

# 波浪能发电装置能量转换系统多级负载试验

盛松伟, 张亚群, 王坤林, 游亚戈

(中国科学院 广州能源研究所, 可再生能源重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 根据波浪的特点,设计了一种应用在波浪能转换装置上的多级负载系统。对安装该系统的鹰式波浪能转换装置,按照功能和能量转换两种分类方法介绍机构组成和工作原理,并对液压系统的多级负载系统的设计进行了描述,包括系统的元件、试验原理及方法,最后通过试验对系统进行验证。试验结果表明,多级负载系统设计合理,能高效合理地利用及转换液压能。

**关键词:** 波浪能发电装置; 能量转换系统; 多级负载; 效率

**中图分类号:** P743.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2017)02-0311-06

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2017.02.024

## 0 引言

环境污染日趋严重,绿色环保的可再生能源越来越受大家的重视。波浪能是海洋能中最常见,也是利用最为方便的一种可再生能源。迄今为止,开发利用波浪能的发电装置有上千种,且建成了一些试验电站<sup>[1-3]</sup>。波浪能发电装置通常由三级系统组成: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>[4]</sup>。

与其它转换方式相比,液压转换具有明显优势:①惯性小,所有刚性的依附于波浪能俘获系统的只有惯性很小的液压缸活塞,不会影响波浪能俘获系统的运动;②易于通过阀控制阻尼;③转换效率高;④无须增速机构;⑤输出稳定;⑥液压系统便于实现过载保护,使用安全、可靠;⑦液压元件易于实现系列化、标准化和通用化,便于设计、制造、维修和推广使用,且价廉<sup>[5]</sup>。液压转换的前 3 个优点有利于提高波浪能装置的总效率,后 4 个优点有利于提高波浪能装置的可靠性、稳定性,同时降低造价。

本文以漂浮式鹰式波浪能装置为例,按照功能和能量转换两种分类方式介绍了装置的组成,

并概述了工作原理。设计了液压系统的多级负载,列举了试验的相关元件及相关的试验计算公式,并介绍了试验方法。通过采集试验结果,分析试验数据,验证了设计的合理性和可行性,获得了指导性的结论。

## 1 组成及工作原理

### 1.1 装置组成

漂浮式鹰式波浪能装置的结构从功能上可以分为俘获系统、能量转换系统、监控系统、锚泊系统。俘获系统包括鹰头吸波浮体和半潜船体;能量转换系统包括液压系统和发电系统;监控系统包括视频采集系统、数据采集系统、数据收发系统等;锚泊系统主要包括锚链、锚、沉块、浮筒等。鹰式“万山号”波浪能发电装置如图 1 所示。

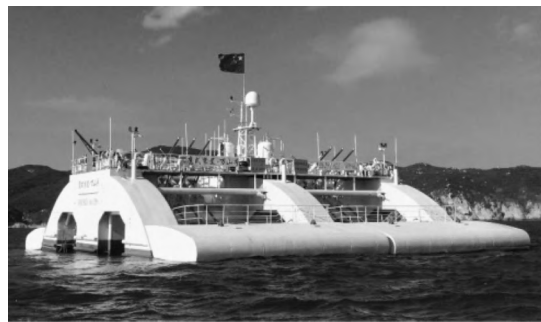


图 1 鹰式“万山号”波浪能发电装置  
Fig.1 The Wanshan Sharp Eagle WEC

鹰头吸波浮体通过支撑臂铰接在半潜驳上,除了允许吸波浮体通过支撑臂绕铰链往复旋转运

收稿日期: 2015-12-04。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41406102); 中国科学院重点实验室基金(y407j31001)。

通讯作者: 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

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

动做功外,其他降低波浪能俘获量的运动都得到了有效抑制。吸波浮体的设计目标与半潜船体相反,要求其质量轻、惯性小、反应敏捷、随浪性好。为了实现波浪的敏捷反应,提高波浪能的俘获效率,鹰头吸波浮体采用特殊的外形结构,以达到正面吸收波浪,背面不造波的效果。

半潜船体是鹰式波浪能装置的主体结构,可搭载鹰头吸波浮体与设备。非工作状态时,半潜船体有足够的浮力,漂浮于水面上,可在江中或海中航行。工作时,半潜船体潜入水中,作为阻尼基座,可有效防止装置基体随波浪高频垂荡、纵荡和纵摇。

能量转换系统包括二级能量转换系统和三级能量转换系统。鹰式波浪能装置的二级能量转换系统采用液压系统(主要由液压转换系统、蓄能稳压系统、液压自治控制系统组成),将浮子的往复机械能转换为液压能,再转换为发电机的旋转机械能。三级能量转换系统(即发电系统)由马达、发电机、变换电路、负载组成。液压转换系统的核心元件通常采用液压缸或柱塞泵,鹰式“万山号”波浪能装置采用双出杆的液压缸,安装在吸波浮体与半潜船体之间。

### 1.2 工作原理

鹰式波浪能装置的工作原理:波浪推动鹰头吸波浮体做往复运动,驱动液压缸将波浪能转换为液压能,储存在蓄能系统中,当蓄能系统压力达到预设值时,释放液压能驱动液压马达,并通过液压马达驱动发电机发电(图2)。

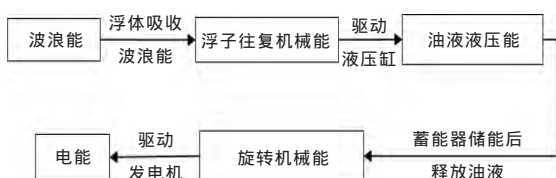


图2 液压式能量转换系统工作原理图  
Fig.2 Graph of hydraulic power take-off system

由于波浪的不稳定,鹰头吸波浮体的转动是往复、低速和不稳定的,在波浪较小的条件下,角速度接近于正弦曲线,周期约为4s,角速度峰值约为3r/min。现有的发电机须要在稳定的、单一方向的驱动下工作,转速一般大于200r/min。为了实现鹰头吸波浮体的运动与发电机旋转运动之间的转换,鹰式波浪能装置采用液压系统,通过蓄

能稳压系统消除鹰头吸波浮体与电机在能流和运动规律上的差异,并通过液压缸与液压马达排量上的不同实现增速。

### 2 液压系统多级负载的设计

波浪能装置俘获的波浪能最终通过马达和发电机转换为电能供给电阻负载或是并入电网。发电系统中的马达和发电机,两者可称为液压系统负载。当两者的参数与液压系统输出的功率达到最佳匹配值时,整个发电系统的效率将达到峰值,二级能量转换系统输出的能量得到最大化利用。

为了适应液压系统不同的输出功率,获得最大化的发电效率,鹰式波浪能装置设置了多级液压系统的负载。多级液压系统负载可划分为4个级别,包含了参数各不相同的4组马达和发电机,各组之间即可以单独工作又可以组合工作。考虑到液压设备的安全问题,鹰式波浪能装置的液压系统的最高压力设置为20MPa。因此,4台发电机设置的启动压力分别为16MPa(21#),17MPa(11#),18MPa(22#),19MPa(12#)。其中,以16MPa和17MPa启动的发电机组为低压发电机组,另两组为高压发电机阻。4台发电机采用两种负载模式,即蓄电池负载和电阻负载。

### 3 对比试验

为研究液压系统的输出功率与液压系统负载之间的参数匹配,优化设计参数,本文进行了相关对比试验。对4个级别的液压系统的负载系统分别进行两种类型的对比试验。其一,对比相同负载模式,不同启动压力下的负载发电效率;其二,对比相同启动压力,不同负载模式下的负载发电效率。

#### 3.1 试验元件

压力传感器,测量范围分别为0~1MPa和0~25MPa,输出4~20mA的电流信号;动态扭矩传感器,测量范围为0~±300Nm,输出12~4mA(逆时针)和12~20mA(顺时针)的电流信号;转速传感器,测量范围为0~3000r/min,输出4~20mA的电流信号;涡轮流量传感器,测量范围为10~300L/min,输出4~20mA的电流信号;直流电流模块,测量范围分别为0~30A和0~150A,输出4~20mA的电流信号;直流电压模块,测量范围分别为0~300V和0~1200V,输出0~50mA的电流信号;交流电流模块,测量范围分别为0~30A

和 0~150 A, 输出 4~20 mA 的电流信号; 交流电压模块, 测量范围分别为 0~250 V 和 0~1 000 V, 输出 0~50 mA 的电流信号; 采集模块, 单端 32 通道, 采集频率为 0~250 kHz, 输入 0~5 V 的直流电压信号; 计算机, 以 C 语言为平台编写数据采集及处理软件。

### 3.2 试验方法

试验过程中, 液压缸由液压泵代替。利用变频器控制电动机, 带动液压泵向蓄能器组中压入液压油。蓄能器内压力到达预设最高工作压力  $p_{2max}$  时, 电磁阀开启, 蓄能器开始释放高压液压油, 液压马达被驱动, 发电机开始发电。

#### (1) 压力测试

为了测试液压系统各个部分在工作中的压力, 在系统中设置了 3 个压力测试点(表 1), 以达到实时监控压力变化的目的。

表 1 压力测试设置  
Table 1 Setting for pressure tests

压力测试点	测试压力的名称	传感器及标号	符号
1	液压泵出口压力	压力计-1#	$p_1$
2	蓄能器压力	压力计-3#	$p_2$
3	马达入口压力	压力计-4#	$p_3$

#### (2) 流量测试

试验中设置了两个流量测试点。其一, 安装在液压泵出口, 测试进入蓄能器组的液压油的量; 其二, 安装在液压马达入口, 测试由蓄能器组输出的液压油的量。

依据流量数据可以计算蓄能器的效率, 以及进入液压系统和发电系统之前的能量。计算公式如下:

$$P_1 = p_1 Q_1 \quad (1)$$

$$P_2 = p_2 Q_2 \quad (2)$$

式中:  $P_1$  为液压泵输入液压系统的功率, kW;  $Q_1$  为液压泵输出液压油的流量,  $m^3/s$ ;  $P_2$  为输入液压马达的功率, kW;  $Q_2$  为进入液压马达的液压油的流量,  $m^3/s$ 。

#### (3) 转速测试

在发电机轴上安装测速码盘, 当发电机带动其旋转时, 根据码盘的齿数和输出信号的频率, 即可计算出发电机的旋转速度。

#### (4) 动态扭矩测试

在发电机与液压马达之间安装动态扭矩传感器, 用于测量蓄能器组释放液压油时和马达带动

发电机工作时, 发电机轴的旋转扭矩。

发电机的输入功率为发电机旋转速度与旋转时轴侧的力矩的乘积, 计算式为

$$P_{g-in} = M\omega \quad (3)$$

式中:  $P_{g-in}$  为输入发电机的功率, kW;  $M$  为发电机轴的旋转扭矩,  $N \cdot m$ ;  $\omega$  为发电机轴的旋转速度,  $rad/s$ 。

#### (5) 电压电流测试

利用电压电流模块, 同时采集交流电压、交流电流、直流电压、直流电流 4 种数据。测试在一定负载下, 发电机输出的交流电压、交流电流值, 以及经过整流模块之后供给负载的直流电压、直流电流值, 并分别计算出发电系统输出的交流电功率和直流电功率。

$$P_{AC} = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi \quad (4)$$

$$P_{DC} = UI \quad (5)$$

式中:  $P_{AC}$  为发电机输出交流电的有功功率, kW;  $U_L$  为交流线电压, V;  $I_L$  为交流线电流, A;  $\cos\varphi$  为功率因数, 由于负载为纯电阻负载, 因此,  $\cos\varphi = 1$ ;  $P_{DC}$  为发电机输出直流电功率, kW;  $U$  为直流电压, V;  $I$  为直流电流, A。

#### (6) 效率计算

蓄能器效率:

$$\eta_A = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (6)$$

马达效率:

$$\eta_m = \frac{P_{g-in}}{P_2} \times 100\% \quad (7)$$

发电机效率:

$$\eta_g = \frac{P_{g-out}}{P_2} \times 100\% \quad (8)$$

式中:  $P_{g-out}$  为发电机的输出功率, kW。

整流模块效率:

$$\eta_{AC-DC} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \times 100\% \quad (9)$$

交流发电效率:

$$\eta_{AC} = \frac{P_{AC}}{P_1} \times 100\% \quad (10)$$

直流发电效率:

$$\eta_{DC} = \frac{P_{DC}}{P_1} \times 100\% \quad (11)$$

### 3.3 试验结果与分析

为测试 4 组不同参数的液压马达与发电机的

工作性能,设置不同的工况分别进行试验,设计工况如表2所示。试验中,数据采集的频率为 $f=20$  Hz。由于12#与22#机组没有合适的蓄电池负载,用固定电阻作为相应的负载。试验获得的数据经过统计分析后,按照式(6)~(11)计算得到转换效率的数值(表3,4)。

表2 试验工况  
Table 2 Test conditions

序号	机组	启动压力/MPa	负载	
			交流	直流/ $\Omega$
1	11#	16	蓄电池	1.2\1.5\2
2	21#	17	蓄电池	1.2\1.5\2
3	12#	18	蓄电池(48 $\Omega$ )	20\23\25.5\28.5
4	22#	19	蓄电池(23 $\Omega$ )	20\22.5\25.5\28.5

表3 试验数据(蓄电池负载)

Table 3 Data of experiments (battery as load)

机组	负载	工况1		工况2	
		启动压力/MPa	效率/%	启动压力/MPa	效率/%
11#	蓄电池	16	76.2	20	75.7
21#	蓄电池	17	73.3	20	73.0
12#	蓄电池(48 $\Omega$ )	18	82.3	20	--
22#	蓄电池(23 $\Omega$ )	19	62.5	20	--

表4 试验数据(电阻负载)

Table 4 Data of experiments(resistive as load)

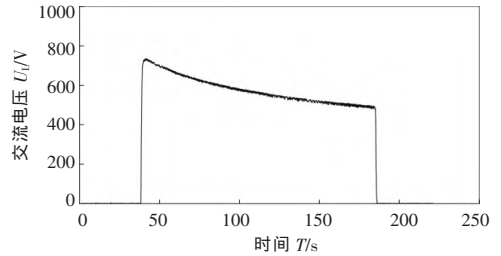
机组	工况1			工况2		
	启动压力 MPa	负载 $\Omega$	效率 %	启动压力 MPa	负载 $\Omega$	效率 %
11#	16	1.2	84.26	20	1.2	84.17
	16	1.5	83.58	20	1.5	83.95
	16	2.0	80.72	20	2.0	82.31
21#	17	1.2	80.80	20	1.2	81.19
	17	1.5	75.84	20	1.5	81.35
	17	2.0	78.32	20	2.0	78.31
12#	18	20.0	88.83	20	20.0	88.85
	18	22.5	89.65	20	22.5	90.10
	18	25.5	89.90	20	25.5	89.74
	18	28.5	89.82	20	28.5	89.89
22#	19	20.0	87.57	20	20.0	91.70
	19	22.5	88.94	20	22.5	88.04
	19	25.5	88.28	20	25.5	88.17
	19	28.5	87.84	20	28.5	87.87

从表3可以看出,启动压力为19 MPa时,发电效率最低,为62.5%;启动压力为18 MPa时,发电效率最高,为82.3%。同一机组中,启动压力高时,发电效率反而低;对于不同的机组,也是启动压力高时,发电效率反而低。

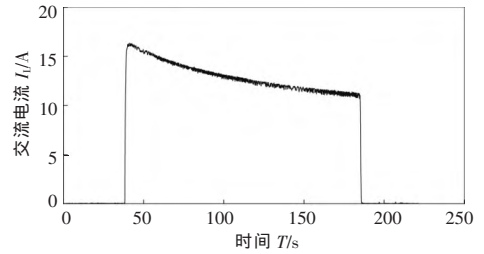
从表4可以看出,最高转换效率(91.7%)出现在22#机组,启动压力为20 MPa;其次是12#机组,启动压力为20 MPa,效率为90.1%;最低转换

效率(75.84%)出现在21#机组,启动压力为17 MPa。最高效率与最低效率数值之间相差15.86%。同一机组中,在连接相同电阻负载时,启动压力对转换效率几乎没有产生影响。在连接不同电阻负载时,启动压力为18 MPa或19 MPa时,转换效率数值上基本一致,启动压力为16 MPa或17 MPa时,转换效率数值上变化较大。

蓄电池为负载的工况中,发电效率最高的是12#机组,启动压力为18 MPa,直流电阻为48  $\Omega$ ,数据曲线如图3,4所示。

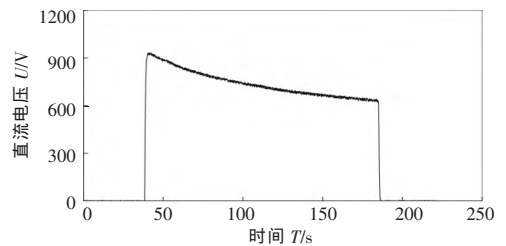


(a)交流电压

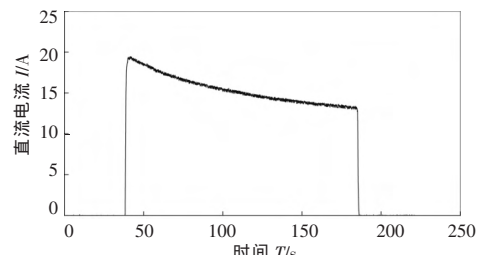


(b)交流电流

图3 交流电压和电流  
Fig.3 AC voltage and current



(a)直流电压



(b)直流电流

图4 直流电压和电流  
Fig.4 DC voltage and current



从图 3(a)可以看出,发电机所产生的交流电单项线电压最高值为 729.17 V,最低值为 483.04 V;从图 3(b)可以看出,发电机所产生的交流电单项线电流最高值为 16.2 A,最低值为 11.12 A。

从图 4 可以看出,电压为 923.35~627.78 V,电流为 19.33~13.1 A。

交流电阻为负载的工况中,发电效率最高的是 22# 机组,启动压力为 20 MPa,发电系统提供的交流负载的电阻为 20  $\Omega$ 。图 5 为发电机输出的交流电压和交流电流的时域曲线。从图 5 可以看出,电压为 676.59~372.96 V,对应的电流为 20.09~10.89 A。

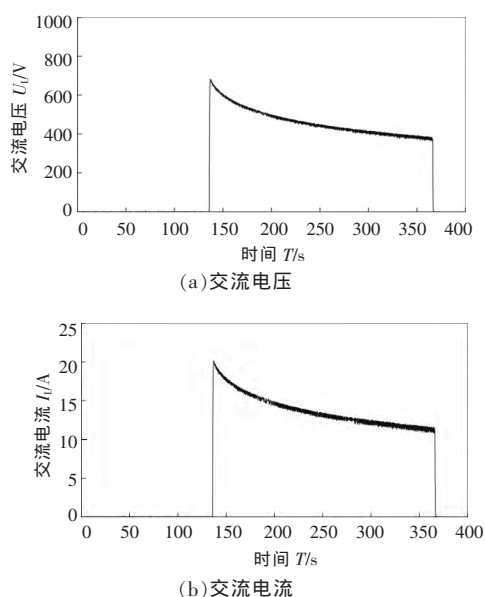


图 5 交流电压和电流  
Fig.5 AC voltage and current

#### 4 分析

根据以上对比试验,分析各组试验数据如下。

①当系统负载为蓄电池时,同一机组中,启动压力对转换效率的影响较小。这是因为蓄电池的内阻随着充电时间及充电量的变化而不断变化,发电机转换的电能都能高效地转换为蓄电池中的化学能储存起来。

②同一机组中,启动压力的提高不能对转换效率产生根本性的影响。在试验过程中,机组的启动压力设定之后,各个环节的设备按照参数选定,提高启动压力,蓄能器中虽然蓄积了更多的能量,但是系统的转换效率基本确定,只是小范围的振荡,无法大幅度提高。

③系统负载为蓄电池时的发电时间,较负载

为电阻时短。负载为蓄电池时,工作时间仅为 147.85 s;负载为电阻时,工作时间为 230.85 s,是前者的 1.5 倍。这是因为蓄电池容量大,能够迅速储存发电机输出的电能。

④负载为蓄电池时,数据的时域曲线较负载为电阻时的时域曲线平缓。负载为电阻时,各个数据曲线在蓄能器最开始释放液压油时都有一个尖峰,并且数值变化范围大,如电压变化为 303.63 V,电流变化为 9.2 A;而负载为蓄电池时,相对应的电压变化为 295.57 V,电流变化为 6.23 A。

⑤各种工况下,都有一个最优负载。每一个工况下,当负载为最优负载时,系统的转换效率达到最高。

#### 5 结论

本文介绍了鹰式波浪能转换装置的组成及工作原理,设计并进行了液压系统多级负载试验。从 4 个级别的不同工况下的试验结果对比可知,采用蓄电池作为液压系统的负载有助于储存电能,提高发电效率。在液压系统输出功率不同时,须要匹配不同级别的液压系统负载,同时调整负载为最优值,此时系统获得的转换效率可达到最高。

#### 参考文献:

- [1] AFDO Falcao . Wave energy utilization; A review of the Technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 899-918.
- [2] Zhang Dahai, Li Wei, Lin Yonggang. Wave energy in China: Current status and perspectives [J]. Renewable Energy, 2009, 34(10): 2089-2092.
- [3] 游亚戈,李伟,刘伟民,等.海洋能发电技术的发展现状与前景[J].电力系统自动化,2010,34(14): 1-12.
- [3] You Yage, Li Wei, Liu Weimin, et al. Development status and perspective of marine energy conversion systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 1-12.
- [4] 张亚群,于龙飞,盛松伟,等.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
- [4] Zhang Yaquin, Yu Longfei, Sheng Songwei, et al. Research on hydraulic power take-off system of wave energy converter [J]. Acta Energetica Sinica, 2014, 35(10): 2071-2076
- [5] 章宏甲,黄谊. 液压传动[M].北京:机械工业出版社,2004.55-75.
- [5] Zhang Hongjia, Huang Yi. Hydraulic Transmission[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004.55-75.

## Experiment for multi-level load of a power take off system of wave energy converters

Sheng Songwei, Zhang Yaqun, Wang Kunlin, You Yage

(Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** According to the characteristics of waves, a multi-stage load system for a power take-off system applied in wave energy converters (WECs) is designed. Firstly, it introduces the structure and working principle of the Sharp Eagle WEC. Secondly, the design contents of multi-stage load system of the hydraulic system is explained, including system components, experiment principles and methods. And finally, through experiments to verify whether the system is reliability. The result shows that the design of the multi-level load system is reasonable, efficient.

**Key words:** wave energy converter (WEC); power take off system (PTO); multi-stage load; efficiency