

低压透平叶片表面合成射流非定常流动控制机理研究

刘小民¹, 周海洋^{1,2}, 王星¹, 席光¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 湖南桃花江核电有限公司, 413000, 湖南益阳)

摘要: 基于 Langtry-Menter 转换模型的 SST 湍流模型, 通过求解三维非定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程, 数值研究了低雷诺数下合成射流涡发生器对 Pak-B 低压透平叶片吸力面流动分离的影响, 揭示了低压透平叶片表面合成射流非定常流动的控制机理。结果表明, 引入合成射流涡发生器能够抑制甚至消除低雷诺数下叶片吸力面上的流动分离。在雷诺数为 25 000、自由流湍流强度为 0.08% 下, 提高射流控制频率有助于增强合成射流涡发生器对低压透平叶片表面流动分离的控制效果, 减少流动损失。当控制频率为 10 Hz 时, 叶栅出口的相对总压损失系数为 0.42; 当控制频率增加到 20 Hz 时, 相对总压损失系数仅下降到 0.41。这表明, 当合成射流控制频率大于 10 Hz 时, 继续增加控制频率来减少叶片表面流动损失的效果是不明显的。

关键词: 流动分离控制; 合成射流; 低雷诺数; 低压透平叶片; 数值模拟

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0095-07

Unsteady Flow Control Mechanism of Synthetic Jet on a Low Pressure Turbine Blade

LIU Xiaomin¹, ZHOU Haiyang^{1,2}, WANG Xin¹, XI Guang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Hunan Taohuajiang Nuclear Power Co. Ltd., Yiyang, Hunan 413000, China)

Abstract: The three-dimensional viscous unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations were solved to simulate the flow on a low pressure turbine blade. The effects of synthetic jet on the flow separation in the suction side of the Pak-B low pressure turbine blade were numerically investigated by the SST (shear stress transport) turbulence model coupled with the Langtry-Menter transition model for turbulent flow. The unsteady flow control mechanism of synthetic jet and the flow structure were also presented. The numerical results show that the flow separation in the blade suction side can be effectively suppressed even eliminated by introducing the synthetic jet with the proper control frequency. At the Reynolds number of 25 000 and the free stream turbulence intensity of 0.08%, the increase in synthetic jet frequency can improve the control effectiveness of the flow separation on the low pressure turbine blade and reduce the flow loss. When the synthetic jet frequency is 10 Hz, the flow loss coefficient relative to the total pressure at the turbine blade exit is 0.42. However, the relative loss coefficient decreases to only 0.41 when the synthetic jet frequency increases to 20 Hz. These results imply that the flow loss does not drop clearly for the low pressure turbine blade at low Reynolds number when the synthetic jet frequency is greater than 10 Hz.

Keywords: flow separation control; synthetic jet; low Reynolds number; low pressure turbine blade; numerical simulation

在低 Re 下运行的航空发动机,其透平叶片表面会产生较为严重的边界层流动分离,从而导致总压损失^[1]. 因此,探索先进的流动控制策略来有效抑制低 Re 下的透平叶片表面流动分离,已成为目前研究的热点问题之一.

相对于其他流动控制方式,合成射流流动控制技术更符合航空发动机结构紧凑、质量轻的设计要求,该技术最突出的特点是无需额外的供气装置,可以实现质量输入为 0,而动量输入不为 0. 20 世纪 90 年代,美国乔治亚理工大学的 Smith 和 Glezer 等人^[2]将合成射流技术成功地用于流动控制,随后 Schaeffler^[3]、Amitay 等人^[4]又通过实验的方法对合成射流进行了研究,并指出合成射流在分离控制方面具有巨大的潜力. Rizzetta 等人^[5]以 NA-CA0012 叶型为研究对象,通过数值求解了三维非定常 N-S 方程,研究了合成射流激励器气腔内部和叶片外流场的流场结构. 近年来,国内也相继开展了低 Re 下低压透平叶片流动分离的主动流动控制技术的研究^[6-7]. 尽管如此,在对合成射流流动控制过程与机理、流动结构分析,对影响合成射流流动控制性能的主要参数的综合分析和优化设计等方面仍有待于进一步深入的研究和探讨.

本文采用耦合 Langtry-Menter 转捩模型的 SST(shear stress transport)的湍流模型,通过求解三维非定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程,对带有和不带有合成射流涡发生器的低压透平叶片流动特性进行了数值计算,分析、考察了低 Re 下 2 种不同控制频率的合成射流对叶片表面流动分离的控制效果. 通过低压透平叶片表面流动结构变化及其激励涡动力特性的非定常分析,较为详细地揭示了合成射流主动流动控制机理.

1 数值计算方法

1.1 研究对象

本文以 Pak-B 透平叶片为研究对象,通过引入合成射流来研究合成射流对叶片表面流场的流动控制(不涉及合成射流激励器气腔内的流场). 图 1 为带有合成射流激励器的 Pak-B 叶型几何模型,其中叶片弦长 $C=17.78$ cm,叶片安装角度 $\gamma=26^\circ$,叶片轴向弦长 $C_x=C\cos\gamma=15.95$ cm,叶片栅距 $L=0.88 C_x$,叶片的进口角 $\beta_1=35^\circ$,出口角 $\beta_2=-60^\circ$. 射流孔沿叶展方向分布,射流方向由偏斜角 θ_g 和倾斜角 φ_g 来确定, θ_g 为射流方向在当地表面的投影与当地主流方向的夹角, φ_g 为射流方向与当地表面的

夹角.

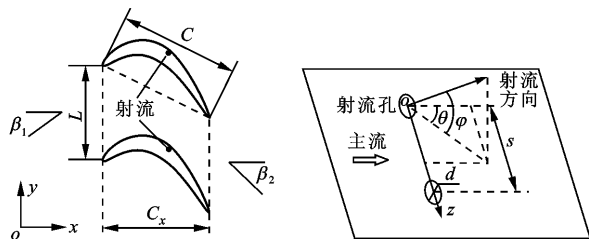


图 1 带有合成射流激励器的 Pak-B 叶片叶型示意图

1.2 边界条件及计算网格

在叶片轴向沿前缘上游延伸 $2C_x$ 作为进口边界,给定进口气流温度、进口速度和来流角度;沿叶片尾缘向下游方向延伸 $5C_x$ 作为周围出口边界,给定出口气流静压,以便消除出口压力边界的反射效应;叶栅通道上下边界设定为周期性边界条件;叶片壁面为绝热无滑移壁面. 本文射流孔径 $d=1$ mm,射流孔间距 $s=10$ mm,射流管长度 $l=5$ mm. 计算域采用 H-O-H 结构化网格,在叶片近壁面及流动分离区加密网格,在叶片壁面附近、射流管内壁面附近和射流出口区域均采用 O 型网格. 叶片计算域网格数为 476 694,射流计算域网格数为 18 120. 为了获得准确的边界层解,叶片表面法向第 1 层网格 $y^+<1$.

1.3 数值计算模型

数值计算采用了计算流体力学(CFD)商业软件 ANSYS CFX 11.0. 为了准确描述低 Re 、低压透平叶片吸力面上的边界层转捩和分离现象,湍流计算模型采用耦合 Langtry-Menter 转捩模型的 Menter SST 方程湍流模型^[8-9]. Langtry-Menter 模型是严格建立在局部变量基础上的基于经验关联的转捩模型,因此它能够与现有的 CFD 计算程序耦合,同时还考虑了来流湍流度以及逆压梯度对边界层转捩的影响. 对于三维非定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程的数值求解采用了基于有限单元的有限体积法,方程中扩散项和源项的离散为二阶中心差分格式,对流项的离散为高精度离散格式,时间项的离散采用双时间步隐式时间迭代方法. 数值模拟计算方案的可靠性及网格无关性验证详见文献[10-11].

2 计算结果及分析

2.1 标准工况

当 $Re=25\ 000$ 、自由流湍流强度 $S_{FTI}=0.08\%$ 时,无控制条件下的低压透平叶栅流场为标准

(Baseline)工况. 首先对 Baseline 工况进行定常计算,时间步长设为 0.005 s ,总迭代步数为 $1\ 000$. 将定常计算结果作为非定常计算的初值进行数值计算,非定常计算时间步长设为 0.1 ms ,每一时间步内的最大迭代次数为 10 ,真实计算的总时间为 0.5 s ,便可保证计算流场达到稳定.

取相邻射流孔中间截面为观察面,则在 Baseline 工况下,观察面上叶片表面时均压力系数 c_p 沿叶片弦长的分布及叶栅流场时均流线和速度云图如图 2 和图 3 所示,其中的 Re 是基于叶栅进口速度与叶片轴向弦长定义的,表达式为

$$Re = \frac{\rho_{in} u_{in} C_x}{\mu} \quad (1)$$

式中: ρ_{in} 为叶栅进口的气流密度; u_{in} 为叶栅进口的气流速度; C_x 为叶片轴向弦长; μ 为流体动力黏性系数. 定义压力系数

$$c_p = \frac{P_s - P_\infty}{(1/2)\rho_{in} u_{in}^2} \quad (2)$$

式中: P_∞ 为叶栅进口的自由来流静压; P_s 为当地叶片的表面静压; $(1/2)\rho_{in} u_{in}^2$ 为叶栅进口动压.

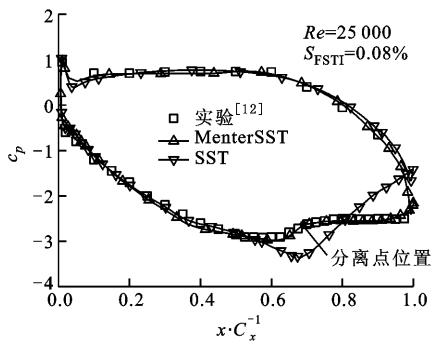


图2 Baseline 工况下时均叶片表面压力系数分布

从图 2 可以看出,叶片吸力面上大约 $68\%C_x$ 位置出现了压力平台,且一直延续到叶片尾缘,表明叶片吸力面存在着一个“开式”的分离.

从图 3 可以清楚地观察到,叶片吸力面的下游区域存在着大面积的流动分离现象,分离区域一直延伸到叶片尾缘之后,但未发生流动再附. 结合图 2 可以看出,分离点与压力平台起始位置基本重合.

2.2 合成射流控制频率对控制效果的影响

合成射流的射流孔布置在无控制工况时流动分离的起始点($68\%C_x$ 位置处),沿叶展方向均匀分布,且 $\theta_g = 90^\circ$, $\varphi_g = 30^\circ$. 对于控制工况,在射流管进口截面给定了进口速度

$$V_{in,jet} = V_{max} \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

式中: V_{max} 为一个控制周期 T 内射流管入口的最大

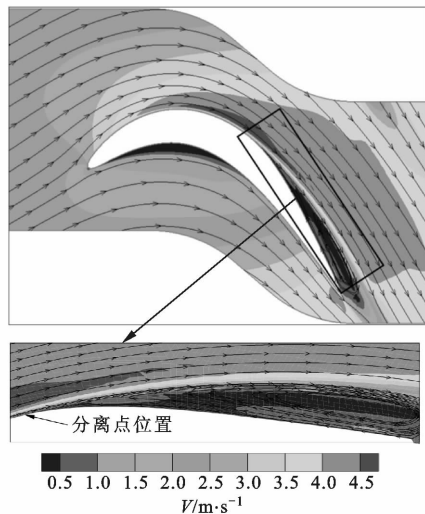


图3 Baseline 工况下时均流线和速度云图

射流速度; f 为合成射流控制频率; t 为瞬态时间.

以 Baseline 工况非定常计算的结果作为合成射流控制工况非定常计算的初值进行了数值计算,其中非定常计算时间步长为 $1 \times 10^{-5}\text{ s}$,每一时间步内最大迭代次数为 10 ,计算的总时间为 5 个合成射流的控制周期. Re 、 S_{FSTI} 、主流进出口边界条件及计算区域的几何参数,与 Baseline 工况非定常计算保持一致. 最大射流比(射流最大速度与主流速度之比) $B_{max} = 2$,合成射流控制频率 $f = 10, 20\text{ Hz}$.

图 4 为不同控制频率下,观测面上的叶片表面时均压力系数分布图. 从图 4 可以看出:相比 Baseline 工况,在叶片压力面及吸力面上游区域, c_p 曲线基本保持一致;在叶片吸力面下游区域,由于合成射流的作用, c_p 有不同程度的增加,所以几乎观察不到压力平台. $f = 20\text{ Hz}$ 控制工况下,叶片吸力面下游区域的 c_p 略大于 $f = 10\text{ Hz}$ 工况,说明提高控制频率有利于提高合成射流的控制效果.

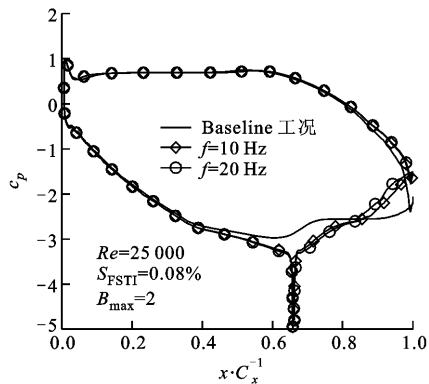


图4 不同控制频率条件下低压透平叶片表面时均压力系数分布

图5为不同控制频率下,在观测面上的低压透平叶片时均流线和压力云图,其中压力是以101 325 Pa为参考值的相对压力(下同). 相对于Baseline工况,在2种不同的合成射流流动控制频率下,叶片吸力面的低压区域和分离区域均显著减小,流动分离现象几乎完全消失.

图6为不同的控制频率下,合成射流对叶栅总压损失系数的影响,其中低压透平叶栅出口相对总压损失系数

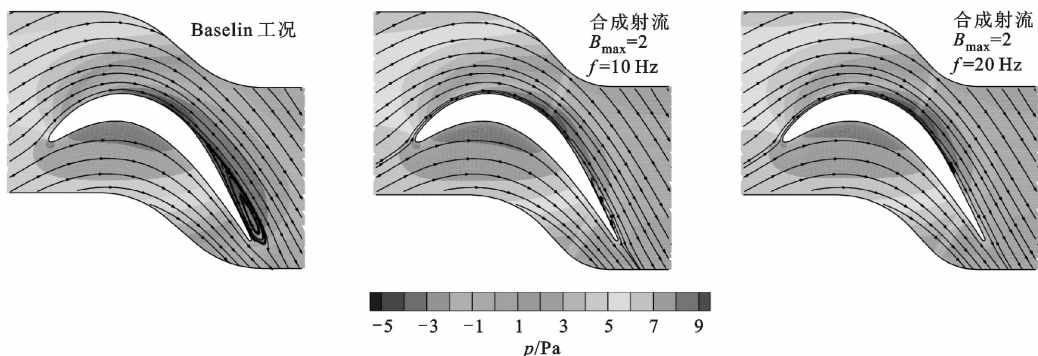


图5 不同控制频率下低压透平叶片时均流线和压力云图

从图6可以看出:引入不同控制频率的合成射流,能够有效减少低 Re 、低压透平叶片表面的流动损失,这与脉冲式涡流发生器对低 Re 、低压透平叶片表面流动控制效果是一致的^[11]. 对于合成射流涡流发生器主动流动控制,随着控制频率的增加,叶片流动总压损失随之减少,但这种减少是非线性的. 无控制时, $\xi'=1$; $f=5$ Hz时, ξ' 迅速下降为0.45; f 增加到10 Hz时, ξ' 进一步下降到0.42; f 由10 Hz增加到20 Hz时, ξ' 从0.42下降到0.41. 可见,当合成射流的 $f>10$ Hz时,继续增加控制频率对减少低 Re 、低压透平叶片表面流动损失的作用则不大.

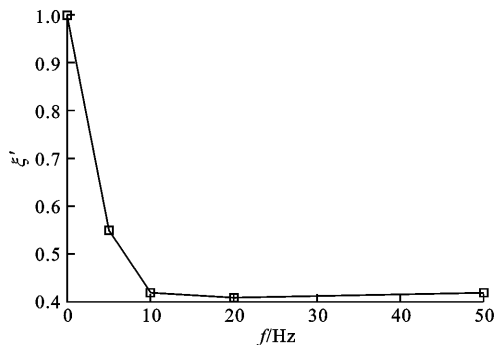


图6 合成射流控制频率对相对总压损失系数的影响

2.3 合成射流流动控制机理

为了进一步揭示合成射流对低压透平叶片吸力面流动分离的控制机理及其流动结构,本文在 $B_{\max}=2$ 、 $f=10$ Hz的控制条件下对合成射流流动控制

$$\xi' = \xi/\xi_{\text{ref}} \quad (4)$$

式中: ξ_{ref} 为 $Re=25\ 000$ 、 $S_{\text{FSTI}}=0.08\%$ 时的低压透平叶栅出口总压损失系数; ξ 为基于叶栅出口动压头的总压损失系数,定义为

$$\xi = \frac{P_{\text{ti}} - \bar{P}_{\text{to}}}{\bar{P}_{\text{to}} - \bar{P}_{\text{so}}} \quad (5)$$

其中: P_{ti} 为进口总压, $\bar{P}_{\text{to}}$ 为质量加权平均的叶栅出口总压, $\bar{P}_{\text{so}}$ 为质量加权平均的叶栅出口静压.

过程进行了分析.

图7给出了 $B_{\max}=2$ 、 $f=10$ Hz在合成射流控制工况下的观测面上叶片吸力面附近不同时间点的合成射流吹气状态流线和速度云图,图8给出了 $B_{\max}=2$ 、 $f=10$ Hz在合成射流控制工况下的观测面上叶片吸力面附近不同时间点的合成射流吸气状态流线和速度云图. 在 $t/T=0$ 中,由于受上一控制周期的作用,叶片吸力面下游流动分离区域明显小于无控制工况的情况,此时合成射流进入吹起状态.

由于每一周期在起始时刻的吹气速度较小,所以合成射流不能对透平叶片吸力面上的流体流动分离进行有效的抑制. 随着时间的推移,流动分离区域不断扩大,射流速度不断提高. $t/T=0.20$ 时,叶片吸力面的流动分离区域已经延伸到了叶片尾缘. $t/T=0.24$ 时,吹气开始作用于流动分离前沿,分离区域前沿开始向下游移动. $t/T=0.28$ 时,吹气对分离区域产生影响. 随着吹气速度不断下降,分离区域不断减小并向着下游方向移动,以至于合成射流进入到吸气状态.

$t/T=0.56$ 时,叶片吸力面的流动分离区域几乎完全被抑制,仅在叶片尾缘附近还存在很小的流动分离. 由于此合成射流的吸气量较小,不能有效吸除边界层的低动量流体,所以一个新的流动分离开始产生,这个新的分离区域也在不断发展.

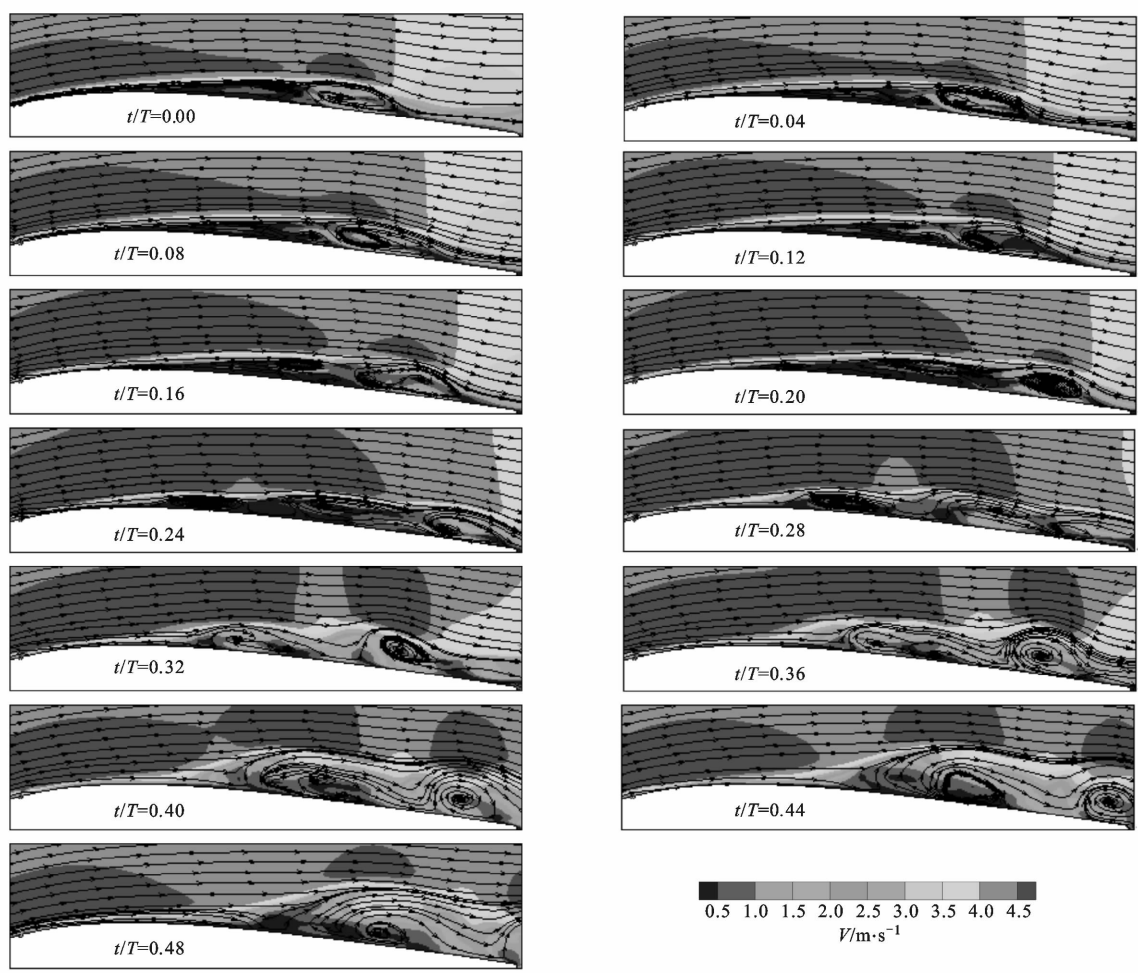


图 7 叶片吸力面附近不同时间点的合成射流吹气状态的流线和速度云图($B_{\max}=2, f=10\text{ Hz}$)

$t/T=0.76$ 时,合成射流不断地抽吸掉边界层的低动量流体,流动分离区域前沿开始向下游移动,随着吸气量的减小,边界层低动量流体不断增加,分离区域前沿向上游移动,同时分离区域向下游区域扩展.

通过上述分析可知,合成射流可以有效地抑制低压透平叶片吸力面的流动分离,减少总压损失,合成射流也可以通过吹气和吸气对流动分离进行控制.在吹气过程中,吹气在分离区域前沿产生扰动,增加了该区域的湍流强度,促使分离点向下游移动,同时引起主流区域高动量流体与边界层低动量流体不断掺混,流动分离得到了有效的抑制.在吸气过程中,通过边界层的低动量流体吸取,进而达到了抑制流动分离的作用.在吹气和吸气交替的过程中,尽管吹气或者吸气动作已经停止,但吹气和吸气对叶片表面流动控制作用并没有停止,而是随着时间的推移持续向下游区域推进.

3 结 论

基于 Langtry-Menter 转捩模型,通过数值求解三维黏性非定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程,研究了合成射流涡发生器对低压透平叶片吸力面流动分离控制的影响,从中获得的主要结论如下.

(1)合成射流激励涡与叶片吸力面分离涡的非定常相互作用,改变了叶片表面流动分布状态,有效地抑制甚至消除了低 Re 、低压透平叶片表面边界层的流动分离.

(2)射流控制频率对合成射流涡发生器的流动控制效果有较大影响.在 $Re=25\ 000$ 、自由流湍流强度 $S_{FSTI}=0.08\%$ 下,增加控制频率有助于提高涡发生器对低压透平叶片表面流动分离的控制效果. $f=10\sim20\text{ Hz}$ 时,低压透平叶栅出口的 ξ' 由 0.42 减小到 0.41; f 增加到 50 Hz 时, ξ' 基本保持不变. $f>20\text{ Hz}$ 时, ξ' 的变化及流动控制效果还有待于进

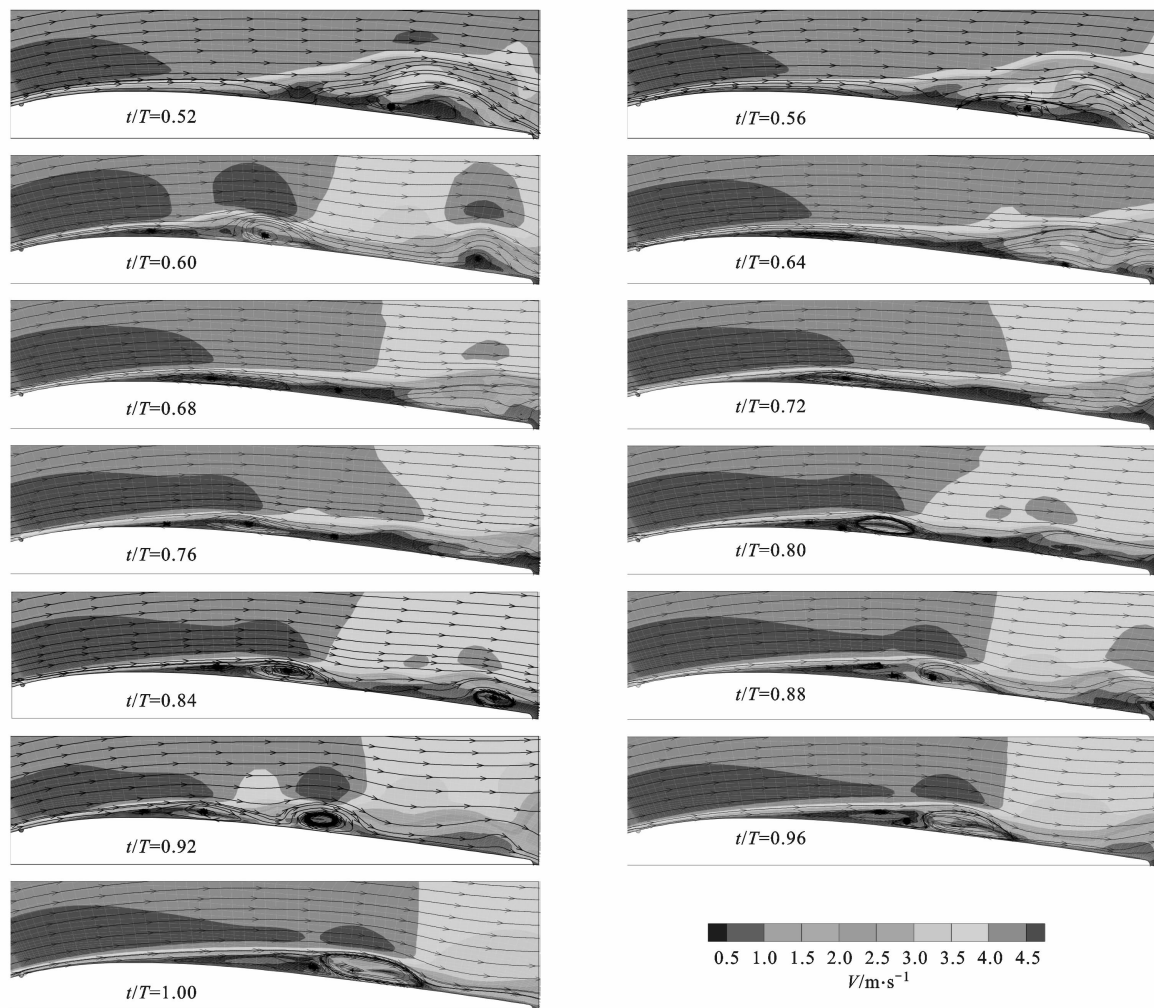


图8 叶片吸力面附近不同时间点的合成射流吸气状态的流线和速度云图($B_{\max}=2$, $f=10$ Hz)

一步研究。

(3)合成射流涡发生器是通过交替吹气和吸气对低压透平叶片表面流动实施控制的。吹气过程在叶片吸力面分离区域前沿产生扰动,增加该区域的湍流强度,促使分离点向下游移动,同时引起主流区域高动量流体与边界层低动量流体的掺混。吸气过程通过抽吸边界层的低动量流体,使得高动量流体能够及时补充到被抽走的低动量流体所占据的区域,进而达到了抑制流动分离的效果。

参考文献:

- [1] SHARMA O. Impact of Reynolds number on low pressure turbine performance, CP-1998-206958[R]. New York, USA: NASA, 1998: 65-70.
- [2] SMITH B L, GLEZER A. The formation and evolution of synthetic jets [J]. Physics of Fluids, 1998, 10

(9):2281-2297.

- [3] SCHAEFFLER N. The Interaction of a synthetic jet and a turbulent boundary layer, AIAA 2003-0643 [R]. Reston, VA, USA: AIAA, 2003.
- [4] AMITAY M, KIBNS V, PAREKH D, et al. The dynamics of flow reattachment over a thick airfoil controlled by synthetic jet actuators, AIAA 1999-1001 [R]. Reston, VA, USA: AIAA, 1999.
- [5] RIZZETTA D P, VISBAL M R. Numerical simulation of separation control for a transitional highly-loaded low-pressure turbine [J]. AIAA Journal, 2005, 43 (9):1958-1967.
- [6] 肖中云, 牟斌, 陈作斌, 等. 零质量射流与分离控制的数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2006, 24(1): 46-50. XIAO Zhongyun, MOU Bin, CHEN Zuobin, et al. Compressible simulation of active flow control using synthetic jets [J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2006, 24

(1);46-50.

[7] 郝礼书,乔志德. 合成射流用于翼型分离流动控制的研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(4): 528-531.
HAO Lishu, QIAO Zhide. Maximizing the effect of synthetic jet on airfoil separation flow control [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(4): 528-531.

[8] MENTER F R, LANGTRY R B. A correlation-based transition model using local variables; part I model formulation, ASME-GT 2004-53452 [R]. New York, USA: ASME, 2004.

[9] LANGTRY R B, MENTER F R. A Correlation-based transition model using local variables; part II test cases and industry applications, ASME-GT 2004-53454 [R]. New York, USA: ASME, 2004.

[10] LIU Xiaomin, ZHOU Haiyang. Numerical investigations of flow separation control for a low pressure turbine blade using steady and pulsed vortex generator jets[C] // Basic Gas Turbine Metallurgy and Repair Technology Workshop. New York, USA: ASME, 2010: 1253-1262.

[11] 周海洋. 低压透平叶片流动分离主动控制的数值研究[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2010.

[12] HUANG Junhui, CORKE T C, THOMAS F O. Plasma actuators for separation control of low-pressure turbine blades [J]. AIAA Journal, 2006, 44(1): 51-57.

(编辑 苗凌)

(上接第 34 页)

LI Jingshan, GUO Xianmin, CHEN Yiguang, et al. Experimental study of frost growth characteristics on outdoor heat exchanger of air source heat pump unit [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(1):18-22.

[5] YANG D K, LEE K S, SONG S. Modeling for predicting frosting behavior of a fin-tube heat exchanger [J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2006, 49 (7/8): 1472-1479.

[6] YAO Y, JIANG Y Q, DENG S M. A study on the performance of the airside heat exchanger under frosting in an air source heat pump water heater/chiller unit [J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2004, 47 (17/18):3745-3756.

[7] TSO C P, CHENG Y C, LAI A C K. Dynamic behavior of a direct expansion evaporator under frosting condition; part I distributed model [J]. Int J Refrigeration, 2006, 29 (4):611-623.

[8] QU K Y, KOMORI S, JIANG Y. Local variation of frost layer thickness and morphology [J]. Int J Thermal Sciences, 2006, 45 (2):116-123.

[9] CHENG C H, WU K H. Observations of early-stage frost formation on a cold plate in atmospheric air flow [J]. ASME J Heat Transfer, 2003, 125(1):95-102.

[10] MAGO P J, SHERIF S A. Modeling the cooling process path of a dehumidifying coil under frosting conditions [J]. ASME J Heat Transfer, 2002, 124 (6):1182-1191.

(编辑 苗凌)

(上接第 94 页)

[8] SWAIN E. The design of an inlet guide vane assembly for an industrial centrifugal compressor[J]. Energy Saving in the Design and Operation of Compressors, 1996 (13): 11-22.

[9] ARMAN M, ERIK G, RENÉ A, et al. Novel IGV designs for centrifugal compressors and their interaction with the impeller[C] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air. New York, USA: ASME, 2010: 2019-2029.

[10] 商景泰. 通风机手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1994: 371-376.

[11] TAN Jiajian, QI Datong, WANG Rui. The effects of radial inlet on the performance of variable inlet guide vanes in a centrifugal compressor stage [C] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air. New York, USA: ASME, 2010: 1723-1732.

(编辑 苗凌)