

# 变几何涡轮可调导叶瞬时转动气动特性研究

廖宇楠<sup>1</sup>,杜玉峰<sup>2</sup>,屈彬<sup>3</sup>,高杰<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨广瀚燃气轮机有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150078;  
3. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

**摘要:**为探究单级变几何涡轮(VGT)在导叶转动过程中的过渡态性能,对某动力涡轮进行了非定常数值计算,应用动网格技术实现导叶转角的改变,并对导叶通道开大或关小过渡过程中涡轮性能进行了分析。结果表明:导叶转角从0°变化到-5°时,单级涡轮效率逐渐下降1.6%,从0°变化到6°时,效率逐渐提高0.5%;质量流量和导叶出口绝对气流角随转角改变接近线性变化,而动叶出口相对气流角、熵增、效率和导叶出口总压损失等随转角改变呈抛物线型变化;过渡态下导叶流场内损失变化主要受上、下端壁处间隙泄漏涡影响,动叶出口熵增变化规律主要受动叶吸力侧泄漏涡和下部通道涡影响,其中下部通道涡的改变是引起熵增变化的主要原因。

**关键词:**变几何涡轮;可调导叶;瞬时转动;过渡态;气动特性

中图分类号:V232.4 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgec.2024.01.009

[引用本文格式]廖宇楠,杜玉峰,屈彬,等.变几何涡轮可调导叶瞬时转动气动特性研究[J].热能动力工程,2024,39(1):79-88. LIAO Yu-nan, DU Yu-feng, QU Bin, et al. Study on aerodynamic characteristics of variable geometry turbine adjustable guide vane under instantaneous rotation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 79-88.

## Study on Aerodynamic Characteristics of Variable Geometry Turbine Adjustable Guide Vane under Instantaneous Rotation

LIAO Yu-nan<sup>1</sup>, DU Yu-feng<sup>2</sup>, QU Bin<sup>3</sup>, GAO Jie<sup>1</sup>

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001;  
2. Harbin Guanghan Gas Turbine Co., Ltd., Harbin, China, Post Code: 150078;  
3. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou, China, Post Code: 412002)

**Abstract:** To investigate the transition state performance of single-stage variable geometry turbine (VGT) in the process of guide vane rotation, the unsteady numerical calculation of a power turbine was carried out, the dynamic mesh technology was used to realize the change of guide vane rotation angle, and the turbine performance during the transition process of the guide vane channel opening or closing was analyzed. The results show that when the guide vane angle changes from 0° to -5°, the single-stage turbine efficiency gradually decreases by 1.6%; from 0° to 6°, it gradually increases by 0.5%; the mass flow rate and the absolute flow angle at the outlet of the guide vane change nearly linearly with the change of the rotation angle, while the relative flow angle, entropy increase, efficiency and total pressure loss at the outlet of the rotor blade show parabolic changes with the change of the rotation angle; in the transition state, the change of the loss in the flow field of the guide vane is mainly affected by the leakage vortex at the upper and lower end walls, and the change of the entropy increase at the outlet of the rotor

收稿日期:2023-06-02; 修订日期:2023-07-10

基金项目:黑龙江省优秀青年科学基金项目(YQ2020E024);国家自然科学基金(51979052);国家科技重大专项(J2019-II-0018-0039)

**Fund-supported Project:** Excellent Youth Foundation of Heilongjiang Province (YQ2020E024); National Natural Science Foundation of China (51979052); National Science and Technology Major Project (J2019-II-0018-0039)

作者简介:廖宇楠(1996-),男,哈尔滨工程大学硕士研究生。

通讯作者:高杰(1985-),男,哈尔滨工程大学教授。

blade is mainly affected by the leakage vortex at the suction side of the rotor blade and the lower passage vortex which is the main reason for the change of entropy increase.

**Key words:** variable geometry turbine(VGT), adjustable guide vane, instantaneous rotation, transition state, aerodynamic characteristics

## 引言

燃气轮机在启动、功率变化、停机以及环境条件变化等过程中都会经历瞬态变化,这些变工况条件使发动机热平衡从一个稳态转向另一个稳态。同时,各种气动热应力和机械应力也随之发展,对发动机的可靠性、可用性和整体健康不利<sup>[1]</sup>。变几何涡轮的设计使燃气轮机在非设计点工况下的性能得到提升,可改善系统整体的流量匹配,改善发动机的起动加减速性,改善或调节各部件间的匹配关系<sup>[2]</sup>。变几何涡轮导叶转动过渡态是指可调导叶开大或关小使涡轮性能参数发生变化的过程。因此,针对转动过渡态开展数值仿真研究,探究涡轮性能变化,可为变几何涡轮设计与制定导叶转角控制策略提供参考。

Barbosa 等人<sup>[3]</sup>通过试验研究了压气机可调导叶在小型燃气轮机加减速时的瞬态性能表现,同时利用其所开发的仿真算法进行发动机变几何瞬态性能计算,证明变几何过程的发动机瞬态表现可以被捕获。贾琳渊等人<sup>[4]</sup>采用功率提取法研究了变几何参数对双轴混排涡扇发动机过渡态性能的影响,得到了变循环发动机过渡态性能随高低压涡轮导向器喉部面积、尾喷管喉部面积及后可变面积涵道引射器面积调整的变化规律。在之后的研究中,贾琳渊等人<sup>[5-6]</sup>将过渡态性能直接模拟方法用于转模态过渡态性能模拟和变几何参数控制规律的设计。郭倩楠等人<sup>[7]</sup>采用基于动态边界的三维非定常模拟方法对压气机的过渡态过程进行数值计算,结果表明,该方法能够准确模拟过渡态压气机性能和非定常流场细节。李绍斌等人<sup>[8]</sup>也应用动态边界,使用双向流固耦合方法模拟压气机过渡态下的叶片载荷。李彦静等人<sup>[9]</sup>开展了变几何涡轮可调导叶扇形叶栅试验与数值仿真,对导叶转动瞬态数据进

行采集,得到可调叶栅过渡态参数的变化规律。Rane 等人<sup>[10]</sup>使用变形网格技术,分析双螺杆压缩机的性能,验证了此类技术在旋转流体机械数值计算中的可行性。

目前,针对变几何涡轮的研究大多是在选定几个不变的安装角下进行的涡轮特性参数变化分析,而忽略了导叶前一时刻的转动对后一时刻的影响。本文基于某型发动机动力涡轮第一级进行非定常数值计算,采用动网格技术应用程序控制导叶的转动实现可调导叶通道的开大与关小,研究导叶转动对变几何涡轮性能的影响,总结导叶转动过渡态涡轮特性参数变化规律。

## 1 过渡态特性的数值计算方法

### 1.1 研究对象

本文的过渡态研究基于某型燃气轮机的第一级动力涡轮改型叶片进行,计算域模型如图 1 所示。为了避免数值计算过程中因转轴的下凹和上凸使上端壁变形出现负网格,在建模时将转轴删除,在导叶与上、下端壁处留出完整间隙,导叶的初始端壁间隙选取为 0.76% 叶高。图 2 给出了该导叶在全间隙与部分间隙模型的定常计算性能对比。由图 2 可知,转角变化时两个方案的流量与效率变化规律相近。计算用导叶的几何参数如表 1 所示。表 2 给出变几何涡轮的性能参数。

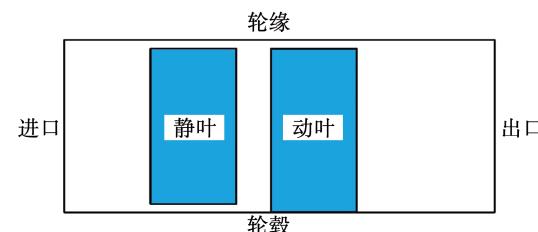


图 1 单级变几何涡轮计算域

Fig. 1 Calculation domain of single-stage VGT

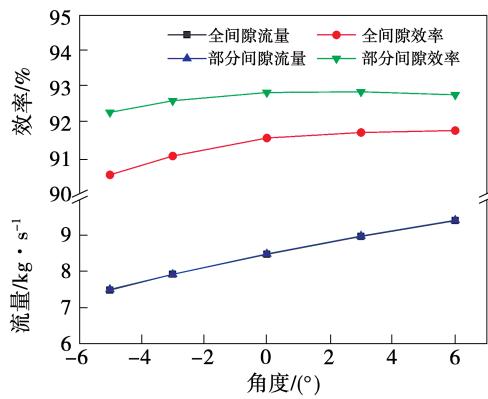


图 2 不同间隙方案的性能对比

Fig. 2 Performance comparison in different clearance schemes

表 1 可调导叶几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of adjustable guide vanes

参数	数值
弦长/mm	48.32
叶根栅距/mm	29.98
叶顶栅距/mm	37.73
安装角/( $^{\circ}$ )	53.28
几何进口角/( $^{\circ}$ )	0(轴向进气)
几何出口角/( $^{\circ}$ )	72.42(轴向夹角)

表 2 变几何涡轮性能参数

Tab. 2 Performance parameters of variable geometry turbine

参数	数值
折合流量 $\dot{G}/\text{kg} \cdot \text{K}^{1/2} \cdot (\text{s} \cdot \text{kPa})^{-1}$	0.941
折合转速 $n/\text{r} \cdot (\text{min} \cdot \text{K}^{1/2})^{-1}$	648.88
效率/%	93.62

## 1.2 数值计算设置

使用 FLUENT 软件在非定常计算的设置下同时激活并设置动网格模型,工质设置为完全气体,给定边界条件为进口总压、进口总温、出口静压,壁面采用绝热无滑移壁面,流道两侧设置为旋转周期性边界,混合网格交界面设置为静态连接方式。导叶与动叶片数之比为 54:47,因此使用几何约化法<sup>[11]</sup>对动叶的几何尺寸进行缩小,改变其节距与叶片数,使之满足约化条件,动静叶片都采用单通道,动静交界面类型设置为周期性重复。

采用基于压力基的 SIMPLE 算法,非定常计算时间步长设置为 0.000 003 s,取值原则为每个叶片通过叶栅之间设置 20 个时间步,每个时间步内最大

迭代次数设置为 20。经时间步长敏感性验证,这样的设置即可满足计算精度要求。

针对本文研究的旋转运动,动网格采用的网格光顺方式为线弹性固体,网格重构方式采用局部单元和切削网格。其中网格光顺的尺度范围设置在初始流场网格尺度的 0.8~1.2 倍之间,每迭代 1 个时间步长检查一次网格。

通过 Profile 文件实现对导叶转动的控制,转动角速度选择依据为:单个动叶旋转经过 25 个叶栅通道时导叶转动 1 $^{\circ}$ ,即经过 500 个时间步。通过验证,该设置可以捕捉导叶转动过渡态特征。导叶转角随时间步长的变化如图 3 所示,其中由两条曲线分别给出转角从 0 $^{\circ}$ 到 -5 $^{\circ}$ 与转角从 0 $^{\circ}$ 到 6 $^{\circ}$ 的变化。以可调导叶的设计安装角对应 0 $^{\circ}$ 转角,转角调大是指将可调导叶转角变为正转角,转角调小是指将可调导叶转角变为负转角。图 4 为导叶转角变化的示意图。由图 4 可知,转角调大至 6 $^{\circ}$ ,导叶片叶栅通道流通面积扩大;转角调小至 -5 $^{\circ}$ ,导叶片叶栅通道流通面积减小。使用 FLUENT 软件的网格划分模块对导叶近壁面三棱柱网格和导叶流道四面体网格连接点进行节点分离,用以实现网格重构,防止在叶片尾缘位置出现负网格。此外,为了精确获得叶片表面相关流动信息,导叶近壁面三棱柱网格采用随动方式<sup>[12]</sup>。

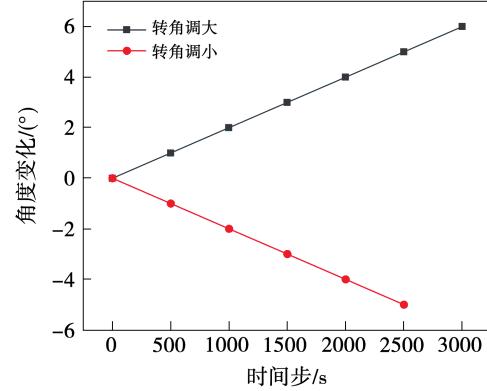


图 3 导叶转角的调整曲线

Fig. 3 Adjustment curve of turning angle of guide vane

SST  $k-\omega$  模型结合了  $k-\varepsilon$  模型和  $k-\omega$  模型的优点,不仅能够很好地实现对流场中强流线弯曲、漩涡和旋转的捕捉,还能精确反映近壁边界层的流动,常用于叶轮机械的数值计算<sup>[13~17]</sup>。李彦静等人<sup>[9]</sup>对相同变几何涡轮可调导叶进行转动过渡态

扇形叶栅试验与数值计算,对比导叶转动过程中某一点端壁的静压系数时均值变化。定义静压系数为  $p/p_{in,tot}$ ,其中  $p$  为当地压力,  $p_{in,tot}$  为进口总压,结果如图 5 所示。在变化趋势上数值计算与仿真接近,受试验件与计算域模型端壁间隙差异较大的影响,数据间存在明显误差,但变化趋势近似。因此可以认为,针对此研究对象,选用 SST  $k-\omega$  湍流模型进行非定常计算,可以反映变几何涡轮过渡态特性。

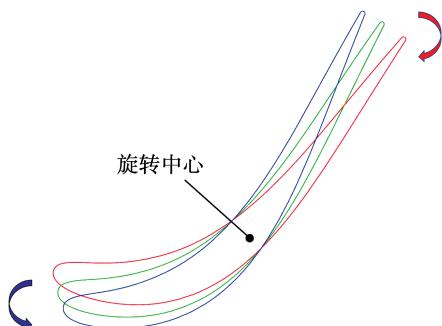


图 4 导叶转角调整示意

Fig. 4 Adjustment diagram of turning angle of guide vane

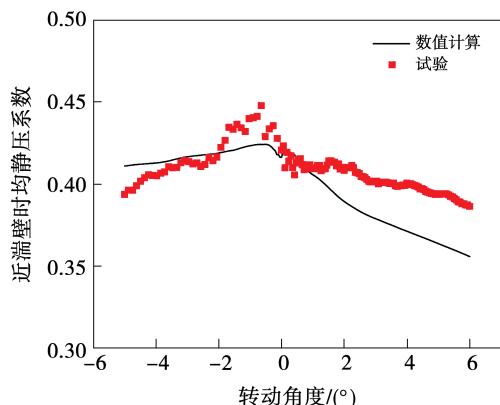


图 5 近端壁时均压力变化

Fig. 5 Time-averaged pressure variation near the endwall

### 1.3 网格划分

基于级的变几何涡轮网格整体采用混合网格划分,如图 6 所示。进出口流道部分采用六面体结构化网格划分;受网格重构限制,变几何导叶流道部分使用四面体网格划分,边界层处使用三棱柱网格划分,加密 10 层,第 1 层高度 0.001 mm,保证  $y^+ < 1$ ,放大比率为 1.2;动叶部分采用 NUMECA 进行 HOH 结构网格划分,边界层网格 17 层加密,第 1 层高度 0.001 mm,放大比率为 1.4。

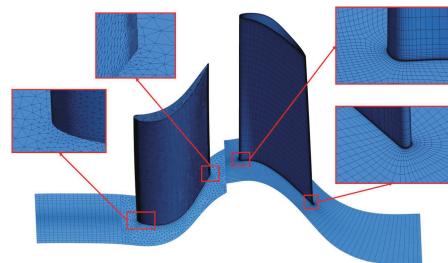


图 6 单级变几何涡轮混合网格

Fig. 6 Hybrid meshes of single-stage VGT

图 7 给出的单级涡轮质量流量与出口绝对马赫数随网格数的变化趋势。由图 7 可知,当网格数超过 300 万后数值变化趋于平稳,考虑到计算精度与成本的平衡,最终确定基于级的变几何涡轮数值计算网格数为 416 万。

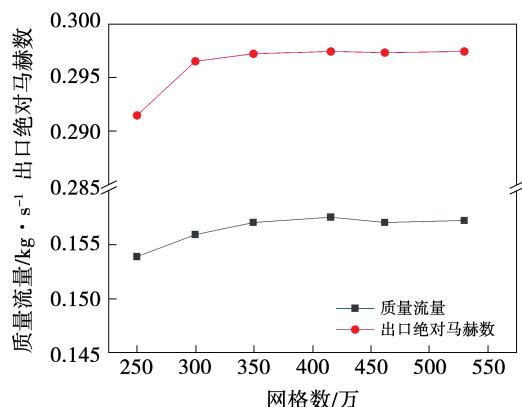


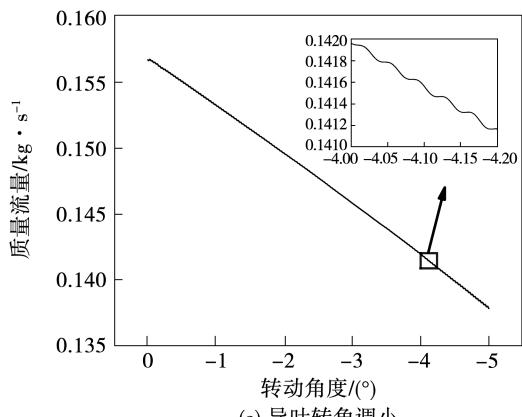
图 7 网格敏感性验证

Fig. 7 Mesh sensitivity verification

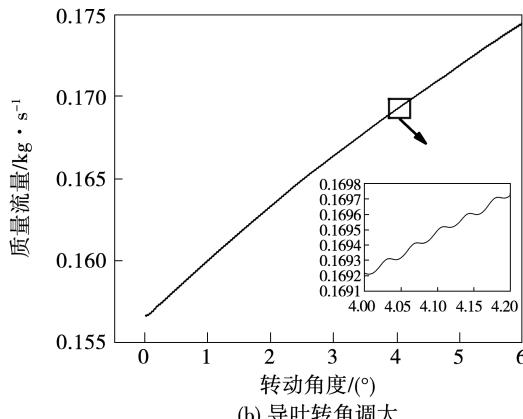
## 2 结果与讨论

### 2.1 变几何涡轮特性参数的变化

动叶出口质量流量随转角的变化趋势如图 8 所示。由图 8 可知,动叶出口质量流量随导叶转角接近线性变化,转角调小质量流量减少,转角调大质量流量增加,且转角调大的质量流量变化趋势更加接近线性。图中同时分别给出导叶转角变化  $-4^\circ \sim -4.2^\circ$ 、 $4^\circ \sim 4.2^\circ$  放大图。导叶角度调小时,流量变化趋势为先大幅下降、再小幅度上升;导叶角度调大时,流量变化趋势为先大幅上升、再小幅度下降。由此可见,动叶出口流量随导叶转角变化表现为阶梯性增大或减小。



(a) 导叶转角调小

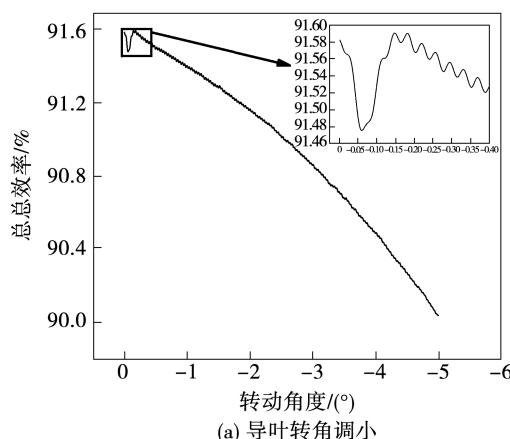


(b) 导叶转角调大

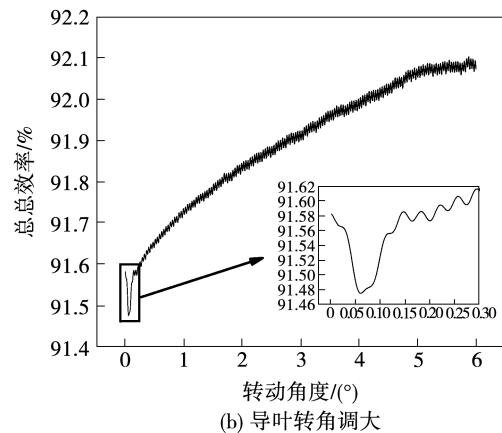
图8 动叶出口质量流量随导叶转角变化规律

Fig. 8 Variations of mass flow at rotor blade outlet with turning angle of guide vane

总总效率随转角变化趋势如图9所示。由图9可知,导叶从0°转动到-5°过程中,总总效率随转动角度值增大呈抛物线型变化逐渐降低,波动幅值逐渐减小;导叶从0°转动到6°过程中,总总效率随转动角度值增大呈抛物线型变化逐渐提高,波动幅值逐渐变大。两相比较角度调大时,总总效率在变化过程中波动的幅值更大。在导叶转角从0°调整到±0.15°的过程中,总总效率呈现先降低再增大的变化趋势。



(a) 导叶转角调小



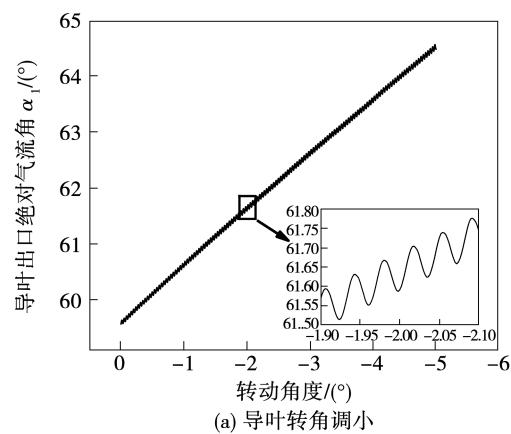
(b) 导叶转角调大

图9 总总效率随导叶转角变化规律

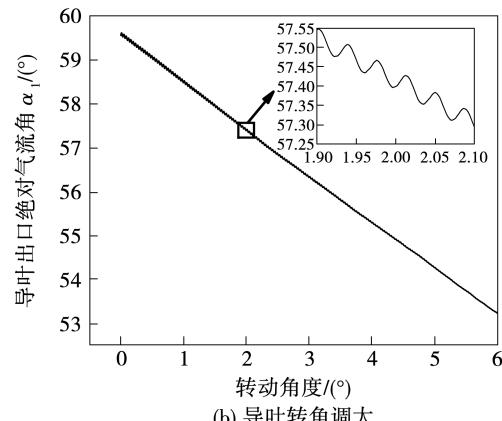
Fig. 9 Variations of total efficiency with turning angle of guide vane

## 2.2 气流角随导叶转角变化趋势

图10给出导叶出口绝对气流角 $\alpha_1$ (气流与轴向夹角)随转角改变的变化情况。



(a) 导叶转角调小



(b) 导叶转角调大

图10 导叶出口绝对气流角 $\alpha_1$ 随导叶转角变化规律

Fig. 10 Variations of absolute airflow angle at guide vane outlet with turning angle of guide vane

由图 10 可知,随着导叶转角调小,导叶出口气流角增大,整体变化趋势接近线性,同时伴随着数值上的波动变化;随导叶转角调大,与之相反的,导叶出口气流角减小,整体变化趋势仍然接近线性,但数值上的波动变化却随着角度变大的过程幅值变小。对比较转角调小和调大的气流角变化可知,导叶转角调小时,自身处于正冲角状态,负转角状态下流场中的间隙泄漏和损失增多,流场的稳定性降低。从两个接近线性变化的结果来看,导叶的角度变化几乎对落后角不产生影响。

对于变几何涡轮动叶的设计,应考虑多采用负冲角设计来降低变工况下工作时的动叶冲角损失。动叶进口相对气流角  $\beta_1$  (气流与轴向夹角) 随导叶转角改变的变化情况如图 11 所示。由图 11 可知,随着导叶转角调小  $5^\circ$ , $\beta_1$  接近线性,减小约  $13.5^\circ$ ;导叶角度调大  $6^\circ$  的过程中, $\beta_1$  增加了约  $14^\circ$ 。连续经过两个过程的动叶进口相对气流角总变化约为  $27.5^\circ$ 。

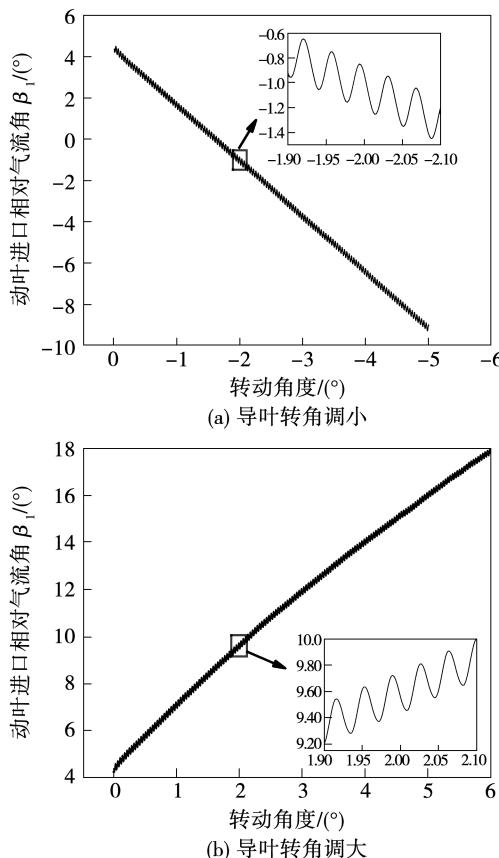


图 11 动叶进口相对气流角  $\beta_1$  随导叶转角变化规律

Fig. 11 Variations of relative airflow angle at rotor blade inlet with turning angle of guide vane

动叶出口相对气流角  $\beta_2$  (气流与轴向夹角) 随导叶转角改变的变化情况如图 12 所示。由图 12 可知,当导叶转角调小时, $\beta_2$  接近抛物线增加约  $0.7^\circ$ ;当导叶转角调大时, $\beta_2$  接近抛物线减小约  $0.3^\circ$ 。当与动叶进口相对气流角  $\beta_1$  的变化情况相比较时可以发现,经历一样的转角变化,气流角变化数值上相差约 27 倍;当转角越向转动方向持续变化时, $\beta_2$  的波动幅值逐渐增大,气流更加不稳定,这与  $\beta_1$  呈现的变化情况不同。在导叶转角从  $0^\circ$  调大到  $0.15^\circ$  的过程中,动叶进入负冲角,动叶载荷降低,横向压力梯度降低,导致吸力侧泄漏涡强度减弱,在其影响下,下部通道涡强度降低。因此,动叶出口相对气流角  $\beta_2$  减小约  $0.05^\circ$ 。当导叶从  $0^\circ$  转动到  $-0.15^\circ$  时,结果正好与之相反。

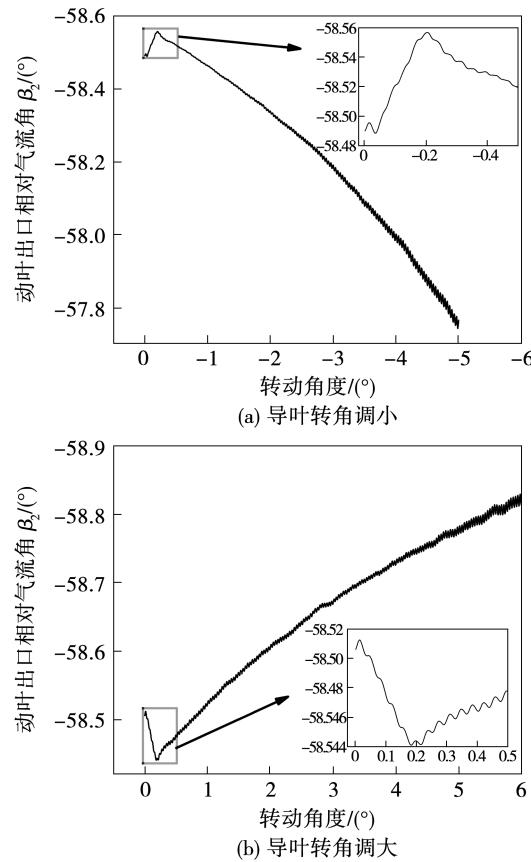


图 12 动叶出口相对气流角  $\beta_2$  随导叶转角变化规律

Fig. 12 Variations of relative airflow angle at rotor blade outlet with turning angle of guide vane

## 2.3 级的流场内损失情况随导叶转角变化规律

### 2.3.1 导叶流场内损失情况随导叶转角变化规律

随着导叶转角的变化,轮缘与轮毂的间隙相应

发生改变,针对间隙的研究指出,轴向的非均匀性是造成泄漏损失的主要因素。叶顶叶根间隙泄漏流的产生原因为压力侧与吸力侧压差力,间隙侧面积大小决定了泄漏量,进而直接影响泄漏涡的强度与发展,影响了导叶内二次流损失<sup>[18]</sup>。图13给出叶顶和叶根处叶片表面速度流线分布。由图13可知,后加载叶型压力梯度在前部较小,而在后部迅速增加,从而出现叶片前缘泄漏量小,后部泄漏量增加的情况。无轴叶片的叶根和叶顶全间隙流动形式几乎相同,沿着轴向在端壁间隙处产生泄漏流,而后在粘性力和压力梯度的共同作用下产生随主流向后发展的泄漏涡。图14给出了导叶轴向各截面的熵增,体现了叶顶处的泄漏涡发展。

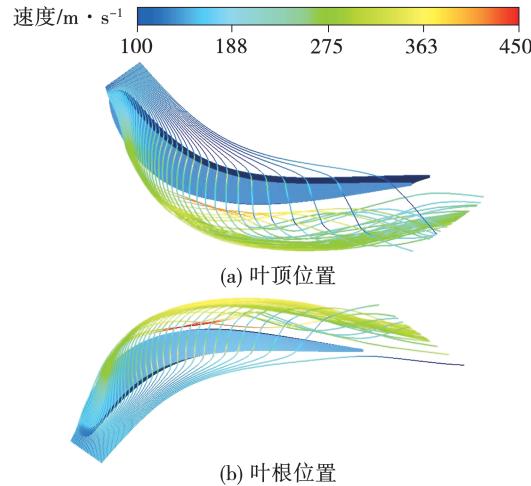


图13 叶片表面速度流线分布

Fig. 13 Velocity streamlined distributions on blade surface

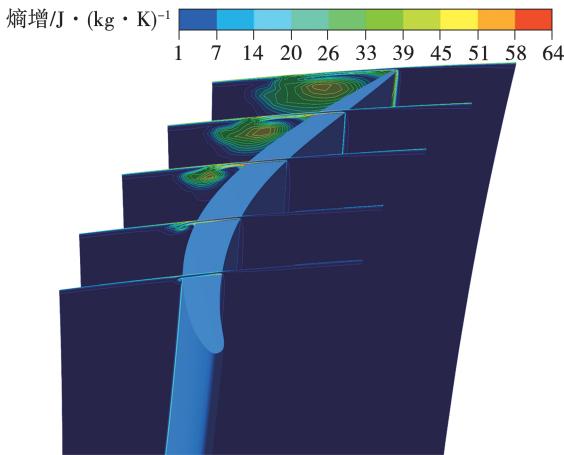


图14 导叶叶顶轴向各截面熵增云图

Fig. 14 Cloud maps of entropy increase on each axial section at guide vane tip

图15和图16分别是转角调小和调大过渡态下各转角瞬时的导叶出口熵增云图。1个时间步长用 $t$ 表示。上、下端壁处的间隙泄漏涡是引起熵增的主要因素,同时也包括尾迹引起的熵增。在转角调小过程中,上、下端区泄漏涡熵增区面积扩大,整个涡的熵增范围也稍有扩大,使损失增加,值得注意的是,尾迹导致的熵增范围也有轻微扩大。在转角调大的过程中,泄漏涡的高熵增区面积逐渐缩小,在轮毂处的变化最明显,且轮毂处的高熵增区先扩大再缩小,同时整个泄漏涡熵增区和尾迹熵增区的面积也有所缩小。

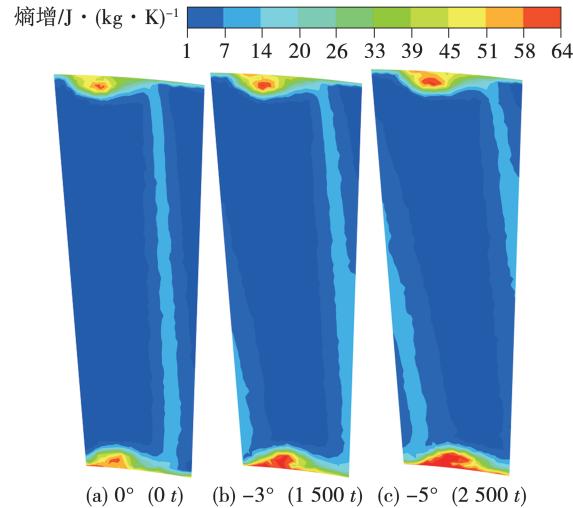


图15 转角调小过程中导叶出口的熵增云图

Fig. 15 Cloud maps of entropy increase at guide vane outlet in the process of reducing the turning angle

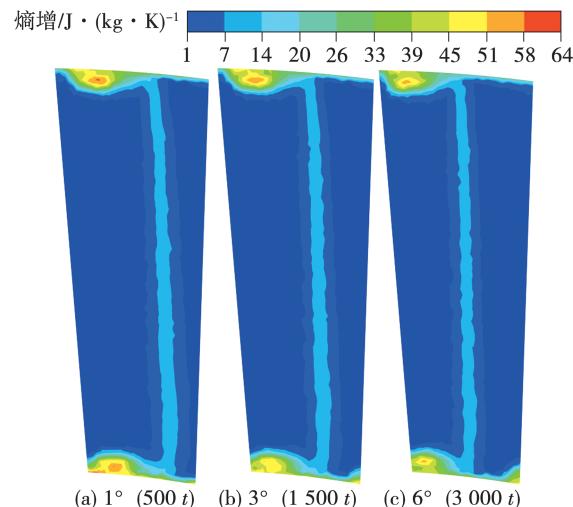
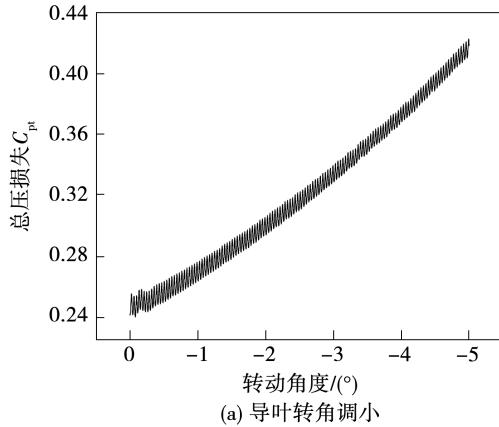


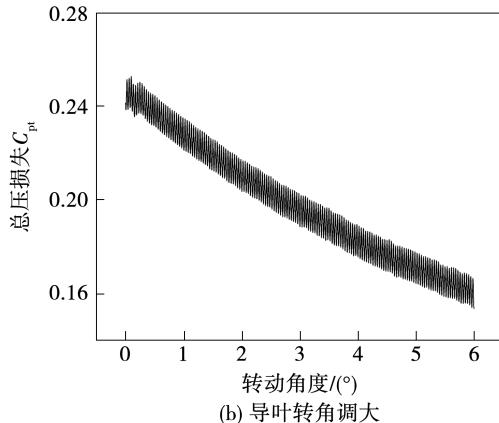
图16 转角调大过程中导叶出口的熵增云图

Fig. 16 Cloud maps of entropy increase at guide vane outlet in the process of increasing the turning angle

变几何涡轮导叶转角变化必然会引起叶型损失、二次流损失和尾迹损失的改变。图 17 给出导叶转动过程中的总压损失变化。由图 17 可知, 总压损失整体呈抛物线型, 在导叶转角调小过程中, 总压损失持续增加; 在导叶转角调大过程中, 总压损失持续减少。



(a) 导叶转角调小



(b) 导叶转角调大

图 17 导叶出口总压损失系数随导叶转角变化规律

Fig. 17 Variations of total pressure loss coefficient at guide vane outlet with turning angle of guide vane

总压损失变化与图 15 和图 16 的导叶出口熵增云图中泄漏涡熵增区的变化趋势相同, 上下端壁处泄漏涡对导叶通道的损失影响最明显。总压损失的变化呈现较大的振荡波动, 对比两个转角变化过程, 转角调小的情况下, 波动的幅度逐渐变小。

### 2.3.2 动叶流场内损失情况随导叶转角变化规律

涡轮流道内通道涡和间隙泄漏涡等二次流导致动叶出口出现熵增加和总压损失提高。图 18 为动叶与上端壁间隙泄漏涡熵增示意图。泄漏流的产生原因为压力侧与吸力侧压差力, 从流线图可以发现, 泄漏涡向后发展, 在动叶出口上部位置的高熵增区就是由泄漏涡导致。同时, 从泄漏涡流线在动叶片间的分布可以判断, 在来流惯性力和叶盆叶背压差

力较小的情况下, 叶片前缘气流泄漏相对其他位置较少; 动叶片中部径向位置气体加速流动, 静压降低导致两侧压差增加, 泄漏流强度提高并与主流掺混向后发展。

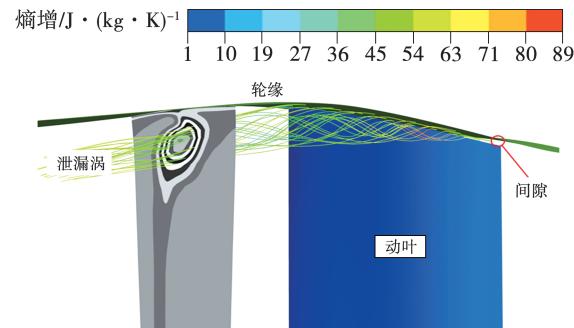


图 18 动叶片顶间隙泄漏涡熵增示意图

Fig. 18 Schematic diagram of leakage vortex entropy increase of rotor blade tip clearance

图 19 和图 20 分别为转角调小和调大过渡态下动叶流道轴向位置 51% 处各转角瞬时的熵增云图, 用  $t$  代表一个时间步长。由图可知, 泄漏涡和下部通道涡是引起熵增的主要漩涡结构。在导叶转角调小过程中, 泄漏涡引起的高熵增区域减小至消失, 但在流道下部的熵增区域因通道涡强度增加而扩大, 损失增加。在导叶转角调大过程中, 流道上部因泄漏涡引起的熵增区域变化不大, 但其中的高熵增区域扩大, 下部通道涡引起的熵增区域明显减小。

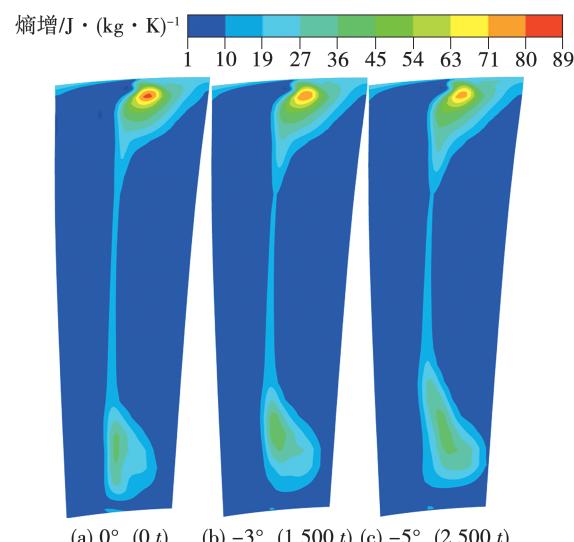


图 19 转角调小过程的动叶流道轴向位置 51% 处熵增云图

Fig. 19 Cloud maps of entropy increase at 51% axial position of rotor blade channel in the process of reducing the turning angle

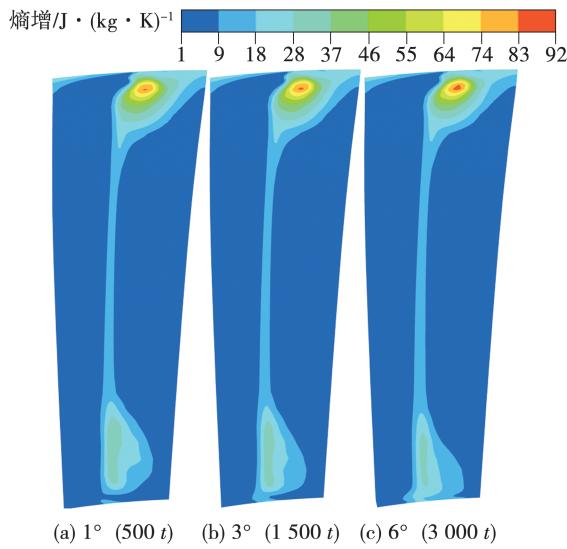


图 20 转角调大过程的动叶流道轴向位置 51% 处熵增云图

Fig. 20 Cloud maps of entropy increase at 51% axial position of rotor blade channel in the process of increasing the turning angle

动叶出口熵增数值随导叶转角的变化情况如图 21 所示。

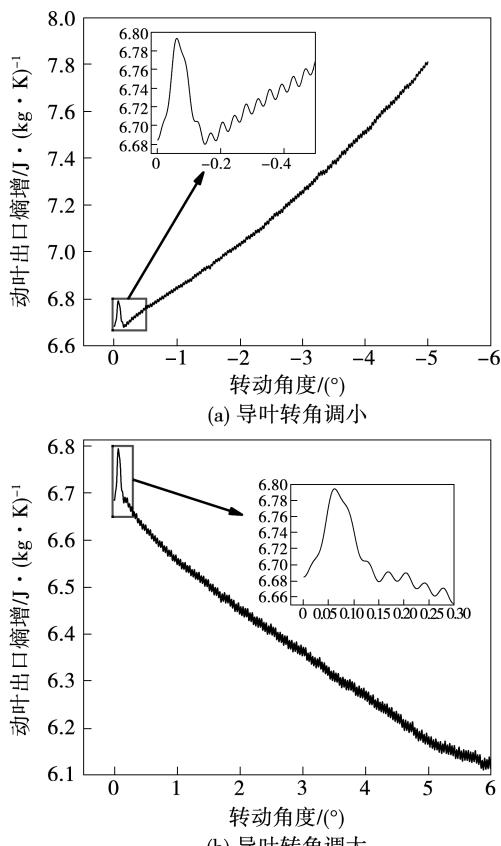


图 21 动叶出口熵增随导叶转角变化规律

Fig. 21 Variations of entropy increase at rotor blade outlet with turning angle of guide vane

由图 21 可知, 导叶转角调小, 熵增增加; 导叶转角调大, 熵增减少; 相对于转角减小, 转角增大过程中熵增变化的数值波动幅度更大。再结合图 19 和图 20 中泄漏涡和下部通道涡导致的熵增随导叶转角的变化可知, 无论导叶转角如何变化, 动叶出口熵增数值的变化主要受动叶下部通道涡强度的影响。导叶转角从 0° 调整到 0.15° 的过程中, 动叶出口相对气流角发生变化, 偏离了设计点, 导致叶片尾缘后部掺混发生改变, 整体熵增数值表现为迅速增加再下降。此外, 结合图 9 中涡轮效率的变化可知, 在导叶转角从 0° 调整到 ±0.15° 的过程中, 动叶出口熵增数值的改变使涡轮总效率出现先降低后升高的现象。

### 3 结 论

为了提高变几何涡轮技术在燃气轮机中的可应用性, 基于某型发动机第一级动力涡轮, 运用仿真软件中的动网格技术对导叶转动时变几何涡轮过渡态性能的变化展开研究, 分别进行导叶转角从 0° 调小至 -5° 与调大至 6° 的过渡态过程的非定常数值仿真。研究结论如下:

(1) 在导叶转角调小的过渡态过程中, 动叶进口相对气流角接近线性减小, 13.5° 动叶出口流量降低约 12%; 动叶出口相对气流角接近抛物线型增大 0.7°, 涡轮级效率降低 1.6%; 导叶转角调大的过渡态过程中, 动叶进口相对气流角与动叶出口流量分别接近线性增大 14° 与提高 11.3%, 动叶出口相对气流角与涡轮级效率分别接近抛物线型减小 0.3° 与提高 0.5%。变几何涡轮动叶在负冲角下表现出更好的适应性, 涡轮级效率更高。

(2) 导叶从 0° 转角调大或调小的瞬时(转角 0° ~ ±0.15°), 动叶进口相对气流角突然改变导致吸力侧泄漏涡和下部通道涡强度发生变化, 影响动叶出口相对气流角使之偏离设计点, 导致叶片尾缘后部掺混发生改变, 体现在动叶出口熵增数值迅速增加再下降, 涡轮效率也相应出现先降低后升高的现象。

(3) 导叶上、下端壁处间隙泄漏涡对导叶通道的损失影响明显, 转角调小时, 导叶出口的总压损失呈抛物线型逐渐升高, 转角调大时则相反。导叶转角的变化对动叶叶尖泄漏涡强度影响较小, 对下部通道涡影响较大; 导叶转角调小时, 熵增增加, 而导叶转角调大时, 熵增减少, 且熵增变化的数值波动幅

度更大,且稳定下降;无论导叶转角如何变化,动叶出口熵增数值的变化主要受动叶下部通道涡强度的影响。

## 参考文献:

- [1] HASHMI M B, LEMMA T A, AHSAN S, et al. Transient behavior in variable geometry industrial gas turbines:a comprehensive overview of pertinent modeling techniques [ J ]. Entropy, 2021, 23(2) :250.
- [2] 胡松岩. 变几何涡轮及其设计特点 [J]. 航空发动机, 1996, 17(3) :21~26.
- HU Song-yan. Variable geometry turbine and design characteristics [J]. Aeroengine, 1996, 17(3) :21~26.
- [3] BARBOSA J R, SILVA F J D S, TOMITA J T, et al. Influence of variable geometry transients on the gas turbine performance [ C ]// ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, Vancouver, British Columbia, Canada, 2011.
- [4] 贾琳渊, 陈玉春, 谭甜, 等. 变几何参数对变循环发动机过渡态性能的影响分析 [J]. 推进技术, 2020, 41(8) :1681~1691.
- JIA Lin-yuan, CHEN Yu-chun, TAN Tian, et al. Analysis for influence of variable geometry parameters on transition state performance of variable cycle engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(8) :1681~1691.
- [5] 贾琳渊, 陈玉春, 程荣辉, 等. 变循环发动机过渡态性能直接模拟方法 [J]. 航空学报, 2020, 41(12) :52~64.
- JIA Lin-yuan, CHEN Yu-chun, CHENG Rong-hui, et al. Direct simulation method of transient-state performance of variable cycle engines [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(12) :52~64.
- [6] 宋可染, 陈玉春, 贾琳渊, 等. 基于梯度法和最大熵方法的变循环发动机加速控制规律设计 [J]. 推进技术, 2022, 43(5) :55~63.
- SONG Ke-ran, CHEN Yu-chun, JIA Lin-yuan, et al. Design of variable cycle engine acceleration control schedule based on gradient method and maximum entropy method [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(5) :50~58.
- [7] 郭倩楠, 李绍斌, 宋西镇, 等. 基于动态边界的跨声速压气机过渡态三维模拟方法 [J]. 推进技术, 2019, 40(6) :1231~1238.
- GUO Qian-nan, LI Shao-bin, SONG Xi-zhen, et al. Three-dimensional transient simulation method for transonic compressor based on dynamic boundaries [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(6) :1231~1238.
- [8] 李绍斌, 张韦雅, 杨彩琼, 等. 基于动态边界的跨声速压气机过渡态载荷研究 [J]. 航空动力学报, 2021, 36(7) :1367~1376.
- LI Shao-bin, ZHANG Wei-ya, YANG Cai-qiong, et al. Research on transient load for transonic compressor based on dynamic boundaries [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(7) :1367~1376.
- [9] 李彦静, 杜玉峰, 宋义康, 等. 变几何涡轮可调叶栅过渡态特性研究 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(10) :126~135.
- LI Yan-jing, DU Yu-feng, SONG Yi-kang, et al. Research on transition state characteristics of variable geometry turbine adjustable cascade [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10) :126~135.
- [10] RANE S, KOVACEVIC A, STOSIC N, et al. Deforming grid generation and CFD analysis of variable geometry screw compressors [J]. Computers & Fluids, 2014, 99 :124~141.
- [11] RAI M M, MADAVAN N K. Multi airfoil Navier-Stokes simulations of turbine rotor stator interaction [J]. Journal of Turbomachinery, 1990, 112(3) :377~384.
- [12] 杜玉峰. 基于导叶转动的变几何涡轮过渡态特性研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2021.
- DU Yu-feng. Transition characteristics of variable geometry turbine based on guide vane rotation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [13] SPALART P, ALLMARAS R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows [C]// 30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, USA, 1992.
- [14] BALDWIN B S, BARTH T J. A one-equation turbulence transport model for high Reynolds number wall-bounded flows [M]. Washington: The National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, 1990.
- [15] MENTER F R. Zonal two equation  $k-w$  turbulence models for aerodynamic flows [C]// 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida, USA, 1993.
- [16] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994 (32) :1598~1605.
- [17] ZUCKERMAN N, LIOR N. Impingement heat transfer: corre lat-ions and numerical modeling modeling [J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(5) :544~552.
- [18] 刘鹏飞, 高杰, 牛夕莹, 等. 大子午扩张变几何涡轮可调叶片端区设计优化 [J]. 航空动力学报, 2017, 32(3) :558~567.
- LIU Peng-fei, GAO Jie, NIU Xi-ying, et al. Design and optimization of end zone of large meridional expansion adjustable blades on variable geometry turbine [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3) :558~567.

(刘颖 编辑)