

引用格式:王一帆,赵庆旭,王盼,等.微纳操纵成像系统自适应模糊PI控制器设计[J].电光与控制,2019,26(4):106-110. WANG Y F, ZHAO Q X, WANG P, et al. Design of adaptive fuzzy PI controller for micro-nano manipulated imaging system[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(4):106-110.

微纳操纵成像系统自适应模糊PI控制器设计

王一帆, 赵庆旭, 王盼, 吴文鹏, 胡贞
(长春理工大学电子信息工程学院, 长春 130022)

摘要: 在传统PI控制微纳操纵成像系统的基础上实现参数实时在线调整。为了获得更好的控制效果,进行了自适应模糊PI控制的微纳操纵成像系统仿真研究。运用探针与样品之间原子力保持不变的原理对微纳操纵成像系统动态过程进行建模,加入模糊PI控制模块,建立了一套完整的系统仿真平台。设计了一种自适应模糊PI控制器,该控制器通过对电压值的误差和误差变化的判断进行模糊化推理,实现对控制参数的实时在线整定,以达到优化控制的目的;同时,利用Matlab进行仿真研究。结果表明,自适应模糊PI控制算法比传统PI控制算法能有效地改善系统的动态性能和稳态性能。

关键词: 微纳操纵成像系统; PI控制; 自适应模糊PI控制

中图分类号: TP273.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.04.021

Design of Adaptive Fuzzy PI Controller for Micro-nano Manipulated Imaging System

WANG Yi-fan, ZHAO Qing-xu, WANG Pan, WU Wen-peng, HU Zhen

(School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the traditional PI control micro-nano manipulated imaging system, the parameters can be online adjusted in real time. In order to obtain better control effects, the simulation of the micro-nano manipulated imaging system of adaptive fuzzy PI control is studied. The principle that the atomic force between the probe and the sample remains unchanged is used, the dynamic process of the micro-nano manipulated imaging system is modeled, and the fuzzy PI control module is added to establish a complete system simulation platform. An adaptive fuzzy PI controller is designed, which can adjust the control parameters online in real time by the fuzzy reasoning of the voltage error and error variations, so as to optimize the control process. At the same time, Matlab is used for simulation. The results show that the adaptive fuzzy PI control algorithm can improve the dynamic and steady-state performance of the system more effectively than the traditional PI control algorithm.

Key words: micro-nano manipulated imaging system; PI control; adaptive fuzzy PI control

0 引言

微纳操纵成像系统具有微米/纳米级成像能力,是纳米技术领域研究的主要工具。在成像过程中,微纳操纵成像系统将具有半径约几个埃米尖端的探针在被测样品的表面进行扫描,然后通过观测和分析针尖与样品表面之间的相互作用力得到样品表面的轮廓^[1]。其中,控制器的主要作用是将微悬臂振动间接改变的四

象限接收电压值的变化作为反馈信号,利用所设计的控制算法使压电扫描器在微悬臂振动方向上移动到设定的参考值^[2]。毫无疑问,控制器是微纳操纵成像系统的核心部件之一,它直接决定了系统的测量性能^[3-4]。因此,当前国内外关于微纳操纵成像系统的研究主要集中在设计更为合理的算法来实现样品与探针尖端之间距离的精确控制^[5],减少样品和针尖的损伤。

目前,实验室的微纳操纵成像系统中,控制器采用比例积分(PI)算法,实验操纵者通常需要多次调试才能找到一组效果较好的离线PID控制参数。因此,在PID控制器基础上加入自适应模糊PID控制器原理,设计了自适应模糊PID控制器,实现对PID参数的

收稿日期:2019-01-21

修回日期:2019-02-24

基金项目:吉林省自然科学基金(201554)

作者简介:王一帆(1994—),女,吉林长春人,硕士生,研究方向为机器人测控技术。

实时在线调整,能取得比传统PID更好的控制效果。本文打破传统利用复杂不易理解的欧拉-伯努利方程对系统动态过程进行建模的方式^[6],采用输入输出电压值恒定的方式进行建模,建立一套微纳操纵成像系统仿真平台,借此验证自适应模糊PID控制器对微纳操纵成像系统的控制参数实时在线整定的控制效果。

1 系统模型构建

如图1所示,微纳操纵成像系统主要组成部分包括控制器、压电陶瓷驱动平台和悬臂梁以及四象限光斑检测器。在微纳操纵成像系统中,控制器的作用是计算出合适的控制量 $g(t)$,使扫描过程中样品与探针尖端之间的距离保持恒定,也就是保持针尖与样品之间的电压值恒定。

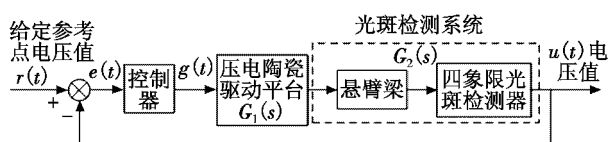


图1 微纳操纵成像系统结构图

Fig.1 Structural chart of micro-nano manipulated imaging system

1.1 压电陶瓷驱动平台

首先对压电陶瓷驱动平台进行建模,取采样时间为0.000 04 s,阶跃信号为0.1 mV,记录随时间变化时压电陶瓷电压值的变化情况。根据图2a可观测出该数据组构成的波形图存在噪声干扰,利用Matlab对图2a的波形采用线性最小二乘滤波方法(lowess),主要思想是取一定比例的局部数据,将局部范围从左往右依次推进,最终得到一条连续的曲线。其中比例越少,拟合越不光滑(因为过于看重局部性质),反之越光滑。在Matlab输入窗口输入smooth(a,52,lowess)对该数据组进行去噪滤波得到图2b。

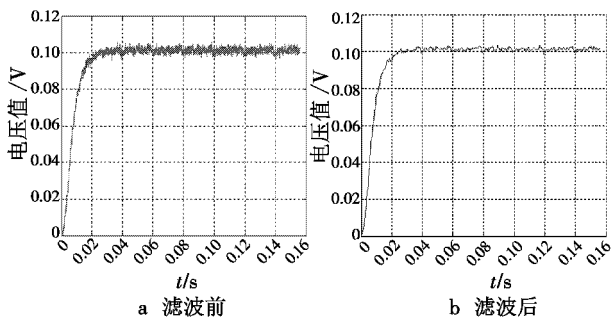


图2 压电陶瓷驱动平台系统响应

Fig.2 Piezoelectric ceramic driving platform system response

运用Matlab系统辨识工具箱对图2b系统模型进行辨识,在选取不同阶次时对该波形的拟合率是不同的,一阶函数拟合率为91.61%,二阶函数拟合率为96.03%,三阶函数拟合率为95.76%。本文选取拟合

率最高的二阶函数拟合。

由图1可知,系统的输入信号、偏差信号、压电陶瓷驱动平台的输出信号以及整个系统输出信号分别为 $r(t), e(t), g(t)$ 和 $u(t)$,经拉普拉斯变换后得 $r(s), e(s), g(s)$ 和 $u(s)$,得出压电陶瓷驱动平台相应的二阶系统的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{g(s)}{e(s)} = \frac{1.0077}{(0.074277s+1)(0.0057058s+1)} \quad (1)$$

1.2 微悬臂光斑检测系统

用于微悬臂光斑偏转系统的光束偏转法是根据光杠杆原理^[7]设计而成的,它的结构较简单,而且能很好地适应环境,其原理如图3所示。

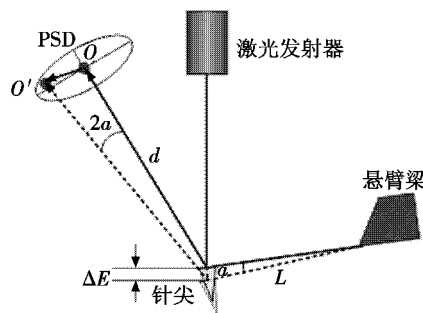


图3 光杠杆原理示意图

Fig.3 The principle of optical lever

假设初始状态为反射光点落在四象限探测器光敏面的O点上。针尖逐渐逼近样品至某一数值时,微悬臂会因两者间产生的原子力而发生偏转,设其偏转量为 ΔE ,偏转角为 α ,则相应的反射光束偏转角为 2α ,导致光点由O移动到O',记其位移量为 ΔS 。若微悬臂长度记为L,微悬臂反射光点处到光敏面的距离记作d,则光敏面上反射光点的位移 ΔS 可表示为

$$\Delta S \approx 2ad = 2 \frac{\Delta E}{L} d = 2 \frac{d}{L} \Delta E \quad (2)$$

由式(2)可知,通过光杠杆作用可将悬臂的位移放大 $2d/L$ 倍。本文研制微纳操纵系统采用的ContAl-G接触式探针悬臂长(L)为450 μm ,四象限光斑检测器到悬臂的距离(d)约为80.5 mm,则四象限光斑的位移约为悬臂位移的357.78倍。

1.3 四象限光斑检测器

四象限光斑检测器,利用光斑的偏移和输出的电压变化值构建数学模型。首先对四象限光斑检测器进行手动移位,将光斑从光斑中心向左侧每移动0.1 mm记录一次电压值,再将光斑移回中心点后向右移动,每移动0.1 mm记录一次电压值。按光斑完整的在四象限中的数据为有效值,四象限光斑检测器及所得数据的仿真如图4所示。经过多次比较可得,四象限光斑

检测器工作在 $[-1, 1]$ 内可近似为比例环节, 相应的一阶系统数学模型为

$$f(x) = 1173x - 105 \quad (3)$$

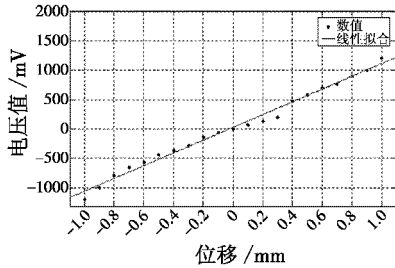


图 4 光斑在 $-1 \sim 1$ mm 变化时对应电压值拟合图像

Fig. 4 Fitted image of voltage value

when the light spot changes from -1 mm to 1 mm

根据图 1 可知, 光斑检测系统由两部分串联组成: 第一部分是微悬臂光斑偏转系统, 可以认为是一个线性放大环节, 增益为 357.78; 第二部分是四象限光斑检测器, 其本身性质是光电转换器件, 可以认为其转换是瞬时完成的, 假设为一个比例环节, 由式(3)可得出位移变化 $1 \mu\text{m}$ 时电压值变化约为 1.173 mV , 其增益约为 1.173, 所以光斑检测系统为

$$G_2(s) = \frac{u(s)}{g(s)} \quad (4)$$

其值约为 420 mV 。

1.4 微纳操纵成像系统

根据上述对微纳操纵系统各个部分的分析建模, 由图 1 可得开环传递函数为

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{423.2}{(0.074277s + 1)(0.0057058s + 1)} \quad (5)$$

2 自适应模糊 PI 控制器设计

2.1 自适应模糊 PI 控制原理

由式(5)得出系统的开环传递函数, 在图 1 中还缺少一个合适的控制器。在扫描不同的样品时为了获得更好的成像效果, 需要反复调整控制参数。而微纳操纵成像系统通常采用传统 PID 控制器, 传统 PID 控制器是线性结构的, 该控制器会根据给定参数 $r(t)$ 和输出值 $u(t)$ 做比较, 计算出实时误差函数为

$$e(t) = r(t) - u(t) \quad (6)$$

$$u(k) = K_p * e(k) + K_i * \sum_{j=0}^k e(j) + K_d * [e(k) - (k-1)] = K_p * e(k) + K_i * \sum_{j=0}^k e(j) + K_d * \Delta e(k) \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

式中: $u(k)$ 为采样第 k 时刻控制器的输出值; $e(k)$, $e(j)$ 分别为采样第 k, j 时刻输入的电压误差值; $\Delta e(k)$ 为采样第 $e(k)$ 时刻输入的电压误差变化率; K_p 为比例

系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数。

自适应模糊 PID 控制^[8]是在 PID 控制基础上, 加入逻辑控制器对偏差及偏差率进行控制, 如图 5 所示。

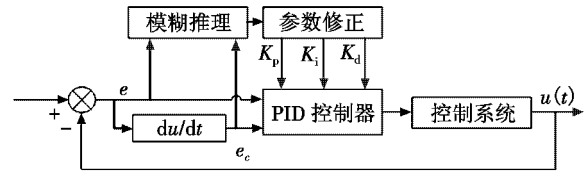


图 5 自适应模糊 PID 控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of adaptive fuzzy PID control system

分析图 5 可知, 基于自适应模糊 PID 控制系统可分为 PID 控制器控制电压值部分和模糊控制器调参部分。在模糊控制器调节参数部分中, 将电压值的偏差 e 和偏差的变化率 e_c 作为模糊系统的输入, K_p, K_i 和 K_d 3 个参数的变化值作为 PID 的输出。根据制定的模糊控制规则进一步做出模糊推理的参数校正, 在线实时改变 PID 参数的值, 定义参数调整算式为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + (e, e_c)_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + (e, e_c)_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + (e, e_c)_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 为 PID 参数的初始值; $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 为模糊控制器的输出, 也是 PID 的 3 个校正参数, 在运行中通过不断检测 e 和 e_c 的值, 对参数进行在线修改, 以满足不同 e 和 e_c 对控制参数的需求, 使参数适应不同样品的扫描。

2.2 自适应模糊 PI 控制器设计

模糊控制的模型维度越高, 越有利于提高系统的控制精度, 然而维度较高的模型会使控制规则变得更复杂, 影响控制算法的实现, 目前广泛应用二维模糊控制器作为基于自适应模糊 PI 的微纳操纵成像系统的控制器^[9-10]。

1) 系统输入输出变量的确定。由图 5 可知, 微纳操纵成像系统的核心是控制电压值恒定, 由 PID 控制器负责整体的调节, 而 PID 控制参数的调整部分则由模糊控制器进行自适应调整。根据自适应模糊 PID 的微纳操纵成像系统控制特性, 本文选取当前电压值误差 e 和电压值误差变化率 e_c 作为模糊控制器的输入量, PID 控制参数的变化量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 作为模糊控制器的输出量。

2) 模糊化处理。依据上述分析, 定义模糊控制器输入量当前电压值误差 e 、电压值误差变化率 e_c 和输出控制量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊子集均为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ 。系统偏差 e 的量化论域范围为 $[-0.6, -0.3, -0.1, 0, 0.2, 0.5, 1]$, 偏差变化率 e_c 量化论域范围为 $[-15, -8, -3, 0, 1, 2, 6]$, 控制量 u 的

化论域范围为 $[-1, -0.5, -0.2, 0, 0.5, 1, 2]$ 。然后选取模糊语言变量相应的隶属度函数为三角形。

在 Matlab2016b 中调用 Fuzzy 在弹出的页面中建立模糊控制器,根据模糊控制规则进行模糊推理,采用模糊推理的 Mamdani 法,并决策出模糊输出量。

3) 模糊推理。根据具体的系统确定输入、输出量。令输入量为当前电压值误差 e 和电压值误差变化率 e_c , 输出量为控制量 u , 根据 e, e_c, u 建立模糊规则。模糊规则如表 1 所示, 共建立 28 条规则, 用于修改 K_p, K_i, K_d 的参数模糊调整规则, 如表 1 所示。

表 1 模糊规则
Table 1 Fuzzy rules

电压值误差 变化率 e_c	电压值误差 e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-	NB	NB	NB	NM	NM	-
NM	-	NB	-	-	-	NM	NS
NS	NM	NM	-	NS	NS	-	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	ZE	PS	PS
PS	NM	-	PS	PS	PS	PS	-
PM	PS	-	-	-	-	-	-
PB	-	PB	PB	-	-	-	-

对于二维输入 (e, e_c) 、一维输出 (u) 的 Fuzzy 控制系统,其控制规则一般可写成 if $(e = e_j)$ and $(e_c = e_{c_i})$ then $(u = u_{ij})$ 。其中, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。举例用 if-then 语言表示: if $(e$ is NM) and $(e_c$ is NB) then $(u$ is NB)。

4) 解模糊。一个模糊集合是模糊控制器本身的输出量,采用反模糊化方法判决出一个确切的精确量,在该设计中反模糊化选取重心法(加权平均法)。对输出模糊集合用连续函数描述情况,输出值由加权平均法求得,即

$$\mu = \frac{\sum \mu(u_i) u_i}{\sum \mu(u_i)} \quad (9)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$, 表示集合覆盖元素个数。

3 仿真实验及分析

根据第 1 章的系统模型和第 2 章控制器的设计, 本文利用 Matlab/Simulink 搭建了微纳操纵成像控制系统仿真模型, 仿真验证自适应模糊 PI 控制器的性能。系统仿真如图 6 所示。

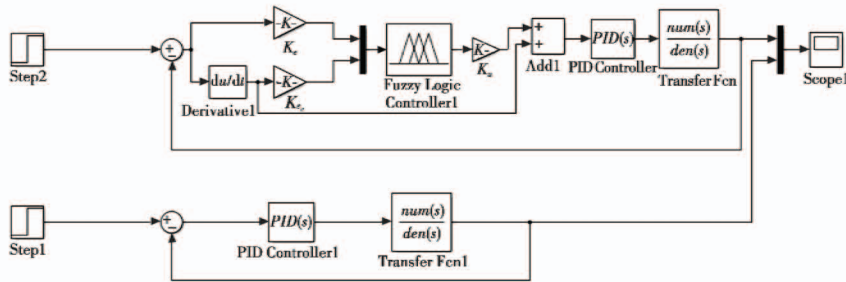


图 6 自适应模糊 PI 与常规 PI 仿真图

Fig.6 Simulation diagram of adaptive fuzzy PI and conventional PI

3.1 阶跃响应

采用阶跃响应信号,验证自适应模糊 PI 的响应速度和稳态时间的优越性。调节量化因子 K_e, K_c, K_u 分别为

$$\begin{cases} K_e = n/e(\max) \\ K_c = m/e_c(\max) \\ K_u = u(\max)/l \end{cases} \quad (10)$$

式中: n, m, l 分别为 K_e, K_c, K_u 的量化等级, 一般可取 6 或 7; $e(\max)$ 为电压值误差; $e_c(\max)$ 为电压值误差变化率; $u(\max)$ 为控制输出的论域。式(10)只做参考值, 与实际值会有偏差, 故一般采用经验推理得出 $K_e = 135, K_c = 0.65, K_u = 3$ 。由于微纳操纵成像控制系统是微米/纳米级的操作, 对噪声特别敏感, 微分环节对噪声有放大的作用, 因此在设计控制器时不考虑微分部分^[11]。确定 PID 控制参数 $K_p = 0.01, K_i = 0.1, K_d = 0$ 。

在微纳操纵成像系统控制端输入参考信号为阶

跃信号 0.1 mV, 取采样时间为 0.000 04 s, 仿真时间为 10 s, 可以得到自适应模糊 PI 和 PI 系统的阶跃响应曲线, 其仿真结果见图 7。

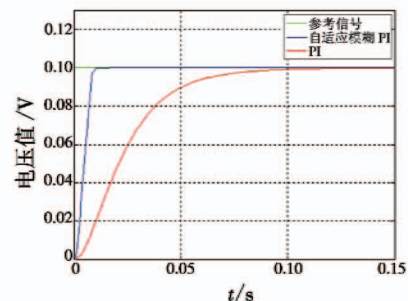


图 7 自适应模糊 PI 系统阶跃响应仿真结果

Fig.7 Simulation results of step response of adaptive fuzzy PI system

由图 7 可看出, 基于自适应模糊 PI 控制系统的调节时间大约在 0.01 s 范围内, PI 控制系统大约在 0.1 s 范围内, 可以看出对 PI 参数的改进策略明显提升了控

制系统的响应速度,缩短了调节时间。

3.2 正弦和三角波跟踪

采用正弦和三角波信号,验证自适应模糊 PI 在不同样品的跟踪能力。在微纳操纵成像系统控制端输入参考信号 $r(t) = \sin 2\pi t$ 正弦波信号和三角波信号,得到自适应模糊 PI 和 PI 系统的跟踪位移和跟踪误差曲线,其仿真结果见图 8、图 9。基于自适应模糊 PI 控制系统的跟踪误差分别大约在 $\pm 0.001 \mu\text{m}$, $\pm 0.002 \mu\text{m}$ 范围内,PI 控制系统的跟踪误差分别大约在 $\pm 0.17 \mu\text{m}$, $\pm 0.027 \mu\text{m}$ 范围内,可以看出对 PI 参数的改进策略明显提升了控制系统对正弦信号的跟踪能力。

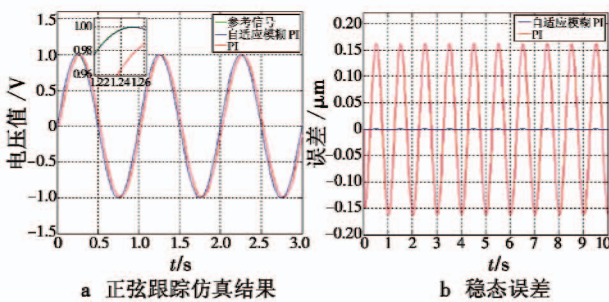


图 8 自适应模糊 PI 系统正弦波信号实验结果

Fig. 8 Sinusoidal wave tracking experiment results of adaptive fuzzy PI system

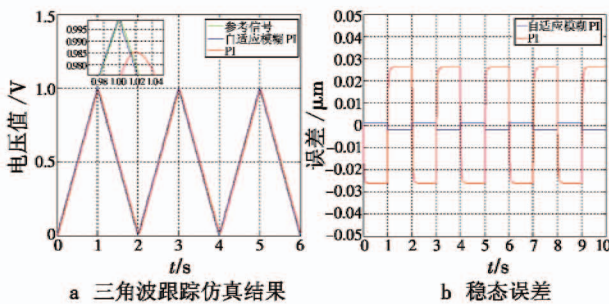


图 9 自适应模糊 PI 系统三角波信号实验结果

Fig. 9 Triangular wave tracking experiment results of adaptive fuzzy PI system

由图 7~图 9 可知,对于微纳操纵成像系统,自适应模糊 PI 控制与传统 PI 控制相比,具有更快的响应特性、更高的控制精度和跟踪能力,其控制效果优于传统 PI 控制,不需要精准的数学模型,可以实时在线整定 PI 参数。这说明在实际应用中自适应模糊 PI 能够较好地适应环境变化,与传统 PI 相比具有更好的动态特性。

4 结束语

本文通过自适应模糊控制器对 PI 参数进行实时

调整,获得了较好的控制效果;通过 Simulink 平台进行扫描仿真,直观地反映出自适应模糊 PI 具有较高的准确性、快速性以及跟踪能力,明显体现出其优越性,并为将自适应模糊 PI 运用于实际微纳操纵成像系统等更进一步的工作提供了一定的依据。

参考文献

- [1] GIESSIBL F J. Advances in atomic force microscopy[J]. Review of Modern Physics, 2003, 75(3):949-983.
- [2] BUTTERWORTH J, PAO L Y, ABRAMOVITCH D Y. Architectures for tracking control in atomic force microscopes [C]//Proceedings of the IFAC World Congress, 2008: 8236-8250.
- [3] ABRAMOVITCH D Y, ANDERSSON S B, PAO L Y, et al. A tutorial on the mechanisms, dynamics, and control of atomic force microscopes [C]//American Control Conference, 2007:3488-3502.
- [4] RANA M S, POTA H R, PETERSEN I R. A survey of methods used to control piezoelectric tube scanners in high-speed AFM imaging [J]. Asian Journal of Control, 2018, 20(4):1379-1399.
- [5] CHEN Y F, LI Y Z, SHAN G Q, et al. Design and implementation of a novel horizontal AFM probe utilizing a quartz tuning fork [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2018, 19(1):39-46.
- [6] 梁军,符雪桐,吕勇哉. 自适应 PID 控制—I. 基本原理与算法[J]. 浙江大学学报:自然科学版,1994, 28(5): 523-529.
- [7] 宋云鹏. 基于微悬臂梁弯曲法的微尺度力学特性测量技术研究[D]. 天津:天津大学,2015.
- [8] 张金龙,徐慧,刘京南,等. 基于模糊神经网络的精密角度定位 PID 控制[J]. 仪器仪表学报,2012, 33(3): 549-554.
- [9] 曹海源,黎伟,初华,等. 基于模糊 PID 算法的红外面源黑体设计[J]. 电光与控制,2018, 25(7):92-95.
- [10] 张开生,折娇. 基于模糊理论的蒸汽加热罐温度控制系统的设计[J]. 传感器与微系统,2012, 31(2):118-120.
- [11] 鄢志丹. 基于 AFM 的纳米操作系统主控器及其反馈模块的开发[D]. 天津:天津大学,2007.