

转子倾斜状态下的指尖密封动态性能

石岩松 路菲* 周志刚 贲小康

河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳, 471003

摘要:针对转子倾斜对指尖密封性能的影响,建立了考虑转子倾斜的指尖密封三维有限元模型,提出了相应的泄漏率计算方法。研究了转子倾斜基准位置和倾斜角度对密封位移、接触压力、泄漏间隙及流道的影响规律。研究表明:转子倾斜显著增大系统泄漏率,2°倾斜的泄漏率超过0°泄漏率的3倍;转子倾斜时,下部指尖靴接触压力降低;指尖与转子分离阶段的泄漏流道在轴向呈阶梯状、周向呈非对称楔形,且翘曲程度随倾斜角增大而加剧。

关键词:指尖密封;转子倾斜;动态性能;有限元仿真

中图分类号:V231.3;TB42

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.01.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dynamic Performance of Finger Seals under Rotor Tilt Conditions

SHI Yansong LU Fei* ZHOU Zhigang BEN Xiaokang

School of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan, 471003

Abstract: To investigate the influences of rotor tilt on the performance of finger seals, a 3D finite element model incorporating rotor tilt was developed, and a corresponding method for leakage rate calculation was proposed. The effects of tilt reference positions and tilt angles on seal displacement, contact pressure, leakage clearance, and flow paths were systematically analyzed. The results indicate that rotor tilt significantly increases system leakage, and the leakage at a 2° tilt exceeds 3 times leakage at 0°. When the rotor is tilted, the contact pressure of the lower finger boots decreases. In finger lift-off phase, the leakage path exhibits a stepped profile axially and asymmetric wedge-shaped distributions circumferentially, with pad warping severity increasing with tilt angles.

Key words: finger seal; rotor tilt; dynamic performance; finite element simulation

0 引言

动态性能是指尖密封研究中最关注的内容。运行过程中,转子会因各种原因而倾斜,改变指尖密封与转子的接触状态,影响密封性能。通过物理试验研究指尖密封动态性能是最直接有效的方法,但物理试验成本过高,且现有试验条件无法复现转子倾斜的所有工况,故物理试验的应用有限,因此通过理论分析或数值仿真研究指尖密封动态性能是一个重要的方法。

目前关于转子倾斜对指尖密封动态性能影响的研究集中在基于动力学的等效模型方法。WANG等^[1]采用分布质量的等效动力学模型,研究考虑工作状态的指尖密封动态性能,发现倾斜角度对指尖密封的动态性能影响显著,且密封泄漏率随转子倾角的增大而增大。ZHAO等^[2]基于

等效动力学模型研究了C/C复合材料纤维束的密度和制备方向对转子倾斜时指尖密封动态性能的影响,发现随着纤维束密度的增大,泄漏率减小;考虑到转子倾斜使指尖靴与转子的接触压力不同,提出一种基于指尖靴与转子接触压力的指尖密封设计方法。ZHAO等^[3]根据指尖密封实际工况建立了考虑复杂因素(包括转子倾斜、装配条件、温度效应和冲击效应)的分布式质量等效动力学模型,研究结果证明了指尖密封性能分析中考虑复杂工况的必要性。

有学者利用商业软件研究了多种密封的动态性能。对于光滑环形密封,ANDRES^[4]分析了轴线上任意倾斜中心位置及转子倾斜角对密封性能的影响,发现转子倾斜可提高密封系统的稳定性。陈慈伟等^[5]等采用CFD软件研究了普通梳齿密封的流体激振特性,发现转子倾斜对径向力产生较大影响。王应飞等^[6]采用CFD方法研究转子倾斜条件下的交错式迷宫密封动静特性,发现转子适当倾斜可减小交错式迷宫密封的泄漏。陈国

收稿日期:2024-09-30

基金项目:国家自然科学基金(52105183);河南省科技攻关计划(242102220088)

定等^[7-8]采用有限元分析方法对比分析指尖密封的结构性能,发现选择合适的型线可获得小径向刚度、低迟滞的指尖密封结构。张延超等^[9-10]通过有限元仿真软件建立了动态条件下的指尖密封性能分析模型和方法,探讨了转子位移激励的处理方法,在考虑支承轴承游隙、安装过盈量等初始工作状态参数的基础上,研究了不同密封结构和工况参数对指尖密封动态性能的影响,发现计入初始工作状态条件的模拟结果更贴近指尖密封的实际工作情况。目前,采用有限元仿真分析方法研究考虑转子倾斜等复杂工况条件的相关研究鲜有报道。

等效动力学模型计算量较小,但忽略了指尖梁的曲率、轴向变形、指尖靴翘曲的影响,且模型的简化和假设使所得结果与实际存在一定差距。有限元方法虽会花费较长的计算时间,但计算精度较高。因此考虑指尖密封的实际结构,通过有限元仿真分析研究转子倾斜对指尖密封性能的影响很有必要。

本文利用 ANSYS 仿真软件建立指尖密封三维仿真模型,研究转子倾斜对指尖密封动态性能的影响,分析不同倾斜位置和倾斜角度下指尖密封泄漏和磨损的动态性能,在更符合工程实际的条件下分析指尖密封的动态性能。

1 指尖密封基本结构

指尖密封通常由前挡板、垫片、若干层环形指尖状密封片和后挡板通过铆钉连接而成,如图 1a 所示。指尖密封片由沿周向均匀排列的柔性指尖梁构成,其中,指尖梁自由端(与转子接触部分)称为指尖靴。指尖片周向旋转、轴向交错叠置,遮盖指尖梁间的缝隙,阻止气体从高压侧向低压侧泄漏。如图 1b 所示,指尖密封梁曲线为圆弧,具体结构尺寸包括密封外径 D_w 、密封内径 D_r 、指尖片厚度 b 、指尖靴高度 h 、指梁圆弧半径 R_s 、指尖靴间隙角 β 、指梁圆弧基圆直径 D_c 、指尖梁根圆直径 D_g 。高压侧至低压侧的指尖片编号依次为 1~5。

2 指尖密封有限元模型

2.1 模型建立

结合环形密封转子的 3 种倾斜方式^[4],根据指尖密封结构,建立转子在 3 个不同基准位置的倾斜示意图(图 2),图中, θ 为倾斜角度。将倾斜转子轴线(红色)与未倾斜转子的轴线(Z 轴)交点定义为基准位置,基准位置对应的指尖片为基准指尖片,记为 i_{st} 。3 个基准位置分别对应第 1 层(高

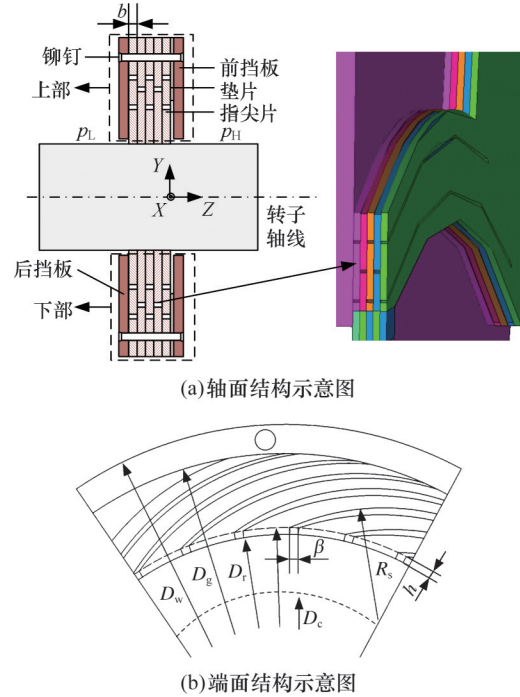


图 1 指尖密封结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of finger seal structure

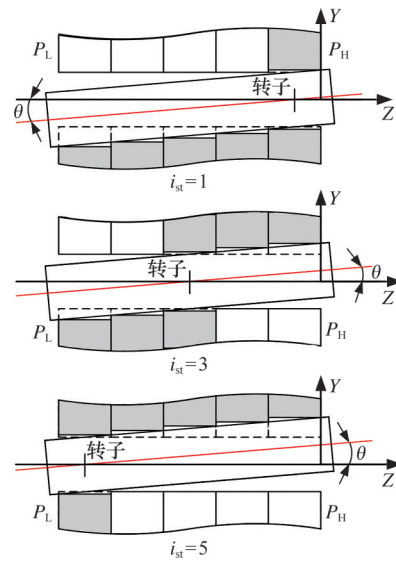


图 2 3 个基准位置转子倾斜示意图

Fig.2 Schematic diagram of rotor tilt at three reference positions

压侧)、第 3 层(中间位置)和第 5 层(低压侧)指尖片,记为 $i_{st}=1,3,5$ 。

转子倾斜后,部分指尖片的上部或下部与转子存在初始过盈,产生初始接触压力及初始位移,如图 2 中阴影部分所示,指尖片从虚线(原始)位置移动到实线位置。另一部分指尖片的上部或下部受转子倾斜的影响,与转子存在初始间隙。

由图 2 可知,转子倾斜对倾斜方向(Y 向)上指尖片的变形影响最大。因此,在满足计算精度的基础上,选择如下分析区域:沿圆周方向选择 180° 对称布置的 2 个指尖密封单元(Y 轴正向单元

定义为上部, Y轴负向单元定义为下部), 沿轴向(Z向)取5层指尖片, 并将转子和后挡板纳入分析范围。基于有限元软件 ANSYS 建立局部坐标系, 在 OYZ 平面内使转子相对 Z 轴倾斜指定角度。指尖片和后挡板材料均为 GH605 (弹性模量为 231 GPa, 泊松比为 0.286), 转子材料为 40CrNiMo (弹性模量为 231 GPa, 泊松比为 0.295)。采用 Solid185 单元划分网格, 为提高计算精度, 对指尖靴和转子接触部分进行网格加密。图 3 所示为转子倾斜状态下指尖密封的有限元分析模型。

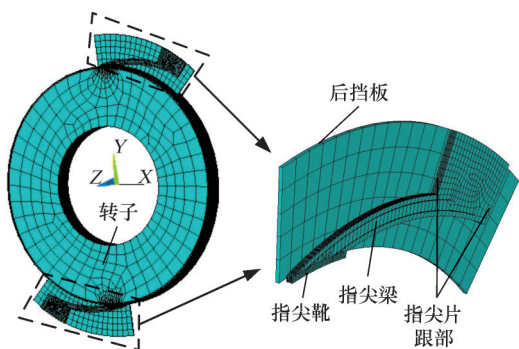


图3 指尖密封有限元分析模型

Fig.3 Finger seal finite element analysis model

指尖片与指尖片、指尖片与后挡板、指尖靴与转子接触, 因此通过 ANSYS 中 Contact Pair 接触分析模块设置接触对, 指尖片与指尖片、指尖片与后挡板之间的摩擦系数设为 0.2。接触面单元类型选取 3D8 节点、CONTA174 面面接触单元, 目标面单元选 3D 目标面 TARGE170 单元。转子激励过程中, 指尖靴与转子表面有接触和分离两种状态, 因此接触面行为是标准接触模式, 接触分离时法向压力为 0。

ANSYS 软件中, 转子倾斜后会与部分指尖靴形成几何侵入。实际情况下, 转子倾斜后与指尖靴存在初始力的作用, 定义转子与指尖靴接触对时, 需调节转子与指尖靴的初始接触状态。如图 4 所示, 接触面上的节点会自动捕捉侵入距离, 调整目标面与接触面的接触状态以模拟转子与指尖靴之间的过盈接触状态。

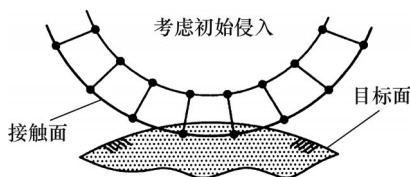


图4 初始接触状态考虑初始侵入

Fig.4 The initial contact state considers the initial intrusion

2.2 边界条件与载荷

结合指尖密封的工作特征, 针对图 3 所示的

有限元模型, 设置如下边界条件: ①在指尖片根部两侧施加循环的对称约束; ②在第 1 层指尖片靠近高压侧端面施加上下游压差; ③在后挡板低压侧端面施加位移全约束; ④对转子施加 X 向、Z 向的约束。转子对指尖片产生激励的根源是不平衡力。不平衡力作用下, 转子轴心的涡动轨迹近似是圆, 径向投影是正弦曲线^[11]。转子径向跳动位移的相位和频率与转子不平衡力的相位和频率相同, 为方便分析问题, 用转子位移激励代替转子不平衡力激励, 其中, 位移激励的振幅就是转子的径向跳动量。因此指尖密封动态分析的转子位移激励表达式为

$$y(t) = \Delta r \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中: Δr 为转子不平衡质量引起的径向跳动量, mm; ω 为转子角速度, rad/s。

通过 ANSYS 后处理模块可得指尖靴底位移响应, 以及靴底与转子接触表面的压力。指尖靴底位移响应由指尖靴底面节点的径向(Y向)平均位移表示, 指尖靴与转子的接触压力由指尖靴底面节点的平均接触压力表示。

2.3 网格独立性验证

以指尖靴底平均位移作为验证目标对网格进行无关性验证, 如图 5 所示, 综合考虑计算精度和效率, 最终的网格数量 N 约 120 000。

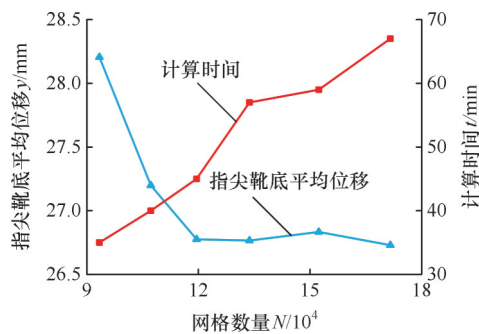


图5 网格独立性验证

Fig.5 Grid independence verification

3 泄漏间隙与泄漏率计算

指尖密封的泄漏分为侧隙泄漏和主流道泄漏。侧隙泄漏占总泄漏的 0.11%~9.35%^[12], 可忽略不计。

指尖密封与转子的泄漏间隙等于指尖靴相对于倾斜状态下转子初始表面的位移与这个时刻的转子位移之差。通过 ANSYS 的 General Postproc 后处理模块获得的指尖靴底位移以初始(转子未倾斜)表面为基准, 因此必须考虑转子倾斜角度的影响。图 6 为 3 个基准位置倾斜示意图, 倾斜量计算过程如下。

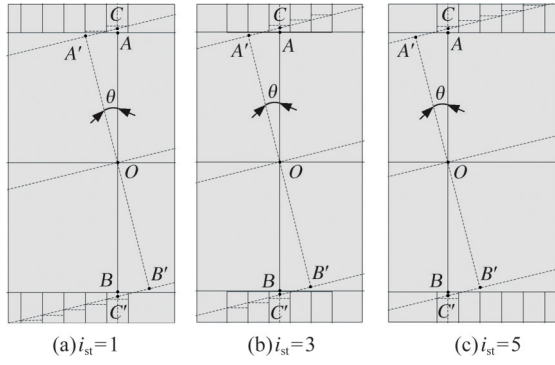


图6 三个基准位置倾斜放大示意图

Fig.6 Diagram of oblique magnification for three reference positions

转子倾斜后,转子表面初始位置的 A 、 B 两点移动到 A' 、 B' , C' 为转子表面某点在旋转一定角度后的最终位置(指尖靴变形后的位置)。在三角形 $OA'C$ 和 $OB'C'$ 中, OA' 、 OB' 等于转子半径 R_d ,通过三角函数关系可计算出基准位置偏斜量 OC 和 OC' :

$$OC=OC'=R_d/\cos\theta \quad (2)$$

则基准指尖片对应的转子倾斜量为

$$\Delta h_{st}=BC'=AC=R_d/\cos\theta-R_d \quad (3)$$

每层指尖片的偏斜量根据对应指尖片厚度的轴向中间位置计算。转子倾斜后,相邻两层指尖片倾斜量之差为 $b\tan\theta$,指尖片 i ($i=1,2,\dots,5$)的倾斜量根据基准倾斜量调整:

$$\Delta h_i = \begin{cases} \Delta h_{st} + (i_{st} - i)b \tan\theta & \text{上部} \\ \Delta h_{st} - (i_{st} - i)b \tan\theta & \text{下部} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可看出 Δh_i 与指尖片厚度、转子半径、转子倾角有关。 $\Delta h_i \leq 0$ 时,在转子倾斜后的初始状态下,指尖片与转子之间存在间隙或刚好接触; $\Delta h_i > 0$ 时,初始状态下的指尖片与转子之间存在过盈,产生接触压力,指尖片有径向位移。

通过ANSYS结果后处理模块得到指尖靴底的位移 $y_i(t)$ 。转子径向推动及相邻指尖片摩擦产生的靴底位移 $y_i(t)$ 由某一时刻指尖靴底面节点 Y 向位移的均值表示。得出指尖密封相对转子倾斜后的初始表面位移:

$$y'_i(t) = y_i(t) \pm \Delta h_i \quad (5)$$

式中:“+”对应下部指尖靴;“-”对应上部指尖靴。

则 t 时刻第 i 层指尖靴与转子之间的泄漏间隙为

$$h_i(t) = |y'_i(t) - y(t)| \quad (6)$$

结合倾斜状态下指尖密封的有限元模型,在圆周方向上,选取 Y 轴上部(正半轴)和下部(负半轴)的2个完整指尖靴,在轴向选取 n 层指尖片作为基本单元,并计算此基本单元的泄漏率:

$$q_i = \frac{\rho_a l (\bar{h}_i)^3 \Delta p}{12 \eta n b} \quad (7)$$

$$q_u = \frac{\rho_a l (\bar{h}_i)^3 \Delta p}{12 \eta n b} \quad (8)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{f} \sum_{j=1}^f \left[\frac{1}{n} h_i(t + j\Delta t) \right] \quad (9)$$

式中: q_i 、 q_u 分别为上下部指尖基本单元的泄漏率; Δp 为上下游压差; ρ_a 为空气密度; l 为一个指尖靴的周向长度; η 为空气动力黏度; \bar{h} 为基本单元平均泄漏间隙; Δt 为ANSYS瞬态分析转子激励时间步长; f 为转子一个周期的计算时间步数。

实际运用中,指尖密封的工作环境是变化的。由于指尖密封的柔性设计,随着转子的旋转和振动,密封间隙的实际形状发生变化,且多层指尖片使泄漏间隙变得复杂,泄漏间隙在轴向和周向并不均匀,故各层指尖片间隙采取平均处理。

指尖片泄漏率取均值,即

$$\bar{q} = (q_i + q_u)/2 \quad (10)$$

由几何模型可知,转子倾斜对指尖位移的 Y 向分量影响最大。考虑指尖密封的循环对称结构,用基本单元的平均泄漏率近似代替周向各对称单元的泄漏率,则通过叠加获得的指尖密封系统泄漏率为

$$Q = n_i \bar{q} \quad (11)$$

式中: n_i 为指尖梁数目。

4 结果与讨论

本文以圆弧形线指尖密封为分析对象,其主要结构参数尺寸如下:密封外径 $D_w=190$ mm,密封内径 $D_r=150$ mm,指尖片厚度 $b=0.2$ mm,指尖靴高度 $h=1$ mm,指尖梁圆弧半径 $R_s=75$ mm,指尖靴间隙角 $\beta=0.3^\circ$,指尖梁圆弧基圆直径 $D_c=35$ mm,指尖梁根圆直径 $D_g=170$ mm。所施加的工况参数如下:高压侧指尖片压力 0.5 MPa,转子转速 $10\ 000$ r/min,转子径向跳动量 $\Delta r=0.03$ mm。指尖靴和转子的初始接触为理想接触。分析中,指尖密封的密封介质为空气,其密度为 1.225 kg/m³,动力黏度为 17.9×10^{-6} Pa·s。

4.1 有限元分析方法验证

为验证有限元仿真计算的正确性和准确性,对比分析了转子转速为 5000 、 7000 、 $10\ 000$ 、 $12\ 000$ r/min条件下渐开线型指尖密封结构的试验结果^[13]、等效动力学模型计算结果^[14]和有限元仿真分析的结果。由图7可看出,有限元仿真分析计算的结果与试验结果^[13]变化趋势一致。

4.2 转子未倾斜时指尖密封性能

本文研究转子动态激励条件下倾斜角度及倾斜基准位置对密封性能的影响,其中,转子倾斜角度 θ 取值范围为 $0^\circ \sim 2^\circ$ ^[15]。首先分析转子未倾斜($\theta=0^\circ$)的密封性能。

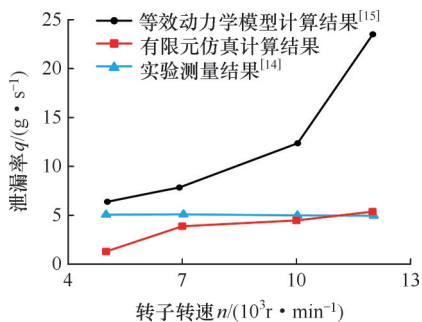


图7 有限元分析方法验证对比

Fig.7 Comparison of finite element analysis methods

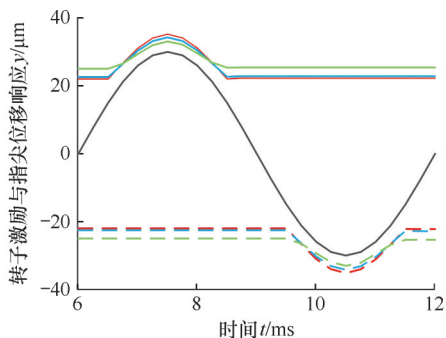
图8a所示为一个周期内的转子激励与指尖位移响应,其中,动态位移是指尖片径向位移随转子激励时间变化的位移(指尖1、3、5表示第1、3、5层指尖片,下同)。在转子激励作用于指尖密封的阶段(6.5~8.5 ms、9.5~11.5 ms),指尖位移响应大于转子激励,与文献[16]中指尖位移响应与转子激励相等不同。这是因为有限元方法考虑了指尖梁的柔性结构,指尖受转子激励时,指尖靴翘曲,指尖靴底面沿周向与转子并非完全贴合,出现间隙。指尖与转子分离阶段(8.5~12 ms),指尖靴因相邻指尖片的摩擦阻力而不能回到初始位置,产生“迟滞”,且每层的迟滞量不同。近低压侧指尖5的迟滞量最大,近高压侧指尖1的迟滞量最小。这是因为近低压侧指尖5直接与后挡板接触,大的接触面积导致其受到的摩擦力最大。

通过式(7)、式(8)可计算出一个周期内的指尖泄漏间隙,如图8b所示。指尖泄漏间隙呈周期性变化,一个周期内,指尖与转子之间始终存在间隙。上下部指尖在周向位置上相差180°,故上下部指尖最大泄漏间隙相差半个周期。对比上下部指尖的位移响应和泄漏间隙可知,θ=0°的上下部指尖泄漏间隙数值相等。

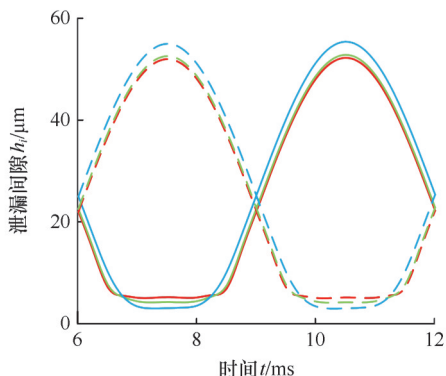
指尖靴与转子之间的接触压力变化如图9所示,转子激励的前半个周期内,上部指尖靴的接触压力从零增加到最大值、再减小到零;转子激励的后半个周期内,由于指尖的“迟滞”作用,指尖靴与转子提前分离,此阶段接触压力为零。

4.3 倾斜角度对密封性能的影响

转子在*i_{st}*=1基准位置倾斜,θ=1°,2°时,一个周期内指尖位移响应、泄漏间隙变化如图10所示。由图10a、图10c可看出,同层指尖的下部指尖位移明显大于上部指尖位移,这与图8a有明显差异,且倾角越大,差异越明显。对比图10a与图8a发现,上部指尖1、3在θ=0°的迟滞量较θ=1°的迟滞量大,这是因为转子倾斜后,倾斜量使指尖有一定的初始过盈,指尖梁储存了一定的“回弹



(a) 转子激励与指尖位移响应(θ=0°)



(b) 泄漏间隙(θ=0°)

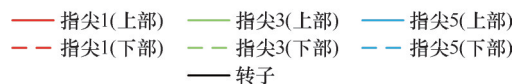


图8 θ=0°的指尖位移响应与泄漏间隙

Fig.8 θ=0° finger displacement response and leakage clearance

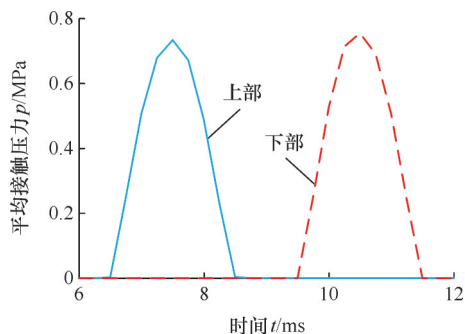


图9 θ=0°的指尖靴接触压力

Fig.9 θ=0° finger foot contact pressure

力”,指尖能更好回位。指尖1、3在θ=2°的位移响应较θ=1°时大,这是因为倾斜角度越大,转子倾斜量越大,指尖靴翘曲越明显。指尖1、3在θ=2°的迟滞量比θ=1°时的迟滞量大,这说明转子倾斜对指尖回弹的效果是有限的,并不是倾斜角度越大,指尖回弹效果越好。一个周期内指尖泄漏间隙如图10b、图10d所示,转子倾斜后,指尖泄漏间隙增大,指尖与转子的接触时间延长。

转子在*i_{st}*=3基准位置倾斜,θ=1°,2°时,一个周期内的指尖位移响应、泄漏间隙变化如图11所示。转子激励前半周期(6~9 ms)内,转子向Y轴

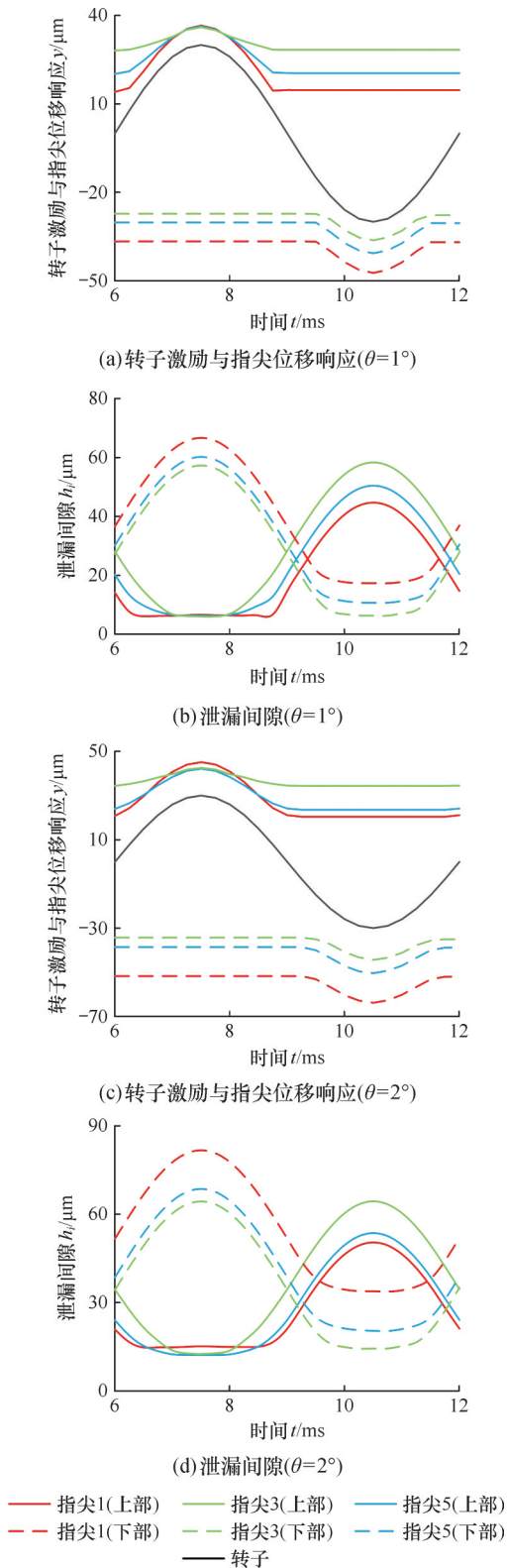


图 10 指尖位移响应与泄漏间隙($i_{st}=1$)

Fig.10 Finger displacement response and leakage clearance($i_{st}=1$)

正向跳动,上部基本单元与转子接触,产生径向位移,下部基本单元位移响应不变,与转子并无接触。这是因为指尖虽受转子倾斜量影响,但转子位移大于转子倾斜造成的偏斜位移。转子激励后半周期内(0.9~1.2 ms),转子向 Y 轴负方向跳动,

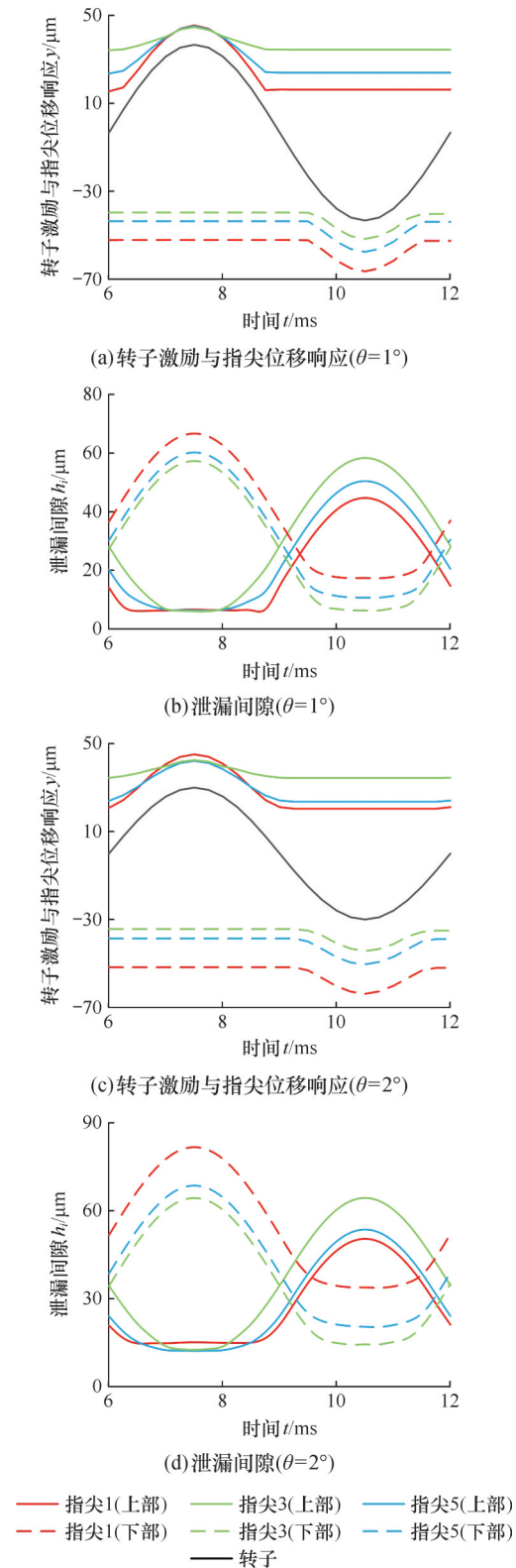


图 11 指尖位移响应与泄漏间隙($i_{st}=3$)

Fig.11 Finger displacement response and leakage clearance($i_{st}=3$)

转子与上部基本单元分离,在某一时刻与下部基本单元接触。与 $i_{st}=1$ 基准位置的倾斜相比,相同倾斜角度下 $i_{st}=3$ 各指尖一个周期内的变化趋势大致相同。这是因为转子倾斜基准位置虽然变化,但上下部指尖倾斜量从高压侧至低压侧的变

化趋势相同,即上部指尖对应倾斜量自高压侧至低压侧依次减小,下部指尖则与之相反。

4.4 倾斜位置对密封性能的影响

图12所示为不同基准下指尖上下部基本单元泄漏率随倾斜角度的变化。 $\theta=2^\circ$ 时, $i_{st}=1$ 对应的上部基本单元泄漏率为 1.71g/s ,比 $i_{st}=3$ 、 $i_{st}=5$ 对应的上部基本单元泄漏率大 16.3% 和 27.6% ;下部基本单元泄漏率为 0.41g/s ,比 $i_{st}=3$ 、 $i_{st}=5$ 对应的下部基本单元泄漏率小 21.2% 和 36.9% 。这说明相同的倾斜角度、不同的基准位置倾斜下,上下部基本单元泄漏率变化趋势不同。 $i_{st}=1$ 对应的上部基本单元泄漏率最大、下部基本单元泄漏率最小。 $i_{st}=1$ 的上部指尖向低压侧(后挡板方向)的挤压程度大于 $i_{st}=3$ 和 $i_{st}=5$ 时的挤压程度,这增大了指尖片与后挡板之间的摩擦力,导致指尖片回弹后的迟滞位移和泄漏间隙增大。下部指尖受转子倾斜影响,向高压侧挤压,减小了指尖片与后挡板之间的接触压力与摩擦力,导致指尖片回弹时所受的摩擦阻力减小,迟滞位移与泄漏间隙较小。相较于 $i_{st}=3$ 和 $i_{st}=5$, $i_{st}=1$ 的上部基本单元泄漏率最大、下部基本单元泄漏率最小。值得注意的是, $\theta=0.5^\circ$ 时,下部基本单元的泄漏率比转子未倾斜的泄漏率小; $\theta>0.5^\circ$ 后,泄漏率随倾斜角度的增大而增大。

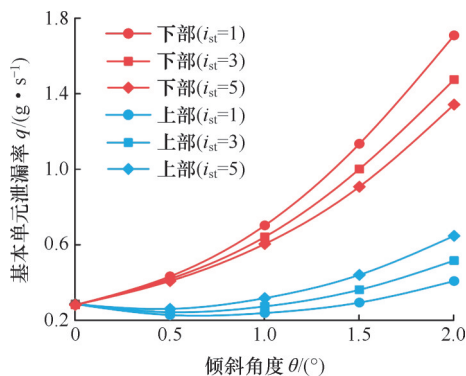


图12 不同基准条件下基本单元的泄漏率

Fig.12 Leakage rate of basic unit under different reference conditions

得到上下部基本单元的泄漏率后,根据式(10)计算指尖密封系统的泄漏率,如图13所示。3个基准位置下, $\theta=2^\circ$ 的下指尖密封系统泄漏率是 $\theta=0^\circ$ 的 $3.2\sim 3.4$ 倍。虽然图12显示 $\theta=0.5^\circ$ 的下部指尖基本单元泄漏率有所减小,但上部指尖泄漏率增加的更快,因而系统泄漏率整体呈增大的趋势。

图14所示为 $i_{st}=1$ 和 $i_{st}=3$ 基准位置、不同倾斜角度下,上下部指尖靴接触压力变化情况。随

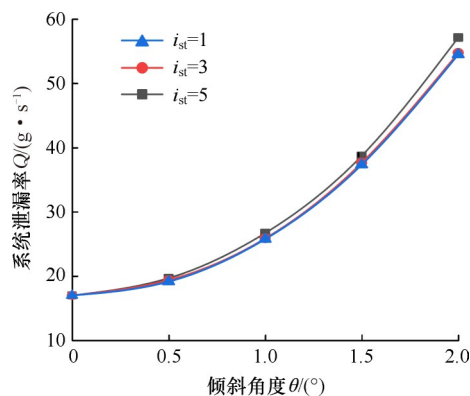


图13 不同基准下密封系统泄漏率

Fig.13 Leakage rate of seal system under different datum

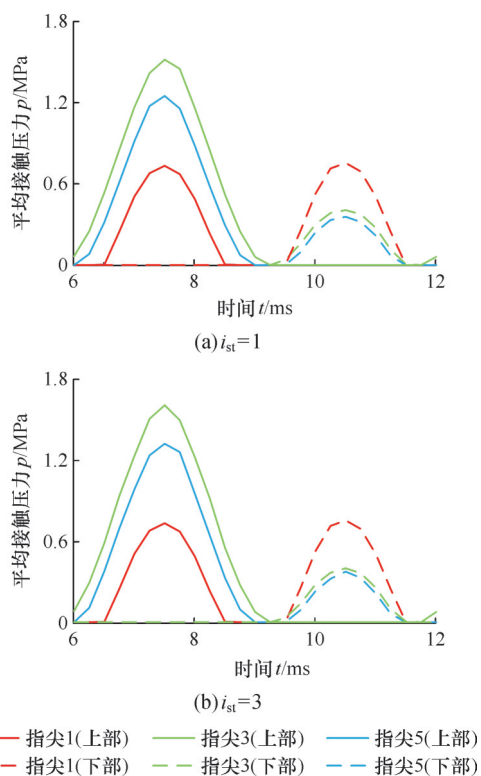


图14 不同基准下指尖靴接触压力

Fig.14 Finger foot contact pressure under different datum

倾斜角度增大,上部指尖靴接触压力增大;转子倾斜后,下部指尖靴的接触压力小于未倾斜的指尖靴接触压力。在 $i_{st}=1$ 基准位置,上部指尖靴的最大平均接触压力从 $\theta=0^\circ$ 的 0.73MPa 增加到 $\theta=2^\circ$ 的 1.52MPa ;下部指尖靴最大平均接触压力从 $\theta=0^\circ$ 的 0.75MPa 减小到 $\theta=2^\circ$ 的 0.36MPa 。这说明转子倾斜增大了上部密封面的接触压力,减小下部密封面的接触压力, $i_{st}=3$ 基准位置亦是如此。接触压力的增大会加剧指尖靴的磨损,因此转子倾斜后,指尖靴磨损加剧,且上下部指尖靴接触压力的不同还会导致磨损的不均匀。由图2可看出,转子倾斜后,上部指尖受转子向Z轴负向

(后挡板一侧)的挤压,增大上部指尖片间的摩擦力,故转子在径向跳动时会与指尖靴之间会产生更大的接触力。

4.5 转子倾斜对密封泄漏流道的影响

本文研究的指尖片指尖梁数目为60,指尖靴底面的周向尺寸比转子整个周向表面的尺寸小很多,因此忽略指尖靴底弧度的影响。绘制三维泄漏通道前,先对指尖靴底面节点的坐标进行归一化。采用线性变换

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \\ z' &= \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将 X 坐标从 $[-3.73 \times 10^{-3}, 3.73 \times 10^{-3}]$ 映射到 $[0, 1]$, 将 Z 坐标从 $[-1 \times 10^{-3}, 0]$ 映射到 $[0, 1]$ 。

图 15 为 $\theta=0^\circ$ 时指尖靴与转子分离后的泄漏通道三维图。 $\theta=0^\circ$ 时,上下部泄漏间隙相等,故上下部泄漏流道一致。指尖靴与转子分离阶段的指尖靴翘曲依然存在。低压侧指尖片泄漏通道明显高于高压侧(相对于基准平面的位置),第5层指尖泄漏通道的高度相对于其他层泄漏通道的高度阶跃性增大。指尖靴尖部泄漏通道高度大于指尖靴根部通道高度,这是由于指尖靴发生翘曲。指尖靴翘曲间接说明指尖密封磨损主要发生在靴跟部,与试验结果^[17]一致。指尖靴翘曲率可表征

指尖靴的翘曲程度,忽略弧度的影响后,密封泄漏流道沿轴向呈阶梯状、沿周向呈出不同的楔形。上述两种特征形状影响流体通过密封间隙的压力分布,进而对气体的流动特性产生显著作用。

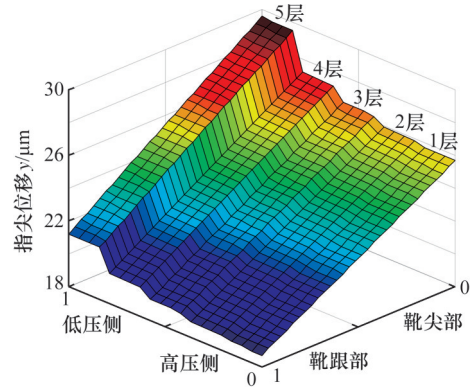


图 15 $\theta=0^\circ$ 条件下的泄漏流道

Fig.15 Leakage passage under the condition of $\theta=0^\circ$

图 16 为 $i_{st}=1, \theta=1^\circ, \theta=2^\circ$ 的泄漏流道三维图。 $\theta=1^\circ$ 时,上部指尖泄漏流道的高度从高压侧至低压侧增大,下部指尖泄漏流道的高度从高压侧至低压侧减小。与 $\theta=0^\circ$ 相比, $\theta=1^\circ$ 的密封流道在轴向的阶梯特征更明显。 $\theta=2^\circ$ 时,各层指尖泄漏流道均大于其他倾斜角度,但上部指尖靴泄漏通道有所差异,其中,第2层泄漏通道的高度最小。计算发现, $\theta=2^\circ$ 的指尖靴翘曲率大于 $\theta=1^\circ$ 的指尖靴翘曲率。

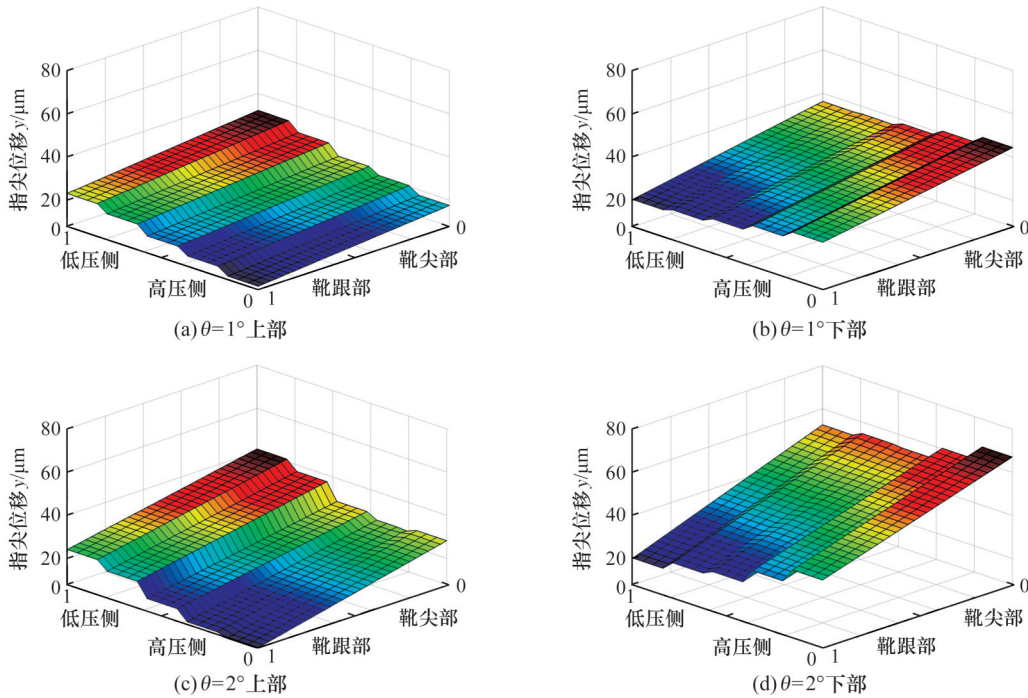


图 16 $i_{st}=1, \theta=1^\circ$ 和 $\theta=2^\circ$ 条件下的泄漏流道

Fig.16 $i_{st}=1, \theta=1^\circ$ and $\theta=2^\circ$ for leakage channels

5 结论

1) 倾斜角度相同时, $i_{st}=5$ 基准位置倾斜的指

尖密封系统泄漏率最大;3种基准位置($i_{st}=1, 3, 5$)倾斜条件下,指尖密封系统的泄漏率都随倾斜角度的增大而增大, $\theta=2^\circ$ 的系统泄漏率是 $\theta=0^\circ$

的3倍多。

2)指尖靴接触压力是变化的,上部指尖靴的接触压力随倾斜角度增大而增大,下部指尖靴的平均接触压力小于未倾斜时的平均接触压力,上下部接触压力的不同会导致指尖靴磨损不均匀。

3)忽略指尖靴弧度的影响后,在指尖与转子分离阶段,密封泄漏流道沿轴向呈现阶梯状、沿周向呈现不同的楔形。

4)指尖靴翘曲率随倾斜角度增大而增大。

参考文献:

- [1] WANG Lina, CHEN Guoding, SU Hua, et al. Effect of Work Status on Leakage and Contact Pressure of C/C Composite Finger Seal[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(5): 925-940.
- [2] ZHAO Hailin, CHEN Guoding, WANG Li'na, et al. Dynamic Performance of a C/C Composite Finger Seal in a Tilting Mode[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(4): 1603-1614. WANG Lina, et al. Dynamic Analysis of Finger Seal in the Complex Working State[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(1): 125-137.
- [3] ZHAO H, CHEN G, WANG L N, et al. Dynamic Performance of a C/C Composite Finger Seal in a Tilting Mode [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(4): 1603-1614.
- [4] ANDRES L S. Effect of Shaft Misalignment on the Dynamic Force Response of Annular Pressure Seals[J]. Tribology Transactions, 1993, 36(2): 173-182.
- [5] 陈慈伟, 张万福. 倾斜转子对密封流体激振特性的影响[J]. 动力工程学报, 2017, 37(3): 213-217. CHEN Ciwei, ZHANG Wanfu. Effects of Tilting Rotor on Fluid-induced Vibration Characteristics of a Labyrinth Seal [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(3): 213-217.
- [6] 王应飞, 张万福, 潘渤, 等. 转子倾斜对交错式迷宫密封动静特性的影响[J]. 航空学报, 2020, 41(11): 123782. WANG Yingfei, ZHANG Wanfu, PAN Bo, et al. Effect of Shaft Misalignment on Dynamic and Static Characteristics of Interlocking Labyrinth Seals[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(11): 123782.
- [7] 陈国定, 徐华, 虞烈, 等. 指尖密封型线力学性能的有限元分析[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(2): 218-221. CHEN Guoding, XU Hua, YU Lie, et al. On Selecting Proper Shape of Finger Seal[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2002, 20(2): 218-221.
- [8] 陈国定, 吴昊天. 后遮流板结构尺寸对指尖密封性能影响的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(1): 11-13. CHEN Guoding, WU Haotian. Research to the Influence of Aft Cover Plate Construction on the Finger Seal Performances[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(1): 11-13.
- [9] 张延超, 刘凯, 胡海涛, 等. 基于有限元仿真的指尖密封准动态性能分析方法[J]. 推进技术, 2016, 37(12): 2352-2358. ZHANG Yanchao, LIU Kai, HU Haitao, et al. Quasi-dynamic Performances Analysis of Finger Seal Based on Finite Element Simulation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(12): 2352-2358.
- [10] 张延超, 陈国定, 申晓龙. 指尖密封动态性能分析与泄漏量计算[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2193-2199. ZHANG Yanchao, CHEN Guoding, SHEN Xiaolong. Analysis of Dynamic Performance and Leakage for Finger Seal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11): 2193-2199.
- [11] 袁景琳, 苏华, 黄玉辉. 基于流固耦合的双靴互嵌式指尖密封动态性能分析[J]. 航空动力学报, 2025, 40(2): 486-498. YUAN Jinglin, SU Hua, HUANG Yuhui. Dynamic Performance Analysis of Double Interlocking Padded Finger Seal Based on Fluid-structure Interaction [J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(2): 486-498.
- [12] 赵海林, 陈国定, 苏华. 考虑粗糙渗流效应的指尖密封总泄漏性能分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(3): 152-161. ZHAO Hailin, CHEN Guoding, SU Hua. Analysis of Total Leakage Performance of Finger Seal Considering the Rough Seepage Effect[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3): 152-161.
- [13] 张延超. 指尖密封的性能分析和优化研究[D]. 西安:西北工业大学, 2009. Zhang Yanchao. Performance Analysis and Optimization Research of Finger Seal[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2009.
- [14] 俞镔鹏. 钴基合金和C/C复合材料多层叠置指尖密封的动态性能分析[D]. 西安:西北工业大学, 2013. Yu Qiang Peng. Dynamic Performance Analysis of Multi-layer Finger Seal Made of Cobalt-based Alloys and C/C Composites[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013.
- [15] 王莉娜. 考虑工作状态的C/C复合材料指尖密封动态性能研究[D]. 西安:西北工业大学, 2016. WANG Lina. Research on Dynamic Performance of C/C Composite Finger Seal under Considering Work Status [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [16] 王莉娜, 陈国定, 苏华, 等. 考虑装配条件的C/C复合材料指尖密封动态性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(7): 135-139. WANG Lina, CHEN Guoding, SU Hua, et al. Dynamic Performance of C/C Composite Finger Seal Considering Assembly Condition [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(7): 135-139.
- [17] LU Fei, LIU Jian, LU Hongyan. Experimental Study on Leakage and Wear Characteristics of C/C Composite Finger Seal[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2020, 72(10): 1133-1138.

(编辑 张洋)

作者简介:石岩松,男,1999年生,硕士研究生。研究方向为润滑与密封。E-mail: s15514701776@163.com。路菲*(通信作者),女,1986年生,副教授。研究方向为润滑与密封、摩擦动力学。E-mail: lufei@haust.edu.cn。

本文引用格式:

石岩松,路菲,周志刚,等. 转子倾斜状态下的指尖密封动态性能[J]. 中国机械工程, 2026, 37(1): 126-134.

SHI Yansong, LU Fei, ZHOU Zhigang, et al. Dynamic Performance of Finger Seals under Rotor Tilt Conditions[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(1): 126-134.