

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2016.05.0010

新型潮流波浪集成柔性浪轮式发电轮机的研究

王世明¹, 杨志乾¹, 吴帅桥¹, 田 卡¹, 江恩祝², 秦渭华², 李延刚³

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 国家海洋局东海标准计量中心, 上海 201306;

3. 国家海洋局东海预报中心, 上海 201306)

摘 要: 为了寻求波浪和潮流能集成利用的可能性, 基于 Gorlov 浪流集成理论, 提出一种新型潮流波浪集成发电轮机结构, 主要包含组合式导流罩、S 型叶片轮机、发电机、浮体 4 个部分。通过水动力理论计算、流体数值模拟以及水槽实验结合的方式, 对其进行结构的优化设计。实验证实了轮机优化方案的可行性以及浪流获能合理性。

关键词: 潮流能; 波浪能; 集成; 组合式导流罩; S 型叶片轮机

中图分类号: P743.1

文献标志码: A

文章编号: 1003-2029(2016)05-0051-04

波浪能是指海洋表面波浪所具有的动能和势能。波浪的能量与波高的平方、运动周期以及迎波面的宽度成正比。波浪能具有力量强、速度慢和周期性变化的特点, 是可再生能源中最不稳定的能源。潮流能是指海水流动的动能, 与流速的平方和流量成正比。潮流能随潮汐的涨落每天 2 次改变大小和方向, 相对波浪而言, 海流能的变化要平稳且有规律得多。

在海洋可再生能源开发利用中, 波浪和潮流能是密不可分的, 是有相互集成作用的。国外主要有 Gorlov 浪流耦合原理的发明专利, 俄罗斯漂浮式波浪能及潮流能发电通用正交轮机, 马来西亚科技大学的 Omar Bin Yaakob 教授浪流耦合理论及发电技术研究等; 大连理工大学已有“波浪能-潮流能转换及综合利用装置”授权发明专利, 能够有效地将能量分布广泛但能流密度低的波浪能转化成能流密度高的潮流能, 并通过潮流水轮机提取。基于目前海洋能开发主要存在的基础理论问题有 (1) 由于各种能源分布范围广且每个区域能量频率、构成不同, 目前国际上对海洋能商业性开发的流体力学特性, 特别是浪流集成的资源评估、集成机理、初级获能理论的研究非常浅^[1] (2) 目前无论国内还是国外,

目前都是对波浪和潮流能分别研究和利用, 或者在波浪和潮流能研究和利用中, 虽然在实际应用中有集成, 但对其发电设备的型式类别一般都明确归类为波浪和潮流能, 主要原因就是波浪和潮流能集成理论和工程问题都非常复杂^[2]。

由于波浪和潮流的不稳定和频率范围较宽, 波浪和潮流相互集成有时可以使发电效果增强, 有时会使发电效果增强减弱, 集成导致转换装置经常处于非设计工况或无法发电甚至使发电设备破坏。因此, 波浪和潮流能如何集成、何时集成? 研究典型海域波浪能和潮流能时空分布特征和相互集成作用机理, 并考虑波浪能、潮流与柔性浪轮式发电设备的流固耦合, 与发电设备的结构设计和海上布置结合起来, 使发电装置处于设计工况, 这些都是亟待解决的科学问题。

1 潮流波浪集成发电轮机结构

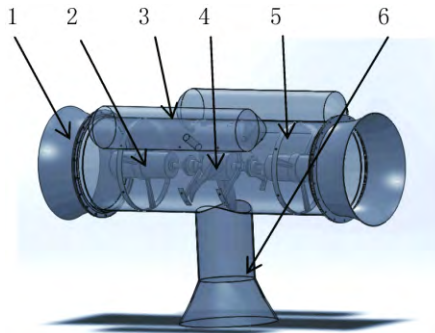
1.1 潮流波浪集成发电轮机

本装置主体结构是由组合式导流罩、S 型叶片轮机、发电机、浮体 4 部分组成。

收稿日期 2016-07-10

基金项目 国家海洋局 2013 年海洋可再生能源专项资金资助项目(SHME2013JS01); 上海市 2014 年优秀技术带头人计划资助项目(14XD1424300); 上海市军民结合专项资金资助项目“大型海洋自供电观测浮标产业化示范推广”

作者简介 王世明(1964-) 男, 教授, 博导, 主要研究方向为海洋工程装备及海洋可再生能源。E-mail smwang@shou.edu.cn



1.潮流导流罩 2.电机箱 3.浮体 4.叶轮 5.电机支撑架, 6.波浪导流罩

图 1 潮流波浪集成轮机发电设计图

如图 1 所示,潮流波浪集成发电轮机由防侧翻重块、潮流导流罩、支撑构件、浮体、波浪导流罩、电机箱、叶轮组成。本装置有两部分能量吸收过程,第一部分潮流能通过潮流导流罩收集,从扩口的入口段进入,通过加速段推动叶轮转动,从而使法兰盘转动,进而使与法兰盘固定的主轴转动,因主轴与电机轴连接,从而使电机工作。第二部分波浪能通过波浪导流罩收集,由于波浪的作用,使整个装置上下浮动,因此使垂直设置的波浪导流罩可以将波浪引入,波浪通过波浪导流罩上端的入口进入,波浪再通过潮流导流罩上的波浪入口推开挡板进入潮流导流罩内,可以使波浪推动叶片转动,带动法兰盘和主轴转动,从而使与主轴相连的电机工作。通过对波浪能和潮流能两种能量的吸收,可以最大程度利用海洋能源进行发电,增加吸收能量的效率。

1.2 潮流波浪集成原理

如图 2 所示潮流波浪集成原理,潮流导流罩内的 S 型叶片可以双向接收能量,无需改变整个装置方向,随一天两次的潮流走向,与有尾舵的集成装置达成同样的吸收效果。垂直设置的波浪导流罩可以将波浪引入,波浪通过波浪导流罩上端的入口进入,波浪再通过潮流导流罩上的波浪入口推开挡板进入潮流导流罩内,可以使波浪推动叶片转动,带动法兰盘和主轴转动,从而使与主轴相连的电机进行工作。

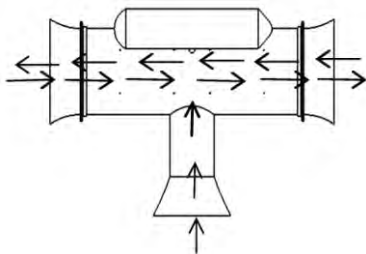


图 2 潮流波浪集成原理

2 S 型叶片结构优化设计及水槽实验

水轮机能量利用率 C_p 是衡量水动性能的关键指标,已得到国内外普遍认可。其计算公式为:

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho V^3 S} \quad (1)$$

结合公式 $P=nT/9.55$

$$C_p = \frac{nT}{4.78\rho SV^3} \quad (2)$$

式中 P 为叶片吸收的总功率, W; ρ 为海水密度, 1025 kg/m^3 ; S 为水轮机扫掠面积, m^2 ; V 为浪流速度, m/s ; n 为轮机转速, r/min ; T 为主轴扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; 为能量利用率系数。

2.1 S 型叶片结构设计

平板翼型和抗流不好,性能较差。风力机翼型吸收效率研究达到瓶颈,现在世界上获能最高的风机翼型能够达到 0.59 左右,且不好加工,占用空间太大。水平轴轮机获能效率最高约 0.4 左右,而垂直轴轮机的为 0.25~0.4。基于泵机原理,设计出特定 S 型叶片,经模型试验, S 形翼型能够获得较高的捕能效果。

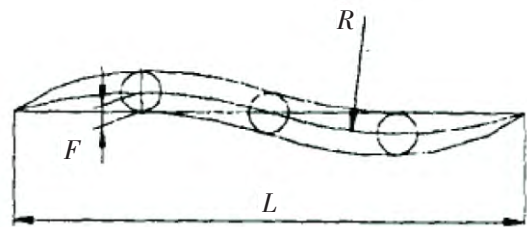


图 3 S 型叶片翼型

图中 F 为拱度,拱度 F/L 取 4% 左右性能最好,圆弧半径:

$$R = \frac{F}{2} + \frac{L^2}{32F} \quad (3)$$

本轮机采用简化三元流动模型,转轮出口平均速度分布可转化为径向流动方程,方程式可表示为:

$$\eta_R \omega \frac{d}{dr} (rV_u) = \frac{V_u^2}{r} + V_z \frac{dV_z}{dr} + V_u \frac{dV_u}{dr} \quad (4)$$

式中 η_R 为叶轮效率, ω 为叶轮旋转角速度, $\omega 2\pi n/60$; n 为叶轮转速; r 为半径; V_z 为轴向流速; V_u 为圆周速度。同时为了获得更好的发电效能,水流是双向的,要采用双向驱动,能量利用率高。查阅资料表明低转速叶轮驱动,叶轮采用双向,因此叶

片轮机采用双向对称翼型。

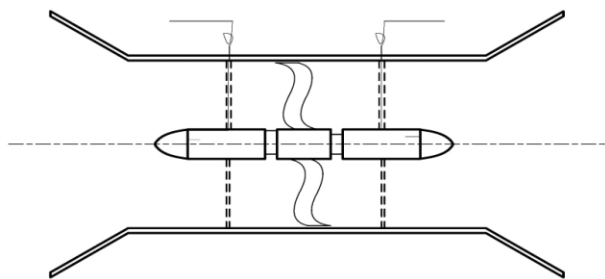


图 4 双向叶轮细长海浪发电系统示意图

2.2 水槽实验

实验通过改变叶片的不同安装角度 β 和叶轮片数 z ,来求得叶片安装角和片数的最优解,由于实验成本的限制,采用 3 个不同的安装角度及 2 个不同的叶片数量共计 9 种不同的 S 型叶片模型进行水槽实验。S 型叶片轮机参数如表 1。

表 1 S 型叶片轮机参数

参数名称	参数
安装角度 β	30°/40°/50°
对应轮机叶片个数 z	3/4
叶片截面形式	S 型对称截面
轮机扫掠面积 s	0.31 m ²

实验地点选在国家海洋局东海标准计量中心的水槽。该水槽型号是 200 m×4 m×3 m,可以模拟不同海况的浪流,产生规则波和不规则波,拖船速度相对范围是 0.5~3 m/s。通过 ZHO7-50 转速扭矩传感器测得 S 型叶片轮机的转速 n 及轮机扭矩 T ,将以上数据代入式(2)中,测得不同叶片轮机的能量吸收效率 C_p 。



图 5 东海标准计量中心水槽安装现场图



图 6 实验现场图

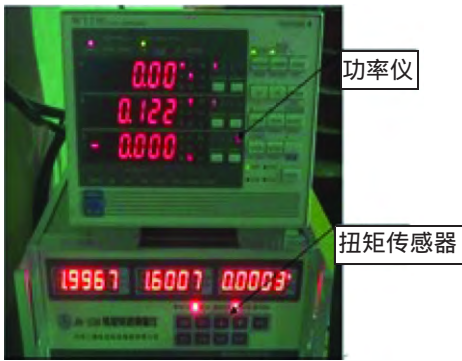


图 7 功率仪与传感器显示仪

3 试验结论

水槽试验中,采用轮机支架结构与拖车固连,通过电控室对拖车速度的控制来模拟海浪流速。在模拟浪高 0.5 m、周期为 2 s、浪流速度 1 m/s 下,改变不同的叶片安装角度 β 及叶片数量 z ,即更换不同的叶轮,获得功率、转速、扭矩数据如表 2。

表 2 试验收集数据

β/z	功率/W	转速/r·min ⁻¹	扭矩/N·m	能量转换率/%
30°/4	57.6	21.03	2.74	29.73
40°/4	70.04	42.97	1.63	36.15
50°/4	61.38	26.12	2.35	31.68
30°/3	52.29	16.13	3.26	26.99
40°/3	65.12	31.61	2.06	33.61
50°/3	55.3	19.54	2.83	28.54

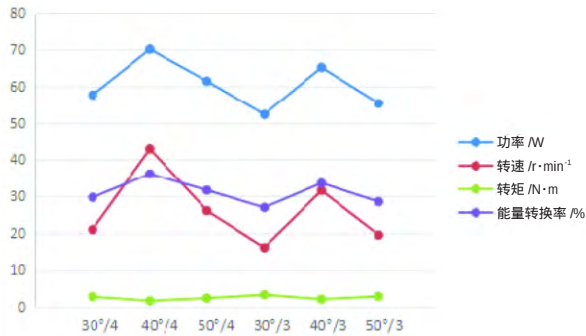


图 8 各项参数与叶轮 β/z 的关系图

结合上述试验所测相关数据,归纳结论如下:

- (1) S 型翼型 4 片叶轮的水动性能明显优于 3 片叶轮,更容易吸收潮流与波浪产生的能量,叶片数量过多容易在叶片附近造成紊流,导致能量吸收不均匀。
- (2) 叶片的安装角度 40°附近捕获能量明显优于 30°与 50°,但是试验成本有限,没有做更详细的

叶片安装角试验,推测在 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间存在最佳安装角。

(3) 从目前模拟浪流试验数据看出,在模拟浪高0.5 m、周期为2 s、浪流速度1 m/s下, $40^{\circ}/4$ 为最佳获能安装角/叶片数,能量转换率达到最大36.15%。在实际海域下,存在高于试验条件的海况,能量捕获会更大,效率也会更高。

4 总结

本文结合国内外先进潮流波浪集成理论,自主

设计潮流波浪集成发电装置,详细阐述该轮机的发电原理和结构设计方案。在潮流波浪集成的基础上,为以后更好地利用海洋能提供了有效的参考和借鉴。

同时,针对S型叶片轮机的分析,以其获能系数为主要考察点而设计了水槽实验方案,且通过实验数据对其性能及最佳获能点进行分析,上述实验方案设计及其实验结论为轮机的结构优化提供了有效的数据支撑,也可为解决类似的工程问题提供参考依据。

参考文献:

- [1] 王传崑,卢苇.海洋能资源分析方法及储量评估[M].北京:海洋出版社,2009.
- [2] Kofoed J P, Frigaard P, Friis M E, et al. Prototype Testing of the Wave Energy Converter Wave Dragon [J]. Renewable Energy, 2006, 31(2): 181-189.
- [3] 张理,李志川,肖钢,等.中低流速潮流能发电系统关键技术研究[J].中国海上油气,2013, 25(6): 115-118.
- [4] 樊世荣.波浪及潮流发电通用正交轮机开发[C]//中国可再生能源学会2011年学术年会论文集,2011.
- [5] 王世明,汪振,吕超,等.一种卧式浪流发电装置研究与实验[J].海洋技术学报,2014, 33(4): 39-45.
- [6] 李志勇.锥形螺旋波浪能和海流能通用发电装置:中国,CN 101139969[P]. 2012.
- [7] 王贤成,朱文斌,张国俊,等.潮流能和波浪能综合性能测试装置:中国,CN102767466A[P]. 2012.
- [8] Westwood A. Ocean Power: Wave and Tidal Energy Review[J]. Refocus, 2004,5(5): 50-55.
- [9] 王树杰,李冬,赵龙武,等.柔性叶片水流发电模型实验研究[J].太阳能学报,2010,31(3):362-366.
- [10] 邵萌.海洋能多能互补智能供电系统总体开发方案研究及应用[D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [11] 罗耀华,巫伟男,游江,等.水轮机模拟装置及最大功率获取控制策略[J].应用科技,2013,12(1):61-64.

Research on a New Type of Tidal-Current-Wave Integrated Power Generating Device with Flexible Blade Turbine

WANG Shi-ming¹, YANG Zhi-qian¹, WU Shuai-qiao¹, TIAN Ka¹, JIANG En-zhu²,
QIN Wei-hua², LI Yan-gang³

1. College of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. East China Sea Center of Standard and Metrology, State Oceanic Administration, Shanghai 201306, China;

3. East China Sea Forecasting Center of State Oceanic Administration, Shanghai 201306, China

Abstract: To explore the possibility of wave and tidal current energy integrated utilization, based on the Gorlov wave theory, this paper puts forward a new structural design of tidal-current-wave integrated power generating turbine. Its main structure is composed of modular power turbine shroud, S-type turbine blades, generators and floating body. Its structural design is optimized through hydrodynamic theoretical calculation, fluid numerical simulation and flume experiments. The results prove that the optimizing scheme is feasible and the structural design is scientific and rational.

Key words: tidal current energy; wave energy; integration; modular shroud; S-type turbine blade