

潮流对楔形波浪发电平台发电效果的海试分析

郑松根^{1,2}, 何宏舟^{1,2}, 杨绍辉^{1,2}

(1. 福建省清洁燃烧与能源高效利用工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;

2. 福建省能源清洁利用与开发重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 以单点系泊漂浮式楔形波浪发电平台为研究对象, 根据平台运行海域的风、浪、流实测数据, 结合平台实际发电功率数据, 从潮流对波浪的影响以及潮流对平台工作位置的推移响应两个方面出发, 分析潮流对平台发电效果的影响规律和原因。结果认为, 潮流通过影响波浪从而导致发电功率变化的可能性小, 潮流主要通过改变平台工作位置, 导致浮子采能效果改变, 进而影响平台整体发电效果。

[关键词] 单点系泊; 楔形波浪发电平台; 潮流; 海试

[中图分类号] P 743.2

Analysis of the Influence of Tidal Current on Wedge-shaped Wave Power Platform in Sea Trial

ZHENG Songgen^{1,2}, HE Hongzhou^{1,2}, YANG Shaohui^{1,2}

(1. Cleaning Combustion and Energy Utilization Research Center of Fujian Province, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory for Energy Cleaning Utilization and Development, Xiamen 361021, China)

Abstract: This paper studies the effect and the reason of the tidal current on the single mooring wedged-shaped wave power platform. According to the measured data of wind, wave, tidal current and actual wave generation power in the sea trial, the effect of tidal current on wave and the moving rules of platform were analyzed. As a result, it shows that the tidal current is unlikely to transform the generation power by influencing wave. Mainly, it impacted on the overall power generation effect of the platform by changing the working position of the platform which brings about the change of the energy recovery effect of the float.

Keywords: single point mooring; wedge-shaped wave power platform; tidal current; sea trial

0 引言

波浪能是一种取之不尽的清洁可再生的海洋能源, 据估计全世界波浪能储量高达 2.5×10^9 kW, 其开发应用对于缓解能源和环境问题, 改善民生和社会经济, 巩固国防建设等众多方面均具有重大意义^[1-6]。

利用海洋波浪能发电, 在边远海域建立海洋能供电系统, 能够有效解决海岛和过往船舶的用电难问题, 开发价值十分显著。波浪发电装置的形式主要有振荡水柱式、聚波水库式、摆板式、振荡浮子

[收稿日期] 2017-05-02

[修回日期] 2017-05-23

[基金项目] 国家海洋局海洋可再生能源专项(XMME2011BL02); 福建海洋高新产业发展专项, 闽海洋高新[2014]16号

[作者简介] 郑松根(1985—), 男, 助理实验师, 从事波浪能开发利用研究。通信作者: 何宏舟(1967—), 男, 教授, 博士, 从事清洁能源开发与利用研究, E-mail: hhe99@jmu.edu.cn。

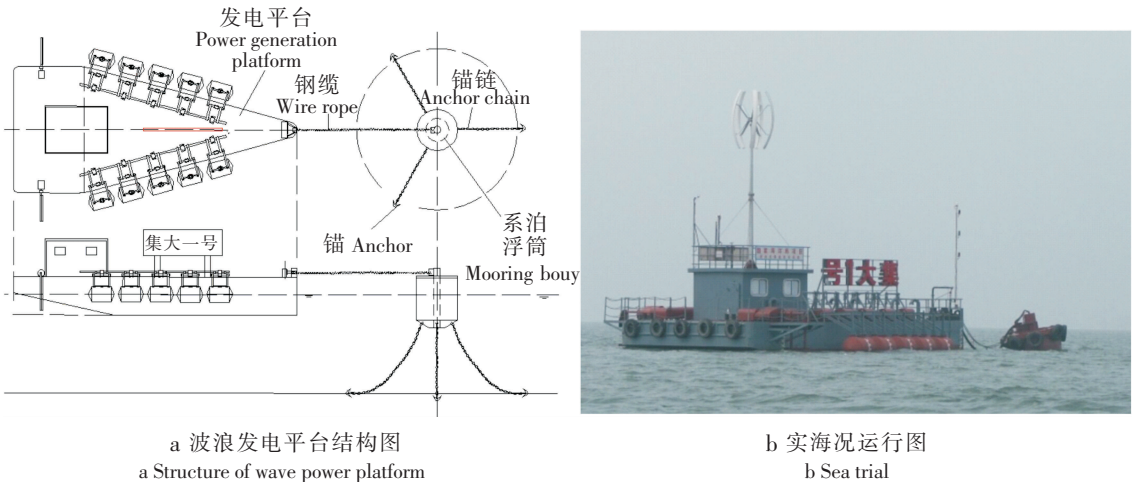
式等^[7-9]。浮子式波浪发电装置结构简单, 转换效率高, 具有较好的应用前景, 近年来一直是波浪能发电装置研究的热点^[10-12]。为进一步调高振荡浮子装置的发电效率, 国内外研究机构仍在不断开发和改进振荡浮子装置的结构型式和布置方法, 针对浮子式采能特点开发的楔形波浪发电平台为振荡浮子式波能装置提供了良好的运行载体, 而平台采用悬链线单点浮筒系泊也为进一步提高波浪能利用率提供了可能^[13]。

单点系泊的楔形波浪发电平台受到海风、海浪和潮流三者的联合作用, 在潮流变化较大的情况下, 平台相对浮筒的位置及迎浪方向经常发生变化^[13-14], 导致波浪能捕获效果变化幅度大, 发电效率不稳定。根据实海况测试观察, 海浪多为风致波, 海风和海浪的方向一般一致; 而潮流由于受到涨潮和落潮的影响, 流动方向每天都会有2次改变, 在涨落潮的过程中, 潮流的流速也在不断变化, 导致潮流与风浪的方向夹角经常发生变化。一方面, 潮流的变化可能会引起波浪的变化, 从而引起平台发电效果的变化; 另一方面, 潮流流向和流速的经常性变化, 会与海洋季风和风致波呈现不同的受力组合, 使得楔形平台相对波浪的位置不断发生变化, 这种变化可能引起平台两侧浮子采能装置的有效采能面积和采能效果发生变化。

本文根据单点系泊楔形漂浮式波浪发电平台的实海况测试数据和现场观察记录, 分析潮流与波浪、海风的相互作用, 研究潮流对波浪以及楔形平台的实际影响, 探究潮流对单点系泊楔形漂浮式波浪发电平台发电效果的影响机理, 找出发电装置功率变化的规律和原因, 可为日后波浪发电平台及其系泊系统的设计和选址安装提供一定的实践参考。

1 单点系泊楔形漂浮式波浪发电平台

楔形漂浮式波浪发电平台结构如图1a所示, 为艏部呈尖角形(楔角 30°), 尾部逐渐变宽的三角形形状平台。平台上安装有两组浮子式波浪能发电装置, 对称布置于平台两侧。每组装置由5套浮子采能设备、1个飞轮、1个增速齿轮箱和1台永磁发电机组成, 每套浮子采能设备又包括一个振荡浮子、一个浮子支架和一个双向棘齿组驱动机构, 如图2所示。该波浪发电装置的原理是利用波浪推动浮子上下振荡获得波浪的机械能, 浮子的机械振荡通过支架和齿轮组传递至发电主轴, 带动发电机主轴旋转, 5套浮子采集的机械能汇聚到一根发电机主轴, 主轴再通过飞轮和增速箱驱动发电机转子转动, 转化为发电机的电能。



a 波浪发电平台结构图
a Structure of wave power platform

b 实海况运行图
b Sea trial

图1 楔形漂浮式波浪发电平台及其系泊系统

Fig.1 Wedge-shaped wave power platform and mooring system

如图1a所示, 该平台的系泊型式采用悬链线单点浮筒系泊^[13,15], 即: 平台—连接缆—浮筒—锚链—锚定装置。发电平台通过钢缆与浮筒连接, 浮筒则由三根锚链定位于试验海域, 锚链采用三点对

称辐射式布置，锚链间静态水平夹角为 120° ，末端用锚定装置固定于海底，该系统适用于浅海系泊。

在单点系泊系统作用下，随着风、浪、流载荷的大小和方向变化平台围绕浮筒自动调整位置^[13,16]，在海流较小的情况下，平台艏向能调整至波浪载荷最大的位置，获得较佳的迎浪方向。而发电平台采用楔形结构，能够引导波浪能沿着平台的两侧舷均匀地传播，让平台两侧采能机构实现同时均衡且最大面积的捕获能量，提高波浪能量收集和发电效率。

采用单点系泊和楔形船体结构的优势还在于，平台位置调整使得平台横向不需长时间抵抗波浪，提高了平台横向稳定性，同时浮子沿平台两侧布置能有效抑制横摇运动，从而提高平台的横稳性。若采用多点系泊，一方面施工安装变得复杂，费用增加；另一方面多点系泊使得平台位置相对固定，无法旋转，则无论波浪从何方向入射，都会存在入射波死角，只有迎波面可以采能，背波面的装置无法工作，则无论何时都至少有一半装置处于不工作状态，造成设备和能量的双浪费。若采用其他形式平台，则浮子和采能机构布置变得复杂，而且平台不能有效导分波浪，加剧波浪反射和干涉，削弱入射波能量，对于平台整体稳性的提高也不利。

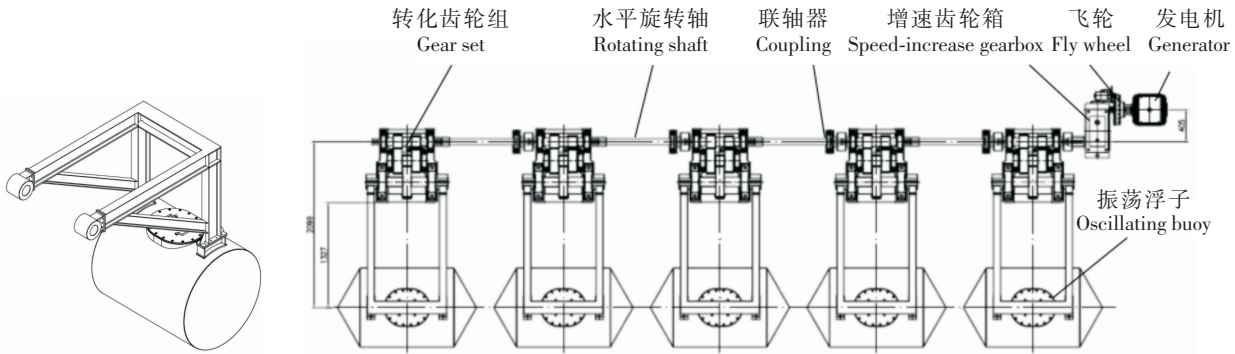


图 2 波浪发电装置原理图
Fig.2 Schematic diagram of wave power generation equipment

2 潮流对单点系泊楔形波浪发电平台的发电影响

2014 年，该平台在厦门市小嶝岛海域进行了为期半年的实海况试验（如图 1b），试验期间测得了许多发电数据，以及海风、海浪、潮流等海况数据，并观测记录了海试期间的平台位置的变化状态。

本测试地点位于东南沿海，属于典型亚热带海洋性季风气候带，4 月至 9 月主要为东南季风，11 月至次年 3 月主要为东北季风，浪随风增，该区域海浪方向也大致与季风方向一致；由于测试地点靠近海岸，在涨潮和落潮时段会产生较大的向岸和离岸潮流，潮流方向与风浪方向夹角随着潮水的涨落每天至少变换 2 次。测试地点的风、浪、流变化关系具有一定区域代表性，与东南沿海近岸非流道海域的风浪流特征基本相同，因此本次试验可以为东南沿海区域的波浪能开发提供一定的借鉴和参考。

2.1 潮流对波浪的影响分析

为研究潮流对单点系泊楔形波浪发电平台的发电效果的影响，首先对试验海域（厦门市小嶝岛）的海况进行调查，主要包括测量海风、海浪、海流等海况要素。下面以 2014-07-11 8:30—18:30 小嶝岛海域实测为例进行分析。

风速变化曲线如图 3 所示，采样频率为 10 s。由图 3 可知，当日海试地点风速最小为 0.5 m/s，最大时约为 13.5 m/s，变化情况较为剧烈，风速较大的时间段出现在下午 14:00—18:00，全天风向变化范围在南偏东 30° 至 60° 之间。

当日实测波高变化曲线为如图 4 所示，采样频率为 30 min。由图 4 可知，波高在同一日内变化也比较明显，当日波高最小为 0.1 m，最高达 1.6 m，波高较大的时间段出现在下午 14:30—18:00。

图 5 所示为海试平台垂直下方 2 m 处，当日海流流速的变化情况，采样频率为 30 min。由图 5 可

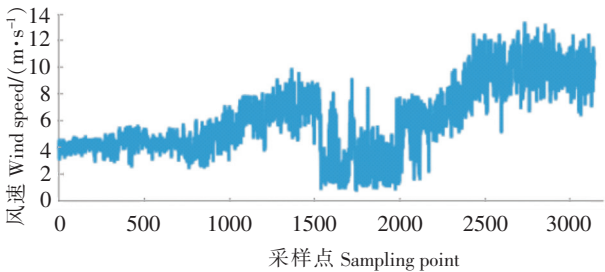


图3 8:30—18:30 海洋风速曲线

Fig.3 8:30—18:30 ocean wind speed curve

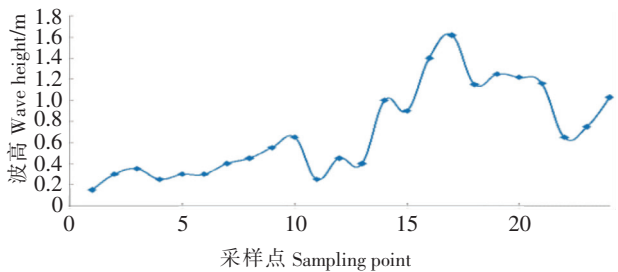


图4 8:30—18:30 海浪波高曲线

Fig.4 8:30—18:30 wave height curve

知,海试地点海流流速较小,当日变化区间为 0.05 ~ 0.38 m/s,比较平缓,适合于波浪能海试平台的运行。

当日潮位变化曲线如图 6 所示,采样频率为 30 min。由图 6 可知当日白天最高潮位 561cm,最低潮位 41cm,潮差 520 cm。

根据图 5、图 6 可知:8:30—10:30 为涨潮期,10:00—11:00 潮水维持在高潮位,在高潮前 2 h 至高潮期结束,潮流速度较为缓慢,约为 0.05 ~ 0.1m/s,潮水自东南向西北方向流动为向岸流。10:30—16:30 为退潮期,16:00—17:00 潮水维持在低潮位,11:00—14:30 潮位降低较快,潮流流速约 0.3 ~ 0.4 m/s,在低潮前 2 h 至低潮期结束,潮流速度亦较为缓慢,约为 0.08 ~ 0.12 m/s,潮水自西北向东南方向流动为离岸流。

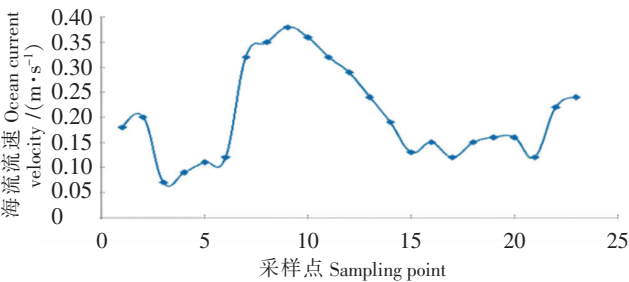


图5 8:30—18:30 海洋潮流流速曲线

Fig.5 8:30—18:30 tidal current velocity curve

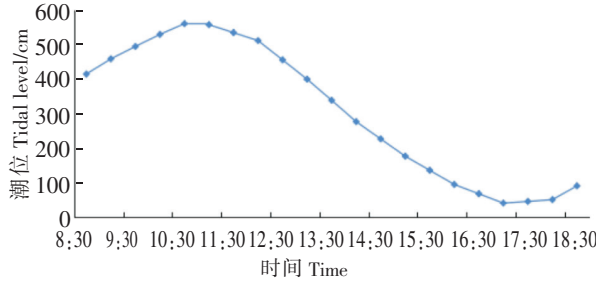


图6 8:30—18:30 海洋潮位变化曲线

Fig.6 8:30—18:30 tide level variation curve

通过实地观察,对比图 3 ~ 图 6 可见:

- 1) 波高和风速的变化趋势基本同步,风速与波浪是正相关关系,浪随风增,风速越大,在风激励下波浪的波高越大,波浪本身所具有的能量就越大,并且波浪的方向与风向基本一致。
- 2) 波浪大小与潮流流速、流向、潮位高低之间没有明显的相关关系。
- 3) 潮流流速、流向基本不随海面风速变化。
- 4) 潮流流速、流向与潮位有较大关系,在低潮和高潮时段,潮位变化较小,潮水流动缓慢,在涨潮和退潮过程中潮位变化较大的时段,潮水流动速度较快,且相应表现为向岸流或离岸流。

由以上实测数据分析可知,潮流对波浪的影响较小,基本没有相关性,波浪的大小主要受风速影响,风速越大波高越大。

2.2 潮流对波浪发电平台的发电情况影响

1) 当潮流与波浪、风方向一致时,楔形平台会调整至如图 7a 所示的位置,此时平台艏向与风浪流方向相反,平台正面迎浪且波浪沿着平台两侧辐射,平台获得最佳迎浪方向,两侧振荡浮子都能均匀采能,此时若波浪振幅较大,很容易捕获波浪能,发电效果最佳。

2) 当潮流与风、浪方向不一致时,会出现如图 7b ~ 图 7d 所示的三种情况。

当风浪与流的强度相当,或者风浪与流强弱转化使得平台正在发生偏转时,平台将处于图 7b 所示的左侧平衡位置,此时,平台左侧迎浪,右侧几乎采集不到波浪,平台两侧波浪发电装置的发电效

果将会有较大差别，左侧的发电功率将明显好于右侧发电功率。平台若向右侧偏转，如图 7e 所示，则情况刚好与图 7b 相反，右侧发电效果好于左侧。

当流的强度大于风浪的强度时，平台所处的位置如图 7c 所示。该情况发生时采能效果最差，由于受到楔形平台尾部遮蔽效应，发电平台两侧浮子基本都无法与来浪直接接触，波浪能量大部分被平台吸收或反射，最终导致两侧发电功率都很低。

当风浪的强度大于流的强度时，平台最终所处的位置如图 7d 所示。由于潮流受到平台尾部遮挡，基本不对采能装置造成影响，风浪正面迎向平台艏部，此时平台的发电状况与图 7a 类似，平台两侧浮子能够均衡采能，发电效果和稳定性均较高。

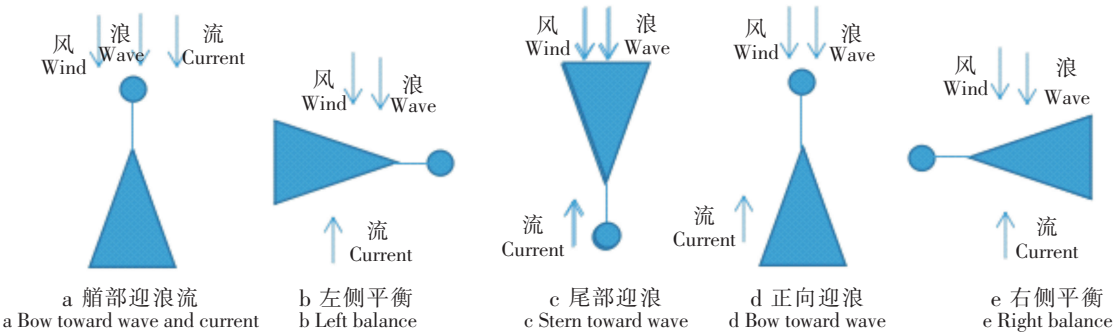


图 7 平台在潮流影响下的运动情况

Fig.7 Movement of platform under the influence of tidal currents

2.3 潮流作用下波浪发电平台的实海况测试结果分析

图 8 是平台两侧发电机在 2014-07-11 8:30—18:30 期间的功率输出曲线，数据点为每半小时的平均输出值。图 8 中发电机 1 功率变化曲线为平台左侧发电机输出，发电机 2 功率变化曲线为平台右侧发电机输出。由图 8 可知，平台两侧的发电机功率输出基本保持一致且大小相差不大。与图 4 对比发现，平台的输出功率与当日波浪波高变化趋势一致，即波高越大时，发电机的输出功率越高，发电功率输出较好的时段出现在下午 15:30—17:30。

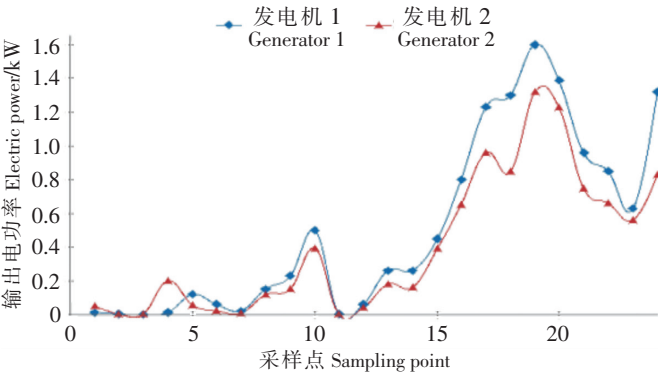


图 8 7 月 11 日 8:30—18:30 功率变化曲线

Fig.8 Power change curve of 8:30–18:30 on July 11th

根据 2.1 节分析，在 8:30—11:30 时段，潮流方向与风浪方向基本一致，波浪发电装置的实测位置接近于图 7a 所示状态，由于潮流流速和风浪均较小，发电功率一直维持较低水平。随着风浪在 12:00 左右短暂增强，波浪能发电功率出现了明显的小波峰。12:30—14:30 时段，风浪减弱，同时流速大幅加快，流向与风浪方向相反，平台逐渐调整至接近图 7c 所示的位置，平台后部对振荡浮子形成遮挡，发电功率直线下降至接近零位，发电效果极不理想。14:30 以后，潮流减弱，同时风浪逐渐加强，流向依然与风向相反，平台逐渐调整至接近图 7d 所示的位置，漂浮平台基本对准了来浪方向，平台两侧浮子重新采集到波浪能量，输出功率出现大幅增长，发电效果良好。

为进一步验证 2.2 节所述的分析结果，本文选取 2014-06-11 与 2014-06-12 的实测发电功率曲线和现场观察情况进行进一步分析。

图 9 为 6 月 11 日 16:30—18:30 的发电功率曲线，每一个采样点为发电机 2 min 平均功率。图 9 中曲线 1 为平台左侧发电机输出，曲线 2 为平台右侧发电机输出。由图 9 可知，当天该时段右侧发电

机比左侧发电机功率大很多, 右侧发电机的发电效率明显好于左侧发电机效率。根据现场观测数据, 当天海水主要退潮时间约为 11:30—17:30, 在 16:30—17:30 时段的潮流为西北往东南方向离岸流, 风浪方向为东南往西北方向, 流与浪的方向相反, 现场观测发电平台在风浪流合力作用下处于图 7e 的位置, 即平台右侧迎浪, 左侧迎流。按 2.2 分析, 该时段平台应是右侧发电功率要好于左侧, 与实测数据 (图 9) 相符。17:30—18:30, 海面逐渐接近低潮位, 潮流减弱, 在风浪作用下, 平台逐渐调整为艏向迎浪, 平台两侧采能效率渐趋平衡, 于是两侧发电机功率变化曲线逐步接近, 与实测结果 (图 9) 相符。

图 10 所示为 6 月 12 日 8:30—15:00 的发电功率曲线。由图 10 可见, 发电功率曲线的前半段, 左右两台发电机的发电功率相当, 后半段曲线右侧发电功率明显高于左侧。6 月 12 日的涨潮时段约为 6:00—12:00, 退潮时段约为 12:00—18:00, 当日风浪方向为夏季东南季风, 涨潮潮流流向与风浪同向, 退潮时段潮流流向与风浪反向。据当日观察, 8:30—11:30 左右, 发电平台由于受到同向浪流合力作用处于图 7a 所示位置, 按 2.2 分析, 左右侧发电功率应基本相同, 与实测结果 (图 10) 相符; 后半段曲线时段随着潮流方向改变, 平台逐渐调整为图 7e 所示的对称方向状态, 按 2.2 分析, 右侧发电功率应大于左侧发电功率, 与实测结果 (图 10) 相符。

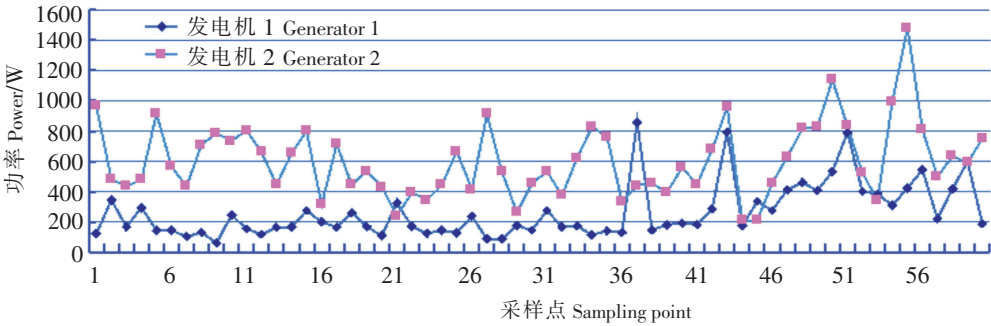


图 9 6 月 11 日发电功率曲线
Fig.9 Power generation curve on June 11th

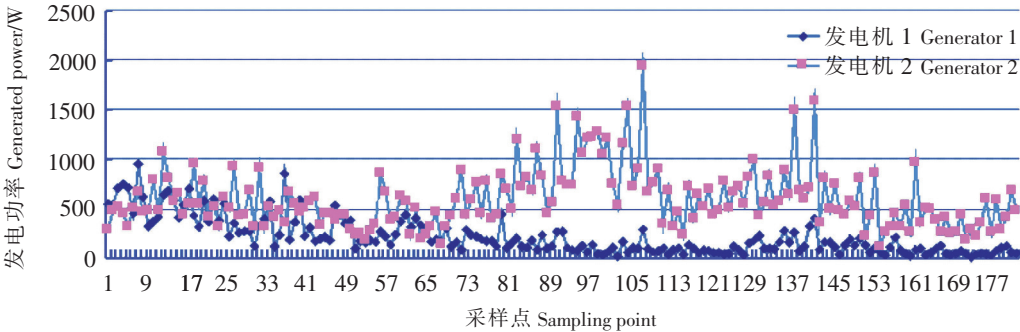


图 10 6 月 12 日发电功率曲线
Fig.10 Power generation curve on June 12th

3 结论

根据 2.1 节实海况测试数据分析, 海洋波浪基本为风致波, 风速的大小和方向是影响波浪波高和辐射方向的主要因素, 潮流的流速和流向对波浪本身的生成和减弱没有大的影响, 因此, 潮流通过影响波浪从而导致楔形波浪发电平台的输出功率发生变化的可能性很低。

但是, 在潮流作用下, 随着潮流力的大小或方向发生变化, 单点系泊的楔形波浪发电平台会逐渐围绕系泊点产生偏移, 当海风与波浪较弱时, 这种潮流力会克服波浪力和海风力推动平台发生 0° ~ 180° 的偏转。当楔形平台偏转至艏向与波浪辐射方向相对 (即平台正面迎浪) 时, 发电平台两侧的

波浪采能装置便能同时工作, 两侧发电机输出功率十分接近, 发电效果最好。当楔形平台偏转至纵向与波浪辐射方向垂直 (即平台一侧对另一侧造成明显遮挡) 位置时, 发电平台两侧的波浪采能装置便无法同时工作, 两侧发电机输出功率出现明显差异。当楔形平台偏转至尾部与波浪辐射方向相对 (即尾部迎浪) 位置时, 平台后部反射或抵消了大部分波浪能量, 两侧的波浪采能装置均无法有效捕获波浪能, 两侧发电机输出功率均大幅降低, 甚至无输出。

单点系泊系统结合楔形平台在浪大流小的海洋环境中具有十分明显的优势, 而且单点系泊本身结构简单, 在海洋工程上容易安装实现。在实际应用中, 若能寻找到潮流较小, 海洋季风比较稳定且波浪较大的海域, 本文所讨论的装置将有较大地开发潜力。

若是遇到浪大流也大或浪小流大的环境, 则该装置的应用将受到限制。今后的研究重点是: 如何减少平台本身的遮蔽效应, 如何有效控制平台偏转从而提高发电效率; 将潮流能加以利用, 甚至将潮流力变成对平台进行有益偏转的动力。

[参 考 文 献]

- [1] 李成魁, 廖文俊, 王宇鑫. 世界海洋波浪能发电技术研究进展 [J]. 装备机械, 2010(2): 68-73.
- [2] 王传崑, 卢苇. 海洋能资源分析方法及储量评估 [M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [3] 孟浩, 陈颖健. 基于层次分析法的新能源产业发展能力综合评价 [J]. 中国科技论坛, 2010(6): 53-58.
- [4] 郑友华, 郑崇伟, 李训强. 基于海浪资料的全球海域波浪能研究 [J]. 可再生能源, 2011, 29(5): 108-112.
- [5] 曲泉铀. 波浪能发电技术的发展现状与展望 [C] //第八届长三角能源论坛论文集. 上海: 上海市能源研究会, 2011: 152-156.
- [6] 褚同金. 海洋能资源开发利用 [M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 93-112.
- [7] 王永奕. 漂浮式波浪发电装置实海况试验及电能处理 [D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [8] LAIFENG MAO, JUN ZHANG. Investigation and Analysis on the Performance of the Oscillating Buoy Wave Power Device under the South China Sea [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(321/322/323/324): 1365-1372.
- [9] 杨绍辉, 何宏舟, 曲泉铀. 多点直驱式波浪能发电系统的仿真分析与试验研究 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(8): 1375-1380.
- [10] SIMON LINDROTH, MATS LEIJON. Offshore wave power measurements: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4274-4285.
- [11] 曲泉铀. 一种浮摆式波能发电装置的设计开发 [D]. 厦门: 集美大学, 2013: 7-9.
- [12] LIU ZHEN, HYUN BEOM-SOO, HONG KEYYONG. Numerical study of air chamber for oscillating water column wave energy convertor [J]. China Ocean Engineering, 2011, 25(1): 169-178.
- [13] 郑松根, 何宏舟. 单点系泊的楔形波浪发电平台稳定性仿真分析 [C] //第四届海洋可再生能源发展年会暨论坛论文集. 威海: 国家海洋技术中心, 2015: 65-74.
- [14] 余建星, 王永功, 王宏伟. 风浪流联合作用下单点系泊船的受力分析 [J]. 海洋技术, 2005(3): 96-100.
- [15] 郑松根, 何宏舟. 浮摆式波浪发电平台系泊系统设计 [J]. 中国造船, 2015, 56(2): 102-111.
- [16] 史杰平, 劳国生. 单锚系泊浮体运动及系泊力分析 [J]. 大连海运学院学报, 1989, 15(4): 7-14.

(责任编辑 陈 敏 英文审稿 郑青榕)