

圆弧型指尖密封迟滞特性的 数学计算方法

杜春华^{1,2}, 张延超¹, 董书娜¹, 崔亚辉¹, 吉洪湖³

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048;

2. 苏州迈为科技股份有限公司 研发部, 江苏 苏州 215200;

3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了预测指尖密封迟滞特性,提出了用能够直观反映指尖密封迟滞特性的最小迟滞量来表征指尖密封的迟滞,建立了指尖密封最小迟滞量计算的数学模型,确定了模型中的修正系数,并进行了试验验证,采用修正后的计算模型研究并获得了结构和工况参数对指尖密封迟滞的影响规律。研究表明:采用修正后的模型进行考虑迟滞效应的泄漏特性数值计算与试验结果误差最大为 7.64%,最小迟滞量的计算模型合理可靠;指尖密封结构参数对其最小迟滞量影响程度从小到大依次为:指梁型线圆、指梁间隙、指梁根圆、指梁顶圆、指梁基圆、周向角、指尖片厚度。研究结果为进一步开展迟滞对指尖密封泄漏特性影响和指尖密封结构优化设计的研究提供了依据和理论基础。

关 键 词: 指尖密封; 迟滞特性; 最小迟滞量; 结构参数; 工况参数

中图分类号: V231

文献标志码: A

Mathematical calculation method for hysteresis characteristics of arc-shaped finger seal

DU Chunhua^{1,2}, ZHANG Yanchao¹, DONG Shuna¹,
CUI Yahui¹, JI Honghu³

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Research and Development Department,
Suzhou Maxwell Technologies Company Limited, Suzhou Jiangsu 215200, China;

3. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to predict the hysteresis characteristics of finger seal accurately, minimum hysteresis representing hysteresis characteristics of finger seal was proposed. Then minimum hysteresis mathematical calculation method was established, the correction coefficient of model was determined and verified by experiments. The influence rules of the structure and working con-

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 陕西省科技成果转移与推广计划(2018XNCG-G-11); 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(19JC030);

国家自然科学基金青年基金(51305343)

作者简介: 杜春华(1987—),男,讲师,博士,研究领域为润滑与密封技术、传质与传热。E-mail: duchunhua555@163.com

引用格式: 杜春华,张延超,董书娜,等. 圆弧型指尖密封迟滞特性的数学计算方法[J]. 航空动力学报, 2022, 37(8): 1587-1596. DU Chunhua, ZHANG Yanchao, DONG Shuna, et al. Mathematical calculation method for hysteresis characteristics of arc-shaped finger seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(8): 1587-1596.

dition parameters of finger seals on the hysteresis characteristics were studied and obtained based on the modified calculation model. Results showed that the maximum error between the numerical calculation of leakage characteristics considering the hysteresis effect based on modified calculation model and the test results was 7.64%, and the conclusion of model was reliable. The degree of influence of various structural parameters on the hysteresis characteristics of finger seal was in descending order: thickness of each finger laminate, finger repeat angle, arc radius of the finger beam arcs centers, diameter of the finger base circle, width of the interstice between fingers, and arc radius of finger beam. The results provide a theoretical basis and basis for further research on the influence of hysteresis on the finger seal leakage characteristics and the optimal design of finger seal structure.

Key words: finger seal; hysteresis characteristics; minimum hysteresis; structural parameters; working conditions parameters

密封技术在航空发动机的发展过程中扮演着重要角色,已经成为了发展高推重比、低耗油率以及工作稳定可靠的先进航空发动机的一项关键技术。指尖密封作为一种新型接触式密封技术已备受关注。试验研究表明:用指尖密封代替传统的篦齿密封可使泄漏量降低 20%~70%^[1];在密封效果相近的情况下,指尖密封的制造费用约为刷式密封的 1/2^[2],且能够有效避免刷式密封“断丝”的缺陷。泄漏特性作为指尖密封最重要的性能评价指标,目前国内外学者已经做了大量的研究^[3-15]。由于指尖密封在工作时受上下游压差影响,指尖片与后挡板间存在较大摩擦力,阻碍了指尖片跟随转子径向变形的恢复,指尖片与转子之间的接触间隙增大,出现迟滞现象,从而造成密封泄漏增大。因此,开展指尖密封迟滞特性的研究对密封技术的改进具有实际意义。

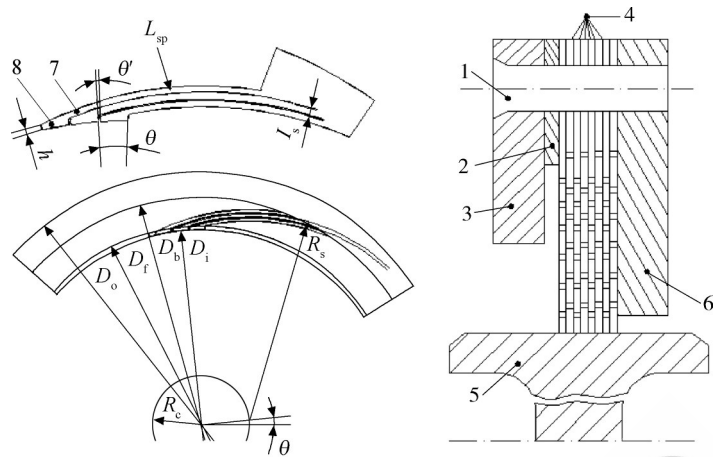
目前,对指尖密封迟滞特性的研究较少,指尖密封的迟滞现象最早是由 Arora 等^[2]在泄漏特性随转子转速升降循环变化的试验研究中发现的,研究发现在转速下降后指尖密封泄漏明显增加,出现严重迟滞现象。陈国定等^[16]最早提出迟滞率的概念并提出用迟滞率表示指尖密封迟滞特性的优劣,并分析了不同型线指尖密封结构在不同压差下的迟滞特性。朱三朋^[17]以低迟滞率为目标,对指尖密封的结构参数进行优化研究。苏华等^[18]研究表明认为指尖密封的迟滞由其工作过程中摩擦力做功不等所造成的,并从功能观点出发研究了指尖密封产生迟滞的机理。雷艳妮等^[19]采用动力学模型研究指尖密封的迟滞特性,白花蕾^[20]利用有限元技术分析了圆弧形线指尖密封的迟滞特性。根据文献分析,目前对指尖密封迟滞特性的

研究主要集中在机理分析和迟滞量变化等方面,迟滞对泄漏影响的

目前,指尖密封迟滞特性的研究主要是采用有限元分析方法对迟滞率进行分析,而迟滞率是与径向变形量相关的动态量,不利于对迟滞影响的分析。本文根据指尖密封的结构特点及其理论分析,提出了用静态的最小迟滞量来表征指尖密封迟滞的大小,并根据指尖片单个指尖的受力分析建立了圆弧形线指尖密封最小迟滞量的数学模型。在此基础上,开展了圆弧形线指尖密封的结构和工况参数对其迟滞特性影响规律的研究,为设计低迟滞型圆弧形指尖密封,提高密封性能提供理论依据。

1 圆弧形指尖密封结构

如图 1 所示,指尖密封结构是由前挡板、隔片、指尖片和后挡板通过铆钉联接组成。在薄片上按照一定规律加工出具有圆弧曲线形状的曲梁,形成圆弧形指尖片。多层指尖片交替叠置,使得相邻指尖片的指梁互相覆盖指梁间隙,起到阻漏的作用;指尖片与转子接触的部分称为指尖靴,指尖靴与转子之间形成过渡或过盈配合,从而阻止流体流动形成密封。指尖密封结构参数如图 1 所示,其中 D_o 表示指尖片的外圆直径, D_i 表示指尖密封结构的内圆直径, D_t 表示指梁顶圆直径, D_b 表示指梁根圆直径, R_s 表示指梁型线圆半径, R_c 表示指梁型线基圆半径, θ 表示指尖片指梁的周向角, θ' 表示指尖靴间隙周向角, L_{sp} 表示指梁跨度, I_s 表示指梁间隙, b 表示指尖片厚度, h 表示指梁截面高度, Z 是单层指尖片单元个数。各结构参数的具体取值如表 1 所示。



1 铆钉; 2 隔片; 3 前挡板; 4 指尖密封片; 5 转子; 6 后挡板; 7 指梁; 8 指尖靴。

图 1 指尖密封结构
Fig.1 Structure of finger Seal

表 1 指尖密封的结构参数	
Table 1 Structure parameters of finger seal	
结构参数	参数取值
D_o/mm	190
D_i/mm	150
D_r/mm	152
D_b/mm	170
R_c/mm	17.5
R_s/mm	75
$\theta/(\text{^\circ})$	6
$\theta'/(\text{^\circ})$	6
I_s/mm	0.3
$Z/\text{个}$	60
b/mm	0.25

2 指尖密封迟滞计算的数学模型

2.1 最小迟滞量

指尖密封是一种接触式密封,其主要应用在高压高转速的工况条件。转子在高速旋转时会产生径向跳动、离心变形以及在摩擦热作用下的热膨胀变形等,从而使转子表面产生径向位移,与之接触的指尖片会随着转子径向位移而产生径向变形。由于指梁具有一定的刚度,发生变形时能够产生一定的恢复力,在转子转速降低后转子表面径向位移减小时,使指尖靴恢复到原来位置。但指尖密封在工作时受上下游压差的影响,指尖片与后挡板之间会产生较大摩擦力,当转子表面径

向位移减小时,由于摩擦阻力的存在,指尖片不能及时跟随转子径向位移减小而恢复,在恢复过程中与转子表面分离出现间隙,这一间隙称为指尖密封的迟滞量,是动态变量。指尖靴在恢复力的作用下不断恢复,当摩擦力与指梁产生的恢复力平衡时,指梁变形就不能继续恢复,变形量为指尖片能克服摩擦阻力而恢复到的最小变形量,这一残留的剩余径向变形量称为指尖密封的最小迟滞量。

指尖密封的最小迟滞量与转子径向位移之间的差值即为指尖密封的“迟滞间隙”,其大小是决定迟滞对泄漏特性影响的主要因素,而“迟滞间隙”的大小取决于指尖密封最小迟滞量的大小即指尖密封变形恢复后剩余的变形量的大小。当转子表面径向位移下降阶段且径向位移相同时,指尖密封最小迟滞量越大,迟滞间隙越大,迟滞对其泄漏特性影响越大。指尖密封的最小迟滞量不仅反映指尖片与后挡板之间摩擦力对指尖片变形恢复的阻碍效果,而且可以间接反映迟滞对泄漏的影响程度。因此,本文提出用最小迟滞量的大小来度量指尖密封迟滞性能的指标,表征指尖密封的迟滞特性。最小迟滞量越大表征指尖密封的迟滞越严重,指尖密封性能越差。

此外,指尖密封迟滞主要是伴随转子表面径向位移的变化而产生的,而引起转子径向位移的因素很多,如转子离心变形、装配偏心、热膨胀变形、径向跳动等,装配偏心和径向跳动引起的迟滞影响指尖密封在发动机整个运转过程中的密封效果,离心变形引起的迟滞主要影响停车阶段的密封效果。本文所讨论的迟滞主要是在转速升降循

环过程中转子离心膨胀变形引起的指尖密封的迟滞。

2.2 最小迟滞量的数学计算模型

2.2.1 基本假设

指尖密封产生迟滞的主要原因是指尖片在上下游压差作用下与后挡板产生摩擦力的结果,因此要进行指尖密封的最小迟滞量计算首先要对指尖片在上下游压差作用下的受力进行分析。如图 2 所示为在上下游压差作用下指尖指尖片的轴向受力情况, p_u 表示指尖片受到上游均布压力、 p_d 表示在后挡板保护高度以下部分受下游均布压力、 F 表示后挡板对指尖片的作用力。分析可知,作用在指尖片上游均布压力等于作用在指尖片下游均布压力与后挡板对指尖片的压力之和。指尖片的单个指梁所受力情况如图 3 所示,其中 q_u 为上游压力作用在指梁上的均布载荷, q_d 为下游压力作用在指梁上的均布载荷, q_f 表示后挡板作用在指梁上的均布载荷, F_f 为后挡板与指梁间的摩擦力, F_d 为指梁变形后产生的恢复力, F_p 为作用在指梁上的轴向载荷。

指尖密封的前后挡板保护高度一般都很小,忽略后挡板保护高度以下部分的轴向受力;后挡板一般与指梁部分完全接触,与指尖靴部分接触,

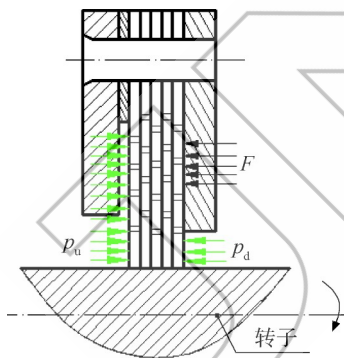


图 2 上下游压差作用下的指尖片受力

Fig.2 Stress of finger seal laminates under pressure difference between the upstream and downstream

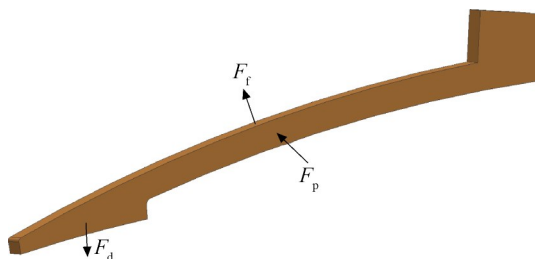


图 3 指尖片单个指的受力

Fig.3 Force on single finger of finger seal laminates

且与指尖靴接触面积很小,因此可忽略指尖靴与后挡板接触部分,认为是整个指梁与后挡板的接触;假设后挡板与指尖片接触力为均匀分布力。在进行分析计算时,将指梁视为具有一定形状的悬臂梁。根据圆弧型指尖密封指梁形成原理和结构特点可知,指梁宽度从指梁顶圆处到指梁根圆处呈连续变化的,但其最大变化量相对指梁宽度是很小的,仅为指梁宽度的 5%,可忽略不计。在转子装配偏心时,指尖片上不同位置的指梁变形量是不同的,各指尖片是交错重叠在一起的,所以轴向相邻的两个指梁的经向变形量是不同的,但其变形量相差不大,经计算最大差值仅为变形量的 5.17%,可忽略。

综上所述,在推导指尖密封最小迟滞量的数学模型时进行了如下假设:①后挡板保护高度下的指梁在轴向受力为零;②假设指尖密封的指梁为具有一定形状的悬臂梁;③假设从指梁顶圆到指梁根圆处的指梁宽度不变;④各层指尖片的径向变形是同步的,指尖片之间没有相对位移,且在指尖回弹过程中各指尖也都是同步,不产生相对位移。

2.2.2 指尖片与后挡板间的摩擦力矩

根据基本假设和轴向受力分析,指尖片与后挡板接触压力可以由上游压力与接触面积的乘积来计算。取微小长度的指梁进行分析,微小长度的指梁与后挡板之间的摩擦力计算公式为

$$dF_f = C_f \cdot f \cdot dN = C_f \cdot f \cdot (p_u \cdot h_l \cdot dl) \quad (1)$$

式中 dF_f 表示微小长度指梁受到的摩擦力, (N); C_f 表示指梁与后挡板之间的摩擦力修正系数,需要根据试验进行确定; dN 表示微小长度指梁受到后挡板的压力, (N); p_u 表示上游压力, (MPa); h_l 表示指梁宽度, (m); dl 表示微小长度的指梁长度, (m); f 表示指尖片与后挡板之间的摩擦因数。

根据基本假设,以指梁根部为坐标原点,径向方向为 Y 轴,根部切线方向为 X 轴建立坐标系,并将指梁看作具有一定形状的悬臂梁,构建微小长度 dl 的指梁摩擦力矩分析模型,如图 4 所示。图中 L_y 为指梁顶部 X 轴垂直距离; x 、 y 是微小长度 dl 的指梁所在坐标系中的坐标; β 表示微小段指梁处圆弧法线与指尖密封径向的夹角; θ_x 表示微小段指梁到指梁根部之间圆弧的弦切角。可求得微小长度 dl 的指梁的摩擦力矩公式为

$$dM_f = dF_f \cos \beta \cdot x + dF_f \sin \beta \cdot y = 2R_s dF_f \sin \theta_x \cdot \cos(\beta - \theta_x) \quad (2)$$

将式(2)在指梁方向上积分,得到指梁所受的摩擦力矩为

$$M_f = \int_0^L dM_f = C_f R_s^2 p_u h f \left(2\theta_1 + \frac{1}{2} \sin 4\theta_1 \right) \quad (3)$$

式中 M_f 表示指梁摩擦力矩, (N·m); θ_1 表示指梁顶部到指梁根部之间圆弧的弦切角, $\theta_1 = L/2R_s$ 。

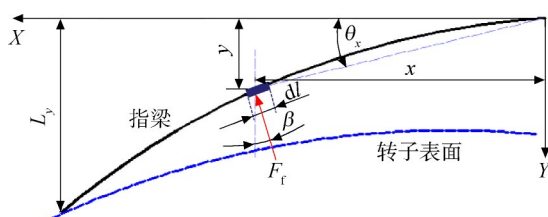


图4 指梁摩擦力矩分析模型

Fig.4 Analysis model of friction torque of finger beam

2.2.3 指尖片指梁的恢复力矩

指尖密封的指梁在径向发生变形时具有一定的恢复力使指梁恢复原状。根据基本假设,在进行指梁的恢复力力矩分析时将指梁看作悬臂梁。如图5所示为指尖密封指梁恢复力力矩分析模型。指梁径向变形量很小,指梁弧线的弦切角变化很小,忽略其变化。经分析可得指梁的恢复力力矩表达式为

$$M_k = F_{\text{eff}} \cos \alpha \cdot L_s + F_{\text{eff}} \sin \alpha \cdot L_y = 2C_{\text{eff}} k_{\text{eff}} R_s \cdot \Delta r \cdot \sin \theta_1 \cos(\alpha - \theta_1) \quad (4)$$

式中 L_s 表示指梁在 x 轴上的投影长度; L_y 表示指梁在 y 轴上的投影长度; C_{eff} 表示考虑指尖片之间受摩擦力时指梁等效刚度的修正系数,这一参数与单个指梁形状和指尖片之间摩擦力有关,是一个综合修正系数; k_{eff} 表示指梁的等效刚度, (N/m); Δr 表示指尖密封的径向变形量, (m); α 表示恢复力方向与指尖密封的径向方向的夹角, (rad), 计算如式(5)所示:

$$\alpha = \theta_1 - a \cos \frac{R_f^2 + R_s^2 - R_c^2}{2R_f R_c} \quad (5)$$

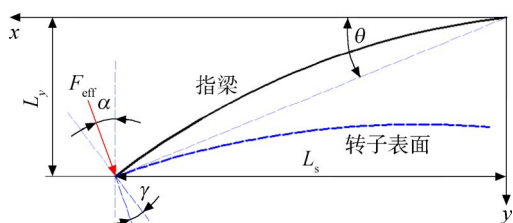


图5 指梁恢复力力矩分析模型

Fig.5 Analysis model of restoring force of finger beam

2.2.4 最小迟滞量的数学计算模型

根据指尖密封最小迟滞量定义和指尖密封受力分析可知,指尖密封在指梁恢复到最小迟滞量位置时,指尖片与后挡板之间的摩擦力矩和指梁恢复力矩相等。因此,令指尖片与后挡板之间的摩擦力矩和指梁恢复力矩相等,并求解可得指尖密封最小迟滞量

$$\Delta r_{h-\min} = C_{h-\min} \frac{R_s p_u h f \left(2\theta_1 + \frac{1}{2} \sin 4\theta_1 \right)}{2k_{\text{eff}} \cdot \sin \theta_1 \cos(\alpha - \theta_1)} \quad (6)$$

式中 $\Delta r_{h-\min}$ 表示指尖密封的最小迟滞量, (m); $C_{h-\min}$ 表示最小迟滞量的综合修正系数, $C_{h-\min} = C_f / C_{\text{eff}}$ 。

指尖片之间和指尖片与后挡板之间的摩擦力以及指梁型线都会对指尖密封的综合刚度产生影响,进而影响指尖密封的迟滞大小,而本文所推导的最小迟滞量计算模型是基于单片指尖片进行的,因此,本文引入综合修正系数 $C_{h-\min}$ 来对整个指尖密封结构的最小迟滞量进行修正。消除了因基本假设中不考虑片与片之间摩擦力及指梁为悬臂梁而引起的误差,通过试验修正综合修正系数可以使数值计算结果更为准确。

2.3 修正系数

迟滞存在会较大程度地影响指尖密封的性能,如指尖片刚度、摩擦功耗以及密封性能等,迟滞通过径向变形影响其刚度的大小,又通过迟滞量和刚度的变化对摩擦功耗产生影响,摩擦功耗又会通过摩擦热影响指尖片的刚度和密封的迟滞性能,它们之间的相互关系不宜通过试验测量和验证。而迟滞对指尖密封泄漏的影响,可以通过试验测量泄漏量的变化来分析验证,而且泄漏特性的影响也是迟滞对指尖密封性能影响极其重要的一个方面。因此,本文采用泄漏特试验来进行修正参数和试验验证。指尖密封的迟滞现象主要发生在转速下降阶段,且转速越低,其迟滞现象越明显,即泄漏量越大。仅考虑转子的离心膨胀变形的情况时,随着转速从最高下降至最低,转子表面径向位移为零,此时指尖片的径向变形量等于转子在转速循环过程中的最大径向位移或者等于指尖片的最小迟滞量。因此,可以采用转速升降循环过程中的下降阶段的零转速时的泄漏来进行指尖密封最小迟滞量的修正,即确定最小迟滞量计算数学模型中修正系数。本文的试验数据采用文献[14]中过盈量为 0.068 mm 的指尖密封在不

同压差下的试验数据来确定最小迟滞量计算数学模型中修正系数 $C_{h\min}$ 。

图6是不同压差转子转速下降阶段零转速时的数值计算与试验结果,图中指尖在最大变形位置是指尖径向变形保持在转子最高转速时由于膨胀变形引起的指尖径向变形处,指尖在最小变形位置是指尖径向变形保持在最小迟滞变形量处。由于指尖密封迟滞的大小通过迟滞间隙和径向变形对本文所采用的多孔介质模型的孔隙率的改变来影响指尖密封的泄漏的,而迟滞量修正系数又影响最小迟滞量的大小。从最小迟滞量计算公式可知最小迟滞量与迟滞量修正系数呈线性关系,在相同工况下且径向变形变化量较小的情况下,可以认为泄漏量与径向变形量呈线性关系。因此可以采用线性插值进行指尖片径向变形的确定。采用插值的方法计算指尖恢复位置,然后根据过盈配合状态和变形量进行分析,确定最小迟滞量的大小。根据试验确定的最小迟滞量和最小迟滞量计算模型分析确定不同压差下的综合修正系数 $C_{h\min}$,通过非线性拟合得到 $C_{h\min}$ 与压差 Δp 之间的关系式

$$C_{h\min} = C_0 + \frac{A}{\sqrt{2\pi} w \cdot \Delta p} e^{-\frac{[\ln \frac{\Delta p}{\Delta p_c}]^2}{2w^2}} \quad (7)$$

其中 $C_0=0.19354$, $\Delta p_c=0.1281$, $w=0.60086$, $A=0.17782$, e 为自然底数。本文用来表征指尖密封的迟滞特性的最小迟滞量的大小仅与结构参数、摩擦因数和压差相关的变量,不受转子转速的

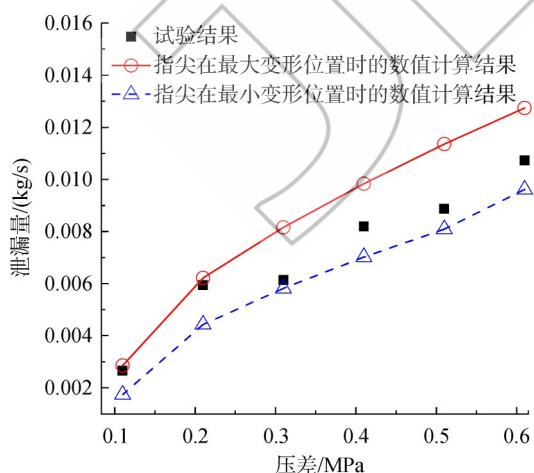


图6 转速下降阶段转子在零转速时泄漏量随压差变化的数值计算与试验结果

Fig.6 Numerical calculation and experiment results of leakage varies along with different pressures at zero rotor speed in rotor speed drop phase

影响;且由于本文采用的试验数据的压差范围是 $0.1\sim 0.6$ MPa,因此式(7)仅适用于压差为 $0.1\sim 0.6$ MPa 工况下不同转速下的指尖密封。

图7是指尖密封最小迟滞量计算模型中的综合修正系数 $C_{h\min}$ 及其拟合曲线。图中结果显示,拟合曲线与所确定的 $C_{h\min}$ 能够很好地吻合,其最大误差为 4.75% 。

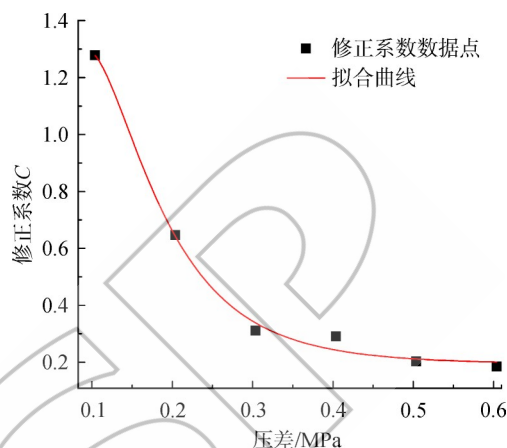


图7 综合修正系数及其拟合曲线

Fig.7 Comprehensive correction coefficient and its fitting curve

2.4 试验验证

指尖密封在转子转速升降过程中,指尖不能够跟随转子膨胀变形而变形,从而产生迟滞间隙,使指尖密封的泄漏增加。迟滞间隙是反映指尖密封迟滞特性的重要参数,由于试验条件的限制在指尖密封泄漏试验中,迟滞间隙的大小暂无法精确检测,由于指尖密封的迟滞发生在转速升降循环过程中,因此可以通过转子转速升降循环过程中的指尖密封泄漏量的变化来间接反映。因此,本文采用转子转速升降循环过程中指尖密封泄漏量变化的数值计算结果与试验结果对比来验证最小迟滞量计算模型。

采用本文所建立的最小迟滞量计算模型对文献[14]中过盈量为 0.068 mm 的指尖密封进行转子转速升降循环过程中的泄漏特性数值计算,并与文献中的试验结果进行对比分析。图8是转子转速升降循环过程中指尖密封泄漏量随转速变化的数值计算结果与文献中的试验结果对比。结果显示:在转速升降循环过程中,不考虑迟滞时,数值计算结果与试验结果误差较大,最大误差达到 31.95% ;考虑迟滞的数值计算结果与试验结果能够很好地吻合,其误差比较小,最大误差为

7.64%。证明了考虑迟滞的指尖密封数值计算方法是合理和正确的,也间接证明最小迟滞量的计算方法的合理性。修正和验证采用的是同一试验件不同工况下的试验数据进行的,对文中修正系数试验中的指尖密封结构在不同工况下具有普适性,而对于不同的指尖密封结构需要更多的试验数据进行修正。

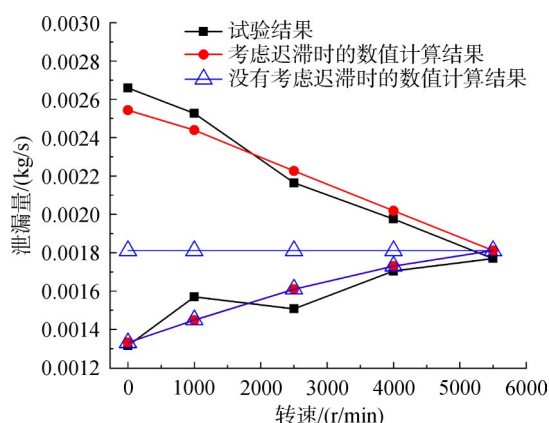


图8 指尖密封泄漏量随转速升降循环的变化

Fig.8 Leakage varies of finger seal along with rotor speed rise and fall

3 计算结果与分析

本文采用所建立的指尖密封最小迟滞量计算模型对指尖密封的迟滞特性进行了分析研究,研究了 D_f 、 D_b 、 R_c 、 R_s 、 θ 、 I_s 、 b 等结构参数,以及压差、摩擦因数等工况参数对指尖密封迟滞特性的影响,并获得了相应的影响规律。还分析了各结构参数对指尖密封迟滞特性影响程度的大小。在分析过程中,指尖密封各结构参数取值的数量级变化较大,不易在同一水平进行比较分析,为了方便研究工况和结构参数对迟滞特性的影响规律和程度,本文引入了无量纲化参数 C ,其计算式为

$$C = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (8)$$

式中 $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 、 X 分别表示各参数的最大取值、最小取值、计算时的取值。 C 取值范围是 0 到 1, C 取值为 0 时表示当前值为结构参数的最小值, C 取值为 1 时表示当前值为结构参数的最大值。由于本文中对迟滞特性的分析主要是定性分析,各结构参数的取值大小对指尖密封迟滞特性的定性分析结果不会产生影响。

3.1 结构参数对迟滞特性的影响

图9为指尖密封最小迟滞量随结构参数变化

系数的变化。图中计算结果显示了指尖密封最小迟滞量随各结构参数变化规律,反映了结构参数对迟滞特性的影响。下面将对各参数对指尖密封迟滞的影响进行详细分析。

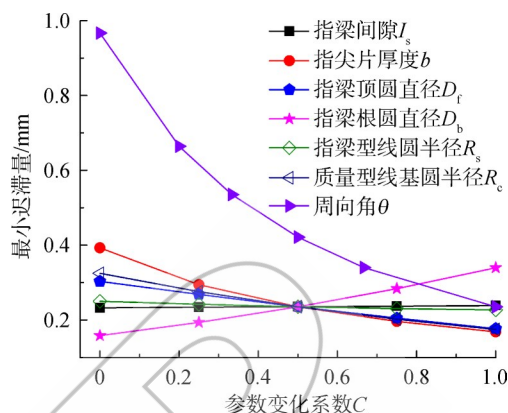


图9 指尖密封最小迟滞量随参数变化系数的变化

Fig.9 Variation of the minimum hysteresis of finger seal along with variation of parameter change coefficient

1) 指梁间隙

指尖密封最小迟滞量随指梁间隙的增加而增大,增加的幅度较小,说明指梁间隙增加会使指尖密封的迟滞增加,恢复性能下降。其主要原因在其他结构参数不变时,指梁会随指梁间隙增加而变窄,从而降低指梁的刚度,减小指梁的恢复力,从而使指尖密封的最小迟滞量增加。可以采用减小指梁间隙的方法来提高指尖密封的恢复力,降低指尖密封的最小迟滞量。由于指梁间隙减小会降低指尖密封的允许在径向的变形,因此指梁间隙不宜过小。

2) 指尖片厚度

指尖密封的最小迟滞量随指尖片厚度的增加而减小,减小趋势相对较大。主要原因是其他参数不变,指尖片厚度增大,指梁的刚度增加,使得指尖在发生变形后的恢复力增加,指梁发生很小变形就可以产生与阻碍其恢复变形的摩擦力相平衡的力,因此可以减小最小迟滞量,并且指梁发生变形后可以很快地恢复到平衡位置。在进行指尖密封设计时,可以通过增加指尖密封厚度来减小指尖密封的迟滞,而且相比改变其他参数来说采用增加指尖密封厚度来减小指尖密封的迟滞更为快速有效。但是,指尖片厚度并不是越大越好,指尖片厚度的合理选取需要综合考虑指尖密封的泄漏和磨损特性。

在进行指尖密封设计时,可以通过增加指尖密封厚度来减小指尖密封的迟滞,而且相比改变其他参数来说采用增加指尖密封厚度来减小指尖密封的迟滞更为快速有效。但是,指尖片厚度并不是越大越好,指尖片厚度的合理选取需要综合考虑指尖密封的泄漏和磨损特性。

3) 指梁顶圆

指尖密封的最小迟滞量随指尖片指梁顶圆直径的增加而减小,其变化趋势相对也比较大。其对指尖密封迟滞的影响小于指尖片厚度对指尖密封迟滞的影响,大于其他参数对指尖密封迟滞的影响。其他参数不变指梁顶圆直径增加,会使指梁变短,指梁跨度减小;指梁刚度相同情况下,跨度减小会使指尖密封发生变形后的恢复力增加,从而减小指尖密封的迟滞。增加指尖片指梁顶圆直径也是减小指尖密封迟滞的有效方法之一。

4) 指梁根圆

指尖密封的最小迟滞量随指尖片指梁根圆直径的增加而增加,其增加的速度略小于最小迟滞量随指尖片指梁顶圆直径的增加而减小的速度。分析其原因是其他结构参数不变,指梁随指梁根圆直径增加而变长,从而增加了指梁跨度;指梁刚度相同情况下,指梁跨度增大会使指尖密封发生变形后的恢复力减小,从而增加指尖密封的迟滞。由于指梁根圆直径的增加使指梁长度的增加量略小于指梁顶圆直径的增加使指梁长度的减小量,即指梁根圆直径的增加引起的指梁跨度变化略小于指梁顶圆直径的增加引起的指梁跨度变化,因此指梁根圆直径的增加引起的最小迟滞量的增加速度略小于指梁顶圆直径的增加引起的最小迟滞量的减小速度。减小指尖片指梁根圆直径可以有效减小指尖密封迟滞。

5) 指梁型线圆

指尖密封的最小迟滞量随指梁型线圆半径的增加而略有减小。分析原因是,指梁型线圆半径的增加不仅增加指梁型线长度,还改变型线与径向的角度,这些因素都会影响指尖密封发生变形后的恢复力,情况比较复杂,需要对不同结构的指尖密封进行计算后才能确定指尖密封的最小迟滞量随指梁型线圆半径的增加是增加还是减小。本文所研究的指尖密封结构中,最小迟滞量随指梁型线圆半径的增加而减小。在进行指尖密封设计时,需要根据已设计好的结构参数确定指尖密封的最小迟滞量随指梁型线圆半径的变化趋势,然

后再调整指梁型线圆半径以达到合理值。

6) 指梁基圆

指尖密封的最小迟滞量随指梁型线圆基圆半径的增加而减小,其变化引起的最小迟滞量变化速度比指尖片厚度小,比随型线圆半径、指梁间隙大。分析原因,其他参数不变的情况下,指尖密封指梁型线基圆半径增加,指梁的长度减小,指梁跨度减小,使指尖密封发生变形后的恢复力增加,从而减小指尖密封的迟滞。另外,指梁长度大小取决于指梁型线基圆和型线圆半径,在进行结构设计时,需要综合考虑两因素的影响。

7) 周向角

指尖密封最小迟滞量随周向角的增加而减小。其原因是其他结构参数不变,周向角增加,指尖数减少,指梁变宽,使得指梁刚度增加,进而增加指梁在发生变形后的恢复力,减小指尖密封的迟滞。周向角增加可以有效减小指尖密封的迟滞,但周向角并不是越大越好,需要综合考虑泄漏特性和磨损性能。

3.2 结构参数对迟滞特性的影响程度

根据以上分析可知,其他参数不变的情况下,指尖片厚度、指梁顶圆、指梁基圆、周向角、指梁型线圆等指尖片结构参数的增加会减小指尖密封迟滞;指梁间隙、指梁根圆等指尖片结构参数增加会增加指尖密封迟滞。根据曲线越陡其结构参数对指尖密封迟滞影响越大和图 9 中结果分析可得:对指尖密封迟滞影响的程度从大到小依次为周向角、指尖片厚度、指梁根圆、指梁基圆、指梁顶圆、指梁型线圆、指梁间隙。这一结果是根据无量纲参数变化所得,但由于各参数的取值范围不同,这一结果不能够准确反映结构尺寸对迟滞特性影响程度的大小关系。因此,本文采用单位结构参数变化量下指尖密封最小迟滞的量变化量来对结构参数对迟滞特性影响程度大小进行精确分析。

图 10 是指尖密封最小迟滞量随实际结构尺寸的变化趋势,图中横轴为结构参数,由于结构参数中除了直径、间隙和厚度等长度单位外,还有周向角,因此横轴单位为 mm 和 $^{\circ}$ 。表 2 是单位参数变化量下指尖密封最小迟滞量的变化量。图中结果和表中数据显示:结构参数对指尖密封迟滞影响程度从大到小依次为指尖片厚度、周向角、指梁基圆、指梁顶圆、指梁根圆、指梁间隙、指梁型线圆。

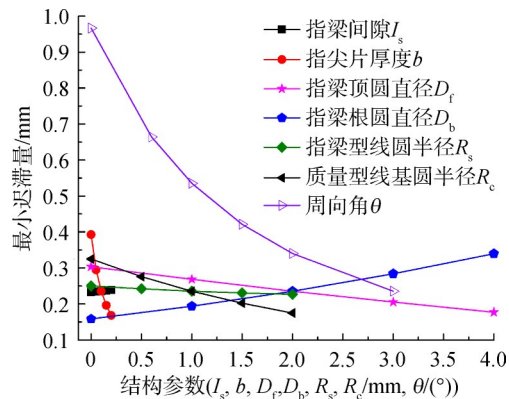


图 10 指尖密封最小迟滞量随实际结构尺寸的变化趋势
Fig.10 Change trend of the minimum hysteresis of finger seal along with the practical value of structure parameters

表 2 单位参数变化量下指尖密封最小迟滞量的变化量
Table 2 Variation of the minimum hysteresis of finger seal under change of the unit parameter

结构参数	变化量	结构参数	变化量
D_f/mm	0.063 3	I_s/mm	0.029 7
D_b/mm	0.045 4	b/mm	1.121 5
R_c/mm	0.075	$\theta/(^\circ)$	0.243 7
R_s/mm	0.011 5		

3.3 工况参数对迟滞特性的影响程度

本文除了分析了结构参数对指尖密封迟滞特性的影响,还研究了压差、摩擦因数等工况参数对指尖密封迟滞特性的影响,并获得了相应的影响规律。图 11 为指尖密封最小迟滞量随压差和摩擦因数的变化趋势。图中计算结果显示:指尖密

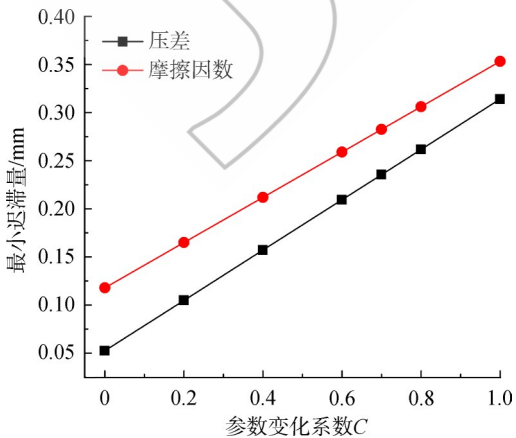


图 11 小尺寸指尖密封的最小迟滞量随压差和摩擦因数的变化
Fig.11 Variation trend of the minimum hysteresis of small size finger seals along with pressure

封的最小迟滞量随着压差和摩擦因数的增加而增加,且呈线性增加趋势;随摩擦因数变化直线的斜率小于随压差变化直线的斜率。其原因是压差和摩擦因数的增加都会使指尖片与后挡板之间的摩擦力增加,使得指尖密封的迟滞增加。根据分析可知,减小压差和摩擦因数可以有效减小指尖密封的迟滞。可以选择合适的材料使指尖片与后挡板组成的摩擦副之间的摩擦因数降低,来减少指尖密封的迟滞。

4 结 论

1) 提出了用最小迟滞量来表征指尖密封迟滞特性。最小迟滞量能够直观描述指尖密封迟滞特性,为进一步开展迟滞对泄漏特性影响数值计算方法的研究提供了依据和理论基础。

2) 本文建立了最小迟滞量计算的数学模型,给出了模型中修正系数的确定方法,根据文献中试验数据确定了修正系数,并进行了模型的试验验证。验证结果显示,采用修正后的模型进行指尖密封的泄漏特性数值计算与试验结果误差最大为 7.64%,证明了最小迟滞量的计算方法的合理性。

3) 采用经过试验验证后的指尖密封最小迟滞量计算的数学模型进行了指尖密封迟滞特性研究,研究了指尖片结构参数和工况参数对指尖密封迟滞特性的影响,获得影响规律,分析了各结构参数对指尖密封迟滞特性影响程度的大小,其从大到小依次为:指尖片厚度、周向角、指梁基圆、指梁顶圆、指梁根圆、指梁间隙、指梁型线圆。研究结果为指尖密封结构设计提供了理论基础和依据。

参考文献:

[1] 王强,吉洪湖,胡娅萍,等.考虑磨损效应的指尖密封瞬态泄漏特性分析[J].推进技术,2020,41(12):2815-2825.
WANG Qiang,JI Honghu,HU Yaping,et al.Transient leakage characteristics analysis of finger seal considering wear effects[J].Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(12): 2815-2825.(in Chinese)

[2] ARORA G K,PROCTOR M P,STEINETZ B M,et al. Pressure balanced, low hysteresis, finger seal test results[R]. AIAA 99-2686,1999.

[3] BRAUN M J,PIERSON H M,DENG D. Thermofluids considerations and the dynamic behavior of a finger seal assembly[J].Tribology Transactions,2005,48(4):531-547.

[4] 王莉娜,陈国定,苏华,等.考虑泄漏间隙有压流体作用的指式密封瞬态性能分析[J].航空动力学报,2015,30(8):

- 2004-2010.
- WANG Lina, CHEN Guoding, SU Hua, et al. Transient performance analysis of finger seal considering compressed fluid in the leakage gap effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(8):2004-2010. (in Chinese)
- [5] 王莉娜, 陈国定, 苏华, 等. 考虑装配条件的C/C复合材料指式密封动态性能[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. (in Chinese)
- [6] CHEW J W, HOGG S I. Porosity modeling of brush seals[J]. ASME Journal of Tribology, 1997, 119(4):769-775.
- [7] 胡廷勋, 周坤, 力宁, 等. 指尖密封泄漏特性数值计算与试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(5):1089-1096.
- HU Tingxun, ZHOU Kun, LI Ning, et al. Numerical calculation and experimental study on leakage characteristic of finger seal[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(5): 1089-1096. (in Chinese)
- [8] WANG Qiang, HU Yaping, JI Honghu, et al. An anisotropic porous media model for leakage analysis of finger seal[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2020, 234(2):280-292.
- [9] 白花蕾, 王伟, 张振生, 等. 基于多孔介质模型的指式密封泄漏流动分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31(6):1303-1306.
- BAI Hualei, WANG Wei, ZHANG Zhensheng, et al. Analysis of leakage on flow through finger seal based porous medium[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(6):1303-1306. (in Chinese)
- [10] 白花蕾, 吉洪湖, 纪国剑, 等. 指式密封泄漏特性的实验研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3):532-536.
- BAI Hualei, JI Honghu, JI Guojian, et al. Experimental investigation on leakage characteristics of finger seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(3):532-536. (in Chinese)
- [11] 曹静, 吉洪湖, 金峰, 等. 指尖密封结构中气流流动与传热特性分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(4):33-36.
- CAO Jing, JI Honghu, JIN Feng, et al. Analysis of air flow and heat transfer characteristics in fingertip sealing structure[J]. Aeroengine, 2011, 37(4):33-36.
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] 王璐, 苏华. 具有一般型线的指式密封性能优化设计[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(4):544-548.
- WANG Lu, SU Hua. Optimization design of the finger sealing performance with general profile[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(4): 544-548. (in Chinese)
- [14] 杜春华, 吉洪湖, 胡娅萍, 等. 指尖密封的转子轴心轨迹与泄漏特性的试验[J]. 航空动力学报, 2016, 31(11):2575-2584.
- DU Chunhua, JI Honghu, HU Yaping, et al. Experiment on axis locus of rotor and leakage characteristics of finger seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(11):2575-2584. (in Chinese)
- [15] 杜春华, 吉洪湖, 胡娅萍, 等. 指尖密封磨损特性及其对泄漏影响的试验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(1):53-59.
- DU Chunhua, JI Honghu, HU Yaping, et al. Experiment of wearing characteristics and its effect on leakage of finger seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1):53-59. (in Chinese)
- [16] 陈国定, 徐华, 虞烈, 等. 指式密封的迟滞特性分析[J]. 机械工报, 2003, 39(5):121-124.
- CHEN Guoding, XU Hua, YU Lie, et al. Analysis on hysteresis characteristics of finger seal[J]. Journal of Mechanical engineering, 2003, 39(5):121-124. (in Chinese)
- [17] 朱三朋. 基于多工况要求的低迟滞指尖密封结构优化[J]. 润滑与密封, 2007, 32(12):40-46.
- ZHU Sanpeng. Structural optimization of finger seal with low hysteresis based on multi-operating condition[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(12):40-46. (in Chinese)
- [18] 苏华, 陈国定. 指尖密封迟滞特性的机理分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5):57-61.
- SU Hua, CHEN Guoding. Analysis on hysteresis characteristics of finger seal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5):57-61. (in Chinese)
- [19] 雷艳妮, 陈国定. 基于动力学模型的指尖密封迟滞特性[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5):122-126.
- LEI Yanni, CHEN Guoding. Finger seal's hysteresis characteristic based on dynamical model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5):122-126. (in Chinese)
- [20] 白花蕾. 圆弧型线指尖密封结构的形成方法和迟滞性能分析[J]. 航空发动机, 2014, 40(3):49-51.
- BAI Hualei. Analysis of hysteresis and forming method for finger seal with arc shape curve[J]. Aeroengine, 2014, 40(3): 49-51. (in Chinese)

(编辑:张雪)