

直通型迷宫密封动力学特性研究

卢程程, 欧阳志雄, 印 玮, 王 涛, 刘春辉, 吴 涛

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

Email: cclu105@163.com

收稿日期: 2020年10月28日; 录用日期: 2020年11月10日; 发布日期: 2020年11月17日

摘 要

本文利用Fluent软件数值仿真研究了不同工况(进口预旋、转速和压比)下, 偏心率分别为5%和10%、转子涡动速度为10%~240%倍转速的涡动转子-密封流场, 获得了作用在涡动转子上的径向气流力和切向气流力, 进而分析该气流力对转子振动的影响。研究表明: 进口预旋速度对密封径向气流力影响不大, 而对密封切向气流力影响很大。高转速下密封切向气流力在转子高频涡动下会变为正值, 促进转子涡动, 可能引起转子失稳。压比越高, 密封气流力越大。密封径向气流力随着转子偏心率的增大而增大, 但增大速率逐渐减缓。

关键词

迷宫密封, 动力特性, 稳定性, 径向气流力, 切向气流力

Study on the Dynamic Characteristics of the Straight-Through Labyrinth Seal

Chengcheng Lu, Zhixiong Ouyang, Wei Yin, Tao Wang, Chunhui Liu, Tao Wu

School of Energy and Power, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Email: cclu105@163.com

Received: Oct. 28th, 2020; accepted: Nov. 10th, 2020; published: Nov. 17th, 2020

Abstract

This paper uses Fluent software numerical simulation to study the vortex rotor-seal flow field with eccentricity of 5% and 10% and rotor whirl speed of 10% - 240% under different working conditions (imported pre-spin, speed and pressure ratio), obtain the radial air force and tangential air force acting on the vortex rotor, and then analyze the effect of the air force on the rotor vi-

bration. The research results show that the inlet pre-rotation speed has little effect on the radial air force of the seal, but has a great influence on the tangential air force of the seal. The sealing tangential airflow force at high speed will become positive under the high-frequency turbulence of the rotor, which promotes the vortex of the rotor and may cause the instability of the rotor. The higher the pressure ratio, the greater the sealing air force. The radial air flow force of the seal increases with the increase of the rotor eccentricity, but the increase rate gradually slows down.

Keywords

Labyrinth Seal, Dynamic Characteristics, Stability, Radial Air Force, Tangential Air Force

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

迷宫密封由于其良好的密封性能、结构简单以及性能安全可靠等优点，被广泛应用于各类透平机械中以减少动静部件之间的泄露。迷宫密封在减少流体从高压端向低压端泄漏的同时，也会产生作用于转子表面的气流激振力，在某些条件下引起转子的失稳，形成气流激振现象[1] [2]。

由于迷宫密封结构具有特殊性，在对其内部结构进行研究时，实验设备较为复杂并且有效数据较少[3]。近年来，随着计算机软件的高速发展，利用仿真软件数值模拟迷宫密封的内部流场及泄漏特性进行研究成为热点[4]。Tong 等人[5]对直通式与台阶式密封进行对比，分析不同参数下两种密封形式的性能差异。林丽[6]数值仿真分析了直通式迷宫密封的间隙宽度、齿型夹角以及空腔深宽等结构因素对迷宫密封性能的影响。黄建峰[7]以 Fluent 软件的动网格数值模拟方法为理论依据，通过改变密封间隙、空腔深宽比、齿数、进出口压力比以及活塞往复速率进行数值模拟。G.A 等人[8]运用试验分析转子转速、压比对密封性能的影响。焦圳等[9]采用 CFD 方法对 4 组不同的齿形结构进行数值模拟，深入讨论了不同齿形对类迷宫密封的密封性能影响。崔亚辉等[10]针对齿顶间隙为 0.2 mm 的迷宫密封，分别计算了 -60° 、 -45° 、 0° 、 45° 、 60° 几种预旋工况下系统的动特性系数和泄漏量。陈尧兴等[11]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。

目前，学者对迷宫密封进行了一系列的研究，但在密封间隙气流量方面的研究较少。迷宫密封在减少动静部件的泄露中有着重要的作用，本文以直通型迷宫密封为例，主要研究作用于转子的密封间隙气流量随进出口压比、进口预旋速度以及转子转速等参数的变化规律，进而分析该气流量对转子振动的影响。以期对迷宫密封设计提供合理参考。

2. 数值计算方法

2.1. 控制方程

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_j\bar{u}_i)}{\partial x_j} = \rho\bar{f}_i - \frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} - \rho\overline{u'_j u'_i}) \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\bar{E})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_j\bar{E})}{\partial x_j} \\ & = \rho\bar{f}_j\bar{u}_j - \frac{\partial(\bar{p}\bar{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\bar{\tau}_{ij}\bar{u}_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\bar{q}_j - \rho\overline{u'_j E'}) + S(\bar{T}) - \frac{\partial(\overline{p'u'_j})}{\partial x_j} + \frac{\partial(\overline{\tau'_{ji}u'_i})}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, u 为流体速度, p 为流体热力学压强, ρ 为流体密度, S 为体积热源, λ 为流体的导热系数, μ 为流体的动力黏度, E 为流体总能量, $\bar{\tau}_{ij}$ 为平均应力张量, τ'_{ij} 为脉动应力张量, \bar{q}_j 为平均导热量。

2.2. 湍流模型

本文湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型, 通过求解湍流能 k 和湍流耗散率 ε 方程来求解复杂的强紊动流动过程。

湍流能方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right] \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

湍流耗散率方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + \rho C_1 \varepsilon S - \frac{C_2 \rho \varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (5)$$

其中, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$, $C_2 = 1.9$, $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$ 。

2.3. 计算模型

以直通式迷宫密封为研究对象, 建立的迷宫密封计算模型示意图, 如图 1 所示。密封段长 $L_s = 70 \text{ mm}$ 、转子直径 $D = 220 \text{ mm}$ 、密封齿高 $h = 4.0 \text{ mm}$ 、密封间隙 $C_r = 0.3 \text{ mm}$ 、等腰梯形齿的齿顶宽度 $w = 0.2 \text{ mm}$ 、密封齿角 $\theta = 15^\circ$ 、密封齿间距 $p = 5 \text{ mm}$ 。

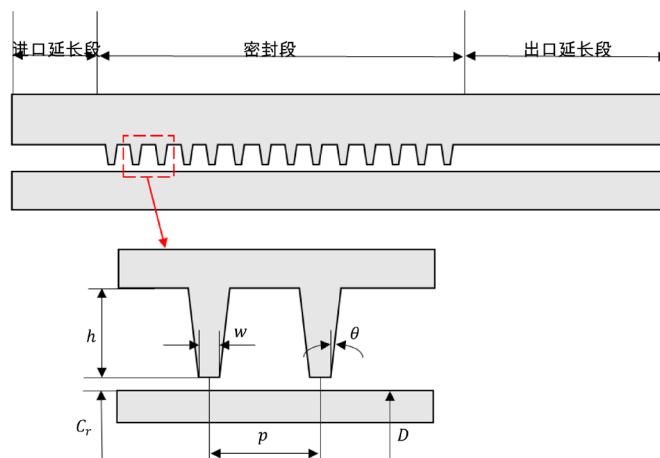


Figure 1. Labyrinth seal calculation model
图 1. 迷宫密封计算模型

2.4. 边界条件和网格划分

本文在考虑转子涡动的条件下，设转子偏心方向为 y 轴正向，偏心率分别为 5% 和 10% 倍密封间隙。由于此时密封间隙不具有几何轴对称性，需进行全三维计算。入口给定总压和总温分别为 77.9 bar、285.65 K，在有进口预旋的情况下，还需要给定进口周向速度，出口给定平均静压为 50.6 bar，固体壁面绝热无滑移，转子转速 n 为 1000 rpm，转子涡动速度范围为 $10\%n \sim 240\%n$ 。控制方程对流项采用二阶迎风格式离散，扩散项则采用中心差分格式离散，通过耦合算法求解离散方程获得密封流场数值解以及作用在转子上的径向和切向气流量。

图 2 为偏心转子 - 密封三维网格示意图，在密封间隙、转子壁面以及静子壁面这些流场剧烈变化的区域进行适当的加密处理，壁面处第一层网格高度约为 0.005 mm，经过网格无关性验证，最终网格量约为 700 万。本文在旋转坐标系下求解定常 RANS 方程，计算涡动转子 - 密封流场，在旋转坐标系下相对速度 u_r 和绝对速度 u 存在如下关系：

$$u_r = u - (\Omega \times r) \tag{6}$$

式中， Ω 为旋转坐标系的角速度向量， r 是旋转坐标系中的位置向量。

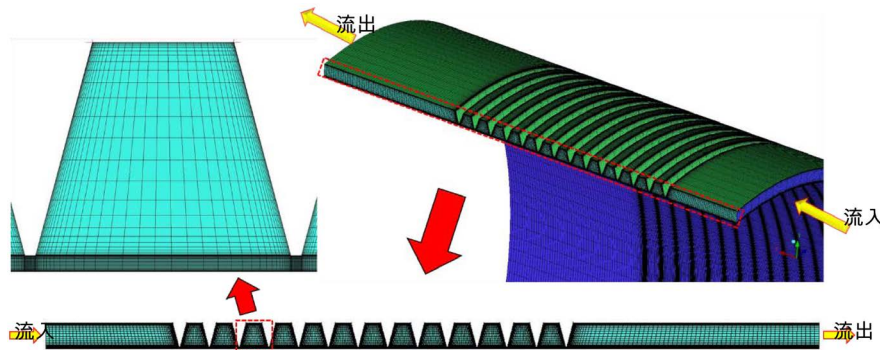


Figure 2. Eccentric sealed flow field calculation grid
图 2. 偏心密封流场计算网格

3. 进口预旋对直通型迷宫密封动力特性的影响

由于转子的旋转效应，密封进口流体通常具有较大的周向速度，密封进口周向速度是影响密封动力特性最主要因素之一。定义无量纲化进口周向速度为：

$$SR = \frac{U_\theta}{R\omega} \tag{7}$$

式中 U_θ 为密封进口流体周向速度， R 、 ω 分别表示转子半径和转子旋转角速度。文中 SR 的值分别为 86.86%、0.00% 以及 -86.86%。

影响转子振动稳定性的力主要为密封切向气流量，切向气流量决定了密封的交叉刚度系数 k 和直接阻尼 C ，较小的交叉刚度系数 k 和较大的直接阻尼系数 C 将有利于转子的振动稳定性，是迷宫密封设计的重要目标之一。图 3 为不同进口预旋下密封径向气流量随转子涡动速度的变化。从图中可以看出，不同进口预旋条件下，密封径向气流量随转子涡动速度的变化规律基本一致，呈现开口向下的二次曲线分布趋势。在涡动速度小于转子自转速度的范围内，密封径向气流量随转子涡动速度的变化曲线较为平缓，即与转子涡动频率相关性较弱；当涡动速度大于转子自转速度后，进口预旋对密封径向气流量影响不大，但密封径向气流量随涡动速度增加明显减小，表现出较强的涡动频率相关性。

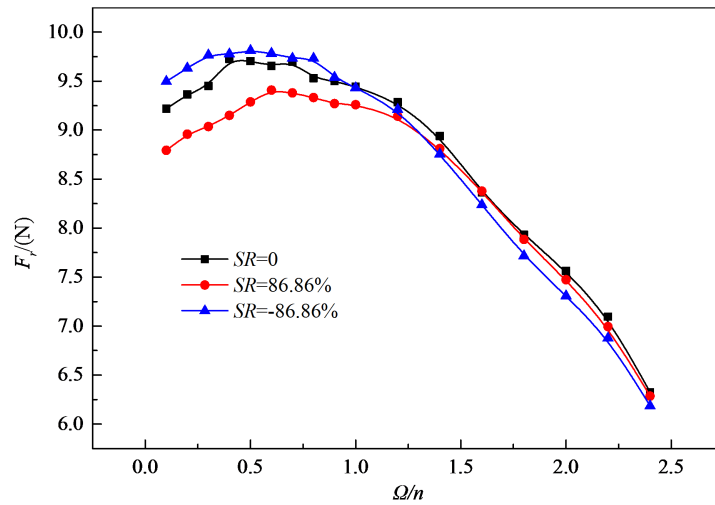


Figure 3. The radial air force of the seal under different inlet pre-rotation changes with the vortex speed of the rotor ($e = 5\%$)
图 3. 不同进口预旋下密封径向气流力随转子涡动速度的变化($e = 5\%$)

图 4 给出了不同进口预旋下密封切向气流力随转子涡动速度的变化。从图中容易看出，不同进口预旋条件下，密封切向气流力随转子涡动速度的变化规律基本一致，呈现近似线性变化规律。进口预旋速度对密封切向气流力影响非常大，因此进口预旋是影响转子稳定性的重要因素。在进口正预旋下，密封切向气流力为正值，此时切向气流力与转子涡动方向一致，促进转子的不稳定振动，在无进口预旋和负进口预旋下，密封切向气流力均为负值，此时切向气流力与转子涡动方向相反，密封能够抑制转子的不稳定振动。相比于无进口预旋，负进口预旋下与转子涡动方向相反的切向气流力更大，具有更好的抑振效果。因此，通常在密封进口增设反预旋装置或在密封内注入负周向速度的流体来改变密封切向气流力，达到抑制转子涡动的效果。

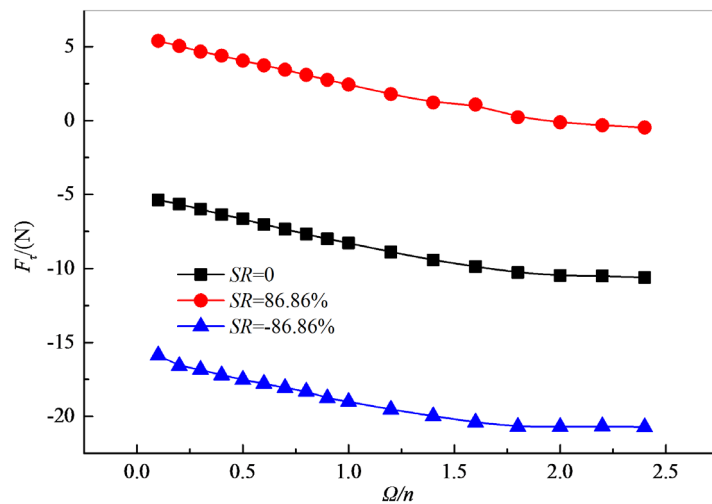


Figure 4. The change of seal tangential air force under different inlet pre-rotations with rotor whirl speed ($e = 5\%$)
图 4. 不同进口预旋下密封切向气流力随转子涡动速度的变化($e = 5\%$)

图 5~7 给出了不同偏心率下，密封单位偏心距气流力随转子涡动速度的变化。从图 5(a)、图 6(a)和图 7(a)可知，在不同进口预旋下，偏心率为 5% 时的单位偏心距径向气流力均大于偏心率为 10% 时的单位偏心距径向气流力，由此可以推断出虽然密封径向气流力随着转子偏心率的增大而增大，但增大的速率逐渐减缓；同时，这也说明采用偏心率为 5% 模型预测的直接刚度系数 K 和交叉阻尼系数 c 与偏心率为

10%模型不同。从图 5(b)、图 6(b)和图 7(b)可知,对于不同进口预旋,在转子涡动速度小于转速范围内,偏心率为 5%时单位偏心距切向气流力和偏心率 10%时基本相同,可以推断出密封切向气流力随着转子偏心距增大而线性增大;同时,这也说明无论采用 5% 偏心率模型还是 10% 偏心率模型预测的交叉刚度系数 k 和直接阻尼系数 C 基本一致。而在转子涡动速度大于转速的范围内,偏心率为 5%时的单位偏心距切向气流力均大于偏心率为 10%时的单位偏心距切向气流力,可以推断出密封切向气流力随着转子偏心率的增大而增大,但增大的速率逐渐减缓。

图 8 给出了不同进口预旋比下的密封动力特性系数。由图 8(a)可知,在正进口预旋下,密封交叉阻尼系数为负值,且受进口预旋影响很小;在负进口预旋下,密封交叉阻尼系数为正值,且随着预旋速度的增大而增大,影响较大。由图 8(b)可知,无论在进口正预旋还是负预旋下,密封直接刚度系数均为负值,即密封弹性力总是与转子偏心方向相反,阻止转子向更大偏心方向发展。在正进口预旋下,直接刚度系数随着进口预旋的增大而减小;在负进口预旋下,直接刚度系数随着进口预旋的增大而增大。由图 8(c)可知,无论在进口正预旋还是负预旋下,密封直接阻尼系数均为正值且随着进口预旋速度的增大而增大,但负进口预旋影响更大。由图 8(d)可知,无进口预旋下,密封交叉刚度为负值,能够抑制转子的不稳定振动,然而随着进口正预旋的增大,交叉刚度系数由负值变为正值,密封由抑振效果变为激振效果;而随着进口负预旋的增大,交叉刚度系数逐渐增大,抑振效果更好。

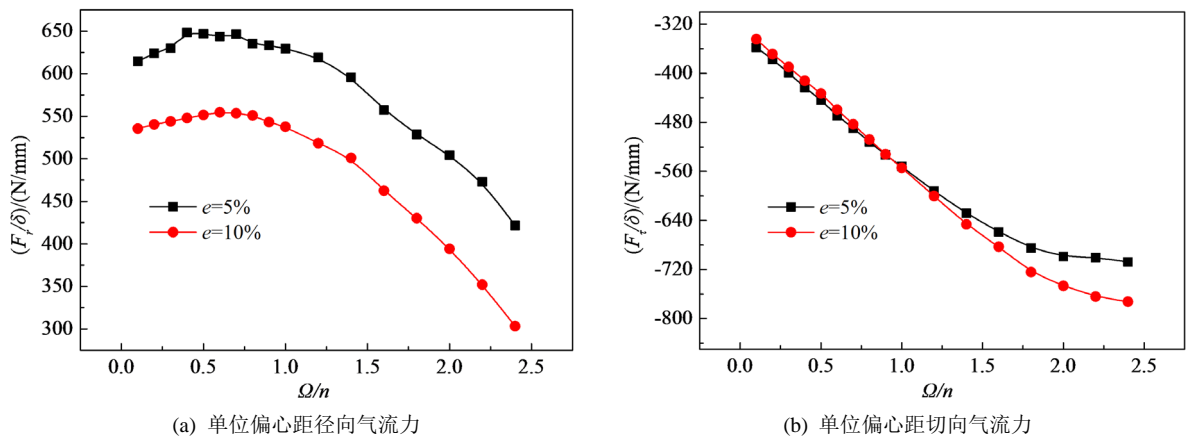


Figure 5. Change of air force per unit eccentricity with rotor whirl speed under different eccentricity ($SR = 0$)
图 5. 不同偏心率下单位偏心距气流力随转子涡动速度的变化($SR = 0$)

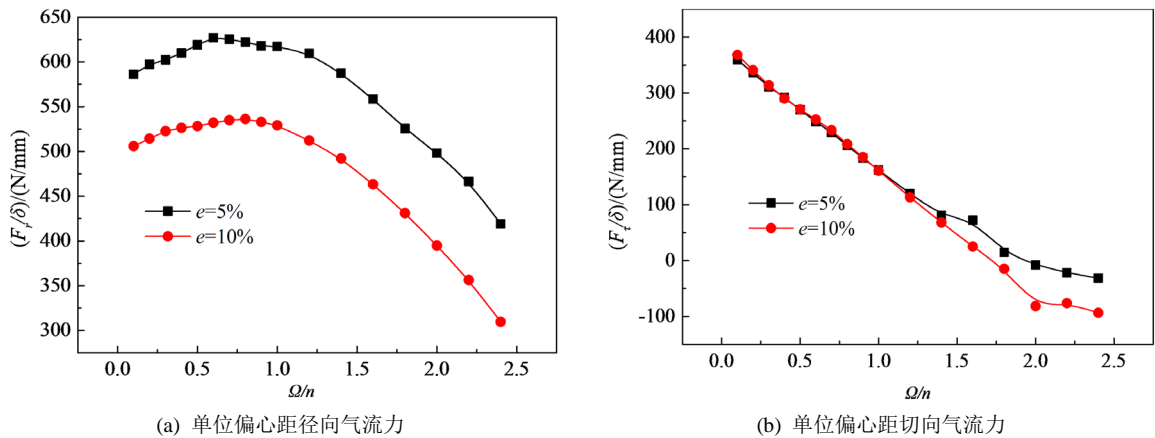


Figure 6. Change of air force per unit eccentricity with rotor whirl speed under different eccentricity ($SR = 86.86\%$)
图 6. 不同偏心率下单位偏心距气流力随转子涡动速度的变化($SR = 86.86\%$)

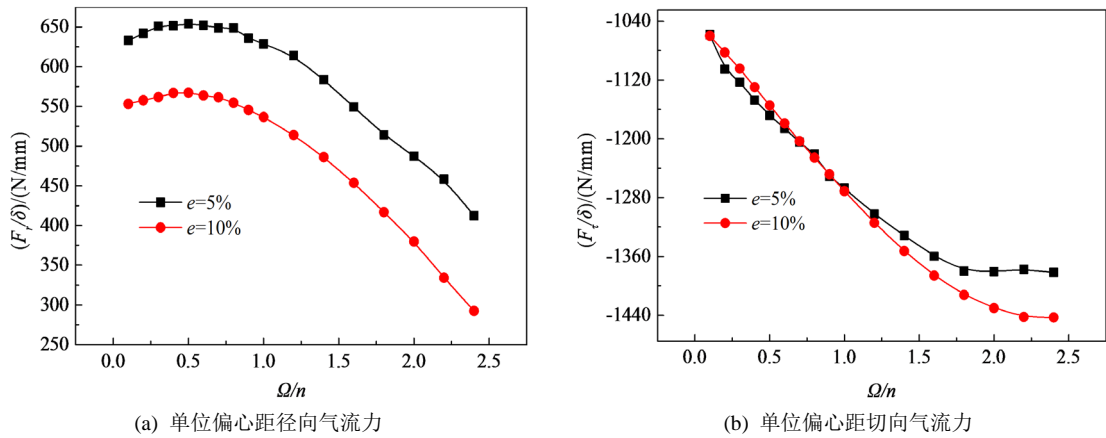


Figure 7. Change of air force per unit eccentricity with rotor whirl speed under different eccentricity ($SR = -86.86\%$)
图 7. 不同偏心率下单位偏心距气流量随转子涡动速度的变化($SR = -86.86\%$)

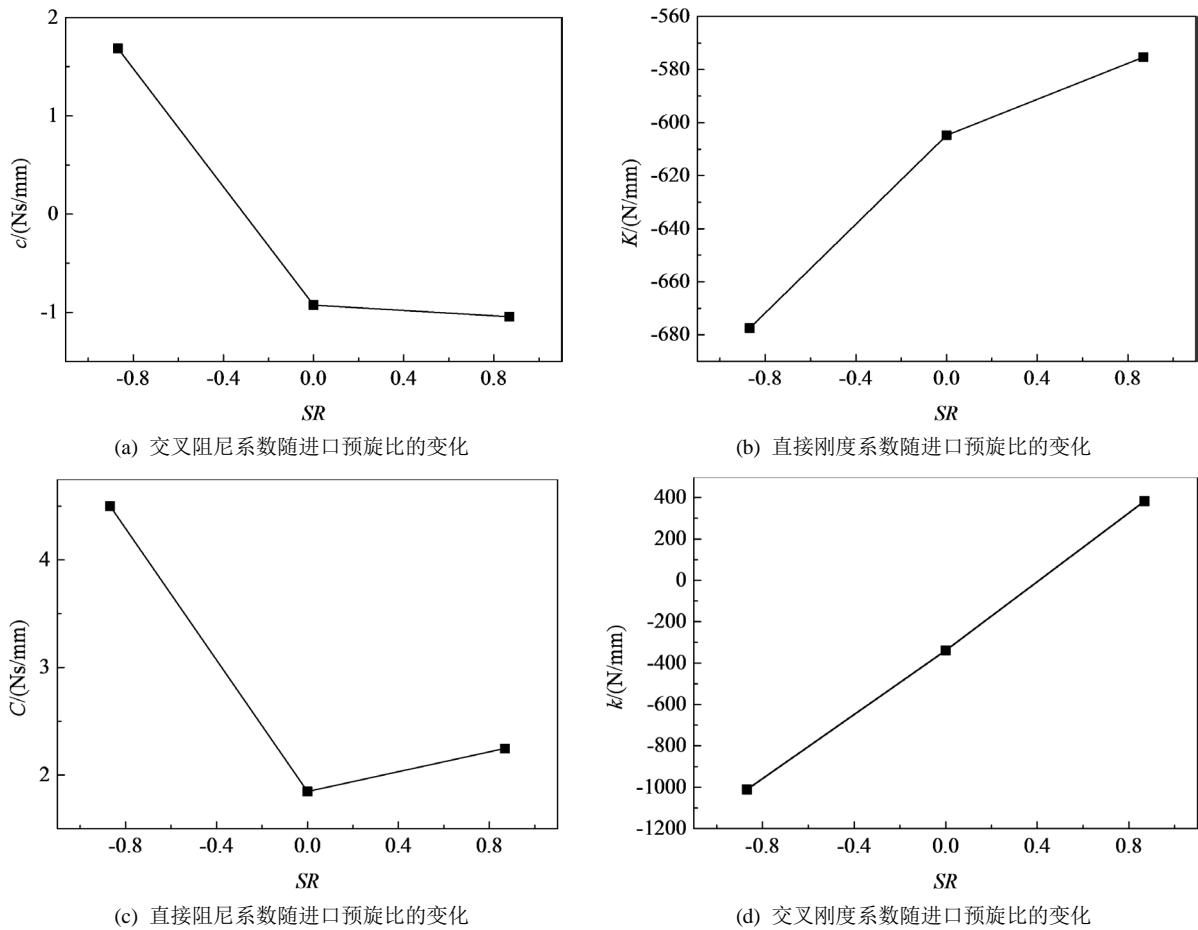


Figure 8. Seal dynamic characteristic coefficient under different imported pre-rotation ratio
图 8. 不同进口预旋比下密封动力特性系数

图 9 给出了不同进口预旋下密封涡动频率比 f 和有效阻尼系数 C_E ，由图 9(a)可以看出，在无进口预旋和负进口预旋下，密封涡动频率比均为负值，此时密封具有抑振效果，且进口负预旋越大，抑振效果越好。而在较大进口正预旋下，密封涡动频率比为正值，会使转子失去稳定性。由图 9(b)可以看出，在

无进口预旋和负进口预旋下，密封有效阻尼均为正值，而在较大进口正预旋下，密封有效阻尼系数为负值，可以得出上述相同的结论。

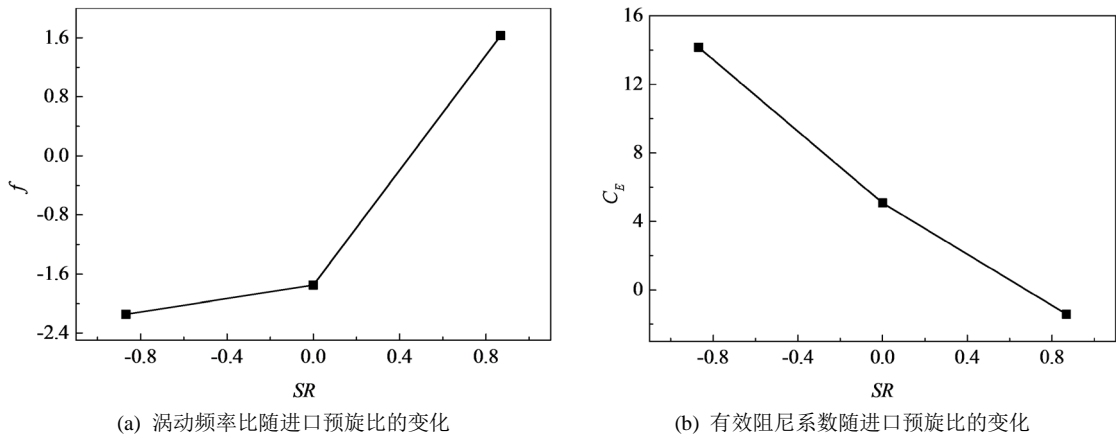


Figure 9. Whirl frequency ratio and effective damping coefficient under different inlet pre-swirls
图 9. 不同进口预旋下涡动频率比和有效阻尼系数

4. 转子转速对直通型迷宫密封动力特性的影响

为研究转子转速对密封动力特性的影响，在无进口预旋的条件下，对转子转速分别为 1000 rpm、5000 rpm、10,000 rpm 时偏心转子 - 密封流场计算。

图 10 给出了转子偏心率为 5% 时不同转速下，密封径向气流力的变化曲线。可见，在转子涡动速度小于转子自转速度的范围内，不同转速下的密封径向气流力基本上相等，同时也表现出弱涡动频率相关性。而在转子涡动速度大于转子自转速度时，高转速下的密封径向气流力表现出强涡动频率相关性，且随着转速的增大，这种涡动频率相关性越强，密封径向气流力随着涡动频率的增大而迅速增大。

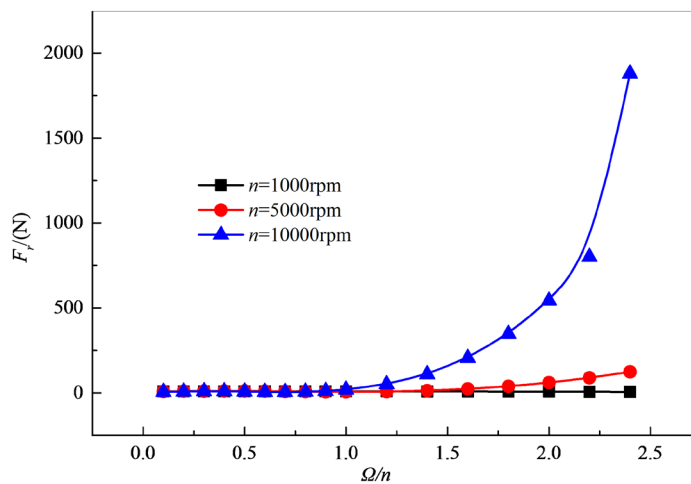


Figure 10. The change of seal radial air force with whirl frequency at different speeds ($e = 5\%$)
图 10. 不同转速下密封径向气流力随涡动频率的变化($e = 5\%$)

图 11 给出了转子偏心率为 5% 时不同转速下，密封切向气流力随转子涡动速度的变化。可见，在 1000 rpm 转速下，密封气流切向力随着转子涡动转速的增大而增大；在 5000 rpm 转速下，密封切向气流力随着转子涡动转速先增大后减小，在一定的涡动转速下减小为 0，随后随着涡动频率的增大而增大；

在 10,000 rpm 转速下, 密封切向气流力随着转子涡动转速的变化在大部分涡动速度范围内与 5000 rpm 转速下的变化规律相同, 只有在高涡动速度下还存在随着涡动频率先减小后增大的规律, 在高转速下密封切向气流力存在很强的涡动频率相关性, 且这种相关性随着转速的增大越来越强。在转子低频涡动下, 转子转速越高, 密封切向气流力越大且为负值, 密封抑制转子涡动的效果越好, 而在转子高频涡动下, 密封切向气流力由负值变为正值, 对转子涡动的抑制效果变为促进转子涡动效果, 可能导致转子系统失稳。

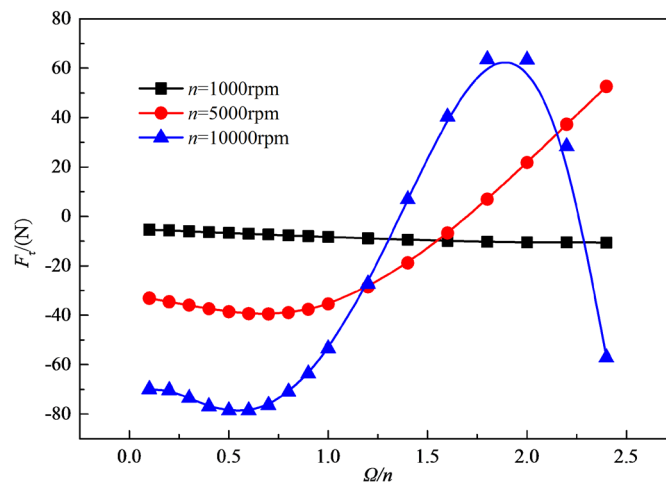


Figure 11. Change of seal tangential air force with whirl frequency at different speeds ($e = 5\%$)

图 11. 不同转速下密封切向气流力随涡动频率的变化($e = 5\%$)

图 12 给出了转速为 1000 rpm 时不同偏心率下, 密封单位偏心距气流力随转子涡动速度的变化。

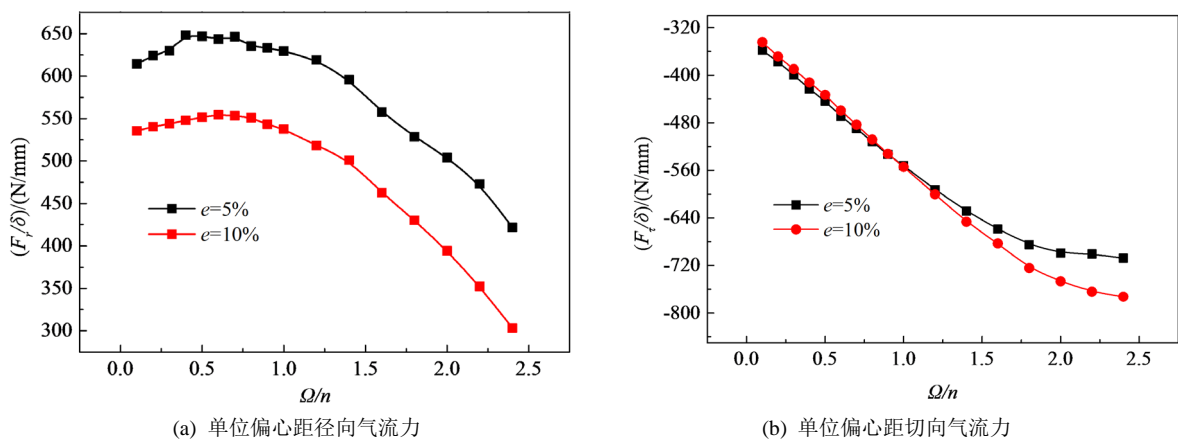


Figure 12. The change of air force per unit eccentricity with rotor whirl frequency under different eccentricity ($n = 1000$ rpm)

图 12. 不同偏心率下单位偏心距气流力随转子涡动频率的变化($n = 1000$ rpm)

图 13 给出了转速为 5000 rpm 时不同偏心率下, 密封单位偏心距气流力随转子涡动速度的变化。由图 13(a)可知, 偏心率为 5% 时的单位偏心距径向气流力在不同转子涡动频率下均大于偏心率为 10% 时, 且这种差距在转子涡动速度大于转速时更大, 可以推断出虽然密封径向气流力随着转子偏心率的增大而增大, 但增大的速率逐渐减缓。由图 13(b)可知, 偏心率为 5% 时的单位偏心距切向气流力与偏心率为 10% 时基本相同, 因此, 密封切向气流力随着转子偏心距增大而线性增大。

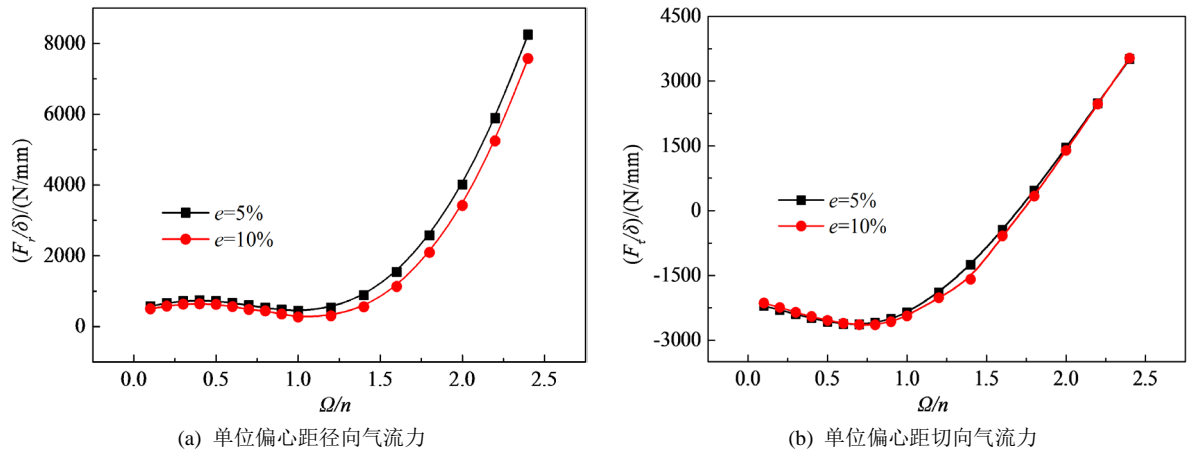


Figure 13. The change of air force per unit eccentricity with rotor whirl frequency under different eccentricity ($n = 5000$ rpm)
图 13. 不同偏心率下单位偏心距气流力随转子涡动频率的变化($n = 5000$ rpm)

图 14 给出了转速为 10,000 rpm 时不同偏心率下,密封单位偏心距气流力随转子涡动速度的变化。可见,偏心率为 5% 时的单位偏心距径向气流力和切向气流力均与偏心率为 10% 时基本相同,可以推断出密封气流力随着转子偏心距增大而线性增大。

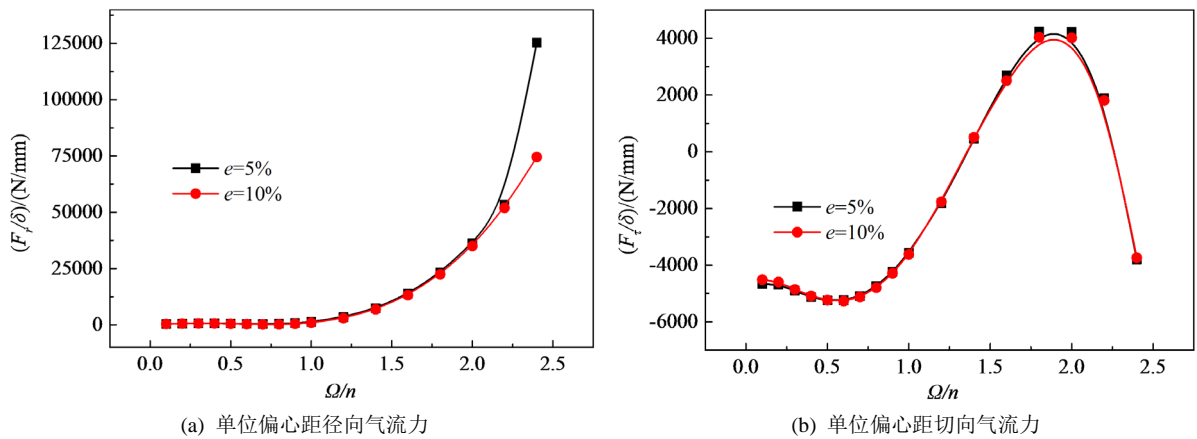
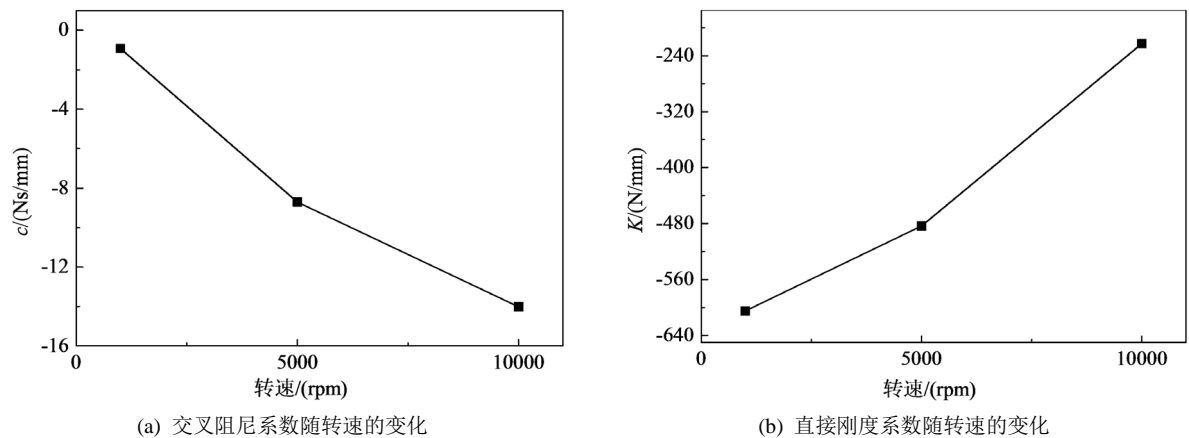


Figure 14. The air force of the seal unit eccentricity varies with the vortex frequency of the rotor under different eccentricity ($n = 10,000$ rpm)
图 14. 不同偏心率下密封单位偏心距气流力随转子涡动频率的变化($n = 10,000$ rpm)



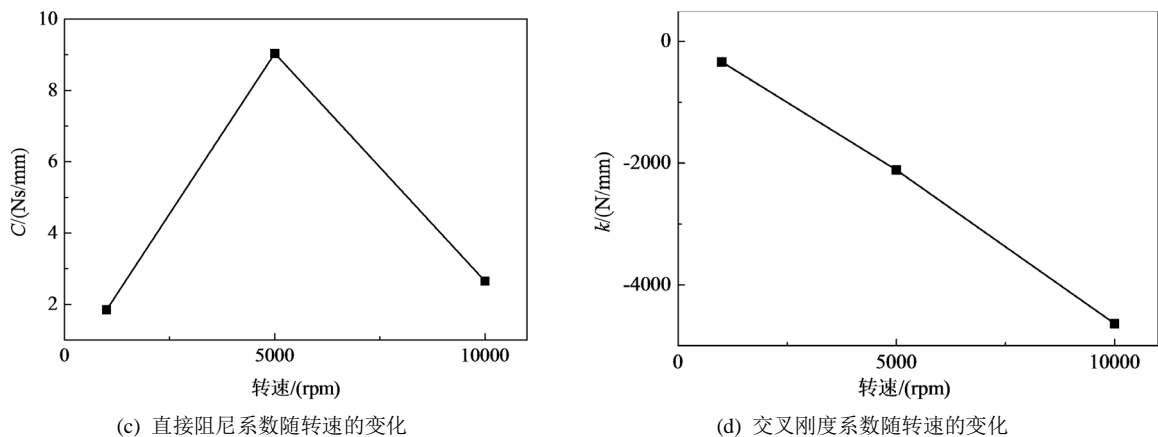


Figure 15. Seal dynamic characteristic coefficient at different speeds
图 15. 不同转速下的密封动力特性系数

图 15 给出了不同转速下的密封动力特性系数。由图 15(a)可知, 随着转速的升高, 密封交叉阻尼系数也增大, 且为负值。由图 15(b)可知, 直接刚度系数随着转速的升高而减小, 且为负值, 表明密封内流体作用在转子上的弹性力与转子偏心方向相反, 阻止转子向更大偏心发展。由图 15(c)可知, 密封直接阻尼系数随着转速先增大后减小, 且均为正值, 有利于转子的振动稳定性。由图 15(d)可知, 密封交叉刚度系数随着转速的增大而增大, 且均为负值, 有利于转子的振动稳定性。

图 16 给出了不同转速下密封涡动频率比 f 和有效阻尼系数 C_E 。由图 16(a)可知, 密封涡动频率比随着转速的增大而增大, 且均为负值, 根据稳定性判据, 对转子均起到抑振效果。由图 16(b)可知, 密封有效阻尼系数随着转速的增大而增大, 且均为正值, 因此对转子起到抑振作用, 有效阻尼越大, 对转子的抑振作用越强。

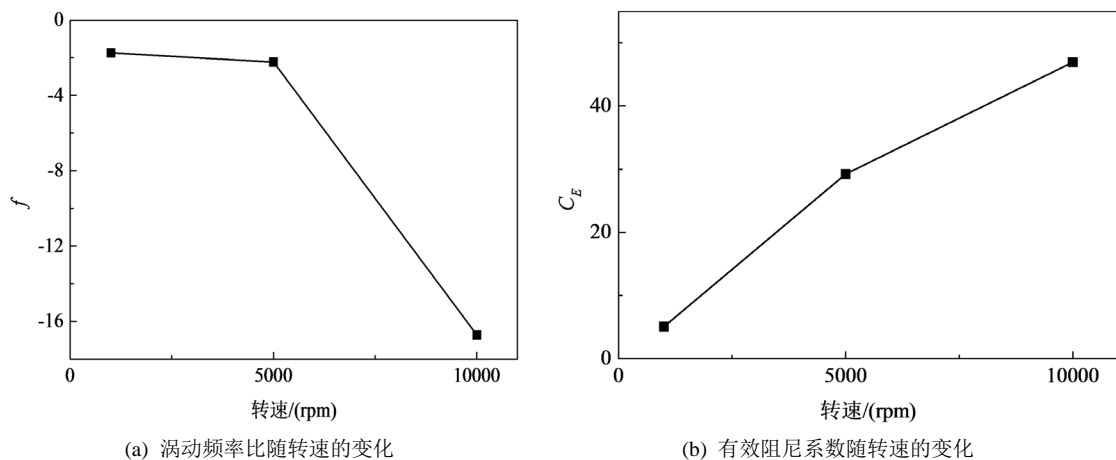


Figure 16. Whirl frequency ratio and effective damping coefficient at different speeds
图 16. 不同转速下涡动频率比和有效阻尼系数

5. 进出口压比对直通型迷宫密封动力特性的影响

迷宫密封通常会工作在不同的进出口压力下, 压比对密封泄漏特性影响很大, 同时也对密封动力特性影响很大。为研究压比对密封动力特性的影响, 本文保持出口平均静压不变, 通过改变进口总压来实现不同的压比, 本文选取的压比分别为 1.54、1.3 和 1.1。

图 17 给出了不同压比下，密封径向气流量随转子涡动速度的变化。从图中可以明显看出，密封进出口压比越大，密封径向气流量越大。不同压比下的密封径向气流量均为正值，即与转子偏心方向一致，促使转子向更大偏心方向发展。

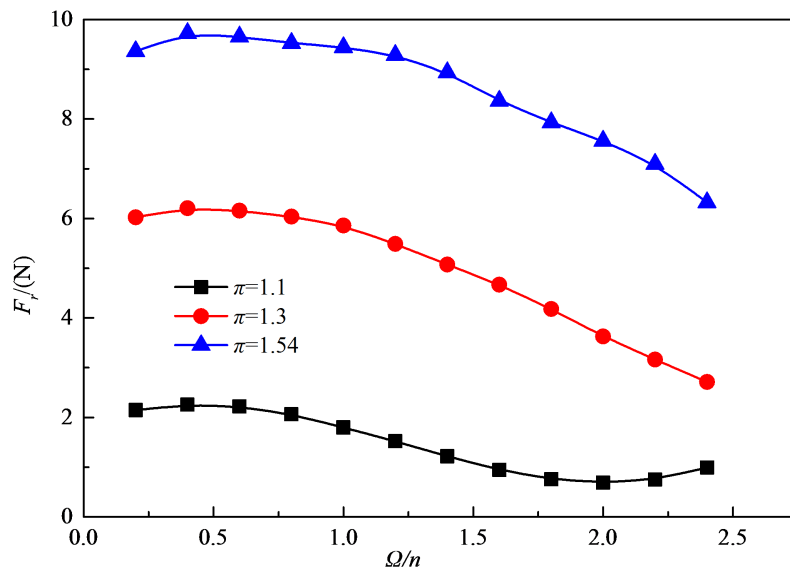


Figure 17. The change of the radial air force of the seal with the whirl speed of the rotor under different pressure ratios ($e = 5\%$)
 图 17. 不同压比下密封径向气流量随转子涡动速度的变化($e = 5\%$)

图 18 给出了不同压比下，密封切向气流量随转子涡动速度的变化。由图可知，压比为 1.1 时，密封切向气流量随转子涡动速度增大先增大后减小；压比为 1.3 时，密封切向气流量也是随着转子涡动速度增大先增大后减小；而当压比为 1.54 时，密封切向气流量随着转子涡动速度的增大而减小。不同压比下的密封切向气流量均为负值，与转子涡动方向相反，均起到抑制转子涡动的作用，在本文计算工况下，高压比下的切向气流量整体上大于低压比下的切向气流量。

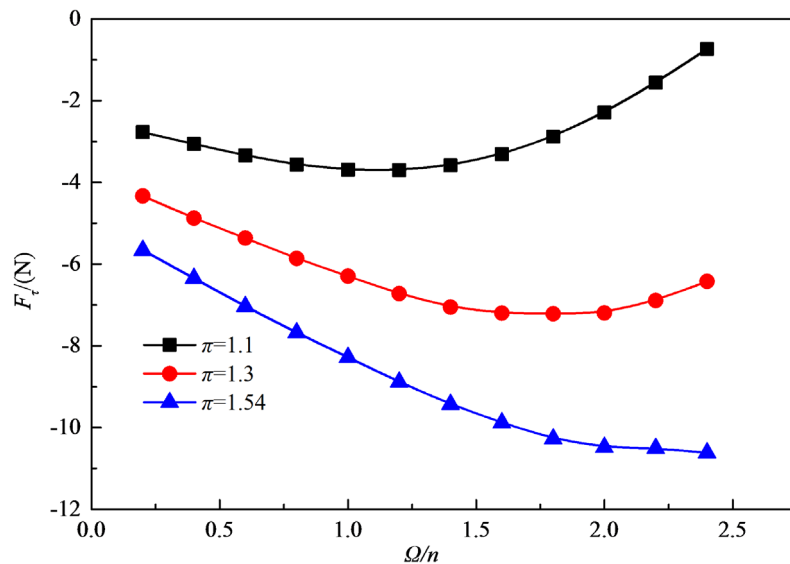


Figure 18. Change of seal tangential air force with rotor whirl speed under different pressure ratio ($e = 5\%$)
 图 18. 不同压比下密封切向气流量随转子涡动速度的变化($e = 5\%$)

图 19、图 20 和图 21 分别给出了压比为 1.1、1.3 和 1.54 时不同偏心下，单位偏心距气流量随转子涡动频率的变化。由图 19(a)、图 20(a)和图 21(a)可知，不同压比下偏心率为 5%时的单位偏心径向气流量整体上均大于偏心率为 10%时的单位偏心径向气流量，由此可以推断出密封径向气流量随着转子偏心率的增大而增大，但增大的速率逐渐减缓。由图 19(b)、图 20(b)和图 21(b)可知，在转子涡动频率小于自转频率的范围内，不同压比下偏心率为 5%时的单位偏心切向气流量与偏心率为 10%时的单位偏心切向气流量基本相同，密封切向气流量随着转子偏心距增大而线性增大；而当转子涡动频率大于自转频率时，不同压比下偏心率为 5%时的单位偏心距切向气流量大于偏心率为 10%时的单位偏心距切向气流量，因此密封切向气流量随着转子偏心率的增大而增大，但增大的速率逐渐减缓。

图 22 给出了不同压比下的密封动力特性系数，由图 22(a)可以看出，密封交叉阻尼系数随着压比的增大而增大，且均为负值；由图 22(b)可以看出，密封直接刚度系数随着压比的增大而增大，且均为负值；由图 22(c)可以看出，密封阻尼系数随着压比的增大而增大，且均为正值；由图 22(d)可以看出，密封交叉刚度系数随着压比的增大而增大，且均为负值。

图 23 给出了不同压比下密封涡动频率比 f 和有效阻尼系数 C_E 。由图 23(a)可以看出，密封涡动频率比随着压比先减小后增大，且均为负值，能够抑制转子的不稳定振动。由图 23(b)可以看出，密封的有效阻尼系数随着压比的增大而增大，且均为正值，能够消耗转子振动能量，达到抑振作用。

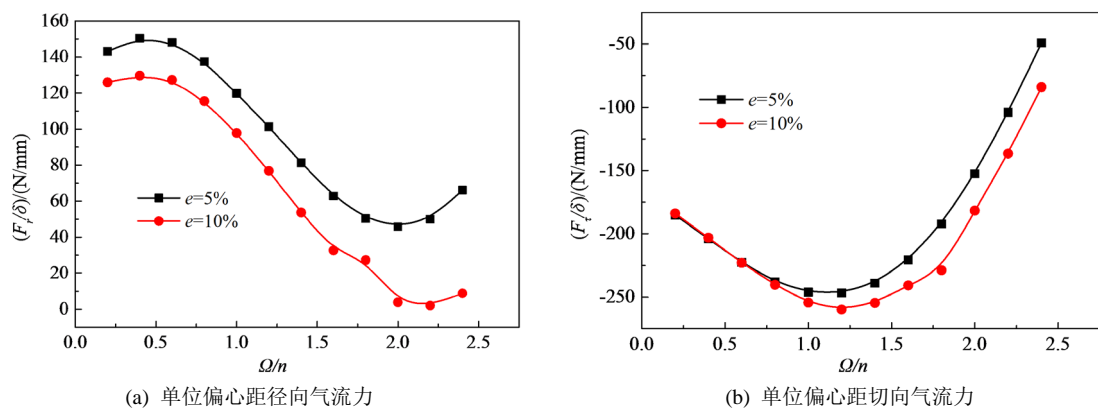


Figure 19. The change of air force per unit eccentricity with the vortex frequency of the rotor under different eccentricity ($\pi = 1.1$)

图 19. 不同偏心率下单位偏心距气流量随转子涡动频率的变化($\pi = 1.1$)

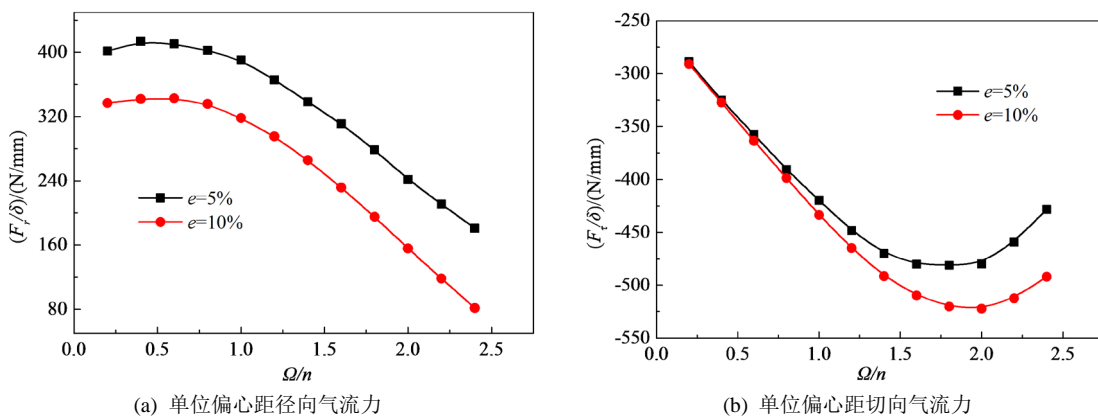


Figure 20. The change of air force per unit eccentricity with rotor whirl frequency of the rotor under different eccentricity ($\pi = 1.3$)

图 20. 不同偏心率下单位偏心距气流量随转子涡动频率的变化($\pi = 1.3$)

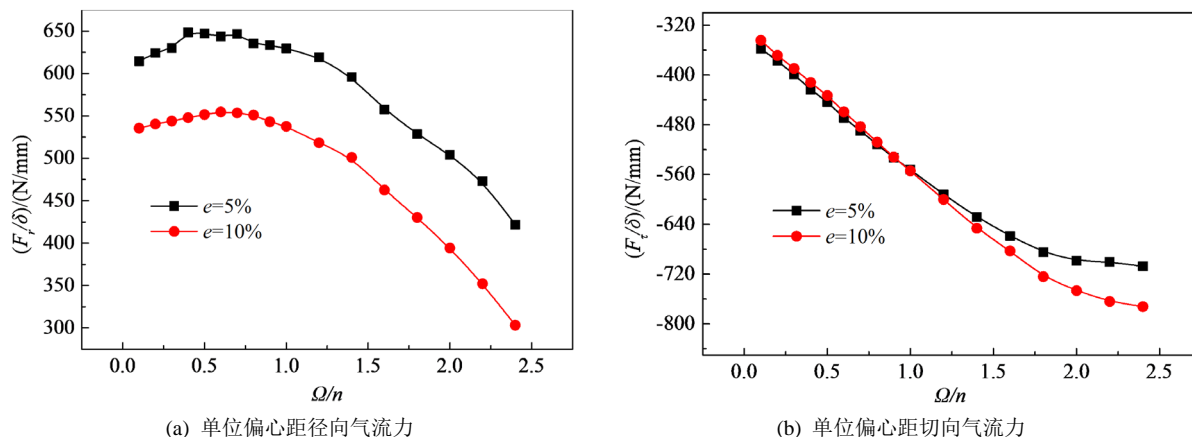


Figure 21. The change of air force per unit eccentricity with rotor whirl frequency of the rotor under different eccentricity ($\pi = 1.54$)

图 21. 不同偏心率下单位偏心距气流量随转子涡动频率的变化($\pi = 1.54$)

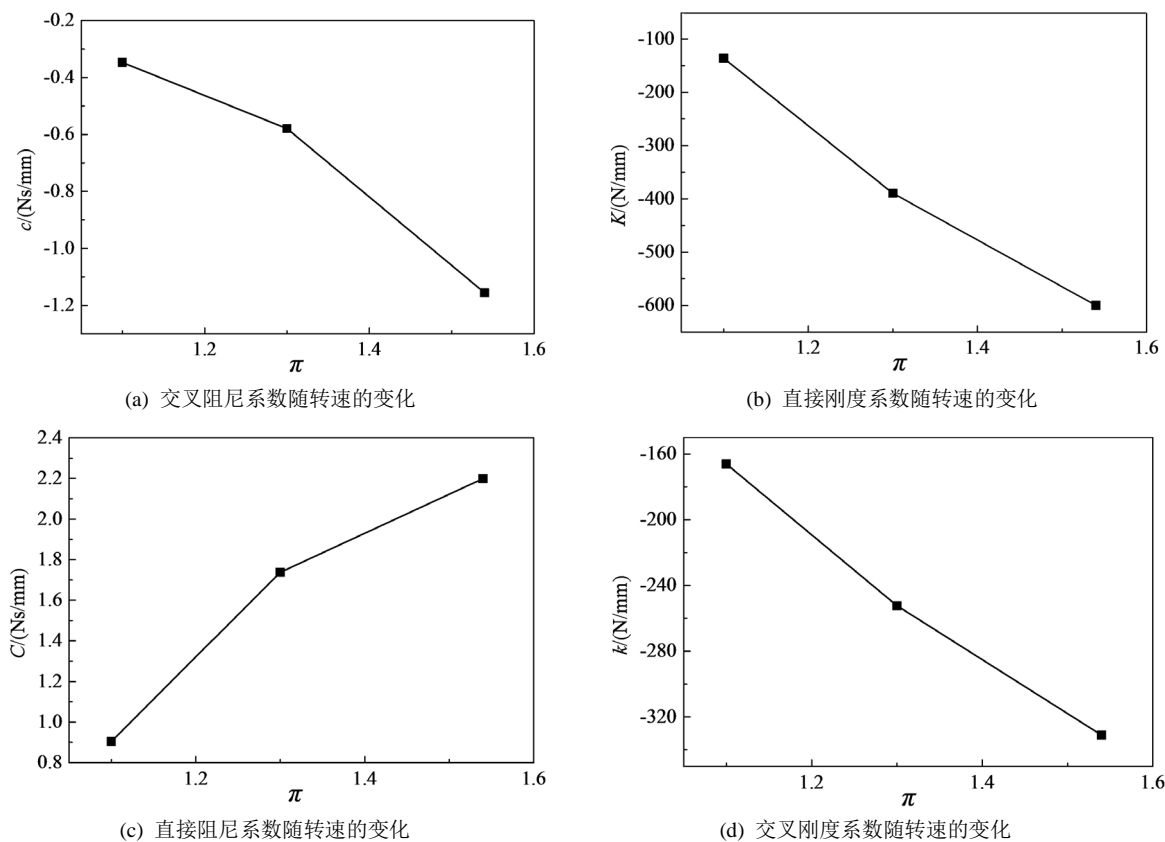


Figure 22. Seal dynamic characteristic coefficient under different pressure ratio

图 22. 不同压比下的密封动力特性系数

6. 结论

本文采用旋转坐标系方法计算了不同工况(进口预旋、转速和压比)下, 偏心率分别为 5% 和 10%、转子涡动速度为 10%~240% 倍转速的涡动转子 - 密封流场, 获得了作用在涡动转子上的径向气流量和切向气流量, 分析密封工况参数对其动力特性的影响。主要得出以下几点结论:

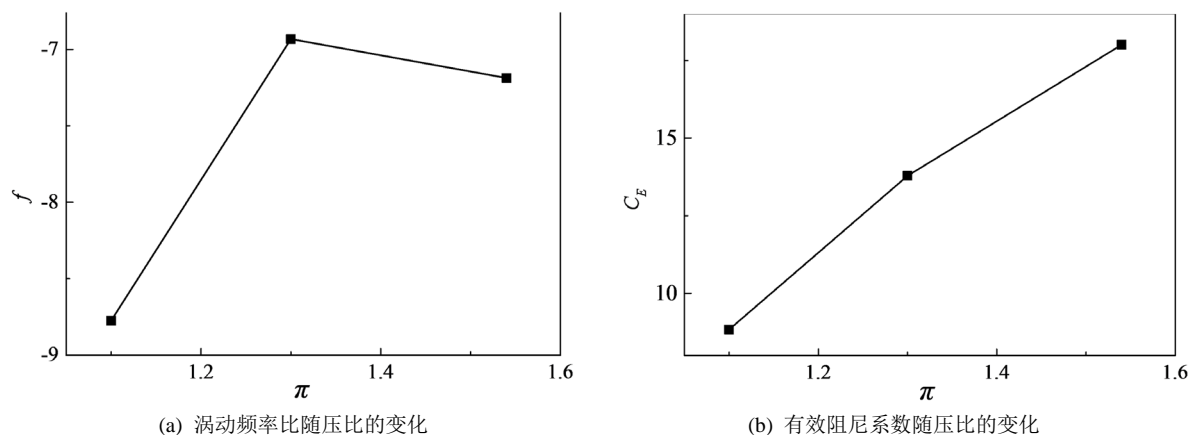


Figure 23. Whirl frequency ratio and effective damping coefficient under different pressure ratios

图 23. 不同压比下涡动频率比和有效阻尼系数

- 1) 进口预旋速度对密封径向气流力影响不大，而对密封切向气流力影响很大。
- 2) 转速对密封切向气流力有很大的影响，高转速下密封切向气流力在转子高频涡动下会变为正值，促进转子涡动，可能引起转子失稳；当转子涡动速度小于转速的范围内，转速对密封径向气流力影响不大，而当涡动速度高于转速时，高转速下密封径向气流力随转子涡动速度迅速增大。
- 3) 压比对密封径向气流力和切向气流力影响均很大，压比越高，密封气流力越大。
- 4) 不同工况下，密封径向气流力随着转子偏心率的增大而增大，但增大速率逐渐减缓。在转子涡动速度小于转速范围内，密封切向气流力随着转子偏心率增大而线性增大，而当转子涡动速度大于转速时，密封切向气流力随着转子偏心率增大而增大，但增大速率逐渐减缓。

参考文献

- [1] 顾乾磊, 张万福, 潘渤, 杨建刚. 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.
- [2] Zhang, W.F., Zhang, Y., Yang, J.G. and Li, C. (2016) Influence of Tilting Rotor on Characteristics of Fluid-Induced Vibration for Labyrinth Seals. *Journal of Vibroengineering*, 18, 5416-5431. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17737>
- [3] 张雨, 张开林, 姚远, 王晓鹏. 转子转速对迷宫密封性能影响的数值研究[J]. 机械设计与制造, 2017(3): 183-185.
- [4] 宋占宽, 曾永忠, 刘小兵, 余志顺, 邱胜. 基于 CFD 偏置迷宫密封泄漏特性研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(21): 150-153+179.
- [5] Kim, T.S. and Cham K.S. (2009) Comparative Analysis of the Influence of Labyrinth Seal Configuration on Leakage Behavior. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23, Article No. 2830. <https://doi.org/10.1007/s12206-009-0733-5>
- [6] 林丽, 刘卫华. 基于 FLUENT 的迷宫密封机理研究[J]. 中国机械工程, 2007(18): 2183-2186.
- [7] 黄建峰, 巴鹏, 张秀珩. 基于动网格的迷宫密封泄漏量动态模拟分析研究[J]. 压缩机技术, 2015(1): 20-23+51.
- [8] Bondarenko, G.A., Baga, V.N. and Bashlak, I.A. (2014) Flow Simulation in a Labyrinth Seal. *Applied Mechanics and Materials*, 630, 234-239. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.234>
- [9] 焦圳, 盖永庆, 王晓冬, 王智勇, 李强, 高飞, 刘琳琳. 齿形对类迷宫密封性能的影响研究[J]. 流体机械, 2015, 43(5): 24-27+69.
- [10] 崔亚辉, 王路遥, 张俊杰, 刘红, 李雪松, 王浩, 渠福来. 基于 CFX 的实验台迷宫密封动特性数值计算[J]. 汽轮机技术, 2016, 58(4): 253-256+259.
- [11] 陈尧兴, 李志刚, 李军. 进口预旋对高压迷宫密封流体激振转子动力特性的影响[J]. 润滑与密封, 2017, 42(11): 1-6+12.