# 非定常条件下 OWC 径向透平冲击式 动叶片优化研究

韩孜乾,刘 臻\*,张晓霞,许传礼,杨 鑫

(中国海洋大学工程学院,山东青岛 266100)

摘 要:为优化径向透平动叶片的结构型式,有效提高透平工作效率,本文基于 Ansys-Fluent 软件构建振荡水柱波能 发电装置径向冲击式透平的三维瞬态全流域数值模型,通过改变透平动叶片吸力面型式,研究了正弦往复入射气 流条件下动叶片厚度差异对透平扭矩、压强等参量的影响及其对透平输入系数、扭矩系数和周期平均效率等非定 常性能评价参数的影响。在保证压力面型式不变情况下,研究了 5 种动叶片厚度分别为 7 mm、13 mm、16 mm、 19 mm 和 22 mm 的透平在呼气、吸气阶段的非定常工作性能,结果表明:不同动叶片厚度的透平的非定常工作性能 存在较大差异,动叶片厚度为 13 mm 的透平非定常工作性能最优,最大峰值效率可达 47.7%。

关键词:径向透平;正弦往复气流;吸力面型式;动叶片厚度;非定常工作性能

中图分类号: P743.2;TV136 文献标志码: A 文章编号: 1002-3682(2022)03-0198-11 doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220318001

**引用格式:**韩孜乾,刘臻,张晓霞,等. 非定常条件下 OWC 径向透平冲击式动叶片优化研究[J]. 海岸工程, 2022, 41(3): 198-208. HAN Z Q, LIU Z, ZHANG X X, et al. Study on optimization of impulse rotor blades of radial flow turbine for OWS under unsteady conditions[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(3): 198-208.

随着社会的发展,人类对能源的需求量激增。传统化石燃料存在储量有限、污染环境、温室气体排放等弊端。另一方面,可再生能源的快速发展使得人类在寻找清洁、高效的替代能源方案上有了新选择。世界上主要的能源需求国家,如:中国、美国以及欧盟各国<sup>[1-3]</sup>等,均出台了法规政策,支持可再生能源的发展。可再生能源种类繁多、储量丰富,发电环节产生的温室气体较少,符合我国的"双碳"目标<sup>[4]</sup>。目前,应用较广泛的可再生能源包括风能、太阳能及水能<sup>[5-7]</sup>等,其他可再生能源如海洋能、生物质能及氢能也处于快速发展阶段。海洋能储量巨大、分布范围广、能流密度大、对环境影响小,虽然目前技术发展尚不成熟,但作为清洁能源具有巨大的开发潜力<sup>[8]</sup>。

波浪能是海洋能中储量最大的清洁能源,波浪能转换装置可将波浪能转换为电能,近年来,世界各地的沿海国家纷纷加大对波浪能转换装置的研发力度<sup>[9-12]</sup>。振荡水柱波能发电装置(oscillating water column wave energy convertor, OWC)具有结构简单、安装维护成本低及使用寿命长的优点,是发展较成熟的波浪能转换装置之一<sup>[13]</sup>。OWC利用入射波运动带动气室内部液面上下移动,产生往复气流,实现由波浪能到空气动能的转换;往复气流带动气室顶部的空气透平单向旋转,实现由空气动能到透平转轴动能的转换;转轴带动发电机工作将转轴动能转换为电能。空气透平作为OWC能量转化的关键部件,其性能的优劣对装置的工作性能有较大影响。径向空气透平转轴所受轴向应力小于轴流式透平,且动叶片无需采用三维实心叶片,节省材料的同时还可降低动叶片转动惯量,在小转速下便可获得较大输出扭矩。基于上述优点,径向透平受到了研究人员的广泛关注。Setoguchi等<sup>[14]</sup>通过物理模型试验研究了径向透平的运行特性,研究表明导流叶片安装角

收稿日期:2022-03-18

作者简介:韩孜乾(1996—),男,硕士研究生,主要从事海洋可再生能源开发与利用方面研究.E-mail: 1379205605@qq.com

(李 燕 编辑)

**资助项目:**国家自然科学基金项目——扑翼式潮流能装置水动力学性能与能量摄取机理研究(51779239)和典型波浪能装置能量捕获-传递-转换耦合模型的构建与优化(U1906228)

<sup>\*</sup>通信作者:刘 臻(1979—),男,教授,博士,主要从事海洋可再生能源开发与利用方面研究. E-mail: liuzhen@ouc.edu.cn

较小时,透平吸气阶段的效率比呼气阶段的效率高;内、外侧导流叶片的最优安装角均为25°。Marjani等<sup>[15]</sup> 采用滑移网格技术模拟透平内部流动,研究表明呼气阶段气流在导流叶片处产生的能量损失导致透平呼气 阶段的效率低于吸气阶段的效率。Pereiras 等<sup>[16]</sup> 发现叶片曲率、通道面积会影响上游导流叶片与动叶片之间 的能量损失;增大导流叶片的径向长度既有利于导流,又能增加偏转矩。优化后的透平呼气阶段的效率提高 了 9%,吸气阶段的效率保持不变。Elatife 和 Marjani<sup>[17]</sup> 采用试验设计(Design of Experiments, DOE)方法对透平 进行优化,涉及的结构参数包括吸力侧半径、叶片弦长、两圆弧中心位置和动叶片前、后缘几何角。结果表 明优化后透平的最大峰值效率能达到 70%。Elatife 和 Marjani<sup>[18]</sup> 发现动叶片结构型式对透平性能影响最大,采用圆形剖面动叶片透平的效率比原型透平的效率提高约 19%。Gato 等<sup>[19]</sup>提出了一种新型双径向自整流空 气透平,该透平使用的两排或多排导流叶片增加了导流叶片流域的自由空间。研究表明,多排导流叶片透平 阻尼较小,峰值效率比单排导流叶片透平高约 3.2%。

研究表明,如果径向透平的相对流动角与动叶片的叶片几何角不匹配,动叶片吸力面将出现明显的流动 分离现象<sup>[18]</sup>,改变动叶片吸力面形状可使叶片几何角与相对流动角相匹配,从而提高透平工作性能。本文在 动叶片通道宽度和压力面型式不变的前提下,设计了5种不同厚度的动叶片(5种动叶片的叶片几何角不同), 并采用数值模拟方法研究动叶片厚度对透平非定常性能的影响。

1 研究方法

#### 1.1 透平参数

1.1.1 透平结构参数

本文研究的 OWC 径向透平由固定段(图 1a)和旋转段(图 1b)两部分组成,固定段包括气室、导流叶片及导流叶片盘,旋转段包括转向结构、动叶片及转盘。透平主要结构参数如表1 所示。



图 1 任间近于年刊 Fig. 1 Structure of the radial flow turbine

径向透平主要结构参数

.. . .

表 1

Table 1         Main structural parameters of the radial flow turbine			
结构参数	数值	结构参数	数值
入口段内径 d/mm	300	出口段直径 D/mm	700
入口段长度 L/mm	300	通道高度 h/mm	53
中值半径r <sub>R</sub> /mm	261	叶尖间隙 t/mm	1.50
动叶片个数ZR/个	43	动叶片稠度σ	1.70
动叶片厚度t <sub>R</sub> /mm	19	动叶片弦长 <i>l</i> <sub>R</sub> /mm	65
动叶片安装角α <sub>R</sub> /(°)	0	动叶片展长 <i>h</i> <sub>R</sub> /mm	51.5
外导流叶片个数Z0/个	66	内导流叶片个数Z1/个	47
导流叶片稠度 S	2.07	导流叶片弦长 <i>l</i> G/mm	60
导流叶片安装角a <sub>G</sub> /(°)	25	导流叶片展长h <sub>G</sub> /mm	51.5

注:导流叶片稠度S和动叶片稠度o为无量纲数,分别反映导流叶片和动叶片的稠密程度。

由于径向透平动叶片吸力面存在明显流动分离现象,因此需合理设置吸力面形状以提高透平工作性能。 在动叶片弦长、开口角、安装角和压力面形状不变的前提下,本文共设计5种厚度分别为7mm、13mm、 16mm、19mm和22mm的动叶片,同时确定动叶片数量分别为117个、63个、51个、43个和37个,以保证总 气流通道宽度不变。5种动叶片结构如图2所示。



1.1.2 透平性能参数

相对于定常研究,非定常研究获得的透平输出扭矩、压强等参量的瞬时变化规律更有助于揭示透平真实 运行特性。在实际海况下,OWC内部气流为不规则气流,可看作是若干不同周期、频率的正弦气流的叠加。 故可用正弦往复气流代替不规则气流来研究透平非定常性能。研究透平非定常性能参数可定性分析透平输 出扭矩、转速、中值半径处气流流速、上下游压差和流量等物理量对透平工作性能的影响。

透平非定常性能评价参数(无量纲数)中扭矩系数 $C_{T}$ 、输入系数 $C_{A}$ 和流量系数 $\phi$ 的表达式如下:

$$C_{\rm T} = \frac{2T_0}{\rho(v_{\rm a}^2 + U_{\rm a}^2)A_{\rm R}r_{\rm R}},\tag{1}$$

$$C_{\rm A} = \frac{2\Delta P_{\rm a}}{\rho(v_{\rm a}^2 + U_{\rm a}^2)},\tag{2}$$

$$\Phi = \frac{v_a}{U_a},\tag{3}$$

式中: *T*<sub>0</sub>为透平周期平均扭矩; ρ为理想气体密度; *v*<sub>a</sub>为动叶片中值半径处径向峰值流速; *U*<sub>a</sub>为动叶片圆周速度; *A*<sub>R</sub>为动叶片中值半径处气流通道面积; *r*<sub>R</sub>为动叶片中值半径; Δ*P*<sub>a</sub>为动叶片上下游压差峰值。*A*<sub>R</sub>、*v*<sub>a</sub>和*U*<sub>a</sub>的表达式如下:

$$A_{\rm R} = 2\pi r_{\rm R} h, \tag{4}$$

$$v_{\rm a} = \frac{V_{\rm a}\pi d^2}{4A_{\rm R}},\tag{5}$$

$$U_{\rm a} = \omega r_{\rm R}, \tag{6}$$

式中: V。为入射气流峰值流速; d为入口段内径; h为通道高度; w为动叶片转速。

透平的瞬时输入、输出功率均随时间不断变化,因此需通过周期平均效率**n**评价透平非定常性能,其表达 式如下:

$$\overline{\eta} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T T_1 \omega dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p Q dt},$$
(7)

式中:T为透平入射气流周期;T1为瞬时输出扭矩;ΔP为上下游瞬时压差;Q为瞬时流量。

#### 1.2 数值模型构建

本文利用 SolidWorks 软件构建透平三维几何模型,使用 CAE(Computer Aided Engineering)前处理软件 ICEM CFD 简化几何模型壁面厚度并划分网格。根据叶片径向布置特点将整个计算域划分为4部分,沿转轴 向外依次为气室区域、环形内侧导流叶片区域、环形动叶片区域和环形外侧导流叶片区域。结构简单的气 室计算域采用非结构化网格,其余计算域均采用结构化网格,各相邻区域边界通过 Interface 连接。为保证数 值模拟的准确性,在动叶片和导流叶片处添加边界层网格,近壁面无量纲壁面距离在5左右;采用 UDF(User-Defined Function)程序控制网格运动和气流输入条件。具体的网格划分如图 3 所示。



图 3 模型计算网格划分 Fig. 3 Grid division for the model calculation

将网格模型导入 Ansys-Fluent 软件进行瞬态数值计算。该软件使用有限体积法求解连续性方程和纳维-斯托克斯方程,流动模型通过压力求解器来求解不可压缩的流体动量守恒方程,其中扩散项和对流项分别采 用中心迎风格式和二阶迎风格式进行离散,使用 SIMPLE 算法进行压力-流速耦合,使用 realizable *k-e* 湍流模 型闭合雷诺时均方程。

201

#### 1.3 数值模型验证

本文透平的数值模型为全流域模型,结构复杂,网格数对计算结果影响较大,因此本文需进行网格无关性验证。

为了对数值模拟提供数据支持,首先需进行正弦往复气流下的物理模型试验。图4为试验平台简图,试 验平台包括往复造流风洞、径向透平、数据采集及控制系统三部分。往复造流风洞如图5a所示,验证试验中 风洞推板行程和频率分别为0.25m和0.6Hz,能产生峰值流速和周期分别为3.34m/s和1.67s的正弦气流。 透平和数据采集及控制系统如图5b所示,透平尺寸见图1,电磁离合器和伺服电机能使转轴在不同预定转速 下恒定转动。将采集系统采集的人口峰值流速代入式(5)可得中值半径处的径向峰值流速,将采集系统采 集的转速代入式(6)可得动叶片圆周速度,将中值半径处的径向峰值流速和动叶片圆周速度带入式(3)可得 流量系数,将采集的扭矩、压强等参量代入式(1)、(2)、(7)可得透平输入系数、扭矩系数和周期平均效率。



图 4 往复气流试验平台 Fig. 4 Platform for reciprocating airflow experiment



(a) 往复造流风洞

(b) 透平和数据采集及控制系统



本文对动叶片厚度为 19 mm 的透平数值模型进行网格无关性验证,时间步长取 0.005 s, 网格数分别取 4.0×10<sup>6</sup>(粗网格)、5.5×10<sup>6</sup>(中间网格)和 7.0×10<sup>6</sup>(细网格)。将数值计算结果与试验数据进行对比,结果如图 6 所示,图中横坐标为流量系数 *Φ*,纵坐标依次为透平输入系数*C*<sub>A</sub>、扭矩系数*C*<sub>T</sub>及周期平均效率*η*。综合考虑计 算精度和时长,选取网格数量为 5.5×10<sup>6</sup> 的数值模型。



Fig. 6 Effect of grid number on the turbine efficiency

### 2 数值计算结果

本文通过控制转速来覆盖透平工作范围,数值计算中所有工况均在典型气流条件(峰值流速Va=3.34 m/s、 周期 = 1.67 s)下进行。在只改变动叶片厚度的前提下,通过透平动叶片附近流速云图和压力云图分析动叶片 厚度对流场的影响;通过输出扭矩和上下游压差时程曲线分析动叶片厚度对输出扭矩和上下游压差的影响; 最后通过透平非定常性能评价参数探究动叶片厚度对透平非定常工作性能的影响。从吸力面增大动叶片厚 度时,动叶片吸力面曲率不断增大,将加重吸力面背流侧的流动分离现象,造成更大的流量损失;反之,动叶 片厚度减少时,为保证动叶片通道宽度不变需增加动叶片个数,动叶片与气流间的摩擦损失也将增大,因此 存在一个最佳动叶片厚度使透平达到最佳工作状态。

#### 2.1 流场分析

利用可视化处理软件 Tecplot 360 对 Ansys-Fluent 软件得到的动叶片流域的压强和气流流速进行可视化处理,得到不同动叶片厚度下动叶片的压力云图和流域流速云图,以此分析流场的变化。

图 7 和图 8 分别为转速ω=120 r/min 时 5 种不同动叶片厚度的透平呼气、吸气阶段动叶片附近的速度云图。 可以看出,无论是呼气还是吸气阶段,随着动叶片厚度的增大,动叶片流域通道由窄变宽,动叶片迎流侧高流 速区面积和通道两侧曲率差异逐渐增大;动叶片前缘的叶片几何角逐渐减小,而相对流动角逐渐增大,两角 差距逐渐增大,加剧了压力面迎流侧的流动分离。呼气阶段,沿着气流方向的动叶片流域通道宽度逐渐增大, 相对流动角和动叶片几何角的差异增大,加剧了流动分离,并产生更大的负扭矩;而吸气阶段,沿着气流方向 的通道宽度逐渐减小,一定程度上减小了相对流动角和动叶片几何角的差异,削弱了吸力面处的流动分离, 避免产生较大的负扭矩。

图 9 和图 10 分别为转速ω=120 r/min 时 5 种不同动叶片厚度的透平呼气阶段动叶片吸力面和压力面压力 云图, 气流均为自上而下。由图 9 可知, 随着动叶片厚度的增大, 呼气阶段动叶片吸力面压强整体先减小后 增大, 沿着气流方向转子上下游压强的差值先减小后增大, 而迎流侧高压区逐渐向背流侧扩散导致中部低压 区面积逐渐减小; 吸力面中部相对低压区的面积和压强量值均逐渐减小。由图 10 可知, 随着动叶片厚度的 增大, 呼气阶段动叶片压力面上中部相对高压区和远离转盘侧的高压区先分离再融合; 迎流侧负压区面积先 增大后减小。呼气阶段吸力面、压力面之间的平均压差基本不变, 故产生的扭矩值基本不变。

图 11 和图 12 分别为转速ω=120 r/min 时 5 种不同动叶片厚度的透平吸气阶段动叶片吸力面和压力面压力云图, 气流均为自上而下。由图 11 可知, 在吸气阶段, 动叶片吸力面沿气流方向压强分布比呼气阶段均匀;

随着动叶片厚度的增大,动叶片吸力面背流侧低压区的值减小,但面积不断增大。由图 12 可知,压力面中部 相对高压区随着动叶片厚度的增大逐渐消失。不论是吸力面还是压力面,沿气流方向动叶片上下游压差相 差较小,即转子上下游压差保持不变。



图 7 呼气阶段动叶片厚度对叶片附近速度云图的影响

Fig. 7 Influence of the rotor blade thickness on the speed cloud map near the blade during the exhale stage





Fig. 8 Influence of the rotor blade thickness on the speed cloud map near the blade during the inhale stage



图 9 呼气阶段不同厚度动叶片吸力面压力云图

Fig. 9 The pressure cloud map of the suction surface of the rotor blades with different thickness during the exhale stage



图 10 呼气阶段不同厚度动叶片压力面压力云图

Fig. 10 The pressure cloud map of the pressure surface of the rotor blades with different thickness during the exhale stage



图 11 吸气阶段不同厚度动叶片吸力面压力云图

Fig. 11 The pressure cloud map of the suction surface of the rotor blades with different thickness during the inhale stage





Fig. 12 The pressure cloud map of the pressure surface of the rotor blades with different thickness during the inhale stage

#### 2.2 参量时程分析

能反映透平性能的主要物理量为动叶片输出扭矩和上下游压差,通过分析正弦气流条件下两者的变化 规律,可更直观地了解动叶片厚度对透平瞬时性能的影响。

图 13a 为不同动叶片厚度的透平输出扭矩时程曲线,图 13b 为不同动叶片厚度的透平上下游压差时程曲 线(横坐标为无量纲时间)。由图 13a 结合 2.1 节流场分析结果可知,当转速ω=100 r/min 时,动叶片厚度仅对 吸气阶段的输出扭矩有较大影响,两者呈正相关。在呼气阶段,动叶片流域通道宽度和吸力面曲率的增大造 成了严重的流动分离,而迎流侧高速流的增长有利于正扭矩的产生,两种作用相互抵消致使输出扭矩值无明 显变化;在吸气阶段,动叶片流域通道宽度的减小减弱了由吸力面曲率增大造成的流动分离,此时迎流侧高 速流的增长对扭矩的有利影响起主导作用,即动叶片厚度越大,透平输出扭矩越大。由图 13b 可知,在呼气 阶段,随着动叶片厚度的增大,上下游压差值先减小后增大,在t<sub>R</sub>=13 mm 时透平上下游压差最小。综上可知, 透平输出扭矩和上下游压差越接近峰值,动叶片厚度对其影响越大,各输出扭矩和上下游压差时程曲线之间 无明显相位差。







#### 2.3 非定常性能评价参数分析

径向透平输入系数 $C_A$ 、扭矩系数 $C_T$ 和周期平均效率 $\eta$ 为径向透平结构优化研究中最重要的评价指标,本节通过分析动叶片厚度 $t_R$ 对三者的影响,定性研究不同工作范围(不同流量系数)下透平非定常工作性能的差异。

图 14 为动叶片厚度t<sub>R</sub>对径流式透平输入系数C<sub>A</sub>、扭矩系数C<sub>T</sub>和周期平均效率η的影响。由图 14a 中可知, 输入系数与流量系数呈正相关,但随着流量系数的增大,输入系数的增速逐渐降低;在同一流量系数下,输入 系数随动叶片厚度的增大先减小后增大,随着流量系数的增大,动叶片厚度对输入系数的影响程度逐渐增大, t<sub>R</sub>=13 mm 时的透平输入系数最小。由图 14b 可知,扭矩系数和流量系数呈正线性相关;扭矩系数随动叶片厚 度的增大先增大后减小,变化幅度较小,t<sub>R</sub>=19 mm 时透平的扭矩系数最大,可认为动叶片厚度对透平输出扭 矩的影响较小。由图 14c 可知,动叶片厚度对透平周期平均效率的影响较大,5种透平均在流量系数 Φ=1.2 左右达到峰值效率;当 Φ<0.4 时,动叶片厚度对输入系数、扭矩系数和周期平均效率的影响可忽略不计;而 当 Φ>0.4 后,动叶片厚度依旧对扭矩系数的影响较小,但对输入系数的影响逐渐增大,因此该范围内的效率 随动叶片厚度的增大先增大后减小;结合式(1)和式(2)可得,t<sub>R</sub>=19 mm 的透平周期平均扭矩最大,t<sub>R</sub>=13 mm 的透平上下游压差最小。综合数值计算结果,可得动叶片厚度对透平上下游压差影响较大,透平在动叶片厚 度t<sub>R</sub>=13 mm 时性能最优,最大峰值效率可达 47.7%。





Fig. 14 The effect of the thickness of rotor blades on the unsteady performance evaluation parameters of radial turbine

## 3 结 论

3期

本文构建了径向透平三维瞬态全流域数值模型,并通过与非定常试验结果对比对其进行了验证。进一步分析流场、各参量和非定常性能评价参数的变化规律,发现动叶片厚度对透平非定常工作性能有较大影响, 具体结论如下。

1)径向透平不同于轴流式透平,其呼气、吸气阶段的非定常工作性能存在差异,具体表现为两阶段动叶 片流域的流速、压强均存在明显差异。

2)不同厚度动叶片的叶片几何角和相对流动角的匹配程度存在差异,致使动叶片吸力面的流动分离程 度也存在差异。

3)呼气阶段动叶片厚度对透平输出扭矩影响较大,两者呈正相关;动叶片厚度对上下游压差影响较小。 吸气阶段动叶片厚度对上下游压差影响较大,随着动叶片厚度的增大,上下游压差先增大后减小;动叶片厚 度对透平输出扭矩影响较小。

4)在不同流量系数下,动叶片厚度对透平周期平均效率的影响存在差异。当流量系数 Ø>0.4 时透平周期 平均效率随动叶片厚度的增加先升后降;当 Ø<0.4 时两者无明显相关性。在其他结构参数保持不变的前提 下,动叶片厚度t<sub>R</sub>=13 mm 时透平非定常工作性能最优,最大峰值效率为 47.7%。

综上所述,合理改变径向透平冲击式动叶片吸力面的结构型式可使动叶片几何角与相对流动角相匹配, 减小动叶片吸力面的流动分离,进而提高透平输出扭矩和周期平均效率。

#### 参考文献 (References):

- [1] ZHOU S, TONG Q, YU S, et al. Role of non-fossil energy in meeting China's energy and climate target for 2020[J]. Energy Policy, 2012, 51: 14-19.
- [2] MAYER A. Partisanship, politics, and the energy transition in the United States: a critical review and conceptual framework[J]. Energy Research & Social Science, 2019, 53(5): 85-88.
- [3] CONNOLLY D, LUND H, MATHIESEN B V. Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 1634-1653.
- [4] 李虹, 董亮, 段红霞. 中国可再生能源发展综合评价与结构优化研究[J]. 资源科学, 2011, 33(3): 431-440. LI H, DONG L, DUAN H X. Research on comprehensive evaluation and structural optimization of renewable energy development in China[J]. Resources Science, 2011, 33(3): 431-440.
- [5] KEHINDE A A, NELSON I, JONATHAN S C. A techno-economic model for wind energy costs analysis for low wind speed areas[J]. Sustainable Energy, 2021, 9(1): 9-21.

- [6] 闫云飞, 张智恩, 张力, 等. 太阳能利用技术及其应用[J]. 太阳能学报, 2012, 33(增刊1): 47-56. YAN Y F, ZHANG Z E, ZHANG L, et al. Application and utilization technology of solar energy[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(Suppl.1): 47-56.
- [7] 陆佑楣. 我国水电开发与可持续发展[J]. 水力发电, 2005, 36(2): 1-4. LU Y M. Hydropower development and sustainable development in China[J]. Journal of Hydropower Engineering, 2005, 36(2): 1-4.
- [8] NARULA K. The maritime dimension of sustainable energy security[M]. Singapore: Springer, 2019.
- [9] ZHENG C W, PAN J, LI J X. Assessing the China Sea wind energy and wave energy resources from 1988 to 2009[J]. Ocean Engineering, 2013, 65: 39-48.
- [10] KHOJASTEH D, MOUSAVI S M, GLAMORE W, et al. Wave energy status in Asia[J]. Ocean Engineering, 2018, 169: 344-358.
- [11] PIERCE J C, STELL B S. Prospects for alternative energy development in the US West [M]. Cham: Springer, 2017.
- [12] MWASILU F, JUNG J W. Potential for power generation from ocean wave renewable energy source: a comprehensive review on state-ofthe-art technology and future prospects[J]. The Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation, 2019, 13(3): 363-375.
- [13] SETOGUCHI T, TAKAO M, KINOUE Y, et al. Study on an impulse turbine for wave energy conversion[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2000, 10(2): 180-187.
- [14] SETOGUCHI T, SANTHAKUMAR S, TAKAO M, et al. A performance study of a radial turbine for wave energy conversion[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2002, 216(1): 15-22.
- [15] MARJANI A E, RUIZ F C, RODRIGUEZ M A, et al. Numerical modelling in wave energy conversion systems[J]. Energy, 2008, 33(8): 1246-1253.
- [16] PEREIRAS B, CASTRI F, MARJANI A E, et al. An improved radial impulse turbine for OWC[J]. Renewable Energy, 2011, 36(5): 1477-1484.
- [17] ELATIFE K, MARJANI A E. Optimized blade design of a radial impulse turbine for wave energy conversion[C]//2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference. Marrakech: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015: 1-6.
- [18] ELATIFE K, MARJANI E A. Efficiency improvement of a self-rectifying radial impulse turbine for wave energy conversion[J]. Energy, 2019, 189(17/18): 116257.
- [19] GATO L M C, MADURO A R, CARRELHAS A A D, et al. Performance improvement of the biradial self-rectifying impulse air-turbine for wave energy conversion by multi-row guide vanes: Design and experimental results[J]. Energy, 2021, 216(3): 119110.

# Study on Optimization of Impulse Rotor Blades of Radial Flow Turbine for OWC Under Unsteady Conditions

HAN Zi-qian, LIU Zhen, ZHANG Xiao-xia, XU Chuan-li, YANG Xin (College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In order to optimize the structural type of the rotor blades of radial flow turbine to improve effectively the turbine's efficiency, a three-dimensional transient whole-basin numerical model is constructed for the radial impact-type turbine with impulse rotor blades in oscillating water column wave energy convertor based on the Ansys-Fluent software. By changing the suction surface type of the turbine's rotor blades, the influences of the thickness difference of the rotor blades on the parameters such as turbine torque and pressure and the unsteady performance evaluation parameters such as turbine input coefficient, torque coefficient and periodic average efficiency are studied under the sinusoidal reciprocating incident airflow condition. Under the condition that the pressure surface type is guaranteed unchanged, the unsteady working performances of the turbines respectively with a rotor blade thickness of 7 mm, 13 mm, 16 mm, 19 mm and 22 mm in the inhale and exhale stages are studied. The results show that the turbines with different rotor blade thickness of 13mm has the optimal working performance, with its maximum peak efficiency being up to 47.7%.

Key words: radial flow turbine; sinusoidal reciprocating airflow; suction surface type; thickness of rotor blade; unsteady working performance

Received: March 18, 2022