

# 海上大功率风浪复合发电装备设计与研究

陈卫星, 李绍勋, 高峰

上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

**摘要** 充分利用海洋能源, 是人类实现可持续发展的重要途径。海洋能源中海上风能和波浪能储量尤其显著, 综合利用海上风能和波浪能是可再生能源利用领域的研究热点。设计了全新的海上风浪复合发电装备, 将无规则、不稳定的风能和波浪能均通过液压能转换为电能, 同时设计了包含5个装备的单排复合发电场, 综合计算和部分实验表明, 该发电装备和发电场的功率分别为17 MW和91 MW。

**关键词** 海上风能; 波浪能; 复合发电; 发电装备; 发电场

能源是科技和经济发展的命脉<sup>[1]</sup>。人类生活需要稳定可靠的能源, 因为它关系到人们的衣食住行。人类长期使用的化石能源(煤、石油、天然气) 尽管推动着人类进步, 也带来了越来越多的问题。其中比较突出的是温室效应的加剧, 以及因此带来的冰川融化、海平面上升和动物灭绝等一系列问题<sup>[2]</sup>, 而且化石能源是不可再生的, 终有一天会消耗殆尽。

20世纪70年代的石油危机促使世界各国开展新能源研究, 包括核能、太阳能、风能、波浪能和生物能等。研究表明, 未来可再生能源满足人类所有的能源需求是可以实现的<sup>[3]</sup>。可再生能源中, 风能被认为未来会在国家能源中扮演重要的角色<sup>[4-5]</sup>。风是由太阳辐射热不平衡引起的, 据估计, 太阳能

中大约有2%转化为风能, 2000年全球潜在风能在 $7.2 \times 10^6$  MW左右<sup>[5]</sup>。海上风能利用相比陆地有很大的优势, 海面粗糙度小, 海风更强更稳定, 而且海上开发利用风能可用的面积更广。中国拥有广阔的海上专属经济区, 面积约为300万 $\text{km}^2$ , 海上风能储量位居世界第一<sup>[6]</sup>。除此之外, 海洋还拥有丰富的海洋能, 包括波浪能、潮汐能、海流能、海水温差能和海水盐差能<sup>[7]</sup>, 其中波浪能是最显著的能量形式<sup>[8]</sup>。波浪能主要是由风能产生的, 而且波浪能比其他新能源包括风能有更好的预测性<sup>[9]</sup>。全世界的波浪能在 $10^7$  MW左右<sup>[10]</sup>, 中国的海岸线长, 岛屿众多, 波浪能资源丰富<sup>[11-12]</sup>。

综合利用海上风能和波浪能, 是国际海上新能源开发利用课题的前沿<sup>[13]</sup>。同时利用风能和波浪

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805319)

作者简介: 陈卫星, 助理教授, 研究方向为海洋新能源装备设计与开发, 电子信箱: wxchen@sjtu.edu.cn; 李绍勋(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为海洋能采集技术, 电子信箱: lishaoxun@sjtu.edu.cn

引用格式: 陈卫星, 李绍勋, 高峰. 海上大功率风浪复合发电装备设计与研究[J]. 科技导报, 2021, 39(6): 29-34; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.06.003

能进行发电有许多优点,例如可以提高单位海域面积的功率输出,使功率输出更加平稳,可以简化设备,利用相同的传输设备、并网设备和浮式基础等<sup>[14]</sup>。目前风能和波浪能的综合利用方式主要分为组合和集成两种形式。组合是指将已有的风机和波浪能发电装备放在同一个海域,风机和波浪能发电装备采用独立的基础,通过相同的传输和并网设备将电能输出,如 Wave Star 组合式概念设计<sup>[15]</sup>。集成是指将风机和波浪能发电装备采用相同的固定或浮式基础,作为一个发电单元,多个发电单元再布置成发电场进行发电,如 Wave Star、W2Power、STC<sup>[16]</sup>等设计。国内对海上风机<sup>[17-20]</sup>和波浪能发电装备<sup>[21-25]</sup>的设计开发分别开展了许多工作,但是目前还缺少综合利用风能和波浪能的相关研究。

鉴于此,设计全新的海上风浪复合发电装备,采用相同的能量转换介质液压能和相同结构的机液转换装置,将无规则的、不稳定的风能和波浪能捕获转换输出为规则的、稳定的电能。同时设计包含5个装备的复合发电场,综合计算和部分实验表明,该发电装备和发电场的功率分别为17 MW、91 MW。

## 1 复合发电装备原理

海上风浪复合发电装备如图1(a)所示。单个发电装备包括1个漂浮式的大平台,1套风能捕获转换装备,3套波浪能捕获转换装备,1组蓄能器、液压马达和发电机设备。可伸缩叶片捕获不同风况下的风能转换为风轮转动的机械能,如图1(b)所示;风轮转动,驱动机液转换装置旋转,将机械能转换为液压能,如图1(c)所示;振荡浮子和三自由度机构,捕获转换波浪能为机械能,如图1(d)所示;机液转换装置将机械能转换为液压能,如图1(e)所示;两种能量转化的液压能经过蓄能器的储能和保压,高压油输入液压马达,驱动发电机发电,如图1(f)所示。该发电装备可以用来为沿岸和海岛居民供电、海上制氢、开采海底资源以及淡化海水等。

该复合发电装备有如下特点:(1) 大功率。该

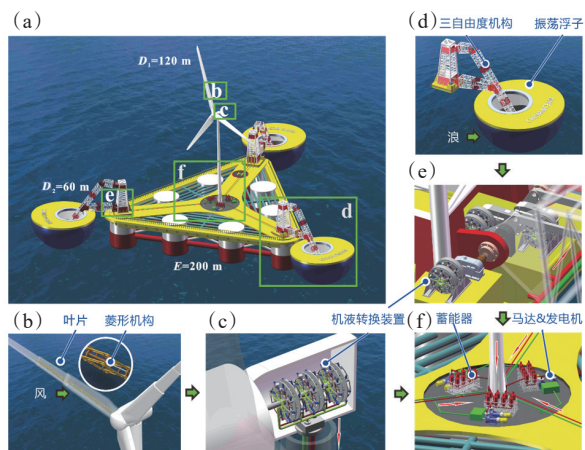


图1 海上风浪复合发电装备

发电装备同时捕获了海上两种形式的能量,提高了单位海域的功率输出。(2) 高效率。风轮可以根据风速调节直径以追踪最佳风能利用系数;三自由度波浪能捕获机构,能够捕获振荡浮子垂荡、横摇和纵摇三维运动的能量,提高了能量吸收效率。(3) 输出平稳。合理配置蓄能器有利于改善系统运行时压力和流量波动。(4) 安装维护方便。风力发电的发电机均置于海上平台上,避免了高空发电机等的安装维护;模块化的机液转换装置将机械能转化为液压能,简化了系统的构成,可以大大降低成本。(5) 可靠性高。极端风况下,风轮叶片缩至最短以保护风机;波浪能发电装备中只有浮筒与海水接触,提高了系统的抗腐蚀能力。

## 2 风能捕获转换设备

液压式风能捕获转换装备由于采用液压油作为传递能量的介质,风轮和发电机之间的刚性连接断开,不仅没有了发电机转速的限制,而且消除了由于输出功率过高,导致发电机和其他电器部件损坏的限制。液压式风能捕获转换装备具备更高的最大转速,而且不需要变桨等技术限制功率的输出,所以这种液压式风能捕获转换装备只存在转速限制,也就是叶片及机械传动部分等的结构强度限制。可变直径的风轮可根据风速调节风轮直径获得最佳叶尖速比,如图1(b)所示的风轮叶片由3段

组成,采用两套菱形机构实现风轮直径 $D_{1/2}-D_1$ 调节,根据风速大小,调节风轮的直径获得最佳风能利用系数。如图1(a)所示,风轮直径 $D_1=120$  m,当风速 $v=13.8$  m/s时,取最佳风能利用系数 $C_{pmax}=0.42$ ,叶片捕获风能功率为 $P_{wind} = \frac{1}{8} \rho \pi D_1^2 v^3 C_{pmax} = 8$  MW,其中 $\rho$ 为空气密度。

### 3 波浪能捕获转换装备

波浪能捕获转换装备如图2(a)所示,振荡浮子在波浪激励下沿垂荡、横摇和纵摇3个方向往复振动,三自由度机构将浮子3个方向随机的往复运动,转换为相对漂浮平台同轴的3个往复转动 $\theta$ 、 $\varphi$ 和 $\psi$ ,其中 $\theta$ 是浮筒垂荡运动通过三自由度机构转换为相对机架的往复转动, $\varphi$ 是浮筒纵摇运动通过

三自由度机构转换为相对机架的往复转动, $\psi$ 是浮筒横摇运动通过三自由度机构转换为相对机架的往复转动。三自由度机构主要由四杆机构和二自由度球面铰链组成,如图2(b)所示。四杆机构捕获浮子的垂荡运动,当四杆机构匹配合适的尺寸时,转动中心 $O$ 点可以实现垂荡方向近似直线的运动。二自由度球面铰链捕获浮筒横摇和纵摇2个方向的运动,不论波浪来自什么方向,浮筒均绕着 $O$ 点旋转,球面铰链输出2个垂直的转动,其中空间四杆RSSR(转动副-球副-球副-转动副)垂直改变浮筒横摇运动输出的方向,实现球面铰链2个转动的平行输出。基于Cummins方程和拉格朗日方程,建立了动力学模型,并在Simulink下搭建仿真平台,计算得到其捕获转换功率图谱如图2(b)所示,当 $H_w=4$  m, $T_w=10$  s, $\beta=180^\circ$ 的波浪时,浮筒直径 $D_2=60$  m,其波浪能捕获功率 $P_{wave}=4.2$  MW<sup>[26]</sup>。

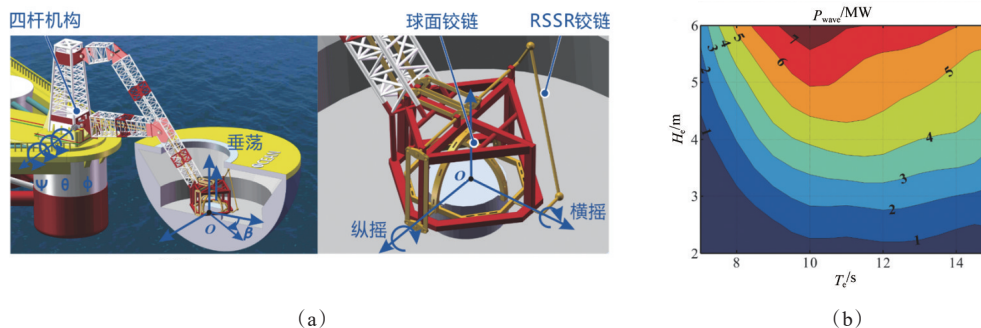


图2 三自由度波浪能捕获机构

### 4 能量转换装置效率实验

机液转换装置将风轮和三自由度机构的机械能转换为液压能。如图3(a)所示,机液转换装置包括一套齿轮增速机构,16套曲柄摇块机构。中心大齿轮周围均匀安装8个小齿轮,16套曲柄摇块机构均匀布置于大齿轮两侧。主轴转动带动中心大齿轮,中心大齿轮传动至周围的8个小齿轮,每个小齿轮轴带动两侧两个曲柄转动,曲柄带动活塞杆做往复运动,液压缸不断吸油排油,从而完成由机械能转化为液压能的过程。

基于功率回收测试方法,设计了如图3(b)所

示的机液转换机构效率测试台。测试台将液压变量马达的输出,通过减速箱传递给机液转换机构,机液转换机构转动输出高压油再输入液压马达,构成一个循环系统,循环系统外主泵给系统供油,补充损耗。其中力矩/转速传感器得到的数据用以计算减速器的功率损耗,飞轮增加了转动惯量,减小主轴的转速波动。保持主轴的速度稳定下,主泵补充的功率即为测试系统的损失,减去减速器和马达的损失即为机液转换机构的功率损失。

通过实验和计算得到了转换机构在不同油压不同主轴转速下的效率,如图3(c)所示,效率 $\eta=80\%$ 左右<sup>[27]</sup>。

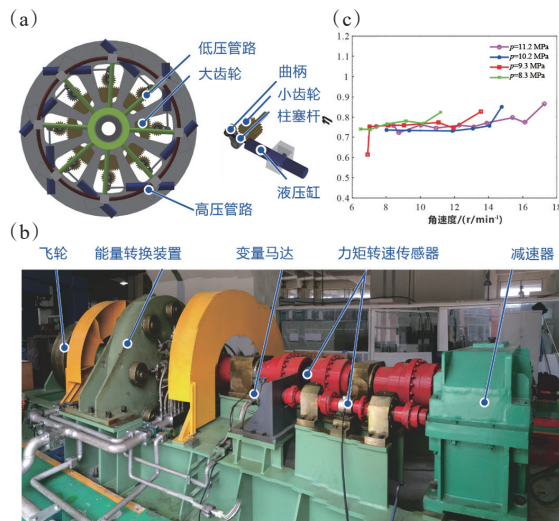


图3 机液转换机构效率测试台

## 5 波浪能发电装备布置方法

风浪复合发电装备中,波浪能捕获转换装备采用正三角形布置,正三角形布置的波浪能捕获转换影响系数 $q$ ( $N$ 个波浪能发电功率的总和与单个发电功率 $N$ 倍的比值),与装备间的距离以及波浪的方向有关。当装备之间的距离 $L=5D_2$ ,平台尺寸 $E = \frac{10}{3}D^2, \beta=180^\circ$ 时,发电装备间相互影响的积极作用明显,此时 $q=1.336^{[28]}$ 。

风浪复合发电装备作为一个发电模块,以模块为基础,研究单排模块布置的方法。假设相邻模块之间的距离相等,且只考虑相邻发电模块之间的影响,根据所处位置,模块具有3种基本拓扑类型A、B、C:只与一个发电模块相邻的A型,相邻2个发电模块相对自身中心对称的B型,相邻两个发电模块相对其轴对称的C型。发电场中第 $i$ 个模块的 $q$ 与模块的拓扑、相邻模块之间的距离和波浪方向有关,这里只考虑波浪方向沿着垂直于单排布置方向,所以可以表达为 $q_i = \phi(\Gamma, x, y)$ ,其中 $\Gamma$ 是单元的拓扑形式, $(x, y)$ 表示单元的坐标。如图4(a)所示,当左侧A的中心作为坐标原点时,B和C的坐标即可表示B和C的位置,同时A的位置也确定了;当描述右侧A的位置时,B和C的中心可以作为坐标原点。通过计算,得到如图4(b)所示3种拓扑形式在

不同位置 $q$ 系数的等高线图,当模块之间的水平距离为 $8D_2$ 、垂直距离为 $2D_2$ 时,3种类型模块的 $q$ 均较大。

当研究单排发电场布置方式的优劣时,只需要比较影响系数的平均值 $\bar{q}$ 的大小。针对包含5个发电模块的发电场,比较了如图4(c)所示5种不同的布置方式,优化出ACCCA的布置形式,此时 $\bar{q}=1.477$ 。建立了如图5所示,包含5个模块的风浪复合发电场,为了提高平台的稳定性,平台之间通过桁架结构链接。

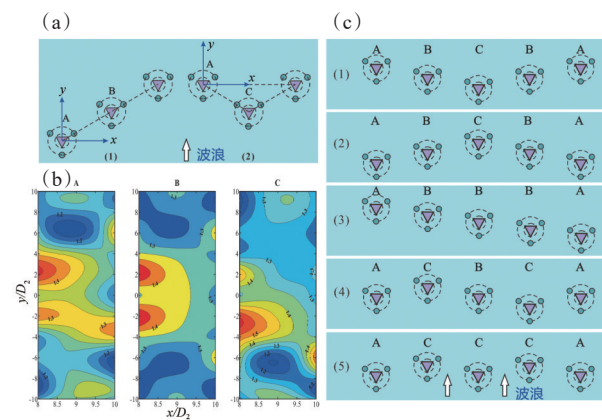


图4 复合发电装备布置方法

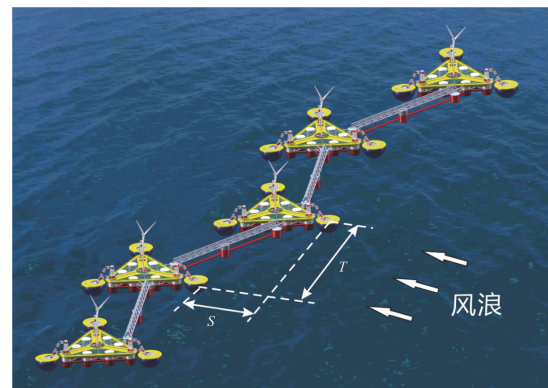


图5 复合发电场

## 6 复合发电装备及发电场输出功率

发电装备的风轮直径 $D_1=120$  m,浮筒直径 $D_2=60$  m,平台边长 $E=200$  m,取液压油传输的效率 $\eta_t=0.98$ ,马达的效率 $\eta_m=0.93$ ,发电机的发电效率 $\eta_g=0.94$ ,在 $H_s=4$  m,  $T_c=10$  s,  $\beta=180^\circ$ ,  $v=13.8$  m/s的风况和海况下。风浪复发电装备额定发电功率为

$$P_0 = (P_{\text{wind}} + 3P_{\text{wave}}q)\eta\eta_t\eta_m\eta_g = 17 \text{ MW} \quad (1)$$

图5复合发电场额定发电功率为

$$P = (P_{\text{wind}}M + 3P_{\text{wave}}\bar{q}M)\eta\eta_t\eta_m\eta_g = 91 \text{ MW} \quad (2)$$

式中,  $M$  为复合发电装置的个数。

## 7 结论

设计了采用相同的能量转换介质液压能, 和相同结构的机液转换装置将无规则的、不稳定的风能和波浪能, 捕获转换输出为规则的、稳定的电能的海上风浪复合发电装备, 并基于复合发电装备设计了单排的复合发电场。经过计算和部分实验, 结果表明该发电装备和发电场的功率分别为 17 MW、91 MW。

### 参考文献 (References)

- [1] Chow J, Kopp R J, Portney P R. Energy resources and global development[J]. *Science*, 2003, 302(5650): 1528-1531.
- [2] Kerr R A. Global warming is changing the world[J]. *Science*, 2007, 316(5822): 188-190.
- [3] Sesto E, Casale C. Exploitation of wind as an energy source to meet the world's electricity demand[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1998, 74: 375-387.
- [4] Fung K T, Scheffler R L, Stolpe J. Wind energy—A utility perspective[J]. *IEEE Power Engineering Review*, 2010, PER-1(3): 28-28.
- [5] Archer C L, Jacobson M Z. Evaluation of global wind power[J]. *Advancing Earth and Space Science*, 2005, 110 (D12). doi: 10.1029/2004JD005462.
- [6] Siegfriedsen S, Lehnhoff M, Prehn A. Primary markets for offshore wind energy outside the European Union[J]. *Wind Engineering*, 2003, 27(5): 419-429.
- [7] Isaacs J D, Schmitt W R. Ocean energy: Forms and prospects[J]. *Science*, 1980, 207(4428): 265-273.
- [8] McCormick M E. Ocean wave energy conversion[J]. *Renewable Energy*, 1986, 1(11): 1309-1319.
- [9] Scruggs J, Jacob P. Harvesting ocean wave energy[J]. *Science*, 2009, 323(5918): 1176-1178.
- [10] Falnes J. A review of wave-energy extraction[J]. *Marine Structures*, 2007, 20(4): 185-201.
- [11] Zheng C, Zhuang H, Li X, et al. Wind energy and wave energy resources assessment in the East China Sea and South China Sea[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(1): 163-173.
- [12] 郑崇伟, 李崇银. 中国南海岛礁建设: 风力发电、海浪发电[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(9): 7-14.
- [13] Pérez-Collazo C, Greaves D, Iglesias G. A review of combined wave and offshore wind energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 141-153.
- [14] Perez-Collazo C, Astariz S, Abanades J, et al. Co-located wave and offshore wind farms: A preliminary approach to the shadow effect[C]//The 5th International Conference on Ocean Energy (ICOE). Paris: The Ocean Energy Systems Implementing Agreement, 2014. doi: 10.13140/RG.2.1.3392.5285.
- [15] Unlimited clean energy with the wavestar machine[EB/OL]. (2020-10-31). <http://wavestarenergy.com>.
- [16] Wan L, Gao Z, Moan T, et al. Experimental and numerical comparisons of hydrodynamic responses for a combined wind and wave energy converter concept under operational conditions[J]. *Renewable Energy: An International Journal*, 2016, 93: 87-100.
- [17] 姜楠. 深海风力发电技术的发展现状与前景分析[J]. *新能源进展*, 2015, 3(1): 21-24.
- [18] 赵永生, 杨建民, 何炎平, 等. 新型多立柱张力腿式浮动风力机概念模型试验研究[J]. *中国科学: 物理学 天文学*, 2016, 46(12): 104-114.
- [19] 刘格梁, 胡志强. 基于刚柔混合多体动力学的海上浮式风机系统动力耦合建模[C]//第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 北京: 中国海洋工程学会, 2015: 88-93.
- [20] 张晓蕊, 刘利琴, 王凤东, 等. 海上浮式垂直轴风力机的气动特性研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(6): 859-865.
- [21] 杨绍辉, 何宏舟, 陈沪, 等. 阵列筏式波浪能发电系统设计及试验研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(11): 57-62.
- [22] 史宏达, 曲娜, 曹飞飞, 等. 振荡浮子波能发电装置浮子运动性能的试验研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(6): 124-130.
- [23] 盛松伟, 游亚戈, 王坤林, 等. 10 kW 鹰式波浪能发电装置研究[C]//中国海洋可再生能源发展年会暨论坛. 北京: 国家海洋技术中心, 2013: 378-384.
- [24] 鲍经纬, 林勇刚, 刘宏伟, 等. 浮力摆式波浪能发电装

- 置试验系统研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1334-1339.
- [25] 陈启卷, 李永兴, 许志翔, 等. 液压传动共振波力发电装置提能系统特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 209-216.
- [26] Chen W, Meng X, Gao F. The principle of a three-DOF mechanism for wave energy absorption[C]//ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2016. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2016: V006T09A030.
- [27] Chen W, Gao F, Meng X, et al. Power recovery method for testing the efficiency of the ECD of an integrated generation unit for offshore wind power and ocean wave energy[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(3): 1-12.
- [28] Chen W, Gao F, Meng X, et al. Design of the wave energy converter array to achieve constructive effects[J]. Ocean Engineering, 2016, 124: 13-20.

## An integrated equipment for generation of offshore wind power and ocean wave energy

CHEN Weixing, LI Shaoxun, GAO Feng

School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Energy is the lifeblood of the technological and economic development. Fossil energy, such as coal, oil and natural gas, has long been the main source of energy for mankind. Although it promotes human progress, it brings about many problems. The ocean contains abundant renewable energy which is inexhaustible. Making full use of the marine energy is an important way for mankind to achieve the sustainable development. This paper designs a novel integrated equipment for generation of the offshore wind power and the ocean wave energy. The equipment can convert these two kinds of random and unstable energies into regular and stable electricity through the hydraulic energy transmission. An integrated generation farm including five units of equipment is established. Through the numerical calculations and the partial experiments, the output of the equipment and the farm is 17 MW and 91 MW, respectively.

**Keywords** offshore wind energy; wave energy; integrated generation; generation equipment; farm ●



(责任编辑 刘志远)