

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.12.001

波浪能捕获及发电装置研究进展与技术分析*

鄂世举, 金建华, 曹建波*, 郭 壮, 任钰雪, 夏文俊, 蔡建程, 朱喜林
(浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321004)

摘要:针对目前波浪能发电成本高、结构复杂、能量转换效率低等问题,对波浪能发电的基本原理、新型发电装置及相关新技术进行了研究。具体对直线电磁型、压电型和电活性聚合物型波浪能发电装置进行了总结和分析,探究了点吸式、振荡水柱式、振荡摇摆式和筏式等波浪能捕获装置的工作原理、优缺点、适用场合和应用前景,特别是对新型的波浪能发电技术—介电弹性体发电机进行了分析和探究;同时对波浪能发电技术的进一步发展提出了建议。研究表明,对比其他方式的波浪能捕获装置,基于介电弹性体的波浪能装置发电成本更低,结构更加简单,能量转换效率更高。

关键词:波浪能;捕获装置;发电装置;介电弹性体发电机

中图分类号:TM314*.9;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)12-1421-07

Advances and technical analysis of wave power capture devices and electric power generators

E Shi-ju, JIN Jian-hua, CAO Jian-bo*, GUO Zhuang, REN Yu-xue, XIA Wen-jun,
CAI Jian-cheng, ZHU Xi-lin
(College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: Aiming at the high cost, complex structure and low energy conversion efficiency of wave power generation currently, the basic principles, new electric power generators and related advanced technology of wave power generation were studied. Different kinds of wave electric power generators such as the linear electromagnetic type, piezoelectric type and electroactive polymer type were summarized and analyzed specifically. The principles, advantages and disadvantages, and application situations of wave power capture devices including buoy type, oscillating water column type, swing and oscillation type and raft type were discussed, especially for the new dielectric elastomer generator. The future development of wave power generation technology were proposed. The results indicate that the dielectric elastomer generator which was used in the wave power generation has the advantages such as lower generating cost, simpler structure and higher energy conversion efficiency.

Key words: wave power; capture device; electric power generator; dielectric elastomer generator

0 引 言

能源危机和环境问题令清洁能源的研究备受关注。太阳能、风能、海洋能是重要的可再生清洁能源。其中,海洋蕴藏着巨大的能量,主要可分为潮汐

能、波浪能、海流能、温差能和盐差能等,而波浪能是海洋能源中蕴藏最为丰富的能源之一,且由于以机械能形式存在,开发过程对环境影响小,被认为是品质最高的海洋能^[1]。

波浪能转换为电能,一般可分为3个过程:一次转

收稿日期:2016-07-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377146,51407162);浙江省自然科学基金资助项目(LY17E070001)

作者简介:鄂世举(1970-),男,吉林长春人,博士,教授,硕士生导师,主要从事介电弹性体发电技术方面的研究。E-mail: esx_2001@zjnu.cn

通信联系人:曹建波,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail: caojianbo2008@163.com

换、中间转换和二次转换。一次转换是指波浪能捕获装置俘获波浪能的过程,其结构可分为浮子式、振荡水柱式、振荡摇摆式、筏式等。中间转换是将捕获的机械能传递到发电装置的过程,主要传动类型有机械式、液压式、气动式等。针对不同的波浪能捕获装置,中间转换环节不是必备环节,且中间转换的原理及结构形式较为简单和固定,本研究不详细叙述。二次转换是指通过发电装置将捕获装置俘获的机械能转化为电能的过程。典型的发电装置类型有直线电磁型、压电型和电活性聚合物型。

本研究将对各类波浪能捕获装置和发电装置进行总结、分析和研究,指出波浪能发电需要进一步解决的若干理论和技术问题,为后续研究提供借鉴。

1 波浪能发电装置

发电装置作为电能转换环节,对波浪能发电系统的性能至关重要。目前,波浪能发电系统中典型的几类发电装置包括:直线电磁发电机、压电发电机及电活性聚合物发电机。其中,压电发电技术和电活性聚合物发电技术是较新的二次转换技术,特别是电活性聚合物发电机的研究方兴未艾。

1.1 直线电磁发电机

直线电磁发电机是直线驱动的电磁感应发电机,是目前波浪能发电中应用较多的发电装置,通常用于浮标型发电系统。直线电磁发电机的原理同传统的旋转式发电机相同,基于法拉第电磁感应定律。直线电磁发电机主要分 5 类:永磁直线发电机、直线感应发电机、开关磁阻发电机、纵向磁通发电机和横向磁通发电机^[2]。张露予等^[3]设计了工作在较低频率的电磁式振动发电机,并进行谐振频率分析。Henk Polinder 等提出了永磁直线发电机比感应发电机、开关磁阻发电机效率更高,并提出了一种新式双侧横向磁通永磁发电机,适合浮标型波浪能装置^[4]。

永磁直线发电机是未来直线电磁发电机的发展方向。我国稀土资源丰富,稀土永磁材料优异的磁性能非常适合永磁直线发电机的研究发展,能够使其结构更简单、运行更为可靠,更好地应用于波浪能发电。

1.2 压电发电机

压电陶瓷是一种具有压电效应的无机非金属材料。压电效应分为正压电效应和逆压电效应。某些介质在力的作用下,产生形变,引起介质表面带电,这是正压电效应。反之,若施加激励电场,介质将产生机械变形,称逆压电效应。压电发电机正是利用了正压电

效应。因为压电陶瓷发电需要工作于高频率振动,一般设计为悬臂梁结构。Murray 和 Rasteger^[5]设计了基于波浪能的压电能量获取装置,该装置通过浮漂系统和悬臂梁结构将低频波浪振动转化压电系统高频振动。谢涛等^[6]对多悬臂梁压电振子频率进行了分析,表明多悬臂梁可以有效地拓宽谐振频带,更好地与外界振动相匹配,从而提高压电发电效率。

压电发电机需要工作于高频率振动,而波浪能频率低,如何设计装置将低频的波浪能转化为压电系统所需的高频振动是一大难点,制约着压电式波浪能发电的进一步发展。

1.3 电活性聚合物发电机

电活性聚合物(electroactive polymer, EAPs)是一类高分子功能性材料,而介电弹性体(dielectric elastomer, DE)是其中性能最优的一种。从原理上,介电弹性体发电机(dielectric elastomer generator, DEG)是一种具有“三明治”式三层结构的可变电容器,上、下两侧是柔性电极,中间是介电弹性体。在施加偏置电压时,通过拉伸、收缩介电弹性体即可将施加的机械能转化为电能,发电循环如图 1 所示^[7-9]。

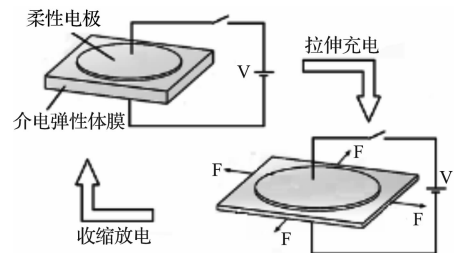


图 1 介电弹性体发电机发电循环

介电弹性体具有质量密度低、能量密度高、变形大、机电耦合好、转换效率高及价格低等突出特点,使其在能量收集领域具有广阔的应用前景^[10]。相对于压电陶瓷,介电弹性体发电机能在更宽的频率范围高效工作,特别适合于波浪能低频率、大推力的场合。

3 种发电机类型的参数对比及其主要特点如表 1 所示^[11-13]。

表 1 3 种发电机的参数及主要特点

类别	典型最大效率/(%)	最大能量密度/(J · g ⁻¹)	最小工作频率/Hz	主要特点
直线电磁发电机	< 20	0.004	约 > 5	能量密度与效率较低,工作频率较低
压电发电机	> 50	0.01	约 > 50	能量密度和效率高,工作频率高
电活性聚合物发电机	> 50	0.4	约 > 0.1	能量密度和效率高,工作频率低

2 波浪能捕获装置

2.1 点吸式(浮标型)

点吸式波浪能装置的结构较为简单,主要由浮体、锚绳、发电装置组成。其基本原理是利用浮体随着波浪的起伏运动(位能)来俘获波浪能^[14]。随着直线型电磁发电机的发展,直线驱动的发 电形式所具有的结构简单和能量转换效率高等特点被越来越多的研究人员看好^[15]。相对于传统的波浪能发电机,这种发电装置省去了中间转换机构,可以有效提高波浪能的转换效率。阿基米德波浪能装置(archimedes wave swing, AWS)最先将直线型电磁发电机与浮标结构结合,其结构包括浮子和基座,是一种完全淹没在水中的装置,浮子在水中随波浪上下移动,该装置模型在葡萄牙北部海岸进行了安装和测试^[16]。直线电磁浮标型波浪能装置示意图如图 2 所示。

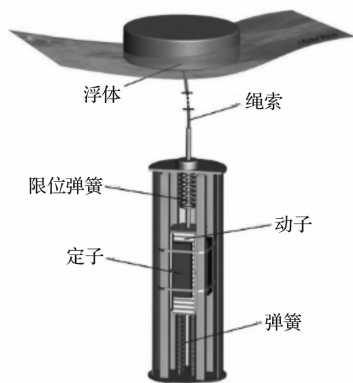


图 2 直线电磁浮标型波浪能装置示意图

Waters 等在瑞典西海岸进行实验,用该模型证实了整体波浪能换能器概念,并对输出的电能入网做出了展望^[17]。但是这种形式的发电机浮体与发电装置距离太大,响应性比较差。

由于波浪的频率较低,压电发电机对频率的要求使其利用波浪能发电面临着很大的困难。Murray 从吉他中获得灵感,设计了一种压电波浪能发电装置,压电振子固定在套筒内壁上,而桅杆上分布着相对应的划片,当桅杆随波浪上下起伏时,划片波动压电片使其在自振频率下变形振动,再而转化为电能。该装置很好地解决了不同来波频率下压电发电振子的适应问题^[18]。

介电弹性体膜(DE膜)可以高效地工作在低频率的条件下,其发电特性可以使基于 DEG 的波浪能装置更为简单。Chiba 等^[19]设计了一种基于 DE 的浮标型波浪能收集装置,主要结构包括浮体、支撑架、DE 发电机和锚绳,DEG 浮标型波浪能装置如图 3 所示。

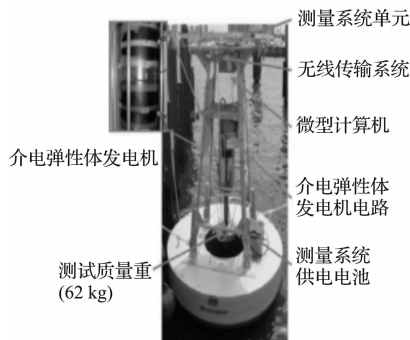


图 3 DEG 浮标型波浪能装置

虽然浮标型发电机因结构简单而备受关注,但是仍有许多工作需进一步深入研究:

(1) 提高能量转换效率。如利用浮体与波浪产生共振来增加浮体吸收的波浪能,这是提高能量转换效率的直接方法^[20];设计浮体的几何形状将入射波进行聚波,提高浮体对波浪的响应带宽,可提高能量转换效率。Engstrom 等^[21]在浮体下面悬挂一个小球,使入射波条件发生改变,提高浮体的吸收特性来提高能量转换效率。

(2) 优化结构设计,提高发电量。浮标型发电机单个装置的发电量较小,可设计阵列型分布式发电机来增加发电量^[22]。

(3) 加强浮标型波浪能装置的抗浪性设计。浮标型发电机抗浪性较差,在很大程度上依赖当地海洋的气候,在极端的天气时不能工作,甚至损坏。

2.2 振荡水柱式

振荡水柱型(oscillating water column, OWC)是目前研究最为广泛且应用最为成功的一类波浪能装置,主要由一个上下开口的空心腔体、空气透平以及发电机组成。空心腔体下端没入海中,上端开有气流通道,形成一个气室。工作过程是海浪波峰进入腔内,对腔内气体进行压缩,腔内气压增大,气体通过上端气流通道向外排出;当海浪波谷进入腔内时,腔内气压降低,外面空气通过气流通道进入腔内,OWC 工作原理示意图如图 4 所示^[23]。

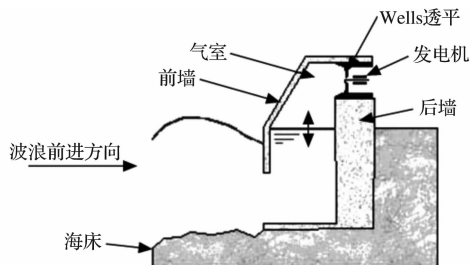


图 4 OWC 工作原理示意图

腔内气体的进出带动透平旋转,将波浪能转变为

机械能。这种工作方式使波浪能装置与海水不接触，可靠性较高；该型装置基本处于海平面上，安装与维护方便；缺点是建造成本高，空气透平转换效率较低。

LIMPET 作为第一个商业化的振荡水柱型发电机，具有 500 kW 的发电功率，且已运作十年以上，很好地证明了该种发电机的可靠性^[24]。为获得更大的波浪能，有研究人员提出了在近海安装漂浮式 OWC。相对于靠岸式 OWC，近海的风浪更大，漂浮式 OWC 可收集的波浪能更多，但是环境相对来说更加恶劣^[25]。因为 OWC 的建造成本过高，有研究者提出了将港口防浪堤和 OWC 相结合。2011 年在西班牙海岸，Mutriku 发电厂开始运作。该发电厂建造在原有的防浪堤中，包含 16 个单腔 OWC，总功率大约 300 kW。这种与其他原有设施相结合的 OWC 可以有效地降低成本^[26]。另外，Vertechy^[27-28] 团队设计了一种新颖的基于介电弹性体的 OWC，其示意图如图 5 所示。

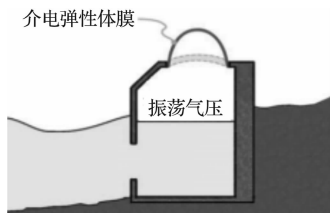


图 5 基于介电弹性体的 OWC 示意图

由于空气透平的能量转换效率较低^[29-30]，基于介电弹性体的发电特性，该种发电机将作为中间传递装置的空气透平舍去，可极大地提高效率。

OWC 作为一种不与海浪接触的波浪能发电机，一直被研究人员所关注，也是众多波浪能发电机中最为成熟的技术之一。但是，因为巨额的建造成本和较低的能量转换效率（主要因为空气透平转换效率低）而不能得到大范围推广。基于 DE 的 OWC 有望极大地提高能量转换效率，降低成本，有利于实现商业化。

2.3 振荡摇摆式

振荡摇摆式波浪能发电机根据装置是否固定可分成铰接固定摆式和浮体摆式。

铰接固定摆式的工作原理如图 6 所示。

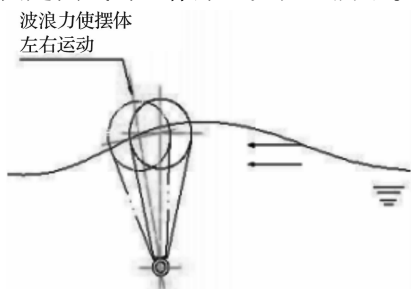


图 6 铰接固定摆式的工作原理示意图

摆体铰接固定在海床上，在波浪的作用下，摆体来回摆动，使波浪能变成摆体的动能，完成波浪能的捕获。最早提出这一概念的是日本室兰工业大学渡部富治教授，此后室兰工业大学对此进行了进一步的研究。其设计属于典型的固定摆式波浪能装置，具体结构如图 7 所示^[31]。

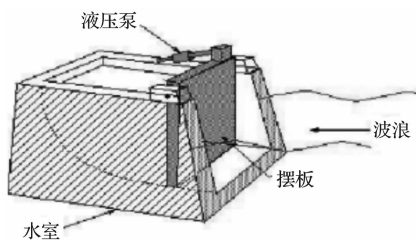


图 7 室兰工业大学的摆式示意图

该装置由摆板、水室、液压传动装置、发电机组成，如何设计摆板和水室使得摆板俘获更多的波浪能是关键所在。

为了获得更大的波浪能，有学者提出了一种离岸摆式波浪能装置。其采用的是底部铰接的摆板装置，摆板运动形式为纵摇运动，其动力特性是由惯量控制^[32]。最著名的离岸摆式波浪能装置是 Oyster 发电机，由贝尔法特斯的女王大学和绿色电力公司 (Aquamarine Power) 合作研发。Oyster 波浪能装置示意图如图 8 所示。

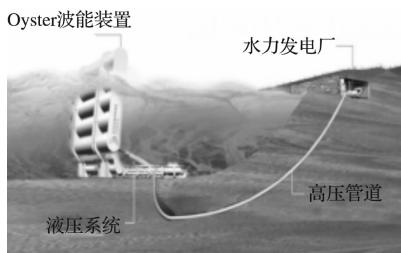


图 8 Oyster 波浪能装置示意图

底座固定在海床上，摆体与底座铰接，在波浪的作用下左右摆动。Oyster 的发电装置安装在岸上，摆体通过高压管道将海水压到岸上进行水力发电^[33]。从图 8 中可以看到海底部分的装置非常巨大，且岸上需要建一个发电厂，成本高。Moretti 和 Vertechy 团队^[34]提出将类似于 Oyster 的摆式捕捉波浪能的方式与 DE 结合，可以很好地降低成本。这种波浪能装置利用介电弹性体的发电特性，避免了在岸上再建造一个发电厂并且省去了液压传递装置，提高了能量转换效率。文献^[35]后续还对平行四边形的介电弹性体进行了建模和实验分析，验证其可行性。

浮体摆式发电机的摆体通常安装在装置内部。英国的 PS Frog Mk 5 是一种漂浮在海平面的装置，当波

浪作用于装置时,装置周期性地左右倾斜,装置里面的质量块随着装置来回运动,以此来捕捉波浪能^[36]。法国的 Searev 发电装置与 PS Frog Mk 5 类似,里面有一个钟摆,当波浪作用使其左右倾斜时,钟摆来回摆动,并由液压传递装置把获得的波浪能传递到发电装置。Searev 波浪能装置示意图如图 9 所示^[37]。

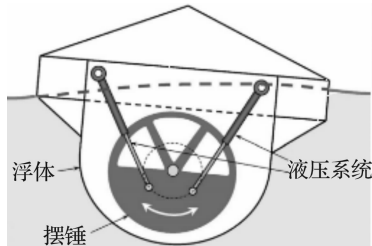


图 9 Searev 波浪能装置示意图

这种浮体摆式发电机适合应用在波浪比较小的海域,对外界风浪的抵抗能力较差。

振荡摇摆式波浪能装置中摆体的运动很适合波浪的大推力、低频特性,且对波浪能的势能和动能都有俘获,因此摆式波浪能装置的转换效率比较高。另外,相位控制技术可以很好地与其相结合,使俘获装置吸收迎波宽度以外的波浪能。摆式机构大多使用液压传动,存在维护较为困难、液压油泄露造成海洋污染等缺点。基于 DE 的摆式发电机可以省去传动装置,可以进一步提高效率,降低成本。

2.4 筏式

筏式波浪能发电机的基本结构和工作原理如图 10 所示^[38]。

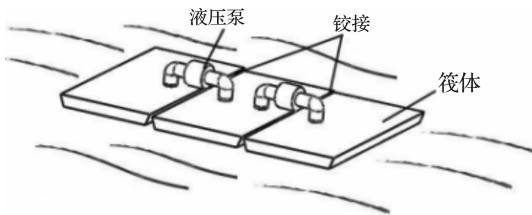


图 10 筏式工作原理示意图

可以简单地示意成多个筏体铰接相连,漂浮于海面上;铰接处连有液压系统,在波浪作用下,各个铰接的筏体产生角位移,进而作用于液压系统,即将最初的波浪能转换成了液压能,进而将液压能转换为电能。

最具代表性的筏式波浪能装置是英国 OPD 公司研制的名为“Pelamis”波浪能装置,其于 2004 年在苏格兰海域安装测试,功率为 750 kW^[39]。Pelamis 波浪能装置示意图如图 11 所示。该装置由多个浮筒组成,各个浮筒之间采用十字接头的方式相连。在波浪作用下,浮筒可以纵摇,也可以艏摇,将波浪能转化为液压能。该装置既可以吸收波浪的势能,也可以吸收波浪

的动能,具有较高的波浪能捕获效率,并且 Pelamis 的仿生设计使其有着较高的抗浪性。该装置的缺点是需要应用在波浪密度较大的海域,且成本较高。

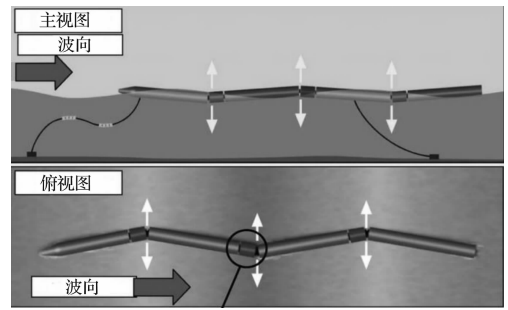


图 11 Pelamis 波浪能装置示意图

英国的 McCabe 波浪泵在发电概念上与 Pelamis 类似,也是利用浮筒间的角位移压缩液压装置产生液压能。该装置主要由 3 个浮筒组成,中间的浮筒下端连有阻尼器,阻碍中间浮筒的移动,而前后两个浮筒在波浪的作用下上下起伏。相对于 Pelamis,该装置的尺寸较小,前后两侧的浮筒只有 4 m,在中间浮筒下边加一个阻尼器来减小运动幅度以增加前后两个浮筒与中间浮筒的角位移,从而增加转换效率。该装置于 1996 年在爱尔兰海域测试安装^[40]。

总体来说,筏式波浪装置具有高的转换效率且抵抗风浪的能力也较强,但是该装置对海域波浪密度要求较高,成本较高,且大多装有液压系统,存在液压油泄露等问题。

4 种波浪能装置的优缺点、适应场合及应用前景的比较如表 2 所示。

表 2 装置的优缺点、适应场合及应用前景

装置名称	优点	缺点	适用场合	应用前景
点吸式	结构简单;发电成本低;吸收波浪能效率高	发电量少;抵抗风浪能力差,易损坏	风浪较小的海域	为灯塔、浮标提供电源;可采用阵列式为海岛及海边区域供电
振荡水柱式	无水下活动部件,方便安装和维护,可靠性好	转换效率低;发电成本高	适用于风浪大的海域	可作为大型发电装置;适合多台风天的中国,应用前景广阔
振荡摇摆式	发电成本较低;转换效率高	可靠性差;易损坏;不易维护;转换效率不稳定	固定摆式适用于风浪较大的海域;与防浪堤结合;浮体摆式适用于风浪较小的海域	我国海域的波浪周期与波高较小,可与防浪堤结合,应用前景一般
筏式	理想状况下,转换效率高	波面筏制造成本高;对海域要求较高;液压泄露造成污染	适合于波浪能密度较大的海域	我国海域波浪能密度小,不适合安装筏式波浪能装置

波浪能捕获装置种类繁多,除上述的几类以外还有收缩坡道式和点头鸭式^[41]。收缩坡道式虽然可靠性高、便于维护,但是受地理环境限制大。点头鸭式是转换效率最高的,但是由于容易损坏,尚未推广。

3 结束语

波浪能的开发利用应结合海域特点来综合考虑,选取适合的波浪能装置。浮标型波浪能装置结构简单,波浪能捕获效率高,但是抵抗风浪能力差,适合应用在近海风浪较小的海域。OWC 波浪能装置可靠性高,容易维护,但是成本较高,效率低。振荡摇摆式波浪能装置的波浪能捕获效率最高,但是易损坏,维护难。筏式波浪能装置波浪能捕获效率较高,但是成本高,适合波浪能密度大的海域。目前,各种方式的综合性能优劣还无法明确区分。

提高效率、降低成本、稳定地输出电能是波浪能发电机设计中需要首要考虑的。本研究分析认为,未来可从以下几个方面深入研究:

(1)波浪聚集技术和相位控制技术的研究。中国周边海域的波浪能密度较小,筏式、振荡摇摆式波浪能装置的安装使用受到了限制。波浪聚集技术和相位控制技术能够增加波浪能密度,从而提高波浪能装置的能量转换效率,拓宽波浪能装置的使用种类。

(2)电能稳定输出技术研究。波浪能的不稳定性使得发电装置发出的电能质量较差,难以并网。在波浪能装置中添加储能机构,如添加发条机构等,使捕获装置俘获的波浪能够稳定地输入到发电装置,从而实现电能的稳定输出,提高电能的质量。

(3)波浪能装置共振利用的研究。特别是浮标型与振荡水柱式波浪能装置,共振可以使捕获装置俘获的波浪能增加,从而提高波浪能的吸收效率。

(4)降低成本。将现有基础设施与波浪能装置结合,可有效地降低成本。通过波浪能发电进行养殖、制氢等,将电能转换为其他商品出售可提高其经济效益,降低成本。并且当地消化利用可以解决电能不能入网的问题。

(5)新型发电装置方面的研究。较之直线电磁与压电式发电机,介电弹性体发电机与上述捕获装置结合,具有结构简单、成本低、转换效率高突出特点,相关技术研究一旦成熟,在波浪能发电领域具有较大潜力和广阔的应用前景。

参考文献 (References):

[1] 肖惠民,于波,蔡维由.世界海洋波浪能发电技术的发

展现状与前景[J].水电与新能源,2011(1):67-69.

- [2] 韦明松.波浪能永磁直线发电机的设计与仿真[D].广州:广东工业大学自动化学院,2015.
- [3] 张露予,李志鹏,王博文,等.电磁式振动发电机结构设计及谐振频率分析[J].河北工业大学学报,2014,43(1):1-3.
- [4] 韩冰峰,褚金奎,熊叶胜,等.海洋波浪能发电研究进展[J].电网与清洁能源,2012,28(2):61-66.
- [5] MURRAY R, RASTEGAR J. Novel two-stage piezo-electric-based ocean wave energy harvesters for moored or unmoored buoys[C]// **Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2009**. Arizona:[s. n.],2009.
- [6] 谢涛,袁江波,单小彪,等.多悬臂梁压电振子频率分析及发电实验研究[J].西安交通大学学报,2010,44(2):98-101.
- [7] MCKAY T, ROSSET S, ANDERSON I, et al. Dielectric elastomer generators that stack up[J]. **Smart Materials and Structures**,2015,24(1):015014.
- [8] 金丽丽,鄂世举,曹建波,等.介电弹性体材料研究现状综述[J].机电工程,2016,33(1):12-17.
- [9] 刘爱飞,鄂世举,曹建波,等.介电弹性体发电机机电转换的非线性方法研究[J].机电工程,2016,33(2):191-196.
- [10] VERTECHY R, ROSATI G, FONTANA M. Reduced model and application of inflating circular diaphragm dielectric elastomer generators for wave energy harvesting[J]. **Journal of Vibration and Acoustics**,2015,137(1):011004.
- [11] 赵兴强,温志渝.基于压电材料的振动能量收集器的谐振频率调节[J].压电与声光,2013,35(2):241-244.
- [12] 于明湖,张玉秋,叶云岳,等.直线振荡电机谐振频率跟踪策略研究[C]//第二十九届中国控制会议论文集.北京:中国控制会议,2010:3348-3352.
- [13] KORNBLUH R, PELRINE R, PRAHLAD H, et al. From Boats to Buoys: Promises and Challenges of Dielectric Elastomer Energy Harvesting[J]. **Pro-ceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering**,2011,7976(10):67-93.
- [14] LEIJON M, DANIELSSON O, ERIKSSON M, et al. An electrical approach to wave energy conversion[J]. **Renewable Energy**,2006,31(9):1309-1319.
- [15] MUELLER M. Electrical generators for direct drive wave energy converters[J]. **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings**,2002,149(4):446-456.
- [16] PRADO M. Archimedes wave swing (AWS)[J]. **Green Energy Technology**,2008(4):297-304.
- [17] GAO Y, SHAO S, ZOU H, et al. A fully floating system for a wave energy converter with direct-driven linear generator[J]. **Energy**,2016,95(1):99-109.
- [18] 张永良,林政.海洋波浪压电发电装置的进展[J].水力发电学报,2011,30(5):145-148.
- [19] CHIBA S, WAKI M, WADA T, et al. Consistent ocean wave energy harvesting using electroactive polymer (dielectric elastomer) artificial muscle generators[J]. **Applied**

- Energy**, 2013, 104(2):497-502.
- [20] SCRUGGS J. Disturbance-adaptive stochastic optimal control of energy harvesters, with application to ocean wave energy conversion[J]. **Annual Reviews in Control**, 2015, 40(1):102-115.
- [21] ENGSTROM J, ERIKSSON M, ISBERG J, et al. Wave energy converter with enhanced amplitude response at frequencies coinciding with Swedish west coast sea states by use of a supplementary submerged body[J]. **Journal of Applied Physics**, 2009, 106(6):1-5.
- [22] BABARIT A. On the park effect in arrays of oscillating wave energy converters[J]. **Renewable Energy**, 2013, 58(58):68-78.
- [23] 刘德兴,郑艳娜,张佳星. 振荡水柱波浪能发电装置的研究应用进展[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(2):231-236.
- [24] BOAKE C, WHITTAKER T, FOLLEY M, et al. Overview and initial operational experience of the LIMPET wave energy plant[C]// **Proceedings of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference**. Kitakyushu:[s. n.], 2002:586-594.
- [25] DELMONTE N, BARATER D, GIULIANI F, et al. Review of Oscillating Water Column Converters[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2015, 52(2):1698-1710.
- [26] ORTUBIA I. Mutriku wave power plant: from the thinking out to the reality[C]// **Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference**. Uppsala:[s. n.], 2009:319-329.
- [27] VERTECHY R, FONTANA M, PAPINI G, et al. Oscillating-water-column wave-energy-converter based on dielectric elastomer generator[J]. **Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering**, 2013, 8687(36):127-132.
- [28] PAPINI G, VERTECHY R, FONTANA M, et al. Dynamic Model of Dielectric Elastomer Diaphragm Generators for Oscillating Water Column Wave Energy Converters[C]// **ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems**. Snowbird: ASME, 2013.
- [29] 耿楠. 振荡水柱波浪能转换器效率分析及改进方案研究[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院, 2012.
- [30] KHAN M, BHUYAN G, IQBAL M, et al. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review[J]. **Applied Energy**, 2009, 86(10):1823-1835.
- [31] 张文喜,叶家玮. 摆式波浪能发电技术研究[J]. 广东造船, 2011, 30(1):20-22.
- [32] 张中华,夏增艳,黄勇,等. 离岸摆式波浪能发电技术综述[J]. 太阳能学报, 2012, 33(1):152-155.
- [33] WHITTAKER T, FOLLEY M. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster[J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 2011, 370(1959):345-364.
- [34] MORETTI G, FOREHAND D, VERTECHY R, et al. Modeling of an Oscillating Wave Surge Converter With Dielectric Elastomer Power Take-Off[C]// **ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. San Francisco, California: American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [35] MORETTI G, FONTANA M, Vertechy R. Parallelogram-shaped dielectric elastomer generators: Analytical model and experimental validation[J]. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 2015, 26(6):740-751.
- [36] MCCABE A, BRADSHAW A, Meadowcroft J, et al. Developments in the design of the PS Frog Mk 5 wave energy converter[J]. **Renewable Energy**, 2006, 31(2):141-151.
- [37] BABARIT A, CLÉMENT A, Gilloteaux J. Optimization and Time-Domain Simulation of the SEAREV Wave Energy Converter[C]// **ASME 2005 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. Halkidiki: ASME, 2005:703-712.
- [38] 游亚戈,李伟,刘伟民,等. 海洋能发电技术的发展现状与前景[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14):1-12.
- [39] 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(2):271-283.
- [40] FALCAO A. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010, 14(3):899-918.
- [41] 姚琦,王世明,胡海鹏. 波浪能发电装置的发展与展望[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(1):86-92.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

鄂世举,金建华,曹建波,等. 波浪能捕获及发电装置研究进展与技术分析[J]. 机电工程, 2016, 33(12):1421-1427.

E Shi-ju, JIN Jian-hua, CAO Jian-bo, et al. Advances and technical analysis of wave power capture devices and electric power generators[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(12):1421-1427.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>