

## 扫描探针显微镜的控制技术综述

彭超, 徐红兵, 张健

(电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 扫描探针显微镜(SPM)具有高精度成像、纳米操纵等功能, 是纳米科技、生命科学、材料科学和微电子等科学研究的重要工具. 随着科学技术的发展, 科学家和工程师们对科研工具SPM的性能也提出越来越高的要求. SPM控制技术作为提高SPM性能的关键技术之一, 已经得到广泛的关注和研究. 本文首先介绍SPM系统以及两种常用的SPM, 讨论SPM扫描器(即压电驱动器)的特性及其数学模型; 然后详细总结了SPM水平方向和竖直方向的控制技术, 并且对扫描探针显微镜多输入多输出(SPM MIMO)控制技术进行了探讨; 最后总结了SPM控制技术研究现状及其所面临的问题.

**关键词:** 扫描探针显微镜; 压电驱动器; 迟滞; 迭代学习控制; 二自由度(2DOF)控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Control technologies for scanning probe microscope—a review

PENG Chao, XU Hong-bing, ZHANG Jian

(School of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** Because of its high resolution imaging and nano-manipulation abilities, scanning probe microscope(SPM) is an important tool for the experimental investigation and manipulation in nanotechnology, including life science, material science, microelectronic, etc. With the development of science and technology, higher demands are proposed on SPM performances. As one of key technology to improve SPM performances, SPM control technology has received considerable attentions and investigations. At first, SPM system and two most commonly used SPM's are introduced; characteristics of SPM scanner(piezo-actuator) and its mathematic model are discussed. Secondly, existing SPM level scanning control technologies and vertical positioning control technologies are summarized; and SPM MIMO(multiple-input multiple-output) control technology is explored. Finally, current SPM control technology research and existing questions are discussed.

**Key words:** scanning probe microscope; piezoactuator; hysteresis; iterative learning control; two-degree-freedom (2DOF) control

### 1 引言(Introduction)

1981年, G. Binnig, H. Rohrer在IBM苏黎世实验室发明了扫描隧道显微镜(STM)并为此获得1986年诺贝尔物理学奖<sup>[1]</sup>. STM的出现使人类能够对原子级结构和活动过程进行观察. 由于STM需要被测样本必须为导体或半导体, 其应用受到一定的局限. 1985年, 原子力显微镜(AFM)的发明则将观察对象由导体、半导体扩展到绝缘体. 此后, 人们在STM和AFM原理的基础上利用样品与探针之间多种不同关系, 发明了力调制显微镜(FMM)、相位检测显微镜(PDM)、静电力显微镜(EFM)、电容扫描显微镜(SCM)、热扫描显微镜(SThM)和近场光隧道扫描显微镜(NSOM)等各种系列显微镜. 这些显微镜都是基于探针在被测样本表面上进行横向和纵向扫描, 并检测探针针头与样品表面之间相关检测量变化的原理研制的设备, 因此, 以上各系列显微镜被统称为扫

描探针显微镜(SPM)<sup>[2]</sup>.

SPM被比作作纳米的“眼”和“手”<sup>[3]</sup>, 具有高精度(原子级)观测和纳米操纵制造功能. SPM已经在纳米科技、材料科学、化学、生物等领域中得到广泛的应用. 例如胶原蛋白脱水过程的观察<sup>[4]</sup>、单分子化学反应的实时监控<sup>[5]</sup>、对InAs/InP纳米线内部结构的研究<sup>[6]</sup>以及对高通量的纳米材料与纳米器件的制造<sup>[7]</sup>等. 科学技术的发展也对科研工具SPM的性能提出越来越高的要求, 要求SPM具有更快的成像速度、更高的成像精度以及操纵的鲁棒性<sup>[8]</sup>. 虽然硬件技术(如探针制造技术、高精度传感器等)能够提高SPM的测量精度和测量速度, 图像处理技术能够提高图像处理速度和成像精度; 然而利用控制技术提高扫描精度、扫描速度、成像精度等也是使SPM满足上述性能要求的

关键. 因此, 研究SPM控制技术以满足SPM技术发展的要求得到越来越多的关注.

本文首先介绍扫描探针显微镜系统, 讨论压电驱动器特性及其数学模型; 然后重点总结SPM控制技术包括水平方向、垂直方向的控制方法以及MIMO控制方法; 最后对SPM控制技术及其研究面临的问题进行了总结.

## 2 扫描探针显微镜(Scanning probe microscope)

扫描探针显微镜的基本工作原理是利用探针与样品表面原子分子的相互作用, 即当探针与样品表面接近至纳米尺度时形成的各种相互作用的物理场, 通过检测相应的物理量而获得样品表面形貌<sup>[9]</sup>. SPM主要由探针、扫描器、位移传感器、控制器、检测系统和图像系统5部分组成(如图1所示). 控制器通过扫描器在垂直 $z$ 轴方向移动样品以使探针和样品之间的距离(或相互作用的物理量)稳定在某一固定值; 同时在 $x$ - $y$ 水平平面移动样品, 使探针按照图1所示的扫描路径扫描样品表面. SPM在稳定探针与样品间距的情况下, 检测系统检测探针与样品之间相互作用的相关物理量信号; 在稳定相互作用物理量的情况下, 则通过垂直方向 $z$ 轴位移传感器检测探针与样品之间距离. 图像系统则根据检测信号(或探针与样品间距)对样品表面进行成像等图像处理.

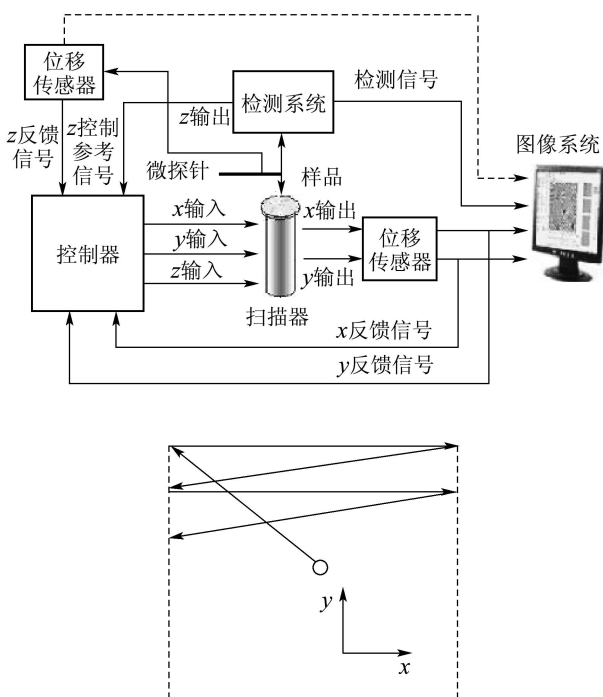


图1 SPM系统结构及扫描路径图

Fig. 1 SPM system and scanning path

根据所利用的探针与样品之间相互作用物理场的不同, SPM被分为不同系列的显微镜. 其中扫描隧道显微镜(STM)和原子力显微镜(AFM)是比较常用的两类SPM显微镜. STM是通过检测探针与被测样品之间的隧道电流的大小来检测样品表面结构. AFM是通过光电位移传感器检测针尖-样品间的相互作用力(既有可能是吸引力, 也有可能是排斥力)所引起的微悬臂形变来检测样品表面.

## 3 压电驱动器特性及其数学模型(Property of piezoactuator and its model)

SPM扫描器普遍采用压电驱动器. 压电驱动器的特性主要有迟滞、蠕变和振动3种非线性特性. 消除压电驱动器的非线性特性对SPM控制性能的不利影响, 从而提高扫描定位速度和精度是SPM控制技术重点要解决的问题, 而且各非线性特性的数学模型是基于模型的SPM控制技术研究的基础.

### 3.1 迟滞(Hysteresis)

压电驱动器的迟滞特性, 表现为输入电压与位移的关系是非线性的, 升压、降压位移曲线存在明显的位移差(如图2); 以及当前的输出位移不仅取决于当前输入电压而且取决于电压输入的历史值.

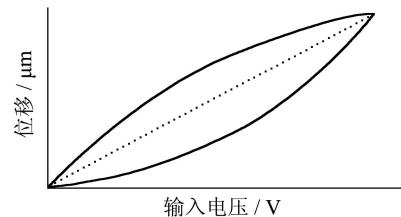


图2 输入电压与位移关系的迟滞特性

Fig. 2 Hysteresis between input voltage and displacement

常用的迟滞模型有 Preisach 模型、Prandtl-Ishlinskii(PI)模型、Krasnosel'skii-Pokrovskii(KP)模型等. 较早提出的迟滞模型是Preisach模型, 该模型利用具有继电器式特性的迟滞算子近似地表示整个系统的迟滞特性<sup>[10]</sup>, 但其密度函数需要大量实验确定, 在线调整困难. PI模型是对Preisach模型的改进, 用斜波函数特性的迟滞算子代替Preisach模型中具有阶跃函数特性的迟滞算子, 逐点逼近迟滞特性. PI模型的逆模型较为容易获得, 但模型结构较为复杂<sup>[11]</sup>. KP模型利用KP算子的累积效果可以较为全面地表示迟滞非线性, 具有能够在线辨识和适用于补偿控制设计的特点<sup>[12]</sup>. 为了建立能够准确描述迟滞特性又适用于迟滞系统控制设计的数学模型, 许多学者对迟滞数学模型进行了深入的研究. 文献[13]通过统计物理学分

析迟滞特性, 提出一种简单实用的压电陶瓷迟滞模型. 文献[14]提出Preisach模型的迟滞非线性神经网络的建模方法. 文献[15]提出基于混沌神经网络的压电驱动器迟滞模型. 文献[16]提出由迟滞静态非线性和动态特性子模型组成的迟滞混合模型. 文献[17]提出基于非对称迟滞曲线并能用最小二乘法计算的迟滞模型.

### 3.2 蠕变(Creep)

压电驱动器对突变输入电压的响应分为两阶段: 首先位移快速达到一定值; 然后由于压电驱动器剩余极化的影响而引起位移缓慢地达到稳定值; 这就是蠕变效应(如图3). 压电驱动器由于蠕变会造成极大的位移误差, 进而影响SPM扫描定位精度.

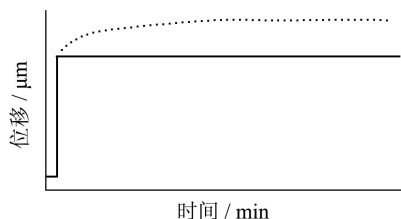


图3 压电驱动器在阶跃响应下的蠕变特性

Fig. 3 Creep under step input voltage

一般用到的蠕变模型有基于时域和频域两种表达方式的模型<sup>[18~20]</sup>. 蠕变的时域模型由下面的非线性等式近似表达:

$$y(t) = y_0 \left\{ 1 + \gamma \log\left(\frac{t}{t_0}\right) \right\}, \quad (1)$$

式中:  $t_0$ 表示蠕变发生的初始时间,  $y_0$ 为 $t_0$ 时刻的驱动器位移,  $\gamma$ 为通过检测驱动器阶跃响应得到的蠕变率. 时域模型能够较为准确地描述蠕变特性, 但选择适合于模型的时间参数 $t_0$ 非常困难.

蠕变的频域模型将蠕变看成弹性环节和多个阻尼环节的连接, 传递函数表达如下:

$$\frac{x(s)}{u_x(s)} = G(s) = \frac{1}{k_{x_0}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_{x_i}s + k_{x_i}}, \quad (2)$$

式中:  $k_{x_0}$ 为压电驱动器低频工作的弹性系数,  $k_{x_i}$ 为弹性常数,  $c_{x_i}$ 是阻尼常数. 频率模型虽然只能近似描述压电驱动器蠕变的低频响应, 但具有适用于蠕变补偿控制设计的优点.

### 3.3 振动(Vibrations)

由于压电驱动器具有比较低的结构阻尼, 当其工作在谐振频率附近时, 会产生自激振动. 实际上, 扫描器能达到的扫描频率一般远远小于其本身的最小谐振频率, 以免振动带来定位误差, 进而导致SPM扫描图像的失真. 图4为文献[21]中水

平平面 $x$ 轴三角波扫描试验结果图, 其三角波频率为40 Hz. 由图可见, 扫描轨迹有振动现象.

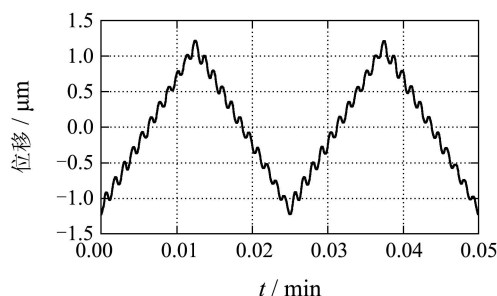


图4 三角波扫描结果图

Fig. 4 Triangle waveform scanning result

振动模型一般都是通过动态信号分析仪(DSA)分析压电驱动器对高频率小幅度电压输入信号(使迟滞和蠕变效应最小化)的响应得到, 即根据输入信号和输出结果拟合振动模型<sup>[22,23]</sup>. 文献[23]由实验数据拟合得到振动的传递函数模型如式(3)所示及其频率伯德图如图5所示:

$$G_x(s) = \frac{7.20 \times 10^{13} (s + 25 - 1059j)(s + 25 + 1059j)}{((s + 411)(s + 1200)(s + 5 - 486j)(s + 5 + 486j) \cdot (s + 70 - 1200j)(s + 70 + 1200j))}. \quad (3)$$

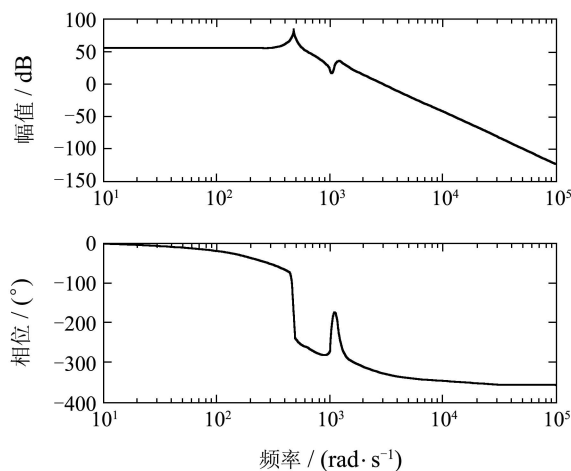


图5 振动传递函数的伯德图

Fig. 5 Bode diagram of vibrations transfer function

大部分压电驱动器的振动模型与上述振动模型相似. 共同点是在第一谐振频率处, 幅值响应有比较尖锐的谐振峰; 同时相位突减(如图4). 这样尖锐的谐振峰和相位快速降低导致压电驱动器的增益裕度比较低.

## 4 SPM控制技术(SPM control technology)

SPM控制需要克服压电驱动器的迟滞、蠕变和振动特性, 实现对水平平面的扫描轨迹跟踪和

竖直方向上探针与样品表面距离定位的精确控制. 下文将分别总结水平方向和竖直方向的控制技术, 并对SPM MIMO控制技术的研究进行讨论.

#### 4.1 水平方向控制(Level control)

水平方向控制通过控制压电驱动器使探针在样品表面完成重复光栅式扫描(如图1), 即 $x$ 轴上重复快速地跟踪三角波轨迹,  $y$ 轴上则相对缓慢地跟踪斜坡轨迹. 水平方向控制使SPM探针在样品表面能够高速精确地跟踪扫描轨迹, 从而实现SPM的高扫描精度和扫描速度. 下面将详细总结目前用于水平方向控制的4种控制方法: PID反馈控制、基于模型的前馈控制、迭代学习控制和二自由度(2DOF)控制.

##### 4.1.1 PID反馈控制(PID feedback control)

PID反馈控制通过高增益反馈消除压电驱动器的蠕变和迟滞等非线性特, 利用积分I控制提高SPM控制系统的增益裕度和控制精度. PI, PII, PID, PIID控制以及PID与其他控制技术相结合的方法都已被广泛应用到SPM系统水平方向控制中<sup>[24~31]</sup>. PID反馈控制框图如图6所示.

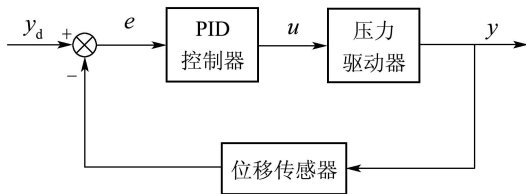


图6 PID反馈控制框图

Fig. 6 PID feedback control diagram

PID反馈控制的基本表达式如下:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{T_I s} + \frac{K_{II}}{(T_I s)^2} + K_D T_D s, \quad (4)$$

式中:  $U(s)$ ,  $E(s)$ 分别为控制器输入 $u$ 、误差 $e$ 的拉氏变换,  $T_I$ ,  $T_D$ 为积分和微分环节的时间常数,  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ 为PID参数,  $K_{II}$ 为双积分参数.

如果反馈增益足够高, PID反馈控制能极大地降低压电驱动器的扫描定位误差. 然而压电驱动器的低结构阻尼导致系统增益裕度较小. 低增益的PID反馈控制器在跟踪特定轨迹时又不能达到足够的精度. 为了保证系统的稳定性, SPM扫描频率只能为压电驱动器谐振频率的十分之一或百分之一. 通过降低位移传感器的位移信号噪声可以提高SPM扫描带宽, 然而硬件功能是有限的. 针对上述问题, 文献[24]提出PID参数自调整的控制方法, 通过调整系统增益来提高SPM扫描带宽. 文献[25]提出PID控制内环中加入正位移反

馈(PPF)控制器的控制方法, 以提高系统阻尼系数. 文献[23, 26]利用串接陷波滤波器(notch-filter)来消除开环频率反应中的尖锐谐振峰提高系统的增益裕度, 使得PID控制能够得到更高的反馈增益, 以提高SPM高频扫描精度.

为了提高SPM扫描频率、扫描精度以及系统鲁棒性, 一些学者提出了许多PID与其他控制技术相结合的SPM控制方法. 如基于神经网络的PID控制方法<sup>[27, 28]</sup>、模糊推理自校正PID控制<sup>[29]</sup>、PID控制与迟滞模型补偿相结合的控制算法<sup>[30]</sup>、基于混合李雅普诺夫方法的鲁棒自适应PID控制方法<sup>[31]</sup>.

##### 4.1.2 迭代学习控制(Iterative learning control)

迭代学习控制通过利用先前试验得到的信息来获得能够产生期望输出轨迹的控制输入, 并不断调整控制输入, 使输出跟踪期望轨迹, 适用于具有重复运动性质的控制(如SPM水平方向的扫描轨迹跟踪控制). 用于SPM控制的迭代学习控制系统一般由迭代学习控制器与反馈控制器组成, 其结构框图如图7所示.

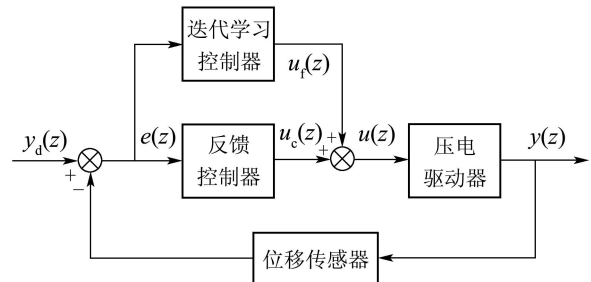


图7 迭代学习控制框图

Fig. 7 Iterative learning control diagram

迭代学习控制可以减弱压电驱动器的迟滞和蠕变等非线性特性以提高轨迹扫描精度, 并且在SPM水平方向控制中得到了良好的应用. 文献[32]证明了SPM迭代学习控制的收敛性, 并能够补偿系统迟滞特性, 提高SPM扫描精度. 文献[33]利用迭代学习控制补偿SPM系统的迟滞和振动特性, 并有效地提高了SPM扫描带宽. 文献[34]提出与 $H_\infty$ 反馈控制相结合的迭代学习控制方法, 有效地提高了系统的鲁棒性. 文献[35]提出基于B样条网络(BSN)滤波的迭代学习控制方法, 利用状态补偿迭代学习公式来提高SPM扫描精度.

##### 4.1.3 基于模型的前馈控制(Feedforward control based on model)

基于模型的前馈控制利用相应的模型设计前馈输入补偿SPM系统中压电驱动器的迟滞、蠕变和振动等非线性特性或者利用已知的系统动态模

型逆设计前馈控制器使实际输出尽量准确地跟踪期望输出轨迹. 基于模型的前馈控制不需要高反馈增益来消除系统的非线性特性, 能够减弱压电驱动器的振动特性, 提高SPM扫描带宽及扫描精度. 基于模型的前馈控制方法可以分为迟滞模型补偿控制、系统逆前馈控制以及多模型逆前馈控制.

1) 迟滞模型补偿控制.

迟滞模型补偿控制是以迟滞模型(如Preisach模型、PI模型等)为基础, 设计相应的补偿信号来消除系统的迟滞特性; 并与其他控制方法相结合以达到精确的水平方向扫描轨迹跟踪控制. 其基本控制结构如图8所示.

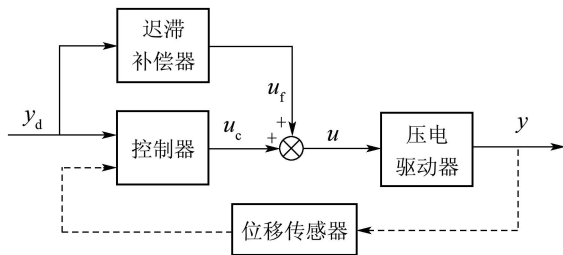


图 8 迟滞模型补偿控制框图

Fig. 8 Hysteresis model compensation control diagram

为了提高SPM水平扫描轨迹跟踪性能, 迟滞模型补偿控制在提高模型的准确性、减低补偿计算的复杂性和与其他控制方法相结合等方面得到了深入的研究. 文献[36]提出以稳态误差信号为参考变量, 利用Sigmoid函数自适应动态调整迭代步长的Preisach模型逆前馈补偿控制算法. 文献[37]提出离散重复控制与基于PI模型逆补偿相结合的控制方法. 文献[38]提出基于通用PI模型逆的前馈控制器与鲁棒自适应控制相结合的控制方法. 文献[39]提出基于Preisach模型的间接自适应补偿控制方法以提高AFM系统的扫描精度.

2) 系统逆前馈控制.

系统逆前馈控制根据压电驱动器的系统动态模型逆设计前馈控制器, 使系统实际输出准确地跟踪期望输出轨迹. 系统逆前馈控制能够有效地减弱压电驱动器的振动特性, 提高SPM的扫描频率和扫描精度<sup>[40]</sup>, 使得系统逆前馈控制能够在SPM控制中得到良好的应用. 考虑到压电驱动器的驱动能力, 文献[41]提出根据压电驱动器的驱动能力和轨迹跟踪误差要求设计最优逆输入的最优逆前馈控制方法. 针对压电驱动器的系统模型为非最小相位系统的情况, 文献[42]提出预览最优系统逆控制, 根据有限的预览时间内确定的期望

轨迹计算出非因果最优逆输入, 实现了SPM扫描轨迹的在线更改. 为了提高系统逆前馈控制的定位精度, 文献[43, 44]提出将系统逆前馈控制与迭代学习控制相结合的迭代逆控制.

3) 多模型逆前馈控制.

多模型逆前馈控制根据压电驱动器蠕变、迟滞和振动模型逆设计前馈控制器. 其基本控制框图如图9所示.

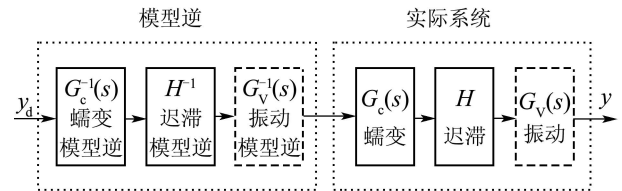


图 9 多模型逆前馈控制框图

Fig. 9 Multi-model inversion control diagram

文献[20]将 SPM 的蠕变、迟滞和振动特性都建立各自模型, 利用蠕变频域线性模型、迟滞Preisach模型、试验数据拟合的振动模型来设计前馈控制器以此提高SPM的扫描精度和扫描带宽. 文献[45]通过迟滞Preisach模型和蠕变模型补偿控制算法来提高AFM的扫描精度. 文献[46]通过PI迟滞模型逆、蠕变补偿算法设计全开环控制方法以提高压电驱动器的跟踪控制性能. 文献[47]在AFM的扫描控制中, 利用基于PI迟滞模型逆和蠕变模型逆的控制算法来消除压电驱动器的迟滞和蠕变特性.

4.1.4 2DOF控制(Two-degree-freedom control)

2DOF控制通过前馈控制器减弱压电驱动器的振动和提高 SPM 扫描带宽. 利用反馈控制减弱迟滞、蠕变等非线性特性和提高系统鲁棒性. 2DOF控制系统结构框图如图10所示.

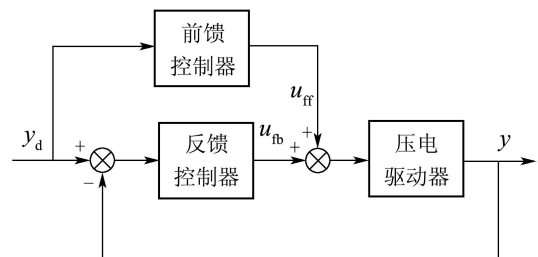


图 10 2DOF控制框图

Fig. 10 2DOF control diagram

文献[48, 49]提出由系统逆前馈控制器和高增益反馈控制器组成的2DOF控制方法, 通过系统逆前馈控制器补偿系统振动特性和保证系统输出跟踪期望轨迹, 通过高增益PD反馈控制器补偿迟滞和蠕变等非线性特性. 文献[50]提出根据系统

扫描带宽、精度和鲁棒性要求设计基于 $H_\infty$ 混合灵敏度的最优2DOF控制方法以提高SPM的轨迹跟踪性能. 文献[51]提出将鲁棒逆前馈控制和鲁棒 $H_\infty$ 反馈控制相结合设计的2DOF控制方法以提高AFM控制系统扫描频率和鲁棒性.

综上所述, PID反馈控制是较早应用于SPM控制中的控制方法, 但随着SPM对其扫描频率和精度要求的提高, PID反馈控制并不能很好地解决压电驱动器高频振动特性问题的缺点越来越明显. 迭代学习控制虽然能够提高SPM水平方向的轨迹跟踪性能, 但需要大量的试验数据和对控制器要求高. 基于模型的前馈控制能够有效地提高SPM的扫描频率, 但是系统鲁棒性差, 无法消除由于模型的不确定性和外部扰动引起的定位误差. 针对上述3种控制方法在SPM应用中存在的缺点, 许多学者进行了深入的研究. 2DOF控制是解决上述缺点的控制方法之一. 2DOF控制将前馈控制和反馈控制相结合, 通过前馈控制提高SPM扫描频率, 通过反馈控制提高扫描精度和系统鲁棒性. 目前, 如何将前馈反馈控制系统地相结合以满足SPM对控制性能要求是SPM 2DOF控制研究的重点.

#### 4.2 竖直方向控制(Vertical control)

SPM竖直方向控制通过压电驱动器, 控制探针与样品表面之间距离以使探针与样品表面相互作用的物理量保持稳定(或者将探针与样品表面之间距离稳定在某一固定值). 竖直方向定位精确度直接影响到SPM成像和纳米操作的精度, 定位速度影响到SPM的成像速度. 样品表面轮廓是未知的、探针与样品间距对其相互作用非常敏感和相互作用非常复杂等问题使在竖直方向上实现快速精确定位十分困难. SPM竖直方向控制的作用是在克服上述问题的基础上实现探针在竖直方向的精确快速定位.

目前, 用于竖直方向定位的控制方法有PID反馈控制、鲁棒控制、结合模型补偿的反馈控制、迭代学习反馈控制以及基于样品表面轮廓或图像的控制方法等. 文献[28]提出的基于神经网络自学习的PID控制器提高了STM扫描器的定位精度. 文献[52]将PI控制用于AFM的竖直方向定位控制. 文献[53]给出用于AFM竖直方向恒力控制的模糊PID控制设计方法. 文献[54]将PI参数自调整的控制方法用于AFM竖直方向恒高控制. 文献[55]提出设计基于 $H_\infty$ 回路成形的鲁棒控制器提高定位控制的鲁棒性及系统带宽. 文献[56]在分析探针

与样品间的动态特性和建立扫描器数学模型的基础上设计基于 $H_\infty$ 的鲁棒控制器, 并证明比传统PID控制的定位速度更快和定位误差更小. 文献[57]给出使探针能够在样品表面进行高速数据采集时的高增益鲁棒控制方法. 文献[58]提出基于模型的前馈补偿控制器和 $H_\infty$ 反馈鲁棒控制器组成的2DOF控制以提高AFM定位速度和减少检测误差. 文献[59]提出的实时反馈迭代学习控制方法极大地提高了AFM的成像速度. 文献[60]提出的基于样品表面图像迭代模型的控制方法提高了STM的成像速度. 文献[61]提出基于样品表面轮廓轨迹预测的逆控制方法, 以减小样品与探针间的竖直方向定位误差.

上述SPM竖直方向控制方法的研究目标都是提高系统的控制精度、频率和保证系统的鲁棒性, 从而提高SPM的成像精度、成像速度以及纳米操作的鲁棒性.

#### 4.3 MIMO控制(MIMO control)

SPM控制器需要同时控制水平方向的扫描以及垂直方向的定位(如图1), 水平平面 $x$ 轴的高速移动会引起 $y$ 轴方向的振动, 水平方向高速扫描也会引起探针与样品之间竖直方向上的振动; 这样的水平方向和竖直方向的耦合问题在高速扫描时特别明显. 耦合所引起的定位误差严重地影响SPM的成像质量, 甚至会损坏探针和扫描样品. 虽然上述的水平方向和竖直方向控制方法在SPM控制中已经得到广泛的应用, 然而都忽略了水平 $x, y$ 轴方向扫描和竖直方向 $z$ 轴定位的耦合问题. 目前, 并没有比较系统的、完善的SPM MIMO控制方法以解决SPM控制的耦合问题, 相关的研究也不是很多. 文献[62]提出利用迭代逆控制补偿水平方向扫描导致竖直方向的定位误差, 并证明该方法提高了竖直方向定位精度. 文献[63]虽然建立了水平 $x, y$ 轴方向的传递函数矩阵, 但直接忽略 $x$ 轴与 $y$ 轴之间的耦合, 只给出了各个轴的基于Glover-McFarlane  $H_\infty$ 回路的SISO控制设计方法. 文献[64]首先建立并分析水平 $x, y$ 轴和竖直 $z$ 轴方向的MIMO模型, 然后对每个自由度单独设计结合迟滞前馈补偿的反馈控制器, 然而该控制器只能保证在频率低于100 Hz的情况下各自由度之间不存在耦合.

#### 5 总结及展望(Conclusion and perspective)

本文对SPM控制技术的研究进行了详细的总结, 分析了水平方向、竖直方向控制及MIMO控制的特点和难点等.

对于SPM控制技术需要解决的传统问题可以总结为以下几个方面:

1) 如何消除压电驱动器的迟滞、蠕变等非线性特性对SPM扫描精度的不利影响。

2) 如何消除压电驱动器的振动特性以及系统的低增益裕度等对SPM扫描带宽的限制。

3) 如何减弱基于模型的控制技术对模型依赖性强的确定和提高数学模型的准确性。

4) SPM扫描成像过程中需要同时控制水平方向扫描和竖直方向定位, 如何消除 $x, y, z$ 轴耦合导致的扫描定位误差。

5) 如何保证水平方向扫描轨迹的匀速跟踪以使SPM成像分辨率一致,

6) 如何提高竖直方向定位控制的精度、带宽和鲁棒性。

上述问题通过现有的SPM控制技术已经得到了一定的解决, 但是SPM扫描定位带宽作为限制SPM扫描速度和成像速度的关键问题, 仍然是SPM控制技术研究的重点。为了解决SPM水平方向和竖直方向控制的耦合问题, SPM MIMO控制技术也需要进一步的研究。

随着SPM的发展, SPM控制技术也面临越来越多的新问题。如多平台多探针SPM的出现, 需要分析多平台多探针SPM的动态特性并解决其多平台定位的控制耦合问题。更加深入研究SPM控制技术以解决不断出现的新问题, 对于SPM的发展具有极其重要的意义。

## 参考文献(References):

- [1] BINNING G, ROHRER H, WEIBEL E. Studies by scanning tunneling microscopy[J]. *Physical Review Letters*, 1982, 49(1): 49 – 57.
- [2] 田文超, 贾建援. 扫描探针显微镜系列及其应用综述[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(1): 108 – 112.  
(TIAN Wenchao, JIA Jianyuan. Overview of the mechanisms and applications of the scanning probe microscope series[J]. *Journal of Xiidian University*, 2003, 30(1): 108 – 112.)
- [3] 白春礼. 纳米科技及其发展前景[J]. 科学通报, 2001, 46(2): 89 – 92.  
(BAI Chunli. Nano technology and its prospects[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(2): 89 – 92.)
- [4] LIN H, CLEGG D O, LAL R. Imaging real-time proteolysis of single collagen in molecules with an atomic force microscope[J]. *Biochemistry*, 1999, 38(31): 9956 – 9963.
- [5] MASON M D, RAY K, FRENKEN J. Single molecule acid-based kinetics and thermodynamics[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(7): 73004 – 73007.
- [6] BLESZYNSKI-JAYICH A C, FROBERG L E, BJORK M T, et al. Imaging a one-electron InAs quantum dot in an InAs/InP nanowire[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(24): 245327 – 245330.
- [7] PRIS A D, PORTER M D. Nanoparticle coding: size-based assays using atomic force microscopy[J]. *Langmuir*, 2004, 20(17): 6969 – 6973.
- [8] SALAPAKA S M, SALAPAKA M V. Scanning probe microscopy[J]. *Control Systems Magazine*, 2008, 28(2): 65 – 83.
- [9] 傅惠南, 王宏霞, 王晓红, 等. SPM探针制造技术的研究和发展[J]. 电子显微学报, 2005, 24(6): 622 – 628.  
(FU Huinan, WANG Hongxia, WANG Xiaohong, et al. Evolvement of fabrication technology of SPM probe[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2005, 24(6): 622 – 628.)
- [10] BERNARD Y, MENDES E, BOUILAULT F. Dynamic hysteresis modeling based on preisach model[J]. *IEEE Transactions on Magnetic*, 2002, 38(2): 885 – 888.
- [11] AL JANAIDEH M, CHUN-YI SU, RAKHEJA S. Development of rate independent Prandtl-Ishlinskii model for characterizing asymmetric hysteresis nonlinearities of SMA actuators[C] // *Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. New York, USA: IEEE, 2008: 477 – 481.
- [12] 王湘江, 王兴松. 基于KP模型的GMA迟滞系统辨识与补偿[J]. 中国机械工程, 2008, 19(10): 1167 – 1173.  
(WANG Xiangjiang, WANG Xingsong. GMA hysteresis system identification and compensation based on KP model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(10): 1167 – 1173.)
- [13] 曲东升, 荣伟彬, 孙立宁, 等. 压电陶瓷微位移器控制模型的研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(6): 602 – 607.  
(QU Dongsheng, RONG Weibin, SUN Lining, et al. Research on the control model of piezoelectric micropositioning actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 602 – 607.)
- [14] 赵新龙, 谭永红. 对Preisach类的迟滞非线性神经网络建模[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 581 – 585.  
(ZHAO Xinlong, TAN Yonghong. Modeling preisach-type hysteresis nonlinearity using neural networks[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 581 – 585.)
- [15] 刘向东, 修春波, 刘承, 等. 基于混沌神经网络的压电陶瓷迟滞模型[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(2): 135 – 138.  
(LIU Xiangdong, XIU Chunbo, LIU Cheng, et al. Hysteresis model of piezoceramics based on chaotic neural networks[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(2): 135 – 138.)
- [16] ZHANG X L, TAN Y H. A hybrid model for rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 157(1): 54 – 60.
- [17] JIANG H, JI H L, QIU J H. A modified Prandtl-Ishlinskii model for modeling asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, 57(5): 1200 – 1210.
- [18] JUNG H, SHIM J Y, GWEON D. New open-loop actuating method of piezoelectric actuators for removing hysteresis and creep[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(9): 3436 – 3440.
- [19] SALAPAK S, SEBASTIAN A, CLEVELAND J P, et al. High band width nano-positoner: a robust control approach[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(9): 3232 – 3241.
- [20] CROFT D, SHED G, DEVASIA S. Creep, hysteresis, and vibration compensation for piezoactuators: atomic force microscopy application[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2001, 123(1): 5 – 43.
- [21] BHIKKAJI B, RATNAM M, FLEMING A J, et al. High-performance control of a PZT scanner[C] // *Proceedings of the 4th IFAC Symposium on System, Structure and Control*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2006: 439 – 444.
- [22] YAN Y, ZOU Q Z, LIN Z Q. A control approach to high-speed probe-based nanofabrication [J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(17): 175301-1 – 175301-11.

- [23] LEANG K K, DEVASIA S. Hysteresis, creep, and vibration compensation for piezoactuators: feedback and feedforward control[C] // *Proceedings of the 2nd IFAC Conference on Mechatronic Systems*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2002: 283 – 289.
- [24] ABRAMOVITCH D Y, HOEN S, WORKMAN R. Semi-automatic tuning of PID gains for atomic force microscopes[C] // *Proceedings of the 2008 American Control Conference*. New York, USA: IEEE, 2008: 2684 – 2689.
- [25] MAHMOOD I A, MOHEIMANI S O R. Improvement of accuracy[C] // *Proceedings of the 2009 American Control Conference*. New York, USA: IEEE, 2009: 973 – 978.
- [26] KODERA N, YAMASHITA H, ANDO T. Active damping of the scanner for high-speed atomic force microscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(5): 053708-1 – 053708-5.
- [27] WEI Q, HU C Z, ZHANG D, et al. Neural network control of scanning probe microscope precision stage[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*. New York, USA: IEEE, 2009: 326 – 330.
- [28] 魏强, 张玉林, 于欣蕾, 等. 扫描隧道显微镜微位移工作台的神经网络PID控制方法研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 422 – 427. (WEI Qiang, ZHANG Yulin, YU Xinlei, et al. Study on neural network PID control for micro-displacement stage of scanning tunneling microscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 422 – 427.)
- [29] 节德刚, 孙立宁, 曲东升, 等. 压电陶瓷微位移系统的模糊PID控制方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(2): 145 – 147. (JIE Degang, SUN Lining, QU Dongsheng, et al. Fuzzy-reasoning based self-tuning PID control for piezoelectric micro-displacement system[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(2): 145 – 147.)
- [30] ZHOU F Q, ZHAO X Z, WANG Y Y. A close-loop control approach to AFM scanner based on a hysteresis model[C] // *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*. New York, USA: IEEE, 2008: 7532 – 7535.
- [31] BASHASH S, SAEIDPOURAZAR R, JALIL N. Tracking control of time-varying discontinuous trajectories with application to probe-based imaging and nanopositioning[C] // *Proceedings of the 2009 American Control Conference*. New York, USA: IEEE, 2009: 277 – 282.
- [32] ASHLEY S C, ARIDÖGAN U, RIDDLE R, et al. Hysteresis inverse iterative learning control of piezoactuators in AFM[C] // *Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2008: 8269 – 8274.
- [33] WU Y, ZOU Q Z. Iterative control approach to compensate for both the hysteresis and the dynamics effects of piezo actuators[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2007, 15(5): 936 – 944.
- [34] HELFRICH B E, LEE C, BRISTOW D A, et al. Combined  $H_\infty$ -feedback and iterative learning control design with application to nanopositioning system[C] // *Proceedings of the 2008 American Control Conference*. New York, USA: IEEE, 2008: 3893 – 3800.
- [35] LEE Fushin, CHIEN Chiangju, WANG Jhencheng. B-spline network based iterative learning for tracking control of a piezoelectric actuator[C] // *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. New York, USA: IEEE, 2006: 3760 – 3765.
- [36] 舒亮, 陈定方, 卢全国. 一种新的磁滞非线性前馈补偿算法[J]. *自动化学报*, 2009, 35(7): 953 – 958. (SHU Liang, CHEN Dingfang, LU Quanguo. A novel algorithm of nonlinear hysteresis feedforward compensation[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(7): 953 – 958.)
- [37] SHAN Y F, LEANG K K. Repetitive control with prandtl-ishlinskii hysteresis inverse for piezo-based nanopositioning[C] // *Proceedings of the 2009 American Control Conference*. New York, USA: IEEE, 2009: 301 – 306.
- [38] JANAIDEH A M, FENG YING, RAKHEJA S, et al. Hysteresis compensation for smart actuators using inverse generalized prandtl-ishlinskii model[C] // *Proceedings of the 2009 American Control Conference*. New York, USA: IEEE, 2009: 307 – 312.
- [39] CHEN Y L, YAN M T. Hysteresis compensation and adaptive controller design for a piezoceramic actuator system in atomic force microscopy[C] // *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. New York, USA: IEEE, 2009: 656 – 661.
- [40] CROFT D, DEVASIA S. Vibration compensation for high speed scanning tunneling microscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(12): 4600 – 4605.
- [41] CROFT D, STILSON S, DEVASIA S. Optimal tracking of piezo-based nano-positioners[J]. *Nanotechnology*, 1999, 10(2): 201 – 208.
- [42] ZOU Q Z, SANTOSH D. Preview-based optimal inversion for output tracking: application to scanning tunneling microscopy[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2004, 12(3): 375 – 386.
- [43] KYONG-SOO K, ZOU Q Z. Model-less inversion-based iterative control for output tracking: piezo actuator example[C] // *Proceedings of the 2008 American Control Conference*. New York, USA: IEEE, 2008: 2710 – 2715.
- [44] KYONG-SOO K, ZOU Q Z. Iteration-based scan-trajectory design and control with output-oscillation minimization: atomic force microscope example[C] // *Proceedings of the 2007 American Control Conference*. New York, USA: IEEE, 2007: 4227 – 4233.
- [45] 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. (WANG Yueyu, ZHAO Xuezheng. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(6): 1032 – 1040.)
- [46] RAKOTONDRAIBE M, CÉDRIC CLÉVY, LUTZ P. Complete open loop control of hysteretic, creeped, and oscillating piezoelectric cantilevers[J]. *IEEE Transactions on Automatic Science and Engineering*, 2010, 7(3): 440 – 450.
- [47] MOKABERI B, REQUICHA A G. Compensation of scanner creep and hysteresis for AFM nanomanipulation[J]. *IEEE Transactions on Automatic Science and Engineering*, 2008, 5(2): 197 – 206.
- [48] LEANG K K, SANTOSH D. Feedback-linearized inverse feedforward for creep, hysteresis, and vibration compensation in AFM piezoactuators[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2007, 15(5): 927 – 935.
- [49] YAN Y, WU Y, ZOU Q Z, et al. An integrated approach to piezoactuator positioning in high-speed atomic force microscope imaging[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(7): 073704-1 – 073704-9.
- [50] LEE CHIBUM, SALAPAKA S M. Robust broadband nanopositioning: fundamental trade-offs, analysis, and design in a two-degree-freedom control framework[J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(3): 035501-1 – 035501-16.
- [51] WU Y, ZOU Q Z. Robust inversion-based 2-DOF control design for output tracking: piezoelectric-actuator example[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2009, 17(5): 1069 – 1082.
- [52] GEORG S, ASTROM K J, DEMARTINI B E, et al. Design and modeling of a high-speed AFM-scanner[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2007, 15(5): 906 – 915.
- [53] WANG Y J. Constant force feedback controller design using fuzzy technique for a tapping mode atomic force microscope[C] // *Chinese Control and Decision Conference*. New York, USA: IEEE, 2009: 1691 – 1696.
- [54] ZHOU X W, DONG X K, ZHANG Y D, et al. Automatic tuning of PI controller for atomic force microscope based on relay with hysteresis[C] // *The 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control*. New York, USA: IEEE, 2009: 1271 – 1275.



- [55] SEBASTIAN A, SALAPAK M V. Robust control approach to atomic force microscopy[C] // *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*. New York, USA: IEEE, 2003: 3443 – 3445.
- [56] SCHITTER G, P MENOLD, KNAPP H F, et al. High performance feedback for fast scanning atomic force microscopes[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(8): 3320 – 3327.
- [57] HSU S, FU L C. Robust output high-gain feedback controllers for the atomic force microscope under high data sampling rate[C] // *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications*. New York, USA: IEEE, 1999: 1626 – 1631.
- [58] SCHITTER G, ALLGOWER F F, STEMMER A. A new control strategy for high-speed atomic force microscopy[J]. *Nanotechnology*, 2004, 15(1): 108 – 114.
- [59] WU Y, ZOU Q Z, SU C M. A current cycle feedback iterative learning control approach for AFM imaging[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2009, 8(4): 515 – 527.
- [60] CLAYTON G M, DEVIASIA S. Iterative image-based modeling and control for higher scanning probe microscope performance[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(8): 083704-1 – 083704-12.
- [61] 张玉东, 方勇纯, 董晓坤, 等. 基于预测轨迹逆控制的AFM扫描方法[C] // 第27届中国控制会议. 北京: 航空航天大学出版社, 2008: 744 – 748.  
(ZHANG Yudong, FANG Yongchun, DONG Xiaokun, et al. Predictive trajectory based inverse control of AFM scanning method[C] // *Proceeding of the 27th Chinese Control Conference*. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2008: 744 – 748.)
- [62] TIEN S C, ZOU Q Z, DEVASIA S. Iterative control of dynamics-coupling-caused errors in piezoscanners during high-speed AFM operation[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2005, 13(6): 921 – 931.
- [63] SEBASTIAN A, SALAPAKA S.  $H_\infty$  loop shaping design for nanopositioning[C] // *Proceedings of the 2003 American Control Conference*. New York, USA: IEEE, 2003: 3708 – 3713.
- [64] ROEL M, MUSTAFA U, VAN DE MOLENGRAFT R, et al. Identification, control and hysteresis compensation of a 3 DOF metrological AFM[J]. *Asian Journal of Control*, 2009, 11(2): 130 – 143.

### 作者简介:

彭超 (1980—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为扫描探针显微镜控制, E-mail: pccdiy@163.com;

徐红兵 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制系统, E-mail: hbxu@uestc.edu.cn;

张健 (1978—), 男, 讲师, 目前研究方向为非线性控制系统, E-mail: zhangj@uestc.edu.cn.

## 下 期 要 目

- 动态评价粒子群优化及风电场微观选址 ..... 万春秋, 王峻, 杨耕, 张兴
- 移动机器人路径规划的改进蚁群优化算法 ..... 赵娟平, 高宪文, 符秀辉, 刘金刚
- 马尔科夫链的粒子群优化算法全局收敛性分析 ..... 任子晖, 王坚, 高岳林
- 风险资本约束下保险公司的最优比例再保险——投资策略 ..... 曾燕, 李仲飞
- 基于形状记忆合金驱动器的微纳定位系统鲁棒自适应控制 ..... 杜娟, 冯颖, 胡跃明
- 基于Backstepping方法的电子节气门控制 ..... 陈虹, 胡云峰, 郭宏志, 宋同好
- 船舶航向保持变论域模糊-最小二乘支持向量机复合控制 ..... 刘胜, 王宇超, 傅荟璇
- 基于高精度导航设备的海上多传感器配准算法 ..... 王成飞, 王航宇, 石章松, 占明锋
- 卫星姿控系统基于模糊基函数网络与自回归模型的故障预测 ..... 张茂林, 宋华, 朱新宇
- 评估诊断证据可靠性的信息融合故障诊断方法 ..... 徐晓滨, 王玉成, 文成林
- 计及螺旋桨负载的船舶电力系统协调控制设计 ..... 张利军, 孟杰, 兰海
- 末端有未知扰动的分布参数柔性机械臂的鲁棒边界控制 ..... 吴忻生, 邓军
- 啤酒生产调度数学模型及其优化 ..... 郑松, 葛铭, 李春富, 薛安克
- 一类多执行机构系统的滑模控制设计及其应用 ..... 马克茂, 赵辉
- 基于非支配排序遗传算法II的多学科鲁棒协同优化方法 ..... 李海燕, 马明旭, 井元伟
- 随机时滞马尔科夫跳跃系统的比例-微分跟踪控制 ..... 许莉娟, 张天平, 裔扬