

基于试验设计方法的液相孔型-迷宫密封 几何参数敏感性分析

薛文松, 王天昊, 李志刚, 李军

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了评估新型液相孔型-迷宫密封在转子偏心下的泄漏特性,提高其运行稳定性,提出了中心组合设计的试验设计方法。对新型液相密封中影响泄漏特性和静态转子动力特性的关键几何参数(迷宫腔室深度、宽度、孔深和孔径)进行敏感性分析;采用基于动网格技术和稳态 RANS 方程的数值计算方法求解 25 种几何参数组合的新型液相密封在 2 种偏心率(0.1、0.2)下的泄漏量、静态气流激振力和静态刚度系数;分别以泄漏量、静态气流激振力和静态刚度系数为响应,以 4 个几何参数为变量获得主效应图。结果表明:偏心率对泄漏量的大小以及其几何参数敏感性影响很小,当腔室深度、宽度、孔深和孔径分别在 40%、24%、56%、44% 水平时,泄漏量最小;在转子偏心下,切向力随着迷宫腔室深度与宽度的增加而单调递减,随着孔深与孔径的增加先增加后减小;径向力随着腔室深度的增加而增加,随着腔室宽度的增加先减小后增加;当偏心率增加到 0.2 时能找到使静态直接刚度最大的几何参数组合,此时腔室深度、宽度、孔深和孔径分别在 24%、48%、40% 和 64% 水平。在转子偏心与不偏心工况下,腔室深度与宽度的增加均会造成静态交叉刚度的单调递减;转子偏心时静态交叉刚度随着孔深与孔径的增加先增加后减小。该研究结果可为液相孔型-迷宫密封的性能分析和结构设计提供参考。

关键词: 液相密封;泄漏量;静态流体激振力;静态刚度系数;试验设计方法

中图分类号: TH136 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202403006 **文章编号:** 0253-987X(2024)03-0058-11

Sensitivity Analysis of Liquid Hole-Pattern Stator/Parallel-Grooved Rotor Seal Design Parameters Based on Design of Experiments Method

XUE Wensong, WANG Tianhao, LI Zhigang, LI Jun

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To evaluate the leakage performance of the novel liquid hole-pattern stator/parallel-grooved rotor seal under rotor eccentricity and improve its operational stability, a central composite design (CCD) is proposed as a design of experiments (DOE) method. A sensibility analysis of key geometric parameters, including cavity depth, cavity length, hole depth, and hole diameter, is conducted to investigate their impact on the leakage performance and rotor stability. A numerical computation approach is adopted, utilizing the mesh deformation technique and steady-state RANS equations, to solve for the leakage, static aero-excitation force, and static stiffness coefficient of the novel liquid seal for 25 combinations of geometric parameters. The

收稿日期: 2023-07-12。 作者简介: 薛文松(1994—),男,博士生;李军(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项

目: 国家自然科学基金资助项目(52176042)。

网络出版时间: 2023-12-05

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231205.1516.004>

computations are performed under two eccentricity values (0.1 and 0.2). The main effects plot is obtained, taking the leakage, static aero-excitation force, and static stiffness coefficient as responses and the four geometric parameters as variables. The results indicate that eccentricity has little effect on the leakage and its parameter sensitivity, and the leakage is the smallest when cavity depth, cavity length, hole depth, and hole diameter are at 40%, 24%, 56%, and 44% of their respective levels. When the rotor is eccentric, the tangential force decreases monotonically with the increase of cavity depth and width, while it increases first and then decreases with the increase of hole depth and diameter. The radial force increases monotonically with the increase of cavity depth, while it decreases first and then increases with the increase of cavity width. When eccentricity increases to 0.2, a geometric parameter combination can be identified that maximizes the static direct stiffness. In this case, the cavity depth, cavity width, hole depth, and hole diameter are at 24%, 48%, 40%, and 64% of their respective levels. Under both eccentric and non-eccentric rotor conditions, the static cross-coupling stiffness decreases monotonically with the increase of cavity depth and width. When the rotor is eccentric, the static cross-coupling stiffness increases first and then decreases with the increase of hole depth and diameter. This study can provide reference for the performance analysis and structure design of the liquid hole-pattern stator/parallel-grooved rotor seal.

Keywords: liquid seal; leakage flow rate; static fluid-induced forces; static stiffness coefficients; design of experiments method

环形密封广泛应用于压气机、离心泵等透平机械中以减小动静间隙的工质泄漏^[1-2]。在液相环境中,常用的密封形式有光滑密封、迷宫密封和螺旋密封。随着全球对深海油气资源的不断开发,广泛使用的电动潜水泵也在进行不断的优化。电动潜水泵具有多级、长轴系结构的特点,因此,转子偏心产生的气流激振力会对轴系稳定性造成不可忽视的影响^[3]。

对于液相旋转机械来说,引起转子偏心的情况很多,偏心意味着转子中心、静子中心或同时偏离旋转轴线^[4]。常见的偏心原因有安装转子和密封静子时两者未同心,较长柔性转子在重力下沿径向弯曲,不平衡力使转子同步涡动以及气流力使转子非同步涡动^[5]。其中,转子偏心会造成动态动力响应行为(转子偏心涡动)或静态动力响应行为(转子偏心旋转)。转子在偏心状态下会导致密封腔室内的压力沿周向不均匀分布,进而产生作用在转子上的流体激振力。

位于转子面或静子面的液相迷宫密封通过减小工质耗散来减小泄漏量,从而广泛应用于液相透平机械。相比于光滑密封,迷宫密封拥有更好的泄漏特性,但是由于迷宫槽的存在使密封内的平均间隙增大,导致液膜动态流体力减小以及液膜周向速度增大,最终导致其转子动力特性比光滑密封有明显的下降^[6-7]。马凯等^[8]研究了不同偏心率下气相梳齿密封静特性变化,结果表明,偏心状态下,梳齿密

封会产生一个使转子偏离中心的气流力和负的直接刚度,且两者都随偏心率的增大而不断增加。秦鹏博等^[9]建立了不同偏心状态下气相迷宫密封三维数值分析模型并计算密封静态特性,结果表明随着偏心率的增大,密封小间隙侧流动黏性效应增强是产生负静态直接刚度的主要原因。Marquette等^[10]采用实验研究对比了迷宫密封与光滑密封在液相中静态偏心下的转子动力特性,研究表明静子面有沟槽的迷宫密封拥有较大的负直接刚度和较小的有效阻尼。Moreland等^[11-13]针对迷宫槽分别在转子面和静子面的液相迷宫密封进行了实验测量,结果表明增加进口预旋会显著削弱二者的直接刚度并提升交叉刚度,破坏二者的聚中能力以及转子稳定性。

由于在液相中工质密度和黏度更大、且不可压缩等特性,使得流体激振问题更为显著,急需研发高效可靠的先进密封形式。以往研究多采用阻尼密封和混合密封的方式来改善液相密封的泄漏特性和转子动力特性。Kaneko等^[14]实验研究对比了液相蜂窝密封和光滑密封的转子动力特性,结果表明,将光滑静子面改为带有孔型的静子面后密封拥有更小的泄漏量和交叉刚度,以及更大的直接刚度系数。Nagail等^[15]将静子面螺旋密封改为螺旋和直通段相组合的密封形式,结果表明新型密封结构具有更小的泄漏量和更大的流体激振力。Childs等^[16]在

液相光滑密封的静子面上加工出不同形状的孔腔并实验测量了其泄漏特性和转子动力特性,研究表明圆形孔腔拥有最优的泄漏特性和转子动力特性。Childs 等^[17-18]研究了孔深和孔隙率对液相孔型阻尼密封的影响,并与静子面光滑的光滑密封进行了对比,发现孔隙率为 34% 且孔深为密封间隙的 3 倍时,可获得最大净阻尼;在相同的间隙下,孔型定子密封的泄漏比光滑密封少约 1/3,具有大致相同的阻尼性能,并且刚度值降低约 20%。Childs 等^[19]通过实验进一步验证了液体孔型阻尼密封主要通过降低密封内的周向旋流速度来增大有效阻尼。Fang 等^[20]在液相转子面螺旋密封的基础上发明了孔型-螺旋密封和袋型-螺旋密封,研究表明在高转速下新型密封比迷宫密封有更大的有效阻尼。方志等^[21]采用数值方法研究了液相中孔型密封倾角对泄漏特性的影响,结果表明倾斜角为 30° 的周向斜孔密封和倾斜角为 20° 的轴向倾斜孔具有更低的泄漏量。之后方志等^[22]又研究了液相孔型密封深径比对泄漏特性的影响,结果表明随着孔深径比增加,液体孔型密封泄漏量先减小后增大。杨兴辰等^[23]建立气相迷宫-蜂窝混合型密封三维数值分析模型,研究密封在不同偏心率下静态稳定性,发现与传统迷宫密封相比,迷宫-蜂窝混合型密封静态刚度系数绝对值较小,稳定性较高。试验设计(DOE)方法对产品工艺参数的量化分析,对寻找并控制关键参数有着重要作用。Untaroiu 等^[24]将 DOE 技术应用在了迷宫密封的防旋板上,分析了防旋板的几何参数对其反旋流性能的影响,结果表明,气流平均周向速度与防旋板有效长度呈明显的二次函数关系。

本文提出了新型液相孔型-迷宫密封,并基于 DOE 中心组合设计试验方法以及动网格和定常 RANS 方法求解转子偏心下产生的泄漏量、气流激振力,计算分析了液相孔型-迷宫密封中迷宫齿深(L_d)、腔宽(L_w)、孔深(H_d)和孔径(H_r)在转子偏心下对泄漏量、气流激振力以及静态刚度系数的影响。

1 计算模型和数值方法

1.1 计算模型及网格

选取 Moreland 等^[12]测试的液相转子面迷宫密封实验件为基础研究模型,图 1 给出了孔型-迷宫密封的计算模型以及计算网格。该实验件的转子面上有 15 个矩形迷宫沟槽,腔室深度、宽度和迷宫齿厚度都是 1.524 mm。

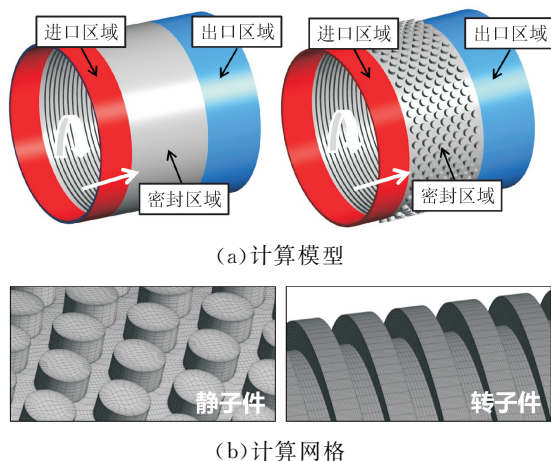
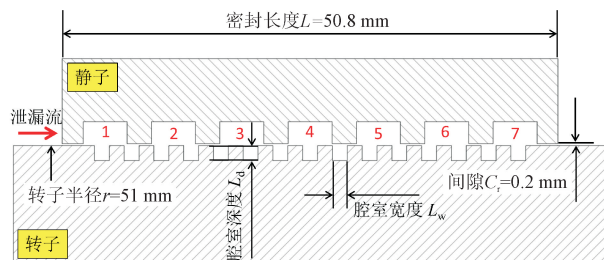
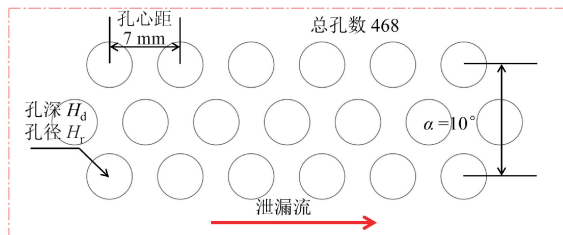


图 1 基准迷宫密封以及孔型-迷宫密封计算模型与计算网格
Fig. 1 Computational domain and grid of basic labyrinth seal and the hole-pattern stator/parallel-grooved rotor seal

基于该迷宫密封实验件,保持密封间隙 0.2 mm、转子直径 102 mm 以及密封段长度 50.8 mm 不变。将光滑静子面换成带有孔型结构的静子件,设计了如图 2 所示的孔型-迷宫密封结构。图 2 给出了孔型-迷宫密封的几何参数。其中在静子面上增加了 468 个孔型结构,孔心距为 7 mm,沿周向每隔 5° 有一列孔型结构。在进行静态偏心求解中,迷宫腔深度、宽度、孔深以及孔径在给定分析范围内均匀选取 5 个参数;在动态求解验证时,迷宫腔的深度与宽度均为 1.524 mm。



(a) 密封子午面图



(b) 孔腔排列

图 2 孔型-迷宫密封几何结构

Fig. 2 The structure diagram of the hole-pattern stator/parallel-grooved rotor seal

采用 ANSYS ICEM 软件分别对静子孔型密封域以及转子迷宫密封域进行结构化网格划分,如图

1 所示。所有网格在壁面均进行了加密处理,总体网格质量良好。所有计算模型的网格节点数均大于 6.0×10^6 , 满足网格无关性要求,且动态求解下得到的转子动力特性系数与实验值吻合良好。

1.2 数值方法

当密封转子和静子的轴线相同时,在密封间隙的工质不会产生作用在转子上的流体激振力。但是,当转子轴系较长而在重力作用下发生弯曲以及转子发生振动或涡动时,密封间隙的工质将在周向不均匀分布并产生作用在转子上的流体激振力,从而影响转子系统的稳定性。根据小位移涡动理论可知,对于工质为液相的密封结构而言,密封腔室内作用在转子上的气流激振力与转子涡动位移、速度以及加速度存在如下关系^[25]

$$-\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{D}_x \\ \dot{D}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{D}_x \\ \ddot{D}_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (F_x, F_y) 为工质作用在转子上的气流激振力; (D_x, D_y) 为转子涡动位移; K_{nm}, C_{nm}, M_{nm} 分别为刚度系数、阻尼系数和虚拟质量项,下标 m, n 分别表示气流激振力方向和转子涡动位移方向。

在动态求解时,利用多频椭圆涡动模型模拟转子偏心涡动,基于密封阻抗-涡动频率最小二乘法拟合方法可以提取液相密封的频率无关刚度、阻尼以及虚拟质量等动力特性参数^[26-27]。在 CFX Pre 软件中设定转子涡动位移,转子运动轨迹如下

$$\begin{cases} D_x = a \sum_{i=1}^N \cos(i\Omega_0 t) \\ D_y = b \sum_{i=1}^N \sin(i\Omega_0 t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: a, b 分别为涡动轨迹的长轴和短轴,它们分别为密封间隙的 2.0% 和 1.0%; Ω_0 为涡动的基准频率,为 20 Hz; N 是涡动的频率数,为 10 个频率。之后采用 FFT 变换将方程(1)中时域信号下的转子气流激振力和涡动位移转化为频率信号进行求解,则频域求解的力-位移方程为

$$-\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{yy} \\ H_{yx} & H_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $H_{nm} = K_{nm} - \Omega^2 M_{nm} + j(\Omega C_{nm})$, 为密封阻抗系数,其中 Ω 为涡动频率, j 表示虚部。数值模拟过程中,作用在转子上的气流激振力和涡动位移会被实时记录。通过对静子件受力分析,得到如下所示的密封阻抗系数的实部与虚部

$$\begin{cases} \text{Re}(H_{nm}) = K_{nm} - \Omega^2 M_{nm} \\ \text{Im}(H_{nm}) = \Omega C_{nm} \end{cases} \quad (4)$$

当转子发生静态偏心时,将式(2)中的转子位移改为如下所示的两个常数^[28]

$$\begin{cases} D_x = \epsilon C_r \\ D_y = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: D_x 设为偏心率 ϵ 乘以密封间隙 C_r ; D_y 设为 0。本文中选取的偏心率为 0.1 和 0.2。

在转子静态偏心条件下,转子的涡动速度以及加速度均为 0。根据该特点对式(1)进行简化,忽略力-位移线性方程中的阻尼项和虚拟质量项。本文采用的数值计算方法项目及属性如表 1 所示。

表 1 数值计算方法项目及属性

Table 1 Numerical method and model parameters

项目	属性
求解器	ANSYS CFX
离散格式	高精度格式
求解方法	定常数值方法,动网格技术
湍流模型	标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,改进壁面函数法
工质	油 (ISOVG2)

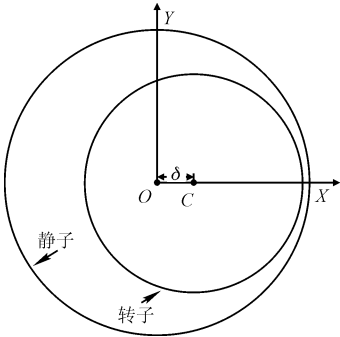
通过求解流体激振力对偏心位移的偏导数获得静态刚度系数为

$$K_{xx} = - \left. \frac{\partial F_x}{\partial \delta_x} \right|_{\delta_x = \epsilon C_r} \quad (6)$$

$$K_{xy} = \left. \frac{\partial F_y}{\partial \delta_x} \right|_{\delta_x = \epsilon C_r} \quad (7)$$

式中: δ_x 表示偏心位移。

图 3 给出了转子静态偏心模型,采用动网格技术使转子中心沿 X 轴正静态偏移,偏心距为偏心率乘以密封间隙。将流体激振力关于偏心距进行多项式拟合并求导,即可获得不同偏心率下的静态刚度系数。



C—转子中心;O—静子中心。

图 3 密封转子偏心模型

Fig. 3 Rotor eccentricity model

1.3 几何参数敏感性分析方法

已有研究表明,在液相孔型-迷宫密封中,迷宫腔室深度、宽度、孔深和孔径将对密封泄漏特性以及

转子动力特性产生明显的影响。然而很少有研究系统地分析这 4 个参数对密封性能的影响。

为科学合理地安排实验,用最小的实验次数和周期来得到多个参数在给定范围内对实验结果的影响,通常采用试验设计方法来设计实验并进行后处理分析。试验设计方法在多个变量参数给定的范围内按照一定的规律挑选多个参数组合方案,通过后处理分析各参数对实验结果的影响大小并达到改进的目的。表 2 给出了迷宫腔室深度(因素 A)、宽度(因素 B)、孔深(因素 C)和孔径(因素 D)的四因素五水平编码表。表 3 给出了基于中心组合设计方法给出的 16 种四因子两水平的全因子试验方案、1 种中心点试验方案以及 8 种轴点试验方案。

表 2 四因素五水平编码表

Table 2 Four-factor and five-level coding table

水平数	迷宫腔 深度/mm	迷宫腔 宽度/mm	孔深/mm	孔径/mm
1	0.724	0.724	0.25	3.5
2	1.124	1.124	1.25	4.0
3	1.524	1.524	2.25	4.5
4	1.924	1.924	3.25	5.0
5	2.324	2.324	4.25	5.5

表 3 试验方案

Table 3 Test scheme

试验方案	孔型-迷宫密封水平数			
	迷宫腔深度	迷宫腔宽度	孔深	孔径
1	2	2	2	2
2	2	2	2	4
3	2	2	4	2
4	2	2	4	4
5	2	4	2	2
6	2	4	2	4
7	2	4	4	2
8	2	4	4	4
9	4	2	2	2
10	4	2	2	4
11	4	2	4	2
12	4	2	4	4
13	4	4	2	2
14	4	4	2	4
15	4	4	4	2
16	4	4	4	4
17	3	3	3	3
18	1	3	3	3
19	5	3	3	3
20	3	1	3	3
21	3	5	3	3
22	3	3	1	3
23	3	3	5	3
24	3	3	3	1
25	3	3	3	5

采用定常求解 RANS 方程的方法来获得上述 25 种密封结构在不同偏心率下的泄漏量以及气流激振力,计算工况点为表 4 中的工况 3。根据式(6)和式(7),对转子静态偏心下的切向气流激振力和径向气流激振力分别在偏心率为 0~0.2 的范围内进行拟合并求导,其中偏心距为 0 时无气流激振力。最终通过求导获得偏心率为 0、0.1 和 0.2 下的静态刚度系数。

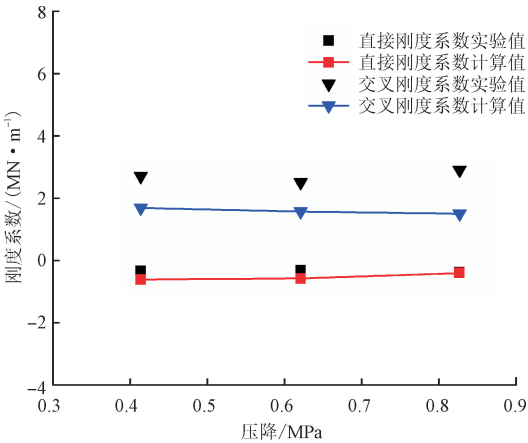
表 4 计算工况

Table 4 Operating conditions

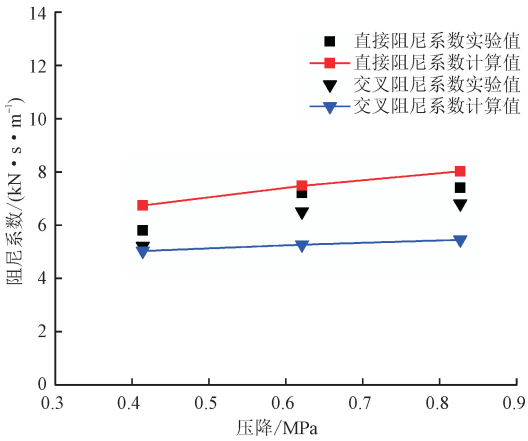
工况	进口总压/ MPa	出口总压/ MPa	转速/ (r · min ⁻¹)
1	0.514	0.1	6 000
2	0.721	0.1	6 000
3	0.927	0.1	6 000

1.4 数值方法验证

图 4 给出了不同压比下,液相转子面迷宫密封动态刚度系数、阻尼系数以及虚拟质量数值计算结果与实验值对比。可以看出,相比 Moreland 等^[11-12]的实验值,除直接虚拟质量明显被低估(-41.2%)外,利用当前基于转子偏心的方法可以较准确地预测液相密封的转子动力系数。



(a)刚度系数



(b)阻尼系数

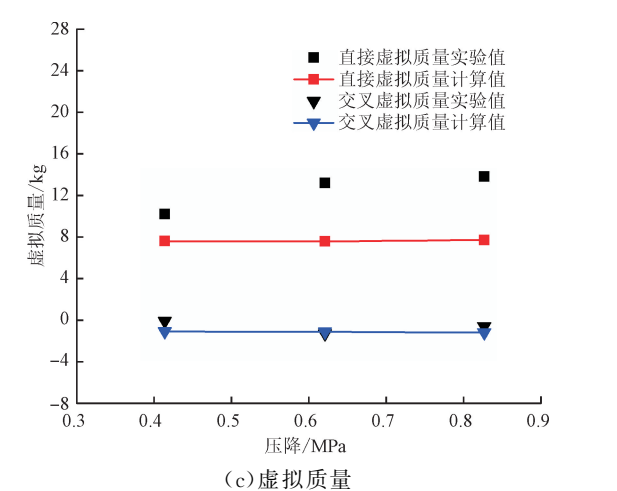


图 4 转子动力特性系数的数值计算与实验结果对比

Fig. 4 Comparison between numerical simulation and experimental measurement of rotordynamic parameters

2 结果与讨论

2.1 泄漏量参数敏感性分析

主效应图表示各因子在某个水平时所有试验中响应的平均值。图 5 给出了基于密封泄漏量的主效应图,横轴表示几何参数的区间归一化,低水平代表 0,高水平代表 1。当偏心率为 0.1 和 0.2 时,二次多项式拟合模型拟合精度 R^2 分别为 0.927 5、0.917 6。

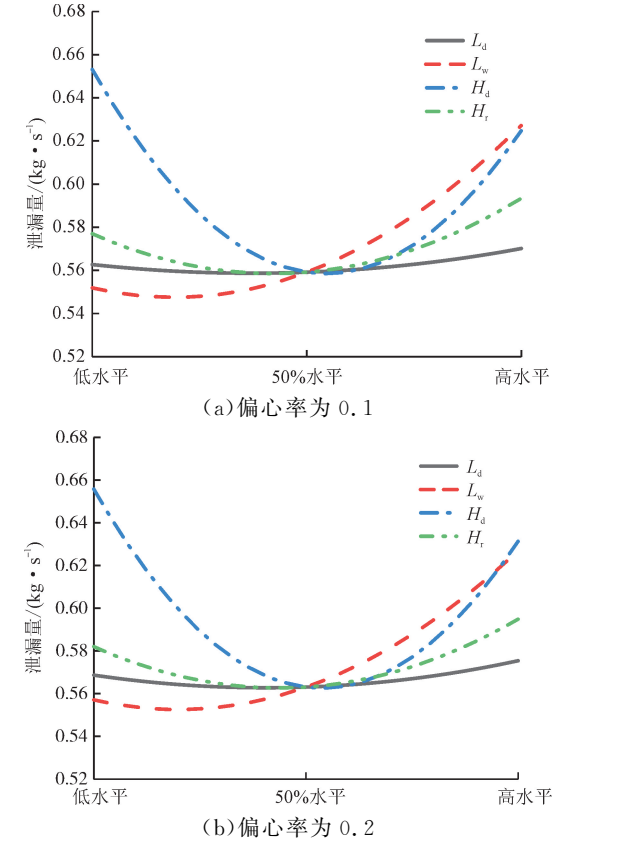


图 5 泄漏量主效应图

Fig. 5 Main effect diagram of leakage

从图 5 可以看出,偏心率从 0.1 增加到 0.2 后泄漏量以及泄漏量对几何参数的敏感性几乎没有变化;泄漏量随迷宫腔室深度、宽度、孔深以及孔径增加呈现出先降低后增加的趋势。说明在给定参数范围内存在最佳几何参数组合使泄漏量最小,此时 4 个几何参数分别在 40%、24%、56%、44% 水平。就腔室深度而言,密封泄漏量在整个因子水平范围内变化幅度小于 2.1%,因此可认为密封泄漏量受腔室深度的影响最小。对泄漏量影响较大的几何参数依次为腔室宽度、孔深以及孔径,在整个因子水平范围内泄漏量变化幅度分别为 14.5%、16.9% 以及 6.2%。

2.2 气流激振力参数敏感性分析

图 6 给出了基于径向气流激振力的主效应图,且当偏心率为 0.1 和 0.2 时,二次多项式拟合模型拟合精度 R^2 分别为 0.921 4、0.955 0。规定当径向力为正时,转子径向气流激振力径向向外。径向力越小,转子聚中能力越强,转子系统越稳定。如图 6 所示,随着偏心率的改变,径向力对几何参数的敏感性也在发生改变。

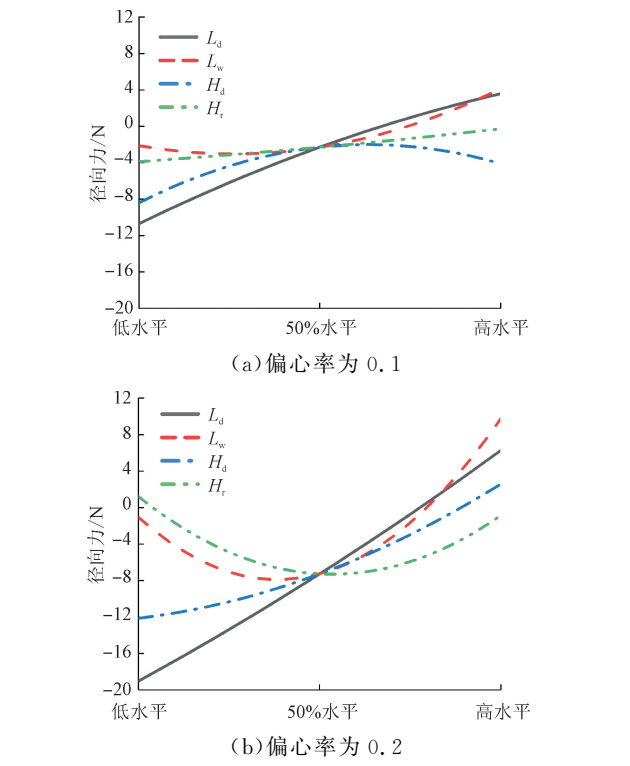


图 6 径向力主效应图

Fig. 6 Main effect diagram of radial force

从图 6 可以看出,在给定几何参数范围内,径向力随着腔室深度单调增加,且随着偏心率增加,腔室深度对径向力的影响逐渐增大,偏心率由 0.1 增加到 0.2 时,径向力在腔室深度从低水平到高水平的增幅由 14.3 N 增加到 25.3 N。可见,当转子存在

偏心时,应当尽量选择较小的转子面迷宫腔深度。在给定的几何参数范围内,径向力随着腔室宽度的增加先减小后增加,因此可以根据转子偏心程度来选取合适的腔室宽度来减小径向力。在偏心率分别为 0.1 和 0.2 时,腔室宽度的最佳水平分别为 28% 和 40%。当偏心率改变时,径向力对孔深和孔径的参数敏感性会发生改变。当偏心率从 0.1 增加到 0.2 时,径向力由随着孔深增加先增加后减小变为单调增加;径向力由随着孔径增加单调增加变为先减小后增加。

图 7 给出了基于切向气流激振力的主效应图,且偏心率分别为 0.1 和 0.2 时,二次多项式拟合模型拟合精度 R^2 分别为 0.957 1、0.928 5。当切向力为正时,转子切向气流激振力与转子转动方向相同。由于在所有工况下切向力均为正值不利于转子稳定,因此切向力越小越能改善转子系统的稳定性。

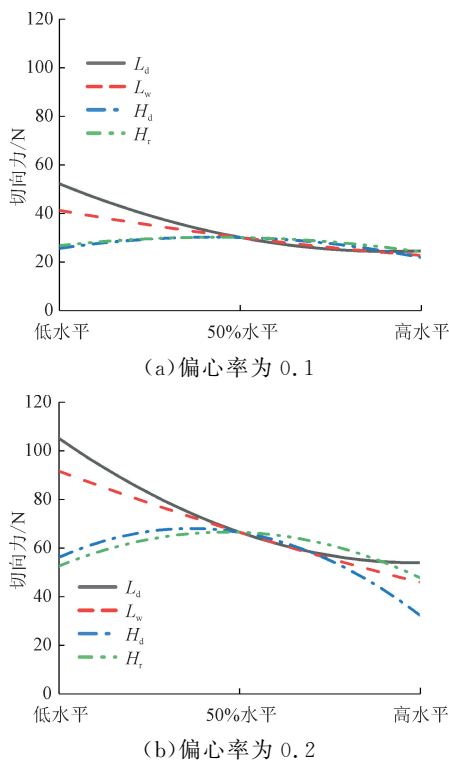


图 7 切向力主效应图

Fig. 7 Main effect diagram of tangential force

如图 7 所示,偏心率的增加会显著增加切向力,25 个工况下的平均切向力由 29.93 N 增加到 60.90 N。在不同偏心率下,每个几何参数改变对切向力的影响规律是相似的。切向力随着腔室深度和宽度的增加而单调递减,随着孔深和孔径的增加先增加后减小。当偏心率为 0.1 时,腔室深度、宽度、孔深以及孔径从低水平到高水平,在整个因子水平范围内对切向力改变的幅度分别为 114.3%、81.4%、38.5%以

及 25.1%;当偏心率为 0.2 时,改变的幅度分别为 94.9%、99.7%、111.3%以及 39.5%,因此偏心率的增加使切向力对几何参数的敏感性也增加。

2.3 静态刚度系数参数敏感性分析

图 8 给出了基于静态直接刚度的主效应图,且偏心率分别为 0、0.1 和 0.2 时,二次多项式拟合模型拟合精度 R^2 分别为 0.830 5、0.955 0 和 0.805 2。可以看出,随着偏心率的增加,25 个工况的平均静态直接刚度分别为 223.48、46.94 和 -129.61 kN/m,因此,转子偏心率的增加会削弱转子聚中能力。

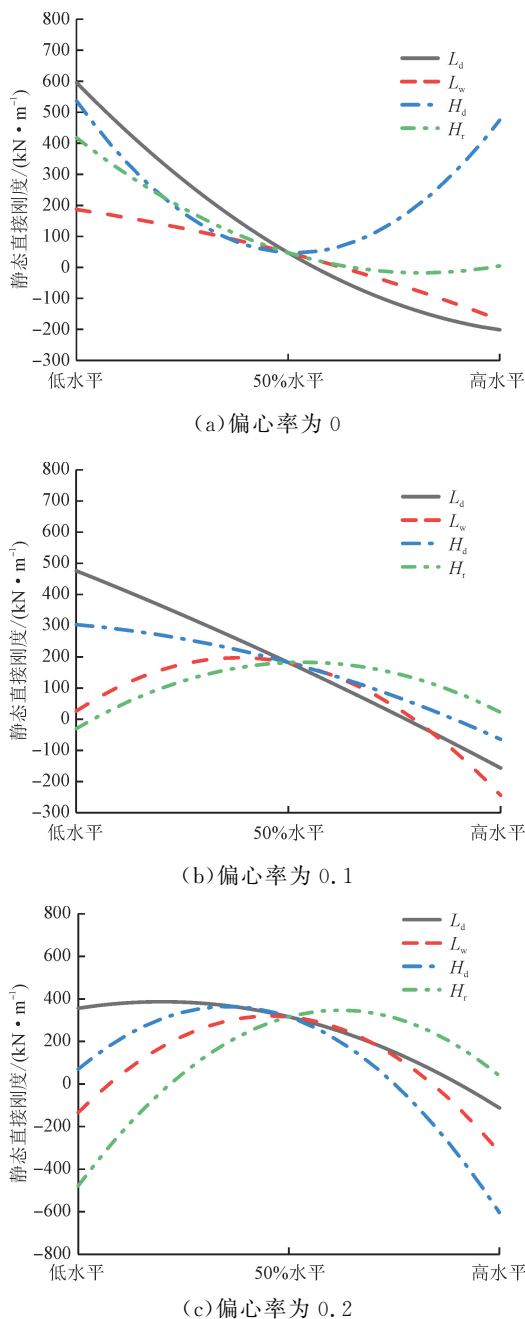


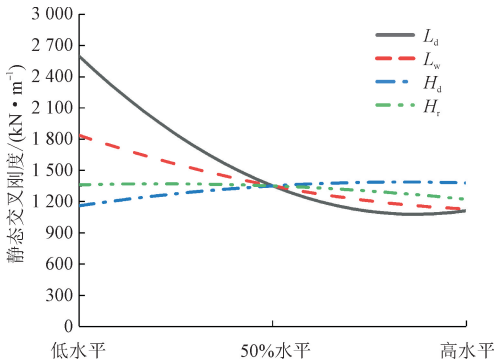
图 8 静态直接刚度主效应图

Fig. 8 Main effect diagram of static direct stiffness

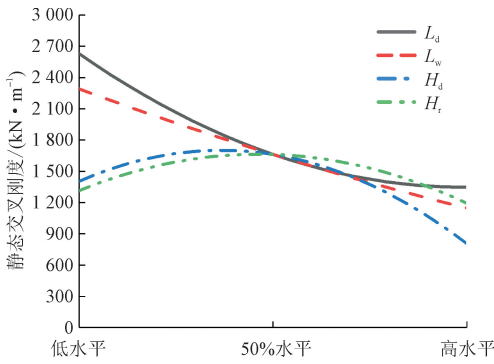
由图 8 可知,当偏心率为 0.2 时,静态直接刚度由随着腔室深度增加单调递减变为先增加后减小,此时在 24% 水平存在最佳参数。当偏心率为 0.1 时,静态直接刚度由随着腔室宽度增加单调递减变为先增加后减小;在偏心率为 0.1 和 0.2 时最佳参数分别为 40% 水平和 48% 水平,因此随着偏心率的增加,存在使静态直接刚度最大的腔室深度和宽度。

对于静子面几何结构,当转子不偏心时,静态直接刚度由随着孔深和孔径的增加先减小后增加,分别在 42% 水平和 84% 水平存在最小静态直接刚度。当转子存在偏心时,静态直接刚度由随着孔深和孔径的增加先增加后减小,在给定几何参数范围内存在最佳参数使直接刚度最大。在偏心率为 0.2 时,孔深和孔径最佳水平分别为 40% 和 64%。

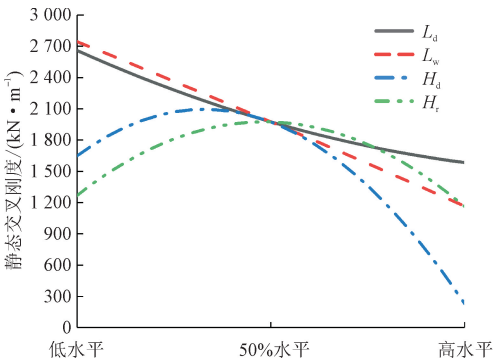
图 9 给出了基于静态交叉刚度的主效应图,且偏心率分别为 0、0.1 和 0.2 时,二次多项式拟合模型拟合精度 R^2 分别为 0.908 1、0.928 5 和 0.814 1。可以看出,随着偏心率的增加,25 个工况的平均静态交叉刚度分别为 1 470.17、1 522.59 和 1 575.01 kN/m,因此转子偏心率的增加会削弱转子稳定性。



(a) 偏心率为 0



(b) 偏心率为 0.1



(c) 偏心率为 0.2

图 9 静态交叉刚度主效应图

Fig. 9 Main effect diagram of static cross-coupling stiffness

由图 9 可知,在转子不偏心时,静态交叉刚度均随着腔室深度的增加先减小后增加,随着腔室宽度的增加单调减小。在转子偏心时静态交叉刚度均随着腔室深度与宽度的增加而单调递减。当偏心率分别为 0、0.1 和 0.2、腔室深度从低水平增加到高水平时,其静态交叉刚度分别降低了 57.1%、48.7% 和 40.4%;腔室宽度从低水平增加到高水平时,其静态交叉刚度分别降低了 38.5%、49.9% 和 57.5%。

在转子偏心下,静态交叉刚度均随着孔深和孔径的增加先增加后减小。在偏心率为 0.1、静态交叉刚度最大时,孔深和孔径的水平分别为 40% 水平和 48% 水平。在偏心率为 0.2 时,静态交叉刚度最大时孔深和孔径的水平分别为 36% 水平和 52% 水平。

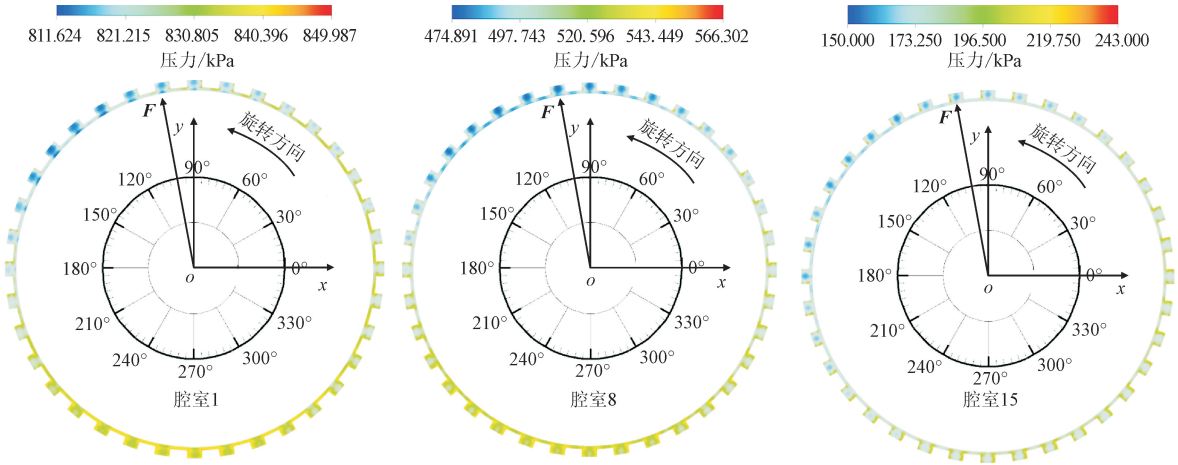
2.4 压力分布与转子流体激振力

图 10 选取试验方案 17、18、19 来分析腔室深度对密封周向压力分布以及流体激振力矢量相位的影响,此时转子在 X 轴正方向保持 0.2 的偏心率。流体激振力与实际情况保持相同相位,力矢量长度按照相同比例缩放。

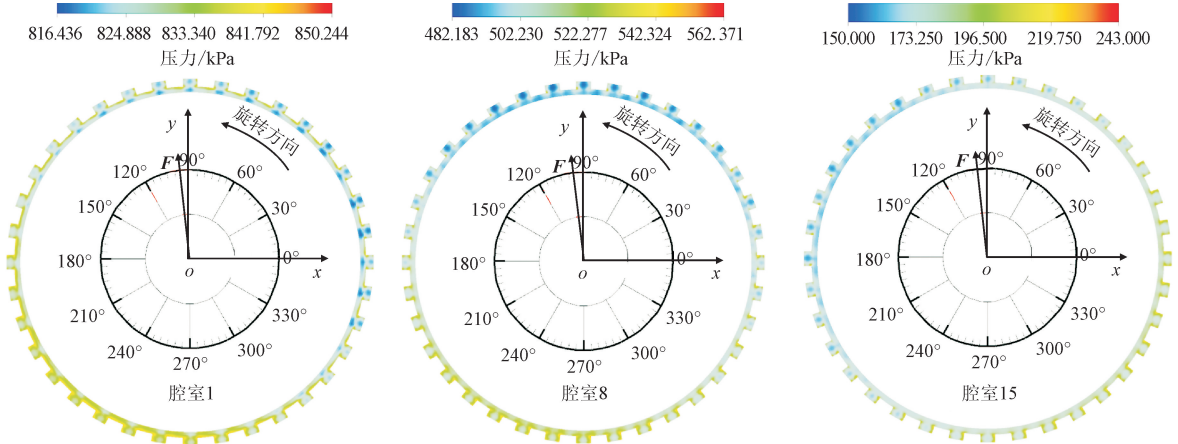
随着迷宫腔室深度的增加,作用在转子上的流体激振力持续减小,而力的相位持续减小。3 种液相孔型-迷宫密封中的切向力与转子转动方向相同,随着腔室深度的增加切向力持续减小。在腔室深度分别为 0.724、1.524、2.324 mm 时切向力分别为 104.9、66.5、45.1 N,这表明随着腔室深度的增加,密封系统的稳定性会增加。由图 10 还可知,腔室深度分别为 0.724、1.524、2.324 mm 时径向力分别为 -18.7、-7.3、5.9 N。随着腔室深度的增加径向力的方向由与转子偏心方向相反逐渐变为和转子偏心方向相同,说明转子聚中能力会略微下降。

图 10 同时给出了在转子迷宫第 1、8、15 个腔室的压力云图。从图可以观察到,沿着轴向方向腔室内高压区或低压区向着旋转的方向移动,同时随着

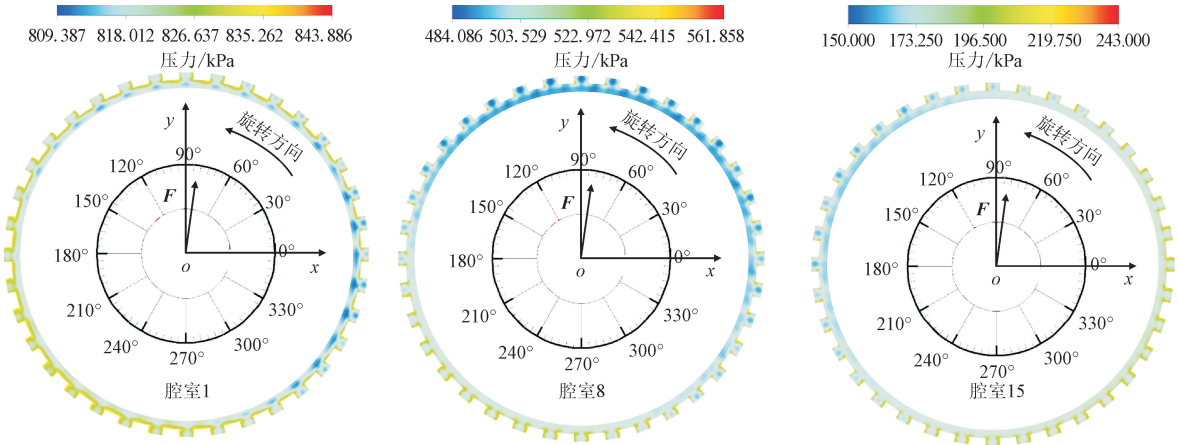
转子面迷宫腔深度的增加,高压区或低压区移动的角度增大,因此腔室深度越大,各个轴向位置作用在转子面上的力矢量互相抵消,导致流体激振力减小。



(a) 试验方案 18 ($L_d=0.724\text{ mm}$)



(b) 试验方案 17 ($L_d=1.524\text{ mm}$)



(c) 试验方案 19 ($L_d=2.324\text{ mm}$)

图 10 迷宫腔压力云图及流体激振力相位图(偏心率为 0.2)

Fig. 10 Static pressure contours and response forces in seal cavity with different cavity depth (eccentricity ratio = 0.2)

3 结 论

(1)偏心率变化对泄漏量以及泄漏量几何参数敏感性的影响可以忽略。在给定参数范围内,存在最佳几何参数使泄漏量最小,此时迷宫腔室深度、宽度、孔深和孔径4个几何参数分别在40%、24%、56%、44%水平。对泄漏量影响较大的几何参数为腔室宽度以及孔深,在整个因子水平范围内泄漏量变化幅度分别为14.5%、16.9%。

(2)径向力随着腔室深度的增加而增大。偏心率由0.1增加到0.2,径向力在腔室深度从低水平到高水平的增幅由14.3 N增加到25.3 N,影响逐渐增大。径向力随着腔室宽度的增加先减小后增大,因此在转子偏心时选取合适的腔室宽度可以减小径向力。在不同偏心率下,切向力随着腔室深度和宽度的增加而单调递减,随着孔深和孔径的增加先增加后减小。

(3)当偏心率从0变化到0.2时,25个工况的平均静态直接刚度从223.48 kN/m降至-129.61 kN/m。随着偏心率的增加存在使静态直接刚度最大的几何参数组合。当偏心率为0.2时静态直接刚度随腔室深度、宽度、孔深和孔径的增加先增加后减小,分别在24%、48%、40%和64%水平达到最大值。

(4)当偏心率从0变化到0.2时,25个工况的平均静态交叉刚度从1470.17 kN/m增加到1575.01 kN/m,静态交叉刚度在所有工况下均为正值。在转子偏心与不偏心工况下,腔室深度与宽度的增加均会造成静态交叉刚度的单调递减。转子偏心时静态交叉刚度随着孔深与孔径的增加先增加后减小。

参考文献:

- [1] 李志刚,方志,李军.液相和多相环境下环形动密封泄漏流动和转子动力特性的研究进展[J].西安交通大学学报,2020,54(9):1-22.
- LI Zhigang, FANG Zhi, LI Jun. Review of the leakage flow and rotordynamic characteristics of the annular dynamic seals in liquid and multiple phases conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(9): 1-22.
- [2] 李军,晏鑫,李志刚.热力透平密封技术[M].西安:西安交通大学出版社,2016:93-94.
- [3] BALKE N E. Analyzing the influence of a swirl brake on a smooth liquid annular seal through measuring static and rotordynamic characteristics [D]. College

- Station, TX, USA: Texas A&M University, 2017.
- [4] 李军,晏鑫,丰镇平,等.透平机械阻尼密封技术及其转子动力特性研究进展[J].热力透平,2009,38(1):5-9.
- LI Jun, YAN Xin, FENG Zhenping, et al. State-of-the-art of turbomachinery damper seals technology and their rotordynamic characteristics [J]. Thermal Turbine, 2009, 38(1): 5-9.
- [5] VANCE J M, ZEIDAN F, MURPHY B. Machinery vibration and rotordynamics [M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010: 271-272.
- [6] ARGHIR M, FRÈNE J. Rotordynamic coefficients of circumferentially-grooved liquid seals using the averaged Navier-Stokes equations [J]. Journal of Tribology, 1997, 119(3): 556-567.
- [7] SAN ANDRÉS L, WU Tingcheng, MAEDA H, et al. A computational fluid dynamics modified bulk flow analysis for circumferentially shallow grooved liquid seals [J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2018, 140(1): 012504.
- [8] 马凯,张万福,张尧,等.梳齿密封静态稳定性理论与实验研究[J].振动与冲击,2019,38(20):140-147.
- MA Kai, ZHANG Wanfu, ZHANG Yao, et al. Theoretical and experimental study on the static stability of labyrinth seals [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(20): 140-147.
- [9] 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.
- [10] MARQUETTE O R, CHILDS D W, SAN ANDRES L. Eccentricity effects on the rotordynamic coefficients of plain annular seals: theory versus experiment [J]. Journal of Tribology, 1997, 119(3): 443-447.
- [11] MORELAND J A. Influence of pre-swirl and eccentricity in smooth stator/grooved rotor liquid annular seals, measured static and rotordynamic characteristics [D]. College Station, TX, USA: Texas A&M University, 2016.
- [12] MORELAND J A, CHILDS D W, BULLOCK J T. Measured static and rotordynamic characteristics of a smooth-stator/grooved-rotor liquid annular seal [J]. Journal of Fluids Engineering, 2018, 140(10): 101109.
- [13] TORRES J M. Static and rotordynamic characteristics of liquid annular seals with a circumferentially-grooved stator and smooth rotor using three levels of circumferential inlet-fluid rotation [D]. College Station, TX,

- USA; Texas A&M University, 2016.
- [14] KANEKO S, IKEDA T, SAITO T, et al. Experimental study on static and dynamic characteristics of liquid annular convergent-tapered damper seals with honeycomb roughness pattern [J]. *Journal of Tribology*, 2003, 125(3): 592-599.
- [15] NAGAI K, KOISO K, KANEKO S, et al. Numerical and experimental analyses of static and dynamic characteristics for partially helically grooved liquid annular seals [J]. *Journal of Tribology*, 2019, 141(2): 022201.
- [16] CHILDS D W, KIM C H. Analysis and testing for rotordynamic coefficients of turbulent annular seals with different, directionally-homogeneous surface-roughness treatment for rotor and stator elements [J]. *Journal of Tribology*, 1985, 107(3): 296-305.
- [17] CHILDS D W, KIM C H. Test results for round-hole-pattern damper seals: optimum configurations and dimensions for maximum net damping [J]. *Journal of Tribology*, 1986, 108(4): 605-609.
- [18] CHILDS D W, NOLAN S A, KILGORE J J. Additional test results for round-hole-pattern damper seals: leakage, friction factors, and rotordynamic force coefficients [J]. *Journal of Tribology*, 1990, 112(2): 365-371.
- [19] CHILDS D W, FAYOLLE P. Test results for liquid “damper” seals using a round-hole roughness pattern for the stators [J]. *Journal of Tribology*, 1999, 121(1): 42-49.
- [20] FANG Zhi, LI Zhigang, LI Jun, et al. Numerical investigation on the static and rotordynamic characteristics for two types of novel mixed helical groove seals [C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, USA; ASME, 2020; V10AT25A036.
- [21] 方志, 李志刚, 李军. 异形孔腔结构对液体孔型密封泄漏特性及转子耗功的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(1): 143-149.
- FANG Zhi, LI Zhigang, LI Jun. Investigations on the effect of odd-shaped hole geometries on the leakage performance of liquid hole-pattern seals and rotor power loss [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(1): 143-149.
- [22] 方志, 李志刚, 李军. 孔型参数对流体孔型密封泄漏特性和转子耗功的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(9): 81-88.
- FANG Zhi, LI Zhigang, LI Jun. Effects of hole depth and diameter on the leakage characteristics and rotor power loss of liquid hole-pattern seals [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(9): 81-88.
- [23] 杨兴辰, 张万福, 顾承璟, 等. 迷宫-蜂窝混合型密封静态稳定性与泄漏特性研究 [J]. *摩擦学学报*, 2021, 41(5): 738-748.
- YANG Xingchen, ZHANG Wanfu, GU Chengjing, et al. Leakage performance and static stability of hybrid labyrinth-honeycomb seals [J]. *Tribology*, 2021, 41(5): 738-748.
- [24] UNTAROIU A, JIN Hanxiang, FU Gen, et al. The effects of fluid preswirl and swirl brakes design on the performance of labyrinth seals [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018, 140(8): 082503.
- [25] ZHANG Min. Experimental study of the static and dynamic characteristics of a long ($L/D = 0.65$) smooth annular seal operating under two-phase (liquid/gas) conditions [D]. College Station, TX, USA: Texas A&M University, 2017.
- [26] LI Zhigang, FANG Zhi, LI Jun. Influence of annular/pocket groove on the static and rotordynamic characteristics of hole-pattern seals [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2020, 142(6): 061013.
- [27] LI Zhigang, FANG Zhi, LI Jun, et al. Numerical modeling of static and rotordynamic characteristics for three types of helically grooved liquid annular seals [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2020, 142(4): 041001.
- [28] 李志刚, 陈尧兴, 李军. 高偏心率下旋转密封泄漏特性和静态动力特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(7): 1-7.
- LI Zhigang, CHEN Yaoping, LI Jun. Investigation on the leakage and static dynamic characteristics of rotating seals at high eccentricity ratios [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(7): 1-7.

(编辑 亢列梅 杜秀杰)