

DOI: 10.7652/xjtuxb201707001

高偏心率下旋转密封泄漏特性和静态动力特性研究

李志刚¹, 陈尧兴¹, 李军^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 先进航空发动机协同创新中心, 100191, 北京)

摘要: 为了评估转子发生偏心时非同心旋转密封对透平机械运行效率和安全稳定性的影响,提出了基于动网格技术和三维 RANS 方程的高偏心率旋转密封三维计算网格的生成方法,以及高偏心率旋转密封静态气流激振力和静态刚度系数的数值计算方法,研究了高偏心率下旋转密封的泄漏特性和静态动力特性。采用文中所提方法计算分析了 3 种压比(0.17, 0.35, 0.50)、2 种进口预旋比(0, 0.5)和 7 种偏心率(0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9)下的袋型阻尼密封泄漏量、静态气流激振力、静态刚度系数和流场特性。研究结果表明:旋转密封的泄漏量随偏心率的增大而增大;转子偏心和进口预旋产生了显著的正交叉刚度,易诱发转子发生偏心涡动而失稳;非阻塞工况下,旋转密封具有正的静态直接刚度;阻塞工况下,旋转密封的静态直接刚度存在穿越偏心率为 0.5,静态直接刚度随偏心率的增大而增大,其值在穿越偏心率处由负值变为正值,以避免产生密封碰磨失效。

关键词: 旋转密封;高偏心率;泄漏特性;静态动力特性;数值模拟

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)07-0001-07

Investigation on the Leakage and Static Dynamic Characteristics of Rotating Seals at High Eccentricity Ratios

LI Zhigang¹, CHEN Yaoxing¹, LI Jun^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: To evaluate the influence of rotating annular seal with eccentric rotor on the operation efficiency and stability of turbomachinery, a novel 3D mesh generation method and a numerical approach were adopted to solve the static gas response forces and static stiffness coefficients for the rotating annular seal at high rotor eccentricity ratios based on the mesh deformation technique and steady RANS solutions. An investigation on the leakage and static destabilizing characteristics of rotating annular seal at high rotor eccentricity ratios was conducted. The leakage flow rate, static gas response (exciting) forces, static stiffness coefficients and flow field characteristics of a fully-partitioned pocket damper seal (FPDS) were computed at three pressure ratios (0.17, 0.35, 0.50), two inlet preswirl ratios (0, 0.5) and seven eccentricity ratios (0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9). The results showed that the leakage flow rate increases with the eccentricity ratio. The rotor eccentricity and inlet preswirl result in a significant destabilizing cross-coupling stiffness, which may give rise to a risk of rotor whirling instability. The FPDS has

收稿日期: 2017-02-08。 作者简介: 李志刚(1986—),男,副教授;李军(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51406144)。

网络出版时间: 2017-04-17 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170417.1202.010.html>

a positive static direct stiffness as long as it operates at subsonic exit flow conditions, no matter the eccentricity ratio is high or low. For the choked exit condition, the FPDS shows negative static direct stiffness at low eccentricity ratios and then crosses over to positive value at the crossover eccentricity ratio 0.5, following a trend indicative of a parabola. The negative static direct stiffness may result in a full rotor eccentricity and rapid wear of seal due to rubbing contact.

Keywords: rotating seal; high eccentricity ratio; leakage characteristics; static dynamic characteristics; numerical simulation

旋转密封是现代叶轮机械关键部件,其首要目标是控制工质通过动静间隙从高压区向低压区的泄漏流动,有效地减小泄漏流量,提高叶轮机械的气动效率。旋转密封在控制工质泄漏流动的同时,还会产生重要的气流激振力,对叶轮机械的转子稳定性具有显著影响^[1-3]。旋转密封泄漏特性和动力特性的研究对进一步提高叶轮机械运行效率和安全稳定性具有重要意义。

对于旋转密封,偏心意味着密封静子面中心和转子面中心之一或两者同时沿径向偏离了旋转轴的轴线。工程实际中引起密封偏心的因素很多,如转子和密封静子件的非同心安装,长柔性转子径向弯曲,不平衡力引起的转子同步涡动,以及气流激振引起的转子非同步涡动等^[1]。密封偏心行为又可分为动态动力响应行为(转子偏心涡动引起动态气流激振力)和静态动力响应行为(转子偏心旋转引起静态气流激振力)。本文主要研究密封转子面和静子面非同心时转子偏心旋转引起的静态动力响应行为。

Childs 等研究了光滑静子面环形密封和孔型阻尼密封在高偏心率下的静态动力特性^[4],获得了零转速下转子从同心(偏心率为 0)发展到完全偏心(偏心率为 1)过程中,密封内气流激振力和泄漏流量的变化规律。工程实际中具有负静态直接刚度的密封会引起轴系临界转速的降低、并会进一步促进转子向完全偏心发展,进而产生密封碰磨而失效^[5-6]。先前的理论研究证明了在零转速、转子同心且出口发生堵塞工况下,气体旋转密封才具有负的静态直接刚度^[7-8]。Arghir 等采用基于密封 Bulk Flow 流动模型的理论分析方法对 Childs 等的实验结果进行了数值分析验证^[9],从理论上解释了密封产生负静态直接刚度的可能性和条件,并证明了非零转速下旋转密封具有正直接静态刚度且随偏心率的增大而增大。Ertas 等实验测量了在不同转速下、密封出口发生阻塞时,迷宫密封、袋型阻尼密封和蜂窝密封的静态直接刚度系数^[10]。李志刚等提

出了基于转子多频涡动模型和动网格技术的旋转密封转子动力特性系数预测方法,并研究了进口预旋对密封转子动力特性的影响^[11-14]。

本文提出了基于动网格技术和定常 RANS 方程求解的高偏心率旋转密封网格生成方法和静态刚度系数预测方法,计算分析了 3 种压比、2 种进口预旋比和 7 种偏心率下的袋型阻尼密封泄漏量、静态气流激振力、静态刚度系数和流场特性,获得了袋型阻尼密封在高偏心率下的泄漏特性和静态动力特性。

1 计算模型和数值方法

1.1 计算模型

袋型阻尼密封的研究对象选取了 GE 公司旋转机械振动实验室的袋型阻尼密封实验件^[10],表 1 给出了袋型阻尼密封实验件的几何尺寸和计算工况。

表 1 袋型阻尼密封几何尺寸和计算工况^[10]

项目	数值
进口总压/ 10^5 Pa	6.9
出口压力/ 10^5 Pa	1.0,2.3,3.5
工质温度/ $^{\circ}\text{C}$	14
$n/r \cdot \text{min}^{-1}$	15 000
$u_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0,60
偏心率	0,0.1,0.3,0.50.7,0.8,0.9
转子直径/mm	170.6
密封间隙/mm	0.3
周向挡板数	8
密封齿数	8
腔室深度/mm	3.175
密封齿厚度/mm	3.175
挡板厚度/mm	3.175
腔室长、宽/mm	13.97、6.35

当转速 n 为 15 000 r/min 时,本文计算 3 种出口压力(0.1,0.23,0.35 MPa)、2 种进口预旋速度 u_0 (0、60 m/s)和 7 种偏心率(0,0.1,0.3,0.5,0.7,0.8、

0.9)工况下,袋型阻尼密封的泄漏量和静态刚度系数。

图 1 给出了袋型阻尼密封实验件的几何结构、三维计算模型和三维计算网格。该密封实验件是一个贯通挡板型袋型阻尼密封,沿流动方向具有 7 个有效的袋型腔室。袋型阻尼密封的计算网格为整圈

的多块结构化网格,在每个袋型腔室内生成了 O 型网格,壁面区域采用加密网格。根据文献[14]中的网格无关性分析结果,当袋型阻尼密封生成了网格节点数为 621 万、在密封间隙处沿径向布置了 22 个节点、网格最小正交性为 43°、最大长宽比为 105,网格具有很好的质量。

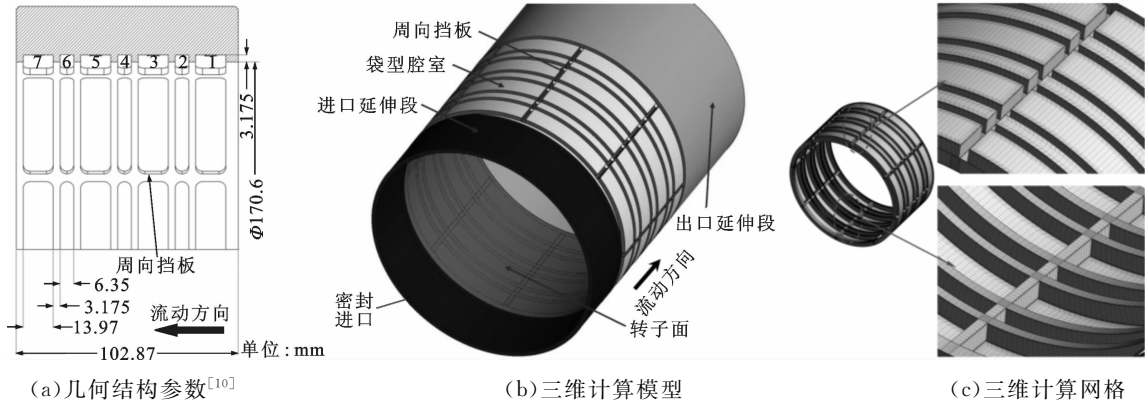


图 1 袋型阻尼密封结构及计算模型

1.2 数值方法

在理想状态下,密封转子和静子同轴(转子轴心 C 和静子中心 O 重合),密封转子绕静子中心 O 以自旋速度 ω 做同轴的旋转运动。在理想状态下密封腔室内流场是严格轴对称的,因此转子面上不会受到不平衡气流激振力作用($F_x=0, F_y=0$)。图 2 给出了非同心安装或长柔性转子发生重力弯曲,转子沿 Y 轴负方向发生偏移时的转子偏心模型,图中 δ 为转子轴心 C 的偏心距, ϵ 为偏心率, s 为密封径向间隙,本文计算中 ϵ 取为 0、0.1、0.3、0.5、0.7、0.8 和 0.9。由于转子偏心距极小,而转子直径尺寸相对很大,所以生成不同转子偏心率下密封几何和网格的方法较为困难,且存在较大的几何误差。本文提出了基于动网格技术的转子偏心旋转密封网格的生成方法,采用 ICEM CFD 生成了转子同心的密封整圈全三维计算模型和网格,然后采用动网格技

术,通过求解位移扩散方程获得了 6 种偏心率下的转子偏心旋转密封的计算网格,位移扩散方程为

$$\nabla \cdot (\Gamma_{\text{disp}} \nabla \delta) = 0 \tag{1}$$

式中: δ 为转子轴心偏心距; Γ_{disp} 为网格刚度,决定着一定范围内节点一起移动的程度。图 3 给出了不同偏心率下袋型阻尼密封间隙局部网格,采用本文所提网格生成方法获得了较高网格质量,同时保证了密封几何精度。表 2 详细给出了本文求解转子同心和偏心时,密封泄漏量和静态气流激振力的数值方法以及边界条件。采用商用软件 ANSYS-CFX 数值求解 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 方程。湍流模型为标准 $k-\epsilon$ 模型,对流项采用高精度离散格式,固体壁面均设为光滑绝热边界,近壁面采用改进壁面函数法来处理。密封进口给定总压、总温,通过设定进口气流在圆柱坐标系下的气流角

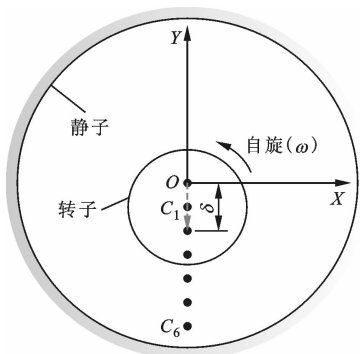


图 2 密封转子偏心模型

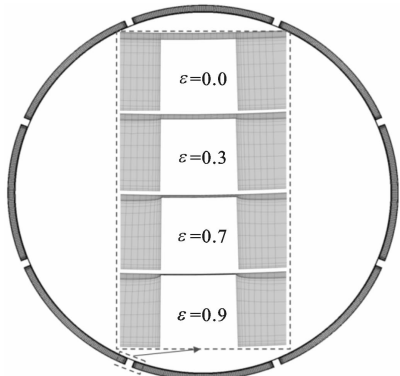


图 3 不同偏心率下密封间隙局部网格

给出进口预旋速度,出口给定平均静压。转子面给定以 $C_1 \sim C_6$ 为自旋中心的旋转速度。收敛判断标准为:连续、动量和湍流方程的均方根残差下降到 10^{-5} ,转子面受力 F_x 和 F_y 在 100 迭代步内波动小于 0.1% 时,认为计算收敛。

表 2 气流激振力数值求解方法

项目	数值或属性
求解器	ANSYS CFX
工质	理想空气
求解方法	稳态,时间推进
离散格式	高精度格式
湍流模型	标准 $k-\varepsilon$,改进壁面函数法
壁面条件	光滑,无滑移
进口总压/ 10^5 Pa,总温/ $^{\circ}\text{C}$	6.9,14
出口静压/ 10^5 Pa	(1.0,2.3,3.5)
转子面旋转速度/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	15 000
进口预旋	圆柱坐标系下给定流动气流角

2 刚度系数求解方法

假设转子涡动频率为 0,可得转子静态偏心时的密封激振力、位移线性方程

$$-\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (2)$$

密封在 Y 方向偏心率为 ε 时,可得静态直接刚度系数(K_{xx}, K_{yy})和静态交叉刚度系数(K_{xy}, K_{yx})

$$\left. \begin{aligned} K_{xx} &= K_{yy} = -\frac{\partial F_y}{\partial \delta_y} \bigg|_{\delta_y = \varepsilon} \\ K_{yx} &= -K_{xy} = -\frac{\partial F_x}{\partial \delta_y} \bigg|_{\delta_y = \varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

通过 CFD 计算获得不同偏心率下的激振力(F_x, F_y),并获得激振力与转子 Y 方向的偏心距 δ_y 的拟合公式。根据式(3),通过对多项拟合公式进行求导,获得不同偏心率下的刚度系数。

3 结果与讨论

3.1 数值方法验证

图 4 给出了静态直接刚度系数和交叉刚度系数随转速的变化曲线。由图 4 可知,相比于 Ertas^[10] 的实验值,静态直接刚度系数和交叉刚度系数计算结果分别偏大了 13%~29% 和 9%~19%,数值计算准确预测了静态直接刚度系数和静态交叉刚度系数随转速的变化规律。数值计算和实验结果均表明,转子偏心率为 0 时,袋型阻尼密封具有负的静态直接刚度。因此,本文所提数值方法能够可靠地预测袋型阻尼密封的静态动力特性。

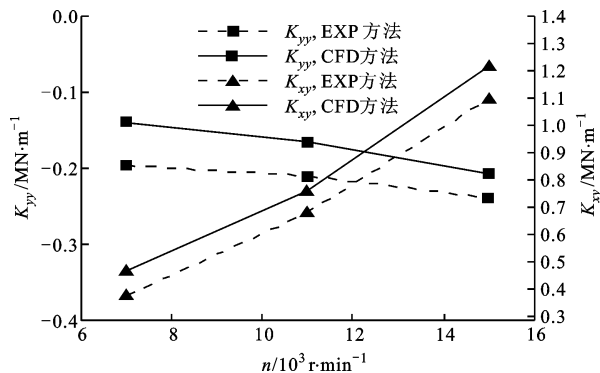
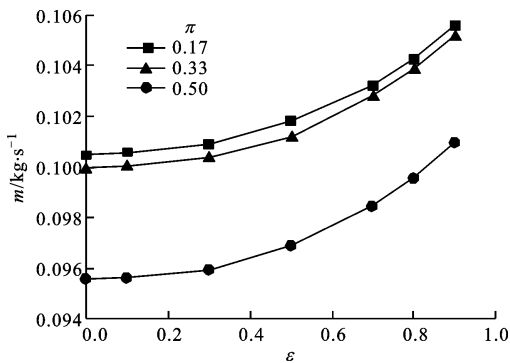


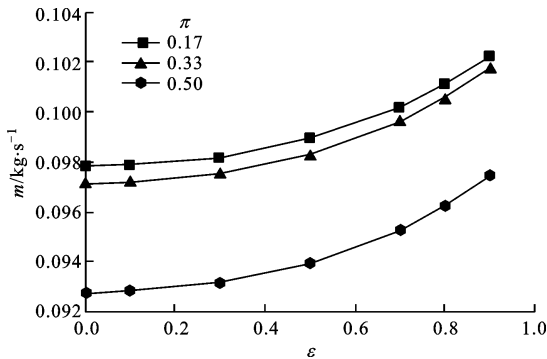
图 4 静态直接刚度和交叉刚度系数随转速的变化曲线

3.2 泄漏量

图 5 给出了不同压比 π 下,泄漏量 m 随偏心率的变化曲线。由图 5 可知,泄漏量随偏心率的增大而增大,且偏心率越大,增速越快。相比于转子同心工况,偏心率 $\varepsilon = 0.9$ 使泄漏量增大了 4%~6%。泄漏量随压比减小而增大,进口预旋使泄漏量减小了约 3%。不同压比下最后一个密封齿间隙处的马赫数云图 Ma 如图 6 所示,最后一个密封齿间隙处最大马赫数随压比的减小而增大,当压比减小到 0.17 时,密封出口压力为 1.0×10^5 ,最后一个密封齿间隙处马赫数大于 1,密封出口流动发生了阻塞。



(a) 进口预旋速度为 0 m/s



(b) 进口预旋速度为 60 m/s

图 5 泄漏量随偏心率的变化曲线

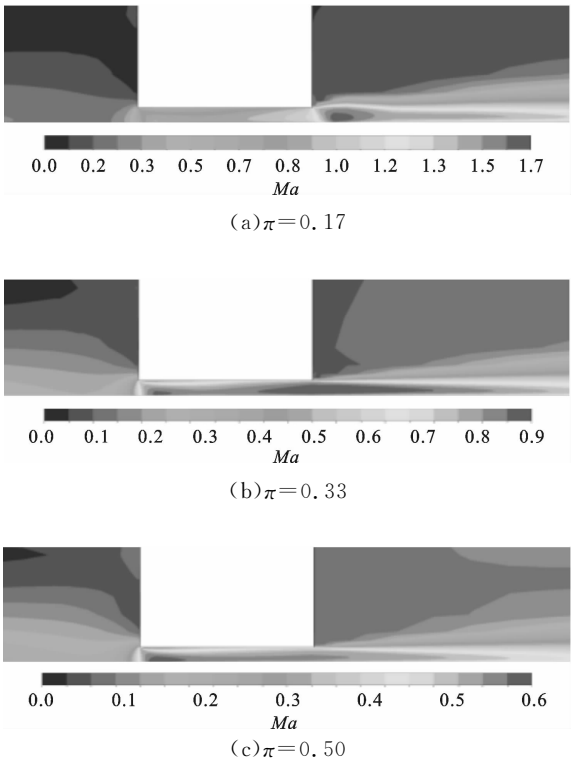
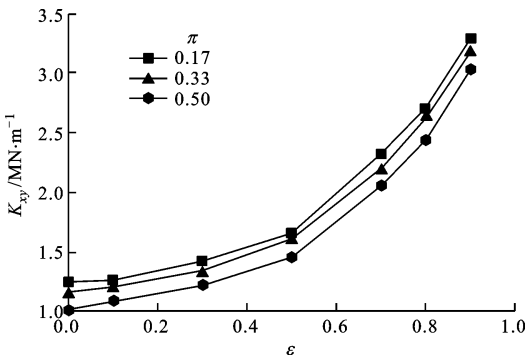


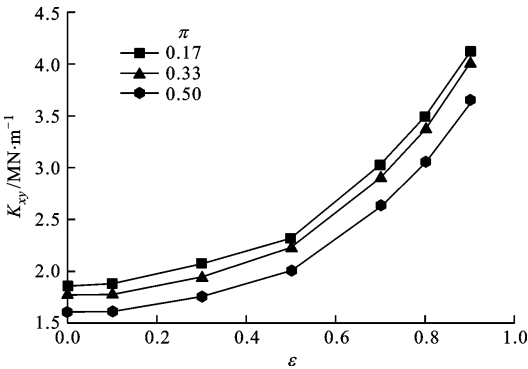
图 6 不同压比下最后一个密封齿间隙处的马赫数云图

3.3 气流激振力和刚度系数

图 7、8 给出了转子沿 Y 轴负方向发生偏心时，



(a)进口预旋速度为 0 m/s

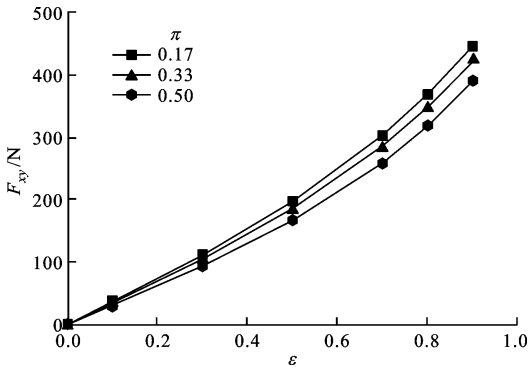


(b)进口预旋速度为 60 m/s

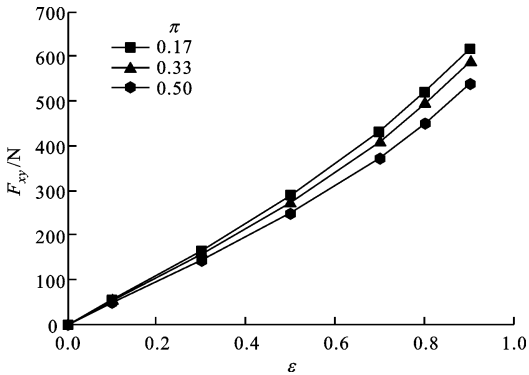
图 8 交叉刚度随偏心率的变化曲线

不同压比下 X 方向的静态交叉气流激振力 F_{xy} 和 K_{xy} 随偏心率的变化曲线。由图 7 可知,不同压比下,X 方向静态交叉气流激振力相差较小($<8\%$),均随偏心率的增大而增大,且偏心率越大其增大越快。由图 8 可知,当 K_{xy} 为正且随偏心率的增大呈二次曲线形增大,进口预旋使交叉气流激振力和交叉刚度显著增大。交叉刚度对转子产生的流体激振力如图 9 所示,正的 K_{xy} 产生了与转子偏心位移方向垂直的切向力 F_{ϕ} ,可诱发转子发生偏心涡动。因此,偏心率和进口预旋越大,转子越容易产生偏心涡动而失稳。

图 10、11 分别给出了转子沿 Y 轴负方向发生偏



(a)进口预旋速度为 0 m/s



(b)进口预旋速度为 60 m/s

图 7 X 方向静态交叉激振力随偏心率的变化曲线

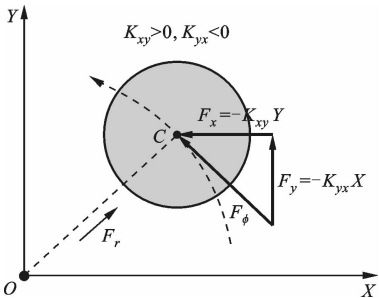
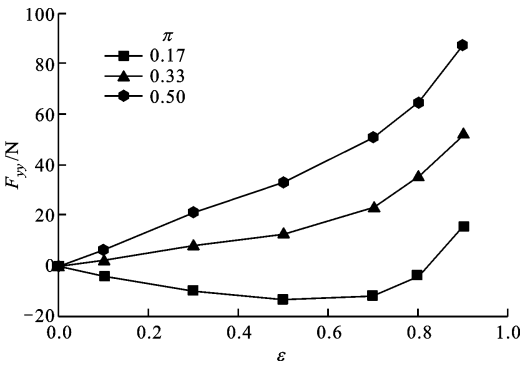
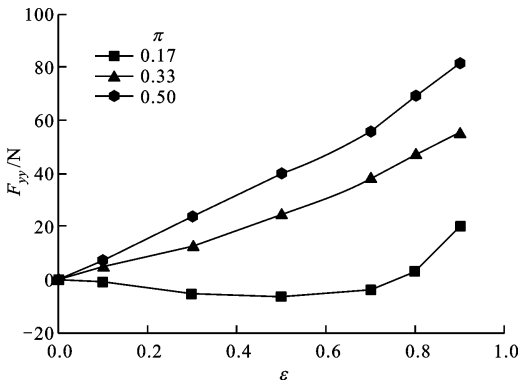


图 9 交叉刚度对转子产生的流体激振力

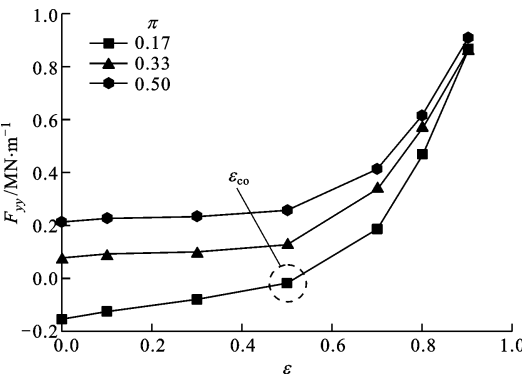


(a)进口预旋速度为 0 m/s

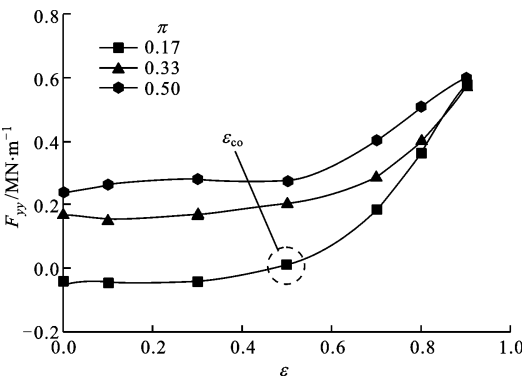


(b)进口预旋速度为 60 m/s

图 10 Y 方向静态直接气流激振力随偏心率的变化曲线



(a)进口预旋速度为 0 m/s



(b)进口预旋速度为 60 m/s

图 11 直接刚度随偏心率的变化曲线

心时,不同压比下 Y 方向的静态直接气流激振力 F_{yy} 和 K_{yy} 随偏心率的变化曲线。由图 10、11 可知, Y 方向静态直接气流激振力和直接刚度均随压比的增大而显著增大,但 K_{yy} 在大偏心率下 ($\epsilon > 0.8$) 受压比影响很小,进口预旋对直接气流激振力和直接刚度的影响均很小。在阻塞工况 $\pi = 0.17$ 下,当 $\epsilon \leq 0.8$ 时,直接气流激振力为负值;当 $\epsilon \leq 0.5$ 时,直接刚度系数为负值。在非阻塞工况 π 为 0.35、0.50 下,当 $\epsilon \leq 0.5$ 时,直接气流激振力随偏心率的增大而线性增大;当 $\epsilon > 0.5$ 时,直接气流激振力随偏心率的变化曲线的斜率逐渐增大。

因此,袋型阻尼密封产生负静态直接刚度的偏心率 $\epsilon \leq 0.5$,密封出口流动发生阻塞。非阻塞工况下整个转子偏心行程中,袋型阻尼密封的静态直接刚度系数均为正,产生的气流激振力为使转子趋向恢复同心的稳定归心力。阻塞工况下,袋型阻尼密封静态直接刚度系数存在一个穿越偏心率 $\epsilon_{co} = 0.5$,直接刚度系数在此处由负值变为正值。负的静态直接刚度产生使转子偏离同心位置的非稳定力,将会进一步促进转子向完全偏心发展,进而发生密封碰磨失效。

4 结 论

基于动网格技术和 RANS 方程,本文提出了一种高偏心率旋转密封全三维网格生成方法和能够预测其泄漏量、静态气流激振力和静态刚度系数的数值方法。采用该数值方法,研究了袋型阻尼密封在高偏心率下的泄漏特性和静态动力特性。

袋型阻尼密封泄漏量随偏心率的增大而增大,随压比的减小而增大,随进口预旋的增大而减小。当压比减小到 0.17 时,最后一个密封齿间隙流动马赫数大于 1,流动发生了阻塞。袋型阻尼密封具有正的静态交叉刚度,静态交叉刚度随偏心率和进口预旋的增加而增大,但受压比影响较小 ($< 8\%$)。高偏心率和进口预旋使密封正静态交叉刚度显著增大,易使转子发生偏心涡动而失稳。袋型阻尼密封产生负静态直接刚度的偏心率 $\epsilon \leq 0.5$,密封出口流动发生阻塞。阻塞工况下,袋型阻尼密封的静态直接刚度系数存在穿越交叉刚度为 0.5,直接刚度系数在此处由负值变为正值。

参考文献:

[1] VANCE J M. Machinery vibration and rotordynamics [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2010;

- 271-272.
- [2] CHUPP R E, HENDRICKS R C, LATTIME S B, et al. Sealing in turbomachinery [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(2): 313-349.
- [3] 曹树谦, 陈予恕. 现代密封转子动力学研究综述 [J]. *工程力学*, 2009, 26(s2): 68-79.
CAO Shuqian, CHEN Yushu. A review of modern rotor/seal dynamics [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 26(s2): 68-79.
- [4] CHILDS D W, ARTHUR S P. Static destabilizing behavior for gas annular seals at high eccentricity ratios [C] // ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2013: V07AT29A003.
- [5] VALANTAS R, BOLLETER U. Solutions to abrasive wear-related rotordynamic instability problems in Prudhoe Bay injection pumps[EB/OL]. [2016-12-26]. <http://turbolab.tamu.edu/proc/pumpproc/P5/P53-10.pdf>.
- [6] MARQUETTE O, CHILDS D W, SAN ANDRES L. Eccentricity effects on the rotordynamic coefficients of plain annular seals: theory versus experiment [J]. *ASME Journal of Tribology*, 1997, 119(3): 443-448.
- [7] ARGHIR M, DEFAYE C, FRENE J. The Lomakin effect in annular gas seals under choked flow conditions [J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, 129(14): 1028-1034.
- [8] HASSINI M A, ARGHIR M. Phase change and choked flow effects on rotordynamic coefficients of cryogenic annular seals [J]. *ASME Journal of Tribology*, 2013, 135(4): 042201.
- [9] ARGHIR M, MARIOT A. About the negative direct static stiffness of highly eccentric straight annular seals [J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(8): 082508.
- [10] ERTAS B H, DELGADO A, VANNINI G. Rotordynamic force coefficients for three types of annular gas seals with inlet preswirl and high differential pressure ratio [J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012, 134(4): 042503.
- [11] 李志刚, 李军, 丰镇平. 袋型阻尼密封转子动力特性的多频单向涡动预测模型 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(5): 13-18.
LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Multiple frequencies one-dimensional prediction model of rotordynamic characteristics for pocket damper seals [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(5): 13-18.
- [12] 王世柱, 李志刚, 李军, 等. 补汽对透平级气动性能和静叶汽封转子动力特性影响的数值模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(5): 56-61.
WANG Shizhu, LI Zhigang, LI Jun, et al. Numerical investigations for effect of supplementary steam on aerodynamic performance of turbine stage and rotordynamics of stator seal [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(5): 56-61.
- [13] 李志刚, 李军, 丰镇平. 进口防旋板对孔型密封非定常气流激振特性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(1): 16-21.
LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Effect of swirl brakes on unsteady flow excitation characteristics of hole-pattern seal [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(1): 16-21.
- [14] LI Zhigang, Li Jun, Feng Zhenping. Numerical investigations on the leakage and rotordynamics characteristics of pocket damper seals: part I Effects of pressure ratio, rotational speed, and inlet preswirl [J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(3): 1-15.

[本刊相关文献链接]

张西宁, 刘旭, 吴婷婷. 注排液式砂轮在线动平衡技术研究. 2017, 51(4): 1-5. [doi:10.7652/xjtuxb201704001]

邵卫东, 李志刚, 李军. 二维时间发展混合层噪声的直接数值模拟. 2017, 51(1): 38-44. [doi:10.7652/xjtuxb201701007]

张西宁, 尤亚男, 王奔. 一种利用磁流体液流变效应的在线动平衡方法. 2016, 50(12): 6-11. [doi:10.7652/xjtuxb2016120006-06]

宋金龙, 刘勇智, 周政, 等. 中低速开关磁阻电机转矩优化策略研究. 2016, 50(11): 83-90. [doi:10.7652/xjtuxb201611013]

刘昕, 袁奇, 欧文豪. 燃气轮机周向拉杆转子拉杆应力分析和改进设计. 2016, 50(10): 104-110. [doi:10.7652/xjtuxb201610016]

张鹏飞, 王志恒, 席光. 用于柔性转子主动控制的等几何 Timoshenko 梁模型及其数值验证. 2016, 50(10): 139-146. [doi:10.7652/xjtuxb201610021]

李志刚, 李军, 丰镇平. 进口防旋板对孔型密封非定常气流激振特性的影响. 2016, 50(1): 16-21. [doi:10.7652/xjtuxb201601003]

王世柱, 李志刚, 李军, 等. 补汽对透平级气动性能和静叶汽封转子动力特性影响的数值模拟. 2015, 49(5): 56-61. [doi:10.7652/xjtuxb201505009]

(编辑 赵炜 苗凌)