

基于 PZT 的微驱动定位系统及控制方法的研究

孙立宁, 孙绍云, 曲东升, 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 介绍了基于 PZT 驱动的一维微动工作台。该微动台采用柔性平行板铰链机构, 对其进行了出力和位移关系的分析, 并且进行了 ANSYS 的有限元分析设计, 求得了系统的固有频率和最大位移。其理论分析、有限元计算和试验测试结果的对比分析的一致性说明了理论分析的正确性和数值分析的可靠性。使用精密光栅进行微位移闭环检测, 使用哈工大博实精密测控公司研制的压电陶瓷驱动电源。采用单神经元自适应 PID 控制算法对系统进行控制, 单神经元具有自学习和自适应能力, 而且结构简单易于计算; 而传统的 PID 调节器也具有结构简单、调整方便和参数整定与工程指标联系密切等特点。推导了单神经元自适应 PID 控制器, 并进行了实验, 微位移为 20 μm 时的响应时间为 12 ms, 实验证明了该方法的有效性。

关键词: 微动工作台; 平行板; PZT 驱动; 单神经元; 自适应 PID 控制

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Micro-drive positioning system based on PZT and its control

SUN Li-ning, SUN Shao-yun, QU Dong-sheng, CAI He-gao

(Robot Research Institute of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: An 1D micro-drive table actuated by PZT, which has a parallel board framework, is described in detail, and the relationship between its thrust force and displacement is analyzed and validated with ANSYS simulation and experimental results. The system is controlled by a neuron adaptive PID controller, which features self-learning and adaptability, and easy calculation for simple structure, and the experiments made with the neuron adaptive PID controller indicate that the method proposed is effective, and the response time for a micro displacement of 20 μm is 12 ms.

Key words: micro-drive table; parallel board; PZT actuator; neuron; adaptive PID control

1 引言

随着制造业的发展, 对于精密加工的精度要求也越来越高, 微位移机构得到越来越广泛的应

用^[1-4]。微位移机构多采用柔性铰链机构^[5]。由于压电陶瓷具有出力大、响应快、分辨率高等优点, 本文采用压电陶瓷驱动的平行板机构, 利用光栅尺进行微位移的检测, 采用单神经元自适应 PID 算法对压电陶瓷进行控制。

收稿日期: 2003-08-14; 修订日期: 2003-11-20.

基金项目: 国家“863”资助项目 (No. 2001AA423110)

2 微位移机构的设计与仿真

图 1 (a) 为平行板弹性移动幅的结构参数图, 图 1 (b) 为其力学计算模型, 由于 $H \gg t$, 所以可把中部的长方块 (a, b, h) 视为刚体, 即长方块在分布力 q 作用下, 只发生平动而不发生弯曲, 如图 1 (c) 所示, 该弹性体特点为在 A 点的挠度变形为 0, 即 $Y_A = 0$ 。

所以

$$Y_A = \frac{PL^3}{3EJ} + \frac{PL \cdot L^2}{2EJ} - \frac{1}{2} \cdot \frac{8L^3}{3EJ} + \frac{M \cdot 4L^2}{2EJ} = 0$$

式中, E 为材料的弹性模量。则

$$M = \frac{1}{4} PL, \quad (1)$$

从图 1 (d) 中可求得弹簧体的伸长量, 利用

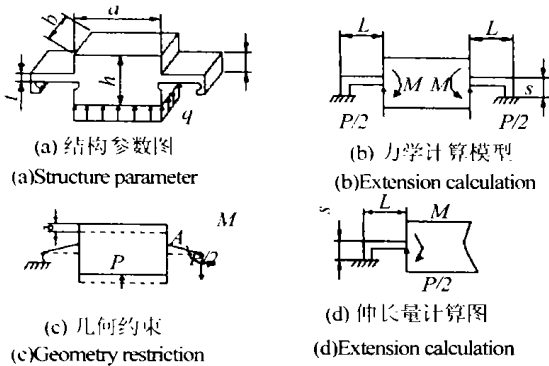


图 1 平行板弹性移动副

Fig. 1 Elastic translational joint of parallel board

叠加原理, 将每部分分别看作刚体, 计算出变形后叠加起来, 得

$$= \frac{1}{EJ} \left[\frac{\frac{P}{2} \cdot L^3}{3} + \frac{P}{2} L \cdot S \cdot L - \frac{ML^2}{2} - M \cdot L \cdot S \right]$$

则

$$= \frac{PL^2}{2Ebt^3} (L + 6S), \quad (2)$$

设计实际机构时, 为考虑加工方便, 取 s 部分较厚, 视为刚体, 则变形为

$$= \frac{PL^3}{2Ebt^3}, \quad (3)$$

同理, 可推导出多层平行板弹性移动幅的驱动力与位移的模型

$$= \frac{PL^3}{2nEbt^3} \quad (n \text{ 为弹性平行板的层数}), \quad (4)$$

微动工作台采用平行板机构的柔性铰链, 结构简图如图 2 所示。工作台的材料采用铝, 利用 ANSYS 对微动台进行固有频率、位移、应力的分析, 得出固有频率为 974.46 Hz (如图 3), 最大位移为 $30 \mu\text{m}$ (如图 6)。图 4 为加 100 N 的位移图形, 图 5 为加 100 N 的应力图形。

利用式 (4) 计算出 100 N 的位移是 $25.15 \mu\text{m}$, ANSYS 分析最大位移为 $30 \mu\text{m}$, 实际测量微动台的最大位移为 $24 \mu\text{m}$, 固有频率为 790 Hz。

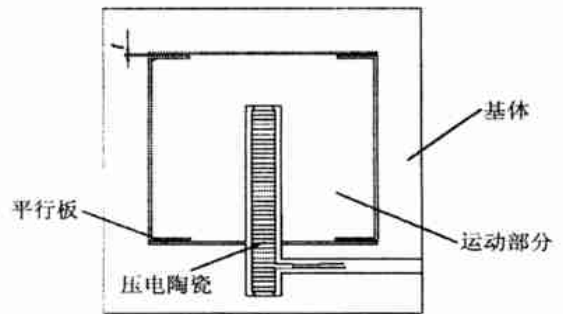


图 2 直线驱动微动机器人结构简图

Fig. 2 Diagram of the translation driven micro-machine

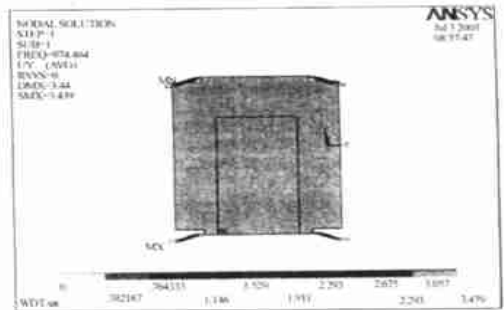


图 3 固有频率

Fig. 3 Connatural frequency

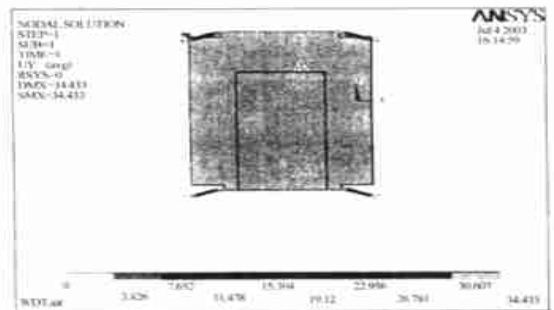


图 4 加 100 N 的位移

Fig. 4 Position with 100 N

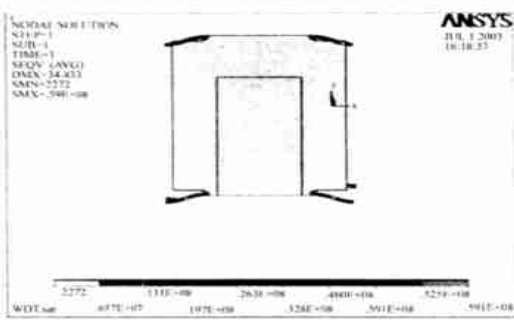


图 5 加 100 N 的应力
Fig. 5 Stress with 100 N

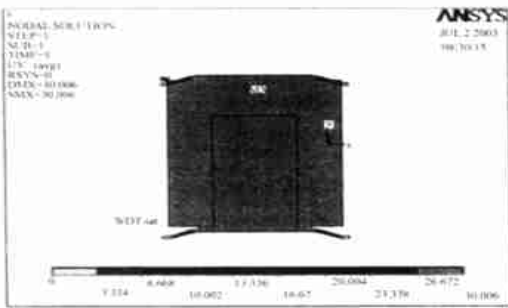


图 6 输出 30 μm 的位移
Fig. 6 Position with 30 μm

3 单神经元自适应 PID 控制器的设计

微动系统采用精密光栅尺作为位移传感器, 信号周期细达 2 μm, 经细分后测量间隔能够达到 5 nm, 量程达到 130 mm。本系统采用哈工大机器人研究所微驱动实验室研制的压电陶瓷驱动电源, 其主要性能指标如下:

- 输出电压范围为 0~15 V
- 电压分辨率: 5 mV
- 电压稳定性: 1% @ 8 h
- 峰值输出电流: 500 mA
- 具有过压和过流保护功能

3.1 单神经元的 PID 控制^[6]

结构框图如图 7 所示。图中转换器的输入为设定值 $y_r(k)$ 和输出 $y(k)$; 转换器的输出神经元学习控制所需要的状态量 $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$ 。即

$$\left. \begin{aligned} x_1(k) &= y_r(k) - y(k) = e(k) \\ x_2(k) &= e(k) \\ x_3(k) &= e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

$z(k) = x_1(k) = y_r(k) - y(k) = e(k)$ 为性能指标或递进信号。图中 K 为神经元的比例系数, $K > 0$ 。神经元通过关联搜索来产生控制信号, 即

$$u(k) = u(k-1) + k \sum_{i=1}^3 i(k) x_i(k), \quad (6)$$

式中 $i(k)$ 对应于 $x_i(k)$ 的加权系数。

3.2 单神经元自适应 PID 控制器

首先引入性能指标函数, 采用以输入误差二次方为性能指标

$$J_1 = \frac{1}{2} [y_r(k+1) - y(k+1)]^2 = \frac{1}{2} z^2(k+1), \quad (7)$$

使加权系数 $i(k)$ 的修正沿着 J_1 的减小方向, 即对 $i(k)$ 的负梯度方向搜索调整, 可以有更加明确的物理意义。

J_1 关于 $i(k)$ 的梯度为

$$\frac{J_1}{i(k)} = -z(k+1) \frac{y(k+1)}{u(k)} \cdot \frac{u(k)}{i(k)}, \quad (8)$$

所以 $i(k)$ 的调整量为

$$i(k) = i(k+1) - i(k) = -i \frac{J_1}{i(k)} = z(k+1) \frac{y(k+1)}{u(k)} \cdot \frac{u(k)}{i(k)}, \quad (9)$$

式中 $i (i = I, P, D)$ 为学习速率。

利用式 (5) 的定义, 并将式 (6) 代入式 (9) 后, 可得

$$\left. \begin{aligned} i_1(k) &= i_1 K z(k+1) e(k) \frac{y(k+1)}{u(k)} \\ i_2(k) &= i_2 K z(k+1) [e(k) - e(k-1)] \frac{y(k+1)}{u(k)} \\ i_3(k) &= i_3 K z(k+1) [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \frac{y(k+1)}{u(k)} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

由于在 PID 控制算法中, 通常 $y(k+1)/u(k)$ 未知, 可以近似用符号函数 $\text{sgn } y((k+1)/u(k))$ 取代, 由此带来的计算不精确的影响可以通过学习速率 i 来补偿。

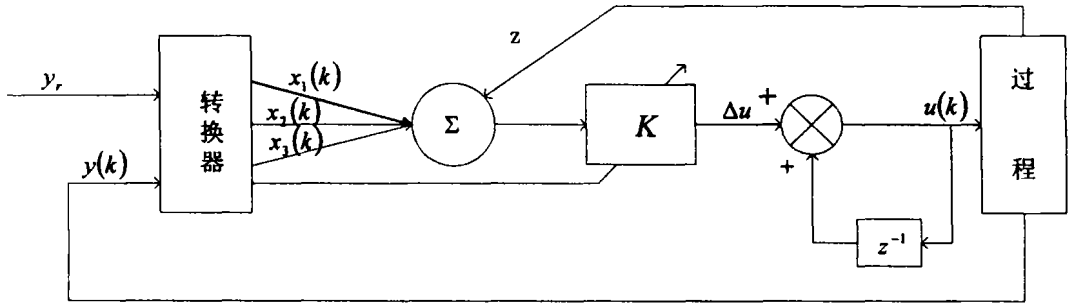


图 7 单神经元自适应 PID 控制框图

Fig. 7 Block diagram of neuron adaptive PID control

对上述算法进行规范整理后，可得学习算法如下：

$$\left. \begin{aligned}
 u(k) &= u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 \bar{w}_i(k) x_i(k) \\
 \bar{w}_i(k) &= \frac{w_i(k)}{|w_i(k)|} \quad (i = 1, 2, 3) \\
 w_1(k+1) &= w_1(k) + I K_z z(k+1) x_1(k) \operatorname{sgn}\left(\frac{y(k+1)}{u(k)}\right) \\
 w_2(k+1) &= w_2(k) + P K_z z(k+1) x_2(k) \operatorname{sgn}\left(\frac{y(k+1)}{u(k)}\right) \\
 w_3(k+1) &= w_3(k) + D K_z z(k+1) x_3(k) \operatorname{sgn}\left(\frac{y(k+1)}{u(k)}\right) \\
 \operatorname{sgn}(x) &= \begin{cases} +1 & x > 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

4 实验结果

利用单神经元自适应 PID 控制方法对微定位系统进行闭环控制，图 8 为采用单神经元自适应 PID 控制时所得到的上升阶跃特性曲线。从

曲线控制可以看出，采用单神经元自适应 PID 控制微定位系统得到满意的效果。

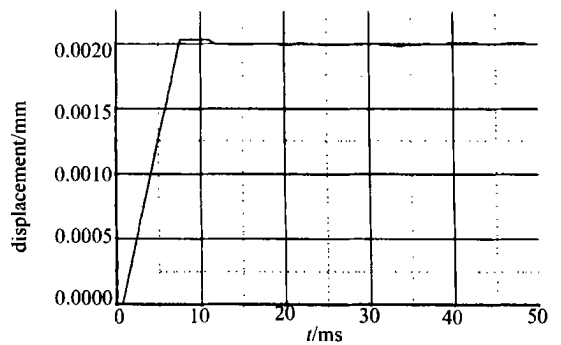


图 8 单神经元自适应 PID 控制作用下的闭环响应曲线

Fig. 8 Closed loop answer curve with neuron adaptive PID control

5 结论

介绍了基于 PZT 的一维微动工作台，采用平行板机构，利用 ANSYS 对其进行了有限元分析，使用精密光栅进行位移闭环检测。采用单神经元自适应 PID 控制算法，对系统进行控制，实验证明了方法的有效性。

参考文献：

[1] CHETWYND D G. Linear translation mechanisms for nanotechnology applications [J]. *Measurement & Control*, 1991, 24: 51-55.

[2] ISHIKAWA Y, KITAHARA T. Present and future of micromechatronics [C]. *IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science*. Nagoya, Japan. 1997: 13-20.

[3] MARUO S, IKUTA K. New microstereolithography (super-IH process) to create D freely movable micromechanism without sacrificial layer technique [C]. *IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, Nagoya, Japan. 1998:

115-120.

- [4] AKITA S. Micromachine technology development and its applications [C]. *IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science*. Nagoya, J. 1998: 17-22.
- [5] Montané E, Miribel P, Puig-Vidal M, et al. High voltage smart power circuits to drive piezoceramic actuators for micro robotic applications [C]. *Proceedings of DCIS 2000*. Montpellier, 2000: 668-673.
- [6] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002, 11. 160-170.
- TAO Y H. *New PID control and application* [M]. Beijing: Book Concern of Machine Industry (in Chinese)

作者简介: 孙立宁 (1964 -), 男, 黑龙江人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器人技术、微驱动技术、微操作技术, 现任哈尔滨工业大学机器人研究所所长。

欢迎订阅《中国光学与应用光学文摘》

《中国光学与应用光学文摘》是经国家科委批准, 由中科院文献情报中心、中科院光学情报网和中科院长春光学精密机械与物理研究所联合主办的国家级检索刊物, 该刊主要收录我国科研人员在国内期刊和有关会议上发表的科技论文和会议论文, 年收录量 5 000 篇左右。《中国光学与应用光学文摘》以文摘形式报道国内光学、光电子学领域的理论研究动态、最新科研成果和相关创新技术, 是国内该领域唯一的检索刊物, 是了解光电子行业相关科技信息的最新窗口, 以报道时差短、检索途径多、信息量充实为特色。

《中国光学与应用光学文摘》为双月刊, 大 16 开本, 110 页, 国内公开发行。邮发代号: 12-140, 定价: 15 元/期。为满足不同订户的要求, 编辑部亦随时办理破年、破季订阅。

单 位: 中科院长春光学精密机械与物理研究所《中国光学与应用光学文摘》编辑部

联系人: 杨妹清

地 址: 长春市东南湖大路 16 号

邮 编: 130033

电 话: (031) 6176853

账 户: 中科院长春光学精密机械与物理研究所

<http://www.ciom.ac.cn>

账 号: 01471908091001

E-mail: yanh@ciomp.ac.cn

银 行: 中行吉林省分行营业部