

中国波浪能技术进展与未来趋势

路 晴¹, 史宏达^{1,2*}

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100;

2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要:我国化石资源供需紧张而波浪能储量十分丰富。近十年来,我国波浪能研发技术日趋成熟,“十四五”规划背景下波浪能开发利用之势更是方兴未艾。掌握我国现阶段波浪能利用技术现状并更好地把控波浪能利用技术未来发展趋势方能进一步推动我国波浪能技术进步和开发利用。基于此,本文阐述了波浪能发电技术的主要形式并对其原理进行了介绍;列举了不同类型的典型波浪能转换装置及其技术手段,总结归纳了我国近十年在波浪能发电技术方面的进展;并从多自由度阵列发电、多能互补耦合发电和多功能综合平台利用三个方面对波浪能发电技术的未来发展趋势做出了合理展望。

关键词:波浪能发电技术;波浪能转换装置;多自由度阵列发电;多能互补耦合发电;多功能平台综合利用

中图分类号: TM619

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)01-0001-12

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2022.01.001

引用格式: 路晴, 史宏达. 中国波浪能技术进展与未来趋势[J]. 海岸工程, 2022, 41(1): 1-12. LU Q, SHI H D.

Progress and future trend of wave energy technology in China[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(1): 1-12.

煤炭、石油等传统化石燃料储量有限且严重污染环境,为缓解传统能源供需紧张关系,应对能源危机以及严峻的环境问题,研究者们一直致力于寻求可以替代传统能源的可再生清洁能源。波浪能作为可再生清洁能源中的一种,因其分布广、储量巨大受到了研究者们重点关注。我国自 20 世纪 60 年代起开展波浪能发电研究工作,至今已有约 60 a 的时间。经过多年的技术攻关与突破,波浪能发电技术整体研发水平显著提升,电能转化效率显著提高。波浪能研发机构也不断发展壮大,主要有中国科学院广州能源研究所(以下简称广州能源所)、国家海洋技术中心、各大高校和科研院所等。第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要提出推进海洋能规模化利用,建设现代化海洋产业体系目标^[1]。在此战略背景下,波浪能研究队伍不断壮大,研发投入不断增加,对丰富的波浪能资源的开发利用之势更是方兴未艾。

本文介绍了波浪能资源储量和典型的波浪能发电技术形式及其原理,在已有的波浪能发电装置中列举了具有代表性的装置,通过对其关键技术进行分析,总结归纳了我国近十年波浪能技术的进展。基于目前波浪能技术现状及难点,探讨了波浪能技术未来的发展趋势。

1 波浪能概述

1.1 波浪能资源储量

地球表面积约 71% 是海洋,海洋中不仅有丰富的石油、水产资源,更蕴藏着巨量的可再生能源,主要包

收稿日期:2021-11-11

资助项目:国家重点研发计划项目——基于我国资源特性的海洋能高效利用创新技术研发(2018YFB1501900);国家自然科学基金项目——基于波高摄取的波浪能装置获能谱研究(52071303)和典型波浪能装置能量捕获-传递-转换耦合模型的构建与优化(U1906228);山东省自然科学基金重大基础研究项目——海上风-浪耦合获能机理研究(ZR2021ZD23)

作者简介:路 晴(1995—),女,硕士研究生,主要从事海洋能开发与利用方面研究. E-mail: oucluqing@163.com

* 通信作者:史宏达(1967—),男,教授,博士,主要从事海洋可再生能源开发与利用、港口和海岸工程等方面研究. E-mail: hd_shi@ouc.edu.cn

(李 燕 编辑)

括波浪能、温差能、潮汐能、盐差能、潮流能和海洋风能等^[2]。我国沿岸和近海及毗邻海域的各类海洋能源理论总储量约为 6.11×10^{11} kW, 其中波浪能占比最大, 约为 5.74×10^{11} kW^[3], 可开发量巨大, 具体储量详见表 1。

未来 20 a 能源结构将发生巨大变化, 天然气消耗量快速增长, 可再生能源发展强劲, 到 2035 年可再生能源的需求量将翻两番^[4]。因此在目前波浪能技术的基础上实现创新与突破, 开发储量丰富的波浪能, 推进波浪能规模化、商业化利用, 是有效缓解能源枯竭、电力供应紧缺的重要途径, 是实现“碳达峰”与“碳中和”目标, 加速我国能源转型, 建设清洁低碳、安全高效的能源体系的必经之路。

1.2 波浪能技术形式及其原理

波浪能发电技术形式多种多样, 根据安装形式可分为固定式和漂浮式, 根据工作原理的不同分为振荡体式、振荡水柱式和越浪式三类。此外, 常见的波浪能发电技术形式还可以根据安装位置、波能吸收类型等进行分类, 具体如表 2^[5] 所示。

波浪能技术的基本原理^[6] (图 1) 为: 波浪能从捕获到发电一般经过三级能量转换, 一级转换为波浪蕴含的能量通过捕能机构在波浪下的运动转换为传动系统所需能量, 二级转换为将捕能机构捕获的能量通过传动系统转换成发电机所需的能量形式, 三级转换为通过发电机等设备将能量以电能形式输出。不同形式的波浪能发电装置其技术原理又有所不同。

表 1 我国海洋能资源储量

Table 1 Reserves of marine energy resources in China

能源类型	理论储量/kW	技术可利用量/kW
波浪能	5.74×10^{11}	5.78×10^8
温差能	3.66×10^{10}	3.66×10^8
潮汐能	1.10×10^8	2.18×10^7
盐差能	1.14×10^8	1.14×10^7
潮流能	1.40×10^7	4.19×10^6
我国海洋能资源总储量	6.11×10^{11}	9.81×10^8

资料来源: 参考文献[3]。

表 2 常见的波浪能发电技术形式

Table 2 Common forms of wave energy converter

分类方式	技术形式
工作原理	振荡水柱式、振荡体式 and 聚波越浪式等
安装形式	固定式、漂浮式
安装位置	岸式、近岸式、离岸式
波能吸收类型	衰减式、点吸收式和截至式等
能量传递方式	气动式、液压式、机械式和磁动式等

资料来源: 参考文献[5]。

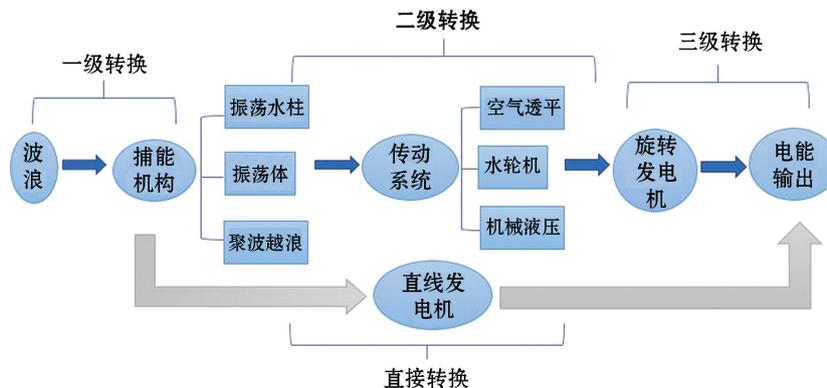


图 1 波浪能发电装置基本原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the basic principle of wave energy converter

振荡体式波浪能发电装置(图 2)技术原理为利用捕能机构在波浪作用下所做的单自由度或多自由度运动将波浪能转换为捕能机构的机械能。装置主要包括质量体和发电机等, 此类装置结构简单, 造价成本低, 可适应性强, 可扩展性好。通过优化俘获体的质量、形状、半径和吃水等参数, 可以达到较高的俘获宽度比, 技术开发难度低, 是目前研究最为广泛的波能转换装置^[7]。

振荡水柱式波浪能发电装置(图 3)主体结构为中空气室,气室上部与空气连通,气室下部与水体连通,波浪往复运动带动气室中的空气被压缩和膨胀,空气流过透平驱动涡轮机高速旋转,进而驱动发电机发电。此类装置结构简单,能量转换部件位于水面上方,不与海水接触,装置不易腐蚀,维护较为方便,但由于二级能量转换效率低,导致发电成本较高^[8]。

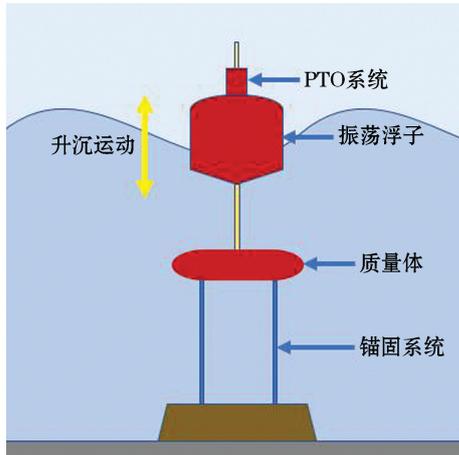


图 2 振荡体式波能发电装置技术原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the principle of oscillating wave energy converter

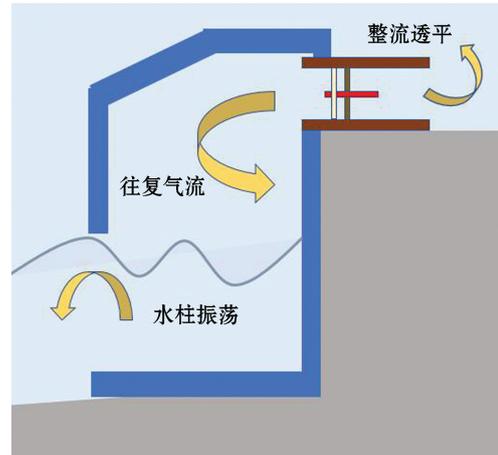


图 3 振荡水柱式波能发电装置技术原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the principle of oscillating water column wave energy converter

聚波越浪式波浪能发电装置(图 4)一般利用呈喇叭状的收缩坡道或斜坡形成聚波效应将波浪引入高位蓄水池,利用水面高度差产生的势能驱动水轮机转动,进而带动发电机发电。此类装置一级转换过程没有转换部件,减少了过程中的能量损耗,可靠性较高。但受收缩坡道或斜坡地形限制,对建造选址要求较高,而且在小波海况下,装置发电效率偏低,无法大规模建设,可扩展性差^[9]。

2 我国波浪能技术进展

2.1 振荡体式

相比振荡水柱式和聚波越浪式,我国对波浪能技术探索较多的是振荡体式,振荡体形式种类繁多,技术手段较其他类型也更为成熟。其中具有代表性的装置有以下几种。

1) 鸭式波浪能发电装置

2009 年至 2013 年,广州能源所先后研制了“鸭式 I 号”、“鸭式 II 号”和“鸭式 III 号”波浪能发电装置(图 5),并进行了海上测试。鸭式系列装置由主轴部分、鸭体部分和水下支撑部分组成^[10],鸭体部分在波浪作用下上下摆动以捕获波浪能,同时驱动内部液压系统做功,进而带动发电机发电。“鸭式 II 号”相较于“鸭式 I 号”,液压系统的压力等级得到了提高,经测试发现能量转换系统的效率有明显提高^[11]。“鸭式 III 号”相比前两代装置,经过技术改进后,可根据波浪条件匹配发电功率,实际最大输出功率达 25 kW,装机容量达 100 kW^[12],但由于装置整体质量和转动惯量过大,鸭式波能发电技术的进展受到了一定限制。

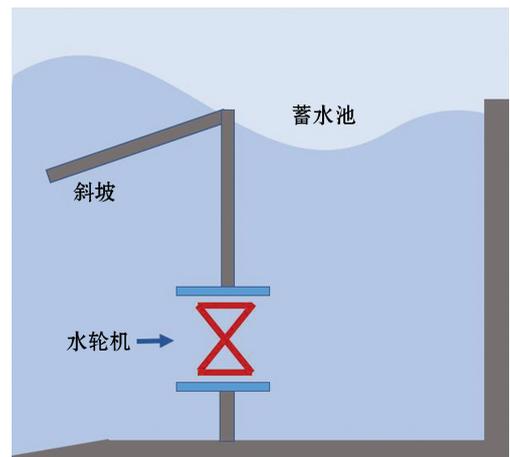


图 4 聚波越浪式波能发电装置技术原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of the principle of wave-crossing wave energy converter



图 5 鸭式波浪能发电装置

Fig.5 Duck wave energy converter

2) 哪吒波浪能发电装置

2011年,广州能源所在大万山岛进行了我国第一套 10 kW 漂浮点吸收直线发电波力装置“哪吒一号”(图 6a)的海试,该装置采用双圆柱体漂浮结构,振荡浮子为蝶形,浮子中间直筒与水下阻尼板刚性相连,浮子振荡运动带动直筒内直线发电机发电。经实海况测试,发电机输出最高电压可达 381 V^[13]。此后广州能源所又对该装置进行了优化研究,研制出了“哪吒二号”(图 6b),并在指定海域完成了海试。哪吒波浪能发电装置的海试经验使得漂浮点吸收直线波浪能发电装置在能量转换环节、生产装配、锚泊技术、密封防腐等关键技术和工艺方面取得了突破,为后续漂浮式装置的产业化应用奠定了良好基础。

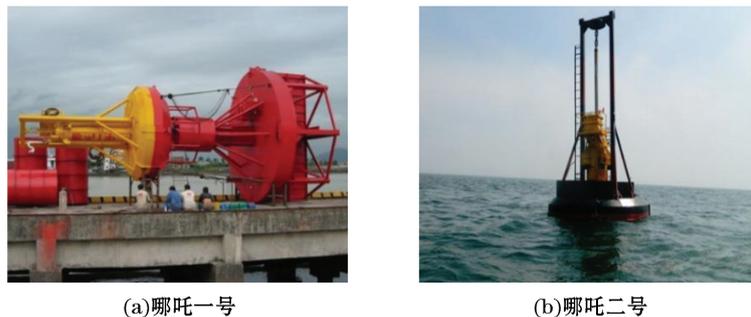


图 6 哪吒波浪能发电装置

Fig.6 Neza wave energy converter

3) 鹰式波浪能发电装置

为了克服鸭式系列装置的缺点,广州能源所将鸭式装置与半潜驳船相结合,研发出鹰式波浪能转换装置,装置主要由鹰式吸波浮体、能量转换系统和半潜船体构成。“鹰式一号”波浪能发电装置(图 7a)采用液压式与直驱式组合的发电系统,总装机容量为 10 kW,于 2012 年正式海试,并在无人值守的条件下单次无故障连续运行超过 180 d,甚至在台风“海燕”来临时也能在风暴中正常发电^[14-15]。鹰式装置“万山号”(图 7b)作为大型漂浮式波浪能发电装置,采用两套独立并行的液压系统进行波浪能的转换,系统配备 4 台由液压马达驱动的 30 kW 永磁发电机,可在不同浪况下分级启动发电。“万山号”设计最大输出功率为 100 kW,于 2015 年成功进行海试,最大发电功率为 128.32 kW,整机能量转换效率基本在 20% 以上,最高可达 37.7%^[16-17]。2018 年,继“万山号”之后,260 kW“先导一号”海上可移动能源平台(图 7c)通过海底电缆成功并入三沙市永兴岛电网,成为海岛能源电力能源的一个重要补充。“先导一号”可移动能源平台并网技术的成功实现,使我国成为了全球首个在深远海布放波浪能发电装置并成功并网的国家,“先导一号”平台也在海上波-光-储互补技术上实现了重大突破^[18-19],为其他海上多功能互补平台提供了成功经验。

广州能源所研制的我国首座半潜式波浪能养殖网箱“澎湖号”(图 7d)于 2019 年交付使用,可提供

10 000 m³养殖水体,具备 20 人居住空间,同时搭载了太阳能发电系统,拥有 120 kW 海洋供电能力,集旅游观光和养殖发电功能于一体,在海洋装备产业化应用上实现了突破^[20],截至到目前。“澎湖号”已连续无故障运行 3 a。2020 年由广州能源所研发设计的我国首台 500 kW 波浪能发电装置“舟山号”(图 7e)正式交付,该装置采用四角抛锚方式锚固于海底,装置内部采用双套液压发电系统互为备用,吸波浮体经技术改造后,俘获性能得到了有效提升。“舟山号”为偏远海岛清洁能源供电提供了技术和装置支撑,并为其他波浪能发电装置并网运维积累了丰富的经验,是服务我国海洋强国建设的优良范例^[21]。2022 年 1 月,由广州能源所研发的半潜式波浪能深远海智能养殖旅游平台“闽投 1 号”(图 7f)开工建设,平台采用波浪能、太阳能等清洁能源供电,可实现零碳源供给。相较于“澎湖号”,“闽投 1 号”居住空间增加到可容纳 36 人,并增加了网衣清洗和鱼群与环境监测等设备^[22]。



图 7 鹰式波浪能发电装置

Fig.7 Eagle wave energy converter

鹰式装置将波浪能转换设备与半潜船相结合,可适应不同海域条件,有利于规模化阵列布置,与养殖网箱、旅游平台相结合,可实现集多功能于一体的智能海上漂浮式波浪能利用装置,为漂浮式波浪能发电装置商业化开发奠定了坚实的理论和实践基础。

4) 振荡浮子式波浪能发电装置

振荡浮子式装置作为典型的点吸收式波浪能发电装置,具有可灵活布置、易于阵列化扩展等优点,一直是各大科研院所研究的重点,我国近十年在振荡浮子式波浪能发电技术领域也取得了许多进展。

山东大学研制了装机容量为 120 kW 的漂浮式振荡浮子波浪能发电装置“山大一号”(图 8a),于 2012 年在山东荣成成山头海域进行了海试,装置在电能输出方面进行了技术改进,利用双定子、双电压结构平稳输出电能,提高装置转换效率^[23]。东南大学研制了装机容量为 1 kW 的振荡浮子式波能转换装置(图 8b),并于 2014 年在连云港黄海海域进行了海试,装置设计为双浮体结构,外浮子可通过调整吃水实现与入射波共振,固定在内浮子上的阻尼板在周围水体作用下增加阻尼效应,内外浮子垂直相对运动带动永磁线性发电机发电^[24]。浙江海洋学院研制的“海院一号”装置(图 8c)具有自动升降系统,可适应水位变化^[25-26],作为阵列式发电场的尝试,“海院一号”的海试为后续波浪能发电装置的阵列化研究提供了实测数据和技术依据。

中国海洋大学自主研制的“海灵号”组合型振荡浮子式波浪能发电装置(图 8d)是阵列化的又一尝试,装置总装机容量为 10 kW,吸波部分由 4 个锥底圆柱型浮子构成,浮子呈阵列式排布,在波浪作用下沿桩柱上的导轨上下往复运动从而带动发电机发电。该装置于 2014 年在青岛斋堂岛海域投放,最大工作水深可达 40 m,

安全海试运行时间超过一年^[27]。集美大学研制了“集大一号”振荡式点吸收波浪能发电装置(图 8e),其搭载漂浮式平台进行波浪能转换发电,在我国台湾海峡进行了长达 3 个月的实海况测试,测试期间装置最大发电功率达 36 kW。研究发现浮子垂荡运动和永磁发电机的瞬时和平均输出功率在很大程度上受振荡浮子数量的影响,多个振荡浮子同时吸收波能可有效增加装置发电量,但在大周期波况下能量转换效率较低^[28]。



图 8 振荡浮子式波浪能发电装置

Fig.8 Oscillating buoy wave energy converter

5) 其他振荡体式波浪能发电装置

除了上述典型的振荡体式波浪能发电装置外,我国学者还研发了一些其他形式的振荡体式波浪能发电装置。2012 年,国家海洋技术中心研制了 100 kW 底铰摆式波浪能发电装置(图 9a),在山东即墨大管岛海域投放运行。该装置安装时需要将铰摆底座固定,受潮差影响较大,波浪能转换效率较低,对小波高海况的海域适应性较差^[29],在技术实用性方面还有待进一步加强。同年广东海洋与渔业服务中心和华南理工大学联合研制了漂浮式阵列摆式波浪能发电装置(图 9b),并在南海海域进行了海试,装置包含 9 个吸波摆板,交错排列于浮式基础上。区别于传统摆式波浪能转换装置的单一运动模态,该装置首次实现了对波能装置在摇摆和垂荡方向同时进行波能转换的复合模态实海况测试^[30],为摆式波能转换装置的实用化提供了技术支持和工程经验。中国船舶重工集团公司第 701 研究所研制了筏式液压波浪能发电装置“海龙一号”(图 9c),于 2014 年进行海试,装置由 4 节漂浮式圆柱浮子和个连接部件构成,总长 86 m,重约 400 t^[31]。



图 9 其他振荡体式波浪能发电装置

Fig.9 Other types of oscillating buoy wave energy converter

2.2 振荡水柱式

振荡水柱式波能发电技术早在 20 世纪 80 年代就开始用于研制航标灯的 BD 系列微型波浪能发电装置(图 10a),经过多种装置类型的研制,成功实现了该类航标灯的商业化投产。BD102G 型装置在 BD102B 型装置的基础上实现了较全面的更新换代,将原来平铺于铝合金地板上的控制器改为双层铺设,从而极大缩小了装置体积,将保护帽与发电机的紧固螺栓合二为一减轻了装置的质量,外形也更美观流畅。经过技术改进后,BD102G 型装置实测平均功率达到 7.547 W(额定功率 10 W)^[32],既降低了制造成本又提高了发电效率。

随着微型航标灯振荡波能发电技术趋于成熟,学者们开始研究后弯管波力发电装置技术。5 kW 后弯管波力发电浮体是当时世界上装机容量最大的后弯管波力发电装置,在技术方面装置采用前方后圆浮室后伸型后弯管波力发电浮体,浮体采用船板制造,不仅峰值功率大,而且特性较为平缓,响应波周期宽^[33]。中水道 1 号灯船波力发电装置(图 10b)采用前开口直管和后弯管两种振荡水柱波能转换系统,经过水池模型试验后,在琼州海峡中水道 1 号标位成功进行了海上试验,实测装置的输出功率超出了额定功率,运行良好^[34]。

位于珠海市大万山岛的我国第一座振荡水柱型波力电站(图 10c)经过 3 a 海上运行测试后,被改建为一座装机容量为 20 kW 的波力电站,于 1996 年试发电成功,峰值功率可达 14.5 kW,电站的总能量平均俘获宽度比为 10%~40%^[35]。随后,广州能源所在广东省汕尾市建造了我国第一座并网波浪能电站,电站采用了岸式振荡水柱波能发电技术,装机功率达到 100 kW,安全运行超 2 a^[36]。



(a)航标灯用BD102型波能发电装置

(b)中水道1号灯船

(c)大万山波力电站

图 10 振荡水柱式波能发电装置

Fig.10 Oscillating water column wave energy converter

在此之后,由于大型振荡水柱式波能发电装置建造和运行成本居高不下,研究人员对振荡水柱式波能发电装置的重点也转向了空气透平的优化、转换系统气室压强特性、结合振荡水柱的防波堤等研究领域。段春明和朱永强^[37]研究了一种新型振荡水柱式波浪能发电装置,该装置利用振荡浮子吸收波能,浮子连接杠杆运动转换为活塞动能,活塞产生的空气动能和振荡水柱产生的空气动能同时压缩、抽吸空气形成更强风能带动空气透平旋转。王鹏等^[38]提出了一种带水平底板的振荡水柱式新型防波堤,经过物理模型试验研究了波高对振荡水柱防波堤水动力参数的影响。张真等^[39]通过构建在叶片尖端安装有环结构的冲击式透平的三维数值模型开展了一系列仿真计算,研究了不同环结构厚度对冲击式空气透平输入系数、扭矩系数及透平效率的影响规律,最终确定了最优结构参数,该优化结果可为实际工程应用中冲击式空气透平的结构选型提供可靠依据。

2.3 聚波越浪式

由于聚波越浪式装置受到安装位置、海岸线地形、潮差等诸多因素的限制,其波浪能利用率远低于深水区。研究机构对聚波越浪式波浪能转换装置的研发和投入不及振荡体式和振荡水柱式,有关装置大多只进行了水池物理模型试验。

陈兵等^[40]研究了在不同波况下聚波越浪式发电装置的越浪量以及坡道压力分布,并在试验水槽中进行了模型试验。研究表明装置的越浪量基本符合 Van der Meer 越浪量模型,并给出了坡道在不同波况下受力的变化规律及装置的水力效率,该试验为研究越浪式装置的水力性能和结构稳定性分析提供了依据。Liu 等^[41]研

究了圆形坡道溢流波浪能转化器,并在中国海洋大学进行了波浪水槽物理模型试验的初步研究。研究发现导流叶片可有效引导波浪从坡道进入水库,导流叶片的角度和坡道的平缓程度对过顶流量有显著影响,该试验为样机冠形结构参数的设计和优化提供了依据。龚怡慧^[42]在传统越浪式发电装置基础上,设计了一种新型碟型越浪式波浪能发电装置,并对该碟型发电装置的整体结构和工作原理进行了详细介绍。该碟形装置可自由漂浮在水面,平稳性好,成本低且能量转换率高,为越浪式波浪能发电装置的结构优化提供了借鉴。

目前波浪能发电技术形式还未达到收敛,在深远海、近岸、漂浮式或海底安装方面各类转换装置形式尚未达成一致标准,优化设计也各有针对性,且波浪能发电场的开发速度各不相同。学者们在研发各种形式的波浪能发电装置的同时也在积极寻求可实现波浪能发电装置大规模商业化的有效途径,对波浪能发电装置的研究也从一开始的广泛涉猎转向了具体细分领域。针对我国波浪能资源功率密度较低的特点,研究人员以小功率波浪能发电装置为着力点,在此基础上不断扩展适用于不同海域不同工况的大型波浪能发电装置。以鹰式系列波浪能发电装置为代表,我国目前已有超过 50 台波浪能发电装置进行了海试,装机容量达兆瓦级的波浪能发电装置也正在紧锣密鼓地研发中。目前我国已掌握的波浪能发电技术可实现微型航标灯波浪能发电装置商业化投产,初步实现为偏远海岛供电,太阳能和海上风能、波浪能等多能互补技术正在探索中,打造基于波浪能发电技术的观光旅游、网箱养殖、海水淡化等多功能综合平台^[43-44]也是未来波浪能技术发展的新方向。

3 波浪能技术未来趋势

波浪能发电技术发展至今,由于技术成熟度不一致,距离实现波浪能发电商业化仍有很长一段路要走。针对以往装置发电效率低、适应性差、生存时间短等不足之处,研究者们一直致力于装置技术与开发手段的创新研究。未来波浪能发电技术发展趋势不再仅限于单一的装置发电研究,而是逐步转向多自由度、阵列化发电、多能互补耦合发电、多功能综合平台利用等方面。

3.1 多自由度、阵列化发电

1) 多自由度

以往开发的大部分波浪能转换装置一般只在单一自由度进行波能捕获运动,经过模拟和试验研究表明,多自由度装置捕能效率较单自由度装置高,释放装置自由度可有效提高装置的捕能效率^[45]。目前我国多自由度波浪能发电装置的研究大多处于理论研究和物理模型试验阶段,但实际海浪具有高度随机性和不可重复性,简化模拟试验会降低结果的准确性,增加装置在实海况中的运行风险。若要更好地实现波浪能发电装置的多自由度获能,还需要在获能体形式、获能体耦合方式、能量提取系统等关键技术难点方面进行突破。多自由度波浪能转换装置可适应我国海域能源密度低的环境,有效增强系统的波能捕获能力,具有巨大的开发潜力和应用前景。未来波浪能转换装置将不再局限于单一自由度吸能,而是将装置多个自由度耦合,可以在不同海况条件下实现波浪能的最大化获取。

2) 阵列化

单个波浪能发电装置单机容量小,发电成本高,无法满足大规模商业化发电要求。而阵列化布置可使装置全方位、连续均匀吸收各种海况下的波浪能,实现大规模连续稳定的电能输出和高效的能量转换,在提高电能转换效率的同时极大降低发电成本。波浪能转换装置模块化设计,有利于扩展成兆瓦级发电装置阵列。根据投放海域选择释放装置自由度以达到最优输出功率,根据波浪场条件合理设计阵列布局形式以得到最优型式的阵列布局。阵列浮子式波浪能发电平台和以阵列浮子式波浪能发电平台为单元的阵列式波浪能发电场可有效扩展波浪能发电的规模,显著增大波浪能发电装置的单机容量。多自由度和阵列化是波浪能发电技术在未来的研究趋势,也是波浪能发电装置在未来的开发趋势。

3.2 多能互补耦合发电

波浪能开发利用目前的主要问题在于开发成本高、单一能源开发效率低、无法规模化商业使用等。海上

风能发电技术比波浪能发电技术更为成熟,但是由于波浪能和风能都有各自的技术局限性和技术难点。如何将两者结合,降低技术开发难度,促进理论研究成熟化和耦合装置(图 11)实用化是亟需研究的重点。海上风能和波浪能作为具有伴生关系的海洋能源,进行波浪能和海上风能联合开发、协同利用,可有效增加海洋空间利用率,减少海缆等基础设施的建设与维护费用,降低单位发电成本,是解决海上能源利用的高效途径。波浪能发电装置依托漂浮式风机平台或风机依托漂浮式波浪能发电装置,实现风能和波浪能一体化联合发电。风机和波浪能发电装置布置在临近区域协同定位,实现海上风能和波浪能协同化组合发电。风能和波浪能耦合发电是当前海洋能领域研究的热点,在此方向上的技术突破会使我国海洋可再生能源利用率达到新高度,是实现“双碳”目标的重要途径。



图 11 风浪耦合装置

Fig.11 Wind-wave coupling generation device

3.3 多功能综合平台

我国是一个海洋大国,也是一个海岛大国。我国面积大于 500 m^2 的海岛有 7 300 多个,有人居住的岛屿约 400 多个^[46-47],海岛兼备丰富的海、陆资源,在海洋经济和沿海经济发展中有重要的作用。未来对波浪能发电装置的研发将会在“澎湖号”的基础上继续扩展,成为集波浪能发电、网箱养殖、观光旅游和环境监测等为一体的新型智慧海洋可再生能源利用多功能综合平台。基于此类平台的高适应性,可将波浪能发电装置向深远海推进,进行平台阵列化投布,扩大海洋开发范围,获取优质的海洋资源。扩展此类平台在偏远海岛的使用也是发展趋势之一,将利用波浪能产生的电力并入海岛电网补充海岛居民生活用电,利用平台进行海水淡化满足海岛居民生活用水,海能海用。

4 结 论

我国波浪能发电技术经过不断完善,在波浪能利用中取得了显著成效。波浪能发电装置单机功率逐渐增大,装置生存能力越来越好,能量转换效率稳步提升,装置的功能综合性日益凸显。未来波浪能发电技术必将在多自由度阵列化发电、多能互补耦合发电、多功能综合平台利用等方面取得新突破。

未来的能源结构布局中新能源必定将占有举足轻重的地位,合理分配使用传统能源,着力研发波浪能等新型可再生清洁能源是发展大势。波浪能作为可再生清洁能源的一种,前景十分广阔,波浪能发电技术也将随着波浪能的进一步开发和利用更加成熟。

参考文献 (References):

- [1] 纪建悦, 孙筱蔚. 海洋产业转型升级的内涵与评价框架研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2021(2): 33-40. JI J Y, SUN X W. Research on connotation and evaluation framework of marine industry transformation and upgrading[J]. Journal of Ocean University of China (Social Science Edition), 2021(2): 33-40.
- [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 M Q, ZHENG Y, ZHAO Z Z, et al. Development and prospect of wave energy utilization[J]. Ocean Development and Management, 2010, 27(3): 80-82.
- [3] 史宏达, 王传崑. 我国海洋能技术的进展与展望[J]. 太阳能, 2017(3): 30-37. SHI H D, WANG C K. Progress and prospect of marine energy technology in China[J]. Solar Energy, 2017(3): 30-37.
- [4] 方行明, 何春丽, 张蓓. 世界能源演进路径与中国能源结构的转型[J]. 政治经济学评论, 2019, 10(2): 178-201. FANG X M, HE C L, ZHANG B. Evolution path of world energy and transformation of China's energy structure[J]. Review of Political Economy, 2019, 10(2): 178-201.
- [5] 方红伟. 波浪发电系统设计与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2020. FANG H W. Design and control of wave power generation system[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [6] 刘延俊, 贺彤彤. 波浪能利用发展历史与关键技术[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(4): 76-81. LIU Y J, HE T T. Development history and key technologies of wave energy utilization[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(4): 76-81.
- [7] 史宏达, 刘臻. 海洋波浪能研究进展及发展趋势[J]. 海洋科技导报, 2021, 39(6): 22-28. SHI H D, LIU Z. Research progress and development trend of ocean wave energy[J]. Ocean Science and Technology Herald, 2021, 39(6): 22-28.
- [8] 陈启卷, 高功正, 岳旭辉, 等. 水电与新能源机遇与挑战: 波浪能发电技术研究进展[J]. 水电与新能源, 2020, 34(8): 1-6. CHEN Q J, GAO G Z, YUE X H, et al. Hydropower and new energy opportunities and challenges: advances in wave power generation technology[J]. Hydropower and New Energy, 2020, 34(8): 1-6.
- [9] 陈映彬, 黄技, 赖寿荣, 等. 波浪能发电现状及关键技术综述[J]. 水电与新能源, 2020, 34(1): 33-35. CHEN Y B, HUANG J, LAI S R, et al. Current situation and key technologies of wave energy generation[J]. Hydropower and New Energy, 2020, 34(1): 33-35.
- [10] 王立国, 游亚戈, 盛松伟, 等. 鸭式波浪能发电装置中蓄能工质的选择研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(12): 2525-2529. WANG L G, YOU Y G, SHENG S W, et al. Study on the selection of energy storage working medium in duck wave energy generator[J]. Journal of Solar Energy, 2014, 35(12): 2525-2529.
- [11] YOU Y G, ZHENG Y H, MA Y J, et al. Structural design and protective methods for the 100kW shoreline wave power station[J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(3): 439-448.
- [12] 杨强, 孔祥训. 100kW 鸭式波浪能发电装置的建造要点[J]. 船海工程, 2013, 42(5): 112-114. YANG Q, KONG X X. Key construction points of 100kW duck wave energy generation device[J]. Ship and Sea Engineering, 2013, 42(5): 112-114.
- [13] 吴必军, 刁向红, 王坤林, 等. 10kW 漂浮点吸收直线发电波力装置[J]. 海洋技术, 2012, 31(3): 68-73. WU B J, DIAO X H, WANG K L, et al. 10kW floating-point absorption linear radio force device[J]. Marine Technology, 2012, 31(3): 68-73.
- [14] 盛松伟, 张亚群, 王坤林, 等. “鹰式一号”波浪能发电装置研究[J]. 船舶工程, 2015, 37(9): 104-108. SHENG S W, ZHANG Y Q, WANG K L, et al. Research on wave energy generation device of “Ying-1”[J]. Marine Engineering, 2015, 37(9): 104-108.
- [15] 刘伟民, 刘蕾, 陈风云, 等. 中国海洋可再生能源技术进展[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 27-39. LIU W M, LIU L, CHEN F Y, et al. Progress of marine renewable energy technology in China[J]. Science and Technology Review, 2020, 38(14): 27-39.
- [16] 张亚群, 游亚戈, 盛松伟, 等. 鹰式波浪能发电装置水动力学性能分析及优化[J]. 船舶力学, 2017, 21(5): 533-540. ZHANG Y Q, YOU Y G, SHENG S W, et al. Analysis and optimization of hydrodynamic performance of eagle wave energy generator[J]. Ship Mechanics, 2017, 21(5): 533-540.
- [17] 盛松伟, 张亚群, 王坤林, 等. 鹰式波浪能发电装置发电系统研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(9): 1422-1426. SHENG S W, ZHANG Y Q, WANG K L, et al. Research on power generation system of eagle wave power plant[J]. Renewable Energy, 2015, 33(9): 1422-1426.
- [18] 张亚群, 盛松伟, 游亚戈, 等. 波浪能发电技术应用发展现状及方向[J]. 新能源进展, 2017, 7(4): 374-378. ZHANG Y Q, SHENG S W, YOU Y G, et al. Development status and application direction of wave energy generation technology[J]. Progress in New Energy, 2017, 7(4): 374-378.
- [19] 赵淑莉, 王冬海, 郭明瑞, 等. 海上多能源高效互补智能供电系统技术研究[J]. 环境技术, 2020, 38(2): 123-126. ZHAO S L, WANG D H, GUO M R, et al. Research on technology of offshore multi-energy efficient complementary intelligent power supply system[J]. Environmental Technology, 2020, 38(2): 123-126.
- [20] 孔一颖, 王明晔. 全国首座半潜式波浪能养殖网箱广东交付[J]. 海洋与渔业, 2019(8): 74-75. KONG Y Y, WANG M Y. China's first

- semi-submersible wave energy aquaculture cage delivered by Guangdong[J]. *Ocean and Fisheries*, 2019(8): 74-75.
- [21] 中国科学院广州能源研究所. “南海兆瓦级波浪能示范工程建设”项目首台 500 kW 鹰式波浪能发电装置“舟山号”正式交付[EB/OL]. [2020-07-01]. http://www.giec.cas.cn/ttxw2016/202007/t20200701_5614043.html. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences. The first 500 kW eagle wave energy converter “Zhoushan” of the “South China Sea Megawatt Wave Energy Demonstration Project Construction” was formally delivered[EB/OL]. [2020-07-01]. http://www.giec.cas.cn/ttxw2016/202007/t20200701_5614043.html.
- [22] 中国科学院广州能源研究所. 波浪能智能养殖旅游平台“闽投 1 号”开建[EB/OL]. [2022-01-05]. http://www.giec.ac.cn/mtsm2016/202202/t20220217_6357357.html Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences. The intelligent wave energy breeding and tourism platform “Mintou No.1” started construction[EB/OL]. [2022-01-05]. http://www.giec.ac.cn/mtsm2016/202202/t20220217_6357357.html.
- [23] 刘延俊, 武爽, 王登帅, 等. 海洋波浪能发电装置研究进展[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 63-75. LIU Y J, WU S, WANG D S, et al. Research progress of ocean wave energy converters[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2021, 51(5): 63-75.
- [24] CHEN Z Y, YU H T, LIU C Y, et al. Design, construction and ocean testing of wave energy conversion system with permanent magnet tubular linear generator[J]. *Transactions of Tianjin University*, 2016, 22(1): 72-76.
- [25] LV Q, LI D T, LI D T. Design of energy harvesting efficiency of ‘Haiyuan 1’ wave power generating platform’s buoy testing system based on LabVIEW[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2015, 19(3): 264-272.
- [26] KONISPOLIATIS D N, MAVRAKOS S A. Hydro dynamic analysis of an array of interacting free-floating oscillating water column (OWC’s) devices[J]. *Ocean engineering*, 2016, 111: 179-197.
- [27] 史宏达, 曹飞飞, 马哲, 等. 振荡浮子式波浪发电装置物理模型试验研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(4): 98-104. SHI H D, CAO F F, MA Z, et al. Experimental study on physical model of oscillating float wave power generation device[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2014, 33(4): 98-104.
- [28] YANG S H, HE H Z, CHEN H, et al. Experimental study on the performance of a floating array-point-raft wave energy converter under random wave conditions[J]. *Renewable Energy*, 2019, 139: 538-550.
- [29] 王猛, 李蒙, 夏增艳, 等. 浮力摆式波浪能发电装置模型试验[J]. 海洋技术, 2013, 32(1): 79-82. WANG M, LI M, XIA Z Y, et al. Model test of buoyancy pendulum wave energy generator[J]. *Marine Technology*, 2013, 32(1): 79-82.
- [30] 邱守强. 摆式波能转换装置研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013. QIU S Q. Research on pendulum wave energy conversion device[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [31] LIU Y J, LI Y, HE F L, et al. Comparison study of tidal stream and wave energy technology development between China and some western countries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 701-716.
- [32] 梁贤光, 杨光宇, 吴海明, 等. BD102G 型航标用波力发电装置研制[J]. 可再生能源, 2014, 32(12): 1933-1938. LIANG X G, YANG G Y, WU H M, et al. Development of BD102G wave power generation device for navigation beacon[J]. *Renewable Energy*, 2014, 32(12): 1933-1938.
- [33] 梁贤光, 蒋念东, 王伟, 等. 5 kW 后弯管波力发电装置的研究[J]. 海洋工程, 1999, 17(4): 374-378. LIANG X G, JIANG N D, WANG W, et al. Research on 5 kW rear bend wave energy generator[J]. *Ocean Engineering*. 1999, 17(4): 374-378.
- [34] 高祥帆, 梁贤光, 蒋念东, 等. 中水道 1 号灯船波力发电系统模拟试验和设计[J]. 海洋工程, 1992(2): 79-87. GAO X F, LIANG X G, JIANG N D, et al. Simulation test and design of wave force power generation system for “Zhongshui No.1” light ship[J]. *Ocean Engineering*, 1992(2): 79-87.
- [35] 余志, 蒋念东, 游亚戈. 大万山岸式振荡水柱波力电站的输出功率[J]. 海洋工程, 1996, 14(2): 78-83. YU Z, JIANG N D, YOU Y G. Output power of Dawanshan shore oscillating water column wave force power station[J]. *Ocean Engineering*, 1996, 14(2): 78-83.
- [36] YOU Y G, ZHENG Y H, MA Y J, et al. Structural design and protective methods for the 100kW shoreline wave power station[J]. *China Ocean Engineering*, 2003, 17(3): 439-448.
- [37] 段春明, 朱永强. 一种新型振荡水柱式波浪能发电装置的设计[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(3): 446-451. DUAN C M, ZHU Y Q. Design of a new oscillating water column wave energy generator[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(3): 446-451.
- [38] 王鹏, 邓争志, 王辰, 等. 振荡水柱式防波堤的水动力特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(12): 2235-2341. WANG P, DENG Z Z, WANG C, et al. Hydrodynamic characteristics of oscillating water column breakwater[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(12): 2235-2341.
- [39] 张真, 刘臻, 张晓霞. 振荡水柱波能装置冲击式空气透平优化数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2021, 40(1): 20-28. ZHANG Z, LIU Z, ZHANG X X. Numerical study on optimization of impulse air turbines for OWC wave energy conversion[J]. *Coastal Engineering*, 2021, 40(1): 20-28.

- [40] 陈兵, 杨宗宇, TOM B. 越浪式波能发电装置的水力性能研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(1): 81-86. CHEN B, YANG Z Y, TOM B. Study on hydraulic performance of wave-crossing wave energy generator[J]. Renewable Energy, 2013, 31(1): 81-86.
- [41] LIU Z, SHI H D, CUI Y, et al. Experimental study on overtopping performance of a circular ramp wave energy converter. Renewable Energy, 2017, 104: 163-176.
- [42] 龚怡慧. 碟型越浪式波能发电装置的整体设计及优化[J]. 船舶科学技术, 2017, 39(12A): 58-60. GONG Y H. Overall design and optimization of discotic over-tipping wave energy convertor[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(12A): 58-60.
- [43] 王琛, 岳付昌, 陈珉烁, 等. 基于波浪能和风能的多能发电系统建模及仿真分析[J]. 电气应用, 2018, 37(6): 25-33. WANG C, YUE F C, CHEN M S, et al. Modeling and simulation analysis of multi-power generation system based on wave energy and wind energy[J]. Electric Application, 2018, 37(6): 25-33.
- [44] 明慧, 张磊, 刘芳名, 等. 波浪能风能互补供能升膜海水淡化装置[J]. 河北农机, 2019(11): 44-45. MING H, ZHANG L, LIU F M, et al. Wave energy and wind energy complementary power supply and rising film seawater desalination device[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2019(11): 44-45.
- [45] SHI H D, HUANG S T, CAO F F. Hydrodynamic performance and power absorption of a multi-freedom buoy wave energy device[J]. Ocean Engineering, 2019, 172: 541-549.
- [46] 樊祥国. 中国海岛保护与管理的工作进展及发展思路[J]. 海洋开发与管理, 2016(增刊2): 3-6. FAN X G. Progress and development in protection and management of island in China[J]. Ocean Development and Management, 2016(Suppl.2): 3-6.
- [47] 麻常雷. 海洋可再生能源产业发展“十四五”战略研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2020. MA C L. Strategic study on the 14th Five-Year Plan of marine renewable energy industry development[M]. Beijing: Ocean Press, 2020.

Progress and Future Trend of Wave Energy Technology in China

LU Qing¹, SHI Hong-da^{1,2}

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266100, China)

Abstract: The supply and demand of fossil resources are tight, whereas the wave energy reserves are abundant in China. In the past ten years, the wave energy research and development technology in China is increasingly mature. Especially under the background of the 14th Five-Year Plan of China, the development and utilization trend of wave energy is even booming. In order to further improve the progress, development and utilization of wave energy technology in China, it is crucial to grasp the current situation of wave energy utilization technology in China and control better the future development trend of wave energy utilization technology. For this purpose, the main forms and the principle of wave energy power generation technology are introduced and different typical wave energy converters and their technical means are listed and the advances in wave energy generation technology in China in recent decade are summarized. The future development trend of wave energy generation technology is prospected from the aspects of multi-degrees of freedom array power generation, multi-energy complementary coupled power generation and multi-functional comprehensive platform utilization.

Key words: wave energy generation technology; wave energy converter; multi-degrees of freedom and array power generation; multi-energy complementary coupling power generation; multi-functional comprehensive platform utilization

Received: November 11, 2021