

考虑进口预旋的阶梯型迷宫密封转子动力特性

李康迪¹, 周倩倩¹, 徐自力¹, 王鑫², 靳亚峰²
(1. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安;
2. 东方汽轮机有限公司产品研发中心, 618000, 四川德阳)

摘要: 针对阶梯型迷宫密封转子动力特性受进口预旋影响的问题,提出了考虑进口预旋的阶梯型迷宫密封动力特性计算方法。基于 Murphy 小位移涡动原理建立气流激振力-转子位移-转子速度的控制方程;采用计算流体力学(CFD)数值模拟方法对不同预旋比的全环密封流道进行计算,通过频域内求解控制方程得到了刚度和阻尼等动力特性参数,研究了不同预旋比的情况下阶梯型迷宫密封的动力特性;绘制了流道内的压力分布和流速矢量图,研究了阶梯型迷宫密封的流场特性。数值仿真结果表明:随着预旋比的增加,直接刚度在低频部分增大,在高频部分减小,交叉刚度几乎不变,交叉阻尼随预旋增加而减小;气流预旋明显降低了直接阻尼,相较于预旋比 $\lambda=0$ 的情况, $\lambda=0.255$ 及 $\lambda=0.516$ 的工况下直接阻尼的预估值平均减小了16.9%和21.4%;随着节流次数增加,气流经过密封齿的压降逐渐增加,分别为0.25、0.374和0.499 MPa,密封齿顶的流速也逐渐增加,分别为79.5、88.36和106.0 m/s;由于密封齿阶梯式的排列增加了主流道的复杂性,阶梯密封流道分为节流区、射流区和涡流区,涡流区2个转向相反的旋涡增加了流道内气流动能的耗散。

关键词: 阶梯型迷宫密封;进口预旋;动力特性;直接阻尼;交叉刚度

中图分类号: TB42;TH452 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202203012 **文章编号:** 0253-987X(2022)03-0117-07



A Study on Dynamic Characteristics of Step-Shaped Labyrinth Sealing Rotor Considering Inlet Preswirl

LI Kangdi¹, ZHOU Qianqian¹, XU Zili¹, WANG Xin², JIN Yafeng²
(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an JiaoTong University, Xi'an 710049, China; 2. Product Development Center, Dongfang Electric Corporation, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: A method for calculating dynamic characteristics of stepped labyrinth seals with consideration of inlet preswirl is proposed to solve the problem that the dynamic characteristics of stepped labyrinth seals are affected by inlet preswirl. Governing equations of air excitation force-rotor displacement-rotor velocity are established based on Murphy's small displacement vorticity principle. CFD numerical simulation method is used to calculate the flow passage of full-ring seals with different prswirl ratios. Dynamic characteristic parameters such as stiffness and damping are obtained by solving the governing equations in the frequency domain. The dynamic characteristics of stepped labyrinth seals with different preswirl ratios are studied. The flow field characteristics of stepped labyrinth seal are studied by drawing the pressure distribution and velocity vector diagrams in the flow passage. Numerical simulation results show that with the increase of

preswirl ratio, the direct stiffness increases at low frequency and decreases at high frequency, the cross stiffness is almost constant, and the cross damping decreases with the increase of preswirl. Air flow preswirl significantly reduces the direct damping, and the estimated direct damping in preswirl ratio $\lambda = 0.255$ and $\lambda = 0.516$ conditions decreases by 16.9% and 21.4% on average compared with the case of $\lambda = 0$ condition. With the increase of throttling times, the pressure drop of airflow passing through the sealing tooth increases gradually, which are 0.25 MPa, 0.374 MPa and 0.499 MPa, respectively. The velocity of sealing tooth tip also increases gradually, which are 79.5 m/s, 88.36 m/s and 106.0 m/s, respectively. The step arrangement of sealing teeth increases the complexity of the main flow passage, and the step sealing flow passage is divided into throttling region, jet region and eddy region. The eddy region has two vortexes with opposite direction, which increase the dissipation of airflow kinetic energy in the flow passage.

Keywords: step-shaped seal; inlet preswirl; dynamic characteristics; direct damping; cross stiffness

密封是压缩机、汽轮机、液体火箭发动机涡轮泵、航空发动机等旋转机械用于控制工质泄露的关键部件^[1]。转子偏心涡动时,密封动静部件之间的微小间隙形成的压力场会产生作用于转子的气流激振力^[2],影响转子系统的动力特性,致使系统稳定性降低,严重时可能产生大幅低频振动,诱发转子失稳,影响机组的安全性和经济性^[3]。因此,研究密封动力特性对保障转子安全高效运行具有重要意义。

20世纪80年代,Iwatsubo首次提出了理论求解迷宫密封转子动力特性的单控制体方法^[4](Bulk Flow方法),晏鑫等采用Bulk Flow方法研究了孔型密封转子动力特性^[5]。在实验方面,Ertas通过测量作用于静子的静态力和相对静态位移,得到了密封的直接和交叉刚度^[6]。随着计算流体力学(CFD)方法计算效率和精度的提高,以及其能够给出密封内部流场细节等优点,采用CFD方法进行透平机械旋转密封转子动力特性的研究逐渐增多。Rhode等采用CFD方法求解了迷宫密封的转子动力特性系数^[7]。交叉刚度导致转子的涡动轨迹更接近椭圆^[8],Li等提出了转子轴心轨迹为椭圆形的求解模型,椭圆长轴的方向取决于激励的方向^[9]。密封的转子动力特性系数具有很强的频率相关性^[10],需研究其随频率的变化规律,Li等提出了一种转子多频椭圆涡动的动力特性求解模型,能够实现同时对多个涡动频率下密封动力特性系数的求解^[11]。

预旋是影响密封动力特性的重要因素,气流在进入密封时受到高速旋转的转子带动,不仅沿轴向流动,还有一定的周向速度分量。当转子涡动时,转子与密封之间的间隙在全周的分布不再相同,不均匀的圆周间隙使得气流对转子产生周向不平衡的作

用力,继而促使转子做偏心运动,从而加剧了转子运行的不稳定性^[12]。Benckert通过实验研究得到,密封进口处同转动方向的流动,会使密封产生不利于稳定的交叉刚度从而降低转子的稳定性^[13]。近年来国内外学者采用CFD方法针对含预旋密封流场及其动力特性进行了一定的研究^[14-16],Childs采用数值模拟与实验的方法,研究了逆旋栅对直迷宫密封动力特性的影响,结果表明逆旋栅可以有效提高密封稳定性^[17]。孙丹等采用CFD方法研究了反旋流对直迷宫密封动力特性的影响^[18]。陈尧兴等采用CFD数值方法研究了不同预旋比下密封腔室旋流强度、周向压力与转子动力特性的变化规律^[19]。Corral和Vega提出了一种新型密封颤振综合模型,通过构建无因次参数 W_{cyc} ,来描述每个周期中流体对密封做功的正负,其包含了预旋、密封齿间隙、腔体几何形状、密封两端压力比、振动模态等因素对密封稳定性的影响,但仅适用于直迷宫密封^[20-21]。国内外学者的研究主要集中于等间隙的迷宫密封形式,例如直齿密封。已有实验研究结果表明,台阶齿和直齿密封的性能具有区别,例如齿型结构参数相同时,台阶齿相比直齿的泄漏系数有所降低^[22],同时,密封的几何因素如密封齿形和齿间空腔对密封流场也会产生影响^[23]。在燃气轮机、压缩机系统中经常用到阶梯密封结构,但是目前关于进口预旋对阶梯齿型迷宫密封动力特性影响的相关研究还较少。

本文研究了不同预旋比的情况下阶梯型迷宫密封的动力特性。基于Murphy小位移涡动原理建立气流激振力-转子位移-转子速度的控制方程,采用CFD数值模拟方法对不同预旋比的全环密封流道

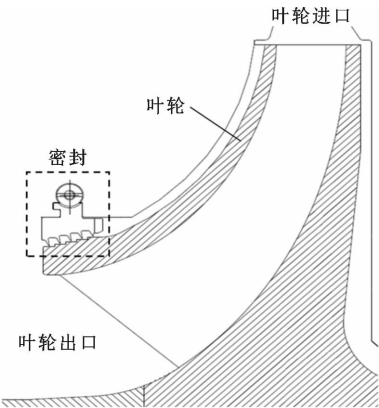
进行计算,通过频域内求解控制方程得到了不同预旋情况的刚度和阻尼等特性参数,通过绘制压力云图、速度矢量图表征了密封内流场特性。研究结果可为阶梯型迷宫密封的动力学设计提供参考。

1 考虑预旋的密封动力特性计算方法

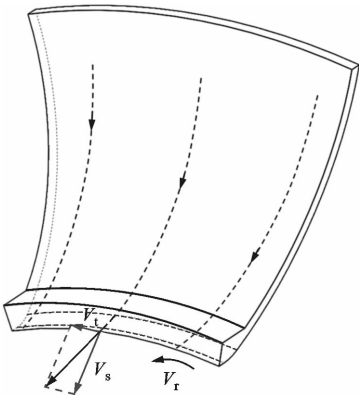
在压缩机中,气体经过叶轮后压力上升,压力差促使气流在叶轮和静子的间隙中回流泄漏,通过密封结构可以减少工质的回流泄漏,提升压缩机效率。在叶轮口位置处,常采用如图 1a 所示的阶梯型迷宫密封。

气流沿径向流入间隙,在到达密封前经历弯曲的流道而转为轴向流动。由于转子壁面对气流的黏性拖动,气体存在一定的周向速度分量,产生密封进口预旋如图 1b 所示。预旋对密封动力特性具有显著影响^[13],定义进口处气流的周向速度分量 V_t 与进口处转子运行线速度 V_r 之比为预旋比

$$\lambda = \frac{V_t}{V_r} = \frac{60V_t}{n\pi D} \tag{1}$$



(a)阶梯型迷宫密封



(b)密封的进口预旋

图 1 阶梯型迷宫密封和进口预旋

式中: n 为转子转速; D 为进口位置转子直径。

与传统直密封相比,阶梯密封的每个密封腔底面距轴心的距离不再相同,图 2 给出了阶梯型密封的截面示意图,在转子运行时,每个密封腔内底面的转子运动线速度也不相同。

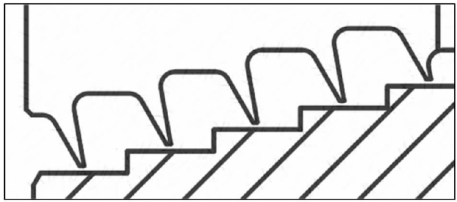


图 2 阶梯型密封截面示意图

Fig. 2 A cross section of step-shaped labyrinth seal

对于阶梯密封,要考虑各密封腔的底面位置不同带来的转子表面运动速度差异。在转子发生涡动时,转子表面上某点的运动速度 V_i 等于涡动速度 V_o 与转子表面旋转线速度的矢量和。

$$V_i = V_o + \frac{n}{60}\pi D_i a_i \tag{2}$$

式中: D_i 为不同阶梯位置对应的转子直径; a_i 为对应的单位切向量。

在密封-转子的整体结构中,当转子涡动时,根据 Murphy 小位移涡动原理^[24]可得,密封气流激振力与转子位移及速度之间的控制方程为

$$-\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中: F_x 、 F_y 分别为 x 、 y 方向的气流激振力; X 、 Y 为转子涡动位移; $\dot{X}$ 、 $\dot{Y}$ 为转子涡动速度; K_{xx} 、 K_{yy} 为直接刚度; K_{xy} 、 K_{yx} 为交叉刚度; C_{xx} 、 C_{yy} 为直接阻尼; C_{xy} 、 C_{yx} 为交叉阻尼。

通过给定转子位移 X 、 Y ,采用 CFX 软件进行三维非定常 CFD 求解,得到气流激振力 F_x 、 F_y 。

密封气流激振力是在时域内的多频波动信号,其频率成分与涡动位移、涡动速度相同。为了解各涡动频率下转子的动力特性系数,采用快速傅里叶变换(FFT),将位移、速度以及激振力等时域信号转化为频域信号,得到频域内激振力与位移的关系式为

$$-\Psi_{yy} = (K_{yy} + j\Omega C_{yy})D_{yy} + (K_{yx} + j\Omega C_{yx})D_{yx} \tag{4}$$

$$-\Psi_{yx} = (K_{xx} + j\Omega C_{xx})D_{yx} + (K_{xy} + j\Omega C_{xy})D_{yy} \tag{5}$$

$$-\Psi_{xx} = (K_{xx} + j\Omega C_{xx})D_{xx} + (K_{xy} + j\Omega C_{xy})D_{xy} \tag{6}$$

$$-\Psi_{xy} = (K_{yy} + j\Omega C_{yy})D_{xy} + (K_{yx} + j\Omega C_{yx})D_{xx} \tag{7}$$

式中: $j = \sqrt{-1}$; $\Omega = 2\pi f$ 为涡动角速度, f 为涡动频

Fig. 1 Step-shaped labyrinth seal and inlet pre-swirl

率; Ψ_{ij} 和 D_{ij} 分别为气流激振力和涡动位移的频域信号。

令 $H_{ij} = K_{xx} + j\Omega C_{xx}$ 为密封的阻抗特性系数, 通过方程组式(4)~(7)联立求解, 得到 4 个待求未知量 H_{ij} 的值。根据实部和虚部的对应关系, 可以得到密封刚度特性参数 K_{ij} 和阻尼特性参数 C_{ij}

$$\left. \begin{aligned} K_{ij} &= \operatorname{Re}(H_{ij}) \\ C_{ij} &= \operatorname{Im}(H_{ij})/\Omega \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

实际计算时, 给出的转子位移 X 、 Y 必须能合理地描述多种因素共同影响下的转子运动。本研究采用多频椭圆涡动模型^[25], 认为转子的涡动由 N 种不同频率 f_i 的椭圆涡动共同叠加而成, 转子在多频涡动下的轴心运动方程为

$$X = a \sum_{i=1}^N \cos(\Omega_i t), \quad Y = b \sum_{i=1}^N \sin(\Omega_i t) \quad (9)$$

按照多频椭圆涡动假设, 转子轴心的运行轨迹将是各单一椭圆轨迹的叠加, 选取 $N=10$, $a=1.5 \mu\text{m}$, $b=3 \mu\text{m}$, 各涡动频率 f_i 以 20 Hz 为间隔, 依次取 20、40 直至 200 Hz。长轴为 y 方向的转子涡动轴心轨迹如图 3 所示。

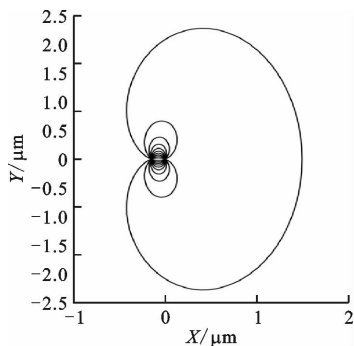


图3 转子涡动轴心轨迹

Fig. 3 Trajectory of rotor axial center under whirling motion

2 密封的结构参数

计算对象为某离心式管线压缩机第一级叶轮口处的阶梯型迷宫密封, 其结构如图 2 所示。阶梯密封总长度为 33 mm, 密封齿数为 5 个, 腔室深度为 5 mm, 腔室长度为 6 mm, 进口处密封齿顶与轴心的距离为 208 mm, 每隔一个阶梯齿, 齿顶距轴心的距离减小 1.5 mm。

流体工质为天然气, 工质温度为 21.5°C , 在密封进口处总压为 9.13 MPa, 出口静压为 7.39 MPa, 转子的工作转速为 6 000 r/min。在本研究中, 计算了 λ 为 0、0.255、0.516 等工况。

由于进口气流的预旋, 气流具有周向速度, 需要

考虑气体在各扇区之间流动, 因此计算时采用全环模型。建立了密封流道的全环模型, 并进行了非结构化网格的划分。对密封腔采用 O 型结合 C 型子块, 为提高求解精度, 射流区以及近壁面区域采用加密的网格, 在节流间隙处布置 20 个节点, 密封全环模型几何结构及网格划分如图 4 所示, 总网格数为 966.4 万。

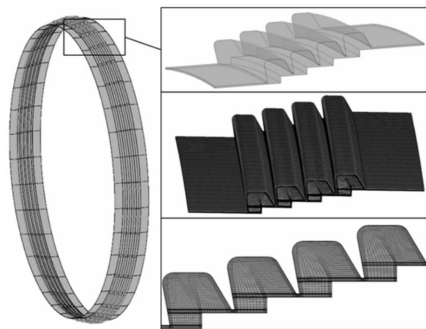


图4 密封全环模型几何结构及网格划分

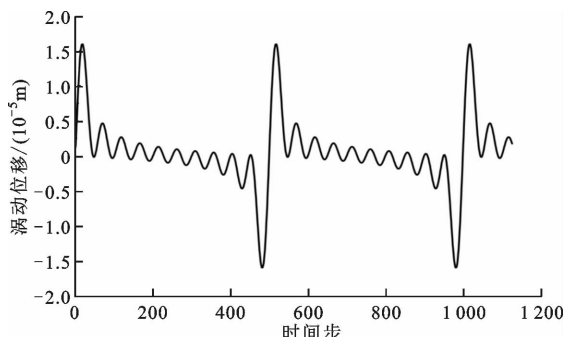
Fig. 4 Whole ring model and meshing of the seal

3 动力特性计算结果及分析

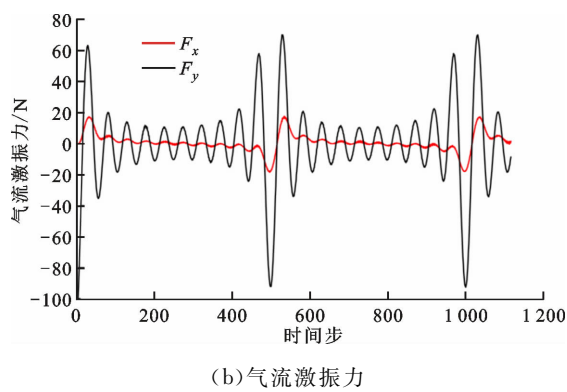
针对密封腔的全环模型, 采用定常计算收敛的结果作为非定常计算的初场进行瞬态计算, 对转子施加多频椭圆涡动位移激励, 如图 5a 所示。进口指定总压和总温, 出口指定静压边界条件, 固体壁面采用绝热无滑移边界条件, 时间步长取为 10^{-4} s。以 λ 为 0.516 工况为例, 通过 CFD 方法计算得到的气流激振力响应如图 5b 所示。

由图 5 可以看出, 多频椭圆涡动激励下, 转子面的 Y 向涡动位移由多个频率叠加而成; 受转子面涡动的影响, 气流激振力呈现明显的周期性变化的特征。在幅值方面, 涡动位移的变化引起的 Y 方向气流激振力较大, X 方向气流激振力较小。

通过 CFD 方法计算得到气流激振力的时域响应后, 通过密封动力特性的求解方法, 对转子位移和气流激振力进行时频域变换, 求解频域方程组, 得到



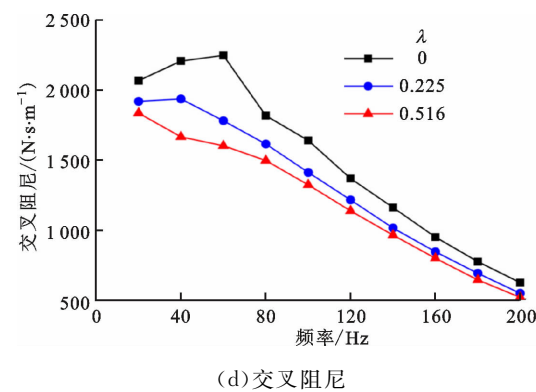
(a) 涡动位移



(b)气流激振力

图 5 转子涡动位移和气流激振力时域曲线

Fig. 5 Time-domain curves of rotor displacement and airflow induced force



(d)交叉阻尼

图 6 各涡动频率下转子密封动力特性系数

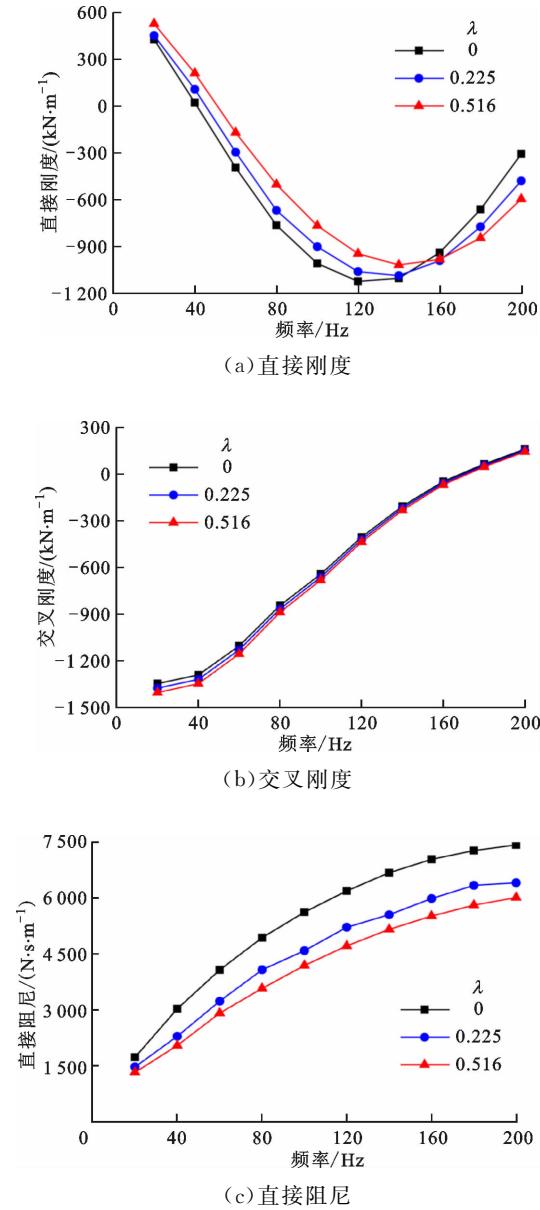
Fig. 6 Dynamic characteristic coefficients of rotor at each vortex frequency

各涡动频率下转子密封动力特性系数如图 6 所示。
从图 6 可以看出,直接刚度随涡动频率先减小

后增大,考虑预旋后,直接刚度在低频部分增大,高频部分减小;交叉刚度随涡动频率增加而增大;直接阻尼随涡动频率增加而增大,考虑预旋后直接阻尼减小;交叉阻尼随涡动频率整体呈现减小的趋势,考虑预旋后,交叉阻尼减小。

对于密封-转子系统,主要考虑交叉刚度和直接阻尼。交叉刚度是促使转子做非同步低频涡动的激振力来源,增大时转子稳定性降低,从图 6b 可以看出,进口预旋对交叉刚度影响不大。直接阻尼是低频涡动现象的抑制力,越大越有利于系统稳定,从图 6c 可以看出,预旋比为 0.255 时,直接阻尼相较于无预旋时平均减小 16.9%,预旋比为 0.516 时,直接阻尼平均减小 21.4%。可见,气流预旋明显降低了直接阻尼,对转子安全运行存在威胁。

通过密封流场压力及流速的分布,可以分析密封的流场特性。图 7~9 分别是预旋比为 0.516 工况时阶梯密封流道截面上的压力分布、流线及速度矢量图。



(a)直接刚度

(b)交叉刚度

(c)直接阻尼

图 7 密封流道截面压力分布

Fig. 7 Pressure distribution on the section of seal flow passage

由图 7 可以看出,阶梯密封流道中气体压力逐级递减,气流经过 3 个密封齿的压降分别为 0.25、0.374 和 0.499 MPa,压降逐级增大。随节流次数的增加,气体流速增加,气流在 3 个密封齿顶的流速

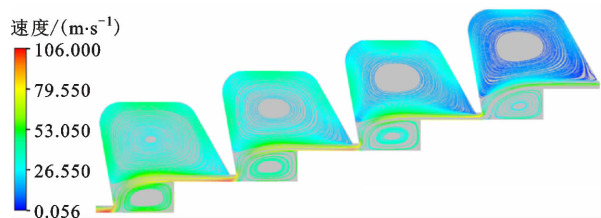


图8 密封流道截面流线

Fig. 8 Streamlines on the section of seal flow passage

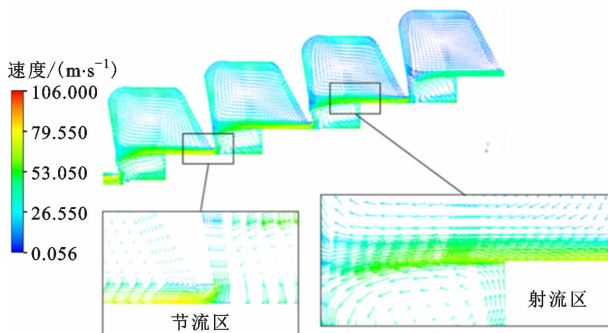


图9 密封流道截面速度矢量图

Fig. 9 Velocity vectors on the section of seal flow passage

分别为 79.5、88.36 和 106.0 m/s,射流区内流速明显高于涡流区;射流区的流体在冲击密封腔壁面后发生分离,在密封腔内形成一大一小两个涡团;两个涡团流动方向相反,大涡团沿顺时针方向流动,导致气体回转,小涡团沿逆时针方向流动,并在密封齿的顶部再次分流,一部分进入下一个密封腔,一部分则回转汇入小涡团中。

与直密封相比,阶梯密封由于密封齿阶梯式的排列,增加了主流道的复杂性,密封腔内的射流因冲击壁面向两边扩散,形成了气流旋涡,气流动能由于旋涡作用转化为热量,增加了流道内动能的耗散,使得密封效果更好。

4 结 论

建立了考虑进口预旋的阶梯型迷宫密封动力特性计算方法。计算了某阶梯型迷宫密封在不同预旋比工况的密封动力特性系数,数值仿真得到以下结论。

(1)随预旋比的增加,直接刚度在低频部分增大,在高频部分减小,交叉刚度几乎不变,直接阻尼和交叉阻尼均随预旋比增加而减小。

(2)预旋比为 0.255 时,直接阻尼相较于无预旋时平均减小了 16.9%,预旋比为 0.516 时,直接阻尼平均减小了 21.4%,气流预旋明显降低了直接阻尼,对转子安全运行存在威胁。

(3) λ 为 0.516 时,气流经过 3 个密封齿的压降逐渐增加,分别为 0.25、0.374 和 0.499 MPa,随着节流次数增加,密封齿顶的流速也逐渐增加,分别为 79.5、88.36 和 106.0 m/s。

(4)由于密封齿阶梯式的排列增加了主流道的复杂性,阶梯密封的流道内存在节流区、射流区和涡流区;涡流区一大一小两个旋涡的存在,增加了流道内气流动能的耗散。

参考文献:

- [1] DENTON J D. The 1993 IGTI scholar lecture: loss mechanisms in turbomachines [J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115(4): 621-656.
- [2] 荆建平, 孟光, 赵玫, 等. 超超临界汽轮机汽流激振研究现状与展望 [J]. 汽轮机技术, 2004, 46(6): 405-407.
- JING Jianping, MENG Guang, ZHAO Mei, et al. Survey and outlook on the research o of the steam excitation of superior ultra-critical steam turbine [J]. Turbine Technology, 2004, 46(6): 405-407.
- [3] 曹树谦, 陈予恕. 现代密封转子动力学研究综述 [J]. 工程力学, 2009, 26(S2): 68-79.
- CAO Shuqian, CHEN Yushu. A review of modern rotor/seal dynamics [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S2): 68-79.
- [4] IWATSUBO T. Evaluation of instability forces of labyrinth seals in turbines or compressors [EB/OL]. [2021-09-10]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19800021214>.
- [5] 晏鑫, 李军, 丰镇平. Bulk Flow 方法分析孔型密封转子动力特性的有效性 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 24-28.
- YAN Xin, LI Jun, FENG Zhenping. Validation of two-control-volume Bulk Flow method for rotordynamic characteristics of hole-pattern seals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(1): 24-28.
- [6] ERTAS B H. Rotordynamic force coefficients of pocket damper seals [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(4): 725-737.
- [7] RHODE D L, HENSEL S J, GUIDRY M J. Labyrinth seal rotordynamic forces using a three-dimensional Navier-Stokes code [J]. Journal of Tribology, 1992, 114(4): 683-689.
- [8] VANCE J M, ZEIDAN F Y, MURPHY B G. Machinery vibration and rotordynamics [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010: 113-126.
- [9] LI Zhigang, LI Jun, YAN Xin. Multiple frequencies

- elliptical whirling orbit model and transient RANS solution approach to rotordynamic coefficients of annular gas seals prediction [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2013, 135(3): 031005.
- [10] 李志刚, 李军, 丰镇平. 袋型阻尼密封转子动力特性的多频单向涡动预测模型 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(5): 13-18.
- LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Multiple frequencies one-dimensional prediction model of rotordynamic characteristics for pocket damper seals [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(5): 13-18.
- [11] LI Jun, LI Zhigang, FENG Zhenping. Investigations on the rotordynamic coefficients of pocket damper seals using the multifrequency, one-dimensional, whirling orbit model and RANS solutions [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012, 134(10): 102510.
- [12] ALFORD J S. Protecting turbomachinery from self-excited rotor whirl [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1965, 87(4): 333-343.
- [13] BENCKERT H, WACHTER J. Flow induced spring coefficients of labyrinth seals for application in rotor dynamics [EB/OL]. [2021-09-10]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19800021216>.
- [14] IWATSUBO T, ISHIMARU H. Consideration of whirl frequency ratio and effective damping coefficient of seal [J]. *Journal of System Design and Dynamics*, 2010, 4(1): 177-188.
- [15] NAYAK K C, DUTTA P. Numerical investigations for leakage and windage heating in straight-through labyrinth seals [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(1): 012507.
- [16] LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Comparisons of rotordynamic characteristics predictions for annular gas seals using the transient computational fluid dynamic method based on different single-frequency and multi-frequency rotor whirling models [J]. *Journal of Tribology*, 2016, 138(1): 011701.
- [17] CHILDS D W, MCLEAN J E Jr, ZHANG Min, et al. Rotordynamic performance of a negative-swirl brake for a tooth-on-stator labyrinth seal [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(6): 062505.
- [18] 孙丹, 王双, 艾延廷, 等. 反旋流对密封静力与动力特性影响的理论与试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(3): 101-109.
- SUN Dan, WANG Shuang, AI Yanting, et al. Theoretical and experimental research on the performance of anti-swirl flow for the static and dynamic characteristics of seals [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(3): 101-109.
- [19] 陈尧兴, 李志刚, 晏鑫, 等. 迷宫齿蘑菇形磨损时密封泄漏特性和转子动力特性系数研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(1): 40-46.
- CHEN Yaoxing, LI Zhigang, YAN Xin, et al. Investigation on the leakage performance and rotordynamic coefficients of labyrinth seal with mushroom-shaped tooth wear [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(1): 40-46.
- [20] CORRAL R, VEGA A. Conceptual flutter analysis of labyrinth seals using analytical models: part I theoretical support [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(12): 121006.
- [21] VEGA A, CORRAL R. Conceptual flutter analysis of labyrinth seals using analytical models: part II physical interpretation [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(12): 121007.
- [22] 纪国剑, 吉洪湖, 王政伟. 转静态台阶篦齿封严结构泄漏特性的数值研究 [J]. *润滑与密封*, 2011, 36(4): 73-76.
- JI Guojian, JI Honghu, WANG Zhengwei. Numerical investigation of sealing characteristics of step labyrinth seals at rotational and static states [J]. *Lubrication Engineering*, 2011, 36(4): 73-76.
- [23] 丁学俊, 肖国俊, 杨彦磊, 等. 迷宫密封齿型对密封流场与泄漏量的影响 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(7): 9-10.
- DING Xuejun, XIAO Guojun, YANG Yanlei, et al. Influence of labyrinth seal teeth shape on sealed flow field and leakage [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2006, 34(7): 9-10.
- [24] MURPHY B T, VANCE J M. Labyrinth seal effects on rotor whirl stability [C]// *Proceedings of the Second International Conference on Vibrations in Rotating Machinery*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1980: 1-4.
- [25] 孙丹, 王旭东, 李胜远, 等. 透平机械动密封动力特性数值方法研究 [J]. *推进技术*, 2018, 39(8): 1829-1840.
- SUN Dan, WANG Xudong, LI Shengyuan, et al. Numerical method study on rotordynamic characteristics of turbine machinery dynamic seals [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(8): 1829-1840.

(编辑 武红江)