

文章编号: 0253-2239(2007)01-0063-5

# 基于激光差动多普勒效应的微机电系统动态测试技术\*

张 涛 冷长林 钟 莹 张国雄

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 提出了一种用于测量微机电系统(MEMS)器件瞬时速度、位移的测量系统。采用激光差动多普勒技术,检测谐振器在平面内的振动,测量垂直于系统测量光轴方向的振动速度。并在差动多普勒测量光路的基础上加入了 CCD 监测光路,实时观察被测器件调整过程和振动情况。通过处理电路从光学系统输出的高频信号中提取多普勒信号,利用 Labview 和 Matlab 软件对采集的多普勒信号进行时频分析,得到被测器件的运动参量。通过对测点的微定位,对 MEMS 器件进行整平面的扫描,得到器件振动的瞬时速度场,为进一步对 MEMS 器件的高阶谱振动分析及扭转分析提供了一定的基础和必要的支持。

**关键词:** 光学测量; 动态测试; 差动多普勒; 微机电系统; 时频分析

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## MEMS Dynamic Testing Technique Based on Differential Laser Doppler Effect

Zhang Tao Leng Changlin Zhong Ying Zhang Guoxiong

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** A system used for testing transient velocities and displacements of the micro-electronic-mechanical system (MEMS) devices is presented. A differential laser Doppler technique is adopted to measure the in-plane vibration of MEMS resonator and vibration velocity which is perpendicular to the optical axis of the measuring system. A CCD camera with imaging system to observe the position adjustment and resonator vibration status is introduced to the optical arrangement. The Doppler frequency is extracted by processing circuit from the high-frequency output of the optical system, and powerful Labview & Matlab are used in time-frequency analysis to measure the movement parameters. In the system, a tiny location device is used to scan the whole plane of the MEMS devices. As a result the transient velocity field, which provides certain basis and necessary support for the higher-order spectral analysis and torsion analysis, is achieved.

**Key words:** optical measurement; dynamic testing; differential Doppler; micro-electro mechanical system (MEMS); time-frequency analysis

### 1 引 言

微机电系统(MEMS)是多学科交叉融合的前沿技术,以其微型化的优势,在汽车、电子、家电、机电等行业和军事领域有着极为广阔的应用前景。

随着 MEMS 从研究阶段逐渐步入产业化阶段,其对测试系统的需求也越来越迫切。特别是动态特性的测试技术,这是因为 MEMS 的动态特性决定了 MEMS 器件的基本性能;而且 MEMS 微结构三维微运动情况、材料属性及机械力学参量、MEMS 可靠性与器件失效模式、失效机理等关键问题均可通

过 MEMS 动态测试技术来进行衡量;同时,通过动态测试技术,还可以研究一系列相关的基础理论问题。MEMS 动态测试技术近年来得到了国内外许多 MEMS 研究机构的高度重视<sup>[1]</sup>。

频闪成像、计算机视觉和干涉测量技术以及激光多普勒测振技术作为两种主要的通用 MEMS 动态测试技术,得到了广泛的研究和应用。而激光多普勒测量技术又以其精度高、线性度好、动态响应快、测量范围大及非接触测量等特点在各种运动测量中得到了很大的发展。本文提出了一种基于激光

\* 国家自然科学基金(50275108)资助项目。

作者简介: 张 涛(1982—),男,江苏人,硕士研究生,主要从事微机电系统动态测试技术的研究。E-mail: zt117@eyou.com

导师简介: 张国雄(1936—),男,教授,博士生导师,主要从事精密测量、智能测量技术的研究。

收稿日期: 2006-01-04; 收到修改稿日期: 2006-04-06

差动多普勒效应的测试技术,对 MEMS 器件进行了振动实验的测量,利用 Labview 和 Matlab 软件对采集的多普勒信号进行时频分析处理,从而得到 MEMS 器件振动的振动频率、瞬时速度、位移及加速度曲线<sup>[2]</sup>。

## 2 测量系统

### 2.1 激光差动多普勒效应

激光差动多普勒测量方法是把两束强度相近的测量光束聚焦到被测表面上,收集两束不同角度测量光束产生的散射光,这两束散射光混频形成的差拍信号的频率等于两束测量光的多普勒频移的差值。与多普勒频移检测的另一种光路形式—求测量光束与参考光束频差的系统相比,差动系统输出的信号信噪比高,抗干扰能力更强。

假设观测方向如图 1 所示,入射光束 1 和 2 是经过凸透镜汇聚的两束光,夹角为  $\alpha$ ,其频率都为  $f_0$ ,活动梳齿的运动速度为  $v$ ,光束 1、2 与运动方向的夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ,观察方向与运动方向的夹角是  $\theta_3$ 。

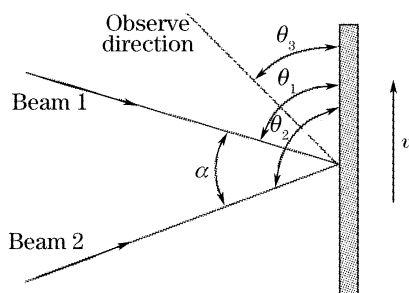


图 1 差动多普勒的测量光束布置

Fig. 1 Arrangement of the testing laser beam in differential Doppler system

在观测方向上,由光束 1 产生的散射光中包含的多普勒频移为<sup>[3]</sup>

$$\Delta f_1 = \frac{f_0 v}{c} (\cos \theta_1 + \cos \theta_3), \quad (1)$$

由光束 2 产生的散射光中包含的多普勒频移为

$$\Delta f_2 = \frac{f_0 v}{c} (\cos \theta_2 + \cos \theta_3), \quad (2)$$

根据光学外差干涉的原理,在观察方向上,光电接收器输出的信号的频率为

$$f_d = \Delta f_1 - \Delta f_2 = \frac{f_0 v}{c} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2), \quad (3)$$

可见,光电接收器的输出与观测方向无关,这是差动多普勒光路系统的重要特点。又

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 - \cos \theta_2 &= -2 \sin\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) = \\ &= 2 \sin\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

所以

$$f_d = \frac{2f_0 v}{c} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{2v}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (5)$$

在实际运用过程中,为了能够辨别谐振器振动的方向,用声光调制器使光束 1、2 之间产生频率为  $f_c$  的频率差。在这种情况下,当谐振器振动时,光电接收器上输出的信号频率为

$$f_d = f_c + \frac{2v}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (6)$$

经过信号处理电路和计算机程序,可以提取出的多普勒频移为

$$f_v = \frac{2v}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (7)$$

由此可得,被测速度  $v = \frac{f_v \lambda}{2 \sin(\alpha/2)}$ ,与多普勒频移成线性关系。

### 2.2 实验测量系统

测量 MEMS 器件的实验系统如图 2 所示<sup>[4]</sup>。激光器发出频率为  $f_0$  的光,经声光调制器后分为频率差为 40 MHz 的两束,其中一束经反射镜 M 反射后与另一束平行,这两束光在经过三个半透半反镜后进入 40 倍显微物镜 L1,经显微物镜汇聚到被测物上。其中,透镜 L4 收集自半透半反镜 N3 反射回来的散射光,将散射光汇聚进入光电接收器;透镜 L3 将收集到的照明光入射到显微物镜中,从而照到被测物上,达到照明的目的(即柯勒照明原理);透镜 L2 收集从被测物上反射回来的散射光,通过 CCD 达到实时观测被测物的目的。

实验中,被测器件被固定在一个六维定位精度为  $1 \mu\text{m}$  的微动台上,当水平或垂直旋转微动台,调整被测器件的位置时,CCD 摄像机能够观察到光斑照在谐振器上的位置,确保光斑定位在所需要的测量区域内。此外,开始测量后,首先需要通过 CCD 摄像机观察确定谐振器的活动梳齿是否已经开始振动,这时要求能通过 CCD 摄像机看清谐振器的质量块和梳齿等主要细节,即此时要求成像系统达到一定的放大倍数,且要具备良好的成像质量。在这个监测光路中,照明光源采用卤素灯,照明效果比较理想,能够清晰地观察到被测器件。

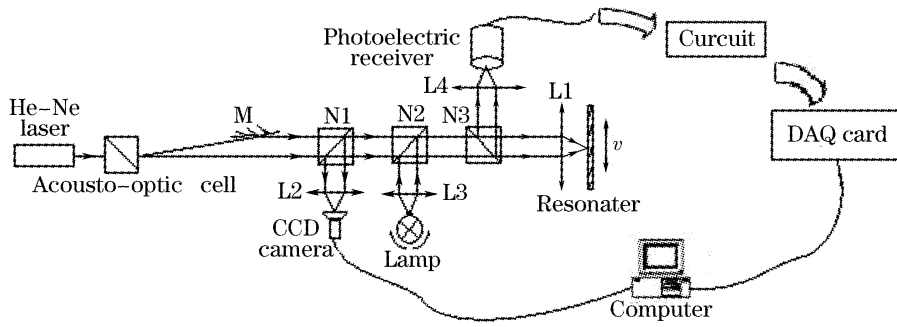


图 2 测量原理图

Fig. 2 Principle of measurement

实验系统的处理电路原理图如图 3 所示<sup>[5]</sup>。待测信号  $U(t)$  经过放大后与参考信号  $W(t)$  在相敏检波器处相乘, 相敏检波器的输出经过低通滤波器滤除高频成分(40 MHz 的载波频率), 得到多普勒频率信号  $V(t)$ 。

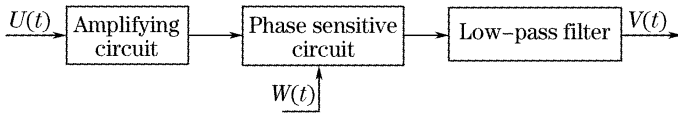


图 3 电路原理框图

Fig. 3 Diagram of the circuit

最后将电路处理的包含被测谐振器运动信息的多普勒频率信号, 通过数据采集卡采集到计算机内, 用计算机程序提取出被测物的运动信息。

### 3 信号处理

测量系统使用了 ADLINK 公司生产的数据采集卡 DAQ2010, 把经过电路处理后的多普勒信号采集进入计算机, 采样率设为 2 MHz。

我们利用 LabVIEW 和 Matlab<sup>[6]</sup> 开发出了一种在信号处理方面具有一定运用范围信号处理程序。软件的流程如图 4 所示。

现有的多普勒信号处理方法有多种, 有频谱分析法、频率跟踪法、计数法等。多普勒信号质量好且

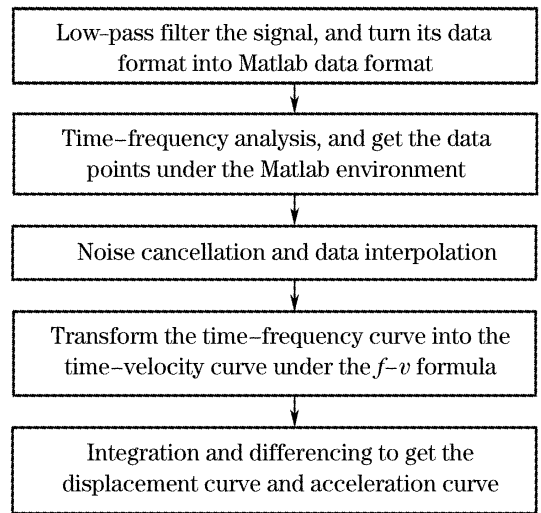


图 4 信号处理流程

Fig. 4 Flow chart of signal processing

对实时性要求比较高的场合常采用频率跟踪法和计数法; 但是对于那些信号质量差, 一个多普勒信号周期内有效载波数少的信号, 一般的分析方法很难提取出所需要的信息, 而时频分析法能很好地解决这个问题, 在时域上观察信号频率的变换。

根据本实验系统所采集的信号有效载波数少的特点, 软件采用了时频分析法。所谓时频分析, 就是建立一种能够在时间和频率上同时表示信号能量或者强度的分布。

时频分析时采用了著名的魏格纳-维尔分布, 并

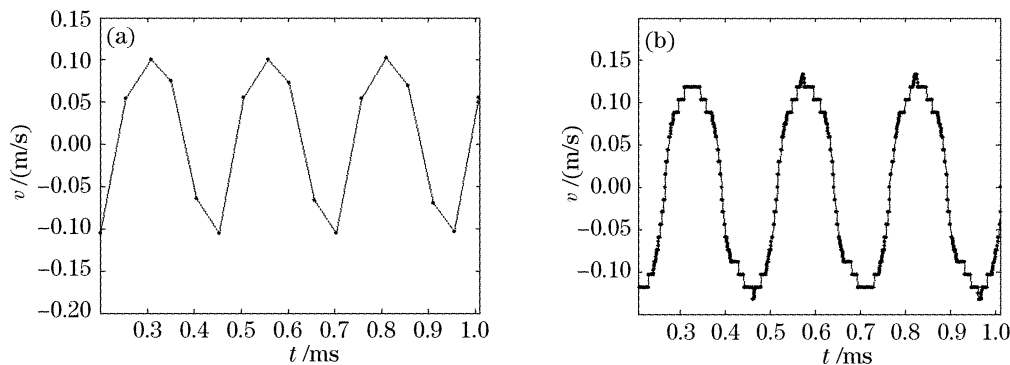


图 5 速度曲线。(a)计数法,(b)时频分析法

Fig. 5 Velocity curve, counting method (a), time-frequency analysis method (b)

在此基础上进行平滑、重排,得到重排平滑魏格纳-维尔分布。在对包含噪声的信号进行频率的分析提取时,优化了算法,有效地抑制了时频数据点中出现的噪声点。实验中,我们分别用计数法和时频分析法对同一信号作了处理,两者的处理结果如图 5 所示。很容易看出,时频分析法具有更好的分辨力和精度,尽可能地恢复了信号的时频特征。

#### 4 实验结果及分析

实验中,对 MEMS 器件进行了逐点的测量,如图 6。测量参量、条件如下:光斑直径为  $20\sim 30\ \mu\text{m}$ ;行间距为  $60\ \mu\text{m}$ ;列间距为  $70\ \mu\text{m}$ ;激励频率为  $2.07\ \text{kHz}$ ;激励信号幅值为  $70\ \text{V}$ ;采样频率为  $2\ \text{MHz}$ 。实验中,对图中的每一点进行了三次以上的重复测量,现任取其中一点(对应图 6 中的第 13 个点)来观测其重复性,其它点类似。由图 7 可以得到,该点振动速度的重复性误差小于  $0.03\ \text{m/s}$ ,振动的平均频率为  $(3.963 + 3.924 + 4.011)/3 = 3.97\ \text{kHz}$ (理论上信号的振动频率是激励频率的 2 倍),速度曲线的平均幅值为  $(0.1329 + 0.1328 + 0.1182)/3 = 0.128\ \text{m/s}$ 。图 8 是由此得出的位移曲线,最大位移为  $(5.5733 + 5.5675 + 5.5901)/3 = 5.577\ \mu\text{m}$ ,表示谐振器在光斑所在点的位置处振动的最大幅度为  $5.577\ \mu\text{m}$ 。图 9 是由此得出的加速度曲线,最大幅值为  $\frac{1.5487 + 1.5845 + 1.5893}{3} \times 10^{-3} = 1.574 \times 10^{-3}\ \text{m/s}^2$ 。

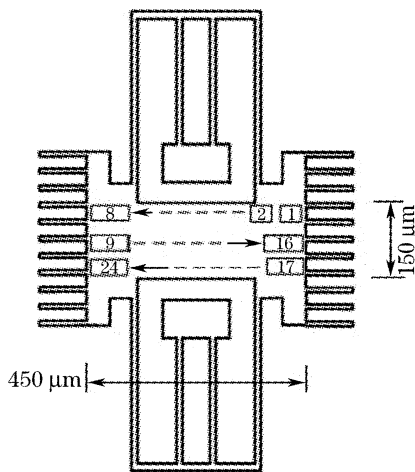


图 6 测点的分布

Fig. 6 Distribution of the testing points

影响测量结果重复性的因素一般有:激励电压、频率的不稳定,外界低频干扰,温度的变化等,这些都影响谐振器每次振动的状态(包括振动周期、幅值的微小变化等)。

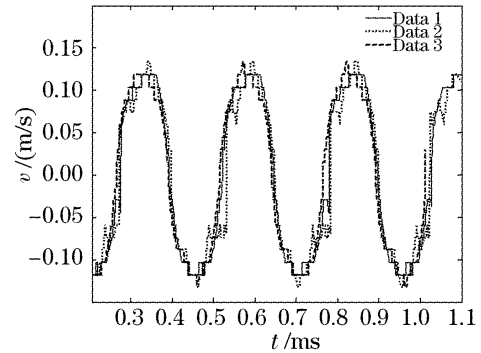


图 7 速度曲线

Fig. 7 Velocity curve

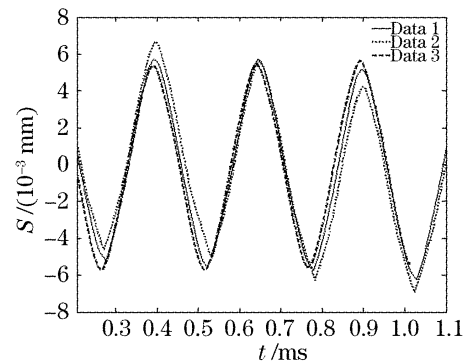


图 8 位移曲线

Fig. 8 Displacement curve

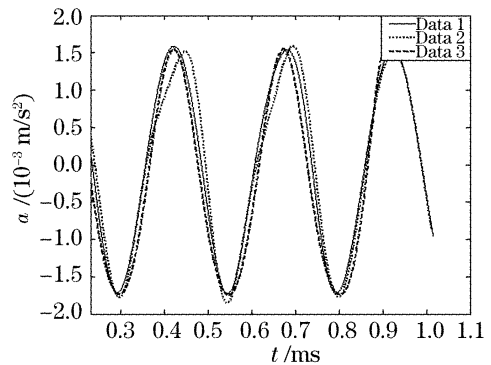


图 9 加速度曲线

Fig. 9 Acceleration curve

现假设谐振器每次振动的状态是固定的,这一点从各测点振动的重复性可以看出来。于是,按照图 6 测量点的位置,可以得出如图 10、图 11 所示的整个平面的瞬时速度场(经过二维插值后)。图中零时刻表示的是振动平面上各点处于速度最小值时的情况; $T/2$ 时刻表示的是各点处于速度最大值时的情况。一般图中速度值大的地方,可认为是振动时较为平整的部位,而速度小的地方,可认为是振动过程中扭转或凸起凹陷的部位。这是由于差动多普勒的测量方法仅限于测量垂直于光轴方向的运动,而在振动时发生扭转的部位,速度往往被分解为垂直于光轴和平行于光轴两个方向,我们测量得到的是

其中一个方向上的量值。扭转的程度越厉害,水平方向速度的分量值就越大,垂直方向的速度分量就越小,测得的速度值也就越小;反之亦然。

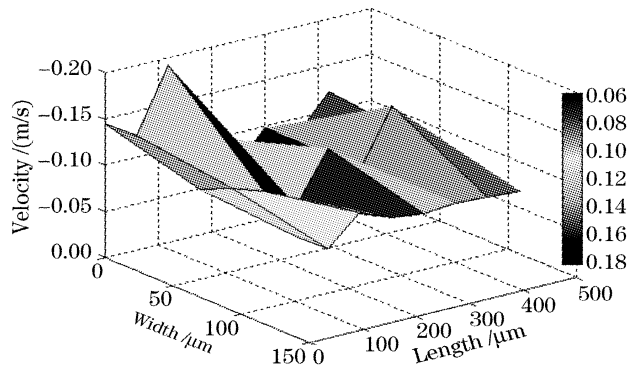


图 10 零时刻的瞬时速度场

Fig. 10 Transient velocity field on moment 0

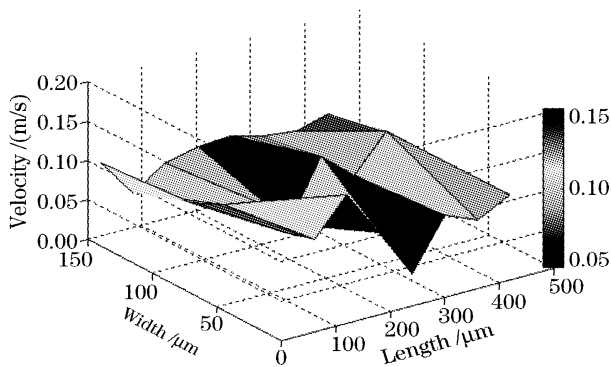


图 11  $T/2$  时刻的瞬时速度场

Fig. 11 Transient velocity field on moment  $T/2$

## 5 结 论

将激光差动多普勒测量原理用于 MEMS 面内运动的检测,具有良好的动态特性,能检测瞬时运动

速度、加速度和位移。测量了谐振器在垂直于测量光轴方向上的平面内的振动,并给出了谐振器振动的瞬时速度场的情况,为进一步分析谐振器高阶谱振动及扭转提供了一定的帮助。另外,本文所述的测量方法还被运用在对微型马达的参量测量,研究其线速度、角速度、角加速度、运动特性等。

## 参 考 文 献

- 1 Sun Lining, Zhou Zhaoying, Gong Zhenbang. The status of MEMS' development inside and outside and the develop strategic considering in our country [J]. *Robot Technology and Application*, 2002, (2): 2~4 (in Chinese)  
孙立宁,周兆英,龚振邦. MEMS 国内外发展状况及我国 MEMS 发展战略的思考[J]. *机器人技术及应用*, 2002, (2): 2~4
- 2 Li Dachao, Feng Yalin, Fu Xing *et al.*. MEMS dynamic testing technique[J]. *MEMS Resonator and Technology*, 2005, (4): 188~192 (in Chinese)  
栗大超,冯亚林,傅星等. MEMS 动态测试技术[J]. *MEMS 器件与技术*, 2005, (4): 188~192
- 3 Shen Xiong. *Laser Doppler Velocity Testing Technology and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 20~35 (in Chinese)  
沈 熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 20~35
- 4 Du Zhenhui, Li Shuqing, Jiang Chengzhi. Small vibration measurement using laser grating Doppler effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 834~837 (in Chinese)  
杜振辉,李淑清,蒋诚志. 激光光栅多普勒效应微小振动测量[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 834~837
- 5 Zhong Yin. In-plane motion measurements of MEMS resonators by using laser Doppler method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. 46~63 (in Chinese)  
钟 莹. 微机电系统谐振器面内运动检测的激光多普勒方法[D]. 天津: 天津大学, 2005. 46~63
- 6 Zhang Zhiping, Liu Zhengping. Using MATLAB to process signal in LabVIEW[J]. *China Measurement Technology*, 2004, **30**(4): 77~79 (in Chinese)  
张志平,刘正平. 在 LabVIEW 中应用 MATLAB 进行信号处理[J]. *中国测试技术*, 2004, **30**(4): 77~79