

原子力显微镜系统广义预测控制与成像

董晓坤, 方勇纯[†], 张雪波

(南开大学 机器人与信息自动化研究所, 天津 300071;

天津市智能机器人技术重点实验室, 天津 300071)

摘要: 在原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)扫描样品时, 控制参数调节困难, 依赖于操作经验. 本文基于在线动态模型辨识, 提出了一种AFM系统广义预测自校正控制与成像方法. 首先, 利用CARIMA(controlled autoregressive and moving-average)参数模型来描述局部线性化后的AFM系统模型, 并通过在线动态模型辨识得到线性化模型的参数; 基于该模型, 采用基于GPC(generalized predictive control)的优化方法, 在线求解类PI(proportional integral)控制器的参数, 进而得到一种具有控制参数自动调整功能的AFM成像方法. 为了验证本文方法的有效性, 进行了仿真与实验测试. 结果表明, 在AFM扫描速度不同或PI参数选择不恰当的情况下, 该方法能够自动地调整控制器参数, 从而减小控制误差, 提高成像精度.

关键词: 原子力显微镜; 成像方法; 广义预测控制; 自整定

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Generalized predictive control and imaging for atomic force microscope systems

DONG Xiao-kun, FANG Yong-chun[†], ZHANG Xue-bo

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

Tianjin Key Laboratory of Intelligent Robotics, Tianjin 300071, China)

Abstract: When an atomic force microscope (AFM) is employed to scan a sample, the proper adjustment of control parameters is usually difficult; it needs operator's experience. To address this problem, we present a generalized predictive control and imaging scheme based on the online identification of dynamic system model, which achieves self-tuning of control gains. Specifically, the controlled autoregressive and moving-average model (CARIMA) is adopted to describe the linearized AFM system, whose parameters are obtained through online dynamic model identification. Then, the generalized predictive control (GPC) optimization method is applied to calculate the parameters of a quasi-proportional integral (PI) controller which automatically controls the AFM system gains. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed method can adjust the control gains automatically to reduce the control error and improve the imaging precision, even when the scanning speed is changed or the control parameters are chosen improperly.

Key words: atomic force microscopy; imaging method; generalized predictive control; self-tuning

1 引言(Introduction)

由于医学、生物、化学等对高性能纳米测量技术的要求不断提高, 现有的AFM逐渐难以满足科研工作者的需求. 一方面, 不同于传统光学显微镜的一次成像, AFM在成像时需要同时对样品进行逐点扫描, 因此其成像速度非常慢^[1]. 一些化学与生物任务需要观测活性样品的快速变化过程^[2], 因此要求AFM具有每秒几十帧乃至上百帧的成像速度, 而当前的系统难以满足要求. 另一方面, 原子力显微镜结构复杂^[3], 操作繁琐,

且针对不同任务, 需要经常切换扫描模式以及更换扫描管、探针、样品、探针架等组件, 且每次更换之后需重新设置扫描参数. 此外, AFM系统的使用目前对操作者的经验有着很强的依赖性. 这些都极大地限制了AFM的进一步应用. 因此如何提高AFM系统的智能化程度, 简化操作的复杂性, 降低对操作者技能和经验等要求, 是AFM系统自动化的一个研究重点.

在控制器设计方面, 尽管一些学者提出了各种先进控制方法^[4-6], 比例积分控制(PI控制)仍是商用

AFM系统采用的主流方法, 而其控制参数对显微镜的成像性能具有直接影响. 因此, 如果能够实现PI控制参数的自动调节, 则有望提高成像性能, 并大幅降低对操作者经验的要求. 例如, Wang等人^[7]提出了基于模糊控制的智能PID整定方法, 而Zhou等人^[8]利用继电器反馈法来对PI参数进行整定, 这些方法均简化了控制参数的调节过程, 在一定程度上提高了系统的智能化水平. 然而, 前者需要大量的AFM操作经验来完成模糊规则以及类属度函数的设定, 而后者则需要在每次扫描之前进行继电器激励实验, 较为繁琐. 值得指出的是, 利用上述方法确定PI参数后, 在整个扫描过程中无法改变. 因此, 在AFM的扫描过程中, 如果用户在线修改了扫描速度, 或者样品的软硬物理特性发生变化等, 由于这些方法不能及时调整PI参数, 从而会影响系统的成像精度.

针对系统模型复杂、工况参数变化等情况, 如果利用系统运行时产生在线/离线数据, 实时在线对系统动态局部模型进行辨识, 并在此基础上设计控制器, 则能够很好地克服参数变化以及系统不确定性带来的影响. 侯忠生等^[9]提出了无模型自适应控制方法, 利用紧格式, 偏格式, 全格式动态线性化模型来动态地刻画系统模型, 从而克服了未建模特性与系统不确定性的影响. 李少远等^[10]针对化工生产过程中具有高度非线性的连续搅拌反应釜, 离线地建立了多个局部模型, 并分别设计子GPC控制器, 得到了满意的控制性能. 柴天佑等^[11]针对非线性不确定非最小相位系统, 研究了基于神经网络和多模型的非线性广义预测自适应控制方法. 胡德文等^[12]基于子空间辨识方法和预测控制理论, 提出了一种考虑执行器动力学特性的动态控制分配新方法. 孙磊和金晓明^[13]将基于子空间模型辨识的预测控制方法应用于模拟移动床过程控制之中. 值得注意的是, 基于局部动态模型辨识的广义预测自校正控制方法至今尚未在原子力显微镜控制系统中得到应用.

由于AFM系统模型具有非常复杂的非线性特性, 尤其是在高速扫描的情况下, 这些非线性特性诸如原子间力与距离, 迟滞等, 以及不确定特性如不同材料的探针与样品等将明显地显现出来. 在这种情况下, 利用基于单一全局模型的系统控制与成像方法, 其性能将大打折扣. 为此, 本文将致力于将局部动态模型在线辨识应用于原子力显微镜系统之上, 提出一种高速AFM系统广义预测自校正控制与成像方法. 具体而言, 该方法引入CARIMA参数模型来描述局部线性化之后的AFM系统, 并通过动态模型在线模型辨识方法实时求解模型参数; 然后, 采用基于GPC的优化方法来实时计算得到控制器参数, 从而得到了新的原子力显微镜成像方法. 仿真与实验结果表明, 在扫描速度等参数发生变化时, 本文提出的成像方法可以在线实

时地调整控制参数, 从而降低AFM的操作复杂度, 并提高系统的智能化水平.

本文其他部分组织如下: 第2节分析了原子力显微镜参数调节困难的主要原因; 第3节提出了一种基于动态模型在线辨识与广义预测控制的参数自整定方法; 第4节给出了应用该方法进行成像的流程; 第5节提供了仿真与实验结果; 第6节为本文的研究结论.

2 AFM系统参数调节问题(Problems on parameter tuning for AFM systems)

在AFM进行实际操作时, 根据不同的任务需求, 对器件进行更换并相应地调节扫描参数. 其中, 根据样品的软硬度, 来选取合适的探针; 根据任务所需扫描范围大小, 来选用不同的压电扫描管. 此外, AFM的扫描频率与扫描分辨率等扫描参数等也通常会发生变化. 当上述器件或者参数发生变化时, 控制器的参数需要相应地进行调节, 否则会导致较大的控制误差, 并影响AFM的成像效果. 鉴于原子力显微镜结构与工作原理比较复杂, 控制器参数的合理条件往往要求使用者具有极为丰富的AFM操作经验.

因此, 如何根据AFM组件及参数变化, 实现对控制参数地自动调整从而得到良好的扫描效果, 成为了AFM领域一个亟待解决的问题. 本文将基于动态模型在线辨识与广义预测自校正控制的思想应用于AFM系统中, 力图解决这些问题, 增强仪器的易用性与自动化程度.

3 基于在线动态模型辨识的控制参数自整定方法 (Self-tuning of control parameters based on online identification of dynamic model)

3.1 AFM系统局部线性化(Local linearization of AFM systems)

虽然AFM系统模型复杂, 具有较强的非线性特性, 但在工作状态的附近, 仍然可以用局部线性化的动态模型进行描述. 不失一般性, 采用如下CARIMA模型:

$$A(z^{-1}) \cdot y(k) = B(z^{-1}) \cdot u(k-1) + \xi(k)/\Delta, \quad (1)$$

其中: $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别表示系统的控制输入和输出; Δ 表示差分算子, 即 $\Delta = 1 - z^{-1}$. z^{-1} 是后移时间算子, 即 $z^{-1}y(k) = y(k-1)$; 变量 $\xi(k)$ 代表干扰信号. 针对AFM系统, 根据大量的系统辨识经验, 多项式 $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 分别选取为3阶与2阶形式:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + a_3 \cdot z^{-3}, \quad (2)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}. \quad (3)$$

将式(2)与式(3)带入到式(1)中, 整理为如下向量相乘的形式:

$$\Delta y(k) = \phi^T(k-1) \cdot \theta + \xi(k), \quad (4)$$

其中参数向量 $\theta \in \mathbb{R}^6$ 为

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ b_0 \ b_1 \ b_2]^T. \quad (5)$$

信息向量 $\phi \in \mathbb{R}^6$ 存储在数据库中, 定义如下:

$$\begin{aligned} \phi(k-1) = & [-\Delta y(k-1) \ -\Delta y(k-2) \\ & -\Delta y(k-3) \ \Delta u(k-1) \\ & \Delta u(k-2) \ \Delta u(k-3)]^T. \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 在线动态模型辨识 (Online dynamic model identification)

本节给出一种在线动态模型辨识算法, 其流程图如图1中控制回路以外的部分. $\hat{\theta}$ 为公式(4)中 θ 的估计值, Ω 为信息向量数据库, Φ 为选取出的与当前向量临近的向量集合.

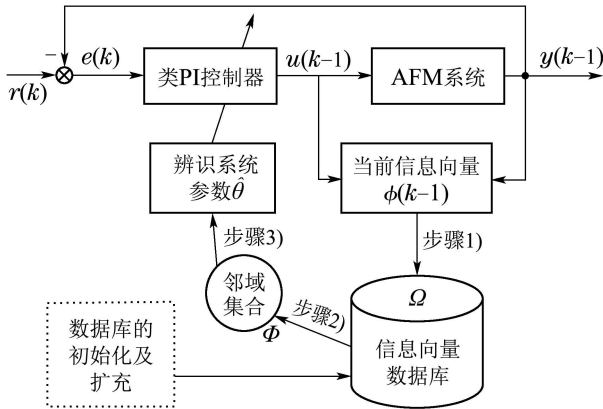


图1 在线动态模型辨识

Fig. 1 Online dynamic model identification

辨识前, 首先需要建立经验数据库 Ω , 其中经验数据以信息向量 ϕ 的形式存储, 即

$$\Omega = \{\phi(j) | j = 1, 2, \dots, N\}, \quad (7)$$

其中 N 为数据库中所有信息向量的数目. 在得到当前状态信息向量 $\phi(k-1)$ 后, 其对应的CARIMA模型的辨识过程包括如下3个步骤:

1) 信息向量的间距计算.

为了计算当前信息向量 $\phi(k-1)$ 与数据库 Ω 中其他向量的间距, 本文采用马氏距离来计算:

$$d_k(j) = \sqrt{\sum_{l=1}^6 \frac{(\phi_l(k-1) - \phi_l(j))^2}{\sigma_l^2}}, \quad (8)$$

其中: $\phi_l(j)$ 为 ϕ_l 的第 l 个分量, $\phi_l(k-1)$ 为 $\phi_l(j)$ 的第 l 个分量, σ_l 为 $\phi_l(j)$ ($j = 1, 2, \dots, N$) 的标准差.

2) 选择临近向量集合.

将公式(8)得到的马氏距离 $d_k(j)$ 进行排序, 选取 M 个与 $\phi(k-1)$ 距离最小的信息向量组成临近集合:

$$\Phi = [\phi_{i_1} \ \phi_{i_2} \ \dots \ \phi_{i_M}]^T, \quad (9)$$

其中 $d_k(i_1) \leq d_k(i_2) \leq \dots \leq d_k(i_M)$, $M \geq 6$.

3) 系统线性模型辨识.

将步骤2)得到的信息向量邻域集合 Φ 代入模型(4)中, 用最小二乘法估计模型参数:

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y, \quad (10)$$

其中: 变量 $\hat{\theta}$ 表示辨识得到的模型参数, 向量 $Y = [\Delta y_{i_1} \ \Delta y_{i_2} \ \dots \ \Delta y_{i_M}]^T$ 为当前邻域集合中对应的输出增量. 在这一步, 同时计算出模型辨识误差 $(\Delta y_{i_m} - \phi_{i_m}^T \hat{\theta})$ 的标准差 σ_e .

3.3 类PI控制器参数自调节 (Self-tuning of quasi-PI controller parameters)

对于原子力显微镜系统而言, PI控制器是最为常见的控制方法, 但是针对具体的扫描或操作任务, 通常需要对控制增益进行反复调整, 不利于实际应用. 基于这种原因, 本文采用如下的基于GPC优化的增量式类PI控制方法^[14]:

$$\begin{aligned} \Delta u(k) = & K_P^T(k) [\Delta R(k) - \Delta F(k)] + \\ & K_I^T(k) [R(k) - F(k)], \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $R(k)$ 为期望值向量

$$R(k) = [r(k+1) \ r(k+2) \ \dots \ r(k+N_y)]^T, \quad (12)$$

上式中, N_y 为预测步长, $r(k+j)$, $j = 1, 2, \dots, N_y$ 为各步的期望值, 本文中设为恒值. 在式(11)中, 辅助函数 $F(k) \in \mathbb{R}^{N_y \times 1}$ 的取值由之后 N_y 步的预测输出计算得到, $K_P \in \mathbb{R}^{N_y \times 1}$, $K_I \in \mathbb{R}^{N_y \times 1}$ 表示与PI控制器中的比例与积分增益相类似的控制增益向量, 其取值可通过求解丢番图方程进行更新. 具体计算方法见文献[14].

3.4 数据库的初始化与扩充 (Initialization and expansion of the database)

原子力显微镜的组件变化、扫描参数的调节以及扫描样品的不同, 均会改变系统的模型. 因此, 在每次扫描前, 均需要进行若干行的闭环空扫(空扫是指在扫描时记录数据, 但不利用其进行成像), 从而实时地建立数据库. 为了避免所采集的数据信息过于单一化, 保证所采集系统的状态信息量足够丰富, 在空扫时, 采用如图2中箭头所示的三角形路径进行移动扫描.

由于数据库不能保证包含着表征系统状态的所有信息向量, 因此在扫描成像过程中, 需要及时地把那些新的信息向量加入进来, 对数据库进行实时在线扩充更新. 假设当前信息向量为 $\phi(k-1)$, 根据以上算法可以得到模型参数 $\hat{\theta}$ 以及控制量 $u(k)$, 将 $u(k)$ 作用到AFM系统得到其输出 $y(k)$, 定义辨识误差为

$$\varepsilon(k) = \Delta y(k) - \phi^T(k-1) \cdot \hat{\theta}. \quad (13)$$

若 $\varepsilon(k)$ 满足公式

$$\varepsilon(k) > 3 \cdot \sigma_e, \quad (14)$$

则认为信息向量 $\phi(k-1)$ 为全新的向量, 应将其扩充到数据库中, 其中的 σ_e 为辨识误差的标准差。

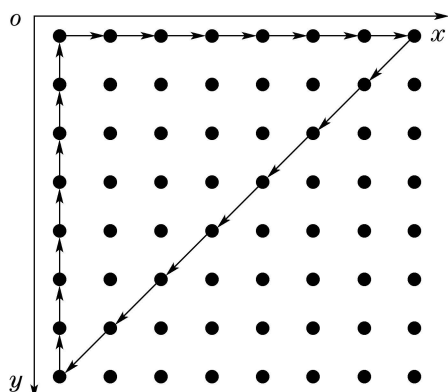


图 2 初始化数据库时的AFM扫描路径

Fig. 2 Scanning path for database initialization

4 控制成像算法流程(Flow chart of the control-based imaging algorithm)

在扫描过程中, 基于以上提出的在线模型辨识方法, 能够实时地得到AFM系统的局部动态模型, 进而基于此模型对控制参数进行自动地调整与优化。

同时, 如果在每个控制周期均进行基于在线动态模型辨识的参数自整定, 必然产生较大的计算量, 并影响控制平台的正常使用。然而, 当闭环控制效果良好使得控制误差较小时, 表明当前的控制参数较为合适, 而无需重新进行参数整定。因此, 为了提高算法的实时性能, 本文仅仅在控制误差较大时, 才启用第3节所提出的控制参数调整方法。

在每个扫描点上, 当AFM系统进入稳态时, 实时计算得到控制误差的标准差 σ 。设当前控制误差为 $e(k)$, 当满足条件 $|e(k)| < 3\sigma$ 时, 则认为控制误差较小; 而当 $|e(k)| \geq 3\sigma$ 时, 说明控制效果较差, 便启动基于在线模型辨识与预测控制的控制参数自整定程序, 进行类PI控制器的参数调整。

在获取控制信号 $u(k)$ 后, 为保证系统的成像精度, 本文采用动态成像方法来得到样品最终的形貌图像^[15]。综上所述, 整个成像算法的流程如图3所示。

5 仿真及实验结果(Simulation and experimental results)

本节提供了仿真与实验结果, 以验证论文所提方法的有效性。

5.1 仿真(Simulation)

针对原子力显微镜系统, 本课题组已在Matlab/Simulink环境下搭建了一套虚拟仿真平台^[16], 本文仿真正是在该平台上进行。为了便于对比, 仿真实例中采用与后文实验相同的光栅样品模型进行测试。为此, 采用方波信号来模拟真实光栅样品的一条横断面曲

线。扫描分辨率设置为 200×200 像素, 扫描频率设置为25 Hz, 而方波的幅值是20 nm。

为了说明本文方法优点, 与固定PI参数的扫描方法进行了仿真对比。仿真结果如图4所示, 其中: 虚线表示PI参数固定时得到的成像曲线, 而实线为本文方法获得的形貌曲线, 点划线表示真实的样品形貌。

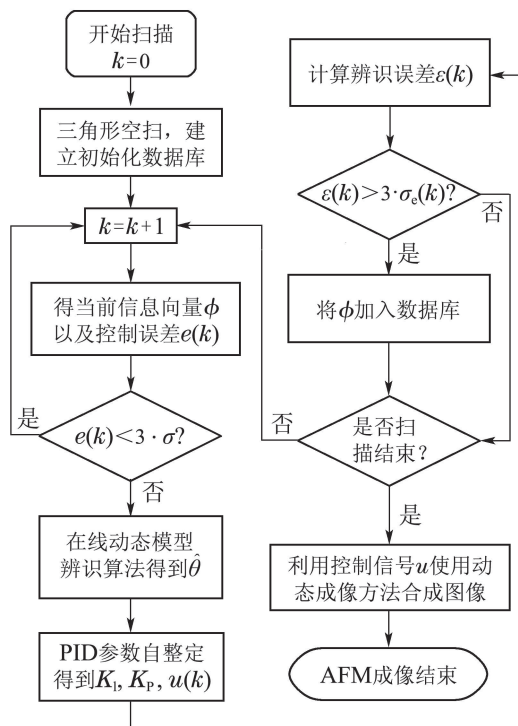


图 3 成像算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the imaging algorithm

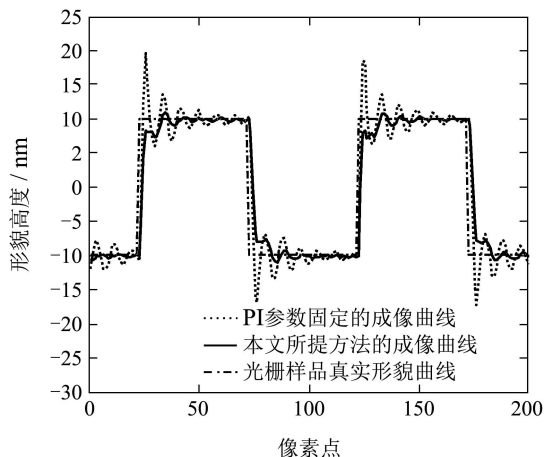


图 4 两种成像方法的形貌高度对比曲线

Fig. 4 Comparison of topography by two imaging approaches

图5展示了本文方法与PI参数固定方法得到的成像误差曲线对比图, 其中, 虚线表示PI参数固定时的成像误差, 实线则表示本文方法的成像误差。从图5中可以看出, 在方波的台阶跳变处, 两种方法均会产生20 nm左右的成像误差, 但在此之后, 固定PI参数方法的成像误差出现了较大的超调振荡现象。与此相

反,本文所提出的方法则能基于在线动态模型辨识与GPC实时优化调整控制参数,因此成像误差能够较快地收敛,并且无明显振荡现象.

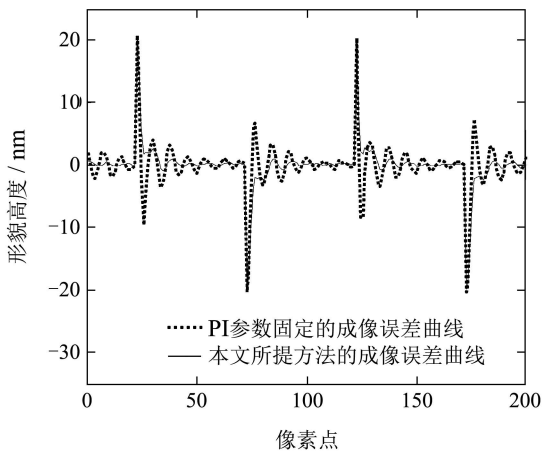


图5 成像误差曲线对比

Fig. 5 Comparison of imaging errors

图6则为两种控制与成像方法得到的样品形貌图.其中,图6的上半部分为传统PI参数固定方法的成像图,而下半部分为本文方法得到的光栅形貌图.对上下两幅图像进行比较可知:由于所选的PI参数不恰当,在台阶跳变处,上半幅图产生了明显的条纹,而下半幅图则无明显条纹,且更加接近于真实的样品形貌.

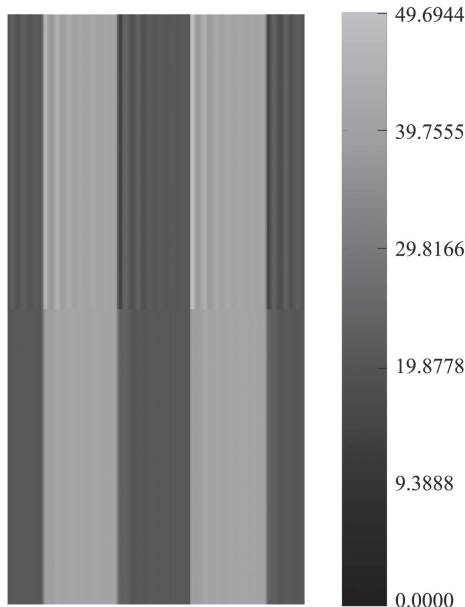


图6 两种成像方法的仿真形貌对比图(单位: nm)

Fig. 6 Comparison of simulated topography (Unit: nm)

从上述仿真结果可以看出,本文方法能够降低由于参数选择不当或AFM系统工作状态发生变化而引起的成像误差.

5.2 实验(Experiments)

本节将基于在线模型辨识的广义预测自校正控制与成像方法应用于实际的AFM系统中,以进一步验证

其有效性.在本实验中,采用自行搭建基于RTLinux系统的AFM开放式实验平台,能够进行控制周期50 μ s的实时数据采集与控制任务^[17].实验AFM本体为中国本原纳米仪器公司生产的CSPM4000系列,选用的探针型号为CSC11 (uMasch Inc. 爱沙尼亚),采用的一维光栅型号为TGZ02 (uMasch Inc.),台阶高度为84 nm \pm 10 nm.实验的扫描区域范围为15000 nm,扫描分辨率设置为500 \times 500像素,扫描频率设置为10 Hz.

图7、图8分别展示了采用PI固定参数控制方法以及本文方法得到的光栅样品形貌图(图中的斑点是由光栅表面污染物或加工缺陷引起的).实验对比表明:使用PI固定参数的AFM控制与成像方法,在光栅上跳沿处出现较亮的条纹,在下跳沿处出现较暗的条纹,这种现象是由较大的成像误差引起的;而本文方法则无明显的超调过渡条纹,更接近于光栅的真实形貌.

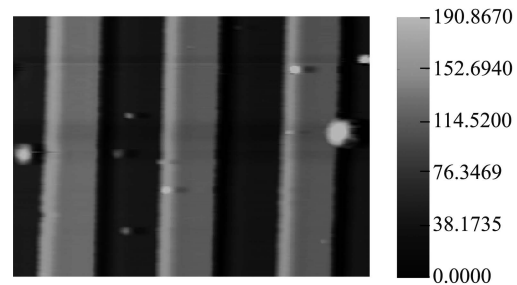


图7 10 Hz下固定PI参数扫描的光栅形貌(单位: nm)

Fig. 7 Topography scanned with fixed PI parameters at 10 Hz (Unit: nm)

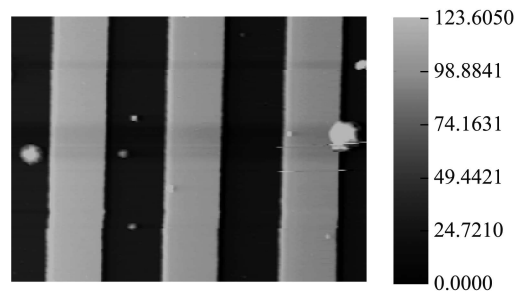


图8 10 Hz下用本文方法得到的光栅形貌(单位: nm)

Fig. 8 Topography scanned using the proposed approach at 10 Hz (Unit: nm)

为进一步说明本文方法的良好性能,图9给出了同一位置的横截面形貌曲线比较图.其中:虚线代表PI参数固定时得到的高度曲线,实线为本文方法获取的高度曲线.对该行数据进行统计计算,前者的台阶高度(在此定义为相邻峰峰差)平均为162.3 nm,而后的台阶高度平均值为104.6 nm,显然本文方法(后者)更接近于真实样品形貌.

实验结果表明:与现有方法相比,本文方法能明显减小由于PI控制器参数不恰当而引起的成像误差,从而提升AFM扫描图像的质量.

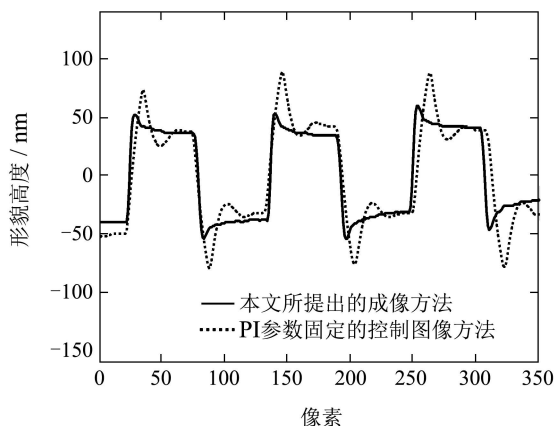


图 9 某一扫描行成像结果的对比曲线

Fig. 9 Comparison of imaging results for a certain scanning line

需要注意的是, 本文方法能够实时地得到AFM的近似模型, 并进而用该模型来自动地调整控制参数, 因此, 除了扫描参数改变外, 该方法也能够抑制AFM零部件更换而引起的成像质量下降问题。

6 结论(Conclusions)

本文提出了一种基于在线动态模型辨识的AFM广义预测自校正控制与成像方法. 引入CARIMA 参数模型来描述线性化之后的AFM系统, 并通过基于在线动态模型辨识的方法得到线性化模型参数, 然后对该模型采用GPC的优化方法来实时计算得到控制器参数, 在此基础上得到了一种新的成像方法. 仿真与实验结果表明: 在扫描参数发生变化时, 本文所提的成像方法可以实时地自动调整控制参数, 进而降低AFM操作的复杂度, 提高了AFM系统的易用性与智能化水平。

需要注意的是, 基于数据的在线动态模型辨识方法需要较为丰富的数据样本, 与传统PI算法相比, 其计算量较大. 因此, 后续研究将主要集中在如何进一步改进和优化该控制与成像方法, 以期在实际AFM系统之中得到广泛应用。

参考文献(References):

- [1] QI N, FANG Y, REN X, et al. Varying-gain modeling and advanced DMPC control of an AFM system [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2015, 14(1): 82 – 92.
- [2] YONG Y, REZA MOHEIMANI S. Collocated Z-axis control of a high-speed nanopositioner for video-rate atomic force microscopy [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2015, 14(2): 338 – 345.
- [3] HUNG S, CHENG C, CHEN C. Automatic-patterned sapphire substrate nanometrology using atomic force microscope [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2015, 14(2): 292 – 296.
- [4] FANG Y, ZHANG Y, QI N, et al. AM-AFM systems analysis and output feedback control design with sensor saturation [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2013, 12(2): 190 – 202.
- [5] YANG Q, JAGANNATHAN S. Adaptive creep and hysteresis compensation for nanomanipulation using atomic force microscope [J]. *Asian Journal of Control*, 2009, 11(2): 1 – 6.
- [6] HOU J, LIU L, WANG Z, et al. AFM-based robotic nano-hand for stable manipulation at nanoscale [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(2): 285 – 295.
- [7] WANG Y. Constant force feedback controller design using fuzzy technique for a tapping mode atomic force microscope [C] // *Proceedings of the 2009 Chinese Control and Decision Conference*. Guilin: IEEE, 2009: 1691 – 1696.
- [8] ZHOU X, DONG X, ZHANG Y, et al. Automatic tuning of PI controller for atomic force microscope based on relay with hysteresis [C] // *Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Control Applications*. Saint Petersburg: IEEE, 2009: 1271 – 1275.
- [9] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望 [J]. *自动化学报*, 2009, 35(6): 650 – 667. (HOU Zhongsheng, XU Jianxin. On data-driven control theory: the state of the art and perspective [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 650 – 667.)
- [10] 王蓬, 李少远. 一类非线性系统的多模型预测控制 [J]. *控制与决策*, 2007, 22(10): 1113 – 1118. (WANG Peng, LI Shaoyuan. Multiple model-based predictive control for a class of nonlinear systems [J]. *Control and Decision*, 2007, 22(10): 1113 – 1118.)
- [11] 石宇静, 柴天佑. 基于神经网络与多模型的非线性自适应广义预测控制 [J]. *自动化学报*, 2007, 33(5): 540 – 545. (SHI Yujing, CHAI Tianyou. Neural networks and multiple models based nonlinear adaptive generalized predictive control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(5): 540 – 545.)
- [12] 马建军, 郑志强, 胡德文. 包含执行器动力学的子空间预测动态控制分配方法 [J]. *自动化学报*, 2010, 36(1): 130 – 138. (MA Jianjun, ZHENG Zhiqiang, HU Dewen. Subspace predictive dynamic control allocation for overactuated system with actuator dynamics [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(1): 130 – 138.)
- [13] 孙磊, 金晓明. 基于子空间辨识的模型预测控制策略及其应用 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(3): 313 – 315. (SUN Lei, JIN Xiaoming. Model-predictive-control based on subspace identification and its application [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(3): 313 – 315.)
- [14] 陈增强, 车海平, 袁著祉. 具有比例积分结构的广义预测自校正控制器 [J]. *控制与决策*, 1994, 9(2): 105 – 110. (CHEN Zengqiang, CHE Haiping, YUAN Zhuzhi. A generalized predictive self-tuning controller with proportion and integration structure [J]. *Control and Decision*, 1994, 9(2): 105 – 110.)
- [15] 董晓坤, 方勇纯, 周娴玮, 等. 基于压电扫描动态特性分析的AFM成像方法研究 [J]. *高技术通讯*, 2008, 18(1): 54 – 58. (DONG Xiaokun, FANG Yongchun, ZHOU Xianwei, et al. An AFM imaging method based on analysis of piezo-scanner's dynamic characteristic [J]. *High Technology Letters*, 2008, 18(1): 54 – 58.)
- [16] 张玉东, 高金晟, 周娴玮, 等. 原子力显微镜仿真平台的设计与实现 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(6): 1548 – 1552. (ZHANG Yudong, GAO Jinseng, ZHOU Xianwei, et al. Design and implementation of atomic force microscope simulation platform [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(6): 1548 – 1552.)
- [17] 周娴玮, 方勇纯, 董晓坤, 等. 基于RTLinux的AFM实时反馈控制系统 [J]. *计算机工程*, 2008, 34(15): 226 – 230. (ZHOU Xianwei, FANG Yongchun, DONG Xiaokun, et al. Real-time Feedback Control System for AFM Based on RTLinux [J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(15): 226 – 230.)

作者简介:

董晓坤 (1984–), 男, 博士, 主要研究方向为原子力显微镜系统、微纳操作与控制, E-mail: 85352742@qq.com;

方勇纯 (1973–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为欠驱动吊车系统、机器人视觉控制、基于AFM的纳米操作、无人飞行器, E-mail: fangyc@nankai.edu.cn;

张雪波 (1984–), 男, 副教授, 主要研究方向为移动机器人学、视觉伺服、运动规划、无人车自主导航、多摄像机网络建模与优化, E-mail: zhangxuebo@nankai.edu.cn.