

一种原子力显微镜中蠕变迟滞非线性特性补偿方案

肖祥丽, 张承进

(山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 压电陶瓷通常用于原子力显微镜 (AFM) 中的扫描器中, 但是在无补偿开环控制中压电陶瓷在输入电压与输出位移之间表现出明显的迟滞和蠕变非线性特性, 使得扫描所得图像失真. 为此, 针对原子力显微镜 X 轴的需求, 采用了分步补偿的办法, 先补偿蠕变特性而且可以简化迟滞补偿的算法, 很大程度上减轻了图像的失真, 使整个控制算法简单, 无需复杂的运算, 降低了对控制系统处理器的要求, 降低设备成本.

关键词: 压电驱动器; 迟滞特性; 蠕变特性; 纳米定位

中图分类号: TP273

文献标识码: A

A compensating scheme for hysteresis and creep in a atomic force microscope scanner

XIAO Xiang - li, ZHANG Cheng - jin

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: The piezoelectric actuator is used as the scanner in the atomic force microscope. It has obvious creep and hysteresis between the input voltage and the output displacement in the open control loop without compensation, which make the image distortion seriously. For the atomic force microscope X axial, we introduced the compensation method of the two characters separately, because after the creep compensation, the hysteresis compensation is easier to realize. This method is simple to realize, eliminates the effects of creep and hysteresis effectively and decreases the request of the processor.

Keywords: piezoelectric actuator; hysteresis; creep; nano - positioning

20 世纪 80 年代, 扫描隧道显微镜 (STM) 和原子力显微镜 (AFM) 的发明, 揭开了人类探究纳米世界的序幕. 作为关键技术之一的纳米定位技术将直接左右着各学科纳米技术的发展. 在纳米定位技术中应用最为广泛的定位元件是压电陶瓷, 它应用逆压电效应, 将电压信号转换成纳米到几十微米尺度的位移. 由于压电陶瓷具有分辨率高、体积小、输出力大、频响高、不发热和响应速度快等诸多优点^[1], 被广泛应用于 STM、AFM 等需要 1 ~ 50 μm 移动范围的纳米定位系统中. 但由于压电陶瓷的迟滞、蠕变等非线性特性, 给纳米定位系统带来了一定的误差, 影响了 STM、AFM 成像精度. 因此迟滞、蠕变非线性特性成为精密定位技术中的一大瓶颈. 传统 AFM 仪器大多不考虑迟滞、蠕变非线性特性, 采用模拟 PD 控制, 且实现不全面、配置也不够灵活. 这种控制系统虽然具有控制速度快的优点, 但精度不够高, 抗干扰能力不够强, 而且往往会引起惯性环节的附加, 从而影响探针样品间距的精确控制, 且电路结构复杂. 有人曾经用电荷控制法来消除迟滞的影响, 但造成蠕变增大、行程变小、响应速度变慢, 且电荷放大器比电压放大器更昂贵, 在实际中很难被广泛推广.

1 迟滞特性

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^[2]. 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, 由于材料和制造过程的差异, 不同压电驱动器所表现出迟滞效应大小也不同.

图 1 为本文所采用的德国 Piezsystem jena 公司生产的 TR IIOR 100 型三维压电工作台 X 轴向慢速运动

收稿日期: 2008 - 06 - 12

作者简介: 肖祥丽 (1982 -), 女, 硕士研究生.

基金项目: 山东省科技攻关资助项目 (2007GG30004002)

定位时实测的位移输出曲线. 从图 1 中可看出, 压电陶瓷驱动器的位移范围为 $0 \sim 30 \mu\text{m}$, 并且该驱动器具有迟滞和蠕变特性, 当控制电压为 $0 \sim 45 \text{V}$ 时, 相同输入电压对应的最大输出位移差值达 $5 \mu\text{m}$, 这给精密定位控制带来极大的难度. 导致同一样本在两个相反方向上的扫描图像是不同的.

2 蠕变特性

压电驱动器对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, 这就是蠕变效应. 在只考虑蠕变特性的情况下, 压电驱动器的阶跃响应如图 2 所示. 由图 2 可见, 蠕变效应使得驱动器位移误差最大达到 33.64% , 会很大程度上影响成像精度.

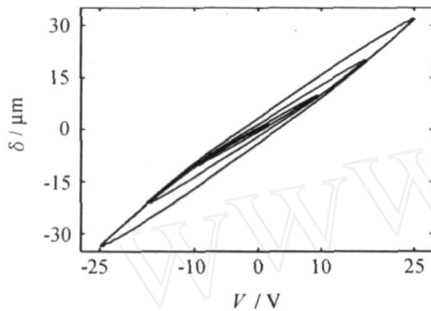


图 1 压电驱动器输入电压与位移关系的迟滞特性
Fig. 1 The hysteresis of the piezoelectric actuator between the input voltage and the displacement

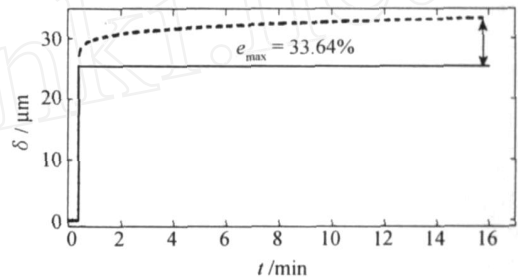


图 2 压电驱动器阶跃响应下的蠕变特性
Fig. 2 The creep of the piezoelectric actuator's step response

3 X轴算法补偿

近几年来对于这两种非线性特性的研究也取得了一定的成就, 如基于 Preisach 模型的 PD 控制, 虽然基于 Preisach 模型的建模方法能较好地描述压电陶瓷驱动器的非线性和迟滞特性, 但建模过程需要大量的试验, 并且模型本身计算复杂不利于快速处理^[3], 其他一些基于智能建模的方法, 比如神经网络方法, 虽然也能描述这种非线性, 但神经网络的局部极小点、过拟合以及结构和类型的选择过分依赖于经验等固有缺点严重降低了模型预测的最缺型. 基于算子加权而得到的迟滞环模型以及其逆模型计算简单但是其抗干扰太差, 往往由于系统中噪声而导致系统不稳定. 针对 ARM 光栅扫描模式, 采用逐行扫描的光栅扫描模式 (图 3). 显而易见, 水平方向 X 轴上的驱动电压信号为三角波 (图 4), Y 轴上的为斜率很小的斜坡信号, 这种比文献 [4] 中的 Y 轴驱动电压简单、易于实现.

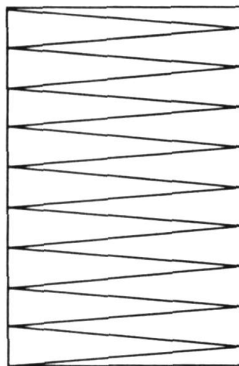


图 3 探针在样品表面水平方向光栅扫描示意图
Fig. 3 The raster scan mode of the probe

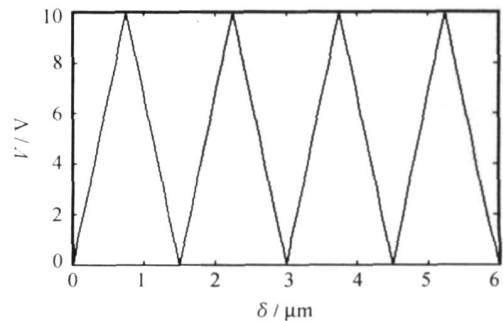


图 4 X 轴的驱动电压信号
Fig. 4 The drive voltage signal of the X axis

现在只研究 x 轴的扫描. 如图 4 所示, 驱动电压为三角波, 且最大电压为 10V, 则图 5 为压电驱动器在蠕变和迟滞都考虑在内的响应图. 图 5 中曲线 C 为前半个周期驱动电压单调上升时响应曲线, 曲线 A 为下半个周期驱动电压单调下降时的响应曲线, 由于蠕变的影响当电压将为零时位移不再为零. 从而在前 2.5 个周期内形成了 $C A B D$ 的运动轨迹, 表现在压电驱动器上就是响应曲线的不确定性.

迟滞特性具有非局部记忆特性, 即当前时刻的输出不仅取决于系统当前时刻的输入, 还与历史输入峰值有关, 但与输入信号的变化率无关, 这是迟滞的本质特性, 迟滞曲线形状只与驱动电压的最大驱动电压与最小驱动电压有关^[5], 而原子力显微镜的 x 轴的驱动电压为周期性的三角波, 则迟滞曲线的形状不变, 压电驱动器 x 轴在蠕变完全补偿后在周期三角波的驱动下的迟滞曲线形状不再变化 (图 6). 由此, 想到了简化迟滞蠕变补偿的方法, 即迟滞蠕变分步补偿.

由文献 [1] 的实验可以看出蠕变是按一定规律变化的, 具有很好的可重复性, 且蠕变与电压变化的方向无关, 因此可以精确预测, 我们应用^[5] $y(t) = y_0 \left\{ 1 + \log \left(\frac{t}{t_0} \right) \right\}$ 建立迟滞模型, 这里 y_0 指压电驱动器在时间 t_0 时刻的位移, K_d 为压电常数. 应用高增益反馈控制器来消除蠕变的影响, 该控制器传递函数为 $K_p + K_d \frac{2S}{(s +)^2}$, 从仿真结果可以看出蠕变效应由原来的最大误差 33.64% 降至 1.48%. 驱动电压为图 5 的周期三角波的迟滞响应曲线如图 7 所示.

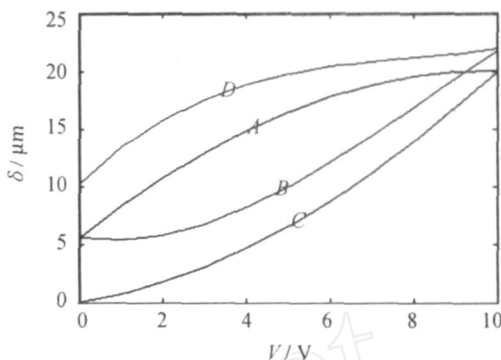


图 5 压电驱动器在 x 轴 2.5 个周期的位移图
Fig 5 The displacement of the X axis in the first 2.5 periods

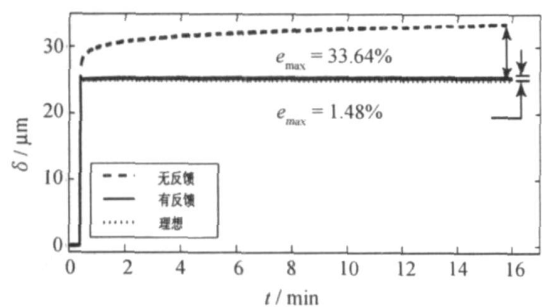


图 6 蠕变补偿后驱动器的阶跃响应图
Fig.6 The step response after creep compensation

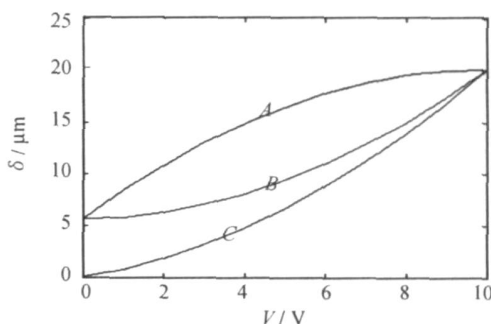


图 7 只有迟滞特性下的驱动器 X 轴响应曲线
Fig.7 The response of the X axis only has the hysteresis

由于多项式运算简单, 此处用三阶多项式对迟滞曲线进行曲线拟合, 因为阶次太低模型误差大, 阶次太高模型误差不能无限小且计算时间长, 不利于减小处理器的运算时间, 而达到快速、实时控制的目的. 而三阶模型迟滞模型能够获得满意的模型精度且计算时间适中, 并且有实验可得采用此三阶模型建立的模型误差在 1% 以内. 最后由于 PD 控制器模型简单且参数易于调节, 因此, 基于此模型采用 PD 控制器来补偿其迟滞影响, 用 CH 900B 型扫描电化学显微镜的三维定位压电工作台 (德国 Piezo system jena 公司生产的 TR IIOR100 型三轴向压电工作台) x 轴向为研究对象, 对它施加 0 ~ 25V, 频率分别为 1、10、20 Hz 的三角波信号的驱动电压, 通过多次调节 PD 控制器的参数都使得最大迟滞非线性误差由原来的 14% 降低到 2% 以内, 提高了压电驱动器的定位精度.

4 结语

由于压电陶瓷具有分辨率高、体积小、输出力大、频响高、不发热等诸多优点而被用作 ARM 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. 原来的控制方法有的简单易实现但不能有效消除迟滞蠕变的影响, 图像失真严重, 有的算法复杂, 成本高而且计算量大, 不利于实时处理. 本研究采用一种补偿压电陶瓷迟滞和蠕变非线性特性的一种简单有效的方法, 该方法将迟滞与蠕变分开处理, 方法简单, 降低了对控制系统处理器的要求, 能够降低设备成本.

参考文献:

- [1] 范伟, 余晓芬. 压电陶瓷驱动器蠕变特性的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1383 - 1386
- [2] 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.
- [3] 王岳宇, 赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1032 - 1040.
- [4] 李黎, 刘向东, 王伟, 等. 压电陶瓷执行器迟滞特性的广义非线性 Preisach 模型及其数值实现 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 706 - 712.
- [5] Devasia S, Eleftheriou E, Moheimani S O R. A survey of control issues in nanopositioning [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(5): 802 - 823.

(责任编辑: 郑美莺)