

# 基于电流偏差补偿模型的 SICM 自适应控制\*

滕泽宇<sup>1,2</sup>, 于鹏<sup>1</sup>, 杨洋<sup>1</sup>, 杨铁<sup>1</sup>, 刘连庆<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016; 2. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

**摘要:**扫描离子电导显微镜(SICM)能够在非接触条件下获取样品表面纳米级形貌特性信息,可以在生理液态环境下实现对活体细胞等柔软样品无损成像。但是通过前期大量实验结果,发现在使用连续扫描模式时 SICM 扫描图像存在“拖尾”现象,导致图像失真,并限制了扫描成像速度。针对这一问题,结合 SICM 成像原理进行分析,得出电流逼近曲线高度非线性是产生这一现象的主要原因,并提出一种基于电流偏差补偿模型的 SICM 自适应控制方法。主要思想是建立电流偏差补偿模型,利用上一行扫描高度数据作为先验知识预测当前扫描点位置,并输入补偿模型得到新的电流偏差作为系统被控量。最后分别用新旧控制算法对标准栅格扫描图像进行成像效果对比,实验结果验证了该算法在一定扫描速度范围内能够有效地解决“拖尾”现象,明显减小图像失真,为进一步提高 SICM 系统成像质量和成像速度提供了一种有效的技术方法。

**关键词:**扫描离子电导显微镜;拖尾现象;自适应控制;补偿模型;先验知识

中图分类号: TH89 TP273 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4025 510.80

## Adaptive control based on current-error compensation model for SICM

Teng Zeyu<sup>1,2</sup>, Yu Peng<sup>1</sup>, Yang Yang<sup>1</sup>, Yang Tie<sup>1</sup>, Liu Lianqing<sup>1</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, China Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Scanning ion conductance microscopy (SICM) can be used to obtain the surface topography of the sample under non-contact conditions. It can realize the nondestructive imaging of soft samples, e. g., living cells in physiological liquid environment. However, there is smearing phenomenon in the SICM image when using the continuous feedback-control scanning mode which is found through a large number of experimental results. It causes the image distortion and limits the scan speed. To solve this problem, the SICM imaging principle is analyzed. It is concluded that the highly nonlinearity of the approach curve is the main reason for this phenomenon, and an adaptive control method based on current-error compensation model for SICM is proposed in this study. The main idea is to establish a current-error compensation model, predict the current scanning point position by using the scanning data of the last line as the prior knowledge, and then put it into the compensation model to calculate the new current-error as the system controlled variable. Finally, the performance of scan images for the standard grating under the new and old control algorithms is compared. The experimental results show that the new algorithm can effectively solve the smearing phenomenon at a certain degree of scanning speed and significantly reduce the image distortion. It provides an effective technical method to improve the image quality and imaging speed of SICM system.

**Keywords:** scanning ion conductance microscopy (SICM); smearing phenomenon; adaptive control; compensation model; prior knowledge

## 0 引言

扫描离子电导显微镜 (scanning ion conductance

microscopy, SICM) 是 1989 年由 Hansma P. K. 等人<sup>[1]</sup> 提出并逐步发展起来的一种扫描探针显微镜技术<sup>[2]</sup> (scanning probe microscopy, SPM)。不同于其他扫描探针显微技术, SICM 的待测样品浸没在电解液中, 不需做

荧光标记等预处理,可以在探针与样品不接触的情况下完成表面形貌成像,因而使 SICM 能够在生理条件下,对活细胞进行无损伤高分辨率观测<sup>[3]</sup>。2006 年 Shevchuk A. I. 等人<sup>[4]</sup>验证了 SICM 的超高分辨率成像效果,利用内半径 6.5 nm 的探针 for 细胞膜表面蛋白质的变化进行表征,辨识出单个分子样品形貌;2009 年 Novak P 等人<sup>[5]</sup>利用 SICM 对复杂结构的活体细胞进行无损成像,扫描出海马神经元轴突结构。另外,SICM 不仅可用作纳米观测成像,还可利用其中空玻璃管探针以及高精度定位功能,实现细胞多种生理信息获取。比如,2000 年 Korchev Y. E. 等人<sup>[6]</sup>结合 SICM 与膜片钳技术对心肌细胞表面钾离子通道分布进行了表征;2012 年 Seger R. A. 等人<sup>[7]</sup>利用 SICM 探针将荧光素分子注射到活细胞内,观测细胞核在细胞分裂过程中的变化;2016 年 Rerry D 等人<sup>[8]</sup>在对活细胞形貌成像的同时,对细胞表面电荷分布进行了表征。由于 SICM 的特点和优势,使它逐步发展成为一种纳米级成像及单细胞研究领域的有力工具。

目前商业 SICM 的扫描模式包括直流模式、交流模式和跳跃模式。直流模式为最先提出的扫描模式,其反馈电流为直流电流,抗干扰能力差,对此,中科院沈阳自动化研究所提出了同向电压调制模式<sup>[9]</sup>即交流模式,在电极两端施加交流电压,使系统对直流漂移<sup>[10]</sup>和电气噪声的抑制能力大幅增强,以上两者都属于连续扫描模式,即扫描时探针在样品表面连续移动。跳跃模式是一种非连续的扫描模式<sup>[11]</sup>,在每个点都将探针抬起重新进行逼近,跳跃模式更有利于对表面起伏较大的样品进行扫描,但与连续模式相比扫描速度慢,且成像精度较差。

但是,在使用连续模式对样品进行成像时发现,在扫描图像中样品高度突然下降处偶尔会出现模糊甚至“拖尾”现象,这是由于对探针与样品间距离控制时,探针不能及时地跟踪到样品形貌的变化,且扫描速度越大、高度差越大“拖尾”现象越严重。因此,当样品表面形貌变化剧烈时,采用连续模式成像并不能完全反映样品表面的真实形貌,尤其随着下降高度和扫描速度的增加,这一现象更加明显。对探针位置的精确控制, Jung G. E. 等人<sup>[12]</sup>曾提出一种闭环跳跃模式,增加一个由反馈电流决定的乘子,用以调节偏差的值,提高了跳跃模式的成像效率,对另一种常见的扫描探针原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 的控制,常用到动态 PID<sup>[13]</sup>、自适应<sup>[14]</sup>、前馈<sup>[15-16]</sup>等方法, Ahmad A 等人<sup>[17]</sup>也曾采用自适应扫描速度<sup>[17]</sup>的方法,根据反馈量改变扫描速度以给 Z 向纳米平台足够的时间跟踪样品的形貌变化。

本文从 SICM 成像机理上分析了出现拖尾现象的主要原因,在前期常规 PID 控制方法的基础上,提出了一种 SICM 探针与样品间距自适应控制方法,该方法以上一行

的扫描结果作为预测,结合逼近曲线建立补偿函数,再根据探针位置实时调整下降沿电流偏差大小,实验结果表明本方法能够较好地解决这一问题,同等扫描速度下消除了样品高度下降沿处的模糊以及“拖尾”现象。

## 1 SICM 图像“拖尾现象”原理分析

### 1.1 SICM 成像原理

SICM 主要由探针、控制器及压电陶瓷纳米运动平台组成,探针为一根尖端为锥形的中空玻璃管,在探针内部和外部分别灌有相同的电解质溶液,并各放置一根电极,如图 1 所示。两电极在外加偏置电压的驱动下通过探针针尖构成回路产生离子电流,当探针与样品距离比较远时,电流保持最大值恒定不变,当针尖与样品的距离足够小,约为几十到几百纳米,容许离子电流通过的空间减少,等效电阻加大,导致电流急剧减小。扫描过程中通过负反馈控制使电流保持恒定,使得针尖在样品表面移动时保持恒定的间距,探针运动的轨迹就可以反映样品表面的起伏,逐行对样品扫描则可得到整个样品的三维形貌图像。

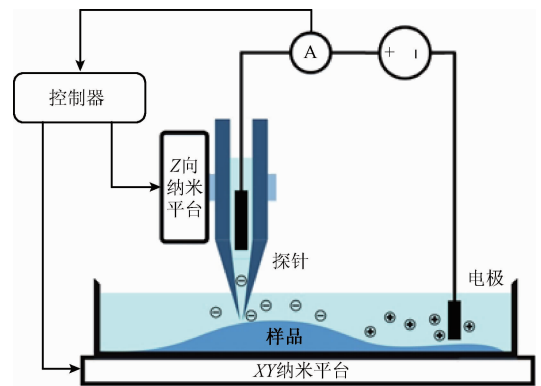


图 1 扫描离子电导显微镜原理

Fig. 1 Schematic diagram of SICM

### 1.2 SICM 扫描图像“拖尾”现象分析

以对标准栅格样品的成像为例,图 2 所示为对凸起的聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 栅格扫描结果,每个栅格的左边轮廓为上升沿,右边轮廓为下降沿,上升沿较清晰,而下降沿均出现了不同程度的虚影或拉长,称之为“拖尾”现象。从横截面曲线图 3(a)可以看出这是由于反馈量不足,探针没有很好跟踪样品形貌变化所致。此时增大 PID 参数,下降沿拖尾明显改善,如图 3(b)所示,但是上升沿开始超调,出现了一个尖峰,说明相同的 PID 参数无法使得 SICM 系统在样品高低变化下产生相同的动态响应,使得参数调节困难,也无法获得更高质量的扫描图像。

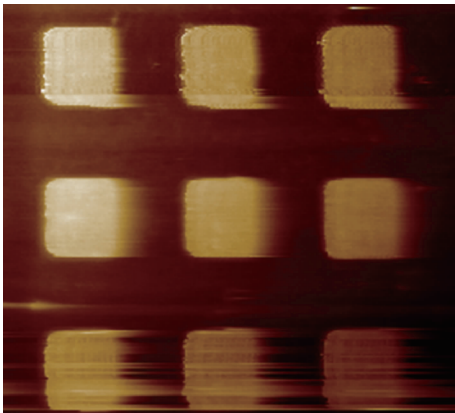


图2 SICM对样品成像‘拖尾现象’

Fig. 2 Smearing phenomenon of SICM topography image

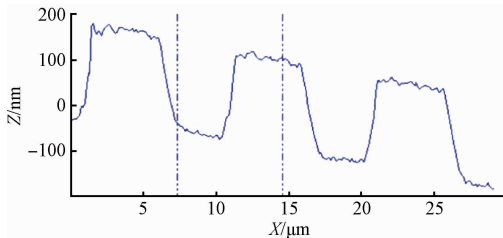
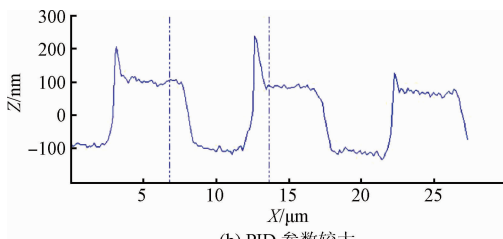
(a) PID 参数较小  
(a) PID parameters is small(b) PID 参数较大  
(b) PID parameters is large

图3 SICM 图像截面高度

Fig. 3 Cross section of SICM images

### 1.3 “拖尾”现象原理分析

逼近曲线是反映离子电流和针尖/样品间距的关系曲线,它是 SICM 探针位置控制的依据。典型逼近曲线如图 4 所示,在探针远离样品时,离子电流不受距离影响保持在最大值;当针尖不断逼近样品,电流持续减小,直至针尖几乎接触到样品电流降至 0。电流的最大值称为基准电流,以基准电流的 98% 作为设定值,此时针尖位置即为工作点。当样品高度上升时,针尖与样品距离减小,系统状态为图 4 中逼近曲线工作点的左边,此时反馈电流减小,偏差为负;当样品高度下降时,距离增大,系统状态为逼近曲线工作点的右边,此时反馈电流增大,偏差为正。可以看出,正偏差与负偏差各自随距离非线性变化,且当高度下降足够大时,针尖离开敏感区域,进入基

准电流区域,不论距离如何增大,电流都维持在基准值不变,即进入了对距离的盲区。由于逼近曲线这两个特征,使得样品在上升沿和下降沿处对应相同距离变化所产生的电流偏差不同,如选用相同 PID 参数则在上升沿处输出控制量大,下降沿处控制量小,因此在相同时间内针尖位置调节量不同,即系统动态响应的峰值时间不同,从而导致上升沿与下降沿成像差异。

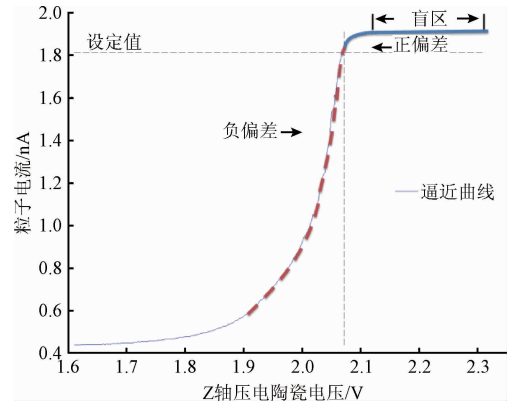


图4 SICM 探针/样品间距与电流的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of tip-sample distance and current for SICM

## 2 基于电流偏差补偿模型的自适应控制方法

### 2.1 电流偏差补偿函数模型

为了消除电流逼近曲线工作点两侧变化特性差异,引入了电流偏差补偿函数。在扫描过程中当扫描到样品下降沿时,对电流偏差数值利用补偿函数进行加权,使新偏差大小与上升沿处相同距离变化下所产生的偏差相同。

具体建立过程:首先获取原始电流逼近曲线,如图 4 所示,以扫描工作点位置为原点,以工作点两侧相对工作点的电流偏差绝对值为纵坐标,以相应距离偏差为横坐标,建立正负电流偏差随距离偏差的变化曲线,如图 5(a)所示。图中可以看到在同样距离变化下,上升沿与下降沿处所产生电流偏差的差异。将正偏差除负偏差,拟合比值结果得到电流偏差补偿函数  $k(d)$ ,对应曲线如图 5(b)所示。电流偏差补偿函数以正负电流偏差的比值  $k$  为函数值,以当前位置与工作点的距离即距离偏差  $d$  为自变量,其中距离  $d$  由  $Z$  向纳米平台的压电陶瓷位置计算得到,采用最小二乘法进行有理数逼近拟合,得到图 5(b)中补偿函数为:

$$k(d) = (17.37 \times d - 0.0448) / (d + 0.0446) \quad (1)$$

补偿后的偏差曲线和电流逼近曲线分别如图 5(c)、(d)所示,从图中可以看出经过补偿后工作点两侧电流偏差的变化特性趋于一致。

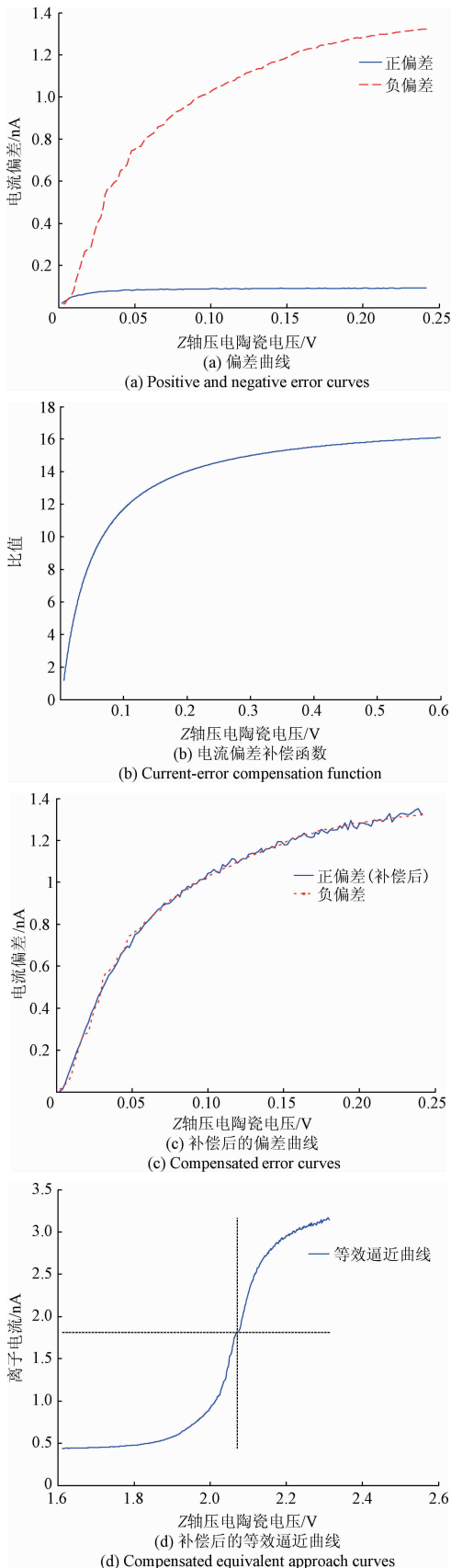


图5 电流偏差补偿模型建立

Fig.5 Establishment of current-error compensation model

## 2.2 基于补偿模型的自适应控制

为了得到当前位置与工作点的距离  $d$ , 采用了基于先验知识的行预测方法。对于连续变化的待测样品, 相邻两像素行的形貌高度变化较小, 可用上一行的扫描高度来预测当前行的高度。

扫描时当探针水平移动到下一个像素点, 若电流偏差为正, 即样品高度下降, 此时探针在反馈控制作用下沿  $Z$  轴向目标位置(即工作点位置)运动, 此目标位置可用上一行相同列对应点高度来代替, 针尖当前位置由  $Z$  向纳米平台的压电陶瓷当前位置得到, 具体公式如下:

$$h_p(x, y) = h(x, y - 1) \quad (2)$$

$$d(t) = h_{z\_piezo}(t) - h_p(x, y) \quad (3)$$

式中:  $d(t)$  为距离偏差即针尖当前位置与工作点位置的距离,  $h_{z\_piezo}(t)$  为当前高度,  $h_p(x, y)$  为待扫描点预测高度,  $h(x, y - 1)$  为上一行对应点扫描高度。此时的  $k$  值可由  $d$  计算得到, 再将电流正偏差乘以  $k$  作为新偏差, 如下:

$$e(t) = k(d(t)) \times (i(t) - i_{sp}) \quad (4)$$

$$k(d) = \begin{cases} 1, & i(t) \leq i_{sp} \\ (p1 \times d + p2)/(d + q1), & i(t) > i_{sp} \end{cases} \quad (5)$$

电流逼近曲线补偿后在上升沿和下降沿处经过相同距离变化, 电流偏差量相同, 使得控制器在样品形貌上升沿和下降沿处产生相同控制量, 从而能够具有相同的动态响应特性, 最终从原理上解决“拖尾”现象。该方法系统控制框图如图6所示。

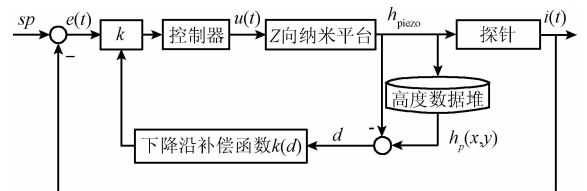


图6 基于电流偏差补偿模型的自适应控制系统

Fig.6 Control block diagram of the adaptive control system based on current-error compensation model

## 3 实验

### 3.1 实验装置

实验仪器采用自制 SICM 系统<sup>[18]</sup>, 硬件结构主要包括扫描头、控制主机及上位机。扫描头包含  $Z$  向纳米平台、三维纳米位移平台、三维电动位移平台、扫描探针和电极探头。 $Z$  向纳米平台(型号 P753. 3CD, Physik Instrumente 公司)行程范围  $38 \mu\text{m}$ , 分辨率  $0.2 \text{ nm}$ , 带动探针在样品表面实现纳米级位移反馈调节。三维纳米位移平台(型号 P517. 3CD, Physik Instrumente 公司),  $XY$  向

扫描范围  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ , 分辨率  $1\ \text{nm}$ , 在成像时带动样品在  $XY$  方向做扫描运动。三维电动平台 (9062-XYZ-PPP, New Focus Corporation 公司) 运动精度为亚微米级别, 最大行程  $7\ \text{mm}$ , 用于带动探针接近待扫描区域。电极探头采集的微弱电流通过电流放大器放大后输送给控制主机, 控制主机再输出控制量控制  $Z$  向纳米平台移动。上位机运行由 Labview 开发的人机交互界面, 与控制主机通过以太网进行通信。

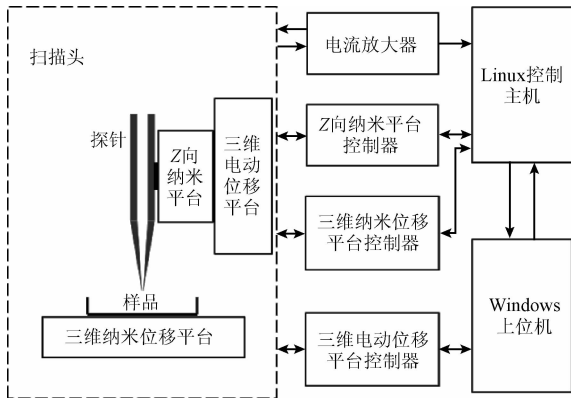


图7 自制 SICM 系统结构

Fig. 7 Schematic diagram of developed SICM system

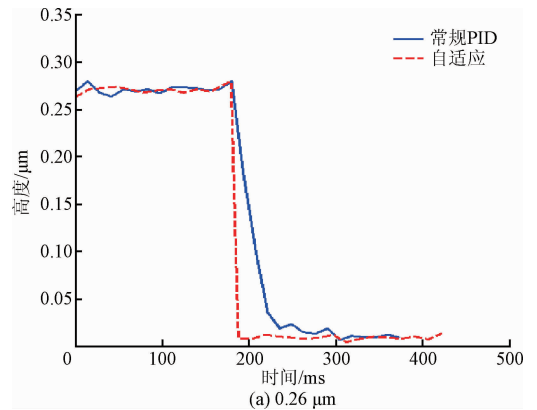
实验中的探针均由激光微电极拉制仪 (P2000, Sutter Instrument 公司) 对外直径  $1.0\ \text{mm}$ 、内直径  $0.5\ \text{mm}$  的硼硅酸盐玻璃管拉制而成, 探针中注入磷酸盐缓冲溶液 (PBS) 作为导电溶液, 样品也浸没在同样 PBS 溶液中。

扫描样品选用宽  $5\ \mu\text{m}$ 、深  $200\ \text{nm}$  的聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 栅格, 由 AFM 标定用标准栅格 (P/N 498-000-026, Digital Instruments 公司) 作为母模倒模而成。

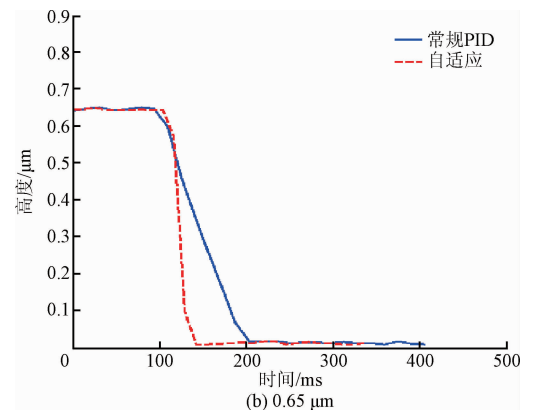
### 3.2 控制算法动态特性分析

对同样下降沿阶跃信号, 分别采用基于补偿模型的自适应控制方法和常规 PID 控制方法让探针进行跟踪。在探针跟踪过程中, 通过移动三维纳米位移平台  $Z$  向, 给予 4 个不同的高度变化, 分别得到两种算法对于高度阶跃的响应曲线, 如图 8 所示。其中虚线为使用自适应方法, 预测高度根据将要施加的阶跃大小提前输入, 实线为常规 PID 方法, 两种算法下 PID 参数保持一致。

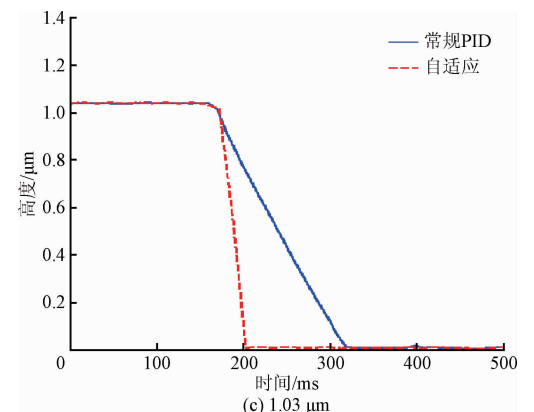
从图 8 可以看出在不同高度下降沿阶跃信号下自适应方法的响应速度均快于常规 PID 方法, 且对于高度变化大的特征效果更加明显。不同下降沿阶跃的调节时间如表 1 所示。下降沿高度为  $0.26\ \mu\text{m}$  时, 常规 PID 方法调节时间用时  $63\ \text{ms}$ , 而本自适应方法仅用时  $16\ \text{ms}$ 。随着下降沿高度增加, 两种方法响应速度的差距逐渐增大, 在下降沿高度为  $2.6\ \mu\text{m}$  时, 常规 PID 方法所需调节时间用时  $922\ \text{ms}$ , 超出了可接受范围, 而自适应方法相对效果较好, 仅用时  $94\ \text{ms}$ 。



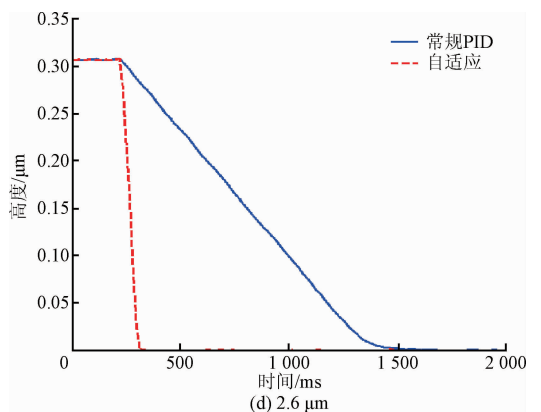
(a)  $0.26\ \mu\text{m}$



(b)  $0.65\ \mu\text{m}$



(c)  $1.03\ \mu\text{m}$



(d)  $2.6\ \mu\text{m}$

图8 不同高度阶跃的响应特性曲线

Fig. 8 Experimental curves of different height steps responses

表1 不同高度阶跃的调节时间

Table 1 Settling time of different height steps

阶跃高度/ $\mu\text{m}$	调节时间/ms	
	常规PID	自适应控制
0.26	63	16
0.65	109	34
1.03	250	47
2.60	922	94

3.3 实验结果对比

为了验证基于电流偏差补偿模型的自适应控制方法对于SICM成像的效果,在相同的PID参数下分别采用新方法与原方法对标准200 nm栅格样品进行扫描成像,做了两组对照实验,行扫描频率分别为0.5和2 Hz。

3.3.1 行扫描频率0.5 Hz条件下扫描成像结果对比

原方法与新方法对标准栅格的成像如图9所示,两者采用相同行扫描频率及PID参数。将两次成像结果图9(a)、(b)中的虚线区域放大,如图9(c)、(d),可以看到两幅图像中栅格左边界都比较清晰,而右边界在原方法所成图像中有模糊现象,在新方法所成图像中则相对清晰,取图9(c)、(d)截面图进行比较,如图9(e)所示,在上升沿处两次成像高度曲线基本重合,在下降沿处新方法探针跟踪效果明显优于原PID方法,得到图像的上升沿和下降沿斜率基本相同。比较结果说明新算法抵消了上升和下降沿的偏差差异,相比原方法能够得到更准确的图像。

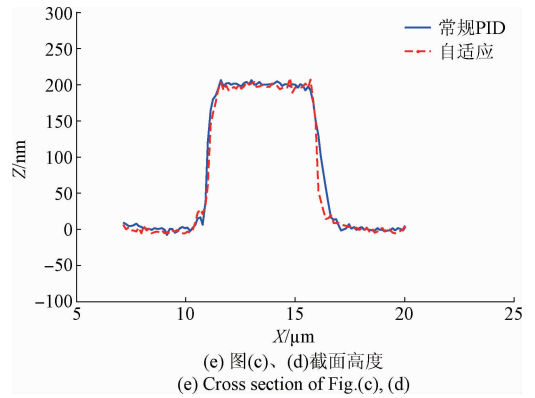


图9 SICM标准栅格扫描结果对比,行扫描频率0.5 Hz  
Fig. 9 Comparison of SICM images of standard grating in 0.5 Hz scan rate

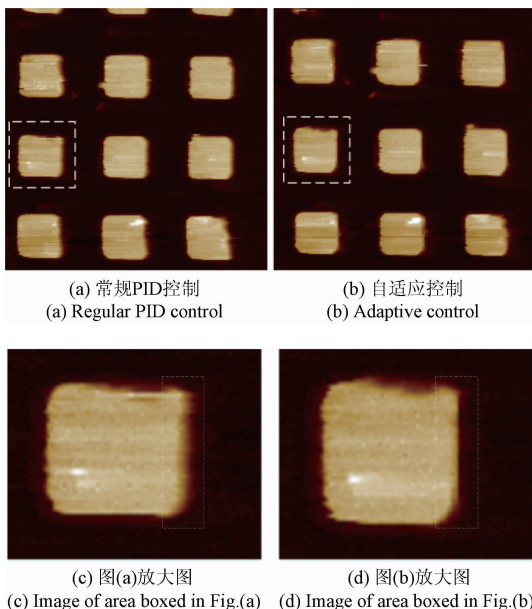
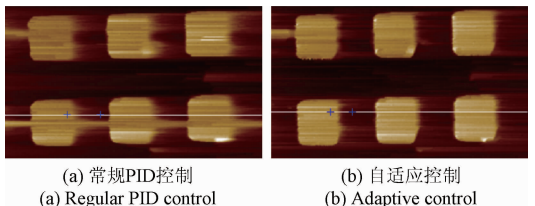
图9(e)栅格参数如表2所示,其中拖尾长度指图像中下降沿的起点和终点所对应的X轴距离。相比常规PID方法,自适应控制扫描的栅格图像在下降沿所需的调节时间更少、拖尾更小,且所测栅格宽度与制作样品时所用的母模栅格宽度5  $\mu\text{m}$ 相比误差更小。

表2 横截面曲线图9(e)栅格参数,行扫描频率0.5 Hz  
Table 2 Parameters of grating in cross section Fig. 9 (e) in 0.5 Hz scan rate

参数	常规PID	自适应控制
下降沿调节时间/ms	94	70
下降沿拖尾长度/ $\mu\text{m}$	1.40	0.94
栅格半高宽/ $\mu\text{m}$	5.19	4.93
栅格宽度与母模误差/ $\mu\text{m}$	+0.19	-0.07

3.3.2 行扫描频率2 Hz条件下扫描成像结果对比

将行扫描频率增加至2 Hz,采用同样的PID参数分别用两种控制方法进行扫描,成像结果如图10所示。对上升沿处,原方法还可以完成成像,但在下降沿处已经无法及时跟踪到高度的变化,产生明显的“拖尾”。而新方法可以有效地改善这一状况,但是依然可以看到图像有轻微的“拖尾”现象,主要是由于是扫描速度过快,系统的闭环反馈频率低,造成单位时间内不能很好地调节探针到目标工作点,如果提高系统地闭环反馈速度,将能够解决这一问题,从而提高扫描速度和成像质量。



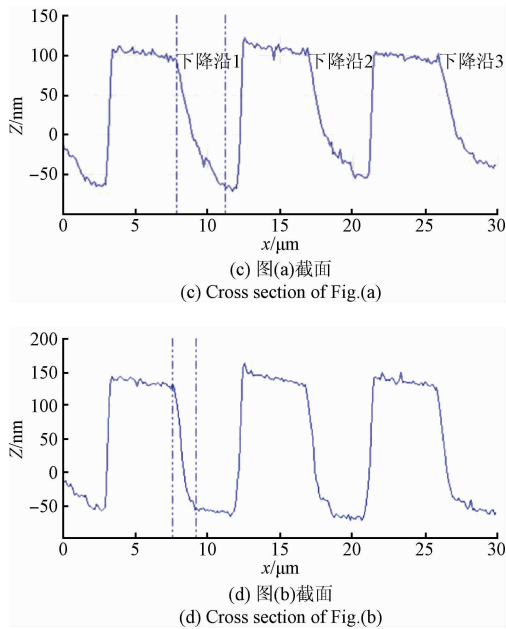


图10 SICM标准栅格扫描结果对比,行扫描频率2 Hz  
Fig. 10 Comparison of SICM images of standard grating in 2 Hz scan rate

行扫描频率2 Hz条件下成像的横截面曲线如图10(c)、(d)所示,其横截面中3个栅格下降沿的参数如表3所示。可以看出常规控制方法成像图栅格高度差在150 nm左右,小于栅格实际高度差200 nm,这是由于常规PID控制方法下,探针在扫描到下一个上升沿时未完成对下降沿的跟踪,探针还未下降到最低又开始上升,导致栅格的成像高度低于实际高度。而在自适应控制方法下栅格高度差为190 nm左右(受信号噪声影响,目前SICM的Z向分辨率为20 nm左右,会带来一定测量误差),更接近栅格的实际高度差。因此,可以得出自适应成像方法优于常规PID控制方法。

表3 横截面曲线图10(c)、(d)栅格参数,  
行扫描频率2 Hz

Table 3 Parameters of grating in Cross section  
Fig. 10(c)、(d) in 2 Hz scan rate

参数	常规PID(图10(c))			自适应控制(图10(d))		
	高度/ nm	调节 时间/ms	拖尾 长度/ $\mu\text{m}$	高度/ nm	调节 时间/ms	拖尾 长度/ $\mu\text{m}$
下降沿1	161	57	3.41	188	28	1.65
下降沿2	158	53	3.18	196	31	1.88
下降沿3	142	59	3.53	183	35	2.12

## 4 结 论

本文针对SICM成像实验中的“拖尾”现象,结合成

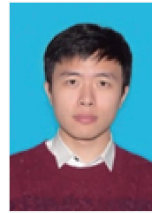
像原理分析了其产生的原因,并提出一种基于电流偏差补偿模型的自适应控制方法。该方法解决了由于逼近曲线非线性所带来的SICM控制系统在工作点两侧系统动态响应不同这一问题。新方法利用相同的PID控制参数就能够对样品上升沿和下降沿就能产生相同的跟踪效果,减小下降沿模糊现象和“拖尾”现象,使得PID参数调节更加容易。另外对于形貌变化剧烈以及宽度较小的形貌特征,如凹坑特征,使用原方法探针未跟踪到实际深度就已经完成了该处的扫描,使成像的凹坑深度小于实际深度。新方法解决了下降沿处跟踪缓慢的问题,能更准确反映其高度信息,减小图像失真。本文提出的方法对于提高SICM系统性能,使SICM更加精确、快速地获得样品形貌具有重要作用。

## 参考文献

- [1] HANSMA P K, DRAKE B, MARTI O, et al. The scanning ion-conductance microscope [J]. Science, 1989, 243(4891): 641-643.
- [2] 李达成, 王佳. 纳米科学测量与传感技术[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(1): 75-78.  
LI D CH, WANG J. The measurent and sensor in nanometer scale science[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1995, 16(1): 75-78.
- [3] KORCHEV Y E, MILOVANOVIC M, BASHFORD C L, et al. Specialized scanning ion-conductance microscope for imaging of living cells [J]. Journal of Microscopy, 2010, 188(1): 17-23.
- [4] SHEVCHUK A I, FROLENKOV G I, SANCHEZ D, et al. Imaging proteins in membranes of living cells by high-resolution scanning ion conductance microscopy [J]. Angewandte Chemie, 2006, 45(14): 2212-2216.
- [5] NOVAK P, LI C, SHEVCHUK A I, et al. Nanoscale live-cell imaging using hopping probe ion conductance microscopy [J]. Nature Methods, 2009, 6(4): 279-281.
- [6] KORCHEV Y E, NEGULYAEV Y A, EDWARDS C R W, et al. Functional localization of single active ion channels on the surface of a living cell [J]. Nature Cell Biology, 2000, 2(9): 616-619.
- [7] SEGER R A, ACTIS P, PENFOLD C, et al. Voltage controlled nano-injection system for single-cell surgery [J]. Nanoscale, 2012, 4(19): 5843-5846.
- [8] PERRY D, NADAPPURAM B P, MOMOTENKO D, et al. Surface charge visualization at viable living cells [J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(9): 3152-3160.
- [9] LI P, LIU L, WANG Y, et al. Phase modulation mode of scanning ion conductance microscopy [J]. Applied

- Physics Letters, 2014, 105(5): 053113.
- [10] HAPPEL P, THATENHORST D, DIETZEL I D. Scanning ion conductance microscopy for studying biological samples [J]. Sensors, 2012, 12 (11): 14983-15008.
- [11] NOVAK P, LI C, SHEVCHUK A I, et al. Nanoscale live-cell imaging using hopping probe ion conductance microscopy [J]. Nature Methods, 2009, 6 (4): 279-281.
- [12] JUNG G E, NOH H, SHIN Y K, et al. Closed-loop ARS mode for scanning ion conductance microscopy with improved speed and stability for live cell imaging applications [J]. Nanoscale, 2015, 7 (25): 10989-10997.
- [13] KODERA N, SAKASHITA M, ANDO T. Dynamic proportional-integral-differential controller for high-speed atomic force microscopy [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(8): 083704.
- [14] GUNEV I, VAROL A, KARAMAN S, et al. Adaptive Q control for tapping-mode nanoscanning using a piezoactuated bimorph probe [J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(4): 043707.
- [15] 王栋,于鹏,周磊,等.基于梯形算子的AFM驱动器非对称迟滞性校正[J].仪器仪表学报,2015,36(1): 32-39.  
WANG D, YU P, ZHOU L, et al. Asymmetric hysteresis calibration of AFM actuator based on keystone operator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(1):32-39.
- [16] 张春雷,刘健,王绍治,等.前馈控制算法校正相移微动台非线性运动[J].电子测量与仪器学报,2014, 28(8):879-884.  
ZHANG CH L, LIU J, WANG SH ZH, et al. Feed forward control algorithm for nonlinear motion correction of phase shifting stage [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2014,28(8):879-884.
- [17] AHMAD A, SCHUH A, RANGELOW I W. Adaptive AFM scan speed control for high aspect ratio fast structure tracking [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(10): 103706.
- [18] 李鹏,张常麟,王文学,等.扫描离子电导显微镜的研制与实现 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43 (6): 1894-1898.  
LI P, ZHANG CH L, WANG W X, et al. Development and implementation of scanning ion conductance microscope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1894-1898.

### 作者简介



滕泽宇,2012年于中国石油大学(北京)获得学士学位,2017年于东北大学获得硕士学位,现在为东北大学博士研究生,主要研究方向为自动控制、精密仪器。

E-mail: zeyuteng@foxmail.com

**Teng Zeyu** received his B. Sc. degree from China University of Petroleum-Beijing in 2012 and M. Sc. degree from Northeastern University in 2017. Now he is a Ph. D. candidate in Northeastern University. His main research interests include automatic control and precision instrument.



刘连庆(通讯作者),2002年于郑州大学获得学士学位,2008年于中科院沈阳自动化所获博士学位,现为中科院沈阳自动化所研究员,主要研究方向为纳米机器人学、智能控制、微纳生物传感技术。

E-mail: lqliu@sia.cn

**Liu Lianqing** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhengzhou University in 2002 and Ph. D. degree from Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2009. Now he is a professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include nanorobotics, intelligent control, and biosensors.