

DOI: 10.3901/JME.2022.20.137

振荡扑翼波浪能发电装置系统建模与仿真^{*}

方子帆^{1,2} 朱 畅² 王佳佳² 熊 飞² 左新球² 谢雪媛²

(1. 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室 宜昌 443002;

2. 三峡大学机械与动力学院 宜昌 443002)

摘要: 为了实现波浪能的采集与高效转换, 提出一种振荡扑翼波浪能发电装置, 通过采集机构、液压转换系统和电能变换及储能系统将随机波浪能转换为稳定的电能。基于扑翼与波浪耦合受力分析, 设计波浪能采集机构方案; 为了能量高效转换和保证液压系统稳定性, 创成一种含多腔液压缸的液压转换系统; 根据储能单元的额定电能需求, 进行电能变换及储能系统方案设计与元件参数计算; 基于多能域键合图理论和 AMESim 仿真软件, 建立包括机-液-电的整体虚拟样机仿真模型; 搭建仿振荡扑翼波浪能发电装置试验平台, 模拟规则波浪进行试验, 验证系统的有效性。研究结果表明, 在三级海况和四级海况下振荡扑翼波浪能发电装置发电效率分别可以达到 61.5% 和 66.2%, 能够有效采集波浪能, 实现电能的稳定输出并储存到蓄电池中。试验结果证明了振荡扑翼波浪能发电装置工作原理和参数设计的合理性。研究结果为波浪能发电装置的设计与开发提供了理论基础与参考。

关键词: 波浪能; 发电装置; 采集机理; 系统建模; 转换特性; 振荡扑翼

中图分类号: P743; U260

System Modeling and Simulation of Oscillating Flapping-wing Wave Power Generation Device

FANG Zifan^{1,2} ZHU Chang² WANG Jiajia² XIONG Fei² ZUO Xinqiu² XIE Xueyuan²

(1. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design and Maintenance,

China Three Gorges University, Yichang 443002;

2. College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002)

Abstract: In order to realize wave energy acquisition and efficient conversion, which converts random wave energy into stable electric energy through acquisition mechanism, hydraulic conversion system and electric energy conversion and storage system. Based on the coupled force analysis of flapping wings and waves, the scheme of wave energy collection mechanism is designed. In order to efficiently convert energy and ensure the stability of the hydraulic system, a hydraulic conversion system with multi-chamber hydraulic cylinders is created. According to the rated electric energy demand of the energy storage unit, an electric energy conversion and energy storage system was created. Based on the multi energy domain bond graph theory and AMESim simulation software, an overall virtual prototype simulation model including mechanical, hydraulic and electrical was established. The experimental platform of oscillating flapping wing wave energy power generation device was built, and the regular waves were tested to verify the validity of the system. The research results showed that the power generation efficiency of the oscillating flapping-wing wave energy power generation device can reach 61.5% and 66.2% under the third-level sea state and the fourth-level sea state, respectively, which can effectively collect wave energy, realized the stable output of electric energy and store it in the battery. The experimental results proved the rationality of the working principle and parameter design of the oscillating flapping-wing wave power generation device. The research results provided a theoretical basis and reference for the design and development of wave power generation devices.

^{*} 国家自然科学基金(51875314)和水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室开放基金(2018KJX05)资助项目。20220520 收到初稿, 20220908 收到修改稿

Key words: wave energy; power plant; acquisition mechanism; system modeling; conversion characteristics; oscillating flapping wing

0 前言

随着全球经济发展和能量需求的日益增加,能源安全已经成为国家发展战略问题^[1]。同时,由于化石能源的消耗造成的温室效应和环境污染问题日益突出,提倡利用可再生能源,实现节能减排绿色环保成为当今世界发展的主题^[2]。海洋波浪能因具有可再生和储量巨大的特点,其开发逐渐为世界海洋大国所青睐^[3]。开发波浪能符合我国“2060 年前实现碳中和”的战略部署,我国海岸线漫长,山东、江苏、福建、浙江、广东和台湾地区波浪能丰富,总量约为 5 亿千瓦,可开发利用的为 0.7~1.7 亿千瓦,拥有巨大的开发价值。

目前国际上现有的波浪发电装置主要有点吸收式、振荡浮子式、摆式、点头鸭式等几种类型^[4]。欧美国家和一些跨国能源公司积极研发多种波浪能发电新技术及 Pelamis、Oyster、PowerBuoy、WaveDragon、Wave Roller 和 WaveStar 为典型代表的波浪能发电海试装置^[5]。我国大多数波浪能发电技术处于试验室样机阶段,仅有中科院广州能源研究所为代表的少数单位开发的波浪能发电技术进入海试阶段^[6]。国内高校在漂浮式波浪能发电原理、阵列筏式波浪能发电原理、多节飘浮型波浪能发电原理以及海洋浮标发电技术等方面,进行了有益探索和理论研究^[7-10]。波浪能发电技术发展至今,围绕能量采集和能量转换系统的设计与电力高效传输仍然是技术难点。由于海浪引起的物体运动或振荡非常缓慢,且具有双向和随机不规则的特点,会导致设备发电不稳定,系统输出特性较差。通过合理的控制方法在短时间内调节液压系统和电能变换系统,得到稳定的电能是有可能的。高红等^[11]建立了随机波浪力作用下液压系统能量转化模型,研究了有效波高和能量周期对波浪能捕获系统特性的影响规律。叶寅等^[12]通过引入测量液压缸实现海浪发电装置加减液压负载的功能,实现系统自动分级控制,保证波浪能与液压能的最优能量匹配。YU 等^[13]研究了海洋移动浮标推进机构的动力学模型,采用数值积分法求解常微分方程得到平台和水翼的运动响应。鲍经炜等^[14]将系统动力输出(Power-Take-off, PTO)阻尼与辐射阻尼相匹配,实时测量液压系统的压力及捕能推摆的角速度,通过在线调解液压马达的排量提高能量捕获效率。刘延俊等^[15]提出比例流

量阀控制蓄能器的回路设计方案,实现蓄能器进油管道通流面积的跟踪调节,证实比例流量阀控制蓄能器的结构具有优良的平稳压力波动、拓宽波浪能捕获频带宽度的特性。YANG^[16]等通过在波浪能收集器中加入变惯量飞轮的方式,减缓发电机的速度衰减,有效提高了装置的输出功率和转化效率。上述研究为波浪能发电装置能量转换系统的设计提供了一定的参考,但是现有的研究中并没有考虑在复杂海洋环境下液压缸的动力响应,以及波浪能发电的储能问题。海洋环境多变,波浪等级跨度较大,对液压缸的行程、液压系统的稳定性以及电能变换与储能系统的稳定性提出了很高的要求。因此,需要研究在复杂海洋环境下液压缸及其阀组与波浪的匹配问题,电能变换系统设计与储能问题。

基于振荡扑翼能量采集理论^[17],提出振荡扑翼波浪能发电装置,研究系统能量采集机理与设计方法,探索波浪能稳定高效采集方法,电能变换及储能方法,建立多能域仿真模型,进行机—液—电联合仿真分析与试验研究,为开发波浪能采集与转换装置、发展多能域系统能量高效稳定转换提供理论基础。

1 振荡扑翼波浪能发电装置组成及工作原理

振荡扑翼波浪能发电装置主要包括采集机构、液压转换系统和电能变换及储能系统三部分,如图 1 所示。采集机构由浮子、摇臂、液压缸和支撑平台组成,浮子和摇臂构成扑翼机构;液压转换系统由单向阀、溢流阀、蓄能器、油箱、液压马达和发电机组成;电能变换系统由二极管、变压器、电容、稳压管和蓄电池组成。支撑平台垂直固定于海洋底层,联系波浪采集系统与能量转换系统位置关系,支撑平台分为内外两部分。摇臂顶部与支撑平台铰接、摇臂底部与浮子固定连接;在垂直支撑平台和摇臂之间设有油缸,液压缸的活塞杆与摇臂铰接,液压缸的缸体与支撑平台铰接;液压系统、电能变换系统等设备安装在支撑平台密封舱室内。

振荡扑翼波浪能发电装置的能量转换原理是在波浪激励作用下,扑翼上下摆动而产生动能,使波浪能采集机构的摇臂压缩液压缸活塞杆产生往复机械运动,将扑翼的随机机械能转换为不稳定的高压液压能,实现能量的转换。液压系统的高压和低压

管线在马达进出口端形成压力差, 推动液压马达旋转, 将液压能转换为旋转机械能。液压马达通过联轴器带动发电机旋转, 发电机输出电压和电流将旋转机械能转换为不稳定的电能。通过降压、滤波和稳压处理产生稳定的电压和电流, 最终将稳定的电能存储到蓄电池中。该系统是集能量转换、发电、储能于一体的能源转换系统, 其设计原则是稳定可靠且高效地实现能量的转换与传递, 结合蓄能器与控制元件形成一个独立的海浪发电系统, 为海上平台提供分布式电源解决方案^[3]。

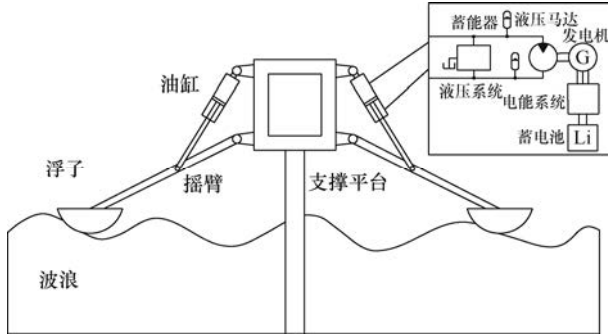


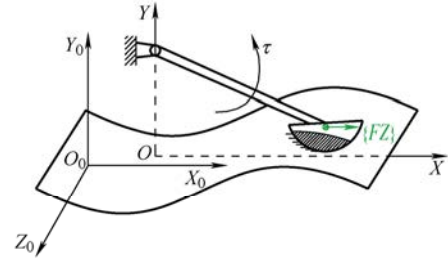
图1 振荡扑翼波浪能采集与转换系统基本组成

2 能量采集机理与采集机构

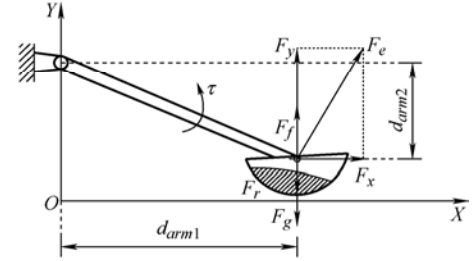
2.1 能量采集机理

为了使浮子可以同时做沉浮俯仰运动, 将浮子通过与摇臂固定连接后, 铰接于固定点, 成为回转机构。回转机构包括浮子和摇臂, 形成扑翼, 扑翼的末端绕着铰接点做弧形的沉浮俯仰运动。如图2所示, 建立扑翼-波浪空间坐标系, $\{O_0-X_0-Y_0-Z_0\}$; 扑翼垂直运动坐标系, $\{O-X-Y\}$; 浮子水平面坐标系 $\{FZ\}$ 。图中符号定义为 τ 为扑翼转矩; F_f 为浮子所受浮力; F_g 为扑翼重力; F_e 为波浪对扑翼的激励力, 即入射波对扑翼施加的力; F_x 为激励力的水平方向分力; F_y 为激励力的垂直方向分力; F_r 为波浪对扑翼的辐射力, 即在水中运动的扑翼引起的波浪辐射, 反过来对扑翼本身又产生作用力, 该影响称为波浪辐射力; F_a 为扑翼重力对波浪的作用力。根据规则波浪的运动特点, 对扑翼和波浪进行受力分析。

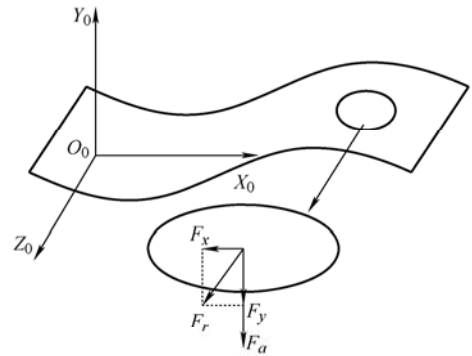
在扑翼中, 浮子质量远大于摇臂质量, 摇臂质量可以忽略不计, 故假设扑翼的质心在浮子质心处。波浪对浮子的各种作用力均为均布载荷, 可以将波浪的均布载荷等效为作用在浮子质心的集中力。设扑翼摆角为 θ , 由动量矩定理得到



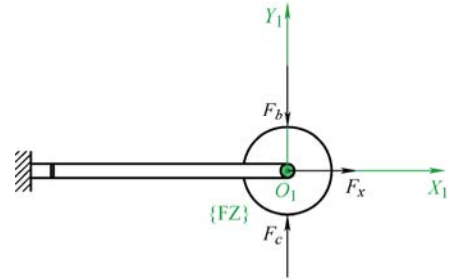
(a) 扑翼-波浪空间坐标系



(b) 扑翼垂直运动坐标系



(c) 波浪空间坐标系



(d) 浮子平面坐标系

图2 波浪-扑翼坐标系

$$\tau = J\ddot{\theta} = \tau_e + \tau_f - \tau_r - \tau_g \quad (1)$$

式(1)也可以写为

$$\tau = F_f d_{\text{arm1}} + F_x d_{\text{arm2}} + F_y d_{\text{arm1}} - F_r d_{\text{arm1}} - F_g d_{\text{arm1}} \quad (2)$$

在 $\{FZ\}$ 坐标系中, 波浪对浮子上下两侧的等效集中力的方向垂直于波浪速度方向, 浮子上下两侧的受力面积相等, 故有

$$F_b = F_c \quad (3)$$

基于振荡扑翼能量采集原理, 分析一个周期内

波浪对扑翼做功情况。将一个周期的正弦波浪(以 0 点为起点)分为四个区间,分别为 I、II、III 和 IV,波浪推动扑翼做沉浮俯仰运动,扑翼重心的运动轨迹如图 3 所示。分析四个区间扑翼的波浪力与速度方向,判断扑翼的能量采集状态。

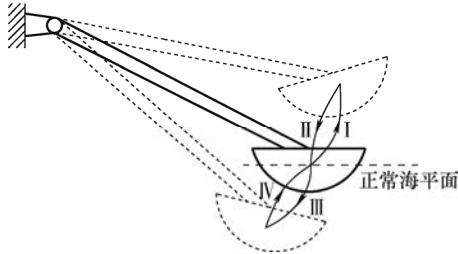


图 3 扑翼运动轨迹

四个区间内,扑翼的速度方向与受力情况如图 4 所示。在一个正弦波浪周期内,扑翼具有初始角速度。根据波浪中水质点速度分布,可以得到四个区间内浮子的受力情况分别为

$$\begin{aligned} \tau_{1,4} &= F_f(t)d_{arm1}(t) + F_x(t)d_{arm2}(t) + \\ &F_y(t)d_{arm1}(t) - F_r(t)d_{arm1}(t) - F_g(t)d_{arm1}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tau_{2,3} &= F_r(t)d_{arm1}(t) + F_g(t)d_{arm1}(t) - \\ &F_f(t)d_{arm1}(t) - F_x(t)d_{arm2}(t) - F_y(t)d_{arm1}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

在 I 区间扑翼运动方向和波浪激励力方向相同;在 II 区间扑翼运动方向和波浪激励力方向相反;在 III 区间扑翼运动方向和波浪力方向相反;在 IV 区间扑翼运动方向和波浪力方向相同。故在 I 和 IV 区间,扑翼采集能量;在 II 和 III 区间,扑翼消耗能量。所以在正常海平面至波峰和波谷至正常海平面的波浪运动阶段,波浪对扑翼做功,扑翼采集能量,将波浪能转换为动能和重力势能;在波峰至正常海平面和正常海平面至波谷的波浪运动阶段,波浪对扑翼不做功,扑翼消耗能量,将上一区间获得的重力势能转换为动能。

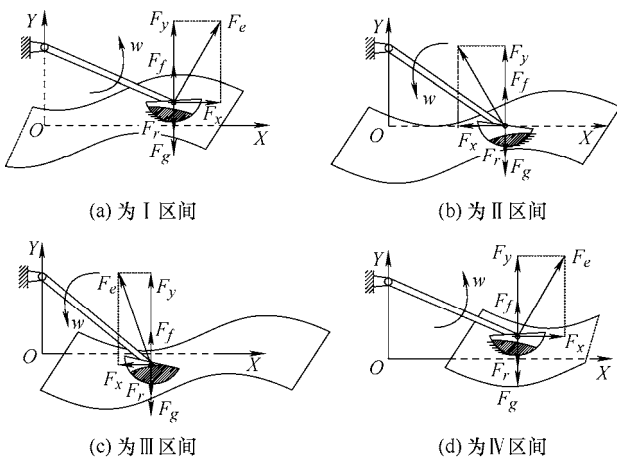


图 4 不同区间内扑翼受力方向与速度方向

2.2 采集机构的方案选择

波浪是不规则的和随机的,沿某一方向上的不规则波浪可以看作是大量单元规则波的组合,为了提高采集效率,波浪能装置的采集机构运动频率应与波浪激励频率相近,使采集机构与波浪运动处于耦合共振状态。

基于振荡扑翼能量采集原理,以曲柄摇块机构为基础,设计采集机构如图 5 所示。将曲柄摇块机构进行摇块偏置,设计振荡扑翼波浪能发电装置的采集机构。采集机构包括支撑平台、浮子、摇臂和液压缸,支撑平台通过基柱固定于海底,摇臂和液压缸铰接在支撑平台上。浮子在波浪的激励下做俯仰沉浮运动,带动摇臂绕铰接点旋转,浮子和摇臂共同构成扑翼结构,波浪水平方向力(俯仰力)和垂直方向力(沉浮力)均可以带动摇臂旋转。液压缸替换曲柄摇块机构中的连杆和摇块,液压缸的活塞杆作为新的连杆,连接摇臂。摇臂的旋转运动可以带动活塞杆伸缩,做直线往复运动,即将扑翼的周期性往复机械能转换为液压缸的液压能,完成波浪能的采集。

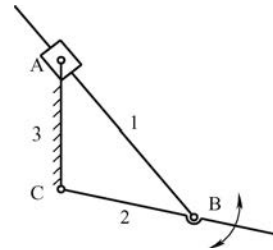


图 5 曲柄摇块机构

2.3 采集机构的参数计算

定义振荡扑翼波浪能采集系统坐标系,即全局坐标系 XOY (Z 轴垂直于纸面)和扑翼运动坐标系 $\{F\}$,建立其分析模型,由空间坐标变换技术,描述各运动点的相对位置关系。根据振荡扑翼波浪能采集系统的工作原理,建立其分析模型,其符号定义为 η_w 为实际波高, θ_{arm} 为摇臂运动角位移, ω 为摇臂角速度, x 为液压缸动长度, L_1 为摇臂长度, L_2 为摇臂上铰接点 A 与油缸上铰接点 B 之间的距离,波浪作用在扑翼上的力矩 τ_w , τ_{PTO} 为液压缸输出力矩, τ_G 为扑翼重力矩。系统坐标系如图 6 所示。

根据波浪情况、机构运动环境等多种约束条件对各机构组成的结构和尺寸参数进行设计,重点设计扑翼摇臂的长度和活塞杆铰接点的位置。

根据三角函数得到摇臂角位移 θ_{arm} 与摇臂长度 L_1 的关系

$$\theta_{\text{arm}} = \arcsin \frac{L_4}{L_1} - \arcsin \frac{L_4 - h}{L_1} \quad (6)$$

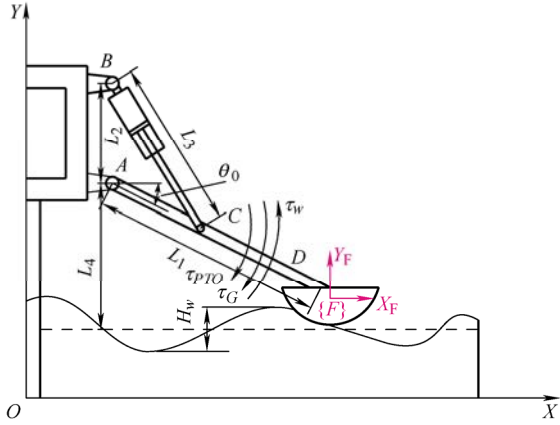


图 6 系统坐标系与机构受力分析

根据装置工作海域的海况确定波浪高度范围，以摇臂角位移最大为目标，由式(6)可以确定摇臂的长度。

根据文献[18]的研究，一个波浪周期内液压缸的输入能量 W 与活塞杆铰接点位置的关系

$$W = \int_0^T F_W \cdot \frac{L_1}{L_{AC}} \cdot \frac{L_2 + L_{AC} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right)}{L_3} - \frac{L_{AC} \cdot L_2 v \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right)}{L_3} \quad (7)$$

$$L_3^2 = L_2^2 + L_{AC}^2 + 2L_{AC}L_2 \cdot \sin\theta_0 \quad (8)$$

由铰接点位置 C 与摇臂 AD 的位置关系可得

$$\begin{cases} l_{BC\max} = \sqrt{(l_{AC} \sin \alpha)^2 + (l_{AB} + l_{AC} \cos \alpha)^2} \\ l_{BC\min} = \sqrt{(l_{AC} \sin \beta)^2 + (l_{AB} + l_{AC} \cos \beta)^2} \end{cases} \quad (9)$$

$$1.6l_{BC\min} - l_{BC\max} \geq 0 \quad (10)$$

式中, $l_{BC\max}$ 为 BC 最大长度; $l_{BC\min}$ 为 BC 最小长度; l_{AC} 为 AC 长度; l_{AB} 为 AB 长度; α 为摇臂与机架最小夹角; β 为摇臂与机架最大夹角。

采集机构结构参数如表 1 所示。

表 1 采集机构结构参数

参数名称	数值
浮子高度 H_w/m	3.5
浮子圆柱体高度/m	1
浮子圆柱体半径/m	2.5
摇臂长度 L_1/m	8.5
工作平台宽度/m	4
液压缸与摇臂铰接点长度 L_2/m	3
静水摇臂旋转角 $\theta_0/(^\circ)$	24.5
点 A 距静水面高度 L_4/m	5.4

3 液压转换系统

3.1 液压转换系统的方案选择

在一般波浪能发电装置中，当大波浪袭来时，液压缸将受到很大的上升波浪力作用，如果系统压力较小，活塞杆将快速运动至顶端，从而造成系统内油液冲击，增加损耗且不利于系统稳定；当波浪下降时，活塞杆自然伸出，此时波浪负载力可能很小，而液压系统压力却较大，这将导致活塞杆很缓慢伸出甚至无法伸出的状况出现，这种状况会影响能量的采集以及液压系统的稳定性^[7]。在设计过程中不仅要考虑采集机构所摄取能量的稳定性，也要保证液压马达的输出稳定性。基于这些，振荡扑翼波浪能发电装置液压转换系统应该考虑以下要求。

(1) 实际海况中波浪为不规则波，具有不稳定性，扑翼对液压缸可能产生较大冲击力，液压转换系统要能够提供一定强度的负载，以缓和 irregular 波浪带来的能量冲击。

(2) 在低等级波浪和高等级波浪下，液压管线均能保持稳定的压力，具有较强的海况适应能力。为了使振荡扑翼波浪能发电装置对不同的海况都具有良好的适应性，设计一种基于多腔液压缸及电磁阀联合控制的波浪能液压转换系统。

波浪能液压转换系统结构组成如图 7 所示。多腔液压缸包括有四个截面积不同的油液腔室；活塞杆末端设置有速度传感器和加速度传感器，用于检测活塞杆的瞬时运动状态以便于控制系统计算出其瞬时受力情况。在液压回路中设置有三个电磁阀，每个电磁阀对应连接一个液压缸腔室，输出端则分别连接高、低压管线。高压管线上设置有高压蓄能器，起到稳定系统压力和储存能量的作用；低压管线上设置有低压蓄能器，用于提供回油压力，提高系统稳定性。当波浪等级较高时，阀组控制液压缸

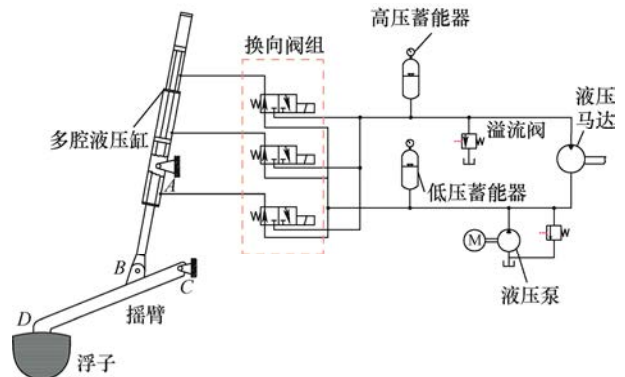


图 7 振荡扑翼波浪能液压转换系统

腔室油液压力增大,减少活塞杆的位移,稳定系统压力;当波浪等级较小时,阀组控制液压缸腔室油液压力减小,增大活塞杆的位移,稳定系统压力。通过多腔油缸和电磁阀组的联合控制,液压系统在面临不同等级的波浪时,可以将系统压力稳定在均值,提高系统的工作裕度,保证系统稳定性。

3.2 液压转换系统元件的参数计算

如图 8 为多腔液压油缸的结构简图,多腔液压缸包含四个液压腔室。为满足不同出力之间的切换,需保证液压缸的各腔室面积不同。

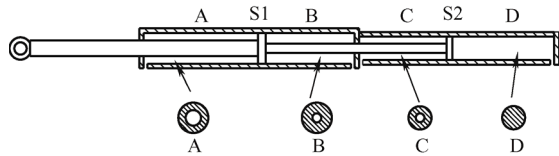


图 8 多腔液压缸结构简图

A1 腔和 A2 腔的液压缸内壁直径相同,二者之间通过活塞隔开,A1 腔中的活塞杆直径大于 A2 腔的活塞杆直径;A2 腔的液压缸内径又大于 A3 腔的液压缸内径且二者互不相通,但 A2 腔的活塞杆直径与 A3 腔的活塞杆直径相同;最后一个腔室与 A3 腔通过活塞 S2 隔开且最后一个腔室直接与油箱连通。

结合油缸结构简图,可得知其输出力为

$$F_s = (-P_{A1} \times S_{A1} + P_{A2} \times S_{A2} - P_{A3} \times S_{A3}) \times \eta \times \psi \quad (11)$$

式中, P_{A1} 、 P_{A2} 、 P_{A3} 为各腔室压力; S_{A1} 、 S_{A2} 、 S_{A3} 为各腔室油液横截面积; η 为液压缸效率,一般取 0.7~0.9; ψ 为液压缸负载率,通常取 0.5~0.7。

根据强度要求,活塞杆直径 d 需要满足

$$d \geq 1.13 \sqrt{\frac{F_{\max}}{[\sigma]}} \times \zeta \quad (12)$$

式中, F_{\max} 为液压缸最大输出力; $[\sigma]$ 为活塞材料的许用应力; ζ 为安全系数。

根据液压缸所受载荷大小和所选定的系统压力,计算液压缸内径时,需要满足

$$D = 1.13 \sqrt{\frac{F_{\max}}{P}} \quad (13)$$

式中, P 为系统供油压力。

当 A1、A3 腔通入低压油, A2 腔通入高压油时,多腔油缸的输出力可达到正常作业工况的最大值,记低压管线压力为 P_L ,高压管线压力为 P_H ,即

$$F_{\max} = (-P_L \times S_{A1} + P_H \times S_{A2} - P_L \times S_{A3}) \times \eta \times \psi \quad (14)$$

结合腔室面积公式, $S = \frac{(D^2 - d^2)\pi}{4}$ 可计算出各

腔室参数。

将充入蓄能器气腔内的氮气视为理想气体,根据理想气体状态方程有

$$P_0 V_0^m = P_1 V_1^m \quad (15)$$

式中, P_0 为预充气压力; V 为预充气体积; P_1 为任意时刻气腔压力; V_1 为任意时刻气腔气体体积; m 为多变指数, $m=1.4$ 。

忽略油液的可压缩性,蓄能器气腔内气体体积与油腔油液流量满足

$$q_a = -\frac{dV_0}{dt} \quad (16)$$

式中, q_a 为蓄能器端口油液流量。

蓄能器预充压力与高压管线压力相等,即 $P_0 = P_H$,则有

$$q_a = \frac{V_1 P_H}{m P_1} \quad (17)$$

忽略油液的压缩性和泄漏,则马达的流量连续方程为

$$q_M = D_M \omega_M = q_a \quad (18)$$

式中, ω_M 为变量马达的角速度; D_M 为变量马达的排量。

定量马达的输出转矩为

$$T_M = p_M D_M \eta_M \quad (19)$$

式中, p_M 为马达入口处压力; η_M 为定量马达的机械效率。

液压转换系统的元件参数如表 2 所示。

表 2 液压转换系统元件参数

参数名称	数值
管道内径/mm	25
管道壁厚/mm	3
高压溢流阀工作压力/MPa	25
低压溢流阀工作压力/MPa	65
马达排量 D_M /(mL·r ⁻¹)	9
马达额定转速 n_M /(r·min ⁻¹)	750
液压泵排量 V /(mL·r ⁻¹)	48.7
液压泵额定转速 n /(r·min ⁻¹)	750

3.3 电磁换向阀组控制策略

在实际液压缸运动过程中,各腔室压力不断进行高低压切换,使得液压缸输出力范围也随之变大,

以更好地匹配波浪作用力。各腔室内不同压力的选择由快速电磁阀开关控制^[19], 将腔室连接的电磁阀所有不同开关状态组合到一起, 即为电磁开关阀的规则表。

结合实际海域内波浪数据与浮子参数, 可初步计算出当随机波浪作用到浮子摇臂上时, 多腔液压缸所受到的最大力信号并记为 $F_{\max} = H$ 。

依据液压缸活塞杆所受力信号的最大幅值 H 来编制专家规则表。由于三个腔室均可连接两种压力管线, 故有 8 种电磁阀组合, 即得到 8 种不同的液压缸输出力^[11]。将每种开关阀组合按活塞杆输出力的大小和方向分类为 8 段区间值, 每个区间对应一组开关阀组。

当活塞杆受力向上时, 其输出力为

$$F_s = P_{A2} \times S_{A2} - P_{A1} \times S_{A1} - P_{A3} \times S_{A3} \quad (20)$$

活塞杆输出力最大时电磁阀控制 A1 腔连低压线路、A2 腔连高压线路、A3 腔连低压线路。将连接低压线的状态记为 1, 连接高压线的状态记为 2, 则上述电磁阀状态记为 121 组合, 输出力为 F_{121} , 依此类推可得在活塞杆速度向上时各组合力的大小关系

$$F_{222} < F_{221} < F_{122} < F_{121} \quad (21)$$

活塞杆向下运动时, 同理可求得

$$F_{212} > F_{211} > F_{112} > F_{111} \quad (22)$$

综上所述, 当波浪袭来时, 活塞杆受力依据大小被分配至各区间段内, 控制系统则选择一组与之相对应的开关阀组, 得到各波浪力信号所对应的液压回路。不同区间和不同开关阀组所构成的规则表, 即为电磁阀开关专家规则表, 如表 3 所示。

表 3 电磁阀开关专家规则表

腔室	液压缸输出力							
	F_{212}	F_{211}	F_{112}	F_{111}	F_{222}	F_{221}	F_{122}	F_{121}
A1	2	2	1	1	2	2	1	1
A2	1	1	1	1	2	2	2	2
A3	2	1	2	1	2	1	2	1

4 电能变换及储能系统

4.1 电能变换及储能系统的方案选择

振荡扑翼波浪能发电装置拟作为蓄电池充电

站, 分布广泛, 可向偏远海岛和海上电动艇提供灵活的充电方案。但经过液压变换系统产生的电能为交流电, 并且存在电压过高、幅值不稳、频率波动和压力波动的情况, 无法直接输入蓄电池中, 故设计振荡扑翼波浪能发电装置电能变换与储能系统。

电能变换与储能系统根据蓄电池组的额定电能需求, 选用三相永磁同步发电机, 其输出的交流电经三相不控整流桥和滤波电容转变为具有脉动的直流电, 再通过稳压和升降压处理调整为满足需求的稳定直流电并输出至充电储能单元(蓄电池组)中。如图 9 所示为该波浪能发电装置的电能变换系统组成, 主要包含三相整流单元、滤波稳压单元、DC/DC 变换单元、充电储能单元等。

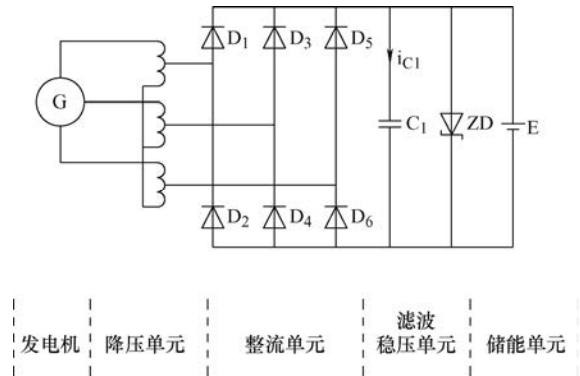


图 9 电能转换系统电路图

4.2 电能变换及储能系统元件的参数计算

发电机为三相永磁同步发电机, 采用星形连接法, 则电动机相电压 $U = E$ 。

发电机在额定功率下相电流

$$I = \frac{P_G}{\sqrt{3}U\phi} = \frac{P_G}{\sqrt{3}E\phi} \quad (23)$$

式中, ϕ 为输入功率因数。

变压器中性点电压及各相电压

$$U_n = \frac{1}{3}(U_{sA} + U_{sB} + U_{sC})$$

$$\begin{cases} U_a = U_{sA} - U_n \\ U_b = U_{sB} - U_n \\ U_c = U_{sC} - U_n \end{cases} \quad (24)$$

变压器一次侧相电压有效值

$$U_{\text{rms(in)}} = \frac{\sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2}}{3} \quad (25)$$

变压器二次侧相电压有效值

$$U_{\text{rms(out)}} = KU_{\text{rms(in)}} \quad (26)$$

蓄电池充电电流

式中, K 为变压比。

变压器一次侧电流有效值

$$I_{\text{rms(in)}} = \frac{\sqrt{I_{\text{sA}}^2 + I_{\text{sB}}^2 + I_{\text{sC}}^2}}{3} \quad (27)$$

变压器二次侧电流有效值

$$I_{\text{rms(out)}} = \frac{KI_{\text{rms(in)}}}{\text{eff}} \quad (28)$$

式中, eff 为变压器传输效率。

整流桥输出电压 U_0 的大小等于三相相电压的上下包络线间的垂直距离, 即每一时刻最大一个线电压的值。其脉动较小, 平均值为

$$U_0 = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{2}U_a \sin(\omega t + 30^\circ) d(\omega t) = 2.34U_{\text{rms(out)}} \quad (29)$$

输出电流 i_R 的平均值为

$$I_R = \frac{U_0}{R_L} = 2.34 \frac{U_{\text{rms(out)}}}{R_L} \quad (30)$$

式中, R_L 为整流桥右侧负载等效电阻。

滤波电容输出电压

$$\dot{U}_c = \frac{I_R}{C_{\text{cap}}} \quad (31)$$

式中, C_{cap} 为电容容量。

稳压二极管输入电压

$$U_z = U_c - RI_{\text{ZD}} \quad (32)$$

式中, R 为限流电阻, I_{ZD} 为稳压二极管输入电流。

稳压二极管输入电流, 分为三个阶段

$$I_{\text{ZD}} = \begin{cases} \frac{U_c + U_z}{R_{\text{on}}} - \frac{U_z}{R_{\text{off}}} & U_c < -U_z \\ \frac{U_c}{R_{\text{off}}} & -U_z \leq U_c < U_f \\ \frac{U_c - U_f}{R_{\text{on}}} + \frac{U_f}{R_{\text{off}}} & U_c \geq U_f \end{cases} \quad (33)$$

式中, U_z 即为稳压二极管稳定电压, U_f 为正向电压降, R_{on} 为导通状态电阻, R_{off} 为未导通状态电阻。

蓄电池充电电压

$$U_{\text{Li}} = U_z \quad (34)$$

$$I_{\text{Li}} = \frac{U_z - U_{\text{ocv}}}{R_{\text{ohm}}} \quad (35)$$

式中, U_{ocv} 为电池端电压, R_{ohm} 为电池内阻。

蓄电池输入功率为

$$P_{\text{Li}} = U_{\text{Li}} I_{\text{Li}} \quad (36)$$

电能变换及储能系统的元件参数如表 4 所示。

表 4 电能变换及储能系统元件参数

参数名称	数值
发电机额定功率 P_G/kW	30
发电机额定转速 $n_G/(\text{r/min})$	1 000
发电机频率/Hz	50
变压器额定容量/(kV · A)	20
变压器额定电压/V	220
整流桥最大工作电流/A	150
整流桥最大工作电压/V	400
稳压器额定容量/(kV · A)	20
稳压器输出电压/V	220
锂电池标称电压/V	220
单个锂电池容量/(A · h)	2.3
锂电池个数/个	65

5 系统建模与仿真研究

5.1 系统建模

基于功率键合图理论, 通过子系统间的连接关系确定耦合参数, 将每个子系统之间的流变量和势变量的传递、分配、调整、转换表示出来^[20], 建立系统的参数关联关系图, 利用 AMESim 软件建立机电液多能域联合仿真模型, 设置各元件参数, 对系统工作状态进行仿真分析。

根据文献[4], 南海海域波浪波浪平均周期约为 4~9 s, 波高为 0.5~4 m。选取该海域三级和四级波浪作为系统的输入信号, 波浪具体参数如表 5 所示。系统机-液-电联合仿真模型如图 10 所示。

表 5 波浪参数表

等级	波幅/m	周期/s
三级	0.4	3.5
四级	1	5.4

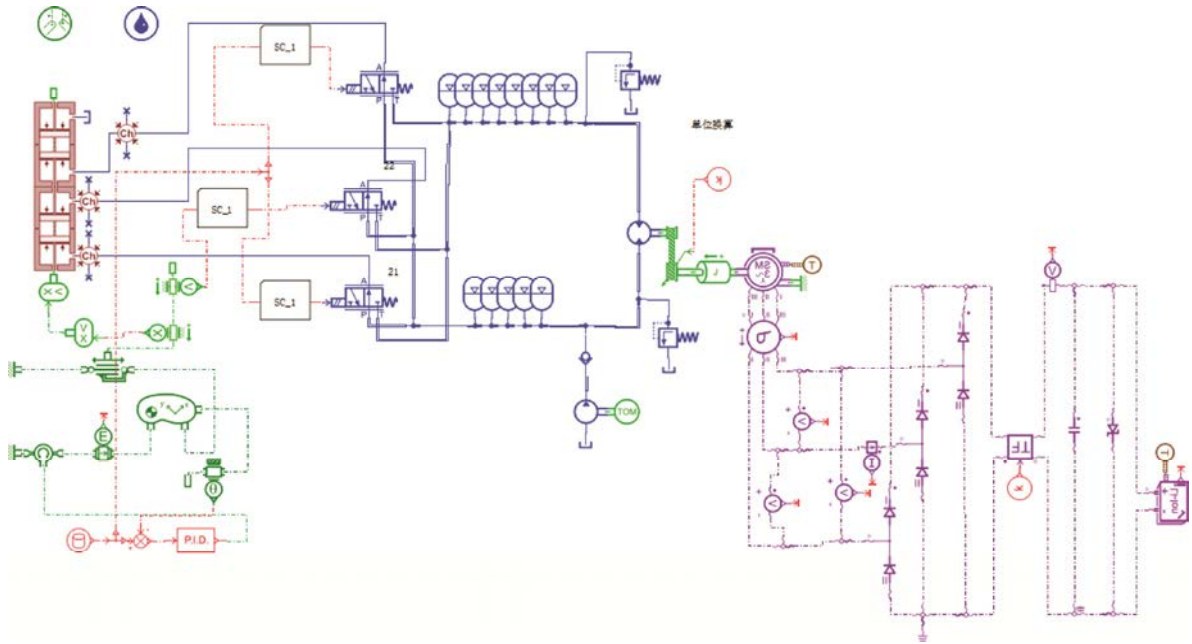


图 10 系统机-液-电联合仿真模型

5.2 系统仿真分析

在 AQWA 软件中搭建振荡扑翼波浪能发电装置采集机构物理仿真模型, 对振荡扑翼波浪能发电装置采集机构与波浪的耦合进行仿真。海洋环境设置为水深 30 m, 水域长度和宽度均为 80 m, 海水密度 $\rho=1\,025\text{ kg/m}^3$, 波浪入射角度为 0° 。由于 AQWA 软件不能模拟液压系统的运动, 故根据油缸反作用力和铰接点回转阻力对铰接点施加等效铰接阻尼 30 000 N·m/rad, 模拟液压系统阻尼。

根据三级和四级规则波浪参数设定波浪的波高、周期和波速, 波浪入射方向与 x 轴平行, 模拟行波的入射。在入射波的作用下, 振荡扑翼绕着摇臂铰接点转动, 其角位移的幅度与波浪高度有关。波浪高度如图 11 所示, 振荡扑翼波浪能发电装置采集机构摇臂摆动角度如图 12 所示。从图 11 和图 12 中可以看出摇臂的摆动与波浪的运动具有一致性。

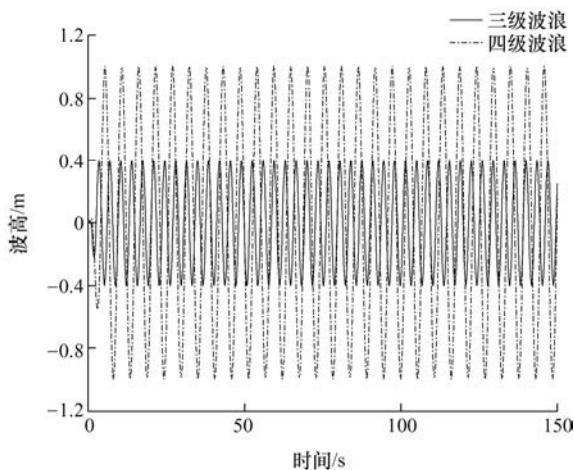


图 11 波浪高度

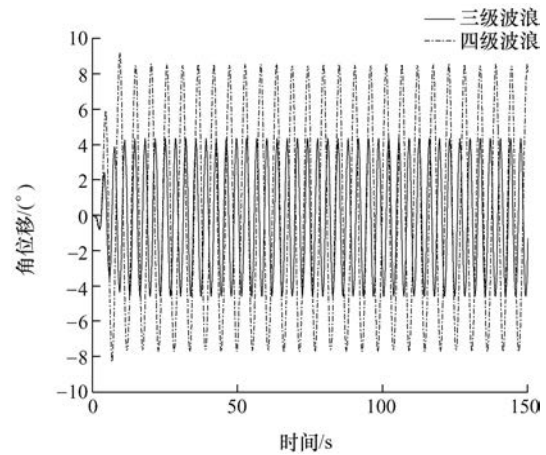


图 12 摇臂摆动角度

在 AMESim 中进行液压能量转换系统的建模时, 利用浮子在波浪作用下产生的运动特征对摇臂的摆动速度和转角进行控制^[21], 从而实现摇臂带动活塞杆做伸缩运动, 通过液压系统进行能量传递, 最后带动液压马达和电动机的运转。液压元件参数如表 4 所示。三级波浪作用下的高低压管线压力如图 12 所示, 四级波浪作用下的高低压管线压力如图 13 所示, 液压马达转速如图 15 所示。

从图 13 中可以看出, 在三级波浪作用下的高压管线压力经过约 80 s 的时间最终稳定在 200 MPa 左右, 低压管线稳定在 65 MPa 左右, 高低压管线压差为 135 MPa; 从图 14 中可以看出, 在四级波浪作用下的高压管线压力经过 30 s 的时间最终稳定在 240 MPa 左右, 低压管线压力稳定在 60 MPa 左右。高低压管线压差为 180 MPa; 从图 15 中可以看出, 在三级和四级波浪作用下液压马达的转速分别为

410 r/min 和 490 r/min。随着波浪等级的增加, 摇臂摆动角度增加, 管线压差也随之增加, 液压马达转速增加, 但是液压系统的管线压力均能稳定, 液压马达均能保持稳定转速, 能够满足发电机的发电要求。

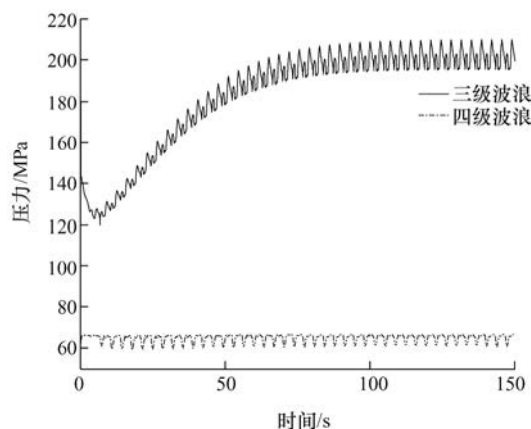


图 13 三级波浪作用下管线压力

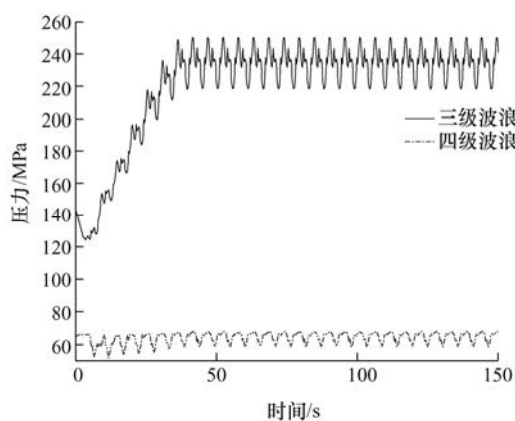


图 14 四级波浪作用下管线压力

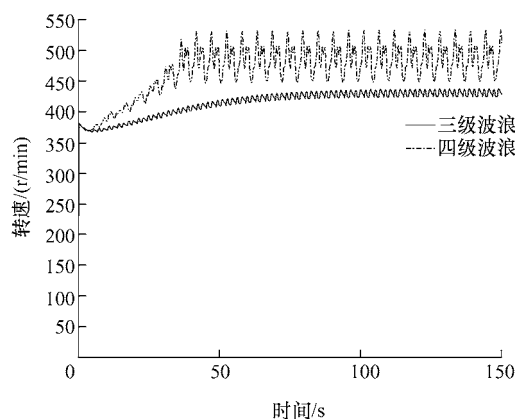


图 15 液压马达转速

振荡波浪能电能转换系统主要是将液压马达输出给发电机的机械能, 转换为可供锂电池稳定存储的电能。电能变换及储能系统的元件参数如表 5 所示, 发电机的输出功率如图 16 所示, 蓄电池组的充

电电压如图 17 所示, 蓄电池充电电量百分比如图 18 所示。

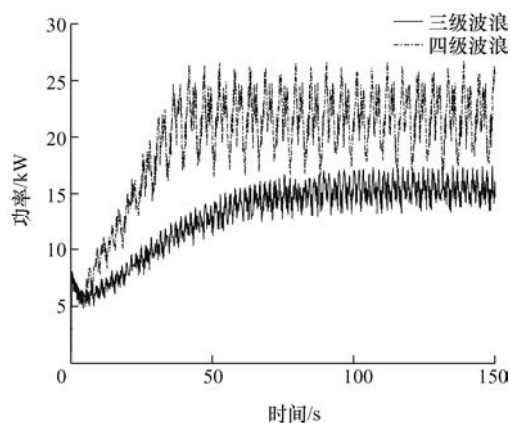


图 16 发电机输出功率

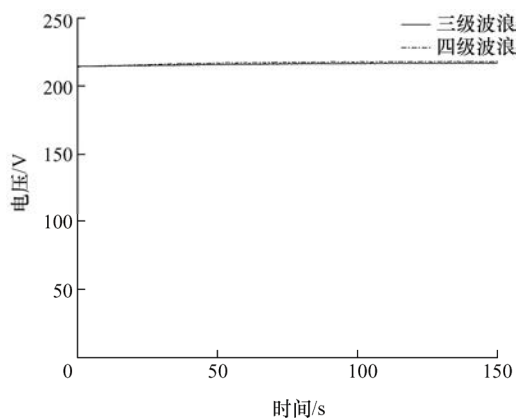


图 17 蓄电池组充电电压

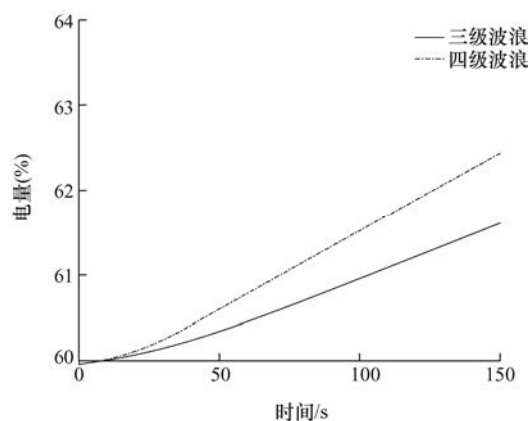


图 18 蓄电池组充电百分比

从图 16 可以看出, 在三级波浪作用下发电机的输出功率均值为 15.52 kW, 在四级波浪作用下的发电机的输出功率均值为 22.06 kW, 由于四级波浪作用下的高低压管线压差增大, 液压马达输出转矩波动增加, 导致四级波浪作用下的发电机输出功率波动较大。经过电能变换及储能系统的整流稳压, 在三级和四级波浪作用下蓄电池组的充电电压均能稳

定在 220 V。采用恒压充电的方式对初始容量约为 60% 的蓄电池组进行充电储能，在三级和四级波浪作用下的蓄电池组的储能百分比 150 s 能够分别达到 1.5% 和 2.6%。

5.3 系统效率计算

采集机构的采集功率取决于摇臂所受力矩和角速度，则采集机构瞬时采集功率可以表示为

$$P_{\text{ext}}(t) = \tau_{\text{PTO}} \omega_{\text{arm}}(t) = C_{\text{PTO}} \omega_{\text{arm}}^2 \quad (37)$$

式中， τ_{PTO} 为液压系统作用到摇臂上的力矩， $\tau_{\text{PTO}} = C_{\text{PTO}} \omega_{\text{arm}}$ ； C_{PTO} 为液压系统作用到摇臂上的等效阻尼。

采集机构平均采集功率为

$$\bar{P}_{\text{ext}} = \frac{1}{t} \int_0^t P_{\text{ext}}(t) dt \quad (38)$$

发电机的平均输出功率为

$$\bar{P}_{\text{G}} = \frac{1}{t} \int_0^t U(t) I(t) dt \quad (39)$$

液压泵用于向系统泵油，提供额外的液压油液补充系统压力，也属于系统动力源，液压泵的平均输出功率为

$$\bar{P}_{\text{t}} = \frac{1}{t} \int_0^t p q_{\text{t}} dt \quad (40)$$

能量转换系统的输出功率为

$$P_{\text{out}} = \bar{P}_{\text{G}} - \bar{P}_{\text{t}} \quad (41)$$

蓄电池平均输入功率为

$$\bar{P}_{\text{L}} = \frac{1}{t} \int_0^t U_{\text{L}}(t) I_{\text{L}}(t) dt \quad (42)$$

则振荡扑翼波浪能发电装置的波浪能—发电机能量转换效率，即发电效率为

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{\bar{P}_{\text{ext}}} = \frac{\bar{P}_{\text{G}} - \bar{P}_{\text{t}}}{\bar{P}_{\text{ext}}} \quad (43)$$

通过仿真结果分析可得，不同海况下装置的储能效率，如表 6 所示。

表 6 不同海况下系统储能效率

波浪	采集功率/kW	输入功率/kW	发电机功率/kW	转换效率(%)
三级	18.99	3.82	15.52	61.5
四级	27.74	3.64	22.06	66.2

5.4 试验研究

为了验证振荡扑翼波浪能发电系统原理的合理

性和可行性，检验该系统的实际能量转化效率，开发制造试验样机。

根据等效比例尺，将振荡扑翼波浪能发电装置采集机构等比缩小 100 倍，搭建仿振荡扑翼波浪能发电装置试验平台。设计波浪运动机械式模拟器，用于模拟波浪激励环境，按照零部件设计尺寸等比缩小进行制造加工或者选型，依次安装调试波浪运动机械模拟器、波浪能采集机构、液压转换系统和电能变换与储能系统，试验平台与设计方案具有运动相似和动力相似关系。仿振荡扑翼波浪能发电装置试验平台如图 19 所示。

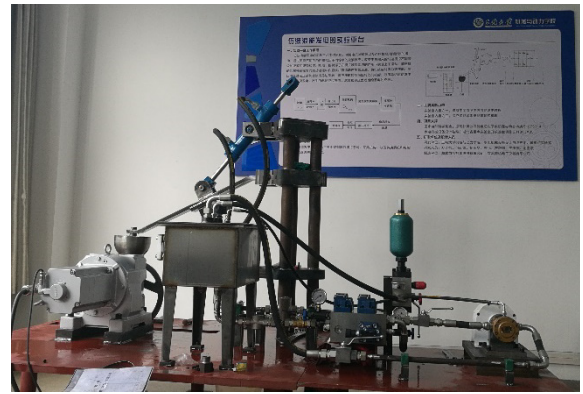


图 19 仿振荡扑翼波浪能发电装置试验平台

试验平台包括波浪运动机械式模拟器、采集机构等机械元件。波浪运动机械式模拟器主要由可变频减速电动机和凸轮组成。通过更换不同结构参数的凸轮用于模拟不同等级波浪，凸轮旋转使浮子上下运动模拟波浪对浮子的作用，调节发电机的工作频率模拟波浪的周期变化。由于采集机构等比缩小后，浮子和摇臂对液压缸施加的重力小于液压缸的液压力，不能对液压缸活塞杆进行拉伸，故选用刚度为的弹簧安装在摇臂上模拟真实环境下的浮子和摇臂的重力作用。

运行仿振荡扑翼波浪能发电装置试验平台，电动机运行平稳，摇臂稳定的上下摆动，通过液压油观察口以及液压压力表观察到液压油单向流动，系统压力稳定。试验得到减速器输出转速、液压转换系统压力、液压马达转速和稳压电压如表 7 所示。

表 7 试验平台测量参数

试验参数	减速器输出转速/(r/min)	液压转换系统压力/MPa	液压马达转速/(r/min)	稳压后电压/V
数值	11	7.5	695	24.1

试验平台的各项数据表明，平台的各种性能满足要求，系统能够稳定运行，证明了振荡扑翼波浪能发电装置方案设计的合理性。

6 结论

针对波浪运动的随机特性,提出一种带有多腔液压油缸的振荡扑翼波浪能发电装置设计方案,基于 AMESim 仿真软件搭建了包含机-液-电的多能域模型,分析研究了振荡扑翼波浪能发电系统在不同波况下的能量转换效率,试验验证了发电装置的可行性,得出以下结论。

(1) 液压回路中设置高低压蓄能器,并结合多腔油缸,可实现将随机波浪信号按 8 种离散区间进行能量吸收,增加了系统对波浪的适应性,减少能量损失,确保系统稳定高效地实现能量转换。

(2) 仿真结果表明所设计的振荡扑翼波浪能发电装置,在不同波浪作用下,液压系统能够稳定系统压力,液压马达稳定输出能量,电能变换及储能系统稳定工作,将电能稳定的储存在蓄电池中;在三级波浪和四级波浪作用下系统发电效率分别达到了 61.5% 和 66.2%;基于等效比尺,搭建振荡扑翼波浪能试验平台,证明了振荡扑翼波浪能发电装置的可行性,系统组成的有效性。

参 考 文 献

- [1] 崔守军, 蔡宇, 姜墨骞. 重大技术变革与能源地缘政治转型[J]. 自然资源学报, 2020, 35(11): 2585-2595.
CUI Shoujun, CAI Yu, JIANG Moqian. Major technological change and energy geopolitical transformation[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(11): 2585-2595.
- [2] POURARSHAD M, NOOROLLAHI Y, ATABI F, et al. Sustainable energy system modelling with a high renewable energy penetration rate for rich oil regions[J]. International Journal of Sustainable Energy, 2021, 40(5): 494-513.
- [3] 韩林生, 王静, 高佳, 等. 山东褚岛北部海域波浪能资源分析[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 165-171.
HAN Linsheng, WANG Jing, GAO Jia, et al. Analysis of wave energy resources in the northern waters of Chu Island, Shandong[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(2): 165-171.
- [4] 李学民. 浅析波浪能发电的现状与发展[J]. 上海节能, 2021(1): 38-42.
LI Xuemin. Analysis on the status quo and development of wave power generation[J]. Shanghai Energy Conservation, 2021(1): 38-42.
- [5] ANTÓNIO F, de FALCÃO. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 899-918.
- [6] 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 Yaqun, YOU Yage, SHENG Songwei, et al. Analysis and optimization of hydrodynamic performance of eagle-type wave energy power generation device[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(5): 533-540.
- [7] 盛松伟, 游亚戈, 张亚群, 等. 漂浮式波浪能装置能量转换系统研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(24): 141-146.
SHENG Songwei, YOU Yage, ZHANG Yaqun, et al. Research on power take-off system of floating wave power device[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24): 141-146.
- [8] 杨绍辉, 何宏舟, 陈沪, 等. 阵列筏式波浪能发电系统设计与试验研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 57-62.
YANG Shaohui, HE Hongzhou, CHEN Hu, et al. Design and experimental study of array raft wave energy power generation system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 57-62.
- [9] 方子帆, 马振豪, 高术, 等. 多节漂浮型机械式波浪能发电装置的研制[J]. 太阳能学报, 2015, 36(10): 2518-2523.
FANG Zifan, MA Zhenhao, GAO Shu, et al. Development of multi-section floating mechanical wave energy power generation device[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(10): 2518-2523.
- [10] 宋保维, 丁文俊, 毛昭勇. 基于波浪能的海洋浮标发电系统[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 139-143.
SONG Baowei, DING Wenjun, MAO Zhaoyong. Conversion system of ocean buoys based on wave energy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 139-143.
- [11] 高红, 梁睿智. 波浪能捕获液压系统的特性研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 180-187.
GAO Hong, LIANG Ruizhi. Performance investigation of hydraulic wave energy capture system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18): 180-187.
- [12] 叶寅, 王坤林, 张亚群, 等. 波浪能装置蓄能稳压系统数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(8): 30-35.
YE Yin, WANG Kunlin, ZHANG Yaqun, et al. Numerical simulation research on energy storage system of wave energy converter[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(8): 30-35.

- [13] YU Z, ZHENG Z, YANG X, et al. Dynamic analysis of propulsion mechanism directly driven by wave energy for marine mobile buoy[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(4): 710-715.
- [14] 鲍经纬, 李伟, 张大海, 等. 基于液压传动的浮力摆式波浪能发电系统稳压恒频控制[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(9): 18-22.
BAO Jingwei, LI Wei, ZHANG Dahai, et al. A control method for inverse-pendulum wave power generation system based on hydraulic transmission to maintain pressure and ensure constant frequency[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(9): 18-22.
- [15] 刘颖昕, 秦健, 刘延俊. 液压蓄能是波浪能发电装置关键参数分析[J]. *山东大学学报*, 2021, 51(6): 1-8.
LIU Yingxin, QIN Jian, LIU Yanjun. The analysis of key parameters of hydraulic energy storage system of wave energy converter[J]. *Journal of Shandong University*, 2021, 51(6): 1-8.
- [16] YANG Yiqing, CHEN Peihao, LIU Qiang. A wave energy harvester based on coaxial mechanical motion rectifier and variable inertia flywheel[J]. *Applied Energy*, 2021, 302: 117528.
- [17] 谢永慧, 姜伟, 吕坤, 等. 振荡扑翼流场能量采集研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2016(20): 5564-5574.
XIE Yonghui, JIANG Wei, LÜ Kun, et al. Research progress on energy acquisition of oscillating flapping-wing flow field[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(20): 5564-5574.
- [18] 方子帆, 覃琳, 刘进, 等. 波浪与振荡扑翼流固耦合数值分析与研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(12): 349-355.
FANG Zifan, QIN Lin, LIU Jin, et al. Numerical analysis and study of fluid-structure interactions between wave and oscillating flapping wings[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(12): 349-355.
- [19] 钟麒, 谢耿, 汪谢乐, 等. 多电压复合驱动的高速开关阀性能研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(4): 191-201.
ZHONG Qi, XIE Geng, WANG Xiele, et al. Performance analysis of high speed on/off valve by multi-voltages compound excitation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(4): 191-201.
- [20] 谢雪媛. 振荡扑翼波浪能发电装置仿真平台研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2022.
XIE Xueyuan. Research on the simulation platform of the oscillating flapping-wing wave energy converter[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2022.

作者简介: 方子帆, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。
主要研究方向为机械设计及理论。

E-mail: fzf@ctgu.edu.cn

朱畅, 男, 1998 年出生。主要研究方向为机械设计及理论。

E-mail: 546868446@qq.com