

# 圆弧形线指尖密封结构的形成方法和迟滞性能分析

白花蕾

(中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

**摘要:**对圆弧形线指尖密封结构的形成方式进行了分析和研究,在此基础上采用有限元技术对圆弧形线指尖密封结构的迟滞性能进行了计算分析。计算结果表明:在相同的展开角范围内,2种圆弧形线指尖密封结构的迟滞性能要优于对数螺线指尖密封结构的迟滞性能,圆弧形线弧长较短的指尖密封结构的迟滞性表现更优。

**关键词:**指尖密封;圆弧形线;迟滞性能;航空发动机;对数螺线;对数螺线

**中图分类号:**V233.1 **文献标识码:**A **doi:**10.13477/j.cnki.aeroengine.2014.03.010

## Analysis of Hysteresis and Forming Method for Finger Seal with Arc Shape Curve

BAI Hua-lei

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** The forming method for finger seal with arc shape curve was analyzed and studied, and the hysteresis effect of finger seal with arc shape curve was computational analyzed by FEM (Finite Element Method). The result indicates that the hysteresis effects of two kinds of finger seal with arc shape curve are better than finger seal with logarithmic curvature in the range of the same opening angel. The shorter arc length indicate better hysteresis.

**Key words:** finger seal; arcs of circles shape-curve; hysteresis; aeroengine; logarithmic curvature

## 0 引言

指尖密封是继篦齿密封和刷式密封之后发展起来的 1 种新型密封技术,相比于后二者具有相对优良的密封特性和较低的制造成本。

NASA 的 Glenn 研究中心等机构对指尖密封技术进行了较多研究<sup>[1-4]</sup>,拟将其应用于下一代先进航空发动机中。该技术在国外已经获得多项专利<sup>[5-8]</sup>,可应用于发动机高压腔与低压腔之间的静态和动态气路和主轴承腔的密封。近年来国内对指尖密封技术也开展了研究,陈国定等主要研究了指尖密封结构的强度问题<sup>[9-11]</sup>,吉洪湖等针对指尖密封结构的泄漏特性进行了数值计算和实验研究<sup>[12-14]</sup>。从已有文献来看,国内主要研究的指尖型线为渐开线、对数螺线等,很少涉及到圆弧形线。由于指梁型线直接影响到指尖密封技术的迟滞性,该迟滞性一般指当转子(或轴)运转时,

因为各种原因造成转子的径向跳动,从而引起指尖密封结构变形而发生径向外移,而当转子恢复到原始位置时,指尖密封结构却因摩擦力作用不能恢复到原始形状,从而在其自由端和转子圆周面间形成泄漏通道,造成密封失效。

鉴于圆弧形线的简单性,本文参考了国外圆弧形线指尖密封结构设计方法<sup>[15]</sup>,提出圆弧形线的 1 种形成方法,同时采用有限元方法对 2 种不同弧长圆弧形线指尖密封结构的工作性能进行了分析。为下一步的理论分析和实验研究提供了一些参考依据。

## 1 圆弧形线指尖密封结构的形成

单指的形成结构如图 1(a)所示。在指尖密封顶圆直径  $D_t$  和根圆直径  $D_r$  一定的情况下,根据实际试验器条件首先确定形成指梁型线所需的展开角  $\eta=29.4^\circ$ ,然后选取圆弧形线所在的圆心位置  $(x, y)$  和

收稿日期:2013-01-13

作者简介:白花蕾(1983),女,硕士,工程师,从事航空发动机密封设计工作;E-mail: baihualei@163.com。

引用格式:白花蕾.圆弧形线指尖密封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.

半径  $R$ 。在一定的展开角范围内,圆心和半径的选取决定了指梁型线的弧长大小。已经确定的圆弧线绕顶圆圆心旋转角度  $\alpha$  形成指梁指尖的间隙,接着旋转角度  $\beta$  形成指梁的宽度。对于指尖靴部分,首先确定指尖靴前端的高度  $h$ ,如图旋转角度  $\rho$  形成指尖靴指尖的间隙,接着旋转角度  $\gamma$  形成指尖靴的宽度。要形成 1 个完整的密封片,需满足

$$\begin{cases} (\alpha+\beta)N=360 \\ (\rho+\gamma)N=360 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $N$  为指尖的个数。

指尖密封结构的端面结构如图 1(b)所示。从图中可见,单指沿周向阵列  $N$  个之后形成完整的密封片。

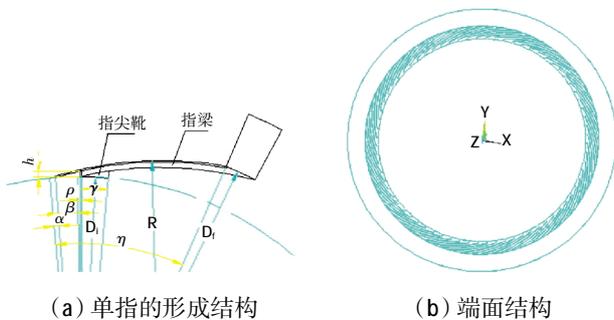


图 1 指尖密封结构

## 2 圆弧型线的迟滞性能分析

### 2.1 计算模型的选取

为进一步研究圆弧型线指尖密封的迟滞性能,本文采用商业软件 ANSYS 对一定展开角范围内的 2 种不同弧长的指尖密封结构进行了分析,并与目前具有较好迟滞性能的对数螺线型线指尖密封结构进行了比较。

计算模型如图 2 所示。计算中取 1 个指尖所包括的区域作为求解域,为减少计算工作量,轴向仅取 1 个指尖密封件和后挡板作为分析对象。与上游压力区接触的密封片表面称为密封片上游面,与后挡板接触的密封片表面称为密封片下游面。计算中密封片下游面与后挡板、指尖靴与转子之间分别形成 2 个面接触对。目标单元和接触单元分别采用 Target170 单元和 Contact174 单元,接触表面间的摩擦系数取 0.2,并考虑到密封装置上、下游有压力差,规定接触面间不允许有间隙存在。

计算通过 3 个载荷步

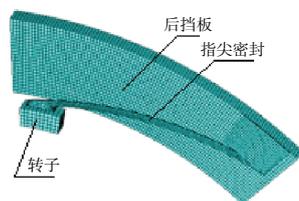


图 2 计算模型

来完成:在密封片上游面施加流体压差;转子径向产生跳动与指尖曲梁自由端(即指尖靴)接触并使指尖曲梁变形;转子恢复原始位置,指尖曲梁因摩擦力作用而迟滞。通过上述分析,在密封片结构参数和工作条件基本不变的情况下,探讨圆弧型线指尖密封的迟滞性能。计算中所取具体参数见表 1。圆弧型线 II 与圆弧型线 I 相比,通过取不同的圆心位置和半径获得不同的弧长,以便研究在相同的展开角范围内不同弧长对迟滞性的影响。

指尖密封片迟滞性能的优劣用迟滞率  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\Delta r} \quad (2)$$

式中: $\Delta r$  为转子的径向跳动量,mm; $\delta$  为转子恢复到原始位置后指尖密封片残留的变形量。

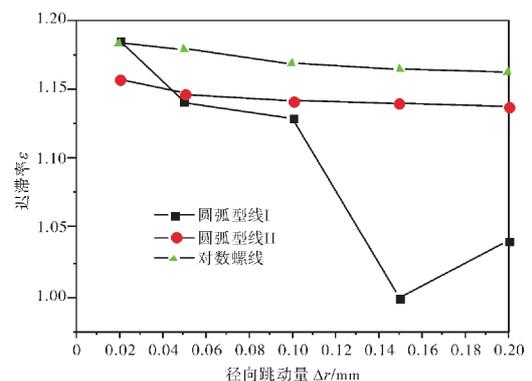
分析中转子径向跳动大多取 0.02 ~ 0.20 mm;密封片上、下游压差分别取 0.10、0.25、0.40 MPa。

表 1 计算参数

型线类型	不同参数	相同参数
圆弧型线 I	圆心位置(20, -5) R=89	$D_1=159.8, D_2=180, D_3=207,$ h=0.31, t=0.3
圆弧型线 II	圆心位置(19.86, -3) R=87.06	N=72, $\alpha=1^\circ, \beta=4^\circ,$ $\rho=0.3^\circ, \gamma=4.7^\circ$
对数螺线		$\eta=29.4$

### 2.2 计算结果和分析

圆弧型线和对数螺线的指尖密封在 3 种压差条件下迟滞率随转子径向跳动量变化的关系如图 3 所示。从图中可见,本文提出的 2 种圆弧型线指尖密封结构的迟滞率比对数螺线指尖密封的相对小;对于 2 种不同弧长的圆弧型线,圆弧型线 I 的迟滞率要比圆弧型线 II 的小,而且随着压差的增大,这种差别越明显,这是因为在相同的展开角范围内,



(a)  $\Delta p=0.10$  MPa

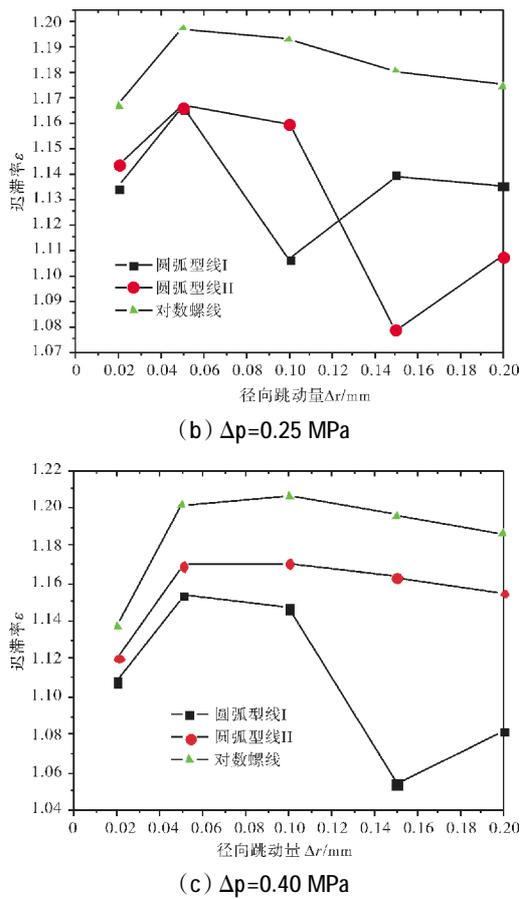


图3 迟滞率与转子径向跳动量的关系

圆弧型线 I 的弧长较短,刚度较大,从而表现出迟滞性较小。与文献[10]不同的是,本文中指尖片的变形量还包括因压差而产生的变形,所以在转子恢复原始位置后,压差使指尖靴产生轴向变形,从而使指尖密封结构与转轴之间的泄漏通道增大。

### 3 结论

(1)在本文选取计算参数范围内,可以获得比对数螺线迟滞率小的圆弧指梁型线。

(2)在指尖密封结构参数及工作条件基本相同的情况下,弧长较短的圆弧型线指尖密封结构的迟滞率比弧长较长的圆弧型线指尖密封结构的小。

鉴于圆弧型线的简单性,可将圆弧型线指尖密封结构作为下一步研究的对象。

#### 参考文献:

[1] Arora G K, Proctor M P, Steinetz B M, et al. Pressure balanced, low hysteresis, finger seal test results[R]. NASA-TM-199 9-209191.  
 [2] Steinetz B M, Hendricks R C. Advanced seal technology in

meeting next generation turbine engine goal[R]. NASA-TM-199 8-06961.  
 [3] Braun M J, Kudriavtsev V V, Steinetz B M. Two and three dimensional numerical experiments representing two limiting cases of an in-line pair of finger seal components [C]//The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Honolulu, Hawaii, 2002 :1-8.  
 [4] Steinefz B M, Hendricks R C. Engine seal technology requirements to meet NASA's advanced subsonic technology program goals[R]. AIAA-94-2698.  
 [5] Heydrich H. Bi-directional finger:US,5031922[P]. 1991-07-16.  
 [6] Mackay C G. Laminated finger seal:US,5042823[P]. 1991-68-27.  
 [7] Mackay C G. Laminated finger seal: US,5071138 [P]. 1991-12-10.  
 [8] Johnson M C. Laminated finger seal with logarithmic curvature:US,5108116 [P]. 1992-04-28.  
 [9] 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. (in Chinese)  
 [10] 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 of finger seal [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5): 121-124. (in Chinese)  
 [11] 苏华,陈国定.指尖密封型线形成的研究[J]. 机械科学与技术, 2003,22(6):876-878.  
 SU Hua, CHEN Guoding. Study of the shape-curve of finger seal [J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(6): 876-878. (in Chinese)  
 [12] 曹静,吉洪湖,金峰,等.指式封严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 finger seal structure [J]. Aeroengine, 2011, 37(4): 33-36. (in Chinese)  
 [13] 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)  
 [14] 白花蕾.指式封严泄漏特性的实验研究和数值模拟[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.  
 BAI Hualei. Experimental and numerical study on leakage characteristics of finger seal [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)  
 [15] Steinetz B M, Dunlap P. 2005 NASA seal/secondary air system workshop[R]. NASA-CP-2006-214383.