

文章编号:1000-8055(2013)01-0205-06

## 基于系统响应特征的指尖密封泄漏特性分析

张延超<sup>1</sup>, 刘 凯<sup>1</sup>, 周连杰<sup>2</sup>, 胡海涛<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048;

2. 中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院 机械系统研究室, 成都 610500)

**摘 要:** 结合指尖密封动态工作特点,通过研究转速和转子不平衡力与转子跳动之间的关联规律,得到转子的位移激励,构建了指尖密封系统的动态计算模型,依据指尖密封的系统响应特征研究其泄漏间隙的获取办法,进而基于泄漏间隙特征建立了指尖密封动态泄漏量计算方法.针对某型发动机转子进行了动态泄漏量分析,结果表明:在转子每个转动周期内,指尖密封的动态响应跟随转子激励周期性变化,由此产生的动态迟滞泄漏间隙也随时间而周期性变化,迟滞泄漏的大小随着密封上下游压差的增加而增大,随着转子转速的升高先增加后减小;设置一定的装配过盈量能够一定程度地减小迟滞泄漏;指尖密封磨损后迟滞泄漏规律表现出先减小后增加再降低的变化趋势;与国内外试验结果的对比分析初步验证了提出的计算方法,为指尖密封动态性能设计方法研究提供了参考.

**关 键 词:** 指尖密封; 迟滞; 动态计算模型; 位移响应; 动态泄漏量

**中图分类号:** V231.96; TH122

**文献标志码:** A

### Analysis of leakage characteristics of finger seal based on system responses

ZHANG Yan-chao<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>, ZHOU Lian-jie<sup>2</sup>, HU Hai-tao<sup>2</sup>

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

2. The Research Laboratory of Mechanical System, China Gas Turbine Establishment,  
Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** The current work obtained the seal rotor displacement excitation through studying the association rules of rotor speed, rotor unbalanced force and rotor runout based on dynamic working characteristics of finger seal. Then, a dynamic computational model of finger seal system was constructed. The leakage clearance computation method was researched according to the dynamic displacement response characteristics from the constructed model. Then the dynamic leakage calculation method was constructed and the leakage analysis work was conducted. The results preliminarily shows that dynamic displacement response changes with the rotor excitation time in every rotation period. The dynamic leakage clearance produced by dynamic displacement response also changes with the rotor excitation time. The results also indicate that leakage numerical size is affected by working conditions, installation conditions and the abrasion degree of finger boots. The method was validated by

**收稿日期:** 2012-01-02

**网络出版地址:** [http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130114.1726.201301.205\\_028.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130114.1726.201301.205_028.html)

**基金项目:** 高等学校博士点专项(新教师类)科研基金(20116118120005); 陕西省自然科学基金(2011JQ7003);  
陕西省教育厅基金(11JK0870)

**作者简介:** 张延超(1978-),男,河南鲁山人,讲师,博士,主要从事叶轮机械动力学、密封技术研究.

the computational example of a special engine and the comparison of calculating results and test data in references. The research work can provide valuable reference for dynamic performances design and study of finger seal.

**Key words:** finger seal; hysteresis; dynamic computational model; displacement response; dynamic leakage

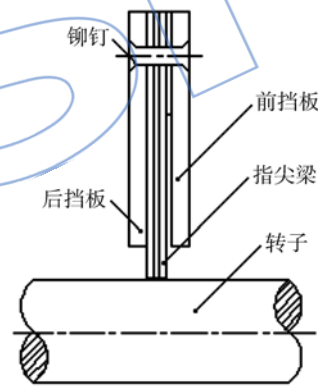
指尖密封是由刷式密封演化而来的一种新型柔性密封装置. 国内外的研究表明指尖密封的密封性能与刷式密封相当<sup>[1-3]</sup>, 同样条件下相对于4级蓖齿密封其泄漏量可以减少20%~70%, 仅次于石墨密封, 而其制造成本却只有刷式密封的40%~50%, 更是大大低于石墨密封, 因此是一种具有很大应用前景的密封技术, 在提高发动机性能和使用寿命、降低运行成本方面具有良好的应用前景, 越来越受到国内外学者的关注.

指尖密封工作中, 由于转子的质量偏心产生的不平衡力作用到指尖靴部, 从而导致指尖靴产生径向跳动, 在密封气体上下游压差以及指尖梁自身刚度的影响下, 指尖靴部与转子的位移响应产生差异, 导致指尖靴与转子之间产生泄漏间隙, 发生密封泄漏, 国内外的理论和试验研究都表明这是影响指尖密封性能的重要因素之一<sup>[4-7]</sup>. 针对这个问题, 国外对不同结构的指尖密封开展了一系列试验研究<sup>[8]</sup>, 但没有开展相应的理论分析, 这使得高性能指尖密封的设计具有很大的盲目性, 同时也增加了指尖密封的研制成本. 国内开展了指尖密封的指尖梁型线、轴向结构布局、指尖密封迟滞性能等方面的相关研究, 还开展了指尖密封的结构优化分析、指尖密封结构的等效动力学模型等有关研究<sup>[9-11]</sup>, 但对动态条件下指尖密封性能计算方面的研究还较为欠缺, 而这恰是衡量指尖密封性能是否优良的理论准则, 也可以对试验结果进行解释和验证, 因此开展指尖密封动态泄漏性能的理论研究对于高性能指尖密封的设计和研制, 以及降低指尖密封研制的费用都具有较大价值.

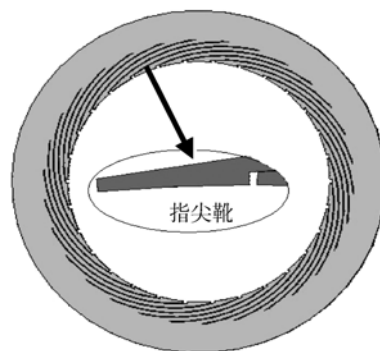
本文根据指尖密封的结构特征, 结合国内外已有研究经验, 建立了指尖密封泄漏量理论计算方法, 并结合有限元分析技术研究了转子不平衡激励条件下指尖密封的动态泄漏量计算问题, 与国外的试验结果进行了比较分析, 验证了计算方法的正确性, 可以为动态条件下指尖密封泄漏量的计算以及结果的合理性验证提供参考.

## 1 指尖密封动态性能分析模型

指尖密封的结构如图1所示, 为了得到动态条件下指尖密封的泄漏性能, 研究中将指尖密封转子质量偏心产生的不平衡激励力施加到指尖靴部, 结合图1中的指尖密封结构建立动态条件下指尖密封的有限元分析模型, 通过瞬态有限元分析计算出指尖梁在转子不平衡力激励下的位移响应, 通过在转子上施加位移激励代替转子相应的不平衡力激励, 从而得到不同转速条件下指尖靴部与转子之间的间隙, 获得密封气体的泄漏通道, 由此即可计算出不同转速条件下指尖密封的泄漏因子.



(a) 指尖密封轴向结构布局



(b) 指尖密封片结构

图1 指尖密封基本结构

Fig. 1 Structure of finger seal

### 1.1 指尖密封动态迟滞泄漏机理

转子的不平衡力是由转子的质量偏心所产生的径向惯性力. 制造中由于材料的不均匀以及加

工精度的影响通常会导致转子的质心不在转子的转轴中心线上,当转子高速旋转时转子就会产生径向惯性力,致使与转子密封面(指尖密封通过指尖靴与转子上安装的环形跑道外圆周面接触实现径向密封,将与指尖靴接触的环形跑道外圆周面称为转子密封面)接触的指尖靴部受到这种不平衡惯性力的作用产生径向位移响应。由于转子与指尖梁自身刚度的差异以及指尖片和后挡板之间的摩擦阻滞作用致使指尖梁与转子的位移响应不同,从而导致指尖靴部和转子之间产生间隙,造成密封泄漏。

根据指尖密封的工作结构(如图 1 所示)和动态迟滞机理,可以通过转子表面激励位移与指尖靴位移响应之间的差异来获得指尖密封的动态泄漏间隙,为指尖密封的动态泄漏量计算提供必要条件。

实际计算中可以将指尖密封动态工作系统简化成一个集中质量-弹簧-阻尼等效系统,通过等效计算获得等效动力学系统的相关等效参数,然后再通过数值方法进行求解分析其动态迟滞泄漏,亦可结合指尖密封的动态系统直接建立符合实际条件的有限元模型进行计算。但等效处理方法获得各等效参数的过程十分复杂,而且转子的动态激励难以在简化模型中准确体现,这些原因导致基于简化模型的分析可参考性较差,也与工程实际存在较大差距,因此本文采用有限元方法进行指尖密封动态泄漏性能分析。

## 1.2 指尖密封动力学系统有限元分析模型

根据指尖密封的动态工作原理,利用软件 Ansys12.0 有限元分析平台建立的动态有限元分析模型如图 2 所示。考虑到指尖密封结构的对称性,计算时轴向取 3 片指尖密封片,圆周方向取 2 个指尖梁包含的区域作为求解区域。后挡板与指尖片的外圆周施加全约束;后挡板外侧施加  $\approx$  向约束;后挡板、转子以及指尖片圆周方向分割面分别施加圆周方向约束;转子轴向前后面施加  $\approx$  向约束;指尖片与片之间、指尖片与后挡板之间、指尖梁与转子之间建立摩擦接触对;与高压密封腔接触的指尖片上施加气体压力;转子  $y$  方向施加不平衡力产生的转子位移激励。分析中采用的密封片材料为镍钴合金,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3,摩擦因数均为 0.15。

进行有限元分析时,在转子上施加  $y$  向位移激励模拟不平衡力产生的转子跳动,通过指尖密封系统的有限元瞬态分析获得指尖靴底部的位移

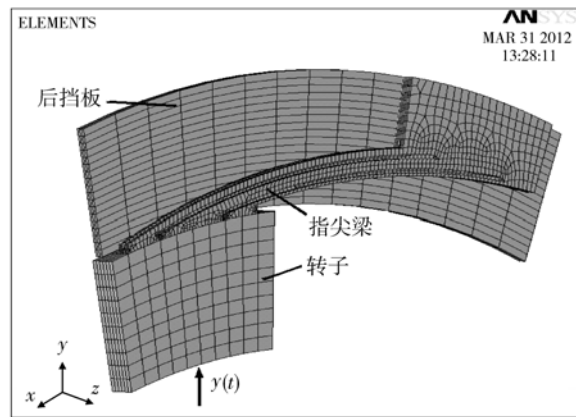


图 2 指尖密封动态有限元分析模型

Fig. 2 Dynamic finite element analysis model of finger seal

响应,根据指尖靴底部的位移响应和转子位移激励差异获得指尖密封的动态泄漏间隙,并利用建立的间隙泄漏量计算公式即可获得指尖密封动态工作条件下的泄漏因子。

## 2 指尖密封动态泄漏性能计算

通过上述指尖密封有限元模型的分析计算可以得到指尖密封动态条件下的位移响应,但是工程中衡量指尖密封工作性能的通常是泄漏因子,因此进一步分析得到位移响应,研究指尖密封系统的泄漏量计算方法以及指尖密封系统的泄漏因子是非常有必要的。

由于转子与指尖靴底部的响应不完全同步,这使得两者之间产生泄漏间隙,在动态条件下只要计算出每一时刻转子与指尖靴底部的位移间隙即可获得一个周期内指尖密封的泄漏量,从而得到指尖密封系统的泄漏量,亦可进一步计算出泄漏因子。工作时实际的泄漏间隙非常小,并且密封转子的工作转速非常高,因此,指尖密封的泄漏通道可以看成有偏心的圆环泄漏。此外,由于转子的转速很高,除了泄漏通道两端的压力差影响外,转子转速对泄漏的影响也必须加以考虑。根据文献 [9-11] 提供的间隙泄漏量计算方法,结合指尖密封的结构特点可以建立如式 (1) 所示的指尖密封泄漏量计算公式。

$$Q = \pi D_s \sqrt{\frac{2\Delta p}{\frac{\rho \lambda l}{2s} + 1.5\rho}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{96}{1 + (1.5 - 9.26 \times 10^{-3} Re_w^2) \epsilon^2 Re_z} \quad (2)$$

式中  $Q$  为指尖密封泄漏量 (kg/s);  $D$  为密封转子直径 (m);  $s$  为密封间隙 (m);  $l$  为泄漏间隙轴向长度 (m);  $\Delta p$  为密封间隙上下游压力差 (Pa);  $\rho$  为密封气体密度 (kg/m<sup>3</sup>);  $\lambda$  为流动阻尼系数;  $\epsilon$  为密封缝隙系数;  $Re_w$  为流体周向雷诺数;  $Re_z$  为流体轴向雷诺数. 研究中通常用泄漏因子来衡量指尖密封的泄漏性能, 计算公式如下<sup>[1,12]</sup>:

$$\varphi = \frac{385.3485Q \sqrt{1.8t + 491.670}}{p_h D} \quad (3)$$

式中  $\varphi$  为泄漏因子;  $t$  为密封气体的平均温度 (°C);  $p_h$  为上游密封气体的压力 (Pa);  $D$  为密封转子直径 (m);  $Q$  为密封气体的泄漏量 (kg/s).

### 3 指尖密封转子位移激励

根据分析, 进行指尖密封动态泄漏性能计算时, 转子激励形式和激励幅值大小对泄漏性能有重要影响. 转子对密封构件的激励, 主要是由于转子不平衡质量所产生的不平衡力引起的, 而且由于发动机不同部位的转子形状、质量以及支撑形式有区别, 其激励也不同. 为了使计算能够进行, 根据《航空制造工程手册》<sup>[13]</sup>, 选取涡轴 4 型发动机中的轴流压气机转子为研究对象, 转子设计的最大转速为 33500 r/min, 质量为 3.63 kg, 转子密封部位直径为 230.9 mm, 设计的指尖密封结构参数如表 1 所示, 转子不平衡量为 20 g·mm, 支撑轴承最大游隙为 0.045 mm<sup>[14]</sup>.

表 1 指尖密封结构参数

Table 1 Structure parameters of finger seal

参数名称	数值
指尖梁型线类别	渐开线
指尖梁个数	64
渐开线基圆半径/mm	16
指尖片内圆半径/mm	115.45
指尖片外圆半径/mm	131
指尖梁根圆半径/mm	124
指尖靴间隙宽度角/(°)	0.3
指尖片厚度/mm	0.3
轴向指尖片层数	16

根据对转子运行状态的仿真测试, 发现转子不平衡力作用下的激励近似为正弦激励, 经过计算发现在极限设计转速工作时, 转子的最大不平衡惯性力为 246 N, 远远大于转子的自身质量

36.3 N, 因此, 研究中假设一旦转子不平衡质量所产生的不平衡力大于转子自身质量, 将认为转子在对应转速条件下可以充满整个游隙, 即此时的最大振幅为支撑轴承游隙的大小. 根据计算发现当转速达到 12865 r/min 时转子不平衡惯性力为 36.3 N, 此时可以认为转子充满整个游隙, 转子振动达到最大幅值 0.045 mm. 如果转速继续升高则认为转子的振幅将不再增大, 将维持在最大游隙水平. 因为通过对转子的变形分析发现即使在最大不平衡力 246 N 作用下, 转子的变形量级与最大游隙相比也相差 100 倍, 因此, 可以认为充满游隙以后转子的激励振幅不再增大. 为了计算能够进行, 假设转速在达到 12865 r/min 之前, 转子的激励振幅是随转速线性变化的.

### 4 计算结果

为了计算指尖密封的泄漏量, 首先需要获得各种压差和转速工况条件下, 指尖靴与转子外表面之间的缝隙随时间的变化规律. 根据转子激励形式, 如图 3 所示是指尖靴和转子之间安装过盈量为 0.04 mm、密封上下游压差为 0.2 MPa、转速为 8580 r/min 时指尖密封的位移响应曲线.

从图 3 中可以看出指尖靴在某些时刻不能跟随转子一起跳动, 导致泄漏间隙产生, 因此通过图 3 中指尖密封的位移响应曲线可以得到对应压差和转速工况条件下指尖密封的泄漏间隙, 通过式 (1) 和式 (3) 可以进一步计算出对应的泄漏量和泄漏因子, 从而得到不同压差和转速工况条件下对应指尖密封泄漏量的变化规律如图 4 所示. 从图 4 中的变化规律可以看出, 转子跳动幅值没有受到游隙制约之前, 随着转子转速的增加泄漏逐渐增大, 但当转子跳动幅值受到游隙制约以后泄漏量随转速的增大而逐渐减小, 这主要是由于在转子上升至一定转速之前, 随着转速的增大, 转子跳动幅值的增加导致迟滞泄漏间隙以及泄漏量的增大, 而当转速升高至一定程度时, 游隙限制了转子跳动幅值继续增大. 而且转速越高泄漏缝隙内的气体沿圆周方向的交叉流动对泄漏量的影响就越明显, 导致泄漏量呈现出下降的趋势. 图 4 中的这种变化规律在如图 5 所示的文献[8,15]的指尖密封试验结果中都有所体现, 这从试验角度说明了上述分析现象的原因.

此外, 从图 4 中还可以看到, 随着压差的增大, 指尖密封的泄漏量明显增大, 这个变化规律在文献[8,15]的指尖密封试验结果中也有所体现

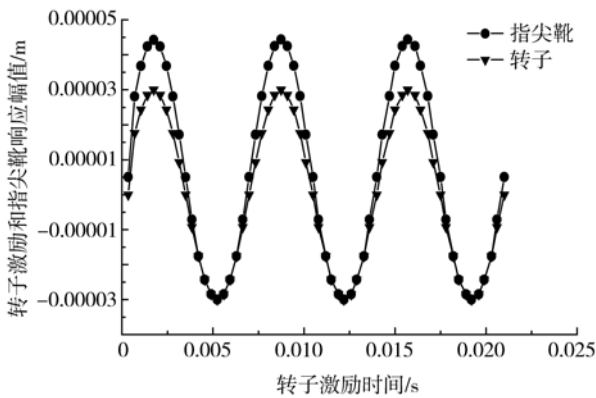


图 3 转子激励和指尖靴位移响应曲线

Fig. 3 Excitation of rotor and displacement responses of finger foot

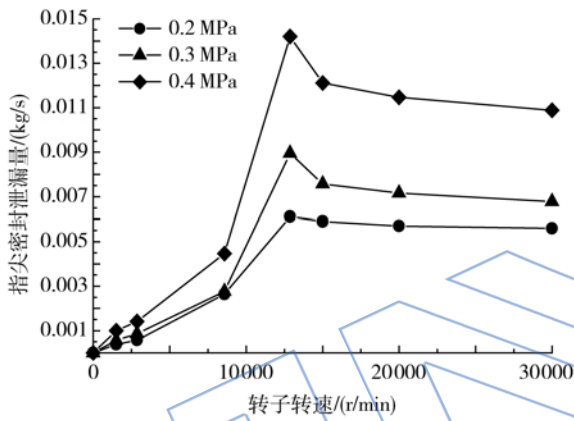


图 4 过盈装配条件下的泄漏量

Fig. 4 Leakage under condition of across assembling

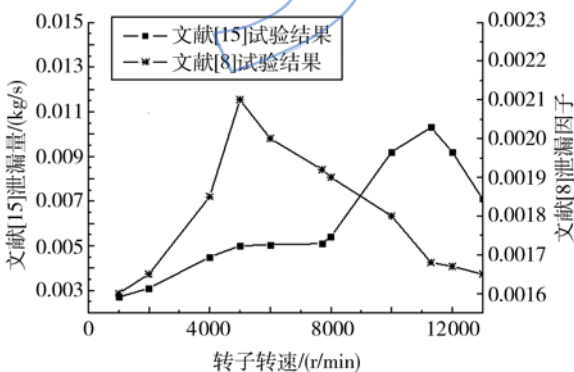


图 5 指尖密封泄漏试验结果

Fig. 5 Leakage test results of finger seal

(文献[8]试验条件:转子直径为 129.54 mm,压差为 0.415 MPa;文献[15]试验条件:转子直径为 150 mm,压差为 0.1 MPa),其原因是显而易见的.压差的增大会直接导致泄漏气体的流速增大,从而使泄漏增大,此外,当压差增大时,指尖密封片受到后挡板以及片与片之间的摩擦阻力增大,从

而使指尖密封的迟滞量增大,最终导致指尖密封的泄漏缝隙变大,表现出泄漏量的增加.

由于指尖密封是接触式密封,在应用中出现磨损是不可避免的,图 6 所示是磨损量在 0.04 mm、压差为 0.2 MPa 时指尖密封泄漏量跟随转速的变化情况.从图 6 中可以看出指尖密封的泄漏量先随转速的增大而减小,接着突然增大,然后又随转速的增大而减小.分析原因,主要是指尖密封磨损后与转子之间已经存在一个初始间隙,因此,初始阶段随着转子转速的增大,转子跳动量不断增大,导致密封间隙不断缩小,从而表现出泄漏量不断减小的现象.但是当转子跳动量超过 0.04 mm(初始磨损间隙)时,指尖靴将在转子的作用下发生跳动,导致密封间隙增大,从而出现泄漏量突然增大的现象.当转子跳动量达到最大时,密封间隙不再继续增加,而在交叉流的影响下泄漏量随着转速的增大而减小.

图 7 所示是在无过盈装配情况下的计算结

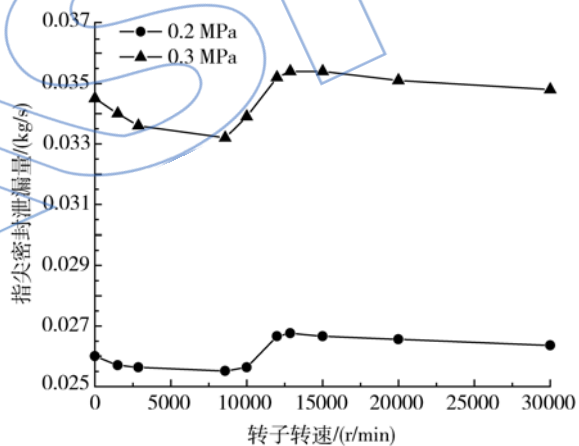


图 6 磨损条件下的泄漏量

Fig. 6 Leakage under condition of abrasion

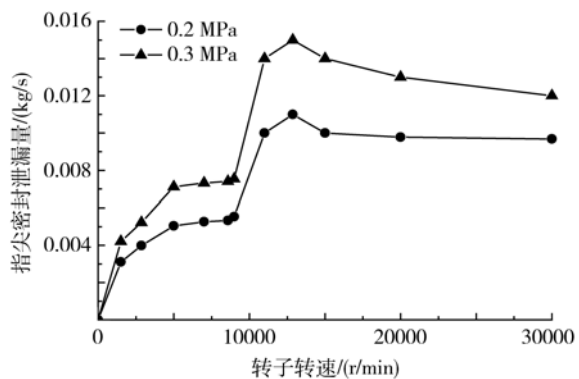


图 7 无过盈装配条件下的泄漏量

Fig. 7 Leakage under condition of no across assembling

果,与有过盈装配时相比,没有过盈装配时的指尖密封泄漏量明显增大,因此,在考虑磨损情况下适当地设计过盈装配对提高指尖密封的密封效果具有重要意义。

## 5 结 论

1) 根据指尖密封的结构特征和工作原理,将转子不平衡量和支撑轴承游隙纳入考虑因素,建立了指尖密封工作时转子的位移激励形式,并据此确定了转子位移激励的大小。

2) 以某型发动机转子密封部位为研究对象,结合指尖密封的柔性结构特征建立的指尖密封动态工作性能有限元分析结果表明:转子每个转动周期内,指尖密封的动态响应跟随激励时间而变化,而且由于指尖密封动态响应而产生的动态泄漏间隙随时间而动态变化。

3) 根据获得的指尖密封位移响应和转子位移激励,结合指尖密封的泄漏通道特征建立了指尖密封动态泄漏量计算方法,研究表明指尖密封的动态泄漏特性不仅受到由于转子动态激励而产生的迟滞影响,而且由于迟滞而产生的泄漏大小还与工作转速、密封上下压差、指尖密封的安装过盈量、指尖密封磨损量密切相关,进行指尖密封性能设计时需要对这些影响因素加以考虑。本研究可以为指尖密封动态试验和具有优良性能的指尖密封结构设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] Proctor M P, Kumar A, Delgado I R. High-speed, high-temperature finger seal test result[R]. Indianapolis, Indiana: 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2002.
- [2] San A L, Baker J, Adolfo D. Rotordynamic force coefficients of a hybrid brush seal: measurements and predictions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(4): 256-262.
- [3] Li J, Obi S, Feng Z. The effects of clearance sizes on labyrinth brush seal leakage performance using a Reynolds-averaged Navier-Stokes solver and non-Darcian porous medium model[J]. Journal of Power and Energy, 2009, 223(8): 953-964.
- [4] Braun M J, Plerson H M, Kudriavtsev V V. Finger seal solid modeling design and some solid/fluid interaction considerations[J]. Tribology Transactions, 2003, 46(4): 566-575.
- [5] 陈国定,徐华,虞烈,等.指尖密封的迟滞特性分析[J].机械工程学报,2003,39(5):121-124.  
CHEN Guoding, XU Hua, YU Lie, et al. Analysis to the hysteresis to the hysteresis of finger seal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5): 121-124. (in Chinese).
- [6] 陈国定,苏华,张永红.指尖密封轴向布局的变尺度结构研究[J].航空动力学报,2003,18(4):488-491.  
CHEN Guoding, SU Hua, ZHANG Yonghong. Variable-dimension construction in the axial arrangement of finger seal mechanism[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 488-491. (in Chinese).
- [7] 李二圣,陈国定.一种低迟滞低磨损的指尖密封型线构形的研究[J].航空动力学报,2008,23(4):759-764.  
LI Ersheng, CHEN Guoding. Study on a new shape-curve of finger seal with low-hysteresis and low-wear[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 759-764. (in Chinese)
- [8] Arora G K, Proctor M P, Steinetz B M, et al. Pressure balanced, low hysteresis, finger seal test results[R]. AIAA-1999-2686, 1999.
- [9] 张延超,陈国定.指尖密封性能的 NASH 平衡优化[J].西北工业大学学报,2008,26(1):35-40.  
ZHANG Yanchao, CHEN Guoding. Applying Nash equilibrium theory to achieving better design of finger seal[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(1): 35-40. (in Chinese)
- [10] 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):123-126.  
LEI Yanni, CHEN Guoding. Finger seal's hysteresis characteristic based on dynamical model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 123-126. (in Chinese)
- [11] 张延超,陈国定,申晓龙.指尖密封性能的模糊 Nash 平衡优化[J].航空动力学报,2010,25(1):228-233.  
ZHANG Yanchao, CHEN Guoding, SHEN Xiaolong. Performance optimization for finger seal based on fuzzy Nash equilibrium game[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(1): 228-233. (in Chinese)
- [12] 顾永泉.流体动密封(下册)[M].北京:石油大学出版社,1990.
- [13] 郝命麒.航空制造工程手册[M].北京:航空工业出版社,1993.
- [14] 第三机械工业部第六二八研究所.航空发动机轴承资料汇编(下)[R].江苏 无锡:第三机械工业部第六二八研究所,1975.
- [15] 苏华.指尖密封结构和性能设计分析与试验研究[D].西安:西北工业大学,2006.  
SU Hua. Structural design, performance analysis and tests of finger seal [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)