文章编号：1000-8055(2024)06-20220460-12 doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220460

齿形结构对迷宫密封泄漏与动力特性影响

叶强生[1]，张万福[1,2]，周庆辉[1]，李 春[1,2]

（1. 上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093；
2. 上海理工大学 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室，上海 200093）

摘 要： 建立齿在静子上迷宫密封(TOS LS)、齿在转子上迷宫密封(TOR LS)与交错式迷宫密封(ILS)三维数值分析模型，并采用多频椭圆涡动轨迹模型与计算流体力学方法阐明四种齿形角(θ=0°, 15°, 30°, 45°)对三种迷宫密封泄漏与动力特性的影响。结果表明：在转子转速 15 000 r/min 与进口压力 6.9×10^5 Pa 的运行工况下，ILS 具有最小的泄漏量，但是若采用过小的齿形角(θ=0°, 15°)易引发转子失稳；TOR LS 具有最差的封严性能；TOS LS 具有最好的系统稳定性。在齿形角从 0°增加至 45°时：TOS LS、TOR LS 与 ILS 的泄漏量分别降低 5.6%、5.1% 与 16.8%；中间腔室负气流切向力的绝对值分别增加 60.2%、133.9% 与 470.3%；整个密封段的有效阻尼分别增加 44.9%～61.9%、30.7%～53.6% 与 90.4%～445.3%，系统稳定性均得到显著加强。

关 键 词： 迷宫密封；计算流体力学；泄漏量；动力特性；齿形角

中图分类号： V232.9；TK263 **文献标志码：** A

Effect of tooth profile on the leakage and dynamic characteristics of labyrinth seals

YE Qiangsheng[1], ZHANG Wanfu[1,2], ZHOU Qinghui[1], LI Chun[1,2]

(1. School of Energy and Power Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The three-dimensional numerical analysis models of teeth-on-stator labyrinth seal (TOS LS), teeth-on-rotor labyrinth seal (TOR LS) and interlocking labyrinth seal (ILS) were established. The effects of four tooth profile angles (θ=0°, 15°, 30°, 45°) on the leakage and dynamic characteristics of three labyrinth seals were investigated by applying multi-frequency elliptical whirling orbit model and computational fluid dynamics method. Under the operating conditions of 15 000 r/min rotational speed and 6.9×10^5 Pa inlet pressure, although ILS leaked the least, it was easy to cause rotor instability if the tooth profile angle was too small (θ=0°, 15°); TOR LS had the worst sealing performance, while TOS LS had the best system stability. As the tooth profile angle increased from 0° to 45°: the leakage flow rate of TOS LS, TOR LS and ILS decreased by 5.6%, 5.1% and 16.8%; the absolute value of negative flow-induced tangential force for the middle cavity increased by 60.2%, 133.9% and 470.3%; the effective damping of the whole seal section increased by 44.9%—61.9%, 30.7%—53.6% and 90.4%—445.3%, respectively, indicating the system stability was significantly enhanced.

收稿日期： 2022-06-26

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： 叶强生(1998—)，男，硕士生，研究方向为透平机械密封动力学。

通信作者： 张万福 (1986—)，男，副教授，博士，研究方向为透平机械流体激振及旋转机械故障诊断。E-mail: wfzhang@usst.edu.cn

引用格式： 叶强生，张万福，周庆辉，等. 齿形结构对迷宫密封泄漏与动力特性影响[J]. 航空动力学报, 2024, 39(6): 20220460. YE Qiangsheng, ZHANG Wanfu, ZHOU Qinghui, et al. Effect of tooth profile on the leakage and dynamic characteristics of labyrinth seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(6): 20220460.

Keywords: labyrinth seal；computational fluid dynamics；leakage flow rate；dynamic characteristics；tooth profile angle

环形密封广泛应用于汽轮机、燃气轮机、航空发动机、泵与风机等各类透平机械中，通过抑制工质从高压区至低压区的泄漏以实现机组运行效率的提高[1]。然而在实际运行中，密封间隙内的不均匀分布工质同时会产生作用于转子表面的激振力，引起转子失稳进而严重影响转子系统的安全运行[2-3]。因此，如何降低密封泄漏损失与提高系统稳定性已成为当前透平机械领域的研究重点[4-6]。

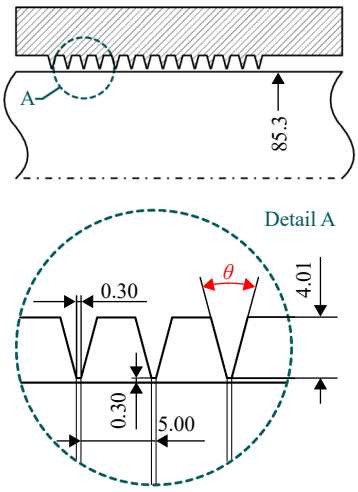
作为一种最常见的非接触环形密封，迷宫密封是由在静子或者转子上连续排列的环形密封齿所组成，具有结构简单、使用寿命长与维护方便等优点。根据流动通道形状的不同，可分为直通式迷宫密封（straight-through labyrinth seal, STLS）、交错式迷宫密封（ILS）与阶梯式迷宫密封（stepped labyrinth seal, SLS）等结构型式，其中 STLS 还可依据齿安装位置细分为齿在静子上迷宫密封（TOS LS）与齿在转子上迷宫密封（TOR LS）[7]。已有大量文献表明[8-12]，迷宫密封的泄漏与动力特性受其结构型式与运行工况的影响较大。Childs 与 Scharrer[13] 发现 TOS LS 与 TOR LS 的刚度与阻尼系数均随着进口压力的增加而增加，并指出在相同的进口预旋下，TOS LS 表现出更为良好的系统稳定性。Childs 等[14] 实验测量 TOS LS 与 ILS 的泄漏量与动力特性系数，发现 ILS 的泄漏量虽然显著低于 TOS LS（约为 60%），但是其直接刚度约为 TOS LS 的两倍，直接阻尼只有 TOS LS 的一半，且 ILS 的动力特性系数具有频率相关性。Wang 等[15] 采用单控制体整体流动模型[16] 研究 TOS LS 动力特性系数的影响因素，阐明进口预旋会降低有效阻尼并增加穿越频率，是转子系统失稳的关键原因。

同时，环形齿的几何形状也是决定迷宫密封泄漏与动力特性的主要因素之一[17-19]。Mehta 与 Childs[20] 发现相比于传统的直齿迷宫密封，前倾式斜齿迷宫密封（轴向倾角为 65°）具有更小的泄漏量（在所有运行工况下）与更大的直接阻尼（在高进口预旋下），可能是离心式压缩机中更为理想的选择。林丽等[21] 发现梯形齿形角的增大会引起 TOR LS 泄漏量的降低，并指出梯形齿形角与进出口压比均会影响密封的泄漏系数。Zhang 等[22] 提出一种加装侧齿结构的混合式迷宫密封，发现密封腔室内涡流的动能耗散效应得到显著增强，并出现更多的流动分离与扰动，泄漏量因此降低约 30%，还给出侧齿高度与间隙的最佳设计参数。Jia 等[23] 设计一种 T 形齿迷宫密封，发现该特殊结构能显著增强齿尖间隙处流场的 Lomakin 效应[24]，使得密封腔室内的周向压力分布得到改善，从而增大有效阻尼并提高转子系统的稳定性。此外在实际运行中，机组启动、停机与热重启等操作会引起动静部件之间发生碰磨，导致齿形弯曲或者蘑菇状磨损而偏离其原始结构设计，同样会影响迷宫密封泄漏与动力特性[25-26]。

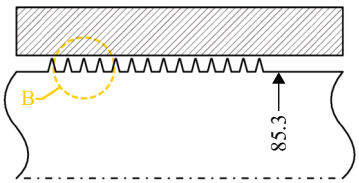
目前，TOS LS、TOR LS 与 ILS 仍是较为广泛应用的迷宫密封型式，且其齿形大多以等腰梯形为主。为了量化分析不同等腰梯形齿的形状对三种迷宫密封泄漏与动力特性的影响，本文应用计算流体力学方法与多频椭圆涡动轨迹模型[27] 研究齿形角对密封综合性能的影响规律与机理。

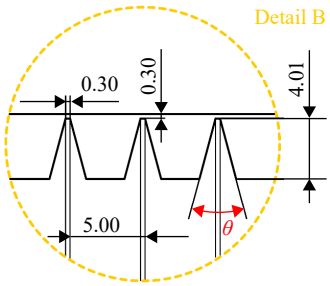
1 几何模型

本文基于 Ertas 等[28] 迷宫密封实验模型作为研究对象，保持密封其余几何参数（密封间隙、齿尖宽度、齿高及齿数等）不变，仅改变齿形角与结构型式，以研究齿形结构对三种迷宫密封泄漏与动力特性的影响规律，如图 1 所示。当齿形角最小时（θ=0°），密封齿的横截面呈现为矩形。随着齿形角的增加，齿根宽度增加，腔底宽度相应减小。表 1 列出了三种迷宫密封具体几何参数。

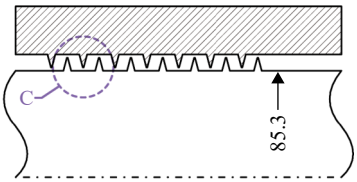


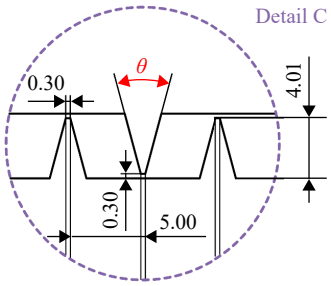
(a) TOS-LS





(b) TOR-LS





(c) ILS

图 1　三种迷宫密封几何结构(单位: mm)

Fig. 1　Geometries of three labyrinth seals (unit: mm)

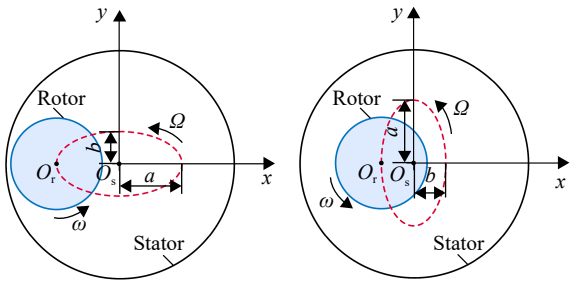
表 1　几何尺寸

Table 1　Geometry dimensions

参数	数值
密封长度 L/mm	65.02
转子半径 R/mm	85.3
密封间隙 C_r/mm	0.3
齿尖宽度 s/mm	0.3
齿高 h/mm	4.01
齿距 l/mm	5
齿形角 θ/(°)	0, 15, 30, 45
齿数 N_t	14

2　密封动力特性系数识别方法

本文采用多频椭圆涡动轨迹模型以求解迷宫密封的动力特性系数。图 2 为 x 方向激振与 y 方向激振的椭圆涡动轨迹模型示意图，其中 O_s 为静子中心；O_r 为转子中心；ω 与 Ω 分别为转子转速与涡动速度。



(a) x方向激振　　(b) y方向激振

图 2　椭圆涡动轨迹模型示意图

Fig. 2　Schematic of the elliptical whirling orbit model

x 方向激振的转子涡动位移表示为

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

y 方向激振的转子涡动位移表示为

$$X = b\sum_{i=1}^{N}\cos(\Omega_i t),\qquad Y = a\sum_{i=1}^{N}\sin(\Omega_i t) \tag{2}$$

式中 a、b 代表椭圆轨迹的长轴与短轴，且 a=0.1C_r/N(N 为涡动频率个数，N=13)，b=0.5a。涡动速度 Ω_i=2πf_i(i 为涡动频率的累计叠加个数，i=1, 2,⋯, 12, 13)，f_1=20 Hz 为基频。基于转子小位移涡动理论[2]，流体激振力(F_x、F_y)、转子涡动位移(X、Y)与转子涡动速度($\dot{X}$、$\dot{Y}$)之间的关系：

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

式中 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。

采用快速傅里叶变换可将时域信号转换为频域信号，则式(3)转变为

$$-\begin{bmatrix}F_{xx}&F_{yx}\\F_{xy}&F_{yy}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{xx}&H_{xy}\\H_{yx}&H_{yy}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}D_{xx}&D_{yx}\\D_{xy}&D_{yy}\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 H_{mn}=K_{mn}+jΩC_{mn} 为阻抗系数；D_{mn} 为转子与静子之间相对位移的频域分量；下标 m 代表激振方向；下标 n 代表激振力方向。

将数值求解后的 F_{mn} 与 D_{mn} 代入至式(4)，得到刚度与阻尼系数：

$$\begin{bmatrix}K_{xx}&K_{xy}\\K_{yx}&K_{yy}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathrm{Re}(H_{xx})&\mathrm{Re}(H_{xy})\\\mathrm{Re}(H_{yx})&\mathrm{Re}(H_{yy})\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{Im}(H_{xx})/\Omega & \mathrm{Im}(H_{xy})/\Omega \\ \mathrm{Im}(H_{yx})/\Omega & \mathrm{Im}(H_{yy})/\Omega \end{bmatrix} \tag{6}$$

3 数值方法

3.1 边界条件

应用 ANSYS-CFX 求解三维雷诺时均方程。当质量、动量与湍流方程均方根残差小于 10^{-6} 及进出口流量差小于 0.1% 时，可认为稳态计算收敛，并将稳态结果作为瞬态计算的初始流场。然后采用多频椭圆涡动轨迹模型与动网格技术求解迷宫密封的动力特性系数，若相同方向的转子激振力呈现周期性波动，且不同周期对应点转子激振力的误差小于 0.1% 时，则可认为瞬态计算收敛。

表 2 列出了三种迷宫密封的具体运行工况参数。工质选用空气并将标准 k-ε（湍流强度为 5%）作为湍流模型，转子与静子壁面属性设置为绝热光滑壁面。进口总压为 6.9×10^5 Pa，进口总温为 287 K，出口静压为 10^5 Pa，转子转速为 15 000 r/min。

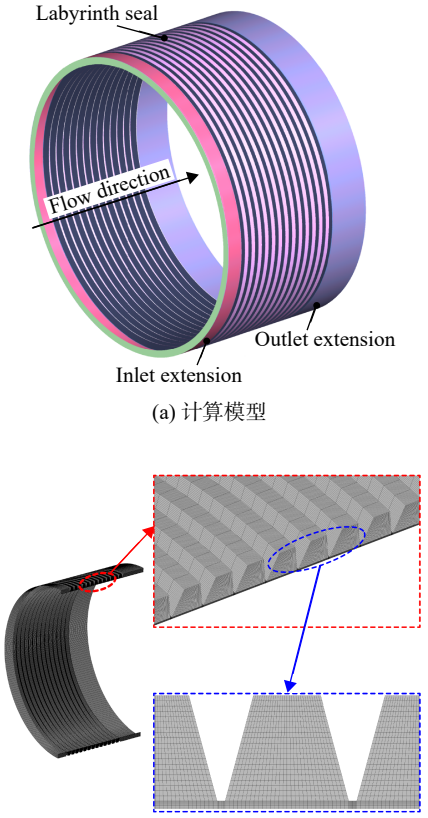
表 2 运行工况

Table 2 Operating conditions

参数	设置
工质	空气（理想气体）
湍流模型	标准 k-ε
壁面属性	绝热、光滑
进口温度 T/K	287
进口压力 $p_{in}/10^5$ Pa	6.9
出口压力 $p_{out}/10^5$ Pa	1
转速 $\omega/10^3$(r/min)	15
涡动频率 Ω_i/Hz	20, 40,⋯, 240, 260

3.2 网格划分

图 3 为 TOS LS 计算模型及其结构化网格分布，对密封间隙及周向网格进行加密处理，y^+值控制在 30～300 之间。为消除网格密度变化对计算结果的影响，以齿形角 θ=30°的 TOS LS 为例进行网格无关性验证，比较四种不同网格密度（219 万、337 万、451 万与 568 万）下的泄漏量，如图 4 所示。当网格密度从 451 万增加至 568 万后，两者稳态与瞬态泄漏量相对误差分别为−0.14% 与−0.13%。对 TOR LS 与 ILS 计算模型采用相同的网格节点布置并进行网格无关性验证，最终确定三种迷宫密封计算模型的网格数均为 451 万。



(a) 计算模型

(b) 网格分布

图 3 TOS LS 计算模型及其网格分布

Fig. 3 Computational model and grid distribution of TOS LS

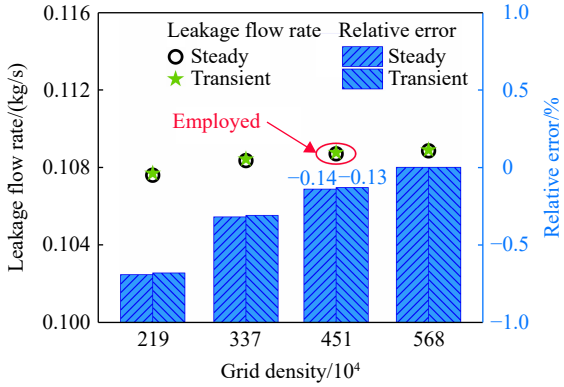
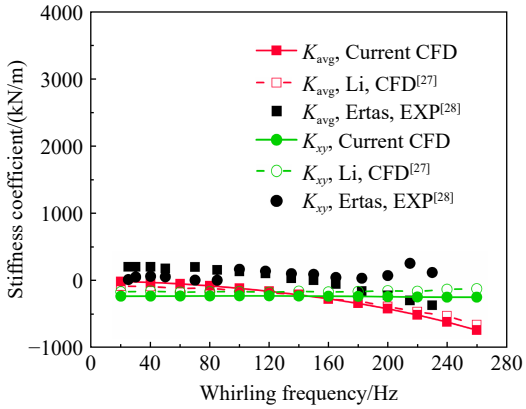


图 4 网格无关性验证

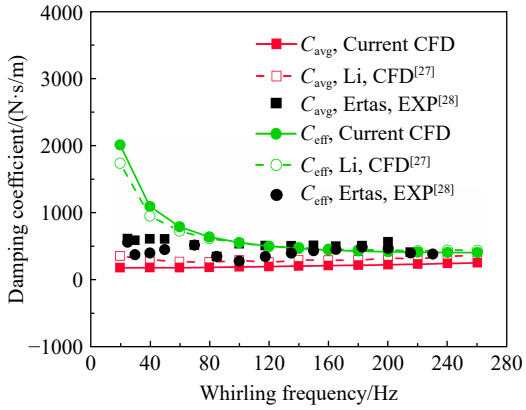
Fig. 4 Grid independence verification

3.3 数值方法验证

采用 Li 与 Ertas 等[27-28] 的 14 齿 TOS LS（θ=30°）作为验证几何模型，其余几何参数与运行工况参数均保持一致，通过对比分析动力特性系数的计算结果，旨在验证本文数值方法的可靠性，如图 5 所示。当前方法预测得到的平均直接刚度 K_{avg}、交叉刚度 K_{xy}、平均直接阻尼 C_{avg}、有效阻尼 C_{eff} 与 Li 数值结果较为一致，且随着涡动频率的增加，其变化趋势也与 Ertas 实验结果相吻合。因此，当



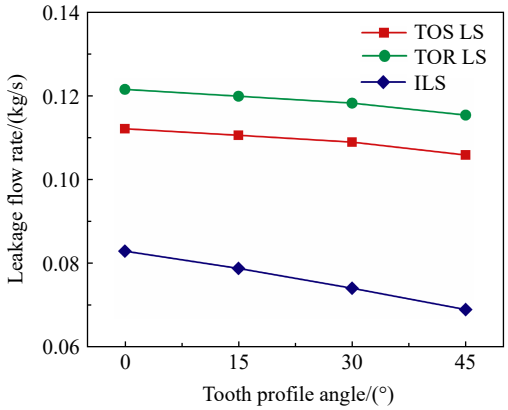
(a) 刚度系数



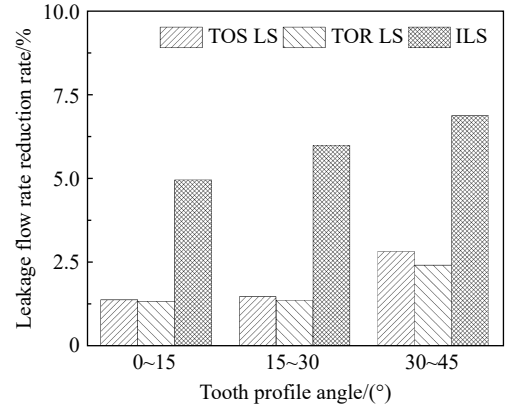
(b) 阻尼系数

图 5　数值与实验方法的动力特性系数对比

Fig. 5　Comparison of the rotordynamic coefficient between numerical and experimental methods



(a) 泄漏量



(b) 泄漏量下降率

图 6　不同齿形角下三种迷宫密封的泄漏特性

Fig. 6　Leakage characteristics of three labyrinth seals with different tooth profile angles

前数值方法在预测迷宫密封的动力特性系数上具有合理的精度，可用于后续研究。K_{avg}、C_{avg} 与 C_{eff} 定义如下：

$$K_{avg} = (K_{xx} + K_{yy})/2 \tag{7}$$

$$C_{avg} = (C_{xx} + C_{yy})/2 \tag{8}$$

$$C_{eff} = C_{xx} - K_{xy}/\Omega \tag{9}$$

4　结果与分析

4.1　泄漏特性分析

图 6 对比了不同齿形角下三种迷宫密封的泄漏特性。在各种齿形角下，泄漏量从小到大排序依次为 ILS、TOS LS 与 TOR LS，其中 ILS 的泄漏量比TOSLS 小26.1%～34.9%，比TORLS 小31.8%～40.3%。随着齿形角的增加，三种迷宫密封的泄漏量均逐渐下降，最小泄漏量与最大泄漏量分别为 0.069 kg/s（θ=45°, ILS）与 0.121 kg/s（θ=0°, TOR LS）。同时，三种迷宫密封的泄漏量下降率均随着齿形角的增加而增加，其中 TOS LS 的下降率为 1.4%～2.8%，TOR LS 的下降率为 1.3%～2.4%，ILS 的下降率为 4.9%～6.9%，这表明：齿形角越大，抑制迷宫密封泄漏的作用越强，对于 ILS 而言抑制泄漏效果最为显著。

4.1.1　齿形角对直通式迷宫密封泄漏特性的影响

通过分析流场流动特性，初步揭示齿形角对直通式迷宫密封泄漏的影响机理，如图 7、图 8 所示。在进出口压差驱动下，流体从进口高压侧向出口低压侧流动。当流体流经齿尖与转子壁面间的密封间隙时，流动截面收缩及流体自身惯性作用共同导致静压骤降与流速骤增，将压力能转换为动能。经过节流后的流体形成射流，部分射流以较小的扩散角 β 射入相邻腔室，带动腔室内原有流体旋转并生成涡流，将动能转换为热能，称为涡流动能耗散效应；另一部分射流沿着转子壁面高速流动，形成主流并最终与腔室出口处流出流体汇合。然而由于黏性作用，高速射流在流经密封间隙处时会与转子壁面发生摩擦，导致流速

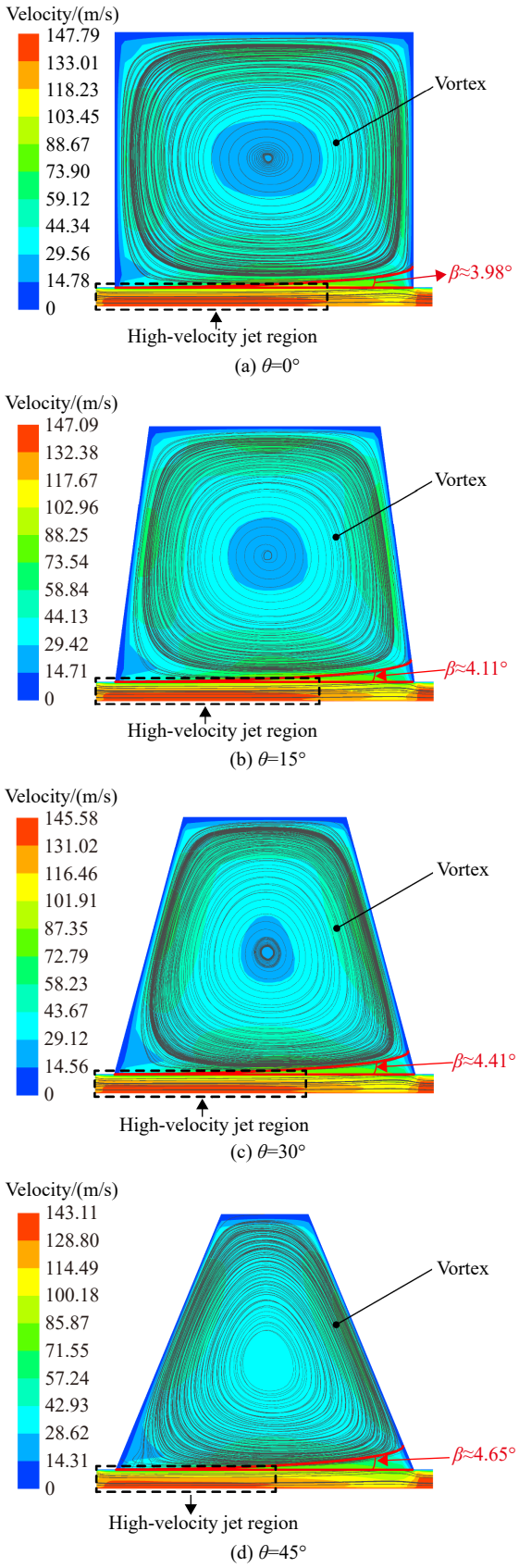
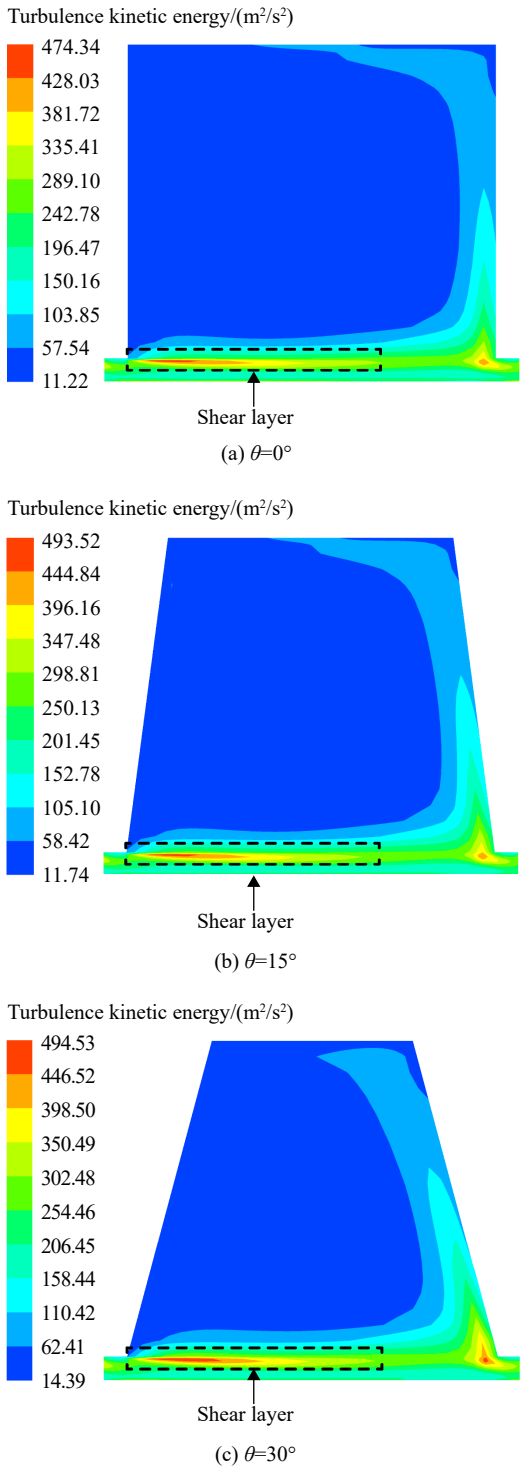
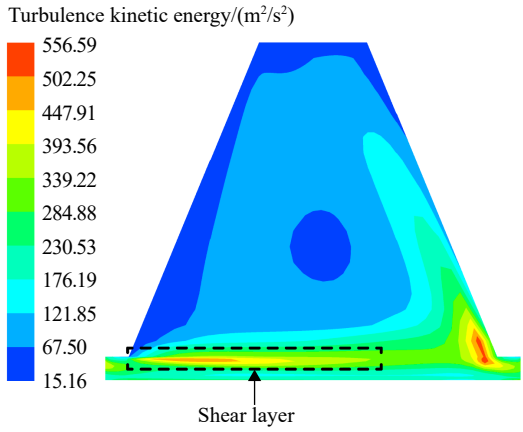


图 7　不同齿形角下 TOS LS 第七腔室速度云图

Fig. 7　Velocity contours for cavity #7 of TOS LS with different teeth profile angles

降低，称为黏性摩擦效应，上述两种效应都有利于降低直通式迷宫密封泄漏量并提高封严性能[29-30]。注意到湍流动能较大值出现在腔室出口处与剪切层，这是由于上游射流会冲击齿迎风面，发生反射并形成回流区，使得腔室出口处流速剧烈变化，因而该处的能量耗散非常大。同时，高速射流区与回流区的流速存在较大差别，从而发生摩擦并形成剪切层，动能通过黏性作用耗散为热能，也会实现能量的耗散。





(d) θ=45°

图 8　不同齿形角下 TOS LS 第七腔室湍流动能云图

Fig. 8　Turbulence kinetic energy contours for cavity #7 of TOS LS with different teeth profile angles

从图 7、图 8 还可以看出，随着齿形角的增加：①靠近转子壁面的高速射流区的范围及强度都有所降低，黏性摩擦效应得到加强；而流进腔室的射流扩散角 β 缓慢增加，提高了涡流与射流间的动量与能量交换。②腔室容积减小，腔室形状变化越有利于涡流形成，涡流流速逐渐减小，而湍流动能逐渐增大，涡流动能耗散效应得到加强。当 θ=45°时，此时涡流最为明显，且湍流动能最大，表明能量耗散也最大。③腔室内的湍流动能分布越来越均匀，且腔室出口处与剪切层的湍流动能显著增加，促进了涡流与主流间的动量与能量交换。综上，增加齿形角能同时加强黏性摩擦效应与涡流动能耗散效应，并促进涡流与射流/主流间动量与能量的交换，从而降低直通式迷宫密封的泄漏量并提高其封严性能。

4.1.2　齿形角对交错式迷宫密封泄漏特性的影响

湍流黏度 μ_t 用于评估泄漏控制的有效性[22]，定义为

$$\mu_t = \rho C_\mu \kappa_t^2 / \varepsilon_t \tag{10}$$

式中 ρ 为流体密度；C_μ 为经验系数，一般取 0.09；κ_t 为湍流动能；ε_t 为湍流涡耗散。

图 9 给出了不同齿形角下交错式迷宫密封的湍流黏度云图。相比于齿在静子或转子上依次排列的直通式迷宫密封而言，交错式迷宫密封的流动通道更长且较为曲折，使得流体湍流黏度较大，流体受到的流动阻力也较大，进而导致流速较低，这是 ILS 泄漏量较小的主要原因。同时，当齿形角增加时，腔室形状也随之发生改变，流体湍流

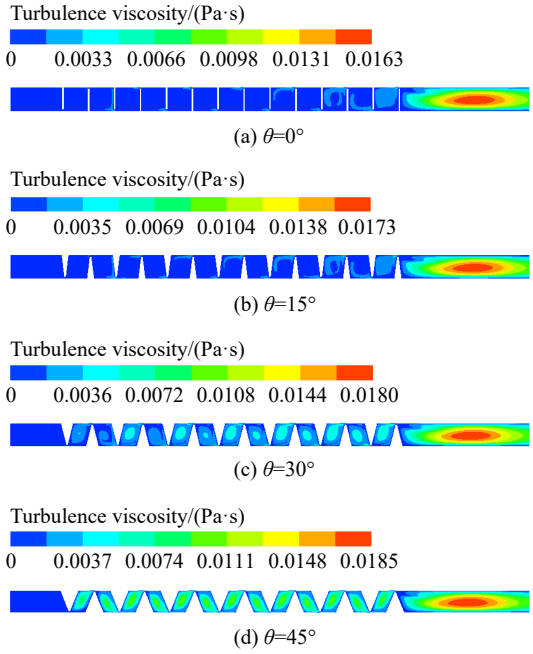


图 9　不同齿形角下 ILS 湍流黏度云图

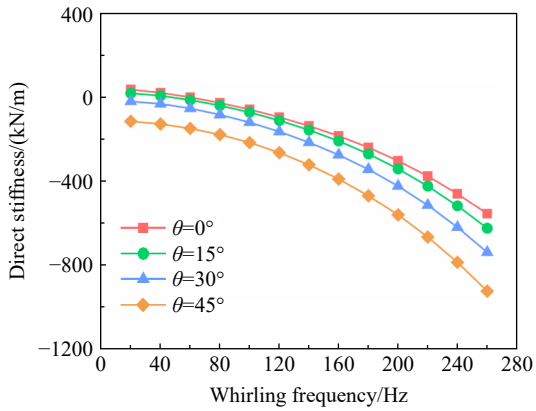
Fig. 9　Turbulence viscosity contours of ILS with different tooth profile angles

黏度与湍流动能均有所增加，流体受到的流动阻力也相应增大，有利于能量的充分耗散，从而降低交错式迷宫密封的泄漏量并提高其封严性能。

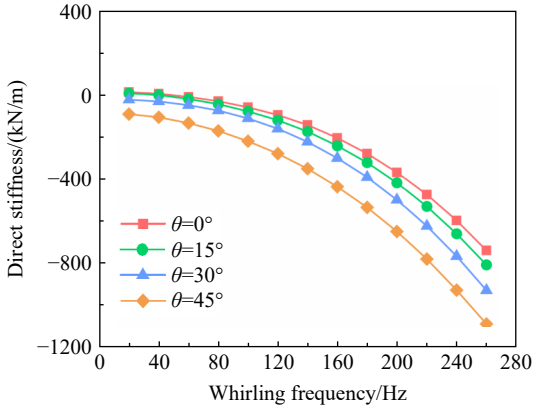
4.2　动力特性分析

4.2.1　齿形角对直通式迷宫密封动力特性的影响

图 10 与图 11 分别给出了不同齿形角下直通式迷宫密封的直接/交叉刚度随涡动频率的变化趋势。TOS LS 与 TOR LS 的直接刚度均随着涡动频率的增加而显著降低，具有较强的频率依赖性。在相同齿形角下，TOS LS 的直接刚度系数整体上略大于 TOR LS 的直接刚度系数。然而随着齿形角的增加，TOS LS 与 TOR LS 的直接刚度均有所降低，从而减小转子系统的临界转速。



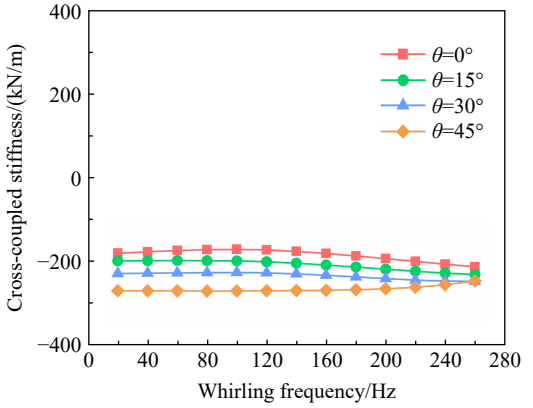
(a) TOS LS



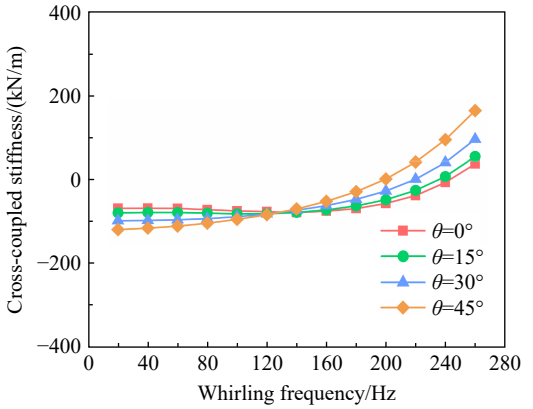
(b) TOR LS

图 10 不同齿形角下 TOS LS、TOR LS 直接刚度随涡动频率变化趋势

Fig. 10 Direct stiffness of TOS LS, TOR LS versus whirling frequency with different tooth profile angles



(a) TOS LS



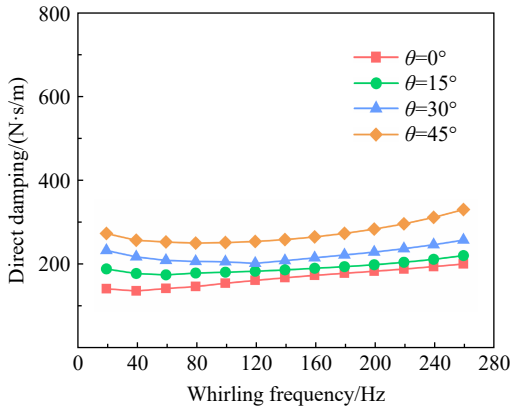
(b) TOR LS

图 11 不同齿形角下 TOS LS、TOR LS 交叉刚度随涡动频率变化趋势

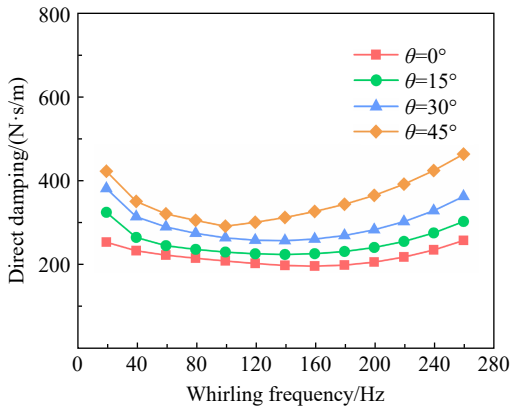
Fig. 11 Cross-coupled stiffness of TOS LS, TOR LS versus whirling frequency with different tooth profile angles

交叉刚度是衡量转子系统稳定性的重要参数，负交叉刚度会产生与涡动速度方向相反的切向激振力，从而抑制转子失稳[25]。对于 TOS LS 而言，交叉刚度随着齿形角的增加而降低，且其频率依赖性较弱。对于 TOR LS 而言，交叉刚度随着涡动频率的增加而增加，并逐渐由负值向着正值转变。值得注意的是：在低频工况下，交叉刚度随着齿形角的增加而降低，且其频率依赖性相对较弱；而在高频工况下，交叉刚度随着齿形角的增加而增加，且其频率依赖性相对较强。

直接阻尼是另一个衡量转子稳定性的重要参数，正直接阻尼可产生阻尼效应以抑制转子的低频涡动[18]。图 12 给出了不同齿形角下直通式迷宫密封的直接阻尼随涡动频率的变化趋势。在各种齿形角下，两种迷宫密封的直接阻尼均为正值，且 TOS LS 的直接阻尼整体上略小于 TOR LS 的直接阻尼。同时，TOS LS 与 TOR LS 的直接阻尼都随着齿形角的增加而增加，而随着涡动频率的增加均呈现先降低后增加的趋势。



(a) TOS LS



(b) TOR LS

图 12 不同齿形角下 TOS LS、TOR LS 直接阻尼随涡动频率变化趋势

Fig. 12 Direct damping of TOS LS, TOR LS versus whirling frequency with different tooth profile angles

综合考虑交叉刚度与直接阻尼对转子系统稳定性的影响，引入有效阻尼 C_{eff}，正有效阻尼数值越大，转子系统稳定性越好，其表达式已在式(9)给出。由图 13 可知：TOS LS 与 TOR LS 的有效阻尼均为正值，且随着涡动频率的增加而降低，在低频工况下(20～120 Hz)表现为极强的频率依赖性。随着齿形角从 0°增加至 45°，TOS LS 与 TOR LS 的有效阻尼分别增加 44.9%～61.9% 与 30.7%～53.6%，转子系统的稳定性均得到显著提高。在各种齿形角下，TOS LS 的有效阻尼整体上明显大于 TOR LS 的有效阻尼，约为 129.2%～196.2%，表明 TOS LS 更有利于转子系统的稳定性。

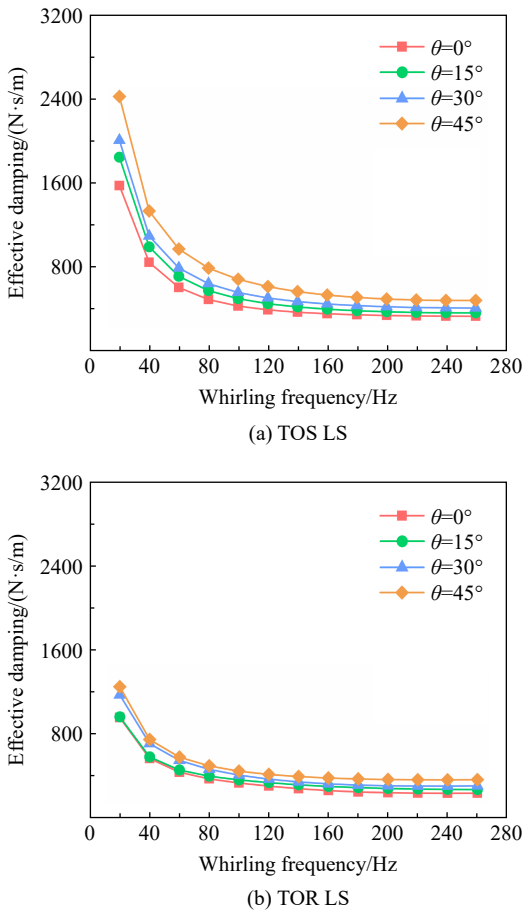


图 13　不同齿形角下 TOS LS、TOR LS 有效阻尼随涡动频率变化趋势

Fig. 13　Effective damping of TOS LS, TOR LS versus whirling frequency with different tooth profile angles

4.2.2　齿形角对交错式迷宫密封动力特性的影响

图 14 给出了不同齿形角下交错式迷宫密封的刚度系数随涡动频率的变化趋势。直接刚度随着涡动频率的增加而显著降低，具有较强的频率依赖性，且随着齿形角的增加，直接刚度呈现下降趋势。在低频工况下，交叉刚度随着齿形角的增加而降低，而在高频工况下则呈现相反的变化趋势。

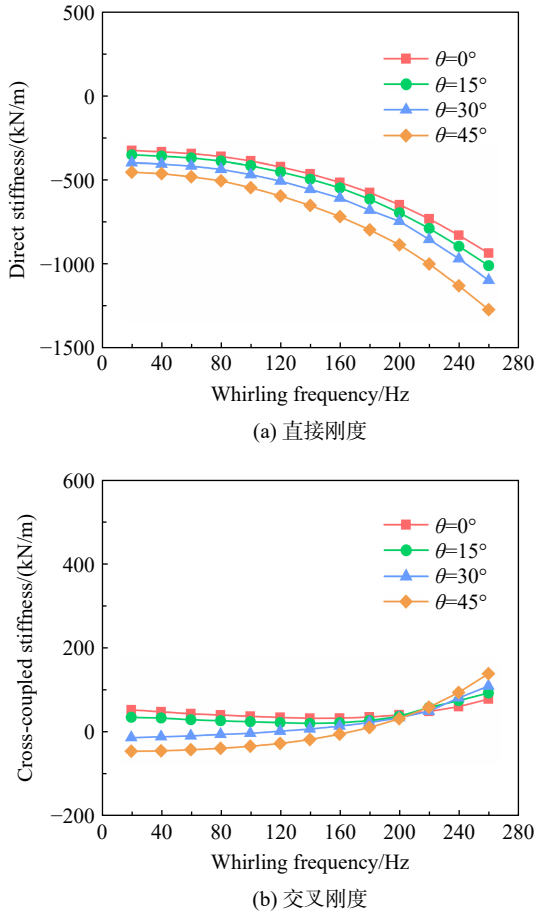


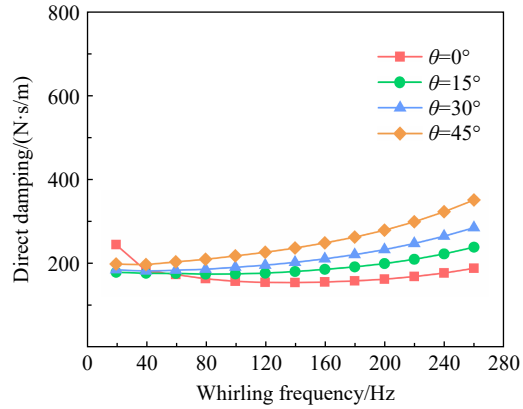
图 14　不同齿形角下 ILS 刚度系数随涡动频率变化趋势

Fig. 14　Stiffness coefficient of ILS versus whirling frequency with different tooth profile angles

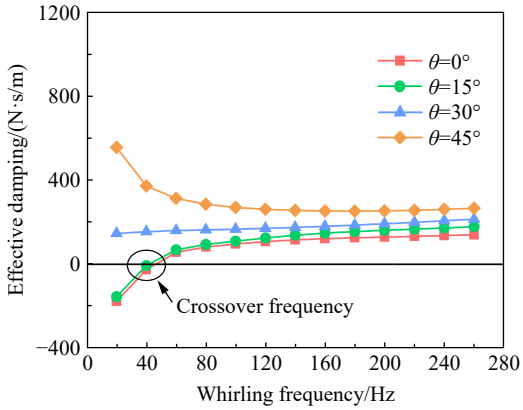
图 15 给出了不同齿形角下 ILS 的阻尼系数随涡动频率的变化趋势。正直接阻尼随着涡动频率的增加表现为先降低后增加的趋势，且整体上随着齿形角的增加而增加。然而，若 θ=0°或 θ=15°时，在低频下负有效阻尼随着涡动频率的增加而显著增加，并出现约 40 Hz 的穿越频率，易引起转子失稳，因此若采用 ILS 作为密封件，不宜采用过小的齿形角。此外，当齿形角从 0°增加至 45°时，有效阻尼增加约 90.4%～445.3%，这有助于提高系统稳定性。

4.3　减振机理分析

当转子涡动时，密封内部流体与转子表面发生碰撞，进而挤压密封的流场形状，导致密封间隙与周向压力分布不均匀，并产生作用在转子表面上的激振力 F。图 16 给出了 TOS LS (θ=30°)的转子位移与激振力随涡动时间的变化趋势



(a) 直接阻尼

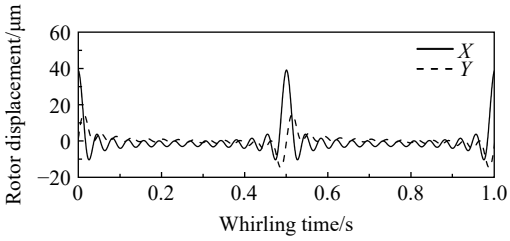


(b) 有效阻尼

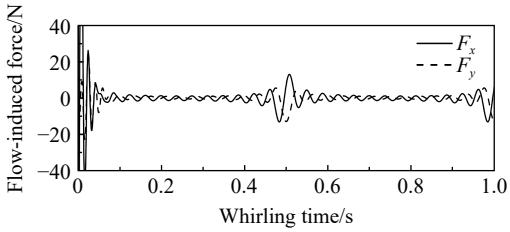
图 15 不同齿形角下 ILS 阻尼系数随涡动频率变化趋势

Fig. 15 Damping coefficient of ILS versus whirling frequency with different tooth profile angles

(x 方向激振)。观察到转子位移与激振力都呈现周期性波动(周期为 0.5 s),当时间 t=0.1 s 时,转子在 x 方向上的位移到达最大值 X_{max},在 y 方向上的位移为零(X=X_{max}, Y=0 μm),并朝着 y 正方向逆时针涡动($\dot{X}$=0, $\dot{Y}$>0 μm),此时直接激振力 F_x 为正,交叉激振力 F_y 为负(F_x>0 N, F_y<0 N)。通过进一步分析流场与激振力,旨在揭示齿形角对迷宫密封的减振机理。



(a)

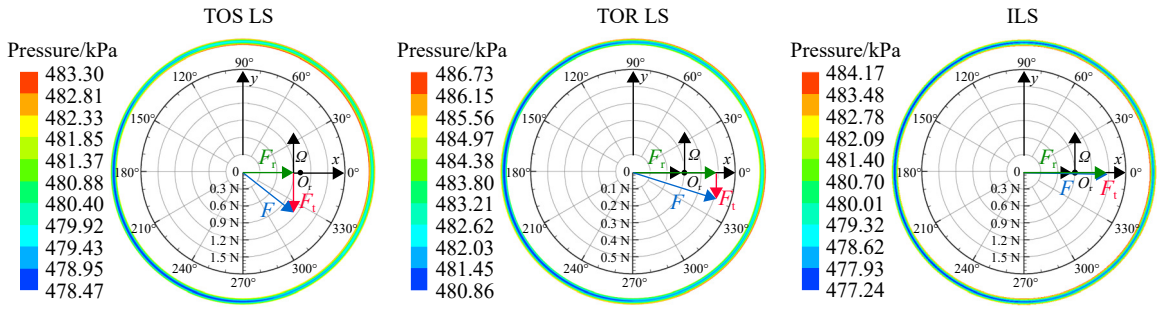


(b)

图 16 TOS LS (θ=30°)转子位移与激振力随涡动时间变化趋势

Fig. 16 Rotor displacement and flow-induced force of TOS LS (θ=30°) versus whirling time

图 17 给出了不同齿形角下三种迷宫密封第七腔室的静压云图与激振力 F 分布(x 方向激振, t=0.1 s)。激振力 F 可分解为径向激振力 F_r 与切向激振力 F_t,规定 F_r、F_t 正方向分别与转子涡动的位移方向与速度方向相同,且正径向力 F_r 与负切向力 F_t 分别起到了促进转子涡动速度与抑制转子涡动振幅的作用。对于 TOS LS、TOR LS 与 ILS 而言,当齿形角 θ 从 0°增加至 45°时:①正径向力 F_r 分别降低 49.1%、37.6% 与 26.9%;②负切向力 F_t 的绝对值分别增加 60.2%、133.9% 与 470.3%;③腔室静压分布更加均匀,因此系统稳定性得到提高。对于同一齿形角(θ=45°)而言,TOS LS 的负 F_t 的绝对值最大(−1.13 N),TOR LS 的负 F_t 的绝对值次之(−0.36 N),ILS 的负 F_t 的绝对值最小(−0.17 N),这表明 TOS LS 的系统稳定性最好,而 ILS 的系统稳定性最差。



(a) θ=0°

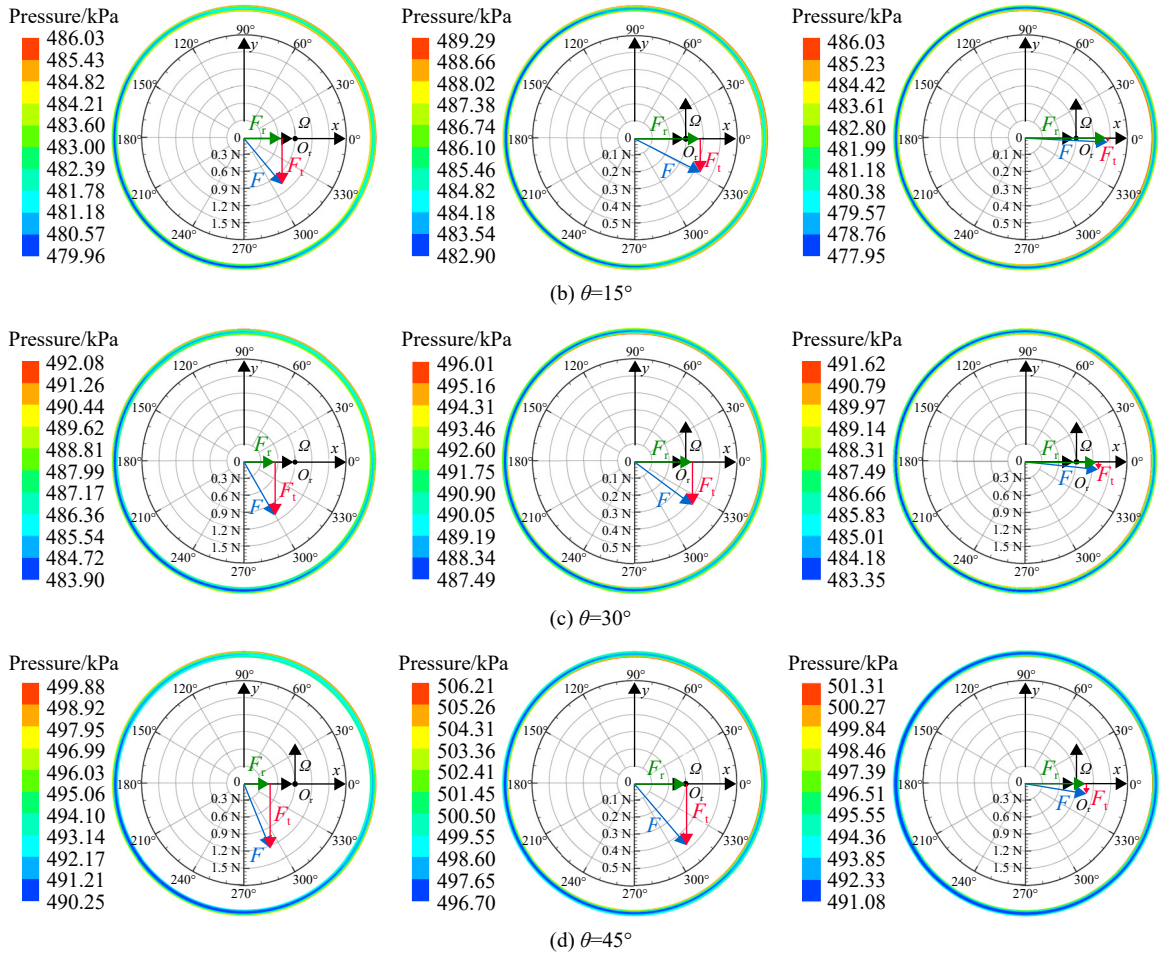


图 17　不同齿形角下三种迷宫密封第七腔室的静压云图与激振力分布（x 方向激振，t=0.1 s）

Fig. 17　Static pressure contours and flow-induced force distribution for cavity #7 of three labyrinth seals with different tooth profile angles（x-direction excitation, t=0.1 s）

5　结　论

本文基于 Ertas 迷宫密封实验模型作为研究对象，应用计算流体力学方法与多频涡动轨迹模型分析了齿形结构对三种迷宫密封泄漏与动力特性的影响，结论如下：

1）在四种齿形角（θ=0°, 15°, 30°, 45°）下，三种迷宫密封的封严性能从高到低依次排序为 ILS、TOS LS 与 TOR LS；系统稳定性从高到低依次排序为 TOS LS、TOR LS 与 ILS。

2）增加齿形角能加强 TOS LS 与 TOR LS 的黏性摩擦效应与涡流动能耗散效应，并促进涡流与射流/主流间动量与能量的交换，从而提高 TOS LS 与 TOR LS 的封严性能；同时也能增大流体在 ILS 所受到的流动阻力，有利于能量的充分耗散，从而提高 ILS 的封严性能。

3）增加齿形角能降低三种迷宫密封的直接刚度，降低 TOR LS/ILS（低频工况下）及 TOS LS 的交叉刚度，增加 TOR LS/ILS（高频工况下）的交叉刚度，提高三种迷宫密封的直接阻尼，有效阻尼分别提高 44.9%～61.9%、30.7%～53.6% 与 90.4%～445.3%，从而避免过小齿形角（θ=0°, 15°）的 ILS 发生转子失稳。

4）增加齿形角能降低三种迷宫密封的正径向激振力与增加负切向激振力的绝对值，并改善腔室静压分布，从而显著提高系统稳定性。

参考文献：

[1] CHUPP R E, HENDRICKS R C, LATTIME S B, et al. Sealing in turbomachinery[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 313-349.

[2] CHILDS D W. Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling, and analysis[M]. New York: Wiley, 1993.

[3] CHILDS D, VANCE J. Annular gas seals and rotordynamics of compressors and turbines[R]. College Station, Texas , USA: 26th Turbomachinery Symposium, 1997.

[4] 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)

[5] LI Jin, FU Xiaoli, YAN Shenglin. Simulation and experimental investigation of a new type of combined seal structure[J]. Journal of Fluids Engineering, 2021, 143(5): 051503.

[6] GU Qianlei, YANG Jiangang, ZHANG Wanfu, et al. On the dynamic performance of a novel airfoil guider seal with the controlled circumferential flow: numerical analysis and experimental validation[J]. Tribology International, 2022, 167: 107413.

[7] ZHANG Wanfu, WANG Yingfei, GU Qianlei, et al. Rotordynamic performance of the interlocking labyrinth seal with a tilting rotor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(1): 011012.

[8] SCHARRER J K. Rotordynamic coefficients for stepped labyrinth gas seals[J]. Journal of Tribology, 1989, 111(1): 101-107.

[9] GAO Rui, KIRK G. CFD study on stepped and drum balance labyrinth seal[J]. Tribology Transactions, 2013, 56(4): 663-671.

[10] 张晓旭, 李雪松, 王路遥, 等. 直通齿和交错齿迷宫密封流场与动特性的比较[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(6): 1083-1086.
ZHANG Xiaoxu, LI Xuesong, WANG Luyao, et al. The comparison of flow field and dynamic characteristic of straight and staggered labyrinth seal[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(6): 1083-1086. (in Chinese)

[11] TSUKUDA T, HIRANO T, WATSON C, et al. A numerical investigation of the effect of inlet preswirl ratio on rotordynamic characteristics of labyrinth seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(8): 082506.

[12] WU Tingcheng, SAN ANDRÉS L. Leakage and dynamic force coefficients for two labyrinth gas seals: teeth-on-stator and interlocking teeth configurations. A computational fluid dynamics approach to their performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(4): 042501.

[13] CHILDS D W, SCHARRER J K. Experimental rotordynamic coefficient results for teeth-on-rotor and teeth-on-stator labyrinth gas seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1986, 108(4): 599-604.

[14] CHILDS D, ELROD D, HALE K. Rotordynamic coefficient and leakage test results for interlock and tooth-on-stator labyrinth seals [R]. ASME Paper 88-GT-87, 1988.

[15] WANG Tianhao, LI Zhigang, LI Jun. Rotordynamic characteristics of the straight-through labyrinth seal based on the applicability analysis of leakage models using bulk-flow method[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2022, 144(1): 011028.

[16] CANGIOLI F, PENNACCHI P, VANNINI G, et al. On the thermodynamic process in the bulk-flow model for the estimation of the dynamic coefficients of labyrinth seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(3): 032502.

[17] 司和勇, 曹丽华, 李盼. 密封结构对汽轮机转子动力特性的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 165-175, 384.
SI Heyong, CAO Lihua, LI Pan. Effect of seal structure on rotor dynamic characteristics of steam turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 165-175, 384. (in Chinese)

[18] ZHANG Xuan, JIANG Jinbo, PENG Xudong, et al. Leakage and rotordynamic characteristics of labyrinth seal and hole-pattern damping seal with special-shaped 3D cavity[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2020, 73(2): 396-403.

[19] LEE S I, KANG Y J, KIM W J, et al. Effects of tip clearance, number of teeth, and tooth front angle on the sealing performance of straight and stepped labyrinth seals[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(4): 1539-1547.

[20] MEHTA N J, CHILDS D W. Measured comparison of leakage and rotordynamic characteristics for a slanted-tooth and a straight-tooth labyrinth seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(1): 012501.

[21] 林丽, 刘卫华. 齿型夹角对迷宫密封性能影响的数值研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(3): 47-50.
LIN Li, LIU Weihua. Numerical study of configuration effect on labyrinth seal characteristics[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(3): 47-50. (in Chinese)

[22] ZHANG Mingjie, YANG Jiangang, XU Wanjun, et al. Leakage and rotordynamic performance of a mixed labyrinth seal compared with that of a staggered labyrinth seal[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(5): 2261-2277.

[23] JIA Xingyun, ZHENG Qun, JIANG Yuting, et al. Leakage and rotordynamic performance of T type labyrinth seal[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 88: 22-31.

[24] ALFORD J S. Protecting turbomachinery from self-excited rotor whirl[J]. Journal of Engineering for Power, 1965, 87(4): 333-343.

[25] CHEN Yaoxing, LI Zhigang, LI Jun, et al. Effects of tooth bending damage on the leakage performance and rotordynamic coefficients of labyrinth seals[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(4): 1206-1217.

[26] 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. (in Chinese)

[27] LI Zhigang, LI Jun, YAN Xin. Multiple frequencies elliptical whirling orbit model and transient RANS solution approach to rotordynamic coefficients of annual gas seals prediction[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2013, 135(3): 031005.

[28] ERTAS B H, DELGADO A, VANNINI G. Rotordynamic force coefficients for three types of annular gas seals with inlet preswirl and high differential pressure ratio[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(4): 1.

[29] ZHANG Xuan, JIANG Jinbo, PENG Xudong, et al. Leakage reduction by optimization of hole-pattern damping seal with inclined hole cavity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 169: 120924.

[30] LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Numerical comparisons of rotordynamic characteristics for three types of labyrinth gas seals with inlet preswirl[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A:Journal of Power and Energy, 2016, 230(7): 721-738.

（编辑：陈　越）