

文章编号 1004-924X(2006)06-1032-09

补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法

王岳宇¹, 赵学增¹

(1. 哈尔滨工业大学 机械电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:研究了用于扫描探针显微镜,特别是原子力显微镜(AFM)中的扫描器高精度定位问题。压电陶瓷驱动器通常用于这种扫描器中,在无补偿的开环控制期间,它在输入电压和输出位移之间表现出明显的迟滞和蠕变。迟滞和蠕变降低了扫描器的定位精度并使扫描图像出现了畸变。给出了迟滞和蠕变模型及参数的在线辨识方法。在AFM的扫描控制中,使用基于该模型的逆控制算法补偿了压电陶瓷的迟滞和蠕变。在分析中,Preisach迟滞模型和对数蠕变模型被用于描述压电陶瓷驱动器的非线性。由于该方法不需要在控制过程中进行参数设置,因此很容易使用。此外由于是开环控制方法,可以具有更好的分辨率。闭环操作能够给出较好的迟滞和蠕变补偿,但由于在高带宽情况下传感器动态范围的限制,对于小扫描区域或样本特征,它减小了成像的分辨率。三角波轨迹跟踪的仿真结果说明轨迹误差在传感器噪声量级上,证明了这个方法的有效性。

关键词:原子力显微镜;压电陶瓷;迟滞;蠕变

中图分类号:TP273+.2 **文献标识码:**A

Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic

WANG Yue-yu, ZHAO Xue-zeng

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The high-precision positioning with scanners in Scanning Probe Microscopes applications, particularly in atomic force microscopes (AFM), was studied. The piezoceramic actuators are usually used in this kind of scanner, which obviously exhibits the hysteresis and creep between the input voltages and the output displacements during the uncompensated open-loop operation. The hysteresis and creep reduce the positioning precision and produce a distortion in scanning images. A novel hysteresis and creep model was proposed, and the method that can on-line identify parameters was also provided. Furthermore, the model-based inverse control algorithm was used to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic during AFM scanning. In the analysis, the Preisach hysteresis model and logarithmic creep model were used to characterize the nonlinear behavior of the piezoceramic actuator. This method is easy-to-use because it does not need set parameters in control procedure. Moreover, it has high resolution as it is an open-loop control scheme. Closed-loop operation can offer better hysteresis and creep compensation, but it can reduce image resolution for small scans/sample features due to

收稿日期:2006-07-03;修订日期:2006-09-28.

基金项目:教育部留学回国基金

limited dynamic range of sensors at higher bandwidth. Simulation results of tracking triangular wave trajectories show tracking error is on the magnitude of the sensor noise level, which demonstrate the validity of the method.

Key words: atomic force microscope(AFM); piezoceramic; hysteresis; creep

1 引言

原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)能够以 nm 级分辨率获得样本表面的三维形貌,并可进行 pN~nN 级的表面力测量。在发明 AFM^[1]后的 20 年时间里,其开发和应用都得到了迅速发展。现在它已被广泛地用于材料、生物、半导体等诸多科研和工程领域。

AFM 利用一个锋利的针尖扫描被测样本表面,同时调节探针在 Z 方向(高度方向)上的高度来适应样本表面形貌的变化,并记录样本表面上的扫描数据,以获得样本表面的三维形貌。在 AFM 中,三维扫描器带动样本(样本扫描型 AFM)或针尖(探针扫描型 AFM)做三维运动。通常使用压电陶瓷作为 AFM 扫描器的驱动元件。借助于逆压电效应,压电陶瓷在外电场作用下可产生机械伸长或缩短,能够驱动 AFM 扫描器的运动。压电陶瓷具有高响应频率、低温漂、高热稳定性、无摩擦、输出力大等优点。但压电陶瓷也具有迟滞^[2]和蠕变^[3]的缺点。压电陶瓷的迟滞特性是指在输入电压和输出位移之间的一种非线性对应关系,图 1 为压电陶瓷的迟滞特性曲线的示意图。迟滞效应的大小和迟滞特性曲线的形状依赖于驱动电压的驱动过程、大小和频率,根据材料和制造过程的差异,不同压电陶瓷驱动器所表现出迟滞效应大小也不同,其中一些可以达到 25%以上^[4]。在扫描方向上,迟滞效应导致同一样本在两个相反方向上的扫描图像是不同的。当外加驱动电压迅速改变的时候,压电陶瓷的伸长过程分成两步:第一步是在较短时间内的快速伸长;第二步是需要较长时间的缓慢伸长过程,即为时间相关的蠕变效应,其大小依赖于驱动电压的大小和速率。压电陶瓷蠕变特性的大小亦随材料特性而变化,其中一些可以达到 20%以上^[4]。对于长时间的定位,压电陶瓷的蠕变特性可导致定位点的漂移。压电陶瓷的迟滞和蠕变效应极大地影响了 AFM 扫描器的扫描定位精度,在 AFM 的扫描图像中产生了伪像。

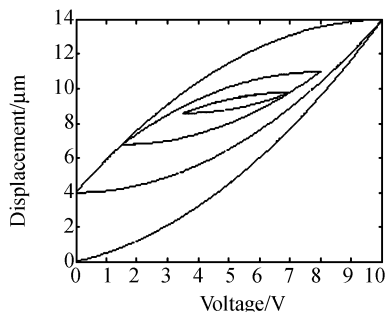


图 1 压电陶瓷的迟滞特性

Fig. 1 Hysteresis of piezoceramic

为消除压电陶瓷迟滞效应的影响,Koops 使用了硬压电陶瓷作为驱动元件^[5]。这种压电材料具有更小的迟滞效应,但却具有行程范围小、蠕变大的缺点。Newcomb 等人使用电荷控制法^[6],改善了压电陶瓷的迟滞特性,但产生了蠕变增大、行程变小、响应速度变慢等缺点,且电荷放大器比电压放大器更昂贵。

利用对压电陶瓷的迟滞特性建模的方法进行定位控制,例如现象宏观模型^[7],Preisach 模型^[8],畴壁模型^[9],微机械模型^[10],统计物理分析^[11],均匀分布能量关系^[12]等模型,能够得到较好的定位精度。但这些模型的共同缺点是模型复杂、参数多且不易确定、模型对参数敏感、运算量大。通常在 AFM 扫描样本过程中,AFM 的实际扫描范围与扫描器的全部行程相比是相对小的。也就是说,通常在 AFM 扫描样本过程中,压电陶瓷所呈现出的迟滞环仅是其主迟滞环中的一个子环,决定这个子迟滞环形状的因素包括子迟滞环位置、逆压电系数、工作环境、载荷、扫描频率等。这些因素都使得 AFM 用户无法预知扫描过程中子迟滞环的形状和参数,加大了对该子迟滞环建模的难度,进而不易实现精确的扫描控制。因此,对于 AFM 扫描控制的应用,上述需要离线辨识模型参数的方法具有较大缺陷。

目前,AFM 通常使用 PID、PI 或 PII 控制^[4,13],这种控制方法结构简单,易于实现。但这种算法在大范围扫描时不够稳定,并且在每条扫

描线的开始部分有振动^[13]。系统控制性能对控制器参数、扫描器动态特性及负载敏感。在系统稳定的前提下,这种控制器参数的选择通常需要在鲁棒性和其它性能之间进行折中。在 AFM 操作过程中,每次调整样本或仪器设置后都需要重新调节 PID 控制器的参数。PID 控制器需要有经验的操作人员通过实验的办法来确定 P、I、D 三个系数,参数调整过程困难而且耗时,这使 AFM 操作复杂化。而且扫描器的定位精度强烈依赖于控制器参数的选择。若 PID 参数调节不好,可使扫描器动态性能和精度很差,甚至导致控制系统不稳定。H_∞鲁棒控制算法在增大系统带宽方面取得了较大成功。在控制器设计过程中,为得到扫描器的数学模型,Murti V Salapaka 和 G Schitter 等人都使用了小信号频域辨识法得到扫描器的近似线性模型^[14-15],并设计了 H_∞鲁棒控制器对 AFM 扫描器进行控制。但在这种控制方法中,控制信号中有振动,不能用于形成 AFM 的扫描图像^[16];在三角波扫描轨迹的尖端部分出现了较大的误差^[17]。鲁棒控制的成功在很大程度上依赖于控制器设计中权值的选择^[18]。并且需要对每个 AFM 扫描器和压电陶瓷驱动器进行模型辨识和控制器设计,而这种模型辨识过程是复杂而耗时的,所以这种方法不利于广泛应用。

综上所述,使用硬压电陶瓷或电荷控制法虽然在一定程度上减小了压电陶瓷的迟滞效应,但剩余迟滞对于 AFM 精确扫描的影响仍然较大;并且这种方法加大了蠕变效应。迟滞建模法能够得到较好扫描精度,但需要大量的模型参数,而这些参数的辨识和选择是不容易的。PID 和鲁棒控制减小了控制参数个数,但扫描精度和控制性能仍然依赖于控制参数的选择。由于压电陶瓷是无摩擦、无间隙、无死区的驱动器,因此在理论上它具有无限小的位移分辨率。但在闭环控制方法中,由于传感器噪声的引入而恶化了扫描器的分辨率,这不利于小样本的精细扫描。为对样本进行高分辨率、精确且便捷的扫描,提出了一种新的迟滞和蠕变模型,同时给出了模型参数在线辨识的方法,并开发了基于该模型的逆控制算法,用于补偿压电陶瓷的迟滞和蠕变效应。该方法在本质上是开环控制,因此可以得到比闭环控制更好的位移分辨率。

2 AFM 扫描器的控制

2.1 迟滞建模

压电陶瓷迟滞环的形状与驱动电压波形无关,但与驱动电压的施加过程、大小、频率以及负载相关。这些因素都影响迟滞特性曲线的建模及模型参数选择。但在每次利用 AFM 对样本进行扫描成像的过程中,上述每个参数都可能变化,这增加了对迟滞特性进行建模及其参数辨识的难度,同时也影响了模型的准确性。这里采用在线模型参数辨识的方法对压电陶瓷的迟滞特性进行建模。

图 2 是利用 Preisach 模型仿真的压电陶瓷迟滞特性曲线(以下简称迟滞曲线)。其中图 2(a)显示了施加到压电陶瓷上的周期三角波驱动电压,图 2(b)表示在该驱动电压作用下的电压-位移迟滞曲线。从图 2(b)中看出,由第一个三角波的前半周期驱动产生的 OA 段迟滞曲线明显不同于以后的迟滞曲线,而在以后的循环周期中压电陶瓷显示出了相同的迟滞环,在频率没有明显变化的情况下,只要驱动电压单调地在最大驱动电压和最小驱动电压之间变化,迟滞曲线的形状就不会改变,即迟滞曲线的形状与驱动电压波形无关。由此,考虑在 AFM 对样本进行扫描之前,首先在期望的扫描范围上进行 1.5 个三角波周期的预扫描,同时记录驱动电压和压电陶瓷的位移数据,可以分别得到 A→C 段和 C→A 段迟滞曲线。但用上述方法得到的驱动电压-位移数据中包含位移传感器测量噪声(不能用滤波方法去除数据测量频带内的测量噪声),这种噪声使测得的迟滞曲线含有高频振动,不利于 AFM 扫描器的精确定位控制。为得到光滑的迟滞曲线,用两个多项式分别拟合上述两段曲线的测量数据,得到:

$$y_{AC}(t) = f_{AC}(u(t)), \quad (1)$$

$$y_{CA}(t) = f_{CA}(u(t)). \quad (2)$$

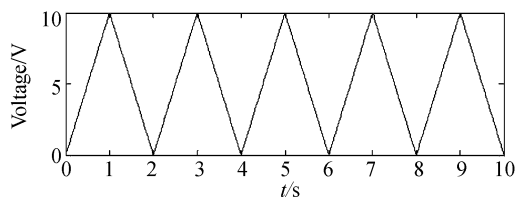
其中:

$u(t)$ —驱动电压

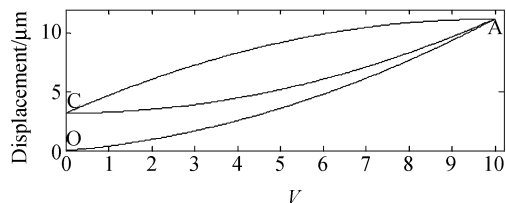
$y_{AC}(t)$ —A→C 段拟合迟滞曲线

$y_{CA}(t)$ —C→A 段拟合迟滞曲线

由于多项式运算简单,因此用多项式对迟滞曲线进行逼近有利于减小处理器的运算时间,而达到快速、实时控制的目的。



(a)驱动电压
(a)driving voltage



(b)压电陶瓷迟滞曲线
(b)Hysteresis curve of piezoceramic

图 2 Preisach 模型仿真的压电陶瓷迟滞特性

Fig. 2 Hysteresis of piezoceramic simulated using Preisach hysteresis model

本文利用 Preisach 模型仿真迟滞曲线时,选用了简单的均匀权函数。仿真结果显示出,当用三次多项式拟合迟滞曲线时,对任意位置、任意大小的子迟滞环的上升和下降段曲线的逼近误差都在传感器噪声范围之内。本文中所有仿真过程都假定:用于测量压电陶瓷位移的传感器具有 2 nm 的随机测量噪声。用三次以上的多项式逼近迟滞曲线时,不能减小模型误差,而且增加了计算量。由此,本文选用三次多项式逼近迟滞曲线。在不同的压电陶瓷建模中,可以根据实际的压电陶瓷特性利用实验的方法得出合适的多项式次数。

2.2 蠕变建模

压电陶瓷驱动器对于快速变化输入电压的响应分成两步,响应的最初部分发生在驱动器的机械谐振所决定的时间尺度范围之内,然后是缓慢的蠕变响应过程。压电陶瓷的蠕变特性曲线如图 3 所示,其中的插图为蠕变特性曲线的放大部分。通常认为压电陶瓷的蠕变过程为对数形式^[9]:

$$y_c(t) = y_{c0}(1 + r \log \frac{t}{t_0}), \quad (3)$$

其中:

- y_{c0} —最初部分的压电陶瓷位移
- r —压电陶瓷的蠕变系数

- t_0 —最初部分的响应时间
- t —蠕变时间, t_0 为 t 的计时零点
- $y_c(t)$ —压电陶瓷的总位移

这里 y_{c0} 、 r 和 t_0 依赖于压电陶瓷材料、实验条件、驱动电压的大小和速率等因素。由于压电材料的不同、压电陶瓷的老化、实验条件的不同、以及 AFM 扫描的范围和速率的不同,导致压电陶瓷蠕变公式中的三个模型参数不容易精确地确定。

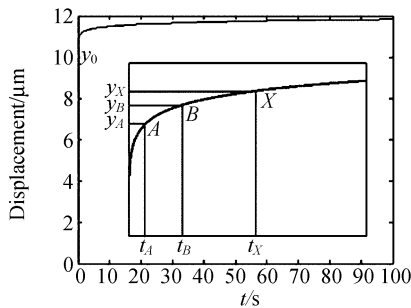


图 3 压电陶瓷蠕变特性

Fig. 3 Creep of piezoceramic

A、B、X 为迟滞曲线上的任意 3 点。由公式 (3) 可得:

$$y_{cA}(t_A) = y_{c0}(1 + r \log \frac{t_A}{t_0}), \quad (4)$$

$$y_{cB}(t_B) = y_{c0}(1 + r \log \frac{t_B}{t_0}), \quad (5)$$

$$y_{cX}(t_X) = y_{c0}(1 + r \log \frac{t_X}{t_0}). \quad (6)$$

其中:

- t_A —A 点时间
- t_B —B 点时间
- t_X —X 点时间
- y_{cA} —A 点蠕变位移
- y_{cB} —B 点蠕变位移
- y_{cX} —X 点蠕变位移

公式(5)减去公式(4)可得:

$$\Delta_{cBA} = y_{cB}(t_B) - y_{cA}(t_A) = y_{c0} r \log \frac{t_B}{t_A}, \quad (7)$$

其中:

Δ_{cBA} —B、A 两点的蠕变位移差
整理后可得:

$$\alpha = y_{c0} r = \Delta_{cBA} / \log \frac{t_B}{t_A}, \quad (8)$$

其中:

- α — y_{c0} 、 r 乘积

公式(6)减去公式(4)可得:

$$\Delta_{cXA} = y_{cX}(t_X) - y_{cA}(t_A) = y_{c0} r \log \frac{t_X}{t_A}, \quad (9)$$

其中:

Δ_{cXA} —X、A 两点的蠕变位移差

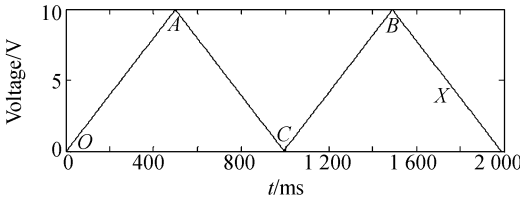
把公式(8)代入公式(9)可得:

$$\Delta_{cXA} = \alpha \log \frac{t_X}{t_A}, \quad (10)$$

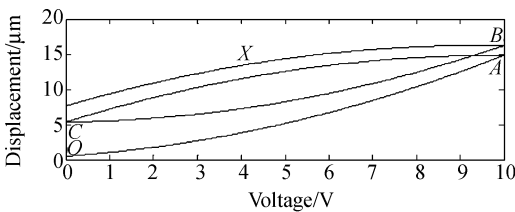
由公式(8)可以看出,只要能够测得 A、B 两点间的位移差 Δ_{cBA} 和 A、B 两点的对应时间 t_A 、 t_B ,即可由公式(8)和(10)求出 t_A 之后任意时刻 t_X 的对应点 X 相对于 A 点的蠕变位移差 Δ_{cXA} 。

2.3 迟滞和蠕变特性的逆补偿控制

如图 4 所示,由于压电陶瓷同时具有迟滞和蠕变特性,当在压电陶瓷上施加如图 4(a)所示的两个周期三角波驱动电压时,得到如图 4(b)所示的驱动电压-位移曲线。为使图 4(b)中曲线清晰,这里夸大了蠕变效应。对比图 2 可知,图 4(b)中 A、B 两点间的位移差是由蠕变产生的。



(a)驱动电压
(a) driving voltage



(b)带蠕变的迟滞环
(b) Creep and hysteresis

图 4 压电陶瓷的电压-位移特性曲线

Fig. 4 Voltage-displacement curve of piezoceramic

在 AFM 扫描样本之前,由于 AFM 探针针尖不能够精确地落在期望扫描区域的中线上,所以在扫描前,要先进行针尖的初始定位,如图 5 所示。假设现针尖的位置为坐标 0 点,期望扫描区域如图 5 中粗黑方框所示。

在 AFM 扫描样本前,首先利用单调递增的电压驱动压电陶瓷伸长,使 AFM 扫描器的位移

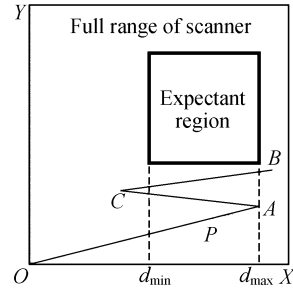


图 5 预期扫描区域

Fig. 5 Schematic of expected scanning area

增加,直到扫描器位移增加到期望扫描区域的最远处 d_{max} ,记录此时的时间 t_A 和驱动电压值 V_A (参考图 4 和图 5 中的 A 点);然后从 A 点开始,在压电陶瓷上施加单调递减的电压驱动压电陶瓷缩短,直到扫描器位移减小到期望扫描区域的最远点 d_{min} 之外的一定距离(例如越过扫描区域 20%,也就是,使扫描器位移减小到 $d_{min} - 0.2 \times (d_{max} - d_{min})$ 位置处),记录此时的驱动电压值 V_C (参考图 4 和图 5 中的 C 点);然后从 C 点开始,在压电陶瓷上再施加单调递增的驱动电压,直到驱动电压增加到 V_A 为止,记录此时的时间 t_B 、和位移 d_B (参考图 4 和图 5 中的 B 点)。在上述预扫描过程中,同时记录 AC、CB 两段轨迹的位移和驱动电压,分别为 $L_{AC}(t), u_{AC}(t), L_{CB}(t), u_{CB}(t)$ 。

在上述预扫描过程中,为把针尖移动到预期的扫描区域上,相当于在压电陶瓷上施加了一个偏置电压 $V_p = (V_A - V_C)/2$,在以后的扫描过程中,该偏置电压一直加在压电陶瓷上,直到 AFM 扫描完成为止。在 AFM 对样本进行往复扫描过程中,实际施加到压电陶瓷上的全部驱动电压为:

$$V = V_p + V_{tri}, \quad (11)$$

其中:

V —全部驱动电压

V_p —偏置电压

V_{tri} —交流三角波扫描电压

由于 V_p 是直流的偏置电压,能够使压电陶瓷产生蠕变效应,并导致针尖位置相对于样本缓慢移动,给扫描器定位带来误差,因而在 AFM 扫描图像中产生了畸变。但在压电陶瓷上施加的高速往复三角波扫描电压 U_{tri} 是交流电压,它所产生的蠕变效应可以忽略。

在上述预扫描过程中, A 、 B 两点位移都是由迟滞和蠕变特性共同作用产生, 表示为:

$$d_A = H_A + C_A, \quad (12)$$

$$d_B = H_B + C_B. \quad (13)$$

其中:

H_A — A 点位移中的迟滞分量;

C_A — A 点位移中的蠕变分量;

H_B — B 点位移中的迟滞分量;

C_B — B 点位移中的蠕变分量

由于 $V_A = V_B$, 参考图 2 可知, $H_A = H_B$ 。所以, 由公式(13)减去公式(12)可得:

$$d_B - d_A = C_B - C_A, \quad (14)$$

即 A 、 B 两点的位移差是由于 V_P 激励蠕变效应产生的。把 t_A 、 t_B 、 d_A 、 d_B 代入到公式(7)、(8)可得:

$$\alpha = (d_B - d_A) \left/ \log \frac{t_B}{t_A} \right., \quad (15)$$

则由公式(10)可得, 在 A 点以后, 时间为 t_X 的扫描点 X 相对于 A 点的蠕变增量为:

$$\Delta_{xA} = \alpha \log \frac{t_X}{t_A}, \quad (16)$$

利用公式(16)可以计算出 $A \rightarrow C \rightarrow B$ 段中所有轨迹点相对于 A 点的蠕变位移增量。设 AC 段上轨迹点相对于 A 点的蠕变位移增量为 $C_{AC}(t)$, CB 段上的轨迹点相对于 A 点的蠕变位移增量为 $C_{CB}(t)$ 。可得:

$$L_{AC}'(t) = L_{AC}(t) - C_{AC}(t), \quad (17)$$

$$L_{CB}'(t) = L_{CB}(t) - C_{CB}(t). \quad (18)$$

这里的 $L_{AC}'(t)$ 、 $L_{CB}'(t)$ 即为由 AC 、 CB 段轨迹点相对于 A 点的压电陶瓷迟滞特性位移, 消除了由蠕变效应所产生的附加位移。在 $L_{AC}'(t)$ 、 $L_{CB}'(t)$ 上的 B 点和 A 点的位移相等。利用公式(1)、(2)分别对 $(L_{AC}'(t), u_{AC}(t))$ 、 $(L_{CB}'(t), u_{CB}(t))$ 进行拟合可得:

$$y_{AC}(t) = f_{AC}(u(t)), \quad (19)$$

$$y_{CA}(t) = f_{CA}(u(t)). \quad (20)$$

其中:

$y_{AC}(t)$ — AC 段相对于 A 点的迟滞曲线

$y_{CA}(t)$ — CB 段相对于 A 点的迟滞曲线

在以后的扫描过程中, 只要驱动电压单调地在 V_A 和 V_C 之间变化, 则迟滞环的形状将保持不变, 参考图 2, 分别对公式(19)、(20)求反可得:

$$u_{AC}'(t) = f_{AC}^{-1}(y(t)), \quad (21)$$

$$u_{CA}'(t) = f_{CA}^{-1}(y(t)). \quad (22)$$

经过上述预扫描过程之后, 从 B 点开始对样本进行扫描成像。规定从扫描区域远端 d_{\max} 到近端 d_{\min} 的扫描为正向扫描, 期望扫描轨迹为 $S^+(t)$; 从扫描区域近端到远端的扫描为负向扫描, 期望扫描轨迹为 $S^-(t)$ 。对于扫描轨迹上的任意点, 可以利用扫描速率和扫描器位移计算出扫描器到达该点的时间 t 。为在 t 时刻达到期望的扫描轨迹, 由公式(16)、(21)、(22)可得到扫描器的正、负向扫描所需的外加驱动电压分别为:

$$u^+(t) = f_{AC}^{-1}(S^+(t) - \alpha \log \frac{t}{t_A}), \quad (23)$$

$$u^-(t) = f_{CB}^{-1}(S^-(t) - \alpha \log \frac{t}{t_A}). \quad (24)$$

其中:

$u^+(t)$ —扫描器正向扫描所需的驱动电压

$u^-(t)$ —扫描器负向扫描所需的驱动电压

由公式(23)、(24)所得出的驱动电压 $u^+(t)$ 、 $u^-(t)$ 即为跟踪预期扫描轨迹的驱动电压。由公式(23)、(24)可以看出, 由于压电陶瓷的蠕变位移是时间 t 的函数, 在利用电压控制压电陶瓷扫描过程中, 由蠕变效应所产生的位移是不可控的, 仅能通过控制压电陶瓷的迟滞位移来达到跟踪预期轨迹的目的。为保持在整个扫描过程中迟滞环形状不变并能够抵消蠕变效应所带来的位移偏差, 在预扫描阶段的 C 点应该预留出补偿蠕变所需的位移。所以在预扫描中寻找 C 点位置时, 把 C 点置于扫描区域之外某一位置, 该位置可以根据所使用的压电陶瓷特性和期望扫描区域大小进行粗略估计得到, 只要预留出能足够补偿蠕变效应的位移, 则该位置的估计对轨迹跟踪精度没有影响。

3 仿 真

用 Preisach 模型对压电陶瓷的迟滞特性进行建模可得到很高的精度^[8], 本文利用 Preisach 模型仿真压电陶瓷的迟滞特性, 仿真结果如图 2 所示。利用公式(5)仿真压电陶瓷的蠕变特性, 仿真结果如图 3 所示。迟滞和蠕变特性共同作用时, 压电陶瓷的驱动电压-位移特性如图 4 所示。AFM 期望的扫描区域如图 5 所示, 其中 $d_{\max} = 15 \mu\text{m}$, $d_{\min} = 10 \mu\text{m}$ 。探针针尖的初始位置坐标为 $(0, 0) \mu\text{m}$ 。扫描图像为 $512 \text{ Pixel} \times 512 \text{ Pixel}$ 。

首先利用单调递增电压驱动压电陶瓷伸长,同时利用位移传感器监视并记录扫描器的位移,直到扫描器位移达到 d_{max} ,此时驱动电压为 V_{max} ;然后从 V_{max} 开始利用单调递减的电压驱动压电陶瓷缩短,直到扫描器位移达到 d_{min} ,此时驱动电压为 V_{min} 。利用大小在 V_{max} 和 V_{min} 之间的标准三角波电压驱动压电陶瓷扫描。当压电陶瓷仅包含迟滞特性而没有蠕变特性时,上述扫描过程的仿真曲线如图 6 所示。其中图 6(a)中靠下的三角波为驱动电压波形,第一个周期是寻找扫描区域的预扫描过程,从第二个周期开始的十个周期是正常扫描周期;图 6(a)中靠上的三角波为期望的扫描轨迹,图 6(a)中的虚线所示曲线为实际扫描轨迹,从该轨迹中可以明显看出压电陶瓷的迟滞特性。图 6(b)为轨迹误差(实际扫描轨迹位移减去期望轨迹位移)。由迟滞特性所产生的最大轨迹误差 $2.5295 \mu\text{m}$,测量轨迹误差远超过位移传感器噪声(预扫描阶段不计算轨迹误差)。扫描轨迹的最大非线性度为 25.295% 。这么大的轨迹误差和非线性度在 AFM 成像扫描应用中是不可接受的。

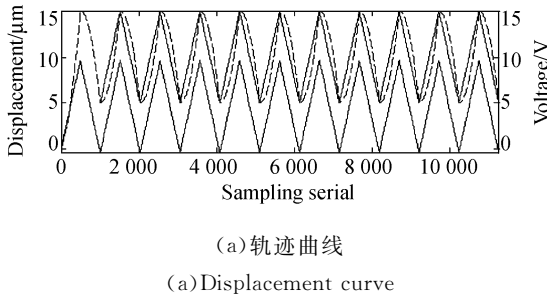


图 6 仅迟滞特性作用时无补偿轨迹曲线
Fig. 6 Uncompensated displacement curve only effected by the hysteresis

当压电陶瓷同时包含迟滞和蠕变特性时,重复上述扫描过程,仿真曲线如图 7 所示(各曲线的

含义同图 6)。最大轨迹误差 $2.8133 \mu\text{m}$,产生了更大的轨迹误差。由于蠕变作用,位移误差增加了 $0.2838 \mu\text{m}$,并随时间延长而继续增大。扫描轨迹中的最大非线性度 28.133% 。在 10 个扫描周期中,由蠕变引起的最大非线性度为 2.838% 。对于 $512 \text{ Pixel} \times 512 \text{ Pixel}$ 的 AFM 扫描图像,需要 256 个扫描周期,由蠕变引起的轨迹误差和非线性度将会更大。可见,有蠕变引起的扫描器轨迹误差和非线性度也很大,在 AFM 扫描成像应用中不可忽略。

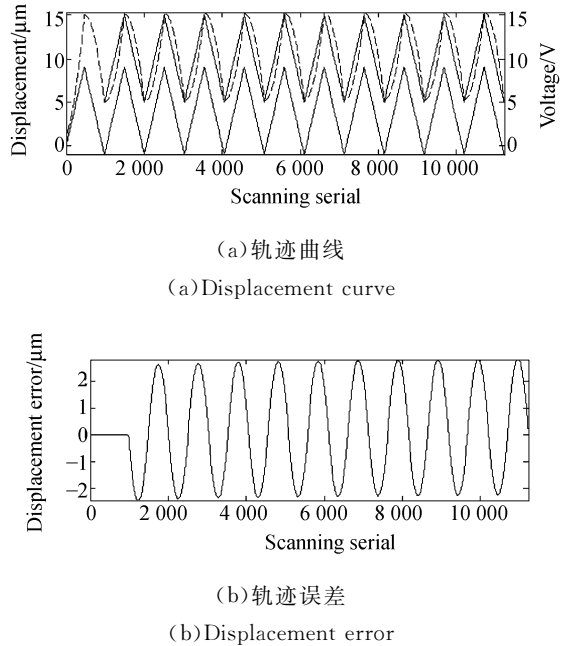


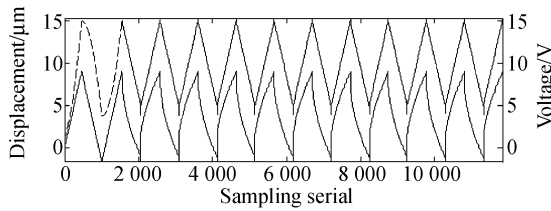
图 7 包含迟滞和蠕变特性时无补偿轨迹曲线
Fig. 7 Uncompensated displacement curve effected by the hysteresis and creep

对于同时含有迟滞和蠕变特性的压电陶瓷,利用 2.3 段给出的补偿方法,得出的仿真曲线如图 8 所示(图 8 中的曲线含义与图 6 相同)。最大轨迹误差 2 nm ,测量轨迹误差在位移传感器噪声之内,实际的轨迹误差可能更小。最大非线性度 0.0002% 。图 8(a)中的扫描轨迹下端超出扫描范围一段,这是由于在补偿蠕变特性时,为保持整个扫描过程中迟滞环不变而预留位移所引起的,这使得实际扫描区域略大于期望扫描区域,但在超出期望扫描区域的部分不进行样本的扫描采样,所以并不影响 AFM 成像。

上述扫描过程中,压电陶瓷迟滞环的位移范围为 $3.6957 \sim 15 \mu\text{m}$,大于期望的扫描范围

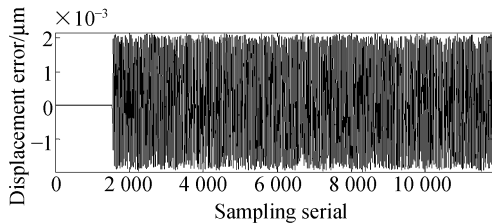
5~15 μm ,多出的部分是预留出用于补偿压电陶瓷蠕变效应的部分。

图 9(a)为进行 512 Pixel \times 512 Pixel 图像的



(a) 轨迹曲线

(a) Displacement curve



(b) 轨迹误差

(b) Displacement error

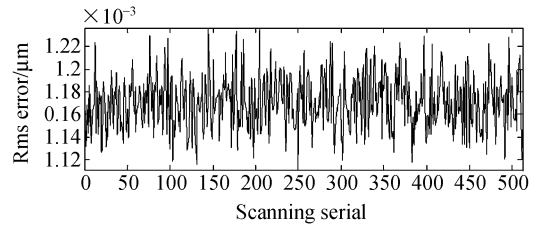
图 8 迟滞和蠕变同时作用时补偿后的轨迹曲线

Fig. 8 Compensated displacement curve effected by the hysteresis and creep

4 结 论

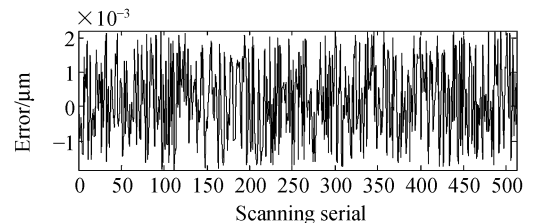
由于压电陶瓷具有诸多优点而被用作 AFM 扫描器驱动元件。但其迟滞和蠕变特性降低了扫描器的定位精度,进而使 AFM 图像产生了畸变。目前通常使用的模型前馈控制和反馈控制都需要控制参数设置,而系统的控制性能在很大程度上依赖于这些参数值,并且这些参数设置对于 AFM 用户来说是不容易而且耗时的;闭环控制方法由于分辨率相对较差而不适用于小样本特征的测量和成像。本文提出一种压电陶瓷迟滞和蠕变的在线辨识模型及逆控制算法,用于 AFM 扫描期间压电陶瓷迟滞和蠕变特性补偿。这个算法用多项式建模了迟滞、用相对位移的方法建模了蠕变,并

仿真扫描所得到的扫描线轨迹误差均方根曲线。图 9(b)为 Y 方向的轨迹误差曲线。从图中看出,最大轨迹误差都在位移传感器噪声范围之内。



(a) 扫描线 X 方向轨迹误差的均方根

(a) rms error of scanning serial for X direction



(b) Y 方向轨迹误差

(b) Error of tracks for Y direction

图 9 扫描轨迹误差曲线

Fig. 9 Error curve of scanning track

用预扫描方法在线辨识了模型参数,克服了压电陶瓷迟滞和蠕变建模及模型参数辨识困难的问题。该算法具有的明显优点为:

(1)对于 AFM 扫描器的控制过程,无需操作者进行任何的扫描参数设置,也就不需要操作人员的任何关于扫描器控制方面的知识和经验,使得系统的扫描测量结果仅与设备本身相关,不含人为因素,扫描轨迹误差在传感器噪声范围之内。简化了 AFM 的操作过程。

(2)整个控制算法简单,无须复杂的运算,降低了对控制系统处理器的要求,能够降低设备成本。

(3)该算法在扫描控制过程中实际上是开环控制方法,因此可以得到比闭环控制更好的位移分辨率,能够对小扫描区域或小样本特征进行更精细的扫描和测量。

参考文献:

- [1] BINNIG G, QUATE C F, GERBER C. Atomic force microscope[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 56(9): 930-933.
- [2] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(5): 26-32.

- ZHANG T, SUN L N, CAI H G. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(5): 26-32. (in Chinese)
- [3] JUNG H, GWEON D G. Creep characteristics of piezoelectric actuators[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(4): 1896-1900.
- [4] RIFAI O M E, AUMOND B D, TOMI K Y. Imaging at the nano-scale[C]. *Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference, Monterey, California, United States*, 2003: 715-722.
- [5] KOOPS R, SAWATZKY G A. New scanning device for scanning tunneling microscope applications[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(8): 4008-4009.
- [6] NEWCOMB C V, FLINN I. Improving the linearity of piezoelectric ceramic actuators[J]. *Electronics Letters*, 1982, 18(11): 442-444.
- [7] OZER M B, ROYSTOM T J. Modeling the effect of piezoceramic hysteresis in structural vibration control[C]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, Newport Beach*, 2001: 89-100.
- [8] SMITH R C, SALAPAKA M, CHERVENY L. A preisach model for quantifying hysteresis in an atomic force microscope[C]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, San Diego*, 2002: 498-504.
- [9] SMITH R C, HOM C L. Domain wall theory for ferroelectric hysteresis[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1999, 10(3): 195-213.
- [10] CHEN W, LYNCH C S. A micro-electro-mechanical model for polarization switching of ferroelectric materials [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(15): 5303-5311.
- [11] 曲东升, 荣伟彬, 孙立宁, 等. 压电陶瓷微位移器件控制模型的研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6): 602-607. QU D SH, RONG W B, SUN L N, *et al.* Research on the control model of piezoelectric micropositioning actuator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 602-607. (in Chinese)
- [12] SMITH R C, HATCH A, MUKHERJEE B. A homogenized energy model for hysteresis in ferroelectric materials: general density formulation[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(9): 713-732.
- [13] RIFAI O M E, KAMAL Y T. Design and control of atomic force microscopes[C]. *Proceedings of American Control Conference, Denver*, 2003: 3714-3719.
- [14] SEBASTIAN A, SALAPAKA M V, CLEVELAND J P. Robust control approach to atomic force microscopy[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, United States*, 2003: 3443-3444.
- [15] SCHITTER G, STEMMER A, ALLGOWER F. Robust 2 DOF-control of a piezoelectric tube scanner for high speed atomic force microscopy[C]. *42nd IEEE Conference on Decision and Control United States*, 2003: 3720-3725.
- [16] SCHITTER G, MENOLD P, KNAPP H F, *et al.* High performance feedback for fast scanning atomic force microscopes[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(8): 3320-3327.
- [17] SCHITTER G, STEMMER A. Model-based signal conditioning for high-speed atomic force and friction force microscopy[C]. *Proceedings of the 28th International Conference on MNE Switzerland*, 2003: 938-944.
- [18] OLOOMI H, SHAFAI B. WEIGHT. Selection in mixed sensitivity robust control for improving the sinusoidal tracking performance[C]. *42nd IEEE Conference on Decision and Control United States*, 2003: 300-305.

作者简介: 王岳宇(1977—), 男, 哈尔滨工业大学博士生, 主要从事扫描探针显微镜开发和纳米尺度线宽测量技术研究。

E_mail: wang_yueyu@163.com