

涡轮盘腔轴向封严流动的数值研究

张晶辉, 马宏伟

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 利用数值方法研究了轴向封严结构内的燃气入侵与封严流动。研究表明:由于封严间隙处流场参数梯度较大,封严面非匹配网格影响了数值传递而造成封严效率数值结果偏高。定常数值模拟结果低估了导叶下游静压的周向不均匀性,同时没有考虑转静干涉,所得到的封严效率较非定常结果要高。非定常计算得到的导叶下游静压周向分布与试验结果符合较好,在盘腔子午面内形成 3 个涡核结构,引导静盘壁面流体流向动盘以补充动盘泵效应所需流量。封严间隙内存在旋转的燃气入侵与出流结构,燃气入侵伴随较大的切向速度,封严间隙内的封严间隙涡对封严效率有积极影响,封严面上径向速度的瞬时值为时均值的 3 倍以上。燃气入侵受到导叶尾缘周向静压分布和转子旋转的共同影响。

关 键 词: 轴向封严结构; 轮缘封严机理; 燃气入侵; 非定常; 涡轮盘腔

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Numerical investigation of axial seal flow in turbine cavity

ZHANG Jing-hui, MA Hong-wei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Hot gas ingestion and seal flow in axial seal configuration was investigated numerically. The results show that the unmatched mesh strategy on sealing surface affects the numerical transfer because of bigger gradient of parameters which lead to higher sealing effectiveness. The steady simulation underestimates the circumference pressure unevenness downstream the vane and ignores the interaction of stator and rotor; as a result the sealing effectiveness is much bigger than unsteady simulation. The unsteady results agree with the experimental date very well. Three vortexes appear in the cavity meridian plane, and guide the flow near static disc to rotor disc for supplement the flow required by disc entrainment. Rotating hot gas ingestion and egress structures appear in seal clearance, and the ingestion flow has bigger tangential velocity. The seal clearance vortexes in seal clearance have positive effects on sealing efficiency. The transient radial velocity is 3 times bigger than time-averaged value on sealing surface. The hot gas ingestion is affected by the circumferential distribution of static pressure downstream of vane and rotor rotation.

Key words: axial seal configuration; rim seal mechanism; hot gas ingestion;
unsteady; turbine cavity

涡轮通道主流燃气会通过转子与静子之间的
间隙入侵涡轮盘腔,从而造成涡轮盘温度过高而

影响涡轮盘的工作安全和使用寿命,一般通过在
涡轮盘腔中引入高压压气机出口的冷气对涡轮盘

收稿日期: 2013-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51161130525); 北京航空航天大学基本科研业务费-博士研究生创新基金(YWF-13-A01-17)

作者简介: 张晶辉(1986—),男,河南洛阳人,博士生,主要从事叶轮机械内复杂流动研究。

进行冷却,同时也作为封严气体,阻止燃气入侵涡轮盘腔.但是封严冷气流量过大,会降低航空发动机的整机效率.涡轮封严结构设计的目标是以最小的封严流量保证足够的封严效率,这就要求对燃气入侵和冷气封严机理有深刻的认识.

Johnson 等^[1]和 Coren 等^[2]总结了燃气入侵机理,一般认为定常数值模拟不能准确揭示具有三维非定常湍流流动特性的燃气入侵的物理机制^[3-5],即使在不考虑主流叶片的轴对称模型和定常边界条件下,燃气入侵也是三维非定常流动^[6]. Jakoby 等^[7]通过盘腔压力的频谱分析发现当封严冷气量低于一定值时,涡轮前盘腔中存在以80%动盘转速旋转的大涡结构,这会引起较深的燃气入侵. Cao 等^[8]和 Schuepbach 等^[9]也通过试验发现了类似的低频结构. Steve 等^[10]发现当冷气流量较大时,旋转的大涡结构消失,导叶和动叶的相互作用成为燃气入侵的主要因素. O'Mahoney 等^[11]采用大涡模拟技术较好地捕捉到了燃气入侵的物理现象,与试验结果也更接近. Rabs 等^[12]通过封严间隙内开尔文-赫姆霍兹涡的形成理论解释了轮缘封严机理,封严间隙内的这些非定常涡抑制了燃气入侵. Green 等^[13]通过试验发现即使冷气流量再大,依然存在燃气入侵现象,推测如果要完全阻止燃气入侵,必须提高盘腔内封严处的压力达到主流总压或动叶前缘的相对滞止压力. Wang 等^[14]研究了盘腔间距对封严效果的影响.国内对涡轮封严的研究相对较少,孙纪宁等^[15]通过试验拟合出了不同封严结构的封严准则函数关系式,并探寻出最优的封严结构.周昆原等^[16]通过二维定常数值方法研究了封严流量对盘腔压力、封严效率和封严间隙处径向速度的影响.高庆等^[17]通过定常数值方法研究了不同导叶和动叶轴向间距和轮缘密封轴向位置对封严效率的影响.但国内还鲜有研究燃气入侵及冷气封严的非定常现象.

本文通过非定常数值方法研究了主流存在导叶和动叶时涡轮前盘腔简单轴向封严结构的封严流动,从盘腔内涡结构、封严间隙涡和转静干涉的角度探讨了燃气入侵及轴向封严的机理.

1 数值计算方法

1.1 研究对象

本文研究对象为 Aachen 大学蒸汽燃气涡轮研究所 1.5 级涡轮盘腔试验台^[18](图 1). 两排静子各有 16 个叶片,转子 32 个叶片.轴向封严几何

结构如图 2 所示(图中 s 为盘腔间距, s_c 为封严间隙宽度, s_{lip} 为封严唇齿宽度, R 为轮缘半径, φ 为周向坐标, t 为栅距),盘腔间距比($G = s/R$)为 0.0926,封严间隙比($G_c = s_c/R$)为 0.0296.

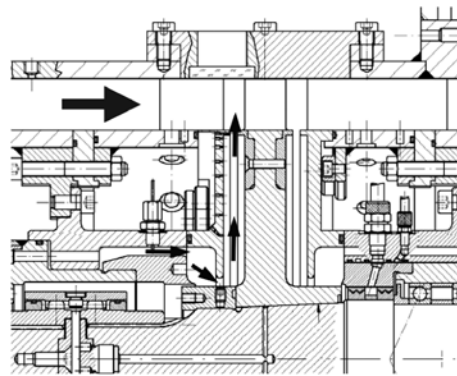


图 1 涡轮盘腔试验台截面^[18]

Fig. 1 Cross section of test rig of turbine cavity^[18]

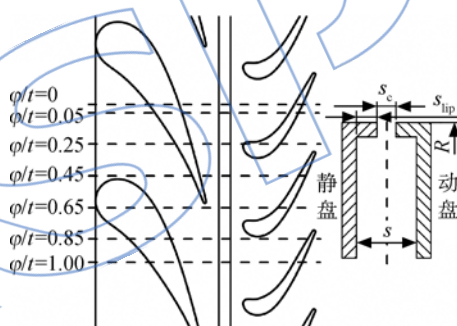


图 2 轴向封严几何结构

Fig. 2 Axial seal geometric configurations

1.2 模型、网格及边界条件

计算域如图 3 所示,主流进口位于导叶上游 1.5 倍弦长处,主流出口位于动叶下游 1.5 倍弦长处,转静交界面位于封严间隙下游,不考虑叶顶间隙对流场的影响.

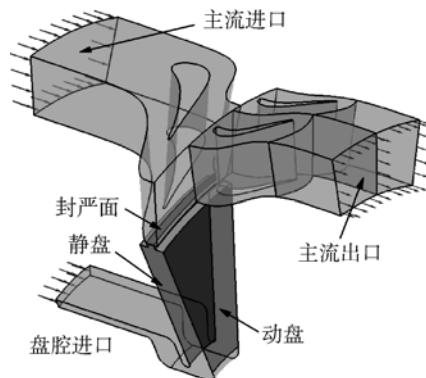


图 3 计算域

Fig. 3 Computational domain

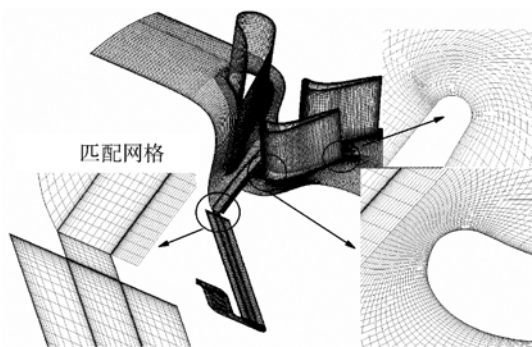


图4 匹配网格

Fig. 4 Matched mesh

采用软件 ANSYS-CFX 12.0 求解三维非定常黏性雷诺平均的 Navier-Stokes 方程, 使用切应力输运(SST)湍流模型, 为了更好地显示燃气入侵现象, 工质设置为多组分气体: 主流和封严气流, 但物理性质都为理想气体。

静子域及盘腔采用 ANSYS-ICEM 进行网格划分, 转子域采用 Numeca-IGG 进行网格划分。为了研究网格质量对计算结果的影响, 封严面网格分为两种: 匹配和非匹配网格。匹配网格如图4所示, 网格数为247万, 周向间距角度最大角度为 0.34° , 主流壁面 y^+ 小于5, 盘腔壁面 y^+ 小于2。采用冻结转子转静交界面进行了网格无关性验证, 所比较的密网格为345万, 数值结果表明所采用的网格数量满足计算需求。

本文只研究了涡轮设计工况下(OP1)^[48]的燃气入侵及封严现象。主流轴向雷诺数 Re_{ax} 为 1.18×10^6 ($Re_{ax} = \rho_{02} V_{02,ax} R / \mu_{02}$, 其中 ρ_{02} 为导叶下游流体的密度, $V_{02,ax}$ 为轴向速度, μ_{02} 为主流气体动力黏度), 转子旋转速度 $\omega = 9000 \text{ r/min}$ 。主流进口给定总压 p_{01m}^* 、总温 T_{01m}^* 、封严气体质量分数 $\Psi = 0$; 出口给定平均静压; 涡轮盘腔进口给定总温 T_s^* 、流量系数 ($C_w = \dot{m}_s / (\mu_s R) = 20\,000$, 其中 $\dot{m}_s$ 为封严气体流量, μ_s 为封严气体动力黏度)、封严气体质量分数为1, 在此冷气流量情况下, 盘腔内的旋转大涡结构消失, 所采用的扇形计算域合理^[7]; 所有壁面为无滑移绝热壁面。非定常计算转子域扫过一个导叶通道分100个时间步。

2 计算结果及分析

2.1 网格匹配性及数值方法对计算结果的影响

由于封严间隙内的强剪切流动, 流场参数的梯度变化很大, 因此讨论此处网格的匹配性具有很大的工程应用价值。图5为导叶下游静压沿周

向的分布, p_s 为静压, $p_{s,min}$ 为静压最小值, V_{02} 为导叶下流速度。可以看出, 定常计算时, 网格匹配性对导叶尾迹的高静压区几乎没有影响, 而在通道中间, 匹配网格所得到的静压较低。非定常计算时, 匹配网格时尾迹区时间平均的静压较高, 在通道中间的静压较低。说明匹配网格得到的导叶尾缘周向静压不均匀性更大, 而周向静压不均匀性正是驱动燃气入侵的主要因素。通过与试验结果比较发现匹配网格的非定常时均结果与试验结果最为接近。

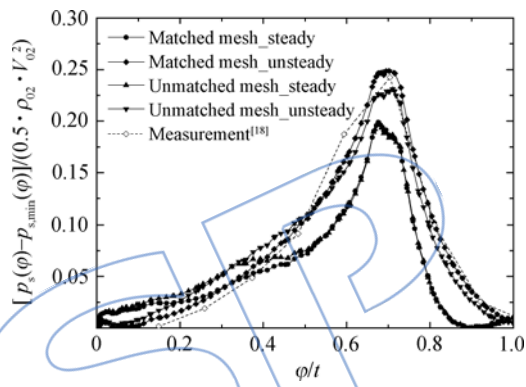


图5 导叶下游静压周向分布

Fig. 5 Circumferential distribution of static pressure downstream of vane

封严效率可以通过封严气体质量分数和静盘壁面静压升来衡量^[5], 如图6、图7所示。图6为静盘壁面静压升, r 为径向坐标, $p_{s,ri}$ 为 $r/R = 0.5$ 位置的静压值, 与文献^[12]的结果进行了比较, 发现定常结果情况下封严面静压低于盘腔内的静压, 已接近完全封严, 而非定常结果显示还有较大燃气入侵发生。匹配网格非定常时均结果在高半径封严处与试验结果最为接近。

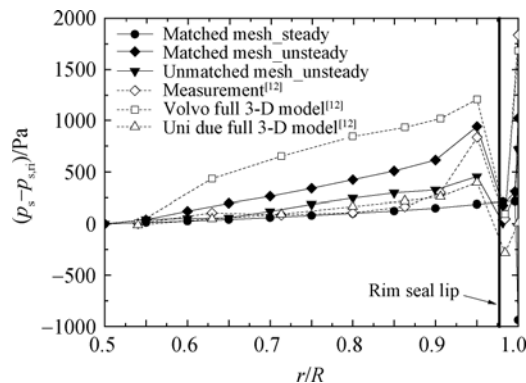


图6 静盘壁面静压升径向分布

Fig. 6 Radial distribution of wall static pressure rise at stator disk

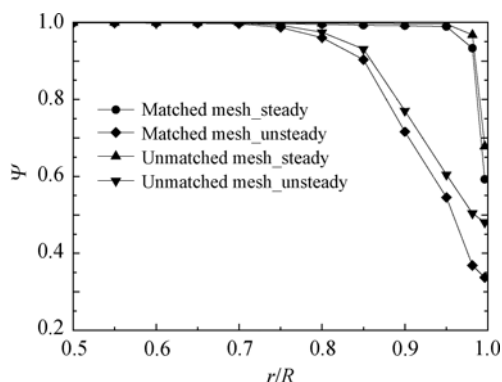


图7 静盘壁面封严气体质量分数径向分布

Fig. 7 Radia distribution of wall sealing air mass fraction at stator disk

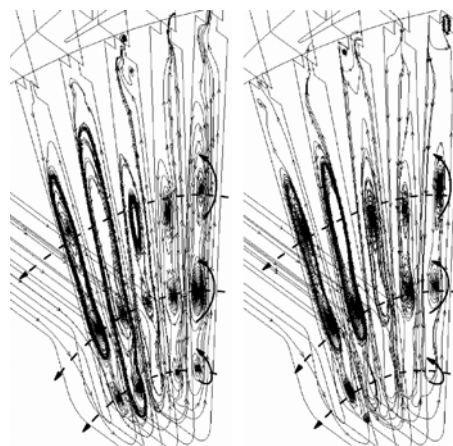
2.2 盘腔及封严间隙内流动结构

盘腔内的流动结构对燃气入侵有很大影响. 图8为涡轮前盘腔(图1箭头所示盘腔)内子午面(图2所示 $\varphi/t=0.05, 0.25, 0.45, 0.65, 0.85$ 位置)和封严间隙中间截面2个时刻的流线图, 在子午面内存在3个涡核结构. 封严气体在动盘壁面附近受到离心力的作用向外流动, 同时由于封严气体流量小于自由盘转动所能泵出的流量, 气体在静盘附近向内流动以补充动盘泵效应所需流量, 因此形成涡核. 由于动盘对面存在静盘, 不是无限空间, 也即非自由盘, 因此动盘的泵效应受到静盘的影响, 静盘壁面部分向内流动的气体在还未到达最内部时就向动盘流动, 形成数个涡核结构. 从非定常流线组图还发现涡核沿着动盘旋转方向旋转, 涡核的径向位置变化较小, 但涡核的大小会有所改变.

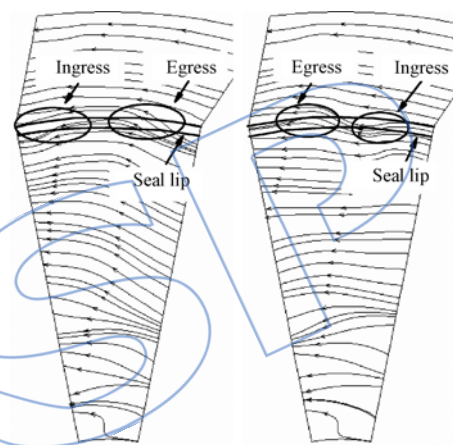
动盘壁面附近的流体既向外流动, 又随动盘旋转, 并且随着距离动盘越远, 切向速度越小, 同时径向速度受泵效应的影响也减弱, 从封严间隙中间截面的流线图可以看出, 在盘腔内流线方向有较大的改变, 这是引起子午面内涡核大小改变的主要因素. 在高半径封严间隙处可以发现旋转的燃气入侵与出流结构交替出现. 盘腔内的涡核结构影响到了封严间隙处的燃气入侵及封严流动, 对燃气入侵的深度有很大影响.

图9为封严间隙内的非定常矢量分布, 每个时刻导叶和动叶的相对位置如图10所示. 由于主流与封严间隙内速度差异太大, 仅显示了速度方向, 没有速度大小信息.

从非定常矢量分布可以看到在封严处存在复杂的封严涡, 并且在 $\varphi/t=0.45, 0.85$ 位置处都存



(a) 盘腔内子午面流线图



(b) 封严间隙中间截面流线图

图8 盘腔内流动结构

Fig. 8 Flow structures in cavity

在交替进行的燃气入侵与出流现象, 这与定常计算所得到的结果明显不同. 定常计算结果显示燃气入侵主要发生在导叶尾迹和动叶前缘, 封严冷气出流主要发生在导叶通道中间区域和转子通道中间区域的动盘轮缘附近, 这是由于尾迹区静压大, 通道中间静压小, 动叶前缘气流滞止, 引起静压较高, 形成燃气入侵的驱动力. 而非定常结果显示, 燃气入侵和封严气体出流现象在周向位置普遍存在, 只是受到转静干涉的影响而在不同周向位置的燃气入侵深度有所不同.

封严涡还受到气流切向速度的影响, 图9中 $\varphi/t=0.45$ 位置 $\frac{1}{10}T$ 时刻出现类似源的结构, 说明此处的流体是从 $\varphi/t<0.45$ 位置而来, 进而分成3路: 一路流向动盘, 与动盘壁面向外流动的流体相遇之后拐向中间并向下流入盘腔内3个涡核中最上面一个; 一路流向封严间隙处阻止燃气入侵; 另一路流向静盘壁面并向内半径流动, 用来补

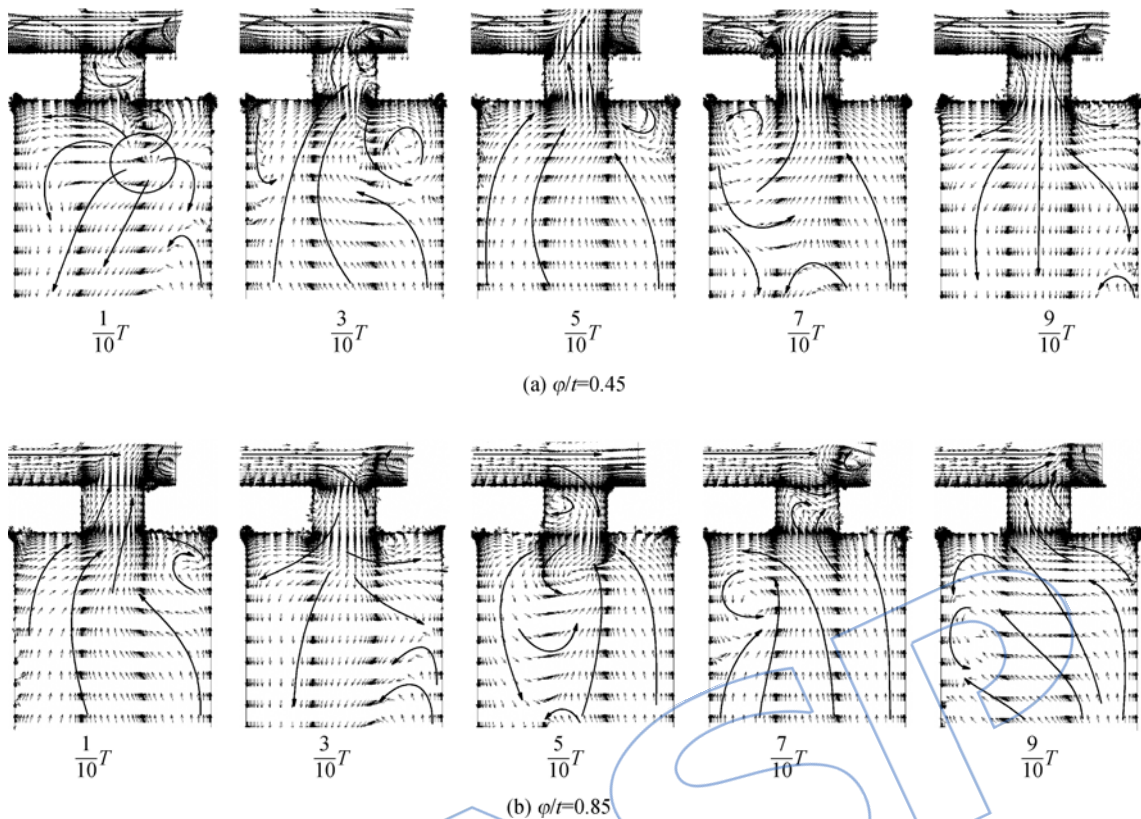


图9 非定常速度矢量分布

Fig. 9 Unsteady velocity vector distribution

充动盘泵效应所需流量. 在 $\frac{7}{10}T$ 时刻静盘轮缘出现角涡结构, 并流向封严间隙内. 封严间隙内的气流在 $\frac{1}{10}T$ 时刻是由动盘轮缘流向静盘, 随后的 $\frac{3}{10}T$, $\frac{5}{10}T$ 和 $\frac{7}{10}T$ 时刻, 流动方向逐渐改为向外流动, 在 $\frac{9}{10}T$ 时刻出现大的燃气入侵. 燃气进入盘腔之后同时向静盘和动盘壁面流动, 由于动盘的旋转作用, 入侵燃气与动盘壁面向外的流体相遇, 不能到达更深的位置, 而在静盘壁面可以长驱直入, 直到遇到最上面的涡核结构而转向动盘壁面然后向外流动.

$\phi/t=0.85$ 位置的 $\frac{5}{10}T$ 和 $\frac{7}{10}T$ 时刻在间隙内部出现封严间隙涡, 主流燃气冲向动盘轮缘并向下游流动, 由此在静盘轮缘诱导出现顺时针的封严间隙涡, 并在静盘壁面形成向外的流动, 这个封严间隙涡减小了燃气入侵的面积, 对封严有益, 之后的时刻燃气入侵减弱并逐渐形成出流现象.

2.3 盘腔及封严间隙内速度分布

从径向速度云图可以更直观地看到燃气入侵

及出流现象. 图 10 所示为盘腔内子午面的无量纲径向速度分布云图. 无量纲径向速度定义如下:

$$V_{r,c} = V_r / V_{ideal} \quad (1)$$

其中 V_r 为径向速度, V_{ideal} 为假设封严面上都是均匀出流时的径向速度.

从图 10 中可以看出高半径区域由于受到燃气入侵及出流结构的影响, 径向速度分布受动盘旋转的影响减小. 封严间隙内燃气入侵主要发生在动叶前缘的压力面侧, 出流结构主要发生在动叶前缘的吸力面侧及转子通道中间, 这归因于动叶前缘压力面侧静压较高, 而吸力面侧及转子通道中间静压较低. 燃气入侵较为严重的区域会在动盘轮缘处诱导出角涡结构. 从出流区域可以看出封严气体进入主流会对转子前的流动产生较大影响, 主要影响区域是动叶的吸力面. 非定常结果体现了转子的旋转对燃气入侵产生的影响, 而导叶的影响主要体现在非定常时均结果上.

图 11 所示为封严面上径向速度瞬时值和时均值沿周向的分布, 通过对比导叶下游静压分布 (图 5) 可以看出导叶尾迹区域的径向速度时均值为负值, 说明导叶尾缘的高静压引起了当地的燃气入侵, 而通道中间的时均结果显示为出流. 从瞬

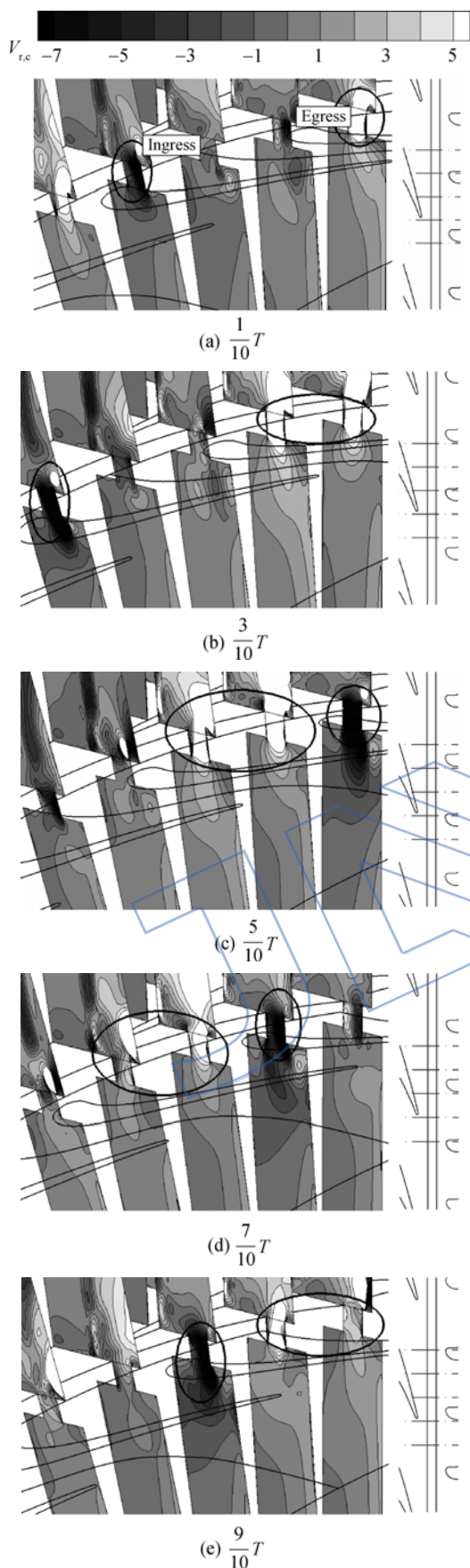


图 10 盘腔内无量纲径向速度分布云图

Fig. 10 Counter of non-dimensional radial velocity distribution in cavity

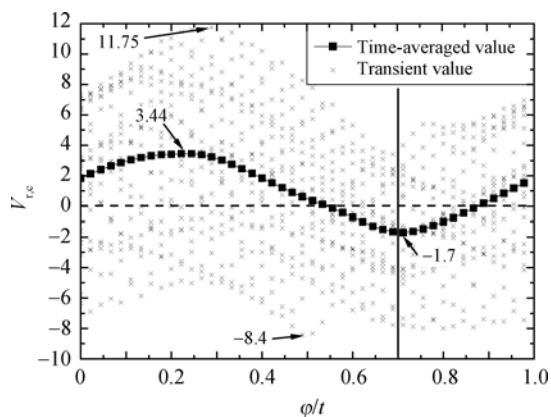


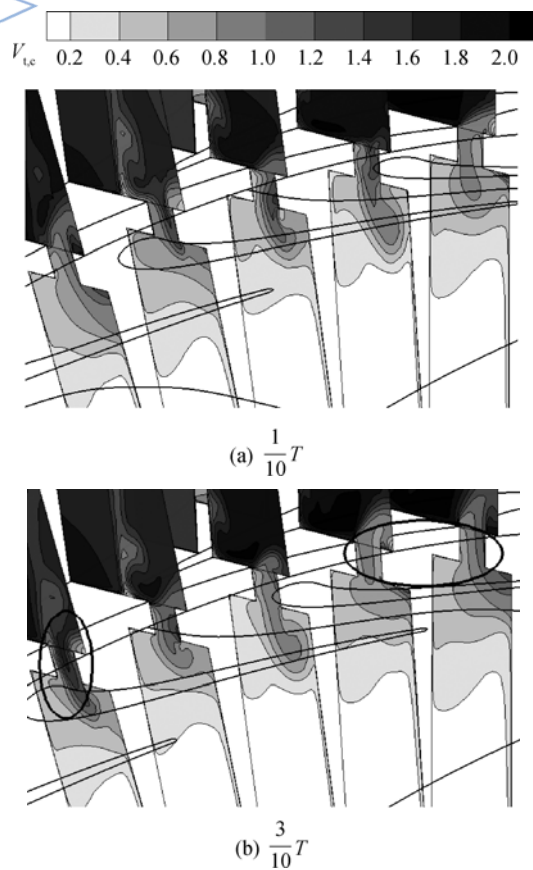
图 11 封严面上径向速度分布

Fig. 11 Radial velocity distribution on sealing surface

时值可以看出整个周向区域都存在入侵与出流结构,而且出流的径向速度瞬时值可以达到平均值的 3.4 倍,燃气入侵的径向速度瞬时值可以达到平均值的 4.9 倍.由于燃气入侵对盘腔的负面影响主要决定于燃气能到达的深度,因此必须考虑非定常的燃气入侵现象.导叶对封严效果的时均结果有影响,而转子的旋转对封严效果的非定常结果有影响,两者共同决定了封严效果.

图 12 所示为盘腔内无量纲切向速度分布云图,其定义如下(V_t 为切向速度):

$$V_{t,c} = V_t / (R\omega) \quad (2)$$



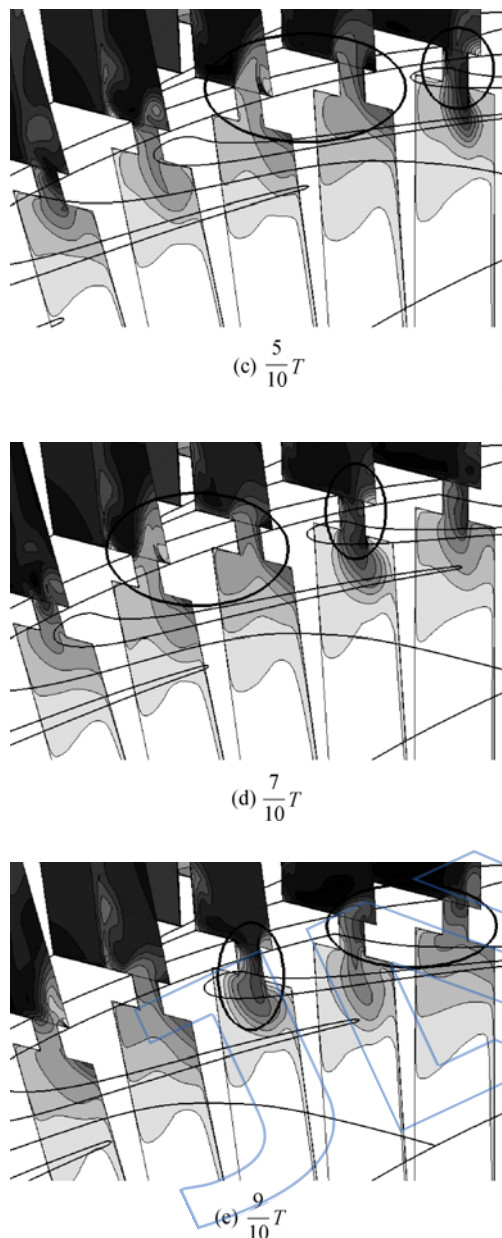


图12 盘腔内无量纲切向速度分布云图

Fig. 12 Counter of non-dimensional tangential velocity distribution in cavity

对比径向速度分布,可以看出:燃气入侵较为严重的区域切向速度也较大,这是因为主流燃气具有较高的切向速度,入侵封严间隙之后依然保持较高切线速度。

3 结 论

本文通过定常和非定常数值方法研究了涡轮盘腔轴向封严机理,主要结论如下:

1) 封严处网格匹配性对数值结果有较大影响,由于封严处参数梯度较大,非匹配网格引起数值误差较大,造成封严效率偏高。

2) 定常数值模拟结果低估了导叶下游机匣

壁面静压的周向不均匀性,严重高估了涡轮盘腔的封严效率。非定常匹配网格时均结果得到的导叶尾缘下游静压分布与试验结果符合较好。

3) 在所计算封严流量下,盘腔内形成3个径向分布的涡核结构,引导静盘壁面附近流体流向动盘表面以补充动盘泵效应所需流量。

4) 封严间隙处的燃气入侵与出流结构交替出现并随动盘旋转,封严间隙内的封严间隙涡对封严作用有积极效果。燃气入侵较为严重的区域切向速度也较大。燃气入侵现象受到转子旋转和导叶尾迹的共同作用,其中导叶尾迹影响时均结果,而转子旋转影响瞬时结果。转子旋转引起的燃气入侵要比导叶尾迹的影响要大。

参考文献:

- [1] Johnson B V, Mack G J, Paolillo R E, et al. Turbine rim seal gas path flow ingestion mechanisms[R]. AIAA 94-2703, 1994.
- [2] Coren D D, Atkins N R, Turner J R, et al. An advanced multi-configuration stator well cooling test facility[R]. ASME Paper GT2010-23450, 2010.
- [3] Hills N J, Chew J W, Turner A B. Computational and mathematical modeling of turbine rim seal ingestion[J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 306-315.
- [4] Gentilhomme O, Hills N J, Turner A B, et al. Measurements and analysis of ingestion through a turbine rim seal[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(3): 505-512.
- [5] Roy R P, Zhou D W, Ganesan S, et al. The flow field and main gas ingestion in a rotor-stator cavity[R]. ASME Paper GT2007-27671, 2007.
- [6] Chew J W. Developments in turbomachinery internal air systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(1): 189-234.
- [7] Jakoby R, Zierer T, Lindblad K, et al. Numerical simulation of the unsteady flow field in an axial gas turbine rim seal configuration[R]. ASME Paper GT2004-53829, 2004.
- [8] Cao C, Chew J W, Millington P R, et al. Interaction of rim seal and annulus flow in an axial flow turbine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4): 786-793.
- [9] Schuepbach P, Abhari R S, Rose M G, et al. Effects of suction and injection purge-flow on the secondary flow structures of a high-work turbine[R]. ASME Paper GT2008-50471, 2008.
- [10] Steve J, Julie L, Guy D, et al. Simulations of flow ingestion and related structures in a turbine disk cavity[R]. ASME Paper GT2010-22729, 2010.
- [11] O'Mahoney T S D, Hills N J, Chew J W, et al. Large-eddy simulation of rim seal ingestion[R]. ASME Paper GT2010-22962, 2010.

- [12] Rabs M, Benra F K, Dohmen H J, et al. Investigation of flow instabilities near the rim cavity of a 1.5 stage gas turbine[R]. ASME Paper GT2009-59965, 2009.
- [13] Green T, Turner A B. Ingestion into the upstream wheel-space of an axial turbine stage[J]. Journal of Turbomachinery, 1994, 116(2): 327-332.
- [14] Wang C Z, Johnson B V, Jong F D, et al. Comparison of flow characteristics in axial-gap seals for close and wide-spaced turbine stages[R]. ASME Paper GT2007-27909, 2007.
- [15] 孙纪宁, 罗翔, 刘金楠, 等. 体积分数法测量几种转静系中的最小封严流量[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 981-985.
SUN Jining, LUO Xiang, LIU Jinnan, et al. Volume fraction technique for measuring the minimum value of mass flow in turbine rotor-stator disk cavities[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 981-985. (in Chinese)
- [16] 周昆原, 罗翔, 徐国强. 旋转诱导燃气入侵的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2704-2709.
ZHOU Kunyuan, LUO Xiang, XU Guoqiang. Numerical simulation of rotationally-induced ingress through turbine rim seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2704-2709. (in Chinese)
- [17] 高庆, 陶加银, 宋立明, 等. 涡轮轮缘密封封严效率的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(5): 12-17.
GAO Qing, TAO Jiayin, SONG Liming, et al. Numerical investigation on the sealing efficiency of the turbine rim seal[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(5): 12-17. (in Chinese)
- [18] Bohn D E, Decker A, Ohlendorf N, et al. Influence of an axial and radial rim seal geometry on hot gas ingestion into the upstream cavity of a 1.5-stage turbine[R]. ASME Paper GT2006-90453, 2006.