

100 kW 鹰式波浪能发电装置“万山号” 实海况试验

盛松伟^{1,2}, 王坤林^{1,2}, 吝红军^{1,2}, 张亚群^{1,2},
游亚戈^{1,2}, 王振鹏^{1,3}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510070; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 鹰式装置“万山号”为一大型漂浮式波浪能发电装置, 装置采用2套独立并行的液压系统将不稳定的波浪能转换为相对稳定的电能, 系统配置4台由液压马达驱动的30 kW永磁发电机, 在不同浪况下分级启动发电。2015年11月~2016年6月, “万山号”在珠海万山海域已开展不同海况的实海况试验, 海试经历小浪、中浪、大浪等多种环境动力输入, 取得一系列试验数据和成果。根据已获的阶段成果, 总结出改进措施, 后续“万山号”将优化升级现有系统, 扩展太阳能发电及海水淡化系统, 并在开阔海域开展长期实海况试验, 持续提高鹰式波浪能转换装置的可靠性、转换效率、环境适应性和经济性。

关键词: 波浪能; 能量转换; 装置测试; 鹰式装置“万山号”

中图分类号: O325/TK79

文献标识码: A

0 引 言

2012~2014年鹰式波浪能发电装置概念样机10 kW“鹰式一号”装置在珠海万山海域开展海试, 初步验证该型半潜式装置具有较高的效率, 良好的环境适应性和工程便利性^[1,2]。2015年11月, 鹰式波浪能发电装置工程样机100 kW“万山号”装置在珠海万山海域开展试验, 截至2016年6月27日, “万山号”开展不同海况的实海况试验, 试验历经小浪、中浪、和大浪多种海况, 取得阶段性试验数据与成果。本文介绍“万山号”装置的工作原理、海试工况、试验结果, 并优化海试方案, 提出下一步海试工作要点, 为下一步海试取得更大成果提供指导。

1 工作原理

鹰式波浪能发电装置“万山号”的组成, 按功能不同可分为4个部分。第1部分为半潜式浮体结构, 是漂浮式波浪能装置的载体和减小装置随浪运动的阻尼体; 第2部分为波浪能俘获系统, 作用是

吸波浮体接受波浪能作用, 做往复运动, 将波浪能转换为往复机械能; 第3部分是能量转换系统, 作用是把往复机械能转换为液压能, 液压能经蓄积稳压后再转换为电能; 第4部分为锚泊系统, 作用是将装置与海底锚固在一起, 防止装置在风、浪、流的作用下大幅漂移而离开工作海域^[3]。

“万山号”的投放步骤为: 整体漂浮于水面的波浪能装置通过拖轮拖航至投放海域; 在拖轮的配合下, 在指定坐标点, 分别投下装置四角的四口锚, 并通过安装在装置顶部的锚机放出设定长度的锚链; 通过装置自带的抽排水系统向半潜式浮体舱式结构内注水, 使其逐步失去浮力, 装置下潜至设定水线, 装置达到工作姿态, 能量转换系可投入工作, 投放工作完成。“万山号”若需在海面检修, 可通过抽排水系统抽出半潜式浮体舱式结构内的水, 使装置浮力增大, 逐步整体浮出水面, 供人员和设备登装置开展检修工作; 若需要回港, 装置浮起后通过锚机收起锚链, 然后由拖轮拖航至港口即可。多次投放、检修和回收工作已证明“万山号”具有良好的环

收稿日期: 2016-11-04

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13040204); 海洋可再生能源专项资金(GHME2017SF01)

通信作者: 盛松伟(1972—), 男, 博士、研究员、硕士生导师, 主要从事波浪转换方面的研究。shengsw@ms.giec.ac.cn

境适应性和工程便利性。

“万山号”的能量转换过程为:在波浪的往复作用下,鹰式吸波浮体绕铰链往复旋转运动,推动安装在鹰式吸波浮体与半潜式浮体结构之间的液压缸往复运动,吸进低压油箱内的工质油液,打入高压蓄能器,将波浪能转换为液压能;液压能在能量库-蓄能器中蓄积稳压后,在液压自治控制器设定的开启压力和关闭压力之间释放高压液压油,驱动液压马达推动发电机发电,即将液压能转换为电能。能量转换过程概括地讲是波浪能首先转换为机械能,然后机械能转换为液压能,最后液压能转换为电能,能量转换过程见图 1。系统中蓄能器有蓄能稳压功能,系统前端输入功率高度不稳定的波浪能,系统后端可输出相对稳定的电能,该能量转换方案大幅提高了波浪能装置的发电品质^[4-8]。

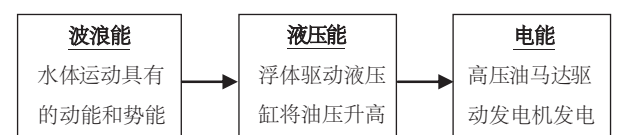


图1 能量转换框图
Fig. 1 Energy conversion block diagram

2 波浪能发电装置参数

2.1 发电装置主体参数

“万山号”(如图 2)长 36 m,宽 24 m,总高 16 m,工作吃水 12 m,配置 4 台 1500 r/min,30 kW 永磁交流发电机,设计最大平均输出功率 100 kW,自带压载系统和锚机,并配备视频监控系统和卫星通讯系统,实现岸基与海上的数据实时传输。“万山号”基本几何参数与设备配置情况表 1 所示。



图2 “万山号”停泊和工作状态
Fig. 2 WANSHAN wave energy converter at anchor and under working condition

2.2 锚泊系统设计

鹰式波浪能发电装置顶部四角各配备 1 台锚

表1 “万山号”基本参数表

Table 1 Main particulars of sharp eagle WANSHAN				
主体尺寸及系统配置				
总长/m	总宽/m	总高/m	停泊吃水/m	工作吃水/m
36	24	16	3	12
能量转换系统配置				
系统组件	数量	备注		
吸波浮体	4个	前后对称分布,2前2后		
液压缸	12条	设计行程 5.2 m,双出杆		
蓄能器	12台	活塞式,压力等级 31.5 MPa		
发电机	4台	永磁交流,1500 r/min,30 kW		
附属系统配置				
系统组件	数量	备注		
数据采集点	94个	采集能量转换各环节运行数据		
卫星通讯	1台	双向数据 1 MB 流量		
视频监控	15台	海事用摄像机		
蓄电池	110节	2 V 800 AH 胶体免维护蓄电池		
空调	2台	调节设备舱温度		
柴油发电	1台	80 kW,备用电源		
抽排水泵	2台	15 kW 电机驱动水泵		
锚机	4台	2台 30 kW 液压站驱动		
锚、锚链	4套	每套含 2.5 t 锚 1 个及锚链 250 m		

机,配置 4 条锚链,4 条锚链呈 90°夹角布置(如图 3 所示)。采用 R3 级锚链,链径 40 mm,破断力 148 t,躺底长 200 m,适应水深 15~100 m。

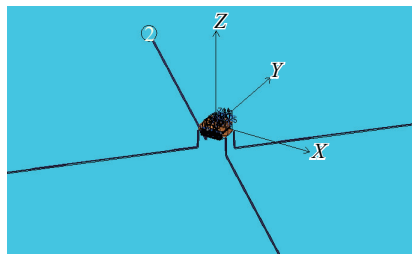


图3 锚泊布置方式
Fig. 3 Mooring system

根据万山海域历年海洋环境变化确定的锚泊系统水动力学计算工况如表 2 所示。结果显示,在 30 m 水深海域,四角分布式系泊系统可满足正常海况和大浪海况的系泊要求。“万山号”实海况试验期间经历 2016 年 5 月 27 日热带风暴,装置在风暴中稳定发电,姿态正常,锚泊稳固,监控及通讯系统准确清晰。

表2 锚泊系统计算工况

Table 2 Environment parameters of mooring calculation

参数	有义 波高 H_s/m	谱峰 周期 T_p/s	流速 $V/m \cdot s^{-1}$	风速
正常海况	2.5	5	0.65	8级
大浪海况	4	8	0.65	8级

3 实海况试验

3.1 海试条件

珠海市万山群岛是我国波浪能资源最丰富的海域之一。该海域受到东北、东、东南、南、西南各方向的浪,年均波浪能流密度约 4 kW/m ,波谱峰周期 $3.5 \sim 6.0 \text{ s}$ 。冬季受东北季风影响,波能流密度可达 $4 \sim 10 \text{ kW/m}$;夏季受西南季风影响,波能流密度约 $1 \sim 6 \text{ kW/m}$,但多风暴^[9,10]。

“万山号”海试点位于小万山附近海域,投放坐标 $21^\circ 56.284' \text{ N}$, $113^\circ 41.455' \text{ E}$,水深 20 m 。装置四角抛锚,允许漂移距离不超过 50 m ,整体旋转小于 120° 。装置投放点冬季吹北至东北风,受小万山和大万山山体遮蔽,风浪较小;夏季吹南至西南风,不受山体遮蔽,风浪较大。

3.2 海试试验结果

春季的万山岛海域处于冬季风逐步衰退和夏季风逐步生成的过程中,4月份和5月份风浪较小,期间有较长时间海面平静。从5月份下旬开始,西南风和南风明显增强,此时西南风浪和南向风浪可直接进入“万山号”试验点,装置完全处于无山体遮挡的状态^[11]。

经过从2015年年底开始的2个月前期试验调试后,“万山号”于2016年3月28日再次投放到小万山海域,开始新一轮海上试验工作。近3个月的海上发电数据曲线如图4、图5所示。截至2016年6月24日,装置累计发电 30530.57 kWh 。装置在第2阶段海试中的前2个月,因风浪较小,发电量较小,第3个月因夏季风浪兴起,该月发电量大增。2016年5月26日~6月18日,除去装置在海上浮起开展检查工作,无发电的2d外,装置在22d内发电 13458.13 kWh 。显示出较强的发电能力。其中,5月27日单日发电 1847.09 kWh (见图6)。3个月的发电数据显示,海洋可再生能源受季节影响

较大,能量资源随季节变化而变化,波浪能发电装置应加装其他可再生能源在其上,形成多能互补,可有效提高其实用性。

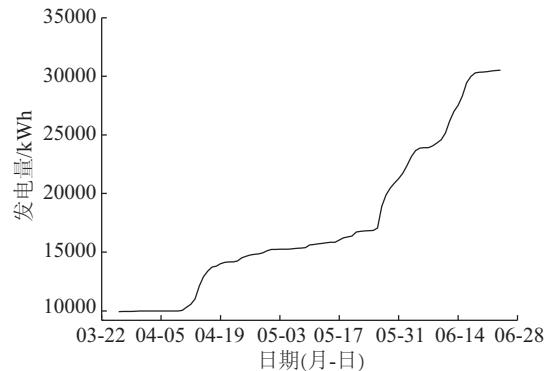


图4 春夏季累计发电量曲线(第2阶段)

Fig. 4 Accumulative generated output curve (stage II)

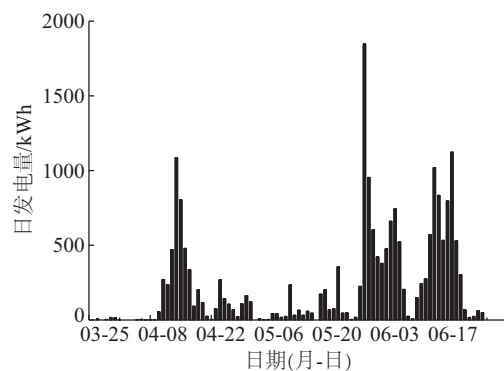


图5 春夏季日发电量柱状图(第2阶段)

Fig. 5 Daily generated output bar chart (stage II)

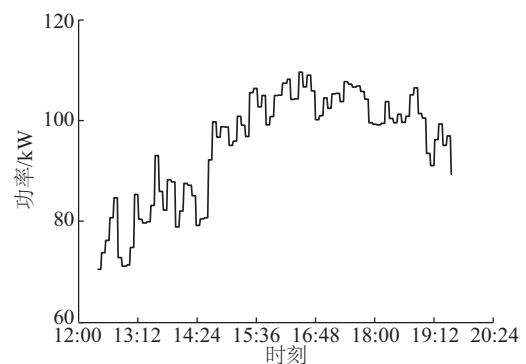


图6 2016年5月27日功率曲线

Fig. 6 Output power curve on May 27th, 2016

3.3 实海况条件下的能量转换效率

在装置来浪方向前端投放的波浪测量仪“浪龙”记录装置前方的来浪周期、波高、浪向,以小时为单位计算来波能量和装置发电量,并计算装置在

实海况条件下的转换效率。装置前端波浪能流密度,对于不规则波,可采用式(1)计算:

$$E_w \approx CH_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (1)$$

式中, C ——基于波谱形状的系数,取值 0.5; $H_{1/3}$ ——有效波高, m; $T_{1/3}$ ——有效波高对应的周期, s。

装置输出功率 E_o 即发电功率为发电能量与发电时间的比值,发电能量通过数据采集系统实时采集,采集频率为 1 Hz,单位为 kWh。装置的转换效率为:

$$\eta = \frac{E_o}{E_w b} \times 100\% \quad (2)$$

式中, b ——装置的迎波宽度,取值 24 m。

图 7、图 8 为 6 月 8~18 日装置在正常工作期间由波浪到电的转换效率。在共 10 d 的运行过程中,装置在周期 4~6.5 s,波高 0.6~1.8 m 浪况下,整机能量转换效率基本保持在 20% 以上,最高达到 37.7%。

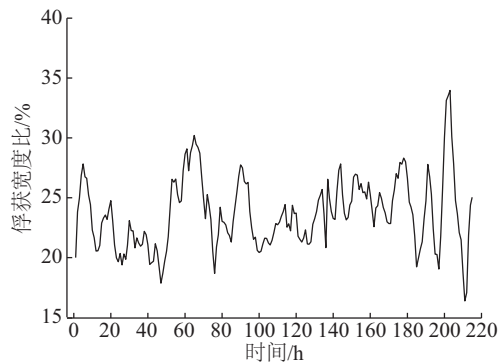


图 7 实海况条件下的转换效率

Fig. 7 Conversion efficiency under sea test conditions

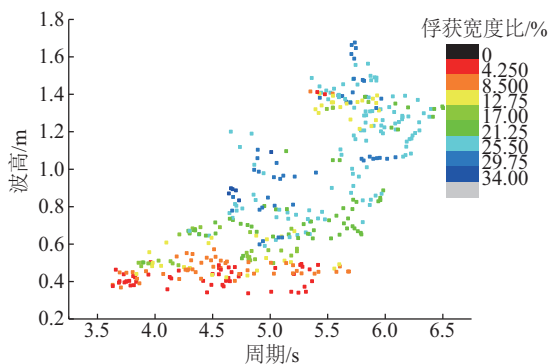


图 8 效率分布散点图

Fig. 8 Distribution of capture width

3.4 与模型试验数据对比

在开展“万山号”实型装置设计之前,研究人员

根据设计尺寸按照 1/13.78 比例制作模型,在二维及三维水池开展了大量模型试验。

模型与实型装置之间的比例关系为:

$$\frac{L_m}{L_d} = K = \frac{1}{13.78} \quad (3)$$

$$\frac{T_m}{T_d} = \sqrt{K} = 3.712 \quad (4)$$

式中, L_m 、 T_m ——与模型相关的几何尺寸、周期; L_d 、 T_d ——与设计样机相关的几何尺寸、周期。

按照比例确定试验参数如表 3 所示,对模型的水动力学性能和能量转换效率进行测试。

表 3 模型试验参数

Table 3 Parameters of model tests

波况 编号	周期/ s	波高/ mm	迎波 面	规则波/ 不规则波
1	1.4	168	正面	规则波
2	1.4	178	正面	规则波
3	1.4	168	正面	不规则波
4	1.4	178	正面	不规则波
5	1.4	178	侧面	规则波
6	1.4	225	侧面	规则波
7	1.6	136	侧面	规则波
8	1.6	209	侧面	规则波
9	2.3	149	侧面	不规则波

对比“万山号”实海况转换效率与其模型在水槽内测得的转换效率(图 9~图 11)^[12],可看出实海况装置的转换效率与模型试验在同等工况下的转换效率接近。模型与实型装置保持了较好的一致性,证明了由模型推算设计实型装置的可行性和准确性。



图 9 模型试验

Fig. 9 Model tests

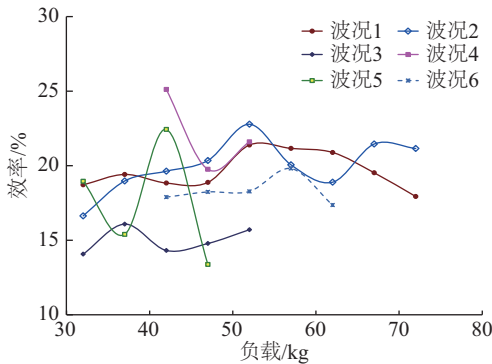
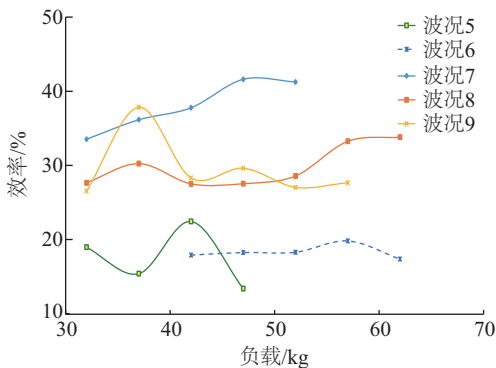
图10 模型在 $T=1.4$ s波的效率曲线Fig.10 Model efficiency when $T=1.4$ s

图11 模型在侧面来波的效率曲线

Fig.11 Model efficiency in wave from sideways

4 结 论

1)介绍鹰式波浪能装置“万山号”的工作原理、系统组成、海试结果。通过实海况试验证明“万山号”可实现在0.5 m微小波高下间歇发电,4 m高大浪工况下安全发电,装置可启动做功的波况范围宽,对波况的适应性好。

2)实海况试验证明,系统能够实现将高度不稳定的波浪能转换为相对稳定的电能,在设计波况下(周期4~6 s,波高1~2 m)系统总效率在可达20%以上,装置在实海况条件下整机转换效率高。

3)“万山号”在2016年5月27日的最大发电功率为128.32 kW,5 h平均功率达101.3 kW。上述发电功率已超出装置的最大设计功率100 kW,安全余量不够,后续应评估最大工作波况下的装置输出功率,扩大装置容量。

4)实海况显示,来波功率随季节变化大,且在季风更替季节,如春季,有较长时段处于波浪能资源偏弱的工况。为保障长期稳定的为用户输送电

力,合理配置储能环节,并增加太阳能等其他类型的能源供给,形成多能互补是必要的。

5)装置的锚泊设计方案合理可行,在大浪中能保证装置的安全稳定。但由于中国南海为台风多发地带,需要进行进一步的抗台风锚泊系统研究,增强装置的抗台风能力,提高装置的安全性。

6)对比模型试验数据和实海况装置试验数据,两者之间保持较好的一致性。因此,在实海况装置的设计前,积极开展模型试验,以模型试验为基础推进实型装置设计,可起到事半功倍的效果。

7)本文对目前我国最大的漂浮式波浪能装置“万山号”的实海况试验进行介绍,有助于提高波浪能装置的设计和试验水平,为进一步优化系统,开展下一阶段开阔海域的长期海试提供基础,为同类装置的设计和试验提供参考依据。

[参考文献]

- [1] 盛松伟,张亚群,王坤林,等. “鹰式一号”波浪能发电装置研究[J]. 船舶工程, 2015, 37(9): 104—108.
- [1] Sheng Songwei, Zhang Yaquin, Wang Kunlin, et al. Research on wave energy converter Sharp Eagle 1 [J]. Ship Engineering, 2015, 37(9): 104—108.
- [2] 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, 33(9): 1422—1426.
- [2] Sheng Songwei, Zhang Yaquin, Wang Kunlin, et al. Experiment research on the power generation system of the Sharp Eagle wave energy converter [J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(9): 1422—1426.
- [3] 盛松伟,张亚群,王坤林,等. 鹰式装置“万山号”总体设计概述[J]. 船舶工程, 2015, 37(Sup1): 10—14.
- [3] Sheng Songwei, Zhang Yaquin, Wang Kunlin, et al. The overall design of wave energy converter Wanshan [J]. Ship Engineering, 2015, 37(Sup1): 10—14.
- [4] 王坤林,田联房,王孝洪,等. 液压蓄能式波浪能装置发电系统的特性[J], 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 42(6): 25—30.
- [4] Wang Kunlin, Tian Lianfang, Wang Xiaohong, et al. Characteristics of power generation system with hydraulic energy-storage wave energy converter [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(6): 25—30.
- [5] 张亚群,于龙飞,盛松伟,等. 液压式波浪能装置能量转换系统研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(10):

- 2071—2076.
- [5] Zhang Yaqu, Yu Longfei, Sheng Songwei, et al. Research of power-take off system of hydraulic wave energy converter[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2014, 35(10): 2071—2076.
- [6] 姜家强, 游亚戈, 盛松伟, 等. 一种波浪能装置液压自治控制器的设计与试验[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(4): 594—598.
- [6] Jiang Jiaqiang, You Yage, Sheng Songwei, et al. Design and test on hydraulic autonomous controller for wave energy device[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2014, 35(4): 594—598.
- [7] 盛松伟, 游亚戈, 张亚群, 等. 漂浮式波浪能装置能量转换系统研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(24): 141—146.
- [7] Sheng Songwei, You Yage, Zhang Yaqu, et al. Research on power take-off system of floating wave power device[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(24): 141—146.
- [8] Zhang Yaqu, Sheng Songwei, You Yage, et al. Research on energy conversion system of floating wave energy converter[J]. *China Ocean Engineering*, 2014, 28(1): 105—113.
- [9] Wang Chonghao, Wai Winghong, Li Yoksheung, et al. Modeling of the wave-current interaction in the Pearl River estuary[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2006, 18(3): 159—165.
- [10] Jia Liangwen, Wen Yi, Pan Shunqi, et al. Wave-current interaction in a river and wave dominant estuary: A seasonal contrast[J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 52: 151—166.
- [11] Chen Y, Wai O W H, Li Y S, et al. Numerical model for wave refraction-diffraction near Pearl River estuary, China[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2003, 129(6): 260—269.
- [12] 张亚群, 盛松伟, 游亚戈, 等. 100 kW 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*, 2014, 33(4): 73—80.
- [12] Zhang Yaqu, Sheng Songwei, You Yage, et al. Experiment study on a 100 kW one-base multi-buoy floating “Sharp Eagle” wave energy converter[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2014, 33(4): 73—80.

OPEN SEA TESTS OF 100 kW WAVE ENERGY CONVERTOR SHARP EAGLE WANSHAN

Sheng Songwei^{1,2}, Wang Kunlin^{1,2}, Lin Hongjun^{1,2}, Zhang Yaqu^{1,2},
You Yage^{1,2}, Wang Zhenpeng¹⁻³

(1. *Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510460, China;*

2. *Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510460, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A one-based multi-buoy offshore floating wave energy converter was designed and named Sharp Eagle WANSHAN. The energy conversion system configures four sets of 30 kW permanent magnet generators driven by hydraulic motor, which starts to work under different wave conditions. Two sets of independent parallel hydraulic system were adopted, which can convert unstable wave energy into relatively stable electricity. Two stages open sea tests have been finished in the sea near Wanshan island during November 2015 to June 2016. After a wide range of operating conditions, including a tropical storm on May 27, amounts of tests data, experiences and lessons have been obtained and will be summed up and shown in the paper. In order to improve the reliability, conversion efficiency, environmental adaptability and economy. Follow-up tests will be carried out after system upgrading, expanding solar power and desalination system.

Keywords: wave energy convertor; power transmission; equipment testing; sharp Eagle WANSHAN