文章编号:1000-8055(2024)07-20220479-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220479

# 反旋流对梳齿密封动力特性影响机理及有效性

张乃丹<sup>1</sup>,张万福<sup>1</sup>,周庆辉<sup>1</sup>,顾乾磊<sup>2</sup>,李 春<sup>1</sup>
(1.上海理工大学能源与动力工程学院,上海 200093;
2.东南大学能源与环境学院,南京 210096)

**摘** 要:对比分析了不同预旋比下反旋流装置对梳齿密封各腔室内压力、周向流速、周向旋流增长率 及动力特性系数,对反旋流梳齿密封的有效性进行定量分析与判别。研究表明:反旋流装置对密封周向流动 有较强的抑制作用,且对各腔室压力有不同影响,其中对C3~C6腔室压力作用效果较明显;引入周向旋流增 长率衡量反旋流装置作用效果,添加反旋流装置后,密封周向旋流增长率沿泄漏方向降低至C8腔室,在C9 腔室处略有回升,无反旋流密封基本保持不变。添加反旋流喷嘴使C3~C6腔室直接阻尼增大,且各腔室交 叉刚度均减小,各腔室有效阻尼提高,总有效阻尼增大稳定性增强。预旋比使C1~C2腔室的直接阻尼有显 著变化。添加反旋流喷嘴后,腔室交叉刚度在高预旋比下减小更多,有效阻尼受预旋影响较小,反旋流对进 口正预旋有较好抑制作用。

关键 词:反旋流;梳齿密封;周向旋流;动力特性;计算流体力学
 中图分类号: V219; TK263
 文献标志码: A

# Influence of shunt injection on dynamic characteristics of labyrinth seals and its effectiveness analysis

ZHANG Naidan<sup>1</sup>, ZHANG Wanfu<sup>1</sup>, ZHOU Qinghui<sup>1</sup>, GU Qianlei<sup>2</sup>, LI Chun<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The influences of adding or not adding the shunt injection with different preswirl ratios on the pressure, the circumferential flow velocity, the growth rate of the circumferential swirling flow and rotordynamic characteristics coefficients in each seal cavity were compared and analyzed. The effectiveness of the shunt injection was quantitatively analyzed and evaluated. Studies showed that the shunt injection device had a strong inhibitory effect on the circumferential flow of the seal, and also a different influence on the pressure in each cavity, with a more obvious influence on the pressure in C3—C6. The growth rate of the circumferential swirling flow was introduced to measure the effect of the shunt injection. With the addition of shunt injection, the circumferential swirling flow growth rate for labyrinth seal was reduced along the direction of leakage to C8, and slightly rebounded at C9. The labyrinth seal without shunt injection remained largely unchanged. The shunt injection increased the direct damping of C3—C6, decreased the cross-coupled stiffness of each cavity, thus improving the effect damping of C1—C2. The shunt injection made the cross-coupled stiffness of each cavity decrease more at the high preswirl

收稿日期:2022-07-04

基金项目:国家自然科学基金(51875361);上海市自然科学基金(20ZR1439200)

作者简介:张乃丹(1999-),女,硕士生,研究方向为透平机械密封动力学。

引用格式:张乃丹,张万福,周庆辉,等. 反旋流对梳齿密封动力特性影响机理及有效性[J]. 航空动力学报, 2024, 39(7): 20220479. ZHANG Naidan, ZHANG Wanfu, ZHOU Qinghui, et al. Influence of shunt injection on dynamic characteristics of labyrinth seals and its effectiveness analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(7): 20220479.

ratio. The effect damping was less affected by the preswirl ratio, thus the shunt injection had a better suppression effect on inlet the positive preswirl ratio.

**Keywords:** shunt injection; labyrinth seal; circumferential swirling flow; rotordynamic characteristics; computational fluid dynamics

梳齿密封广泛应用于航空发动机、汽轮机、 压缩机等透平机械,以减小泄漏并提升机组运行 效率。然而大量研究表明迷宫密封由于其特殊的 环形腔室结构,易产生螺旋形流动效应<sup>[1]</sup>,导致密 封腔室内产生流体激振,进而导致系统失稳<sup>[2]</sup>。

几何参数和运行工况对梳齿密封动力稳定性 影响较大, Scharrer<sup>[3]</sup> 通过实验证实不同结构迷宫 密封泄漏量有差异, 其中扩散型密封泄漏较大, 但稳定性较好。节流需要的密封间隙大小及节流 尺寸也会对密封性能造成影响<sup>[4]</sup>。偏心率的增大 会降低有效阻尼从而影响密封系统的稳定性<sup>[5]</sup>。 同时,进口预旋是影响梳齿密封转子动力学系数 的重要因素<sup>[6]</sup>。梳齿密封由于其周向结构上的贯 通性, 会使工作流体在进入密封件之前产生圆周 速度分量。Kirk 等<sup>[7]</sup>将第1齿之前的上游区域中 平均流体圆周速度除以轴同步表面速度定义为预 旋比, 预旋比是决定密封稳定性能的关键因素。 因此, 减小密封腔室内周向流动可以有效减小转 子上的激振力, 从而提升转子运行性能<sup>[8]</sup>。

为了提高转子稳定性,减小进气预旋对密封 周向流动的影响,国内外许多学者进行了相关研 究。Muszynsk等<sup>[9]</sup>提出两种反预旋方案,其中一 种是在密封入口安装阻旋栅<sup>[10]</sup>,研究表明阻旋栅 提升密封稳定性的机理是减小梳齿密封进口流体 圆周速度<sup>[11]</sup>。此外,一些研究指出阻旋栅可以显 著减小交叉刚度并增大有效阻尼。因此,阻旋栅 具有一定的增稳作用,但当密封预旋比增大时, 采用阻旋栅对密封系统稳定提升有限<sup>[11-13]</sup>。

另一种是在梳齿密封入口处设置反旋流装置 (shunt injection)<sup>[14-15]</sup>。20世纪 80年代 Muszynska 等<sup>[15]</sup>首次指出反旋流提升迷宫密封动力稳定性。 Soto 和 Childs<sup>[16]</sup>通过实验发现梳齿密封采用反旋 流注射时其有效阻尼系数可显著增大。沈庆根等<sup>[17]</sup> 系统的研究阐述了反旋流对梳齿密封静力特性的 影响。Kim 等<sup>[18]</sup>提出了反旋流可以解决密封腔 室内的流体激振。何立东<sup>[19]</sup>指出反旋流抑制转 子振动的机理,且反旋流流量和流速大小与转子 的特性有密切关系。孙丹等<sup>[20]</sup>通过实验操作得 到反旋流可减小密封间隙流体的切向速度,从而 抑制密封气流激振力。然而,反旋流强度对密封 腔周向流动的影响规律尚不清晰,且关于反旋流 喷嘴在不同工况下对迷宫密封泄漏特性和动力稳 定性的有效性影响研究鲜见报道。

本文应用多频涡动理论和计算流体力学方法 计算反旋流喷嘴对梳齿密封各腔室压力、周向旋 流强度、动力特性系数的影响规律,得出反旋流 对梳齿密封各腔室稳定性影响范围。

## 1 数值计算模型及方法

## 1.1 动力学模型

在密封系统中,转子以小位移进行涡动。 1993年 Childs<sup>[21]</sup>提出,转子受到气流力*F<sub>x</sub>、F<sub>y</sub>*与 涡动速度*X、Y*及涡动位移*X、Y*关系为

$$-\begin{bmatrix}F_{x}\\F_{y}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}K_{xx} & K_{xy}\\K_{yx} & K_{yy}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}X\\Y\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}C_{xx} & C_{xy}\\C_{yx} & C_{yy}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\dot{X}\\\dot{Y}\end{bmatrix}$$
(1)

式中 $K_{ij}(i, j = x, y)$ 为直接刚度与交叉刚度系数;  $C_{ij}(i, j = x, y)$ 为直接阻尼与交叉阻尼系数。

时域信号经过快速傅里叶变换(FFT)后,转 换为频域形式:

$$-F_x = (K_{xx} + j\Omega C_{xx}) D_x + (K_{xy} + j\Omega C_{xy}) D_y \quad (2)$$

 $-F_{y} = (K_{yy} + j\Omega C_{yy})D_{y} + (K_{yx} + j\Omega C_{yx})D_{x} \quad (3)$ 

式中 $j = \sqrt{-1}$ ,  $\Omega$  为涡动频率,  $D_x$ 、 $D_y$  分别为添加 激励后 x、y 方向转子和静子间相对位移。

图 1 为转子涡动示意图。假设转子自转速度 为 ω,转子中心为 O<sub>r</sub>,涡动中心为 O<sub>s</sub>,运动轨迹为 椭圆。

长轴在 x 轴、y 轴上时分别进行转子涡动, 可 表示为

$$\begin{cases} X = a \sum_{i=1}^{N} \cos \left( \Omega_{i} t \right) \\ Y = b \sum_{i=1}^{N} \sin \left( \Omega_{i} t \right) \end{cases}$$
(4)



#### (b) y方向激励

#### 图 1 转子椭圆涡动示意图

Fig. 1 Rotor whirling orbit schematic

$$\begin{cases} X = b \sum_{i=1}^{N} \cos\left(\Omega_{i}t\right) \\ Y = a \sum_{i=1}^{N} \sin\left(\Omega_{i}t\right) \end{cases}$$
(5)

式中 *a* 为椭圆形涡动轨迹的长半轴, *b* 为短半轴。 对 *x*、*y* 两个方向下的激励进行求解, 可得

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

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

$$-F_{yy} = (K_{yy} + j\Omega C_{yy}) D_{yy} + (K_{yx} + j\Omega C_{yx}) D_{yx} \quad (8)$$

$$-F_{yx} = (K_{xx} + j\Omega C_{xx}) D_{yx} + (K_{xy} + j\Omega C_{xy}) D_{yy}$$
(9)

通过模拟计算得到激振力 *F<sub>ij</sub>* 和转子涡动位 移 *D<sub>ij</sub>*(*i*表示激励方向,*j*表示流体激振力或转子 涡动位移方向)。代入式(6)~式(9),可得密封 动力特性系数。

在动力特性系数中,有效阻尼 C<sub>eff</sub> 是衡量密 封系统稳定性的重要参数:<sup>[17]</sup>

$$C_{\rm eff} = C(\Omega) - \frac{k(\Omega)}{\Omega}$$
(10)

其中  $C(\Omega)$ 、 $k(\Omega)$ 为涡动频率  $\Omega$ 下的直接阻尼与 交叉刚度。

#### 1.2 几何模型

图 2(a)为密封局部模型,周向包括 16 个反旋 流喷嘴,将第 2 个密封齿去掉,替换为反旋流方形 孔。反旋流孔的边长分别为 s,反旋流喷嘴倾斜 角度为 30°。反旋流-梳齿密封系统二维几何结构 如图 2(b),其中 C1-2 为原腔室 C1 和 C2,在去掉 第 2 个齿后合并为 C1-2 腔。表 1 给出了反旋流 梳齿密封具体几何尺寸。



图 2 反旋流梳齿密封几何模型

Fig. 2 Geometry model of the shunt injection labyrinth seal

#### 表1 反旋流梳齿密封几何尺寸

#### Table 1 Dimensions of the shunt injection labyrinth seal

mm

参数	数值
转子直径 d	60
密封间隙 Cr	0.15
密封腔室底部宽度 w1	3.8
密封齿尖宽度 w2	0.25
密封腔底部弧形半径 R	1.25
腔室深度 h	3.3
反旋流孔边长 s	3.0

### 1.3 边界条件

本文研究了添加反旋流喷嘴(SI)和未添加反旋流喷嘴(无 SI)2种结构、4种进口预旋比(*λ*=0,

0.3, 0.45, 0.6, 0.8)下反旋流梳齿密封的动力特性。 应用计算流体力学软件 ANSYS CFX, 构造多频椭 圆涡动模型进行动网格计算, 得到密封系统内流 场及腔室压力分布、系统动力特性系数和周向旋 流强度。其中预旋比定义为

$$\lambda = \frac{60v_{\rm c}}{d\pi} \tag{11}$$

其中v<sub>c</sub>为密封进口处气体周向流速。

为保证模拟可靠性,模拟时各方程均方根残 差需小于10°,且在动态模拟中,气流力变化为周 期性,泄漏量无明显波动。本文采用理想气体在 湍流强度为5%的工况进行模拟计算。表2为反 旋流梳齿密封计算工况参数,固体表面设置为绝 热无滑移壁面。时间步长为0.0001 s。

表 2 计算工况参数

Table 2	Calculation	condition	paramet	ters

计算工况	参数设置
湍流模型	标准 k- <i>ε</i>
进口温度 T <sub>in</sub> /K	298
进口压力 p <sub>in</sub> /MPa	0.5
出口压力 p <sub>out</sub> /MPa	0.1
反旋流喷嘴压力 psi/MPa	0.5
转子转速 ω/(r/min)	6 000
涡动频率 $\Omega_i/Hz$	20, 40,, 260, 280
涡动幅值/mm	<i>a</i> =0.001, <i>b</i> =0.000 5

#### 1.4 可靠性验证

用 Gambit 建立反旋流梳齿密封三维结构化 网格模型, 网格布置如图 3 所示。对反旋流喷嘴、 密封齿及密封间隙处网格进行加密, y<sup>+</sup>值在 20~200范围内。分别采用 148 万、248 万、368 万、 428 万网格进行网格无关性验证, 比较密封内平 均气流力和泄漏量的相对误差, 计算结果如表 3 所示。综合考虑计算精度及计算资源, 本文采用





表 3 网格无关性验证

 Table 3
 Grid-independent verification

网格数/10 <sup>4</sup>	气流力相对误差 平均值/%	泄漏量 相对误差/%
148	1.31	0.153
248	0.31	0.118
368	0.21	0.047
428	0	0

248万网格。

图 4 为相同密封尺寸下,模拟计算(CFD)与 实验结果<sup>[22]</sup>对比,图中 $K_{avg} = (K_{xx} + K_{yy})/2, C_{avg} = (C_{xx} + C_{yy})/2。各动力特性系数变化趋势基本相同。多频椭圆涡动模型模拟结果与实验值较为吻合,其中高频下的有效阻尼尤为显著。$ 







## 2 结果与讨论

## 2.1 反旋流梳齿密封流动特性分析

图 5 为密封间隙处沿密封轴向的周向分布。 进口预旋和梳齿密封的贯通式结构是影响密封周 向流速的重要因素,反旋流喷嘴在第1个腔室处 提供1个与预旋方向及转子转动方向相反的气流 力。因此,密封的周向速度在添加反旋流喷嘴所 在的腔室处急剧变化,而反旋流喷嘴对周向速度 所带来的影响在几个腔室后逐渐减弱。为研究反 旋流喷嘴对密封周向流动抑制效果,取周向速度 变化较大腔室内的沿径向方向的周向速度进行分 析,对在不同预旋比下的抑制效果,并进行讨论。

沿转动方向的周向流动会导致密封稳定性降低,因此逆转动方向的速度能提高密封系统稳定





性。图 6 给出了腔室 C1-2 中心截面处的速度场 及压力场。加入反旋流喷嘴后 C1-2 腔室产生逆 转子转动方向速度场,这是由于反旋流喷嘴带有 一定的倾斜角度,且方向与转子转动方向相反, 喷嘴压力抵消了转子和预旋产生的周向流动,进 而速度矢量方向发生变化。在反旋流喷嘴的作用 下,腔室 C1-2 中流体方向发生改变,产生局部逆 转动方向速度场,转子转动及进口正预旋对密封 腔内流体的影响减弱且被抵消。



图 6 腔室 C1-2 的周向压力和速度场 Fig. 6 Circumferential pressure and velocity fields of chamber C1-2

对比图 7 中有无反旋流喷嘴的密封子午面周 向速度云图可以看出:无反旋流梳齿密封后各腔 室内周向速度分布均匀,添加反旋流喷嘴的腔室 产生一个较大的周向速度区,各腔室内产生较为 明显周向速度梯度,且后级腔室速度接近于 0 m/s。





压力幅值及压差的变化对密封间隙流场分布 有较大影响。图 8 为不同预旋比下反旋流梳齿密 封与不添加反旋流喷嘴梳齿密封各腔室周向压力。 在不同预旋比下,各密封腔室内压力沿周向角度 成正弦趋势。且在高预旋比下,周向压力明显减 小。图 8(a)为腔室 C3 处的周向压力,在添加反 旋流喷嘴后,周向压力明显升高,这是由于反旋 流喷嘴处所加的压力与进口压力共同作用于腔室, 相比于梳齿结构,反旋流梳齿密封腔室压力增大。 由图 8 可知,随着腔室位置的变化压力减小,且相 比于梳齿密封,添加反旋流喷嘴的密封压力幅值 随腔室变化较为明显。随着腔室位置远离进口段, 压力幅值变化逐渐减弱,反旋流对密封作用效果 逐渐减小。在同一密封结构下,高预旋比下的压 力幅值较低。在同一预旋比下,反旋流密封的压 力幅值较低。在同一预旋比下,反旋流密封的压 力幅值较低。在同一腔室中,随着预旋比的增加, 反旋流喷嘴对预旋有一定的抑制效果。 添加反旋流喷嘴后的密封在不同腔室中,均会产 生滞后于梳齿密封的角度,这是由于反旋流喷嘴







的压力造成的。

图 9 是不同结构下压差变化趋势。添加反旋 流喷嘴后,密封各腔室压差有明显升高,这是由 于反旋流喷嘴处所加的喷嘴进口压力影响了整个 密封各个腔室内压力变化。由图可知,反旋流密 封各个腔室的压差变化率较大,且喷嘴对其所在 腔室的后 4 个腔室的作用较明显。





#### 2.2 反旋流梳齿密封周向旋流增长率

周向旋流强度可以反映某处切向方向流体速 度大小。密封系统稳定性与周向旋流强度关系密 切<sup>[20]</sup>。其中周向旋流强度表达式为

$$\phi_x = \frac{60v_x}{\mathrm{d}\pi\omega} \tag{12}$$

其中 v<sub>x</sub> 为流体在该点处的周向速度。

在分析周向旋流强度的基础上,为探究周向 旋流强度作用效果及作用范围,分析相邻腔室间 周向旋流强度变化规律,引入相邻密封腔室周向 旋流增长率,定义为

$$S_{i+1} = \frac{\overline{\phi}_{i+1} - \overline{\phi}_i}{\overline{\phi}_i} \tag{13}$$

式中i为腔室序号, $\overline{\phi}$ 为整个密封腔室内的平均周向旋流强度。

图 10 为梳齿密封在是否添加反旋流装置及 不同预旋比下不同腔室的周向旋流增长率。在添 加反旋流后 C4 的周向旋流增长率由负变正,且 高预旋比下周向旋流增长率变大。沿流动方向, 密封腔室周向旋流增长率逐渐下降且趋于平稳, 在 C8 处略有回升。反旋流喷嘴的添加大幅抵消 了进口正预旋对周向速度的影响,且反旋流喷嘴 的影响效果可以作用于其后 6 个腔室。



Fig. 10 Circumferential swirling flow growth rate

#### 2.3 反旋流梳齿密封动力特性分析

图 11 为不同密封腔室内直接阻尼随涡动频 率变化。直接阻尼反映了系统阻尼对低频涡动的 抑制作用。不同结构、不同工况下,直接阻尼变 化不明显。添加反旋流喷嘴后,梳齿密封直接阻 尼在不同腔室中均大于无反旋流梳齿密封。预旋 比对 C1-2 腔室的直接阻尼影响较大,腔室 C9 直 接阻尼随工况和结构改变变化较小,这是由于反 旋流喷嘴的作用抵消了预旋的作用,且在末端腔 室处,反旋流喷嘴作用减弱。





图 12 为总直接阻尼, 在反旋流的作用下, 密 封总体的直接阻尼明显提高。且在高频、高预旋 下直接阻尼较大。

交叉刚度的变化是影响系统稳定性的主要原因,周向速度直接影响交叉刚度的变化,密封系统稳定性受到影响。图13为不同密封腔室内交叉刚度系数。靠近进口段腔室交叉刚度随进口预







Fig. 13 Cross-coupled stiffness in different seal cavity

旋变化剧烈,而后级腔室交叉刚度的频率依赖性 较小。在高预旋比下,梳齿密封交叉刚度明显增 大,这是由于高预旋会加强流体周向流动,影响 密封稳定。添加反旋流密封在不同工况下的交叉 刚度明显减小,反旋流喷嘴对提升腔室稳定性有 显著作用。在反旋流喷嘴所在的腔室 C1-2 中,交 叉刚度随预旋比的作用产生明显波动,腔室内流 场较为混乱。在反旋流喷嘴作用下,高预旋比可 以降低后级腔室交叉刚度,提升腔室稳定性。反 旋流对高预旋比下密封系统交叉刚度作用效果较 为明显。

图 14 为密封总交叉刚度。密封整体交叉刚 度在反旋流作用下明显减小,这对提升密封整体 稳定性大有裨益。添加反旋流喷嘴在高预旋比下, 交叉刚度略有减小。



图 15 给出了不同密封腔室内有效阻尼系数。 在各个腔室中,预旋对腔室稳定性均有一定的影响。其中添加反旋流喷嘴后腔室 C1-2 的有效阻 尼明显增加,且在低预旋比时,有效阻尼增大。 随着腔室变化,有反旋流喷嘴腔室有效阻尼增加





图 15 不同密封腔室内有效阻尼 Fig. 15 Effective damping in different seal cavity

的越少,反旋流喷嘴作用效果减弱。随着腔室远 离入口段,预旋对有效阻尼的影响减小,曲线分 离度减小。且由于反旋流喷嘴的作用,腔室 C9 的有效阻尼在预旋作用下变化较小。

在反旋流作用下,密封整体有效阻尼有显著 的提高,稳定性也大幅度提升,如图 16 所示。梳 齿密封在高预旋比下的有效阻尼变小,且在低频 下较明显。添加反旋流喷嘴后,预旋对密封整体 有效阻尼的影响明显降低,有利于减轻预旋对密 封稳定性的影响。



# 3 结 论

本文研究了在不同预旋比下梳齿密封和添加 反旋流喷嘴的梳齿密封流体流动特性及系统动力 特性。并通过数值比较,分析得到反旋流对梳齿 密封影响范围,研究反旋流喷嘴对梳齿密封各腔 室内流体激振抑制作用。得到结论:

 1)反旋流装置对密封周向流动有较强的抑 制作用,且对各腔室压力有不同影响。

2)沿流动方向,密封腔室周向旋流增长率逐 渐下降且趋于平稳。反旋流喷嘴大幅抵消了进口 正预旋对周向速度的影响,且反旋流喷嘴的影响 效果可以作用于其后6个腔室。

3)反旋流喷嘴会使 C1-2 腔室有效阻尼显著 增大,使得后级腔室的交叉刚度减小,有利于密 封整体的稳定性。预旋比的增大使梳齿密封的稳 定性降低,反旋流喷嘴的作用可以减小预旋对密 封的影响,且使有效阻尼显著增加。

# 参考文献:

- ROSENBERG C. Investigating aerodynamics transverse force in labyrinth seals in cases involving totor eccentricity[J]. Translated from Energy Mashinostrojohic, 1974, 8(27): 15-17.
- [2] 刘卫华,林丽,朱高涛.迷宫密封机理的研究现状及其展望
  [J].流体机械, 2007, 35(2): 35-39.
  LIU Weihua, LIN Li, ZHU Gaotao. Current situation of the research and development of the mechanism of labyrinth seal[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(2): 35-39. (in Chinese)
- [3] SCHARRER J K. Rotordynamic coefficients for stepped labyrinth gas seals[J]. Journal of Tribology, 1989, 111(1): 101-107.
- [4] 高光藩,张牢牢.迷宫密封性能影响因素分析[J].风机技术, 1997, 39(6): 17-21.
   GAO Guangfan, ZHANG Laolao. Analysis to the affecting factors for labyrinth seal performance[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 1997, 39(6): 17-21. (in Chinese)
- [5] 秦鹏博,张万福,曹浩,等.偏心迷宫密封动静特性研究[J]. 摩擦学学报,2020,40(6):735-745.

QIN Pengbo, ZHANG Wanfu, CAO Hao, et al. Static and dynamic characteristics of eccentric labyrinth seals[J]. Tribology, 2020, 40(6): 735-745. (in Chinese)

- [6] 顾乾磊,张万福,潘渤,等.预旋对迷宫密封动静特性影响研究[J].热能动力工程,2020,35(6):37-44.
  GU Qianlei, ZHANG Wanfu, PAN Bo, et al. Effect of pre-swirl on static and dynamic characteristics of labyrinth seals[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(6): 37-44. (in Chinese)
- [7] KIRK G, GAO Rui. Influence of preswirl on rotordynamic characteristics of labyrinth seals[J]. Tribology Transactions, 2012, 55(3): 357-364.
- [8] WANG Qingfeng, HE Lidong. Effects of four types of pre-swirls on the leakage, flow field, and fluid-induced force of the rotary straight-through labyrinth gas seal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 1-15.
- [9] MUSZYNSKA A, FRANKLIN W D, BENTLY D E. Rotor active "anti-swirl" control[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1988, 110(2): 143-150.
- [10] CHILDS D W, MCLEAN J E, 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.
- [11] 孙丹, 王双, 艾延廷, 等. 阻旋栅对密封静力与动力特性影响的数值分析与实验研究[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3002-3011.
  SUN Dan, WANG Shuang, AI Yanting, et al. Numerical and experimental research on performance of swirl brakes for the static and dynamic characteristics of seals[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 3002-3011. (in Chinese)
  [12] 吴可欣, 张万福, 曹浩, 等. 阻旋栅对梳齿密封动静特性影
- 响研究[J].摩擦学学报, 2020, 40(5): 647-655. WU Kexin, ZHANG Wanfu, CAO Hao, et al. Effects of swirl brakes on static and rotordynamic performance of labyrinth seals[J]. Tribology, 2020, 40(5): 647-655. (in Chinese)
- [13] BENCKERT H, WACHTER J. Flow induced spring coefficients of labyrinth seals for application in rotor dynamics[C]//Proceedings of Workshop on Rotordynamic Instability Problems in High-Performance Turbomachinery. Houston, USA: NASA, 1980:190-212.
- [14] LI Jiming, CHOUDHURY P D, KUSHNER F. Evaluation of cen-

trifugal compressor stability margin and investigation of antiswirl mechanism[C]//Proceedings of the Thirty-Second Turbomachinery Symposium. College Station, Texas, USA: Texas A & M University System, 2003: 49-57.

- [15] MUSZYNSKA A, BENTLY D E. Anti-swirl arrangements prevent rotor/seal instability[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1989, 111(2): 156-162.
- [16] SOTO E A, CHILDS D W. Experimental rotordynamic coefficient results for (a) a labyrinth seal with and without shunt injection and (b) a honeycomb seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999, 121(1): 153-159.
- [17] 沈庆根,李烈荣,潘永密.迷宫密封中的气流激振及其反旋流措施[J].流体机械, 1994, 22(7): 7-12.
  SHEN Qinggen, LI Lierong, PAN Yongmi. Air flow excitation in labyrinth seal and its anti-swirl measures[J]. Fluid Machinery, 1994, 22(7): 7-12. (in Chinese)
- [18] KIM N, PARK S Y, RHODE D L. Predicted effects of shunt injection on the rotordynamics of gas labyrinth seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(1): 167-174.
- [19] 何立东.转子密封系统反旋流抑振的数值模拟[J].航空动力学报, 1999, 14(3): 293-296.
  HE Lidong. Numerical simulation of anti-swirl arrangements for suppressing rotor/seal instability[J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(3): 293-296. (in Chinese)
- [20] 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. (in Chinese)

- [21] CHILDS D. Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling, and analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [22] 张万福,王应飞,张晓斌,等.基于阻抗法的密封动力特性 系数实验识别[J].航空学报,2022,43(1):424719. ZHANG Wanfu, WANG Yingfei, ZHANG Xiaobin, et al. Experimental identification for rotordynamic coefficients of labyrinth seal based on impedance method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(1): 424719. (in Chinese)

(编辑:陈 越)