

# 前方后尖浮舱五边形后弯管水槽性能实验研究

李 猛<sup>1,2</sup>, 吴必军<sup>1</sup>, 伍儒康<sup>1,2</sup>, 陈天祥<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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为提高后弯管(BBDB)波浪能的转换效率,对基于新理念和经验研制的前方后三角浮力舱五边形后弯管模型在造波水槽中进行一级能量转换实验研究。共考虑约束方式、喷嘴比、链长、吃水深度、模型浮态等因素,设置23种实验工况进行对比。实验中测量入射波高、波周期、气室液位和气室内外气压差。实验结果得到,该模型俘获宽度比最高值为121.34%,远优于同样实验条件下前方后圆后弯管模型79.1%的历史文献最高值;并且具有较宽的响应周期,为后弯管在随机波条件下实现高效转换创造条件;在BBDB模型正向波作用自由漂荡运动中,测得最大俘获宽度比为94.73%。模型实验结果与高效空气透平机组的结合,为波浪能的高效、低成本利用提供可能。

**关键词:** 波浪能; 模型实验; 气动功率; 俘获宽度比; 振荡水柱; 后弯管

**中图分类号:** TK212.73; TV139.275

**文献标识码:** A

## 0 引 言

波浪能是一种分布广、蕴藏量丰富的可再生能源。波浪能开发利用技术<sup>[1-6]</sup>种类繁多,其中漂浮利用技术是研究的主流,而后弯管(backward bent duct buoy, BBDB)技术是漂浮单浮体技术的杰出代表。后弯管波能发电装置是由向后弯的L型管道、浮力舱、透平和发电机构成,它在波浪作用下俘获波浪能,使自身产生摇荡运动而获得机械能,然后通过后续转换系统(管道、气室、空气透平和发电机)把机械能转换为电能。由于可利用自身整体摇荡的机械能,因此后弯管波浪能利用技术有望获得较高的转换效率。

自1986年Masuda Yoshio<sup>[7]</sup>提出后弯管波能利用技术以来,许多学者对后弯管技术进行了研究。中国科学院广州能源研究所自1989年就开始后弯管型波力发电导航浮标的研究工作<sup>[8]</sup>,梁贤光等<sup>[8-10]</sup>通过对多种形状的后弯管模型进行水槽实验研究,在规则波作用下,将后弯管的初级能量转换效率(即俘获宽度比)由40.5%<sup>[9]</sup>提高到79.1%<sup>[10]</sup>,并得到前方后圆浮室后伸型模型为最佳模型。广州能源研究所

研建了至少4套小型航标灯用海试样机<sup>[8]</sup>和1台19 t的5 kW海试样机,试验中记录到最大发电功率为5.7 kW<sup>[11]</sup>。Toyota Kazutaka等<sup>[12,13]</sup>对多种形状的后弯管模型进行了水池和水槽实验研究,将俘获宽度比提高到78%。2006年爱尔兰研建的28 t的OE Buoy装置投放成功,海试时间超过3 a,经受住几次强飓风的考验<sup>[14]</sup>。

为提高后弯管的转换性能,本文基于前人研究和对后弯管技术新的认识,通过理论分析和实验积累,设计制造1种前方后三角浮力舱后弯管模型,管道开口为五边形,通过改变入射波周期、吃水深度、喷嘴比、约束方式等因素,实验研究该模型在多种工况下的俘获宽度比。根据实验结果找出较佳工况,以期设计并建造新型后弯管波力发电装置提供基础数据。

## 1 后弯管波能转换理论

后弯管技术是通过空气把波浪能转换为可用的能量。该技术可分为三级转换:一级转换通过浮体和管道内的气室把波浪能转换为空气的动能;二级转换把气体的动能通过空气透平转换为旋转

机械能;三级转换把旋转的机械能转换为电能或其他形式的能量。本文是通过实验方法研究模型把波浪能转换为空气动能的能力。

在波浪能利用技术中,遵守式(1)所示能量守恒关系:

$$E_w = E_1 + E_2 + E_3 \quad (1)$$

式中,  $E_w$  ——入射波总的能量;  $E_1$  ——装置俘获的能量;  $E_2$  ——装置运动造成的辐射能量(包括装置运动造成的顺波向辐射的兴波能量和装置运动造成的逆波向辐射的反射波能量);  $E_3$  ——从装置下透过的波浪能量。显然减小  $E_2$  和  $E_3$  可提高  $E_1$ ,  $E_2$  同装置外形有重要关系。

本模型实验中,气室内外的压差最大不超过 2 kPa,相对于标准大气压 101.325 kPa,气室内外压力差不超过总压强的 2%,气体在流动过程中可认为是不可压缩气体。气室输出的平均气动功率  $P_{air}$  由气室内外气体压力差和气室内液位算出。气室内液位变化由波高仪测出,压力差由气压差传感器测出,其计算公式<sup>[8]</sup>为:

$$P_{air} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{i+1} - h_i) \times \Delta p_i \times S / \Delta t \quad (2)$$

式中,  $n$  ——采样总次数;  $\Delta p_i$  ——第  $i$  次采样时气室内压力差, Pa;  $h_i$ 、 $h_{i+1}$  ——第  $i$  和  $i+1$  次采样时气室内水位, m;  $S$  ——气室水线截面积,  $m^2$ ;  $\Delta t$  ——采样时间间隔, s。

气室平均气流量  $Q_{av}$ :

$$Q_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_{i+1} - h_i| \times S / \Delta t \quad (3)$$

气室平均气压差  $\Delta p_{av}$ :

$$\Delta p_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta p_i| \quad (4)$$

气室平均气流量和平均气压差对设计相匹配的空气透平有重要作用。

由线性波理论可知,入射波功率<sup>[15]</sup>为:

$$P_w = \frac{1}{16} \rho g H^2 \frac{\lambda}{T} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] B \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  ——波长,  $\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)$ ;  $k$  ——波数,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $g$  ——重力加速度;  $T$  ——入射波周期;  $H$  ——入射波波高;  $d$  ——水槽的水深;  $B$  ——浮体的迎波宽度;  $\rho$  ——水的密度,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。

如果  $d/\lambda \geq \frac{1}{2}$  就是深水波条件,此时:

$$P'_w \approx 10^3 H^2 T B \quad (6)$$

由于采用式(5)计算复杂,因此文献[8~10]采用式(6)计算入射波功率来研究模型的能量转换性能,但造波水槽的波浪周期可调,当波浪周期较长时就可产生较长的波长,那么条件  $d/\lambda \geq \frac{1}{2}$  得不到满足,采用式(6)计算入射波功率就会产生较大的误差。本文采用式(5)计算入射波功率。

表征装置或模型一级能量转换性能的物理量通常采用俘获宽度比(capture width ratio, CWR)来描述,其定义为:

$$CWR = \frac{P_{air}}{P_w} \times 100\% \quad (7)$$

## 2 后弯管模型和实验装置

基于能量守恒定律和前人设计的装置形式对后弯管模型进行改造,把后弯管的浮舱尾部设计成三角形以减小垂直于结构物表面流体的运动速度,减少造波损失,增加管口进出口面积减少管道口兴波能量损失,增加吃水深度减少透射波能量损失。通过这些形状的改变,期望能提高模型的俘获宽度比。后弯管浮体模型的三视图如图 1 所示。实验模型用厚 7 mm 的木板制成,自身质量及所安装传感器质量之和为 25 kg。

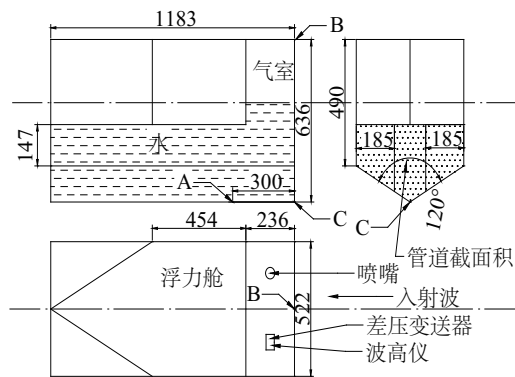


图 1 后弯管 BBDB 模型三视图(mm)

Fig. 1 Three views of (BBDB) model(mm)

后弯管模型实验在中国科学院广州能源研究所海洋能实验室的造波水槽中进行,水槽宽 1.2 m,高 1.2 m,长 56 m。图 2 为实验设备示意图及模型照片。在距离造波机约 7 m 处装有型号为 YWH200-DXX 的数字波高仪,可测量入射波浪高和波浪周

期;在距离造波机约 17 m 处放置后弯管实验模型,在模型气室顶部安装有另一型号为 YWH201-AXX 的模拟波高仪,用于测量气室内水位的相对波动;气室顶部还装有测压口,用 PY301 差压变送器测量气室内相对压力。入射波的波高数据由 SDA1000 传感器数据采集系统采集,由计算机控制,采样频率为 20 Hz;气室内的水位变化和气压相对变化被相应的传感器获取,通过 RBH8251-19 型采集卡进行同步采样,由计算机控制,采样频率为 32 Hz。为

保证实验所测得数据的准确性,提高实验可信度,每个实验工况至少重复 3 次。

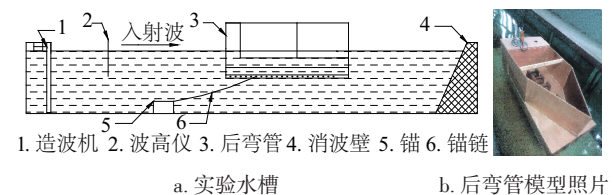


图2 实验装置简图及后弯管模型

Fig. 2 Experimental apparatus and BBDB model

表1 模型实验工况一览表  
Table 1 List of model test cases

工况	水深/m	模型浮态	总质量/kg	吃水深度/m	链长/水深( <i>l/d</i> )	气孔直径/mm	喷嘴比	约束方式	造波周期/s
1	0.915	水平	50	0.396	2.38	45	0.014	A挂点	0.9~1.7
2	0.910	水平	50	0.396	2.39	38	0.010	A挂点	1.2~1.4
3	0.910	水平	50	0.396	2.39	45	0.014	B挂点	0.9~1.7
4	0.910	水平	50	0.396	—	45	0.014	逆波拖航	1.3
5	0.910	艏倾	50	—	—	45	0.014	逆波拖航	1.3
6	0.910	艏倾	50	—	—	45	0.014	顺波拖航	1.3
7	0.910	水平	50	0.396	—	45	0.014	自由漂荡	1.3
8	0.905	水平	50	0.396	2.50	45	0.014	C挂点	1.3
9	0.905	水平	50	0.396	3.10	45	0.014	C挂点	1.3
10	0.905	水平	50	0.396	1.86	45	0.014	C挂点	1.3
11	0.905	水平	50	0.396	1.50	45	0.014	C挂点	1.3
12	0.905	水平	50	0.396	1.64	45	0.014	C挂点	1.1~1.5
13	0.905	水平	60	0.418	1.64	45	0.014	C挂点	1.1~1.5
14	0.905	水平	70	0.440	1.64	45	0.014	C挂点	1.1~1.5
15	0.905	水平	40	0.374	1.64	45	0.014	C挂点	1.1~1.5
16	0.905	水平	30	0.350	1.64	45	0.014	C挂点	1.1~1.5
17	0.905	水平	35	0.361	1.64	45	0.014	C挂点	1.1~1.5
18	0.900	艏倾	50	—	1.64	45	0.014	C挂点	1.3
19	0.900	艏倾	50	—	1.64	45	0.014	C挂点	1.3
20	0.900	水平	30	0.350	1.64	45	0.014	C挂点	0.9~2.0
21	0.900	水平	30	0.350	1.64	64	0.028	C挂点	1.1~1.3
22	0.905	水平	30	0.350	1.64	45	0.014	A挂点	1.1~1.5
23	0.905	水平	30	0.350	—	45	0.014	自由漂荡	0.9~1.7

注:A、B、C 位置参见图 1。

### 3 工况及实验内容

实验时水深设置约为 0.9 m,在整个实验期间

水深变化少于 2%。使用造波机造规则波,造波浪高约 0.1 m,造波周期在 0.8~2.0 s 之间。实验主要设置 23 种工况进行对比实验,包括约束方式、喷嘴

比(气孔大小)、锚链长度、吃水深度(总质量)、模型姿态的改变。实验工况如表 1 所示。

## 4 实验结果及分析

在入射波高约 0.1 m,不同波周期、不同工况下进行实验,采集数据。图 3 是某工况下测得气室内水位变化和气压差变化的一组数据。图 3 表明水位和气压差的变化尽管呈周期变化,但并非正弦变化。选取实验中采得的 10 个波的实验数据,通过上述公式计算可得到入射波功率、模型的气动功率及 CWR。

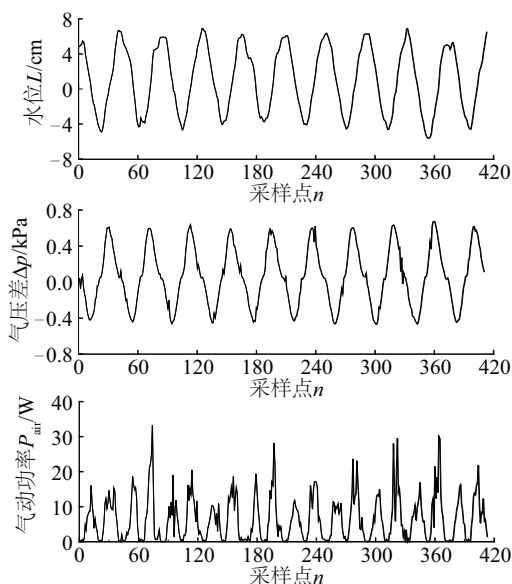


图3 气室内水位、气压差和瞬时气动功率变化图  
Fig. 3 Time history of water level, pressure difference and instantaneous pneumatic power in air chamber

### 4.1 约束方式的影响

模型的约束方式分为有锚链的定点方式和无锚链的运动方式。定点方式又有锚链的挂点之分,运动方式又有自由飘荡、逆波拖航、顺波拖航等之分。

工况 1、工况 3、工况 8 是在定点方式下不同

锚泊挂点的实验。不同锚链挂点位置如图 1 中的 A 点、B 点和 C 点。A 点在后弯管底部重心位置附近,B 点在后弯管气室前端顶部,C 点在后弯管前端底部拐点处。挂点为 A 和 B 时,CWR 随波浪周期的变化如图 4 所示。基于挂点 A 和 B 在 1.3 s 附近 CWR 达到最大值的情况,挂点 C 只测了在周期为 1.3 s 的实验。对实验数据进行处理得到 3 种工况下最佳响应点的性能,如表 2 所示。

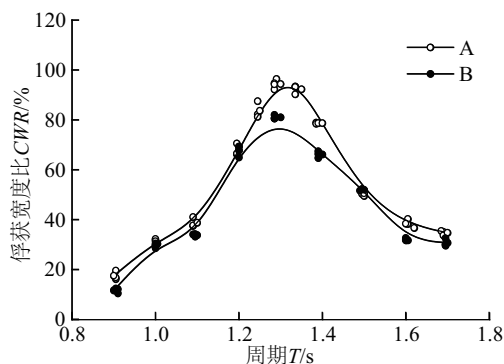


图4 不同锚泊挂点下的 CWR  
Fig. 4 CWR of BBDB with different anchor point

由实验结果可知,锚链挂点位置对模型的最佳响应周期未见明显影响,均在波浪周期约为 1.3 s 时获得最大 CWR,但挂点 B 相比较于挂点 A,最大 CWR 从 96.37%下降到 81.99%,且在各个周期的波浪作用下,CWR 均有小幅下降;而挂点 C 相比于挂点 A,最大 CWR 仅下降 3.67%。对于实海况下装置的设计来说,锚泊挂点位置选择挂点 C 时,能降低锚泊系统的工程实施难度,减少施工成本,而且装置的 CWR 不会明显降低。

对后弯管模型进行拖航实验和自由漂荡实验,设置工况 4~工况 7,工况 4 是用绳索拉着水平的后弯管模型迎着波浪前行,工况 5 是用绳索拉着艏倾的后弯管模型迎着波浪前行,倾角大概为 5°,工况 6 是弯管开口迎着来波方向顺着波浪传播方向拖行,

表2 不同锚泊挂点下最佳响应点的性能

Table 2 Optimum response performance of three cases of different anchor point

工况	挂点位置	$H/\text{m}$	$T/\text{s}$	$P_a/\text{W}$	$P_{\text{air}}/\text{W}$	$Q_a \times 10^3/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta p_a/\text{Pa}$	$CWR/\%$
1	A	0.1013	1.290	7.109	6.851	19.73	282.9	96.37
3	B	0.1025	1.285	7.245	5.940	19.03	248.6	81.99
8	C	0.1025	1.285	7.260	6.730	19.86	272.7	92.70



工况 7 是后弯管模型在入射波的作用下自由漂荡， 种工况下  $CWR$  实验结果如图 5 所示。4 种工况条件下最佳响应点的性能如表 3 所示，4

表 3 不同锚泊状态的不同工况下模型最佳响应点的性能  
Table 3 Optimum response performance of different anchoring state

工况	锚泊状态	$H/m$	$T/s$	$P_w/W$	$P_{air}/W$	$Q_a \times 10^3/m^3 \cdot s^{-1}$	$\Delta p_{av}/Pa$	$CWR/\%$
4	水平逆波拖航	0.1016	1.290	7.157	3.580	16.31	185.4	50.02
5	艏倾逆波拖航	0.1034	1.290	7.421	3.724	20.55	187.1	50.18
6	艏倾顺波拖航	0.1022	1.285	7.209	0.783	9.06	84.4	10.86
7	自由漂荡	0.1018	1.285	7.146	5.583	18.90	238.0	78.13

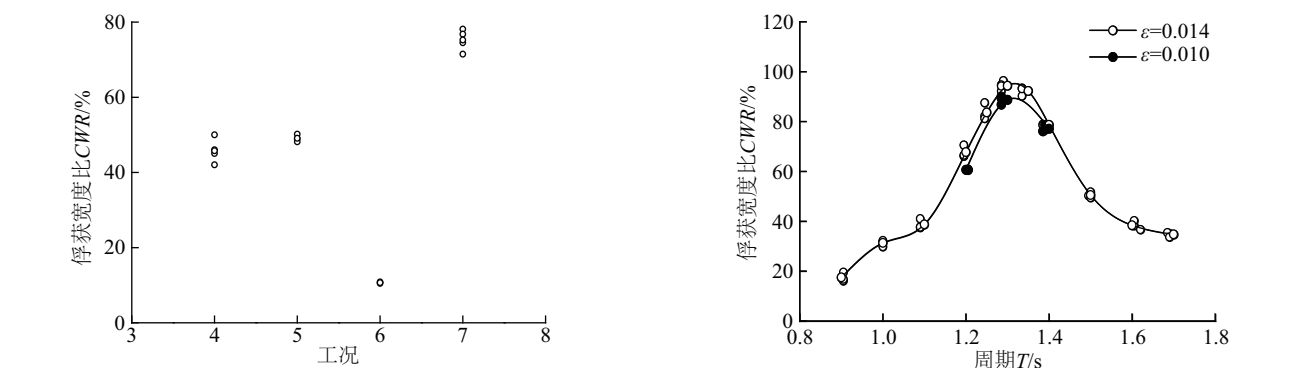


图 5 不同锚泊状态下 BBDB 模型的  $CWR$   
Fig. 5  $CWR$  of BBDB in different anchoring state

由实验结果可知,当模型逆波方向运动时,无论是水平姿态或是有一小角度的艏倾,都能达到最高约 50%的  $CWR$ ,这给装置在逆波正向航行过程中发电带来可能。工况 6 条件下,模型变成了前弯管, $CWR$  很低,仅为 10.86%。在没有锚泊系统作用下的工况 7, $CWR$  最高达 78.13%,说明后弯管在自由漂荡时也能获得较高的气动功率。

#### 4.2 2组不同质量下喷嘴比大小的影响

喷嘴比 ( $\varepsilon$ ) 是喷嘴面积与气室水线面积之比。工况 1 和工况 2 模型总质量为 50 kg,控制其他参量不变,改变气孔大小,工况 1 的气孔直径为 45 mm,工况 2 为 38 mm,喷嘴比  $\varepsilon$  分别为 0.014、0.010。工况 20 和工况 21,模型总质量为 30 kg,改变气孔直径,喷嘴比分别为 0.014 和 0.028。4 种工况条件下最佳响应点的性能如表 4 所示,工况 1、工况 2 和工况 20、工况 21 的结果对比如图 6 所示。由于 2 组工况的模型质量不同,因此对应的最佳周期也不同,工况 1、工况 2 的  $CWR$  最佳值对应的周期约为 1.2 s,工况 20、工况 21 的  $CWR$  最佳值对应的周期约为 1.3 s。

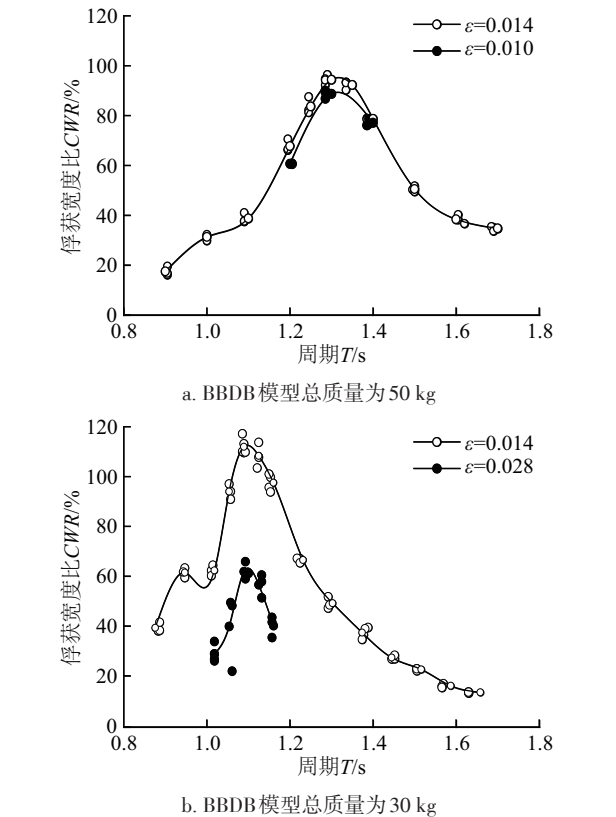


图 6 2组不同喷嘴比下的  $CWR$   
Fig. 6  $CWR$  of BBDB with 2 groups of different nozzle area ratios

由图 6 工况 1 和工况 2 的对比可知,喷嘴比为 0.014 时,较 0.010 时在同样入射波条件下有较大的  $CWR$ ,最大  $CWR$  由 90.02%提高到 96.37%,且在其他周期内  $CWR$  也有所增加。由工况 20 和工况 21 可知,在喷嘴比为 0.028 时,相比于 0.014 时,平均气压减少近一半,而平均气流量增加略少,同样入射波条件下的  $CWR$  减少近一半,由 2 组对比结果可知,在喷嘴比为 0.014 时,后弯管模型具有较大的  $CWR$ 。

#### 4.3 锚链长度与水深之比的影响

在其他参数基本不变的条件下,设置链长与水深

表4 不同工况下模型最佳响应点的性能  
Table 4 Optimum response performance of 4 cases

工况	总质量/kg	$e$	$H/\text{m}$	$T/\text{s}$	$P_w/\text{W}$	$P_{\text{air}}/\text{W}$	$Q_{\text{av}} \times 10^3/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta p_{\text{av}}/\text{Pa}$	$CWR/\%$
1	50	0.014	0.1013	1.290	7.109	6.851	19.73	282.9	96.37
2	50	0.010	0.1015	1.285	7.104	6.395	17.18	306.4	90.02
20	30	0.014	0.1019	1.195	6.494	7.617	20.80	280.8	117.29
21	30	0.028	0.1057	1.205	7.065	4.671	29.80	145.5	66.11

比为 1.50、1.64、1.86、2.50 和 3.10 共 5 种工况进行实验,测量后弯管在入射波周期约为 1.3 s 时各工况下的  $CWR$ 。5 种工况条件下最佳响应点性能如表 5 所示,其图形表达如图 7 所示。

表5 不同  $l/d$  的工况下 BBDB 模型最佳响应点的性能

Table 5 Optimum response performance of BBDB with different  $l/d$

参数	工况				
	9	8	10	12	11
$l/d$	3.10	2.50	1.86	1.64	1.50
$H/\text{mm}$	101.9	102.5	102.3	102.7	102.9
$T/\text{s}$	1.285	1.285	1.285	1.285	1.285
$P_w/\text{W}$	7.174	7.260	7.240	7.298	7.320
$P_{\text{air}}/\text{W}$	6.499	6.730	6.918	7.055	7.099
$Q_{\text{av}} \times 10^3/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	19.58	19.86	20.07	20.69	20.41
$\Delta p_{\text{av}}/\text{Pa}$	270.6	272.7	278.2	275.9	281.4
$CWR/\%$	90.59	92.70	95.55	96.67	96.98

由图 7 可知,当链长与水深比在 1.50~1.86 时,模型的  $CWR$  较大,均值约为 95%,增大锚链长度,链长与水深比在 2.5 和 3.1 时, $CWR$  略微下降,

表6 6种不同吃水深度下模型最佳响应点的性能

Table 6 Optimum response performance of 6 cases of different draft

工况	总质量/kg	吃水深度/m	$H/\text{m}$	$T/\text{s}$	$P_w/\text{W}$	$P_{\text{air}}/\text{W}$	$Q_{\text{av}} \times 10^3/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta p_{\text{av}}/\text{Pa}$	$CWR/\%$
16	30	0.350	0.1013	1.200	6.457	7.690	20.92	286.7	119.10
17	35	0.361	0.1007	1.245	6.695	7.845	20.27	287.6	117.18
15	40	0.374	0.1037	1.280	7.391	7.774	20.21	294.9	105.18
12	50	0.396	0.1027	1.285	7.298	7.055	20.69	275.9	96.67
13	60	0.418	0.1045	1.385	8.383	6.667	20.65	272.7	79.53
14	70	0.440	0.1055	1.390	8.593	5.750	19.66	248.1	66.91

根据实验结果可知,在后弯管总质量为 30 kg、吃水深度为 0.350 m 时,具有最高  $CWR$  为 119.10%,随着后弯管总质量的增加,吃水深度增

但是锚泊力会因为链长的变长而降低,因此在产品的设计时,其安全性和转换效率应进行综合考虑。

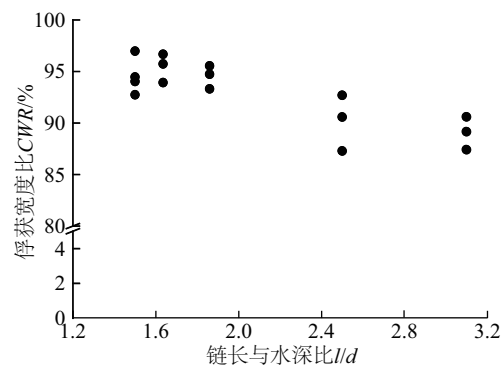


图7 不同链长与水深比工况下的  $CWR$

Fig. 7  $CWR$  of BBDB with different  $l/d$

#### 4.4 吃水深度的影响

在浮力舱中添加合适砝码,改变装置总质量研究不同吃水深度对  $CWR$  的影响。设计工况 12~工况 17 这 6 种吃水深度,研究后弯管在最佳响应波周期附近的  $CWR$ 。6 种不同吃水深度(总质量)时,实验结果如图 8 所示,最佳响应点的性能如表 6 所示。

加,后弯管的  $CWR$  整体呈下降趋势。由于装置的摇荡固有周期与装置总质量的平方根呈正比,随着后弯管总质量的增加,其最佳响应波周期也变大。

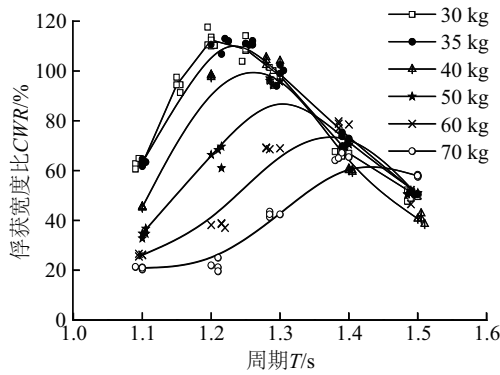


图8 总质量变化对CWR的影响  
Fig. 8 Impact of total mass on CWR

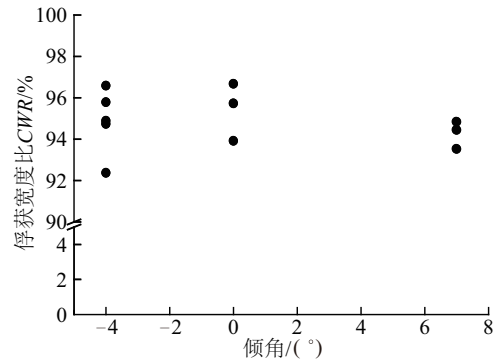


图9 后弯管3种姿态下的CWR  
Fig. 9 CWR of BBDB in 3 floating-state

#### 4.5 后弯管模型姿态变化的影响

考虑到实际海况,装置会出现小幅的艏倾和艉倾的姿态,因此设置工况 18 和工况 19 进行性能研究。工况 18 为后弯管处于艏倾状态,倾角约为  $7^\circ$ ,工况 19 为后弯管处于艉倾状态,倾角约为  $4^\circ$ ,对比处于水平状态的工况 12,在同一周期的入射波作用下,3 种工况的实验结果如图 9 所示,测量得到的最好性能点如表 7 所示。由实验结果可知,当后弯管模型出现小角度的艏倾和艉倾状态时,后弯管的 CWR 会稍微下降,说明小角度的纵倾角变化对后弯管的俘获性能有一定影响。

表7 模型在3种不同姿态下最佳响应点的性能

参数	工况		
	12	18	19
浮态	水平	艏倾	艉倾
$H/m$	0.1027	0.1012	0.1026
$T/s$	1.285	1.290	1.285
$P_w/W$	7.298	7.117	7.290
$P_{air}/W$	7.055	6.750	7.041
$Q_a \times 10^3/m^3 \cdot s^{-1}$	20.69	19.36	20.59
$\Delta p_{av}/Pa$	275.9	272.4	269.6
CWR/%	96.67	94.84	96.58

表8 较佳参数工况下模型最佳响应点的性能

Table 8 Optimum response performance of BBDB with better parameters								
工况	约束方式	$H/m$	$T/s$	$P_w/W$	$P_{air}/W$	$Q_a \times 10^3/m^3 \cdot s^{-1}$	$\Delta p_{av}/Pa$	CWR/%
22	挂点 A	0.1013	1.205	6.484	7.868	23.65	266.5	121.34
23	自由漂荡	0.1076	1.115	6.620	6.271	19.21	247.7	94.73

#### 4.6 较佳参数实验及分析

通过对前文实验结果分析,选择挂点 A、链长与水深比为 1.64、喷嘴比为 0.014、模型总质量为 30 kg、模型浮态水平等这些较佳参数进行性能实验研究,其最佳响应点的性能如表 8 所示,工况 22 结果如图 10 所示。显然 CWR 最高值达到 121.34%,CWR 大于 60%的周期宽度超过 0.3 s。按照相似理论可知,如果模型放大 20 倍设计样机,样机 240 t(包含设备及压舱物重量)、长 23.66 m、宽 10.44 m、吃水 7 m,在约 2 m 波高、周期 5.4 s,在入射功率密度约为 21.6 kW/m 波作用下,可产生 281 kW 的气动功率,如果气流功率到电的转换效率为 50%(目前国际上从气流功率到电功率的转换效率实海况测量值已接近 60%<sup>[3]</sup>),样机可输出电功率 140.5 kW,输出能力可观。

基于工况 22,断开锚链,使模型处于自由漂浮状态,得到工况 23。对工况 23 进行一级转换性能实验,得到结果如图 10,其最佳响应点的性能如表 8 所示。显然模型在无锚链约束下自由漂荡,也具有较高的 CWR,最大值为 94.73%,最佳响应周期约为 1.1 s,较工况 22 最佳响应周期向前迁移。模型在漂浮状态得到较大的 CWR,为装置在深海中低成本开发波浪能资源创造了条件。

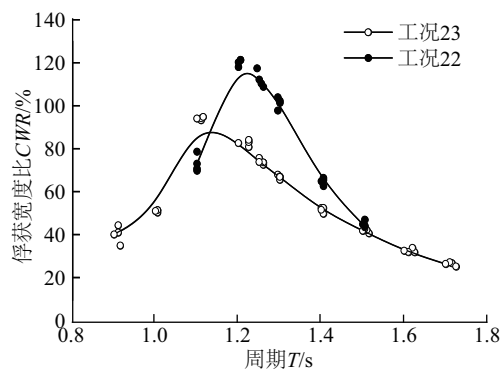


图 10 BBDB 模型在较佳参数下 2 种工况的 CWR

Fig. 10 CWR of BBDB with better parameters

## 5 结 论

本文从约束状态、喷嘴比、锚链长度、吃水深度等多种因素对前方后三角五边形后弯管模型在二维水槽的规则波下进行了一级能量转换性能实验研究。由实验结果可知,入射波周期对后弯管的 CWR 影响很大,存在最佳周期,在该最佳周期点上 CWR 达到最高;喷嘴比对后弯管的 CWR 影响较大,从实验结果可知,选择合适的喷嘴比有利于后弯管模型获得较大的 CWR。后弯管的总质量和吃水深度对 CWR 影响较大,总质量过大,后弯管技术的 CWR 会明显降低,后弯管的最佳响应周期会随总质量的增加而变大。后弯管由水平浮态变为小角度的艏倾或艉倾时,其 CWR 变化不大。锚泊挂点的位置和锚链长度与水深比对 CWR 有一定影响。水槽实验获得了最高 121.34% 的 CWR,相比于文献中 79.1% 的最高值提高了 53%,而且具有较宽的通频带,为随机波下实现高效转换提供了依据。在正向波作用自由漂荡下,测得模型最大 CWR 为 94.73%,为装置在运动状态下高效利用波浪能资源特别是深海区波浪能资源创造了条件,装置在运动状态下的高效转换突破目前波浪能利用技术定点使用的局限,意义重大。实验数据对后弯管波力发电装置的设计具有重要作用,为波浪能的高效和低成本利用提供了可能。

### [参考文献]

- [1] De O, Falcão A F. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 899—918.
- [2] Lindroth S, Leijon M. Offshore wave power measurements: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4274—4285.
- [3] Heath T V. A review of oscillating water columns[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, 370(1959): 235—245.
- [4] Astariz S, Iglesias G. The economics of wave energy: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45: 397—408.
- [5] Falcão A F O, Henriques J C C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 1391—1424.
- [6] Zhang Dahai, Li Wei, Lin Yonggang. Wave energy in China: Current status and perspectives[J]. Renewable Energy, 2009, 34(10): 2089—2092.
- [7] Masuda Yoshio. Experience in pneumatic wave energy conversion in Japan[A]. Proceeding of ASCE Specialty Conference on Utilization of Ocean Waves: Wave Energy Conversion[C], Rykusha CO., Japan, 1986.
- [8] 梁贤光, 王伟, 杜斌, 等. 后弯管波力发电浮标模型性能试验研究[J]. 海洋工程, 1997, 15(3): 77—86.
- [8] Liang Xianguang, Wang Wei, Du Bin, et al. Experimental research on performance of BBDB wave-activated generation device model[J]. The Ocean Engineering, 1997, 15(3): 77—86.
- [9] 梁贤光, 王伟, 蒋念东, 等. 5 kW 后弯管波力发电浮标模型性能的试验研究[J]. 新能源, 1995, 17(6): 4—10.
- [9] Liang Xianguang, Wang Wei, Jiang Niandong, et al. An experimental research on performance of the 5 kW BBDB model[J]. New Energy, 1995, 17(6): 4—10.
- [10] 梁贤光, 孙培亚, 王伟, 等. 后弯管波力发电浮体模型试验研究[J]. 新能源, 2000, 22(2): 10—18.
- [10] Liang Xianguang, Sun Peiya, Wang Wei, et al. The experiment study of BBDB generating body model[J]. New Energy, 2000, 22(12): 10—18.
- [11] 梁贤光, 蒋念东, 王伟, 等. 5 kW 后弯管波力发电装置的研究[J]. 海洋工程, 1999, 17(4): 55—63.
- [11] Liang Xianguang, Jiang Niandong, Wang Wei, et al. Research on the 5 kW BBDB wave-activated generation device[J]. The Ocean Engineering, 1999, 17(4): 55—63.
- [12] Toyota Kazutaka, Nagata Shuichi, Imai Yukitaka, et al. Effects of hull shape on primary conversion



- characteristics of a floating OWC “backward bent duct buoy” [J]. *Journal of Fluid Science and Technology*, 2008, 3(3): 458—465.
- [13] Imai Yukitaka, Toyota Kaxutaka, Nagata Shuichi, et al. An experimental study on generating efficiency of a wave energy converter “Backward Bent Duct Buoy” [A]. The 9th European Wave and Tidal Energy Conference [C], Southampton, UK, 2011.
- [14] Ocean energy—A world of power[R/OL]. <http://oceanenergy.ie/>.
- [15] 许维德. 流体力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979, 165—187.
- [15] Xu Weide. Fluid mechanics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979, 165—187.

## EXPERIMENTAL STUDY ON PERFORMANCE OF PENTAGONAL BACKWARD BENT DUCT BUOY WITH BUOYANCY TANK SQUARE IN FRONT AND TRIANGULAR IN BACK IN 2D WAVE TANK

Li Meng<sup>1,2</sup>, Wu Bijun<sup>1</sup>, Wu Rukang<sup>1,2</sup>, Chen Tianxiang<sup>1,2</sup>

(1. *Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** For improving the energy conversion efficiency of Backward Bent Duct Buoy (BBDB) wave energy utilization, a pentagonal BBDB model with the buoyancy tank square in front and triangular in back is developed based on the new ideas and the experiment experience and the BBDB is tested on the primary energy conversion in the wave flume (2D). 23 test cases for five influence factors including the restraint way, the nozzle area ratio, the anchor chain length, the draft and the floating-state of model are carried out for comparison. The incident wave height, wave period, the elevation of internal water surface and the air pressure in the air chamber were measured in the tests. From the results, the maximum Capture Width Ratio (*CWR*) of the new model is 121.34%, which is far superior to the maximum *CWR* of the one with the buoyancy tank square in front and half cylinder in back 79.1% in the historical document under the same test condition. In addition, it has a wide responsive wave period, which creates the condition for a high-efficiency conversion under the condition of irregular waves. When the BBDB is drifting freely along the direction of wave propagation, the maximum *CWR* is 94.73%. If the BBDB is combined with the high-efficiency air turbine and generator, it provides the possibility for efficient and low cost utilization of wave energy.

**Keywords:** wave energy; model test; pneumatic power; capture width ratio (*CWR*); oscillating water column (OWC); backward bent duct buoy (BBDB)