

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.10.006

基于条纹薄膜的非接触式振动 测量和模态分析系统研究*

徐宗煌, 钟舜聪*, 林云琳, 刘 峰, 陈 曼
(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:针对传感器自身重量影响结构模态参数的问题,提出了基于条纹薄膜的测量理论和方法,以实现非接触式振动测量。采用有限元模拟仿真和实验,探讨了薄膜的形状、材料、厚度、直径大小、条纹打印质量、条纹密度以及条纹采样分辨率等因素对系统测量性能的影响;利用傅里叶变换对薄膜表面条纹信号进行了分析,同时结合频谱校正方法对条纹的频域信号进行了校正,研究了基于条纹薄膜的低频振动测量系统的性能;该系统在横梁的非接触实验模态分析中,利用条纹薄膜测量成功实现了对梁结构的模态分析。研究表明:前三阶固有频率与模拟结果基本吻合;该测量方法简单有效,具有很好的工程应用前景。

关键词:条纹薄膜;低频振动测量;频谱校正方法;模态分析

中图分类号:TH825;TH878

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)10-1158-07

Noncontact vibration measurement and modal analysis system based on fringe-pattern thin films

XU Zong-huang, ZHONG Shun-cong, LIN Yun-lin, LIU Feng, CHEN Man
(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the influence of the weight of the sensors on the modal parameters of the structure, a fringe pattern-based testing theory and methodology were proposed in this work to noncontact measure vibration of the structures. The effects of shape, material, thickness, diameter, print quality and initial density of the fringe patterns on the measurement performance and sampling resolution of the fringe patterns were investigated using finite element simulations and experiment validations. The Fourier transform was employed to analyze the fringe pattern signal, combining with the frequency spectrum correction method to correct the frequency of the signal. Subsequently, the proposed testing system was applied for noncontact experimental modal analysis of beam-like structures. The results indicate that the first three resonance frequencies of the beams measured by the fringe pattern was consistent with the simulation results. The measuring principle of the proposed method is simple but effective and therefore, it could be recommended for real engineering applications.

Key words: fringe pattern; low-frequency vibration measurement; spectral correction method; modal analysis

0 引 言

声音的频率在 20 Hz - 20 kHz 之间。现阶段的声音测量方式主要有声压测量、声强测量和声功率测量

等^[1]。其中,最常见的是通过电学麦克风的形式进行声压的测量,其工作原理是通过空气中的振动压力波,将声音信号转化为电信号^[2]。

电学麦克风虽然具有较高的灵敏度,但是存在电

收稿日期:2020-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675103);机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金资助项目(MSV-2018-07);上海市自然科学基金项目(18ZR1414200);福建省质量技术监督局科技项目(FJMS2019044);福建省科技计划项目(2019I0004)

作者简介:徐宗煌(1992-),男,福建龙岩人,硕士研究生,主要从事结构有限元分析及无损检测技术的研究。E-mail: xu_zonghuang@163.com

通信联系人:钟舜聪,男,教授,博士生导师。E-mail: sczhong@fzu.edu.cn

信号的转换,会受到外界电磁信号的干扰^[3-5]。随着光纤传感技术的发展,人类开始利用以光波为载体的光纤麦克风来测量声压^[6],其主要原理是利用声音信号的声压作用改变反射面与光学镜头之间的距离,使得光电探测器上接收到的光强信号发生改变,从而感知声压的大小及变化^[7-8]。由于其是光纤结构,具有良好的抗外界磁场信号干扰的性能,然而光纤麦克风对振动膜的要求比较高,不但需要高反射率、制备方便的振动膜,而且容易受到外界环境和光源稳定性的影响,精度不高。此外,其光纤结构装置和解调系统相对比较复杂^[9]。

传统的振动测量方法是利用加速度传感器,但是因为传感器有自身的质量,在一定程度上会影响结构模态分析,特别是测量薄壁结构的模态分析时。

因此,笔者提出一种条纹薄膜实现对非接触式的振动测量方法。

1 薄膜振动的理论基础

一般来说,利用麦克风测量声音信号,其主要功能是测量声音的大小和频率,其分别是通过振膜的振幅和振动频率来表现^[10-11]。由于振膜起作用的主要是一阶振动模态^[12],这里推导振膜的一阶谐振频率的公式。

1.1 圆形振膜振动理论

假设圆形振膜的边缘被固定在支架上时,静止状态下其各处的张力为 T_0 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$),当声波传至振膜时,振膜在声压的作用下会产生振动,振膜中心位置的振幅最大,而边缘位置的振幅最小为 0。由于薄膜振幅很小,振膜振动时其边缘处的张力仍为 T_0 ,圆形振膜振动示意图如图 1 所示。

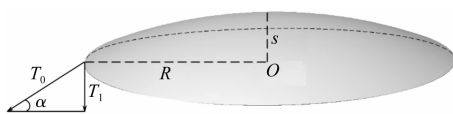


图 1 圆形振膜振动示意图

振膜振动时对其边缘的作用力,即回复力 F_1 为:

$$F_1 = -2\pi RT_1 = -2\pi RT_0 \sin\alpha = -2\pi T_0 s \quad (1)$$

式中: R —振膜的半径; α —振膜振动时张力方向与其静止状态的直径夹角; s —振膜的振幅大小。

振膜振动时受到的空气阻力 F_2 为:

$$F_2 = -(\pi R^2) \eta \frac{ds}{dt} \quad (2)$$

式中: η —空气的粘滞系数。

不妨假设声压为 $P = P_0 \sin\omega t$,则振膜所受到的声压作用力 F_3 为:

$$F_3 = (\pi R^2) P_0 \sin\omega t \quad (3)$$

根据牛顿第二定律,联立式(1~3)可以得到振膜振动的微分方程^[13]为:

$$\pi R^2 \sigma \frac{d^2 s}{dt^2} = -2\pi T_0 s - \pi R^2 \eta \frac{ds}{dt} + \pi R^2 P_0 \sin\omega t \quad (4)$$

式中: σ —振膜单位面积的质量,且满足 $\sigma = h\rho$; h —振膜的厚度; ρ —振膜材料的密度。

化简可得:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2k \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = \frac{P_0}{\sigma} \sin\omega t \quad (5)$$

式中: ω_0 —振膜的固有圆频率, $\omega_0 = \frac{k_0}{R} \sqrt{\frac{T_0}{\sigma}}$; k_0 —由第一类贝塞尔函数的根值决定^[14],这里取 $k_0 = 2.4048$ 。

则其一阶谐振频率为:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{k_0}{2\pi R} \sqrt{\frac{T_0}{h\rho}} \quad (6)$$

由式(6)可知,圆形振膜的一阶谐振频率与其半径、厚度成反比关系,振膜半径越大、厚度越厚,则一阶谐振频率越低,容易出现共振现象,导致声谐振频率越高,这样薄膜的频率响应特性越好。

1.2 方形振膜振动理论

由矩形薄膜自由振动的基本原理^[15]可知,方形振膜的一阶谐振频率为:

$$f_{m,n} = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{T_0}{h\rho} (m^2 + n^2)} \quad (7)$$

式中: a —方形振膜的边长; m, n —正整数,表示方形振膜振动的节线数。

若令 $m = n = 1$,即可得到方形振膜的最低一阶谐振频率为:

$$f_{m,n} = \frac{\sqrt{2}}{2a} \sqrt{\frac{T_0}{h\rho}} \quad (8)$$

2 条纹位移测量原理

条纹位移测量是利用高速相机成像,通过条纹的密度变化提取振动的位移信息。笔者将条纹附在薄膜表面,形成条纹薄膜。薄膜在声压的作用下,其表面的条纹密度会随着振动发生变化,条纹的频率信息也会发生变化。

由于薄膜四周被固定,其表面中心位置条纹的中心线密度变化呈现微小的线性变化,但考虑到薄膜中心位置的位移足够小,笔者近似地将薄膜振动视为平动变化,于是可以通过傅里叶变换对薄膜表面的条纹信号进行分析^[16]。同时,结合频谱校正方法对条纹信

号的频率进行校正^[17],得到条纹信号的真实频率信息,实现薄膜振动信息的提取,从而实现低频振动的测量,如图 2 所示。

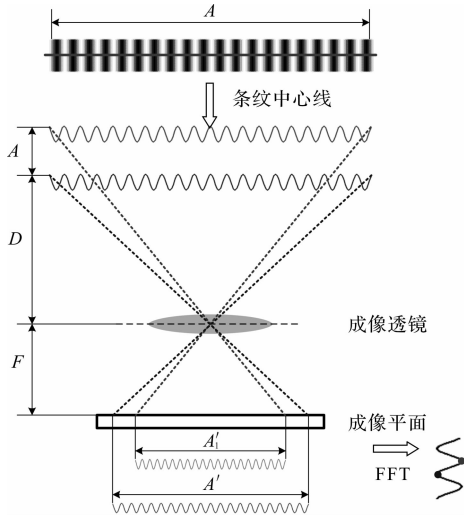


图 2 条纹位移测量原理图

A - 条纹的实际长度; A' - 条纹初始位置的成像长度;
 D - 物距; F - 像距,即透镜与成像平面之间的距离; ΔA - 条纹与初始位置之间的位移; A'_1 - 对应的成像长度

由成像原理可得:

$$\frac{A'}{F} = \frac{A}{D} \quad (9)$$

$$\frac{A'(t)}{F} = \frac{A}{D + \Delta A(t)} \quad (10)$$

由透镜的成像关系可得:

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{F} = \frac{1}{f} \quad (11)$$

$$M = \frac{F}{D} = \frac{A'}{A} \quad (12)$$

式中: f —透镜焦距; M —成像的放大因子。

由式(9 ~ 10),可知

$$D = f(1 + M) \quad (13)$$

联立以上各式,可得薄膜在 t 时刻振动的振幅为:

$$\Delta A(t) = \frac{f(1 + M)(a(t) - a_0)}{a_0} \quad (14)$$

式中: $a(t)$ —条纹在 t 时刻的成像条纹密度; a_0 —条纹初始位置对应的成像条纹密度。

由式(14)可知:在透镜焦距 f 与成像的放大因子一定的情况下,只需要知道初始位置的成像条纹密度及其在 t 时刻的密度变化,即可得到薄膜在 t 时刻振动的振幅。

3 条纹薄膜的性能研究

3.1 COMSOL 仿真模型

笔者利用 COMSOL Multiphysics 建立仿真模型。

该软件具有振动声学的接口,可以自定义点声源激励,薄膜在点声源声压的作用下将产生振动。模型可被简化为一个包含压力声学 and 壳单元 2 个物理接口的声壳耦合问题;同时笔者将薄膜简化为一个边界固定的圆形外壳,在其周围定义一个球形空气域,球形域内部包含一个点声源。

笔者对球形域边界应用球面波辐射条件,这样可以将整个声场视为没有界限,有限元仿真模型示意图,如图 3 所示。

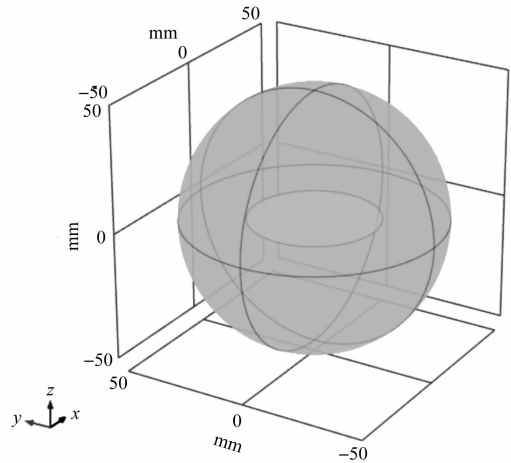


图 3 有限元仿真模型示意图

3.2 实验装置

本研究采用模拟仿真与实验分析相结合的方法,研究薄膜的形状、材料、厚度、直径大小、条纹打印质量、条纹密度以及条纹采样分辨率对测量性能的影响。

条纹薄膜性能实验装置如图 4 所示。

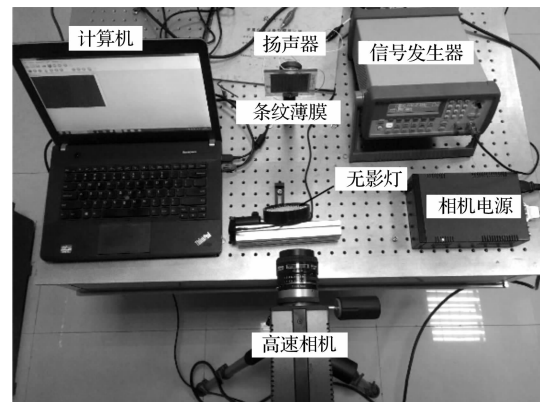


图 4 条纹薄膜性能实验装置图

图 4 中,采用型号为 PCO.1 200 hs 的 CMOS 高速相机,将其固定在三脚架上,调整成像镜头正对着条纹薄膜。薄膜通过夹具固定在工作台上,采用扬声器激励,扬声器由信号发生器(Agilent 33220)输出激励信号的幅值和频率进行控制。

3.3 COMSOL 仿真与实验结果分析

3.3.1 形状对测量性能的影响

通常情况下,大多数振动膜都是设计成圆形和方形结构^[18]。为了研究这两种薄膜形状对低频声音测量性能的影响,笔者先运用 COMSOL 软件分别对直径 $\varphi=50\text{ mm}$ 、边长 $a=50\text{ mm}$ 、厚度 $h=70\text{ }\mu\text{m}$ 的圆形和方形的 PET 薄膜进行应力分析,接着利用图 4 实验装置,采用 $0\sim 250\text{ Hz}$ 的扫频信号对两种形状薄膜进行激励,扫频时间为 10 s ,结果如图 5 所示。

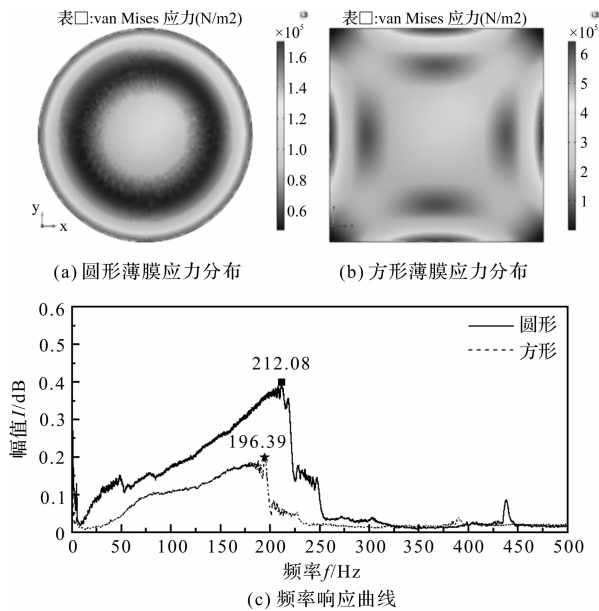


图 5 两种形状薄膜的应力分布与频率响应曲线

薄膜参数:弹性模量 $E=2.96\text{ GPa}$;泊松比 $\nu=0.37$;密度 $\rho=1\,420\text{ kg/m}^3$ 。

从图 5 可知:(1)圆形薄膜表面沿圆周方向应力分布均匀,而且在垂直圆周方向的应力分布呈阶梯状变化,无应力集中点;(2)方形薄膜表面的应力分布不均匀,且在薄膜四周边沿的中间位置处容易产生应力集中;(3)两种形状薄膜的频率响应范围均在 $0\sim 200\text{ Hz}$ 左右,而圆形薄膜的响应幅值比方形薄膜的大,说明圆形薄膜的频响效果更好。因此,笔者将条纹薄膜设计成圆形。

通过式(6~7)、COMSOL 有限元仿真和实验,得到的圆形和方形薄膜的一阶谐振频率结果,如表 1 所示。

表 1 圆形和方形薄膜的一阶谐振频率结果

(单位:Hz)			
形状	理论结果	仿真结果	实验结果
圆形	211.66	211.67	212.08
方形	195.52	195.52	196.39

由表 1 可知:两种薄膜的理论、仿真和实验一阶谐振频率基本吻合,验证了仿真与实验结果的准确性。

3.3.2 材料对测量性能的影响

为了研究不同材料、厚度和直径大小的振膜对测量性能的影响,笔者采用图 4 实验装置,采用条纹密度为 10 周期/cm 、直径为 $\varphi=40\text{ mm}$ 、厚度为 $h=85\text{ }\mu\text{m}$ 的 PET 膜和双胶纸;双胶纸的参数如下:弹性模量 $E=634\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.34$,密度 $\rho=1\,400\text{ kg/m}^3$,分别用 $0\sim 250\text{ Hz}$ 的扫频信号激励,高速相机的采样频率为 $f_s=2\text{ kHz}$ 。得到的结果如图 6 所示。

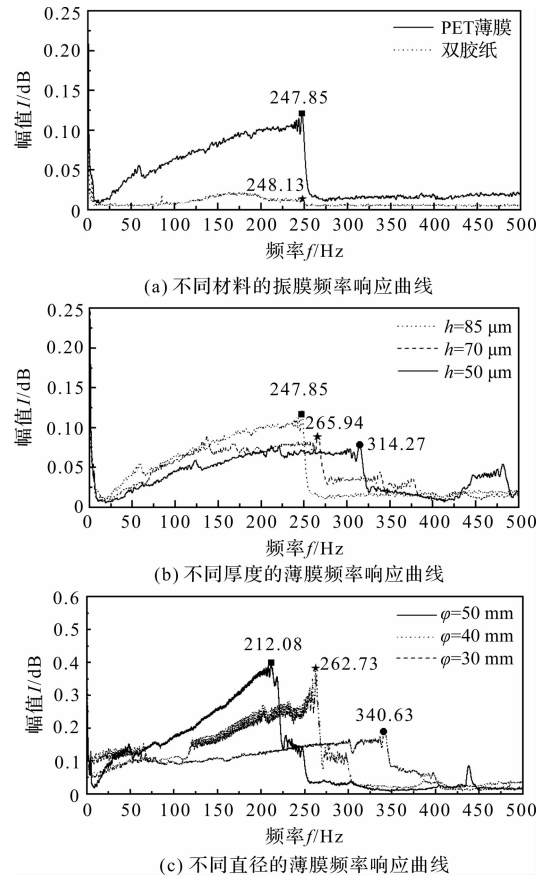


图 6 不同材料、厚度和直径的薄膜频率响应曲线

图 6 可知:不同材料的振膜频率响应曲线不同;PET 薄膜的响应幅值比双胶纸的大,双胶纸的响应幅值最高不超过 0.025 。这说明用双胶纸制作条纹薄膜,达不到低频声音的测量效果。

同理,分别通过式(6)、COMSOL 有限元模拟仿真和实验,得到 PET 薄膜和双胶纸的一阶谐振频率结果,如表 2 所示。

表 2 PET 薄膜和双胶纸的一阶谐振频率结果(单位:Hz)

材料	理论结果	仿真结果	实验结果
PET 薄膜	240.10	240.10	247.85
双胶纸	241.81	241.81	248.13

由表 2 可知:PET 薄膜和双胶纸的理论、仿真和实验一阶谐振频率基本吻合。结合图 6 实验结果,笔者利用 PET 薄膜制作条纹薄膜。

3.3.3 厚度对测量性能的影响

振膜的一阶谐振频率会随着其厚度的变化而变化,因此笔者采用条纹密度为 10 周期/cm,直径为 $\varphi = 40$ mm,厚度分别为 85 μm 、70 μm 和 50 μm 的 PET 薄膜,用 0 ~ 500 Hz 的扫频信号激励,高速相机的采样频率为 $f_s = 2$ kHz,以研究不同厚度对测试性能的影响。

由图 6(b)可知:随着振膜厚度的减小,其一阶谐振频率逐渐增大。分别通过式(6)、COMSOL 有限元模拟仿真和实验得到 3 种不同厚度下 PET 薄膜的一阶谐振频率结果,如表 3 所示。

表 3 85 μm 、70 μm 和 50 μm 薄膜的一阶谐振频率结果

(单位:Hz)

厚度/ μm	理论结果	仿真结果	实验结果
85	240.10	240.10	247.85
70	264.58	264.58	265.94
50	313.05	313.06	314.27

由表 3 可知:不同厚度下 PET 薄膜理论、仿真与实验所得到的一阶谐振频率基本吻合。

因此,在其他条件一定的情况下,应尽可能地选择厚度薄的振膜,以得到更宽的频率响应范围。

3.3.4 直径大小对测量性能的影响

同样,由式(6)可知:振膜的一阶谐振频率会随着其直径大小的变化而变化,采用条纹密度为 12 周期/cm,厚度为 $h = 70$ μm 的 PET 膜,直径分别为 30 mm、40 mm 和 50 mm 的 PET 薄膜,分别用扫频信号激励,高速相机的采样频率为 $f_s = 2$ kHz,以研究不同直径大小对测试性能的影响。

由图 6(c)可知:随着半径的增大,其频率响应范围逐渐减小,且频率响应范围均不低于 200 Hz。而且,随着直径的增大,薄膜的响应幅值不断增大,即频率响应的效果逐渐提高。

分别通过式(6)、COMSOL 有限元模拟仿真和实验得到不同直径大小 PET 薄膜的一阶谐振频率结果如表 4 所示。

表 4 30 mm、40 mm 和 50 mm 薄膜的一阶谐振频率结果

(单位:Hz)

直径/mm	理论结果	仿真结果	实验结果
30	352.77	352.78	340.63
40	264.58	264.58	262.73
50	211.66	211.67	212.08

由表 4 也可直观看出,不同直径下 PET 薄膜理论、仿真与实验所得到的一阶谐振频率基本吻合。

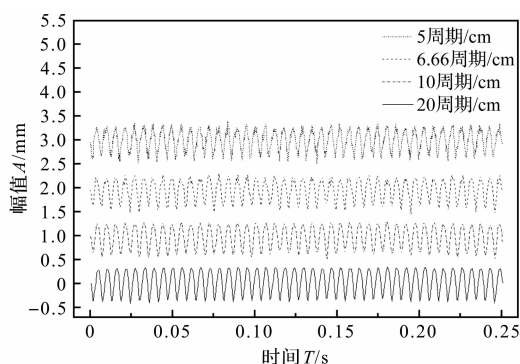
本研究设计的条纹薄膜直径为 $\varphi = 50$ mm,这样既能满足一定的频率响应范围,同时又能保证薄膜频响效果。

3.3.5 条纹打印质量对测量性能的影响

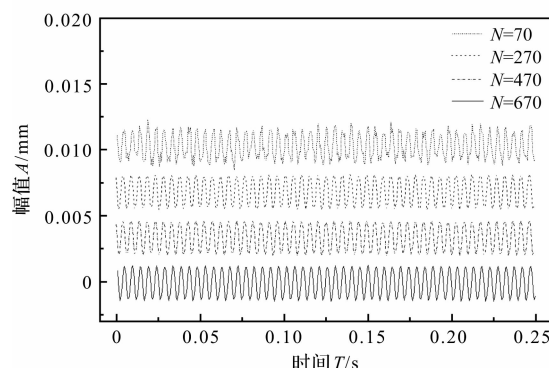
如果相机拍摄的条纹信号存在噪声,则会影响图像的识别精度,进而影响薄膜振动信息的提取精度,因此,应尽量减少由于薄膜表面初始条纹的打印质量不高引入的噪声。笔者利用 MATLAB 编写的条纹生成函数生成条纹,采用喷墨打印机将生成的条纹打印在 PET 薄膜表面,以减小自身引入的噪声,在一定程度上提高了条纹图像的识别精度和薄膜振动信息的提取精度。

3.3.6 条纹密度对测量性能的影响

笔者采用图 4 所示的实验装置,得到了不同条纹密度和像素点数的振膜对测量性能的影响,如图 7 所示。



(a) 不同条纹密度的薄膜中心位置振动位移图



(b) 不同像素点数的薄膜中心位置振动位移图

图 7 不同条纹密度与像素点数的薄膜中心位置振动位移图

在相机能够分辨条纹的情况下,笔者采用直径 $\varphi = 50$ mm、厚度 $h = 25$ μm 的 PET 膜,在固定频率 $f = 175$ Hz 的激励下,高速相机采样频率为 $f_s = 2$ kHz,分别设置了 5 周期/cm、6.66 周期/cm、10 周期/cm 以及 20 周期/cm 等 4 组不同条纹密度,研究条纹密度对振膜测量性能的影响。

由图 7(a)可知:初始条纹密度越小,在薄膜中心位置测量的位移曲线噪声越大,相应的误差也越大;反之,所得到的位移曲线越平滑、噪声越小,测量精度也越高。

综上所述,所研究的条纹薄膜参数为:直径为 $\varphi =$

50 mm、厚度为 $h = 50 \mu\text{m}$ 的圆形 PET 薄膜;条纹周期密度为 20 周期/cm 的正弦条纹。

3.3.7 条纹采样分辨率对测量性能的影响

通常相机中图像传感器的物理尺寸和像素分辨率是固定的。由图 2 和式(9)可知:当条纹薄膜的密度和长度一定时,对于固定的透镜,条纹在高速相机上的成像范围随着物距 D 的增加而减小。

为了研究条纹采样分辨率对条纹薄膜测量低频声音的影响,笔者采用条纹密度为 20 周期/cm、直径 $\varphi = 50 \text{ mm}$ 、厚度 $h = 70 \mu\text{m}$ 的 PET 膜,在固定频率 $f = 205 \text{ Hz}$ 的激励下,高速相机采样频率为 $f_s = 2 \text{ kHz}$,研究像素点数 N 分别为 70、270、470 和 670 的薄膜中心位置振动的测量结果。

由图 7(b)可知:对于同一密度条纹,随着相机像素点数 N 的增加,所得到薄膜中心位置的振动位移曲线越平滑,测量精度也越高。因此,在实际测量中,应使尽量多的像素点用于薄膜条纹的成像,以提高测量精度。

4 条纹薄膜在梁模态分析中的应用

为了验证条纹薄膜能有效地测量低频声音,笔者将所研究的条纹薄膜应用在横梁的模态分析中,进行实验验证。

笔者搭建的实验装置如图 8 所示。

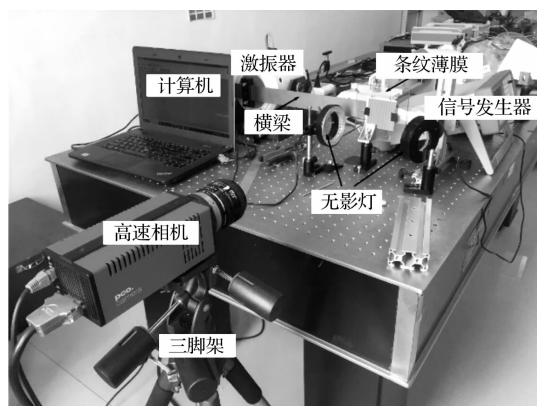


图 8 横梁模态分析实验装置图

分析结果如图 9 所示。

实验中,笔者采用的横梁尺寸为 $500 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$,其一端固定在工作台上,另一端固定在激振器(TIRA GmbH,德国)的输出端,激振器的振动幅值和频率由信号发生器(Agilent 33220)输出一段时长为 10 s,功率为 500 mV,频率 0 ~ 150 Hz 的扫频信号,并经过功率放大器后再输入激振器中。

首先,笔者通过 COMSOL Multiphysics 有限元模拟仿真,得到横梁的前三阶共振频率分别为 $f_1 =$

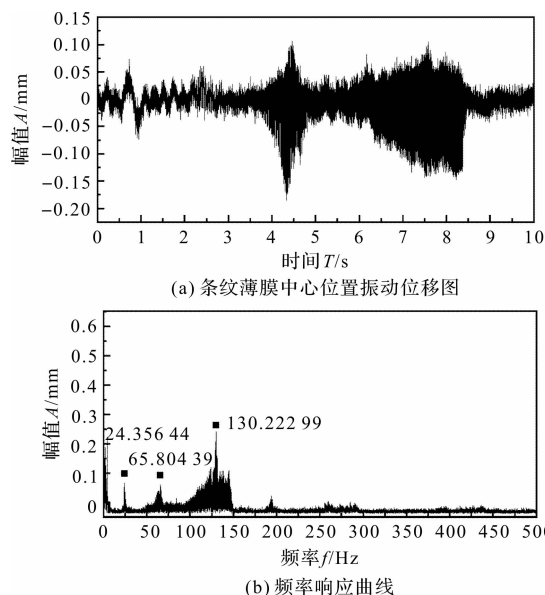


图 9 横梁振动模态分析结果

24.218 Hz , $f_2 = 66.765 \text{ Hz}$, $f_3 = 130.99 \text{ Hz}$ 。实验中,将条纹薄膜通过夹具放置在距离激振器一端 5/7 位置,利用采样频率为 $f_s = 2 \text{ kHz}$ 的 CMOS 高速相机进行采集,得到条纹薄膜中心位置的振动位移和频率响应曲线。

由图 8 可知:利用条纹薄膜测量得到横梁的前三阶共振频率分别为 $f_1 = 24.36 \text{ Hz}$, $f_2 = 65.80 \text{ Hz}$, $f_3 = 130.22 \text{ Hz}$,与仿真结果基本吻合,从而验证了所设计的条纹薄膜对低频声音能进行准确性测量。

5 结束语

为了避免传感器自身重量影响结构的模态参数,笔者提出了基于条纹薄膜的测量理论和方法,以实现非接触式振动测量;结合有限元模拟仿真和实验分析、探讨了薄膜的形状、材料、厚度、直径大小等因素对测量性能的影响;利用傅里叶变换,对薄膜表面的条纹信号进行了分析,并结合频谱校正方法对条纹频谱信号进行了校正,研究了低频振动测量的条纹薄膜;其次,笔者将条纹薄膜应用在梁结构的模态分析中。

实验结果表明:利用条纹薄膜测量得到横梁的前三阶固有频率与仿真结果基本吻合;该测量方法简单有效,具有很好的工程应用前景。

参考文献(References):

- [1] 赵松龄. 声学测量技术 20 年[J]. 声学技术, 2002, 21(1): 52-54.
- [2] 杜江. 用于光纤麦克风探测系统的光纤探头设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学光学工程系, 2012.

- [3] 付 涛. 新型光纤传感器及其在纤维复合材料的声发射源定位研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学航天学院, 2014.
- [4] WANG S, ZHANG M, CAO Y, et al. A Micro-machined Optical Fiber Acoustic Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer[C]. International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM), 2013.
- [5] 于洪峰, 王 伟, 王世宁, 等. 一种基于感声波纹结构的光学式声传感器[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(9): 68-70.
- [6] 王 伟, 栾 剑, 史 鑫, 等. 基于硅 MEMS 敏感结构的光学检测声传感器[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(3): 320-323.
- [7] LINDSTRÖM L H. Miniaturized pressure transducer intended for intravascular use [J]. **IEEE Transactions on Bio-medical Engineering**, 1970, BME-17(3): 207-219.
- [8] 蒋永梁. 光纤麦克风的理论和实验研究[D]. 南京: 东南大学电子工程系, 2005.
- [9] 欧阳毅, 郑虎鸣. 微小振幅的圆形振膜的受迫振动[J]. 电声基础, 2004(1): 7-8, 11.
- [10] MAMMEN H T, STIRMER U, KOCH M. Modelling and Application of silicon microphone systems [J]. **Electronics Packaging Technology Conference**, 2004 (8821): 183-188.
- [11] FU M, DEHE A, LERCH R. Analytical analysis and finite element simulation of advanced membranes for silicon microphones [J]. **IEEE Sensors Journal**, 2005, 5(5): 857-863.
- [12] HAQUE R I, LOUSSERT C, SERGENT M, et al. Optimization of capacitive acoustic resonant sensor using numerical simulation and design of experiment [J]. **Sensors**, 2015, 15(4): 8945-8967.
- [13] XU F, SHI J, GONG K, et al. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm [J]. **Optics Letters**, 2014, 39(10): 2838-2840.
- [14] BOWER A F. *Applied Mechanics of Solids* [M]. CRC Press; New York, USA, 2010.
- [15] 吴福光, 蔡承武, 徐 兆. 振动理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [16] ZHONG Shun-cong, ZHONG Jian-feng, ZHANG Qiu-kun, 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.
- [17] 丁 康, 谢 明, 杨志坚. 离散频谱分析校正理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [18] LAVETGNE T, DURAND S, BRUNEAU M, et al. Dynamic behavior of the circular membrane of an electrostatic microphone: effect of holes in the backing electrode [J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2010, 128(6): 3459-3477.

[编辑: 冯黎雅]

本文引用格式:

徐宗煌, 钟舜聪, 林云萍, 等. 基于条纹薄膜的非接触式振动测量和模态分析系统研究[J]. 机电工程, 2020, 37(10): 1158-1164.

XU Zong-huang, ZHONG Shun-cong, LIN Yun-lin, et al. Noncontact vibration measurement and modal analysis system based on fringe-pattern thin films[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(10): 1158-1164.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>