

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.05.009

海洋能利用工程的研究进展与关键科技问题

郑金海,张继生

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要: 针对海洋能利用工程这一港口、海岸及近海工程学科的前沿研究热点领域,从能源资源调查与评估、能源转换技术与示范工程等方面评述了海洋能利用工程的研究进展,指出新型结构形式、结构与基础的安全稳定、海域水沙环境影响、转换效率与并网技术等关键科技问题是大规模利用海洋能的研究重点与难点,急需开展系统深入的学术研究和工程实践。

关键词: 海洋能利用工程;潮汐能;潮流能;波浪能;温差能;盐差能;能源转换;水沙环境

中图分类号: P743

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2015)05-0450-06

Recent advances and key technologies in marine energy utilization engineering

ZHENG Jinhai, ZHANG Jisheng

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Marine energy utilization engineering is one of main issues in the field of harbor, coastal, and offshore engineering. This paper reviews recent advances in investigation and evaluation of energy resources, energy conversion technology, and demonstration projects. Key scientific and technical problems for innovative structures, the safety and stability of structures and foundations, the impact on sea water and sediment environment, the conversion rate, and the grid connection technique, which need to be further studied and practiced, were study emphases as they remain difficulties in large-scale utilization of marine energy.

Key words: marine energy utilization engineering; tidal energy; tidal current energy; wave energy; temperature gradient energy; salinity gradient energy; energy conversion; water and sediment environment

港口、海岸及近海工程学科涵盖水运与海岸带资源开发和空间利用工程、河口海岸防灾减灾与环境保护以及技术规划管理与物流工程等方面,其研究与建设取得了显著的进展^[1-2]。随着国家海洋资源和可再生能源的可持续发展战略的不断推进和实施,海洋能利用工程正成为港口、海岸及近海工程学科的前沿研究热点之一。为了更好地交流与讨论该领域的技术研发、示范应用及政策规划等方面的热点问题,2008 年美国 Department of Energy 新创办了国际会议“Annual Global Marine Renewable Energy Conference”,国际著名会议 OMAE 和 ISOPE 先后在 2007 年和 2010 年新增海洋能专题“Ocean Renewable Energy Symposium”和“Renewable Energy & Environment Symposium”。我国也于 2012 年设立“中国海洋可再生能源发展年会暨论坛”,为促进我国海洋能的开发利用集思广益、建言献策。此后,国际知名出版社 Elsevier 和 Springer 分别于 2013 年和 2015 年创建新期刊《International Journal of Marine Energy》和《Journal of Ocean Engineering and Marine Energy》,为及时发表海洋能利用的最新研究成果提供学术交流平台。

我国海岸线漫长,蕴藏着丰富的海洋能,且沿海地区经济发达,能源需求量大,这些都为大规模开发和利用海洋能提供了有利条件和动力。安全高效的海洋能利用工程是开发海洋能的重要前提和必备条件,但其规划、设计、建设、实施、维护等方面仍处于起步阶段,技术尚不成熟,面临很多挑战。本文从海洋能资源调查

收稿日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(51137002,51479053);高等学校博士学科点专项科研基金(20130094110014);中央高校科研业务费专项(2014B04114)

作者简介: 郑金海(1972—),男,福建莆田人,教授,博士,主要从事港口、航道、海岸及近海工程研究。E-mail: jhzheng@hhu.edu.cn

与评估、能源转换技术与示范工程和关键科学技术问题等几个方面,综述海洋能利用工程的现状、研究进展与前沿问题。

1 海洋能资源调查与评估

海洋能是指海洋中所蕴藏的潮汐能、潮流能(海流能)、波浪能、温差能、盐差能等,具有总蕴藏量大、可持续利用、绿色清洁等特点。在20世纪,以英国为代表的欧美国家对其海洋能开展了大量的资源调查与评估,以了解他们国家的海洋能的分布情况^[3-5]。我国海洋能资源调查与评估工作到目前大致可分为3个阶段,第一阶段,20世纪50、70、80年代开展了3次海洋能普查工作,其评估数据多取自于历史数据,采用的估算方法多为经验公式法,评估能源的类型较少但为我国海洋能的资源评估积累了宝贵的资料和研究经验。第二阶段,2003年9月经国务院批准“我国近海海洋综合调查与评价(908专项)”正式启动,包括“我国近海海洋可再生能源调查与研究”等调查评估系列项目,利用实测调查数据评估了潮汐能、潮流能、波浪能、温差能、盐差能和海洋风能6类可再生能源,以掌握我国海洋能的分布情况^[6-7]。

为了满足海洋能规划和建设选址的需要,解决海洋能规模化开发利用的资源分析瓶颈问题,2010年财政部设立的海洋可再生能源专项资金资助开展第三阶段海洋能资源调查,于2010年和2011年分别支持了“潮汐能和潮流能重点开发利用区资源勘查与选划”“波浪能重点开发利用区资源勘查与选划”等多个海洋能勘查选划项目,旨在“908专项”海洋能调查研究的基础上,遴选数十个重点区域分别开展潮汐能、潮流能和波浪能的勘查和选划,摸清勘查区域的潮汐能、潮流能、波浪能资源储量及其时空分布状况。调查研究结果显示,我国近海(台湾海域除外)海洋能总蕴藏量为15.80亿kW,理论年发电量为13.84万亿kW·h;总技术可开发装机容量为6.47亿kW,年发电量为3.94万亿kW·h^[8]。

需要指出的是,影响海洋能资源评估的因素很多。海洋能蕴藏量和技术可开发量与其采用的评估方法、基础测量数据、数值模拟技术都密切相关。由于海洋能种类多、分布广,现有的调查与评估涉及的种类和覆盖的海域范围都是很有限的,仅能反映出一个基本概况,离全面、准确地描述我国海洋能的资源状况还有一定的差距。此外,资源评估是为了明确其实际利用的价值和大规模开发利用的可能性,除了评估能源蕴藏量和技术可开发量等重要指标^[9-10]外,还需要与发电设备性能特征结合起来,以便进一步确认海洋能利用工程的技术经济可行性。例如,在潮流能资源评估中引入潮流能水轮机的连续发电时间和离散度^[11],可更好地服务于场址比选和水轮机选型。

2 海洋能发电技术与示范工程

2.1 潮汐能发电技术与示范工程

潮汐能发电技术研究起步较早,具有一定的工程技术积累。它是利用涨落潮水位在水库两侧形成落差进行发电,可以采用单库单向、单库双向或双库双向等3种形式。按照水轮机工作原理,又可分为冲击式水轮机和反击式水轮机。1912年,德国在Busum建成了世界上第一座潮汐电站,从此开始了潮汐能发电的历史。1967年,世界上第一座大型潮汐电站Rance潮汐电站(240 MW)在法国商业运行,目前仍在正常运行。1984年,加拿大建成Annapolis实验潮汐电站,潮汐发电机组单机容量达到20 MW。2011年韩国的Siwha-lake潮汐电站竣工,成为目前世界上单机和总装机都是最大的潮汐电站。目前,在法国、英国、加拿大、俄罗斯、印度、韩国等13个国家进行的潮汐能开发利用项目中,运行、拟建、在建、设计的潮汐电站超过140座。

建国初期,我国在浙江、福建等东南沿海省份相继建设了40余座潮汐能发电站,虽然由于各种原因陆续废弃,但为潮汐能的利用积累了大量经验。当前还在运行的江夏潮汐电站已正常发电30余年,初始装机容量3.2 MW,经过专项资金以及国家863计划的支持升级改造,电站总装机容量将达4.1 MW,是世界上第四大潮汐能电站。目前,我国已具备低水头大容量潮汐水轮机组设计及加工能力,能在低水位差条件下高效运行,大大提升了潮汐能的利用效率。在海洋可再生能源专项资金支持下,浙江瓯飞(装机容量拟定为400 MW,规模为世界第一)潮汐能电站规划于2013年正式启动。山东乳山口(装机容量40 MW)、福建八尺门(装机容量30 MW)、福建马銮湾(装机容量24 MW)潮汐电站预可研工作稳步实施,目前已基本完成研究任务。在可再生能源规模化发展项目CRESP一期资金的支持下,中国国电集团公司、中国大唐集团公司分别在浙江健跳港、福建八尺门开展了潮汐电站建设前期工作。清华大学、河海大学、华东勘测设计研究院等

正在开展动态潮汐能(DTP)技术研究,寻求一种高效开发潮汐能的新型技术。此外,河海大学在潮汐能发电站的超低水头水轮机方面做了大量研究工作,促进了超低水头竖井贯流式水轮机的快速发展^[12-13]。当前,潮汐能发电技术已不再是瓶颈问题,潮汐发电工程应重点关注如何有效减低投资成本、提高综合效益和减少生态环境影响等方面。

2.2 潮流能发电技术与示范工程

利用潮流动能推动水轮机发电称为潮流能发电,方法类似于风力发电,其发电装置被形象地比喻为“水下风车”。国外的潮流能发电技术研究始于20世纪70年代,发电设备等关键技术处于国际领先地位,达到MW级装机容量。例如,英国MCT(Marine Current Turbine)公司研发的SeaGen 1.2 MW潮流能水轮机于2009年在北爱尔兰海外的Strangford Lough成功满负荷运转,当前正在全力推进SeaGen S(>2 MW)、SeaGen U(>3 MW)系列水轮机。在同一年,加拿大Nova Scotia电力公司设计了1 MW商业型示范样机,并成功安装于Fundy Bay。作为目前全球规模最大的潮流能发电计划,MeyGen潮流能示范工程预计于2016年在英国苏格兰北部的Pentland Firth开始运行,计划安装269台水轮机,装机总容量达到398 MW,一旦完工后,可满足17.5万户家庭用电需求。

近年来,在国家科技计划和专项资金支持下,我国研发了10余项潮流能试验装置,主要潮流能发电技术已全面进入海试阶段,基本解决了潮流能发电的关键技术问题,发电机组的关键部件已基本实现了国产化。例如,哈尔滨工程大学自1980年开始研究潮流能发电机组,其研发的“海能I号”(总装机容量300 kW)已通过海试。目前,哈尔滨工程大学在浙江舟山海域建立的岱山600 kW潮流能机组项目已进入试运行阶段,并取得良好效果。中国海洋大学基于柔性叶片开发的潮流能发电机可双向发电,并于2008年在山东斋堂岛海试5 kW的样机。河海大学在优化双向潮流能发电机组翼型方面也做了大量研究,研发的水平轴式水轮机和垂直轴式水轮机正处于水槽测试阶段,运行效果良好。浙江大学研制的60 kW水平轴潮流能发电机组于2014年进行海试,目前正在与国电联合动力技术公司开展300 kW机组设计与制造。

随着技术的不断成熟,一些大型企业也进入了潮流能示范工程这一领域。当前,中国长江三峡集团公司、华东勘测设计研究院、河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心等单位已完成我国首个MW级潮流能示范工程的整体设计方案,将在浙江舟山普陀山岛与葫芦岛之间海域建设实施。该示范工程建成以后,将为我国的潮流能发电设备提供统一的测试平台。同时,浙江舟山联合动能新能源开发有限公司正在研发的LHD-L-1000林东模块化大型海洋潮流能发电机组,已获得地方政府用海许可。中国节能环保集团在浙江舟山海域通过引进技术正在建设1 MW并网示范项目。山东斋堂岛“500 kW海洋能独立电力系统”示范工程,目前已经向岛上居民供电。这些示范工程的顺利实施已成为商业大规模利用潮流能的重要前提和必经阶段,依托示范工程发现、分析与解决潮流能开发利用的关键技术问题是未来的工作重心。

2.3 波浪能发电技术与示范工程

波浪能发电是以波浪的能量为动力生产电能。一般说来,通过一定的波浪能装置将波浪能首先转换为机械能(液压能),然后再转换成电能。根据转换原理,可将波浪能发电技术分为振荡水柱、摆式、阀式、收缩波道、点吸收(振荡浮子)、鸭式等技术。目前,在国外建成的振荡水柱式发电装置有英国LIMPET 500 kW固定式电站、葡萄牙400 kW固定式电站和澳大利亚500 kW离岸固定式装置。建成的摆式发电装置包括日本5 kW悬挂摆和英国400 kW海底铰接摆Oyster。海蛇Pelamis是阀式发电装置的典型代表,总装机容量为750 kW。目前,正在运转的收缩波道电站有挪威的350 kW固定式收缩波道装置和丹麦的离岸漂浮式波能装置Wave Dragon(>1 MW)。点吸收式发电的典型装置主要有英国的AquaBuoy装置和美国的PowerBuoy装置。国外的波浪发电技术种类多、涉及面广、装机容量跨度大,并在波浪能示范工程中得到较好应用。

我国在波浪能发电技术研究方面,主要开展了功率在100 kW以下装置的研发试验,目前有超过15个波浪能装置开展了海试。国家海洋技术中心研发的30 kW重力摆、100 kW浮力摆波浪能装置均已开展示范运行。中国科学院广州能源研究所目前已建成100 kW固定振荡水翼式电站^[14],在研发5 kW鸭式系列波浪能装置的基础上开展了鹰式波浪能装置研发并进行了1年多的海试,还研发了哪吒系列的点吸式波浪能装置并成功开展了海试。中国船舶重工集团公司第七一〇研究所的150 kW阀式液压波浪发电装置“海龙”在广东万山海域开展了海试。集美大学研发的10 kW浮式波浪能装置“集美1号”在福建小澄岛海域开展了海试。

对于远离陆地而又没有传统能源储备的孤岛,波浪能开发是解决能源供应的可行途径。2009年,在珠江江口的担杆岛初步建成投产综合利用波浪能、太阳能和风能的可再生独立能源电站,岛上300居民实现了

24 h 电力自行供应;山东大管岛波浪能、太阳能和风能多能互补电站为岛上居民生产生活供电,是居民实际需求的 1.1 倍以上^[15]。目前,我国计划在广东珠海万山建设波浪能海上试验场,为波浪能发电设备提供统一的测试平台。同时,在山东威海建设的国家海上综合测试场也可为波浪能设备进行原理测试。相比小功率波浪能发电装置而言,大功率波浪能发电技术与示范工程仍处于起步阶段。

2.4 温差能和盐差能发电技术与示范工程

温差能发电是利用海洋中受太阳能加热的暖表层水与较冷深层水之间的温差进行发电。目前,国外正在实施和计划实施的温差能发电项目主要在日本、荷兰和英国。日本电力公司在 Nauru 成功建设 100 kW 温差能发电站的基础上,将再建造一座 20 MW 的温差能电站。同时,正在利用一座 5 kW 电站进行温差能发电与养殖业的综合利用试验研究。荷兰拟在 Antilles 和 Bali 分别建造 10 MW 浮动式温差能电站和 100 kW 岸基温差能电站。英国也计划在加勒比海或者太平洋修建一座 10 MW 温差能电站。我国的温差能研究处在起步阶段。国家海洋局第一海洋研究所研发了 15 kW 温差能发电装置并开展了电厂温排水试验,同时也进行了温差能技术为海洋观测仪器供电的相关研究。虽然温差能发电的总体规模较小,但是温差能发电技术的研究与发展较为活跃,我国南海西沙群岛被认为是最适合开展温差能开发试验的场地^[16]。

盐差能发电的主要工作原理是将不同盐浓度海水之间的化学电位差能转换成水的势能,再驱动水轮机发电。盐差能的研究以美国、以色列的研究较为领先,中国、瑞典和日本等也开展了一些研究。例如,Statkraft 公司从 1997 年开始研究盐差能利用装置,2003 年建成世界上第一个专门研究盐差能的实验室,2008 年设计并建设了一座功率为 2~4 kW 的盐差能发电站。相比其他海洋能而言,盐差能利用技术还处于实验室原理研究阶段。

3 关键科技问题

3.1 新型结构形式

为减少潮汐电站对环境的影响,新的潮汐能利用方式应运而生。Cornett 等^[17]讨论了建设潟湖潮汐电站对环境的影响,预测在 Fundy 河口建设潟湖潮汐电站的发电量。潟湖潮汐电站是在潮差较大的河口、海湾等近岸地区,建设圆形等形式的围堰,涨潮注水、落潮截流,等围堰内外形成可利用的水头差后开始发电。同时,英国也开始着手在 Swansea Bay 建设潟湖潮汐电站,该发电站将由 6 个巨型潮汐能转换设施构成,完工后将负责全英国 8% 的供电。

潮流能开发利用时,因水流结构垂向上的变化,会引起布置在表层和底层的潮流能水轮机输出电量的不同。Sanchez 等^[18]针对西班牙 Galiza 一个河口地区,对比分析了座底式和漂浮式潮流能水轮机的发电量,由于水平速度在垂直方向上不均匀分布,采用漂浮式潮流能水轮机的发电量大于采用座底式潮流能水轮机的发电量。

在波浪能发电方面,传统的岸式振荡水柱式设备不能适应水平面的涨落,在应用上具有一定的局限性,人们开始寻求漂浮式波浪能技术,例如以英国 McCabe 和丹麦 Pelamis 为代表的阀式波浪能发电技术和以英国 AquaBuoy 为代表的点吸式波浪浮子技术。

然而,单一的海洋能利用形式开发成本太高,与常规能源利用相比经济性不好,不利于大规模商业推广。研发新型海洋能开发利用工程结构,建设多能互补的电站,综合利用潮汐能、潮流能、波浪能、海上风能和太阳能,可以提高能源开发效率。研究新型的防波堤、挡潮闸、围堤形式以利用海洋能,是促进海洋能商业化开发利用的有效途径^[19]。

3.2 结构与基础的安全稳定

在全球气候环境变化影响下,极端天气不断增加,其引起的台风浪、风暴潮等恶劣海况对海洋能利用工程及其设备的破坏也不可忽视,如何有效保护工程及其设备设施的安全与稳定已成为海洋能利用的关键难点。与传统的静态海洋工程结构如防波堤与海上石油平台相比,海洋能利用工程的发电装置具有动态发电特点,例如,潮流能叶片运作与波浪浮子运动,对其桩基等固定基础结构的冲刷防护有更高要求^[20]。

灾害性海洋过程如台风浪、风暴潮等也蕴含了巨大能源,如果能从海洋灾害中提取出能量,既能防灾减灾、又能提供能源,可为海洋能的开发利用拓宽思路。海洋能利用工程材料的使用环境苛刻,处于水表面的部分长期受干湿交替、冷热循环作用,对结构与基础的耐久性提出了更高要求;海下结构长期受海水及海生

物的侵蚀产生腐蚀,除了承担自身重力外,还遭受风浪、海流、地震、低温等自然力的恶劣海况^[21]。此外,微生物附着不但会降低海洋能的发电效率,也会影响结构物的生命周期。因此,对海洋能利用工程的结构与基础提出了高强度、高韧性、耐低温、抗疲劳、防生物附着等要求,急需开展系统深入的研究。

3.3 海域水沙环境影响

根据能源分布的特点,海洋能利用工程多采用阵列布局的发电机组,如潮流能水轮机阵列、波浪能浮子阵列等发电机组。进入21世纪以来,在海洋能开发利用的实践工程中,欧美等发达国家开始关注和评估海洋能利用工程对临近海域环境的影响。海洋能发电机组在安装、运行和报废的不同阶段都会直接影响其周边水沙动力生态环境,其中主要包括水文动力环境、沉积物环境、水质环境、生态环境和地形地貌等^[22-23]。例如,潮流能水轮机转动对潮流动力产生扰动影响,在叶轮区提取能量将改变潮流流速和方向,水下支撑结构影响附近区域的流体动力特性。Robins等^[24]以英国 Skerries Islands 附近的潮流能电站为例,发现当潮流能的开发规模大于50 MW时,发电机组局部的泥沙输运过程与岸滩演变规律会受到显著影响。但是,目前这方面的影响都以定性分析为主,并未对海洋能利用工程的环境影响进行量化研究。现有规划的海洋能利用示范工程,例如,英国的 MeyGen 示范工程项目和我国的舟山潮流能示范工程项目,通常分为多个阶段,海洋环境影响的现场观测、分析与预测是第一阶段实施的重要工作内容,可为后续阶段和其他类似工程建设提供重要参考价值。为尽可能减少甚至避免海洋能利用对临近水域水沙环境的不利影响,应尽早开展影响评价体系研究以便进行定量评估,促进环境友好型海洋能利用工程的发展。

3.4 转换效率与并网技术

海洋能发电一般是先将海洋能转换成机械能,再转换为电能。目前,海洋能发电装置的转换效率低,急需研发高转换效率的发电装置。同时,海洋能输出功率受自然资源特性,如潮流流速流向、波浪浪高等限制,具有很强的随机变化性、间歇性、波动性等特点,输出功率变化大。发展海洋能既可以建立独立分布式电站,也可以建立并网式电站。建立独立式电站应考虑电力用户需求问题,只要沿海和岛屿居民有需求就可以就近布置电站,不考虑并网问题。当考虑海洋能发电并网时,海洋新能源并网会给电力系统的调峰、调频、电压控制、电能质量等带来一定的影响^[25]。为了充分发挥海洋能发电的优势,解决其输出功率波动对电网的影响,需要在发电系统中配置一定容量的储能装置。控制储能系统和发电场的协调运行,使储能系统适时吸收和释放功率,可以有效地平抑海洋能电场注入电网的功率波动,改善并网设备运行稳定性,提高源网协调性能。

4 结 语

海洋能利用工程正成为港口、海岸及近海工程学科的前沿研究热点之一。本文回顾了海洋能利用工程领域的资源调查与评估、能源转换技术与示范工程的国内外最新研究进展,指出了其所面临的许多挑战。集成多功能的新型结构形式、恶劣海况下的结构与基础的安全稳定、复杂未知的海岸与近海水沙环境影响、高效可控的转换效率与并网技术等关键科技问题是大规模利用海洋能的研究重点与难点,急需开展系统深入的学术研究和工程实践。

参考文献:

- [1] 邱大洪.海岸与近海工程学科中的科学技术问题[J].大连理工大学学报,2000,40(6):631-637.(QIU Dahong.Science and technology problems in coastal and offshore engineering[J].Journal of Dalian University of Technology,2000,40(6):631-637.(in Chinese))
- [2] 左其华,窦希萍,段子冰.我国海岸工程技术展望[J].海洋工程,2015,33(1):1-13.(ZUO Qihua,DOU Xiping,DUAN Zibing.Prospects of coastal engineering technology in China[J].The Ocean Engineering,2015,33(1):1-13.(in Chinese))
- [3] XIA J,FALCONER R A,LIN B.Impact of different tidal renewable energy projects on the hydrodynamic processes in the Severn Estuary,UK[J].Ocean Modeling,2010,32(1/2):86-104.
- [4] LEWIS M,NEILL S P,ROBINS P E,et al.Resource assessment for future generations of tidal-stream energy arrays[J].Energy,2015,83:474-477.
- [5] BRYSON R D,CLAYTON E H,BRADLEY J B.Characterizing the near shore wave energy resource on the west coast of Vancouver Island,Canada[J].Renewable Energy,2014,71:665-678.
- [6] WANG Shujie,YUAN Peng,LI Dong,et al.An overview of ocean renewable energy in China[J].Renewable and Sustainable

- Energy Reviews, 2011, 15(1): 91-111.
- [7] ZHANG Yongliang, LIN Zheng, LIU Qiulin. Marine renewable energy in China: current status and perspectives [J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(3): 288-305.
- [8] 国家海洋技术中心. 中国海洋能近海重点区资源特性与评估分析[R]. 北京: 国家海洋技术中心, 2015.
- [9] 武贺, 王鑫, 韩林生. 成山头海域潮流能资源可开发量评估[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(3): 570-576. (WU He, WANG Xin, HAN Linsheng. Assessment of extractable energy of tidal current at Chenshantou Cape [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(3): 570-576. (in Chinese))
- [10] 纪洪艳. 海洋能能量转换计算及微观场址布局方法简述[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(4): 128-134. (JI Hongyan. Overview of the marine energy conversion calculation and micro site layout method [J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(4): 128-134. (in Chinese))
- [11] ZHANG Jisheng, WANG Jun, TAO Aifeng, et al. New concept for assessment of tidal current energy in Jiangsu Coast, China [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013. doi: 10. 1155/2013/340501.
- [12] 李玲玉, 郑源, 周大庆, 等. 超低水头竖井贯流式水轮机数值模拟[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 168-170. (LI Lingyu, ZHENG Yuan, ZHOU Daqing, et al. Numerical simulation for shaft tubular water turbine with super-low head [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2013, 31(2): 168-170. (in Chinese))
- [13] 郑源, 吴春旺, 牟敏, 等. 新型潮汐双向竖井贯流式水轮机能量特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 66-70. (ZHENG Yuan, WU Chunwang, MO Min, et al. Research on energy characteristics of new-type bidirectional shaft tubular turbine [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 66-70. (in Chinese))
- [14] 陈誉, 李龙, 刘政. 振荡水柱波浪发电空气透平工作特性数值模拟[J]. 水电能源科学, 2015, 33(3): 160-163. (CHEN Yu, LI Long, LIU Zheng. Numerical simulation of working performance on air turbine for wave energy conversion [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2015, 33(3): 160-163. (in Chinese))
- [15] 熊焰, 王海峰, 崔琳, 等. 大管岛多能互补独立发电系统的发电量设计[J]. 海洋技术, 2009, 28(1): 101-103. (XIONG Yan, WANG Haifeng, CUI Lin, et al. Study on power generation design of stand-alone hybrid power system in Daguan Island [J]. Ocean Technology, 2009, 28(1): 101-103. (in Chinese))
- [16] 施伟勇, 王传崑, 沈家法. 中国的海洋能资源及其开发前景展望[J]. 太阳能学报, 2011, 32(6): 913-923. (SHI Weiyong, WANG Chuankun, SHEN Jiafa. Utilization and prospect of ocean energy resource in China [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(6): 913-923. (in Chinese))
- [17] CORNETT A, COUSINEAU J, NISTOR L. Assessment of hydrodynamic impacts from tidal power lagoons in the bay of Fundy [J]. International Journal of Marine Energy, 2013, 1: 33-54.
- [18] SANCHEZ M, CARBALLO R, RAMOS V, et al. Energy production from tidal currents in an estuary: a comparative study of floating and bottom-fixed turbines [J]. Energy, 2014, 77: 802-811.
- [19] 王树杰, 王举田, 刘锦昆, 等. 海工构筑物海洋能集成利用技术探讨[J]. 海洋工程, 2015, 33(4): 115-120. (WANG Shujie, WANG Jutian, LIU Jinkun, et al. Investigation and discussion of marine structures integrated with ocean energy devices [J]. Ocean Engineering, 2015, 33(4): 115-120. (in Chinese))
- [20] LI Linjuan, ZHENG Jinhai, PENG Yuxuan, et al. Numerical investigation of flow motion and performance of a horizontal axis tidal turbine subjected to a steady current [J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(2): 209-222.
- [21] 李扬眉, 杨立, 杨东菊, 等. 海洋能发电装置的防腐技术概述[J]. 海洋技术, 2011, 30(3): 108-110. (LI Yangmei, YANG Li, YANG Dongju, et al. Study on anti-corrosion of ocean energy conversion device [J]. Ocean Technology, 2011, 30(3): 108-110. (in Chinese))
- [22] 孟洁, 张榕, 孙华峰, 等. 浅谈海洋能开发利用环境影响评价指标体系[J]. 海洋技术, 2013, 32(3): 129-132. (MENG Jie, ZHANG Rong, SUN Huafeng, et al. Discussion on the index system of environmental impact assessment for ocean energy resource utilization [J]. Ocean Technology, 2013, 32(3): 129-132. (in Chinese))
- [23] 于灏, 徐焕志, 张震, 等. 海洋能开发利用的环境影响研究进展[J]. 海洋开发与管理, 2014(4): 69-74. (YU Hao, XU Huanzhi, ZHANG Zhen, et al. Research progress on environmental impacts of the utilization and explosion of ocean renewable energy [J]. Ocean Development and Management, 2014(4): 69-74. (in Chinese))
- [24] ROBINS P, SIMON P, LEWIS R. Impacts of tidal-stream arrays in relation to natural variability of sedimentary processes [J]. Renewable Energy, 2014, 72: 311-321.
- [25] 吴峰, 鞠平, 秦川, 等. 近海可再生能源发电研究综述与展望[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42(1): 80-87. (WU Feng, JU Ping, QIN Chuan, et al. Progress and prospect of research on offshore renewable energy generation [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(1): 80-87. (in Chinese))