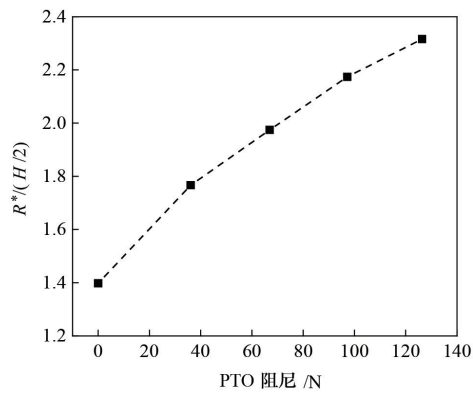


图5 浮子迎浪侧无因次最大波浪爬升随PTO阻尼的变化

2.3 波浪周期和PTO阻尼对波浪爬升的影响

图6给出了不同周期下垂荡运动浮子迎浪侧无因次最大波浪爬升值随常数PTO阻尼的变化规律。由于波浪周期为1.4 s时,施加PTO阻尼会导致浮子顶部发生越浪,因此本模型试验忽略了 $T=1.4$ s时波浪爬升随阻尼变化的工况。通过调制磁粉制动器的激磁电流,选择激磁电流为0.07、0.11、0.15、0.19、0.23 A,则对应的常数PTO阻尼分别为17.6、42.3、66.9、91.5、116.2 N。从图6可以看出,波浪周期较大时,浮子迎浪侧的波浪爬升随着阻尼的增加变化十分显著。但在周期较小时,浮子迎浪侧的波浪爬升随阻尼变化并不明显,这是由于波浪周期较小时浮子的运动振幅已经变得很小了,施加阻尼对于运动振幅的影响并不显著。由此可以发现,

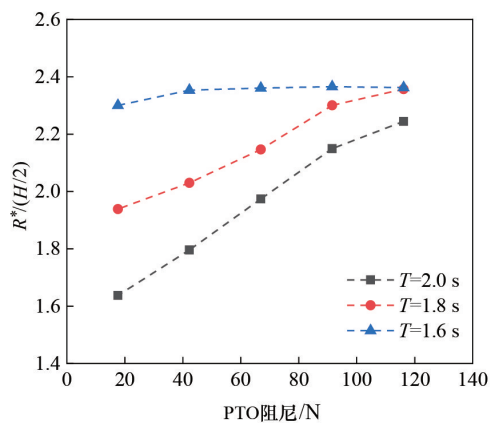


图6 不同周期下浮子迎浪侧无因次最大波浪爬升随PTO阻尼的变化

垂荡运动浮子的振幅对迎浪侧波浪爬升值有较大影响。

3 结论

基于规则波作用下振荡浮子式波能发电装置波浪爬升过程的物理模型试验,分析浮子迎浪侧的波浪爬升特性,探讨了波浪周期与常数PTO阻尼对俘能装置迎浪侧波浪爬升的影响,得出以下结论。

1) 浮子做单自由度垂荡运动时,其迎浪侧的波浪爬升幅度随波浪周期的增大而减小,这与浮子垂荡运动的振幅变化规律相反。波浪周期越小,浮子迎浪侧发生越浪的可能性越大。

2) 浮子做单自由度垂荡运动时,在竖直方向施加常数PTO阻尼会使得浮子迎浪侧的波浪爬升幅度增大。随着常数PTO阻尼数值的增大,波浪爬升值有明显上升的趋势。

3) 波浪周期较大时,浮子迎浪侧的波浪爬升随着浮子所受PTO阻尼的增加变化十分显著。波浪周期较小时,浮子迎浪侧的波浪爬升随阻尼变化并不明显。

参考文献 (References)

- [1] 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, 35(8): 1611-1616.
- [2] 肖惠民, 于波, 蔡维由. 世界海洋波浪能发电技术的发展现状与前景[J]. 水电与新能源, 2011(1): 67-69.
- [3] 韩冰峰, 褚金奎, 熊叶胜, 等. 海洋波浪能发电研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 61-66.
- [4] Qiu S Q, Liu K, Wang D J, et al. A comprehensive review of ocean wave energy research and development in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 113: 109271.
- [5] António F, deFalcão O. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 14(3): 899-918.
- [6] Xia D W, Ma C L, Xia Q. New wave energy devices developed in China[J]. Sea Technology, 2014, 55(5): 35-37.
- [7] 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, 29(4): 498-501.

- [8] 王梦, 陈林烽, 孙士艳. 振荡浮子阵列式波能转换装置水动力性能与效率研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(5): 1-16.
- [9] Goggins J, Finnegan W. Shape optimisation of floating wave energy converters for a specified wave energy spectrum[J]. *Renewable Energy*, 2014, 71: 208-220.
- [10] 史宏达, 曲娜, 曹飞飞, 等. 振荡浮子波能发电装置浮子运动性能的试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 124-130.
- [11] Liu Z, Qu N, Shi H D. Experimental study on hydrodynamic performance of a wave energy converter within multi-heaving-buoys[J]. *International Journal of Energy Research*, 2017, 41: 1351-1366.
- [12] Huang S T, Shi H D, Cao F F, et al. Experimental study on interaction between degrees of freedom in a wave buoy[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(6): 1256-1264.

Experimental study of wave run-up characteristics of oscillating buoy wave energy device

YU Tongshun^{1,2,3}, TANG Yuying¹, HUANG Shuting⁴

1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266100, China
3. Qingdao Municipal Key Laboratory of Ocean Renewable Energy, Qingdao 266100, China
4. Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China

Abstract In the complex marine environment, there are some nonlinear phenomena such as the wave impinge on the front of the oscillating buoy wave energy device, the wave run-up and overtopping during the interaction between the wave and the oscillating buoy, with negative effects on the safety and the working performance of the wave energy device. In this paper, the physical model tests are designed and conducted to investigate the wave run-up characteristics of the buoy on the wave-facing side, and the effects of the wave period, the value of constant PTO damping and the buoy motion amplitude on the wave run-up are discussed. Studies show that when the wave period is large and the PTO damping is small, it is beneficial to reduce the wave run-up amplitude on the wave-facing side of the buoy. When the wave period is small, the variation of the PTO damping has a very small effect on the wave run-up amplitude, while the run-up values are significantly affected by the amplitude of the heave motion.

Keywords ocean energy; wave energy device; wave power generation; oscillating buoy ●



(责任编辑 刘志远)