

文章编号:1005-9865(2018)03-0043-08

潮流能发电装置支撑结构对水轮机 水动力学性能影响研究

谭俊哲^{1,2}, 郑志爽¹, 李仁军¹, 王树杰^{1,2}, 袁 鹏^{1,2}, 闫家政¹

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 青岛市海洋可再生能源重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要:水平轴潮流能水轮机在工作过程中,由于支撑结构的存在,会使水轮机周围流场中的潮流流向、流速等参数发生不同程度的改变,进而影响水轮机的性能和发电装置的稳定性。为了研究支撑结构对水轮机水动力学性能的影响规律,以某 100 kW 单立柱座底式潮流能发电装置的支撑结构为研究对象,采用 CFD 方法,分别在正、反向来流时采用不同支撑结构的共六种工况下,对潮流能水轮机模型的获能和受力进行数值模拟。通过水槽模型试验,验证数值模拟的可靠性。研究结果表明:支撑结构对水轮机水动力学性能的影响不容忽视,针对所研究的支撑结构,在正向来流时水轮机的获能系数降幅约 30%,轴向力系数降幅约 28%;反向来流时的降幅更大,分别约为 63% 和 41%。

关键词:潮流能水轮机;支撑结构;数值模拟;水动力学性能

中图分类号:P743.1; TK73 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2018.03.006

Study on the influence of support structure on hydrodynamic performance of tidal turbine

TAN Junzhe^{1,2}, ZHENG Zhishuang¹, LI Renjun¹, WANG Shujie^{1,2}, YUAN Peng^{1,2}, YAN Jiazheng¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Ocean Engineering Key Lab of Qingdao, Qingdao 266100, China)

Abstract: In the working process of horizontal axis tidal turbines, performance of the turbine and stability of the power generation devices would be influenced by the change of parameters of the flow field around the turbine such as the current direction and velocity affected by the support structure. In order to know how the support structure influences the hydrodynamic performance of the tidal turbine, a bottom-seated 100 kW tidal turbine with a single column structure was studied by using CFD method. The performance of energy capturing and the force of the turbine model were simulated under six working conditions with different supporting structures, and both the flow directions of the tidal current and the simulation results were verified by model testing in flume. The results show that the influence of the support structure on the hydrodynamic performance of the tidal turbine is not negligible. With the influence of the support structure, the power coefficient and axial force coefficient might decrease by about 30% and 28% respectively in the forward flow. The power coefficient and axial force coefficient influenced by the support structure might be more severe in the forward flow, which could decrease by about 63% and 41% respectively.

Keywords: tidal axis turbine; support structure; numerical simulation; hydrodynamic performance

收稿日期:2017-10-27

基金项目:山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2017ZA0202);国家自然科学基金项目(51479185)

作者简介:谭俊哲(1972-),男,山东人,副教授,主要从事海洋机电装备仪器研发和海洋可再生能源研究工作。

E-mail:tanjunzhe_cn@163.com

水平轴潮流能水轮机以其转化效率高、工作平稳等优点,已成为一种重要的潮流能转换装置^[1]。水轮机在实际工作过程中,其水动力学性能不仅受到复杂海洋环境的影响,同时还受到发电装置本身支撑结构的影响。由于潮流的双向性,在正、反向流流过发电装置时,水轮机及发电装置都会对水流的流速和流向产生不同程度的改变^[2-5],这会对水轮机的水动力学性能产生一定的影响。这种由支撑装置对叶片的获能和载荷造成影响的现象在风力机的研究中称之为塔影效应^[3, 6]。针对水轮机的这一现象,国内外专家对其展开了一系列研究,Mason-Jones 等^[7]分别对 5 种不同截面形状的支撑立柱以及在有、无支撑立柱时对水平轴潮流能水轮机性能的影响进行了对比研究;王树齐等^[5]研究了圆形和椭圆形两种截面形状的支撑立柱以及立柱到水轮机前缘的不同距离对水轮机性能的影响;李广建^[8]对比分析了在流速和流向一定时,不同直径和形状的机舱、不同直径的立柱以及立柱与水轮机叶轮之间的间距对水轮机性能的影响。潮流能发电装置支撑结构对水轮机的水动力学性能影响的问题得到了广泛关注。

针对这一问题,以某 100 kW 潮流能发电装置的支撑结构为研究对象进行分析研究。该装置的施工海域位于山东青岛斋堂岛南侧,在实际设计中结合了斋堂岛海域的实际海况,兼顾座底式和桩柱式支撑结构的优点,同时为了方便检修水轮机而设计了单立柱可升降支撑平台结构。如图 1 所示为 100 kW 潮流能发电装置的设计图。

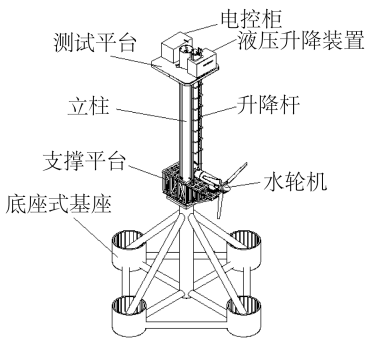


图 1 100 kW 潮流能发电装置设计图
Fig. 1 Design drawing of a 100 kW tidal turbine

在实际工作过程中,水轮机的转子与支撑结构之间距离较近,而装置的支撑结构会对水轮机周围流场中的潮流流向、流速等参数产生一定的影响,进而影响水轮机的水动力学性能。这里就该支撑结构对水轮机的水动力学性能影响规律进行理论研究,通过建立可供于试验的小尺度比例模型,采用 CFD 方法对水轮机的典型工况进行数值模拟和试验验证。本研究来源于实际的示范工程,在主要考虑到实际施工的同时对发电装置的支撑结构对水轮机的水动力性能的影响进行了分析研究,对以后的示范工程的结构优化提供一定的参考。

1 计算模型

1.1 几何模型建立及网格划分

100 kW 单立柱座底式潮流能发电装置由潮流能水轮机、可升降式支撑平台、液压升降装置和座底式基座等部分组成。为研究支撑装置对水轮机水动力学性能的影响,分别对在正、反向流时,水轮机处于无支撑、单立柱支撑、立柱及支撑平台共同支撑的共六种工况下的水动力学性能进行分析研究,并将上述有支撑的共四种工况的数值模拟结果同模型试验结果进行对比分析。水轮机的六种工况示意如图 2 所示。

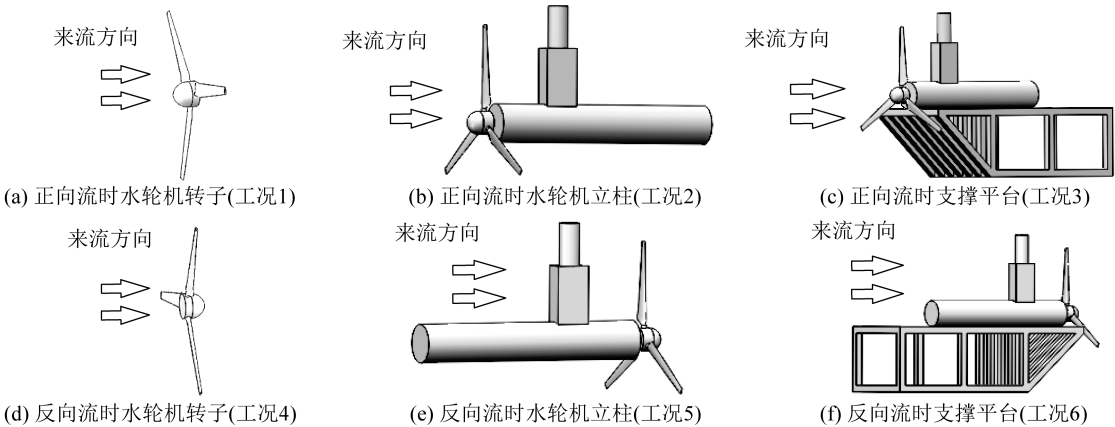


图 2 水轮机六种工况示意
Fig. 2 Six working conditions of the tidal turbine

在数值模拟与模型试验中均采用 NACA4415 翼型,进行小尺度模型的重建。缩放之后的水轮机转子三维图如图 3 所示,转子参数如表 1 所示。

为提高网格质量,减少运算时长,对水轮机转子及立柱和支撑平台进行三维建模时,对其结构进行简化,特别是对图 2(c)、(f) 两种工况进行建模时,重点考虑支撑平台和立柱,选择性忽略其它无关部分。

对建立好的三维模型进行网格划分,由于叶片及支撑平台的外形结构较为复杂,非结构网格对该情况的适应性较好^[9],所以本例采用非结构网格。对水轮机叶片表面、水轮机立柱和支撑装置等面区域采用三角形网格,旋转域和流体域等体区域采用四面体非结构网格,水轮机转子、立柱及支撑结构的面网格尺寸为 5 mm,旋转域及流体域体网格尺寸分别为 10 mm 和 80 mm,其输出的网格总数分别约为 25 万和 110 万。在实际装置的运行中,当反向流流过装置和水轮机时,水轮机的桨距角会自动改变以适应变化的潮流流向,在数值模拟及试验中将水轮机叶片反向旋转 180°以模拟变桨的效果,在三种支撑状态中除了水轮机转子后的支撑不同和水流的来流方向不同外,其余设置均相同。

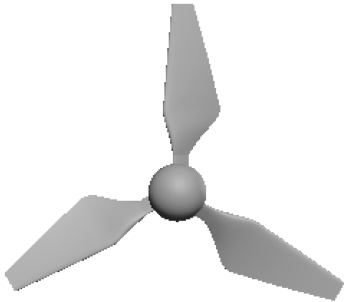


图 3 水轮机转子模型
Fig. 3 Model of turbine rotor

表 1 水轮机转子参数
Tab. 1 Parameters of the turbine rotor

翼型	叶片数	转子直径/mm	轮毂直径/mm
NACA4415	3	600	90

1.2 湍流模型的选择和边界条件设置

SST k- ω 模型兼顾了标准 k- ω 湍流模型和标准 k- ϵ 湍流模型的优势,在预测近壁区域绕流和旋流方面具有较高的准确度和较好的收敛性,故选用 SST k- ω 湍流模型作为计算湍流模型。对划分好的网格设定边界条件,将计算模型设置流体域和旋转域,支撑结构设置为水流不可通过的 wall 类型,水轮机转子完全于旋转域内,内部旋转区域与外部流体区域之间存在三个相互重合的面,将三对相互重合的面设置为 interface 面,并在 Fluent 中完成交界面设置。为了分析水轮机单个叶片的瞬时获能情况,先采用多参考系模型对计算模型进行求解,然后使用非稳态滑移网格的方法计算。由于本研究中水轮机及支撑结构完全浸入到水面下一段距离,主要考虑为定常流时的情况,故在数值模拟中不考虑自由表面的影响^[10]。边界条件的设定如图 4 所示。

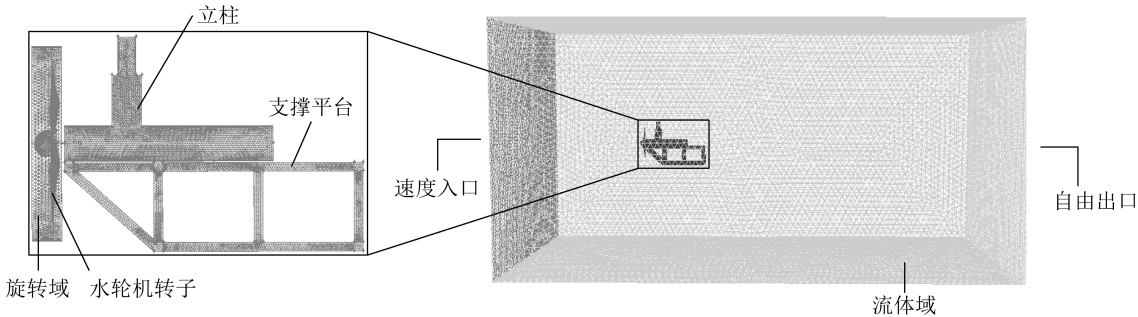


图 4 网格及边界条件
Fig. 4 Grid and boundary conditions

2 数值分析

在对水轮机进行数值模拟和试验研究时,获能系数和轴向力系数是表征水轮机水动力学性能的最重要的两个参量,其表达式^[11]分别为:

获能系数:

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho V^3 \pi R^2}$$

(1)

轴向力系数:

$$C_t = \frac{F}{0.5\rho V^2 \pi R^2}$$

(2)

叶尖速比:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} = \frac{\pi R n}{30V}$$

(3)

式中: P 为功率, W ; F 为轴向力, N ; n 为转速, r/min 。

2.1 水轮机性能分析

使用 CFD 数值模拟方法对六种工况下的水轮机进行数值模拟,得到水轮机的获能系数 C_p 及轴向力系数 C_t 与尖速比 λ 的关系曲线,如图 5 和图 6 所示。

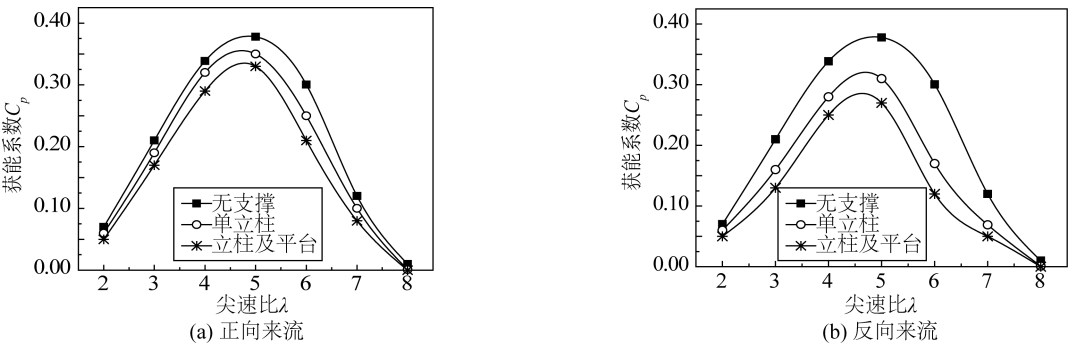


图 5 各个工况下水轮机获能系数数值模拟结果
Fig. 5 Simulation results of the turbine power coefficient in each working condition

由图 5 可知,水轮机的获能系数随尖速比的增大而呈现出先增大后减小的趋势,在尖速比为 5 左右时各个工况均达到获能系数最大值,且在尖速比为 5~6 时的获能系数降幅最大。无支撑时,水轮机在正、反来流两种工况下的最大获能系数基本相同,约为 0.37。正向来流时,水轮机在两种有支撑工况下,其获能系数与无支撑时的趋势大致相似,只是其数值有所降低。其中,当尖速比为 6 时,单立柱支撑(工况 2)时水轮机的获能系数比无支撑(工况 1)降低约 0.06,降幅约 20%;而立柱及平台共同支撑(工况 3)时的降幅更大,约为 30%。反向来流时,由于水轮机转子处于支撑结构的尾流区域,支撑结构对水流的阻挡作用要比正向来流时的更大,因此对水轮机的获能影响更大。尖速比为 6 时,单立柱支撑(工况 5)时水轮机的获能系数约为 0.17,相比无支撑(工况 4)降幅约为 47%,而此时立柱及平台共同支撑(工况 6)的降幅可达到约 63%。

由图 6 可知,六种工况下水轮机轴向力系数的整体趋势都是随尖速比的增大而增大。无支撑时其整体轴向力系数最大,在尖速比为 8 时达到极大值约为 0.85;正向来流时,对于单立柱支撑(工况 2)和立柱及平台共同支撑(工况 3),二者在尖速比为 2~3 时的轴向力系数几乎相同,在尖速比为 8 时两种工况的轴向力系数分别为 0.71 和 0.61,相比无支撑(工况 1)时降幅分别约为 16% 和 28%;在反向来流时,对于单立柱支撑(工况 5)和立柱及平台共同支撑(工况 6),在尖速比为 8 时,其轴向力系数分别达到各自的极大值为 0.55 和 0.5,相比无支撑(工况 4)时降幅分别约为 35% 和 41%。由于支撑结构对水流会有一定的阻挡作用,这会降低水轮机的轴向力系数,且反向流时的降幅更大。

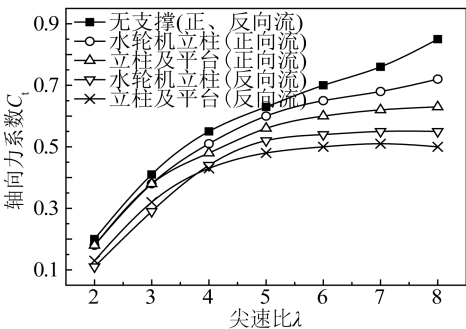


图 6 各个工况下水轮机轴向力系数数值模拟结果
Fig. 6 Simulation results of axial force coefficient of the turbine in each working condition

2.2 水轮机获能的瞬时分析

为了进一步分析立柱和支撑平台对水轮机获能的瞬时影响,现选中水轮机转子的一个叶片为研究对象,在设定流速为 0.4 m/s,尖速比为 5 的条件下,分别在六种工况下对被选中的叶片进行瞬时分析,被选中的某叶片与立柱及支撑平台的相对位置如图 7 所示,深色叶片为选中的叶片,箭头代表水轮机旋转方向。

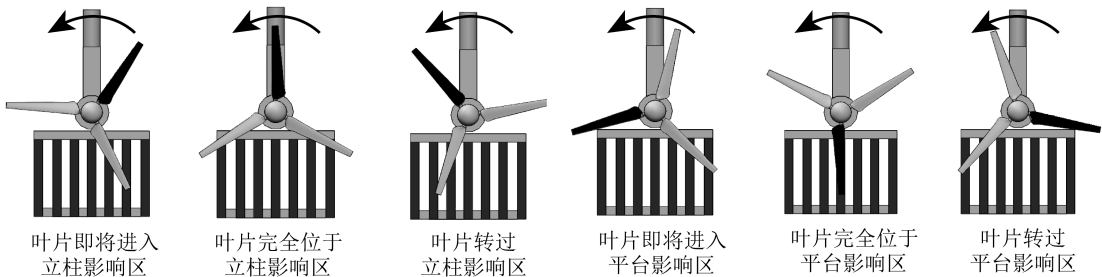


图 7 被选中的叶片与立柱及支撑平台相互位置关系示意

Fig. 7 Mutual location between the selected blade and the column with supporting platform

在 Fluent 中对被选中的叶片进行瞬态数值模拟,分析其在旋转 360°的整个过程中,在不同角度时获能的瞬时变化情况。得到在各个工况时单叶片获能的瞬时变化趋势,如图 8 所示。

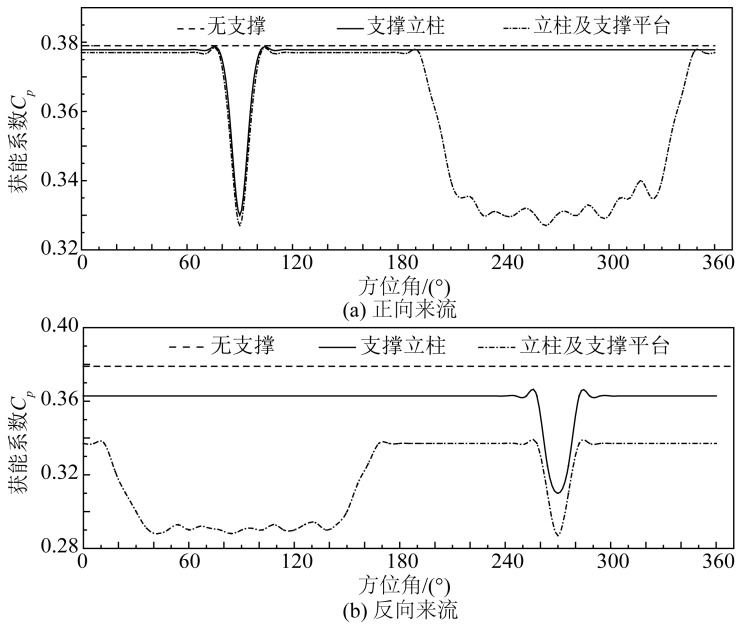


图 8 正、反向来流时水轮机单叶片获能的瞬时变化情况

Fig. 8 Transient variation of the turbine's single blade in forward and reverse flow directions

根据瞬时分析的结果:无支撑时,正、反向流叶片的获能系数都在接近 0.38 处维持稳定。正向来流情况下,单立柱支撑(工况 2)在 80°时,被选中的叶片逐渐进入立柱影响区,此时其瞬时获能系数突然降低,到 90°时降到最低值约 0.33,随着叶片转过立柱区,其获能系数逐渐回升。而立柱及平台共同支撑(工况 3),除了在 80°~100°时有和工况 2 相似的突变外,在 190°时被选中的叶片逐渐进入平台影响区,其获能系数逐步降低并在 0.33 上下浮动,到 350°左右时其获能系数才回升到正常值。反向来流情况下,单立柱支撑(工况 5)在 260°时,被选中的叶片瞬时获能系数会发生突变,降到最低值约 0.31,之后逐渐回升;而立柱及平台共同支撑(工况 6)在 10°时,被选中的叶片进入平台影响区,其获能系数逐步降低并在 0.29 上下浮动,在 170°时才回升到正常值,此外,在 260°~280°叶片经过水轮机立柱时,也会出现与工况 5 相似的突变,获能系数最低降到约 0.29。

3 模型试验

为了进一步研究支撑结构对水轮机性能的影响,在风—浪—流水槽中进行了潮流能发电装置的模型试

验,由于受到试验条件的限制,在水槽中进行人工造流以模拟海洋环境中的潮流流动,对试验值和数值模拟结果进行对比分析。

3.1 试验设计

水槽水深为 0.8 m,宽 1 m,流速为 0~0.7 m/s。试验装备主要包括:水轮机(内部安装扭矩转速传感器)、支撑装置、应变片测试系统、ADV 和数据采集与分析系统等。数据采集与分析系统主要由扭矩转速采集系统、轴向力采集系统和流速采集系统等组成,装置模型主要由水轮机和支撑平台等组成。部分试验设备与装置以及试验装置示意图分别如图 9 和图 10 所示。



图 9 部分试验设备与装置

Fig. 9 Part of the experiment equipments and devices

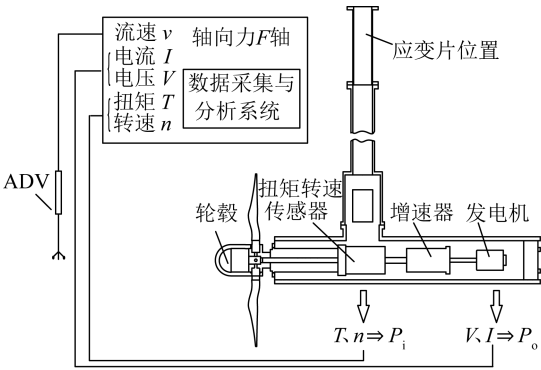


图 10 试验装置示意

Fig. 10 Experiment equipments

3.2 模型试验与数值模拟对比分析

在试验水槽中对水轮机转子在有支撑结构的共 4 种工况下进行试验,实时采集不同尖速比下水轮机的轴向力、扭矩和转速等参数,以得到各个工况下水轮机的获能系数和轴向力系数,并与数值模拟的结果对比。试验值与数值模拟结果如图 11~图 14 所示。

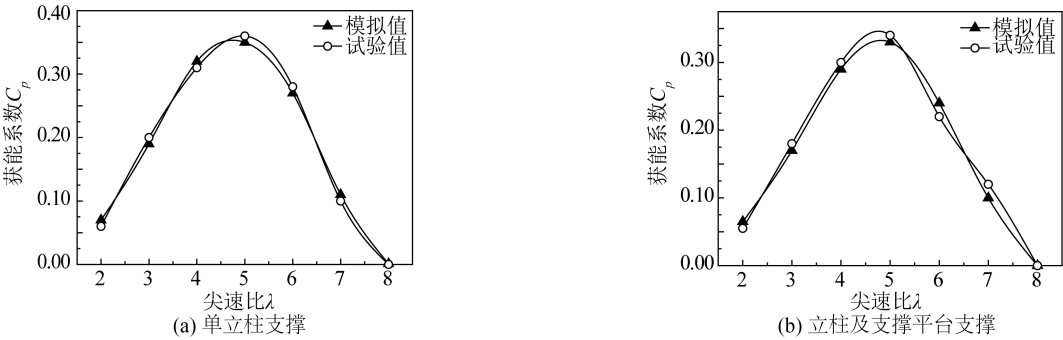


图 11 正向来流时两种工况下水轮机获能系数试验值与模拟值对比

Fig. 11 Comparison of the turbine power coefficients and simulation results in forward flow direction under two working conditions

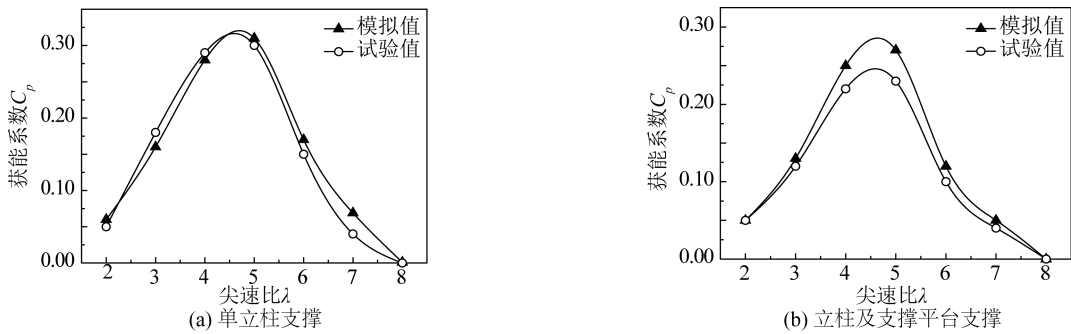


图 12 反向来流时两种工况下水轮机获能系数试验值与模拟值对比

Fig. 12 Comparison between experiments and simulation of the turbine power coefficients in reverse flow direction under two working conditions

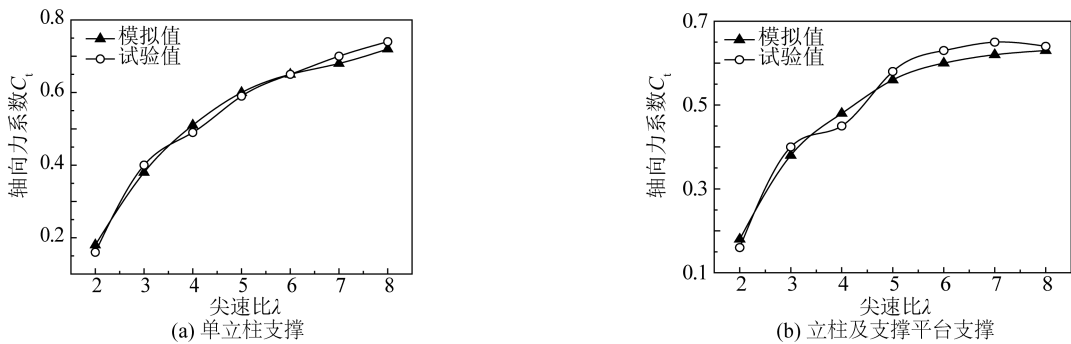


图 13 正向来流时两种工况下水轮机轴向力系数试验值与模拟值对比

Fig. 13 Comparison between experiment and simulation of turbine's axial force coefficients in forward flow direction under two working conditions

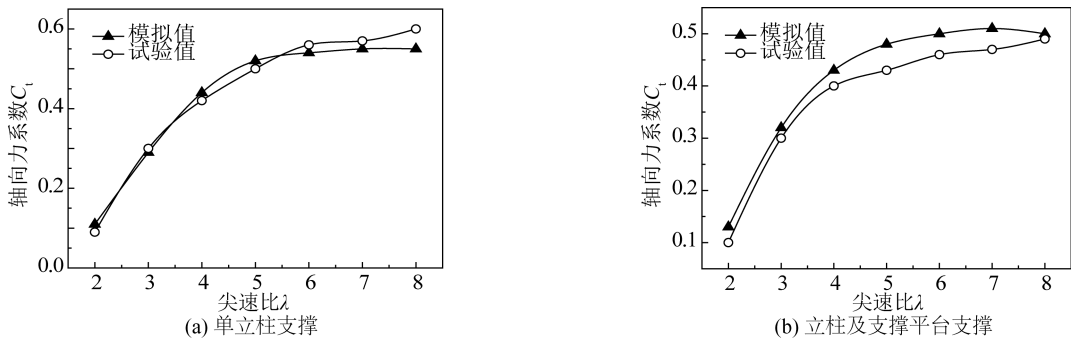


图 14 反向来流时两种工况下水轮机轴向力系数试验值与模拟值对比

Fig. 14 Comparison between experiment and simulation of turbine's axial force coefficients in reverse flow direction under two working conditions

由于试验过程中测量装置误差及数值模拟精度问题,两者存在一定误差。根据试验测试值:正向来流时,单立柱支撑(工况 2)和立柱及平台共同支撑(工况 3)时水轮机的最大获能系数分别约为 0.35 和 0.33,最大轴向力系数分别约为 0.64 和 0.75。反向来流时,单立柱支撑(工况 5)和立柱及平台共同支撑(工况 6)时水轮机的最大获能系数分别约为 0.30 和 0.23,最大轴向力系数分别约为 0.60 和 0.47。大约在越接近最佳尖速比处,支撑结构对水轮机的获能影响越大。对比分析以上试验测试值和数值模拟结果:各工况下水轮机的获能系数和轴向力系数的试验测试值与数值模拟值基本吻合。

4 结 语

以单立柱座底式潮流能发电装置为研究对象,分别在正、反向来流和有无支撑结构的不同工况下对水轮

机进行了数值模拟,并对有支撑结构的 4 种工况的水轮机进行了试验验证,将二者进行了对比分析,得到支撑结构对水轮机水动力学性能的影响规律趋势,结论如下:

1) 支撑结构对潮流能水轮机的水动力学性能的影响不容忽视。在正向来流时,有支撑结构和无支撑结构工况下相比,水轮机在单立柱支撑时的获能系数最大降幅约为 20%,轴向力系数最大降幅为 16%,而在立柱及支撑平台共同支撑下的获能系数最大降幅约为 30%,轴向力系数最大降幅为 28%;在反向来流时,以上两种支撑结构下水轮机获能的最大降幅分别约为 47%和 63%,轴向力系数最大降幅分别约为 35%和 41%。由此可见,支撑结构对水轮机水动力学性能会产生较大的影响。考虑到施工海域的实际潮流情况,以及为了满足海上施工和检修需要而采用了这种支撑结构,在今后的研究中还需继续对该支撑结构进行优化。

2) 对选定的叶片作为研究对象进行瞬时分析,可以明显地看出支撑结构对被选中叶片获能的瞬时影响,正向来流时,在立柱和支撑平台共同支撑的工况下被选中叶片的瞬时获能系数最低降到约为 0.33,而反向流时约为 0.29。通过模型试验对数值模拟结果进行验证,对比分析试验测试值和数值模拟结果可得:在有支撑结构的四种工况时,二者的获能系数和轴向力系数趋势具有一致性。

通过数值模拟和试验验证的方法探索了潮流能发电装置的支撑结构对水轮机水动力学性能的影响规律。然而,潮流能发电装置在实际海域运行时会受到波浪、速度梯度等更复杂的海洋环境的影响,在以后的研究中对实际尺寸支撑结构支撑下的水轮机进行仿真分析,并进一步综合考虑复杂海洋环境的影响,从而更全面、准确地分析支撑结构对水轮机水动力学性能的影响规律。

参考文献:

- [1] 王树齐, 马伟佳, 徐刚, 等. 水平轴潮流能水轮机耦合运动水动力分析[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(1):51-56. (WANG Shuqi, MA Jiawei, XU Gang, et al. Coupling motion hydrodynamic analysis of horizontal axis tidal turbine [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(1):51-56. (in Chinese))
- [2] DOLAN D S L, LEHN P W. Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3):717-724.
- [3] 范忠瑶, 康顺, 赵萍. 上风向风力机塔影效应的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(10):1707-1710. (FAN Zhongyao, KANG Shun, ZHAO Ping. Numerical simulations of upwind wind turbine tower shadow effects [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(10):1707-1710. (in Chinese))
- [4] FADAEINEDJAD R, MOSCHOPOULOS G, MOALLEM M. The impact of tower shadow, yaw error, and wind shears on power quality in a wind-diesel system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1):102-111.
- [5] 王树齐, 肖钢, 张亮, 等. 潮流能水平轴水轮机支撑立柱干扰研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(4):81-85. (WANG Shuqi, XIAO Gang, ZHANG Li, et al. Supporting column influence analysis of horizontal axis tidal current turbine [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, Natural Science Edition, 2014, 42(4):81-85. (in Chinese))
- [6] HUGHES F M, ANAYA-LARA O, RAMTHARAN G, et al. Influence of tower shadow and wind turbulence on the performance of power system stabilizers for DFIG-Based wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2):519-528.
- [7] MASON-JONES A, O'DOHERTY D M, MORRIS C E, et al. Influence of a velocity profile & support structure on tidal stream turbine performance[J]. Renewable Energy, 2013, 52:23-30.
- [8] 李广建. 水平轴潮流能发电装置机舱和立柱结构对其水动力性能的影响[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2016. (LI Guangjian. Influence of the engine room and column structure of horizontal axis tidal current energy generator device on its hydrodynamic performance [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016. (in Chinese))
- [9] 陈存福. 潮流能水平轴水轮机叶片优化及水动力性能研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012. (CHEN Cunfu. Study on blade optimization and hydrodynamic performance of horizontal axis marine current turbine [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese))
- [10] YAN J, DENG X, KOROBEENKO A, et al. Free-surface flow modeling and simulation of horizontal-axis tidal-stream turbines [J]. Computers & Fluids, 2016, 158:157-166.
- [11] STRINGER R M, HILLIS A J, ZANG J. Numerical investigation of laboratory tested cross-flow tidal turbines and Reynolds number scaling[J]. Renewable Energy, 2016, 85:1316-1327.