

# 基于压电扫描管动态特性分析的 AFM 成像方法研究<sup>①</sup>

董晓坤<sup>②</sup> 方勇纯<sup>③</sup> 周娴玮 张玉东

(南开大学信息技术科学学院机器人研究所 天津 300071)

**摘要** 针对原子力显微镜(AFM)在高速扫描下成像误差大的缺点,提出了一种基于压电扫描管动态特性的改进成像方法,并对这种成像方法的性能进行了理论分析和实验验证。分析和实验结果表明,该成像方法可以较好地处理压电扫描管的动态特性,有效地提高 AFM 在 Z 方向上的成像精度,因此得到的扫描图像能够更加真实地反映样品的形貌。

**关键词** 原子力显微镜, 成像技术, 压电扫描管, 动态特性

## 0 引言

原子力显微镜(AFM),因不受被观测样品材料导电性的限制而得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。其基本工作原理是使用末端带有探针的微悬臂在被探测样品表面逐行进行扫描,然后对扫描得到的信号进行处理获得样品表面的形貌信息<sup>[3,4]</sup>。但是,目前的 AFM 只能在较低的扫描速度下实现纳米级的测量精度,所以必须对 AFM 进行改进后才能扩展其应用<sup>[5-7]</sup>。提高 AFM 扫描速度的方法主要有 3 种:在 Z 方向上使用具有更高共振频率的压电陶瓷,通过缩短响应时间来提高扫描速度<sup>[8]</sup>;采用集成了执行器的微悬臂阵列来扫描样品,通过一种类似于并行处理的方式来缩短对样品的扫描时间<sup>[9]</sup>;采用更为合理的控制策略和成像方法来提高扫描速度和成像精度<sup>[10]</sup>。前两种方法需要利用特殊器件来实现,因此成本高,设计复杂,很难在实际系统中得到应用。

通过分析 AFM 的基本组成结构及其各部件的特性可知,压电扫描器的动态特性是限制 AFM 扫描速度与精度的主要原因之一<sup>[11]</sup>。对于现有的 AFM 而言,成像时一般不考虑压电扫描管的动态特性,而是将其作为稳态数据进行处理来获取样品的表面形貌。所以,这种成像方法只有在低速扫描时才能得到较为可靠的测量数据。而对于高速扫描而言,由于探针在各个扫描点上停留的时间很短,因此在扫描过程中,压电扫描管无法达到稳定状态,此时如果忽略压电扫描器的动态特性将严重地影响 AFM 的测量性能。基于这种考虑,本文针对 AFM 的高速扫

描模式,提出了一种基于压电扫描管动态特性分析的成像方法,并从理论上对这种成像方法的性能进行了分析,最后利用实验数据验证了该成像方法的优良性能。

影响成像精度的另一个重要因素是压电扫描管的迟滞特性,其在 X、Y 方向上的定位误差也会使图像发生畸变。为更好体现动态特性成像方法的优越性,本文的分析过程都是基于压电扫描管在 X、Y 方向的迟滞非线性得到有效补偿<sup>[12]</sup>的基础上进行的。

## 1 AFM 成像原理及其改进方法

### 1.1 现有成像方法的主要缺陷分析

对于当前的 AFM 系统而言,通常是在比例-积分(PI)闭环控制的基础上,使用压电陶瓷在 Z 方向的输入信号  $u$  与光斑的反馈信号  $v$  来对样品表面成像,一般采用如下静态的线性成像方法:

$$h = k \cdot (\pm u + v/k_{\text{sens}}) \quad (1)$$

其中,  $h$  为样品表面的形貌高度,  $u$  是为了在恒力模式下使探针跟踪样品表面所需要的压电陶瓷的输入信号,其正负极性由 AFM 在 Z 方向上的执行器结构决定:当执行器在扫描管上时为负,若集成在微悬臂上则为正,本课题选用的 AFM 属于前者;  $v$  是光斑的反馈信号,将它作为修正项,可以在一定程度上弥补扫描速度过快时的控制误差;  $k_{\text{sens}}$  为系统开环时从输入  $u$  到输出  $v$  的灵敏度系数;  $k$  为压电陶瓷管 Z 方向上的伸缩系数,这两个系数可以通过标定预先得到。

由于压电陶瓷的响应速度比微悬臂探针系统的

① 国家自然科学基金(60574027)、天津市应用基础研究计划(07JCYBJC05400)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0210)资助项目。  
② 男,1984年生,硕士生;研究方向:原子力显微镜控制技术;联系人,E-mail: dongxk@robot.nankai.edu.cn  
③ 通讯作者,E-mail: yfang@robot.nankai.edu.cn  
(收稿日期:2007-05-08)

响应速度慢很多,所以压电执行器的动态特性是限制高速扫描成像的主要原因。此外,当扫描速度高于压电陶瓷的响应速度时,扫描过程中陶瓷管将无法达到稳态过程,此时采用上述线性成像方法就无法正确地反映样品 Z 方向上的真实形貌。

### 1.2 AFM 成像系统中的信号分析

在高速扫描时,压电陶瓷实际上处于暂态过渡阶段。因此,如果在成像过程中考虑压电陶瓷的动态特性,利用其 Z 方向上的动态模型  $G_1(s)$  来计算其真实形变量,则可以更加准确地表达样品的形貌信息。

#### 1.2.1 探针-样品-扫描管的关系

当利用 AFM 对样品进行探测时,探针-样品-扫描管的关系示意图如图 1 所示。

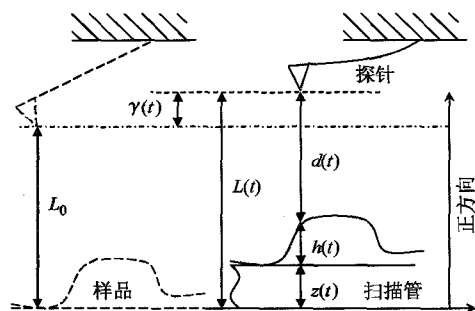


图 1 探针-样品-扫描管的关系示意图

扫描前,将探针与样品慢慢逼近,接触后将激光接收器调零,此时的位置为样品与探针的初始位置,如图中虚线所示。而开始扫描后的位置为图中实线所示。

其中变量  $\gamma(t)$  为微悬臂相对于初始位置(如图 1 中点划线)的形变量,  $d(t)$  为探针与样品之间的距离,  $h(t)$  为样品的形貌变化,  $z(t)$  为压电陶瓷在 Z 方向上的位移量。初始位置时,设探针到压电陶瓷零位移的距离为  $L_0$ , 探针与样品间的距离为  $d_0$ , 二者均为常量,并且此时有  $z(0) = 0, h(0) = 0, d(0) = d_0, \gamma(0) = 0$ 。

为了统一图中各个变量的正负符号,以压电陶瓷 Z 方向零位移处为基线,建立坐标系如图 1 所示,其中,横坐标轴指向为扫描方向,纵坐标轴指向为各变量的正方向。

在扫描过程中,一方面从探针-样品-扫描管的关系,可以得到探针到压电陶瓷零位移处的距离  $L(t)$  为

$$L(t) = d(t) + h(t) + z(t)$$

另一方面,从微悬臂相对于初始位置的形变考虑,又有

$$L(t) = L_0 + \gamma(t)$$

则有

$$L_0 + \gamma(t) = d(t) + h(t) + z(t)$$

为了简化模型,暂不考虑探针-样品系统中力-距离的非线性因素,将其相互作用力  $f(d)$  在位置  $d_0$  进行线性化后得到  $f[\Delta d(t)] = k_2 \cdot \Delta d(t)$ 。这里  $f[\Delta d(t)]$ 、 $\Delta d(t)$  的意义均为  $f(d_0)$ 、 $d_0$  的相对变化量,有  $d(t) = d_0 + \Delta d(t)$ , 代入上式则有

$$L_0 + \gamma(t) = d_0 + \Delta d(t) + h(t) + z(t) \quad (2)$$

在初始位置处时,将  $z(0) = 0, h(0) = 0, d(0) = d_0, \gamma(0) = 0$  代入上式中可以得到

$$L_0 = d_0$$

则在扫描过程中,式(2)可简化为

$$\gamma(t) = \Delta d(t) + h(t) + z(t) \quad (3)$$

#### 1.2.2 AFM 系统模型 $G(s)$ 与压电陶瓷动态模型 $G_1(s)$ 的关系

AFM 系统中信号流程示意图如图 2 所示,其中  $G_1(s)$  为压电陶瓷 Z 方向上的动态特性,  $u(t)$  为压电陶瓷 Z 方向的控制输入电压,  $U_a(t)$  表示经过电压放大器之后的实际电压,  $f(d(t))$  表示探针与样品之间的作用力,最终的反馈信号则为光电管的输出  $v(t)$ , 而变量  $z(t), h(t), d(t), \gamma(t)$  的定义与图 1 一致。

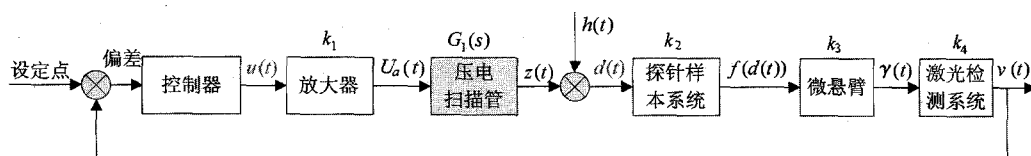


图 2 AFM 信号流程示意图

鉴于实验条件限制,我们无法直接获得压电陶瓷的动态特性  $G_1(s)$ , 但是可以得到系统中由输入  $u(t)$  到输出  $v(t)$  的开环动态模型  $G(s)$  :

$$G(s) = \frac{V(s)}{U(s)} \quad (4)$$

在开环实验过程中,输入  $u(t)$  和输出  $v(t)$  均可以

采集得到,因此通过模型辨识可以建立系统的模型  $G(s)$ 。在此基础上,我们可以利用  $G(s)$  来间接获得压电扫描管的动态特性  $G_1(s)$ 。

由于压电陶瓷的响应速度比探针-样品系统、微悬臂探针系统和激光监测系统的响应速度慢很多,这里我们不考虑后三者的动态特性,简化其传递函数分别为  $k_2, k_3, k_4$ 。

由以上分析以及图2的结构可知,信号  $u(t)$  与  $z(t)$  之间满足如下关系:

$$Z(s) = U(s) \cdot k_1 \cdot G_1(s) \quad (5)$$

同时,从  $\Delta d(t)$  到  $v(t)$  有:

$$V(s) = \Delta D(s) \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \quad (6)$$

因此,根据图2所示的信号流程图和式(5)、式(6)可知:如果能分析得到中间环节  $z(t)$  到  $\Delta d(t)$  的传递函数,则可以由  $G(s)$  间接求出  $G_1(s)$ 。

在辨识 AFM 系统的模型  $G(s)$  时,由于探针沿样品表面不做运动,探针仅在同一个扫描点上做  $Z$  方向上的移动,因此,无需考虑样品形貌变化,可以设置  $h(t) = 0$ ,代入式(3)并结合图2,则可以得到从  $z(t)$  到  $\Delta d(t)$  的关系如下:

$$z(t) = \gamma(t) - \Delta d(t) = (k_2 k_3 - 1) \cdot \Delta d(t)$$

其对应的传递函数为:

$$\Delta D(s) = \frac{1}{k_2 k_3 - 1} Z(s) \quad (7)$$

将式(5)、(6)、(7)代入式(4)并进行整理后,可得 AFM 系统的动态模型如下:

$$G(s) = k_1 \cdot G_1(s) \cdot \frac{1}{k_2 k_3 - 1} \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$$

则压电扫描管的动态模型为

$$G_1(s) = \frac{(k_2 k_3 - 1) \cdot G(s)}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4} \quad (8)$$

$k_1, k_2, k_3, k_4$  均为图2中所示的系统常数。

### 1.3 根据压电扫描管动态特性计算形貌信息

在正常扫描过程中,结合图2,将压电扫描管动态特性式(8)代入式(3)中可以得到:

$$\begin{aligned} h(t) &= \gamma(t) - z(t) - \Delta d(t) \\ &= (k_2 k_3 - 1) \cdot \Delta d(t) \\ &\quad - L^{-1}(U(s) k_1 G_1(s)) \\ &= \frac{(k_2 k_3 - 1)}{k_2 k_3 k_4} (v(t) - L^{-1}(U(s) G(s))) \end{aligned}$$

由于在扫描过程中  $k_2, k_3, k_4$  均为常数,因此样品的相对形貌可由公式

$$h(t) = k_v \cdot (v(t) - L^{-1}(U(s) G(s))) \quad (9)$$

来表示,其中,  $k_v = (k_2 k_3 - 1) / k_2 k_3 k_4$  为激光检测

系统的静态增益。为了与传统的成像方法相比较,将  $k = k_v \cdot k_{sens}$  代入式(1)得到

$$h(t) = k_v \cdot (v(t) - u(t) \times k_{sens}) \quad (10)$$

将式(9)与(10)相比较后可知:改进后的方法用包含压电陶瓷动态特性的  $L^{-1}(U(s) G(s))$  项代替了  $u(t) \times k_{sens}$  项,因此在快速扫描过程中可以得到更为准确的样品图像。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验平台

为获取最原始的控制信号以利于成像,我们在本原 CSPM4000 系列原子力显微镜 的基础上,搭建起一个基于 PC 的 RTLinux 实时控制平台,其控制周期为  $50\mu s$ 。基于该实验平台,在开环条件下辨识得系统模型如下<sup>[13]</sup>:

$$G(z) = \frac{C(z)}{R(z)}$$

其中:

$$\begin{aligned} C(z) &= -0.00011z^4 + 0.001512z^3 + 0.01062z^2 \\ &\quad + 0.01057z^1 - 0.0008574 \\ R(z) &= z^5 - 0.9979z^4 - 0.6761z^3 + 0.6541z^2 \\ &\quad + 0.5269z^1 - 0.3975 \end{aligned}$$

在该平台下,合成图像所需数据的采集过程为:首先关闭厂商的控制器,仅利用自己的控制平台对  $Z$  方向上进行 PI 控制,然后调节好 PI 参数使得控制效果为最佳,对样品光栅进行扫描,并由 PC 同时记录下输入数据  $u$  和输出数据  $v$ 。

### 2.2 实验结果分析

实验选用的扫描探针型号为 CSC21/AIBS ( $\mu$ Masch Inc. USA, 具体参数:针尖曲率半径小于  $10nm$ ,微悬臂长度  $110\mu m$ ,微悬臂宽度  $40\mu m$ ,微悬臂厚度  $1\mu m$ ,固有频率  $105kHz$ ,力常数  $2N/m$ ),扫描样本为一维光栅(台阶高度  $100nm \pm 10nm$ ,  $\mu$ Masch Inc., USA)。

在具体扫描过程中, $X$ 、 $Y$  方向的迟滞通过逆补偿得到有效控制。扫描图像分辨率均为  $512 \times 512$  像素,扫描范围  $3500nm \times 3500nm$ 。将在闭环控制下采集得到的数据分别利用式(9)和(10)进行成像,得到的结果如图3~图5所示。

图3记录了扫描频率为  $15Hz$  的局部形貌高度数据,其中黑色实线为采用式(9)的动态成像曲线,而虚线为利用式(10)的传统静态成像曲线。图4为扫描频率  $20Hz$  时的局部形貌高度数据,而图5为其合成图像。

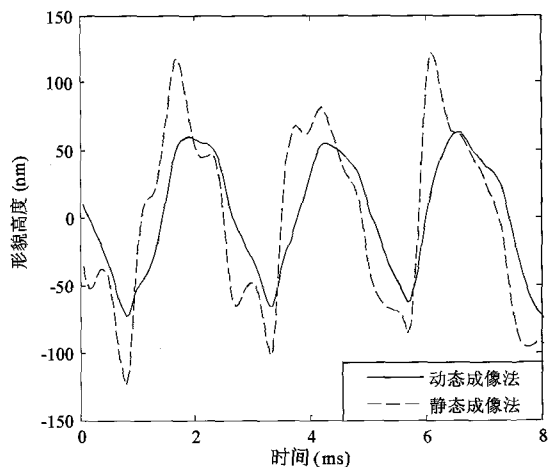


图3 扫描频率为 15Hz 时的局部成像曲线的对比

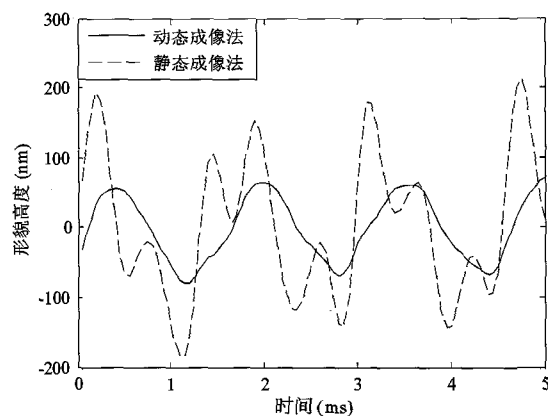
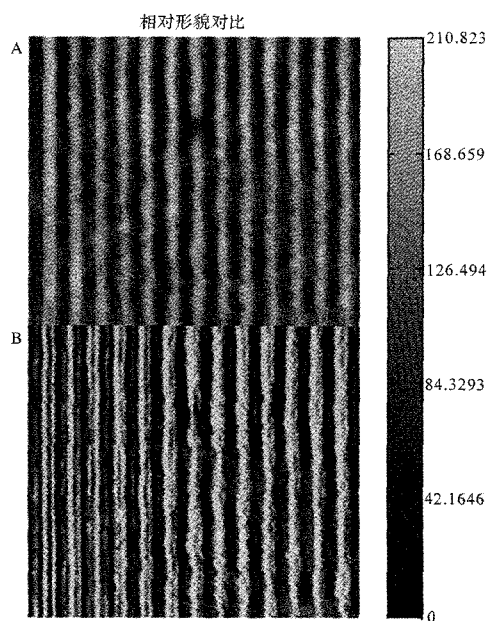


图4 扫描频率为 20Hz 时的局部成像曲线的对比



A 为加入动态特性的形貌, B 为没有加入动态特性的形貌,单位为 nm, 扫描方向为自左到右

图5 两种成像方法的形貌对比

从图 3 和图 4 中可以看出,传统的静态成像方法在光栅的上下跳沿处出现了超调,并且随着扫描速度的提高,超调也明显增大,甚至出现了一定程度振荡;而利用本文的成像方法得到的曲线在光栅上下跳沿的超调明显减小,更加接近于真实光栅的形貌曲线。此外,这种成像方法得到的曲线具有 300 $\mu$ s 左右的滞后,较为真实地反映出了压电陶瓷 Z 方向上的动态响应时间。

图 5 中记录了 20Hz 下利用全部扫描数据合成后得到的光栅形貌对比图。其中, B 为传统的成像方法得到的结果,经统计其台阶高度大部分分布在 200 ~ 320nm 范围,其在光栅跳沿处有着明显的超调振荡,其视觉效果为光栅高低平台出现了条纹和斑点,而在采用本文提出的方法得到的扫描图像(图 5A)中,台阶高度大部分分布在 90 ~ 150nm 之内,在光栅跳沿处的超调则明显减小,并且振荡消失。这种标准光栅的台阶高度约为 100nm,因此利用本文提出的方法得到的图像更加符合样品的真实形貌。

表 1 对比了分别用两种方法成像时光栅台阶的平均高度。从该表中可以看出:传统静态成像方法由于超调将使样品的台阶虚假偏高,并且误差随扫描频率的加快而逐步增加;与之相比较,改进后的动态特性成像方法可以较好地解决这种虚假偏高问题。此外,对于同一个样品,台阶高度在不同的扫描频率下基本保持不变,证明改进后的成像方法具有较高的可靠性,可以应用于高速扫描成像。

表 1 不同扫描频率下光栅成像的台阶平均高度

扫描频率/Hz	传统的静态成像方法/nm	加入动态特性的成像方法/nm
10	159	126
15	185	126
20	267	136

上述实验结果表明,在以 15Hz、20Hz 的高速扫描方式下,本文所提出的成像方法可以较好地处理压电扫描管的动态特性,因此得到的扫描图像能够更加真实地反映样品的形貌。但是,由于实验过程中采用带宽较窄的 PI 控制,对于更高扫描速度的成像的改善还不够理想,这是因为在形貌产生突变时,PI 控制方法不能及时将系统的输出稳定在设定点。后续研究中将采用更为先进的控制方法来缩短系统的过渡时间,在这种情况下,本文提出的成像方法应

能体现出更为明显的改进效果。

### 3 结论

本文针对原子力显微镜在高速扫描情况下成像误差大的缺点,提出了一种基于压电扫描管动态特性的改进成像方法,并从理论上对这种方法的性能进行了分析,最后利用实验数据对这种成像方法的实际效果进行了验证。通过实验结果表明:在相同的实验条件下,加入压电扫描管动态特性的成像方法,能够更加真实地反映样品的形貌。而由于PI控制器的带宽限制,对于更高扫描速度的精确成像还有赖于更好的控制策略,这也是我们下一步的工作方向。

#### 参考文献

- [ 1 ] Binnig G, Quate C, Gerber C. Atomic force microscopy. *Physical Review Letters*, 1986, 56(9): 930-933
- [ 2 ] 师晓丽, 余军平, 江雅新等. 原子力显微镜在生物医学研究中的应用. *基础医学与临床*, 2006, 26(7): 694-696
- [ 3 ] 白春礼, 田芳, 罗克. 扫描力显微术. 北京: 科学出版社, 2000. 7-150
- [ 4 ] 周娴玮, 方勇纯. 原子力显微镜中压电扫描器的非线性特性研究. 见: 2005年中国智能自动化会议论文集, 青岛, 2005. 1052-1057
- [ 5 ] 周保康. 原子力显微镜形貌像成像质量的研究. 山东科技大学学报(自然科学版), 2006, 25(3): 42-45
- [ 6 ] Zou Q, Leang K, Sadoun E, et al. Control issues in high-speed AFM for biological application: Collagen imaging example. *Asian Journal of Control*, 2004, 6(2): 164-178
- [ 7 ] You H, Lau X, Zhang S, et al. Atomic force microscopy imaging of living cells: a preliminary study of the disruptive effect of cantilever tip on cell morphology. *Ultramicroscopy*, 2000, 82: 297-305
- [ 8 ] Egawa A, Chiba N, Homma K, et al. High-speed scanning by dual feedback control in SNOM/AFM. *Journal of microscopy*, 1999, 194: 325-328
- [ 9 ] Minne S C, Yaralioglu G, Manalis S R, et al. Automated parallel high-speed atomic force microscopy. *Applied physics letters*, 1998, 72: 2340-2342
- [ 10 ] Schitter G, Menold P, Knapp H F. High performance feedback for fast scanning atomic force microscopes. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(8): 3320-3327
- [ 11 ] Schitter G, Stark R W, Stemmer A. Fast contact-mode atomic force microscopy on biological specimen by model-based control. *Ultramicroscopy*, 2004, 100(3-4): 253-257
- [ 12 ] Zhang Y D, Fang Y C, Zhou X W, et al. Image-based hysteresis modeling and compensation for piezo-scanner utilized in AFM. In: *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology*, Hong Kong, 2007. 90-95
- [ 13 ] Zhou X W, Fang Y C, Dong X K, et al. System modeling of an AFM system in Z-axis. In: *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology*, Hong Kong, 2007. 96-99

## An AFM imaging method based on analysis of piezo-scanner's dynamic characteristic

Dong Xiaokun, Fang Yongchun, Zhou Xianwei, Zhang Yudong

(Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300071)

#### Abstract

An improved imaging method based on the piezo-scanner's dynamics was presented to remedy high-speed scanning atomic force microscopes (AFMs)' fault of imprecise imaging along Z direction. The performance of the method was analysed theoretically and verified by experiment. The results showed that the method had the advantage in processing dynamic characteristics of the piezo-scanner and the effectiveness in improvement of AFM's imaging precision along Z direction, and the scanning images it gave reflected the real topography of the sample being observed.

**Key words:** atomic force microscopy, imaging technology, piezo-scanner, dynamic characteristic