

# 滑动挡板堤式波浪发电装置水动力特性研究

王海军<sup>1,2</sup>, 周 欢<sup>1,2</sup>, 盛传明<sup>3</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;  
3. 天津大学前沿技术研究院有限公司, 天津 300017)

**摘 要:** 针对滑动挡板斜坡堤式波浪发电装置,通过模型试验和数值模拟,研究斜坡比对装置越浪量的影响以及水深、滑动挡板顶高程、泄流通道直径等对泄流通道内流速和能量转换的影响。研究表明,相同水深条件下,斜坡堤的最优斜坡比为2.0。相同水深和斜坡比时,泄流通道内流速随滑动挡板顶高程的增大而减小。通过调整滑动挡板顶高程与水位的关系及优化流道内径,该发电装置在试验中的稳定获能系数可达到约8.0%。

**关键词:** 波浪能; 挡板; 泄量; 斜坡比; 流速; 获能系数

**中图分类号:** TV871

**文献标识码:** A

## 0 引 言

占地球表面积 71% 的海洋蕴含着巨大的可再生能源,主要包括海洋风能、潮汐能、波浪能、海流能、温差能和盐差能等<sup>[1]</sup>。据联合国教科文组织出版的《海洋能开发》所述,全球波浪能的理论可再生功率约为 10 亿 kW<sup>[2]</sup>。近年波浪能发电得到快速发展,各种的发电技术和装置层出不穷,目前较成功的有 Pelamis<sup>[3]</sup>、Wave Dragon<sup>[4]</sup> 和澳大利亚的 Oceanlinx 公司研发的几种振荡水柱式装置<sup>[5]</sup>。

越浪发电是一种较新的波浪发电方式。挪威开发的锥形槽波能发电装置(sea-wave slot-cone generator, SSG)是一种具有多层水仓的装置,它利用不同的入射波高将水体储藏于不同高度的水仓内,通过多级涡轮装置能够保证装置高效运行。该装置整个系统的总效率为 10%~26%<sup>[6,7]</sup>。

为了克服 SSG 装置在结构上的复杂性,本文提出一种能将波浪发电装置与斜坡堤结合的新型越浪式波浪发电结构——滑动挡板斜坡堤式波浪发电装置,如图 1 所示<sup>[8]</sup>。该结构迎水面设有滑动挡板,可上下滑动以适应不同的水深,使结构在不同水位下均能汇集较大的越浪量,从而提高波浪能的捕捉效率。

本文采用模型试验和数值模拟 2 种方法研究

新型滑动挡板斜坡堤式波浪发电装置的水动力特性:第 1 部分为模型试验,研究斜坡比与装置越浪量的关系,确定斜坡堤的最优斜坡比;第 2 部分为数值模拟,分析泄流通道内流速的变化趋势,确定滑动挡板与堤前水位的对应关系。同时分析装置能量转换效率与管径的关系,得出最优管径和最大获能系数,为装置设计提供依据。

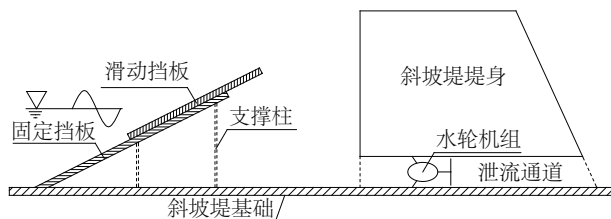


图1 滑动挡板斜坡堤式波浪发电装置

Fig. 1 Sliding plate breakwater type wave energy converter

## 1 模型试验

### 1.1 试验模型

参照《波浪模型试验规程》JTJ/T 234—2001<sup>[9]</sup>,模型设计采用正态模型,且符合重力相似准则,根据波浪参数、初步设计斜坡堤的几何尺寸以及实验室水槽条件,模型的长度比尺取  $\lambda_1 = 20$ ,时间比  $\lambda_t = \lambda_1^{1/2} = 4.47$ 。堤前水深  $d$  取 0.40~0.49 m,设定波

浪为正向规则入射波,波高  $H=0.1\text{m}$ ,周期  $T=1.34\text{s}$ 。通过模型试验研究固定波浪参数时,不同水深、不同挡板斜坡比与越浪量的关系。

试验用的波浪水槽宽  $1.0\text{m}$ ,高约  $1.5\text{m}$ 。模型置于水槽中部位置,距离造波板  $5.0\text{m}$ ,正对前部的造波板,模型后部为消波设施,减小波浪的反射,水槽如图 2 所示。

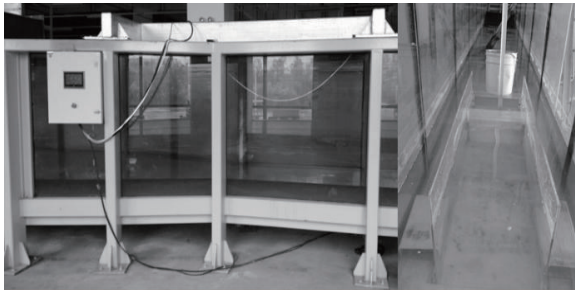
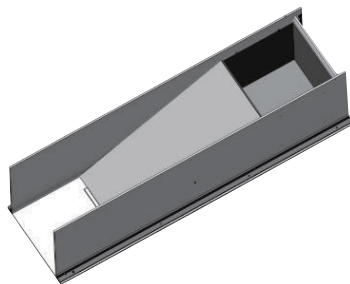


图2 波浪水槽示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wave flume

越浪试验采用的模型如图 3 所示,由底板、侧板、斜坡板以及储水箱前后挡板组成。整个模型长  $1.80\text{m}$ (斜坡部分总长  $1.25\text{m}$ ,储水箱长  $0.50\text{m}$ ,后部剩余  $0.05\text{m}$ ),宽  $0.52\text{m}$ (斜坡板和储水箱宽  $0.50\text{m}$ ,两侧的侧板各厚  $0.01\text{m}$ ),高  $0.61\text{m}$ (侧板高  $0.60\text{m}$ ,底板厚  $0.01\text{m}$ )。



a. 整体模型



b. 模型实物

图3 越浪试验模型

Fig. 3 Overtopping experiment model

## 1.2 试验内容及方法

越浪试验,即通过研究不同工况下的越浪量,确定最优斜坡比。研究越浪量  $Q$  与斜坡比  $m$  的关系,装置高度固定为  $0.5\text{m}$ ,斜坡比取  $1:0.50$ 、 $1:0.75$ 、 $1:1.00$ 、 $1:1.25$ 、 $1:1.50$ 、 $1:2.00$ 、 $1:2.50$  共 7 组。为研究最优斜坡比在不同水深条件下是否具有普适性,堤前水深取  $0.41$ 、 $0.43$ 、 $0.45$ 、 $0.47$  和  $0.49\text{m}$  共 5 个值。

越浪试验中采集 10 个波的越浪量,测得收集到的水体体积  $V$  后清空储水箱进行下一组试验。由于越浪量的非时均性,结果分析所用的越浪量均为平均越浪量:

$$Q = \frac{V}{NTB} \quad (1)$$

式中,  $Q$ ——单位宽度单位时间的平均越浪量,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $V$ ——收集到的水体体积,  $\text{m}^3$ ;  $N$ ——波的个数,取 10;  $T$ ——波周期,  $\text{s}$ ;  $B$ ——迎浪宽度,  $\text{m}$ 。

## 2 试验结果分析

整理越浪试验结果,越浪量  $Q$  与斜坡比  $m$  的关系如图 4 所示。从图 4 可看出,在相同的水深条件下,越浪量  $Q$  随斜坡比  $m$  的增大呈现出先增后减的趋势,  $m=2.0$  对应的越浪量最大。因为当斜坡较小时,斜坡较陡,波浪难以爬升,还未跃入储水箱就已滑落,导致越浪量减小;当斜坡较大时,坡度平缓,斜坡过长,波浪在爬坡过程中损失过多能量,波浪还未跃入储水箱就已滑落,导致越浪量减小;  $m=2.0$  时,波浪的能量损耗较小,越浪量出现极值。5 种水深条件下均有  $m=2.0$  对应的越浪量最大。

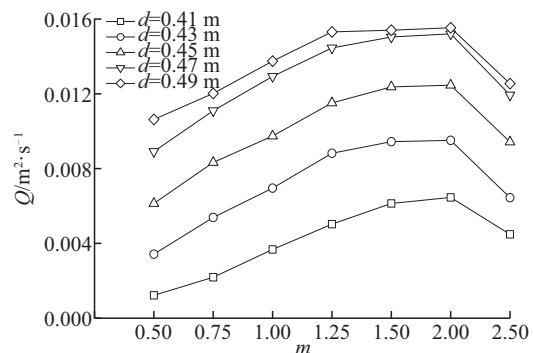


图4 斜坡比  $m$  对越浪量  $Q$  的影响曲线

Fig. 4 Influence of ratio of slope on wave overtopping discharge

同时还可看出,同一斜坡比条件下,水深越大越浪量越大。因为,水深越大,波浪需爬升的距离越短,也就越易跃入储水箱。

## 3 数值模拟

借助 Flow3D 建立数值模型,通过数值模拟与模型试验相结合的方法,研究越浪后泄流通道的内水力特性。

### 3.1 三维数值模拟模型建立

越浪模型计算区域长  $5.75 (m=0.5) \sim 6.75 (m=2.5)$  m, 流速模型计算区域长 7.3 m, 2 种模型均宽 0.5 m, 高 0.7 m。  $X_{\min}$  位于 -5 m 处, 为造波边界, 波浪为线性正弦波, 参数同试验,  $H=0.1$  m,  $T=1.34$  s; 越浪模型  $X_{\max}$  为 Wall 边界, 流速模型  $X_{\max}$  为 Specified Pressure 边界, 设置一定的水头。  $Y_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ 、 $Z_{\min}$  为 Wall 边界,  $Z_{\max}$  为空气边界。以流速模型为例, 其 2D 视图如图 5 所示。

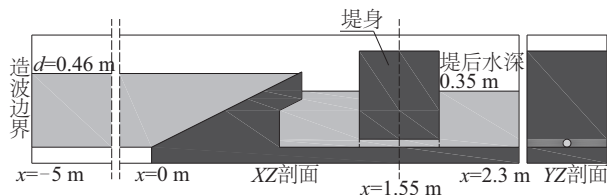


图5 流速模型2D视图

Fig. 5 2D view of velocity model

为验证数模方法的可行性, 首先模拟越浪试验工况(如 1.2 节所示), 比较 2 种方法的越浪量。然后通过流速数模研究堤前水深  $d$ 、滑动挡板顶高程  $h$  和管径  $D$  对越浪后泄流通道的平均流速  $v$  的影响, 并通过对流速的分析, 估算装置的获能情况。由于港池内水位一般都比较平稳, 变化较小, 根据模型尺寸, 堤后水位取为 0.35 m。波浪参数不变, 斜坡比  $m=2.00$ , 泄流通道管径取 5 个值: 50、75、100、150 和 200 mm, 堤前水深  $d$  与滑动挡板顶高程  $h$  的组合见表 1。表中每列同一堤前水深可对应多个滑动挡板顶高程, 共 30 个组合。

表1  $d$ 与 $h$ 的组合工况(cm)

Table 1 Combined condition of  $d$  and  $h$ (cm)

$d$	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	42	43	44	45	46	47	48	49	50	—
$h$	43	44	45	46	47	48	49	50	—	—
	44	45	46	47	48	49	50	—	—	—

### 3.2 越浪试验三维数值模拟的验证

将模拟出的波高结果与波浪理论进行比较, 取水深为 0.4 m 时  $x=0$  m 处(即斜坡堤堤前处, 如图 5 所示)的波面历时曲线, 并将其与理论作对比, 如图 6 所示。

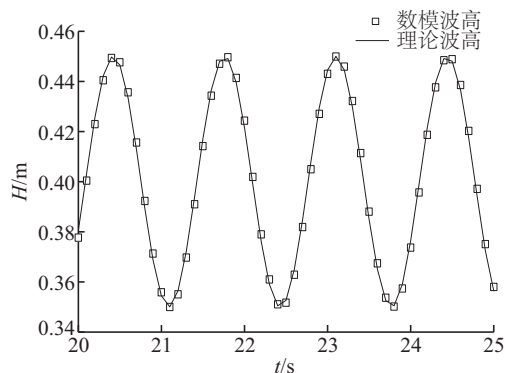


图6  $x=0$  m处的波面历时曲线验证图

Fig. 6 Verification of wave surface curve at  $x=0$  m

由图 6 可知, 数值模拟计算出的波高与理论波高均吻合得很好。

将数值模拟的越浪量与越浪试验所得的数据进行对比。以  $m=0.50$  为例, 对比结果如图 7 所示, 可见 2 种方法的结果相近。

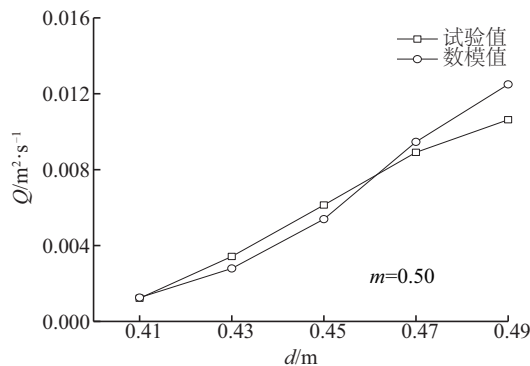


图7 越浪量试验值与数模值对比图

Fig. 7 Comparison of overtopping discharge between experimental and simulate data

因此, 数模可作为模型试验的合理补充, 用此研究泄流通道内的水动力特性。

### 3.3 流速模型数值模拟结果分析

在泄流通道内, 流体的流速以  $x$  方向为主, 重点取  $x$  方向流速进行分析。

由于流速并不恒定, 需要借助统计学方法对其进行处理。与越浪试验一样, 数值模拟同样取 10 个波时间段, 以流速采样点的流速为样本, 计算泄流通道流体的平均流速  $v$ 。流速采样点在泄流通道中轴线上中部中心处。  $D$  为 200 和 150 mm, 不同水深与滑动挡板顶高程组合时的结果如图 8 所示。

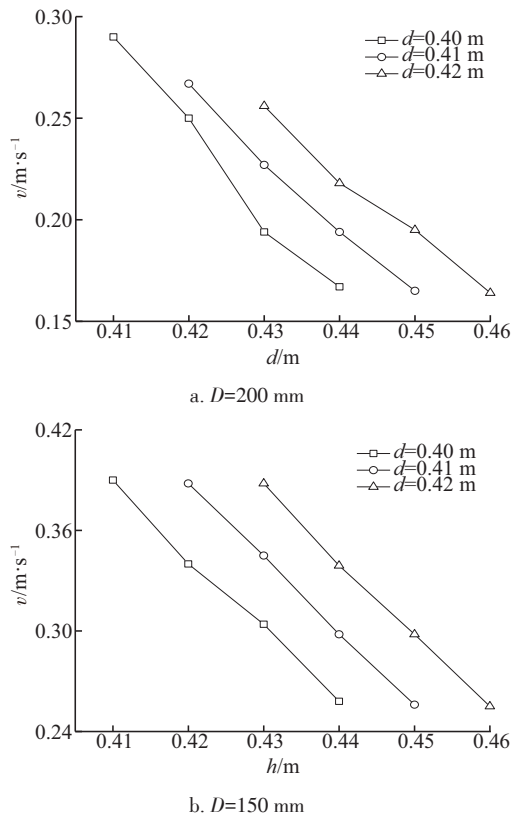


图8 不同水深与滑动挡板顶高程的流速

Fig. 8 Average velocity of different water depth combined with different sliding plate's top elevation

由图8可看出,泄流通道内平均流速与堤前水深、滑动挡板顶高程都有关。以  $D=200$  mm,  $d=0.40$  m 为例,平均流速随滑动挡板顶高程的增大而呈递减趋势; $D=150$  mm 同样有此趋势。因此  $d=0.40$  m 的较优滑动挡板顶高程为  $h_m=0.41$  m。 $d=0.41$  m、 $0.42$  m 的较优滑动挡板顶高程以此类推可得,分别为  $0.42$  和  $0.43$  m。

仿照此方法,可得出所有水深对应的较优滑动挡板顶高程。不同堤前水位,滑动挡板顶高程等于或略高于堤前水位时,泄流通道内平均流速最大。

### 3.4 管径与获能的关系

获能特性主要由获能功率和获能系数来表征,装置单位迎浪宽度上获能功率  $P_{\text{flow}}$ 、获能系数  $C_p$  的表达式为:

$$P_{\text{flow}} = \frac{1}{8} \rho v^3 \pi D^2 / B \quad (2)$$

$$P = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T \quad (3)$$

$$C_p = \frac{P_{\text{flow}}}{P} \quad (4)$$

式中,  $\rho$  ——水密度,取  $1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $v$  ——泄流通道流体的平均流速,  $\text{m/s}$ ;  $D$  ——泄流通道管径,  $\text{m}$ ;  $P$  ——堤前波浪的功率,  $\text{W/m}$ ;  $g$  ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $H$  ——波高,  $\text{m}$ 。

管径影响装置的获能,管径过大造成水头小,流速低,获能少,且流速太小不易利用;管径过小虽流速变大,但根据式(2),此时截面积小,获能不一定大,且可能使得水体来不及由泄流通道流出,而从越浪入口溢出,造成越浪能量损失。

以  $d=0.46$  m,  $h=0.47$  m 为例,泄流通道流速稳定后 5 个管径的获能功率和获能系数计算如表 2 所示。计算时所采用的是系统稳定时所计算的流速值。

表2 获能计算情况

Table 2 Calculation of energy capture

$D/\text{mm}$	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$P_{\text{flow}}/\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$	$C_p/\%$
50	0.738	0.789	6.2
75	0.594	0.926	7.2
100	0.508	1.030	8.0
150	0.252	0.283	2.2
200	0.157	0.122	0.9

由表2可知,获能功率随管径的增大呈现出先增后减的趋势,在  $D=100$  mm 时有较大值。

通过分析可知,当越浪量完全转化为泄流通道的泄流流量时,装置获能最优。当管径过大时,泄流通道中存在回流现象;管径过小时越浪入口出存在溢出现象。

计算结果表明,  $D=100$  mm 时,4 种工况 ( $d=0.46$  m,  $h=0.47$  m;  $d=0.47$  m,  $h=0.48$  m;  $d=0.48$  m,  $h=0.49$  m;  $d=0.49$  m,  $h=0.50$  m) 下泄流通道的平均流速比其他工况大,获能系数约为 8.0%。

## 4 结 论

1) 水深、斜坡比均影响装置的越浪量。装置高度不变时,斜坡比相同,水深越大,越浪量越大;水深相同,越浪量在斜坡比  $m=2.00$  时最大。

2) 对比数值模拟和模型试验结果可知,斜坡堤的越浪量趋势一致,数值差异不大,验证了数值模拟方法的可行性。



3)管径相同时,泄流通道内平均流速大小与堤前水深、滑动挡板顶高程有关。水深相同时,流速随滑动挡板顶高程的增大呈递减趋势。

4)相同水深和滑动挡板顶高程条件下,获能功率和获能系数随管径的增大呈现出先增后减的趋势。通过调整滑动挡板顶高程与水位的关系和优化泄流通道内径,该试验发电装置的稳定获能系数可达到 8.0%。

### [参考文献]

- [1] 盛传明. 复杂工况下潮流能水平轴水轮机水动力性能研究及叶片优化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [1] Sheng Chuanming. Study on the performance of horizontal axis marine current turbine under complicated conditions and blade optimization [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [2] 黄 燕. 碟形越浪式波能发电装置的水动力性能研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [2] Huang Yan. The study on hydrodynamic performance of saucer-like wave energy converter [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [3] 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.
- [4] De O. Falcão A F. Wave energy utilization: A review of the technologies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 899—918.
- [5] López I, Andreu J, Ceballos S, et al. Review of wave energy technologies and the necessary power equipment [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27(10): 413—434.
- [6] Margheritini L. R&D towards commercialization of the sea wave slot cone generator overtopping wave energy converter[D]. Aalborg: Aalborg University, 2009.
- [7] Margheritini L, Vicinanza D, Frigaard P. SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(5): 1371—1380.
- [8] 练继建, 王海军, 于通顺. 一种能够利用波浪发电的防波堤[P]. 中国: ZL201110117283.4, 2011-05-06.
- [8] Lian Jijian, Wang Haijun, Yu Tongshun. A kind of breakwater utilizing wave to generate electricity [P]. China: ZL201110117283.4, 2011-05-06.
- [9] JTJ/T 234—2001, 波浪模型试验规程[S].
- [9] JTJ/T 234—2001, Regulation for wave model experiment [S].

## STUDY OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF SLIDING PLATE BREAKWATER TYPE WAVE ENERGY POWER GENERATION DEVICE

Wang Haijun<sup>1,2</sup>, Zhou Huan<sup>1,2</sup>, Sheng Chuanming<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Frontier Technology Research Institute CO., Ltd., Tianjin University, Tianjin 300017, China)

**Abstract:** Aiming at sliding plate breakwater type wave energy power generation device, the effect of slope ratio on wave overtopping discharge of the device and influence of water depth, height of sliding plate's top, diameter of flow channel etc on flow rate and energy conversion in flow channel are studied through model test and numerical simulation. The results show that the best ratio of slope is 2.0 when water depths are same. Under the same condition of water depth and ratio of slope, the flow rate in flow channel decreases when height of sliding baffle's top increases. By adjusting the relationship between height of sliding plate's top and water depth and optimizing the inner diameter of the flow channel, the steady energy capture coefficient of this device can reach about 8.0% in the experiment.

**Keywords:** wave energy; plate; discharge; ratio of slope; flow rate; energy capture coefficient