

文章编号 1004-924X(2003)01-0037-08

微机电系统测试技术及方法

李 智, 王向军

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:微机电系统(MEMS)测试技术及方法是MEMS设计、仿真、制造及质量控制和评价的关键环节之一,本文对MEMS测试技术及方法所涉及的微机械量、微几何量、微材料特性以及系统综合参数与性能的测试技术及方法进行了讨论。重点介绍了光学及光电检测技术在微机电系统检测中的应用,对计算机微视觉检测技术在微机电系统检测中的应用进行了探讨。

关键词:微机电系统; MEMS检测技术; 光电检测; 计算机视觉检测

中图分类号:TH133.21 **文献标识码:**A

1 引言

MEMS的测试技术和方法已经成为了MEMS设计、仿真、制造及质量控制和评价的关键环节之一。微机电系统(MEMS)的迅速发展对精密检测技术提出了新的要求。由于MEMS具有的结构尺寸小、集成度高等特点,传统的检测技术与方法已不能完全满足需要,研制精度高、简单便捷、成本低的新的检测手段已经成为MEMS发展的迫切需要。

在MEMS设计、制造等过程中,主要需要检测的参数包括微机械量、微几何量、微材料特性及电学参数,其中电学参数检测方法相对比较成熟,本文将从微机械量、微几何量、微材料特性三个方面对MEMS检测技术和方法进行讨论。

2 微机械量测量

对MEMS的机械运动参数如位移、速度、振幅、频率等进行精确测量已经成为MEMS发展的迫切要求^[1]。目前采用的微机械量测量方法主要有电测法和光测法。电测法具有简单实用、稳定性好、信号分析处理容易等特点,包括压阻测试法、电容测试法、电感测试法、压电测试法等在内的电测法在微机械量测量中占有重要地位,具体

应用例子有:国内研制的一种硅微机械粘滞型谐振真空计,使用了制作在悬臂梁根部的横向压阻器件实现单晶硅制作的悬臂梁的振动信号机电转换^[2];在研究微角速度传感器在不同气压下的振动特性时,采用电容检测技术测量微机械角速度传感器的振动信号^[3]等。

微机械的特征尺度一般为毫米至亚微米远小于宏观机械,微机械的动态特性很容易被测量过程干扰,光电测试方法由于是非接触测量,同时又具有分辨率好、精度高的特点,目前已成为微机械量检测领域的研究热点,一系列应用光电检测方法的MEMS动态参数检测仪器,如激光多普勒测振仪(LDV)、频闪显微干涉系统(SMIS)、计算机微视觉系统(CMVS)、光纤迈克尔逊干涉仪等已投入实际应用。

2.1 计算机微视觉与频闪光照明技术在微机械量检测中的应用

计算机微视觉技术在微机械量测量领域有着广泛的应用,CCD成像系统结合光学显微系统、计算机图像处理系统可以比较容易的对微位移^[4]、微马达转速^[5]等运动参数进行检测,而且可以达到较高精度。但是由于视觉成像系统采样频率的限制,单纯的计算机微视觉技术不能实现高速、高频运动参数的检测,如国内研制微型机械运动参数测试仪^[5-6],设计了两套测量系统,当微马达转速大于50 r/min时,采用光电三极管测量

系统代替视觉测量。

将频闪光照明技术与计算机微视觉技术相结合可对 MEMS 微结构的周期及可周期重复运动

进行有效检测。美国麻省理工学院 (MIT) 研制的计算机微视觉系统 (CMVS) 采用了频闪光照明, 可测量的最高周期运动频率达到 100 kHz (表 1)。

表 1 几种 MEMS 动态参数测试设备特性比较

Table 1 Features of BSAC dynamic MEMS facilities

	SMIS (BSAC)	CMVS (MIT)	LDV (Polytec)
静态测量	能	能	不能
可测量的运动	周期运动和重复的 瞬时运动	周期运动和重复 的瞬时运动	瞬时运动和周期运动
多自由度测量	面内:刚体运动;离面变形	三维刚体运动(点测量)	离面运动(点测量)
最大离面位移	20 μm		10 cm
最大面内位移	~ 500 μm *		不能
离面运动分辨率	1 nm	5 nm(MIT 测试结果)	~ 0.01 nm
离面轮廓分辨率	20 nm	不能	不能
面内运动分辨率	5 nm	2.5 nm(MIT 测试结果)	不能
空间面内分辨率	500 nm	500 nm	500 nm
扫频	未实现	能	能
频带	0 ~ 1 MHz	0 ~ 100 kHz (BSAC 测试结果)	0.5 Hz ~ 1.5 MHz
速度范围(面内)	0 ~ 20 m/s *	0 ~ 20 m/s	不能
速度范围(离面)	0 ~ 3.3 m/s		500 nm/s ~ 10 m/s

* 与显微镜物镜有关

CMVS 是集光学显微镜、视觉成像和机器视觉技术实现实时、可视化检测的运动参数检测平台(图 1)。Freeman 等人领导的研究小组应用这套系统对 MEMS 进行检测实现了面内 (in-plane) 运动检测分辨率小于 2.5 nm, 离面 (out-of-plane) 运动检测分辨率小于 5 nm。这套系统主要组成部分包括:光学显微镜, CCD 图像采集部分, LED 照明及其控制部分, 计算机控制部分, 图像处理分析部分。LED 照明采用了锁相环 (PLL) 控制, 可实现 LED 闪光频率的连续调制。计算机控制过程包括图像采集及采集频率设置、闪频频率控制、MEMS 器件激励控制以及通过控制步进电机对显微镜微调焦。检测原理主要是利用频闪照明使作周期运动的微结构“静止”, 再通过对照明控制信号相位微调, 获得运动结构处于不同相位的“静止图像”, 对这一系列的静止图像运用机器视觉方法进行分析就可以得到相关运动参数, 当对离面运动进行测量时, 还要进行光学显微镜调焦, 在不同物镜焦平面采集系列图像, 因为运动结构相对物镜焦平面的位置发生变化导致采集到的灰度图变得模糊, 根据图像的变化来测量离面运动的相关参数^[7-8]。

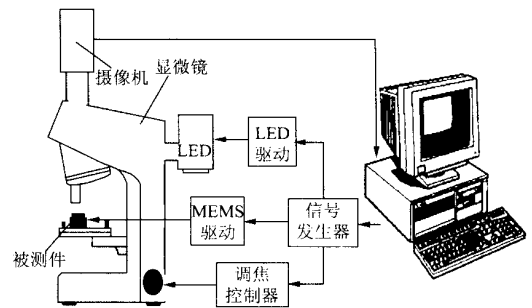


图 1 CMVS 示意图

Fig. 1 Schematic of computer micro-vision system

美国加州大学伯克利分校研制的频闪显微干涉系统 (SMIS) 在对面内运动进行检测时原理同 CMVS 相同, 图像处理算法相近。在实际微结构面内运动参数测量时, SMIS 通过调整频闪频率获得运动结构处于一个周期内不同相位的 10 幅图像 (CMVS 采 8 幅图像)。图像被存为矩阵 M , M 由 $I_s(i_n, j_n)$ ($i_n, j_n = N$) 组成, 首先用 Nyquist 采样定理对原始图像计算获得连续灰度分布函数 $I_r(i, j)$, ($i, j = R$)。(公式 1, 设原始图像有 n 列, m 行)。

$$f(i, l) = \sum_{k=1}^n \frac{\sin((k-i))}{(k-i)} I_s(k, l)$$

$$I_r(i, j) = \sum_{l=1}^m \frac{\sin((l-j))}{(l-j)} f(i, l), \quad (1)$$

然后用面内运动算法计算 I_1 和 I_2 两幅图之间位移 d_i 和 d_j , 使用最小平方优化准则 (least-square-optimization criterion) 计算 (公式 2):

$$\min(\|I_{1,s}(i_n, j_n) - I_{2,r}(i_n - d_i, j_n - d_j)\|_2), \quad (2)$$

SMIS 测量到器件在两幅图像间位移最小可达到 $2 \mu\text{m}^{[7,9]}$ 。

2.2 干涉技术在微机械量检测中的应用

1) 频闪显微干涉系统

对离面运动高精度测量用 SEM、AFM 以及光学显微镜都难以实现,激光多普勒测振仪可以达到很高精度,但是它主要是点测量,如要进行面测量需要对被测结构进行激光扫描。MIT 的 CMVS 对面内运动检测能够达到纳米精度,但对于离面运动检测就达不到对光学平面动态变形进行测量的要求。

针对 MEMS 的离面运动,频闪显微干涉系统 (SMIS) 在计算机微视觉和频闪技术的基础上融入了干涉系统 (图 2)。其中干涉测量部分包括一个可以进行频闪照明的 658 nm 的激光二极管,一个偏振分光棱镜,一个参考平面镜,若干 1/2、1/4 波片和被测 MEMS 器件。激光二极管的频闪频率由计算机发出的脉冲电流控制。参考镜与一个压电控制单元结合在一起,在测量过程中进行可控的微小轴向运动,实现测量所需的相位调整。在测量过程中如果将参考镜遮蔽,通过频闪光照明,系统可以获得一组没有干涉条纹的周期运动不同相位图像 (10 幅)。通过对 10 幅图像进行数字图像处理可以得到面内运动的参数,分辨率达到 5 nm。在频闪照明下,运动结构“静止”在采样相位时,去掉参考镜上的遮蔽物,使用压电执行器调整参考镜从 5 个不同相位获得带有干涉条纹的干涉图像。这样一个完整的测量图像序列包括在 10 个不同相位点获取的 60 幅图像。图像处理中首先计算面内运动,然后通过 5 步 PSI (相移干涉测量法) 算法 (又称为 Hariharan 算法) 计算离面运动位移。SMIS 对离面运动测量分辨率可以达到 20 nm (见表 1), 同时还可用于微结构表面轮廓测量^[7,9]。

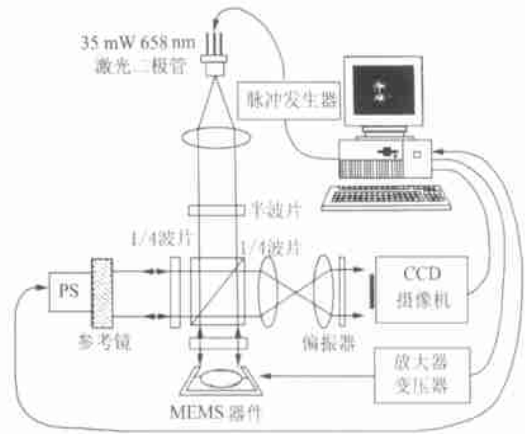


图 2 频闪显微干涉系统 (SMIS) 示意图

Fig. 2 Schematic of stroboscopic interferometer.

与 SMIS 类似的测量系统还有一种改进的迈克尔逊仪 (Michelson-interferometer system), 它被用来测量微执行器的 z 轴位移和频率响应同时也可进行静态轮廓测量。采用 633 nm 的氦氖激光器作光源, 用一红色 LED 作为辅助光源来消除杂光, 干涉图像由光敏二极管接受, 当微执行器作 z 轴运动时, 光敏二极管接收光强将发生变化, 转换为电信号后, 测得电压与 z 轴位移有很好对应关系^[10]。

另外, 斯坦福大学研制的微接触力和微位移测量系统^[11], 微接触力测量使用压敏电阻, 测量范围从 mN 到 nN, 微位移测量使用迈克尔逊干涉仪, 可测最小位移达到 0.01 nm。

2) MEMS 运动参数的注入干涉测量法^[12] (Injection Interferometry)

激光从被测 MEMS (Gyroscope) 运动结构反射回激光源发生干涉, 激光光源后设置光敏二极管可探测到干涉条纹的变化并将其转换为电信号。当运动构件振动振幅为 $s = s_0 \sin t$ 时, 光敏二极管接受光强表达式为:

$$I = I_0 [1 + \cos(2ks_0 \sin t)], \quad (3)$$

这种方法可以用来测量振幅、共振频率、Q 因子等物理量, 特点是不需要进行临界调整, 对反射面没有平滑要求, 不需要对激光束进行十分精确的定位, 测量频率可达数百 kHz。

3) Fabry-Perot 结构用于振动测量

利用 Fabry-Perot 结构: 即一层厚度为 h 的空气隙夹在衬底和可运动的光学厚度为 $\lambda/4$ 的悬浮

膜之间。结构的反射率与厚度 h 有关, 研究光调制器的反射率与外加电压的关系, 就能了解微机械薄膜的受迫振动规律, 得到各种动态参数^[13]。

2.3 光纤技术在微机械量检测中的应用

光纤具有传输距离长、损耗低、重量轻、成本低、传输信息量大、防水防火耐腐蚀、抗电磁干扰等优点。利用光纤传输中光强的变化可测位移、应力、应变等。

1) 光纤用于微位移、振动测量

采用反射式光纤位移传感器, 出射光纤和入射光纤并在一起, 将被测面置于光纤端面附近, 当被测面有垂直于光纤的位移变化时, 出射光纤中的光强将发生变化, 通过对其进行检测可实现对被测面的运动特性的测量。用光纤耦合法测量微悬臂梁的的横向振动参数, 以不同频率激励悬臂梁, 作为发射面的梁的振幅会发生变化, 出射光纤中的光强也会随之发生变化, 检测光强的变化可实现对梁的固有频率的检测^[14]。

2) 光纤迈克尔逊干涉仪

微机械部件尺寸小, 运动幅度小, 有的仅为微米量级甚至亚微米级, 测量时需要非接触无损检测, 传统测量手段难以满足这些要求。光纤干涉传感技术具有灵敏度高, 体积小, 对特殊环境适应性强的特点。国内一研究所曾提出了一种基于光纤迈克尔逊干涉仪的测量方案, 并进行了初步实验, 该仪器可用于对高频运动检测^[15]。

此外, 用于 MEMS 动态参数检测的常用仪器还有激光多普勒测振仪 (LDV)。主要依据的原理是多普勒效应, 可用来对离面运动进行测量。激光通过显微镜在被测结构上聚焦成一个直径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的光斑, 当被测结构做离面运动时, 系统可以测得多普勒频移。SMIS 和 CMVS 对运动结构进行检测时要求运动过程是周期的或可周期重复的, 同时还要不断调整激光二极管的照明频率 (频闪频率) 使其与运动同步, 不能检测随机的或非可重复的运动。LDV 和显微镜结合在一起就可用来对 MEMS 的这种运动进行检测, 实时的对某点速度进行测量。

3 微几何量检测方法

微几何量测量主要是针对 MEMS 的微小构件的三维尺寸、三维形貌的精密测量。如何界定

MEMS 尺寸范围目前没有统一的认识, 一般认为范围在亚微米到 $10\ \text{mm}$ 之间。微几何量测量具有以下特点: 测量力引起的误差较大; 定位误差往往较大; 温度引起的误差小; 被测件轮廓影像易受异物的影响; 衍射效应的影响大。目前, 光切法、干涉法、共焦显微干涉法等非接触测量方法已经成为对微小构件几何量精密测量的主要方法, 其中, 将计算机视觉技术与光学显微技术相结合的微视觉测量方法越来越受到重视。

微几何量检测测量范围小, 测量精度要求高。二维微几何量检测可以采用普通光学显微镜和扫描电子显微镜 (SEM)。由于具有较高的分辨率, SEM 目前已成为 MEMS 设计、制造中最常用的观测仪器之一。由于加工工艺和 MEMS 可靠性设计等方面的要求, 获得 MEMS 微结构精确的三维结构信息是 MEMS 中几何量测试的重点。三维微几何量测试的方法可以概括为两类, 一类是从传统的几何量检测技术发展和改进而来, 如光切法、白光干涉法、光栅投影法^[25-26]、普通触针^[27]和光针式^[28-29]三维轮廓仪等, 其中包括应用扫描探针显微镜的纳米观测方法以及微视觉测量方法; 另一类则是根据被测件的材料和结构特点专门设计的, 如基于计算机视觉的硅片厚度测量仪器 OMMS^[17]、MEMS 器件实时蚀刻深度检测^[30]等。

微视觉测量技术在微几何量检测领域越来越得到重视。对亚微米级的微机械量和几何量的检测和计量手段有: 扫描电子显微镜 (SEM)、扫描探针显微镜 (SPM)、干涉显微镜、高精度轮廓仪、光电坐标测量机 (CMM-Opt) 等。其中, SEM 和 SPM 的测量范围分布在 $几\ \text{nm} \sim 200\ \mu\text{m}$; 白光干涉显微镜测量范围分布在 $0.05\ \mu\text{m} \sim 0.6\ \text{mm}$; 轮廓仪测量范围分布在 $0.1\ \mu\text{m} \sim 5\ \text{mm}$; 采用光探针 (Optical Probe) CMM 测量范围分布在 $1\ \mu\text{m} \sim 1000\ \text{mm}$; 具有机械式测头 (Mechanical Probe) 的 CMM 对微机械量和几何量检测和计量相对较困难; 扫描隧道显微镜 (STM) 和原子力显微镜 (AFM) 就其测量精度和范围属于纳米测量手段。MEMS 尺寸范围分布在亚微米到 $10\ \text{mm}$ 之间, 在这个测量区域中, 微视觉测量方法辅助以精密的机械移动可以覆盖亚微米到 $10\ \text{mm}$ 的区间, 几乎可以覆盖整个微几何量测量区间, 是该领域中最有前景的计量测试方法和手段之一^[18-19]。但是,

微视觉测量系统要解决自身的精密成像问题,它的测量区间才能有效的覆盖亚微米的微观物理空间。作者所在的研究组曾经采用微视觉测量方法,使用双目高倍体式显微光学系统对被测量视场进行成像,利用亚微米级的自然物质表面晶格排列图案作为标准被测物对显微系统进行标定,对约 $7\ \mu\text{m}$ 厚的金属镀层厚度进行精确测量,镀层厚度检测精度 $\pm 3\sigma$ 为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。CMVS、SMIS 均采用了显微视觉测量方法,可对 MEMS 静态结构尺寸进行精密测量。其中 SMIS 对三维静态轮廓测量时在离面(out-of-plane)方向上的分辨率可以达到 $20\ \text{nm}$ ^[7]。

干涉法用于微观形貌测量主要有三种方式。相移干涉测量法(Phase Shifting Interferometry),简称 PSI,使用单色光。特点是精度高,测量速度快,垂直方向分辨率可以达到亚纳米级,但是如果被测表面不连续,有垂直梯度变化较大的结构如阶梯、洞、岛状结构时,得不到有效的干涉图,这就限制了它的测量范围。一般垂直方向测量范围限制在 $\lambda/4$ (λ 是所用的单色激光波长),约 $150\ \text{nm}$ 。垂直扫描干涉测量法(Vertical Scanning Interferometry),简称 VSI,也称为白光干涉法,使用白光作为光源,这种方法并不需要对干涉条纹的具体形状进行分析,它根据的是白光干涉原理。白光干涉条纹基本上要在等光程差位置才能够观察到,而且条纹数目少,干涉条纹在零光程差附近对比度最大,通过观察白光干涉零级条纹就可确定零光程差位置,通过微调参考镜的位置对被测件进行垂直方向的扫描记录下每一点零光程差的位置,即可获得被测件表面三维信息。这种测量方法适合于对垂直梯度较大的不连续表面进行测量,测量精度可以达到纳米级,测量时间相对 PSI 较长,垂直方向测量范围可以达到几个毫米。比较适合于 MEMS 测量^[7, 21-22]。增强型的 VSI(Enhanced VSI),简称 EVSI,也称为白光相移干涉测量法,结合了白光干涉和相移干涉的优点,具有垂直方向测量范围大,测量精度高的特点。干涉仪的水平方向的分辨率取决于光学系统和所用光波的波长,一般可以达到 $300\ \text{nm}$ 。

4 微材料特性检测

MEMS 器件的组成材料特性是影响 MEMS

可靠性、稳定性的重要因素,由于加工工艺、结构尺寸不同,即使是同样的材料也会表现出不同的材料特性,因此对 MEMS 器件组成材料特性进行检测具有重要意义。目前在 MEMS 设计、制造中比较常见的材料特性测量包括测量材料的断裂模数、弹性模量、应力应变、微摩擦特性等。

4.1 静态梁弯曲实验测量材料的力学特性

微型梁结构的断裂模数和杨氏模量可以通过直接测量作用在悬臂梁上的力和梁的弯曲形变来计算。Lyndon S. Stephens 等人研制的实验装置可以用来测量用 LIGA 工艺加工的镀膜柱状微结构(HARM)的断裂模数和弹性模量以及柱状微结构与基座(BASE)间的粘结强度和整个微结构所能承受的最大横向力。移动工作台使其所载的柱结构(HARM)与测量悬臂梁的尖端>Loading Pointer)接触,通过调整工作台内置显微镜焦平面测量接触点到基座的距离(L),然后使工作台向测量梁的轴向移动直至微型柱断裂,记录下压力传感器(Force Sensor)所受力和工作台的位移即可绘制出应力-应变曲线。这种测量方法对力和形变的测量较为简捷,其中对微型柱形变的测量可以达到亚微米甚至纳米精度。测量结果显示,弹性模量与微型柱结构的尺寸以及电镀特性有着密切联系^[31]。

4.2 用固有频率法测量微型梁的杨氏模量

通过对微型梁的固有频率的检测,计算微型梁的杨氏模量和内应力。等截面悬臂梁的横向振动基频 f_b 与杨氏模量 E 的关系式是振动力学的一个基本结论,它们之间的关系:

$$f_b = \frac{\omega_b}{2\pi} = \frac{3.515}{2} \left(\frac{EI}{Al^4} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中: J 为梁横截面惯量矩; ρ 为密度; A 为横截面面积; l 为梁长度; E 为杨氏模量。

目前这种方法的测量误差主要来源于对微型梁厚度的测量^[14]。

4.3 应变的干涉测量法

应变/位移干涉测量仪(Interferometric Strain/Displacement Gage (ISDG)),从被测件上预置的两条反射计量线(Gold Lines)的不同侧面反射的光线形成两幅干涉条纹,当被测件受拉力或压力产生应变时,两条反射计量线将发生相对位移,对所产生干涉条纹的变化进行分析,可计算出应变的大小。使用的干涉条纹探测器是两组光

敏二极管阵列,实测时可将阵列中心调整至干涉图中心位置,输出 0~5 V 电信号^[32]。

4.4 微摩擦测量方法

1) 微摩擦测量装置

将摩擦测试件分别装在微型电机外伸轴端和施力装置上,加力使两试件相互作用,由于摩擦力作用,电机的输出功率将发生变化,通过测量电机输出功率变化和两个试件间相互作用的正压力,来对他们产生的微摩擦进行分析^[33]。

2) 静摩擦测量

静摩擦力的测量对于 MEMS 设计具有重要意义。由杠杆臂 (lever arm)、拉杆 (push-rod)、和滑块 (shuttle) 等组成的铰链连接结构,要设计拉动滑块带动整个机构运动的微执行器首先必须对机构的静摩擦力进行测量。Richard Yeh 等人使

用了一种微弹簧结构来测量静摩擦力,对杠杆臂在空载和负载情形下位于不同角度时发生突然偏转所需拉力进行分析,估算出最小静摩擦力^[35]。

5 结 论

改进传统检测方法,研究新的测试技术是 MEMS 发展的迫切要求。MEMS 器件结构尺寸小、质量小、易受外界干扰,对 MEMS 器件采取非接触测量已成为趋势。计算机微视觉技术具有可视化、速度快、精度高的特点,与频闪光照明技术、干涉技术、高精度图像处理技术相结合,可实现多参数、多自由度的 MEMS 参数检测,在 MEMS 测试中具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 苑伟政, 马炳和. 微机械与微细加工技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000. 137-159.
YUAN W ZH, MA B H. *Micro-machine and microfabrication technology* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical Univ Press, 2000. 137-159. (in Chinese)
- [2] 王亚强, 金仲和. 一种新型硅微机械粘滞型谐振真空计[J]. 真空科学与技术, 1997, 17(3): 153-159.
WANG Y Q, JIN ZH H. A novel silicon micromechanical resonant viscosity vacuum gauge[J]. *Vacuum Science and Technology*, 1977, 17(3): 153-159. (in Chinese)
- [3] 陈志勇, 高钟毓. 微角速度传感器在不同气压下的振动特性[J]. 清华大学学报, 2002, 42(6): 799-813.
CHEN ZH Y, GAO ZH Y. Vibration characteristics of a micromachined angular rate sensor at different pressures[J]. *J Tsinghua Univ (Sci and Tech)*, 2002, 42(6): 799-813. (in Chinese)
- [4] 徐锡林. 微位移的高精度测量控制设计[J]. 现代计量测试, 1997, (1): 11-14.
XU X L. High precision micro-actuator measuring and controlling system[J]. *Modern Measuring and Testing*, 1997, (1): 11-14. (in Chinese)
- [5] 张二星. 微型机械运动参数测试仪光学机械系统研究[J]. 光学 精密工程, 1996, 4(2): 48-52.
ZHANG E X. Research into an optical and mechanical system of the instrument for measuring dynamics of micromechanism[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4(2): 48-52. (in Chinese)
- [6] 杨近松, 张二星. 微型机械旋转运动参数测试仪研究[J]. 光学 精密工程, 1995, 3(4): 66-75.
YANG J S, ZHANG E X. Study on instrument of revolving micromachine dynamic measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, 3(4): 66-75. (in Chinese)
- [7] REMBE C, KANT R, RICHARD S. Muller. Optical measurement methods to study dynamic behavior in MEMS[J]. *SPIE*, 2000, 4400: 127-137.
- [8] DAVIS C Q, FREEMAN D M. Using a light microscope to measure motions with nanometer accuracy[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37: 1299-1304.
- [9] HART M, CCONANT R, LAU K. Time-resolved measurement of optical MEMS, using stroboscopic interferometry[A]. *Proc. Transducers '99* [C]. Sendai, Japan, 1999. 470-473.
- [10] XIE H K, ERDMANN, JING Q, et al. Simulation and characterization of a CMOS Z-axis microactuator with electrostatic comb drives[A]. 2000 *International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems-MSM* [C]. San Diego, 2000. 181-184.
- [11] PRUITT B, CHOI D H, FLORANDO J, et al. Low force electrical contact measurements using piezoresistive can-

- tilers to characterize thin-film metallization[A]. *Transducers '01/ EuroSensors XV 2001* [C]. Munich, Germany, Springer, 2001. 1032-1035.
- [12] DONATI S, NORCIA M, ANNOVAZZI FLODI V, *et al.* Measurement of MEMS mechanical parameters by injection interferometry[A]. *Proc of International conference on Optical MEMS*, 2000[C]. Sheraton Kauai, USA, 2000. 89-90.
- [13] 茅惠兵, 忻佩胜. 微机械光调制器的制备及其在不同激励条件下的响应研究[J]. *电子学报*, 2002, 30(2): 262-265.
- MAO H B, XIN P SH. Response study of the micromechanical modulator under different drive conditions[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(2): 262-265 (in Chinese)
- [14] 蒋庄德, 卢德江. 微型梁杨氏模量与内应力的固有频率法测量[J]. *西安交通大学学报*, 2000, 34(5): 55-58.
- JIANG Z D, LU D J. Determination of Young's modulus and internal stress from natural frequency of micro beam[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong Univ*, 2000, 34(5): 55-58. (in Chinese)
- [15] 瞿荣辉, 丁浩. 微机械部件运动的光学测量[J]. *功能材料与器件学报*, 1998, 4(2): 141-144.
- QU R H, DING H. Optical method for measuring micro-mechanical devices movement [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 1998, 4(2): 141-144. (in Chinese)
- [16] 《计量测试技术手册》编辑委员会. 计量测试技术手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1997.
- Editor committee of the handbook of measurement and testing. *Handbook of measurement and testing (vol. 2)* [M]. Beijing: China Metrology Press, 1997. (in Chinese)
- [17] VIRGINIA TECHNOLOGIES Inc. Thickness measurement of micromachined silicon wafers using machine vision [EB/OL]. <http://www.vatechnologies.com/omms.htm>, 2002-9-15.
- [18] 王向军, 王峰. 显微精密成像与微型机械尺寸检测技术[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(6): 511-513.
- WANG X J, WANG F. Study of micro mechanical inspection technology by microscope precision digital image[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(6): 511-113. (in Chinese)
- [19] WILKENING G. Measuring methods for determination of geometrical quantities of micro parts[A]. W. B. Lee, Y. Xu. *Nano-metrology in Precision Engineering* [C]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 1998. 68-75.
- [20] 赵平, 杨勇. 几何量纳米计量方法及仪器[J]. *航空精密制造技术*, 2001, 37(6): 28-32.
- ZHAO P, YANG Y. An overview of nanometrology for geometry parameters[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2001, 37(6): 28-32. (in Chinese)
- [21] OLSZAK A G, SCHMIT J, HEATON M G. Interferometry: technology and applications [EB/OL]. [http://www.di.com/AppNotes-PDFs/AN47 Interferometry.pdf](http://www.di.com/AppNotes-PDFs/AN47%20Interferometry.pdf), 2002-10-10.
- [22] 何永辉, 蒋剑峰. 基于扫描白光干涉法的表面三维轮廓仪[J]. *光学技术*, 2001, 27(2): 150-153.
- HE Y H, JIANG J F. Surface 3D profiler based on scanning white light interferometry method[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(2): 150-153. (in Chinese)
- [23] 李艳军, 左洪福. 显微观测技术的新进展及其应用[J]. *光学仪器*, 2002, 24(2): 32-37.
- LI Y J, ZUO H F. Development and application of microscopic inspecting technology[J]. *Optical Technique*, 2002, 24(2): 32-37. (in Chinese)
- [24] Nano Focus Inc. *Whitelight confocal microscope* [EB/OL]. <http://www.nanofocus-inc.com/pdfs/nanosurf-datasheet.pdf>, 2002-10-10.
- [25] GOM-GESELLSCHAFT FÜR OPTISCHE MESSTECHNIK MBH. *Quality control and 3D-digitizing using photogrammetry and fringe projection* [EB/OL]. <http://www.gom.com/pub/publications/quality-en.pdf>, 2002-10-10.
- [26] Fries Research & Technology Gmb H. *MicroSpy fringe projection* [EB/OL]. <http://www.frt-gmbh.com/downloads>, 2002-10-15.
- [27] 金增伟. Talysur-6 型触针式轮廓仪测量表面质量的特点[J]. *实验室研究与探索*, 1997(4): 48-51.
- JIN Z W. Characteristics and the surface quality measurement using the profiler Talysur-6[J]. *Laboratory Research and Exploration*, 1997, (4): 48-51. (in Chinese)
- [28] 谢峰, 李建林. 光针式轮廓仪的研制[J]. *现代计量测试*, 1999, (2): 10-15.
- XIE F, LI J L. Development of optical stylus profilometer[J]. *Modern Measuring and Testing*, 1999, (2): 10-15. (in Chinese)

Chinese)

- [29] 王富生, 谭久彬. 表面微观轮廓的高分辨率光学测量方法[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(4): 309-315.
WANG F SH, TAN J B. Methods of high resolution optical measurement for surface profile[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(4): 309-315. (in Chinese)
- [30] CHARPENAY S B, XU J H, HAIGIS J, *et al*. Real-time etch-depth measurements of MEMS devices[J]. *Microelectro Mechanical Systems*, 2002, 11(2): 111-117.
- [31] STEPHENS L S, KELLY K W, SIMHADRI S, *et al*. Mechanical property evaluation and failure analysis of cantilevered LIGA nickel microposts[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(3): 347-359.
- [32] SHARPE W N, YUAN B G, VAIDYANATHAN R. Measurement of Young's modulus, Poisson's ratio, and tensile strength of polysilicon[A]. *Proceedings of the Tenth IEEE International Workshop on Microelectromechanical Systems Nagoya* [C]. Japan, 1997. 424-429.
- [33] 曹长江, 张琛. 一种基于电磁型微马达的微摩擦测试装置[J]. 仪表技术与传感器, 2000, (10): 36-38.
CAO CH J, ZHANG CH. A testing instrument for micro-friction based on electromagnetic micro-motor[J]. *Instrument Technology and Sensor*, 2000, (10): 36-38. (in Chinese).
- [34] 王琪民, 单保祥. 微电子机械系统中构件的基本力学量检测[J]. 实验力学, 1997, 12(4): 487-499.
WANG Q M, SHAN B X. Measurement of essential mechanical characteristics for MEMS and its components[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1997, 12(4): 487-499. (in Chinese)
- [35] YEH R, PISTER K S J. Measurement of static friction in mechanical couplings of articulated microrobots[A]. *Proc SPIE Conf Micromachined Devices and Components* [C]. Austin, TX, 1995. 40-41.

MEMS measurement technologies and methods

LI Zhi, WANG Xiang-jun

(National Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
College of Precision Instrument and Opto-electronic Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The rapid development of microelectromechanical systems (MEMS) makes it necessary to have precise measurement during the design, simulation, fabrication, and evaluation of MEMS. The MEMS measurement technologies and methods are reviewed from the viewpoints of mechanical parameters, geometric dimensions and material properties on a micro-scale. The micro-vision metrology technology, the interferometer and some optoelectronic detection methods used for measurement are discussed in detail.

Key words: MEMS; measurement of MEMS; MEMS inspection; MEMS test; computer micro-vision

作者简介: 李智(1977-), 男, 湖南长沙市人, 天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为机电系统测试技术及方法; E-mail: li.zhi@eyou.com
王向军(1955-), 男, 黑龙江省哈尔滨市人, 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 博士, 教授, 1992年于英国留学回国, 主要研究方向为精密测试技术及仪器, 影像与视觉测量理论与技术, MEMS测试技术及方法。