

高进口预旋条件下迷宫密封转子动力特性实验研究

方志, 李志刚, 王天昊, 薛文松, 李军

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为获得高进口预旋条件下迷宫密封转子动力特性, 阐明其气流激振失稳机制, 本文基于西安交通大学动密封转子动力特性实验台, 实验研究了高进口预旋条件下(预旋比 $\mu_0 > 0.8$), 压比以及转速对迷宫密封转子动力特性影响规律。实验测量了2种压比($\pi = 3.0, 4.0$)、3种转速($n = 3\ 000, 6\ 000, 12\ 000$ r/min)下迷宫密封频率相关的转子动力特性系数。研究发现: 高预旋条件下, 迷宫密封交叉刚度始终为较大的正值, 导致有效阻尼始终为负值, 不利于转子系统稳定, 容易诱发转子失稳; 压比对迷宫密封转子动力特性影响显著, 随压比增加, 迷宫密封直接刚度幅值显著增大, 交叉刚度始终为正值且幅值显著增大, 有效阻尼明显降低; 转速对迷宫密封转子动力特性影响较小, 直接刚度、直接阻尼对转速变化不敏感, 基本保持不变, 交叉刚度随转速增加略微增加, 进而导致有效阻尼略微减小。

关键词: 迷宫密封; 转子动力特性; 高进口预旋; 压比; 转速

中图分类号: TK476 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202207010 **文章编号:** 0253-987X(2022)07-0086-10



OSID 码

Experimental Research on Rotordynamic Characteristics of Labyrinth Seals at High Inlet Preswirl

FANG Zhi, LI Zhigang, WANG Tianhao, XUE Wensong, LI Jun

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To better understand the rotordynamic characteristics of a labyrinth seal at high inlet preswirl and elucidate the mechanism of instability induced by airflow, the rotordynamic characteristic test rig of Xi'an Jiaotong University was utilized to research the effects of pressure ratio and rotational speed on the rotordynamic characteristics of the labyrinth seal at high inlet preswirl (preswirl ratio $\mu_0 > 0.8$). The frequency-dependent rotordynamic coefficients were measured at two pressure ratios ($\pi = 3.0, 4.0$) and three rotational speeds ($n = 3\ 000, 6\ 000, 12\ 000$ r/min). The results show that at high inlet preswirl, the labyrinth seal had always a large positive cross-coupled stiffness so that its effective damping was always negative, which was not conducive to the stability and may cause instability of the rotor system. It is also shown that the rotordynamic characteristics were significantly affected by the pressure ratio: As the ratio increased, the direct stiffness increased greatly, the cross-coupled stiffness was always positive and increased greatly, and the effective damping decreased significantly and that the rotordynamic characteristics were slightly affected by the rotational speed; Direct stiffness and direct damping

收稿日期: 2021-12-14。 作者简介: 方志(1994—),男,博士生;李志刚(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776152)。

网络出版时间: 2022-03-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220321.1326.002.html>

were insensitive to speed change and remained substantially unchanged, and the cross-coupled stiffness increased slightly along with the speed increase, resulting in a slight decrease of effective damping.

Keywords: labyrinth seal; rotordynamic characteristics; high inlet preswirl; pressure ratio; rotational speed

现代透平机械通常在轴端、平衡活塞等位置安装旋转动密封,通过限制工质流体从高压端泄漏到低压端,减少泄漏损失提升机组效率^[1]。如 Chupp 等通过对某压气机密封部件的升级改造,使得机组输出功率增加了 0.3%~1%^[2]。

旋转动密封能够有效提升透平机械运行效率,但也可能诱发气流激振问题,影响转子系统稳定性。旋转动密封通常工作在高温、高压、高转速环境下,在转子发生微小振动时,密封处会产生较大的气流激振力。密封气流激振力对转子系统稳定性影响显著,甚至可能诱发转子失稳^[3]。因此,针对目前透平机械日益增长的运行效率以及安全稳定需求,开展先进的动密封技术研究十分必要。

典型的旋转动密封包括迷宫密封、孔型密封、袋型密封等。其中迷宫密封结构简单、制造成本低、安装方便,是目前国内应用最广泛的旋转动密封结构,也是本文实验研究的密封形式^[4]。

针对迷宫密封,国内外已开展大量实验与数值研究,且主要关注其泄漏与转子动力特性^[5-19]。Garnal 等采用实验研究方法,研究了密封齿形、齿厚等几何参数对迷宫密封泄漏特性的影响^[5]。研究结果表明:增大迷宫齿厚能够略微降低泄漏量;斜齿密封相较于垂直齿密封泄漏量更低。在此基础上,Zhang 等进一步实验研究了密封间隙、密封齿倾斜角度等参数对高低齿迷宫密封泄漏特性的影响^[6]。研究结果表明密封间隙、齿数以及齿倾斜角是影响其泄漏特性的关键因素,并给出了各几何参数对密封泄漏量的影响规律。

迷宫密封气流激振问题是引起透平机械不能稳定、满负荷运行的一个重要因素^[8]。因此,大量学者针对迷宫密封开展了转子动力学研究,试图明确气流激振失稳机制。Alford 研究发现,当转子转速与密封流道内当地声速相等时,会发生自激振动现象,可能导致阻尼较小的转子系统失稳^[9-10]。Benckert 和 Wachter 采用腔室动态压力响应法,实验研究了运行工况参数以及几何结构对迷宫密封转子动力特性的影响,研究发现密封内流体周向旋流是影响其转子动力特性的重要因素^[11]。由于转子表面的粘

性摩擦力作用以及进口预旋影响,动密封间隙以及腔室内通常存在强烈的周向旋流。强烈的周向旋流会产生大的交叉刚度,不利于转子系统稳定。迷宫密封由于密封齿为周向环形结构,对周向旋流抑制作用有限,因此,在高转速以及高进口预旋工况下更易发生转子系统失稳。Childs 等实验测试了一个收敛型迷宫密封的转子动力特性,结果发现,在进口有预旋条件下,该密封发生了失稳问题^[12]。总体来说,迷宫密封由于具有结构简单、制造成本低等优点,仍是目前应用最广泛的密封形式,但其在高转速以及高进口预旋工况下(如离心压气机/向心透平凸肩密封、轴流透平叶顶密封等进口预旋比可达 1.0 以上^[3-4])易发生转子系统失稳。因此,针对迷宫密封,需要进一步开展实验与数值研究,明确其气流激振失稳机制,为其工业应用以及研发设计提供可靠数据支撑。

动密封性能研究方法主要包括 Bulk Flow 理论研究方法、CFD 数值研究方法以及实验研究方法。Bulk Flow 理论研究方法具有计算速度快的优点,但其计算精度欠佳,因此难以应用于动密封精细化设计与性能分析^[19]。CFD 数值研究方法^[20]能够提供精细化的内部流场、压力场等信息,且计算精度以及计算效率随着计算机技术的发展逐步提升但仍然需要更多的实验研究结果为其提供可靠性支撑。因此,实验研究仍然是目前动密封性能研究最可靠的方法。

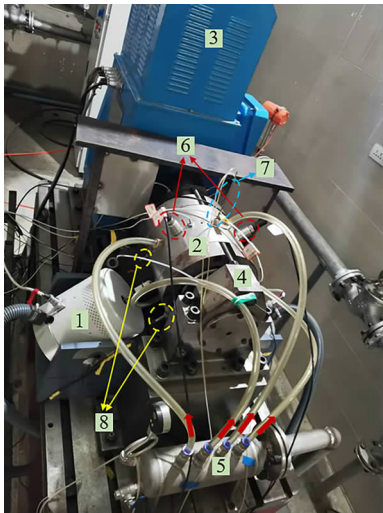
总体上看,国外针对动密封的研发受到国家相关部门的高度重视和资助,充分利用企业先进的制造技术和工程经验,结合高校深厚的理论基础和创新能力,搭建了一系列动密封泄漏、振动、传热和磨损实验台^[21-23],积累了大量的实验数据库,并已形成系列有效的动密封分析方法、选型和设计准则,能够保证现代叶轮机在全工况运行的稳定性、可靠性和经济性设计要求。相比国外完善的动密封研发体系,国内对动密封的研究缺少总体规划和长期投入,相关研究分散、未形成完善体系;亟待加强相关高水平实验台和先进测试技术的开发,开展一系列的实验测试,获得相关系统的实验数据,结合数值仿真方

法,形成可靠的设计准则和经验关联式,应用于我国透平机械动密封系统的研发中。

针对迷宫密封转子动力特性实验研究问题,本文利用西安交通大学的动密封转子动力特性实验台^[24],实验研究了高进口预旋条件下(预旋比 $\mu_0>0.8$),压比(进口总压/出口静压)以及转速对迷宫密封转子动力特性影响,实验测量了 2 种压比($\pi=3.0,4.0$),3 种转速($n=3\,000,6\,000,12\,000\text{ r/min}$)下迷宫密封频率相关的转子动力特性系数,分析了高进口预旋条件下,压比、转速对迷宫密封转子动力特性系数的影响规律,旨在为迷宫密封研发设计以及工业应用提供可靠的实验数据支撑。

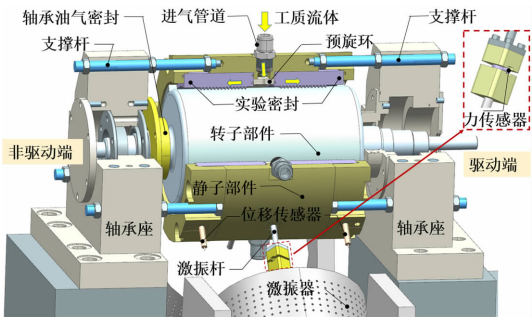
1 动密封转子动力特性实验台

图 1 给出了西安交通大学的动密封转子动力特性实验台详细结构。实验台转子由变频电机驱动,可快速调节转速,最高转速可达 15 000 r/min。实验静子件通过支撑杆与两侧轴承座连接,悬套在转子外部,密封间隙为 0.3 mm。激振器通过激振杆刚性连接在静子件上,由激振控制仪控制,用以对静子件施加激励信号。实验测试时,激振控制仪发出力谐波激励信号,激振器接收到力谐波激励信号,通过激振杆激振密封静子件。激振杆上安装有力传感器,用以监测密封静子件实际受力,并且同步反馈到激振控制仪中,激振控制仪根据反馈信号,调整输出激励信号,最终实现稳定的目标力谐波激励信号。激励信号频率范围是 0~500 Hz,振幅范围是 0~

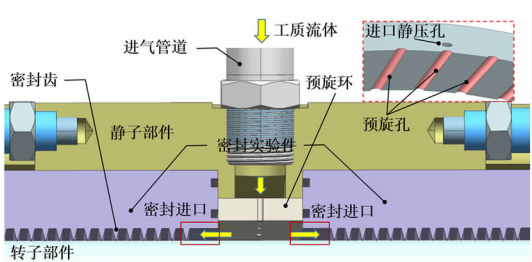


1—激振器;2—静子件;3—电机;4—轴承座;5—进气流分管;
6—加速度传感器;7—压力探针;8—位移传感器。
图 1 动密封转子动力特性实验台
Fig. 1 Rotordynamic characteristic test rig for rotating seal

1 000 N,可为单频信号或多频叠加信号。
实验测量段内部结构如图 2 所示。静子件轴向中间位置均匀布置有 4 个进气口,保证进气周向均匀。进气经预旋环流入预旋腔,产生较大的周向速度,并受压差驱动向两侧测量密封段流动,密封出口为大气环境。预旋腔中布置有毕托管以及温度传感器,用以测量密封进口总静压力、旋流速度以及进气温度。



(a) 实验测量段结构模型

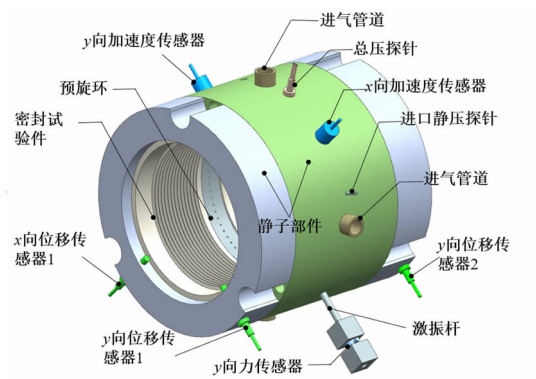


(b) 实验台进气口详细结构模型

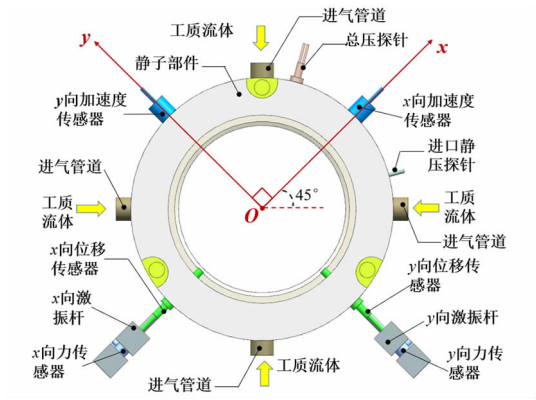
图 2 实验台测量段内部结构模型图
Fig. 2 Geometric model of test measuring section

除激振器外,静子件外部还布置有加速度传感器、位移传感器等测量仪器。图 3 给出了实验台密封静子件上激振器以及各测量仪器安装位置。两个激振器互相垂直布置,与水平方向夹角为 45°(定义为 x,y 方向),通过激振杆刚性连接到密封静子件上,施加激励信号。激振杆上安装有力传感器,用以测量静子件所受 x,y 方向上的激振力。在静子件上布置有 4 个电涡流位移传感器,其中两个布置在 y 方向上,且分别位于静子件轴向两端,均测量静子件 y 方向的涡动位移,通过比较两个 y 方向位移传感器的信号是否一致,可检测静子件是否在 y 方向上发生扭振。另外两个电涡流传感器布置在 x 方向上,且分别位于静子件轴向两端,均测量静子件 x 方向的涡动位移,通过比较两个 x 方向位移传感器的信号是否一致,可检测静子件是否在 x 方向上发生扭振。加速度传感器共有两个,布置在静子件轴向中间位置,且分别为位于 x,y 方向上,分别测量

静子件在 x 、 y 方向上的加速度。



(a) 静子件整体结构

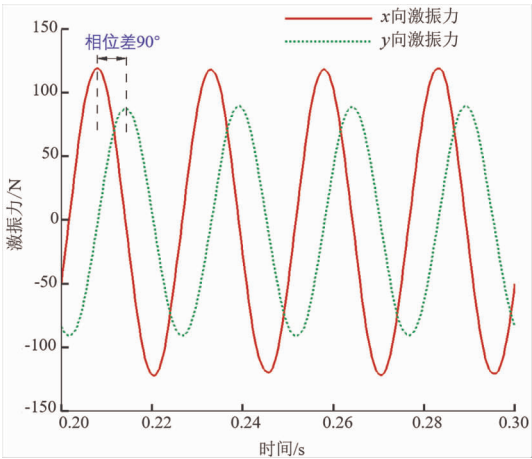


(b) 静子件侧视图

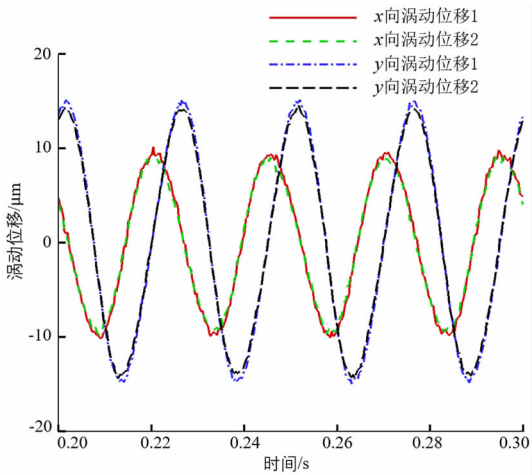
图 3 密封静子件上测量仪器安装位置
Fig. 3 Measuring instruments on the seal stator

图 4 给出了实验测试时采集到的力、位移以及加速度信号示例。如图 4(a) 所示, 激振器通过激振杆对静子件施加 x 、 y 两个方向的力谐波激励 (4 Hz), 其中 y 方向激振力信号落后 x 方向激振力信号 90° 相位。图 4(b) 给出了静子件的响应位移曲线, 其中 x 方向的两个位移传感器、 y 方向的两个位移传感器测量结果基本一致, 表明此时静子件没有发生扭振。响应位移信号频率与激振力信号频率一致, 且 y 方向的位移信号落后 x 方向的位移信号 90° 相位, 这是由于 y 方向激振力落后 x 方向激振力 90° 相位, 此时静子件涡动方向与转子转动方向相同, 为正向涡动。图 4(c) 给出了静子件的响应加速度信号。加速度信号频率与激振力信号的频率一致, 且基本呈正弦规律分布。 y 方向加速度落后 x 方向加速度 90° 相位。

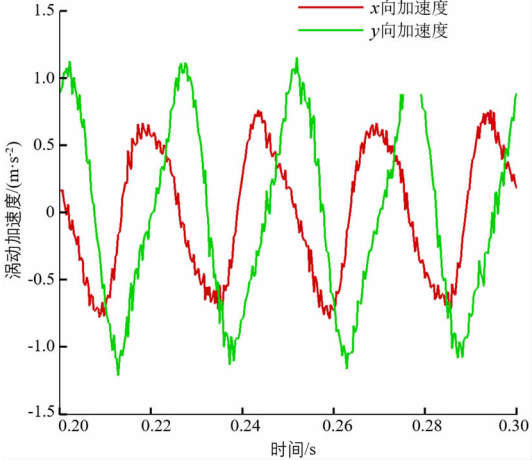
密封系统对转子稳定性的影响常用密封的转子动力特性系数来衡量。实验过程中, 利用静子件上布置的测量仪器可监测得到力信号、位移信号以及加速度信号, 处理可获得频率相关的动密封转子动



(a) 激振力信号



(b) 响应位移信号



(c) 响应加速度信号

图 4 实验测量动态信号示例
Fig. 4 Example of measuring dynamic signals

力特性系数。本文处理分析了直接刚度 K 、交叉刚度 k 、直接阻尼 C 以及有效阻尼 C_{eff} , 用以评估迷宫密封转子稳定性。其中有效阻尼由式 (1) 计算得到,

式中 Ω 为角频率。具体的动密封转子动力特性系数提取方法参考文献^[25]。实验台所用的测量仪器

的测量范围以及精度如表 1 所示。

$$C_{\text{eff}} = C - k/\Omega$$

(1)

表 1 实验测量仪器精度及其测量范围
Table 1 Measuring accuracy and range of the test instrument

测量仪器	灵敏度	仪器精度或非线性误差	量程
热式气体质量流量计		±1.0%	0~0.65 kg/s
PSI 压力扫描阀		±0.1%	0~0.69 MPa
K 型热电偶	3 mV/℃	0.2%	-50~100℃
电涡流位移传感器	246.24 mV/mm	0.1%	0~1 mm
压电式力传感器	1 mV/N	0.5%	0~1 000 N
IEPE 式加速度传感器	100 mV/g	1.0%	0~6 g

2 迷宫密封实验件

图 5 给出了本文实验测量的迷宫密封几何结构。实验迷宫密封为直齿型迷宫密封,密封长度为 102.8 mm,直径为 170 mm,长径比为 0.6。实验密封安装有预旋环,用以产生预旋速度。预选环结构如图 6 所示,布置有沿转子转速方向倾斜的预旋孔,预旋孔倾斜角度为 60°。预旋环安装在实验台进气管与密封进口之间,如图 2 所示。实验过程,进气经预旋环产生周向速度,然后再进入实验密封段。

预旋速度随密封进出口压比的变化曲线。如图 7 所示,随压比增加,密封进口预旋急剧增加。转速为 12 000 r/min 时,压比在 3.0~4.0 范围内,预旋速度约为 86 m/s~96 m/s,预旋比为 0.8~0.9。图 8 给出了相同压比下,预旋速度以及预旋比随转子转速变化曲线。如图 8 所示,随转速增加,密封进口预旋速度略微增加。压比为 4.0 时,转速在 3 000~12 000 r/min 范围内,预旋速度约为 86.2 m/s~96 m/s,预旋比为 0.9~3.23。

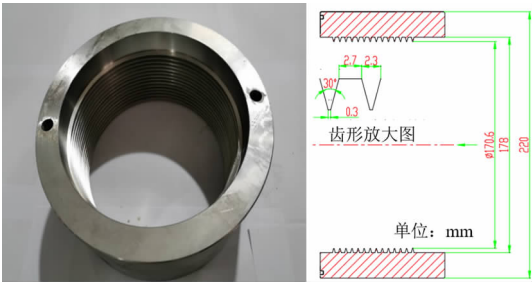


图 5 实验迷宫密封结构

Fig. 5 Geometric construction of the test labyrinth seal

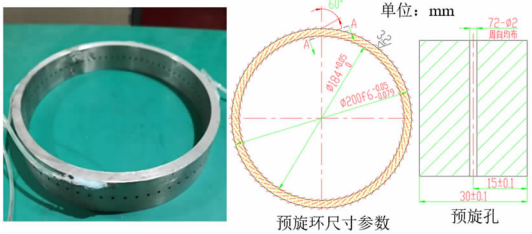


图 6 实验安装的预旋环几何结构

Fig. 6 Geometric construction of the preswirl ring

预旋环依靠沿转子转速方向倾斜的预旋孔,使进气产生预旋速度。在不同压力以及转速下,预旋环产生的预旋速度不同。图 7 给出了相同转速下,

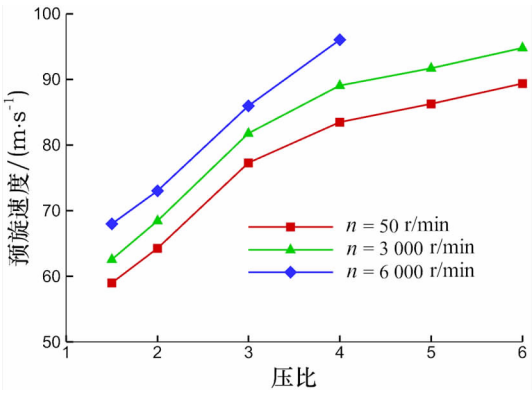


图 7 不同转速下进口预旋速度随压比的变化曲线

Fig. 7 Inlet preswirl velocity versus pressure ratio at different rotational speed

基于动密封转子动力特性实验台,实验研究了高进口预旋条件下,压比以及转速对迷宫密封转子动力特性的影响。实验测量了转速固定时($n=12\,000\text{ r/min}$),不同压比下($\pi=3.0,4.0$)迷宫密封频率相关的转子动力特性系数,以及压比固定时($\pi=4.0$),不同转速下($n=3\,000\sim12\,000\text{ r/min}$)的迷宫密封频率相关的转子动力特性系数。其中,各工况的进口预旋速度如图 7、图 8 和表 2 所示。

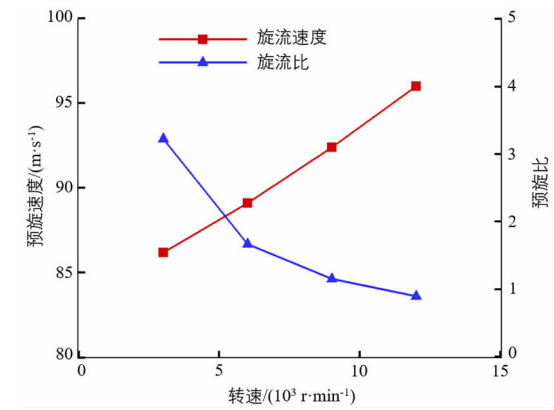


图 8 进口预旋速度和预旋比随转速的变化曲线
Fig. 8 Inlet preswirl velocity and preswirl ratio versus rotational speed

表 2 实验测量工况

Table 2 Labyrinth seal test operating conditions				
$n=12\ 000$	压比	3.0	4.0	
	出口静压/MPa	0.1	0.1	
	r/min			
	预旋速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	86	96	
	预旋比	0.80	0.90	
$\pi=4.0$	转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	3 000	6 000	12 000
	预旋速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	86.2	89.1	96
	预旋比	3.23	1.67	0.90

3 实验结果与讨论

以往文献表明^[26],进口预旋是影响迷宫密封转子动力特性的关键因素之一。此外,透平机械工作时,通常会根据实际载荷需求变工况运行,此时动密封进出口压比以及转子转速会发生显著变化,离心压气机/向心透平凸肩密封、轴流透平叶顶密封等动密封进口预旋比可达 1.0 以上^[3-4]。为保证机组全工况安全稳定运行,研究高进口预旋下,压比以及转速对动密封转子动力特性影响是十分必要的。因此本文实验测量了转速为 12 000 r/min、进口预旋比 $\mu_0>0.8$ 时,2 种压比($\pi=3.0,4.0$)、3 种转速($n=3\ 000,6\ 000,12\ 000$ r/min)下迷宫密封频率相关的转子动力特性系数。表 2 给出了详细的实验测量工况。

3.1 压比对迷宫密封转子动力特性影响

如表 2 所示,对于变压比实验工况,转速恒定为 12 000 r/min,不同压比下密封进口预旋速度不同。随压比增加,密封进口预旋速度显著增加,压比在 3.0~4.0 范围内,预旋速度为 86~96 m/s,预旋比

为 0.8~0.9。

图 9 给出了高进口预旋下,实验迷宫密封泄漏量随压比变化曲线。如图 9 所示,转速不变时,随压比增加,实验迷宫密封泄漏量近似线性增加。压比由 2.0 增加到 5.0 时,泄漏量增加约 242%。

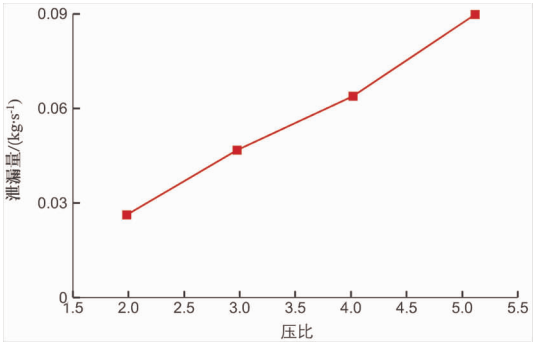


图 9 $n=12\ 000$ r/min 时迷宫密封泄漏量随压比的变化曲线
Fig. 9 Measuring leakage flow rate versus pressure ratio for test labyrinth seal for $n=12\ 000$ r/min

图 10 给出了不同压比下实验迷宫密封转子动力特性系数随频率变化曲线,实验工况如表 2 所示。如图 10 所示,实验迷宫密封转子动力特性系数均具有显著的频率相关性,尤其是直接刚度与有效阻尼系数。在低频时,迷宫密封有效阻尼为幅值较大的负值,随频率增加,有效阻尼急剧增加然后在高频区域趋于恒定。目前,国内学者开展的动密封实验研究主要关注迷宫密封的频率无关转子动力特性系数的测量以及迷宫密封轴承转子系统临界转速和稳定性评估方面。本文的实验研究结果,证明了频率相关的动密封转子动力特性研究的必要性。

以往文献中,Ertas 实验研究了进口无预旋以及低预旋($\mu_0=0,0.45$)条件下,迷宫密封的转子动力特性^[21]。结果表明,无进口预旋条件下,迷宫密封的交叉刚度较小,且有效阻尼始终为正值,表明无进口预旋时迷宫密封使得转子系统更加稳定。较低预旋条件下($\mu_0=0.45$),迷宫密封交叉刚度幅值增加,有效阻尼在低频时为负值,并随着频率增加而急剧增加,最终在高频区转变为正值。对比 Erats 以及本文实验测量结果,发现在不同预旋条件下,迷宫密封转子动力特性存在显著不同。如图 1 所示,高进口预旋条件下($\mu_0>0.8$),实验测量的迷宫密封交叉刚度为较大的正值,且有效阻尼始终为负值。这表明此时迷宫密封已不利于转子系统稳定,可能会诱发转子失稳,特别是对阻尼较小的转子系统。

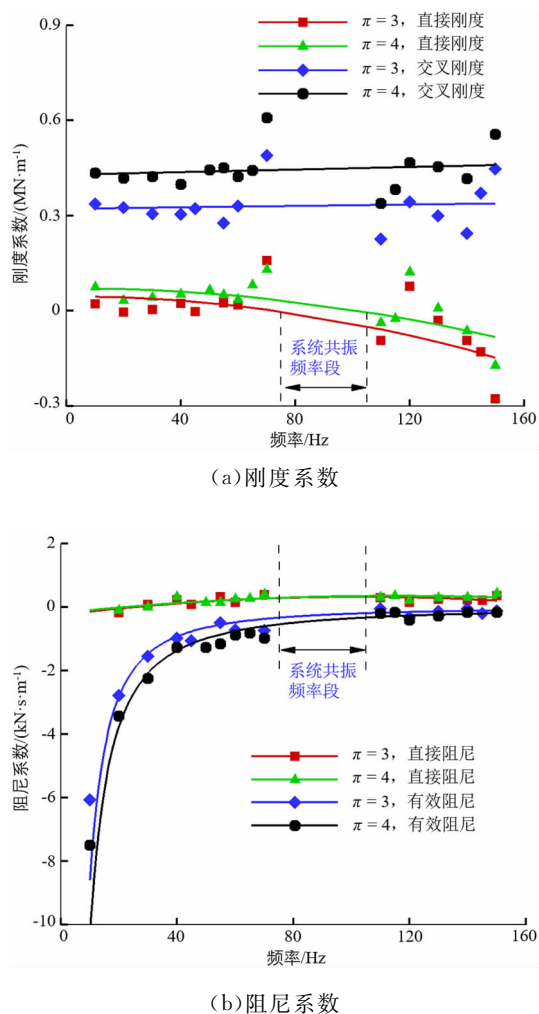


图10 不同压比下迷宫密封转子动力特性系数随频率的变化曲线($n=12\,000\text{ r/min}$)

Fig. 10 Rotordynamic coefficients versus frequency for test labyrinth seal at different pressure ratio

图10(a)给出了高进口预旋条件下,不同压比时迷宫密封直接刚度、交叉刚度随频率变化曲线。如图所示,实验迷宫密封直接刚度在低频时(10~60 Hz)为正值,且整体随着频率增加而逐渐降低,在高频区域(>120 Hz),直接刚度转变为负值。随压比增加,实验密封直接刚度幅值显著增加,尤其是在低频区域。当压比由3.0增加到4.0时,直接刚度幅值增加100%以上。压比增加时,密封腔内气体压力和密度增大,导致密封腔动态压力和气流激振力增大,因此具有较大的直接刚度幅值。不同压比下,迷宫密封交叉刚度始终为正值。随频率增加,迷宫密封交叉刚度略微增加。随压比增加,迷宫密封交叉刚度显著增加,压比由3.0增加到4.0,交叉刚度增加了约50%。如图7所示,随压比增加,密封进口旋流速度显著增加,这是导致图10(a)中交叉刚

度随压比增加而显著增加的原因。

图10(b)给出了不同压比下,迷宫密封直接阻尼、有效阻尼随频率变化曲线。如图10(b)所示,压比由3.0增加到4.0时,随频率增加,迷宫密封直接阻尼在低频区略微增加,并在高频区(>120 Hz)基本保持不变。高进口预旋条件下,压比对迷宫密封直接阻尼影响微弱,平均变化幅值小于<10%。高进口预旋条件下,迷宫密封有效阻尼始终为负值,并具有很强的频率相关性。在低频时,有效阻尼为幅值较大的负值,随频率增加,有效阻尼急剧增加并在高频时趋于恒定。随压比增加,迷宫密封有效阻尼显著降低,特别是在低频区域(10~50 Hz)。这意味着随机组负荷的增大,迷宫密封转子稳定性急剧降低,极易诱发转子失稳,尤其是对整体阻尼较小的转子系统。由公式(1)可知,有效阻尼同时耦合了直接阻尼和交叉刚度的影响。随压比增加,迷宫密封交叉刚度急剧增加,导致了有效阻尼显著降低。在高频区域,交叉刚度对有效阻尼贡献较小,直接阻尼对有效阻尼影响占主要部分,而不同压比下,迷宫密封直接阻尼基本相同,导致高频区域其有效阻尼随压比变化较小。

以往针对无进口预旋下迷宫密封动力特性的数值研究表明^[27]:无进口预旋下,压比增加会导致迷宫密封交叉刚度幅值增大,进而导致有效阻尼降低。这与本文高进口预旋下的实验研究结论相同。

综上所述,高进口预旋下,压比对迷宫密封转子动力影响显著。迷宫密封直接刚度随频率增加而逐渐降低,且幅值随压比增大而增大。随压比增加,迷宫密封交叉刚度显著增大,进而导致有效阻尼明显降低。

3.2 转速对迷宫密封转子动力特性影响

如表2所示,对于变转速实验工况,压比恒定为4.0,此时密封进口预旋速度随转速增加略微增加。压比为4.0时,转速在3 000~12 000 r/min范围内,预旋速度为86.2 m/s~96 m/s,预旋比为0.9~3.23。

图11给出了不同压比下,实验迷宫密封泄漏量随转速变化曲线。如图所示,压比在3.0~5.0范围内,转速由50 r/min增加到6 000 r/min,泄漏量基本保持不变,变化幅度小于3%。

图12给出了不同转速下,迷宫密封转子动力特性随频率变化曲线。不同转速下,迷宫密封的转子动力特性系数均表现出较强的频率相关性,特别是直接刚度和有效阻尼。

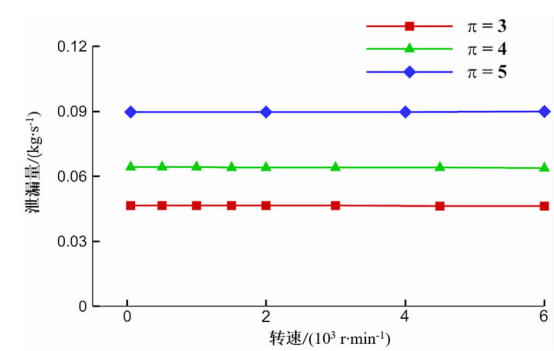


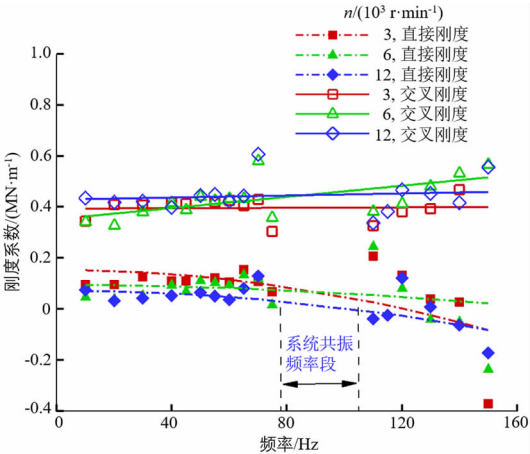
图 11 不同压比下迷宫密封泄漏量随转速的变化曲线
Fig. 11 Leakage flow rate versus rotational speed for test labyrinth seal at different pressure ratio

图 12(a)给出了不同转速下,实验迷宫密封刚度系数随频率变化曲线。如图所示,迷宫密封直接刚度在低频时(10~60 Hz)为正值,且整体幅值随着频率增加而逐渐降低,在高频区域(>120 Hz),直接刚度逐渐降低为负值。高进口预旋条件下,转速增加,直接刚度基本保持不变,转速由 3 000 r/min 增加到 12 000 r/min,直接刚度变化幅度小于 10%。不同转速下,迷宫密封交叉刚度始终为幅值较大的正值,且随频率增大,交叉刚度略微增大。转速由 3 000 r/min 增加到 6 000 r/min,交叉刚度基本保持不变。转速由 6 000 r/min 增加到 12 000 r/min,交叉刚度略微增加(约 15%)。如表 2 所示,转速由 6 000 r/min 增加到 12 000 r/min,密封进口旋流速度略微增加,由 89 m/s 增加到 96 m/s,这是导致其交叉刚度略微增加的原因。

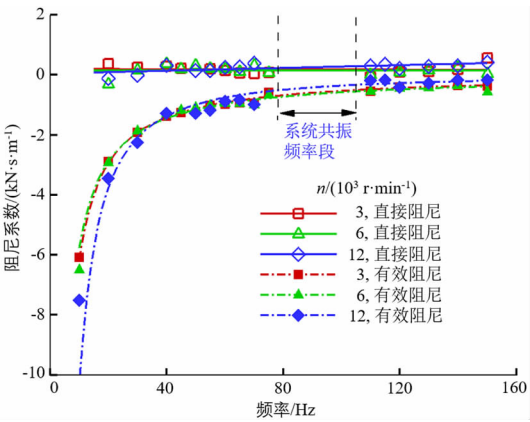
图 12(b)给出了不同转速下,迷宫密封直接阻尼、有效阻尼随频率变化曲线。如图 12(b)所示,转速在 3 000~12 000 r/min 间变化时,其对迷宫密封直接阻尼影响微弱,可忽略不计。较高频范围内(>70 Hz),迷宫密封直接阻尼表现出频率无关性,各转速下均为幅值较小的正值。不同转速下,迷宫密封有效阻尼均为负值,且具有较强的频率相关性。有效阻尼随频率的增大而急剧增大,并在高频时逐渐趋于恒定的负值。高进口预旋条件下,随转速增加,迷宫密封有效阻尼略微减小,尤其是在低频区域(10~50 Hz)。这是由于高进口预选条件下,转速增加,密封进口预旋速度略微增加,交叉刚度也略微增加,导致有效阻尼略微减小。

李志刚等 2016 年采用非定常数值方法研究了无进口预旋条件下转速对迷宫密封转子动力特性的影响^[27],研究表明:无进口预旋时,转速增加导致迷宫密封交叉刚度显著增加,进而导致有效阻尼显著

减小。本文实验研究结果表明:高进口预旋下($\mu_0 > 0.8$),转速对迷宫密封交叉刚度以及有效阻尼影响较小。对比文献[27]与本文的研究结果,说明了不同预旋条件下,转速对迷宫密封转子动力特性影响程度不同。本文的实验研究结果,进一步完善了高进口预旋下转速对迷宫密封转子动力特性影响规律。



(a)刚度系数



(b)阻尼系数

图 12 不同转速下迷宫密封转子动力特性系数随频率变化曲线($\pi=4.0$)
Fig. 12 Rotordynamic coefficients versus frequency for test labyrinth seal at different rotational speed ($\pi=4.0$)

4 结 论

针对迷宫密封转子动力特性实验研究问题,本文利用搭建的动密封转子动力特性实验台,实验研究了高进口预旋下(预旋比 $\mu_0 > 0.8$),压比以及转速对迷宫密封转子动力特性影响,实验测量了 2 种压比($\pi=3.0, 4.0$)、3 种转速($n=3\ 000, 6\ 000, 12\ 000$ r/min)下迷宫密封频率相关的转子动力特性系数,得到以下结论:

(1)高进口预旋条件下(预旋比 $\mu_0 > 0.8$),随压比增加,实验迷宫密封稳态泄漏量近似线性增加。相同压比下,随转速增加,实验迷宫密封稳态泄漏量基本保持不变。

(2)高进口预旋条件下,压比对迷宫密封转子动力特性影响显著。迷宫密封直接刚度随频率增加而逐渐降低,且幅值随压比增大而增大。随压比增加,迷宫密封交叉刚度显著增大,进而导致有效阻尼明显降低,这是由于压比增加,密封进口预旋速度增大导致。高进口预旋条件下,压比对迷宫密封转子动力特性系数影响规律与以往文献中进口无预旋条件下的压比影响规律相同。

(3)高进口预旋条件下,转速对迷宫密封转子动力特性影响较小。迷宫密封交叉刚度始终为正值,且幅值随转速增加略微增大。直接刚度、直接阻尼对转速变化不敏感,基本保持不变。有效阻尼在低频区域随转速增加而略微降低。高进口预旋条件下,转速对迷宫密封转子动力特性系数影响规律与以往文献中进口无预旋条件下的转速影响规律不同。

(4)高进口预旋条件下,迷宫密封交叉刚度始终为较大的正值,且有效阻尼始终为负值。此时迷宫密封已不利于转子系统稳定,可能会诱发转子失稳,特别是对系统阻尼较小的转子系统。

参考文献:

- [1] 李军, 晏鑫, 李志刚. 热力透平密封技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2016: 93-94.
- [2] CHUPP R, GHASRIPOOR F, MOORE G. Applying abradable seals to industrial gas turbines [C] // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2002: AIAA 2002-3795.
- [3] VANCE J M, MURPHY B, ZEIDAN F. Machinery vibration and rotordynamics [M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010.
- [4] 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.
- [5] GAMAL A J M, VANCE J M. Labyrinth seal leakage tests: tooth profile, tooth thickness, and eccentricity effects [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1): 012510.
- [6] ZHANG Li, ZHU Hui ren, LIU Cun liang, et al. Experimental and numerical investigation on leakage characteristic of stepped labyrinth seal [C] // ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2016: V05AT15A016.
- [7] 曹丽华, 刘雅超, 张玉峰, 等. 凹槽迷宫密封封严特性的数值研究 [J]. 润滑与密封, 2014, 39(9): 8-13, 18.
CAO Lihua, LIU Yachao, ZHANG Yufeng, et al. Numerical investigation of leakage effects of rub-grooves on labyrinth seal [J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(9): 8-13, 18.
- [8] ARMSTRONG J, PERRICONE F. Turbine instability solution-honeycomb seals [EB/OL]. [2021-10-20]. <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/163441>.
- [9] ALFORD J S. Protection of labyrinth seals from flexural vibration [J]. Journal of Engineering for Power, 1964, 86(2): 141-147.
- [10] ALFORD J S. Protecting turbomachinery from self-excited rotor whirl [J]. Journal of Engineering for Power, 1965, 87(4): 333-343.
- [11] BENCKERT H, WACHTER J. Flow induced spring coefficients of labyrinth seals for applications in turbomachinery: 19800021216 [R]. Ohio, USA: NASA, 1980: 189-212.
- [12] NELSON C C, CHILDS D W, NICKS C, et al. Theory versus experiment for the rotordynamic coefficients of annular gas seals; part 2 constant-clearance and convergent-tapered geometry [J]. Journal of Tribology, 1986, 108(3): 433-437.
- [13] 方志, 李志刚, 李军. 孔型几何参数对孔型密封泄漏和鼓风加热特性影响研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(1): 135-141, 174.
FANG Zhi, LI Zhigang, LI Jun. Investigation on the effects of hole geometrical parameters on leakage and windage heating characteristics of hole-pattern seals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(1): 135-141, 174.
- [14] 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.
- [15] 李志刚, 郎骥, 李军, 等. 迷宫密封泄漏特性的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 48-52, 64.
LI Zhigang, LANG Ji, LI Jun, et al. Experiment on

- leakage flow characteristics of labyrinth seal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 48-52, 64.
- [16] 王炜哲, 刘应征, 叶春, 等. 迷宫密封-转子系统动力学特性的试验测量和数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 22-27.
- WANG Weizhe, LIU Yingzheng, YE Chun, et al. Experimental measurement and numerical simulation of dynamics of labyrinth seal-rotor combination [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 22-27.
- [17] 方志, 李志刚, 李军. 异形孔腔结构对液体孔型密封泄漏特性及转子耗电的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(1): 143-149.
- FANG Zhi, LI Zhigang, LI Jun. Investigations on the effect of odd-shaped hole geometries on the leakage performance of liquid hole-pattern seals and rotor power loss [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(1): 143-149.
- [18] 李志刚, 方志, 李军. 液相和多相环境下环形动密封泄漏流动和转子动力特性的研究进展 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(9): 1-22.
- LI Zhigang, FANG Zhi, LI Jun. Review of the leakage flow and rotordynamic characteristics of the annular dynamic seals in liquid and multiple phases conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(9): 1-22.
- [19] 晏鑫, 李军, 丰镇平. Bulk Flow 方法分析孔型密封转子动力特性的有效性 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 24-28.
- YAN Xin, LI Jun, FENG Zhenping. Validation of two-control-volume Bulk Flow method for rotordynamic characteristics of hole-pattern seals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(1): 24-28.
- [20] MIGLIORINI P J, UNTARIOU A, WOOD H G. A numerical study on the influence of hole aspect ratio on the performance characteristics of a hole-pattern seal [C] // ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2014: V07BT32A018.
- [21] 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]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(4): 042503.
- [22] VANNINI G, CIONCOLINI S, DEL VESCOVO G, et al. Labyrinth seal and pocket damper seal high pressure rotordynamic test data [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(2): 022501.
- [23] ERTAS B H. Rotordynamic force coefficients of pocket damper seals [D]. College Station, TX, USA: Texas A&M University, 2005.
- [24] 薛文松, 方志, 王天昊, 等. 防旋板结构的迷宫密封转子动力特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(3): 105-116.
- XUE Wensong, FANG Zhi, WANG Tianhao, et al. Investigation on the rotordynamic characteristics of labyrinth seal with swirl brakes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(3): 105-116.
- [25] 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.
- [26] NIELSEN K K, CHILDS D W, MYLLERUP C M. Experimental and theoretical comparison of two swirl brake designs [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(2): 353-358.
- [27] LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Labyrinth seal rotordynamic characteristics; part I operational conditions effects [J]. Journal of Propulsion and Power, 2016, 32(5): 1199-1211.

(编辑 荆树蓉 杜秀杰)