文章编号:1002-3682(2016)03-0063-11

一种越浪式波能发电装置越浪量和波压力 的试验研究^{*}

杨宗宇,刘晓鹏

(国核电力规划设计研究院,北京 100095)

摘 要:越浪式发电装置具有结构稳定、可靠性高等优点。在前人的研究基础上,对越浪式波 能发电装置的模型进行了优化设计,通过模型实验研究了该波能发电装置在不同波况、不同 干舷高度下对波能的俘获能力以及结构的受力情况。对越浪量的试验结果进行了无量纲分 析,分别得出了越浪式模型装置的越浪量关于干舷高度和波高的指数函数拟合曲线,总结了 两者对越浪量影响的普遍规律。通过对规则波和不规则波波浪作用下装置受力结果的归纳 总结,探讨了波能装置波压力和浮托力变化的一般规律。本研究可为越浪式波能发电装置的 研究提供参考依据,为波浪能的利用提供一定的参考价值。

关键词:越浪式发电装置;模型试验;干舷高度;波压力;浮托力;越浪量;无量纲分析 中图分类号: P743.2 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2016.03.007

海洋储有巨大的能量。海洋能可以通过很多形式表现出来,其中以波浪能和潮汐能 为两种主要的海洋能源。海洋能与其他能源相比,具有能量形式简单易转换、能流密度大 和分布广泛等特点。在当今能源消费日益增长以及化石燃料所带来温室效应和环境成本 日益受到重视的情况下,发展海洋能对于改善能源结构、减少化石能源对环境的负面影响 具有深远的现实意义。

对于波浪能发电装置研究,在航标灯、浮标上的小型波能装置得到了大规模的应用, 中、大型波能发电装置在日本和欧洲的一些国家得到了十分快速的发展,并且涌现出一些 比较成功的大中型波浪能发电装置。越浪式装置是其中的一种,其结构活动部件较少,整 体稳定性较高、可靠性好,适应各种极端海况的能力较强,在岸线布置的越浪式波能装置 还可以与防波堤等堤岸结构很好的结合。越浪式波能发电装置的主要原理:利用特殊地 形或者装置将波浪聚集在倾斜坡道之前,在坡道之前由于聚集作用波高变大,波浪越过坡 道之后进入水库,通过水库底部的低水头水轮机将水库中水的势能转化为电能。主要有 下面几种类型:

1)收缩波道装置(TAPCHAN),是挪威在1985年建成的波能电站,利用海岛的特殊 地形,波浪进入水库的坡道逐渐变窄,入射波在进入水库前波高逐渐变大进而能越过水 库,使得水库中水的势能通过水轮机转换成电能。2)漂浮式波能船(Floating Wave Pow-

(陈 靖 编辑)

 ^{*} 收稿日期:2016-05-22
作者简介:杨宗宇(1987-),男,硕士,工程师,主要从事水工结构和海岸结构方面研究. E-mail: yangzongyu@ snpdri.com

er Vessel)^[1],是一个海上的漂浮水仓,装置为矩形,在其4个角安装有4个压载仓支撑整个结构,装置的坡道和水仓位于结构中部。装置具有特殊的锚固系统,使得装置的坡道能够朝向波能最强的方向,因此该装置的转换效率较高。3)龙式波能装置(Wave Drag-on)^[2-3],是由丹麦开发的一种离岸越浪式波能转换装置。在该装置的坡道正前方两侧有两个聚波板,当波浪传播到坡道时,经过聚波板之后的波高会显著增大,随后波浪越过坡道,在坡道后有蓄水库,及时存储水体,水库位于水平面上方,在水库下安装有低水头涡轮机。该装置可根据不同情况进行排列组装,对于不同的极端海况也具有较好的适应能力。4)锥型槽波能发电装置(Sea Slot-cone Generator)^[4-5],其基本思路是:根据不同入射波高将海水存储于不同高度的水库内,每级水库都有一个涡轮机,海水流经涡轮机驱动其旋转而发电。多层水库设计使得此种装置可适应多种海面波况,保证了装置的工作时间。多级涡轮机是该装置最具特色的部分,它的启动力矩非常小,即使装置只有一个水库供水也能使装置高效地运作。该装置的优点是活动构件少,只有多级涡轮和回流控制阀门,易于安装和维护。

本文在之前对规则波波况下越浪装置水力性能研究的基础上^[6],设计了一种越浪式波 能发电装置,通过无量纲化方法分析了在规则波、不规则波波况越浪装置的越浪量变化,还 研究了不同干舷高度下装置的越浪性能,测量了装置主要部位在波浪中的受力情况。通过 对越浪式波能发电装置越浪性能和波压力的初步研究及不同波况下越浪性能以及结构受力 情况的对比,探究了越浪式波能发电装置的越浪规律和结构的波压力分布状况。

1 模型实验

1.1 实验布置

本文对如图 1 所示的实验装置进行了研究,由于本实验的研究对象为装置的水力性能,不涉及到漂浮时装置的性能,所以为本实验装置固定在水槽上。本模型包含 3 个主要部分:1)两侧的聚波板,防止波浪从两侧滑落;2)装置主体,包含前方坡道、中间过渡水仓和后方的测量水仓;3)装置整体支撑结构,使结构固定,并且可以通过该支撑结构的升降 来调节装置的吃水,进而改变装置的干舷高度。



Fig. 1 3-D graph of the OWEC model

图 2 装置的布置示意图(mm) Fig. 2 Layout of the OWEC model(mm)

实验在大连理工大学港海教研室波浪水槽中进行,水槽宽度为 1.3 m。本实验设计 水深为 0.6 m,将规则波和不规则波分别进行实验。为了测量装置的受力情况,在坡道上 部以及过渡水仓的底部共安装有 5 个压力盒①②③④⑤,压力盒的具体分布位置以及装 置各部分的尺寸见图 2。使用 DJ800 数据采集系统获取波压力数据。整个模型安装在水 槽的中部,浪高仪在装置前方 1.8 m 处。

1.2 实验组设计

试验模拟西沙水域的波况,平均波高 1.4 m,周期 3.5 s。实验长度比例尺 1:10,故 对应的模型试验波况为波高 0.14 m,周期 1.1 s。根据此安排的规则波实验组如表 1 所 示。为了探究装置在不同波浪状况下的越浪性能和波压力的差别,本文还研究了在不规 则波波况下装置的越浪性能和受力。为便于对比,不规则情况下均采用 1/3 波高和1/3周 期,对应于规则波情况下的波高和周期。由于造波板的冲程限制,现有实验室条件下不能 够造出有效波高为 0.16 m,周期为 1 s 的不规则波波况。具体不规则波实验结果见表 2。 **表1** 规则波实验组别

组 次	d_r/cm	H/cm	T/s	组次	d_r/cm	H/cm	T/s	组次	d_r/cm	H/cm	T/s
AH1T1	1	10	1.00	BH1T1	6	10	1.00	CH1T1	3	10	1.00
AH1T2	1	10	1.10	BH1T2	6	10	1.10	CH1T2	3	10	1.10
AH1T3	1	10	1.25	BH1T3	6	10	1.25	CH1T3	3	10	1.25
AH2T1	1	14	1.00	BH2T1	6	14	1.00	CH2T1	3	14	1.00
AH2T2	1	14	1.10	BH2T2	6	14	1.10	CH2T2	3	14	1.10
AH2T3	1	14	1.25	BH2T3	6	14	1.25	CH2T3	3	14	1.25
AH3T1	1	16	1.00	BH3T1	6	16	1.00	CH3T1	3	16	1.00
AH3T2	1	16	1.10	BH3T2	6	16	1.10	CH3T2	3	16	1.10
AH3T3	1	16	1.25	BH3T3	6	16	1.25	CH3T3	3	16	1.25

Table 1 The combination of regular wave parameters

表 2 不规则波实验组别

Table 2 The combination of irregular wave parameters

组 次	d_r/cm	$H_{rac{1}{3}}/\mathrm{cm}$	$T\frac{1}{3}/s$	组步	d_r/cm	$H_{\frac{1}{3}}/\mathrm{cm}$	$T_{\frac{1}{3}}/s$	组次	d_r/cm	$H_{rac{1}{3}}/\mathrm{cm}$	$T_{\frac{1}{3}}/s$
AH1T1	1	10	1.00	BH1T	1 6	10	1.00	CH1T1	3	10	1.00
AH1T2	1	10	1.10	BH1T	26	10	1.10	CH1T2	3	10	1.10
AH1T3	1	10	1.25	BH1T	3 6	10	1.25	CH1T3	3	10	1.25
AH2T1	1	14	1.00	ВН 2Т	°1 6	14	1.00	CH2T1	3	14	1.00
AH2T2	1	14	1.10	BH2T	2 6	14	1.10	CH2T2	3	14	1.10
AH2T3	1	14	1.25	BH2T	3 6	14	1.25	CH2T3	3	14	1.25
AH3T2	1	16	1.10	внзт	2 6	16	1.10	CH3T2	3	16	1.10
AH3T3	1	16	1.25	внзт	3 6	16	1.25	CH3T3	3	16	1.25

实验组波高从 10 cm 依次递增到 16 cm,周期为 1.00~1.25 s。d_r为装置的吃水深度,为了考察装置的吃水对越浪量的影响,将 d_r分别设置为 1,3 和 6 cm。由于装置垂直 长度固定为 20 cm,所以吃水的变化会导致干舷高度的相应变化。实验中控制每次造波 的时长 T,在测量水仓中得到越浪水体的体积 V,然后除以迎浪面宽度和时间 t,就可以得 到模型单宽上的平均越浪量 q,每组实验进行 3 次之后取平均值。得到实验数据之后,对 越浪量和波压力数据进行处理和分析。

2 实验结果及讨论

本文的主要研究目标为模型装置的越浪性能与不同波要素之间、与装置不同吃水之间的关系。研究装置在几种不同波况和吃水条件下的波压力分布情况,进而对该类装置的结构稳定性进行初步分析。

2.1 越浪量和波要素之间的关系

本实验采用 JENTSJE 和 JOHANNES^[7]提出的无量纲越浪量模型对越浪量进行 分析

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}},\tag{1}$$

式中,Q为无量纲越浪量;q为实测越浪量;H。为每个实验组的平均波高。为了寻找出越 浪量和干舷高度之间的普遍规律,使用无量纲参数 R=R。/H。代替干舷高度的具体数值, 其中 R。为干舷高度。由得到的越浪实验数据可得到图 3 和图 4 所示的 Q 与 R 的关系。



拟合指数曲线的函数关系式已在图 3 和图 4 中标出,由图可知,在不规则波的有效波高和规则波相同的情况下,不规则波的越浪量要小于规则波的越浪量;在规则波和不规则 波的波况下出现同样的变化规律:1)越浪量随着周期的增加有增加的趋势,在不规则波波 况下表现的更加明显;2)无量纲越浪量 Q 随着 R 的增加而减小,而且基本符合指数变化 规律,这与斜坡越浪量的基本模型相符合,由此还可以得到,波高越大越浪量越大,很显然 波高大的时候,能够提供足够的越浪;3)当 R 处于一定的范围内时,越浪量实验结果与函数曲线的离散化程度会随着 R 的增加而增加,这说明,当波高较小且有越浪时,指数函数的描述不够准确,越浪量的规律不够显著和稳定,这与实验情况也比较相符。

2.2 越浪量和干舷高度之间的关系

图 5 和图 6 分别给出了装置在不同干舷高度下的越浪量变化,从图中可以明显地看出,干舷高度越小,装置的越浪量越大,在大波高的情况下这个规律更加明显。实验过程中可以明显地看到,当增大吃水深度时,波浪水体的大部分能够越过坡道进入水仓。这主要是由于在同一波况下波浪的爬高能力相同,当吃水深度加大时,装置的干舷高度减小, 波浪就很容易爬高越过坡道,大部分水体都能够进入水仓中。由图 4 和图 6 可知,无量纲 越浪量 Q 和 R 基本符合指数关系,R 是干舷高度与波高的无量纲化参数,所以,当波高不 变时,Q 随着干舷高度的增加而减小。









2.3 装置的受力分析

本文还对装置的坡道和水仓在波浪作用下所受的压力进行了研究。通过安放的压力 盒①②③④⑤得到压力数据,实验的采样频率为 500 Hz。就装置的结构稳定来说,主要 研究的是装置极端情况下结构的受力情况。所以本实验选取波高 0.16 m 的波压力情况 作为主要的研究对象。选取每组 3 次实验中波压力没有明显的漂移的数据进行光滑处 理,得到如图 7 所示的规则波波压力。







由图 7 可以得到以下结论:

1) 坡道所受的波压力的数值从上至下逐渐减小,除了最底部的测点1之外,其余测 点都处在静水面之上,所以受到的都是冲击力。测点1受到波吸力和波压力的共同作用, 但主要都是波压力,测点2和测点3所受的全部是波压力;

2) 从装置底部测点的波压力图可以看到,由于装置底部浸没在水中,装置会受到波

压力和波吸力的反复作用,这与实验中装置出现前后晃动的实验现象相吻合;

3) 在同一周期不同波高的情况下,坡道和装置底部所受的波压力随着波高的增大而 增大,测点4的波压力和波吸力比测点5的稍小,这说明装置底部所受的波压力和波吸力 沿着入射波的方向逐渐减小。



Fig. 8 The comparison of wave pressure in different wave period during regular conditions 图 8 给出了不同周期下装置波压力的变化情况,基本规律与图 7 所表现出的基本趋

势相同。另外,在规则波波高不变的情况下,装置坡道所受波压力随着周期的增加而减小,从图中看出,当周期从1.00 s增加到1.25 s时,测点1的波压力从1 340 Pa 降到了650 Pa,降低了50%。最顶部测点3的波压力并未出现大幅的下降,从320 Pa 降到300 Pa。装置底部受力随着周期的增大而增大,当周期从1.00 s增加到1.25 s时,测点1的 波压力从160 Pa增加到190 Pa,增加了18%。



Fig. 9 Wave pressure in different wave height during irregular conditions



图 10 不规则波实验组不同周期下装置所受波压力对比 Fig. 10 Wave pressure in different wave period during irregular conditions

在不规则波波况下,由于波高和周期的不规律性,所以采用较长时间内波压力图进行 结果分析,每个实验组选取出现最大波高的时间段,本组实验选择 16 s内的受力情况进 行分析。选取的实验组合的波高和周期与规则波波况时相对应,得到的波压力如图 9 和 10 所示。 由图 9 可知,在不规则波不同波高的作用下,测点波压力的基本变化规律与规则波波 况时相同,各测点波压力随着波高的增大而增大。

由图 10 可知,在不规则波不同周期的作用下,测点波压力的基本变化规律与规则波 波况时相同。当周期从 1.0 s 增加 1.1 s,再增加到 1.25 s 时,坡道测点 1 的最大波压力 从 825 Pa 增加到 1 240 Pa,随后减小到 750 Pa,变化幅度在 50%左右。测点 2 的最大波 压力由 390 Pa 增加到 417 Pa 最后减小到 380 Pa,测点 1 的最大波压力变化幅度较小。 由此可知随着周期的增大,装置坡道的最大波压力先增大后减小。当周期从 1.0 s 增加 1.1 s,再增加到 1.25 s 时,而装置底部的最大波压力从 175 Pa 减小到 160 Pa,最后增加 到 200 Pa 左右。由此可知随着周期的增大,装置底部的最大波压力先减小后增大。

对比图 7 和图 9 可知,测点 3 在不规则波波况下的最大波压力为 1 380 Pa,而在规则 波波况下的最大波压力为 930 Pa,提高了 50%。最大波压力均出现在波高为 16 cm 的情 况下。在波高为 10 cm 时,2 种波况的最大波压力相差不大。

3 结 论

本文研究了波要素对装置越浪量和受力的影响,得到了波要素以及装置的吃水深度 对装置越浪量和受力影响的一般规律。

1)关于波要素对越浪量的影响:在实验中,对规则波和不规则波越浪量进行了无量 纲分析,并给出了模型装置越浪量的指数函数拟合曲线及规律:越浪量随着周期的增加有 增加的趋势;无量纲越浪量 Q 随着 R 的变化符合指数变化规律,当波高较小且有越浪时, 指数函数的描述不准确。

2)关于吃水深度对越浪量的影响:在装置高度固定的情况下,吃水越深,装置的越浪 量越大,在大波高的情况下这个规律更加明显。无量纲越浪量Q和R基本符合指数关系。

3)关于波压力的影响:①规则波波况下:装置坡道受力沿坡道从下而上逐渐减小,装置底部受力沿入射波方向逐渐减小。随着波高的增大,坡道中部和上部都会出现较大的冲击作用。在相同波高下,周期越小时,坡道所受最大波压力越大,装置底部的最大波压力则越小,而且波浪对于坡道的冲击作用也变得显著;②不规则波压力随波高的变化规律与规则波相同,但是随周期的增大,装置坡道的最大波压力先增大后减小,装置底部的最大波压力先减小后增大;③装置坡道所受波压力随着吃水的增加而增加,但是装置底部所受到的波压力随着吃水的增加而减小;④不规则波波况下的最大波压力比规则波波况下要大 50% 左右。

参考文献:

- LAGSTROE M G. Wave Power-moving towards commercial viability[C]//London: Institution of Mechanical Engineers Seminar, 1999;8-12.
- [2] FRIGAARD P, KOFOED J P, RASMUSSEN M R. Overtopping measurements on the wave dragon nissum bredning prototype[C]//Proceedings of the Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Toulon: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004(1): 210-216.

- [3] KOFOED J P, FRIGAARD P, MADSEN E F, et al. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon[J]. Renewable Energy, 2006,31(2):181-189.
- [4] MARGHERITINI L, VICINANZA D, FRIGARRD P. SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device[J]. Renewable Energy, 2009, 34: 1371-1380.
- [5] KEULENAER H D. Seawave Slot-Cone generator[J]. The Power of the Oceans-Leonardo Energy, 2007(1):1-6.
- [6] 陈兵,杨宗宇,BRUCE T. 越浪式波能发电装置的水利性能研究[J]. 可再生能源,2013(1):81-86.
- [7] JENTSJE W van der MEER, JOHANNES P F M JANSSEN. Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments[R/OL]. [2016-04-22]http://www.vandermeerconsulting.nl/downloads/ functional_a/1994_vandermeer_janssen.pdf

The Experimental Study on Overtopping Discharge and Wave Pressure of an Overtopping Wave Energy Converter

YANG Zong-yu, LIU Xiao-peng

(State Nuclear Electric Power Planning Design & Researching Institute, Beijing 100095)

Abstract: The Overtopping Wave Energy Convertor (OWEC) has the advantages of high structural stability and reliability. Base on previous studies, this paper design a new optimized OWEC model, the wave energy capture capability and structure stress status during different wave conditions and freeboard are investigated through model test of the OWEC. The exponential function fitting curve of the overtopping discharge on the freeboard height and wave height are respectively obtained by nondimensionalization, and the universal laws of the two factors on wave overtopping is also given. According to the analysis for pressure results of the OWEC during the regular wave and irregular wave conditions, the general changing laws of the wave pressure and uplift of the OWEC is obtained. The results can provide some reference for further research on the OWEC and the utilization of the wave energy.

Key words: OWEC; model test; freeboard; wave pressure; uplift; overtopping discharge; nondimensionalization