

浮潜式载体对潮流能水轮机性能的影响研究

王树杰^{1,2}, 于晓丽¹, 李仁军¹, 袁 鹏^{1,2}, 张以俊¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266003; 2. 青岛市海洋可再生能源重点实验室, 山东 青岛 266000)

摘 要: 浮潜式载体是一种创新性的潮流能水轮机载体形式, 在设计时, 需在保证其上浮下沉及拖航稳定性的同时, 尽量减小载体结构形式对其所搭载水轮机的影响。采用计算流体力学方法对两种浮潜式载体结构形式下水轮机运行状态及流场流速分布进行研究, 计算结果表明: 浮潜式载体中有无坡度对于水轮机的功率系数与轴向力系数影响很大, 功率系数在提高的同时, 轴向力系数也相应的增加, 因此在保证水轮机获能的同时, 需要对结构进行稳定性校核; 水轮机在额定流速条件下, 浮潜式载体的存在对于水轮机上游流速有一定的加强作用, 有坡度浮潜式载体因其导流聚流作用将流速提高 0.4 m/s 左右, 更有利于水轮机获能和效率的提高。

关键词: 水平轴潮流能水轮机; 浮潜式载体; 数值模拟; 性能分析; 流场分布

中图分类号: P743; TK73

文献标志码: A

文章编号: 1003-2029(2016)05-0005-05

水平轴潮流能水轮机作为目前应用最广的潮流能转换机构形式^[1], 其性能与载荷不仅受到外部复杂海洋环境的影响, 而且会受到自身载体结构、支撑结构等的影响。国内外学者对于载体结构与支撑结构的影响进行一系列研究。卡迪夫大学的 A. Mason-Jones, D. M. O'Doherty 等^[2]对比研究 5 种不同的支撑结构对于水平轴潮流能水轮机的影响; 中海油研究总院的李志川, 张理等^[3-4]研究了漂浮式载体运动及不同支柱形式对于水轮机载荷与效率的影响; 陈存福^[5]采用试验研究方法对比分析有无导流罩对于水平轴水轮机的影响, 指出导流罩的加入能够提高水轮机效率。20 kW 潮流能发电装置综合座海底式和漂浮式载体的优缺点, 首次提出浮潜式载体的概念, 浮潜式载体的结构形状对于水轮机及流场产生一定的影响, 然而关于这方面的研究尚未见到相关的文献, 针对上述问题, 本文拟采用 CFD 的方法对 20 kW 潮流能发电装置中浮潜式载体对水平轴潮流能水轮机性能影响进行对比分析, 为该装置的优化设计提供参考和依据。

1 20 kW 潮流能发电装置

20 kW 潮流能发电装置由中国海洋大学设计, 采用的是水平轴可变桨距水轮机, 由水轮机、浮潜式载体及支撑结构 3 部分组成, 如图 1 所示。

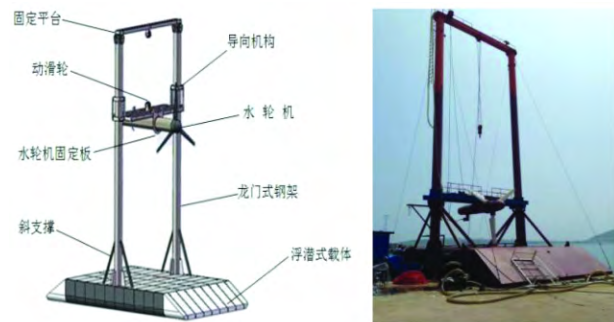


图 1 20 kW 实尺潮流能装置

20 kW 潮流能发电装置独创性地采用浮潜式浮箱作为载体, 通过对浮箱舱室内部舱室进行合理分布同时实现各个舱室的注水与抽水, 使浮潜式载体具备 3 种不同工作状态, 保证拖航与水下工作时

收稿日期 2016-02-25

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (51479185) 海洋可再生能源专项资金资助项目 (GHME2010ZC04)

作者简介 王树杰 (1961-), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋能利用技术研究工作。E-mail wangshujie@ouc.edu.cn

稳定性。浮潜式载体工作状态示意图如图 2 所示。

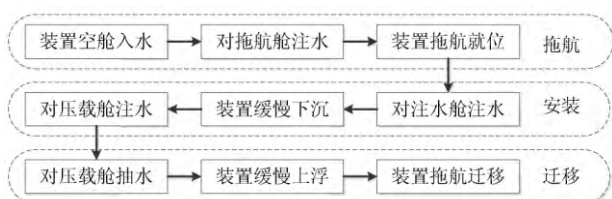


图 2 浮潜式载体工作状态

水轮机为整个获能装置的获能部件,通过叶素动量理论完成叶片的设计优化,并在三维绘图软件 Solidworks 完成水轮机叶轮建模,三维图如图 3 所示,水轮机及载体尺寸等参数如表 1 所示。



图 3 水轮机叶轮

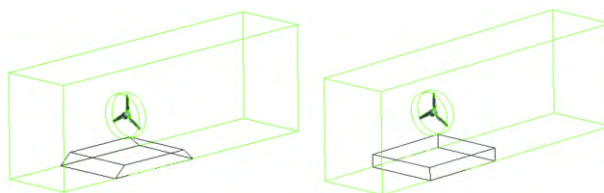
表 1 水轮机及载体各项参数

各项参数	数值
设计流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.75
水轮机叶轮直径/m	5.2
水轮机安装深度/m	-6.7
浮潜式浮箱长度/m	14
浮潜式浮箱宽度/m	8
浮潜式浮箱高度/m	1.5

2 数值模拟

2.1 几何模型建立及网格划分

为研究浮潜式载体结构形状对于水轮机性能的影响,需对前后有坡度浮潜式载体和前后无坡度浮潜式载体两种载体结构形式对水轮机性能的影响进行对比分析,在三维绘图软件 SolidWorks 中完成浮潜式载体与叶轮的建模,导入到前处理软件 Gambit 中,完成旋转域与流体域的建模,为简化运算将浮潜式载体进行简化,忽略两边立柱及后方横梁的影响,如图 4 所示。



(a) 有坡度浮潜式载体 (b) 无坡度浮潜式载体

图 4 旋转域与流体域建模

旋转域要求能够包裹水轮机,设定旋转域直径为 5.5 m,厚度为 1 m。斋堂岛海域平均水深为 12 m,将流体域的尺寸设置为 $35 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 。两种载体形式除载体结构形状不同,其他条件设置保持一致。

网格划分不仅要考虑计算机的计算能力,还要考虑网格的优劣,因为网格划分的质量直接决定了计算结果的准确度。作为 CFD 前处理软件 GAMBIT,提供了结构网格和非结构网格两种网格类型。鉴于叶片较为复杂的外形以及非结构网格的适应性^[5],采用非结构网格。对网格进行分区划分,水轮机叶片表面采用三角形网格划分,流体域采用四面体非结构网格进行划分,网格尺寸为 400 mm,网格数约为 40 万,对旋转域进行加密处理,以便能获得重要的流场信息,网格尺寸为 100 mm,网格数为 17 万。

2.2 湍流模型选择及边界条件设定

假设流体是粘性不可压的,流场的连续方程和动量方程为:

连续方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

式中: u_i, u_j 为速度分量, m/s ; x_i, x_j 为位置坐标分量; P 为流体压力, Pa ; μ 为流体动力粘性系数。

采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,在形式上类似于 standard $k-\varepsilon$,但计算功能上强于 standard $k-\varepsilon$ 。模型中考虑到旋转效应,对于强旋转流动计算精度得到提高,并且该模型改善了标准形式下模拟壁面流动失真的情况,使用较广泛。RNG $k-\varepsilon$ 模型的数学表达式^[6]为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, $C_\mu = 0.0845$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$,

$C_{2\varepsilon}=1.68, \eta=\sqrt{2} E_{ij}k/\varepsilon, C_{1\varepsilon}^*=C_{1\varepsilon}-\eta(1-\eta/\eta_0)/(1+\beta\eta^3),$
 $\eta_0=4.377, \beta=0.012$ 。

设定边界条件,流体为不可压的流体,已知来流速度分量,进口边界设置为速度入口(velocity inlet),流场无限大、参数未知时将出口设为自由出口(outflow),默认值为0。水轮机叶片及浮潜式载体表面设置为无滑移的固壁条件(wall)旋转域和流体域的类型都为流体(fluid),边界条件设定如图5所示。

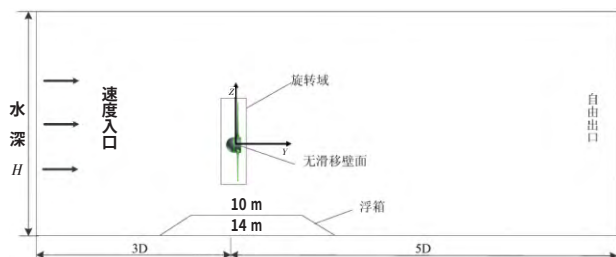


图5 边界条件

3 结果分析

在对仿真结果分析时,最能表征水轮机水动力学性能的参数是功率系数、轴向力系数。其中功率系数直接关系水轮机的发电量,轴向力系数则用来对支撑结构进行校核,保证安全性和稳定性。功率系数和轴向力系数的表达式^[7]为:

$$C_p = \frac{P_{\text{电}}}{0.5\rho V^3 \pi R^2} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{F}{0.5\rho V^2 \pi R^2} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{n\pi R}{30V} \quad (7)$$

式中 $P_{\text{电}}$ 为功率; F 为轴向力; n 为转速; V 为额定流速。

3.1 性能参数对比

在 ANSYS workbench-fluent 中完成两种工况下水轮机的数值模拟,得到不同尖速比下的轴向力系数与功率系数,如图6所示。

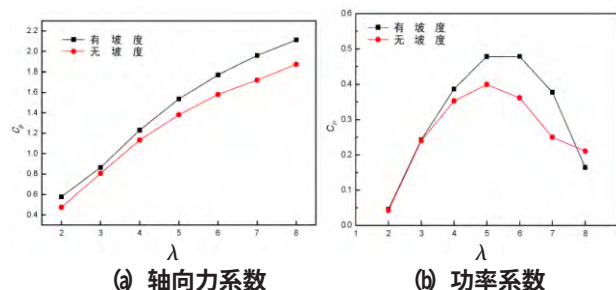


图6 性能参数

由图可见,两种载体结构形式下功率系数与轴向力系数相差较大,浮潜式载体的结构形状对于水轮机获能与受力均具有一定的影响。就轴向力而言,两种形式下轴向力系数随尖速比增大而增大,有坡度浮潜式载体的轴向力系数要高于无坡度浮潜式载体的轴向力系数,产生较大载荷。就功率系数而言,两种形式下功率系数是先增大后减小的趋势,存在最优尖速比,有坡度时,在尖速比为6时达到最大功率系数,无坡度时, $\lambda=5$ 为最佳尖速比,有坡度时的功率系数整体要高于无坡度时的功率系数,最高能达到0.47左右。主要因素为有坡度浮潜式载体对水轮机前方来流是逐渐加强作用,而对于无坡度浮潜式载体,来流在海底1.5 m高度上受到无坡度浮潜式载体的影响,产生湍流与涡流的复杂流动,削弱来流强度。

3.2 对上游来流与尾流的影响

为了综合考察浮潜式载体与水轮机工作时对于上游来流与尾流流场影响,选择在水轮机前后不同位置分析流速变化。选定水轮机工作尖速比 λ 为6时,分别对水轮机前后不同位置处垂向速度分布与水平方向流速进行分析。

在流体域中选取过叶轮中心的水平直线,通过CFD-POST后处理监测流场水平速度随位置变化情况,如图7所示,浮潜式载体的存在对于水轮机($Y=0$)上游流速有加强作用,无坡度浮潜式载体将流速提高0.2 m/s左右,而有坡度浮潜式载体将流速提高0.4 m/s左右,更有利于水轮机获能,但同时水轮机产生了较大的轴向载荷,相应的尾流也有一定的差别,整体而言,有坡度浮潜式载体情况下水平方向流场流速高于无坡度浮潜式载体时流速。

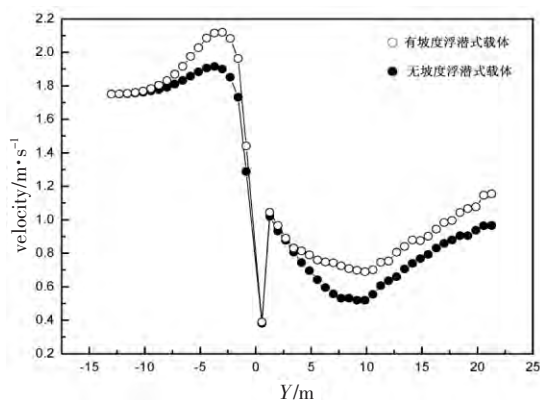


图7 水平速度分布曲线

在图5所示的YOZ平面内,选定水轮机前后Y为 ± 2 m, ± 3 m, ± 4 m, ± 8 m 8个不同位置,对水轮机前后不同位置的流速垂向分布受浮潜式载体的影

响规律进行分析,得到不同位置流速沿垂向分布规律曲线如图 8 所示。由图 8 (a) 可见,在水轮机前后 ± 8 m 处,浮潜式载体对于其上游来流并没有太大的影响,基本保持在 1.75 m/s 左右。由图 8 (b)~8 (d) 可知,受水轮机与来流双向耦合的影响,水轮机前方来流并不是定值 1.75 m/s,而出现一定的偏差,并且越靠近水轮机变化越明显。各位置的垂向速度分布由于受浮潜式载体的影响而发生变化,有无坡度的浮潜式载体使上游流速都有所提高,有坡度浮潜式载体使上游流速平均提高 0.4 m/s 左右,无坡度浮潜式载体使上游流速平均提高 0.2 m/s 左右,相比无坡度浮潜式载体,有坡度浮潜式载体由于导流增速明显更有利于水轮机获能。对于尾流分布,两种载体结构形式下流速也存在一定的差别,整体上有坡度浮潜式载体的尾流速度要高于无坡度浮潜式载体的尾流速度。

综合分析可见,浮潜式载体的存在对水轮机附近的流场造成了一定的影响,有坡度浮潜式载体由于具有一定的导流聚流作用使流经水轮机的水流流速提高,同时避免了无坡度浮潜式载体造成的局部湍流和涡流现象,有利于水轮机的获能和效率的提高。

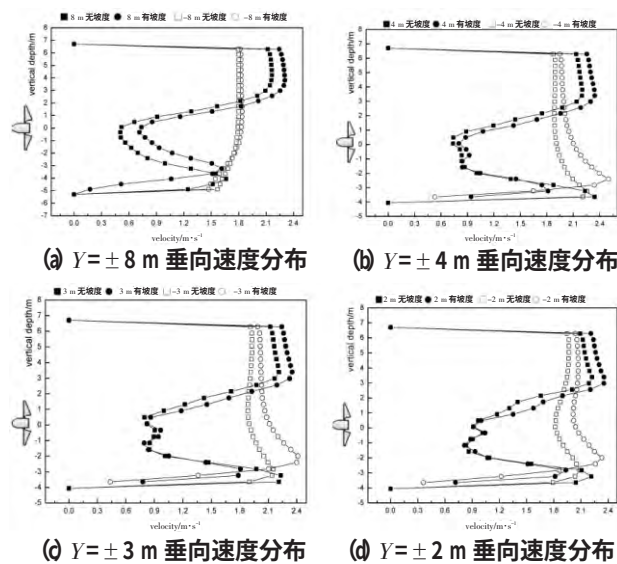


图 8 水轮机前后不同位置垂向速度分布

4 应用

依据分析结果,设计制造了带有前后坡度的浮潜式载体箱体,并于 2015 年 6 月对 20 kW 浮潜式潮流能发电装置按照图 2 所示的拖运下潜流程顺

利安装就位,如图 9 所示,目前已在青岛斋堂岛水道正常运行 1 a 多时间。



图 9 20 kW 潮流能发电装置

在运行过程中,经监测,机组效率大于 35%,这除了变桨距系统实现的最大功率点追踪控制外,带有前后坡度的浮潜式载体的导流增速作用也发挥了一定的作用。

5 结语

为研究浮潜式载体对于水平轴水轮机及其流场的影响,对两种载体结构形式下的水轮机运行状态进行数值模拟,对比得到以下结论:

(1) 浮潜式载体结构形状对于水轮机的影响不能忽略。前后坡度的存在使功率系数有所提高,最高能达到 0.47 左右,但轴向力也相应的提高,因此在浮潜式载体设计优化过程中,在保证获能效率的同时进行结构校核,保证安全与稳定。

(2) 浮潜式载体的存在对于水轮机上游流速有一定的加强作用,无坡度浮潜式载体将流速提高 0.2 m/s 左右,而有坡度浮潜式载体因其导流聚流作用将流速提高 0.4 m/s 左右,更有利于水轮机获能和效率的提高。

本文通过对比两种载体结构形式下水轮机运行状态,研究浮潜式载体结构形状对于水轮机性能的影响。但设计优化过程中,潮流能装置中的立柱及横梁等都是水轮机性能的影响因素,在本文中并未进行全面考虑,拟在以后的研究工作中,进一步综合考虑潮流能装置中立柱、横梁等对于水轮机获能与受力的影响,更全面地分析载体及支撑结构对水轮机性能的影响。

参考文献:

- [1] 张亮, 李新仲, 耿敬, 等. 潮流能研究现状[J]. 新能源进展, 2013, 1(1): 53-68.
- [2] A Mason-Jones, D M O'Doherty, et al. Influence of a velocity profile & support structure on tidal stream turbine performance[J]. Renewable Energy, 2013, 52:23-30.
- [3] 李志川, 张理, 肖钢, 等. 200 kW 潮流能发电装置漂浮式载体运动对水轮机性能影响分析 [J]. 海洋技术学报, 2014, 33(4): 52-55.
- [4] 李志川, 张理, 荆丰梅. 支柱对潮流能水轮机效率和载荷影响研究[J]. 中国造船, 2014, 55: 186-191.
- [5] 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.
- [6] Anup KC, Young Ho Lee. CFD study on prediction of vortex shedding in draft tube of Francis turbine and vortex control techniques[J]. Renewable Energy, 2016, 86:1406-1421.
- [7] R M Stringer, A J Hillis, J Zang. Numerical investigation of laboratory tested cross-flow tidal turbines and Reynolds number scaling[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 1316-1327.

Research on the Effect of Buoyancy Carrier on the Performance of Tidal Current Energy Turbine

WANG Shu-jie^{1,2}, YU Xiao-li¹, LI Ren-jun¹, YUAN Peng^{1,2}, ZHANG Yi-jun¹

1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong Province, China;

2. Qingdao Municipal Key Laboratory of Ocean Renewable Energy, Qingdao 266000, Shandong Province, China

Abstract: Buoyancy carrier is an innovative carrier form of tidal current energy turbine. During the design of the turbine, the stability of floating, sinking and towing should be ensured, while minimizing the influence of carrier form on its carried tidal turbine. The method of computational fluid dynamics is adopted to study the operational performance of the turbine and the distribution of fluid velocity under two different carrier forms. The results show that the gradient of buoyancy carrier has an important effect on the power coefficient and the axial force coefficient of the turbine. With increasing power coefficient, the axial force coefficient also increases accordingly. Therefore, while ensuring the turbine efficiency, it needs check the stability of the structure. Under the condition of rated flow velocity, the existence of buoyancy carrier reinforces the upstream flow velocity. The carrier with gradient will improve the flow velocity by 0.4 m/s owing to the function of stream guidance and focused fluid, which benefits energy capture and improves energy efficiency.

Key words: horizontal axis tidal current energy turbine; buoyancy carrier; numerical simulation; performance analysis; distribution of flow field