

文章编号: 1000-8055(2022)01-0114-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210076

周向发散式袋型阻尼密封泄漏特性与 动力特性数值研究

白 禄¹, 孙 丹¹, 赵 欢¹, 肖忠会², 孟继纲², 胡 永²

(1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院

辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136;

2. 沈阳鼓风机集团股份有限公司 辽宁重大装备制造协同创新中心, 沈阳 110142)

摘 要: 提出一种周向发散式袋型阻尼密封结构, 建立了袋型阻尼密封多频椭圆涡动求解模型, 在实验验证求解模型准确性的基础上, 研究了进出口压比、偏心率对袋型阻尼密封泄漏特性与动力特性的影响, 分析了两种袋型阻尼密封的转子稳定性。结果表明: 两种袋型阻尼密封的泄漏量平均相差 0.89%, 两者泄漏特性相当。传统袋型阻尼密封在转子偏心状态时各腔室存在较大周向压力差, 周向发散式袋型阻尼密封各腔室压力分布基本均匀; 两者切向气流量与转子涡动方向相反, 均抑制转子的涡动, 且周向发散式袋型阻尼密封的切向气流量是传统袋型阻尼密封的 2.29 倍; 周向发散式袋型阻尼密封的平均有效阻尼是传统袋型阻尼密封的 1.29 倍, 周向发散式袋型阻尼密封可提高转子系统的稳定性。

关 键 词: 周向发散式袋型阻尼密封; 流体动压效应; 气流激振力; 泄漏特性; 动力特性; 转子稳定性

中图分类号: V233.5

文献标志码: A

Numerical study on leakage and dynamic characteristics of circumferentially divergent pocket damping seal

BAI Lu¹, SUN Dan¹, ZHAO Huan¹, XIAO Zhonghui²,
MENG Jigang², HU Yong²

(1. Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for
Aviation Propulsion System, Liaoning Province, School of Aero-engine,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Collaborative Innovation Center of Machine Manufacturing in Liaoning,
Shenyang Blower Works Group Company Limited, Shenyang 110142, China)

Abstract: A type of circumferentially divergent pocket damping seal structure was proposed, the pocket damping seal multi-frequency elliptical vortex solution model was established, and based on the experimental verification of the accuracy of the pocket damping seal solution model, the effects of the inlet and outlet pressure ratio and eccentricity on the leakage characteristics and dynamic characteristics of pocket damping seal were studied, and the rotor stability of

收稿日期: 2021-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(52075346, 51675351); 辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0236);
辽宁省教育厅基础研究项目(JYT2020047)

作者简介: 白禄(1998—), 女, 硕士生, 主要研究涡轮机械动密封动力特性。

通信作者: 孙丹(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事涡轮机械先进密封技术研究。E-mail: phd_sundan@163.com

引用格式: 白禄, 孙丹, 赵欢, 等. 周向发散式袋型阻尼密封泄漏特性与动力特性数值研究[J]. 航空动力学报, 2022, 37(1): 114-123.

BAI Lu, SUN Dan, ZHAO Huan, et al. Numerical study on leakage and dynamic characteristics of circumferentially divergent pocket damping seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(1): 114-123.

the pocket damping seals was analyzed. The research results showed that the difference in leakage between two pocket damping seals was 0.89% on average, and the leakage characteristics of these two were equivalent. The traditional pocket damping seal had a large circumferential pressure difference in each chamber when the rotor was eccentric, while the pressure distribution in each chamber of the circumferentially divergent pocket damping seal was basically uniform; the tangential airflow force of these two was opposite to the direction of the rotor whirl, and both suppressed the vortex of the rotor, and the tangential air force of the circumferentially divergent pocket damping seal was 2.29 times that of the traditional pocket damping seal; the average effective stiffness of the circumferentially divergent pocket damping seal was 1.29 times that of the traditional pocket damping seal, the circumferentially divergent pocket damping seal was more conducive to the stability of the rotor system.

Key words: circumferential divergent pocket damping seal;
fluid dynamic pressure effect; airflow excitation force;
leakage characteristics; dynamic characteristics; rotor stability

密封是航空发动机、燃气轮机、压缩机等涡轮机械的关键部件,起着减少工质泄漏的关键作用^[1-2]。近年来,随着涡轮机械工作介质参数的不断提高,密封气流激振故障越来越突出^[3-6],袋型阻尼密封因具有较好的动力学特性而成为国内外研究热点^[7]。开展袋型阻尼密封泄漏特性与动力特性研究具有重要理论意义和工程应用价值。

目前国内外关于袋型阻尼密封的研究包括泄漏特性与动力特性两方面,改变袋型阻尼密封的几何参数对密封的泄漏特性与动力特性有重要影响。Ertas等^[8]通过改变袋型阻尼密封与转子之间的密封间隙比、转子表面速度、进出口压力差等因素来研究袋型阻尼密封的静力特性与动力特性,研究结果表明,转子与密封件的间隙设计对袋型阻尼密封的动力特性及密封腔内力的分布有较大影响;Yang等^[9]提出一种轴呈阶梯式的袋型阻尼密封,该种阶梯轴的袋型阻尼密封相比于光滑轴而言泄漏量降为原来的1/2,阻尼系数是光滑轴袋型阻尼密封的1.5~2.5倍,更有利于转子系统的稳定;Vance等^[10]研发了袋型阻尼密封,并在密封腔室出口的密封齿设计凹槽,该种结构可以提高转子的稳定性;Child等^[11]的研究表明齿顶斜面会削弱袋型阻尼密封的封严性能;Griebel^[12]基于CFD,对袋型阻尼密封的几何形状变化进行研究,并提出一种交错式壁面的袋型阻尼密封,该种结构具有更高的有效阻尼;张万福等^[13]提出一种袋型阻尼密封周向挡板渐缩与渐扩的结构,该种结构相比于传统贯通式袋型阻尼密封而言具有更

大的有效阻尼系数;孙丹等^[14]提出了一种浮动式袋型阻尼密封,并对该种密封进行了数值与实验研究,研究表明该种密封结构具有自适应同心性能,相比于传统迷宫密封有着更大的有效刚度系数。转子在偏心状态对密封的性能有较大影响,李志刚等^[15]在高偏心率下对袋型阻尼密封性能进行研究,并得出袋型阻尼密封的交叉刚度值为正;陈陆森等^[16]对航空发动机中的篦齿封严所产生的气流激振特性进行研究,研究表明当转子处于偏心状态时,密封腔室内的流动具有非定常性,所产生的气流激振力会促进转子的运动,对转子系统的稳定性有一定影响;曹浩等^[17]研究了偏心率对密封动力特性的影响,实验结果表明,转子处于偏心状态时其交叉刚度大于同心状态下的交叉刚度,偏心状态不利于转子系统的稳定。从现有发表的文献看,传统袋型阻尼密封在转子偏心时由于流体动压效应诱发的密封气流激振问题尚未引起足够重视,密封气流激振问题难以得到根本解决。

针对转子系统在偏心状态下所产生的气流激振问题,本文提出了一种周向发散式袋型阻尼密封结构,该种设计不满足流体动压效应的形成条件,进而对气流激振力起到了抑制作用。本文建立了传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型阻尼密封数值求解模型,研究了偏心率及压比对两种袋型阻尼密封泄漏特性与动力特性的影响,并在转子偏心状态下分析了传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型阻尼密封对转子系统稳定性的影响。

1 周向发散式袋型阻尼密封设计

思路

1.1 周向发散式袋型阻尼密封结构

图 1 为传统袋型阻尼密封的结构图,该结构由密封腔室及周向挡板组成,其中周向挡板从密封的进口到出口穿过了所有的密封腔室,所有的密封腔室均为周向孤立的等弧段袋型腔室。

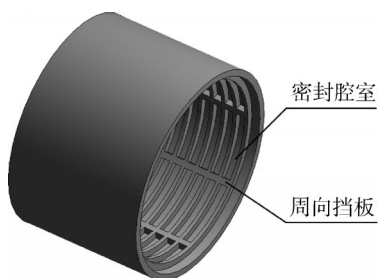


图 1 袋型阻尼密封结构

Fig.1 Pocket damping seal structure

图 2 为本文所研究的两种袋型阻尼密封,图 2(a)为传统袋型阻尼密封的腔室示意图,其在周向由 8 个等大的密封腔室组成,腔室深度处处相等,腔室与腔室之间由周向挡板分隔开,图 2(b)为周向发散式袋型阻尼密封,在周向仍有 8 个等大的密封腔室,但每个腔室的两端深度不同,是在传统袋型阻尼密封的基础上,将腔室形状设计成楔形,密封腔室在周向上呈发散式结构。

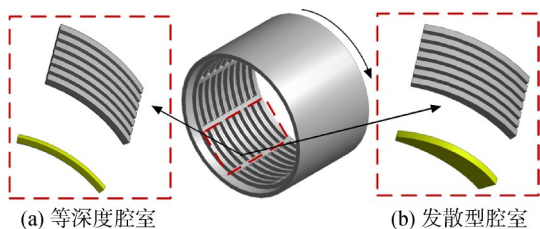


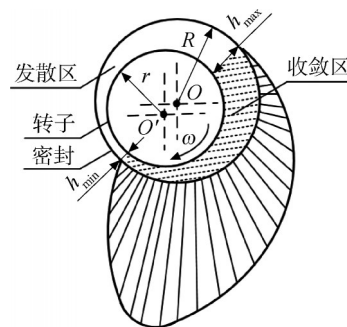
图 2 袋型阻尼密封腔室图

Fig.2 Pocket damping seal chamber diagram

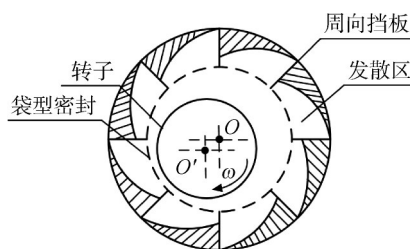
1.2 周向发散式袋型阻尼密封工作原理

转子在运转过程中,会出现偏心的运动状态,图 3 为密封在转子偏心时流体动压效应示意图,其中 R 为静子半径, r 为转子涡动半径, $h_{\max}$ 为转、静子间的最大间隙, $h_{\min}$ 为转、静子间的最小间隙, ω 为转子涡动角速度。如图 3(a)所示,转子偏心时,转子与密封件之间会产生收敛区,根据流体动压效应的产生条件,当气流由大间隙流向小间隙时,会产生流体动压效应,且密封间隙越小,压力

越大^[18],从而使得气流激振力的作用增强,易使转子发生失稳。而周向发散式袋型阻尼密封正是破坏了流体动压效应的产生条件,如图 3(b)所示,本文提出的袋型阻尼密封的腔室呈周向发散式,使得转子与密封件之间的流体在转子转动时,由小间隙流向大间隙,不满足流体动压效应的产生条件,有利于转子系统的稳定。



(a) 圆形密封



(b) 周向发散式袋型密封

图 3 密封流体动压效应示意图

Fig.3 Schematic diagram of the fluid dynamic pressure effect of seal

2 袋型阻尼密封求解模型

2.1 密封动力特性理论模型

本文采用非恒定动网格技术实现转子多频椭圆涡动求解模型,转子椭圆涡动振幅 a 、 b 分别设置为 $a=0.002$ mm、 $b=0.001$ mm。根据转子小位移涡动理论^[19],转子受到微小位移和速度扰动时,可将转子受到的气流量与扰动位移和扰动速度的关系线性化表示为

$$-\begin{bmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 K_{xx} 与 K_{yy} 为直接刚度系数; K_{xy} 与 K_{yx} 为交叉刚度系数; C_{xx} 与 C_{yy} 为直接阻尼系数; C_{xy} 与 C_{yx} 为交叉阻尼系数; Δx 与 Δy 为转子涡动位移; $\Delta \dot{x}$ 与 $\Delta \dot{y}$ 为转子涡动速度。

转子涡动方程为

$$\begin{cases} x = a \cdot \sum_{z=1}^N \cos(\Omega_z t) \\ y = b \cdot \sum_{z=1}^N \sin(\Omega_z t) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = b \cdot \sum_{z=1}^N \cos(\Omega_z t) \\ y = a \cdot \sum_{z=1}^N \sin(\Omega_z t) \end{cases} \quad (3)$$

考虑转子对密封动力特性系数影响后,式(1)可写为

$$-\begin{bmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx}(\Omega) & K_{xy}(\Omega) \\ K_{yx}(\Omega) & K_{yy}(\Omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx}(\Omega) & C_{xy}(\Omega) \\ C_{yx}(\Omega) & C_{yy}(\Omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对式(4)进行快速傅里叶变换,可得到频域内密封气流量变化量与密封动力特性系数和微小扰动位移的关系式为

$$\begin{cases} -\Delta F_x = (K_{xx} + j\Omega C_{xx}) \cdot D_x + (K_{xy} + j\Omega C_{xy}) \cdot D_y \\ -\Delta F_y = (K_{yy} + j\Omega C_{yy}) \cdot D_y + (K_{yx} + j\Omega C_{yx}) \cdot D_x \end{cases} \quad (5)$$

在式(5)中 $j = \sqrt{-1}$ 。将转子多频涡动位移方程式(2)与式(3)分别代入到式(5)中,整理可得

$$\begin{cases} -\Delta F_{xx} = (K_{xx} + j\Omega C_{xx}) \cdot D_{xx} + (K_{xy} + j\Omega C_{xy}) \cdot D_{xy} \\ -\Delta F_{xy} = (K_{yy} + j\Omega C_{yy}) \cdot D_{xy} + (K_{yx} + j\Omega C_{yx}) \cdot D_{xx} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} -\Delta F_{yy} = (K_{yy} + j\Omega C_{yy}) \cdot D_{yy} + (K_{yx} + j\Omega C_{yx}) \cdot D_{yx} \\ -\Delta F_{yx} = (K_{xx} + j\Omega C_{xx}) \cdot D_{yx} + (K_{xy} + j\Omega C_{xy}) \cdot D_{yy} \end{cases} \quad (7)$$

在式(6)与式(7)中, D_{uv} 和 ΔF_{uv} ($u=x, y; v=x, y$) 的第一个下角标 u 代表给转子施加微小扰动位移激励的方向,第二个下角标 v 代表在 u 方向激励下, v 方向施加给转子的微小扰动位移与密封气流力的变化量。定义阻抗系数 $H_{uv} \Delta F_{uv}$ ($u=x, y; v=x, y$) 为

$$\begin{cases} H_{xx} = K_{xx} + j\Omega C_{xx} \\ H_{xy} = K_{xy} + j\Omega C_{xy} \\ H_{yx} = K_{yx} + j\Omega C_{yx} \\ H_{yy} = K_{yy} + j\Omega C_{yy} \end{cases} \quad (8)$$

将阻抗系数式(8)代入到式(6)与式(7),整理化简后,得到阻抗系数为

$$\begin{cases} H_{xx} = \frac{(-\Delta F_{xx}) \cdot D_{yy} - (-\Delta F_{yx}) \cdot D_{xy}}{D_{xx} \cdot D_{yy} - D_{yx} \cdot D_{xy}} \\ H_{xy} = \frac{(-\Delta F_{xx}) \cdot D_{yx} - (-\Delta F_{yx}) \cdot D_{xx}}{D_{xy} \cdot D_{yx} - D_{yy} \cdot D_{xx}} \\ H_{yx} = \frac{(-\Delta F_{yy}) \cdot D_{xx} - (-\Delta F_{xy}) \cdot D_{yx}}{D_{yy} \cdot D_{xx} - D_{yx} \cdot D_{xy}} \\ H_{yy} = \frac{(-\Delta F_{yy}) \cdot D_{xy} - (-\Delta F_{xy}) \cdot D_{yy}}{D_{xy} \cdot D_{yx} - D_{yy} \cdot D_{xx}} \end{cases} \quad (9)$$

通过阻抗系数可得到密封动力特性系数,如式(10)所示。

$$\begin{cases} K_{ij} = \text{Re}(H_{ij}) \\ C_{ij} = \frac{\text{Im}(H_{ij})}{\Omega} \end{cases} \quad (10)$$

2.2 几何模型

本文所计算的传统袋型阻尼密封实验件如图4所示,周向发散式袋型阻尼密封是在传统袋型阻尼密封的基础上将每一个密封腔室设计成周向发散式,腔室的深度顺着转子旋转方向均匀增加;两种袋型阻尼密封在周向均有8个等大的腔室,由8个周向隔板将腔室与腔室之间分隔开。

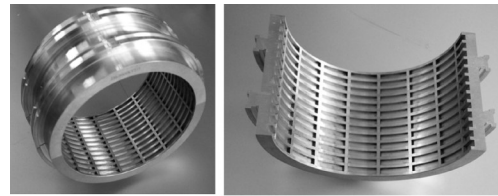
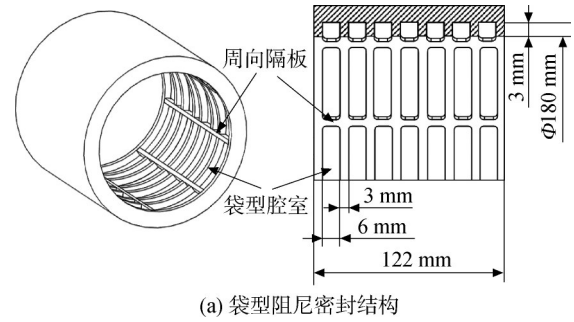


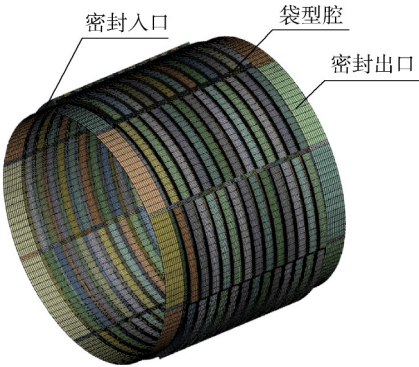
图4 袋型阻尼密封物理模型

Fig.4 Physical model of pocket damping seal

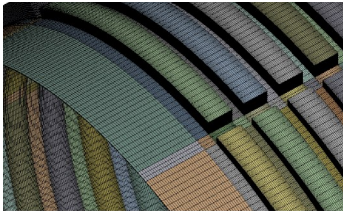
2.3 网格划分

对传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型阻尼密封进行网格划分,图5所示为袋型阻尼密封的计算模型与六面体网格,为了提高网格的划分质量,将周向发散式袋型阻尼密封的发散型腔室进行加密处理,根据划分节点的不同,得到的泄漏量

如表 1 所示:划分方法 1 与划分方法 2 相差 3.8%,划分方法 2 与划分方法 3 相差 0.28%,此时再增加节点数对结果影响不大,因此最终选择划分方法 2,网格数为 628 万。



(a) 求解模型



(b) 网格划分

图 5 袋型阻尼密封求解模型及网格划分
Fig.5 Solving model and meshing of pocket damping seal

表 1 网格密度对袋型阻尼密封泄漏量的影响
Table 1 Effect of mesh density on leakage of pocket damping seal

划分方法	节点数/万	泄漏量/(kg/s)
1	586	0.051 322
2	628	0.049 358
3	656	0.049 344

2.4 边界条件

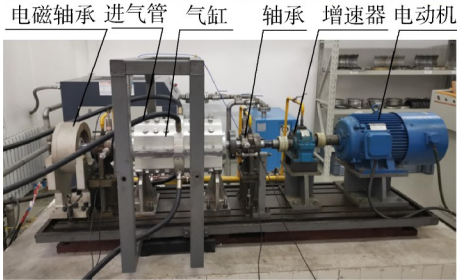
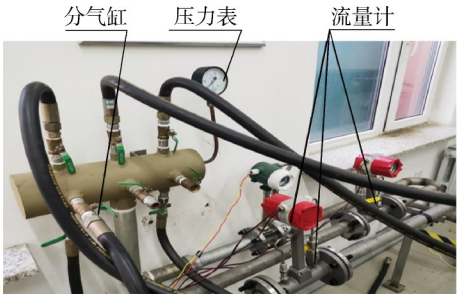
表 2 给出了袋型阻尼密封泄漏特性与动力特性求解模型的边界条件,密封件进口处设定为总压,出口为静压,温度为 25 ℃,工质选用理想空气,固定壁面为光滑、绝热、无滑移边界条件。

2.5 求解模型准确性验证

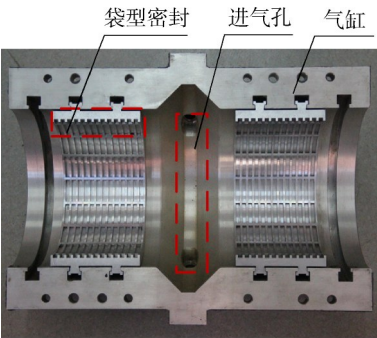
为验证本文数值求解模型的准确性,将本文传统袋型阻尼密封的泄漏量与实验测量结果进行比较,实验的设备如图 6 所示,实验台的转子直径为 180 mm,袋型阻尼密封间隙为 0.2 mm,实验中转子的转速为 3 000 r/min,进气压力为 0.6 MPa,

表 2 袋型阻尼密封结构尺寸参数
Table 2 Dimensional parameters of a pocket damping seal structure

参数	数值
密封长度/mm	120
密封间隙/mm	0.2
密封齿数	14
腔室轴向长度/mm	6
腔室深度/mm	4
周向腔室数目	8
周向隔板数目	8



(a) 密封转子实验台



(b) 袋型密封进气形式及实验气缸内部图

图 6 密封实验台及装置图
Fig.6 Sealing experiment bench and device diagram

实验台气缸设计为垂直进气,两端出气,气流通过气罐流过装有高精度的管路进入气缸,利用数据采集系统进行同步采集进气流量数据,实验数据

与数值模拟的结果如图7所示,泄漏量的数值模拟与实验所测得的误差为10.5%,实验测量与数值模拟的结果吻合,其产生误差的原因为:计算模型进气为轴向进气,实验气缸为径向进气,轴向出气,模型存在简化,导致泄漏量有一定误差。

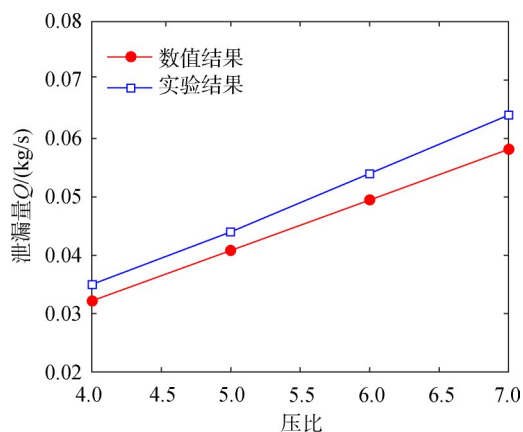


图7 实验测量与数值计算泄漏量对比验证

Fig.7 Comparison and verification of experimental measurement and numerical calculation of leakage

3 袋型阻尼密封数值结果分析

3.1 密封流场特性分析

图8所示为袋型阻尼密封模型沿轴向流场特性图,图8(a)为袋型阻尼密封轴向压力分布,由图中可以看出袋型阻尼密封的压力逐级降低;图8(b)为袋型阻尼密封轴向速度分布,由图中可以看出袋型阻尼密封的速度逐渐增加,且射流区的速度大于腔内流区,泄漏量以射流区部分为主体。

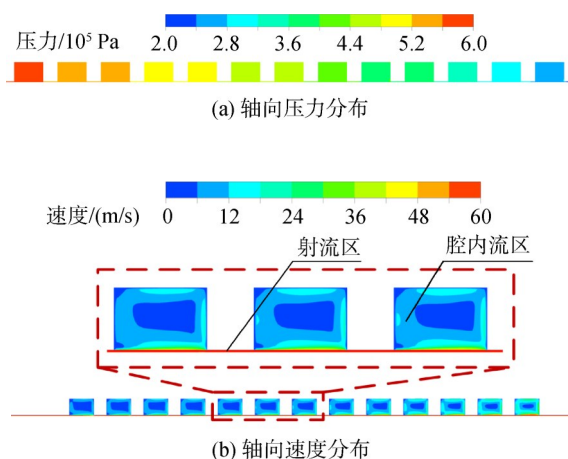


图8 袋型阻尼密封轴向流场特性云图

Fig.8 Cloud diagram of axial flow field characteristics of pocket damping seal

图9所示为两种袋型阻尼密封周向速度分布,传统袋型阻尼密封的腔室为等深度腔室,本文提出的袋型阻尼密封的腔室为周向发散型腔室,由图可以看出,两者的周向速度分布由于腔室结构的不同而有所差别,周向发散式袋型阻尼密封各腔室的周向速度随着腔室深度的增加而增大。

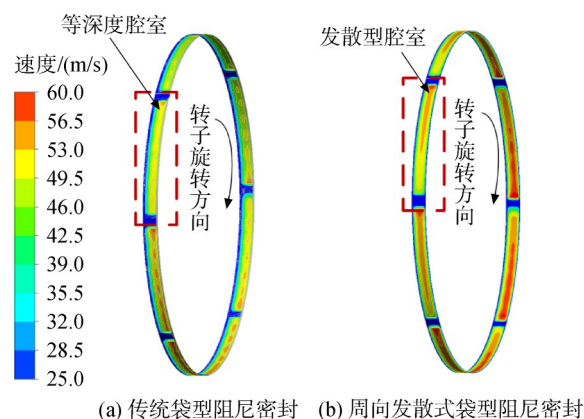
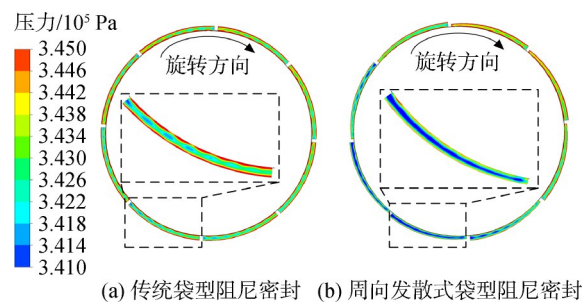


图9 袋型阻尼密封周向速度分布云图

Fig.9 Circumferential velocity distribution cloud diagram of pocket damping seal

图10所示为两种袋型阻尼密封周向压力分布,由图10(a)可知,转子偏心时,传统袋型阻尼密封各腔室存在较大周向压力差,8个腔室中各腔室的周向压差为1 800~2 400 Pa,每个腔室内产生流体动压效应,而由图10(b)可以看出,周向发散式袋型阻尼密封各腔室压力分布基本均匀,8个腔室中各腔室的周向压差为200~800 Pa,周向发散式袋型阻尼密封有效地抑制了流体动压效应的产生。



(a) 传统袋型阻尼密封 (b) 周向发散式袋型阻尼密封

图10 袋型阻尼密封周向压力分布云图

Fig.10 Circumferential pressure distribution cloud diagram of pocket damping seal

3.2 密封泄漏特性分析

如图11所示为压比对传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型阻尼密封泄漏量的影响,由图中

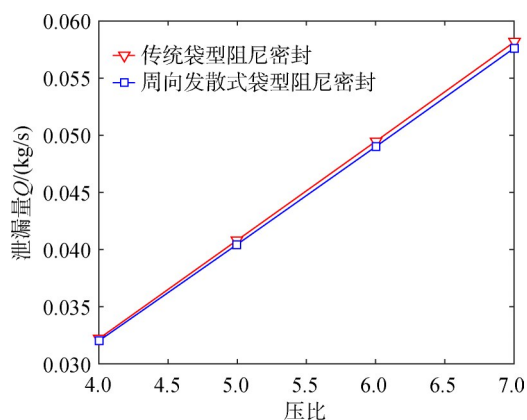


图 11 压比对泄漏量的影响

Fig.11 Effect of pressure ratio on leakage

可知,两种袋型阻尼密封的泄漏量均随压比的增加而增大,传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型阻尼密封的泄漏量平均相差 0.89%,两者的泄漏特性相当。

图 12 为传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型阻尼密封的偏心率对泄漏量的影响,由图可知,随着偏心率的增加,两种袋型阻尼密封的泄漏量均增加,这是因为偏心率的增加使得袋型阻尼密封的直通效应增大^[2],故泄漏量增加。

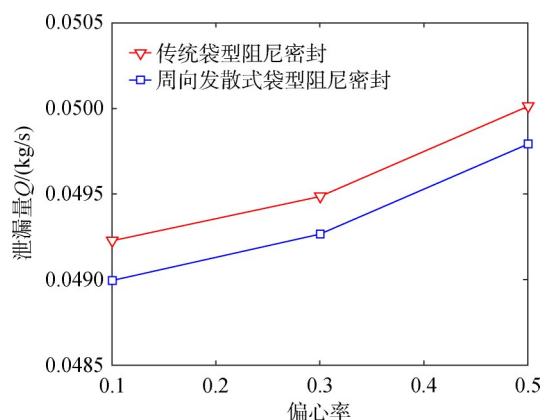


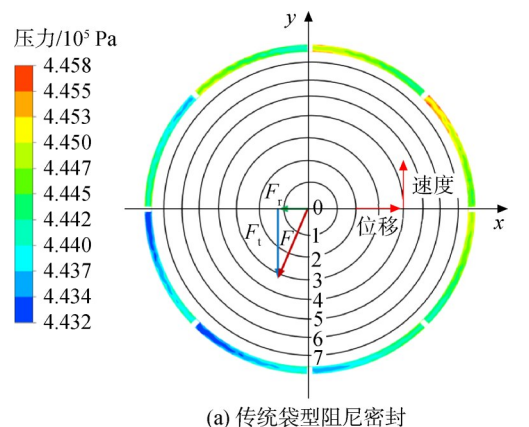
图 12 偏心率对泄漏量的影响

Fig.12 Effect of eccentricity on leakage

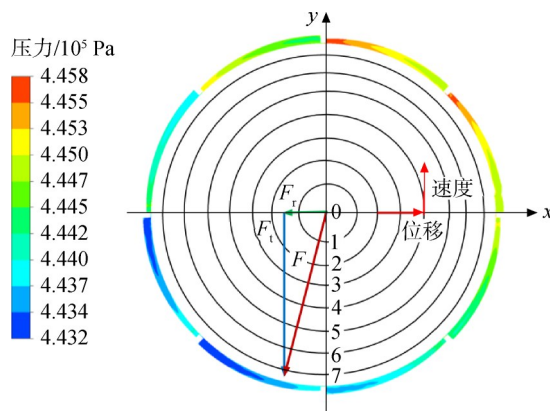
3.3 密封动力特性分析

3.3.1 密封气流力分析

在图 13 中给出了 x 方向激励、非定常工况下 $t=0.05$ s 时刻传统与周向发散式袋型阻尼密封的瞬态气流力,此时转子完成一个周期涡动,气流力 F_x 、 F_y 分别与径向力 F_r 、切向力 F_t 的大小和方向重合。其中 F_r 为径向气流力, F_t 为切向气流力, F 为转子所受到气流激振力的合力。由图中可以看出,传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型



(a) 传统袋型阻尼密封



(b) 周向发散式袋型阻尼密封

图 13 袋型阻尼密封周向力与速度示意图

Fig.13 Schematic diagram of circumferential force and velocity of pocket damping seal

阻尼密封的转子涡动方向均为逆时针方向,周向发散式袋型阻尼密封切向气流力的方向与转子涡动的方向相反,对转子的涡动起到了抑制作用,传统袋型阻尼密封切向气流力的方向与转子涡动的方向也相反,同样对转子的涡动起到了抑制作用。由图中看出,虽然两种袋型阻尼密封结构均对转子的涡动起到了抑制作用,但周向发散式袋型阻尼密封的切向气流力为传统袋型阻尼密封的 2.29 倍,对转子涡动的抑制能力更强,更有利于转子系统的稳定。

3.3.2 密封动力特性系数结果分析

图 14~图 17 给出了传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型阻尼密封在 40~320 Hz 转子涡动频率下的动力特性系数。其中图 14 为两种袋型阻尼密封结构的交叉刚度随转子涡动频率的变化情况,由图 14 可知,传统袋型阻尼密封的交叉刚度 K_{xy} 值为正,根据激振力与转子动力特性系数的关系^[20]可知,当交叉刚度 K_{xy} 值为正时,泄漏流体

所产生的气流激振力方向与转子的涡动方向相同,促进了转子的失稳,因此在转子偏心条件下,传统袋型阻尼密封对转子系统的失稳起到了促进作用,而本文所提出的周向发散式袋型阻尼密封的交叉刚度 K_{xy} 值为负,泄漏流体所产生的气流激振力方向与转子涡动方向相反,从而对转子系统的失稳起到了抑制作用,这是由于本文所提出的袋型阻尼密封的腔室为周向发散式,在转子偏心状态时,气流由小间隙流向大间隙,而流体动压效应产生条件之一为流体从大间隙流向小间隙,该周向发散式袋型阻尼密封结构不满足流体动压效应的产生条件,因此有利于转子系统的稳定。

而直接刚度系数 K_{xx} 、 K_{yy} 反映的是密封腔室内气流对转子固有频率的影响,当密封直接刚度为正值时,转子的固有频率和临界转速均随之增大,由图15可知,两种袋型阻尼密封结构的直接刚度均随着转子涡动频率的增加而增加,在低于240 Hz时,传统袋型阻尼密封的直接刚度较大,

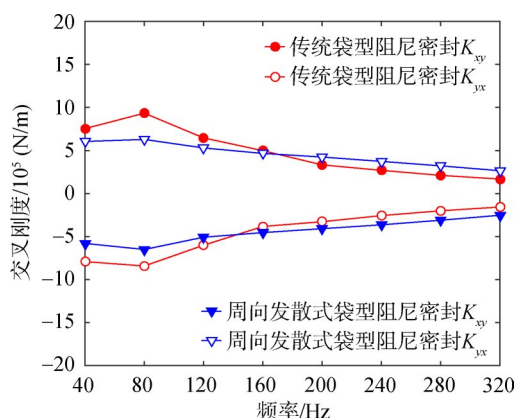


图14 交叉刚度系数

Fig.14 Cross stiffness coefficient

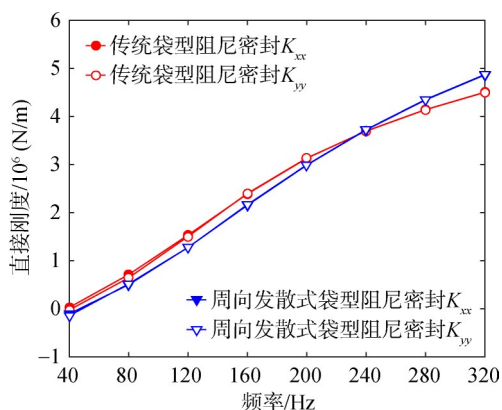


图15 直接刚度系数

Fig.15 Direct stiffness coefficient

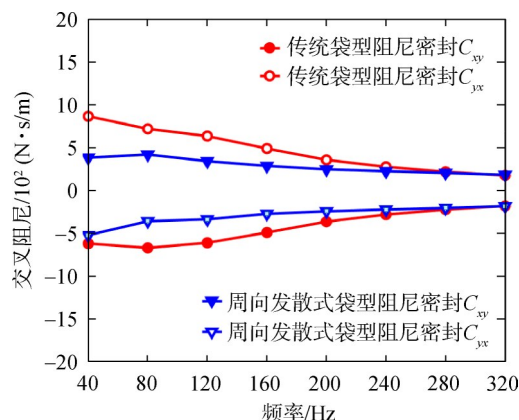


图16 交叉阻尼系数

Fig.16 Cross damping coefficient

高于240 Hz时,周向发散式袋型阻尼密封的直接刚度较大。

图17为直接阻尼与转子涡动频率的关系,由图中可知,随着转子涡动频率的增加,两种袋型阻尼密封的直接阻尼逐渐减小,根据激振力与转子动力特性系数的关系^[20]可知,当直接阻尼 C_{xx} 值为正时,泄漏流体所产生气流力的方向与转子涡动方向相反,抑制转子系统的失稳。随着转子涡动频率的增大,流体的流动状态越发混乱,阻尼效果减弱,由图中可以看出,两种袋型阻尼密封结构的直接阻尼均为正,均对转子系统的涡动起到了抑制作用,而周向发散式袋型阻尼密封的直接阻尼大于传统袋型阻尼密封,因此,在偏心条件下,周向发散式袋型阻尼密封抑制转子系统失稳的能力强于传统袋型阻尼密封。

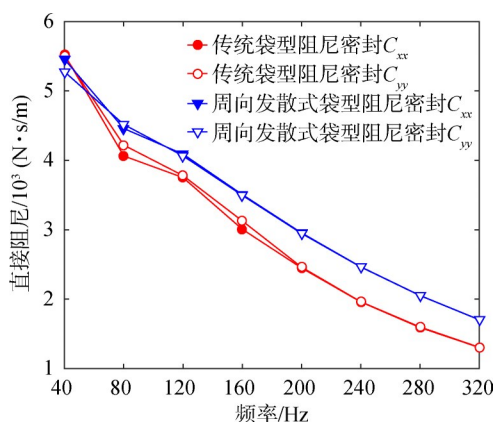


图17 直接阻尼系数

Fig.17 Direct damping coefficient

3.3.3 密封转子稳定性分析

为综合反映密封动力特性对转子系统稳定性的影响,定义有效阻尼 C_{eff} 与有效刚度 K_{eff} 如下,两

者越大越有利于转子系统的稳定。

$$C_{\text{eff}} = C_{xx} - K_{xy}/\Omega \quad (11)$$

$$K_{\text{eff}} = K_{xx} + C_{xy}\Omega \quad (12)$$

图 18 为有效阻尼与转子涡动频率的关系,由图中可以看出,随着转子涡动频率的增加,两种袋型阻尼密封结构的有效阻尼均减小,周向发散式袋型阻尼密封的有效阻尼高于传统袋型阻尼密封,其平均有效阻尼是传统袋型阻尼密封的 1.29 倍,由此可知,周向发散式袋型阻尼密封相比于传统袋型阻尼密封而言更有利于转子系统的稳定,图 19 为有效刚度与转子涡动频率的关系,由图中可知,随着转子涡动频率的增加,两种袋型阻尼密封的有效刚度均增加,而周向发散式袋型阻尼密封的有效刚度高于传统袋型阻尼密封结构,且其平均有效刚度是传统袋型阻尼密封的 1.92 倍,因此进一步验证了周向发散式袋型阻尼密封抑制转子系统失稳的能力强于传统袋型阻尼密封。

综上所述可以得出:传统袋型阻尼密封在转子偏

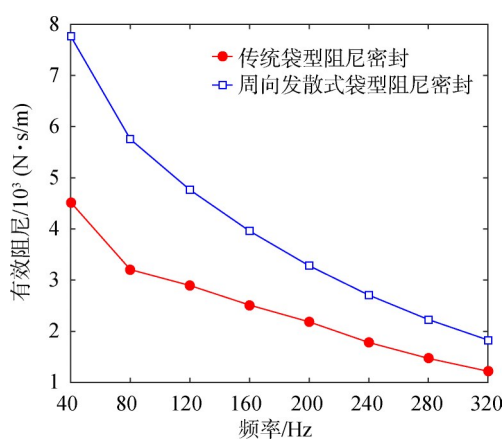


图 18 有效阻尼系数

Fig.18 Effective damping coefficient

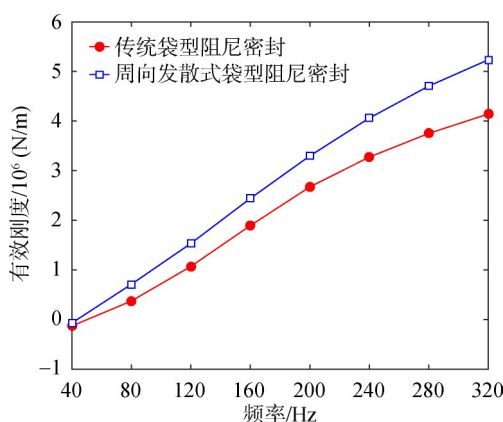


图 19 有效刚度系数

Fig.19 Effective stiffness factor

心时,密封件与转子之间的气流由大间隙流向小间隙,产生了流体动压效应,从而产生了气流激振力,对转子系统的失稳起到了促进作用,而本文提出的周向发散式袋型阻尼密封由于腔室设计成周向发散式的楔形结构,在转子偏心时,该结构的设计使得气流由小间隙流向大间隙,破坏了流体动压效应的产生条件,因此,周向发散式袋型阻尼密封在转子偏心时能够抑制流体动压效应的产生,有利于转子系统的稳定性。

4 结 论

本文提出一种周向发散式袋型阻尼密封,应用非定常动网格技术建立了传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型阻尼密封多频椭圆涡动求解模型,比较分析了传统与周向发散式袋型阻尼密封的流体动压效应,研究了进出口压比、偏心率对袋型阻尼密封泄漏特性与动力特性的影响,并在偏心状态下分析了传统与周向发散式袋型阻尼密封对转子系统稳定性的影响,可以得出以下结论:

1) 传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型阻尼密封的泄漏量平均相差 0.89%,两种袋型阻尼密封的泄漏特性相当。

2) 传统袋型阻尼密封在转子偏心状态下会形成流体动压效应,各腔室存在较大周向压力差,周向发散式袋型阻尼密封可有效地抑制流体动压效应,各腔室压力分布基本均匀。

3) 传统袋型阻尼密封与周向发散式袋型阻尼密封所受到的气流激振力与转子涡动方向相反,均抑制转子的涡动,在本文研究工况下,周向发散式袋型阻尼密封的切向气流量大小为传统袋型阻尼密封的 2.29 倍。

4) 周向发散式袋型阻尼密封的有效阻尼系数大于传统袋型阻尼密封,在本文研究工况下,其平均有效阻尼系数为传统袋型阻尼密封的 1.29 倍,故周向发散式袋型阻尼密封更有利于转子系统的稳定。

参考文献:

- [1] 罗跃纲,王鹏飞,徐昊,等.密封-转子系统气流激振问题数值仿真[J].航空动力学报,2019,34(9):1857-1865.
LUO Yuegang, WANG Pengfei, XU Hao, et al. Numerical simulation on seal-rotor system with airflow induced vibration[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 1857-1865. (in Chinese)
- [2] 孙丹,卢江,艾延廷,等.偏心密封动力特性分析与新型自同心密封研究[J].推进技术,2018,39(9):2075-2084.

- SUN Dan, LU Jiang, AI Yanting, et al. Dynamical characteristics of eccentric seal and novel floating self-adapt concentric seal concepts[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(9): 2075-2084. (in Chinese)
- [3] 孙丹, 王双, 艾延廷, 等. 负错位密封静力与动力特性的数值研究[J]. 航空动力学报, 2017, 32(4): 791-799.
- SUN Dan, WANG Shuang, AI Yanting, et al. Numerical study on static and dynamic characteristics of negative dislocated seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(4): 791-799. (in Chinese)
- [4] 胡东旭, 贾力, 杨立新. 篦齿封严泄漏特性的实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 549-555.
- HU Dongxu, JIA Li, YANG Lixin. Experiment on leakage characteristics in labyrinth seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 549-555. (in Chinese)
- [5] 马纲, 栗秀花, 沈心敏, 等. 柱面气膜密封界面结构与性能分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2610-2616.
- MA Gang, LI Xiuhua, SHEN Xinmin, et al. Analysis of performance and interface structure of cylinder gas film seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2610-2616. (in Chinese)
- [6] 王虹, 洪杰, 马艳红. 用于转子系统的气膜密封阻尼结构稳态特性[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1): 190-197.
- WANG Hong, HONG Jie, MA Yanhong. Steady-state properties of gas film seal damper used in a rotor system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1): 190-197. (in Chinese)
- [7] VANCE J M, LI J M. Test results of a new damper seal for vibration reduction in turbomachinery[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118(4): 843-846.
- [8] ERTAS B, GAMAL A, VANCE J. Rotordynamic force coefficients of pocket damper seals[R]. Reno, NV, US: ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2006.
- [9] YANG J, LUIS S A, LU X L. On the leakage and dynamic force coefficients of a novel stepped shaft pocket damper seal: experimental and numerical verification[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(3): 031002.1-031002.12.
- [10] VANCE J M, SCHULTZ R R. New damper seal for turbomachinery[R]. Albuquerque, NM, US: the 14th Biennial ASME Design Technical Conference on Mechanical Vibration and Noise, 1993.
- [11] CHILDS D W, WADE J. Rotordynamic-coefficient and leakage characteristics for hole-pattern-stator annular gas seals-measurements versus predictions[J]. Journal of Tribology, 2004, 126(2): 326-333.
- [12] GRIEBEL C. Impact analysis of pocket damper seal geometry variations on leakage performance and rotordynamic force coefficients using computational fluid dynamics[J]. Gas Turbines Power, 2019, 141(4): 041024.1-041024.9.
- [13] 张万福, 马凯, 潘渤, 等. 基于变厚度挡板的新型渐扩/渐缩袋型阻尼密封动力特性研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(5): 24-33.
- ZHANG Wanfu, MA Kai, PAN Bo, et al. Study on dynamic characteristics of pocket damper seals with divergent/convergent cavity[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(5): 24-33. (in Chinese)
- [14] 孙丹, 王平, 赵欢, 等. 新型浮动式收敛袋型密封自适应同心性能数值与实验研究[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 325-335.
- SUN Dan, WANG Ping, ZHAO Huan, et al. Numerical and experimental study on adaptive concentric performance of a new type of floating convergent pocket seal. [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 325-335. (in Chinese)
- [15] 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 Yaoming, 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. (in Chinese)
- [16] 陈陆森, 秦朝辉, 褚福磊. 航空发动机转子篦齿封严诱导的气流激振力分析[J]. 推进技术, 2016, 37(3): 527-533.
- CHEN Lumiao, QIN Chaoye, ZHU Fulei. Analysis on air-flow induced forces of Aero-Engine rotor with labyrinth seal [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(3): 527-533. (in Chinese)
- [17] 曹浩, 杨建刚, 郭瑞, 等. 密封动力特性系数试验识别方法及影响因素分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 85-89.
- CAO Hao, YANG Jiangang, GUO Rui, et al. Experimental identification method and influence factor analysis of seal dynamic characteristic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9): 85-89. (in Chinese)
- [18] 王双. 旋转机械滑动轴承与密封结构流体动力特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
- WANG Shuang. Study of fluid dynamic characteristics of journal bearings and seals in rotating machinery[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016. (in Chinese)
- [19] YAN Xin, HE Kun, LI Jun, et al. A generalized prediction method for rotordynamic coefficients of annular gas seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(9): 092506.1-092506.12.
- [20] MEHTA N J, CHILDS D W. Measured comparison of leakage and rotordynamic characteristics for a slanted-tooth and a straight-tooth labyrinth seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(1): 012501.1-012501.11.

(编辑: 王碧琚)