

文章编号: 0253-2239(2006)11-1647-4

# 连续振动悬臂梁的瞬时三维形貌测量\*

陈凡秀<sup>1,2</sup> 何小元<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 东南大学工程力学系, 南京 210096  
<sup>2</sup> 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘要:** 提出一种连续振动悬臂梁瞬时三维形貌的测量方法。利用影栅云纹法在连续振动悬臂梁表面产生包含有三维形貌信息的云纹, 采用准直双光源提高亮度, 通过高速摄像机获取随时间变化的一系列变形条纹, 利用傅里叶变换方法对序列图像进行处理, 采用补零延拓法对数据进行处理, 以减小频谱泄漏所引起的相位计算误差。将相位解包裹方法用于动态过程瞬时三维相位场的相位展开中, 重建了悬臂梁的瞬时三维形貌, 再现了悬臂梁的连续振动过程。

**关键词:** 光学测量; 傅里叶变换; 影栅云纹; 悬臂梁

中图分类号: O438 文献标识码: A

## Instantaneous Three-Dimensional Profile Measurement of Continually Vibrating Cantilever Beam

Chen Fanxiu<sup>1,2</sup> He Xiaoyuan<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096  
<sup>2</sup> Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract:** A method for instantaneous three-dimensional profile measurement of a continually vibrating cantilever beam is proposed. The moiré fringes containing the three-dimensional patterns information of a continually vibrating cantilever beam, generated by the interference of the grating lines and their shadows, are captured by a high-speed CCD camera. Two light sources are used to enhance the illumination of the fringe patterns. Fourier transform method is adopted to analyze the time-sequence fringe patterns, and the outer extended interpolation is used to decline the phase error resulting from the leakage of the frequency. The phase unwrapping method is used to unwrap the phase in the dynamic process, the instantaneous three-dimensional profile is obtained and the continually vibrating process of the cantilever beam is reconstructed.

**Key words:** optical measurement; Fourier transform; shadow moiré; cantilever beam

### 1 引 言

随着三维物体表面形状的非接触检测技术在科研、医学诊断、工程设计、质量检测及许多生产过程中越来越广泛的应用, 人们对三维形貌测量的要求越来越高。三维形貌测量中的光学测量方法<sup>[1~3]</sup>, 例如激光三角法、叠栅投影法、工业视觉测量法等具有非接触、灵敏度高、测量速度快、获取数据多、易于实行自动化测量等优点, 在三维测量中日益受到重视和广泛应用。

傅里叶变换轮廓术 (Fourier transform

profilometry, FTP)<sup>[4,5]</sup> 在光学测试方法中应用较为广泛, 它只需一帧变形条纹图即可解调得到相位图, 测量系统简单, 测量速度快, 数据处理量小, 易于处理动态过程<sup>[6]</sup>。本文研究了傅里叶变换在动态瞬时形貌测量的应用。以悬臂梁连续振动的瞬时三维形貌测量为例, 利用影栅云纹法在连续振动悬臂梁表面产生包含有三维形貌信息的云纹, 通过高速摄像机获取悬臂梁振动过程中的一系列变形条纹, 经过傅里叶变换、带通滤波、逆傅里叶变换、相位解包裹等处理后重建了悬臂梁的瞬时三维形貌, 再现了悬

\* 国家自然科学基金(10472026)和国家重点基础研究专项经费(2006CB300404)资助课题。

作者简介: 陈凡秀(1979~), 女, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事 MEMS 动静态力学性能光学测试方法分析与图像处理技术的研究。E-mail: cfxcfx@seu.edu.cn

导师简介: 何小元(1956~), 男, 江苏泰兴人, 东南大学教授, 主要从事光测力学方法与应用的研究。

收稿日期: 2005-12-12; 收到修改稿日期: 2006-04-25

臂梁的连续振动过程。

## 2 测量原理

利用影栅云纹法研究一曲面,在曲面前放置一

个空间周期为  $P$  的参考光栅,如图 1 所示。光源和 CCD 摄像机到光栅的距离相等。假定光场为正弦分布,则由面形  $h(x, y, t)$  调制,变形光栅图像的光强分布为<sup>[7]</sup>

$$I_{xy}(x, y, t) = a(x, y, t) + b(x, y, t) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y, t)] = a(x, y, t) + b(x, y, t) \cos\left\{2\pi f_0 x + \frac{2\pi h(x, y, t)d}{P[l + h(x, y, t)]}\right\}, \quad (1)$$

式中  $a(x, y, t)$  为背景光强,  $b(x, y, t)$  为条纹幅值。  $\varphi(x, y, t)$  是各时刻包含被测物体三维信息的相位。  $f_0$  是载波频率,  $h(x, y, t)$  为  $t$  时刻物体上点  $(x, y)$  到光栅的距离。背景光强  $a(x, y, t)$ 、条纹幅值  $b(x, y, t)$  和相位  $\varphi(x, y, t)$  变化缓慢,在一个条纹周期内可视为常量。

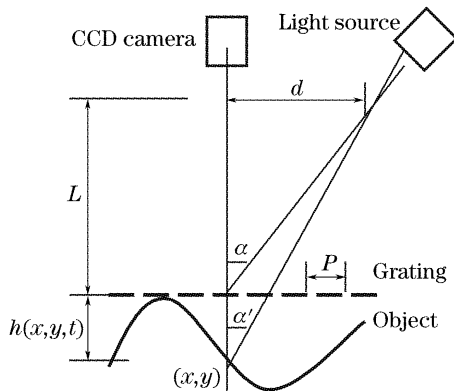


图 1 测量光路图

Fig. 1 Light path in experiment

在动态物体的三维形貌测量中,相位不仅和  $x$ ,  $y$  有关,还和时间  $t$  有关,最终计算得到的相位场是一个三维矩阵。为了得到相位信息,首先对一点时间轴的灰度变化进行一维傅里叶变换,得到该点沿时间轴的包裹相位。傅里叶变换是在频域中进行处理提取相位信息的,(1)式表示成

$$I_{xy}(x, y, t) = a(x, y, t) + c(x, y, t) \exp(j2\pi f_0 x) + c^*(x, y, t) \exp(-j2\pi f_0 x), \quad (2)$$

$$c(x, y, t) = b(x, y, t) \exp[j\varphi(x, y, t)]/2, \quad (3)$$

其中  $j$  为虚数单位,  $*$  表示复共轭。对(2)式做一维傅里叶变换,再进行滤波处理,滤出几种在  $f_0$  附近的频谱并将之移回频谱原点,经一维傅里叶反变换,可得到  $c(x, y, t)$ 。从而可求得点  $(x, y)$  在时刻  $t$  的相位分布为

$$\varphi(x, y, t) = \arctan\left\{\frac{\text{Im}[c(x, y, t)]}{\text{Re}[c(x, y, t)]}\right\}, \quad (4)$$

其中  $\text{Re}$  和  $\text{Im}$  表示复数的实部和虚部。

为减小频谱泄漏引起的相位计算误差,需要对

信号边界进行处理。通常处理边界效应问题<sup>[8~10]</sup>的典型方法主要有:补零延拓法、对称延拓法和光滑延拓法。补零延拓法假定信号支撑外值为零,这种延拓信号由于原边界外信号置零,在后续的有限区间信号零相位数字滤波中边界外的值对原支撑信号的影响也为零。对称延拓法假定信号在边界对称位置处值相等,它使信号在边界处幅值具有连续性,但它有可能增加原边界附近的断点。光滑延拓法试图将信号截断点外移,但对一般信号而言,它也有可能增加原信号边界的断点。因此实验中采用在信号的两端添零,即补零延拓法对数据进行处理。

## 3 相位解包裹计算

通过(4)式得到物体上各点沿时间轴的包裹相位,将结果保存到三维数组里。但实际得到的相位场在  $[-\pi, \pi]$  范围内,为了获得连续的真实相位分布,必须对得到的包裹相位图进行相位展开运算,即相位解包裹。

相位解包裹<sup>[11,12]</sup>可以首先对一帧较易展开的相位图作空域相位展开,最后依照这帧上展开后的各点连续相位值沿时间轴方向上进行时域相位展开,获得物体上点在各时刻的连续相位场;也可以首先选取一点沿时间轴方向上对每帧相应像素点进行时域相位展开,再依据该点的相位值对每帧进行空域相位展开,最终获得各时刻的连续相位场;基于悬臂梁在振动过程中的形貌特点,实验中采用第二种方法对得到的悬臂梁的包裹相位进行解包裹运算,有效地恢复了真实相位场。从相位解包裹得到的三维数组中直接提取各时刻的变形条纹相对于参考平面的相位差,这个相位变化率包含有物体的高度信息,根据相位与高度之间的关系,可恢复得到物体的瞬时三维形貌。

## 4 实验结论及分析

测量采用的实验装置如图 2。铝制悬臂梁一端

固定于激振台上。正弦栅线紧靠悬臂梁垂直放置，栅线频率为 5 line/mm。振动台沿  $z$  方向激振，激振频率约为 95 Hz。悬臂梁在激振频率下做受迫振动。实验中变形光栅图像由 FASTCAM-ultima 512 高速摄像机进行采集，高速摄像机光轴与  $z$  轴平行，采样频率为 4000 f/s，采样范围为 512 pixel $\times$ 256 pixel。

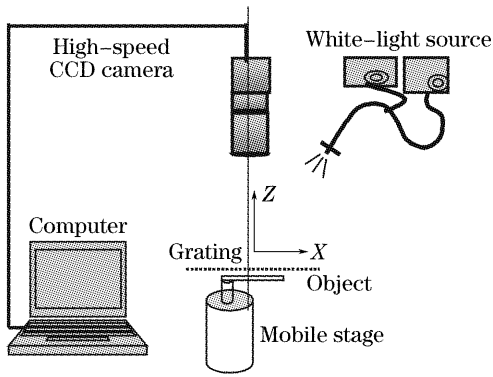


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

采用准直双光源提高亮度。实验装置中光源(或 CCD 摄像机)与参考栅之间的距离为 216 mm，光源和 CCD 摄像机之间的距离为 154 mm。

利用摄像机和图像采集卡获取条纹图，并存入计算机。对采集到时间间隔为  $2.5 \times 10^{-4}$  s 的 500 幅序列图像利用傅里叶变换方法处理，并通过补零延拓法处理数据，以减小频谱泄漏所引起的相位计算误差。利用相位解包裹方法对悬臂梁的包裹相位进行处理，得到了各时刻的真实相位图，从而恢复得到了悬臂梁的瞬时形貌，再现了悬臂梁的连续振动过程。图 3 给出了图像处理过程的悬臂梁云纹图、傅里叶变换得到的包裹相位图以及解包裹相位图，展示了悬臂梁瞬时三维相貌恢复的处理过程。可以看出，解包裹相位图效果很好，仅有个别点存在较小的误差，这些误差可通过滤波手段去除。得到的各时刻连续振动悬臂梁的瞬时三维形貌如图 4，该方法有效地恢复了悬臂梁的瞬时三维形貌，再现了悬臂梁的连续振动过程。

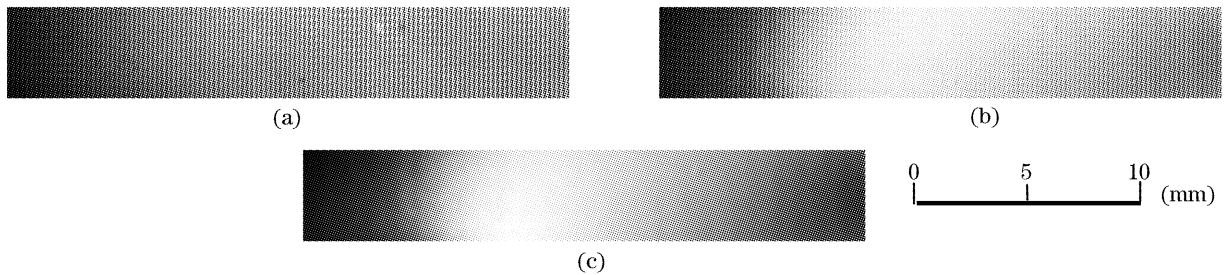


图 3  $T=0.07125$  s 时刻的 (a) 悬臂梁云纹图, (b) 包裹相位图, (c) 解包裹相位图

Fig. 3 (a) Deformed fringe of cantilever beam, (b) wrapped phase of (a), (c) unwrapped phase of (b) at  $T=0.07125$  s

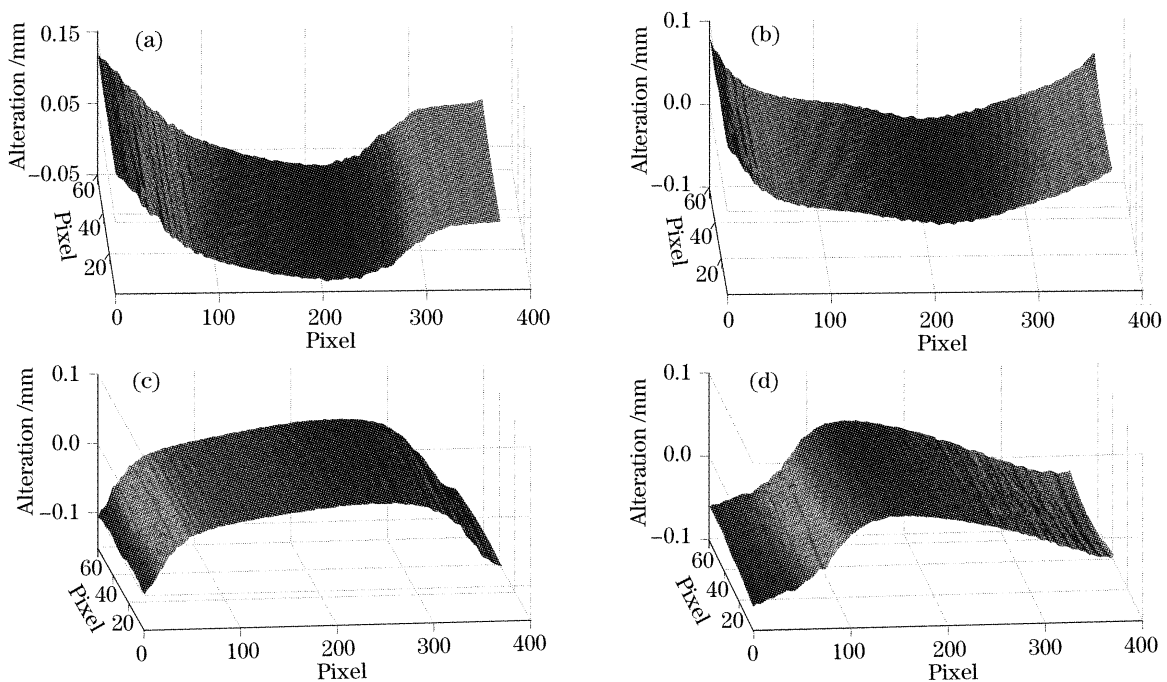


图 4 悬臂梁瞬时三维形貌图. (a)  $T=0.01250$  s, (b)  $T=0.03875$  s, (c)  $T=0.06250$  s, (d)  $T=0.07125$  s

Fig. 4 Instantaneous contours of cantilever beam. (a)  $T=0.01250$  s, (b)  $T=0.03875$  s, (c)  $T=0.06250$  s, (d)  $T=0.07125$  s

## 5 结 论

利用影栅云纹法测量连续振动悬臂梁的瞬时三维形貌,通过高速摄像机获取悬臂梁振动过程中的一系列变形条纹,经过傅里叶变换、带通滤波、逆傅里叶变换、相位解包裹等处理后重建了悬臂梁的瞬时三维形貌,再现了悬臂梁的整个振动过程。通过补零延拓法对数据进行处理,减小频谱泄漏所引起的相位计算误差。将相位解包裹方法用于动态过程测量中瞬时相位场的相位展开,得到了真实的解包裹相位场。本文研究表明:将三维形貌测量中的傅里叶变换方法应用到动态过程研究领域,能提供一种动态过程瞬时三维形貌重建的有力手段,还可以获取悬臂梁振动过程表面形态一系列特征参量。

## 参 考 文 献

- 1 Niu Xiaobing, Liu Yuchi, Zhao Meirong *et al.*. 3-D profilometry measurement using grating projection and key techniques analysis [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(9): 983~986 (in Chinese)  
牛小兵, 林玉池, 赵美蓉等. 光栅投影三维轮廓测量及关键技术分析[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(9): 983~986
- 2 Zhao Jing, Zhong Jingang. Three dimensioned shape measurement with digital projecting system [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(6): 555~558 (in Chinese)  
赵 静, 钟金钢. 数字投影系统在三位轮廓术中的应用[J]. *光学技术*, 2002, **28**(6): 555~558
- 3 Si Shuchun, Wang Yunshan, Yu Fushen. The measurement of transparence surface microtopography based on phase-approaching of projected grating[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(3): 281~284 (in Chinese)  
司书春, 王蕴珊, 于复生等. 基于投影栅相位法的透明体表面微观形貌测量[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(3): 281~284
- 4 Shao Shuangyun, Su Xianyu, Zhang Qican *et al.*. Application of modulation measurement profilometry in complex object shape measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1623~1628 (in Chinese)  
邵双运, 苏显渝, 张启灿等. 调制度测量轮廓术在复杂面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1623~1628
- 5 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Application of Gabor transform to 3-D shape analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 993~996 (in Chinese)  
翁嘉文, 钟金钢. 加窗傅里叶变换在三维形貌测量中的应用[J]. *光子学报*, 2003, **32**(8): 993~996
- 6 Su Xianyu, Chen Wenjing, Zhang Qichan *et al.*. Dynamic 3-D shape measurement method based on FTP[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **36**(1): 49~64
- 7 L. H. Jin, Y. Otani, T. Yoshizawa. Shadow moire profilometry by frequency sweeping[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4221**: 438~441
- 8 Chen Wenjing, Su Xianyu. A new method for improving measuring accuracy of Fourier transform profilometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(1): 19~22 (in Chinese)  
陈文静, 苏显渝. 提高 Fourier 变换轮廓术测量精度的新方法[J]. *光电工程*, 2002, **29**(1): 19~22
- 9 Kang Xiaoping, Yerken Ja. Using gerchberg iteration to eliminate edge errors in Fourier transform profilometry[J]. *J. Northwest Normal University (Natural Science)*, 2002, **38**(1): 103~105 (in Chinese)  
康小平, 叶尔肯·加. Fourier 变换轮廓术中采用 Gerchberg 叠代消除边缘误差[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2002, **38**(1): 103~105
- 10 Zhang Xiangchun, Song Yaozu. Analysis of measurement accuracy for mini-displacement of moiré fringe by Fourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1445~1450 (in Chinese)  
张香春, 宋耀祖. 傅里叶变换求取叠栅条纹微小位移的精度分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1445~1450.
- 11 Zhao Wenjie, Chen Wenjing, Chen Feng *et al.*. Unwrapping phase in dynamic 3-D measurement based on FTP[J]. *Laser J.*, 2004, **25**(6): 23~25 (in Chinese)  
赵文杰, 陈文静, 陈 峰等. 基于 FTP 的动态相位展开方法的研究[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(6): 23~25
- 12 Ma Shaopeng, Jin Guanchang, Dai Shuhong. 3-D profilometry system based on temporal phase unwrapping method[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(5): 395~400 (in Chinese)  
马少鹏, 金观昌, 代树红. 应用时域相位解包裹方法的三维形貌测量系统[J]. *光学技术*, 2002, **28**(5): 395~400