

一维纳米定位控制系统

李瑞君, 赵文楷, 何园涛, 黄强先

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 研制了一套以数字信号处理 (DSP) 芯片为控制器的一维纳米定位控制系统。该系统主要由驱动平台、微型迈克尔逊干涉仪、DSP 控制器等三个模块组成。其中驱动平台模块由线性滑轨、超声波马达 HR4 和驱动器 AB2 组成。HR4 配合其专用驱动器 AB2 利用摩擦力来驱动侧面贴有陶瓷片的线性滑轨, 微型迈克尔逊干涉仪用来感测滑轨的位移。基于 BP 神经网络的 PID 控制算法和迈克尔逊干涉仪的信号处理运算全部由 DSP 控制器完成。实验结果表明, 该定位系统行程为 20 mm, 定位精度优于 10 nm, 重复定位标准偏差为 7 nm。该定位系统具有系统架构简单, 定位精度高等优点, 可用于大行程高精度定位应用场合。

关键词: 定位控制系统; DSP 芯片; 迈克尔逊干涉仪; BP 神经网络

中图分类号: TM930.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1017005

One-dimensional nano-positioning control system

Li Ruijun, Zhao Wenkai, He Yuantao, Huang Qiangxian

(School of Instrument Science and Opto-electric Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A one-dimensional nano-positioning control system based on a controller using DSP (Digital signal processor) chip was developed. The system was mainly composed of a driving stage, a miniature Michelson interferometer and a DSP controller. The driving stage module included a linear stage, an ultrasonic motor HR4 and a motor driver AB2. The HR4 and AB2 were used to drive the ceramic strip adhered to the side of the linear stage by friction. The miniature Michelson interferometer was used to detect the displacement of the stage. Both the PID control algorithm based on BP neural network and the signal processing of the Michelson interferometer were finished by the DSP controller. The experimental results show that the positioning accuracy of the nano-positioning system is better than 10 nm within 20 mm range, and the standard deviation of repeated positioning is 7 nm. The positioning system has the advantages of simple structure, high positioning accuracy, and can be used on the occasion of high-precision positioning.

Key words: positioning control system; DSP chip; Michelson interferometer; BP neural network

收稿日期: 2018-05-07; 修订日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51675157)

作者简介: 李瑞君(1976-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事微纳米测量技术及系统方面的研究。Email: rj-li@hfut.edu.cn

0 引言

当前纳米科技、微电子加工、先进制造业、生物医学等领域均需要大行程(指毫米级)纳米级定位^[1-4],用于大面积样品测量的原子力显微镜和半导体工业中的光刻机也需要对工作台在毫米行程上实现纳米或亚纳米精度的定位控制。

因此,开发毫米行程纳米或亚纳米精度的定位系统已成为相关领域各国科学家竞相研究的热点。

压电陶瓷是新型的微位移器件,具有结构简单、体积小、分辨力高、控制简单、没有发热问题等优点,是理想的微位移器件^[5]。使用压电陶瓷组件实现大

行程的途径是构成超声波马达,压电陶瓷组件在共振信号作用下,形成弯曲和伸缩两种变形模式,两种运动合成为椭圆形运动轨迹,通过摩擦力驱动平台,其分辨率小于 1 nm,行程由陶瓷片长度和滑轨长度决定。

DSP 芯片因其指令周期快、实时性强、功耗低、抗干扰能力强等特点,愈来愈多地被应用在控制和检测领域,是理想的微控制器。

因此,以 DSP 作为主控制器,压电陶瓷作为微位移器件设计了一套高精度一维纳米定位控制系统。

1 系统总体结构及原理

一维纳米定位控制系统结构图如图 1 所示。

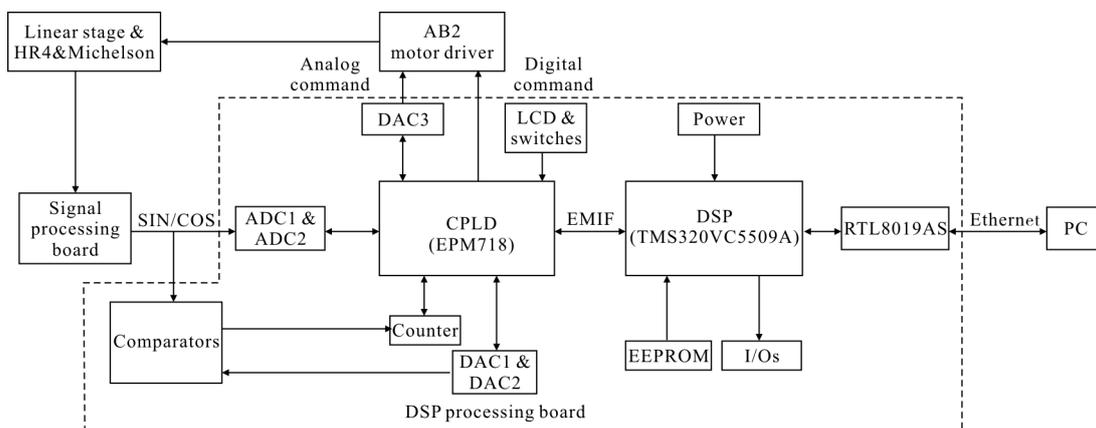


图 1 系统结构框图

Fig.1 System block diagram

PC 软件通过以太网向 DSP 处理板下达位移指令,微型纳米位移传感器——偏振迈克尔逊激光干涉仪(简称 Michelson 干涉仪)感测滑轨实际移动的位移,DSP 将目标位移与滑轨实际移动位移进行比较,在 BP 神经网络模型的说明下计算出最佳 PID 控制参数,进而由 PID 控制算法计算出控制量,由 DAC3 输出相应的模拟电压,AB2 驱动控制器将模拟电压转换成对应驱动超声波马达 HR4 的波形,从而保证线性滑轨平稳准确的运行。

2 系统硬件设计

2.1 驱动平台设计

驱动平台由三个部分组成:线性滑轨、陶瓷片、超声波马达 HR4、驱动器 AB2。图 2 为线性滑轨与

HR4 的安装模型图。

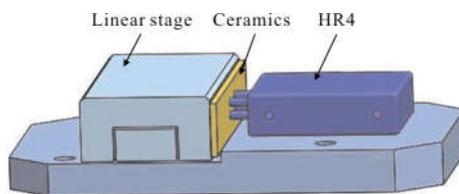


图 2 安装模型图

Fig.2 Model installation diagram

2.1.1 线性滑轨的选择

线性滑轨的直线度直接影响定位系统运动过程的平缓性和定位精度。该系统选择米思米公司生产型号为 CRU3080 交叉滚子型滑轨,该滑轨往复行程 45 mm,滑轨中央部平行度为 2 μm,侧面平行度 5 μm。

2.1.2 位移驱动器件的选择

高分辨率的驱动方式是实现精确定位的前提。Nanomotion 公司利用压电效应设计并制造了超声波电机 HR4。Nanomotion 公司在 HR4 单个接触端子上放置四个压电陶瓷片组件,利用四组电极放置于压电陶瓷片的表面可以产生伸缩和弯曲两种状态,这两种状态经过合成后可以形成圆形或者椭圆形运动轨迹。HR4 的示意结构及运动模态图如图 3 所示。

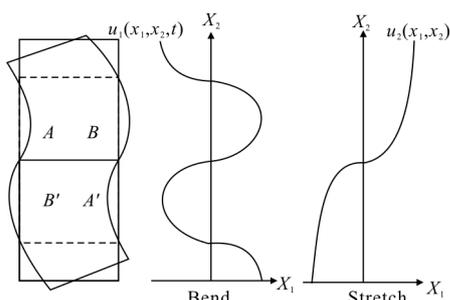


图 3 HR4 结构及其工作模态图

Fig.3 HR4 structure and its working mode

当两组电极 A、A' 和 B、B' 一组伸长一组缩短并加以不同方向驱动时产生弯曲模态的运动,而如果两组同时伸长或缩短时则产生伸缩运动。如果固定其中一组对另一组加以弦波驱动时,则会往某一方向运动。HR4 堆栈了四个接触端子,可以有效地提高驱动力,增加稳定度。Nanomotion 公司根据压电陶瓷组件工作模态的不同组合,开发出多种电机驱动模式。

2.1.3 HR4 的驱动器选择

HR4 正常工作需要配有专门的驱动器。该系统选用 Nanomotion 公司生产的驱动器 AB2,它提供了三种驱动模式,用以满足超声波马达不同行程的需求,AC 模式,用于长行程毫米级驱动;GATE 模式,用于中行程微米级驱动;DC 模式,用于短行程纳米级定位驱动。超声波电机 HR4 与驱动器 AB2 的配合可以组成三种不同的驱动模式,实现大行程高分辨率的驱动控制,这是高精度定位系统实现纳米级定位的硬件基础。

2.2 位移感测单元设计

只有实时准确感测出滑轨的位移值,将此位移与目标位移进行相关运算才能得出 AB2 准确的输出量。该系统位移感测单元选用作者所在团队自主研发的微型迈克尔逊干涉仪。

2.2.1 迈克尔逊干涉仪结构及其原理

该迈克尔逊干涉仪由激光二极管、偏振分光棱

镜、非偏振分光棱镜、四分之一波片、固定不动的平面参考镜、固定在运动物体上的测量镜以及感测干涉信号的光电池构成,其结构图如图 4 所示^[6-7]。

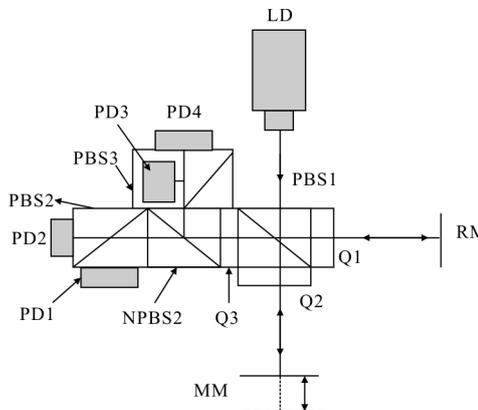


图 4 Michelson 激光干涉仪结构图

Fig.4 Michelson laser interferometer structure

激光器 LD 发出的偏振光,经过偏振分光棱镜 PBS1 和四分之一波片 Q1、Q2,分别变成旋向相反的两束圆偏振光,一束打在测量镜 MM 上返回,一束打在参考镜 RM 上返回,返回的两束光再次经过以上 Q1、Q2 和 PBS1,又变成线偏振光 (o 光和 e 光),再经过四分之一波片 Q3 变成旋向相反的两束圆偏振光,两束光重合并发生干涉;最后再经过非偏振分光棱镜 NPBS2 及后面的偏振分光棱镜 PBS2、PBS3 组成的鉴相模块,提取出相位分别是 0°、90°、180°、270° 的干涉信号,四个光电探测器 PD1~PD4 分别感测干涉条纹的光强变化。因此,测量镜位移变化可通过对干涉条纹明暗变化规律进行计数和细分,便可以同步转换出运动的位移量。将测量镜固定于线性滑轨的一端,则滑轨移动的位移即可通过测量镜移动的位移间接得出。

2.2.2 迈克尔逊干涉仪信号处理电路

理论上 PD1~PD4 输出的为四路两两正交的弦波电流信号,但实际使用中,信号存在三种典型的失真^[8],分别是背景光强变化和光电探测器差异性造成的直流漂移,机台处于不同位置时造成的幅值变化和安装误差导致的两路信号不完全相差 90°,为消除误差需要将信号进行硬件处理,处理过程如图 5 所示。经信号处理板最终输出的两路信号为一组完全正交的弦波信号,对正交弦波信号进行计数和细分,便可得出运动物体的位移量。

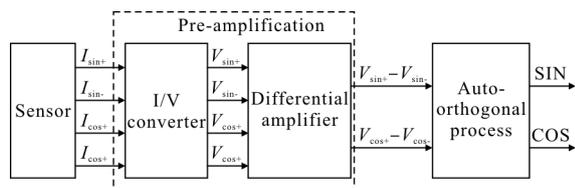


图 5 弦波信号处理流程图

Fig.5 Sine wave signal processing flow chart

2.3 主控制器 DSP 单元设计

DSP 处理板内部结构紧凑复杂, 集结了 DAC、ADC、电压比较器 AD790、双向可逆正交脉冲计数器 HCTL2022、RTL8019AS、CPLD、DSP 等器件。PC 机以太网控制器 RTL8019AS 实现通信, 来获取用户指令。正交弦波信号进入 DSP 处理板后, 同时送至 ADC1/ADC2 和比较器。ADC1/ADC2 将弦波信号转换成数字量, 通过 CPLD 的接口转换传输到 DSP 中。DSP 计算出两路弦波信号的直流偏量, 再经 CPLD 写给 DAC1/DAC2, 转换成模拟电压信号作为电压比较器的参考电压, 此参考电压可以有效消除信号中的直流偏量。比较器再将当前的弦波信号转换成正交脉冲信号, 输入到双向可逆正交脉冲计数器中, 计数大数位移。而对 ADC1/ADC2 转换的数字量进行相关运算, 可以进行相位细分。将大数计数和相位细分结合起来, 就可以得到当前精确位移。由当前位移和历史位移以及目标位移可以计算出对 AB2 的控制量, 通过操作 CPLD 上控制 AB2 的接口, 即可完成运动控制。

3 系统软件设计

3.1 位移感测软件设计

位移测量软件流程图如图 6 所示。

系统初始化之后, 采集一次数据计算初始相位, 在单次运动过程中, 只会计算一次初相位。接下来会每 3 ms 检查一次计数器 HCTL2022 的读数, 是否与上次读数一致, 如果读数一致, 表示机台处于停止状态, 则置位标志位, 同时每 2 ms 对各通道采样 50 次, 如果采样时间达到 60 ms 后, 更新振幅和直流偏量。接下来读取 HCTL2022 的完整计数值, 通过判断上述机台静止标志位决定是否进行末相位的采集与计算, 然后整合总位移值, 并通过 LCD 液晶屏显示。

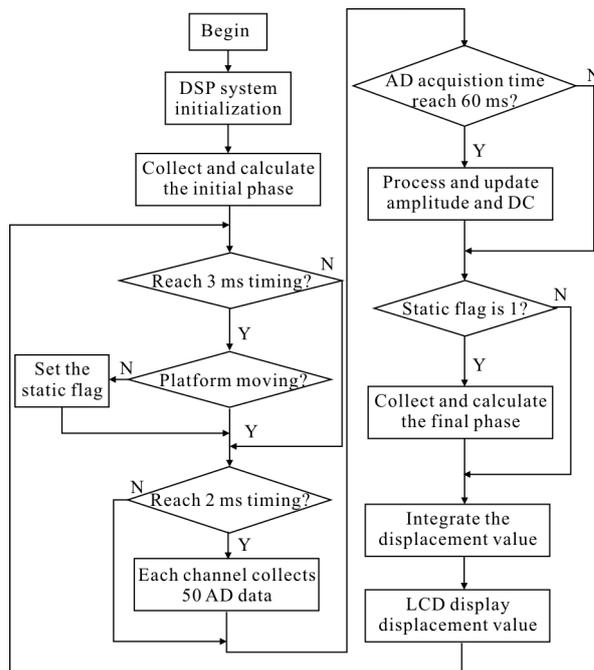


图 6 位移测量软件流程图

Fig.6 Displacement measurement software flow chart

3.2 运动控制软件设计

系统运动控制流程图如图 7 所示。

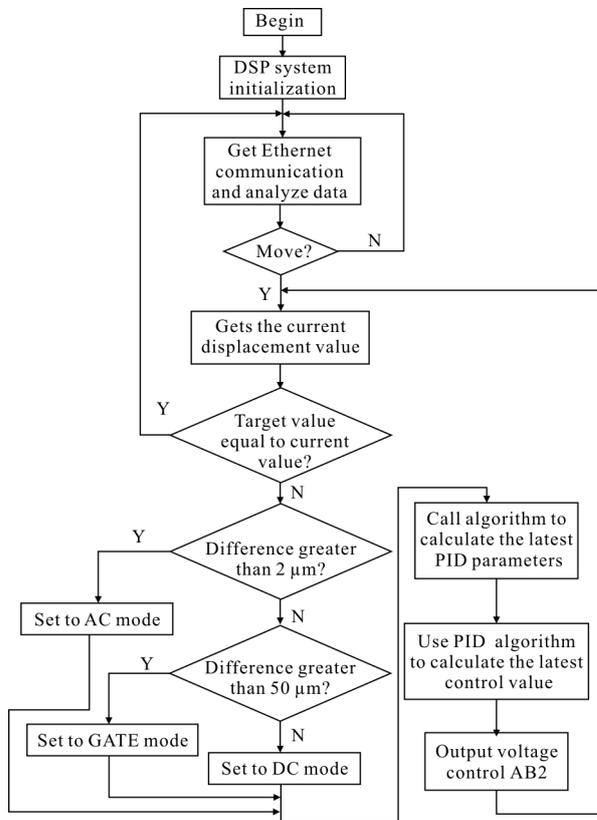


图 7 运动控制软件流程图

Fig.7 Motion control software flow chart

为使定位系统达到快速、稳定和准确的定位效果,将滑轨的一次定位分为三个阶段:开始使用 AC 模式驱动平台以 0.5 mm/s 的速度快速逼近目标点 3 μm 处,BP 神经网络的输入为期望速度减去真实速度的误差;接着用 GATE 模式以 20~50 nm 的步距逼近目标点 50 nm,此时 BP 神经网络的输入为目标步距减去当前步距的差值;最后使用 DC 模式锁位,此时 BP 神经网络的输入为目标位置减去当前位置的差值。

3.3 基于 BP 神经网络的 PID 控制算法

PID 控制算法是工程中最常用的控制算法,具有结构简单、易于理解等优点,但应用时需要事先整定好合适的参数,整定过程比较困难,且参数为固定值。对于纳米定位系统,需要保证滑轨在高速运动下的稳定性和低速运动下的精确性,但滑轨不可避免存在直线度误差且与超声波电机接触的各处摩擦系数不同,所以系统数学模型是复杂多变的,为了保证滑轨运行的稳定性与准确性,就要求 PID 控制参数可以实时调整。因此,该系统选择基于 BP 神经网络的 PID 控制算法。

系统所用倒传递 BP 神经网络如图 8 所示,它

由输入层、隐藏层和输出层组成,输入层由 $e(k)-e(k-1)$ 、 $e(k)$ 、 $e(k)-2e(k-1)+e(k-2)$ 三个神经元组成,输出层作为 PID 控制算法中 K_p 、 K_i 和 K_d 三个参数的值。通过 BP 神经网络算法可以实时自动调整 PID 算法中的三个参数的值,具体算法参见参考文献[9-12]。

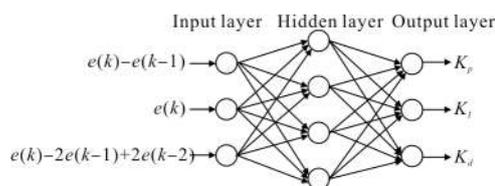


图 8 BP 神经网络结构图

Fig.8 BP neural network structure

4 实验结果

对该一维定位系统进行五组不同的实验测试,平台移动位移设定值分别为:1、6、10、15、20 mm,每组实验重复进行 10 次。实验结果如表 1 所示,平台实际移动位移由 HP5529A 激光干涉仪读取,在全量程内平台定位精度优于 10 nm,重复定位标准偏差为 7 nm。

表 1 实验测试结果

Tab.1 Experimental test results

Times	Displacement/mm				
	1	6	10	15	20
1	0.999 997	5.999 998	9.999 990	15.000 005	20.000 005
2	0.999 999	5.999 998	9.999 990	15.000 003	19.999 996
3	0.999 996	5.999 995	9.999 996	14.999 993	19.999 996
4	1.000 006	5.999 996	9.999 993	14.999 996	20.000 007
5	1.000 003	5.999 998	9.999 994	15.000 001	19.999 992
6	0.999 996	6.000 007	10.000 002	15.000 005	20.000 007
7	1.000 001	5.999 995	9.999 995	14.999 997	20.000 008
8	0.999 998	6.000 003	9.999 996	14.999 998	20.000 001
9	0.999 999	6.000 001	10.000 001	14.999 998	19.999 992
10	0.999 997	5.999 996	10.000 003	14.999 996	19.999 998
Average value/mm	0.999 992	5.999 991	9.999 996	14.999 99	20.000 002
Standard deviation/nm	3	4	5	5	7
Maximum error/nm	6	7	10	5	8

5 结 论

设计了一套以微处理器 DSP 为主控制器的一维纳米定位控制系统,该纳米定位系统行程为 20 mm,实验结果表明,在全量程内平台定位精度优于 10 nm,重复定位标准偏差为 7 nm。该系统具有定位精度高、重复性好、集成度高、功耗低等优点,对于当前纳米科技、半导体领域、微纳机械加工等均有较大的实用价值。

参考文献:

- [1] Fan K C, Fei Y T, Yu X F, et al. Development of a low-cost micro-CMM for 3D micro/nano measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(3): 524-532.
- [2] Jung S, Kim S. Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feed-forward model-reference control [J]. *Precision Engineering*, 1994, 16(1): 57-63.
- [3] Steinmetz C R. Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometer [J]. *Prec Eng*, 1990, 12(1): 12-24.
- [4] Polit S, Dong J. Development of a high-bandwidth XY nanopositioning stage for high-rate micro/nano-manufacturing [J]. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*, 2011, 16(4): 724-733.
- [5] Ji H W, Wen Y Q. Model and control on hysteresis of piezoelectric actuator [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 179: 635-640.
- [6] Haitjem A H. Achieving traceability and sub-nanometer uncertainty using interferometric techniques [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19: 1-6.
- [7] Heydemann P L M. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers [J]. *Applied Opt*, 1981, 20(9): 3382-3384.
- [8] Fang C. An improved design of the linear diffraction grating interferometer [J]. *Proceedings of ASPEN*, 2009, 11:11-13.
- [9] Sirisena H, Teng F. Multivariable pole-zero placement selftuning controller [J]. *International Journal of Systems Science*, 1986, 17: 345-352.
- [10] Wang J, Kang L Y, Cao B G. Neural network PID control of a distributed power generation system based on renewable energy[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2005, 5(10) : 1772-1776.
- [11] Dai Junke, Jiang Haiming, Zhong Qirun, et al. LD temperature control system based on self-tuning fuzzy PID algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3287-3291. (in Chinese)
- [12] Zhan Juntong, Fu Qiang, Duan Jin, et al. Stability improvement of DFB laser driving power using digital position PID algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1757-1761. (in Chinese)