

DOI: 10.3901/JME.2022.20.304

基于视觉位感条纹的转轴裂纹缺陷检测^{*}

徐 帖¹ 钟剑锋¹ 钟舜聪¹ 张秋坤¹ 彭志科² 张 焱³ 罗曼婷^{1,4}

(1. 福州大学机械工程及自动化学院 福州 350116;

2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240;

3. 浙江创立电子股份有限公司 温州 325025;

4. 莆田学院现代精密测量与激光无损检测福建省高校重点实验室 莆田 351100)

摘要: 裂纹缺陷是转轴系统中常见的故障形式, 裂纹的呼吸效应会改变转轴的动态特性, 使转轴的径向振动信号中出现倍频分量。提出一种基于单目视觉位感条纹振动测量原理的转轴裂纹缺陷检测新方法, 可实现转轴振动信号的高效测量和裂纹缺陷的快速检测。分析了含裂纹转轴系统的动力学方程, 并系统描述了单目相机成像条件下采用位感条纹图案实现转轴径向二维振动测量的原理, 建立了成像位感条纹动态编码参数与转轴径向振动位移之间的数学模型。通过与传统基于两路电涡流传感器测量系统的试验对比分析, 验证了本方法测量结果的精确性。分析转轴系统在不同转速下径向振动中的频率分量, 当转速接近 1/2 临界转速时, 2 倍频信号非常明显, 且其幅值接近转频幅值, 可实现对于转轴系统中裂纹缺陷的有效检测。

关键词: 转轴; 裂纹缺陷; 视觉测量; 位感条纹

中图分类号: TH212

Vision-based Displacement-sensitive Fringe Pattern for Identification of Crack in Rotating Shaft

XU Tie¹ ZHONG Jianfeng¹ ZHONG Shuncong¹ ZHANG Qiukun¹ PENG Zhike²
ZHANG Yan³ LUO Manting^{1,4}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

3. Zhejiang Makepower Electronics Company Limited, Wenzhou 325025;

4. Modern Precision Measurement and Laser Nondestructive Testing Key Laboratories of Universities in Fujian Province, Putian University, Putian 351100)

Abstract: Crack defect is a common failure form in rotating shaft. The breathing effect of crack defect will change the dynamic characteristics of rotating shaft and cause multiple frequency components in the radial displacement. A novel identification method using visual displacement-sensitive fringe pattern (DSFP) is proposed to determine the existence of transverse crack in rotating shaft. It can realize the efficient measurement of vibration signal and the rapid detection of the shaft crack defect. The dynamic equation of the cracked shaft and the measurement principle for the shaft radial two dimensional vibration using single camera and one DSFP are illustrated in detail. The mathematical relationship between the dynamic encoding parameters in the imaging DSFP and the real shaft radial displacement is established. The measuring results obtained both from the proposed system and the traditional two eddy current sensors based system verify the measurement accuracy of the proposed system. The multiple frequency components in the radial

^{*} 国家自然科学基金(51905102, 51675103)、中国博士后科学基金(2019M662226)、福建省科技计划(2019I0004)、现代精密测量与激光无损检测福建省高校重点实验室开放基金(2018XKA003)和闽江学院福建省信息处理与智能控制重点实验室开放课题(MJUKF-IPIC202005)资助项目。
20201210 收到初稿, 20211203 收到修改稿

displacement of cracked shaft at different speeds are analyzed. When the rotation speed is close to half of critical rotation speed, the double frequency component is obvious and its amplitude is close to the rotation frequency amplitude, which can realize the effective detection of crack defect in rotating shaft system.

Key words: rotating shaft; crack defect; vision-based measurement; displacement-sensitive fringe pattern

0 前言

转轴是旋转机械中重要的零部件,在长期的运转过程中,由于摩擦、腐蚀和交变应力等多种因素的综合作用,非常容易出现裂纹缺陷^[1]。因此,必须定期检查转轴的运行状态,及时发现转轴中的裂纹缺陷,保证转轴的安全运行。目前针对裂纹缺陷的检测方法大致分为两类:直接检测法和基于振动特性分析的间接检测法。直接检测法主要依靠超声波、红外线、X 光等技术对裂纹进行直接检测^[2]。基于振动特性分析的间接检测法主要通过分析转轴系统在不同转速条件下的振动响应,实现对于裂纹缺陷的检测^[3]。该方法具有检测成本低、无需拆卸转轴、对系统运行影响小等优点,是目前针对转轴裂纹缺陷检测的主要方法。DARPE^[4]通过研究发现裂纹的出现会改变转轴的刚度矩阵,从而影响转子的动力学特性。高建民等^[5]通过对含裂纹转轴系统振动信号的研究,指出裂纹缺陷会导致转轴径向振动信号中出现倍频分量。李亚^[6]分别研究了低转速条件、1/2 临界转速条件以及临界转速条件下含裂纹转轴系统的动态响应,通过监测转轴系统在不同转速下的振动响应,实现对于裂纹缺陷的诊断。向玲等^[7]研究了转轴系统在不同转速条件下轴心轨迹的变化,为裂纹故障进行初步诊断提供了新方法。

在工程应用中,电涡流传感器被广泛用于转轴的振动测量,然而,单个传感器只能测量一维振动,因此在测量中需要在转轴径向安装多个传感器,检测过程较为繁琐。随着视觉测量技术和图像传感技术的发展,基于视觉的振动测量方法以其非接触、无附加质量、测量效率高等优点受到研究者的重视。GU 等^[8]详细介绍了高速视觉检测的优势,突破帧速率的限制,将高速视觉测量应用到振动传感和结构监测等领域。ZHONG 等^[9]基于光学相干振动层析测振技术提出一种位感条纹图像传感器,实现对于梁结构的非接触振动测量,并分析了所提出的位感条纹图案的测量精度。最近,ZHONG 等^[10]采用单目视觉位感条纹图案对悬臂梁结构缺陷进行检测,通过与加速度传感器的对比,便捷地检测出缺陷位置。

本文提出一种基于视觉位感条纹的转轴动态测量方法和裂纹缺陷检测系统,不仅降低了检测设备安装的难度,而且可以同时获得转轴径向两个维度的振动信息,高效地实现转轴的状态监测和裂纹故障诊断。

1 含裂纹转轴单元的动力学方程

假设所研究的转轴系统为线弹性结构,裂纹缺陷为小范围内的屈服裂纹体。采用有限元法构建含裂纹转轴系统的数学模型,将转轴平均划分为有限个单元体,每个单元体含有 2 个节点,每个节点含有 6 个自由度,取其中含有裂纹的转轴单元体,如图 1 所示。设定含裂纹转轴单元受轴向力 P_1 、 P_7 , 剪切力 P_2 、 P_3 、 P_8 、 P_9 , 扭矩 P_4 、 P_{10} , 弯矩 P_5 、 P_6 、 P_{11} 、 P_{12} 等 12 个恒定外力的作用。

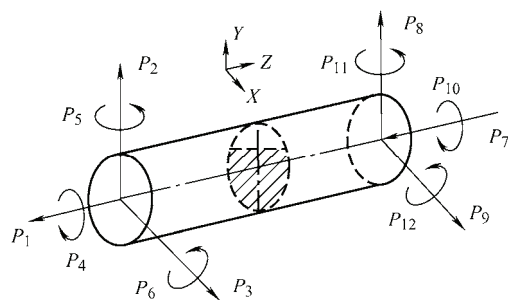


图 1 含裂纹转轴单元的局部载荷图

根据卡式定理^[11],可以得到含裂纹转轴单元在不同作用力 P_i 下的位移 u_i , 如式(1)所示

$$u_i = \frac{\partial U}{\partial P_i} = u_i^0 + u_i^c = \frac{\partial U^0 + \partial U^c}{\partial P_i} \quad i, j = 1, 2, \dots, 12 \quad (1)$$

式中, U 为含裂纹转轴单元的总应变能, U^0 为转轴单元的初始应变能, U^c 为裂纹引起的附加应变能, u_i^0 为转轴单元的初始位移, u_i^c 为裂纹引起的附加位移。根据线弹性体柔度的定义,可以得到单元体在外力 P_i 作用下的柔度 g_i , 如式(2)所示

$$g_i = \frac{\partial u_i}{\partial P_i} \quad (2)$$

联合式(1)和式(2),可以得到含裂纹转轴单元的柔度,如式(3)所示

$$g_{ij} = \frac{\partial^2 U}{\partial P_i \partial P_j} \quad (3)$$

当转轴中不存在裂纹缺陷时, 转轴单元的应变能, 如式(4)所示

$$U^0 = U_F + U_V + U_M + U_T = \frac{1}{2} \left(\frac{P_1^2 l}{EA} + \frac{a_s P_2^2 l}{G_e A} + \frac{a_s P_3^2 l}{G_e A} + \frac{P_3^2 l^3}{3EI_z} + \frac{P_3 P_5 l^2}{EI_z} + \frac{P_5^2 l}{EI_z} + \frac{P_2^2 l^3}{3EI_z} - \frac{P_2 P_6 l^2}{EI_z} + \frac{P_6^2 l}{EI_z} + \frac{P_4^2 l}{G_e I_p} \right) \quad (4)$$

式中, U_F 为轴向力引起的应变能, U_V 为剪切力引起的应变能, U_M 为弯矩引起的应变能, U_T 为扭矩引起的应变能, G_e 为切变模量, I_p 为横截面极惯性矩, I_z 为横截面惯性矩, E 为弹性模量, a_s 为剪切系数, l 为转轴单元长度, A 为转轴横截面积。

根据能量原理^[12], 裂纹形成和扩展的应变能 U^c 可以用应变能释放率函数 $J(\alpha)$ 和裂纹面积 α 来表示, 如式(5)所示

$$U^c = \int_{\alpha} J(\alpha) d\alpha \quad (5)$$

联立式(3)~(5), 可以得到含裂纹转轴单元的柔度矩阵 \mathbf{G} , 如式(6)所示

$$\mathbf{G} = \mathbf{g}_{ij}^0 + \mathbf{g}_{ij}^c = \begin{pmatrix} g_{11}^0 + g_{11}^c & \cdots & g_{16}^0 + g_{16}^c \\ \vdots & & \vdots \\ g_{61}^0 + g_{61}^c & \cdots & g_{66}^0 + g_{66}^c \end{pmatrix} \quad (6)$$

进而可以得到含裂纹转轴单元的刚度矩阵 \mathbf{K} , 如式(7)所示

$$\mathbf{K} = \mathbf{X} \begin{pmatrix} g_{11}^0 + g_{11}^c & \cdots & g_{16}^0 + g_{16}^c \\ \vdots & & \vdots \\ g_{61}^0 + g_{61}^c & \cdots & g_{66}^0 + g_{66}^c \end{pmatrix}^{-1} \mathbf{X}^T \quad (7)$$

式中, \mathbf{X} 是转换矩阵, 由转轴单元的静态负载平衡条件确定。得到含裂纹转轴在静坐标系下的动力学微分方程^[13], 如式(8)所示

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{G} + \mathbf{C})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{f} \quad (8)$$

式中, \mathbf{M} 、 \mathbf{G} 和 \mathbf{C} 分别为系统的质量矩阵、陀螺矩阵、阻尼矩阵, 它们在系统中可认定为常量, 而刚度矩阵 \mathbf{K} 由于裂纹的呼吸效应是不断变化的, \mathbf{f} 是总外力向量。朱厚军等^[14]在弹性支承和陀螺效应的基础上, 分析了单盘含裂纹转轴的动力学特性, 结果表明, 当裂纹轴的转速接近临界转速的一半时, 裂纹轴的径向振动中会出现多个频率分量, 且 2 倍频分量最为明显, 轴心轨迹出现明显的凹陷; 当转轴以临界转速运转时, 倍频分量将明显变弱, 转轴

轴心轨迹变成椭圆形, 因此, 通过转轴径向振动信号的分析可诊断转轴系统的裂纹故障。

2 基于位感条纹的转轴振动测量原理

基于单目视觉位感条纹的转轴振动测量系统如图 2 所示, 包括转轴系统、用于编码动态信息的位感条纹图案、采集条纹图像的高速相机以及用于控制图像采集和处理的计算机。测量前在转轴表面喷印上位感条纹图案, 调整高速相机使其成像光轴与转轴在同一平面上, 保证位感条纹图案在高速相机中心清晰成像。试验中, 含裂纹转轴系统的转速由驱动电机控制, 利用计算机控制高速相机拍摄位感条纹成像图片并存储, 通过数据线将拍摄得到的位感条纹图片传输至计算机, 经由图像处理得到转轴水平和竖直方向的振动信号。

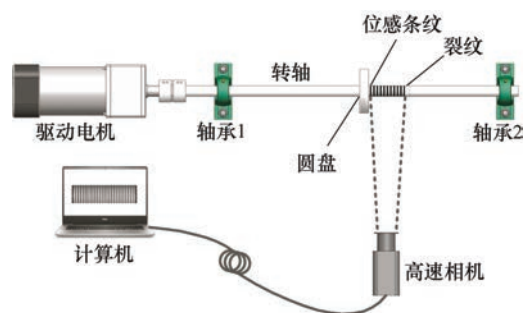


图2 基于位感条纹的转轴振动测量系统

2.1 转轴水平方向振动测量原理

基于位感条纹的转轴水平方向振动测量原理如图 3 所示。在图 3a 中, 以转轴在 a_2 位置为参考位置, 转轴位于位置 a_1 和 a_3 处分别表示靠近和远离相机。由于高速相机的位置是固定的, 根据三角成像原理, 高速相机所拍摄的图像长度(转轴表面位感条纹的成像长度)与转轴和成像透镜之间的距离(成像原理中的物距)成反比, 即当转轴靠近相机时, 位感条纹在相机成像底片上的成像长度就越长, 建立转轴水平方向位移 Δx 与条纹成像长度 l 之间的数学关系, 如式(9)所示

$$\frac{u + \Delta x}{u} = \frac{l_0}{l_t} \quad (9)$$

式中, u 为转轴与成像透镜之间的初始距离, 即成像原理中的物距, l_0 和 l_t 分别为位感条纹图案在初始位置和 t 时刻的成像长度。图 3b 中 b_1 、 b_2 和 b_3 分别对应转轴位于 a_1 、 a_2 和 a_3 位置时高速相机拍摄的位感条纹图像。以转轴的轴线位置处的成像位感条纹为研究对象, 提取转轴轴线行成像条纹的强

度信息,如图 3c 中 c1、c2 和 c3 所示。通过快速傅里叶变换即可得到转轴中心位置条纹的密度变化信息,如图 3d 所示。

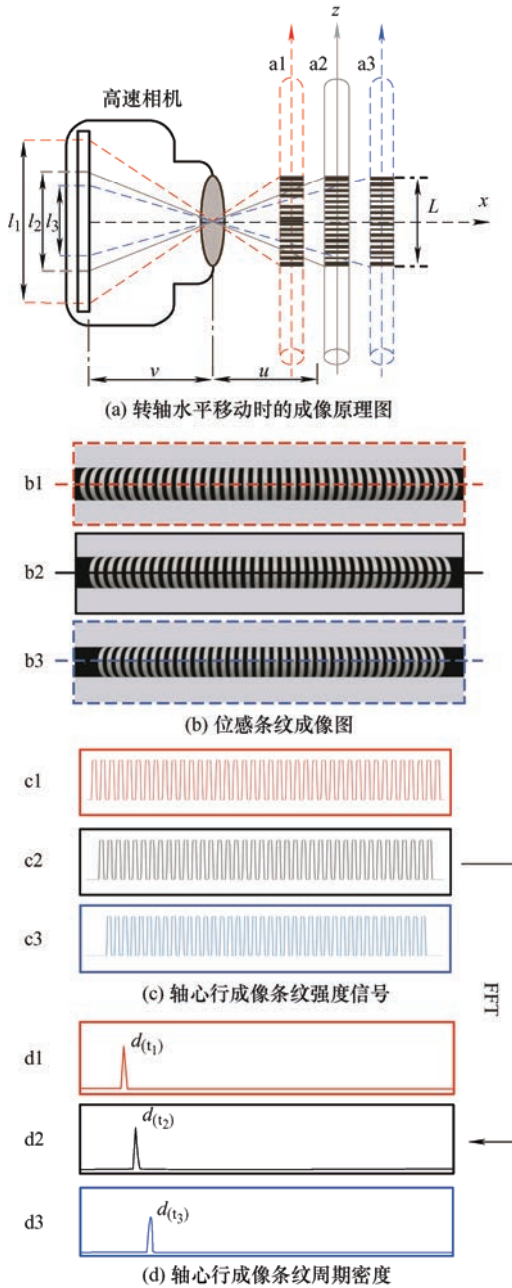


图 3 基于位感条纹的转轴水平方向振动测量原理图

如果转轴在旋转过程中发生水平方向的位移,相机拍得的转轴轴线行处位感条纹图像周期密度会随着转轴与相机镜头之间距离的变化而变化^[15]。当转轴靠近相机镜头时,位感条纹的成像长度变长,然而,成像条纹的数目是恒定的,因此成像条纹的周期密度将变小。建立水平位移 Δx 与成像条纹的周期密度 d 之间的数学关系,如式(10)所示

$$\Delta x = \left(\frac{l_0}{l_t} - 1 \right) \cdot u = \left(\frac{d_t}{d_0} - 1 \right) \cdot u \quad (10)$$

式中, d_0 和 d_t 分别表示在初始位置和 t 时刻的成像位感条纹的周期密度,因此只要通过分析成像位感条纹周期密度的变化就能够得到转轴在水平方向上的位移。

2.2 转轴竖直方向振动测量原理

基于位感条纹的转轴竖直方向振动测量原理如图 4 所示。如图 4a 所示,由于转轴的表面呈圆弧状,轴线行处条纹相比于转轴两侧边缘处条纹更靠近相机镜头,水平方向上的位置差为转轴的半径。结合水平方向振动测量原理可知,转轴轴线行处成像条纹的周期密度最小,转轴两侧边缘处成像的条纹周期密度最大。对拍摄得到的单帧位感条纹成像图片进行逐行信号提取,根据成像位感条纹图片中每一行条纹周期密度的变化得到转轴表面的包络线,再通过定位转轴包络曲线的最小值定位轴线行的成像位置,追踪转轴轴线行位置的变化实现对于转轴垂直方向振动的测量。

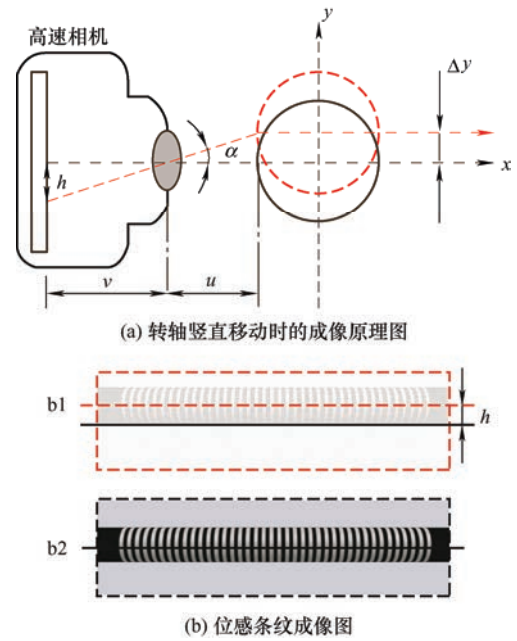


图 4 基于位感条纹的转轴竖直方向振动测量原理图

如图 4b 所示,当转轴发生垂直方向的位移时,高速相机拍摄得到的位感条纹成像图片中,转轴轴线行条纹的成像位置也会发生改变,转轴位于参考位置时,轴线行条纹的成像位置用黑色实线标记,转轴在竖直方向上发生位移时,轴线行条纹的成像位置用红色虚线标记。建立竖直方向位移 Δy 的求解数学关系,如式(11)所示

$$\Delta y = u \cdot \tan \alpha = \frac{u \cdot h}{v} = \frac{L}{l} \cdot h \quad (11)$$

式中, h 为相机拍摄的图片中轴线行条纹成像位置相对于参考帧的偏移量, v 为相机透镜和成像平面

之间的图像距离,即成像原理中的像距。 u 和 v 之间的比例系数可转化为位感条纹图案的实际物理长度 L 和成像长度 l 的比值。但是,转轴在实际运行过程中,水平和垂直方向的振动往往同时出现,如图5所示,因此转轴与相机镜头之间的距离是不固定的,在计算竖直方向的位移时需要考虑由于水平方向位移导致的误差。

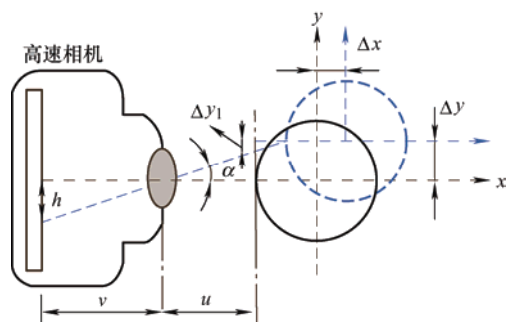


图5 转轴径向振动测量原理图

在计算竖直方向的位移时需要考虑水平位移 Δx 对垂直位移的影响,否则竖直位移的计算将会存在位移误差 Δy_1 ^[16]。对竖直位移的计算公式进行修正,如式(12)所示

$$\Delta y = \frac{(u + \Delta x) \cdot h}{v} = h \cdot \frac{L}{l} \cdot \frac{d_t}{d_0} \quad (12)$$

根据式(10)和式(12)可知,得到转轴水平和竖直方向位移的关键是精确地分析出成像条纹周期密度 d_t 的变化。因成像位感条纹信号的宽度是有限的,在利用傅里叶变换求条纹周期密度过程中会因能量泄漏效应导致密度计算产生误差^[17],无法得到非整数周期密度值,进而导致测量得到的位移会出现阶跃,如图6中虚线所示。

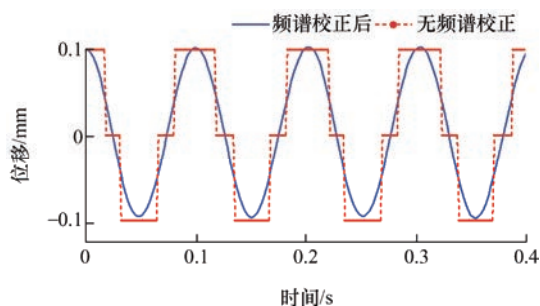


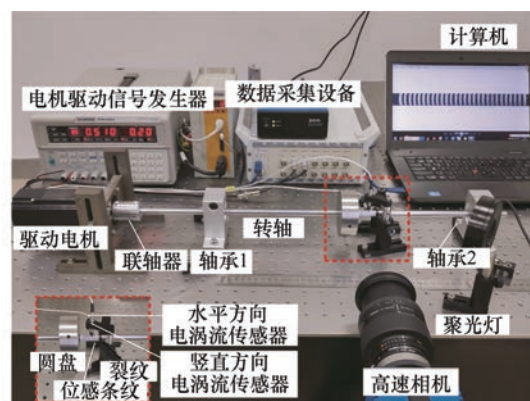
图6 有无频谱校正测得位移对比图

为减小信号频率估计误差,当前许多研究学者提出了各种不同的频谱校正方法,在不同特征信号频率估计上都有不错的性能。其中频谱能量重心校正法的频率估计精度对信号频率偏移量与信号噪声的影响较小,具有较好的频率估计稳定性^[18]。故采

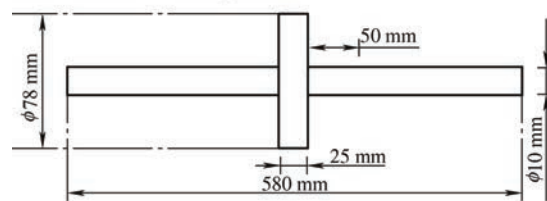
用频谱能量重心校正法减小傅里叶变换中能量泄漏效应的影响,计算成像条纹信号的准确周期密度,进而得到含裂纹转轴系统精确的振动位移,提高裂纹检测的精度。成像位感条纹的周期密度经过校正后,可以精确地获得转轴的位移,如图6中实线所示。

3 试验研究

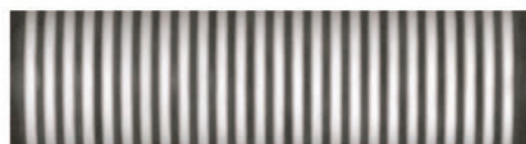
试验中以 Jeffcott 转子模型为基础,转轴的两端为刚性支承,中间固定有刚性配重盘,试验装置如图7a所示。由两个滑动轴承支撑的转轴长580 mm,直径10 mm,材质为 GCr15。转轴的左端用联轴器连接到直流驱动电动机,转轴中间固定有一个直径为78 mm、宽度为25 mm的刚性配重盘。采用线切割方法,在距圆盘50 mm处的转轴上加工一个宽0.2 mm,深5 mm的裂纹缺陷,含裂纹转轴系统的模型尺寸如图7b所示。将长度为25 mm的位感条纹图案喷印在转轴的表面,作为位移传感器。



(a) 试验装置图



(b) 含裂纹转轴系统模型尺寸图



(c) 高速相机拍摄的位感条纹图像

图7 基于视觉位感条纹的转轴裂纹检测试验图

试验过程中利用两路电涡流传感器进行同步对比试验,两个电涡流传感器在位感条纹图案的同一位置沿圆周成90°安装。将高速相机固定在三脚架

上，并垂直于转轴放置，调整高速相机的成像光轴与转轴在同一平面上，确保位感条纹在成像传感器中间成像。为了获得清晰、对比度好的图像，采用了照明光源，并对高速相机的参数进行了适当的调整。为了提高高速相机的帧速率，将相机的成像范围设置为 130 像素×500 像素，该成像范围可对整个位感条纹图案进行成像，位感条纹的成像图片如图 7c 所示。试验中相机的曝光时间设置为 1 ms，该成像参数设置下相机的采样频率为 1 000 Hz，与电涡流传感器采集系统的采样频率相等，相关试验设备的参数设置如表 1 所示。

表 1 试验设备参数

试验设备	参数水平		
	品牌(型号)	设备参数	试验参数设置
驱动电机	Panasonic (MINAS A6)	0~4 000 r/min	600/1 500/3 000 r/min
高速相机	PCO-TECH (PCO.1200hs)	曝光 1 μs~1 s	曝光 1 ms
数据采集设备	DHDAS (DH5922)	1 Hz~128 kHz	1 000 Hz
电机信号发生器	RIGOL (UTG1402)	DC 1~12 V	DC 1/2.5/5 V

当转轴以 600 r/min 的转速转动时，转轴系统处于低转速运行状况，采用两种测量方法得到的振动结果如图 8a、8b 所示，该转速条件下含裂纹转轴系统的径向振动波形较为稳定。蓝色实线是电涡流传感器所得，红色虚线是基于单目视觉位感条纹的测量方法所得，可以看到两种测量方法得到的数据吻合，两者在水平和竖直方向上的最大误差分别为 0.003 259 mm 和 0.003 445 mm。分析振动信号的频

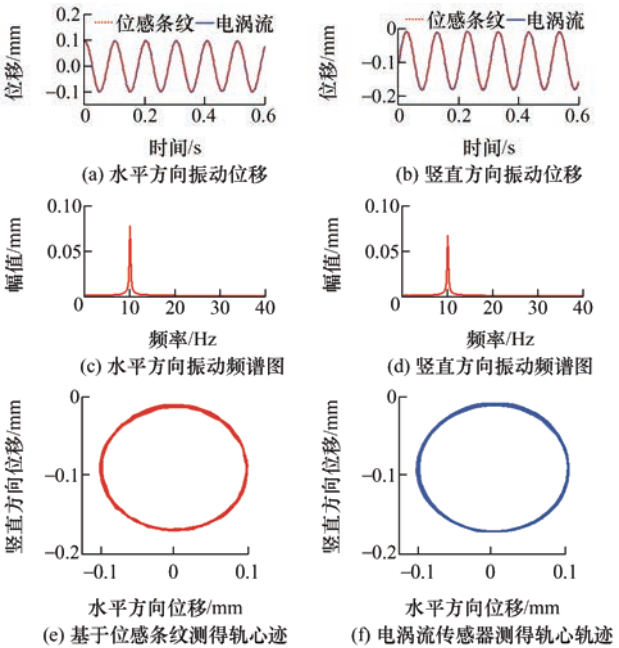


图 8 转速 600 r/min 时含裂纹转轴系统的动态特性

谱成分可以发现，水平和竖直方向振动的频谱中只有一个与转速相等的频率分量，如图 8c、8d 所示。该现象主要因为转速较低时含裂纹转轴系统上的不平衡质量和弯曲是振动的主要影响因素，裂纹对整个系统的动力学特性影响较小，含裂纹转轴的轴心轨迹为椭圆形，如图 8e、8f 所示。

通过有限软件分析得到试验转轴模型的临界转速为 3 050.88 r/min，当转轴的转速提高到 1 500 r/min 附近时，接近临界转速的一半，转轴的振动情况变得复杂，尤其是在水平方向，振动曲线不再是规则的正弦曲线，如图 9a 所示。竖直方向上由于重力的影响，振动曲线变化不明显，如图 9b 所示。频谱分析结果表明，在水平方向振动信号中，除了与转频相等的频率分量外，还存在多个频率分量，其中 2 倍频分量非常突出，如图 9c 所示。在竖直振动中也同样存在多个频率分量，虽然这些倍频分量在竖直振动中的振幅很微弱，但是仍然可以检测到倍频信号的存在，如图 9d 所示。此时轴心轨迹也不再是规则的椭圆形，存在明显的畸变和凹陷，如图 9e、9f 所示，两种测量方法在水平和竖直方向上的最大误差分别为 0.042 565 mm 和 0.018 565 mm。这是因为当转速接近临界转速的一半时，刚度的不对称将激发裂纹轴径向振动的倍频分量，径向振动会发生位移叠加，频谱中可以清晰地看到多个频率分量，尤其是 2 倍频分量，这也是裂纹检测中的主要研究对象。

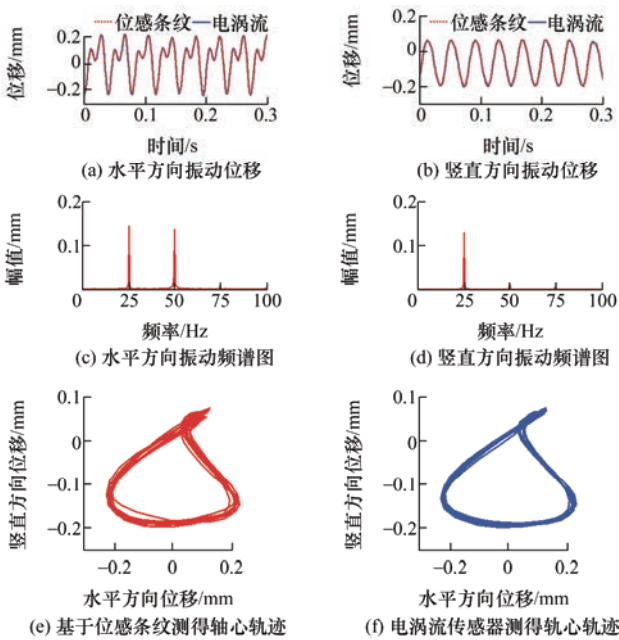


图 9 转速 1 500 r/min 时含裂纹转轴系统的动态特性

当转速继续增加到 3 000 r/min 时，此时转轴系统已经接近临界状态，可以发现含裂纹转轴系统在

水平和垂直方向上的振动恢复到与低转速条件时相似的状态, 水平和垂直方向上振动曲线回归稳定, 如图 10a、10b 所示。径向振动的频率分量重新变得唯一, 与转速频率一致, 如图 10c、10d 所示, 轴心轨迹重新变成规则的椭圆形, 如图 10e、10f 所示, 两种测量方法在水平和垂直方向的最大误差分别为 0.035 667 mm 和 0.018 204 mm。这是因为当转速接近临界转速时, 裂纹的影响将会减小, 裂纹的呼吸效应不明显, 转轴上的不平衡质量重新成为径向振动的决定性因素, 因此转轴径向振动信号中的频率重新回归到与转频一致。

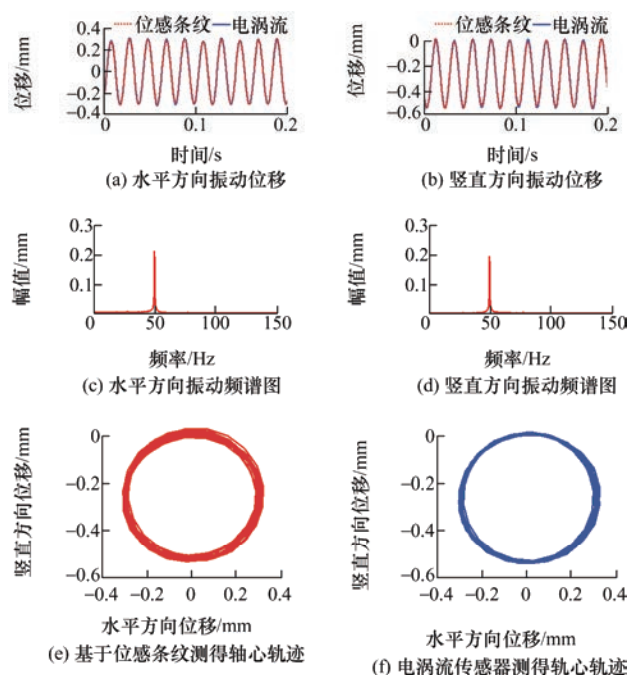


图 10 转速 3 000 r/min 时含裂纹转轴系统的动态特性

通过试验可知, 当转速接近 $1/2$ 临界转速时, 含裂纹转轴系统的径向振动波形出现叠加和扰动, 在频谱成分中出现倍频信号, 轴心轨迹也有非常明显的畸变和凹陷。在低转速和临界转速条件下, 径向振动的波形较为稳定, 频谱图中以转频分量为, 轴心轨迹为稳定的椭圆形。虽然转轴系统中的不平衡质量会导致转轴系统发生振动, 且随着转速的变化, 转频信号的幅值也会发生改变, 但是转轴系统径向振动信号中的倍频成分是由于裂纹呼吸效应导致的, 正是由于不同转速条件下裂纹呼吸效应的变化才导致转轴系统在不同转速条件下的不同振动响应。在低转速条件下, 裂纹缺陷呈现常闭状态, 在临界转速附近, 裂纹缺陷呈现常开状态, 而在 $1/2$ 临界转速附近, 裂纹呼吸效应显著, 裂纹缺陷开闭交替, 刚度的不对称将激发裂纹轴径向振动的倍频分量。通过分析转轴系统振动信号的频率成分可以

有效实现裂纹缺陷的检测。

在提出的基于视觉位感条纹的裂纹检测方法中, 通过在转轴表面喷印位感条纹图案作为位移传感器, 可以同时测量含裂纹转轴系统的水平和垂直方向的振动位移, 能够更加便捷地得到转轴系统在运行过程中的动态特性, 有效地实现转轴裂纹缺陷的检测。基于视觉的检测方法可应用于一些传统位移传感器安装不便的场合, 实现进行转轴振动信息的快速测量和故障诊断。

4 结论

(1) 采用有限元法推导出含裂纹转轴系统的动力学方程, 在转轴在旋转过程中, 裂纹面之间会出现交替性的接触与分离, 呼吸效应引起转轴单元刚度矩阵的变化, 进而改变转轴系统的动态特性。

(2) 针对当前转轴振动测量需要在径向安装多个传感器的问题, 提出单目视觉位感条纹振动测量方法, 实现对含裂纹转轴系统径向二维振动信号的高效测量, 通过与两路电涡流传感器的对比试验, 验证了该测量方法在裂纹缺陷检测中的可行性与可靠性。

(3) 含裂纹转轴系统在不同转速条件下的动态特性不同, 在低转速和临界转速条件下, 裂纹呼吸效应不明显, 径向振动响应平稳。当转速接近 $1/2$ 临界转速时, 裂纹呼吸效应显著, 转轴径向振动波形出现扰动, 频谱图中出现倍频分量, 轴心轨迹出现明显的内凹现象, 因此可以通过分析转轴系统在不同转速条件下的动态响应实现裂纹缺陷检测。

提出的单目视觉位感条纹振动测量方法可测量分析不同转速条件下转轴系统的动态特性, 实现对裂纹缺陷的快速检测, 具有非接触测量、检测成本低、使用简单等优点, 在旋转机械主轴动态测量和缺陷检测中具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] ESPADAFOR F J, VILLANUEVA J B, GARCIA M T. Analysis of a diesel generator crankshaft failure[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(7): 2333-2341.
- [2] DONG H B, CHEN X F, LI B, et al. Rotor crack detection based on high-precision modal parameter identification method and wavelet finite element model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(3): 869-883.
- [3] WEI F, QIAO P. Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study[J]. Structural

- Health Monitoring, 2011, 9(1): 83-111.
- [4] DARPE A K. Dynamics of a Jeffcott rotor with slant crack[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 303(1): 1-28.
- [5] 高建民, 朱晓梅. 裂纹转子的动力特性研究[J]. 西北工业大学学报, 1992, 10(4): 434-440.
- GAO Jianmin, ZHU Xiaomei. Study on dynamic behavior of cracked rotors[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1992, 10(4): 434-440.
- [6] 李亚. 裂纹转子系统动力学特性与性能评价[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- LI Ya. Dynamic characteristics and performance evaluation of the cracked rotor system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [7] 向玲, 张悦. 基于轴心轨迹形态的转子裂纹故障分析与诊断[J]. 振动. 测试与诊断, 2019, 39(4): 760-766, 903-904.
- XIANG Ling, ZHANG Yue. Analysis and diagnosis of rotor crack fault based on morphological characteristics of axis orbits[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2019, 39(4): 760-766, 903-904.
- [8] GU Q, ISHII I. Review of some advances and applications in real-time high-speed vision: Our views and experiences[J]. International Journal of Automation and Computing, 2016, 13(4): 305-318.
- [9] ZHONG J, ZHONG S, ZHANG Q, et al. Vision-based measurement system for structural vibration monitoring using non-projection quasi-interferogram fringe density enhanced by spectrum correction method[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 28(1): 015903.
- [10] ZHONG S, ZHONG J, ZHANG Q, et al. Quasi-optical coherence vibration tomography technique for damage detection in beam-like structures based on auxiliary mass induced frequency shift[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 93(9): 241-254.
- [11] PAPADOPOULOS C A. The strain energy release approach for modeling cracks in rotors: A state of the art review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(4): 763-789.
- [12] 杨丹, 甘春标, 杨世锡, 等. 含横向裂纹 Jeffcott 转子刚度及动力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(15): 121-126.
- YANG Dan, GAN Chunbiao, YANG Shixi, et al. Stiffness and dynamical behavior of Jeffcott rotor with cross crack[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(15): 121-126.
- [13] ZOU J, CHEN J, NIU J C, et al. Discussion on the local flexibility due to the crack in a cracked rotor system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 262(2): 365-369.
- [14] 朱厚军, 赵玫, 王德洋. Jeffcott 裂纹转子动力特性的研究[J]. 振动与冲击, 2001, 20(1): 3-6, 94.
- ZHU Houjun, ZHAO Mei, WANG Deyang. A study on the dynamics of a cracked Jeffcott rotor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(1): 3-6, 94.
- [15] 钟剑锋, 钟舜聪, 彭志科. 位感条纹三维振动测量原理及试验研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(14): 19-29.
- ZHONG Jianfeng, ZHONG Shuncong, PENG Zhike. Theoretical and experimental studies on 3D vibration measurement based on displacement-sensitive fringe pattern[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(14): 19-29.
- [16] ZHONG J, ZHONG S, ZHANG Q, et al. Vision-based system for simultaneous monitoring of shaft rotational speed and axial vibration using non-projection composite fringe pattern[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 120: 765-776.
- [17] 谢明, 张晓飞, 丁康. 频谱分析中用于相位和频率校正的相位差校正法[J]. 振动工程学报, 1999, 12(4): 18-23.
- XIE Ming, ZHANG Xiaofei, DING Kang. A phase difference correction method for phase and frequency correction in spectral analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(4): 18-23.
- [18] 丁康, 钟舜聪. 通用的离散频谱相位差校正方法[J]. 电子学报, 2003, 31(1): 142-145.
- DING Kang, ZHONG Shuncong. A universal phase difference correcting methods on discrete spectrum[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(1): 142-145.

作者简介: 徐帖, 男, 1995 年出生。主要研究方向为无损检测技术。

E-mail: 1483525364@qq.com

钟剑锋(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机电系统状态监测与智能诊断技术。

E-mail: zhongjianfeng@fzu.edu.cn

钟舜聪, 男, 1976 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为结构健康监测、设备故障诊断、无损检测与评价、光学精密诊断仪器和太赫兹技术等。

E-mail: sczhong@fzu.edu.cn