

文章编号:0254-0096(2016)03-0564-06

## 漂浮式波浪能直线发电原理试验研究

林礼群<sup>1~3</sup>, 姜家强<sup>1,2</sup>, 吴必军<sup>1,2</sup>, 吴春旭<sup>1~3</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州 510640;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 介绍一种漂浮式波浪能直线发电装置,按相似理论对该装置进行模型设计和水槽试验,分析不同波高、周期、负载对该类装置输出功率和转换效率的影响。试验结果表明:阻尼匹配极大地影响到模型的转换效率。考虑到机械阻尼情况下模型从波浪到电的最大转换效率为11%,在不计机械阻尼的情况下,模型从波浪到电的最大转换效率可达49%。

**关键词:** 波浪能; 直线电机; 输出功率; 机械阻尼; 转换效率

**中图分类号:** TK79

**文献标识码:** A

### 0 引 言

波浪能发电技术的主要思想是利用波能装置的前级机构俘获波浪能,通过中间转换机构作用将捕获的能量传输到发电机构并转换为电能。目前大多数发电机构采用传统的旋转电机<sup>[1]</sup>。因波浪能是一种以大作用力、低速往复运动的形式而存在的机械能量,要将这种能量形式与高速旋转发电机相匹配,就必须采取一系列中间环节(如液压机构、机械传动机构、气动机构等)来提高转速,但中间环节的存在增加了整个波浪能装置的复杂程度和发电成本,降低了发电装置的可靠性和总转换效率。波浪能直线发电利用直线发电机将前级机构吸收的波浪能转换为电能,无需中间转换环节。该装置结构有利于降低建造成本和能耗损失,提高转换效率。近年来国内外对直驱式波能转换技术进行了一些研究,典型装置有荷兰的 AWS 直驱淹没式波能装置、瑞典的 UUWEC 波能装置、美国俄勒冈州立大学的 SeaBeav 双浮体漂浮式波能装置和中国科学院广州能源研究所的哪吒号漂浮式波浪能直线发电装置<sup>[2-5]</sup>。AWS 波能装置整体淹没在海浪中,基座固定在海底,波浪压力驱动浮体运动,通过直线发电机转换电能。2004 年 Polinder 等<sup>[2]</sup>研究了 AWS 波能装置的发电功率、电磁力与浮体运动速度

的关系及波浪压力变化引起的浮体运动变化,但 AWS 装置制造精度要求高、易损坏、水下维修困难。UUWEC 由一个振荡浮子和一个固定于海底的基座构成,通过柔性绳相连。2007 年, Waters 等<sup>[6]</sup>对 UUWEC 装置进行了实海况试验,研究了装置输出功率与波能密度的关系。Eriksson<sup>[7]</sup>、Stålberg 等<sup>[8]</sup>实验研究了 UUWEC 装置的功率、速度与阻尼变化,虽然该装置结构相对简单,但受潮位影响较大,柔性绳容易疲劳磨损,故可靠性偏低。SeaBeav 由一个振荡浮子和中心管构成,直线电机的线圈和永磁铁分别镶在振荡浮子和中心管中。2007 年, Elwood 等<sup>[9,10]</sup>实验表明 SeaBeav 装置平均转换效率不到 3%,该装置的水动力学效率为 8%。

本文对一种漂浮式直线发电装置进行研究,实验模型简图如图 1 所示。该发电装置是一个漂浮结构,由锥形台浮子、阻尼板、直线电机等构成,与阻尼板相连的中心管内装有直线电机,直线电机的动子和振荡浮子固定在一起,直线电机的定子固定在中心管内。在波浪力作用下,振荡浮子相对阻尼板运动,驱动直线发电机发电。与其他现有的波浪能发电装置相比,该装置结构相对简单、制造精度低、其漂浮结构有利于制造和投放、有效工作时间不受浪向和潮位影响、可靠性高。对于该型式波能装置模型的试验结果国内外尚未见报道。

收稿日期: 2014-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(51276185; 51079138)

通信作者: 吴必军(1965—), 男, 博士、研究员, 主要从事海洋能转换技术方面的研究。wubj@ms.giec.ac.cn

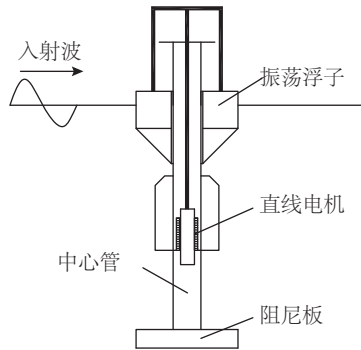


图1 实验模型装置结构简图

Fig. 1 Sketch of the experimental model device

## 1 实验设计

### 1.1 实验装置

实验在中国科学院广州能源研究所可再生能源与天然气水合物重点实验室的造波水槽中进行,水槽长 50 m,宽 1.2 m,水深 0.90 m;一端装有计算机控制的变频电源伺服电机驱动的推板式造波机,可造周期为 0.4~4.0 s,波高为 0.02~0.30 m 的规则波和不规则波。本试验在规则正弦波浪作用下进行,水槽试验整体布置如图 2 所示。实验模型置于水池中距造波机 25 m 处,波高传感器距造波机 10 m 处,用于采集波高,测量范围为 0~0.5 m。振荡浮子直径 0.48 m,吃水深度 0.20 m,质量为 9.4 kg。微型波浪能永磁直线发电机由中国船舶重工集团公司第七一二研究所制造,其额定功率 18 W,重 10.5 kg。负载电阻为滑动变阻器,阻值范围为 0~200  $\Omega$ 。阻尼板直径 0.6 m,由阻尼板和中心管组成的水下浮体力重 9.5 kg,其吃水深度可通过加减配重或充气调节,实验中保持整个装置处于漂浮状态,阻尼板与锚链松弛连接,使漂浮式波浪能装置在一定范围内运动。电路输出端为三相桥式整流电路,电阻两端的电压数据通过示波器采集经数据接口连接

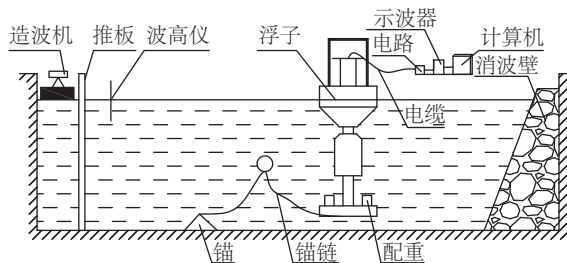


图2 模型试验的整体布置图

Fig. 2 The overall layout of the model test

到计算机进行计算分析。装置的机械阻力测试设备有起吊装置、拉力传感器和数据采集储存卡。

### 1.2 实验方法

为了研究该波浪能装置在不同波浪要素下的功率转换特性,考虑到样机装置的投放地点处于中国南海某海域,该处波浪平均分布周期  $T_a$  为 2~7 s<sup>[11]</sup>,实验中的相似因子取为 10,在 Froude 数和 Strouhal 数和相同的情况下,造波机所输入的正弦入射波周期  $T = T_a/10^{0.5}$ ,即取  $T = 1 \sim 2.2$  s。在波高为 0.08~0.14 m 条件下,对发电功率进行数据采集,实验步骤如下:

- 1) 造波机在计算机控制下造出给定周期和波高的入射波,实验中波浪误差控制在 5% 以内;
- 2) 当系统稳定后,启动数据采集程序,对装置的输出电压、波高数据进行采集。各试验状态采集 3 次数据,取其平均值以减小误差;
- 3) 改变负载电阻,重复上述步骤 1) 和 2);
- 4) 在直线电机空载条件下,起吊设备拉动振荡浮子相对阻尼板匀速上下滑动,利用拉力传感器间接测试该装置的滑动机械阻力。

## 2 波浪能装置的控制方程

假设波浪能装置漂浮在均质、不可压、流动无旋的波面上,在波浪作用下,振荡浮子和水下浮体分别做微幅垂荡运动。根据线性势流理论和牛顿第二定律建立两浮体的双自由度受迫振动方程:

$$\begin{cases} (M_1 + m_{11})\ddot{z}_1 + C_{11}\dot{z}_1 + K_{s1}z_1 + m_{12}\ddot{z}_2 + \\ C_{12}\dot{z}_2 + F_m + C_{gen}|\dot{z}_1 - \dot{z}_2| = F_{ex1} \\ (M_2 + m_{22})\ddot{z}_2 + C_{22}\dot{z}_2 + K_{s2}z_2 + m_{21}\ddot{z}_1 + \\ C_{21}\dot{z}_1 + F_m + C_{gen}|\dot{z}_1 - \dot{z}_2| = F_{ex2} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $M_1$ 、 $m_{11}$ 、 $C_{11}$  和  $K_{s1}$  —— 振荡浮子在垂荡运动方向的质量、附加质量、附加阻尼和静水回复力刚度,其中  $K_{s1} = \rho g \pi r_1^2$  ( $r_1$  为振荡浮子半径);  $M_2$ 、 $m_{22}$ 、 $C_{12}$  和  $K_{s2}$  —— 水下浮体在垂荡运动方向的质量、附加质量、附加阻尼和静水回复力刚度,由于水下浮体无水面面积变化,  $K_{s2} = 0$ ;  $m_{12}$  和  $C_{12}$  —— 水下浮体的运动对振荡浮子产生的附加质量和附加阻尼;  $m_{21}$  和  $C_{21}$  —— 振荡浮子的运动对水下浮体产生的附加质量和附加阻尼;  $F_m$  —— 装置的机械阻力(主要为直线电机的动子和定子之间机械阻力以及两浮体轴承间机械阻力)。

振荡浮子吸收的一部分波浪能通过摩擦生热

损耗,机械阻力平均耗功  $P_m$  为:

$$P_m = \frac{1}{2} F_m |\dot{z}_1 - \dot{z}_2| \quad (2)$$

式中,  $z_1$ 、 $\dot{z}_1$ 、 $\ddot{z}_1$ ——振荡浮子垂荡运动的位移、速度、加速度;  $z_2$ 、 $\dot{z}_2$ 、 $\ddot{z}_2$ ——水下浮体垂荡运动位移、速度、加速度;  $F_{ez1}$  和  $F_{ez2}$ ——两浮体所受的波浪激励力;  $C_{gen}$ ——两浮体所受反电磁力的阻尼系数(即电磁阻尼)。

运动的波能装置通过电磁阻尼作用将吸收的波浪能转化为电能,电磁力做功功率表达式为:

$$P_{gen} = F_{gen} v = \frac{1}{2} C_{gen} |\dot{z}_1 - \dot{z}_2|^2 \quad (3)$$

式中,  $P_{gen}$ ——电机功率, W;  $F_{gen}$ ——电磁力, N;  $v$ ——两浮体相对运动速度, m/s。

当两浮体在波浪力作用下发生相对运动,微型直线电机做切割磁感线运动产生电磁力,输出电能。直线发电机所受电磁力除与电机本身性质(磁性材料、磁极宽度、导体横截面、气隙等)相关外,还与电力输出端的负载电阻和两浮子间的相对运动速度有关;直线电机的动子和定子之间气隙很小,在相对垂荡运动过程中,产生机械阻力,造成能量损失;装置所受的附加质量、阻尼系数、波浪激励力等水动力学量与装置的几何型式和波浪因素有关;故文中对不同波浪要素和负载电阻条件下波能装置的输出功率和转换效率进行试验研究,并测试系统机械阻力对整个模型转换效率的影响。

### 3 试验结果与分析

装置的总转换效率,即波浪能转换为电能的效率为:

$$\eta = (P/P_i) \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $P$ ——试验测得平均发电功率;  $P_i$ ——入射波功率,其计算公式如式(5)所示。

$$P_i = \rho g A^2 r_1 \frac{\omega}{2k} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (5)$$

式中,  $\rho$ ——水密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $A$ ——入射波波幅(波高的一半), m;  $r_1$ ——浮子半径, m;  $\omega$ ——入射波频率, rad/s,  $\omega = 2\pi/T$ , 其中  $T$  为入射波周期(s);  $k$ ——波数, m<sup>-1</sup>;  $h$ ——水深, m。

入射波功率计算结果见表 1。

表 1 入射波功率的计算结果(W)

Table 1 The calculation results of the incident wave power(W)

周期/s	波高/m			
	0.08	0.10	0.12	0.14
1.0	2.97	4.64	6.68	9.09
1.1	3.31	5.18	7.46	10.15
1.2	3.70	5.79	8.33	11.34
1.3	4.13	6.46	9.30	12.66
1.4	4.59	7.17	10.33	14.06
1.5	5.05	7.89	11.37	15.47
1.6	5.50	8.60	12.38	16.85
1.7	5.93	9.27	13.35	18.17
1.8	6.33	9.90	14.25	19.40

图 3 为波高 0.12 m、电阻值 75  $\Omega$  和不同周期条件下,所采集电压波形图(采集时间间隔为 0.01 s)及根据采集电压数据计算的瞬时功率曲线。由图 3 可知:波能装置的输出电压随时间周期性变化,输出功率变化与电压波动变化一致;电压波形的波动周期随入射波周期变化,入射波周期为 1.1 s 时对应的波形电压周期约为 1.1 s,而入射波周期为 1.8 s 时对应的波形电压周期约为 1.8 s;周期不同,波形电压不同,且随周期的增大而减小,结合试验中装置的运动响应分析可知:当装置做垂荡运动时,位移、速度均做周期性变化,其变化周期与入射波周

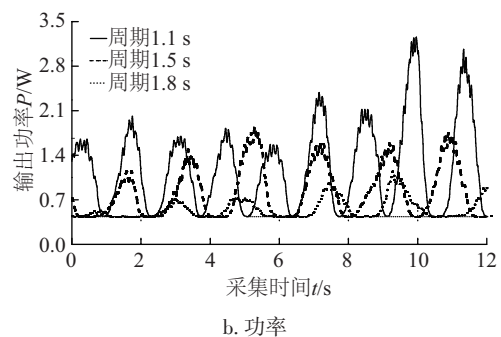
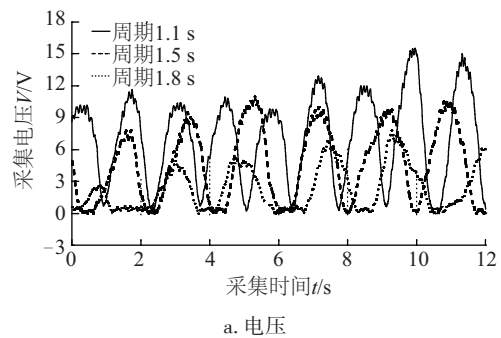


图 3 采集电压波形图和瞬时功率

Fig. 3 Voltage wave form and instantaneous power

期一致,周期越小装置的速度越大,电机速度越大。由于直线电机的输出功率与速度的平方成正比,功率显著提升,图3中,周期为1.1 s的峰值功率是周期为1.8 s时的6倍。

图4分别为装置输出的平均功率和平均转换效率随周期的变化曲线(电阻为75 Ω)。如图4a所示:平均输出功率随周期变化呈现双峰曲线变化,且曲线变化趋势不受波高影响,功率峰值最大值点分别发生在周期1.1 s和1.4 s,且两个峰值大小相近,出现两个峰值的原因一方面为波浪周期1.4 s条件与漂浮装置的固有尺寸最匹配,另一方面波浪周期1.1 s条件下两浮体的相对运动速度大,直线电机转换效率高;随着波高的增大,装置的平均输出功率逐渐增大,图4a中波高为0.14 m时的平均输出功率比波高为0.08 m的输出功率大4倍。从图4b可见:转化率-周期曲线的变化与功率-周期曲线变化相似,呈现两个峰值,但两个峰值大小不同,周期为1.1 s对应的效率峰值比周期为1.4 s的大,机械阻尼作用减弱了装置的共振作用,使共振点的效率

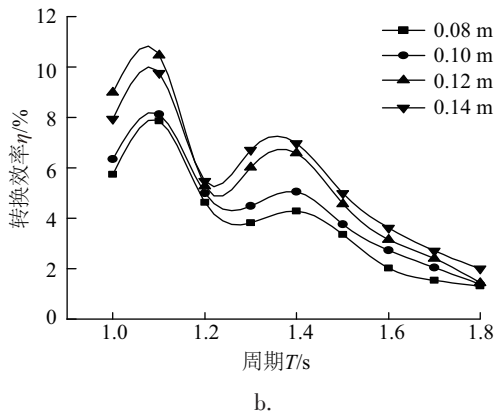
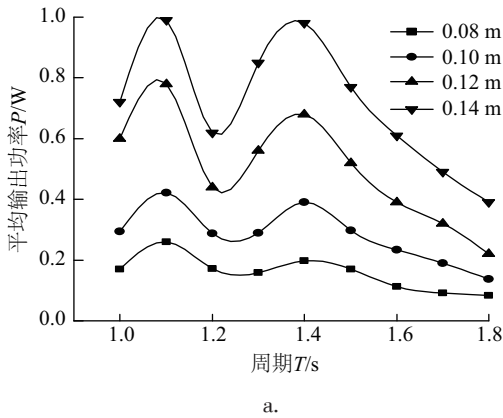


图4 不同波浪要素下的平均输出功率和转换效率  
Fig. 4 Average output power and conversion efficiency for different wave condition

不够大;装置的平均转换效率随波高增大而增大,最高平均转换效率为11%。

图5给出了不同周期下,装置的平均发电功率和平均转换效率随电阻的变化情况(波高为0.12 m)。由图5可见:增大电阻阻值,平均输出功率和平均转换效率均呈先增大后减小的变化趋势,峰值出现位置几乎不因周期而发生变化,其峰值对应的阻值约为60 Ω,此时的电阻阻值对应的电磁阻尼为该波能装置的最佳阻尼。

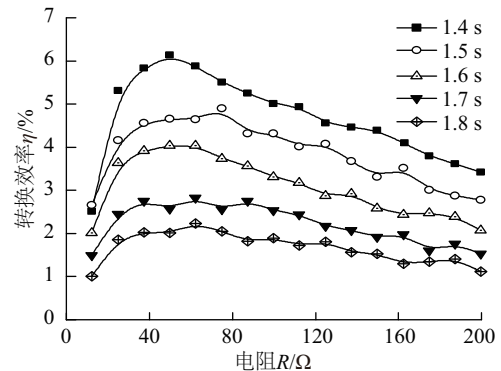
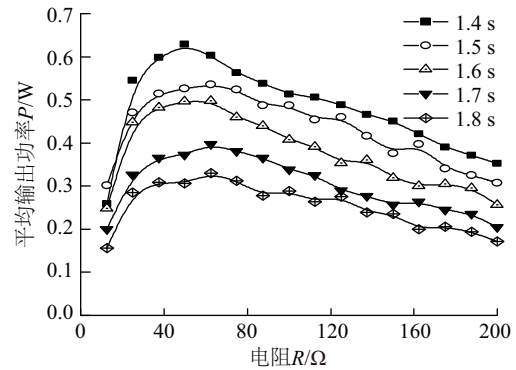


图5 平均输出功率和转换效率随负载电阻阻值变化  
Fig. 5 Curves of average output power and conversion efficiency changing with load resistance

由图4可知,由于机械阻力的存在,模型的转换效率不高。为了评估机械阻力对模型转换效率的影响,笔者对机械阻力进行测试。图6为匀速拉动振荡浮子上下滑动时,拉力传感器所测量的拉力值,其中匀速上滑的平均拉力为181.3 N,匀速下滑的平均拉力为140.4 N。据此测算出的平均机械阻力为20.45 N。以1.1 s周期、波高0.12 m和负载电阻75 Ω情况为例,两浮体的相对运动行程为0.1 m,该条件下装置的平均相对垂荡运动速度约为0.14 m/s,

由式(2)得机械阻力损耗功率  $P_m = 2.86 \text{ W}$ , 占入射波功率的 38.4%, 即不计机械阻力条件下装置的最大总转换效率可达 49%。

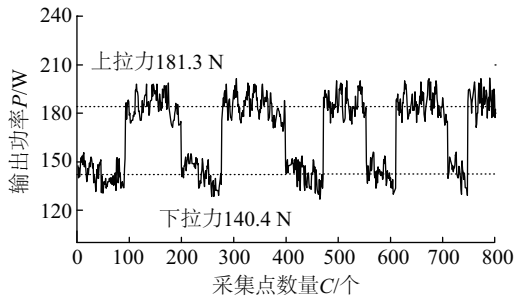


图6 拉力传感器测试的拉力值

Fig. 6 Tension values measured by tension sensor

根据试验结果,当满足波浪要素使波能装置的稳定响应速度大、共振特征值与入射波频率匹配、运动幅值较大、负载电阻与装置匹配、机械阻力小时,装置的吸收能力最强,转换效率高。在实际研究中,波浪要素无法人为改变,因此为了得到较高的输出功和转换效率,还需从改变负载电阻和减小机械阻力两个方面入手。

## 4 结 论

本文对漂浮式波浪能直线发电装置的功率输出特性进行了物理试验研究,分析了该装置输出电压波形和瞬时功率特性,测算了不同波浪要素、不同负载电阻和摩擦阻力对装置的输出功率和转换效率的影响。

试验结果表明:装置的输出电压随时间周期性变化。对于固定几何尺寸的漂浮式波能装置和直线发电机,存在两个匹配的浪周期条件,使装置的输出功率和转换效率较大,其中周期 1.1 s 条件下,装置稳定运行响应速度最快,转换效率最大;波高越大,输出功率越大,转换效率越大;负载电阻对输出功率和效率的影响不随周期变化,且存在一个最佳负载电阻  $R=60 \Omega$  使输出功率和转换效率达到最优值。该装置的机械阻力耗损达约 38.4%,减小机械阻力可显著提高装置的转换效率,可为该类型装置转换效率评估提供依据。

### [参考文献]

[1] de O Falcão A F. Wave energy utilization: A review of

the technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 899—918.

- [2] Polinder H, Damen M E C, Gardner F. Design, modelling and test results of the AWS PM linear generator[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2005, 15(3): 245—256.
- [3] Mueller M A. Electrical generators for direct drive wave energy converters[J]. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2002, 149(4): 446—456.
- [4] Rhinefrank K, Agamloh E B, Von Jouanne A. Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(9): 1279—1298.
- [5] 吴必军,刁向红,王坤林,等. 10 kW 漂浮点吸收直线发电波力装置[J]. *海洋技术*, 2012, 31(3): 68—73.
- [5] Wu Bijun, Diao Xianghong, Wang Kunlin, et al. 10 kW floating point absorber direct drive wave power device[J]. *Ocean Technology*, 2012, 31(3): 68—73.
- [6] Waters R, Stalberg M, Danielsson O, et al. Experimental results from sea trials of an offshore wave energy system[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(3): 034105—034107.
- [7] Eriksson M. Modelling and experimental verification of direct drive wave energy conversion: Buoy-generator dynamics[D]. Uppsala Sweden: Uppsala University, 2007.
- [8] Stålberg M, Waters R, Danielsson O, et al. Influence of generator damping on peak power and variance of power for a direct drive wave energy converter[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2008, 130(3): 031003—031006.
- [9] Elwood D, Yim S C, Prudell J, et al. Design, construction, and ocean testing of a taut-moored dual-body wave energy converter with a linear generator power take-off[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(2): 348—354.
- [10] Elwood D. Evaluation of the performance of a taut-moored dual-body direct-drive wave energy converter through numerical modeling and physical testing [D]. Oregon USA: Oregon State University.
- [11] 孙龙龙. 基于装置研发的波浪能评估方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [11] Sun Longlong. Energy evaluation methodology based on the R&D of wave energy converter[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.

## EXPERIMENTAL STUDY ON LINEAR POWER GENERATING PRINCIPLE OF FLOATING WAVE ENERGY CONVERSION

Lin Liqun<sup>1,3</sup>, Jiang Jiaqiang<sup>1,2</sup>, Wu Bijun<sup>1,2</sup>, Wu Chunxu<sup>1,3</sup>

(1. *Guangzhou Institute of Energy, CAS, Guangzhou 510640, China*; 2. *Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, CAS, Guangzhou 510640, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** The floating direct drive wave energy device was introduced in this paper. The model of device and wave tank experiment was designed according to the similarity theory, and the effects of different wave height, different periods and different loads on output power and conversion efficiency of wave energy device was analyzed. Experimental results showed that the model conversion efficiency is greatly affected by damping matching. Considering the mechanical damping of model, the maximum conversion efficiency from wave energy to electric energy is 11%. However, the maximum conversion efficiency can reach 49% without considering the mechanical damping.

**Keywords:** wave energy; linear generator; output power; mechanical damping; conversion efficiency