

盘腔封严流对主流影响的瞬态 POD 分析

刘春辉,陈二云,杨爱玲

(上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093)

摘要: 盘腔封严冷气泄漏流与主流的相互干涉对燃气轮机效率有重要影响。基于带有叶片的转静系盘腔模型的瞬态数值解,采用本征正交分解(POD)方法对主流场进行分解,分析瞬态流场的湍流能量、模态系数与湍流结构,研究封严泄漏流与主流场的干涉以及轴向封严间隙与径向封严间隙对泄漏流的影响。结果表明:在不同相对叶高处湍流能量占比存在差异,在相对叶高 50% 处,径向封严比轴向封严湍流能量高 19.74%,相对差值达到最大;在相对叶高 30% 处,径向封严比轴向封严湍流能量高 15.93%,绝对差值达到最大;主要湍流结构和次要湍流结构在模态系数频域特性、模态湍流结构上表现出差异,径向封严对盘腔流体与主流流体交互作用的阻碍强化了封严间隙对主流的干扰。

关键词: 盘腔封严; 数值模拟; 本征正交分解; 湍流

中图分类号: TK472 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16146/j.cnki.mdlgc.2023.03.007

[引用本文格式] 刘春辉,陈二云,杨爱玲. 盘腔封严流对主流影响的瞬态 POD 分析[J]. 热能动力工程,2023,38(3):51-58. LIU Chun-hui, CHEN Er-yun, YANG Ai-ling. Transient POD analysis of influence of cavity seal purge flow on mainstream[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3): 51-58.

Transient POD Analysis of Influence of Cavity Seal Purge Flow on Mainstream

LIU Chun-hui, CHEN Er-yun, YANG Ai-ling

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China,
Post Code:200093)

Abstract: The interference between cavity seal purge flow and mainstream has an important effect on gas turbine efficiency. In this paper, based on the transient numerical solution of the rotor disk cavity model with blades, the main flow field is decomposed by using proper orthogonal decomposition (POD) method, the turbulent energy, modal coefficient and turbulent structure of the transient flow field is analyzed, the interference between the sealing leakage flow and the main flow field as well as the influence of the axial and radial sealing clearances on the leakage flow are studied. The results show that the proportions of turbulent energy at different relative blade heights are different. The turbulence energy of radial seal is 19.74% higher than that of axial seal at 50% relative blade height, the relative difference reaches the maximum; and the turbulence energy of radial seal is 15.93% higher than that of axial seal at 30% relative blade height, the absolute difference reaches the maximum; the main turbulent structure and the minor turbulent structure are different in modal coefficient frequency domain characteristic and modal turbulent structure. The obstruction of radial seal on the interaction between the fluid in the disc cavity and the mainstream fluid strengthens the interference of seal clearance on the mainsream.

收稿日期:2022-01-23; 修訂日期:2022-02-14

基金项目:国家自然科学基金(51106099)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51106099)

作者简介:刘春辉(1996-),男,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:杨爱玲(1969-),女,上海理工大学教授。

Key words: disc cavity sealing, numerical simulation, proper orthogonal decomposition (POD), turbulence

引言

燃气轮机高温部件冷却技术是燃气轮机发展的关键技术之一。燃气轮机涡轮的静盘与转盘间存在安装间隙,两者之间的腔体被称为盘腔。为防止高温主流燃气从间隙处入侵盘腔,必须从压气机某级抽取空气通入盘腔,用于冷却涡轮盘和封严间隙。解决高温燃气入侵盘腔的基本方法是设置合理的封严结构和通入适量的冷却气体。国内外研究人员对盘腔入侵的机理进行了大量的实验研究、数值模拟及理论分析。Johnson 等人^[1]总结了导致燃气入侵的因素有转盘旋转的泵送效应、叶栅周期性和非定常压力场、封严几何形状、湍流输运等。Owen 等人^[2]提出了外部诱导入侵、旋转诱导入侵和组合入侵 3 种入侵类型,在单孔孔板模型的基础上提出了双孔孔板模型,并推导其理论关系式。Teuber 等人^[3]通过数值模拟研究了低速实验条件下的轮缘封严特性与实际发动机高速工况封严特性关系。吴康^[4]对轮缘封严流动和传热进行了数值模拟和实验的机理研究。罗擎阳等人^[5]对跨声速涡轮复合结构封严进行了数值模拟研究。

以通入冷却空气的方式可解决盘腔封严问题,但是冷却空气从轮缘间隙处流出,与主流高温燃气汇合会造成燃气轮机总体性能下降。陆泽帆^[6]研究了非对称端壁对封严流和主流流动的影响。杨帆等人^[7-8]研究了封严气流与主流干涉引起的 4 种损失:粘性剪切损失、堵塞效应损失、二次流交互作用损失以及第 2 级静子的附加损失。由于叶片旋转,在轮缘间隙附近存在较强的非定常特性,在分析实验或仿真流场结果时,平均方法难以捕捉流场的湍流特性,而瞬态流场分析方法在流场样本较少的情况下容易忽略部分流场特征,在样本数量较多的情况下难以区分流场有序结构与随机结构。本征正交分解(Proper orthogonal decomposition, POD)方法对瞬态结果进行统计分析,以平均流场作为背景场,物理量随着时间变化的特征被提取为各模态,在分析湍流问题上有着广泛的应用。

Chen 等人^[9]对发动机的流场粒子图像测速法(Particle image velocimetry, PIV)结果进行 POD 分析,分析了流场相似度及各模态能量分布。郭广强等人^[10]使用 POD 降阶模型对液态泵气液两相流的瞬态数值模拟结果进行 POD 分析。赵小存等人^[11]对超声速燃烧室的火焰发光图像进行了 POD 分析,研究火焰的振荡特性。

为了分析盘腔封严的非定常特性,针对 Bath 大学盘腔实验台模型,采用数值模拟方法获得涡轮及盘腔的瞬时流场,使用 POD 方法分析速度场的模态、时域和频域特征,对比主流的流动结构在不同封严结构下的差异。

1 计算模型及数值模拟

1.1 模型建立

采用模型参考 Bath 大学建立的带有叶片的转静系盘腔实验台^[12],其主流道有 32 个导叶和 41 个动叶。盘腔实验台模型参数如图 1(a)所示,其中 r 为圆盘半径方向的坐标。封严间隙位于转、静盘之间,图中虚线圈示。为对比封严间隙对封严流与主流相互干涉特性的影响,分别在轴向和径向封严间隙两种结构下对盘腔封严模型进行非定常流场的数值计算,两种封严间隙如图 1(b) 和图 1(c) 所示。盘腔几何参数如表 1 所示,其他详细参数见文献[12]。图 1(a) 中虚线为盘腔内的流动观测点所设位置,轴向坐标为 $x/s = 0.25$ 。图 1(b) 中间隙内侧和外侧的监测位置,对应径向坐标为 $r/b = 1.000$ 和 1.026。

1.2 网格模型

采用单流道模型进行研究,对动、静叶 1:1 模化,单流道占全周的 1/32。图 2 给出了计算域的划分,图中给出了导叶下游壁面上的 1 条压力监测曲线,周向位置关系用 θ 表示。采用结构化网格,网格数量约为 341 万(进口、导叶及出口延长段为静止域占 159 万,盘腔及动叶为旋转域占 182 万)。为保证近壁区模拟的准确性,盘腔壁面第 1 层网格满足 $y^+ < 1$,主流道壁面第 1 层网格基本满足 $y^+ < 5$ 。流道两侧采用旋转周期面边界条件,转静交界面采用滑移网格模型处理。

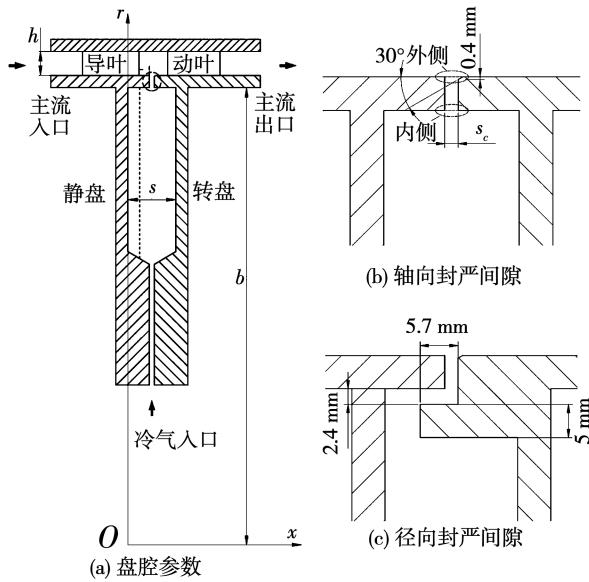


图1 盘腔

Fig. 1 Disk cavity

表1 盘腔几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of disk cavity

参数	数值
主流流道高度 h/mm	10
盘腔外侧半径 b/mm	190
封严间隙 s_c/mm	2
盘腔间隙 s/mm	20

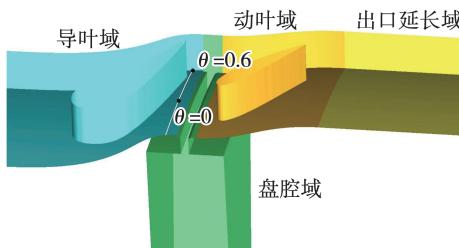


图2 盘腔及主流域分区

Fig. 2 Division of disk cavity and mainstream domain

1.3 数值计算

1.3.1 计算方程

数值计算求解方程为三维非定常雷诺平均的N-S方程,采用的湍流模型为Transition SST,控制方程的空间离散采用二阶迎风格式,时间离散为二阶迎风隐式格式,计算时间步长为1/10的叶片通过周期。数值求解过程使用ANSYS CFD的SIMPLEC算法实现。

针对轴向封严结构,在保持主流参数、转盘旋转

速度及冷气温度不变的条件下,数值模拟冷气流量比MFR(即冷气流量 \dot{m}_c 与主流流量 \dot{m} 之比)为0,0.022和0.040时盘腔与主流道区域的流场。其他相关参数如表2所示,流动介质均为空气。

表2 工况计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of CFD

参数	数值
主流流量 $\dot{m}/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0.51
主流温度 $t_m/^\circ\text{C}$	6
转盘转速 $n/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	3 000
出口压力 p_{out}/Pa	0
冷气温度 $t_c/^\circ\text{C}$	-6

1.3.2 计算结果与误差分析

图3给出了MFR=0时,导叶下游1.5 mm处的压力幅值系数分布。采用压力幅值系数 C_p 表示流体压力周向参数不均匀的程度:

$$C_p = \frac{p - \bar{p}}{0.5\rho \Omega^2 b^2} \quad (1)$$

式中: p —测点静压; \bar{p} —测点静压的平均值; ρ —空气密度; Ω —角速度。

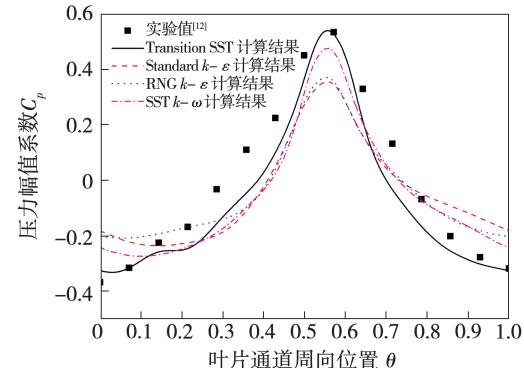


图3 压力幅值系数分布(MFR=0)

Fig. 3 Pressure amplitude coefficient distribution (MFR=0)

由图3可知,SST $k-\omega$ 和 Transition SST 的最大值与实验值较为接近,而 Standard $k-\varepsilon$ 和 RNG $k-\varepsilon$ 的最大值与实验值相差较大,SST $k-\omega$ 的最小值与实验值最小值相差较大,最小值对应的 θ 有明显偏差。考虑到压力幅值分布反映了盘腔外部诱导入侵现象,所以选用 Transition SST 湍流模型。主流于高压区入侵盘腔,盘腔泄漏流从低压区进入主流道,数值结果的最高值和最低值吻合较好,整体趋势一致,虽然略有差异但对封严入侵的影响较小。

图 4 给出了盘腔内 $x/s = 0.25$ 位置处旋流比 $V_\varphi/\Omega b$ 沿径向的分布随冷气流量比 MFR 的变化。由于 V_φ 为流体的周向速度, Ω 为转盘的旋转角速度, 所以旋流比 $V_\varphi/\Omega b$ 的大小表示流体周向流动的强弱。由图 4 可知, 盘腔内冷气的旋流比随涡轮半径增加呈增长趋势, 且越靠近盘腔外缘, 旋流比越大。MFR 的增加不改变这种分布趋势, 但是旋流比沿径向的分布曲线整体下移, 说明增加冷气量可明显减弱盘腔的周向流动。这是由于主流入侵强化了盘腔流体的旋转, 而冷气抑制了主流入侵, 在无冷气量时的高半径处, 主流入侵显著影响盘腔流体的旋转, 随着冷气量的增加, 盘腔旋流现象逐渐减弱。数值模拟给出的旋流比分布与文献[12]的实验结果趋势基本一致, 在 MFR = 0 时, $r/b = 0.96$ 处相对误差为 15.4%。由于叶片数量的模化, 在无冷气和低冷气流量下, 主流对盘腔旋流影响的数值结果与实验结果有所差异, 但是能够捕捉到主流对盘腔高半径处流体旋流的影响。

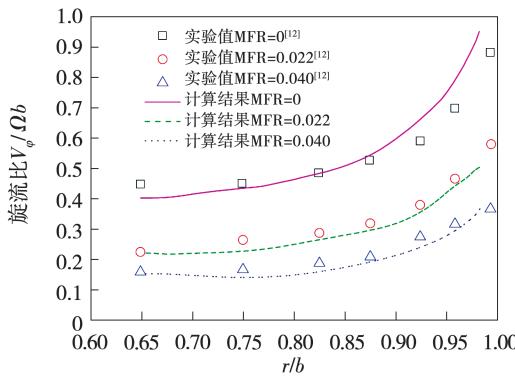


图 4 轴向封严结构的旋流比沿径向分布

Fig. 4 Distribution of swirl ratio of axial clearance seal along radial direction

图 5 给出了不同冷气量下, 轴向封严的封严效率分布, 封严效率计算式为:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_e} \quad (2)$$

式中: \dot{m}_e ——流出的流量; \dot{m}_i ——流入的流量。

封严效率监测面为封严间隙内侧。由于对叶片数量进行了模化, 封严效率与实验值比相对偏低, 平均相对误差为 6.6%。

综上, 数值模拟方法可以较为准确地模拟盘腔和主流道的流场。低冷气量情况主要是研究主流入

侵对盘腔的影响, 在 $MFR = 0.040$ 的工况可以更好地表现出封严射流对主流的影响。

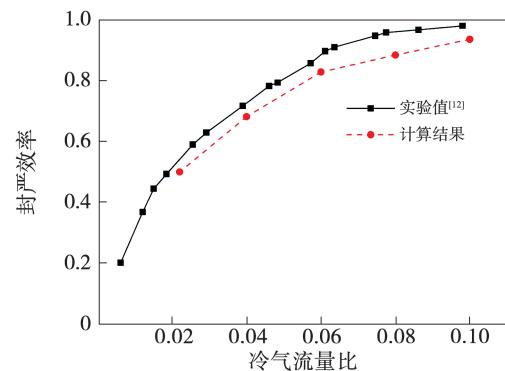


图 5 轴向封严结构的封严效率随冷气流量比变化

Fig. 5 Variation of sealing effectiveness of axial clearance seal with different MFR

2 本征正交分解

针对盘腔泄漏流对主流干涉的瞬态特性, 采用本征正交分解(POD)方法分别对轴向和径向封严间隙的动叶域速度场进行分析和对比。由于盘腔封严流的湍流特性, 封严流的参数呈现出周期性和随机性。为了分析封严流的特征以及封严流对主流道的影响, 在本征正交分解方法的基础上对瞬态流场进行分析。POD 方法可以将非定常流场用加权线性基函数的和来表示, 从而将非线性问题转换为线性问题。根据快照 POD 方法^[9], 流场的轴向速度分量 \mathbf{U} 可表示为:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}^{(1)} \\ \mathbf{U}^{(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{U}^{(K)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1^{(1)} & u_2^{(1)} & \cdots & u_N^{(1)} \\ u_1^{(2)} & u_2^{(2)} & \cdots & u_N^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_1^{(K)} & u_2^{(K)} & \cdots & u_N^{(K)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: u —流场在网格节点上速度的轴向分量; N —流场网格点总数; K —采样样本数。将径向速度分量 \mathbf{V} 和周向速度分量 \mathbf{W} 采用相同方法处理, 可得中间矩阵 \mathbf{P} :

$$\mathbf{P} = \frac{1}{K} (\mathbf{U} \mathbf{U}^T + \mathbf{V} \mathbf{V}^T + \mathbf{W} \mathbf{W}^T) \quad (4)$$

求解矩阵 \mathbf{P} 的特征值 λ_m 和特征向量 β_m , 下标 m 为模态阶数。将 \mathbf{U}, \mathbf{V} 和 \mathbf{W} 投影到特征向量 β_m 上, 并作正交化后得到基函数 $\varphi_m(u), \varphi_m(v), \varphi_m(w)$ 和 POD 的模态矩阵 \mathbf{C} :

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1^{(1)} & c_2^{(1)} & \cdots & c_M^{(1)} \\ c_1^{(2)} & c_2^{(2)} & \cdots & c_M^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_1^{(K)} & c_2^{(K)} & \cdots & c_M^{(K)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: M —模态最高阶数,其值与 K 相同。

由模态矩阵系数可以计算各模态的能量 E_m :

$$E_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (c_m^{(k)})^2 \quad (6)$$

式中: $c_m^{(k)}$ —流场的 m 阶模态对应样本 k 的速度系数,表示模态流场的速度幅值。

1 阶模态表示流场平均能量:

$$E_{ave} = E_1 \quad (7)$$

其他模态表示湍流能量,湍流能量总和为:

$$E_{turb} = \sum_{m=2}^M E_m \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 湍流能量分布

在 $MFR = 0.040$ 时对两种封严结构的主流道速度场进行分解,图 6 为不同采样样本数情况下,轴向盘腔封严间隙的导叶和动叶区域湍流总能量 E_{turb} 与流场平均能量 E_{ave} 之比随叶片旋转周期的变化。

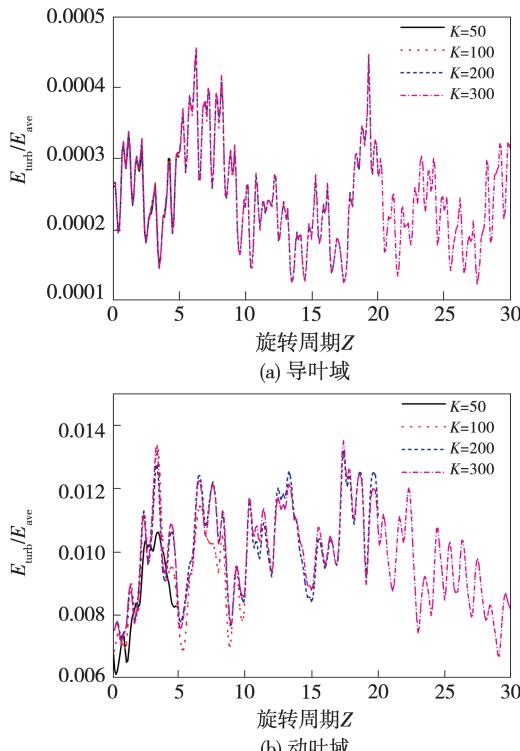


图 6 不同采样样本数的轴向封严湍流能量变化曲线

Fig. 6 Turbulence energy change curves of axial clearance with different sample numbers

从图 6(a) 中可以看出, K 从 50 变化到 300, 导叶域湍流能量随时间变化的曲线基本重合, 这说明 POD 方法可以在较少的采样样本数量下较为准确地识别导叶域流场的湍流能量和平均能量。从图 6(b) 中可以看出, K 不同值得到的动叶域湍流能量随时间的变化较为明显, 只有当 K 从 200 变化到 300 时, 湍流能量的分布才基本吻合。由此可知, 为保证 POD 方法的准确性, 样本选取时, K 应当不小于 200。为保证分解精度, 本文流场的样本数 K 取 300。

图 7 给出了两种封严间隙动叶域的湍流能量随相对叶高的变化。由图 7 可知, 叶轮通道的湍流现象在叶根和叶顶较强, 在叶中较弱。在相对叶高 70% 以下时, 湍流能量上的差异表明封严结构和封严泄漏流对主流影响不同; 在相对叶高 50% 处, 径向封严比轴向封严湍流能量高 19.74%, 相对差值达到最大; 在相对叶高 30% 处, 径向封严比轴向封严湍流能量高 15.93%, 绝对差值达到最大, 说明径向封严结构加强了主流道叶中以下的湍流现象。

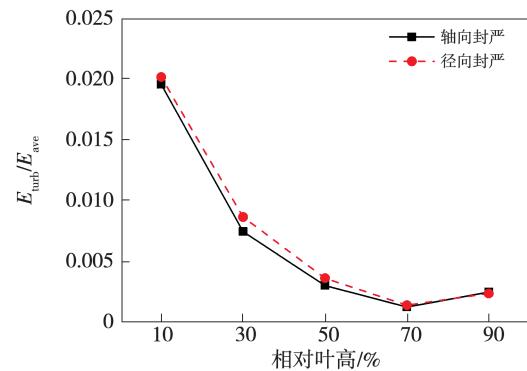


图 7 动叶域湍流能量随相对叶高的分布

Fig. 7 Distribution of turbulent energy with relative blade height in rotor blade domain

图 8 给出了各模态能量在总湍流能量中的占比。图中起始模态为 2 阶模态, 随着模态 m 的增大, 模态能量递减。从图中可以看出, 两种封严间隙的 2,3 阶模态能量占比较高, 为流场的主要湍流结构, 4,5,6 阶模态为流场的次要湍流结构, 两种封严间隙对应的模态能量差异较大。由计算得到的各模态数值与式(8)可算得: 轴向封严间隙 2,3 阶模态的湍流能量之和占总湍流能量的 36.50%, 径向封严间隙 2,3 阶模态的湍流能量之和占总湍流能量的

35.00%; 轴向封严间隙 4,5,6 阶模态的湍流能量之和占总湍流能量的 29.02%, 径向封严间隙 4,5,6 阶模态的湍流能量之和占总湍流能量的 23.47%。其中, 4 阶模态相差最大, 轴向封严比径向封严高 27.89%, 7 阶及以上模态为流场的小尺度湍流结构, 没有明显表现出两种封严间隙的泄漏流对流场干涉的差异。

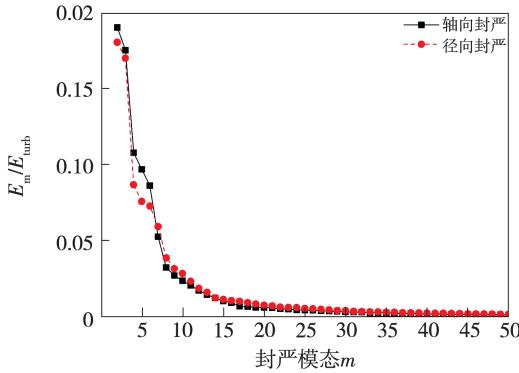


图 8 动叶域模态湍流能量分布

Fig. 8 Distribution of turbulent energy in rotor blade domain with different modes

图 9 为两种封严间隙的前 7 阶模态系数的相关性。由图 9 可知, 轴向封严 2 阶模态与径向封严 2 阶模态强相关, 轴向封严 3 阶模态与径向封严 3 阶模态强相关, 其他模态基本不相关。两种封严间隙模态的强相关性说明 2,3 阶模态是动、静叶干涉的主要流场结构, 具有相同的周期变化规律。

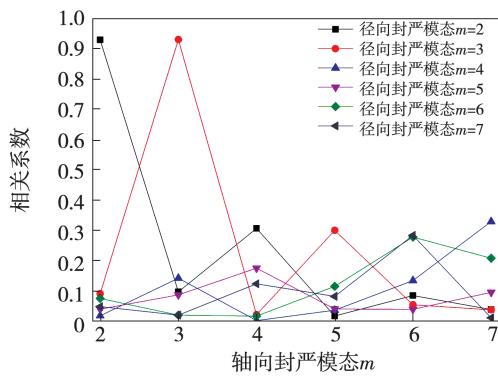


图 9 动叶域模态系数相关性

Fig. 9 Relevance index of different modal coefficients in rotor blade domain

3.2 湍流能量模态频谱特性

图 10 给出了两种封严间隙动叶域 2,3 阶模态的模态系数 $c_m^{(k)}$ 与 1 阶(平均场)模态系数 c_1 之比的

频域分布, 纵坐标是由时域分布进行快速傅里叶变换得到的结果。两种封严间隙 2,3 阶模态系数的主峰在叶片通过频率(1 600 Hz)处, 峰值显著且非常接近, 表现出流场动静干涉的频率特征。轴向封严间隙 2,3 阶模态存在多个副峰, 且副峰峰值远小于主峰峰值。这是由于盘腔内流体的周向速度低于转盘表面的周向速度, 盘腔内流体具有多个小于叶片通过频率的特征频率, 轴向封严间隙的泄漏流影响了轴向封严间隙 2,3 阶模态的特征频率, 而径向封严间隙处流体周向流动较强, 隔绝了盘腔流体滞后对泄漏流的影响, 使得径向封严与轴向封严的动叶域 2,3 阶模态有较大差异。

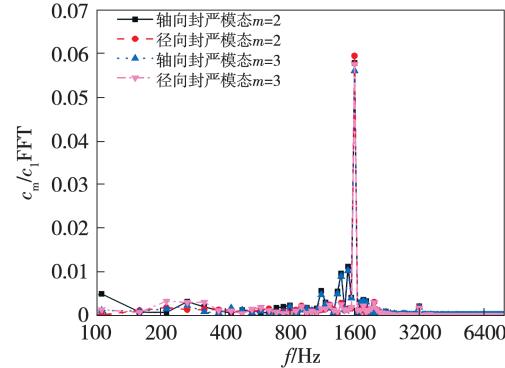


图 10 动叶域 2,3 阶模态系数频域分布

Fig. 10 Frequency domain distribution of 2-and 3-stage modal coefficients in rotor blade domain

图 11 给出了两种封严间隙 4,5,6 阶模态系数的频域分布。

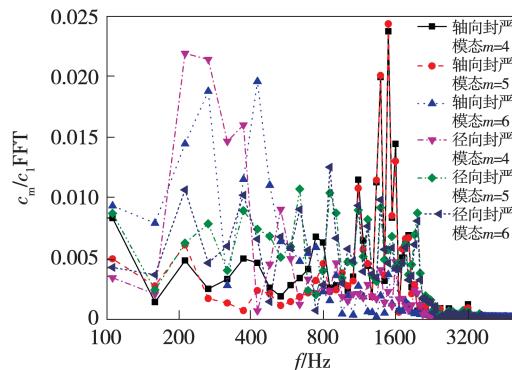


图 11 动叶域 4,5,6 阶模态系数频域分布

Fig. 11 Frequency domain distribution of 4-to 6-stage modal coefficients in rotor blade domain

由图 11 可知, 轴向封严间隙 4,5 阶模态在叶片通过频率附近的各峰频率与其 2,3 阶模态各峰频率

一致,轴向封严间隙的6阶模态峰值对应频率在800 Hz以下,与径向封严间隙的4阶模态相近。径向封严间隙5,6阶模态没有明显的主峰,表现出宽频的特征,两种封严间隙的4,5,6阶模态具有较大的差异,其对应的流场湍流结构见图12和图13。

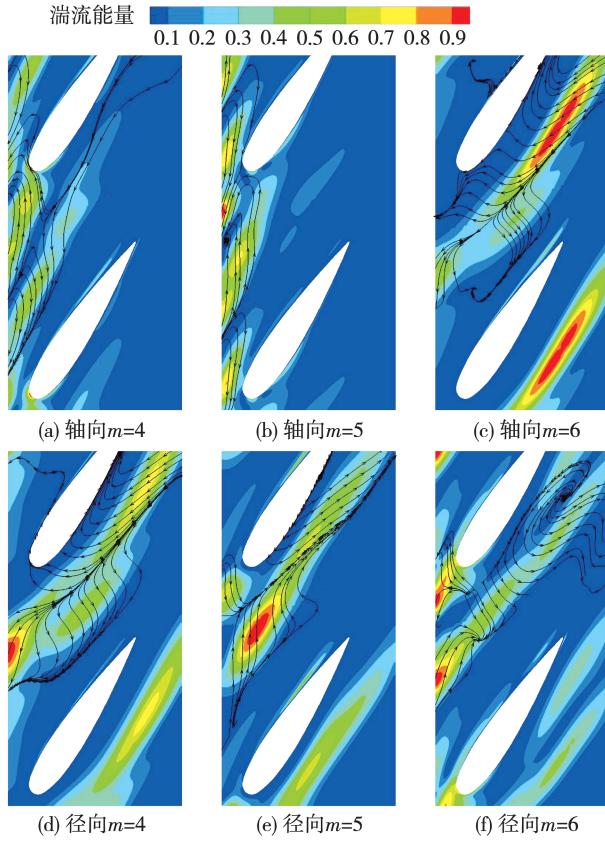


图12 相对叶高50%处的湍流结构

Fig. 12 Turbulent structure at 50% relative blade height

图12是相对叶高50%处两种封严间隙的4,5,6阶模态流场湍流结构。在对称叶型,攻角为零的流场中,两种封严间隙的平均流场,即背景场基本一致。图12中模态的流线由基函数构成,湍流能量为基函数平方的无量纲化结果,其值表示流场湍流能量强弱的空间分布。由图可见,对叶片前缘影响较大的模态为轴向封严间隙的4,5阶模态和径向封严间隙的5,6阶模态,动叶前缘流场的不同对应了图11中两种封严间隙的频率特性差异。湍流分布远离叶片表面的模态为轴向封严间隙的6阶模态和径向封严间隙的4,5,6阶模态,表现出流体速度贴近和远离叶片的变化波动。由图11可见,轴向封严间隙的4阶模态和径向封严间隙的6阶模态表现出较强的低频特性,而两者的湍流结构较为相似,可以看

出封严间隙的改变使得模态序列发生了偏移。

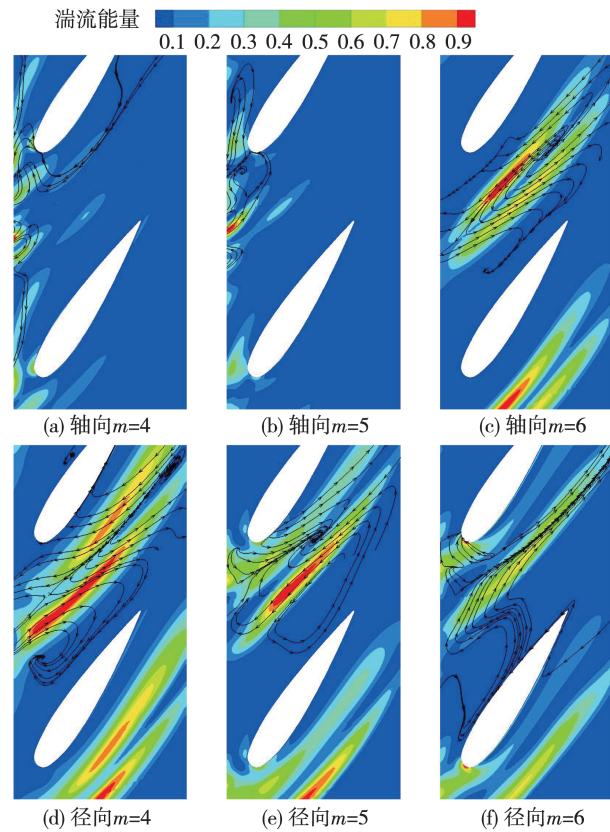


图13 相对叶高30%处的湍流结构

Fig. 13 Turbulent structure at 30% relative blade height

图13是相对叶高30%处两种封严间隙4,5,6阶模态流场湍流结构。该位置离封严间隙更近,封严影响更明显。由图可知,轴向封严间隙的4,5阶模态能量更为集中,表现出封严泄漏流参数变化对间隙附近流场的影响。轴向封严间隙的4阶模态和径向封严间隙的4,5阶模态在相对叶高50%处,湍流能量分布形状为一束能量团;在相对叶高30%处,湍流能量分布形状分裂为两束能量团,涡中心位于能量团间的低能量区域。两种封严间隙的6阶模态表现出流体速度沿叶片弦长方向的变化波动,而不是贴近和远离叶片。

图14给出了封严泄漏流的湍流能量频谱。监测位置在封严间隙内、外侧(见图1(b)),封严间隙通道连接盘腔流体和主流流体。由图可见,轴向封严内、外侧的频率特性基本相同,外侧的峰值始终高于内侧,盘腔内流体与主流流体交互阻碍较小,主流区域包含了部分盘腔流体的流动频率特征(2,3阶模态的各个副峰)。径向封严内、外侧的频率在

400 Hz以下时,频率特性相同,而幅值各有高低;在400~1 600 Hz则没有表现出明显的关联性,径向封严间隙的几何结构阻碍了盘腔流体和主流的交互作用,只表现出流体在封严间隙通道之间的流动特征。

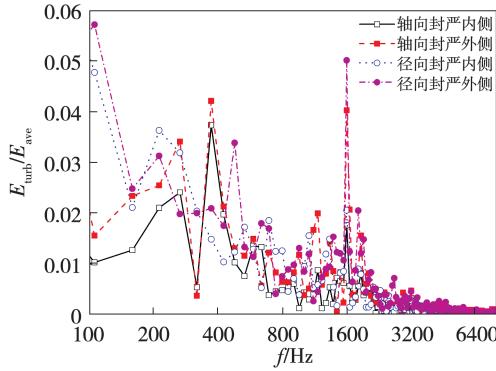


图 14 封严泄露湍流能量频域分布

Fig. 14 Frequency domain distribution of turbulent energy of seal leakage flow

4 结 论

对比轴向封严和径向封严的盘腔封严泄漏流对主流的干涉作用,使用 POD 方法分析主流动叶域的瞬态湍流特征,得到以下结论:

(1) 封严流对主流叶中以下的湍流特征影响较大,在相对叶高 50% 处径向封严比轴向封严湍流能量高 19.74%,相对差值达到最大;在相对叶高 30% 处径向封严比轴向封严湍流能量高 15.93%,绝对差值达到最大。

(2) 两种封严结构的 2,3 阶模态为主要湍流结构,表现出叶轮通道动静干涉;4,5,6 阶模态为次要湍流结构,表现出不同封严间隙对主流的影响差异;7 阶及以上模态为小尺度湍流结构,轴向封严的盘腔流体与主流交互强烈,而径向封严阻碍了两股流体的交互,强化了封严间隙对主流的干扰。

参考文献:

- [1] JOHNSON B V, MACK G J, PAOLILLO R E, et al. Turbine rim seal gas path flow ingestion mechanisms [C]//Indianapolis: 30th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1994, 133 (3): 031005. 1 – 031005. 9.
- [2] OWEN J M. Prediction of ingestion through turbine rim seals - part I: rotationally induced ingress [J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(3): 031005. 1 – 031005. 9.
- [3] TEUBER R, LI Yan-sheng, MALTSON J, et al. Computational ex-

trapolation of turbine sealing effectiveness from test rig to engine conditions [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2013, 227 (2): 167 – 178.

- [4] 吴 康. 燃气轮机高温透平转静轮缘封严与入侵的流动传热机理 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- WU Kang. Research on the flow heat transfer mechanism of sealing and ingestion in high temperature gas turbine rotor-stator rim [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [5] 罗擎阳, 谭晓茗, 张庆才, 等. 跨声速涡轮轮缘复合封严结构的数值研究 [J]. 推进技术, 2021, 42(10): 2257 – 2266.
- LUO Qing-yang, TAN Xiao-ming, ZANG Qing-cai, et al. Numerical investigation on composite rim seal configurations of a transonic turbine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42 (10): 2257 – 2266.
- [6] 陆泽帆. 封严出流特性及其对动叶端区流动和冷却的影响 [D]. 上海: 上海理工大学, 2020.
- LU Ze-fan. Characteristics of purge flow and effects on rotor endwall flow and cooling [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2020.
- [7] 杨 帆, 周 莉, 王占学. 轮缘封严气流与转子干涉损失机理的数值研究 [J]. 推进技术, 2018, 39(11): 2481 – 2489.
- YANG Fan, ZHOU Li, WANG Zhan-xue. Numerical investigation for interaction and loss mechanisms between rim seal flow and rotor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(11): 2481 – 2489.
- [8] 杨 帆, 周 莉, 王占学. 轮缘封严气流与主流干涉的损失机理研究 [J]. 推进技术, 2020, 41(2): 285 – 293.
- YANG Fan, ZHOU Li, WANG Zhan-xue. Investigation on interaction loss mechanism between rim seal flow and mainstream [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41 (2): 285 – 293.
- [9] CHEN H, REUSS D L, HUNG D L S, et al. A practical guide for using proper orthogonal decomposition in engine research [J]. International Journal of Engine Research, 2013, 14(4): 307 – 319.
- [10] 郭广强, 张人会, 陈学炳, 等. 基于 POD 模态分解的液环泵瞬态气液两相流分析 [J]. 工程热物理学报, 2021, 42 (2): 349 – 356.
- GUO Guang-qiang, ZHANG Ren-hui, CHEN Xue-bing, et al. Analysis of transient gas-liquid two-phase flow in liquid-ring pump based on POD modal decomposition [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(2): 349 – 356.
- [11] 赵小存, 雷庆春, 陈 力, 等. 基于高速化学发光测量的超声速燃烧室振荡特性统计学分析 [J]. 固体火箭技术, 2021, 44(3): 297 – 303.
- ZHAO Xiao-cun, LEI Qing-chun, CHEN Li, et al. Statistical analysis on oscillation behavior of flame in a supersonic combustor based on high-speed chemiluminescence measurements [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2021, 44(3): 297 – 303.
- [12] SANGAN C. Measurement of ingress through gas turbine rim seals [D]. Bath: University of Bath, 2011.

(刘 颖 编辑)