

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2017.02.019

双螺旋转子式波浪能发电装置数值仿真分析

刘森明, 何宏舟*, 李居跃, 郑松根

(集美大学 轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:将波浪能转化为电能是海洋能研究的一个热点,设计了一种利用波浪上下运动带动螺旋转子转动的双螺旋转子式波浪能发电装置。利用 Fluent 对双螺旋转子叶片数量、叶片长度、螺旋转子与圆管间隙之间的距离进行压力及速度分布特性的数值仿真分析,计算出双螺旋转子在不同情况下的力矩,其结果表明:对于某固定的双螺旋转子,叶片数量、叶片长度、轮缘间隙存在最佳值使转轮转矩达到最大,为下一步定量优化装置提供了理论依据。

关键词:波浪能;发电装置;双螺旋转子;Fluent 软件;数值仿真

中图分类号:P743.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-2029(2017)02-0111-05

波浪能具有存在范围广、储量大、能流密度大等特点^[1],波浪能发电可为边远海域的海岛建设、国防、海洋开发、农业生产等提供电力。开展海洋能波浪发电技术研究,对于开发利用海洋、优化能源结构、发展低碳经济等具有重要的战略意义^[2-3]。

长期以来,制约波浪能大规模发电利用的一个主要瓶颈是波浪能发电装置的能源采集和转换效率较低,发电成本较高。为了提高装置对波浪能的采集效率,近年来人们做了很多研究:在理论计算方面,梁贤光等^[4]发现三维波下点吸收装置具有聚波效应,具有较高波能采集效率;在装置优化设计方面,SALTER^[5]设计了一种点头鸭装置,能减少装置向后兴波,使得在相当宽的频谱内,装置效率都能达到最优状态;实验方面,勾艳芬等^[6]对阵列式振荡浮子式装置进行了试验研究,发现省去二次能量转换过程,能够提高装置效率。

本论文提出了一种双螺旋转子式波浪能发电装置,该装置的特点是海水从上方向下流还是沿着相反方向流入转轮,波浪力沿着轴切向方向始终是顺时针的,并利用 Fluent 软件对模型进行数值仿真分析,得到双螺旋转子的最佳值,其结果可为双螺

旋转子式波浪能发电装置的优化设计提供理论参考。

1 双螺旋转子式波浪能发电装置的结构与工作原理介绍

双螺旋转子式波浪能发电装置的总体结构如图 1 所示,其主要由 4 部分组成:圆管——用来保护转轮;内、外转轮——用来将波浪能转换成旋转的机械能;主轴——用来传递旋转机械能;上、下密封片——用来封闭水流通道的。

双螺旋转子式波浪能采集装置的运行原理为:当海水上涨时,下密封片会在水流冲击下遮住内螺旋通道,因此水流只能从外螺旋通道流进,从而推动螺旋转子叶片旋转运动,如图 2 所示;当海水下降时,上密封片会在水流和自身重力作用下遮住外螺旋通道,因此水流只能从内螺旋通道流出,从而推动螺旋转子叶片旋转运动,如图 3 所示。如果在外部加载发电机等装置,即可将旋转机械能转换成电能。

收稿日期 2016-01-04

基金项目 福建省海洋高新技术产业发展专项资助项目(闽海高新[2014]16 号)

作者简介 刘森明(1990-)男,硕士研究生,主要从事波浪能发电装置方面的研究。E-mail:liusenming513@163.com

通讯作者 何宏舟(1967-)男,博士,教授,主要从事海洋可再生能源开发利用技术方面的研究。E-mail:hhe99@jmu.edu.cn

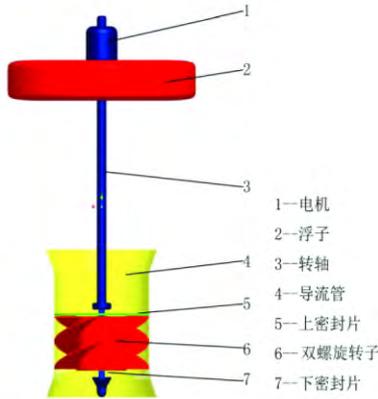


图 1 双螺旋转子装置示意图

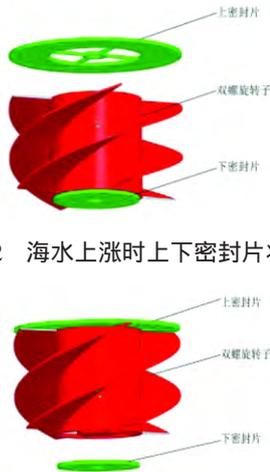


图 2 海水上涨时上下密封片状态

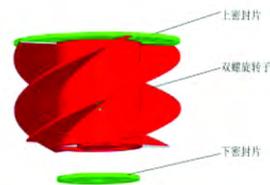


图 3 海水下降时上下密封片状态

该装置结构简单,能充分利用波浪上涨和下落两方面的能量,通过水流与螺旋转子的相互作用,完成波浪能向旋转机械能的转换。对潮水水位变化适应性强,适合于海岛、海上灯塔等处的发电。

2 数值仿真建模

模型初始尺寸参数如表 1 所示。根据实际情况,水流进入圆管涵道做无旋转单向流动,轴向速度分别取 0.8 m/s, 1.0 m/s, 1.2 m/s, 1.4 m/s, 1.6 m/s。流体介质为 17 °C 水,密度为 998.2 kg/m³,动力粘度为 0.001 308 Pa·s。出口边界设置为压力出口,且设置出口中心为相对压力参考点。

进出口及圆管涵道区域采用相对静止参考坐标系,叶轮区域采用旋转坐标系,相对角速度为逆时针 5 rad/s。进水流动区域和出水流动区域采用非结构化 Hex 六面体网格,转轮区域采用 Hex 六面体和 Tet 四面体混合的非结构化网格。

表 1 模型初始尺寸

计算域直径 /mm	叶轮半径 /mm	轮缘间隙 /mm	叶片长度 /mm	叶片数/个
100	46	4	60	4

考虑到计算时间及成本,由于水流在螺旋转子内的实际流动是复杂的三维运动,在建立波浪运动方程时,要选择合适的湍流模型,由于 $\kappa-\varepsilon$ 模型具有较好的稳定性和良好的预测能力,因此 CFD 软件在工程上一般引入 $\kappa-\varepsilon$ 方程来替代求解,其表达式为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu_{eff} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + g \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - C_k \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon)$$

式中:

$$\nu_t = C_u \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad G_k = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad C_u = 0.09 \quad C_k = 1.0$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad \sigma_k = 0.9 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

将 Gambit 中建好的网格模型导入 Fluent 中,设置初始化条件后进行迭代运算,求解出螺旋转子在不同几何参数下压力、流场速度分布,如图 4 和图 5 所示,考察装置几何参数对性能的影响^[7-8]。

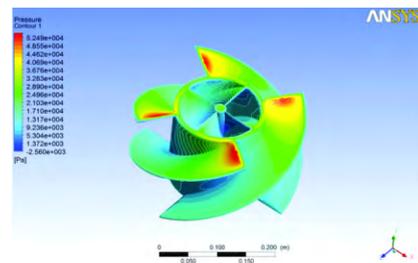


图 4 模拟仿真的压力云图

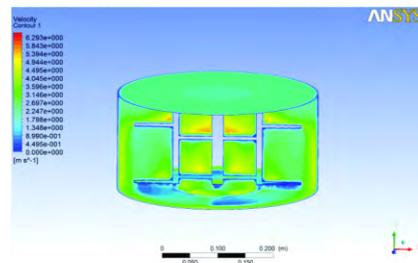


图 5 模拟仿真的速度云图

3 仿真结果分析

双螺旋转子式波浪能发电装置的性能与螺旋转子叶片数量、叶片长度、螺旋转子与圆管之间的间隙大小有关, 通过流场数值模拟研究叶片数量、叶片长度、螺旋转子与圆管之间的间隙大小对装置性能的影响。

3.1 叶片数量的影响

假定其他参数保持不变, 分别取叶片数为 2 3 4 5 6 7 8 9 个, 经过数值仿真计算, 得出转轮转矩与叶片数变化之间的关系, 如图 6 所示。

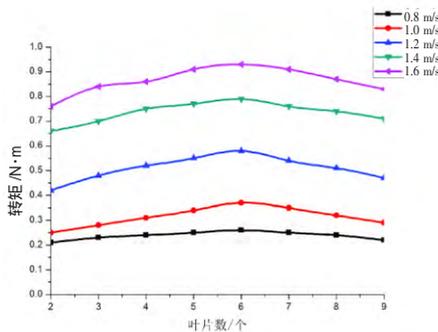


图 6 螺旋转子转矩随叶片数变化关系曲线图

图 6 表明, 在其他参数保持不变的情况下, 对于某固定的双螺旋转子, 叶片数量存在有最佳值, 叶片数在 6 个左右时水流在螺旋转子上的转矩达到最大, 且来流速度越大这种现象越明显。

取叶片数分别为为 4 6 8 个时, 分析叶片数对流场状况的影响。结果如图 7 所示。

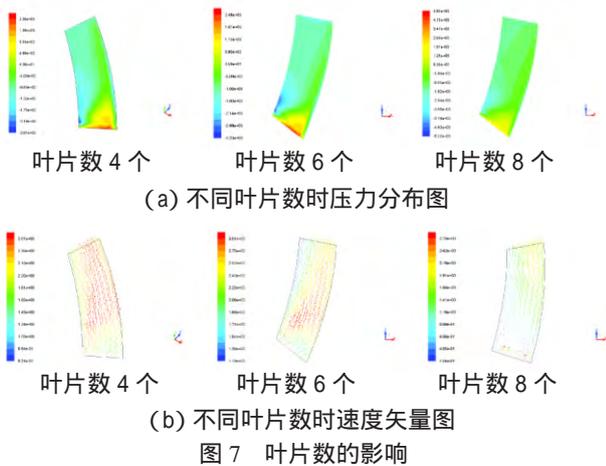


图 7 叶片数的影响

从图 7(a)可以看出, 在流速相同的情况下, 叶片数为 6 个的双螺旋转子叶面上的压力分布比较均匀, 呈现从高到低的分布趋势, 说明叶片数的改变对叶面压力分布有一定的影响, 叶片数较高或较

低时水流在螺旋转子上的径向流动增加, 导致叶片低压区面积减少, 压差变小, 而叶片数为 6 个的双螺旋转子能较好地适应水流的冲击, 在相同情况下比双螺旋转子数为 4、8 个的转矩大。

从图 7(b)可以看出, 叶片数为 6 个的双螺旋转子叶面上的速度分布层次更明显, 可以说明水流在叶片数为 6 个的双螺旋转子上的流动过程中, 流动损失更小, 在出口处没有明显的回流、涡流现象, 从而转矩大小比双螺旋转子数为 4、8 个的更高。

3.2 叶片长度的影响

假定其他参数保持不变, 当叶片长度分别取值为 40 45 50 55 60 65 70 75 80 mm 时, 经过数值仿真计算, 得出转轮转矩与叶片长度变化之间的关系, 如图 8 所示。

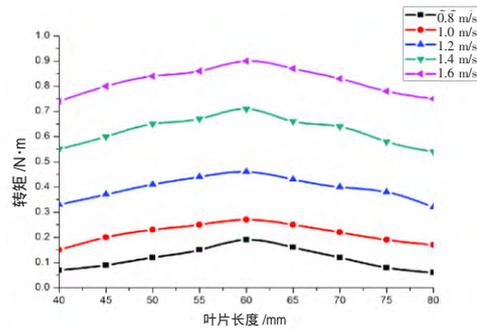


图 8 螺旋转子力矩随叶片长度变化关系曲线图

图 8 表明, 在其他参数保持不变的情况下, 对于某固定的双螺旋转子, 叶片长度存有最佳值, 叶片长度在 60 mm 左右时水流在螺旋转子上的转矩达到最大, 且来流速度越大这种现象越明显。

取叶片长度分别为 40 mm 60 mm 80 mm 时, 分析叶片长度对流场状况的影响。结果如图 9 所示。

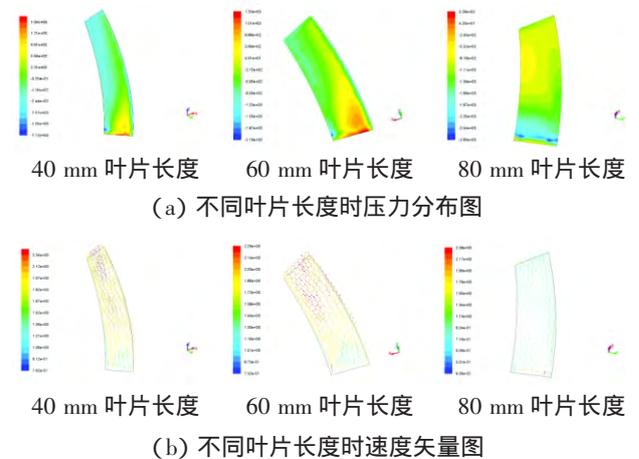


图 9 叶片长度的影响

从图 9(a)可以看出,在流速相同的情况下,60 mm 轴向长度的压力分布比 40 mm 和 80 mm 轴向长度的压力分布均匀,原因主要是对于同一双螺旋转子,随着叶片长度的增加,水流对双螺旋转子的作用面积增加,使其受到更多冲击力,达到一定值后水流在叶面上形成涡流和回流,导致冲击力抵消减小。从而长度为 60 mm 的叶片转矩比长度为 40 mm 和 80 mm 的叶片转矩高。

从图 9(b)可以看出,60 mm 叶片长度速度分布比较均匀,速度分布层次比 40 mm 和 80 mm 叶片长度更明显,沿程阻力较小,从而可获得较高的转矩。

3.3 螺旋转子与圆管之间的间隙距离的影响

假定其他参数保持不变,分别取螺旋转子与圆管之间的间隙为 3,4,5,6,7,8,9 mm,经过数值仿真计算,得到转轮转矩与螺旋转子与圆管之间的间隙变化的关系,如图 10 所示。

图 10 表明,在其他参数保持不变的情况下,对于某固定的双螺旋转子,螺旋转子与圆管之间的间

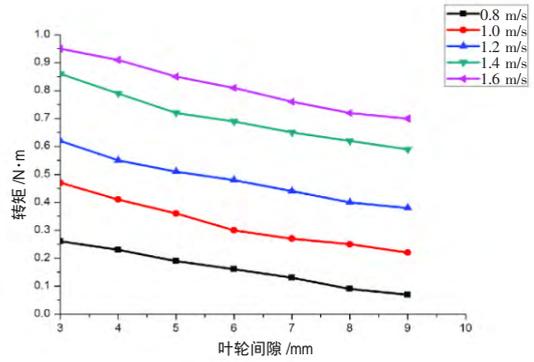
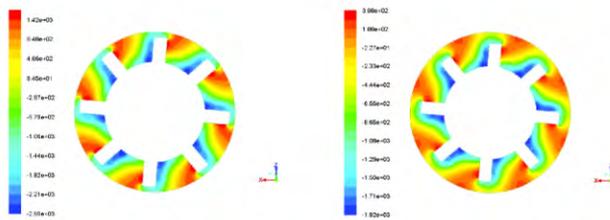


图 10 螺旋转子力矩随间隙变化的关系曲线图

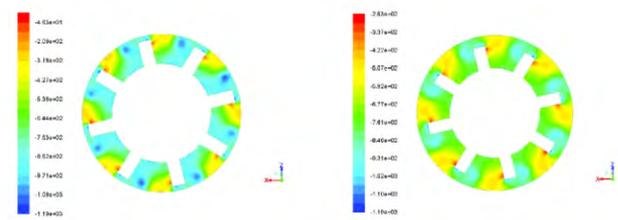
隙取 3 mm 较为合适,随着间隙增大,泄漏损失增加,转矩减小,装置效率降低。但也不是间隙越小越好,还要考虑到转轮运转的稳定性、安全性,选择合理的间隙。

取间隙为 3 mm 和 7 mm 的转轮在 Y=5 mm、Y=55 mm 位置处 (Y=5 mm 接近转轮水流入口, Y=55 mm 接近转轮水流出口)分析螺旋转子与圆管之间的间隙对流场状况的影响。结果如图 11 所示。



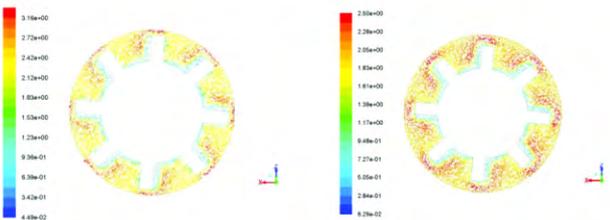
3 mm 叶缘间隙 7 mm 叶缘间隙

(a) 不同叶缘间隙 Y=5 mm 轴测面压力分布图



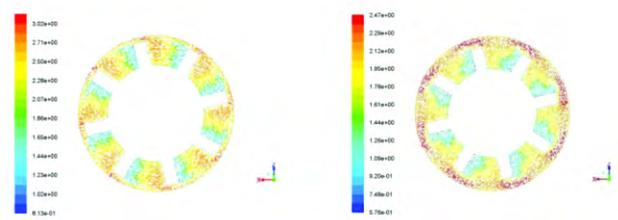
3 mm 叶缘间隙 7 mm 叶缘间隙

(b) 不同叶缘间隙 Y=55 mm 轴测面压力分布图



3 mm 叶缘间隙 7 mm 叶缘间隙

(c) 不同叶缘间隙 Y=5 mm 轴测面速度矢量图



3 mm 叶缘间隙 7 mm 叶缘间隙

(d) 不同叶缘间隙 Y=55 mm 轴测面速度矢量图

图 11 轮缘间隙的影响

从图 11(a)和图 11(b)可以看出,转轮的入口压力基本相等,但间隙为 7 mm 的转轮在出口处压力要低于间隙为 3 mm 的转轮,整体压力分布没有间隙为 3 mm 的转轮分布的均匀。说明随着间隙的增大,转轮泄漏增加,装置力矩也随着下降。

从图 11(c)和图 11(d)可以看出,7 mm 间隙转轮内流场不仅存在轴向流动还存在径向流动。靠近壁面处由于粘性底层的影响,速度比较小,流道内的

迹线比较紊乱,而 3 mm 间隙流场速度分布则更有层次感,说明 3 mm 间隙相较于 7 mm 间隙流动速度稳定,叶片可以更高效地将海水的动能和势能转化为旋转机械能。

4 结语

本文利用计算流体力学软件对双螺旋转子式

波浪能发电装置进行了三维模拟仿真,通过对叶片数量、叶片长度、叶缘间隙等影响转轮性能的参数进行计算模拟,得到相应的流动场压力及速度分布特性,结果表明:对于某固定的双螺旋转子,叶片数

量、叶片长度、轮缘间隙存在最佳值,使得转矩最大。文中为波浪发电提供了一种新的思路,取得了部分有意义的阶段性研究成果,为后续该类型装置加工设计和实际应用有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 张天阔,刘月超.全球新能源面面观[J].高科技与产业化,2007,02:64-69.
- [2] 羊晓晟.振荡浮子式海洋波浪能发电装置的设计[D].上海:上海海洋大学,2010.
- [3] 李成魁,廖文俊,等.世界海洋波浪能发电技术研究进展[J].装备机械,2010,2:68-73
- [4] 梁贤光,王伟,杜彬,等.后弯管波力发电浮标模型性能试验研究[J].海洋工程,1997,15(3):77-86.
- [5] Salter,SH.Wave power[J].Nature,1974,249(5459):720-724.
- [6] 勾艳芬,叶家玮,李峰,等.振荡浮子式波浪能转换装置模型试验[J].太阳能学报,2008,04:498-501.
- [7] 王福军.计算流体力学分析:CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [8] 刘胜柱.水轮机内部流动分析与性能优化研究[D].西安:西安理工大学,2005.

Numerical Simulation Analysis on the Double Helix Rotor Type Wave Energy Power Generation Device

LIU Sen-ming, HE Hong-zhou, LI Ju-yue, ZHENG Song-gen

College of Marine engineering, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian Province, China

Abstract: Converting wave energy into electricity is a hotspot in marine energy research. In this paper, a double helix rotor type wave energy power generation device is designed, which could acquire energy by utilizing the up and down motion of ocean waves. The Fluent software is adopted to conduct numerical simulation analysis on the characteristics of pressure and velocity distribution in the number of the blade, the length of the blade and the distance between the screw rotor and circular tube clearance. The double helix rotor torque is calculated under different situations. The results show that, for a fixed double helix rotor, the number of the blade, the length of the blade and the impeller clearance all have optimal values to maximize the rotor torque. The results obtained in this paper provide a theoretical basis for further quantitative optimization for the wave energy power generation device.

Key words: wave energy; power generation device; double helix rotor; fluent software; numerical simulation