

DOI: 10.3969/j. issn. 1001-3881. 2016. 05. 030

## 波浪能装置液压式蓄能系统设计

张亚群<sup>1</sup>, 盛松伟<sup>1</sup>, 游亚戈<sup>1</sup>, 吝红军<sup>1</sup>, 张超<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东广州 510640;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 蓄能系统是漂浮式波浪能装置液压式能量转换系统中的储能环节。以漂浮式波浪能装置液压式能量转换系统为研究对象, 介绍了液压式能量系统中的蓄能系统的组成, 分析了该系统在大浪下实现稳定发电和小浪时实现 0-1 发电的原理, 建立了预充压力、最低工作压力和最高工作压力、蓄能量几个关键设计参数之间的数学模型, 通过计算实例进行数值模拟, 获得了大量试验数据。试验结果表明: 最高工作压力与最低工作压力在数值上差越大, 蓄能系统单个循环释放出的蓄能越多, 蓄能系统的成本越低; 设计的预充压力安全值为最低工作压力的 80%; 蓄能量与最高工作压力、最低工作压力、预充压力之间存在耦合关系。

**关键词:** 波浪能装置; 液压式能量转换系统; 蓄能系统; 蓄能器

**中图分类号:** TH322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2016) 5-117-5

### Design on Hydraulic Energy Storage System of Wave Energy Converters

ZHANG Yaqu<sup>1</sup>, SHENG Songwei<sup>1</sup>, YOU Yage<sup>1</sup>, LIN Hongjun<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The energy storage system is the key energy storage process of hydraulic power take-off system in a floating wave energy converter (WEC). The components of an energy storage system which is in a floating WEC was introduced, and the principle stable power generation under the huge wave and 0-1 power generation under small wave were analyzed. A mathematical model about a couple of key design parameters including filling pressure, minimum working pressure, maximum working pressure and energy storage value was set up. Numerical simulations were carried on by calculating examples, and a large number of experimental data were obtained. The experiment results show that the lager the difference between the maximum and minimum pressure, and the energy is released in a single cycle, the lower the cost of the energy storage system is. The design safety value of the precharge pressure is 80% of minimum working pressure. There is a coupling relationship between the four key parameters, such as the energy storage value, the maximum working pressure, the minimum working pressure and the precharge pressure.

**Keywords:** Wave energy converter (WEC); Hydraulic power take-off; Energy storage system; Accumulator

### 0 前言

环境的污染、化石能源的日益枯竭, 迫使开发利用可再生能源越来越有必要性。海洋波浪能作为一种清洁的、绿色的、储藏丰富的可再生能源, 逐步受各国的重视。目前波浪能开发利用技术的热点是波浪能利用发电技术, 研究重点是波浪能发电装置<sup>[1]</sup>。

波浪能发电装置通常由三大系统组成, 一级能量转换系统(波浪能俘获系统)将俘获的波浪能转换为往复机械能; 二级能量转换系统将吸波浮体的往复机械能转换为旋转机械的机械能; 三级能量转换系统通过发电机将旋转机械的机械能转换为电能。其中二级能量转换系统可分为气动式、液动式、液压式、机械传动式<sup>[2]</sup>。

由于液压式能量转换系统克服了波浪能具有的周

期短、不稳定、非持续性等缺点, 迅速储存不稳定的波浪能, 再转换为持续平稳的液压能。所以, 液压式能量转换系统目前在漂浮式浪能发电装置转换中得到广泛的应用。例如英国 Salter 的点头鸭、McCabe Wave Pump 筏式、苏格兰 Ocean Power Delivery Ltd 公司设的 Pleamis、美国 OPT 公司的 Power Buoys, 国内的波浪能装置中科院广州能源研究所研制的汕尾 50 kW 振荡浮子波力发电装置 10 kW 鸭式、100 kW 鸭式、10 kW 鹰式, 浙江大学双行程做功的浮力摆等<sup>[3]</sup>。

虽然液压式能量转换系统在漂浮式波浪能装置中应用比较成功, 但是关于其专业系统性的研究文献较少, 特别是关于液压式能量转换系统中的核心部分—液压式蓄能系统的参考资料更为鲜见。文中针对漂浮

收稿日期: 2015-01-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(41406102); 海洋可再生能源专项资金资助项目(GHME2013ZB01)

作者简介: 张亚群(1981—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事海洋波浪能转换及控制方面的研究。E-mail: zhangyq@ms.giec.ac.cn。

式鹰式波浪能装置的液压蓄能系统展开研究，建立了蓄能系统的数学模型，通过仿真模拟展示了各设计参数之间的耦合关系，为系统设计及参数的优化提供理论依据及试验数据参考。

### 1 波浪能装置蓄能系统原理及组成

#### 1.1 组成

鹰式波浪能装置的液压式能量转换系统由蓄能系统、液压自治控制器、液动阀、液压马达、发电机、负载、油箱、溢流阀等设备，如图 1 所示<sup>[4-5]</sup>。

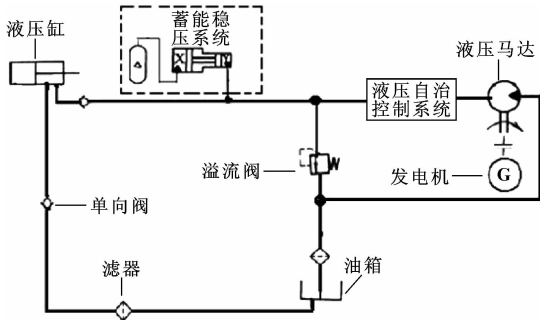


图 1 能量转换系统图

能量转换系统中的蓄能系统是由一个或多个蓄能器（或增压蓄能器）、稳压气瓶、滤器、溢流阀、其他阀组等组成。其中，蓄能器是蓄能系统储蓄能量的主要且必要的设备。由于皮囊式蓄能器具有下述特点，气腔与油腔之间是气囊，密封可靠、无泄漏；胶囊惯性小、反应灵敏；结构紧凑、尺寸小、质量轻，而且其产品已经形成系列化，价格低。故漂浮式鹰式波浪能装置选用该种蓄能器，皮囊内加载氮气，皮囊外填充液压油。

#### 1.2 工作原理

液压式蓄能系统的基本工作原理是，在适当的条件下，蓄能器将系统外一段时间内的能量转变为系统内的压缩能储存起来，当系统外需要时，蓄能器又能将系统内的压缩能逐渐转变为持续稳定的液压能释放出来，重新供给系统外。

在漂浮式鹰式波浪能装置做功过程中，由于波浪的不稳定，能量转换系统的压力总是在波动的，既影响发电质量，又容易导致系统破坏（如发电机过载或机械故障），在波浪能流太小时还会导致效率下降。为克服这一问题，特在能量转换系统内设置蓄能系统，当波浪能流较大时，蓄能系统起移峰填谷的作用，平滑了液压功率和压力的波动，提高可靠性、发电效率和发电稳定性；当波浪能流较小时，蓄能系统起储能作用，将过小能流的液压能储存起来，再以最大功率释放，实现间断发电，以避免功率太小导致的效率下降。事实上，在小浪时，波浪能装置经常只能得到不足 20% 装机容量的波浪能，发电机几乎无法发电。通过蓄能系统的储能作用，进行间断发电，是

提高效率的有效手段，同时也对系统设备进行了有效保护，减小了损耗，避免了频繁的启动。

能量转换系统中，发电机需要额定功率 60% 以上的稳定的轴功率，才能以较高的效率发电。波浪的功率变化很大，为非连续性的，波浪能装置的一级能量俘获系统将俘获的波浪能转换为液压缸的液压能，未经过蓄能系统前的液压缸压力与输入功率随时间变化如图 2、3 所示，成脉冲变化。但经过蓄能系统快速储存和稳定释放液压能，压力输出维持稳定，如图 4 所示。实现了小浪时间歇高效发电，大浪时连续稳定发电，如图 5、6 所示。

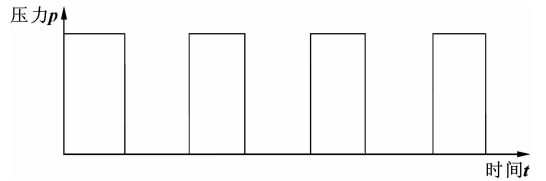


图 2 液压缸压力

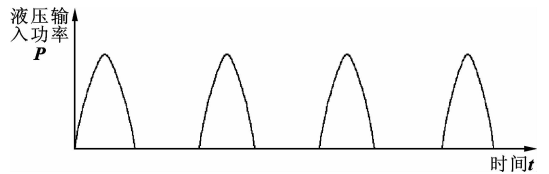


图 3 液压输入功率

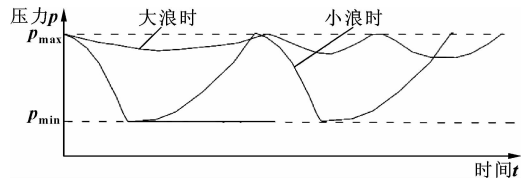


图 4 蓄能系统压力

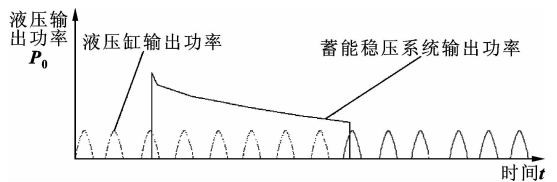


图 5 小浪时输出液压功率

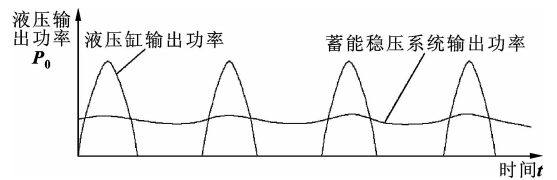


图 6 大浪时输出液压功率

### 2 系统设计

蓄能系统最重要的参数为最低工作压力、最高工作压力、预充压力、蓄能量。这 4 个参数之间相互影响，相互制约。在对蓄能器进行参数设计时，应使蓄能器的工作压力在满足装置工况要求的前提下，实现蓄能器容积尽可能小，尽可能有效地储存和转换波浪

能装置俘获的波浪能,以增加单位体积储能量和减小系统成本。

### 2.1 预充压力

在启动蓄能系统工作之前,蓄能器的气囊内需预充一定体积的气体,这时气体的压力称为预充压力。

在蓄能器工作过程中,气体被反复压缩和释压,蓄能器内始终留有部分油液,这时这部分气体的压力为最低工作压力。参考文献[6]中阐述预充压力一般设计为最低工作压力的80%,过低或是过高都将会导致蓄能器损坏。

### 2.2 最低工作压力

蓄能系统的最低工作压力应根据三级能量转换系统的参数确定,满足发电过程中能量最大化释放的情况的需求,并保证下次储能做功获得较高的效率,因此通常情况下系统最低工作压力设置为

$$2 \text{ MPa} < p_1 < 8 \text{ MPa} \quad (1)$$

式中:  $p_1$  为蓄能系统最低工作压力。

### 2.3 最高工作压力

蓄能器气囊被最大量压缩时,其内部可达到的最大压力为系统允许的极限工作压力。为保证蓄能器的安全,蓄能器系统的最高工作压力一定小于极限工作压力。最高工作压力不仅要考虑能量转换系统中所有液压设备可承受的最高工作压力,而且还要考虑该工作压力下液压设备的使用寿命及有效排油量。波浪能装置中蓄能系统最高工作压力按照下式设置<sup>[7]</sup>:

$$p_2 = \frac{P_0}{\eta_g \eta_{ma} Q_{ma}} \quad (2)$$

式中:  $p_2$  为设定的蓄能系统最大工作压力;  $P_0$  为发电机的额定功率;  $\eta_{ma}$  为液压马达的转换效率;  $\eta_g$  为电机的转换效率;  $Q_{ma}$  为马达的额定流量。

### 2.4 蓄能量

蓄能量是设计蓄能系统的关键参数,也是决定整个能量转换系统转换效率的重要参数。波浪能装置的蓄能系统的工作环节可以大致划分为4个阶段<sup>[8-9]</sup>。第一阶段为准备状态,蓄能器内预充气体体积  $V_0$ , 压力为  $p_0$ , 未储存液压油。通常这个状态只出现在蓄能系统准备工作之前,之后不再出现。第二阶段为初始状态,液压油以流速  $q$  被压入蓄能器内,气囊内压力逐渐上升,达到最低工作压力  $p_1$ , 气体体积为  $V_1$ 。第三阶段为蓄能阶段,液压油以流速  $q$  继续被压入蓄能器内,气囊内压力继续上升,经过时间  $T$  之后,达到最高工作压力  $p_2$ , 气体体积为  $V_2$ 。第四阶段为释放能量阶段,也为第三阶段的逆过程。上述第二阶段至第四阶段的循环即构成了波浪能装置的蓄能系统的工作历程。

蓄能系统的工作环节中的第三和第四阶段即为储存和释放能量的过程,此过程受很多条件的影响,如

系统的工作压力、蓄能时间、释放能量时间、蓄能器中液压油的温度、蓄能器的散热条件等。蓄能器气囊内的氮气作为一个独立的热力学系统,在蓄能器蓄能或释放能量的缓慢过程中和外界的热量交换较小,故近似认为该过程是绝热过程,因此多变指数取  $n = 1.4$ 。

由于液压油的不可压缩性,进入蓄能器内的油液体积等于皮囊内气体被压缩的体积,此过程中蓄能器内氮气气体体积变化为:

$$dV = -qdt \quad (3)$$

式中:  $dV$  为  $dt$  时间内氮气气体体积变化;  $q$  为液压油流入蓄能器内的体积流量;  $dt$  为计算时间间隔。

经过时间  $t_i$  后,蓄能器内氮气压力达到工作压力  $p_i$  时,体积为:

$$V_i = V_1 - \int_0^{t_i} qdt \quad (4)$$

根据理想气体状态方程:

$$p_1 V_1^n = p_i V_i^n \quad (5)$$

根据式(3) — (5)得:

$$p_i = p_1 V_1^n / V_i^n = p_1 V_1^n / (V_1 - \int_0^{t_i} qdt)^n \quad (6)$$

当  $t_i = T$  时,根据式(4) — (5)得:

$$T = [1 - (p_1/p_2)^{1/n}] V_1 / q \quad (7)$$

$$p_2 = p_1 V_1^n / V_2^n = p_1 V_1^n / (V_1 - \int_0^T qdt)^n \quad (8)$$

蓄能量的计算方法为蓄能器内油液体积变化量与压力变化量的积分。若不考虑蓄能器液压油充放过程中能量损失的情况下,蓄能器的蓄能量为

$$E_a = \int_0^T p_i V_i dt = \int_0^T p_1 q (V_1^n / (V_1 - \int_0^T qdt)^n) dt \quad (9)$$

根据式(6),上式可表述为:

$$E_a = \int_0^T p_i V_i dt = \int_0^T p_1 q (V_1^n / (V_1 - \int_0^T qdt)^n) dt \quad (10)$$

式中,  $p_i$  为第  $t_i$  时刻蓄能器内的压力;  $V_i$  为第  $t_i$  时刻蓄能器气囊内的气体体积;  $V_1$  为蓄能器中压力为  $p_1$  时对应的气体体积;  $p_2$  为蓄能器的最高工作压力;  $V_2$  为蓄能器内压力为  $p_2$  时气囊内气体体积;  $E_a$  为蓄能器总的蓄能能量;  $T$  为蓄能器从第二阶段到第三阶段所需时间。

### 3 计算实例

蓄能系统由一个容积  $V_0 = 40 \text{ L}$  的皮囊蓄能器和配套的液压元件组成,环境温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。假设液压油以流速  $q$  被压入蓄能器中。第一阶段时,向蓄能器内的气囊中预充氮气,气体体积为  $V_0$ , 压力为  $p_0$ 。按照上文所述的第二阶段至第四阶段模拟控制蓄能器的工作流程。以预充气体压力  $p_0$ 、最低工作压力  $p_1$ , 最高工作压力  $p_2$  为变量,模拟蓄能器蓄能量与三者之间的数值关系。

当预充气体压力  $p_0$  为变量,最低工作压力  $p_1$ ,

最高工作压力  $p_2$  为定值时, 按照式 (9) 计算得预充压力  $p_0$  与蓄能器蓄能量  $E_a$  之间的关系曲线如图 7 所示。图中显示蓄能器蓄能量  $E_a$  与预充压力  $p_0$  值之间

为比例线性关系,  $E_a$  随着  $p_0$  的增大而增加, 并且当最低工作压力  $p_1$  值越大时增加的速度越缓慢, 当最高工作压力  $p_2$  值越大时这个速度反而变快。

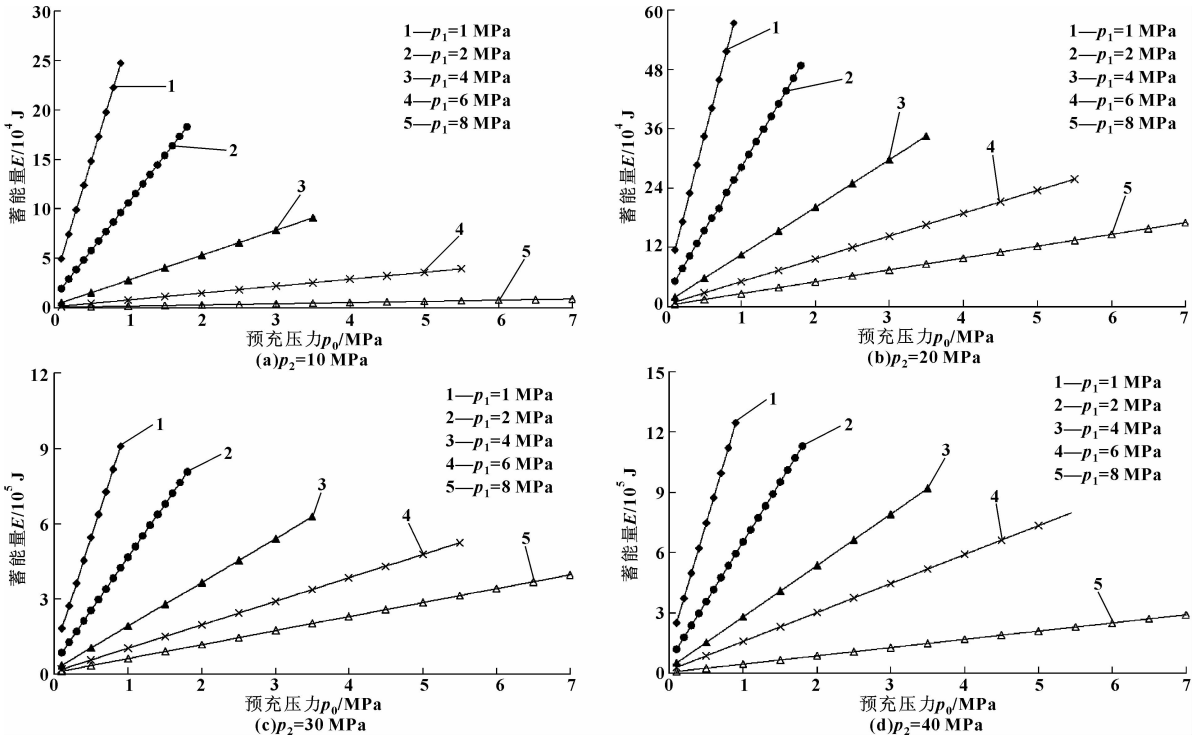


图 7  $p_0-E_a$  关系曲线

当最低工作压力  $p_1$  为变量, 预充气体压力  $p_0$ , 最高工作压力  $p_2$  为定值时, 按照式 (9) 计算得最低工作压力  $p_1$  与蓄能器蓄能量  $E_a$  之间的关系曲线如图 8 所示。图中显示,  $p_1$  与  $E_a$  为双曲线关系, 后者随

着前者的增大而减小。曲线的曲率随着  $p_2$  值的增大而增大, 随着  $p_0$  值的增大而减小。随着  $p_0$  的增大, 不同  $p_1$  下的曲线之间的间距逐渐增大。

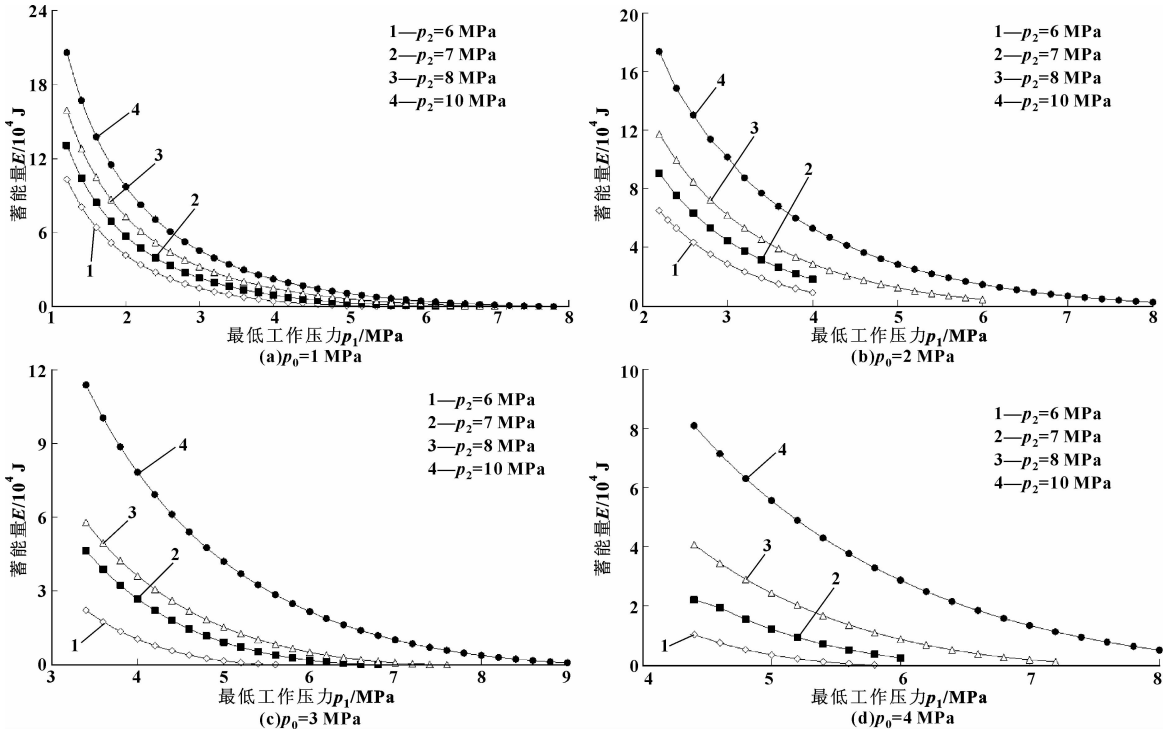


图 8  $p_1-E_a$  关系曲线

当最高工作压力  $p_2$  为变量, 预充气体压力  $p_0$ , 最低工作压力  $p_1$  为定值时, 按照式 (9) 计算得最大工作压力值  $p_2$  与蓄能器蓄能量  $E_a$  之间的关系曲线如

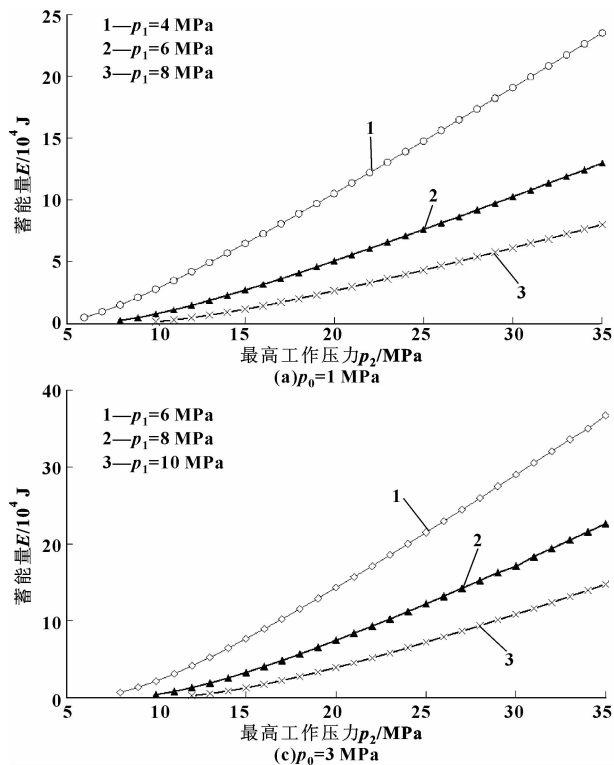


图9  $p_2-E_a$  关系曲线

综合上述分析, 在蓄能器容积量一定的情况下, 最高工作压力  $p_2$  越大, 且最高与最低工作压力之间的差值越大, 最低工作压力与预充压力之间差值越小时, 蓄能器的蓄能量越大。

#### 4 结论

波浪能发电装置液压式蓄能系统为整个波浪能装置中的中间环节, 是决定装置转换效率高低的關鍵之一, 也关系到整个装置实海况试验运行的安全。通过文中的研究可以得到以下结论:

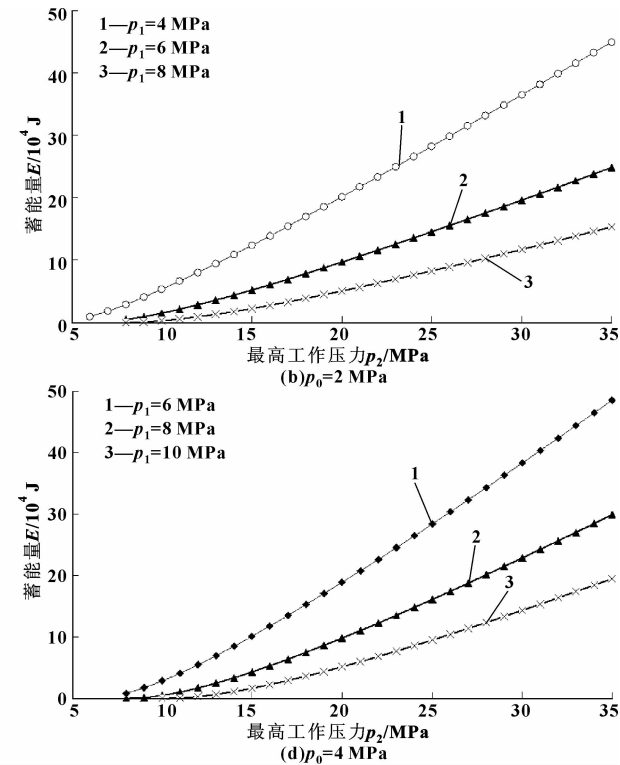
(1) 液压式蓄能系统能够有效克服波浪的间断性、不稳定性等缺点, 适合波浪漂浮式波浪能装置实海况试验运用。

(2) 最高工作压力决定蓄能系统的成本。在预计的成本范围之内, 最高工作压力数值上尽量设计大。

(3) 最低工作压力决定了蓄能系统的寿命及蓄能量。在数值上, 最低工作压力要尽量低, 尽可能的将蓄能系统中的蓄能释放出去。预充压力设计的安全值为最低工作压力的 80%。

(4) 蓄能器容积一定时, 蓄能量由最高工作压力、最低工作压力、预充压力决定。反之, 蓄能量确定时, 这 3 种压力的取值范围也受到限制。

图 9 所示。如图 9 所示  $p_2$  与  $E_a$  为二次曲线关系。 $E_a$  随着  $p_2$  的增大而增加, 当  $p_1$  值越大  $E_a$  变化速度越慢, 然而当  $p_0$  值越大时  $E_a$  变化速度略快。



#### 参考文献:

- [1] 张亚群. 漂浮鹰式波浪能发电装置研究 [D]. 广州: 中国科学院广州能源研究所, 2014.
- [2] 张亚群, 于龙飞, 盛松伟, 游亚戈. 液压式波浪能装置能量转换系统研究 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(10): 2071-2076.
- [3] 王坤林, 田联房, 王孝洪. 液压蓄式波浪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.
- [4] ZHANG Yaquin, YOU Yage, SHENG Songwei, WU Bijun. Research on Energy Conversion System of Floating Wave Energy Converter [J]. China Ocean Engineering, 2014, 28(1): 105-113.
- [5] 盛松伟, 游亚戈, 张亚群, 等. 漂浮式波浪能装置液压系统研究 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(24): 141-146.
- [6] 张路军, 李继志, 顾心泽, 等. 蓄能器类型及应用综述 [J]. 机床与液压, 2001(6): 5-7.
- [7] 易孟林, 朱钊, 邹占江, 等. 自供式伺服变量泵节能液压系统的研究 [J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(3): 57-59.
- [8] WHITTAKER T J T. Learning from the Islay Wave Power Plant [C]. In: Processings of the 1997 IEE Colloquium on wave power: An Engineering and Commercial Persperpective, 1997.
- [9] 王春行. 液压伺服控制系统 (修订本) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.