

DOI: 10.7652/xjtuxb201403016

表面织构对转子轴承系统稳定性影响的实验研究

王琳, 裴世源, 徐华

(西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究表面织构对高速精密机床支撑滑动轴承系统振动的影响,利用一种在轴颈表面大规模加工表面织构的低成本、高效率的方法,设计并制备了带有表面织构的转子。采用无织构和有织构两种转子,在供水压力分别为 0.16 MPa、0.30 MPa 及工作转速分别为 2 400 r/min、4 200 r/min 和 6 000 r/min 的工况下,采用在主轴上附加不平衡质量的方法施加同频激振力,分别对无织构转子和有织构转子的振动进行测试分析。实验结果表明:在一定供水压力和转速条件下,表面织构抑制转子轴承系统振动的作用变得非常明显,有织构转子较无织构转子的相对振动量下降幅度超过 60%,即使在发生水膜振荡的情况下,表面织构依然可以显著减小转子的振动幅值。因此,合理的表面织构设计,可以有效提高径向滑动轴承支撑的转子系统的稳定性。

关键词: 表面织构;转子轴承系统;振动;稳定性

中图分类号: TH117.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0084-05

Surface Texture Influence on Rotor-Bearing System Stability

WANG Lin, PEI Shiyuan, XU Hua

(Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract: Aiming at engineering application of surface texture in high speed and high precision machine tool bearings, an effective and simple process was conducted to make texture on the journal surface. The surface texture influence on rotor-journal bearing system stability was experimentally investigated. The rotor was excited by the unbalance mass, and the vibration displacements of journals with and without texture were measured and compared under supplied pressures of 0.16 MPa and 0.30 MPa, and at rotating speeds of 2 400 r/min, 4 200 r/min and 6 000 r/min. The experiments reveal that the surface texture slightly affects vibration amplitude in the case of lower supplied pressure and rotating speed, but the surface texture is able to reduce vibration significantly at certain rotating speeds. The supply pressure becomes important for the bearing stability, and the vibration amplitude under higher supplied pressure gets greater than that under lower supplied pressure. However, surface texture restrains rotor-bearing system vibration effectively even if oil whirl arises, and the relative vibration amplitude reduces by 60% in the rotor with surface texture.

Keywords: surface texture; rotor-bearing system; vibration; stability

表面织构是通过一定的加工手段在摩擦副表面制备出具有一定尺寸和排列的凹坑、凹痕或凸包等图案的点阵^[1],它可以改变润滑表面之间的摩擦学性能。Hamilton 等指出,单个凸起的织构,其作用相当于一个小的动压轴承,可以提高承载力^[2]。Et-sion 等在研究活塞/气缸系统时发现,具有织构的表

面相对于光滑表面可以降低约 40% 的摩擦力,而在流体静压密封中具有织构的表面则可以降低 90% 的摩擦力^[3-4]。

表面织构可以改善摩擦学性能的优点得到了广泛重视,许多学者投入其中并在理论和实验研究方面取得了一系列成果。Ronen 等发现,在内燃机活塞系统中的织构可以有效提高两平行平面之间的动压效果^[5]。Wang 等研究了水润滑条件下,不同织构密度的 SiC 陶瓷表面从动压润滑转换到混合润滑的极限载荷,发现具有特定形貌织构的表面较光滑表面的极限转变载荷可以提高 20%^[6]。Etsion 等通过 Disk/Disk 实验发现,相对于光滑表面,具有部分织构的表面其摩擦学性能可以得到极大改善,摩擦系数至少降低 50%^[7]。Dong 等分别从理论和实验两个方面研究了矩形织构对超高分子量聚乙烯髓白的摩擦学性能和温度场分布的影响^[8]。Borghi 等利用 Pin-on-Disk 实验台在干摩擦和低度润滑条件下对织构表面和非织构表面进行了对比实验,发现在低度润滑条件下,织构表面的摩擦系数可以降低 75%,即使在干摩擦条件下,也可以降低 10%^[9]。也有研究表明,在某些条件下织构化表面的减摩效果并不理想,甚至出现增大摩擦系数的情况^[10-11]。

表面织构在轴承方面的应用也受到了关注,Pei 等针对大规模多尺度表面织构的流体润滑问题提出了一种有限细胞算法^[12],通过计算对比,验证了算法的准确性和高效性,显示了该算法对于求解大规模多尺度问题具有良好的快速求解能力。Brizmer 等使用有限差分法求解了全域织构和部分织构表面的 Reynolds 方程,发现全域织构产生的承载力较小,而部分织构由于累计效应则可以产生较大的承载力^[13]。Yu 等使用有限差分法研究了织构面积对径向滑动轴承性能的影响,发现织构可以显著提高轴承的各项性能指标^[14]。张金煜等人在推力滑动轴承表面设计了轴对称分布的扇形直槽织构^[15],考察了轴承的内外径、转速、润滑油黏度、轴承间隙以及扇形直槽的参数对承载力的影响,针对不同约束条件及目标,对扇形直槽进行了优化设计。林起崑等采用速度滑移边界条件施加在具有微织构的轴承表面^[16],分析了织构位置分布、面积大小等参数对轴承摩擦学性能的影响规律。

虽然以上学者的研究都取得了有意义的成果,但是目前关于表面织构摩擦学特性的实验研究多局限于使用销(球)盘实验机和活塞气缸实验机等^[7,9]进行实验,线速度较低,润滑状态也多集中在边界润

滑和混合润滑。现有理论分析多集中于对织构的动压效应研究,而关于织构对径向滑动轴承-转子系统稳定性影响的实验研究在国内外则尚属空白。另一方面,为了从实验方面探索表面织构对径向转子轴承系统稳定性的影响,需要将织构加工于轴承或轴颈表面,这属于曲面加工领域,轴承的润滑面积大,需要加工的织构数目庞大,同时一套轴承(或转子)只能加工一种形貌的织构,导致不仅加工难度大,而且成本很高。

本文从织构加工的角度,提出了一种可用于径向轴承实验研究的低成本、高效率、可替换的轴颈表面织构制备方法;在不同转速和供水压力下,分别使用无织构转子和有织构转子进行了一系列实验,通过对比实验结果研究了表面织构对径向转子轴承系统稳定性的影响。

1 实验台

1.1 织构制备

本文设计的织构试样是由一系列分别在水平和竖直方向上均匀排列的圆形微织构组成,如图 1 所示。表面织构的排布通过 Protel 软件设计并设置好加工路径,然后使用电路板雕刻机在铜箔胶带表面打孔,形成圆形的织构,最后贴于轴颈表面。织构圆坑深度为 55 μm ,微织构直径 $d=1\text{ mm}$,水平方向的间距 a 和竖直方向的间距 b 均为 3.963 mm,面积率为 5%, B 和 L 分别为织构试样的轴向宽度和周向长度。制备完成的带有织构的轴颈如图 2 所示。

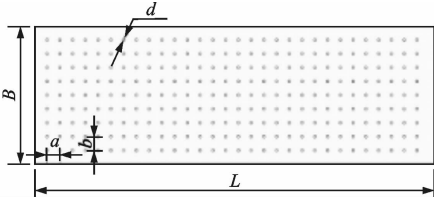


图 1 本文设计的织构几何参数示意图

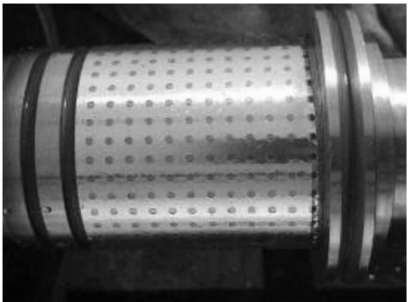


图 2 本文制备的轴颈织构实物图

1.2 实验台结构

图3为水润滑径向转子轴承系统实验台的结构示意图。实验台主要由转子轴承系统、供水系统、驱动电机系统和数据采集系统等组成。

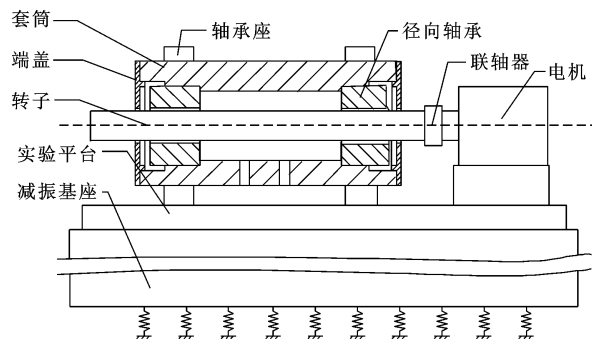


图3 实验台结构示意图

实验台转子直径为50 mm,由2个相同的水润滑径向滑动轴承支撑。径向滑动轴承的内径为50.213 mm,其结构如图4所示。轴承安装在套筒内部并通过轴承座固定在减振基座上,轴承以水作为润滑介质,高压水进入实验台后分为两路分别进入前后轴承。实验台使用气浮轴承支撑的驱动电机,电机与实验主轴之间采用柔性联轴器。转子后端通过柔性联轴器与气浮直流驱动电机的输出端相连,通过调节变频器来控制电机转速。安装在夹具上的2个电容式位移传感器用于测量转子自由端水平和竖直方向上的振动位移。

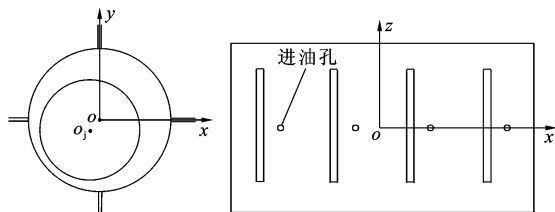


图4 径向滑动轴承结构示意图

2 实验步骤与数据处理

使用无织构和有织构转子,分别在2种供水压力 p (0.16和0.30 MPa)及3种工作转速 v (2 400、4 200和6 000 r/min)下分别进行实验。实验中采用在主轴上附加不平衡质量的方法进行同频加载。实验中所选取的不平衡质量大小为2.01 g,固定位置的半径为25 mm。当转速 v 分别为2 400、4 200和6 000 r/min时,求得施加于轴端的偏心力分别为3.18、9.73和19.86 N。

先对转子进行无织构实验:将表面没有加工圆形微织构的铜箔胶带贴在转子轴颈位置处,连接转

子和电机、固定位移传感器并打开数据采集系统,把不平衡质量块附加于转子自由端,在指定供水压力和转速下进行一系列实验并采集转子的振动位移信号。然后,将无织构的铜箔胶带替换为有织构的,按照前面的操作顺序,对转子进行有织构实验。

因实验环境中电力设备的存在,位移传感器采集到的转子振动信号不可避免地会受到电磁干扰,因此在对实验结果进行分析之前,必须对振动位移信号进行消噪处理。

数据采集系统得到的振动位移信号为

$$x(n\Delta t) = A_0 + \sum_{i=1}^n [A_i \sin(\omega_i n \Delta t + \phi_i)] \quad (1)$$

$$y(n\Delta t) = B_0 + \sum_{i=1}^n [B_i \sin(\omega_i n \Delta t + \phi_i)] \quad (2)$$

式中: x 、 y 分别表示水平和竖直方向上的振动信号; A_0 、 B_0 分别表示水平和竖直方向上的位移初始值; A_i 、 B_i 为振动幅值; n 为采样数; Δt 为采样时间间隔; ω_i 为转动频率; ϕ_i 为相位角。

为了消除位移信号中的趋势项,采用快速傅里叶变换(FFT)进行时频转换,由于转子的振动往往与工作频率相关,取半频、同频和倍频信号对时域信号进行重构,重构后的信号如下

$$x(n\Delta t) = A_1 \sin\left(\frac{\omega}{2} n \Delta t + \phi_1\right) + A_2 \sin(\omega n \Delta t + \phi_2) + A_3 \sin(2\omega n \Delta t + \phi_3) \quad (3)$$

$$y(n\Delta t) = B_1 \sin\left(\frac{\omega}{2} n \Delta t + \phi_1\right) + B_2 \sin(\omega n \Delta t + \phi_2) + B_3 \sin(2\omega n \Delta t + \phi_3) \quad (4)$$

3 实验结果与分析

当供水压力为0.16 MPa时,在3种转速(2 400、4 200和6 000 r/min)条件下,无织构转子和有织构转子的实验结果对比如图5~图7所示。

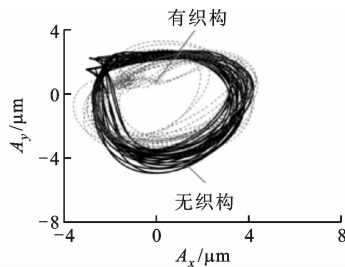


图5 $v=2\,400$ r/min、 $p=0.16$ MPa时无织构和有织构转子的轴心轨迹对比图

从图5中可以看出,有织构转子的轴心轨迹只比无织构的略小,说明较低转速下织构对转子轴承系统振动的影响有限。这是因为测量的振动位移主

要由联轴器所传递的振动和不平衡质量块所引起的强迫振动组成,在低转速下,联轴器所传递的振动占主导地位,所以织构对转子振动影响的效果不明显。

如图6所示,在转速为4 200 r/min、供水压力为0.16 MPa的工况下,无织构转子在 x 、 y 方向的振动幅值 A_x 、 A_y 分别约为7 μm 左右,而有织构转子在 x 、 y 方向振动幅值不到2.5 μm ,相对振动量下降了约64%。这是因为随着转速的升高,联轴器传递的振动所占比例减小,不平衡质量引发的振动占主导。实验结果表明:表面织构对转子轴承系统具有稳定性提高和抑制振动的作用;虽然全织构表面降低了轴承的承载力^[16-17],但也相应增加了偏心率和等效刚度,因此转子的振动幅值显著减小。

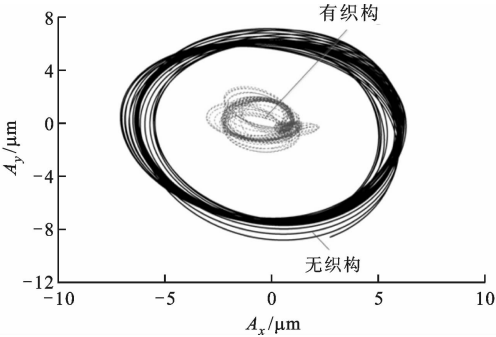


图6 $v=4\,200\text{ r/min}$ 、 $p=0.16\text{ MPa}$ 时无织构和有织构转子的轴心轨迹对比图

从图7中可以看到,在转速为6 000 r/min、供水压力为0.16 MPa的工况下,无织构转子在 x 、 y 方向的振动幅值分别约为8 μm 左右,而有织构转子在 x 、 y 方向振动幅值不超过3 μm ,相对振动量下降了约63%。此时,无织构转子的轴心轨迹已经不是一个椭圆,而变成了大小2个圈叠连的形状,这说明无织构转子已经出现了半频涡动,而有织构转子的轴心轨迹依然为较规则的椭圆,并没有明显的水膜涡动现象出现,说明在表面织构的作用下,转子轴承系统的稳定性提高了。

图8~图10为供水压力在0.3 MPa时,转速分别为2 400、4 200和6 000 r/min工况下的无织构和有织构转子的轴心轨迹对比图。从图中可以看出,3个工况下有织构转子的振动幅值均明显比无织构转子的小,体现了表面织构在抑制振动、提高转子稳定性方面的优势。

对比图5和图8可以看出,在低供水压力和低转速条件下,织构对转子轴承系统的振幅影响不大。图7与图10相比发现,增加供水压力后,无织构转子没有发生半频涡动,这说明供水压力是影响实验

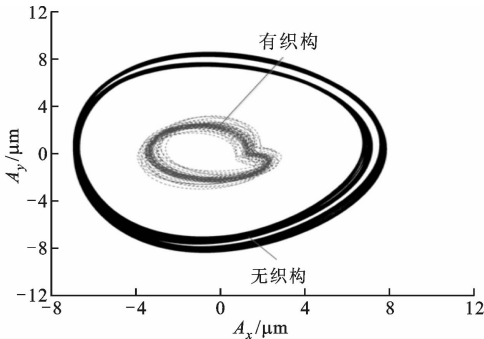


图7 $v=6\,000\text{ r/min}$ 、 $p=0.16\text{ MPa}$ 时无织构和有织构转子的轴心轨迹对比图

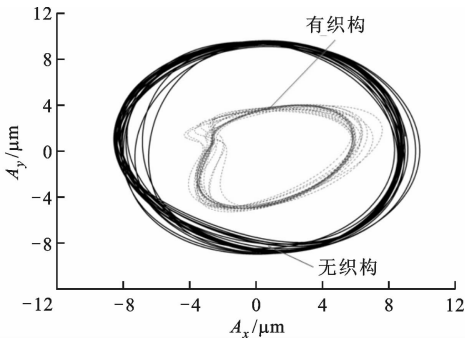


图8 $v=2\,400\text{ r/min}$ 、 $p=0.3\text{ MPa}$ 时无织构和有织构转子的轴心轨迹对比图

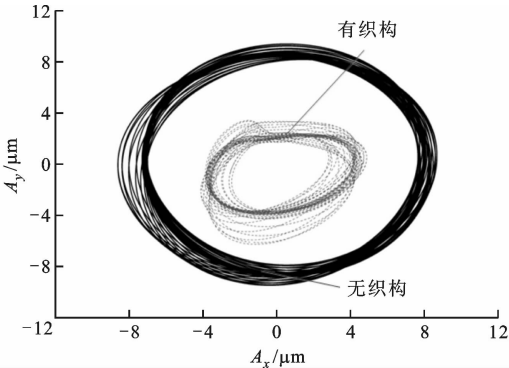


图9 $v=4\,200\text{ r/min}$ 、 $p=0.3\text{ MPa}$ 时无织构和有织构转子的轴心轨迹对比图

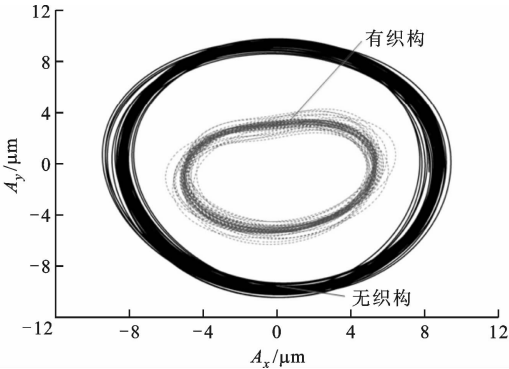


图10 $v=6\,000\text{ r/min}$ 、 $p=0.3\text{ MPa}$ 时无织构和有织构转子的轴心轨迹对比图

转子轴承系统稳定性的重要因素。

在相同转速、未发生水膜振荡的条件下,从不同供水压力下的结果图对比中可以发现,高供水压力下转子的振幅更大。本文实验所用轴承为4个方向进水但没有静压腔的径向轴承,由于水的黏度很低,动压效果相对较小,因此现有工况下静压起主导作用。由于实验用的径向轴承没有静压腔,水膜压力分布在进水孔附近呈尖峰状分布,梯度变化很大,轴承的稳定性不好,转子容易发生扰动,因此供水压力越大,压力分布的尖峰状就越明显,压力梯度变化也越大,轴承的稳定性也随之降低,导致转子振动幅度增大。

4 结 论

本文通过将加工有圆形微织构的铜箔胶带贴于轴颈表面的方法,得到了带有表面织构的转子,从实验方面研究了表面织构对转子轴承系统稳定性的影响,得到的结论如下。

(1)在低供水压力、低转速条件下,表面织构对转子轴承系统的振幅影响不大;随着转速的增加,织构对转子轴承系统的振幅影响逐渐增大,表面织构可以显著提高转子轴承系统的稳定性,可降低转子的振幅超过60%,具有明显的抑振作用。

(2)供水压力是影响转子轴承系统稳定性的重要因素。对于本文实验中使用的径向轴承而言,相同的转速条件,高供水压力下转子的振幅比低供水压力下转子的振幅更大。

(3)在发生水膜振荡的情况下,表面织构同样可以显著减小转子轴承系统的振动幅值。由于水膜振荡现象具有突发性,而表面织构可以显著减小水膜振荡情况下的振动幅值,因此表面织构在径向滑动转子轴承系统中具有重要的应用前景。

参考文献:

- [1] 历建全,朱华. 表面织构及其对摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2009, 34(2): 94-97.
LI Jianquan, ZHU Hua. Surface texture and its influence on tribological properties [J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(2): 94-97.
- [2] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A theory of lubrication by microirregularities [J]. Journal of Fluids Engineering, 1966, 88(1): 177-185.
- [3] ETSION I, KLIGERMAN Y, HALPERIN G. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces [J]. Tribology Transactions, 1999, 42(3): 511-516.
- [4] ETSION I, BURSTEIN L. A model for mechanical seals with regular microsurface structure [J]. Tribology Transactions, 1996, 39(3): 677-683.
- [5] RONEN A, ETSION I, KLIGERMAN Y. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components [J]. Tribology Transactions, 2001, 44(3): 359-366.
- [6] WANG X L, KATO K, ADACHI K, et al. The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed [J]. Tribology International, 2001, 34(10): 703-711.
- [7] ETSION I, HALPERIN G, BRIZMER V, et al. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings [J]. Tribology Letters, 2004, 17(2): 295-300.
- [8] DONG G N, HUA M, LI J, et al. Temperature field and wear prediction for UHMWPE acetabular cup with assumed rectangular surface texture [J]. Materials & Design, 2007, 28(9): 2402-2416.
- [9] BORGHI A, GUALTIERI E, MARCHETTO D, et al. Tribological effects of surface texturing on nitriding steel for high-performance engine applications [J]. Wear, 2008, 265(7): 1046-1051.
- [10] PETTERSSON U, JACOBSON S. Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors [J]. Tribology International, 2007, 40(2): 355-359.
- [11] 邓海顺,于海武,王晓雷. 轴向柱塞泵配流副低压区织构化试验研究 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(6): 16-19.
DENG Haishun, YU Haiwu, WANG Xiaolei. Study on tribological performance of textured port plates of axial piston pumps [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(6): 16-19.
- [12] PEI S, MA S, XU H, et al. A multiscale method of modeling surface texture in hydrodynamic regime [J]. Tribology International, 2011, 44(12): 1810-1818.
- [13] BRIZMER V, KLIGERMAN Y, ETSION I. A laser surface textured parallel thrust bearing [J]. Tribology Transactions, 2003, 46(3): 397-403.
- [14] YU H W, WANG X L, ZHOU F. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces [J]. Tribology Letters, 2010, 37(2): 123-130.

(下转第114页)