

文章编号: 0253-2239(2009)05-1341-06

# 光磁混合存储动态测试系统中的聚焦伺服模块研究

陈 璐 徐文东 朱 青

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 介绍了光磁混合存储动态测试系统中聚焦伺服模块的设计和实现。伺服模块采用了双光束的方案,用独立的红光抽运(LD)作为伺服光源,构成独立的动态聚焦伺服单元,使伺服单元具有模块化、可移植的特点。它不仅适用于混合存储动态测试系统,还可用于卧式或立式、静态或动态的远场激光记录系统中。本文研究了聚焦模块中执行器压电陶瓷(PZT)的幅相频特性和非线性滞回效应,在控制算法方面,使用了 PI 算法闭环控制结合逆系统和逆非线性滞回模型进行校正,实现了高精度的动态聚焦伺服,在盘片转速为 8 r/s 时聚焦偏差在  $\pm 130$  nm 内。利用该测试系统对有机材料作了动态记录测试,记录点大小和深度均匀一致。

**关键词** 光数据存储; 光磁混合存储; 聚焦伺服模块; 逆系统; 非线性滞回

**中图分类号** O435 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS2002905.1341

## A Novel Focus Servo Module in Hybrid Magneto-Optical Recording Testing System

Chen Lu Xu Wendong Zhu Qing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The design and establishment of focus servo module in the hybrid magneto-optical recording system are presented. The servo module, which acquires focus error signal through astigmatism method and utilizes the double-laser method integrated with red-laser servo and blue-laser assisted recording, serves as an independent dynamic focus servo unit. Thus, with the feature of modularization and palatability, the servo module can be used in both stable and dynamic laser recording system, in both horizontal type and vertical type optical system. For control algorithm design, the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics and the nonlinear hysteresis of PZT are studied in detail. High accuracy dynamic focus servo is realized through PI closed-loop control with the inverse system and inverse hysteresis model calibration. Focus error is within  $\pm 130$  nm under the rotate speed 8 r/s, and the diameter and depth of recording spots are almost uniform.

**Key words** optical data storage; hybrid magneto-optical recording; focus servo module; inverse system; nonlinear hysteresis

## 1 引 言

在信息化社会中,信息产业和技术的发展非常重要。信息产业对超大容量信息存储的要求日益增高。当光存储和磁存储不断向高密度方向发展的同时,两者遇到各自的限制。光存储受到光学衍射极限的影响,当光斑聚焦到一定大小时会产生明显的衍射现象,无法进一步缩小光斑。磁存储则受超顺磁效应<sup>[1]</sup>局限,当磁记录位很小时,该记录位的磁性颗粒难以在常温下保持稳定的极性。而光磁混合记

录<sup>[2,3]</sup>是为了克服高密度光存储和磁存储二者缺点而提出的一种新的存储方法。它以激光辅助热磁写入和磁通检测读出为主要特征,其写入过程采用居里点写入或者补偿点写入。激光束聚焦加热介质,使其温度升高到居里温度(补偿温度)附近,矫顽力下降,外部磁场使磁畴反转将信息写入;当激光束停止加热,温度下降,矫顽力再度提高,形成稳定的磁畴。信号的读出仿照硬磁盘的读出,选用灵敏度高的 GMR 磁头通过检测漏磁场来读取,可以得到高

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60490294)和上海市基础性研究重大项目(06DJ14007)资助课题。

作者简介: 陈 璐(1983—),男,硕士研究生,主要从事光磁混合存储系统方面的研究。E-mail: chenlu0806@163.com

导师简介: 徐文东(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事光存储相关测试、特殊光学显微镜和扫描探针显微镜等方面的研究。E-mail: xuwendong@siom.ac.cn(通信联系人)

的读出灵敏度和良好的分辨率。

光磁混合记录突破了衍射极限和顺磁效应的局限,是最有希望实现  $\text{Tb/in}^2$ <sup>[4]</sup> 的存储方式之一。设计和搭建混合存储动态测试系统,对材料的研制和实用化至关重要。混合记录又分为三种记录方式:磁场梯度型混合记录、热梯度型混合记录及双梯度型混合记录。对于热梯度型混合记录,其记录点尺寸主要由加热光斑的质量和大小决定,对于双梯度型混合记录,其记录点尺寸由聚焦光斑的热梯度和写入磁头的磁场梯度共同决定。因此,两种混合记录模式都对动态聚焦伺服提出了很高的精度要求。

介绍了在热梯度混合记录动态测试系统中,模块化的聚焦伺服单元的设计和实现,以及伺服算法的选择和优化,实现了高精度的聚焦伺服。

## 2 聚焦伺服系统

在动态测试中,记录盘片旋转时,由于盘片的翘曲、盘片夹持不平、电机的震动以及环境影响导致在开环时光点不能始终聚焦在记录层上。聚焦伺服系统的功能就是要在盘片旋转时实时监测聚焦误差并调整物镜的轴向位置,保证记录层始终在会聚光点上的焦深以内。获得聚焦偏差信息并控制光学模块移动实现精确聚焦,是一种闭环控制的手段。这种闭环控制实现光学聚焦的形式,是以动态记录为特征的聚焦伺服和以图像分析为基础的自动聚焦<sup>[5,6]</sup>得以实现的方式。

聚焦伺服模块原理上使用了像散法<sup>[7]</sup>获得聚焦偏差信号,用计算机进行数字伺服控制。数字伺服相对模拟伺服有许多优点,其控制形式及参数较易

调整,易于改进算法,有利于缩短设计周期;数字控制器的参数不会受环境影响而漂移,稳定性比模拟伺服要好。聚焦系统原理图如图 1 所示。

如图 1(a)所示,执行器是 PI 公司的压电陶瓷 (PZT)位移台,行程为  $30 \mu\text{m}$ ;物镜是 Nikon 公司生产的 LU Plan 100x/0.90 显微物镜;光电转换模块是 UDT 公司的四象限探测器;模数转换器 (ADC) 和数模转换器 (DAC) 使用的是研华 PCI-1710HG 数据采集卡。聚焦伺服模块的工作流程为,红光(LD)发出的抽运光经物镜照射在盘片上,利用像散法得出聚焦误差信号(FES)。光电检测模块将四象限探测器(QPD)输出的电流信号进行电流电压转换后输出给数据采集卡的模拟输入通道;数据采集卡进行模数转换后送入计算机;计算机完成 FES 计算和校正算法的实现,然后把得出的聚焦伺服信号输出给数据采集卡进行数模转换;PZT 的高压放大器将数据采集卡输出的模拟伺服信号放大至 PZT 需要的输入电压范围,驱动 PZT 带动物镜做轴向运动,进行调焦跟踪。

图 1(b)显示了像散法聚焦偏差探测的光学部分。在整个系统中,动态写入是采用双光束的模式。其中  $406.7 \text{ nm}$  的蓝光作为辅助记录的加热光斑,以独立的红光 LD 作为辅助聚焦伺服控制的信号光,这样就将聚焦伺服给独立起来。所有的反馈和执行器件集中固定在小块金属板上,以便在必要的时候可进行整体的调节移动,甚至移植到别的需要聚焦伺服的光学系统中。图 2(a),和图 2(b)分别是聚焦伺服系统中集成块和光学模块的三维机械示意图。

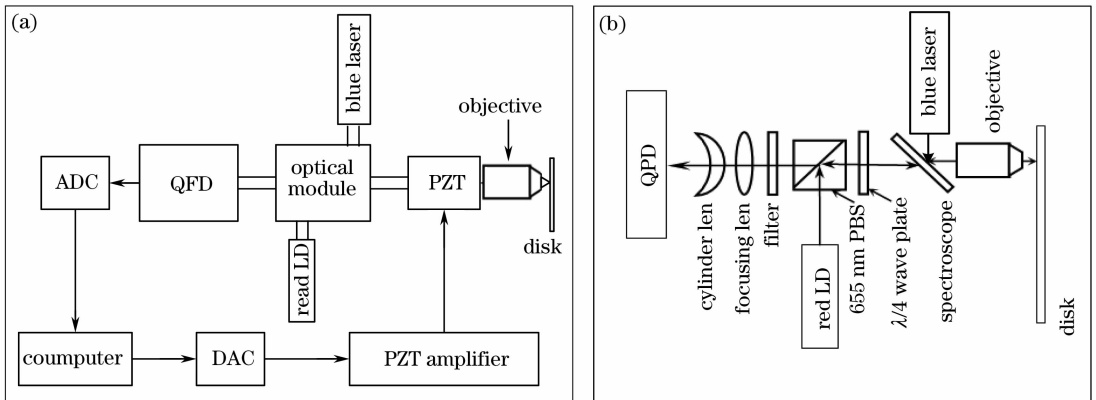


图 1 聚焦伺服系统结构图(a)和像散法聚焦偏差探测光学模块结构图(b)

Fig. 1 Diagram of focus servo system (a) and astigmatic focus error detection optical module (b)

在设计热梯度光磁混合存储动态测试系统中,最初使用 Maxon 公司的直流无刷电机带动盘片稳

速旋转。盘片垂直于水平面,系统光路工作为卧式;后经过实际测试,发现该电机在转动时,在轴向会发

生高频的颤动,已超出了执行器 PZT 的跟踪能力。所以改为使用 Spinstand 平台的空气轴承带动盘片转动,盘片平行于水平面,激光聚焦的工作模式为立式。由于聚焦伺服系统的模块化,在卧式和立式的方案中,整个动态测试系统中的聚焦伺服模块不需做任何改变,只需调整为立式,并在写入激光(406.7 nm 蓝光)调制模块与伺服模块间的导入光路中增加一

光学抬高架。

此外,在另外一个激光刻写系统中,也使用了红光聚焦-绿光记录的双光束工作模式,其中独立的聚焦伺服模块也直接移用该系统中的模块。由此可见,聚焦伺服单元的模块化和可移植的特点具有较大的方便性。

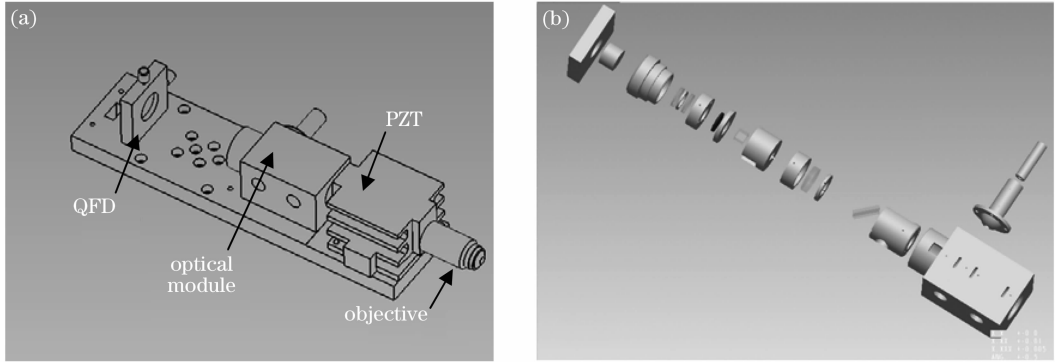


图 2 聚焦伺服系统的集成模块 (a)和聚焦伺服系统的光学模块(b)

Fig. 2 Assembly module of focus servo unit (a) and optical module of focus servo unit

### 3 控制算法

在混合存储测试系统中,为得到尽可能小的加热光斑,使用波长 406.7 nm 的激光作为写入激光,数值孔径(NA)为 0.9 的商用显微物镜为聚焦物镜。受光学衍射的限制,光斑的直径为  $D=1.22\lambda/NA=551.3\text{ nm}$ 。由焦深公式  $d=0.61\lambda/NA^2$ ,计算出焦深为  $\pm 306\text{ nm}$ ,即要求聚焦伺服的剩余误差必须小于  $\pm 306\text{ nm}$ 。在这个范围内,聚焦光斑的质量基本不变,而此时光斑的尺度也决定了记录点的大小,对聚焦伺服系统提出了较高要求。

聚焦伺服系统使用了像散法获得聚焦偏差信号,因此它使用的是数字闭环控制。其中聚焦伺服控制的信号流程如图 3 所示。

在图 3 中,盘片表面位置变化信号为  $R_{in}(s)$ ,四

象限探测器获得的聚焦偏差为信号  $E(s)$ ,而物镜聚焦光斑的位置为  $Y_{out}(s)$ 。 $G(s)$ 为设计的控制算法的频率响应函数,目的是使得  $E(s)$  的范围在  $\pm 306\text{ nm}$  内。函数  $G(s)$  分为三部分,经低通校正后的 PI 控制函数  $G_{PI}(s)$ 、PZT 频率响应逆系统校正函数  $G_{PZT}^{-1}(s)$ <sup>[8]</sup> 和 PZT 非线性迟滞效应校正函数  $K^{-1}(s)$ 。其中,校正函数  $G_{PZT}^{-1}(s)$  和  $K^{-1}(s)$  是为了将执行器 PZT 在工作频率附近校正成相对理想的执行器。

在进行混合记录的过程中,光盘表面位置变化的主要原因为,1)光盘与转轴不可能严格垂直,旋转时产生起伏;2)防震台不能彻底隔绝外部环境的扰动;3)防震台上,气体激光器冷却水管中急速水流产生的振动。(对于 Spinstand,转轴的轴向颤动位移远小于

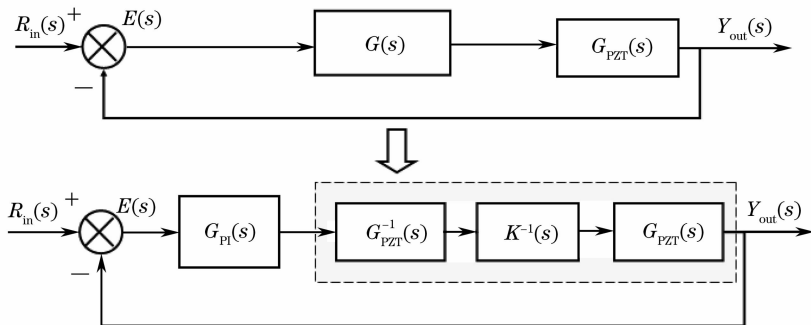


图 3 聚焦伺服系统信号流程图

Fig. 3 Signal flow chart of focus servo system

焦深,可忽略)。将盘片表面位置变化的信号  $R_{in}(s)$  经过数据采集和能谱分析,这三种原因产生的信号频率和振幅为,光盘转动产生频率为光盘转动频率 2~10 Hz,幅度 10~20  $\mu\text{m}$  的起伏信号;防震台不能彻底隔绝的外部环境扰动信号,频率约为 25 Hz,幅度为 1~3  $\mu\text{m}$ ;防震台上激光器内冷却水快速流动产生的振动信号,频率约为 15 Hz,幅度为 4~5  $\mu\text{m}$ 。

而在设计控制算法之前,必须知道执行器 PZT 位移台的频率响应特性。经实验测量,得到 PZT 的幅频响应曲线和相频响应曲线,如图 4 所示。

理论上讲,压电陶瓷及其柔性铰链机械系统等效为一个阻尼弹簧二阶系统,但从图 4 可以看出,PZT 频率响应特性曲线呈现多峰多谷的结构,而且共振峰和反共振点多次交替出现。PZT 的运动模型远比二阶系统复杂,它呈现高阶运动系统的特性。建立了一个 12 阶的系统模型,比较好地模拟了 PZT 在 600 Hz 以下的频率特性。图 4 的实线为该

模型的频率响应曲线,系统模型的传递函数为  $G_{PZT}$  如下:(为简便,其中系数只保留 2 位有效数字,实际控制计算时使用 8 位有效数字)。



图 4 PZT 幅频和相频响应曲线

Fig. 4 Amplitude-frequency and phase-frequency response curve of PZT

$$G_{PZT} = (1.1 \times 10^{-32} s^{10} + 2.0 \times 10^{-30} s^9 + 2.9 \times 10^{-25} s^8 + 2.6 \times 10^{-22} s^7 + 2.2 \times 10^{-18} s^6 + 1.7 \times 10^{-15} s^5 + 5.3 \times 10^{-12} s^4 + \dots + 2.4 \times 10^{-9} s^3 + 4.2 \times 10^{-6} s^2 + 8.2 \times 10^{-4} s + 1) / (7.9 \times 10^{-40} s^{12} + 1.1 \times 10^{-35} s^{11} + 7.3 \times 10^{-32} s^{10} + 2.5 \times 10^{-28} s^9 + 1.1 \times 10^{-24} s^8 + \dots + 1.9 \times 10^{-21} s^7 + 5.3 \times 10^{-18} s^6 + 5.0 \times 10^{-15} s^5 + 9.1 \times 10^{-12} s^4 + 4.6 \times 10^{-9} s^3 + 5.5 \times 10^{-6} s^2 + 1.2 \times 10^{-3} s + 1), \quad (1)$$

由(1)式的倒数容易得到 PZT 频率响应的逆系统频率响应函数  $G_{PZT}^{-1}(s)$ 。值得注意的是, $G_{PZT}(s)$  含有一对不稳定零点,在逆系统函数  $G_{PZT}^{-1}(s)$  中则会变成不稳定极点,影响闭环控制系统的稳定,因此在求  $G_{PZT}^{-1}(s)$  的过程中还需将该极点转换为稳定极点。做此转换后,在该极点的频域处仅仅对 PZT 的幅度做了校正,而没有对滞后的相位作补偿。另外,由于

$G_{PZT}^{-1}(s)$  的分子阶数高于分母阶数,在 1000 Hz 后加入一对不影响  $G_{PZT}^{-1}(s)$  低频特性的极点,避免了算法不符合因果律。

加入  $G_{PZT}^{-1}(s)$  可以消除 PZT 执行器不理想的频域特性,但在时域上,PZT 还具有非线性的滞回效应。经测量(在测量时,电压的变化频率远小于 1 Hz),得到一系列的电压-位移曲线,如图 5 所示。

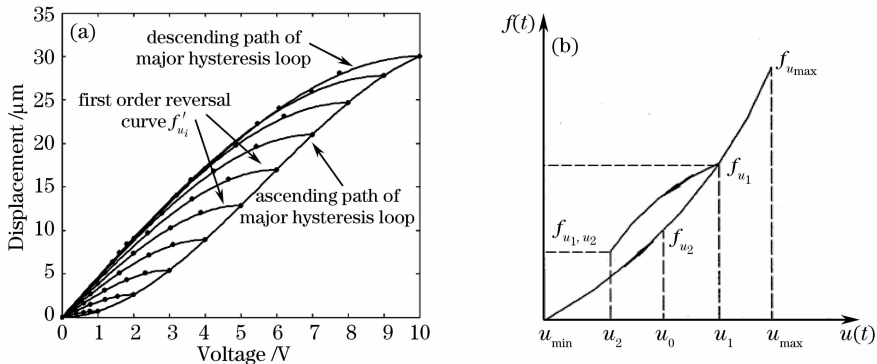
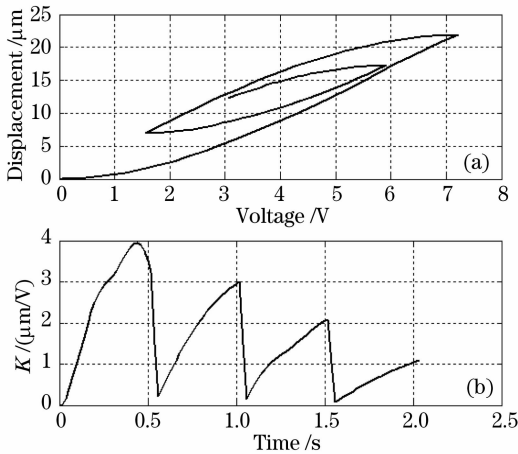


图 5 PZT 的非线性迟滞效应。(a) 实验测得的 PZT 位移-电压曲线;(b) 非线性迟滞效应下的运动路径

Fig. 1 Nonlinear hysteresis effect of PZT. (a) displacement-voltage curve of PZT; (b) motion path of nonlinear hysteresis effect

图 5(a)为给 PZT 加不同变化电压时实验测得的 PZT 位移变化曲线。从图 5(a)可见,在驱动 PZT 位移台运动时会出现非线性滞回效应,PZT 位移和外加电压的关系是非线性的,而且这个非线性关系并不固定,而是与运动路径有关,呈现出类似磁滞回效应<sup>[9]</sup>的一种模式。其中,驱动电压由最小到最大变化的位移曲线为迟滞回路的主上升曲线,最大电压到最小电压的变化曲线为迟滞回路的主下降曲线。在主上升曲线中,电压还不到最大电压 10 V 就开始减小至 0 V 的曲线为一阶回转曲线,有无数条。图 5(a)为实验测得的 10 组一阶回转曲线数据点,且绘制了它们的三次多项式拟合曲线。由多项式的拟合函数代替,可以得到一系列的一阶回转曲线函数  $f'_{u_i}$ 。

关于非线性滞回效应,Preisach<sup>[10,11]</sup>模型是一种比较成熟的能清楚描述其运动特性的模型,如图 5(b)所示。设



$$X(u_2, u_1) = f_{u_1} - f_{u_1, u_2} = f'_{u_1}(u_1) - f'_{u_1}(u_2), \quad (2)$$

则 PZT 的位移可以表示为

$$f[u(t)] = \begin{cases} \sum_{k=1}^N [X(\alpha_k, \beta_{k-1}) - X(\alpha_k, \beta_k)] + X[u(t), \beta_k], \uparrow \\ \sum_{k=1}^{N-1} [X(\alpha_k, \beta_{k-1}) - X(\alpha_k, \beta_k)] + \{X_{\alpha_N, \beta_{N-1}} - X[\alpha_N, u(t)]\}, \downarrow \end{cases} \quad (3)$$

(3) 式中  $\uparrow, \downarrow$  依次为 PZT 电压在增大和减小时位移表达式。从(3)式可以看出,PZT 在  $t$  时刻的位移,不仅和时刻  $t$  的电压  $u(t)$  相关,而且与每一次往复运动的转折点电压  $\alpha_k, \beta_k$  相关,而  $f(t)$  可看作是一系列一阶回转曲线函数的位移之和。

按照 Preisach 模型,清晰描述 PZT 驱动电压变化的过程中,其非线性滞回效应带来的位移变化和斜率变化,得到图 6。

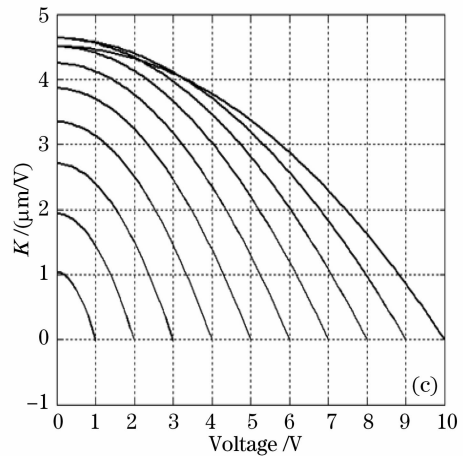


图 6 PZT 运动特性。(a) PZT 位移-电压非线性迟滞变化图;(b) PZT 位移-电压比与时间的关系图;(c)一阶回转曲线的位移-电压比分布图

Fig. 6 Motion characteristics of PZT. (a) displacement-voltage hysteresis loop of PZT; (b) displacement-to-voltage ratio and time relation of PZT; (c) displacement-voltage ratio and voltage diagram

从图 6(a)和图 6(b)可以看出,在实际控制的时候,转折点处的斜率会产生突变,给聚焦伺服带来很大的困难。在实际实验中,如果将 PZT 当作线性执行器或者非线性无滞回执行器来进行闭环聚焦控制,用示波器可观察到 PZT 驱动电压在转折处会出现剧烈的电压振荡,四象限控制器反馈回相当大的聚焦误差,和理论分析是相符的。

因此,在控制过程中,需对执行器 PZT 位移台的非线性滞回效应进行线性化处理。图 6(c)为一系列一阶回转曲线的斜率变化规律。对于相同的电压  $V$ ,PZT 的位移-电压比  $K$  并不相同,与它的历史

路径有关。因此,由(3)式可以得到

$$e = \frac{df}{dt} = \frac{df}{du} \cdot \frac{du}{dt} = K_{\varphi}[u(t)] \cdot \frac{du}{dt}, \quad (4)$$

其中  $e$  为聚焦偏差。(4) 式为在低频工作模式下,对 PZT 进行闭环控制时,聚焦偏差  $e$  和控制电压  $u$  的关系。在实际闭环控制中,为了得到恰当的 PZT 输入电压  $u$ ,需在频域的闭环控制信号流程中加入  $K_{\varphi}^{-1}[u(t)]$ 校正它的非线性滞回效应, $K_{\varphi}^{-1}[u(t)]$ 与时刻  $t$  的电压  $u$  以及  $t$  之前的转折电压  $\alpha, \beta$  相关。它实际上是对 PZT 的非线性滞回效应进行求逆变换。由图 5(a)的拟合曲线计算其斜率得到图 6(c)。

实际上,一阶回转曲线有无数条,实验中只测了其中 10 条,且任意时刻的  $K_{\varphi}[u(t)]$  可通过插值法求出。

经  $G_{PZT}^{-1}(s)$  和  $K^{-1}(s)$  校正,执行器 PZT 已在频域和时域上都变成了比较理想的执行器。此时容易

设计加了低通校正后的 PI 控制函数  $G_{PI}(s)$ ,其主要是为了对信号能谱在 2~10 Hz, 15 Hz, 25 Hz 处有峰值的  $R_{in}(s)$  信号进行跟踪,并对高频的电信号噪声进行滤波。

$$G_{PI}(s) = \frac{0.0773s^4 + 543.7s^3 + 2.89s^2 + 3.97s + 2.48 \times 10^7}{s^4 + 188.5s^3 + 1.18 \times 10^4s^2 + 2.48 \times 10^5s}, \quad (5)$$

在理论上,(5)式对于理想执行器进行闭环控制,当盘片转动时信号频率在 10 Hz 以下时,跟踪偏差能控制在约 1%。

## 4 实验结果

将该算法进行离散化后写入程序,对转动的盘片进行聚焦伺服控制,当盘片转动频率为 8 Hz、幅度在 15  $\mu\text{m}$  内时,成功地将聚焦偏差控制在  $\pm 130$  nm 内。为了对系统的聚焦伺服控制效果进行测试,使用了有机材料进行激光打点记录,并做了原子力测试,如图 7 所示。

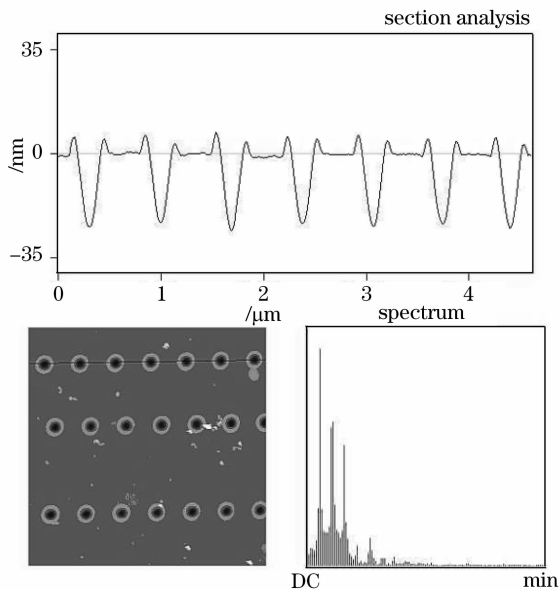


图 7 记录点阵列原子力测量数据显示

Fig. 7 AFM picture of recording point array

图 7 为盘片转速在 4 r/s 的情况下记录的点阵。从图 7 可以看出,点阵中每个点大小相近,深度也基本一致,测得记录点大小(半高全宽)在 150 nm 内。这说明在实际记录时,聚焦伺服模块工作稳定而且聚焦精度较高,激光聚焦光斑已经达到了衍射极限。

## 5 结 论

介绍了混合存储动态测试系统中聚焦伺服模块

的设计与实现。在整个系统中使用双光束并行、红光伺服蓝光记录的方案。在此方案下,伺服单元具有模块化、可移植的特点,适用于各种需要高聚焦精度的远场光学记录系统。在控制算法方面,使用闭环控制进行伺服,并校正执行器 PZT 在频域上不理想的多峰谷结构和时域上的非线性滞回效应。实验结果表明,伺服模块成功达到高精度的动态聚焦伺服的设计目的。

## 参 考 文 献

- Schlesinger T E, Rausch T. An integrated read/write head for hybrid recording[J]. *Jap. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(Part1, 3B): 1821~1824
- H. Katayama, M. Hamamoto, J. Sato *et al.*. New developments in laser-assisted magnetic recording [C]. *IEEE Trans. Magn.*, 2000, **36**(1): 195~199
- S. R. Cumpson, P. Hidding, R. Coehoorn. A hybrid recording method using thermally assisted writing and flux sensitive detection[C]. *IEEE Trans. Magn.*, 2000, **36**(5): 2271~2275
- J. J. M. Ruigrok, R. Coehoorn, S. R. Cumpson. Disk recording beyond 100 GB/in<sup>2</sup>: Hybrid recording[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**: 5398~5403
- Wang Huaying, Liu Jingbo, Wang Dayong *et al.*. Autofocus for numerical reconstruction in digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 343~347  
王华英,刘景波,王大勇等. 显微数字全息数值再现中的自动聚焦[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 343~347
- Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocus criterion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 35~39  
孙杰,袁跃辉,王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 35~39
- Gan Fuxi *et al.*. *Digital Optical Disk Recording Technique*[M]. Beijing: Science Press, 1998. 306~309  
干福熹等. *数字光盘存储技术*[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 306~309
- Donald Croft, Santosh Devasia. Hysteresis and vibration compensation for piezoactuators[J]. *J. Guidance, Control, and Dynamics*, 1998, **21**(5): 710~717
- Leigh T., Zimmerman. An implicit method for nonlinear modelling and simulation of piezoceramic actuators displaying hysteresis, Smart structures and material[C]. Proceedings of the Symposium, 112th ASME Winter Annual Meeting, 1991, **24**: 57~63
- I. D. Mayergoyz. Mathematical Models of Hysteresis[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**(15): 1518~1521
- R. Ben Mrad, H. Hu. A model for voltage-to-displacement dynamics in piezoceramic actuators subject to dynamic-voltage excitations [C]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2002, **7**(4): 479~489