

文章编号 1004-924X(2011)04-0836-08

大范围高速原子力显微镜的前馈反馈混合控制方法

陈代谢^{1,2}, 殷伯华², 林云生², 初明璋², 韩立²

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 2. 中国科学院 电工研究所 微纳加工研究部, 北京 100190)

摘要: 为了扩大原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)使用范围, 研制了一套大范围高速 AFM 系统。针对大范围高速扫描时 Z 方向控制问题, 提出了前馈反馈混合控制方法。前馈控制包括自动调平前馈和基于前一行扫描前馈, 前者通过多线扫描确定样品倾斜位置, 将所有扫描点的倾斜位移差用函数式表达, 然后将其换算为 Z 向驱动电压后驱动下扫描器运动; 后者利用前一行扫描高度数据作为当前行 Z 向扫描器驱动的参考输入。反馈控制为在普通比例-积分(PD)控制基础上改进的动态 P 参数 PI 控制, P 参数设置与误差大小有关。实验结果表明: 采用本控制方法最大控制误差由 40.17 nm 减小为 6.01 nm, 误差均方根值由 22.85 nm 减小为 2.01 nm, 明显抑制了误差信号, 提高了 Z 向控制效果, 获得了更精确的高度图像。

关键词: 原子力显微镜(AFM); 高速扫描; Z 向控制; 前馈反馈混合控制

中图分类号: TH742.9; TN16 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0836

Feed-forward and feed-back controller for large-range and high-speed AFM

CHEN Dai-xie^{1,2}, YIN Bo-hua², LIN Yun-sheng², CHU Ming-zhang², HAN Li²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Department of Micro-nano Fabrication Technology,

Institute of Electrical Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to expand the application scope of Atomic Force Microscopes (AFMs), a large-range and high-speed AFM was developed. A feed-forward and feed-back algorithm is proposed to deal with the Z-control of the AFM. The feed-forward controller includes an auto leveling controller and a last line based controller. The former determines the location of sample tilt by multi-lines scan, and the tilt displacements of all scan points are expressed by a formula. Then, it is transformed into Z control voltages to drive the down-stage. The latter uses the last line height signal as the reference input of Z-control in the current line scan. The feed-back controller is a proportional integral (PI) controller whose P parameter is dynamically changed with error signals. Experimental results indicate that the max error value by proposed method is decreased from 40.17 nm to 6.01 nm, and the root-mean-square error is decreased from 22.85 nm to 2.01 nm. It suppresses error signals evidently, enhances the ef-

收稿日期: 2010-08-27; 修订日期: 2010-09-29.

基金项目: 中国科学院仪器改造资助项目 (No. YZ200831)

fectiveness of Z-control, and makes image more precise.

Key words: Atomic Force Microscopy (AFM); high-speed scan; Z control; feed-forward and feed-back control

1 引言

原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM)^[1] 作为扫描探针显微镜 (Scanning Probe Microscopy, SPM)^[2] 中极具代表性的一员, 目前已广泛应用于生物^[3]、半导体检测^[4] 等领域。随着相关应用的进一步发展, 对 AFM 的性能也提出了更高的要求, 如针对生命活动的在位成像等。目前, 运用 AFM 所遇到的最大难题是扫描速度远远不够。针对 AFM 扫描速度的问题, 美国斯坦福大学的 Quate^[5], 美国加州大学的 Hansma^[6], 日本金泽大学的 Ando^[7], 英国布里斯托尔大学的 Miles^[8] 等均提出了适用于各自研究对象的解决方案, 并实现了 1.8 ms/frame 的超高速扫描^[9]。但是, 这些研究都着重强调扫描的高速或者 Z 方向控制的高精度, 扫描范围往往只有几微米甚至更小。这是因为随着扫描范围的扩大, 必须提高成像分辨率以保证图像的清晰度, 也就意味着在扫描一幅图像时必须处理更多的点, 但这势必将延长 AFM 的扫描处理时间, 影响成像速度。同时, 由于样品放置不平带来的问题也将更加明显, 随着扫描范围的扩大, 同样的放置倾角会导致更大的 Z 向偏差, 该偏差一方面会延长 Z 向响应时间, 影响 Z 向跟踪效果; 另一方面, 高响应速度的 Z 向扫描器行程必然很小, 如果该行程小于样品倾斜导致的 Z 向偏差, 则很容易发生探针与样品碰撞或脱离。

最近北京航空航天大学用 AFM 对经过打磨处理的铝薄片实现了 1.5 kHz 行频, 20 μm 扫描范围的高速扫描成像^[10]。但其 Z 向并没有采用闭环控制, 也就是说在恒高模式下扫描, 这样就大大限制了它的使用范围。

为了进一步扩大 AFM 的应用范围, 本实验室研制了一套大范围高速 AFM。本文针对 Z 方向动态跟踪响应的问题, 提出 Z 方向前馈和反馈混合控制方法, 前馈方法包括样品自动调平前馈

和基于前一行扫描前馈, 反馈则采用动态 P 参数 (proportional integral, PI) 反馈。

2 系统构建

图 1 所示为本实验室研制的大范围高速 AFM 扫描系统结构图, 与普通 AFM 不同, 本结构包括上下两个扫描器^[11]。上扫描器由 Physik Instrumente (PI) 公司生产的 PL022 型压电陶瓷管执行, 陶瓷管具有体积小、结构简单、自振频率高等特点, 主要负责 Z 向高速闭环跟踪响应, 谐振频率为 300 kHz, 行程 2.2 μm 。下扫描器为 PI 公司生产的 P-517.3CL 型多轴压电型扫描台, 该扫描台带有位移传感器, 能实现 X, Y, Z 三轴方向闭环运动控制, 其中 X, Y 方向最大行程均为 100 μm , 主要用于带动样品进行水平面方向扫描; Z 方向谐振频率为 1.1 kHz, 最大行程为 20 μm , 主要用于实现样品前馈式调平。

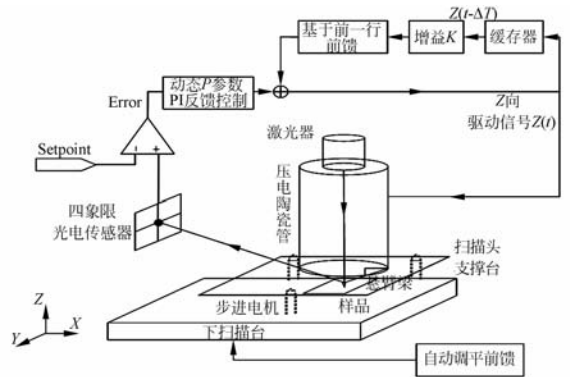


图1 AFM扫描系统结构图

Fig. 1 Structure of AFM scan system

图 2 为本系统电子学部分示意图, PC104 主板^[12] 具有低功耗、高可靠性等特点, 作为主控模块充当着 CPU 的作用, 其他功能模块通过 PC104 总线与主控模块一起实现相互之间的信号传输, 采集到的图像数据最终通过网络上传至 PC 计算机显示出来。随着 FPGA^[13] 芯片性能的不断提

高,本文设计的 Z 方向前馈反馈混合控制算法将通过 Altera 公司生产的 Cycone 系列 EP1C6 芯片来实现。

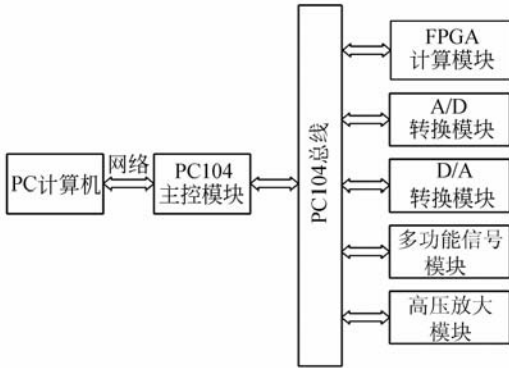


图 2 电子学控制系统

Fig. 2 Electrical control system

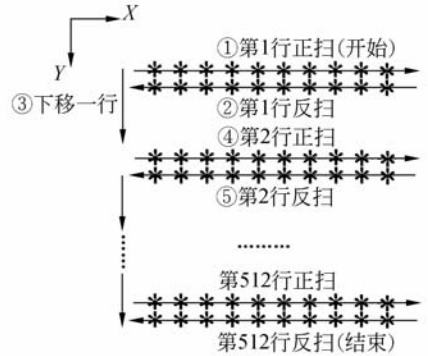
3 控制算法

3.1 自动调平前馈

样品在放置时通常会与水平面存在一定的倾角,在扫描场较小,如 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 时,样品倾角 1° 对应的最大 Z 向位移差大概为 $0.17\ \mu\text{m}$ 。这对于具有 $2.2\ \mu\text{m}$ 行程的高速 Z 向扫描器而言,利用普通的反馈闭环控制就可以消除该位移偏差,剩下 $2.03\ \mu\text{m}$ 的位移区间仍然可以满足大多数样品的跟踪成像。而当扫描场扩大到 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 时,同样为 1° 的样品倾角则会带来 $1.7\ \mu\text{m}$ 的 Z 向位移差,这无疑使得对扫描器的控制将主要用于消除样品倾斜导致的位移差,而只剩下 $0.5\ \mu\text{m}$ 位移余量用于跟踪样品表面形貌,这在高速扫描时将明显影响 Z 向扫描的工作效率。而且当样品表面高低起伏大于 $0.5\ \mu\text{m}$ 时就会受扫描器行程限制而发生探针与样品相撞或脱离。图 1 所示的 3 个步进电机一方面用来逼近探针与样品,另一方面可以通过分别控制 3 个电机对样品进行调平处理,但由于电机的空程影响,实际操作中很难将样品倾角调整至 1° 以下。

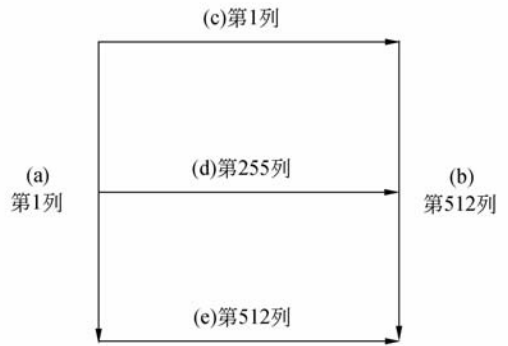
对于样品放置倾斜的问题,由于下扫描台具有 $20\ \mu\text{m}$ 的 Z 向行程,只需确定其平面倾斜的位置,就可以将位置信息转换为 Z 向控制电压后作为前馈控制输入,对倾斜偏差进行补偿。理论上只需通过 3 个点就能确定一个平面,因此在 AFM 中只需用探针采集样品 3 个位置的高度就可以确

定样品的倾角。但实际上,由于样品本身表面形貌的不确定性,无法区分单点采集高度数据中包含的倾斜高度和形貌高度,简单地通过 3 点处理很容易带来较大的误差。本方法采用多线扫描的方式来确定样品的倾斜位置,图 3(a)表示的是 AFM 成像时的扫描路径,图 3(b)则表示了多线扫描方式的扫描路径。该方式对(a),(b),(c),(d),(e)分别进行单线扫描,单线扫描高度结果如图 4(a)所示,从图中可以看出 5 条高度曲线较好地对接在一起。分别对各曲线进行最小二乘线性拟合处理,拟合结果如图 4(b)所示,可见拟合后的直线对接在一起基本构成一个平面,该平面在三维图中的位置实际上体现的就是样品放置时的倾斜位置。



(a) 成像扫描路径

(a) Image scan path



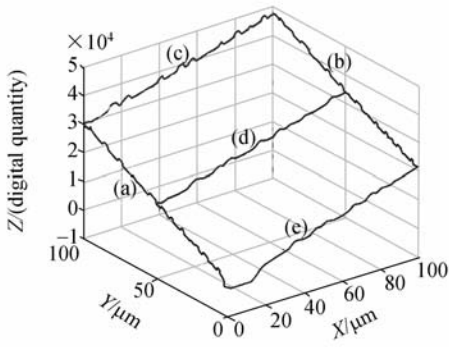
(b) 多线扫描路径

(b) Multi-lines scan path

图 3 AFM 扫描路径示意图

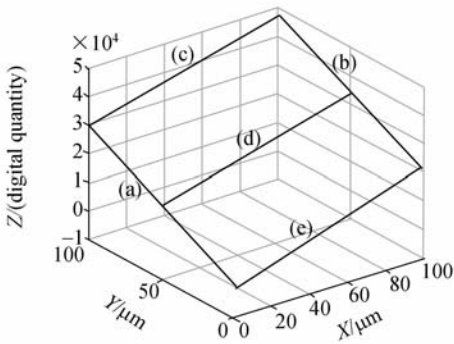
Fig. 3 AFM scan path

假设图 4(2)中拟合直线(a)、(b)分别用函数表示为 $f_{x,1}$ 和 $f_{x,512}$,其中 $x=1,2,3,\dots,512$ 。那么在 AFM 真实扫描过程中,当扫描到第 n 行时,



(a)多线扫描原始曲线

(a)Source curve by multi-lines scan



(b)原始曲线的线性拟合

(b)line fit of source curve

图 4 多线扫描曲线三维图

Fig. 4 3D image of multi-lines scan

该行的两个端点为已知,分别是 $f_{n,1}$ 和 $f_{n,512}$,根据前面对(c),(d),(e)的处理结果可知,两 endpoint 之间的其余点也可以用线性函数表达,根据两点确定一条直线的原理,该行的所有点均可以表示为

$$f_{n,y} = \frac{f_{n,512} - f_{n,1}}{512 - 0} \times y + f_{n,1}, \text{ 其中 } y = 1, 2, 3, \dots,$$

512. 依此类推,平面上每个位置点的倾斜量均可

$$\text{用函数表示为 } f_{x,y} = \frac{f_{x,512} - f_{x,1}}{512 - 0} \times y + f_{x,1}, \text{ 其中}$$

$x, y = 1, 2, 3, \dots, 512$. 压电扫描器本身固有迟滞、蠕变等非线性特性^[14],如果简单地将倾斜量

通过线性函数换算为 Z 方向控制信号,则无法消除非线性的影响。但前馈控制实际上无需对下扫描器的 Z 方向进行精确定位,只需使其跟踪上样品倾斜的大体轮廓即可,精确的 Z 方向定位由

上扫描器来完成。因此,用于前馈控制的 Z 方向控制信号 $F_{x,y}$ 可以简单的表达为:

$$F_{x,y} = k f_{x,y}, \quad x, y = 1, 2, 3, \dots, 512, \quad (1)$$

其中系数 k 为下扫描器 Z 向电压位移比。

3.2 基于前一行扫描前馈

对于自然界中光滑的物质,在用 AFM 对其样品进行表面形貌表征时,可以近似地认为样品的相邻两行具有相似的形貌;而对于那些比较粗糙的物质,由于 AFM 针尖本身具有一定大小的曲率半径,在大气条件下,多数样品表面都附着厚度一般为几纳米的覆盖层(凝集水蒸气、有机污染物、氧化层等),同样可以近似地认为相邻两行具有相似的形貌。因此,在用 AFM 进行高速扫描时,一方面可以将当前扫描行的高度扫描信号作为高度图像显示出来;另一方面,可以将该行高度扫描信号作为下一行高度扫描初始输入信号的参考。这样,在进行恒力模式扫描时,反馈控制只需响应当前行位置点与上一行同位置点的不同即可,因此能大大减少反馈控制的计算时间,提高 Z 向响应速度。同理,两列具有同样的形貌相似性,那么对当前点进行处理时可以综合考虑上一点和上一行同位置点的信息。图 5 所示为 AFM 采用的逐点式扫描示意图,当从 B 点跳跃至 C 点时,传统控制方法中 C 点的初始 Z 方向控制状态会保持在 B 点控制结束时的状态 $C_0 = B$, 然后开始 C 点的 Z 向动态跟踪。而在本设计基于前一行扫描作为当前行前馈的控制方法中 $C_0 = \frac{A+B}{2}$, 前一行 A 点也作为 C 点控制的参考。这样如果相邻点之间的差异不大,在从 B 点到 C 点的跳跃过程中实际就可能已经完成了 Z 向的跟踪定位,接下来可以选择跳过 C 点的闭环控制,直接开始下一点的扫描,从而提高扫描速度,也可以选择继续进行 C 点的闭环跟踪,进一步提高跟踪精度,提高成像质量。对于有一定瑕疵的样品,如表面散落有灰尘颗粒或受到一定程度的磨损,可以对前馈输入增加一个比例调制系数 $K(0 \sim 1 \text{ 变化})$,防

止在高速扫描过程中由于前馈增益过大导致探针与样品发生撞击。

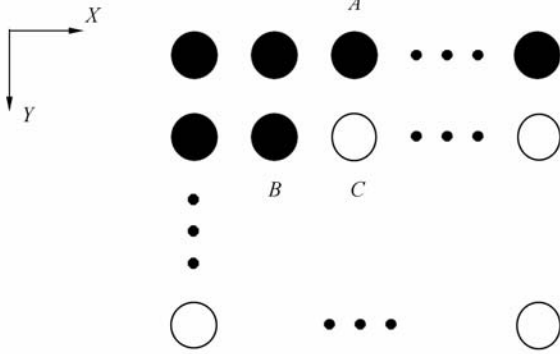


图 5 逐点式扫描

Fig. 5 Scan by points

3.3 动态 P 参数 PI 反馈

AFM 在恒力工作模式下一一般采用比例-积分 (PI) 作为反馈控制算法, 比例环节主要用于成比例地反映误差信号, 误差一旦产生, 控制器立即产生控制以减小偏差; 积分环节主要用于消除静差, 提高系统的无差度, 积分次数越多 (对应连续时间系统则是积分时间越长), 控制效果越好。对于普通 AFM 而言, 由于扫描速度慢, 积分次数多, 积分环节起主要作用, 往往能取得较好的控制效果。而对于高速 AFM 而言, 积分次数将明显减少。以本系统为例, 50 Hz 行频 (512×512 分辨率) 对应的每点总处理时间为 20 μs, 除去电子学和扫描器响应的的时间, 剩下的时间里很难再进行几次积分运算, 积分效果明显减弱, 此时比例环节对控制效果起关键作用。当 AFM 在高速扫描中遇到较大的样品表面形貌变化时, 如果 P 参数太小, 则会由于处理时间太短而来不及对其进行响应, 出现所谓的撞针或空降现象; 如果将 P 参数设置得较大, 虽然在遇到较大形貌变化时能提高其响应速度, 但在扫描到小形貌变化区域时则会造成自激振荡。针对这一相互矛盾的控制现象, 本设计采用动态 P 参数的控制策略, 在普通 PI 控制的基础上根据误差信号的大小动态调整 P 参数, 使其能更好地适应高速扫描时形貌起伏的变化。动态 P 参数 PI 反馈控制原理如图 6 所示, 其中

$E_{high}, E_{low}, K_{ph}, K_{pl}$ 可以根据系统状态灵活设置, 虽然理论上该算法能进一步细化, 但接下来的实验将证明, 此种划分已经能明显改进 AFM 的成像质量。

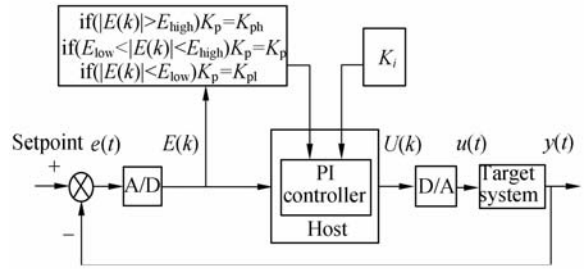


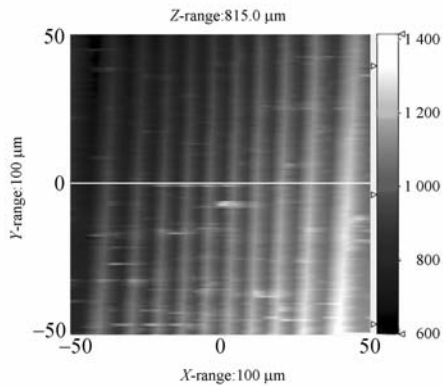
图 6 动态 P 参数 PI 反馈控制原理框图

Fig. 6 Schematic diagram of PI controller with dynamic P parameter

4 实验结果

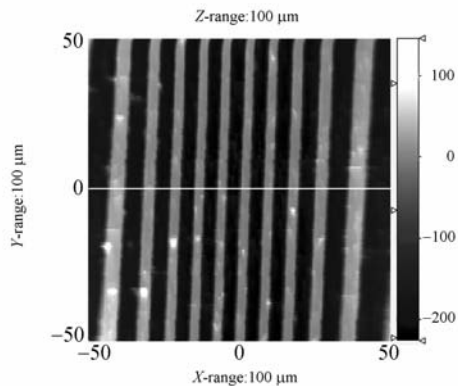
本实验综合运用上述前馈和反馈混合控制算法, 对周期为 10 μm 的标准光栅样品表面进行接触模式扫描成像, 光栅 Z 向高度 200 nm, 扫描范围 100 μm×100 μm, 行频 50 Hz, 图像分辨率为 512×512。在 AFM 整个扫描过程中, 误差值越小表示 Z 向扫描器跟踪样品表面形貌变化效果越好, 反之则表示 Z 向扫描器响应太慢, 针尖和样品磨损较大。

图 7(a), (b), (c), (d) 为采用普通 PI 反馈控制获得, (e), (f), (g), (h) 为采用本设计前馈反馈混合控制获得。对比图中 (c) 和 (g) 可见, 自动调平式前馈控制能有效消除样品倾斜对成像带来的影响, 该方法一方面能通过前馈提高 Z 向跟踪响应的速度, 另一方面还能弥补靠软件后处理修正样品倾斜时, 由于 Z 向超量程而导致撞针或脱离现象的不足。对比 (d) 和 (h) 可见, 采用前馈反馈混合控制算法后, 误差信号明显减小, 反馈跟踪效果更好, 能获得更清晰的高度图像 (e), 控制效果的改进在高速扫描时尤为明显。表 1 为扫描光栅样品得到的误差测量结果, 对比表中数据可知, 采用前馈反馈混合控制算法能使误差抑制效果获得量级的提高。



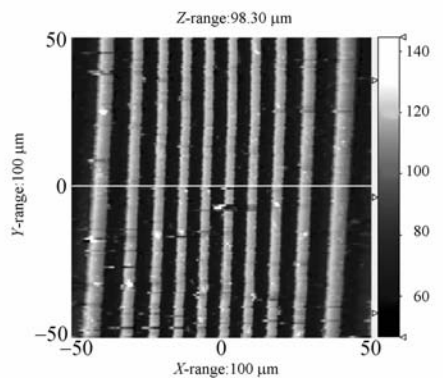
(a) 普通 PI 反馈控制高度图像

(a) Height image with general PI controller



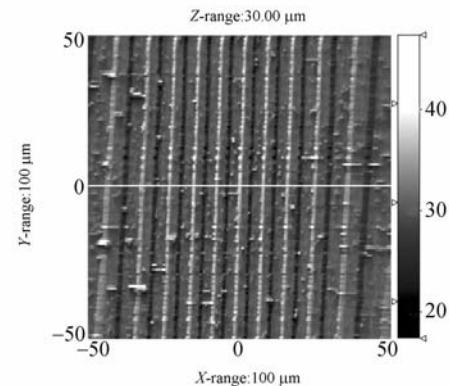
(e) 前馈反馈混合控制高度图像

(e) Height image with feed-forward and feedback controller



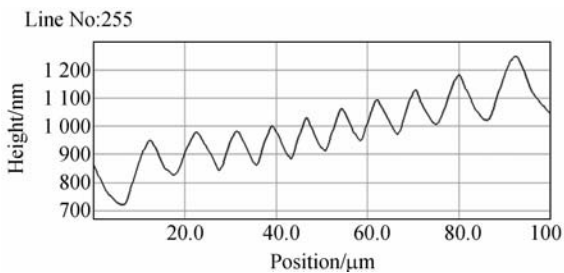
(b) 普通 PI 反馈控制误差图像

(b) Error image with general PI controller



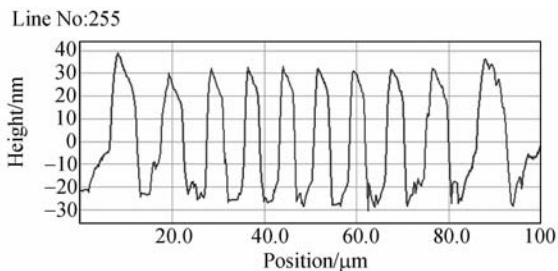
(f) 前馈反馈混合控制误差图像

(f) Error image with feed-forward and feedback controller



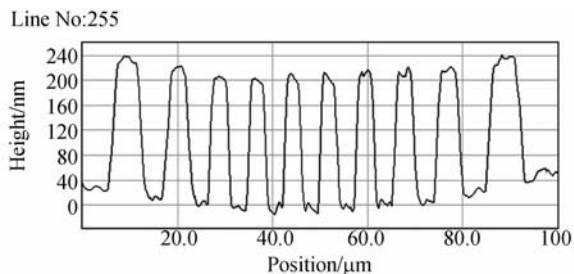
(c) 图(a)单线轮廓

(c) Simple curve from (a)



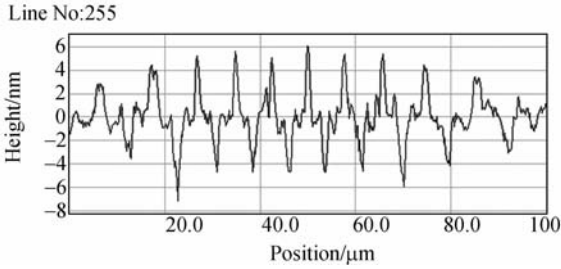
(d) 图(b)单线轮廓

(d) Simple curve from (b)



(g) 图(e)单线轮廓

(g) Simple curve from (e)



(h)图(f)单线轮廓

(h) Simple curve from (f)

图 7 光栅样品 AFM 接触模式扫描成像

Fig. 7 Grating sample imaged by AFM in contact mode

表 1 光栅扫描的误差测量结果对比

Tab. 1 Errors for grating measurement

	最大误差 /nm	误差均方 根/nm
普通 PI 反馈控制 $k_p=0.02, k_i=0.04$	40.17	22.85
普通 PI 反馈控制 $k_p=0.3, k_i=0.04$	12.99	4.33
动态 P 参数 PI 反馈控制 $k_{pi}=0.02, k_p=0.05, k_{ph}=0.3, k_i=0.04$	11.04	3.69
前馈和动态反馈混合控制	6.01	2.01

5 结 论

本文针对自主研发的大范围高速 AFM, 提出了一套前馈反馈混合控制方法, 该方法在 FPGA 上通过 Verilog HDL 编程实现。实验证明, 该方法能将最大控制误差由 40.17 nm 减小为 6.01 nm, 误差均方根值由 22.85 nm 减小为 2.01 nm。该方法既能消除大范围扫描时样品放置倾斜对扫描成像的影响, 又能提高 Z 向扫描器的控制效果, 在实现大范围高速扫描的同时, 明显减小形貌跟踪误差, 提高成像质量, 取得了满意的效果。

混合控制算法中的自动调平前馈和基于前一行扫描前馈均可以通过软件设计自动完成, 动态 P 参数 PI 反馈控制参数还需要人为设定, 在实际使用过程中需要根据环境变化进行适当调整。接下来的工作将致力于参数自动寻优算法的设计, 以期实现更加智能、高效的 AFM 控制。

参考文献:

- [1] BINNING G, ROHRER G. Atomic force microscope [J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56: 930-933.
- [2] BHUSHAN B. *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology*[M]. Springer, 2010.
- [3] CASUSO I, KODERA N, GRIMELLEC C L, et al.. Contact-mode high-resolution high-speed atomic force microscopy movies of the purple membrane[J]. *Biophysical Journal*, 2009, 97: 1354-1361.
- [4] ADAMS J D, ROGERS B, MINNE S C, et al.. Self-sensing tapping mode atomic force microscopy [J]. *Sensors and Actuators*, 2005, A121: 262-266.
- [5] ROGERS B, SULCHEK T, MURRAY K, et al.. High speed tapping mode atomic force microscopy in liquid using an insulated piezoelectric cantilever [J]. *Rev Sci Instrum*, 2003, 74: 4683-4686.
- [6] HANSMA P K, SCHITTER G, FANTNER G E, et al.. High-speed atomic force microscopy [J]. *Applied Physics*, 2006, 31: 601-602.
- [7] ANDO T, UCHIHASHI T, KODERA N. High-speed AFM and nano-visualization of biomolecular processes [J]. *Pflugers Arch-Eur J Physiol*, 2008, 456: 211-225.
- [8] CARBERRY D M, PICCO L, DUNTON P G, et al.. Mapping real-time images of high-speed AFM using multitouch control [J]. *Nanotechnology*, 2009, 20: 434018-434023.
- [9] PICCO L M, BOZEC L, ULCINAS A, et al.. Breaking the speed limit with atomic force microscopy [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18: 044030-044034.
- [10] ZHOU Y SH, SHANG G Y, CAI W, et al.. Cantilevered bimorph-based scanner for high speed atomic force microscopy with large scanning range. *Rev. Sci. Instrum*, 2010, 81: 053708-053713.
- [11] SCHITTER G, ASTROM K J, DEMARTINI B E, et al.. Design and modeling of a high-speed AFM-

scanner [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15 (5):906-915.

[12] PC/104 Specification[S], PC/104 Consortium.

[13] 范进,金声震,孙才红.超高速 FFT 处理器的设计与实现[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9):2241-2246.

FAN J, JIN SH ZH, SUN C H. Design and implementation of hyper-speed FFT processor [J].

Opt. Precision Eng., 2009, 17(9):2241-2246. (in Chinese)

[14] LEANG K K, DEVASIA S. Feedback-linearized inverse feedforward for creep, hysteresis, and vibration compensation in AFM piezoactuators[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(5):927-935.

作者简介:



陈代谢(1983—),男,湖南沅江人,博士研究生,助理研究员,2005年于长沙理工大学获得学士学位,主要从事原子力显微镜和智能控制等方面的研究。E-mail: chendaixie@mail. iee. ac. cn



殷伯华(1973—),男,天津人,博士,助理研究员,1996年于南京航空航天大学获得学士学位,2003于北京工业大学获得硕士学位,主要从事纳米加工技术、纳米图形发生器、原子力显微镜等方面的研究。E-mail: yinbh@mail. iee. ac. cn



林云生(1962—),男,北京人,高级工程师,1984年于北京工业学院获得学士学位,主要从事纳米检测技术与仪器制造等方面的研究。E-mail: lysh@mail. iee. ac. cn



初明璋(1973—),女,黑龙江齐齐哈尔人,高级实验师,1997年于北京工业大学获得学士学位,主要从事电子显微镜及其附件的研究与开发。E-mail: mzhchu@mail. iee. ac. cn

导师简介:



韩立(1970—),男,甘肃临洮市人,研究员,博士生导师,2002年于清华大学获得博士学位,后进入博士后流动站工作,主要从事纳米检测技术与仪器制造等方面的研究。E-mail: lihan@mail. iee. ac. cn