

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2024.02.012

一种基于波浪能的海洋立体观测系统及应用

崔小明¹, 叶寅², 李超¹, 苍思远¹

(1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458;

2. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 随着海洋波浪能发电技术的发展和成熟, 其在海洋观测领域的应用受到关注和研究。自主设计并研制了一种集波浪能发电、海表/海底同步观测、实时 4G 通信传输、远程无线控制于一体的海洋立体观测系统, 于 2021 年 7 月在珠江口万山岛海域通过锚泊系留方式布放, 开展海上波浪能供电和观测应用试验。海试期间连续获取了海底原位观测视频数据, 以及海表波浪变化和波浪能发电参数等监测数据, 并对波浪能发电电流、电压和功率进行了统计分析, 讨论了波浪能发电水平受波浪变化的影响, 分析了两者之间的相关性。试验结果表明: 利用波浪能供电的海洋观测系统具备连续、长周期、全天候观测的优势和潜力, 源源不断的波浪能可保障海洋观测系统的稳定观测和数据可靠传输, 实现了海洋观测系统长期独立运行所需的绿色高效供能, 验证了波浪能在海洋观测领域应用的可行性和先进性。

关键词: 海洋观测; 波浪能; 供能方式; 实时观测; 无线传输; 应用试验

中图分类号: TH766 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2024) 02-0104-11

海洋覆盖了地球 70% 以上的面积, 蕴藏着巨大丰富的能源。随着人类对能源需求的不断增长, 开发海洋可再生能源深受各国关注。对海洋的认识, 首先就需要对海洋进行观测^[1-2], 通过观测获得科学全面的数据, 为开发海洋提供必要的支撑。目前, 国际上海洋观测技术手段主要以卫星、飞机、船舶、浮标、潜标、无人移动潜器、海床基等为观测平台^[3-4], 搭载声、光、电、磁等多类观测传感器, 以期实现全天候、长期、实时、高分辨率的全球或区域观测, 呈现出天-空-陆-海-潜立体组网、协同观测的技术演进趋势^[1]。

现有海洋观测系统供能方式绝大多数采用岸基有缆、蓄电池或太阳能板等, 建造维护成本、持续性、可靠性都未达到较理想的效果^[3, 5-6]。随着海洋观测需求的不断提高、搭载传感器的增多及观测功

能的升级扩展, 传统海洋观测系统供能手段已落后于现有海洋观测需求现状和发展趋势, 而且其主要消耗不可再生能源, 不利于社会经济的可持续发展, 海洋观测平台供能技术亟需新的理念和方法。

海洋波浪能是一种可再生的绿色能源^[7], 通过较小的装置转换可以获取源源不断的能量。随着波浪能发电技术的日趋成熟, 其在海洋观测领域受到重视和应用^[8-10]。本文首先对主要海洋观测系统供能的方式进行简述, 分析其应用和发展的局限; 然后对波浪能发电技术和开发利用进行阐述, 指明其在海洋观测领域的应用潜力和优势; 最后介绍了一种自主设计并研制的集波浪能发电、海表/海底立体观测、数据无线实时传输于一体的海洋立体观测系统, 该系统在珠江口万山岛海域已开展海上应用试验, 试验结果表明可再生海洋波浪能在海洋观测领

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: 中国科学院应用海洋学重点实验室资助项目 (OOST2021-06); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州) 人才团队资助项目 (GML2020GD0801, GML2019ZD0107)

作者简介: 崔小明 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋立体观测技术及应用研究。E-mail: nwpucxm@163.com

域应用的可行性和先进性。本文观测系统的研制应用为海洋观测供能技术发展提供一种新的思路和方法,在海洋资源开发、环境保护、海防建设等领域展现出了巨大的应用前景。

1 典型海洋观测系统的供能方式概述

1.1 岸基有缆供电

海底观测网是人类建立的第三类海洋科学观测系统之一,其针对不同的观测需求,配置水下固定或移动等观测平台,搭载各类观测传感器,通过在海底铺设电缆设立节点为观测平台/设备工作供能。美国、加拿大、日本及欧洲各国凭借在海洋领域和其他相关领域的先发科技优势,在20世纪就已纷纷投入巨资建设相对完善的海底观测网并成功运行^[11-12]。我国自“十一五”开始,在国家“863”等计划和地方科技计划的推动下,也开始研究建设了自己的海底观测网。

海底观测网将海缆直接从陆地延伸到海底,为观测路由各节点持续供电,解决了众多原位观测设备在海底长期运行获取持续供能的难题。海底观测网作为超大型海上工程,建设周期漫长、施工复杂,需要耗费巨大的人力和物力,后期运行维护更是需要不断高昂投入^[13]。海缆一旦铺设,各观测节点安装固定后,观测系统的可扩展能力较弱,并且不具有可移动性,很难对观测区域和观测要素进行调整,海缆、观测节点和传感器的运行维护,以及更新升级非常不易。目前,海底高稳定高压广域直流输电和海底高效率高压高频电能变换等关键技术仍存在工程应用问题^[13],如长距离大功率直流输电受到海底光电缆的单位长度电阻的限制,制约海缆供电方式的发展和应用空间。海底观测网持续大功率的供电实质是不可再生能源的消耗,而且大规模海缆铺设和节点建设对海洋生态系统和环境保护也提出更高的要求。

1.2 蓄电池供电

Argo全球海洋观测网建设是由美国等国家大气、海洋科学家于1998年提出的一个大型海洋观测计划项目^[14],旨在全球无冰覆盖的开阔大洋中建成一个由3000多个Argo剖面浮标组成的实时海洋

观测网。经过20多年全球超过30多个国家和机构的不断加入,全球范围内布放的Argo浮标数量已超过万枚^[15],被誉为“海洋观测手段的一场革命”,实现了长期、自动、实时和连续获取大范围、深层海洋资料的能力。

Argo剖面浮标最初选用一种称为自律式的拉格朗日环流剖面观测浮标,该浮标设计寿命为3—5年,直至浮标自身电源耗尽后沉底,最大测量深度为2000 m,会每隔10—14天通过卫星向岸基自动发送一组剖面实时观测数据^[16]。随着观测需求和技术手段的不断发展,Argo浮标型号从最初应用的PALACE型剖面浮标到如今主要应用的APEX型剖面浮标,然而经过数十年的升级换代,Argo浮标的供能一直采用蓄电池的方式,供能方式是其运行寿命始终维持在3—5年的主要原因,其构成的全球海洋观测网运行维护成本也因此需要不断投入,电池耗尽后浮标沉底也制约了观测数据的连续获取,同时也制造了很多海洋废弃物。

1.3 新型供电方式

随着传统能源的不断消耗和经济的发展,能源需求还将持续增长。因此,利用太阳能、潮汐能、海岛风能和波浪能等海洋可再生能源为海洋观测系统或设备供电受到了广泛关注^[17-20]。

为了得到一定的转换功率,利用太阳能的观测系统往往需要面积相当大的一套收集和转换设备,造价较高;同时,由于受到昼夜、天气等自然条件的限制,导致太阳能发电是间断不连续的,而且是极不稳定的,这给太阳能的大规模应用增加了难度^[20]。而受限于海洋观测系统平台的多尺度应用,以及观测系统向深远海领域的发展,潮汐能和风能虽然技术相对成熟,但较难适用于海洋观测系统的发展需要^[17,20]。波浪能开发利用技术已经开始进入大规模商业化开发利用阶段,英国爱丁堡公司在葡萄牙北部海岸建设的世界上首座波浪能商业电站,是波浪能发电商业化的重要标志^[17]。

目前,绝大多数海洋观测浮标采用太阳能和蓄电池单一或混合的供电方式^[18-21],导致每隔数月就需要前往现场更换电池、维护光伏发电系统等。落后的供能方式导致观测成本的激增,以及运行维护的复杂性和不确定性,已越来越满足不了长周期、

全天候、多样化的现实观测需求,而且随着观测平台搭载传感器的增多及观测功能的扩展和调整,海洋观测系统供能技术严重制约了海洋观测的应用和发展,海洋观测装备供能方式需要新的技术手段。

2 波浪能发电技术研究现状

波浪能是一种分布广泛、能量密度大的海洋可再生能源,主要由海面风动和大气压力变化引起的海水有规则的周期性运动,具有一定的动能和势能,其能量与波高的平方、波浪的运动周期及迎波面的宽度成正比。通过波浪的运动带动能量转换系统,将波浪能赋能于转换介质的机械运动再带动发电机发电,就可以实现可再生海洋波浪能的开发利用。

2.1 波浪能发电技术

波浪能发电技术基本原理是当波浪与波动能收集器接触时,波动能收集器移动形成相对运动,使波浪能转化为机械能,再通过能量转换装置将机械能转化为电能。波浪能发电技术研究的重点是波浪能转换装置的设计和性能提升,现有装置主要有振荡水柱式、摆式、振荡浮子式、点吸收式等多种形式^[8]。波浪能发电装置工作原理主要有以下几种:①利用波动能收集器在波浪作用下的垂荡或纵摇等运动,将波浪能转换为收集器的机械能;②利用海洋波浪装置的前后转动或摆动产生水流或气流,使轮机转动从而带动发电机工作;③利用有限封闭空间内波浪的挤压,将波浪能转换为空气或其他流体的动能等实现发电。

2.2 波浪能的开发与应用

最早利用机械获取波浪能的装置是法国人吉拉德在1799年发明的^[9]。英国、丹麦等西北欧国家,以及日本和美国在波浪能发电技术起步较早,在其沿海已建设有多个大型示范发电站,其中已有一些商业化的波浪能发电装置,如英国的筏式装置“Pelamis”、丹麦的振荡浮子式装置“Wave Star”、苏格兰的摆式装置“Oyster”、美国的点吸收式装置“Power Buoy”等。

我国从20世纪70年代开始研究波浪能发电技术,主要研究机构包括:中国科学院广州能源研究

所、中国海洋大学、国家海洋技术中心、上海交通大学和中国船舶集团有限公司等。20世纪80年代,由中国科学院广州能源研究所研发的航标灯用波浪能发电装置是最早投入批量生产并成功应用的波浪能发电装置^[10]。21世纪以来,由中国科学院广州能源研究所研发的“万山号”“先导一号”已成功并网发电。近年来,在国家政策和资金支持下,尤其是2010年海洋可再生能源专项资金设立以后,波浪能发电技术和转换装置的研究获得了极大的发展和应用。目前开发的波浪能装置超过40个^[9],装机容量范围为10 W~300 kW,截至2018年底,波浪能电站总装机0.2 MW,累计发电量超15万千瓦时。

随着波浪能发电技术和波浪能装置的快速发展,其在海洋观测领域的潜能受到重视,并逐渐被研究和应用^[9-10,20]。直接将观测位置的波浪能转换成电能,为海洋观测平台和传感器设备提供工作用电,实现海洋观测系统供能的就地取材,利用源源不断的可再生海洋波浪能,有望大幅降低海洋观测所需供能产生的建设及运行维护成本。波浪能发电浮标具备观测供能和平台搭载多重作用,同时也拓展了观测平台应用环境的多样性,对资源科学可持续开发利用及海洋环境和生态保护发展也有着极其重要的意义,是研发新型高效、低成本海洋观测系统的新思路。大规模投放海洋观测浮标,需要经济且高效的供电系统,随着可再生波浪能发电技术的快速发展和应用,利用波浪能为海洋观测系统供能已成为研究热点和发展重点。

3 观测系统组成及总体设计

本文海洋立体观测系统主要由波浪能发电浮标、海表和海底观测设备,以及锚泊系留等组成,系统总体设计如图1所示。波浪能发电浮标为观测系统提供电力供应,海表海底观测数据、浮标发电状态参数等通过4G通信模块与岸基进行实时远程无线传输。

波浪能观测系统利用可再生海洋波浪能,就地取材,原位供电,实现观测系统长期稳定运行的供能需求,以此构建具备海表/海底同步观测、数据实时远程无线传输的海洋立体观测系统。在实际应用

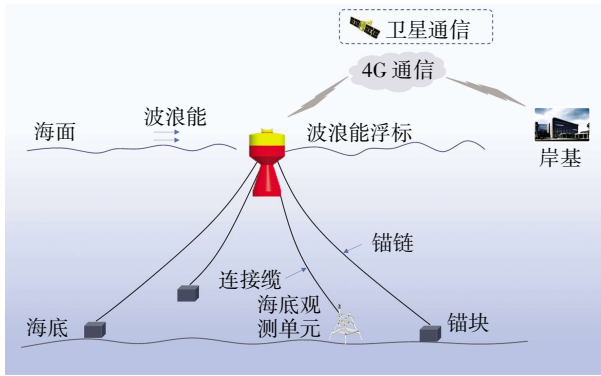


图1 波浪能观测系统设计示意图

中, 观测系统需要结合具体的布放环境和观测目标, 设计搭载不同类型的观测和通信设备。本文系统布放在近海, 选择4G通信进行数据信息的无线远程传输, 若系统布放在远海, 可通过北斗或铱星等卫星通信方式传输。

3.1 波浪能发电浮标

本文波浪能发电浮标通过锚泊系留固定漂浮在海面, 采用气动式中心管波浪能发电技术, 其工作原理为: 利用浮标本体作为吸波浮子, 在浮标本体的中心位置设计有一个中心管, 中心管底部与海水联通, 并设置了尾部锥形的扩张段, 增大中心管气室的面积。中心管上部封闭了空气, 在中心管的顶部安装能量转换系统。在波浪作用下浮标在海中上下振动, 而中心管中的水面受波浪扰动较小, 基本保持不动, 因此浮标和中心管内的水柱形成相对运动, 进而压缩中心管上端空气, 形成往复空气流推动能量转换系统发电。

波浪功率计算公式^[22]如下。

$$P_w = B \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T_e \quad (1)$$

式中, B 为迎波宽度; H_{m0} 是有效波高; T_e 是谱峰周期。波电转换效率 η 公式如下。

$$\eta = \frac{P_g}{P_w} \quad (2)$$

式中, P_g 是发电功率。

根据文献中的结论, 中心管波浪能发电浮标在随机波下的气动效率约为 35%^[23], 目前冲动式透平的转换效率约为 30%^[24], 因此中心管波浪能装置总的波电转换效率约为 10%。本系统布放的万山海域波浪在夏季时, 有效波高范围为 0.3~3.0 m, 谱峰周期范围为 2.7~8.0 s^[24]。为确保在小浪下装置可以满足

供电需求, 根据上述两个公式, 结合观测仪器的用电负荷, 可以计算得到气动式波浪能发电装置的迎波宽度参数, 为浮标的设计提供依据。

波浪能发电浮标标体直径 3 m, 吃水约 6 m, 总高约 10 m, 中心管内水柱直径 1.2 m, 水柱体积 17.4 m³。安装 3 套波浪能能量转换系统, 互为备份, 提高系统供电可靠性。波浪能能量转换系统由单向阀箱、喷嘴、冲动式透平和永磁发电机组组成, 透平直径 162 mm, 永磁发电机装机功率 100 W。波浪能发电浮标结构及平台上搭载的设备连接如图 2 所示。波浪能发电浮标本体同时作为观测平台, 设计搭载了波浪传感器、全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、气象观测 (湿度、风速、风向) 蓄电池、数据存储及 4G 通信模块, 实现平台供能和搭载双重作用。

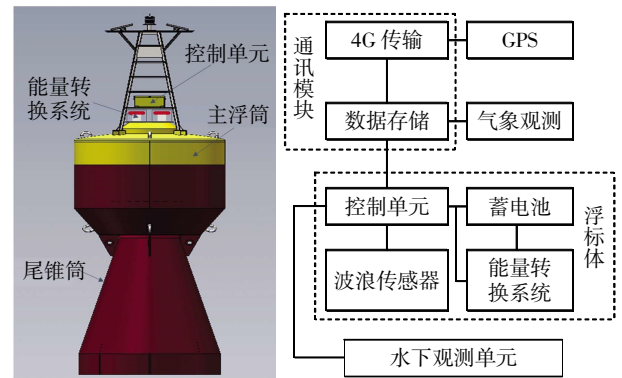


图2 波浪能发电浮标结构及其搭载设备连接示意图

浮标平台上安装了 3 个波浪能气动能量转换机组, 如图 3 所示, 每个气动能量转换机组额定装机功率为 120 W, 峰值功率可达 145 W, 转换输出的电能经过电力变换控制单元降压、升压等处理后为各观测设备提供工作用电, 剩余电能存储到蓄电池。

波浪能浮标平台通过连接水下固定或移动平台, 可实现多空间立体观测, 具备对水文、气象、海流等多要素观测能力。在实际应用中, 无论何种海洋观测系统, 最理想的状态就是高效获取有用的观测信息, 而摒弃多余重复的无效冗余数据, 降低数据存储和传输通信压力。本文系统即采取这样的设计理念, 结合应用试验海区历史波浪变化数据, 分析预估了波浪能发电浮标布放后实际的供电能力, 提出并设计间歇观测策略, 以实现观测系统长



图3 波浪能气动能量转换装置

期稳健的高效运行。

3.2 系统系泊设计及分析

本文观测系统设计采用三点锚泊系留方式，浮标体通过三条锚链固定漂浮在海表，海床基架通过自身配重固定在海底，搭载水下高清摄像机等设备。海表浮标平台与海底观测单元通过光电复合缆连接进行观测数据的传输和电力供应。系泊设计连接如图4所示。

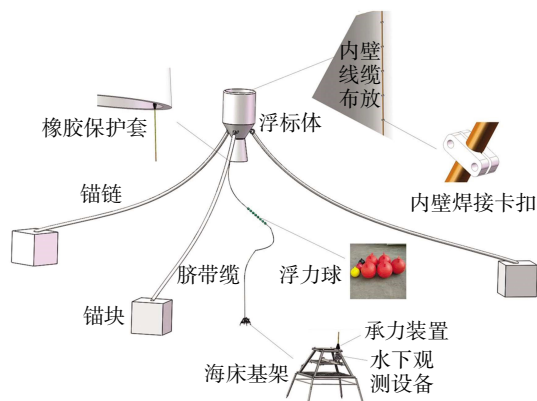


图4 观测系统系泊设计连接示意图

观测系统浮标平台与海底观测单元采用抗拉组合防水脐带缆互连，一根缆实现电源和数据信息的双传输，减少海底布线的复杂度。脐带缆在浮标体内通过焊接卡口固定，防止受到浮标体内海水扰动，并在浮标底端安装橡胶保护套，保证脐带缆从浮标本体到水体过渡连接的可靠性。海水中的脐带缆上固定了若干浮力球，有效减少脐带缆的晃动，并对缆的受力起到保护。脐带缆与海床基的连接处，安装了承力装置，减少脐带缆在水下接口处因长期摆动造成的磨损。

波浪能观测系统的系泊设计很关键，因为观测

系统海上布放后，锚链长度和角度既要保证系统具有足够抵抗台风等恶劣海况的能力，又要尽可能不影响浮标本体的随波性和捕获海洋波浪能的能特性，同时还要重点考虑避免在海水中连接缆与锚链之间存在相互缠绕的安全风险。

系泊使用水泥混凝土重力锚块，单个锚块空气中净重10t，这一设计重量足以保证锚块不会受海流等冲击而在海底产生位移。3条锚链长度均为60m，3个锚块等间距布放在海底，距离浮标正下方海底位置45m处，海床基架布设在浮标体正下方，水中连接脐带缆总长为30m。波浪能观测系统海上布放后，根据系泊设计，可以认为锚块、海床基架不会在海底产生位移。受到海流冲击，海表浮标体会产生漂移，而当单条锚链在水中呈拉直状态时，浮标体此时产生最大位移，浮标体位移前后系泊态势连接如图5所示。

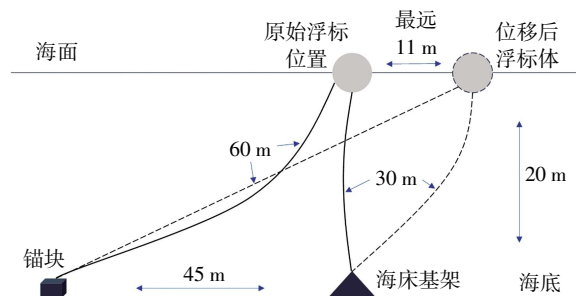


图5 浮标体位移前后系泊态势

通过分析不难得知，浮标体在海面漂浮的范围即为一个以布放海表位置为中心点、最大半径约为11m的圆形区域，该漂移范围足以保障浮标体自然捕获波浪能的能力。在浮标体位移到最远处时，此时浮标体与海床基架直线距离约为23m，该距离可保障连接缆不会被拉扯，也尽量避免与锚链缠绕的风险。

4 海上试验结果与讨论

本文设计研制的基于波浪能供电的海洋立体观测系统结合人工鱼礁特定监测场景，在近海开展试验。

4.1 海上布放实施

观测系统在海上试验前，在岸上对关键部件进行了测试及联调。利用室内压力测试装置在100m

(1 MPa) 水深环境下对水下观测单元, 以及脐带缆和水密连接器进行了连续 72 小时强度压力测试, 没有出现外壳破损、接口渗漏等现象。压力测试后, 对系统进行了集成联调, 测试了数据存储和无线实时传输等功能, 结果显示脐带缆数据传输速率峰值可达 1 000 Mbps, 4G 通信数据传输速率近 100 Mbps, 满足系统实时观测传输的设计目标。

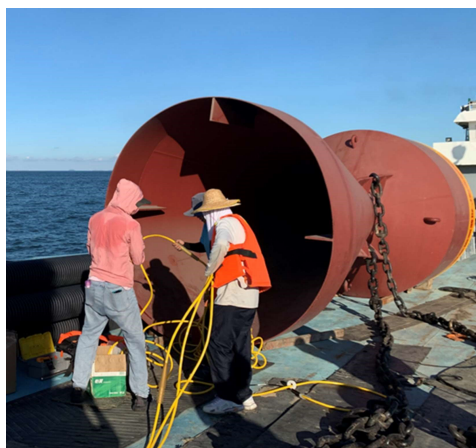
本文波浪能观测系统海上布放时间为 2021 年 7 月 15 日, 试验位置选择在珠江口万山岛海域, 布

放位置如图 6(a)所示, 布放海域位置离岸约 2 km, 水深约 20 m, 海底为泥沙底质。

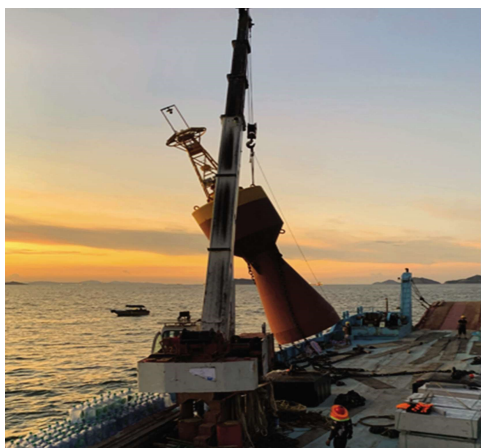
观测系统在海上布放前, 按照设计在现场安装固定了脐带缆, 组装了各个部件, 并进行了下水前状态测试检查, 通过吊机先后完成系统各部件的吊放入水, 布放现场如图 6(b)、图 6(c)所示。完成海上布放后, 如图 6(d)所示, 再由潜水员对海底观测单元和脐带缆及锚泊系留状态进行了逐个检查, 系统水下各部件符合预期状态。



(a) 布放位置



(b) 状态检查



(c) 吊放入水



(d) 完成布放

图 6 浮标体位移前后系泊态势

本文 3.2 节对观测系统的浮标运动特性和锚泊受力情况进行了理论分析, 通过分析可知, 系统在海上布放后, 如遇极端天气, 主要的风险来自系统的位移和锚链与传输缆之间的缠绕。根据本文系统在海上应用试验结果来看, 本文研制系统在经历南海夏季高频次极端天气后, 仍然正常工作, 并通过现场的勘察, 系统并未发生较大偏移, 归其原因, 主要是本文观测系统根据经验加大了锚块的重

量, 单个锚块空气中净重 10 t, 这一重量保证了锚块在极端天气下没有受海流等冲击而在海底产生位移, 从而有效降低了锚链与传输缆之间发生缠绕的风险。

受限于系统搭载的观测设备性能, 本文系统设计水深为不超过 100 m, 而为了得到充足的转换电能, 波浪能观测系统布放的环境需要有稳定的波浪变化条件。本文系统在浅海开展了长期试验, 系统

的运行状态符合设计预期,根据系统的设计和应用结果,在不考虑搭载的观测传感器的工作水深情况下,系统适用于深海观测。以本文所设计系统结构为例,波浪能观测系统应用于深海观测时,锚链和传输缆的长度势必会大大增长,这将为系统的可靠性带来更多安全风险,需要重点考虑。

4.2 海底影像观测结果及分析

本文观测系统水下观测设备为三合一视频采集装置,水下摄像机固定高度和角度进行海底鱼群的活动影像画面摄录,视频数据通过脐带缆上传至浮标平台安装的4G网络硬盘录像机,硬盘容量为6T,可存储6个月的现场观测数据,容量存满时,采用先进先出原则,进行旧数据的删除和新数据的存储。研究人员在岸基登陆萤石云平台,在线实时查看或回看观测数据,也可在线下载视频数据。图7为远程获取的系统布放后连续两个月的海底原位影像观测数据,同时,根据观测系统回传的影像画质,在岸基也可远程进行照明灯亮度和清洁刷周期的参数设置,以期获得清晰的观测效果。

从图7(a)和图7(f)可以看出,由于水体对光线

具有选择性地吸收而导致摄录的视频都是偏蓝青或蓝绿色,针对水下摄录视频数据存在的上述缺陷,可以通过后期的处理软件对其加以改善;在图7(c)和图7(d)中可以清楚地看到画面中的鱼群影像,实时观测掌握海底监测目标的活动情况;图7(b)和图7(h)分别为一天中的早晨和午夜,特别是午夜时分,海底几乎没有自然光照,仅依靠海底照明设备,观测效果依然很清晰;另外,从图7(e)和图7(h)可以看到水中微粒物的存在,使视频图像产生了低对比度的缺陷,同样需要在后期进行画面的处理改善。

图7(g)是观测系统布放后,潜水员对水下摄像头进行清理后获取的观测影像画面,可以看到画质变得很清晰;但从图7(i)也可以看出,因为系统布放在近岸,水下摄像机镜头会被微生物等快速附着,导致影像画面清晰度变差,针对此问题,可以通过增加刷子的清理周期来增强画质效果,但同时增加了观测系统功耗成本。

4.3 波浪观测结果及分析

波浪能浮标安装的波浪传感器可对最大浪高和

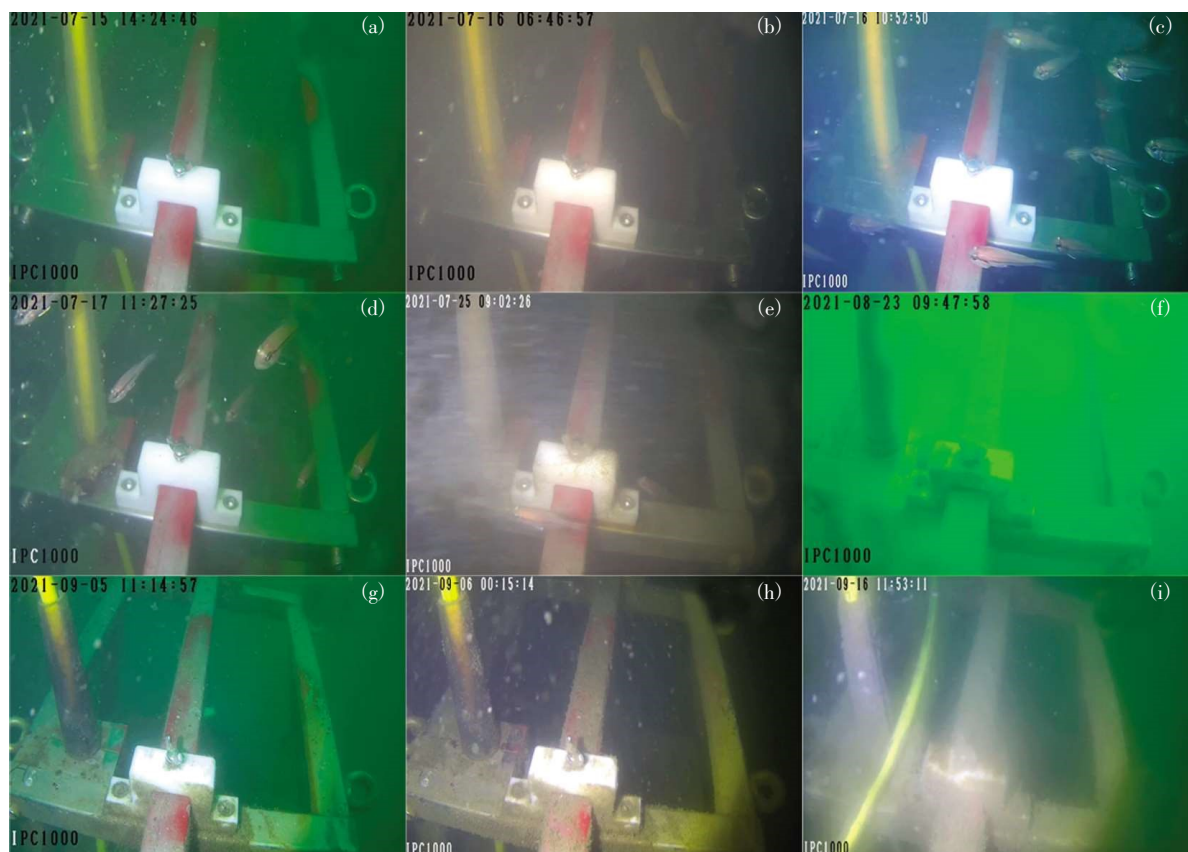


图7 观测系统获取的海底影像画面

波周期、1/3 波高和波周期、1/10 波高和波周期, 以及平均波高和波周期等波浪参数进行测量。图 8 为观测系统远程回传的 2021 年 9 月的波高和波周

期数据, 以此可以实时查看掌握观测海域波浪变化情况, 从图 8 可以看到布放海域在此期间监测到最大波高近 2 m, 波周期多保持在 5 s 左右。

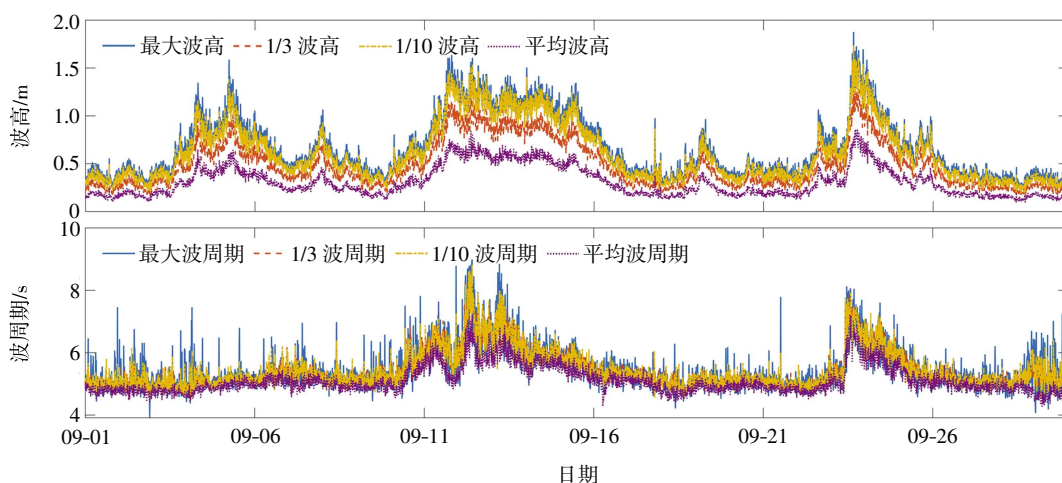


图 8 布放位置海表波浪变化情况

海面波浪实际上是各种不同波高、波周期、行进方向的波浪无规则组合, 因此一个波浪的波高值没有代表性, 将实际测量波列的最大的 1/3 部分波高的平均值称为有效波高, 表示波浪的可视平均水平, 与目测波高比较相近。观测系统实时回传的波浪数据是分析掌握浮标平台发状态关键环境参数, 对于研究波浪能发电浮标的能量转换效率很重要。

4.4 波浪能浮标发电结果及分析

观测系统布放后, 对波浪能浮标发电状态进行远程监测, 以此分析掌握波浪能观测系统独立供电能力和稳定性。图 9 分别为波浪能浮标安装的 3 台能量转换机组 2021 年 9 月的每小时平均发电电

流、发电电压、发电功率, 以及波浪能浮标每小时发电总功率。

从图 9 可以看出, 在 2021 年 9 月期间, 波浪能浮标机组 1 最大小时平均发电功率出现在 9 月 12 日, 达 33.16 W; 机组 2 最大小时平均发电功率出现在 9 月 23 日, 达 39.15 W, 在 9 月 12 日, 机组 2 最大小时平均发电功率达 38.95 W, 接近 9 月的最大值; 机组 3 最大小时平均发电功率出现在 9 月 12 日, 达 36.27 W。3 台机组的发电电流、发电电压及发电功率走势基本趋于相同, 每小时最大发电功率接近额定功率的 40%。波浪能浮标 2021 年 9 月最大小时发电总功率接近 110 W, 单月总发电功率累计为

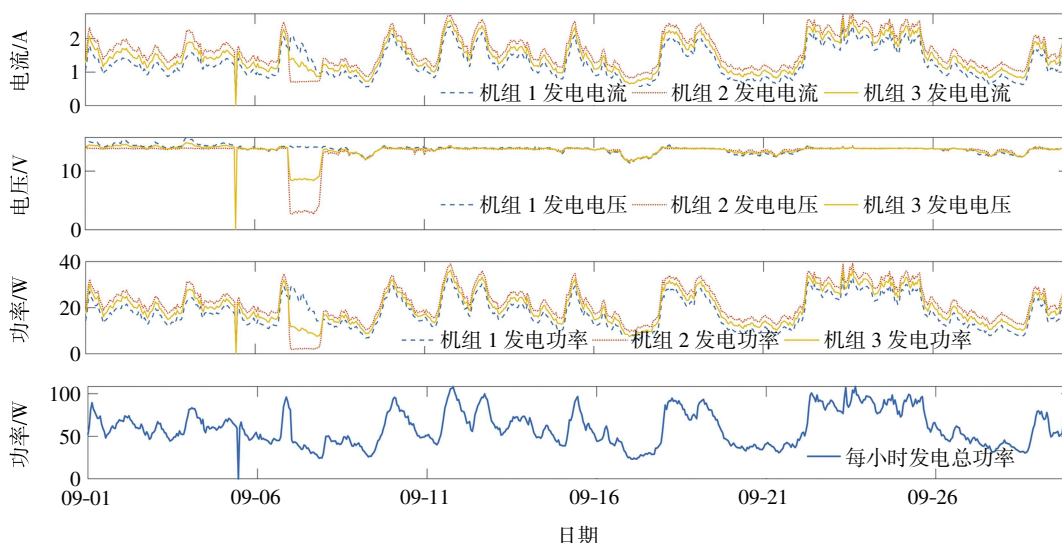


图 9 波浪能浮标 2021 年 9 月的发电数据结果

43 065 W，单日平均发电功率为 1 435.5 W，每小时发电功率约为 60 W，为额定功率的 20%，发电能力可以保障观测系统各类设备运行所需的电力供应。

图 10 为 2021 年 9 月波浪能浮标每小时发电功率和有效波高、有效波周期数据归一化曲线对比图，表 1 为 9 月 12 日波浪能发电和波浪数据每小

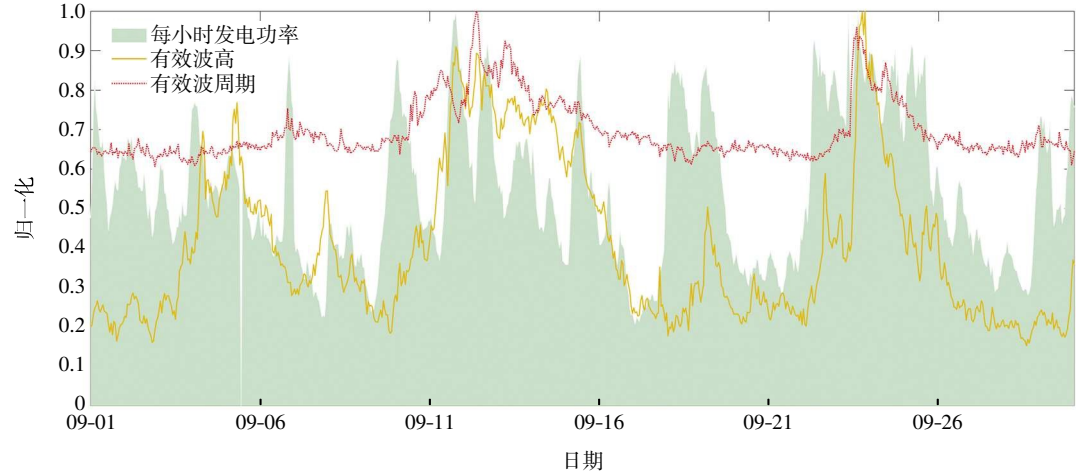


图 10 波浪能浮标每小时发电功率和有效波高、有效波周期归一化数据变化曲线

表 1 2021 年 9 月 12 日波浪能发电和波浪数据每小时变化统计

时间	发电功率/W	有效波高/m	波周期/s	时间	发电功率/W	有效波高/m	波周期/s
00:00	99.98	0.91	6.24	12:00	72.63	0.98	6.29
01:00	105.73	0.93	6.14	13:00	65.37	0.93	6.14
02:00	106.34	1.04	5.97	14:00	65.81	0.88	6.71
03:00	108.25	1.03	5.86	15:00	67.34	0.90	7.05
04:00	102.41	1.09	5.73	16:00	57.68	0.91	7.08
05:00	97.84	1.07	5.70	17:00	55.77	0.95	7.50
06:00	92.50	1.01	5.59	18:00	63.58	0.99	7.63
07:00	93.07	1.01	5.74	19:00	75.52	1.07	7.78
08:00	87.23	0.98	6.02	20:00	80.21	1.07	7.71
09:00	79.90	0.98	5.94	21:00	85.74	1.05	7.32
10:00	79.15	0.96	6.04	22:00	88.77	0.98	6.83
11:00	78.42	0.90	5.91	23:00	92.64	0.90	6.77

时变化统计结果。

由图 10 可以看出，波浪能观测系统发电功率受布放海域波浪变化直接影响，从2021 年 9 月的观测数据分析可知，相比有效波周期的变化曲线，发电功率走势与有效波高的变化曲线更加相关。而从表 1 可以看出，波浪能浮标发电功率与波高变化并非呈完全正相关，发电功率水平同时受波高和波周期的影响，在 9 月 12 日 03 : 00，达到最大发电功率为 105.25 W，而此时有效波高、波周期并非当日的最大值。为了分析波浪能观测系统的发电功率和波高、波周期之间的相关性，图 11(a)给出了 2021 年 9 月波浪能发电功率变化曲线与有效波高、有效波周期，以及波高与波周期乘积变化曲线的相

关系数，图 11(b)至图 11(d)给出了 2021 年 9 月单日有效波高、有效波周期，以及波高与波周期乘积与发电功率变化曲线相关性的统计结果。其中图 11(b)为有效波高相关性最高的日期，共计 15 天；图 11(c)为有效波周期相关性最高的日期，共计 8 天；图 11(d)为波高与波周期乘积相关性最高的日期，共计 7 天。

从图 11(a)可以看出，以 9 月连续 30 天时间尺度来定量分析，有效波高、波高与波周期乘积与波浪能系统发电功率的相关性很接近，且明显均高于有效波周期与系统发电功率的相关性。而以 9 月份每一天时间尺度来定量分析，从图 11(b)至图 11(d)的统计结果来看，波浪能发电功率变化曲

线主要受有效波高参数的变化影响,而有效波高和波高与波周期乘积两种参数变化曲线与发电功率相关系数大小在每一天基本相同,这一结果与以整个

9月来定量分析结果一致。因此可以得到,波浪能系统发电功率的变化受有效波高和有效波周期多个参数的综合影响,但主要受有效波高参数变化影响。

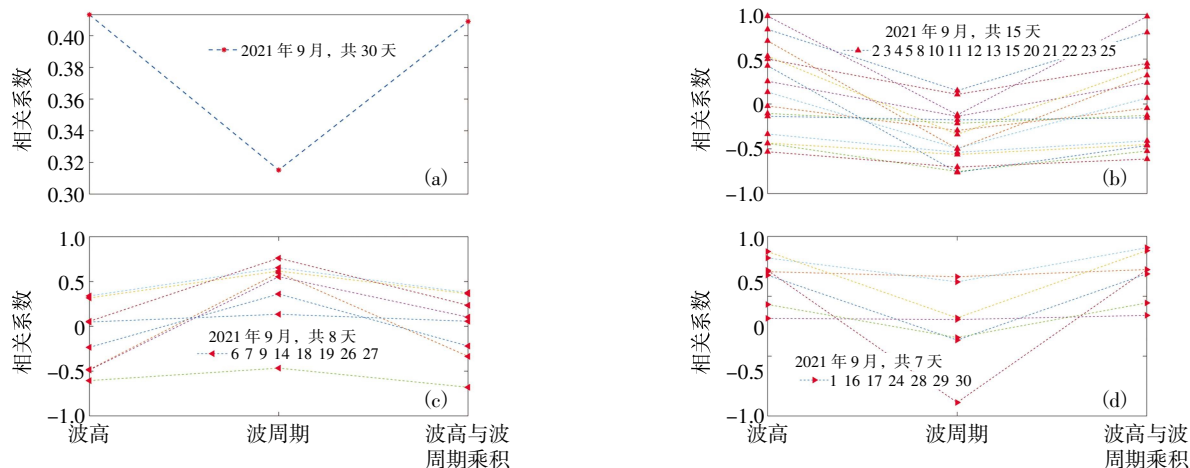


图 11 2021 年 9 月波浪能系统的发电功率与有效波高、有效波周期和波高与波周期乘积的相关系数

实际应用中,利用波浪能供能的海洋观测系统需要掌握分析布放位置波浪的变化情况,而任何海域的波浪变化都不是固定的,会受到各种不确定性因素的影响,无法非常精确地预测。可以通过补充设计太阳能板或蓄电池等其他供能手段,形成混合供能方式,以此提高观测系统的鲁棒性。

5 结 论

本文基于波浪能为海洋观测系统供能这一构想,设计研制了一种集波浪能供电、海表海底立体观测、4G 通信于一体的海洋立体观测系统,并在珠江口万山岛海域开展了海上应用试验。海试期间,波浪能观测系统实现了海表/海底同步连续观测和数据的无线远程实时传输,试验获取的数据处理结果显示观测系统在海上试验期间运行状态正常稳

定,无供电问题导致的观测系统停机、数据传输中断等问题,利用波浪能发电技术有效保障了观测系统可靠持续的供能需求,可得出以下结论。

(1) 海洋观测系统多采用太阳能或蓄电池等供电方式,很难具备长期稳定的观测能力,海洋观测浮标亟待新的海上供电技术手段支持,而利用源源不断的波浪能为海洋观测系统提供新的供能,对绿色可持续发展海洋能源与观测事业意义深远。

(2) 构建了一种基于波浪能发电浮标作为电力供应和观测平台的新型海洋观测-通信-能源一体化系统,在近海完成海上布放试验,观测效果卓有成效,为发展新型海洋观测系统提供应用示范。

(3) 试验验证了利用波浪能浮标进行海洋立体观测的长期稳定能力,表明了可再生波浪能在海洋观测领域应用的可行性和先进性,为系统延伸拓展进行组网观测或深远海观测提供借鉴参考。

参考文献:

- [1] 李颖虹,王凡,任小波.海洋观测能力建设的现状、趋势与对策思考[J].地球科学进展,2010,25(7):715-722.
- [2] “中国工程科技 2035 发展战略研究”海洋领域课题组.中国海洋工程科技 2035 发展战略研究[J].中国工程科学,2017,19(1):108-117.
- [3] 马蕊,赵修涛,柳存根.海洋水下立体观测技术装备发展研究[J].中国工程科学,2020,22(6):19-25.
- [4] 蒋兴伟,何贤强,林明森,等.中国海洋卫星遥感应用进展[J].海洋学报,2019,41(10):113-124.
- [5] 蔡树群,张文静,王盛安.海洋环境观测技术研究进展[J].热带海洋学报,2007,26:76-81.
- [6] 朱心科,金祥龙,陶春辉,等.海洋探测技术与装备发展探讨[J].机器人,2013,35(5):376-384.

- [7] HENG C W, SHAO L T, SHI W L, et al. An assessment of global ocean wave energy resources over the last 45 a[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(1): 92–101.
- [8] 刘延俊, 贾瑞, 张健. 波浪能发电技术的研究现状与发展前景[J]. *海洋技术学报*, 2016, 35(5): 100–104.
- [9] 吴明东, 盛松伟, 张亚群, 等. 海洋波浪能浮标发展现状及前景[J]. *新能源进展*, 2021, 9(1): 42–47.
- [10] 张亚群, 盛松伟, 游亚戈, 等. 波浪能发电技术应用发展现状及方向[J]. *新能源进展*, 2019, 7(4): 374–378.
- [11] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(3): 321–330.
- [12] 宋雨泽, 李红志, 乔正明, 等. 有缆海底观测系统进展及发展建议[J]. *水下无人系统学报*, 2023, 31(1): 121–127.
- [13] 吕枫, 翦知湓. 海底观测网技术研究与进展[J]. *前瞻科技*, 2022, 1(2): 79–91.
- [14] Argo Science Team. On the design and implementation of argo: An initial plan for a global array of profiling floats[R]. Melbourne: the GODAE International Project Office, 1998.
- [15] LIU Z, XING X, CHEN Z, et al. Twenty years of ocean observations with china argo[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 42(2): 1–16.
- [16] 余立中. 我国的海洋剖面探测浮标: COPEX[J]. *海洋技术*, 2003, 22(3): 47–55.
- [17] 熊焰, 王海峰, 崔琳, 等. 我国海洋可再生能源开发利用发展思路研究[J]. *海洋技术*, 2009, 28(3): 106–110.
- [18] 张少伟, 杨文才, 辛永智, 等. 浮标基海洋观测系统研究进展[J]. *科学通报*, 2019, 64: 2963–2973.
- [19] WANG J C, WANG Z Q, WANG Y M, et al. Current situation and trend of marine data buoy and monitoring network technology of China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(2): 1–10.
- [20] 王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2401–2414.
- [21] 吴明东, 盛松伟, 张亚群, 等. 四浮子周向均布波浪能供电浮标的设计与试验[J]. *可再生能源*, 2022, 40(4): 564–568.
- [22] 全国海洋能转换设备标准化技术委员会. 波浪能转换装置发电性能评估: GB/Z 40295—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 7.
- [23] 龙正翔, 吴必军, 李猛. 锥形中心管波浪能量转换模型试验研究及样机设计[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(12): 365–371.
- [24] 伍儒康. 振荡水柱技术中高效透平内部流动机理的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [25] 盛松伟, 张亚群, 游亚戈, 等. 大万山波浪能示范场波浪能资源测试分析[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(2): 462–465.

An Ocean Stereoscopic Observation System Based on Wave Energy and Its Application

CUI Xiaoming¹, YE Yin², LI Chao¹, CANG Siyuan¹

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China; 2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With the development and maturity of ocean wave energy power generation technology, its application advantages in the field of ocean observation have attracted attention and research. An ocean stereoscopic observation system was independently designed and developed, which integrates wave energy power generation, sea surface/seabed synchronous observation, real-time 4G communication transmission, remote wireless control, and was deployed in the waters of Wanshan island at the mouth of the Pearl River in July 2021 by anchoring and mooring, and carried out marine wave energy power supply and observation application experiments. During the sea trial, the seabed in situ observation video data, monitoring data such as sea surface wave changes and wave energy power generation parameters were continuously obtained, and the current, voltage and power of wave energy power generation were statistically analyzed, and the influence of wave energy power generation level by wave changes was discussed, and the correlation between the two was analyzed. The experimental results show that the ocean observation system powered by wave energy has the advantages and potential of continuous, long-period and all-weather observation, and the continuous wave energy conversion power generation efficiency can ensure the stable observation and reliable transmission of data of the ocean observation system, realize the green and efficient energy supply required for the long-term independent operation of the ocean observation system, verify the feasibility and advanced application of wave energy in the field of marine observation.

Key words: ocean observation; wave energy; energy supply method; real-time observation; wireless transmission; application experiment