

波浪能装置蓄能稳压系统数值模拟研究

叶 寅^{1~3}, 王坤林^{1~3}, 张亚群^{1~3}, 黄圳鑫^{1~3}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640)

摘 要: 对波浪能液压蓄能系统进行研究, 分别建立蓄能系统充油和放油过程的数学模型, 进行数值模拟计算, 得到整个蓄能过程中压力流量以及功率对时间的变化曲线, 并与实海况波浪能装置试验数据进行对比, 验证所得到的数值模拟结果的准确性。

关键词: 波浪能; 能量转换系统; 蓄能系统; 等温过程; 绝热过程

中图分类号: P743.2; TK79 **文献标志码:** A

0 引 言

波浪能归根结底是由太阳能转化而来, 因此可以说是无限可再生的^[1]。波浪能不仅资源丰富^[2]、能流密度大^[3], 而且在能量转换过程中基本不产生污染, 这些优势使波浪能发电装置(wave power converter, WEC)成为沿海国家研究的热点。目前, 波浪能装置已经有超过1000多种专利, 装置类型众多^[4]。根据波浪能装置发电原理可将波浪能发电装置分为2个部分: 1) 能量俘获系统, 主要作用是将俘获波浪能转换为浮子的机械能; 2) 能量转换系统, 又称为动力摄取系统(power take off, PTO), 将浮子的机械能最终转换为电能。根据PTO系统的不同可将波浪能装置分为机械式、液压式、水力透平式、空气透平式、直线电机式、磁流体电机式等^[5-7]。

波浪具有出力大和速度低的特点^[8], 而液压转换系统刚好可以适应这些特性。因此, 目前世界上大多数波浪能装置都采用液压式的能量转换系统。为实现较小波浪工况下高效发电, 较大浪况下连续稳定发电, 通常在液压系统中加入蓄能稳压系统, 以便使液压系统受到波浪的冲击更小, 波浪功率更平稳, 发电更加稳定。

本文针对液压式PTO系统蓄能稳压系统进行数值

研究, 并且应用波浪能装置实海况试验数据对数值模拟结果进行验证。

1 蓄能系统的分类及概述

当前常见的储能方式有: 热力储能、电磁储能、化学储能和机械储能^[9], 其中热力储能又分为显热储能和相变储能; 电磁储能包括超导储能、电容储能、超级电容器储能; 化学储能主要是指各类蓄电池, 例如铅酸、镍隔和锂离子等电池储能。机械储能主要分为飞轮、压缩气体储能、抽水蓄能。飞轮储能和压缩气体储能在小功率储能以及可再生能源领域应用广泛。从能量转换的角度来看, 波浪能装置主要是将机械能转换为电能, 因此机械储能比较适合应用在波浪能发电装置中, 其中飞轮主要应用在机械式波浪能装置储能, 压缩气体储能一般应用于液压式的波浪能装置中。

液压式波浪能装置应用的压储能元件是蓄能器。蓄能器在液压系统中应用广泛, 主要起储能、稳压、补偿及消除脉动等作用^[10]。由于波浪能的不稳定, 其发出的电也不稳定, 为解决这个问题, 采用蓄能器这一液压元件。这样即使在波浪比较小时, 装置也能通过蓄能器所储存的能量来发电, 保证装置发电的稳定性和持续性。

蓄能器按加载方式可分为弹簧式、重锤式和皮囊

收稿日期: 2018-02-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项A类资助项目(XDA13040202); 海洋可再生能源资金项目(GHME2016YY01); 广州市科技计划(201607010226); 广东省自然科学基金(2015A030313717)

通信作者: 叶 寅(1986—), 男, 硕士、助理研究员, 主要从事波浪能开发与利用方面的研究。yeyin@ms.giec.ac.cn

式。弹簧式蓄能器依靠压缩弹簧把机械系统中的过剩能量转换成弹簧的势能存储起来,需要时再释放出来,其结构简单。重锤式蓄能器是通过提升加载在密封活塞上的重块把液压系统中的压力能转化为重力势能积蓄起来。皮囊式的蓄能器是通过压缩气体来完成能量储存的,使用时首先向蓄能器中冲入预定压力的气体,当系统的压力超过蓄能器内部压力时,油液压缩气体将油液中的压力能转化为气体的内能,当系统的压力低于蓄能器内部压力时,油液在高压气体的作用下流向外部释放能量。波浪能装置一般应用皮囊式的蓄能器居多。

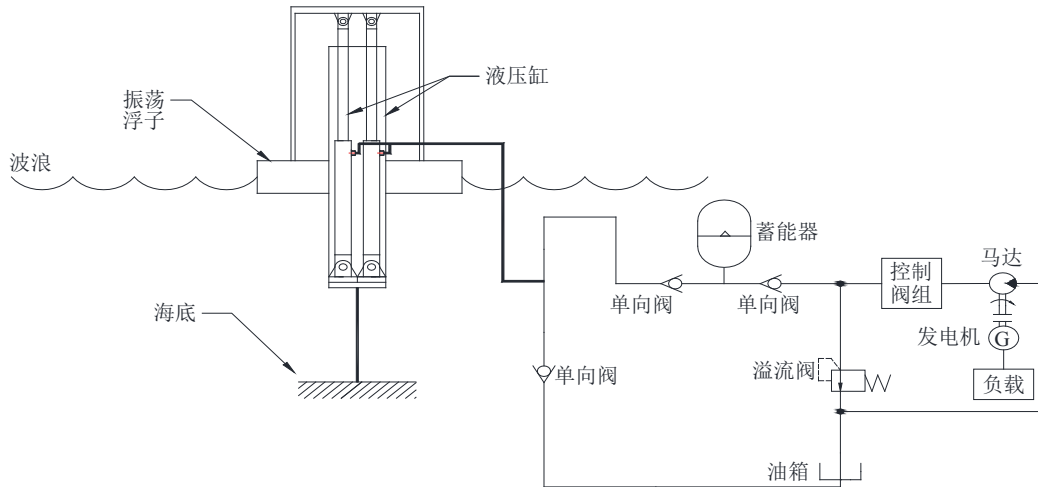


图1 波浪能装置液压发电原理图

Fig. 1 Hydraulic system schematic diagram of WEC

3 蓄能稳压过程数学模型建立

蓄能器的工作过程是:先对气囊里面冲入一定量的工质气体(一般为 N_2),当油腔冲入液压油后,气囊的气体被压缩,压力升高;当油被释放出来时,囊中的气体膨胀,压力降低,这是整个蓄能器的工作过程。在这里液压油冲击马达发电时,蓄能器出口流量较大,流速较快,而进入蓄能器的流量相对较小,因此可近似假设,蓄能器在达到启动压力释放液压油过程中,由液压缸吸入蓄能器的液压油可忽略不计,这样蓄能器可分成充油过程和放油过程2个独立的过程。

3.1 充油过程数学模型

充油过程,蓄能器中的气体热力学过程可示为:

$$p_0 V_0^\alpha = p_{a1} V_{a1}^\alpha = p_{q1} V_{q1}^\alpha \quad (1)$$

式中, p_0 ——初始时刻蓄能器气体的压力; V_0 ——初始时刻蓄能器气体的体积; p_{a1} ——充油时蓄能器瞬时

2 波浪能液压系统工作原理

波浪能装置液压发电原理如图1所示。首先在波浪的作用下,连接有液压缸的浮子往复振动,带动液压缸往复运动,将波浪能转换为液压缸的动能,液压往复运动,将低位油箱中的液压油泵入高压蓄能器,将液压缸的动能转换为液压能,等到蓄能器蓄积到一定压力时,位于蓄能器和液压马达之间的控制阀组打开,液压马达在高压液压油的驱动下高速旋转,将液压能转换成旋转机械能,马达与发电机用联轴器连接,将马达的高速旋转将带动发电机,将旋转机械能转换为电能。

压力; V_{a1} ——充油时蓄能器中气体体积; p_{q1} ——控制阀开启时蓄能器的压力; V_{q1} ——控制阀开启时蓄能器中气体体积; α ——气体指数,在蓄能器充油过程中,由于进油速度较慢,蓄能器中气体压缩时间较长,可近似为等温热力过程过程,即 $\alpha = 1$ [11]。

充油过程中蓄能器进入蓄能器的流量,是蓄能器油腔的体积变化率, $Q_{a1} = \Delta V_y / \Delta t = -\Delta V_{a1} / \Delta t$ (其中 Q_{a1} 为充油过程中蓄能器的流量; V_y 为蓄能器油腔的体积; Δt 为时间间隔),对时间取微元,可得:

$$Q_{a1} = -\frac{dV_{a1}}{dt} \quad (2)$$

由液压缸和蓄能器之间的连续性方程可得:

$$Q_{ye} = Q_{a1} + \frac{(V_0 - V_{a1}) dp_{a1}}{E_a dt} \quad (3)$$

式中, Q_{ye} ——液压缸的平均流; E_a ——液压油有效体积弹性模量。

输入蓄能器的实时功率和一次充油过程输入蓄能

器的总能量分别为:

$$P_{in} = Q_{a1} p_{a1} \quad (4)$$

$$W_{in} = \int Q_{a1} p_{a1} dt \quad (5)$$

式中, P_{in} ——蓄能器的实时输入功率; W_{in} ——蓄能器的输入能量。

3.2 放油过程数学模型

放油过程中, 由于液压流出速度比较快, 蓄能器中的气体来不及与外界进行热交换, 因此可假定蓄能器中气体的热力过程为绝热压缩过程, 即 $\alpha = 1.4$ [11], 因此可得:

$$p_{q1} V_{q1}^\alpha = p_{a2} V_{a2}^\alpha = p_{b1} V_{b1}^\alpha \quad (6)$$

式中, p_{a2} ——蓄能器放油时的工作压力; V_{a2} ——放油时蓄能器中气体的体积; p_{b1} ——放油结束时蓄能器的压力; V_{b1} ——放油时结束时蓄能器中气体的体积。

放油时蓄能器的流量可示为:

$$Q_{a2} = \frac{dV_{a2}}{dt} \quad (7)$$

式中, Q_{a2} ——放油时蓄能器的流量。

将式(6)代入式(7)可得:

$$Q_{a2} = -\frac{1}{1.4} V_{q1} p_{q1}^{\frac{1}{1.4}} p_{a2}^{-\frac{1.2}{0.7}} \frac{dp_{a2}}{dt} \quad (8)$$

蓄能器和液压马达之间的流量连续性方程:

$$Q_{a2} = Q_m + \frac{(V_0 - V_{a2})}{E_a} \frac{dp_{a2}}{dt} + C_{lp} p_{a2} \quad (9)$$

式中, Q_m ——马达的流量; C_{lp} ——液压马达的泄露系数。

蓄能器输出的实时功率和一次放油过程蓄能器输出的总能量分别为:

$$P_{out} = Q_{a2} p_{a2} \quad (10)$$

$$W_{out} = \int Q_{a2} p_{a2} dt \quad (11)$$

式中, P_{out} ——蓄能器的实时输出功率; W_{out} ——蓄能器的输出能量。

3.3 蓄能器液压负载数学模型

从前面的波浪能液压发电原理可知, 蓄能器所接的负载时液压马达和永磁发电机, 式(9)中含有液压马达的流量项, 即是蓄能器的输出流量和所接负载具有很重要关系。液压马达的流量可示为:

$$Q_m = \frac{q_m \cdot n_m}{60} \quad (12)$$

式中, q_m ——液压马达的排量; n_m ——液压马达的转速。

液压马达的输出功率为:

$$P_m = \eta_v \eta_m p_{a2} Q_m \quad (13)$$

式中, P_m ——液压马达输出功率; η_v ——液压马达容积效率; η_m ——液压马达机械效率。

发电机的功率:

$$P_g = \eta_d P_m = 3E^2/R \quad (14)$$

式中, P_g ——发电机功率; η_d ——发电机效率; E ——发电机的相电动势; R ——发电机所接负载电阻。

永磁同步发电机的相电动势可示为[12]:

$$E = 4.44 N K u \Phi n / 60 \quad (15)$$

式中, N ——发电机绕组串联匝数; K ——发电机绕组串联因数; u ——发电机极对数; Φ ——发电机磁通量。

联立式(12)~式(15)可得马达转速的表达式:

$$n = \frac{1.01 \eta_v \eta_m \eta_d q_m p_{a2} R}{N^2 K^2 u^2 \Phi^2} = \frac{1.01 p_{a2} q_m R C_1}{C_2} \quad (16)$$

式中, $C_1 = \eta_v \eta_m \eta_d$; $C_2 = N^2 K^2 u^2 \Phi^2$ 。

将式(16)代入式(9)并整理得到:

$$\frac{V_0 p_{a2}^{\frac{1}{1.4}} - V_{q1} p_{q1}^{\frac{1}{1.4}}}{E_a p_{a2}^{\frac{1}{1.4}}} \frac{dp_{a2}}{dt} + \frac{1.01 p_{a2} q_m^2 R C_1}{60 C_2} + C_{lp} p_{a2} = -\frac{1}{1.4} v_{q1} p_{q1}^{\frac{1}{1.4}} p_{a2}^{-\frac{1.2}{0.7}} \frac{dp_{a2}}{dt} \quad (17)$$

4 数值模拟结果

4.1 充油过程数值结果

根据 3 节建立的数学模型, 进行数值计算。首先, 充油蓄能稳压过程相关参数设置为: 蓄能器组共有 10 只蓄能器, 每个蓄能器容积 50 L, 蓄能器初始体积 $V_0 = 0.5 \text{ m}^3$, 蓄能器初始压力 $p_0 = 8 \text{ MPa}$, 液压油有效体积弹性模量 $E_a = 1000 \text{ MPa}$, 液压缸缸径 $d_1 = 200 \text{ mm}$, 液压缸杆径 $d_2 = 185 \text{ mm}$, 运动速度 0.1 m/s , 容积效率为 0.8, 启动压力为 $p_0 = 12 \text{ MPa}$ 。通过 Mathematica 软件进行编程计算, 得到充油过程中压力随时间变化曲线、流量随时间变化曲线、瞬时功率随时间变化曲线如图 2 所示。设定数值计算步长 $\Delta t = 0.1 \text{ s}$, 输入能量如式(18)所示, 计算得到 $W_{in} = 1622781 \text{ J}$ 。

$$W_{in} = \sum_{i=0} Q_{a1}(t_i) p_{a1}(t_i) \Delta t \quad (18)$$

4.2 放油过程数值结果

放油过程中的相关参数设定: 控制阀关闭压力和初始压力相等, 即 $p_{b1} = 8 \text{ MPa}$, 蓄能器所接的液压马达排量 $q_m = 107 \text{ mL/r}$, 马达泄露系数 $C_{lp} = 2.3 \times 10^{-12} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$,

容积效率 $\eta_v = 0.8$, 机械效率 $\eta_m = 0.9$, 永磁发电机额定转速 $n_e = 1500$ r/min, 额定电压 $E = 400$ V, 发电机效率 $\eta_g = 0.85$ 。发电机电阻 $R = 6 \Omega$ 。经过数值计算得到放油过程中压力随时间变化曲线、流量随时间变化曲线

(平均流量为 1602.96 mL/s)、瞬时功率随时间变化曲线(平均功率为 16569.23 W)如图 3 所示。输出能量如式(19)所示, 计算得到 $W_{out} = 1094580$ J。

$$W_{out} = \sum_{i=0} Q_{a2}(t_i) p_{a2}(t_i) \Delta t \quad (19)$$

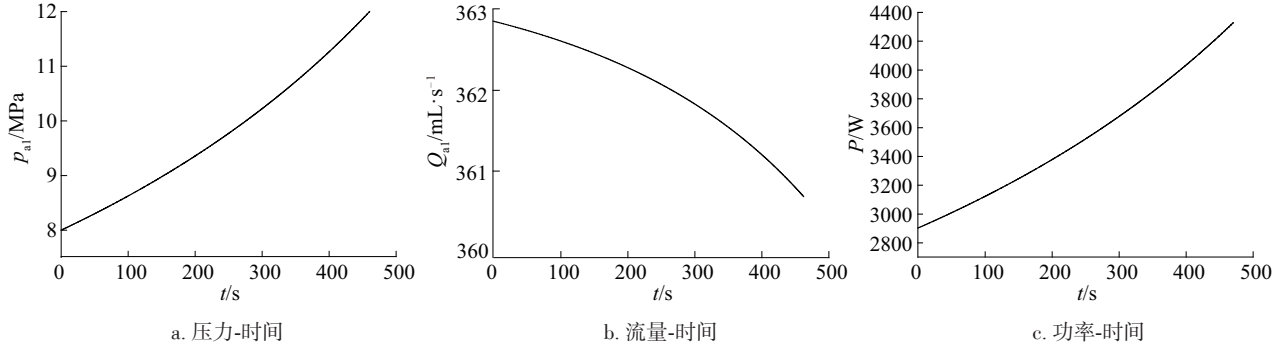


图2 充油过程中压力-时间、流量-时间和功率-时间变化关系

Fig. 2 Curves of pressure-time, flow-time, power-time in oil filling process

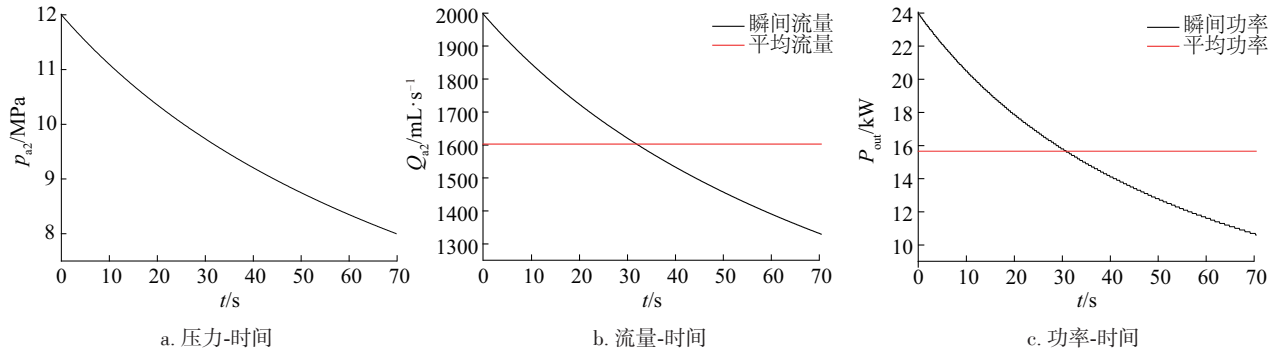


图3 放油过程中压力-时间、流量-时间和功率-时间变化关系

Fig. 3 Curves of pressure-time, flow-time and power-time in oil discharge process

5 实验研究

为验证前面数值模型, 选取蓄能型波浪能装置进行实海况试验数据进行对比。由于实际情况所限制, 只测

量放油过程中的压力和流量数据。数据采样时间为 150 s, 步长 0.2 s。测得放油过程压力、流量随时间变化曲线(平均流量为 1767.24 mL/s)、瞬时功率随时间变化曲线(平均功率为 16857.55 W)如图 4 所示。

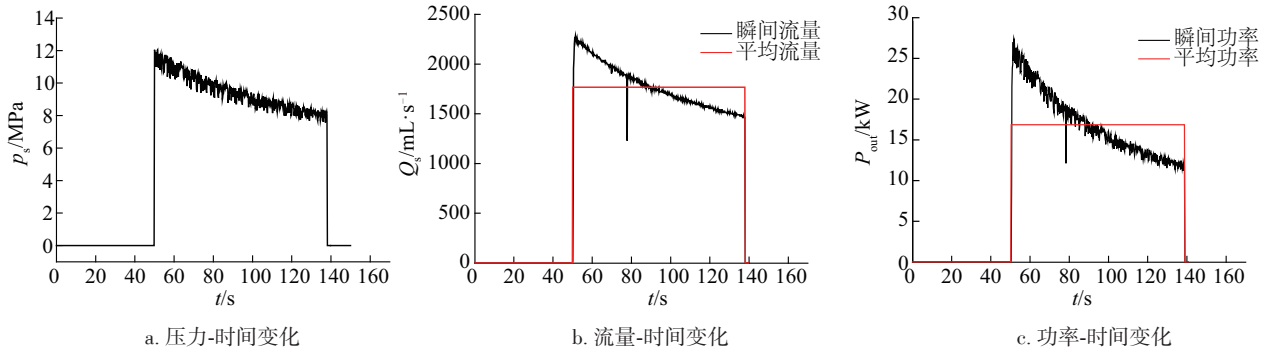


图4 实海况测试放油过程中压力-时间、流量-时间和功率-时间变化关系

Fig. 4 Curves of pressure-time, flow-time and flow-time in real sea condition test

6 结 论

本文对液压式波浪能装置蓄能过程进行了数值模拟研究,为波浪能能量转换系统的设计及高效运行提供了理论基础。应用波浪能装置实海况试验数据对数学模型进行验证,得到以下主要结论:

1)充油过程,蓄能器其压力从 8 MPa 升至 12 MPa 用时 460.5 s,放油过程,蓄能器压力从 12 MPa 降到初始 8 MPa,只用时 69.8 s,说明前文假设充油过程是等温过程,放油过程是绝热压缩过程是比较准确的。

2)对比放油过程的数值模拟结果和试验结果,数值模拟现实蓄能器放油过程持续 69.8 s,试验结果为 88 s,且从压力、流量和功率随时间的变化趋势可看出,本文数值模拟和试验结果基本相近。

3)数值模拟放油过程的平均流量和平均功率分别为 1602.96 mL/s 和 16569.23 W,试验的平均流量和平均功率 1767.24 mL/s 和 16857.55 W,相对误差分别只有 9.0%和 1.7%。验证了本文所建立的蓄能器放油过程的数学模型的准确性。

4)蓄能器中油压对液压缸和浮子的反作用力在冲油过程中,逐渐上升,近似于二次曲线,放油过程中,逐渐下降,近似于双曲函数。此外,根据蓄能器冲油和放油的压力变化值,可以确定吸波浮子的液压负载值,时液压系统可更好地和波浪力匹配。

5)从数值模拟和实验结果可看出,带有蓄稳压系统的波浪能装置放油过程,只和蓄能器的启动、闭合压力以及蓄能器容积有关,和波浪力的输入无直接关系,液压系统输出功率趋于稳定。

[参考文献]

- [1] FIELD C B, BARROS V R, MACH K, et al. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability [J]. Contribution of working group II to the third assessment report, 2014, 19(2): 81-111.
- [2] ZHENG S M, ZHANG Y H, ZHANG Y L, et al. Numerical study on the dynamics of a two-raft wave energy conversion device [J]. Journal of fluids & structures, 2015, 58: 271-290.
- [3] HEIKKINEN H, LAMPINEN M J, BÖLING J. Analytical study of the interaction between waves and cylindrical wave energy converters oscillating in two modes [J]. Renewable energy, 2013, 50(3): 150-160.
- [4] DREW B, PLUMMER A R, SAHINKAYA M N. A review of wave energy converter technology [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part a journal of power & energy, 2009, 223(8): 887-902.
- [5] LÓPEZ I, ANDREU J, CEBALLOS S, et al. Review of wave energy technologies and thenecessary power-equipment [J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2013, 27(6): 413-434.
- [6] FALCÃO A. Wave energy utilization: a review of the technologies [J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2010, 14(3): 899-918.
- [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.
- [8] SHENG S W, YOU Y G, ZHANG Y Q, et al. Research on power take-off system of floating wave power device [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2012, 48(24): 141-146.
- [9] HENDERSON R. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter [J]. Renewable energy, 2006, 31(2): 271-283.
- [10] 方思远. 飞轮储能系统控制及其在波浪发电中的应用 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [11] FANG S Y. Control of flywheel energy storage system and its application in wave power generation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [12] 张世亮. 液压与气压传动 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] ZHANG S L. Hydraulic and atmospheric pressure transmission [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [14] 张峰. 波浪能独立稳定发电控制系统研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [15] ZHANG F. Research on control system of wave energy independent and stable generation [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [16] 王坤林,田联房,王孝洪,等. 液压蓄能式波浪能装置发电系统的特性 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 25-31.
- [17] WANG K L, TIAN L F, WANG X H, et al. Characteristics of power generation system with hydraulic energy-storage wave energy converter [J]. Journal of South China University of Technology (natural science edition), 2014, 42(6): 25-31.

NUMERICAL SIMULATION RESEARCH ON ENERGY STORAGE SYSTEM OF WAVE ENERGY CONVERTER

Ye Yin¹⁻³, Wang Kunlin¹⁻³, Zhang Yaqun¹⁻³, Huang Zhenxin¹⁻³

(1. *Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;*

2. *Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy Sciences, Guangzhou 510640, China;*

3. *Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China.*)

Abstract: In this paper, the wave energy hydraulic energy storage system is studied. The mathematical models of the oil filling and discharging process of the energy storage system were established and the numerical simulation was carried out. The curves of pressure, flow and power change with time during the whole energy storage process were obtained, which were compared with the experimental data of the wave energy device. The accuracy of the numerical simulation results is verified.

Keywords: wave energy; power take-off system; energy storage system; isothermal process; adiabatic process