

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222123

海浪条件下水平轴叶片式潮流能水轮机 流动特性的数值模拟

吴朝阳, 谢占山

(南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 为了研究自由海浪条件下的高潮汐流速对水平轴潮流能水轮机的动态特性影响, 基于 STAR-CCM+ 建立了海浪条件下潮流能水轮机水动力特性的数值模拟方法, 得到了海浪对潮流能水轮机转动影响规律及转动过程中产生的尾流特征。结果表明, 潮流能水轮机角加速度的幅度与频率受海浪影响, 但波动幅度小于海浪波动幅度、变化频率高于海浪波动频率; 水轮机转动产生的尾流会使下一个水轮机的周围流场更紊乱, 对叶片转动的影响、水轮机轴负载和能量利用率等方面会产生影响; 压力脉动变化趋势分析认为, 尾流对水轮机疲劳损伤并无太大影响。

关键词: 水平轴叶片式潮流能水轮机; 水动力特性; 海浪耦合; 尾流特性; 压力脉动

中图分类号: [TV734.1]; TK730.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0149-04

1 引言

潮流能作为海洋能源的一种, 是由月球或太阳引力导致的海水流动的动能^[1], 具有较强的规律性和可预测性, 能量密度大并易于开采^[2]。潮流能水轮机将水的机械能转化为水轮机的机械能, 可实现能量回收或再利用, 且正常运作并不会对海洋环境造成影响, 已成为缓解能源短缺、减少环境污染、实现能源与环境和谐发展的重要途径。水轮机根据旋转轴相对于主流的方向区分为水平式和垂直式。其中, 垂直式水轮机也称为横流水轮机, 其优点是无需导向机构, 但其效率低于水平式水轮机。近年来, 对水平轴水轮机的性能进行了大量的数值和试验研究。MÜLLER G 等^[3]通过收集有关试验成果, 对流轮的所有类型进行理论分析和概述, 有效且精准地确定了适合各种水轮机应用的场合; KLEMEN N 等^[4]通过水轮机的内部模型调节控制水轮机功率, 以确保水轮机得到更高的能量转换; 李彦等^[5]从理论层面提出建设我国潮流能、波浪能海上试验与测试场的紧迫性和必要性, 并结合我国实际, 提出了潮流能、波浪能海上试验与测试场建设须考虑的主要问题和建设; 饶翔等^[6]利用流固耦合方法模拟了水轮

机在不同海况下的运动, 得出了横摇和纵荡幅度等因素对于水轮机能量利用率的影响。同时, 通过分析过流部件的不同设计参数^[7]、不同部件^[8]、不同运转参数^[9], 利用试验和数值模拟方法, 针对结构参数相异及不同工况的水轮机, 开展能量转换效率研究。然而, 已有研究缺少风浪等外界因素对水轮机效率影响的耦合分析。因此, 本文通过 STAR-CCM+ 对潮流能水轮机的水力性能和周围流场进行海浪耦合的三维瞬态数值模拟, 采用滑移网格与六自由度运动技术手段, 对复杂海况下的潮流能水轮机组进行水动力学性能研究, 旨在分析潮流能水轮机在风浪等外界因素下对效率的影响, 为潮流能水轮机组设计和工程应用提供参考。

2 模型与网格划分

2.1 几何模型及网格剖分

以 NACA0012 横截面翼型为基础, 通过不同弦长和对应桨距角的形式进行叶片延伸建模。水轮机半径为 3 m, 轮毂半径为 0.15 m, 叶片数量为 3 片(图 1(a))。建立计算模型后, 给出足够大的计算场来模拟流场。叶片旋转域中心与计算区

收稿日期: 2022-10-13, 修回日期: 2022-11-13

基金项目: 江苏省创新创业项目(202210304109Y)

作者简介: 吴朝阳(1970-), 男, 副教授, 研究方向为流体力学及仿真, E-mail: cwzy0808@sina.com

通讯作者: 谢占山(1984-), 男, 博士、讲师, 研究方向为流体力学及仿真, E-mail: xzs528@163.com

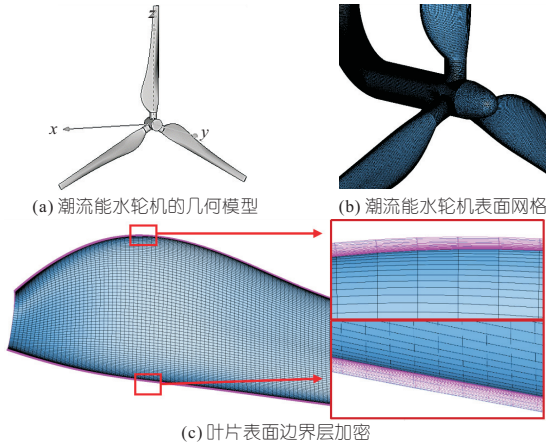


图 1 潮流能水轮机模型及网格剖分

Fig. 1 Model and grid of tidal current turbine

域入口和出口边界的距离分别为 20、30 m。此外,从底部和侧面到涡轮旋转轴的距离为 10 m。为了避免计算过程中网格质量的降低,整个计算区域分为旋转区域和静止区域,并建立了一个固定坐标系, XOY 平面平行于静止的水面,坐标系的原点位于轴与三叶片延长线交点上。Y 轴为潮流方向,Z 轴为垂直水面方向。

采用混合网格形式,叶片采用结构化网格划分,并进行边界层加密。研究表明^[10],潮流能水平轴水轮机网格的数量和收敛性存在相关性,当网格数达到 231×10^4 个,即模型表面第一层网格高度为 0.000 5 m 时,即使加密网格,计算结果也基本不变。在此基础上,对网格进行了近壁面细化,提高了叶片表面的网格质量,网格见图 1(b)、(c)。

2.2 分析控制方程与海浪条件设置

主要采用 STAR-CCM+ 对潮流能水轮机进行 DBPI 六自由度仿真,限制沿轴线转动作为水轮机的运动自由度,采用标准 K-Epsilon 两层湍流的多相流 VOF 模型求解湍动能和湍流耗散率的传输方程^[11],以确定湍流涡粘度。动能 κ 、湍流耗散率 ϵ 的传输方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \nabla(\rho\kappa\bar{v}) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla\kappa \right] + P_\kappa - \rho(\epsilon - \epsilon_0) + S_\kappa \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \nabla(\rho\epsilon\bar{v}) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla\epsilon \right] + \frac{1}{T_\epsilon} C_{\epsilon 1} P_\epsilon - C_{\epsilon 2} f_2 \rho(\epsilon/T_\epsilon - \epsilon_0/T_0) + S_\epsilon \quad (2)$$

式中, ρ 为密度; ∇ 为梯度算子; μ 为动力粘度; μ_t 为 t 时刻动力粘度; κ 为湍动能; ϵ 为湍动能耗散; ϵ_0 为初始时刻湍动能; $\epsilon - \epsilon_0$ 为湍动能耗散增量; S_κ 、 S_ϵ 分别为用户定义数据,用于调整模型精度; $1/T_\epsilon$ 、 $(\epsilon/T_\epsilon - \epsilon_0/T_0)$ 分别为用于计算 κ 方程、 ϵ 方程的湍流反作用普朗特数; \bar{v} 为平均速

度; σ_ϵ 、 σ_κ 、 $C_{\epsilon 1}$ 、 $C_{\epsilon 2}$ 均为模型系数; P_κ 、 P_ϵ 均为结果项; f_2 为阻尼系数。

同时为模拟海洋中的海浪环境冲击对潮流能水轮机的冲击作用,使用斯托克斯波理论^[12,13]的五阶近似海浪建模,依据浙江大学研发的 25 kW 半直驱式水平轴水轮机设计参数^[14],设置海浪来速为 2 m/s,海浪高 0.5 m,整体水深 20 m,海浪波长 6 m,以形成类似于实际的海浪参数^[15]。

3 结果与分析

潮流能水轮机在来流作用下叶片前后产生压差,进而在叶轮上形成扭矩,同时也产生垂直于叶片压力(力与力矩方向见图 2(a))。叶轮在力矩作用下,浸入水下叶轮轴向的角加速度和角速度的时程曲线见图 2(b)、(c)。由图 2(b)、2(c)可看出,潮流能水轮机从静止状态启动,0~1.8 s 内加速度呈波浪式上升,在 1.8 s 时达到峰值,随后在 1.8~2.2 s 内断崖式下降,之后再回升并在零点附近随海浪周期性波动,同样角速度对应角加速度在 2 s 时达到峰值并稳定于 6.6 rad/s。角加速度的幅度与频率虽然受海浪影响,但海浪的波动幅度明显大于旋转的波动幅度,而旋转变化频率明显大于海浪波动频率,两者并不同步,且流体力矩也有相当大的波动,应与叶片边界层流动产生的涡流有关。CFD 数值结果与水轮机水动力学理论分析基本一致,能验证本文采用的海浪数值模拟方法的有效性。

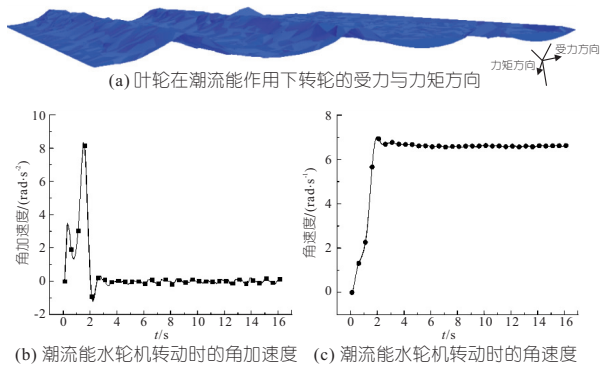


图 2 潮流能水轮机海浪数值模拟方法的有效性验证

Fig. 2 Validation of numerical simulation method for tidal current turbine

图 3(a)为潮流能水轮机旋转域速度矢量云图。由图 3(a)可看出,大部分区域的流体直接穿过潮流能水轮机,只有部分流体的动能转化为水轮机的机械能,以实现能量回收再利用,不会对海洋环境造成影响。

图 3(b)、(c)为 $z=0$ 时水平面内瞬时流向速

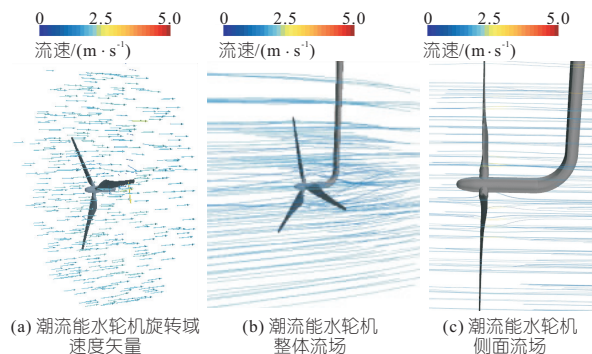


图 3 潮流能水轮机海浪数值模拟方法下的可视化云图

Fig. 3 Visualized nephogram under numerical simulation method of tidal current turbine waves

度的流线。由图 3(b)、(c)可看出,叶尖上方的快速流动导致流线弯曲,在高速转动时,叶片下游的低速尾流卷起产生涡流,在叶尖发现了流向紊乱且速度较低的涡流域,但脱落后迅速消散并不产生螺旋状尾流,叶片尖端与流体层的剪切摩擦会引起涡空化,导致噪音振动等对水轮机组产生不利影响。

为探究尾流特性对水轮机组转动和能量利用的影响,在原有计算域沿流动方向 15 m 处额外增加一个旋转域和一台潮流能水轮机。重新划分网格计算,结果见图 4。由图 4(a)可知,NO. 1 水轮机的尾流紊乱度明显优于 NO. 2 水轮机,这说明尾流会影响下一个水轮机的来流,并使流场变动更紊乱。为进一步探索尾流场对下一个水轮机转动的影响,在叶片表面布置了监测点,结果见图 4(b)。其中,负号代表相对于 Y 轴正方向逆时针转动。由图 4(b)可知,从静止到启动 6 s 时间段内,两者的旋转几乎同步,6~10 s 时间段内,两者旋转角度开始存在明显差异,且 6 s 这一时间差乘以海浪速度与两个水轮机之间的间隔基本吻合。这充分说明尾流特性对叶片转动的影响确实存在,也从侧面证明尾流同样影响水轮机轴负载和能量利用率,在 10 s 时存在 5.53% 的差异。

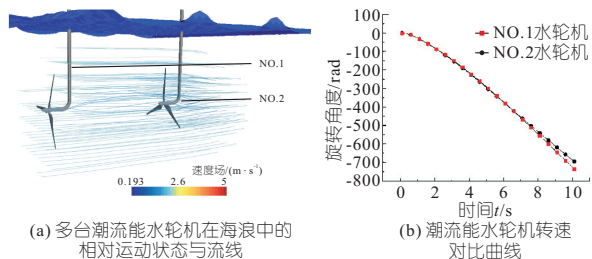
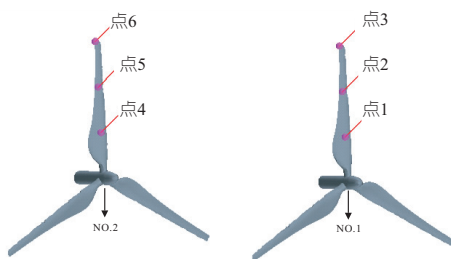


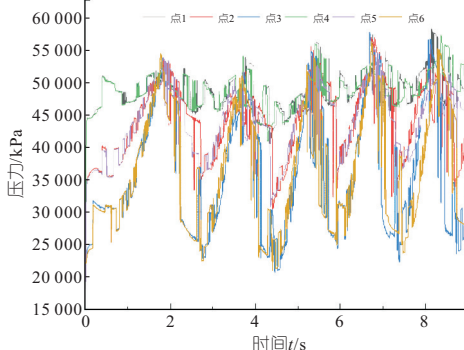
图 4 水轮机尾流对后续水轮机运转影响的可视化云图

Fig. 4 Visualized nephogram of influence of turbine wake on subsequent turbine operation

同时为对水轮机组叶片表面的压力脉动及疲劳预测进行分析,在两个水轮机的其中一个叶片



(a) 水轮机组叶片表面布点示意图



(b) 水轮机组叶片压力脉动曲线

图 5 水轮机组叶片表面布点示意图及压力脉动曲线

Fig. 5 Schematic diagram of blade surface distribution and pressure pulsation curve of hydraulic turbine

表面上均匀布点(图 5(a)),算得叶片表面压力波动见图 5(b)。

由图 5(b)可看出:①叶片表面的压力脉动存在较大的幅值,这与叶片的低速尾流卷起产生涡流破碎、脱落有关,圆周速度和流动分离是产生该种压力脉动的主要原因。②压力存在周期性,其循环波动的周期间隔约为 1.75 s,这主要是源于海浪对叶片的直接冲击。③对比点 1、2、3 可明显看出越远离旋转中心,其压力峰值差越大,其中点 3 处压力峰值为 58 273.4 Pa、压力谷值为 18 297.8 Pa,峰值压力在谷值的 3 倍以上,叶片在循环交变应力下将加速疲劳失效。④对比不同水轮机的同一布点位置(点 1 与点 4、点 2 与点 5、点 3 与点 6),1~7 s 间 NO. 1 与 NO. 2 水轮机压力波动几乎完全相同,直至 7 s 后两者旋转角度逐渐差距拉大,压力波动才有略微差异。因此,水轮机尾流特性对叶片疲劳损伤并无太大影响。

4 结论

a. 潮流能水轮机角加速度的幅度、频率与海浪波动同步,但波动幅度小于海浪波动幅度、变化频率高于海浪波动频率,水轮机叶片表面的压力脉动幅值与叶片旋转产生的涡流破碎脱落有关。

b. 水轮机叶片表面的压力脉动存在的周期性主要源于海浪对叶片的直接冲击。叶片下游的低速尾流区域产生涡流,在叶尖也发现了流向紊乱

且速度较低的涡流域,但脱落后迅速消散并不产生螺旋状尾流,叶尖涡流迅速消散,具备高效率资源利用同时不对海洋环境造成影响的可能性。

c. 水轮机转动产生的尾流会使下一个水轮机的周围流场更紊乱,10 s 时受流场影响的叶片转动角度仅为原来的 94.47%,进而影响水轮机的轴能量利用率;但从压力脉动变化趋势分析,认为尾流对水轮机疲劳损伤并无太大影响。

参考文献:

[1] 刘延俊,贾瑞,张健. 波浪能发电技术的研究现状与发展前景[J]. 海洋技术学报,2016,35(5):100-104.

[2] FRAENKEL P L. Power from marine currents, Proceedings of the institution of mechanical engineers[J]. Part A:Journal of power & energy,2002,216(1):1-14.

[3] MÜLLER G, DENCHFIELD S, MARTH R, et al. Stream wheels for applications in shallow and deep water[C]//32nd IAHR Conference 2007, 2007:96-119.

[4] KLEMEN N, IGOR S. Modelling and internal fuzzy model power control of a francis water turbine[J]. Energies,2014,7(2):874-889.

[5] 李彦,罗续业,路宽. 潮流能、波浪能海上试验与测试场建设主要问题分析[J]. 海洋开发与管理,2013,30(2):36-39.

[6] 饶翔,路宽,伊扬. 不同海况对潮流能水轮机性能的影响分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022,43(4):465-471.

[7] 郭涛,张立翔. 混流式水轮机小开度下导水机构内湍流特性和叶道涡结构研究[J]. 工程力学,2015,32(6):222-230.

[8] XIE Z S, SHI W D, TIAN Q, et al. Fatigue life assessment and damage investigation of centrifugal pump runner [J]. Engineering failure analysis, 2021,124:105256.

[9] XIE Z S, SHI W D, ZHENG Y, et al. Simulation investigation on impact damage characteristics of metal plate by cavitating bubble micro-jet water hammer [J]. Engineering failure analysis, 2020, 115:104-126.

[10] 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.

[11] 龚凯. 基于 Savonius 桨叶的新型浮式防波堤消波捕能性能研究[D]. 赣州:江西理工大学,2021.

[12] ZHANG Z Y, YU T S, ZHAO Z S. Wave run-up on composite bucket foundation due to random waves: Model tests and prediction formulae [J]. Coastal engineering,2022,177(4):104177.

[13] ZHENG Z H, TRI M, DEBORAH G, et al. Investigations of offshore breaking wave impacts on a large offshore structure[J]. Journal of fluids and structures,2017,75:99-116.

[14] 孙健. 水平轴双向叶片结构设计及流固耦合分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.

[15] OURO P, HARROLD M, STOESSER T, et al. Hydrodynamic loadings on a horizontal axis tidal turbine prototype[J]. Journal of fluids and structures, 2017,71:78-95.

Numerical Simulation of Flow Characteristics of Horizontal Axis Blade Tidal Power Turbine Under Sea Waves

WU Zhao-yang, XIE Zhan-shan

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: In order to study the influence of high tidal current velocity on the dynamic characteristics of horizontal axis tidal turbine under free wave conditions, STAR-CCM+ was used to establish a numerical calculation method for the hydrodynamic characteristics of tidal energy turbines under sea wave conditions. The law of wave influence on the rotation of tidal energy turbines and the characteristics of wake flow generated during the rotation were obtained. The results show that the amplitude and frequency of the angular acceleration of the tidal energy turbine are affected by the waves, but the fluctuation amplitude is less than the wave amplitude, the variation frequency is higher than the wave frequency. The wake flow produced by the rotation of the hydraulic turbine will make the flow field around the next hydraulic turbine more chaotic, and will have an impact on the blade rotation, turbine shaft load and energy utilization efficiency. Based on the analysis of the changing trend of pressure fluctuation, it is considered that the wake flow has little effect on the fatigue damage of hydraulic turbine.

Key words: horizontal axis blade tidal power turbine; hydrodynamic characteristics; waves coupling; wake characteristics; pressure fluctuation