

文章编号 1004-924X(2012)08-1747-07

## 集成双光栅干涉微梁位移测量方法

冯金扬, 叶雄英\*, 陈 烽, 商院芳

(清华大学 精密仪器与机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**介绍了一种基于集成双光栅干涉和 CCD 图像测量的微梁位移测量方法, 并利用相位差约为  $\pi/2$  的一组光栅实现了扩量程位移检测。利用表面牺牲层工艺制作敏感芯片, 在玻璃基底上刻蚀深度约为入射激光波长  $1/8$  的凹槽, 凹槽上下的两组光栅与正上方对应的梁分别构成两组相位敏感集成光栅单元。利用 1 级衍射光将集成光栅单元成像在 CCD 靶面上, 梁的位移变化通过 CCD 图像上对应光斑的灰度值变化来反映。实验结果表明, 虽然玻璃凹槽腐蚀深度的误差导致光栅之间的相位差偏离  $\pi/2$ , 但所制作的集成双光栅结构实现了多周期的扩量程位移检测, 通过接近  $\pi/2$  相位差的两个光栅得到的光强信号的错峰使用, 避免了干涉法正弦位移检测信号的峰谷不灵敏位置, 实验测得微梁的位移变化为 650 nm。

**关键词:**位移测量; 集成双光栅干涉法; 图像测量; 微悬臂梁; 扩量程

**中图分类号:** TH744. 3; TH822 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20122008. 1747

## Interferometric displacement measurement of microcantilevers based on integrated dual gratings

FENG Jin-yang, YE Xiong-ying\*, CHEN Feng, SHANG Yuan-fang

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

\* Corresponding author, E-mail: xyue@mail. thu. edu. cn

**Abstract:** A displacement measurement method for microcantilevers based on integrated dual gratings and a CCD image measurement system were presented. The displacement detection range was extended by using two gratings with a phase shift about  $\pi/2$ . The sensor chips were fabricated by surface sacrificial process. Grooves with the depth about  $1/8$  of the incident laser wavelength were etched on the glass substrate and two adjacent gratings patterned inside and outside of the groove and the reflective undersurface of a cantilever formed two phase sensitive integrated gratings, respectively. The integrated grating units formed an image on the CCD sensing surface through the 1st order diffraction light, and the gray value change of the light spot was related to the displacement change of the corresponding cantilever. Experimental results show that although the phase difference between the gratings deviates from  $\pi/2$  caused by the depth errors of the etched grooves, the integrated dual gratings extend the range of displacement detection to multi periods. The insensitive areas at peaks and valleys

收稿日期: 2012-04-26; 修订日期: 2012-06-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 91023027, No. 50730009)

for sinusoidal variation signal of interferometric displacement detection method are avoided by using alternately intensity signals from the two gratings. In the experiment, the measured displacement change of the cantilever is 650 nm.

**Key words:** displacement measurement; integrated dual grating interferometry; image measurement; microcantilever; extended range

## 1 引言

作为一种最简单的微机械元件,微悬臂梁具有工艺简单、尺寸小、灵敏度高、易于实现阵列化等优点,近年来在生物传感器、气体传感器、质量传感器等方面得到了广泛的应用。当微梁表面吸附少量分子时,将引起梁发生弯曲偏转和谐振频率的变化,而基于微梁弯曲变形的检测方法不受液体介质黏性的影响,更适合于液体环境下的生化检测<sup>[1]</sup>。测量微梁弯曲变形的的主要方式有<sup>[2]</sup>:压阻式、电容式、场效应管式、光杠杆式和集成光栅干涉式等。

集成光栅干涉微位移测量方法可以实现高位移分辨率,且易于实现阵列化检测,目前基于集成光栅干涉的微机电系统(MEMS)传感器已有大量的报道。Manali 等<sup>[3]</sup>提出了用于原子力显微镜探针的衍射光栅干涉位移测量方法,利用动齿和定齿形成的相位敏感衍射光栅进行位移测量,在 10 Hz~1 kHz 带宽下均方根噪声约为  $2 \times 10^{-3}$  nm。不同于梳齿结构,Hall 等<sup>[4]</sup>在透明基底上制作金属光栅,金属可动结构作为反射面,形成相位敏感光栅,通过静电驱动来调节检测灵敏度,制作了微型麦克风,在 250 kHz 时噪声水平为  $2 \times 10^{-5}$  nm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。集成光栅测量原理还被用于高分辨率的加速度计<sup>[5]</sup>与陀螺<sup>[6]</sup>、红外成像<sup>[7-8]</sup>、生化检测传感器<sup>[9]</sup>等。

光干涉法位移检测的光强随位移发生正弦变化,在峰谷附近灵敏度极低,可检测范围小于波长的 1/4,检测范围有限。Karhade 等<sup>[10]</sup>通过引入静电反馈将平衡点稳定在最灵敏的位置(间距为波长的 1/8 的奇数倍),可进行低噪声、扩量程检测,本课题组<sup>[11]</sup>将该原理应用于加速度计的研究。Ferhanoglu 等<sup>[12]</sup>利用双波长光源,交替使用不同波长光源的衍射干涉信号来保持较高的位移检测灵敏度,在一定程度上增大了量程。Gorp 等<sup>[13]</sup>提出集成双光栅的方法,通过 2 个光电探测

器分别接收存在  $\pi/2$  相位差的双光栅的光强信号,将位移测量量程增大到多个周期,同时能保持与单个集成光栅干涉位移测量相同的灵敏度。D Shin 等<sup>[14]</sup>通过 PZT 驱动反射镜面,光栅作为分光器件测量反射面位移,利用两组周期不同的光栅,更好地分离了不同光栅的衍射光斑,使 2 束衍射光分别入射到不同的探测器,探测了  $9.4 \mu\text{m}$  的位移变化。比较而言,双波长和双光栅方式无需反馈控制,而双波长方法需 2 路激光,对光源系统要求高且增大量程范围有限。

对于集成双光栅的单个器件,使用 2 个光电检测器件分别进行检测,需保证 2 个光斑足够分开进入不同的检测器。利用搭建光电耦合器件(CCD)光学成像系统可同时采集 2 个光栅衍射光斑的图像,只要在图像上各光斑可分开即可。本文利用表面牺牲层工艺制作集成双光栅微悬臂梁阵列敏感芯片,搭建了 CCD 成像系统并进行了初步位移测试实验。

## 2 集成双光栅位移测量原理

集成双光栅位移测量原理如图 1 所示。在玻璃基底上加工出凹槽,凹槽上下分别有光栅 A、B,2 组光栅底面与正上方的可动部件底面构成 2 个位相敏感集成光栅单元。相干光束透过玻璃基底照射到光栅上,一部分被光栅底面反射形成一束衍射光,另一部分透过光栅间隙照射到可动部件底部,经可动部件反射再次透过光栅间隙透射形成第二束衍射光,2 束光将发生干涉,二者之间存在  $4\pi nh/\lambda$  的相移,其中  $n$  为光栅和反射面间的介质折射率, $h$  为光栅到可动反射面的距离, $\lambda$  为入射光波长,集成光栅单元的衍射光光强随可动部件的位移变化呈正弦变化。凹槽深度  $h_0$  使凹槽上下光栅 A、B 之间存在相位差  $4\pi nh_0/\lambda$ ,其中  $h_0 = h_B - h_A$ ,  $h_A$ ,  $h_B$  分别为光栅 A、B 到可动反射面的距离。

设计合适的凹槽深度,如空气中设计为  $\lambda/8$ ,

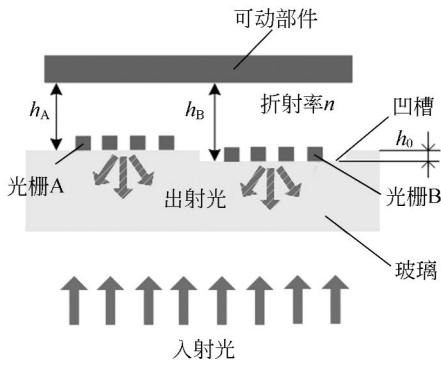


图 1 集成双光栅干涉位移测量原理图

Fig. 1 Schematic of interferometric displacement measurement method based on integrated dual gratings

可使 2 个光栅之间相位差为  $\pi/2$ , 对应的光强随可动部件位移变化曲线存在  $\pi/2$  的相位差, 实际加工过程中, 凹槽的腐蚀深度与设计值存在一定的偏差, 只能实现近似正交相位差的双光栅。图 2 所示为非完全正交双光栅的归一化光强对位移变化曲线, 利用 2 组近似正交相位差光栅可以交替选取灵敏度较高的测量区域进行叠加, 把测量量程扩大到多个周期, 在量程范围内具有与集成单光栅干涉测量相当的灵敏度, 相位偏差会使得局部灵敏度降低。

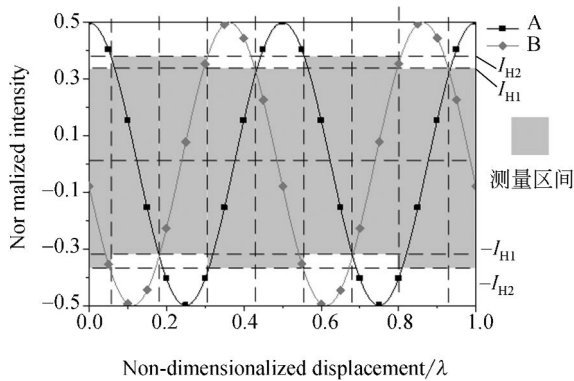


图 2 归一化光强随位移的变化

Fig. 2 Variation of normalized intensity with displacement

2 个集成光栅单元对应的归一化光强分别可表示为:

$$I_A = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right), I_B = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{4\pi(h+h_0)}{\lambda}\right). \quad (1)$$

如图 2 中所示, 各测量区的分界点分别在归一化光强相等和关于轴线对称的位置, 分界点光

强  $I_{H1}$  和  $I_{H2}$  可分别表示为:

$$I_{H1} = |I_{A1}| |I_{B1}|, I_{H2} = |I_{A1}| |I_{B1}|, \quad (2)$$

测量区间内的最高和最低灵敏度分别为:

$$S_{\max} = \pm \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

$$S_{\min} = \pm \min\left\{\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1-4I_{H1}^2}, \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1-4I_{H2}^2}\right\}$$

实际测量中输出光强灰度值  $I$  通过下式进行归一化处理,

$$I_{\text{Normalized}} = \frac{I - (I_p + I_v)/2}{|I_p - I_v|}, \quad (4)$$

式中:  $I_p$  和  $I_v$  分别为对应测量区的峰谷值。

### 3 芯片设计与加工

本研究采用表面牺牲层工艺制作集成光栅微悬臂梁阵列, 在基底上每个悬臂梁末端对应的位置加工 2 组相位差为  $\pi/2$  的光栅。设计悬臂梁长  $600 \mu\text{m}$ , 宽  $100 \mu\text{m}$ , 厚  $2.5 \mu\text{m}$ ; 光栅条长  $40 \mu\text{m}$ , 宽  $4 \mu\text{m}$ , 间隙  $4 \mu\text{m}$ , 光栅整体尺寸为  $44 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ ; 选用波长为  $635 \text{ nm}$  的红光作为激光光源, 设计槽深为  $79 \text{ nm}$ 。芯片制作工艺流程如图 3(a) 所示。首先, 在玻璃基片上湿法刻蚀出  $79 \text{ nm}$  的槽; 随后光刻、溅射、剥离制作出  $200 \text{ nm}$  厚的铝光栅阵列; 光刻形成  $5 \mu\text{m}$  厚的光刻胶牺牲层; 溅射  $2.5 \mu\text{m}$  厚的铝, 图形化形成微梁阵列; 最后通过干法去除光刻胶牺牲层, 释放梁结构。图 3(b) 为加工出的铝悬臂梁阵列的扫描电镜 (SEM) 照片, 实际加工出的芯片的凹槽深度为  $88 \text{ nm}$ , 加工偏差为  $11.4\%$ 。

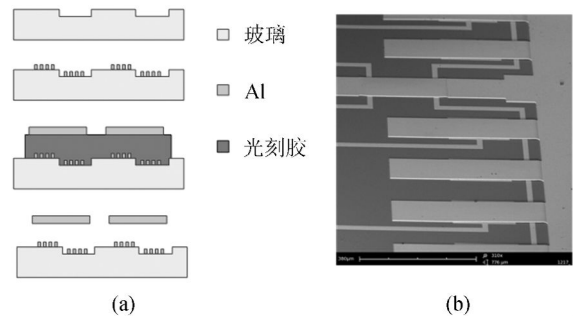


图 3 (a) 芯片加工工艺流程及 (b) 微梁阵列 SEM 照片  
Fig. 3 (a) Fabrication process flow, and (b) SEM of microcantilever array

## 4 实验与讨论

本实验搭建的位移测试装置如图 4 所示。选用功率为 20 mW、波长为 635 nm 的半导体激光器作为光源,由恒流电路驱动;选用 Basler 公司 scA1000-30fm CCD,像素深度为 12 位。采用针孔滤波器和透镜进行准直扩束,经过直角棱镜,半透半反镜入射到芯片底部;集成双光栅结构产生的衍射光依次经透镜 2 和透镜焦平面处的光阑,最后照射到 CCD 靶面上,其中芯片和 CCD 分别位于透镜的物像共轭面上,光阑用于选取某一级次的衍射光进行位移测量。CCD 接收的图像经计算机处理通过灰度值反映光强信息。微梁阵列的位移可从如图 4 所示的 CCD 图像中各光栅对应的光斑的灰度值变化反映出来。图中左右两侧

是光斑阵列,中间的不规则光斑是锚点边缘的衍射图样。光斑阵列的明暗不均表明加工得到的微梁阵列与底面的间距不一致。

实验中采用接触式方法用压电双晶片驱动探针针尖在悬臂梁末端加载微小位移。由于探针装置有较大的振动噪声,很难精确地控制纳米级别的位移进给,实验中从探针不接触梁到施加 20 V 直流电压驱动压电双晶片,通过探针使梁产生一个小于  $3 \mu\text{m}$  的初始变形,由于微梁是一个过阻尼系统(所设计的铝梁具有大的平板和与基底窄的间隙,根据压膜阻尼估算其阻尼比<sup>[15]</sup>为 2.21),撤销电压后,微梁变形缓慢回复,不会发生振荡,通过 CCD 实时记录图像,利用图像中光斑的灰度值(从光斑中心取  $21 \text{ pixel} \times 21 \text{ pixel}$  点取均值)反映被测微梁变形恢复过程中位移的变化。

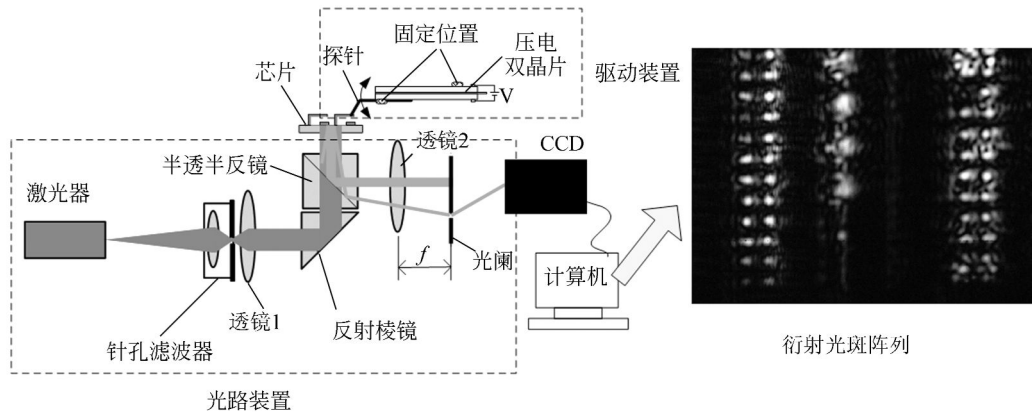


图 4 集成双光栅微梁 CCD 成像测量系统示意图

Fig. 4 Schematic of displacement measurement setup with CCD imaging system for integrated dual grating microcantilevers

图 5 所示为被测集成双光栅梁位移回复过程中 1 级衍射光对应的 2 个光斑的灰度值随时间的变化曲线。1# 和 2# 光斑对应凹槽上下的 2 组光栅。从局部放大图中可以看出,从 V 时刻撤销电压后,回复初期位移变化过程较快,超出了 CCD 的采样频率 25 frame/s,故没有被记录下来。至图中可分辨的光强变化阶段,光强变化逐渐变慢表明位移回复速度放缓;峰谷值有变小的趋势,这是由于加工结果梁的末端向上倾斜,梁恢复到初始位置倾斜度增加,导致峰谷值逐渐变小<sup>[3]</sup>。可分辨的微梁运动过程中出现多个峰谷值,每个峰谷值之间的位移变化为波长的  $1/4$ ,即 159 nm。将 2# 光斑的第一个波峰 O 点处开始的光强利用式(4)进行归一化处理,结果如图 6 所

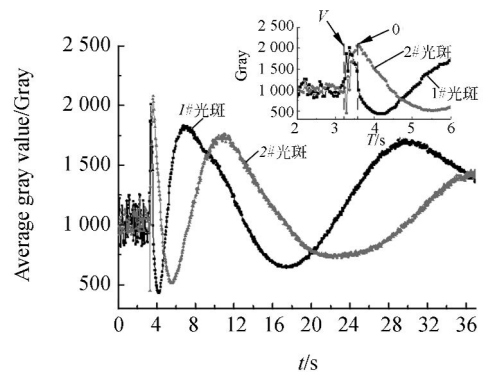


图 5 集成双光栅微梁对应的 2 个衍射光斑的灰度值变化

Fig. 5 Gray value changes of two diffracted light spots corresponding to an integrated dual grating cantilever

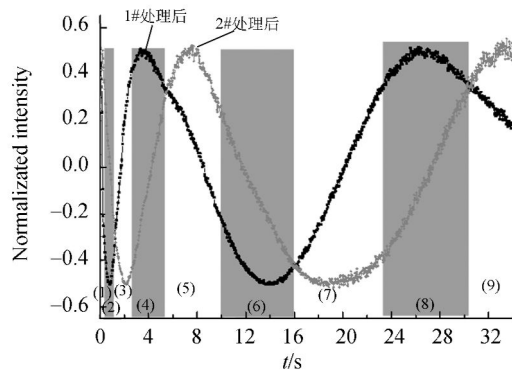


图 6 两个衍射光斑测试的归一化光强

Fig. 6 Normalized intensity of two diffracted light spots

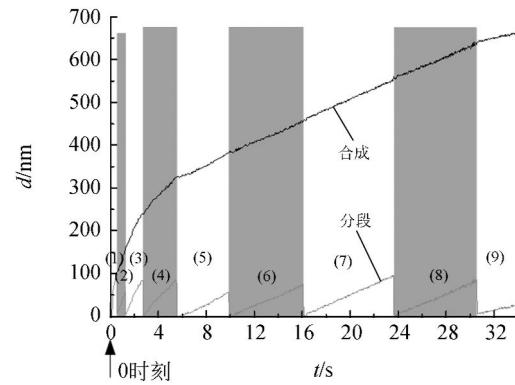


图 7 分段和叠加的位移随时间的变化曲线

Fig. 7 Sectional and accumulated displacement changes with time

示,根据式(2)确定测量区间的分界点光强,利用式(1)计算出各测量区间变化的输出光强对应的梁位移,各区段测量得到的位移及叠加后得到总的梁位移变化曲线如图 7 所示,其中零点对应 0 时刻初始位置,约 34 s 内微梁总位移约为 650 nm,位移变化由快变慢。由式(1)和(2),根据区间 2 和 3 交界点的归一化光强值计算得到凹槽深度约为 93 nm,这与测量的凹槽深度有一些偏差,

可能是加工凹槽深度不均匀性导致。根据式(3)得到各测量区间内的最高、最低灵敏度,如表 1 所示。从表 1 可看出,梁倾斜导致的峰谷值变化使各区域的灵敏度逐渐降低;整个区间内最高灵敏度在区间 2,为 15.48 Gray/nm,最低灵敏度在区间 8 和 9 的交界点处,为 4.426 Gray/nm。实验中测得灰度值噪声约为 30 个灰度值,最低灵敏度对应的噪声等效位移约为  $30/4.426 \text{ nm} = 6.8 \text{ nm}$ 。

表 1 不同测量区段对应的峰谷值和灵敏度

Tab. 1 Corresponding peak and valley values and sensitivity of different measurement areas

测量区 (对应光斑)	1 (1#)	2 (2#)	3 (1#)	4 (2#)	5 (1#)	6 (2#)	7 (1#)	8 (2#)	9 (1#)
峰值[Gray]	—	2 079.4	1 824.5	1 739.0	1 824.5	1 739.0	1 697.3	1 419.6	1 697.3
谷值[Gray]	428.7	514.8	432.9	514.8	646.4	736.3	646.4	736.3	—
最高灵敏度 [Gray/nm]	—	15.48	13.77	12.11	11.66	9.922	10.40	6.761	—
最低灵敏度 [Gray/nm]	12.19	13.66	7.385	6.572	8.996	4.995	5.271	4.426	7.605

本实验中记录得到的位移变化虽只有 650 nm,但对理想的平动反射面、平行光垂直入射,理论上量程不受限制。对实际利用 MEMS 光栅对平动反射面的扩量程位移测量范围可达近十微米<sup>[14]</sup>。实验中等效位移噪声较大,这是光强输出衬比度较低及测量噪声较大所致。其中测量噪声主要包括激光光强噪声、干涉噪声、CCD 散粒噪声、环境振动以及微梁的机械热噪声等。为提高位移分辨率,一方面需改进工艺使 2 个反射面反射率匹配,并避免反射面倾斜,以提高干涉信号的

衬比度;同时使 CCD 工作在接近满量程 (4 096 Gray) 状态,另一方面可通过温控降低激光器和 CCD 的噪声。另外,还需通过提高加工工艺精度,使两个光栅的相位差尽量接近  $\pi/2$ 。

### 5 结 论

研究了集成双光栅干涉微梁位移测量方法,利用表面牺牲层工艺加工了微悬臂梁阵列,在每

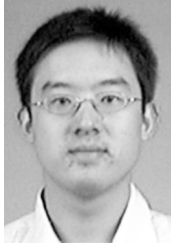
根梁下布置有相位差约  $\pi/2$  的 2 组光栅, 交错利用两组光栅得到的干涉光强对于位移变化的灵敏度较高区域的信号, 得到了远大于单光栅干涉的测量范围。利用 CCD 成像光学检测系统, 实现了微梁两组光栅衍射光强的同时检测, 通过光斑图

像灰度值的变化得到了微梁的位移变化。利用探针压电驱动装置使梁发生变形, 对集成双光栅微梁进行了位移测量, 测到微梁约 650 nm 的位移变化。实验结果表明利用 CCD 成像测量系统实现了集成双光栅微梁扩量程位移检测。

#### 参考文献:

- [1] 曾磊. 基于微悬臂梁的生化传感器[J]. 传感器技术, 2004, 23(6):76-80.  
ZENG L. Micro cantilever based biochemical sensors [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004, 23(6):76-80. (in Chinese)
- [2] ALVAREZ M, LAURA M. Lechuga. Microcantilever-based platforms as biosensing tools [J]. *Analyst*, 2010, 135(5):827-836.
- [3] MANALIS S R, MINNE S C, ATALAR A, et al.. Interdigital cantilevers for atomic force microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(25):3944-3946.
- [4] HALL N A, DEGERTEKIN F L. Integrated optical interferometric detection method for micromachined capacitive acoustic transducers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(20):3859-3861.
- [5] LOH N C, SCHMIDT M A, MANALIS S R. Sub-10 nm<sup>3</sup> interferometric accelerometer with nano-resolution [J]. *JMEMS*, 2002, 11(3):182-187.
- [6] ZHOU G Y, CHEO K L, DU Y, et al.. An optically interrogated microgyroscope using an out-of-plane lamellar grating [J]. *Sens. Actuators A*, 2009, 154(2):269-274.
- [7] ZHAO Y, MAO M Y, HOROWITZ R, et al.. Optomechanical uncooled infrared imaging system: design, microfabrication, and performance [J]. *JMEMS*, 2002, 11(2):136-146.
- [8] TOY M F, FERHANOGLU O, TORUN H, et al.. Uncooled infrared thermo-mechanical detector array: Design, fabrication and testing [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2009, 156(1):88-94.
- [9] SAVRAN C A, BURG T P, FRITZ J, et al.. Microfabricated mechanical biosensor with inherently differential readout [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(8):1659-1661.
- [10] KARHADE O, DEGERTEKIN L, KURFESS T. Active control of grating interferometers for extended-range low-noise operation [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19):3044-3046.
- [11] 伍康, 叶雄英, 陈烽, 等. 带有力反馈控制的三明治式微机械干涉加速度计 [J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(1):21-25.  
WU K, YE X Y, CHEN F, et al.. Micromachined sandwich interferometric accelerometer with force feedback control [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(1):21-25. (in Chinese)
- [12] FERHANOGLU O, UREY H. Sensitivity enhancement of grating interferometer based two-dimensional sensor arrays using two-wavelength readout [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(19):3289-3295.
- [13] GORP B V, ONARAN A G, DEGERTEKIN F L. Integrated dual grating method for extended range interferometric displacement detection in probe microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(8):083101-1-3.
- [14] SHIN D, KIN B. A laser interferometer encoder with two micromachined gratings generating phase-shifted quadrature [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2011, 21(8):085036-1-9.
- [15] HOSAKA H, ITAO K, KURODA S. Damping characteristics of beam-shaped micro-oscillators [J]. *Sens. Actuators*, 1995, 49(1-2):87-95.

## 作者简介:



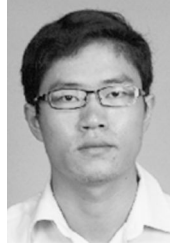
冯金扬(1984—),男,湖南郴州人,博士研究生,2006年于华中科技大学获学士学位,主要从事 MEMS 传感器方面的研究。E-mail: fengjy06@mails. th. edu. cn



陈 烽(1984—),男,浙江绍兴人,博士研究生,2006年于清华大学获学士学位,主要从事 MEMS 传感器方面的研究。E-mail: chen-f02@mails. th. edu. cn



叶雄英(1961—),女,博士,研究员,博士生导师,1989年于日本东京大学获博士学位,主要研究方向为微/纳机电系统,特别是微流控技术、微/纳传感器等。E-mail: xyye@mail. th. edu. cn



商院芳(1986—),男,湖北黄冈人,博士研究生,2009年于华中科技大学获学士学位,主要从事 MEMS 传感器方面的研究。E-mail: shangyf09@mails. th. edu. cn

## ●下期预告

## 飞机结构件运动数据的动态视觉测量系统

李磊刚,梁 晋,唐正宗,郭 成,崔学龙

(西安交通大学 机械工程学院,陕西 西安 710049)

为了准确获得飞机在飞行状态下的运动数据,基于近景摄影测量理论和立体视觉技术,提出并实现了一种针对机身结构件轨迹、姿态、位移、变形等多种运动数据的动态视觉测量方法。主要研究了以下关键技术:基于工业近景摄影测量的多相机快速自标定方法;飞行状态下相机动态定位及消除抖动技术;刚性结构件的运动轨迹及姿态的快速求取;通过多相机( $\geq 3$ )协作实现非编码标志点阵列的精确匹配。在模拟飞行环境下的实验结果表明,该系统的运动轨迹姿态测量精度可达 0.01 mm/1 m,关键点位移变形测量精度可达 0.05 mm/1m,基本满足飞机测试行业的精度和可靠性测量标准。