

# 摆臂浮子式波能装置的运动及能量转换性能

郑雄波<sup>1</sup>, 张亮<sup>2</sup>, 姜劲<sup>1</sup>, 马勇<sup>2</sup>

1. 哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001
2. 哈尔滨工程大学海洋可再生能源研究所, 哈尔滨 150001

**摘要** 海洋波浪能是一种清洁的海洋可再生能源, 受到了广泛关注。设计和制作了一种摆臂浮子式波浪能实验装置, 并在船模拖曳水池进行实验, 以研究该装置的运动和能量转换性能。摆臂浮子式波浪能实验装置由两个浮子、两个摆臂以及机械传动装置和发电机组成, 装置固定于拖车之上。通过水池实验测量不同工况下浮子的垂向运动加速度和发电机的输出电压, 分析波高和周期对浮子运动的影响, 计算装置在不同波浪条件下的能量转换效率。从实验结果可知, 在波浪作用下, 装置的垂荡运动性能较好, 具有较高的能量转换效率。

**关键词** 波浪能装置; 浮子式; 模型实验

**中图分类号** TK89; U661.32

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.17.001

## Movement and Energy Conversion Performance of the Wave Energy Device

ZHENG Xiongbo<sup>1</sup>, ZHANG Liang<sup>2</sup>, JIANG Jin<sup>1</sup>, MA Yong<sup>2</sup>

1. College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China
2. Institute of Ocean Renewable Energy System, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

**Abstract** Ocean wave energy is a clean marine renewable energy, which has received widespread attention. A wave energy device with swing arms and floaters was designed and produced. To study the movement and energy conversion performance of the device, model experiment was carried out in the tank. The device was composed of two floaters, two swing arms, mechanical transmission device and generators. The device was fixed on a trailer. Through experiments under different working conditions, the vertical acceleration of floaters and output voltage of the generator were measured. Finally, the influence of wave height and period on floaters' movement was analyzed, and the wave energy conversion efficiency was computed. Experimental results show that under action of the wave, the heaving motion performance is satisfactory, and the device has high energy conversion efficiency.

**Keywords** wave energy converter; float type; model experiment

随着经济发展和人口增长, 能源消耗大幅增加, 传统的化石能源资源日益耗尽。面对能源短缺的压力, 世界各国都十分重视能源的合理有效开发及新能源的研究。海洋波浪能作为一种清洁的海洋可再生能源, 具有储量丰富、分布广泛的特点, 其开发前景非常可观。近年来, 海洋波浪能开发技术领域的研究日趋活跃<sup>[1-4]</sup>。

波浪能发电是开发和利用波浪能最主要的形式。自

1955年第一台波浪发电装置问世以来, 世界各国先后提出了几百种不同的装置形式, 这些装置通常可以分为三部分: 波浪能捕获系统、机械能转换系统、发电系统<sup>[5,6]</sup>。其中波浪能捕获系统的作用是捕获波浪能量, 迄今为止出现了摆式、鸭式、蚌式、振荡水柱式、浮子式等多种形式; 机械能转换系统的作用是将捕获的波浪能转化为某种特定形式的机械能(如空气或水的压力能); 发电系统是利用透平或机械传动等设

收稿日期: 2014-01-20; 修回日期: 2014-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309069); 中央高校基本科研业务费专项(HEUCFD1414)

作者简介: 郑雄波, 讲师, 研究方向为流体力学和海洋能利用, 电子信箱: zhengxiongbo@hrbeu.edu.cn

引用格式: 郑雄波, 张亮, 姜劲, 等. 摆臂浮子式波能装置的运动及能量转换性能[J]. 科技导报, 2014, 32(17): 15-18.

备将机械能传递给发电机转化为电能<sup>[7-9]</sup>。有些装置只包含波浪能捕获系统和发电系统两部分,而省去了机械能转换系统,如直驱式发电机就是这一类型的装置。目前,波浪能装置的研究重点主要是这3部分系统的转化效率、可靠性以及成本问题。国内外研究人员在这些方面做了大量的理论与实验研究。较受国内外关注的装置主要有振荡水柱式和振荡浮子式,其中振荡浮子式装置由于其结构简单、转换效率高的特点越来越成为研究的热点<sup>[10]</sup>。

本文设计了一种摆臂浮子式波浪能发电实验装置,该装置通过两个浮子捕获波浪能,再通过摆臂以及机械传动装置将浮子捕获的波浪能传递给旋转发电机发电。通过模型实验测量浮子的运动以及装置的平均输出功率,研究不同波浪周期、波高下浮子的运动规律以及装置的能量转换性能。

## 1 实验方案

### 1.1 实验装置的工作原理

所设计的摆臂浮子式波浪能发电装置模型由2个浮子、2个摆臂以及机械传动装置和发电机组成。浮子浮于水面,摆臂的一端与浮子铰接,另一端通过伸出轴连接机械传动装置,传动装置安装于一个箱体结构之中,模型整体结构及箱体内部结构分别如图1和图2所示。

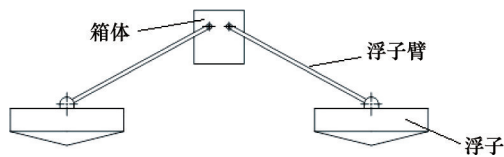


图1 模型整体结构示意图

Fig. 1 Overall structure of the model

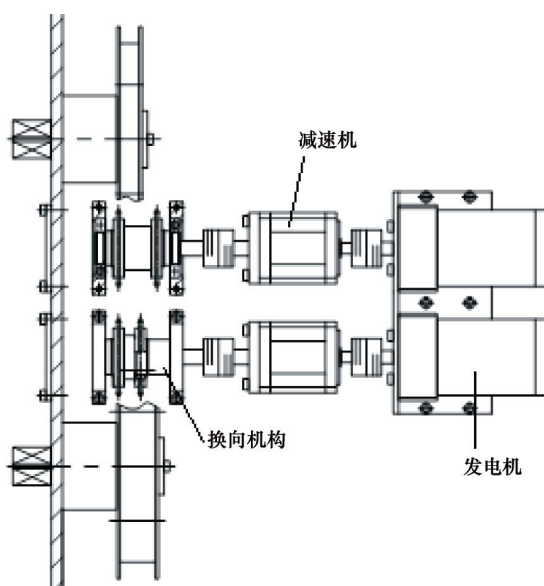


图2 箱体内部结构示意图

Fig. 2 Internal structure of the box

在波浪作用下,浮子上下运动并推动摆臂往复摆动,摆臂进一步带动传动装置工作。其中传动装置包括换向机构和增速机,换向机构作用是将摆臂的往复摆动转化为轴的单向旋转,通过联轴器连接增速机,提高旋转速度,增速机驱动旋转发电机转动将机械能转换为电能输出,其中每个浮子对应一个发电机。

### 1.2 仪器设备

本实验在哈尔滨工程大学船模拖曳水池中进行,水池长108 m,宽7 m,水深3.5 m。实验设备和仪器主要包括摇板式造波机、消波岸、拖车、东华DH5920动态信号测试分析系统、加速度传感器、电阻箱,造波机能够在水池生成周期0.4~4 s、最大波高0.4 m的规则波,模拟ITTC单参数和双参数谱、JONSWAP谱、P-M谱、实际海浪采样谱等,有义波高可达0.32 m的不规则波;信号测试分析系统具有16个工作通道,采样频率在10~100 kHz,系统误差低于0.5%,稳定度为0.05%,用于采集加速度、力以及发电机的电压和电流。

### 1.3 实验方法

本次实验目的是针对不同工况,测量在波浪作用下浮子的运动加速度,发电装置的能量输出,掌握波高、周期、阻尼等因素对浮子运动性能和发电装置能量转换性能的影响规律,为摆臂浮子式波浪发电装置的研究提供实验依据。根据装置的工作原理设计并制作实验模型,模型通过一个框架形式的支架固定于拖车之上,浮子浮于水面。拖车停放在船模拖曳水池上与造波机相距48 m的位置,如图3所示。在2个浮子的圆心处分别贴上加速度传感器,加速度传感器通过缆线连接于动态信号测试分析系统,发电机输出端连接变阻箱,动态信号测试分析系统与变阻箱并联以测量变阻箱两端的电压,从而获得发电机的输出功率。

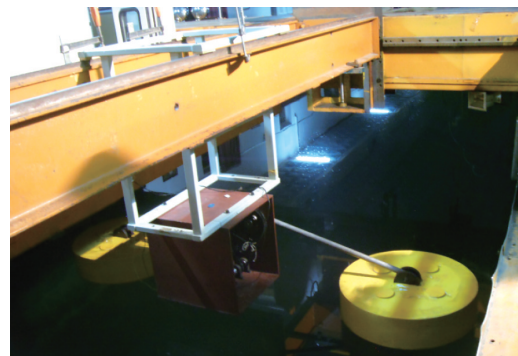


图3 实验照片

Fig. 3 Experiment scene

实验模型的主要参数为:浮子直径750 mm,浮子形状为锥形,浮子高度265 mm,摆臂长度900 mm,吃水89 mm,浮子质量17 kg,平衡状态摆臂与水平方向夹角24°,发电机额定功率50 W动态信号测试分析系统的信号采样频率为50 Hz,造波类型为规则波,波高和周期如下:

- 1) 波高:0.125、0.15、0.175 m;
- 2) 周期:1.2、1.4、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4、2.6 s。

## 2 数据处理及结果分析

### 2.1 浮子运动性能实验

按垂直于来波方向布置浮子,采用造波机造规则波,利用加速度传感器采集浮子在波浪作用下的加速度,然后利用 Matlab 软件对实验数据进行降噪和积分处理,获得浮子的速度和位移,根据处理结果分析浮子的运动规律。在实验过程中利用浪高仪实时测量波浪的变化情况。图4为波高0.15 m和周期1.4 s的规则波时历曲线。

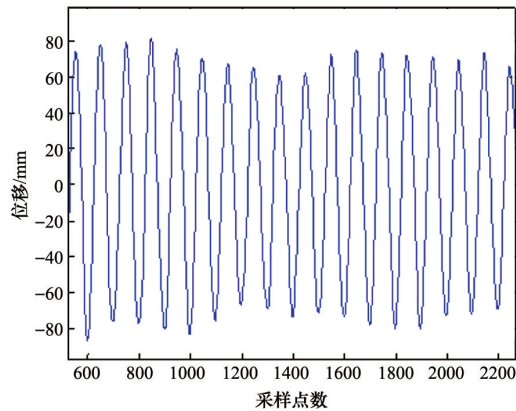


图4 波浪时历曲线  
Fig. 4 Wave curve

同时,比较相同实验工况下2个浮子的垂向运动加速度。图5为入射波波高为0.15 m和周期为2.0 s时,2个浮子的垂向运动加速度时历曲线。

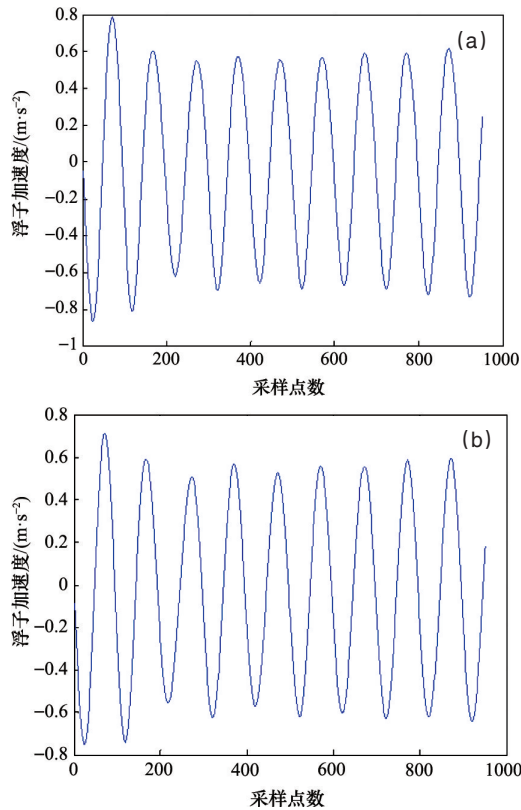


图5 2个浮子的垂向加速度时历曲线  
Fig. 5 Acceleration curve of two buoys

实验处理过程中,忽略波浪自身的不规则性以及测量误差等因素。从图5可以看出,规则波作用下,浮子的运动曲线为正弦曲线,浮子的振动周期为2.0 s,与波浪周期相同。另一方面,从图5可以看出,2个浮子的垂向加速度基本上同步,二者的平均误差约1.2%,造成误差的原因主要是机械传动装置以及测量仪器的误差因素。由此可见,相同实验工况条件下,2个浮子的运动状态相同。因此,本文仅讨论和分析其中1个浮子的运动的能量输出。

为分析浮子垂向位移幅值与入射波周期之间的关系,波高固定为0.15 m,分别在波浪周期为1.2、1.4、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4、2.6 s时,测算浮子的垂向位移,计算浮子位移幅值在测量时间内的平均值与波高的比值,图6为不同周期下浮子平均位移幅值与波高比值( $z/h$ )随周期的变化曲线。

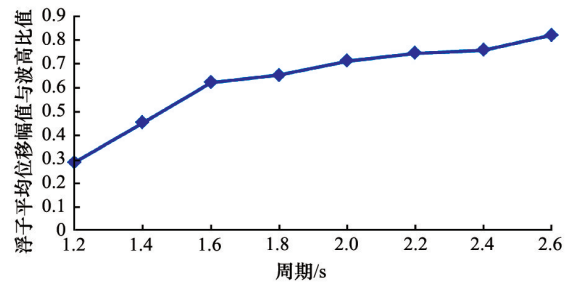


图6 位移幅值增长率曲线  
Fig. 6 Growth rate variation curve of displacement amplitude

由图6可以看出,规则波作用下,1.2~2.6 s周期范围内,浮子位移幅值与波高的比值介于0.2~0.8之间,浮子的位移幅值随着波浪周期的增加而减小。

然后比较相同周期不同波高下浮子的运动位移幅值与波浪之间的关系。波浪周期预设为1.8 s,波高预设为0.125、0.15、0.175 m。在测量周期内,浮子平均位移幅值随波高的变化曲线如图7所示,其中横坐标位波高,纵坐标为浮子平均位移幅值。

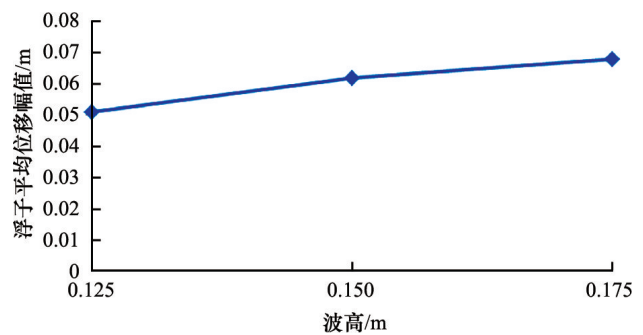


图7 浮子位移幅值的变化曲线  
Fig. 7 Variation curve of buoy's mean displacement amplitude



当波浪周期为 1.8 s 时波长  $\lambda$  约为 5.1 m, 波高  $h=0.175 \ll \lambda$ , 可近似为线性波, 从图 7 所示的实验结果可以看出, 随着波高增加, 浮子的位移振幅也同时增加, 但不是呈线性递增关系, 这是由于机械传动机构的非线性阻尼造成的。

### 2.2 实验装置的能量转换效率

为了计算实验装置的能量转换效率, 需要分别计算浮子宽度内入射波的功率与实验装置的输出功率, 其转换效率用装置的输出功率与浮子宽度内入射功率的比值来衡量。

单位尺寸内入射波的功率为

$$P_w = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T \quad (1)$$

式中,  $H$  为波高, m;  $T$  为波浪周期, s。

装置的输出功率为

$$P_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U^2(t)}{R} dt \quad (2)$$

式中,  $R$  为发电机的外接电阻,  $\Omega$ ;  $U(t)$  为动态信号测试分析系统所采集的电阻两端的电压随时间的函数。这里  $U(t)$  为离散函数, 数据采集点数为  $N$ , 间隔时间为  $\Delta t$ , 则式(2)在实际计算过程中按如下所示的公式<sup>[11,12]</sup>计算

$$P_{out} = \frac{1}{N \times \Delta t} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{U^2(k)}{R} \Delta t \quad (3)$$

设浮子直径为  $D$ , 转换效率为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_w \times D} \times 100\% \quad (4)$$

本实验采用动态信号测试分析系统所采集的电阻箱两端的电压, 电阻为 100  $\Omega$  采集时间间隔为 0.02 s, 按照式(1)~(4)计算不同工况时装置的能量转换效率, 结果如表 1 所示。

表 1 效率与波高和波浪周期的对应关系

Table 1 Relationships of the efficiency with wave height and period

周期/s	效率/%		
	波高 0.125 m	波高 0.15 m	波高 0.175 m
1.2	12.3	16.2	18.1
1.4	18.7	23.5	25.7
1.6	22.4	27.5	30.8
1.8	28.6	31.6	33.8
2.0	21.9	25.7	29.1
2.2	12.3	16.1	20.4
2.4	7.8	10.2	13.1
2.6	5.6	6.4	8.6

从表 1 可以看出, 对于波高为 0.125、0.15 和 0.175 m 3 种情况, 周期在 1.2~1.8 s 范围内, 装置的输出功率从随波浪周期的增加而增加。当波浪周期为 1.8 s 时, 其输出功率达到最大, 然后随着周期的增加而减小; 而同一周期下, 波高越高, 装置的能量转换效率越高, 这是因为波高越高, 浮子的振幅

越大, 此时机械传动装置和发电机的运行效率越高。根据实验可知, 在上述工况下, 装置的最大效率可达 33.8%。

### 3 结论

研究设计了一种摆臂浮子式波浪能实验装置, 并对该装置在船模拖曳水池进行发电实验, 实验从装置的运动性能和能量转换性能两个方面进行研究, 分析规则波的波高和周期对浮子的运动和能量转换效率的影响。实验结果表明, 在规则波作用下, 当 2 个浮子按与来波方向垂直的方式排列时, 2 个浮子的运动是同步的, 浮子的垂向运动位移幅值随着波浪周期的增加而递增, 随波高的增加而增加, 但增加的速度逐渐减小; 同一波高条件下, 装置的能量转换效率随波浪周期的增加先递增后递减, 本实验装置在波浪周期为 1.8 s 时, 效率最高; 另一方面, 周期相同时, 波高越大, 装置效率越高。本文所设计的实验装置具有较好的能量转换性能。

### 参考文献 (References)

- [1] Cruz J. Ocean wave energy: Current status and future prepectives[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [2] 英国石油. BP 世界能源统计[Z]. 2010. British Petroleum. Statistical review of world energy[Z]. 2010.
- [3] 王传崑, 卢苇. 海洋能资源分析方法及存储评估[R]. 北京: 海洋出版社, 2009. Wang Chuankun, Lu Wei. Analysis method of ocean energy resource and storage estimation[R]. Beijing: Ocean Publisher, 2009.
- [4] 游亚戈. 我国海洋能进展[J]. 中国科技成果, 2007, 16(3): 18-20. You Yage. Ocean energy progress of China[J]. China Science and Technology Achievements, 2007, 16(3): 18-20.
- [5] 任建莉, 钟英杰, 张雪梅, 等. 海洋波能发电的现状与前景[J]. 浙江工业大学学报, 2006, 2(1): 69-73. Ren Jianli, Zhong Yingjie, Zhang Xuemei, et al. State of arts and prospects in the power generation from oceanic wave[J]. Journal of Zhjiang University of Technology, 2006, 2(1): 69-73.
- [6] Clement A, McCullen P, Falcao A, et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(5): 405-431.
- [7] Smith H C M, Pearce C, Millar D L. Further analysis of change in nearshore wave climate due to an offshore wave farm: An enhanced case study for the Wave Hub site[J]. Renewable Energy, 2012, 40(1): 51-64.
- [8] Henderson R. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2006, 31(2): 271-283.
- [9] Pecher A, Kofoed J P, Espedal J, et al. Results of an experimental study of the langlee wave energy converter[C]//Proceedings of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China, June 20-25, 2010.
- [10] 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. Gou Yanfen, Ye Jiawei, Li Feng, et al. Investigation on the wave power device[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(4): 498-501.
- [11] Su Y L, You Y G, Zheng Y H. Investigation on the oscillating buoy wave power device[J]. China Ocean Engineering, 2002, 16(1): 142-145.
- [12] 麦考密克, 许适. 海洋波浪能转换[M]. 北京: 海洋出版社, 1985. McCormick M E, Xu Shi. Ocean wave energy conversion[M]. Beijing: Ocean Publisher, 1985.

(编辑 季超)