

海洋波浪能研究进展及发展趋势

史宏达^{1,2}, 刘臻^{1,2}

1. 中国海洋大学青岛市海洋可再生能源重点实验室, 青岛 266100

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266061

摘要 海洋可再生能源是解决能源短缺与环境污染问题的重要方案之一,也是进行深远海开发、海岛建设及国防建设的重要支撑。在众多海洋可再生能源中,波浪能具有品质好、易利用、能流密度较大、分布广泛等优势,因此被广泛研究应用。为全面了解海洋波浪能研究进展,准确把握海洋波浪能发展趋势,以各种型式波浪能发电装置为出发点,综述了海洋波浪能研究进展,介绍了波浪能发电装置的工作原理、主要类型、技术、工程实例。研究发现,波浪能发电装置的技术类型未达到收敛,当前目标主要在于研发高效率、高可靠性及高可维护性的发电装置。波浪能发电装置发展趋势为以大型化及阵列化为基础进行商业化开发。

关键词 波浪能;发电装置;技术原理;工程实例

能源是人类生活和社会发展的重要物质基础。随着工业技术发展和人口增长,世界能源需求剧增。传统化石能源的大量开采带来了能源储量危机、全球气候变暖以及大气污染等一系列问题。满足能源需求、开展能源转型已成为全球共识。发展可再生能源、提高绿色能源占比,是解决能源问题的重要措施。海洋能指海水中的可再生自然能源,包括波浪能、潮汐能、海流能、温差能和盐差能等。据评估,全球波浪能资源总量达2 TW^[1],波浪能因其储量庞大、能流密度较大^[2]、易获取及环境影响小等优势,成为海洋能研究与开发的焦点。20世纪70年代,为应对石油危机^[3]及气候变暖等问题,各国已提出并研究多种型式的波浪能利用装置^[4-6]。

本文介绍波浪能发电装置基本原理,根据各类

型装置工作原理及结构型式等对已有波浪能发电装置进行分类,针对不同类型波浪能装置关键技术、典型工程案例进行分析,探讨波浪能发电装置发展趋势。

1 波浪能发电装置工作原理及技术

波浪能发电装置工作的基本原理为:通过捕能机构捕获波浪中的能量,再利用能量转换-传递系统将捕获的能量进行传递、存储、变换等处理,最终以电能型式输出。波浪能从获取到利用一般包含三级能量转换过程(图1):一级转换是利用物体在波浪作用下的升沉和摇摆等运动将波浪能转换为机械能或者利用波浪的爬升将波浪能转换成水的

收稿日期:2020-10-12;修回日期:2020-12-21

作者简介:史宏达,教授,研究方向为海洋能利用技术,电子信箱:hd_shi@ouc.edu.cn

引用格式:史宏达,刘臻.海洋波浪能研究进展及发展趋势[J].科技导报,2021,39(6):22-28;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2021.06.002

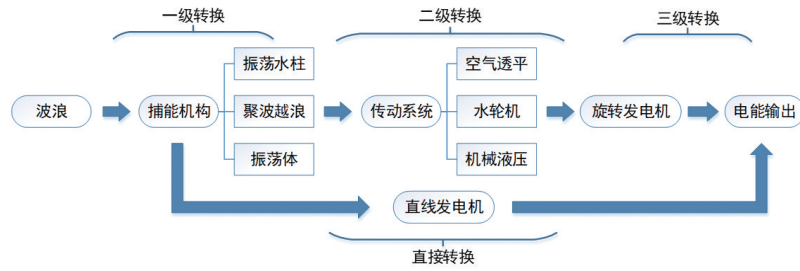


图1 波浪能发电装置原理示意

势能；二级转换是通过能量转换传递系统将捕获的波浪能转换为发电机所需的能量；三级转换主要是通过发电机及电力变换设备输出用户所需的电能。

因此，波浪能装置子系统主要包括水动力子系统、能量摄取子系统、反作用子系统及控制子系

统^[7]。其中，根据水动力子系统工作原理可将波浪能装置分为振荡水柱式、聚波越浪式及振荡体式3种，根据波浪能发电装置所处地理位置及水深可分为固定式（近岸浅水区域）及漂浮式（离岸深水区域），具体技术分类及典型工程案例如图2所示。

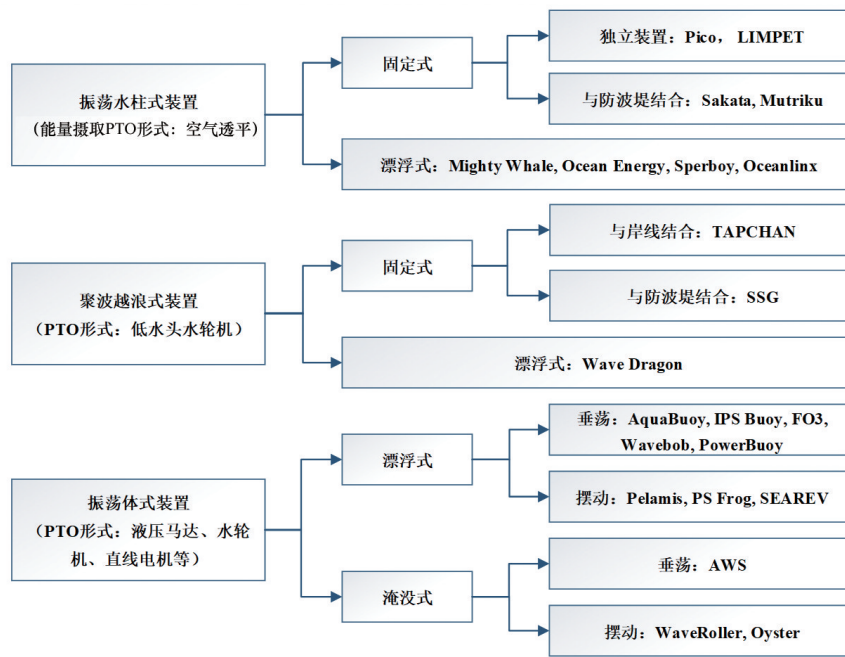


图2 波浪能装置分类

1.1 振荡水柱波浪能发电装置

作为发展最早的波浪能发电装置，振荡水柱波浪能发电装置基本工作原理如图3所示：装置的气室结构下部与海水相连通，形成水柱体，水柱上部空气可通过气管与外部大气连通。在波浪力的推动下，气室内的水柱产生振荡，并通过对水柱上部的空气增减压在气管内形成往复气流，将波浪能转换为空气动能，完成能量一级转换；往复气流推动

气管内的空气透平工作，将气流能量转换为透平旋转的机械能，完成能量二级转换；空气透平通过转轴驱动发电机发电，将轴功转换为电能，完成能量三级转换。振荡水柱波浪能发电装置整体获能效率可达29%^[8]。

振荡水柱波浪能发电装置能量转换系统的结构简单，对地形的依赖性较小；无水下活动部件，减弱了波浪的破坏性，避免了海水腐蚀及发电机组密

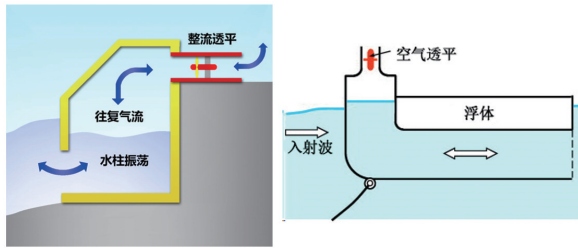


图3 振荡水柱波浪能发电装置原理示意

闭性问题,可靠性高。装置以气体为能量转换介质,由于其密度很低,因此转换效率不高;由于气室所需体积一般较大,基建费用较高。目前对于振荡水柱波浪能发电装置的研究方向主要集中于两方面:(1)对气室结构及空气透平能量转换机理研究,对其进行结构设计及优化,提高各级能量转换效率;(2)进行海洋能-电能的各级能量转换过程耦合研究,设计并优化全过程控制策略,提升装置整体获能效率。

1.2 聚波越浪式波浪能发电装置

聚波越浪式波浪能发电装置的基本工作原理如图4所示:波浪撞击海岸地形或聚波结构后聚集于斜坡道之上,波浪爬升翻越进入后方高位蓄水池(库)中,形成内外水头差,将波浪能转换为水体势能,完成能量一级转换;当蓄水池内水头满足发电要求时,通过回流管道释放水体返回大海,并驱动管道内的低水头水轮机工作,水体势能转换为水轮机旋转的机械能,完成能量二级转换;低水头水轮机通过转轴驱动发电机发电,将轴功转换为电能,完成能量三级转换。聚波越浪式波浪能发电装置获能效率可达到17%^[8]。

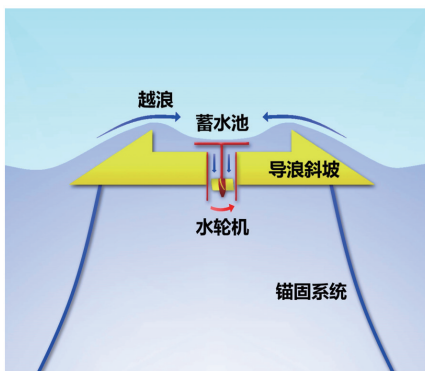


图4 聚波越浪式波浪能发电装置原理示意

聚波越浪式波浪能发电装置作为一种典型的波浪能发电装置,以水体为能量转换介质,能够将较不稳定的波浪能转换为蓄水池内相对稳定的水体势能,发电出力相对平稳;聚波越浪式波浪能发电装置活动部件少,抗风浪能力强,可适应于各种极端海况,具有较高的稳定性及可靠性。聚波越浪式波浪能发电装置关键技术包含波能高效收集及高效转换技术,对蓄水池结构形式及参数进行优化设计以提高越浪量,对出水管道及低水头轮机进行设计优化提高能量输出,提高系统兼容性及系统性,提高装置整体获能效率。

1.3 振荡体式波浪能发电装置

振荡体式波浪能发电装置基本工作原理如图5所示:利用振荡体结构在波浪中产生往复运动,将波浪能转化为物体运动的机械能,完成能量一级转换;振荡体上设置能量转换-传递机构,多为直驱式机械系统或液压系统,将振荡体运动的能量转换为机械能或液压能,完成能量二级转换;最终通过直线电机或液压马达连接发电机完成发电,将机械能或液压能转换为电能,完成能量三级转换。

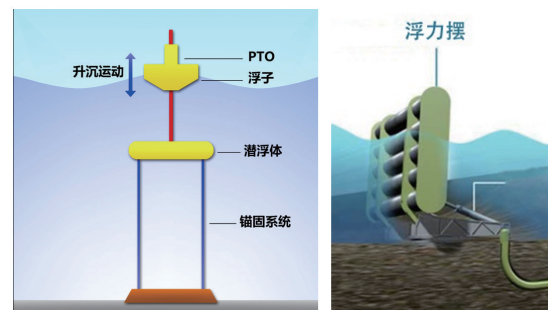


图5 振荡体式波浪能发电装置原理示意

振荡体式波浪能发电装置近年来发展较快,且结构型式多样,已成为一种新的研发趋势。该类装置以捕能机构本身作为转换介质,直接与波浪作用,通过机械或液压系统传递能量,能量转换效率高;根据 Babarit^[8]对振荡体式装置统计汇总,70.18%的升沉型装置效率低于20%,70.9%的摆式装置效率低于40%。装置可利用锚固系统在不同水深条件下工作,结构灵活,且体量相对较小,易于向深水阵列布置型式推广。振荡体式波浪能发电

装置研究方向主要包括装置结构形式设计优化、多自由度、系统控制及获能谱理论研究,提高系统获能效率及装置可靠性。

2 波浪能发电装置工程实例

早期,在挪威、日本、印度、葡萄牙和英国等国实施了实海况原型机测试的波浪能发电装置多为固定式振荡水柱装置,且均采用了威尔斯透平技术驱动发电机发电^[9],如日本酒田(Sakata)港的波力发电防波堤(装机容量60 kW)、葡萄牙亚速尔群岛(Azores Islands)的Pico电站(装机容量400 kW)、英国WaveGen公司在2000年于苏格兰艾雷岛(Islay Island)建成的LIMPET电站(装机容量500 kW)等。固定式振荡水柱装置与岸式防波堤相结合具有明显开发优势,典型工程为西班牙穆特里库(Mutriku)港口的300 kW波浪能电站(图6),该电站于2011年投入使用,包含16个独立气室,每个气室均配备0.75 m直径的威尔斯式透平和额定功率18.5 kW的发电机组,截至2018年6月电站总发电量为1.6 GW·h^[10]。



图6 穆特里库波浪能电站

丹麦LeanCon装置为采用振荡水柱原理的漂浮式装置,全尺度装置设计宽240 m,结构为多气室相通的V形布置,装机容量4.6 MW,包含8个透平—发电机组,预计在北海海域年发电量可达8.8 MW·h^[11]。PTO系统装备了传统的单向气流透平,并利用单向阀对往复气流进行整流。由负压产生的向下作用力能够阻止装置上浮至波峰处,因此可采用较轻的高强度纤维增强材料制造。该装置于

2015年在Nissum Bredning完成了1:10比例样机海试(图7),正在开展1:4比例样机的优化建设。



图7 LeanCon装置1:10比例样机海试

典型的聚波越浪式装置有丹麦Friis-Madsen公司开发的波龙(Wave Dragon)装置(图8),由2个导浪墙、双坡道及混凝土结构的蓄水池3部分组成,采用越浪原理发电,低水头轴流式水轮机组安装于蓄水池底端,在水库下安装有低水头涡轮机。2003年,在Nissum Bredning试验了装机容量为20 kW的样机(由7台转桨式水轮机组组成,蓄水池容量为55 m³),初步实现了并网发电,2006年,针对大波浪环境的比例样机投入运行,这是世界上首座漂浮式越浪式波能发电装置,累计运行超过20000 h,其原型机的发电功率可达4~7 MW。Wave Dragon的进一步应用开发包括在威尔士建设的7 MW波浪能示范项目和在葡萄牙开展的50 MW波浪能发电厂^[12]。



图8 Wave Dragon装置1:4.5比例样机海试

应用振荡体式设计的发电装置实例较多,其中典型代表为美国Ocean Power Technologies公司研发的OPT PowerBuoy装置(图9),该装置基于点吸

收原理,利用浮标内外两部分的相对运动来工作,其PTO系统采用了气动及液压等多种解决方案,可为离岸(20~3000 m水深)的测量传感器(搭载在浮标上部、水面以下及浮标周围海域)提供相对高水平的电能。该装置获得了多个测试项目资助,并已完成了装机容量40 kW(PB40)与150 kW(PB150)原型样机的海上实测,但目前该公司主推350 W全自动化的PB3设备^[13-14]。类似技术的装置还包括Wavebob、Seabased等。



图9 OPT PowerBuoy装置PB150样机海试

通过铰链与海底连接的淹没摆式结构的代表为英国Aquamarine Power公司开发的Oyster装置,该装置由液压缸和固定在近岸海底的浮力摆板组成,波浪使浮力摆板摆动并驱动液压缸,通过海底管道将高压水输送上岸,高压水驱动岸上的水轮机带动发电机发电,以供用户使用或连接到海水淡化装置进行脱盐淡化作业。2009—2011年,Oyster 1样机在Stromness附近的欧洲海洋能源中心(EM-EC)测试场安装使用,该装置额定功率315 kW,在海上运行超过6000 h,可24 h连续供电;优化后的第二代装置Oyster 800,单机装机容量800 kW,其宽和高分别为26、12 m,于2012年进行了海试及并网发电(图10),并于2015年结束测试^[15]。类似原理装置还包括Waveroller、Resolute Marine Energy及Langlee。



图10 Oyster 800样机海试

除上述利用单体结构发电的装置外,还有多体升沉式的集成结构,如丹麦Wave Star Energy公司研制的Wavestar装置,该装置为多点吸收式波浪能发电装置,利用阵列浮子在海上的振荡运动驱动液压型PTO发电,专为离岸10~20 km近海区域设计,且装置具备风暴保护模式,其所有液压和发电设备被安装在水面以上,在风暴期间浮体能够抬升,使其远离海面以避免风暴对设备的破坏,如图11所示。2006年,1:10比例样机(5.5 kW)在丹麦Nissum Bredning实现并网发电;2010年1月,在汉斯霍尔姆建成1:2比例样机(110 kW),实现并网发电^[16]。目前该公司正在开展其试商用机WAVE-STAR C6—1000的融资,全尺度样机概念上由20个直径6 m的浮体组成,输出功率可达1 MW,可在未来建成利用波浪能和风能互补发电的海上综合电站^[17]。



图11 Wavestar装置1:2比例样机海试

WEPTOS装置为另一漂浮式多浮体结构,由丹麦Weptos A/S公司开发,主体为V形框架结构,框架上支撑多组相同的转子,单个转子形状基于爱丁堡大学Salter教授提出的著名的“点头鸭”技术^[3],

与波浪作用直接发电(图12)。各条腿上的转子均连接并驱动同一转轴,两转轴分别连接一组独立的PTO,单向轴承则将转子上、下行冲程的运动转换为转轴上的单向力矩。V形框架的夹角可根据波浪条件进行调整,在运行条件下,可增大面对入射波的宽度,在恶劣波浪条件下,则可减少其与波浪的相互作用。该装置于2016—2017年开展“WEPTOS OFFSHORE #1”样机的海上建设、测试与并网发电,目前该公司正在开展1 MW级装置的开发与商业化产品的融资合作^[18]。



图12 “WEPTOS OFFSHORE #1”样机海试

3 波浪能发电装置发展趋势

在近年世界各国普遍注重发展新能源的大背景下,波浪能储量巨大、能流密度高、绿色清洁,是应对未来化石能源的短缺及全球气候变暖问题的重要选择之一。欧洲海洋能源中心(EMEC)的发布数据显示,2017年全世界正在研发的波浪能发电装置达200余种,且技术成熟度发展不一,波浪能发电装置的技术类型未达到收敛,各型式装置均具备一定的市场前景。然而波浪能装置的进一步商业化应用仍然面临着3个主要的问题:(1)从能量转换率来看,波浪能转换的技术发展还处在不成熟的阶段;(2)波浪俘获海域的环境条件带来的能源开发不确定性;(3)波浪能开发在目前阶段存在经济性问题。基于以上3个问题,目前开发任意特定海域的波浪能都需要进行技术投资成本及利润的评估和可行性分析。

现今,波浪能利用正处于一个关键的转折期,各国科研机构、新能源企业的研发突破重点从机理技术研究转变为如何降低波浪能开发的能源成本,以获取与其他各类新能源进行市场竞争的机会。为解决高成本问题,首先,需要继续深入研究各类主流波浪能发电装置的机理,优化控制策略,提升捕能效率;其次,多元化和综合利用是波浪能发展的新方向,可将波浪能发电装置与其他海上结构耦合开发,综合利用,例如将沉箱防波堤与振荡水柱发电装置相结合^[19],利用传统的浮子式波浪能发电装置作为漂浮式风机基础,同时捕获波浪能与风能^[20];最后,需广泛开拓波浪能利用领域,可利用波浪能进行海水淡化、制氢、提取海洋贵金属等,可将海岛供电作为市场需求的突破口,利用海岛周边自有的波浪能解决传统能源供电不便,海能海用。

随着波浪能发电装置高效性、可靠性、生存性、可维护性等技术的日趋成熟,波浪能发电与传统能源发电的电力成本差距会被进一步缩小,进而吸引政府和能源企业投资,在合适的区域补充或替代传统能源发电。

4 结论

波浪能发电装置从技术原理上主要分为振荡水柱式、聚波越浪式及振荡体式3种,但其装置型式尚未收敛,在以上3种技术型式基础上开发出众多波浪能发电装置。目前,波浪能开发面临诸多挑战,如波浪能装置获能效率不高、装置结构安全性、稳定性要求较高等。因此,各类波浪能发电装置研究目标主要在于优化装置整体发电性能(包括发电稳定性及效率),提高装置可靠性及可维护性,增强装置在极端海况下生存能力。

随着研究技术不断发展,波浪能发电技术日益成熟,从基础研究逐渐发展至示范阶段,部分装置已进入商业化运行阶段。在波浪能商业化开发利用中,波浪能发电装置逐渐向大型化、阵列化方向发展以降低成本。

参考文献 (References)

- [1] Thorpe T W. A brief review of wave energy[M]. London: Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit, 1999.
- [2] Clement A, McCullen P, Falcao A, et al. Wave energy in Europe: Current status and perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, 6(5): 405-431.
- [3] Salter S H. Wave power[J]. *Nature*, 1974, 249(5459): 720-724.
- [4] Leishman J M, Scobie G. The development of wave power: A techno-economic study[R]. East Kilbride, Scotland: National Engineering Laboratory, 1976.
- [5] Stahl A. The utilization of the power of ocean waves[J]. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1892, 13: 438-506.
- [6] Brooke J. Wave energy conversion[M]. Amsterdam: Elsevier, 2003.
- [7] Arthur P, Jens P K. Handbook of ocean wave energy[M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [8] Babarit A. A database of capture width ratio of wave energy converters[J]. *Renewable Energy*, 2015, 80: 610-628.
- [9] Falcão A, Henriques J. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review[J]. *Renewable Energy*, 2016, 85: 1391-1424.
- [10] Mutriku wave power plant[EB/OL]. [2020-11-06]. <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/mutriku-wave-power-plan-t>.
- [11] The LEANCON wave energy device[EB/OL]. [2014-09-27]. <http://www.leancon.com>.
- [12] Wave dragon[EB/OL]. [2003-02-10]. <http://www.wave-dragon.net>.
- [13] Falcao A. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14: 899-918.
- [14] Lehmann M, Karimpour F, Goudey C A, et al. Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 74: 1300-1313.
- [15] Aquamarine power[EB/OL]. [2020-12-22]. <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power>.
- [16] Wavestar[EB/OL]. [2004-03-16]. <http://wavestarenergy.com>.
- [17] Demonstration of a 1-MW wave energy converter integrated in an offshore wind turbine farm[EB/OL]. [2016-05-02]. <https://cordis.europa.eu/project/id/691799>.
- [18] Weptos[EB/OL]. [2019-03-18]. <http://www.weptos.com/>.
- [19] 刘臻, 史宏达, 刘娅君, 等. 沉箱防波堤兼作振荡水柱波能发电装置的设计与研究[C]//第二届全国海洋能学术研讨会论文集. 哈尔滨: 中国可再生能源学会海洋能专业委员会, 2009: 9-15.
- [20] 王淇. 一种新型浮式风浪能混合利用系统概念设计与性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.

Research status and development tendency of ocean wave energy

SHI Hongda^{1,2}, LIU Zhen^{1,2}

1. Qingdao Municipal Key Laboratory of Ocean Renewable Energy, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China

Abstract The renewable marine energy provides a solution to the shortage of fossil fuels and the global warming issues. And it serves as an important foundation for the development of the deep sea, the island, and the national defense. Among the various types of the marine energies, the wave energy enjoys its advantages of good quality, easy utilization, high energy flux density, and wide distribution. The wave energy is widely studied and applied. The wave energy device is now a quite mature technology, with diverse forms. In this review of the research development of the marine wave energy, the wave energy devices are classified, and the current research status and development of wave energy are summarized and evaluated. The working principle, the technology, the engineering examples and the development trend of the wave energy utilization devices are analyzed. It is shown that the technique of the wave energy devices has not yet reached the mature state. A device with high efficiency, stability and maintainability is the prime aim. In the development of the wave energy devices, the commercial development on the basis of a large-scale and arrayed layout should be a focus.

Keywords wave energy; wave energy converter; technical principle; research status ●



(责任编辑 刘志远)