

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105671

# 视觉位感条纹多维动态测量原理及其发展\*

钟剑锋<sup>1</sup> 李思钰<sup>1</sup> 吴生源<sup>1</sup> 陈新伟<sup>2</sup> 罗曼婷<sup>1,3</sup> 钟舜聪<sup>1</sup>(1.福州大学 机械工程及自动化学院 福州 350116; 2.闽江学院 福建省信息处理与智能控制重点实验室 福州 350121;  
3.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:** 针对现有单目视觉测量技术不易实现结构三维振动同步测量及转动测量的问题,提出一系列新型视觉位感条纹作为振动位移或旋转角位移传感器,以单台高速相机作为探测器,实现非旋转结构三维振动位移、转轴三维振动位移、旋转角位移及转速等多维度、多参数的同步测量,形成了一系列视觉位感条纹动态测量新方法。对不同功能视觉位感条纹的由来及其测量原理进行了详细阐述,并通过一系列实验结果验证了各类视觉位感条纹在非旋转结构三维振动、转轴三维振动与转动多参数同步测量的可行性与准确性,相关方法可为多类结构的状态监测和故障诊断提供新的测量方案。

**关键词:** 位感条纹;高速相机;视觉测量;三维振动;旋转参数

中图分类号: TH212 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

## Theories and its developments of vision-based displacement-sensitive fringe pattern for multi-dimensional dynamic measurement

Zhong Jianfeng<sup>1</sup> Li Siyu<sup>1</sup> Wu Shengyuan<sup>1</sup> Chen Xinwei<sup>2</sup> Luo Manting<sup>1,3</sup> Zhong Shuncong<sup>1</sup>

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

2.Fujian Provincial Key Laboratory of Information Processing and Intelligent Control, Minjiang University, Fuzhou 350121, China;

3.Modern Precision Measurement and Laser Nondestructive Testing Key Laboratories of Universities in

Fujian Province, Putian University, Putian 351100, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of existing monocular vision measuring technique in synchronously measurement for structural 3D vibration and rotation parameters measurement, a series of novel vision displacement-sensitive fringe pattern (DSFP) based dynamic measurement methods were proposed. Multi-dimensional and multi-parameter synchronous measurement for non-rotating structural 3D displacement, rotating shaft 3D displacement, rotation angle and rotation speed could be realized by using the novel DSFPs as vibration displacement or rotation angular displacement sensors and using a high-speed camera as a detector. The evolution and measurement principle of different DSFPs were well described. The feasibility and accuracy of the vision DSFP-based measurement methods for the measurement of non-rotating structural 3D displacement, rotating shaft 3D displacement and rotation parameters were verified by experimental results, which provides a series of measurement solution for structural condition monitoring and faults diagnosis.

**Keywords:** displacement-sensitive fringe pattern; high-speed camera; vision measurement; three-dimensional vibration; rotation parameters

## 0 引言

振动测量对于结构的状态监测和故障诊断具有重要的意义,但是传统的接触式测量方法已不能满足一些场合的

动态测量需求。因此,方便、高效、精确的结构多维动态测量方法受到越来越多研究学者的关注。

近年来,随着二维图像传感器在成像精度、速度及数字图像处理技术等方面的快速发展,研究者提出了多种基于

收稿日期:2010-01-07

\*基金项目:国家自然科学基金(51905102,51675103)、中国博士后科学基金(2019M662226)、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)、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)资助

• 122 •

机器视觉的非接触式振动测量技术用于结构的动态测量<sup>[1-2]</sup>。该类方法将不同的目标图案附于被测结构表面,并采用相机对目标图案进行连续成像,再采用不同的图像处理技术提取结构的动态信息。Busca等<sup>[3]</sup>采用图像匹配、边缘检测和数字图像相关3种算法提取目标图像在成像传感器中的位置变化实现桥梁振动的测量。Choi等<sup>[4]</sup>采用黑白圆形规则分布图案实现结构的振动测量。随后,Feng等<sup>[5]</sup>又将更加复杂的二维黑白图案安装于被测结构表面,并采用模板匹配技术实现大型桥梁结构的振动测量。也有研究者采用多个标记图案用于结构多点振动的同步测量与模态分析。Song等<sup>[6]</sup>采用亚像素精度的Hough变换圆检测算法提取梁侧面的48个圆形标记在图像序列中的位置变化得到梁结构的振动模态参数。该算法主要通过圆特征提取技术实现圆的检测,要准确确定圆的中心坐标和半径等参数需要较大计算量,其图像处理效率不高。

以上测量技术主要采用单目视觉测量系统实现结构沿垂直于成像光轴平面的二维振动位移测量,并不能实现结构成像光轴方向位移的测量。为实现单目测量系统对结构三维振动位移的测量,Chang等<sup>[7]</sup>采用黑白方格目标图案和单目视觉测量系统实现结构三维位移和转动的测量。汪佳宝等<sup>[8]</sup>基于视觉EPnP加权迭代算法实现结构三维位移的测量。但该类测量方法需要对相机进行标定,需要确定的系统参数较多,并且其标定精度将直接影响位移测量精度,测量过程步骤比较复杂。

为了使测量系统更加简单,许多研究者提出对结构表面的特征结构进行成像,再采用不同算法提取特征结构在图像中的移位来实现结构的振动测量。Feng等<sup>[9]</sup>结合机器视觉测量、目标匹配和方向码匹配算法捕捉结构中的自然特征在成像传感器中的位置变化实现结构的动态测量。Khuc等<sup>[10]</sup>也采用普通相机和机器视觉技术实现结构特征点在图像中的检测与匹配,在不需要目标图案的情况下实现结构的振动测量。季云峰<sup>[11]</sup>、伍济钢等<sup>[12]</sup>采用光流法图像处理技术实现对拉索桥拉索和薄壁件的振动进行测量与分析。该类方法不需要在结构表面布置目标图案,测量比较方便。但是该测量方法在实际测量中可能因被测结构表面特征结构不存在或不明显导致算法失效或增加图像处理的难度,从而使测量效率不高、精度不足等。

近年来,Zhong等<sup>[13-14]</sup>提出基于干涉条纹的二维光学相干振动层析系统用于结构多点振动的高精度同步测量。随后根据二维光学干涉位感条纹测量系统中采用干涉位感条纹密度变化信息提取平行于探测光方向位移的特点,结合单目视觉测量系统可测量垂直于成像光轴方向二维位移的优点,采用类似于二维干涉位感条纹形式的非干涉位感条纹作为单目视觉测量系统中的特征目标图案,实现了沿成像光轴方向位移和垂直于成像光轴方向二维位移的同步测量<sup>[15]</sup>。结合单密度位感条纹实现结构三维振动测量的原理,将单密度位感条纹进一步应用于旋转机械

转轴的三维振动测量,提出了一种基于单密度位感条纹的转轴三维位移同步测量的新方法;再结合变条纹密度的思路,将用于转轴三维振动测量的单密度位感条纹设计成线性变密度<sup>[16]</sup>和正弦变密度位感条纹<sup>[17]</sup>,进一步提出了基于线性变密度位感条纹或正弦变密度位感条纹的转轴角位移和转速测量的新方法。不仅实现了视觉位感条纹测量方法在非旋转结构三维振动测量中的应用,也实现了其在转轴三维振动及转动测量中的应用,为转轴的多维动态测量提供新的测量方法,也扩展了视觉测量技术的工程应用范围,对于旋转机械等的转子动态监测和故障诊断有一定意义。

## 1 视觉位感条纹的由来及其发展演变

图1所示为不同功能位感条纹的发展演变。图1(a)为文献<sup>[13-14]</sup>提出的二维光学相干振动层析系统的二维干涉条纹图,该系统的干涉条纹密度将随着被测结构表面与参考表面之间相对振动位移变化,在结构振动过程中采用高速相机对干涉条纹进行连续采集,并通过干涉条纹的密度信息变化实现结构振动信号的提取。

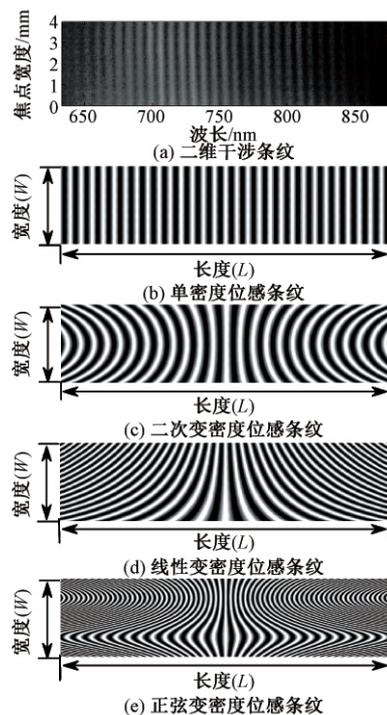


图1 不同功能视觉位感条纹的发展演变

但是二维光学相干振动层析系统需要通过精确的干涉光路产生干涉条纹实现振动测量,并且对被测结构的表面质量要求较高。根据二维光学相干振动层析测量系统中采用干涉位感条纹密度变化信息提取平行于探测光方向位移的原理,结合单目视觉测量系统可测量垂直于成像光轴平面二维位移的特点,文献<sup>[15]</sup>提出如图1(b)所示的单密度位感条纹作为位移传感器附于结构表面,采用高速相机作为探测器对其进行连续采集,并针对该位感条纹提出了结

构三维位移同步提取算法。为提高三维位移的提取算法的运算效率,对单密度位感条纹进行优化,提出如图 1(c)所示的二次变密度位感条纹,可更加高效地实现了结构三维位移的测量。

根据图 1(b)所示单密度位感条纹可实现非旋转结构三维振动同步测量的优点,并针对当前转轴三维振动测量需要在 3 个方向安装三路电涡流传感器进行测量的不足,提出将单密度位感条纹用于转轴三维振动位移的同步测量,建立了基于位感条纹的转轴三维振动视觉测量方法。此外,为了实现转轴的角度位移或转速信号的测量,将单密度位感条纹的条纹形式进行改变,文献[16-17]进一步提出了如图 1(d)和(e)所示的两种变密度位感条纹。图 1(d)为线性变密度位感条纹,该位感条纹沿宽度方向的条纹密度是线性变化的。将其环附于转轴表面后,转轴每个转角将与一个条纹密度值对应,通过求取采集的位感条纹密度值即可确定转轴的角度位移信息。图 1(e)为正弦变密度位感条纹,该位感条纹沿宽度方向的条纹密度是正弦变化的,可以保证条纹密度连续平稳地变化。采用上述两种变密度位感条纹均可实现转轴旋转角度位移及转速的精确测量。

## 2 视觉位感条纹振动及转动测量原理

### 2.1 基于单密度位感条纹的结构三维振动测量

基于单密度位感条纹的结构三维振动测量原理如图 2 所示,该系统主要由位感条纹、高速相机和电脑组成。单密度位感条纹作为三维位移传感器附于被测结构的表面,其将随着结构的振动而移动。高速相机由电脑进行控制并实时采集位感条纹图像,采集后的位感条纹序列传输至电脑进行处理以提取结构的三维位移信息。

结构  $YZ$  方向的二维位移可以从位感条纹中心位置在图像传感器中的二维位移信息获取。位感条纹中心位置在  $Y$  和  $Z$  方向的像素位移可表达为<sup>[15]</sup>:

$$y_1 = y + u \quad (1)$$

$$z_1 = z + w \quad (2)$$

式中: $u$  和  $w$  分别为位感条纹在  $Y$  和  $Z$  方向移动像素点的个数,其值可以通过二维图像相关算法求取。实际位移分别由  $u$  和  $w$  与成像比例因子  $M_a$  的乘积获得。

位感条纹在  $X$  方向的位移将导致其在成像传感器中的成像大小发生变化,进而导致位感条纹的条纹密度发生变化。因此,结构沿  $X$  方向的位移可通过位感条纹密度变化获得,其可表达为<sup>[15]</sup>:

$$\Delta x(t) = \frac{D(d(t) - d_r)}{d_r} \quad (3)$$

式中: $D$  为初始成像物距; $d(t)$  为  $t$  时刻位感条纹的在图像传感器中的条纹密度值; $d_r$  为位感条纹图像参考帧的条纹密度值。

文献[15]对基于单密度位感条纹的动态测量系统的系统参数进行了详细地分析,并将该测量系统对悬臂梁测量

的结果与传统的加速度传感器测量系统获得的结果进行对比分析,结果表明该单密度位感条纹位移测量系统可以精确测量结构的振动位移信号。其非接触测量特性可以极大地减小测量系统对测量结构的影响,获得更加准确的振动模态参数,适用于实际工程中一些轻质、大柔度、大位移和大振幅振动结构的位移测量与模态分析。文献[18]采用该测量系统与移动附加质量法实现了悬臂梁结构缺陷位置的精确定位。文献[19]将多个单密度位感条纹附于悬臂梁结构的表面,并采用单个高速相机对所有位感条纹进行同步采集,实现了悬臂梁结构前三阶模态频率及振型的准确提取。上述结果都验证了单密度位感测量方法的可行性及有效性。

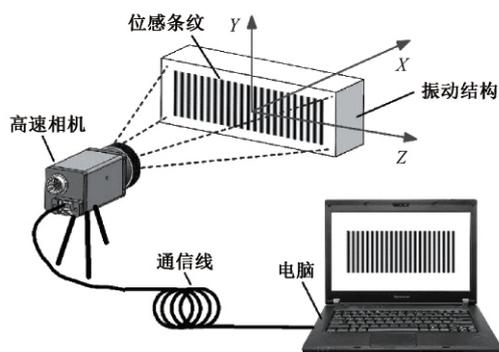


图 2 单密度位感条纹三维位移测量原理

### 2.2 基于二次变密度位感条纹的结构三维振动测量

采用单密度位感条纹进行结构三维位移测量时需要采集位感条纹所有条纹图像信息才能通过二维图像相关运算得到平行于二维图像传感器方向的二维位移信息,该算法运算量相对较大,特别是需要获得亚像素级位移测量精度时,需要对图像进行插值处理,使二维相关运算量随插值点数的提高而增加。为解决该问题,对单密度位感条纹进行改进,提出采用如图 3 所示的二次变密度位感条纹用于结构的三维振动测量。采用该位感条纹可简化结构三维位移的提取算法,提高运算效率。其位移测量原理及步骤为: 1) 采用能量重心频谱校正法<sup>[20]</sup>精确提取每行像素所在条纹的条纹密度值,得到每帧二次变密度位感条纹图像沿宽度方向的密度变化曲线; 2) 对得到的条纹密度变化曲线进行拟合平滑后求其斜率曲线,通过插值算法得到斜率值为 0 的  $Y$  方向坐标时域变化曲线,采用式(4)得到结构  $Y$  方向的位移信息; 3) 提取条纹密度变化曲线斜率值为零坐标位置的密度变化信息,采用式(3)得到结构  $X$  方向的位移信息; 4) 提取条纹密度变化曲线斜率值为零坐标所在行像素的条纹强度曲线,与静止时条纹密度变化曲线斜率值为零坐标所在行像素的条纹强度曲线进行一维互相关运算,提取相关序列峰值坐标位置变化信息,采用式(5)得到转轴  $Z$  方向的位移信息。

$$\Delta y(t) = \frac{\Delta m(t)Ld(t)}{N_L d_r} \quad (4)$$

$$\Delta z(t) = \frac{L \Delta n(t)}{N_L} \quad (5)$$

式中: $d(t)$ 为 $t$ 时刻二次变密度位感条纹密度变化曲线斜率值为零坐标位置的条纹密度值; $d_r$ 为参考帧二次变密度位感条纹密度变化曲线斜率值为零坐标位置的条纹密度值; $\Delta m(t)$ 和 $\Delta n(t)$ 分别为 $t$ 时刻二次变密度位感条纹在 $Y$ 方向上偏移参考位置的像素偏移量和二次变密度位感条纹密度变化曲线斜率值为零位置所在行的条纹在 $Z$ 方向上偏移参考位置的像素偏移量; $L$ 为位感条纹实际的长度; $N_L$ 为参考帧二次变密度位感条纹密度变化曲线零斜率位置横向条纹覆盖的像素点总数。

采用二次变密度位感条纹进行三维测量可不必采集位感条纹全范围条纹信息即可计算结构的三维振动信息。例如,在振动过程中采集图3中虚线框内的局部位感条纹后,再采用上述步骤提取二次变密度位感条纹的局部密度变化曲线进行结构三维位移的提取。

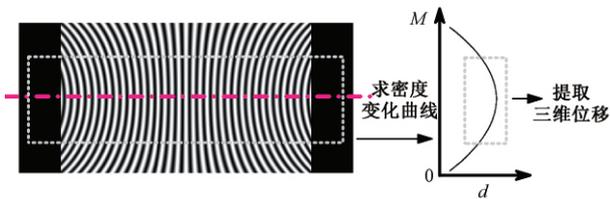
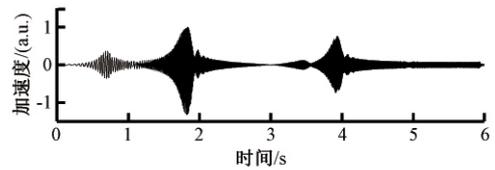


图3 二次变密度位感条纹三维测量原理

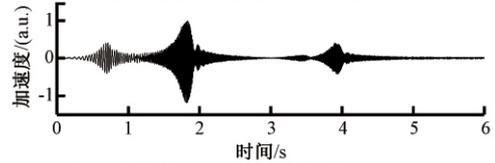
为验证本测量方法的测量性能,将该二次变密度位感条纹粘贴于试验悬臂梁正表面距离固定端10 cm处,采用高速相机对二次变密度位感条纹进行连续成像采集。作为对比,将三维加速度传感器安装于梁背面距离固定端10 cm处对三维加速度信号进行同步采集。实验中,试验梁通过激振器进行激励,激振器输出扫描频率范围为0~300 Hz,扫描周期为6 s的激励信号。图4~6分别为梁在扫频激励下由二次变密度位感条纹和三维加速度在 $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 三个方向同步测量得到的信号对比。其中位感条纹测量系统得到的是结构的位移信号,图中加速度信号由位移信号二阶导求得。由各图中结果可知,提出的基于视觉位感条纹和高速相机的三维振动测量系统可以和三维加速度传感器系统一样实现结构三维振动的同步测量。但由于测量物理参数的不同,信号幅值出现一些差异。然而,位感条纹对测量结构几乎无附加质量,故可避免如加速度传感器自身重量影响结构模态参数的问题。文献[21]对该方法的测量原理与性能做了详细分析。

### 2.3 基于单密度位感条纹的转轴三维振动测量

在实际工程中,对旋转机械转子的振动及转动测量也至关重要。例如,转轴的径向和轴向振动信号、角位移或转速信号可为旋转机械的状态监测和故障诊断提供丰富的信息。结合单密度位感条纹实现结构三维振动测量的原理,将单密度位感条纹进一步应用于旋转机械转轴的三维振动

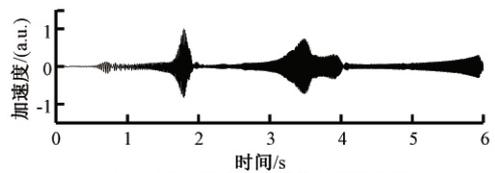


(a) 加速度传感器获得的加速度曲线

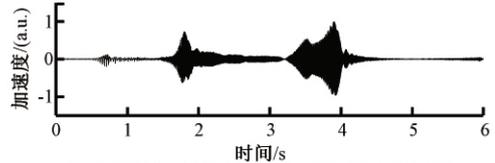


(b) 位感条纹测量位移二阶导获得的加速度曲线

图4 扫频激励下悬臂梁 $X$ 方向的加速度信号

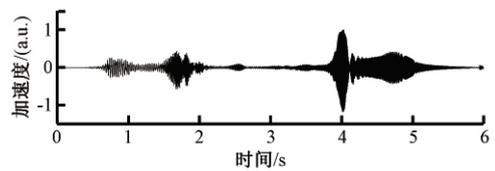


(a) 加速度传感器获得的加速度曲线

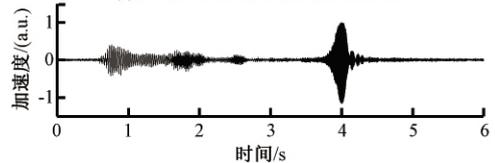


(b) 位感条纹测量位移二阶导获得的加速度曲线

图5 扫频激励下悬臂梁 $Y$ 方向的加速度信号



(a) 加速度传感器获得的加速度曲线



(b) 位感条纹测量位移二阶导获得的加速度曲线

图6 扫频激励下悬臂梁 $Z$ 方向的加速度信号

测量,提出了一种基于单密度位感条纹的转轴三维位移同步测量方法。其测量原理如图7所示。与单密度位感条纹测量非旋转结构三维位移不同的是将单密度位感条纹附于待测转轴圆周表面用于感知转轴的三维位移信息。采用高速相机对待测转轴表面的位感条纹进行图像采集并传输至计算机进行处理以获得转轴的三维振动位移信息。

在单密度位感条纹布置于转轴表面之前其条纹密度是恒定的,但是环布于转轴表面后其在图像传感器中的成像形式如图7所示。可知成像位感条纹沿其宽度方向的条纹密度随转轴表面曲率变化,因此可以通过条纹在宽度方向

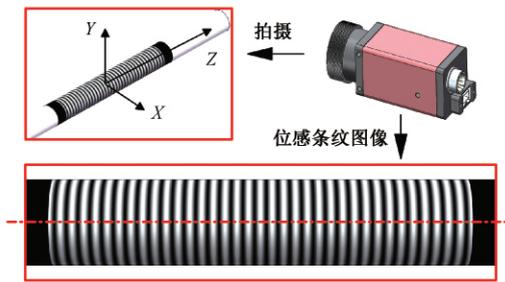


图 7 单密度位感条纹转轴三维振动位移测量

每行条纹的密度变化信息求得转轴的表面包络线,进而确定转轴中心线位置及在该位置的条纹密度变化信息与条纹移位信息,从而获得转轴的三维位移信息。采集得到的转轴表面位感条纹的基本处理步骤为:1)采用能量重心频谱校正法精确提取每行像素所在条纹的条纹密度值,得到转轴表面的包络曲线;2)对得到的包络线进行拟合平滑后求其斜率曲线,通过插值算法得到斜率值为 0 的 Y 方向坐标(即转轴轴线位置坐标),采用式(4)得到转轴 Y 方向的位移信息;3)提取转轴轴线位置的条纹密度变化信息,采用式(3)得到转轴 X 方向的位移信息;4)提取转轴轴线位置的条纹强度曲线,与静止时轴线位置的条纹强度曲线进行互相关并提取相关序列峰值坐标位置的变化信息,采用式(5)得到转轴 Z 方向的位移信息。此时式中的  $d(t)$  为  $t$  时刻转轴轴线位置位感条纹的在图像传感器中的条纹密度值,  $d_r$  为参考帧转轴轴线位置位感条纹的条纹密度值,  $\Delta m(t)$  和  $\Delta n(t)$  分别为  $t$  时刻转轴轴线在 Y 方向上偏移参考轴线的像素偏移量和转轴轴线位置的位感条纹在 Z 方向上偏移初始位置的像素偏移量,  $L$  和  $N_t$  分别为参考帧转轴轴线位置条纹的实际长度与其覆盖的像素点总数。

为了对单密度位感条纹转轴三维位移测量系统的测量性能进行测试,采用该系统对转子系统的旋转转轴三维振动进行测量,实验装置如图 8 所示。实验转轴直径为 10 mm,并由 3 个滑动轴承支撑,左端通过柔性联轴器与电机相连。条纹密度为 16 周期/cm、长度为 6 cm 的单密度位感条纹环贴于转轴的中心位置,用于感知转轴的三维振动。高速相机安装于相机三角架上,成像镜头的成像光轴与转轴轴线垂直并处于同一平面。

作为对比,采用 3 个电涡流传感器对转轴的三维振动进行同步测量。其中两个电涡流传感器互相成 90°角安装在位感条纹相同位置处,用于测量转轴的径向振动。由于电涡流传感器不能在位感条纹位置测量转轴的轴向振动,因此将一个电涡流传感器安装于转轴的右端面,用于测量转轴的轴向振动。三路电涡流传感器的信号通过动态信号采集系统进行同步采集和记录。

实验中先将转轴的转速设置到 1 500 r/min,然后使转轴逐渐减速直到停止。两种系统在 X、Y 和 Z 方向的时域信号结果分别如图 9~11 所示。由图 9 和 10 可知,两种测

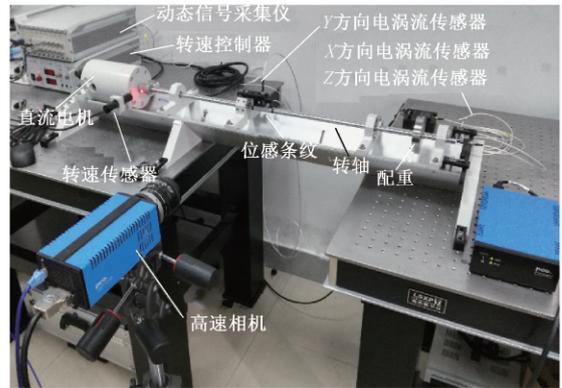


图 8 转轴三维振动位移测量实验装置

量系统得到的转轴 X 和 Y 方向的时域位移曲线幅值及其变化趋势基本相同。而从图 11 可以看出,两种时域位移曲线的变化趋势基本相同,但是不同时刻右侧电涡流传感器测量的 Z 方向位移的幅值比位感条纹测量的位移幅值大,这主要是由于两种测量系统对 Z 方向位移的测量位置不同和转轴的径向振动导致的转轴弯曲使转轴右端产生附加位移的结果。

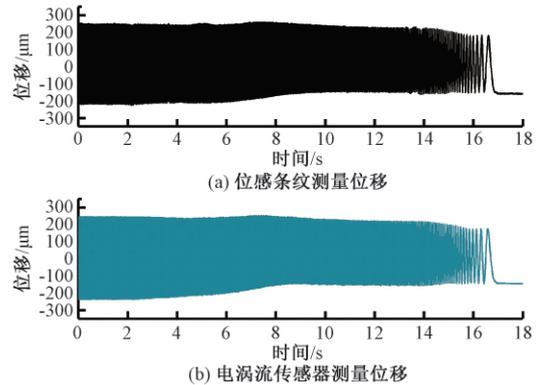


图 9 X 方向时域位移测量结果对比

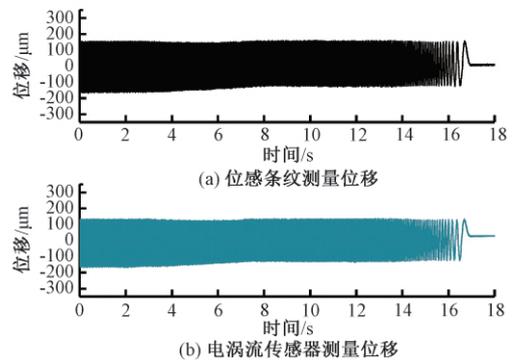


图 10 Y 方向时域位移测量结果对比

因此,基于单个单密度位感条纹的结构三维振动位移测量方法可实现转轴三维振动的同步测量,与传统的基于 3 个电涡流传感器的位移测量系统相比,简化了转轴位移测量系统的原理和组成,提高了转轴三维振动的测量效率。

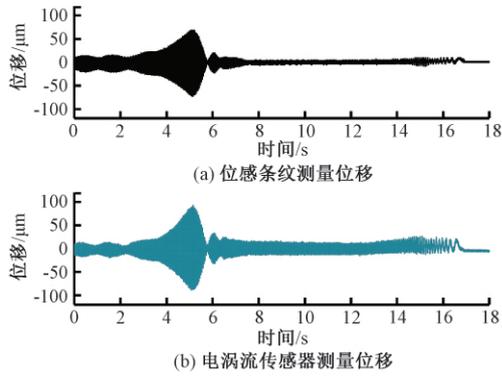


图11 Z方向时域位移测量结果对比

#### 2.4 基于变密度位感条纹的转轴角位移及转速测量

单密度位感条纹可用于转轴三维位移的同步测量,而转轴角位移的测量对于旋转机械的状态监测和故障诊断同样重要。因为获得转轴角位移信号后可进一步获得转轴的角速度和转速信号等,为旋转机械的状态监测与故障诊断等提供有效信息。为实现该功能,在采用单密度位感条纹测量系统实现转轴三维位移的基础上,进一步对单密度位感条纹进行改进,提出新型变密度位感条纹用于转轴角位移和瞬时转速的测量。该系统同样由变密度位感条纹和一台高速相机组成。测量前,将用于转角标记的变密度位感条纹环贴于转轴表面,再采用高速相机对该位感条纹进行采集。成像传感器中的条纹密度会随着转轴的转动变化,通过变化的条纹密度信息即可获得转轴的瞬时转角信息,然后通过两帧之间角位移的变化实现转轴转速的测量。

在实际测量过程中变密度位感条纹必须完全覆盖于转轴表面,即变密度位感条纹的宽度必须完全与转轴的周长相等。因此在实际的测量系统中,对条纹的粘贴有一定的精度要求,必须保证条纹能够完全包裹转轴的圆周表面。为了有效解决条纹对接精度不足引起的误差,可以采用双变密度位感条纹倾斜对接方案。将如图1(d)和(e)所示的两种变密度位感条纹设计成双变密度位感条纹作为转轴角位移传感器附于转轴表面后的结果分别如图12(a)和(b)所示。图中虚线位置为双变密度位感条纹的对接边位置,其与转轴轴线成一定夹角,该对接线对沿轴线方向的条纹强度信号影响较小,也可以使各个角度的条纹密度信号不丢失,保证测量的有效性。双变密度位感条纹可同时对转轴的转角信号进行测量,当左侧变密度位感条纹对接线影响转角的计算精度时,可采用右侧同一行像素上非对接线位置条纹获得的转角信号进行替代,可消除由于对接边线存在造成的影响。

当采用图12(a)所示的双线性变密度位感条纹进行测量时,该线性变密度位感条纹环贴于待测转轴的圆周表面,设计时必须保证位感条纹的宽度与转轴的周长相等,即 $W=D_1\pi$ ,其中 $D_1$ 为转轴的直径。假设条纹的密度从 $d_s$ 线性变化到 $d_e$ ,对应转轴的转角从0变化到 $2\pi$ 。当转轴在转

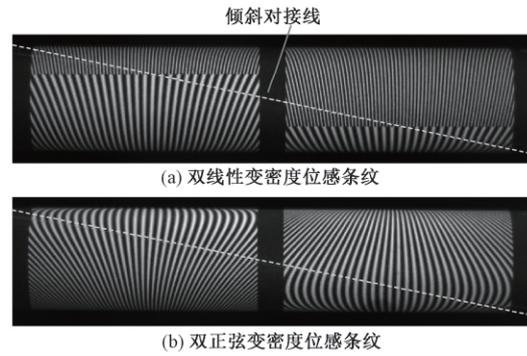


图12 转轴表面倾斜对接的双变密度位感条纹

动时,固定成像位置的条纹密度会随着转轴转动角度的变化而变化,那么转轴的转角与密度的变换关系为:

$$\theta_i = \frac{2\pi}{d_e - d_s}(d_i - d_s) \quad (6)$$

式中: $\theta_i$ 为第 $i$ 帧位感条纹计算获得的转角; $d_i$ 为第 $i$ 帧位感条纹转轴轴线处位感条纹的条纹密度值。由式(6)获得的转角曲线包裹于0和 $2\pi$ 之间,可通过解包裹算法获得连续变化的旋转角位移曲线。因此,相邻两帧条纹图之间的瞬时角速度为:

$$\omega_i = \frac{d\theta_i}{dt} = \frac{2\pi(d_i - d_{i-1})}{(d_e - d_s)}F_s \quad (7)$$

式中: $F_s$ 为高速相机的采样频率。最终,转轴的瞬时转速 $n_i$ 可以表达为:

$$n_i = \frac{60\omega_i}{2\pi} = \frac{60(d_i - d_{i-1})}{(d_e - d_s)}F_s \quad (8)$$

当采用图12(b)所示的双正弦变密度位感条纹进行转轴转角测量时,左右两侧的条纹密度变化曲线都是连续变化的正弦曲线,但右侧条纹密度变化曲线相对于左侧条纹密度变化曲线有 $\pi/2$ 的相位延迟。在计算转轴的转角信息时,先采用式(9)和(10)计算归一化后的左侧条纹密度变化曲线( $d_{left}$ )和右侧条纹密度变化曲线( $d_{right}$ )的相位变化曲线,再通过式(11)确定转轴的旋转角位移时域变化曲线。亦可通过式(7)和(8)获得转轴的瞬时转速信号时域变化曲线。

$$P1 = \arcsin(d_{left}) \quad (9)$$

$$P2 = \arcsin(d_{right}) \quad (10)$$

$$\theta = \begin{cases} P1, & 0 \leq P1 \leq \frac{\pi}{2} \ \& \ -\frac{\pi}{2} \leq P2 \leq 0 \\ \pi - P1, & -\frac{\pi}{2} \leq P1 \leq \frac{\pi}{2} \ \& \ 0 \leq P2 \leq \frac{\pi}{2} \\ 2\pi + P1, & -\frac{\pi}{2} \leq P1 \leq 0 \ \& \ -\frac{\pi}{2} \leq P2 \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

为验证该转速测量系统对变转速的测量效果,采用该转速测量系统对幅值线性减小的正弦变转速进行测量,结果如图13所示。由正弦变密度位感条纹测量得到的转速曲线与编码器测量得到的转速曲线吻合较好。

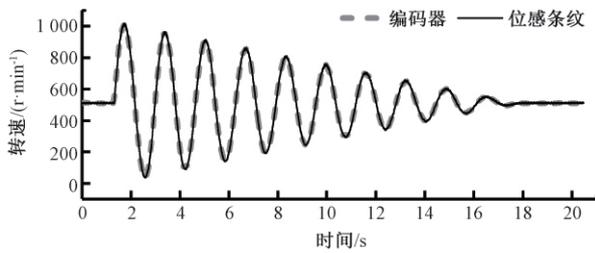


图 13 双正弦变密度条纹测量得到的转速幅值线性减小的正弦变转速信号<sup>[17]</sup>

采用该转速测量系统对该转子系统的转速切变动态特征进行测量。实验中高速相机的采样帧率设置为 5 000 s/帧,对绝对转速分别为 30 和 1 000 r/min,以 2 Hz 频率反向周期切换的转速信号进行测量,测量得到的转速曲线如图 14 所示。由图 14(a)可知,该转子系统在低转速转向切换时会出现明显的转速振荡,最后趋于设置的稳定转速值。对于高转速下的转向切换,并没有出现转速的振荡现象,转速值直接从超差值逐渐衰减到目标转速。因此,该系统可以对转子系统不同转速切变动态特征进行测量评价。

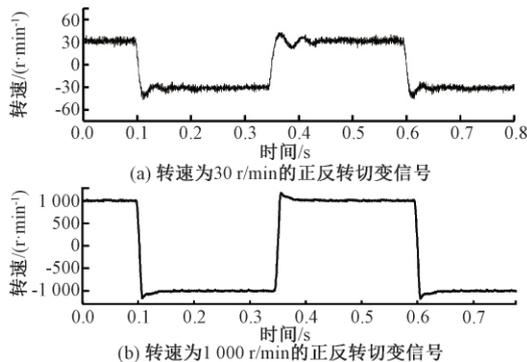


图 14 双正弦变密度条纹测量得到的不同转速切变信号<sup>[17]</sup>

文献[16-17]已对线性变密度位感条纹和正弦变密度位感条纹的测量性能及其转速测量影响因素进行了详细分析,对转轴在锯齿变转速、正弦变转速、方波变转速等不同转动模式下的转速信号进行了实验测量,并与转速编码器测量的转速信号进行了对比,验证了基于变密度位感条纹的测量系统在转轴旋转参数测量中的可行性与准确性。提出的位感条纹动态测量方法可为旋转机械转子的振动和转动参数同步测量提供新的测量技术,为转子在线监测和故障诊断提供新的测量方案。

### 3 结 论

基于二维光学相干振动层析系统中干涉条纹获取结构振动位移信息的特点和原理,提出并发展了一系列不同功能、不同类型可用于结构多维动态同步测量的位感条纹及测量方法。主要结论如下:

1)提出的基于单密度位感条纹和二次变密度位感条纹

的单目视觉测量系统可用于实现非旋转结构三维振动位移的同步测量,解决了单目视觉测量系统难以实现结构三维振动同步测量的问题。

2)提出的基于单密度位感条纹和变密度位感条纹的单目视觉转轴测量系统可实现转子三维振动位移和旋转角位移、角速度的同步测量,解决了当前转轴三维振动及转动测量需在多个位置布置多个多种传感器进行测量的问题,为转子动态测量提供新的测量方案,提高了测量效率。

### 参考文献

- [1] 徐超,张一凡,韩晓明,等.基于机器视觉的大柔性结构振动位移测量[J].振动测试与诊断,2017,37(4): 781-786,846.
- [2] 张浩亚,金永,李海涛,等.基于机器视觉的输电线舞动检测方法研究[J].国外电子测量技术,2020, 39(8): 1-4.
- [3] BUSCA G, CIGADA A, MAZZOLENI P, et al. Vibration monitoring of multiple bridge points by means of a unique vision-based measuring system[J]. Experimental Mechanics,2014,54(2):255-271.
- [4] CHOI H S,CHEUNG J H,KIM S H, et al.Structural dynamic displacement vision system using digital image processing[J]. NDT & E International, 2011, 44(7): 597-608.
- [5] FENG D, FENG M Q. Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring [J]. Structural Control and Health Monitoring,2016,23(5):876-890.
- [6] SONG Y Z, BOWEN C R, KIM A H, et al. Virtual visual sensors and their application in structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13:251-264.
- [7] CHANG C C, XIAO X H. Three-dimensional structural translation and rotation measurement using monocular videogrammetry [J]. Journal of Engineering Mechanics,2010,136(7):840-848.
- [8] 汪佳宝,张世荣,周清雅.基于视觉 EPnP 加权迭代算法的三维位移实时测量[J].仪器仪表学报,2020,41(2): 166-175.
- [9] FENG M, FUKUDA Y, FENG D, et al. Nontarget vision sensor for remote measurement of bridge dynamic response[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20:1-12.
- [10] KHUC T, CATBAS F N. Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision [J]. Structural Control and Health Monitoring,2017, 24(1):1-17.
- [11] 季云峰. 无目标计算机视觉技术在斜拉索振动测试中的应用研究[J]. 振动与冲击,2013,32(20): 184-

- 188,202.
- [12] 伍济钢,王刚,蒋勉,等.光流点匹配跟踪的薄壁件振动模态测试方法[J].电子测量与仪器学报,2017,31(6):850-858.
- [13] ZHONG J F, ZHONG S C, ZHANG Q K, et al. Two-dimensional optical coherence tomography for real-time structural dynamical characterization [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 66(1): 74-79.
- [14] ZHONG J F, ZHONG S C, ZHANG Q K. Two-dimensional optical coherence vibration tomography for low-frequency vibration measurement and response-only modal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 79: 65-71.
- [15] ZHONG J F, ZHONG SH, ZHANG Q K, 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, 2017, 28(1): 1-12.
- [16] ZHONG J F, ZHONG S C, ZHANG Q K, et al. Vision-based measurement system for instantaneous rotational speed monitoring using linearly varying-density fringe pattern [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 99: 1-12.
- [17] ZHONG J F, ZHONG S C, ZHANG Q K, et al. Measurement of instantaneous rotational speed using double-sine-varying-density fringe pattern[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 103(1): 117-130.
- [18] ZHONG S C, ZHONG J F, ZHANG Q K, 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: 241-254.
- [19] ZHONG J F, ZHONG S C, ZHANG Q K. Quasi-OCVT technique for response-only experimental modal analysis of beam-like structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(11): 1-10.
- [20] HUIBIN L, KANG D. Anti-noise performance of energy centrobaric correction method using four points for discrete spectrum [J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(6): 659-664.
- [21] 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.

#### 作者简介

钟剑锋,工学博士,讲师,主要研究方向为智能传感与诊断、无损检测。

E-mail:zhongjianfeng@fzu.edu.cn

李思钰,硕士研究生,主要研究方向为基于机器视觉的结构动态测量与诊断。

E-mail:1085589886@qq.com

钟舜聪,工学博士,教授,主要研究方向为结构健康监测与设备故障诊断、无损检测、光学精密诊断仪器、太赫兹技术及其应用。

E-mail:sczhong@fzu.edu.cn