DOI: 10.3901/JME.2020.18.180

波浪能捕获液压系统的特性研究*

高红^{1,2} 梁睿智¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240;

2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310058)

摘要: 为研究波浪能捕获液压系统在真实海况中的运行情况, 建立随机波浪力作用下液压系统能量转化模型, 模拟有效波高范围在 1~4 m 和能量周期范围在 4~11 s 的随机波浪力, 获得随机波浪力作用下的液压波浪能捕获系统能量转化特性, 探究有效波高和能量周期对波浪能捕获系统特性的影响规律。结果表明, 该系统的液压缸平均位移随着有效波高增大而呈线性增加, 随能量周期从 4 s 到 7 s 显著增加而 7 s 到 11 s 区间内逐渐趋于平稳; 液压缸平均输出力、液压缸平均捕获功率、高压蓄能器压力、液压马达平均转速以及液压马达平均输出功率均随有效波高的增大而增大, 随能量周期的增加迅速增大后逐渐减小, 最佳能量周期在 5~6 s。计算波浪能捕获系统的液压缸捕获功率矩阵、马达输出功率矩阵、液压系统转换效率矩阵。在有效波高为 4 m, 能量周期为 5.5 s 的海况下, 液压缸平均捕获功率为 62.44 kW, 马达平均输出功率为 47.52 kW, 液压系统能量转换效率为 76%, 不同海况下液压系统的能量转换效率在 74%~80%。结合南海海域 15 个点的全年海况统计数据, 计算该波浪能捕获系统在 15 个观测点的全年捕获能量, 单浮子在 P11 点全年能够捕获 106.82 MW·h 的能量, 为波浪能捕获系统的设计以及选址提供理论依据。

关键词: 波浪能; 有效波高; 能量周期; 系统特性; 捕获功率

中图分类号: TK79

Performance Investigation of Hydraulic Wave Energy Capture System

GAO Hong^{1,2} LIANG Ruizhi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: A hydraulic wave energy capture system with irregular wave forces is established to simulate the system performance. Energy conversion characteristics of the hydraulic wave energy capture system are obtained while the significant wave height is in the range of 1 m to 4 m, and the energy period is in the range from 4 s to 11 s. Influences of significant wave height and energy period on the system are also investigated. The results show that the mean hydraulic cylinder displacement increases linearly with the increase of significant wave height. When the energy period changes from 4 s to 7 s the mean hydraulic cylinder displacement increases obviously and gradually trend to be stable as the energy period increases from 7 s to 11 s. The mean cylinder force, mean cylinder captured power, mean high-pressure accumulator pressure, mean motor speed and mean motor output power also increase with the increasing of significant wave height. When the energy period increases, those values rapidly increase and then gradually decrease. The maximal values occur when the energy period is between 5 s and 6 s. The cylinder captured power matrix, the motor output power matrix and the hydraulic system conversion efficiency matrix are also calculated. Under the significant wave height of 4m and energy period of 5.5 s, the mean hydraulic cylinder captured power is 62.44 kW, the mean motor output power is 47.52 kW and the hydraulic system conversion efficiency is 76%. The hydraulic system conversion efficiency in different sea states is in the range of 74% to 80%. With the sea state data of 15 typical points in the South China Sea, the annual captured energy of the hydraulic wave energy system year can be calculated. The annual captured energy of a single buoy is 106.82 MW·h at point P11. Those results provide a theoretical basis for the design and location selection of wave energy capture systems.

Key words: wave energy; significant wave height; energy period; system performance; captured power

* 国家自然科学基金(51675327)和流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金(GZKF-2018014)资助项目。20191021 收到初稿, 20200407 收到修改稿

0 前言

与传统的化石能源相比,波浪能分布区域广泛,在利用的过程中,不产生化学污染和二氧化碳等温室气体,对环境更为友善。与风能和太阳能相比,波浪能在可再生能源当中具有较高的能量密度,因此具有很大的发展潜力,据估计,其全球储量可达 $2\text{ TW}^{[1]}$ 。

与其他形式的波浪能捕获装置相比,点吸收振荡浮子式波浪能捕获装置体积相对比较小、结构复杂性和成本较低^[2];可以进行阵列式布置,多个捕获装置可共用一套能量转换系统,进一步降低其大规模布置的成本^[3];在控制算法的优化下,点吸收式装置能够获得较高的捕获效率^[4];液压传动由于其柔性传输、蓄能稳压、转矩大等特点,与波浪能推力大频率低等特点相适应,可有效解决波浪能的转化和稳定性问题,从而在波浪能发电装置中得到应用。因此,点吸收振荡浮子式液压波浪能发电技术发展很快。丹麦的 Wavestar 是多浮体阵列式布置液压发电装置,在 Hanstholm 海域进行了试验研究, KRAMER^[5]研究了有效波高对捕获功率和捕获宽度的影响,结果表明未来研究的挑战是确保能量高效率 and 全功率传输到电网,关键是液压和电系统的优化和提高效率。VIDAL 等^[6]针对 Wavestar 研究了多级液压缸与电子阀门组合的系统,该系统通过离散位移的方式实现了液压缸出力控制;建立了从波浪能捕获到最后电能输出的数学模型,对不同海况进行模拟,结果表明该波浪能捕获系统的能量转换效率在不同海况中均保持在 70% 以上。为了提高波浪能捕获装置的捕获功率,还需要保证波浪能捕获系统在大波浪情况下的可靠性, BLOMMAERT 等^[7]研究了挪威 Seewec 阵列浮子液压波浪能发电装置在极端波浪条件下的运行可靠性,基于 1:3 的五个浮子海上发电试验平台,验证系统设计,测量实际输出功率和元件能量损失。LIU 等^[8]介绍了青岛市斋堂岛 10 kW 海上试验,该装置采用四个振荡阵列浮子直接驱动马达的液压装置,无蓄能器,结果表明直驱式能量转化效率相对低。为了提高转化效率,继续研究增加了蓄能器组后该系统的能量转化和存储,目标是 100 kW 原型液压蓄能系统,数值模拟结果表明蓄能系统的输出能量比直驱式系统大四十多倍,有待进一步优化浮体和蓄能器的数量提高功率输出。

针对不同液压波浪能捕获系统和元件性能及优化的研究。ANTÓNIO^[9]针对液压缸下置振荡浮子半潜式波浪能液压转换系统中的蓄能器进行了研究,

通过线性波浪理论模拟了具有高低压蓄能器的振荡浮子式液压波浪能转换系统在随机波浪下的运行情况,并且利用无量纲系数分析了蓄能器在时域上的运行特性以及不同有效波高和能量周期的海浪对蓄能器性能的影响,并在此基础上给出了蓄能器参数的计算方法。YANG 等^[10]针对液压缸上置点吸收式波浪能捕获系统,采用双曲传递函数的管路瞬变损耗模型,研究了系统管路的压力损失和长度等参数对系统动态特性的影响,结果表明减小液压管路的长度能够降低瞬变压力的幅值,有利于提高系统的转化效率。KIM 等^[11]针对悬臂式振荡浮子波浪能捕获装置,装置中液压缸与液压马达直接相连,通过建模仿真以及波浪槽试验,研究了半球形浮体在波浪能捕获过程中的水动力系数,模拟了几种波浪条件下浮子的位移以及捕获功率,寻求获得最大功率的波浪条件。对运动幅值和平均捕获功率进行了试验的比较。CHOI 等^[12]提出了一种角度可变的单液压缸振荡浮子式波浪能捕获装置,通过试验研究了液压能量转换系统中各个环节的能量损失情况,研究结果表明该装置机械效率最高可达 91.6%,整体效率在输出功率为 43 kW 时可达 72.7%;当输出功率为 20 kW 时效率急剧下降,其中液压缸和发电机是造成能量损失的主要环节。曹飞飞等^[13]基于 10 kW 斋堂岛组合型振荡浮子式波浪发电装置,研究了蓄能器初始充压、释放压力对系统输出电能的影响,结果表明该系统平均输出功率随初始压力的增加先增加后趋于稳定,随释放压力的增加而增加。张家明等^[14]基于 10 kW 斋堂岛波浪发电装置的海试结果,增加多个蓄能器和电磁阀组调控的波浪能转换发电系统,研究液压自调整控制系统实现能量转换系统蓄能与放能过程的解耦,通过 Simulink 进行了液压转换系统和电力变换系统的仿真,实现了一种“间断平稳”的发电效果。

为了研究波浪能捕获系统在实际海况中的运行特性,本文从实际海域的统计数据出发,生成一系列具有不同有效波高和能量周期的随机波浪力,并将这些随机波浪力作用在上下振荡浮子式波浪能捕获系统上,建立了波浪能捕获系统模型,对液压波浪能捕获系统在随机波浪力作用下的运行特性进行模拟仿真。研究了有效波高和能量周期对液压缸位移、出力、液压缸捕获功率、高压蓄能器压力、马达转速和输出功率的影响规律。根据南海海域 15 个观测点的全年海况统计数据,结合液压波浪能捕获系统在不同海况下的捕获功率,计算得到了该液压波浪能捕获系统在南海海域 15 个观测点上的全年捕获能量。

1 波浪能捕获系统模型

1.1 液压波浪能捕获系统

液压波浪能捕获系统如图 1 所示, 在波浪的作用下, 浮子带动液压缸进行往复运动, 而液压缸的往复运动推动液压油通过单向阀桥路和高压蓄能器之后进入液压马达, 液压马达旋转带动发电机发电, 从而实现波浪能到电能的转换, 液压油从液压马达流出后, 经过低压蓄能器, 重新流入单向阀桥路。

图 1 液压波浪能捕获系统原理图

1. 液压缸 2. 单向阀组 3. 高压蓄能器 4. 低压蓄能器
5. 液压马达 6. 发电机 7. 补油系统 8. 溢流阀

1.2 数学模型

1.2.1 波浪力模型

浮体受到的波浪力可以表示成

$$F_w(t) = F_s(t) + F_d(t) \quad (1)$$

式中, F_w 为浮体受到的波浪作用力, F_d 为浮体受到的动压力, F_s 为浮体受到的静压力。

$$F_s(t) = - \int_{s(t)} p \bar{N} ds \quad (2)$$

式中, s 为浮体的湿表面, p 为静压力, $\bar{N}$ 为浮体表面外法矢量。

$$F_d(t) = - \int_{s(t)} i\omega\rho(\varphi_i + \varphi_d)nds \quad (3)$$

式中, ρ 为海水密度, ω 为波浪的角频率, φ_i 为绕射势, φ_d 为辐射势, n 为广义表面法矢量。

1.2.2 浮体运动模型

浮体在不规则波浪作用下动力学方程为

$$m\ddot{x} = F_w + F_f + F_c \quad (4)$$

式中, m 为浮子质量; x 为浮子位移; F_w 为波浪对浮体的作用力; F_f 为液压缸内的摩擦力, 其中包括库仑摩擦力与黏性摩擦力; F_c 为液压缸对浮体的反作用力。

1.2.3 蓄能器模型

液压回路中有两个蓄能器, 分别为高压蓄能器

和低压蓄能器, 其中高压蓄能器的作用为储存波浪能, 在波浪能发电中能够起到“削峰填谷”的作用, 而低压蓄能器的作用则是让系统保持一定的回油压力。蓄能器采用充气式蓄能器, 假设气体膨胀和压缩的过程为绝热过程, 那么气体的状态方程如下

$$p(V_0 - V)^{1.4} = p_0 V_0^{1.4} \quad (5)$$

式中, p_0 、 V_0 分别为蓄能器充气压力和蓄能器的充气体积; p 、 V 则是在运行过程中蓄能器气体的压力和体积。

1.2.4 液压马达模型

发电机电矩简化为与转速相关的线性阻尼, 则液压马达的运动方程为

$$J\dot{\omega}_m = D_m \Delta p \eta_m - C_g \omega_m \quad (6)$$

式中, J 为马达轴系的转动惯量; D_m 为马达排量; Δp 为马达进出口压差; η_m 为马达的机械效率; C_g 为发电机的阻尼系数; ω_m 为液压马达的转速。

1.2.5 单向阀模型

单向阀在液压系统中的主要功能是调整液压油的流动方向, 由 4 个单向阀组成的液压换向桥路可以保证液压油在回路中朝一个方向流动, 单向阀的流量公式为

$$q_c = \begin{cases} 0 & p_i - p_o \leq p_c \\ k\sqrt{p_i - p_o} & p_i - p_o > p_c \end{cases} \quad (7)$$

式中, q_c 为单向阀流量; p_i 为单向阀入口压力; p_o 为单向阀出口压力; p_c 为单向阀开启压力; k 为单向阀流量系数。

1.2.6 液压系统能量转换效率

定义液压马达平均输出功率与液压缸平均捕获功率之比为液压系统的能量转换效率

$$\eta_h = \bar{P}_m / \bar{P}_c \quad (8)$$

式中, η_h 为液压系统能量转换效率, $\bar{P}_m$ 为液压马达平均输出功率, $\bar{P}_c$ 为液压缸平均捕获功率。

2 不同海况下的波浪能捕获系统仿真结果

为了获得液压波浪能捕获系统在真实海域中的特性, 利用 Matlab Simulink 建立浮子振荡式波浪能捕获系统的数学模型, 并且输入不同有效波高、能量周期的随机波浪力, 有效波高的范围为 1~4 m, 能量周期的范围为 4~11 s, 圆柱浮子直径 6 m, 高 6 m, 入水深度为 4 m, 重心位置为静水中水面以下 1 m。

2.1 液压缸平均位移

液压缸平均位移随有效波高和能量周期的变化如图 2 所示, 液压缸平均位移均随着有效波高和能量周期的增大而增大。不同的是, 液压缸平均位移随有效波高的变化呈正比关系, 而液压缸平均位移随能量周期从 4 s 到 7 s 呈增大趋势。当有效波高小于 3 m 时, 能量周期从 7 s 增加到 11 s 液压缸平均位移逐渐趋于稳定; 当有效波高为 4 m 时, 随能量周期从 7 s 增加到 11 s 液压缸平均位移有所增加但是增幅较小。以有效波高为 4 m 时的情况为例, 当能量周期为 4 s 时, 液压缸平均位移为 0.491 m; 当能量周期为 7 s 时, 液压缸平均位移为 0.781 m; 当能量周期为 11 s 时, 液压缸平均位移仅增长到了 0.798 m。图中标注的圆点是液压缸平均位移到达 90% 的标记点, 可以看出, 液压缸平均位移在能量周期 6~7 s 附近到达了其在能量周期 4~11 s 区间内总增长值的 90%。

图 2 液压缸平均位移

2.2 液压缸平均输出力

液压缸平均输出力随有效波高和能量周期的变化如图 3 所示, 液压缸平均输出力随有效波高的增大而增大, 当能量周期为 6 s 时, 有效波高从 1 m 增长到 4 m, 液压缸平均输出力从 17.2 kN 增长到

图 3 液压缸平均输出力

68.1 kN。液压缸平均输出力随着能量周期的增大先增大后减小, 当有效波高 4 m 时, 液压缸平均输出力在能量周期为 5.7 s 处取到最大值 68.6 kN; 当有效波高为 3 m 时, 在能量周期为 5.7 s 处液压缸平均输出力取到最大值 51.7 kN。液压缸平均输出力取得的最大值在图 3 中用圆点标注出来, 对应的能量周期在 5.4~5.7 s。

2.3 高压蓄能器平均压力

图 4 为高压蓄能器平均压力随有效波高和能量周期变化的曲面图, 从图中可以看出, 高压蓄能器平均压力随有效波高的变化规律比较明显, 在能量周期一定的情况下, 高压蓄能器平均压力随有效波高的增大而增大。而在有效波高一定时, 高压蓄能器平均压力随着能量周期的增大先增大后减小, 当有效波高为 4 m 时, 在能量周期区间 4~5.6 s, 高压蓄能器平均压力增长较快, 从 10.61 MPa 增长到了 12.58 MPa, 达到了最大值; 当能量周期从 5.9 s 增大到 11 s 时, 高压蓄能器平均压力从 12.58 MPa 缓慢下降到了 8.68 MPa。高压蓄能器平均压力在不同有效波高下的最大值在图 4 中用圆点进行标注, 最大值对应的能量周期在 5.1~5.6 s。

图 4 高压蓄能器平均压力

2.4 液压马达平均转速

液压马达平均转速随有效波高和能量周期的变化如图 5 所示, 液压马达平均转速随有效波高的增大而增大。在有效波高相同的情况下, 液压马达平均转速随着能量周期的增大先增大后减小, 在能量周期区间 5.5~5.8 s 取到最大值。当有效波高为 4 m 时, 液压马达平均转速在能量周期 5.7 s 时达到最大值 1 245 r/min; 当有效波高为 3 m 时, 液压马达平均转速在能量周期 5.8 s 时达到最大值 944 r/min; 当有效波高为 2 m 时, 液压马达在能量周期为 6 s 时达到最大值 640.8 r/min。

图5 液压马达平均转速

2.5 液压马达平均输出功率

液压马达平均输出功率随有效波高和能量周期的变化如图6所示, 液压马达平均输出功率随有效波高的增大而增大, 但增大幅度与液压缸平均输出力、高压蓄能器平均压力以及液压马达平均转速相比要更大一些。在有效波高一定时, 液压马达输出功率随能量周期的增大呈现先增大后减小的趋势。当有效波高为4 m时, 在能量周期4 s到5.5 s这个区间内, 液压马达平均输出功率从34.8 kW增大到47.5 kW; 当能量周期从5.5 s增大到11 s时, 平均输出功率下降到了19.5 kW, 下降幅度较大。而随着有效波高的降低, 输出功率随能量周期变化的幅度也随之减小, 当有效波高为1 m时, 输出功率的最大值为3.0 kW, 在能量周期为5.4 s时取到。

图6 液压马达平均输出功率

2.6 液压缸平均捕获功率

液压缸平均捕获功率随有效波高和能量周期的变化如图7所示, 液压缸平均捕获功率随有效波高和能量周期的变化规律与液压马达平均输出功率相类似。在有效波高一定的情况下, 随着能量周期的增大, 液压缸平均捕获功率先增大后减小, 在能量周期区间5.3~5.4 s中取到最大值, 当有效波高为4 m时, 液压缸平均捕获功率在能量周期为5.4 s处取得最大值62.4 kW; 在有效波高为3 m时, 平

均捕获功率在能量周期为5.3 s处取到最大值35.2 kW。图中黑色圆点代表平均捕获功率在有效波高一定时所取到的最大值。

图7 液压缸平均捕获功率

3 南海海域不同点的模拟结果

3.1 南海海况统计数据

本文参考了WANG等^[15]文章中的我国南海海况统计数据, 基于1986年到2015年30年间南海海域长期的风能以及波浪能数据, WANG等对该区域的波浪能资源进行了详细的评估, 并且给出了我国南海海域中15个观测点的全年海况统计数据。其中15个观测点的位置如图8所示。

图8 南海海域观测点分布图

在统计了参考数据中我国南海海域中15个观测点一年里不同有效波高和能量周期海况出现的小时数后, 可以发现, 在有效波高1~4 m, 能量周期

4~11 s 的海况, 出现时间占全年 90%以上, 以观察点 P1、P3、P11 为例, 这三点的海况分布数据如图 9 所示, 其余观测点海况数据参见文献[15]。

图 9 P1、P3、P11 点全年海况数据分布(h)

3.2 不同海况波浪能液压系统捕获功率和转化效率

根据观测点的全年海况统计数据, 可以计算出该观测点的一年间波浪能捕获系统的捕获和输出功率, 为此, 需要计算出在有效波高区间 1~4 m、能量周期区间 4~11 s 对应的波浪能捕获系统的液压缸平均捕获功率以及马达输出功率。图 10 为不同有效波高和能量周期对应的液压缸平均捕获功率矩阵, 图 11 为不同有效波高和能量周期对应的液压马达平均输出功率矩阵。

图 10 液压缸平均捕获功率矩阵(kW)

图 11 液压马达平均输出功率矩阵(kW)

根据上述的数据以及式(8)可以计算出不同海况下液压系统能量转换效率。

不同海况下, 波浪能捕获系统的能量转换效率会略有不同, 如图 12 所示, 能量转换效率在 74% 到 80% 间浮动, 在有效波高相同的情况下, 波浪能

捕获系统在能量周期较大的海况中的能量转换效率会略高一些。

图 12 液压系统能量转换效率矩阵(%)

3.3 15 个观测点全年捕获能量

根据图 10 的液压缸平均捕获功率矩阵和我国南海海域中 15 个观测点的全年海况统计数据, 可以计算出本文研究的波浪能捕获系统放置在 15 个观测点海域内的全年捕获能量。图 13 为波浪能捕获液压系统在 15 个观测点全年捕获的能量。从图 13 中可以看出, 该波浪能捕获系统在 P1、P3、P4、P7、P11、P12 处均能够捕获到较多的波浪能, 在这 15 个观测点中, 该波浪能捕获系统在 P11 处所捕获的能量为 15 个观测点中的最大值, 单个浮子在 P11 点全年能够捕获能量 106.82 MW·h。通过将海况统计数据、浮子动力学建模和液压波浪能捕获系统建模仿真相结合, 能够获得更加准确的波浪能捕获系统的特性和捕获能量。

图 13 P1~P15 全年液压缸捕获能量(MW·h)

4 结论

本文模拟了实际海况下浮体式液压波浪能捕获

系统的特性,研究了随机波特征参数有效波高和能量周期对点吸收振荡浮子式液压波浪能捕获系统中的液压缸位移、液压缸输出力及液压缸捕获功率、高压蓄能器平均压力、马达转速和马达输出功率的影响规律。

研究结果表明液压缸平均位移随着有效波高和能量周期的增大而增大,其中液压缸平均位移随有效波高的变化呈正比关系,在有效波高不变的情况下,随着能量周期从 4 s 增长到 7 s,液压缸平均位移显著增大。当能量周期从 7 s 增长到 11 s 时,液压缸平均位移逐渐趋于平缓。而液压缸平均输出力、高压蓄能器平均压力、液压马达平均转速、液压马达输出功率以及液压缸捕获功率,均随有效波高的增大而增大,随着能量周期的增大迅速增大后逐渐减小,在有效波高不变的情况下,最佳能量周期在 5~6 s。

对液压波浪能捕获系统在不同海况下的捕获功率矩阵、马达输出功率矩阵、波浪能捕获效率矩阵及能量转换效率矩阵进行了模拟计算。结果表明在有效波高为 4 m,能量周期为 5.5 s 的海况下,液压缸平均捕获功率为 62.44 kW,马达平均输出功率为 47.52 kW,液压系统能量转换效率为 76.11%。在不同海况下液压系统能量转换效率在 74%~80%。结合南海海域 15 个观测点的海况统计数据,计算出了该波浪能捕获系统在这 15 个观测点上单个浮子的全年捕获能量。计算结果显示,该波浪能捕获系统在 P1、P3、P4、P7、P11、P12 处能够捕获到较多的波浪能,其中,在 P11 处能够捕获到最多的波浪能,单个浮子全年能够捕获 106.82 MW·h 的能量。本文的研究方法适用于浮体式波浪能捕获液压系统在我国海域不同位置全年输出能量的模拟预测。

参 考 文 献

- [1] WANG Ligu, ISBERG J, TEDESCHI E. Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: The wave-to-wire approach[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81(1): 366-379.
- [2] LÓPEZ I, ANDREU J, CEBALLOS S, et al. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27(1): 413-434.
- [3] FALCÃO A F de O. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 899-918.
- [4] KORDE U A. Efficient primary energy conversion in irregular waves[J]. *Ocean Engineering*, 1999, 26(7): 625-651.
- [5] KRAMER M M. Performance evaluation of the wavestar prototype[C]// *Proceedings of the 9th European Wave and Tidal Conference*. Southampton: 2011, 1: 1015-1025.
- [6] VIDAL E S, HANSEN R H, KRAMER M. Early performance assessment of the electrical output of Wavestar's prototype[C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Ocean Energy*. Dublin: 2012.
- [7] BLOMMAERT C, VAN PAEPEGEM W, DHONDT P, et al. Large scale slamming tests on composite buoys for wave energy applications[C]// *Proceeding of the 17th International Conference on Composite Materials*. Edinburgh, UK: 2010: 27-31.
- [8] LIU Zhen, QU Na, HAN Zhi, et al. Study on energy conversion and storage system for a prototype buoys-array wave energy converter[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2016, 34(1): 100-110.
- [9] ANTÓNIO F de O F. Modelling and control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic power take-off and gas accumulator[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(14-15): 2021-2032.
- [10] YANG Limin, MOAN T. Dynamic analysis of wave energy converter by incorporating the effect of hydraulic transmission lines[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(16): 1849-1860.
- [11] KIM S, KOO W, SHIN M. Numerical and experimental study on a hemispheric point-absorber-type wave energy converter with a hydraulic power take-off system[J]. *Renewable Energy*, 2019, 135(3): 1260-1269.
- [12] CHOI K, YANG D, PARK S, et al. Design and performance test of hydraulic PTO for wave energy converter[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(5): 795-801.
- [13] 曹飞飞, 史宏达, 赵晨羽, 等. 振荡浮子波浪发电装置物理模型试验研究[J]. *太阳能学报*, 2019, 1(1): 1-7.
- [14] CAO Feifei, SHI Hongda, ZHAO Chenyu, et al. Experimental study on a heaving buoy wave energy converter[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 1(1): 1-7.
- [14] 张家明, 黎明, 张帅, 等. 100 kW 组合型振荡浮子式波浪发电装置能量转换系统研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 1(12): 3355-3362.
- [14] ZHANG Jiaming, LI Ming, ZHANG Shuai, et al. Energy

conversion system research of 100 kW combined oscillating float wave power plant[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 1(12): 3355-3362.

- [15] WANG Zhifeng, DUAN Chenglin, DONG Sheng. Long-term wind and wave energy resource assessment in the South China sea based on 30-year hindcast data[J]. Ocean

Engineering, 2018, 163(5): 58-75.

作者简介: 高红(通信作者), 女, 1973 年出生, 副教授。主要研究方向为波浪能捕获与转化发电技术、浮式系统动力学。

E-mail: hgao@sjtu.edu.cn

梁睿智, 男, 1994 年出生。主要研究方向为波浪能捕获系统的数值模拟。

E-mail: aptx4869@sjtu.edu.cn