

一种涵道双向泵叶轮浪流发电装置的研究分析

王世明¹, 吴帅桥¹, 田卡¹, 白连平²

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192)

摘要: 为解决海洋波浪能和潮流能耦合利用的问题, 提升浪流发电装置的发电效率, 上海海洋大学课题组设计了一种新型涵道双向泵叶轮浪流发电装置。主要对轴流泵的工作原理进行理论分析, 阐述将轴流泵排水原理应用于浪流发电装置捕获浪流能的可行性, 基于轴流泵叶片设计原理, 设计出一种可以双向捕获浪流能的叶片。经数据仿真和水槽实验进行验证, 得出涵道双向泵叶轮浪流发电装置可以在浪流流速 $v=0.5$ m/s 工况下浪即可启动, 满足低流速启动要求, 发电效率最高为 23.7%。

关键词: 轴流泵; 浪流能; 海洋能; Fluent 仿真; 真水槽实验

中图分类号: p743.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)02-0029-06
DOI: 10.11759/hyxx20160828002

浪流能发电技术是近年来全球海洋可再生能源研究的热点问题, 是应对能源短缺的一个重要解决手段。海洋波浪能是一种分布广泛、清洁、可再生能源, 有很大的利用价值。目前国外波浪能发电技术已非常接近于应用化水平, 如英国的 Peamis(海蛇)波浪能发电装置, 该装置已经基本实现商业运行。轮机式浪流发电装置因获能效率较高、可靠性较高, 现已成为国内外重点研究对象。水轮机一般分为垂直轴和水平轴, 垂直轴轮机发电效率高、无需换向, 但结构复杂、对主轴的强度要求较高, 限于材料的限制, 在潮流发电中垂直轴水轮机很少被选用^[1-3]。水平轴轮机开发较为成熟, 现多用于潮流能发电, 但水平轴水轮机大多要经过复杂的换向机构才能高效地捕获海洋能, 因结构复杂维护成本也较高^[4-6]。

基于现有垂直轴、水平轴轮机的优缺点, 上海海洋大学课题组设计一种涵道双向泵叶轮浪流发电装置, 其额定功率设计为 40 W, 水轮机主要由叶轮、三相异步永磁电机、涵道 3 部分构成。浪流力推动叶片旋转, 旋转叶片将浪流的动能转换为机械能, 从而实现海洋潮流能和波浪能的捕获。叶轮采用轴流泵的原理进行设计, 可双向捕获潮流能和部分波浪能, 无需复杂的换向装置。本文对轴流泵排水理论进行分析, 阐述涵道双向泵叶轮浪流发电装置的理论基础; 基于轴流泵叶片设计方法, 对涵道双向泵叶轮浪流发电装置叶片参数进行设计; 运用 Fluent 软件对叶轮进行水动力分析, 对比分析水槽实验获得实验数据、仿真数据和理论数据。

1 涵道双向泵叶轮浪流发电装置理论分析

1.1 涵道双向泵叶轮浪流发电装置模型

涵道双向泵叶轮浪流发电装置结构图如图 1。两部功率为 20 W 的永磁电机同轴对称放置, 面向涵道开口处由导流罩将电机密封, 另一端采用动密封, 且轴端伸出连接双向叶轮。叶轮采用轴流泵叶轮设计思路设计^[7-8], 叶片安放角为 42° , 水流方向上叶轮结构对称。将叶轮置于两永磁发电机中间, 与其发电机轴端相连接。用 6 个支撑板将两部发电机固定于涵道内。浪流可从涵道两端双向推动叶轮旋转, 叶轮旋转带动发电机输入轴旋转发电。从入水口看, 叶轮旋转方向始终为顺时针方向旋转, 旋转方向和有关。

收稿日期: 2016-08-28; 修回日期: 2016-10-10

基金项目: 国家海洋局 2013 年海洋可再生能源专项(SHME2013JS01); 上海市 2014 年优秀技术带头人计划项目(14XD1424300); 上海教委产学研项目(15cxy29); 上海海洋大学青年基金(A1-2035-15-002124)

[Foundation: State Oceanic Administration 2013 Marine Renewable Energy Foundation, No. SHME2013JS01; Shanghai 2014 Outstanding Technology Leader Program, No. 14XD1424300; Shanghai Education Commission Research Project, No. 15cxy29; Shanghai Ocean University Youth Foundation, No. A1-2035-15-002124]

作者简介: 王世明(1964-), 男, 山西忻州人, 教授, 博士, 主要从事海洋工程的先进设计制造及智能控制, 电话: 15692165065, E-mail: smwang@shou.edu.cn; 吴帅桥(1990-), 男, 吉林通化人, 硕士研究生, 主要研究海洋工程装备及可再生能源, 电话: 13127828909, E-mail: wushuaiqiao@sohu.com

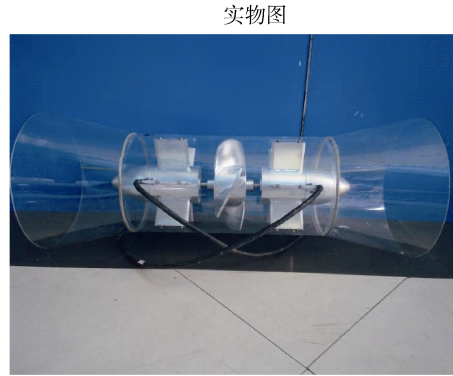
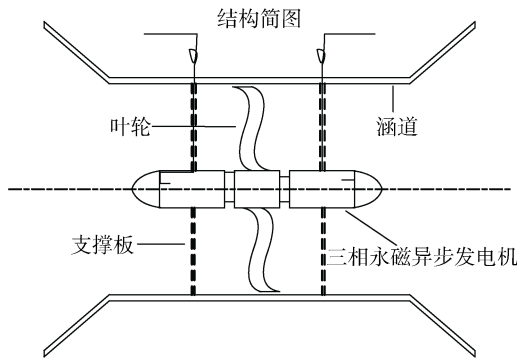


图1 涵道双向泵叶轮浪流发电装置

Fig. 1 A wave-flow generation device with ducted bidirectional pump impeller

1.2 理论分析

轴流泵是一种将机械能转换为水流的动能的装置,其分类有离心泵、混流泵、轴流泵、漩涡泵。在轴流泵中,水流进水与出水方向沿轴线方向,即液体流出叶轮的方向平行于轴线。轴流泵的重要参数扬程 $H(\text{m})$ 表示了轴流泵的推力,其表达如式(1),将浪流发电装置的出口静压力 $p_{\text{out}}(\text{Pa})$ 、进口静压力 $p_{\text{in}}(\text{Pa})$ 、出口液体的速度 $v_{\text{out}}(\text{m/s})$ 、进口液体的速度 $v_{\text{in}}(\text{m/s})$ 带入式(1)中,得到浪流发电装置出口水流高度 $H_{\text{out}}(\text{m})$,如式(2)。将式(2)带入式(3)中可理论计算出浪流发电装置的输出功率 $P(\text{kW})$ 。

$$H = \frac{p_d - p_s}{\rho g} + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} + z_d - z_s \quad (1)$$

式中: p_d 为泵的出口静压力(Pa); p_s 为泵的进口静压力(Pa); v_d 为泵出口液体的速度(m/s); v_s 为泵进口液体的速度(m/s); z_d 为泵出口到测量基准面的距离(m); z_s 为泵进口到测量基准面的距离(m)。

$$H_{\text{out}} = \frac{p_{\text{out}} - p_{\text{in}}}{\rho g} + \frac{v_{\text{out}}^2 - v_{\text{in}}^2}{2g} + z_{\text{out}} - z_{\text{in}} \quad (2)$$

式中: z_{out} 为浪流发电装置出口到测量基准面的距离(m); z_{in} 为浪流发电装置进口到测量基准面的距离(m)。

$$P = \rho g Q H_{\text{out}} \quad (3)$$

式中: ρ 为液体的密度(kg/m^3); Q_m 为流量(m^3/s); g 为重力加速度(m/s^2)。

波浪能 E_w 包括浪流的横向动能与垂直势能,综合表达式如式(4)。潮流能 E_t 表达如式(5)。潮流能和波浪能水平方向和垂直方向叠加,即可理论计算出波浪能和潮流能的总能量 E ,如式(6)。

$$E_w = \frac{1}{l} \int_0^l \int_0^h \frac{1}{2} \rho (v_x^2 + v_y^2) dz dx + \frac{1}{l} \int_0^l \frac{1}{2} \rho g h^2 dx \quad (4)$$

式中: v_x 为水质点的水平速度; v_y 为水质点的垂直速度; l 为波长; h 为浪高。

$$E_t = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5)$$

式中: A 为迎流面积(m^2); v 为水流速(m/s)。

$$E = E_w + E_t \quad (6)$$

能量转化率 η 是考证浪流发电机的重要指标^[9],将 E 代入式(7)中,可理论计算出浪流发电装置的能量转化率 η 。

$$\eta = \frac{P}{E/t} = \frac{P}{P_{\text{in}}} \quad (7)$$

式中: P 为发电的输出功率(kW); t 为浪流周期(s); P_{in} 为输入功率(kW)。

根据轴流泵叶片参数设计经验公式,计算出浪流发电机叶片的主要参数,叶轮直径 D 、轮毂比 \bar{d} 、叶栅稠密度、叶片数 n 、叶片翼型厚度。

以 v 为基变量,取 $h=0.35 \text{ m}$, $t=2 \text{ s}$,运用 matlab 数据分析软件,计算出 P , η ,见表 1。

表 1 理论计算数据

Tab. 1 Theoretical calculations

v (m/s)	P_{in} (W)	P (W)	η (%)
0.5	0.51	0.15	28.87
0.8	13.21	3.55	26.91
1.5	54.8	14.98	27.34
1.8	175.11	49.27	28.14
2.0	257.31	55.32	21.5

2 基于 fluent 流场仿真分析

2.1 控制方程

由于轮机在水中旋转运动,水会出现紊动

现象, 需要考虑湍流的影响, 采用 $k-\varepsilon$ 模型, 如式(8)。流场的控制方程包括连续方程和动量方程, 可以表达成如下形式:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y\varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z\varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + S$$

式中: φ 为变量; Γ 为扩散系数; S 为源相; v_z 为水质点 z 方向速度。

2.2 计算域网格划分

计算域设定为矩形, 由外部静止域和叶轮区域旋转域组成, 设定计算域左边为速度入口, 右边为压力出口。外部静止区域划分为矩形网格, 内部旋转区域加密处理, 整个技术区域网格划分如图 2 所示。

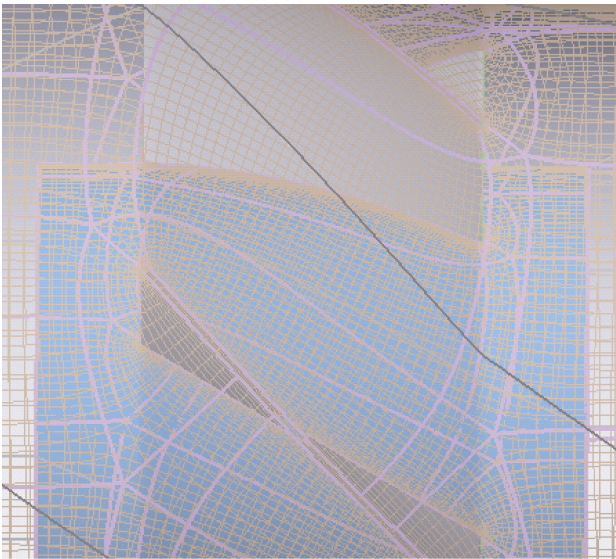


图 2 计算区域网格划分
Fig. 2 Meshing of computational domain

2.3 数据仿真结果分析

以 v 为基变量, h 设为 0.35 m, $t=2$ s, 仿真数据结果见表 2, 从数据可以看出, η 稳定在 25.7% 左右; 在 $v > 2$ m/s 工况下, η 会大幅降低。在运算过程中, 观察仿真流速图的动态变化, 可以看出在 $v < 1.8$ m/s 工况下, 叶轮尾部水流的尾流场成规则的旋转状态, 在 $v > 1.8$ m/s 工况下, 尾流场成不稳定的流动状态, 不规则的尾流场使得叶轮的综合作用力发生变化, 叶轮转速的增量变小, 使得 η 降低。仿真的数据结果低于理论计算的结果。

表 2 仿真数据

Tab. 2 Simulation data

v (m/s)	P_{in} (W)	P (W)	η (%)
0.5	0.51	0.13	25.79
0.8	13.21	3.45	26.12
1.5	54.8	13.87	25.32
1.8	175.11	45.09	25.75
2.0	257.31	50.84	19.76

3 水槽实验分析

3.1 水槽实验设计

实验场地选择国家海洋局东海标准计量中心水槽, 该水槽长度为 200 m、宽度为 5 m、水深为 5 m, 行车行驶速度范围为 0~4 m/s, 水槽可设定 h 为 0~0.5 m, 实验仪器有 3169 钳位功率计, 可测量三相发电机的三相电压, 电流, 功率; 低频示波器; 整流器; 滑动变阻器, 可充当负载。

水槽设定 $h=0.35$ m, $t=2$ s, 行车行驶速度分别设定为 0.5, 0.8, 1.5, 1.8, 2 m/s。将两端电机分别接入电阻器充当负载, 电阻都设定为 20 Ω 。3169 钳位功率计。将涵道双向泵叶轮浪流发电装置悬置于行车下, 并且水平置于水面下 50 cm 处。浪流发电装置在行车的牵引下在水面下运动, 能够模拟出浪流发电装置在海浪中的工作状态。涵道双向泵叶轮浪流发电装置水下安装如图 3 所示, 3169 钳位功率计记录发电机的输出数据, 测量数据如图 4。

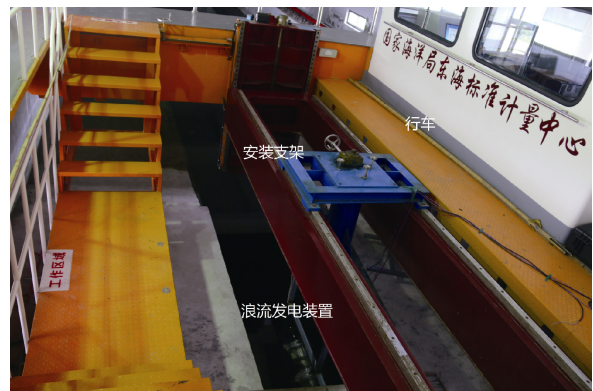


图 3 涵道双向泵叶轮浪流发电装置水下安装
Fig. 3 Underwater installation for the wave-flow generation device with ducted bidirectional pump impeller

3.2 水槽实验数据分析

在不同 v 工况下, 涵道双向泵叶轮浪流发电装置的输出功率 P 变化特性绘制成曲线图, 如图 5 所示。

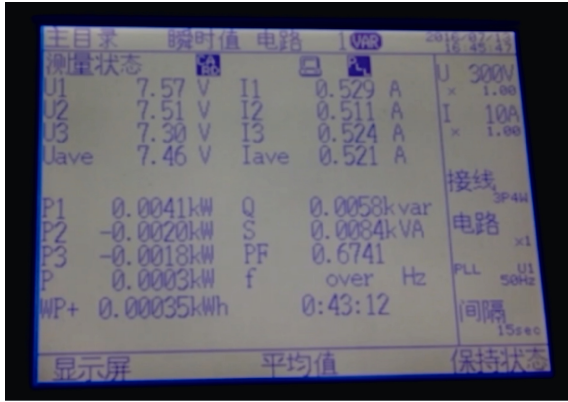


图 4 3169 钳位功率计记录数据
Fig. 4 A screenshot of data recorded by 3169

图中最高点代表在浪流的一个周期内 P 的最高值，将数据整理成表格 3。

如图 5 所示，在 $v=0.5$ m/s 工况下，涵道双向泵叶轮浪流发电装置即可以启动，叶轮能够保持低速旋转， P 呈现周期性变化。在 $v=1.8$ m/s 工况下， P 稳定在 37 W，接近额定功率，并呈现周期性变化。在 $v=2$ m/s 工况下， P 超过额定功率，超过部分在电机承受范围内。

在一个周期内， P 先上升后下降，说明涵道双向泵叶轮浪流发电装置吸收了部分波浪能作用。水流经过水轮机后，会产生旋转的尾流，水流的轴线流动和旋转的尾流相互作用会对叶轮的受力产生影响，

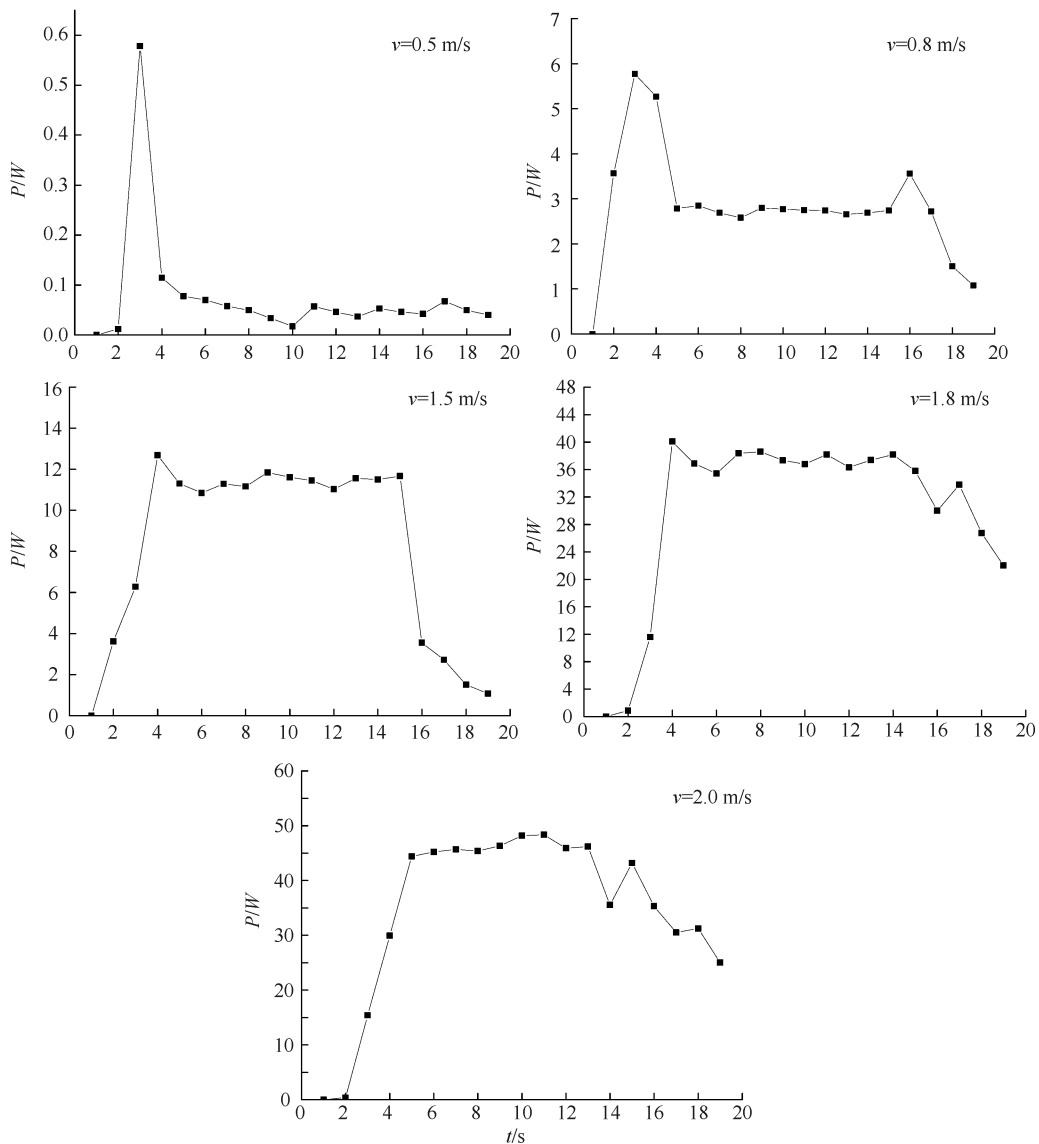


图 5 不同流速下浪流发电机输出功率
Fig. 5 Output power of device in different wave-flow rates

表 3 水槽实验数据

Tab. 3 Experimental data from the tank experiment

v (m/s)	P_{in} (W)	P (W)	η (%)
0.5	0.11	0.51	22.93
0.8	3.18	13.21	24.1
1.5	12.79	54.8	23.34
1.8	41.87	175.11	23.91
2.0	45.03	257.31	17.5

水轮机的转速会产生快慢变化, 所以功率的周期变化曲线并不是平滑的, 而是呈现波动状态。

对比理论计算, 模拟计算和水槽实验 3 种不同分析数据, 绘制 3 种不同情况下 η 关系曲线, 如图 6 所示。分析图 6 可知, 涵道双向泵叶轮浪流发电装置在 $v=1.8$ m/s 以下, η 稳定在 23.7% 左右, 接近于理论值 26.1%。当 $v>1.8$ m/s 后, 尾流场不断地加强, 尾流场对叶轮的受力影响不断加大, η 开始明显降低。

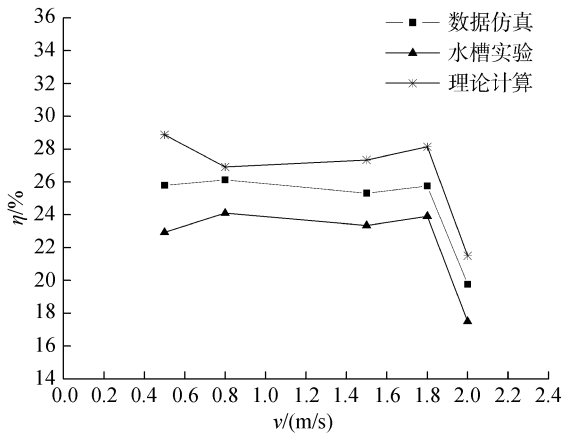


图 6 效率对比图

Fig. 6 Efficiency comparison chart

4 结论

本文以 v 为基变量, 对比理论模型计算、基于 fluent 仿真数据, 水槽实验数据, 分析数据可知: (1) 双向对称叶轮和涵道的设计对于涵道双向泵叶轮浪流发电装置 η 的提升很明显, 在 $v=1.8$ m/s 工况下, 发电机输出功率 P 稳定在 41.87 W 附近, 在 $v>1.8$ m/s 工况下, P 超过额定功率, 超过部分在设计承受范围内。(2) 双向对称叶轮的设计, 可以使得涵道双向泵叶轮浪流发电装置从正反方向都可捕获浪流能, 不需要复杂的换向装置, 且双向捕获浪流的效果相同。(3) 由 P 呈现周期性变化分析可知, 涵道双向泵叶轮浪流发电装置可以吸收部分的波浪能。 P 的理论计算

数值和实际测试数值偏差不大, 设计要求基本能够满足实际工程要求。(4) 在 $v=0.5$ m/s 工况下, 涵道双向泵叶轮浪流发电装置即可启动, 启动流速度较低, 能够满足较复杂的海况。在 $v<1.8$ m/s 工况下, η 稳定在 23.7% 左右。在 $v>1.8$ m/s 工况下, 由于叶轮后方尾流场对叶轮的作用力加强, 使得 η 开始下降。

参考文献:

- [1] 郑金海, 张继生. 海洋能利用工程的研究进展与关键科技问题[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 450-455.
Zheng Jinhai, Zhang Jisheng. Recent advances and key technologies in marine energy utilization engineering[J]. Journal of Hohai University(Natural sciences), 2015, 43(5): 450-455.
- [2] 夏增艳, 郭毅, 张亮, 等. 垂直轴潮流能发电装置模型测试技术研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(4): 104-106.
Xia Zengyan, Guo Yi, Zhang Liang, et al. Research on the model experiments for Vertical Axis Tidal Current Energy Generation Device[J]. Journal of Ocean Technology, 2013, 32(4): 104-106.
- [3] 鲍敏, 鲍献文. 潮流能量的提取及其流速的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(2): 1-7.
Bao Min, Bao Xianwen. The extraction of tidal current energy and its effect on tidal current[J]. Periodical of Ocean University of China(Natural sciences), 2015, 45(2): 1-7.
- [4] 姚琦, 王世明, 胡海鹏, 等. 波浪能发电装置的发展与展望[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(1): 86-92.
Yao Qi, Wang Shiming, Hu Haipeng, et al. On the development and prospect of Wave Energy Power Generation Device[J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(1): 86-92.
- [5] 王树杰, 盛传明, 袁鹏等. 潮流能水平轴水轮机叶片优化研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(7): 113-118.
Wang Shujie, Sheng Chuanming, Yuan Peng, et al. A study on blade optimization of Horizontal Axis Tidal Current Turbines[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural sciences), 2015, 45(7): 113-118.
- [6] 侯二虎, 杜敏, 王兵振, 等. 水平轴潮流能水轮机水力数值模拟研究[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(4): 74-79.
Hou Erhu, Du Min, Wang Bingzhen. Study on the numerical simulation of hydrodynamic performance of the Horizontal Axis Tidal Current Turbine[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(4): 74-79.
- [7] 马希金, 冯志丹. 基于流固耦合的轴流泵叶片结构分析[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(4): 51-54.
Ma Xijin, Feng Zhidan. Structural analysis of ax-

- ial-flow pump blade based turbine on fluid-solid coupling[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2015, 41(4): 51-54.
- [8] 施伟, 李彦军, 袁寿其, 等. 轴流泵导叶进口段调节对其外特性的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 109-116.
Shi Wei, Li Yanjun, Yuan Shouqi, et al. Influence of adjustable inlet part of guide on Hydraulic Performance of Axial-flow Pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 109-116.
- [9] 王世明, 汪振, 吕超, 等. 一种卧式浪流发电装置研究与试验[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(4): 39-45.
Wang Shinming, Wang Zhen, Lü Chao, et al. Research on a kind of Horizontal Wave Flow Generation Device[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(4): 39-45.

Study of a Wave-flow Generation Device with ducted bidirectional pump impeller

WANG Shi-ming¹, WU Shuai-qiao¹, TIAN Ka¹, BAI Lian-ping²

(1. College of Engineering Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Received: Aug. 28, 2016

Key words: axial-flow pump; wave-flow energy; ocean energy; fluent simulation; tank experiment

Abstract: A new type of Wave-flow Generation Device with a ducted bidirectional pump impeller is constructed based on the design principle of the axial-flow pump. In this study, the working principle of the axial-flow pump is analyzed and the back-stepping approach is used to design the device. A comparison with data from theoretical calculations, a numerical simulation, and tank experiments relating to the device shows the power generation efficiency of the device in different working conditions. Results show that the device can be started at a flow rate of 0.5 m/s, its output power is close to rated power at a flow rate of 1.8 m/s, and its energy conversion rate is at its highest of up to 23.7% when the working flow rate is below 1.8 m/s. However, when the working flow rate exceeds 1.8 m/s, the energy conversion rate begins to decline because the increase in the tail flow field strongly increases the reversal force to the pump impeller.

(本文编辑: 刘珊珊)