

中国海域波浪能资源分布及波浪能发电装置适用性研究

胡 聪¹, 毛海英¹, 尤再进¹, 石洪源¹, 高 松²

(1. 鲁东大学 土木工程学院, 山东 烟台 264000; 2. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266000)

摘要: 首先全面综述了国内外波浪能资源开发利用现状, 系统总结了目前国内外海洋波浪能资源发电技术中应用的主要波浪能资源开发装置及存在问题; 基于 ERA-Interim 再分析数据, 给出了中国海域的平均波浪能流密度和季节特征, 从而获取高波能资源分布区域, 得到了中国海域波浪能资源分布富集区域; 结合不同海岸岸线及海底类型, 综合给出了中国波浪能资源富集区域中发电装置适用建议、高峰发电季节。对提高我国波浪能资源开发利用、推动海洋可再生能源行业的发展具有重要意义, 也为实用化、商业化海洋波浪能资源选址提供了科学依据。

关键词: 波浪能资源; 中国海域; ERA-Interim; 发电装置

中图分类号: TV92 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)03-0142-07

DOI: 10.11759/hyxx20170103002

近年来, 随着传统能源资源(煤、石油等)的日益枯竭, 新能源的开发和利用备受关注, 我国大陆岸线 1.8×10^4 km, 岛屿岸线资源、海洋可在生能源资源十分丰富, 根据“我国近海海洋综合调查与评价”结果分析, 我国海洋能资源(包括潮汐能、波浪能、温差能和风能等)的装机总容量超过 15.8×10^8 kW, 但海洋能资源的开发相对缓慢, 部分离岸海岛仍没有电力供应, 严重制约了我国沿海经济的发展。为了缓解能源的压力、调整国家能源结构和发展海洋经济, 解决海岛用电问题, 开发利用海洋波浪能资源已迫在眉睫。波浪能资源作为海洋可在生能源的一种, 具有独特的优点, 相对于传统能源而言, 其优点在于: 可再生性, 海洋中分布广泛, 终而复始; 时间规律性, 波浪能的变化会随年、季、月周期性变化; 局部区域能流密度大, 波浪能流密度与波高、周期有关, 局部区域波高、周期大, 波浪能流密度亦很大; 清洁无污染, 波浪能的开发利用不会影响海洋及大气环境。

我国海洋波浪能资源十分丰富, 大力开发和利用海洋能资源对于我国实行可持续发展战略, 缓解常规能源紧张带来的能源问题具有重大战略意义。本文给出了目前国内外海洋波浪能资源发电技术中应用的主要波浪能资源开发装置及存在问题, 基于 ERA-Interim 再分析数据数值计算了 1985—2015 年 30 年的中国海域波浪能资源分布, 得到了中国海域波浪能资源分布富集区域, 并结合不同海岸岸线及海底类型给出了中国海域波浪能资源开发利用发电

装置的适用性建议, 为实用化、商业化海洋波浪能资源选址提供了科学依据。

1 中国海域波浪能资源分布综合评估

目前世界各国普遍开展了波浪能资源的评估的研究。起初波浪能评估的研究主要以现场观测为主^[1], 但无法获取长时连续的观测资料。随后波浪能评估主要采用全球数值预报模式进行^[2-3]。郑崇伟等^[4]利用 2013 年以前 5 年的实测海浪数据, 对台湾周边海域的波浪能资源进行分析。万勇等^[5]利用 ERA-Interim 再分析数据评估了 2013 年以前渤、黄、东海的波浪能状态分布, 但未对南海海域波浪能进行评估。本文数值计算了中国海域 30 年的波浪能数据, 系统地对中国海域的波浪能进行了评估, ERA-Interim 再分析数据较全面地给出了全球波浪能分布, ERA-Interim 是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的全球大气数值预报再分析资料, 空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, 时间分辨率为 6 h。研究区域 $105^\circ \sim 135^\circ \text{E}$,

收稿日期: 2017-01-03; 修回日期: 2017-05-10

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2017BEE047); 国家海洋局海洋能专项(GHME2014ZC01); 国家级大学生创新创业训练计划(201710451004) [Foundation: Natural Science Foundation of Shandong Province, No.ZR2017BEE047; Ocean Energy of State Oceanic Administration, No. GHME2014ZC01; National Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship, No.201710451004]

作者简介: 胡聪(1986-), 男, 山东泰安人, 博士, 讲师, 从事港口、海岸工程及其与海洋环境的相互作用研究; 毛海英(1985-), 通信作者, 女, 河南商丘人, 博士, 讲师, 从事海洋立管与土体相互作用、圆柱绕流及涡激振动研究, E-mail: maohaiying16@163.com

5°~43°N。波浪能是指海洋表面波浪所具有的动能和势能。Roger 利用 WW-III 数值计算了波浪能流密度, 本文采用美国 Electric Power Research Institute 波浪能流密度评估方法来估算 1985—2015 中国海域波浪能:

$$P_m = 0.5H^2T \quad (1)$$

式中, P_m 是波浪能密度(单位: kW/m), H 是 1/3 大波高(m), T 是平均周期(s)。

应用 ERA-Interim 计算得到的波浪能流密度年平均的变化分布特征。在波浪能评估中, 大于 2 kW/m 时可用, 中国海域波浪能主要集中在南海海域及台湾以东海域, 东海海域、黄海海域波浪能分布一般, 渤海海域波浪能分布最少。春季, 中国近海海域波浪能密度减幅较大, 大值可达 7 kW/m 以上; 夏季和春季相比, 中国近海海域波浪能密度有增大, 大值可达 10 kW/m 以上; 中国近海海域秋季波浪能密度继续增大, 大值可达 13 kW/m 以上; 中国近海海域冬季波浪能最丰富, 大值可达 16 kW/m 以上。综上中国近海海域波浪能资源秋季和冬季较丰富。

2 国内外波浪能资源发电装置研究现状及存在问题

波浪能资源的开发和利用可追溯到 1799 年, 法国最早开发了波浪能转换设备, 18 世纪末英国爱丁堡大学能源工程学院研究开发海洋波浪能资源, 随后挪威、葡萄牙、美国、澳大利亚和日本等国家相继开发了波浪能资源利用发电装置, 逐渐涌现出了波浪能利用及转换技术, 其目前国际上主流的波浪能资源利用及转换技术包括: 振荡水柱式、越浪式、摆式。近年来, 波浪能的开发利用技术逐渐由固定式到浮式, 从刚性连接结构到柔性连接结构, 通过改变波浪能装置来提高波浪能利用效率和装置的转换效率。

2.1 国外现状

目前波浪能发电装置有振荡水柱式、收缩波道式、摆式等, 本文将从发电原理及各国的研究现状对波浪能发电装置进行综述。

2.1.1 振荡水柱式波浪能转换装置

振荡水柱式波浪能发电装置(oscillation water column, OWC)是一种利用波浪运动带动充气舱与外界大气之间压力差变化的波浪能发电装置, 当波浪上升及回落时, 高速气流与空气水轮机相连的发电机发电, 由于采用的可变螺距涡轮叶片, 空气不论沿哪个方向流出都会引起涡轮的同方向旋转, 把涡轮叶片的

动能转化为电能。图 1 给出了振荡水柱装置图, 目前振荡水柱装置的安装位置一般在近岸海底, 在深海可以利用锚泊系统进行安装。目前已经建成的振荡水柱装置: 英国 Wavegen 公司的 LMPET (land installed marine powered energy transformer)固定岸式 500 kW 电站、澳大利亚 Uisce Beatha 的 500 kW 离岸电站(图 2)、挪威 500 kW 岸式电站和葡萄牙 400 kW 固定岸式电站等。



图 1 振荡水柱装置

Fig. 1 Oscillation water column



图 2 澳大利亚的 OWC

Fig. 2 OWC of Australia

在振荡水柱式波浪能转换装置的基础上进一步研究发明了振荡浮子式波浪能转换装置(oscillating-body, OB), 它是由浮动装置(浮子)依靠自身的浮力沿由系锚装置固定的二级浮子做相对运动, 由动能转化为电能。由于振荡浮子式装置的运动没有方向性, 又称其为“点吸式”。目前振荡浮子式波浪能转换装置较成熟的是 750KW 的英国 Pelamis 装置^[6], 该设备在苏

格兰试验后安装到葡萄牙,已经进入商业运行阶段。由海洋电力技术公司开发的小型(40~250 kW)的 Power Buoy 已安装在美国夏威夷、新泽西及西班牙的北部海岸。此外,正在研发中的振荡浮子式波浪能发电装置还有爱尔兰的 Wavebob, WET-NZ、英国的 archinedes wave swing (AWS)^[7-8]及巴西的高压发电装置等。

2.1.2 越浪式波能转换装置

收缩波道式波浪能转换装置式越浪式的一种,它是将波浪集中到一个高于自由水平面的蓄水装置中,把波浪能转化为水的势能,形成水头差,利用水的势能转化为水轮发电机的机械能进行发电,其工作原理是类似于水利工程中的坝体发电装置。收缩波道式装置可以建设为浮式,也可建设在海岸线上及防波堤内。越浪式波能装置主要包括收缩波道技术(tapered channel)、槽式技术(sea slot-cone generator)和波龙(wave dragon)。已经研制成功有丹麦的 Wave Dragon 波力发电装置、挪威 350KW 收缩波道式电站、挪威的 SSG 槽式波能发电装置等。

2.1.3 摆式波能转换装置

摆式波浪能转换装置是利用海水波动推动摆板来回摆动吸收波浪的能量。摆式波浪能转换装置悬分为挂摆式波浪能发电装置和浮力摆式波浪能发电装置。挂摆式波浪能发电装置的摆动板的轴在上方,摆板在下方摆动,像钟摆一样,故称为悬挂摆;浮力摆的摆板为空心的板状体,摆板有两个摆板臂,在摆板臂上有摆板的主轴,在摆板体上有活塞杆支座。活塞杆通过轴联接浮力摆,活塞杆可在液压缸中来回移动。图 3 给出了摆式波浪能发电装置图,相比其他装置而言,摆式波能发电装置成比较低且效率高,但维修较困难。目前英国 Aquamarine-Power 公司研发的 Oyster 式装置和芬兰 AW-Energy 研发的 WaveRoller 式装置^[9]已经成熟应用。

2.1.4 筏式波浪能转换装置

筏式波浪能转换装置是由筏体、铰接链和液压系统组成,筏式波浪能转换装置布置方式为顺波浪方向,波浪运动带动筏体运动,把波浪能转换为筏体运动的机械能。英国的海蛇筏式波浪能转换装置是由多节圆筒状的浮筒铰接组成,筒间的铰链可上下左右方向弯曲,漂浮在海面上,其首部朝向波浪来的方向,随波浪上下左右扭动,像蛇一样,故称之为海蛇,图 4 给出了筏式波浪能发电装置图。2008 年 9 月葡萄牙建造的世界第一座商用波浪能发电厂,通过 3 根 140 m 长的“红色海蛇”和连接在葡萄牙北

海面海床处的圆柱形波浪能转换器,将波浪能转化为电能,然后通过海底电缆中转站,最终注入电网。

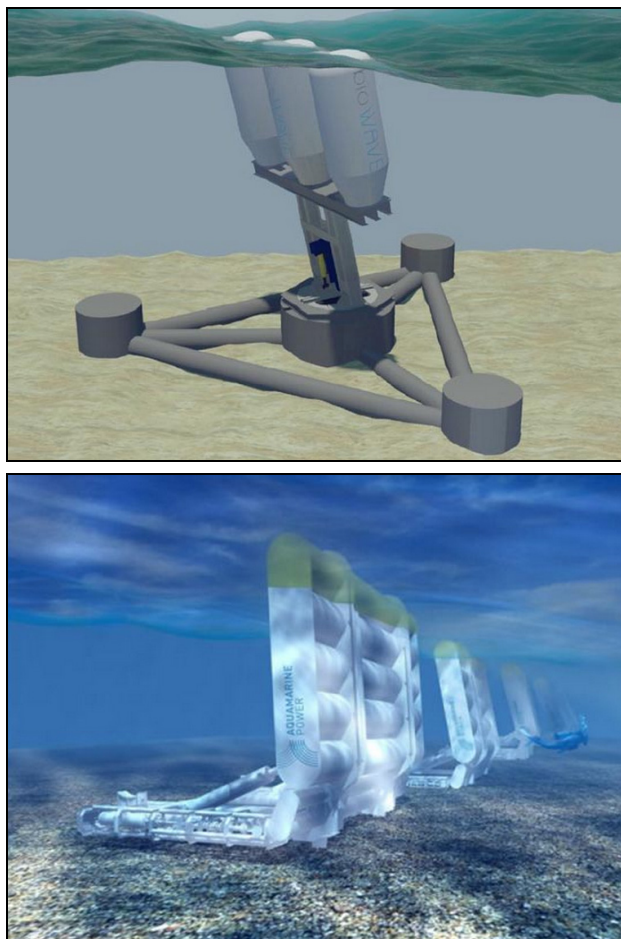


图 3 摆式波浪能发电装置

Fig. 3 The pendulum wave-power-generating device

2.2 国内现状

我国波浪能资源潜在量约为 770×10^4 kW,资源较富集的省份是广东省,其次为福建省、浙江省和海南省。我国近代的波浪能研究始于 1968 年,航空工业部 623 所的樊世荣研究了基于水翼原理的波浪能资源发电装置。由上海市机电局牵头 1975 年研制了 1 kW 的波浪能资源发电浮标并在浙江省嵊山岛附近进行了试验,1977 年又研制了小型航标灯用波浪能资源发电装置并在长江口的横沙岛附近进行了试验。1980 年开始波浪能资源发电装置的研究发展迅速,中国科学院广州能源研究所、中国海洋大学、华南理工大学、国家海洋技术中心和中船重工第 710 研究所等开始从事波浪能利用技术研究,其中研究的波能装置主要包括:固定式振荡水柱、漂浮式和摆式等波能装置。小型固定式和用于航标灯的波浪能

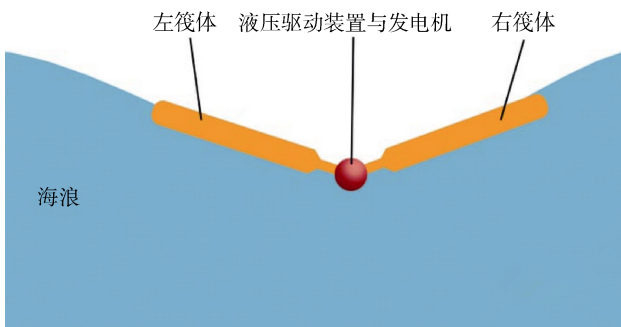


图4 筏式波浪能发电装置

Fig. 4 Raft-type wave energy power generation device

发电装置已进入商业化运行阶段。1990年由中科院广州能源研究所研发的3 kW岸式波浪能发电装置正常运行发电,1996年又相继研发了5 kW发电船和20 kW岸式波浪能发电装置。同年国家海洋局海洋技术中心研发了30 kW摆式波浪能发电装置,该装置在青岛即墨大官岛成功运行,其平均输出功率可达到30 kW^[10]。2005年中国科学院广州能源研究所研发了100 kW的岸式波浪能发电装置发电^[11]。为了给远

海岛屿供电,2009年中国海洋大学研发了6 kW的小型越浪式波浪发电装置。2015年11月,广州能源研究所在珠海市万山岛海域顺利投放了鹰式波浪能发电装置“万山号”,该装置长36 m,宽24 m,高16 m,为半潜驳与波浪能转换设备的结合体,“万山号”前期装机120 kW装置在小于0.5 m浪高的波况下频繁蓄能、发电。我国计划到2020年,在海南、广东、山东各建1座1 000 kW级的岸式波力电站^[12]。

2.3 存在问题

虽然波浪能发电装置的研发已取得了很多成果和进展,但相对与太阳能、风能等清洁能源利用装置而言,波浪能发电装置尚未普遍使用,主要原因可归结为以下两点。

(1) 发电成本较高

据相关计算,常规的热发电的成本仅为海洋波浪能的发电成本的十分之一^[13-14],如此高的成本费用已成为制约波浪能发电装置商业化运行的主要因素。只有采用先进的高效的波浪能发电装置,合理控制发电成本,达到低成本高收益水平时,波浪能发电装置方可普及。

(2) 发电效率较低

海洋中的波浪是非线性变化的,波浪能发电装置无法获得稳定输入的能量,本文统计了国内外的研究资料,对不同发电装置的转换效率进行了对比。振荡水柱式波能转换装置、摆式波能转换装置和筏式波浪能转换装置需要三级能量转换,越浪式波能转换装置需要两级能量转换,平均转换效率在10%~30%,表1给出了不同波浪能资源发电装置及其转换效率。

表1 不同波浪能资源发电装置及其转换效率

Tab. 1 Different power generation devices and their conversion efficiencies

转换装置	转换级别	能量转换方式	转换效率/%	平均转换效率/%
振荡水柱式波能转换装置	一级	波浪能转换为气流能	60	10
	二级	气流能转换为叶轮机机械能	20	
	三级	叶轮机机械能转换为电能	80	
越浪式波能转换装置	一级	波浪能转换为水势能	40	28
	二级	水的势能转换为电能	70	
摆式波能转换装置	一级	波浪能转换为机械能	50	30
	二级	机械能转换为液压能	80	
	三级	液压能转换为电能	75	
筏式波浪能转换装置	一级	波浪能转换为机械能	20	10
	二级	机械能转换为液压能	60	
	三级	液压能转换为电能	80	

3 中国海域波浪能发电装置适用性

中国海域广阔,波浪能的分布不均匀,不同海域季节变化亦很大,本文给出了波浪能分布富集区域并根据不同海域岸线资源特点选择合适的发电装置,给出了不同波浪能发电海域的适用季节。

渤海海域海域面积 7.7 万 km², 平均水深 18 m。波浪能分布较丰富区域为山东半岛北部,西起莱州湾莱州附近,东至山东半岛北岸的蓬莱角,由于该处海岸线多为基岩岸线,建议适用固定近岸式振荡水柱式和摆式波能转换装置。考虑到渤海湾冬季结冰问题,适用季节建议秋季和冬初。

黄海海域海域面积约 38 万 km², 平均深度 44 m。波浪能分布较丰富区域为山东半岛东部海域(威海)和江苏沿海海域(北起连云港,南至南通沿海)。山东半岛东部海域(威海)以基岩海岸为主,建议适用固定近岸式振荡水柱式和摆式波能转换装置;江苏沿

海海域(北起连云港,南至南通沿海)以淤泥质海岸为主,建议适用筏式波浪能转换装置,适用季节建议秋季和冬季。

东海海域海域面积 77 万 km², 东海大陆架平均水深 72 m, 波浪能分布较丰富区域为舟山群岛附近海域和福建沿海海域(北起温州,南至莆田)。舟山群岛附近海域主要以离岸岛为主,建议适用振荡浮筒式波浪能发电装置;福建沿海海域(北起温州,南至莆田)以基岩海岸为主,建议适用固定近岸式振荡水柱式和摆式波能转换装置,适用季节建议春季、秋季和冬季。

南海海域海域面积最广,约有 356 万 km², 波浪能分布较丰富的近岸区域主要从汕头海域到珠江口万山海域,汕头海域到珠江口万山海域以基岩海岸为主,建议适用固定近岸式振荡水柱式和摆式波能转换装置,由于附近海域波能资源丰富,亦可适用于振荡浮子式和筏式波浪能转换装置,适用季节建议春季、秋季和冬季。

表 2 中国海域波浪能发电装置适用性

Tab. 2 Applicability of wave-energy-generating devices in China Sea

中国海域	波能丰富海域范围	建议发电装置	综合效率/%	高峰发电季节	海岸岸线或海底类型要求
渤海	山东半岛北部海域	固定振荡水柱式	10	秋季和冬初	岩石海岸
		越浪式波能转换装置	28		岩石海岸
		摆式波能转换装置	30		砂质/岩石海底
黄海	山东半岛东部海域	固定振荡水柱式	10	秋季和冬季	岩石海岸
		越浪式波能转换装置	28		岩石海岸
		摆式波能转换装置	30		砂质/岩石海底
	江苏沿海海域	筏式波浪能转换装置	10	无	
东海	舟山群岛附近海域	振荡浮筒式发电装置	10	春季、秋季和冬季	无
	福建沿海海域	固定振荡水柱式	10		岩石海岸
		越浪式波能转换装置	28		岩石海岸
		摆式波能转换装置	30	砂质/岩石海底	
南海	汕头海域到珠江口	固定式转换装置	10	春季、秋季和冬季	岩石海岸
	万山海域	越浪式波能转换装置	28		岩石海岸
		浮式波浪能转换装置	10		无

本文给出了波浪能分布富集区域并根据不同海域岸线资源特点选择合适的发电装置,给出了不同波浪能发电海域的适用季节。对于波能丰富的海域而言,建议发电装置存在两种以上的,可以从综合效率入手选择综合效率较高者。

4 结论及建议

通过对中国海域波浪能资源分布及波浪能发电

装置适用性研究分析与研究得到以下结论及建议:

(1) 分析了波浪能资源的成因与优缺点,全面综述了国内外波浪能资源开发利用现状,系统总结了国内外海洋波浪能资源发电技术中应用的主要波能装置,波浪能发电装置主要从波能资源发电装置有振荡水柱式、收缩波道式、摆式等进行对比分析。

(2) 基于 ERA-Interim 再分析数据数值计算了 1985—2015 年 30 年的中国海域波浪场,给出了中国

海域的平均波浪能流密度和季节特征,从而获取高波能区域,中国海域波浪能资源主要集中在南海海域及台湾以东海域,东海海域、黄海海域波浪能资源分布一般,渤海海域波浪能资源分布最少,中国近海海域波能资源秋季和冬季较丰富。

(3) 给出了波浪能分布富集区域并根据不同海岸线资源特点选择合适的发电装置,给出了不同波浪能发电海域的适用季节,为实用化、商业化海洋波浪能选址提供了科学依据。

参考文献:

- [1] Pontes M T. Assessing the european wave energy resource[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998, 120(4): 226-231.
- [2] Pontes M T. A nearshore wave energy atlas for Portugal[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2005, 127(3): 249-255.
- [3] Folley M, Whittaker T J T. Analysis of the nearshore wave energy resource[J]. Renewable Energy, 2009, 34(7): 1709-1715.
- [4] 郑崇伟, 林刚, 邵龙潭. 台湾周边海域波浪能资源研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1179-1186.
Zheng Chongwei, Lin Gang, Shao Longtan. Wave energy resources analysis around Taiwan waters[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1179-1186.
- [5] 万勇, 张杰, 孟俊敏, 等. 基于 ERA-Interim 再分析数据的 OE-W01 区块波浪能资源评估[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1278-1287.
Wan Yong, Zhang Jie, Meng Junmin, et al. Assessment of wave energy resources for the OE-W01 area based on ERA-Interim reanalysis data[J]. Resources Science, 2014, 36(6): 1278-1287.
- [6] Clement A, Macullen P, Falcao A, et al. Wave energy in Europe current status and perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6: 405-431.
- [7] Henderson R. Design simulation and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2006, 31: 271-283.
- [8] Valerio D, Beiriao P, Sa Da Costa J, et al. Optimization of wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing[J]. Ocean Engineering, 2007, 34: 2330-2344.
- [9] YUE Chengyun, Chuang Shihuan. Analysis of a piston-type porous wave energy converter[R]. Taiwan: Department of Harbor and River Engineering, 2010.
- [10] 平丽, 董国海, 游亚戈. 波浪能转换技术的研究与发展[J]. 水利水电科技进展, 2004, 2(14): 124-1247.
Ping Li, Dong Guohai, You Yage. Research and development of wave energy conversion technology[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 2(14): 124-1247.
- [11] 游亚戈. 国内外波能装置介绍[DB/OL]. [2007-03-19]. <http://newenergy.giec.cas.cn/hynxsdtrqshw/>.
You Yage. Introduction of wave energy device at home and abroad[DB/OL]. [2007-03-19]. <http://newenergy.giec.cas.cn/hynxsdtrqshw/>.
- [12] 沈利生, 张育宾. 海洋波浪能发电技术的发展与应用[J]. 能源研究与管理, 2010, 4: 55-58.
SHEN Lisheng, ZHANG Yubin. Development and application of ocean wave energy power generation technology[J]. Energy Research and Management, 2010, 4: 55-58.
- [13] 张丽珍, 羊晓晨, 王世明, 等. 海洋波浪能发电装置的研究现状与发展现状[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(1): 161-164.
Zhang Lizhen, Yang Xiaochen, Wang Shiming, et al. Research status and developing prospect of ocean wave power generation device[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(1): 161-164.
- [14] 陈文创, 张永良. 筏式波浪能装置波能转换液压能效率的数值研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 191-196.
Chen Wenchuang, Zhang Yongliang. Numerical study on conversion efficiency from wave energy to hydraulic energy by raft-type wave energy convertors[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(5): 191-196.

Study on the distribution of wave energy resources in China and the applicability of wave energy generation device

HU Cong¹, MAO Hai-ying¹, YOU Zai-jin¹, SHI Hong-yuan¹, GAO Song²

(1. College of Civil Engineering, Ludong University, Yantai 264000, China; 2. North China Sea Maring Forecasting Certer, Satate Oceanic Administration, Qingdao 266000, China)

Received: Jan. 3, 2017

Key words: wave energy resources; China sea; ERA-Interim; power devices

Abstract: The development and utilization of wave energy at home and abroad are described, and the main wave energy resource development devices used in ocean wave energy generation technology are summarized, as well as the existing challenges. Distribution of wave energy in China during 1985–2015 is calculated and analyzed by ERA-Interim to obtain the annual wave energy density distribution, and consequently the high wave energy resource distribution area. According to the different coastlines and bottom types, this paper presents China wave energy generation devices and power generation peak seasons for considered enrichment areas, which are very significant to improve the development of wave energy resources and promote the development of the renewable energy industry in China, as well as provide a scientific basis for practical and commercial ocean wave energy resource selection.

(本文编辑: 刘珊珊)