

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2017.04.005

多点吸收式波浪能海水淡化技术分析 及其结构设计

杨绍辉^{1,2,3}, 张明镛¹, 何宏舟^{1,2,3}, 李 晖^{1,2,3}, 张 军^{1,2,3}

(1.集美大学 机械与能源工程学院, 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; 3.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)

摘 要:从波浪能和海水淡化技术的研究现状出发,指出了波浪能海水淡化技术未来发展的趋势。提出并设计了多点吸收式波浪能海水淡化装置,讨论了该装置的结构组成与运行原理,指出该种波浪能海水淡化技术能够大规模捕获波浪能,减少波浪能转化环节,提高波浪能的采集效率和淡化水产量。

关键词:波浪能;海水淡化;振荡浮子;液压传递;结构设计

中图分类号:P743.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-2029(2017)04-0024-06

我国淡水资源人均占有量约 2 200 m³, 仅为世界平均值的 1/4 左右, 加上人口增长和经济发展对淡水需求的持续增长和水源污染导致的可用水资源减少, 使水资源缺乏有演变为水资源危机之势。跨区域调水、污水处理、节约用水等都只能在一定程度上缓解用水紧张。通过海水淡化提供“新水源”是从根本上解决水问题、保证我国水资源保障能力的具有战略意义的选择。

近几年, 海水淡化在我国受到了前所未有的重视, 预计到 2020 年其规模将达到 250~300 万 t/d。但传统的海水淡化方法要消耗大量化石能源, 而化石能源短缺是我国面临的又一挑战。以目前较受关注的喷射式压汽低温多效蒸馏海水淡化装置为例, 按产淡水热耗 200 MJ/m³、发电效率 35% 计算, 一个日产万吨的淡化厂年耗能折合约 27 000 t 标煤。同时, 海水淡化过程中, 化石能源利用造成的污染物排放、温度高于环境的浓缩废弃盐水及其中为减缓设备腐蚀和结垢而加入的化学物质等, 又会加重生态环境污染^[1-2]。

海洋可再生能源与海水资源具有地域分布的

一致性, 因此若能直接利用海洋中存在的可再生能源作为驱动源进行海水淡化, 将能大大降低化石能源消耗, 减少温室气体的排放。波浪能是一种清洁、无污染的海洋可再生能源, 由于具有绿色环保和储量丰富的特点, 日益受到科研工作者的广泛关注。资料显示我国沿岸波浪能资源平均理论功率为 1.285×10⁷ kW, 是可开发量最大的海洋可再生能源, 其中又尤其以福建、台湾、山东和广东等省沿岸波浪能资源最为丰富。

可以预见, 未来的淡水供求形势将十分严峻, 研究直接利用海洋波浪能驱动的海水淡化技术是一条有效、清洁、环保的途径, 不仅可以减少化石能源消耗, 缓解我国陆地区域淡水资源短缺, 还可为我国 6 500 多个海岛提供分布式淡水解决方案, 为岛屿国防建设提供必要的支持, 加快海洋能源和海水资源的综合开发与利用。

1 波浪能转化利用技术的研究进展

在波浪能的开发利用方面, 按照波浪能俘获收

收稿日期 2017-02-09

基金项目 国家自然科学基金资助项目(51209104, 51409118), 福建省自然科学基金资助项目(2016J01247), 福建省新世纪优秀人才资助项目(JA13170)

作者简介 杨绍辉(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为可再生能源开发利用、节能技术研究、智能化监测与控制。

E-mail 13163996278@163.com

集方法,可将波浪能利用装置分为振荡水柱式、筏式、摆式、鸭式、越浪式和点吸收式等类型^[3-4]。点吸收式波能俘获技术主要利用振荡浮子在波浪力作用下的升沉运动收集波浪能,由于具有转化效率高、建造难度小、投资成本少、不受波浪方向影响等特点,受到了广泛的重视^[5]。根据振荡浮子的数量不同,又可将点吸收波浪能收集装置分为单浮体式、双浮体式和多浮体式 3 种。图 1 所示为按浮体个数分类的示例图。

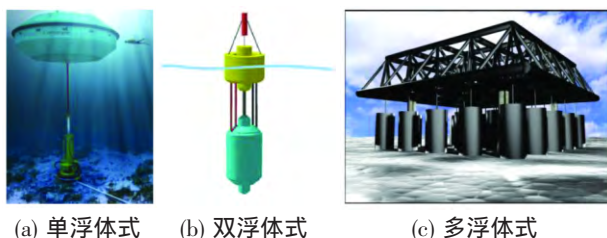


图 1 按振荡浮子个数分类示意图

早期的点吸收式 WEC 仅具有一个漂浮于海面的振荡浮子(单浮体,单自由度),通过缆绳或立柱与海底固定设备连接。如日本研发的 G-1T^[6]、美国俄勒冈州立大学研发的 L-10^[7]以及荷兰 Delft 理工大学研发的 AWS^[8]等装置均属于单浮体型。受海洋潮汐影响,海水表面与海底的距离是随时变化的,单浮体装置需要与海底固定装置连接,因此难以适应潮差的改变,影响了其推广应用。

双浮体式 WEC 一般具有上下两个浮体,一个浮体漂浮在水面上,另一浮体位于水面下。水面的浮体吸收波浪能量,水下浮体起阻尼作用,为水面浮体提供一个几乎不动的稳定平台^[9]。如爱尔兰的 Wavebob 装置^[10]由两个同轴对称的浮体组成,上方的浮体设计与入射波浪频率匹配,实现共振,而下方的浮体设计目的在于增大装置惯性,减少波动。该装置在爱尔兰高威湾进行了 1/4 比尺的海试。美国的 PowerBuoy 装置也具有上下两个浮体^[11],漂浮于海面上的是一个碟形浮体(振荡浮子),在水下末端设有水平阻尼板,其作用是利用海水水体增加附加质量,从而增大阻尼板的惯性,利用碟形浮体与阻尼板之间的相对运动摄取波浪能。PowerBuoy 装置已在西班牙圣托纳海湾进行了 40 kW 样机试验^[11]。

在国内,中国海洋大学对基于双行程液压传动的振荡浮体式波浪能发电系统进行了仿真研究^[12]。东南大学着重对基于直线发电机的双浮体式波浪能发电装置进行了设计与分析^[13]。山东大学研究的 120 kW 双浮体漂浮式波浪液压发电装置^[14]和中科

院广州能源所研制的 100 kW 双浮体直驱式波浪能装置也分别进行了海试试验^[15]。具有两个浮体的双自由度系统能够较好地克服潮位变化,不受海水深度和波浪方向影响,安装投放方便,已成为点吸收式 WEC 的主要发展方向。但与单浮体结构相同的是,仍只能利用一个振荡浮体吸收波浪能,因而转化波浪能的规模受到限制。

由于单浮体式和多浮体式波浪能装置都只能利用一个振荡浮体吸收波浪能,为了扩大波浪能转化利用规模,近年来逐渐出现了多浮体式波浪能转化利用技术。如丹麦 Aalborg 大学提出的 Wave Star 波力发电装置(图 2)^[16-17],该装置能同时安装多组振荡浮子,通过振荡浮子与固定于海底的框架之间的相对转动摄取波浪能。分析得出当 Wave Star 总长为 70 m,具有 20 个直径为 5 m 的振荡浮子,波浪高为 2.5 m 时,可输出的电功率为 600 kW^[18]。该装置已在丹麦的 Hanstholm 湾进行了 1:2 比尺的实海况实验。虽然固定框架结构能够增加该装置的抗风浪能力,但对安装位置有较高要求,只能安装于离岸较近的浅水域中,投入成本高。

集美大学波浪能研究团队,近来研制完成了“多点阵列式波浪能发电装置”(图 3),该装置具有漂浮于海面的楔形平台,可不受安装水域深度的限制。10 组直径为 1 m 的圆柱形振荡浮子分别安装于楔形漂浮平台两侧,振荡浮子与楔形平台产生相对运动吸收波浪能(筏式)。楔形漂浮平台形长 18 m,形宽最大处为 8 m,装机容量为 10 kW。2014 年 6 月开始在台湾海峡小嶝岛附近海域已进行了为期 2 a 的海试实验,实海况平均能量转化效率为 18.7%^[19-20]。分析表明,楔形漂浮平台的形状参数、投入的浮子数量及布放方式等因素将对波浪能摄取效率产生影响,多个振荡浮体能够明显增加波浪能的吸收功率。

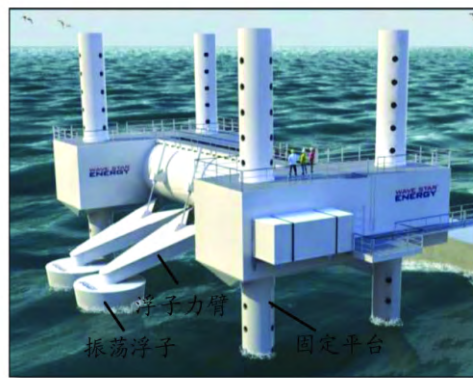


图 2 固定式 Wave star 波力发电装置



图3 多点阵列式波力发电装置

2 波浪能海水淡化技术的研究进展

海水淡化是将纯水从盐水中分离的过程,根据物理过程可以分为两大类:基于蒸发原理的热分离技术,包括多级闪蒸(MSF)、多效蒸馏(MED)、压气蒸馏法(VC);另一种是基于溶解—扩展和筛选过程的膜分离技术,包括反渗透法(RO)、正渗透法(FO)、纳滤法(NF)和电渗析法(ED)等^[1]。多种海水淡化技术中最具优势和成熟度的是反渗透法(RO)。随着膜技术的发展及能量回收系统的高效利用,反渗透海水淡化技术得到了长足发展。但传统海水反渗透方法所利用的电能主要是源于化石燃料,能源消耗大,不仅造成大量碳排放,同时也加剧了能源危机,因此降低反渗透技术的能耗和利用可再生能源作为动力源日益成为关注的焦点。

当前国内外研究人员对于波浪能的研究重点在发电领域,将其应用于海水淡化方面的研究相对较少。具体研究情况如下:在国外,爱尔兰建造了一个反渗透海水淡化装置,该装置利用2个可动驳船与中间1个定位驳船(如图4)之间受波浪力时的相对运动产生机械能,再将机械能转化为液压能,由液压能驱动反渗透脱盐单元将纯水与盐水分离^[21]。在印度喀拉拉邦有一套波浪能海水淡化装置则是先利用波浪能发电,再利用电能驱动反渗透海水淡化系统工作。该装置的采能装置采用振荡水柱式,利用波浪的升降产生的压力差使装置内的空气柱体积变化,与之相连的冲击式透平从空气柱体积变化过程中吸收能量带动发电机发电,输出的电能部分供给蓄能池充电另一部分用于驱动反渗透海水淡化系统工作^[22]。A J Crear 等人提出了一种波浪能驱动的蒸汽压缩式海水淡化系统,经海试和数学模拟后指出波浪能海水淡化的规模需达到1 000 m³/d时,相比于使用化石燃料作为能源的海水淡化系统

才具有经济性^[23]。Crerara 等人改进了点头鸭式利用蒸汽压缩的波浪能海水淡化装置,该装置原本通过波浪能转换为机械能进而驱动内部的海水淡化装置工作,改进后将实现与反渗透海水淡化技术相结合^[24]。Lourdes 等人提出了一种水锤泵式波浪能海水淡化,该系统将水锤泵安装在柔性管两端,管内装有海水,当波浪力作用于柔性管时,管内的海水向两端运动并驱动两端的水锤泵工作产出高压海水用于海水淡化^[25]。Denver Cheddie 等人从理论上提出了一种波浪能反渗透海水淡化的瞬态模型,该模型是第一个在波浪能海水淡化领域较为完整的数学模型^[26]。

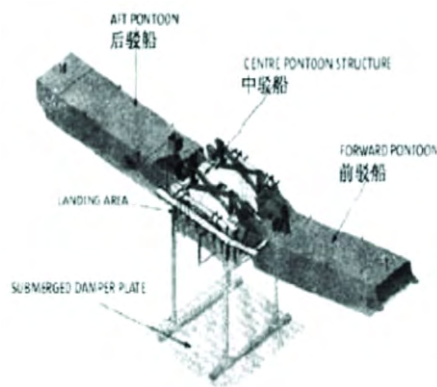


图4 Macabe 拨浪泵

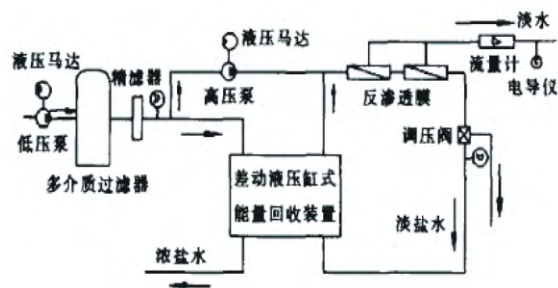


图5 海水淡化反渗透系统试验装置

在国内,孙业山等人研制的波浪能海水淡化装置中使用了新型差动式能量回收装置,综合能耗为5.5 kW·h/m³,使产水能耗大幅度降低,而日产水量可达10 t,该试验装置原理如图5^[26]。中国科学院广州能源研究在广东汕尾市建造了1座波浪能电站进行波浪能海水淡化方面的研究,该装置通过振荡浮子吸收波浪能后通过锚链驱动液压泵作伸缩运动,将液压能传递到液压马达进而驱动发电机和海水淡化系统工作^[27]。林润生等^[28]设计的摆式波浪能海水淡化装置利用摆板的往复运动搜集到的波浪能带动液压缸运动,液压缸将能量传递到隔膜泵使其产生高压驱动反渗透系统工作,该装置示意图及

其工作原理如图6。

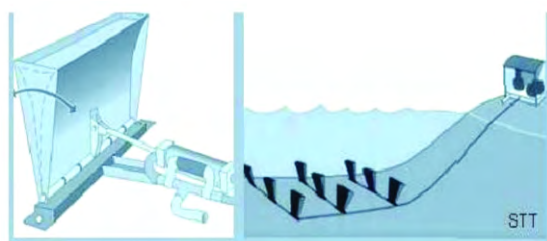


图6 摆式波浪能海水淡化装置

3 多点吸收式波浪能海水淡化系统设计

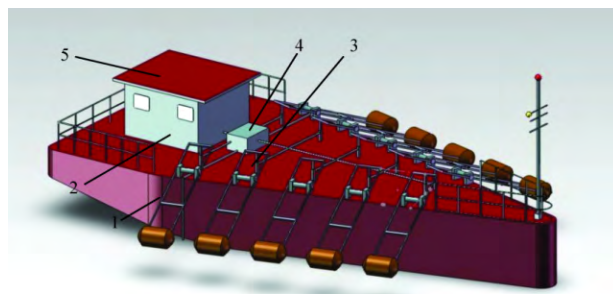
根据上述分析可知,国内外国内外科研工作者已在波浪能转化及其海水淡化技术领域开展了许多研究工作。但上述研究存在如下问题:利用单点吸收式(单浮子式)、单摆式或单筏式进行波浪能的收集,由于受到体积、重量或运输条件的限制,单体装置无法大规模收集波浪能量,因此日淡水产出量较低,装置投资成本较大;其次是间接利用波浪能进行海水淡化,即首先将波浪能先转换为电能,再利用电能驱动海水反渗透装置进行海水淡化,因而具有多级能源转化过程,能量转化利用效率较低。

3.1 多点波浪能采集装置设计

本文根据上述分析,设计了一种新型多点吸收式波浪能波浪能海水淡化系统。图7所示为多点波浪能采集装置结构示意图,该系统主要有漂浮平台、振荡浮子、连杆、支座、抽水管、液压管、液压缸、操控室等组成。其中,振荡浮子分为两列,布置于漂浮平台两侧,每列布置5个,每个浮子经连杆连接在支座上,浮子支架另一端连接一个液压缸。由于浮子与漂浮平台质量和体积相差很大,当有波浪时,浮子相对于漂浮平台在竖直方向的振荡明显,能够带动经连杆连接的液压缸上下运动。振荡浮子与液压缸之间采用杠杆式的传动方式。其次,振荡浮子与支座间的臂长大于液压缸于支座间的臂长,即动力臂大于阻力臂,当浮子上下振荡时,能够传输较大力于液压缸上。当振荡浮子受到波浪力上下振荡时,经连杆连接着的液压缸做上下运动,将液压油经管道输送到液压泵,每个液压缸独立运动,这样就有10个液压缸在不同时刻往液压马达输送液压油。液压马达与增压泵同轴连接,液压马达转动带动增压泵工作,将经过预处理的低压海水经增

压泵增压后输送到反渗透膜。

波浪能经中间液压传递系统转化为液压能,由液压能驱动液压马达带动增压泵产生高压,将经过预处理的原水加压透过反渗透系统产生淡化水。其中,剩余高压能存储在蓄能器中,波浪能采集效果不好时可以由这部分能量驱动液压马达工作。在操控室里,将产出淡化水作后处理,而浓盐水经继续,再将高压浓盐水进行回收利用,进一步得到淡化水,提高产水率。

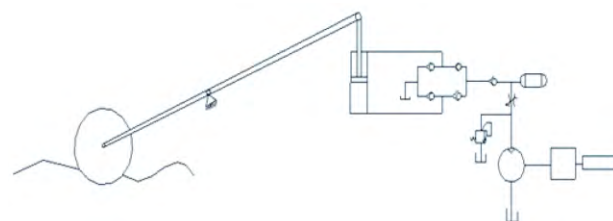


1.振荡浮子 2.支座 3.液压缸 4.增压泵 5.操控室

图7 多点波浪能采集装置设计

3.2 液压传递装置设计

液压转化传递装置由液压缸、液压马达、蓄能器、增压泵等设备组成,如图8所示。振荡浮子与单活塞杆液压缸之间用连杆连接,当振荡浮子受到波浪力作用上下运动时,液压缸也随之做往复直线运动。当浮子向上运动时,液压缸中活塞向下运动,液压缸下腔的液压油经过单向阀进入高压油管,驱动液压马达带动增压泵工作。此时,液压缸上腔形成部分真空,致使油箱中的液压油经过单向阀进入液压缸上腔,补充所需液压油。增压泵工作时将低压海水加压后通过反渗透膜组件得到淡化水。



1.振荡浮子 2.单杆液压缸 3.油箱 4.单向阀 5.液压马达, 6.溢流阀 7.蓄能器 8.增压泵 9.反渗透膜组件

图8 反渗透海水淡化液压系统原理

蓄能器可以稳定压力,消除压力脉动对系统的影响。蓄能器与液压马达之间连接有一个调速阀,可以调节流入液压马达的流量。同样,当液压缸活塞向上运动时,通过组合单向阀可以实现无杆腔吸

油,有杆腔将油液压向液压马达和蓄能器。这样周期性的运动,活塞无论向上或者向下运动都可以驱动液压马达做功,实现双行程全周期做功,最终可以大大提高海水淡化的效率。

反渗透模块是波浪能海水淡化的主要部分,反渗透过程中,膜的透水通量和脱盐率是评价膜性能的重要参数。一般反渗透膜在17~83个大气压之间工作,而且膜需要具备耐高压、高水通量、能够阻止溶解性固体通过以及稳定的理化性能等特点。反渗透膜在工作时主要受以下因素影响:(1)进水压力。进水压力升高使得反渗透的净驱动力升高,产水量加大而盐透量几乎不受影响,透过膜的盐分相当于被稀释,透盐率降低,提高脱盐率。当进水压力超过一定值时,由于回收率过高,浓度差增大,导致盐透量增加,抵消了增加的产水量,使得脱盐率不再上升;(2)进水温度。进水水温对反渗透膜的产水影响较大,水对通量随着水温的上升呈线性增加的趋势。常温下,进水水温每升高1℃,产水量就增2.5%~3.0%。(以25℃为标准)。(3)进水pH值。进水pH值对脱盐率的影响较大,当pH值在7.5~8.5时,脱盐效果最好。(4)进水盐浓度。进水含盐量越高,盐溶液与纯水间渗透压也越大,透盐率增大导致了脱盐率降低。

4 结论

(1) 大多数波浪能发电装置多为小规模单点式

装置,输出功率仍在千瓦级以内。只有向规模化与综合化发展,波浪能利用技术才能实现更好的商业化利用。因此,同时具有多个振荡浮子的多点式波浪能发电装置,或将多个单点吸收式波能装置以阵列形式布放形成大规模波浪能发电厂,可使得波浪能发电装置装机容量达到百万瓦级,降低发电成本,提高发电效率。

(2) 目前,波浪能利用装置一般多将采集的波浪能通过多级转化变为电能来加以利用,而将波浪能应用于海水淡化技术则相对较少。如果能够高效、稳定地大规模收集波浪能,将其能量应用于海水淡化设备,同时尽量避免各种设备与高压海水接触,简化海水淡化步骤,降低淡化成本,将有望更好地推广应用波浪能海水淡化技术。

(3) 本文设计的多点吸收式波浪能海水淡化系统以点吸收式波浪能捕获方式为基础,将多组振荡浮子以阵列形式布放,可同时收集海面上不同位置的波浪能,将其耦合、蓄能、转化为海水液压能,提供给反渗透膜海水淡化装置,获得淡化水。这种新的波浪能海试淡化技术能够大规模捕获波浪能,减少波浪能转化环节,提高波浪能的采集效率和淡化水产量;同时,可使得本系统中只有较少部件与海水接触外,最大程度地降低海水对各设备的腐蚀,具有较长的使用寿命。

参考文献:

- [1] P A Davies. Wave-powered desalination: resource assessment review of technology[J]. Desalination, 2005, 168: 97-109.
- [2] Matt Folley, Baltasar Peate Suarez, Trevor Whittaker. An autonomous wave-powered desalination system [J]. Desalination, 2008, 220: 412-421.
- [3] Antonio F DE. Wave energy utilization: A review of the technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010(14): 899-918.
- [4] Zhang Dahai, Li Wei, Lin Yonggang. Wave energy in China: Current status and perspectives [J]. Renewable Energy, 2009, 28(3): 126-132.
- [5] 游亚戈, 李伟, 刘伟民, 等. 海洋能发电技术的现状与前景. 电力系统自动化[J], 2010, 34(14): 1-12.
- [6] Hirohisa T. Sea trial of a heaving buoy wave power absorber[C]// In Proceedings of 2nd International symposium on Wave Energy Utilization, Trondheim, Norway, 1982: 403-417.
- [7] Waters R, Stalberg M, Danielsson O, et al. Experimental results from sea trials of an offshore wave energy system [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(3): 106-115.
- [8] Miguel Prado, Henk Polinder. Direct drive in wave energy conversion - AWS full scale prototype case study[C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, London, England, 2011, 1-7.
- [9] 吴必军, 王幸, 刁向红, 等. 双圆柱形浮体波能装置双自由度响应及转换效率分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43(8): 978-986.

- [10] Weber J, Mouwen F, Parrish A et al. Wavebob - research and development network and tools in the context of systems engineering[C]// In Proceedings of 8th European Wave Tidal Energy conference. Norway,2009:416-420.
- [11] Prudell J, Stoddard M, Amon E, et al. A permanent-magnet tubular linear generator for ocean wave energy conversion [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(6): 2392-2400.
- [12] 宋文杰,史宏达,刘鹏.基于双行程液压传动的振荡浮子式波浪能发电系统仿真研究[J].太阳能学报,2016,37(1):256-260.
- [13] 黄磊,胡敏强,余海涛,等.直驱式波浪能发电用全超导初级励磁直线发电机的设计与分析[J].电工技术学报,2016,30(2):80-86.
- [14] 刘延俊,李玉,刘计斌.120kW 漂浮式液压海浪发电装置[C]// 第二届中国海洋可再生能源发展年会暨论坛,广州,2013:3-8.
- [15] 盛松伟,游亚戈,张亚群,等.漂浮式波浪能装置能量转换系统研究[J].机械工程学报,2012,48(24):141-146.
- [16] Steenstrup, P. R. Wave Star Energy new wave energy converter, which is now under going sea trial in Denmark [C]// In: International Conference of Ocean Energy, Bremerhaven Germany, 2006, 9: 56-67.
- [17] Anders Hedegaard Hansen, Henrik C Pedersen, Torben O. Andersen. Model based feasibility study on bidirectional check valves in wave energy converters[J]. International Journal of Marine Energy, 2014(5):1-23.
- [18] 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(6):102-112.
- [19] 杨绍辉,何光宇,何宏舟,等.多点直驱式波浪能发电系统浮子阵列的模型分析及数值模拟[J].水力发电学报,2015,34(9):153-158.
- [20] 杨绍辉,何宏舟,陈沪,等.阵列筏式波浪能发电系统设计与试验研究[J].机械工程学报,2016,52(11):57-62.
- [21] Mc Cormick M, Murtagh J, Mc Cabe P. Large-scale experimental study of a hinged-barge wave energy conversion system[C]// proceedings of third european wave energy conference, patras, Greece, 30 september -2 october 1998. Germany: University of Hannover, 2000.
- [22] N Sharm, Purnima Jalihi. Wavepowered desalination system[J].Energy, 2003,29: 1659-1672.
- [23] A J Crerar, R E Low, C L Pritchard. Wave powered desalination[J].Desalination, 1987,67:127-137.
- [24] A J Crerar, C L Pritchard. Wavepowered desalination: experimental and mathematical modeling[J].Desalination, 1991, 81:391-398.
- [25] Lourdes Garcia Rodriguez. Renewable energy applications in desalination: state of the art [J]. Solar Energy, 2003, 75: 381-393.
- [26] 孙业山,游亚戈,马玉久.波浪能海水淡化的应用研究[J].可再生能源,2007,25(2):76-78.
- [27] Denver Cheddie, Aatma Maharajh, Aneil Ramkhalawan, et al. Transient modeling of wave powered reverse osmosis [J]. Desalination, 2010, 260: 153-160.
- [28] 林润生.基于摆式波能转换装置直接进行海水淡化的研究[D].广州:华南理工大学,2010.

Technical Analysis and Structure Design of the Seawater Desalination System Powered by Multi-Point Wave Energy Converter

YANG Shao-hui^{1,2,3}, ZHANG Ming-yong¹, HE Hong-zhou^{1,2,3}, LI Hui^{1,2,3}, ZHANG Jun^{1,2,3}

1. College of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian Province, China;

2. Key Laboratory of Clean Energy Utilization and Development of Fujian Province, Xiamen 361021, Fujian Province, China;

3. Fujian Engineering Technology Research Center of Clean Combustion and Efficient Use of Energy, Xiamen 361021, Fujian Province, China

Abstract: Based on the research status of wave energy and seawater desalination, this paper puts forward the development trend of the seawater desalination technology powered by wave energy. In addition, a kind of novel multiple-point absorbed seawater desalination system powered by wave energy has been designed, with its structural composition and operational mechanism being discussed in detail. The results indicate that the proposed technology can capture wave energy on a large scale, cut down on the energy transfer devices and links, as well as raise the wave energy absorbed efficiency and freshwater production rate.

Key words: wave energy; seawater desalination; oscillating buoy; hydraulic transfer; structural design