DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201603072

双机组十字叉型立轴潮流能水轮机性能分析

王 凯,孙 科,李 岩,张 亮

(哈尔滨工程大学 深海工程技术研究中心,哈尔滨 150001)

摘 要: 为研究传统 H 型立轴水轮机的一种改进形式即双机组十字叉型立轴潮流能水轮机这种新型水轮机的水动力性能,采用 ANSYS-CFX 模拟水轮机不同的运行工况,对比分析双机组十字叉型水轮机和单机组 H 型水轮机的水动力性能.结果表明:双机组水轮机比单机组水轮机效率提高将近 10%;对于涨潮和落潮两种不同运行工况,双机组水轮机的效率变化不大;十字叉型水轮机的推力、侧向力和力矩平均值和 H 型水轮机相等,但其波动幅值远小于 H 型水轮机的波动幅值,这对水轮机的结构安全、疲劳寿命会产生有益的影响.因此双机组十字叉型水轮机比 H 型单机组水轮机有明显优势,既能提高水轮机发电效率,又能保证水轮机运行寿命.

关键词: 潮流能立轴水轮机;双机组;十字叉型;水动力性能;效率;波动幅值

中图分类号: TK730;O352 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2017)04-0156-06

Hydrodynamic performance of cross-type vertical axis tidal current twin-turbine

WANG Kai, SUN Ke, LI Yan, ZHANG Liang

(Deepwater Engineering Research Center, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To study the effect of hydrodynamic performance on the new type vertical axis tidal turbine, using ANSYS-CFX software is adopted to simulate different working conditions for comparing the hydrodynamic performance between cross-type twin-turbine and H-type single turbine. Cross-type vertical axis tidal current twin-turbine is an improved form to traditional H-type turbine. The results show that: the efficiency of twin-turbine is about 10% higher than that of single turbine. The efficiency of twin-turbine changes little for ebbs and flows. The average values of thrust, lateral force and moment are equal between cross-type turbine and H-type turbine, but cross-type turbine's amplitude of fluctation is far less than that of H-type turbine, which can produce beneficial effects on the structure safety and fatigue life of turbines. Therefore, the cross-type vertical axis tidal current twin-turbine has obvious advantages compared to H-type single turbine in the efficiency and guarantying running life.

Keywords: vertical axis tidal turbine; twin-turbine; cross-type; hydrodynamic performance; efficiency; amplitude of fluctuation

目前传统石化能源占世界能源的主要部分,但是按照目前的开采速度,未来几十年后中国将无石化能源可用.许多国家正在寻找干净的可再生能源,海洋可再生能源中的潮流能以其稳定,密度大,可预测的优势受到越来越多的关注[1-3].

潮流能水轮机是主要的潮流能开发装置,结构形式依据主轴与来流方向的关系分为水平轴式和立轴式,主轴平行于来流方向的为水平轴式,主轴垂直于来流方向的为立轴式.相对于水平轴水轮机,立轴水轮机有以下特点:1)叶片结构简单,容易加工,制作成本低;2)发电系统和增速系统可以安装在水面以上,降低水下密封难度;3)工作速比较低,噪音小[4-5].

立轴水轮机按其工作原理分类有阻力型和升力型两种,前者以叶片受到的流体阻力为主要驱动力;而后者主要靠叶片受到的升力推动水轮机转动.由于阻力型水轮机启动流速较低,同时工作效率也较低,所以更适用于低流速的海域.升力型立轴水轮机由于工作速比和工作效率都较高,因此在潮流发电方面研究和采用的更多的是升力型水轮机[6-8].过去几十年里,研究人员对单机组水轮机、多机组水轮机、其他不同形式的水轮机都做了一系列研究.李志川[9]做了一系列立轴水轮机的实验来研究密实度、叶片数、偏角和弦长对水轮机水动力性能的影响,并且和 CFD 结果对比分析.结果显示 SST 湍流模型能够提高计算精度而且当 $Y^+ \leqslant 20$ 时,网格对计算结果几乎没有影响,同时也证明了固定偏角的自启动性能差,自由变偏角的自启动性能好而且能量利用率更高; Calisal 等[10-11]研究了来流角、相对位置和旋

收稿日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(51209060, 11572094, 51579055);高等学校博士学科点专项科研基金(20122304120035);哈尔滨市科技创新人才研究专项资金(2015RQQXJ014)

作者简介: 王 凯(1989—)男,博士研究生;
张 亮(1959—)男,教授,博士生导师

通信作者: 孙 科,sunke@hrbeu.edu.cn

转方向对双机组水轮机的水动力性能影响,结果显示双机组水轮机的效率比两个单机组的效率高;Yang 等[12] 研究了一种特殊的水轮机(Hunter turbine)的三维效应,比较了二维和三维的计算结果.结果表明,随着展弦比增大,二维结果和三维结果之间的差距逐渐变小,而且三维转矩的波动也会随之减小;Akimoto 等[13] 对浮式立轴螺旋状水轮机进行了研究分析,这是一种新型的立轴水轮机,它的主轴可以随着来流方向摆动,这就大大降低了对浮式平台的结构强度和质量的要求,该水轮机能大幅度降低浮式水轮机的成本,突出其较高的经济效益.

本文对传统的单机组 H 型立轴潮流能水轮机进行了改进,使单层叶片变为双层叶片,并使两层叶片的位置角相差 90°,即十字叉型立轴水轮机,并将单机组改为双机组对转形式.本文利用 CFD 方法计算了双机组十字叉型立轴水轮机的水动力性能,并将结果和传统的单机组 H 型水轮机水动力性能对比分析,验证双机组十字叉型水轮机在水动力性能方面的优点.

1　数值模拟

1.1　理论基础

定义速度来流方向为 X 轴正向.水轮机的能量利用率是能量转化的最重要指标,水轮机受到的推力、侧向力是衡量水轮机水动力性能的重要指标.

为方便分析,定义量纲一的量参数如下:

叶尖速比 $\lambda = \dfrac{R\omega}{V_A}$,

叶轮密实度 $\sigma = \dfrac{ZC}{\pi D}$,

叶轮推力系数 $C_{F_x} = \dfrac{F_x}{0.5\rho V_A^2 DH}$,

叶轮侧向力系数 $C_{F_y} = \dfrac{F_y}{0.5\rho V_A^2 DH}$,

叶轮的能量利用率系数 $C_P = \dfrac{Q\omega}{0.5\rho V_A^3 DH}$,

叶轮的力矩系数 $C_Q = \dfrac{Q}{0.5\rho V_A^2 DHR}$.

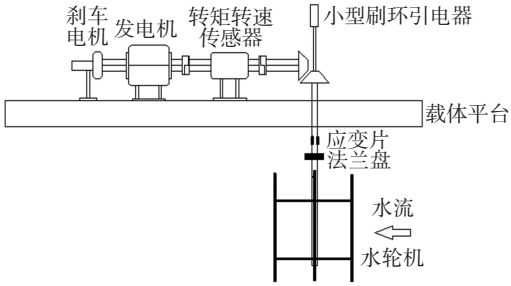
式中:R 为叶轮半径,m;D 为叶轮直径,m;H 为叶轮展长,m;ρ 为来流密度,kg/m^3;F_x 为叶轮推力,N;F_y 为叶轮侧向力,N;V_A 为来流速度,m/s;Q 为叶轮转矩,Nm.

1.2　有效性验证

为验证所采用的 CFD 方法的可行性,将 CFD 的计算结果和实验结果进行对比分析.哈尔滨工程大学循环水槽做了一系列的立轴潮流能实验研究,循环水槽工作段:长×宽×深为(8.0 m×1.7 m×1.5 m),工作流速:0.2~2.0 m/s 无级连续可调.循环水槽如图 1(a),水轮机安装在一载体平台上,载体平台安装在循环式水槽的工作段,将水轮机置于水槽槽道中,如图 1(b)所示,改变水槽流速可以研究水轮机在不同流速下的水动力性能.



(a) 哈尔滨工程大学循环水槽



(b) 实验装置布置示意

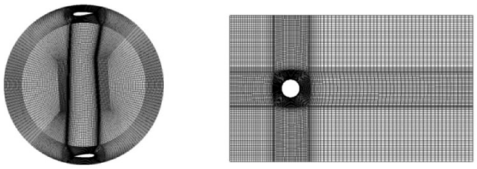
图 1　立轴潮流能水轮机实验

Fig.1　Experiment of vertical axis tidal current turbine

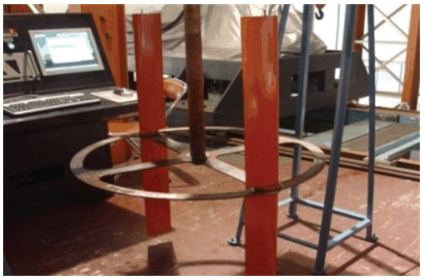
水轮机直径为 0.8 m,弦长为 0.12 m,来流速度为 2.0 m/s,使用翼型为 NACA0018 对称翼型,展长 0.6 m(如图 2 所示).CFD 计算网格模型可以分为两部分,即旋转域和外域,外域的网格在计算过程中静止不动,旋转域绕自身中心做旋转运动,两域的交界面运动采用滑移网格的方法,可以使旋转域在旋转过程中不改变其网格质量.为进一步提高计算精度,叶片表面第 1 层网格高度为 1.0×10^{-4} m,$Y^+<20$.计算模型设置如下:入口设置为速度入口,选用湍流模型(SST),出口设置为压力出口,外域的侧面采用滑动墙面(slip wall)设定(在壁面剪应力是 0,$\tau=0$,壁面附近的流体速度并不受壁摩擦的影响),这种墙面设定也可以有效地提高计算速度及精度,叶片表面无滑移,每一时间步长选择叶片旋转 1°所需要的时间.为了使模型计算充分收敛,选取水轮机旋转 20 圈作为总的计算时间.

实验中测量了两叶片立轴水轮机的效率-速比曲线,将其与 CFD 方法计算值对比分析(如图 3 所示),可以看出速比在 2.5 左右时,水轮机都达到了效率最大点,但是 CFD 计算值明显高于实验值,这是因为三维效应、臂效应、自由面等因素影响所致.

文献[14]研究了立轴水轮机的三维效应和臂效应对水轮机效率的影响,研究中发现当水轮机的展径比(展长/半径)小于 2.0 时,三维效应尤其明显.本实验中的展径比为 1.5,所以三维效应对水轮机的影响巨大,文献[14]还通过实验证明在展径比 1.5 时,三维效应会降低水轮机的效率达 19.5%.臂效应同样会影响水轮机的输出功率,在文献[14]的实验中,臂效应降低了 0.1 的水轮机效率值,达到了水轮机总效率的 20%.在文献[14]的研究结论基础上,对本文的计算结果进行修正(如图 3 所示).修正后的结果和实验值能够高度吻合,其中少量的差异是由水轮机自由液面、实验条件等因素所致.这一结论证明了 CFD 方法计算立轴潮流能水轮机水动力性能的准确性和适用性.



(a) CFD 网格模型



(b) 实验模型

图 2 两叶片立轴潮流能水轮机实验模型与网格模型

Fig.2 Experiment model and grid model of two-blade vertical tidal current turbine

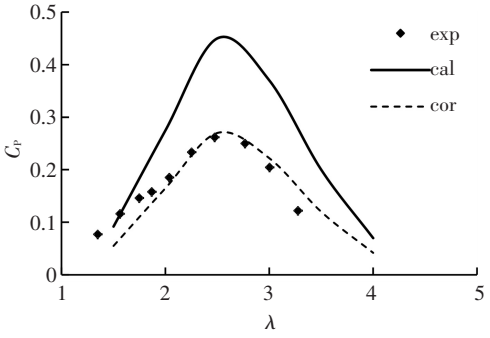


图 3 水轮机效率曲线对比

Fig.3 Comparison of efficiency curves

1.3 十字叉型和 H 型水轮机

传统的立轴潮流能水轮机属于 H 型叶片,如图 4(a)所示,每个水轮机组由两个叶片组成.十字叉式立轴潮流能水轮机,水轮机叶片分为上、下两层,每层各两个叶片,如图 4(b)所示.本文分别研究单机组 H 型和双机组十字叉型立轴潮流能水轮机的水动力性能,并进行对比分析得出双机组十字叉型水轮机的性能优点.两种形式的水轮机具体参数见表 1.



(a) H 型水轮机俯视及侧视图



(b) 十字叉型水轮机俯视及侧视图

图 4 不同形式的立轴潮流能水轮机

Fig.4 Different types of vertical axis tidal current turbines

表 1 H 型及十字叉型水轮机参数

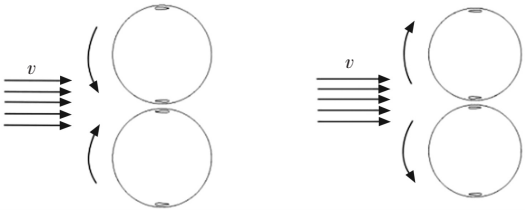
Tab.1 Parameters of H type and cross-type tidal turbine

水轮机类型	密实度	来流流速/(m·s^{-1})	小轴位置	叶片数	展长/m
H 型	0.095	2.0	0.5C	2	2 * 8.2
十字叉型	0.095	2.0	0.5C	4	4 * 4.1

2 结果分析

2.1 对转方向对潮流能水轮机的效率影响

在实际海况中,潮流能水轮机在运行过程会经历涨潮和落潮,潮涨潮落会使水流方向发生变化,而水轮机运行工程中的旋转方向是不变的,所以水轮机的旋转会分为两种方式.本文模拟来流方向不变,水轮机的两种旋转方式,这两种方式分别对应实际海况中的涨潮和落潮.图 5(a)中,沿来流方向看,两个机组向内旋转,对应海水涨潮时水轮机旋转工况,称为内对转.图 5(b)中对应海水落潮时水轮机旋转工况,称为外对转.



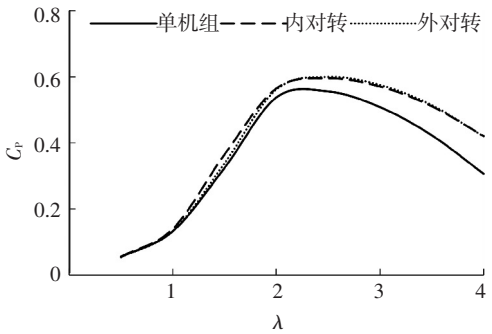
(a) 内对转 (b) 外对转

图 5 双机组水轮机对转方式

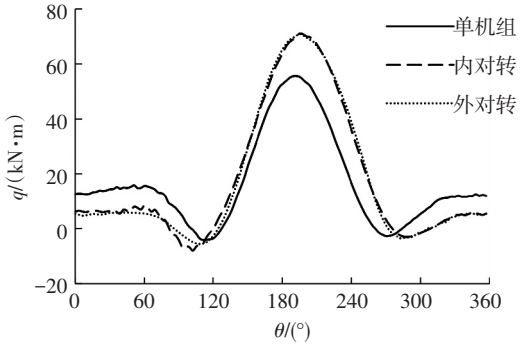
Fig.5 Contra-rotating type of twin-turbine

本文利用 CFD 软件计算了不同速比下的水轮机旋转效率,并将单个水轮机旋转工况和双机组内对转、外对转的效率曲线进行了对比.如图 6(a)所示,双机组水轮机的效率明显高于单机组水轮机效

率,特别是在高速比情况下,效率提高更加明显.而且内对转和外对转的效率曲线基本重合,即双机组内对转和外对转对水轮机组效率影响不大.此外,单机组与双机组对转叶轮在速比 2.0~2.5 时,能量利用率都达到较大值,此时双机组能量利用率比单机组提高了将近 10%.



(a) 水轮机的效率曲线对比



(b) 水轮机的转矩曲线对比

图 6　不同工况水轮机水动力性能比较

Fig.6　Comparison of turbine under different working conditions

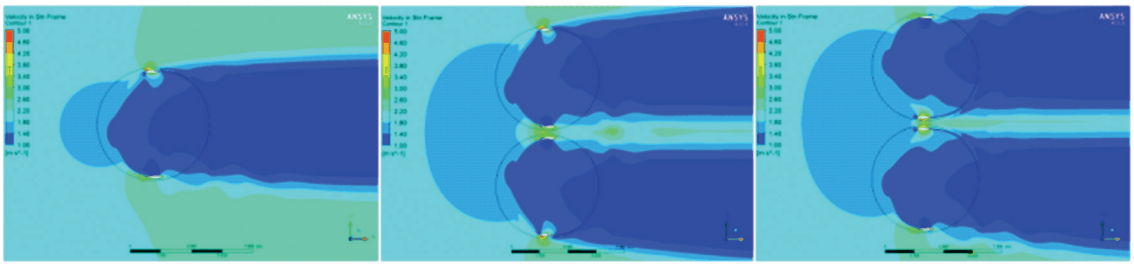
图 6(b)为单机组、内对转和外对转的单个叶片的力矩曲线对比图.单个叶片的力矩直接影响着整个水轮机的总力矩,从而决定了水轮机的功率输出.从图中可以明显看出,双机组水轮机叶片力矩在位置角 90°~270°之间明显高于单机组叶片,而 90°~270°是水轮机功率的最主要输出区间.在其他位置角时,叶片力矩趋于 0,对水轮机功率输出贡献值几乎为 0.从表 2 中可以看出,双机组的叶片力矩平均值比单机组平均值提高了 9%左右,从而提高了双机组总功率,这一结果和图 6(a)结果相吻合.

图 7、8 为单机组和双机组内对转、外对转的速度云图和速度矢量图.从图 7、8 中可以看出,由于双机组水轮机在运行过程中相互影响,使水轮机组间的水流速度增大,使经过这一区域的叶片表面相对速度增大,从而增大了叶片的力矩也提高了水轮机功率.

表 2　不同工况的水轮机叶片力矩统计值

Tab.2　Torque values of turbine blades under different working conditions　(kN · m)

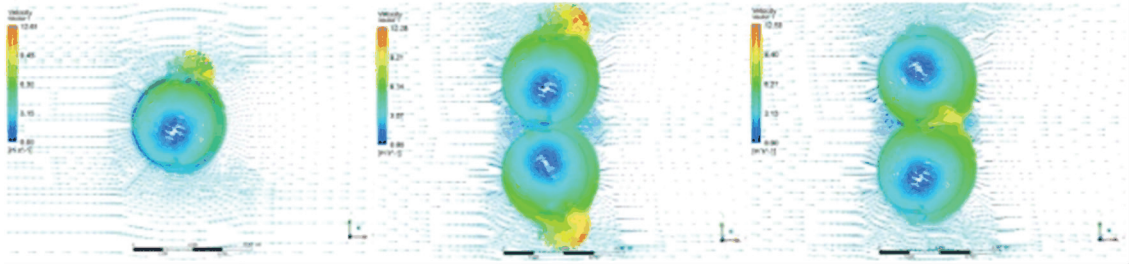
工况	最大值	最小值	平均值	幅值
单机组	55.658	−4.099	16.580	59.756
内对转	70.978	−5.694	18.058	76.672
外对转	71.173	−8.102	18.178	79.275



(a) 单机组　　(b) 内对转　　(c) 外对转

图 7　水轮机速度云图

Fig.7　The velocity nephogram of turbines

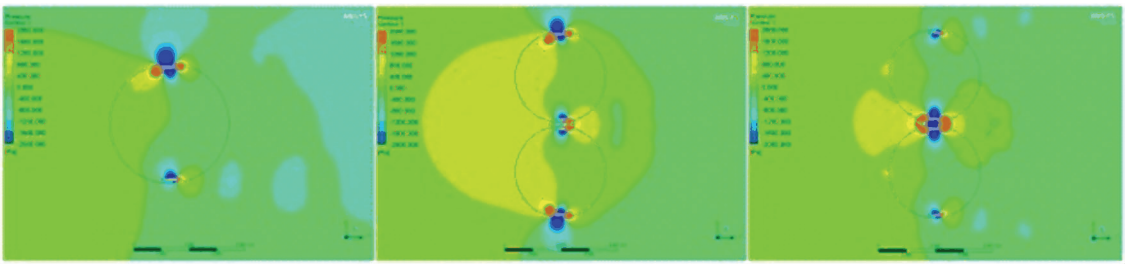


(a) 单机组　　(b) 内对转　　(c) 外对转

图 8　水轮机速度矢量图

Fig.8　The velocity vectorgraph of turbines

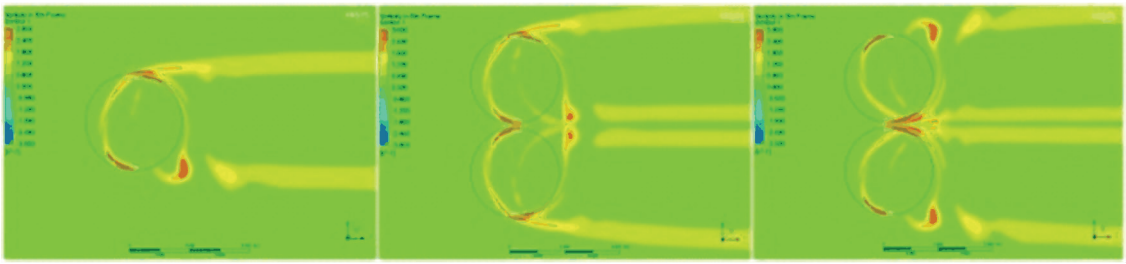
图 9,10 是水轮机压力云图和涡量图. 从图 9 中可以看出,和单机组水轮机相比,双机组水轮机不论是内对转还是外对转,两个水轮机之间受到的压力均增大.从图 10 中可以看出,单机组水轮机叶片旋转过程中会产生尾涡,脱落的尾涡随着水流向下游自由运动扩散.而双机组水轮机叶片产生的脱落涡在向下游扩散过程中会遇到相邻机组叶片产生的脱落涡,使两个水轮机之间的水流复杂.图 10(b),(c)中,由于双机组对转方向的不同,脱落涡之间的相互影响也存在差异.所以双机组水轮机尾涡的脱落和扩散会影响到相邻水轮机组的叶片,从而使经过这一区域的叶片受力随之增大.



(a) 单机组 (b) 内对转 (c) 外对转

图 9 水轮机压力云图

Fig.9 The pressure nephogram of turbines



(a) 单机组 (b) 内对转 (c) 外对转

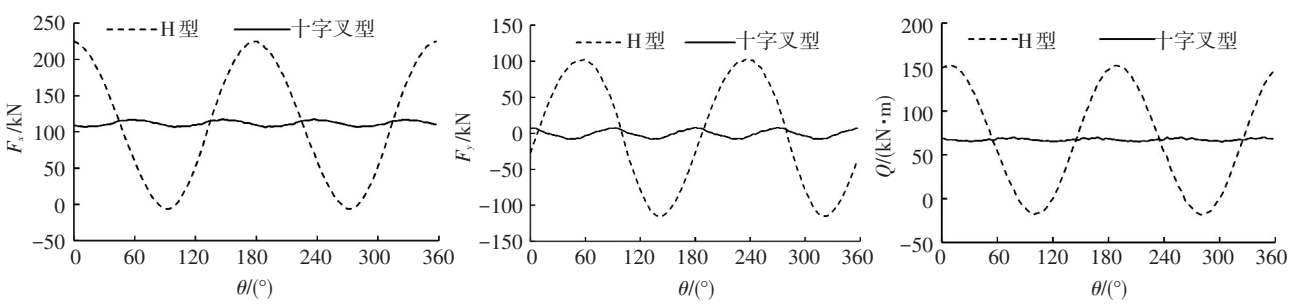
图 10 水轮机涡量图

Fig.10 The vortical contour of turbines

2.2 十字叉型和 H 型水动力性能对比

推力、侧向力和力矩是立轴水轮机最主要的水动力参数,通过对比十字叉型和 H 型立轴水轮机在最优速比下的 3 个水动力参数,可以找出十字叉型水轮机的优点.

如图 11 所示为 H 型和十字叉型的立轴潮流能水轮机的力矩、推力和侧向力的对比曲线.从图中可以明显看出,十字叉型水轮机的受力平稳,波动幅值较小,有益于水轮机的结构稳定性及耐疲劳特性.以水轮机推力为例,从表 3 中看出,两种水轮机的推力平均值都相同,但 H 型水轮机的波动幅值达 231.586 kN,而十字叉型水轮机的推力幅值为 11.071 kN,十字叉型水轮机的波动幅值大大减小.这是因为十字叉型立轴潮流能水轮机的叶片分为上、下两层,两层叶片位置角相差 90°,从图 12 中可以看出,上层叶轮和下层叶轮受到的推力曲线也相差 90°相位角.当上层叶轮受到最大的推力时,下层叶轮此时的推力为最小,所以总的两层叶轮推力变化较稳定,波动幅值也会相应变小.而且从表 3 还可以看出,H 型和十字叉型水轮机的力及力矩的平均值相等,所以十字叉型水轮机可以在保证输出功率不变的情况下减小力及力矩的波动幅值,这有利于叶轮的结构强度,确保其长久运行.



(a) 推力曲线对比 (b) 侧向力曲线对比 (c) 力矩曲线对比

图 11 十字叉型和 H 型水轮机对比

Fig.11 Comparison of cross-type and H-type turbines

表 3　H 型和十字叉型水轮机水动力参数值

Tab.3　Hydrodynamic parameters of H type and cross-type tidal turbine

参数	H 型			十字叉型		
	推力/kN	侧向力/kN	力矩/(kN·m)	推力/kN	侧向力/kN	力矩/(kN·m)
最大值	225.2	102.6	152.2	117.5	7.8	70.1
最小值	-6.4	-115.0	-18.0	106.4	-8.2	64.8
平均值	111.9	-0.6	67.2	111.9	-0.6	67.2
波动幅值	231.6	217.6	170.2	11.1	16.0	5.3

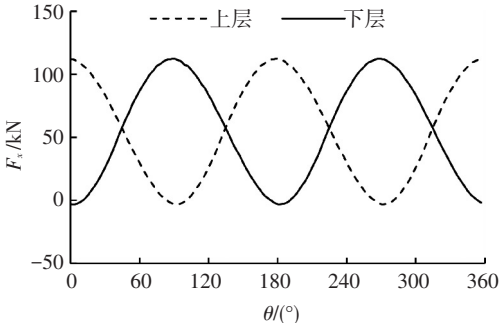


图 12　十字叉型水轮机上、下两层推力对比

Fig.12　Thrust comparison of two layers of cross-type turbine

3　结　论

1)按涨潮和落潮划分,双机组水轮机的旋转方式分为两种:内对转和外对转.这两种对转方式对水轮机总的功率输出几乎没有影响,即涨潮和落潮时水轮机组的发电功率基本相同.

2)不论是内对转还是外对转,双机组水轮机比单机组水轮机效率提高了将近 10%,可以有效地提高水轮机的年发电量.

3)通过对比 H 型水轮机和十字叉型水轮机的水动力性能,两种形式的水轮机受到的推力、侧向力和力矩的平均值相等;十字叉水轮机型能够在不影响输出功率的情况下,大大地减少水轮机受到的推力、侧向力及力矩的波动幅值,这对叶轮结构安全和疲劳寿命、电控系统的稳定性等都会产生有益的影响.

参考文献

[1] 戴军, 单忠德, 王西峰, 等. 潮流水轮机的研究进展[J]. 可再生能源, 2010, 28(4): 130-133. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2010.04.031.
DAI Jun, SHAN Zhongde, WANG Xifeng, et al. Current research progress of water turbine[J]. Renewable Energy, 2010, 28(4): 130-133. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2010.04.031.

[2] WANG Shujie, YUAN Peng, LI Dong, et al. An overview of ocean renewable energy in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1):91-111. DOI: 10.1016/j.rser.2010.09.040.

[3] 刘富铀,张俊海,刘玉新,等.海洋能开发对沿海和海岛社会经济的促进作用[J].海洋技术,2009, 28(1):115-119. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2029.2009.01.028.
LIU Fuyou, ZHANG Junhai, LIU Yuxin, et al. Facilitation of ocean energy developmenton to society and economy of coastal and island area[J]. Ocean Technology, 2009, 28(1): 115-119. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2029.2009.01.028.

[4] BATTEN W M J, BAHAJ A S, MOLLAND A F, et al. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines[J]. Renewable Energy, 2008, 33(5): 1085-1096. DOI: 10.1016/j.renene.2007.05.043.

[5] LI Ye, CALISAL S M. Numerical analysis of the characteristics of vertical axis tidal current turbines[J]. Renewable Energy, 2010, 35(2):435-442. DOI: 10.1016/j.renene.2009.05.024.

[6] 张亮,李志川,刘健,等.垂直轴水轮机耦合数值模拟研究[J].哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(S1): 228-231.
ZHANG Liang, LI Zhichuan, LIU Jian, et al. Coupled numerical simulation of vertical axis tidal turbine[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(S1): 228-231.

[7] 李志川, 张亮,孙科,等. 垂直轴潮流水轮机数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(9): 1321-1326.
LI Zhichuan, ZHANG Liang, SUN Ke, et al. Numerical simulation of vertical axis tidal turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(9): 1321-1326.

[8] 汪鲁兵.竖轴潮流水轮机水动力性能理论与实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.
WANG Lubing. Theoretical and experimental study on hydrodynamic performances of vertical-axis tidal turbine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.

[9] 李志川. 垂直轴潮流能水轮机水动力特性数值模拟与试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2011.
LI Zhichuan. Numerical Simulation and experimental study on hydrodynamic characteristic of vertical axis tidal turbine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.

[10] LI Y, CALISAL S M. Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbines: Part I—Power output[J].Ocean Engineering, 2010,37(7): 627-637. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2010.01.006.

[11] LI Y, CALISAL S M. Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbines: Part II—torque fluctuation [J].Ocean Engineering, 2011, 38(4):550-558. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2010.11.025.

[12] YANG Bo, CHRIS L. Three-dimensional effects on the performance of a vertical axis tidal turbine [J]. Ocean Engineering, 2013, 58: 1-10. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.09.020.

[13] AKIMOTO H, TANAKA K, UZAWA K. A conceptual study of floating axis water current turbine for low-cost energy capturing from river, tide and ocean currents[J]. Renewable Energy, 2013, 57(4): 283-288. DOI:10.1016/j.renene.2013.02.002.

[14] LI Ye, CALISAL S M. Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine[J]. Renewable Energy, 2010, 35(10):2325-2334. DOI: 10.1016/j.renene.2010.03.002.

[15] 盛其虎, 汤福定, 王海峰,等.2×150 kW 漂浮式立轴潮流能独立发电统设计[C]//第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集.大连:[s.n.],2013:758-763.
SHENG Qihu, TANG Fuding, WANG Haifeng, et al. Design of 2×150 kW floating vertical tidal energy independent power system[C]. Dalian: Proceedings of the 16th of China Ocean (Offshore) Engineering Symposium, 2013:758-763.

(编辑　张　红)