

## 基于鹰式装置实海况发电量的波浪能可利用性探究\*

王振鹏<sup>1,2,3,4</sup>, 游亚戈<sup>1,2,3</sup>, 盛松伟<sup>1,2,3†</sup>, 吝红军<sup>1,2,3</sup>, 陈爱菊<sup>1,2,3</sup>, 张超<sup>1,2,3,4</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重点实验室, 广州 510640;

3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 随着海洋资源开发的深入, 波浪能转换逐渐成为新能源工作的研究热点。本文对中国南海永暑礁附近海域的波浪能资源进行调查, 结合鹰式波浪能装置的发电效率, 对波浪能的发电量进行估算。同时以日均满负荷工作小时数为考核指标, 将波浪能与太阳能、风能的发电情况进行对比, 证实在偏远海域开发利用波浪能的可行性。同时验证了漂浮式多能互补发电平台能量供给的可行性, 为深海资源开发, 尤其是解决偏远海岛驻军、居民的用电困难提供新技术。

**关键词:** 波浪能; 发电效率; 鹰式装置; 年发电量; 满负荷小时数

中图分类号: TK79; TK01+9

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.02.007

## Feasibility Analysis of Wave Energy Resources in South China Sea Based on the Open Sea Generation of Sharp Eagle Wave Energy Converter

WANG Zhen-peng<sup>1,2,3,4</sup>, YOU Ya-ge<sup>1,2,3</sup>, SHENG Song-wei<sup>1,2,3</sup>, LIN Hong-jun<sup>1,2,3</sup>,  
CHEN Ai-ju<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Chao<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the development of large-scaled exploitation of ocean resources, there has been a growing interest in wave energy utilization. In this paper, wave energy resources in the South China Sea are surveyed. Depending on the operations efficiency of Sharp Eagle wave energy device, the yearly power generation is estimated. On an annual basis, daily work hours at full capacity of wave energy are compared with solar and wind energy, which are well recognized developing into a rather mature stage. Results show the substantially and stability of wave energy converters, which prove the feasibility of equipment with both wave and solar energy device to power island residents and offshore platforms.

**Key words:** wave energy; operation efficiency; sharp eagle; annual power generation; hours at full capacity

## 0 引言

地球 70% 以上的表面积被海洋覆盖, 随着资源危机、环境危机的日益严峻, 海洋宝藏的开发利用方兴未艾。而随着海洋开发的逐步深入, 解决远海能量供给困难的需求也日渐迫切, 就地取材、就地使用的海洋可再生能源开发势在必行, 能流密度大、分布范围广、持续时间长的波浪能得到了越来越多的关注。

受季风带影响, 西太平洋地区的波浪能资源相比于大西洋或者东太平洋等地区较为匮乏<sup>[1-2]</sup>, 这也导致同样尺寸的波能装置装机容量有所减小。除发电量外, 发电的稳定性和持续性也是检验新能源是否能够满足正常使用的重要考核指标。本文在前人对我国南海海域波浪能资源调查的基础上, 结合由中国科学院广州能源研究所研制且已经实海况运行的鹰式装置“万山号”发电效率, 估算出在南海海域波浪能装置可实现的发电量, 并与太阳能、风能

\* 收稿日期: 2017-01-10 修订日期: 2017-03-02

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13040201, XDA13040301); 国家自然科学基金青年基金项目(41406102); 广州市科技计划项目(210607010226)

† 通信作者: 盛松伟, E-mail: shengsw@ms.giec.ac.cn

相对比,对我国波浪能资源利用的可行性进行验证分析。

## 1 南海海域波浪能资源

前人对中国近海的海浪资源资料进行了大量分析,通过多年的实地观测和数值模拟,在时间分辨率、空间分辨率、时空范围等方面对海浪资源进行了调查。许富祥<sup>[3]</sup>、王婷婷<sup>[4]</sup>、李文波<sup>[5]</sup>等根据多年的观测资料对我国近海以及永暑礁海域进行了波浪资源分布的调查;周良明<sup>[6]</sup>、郑崇伟<sup>[7-8]</sup>等利用 WAVEWATCH- 对南海波况进行了数值模拟,对我国南海进行波浪能资源调查,分析了我国东海、南海以及西沙海域的波浪能能量密度在空间范围上的分布和在时间范围上的变化量。

### 1.1 波浪资源分布

以南海永暑礁附近海域为例对我国南海波浪能资源分布进行调研分析。该海域的波高主要集中在 0.5~2.5 m 之间,在 1988-2010 这 22 年中,波高为 0.5~1.25 m 的波浪发生时间约为 45.6%,波高为 1.25~2.5 m 的波浪发生时间约为 28.9%<sup>[4]</sup>。

波浪的形成受季风影响最为明显,以一年为一个周期呈规律性变化。在南海永暑礁附近海域内,冬季浪高明显较大,其中 1.25~2.5 m 波高的波浪发生时间达到 43.7%,而 0.5~1.25 m 和 2.5~4.0 m 波高的波浪发生时间分别为 22.7%和 26.2%。春季和夏季波浪明显变小,主要以 0.5~1.25 m 之间的波浪为主,发生时间约为 52%,波高为 0.1~0.5 m 和 2.5~4 m 之间的波浪发生时间分别为 18%和 24.5%。秋季波高又明显转大,1.25~2.5 m 之间的波浪发生时间约为 42.6%,0.1~0.5 m 和 2.5~4 m 的波浪发生时间分别为 24.2%和 23.9%<sup>[4,5]</sup>。

总体来看该海域一年中波高呈“U”字形变化,冬季、秋季相对波浪资源较好,波高达到 0.5 m 以上的波浪发生时间超过 94%,而春季和夏季波浪能资源则相对较弱,波高达到 0.5 m 以上的波浪发生时间只有 80%。4 m 以上浪高的极端海况主要集中在冬季,而在春、夏、秋三个季节很少出现<sup>[8]</sup>。

### 1.2 波浪能的稳定性

波浪能的开发利用不仅仅关注其能流密度的大小、分布范围的广泛与否,更要关注其能流密度的稳定性。能流密度的变化范围越小,波浪能就越稳定,就越有利于波浪能的采集和转换。通

过调研发现,波浪能的能流密度都具有两大非常明显的特点:涌浪能流密度的稳定性明显好于风浪。涌浪是风浪离开风吹的区域后所形成的波浪,其能流密度更加稳定,也更与线性波相近,利于捕获和转换。大洋深处的能流密度稳定性明显优于近岸。这主要是因为大洋的波浪中涌浪所占的比例更高。

从季节变化来看,秋、冬两季能流密度的稳定性相对较好,能量密度也相对较大,而春、夏两季能流密度的稳定性则相对较差,能量密度也比较低。

## 2 波浪能装置发电量评估

### 2.1 现阶段波浪能装置简介

现有波浪能装置的工作原理大致都是将波浪的动能和势能转化为机械能或电能等其他可以利用的形式。根据其能量转换原理主要分为振荡水柱式、越浪式和振荡浮子式。

振荡水柱式波能装置通过波浪引起的气室内水柱的往复运动来驱动空气透平,输出电能。该类型装置比较著名的有英国的 LIMPET 和澳大利亚的 Energetech。越浪式波能装置利用水道将波浪引入高位水库形成水位差(水头),驱动水轮机组发电,输出电能。已经成功运行的有挪威的 350 kW Tapchan 以及丹麦的 Wave Dragon。振荡浮子类装置则是利用浮子在波浪推动下产生相对运动来吸收波浪能,进而将其转换为电力等形式的能量。海蛇、摆式、鸭式以及鹰式波能装置都属于这一种。

### 2.2 鹰式波能装置发电效率

由我国自主研发的 100 kW 鹰式装置“万山号”长 36 m,宽 24 m,高 16 m,吃水深度 12 m,为一个半潜母船、四个波浪能吸波浮体以及液压系统、发电机等能量转换设备的结合体,其既可以像船舶一样停泊、拖航,也可以下潜至设定深度成为波浪能发电设备(图 1)。

2015 年 11 月 19 日,“万山号”投放至广东省珠海市小万山岛海域,装置下潜至设定深度后即刻发电。截至 2016 年 06 月,该装置完成两阶段实海况试验,实现累计发电 30530.57 kW·h,最大日发电量 1847.09 kW·h,录得最大发电功率为 128.32 kW。



图 1 “万山号”实海况试验  
Fig. 1 Working state of Sharp Eagle *Wanshan*

### 2.3 波浪能发电评估

基于推广应用、建造成本以及运行维护的便利性等多方面因素考虑，越来越多的研究人员将目光转向漂浮式振荡浮子式波能装置。

考虑到我国海域波浪能资源的特殊性，本文参考我国自主研发且已成功实海况运行的鹰式波浪能装置，对南海海域波浪能的发电量进行评估。“万山号”在实海况试验过程中，通过对入射波浪特征量以及液压发电机组发电数据的双向采集，测得装置从波浪能吸收到电能输出的能量转换效率。装置在 2016 年 6 月 11 日一天内的有义波高、谱峰周期以及装置的能量转换效率变化曲线如图 2 所示。经过对测量结果的分析 and 计算，“万山号”在实海况中电力输出功率与入射波功率的关系如图 3 所示，在各波况下能够达到的能量转换效率如表 1 所示。

试验测得鹰式装置“万山号”可在 0.5 m 微小波高下间歇发电，在 4 m 以下波况中安全发电，波高超过 4 m 时装置自保护机制启动。装置可启动做功的波况范围宽、适应性好。在周期 4~6.5 s、波高 0.6~2.5 m 的浪况下，装置整机从波浪能到电能的能量转换效率保持在 20%以上，最高达到 37.7%<sup>[9]</sup>。

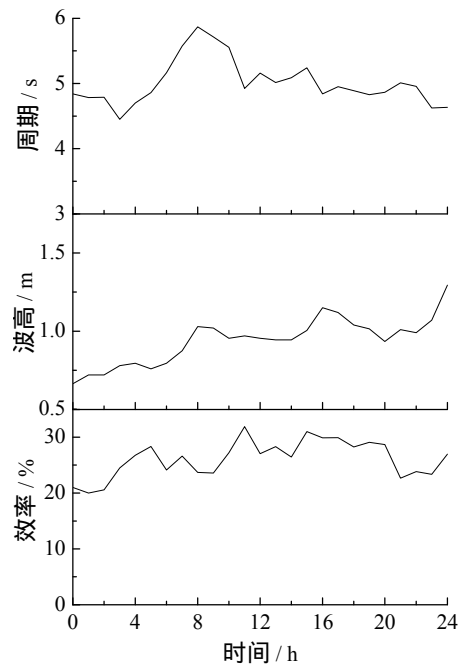


图 2 一天内的有义波高、谱峰周期及发电效率曲线  
Fig. 2 Significant wave height, mean period and generation efficiency in one day

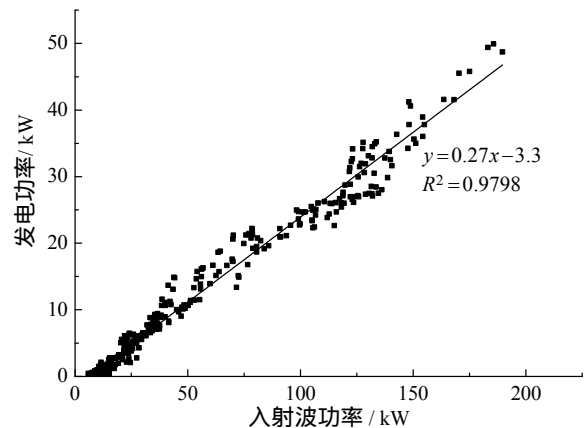


图 3 来波功率与输出功率  
Fig. 3 Wave power VS electric output power

表 1 鹰式装置“万山号”各波况下能量转换效率  
Table 1 Energy conversion efficiency of Sharp Eagle *Wanshan* in different wave conditions

| 波高 / m | 能量转换效率 / % |        |        |        |        |        |        |
|--------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | 3.5 s      | 4.0 s  | 4.5 s  | 5.0 s  | 5.5 s  | 6.0 s  | 6.5 s  |
| 0.4    | 4.565      | 6.450  | 4.607  | 5.678  | 5.230  | —      | —      |
| 0.6    | —          | 12.170 | 14.309 | 16.911 | 20.553 | 20.400 | —      |
| 0.8    | —          | —      | 25.563 | 23.491 | 21.375 | 21.685 | —      |
| 1.0    | —          | —      | —      | 27.221 | 23.365 | 25.945 | —      |
| 1.2    | —          | —      | 24.818 | 26.326 | 23.730 | 22.924 | 22.571 |
| 1.4    | —          | —      | —      | —      | 24.668 | 23.916 | 20.963 |
| 1.6    | —          | —      | —      | —      | 26.315 | 24.725 | —      |

根据统计结果分析，永暑礁附近海域的波浪能资源在时间上的分布规律以及波高和周期等参数如表 2 所示。当水足够深时 ( $h/\lambda \geq 0.5$ )，单位宽度入射波的功率计算公式为：

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (1)$$

其中  $h$  为水深， $\lambda$  为波长，单位均为 m；海水密度  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ； $g$  为重力加速度，取  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ； $H_s$  为有效波高，m； $T_e$  为波浪能量平均周期，s。

而根据该海域的波浪资源，鹰式装置实海况条件下能够达到的年度发电量如表 2 所示。针对该岛屿附近海域的波浪能资源，装机容量 100 kW 的鹰式波浪能装置可实现的年发电量能够达到 33 万 kW 以上，再将其与一定的储能技术和设备相结合，完全满足中小型岛屿或者海洋平台的正常生活使用。

“万山号”实海况试验所处的波况受山体遮蔽的影响，在远离大陆的深海处涌浪资源更加丰富，波浪更加趋于线性化，有利于能量的捕获，能量转换效率也会得到相应的提升，发电量会进一步增加。

表 2 波浪能发电量分析

Table 2 Electricity generation of wave energy

| 波高 $H/\text{m}$ | 周期 $T/\text{s}$ | 装置效率 $\eta/\%$ | 输出功率 $P/\text{kW}$ | 全年发生小时数 / h | 年发电量 / kW·h |
|-----------------|-----------------|----------------|--------------------|-------------|-------------|
| <0.4            | —               | 0              | 0.0                | 1856.9      | 0.0         |
| 0.5             | 4.0             | 12             | 1.4                | 1524.6      | 2150.8      |
| 1.0             | 5.0             | 27             | 15.9               | 1524.6      | 24196.8     |
| 1.5             | 5.5             | 24             | 34.9               | 982.8       | 34316.2     |
| 2.0             | 6.0             | 24             | 67.7               | 982.8       | 66552.6     |
| 2.5             | 6.4             | 24             | 112.9              | 982.8       | 110921.1    |
| 3.0             | 6.9             | 24             | 120.0              | 412.7       | 49525.2     |
| 3.5             | 7.5             | 24             | 120.0              | 412.7       | 49525.2     |
| 4.0             | $\geq 8.0$      | 0              | 0.0                | 80.2        | 0.0         |
| 合计              |                 |                |                    | 8760.0      | 337188.0    |

### 3 太阳能、风能与波浪能对比

能量来源的不稳定性是现阶段可再生能源发展的最大瓶颈。在能量高峰期，可再生能源发电站所吸收并转化的能量远远大于电网的消耗量，而在波谷期发电量却远不能满足用户的使用量。为了能够最大程度地吸收能量以提高发电量，现有的新能源发电站的装机容量都是按照波峰的发电功率进行设计。电站的总发电量与装机容量相关，但是并不能真实地反映出该类型能源的稳定性，且大幅度提高装机容量会相应地增加建造成本。在这种情况下，日均满负荷工作小时数成为了可再生能源发电是否稳定、持续的重要指标。考虑到季节对可再生能源的影响，同样选择一年为一个统计周期。

太阳能、风能是现阶段公认的发展比较成熟的可再生能源，大量的光伏电板、风机被用来建

造分布式能源电站。文中根据已经实海况运行的 100 kW 鹰式装置“万山号”的能量转换效率及指定海域波浪能量密度对其年发电量进行评估，并将其发电量、日均满负荷发电小时数与已经成功运行的台山富华光伏电站<sup>[10]</sup>、格兰仕中山厂区光伏电站<sup>[11]</sup>、东澳岛风电站<sup>[12]</sup>、华能文昌风电站<sup>[13]</sup>等已经成功运行的太阳能、风能发电站进行对比，验证了利用波浪能为海岛以及海洋仪器供电的可行性。各光伏电站、风电站以及 100 kW 鹰式波浪能装置“万山号”在指定海域可实现的发电数据如表 3 所示。

对比发现，华南地区光伏电站的日均满负荷工作小时数基本在 3 h 左右，风力发电站也维持在 5.5 ~ 6 h 之间，而鹰式装置在南海海域日均满负荷发电小时数可以达到 9 h 以上。

表 3 日均满负荷工作小时数对比

Table 3 Comparison of daily work hours at full capacity

| 编号 | 项目名称        | 装机容量 / kW          | 年发电量 / kW·h        | 年发电小时数 / h | 日均满负荷工作小时数 / h |
|----|-------------|--------------------|--------------------|------------|----------------|
| 1  | 台山富华光伏发电    | $2.96 \times 10^4$ | $2.50 \times 10^7$ | 844        | 2.31           |
| 2  | 格兰仕中山厂区光伏发电 | $6.00 \times 10^4$ | $6.00 \times 10^7$ | 1000       | 2.74           |
| 3  | 科达洁能        | 4500               | $4.70 \times 10^6$ | 1050       | 2.88           |
| 4  | 威奇电工        | 1300               | $1.30 \times 10^6$ | 1050       | 2.88           |
| 5  | 东澳岛海上风电项目   | 750                | $1.50 \times 10^6$ | 2000       | 5.48           |
| 6  | 华能文昌风电站     | $4.95 \times 10^4$ | $1.03 \times 10^8$ | 2087       | 5.72           |
| 7  | 鹰式装置“万山号”   | 100                | $3.37 \times 10^5$ | 3371       | 9.23           |

## 4 结 论

根据南海海域的波浪能资源和鹰式装置的能量转换效率测算出 100 kW 的鹰式装置在南海能够实现的年发电量达到 33 万 kW·h, 能够满足中小型岛屿正常的生活需要。通过将波浪能装置发电数据与现阶段发展相对成熟的太阳能、风能相比较, 波浪能发电的日均满负荷工作小时数优势明显, 其在电能供应方面的可行性、稳定性和持续性得到验证。

光伏电板的铺设需要占用岛礁宝贵的陆地资源, 而漂浮式波浪能发电平台能为太阳能电板提供搭载场地, 不但不占用陆地资源, 更能扩展海岛的使用面积。搭载太阳能、波浪能的多能互补发电平台实现资源利用最大化, 为增加平台发电量, 保证能量的稳定输出, 提高装置利用效率, 降低发电成本提供一条新的思路。

### 参考文献:

- [1] YOUNG I R, ZIEGER S, BABANIN A V. Global trends in wind speed and wave height[J]. Science, 2011, 332(6028): 451-455. DOI: 10.1126/science.1197219.
- [2] STERL A, CAIRES S. Climatology variability and extrema of ocean waves: The Web-based KNMI/ERA-40 wave atlas[J]. International journal of climatology, 2005, 25(7): 963-977. DOI: 10.1002/joc.1175.
- [3] 许富祥. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布[J]. 海洋学报, 1996, 18(2): 26-31.
- [4] 王婷婷, 梁广建, 周兆黎, 等. 永暑海区波浪要素变化特征分析[J]. 海洋通报, 2012, 31(3): 278-282. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6392.2012.03.006.
- [5] 李文波, 赵军. 南沙海区波浪的季节变化特征[J]. 广东气象, 2010, 32(2): 24-26. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6190.2010.02.009.
- [6] 周良明, 吴伦宇, 郭佩芳, 等. 应用 WAVEWATCH-

III 模式对南海的波浪场进行数值计算、统计分析和研究[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(5): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5470.2007.05.001.

- [7] ZHENG C W, ZHUANG H, LI X, et al. Wind energy and wave energy resources assessment in the East China Sea and South China Sea[J]. Science China technological sciences, 2012, 55(1): 163-173. DOI: 10.1007/s11431-011-4646-z.
- [8] 郑崇伟, 林刚, 邵龙潭. 1988-2010 年中国海大浪频率及其长期变化趋势[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2013, 52(3): 395-399. DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.2013.03.020.
- [9] 张建列. 我国波浪能发电技术获国际认可[N/OL]. 广东科技报, 2017-02-17(4).  
[http://epaper.gdkjb.com/html/2017-02/17/content\\_4\\_3.htm](http://epaper.gdkjb.com/html/2017-02/17/content_4_3.htm).
- [10] 黄中元, 芬妮. 光伏发电项目运行半年效果良好[EB/OL]. (2015-07-13) 台山政府网.  
<http://www.taishan.gov.cn/business/htmlfiles/kpgov2/wy/yw/201507/223909.html>.
- [11] 欧阳少伟. 格兰仕建全球最大单厂分布式光伏项目[N/OL]. 南方都市报, 2014-09-17(LA07).  
[http://finance.ifeng.com/a/20140917/13120220\\_0.shtml](http://finance.ifeng.com/a/20140917/13120220_0.shtml).
- [12] 走进国内首个兆瓦级岛屿微电网项目[EB/OL]. (2015-08-11) 中国煤炭资源网.  
[http://www.sxsm.com.cn/nengyuan/zxzx/201508/t20150811\\_145291.html](http://www.sxsm.com.cn/nengyuan/zxzx/201508/t20150811_145291.html).
- [13] 张中宝. 华能文昌风电厂并网发电[N]. 海南日报, 2008-12-23.

### 作者简介:

王振鹏 (1990-), 男, 博士研究生, 主要从事波浪能利用方面的研究。

游亚戈 (1956-), 男, 硕士, 研究员, 博士生导师, 主要从事波浪能利用方面的研究。

盛松伟 (1972-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事波浪能利用方面的研究。