

一种基于临近点集数据融合的 AFM 动态成像方法

董晓坤¹ 方勇纯¹ 张玉东¹

摘要 原子力显微镜 (Atomic force microscopy, AFM) 是纳米技术和纳米操作领域中最重要研究工具之一. 本文针对扫描成像的原子力显微镜, 提出了一种改进的 AFM 动态成像方法, 该方法分析了 AFM 系统中样品与针尖之间的非线性力对成像精度的影响, 通过对扫描过程中获得的成像数据进行融合滤波, 有效地提高了快速 AFM 的成像精度. 具体而言, 论文首先分析了原子力显微镜当前成像方法存在的主要问题, 然后针对在高速扫描或者样品形貌高度有突变时, 因 AFM 系统中非线性因素而引起的成像误差, 提出了一种基于临近点集数据融合的改进动态成像方法, 以提高 AFM 对于样品表面形貌的成像精度. 最后分别利用原子力显微镜仿真平台数据和实验数据, 验证了本文提出的改进成像方法的性能.

关键词 原子力显微镜, 扫描成像技术, 数据融合, 滤波技术, 动态特性

DOI 10.3724/SP.J.1004.2011.00214

An Improved AFM Dynamic Imaging Method Based on Data Fusion of Neighboring Point Set

DONG Xiao-Kun¹ FANG Yong-Chun¹ ZHANG Yu-Dong¹

Abstract The atomic force microscopy (AFM) is an important tool in the field of nanotechnology and nanomanipulation. Based on the filtering and data fusion methods, this paper proposes an innovative imaging method to enhance the imaging precision of AFM along the Z direction. Specifically, this article first introduces the common imaging method utilized by commercial AFMs, then presents an improved dynamic imaging method based on data fusion of neighboring point set to deal with the large imaging error along the Z direction due to the AFM nonlinear characteristics when scanning a highly coarse surface or scanning with a high speed. Finally, some simulation and experimental results are included to demonstrate the superior performance of the proposed imaging method.

Key words Atomic force microscopy (AFM), imaging technology, data fusion, filtering technology, dynamics

原子力显微镜 (Atomic force microscopy, AFM) 自 1986 年问世以来^[1], 由于其具有成像精度高, 能够三维实时成像, 不受样品导电性限制, 可以在大气、液体等多种环境下操作等优点, 已经被广泛应用于材料、物理、化学、生物医药等纳米科学研究领域中, 现在已成为纳米技术和纳米操作领域中一种重要的研究工具^[2].

原子力显微镜的基本工作原理为: 使用末端带有微小探针 (针尖曲率半径约十几个纳米) 的微悬臂在被探测样品表面逐行进行扫描, 由于样品表面形貌起伏以及探针与样品之间微弱的相互作用力, 微悬臂会发生微形变. 通过激光位移检测装置测量出这种微形变, 再由闭环反馈系统调节压电执行器 Z

方向的位移, 使得样品表面与探针针尖之间的相互作用力维持恒定, 同时记录 Z 方向的控制电压信号, 最后对这些信号进一步处理就可以获得样品表面的形貌信息.

目前, 虽然原子力显微镜在纳米观测中已经得到了广泛应用, 但是它一般只能在较低的扫描速度下实现纳米级的测量精度^[3-5], 很难将其应用于监测生物等快速反应过程. 因此, 近几年来, 如何提高原子力显微镜高速扫描时的成像精度就成为当前的一个研究热点. 在形貌估计方法研究方面, 美国伊利诺伊大学的 Salapaka 等^[6] 设计了一个接触模式下基于 H_{∞} 鲁棒控制的形貌观测器来估计形貌. 日本学者 Shiraishi 等^[7] 则通过改进形貌观测器中的动态模型, 来提高样品表面形貌的观测精度. 而美国爱荷华州立大学 (Iowa State University) 的 Sebastian 等^[8] 设计了一种在轻敲模式下的暂态成像方法, 该方法使用状态观测器和卡尔曼滤波, 从暂态数据中估计样品与针尖距离的变化量, 进而计算出样品形貌高度.

现有的成像方法, 是建立在针尖与样品间的作用力和距离成线性化关系的假设之上的^[9]. 实际上,

收稿日期 2010-06-12 录用日期 2010-08-26
Manuscript received June 12, 2010; accepted August 26, 2010
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2009AA043703), 国家自然科学基金 (60875055) 和天津市自然科学基金 (08JCZDJC21800)
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2009AA043703), National Natural Science Foundation of China (60875055) and Natural Science Foundation of Tianjin (08JCZDJC21800)
1. 南开大学机器人与信息自动化研究所 天津 300071
1. Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300071

针尖与样品之间的作用力非常复杂, 包括了范德华力等多种非线性作用力, 而线性假设仅仅当两者之间的距离变化较小时成立. 当应用 AFM 扫描样品时, 如果样品形貌变化较缓, 则闭环控制器可以使得探针与样品之间的距离维持在线性化的有效范围之内, 因此可以较好地获得样品的形貌. 而当样品形貌高度变化较大, 即出现突变的时候 (例如光栅表面形貌), 此时控制器无法立即将探针与样品间的距离调节到设定值附近, AFM 系统将呈现出很强的非线性特性, 如果仍然忽略这些特性则将严重影响成像精度. 针对这种情况, 本文提出了一种基于临近点集数据融合的改进动态成像方法, 该方法依据控制误差来分析与之对应的成像数据的可靠性, 并通过对所选定临近点集内的数据进行融合滤波之后再行成像, 有效地提高了成像精度. 最后论文分别用 AFM 虚拟系统三种样品形貌的仿真数据和扫描实际样品获得的实验数据, 验证了这种改进动态成像方法的优良性能.

本文其他部分组织如下: 第 1 节分析了当前原子力显微镜的成像方法以及存在的主要问题; 第 2 节提出了一种改进的动态成像方法; 第 3 节分别利用仿真数据和实验结果来验证这种改进动态成像方法的性能; 第 4 节为本文的研究结论.

1 原子力显微镜现有成像方法及其缺陷分析

图 1 为原子力显微镜成像系统的信号流程图, 它包括以下几个组成部分: 控制器、压电扫描管、AFM 微悬臂探针系统以及激光位移检测系统, 其对应的信号分别为控制信号 u , 压电扫描管 Z 方向的伸缩量 z , 探针与样品之间的间距 d , 以及微悬臂末端的形变量 γ . 由于在实际的 AFM 系统中, 无法直接获得与样品形貌 h 相关的信号量 z 、 d 以及 γ , 所以当前原子力显微镜系统都是通过间接方式来得得到样品形貌. 一般是采用压电扫描管上的控制输入信号 u 与激光位移检测系统的反馈信号 v 来共同表征样品的表面形貌.

现有的成像方法主要是静态成像方法, 它通过将控制信号和反馈信号进行线性叠加来获取形貌信

息, 这是一种非常简单, 也是当前使用最广泛的成像方法, 其具体成像公式为:

$$h = k \left(\pm u + \frac{v}{k_{sens}} \right) \quad (1)$$

其中, h 为样品的形貌高度, u 是为了使探针跟踪样品表面所需要的压电驱动器的输入电压信号, 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 是激光反馈信号, 它反映了微悬臂的形变, 在静态成像公式中, 将它作为修正项, 可以在一定程度上弥补扫描速度快时的控制误差; k_{sens} 为系统开环时从输入 u 到输出 v 的灵敏度系数; k 为压电扫描管 Z 方向上的伸缩系数, 这两个系数可以通过标定预先得到.

理论分析和实验结果表明: 式 (1) 表示的静态成像方法仅仅能在较慢的扫描速度下对样品实现准确成像, 它的有效性依赖于以下前提条件:

条件 1. AFM 的闭环控制系统具有足够快的响应速度. 即在扫描过程中, 当样品或者微悬臂移动时, 探针在每一个扫描点上都能及时稳定至设定点, 因此要求原子力显微镜的扫描速度不能高于压电扫描管的响应速度.

显然, 静态成像方法没有考虑压电扫描管等环节的动态特性, 它将控制输入信号作为稳态数据进行处理来获取样品的表面形貌. 由于压电执行器的响应速度较慢, 所以在快速扫描时它无法达到稳态. 若在快速扫描时忽略这种动态特性, 就难以反映样品的真实形貌.

条件 2. AFM 可以近似当做线性系统进行处理. 但是, 研究表明: 原子力显微镜系统具有很强的非线性特性^[3, 5], 特别是探针与样品之间的力 (F)-距离 (d) 关系非常复杂, 通常采用以下的非线性 Derjaguin-Muller-Toporov (DMT) 模型来描述:

$$f(d) = \begin{cases} -\frac{HR}{6d^2}, & d \geq a_0 \\ -\frac{HR}{6a_0^2} + \frac{4E^*}{3}\sqrt{R}(a_0 - d)^{\frac{3}{2}}, & d < a_0 \end{cases} \quad (2)$$

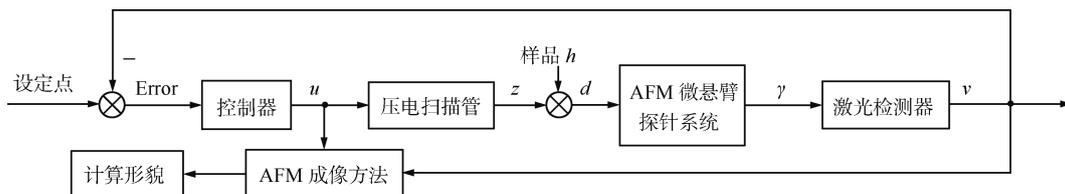


图 1 原子力显微镜成像系统信号流程图

Fig. 1 Signal flow chart of the AFM imaging system

其中, H 为 Hamaker 常数, R 为探针针尖的曲率半径, a_0 为临界距离, E^* 为探针和样品间的有效弹性模量, 由探针和样品的材质共同决定. 图 2 为该模型的力-距离曲线.

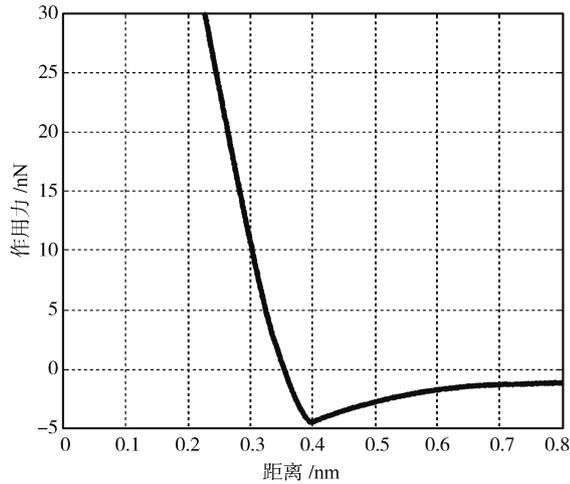


图 2 基于 DMT 模型的力-距离曲线

Fig. 2 Force-distance curve based on DMT model

在扫描速度较慢时, Z 方向上的闭环控制误差较小, 此时, 力-距离曲线的非线性特性对于线性成像方法的影响很小; 若扫描速度加快或样品形貌有突变时, 则会产生较大的控制误差, 此时力-距离曲线的非线性将会严重影响线性成像方法的精度.

2 改进的动态成像方法

2.1 动态成像方法

动态成像方法是指在成像过程中考虑了压电扫描管 Z 方向上动态特性的成像方法^[9].

在 AFM 成像系统结构图中, 探针-样品系统模型见式 (2), 易知其为复杂的非线性关系, 但是, 在闭环控制扫描方式下, 如果控制误差较小, 则样品与探针针尖之间的距离相对恒定, 因此可将非线性力 $f(d)$ 在平衡位置 d_0 处进行线性化, 并近似认为在扫描过程中, 针尖与样品之间的力-距离曲线在 $[d_0 - \Delta d, d_0 + \Delta d]$ 的区间范围内符合线性关系. 微悬臂系统可等效为弹簧振子, 其共振频率一般为几十 kHz 到几百 kHz, 可近似为比例环节. 作为反馈环节, 激光检测器的响应速度非常快, 与其他环节相比较, 其动态特性可以忽略, 因此在分析中通常将其当做比例环节进行处理. 执行器部分是压电扫描管, 其共振频率一般为几百 Hz 到几千 Hz.

由实验分析可知, 压电扫描管的响应速度比微悬臂-探针系统的响应速度慢很多, 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, 而压电扫描管可以体现原子力显微镜的主要动态特性.

在对系统模型进行线性化假设的基础之上, 可以用带比例增益的 AFM 开环系统模型来近似分析得到压电扫描管的动态模型^[10-11]. 在开环条件下, 使用基于子状态空间系统模型的 N4SID (Numerical algorithms for subspace state space system identification) 算法辨识出整个系统连续模型^[12].

得到系统动态模型之后, 通过分析原子力显微镜成像信号, 可得到融合压电扫描管动态特性的成像公式^[9]:

$$h = k_v (v - L^{-1}(U(s)G(s))) \quad (3)$$

其中, k_v 为激光检测系统的静态增益, 可以通过离线标定获得, $U(s)$ 为控制信号 u 的拉普拉斯变换, $L^{-1}(\cdot)$ 为反拉普拉斯变换. 与静态成像公式 (1) 相比较, 动态成像方法用包含压电扫描管动态特性的 $L^{-1}(U(s)G(s))$ 项代替了 u 项.

2.2 基于临近点集数据融合的动态成像方法

针对静态成像方法所面临的主要问题, 成像公式 (3) 考虑了压电扫描管 Z 方向上的动态特性 (即前提条件 1), 因此改善了快速扫描条件下原子力显微镜的成像精度. 然而, 对于前提条件 2, 以上方法仍依赖于线性化假设. 而由式 (2) 及图 2 可知, 探针-样品间的作用力与二者的间距之间存在着严重的非线性关系. 当扫描速度加快或者样品表面形貌有突变时, 会引起探针-样品间距 d 与平衡位置 d_0 之间的偏差超出成像公式 (3) 的线性化假设区间范围, 这使得二者之间的作用力出现剧烈变化, 从而产生大的反馈误差. 如果此时仍使用式 (3) 进行样品形貌估计, 将产生较大的成像误差, 而此时得到的形貌数据可靠性较差.

为此, 我们提出了一种基于临近点集数据融合的改进动态成像方法, 以便在快速扫描等情况下提高 AFM 对于样品表面形貌的成像精度. 从以上分析可知, 非线性力所引起的成像误差仅仅出现在控制误差较大的时候. 因此, 可以在控制误差较小时仍使用动态成像方法, 而在控制误差较大时, 由于当前扫描点的数据可靠性不高, 因此综合使用临近时间或空间内的数据来进行样品成像.

基于这种考虑, 我们将样品形貌的成像公式修改为如下形式:

$$h(k) = \sum_{i=1}^n \lambda_i^k \cdot h(k_i) + \lambda_0^k \cdot \hat{h}(k) \quad (4)$$

其中, $\hat{h}(k)$ 为利用动态成像公式 (3) 估计出来的当前位置点的形貌高度, $h(k_i)$ 为当前点 k 临近点集 $\Omega = \{k_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 中 k_i 点的形貌高度, 其中, n 为临近点的集合大小, $0 \leq \lambda_0^k \leq 1$ 为当前

扫描点的线性可信度因子, 可以理解为衡量在当前扫描点处, 系统状态处于线性化区间的可信程度, $0 \leq \lambda_i^k \leq 1$ 为相邻点 k_i 的滤波权值系数, 且满足

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i^k = 1 - \lambda_0^k$$

下面我们讨论如何选取合适的临近点集 Ω 以及 λ_0^k, λ_i^k 的计算方法.

1) Ω 的选取

考虑到对于一般的样品而言, 其表面的高低起伏平滑性较好, 因此临近点集 Ω 一般选取当前行和前几行中与当前点相邻的已经计算得到形貌高度的 n 个点.

2) λ_0^k 的计算

λ_0^k 为当前第 k 点动态成像数据的可信程度, 其选取原则如下: 显然, λ_0^k 的值应该与控制误差 *Error* 紧密相关. 当光斑的控制误差较小时, 说明当前控制效果较好, 系统处于线性化区间的可信度高, 故应使 $\lambda_0^k \rightarrow 1$; 而当光斑误差较大时, 则说明控制效果不理想, 此时估计成像的可信度较低, 因此应当减小 λ_0^k , 而综合分析临近时间或空间内的数据来估计样品形貌. 并且, 由于力-距离曲线的非线性特性的存在, λ_0^k 的取值应随 *Error* 成非线性变化.

仍然定义 $[-\Delta d, +\Delta d]$ 为探针-样品间距的线性化区间变化范围, 而 $[-\Delta v, +\Delta v]$ 则为所对应的激光光斑反馈信号的变化范围, 则可以选取如下所示的可信程度函数

$$\lambda_0^k = e^{-\frac{|Error(k)|}{\Delta v}} \quad (5)$$

显然, 式 (5) 符合以上分析的选取原则: 即当控制误差 $Error(k) = 0$ 时, $\lambda_0^k = 1$, 此时仍然采用通常的动态成像方法进行成像; 而当控制误差 $Error(k)$ 远超出区间 $[-\Delta v, +\Delta v]$ 时, λ_0^k 则急剧衰减为零, 此时综合采用多个数据来估计样品形貌.

分析仿真和实验结果可以得知: 当在平滑表面上扫描时, 控制器可以对 AFM 系统实施较为稳定的控制, 设此时控制误差的标准差为 σ , 则当 $\Delta v = 3\sigma$ 时, 改进后的成像方法 (4) 可以实现对非线性成像误差的有效抑制. 基于以上原因, 将 λ_0^k 选取为

$$\lambda_0^k = e^{-\frac{|Error(k)|}{3\sigma}} \quad (6)$$

3) λ_i^k 的计算

在成像公式 (4) 中, λ_i^k 为相邻点 k_i 形貌高度数据 $h(k_i)$ 的非线性滤波的权值系数, 由该相邻点对应

的线性可信度因子 λ_0^k 和空间遗忘因子 α_i 共同决定

$$\lambda_i^k = \frac{\lambda_0^k \cdot \alpha_i}{\sum_{i=1}^n (\lambda_0^k \cdot \alpha_i)} \cdot (1 - \lambda_0^k) \quad (7)$$

式中, 对相邻点的权值系数做了局部归一化处理. 空间遗忘因子 α_i 与该相邻点和当前点的空间距离有关, 距离越远则 α_i 值越小. 若定义当前点位置为 (x_k, y_k) , 相邻点的位置为其为 (x_{k_i}, y_{k_i}) , 则相邻点对应的空间遗忘因子的计算式为

$$\alpha_i = \frac{1}{(x_k - x_{k_i})^2 + (y_k - y_{k_i})^2} \quad (8)$$

从形式上看, 式 (4) 为一个非线性低通滤波器, 并且滤波器系数及带宽与线性化区间相关, 此时 λ_0^k 也可理解为时变的滤波器带宽因子, 当控制误差较小时, 带宽较大, 当前点所占的比重大; 而当控制误差较大时, 带宽减小, 则临近点集的加权均值所占的比重大.

后续实验结果表明: 这种改进后的动态成像方法, 不仅可以降低在样品剧烈起伏时, 由于忽略非线性力而带来的成像误差, 而且, 这种具有低通滤波器性质的数据融合方法, 也在一定程度上降低了扫描过程中测量噪声等对样品形貌估计的影响.

3 仿真及实验结果与分析

3.1 仿真结果与分析

为了测试本文所提出的基于临近点集数据融合的改进动态成像方法, 我们首先对其进行了仿真测试, 仿真时采用自行搭建的基于 Matlab/Simulink 的原子力显微镜仿真平台^[13]. 为了更好地测试对比这种成像方法的有效性, 仿真时分别采用梯形波、锯齿波、矩形波来模拟样品形貌高度的突变情况, 而三者的台阶高度均选择为 20 nm, AFM 扫描频率设置为 5 Hz, 仿真步长为 0.25 μ s, 在仿真过程中对激光反馈信号加入了 2.5% 的随机噪声. 临近点集 Ω 取为当前行的前两点以及当前列的前一点.

图 3~图 5 分别记录了利用梯形波、锯齿波和矩形波光栅形貌的仿真数据所合成的样品形貌曲线. 作为对比, 我们同时采用静态成像方法、改进前的动态成像方法和本文所提出的改进动态成像方法来合成功形貌曲线. 其中, 灰色点划线为使用静态成像公式 (1) 得到的成像曲线, 黑色虚线为利用动态成像公式 (3) 得到的成像曲线, 而黑色实线为改进后的动态成像公式 (4) 的成像曲线.

从图中可以看出: 总体而言, 三种成像方法在扫描过程中所得到的样品形貌曲线的台阶高度约为 20 nm, 与真实高度基本相符.

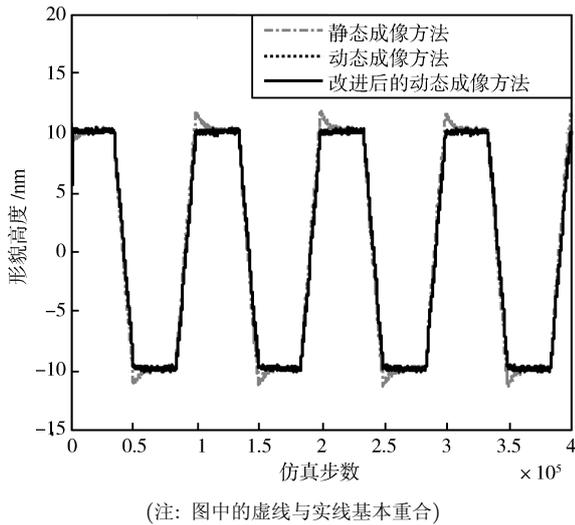


图 3 梯形光栅的仿真成像曲线对比

Fig. 3 The simulation imaging curves' comparison for trapezoid grating

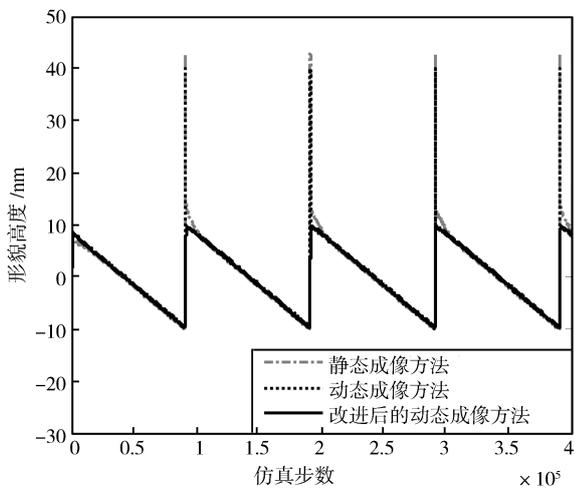


图 4 锯齿光栅的仿真成像曲线对比

Fig. 4 The simulation imaging curves' comparison for sawtooth grating

图 4 锯齿光栅的下降沿变化缓慢, 此时三种成像方法均可以反映样品真实形貌. 在如图 3 的梯形波的上下跳沿处, 与锯齿光栅下降沿相比样品形貌高度的变化率增大, 此时由于没有考虑压电扫描管的动态特性, 线性静态成像曲线 (图 3 中点划线) 呈现出约 2 nm 的超调, 而基于压电扫描管动态特性的动态成像方法 (图 3 中虚线) 和改进后的动态成像方法 (图 3 中实线), 则较好地抑制了超调偏差. 但是当样品形貌变化率继续增大时 (如图 4 和图 5 中的上升沿处), 由于形貌高度急剧变化, 使得探针样品的间距变化超出了力-距离关系的线性化区间, 因此普通的动态成像方法 (图 4 和图 5 中虚线) 仅仅缩

短了其偏差的过渡过程, 而成像偏差仍然较大. 图 4 和图 5 中的动态成像方法仍会产生大约 31 nm 的超调偏差, 而本文所提出的改进动态成像方法则非常有效地避免了超调偏差的产生, 从而明显地提高了样品的成像精度 (图 4 和图 5 中实线). 若定义台阶高度为上跳沿前后的峰峰值差, 则对于矩形光栅来说, 改进前静态成像方法的台阶高度约为 57 nm, 动态成像方法为 51 nm, 而改进后的动态成像方法则仍为 20 nm.

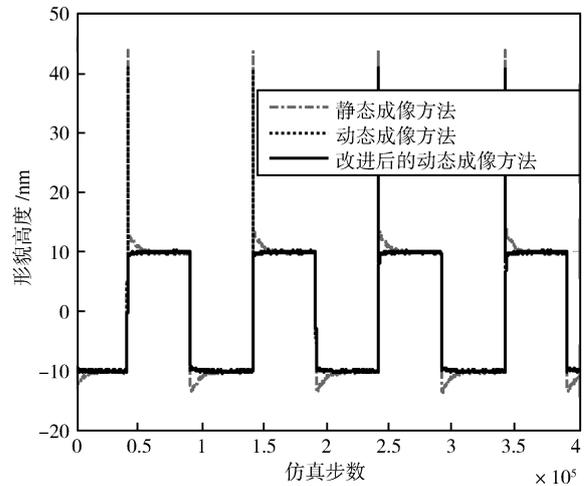


图 5 矩形光栅的仿真成像曲线对比

Fig. 5 The simulation imaging curves' comparison for rectangular grating

从这些仿真结果可以看出, 本文所提出的改进动态成像方法显著降低了由于力-距离的非线性因素所带来的成像误差.

3.2 实验结果与分析

为了进一步验证本文所设计的改进动态成像方法的性能, 我们利用 AFM 系统对实际样品进行了不同频率下的高速扫描实验. 实验平台为 本原公司的 CSPM4000 系列, 但其控制器是不开放的, 因此无法获得控制器的输出信号. 为此, 我们自行搭建了一个基于 PC 的 RTLinux 实时控制平台, 控制周期为 50 μs ^[14].

扫描的样品为一维标准光栅 TGZ02 (台阶高度为 84 nm \pm 1.5 nm, μmasch 公司, 爱沙尼亚), 设置扫描频率分别为 5 Hz 和 10 Hz, 扫描范围为 12000 nm \times 12000 nm. 将扫描样品得到的数据分别利用通常的静态成像方法, 改进前后的动态成像方法合成图像 (成像公式中的有关参数与仿真时的参数相同), 得到的结果如图 6 ~ 图 9 所示. 在成像时, 所选取的临近点集 Ω 为当前扫描行的前两个点以及当前列的前一点.

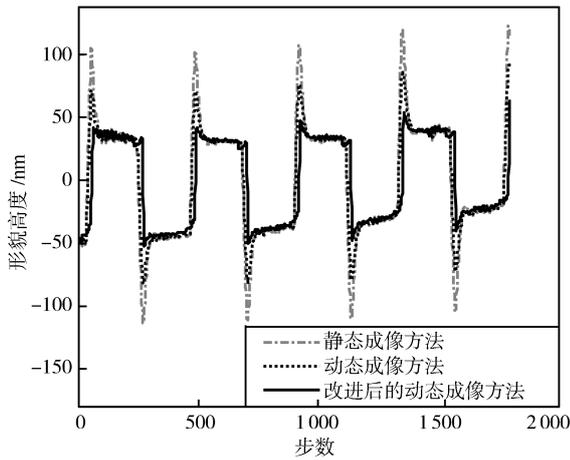


图 6 光栅在 5 Hz 扫描速度下的成像曲线对比

Fig. 6 Grating imaging curves' comparison with 5 Hz scanning speed

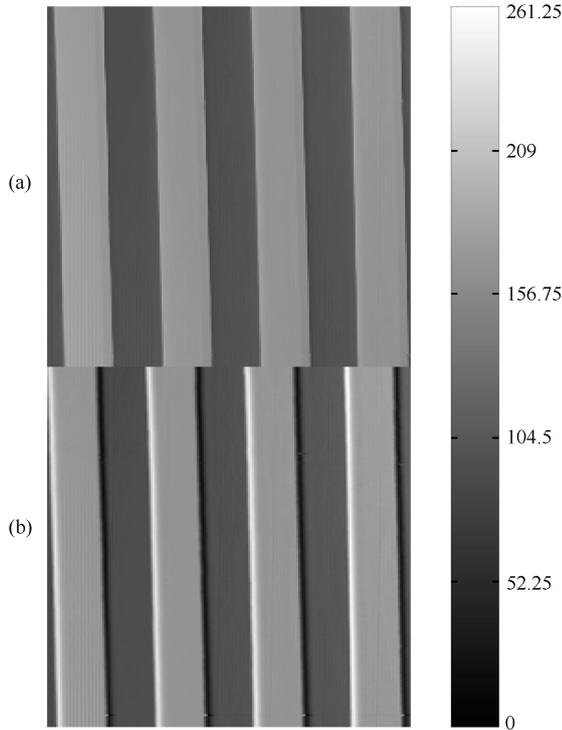


图 7 在 5 Hz 扫描速度下的光栅形貌对比图 ((a) 用改进的动态成像方法得到的形貌; (b) 用传统静态成像方法得到的成像形貌) (二者扫描方向均为自左到右, 单位: nm)

Fig. 7 Comparing images of grating topography with 5 Hz scanning speed ((a) The topography using improved dynamic imaging method; (b) The topography using traditional static imaging method) (The scanning directions are from left to right and the unit is nm.)

图 6 和图 8 分别记录了在 5 Hz 和 10 Hz 的扫描速度下光栅某一行的形貌高度曲线数据, 其中灰色点划线为根据静态成像公式 (1) 得到的成像曲线, 黑色虚线为采用动态成像公式 (3) 得到的曲线, 而黑

色实线为利用本文所设计的改进动态成像公式 (4) 得到的曲线. 从对比曲线中可以得到与仿真结果类似的结论: 利用本文提出的改进成像方法得到的形貌曲线, 在样品形貌突变处的超调偏差得到了明显抑制, 因此图像更加逼近于真实的光栅形貌曲线.

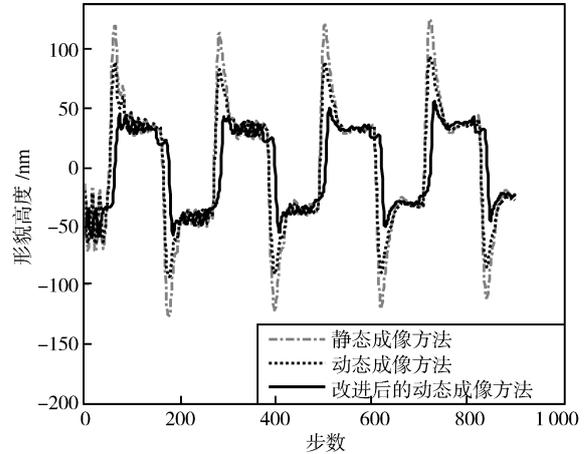


图 8 光栅在 10 Hz 扫描速度下的成像曲线对比

Fig. 8 Grating imaging curves' comparison with 10 Hz scanning speed

表 1 中统计了不同成像方法在不同扫描频率下成像时光栅台阶的平均高度. 从表中数据可以看出改进前的成像方法由于系统的探针-针尖的非线性力关系所引起的成像偏差较大, 并且台阶高度偏差随着扫描速度的加快而随之增大. 而改进后的方法明显地抑制了成像高度偏差, 计算得到的台阶高度也更加接近于真实高度.

表 1 不同扫描频率下光栅成像的台阶平均高度

Table 1 The average step heights of grating images at different scanning speeds

扫描频率 (Hz)	静态成像方法 (nm)	动态成像方法 (nm)	改进后的动态成像方法 (nm)
5	220.24	139.31	81.94
10	242.13	179.01	93.79

图 7 和图 9 分别为 5 Hz 和 10 Hz 的扫描速度下, 将全部数据逐行合成后所得到光栅形貌对比图像. 其中, 图 7 (b) 为传统成像方法所得到的光栅图像, 图 7 (a) 为采用本文所提出的改进方法所得到的光栅图像. 根据表 1 中统计数据得知, 由图 7 (b) 计算出的平均台阶高度为 220.24 nm (为峰峰值差), 可以看出在上跳沿线呈现高亮的超调条纹, 而在台阶下跳沿线则呈现低暗的超调条纹. 而利用改进后的动态成像方法得到的图 7 (a), 它的台阶统计平均高度为 81.94 nm, 在光栅台阶跳变处几乎看不出高亮

或低暗的超调条纹,更符合光栅的标称高度和真实形貌.

上述实验结果表明,本文提出的改进动态成像方法,可以较好地处理因系统的非线性特性而在形貌突变处产生的超调偏差,从而获得更为准确的样品形貌.

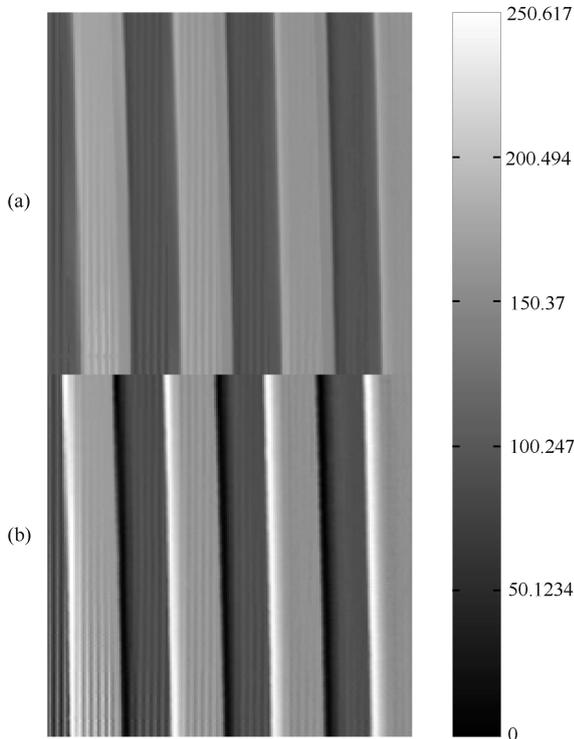


图 9 在 10 Hz 扫描速度下的光栅形貌对比图 ((a) 用改进的动态成像方法得到的形貌; (b) 用传统静态成像方法得到的成像形貌) (二者扫描方向均为自左到右, 单位: nm)

Fig. 9 Comparing images of grating topography with 10 Hz scanning speed ((a) The topography using improved dynamic imaging method; (b) The topography using traditional static imaging method) (The scanning directions are from left to right and the unit is nm.)

此外,对比图 7、图 9 可以看出,当扫描频率从 5 Hz 加快到 10 Hz 时,所得到的扫描图像呈现出规律的纵向条纹,并且自左到右逐渐减弱.这是由于此时扫描速度较快,使得压电扫描管在 X 轴的快扫方向上也呈现出其动态特性,从而引起扫描管在 Z 方向上也出现了规律的纵向条纹.而对应到成像曲线中(如图 8 所示),则表现为由强渐弱的小幅波动,这在一定程度上也增大了成像偏差.所以,在将来的研究中,若能补偿原子力显微镜在快扫方向上的动态特性,则本文所提出的改进的动态成像方法,在高速扫描下的成像精度会得到进一步提高.

4 结论

本文针对原子力显微镜在形貌突变情况下成像误差大的问题,提出了一种基于临近点集数据融合的改进动态成像方法,该方法能根据控制误差对系统非线性因素所引起的超调进行有效的滤波抑制.最后分别利用虚拟原子力显微镜平台的仿真数据和扫描实际样品的实验结果对这种成像方法的性能进行了验证.仿真及实验结果表明:在相同的实验条件下,本文所提出的改进动态成像方法,能够有效地抑制由于形貌突变和系统非线性因素引起的边沿跳变效应,获得的扫描图像能够更加真实地反映样品的实际形貌.

References

- Binnig G, Quate C, Gerber C. Atomic force microscopy. *Physical Review Letters*, 1986, **56**(9): 930–933
- Xi N, Fung C K M, Yang R G, Seiffert-Sinha K, Lai K W C, Sinha A A. Bionanomanipulation using atomic force microscopy. *IEEE Nanotechnology Magazine*, 2010, **4**(1): 9–12
- Bai Chun-Li, Tian Fang, Luo Ke. *Scanning Force Microscopy*. Beijing: Science Press, 2000 (白春礼, 田芳, 罗克. 扫描力显微术. 北京: 科学出版社, 2000)
- Yao Nan, Wang Zhong-Lin. *Handbook of Microscopy for Nanotechnology*. Beijing: Tsinghua University Press, 2006 (姚楠, 王中林. 纳米技术中的显微学手册. 北京: 清华大学出版社, 2006)
- Peng Chang-Sheng, Song Shao-Xian, Gu Qing-Bao. *Scanning Probe Microscopy Principles and Applications*. Beijing: Chemical Industry Press, 2007 (彭昌盛, 宋少先, 谷庆宝. 扫描探针显微技术理论与应用. 北京: 化学工业出版社, 2007)
- Salapaka S M, De T, Sebastian A. A robust control based solution to the sample-profile estimation problem in fast atomic force microscopy. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2005, **15**(16): 821–837
- Shiraishi T, Fujimoto H. Proposal of surface topography observer considering Z -scanner for high-speed AFM. In: Proceedings of the American Control Conference. Baltimore, USA: IEEE, 2010. 2754–2759
- Sebastian A, Sahoo D R, Salapaka M V. An observer based sample detection scheme for atomic force microscopy. In: Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. Maui, USA: IEEE, 2003. 2132–2137
- Dong Xiao-Kun, Fang Yong-Chun, Zhou Xian-Wei, Zhang Yu-Dong. An AFM imaging method based on analysis of piezo-scanner's dynamic characteristic. *Chinese High Technology Letters*, 2008, **18**(1): 54–58 (董晓坤, 方勇纯, 周娴玮, 张玉东. 基于压电扫描管动态特性分析的 AFM 成像方法研究. 高技术通讯, 2008, **18**(1): 54–58)
- Schitter G, Stemmer A. Model-based signal conditioning for high-speed atomic force and friction force microscopy. *Microelectronic Engineering*, 2003, **67–68**: 938–944
- Schitter G, Allgower F, Stemmer A. A new control strategy for high-speed atomic force microscopy. *Nanotechnology*, 2004, **15**(1): 108–114

- 12 Zhou X W, Fang Y C, Dong X K, Zhang Y D. System modeling of an AFM system in Z-axis. In: Proceedings of the 7th IEEE Conference on Nanotechnology. Hong Kong, China: IEEE, 2007. 96–99
- 13 Zhang Yu-Dong, Gao Jin-Sheng, Zhou Xian-Wei, Fang Yong-Chun. Design and implementation of atomic force microscope simulation platform. *Journal of System Simulation*, 2009, **21**(6): 1548–1552
(张玉东, 高金晟, 周娴玮, 方勇纯. 原子力显微镜仿真平台的设计与实现. 系统仿真学报, 2009, **21**(6): 1548–1552)
- 14 Zhou Xian-Wei, Fang Yong-Chun, Dong Xiao-Kun, Zhang Yu-Dong. Real-time feedback control system for AFM based on RTLinux. *Computer Engineering*, 2008, **34**(15): 226–230
(周娴玮, 方勇纯, 董晓坤, 张玉东. 基于 RTLinux 的 AFM 实时反馈控制系统. 计算机工程, 2008, **34**(15): 226–230)



董晓坤 南开大学机器人与信息自动化研究所博士研究生. 2005 年获得天津大学自动化专业学士学位, 2008 年获得南开大学控制理论与控制工程专业硕士学位. 主要研究方向为基于原子力显微镜的微纳控制系统, 原子力显微镜成像技术, 和非线性控制.

E-mail: dongxk@robot.nankai.edu.cn

(**DONG Xiao-Kun** Ph.D. candidate at the Institute of Robotics and Automatic Information System (IR AIS), Nankai University. He received his bachelor degree in automation from Tianjin University in 2005, and received his master degree in control theory and control engineering from Nankai University in 2008. His research interest

covers atomic force microscope based micro/nano control system, AFM imaging method, and nonlinear control.)



方勇纯 南开大学机器人与信息自动化研究所教授. 主要研究方向为非线性控制、机器人视觉伺服, 桥式吊车等欠驱动系统控制. 本文通信作者.

E-mail: yfang@robot.nankai.edu.cn

(**FANG Yong-Chun** Professor at the Institute of Robotics and Automatic Information System (IR AIS),

Nankai University. His research interest covers nonlinear control, visual servoing, and control of underactuated systems including overhead cranes. Corresponding author of this paper.)



张玉东 南开大学机器人与信息自动化研究所博士研究生. 2006 年获得南开大学自动化专业工学学士学位. 主要研究方向为基于原子力显微镜的微纳控制系统, 学习控制, 和非线性控制.

E-mail: zhangyd@robot.nankai.edu.cn

(**ZHANG Yu-Dong** Ph.D candidate at the Institute of Robotics and

Automatic Information System (IR AIS), Nankai University. He received his bachelor degree in automation from Nankai University in 2006. His research interest covers atomic force microscope based micro/nano control system, learning control, and nonlinear control.)