

基于曲率尺度空间角点检测与匹配的 薄壁件振动模态测试方法

伍济钢¹, 张双健^{1*}, 蒋勉², 王刚²

¹湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201;

²湖南科技大学先进矿山装备教育部工程研究中心, 湖南湘潭 411201

摘要 基于视觉的位移和振动测试方法大多需要人工在结构表面预设物理标记,这使得现场测试和监控变得繁琐。针对现有机器视觉技术在薄壁件振动模态测试上的不足,提出基于曲率尺度空间(CSS)角点检测与匹配的薄壁件振动模态测试方法。该方法通过人工设置的虚拟角点代替传统的物理标记,利用改进的CSS角点检测方法定位振动图像序列中的关键点,并采用基于像素平方差改进的匹配方法实现关键点匹配,最终获取振动信息并识别模态参数。对薄壁梁和薄壁圆筒进行振动模态实验,并利用有限元仿真和加速度传感器进行分析验证,结果表明,该方法能够有效准确地获得薄壁件的模态参数,测试精度误差在5%以内。

关键词 图像处理; 振动模态测试; 曲率尺度空间角点检测与匹配; 薄壁件

中图分类号 TH113.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.081001

Vibration Modal Testing Method of Thin-Walled Components Based on Curvature Scale Space Corner Detecting and Matching

Wu Jigang¹, Zhang Shuangjian¹, Jiang Mian², Wang Gang²

¹Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;

²Engineering Research Center of Advanced Mining Equipment, Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

Abstract Most of the displacement and vibration testing methods based on vision require artificial marker on structure surface, which makes vision-based testing and monitoring for real-life more complicated. Aiming at the disadvantages of the existing machine vision technology in vibration modal testing for thin-walled components, a vibration modal testing method of thin-walled components based on curvature scale space (CSS) corner detecting and matching is proposed. The virtual corner is set to replace traditional physical targets, and the key point of vibration image sequence of thin-walled components is oriented by the improved CSS corner detection algorithm, which is matched by using. Thus, the vibration information is obtained and modal parameters are identified. Eventually, the vibration modal testing experiments for thin-walled beam and thin-walled cylinder is carried out. By analyzing measurement results and verifying with finite element simulation and accelerometer, the results show that the proposed method can effectively and accurately obtain modal parameters, and the measurement error is less than 5%.

Key words image processing; vibration modal testing; curvature scale space corner detecting and matching; thin-walled components

OCIS codes 100.2000; 120.4630; 140.3040

收稿日期: 2017-02-27; **收到修改稿日期:** 2017-03-27

作者简介: 伍济钢(1978—),男,博士,副教授,主要从事机械动力学、故障诊断与视觉测量等方面的研究。

E-mail: jgwu@foxmail.com

* **通信联系人.** E-mail: sjzhang@cvm.ac.cn

1 引言

薄壁件具有质量轻、面积大、结构紧凑等优点,已在风力发电和航空航天等诸多工程领域广泛应用。但刚度低、强度弱的特点使其在实际工作中易产生噪声和共振等问题,长期应用会造成疲劳损伤和机器故障。因此需要进行振动模态测试以提供动力学优化与故障诊断的依据。

传统的加速度传感器能够准确测量物体的振动特性,但由于薄壁零件较轻,传感器引入的附加质量会影响其振动特性。针对该问题,尹涛^[1]提出了一种消除传感器附加质量的方法,但精度有限。此外,传感器只能获取单点数据,若进行全场测量需布置多个传感器,现场测试困难且效率较低。高金磊等^[2]研究了双光栅干涉位移测量系统,实现了纳米级精度的位移测量,但光路的安装和调试比较繁琐,且光源易受外界干扰。

近年来,机器视觉技术逐渐应用于振动测试领域。传统的机器视觉振动测试大多需要在结构表面人工预设物理标记以获取振动信号。单宝华等^[3]通过粘贴在结构表面的圆形标记获得了拉索模型的前三阶频率信息。在实际环境中,薄壁常处于高温、高压等恶劣工况下^[4],仅靠人力难以布置物理标记,因此无法实现在线测试和监控,同时空间分辨率有限的问题仍然存在。Dawie 等^[5]通过光流法实现了无标记下的视觉振动测试,获得了自行车固定架的前三阶固有频率,但误差大于 10%。这是由于光流法的前提条件是光照恒定及运动微小,因此利用光流法进行现场测试受环境和被测对象的局限较大。

针对传统视觉振动测试方法的不足,本文提出一种基于曲率尺度空间(CSS)角点检测与匹配的薄壁件振动模态测试方法。该方法通过设置在薄壁件边缘上的虚拟角点代替传统标记,然后对其进行跟踪获取振动信息。角点跟踪首先需要准确定位角点的初始位置,而基于边缘的角点检测方法主要是由 Mokhtarian 等^[6]提出的 CSS 的角点检测算法,其将角点定义为边缘轮廓上的曲率极大值,准确度高、计算量小。但该算法通过 Canny 边缘检测算法^[7]提取边缘特征,利用不同尺度的高斯核对边缘进行平滑,获得边缘的几何特征描述子后进行角点检测。然而,在高频振动的图像中,传统算法构造的角点特征描述子很难满足特征点的精确匹配,容易出现漏检和误检。因此,本文对 CSS 角点检测与匹配算法进行优化,实现对虚拟角点的精确定位,并通过角点匹配获得位移和振动信息,最终得到薄壁件的模态参数,进而避免繁琐的人工布置标记过程,使视觉测量技术非接触、全视野以及现场测试灵活的优势得到了充分体现。

2 基于 CSS 角点检测与匹配的振动模态测试方法

2.1 方法思路

提取被测对象的边缘,在边缘上人工设置一个虚拟角点并进行跟踪获得振动信息,最终识别模态参数。

由于本文算法是通过虚拟角点代替实际的物理标记获取振动信号,因此,所需解决的问题转化为如何在高频振动的图像中准确地定位虚拟点的位置,同时确保该点与初始点的同一性。具体步骤为:在提取的边缘上手动设置一条亚像素直线,将两个区域的交点作为虚拟角点,在后续的振动图像中寻找该点,并绘制出位移时程曲线,分析频谱得到频率信息,通过边缘提取直接获得相应的模态振型。该方法的流程如图 1 所示。

2.2 单目面内振动成像原理

以薄壁件为实验对象,其在受激励时,主要在竖平面内上下平动(Y 方向),因此只考虑 Y 方向上的振动特性。在相机成像平面内,薄壁件上的任意点均沿 Y 方向进行一维振动,根据针孔成像^[8]原理可以得到薄壁件在 Y 平面内的成像模型如图 2 所示。

图 2 中 v 为像距, u 为物距, O 为相机光心,在 t_0 时刻,A 为薄壁件振动前的实际空间位置,大小为 h ,B 为薄壁件振动前在成像平面中的位置,大小为 h' 。A 经过 Δt 时间后运动至 A' 位置,位移距离为 w ,而 B 在成像平面内运动至 B' 位置,根据相似关系可以得到薄壁件在成像平面中的位移为

$$\Delta h = H - h' = \frac{v \cdot (h + w)}{u} - \frac{v \cdot h}{u} = \frac{v \cdot w}{u}, \quad (1)$$

即 $\Delta h(t) = k \cdot w(t)$,其中,系数 $k = v/u$,由(1)式可知,薄壁件实际运动的位移量与成像平面内的位移量成线性关系,因此,可通过图像中像素坐标的变化表示实际空间中的位移变化。

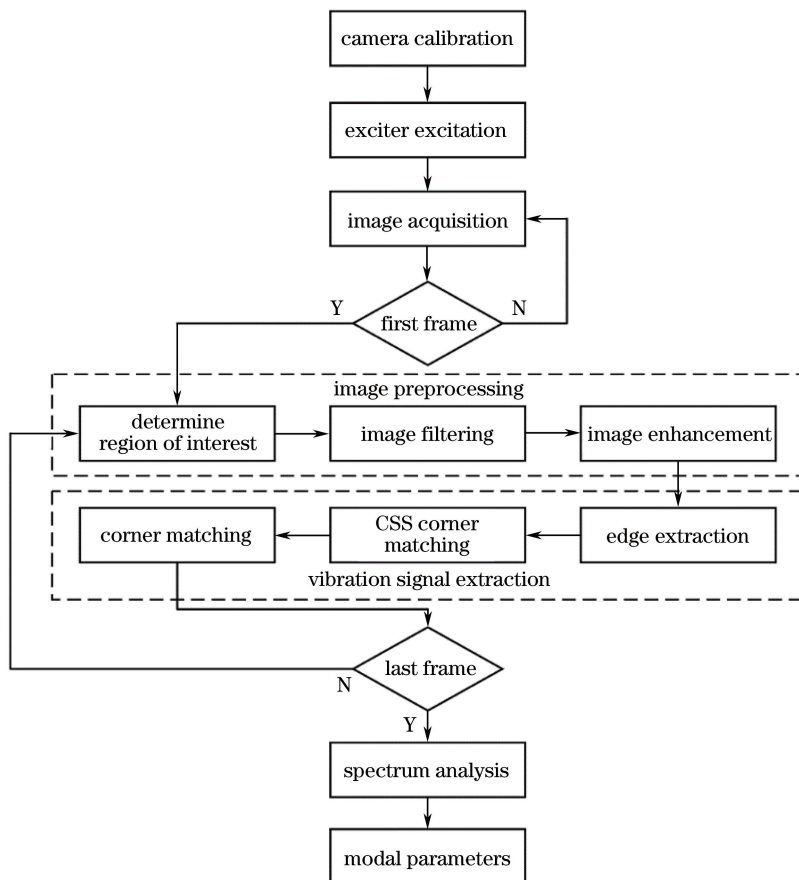


图 1 基于 CSS 角点检测与匹配的振动模态测试方法原理

Fig. 1 Principle of vibration modal testing method based on CSS corner detecting and matching

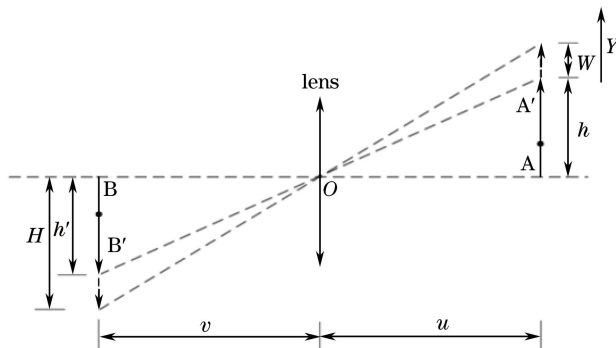


图 2 面内振动成像针孔模型

Fig. 2 Pinhole imaging model of in-plane vibration

3 基于 CSS 的角点检测与匹配

3.1 CSS 角点检测原理

常用角点提取算法有 Harris 算法^[9]、Susan 算法^[10]等。这两种角点检测算法均基于图像的灰度变化，薄壁件在高速振动时，边缘附近的灰度值变化剧烈、噪点陡增，致使传统方法检测到伪角点的可能性大幅提升，影响后续振动信号的提取精度。为了提取相同位置的特征点并提高可重复率，同时保证定位的精准度，降低误检和漏检的概率，本文采用一种基于 CSS 的角点检测算法。其原理是通过 Canny 边缘检测算法获取边缘特征，然后利用不同尺度的高斯核对边缘进行平滑，最终获得边缘的几何特征描述子后进行角点定位。

分析 CSS 角点检测过程,可以发现其存在以下两个问题:1) CSS 首先通过 Canny 算子获取边缘特征,其中步骤之一为高斯滤波^[11],此过程旨在抑制噪声以便后续精确提取边缘,对于高频振动下的薄壁件,高斯滤波会使其边缘模糊,对提取精度的影响很大,此外,通过边缘提取直接获取振型时,边缘检测算法的性能也会直接影响振型的准确性;2) CSS 角点检测算法在构造特征描述子时,只考虑了边缘的几何特征,并未考虑边缘上的像素点及其邻域的灰度变化,因此容易出现漏检和误检。针对 CSS 角点检测算法在薄壁件振动模态测试中的不足,本文提出一种改进的 CSS 角点检测算法。

3.2 改进的 CSS 角点检测与匹配

3.2.1 改进的 Canny 边缘检测

通过上文分析,可以将 Canny 边缘检测中的高斯滤波替换为具有边缘保留性质的双边滤波^[12]。图像平滑的本质是一种加权平均的过程,图像中的每个像素点通过各自邻域中其他像素值的加权平均得到滤波后的图像。高斯滤波在像素的加权平均过程中只考虑像素间的几何距离,而双边滤波还考虑了像素灰度的相似性,其表达式为

$$h(x) = k_r^{-1}(x) \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \cdot c(\xi, x) \cdot s[f(\xi), f(x)] d\xi, \quad (2)$$

$$k_r(x) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\xi, x) \cdot s[f(\xi), f(x)] d\xi, \quad (3)$$

其中权重函数一般为高斯函数

$$c(\xi, x) = \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{d(\xi, x)}{\sigma_d}\right]^2\right\}, d(\xi, x) = d(\xi - x) = \|\xi - x\|, \quad (4)$$

$$s(\xi, x) = \exp\left\{-\frac{1}{2} \left\{\frac{\sigma[f(\xi), f(x)]}{\sigma_r}\right\}^2\right\}, \sigma(\phi, f) = \sigma(\phi - f) = \|\phi - f\|, \quad (5)$$

式中 c 为像素间距离的权重, s 为像素间灰度相似性的权重, x 为中心像素点, ξ 为邻域像素点,随着 x 和 ξ 之间几何距离与灰度的变化,像素点 ξ 的权重也随之变化, $\|\xi - x\|$ 为两点之间的欧氏距离, σ_d 为空域高斯函数标准差, σ_r 为值域高斯函数的标准差。

当中心像素点 x 与邻域像素点 ξ 的欧氏距离较大或两点灰度值相差较大时,该点的权重就较小,在滤波时该点的影响较小,这样即可保护边缘上原像素点的灰度值,使其在滤掉噪声的同时保留边缘。

改进前后的 Canny 边缘检测结果如图 3 所示。

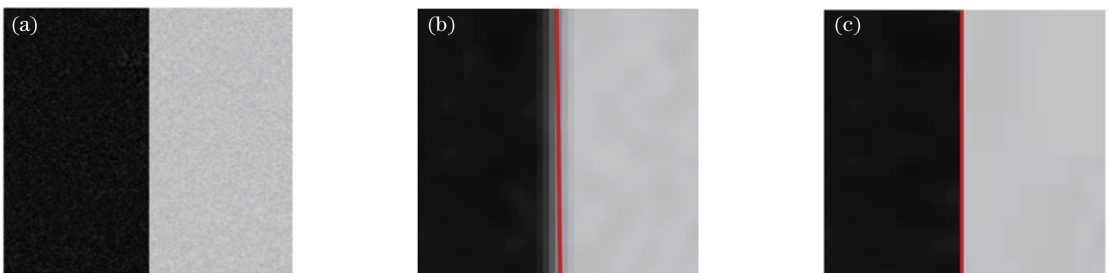


图 3 Canny 边缘检测结果。(a)噪声边缘;(b)高斯滤波;(c)双边滤波

Fig. 3 Results of Canny edge detection. (a) Noise edge; (b) Gaussian filter; (c) bilateral filter

由图 3 可知,高斯滤波和双边滤波均能很好地抑制噪声,但高斯平滑导致的边缘处变化为线性的,因此边缘梯度呈现渐变状态,进而导致后续提取的边缘并不完全准确;而双边滤波较好地保持了边缘梯度,确保了边缘特征的完整性和准确性。

3.2.2 构建基于几何与灰度变化的特征描述子

为了使 CSS 角点检测更准确,对其特征描述子进行改进。将 Canny 边缘检测的边缘轮廓记作 $I(x, y)$,利用不同尺度 σ_i ($\sigma_i = 1, 2, 3$) 的高斯核对边缘上的像素进行平滑,利用基于二阶微分算子获得邻域像素的灰度变化,可以得到

$$\begin{cases} \bar{I}_x^2 = \bar{I}_x^2 \otimes W \\ \bar{I}_y^2 = \bar{I}_y^2 \otimes W \\ \overline{I_x I_y} = I_x I_y \otimes W \\ I_x = \frac{\partial I}{\partial x} \\ I_y = \frac{\partial I}{\partial y} \\ W_{\sigma_i} = \frac{1}{2\pi\sigma_i^2} \exp[-(x^2 + y^2)/2\sigma_i^2] \end{cases}, \quad (6)$$

式中 I_x 和 I_y 分别为边缘轮廓上像素沿 x 和 y 方向上的一阶微分, W_{σ_i} 为高斯核函数。

然后构建一个自相关矩阵

$$\mathbf{M}_{\sigma_i} = \begin{bmatrix} \bar{I}_x^2 & \overline{I_x I_y} \\ \overline{I_x I_y} & \bar{I}_y^2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据文献[13]可知,当自相关矩阵 \mathbf{M}_{σ_i} 对应的两个特征值均比较大时,表明该点在图像中沿各个方向的灰度变化也很大,则将该点作为角点;而当两个特征值相差比较大时,则表明该点为边缘点。此外,由于采集的振动图像噪声较多,需要进行图像增强以提高前景与背景的对比,为了减小该过程对检测结果的影响,对边缘点的自相关矩阵特征值进行归一化处理,以便精确检测角点。假定自相关矩阵 \mathbf{M}_{σ_i} 的两个特征值分别为 $\gamma_{\sigma_i}^1$ 和 $\gamma_{\sigma_i}^2$, 则其归一化后的特征值为

$$\bar{\gamma}_{\sigma_i}(x, y) = \frac{\min(|\gamma_{\sigma_i}^1|, |\gamma_{\sigma_i}^2|)}{\max(|\gamma_{\sigma_i}^1|, |\gamma_{\sigma_i}^2|)}. \quad (8)$$

尺度 σ_i 越大,平滑程度越大,抗噪声能力越强;相反,尺度 σ_i 越小,定位精确性越高,为了使角点检测更精确,稳健性更强,将 $\sigma_i = 1, 2, 3$ 三种尺度下对应的自相关矩阵的归一化特征值相乘,得到角点特征描述子

$$\eta(x, y) = \bar{\gamma}_{\sigma_1}(x, y) \cdot \bar{\gamma}_{\sigma_2}(x, y) \cdot \bar{\gamma}_{\sigma_3}(x, y). \quad (9)$$

由(9)式可知,所构造的角点特征描述子包含了不同尺度下边缘点附近的灰度变化信息,因此可以使边缘角点的检测更精确。改进后的 CSS 角点检测步骤如下:

- 1) 利用改进后的 Canny 边缘检测提取图像的边缘轮廓;
- 2) 通过尺度为 σ_i 的高斯函数 W_{σ_i} 对图像进行平滑,利用微分算子求得边缘上每个像素的水平与垂直方向的灰度变化 I_x 和 I_y , 以此构造一个自相关矩阵 \mathbf{M}_{σ_i} ;
- 3) 计算每个边缘像素自相关矩阵的归一化特征值 γ_{σ_i} , 如(5)式所示;
- 4) 计算不同尺度的归一化特征值并相乘得到 $\eta(x, y)$, 如(7)式所示;
- 5) 将 $\eta(x, y)$ 与预设阈值进行比较,如果 $\eta(x, y)$ 大于预设阈值,则认为该像素点为备选角点;
- 6) 对备选角点进行非极大值抑制,若中心像素点的 $\eta(x, y)$ 为局部极大值,则认为该点为角点,否则进行剔除。

图 4 所示为三种角点检测算法的效果对比。



图 4 三种角点检测算法的效果对比。(a) Harris 算法;(b) CSS 算法;(c)改进后的 CSS 算法

Fig. 4 Comparison of three corner detection algorithms.

(a) Harris algorithm; (b) CSS algorithm; (c) improved CSS algorithm

3.2.3 角点匹配

国内外学者对角点匹配算法进行了大量研究,传统匹配算法多为基于模板匹配^[14],如基于像素平方差的匹配方法,其将图像 A 中的某角点定为基准点,在图像 B 中遍历寻找与之距离最近的几个点,通过欧氏距离的大小和比值判定是否匹配成功,即将欧氏距离作为衡量角点间相似性的方法,公式为

$$S_{SSD} = \sum_{x,y \in w} [I_1(x,y) - I_2(x,y)]^2, \quad (10)$$

式中 I_1 和 I_2 分别为基准图像和目标图像,通过子窗口遍历目标图像,计算子窗口中心点的邻域像素值之差的平方和,当 S_{SSD} 取最小值时, I_2 中子窗口的中心点即为匹配点。

上述角点匹配方法需要计算所有像素点的距离,运行效率不高,且在角点较少的情况下容易出现零匹配,鉴于该情况,为了更快速、更精确地匹配边缘上的角点位置,在该算法基础上引入前文构造的角点特征描述子,以此作为粗匹配的衡量测度,该角点匹配的步骤如下:

1) 将基准图像 A 中角点邻域的特征描述子 $\eta(x,y)$ 作为测度,在目标图像 B 中用 6×6 的子窗口进行遍历,寻找相似度最大的子窗口记为 n_2 ;

2) 在基准图像 A 中以检测出的角点为中心构造 6×6 的区域 n_1 ,并计算 n_1 与 n_2 中心点的邻域像素值之差的平方和,根据(8)式,当 S_{SSD} 取得最小值时, n_2 的中心点即为匹配角点;

3) 将 n_2 的中心点邻域特征描述子 $\eta(x,y)'$ 作为新的测度,在下一帧图像中重复步骤 1) 和步骤 2),直至图像序列的最后帧。

角点匹配的示意图与匹配过程实例如图 5 和图 6 所示。

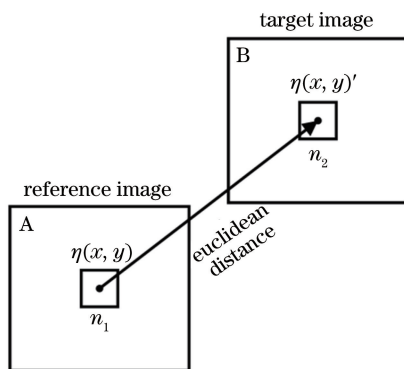


图 5 角点匹配示意图

Fig. 5 Schematic of corner matching



图 6 CSS 角点匹配过程。(a) 初始帧角点; (b) 下一帧角点; (c) 连续帧的角点匹配

Fig. 6 Matching process of CSS corner. (a) Initial frame corner; (b) next frame corner;

(c) corner matching between the continuous frames

取图 6(c) 中振动视频中的 10 帧图像进行分析,表 1 列出了其中角点匹配的位置坐标。

由于初始角点是人工设置的直线与边缘的交点,因此实际位置已知。根据表 1,每帧图像中角点的 X 坐标与初始点的 X 坐标偏差极小,可认为该点沿 Y 方向振动,与假设一致。每帧图像中匹配的角点与边缘之间距离均小于 0.015 pixel,可认作该角点为边缘点,证明改进后的 CSS 角点检测与匹配算法能够精确地定位边缘上虚拟角点的真实位置,确保了振动图像序列中的角点与初始点为同一点,解决了图像中边缘点的对应问题。

表 1 匹配的点角坐标
Table 1 Matching corner coordinates

Number of frames	X position /pixel	Y position /pixel	Distance between corner and edge/ pixel
1 (initial point)	30.012	102.874	—
2	30.024	103.432	0.013
3	30.028	103.961	0.008
4	30.032	104.258	0.005
5	30.035	104.774	0.011
6	30.002	104.347	0.003
7	30.017	104.162	0.003
8	30.016	103.729	0.015
9	30.008	103.185	0.007
10	30.015	102.874	0.006

4 实验验证及分析

4.1 实验系统及方案

实验系统如图 7 所示,一块 $777\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的铝板水平放置,其固定端连接激振器,激振杆末端附近粘贴一个加速度传感器,通过一台 IMB 3213UP 高速 CMOS 工业相机采集铝板在激励下的振动图像序列,相机的分辨率为 $640\text{ pixel} \times 480\text{ pixel}$,镜头焦距为 12 mm ,测量时物距为 2.3 m ,最大采样率为 300 Hz 。

测试过程中先由振动控制仪产生正弦激励信号,激励信号经功率放大器加载到激振器上,使激振杆产生相应的振动,带动被测物体振动,工业相机进行连续图像采集,将图像通传递给计算机并存储,最后计算机分析处理获得振动信息和模态参数,实验方案的设置与实验对象的尺寸分别如图 8 和图 9 所示。

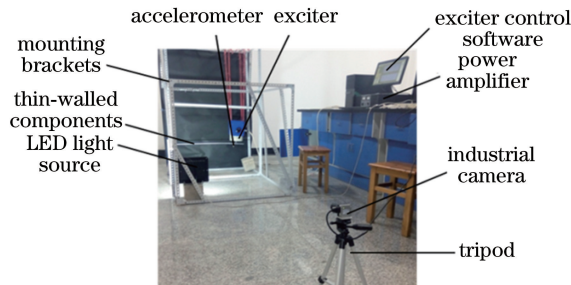


图 7 实验系统

Fig. 7 Experimental system

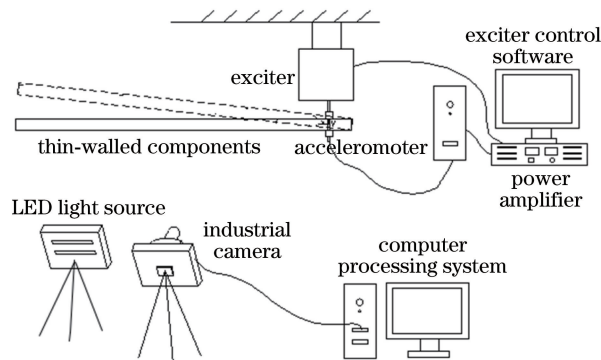


图 8 实验方案示意图

Fig. 8 Schematic of experimental scheme

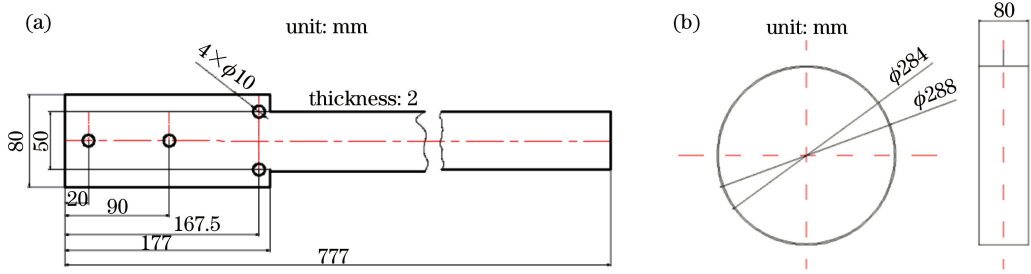


图9 实验对象示意图。(a)薄壁梁;(b)薄壁圆筒

Fig. 9 Schematic of experimental object. (a) Thin-walled beam; (b) thin-walled cylinder

4.2 薄壁件振动模态测试实验

4.2.1 实验过程

受制于工业相机的采样率,只研究薄壁件前两阶的模态参数。为了得到薄壁件的固有频率,首先通过激振仪进行扫频实验,时间为200 s,薄壁梁的频率范围为2~100 Hz,薄壁圆筒的频率范围为2~200 Hz,根据扫频实验得到的固有频率进行定频实验,该过程在特定频率下对薄壁件进行激振,目的是验证本文方法获取模态振型的可行性。

4.2.2 测量结果分析

薄壁件受激励的同时通过加速度传感器将振动的强弱反馈至激振仪,引起驱动电压的变化,并以频率的形式显示,结果如图10所示。

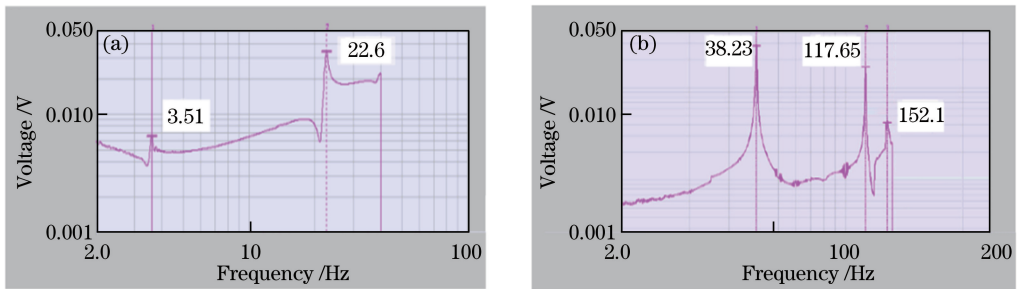


图10 经加速度传感器反馈的频率面板。(a)薄壁梁;(b)薄壁圆筒

Fig. 10 Frequency panel fed by accelerometer. (a) Thin-walled beam; (b) thin-walled cylinder

相机的曝光时间是等步长的,将匹配的各个离散位移等时刻地表示在坐标轴上,可以得到薄壁件上点P的位移时程曲线,再对其进行傅里叶变换便可获得频率信息。

根据图2可知

$$\frac{h'}{h} = \frac{v}{u}, \quad (11)$$

式中 h 为被测对象在空间中的实际大小, u 和 v 分别为物距和像距, h' 为被测对象在图像中所占像素的物理大小,其可表示为

$$h' = d \times \rho, \quad (12)$$

式中 d 为物体在图像中所占像素的个数, ρ 为相机镜头的像素单元物理尺寸(在相机说明书中有提供,大小为 $4.8 \mu\text{m}$)。

将(12)式代入(11)式,可得像素毫米比为

$$R = \frac{d}{h} = \frac{v}{\rho \times u}. \quad (13)$$

而根据光学成像原理,有

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}, \quad (14)$$

式中 f 为焦距, 本文实验中的相机镜头焦距为 12 mm, 相机拍摄时的物距为 2.3 m, 代入(14)式可得此工作距离下的像距 v , 将已知的 u 和 v 代入(13)式可得 $R=0.92$ mm/pixel, 以此来量化振动位移^[15]。

经过换算后, 点 P 的位移时程曲线与相应的频谱图如图 11 和图 12 所示。

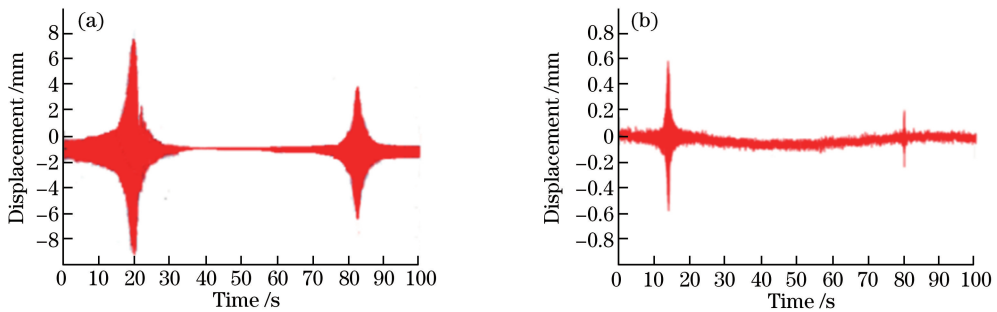


图 11 点 P 的位移时程曲线。(a)薄壁梁;(b)薄壁圆筒

Fig. 11 Displacement and time curve of point P. (a) Thin-walled beam; (b) thin-walled cylinder

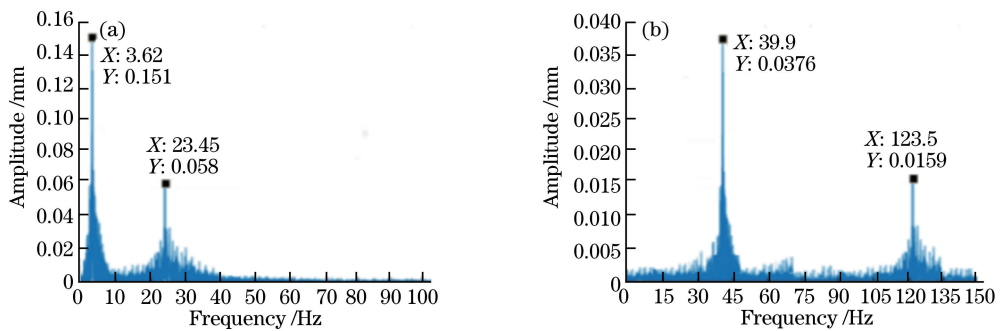


图 12 点 P 的频谱图。(a)薄壁梁;(b)薄壁圆筒

Fig. 12 Spectrum of point P. (a) Thin-walled beam; (b) thin-walled cylinder

为了直观地比较模态振型, 对薄壁件进行有限元模态分析, 在提取的边缘上等距离获取 12 个特征点的坐标并将坐标进行归一化, 通过曲线拟合可得薄壁梁和薄壁圆筒的前两阶振型, 结果如图 13 所示。

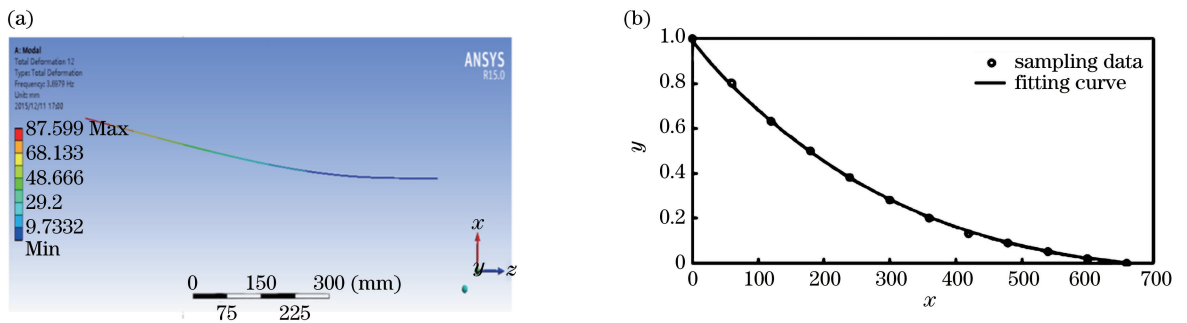


图 13 两种方法获得的薄壁梁一阶振型。(a)有限元仿真;(b)本文方法

Fig. 13 First modal shape of thin-walled beam obtained by two methods. (a) Finite element simulation; (b) proposed method

分析表 2 可知, 本文方法与加速度传感器测量的结果存在一定误差, 这是因为传感器的质量在一定程度上影响了薄壁件的动力学特性, 而且通过虚拟角点获取振动信息, 振动频率越高, 相机的成像精度对测量结果的影响也越大。分析图 13~16 可知, 本文方法与有限元仿真所得到的模态振型变化基本一致。相比于传统的视觉振动测试方法, 本文方法对设备的要求更高, 但其能够实现无标记下的视觉振动测试, 通过边缘特征上的任意点均能准确得到结构的振动特性, 避免了传感器附加质量的影响以及人工布置物理标记的繁琐过程, 现场测试灵活简便, 测量精度能够满足大部分工程测振的要求。此外, 传统的视觉振动测试方法存在标记有限的问题, 而本文方法能够设置更多的边缘点进行曲线拟合, 进而使振型结果更平滑。

表 2 两种测试方法的结果对比

Table 2 Comparison of two testing methods

	Frequency (first) /Hz	Frequency (second) /Hz	Error (first) /%	Error (second) /%
Proposed method (thin-walled beam)	3.62	23.45	—	—
Accelerometer proposed method (thin-walled cylinder)	3.51	22.6	3.1	3.8
Accelerometer	39.9	123.5	—	—
Accelerometer	38.23	117.65	4.4	5.0

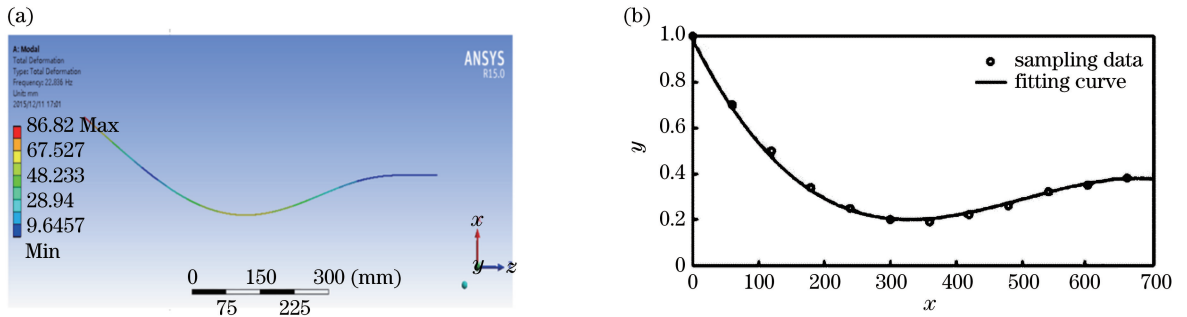


图 14 两种方法获得的薄壁梁二阶振型。(a)有限元仿真;(b)本文方法

Fig. 14 Second modal shape of thin-walled beam obtained by two methods. (a) Finite element simulation; (b) proposed method

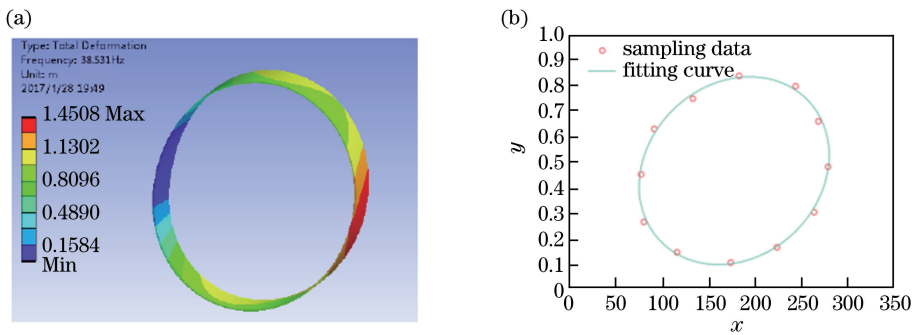


图 15 两种方法获得的薄壁圆筒一阶振型。(a)有限元仿真;(b)本文方法

Fig. 15 First modal shape of thin-walled cylinder obtained by two methods. (a) Finite element simulation; (b) proposed method

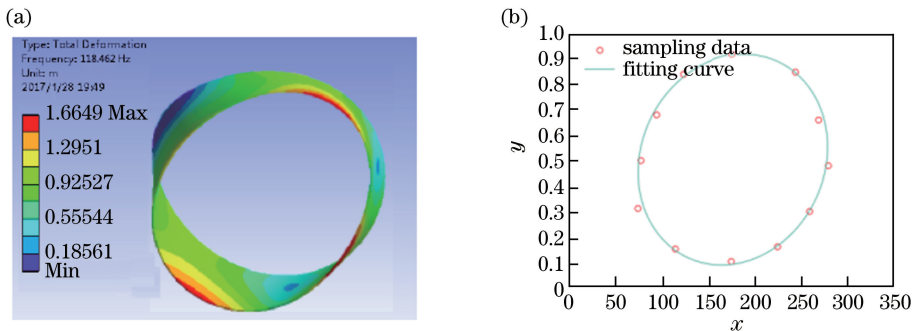


图 16 两种方法获得的薄壁圆筒二阶振型。(a)有限元仿真;(b)本文方法

Fig. 16 Second modal shape of thin-walled cylinder obtained by two methods. (a) Finite element simulation; (b) proposed method

5 结 论

介绍了基于 CSS 角点检测与匹配的振动模式测试方法原理,根据面内振动成像原理建立了相应的数学成像模型;分析了 CSS 角点检测的不足,并优化了 Canny 边缘检测算法;在 CSS 角点检测的基础上,构建了新的角点特征描述子,实现了特征点的匹配;振动模式实验获得了薄壁件的一阶和二阶固有频率及模式振

型。加速度传感器和有限元仿真实验结果表明,固有频率的测量结果精度较高,相对误差在5%以下,模态振型较吻合,能够满足工程模态测试的一般要求,证明该方法能够准确有效地测量薄壁件模态参数。

下一步还需对无明显边缘特征或边缘模糊的结构进行新算法研究;同时对于复杂曲面结构和离面振动,需建立双目立体视觉成像模型,从而研究三维振动。

参 考 文 献

- [1] Yin Tao. Elimination of transducer additional mass effects in time-domain responses [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(4): 28-34.
尹涛. 时域响应中传感器附加质量影响消除 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(4): 28-34.
- [2] Gao Jinlei, Zong Mingcheng. Development of symmetrical double-grating interferometric displacement measuring system [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(9): 0904003.
高金磊, 宗明成. 一种对称式双光栅干涉位移测量系统的研制 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904003.
- [3] Shan Baohua, Shen Yu. Free vibration monitoring testing of a stayed-cable model based on binocular vision [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(11): 105-111.
单宝华, 申宇. 基于双目视觉的拉索模型自由振动监测试验 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45(11): 105-111.
- [4] Shan Yanan. Strain modal-based damage identification method for thin-walled structure [J]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
单一男. 基于应变模态方法的薄壁结构损伤识别 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [5] Diamond D, Oberholster A, Heyns S. Structural vibration field test using optical flow analysis of a video sequence [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1740(1): 070001.
- [6] Mokhtarian F, Suomela R. Robust image corner detection through curvature scale space [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(12): 1376-1381.
- [7] Guo Meng, Hu Liaolin, Zhao Jiangtao. Surface defect detection method of ceramic bowl based on Kirsch and Canny operator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0904001.
郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于 Kirsch 和 Canny 算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0904001.
- [8] Qin M, Xia Q, Guo Y B, *et al.* Pose measurement model of space cooperative target capture based on zoom vision system [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(7): 1-8.
- [9] Zhang Congpeng, Wei Xueguang. Rectangle detection based on Harris corner [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2259-2266.
张从鹏, 魏学光. 基于 Harris 角点的矩形检测 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2259-2266.
- [10] Yu Helong, Su Hengqiang, Wang Yan, *et al.* Application of SUSAN corner detection and matching algorithm in high temperature deformation measurement [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(5): 1064-1072.
于合龙, 苏恒强, 汪岩, 等. SUSAN 角点检测和匹配算法在高温变形测量中的应用 [J]. *航空学报*, 2013, 34(5): 1064-1072.
- [11] Gao M, Liu J Z, Wang R Q, *et al.* Steady-state detection of power plant history data based on adaptive gauss filter [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2014, 34(9): 708-713.
- [12] Yang Yongfa, Li Qi. Application of bilateral filtering algorithm on terahertz confocal scanning image denoising [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 121101.
杨永发, 李琦. 双边滤波算法的太赫兹共焦扫描图像去噪应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 121101.
- [13] Shui P L, Zhang W C. Corner detection and classification using anisotropic directional derivative representations [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(8): 3204-3218.
- [14] Peng Yuqing, Li Mu, Gao Qingqing, *et al.* Mobile robot target recognition based on dynamic template matching [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(1): 58-63.
彭玉青, 李木, 高晴晴, 等. 基于动态模板匹配的移动机器人目标识别 [J]. *传感技术学报*, 2016, 29(1): 58-63.
- [15] Khuc T, Catbas N F. Computer vision-based displacement and vibration monitoring without using physical target on structure [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(4): 505-516.