

## 利用多普勒原理测量微机电系统中微结构的动态特性

Dynamic Properties of Microstructures in MEMS Using Doppler Effect

华中科技大学机械科学与工程学院

白金鹏 史铁林 刘 胜 谢勇君

**[摘要]** 介绍了将显微扫描激光多普勒测振仪与基础激振法相结合的微结构动态特性的非接触无损测量方法、扫描激光多普勒测振仪的工作原理、设计的基础激振器及其驱动信号,并给出典型微结构——微悬臂梁的测量结果。测量结果与理论计算及有限元仿真结果相符,验证了该方法的有效性。

**关键词:** 基础激振 动态特性 微结构 扫描激光多普勒测振仪

**[ABSTRACT]** The noncontact and nondestructive measurement method for microstructure dynamic properties, which combines micro scanning laser Doppler vibrometer (SLDV) with the base excitation, the working principle of SLDV, the base exciter and its drive signal are introduced. The testing results of the typical microstructure—micro cantilever beam are given. It consists with the results of the theoretical calculation and FEM which verifies the effectiveness of this method.

**Keywords:** Base excitation Dynamic property Microstructure Scanning laser Doppler vibrometer

微机电系统(MEMS)技术近年来发展迅速,商业前景广泛。但是目前MEMS商业化的产品非常少,只有少数几家大公司商业化的产品,如模拟器件公司(Analog Devices Inc.)的微加速度计和微陀螺仪、德州仪器(Texas Instrument Inc.)的数字微镜器件(Digital Micromirror Device)等。

MEMS中微结构的特征尺寸在微米、亚微米量级,微结构的机械特性尤其是动态特性对MEMS的可靠性影响很大,其测试需贯穿于整个产品的开发与制造过程。通过动态特性测试可以验证器件初始设计,比较实际性能与设计性能的差异,进行工艺改进、响应预测和分析模型修正等<sup>[1-2]</sup>。传统的接触式测量方法不适用于微结构的动态特性测量,由于光学测量的非接触无损特性,因此非常适合微结构的测量。另外,为了实现动态特性的测试,必须对微结构进行激振。对

于激振方法来讲,传统的力锤激振会损坏微结构,电磁或电液激振的带宽一般不超过2kHz,而且随着器件尺寸的减小,其谐振频率也会逐步增大(通常可以达到几十kHz甚至上MHz)<sup>[3]</sup>,使得这些激振方法不适合微结构激振。其他激振方法,如静电力由于是微结构运动的非线性函数,造成了静电力本身的不能被独立测量,因而也不适于微结构的激振。而在微结构本身制造驱动部分(如设压电驱动部分)则会改变微结构本身的特性。因此,必须采用无损宽频带激振方法。

对于微机械动态特性测试国内外都进行了广泛的研究,主要是将频闪、显微视觉和显微干涉相结合来进行动态特性测试,如美国的加州大学Berkeley分校,国内天津大学和华中科技大学也进行了类似的研究<sup>[4-6]</sup>,这种测量方法必须采集多幅面内和离面图像,可以测量动态三维形貌,但这种方法不适合做快速、宽频带的测量。国立台湾大学应用电容放电原理产生脉冲激振信号,驱动固定微结构的刚体平台进行振动,并使用两台多普勒激光测振仪分别测量刚体平台和微结构的运动作为输入信号和输出信号,以此来构建频率响应函数。Sandia国家实验室Ozdoganlar等研究人员开展了将压电陶瓷片作为激振器的研究<sup>[7]</sup>,压电陶瓷片可响应宽频带的驱动信号因此很适合激振高频的微结构,但由于激光多普勒测量系统的限制,必须进行两次微系统动态测试研究。由此可知,显微激光多普勒与基础激振相结合是进行微机电系统中微结构动态特性测试的无损快速有效方法。

微悬臂梁由于对质量的敏感性高而广泛应用在生化检测方面<sup>[8]</sup>,通过检测其自然频率的变化量来检测由于生化反应造成悬臂梁质量的微小变化,从而达到测量的目的。本文以微悬臂梁为例,介绍了基础激振和显微激光多普勒测振仪相结合的微结构动态特性测量方法,并给出了其分析计算与试验结果。

## 1 激光多普勒测振仪测量原理

进行微悬臂梁动态特性测量所使用的仪器为Polytec公司的MSV300型显微激光多普勒测振仪,其

原理如图 1 所示, 其光路的核心部分是 Mach-Zehnder 干涉仪。氦氖激光器发出的激光经过起偏器后为线偏振光, 线偏振光入射到分光棱镜 1(分光棱镜 1、2、4 均为偏振分光棱镜)后分成两束互相垂直的线偏振光分别入射到分光棱镜 2 和 4, 即分为测量光束和参考光束。测量光束经分光棱镜 2 后的线偏振光通过耦合器耦合到光纤中, 而参考光束则在经过分光棱镜 4 后通过耦合器耦合到光纤中。图 1 中的两个 1/4 波片的作用是使反射后的偏振光旋转 90° 经过偏振分光棱镜后不沿原路返回。参考光束由图 1 中的二维手动定位器调整到通过显微测量光学系统选定的器件上的参考点。而测量光束则通过二维压电自动扫描单元自动扫描由显微测量光学系统确定的扫描栅格点。

当被测物体沿着垂直于测量激光束方向运动时, 物体的运动将使测量光束产生多普勒频移(Doppler shift)  $f_D$ :

$$f_D = 2 \frac{|v|}{\lambda}$$

其中,  $\lambda$  为光源波长,  $v$  为被测物体的运动速度。式中速度采用绝对值是因为此时被测物体运动的方向不能获得。而确定速度方向的办法是通过 Bragg 腔(声光调制器)产生一个恒定的附加频移  $f_B$ 。调制后的频移为  $f_{mod}$  可表示为:

$$f_{mod} = f_B + 2 \frac{v}{\lambda}$$

通过检测调制后的频移可以确定被测物体运动的方向, 从而获得扫描栅格上各个点的运动参数。采用如图 1 所示的光路可以测量参考点和被测点之间的相对速度。

## 2 悬臂梁几何参数与动态参数

所使用的微悬臂梁为 Concentris 公司的 CLA500-010-08 型悬臂梁阵列, 每个阵列对应 8 根几何尺寸相同的微悬臂梁, 如图 2 所示, 其长度、宽度、厚度和节距分别为: 50  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$ 、1  $\mu\text{m}$  和 250  $\mu\text{m}$ 。悬臂梁由 P 型(100)晶圆制造, 其杨氏模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  和密度分别可选为<sup>[9]</sup> 130 GPa、0.064 和 2 330 kg/m<sup>3</sup>。悬臂梁参数如表 1 所示。

对于各项异性的硅微悬臂梁, 采用各项同性且均匀的线弹性悬臂梁的自然频率公式做理论上的近似计算<sup>[10]</sup>:

$$f_i = \left( \frac{i}{2L} \right)^2 \left( \frac{EI}{\rho} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $f_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为自然频率、 $L$  为悬臂梁的长度、 $E$  为悬臂梁的弹性模量(在计算由多层材料构成的梁时弹性模量应使用等效模量代替  $E$ )、 $I$  为中性轴截面惯性矩 ( $I=WT^3/12$ , 其中,  $W, T$  分别为梁的宽度和厚度),  $\rho$  为线密度即单位长度所具有的质量。  $i=1, 2, 3$ 。利用式(1)计算所得的微悬臂梁前三阶自然频率分别为: 4.826 kHz、30.246 kHz、84.698 kHz。

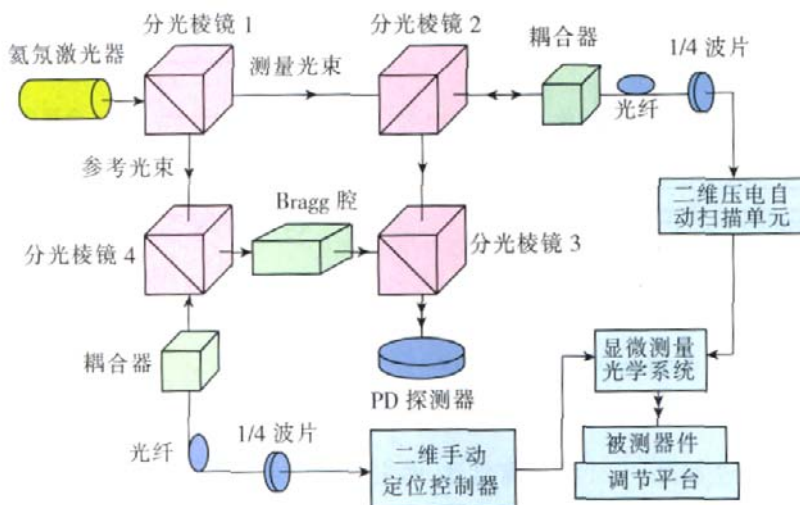


图 1 显微激光多普勒测振仪测量示意图  
Fig.1 Scheme of micro laser Doppler vibrometer

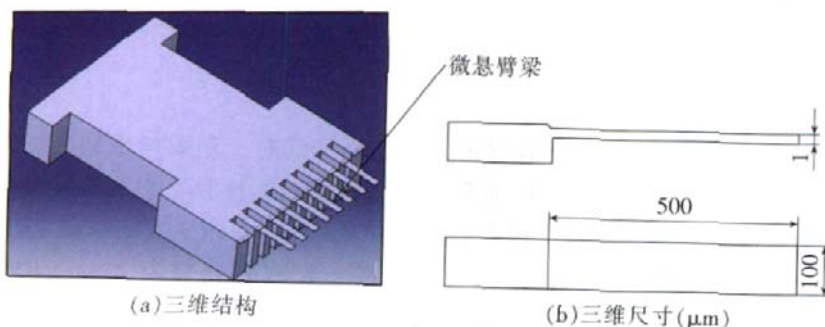


图 2 微悬臂梁三维结构和三维尺寸  
Fig.2 Micro cantilever beam 3D structure and its size

表 1 悬臂梁参数

悬臂梁参数	长度 L/m	宽度 W/m	厚度 T/m	杨氏模量 E/Pa	泊松比 $\mu$	线密度 /kg·m <sup>-1</sup>
参数值	5×10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>	1.3×10 <sup>11</sup>	6.4×10 <sup>-2</sup>	2.33×10 <sup>-7</sup>

### 3 微悬臂梁动态特性测试

动态特性测试一般分为振动激励、振动测量和模态分析 3 个基本环节。以下依照基础激振的模态模型、激振器设计和其驱动信号的选取以及测量结果 3 个部分对微悬臂梁动态特性的测试过程进行介绍。

#### 3.1 基础激振器的设计和驱动信号的选取

如图 3 所示, 激振器由压电陶瓷 (PZT) 激振器、导电胶层、金属电极、粘接胶层 1 和 2、玻璃/陶瓷绝缘层依次粘接而成。其中 PZT 激振器为 PI 公司的压电陶

瓷片 (PIC151), 尺寸为 10mm×100mm×1mm, 由于单层压电陶瓷片的响应特性优于多层压电陶瓷激振器, 所以采用了单层 PZT 激振器<sup>[7]</sup>。导电胶层起到连接 PZT 激振器和金属电极的作用, 使放大器的电压能直接加到 PZT 的底层 (负极)。金属电极用于连接放大器的输出端。粘接胶层 1 和 2 分别起到连接金属电极与玻璃/陶瓷绝缘层, 绝缘层与调整台的作用, 这两层只是完成连接的作用, 不需要使用导电胶。玻璃/陶瓷层将金属电极与调整台隔离开来, 起到电绝缘的作用。还应注意 PZT 的顶层正输入端导线与 PZT 之间的焊点

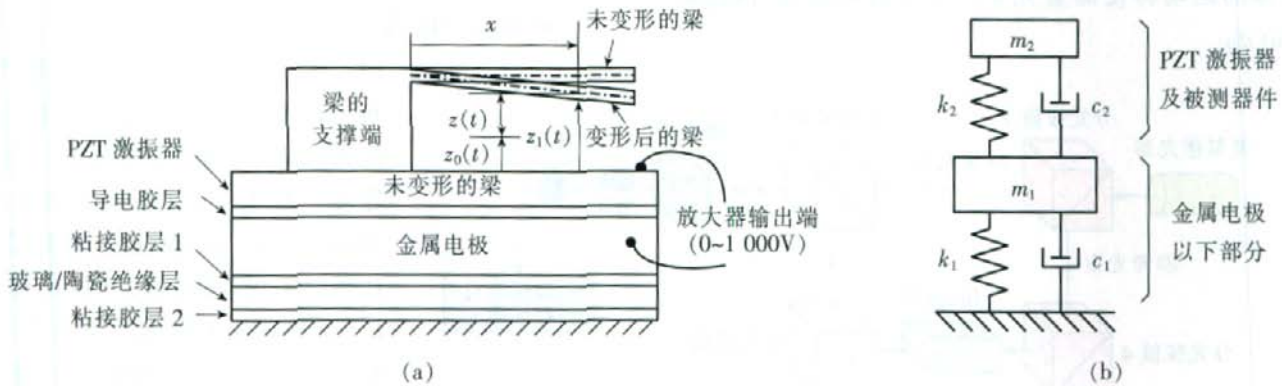


图 3 激振器示意图  
Fig.3 Scheme of base exciter

尽量小, 在给 PZT 加高频驱动电压时, 为了安全起见, 一般应使驱动电压低于 100V。

如图 3(a) 所示,  $z_0(t)$ ,  $z_1(t)$ ,  $z(t)$ , 分别为 PZT 激振器的位移 (梁的支撑端与激振器的位移相等)、梁的位移和梁与 PZT 激振器之间的位移, 其中  $z(t) = z_1(t) - z_0(t)$ , 并且它们均为时间的函数。使用相对坐标系则可建立以下动力学方程<sup>[11]</sup>:

$$\ddot{z}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{z}(t) + \omega_n^2 z(t) = -\ddot{z}_0(t),$$

其中  $\omega_n$  和  $\zeta$  分别为自然频率和阻尼比。通过此式可以看出被测器件实际上是在做受迫振动。

整个激振器系统可以近似等效为两自由度振动系统, 如图 3(b) 所示, 其中被测悬臂梁和 PZT 激振器构成质量  $m_2$ , 而  $k_2$  主要由导电胶层构成。而  $m_1$  则由主要由金属电极和玻璃/陶瓷绝缘层构成, 两层粘接胶层则构成  $k_1$ 。  $m_2$  的主要作用就是使 PZT 产生的运

动远离自己, 而主要作用于被激振器件。为了确保可以起到这种作用, 金属电极和 PZT 激振器之间的质量应该满足一定的关系<sup>[7]</sup>, 这个关系可由冲量定理表示:

$$m_s v_s + m_p v_p = 0,$$

式中,  $m_s$  和  $v_s$  分别为金属电极的质量  $m_p$  和  $v_p$  速度, 分别为 PZT 激振器的质量和速度, 有如下关系:

$$\left| \frac{m_s}{m_p} \right| = \left| \frac{v_p}{v_s} \right|。$$

在保证质量关系的同时, 还要考虑到电极的质量, 应避免 PZT 激振器的共振频率在测量频率范围内。基于上述考虑以及真空腔体空间的限制, 选用不锈钢作为金属电极, 长宽高分别为 25mm×10mm×6mm。该电极的质量至少在 PZT 激振器质量的 10 倍以上, 故其绝大部分运动是远离电极的。

使用单层压电陶瓷作为激振器时位移较小, 但是

相应的响应快, 响应频带宽。而且产生的面内位移很小, 可以忽略不计。将这种激振方法和显微激光多普勒测振仪相结合可以更好地实现微器件动态特性的测量。另外由于压电陶瓷片底部通过粘接固定, 造成了加电时边缘和中心不同的垂向变形, 故器件应固定在压电陶瓷片的中心位置。测量装置如图 4 所示。

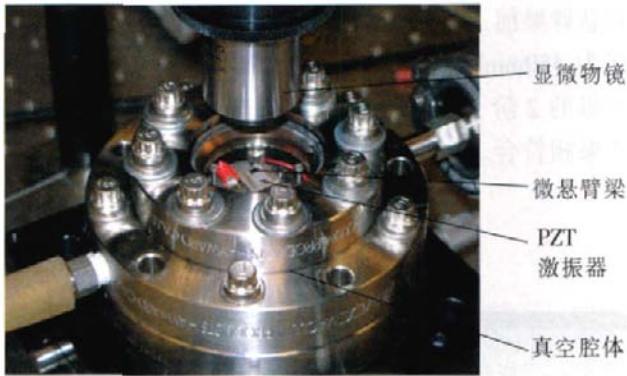


图 4 测量装置图

Fig.4 Photo of Testing Setup

常用的激振信号有正弦扫频激励、快速正弦扫频激励、冲击激励和随机激励<sup>[12]</sup>。正弦扫频激励的好处是激振力容易控制, 适用于大结构和结构非线性方面的研究, 但是扫频速度比较慢, 测试周期较长。冲击激励可以同时激起所有频率, 是目前最快的动态测试方法。但是在给定的频段激振力比较小, 而且微结构尺寸较小, 故而不适于微结构的激振。随机激励和冲击激励一样可以在很宽的频带内激振, 但是也存在各个频率处激振能量较低的问题。快速扫频正弦激励属于瞬态激励, 它在一个测量窗口内, 提供一个从指定的低频到指定的高频的按照一定规律连续变化的正弦信号。扫频一次完成一个激励过程, 可以多次重复。其优点是可以将能量集中在指定的频段, 在此频段内各频率对应的激励能量比较均匀, 如图 5 所示。因此选择周期线性快速正弦信号为激励信号, 带宽 100 kHz。

### 3.2 频率响应函数的获取

传统的动态测试(或试验模态分析)中的激励和响应一般为力和加速度。由于微器件的特征尺寸在微米量级, 使得传统的测试方法不能适应微结构的动态测试。显微激光多普勒测振仪获取频率响应函数的方法为: 首先对激振器驱动信号(参考信号)和激光多普勒测得的速度或位移信号(被测信号)做快速傅立叶变换(FFT), 然后计算参考信号的自功率谱(AP), 再计算参考信号和被测信号的互功率谱(CP), 则频率响应函数可由下式求取:

$$FRF_{VR} = \frac{CP_{RV}}{AP_{RR}} = \frac{V}{R}$$

其中,  $FRF_{VR}$  为输入参考信号和显微激光多普勒测振仪之间的频率响应函数;  $AP_{RR} = R^* \cdot R$ , 为参考信号的自功率谱;  $CP_{RV} = R^* \cdot V$ , 为参考信号和被测信号的互功率谱; \* 表示共轭。V 和 R 分别为被测信号和参考信号的频谱。以上各函数均为频率 f 的函数。

### 3.3 微悬臂梁基础激振测量结果

图 6 为测得的微悬臂梁的频率响应曲线。可以看到在频响曲线上有 3 个尖峰, 其中两个尖峰的幅值较大, 对应的 2 阶、3 阶自然频率分别为 32.14kHz 和 89.64kHz。而另一个相对较小, 其峰值在 5kHz 左右, 对应 1 阶自然频率, 峰值较小主要是由空气阻尼造成。测量获得的自然频率和使用近似的理论公式 1 所获得的结果相符, 如表 2 所示。图 7 的(a)和(b)则分

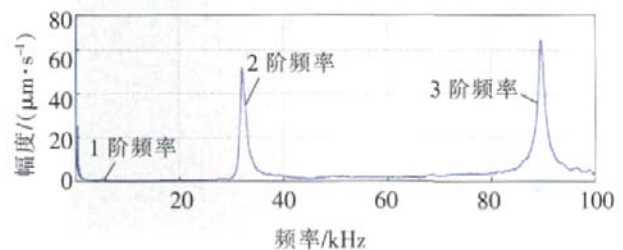


图 6 微悬臂梁频率响应曲线  
Fig.6 Frequency response curve  
of micro cantilever beam

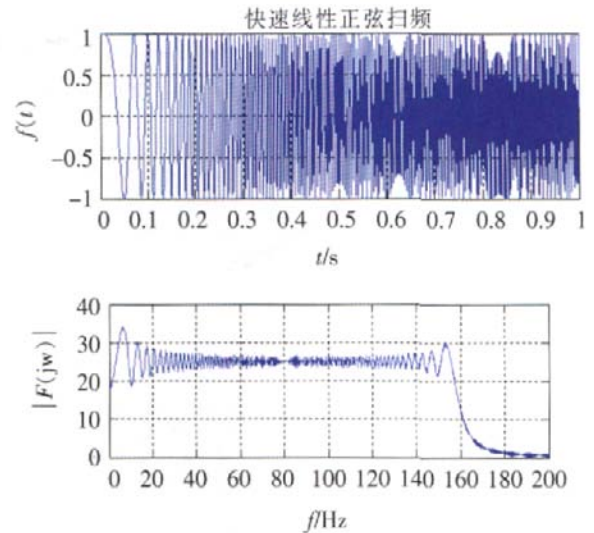


图 5 快速线性正弦扫频信号及其幅度谱

Fig.5 Fast linear sine sweep signal and  
its amplitude spectrum

别对应 2 阶和 3 阶振型。

图 8 为使用有限元分析软件 Ansys 对悬臂梁进行了模态分析获得的 2 阶、3 阶振型 (对应的 2 阶、3

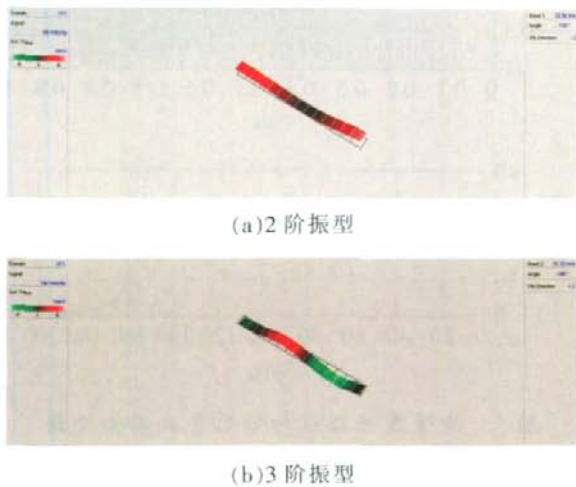


图 7 微悬臂梁 2 阶和 3 阶振型

Fig.7 Second order and third order vibration modes of micro cantilever beam

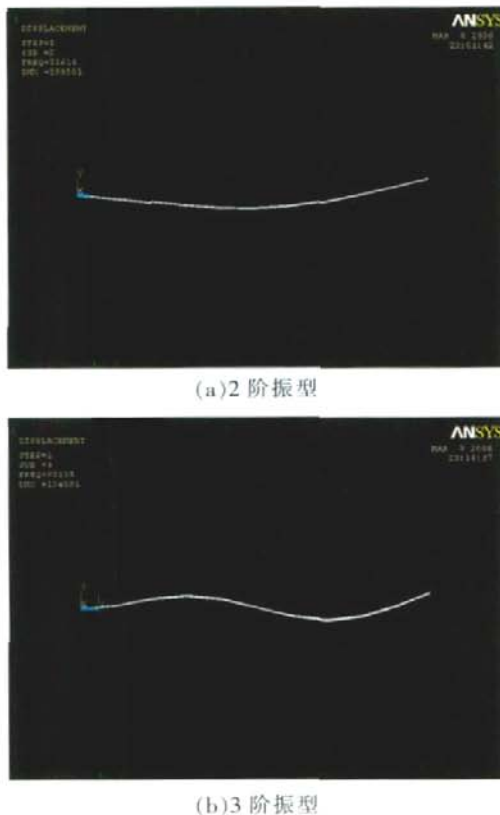


图 8 有限元仿真获得的 2 阶和 3 阶振型  
Fig.8 Second order and third order vibration modes calculated using FEM

阶自然频率分别为: 31.614Hz 和 93.138kHz), 进行模态分析时使用表 1 所列的材料参数, 单元类型为 SOLID45, 边界条件为悬臂梁一端固定。对比图 7 和图 8 可知使用基础激振法测得的 2 阶和 3 阶振型与有限元法分析获得的 2 阶和 3 阶振型相符。

表 2 列出了使用公式 (1) 计算的、有限元分析的微悬臂梁前三阶自然频率, 以及使用 SLDV 在压力分别为 450mmHg 和 750mmHg (1mmHg=133.322Pa) 时测得的 2 阶、3 阶自然频率, 从表中可以看出三者的结果相符合。

表 2 悬臂梁自然频率比较

三种数值		自然频率/kHz		
		1 阶	2 阶	3 阶
理论值		4.826	30.246	84.698
LDV 测量值	450 mmHg	—	32.94	91.52
	750mmHg	—	32.14	89.64
有限元仿真值		4.950	31.614	93.138

\* 1mmHg=133.322Pa.

#### 4 结束语

微悬臂梁在不同压力下动态特性非接触无损测量结果表明, 测试所获得的 2 阶、3 阶自然频率与使用经典理论计算的理论值相接近, 2 阶、3 阶自然频率及振型与有限元仿真结果相符合, 验证了基础激振法在进行微结构动态特性非接触无损测量的快速有效性方法。

#### 参 考 文 献

- [1] Kevin E Speller, Howard Goldberg, Jeff Gannon, et al. Unique MEMS characterization solutions enabled by laser doppler vibrometer measurements. Proceeding of SPIE, 2002, 4827: 478-485.
- [2] 梅涛, 孔德义, 张培强, 等. 微电子机械系统的力学特性与尺度效应. 机械强度, 2001, 23 (4): 373-379.
- [3] Chou Y F, Wang L C. On the modal testing of microstructures: Its theoretical approach and experimental setup. Transactions of ASME, Journal of Vibration and Acoustics, 2001, 123(1): 104-109.
- [4] Christian Rembe, Richard S Muller. Measurement system for full three-dimensional motion characterization of MEMS. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11 (5): 479-488.

(下转第 93 页)

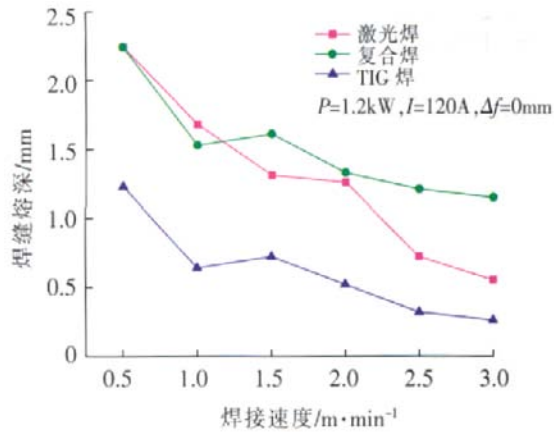


图7 焊接速度对焊缝熔深的影响

Fig.7 Influence of welding speed on weld penetration

分析图7可知,在焊接速度较小时,复合焊及激光焊的熔深相当,但都比TIG电弧焊的熔深大很多。而增大焊接速度,复合焊的熔深最大,并且在2.5m/min左右时,复合焊熔深要大于激光焊与TIG焊所得熔深之和,即出现了强烈的复合效应。可以说明复合焊的优势更多地体现在高速焊接时。

#### 4 结论

(1) 双焦点的应用提高了激光的利用率,扩大了激光与电弧复合的功率配比范围,初步显示了这种复合技术的优点。

(2) 双焦点激光与电弧的相互作用在一定程度上可以增强能量,增加熔深,提高焊接过程的稳定性。

(3) 高速焊接时双焦点激光-电弧复合焊的优势更加明显。

#### 参 考 文 献

- [1] Dilthey U, Wieschmann A. Prospects by combining and coupling laser beam and arc welding processes. *Welding in The World*, 2000, 44(3): 37-46.
- [2] 陈俐,董春林,吕高尚,等. YAG/MAG激光电弧复合焊工艺研究. *焊接技术*, 2004, 33(4): 21-23.
- [3] Walz, Seefeld T, Sepold G. Seam geometry and process stability during laser-MIG welding. *Laser Opto*, 2002, 33(2): 64-67.
- [4] 陈彦宾,李俐群,吴林. 电弧对激光吸收与散焦的定量测量. *焊接学报*, 2003, 24(3): 56-58.
- [5] Haferkamp H, Ostendorf A. Nd: YAG laser MIG hybrid welding of nine-coated fine sheet metal and magnesium materials. *Laser opto*, 2001, 33(1): 61-63.

[6] Engstrom H, Nilsson K. Laser hybrid welding of high strength steels. Section A- ICLAEQ, USA. 2001: 314-318.

[7] 陈彦宾. 激光-TIG复合热源焊接物理特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003: 20-23.

[8] 王威,李丽群,王旭友,等. 激光与电弧复合焊接技术. *焊接*, 2004(3): 6-9.

[9] Kaierte S, Bongard K, Dahmen M. Innovative hybrid welding process in an industrial application. *LIA Proc. ICALEO. USA*, 2000: 91-98.

[10] Hyatt C V, Magee K H, Porter J F. Laser-assisted gas metal arc welding of 25mm-thick HY-80 Plate. *Welding Research Supplement*, 2001, 7: 163-172. (责编 微凉)

\*\*\*\*\*  
(上接第84页)

[5] 胡晓东,栗大超,郭彤,等. 微结构特性的光学测试平台. *光学学报*, 2005, 25(6): 803-808.

[6] 周明才,白金鹏,谢勇君,等. MEMS动态测试系统及其数据处理. *光学技术*, 2004, 30(4): 398-402.

[7] Ozdoganlar O B, Hansche B D, Carne T G. Experimental modal analysis for microelectromechanical systems. *Experimental Mechanics*, 2005, 45(6): 498-506.

[8] Ronald F Gibson, Zhengyu Liu, Niranjana Srinivasan. Influence of bending-extension coupling on the modal frequencies of nonsymmetrically laminated MEMS microcantilevers. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2005, 14(6): 1236-1243.

[9] Carl J Wilson, Patricia A Beck. Fracture testing of bulk silicon microcantilever beams subjected to a side load. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1995, 5(3): 142-150.

[10] Robert D Blevins. *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*. Florida: Krieger Publishing Company, 1979.

[11] Carne T G, Martinez D R, Nord A R. A comparison of fixed-base and driven-base modal testing of an electronics package. *Proceedings of the International Modal Analysis Conference, Las Vegas, NV*, 1989: 672-679.

[12] 李德葆,陆秋海. 实验模态分析及其应用. 北京: 科学出版社, 2001. (责编 晓霏)

\*\*\*\*\*

#### “Sun 2008 科技日”活动即将登陆中国

Sun公司一年一度的全球规模最大的开发者大会——“Sun 2008 科技日”活动将于2008年9月29日从巴西的圣保罗启动,并于2008年11月17日、19日和21日分别抵达台北、广州和北京。此次盛会将巡游4大洲的13个城市,将Sun的最新技术、产品、服务带给每一个开发者,并帮助他们推动下一代产业创新。(本刊记者 微凉)