

海洋波浪能量采集技术研究进展与展望

陈仁文 任 龙 蒋小川 夏桦康 徐栋霞

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016)

摘要:叙述了海洋波浪能量特点及海洋波浪能量采集的重要意义。介绍了几种典型波浪能量采集系统的结构形式、特点和应用情况。重点阐述了作者提出的一种蛇形直接式波浪能量采集装置的结构及特点,并以此为例,分析了海洋波浪能量采集装置设计中的一些难点和关键问题,包括波浪建模、结构参数选择、优化、适应波浪变化的自动调节等。最后,结合当前研究和工程应用中的问题,对波浪能量采集技术的发展趋势进行了展望。

关键词:海洋波浪能;能量采集;电磁转换

中图分类号:TK79

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2014)06-0831-07

Recent Advances and Prospects of Ocean Wave Energy Harvesting Technology

Chen Renwen, Ren Long, Jiang Xiaochuan, Xia Huakang, Xu Dongxia

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The features of ocean wave and the importance of its energy harvesting are introduced. Afterwards, several typical ocean wave energy harvesters (OWEHs) are presented, including their structures, characteristics, and applications, in which a snake-like ocean wave energy harvester proposed by the authors is emphasized. By the example of the harvester, the difficulties and the key technologies of OWEHs are presented in terms of wave modeling, structural parameter selection and optimization as well as wave-adaptive tuning scheme. Finally, the develop trend of OWEH is prospected according to the current problem in their research and application.

Key words: ocean wave energy; energy harvesting; magnetic-electric conversion

经济和社会的发展对能源的需求日益增加,而当今广泛依赖的石油、煤炭、天然气等传统矿物能源有限且不可再生。与此同时,传统能源的使用容易带来环境污染和温室效应等问题,这些都促使人们不断探索可再生新能源。世界各国都将开发利用可再生新能源列入到科学研究的重要位置。在可再生绿色能源中,海洋能源十分丰富,是开发的重点。我国在《可再生能源中长期发展规划》中提出,把积极

推进海洋能的开发利用作为重点发展领域。

据全球能量委员会的调查报告,全球可利用的海洋波浪能约 20 亿千瓦,可开发量远超当前发电功率^[1]。我国海岸线漫长,山东、江苏、浙江、福建、广东和台湾沿海都是波浪能丰富的地方^[2-7]。其中可利用的波浪能理论存储量为 7 000 万千瓦。波浪平均能流密度约为 2~7 kW/m,渤海湾能流密度可以达到 42 kW/m。理论上说,能流密度较高的地方,

基金项目:国家自然科学基金(10972102)资助项目;江苏省科技支撑计划(BE2009163)资助项目;江苏省高校优势学科建设工程(PAPD)资助项目。

收稿日期:2014-10-18;**修订日期:**2014-11-24

作者简介:陈仁文,男,1966 年 1 月生,博士,教授,博士生导师;研究方向:环境能量采集、减振降噪智能结构、测控技术、传感器及网络;获省部级科技进步奖 10 余项,获国家级优秀教学成果二等奖 1 项;申请或授权发明专利 15 项;2009~2010 年为加州大学伯克利分校访问学者。

通信作者:陈仁文, E-mail:rwchen@nuaa.edu.cn.

每米波浪能足以供 20 个家庭照明。另外,海洋波浪能具有如下优点:(1)在所有的可再生能源中,波浪能的能量密度最高^[8];(2)使用时产生的环境影响较少;(3)平均可利用时间长,达到 90% 的时间,比风能和太阳能的 20%~30% 要长很多。由此可见,对海洋波浪能开发有十分重要的现实意义。

本文总结了几种典型海洋波浪能量采集系统的结构、采集原理、特点和最新进展,重点介绍了蛇形电磁直接式波浪能量采集技术研究状况、难点和相关关键技术等。最后对波浪能量采集技术的研究趋势进行了展望。

1 波浪能量采集系统的典型形式与进展

目前英国、美国、日本、挪威、爱尔兰、西班牙、葡萄牙、瑞典、丹麦、印度等国家的科学家都在积极研究各种波浪能发电的高新技术^[1,9-26],不少公司也投入大量资金进行研究,有些公司的相关产品已经在探索产业化道路。当前研究的波浪能量采集装置通常可以分为振荡水柱式、浮子式、鸭子式、浮桥泵式、筏式、离岸越浪式、蛇形电磁直接转换式等。

(1)振荡水柱式。振荡水柱式波浪能量采集装置可以根据其系泊方式不同分为漂浮式和固定式两种。漂浮式将波浪能量采集装置的一端通过锚固定于海底;固定式则一般建在海岸边迎浪侧。相对于漂浮式更易于施工,并网更加简单^[27]。振荡水柱式能量采集装置有一气室,气室下部开口在水下并与海水连通,气室的上部开口则连通大气。在波浪作用下,气室下方的水柱发生受迫振动,压缩气室中的空气往复通过气室上部开口,将波浪能转换为空气的压力势能和动能。压缩气流通过上部开口处安装的透平驱动发电机发电。图 1 为振荡水柱式波浪能量转换装置及其原理示意图。这种方式的波浪能发电机国内外都有试验机组在运行。我国在广东汕尾建设的 100 kW 振荡水柱式波浪发电站也已经通过验收。

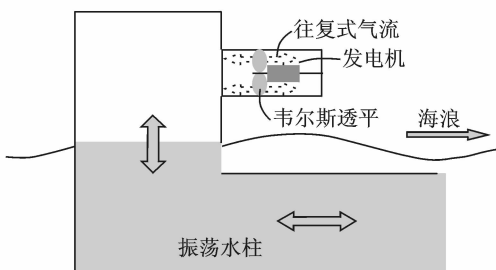


图 1 振荡水柱式波浪能量采集装置及其原理

Fig. 1 Water-column oscillation wave energy harvester and its principle

(2)浮子式。该装置用绳索将一浮子与固定在海底的能量转换机构相连。浮子在波浪作用下上下运动,通过绳索带动能量转换装置工作,将波浪能量转换为电能。一般采用齿轮齿条等机构驱动永磁发电机或者直线发电机发电。图 2 为一种采用直线发电机作为能量转换装置的浮子式波浪能量采集装置的原理结构^[28]。

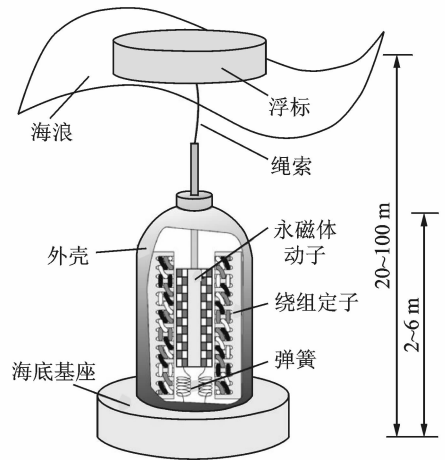


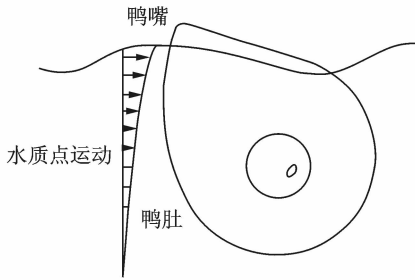
图 2 浮子式波浪能量转换装置结构

Fig. 2 Structure of buoy wave energy harvester

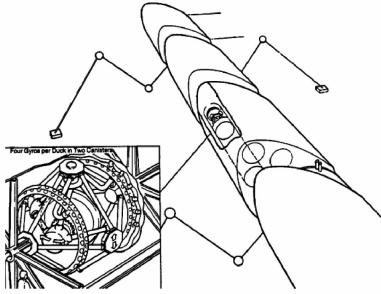
浮子式波浪能量采集装置目前已经在海上导航设备、海洋传感器、水下机器人等设备的供电上有应用。由于浮子的尺度小于波浪的尺度,属于一种点吸收装置,因而通常以阵列形式布置,在一片海区内形成发电场。

(3)鸭子式。1974 年,英国科学家 Salter 在其论文中提出了一种构想巧妙的波能转换装置“点头鸭”^[29],如图 3 所示。鸭体的转动轴心垂直于顺浪方向安装。由于波浪式表面的水质点的圆周运动直径随着深度的增加而迅速减小,当海水波峰从图 3(a)中左侧冲过来时,表层海水和深层海水给予鸭体动压力差值,使得鸭体做抬头运动。当海水波谷从左侧到来时,鸭体受重力作用向下点头。另外,动压力的变化也导致了静压力的改变,使得鸭体上下浮沉运动,也致使其做同相位的回转。鸭体的浮沉摆动带动内部花键泵转动,产生的高压油驱动液压马达,从而发电。

通过选择合适的外形尺寸参数将鸭体形状设计得尽可能符合流体力学受力规律,或者通过调整“点头鸭”的重心位置使得其固有频率与波浪频率匹配,都能达到最大程度吸收波浪能量的效果。实验数据表明,该装置的波浪能一级吸收效率可达 80%~90%,但其总体能量转换效率要小很多。英



(a) 原理示意图



(b) 结构示意图

图 3 索尔特“点头鸭”转换波浪能转换装置
Fig. 3 Salter duck wave energy harvester

国曾计划大规模布置点头鸭式波浪发电装置,供应当时全英所需电力,但因装置结构过于庞大复杂、成本过高而搁置。

(4)浮桥泵式。爱尔兰科学家 Kraemer 在 2000 年提出了一种水波泵式的波浪能量采集装置^[30],如图 4 所示。该装置由 3 个钢质浮桥和 1 个阻尼式锚固系统组成。3 个钢质浮桥铰接在一起,中间浮桥连接放置于深水处的阻尼板,从而保持相对稳定。波浪到来时,前浮桥和后浮桥相对于中间的固定浮桥产生角位移。装置利用水波泵原理驱动水轮机进行工作发电。

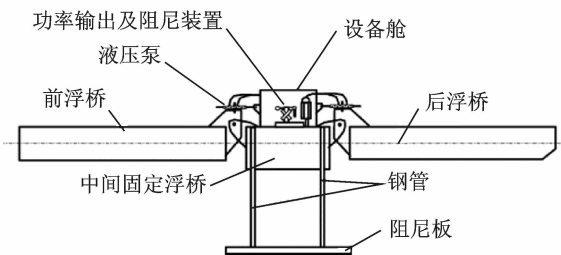


图 4 麦克卡伯水波泵装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of McCabe water wave pump

(5)筏式。英国人 Cockerell 提出了一种筏式波浪能量采集装置,如图 5 所示^[31]。

筏体顺着浪向漂浮在波浪表面上,相邻两个筏体铰接在一起并安装液压缸。筏体受到波浪上下

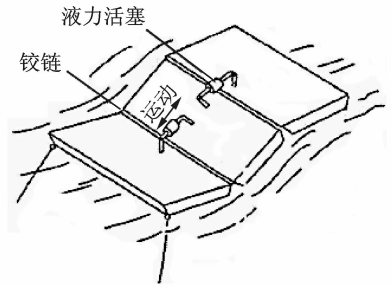


图 5 波面筏装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of wave raft apparatus

起伏的驱动,相邻筏体之间就不断产生变化的角位移,反复压缩液压力活塞,将波浪能转换为液压能,进而转换为电能。该装置具有结构简单,抗浪性好,维护成本低等优点,但是该装置必须布置在顺浪条件下才能达到较高的能量采集效率。

图 6 为英国海洋能源技术公司研制的海蛇波浪能发电装置^[1],这是筏式技术的改良。该装置将筏子改为一系列直径 4 m 的钢制圆柱浮筒,相邻两个浮筒铰接在一起,总长达到 180 m,形似一条巨大的“海蛇”漂浮在海面上。该公司估计,如果在面积为 1 km² 的海面上放置 40 个类似的“海蛇”,其总发电功率可达 30 MW,足以保障两万个英国家庭的用电。

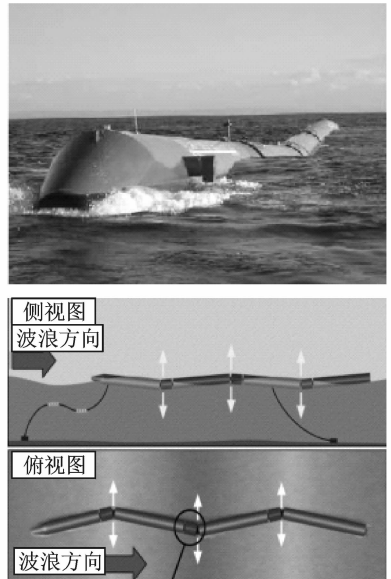


图 6 海洋能源技术公司的海蛇波浪能发电装置

Fig. 6 Pelamis wave energy generators of Ocean Power Technology Company

(6)离岸越浪式。越浪式装置有一蓄水池。当波浪移动到浅水区域时,受岸滩的干扰,水质点运

动变为椭圆形,波浪高度不断被放大。当波高超过蓄水池的高度时,海水溢出,然后像潮汐发电一样推动低水头的水轮发电机。虽然目前技术成熟,但装置容易受潮差的影响,抗极端海况能力弱。

瑞典开发了一种离岸越浪式的波力发电装置,称为飘浮式波能船(Floating wave power)^[32]。该装置是通过特有的锚固系统固定于海上的一个漂浮式水池,水池入口能够始终正对波浪能最强的方向。波浪来流受水深变浅的影响,波高不断增大,最终溢出,海水返回海中时推动低水头的水轮发电机发电。该装置突破了传统收缩坡道装置对于地形要求的限制,具有很强的潮差适应性和抗极端海况的能力。

(7)蛇形电磁直接转换式。南京航空航天大学陈仁文在2011年提出了一种蛇形电磁直接转换式波浪能量发电装置,如图7所示^[33-35]。该蛇形波浪能发电装置由可增减的若干圆柱形漂浮短节连接构成。相邻短节中交替放置带磁芯的线圈(该短节称为线圈短节)和永磁体(称为永磁短节)。当浮筒随着波浪起伏时,在线圈短节中的线圈与永磁短节中的永磁体的相对位置不断变化,线圈切割永磁体产生的磁场,从而感应出电势。浮筒的数量可以根据需要增减。线圈短节内安装电能后处理电路。系统整体呈长蛇状,一端通过钢缆锚固在海底。

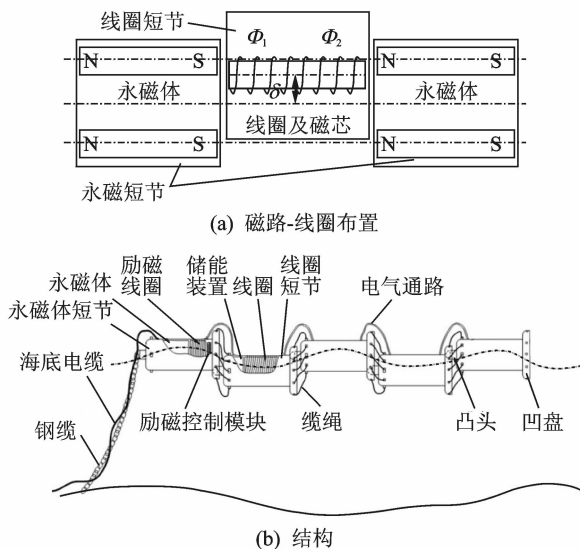


图7 蛇形电磁式波能采集装置原理

Fig. 7 Principle of snake-like magnetoelectric wave energy harvester

值得注意的是,通常波浪能量转换装置包括3级转换:第一级为受波体,它将海洋中的波浪能量以动能的形式吸收进来;第二级为中间转换装置,

它优化第一级转换,产生稳定的能量,通常是将受波体或者波浪的动能转换为压缩气体内能、液压力或蓄水重力势能;第三级为发电装置,与其他发电装置类似。这三级都消耗能量,引起总体能量转换效率的大幅下降。为了提高能量采集效率,蛇形电磁直接转换式波浪能量采集装置通过波浪直接推动含永磁短节和线圈短节,使其产生相对运动来实现发电。既减少了第二级能量转换,又避免了透平和发电机的设计,避免了中间转换环节带来的能量损失。同时,其结构简单可靠、更耐冲击,可以抗击极端海况,系泊成本也较低。该能量转换结构还有一个潜在的优势就是,可以对海浪方向进行自适应调节,使该装置的长度方向始终对着波浪的传播方向,从而可以始终吸收到最大的波浪能量。目前,该能量采集装置已进行结构参数优化,并进行了验证模型的初步试验,有望进一步进行全尺寸试验。

2 海洋波浪能量采集的难点与关键技术

2.1 波浪能量采集的设计难点

从现有的文献资料来看,目前所研究的波浪能量采集装置普遍存在如下一些问题:

(1)能量转换效率不高。正如前文所提及,很多能量采集装置都要经过多级能量转换,每级的能量转换都有能量损失。因此,大多数的波浪能量采集装置的效率仅有10%~30%^[2-7]。

(2)能量采集系统容易损坏,布置和建设比较困难。另外,大部分能量转换依靠液体或气体推动透平和电机进行发电,其中透平的设计也是一个技术难点。液压式能量转换方式相比气动方式在能量转换、传输、控制及储能方面方便,但机械结构复杂、机体易被腐蚀、对材料选择要求较高。

(3)输出电能不稳定,需要与其他的电力系统配合使用。由于波浪的大小随时间不断变化,因而波浪能量采集装置不能单独地提供不间断的电力,需要接入其他电网中才能使用。

2.2 蛇形海洋波浪能量采集的关键技术

基于上述波浪能量采集中的技术难点,作者在蛇形电磁直接转换式波浪能量采集技术的研究中有针对性地提出了一些解决方案,并且在理论和实验上均进行了验证。以蛇形电磁直接转换式波浪能量采集为例,其涉及的主要关键技术如下:

(1)典型海域波浪数据建模

利用测量的数据建立典型海洋波浪模型是设计高效波浪能量采集装置的前提和保障。当前,大

多数波浪能量采集技术的研究选择基于二维条件的线性波理论,将海水的波浪运动模型简化为一个余弦模型来进行设计。但现实中的海水波浪是复杂的、多变的,波浪静水面高度差也随时间不断变化,要进行实用性较高的模型具有较大难度。

在蛇形电磁式波浪能量采集技术的研究过程中,作者选择了浙江舟山群岛嵊泗列岛海域的实测数据,以 Gerstner Waves 模型对该海域波浪进行了建模^[36]。Gerstner Waves 模型主要应用于海面计算机图形的模拟,是基于微幅波理论的深水条件下的简单波动的叠加。运用微幅波的弥散关系,在适当选取一些参数的情况下可以模拟出一些比较复杂的模型,相比较线性波理论建立的波浪模型更加准确可靠。

(2) 波浪能量耦合结构设计及参数优化

波浪能量耦合结构涉及流体力学、多体动力学、电磁学等学科。多物理场间的耦合需要用多学科联合分析和优化的方法才能解决问题。波浪能量采集装置的几何尺寸等参数是决定其工作性能和输出功率的关键因素。在研究中需要利用动力学和流体力学的理论建立整个结构的流固耦合模型,模拟实际工况,分析不同结构参数下不同形式能量转换的规律。通过分析和实际测试,研究一定的优化算法,寻找最优结构参数。

(3) 波浪自适应调节结构及控制律设计

波浪能量采集系统是一个动态系统,该系统的刚度、弹性系数、阻尼系数以及形状尺寸都应该与波浪的形状、高度、频率特性、能量强度等参数进行匹配,才能够达到最佳的能量耦合效率^[37]。因此,波浪能量采集装置需要根据一定的自适应控制结构和策略,去根据波浪特性的变化自动调整结构的动力学特性、能量转换系统的磁路结构,以达到对波浪能最高效率的采集^[38]。

为了适应波浪静水面高度差变化,需要调节浮筒结构中的磁路结构,为使采集结构与波浪周期匹配,也需要对短节的长度进行在线调整。图 8 为自适应结构框图。

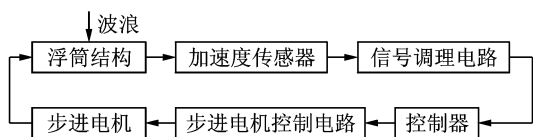


图 8 双永磁体间距调节实现流程

Fig. 8 Implementation process of spacing distance adjustment for double permanent magnets

(4) 充电控制与电源管理

由于海洋波浪不断变化,波浪能采集装置发电产生的电能不稳定,电力的幅值和频率均不断变化,不能够直接应用于负载。因此,必须有相应的充电控制与电源管理来使波浪能量采集装置能够提供稳定的电力。

蛇形电磁式波浪能量采集装置的设计中采用了基于 Buck-Boost 变换器的波浪能量和蓄电池互补发电的能量管理控制策略。波浪能量采集系统的线圈输出的低频且幅值变化的交流电经过全桥滤波整流后,通过初级单向 Buck-Boost 变换器进行电压变换,变成比较稳定的输出电能,再经过第二级双向 Buck-Boost 变换器,使得蓄电池能量和蛇形波能发电装置线圈收集到的能量能够协调工作。

3 波浪能量采集技术的发展趋势

就像太阳能和风能一样,海洋波浪能量采集技术的研究必将成为未来清洁能源技术研究的一个重要方向。但要满足实用化和规模应用的要求,以下是该技术的几个重要方向。

(1)高转换效率的能量采集结构。目前的发电装置中有些机构十分复杂,影响了其实际应用。为提高波浪能量的转换效率,在当前已经提出的多种波浪能量采集方式的基础上,可以考虑减少能量的中间转换环节。例如在蛇形电磁直接转换式波浪能量采集装置中,将波浪能量通过受波体吸收到能量采集装置内,然后直接利用浮筒间位置相对运动将这部分机械能通过磁电换能结构转换为电能,减小了中间过程的能量损耗,分析表明,该方案可将能量采集效率提高到 30% 以上。

(2)结构简单、耐冲击、可长期稳定工作的波浪能量采集装置。海洋条件与陆地条件有显著区别,海水和海风所携带的盐碱对海洋波浪能量采集装置具有较大的腐蚀性,有些情况下海浪的巨大能量也对装置有非常巨大的威胁。因而研究时,除了要考虑从材料、系泊的选择等因素外,还要提出创新的简单、高效结构以提高结构本身对波浪的适应性、耐冲击性,保证波浪能量采集装置长期稳定工作。

(3)可适应波浪参数变化的自适应调节装置及控制律。当能量转换结构的自然频率与外界激励频率相近时,结构与激励处于耦合共振状态,能量采集装置采集的能量将达到最大。因此,可以通过一定的自适应方法改变结构固有频率,以适应外界激励的变化。另外,从蛇形电磁直接转换式波浪能量采集装置的研究中也发现,在波浪能量采集装置

中,不同静水面高度差对应的永磁体最优间距不同,波浪能量采集装置需要调节参数来适应不同波浪高度以提升效率。

(4)新型高性能换能结构材料在波浪能量采集装置中的应用。海洋波浪能量采集装置采用的能量转换方式一般为液压式、气动式和电磁式。随着材料科学研究的不断进步,当前已有一些机构开始研究电活性聚合物和压电材料制作的新型换能结构在海洋波浪能量采集中的应用,其中的一些介电型 EAP、压电式波浪能量采集装置具有较高的能量转换效率。因而,各种新材料衍生的新型高性能换能结构也将成为波浪能量采集技术的研究热点。

(5)波浪能量采集装置的智能充电控制策略及电源管理。波浪能量采集装置在实际波浪的作用下,其输出的电压并非一个恒定值,如果系统投入工程实践,面临更加复杂的海况,输出的电能将更不稳定。因此,在对负载的供电中,将波浪能发电产生的幅值和频率均不稳定的电能转换为能够应用于负载的稳定电能输出,是设计中需要解决的重要问题。波浪的大小和频率经常变化,因而波浪能量采集系统的输出电压波动和闪变将使得并网后电网的电能质量无法得到保证。如何解决这些问题,避免对电力系统调度产生影响将成为波浪发电并网研究的一个重点。

4 结束语

波浪能量是一种取之不尽的清洁能源,波浪能量采集技术具有很高的研究价值。本文对当前波浪能量采集技术研究领域中一些热门的能量采集方式进行了论述,着重介绍了蛇形电磁直接转换式波浪能量采集系统的关键技术,对波浪能量采集技术的几个重要发展趋势进行了探讨,以期为该技术的进一步研究提供有价值的参考。

参考文献:

- [1] Drew B, Plummer A R, Sahinkaya M N. A review of wave energy converter technology[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2009, 223(8): 887-902.
- [2] 刘美琴, 郑源, 赵振宙, 等. 波浪能利用的发展与前景[J]. 海洋开发与管理, 2010, 27(3): 80-82.
Liu Meiqin, Zheng Yuan, Zhao Zhenzhou, et al. Development and prospects of wave energy utilization [J]. Ocean Development and Management, 2010, 27(3): 80-82.
- [3] 刘寅立, 焦永芳. 波浪能开发与利用研究进展[J]. 中国高新技术企业, 2009(2): 19-20.

Liu Yinli, Jiao Yongfang. Research progress of wave energy exploitation and utilization [J]. China High Technology Enterprises, 2009(2): 19-20.

- [4] 任建莉, 罗誉娅, 钟英杰, 等. 波力资源分析系统的实现及波能发电应用[J]. 浙江工业大学学报, 2008, 36(2): 186-191.
Ren Jianli, Ruo Yuya, Zhong Yingjie, et al. The implementation for the analysis system of ocean wave resources and the application of wave energy power generation [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2008, 36(2): 186-191.
- [5] 龚媛. 世界波浪发电技术的发展动态[J]. 电力需求侧管理, 2008, 10(6): 71-72.
Gong Yuan. Development trend of wave power generation technology in the world [J]. Power Demand Side Management, 2008, 10(6): 71-72.
- [6] 李成魁, 廖文俊, 王宇鑫. 世界海洋波浪能发电技术研究进展[J]. 装备机械, 2010(2): 68-73.
Li Chengkui, Liao Wenjun, Wang Yuxin. The development of wave power generation technology in the world [J]. Equipment Machinery, 2010(2): 68-73.
- [7] 蒋秋彪, 鲍献文, 韩雪霜. 我国海洋能研究与开发述评[J]. 海洋开发与管理, 2009, 25(12): 22-29.
Jiang Qiubiao, Bao Xianwen, Han Xueshuang. Study on the research and development of China's oceanic energy [J]. Ocean Development and Management, 2009, 25(12): 22-29.
- [8] Clément A, McCullen P, Falção A, et al. Wave energy in Europe: Current status and perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(5): 405-431.
- [9] Allen J J, Smits A J. Energy harvesting eel [J]. Journal of Fluids and Structures, 2001, 15(3): 629-640.
- [10] Palha A, Mendes L, Fortes C J, et al. The impact of wave energy farms in the shoreline wave climate: Portuguese pilot zone case study using Pelamis energy wave devices [J]. Renewable Energy, 2010, 35(1): 62-77.
- [11] Harb A. Energy harvesting: State-of-the-art [J]. Renewable Energy, 2011, 36(10): 2641-2654.
- [12] Farmer J R. A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [13] Zhu Q, Peng Z. Mode coupling and flow energy harvesting by a flapping foil [J]. Physics of Fluids (1994—Present), 2009, 21(3): 033601.
- [14] Peng Z, Zhu Q. Energy harvesting through flow-induced oscillations of a foil [J]. Physics of Fluids (1994—Present), 2009, 21(12): 123602.

- [15] Dalton G J, Alcorn R, Lewis T. Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(2): 443-455.
- [16] 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.
- [17] Retzler C. Measurements of the slow drift dynamics of a model Pelamis wave energy converter[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(2): 257-269.
- [18] Orazov B, O'Reilly O M, Savas Ö. On the dynamics of a novel ocean wave energy converter[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(24): 5058-5069.
- [19] Seuaciuc-Osório T, Daqaq M F. Energy harvesting under excitations of time-varying frequency[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(13): 2497-2515.
- [20] Khan M J, Iqbal M T, Quaioco J E. River current energy conversion systems; Progress, prospects and challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(8): 2177-2193.
- [21] Kaltseis R, Keplinger C, Koh S J A, et al. Natural rubber for sustainable high-power electrical energy generation[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(53): 27905-27913.
- [22] Trapanese M. Optimization of a sea wave energy harvesting electromagnetic device[J]. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 2008, 44(11): 4365-4368.
- [23] Margheritini L, Vicinanza D, Frigaard P. SSG wave energy converter; Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(5): 1371-1380.
- [24] Dignan M, Giovinazzo M, Gray E, et al. Wave energy converter research[M]. Durham: University of New Hampshire, 2009.
- [25] Polinder H, Scuotto M. Wave energy converters and their impact on power systems[C]// *Future Power Systems, 2005 International Conference on*. [S. l.]: IEEE, 2005.
- [26] Szabó L, Oprea C. Wave energy plants for the black sea possible energy converter structures[C]// *Clean Electrical Power, 2007, International Conference on*. [S. l.]: IEEE, 2007: 306-311.
- [27] O'Sullivan D L, Lewis A W. Generator selection for offshore oscillating water column wave energy converters[C]// *13th Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008*. [S. l.]: IEEE, 2008: 1790-1797.
- [28] Thorburn K, Leijon M. Farm size comparison with analytical model of linear generator wave energy converters[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(5): 908-916.
- [29] Salter S H. Wave power[J]. *Nature*, 1974, 249(5459): 720-724.
- [30] Rourke F O, Boyle F, Reynolds A. Renewable energy resources and technologies applicable to Ireland [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(8): 1975-1984.
- [31] Cockerell C. Apparatus for extracting energy from wave movement of the sea; U. S. Patent 4,098,084 [P]. 1978-07-04.
- [32] Lagstroem G. Sea power international—floating wave power vessel, FWPV [C]// *Wave Power—Moving Towards Commercial Viability*. London, UK: Institution of Mechanical Engineers Seminar, 1999: 8-12.
- [33] 安兴. 波动能量采集系统关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
An Xing. Research on key technology of wave energy collection system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [34] 陈玉立. 双永磁体波浪能量采集器的设计及参数优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
Chen Yuli. Design and parameters optimization of double magnets wave energy harvesters [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [35] 陈仁文, 安兴, 任龙, 等. 一种蛇形波浪能采集装置: 中国, 201110209602.4 [P]. 2011-07-26.
Chen Renwen, An xing, Ren Long, et al. A type of snake-like wave energy harvester: China, 201110209602.4 [P]. 2011-07-26.
- [36] Fournier A, Reeves W T. A simple model of ocean waves [J]. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 1986, 20(4): 75-84.
- [37] 朱莉娅, 陈仁文, 刘祥建, 等. 自调谐宽频带压电振动发电机的改进[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(3): 327-332.
Zhu Liya, Chen Renwen, Liu Xiangjian, et al. Improved design of self-tuning broadband piezoelectric vibration generator [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(3): 327-332.
- [38] 刘强, 王鑫伟, 陈仁文, 等. 基于灰色预测的自适应解耦控制[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(2): 222-226.
Liu Qiang, Wang Xinwei, Chen Renwen, et al. Decoupled coupled algorithm for MIMO system based on grey prediction [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(2): 222-226.