

Synchronous Control of Stroboscopic Imaging and Motion Excitation in MEMS Periodic Motion Testing *

HU Xiaodong^{*}, SUN Bin, LIU Yi, HU Xiaotang

(State Key Lab of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, China)

Abstract : The testing technique of microstructure motion is an important part of MEMS testing technology. Stroboscopic photography has been widely used because of higher motion frequency of microstructures in MEMS device. In order to meet testing requirements of MEMS periodic motion, a synchronous control system of stroboscopic imaging and motion excitation based on FPGA is built for the excitation of periodic motion and the image acquisition in the course of the high-speed motion of microstructures. The experimental result shows that the minimum pulse width of stroboscopic light is 10 ns, the adjusting step of motion phase is less than 3.75° , which can meet the requirements of testing the periodic motion in 1 MHz frequency.

Key words : MEMS testing; stroboscopic imaging; motion excitation; synchronous control
EEACC : 2575; 7230 G

MEMS 周期运动测试中 频闪成像与运动激励的同步控制 *

胡晓东^{*}, 孙 彬, 刘 一, 胡小唐

(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 : 微结构运动测试技术已成为 MEMS 测试技术的重要组成部分。由于 MEMS 器件中微结构的运动频率较高, 频闪成像法得到了广泛的应用。本文针对静电型 MEMS 周期运动测试的要求, 设计并研制了一种基于 FPGA 的频闪成像和运动激励同步控制系统, 用于 MEMS 器件的周期运动激励和微结构高速周期运动过程中清晰图像的获取。实验表明, 频闪照明的最小脉冲宽度为 10 ns, 运动相位的调整间隔小于 3.75° , 能够满足周期运动频率为 1 MHz 微结构运动测试的要求。

关键词 : MEMS 测试; 频闪成像; 运动激励; 同步控制

中图分类号 : TH133. 21

文献标识码 : A

文章编号 : 1004-1699(2008)07-1174-04

随着 MEMS 从研究阶段逐渐步入产业化阶段, 测试的需求越来越迫切, 特别是运动特性测试对 MEMS 器件的设计、加工以及提高可靠性等方面具有重要指导意义。首先, 一些微器件本身就包含工作在振动状态的结构, 其运动特性直接影响整体性能; 其次, 通过测量微结构的谐振频率等运动参数可用于弹性模量、应力等材料力学参数的测量^[1-3]。微结构运动特性测量有 4 种方法: 1 是连续光照明下摄像^[4-5]; 2 是频闪成像^[6-7]; 3 是高速摄像^[8]; 4 是激光多普勒测速^[9]。前 2 种适合于周期运动测量, 与

机器微视觉技术和显微干涉技术相结合, 可分别实现微结构周期平面和离面运动参数的全视场测量, 但是第 1 种只能测得运动幅度的最大值; 后 2 种适合于瞬态运动测量, 但是第 3 种硬件成本非常高, 第 4 种属于单点测量, 且在微结构平面运动测量应用中存在一定难度。因此, 频闪成像在 MEMS 运动特性测试中得到了广泛的应用。在微结构周期运动测量中, 频闪成像与运动激励的同步控制是基础条件。目前大多数研究报道中都是采用通用仪器的组合和外加相应的延迟电路来实现^[10-11], 存在所用仪器设

基金项目 : 国家 863 计划资助项目 (2006AA04Z327); 新世纪优秀人才支持计划资助

收稿日期 : 2007-12-07 **修改日期 :** 2008-02-04

备多、操作复杂而费时、同步性能差等缺点。随着 MEMS 测试需求的提高(运动频率越来越高、运动激励的输入端口数从单路到多路),通用仪器组合方式的不足越来越呈现出来,甚至在一些应用场合已不能满足测试的要求。本文提出了基于 FPGA 的用于 MEMS 周期运动测试的频闪成像与运动激励同步控制器,该控制器具有集成度高、成本低、同步性能好、操作简单等特点。

1 频闪成像与运动激励同步控制要求

MEMS 器件的运动频率一般在几千赫兹到一兆赫兹,而常规摄像机每秒的采集帧数一般只有几十帧。为了获得 MEMS 器件运动瞬间的图像,照明时间应该尽可能短,而在单次照明条件下摄像机不能获得足够的光强进行成像,因此要求 MEMS 器件进行周期运动,照明的频率与其相同,在 MEMS 器件的相同运动位置进行多次曝光来得到在该运动位置的清晰图像,即频闪成像。为了获得 MEMS 器件周期运动的历程,一般至少需要获得 8 个不同运动位置的图像,因此要求频闪照明与 MEMS 器件周期运动激励的相位差可以调整。图 1 为频闪成像与运动激励同步控制的时序示意图^[12]。

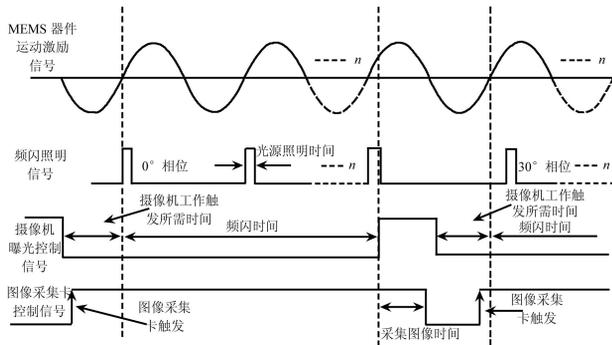


图 1 频闪成像与运动激励同步控制时序示意图

频闪照明的频率与运动激励的频率是相同的,单次频闪照明的时间随着频率的增加而减小,而在相同位置频闪照明的次数可依据采集图像的亮度来进行调整。依据频闪照明的频率和次数,确定摄像机的触发和曝光时间及图像采集卡的触发时间。基于频闪成像的 MEMS 器件运动特性测试的前提条件是稳定的周期运动,外界环境干扰会对运动周期性产生不同程度的影响,因此频闪成像与运动激励同步控制的自动化能减少图像获取的时间,从而能有效地保证数据的准确性。

2 频闪成像与运动激励同步控制的实现

显微光学成像子系统由 Zeiss 公司 Axioplan 2

光学显微镜、Redlake 公司 MegaPlus 1.6i 数字 CCD 摄像机、NI 公司 PCF1422 图像采集卡组成。为了满足上述频闪成像和运动激励同步控制的要求,设计并研制了频闪成像和运动激励同步控制子系统。图 2 为整个系统的组成框图。频闪成像与运动激励同步控制子系统以 Altera FPGA (Stratix II EP2S15F484C5,时钟频率 100 MHz) 为核心,与计算机通过 RS232 进行通讯,接收频闪成像和运动激励同步控制参数,之后,并行输出图像采集卡和摄像机的触发信号、频闪光源驱动信号和 MEMS 器件运动激励信号。频闪光源驱动信号通过集成 LD 驱动芯片 MAX3263 完成 V/I 变换,对三洋公司的半导体激光器 DL-47-062(LD,10 mw) 进行控制,该 LD 经过准直后引入到光学显微镜中进行同轴照明;MEMS 器件运动激励信号通过 AD 公司的 14 bit D/A 转换器(AD9764)进行数模变换,然后再经过数字电位器(AD5235)组成的放大电路进行电压幅值和偏置的调整,最后经过 APEX 公司 PA85 组成的高压放大器,最大电压峰峰值可达到 200 V,满足了大部分静电型 MEMS 器件运动激励的要求。为了满足一些 MEMS 器件差动或多通道运动激励的要求,FPGA 有 3 个通道输出 MEMS 器件运动激励信号,可独立进行调整。

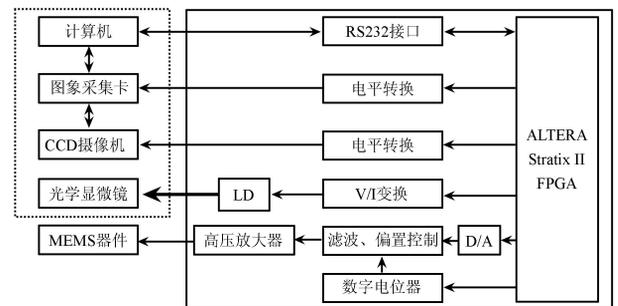


图 2 基于频闪成像的 MEMS 运动特性测试系统框图

为了保证频闪成像和运动激励的同步性和两者相位差的灵活调整,MEMS 器件的运动激励信号采用直接数字频率合成技术来实现。MEMS 器件运动激励基本波形(正弦波、三角波、锯齿波等)数据存储在 FPGA 内部,通过调整频率控制字可实现不同频率运动激励信号的输出;而相位控制字的设置则实现了频闪光源驱动信号的同步输出,消除了周期运动激励信号和频闪脉冲信号之间的延时累加误差,这样不仅使得两者相位差可以灵活调整,而且也使得外围电路存在不同延时特性的补偿可以容易实现。按照 FPGA 时钟频率、频率和相位控制字的取值范围,采用直接数字频率合成的计算方法可得运动激励信号频率调整范围为 1 Hz ~ 1 MHz,频率调

整最小量为 1 Hz, 1 MHz 运动激励频率时的相位调整最小间隔为 3.75° , 即 1 MHz 运动周期可分为 96 个运动相位。

3 实验结果与分析

由于采用了直接数字频率合成技术, 频闪照明信号和运动激励信号之间的同步性可以得到有效保证, 但是由于上述两路信号在 FPGA 内部生成的机制和外围电路的不同, 频闪照明和 MEMS 器件激励之间存在一定的延迟。MEMS 运动器件一般为二阶或高阶系统。如果只需要测量 MEMS 器件的运动历程或幅频特性, 由于频闪照明和运动激励之间的相位差能以很小的间隔进行调整, 存在的延迟对测量结果几乎没有影响; 但是如果需要测量运动相频特性, 存在的延迟是不可接受的, 必须给予补偿。为了确定频闪照明和运动激励之间的延迟时间, 选用 Thorlabs 公司高速硅光电探测器 DET10A 对 LD 的输出进行探测。图 3 所示为频闪照明与运动激励(正弦波)信号之间的延迟时间, 实验数据表明两者的延迟时间不是固定不变的, 而与频率和运动激励信号的幅值存在一定的关系。当频率小于 200 kHz 时, 两者的延迟时间与电压的幅值基本无关, 是一个较为稳定的值, 约为 720 ns; 随着频率的增大, 两者的延迟时间逐渐减小, 且电压的幅值越大, 下降的斜率越小。对于频率为 1 MHz 的周期运动测试(正弦波, 峰峰值为 40 V), 两者的延迟时间为 572 ns, 即 206 相位差; 这对于相频特性测试是不能接受的。依据图 3 所示测得的延迟时间建立了补偿数据表, 在频闪照明和运动激励信号输出之前按照频率和电压幅值进行查表和线性插值获得补偿相位值, 对 FPGA 内部的相位控制字进行调整, 以完成延迟时间的补偿。图 4 所示为实施补偿后 MEMS 运动激励信号与频闪照明之间的同步关系监测情况, 设置运动激励信号为 1 MHz 的正弦波, 频闪照明驱动信号的脉冲宽度为 50 ns, 两者的相位差为 0° , 从图中可看出频闪频闪照明的脉冲宽度为 55 ns, 与运动激励信号保持了严格的同步, 两者的延迟时间小于 1 ns。由此可知, 频闪照明和运动激励信号的同步性能够保证, 且延迟时间的补偿策略是有效的。

图 5 为 LD 输出光功率与频闪脉冲宽度的关系, 可看出随着脉冲宽度的增加光功率越大, 且呈非线性关系。由于光电探测器的感光面积略小于 LD 聚焦后光束的面积, 实际照明的光功率要大于图中的数据, 但是变化趋势是相同的。因此, 在设置单个运动相位下频闪次数时不能简单地按照频闪脉冲宽度来计算, MEMS 运动频率越高, 为了获

得相同亮度的图像, 频闪照明的有效时间就需要越长。

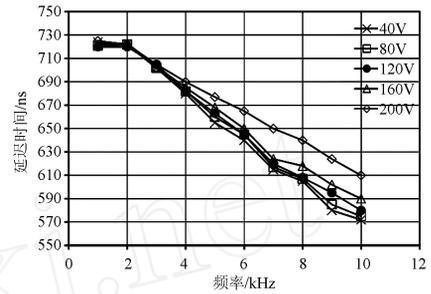


图 3 频闪照明与运动激励的延迟时间

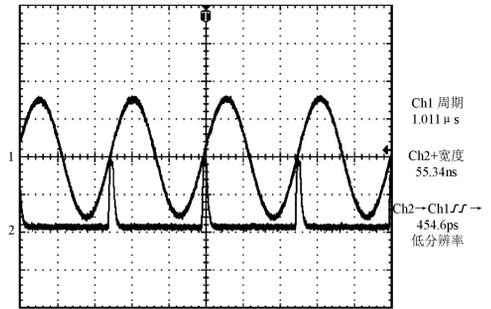


图 4 补偿后频闪照明与运动激励的同步

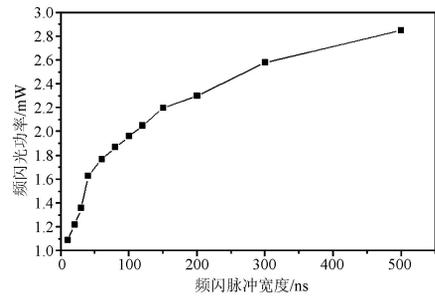


图 5 频闪照明功率与脉冲宽度的关系

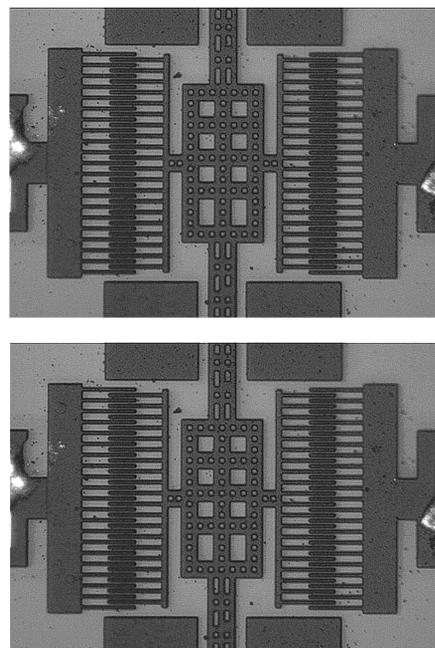


图 6 SiC MEMS 谐振器两个不同运动相位下的图像

为了验证频闪成像和运动激励同步控制的有效性,对一种 SiC MEMS 平面谐振器进行运动激励和频闪成像。运动激励信号为 270 kHz 的正弦波,峰峰电压值为 100 V,偏置电压为 50 V,一个周期分为 12 个运动相位,频闪脉冲宽度为 50 ns,单个运动相位下频闪次数为 20 万次,CCD 曝光时间为 0.8 s,图 6 为该谐振器在两个不同运动相位下的图像,从图像中微结构边缘可看出运动过程能够被“冻结”而清晰成像,且中央微结构在横向存在一定的位移量,对所采集的运动图像序列应用图像块匹配运动估计处理也得到了平面位移变化,如图 7 所示;表明频闪成像和运动激励的同步是有效的。然而以上实验也反映出测量时间较长的问题,这主要是由于目前所使用 LD 的输出光功率较小,而且随着频闪照明频率的增大而有较大衰减,从减少测量时间来降低外界干扰的角度来看,应该采用功率更高和响应时间更短的 LD 作为光源。

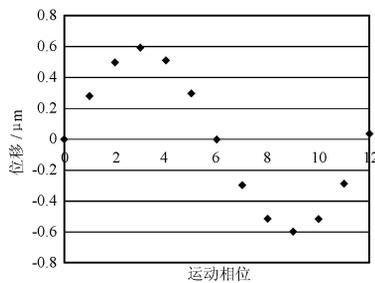


图 7 微谐振器平面位移测量数据

4 结论

本文针对静电型 MEMS 周期运动测试中运动激励和运动过程中清晰图像采集的要求,设计并研制了一种基于 FPGA 的频闪成像和运动激励同步控制系统,具有激励频率和运动相位控制简单、频率和运动相位的调整步距小等特点。为了实现 MEMS 器件运动相频特性的测量,必须考虑频闪照明与运动激励之间的延迟时间,而实施准确的延迟时间补偿应该依据运动激励信号的频率和幅值来确定。由于频闪照明强度随着测试频率的增加而呈非线性减小,测试频率越高所需要的测试时间就越长。



胡晓东(1974-),博士,副教授,主要从事 MEMS 光学测试技术和扫描探针显微技术的研究,xdhu@tju.edu.cn

参考文献:

- [1] 余存江,唐洁影,黄庆安. 一种微悬臂梁疲劳特性的检测方法[J]. 传感技术学报, 2007, 20(9): 2139-2142.
- [2] 郑丽娜,薛晨阳,张文栋等. 基于硅微梳齿型谐振器的 MEMS 动态测试研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(05A): 1531-1534.
- [3] 王晓东,王涛,李楠等. 一种 MEMS 微结构谐振频率的测试技术[J]. 传感技术学报, 2006, 19(05A): 1538-1541.
- [4] Burns D J and Helbig H F. A System for Automatic Electrical and Optical Characterization of Microelectromechanical Devices [J]. Journal of Microelectromechanical System, 1999, 8(4): 473-482.
- [5] Salbut L, Patorski K, J ówik Met al. Active Micro-Elements Testing by Interferometry Using Time-Average and Quasi-Stroboscopic Techniques[C]// Proc. SPIE, 2003, 5145: 23-32.
- [6] Petitgrand S, Yahiaoui R, Danaie K et al. 3D Measurement of Micromechanical Devices Vibration Mode Shapes with a Stroboscopic Interferometric Microscope [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 36(2): 77-101.
- [7] Hart M R, Conant R A, Lau K Y, et al. Stroboscopic Interferometer System for Dynamic MEMS Characterization [J]. Journal of Microelectromechanical System, 2000, 9(4): 409-418.
- [8] Rembe C, Tibken B, Hofer E P. Analysis of the Dynamics in Microactuators Using High-Speed Cine Photomicrography[J]. Journal of Microelectromechanical System, 2001, 10(1): 137-145.
- [9] Burdess J S, Harris A J, Wood D, et al. A System for the Dynamic Characterization of Microstructures [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1997, 6(4): 322-328.
- [10] 胡春光,胡晓东,金翠云等. MEMS 动态测试中频闪同步控制系统的研究[J]. 天津大学学报, 2005, 38(1): 47-51.
- [11] Rembe C and Muller R S. Measurement System for Full Three-Dimensional Motion Characterization of MEMS [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(5): 479-488.
- [12] Hu Xiaodong, Liu Gang, Hu Chunguang, et al. Characterization of Static and Dynamic Microstructures by Microscopic Interferometry Based on Fourier Transform Method [J]. Measurement Science And Technology, 2006, 17(6): 1312-1318.