

考虑波浪与地形共振机制的波浪能发电新概念

王懿^{1,2}, 陶爱峰^{1,2}, 祁锋³, 范骏^{1,2}, 余豪丰^{1,2}, 李硕^{1,2}

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029)

摘要: 提出了一种利用入射波浪与水下周期地形的共振来提高目标海域波能密度, 从而有效提高波浪发电效率的新方法。基于水槽物理模型试验, 通过设置特定周期的入射波来引发其与地形的共振现象, 进而增大地形附近水域的波能密度; 并在水面设置振荡浮子式波能转换装置, 使用故障记录仪测量不同波浪要素下发电装置的功率。研究发现, 水下周期性地形对波浪的反射系数可达 0.5 以上, 并在地形迎浪方向形成立波区域, 该区域波高增加明显, 大幅提高了波能转换装置的发电效率。

关键词: 波浪能; 共振; 实验研究; 发电效率

波浪能是一种在风的作用下产生的, 并以位能和动能的形式由短周期波储存的机械能。波浪发电装置的原理、结构均较简单, 因而不仅经济, 且效果显著, 故波浪能发电具有广泛的应用前景。全世界范围内的波浪能储量十分丰富, 尤其是南、北半球纬度 30°~60° 之间盛行西风的海域^[1], 中国沿海的波能功率密度在 2~7kW/m 之间^[2], 属于波能密度较低的海域。然而, 现阶段无论是我国还是其他波浪能技术领先的国家, 对波浪发电的研究都主要集中于如何有效促进波能转化装置的能量传递与转化效率等具体的机械设计方向, 而忽视了如何增大波浪发电海域波能密度等方面的问题。

基于上述情况, 本文针对中国海域波能密度较低的特点, 采用物理模型试验的方法, 从波浪经过水下周期地形时会发生共振从而提高目标海域波高, 进而提高波能转化装置可吸收波能的角度, 研究不同入射波高、入射波周期以及水深条件下所引发的共振对振荡浮子式波能转化装置发电效率的影响机制。

1 波浪能发电新概念的提出

1.1 波浪与地形共振机制

当波浪经过水下周期地形时, 满足特定条件便会产生布拉格共振 (Bragg Resonance)。该物理现象最初是布拉格研究 X 射线光波通过两平行晶体的反射时所发现的, 其结论是当晶体的间距为入射光波半波长的整数倍时, 光波的反射最强。与之类似, 当波浪经过周期地形, 且地形的间距为入射波半波长的整数倍时, 也会产生共振, 波浪能量可能因此而被反射, 并引发特定区域水面的剧烈波动, 增大该区域波高值。其表达式如下:

$$\frac{2L_0}{l} = n(n \text{ 为整数})$$

式中: L_0 是水下周期地形波长; l 是表面波波长。特别地, 当 $n=1$ 时, 地形对波浪的反射最强。

台湾自 20 世纪 90 年代以来针对系列潜堤(人工沙波地形)的消浪特性进行了深入的研究, 由于水下地形对水体交换的影响小, 诸多学者如台湾成功大学许泰文、欧善惠教授等展开了对连续潜堤应用的可行性研究。我国长江口的南港航道及珠江口的内伶仃岛北部等近海海域都存在大面积的沙波群^[3-4], 所以实际海岸环境中也具有较普遍引发布拉格共振效应的自然条件。

1.2 共振与波浪能发电的结合

通常波浪能发电要通过三级转换^[5], 第一级为受波体, 主要是采用聚波和共振两种方法把分散的波浪能聚集; 第二级为中间转换装置, 包括机械传动、气动传动、低压水力传动、高压液压传动, 目的是将受波体所吸收的波浪能转换为可利用的机械能; 第三级转换为发电装置, 即将机械能通过发电机转换为电能, 包括线性发电机技术等^[6]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51379071, 51137002); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项经费资助项目 (20145028412)

然而现阶段对波浪发电的关注主要都集中于具体的机械装置设计层面,忽视了最为基本的问题,比如如何增大波浪发电海域波能密度等。由于布拉格效应引起的水体共振所体现的最为明显的现象就是水面波动幅度的急剧增大,所以通过布拉格共振对沙波地形向海侧的波浪起到能量积聚的效果来增大目标海域的波高,从而提高波浪能发电能力,同样具有重要的研究意义与价值。

2 试验设计及组次安排

2.1 试验装置

实验水槽长 67 m, 宽 1 m, 高 1.5 m, 壁面为有机玻璃(见图 1)。水槽前端有造波机, 可以稳定地产生试验所需的各个工况对应的规则波。水槽后端布置由碎石块等组成的消波装置, 可以有效减小波浪反射的影响。水下连续地形由 5 块正弦混凝土块组成, 布置在距水槽前端 37.5 m 处。振荡浮子式波能转换装置布置在地形前方, 定子为永磁单向直线电机^[7], 浮子为不锈钢椭圆柱体。波能转化装置与故障录波仪连接成闭合电路, 荷载为额定电压 12 V 及额定功率 10 W 的小电珠。沿水槽全程布置 16 根浪高仪, 其中 9 根组成 3 套入反射分离装置, 分别用来测量浮子反射系数、地形反射系数与岸滩反射系数。

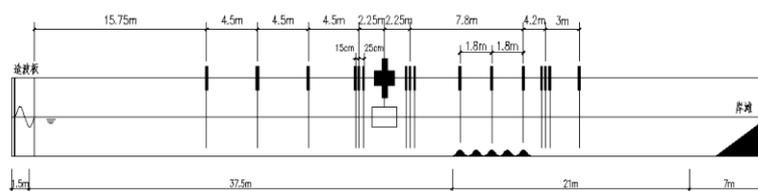


图 1 试验装置布置

设计一个椭圆柱体浮子, 该浮子长轴为 75 cm, 短轴 30 cm, 高 45 cm, 极大降低了对波浪的反射, 减小对波浪场的干扰。

2.2 试验设计

为了研究不同波浪要素对波能转化装置发电效率的影响, 需确定各波浪要素的取值。为了便于分析研究, 选用混凝土正弦地形进行试验。首先在相同的波高与水深条件下, 改变入射波周期, 通过录波仪记录的电压值确定浮子的固有周期范围。根据浮子固有周期来选定符合试验条件的入射波周期 T , T 的取值不能太小, 否则波能转化装置无法正常稳定工作; 选定作为共振周期的 T 值太大会使设计的地形尺寸过大, 不满足试验室条件。再根据所选共振周期确定正弦地形的波长与波高, 继而选定水深 h 。最后根据所选水深与地形波高, 选定入射波波高 H 。

测量不同波浪要素下的发电效率步骤: 首先不设置地形与发电装置, 测波浪场, 并使不同周期下浮子处的波高一致; 不设置地形, 在水槽中放入浮子, 测量自由波下的发电功率, 为后面测量有共振时的发电功率提供对照; 撤掉浮子, 仅设置地形测波浪场, 并确定立波波腹点位置; 最后同时设置地形与发电装置, 测量不同波浪要素下的发电效率。试验中浪高仪采集时长为 2 min, 录波仪采集时长为 1 min。

2.3 组次安排

根据试验设计所确定的波浪要素, 本试验的组次安排如表 1 所示。因波高变化对振荡浮子式波能转化装置的影响前人已经讨论较多, 所以本次试验过程中只设置 2 组波高对照组。

表 1 不同波浪要素对发电效率影响试验组次

组次	水深 h/m	波高 H/m	周期 T/s
1			0.90
2			1.00
3			1.10
4	0.6	0.08	1.15
5			1.20
6			1.30
7			1.40
8			0.90
9			1.00
10			1.10
11		0.08	1.15
12	0.7		1.20
13			1.30
14			1.40
15		0.10	
16		0.12	1.15
17			0.90
18			1.00
19			1.10
20	0.8	0.08	1.15
21			1.20
22			1.30
23			1.40

3 试验初步结果

为了验证试验的可靠性及可重复性，首先对波浪数据进行处理，对比有无浮子时地形反射系数。水深为 70 cm，波高为 8 cm 时，有无浮子时各个周期下地形反射系数的对比见图 2。3 种水深下，波高 8 cm 时不同周期所测得的地形反射系数对比见图 3。从图 2 可见，有无浮子测波场时地形的反射系数几乎相同，证明放置波能转换装置后对波浪场的影响不大，且试验的可重复性很高。由图 3 可见，当水深为 60 cm 时地形的反射系数最大可达 0.53，水深为 70 cm 时地形的最大反射系数也能达到 0.33，而当水深增加到 80 cm 时，地形的最大反射系数仅有 0.2 左右。即当地形尺寸确定时，布拉格共振所能反射的波浪能量随水深增加而减小。

各种工况下的发电功率见图 4。

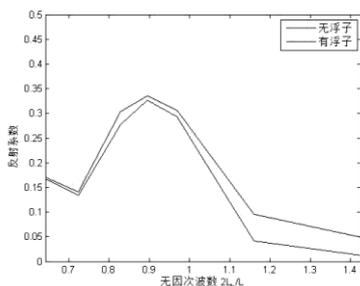


图 2 有无浮子时地形反射系数对比

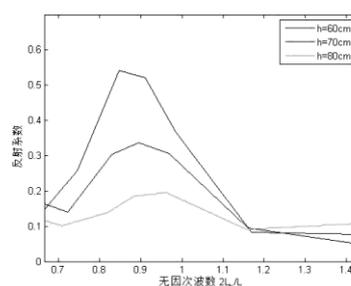


图 3 有浮子时不同水深地形反射系数比较

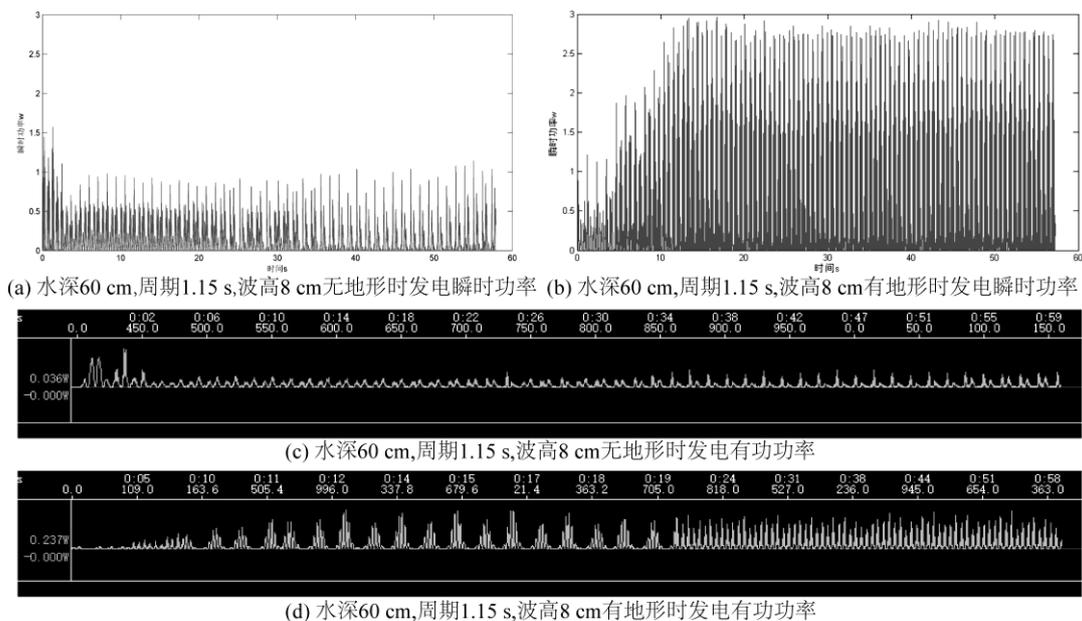


图4 各工况的发电功率

从图4可见,在不设置水下周期地形时,装置稳定发电的瞬时功率最大值在1W左右;设置水下地形后,瞬时功率的最大值接近3W,增大近200%,两种工况下的瞬时功率都稳定在一定的范围内,说明能进行发电作业。针对波浪时有时无、时大时小的特点,利用故障录波仪配套的软件计算了两种工况下的有功功率,可见在不设置水下地形时,有功功率为0.036W;设置水下地形后,有功功率达到0.237W,功率提升558.3%,效果显著。

4 结语

根据以上分析的试验结果,考虑波浪与地形共振后,利用特定区域产生立波且波高增大的特性来进行波浪能发电,可以明显增大其发电效率,有功功率最大增加558.3%。该装置在试验过程中电力输出稳定,装置可靠性较好。对试验结果还需进一步分析,明确随着水深、入射波周期及入射波高变化,波能转化装置发电效率的变化规律,探讨影响发电效率的主要因素。

参考文献

- 1 Falcao A F O. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 899-918.
- 2 余志. 海洋能源利用技术进展与展望[J]. 太阳能学报, 1999, 10(特刊): 214-226.
- 3 杨世伦, 张正扬, 谢文辉, 等. 长江口南港航道沙波群研究[J]. 海洋工程, 1999, 17(2): 79-88.
- 4 孙杰, 詹文欢, 贾建业, 等. 珠江口海域灾害地质因素及其与环境变化的关系[J]. 热带海洋学报, 2001, 29(1): 104-110.
- 5 刘美琴, 郑源, 赵振宙, 等. 波浪能利用的发展与前景[J]. 海洋开发与管理, 2010, 27(3): 80-82.
- 6 韩冰峰, 褚金奎, 熊叶胜, 等. 海洋波浪能发电研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 61-66.
- 7 张静, 于海涛, 陈琦, 等. 一种海浪发电用永磁单相直线电机的工作特性与实验分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7):110-116.