

## 用于双向水流发电的导流罩增速性能研究

颜瑞雪, 陈 韬, 李国富\*, 刘晓杰

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 为提高水平轴水轮机用于双向水流发电时总输出功率, 对一种导流罩的增速性能进行了研究. 以流速比作为导流罩的性能指标, 利用有限元仿真计算不同几何参数时导流罩流速比且对其进行优化, 分析了增速导流罩的安装对水平轴水轮机双向发电性能的影响, 并通过水下拖拽发电试验对仿真优化后的导流罩性能加以验证. 结果表明: 增速导流罩长度和角度是影响其性能的关键因素, 在导流罩长度保持不变时, 随着导流罩角度的增加, 流速比呈现先增后减的变化趋势; 当水流速度为  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 加装增速导流罩后发电装置的双向发电功率提高了 37%.

**关键词:** 水平轴水轮机; 导流罩; 双向水流; 发电效率

**中图分类号:** TK79

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2021) 03-0018-06

近年来, 潮流能由于其可预测性强和能量密度高等优点成为广受关注的可再生能源之一<sup>[1-2]</sup>. 水平轴潮流能水轮机作为目前最常用的一种潮流能发电装置, 具有能量转换效率高、运行稳定等优点, 但受其自身结构和叶片翼型等因素的影响, 水平轴水轮机无法有效利用双向水流流动, 往往需要额外的辅助设备, 存在运行稳定性偏低、安装与维护困难、成本较高等问题<sup>[3]</sup>. 因此, 改善水轮机反向发电性能, 提高对双向水流流动能量的有效利用率, 增加水轮机总输出功率, 对促进和加快海洋能的开发利用具有重要意义.

王树杰等<sup>[4]</sup>为了提高水平轴水轮机的总发电功率, 对一种水平轴水轮机的导流罩进行了优化, 研究了导流罩线型中收缩角度、收缩长度等参数与其性能之间的关系. 周旭<sup>[5]</sup>对美国国家航空咨询委员会(National Advisory Committee for Aeronautics, NACA)开发的 2 种翼型进行了改造, 将其用作水轮机叶片截面形状, 设计了一种悬浮式双向潮流能水轮机, 以有效利用双向水流的能量, 但由于采用悬浮式结构, 水轮机在水下容易晃动, 难以保持平衡, 因此运行稳定性较差. Luquet 等<sup>[6]</sup>研究了一

种自适应导流装置, 该装置利用导流装置末端安装的尾翼控制装置整机的朝向, 理论上可以使水轮机始终正对水流方向, 避免了使用非固定式叶片或较复杂的辅助装置, 但由于自然环境中水流流动方向往往具有随机性, 可能会导致导流装置频繁调整, 难以保持稳定的姿态, 从而降低了发电装置的运行稳定性. 张兴等<sup>[7]</sup>设计了一种摆动叶片式波浪能发电装置, 该装置能将波浪的上下双向运动转化为叶片转轴单向旋转运动, 提高对波浪能的利用效率, 但存在响应不及时、能量转换效率较低等问题. Khamlaj 等<sup>[8]</sup>利用有限元仿真软件, 通过改变不同导流装置的形状、曲率半径等参数, 考察导流装置结构和几何参数对发电性能的影响, 但未考虑水流双向流动时导流装置的性能变化. 邓智雯等<sup>[9]</sup>采用数值模拟与实验设计相结合的方法, 选取导流罩扩口段长度、中间段长度和开口张角为主要因素优化装置性能, 但受到导流装置结构影响, 其反向性能相对较低. Matsushima 等<sup>[10]</sup>分析了一种带后缘的扩张型导流罩几何参数对增速效果的影响, 研究了扩张角度与后缘长度的变化对装置内部流速的影响, 结果表明导流装置扩张出

收稿日期: 2020-09-26.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(61802211).

第一作者: 颜瑞雪(1996-), 女, 浙江温岭人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 海洋能发电. E-mail: 1036361233@qq.com

\*通信作者: 李国富(1966-), 男, 浙江温岭人, 教授, 主要研究方向: 机电测控等. E-mail: liguofu@nbu.edu.cn

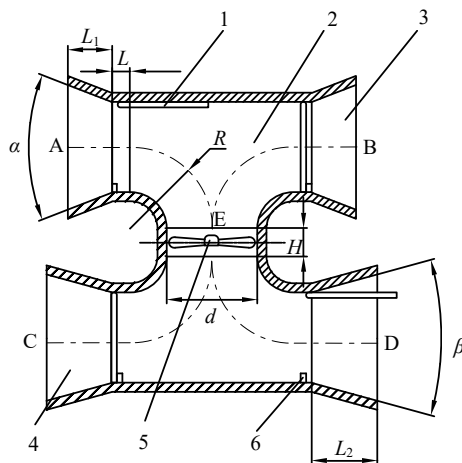
口的几何参数对其性能具有重要影响. 综上, 目前多数研究重点关注如何提高水轮机的单向发电性能, 忽视了潮流双向流动对其性能的影响, 而现有的双向发电技术也存在维护困难、能量利用效率较低等问题.

本文基于文献[11]中提出的复合式发电装置, 研究了一种用于双向导流装置的导流罩及其性能, 分析了出入口所安装的增速导流罩收缩和扩张几何参数对提高水流速度及增加水轮机输出功率的作用, 以期提升水平轴潮流能水轮机的发电效率.

## 1 仿真模型的建立

### 1.1 工作原理

导流装置的基本结构如图1所示, 主要由出入口处的增速导流罩、导流管道、单向阀门组成. 通过限位块限制阀门的转动方向, 使其仅能朝单一方向开启和关闭. 水轮机安装在装置中心E处, 导流管道截面形状为正方形. 当水流从左至右流动时, 外部水流从入口A流入, 推动入口B与出口C处的阀门关闭, 随后水流流经水轮机所在位置E, 推动出口D处阀门开启后流出. 当水流从右至左流动时, 阀门的运动情况与上述相反. 借助单向阀门对水流流向的控制, 该装置可将外部双向流动的水流转换为内部单向流动的水流, 提高了水轮机对双向水流能量的利用效率.



1 为单向阀门; 2 为导流管道; 3 为入口导流罩; 4 为出口导流罩;  
5 为水轮机叶片; 6 为限位块.

图1 导流装置基本结构示意图

### 1.2 仿真参数设定

本文主要研究双向导流装置出入口位置所安

装的增速导流罩, 分析其收缩角度和长度、扩张角度和长度等几何参数对其阻力损耗、流速比及水轮机发电功率的影响, 不涉及中部“工”字形导流管道的转角半径 $R$ 、管道宽度 $d$ 等几何参数对内部阻力损耗以及水轮机发电功率的影响. 因此, 选取导流管道宽度 $d=0.5\text{ m}$ , 中心高度 $H=0.2d$ , 转角半径 $R=1.5d$ , 过渡段长度 $L=0.2d$ .

利用有限元仿真软件 Fluent 对水流流动进行模拟, 选择 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型作为仿真计算模型, 该模型对有曲率流动、分离流动以及二次流等复杂流动有较好的计算精度<sup>[12]</sup>. 由于海水通常视为具有不可压缩性, 因此选用基于压力的 Simple 算法, 该算法广泛应用于不可压缩流的稳态分析, 具有计算精度高、求解速度快等优点. 采用高精度的二阶迎风格式作为离散控制方程进行计算, 可有效地提高求解精度, 避免解的发散.

模型边界条件的设定如图2所示, 采用多重参考系方法对水轮机旋转运动进行模拟, 并将仿真水域划分为静止域和旋转域两部分. 根据真实海洋环境中水流自由流动的特点, 在仿真水域边界条件的设定中, 将边界入口设定为速度入口, 模拟水流的自由流动. 出口为压力出口, 可保障水流充分流动, 其余边界设定为不可滑移壁面. 为防止水流回流导致求解发散, 影响计算结果的准确性, 设置出口长度为 $L_{\text{out}}=30d$ , 入口长度 $L_{\text{in}}=15d$ , 圆柱形仿真水域直径 $D=20d$ , 避免阻塞效应对计算结果造成影响.

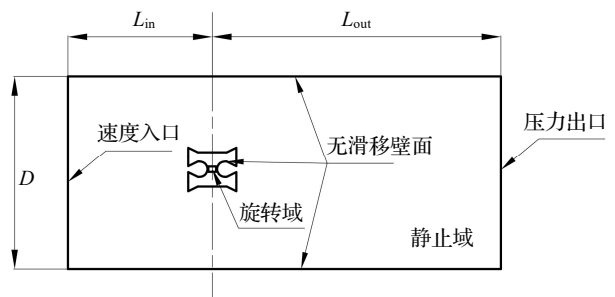


图2 边界条件

### 1.3 导流罩性能评价模型

水轮机从水流中获得的功率为<sup>[13]</sup>:

$$P = 0.5 \rho A v^3 C_p, \quad (1)$$

式中:  $P$  为发电功率, W;  $\rho$  为水流密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $A$  为叶片扫掠面积,  $\text{m}^2$ ;  $v$  为水轮机前方来流速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$C_p$  为水轮机叶片的功率系数。

从式(1)可看出, 水轮机输出功率受水流速度影响极大, 因此在对增速导流罩进行优化过程中, 采用计算流速比(导流管道内叶片旋转平面处的平均流速与外部流速的比值)作为评估导流罩性能的指标。流速比的计算公式为:

$$i = \frac{v_1}{v_\infty}, \quad (2)$$

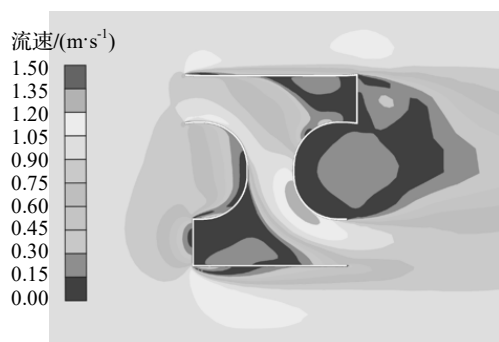
式中:  $i$  为流速比;  $v_\infty$  为外部水流平均速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $v_1$  为导流管道中心截面水流平均速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

## 2 数值分析与试验验证

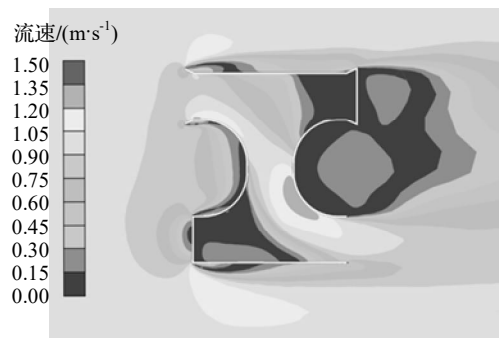
### 2.1 入口导流罩分析

入口处导流罩通过缩小管道截面面积来提高装置内部水流速度, 增加水轮机输出功率。收缩长度  $L_1$  和收缩角度  $\alpha$  是影响导流罩性能的主要参数。利用仿真软件对不同导流罩几何参数的内部流场进行分析, 优化导流罩尺寸, 以提高其性能。不同几何参数时装置截面的速度云图如图 3 所示。

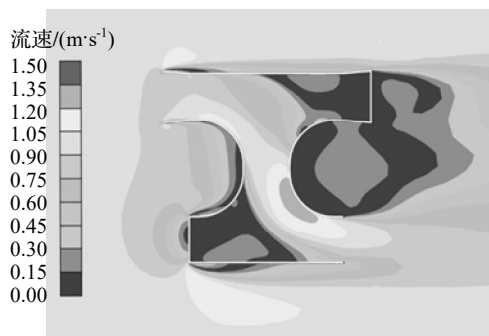
对比图 3(a)和图 3(b)可看到, 在收缩长度相同时, 增加收缩角度后导流管道入口处的水流速度相对有所下降, 但内部水流高速区域范围相对增大。对比图 3(a)和图 3(c)可看到, 在收缩角度不变



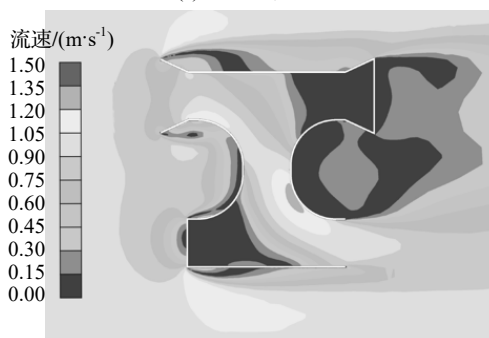
(a)  $L_1=0.2d, \alpha=5^\circ$



(b)  $L_1=0.2d, \alpha=25^\circ$



(c)  $L_1=0.6d, \alpha=5^\circ$



(d)  $L_1=0.6d, \alpha=25^\circ$

图 3 入口导流罩不同几何参数时装置截面速度云图

时, 增加收缩长度使得导流管道内部高速区域范围扩大, 有利于流速比的提高。对比图 3(b)和图 3(d)发现, 当收缩角度较大时, 增加收缩长度使得入口处的水流速度降低, 导流管道内部的水流速度也有所下降。上述结果表明, 收缩角度过大可能会导致水流收缩过于剧烈而引起能量损失, 因此收缩角度不宜过大。

图 4 是流速比随收缩角度增加的变化曲线。从图 4 可发现, 不同收缩长度下, 随着导流罩收缩角度的增加, 流速比呈现先增后减的变化趋势, 当入口导流罩选择收缩角度为  $10^\circ$ , 收缩长度为  $0.6d$  时, 其流速比为 0.957, 能够获得较高的性能。

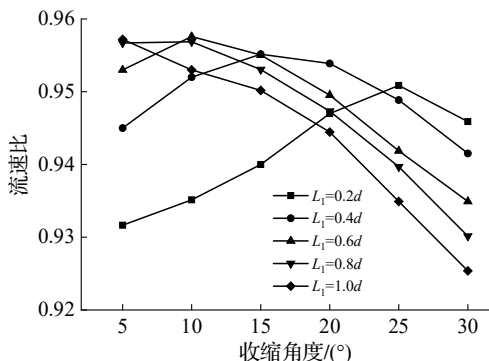


图 4 入口导流罩几何参数对流速比的影响

## 2.2 出口导流罩分析

扩张型导流罩可以增加进出口之间的压力差, 形成一股吸力, 提高内部水流速度, 扩张角度  $\beta$  和扩张长度  $L_2$  是影响其性能的关键因素, 不同扩张长度时装置的截面速度如图5所示. 从图5可看出, 随着出口扩张长度的增加, 导流管道内部的水流速度明显增加, 内部高流速区域范围显著扩大.

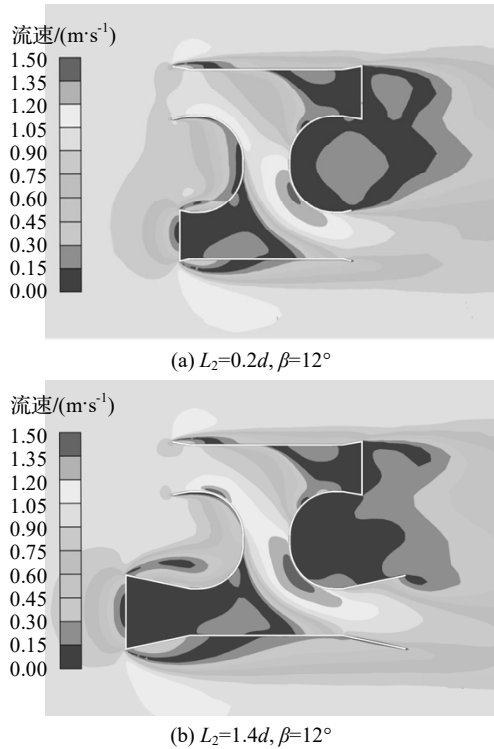


图5 不同扩张长度时装置截面速度云图

图6是流速比随扩张角度增加的变化曲线. 从图6可看到, 在相同扩张角度下, 适当增加扩张长度能使得流速比提高. 数据表明, 选择  $L_2=1.4d$ ,  $\beta=12^\circ$  作为出口导流罩设计尺寸能获得较好的性能, 此时流速比可达到1.13, 显著提高了导流管道内部的水流速度.

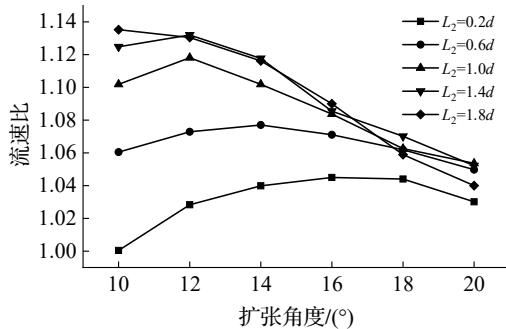


图6 出口导流罩几何参数对流速比的影响

## 2.3 导流罩对发电性能的影响

前文通过改变导流罩的几何参数得到了优化后的收缩长度、角度以及扩张长度、角度的取值. 考虑到安装导流罩与水轮机之间存在相互影响, 其实际效果难以仅通过流速比进行直接计算, 因此选择  $\alpha=10^\circ$ 、 $L_1=0.6d$ 、 $L_2=1.4d$ 、 $\beta=12^\circ$  作为出入口导流罩设计尺寸, 与水轮机相结合验证其用于发电时的效果.

叶尖速比是影响水轮机发电性能的重要因素之一, 其计算公式为:

$$\lambda = v_{\text{tip}} / v_0 = \omega r / v_0, \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为叶尖速比;  $v_{\text{tip}}$  为叶片尖端线速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\omega$  为叶片转速,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $r$  为叶片半径,  $\text{m}$ .

根据式(3), 通过仿真软件设定水轮机叶片转速可获得不同的叶尖速比, 从而得到水轮机的功率系数曲线, 对安装导流罩前后的水轮机发电性能进行对比分析. 为便于对比加装导流罩前后水轮机输出性能的变化, 将裸叶片水轮机的最大功率系数设置为1, 通过相对功率系数衡量加装导流罩前后不同叶尖速比下的水轮机功率系数变化. 相对功率系数的计算公式为:

$$C_{\text{pr}} = C_{\text{pl}} / C_{\text{pmax}}, \quad (4)$$

式中:  $C_{\text{pr}}$  为相对功率系数;  $C_{\text{pl}}$  为不同叶尖速比下水轮机功率系数;  $C_{\text{pmax}}$  为裸叶片水轮机的最大功率系数.

结合式(2)~(4), 通过有限元仿真软件 Fluent, 计算不同叶尖速比下水轮机单向发电的相对功率系数, 结果如图7所示.

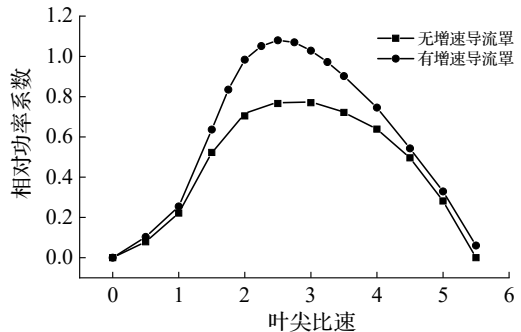


图7 不同装置条件下水轮机功率系数对比

从图7可看到, 由于导流管道内部存在转角, 水流在导流管道内部流动时受到转角阻力的影响而导致能量损耗, 因此水轮机相对功率系数有所

下降,通过增速导流罩的汇流聚能作用,显著提高了导流管道内部的水流速度.根据仿真数据,在安装增速导流罩前水轮机  $C_{pr} = 0.769$ ,安装增速导流罩后  $C_{pr} = 1.079$ ,表明增速导流罩对提升相对功率系数效果明显.

功率系数是水轮机对水流能量的有效利用效率.根据式(1)可知,功率系数的提升会使水轮机的输出功率增加.因此,在水流双向流动速度大小完全一致的理想情况下,一般裸叶片水轮机的双向发电功率与其正向发电功率相等为 1.使用导流罩后水轮机双向总发电功率的计算公式为:

$$P = 2P_0 C_{pr}, \quad (5)$$

式中:  $P_0$  为裸叶片水轮机的总发电功率.

仿真结果表明,无增速导流罩时总发电功率为 1.54 W,增加增速导流罩后总发电功率为 2.16 W,总发电量提高了 40%.

## 2.4 试验研究

为验证优化后增速导流罩的实际效果,设计水下拖拽试验进行发电性能测试.试验时,发电装置与导流装置吊装在一辆可在水箱上方双向滑行的滑车下方,滑车一端通过牵引绳与电动机上的卷线桶相连接,启动电动机可以收卷牵引绳,拖拽发电装置在水下移动,通过调整电动机的转速可以实现不同的拖拽速度,从而实现对不同水流速度的模拟.发电装置与电阻串联,通过测量负载电阻上的电压计算发电装置的输出功率,并以此分析发电装置的发电性能.为了对比安装增速导流罩前后,负载电功率的增长情况,量化发电装置输出功率的增长幅度,根据不同流速下的负载电功率数据,计算相对功率增长系数,其计算公式为:

$$P_r = \frac{P_d - P_l}{P_l}, \quad (6)$$

式中:  $P_d$  为有导流装置时的总负载电功率, W;  $P_l$  为裸叶片的总负载电功率, W.

试验时,拖动滑车在水下来回正向和反向移动以模拟水流的双向流动,并通过多次反复移动,获得发电装置外接电阻上的电压信号,最后根据式(6)对加装增速导流罩前后的发电装置功率变化进行计算,结果如图 8 所示.

通过控制滑车的移动速度,拖动发电装置以

$1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的平均速度在水下运动.根据相对运动原理,可认为此时的水流双向流动的平均速度同为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .试验数据表明,在相同试验条件下,加装增速导流罩能使发电装置发电功率相对提高约 37%,此结果虽因受装置制造精度等因素影响低于仿真值,但比较接近,说明加装增速导流罩对发电装置性能的提高有效.

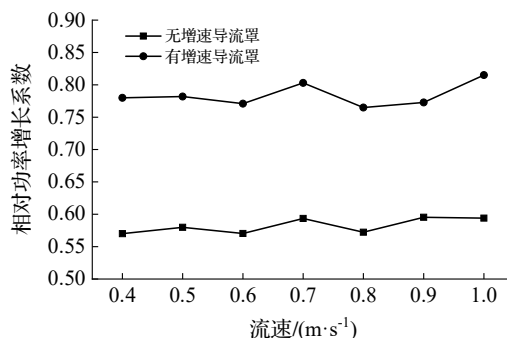


图 8 相对功率增长系数变化曲线

## 3 结论

(1)对增速导流罩进行优化设计发现,在入口的收缩导流罩几何参数中,收缩角度对其性能影响最为显著,随着收缩角度增加,流速比呈现先上升后下降的变化趋势;对于出口处的扩张导流罩,扩张长度对其性能影响较大,在扩张角度保持不变时,增加扩张长度有利于提高流速比,当扩张长度保持不变,流速比随扩张角度的增加,呈现先上升后下降的趋势.

(2)在导流管道的出入口处安装增速导流罩,其收缩角度为  $10^\circ$ 、收缩长度为  $0.4d$ 、扩张角度为  $12^\circ$ 、扩张长度为  $1.4d$  时,流速比可达 1.13.增速导流罩的使用可明显增加导流管道内部的水流速度,提高其性能.

(3)对加装增速导流罩前后的发电装置进行水下发电试验表明,当水流双向流动速度为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在导流管道的外部安装增速导流罩可显著提高发电装置双向发电时总输出功率,与安装前相比提高约 37%.

## 参考文献:

- [1] 麻常雷,夏登文,王萌,等.国际海洋能技术进展综述[J].海洋技术学报,2017,36(4):70-75.
- [2] 刘伟民,麻常雷,陈风云,等.海洋可再生能源开发利

- 用与技术进展[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(1):1-18.
- [3] Qian P, Feng B, Liu H, et al. Review on configuration and control methods of tidal current turbines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 108:125-139.
- [4] 王树杰, 徐世强, 袁鹏, 等. 轴流式潮流能发电装置导流罩水动力特性研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(6): 1098-1104.
- [5] 周旭. 双向潮流能发电装置设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [6] Luquet R, Bellevre D, Fréchou D, et al. Design and model testing of an optimized ducted marine current turbine[J]. International Journal of Marine Energy, 2013, 2:61-80.
- [7] 张兴, 李国富, 吴林杰, 等. 摆动叶片式波浪能发电装置的水动力性能分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1):136-140.
- [8] Khamlaj T A, Rumpfkeil M P. Analysis and optimization of ducted wind turbines[J]. Energy, 2018, 162:1234-1252.
- [9] 邓智雯, 袁军亭, 王世明, 等. 基于CFD的直线型导流罩加速性能研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 116-120.
- [10] Matsushima T, Takagi S, Muroyama S. Characteristics of a highly efficient propeller type small wind turbine with a diffuser[J]. Renewable Energy, 2006, 31(9):1343-1354.
- [11] 李国富, 刘璟波, 卜梦珂, 等. 一种复合式发电装置: CN103758686A[P]. 2014-04-30.
- [12] 徐连奎, 张建蓉, 王永利, 等. 不同湍流模型在水轮机数值计算中的适用性探究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3):161-163.
- [13] Lawn C J. Optimization of the power output from ducted turbines[J]. Journal of Power and Energy, 2003, 217(1): 107-117.

## Study on shroud speed increasing in a two-way flow power generation

YAN Ruixue, CHEN Tao, LI Guofu<sup>\*</sup>, LIU Xiaojie

( Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China )

**Abstract:** In order to improve the total output power of horizontal axis turbine when it is used in two-way water flow power generation, the speed increasing of a shroud is studied. Through the simulation of the flow rate ratio of the shroud under different geometric parameters, the effect of the installation of the speed increasing shroud on the power generation is analyzed and optimized, and finally the optimization results are verified by the underwater drag test. The results show that the length and angle of the speed increasing shroud are the key factors. When the length of the shroud remains unchanged, with the increasing of the shroud angle, the flow rate ratio increases at first and then decreases. When the water flow velocity is  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the two-way flow power generation efficiency is increased by 37% after installing the shroud.

**Key words:** horizontal axis turbine; shroud; two-way flow; power generation efficiency

( 责任编辑 史小丽 )