

压电微角度驱动器及其闭环控制检测系统

张亚超,赵美蓉,林玉池

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘要:采用高碳铬轴承钢 GCr15 作为压电微角度驱动器的加工材料,满足了系统高硬度、耐磨性、抗腐蚀性等要求。运用柔性铰链结构为压电陶瓷提供预紧并扩大输出角位移。通过 TMS320LF2407 型数字信号处理器 (DSP) 实现对运动系统的控制,提高了系统数据处理能力和运行速度。对运动系统采用数字比例-积分-微分 (PID) 闭环控制,提高了驱动器的位移分辨率和重复定位精度。在检测系统中,通过集成在驱动器上的圆光栅,将驱动器的实际输出结果一方面液晶显示,另一方面反馈到 DSP 内以进行闭环控制。驱动器单周期角位移精度可达 3%。

关键词:压电陶瓷;微角度驱动器;柔性铰链;PID 控制;圆光栅

中图分类号:TH-39 **文献标识码:**A

Piezoelectric Micro-angle Rotary Actuator and Close-loop Control Test System

ZHANG Yachao, ZHAO Meirong, LIN Yuchi

(State Key Lab. of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: High carbon chromium bearing steel GCr15 was used as the material for piezoelectric actuator to meet the requirements of high hardness, wear resistance, corrosion resistance. Flexure hinges structure was adapted to pre-load piezoelectric ceramic and expand the output angular displacement. TMS320LF2407 DSP realized the control of motor system and improved system data processing performance and speed. Digital PID closed-loop control in moving system could improve displacement resolution and repositioning precision of driver. In detection system, circular grating integrated on actuator would drive the actual output on the LCD display, and feedback the output to DSP for closed-loop control. The single cycle angular displacement accuracy of the driver could reach up to 3%.

Key words: piezoelectric ceramics; micro-angle rotary actuator; flexure hinge; PID control; circular grating

0 引言

微位移驱动定位系统是指系统产生的运动位移在几微米到几百微米范围内,其分辨率、定位精度和重复定位精度在纳米级^[1-2]。微位移定位系统在纳米加工、生物工程、激光通讯、精密机械加工等高新技术领域发挥着越来越重要的作用^[3]。

压电微角位移驱动定位系统主要是利用压电陶瓷的逆压电效应来输出驱动旋转位移。本文研究的压电驱动器主要包括压电微角位移执行器、压电微角位移驱动控制与检测系统 3 部分。机械执行机构方面采用高碳铬轴承钢 GCr15 作为执行器加工材料,满足了系统高硬度、高耐磨性等要求。控制系统采用 TI 公司生产的 TMS320LF2407 型 DSP 作为整个系统的控制核心,检测系统通过集成在驱动器上的圆光栅,不仅能实现全圆周范围检测,同时把角

位移检测量引入到 DSP 中,实现 PID 闭环控制,从而提高了控制定位精度。

1 压电微角度驱动器机械结构

压电陶瓷具有线性度好,定位精度高,位移分辨率高,不发热,无噪声等优点。利用压电陶瓷作为核心驱动部件的驱动器具有低速大转矩,动态响应快,无电磁干扰,定位精度高,结构简单,设计灵活简单等优点,故压电陶瓷是微小型驱动器中的主流材料^[4]。压电微角度驱动器结合了柔性铰链机构。柔性铰链是利用结构薄弱部分的弹性微小角度变形来完成类似铰链的运动传递,具有传动无间隙,无机械摩擦,运动灵敏度高和响应快等优点^[5]。

驱动器的机械结构主要由夹紧器、促动器、联动盘及主轴组成,机盖和机座用于封装和稳固整个系统。图 1 为压电微角度驱动器的机械图。

收稿日期:2011-05-30

基金项目:天津市应用基础与前沿技术研究计划基金资助项目(10JCYBJC06600 和 09JCYBJC05200)

作者简介:张亚超(1986-),女,天津武清人,硕士生,主要从事压电微驱动、机械设计、DSP 控制、纳米测量等研究。

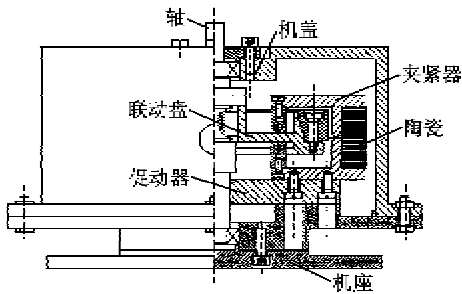


图 1 压电微角度驱动器机械图

由图 1 可见, 夹紧器安装压电陶瓷, 利用压电陶瓷的逆压电效应输出位移, 加紧联动盘; 同时, 驱动器相应的压电陶瓷在同步电压信号下发生膨胀, 驱动驱动器旋转微小角度, 最终将微小角度传递到主轴。

机械材料的选择是影响加工精度及工作稳定性的重要因素。高碳铬轴承钢 GCr15 是一种广泛应用的轴承钢, 具有较高淬透性, 热处理后可获得高而均匀的硬度, 接触疲劳强度高, 有良好的尺寸稳定性和抗蚀性。以夹紧器设计要求为例, 夹紧器的使用方式决定了其必须兼顾弹性段的疲劳和锁紧部的耐磨性要求, 因此选用 GCr15 作为机械结构的主要材料。

2 控制系统及检测系统设计

2.1 控制及检测系统整体设计

驱动器的整个系统控制及检测部分是由控制信号产生、控制信号调整放大、压电驱动器的执行机构和运动角位移检测 4 部分组成。整个控制检测系统的结构框如图 2 所示。

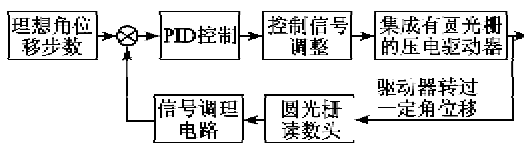


图 2 控制及检测系统框图

DSP 事件管理器 A、B (即 EVA、EVB) 产生 4 路方波信号, 其中两路方波信号通过外部调整电路转换成两路三角波信号, 三角波和方波共同作为控制信号。压电陶瓷驱动电压为 0~200 V, 而方波和三角波分别为 3.3 V 和 0~5.6 V 的小信号, 故将小信号经压电陶瓷驱动电源放大到 0~200 V; 放大的高压信号作用于夹紧器和驱动器上的压电陶瓷, 使整个机构连续均匀微角度转动。集成在驱动器上的圆光栅检测实际转过角位移, 一方面将检测结果显示在液晶屏, 另一方面将检测结果反馈到 DSP 进行

PID 控制, 从而实现闭环控制。

2.2 闭环控制系统设计

驱动器的性能取决于控制系统。驱动器工作中如果应用开环控制系统就无法知道执行机构工作中是否丢失脉冲, 结构上是否出现机械卡死等问题, 所以应用闭环控制系统。将数字 PID 算法加入到 DSP 控制系统中, 提高系统稳定性及定位精度。图 3 为系统数字化 PID 控制原理图。

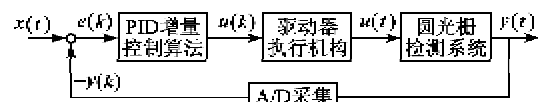


图 3 数字 PID 控制原理图

PID 控制因其算法简单, 对对象模型依赖较少, 鲁棒性强而在工业控制领域中得到广泛应用^[6]。近年来, 随着计算机技术的飞速发展, 由计算机实现的数字 PID 控制器正逐步取代由模拟仪表构成的模拟 PID 控制器。

系统中驱动器输出角位移随压电陶瓷的匀速伸长而线性增加。根据单周期压电陶瓷伸长量与机械结构运算关系, 可计算出压电陶瓷工作一段时间的理想输出角位移。在 PID 闭环控制中, 压电陶瓷每工作 n (一般 $n=10\sim50$) 周期对输出角位移进行采样, 将实际位移与理想位移的差值进行 PID 调节, 通过调整系统运行周期, 达到降低系统运行误差的目的。

同时, 执行机构需要的控制量不是位置量的绝对数值而是其增量, 故采用增量式 PID 算法^[7]:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_P [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (1)$$

式中: K_P 为比例增益; $K_I = K_P T / T_i$ 为积分系数; $K_D = K_P T_D / T$ 为微分常数。

由式(1)可见, 它只保留现在以前 3 个时刻的偏差值即可。与位置式算法相比, 式(1)的计算量小, 更适合于计算机计算, 且这种形式在一定程度上能避免控制器产生积分饱和。

2.3 控制及检测系统硬件设计

系统的硬件结构如图 4 所示。TMS320LF2407 型 DSP 作为控制核心产生频率和步数可调的方波, 部分方波经转换电路输出三角波, 三角波和方波作为控制信号经驱动电源放大后驱动执行器转动, 检测系统一方面在液晶屏显示实际转过角位移, 另一

方面经 A/D 采集将实际角位移反馈到 DSP 以进行 PID 控制。

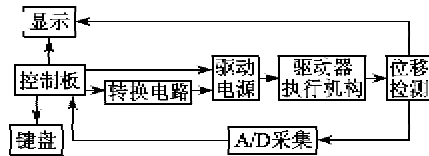


图4 整个系统硬件框图

圆光栅随压电微角度执行器连续均匀转动时，代表转过角度的电信号经读数头及细分盒，转化成两路相位相差 90°的正交模拟正弦波信号 V_1 、 V_2 ，当读数头检测到零位刻线时，产生零位信号 V_0 。

图5为圆光栅信号波形。由图可见，正弦波信号以差分的形式传输，电缆传输模拟信号 V_{1+} 、 V_{1-} 、 V_{2+} 、 V_{2-} 、 V_{0+} 、 V_{0-} 。在接收端利用差分放大器可有效克服外部系统的噪声干扰。图中 V_1 、 V_2 和 V_0 差分后幅值增大 2 倍，正弦信号相位相差 90°。相位差用来辨向，圆光栅顺时针转时， V_1 超前于 V_2 ；逆时针转时， V_1 滞后于 V_2 ， V_1 、 V_2 每个周期代表一个栅距 20 μm 。

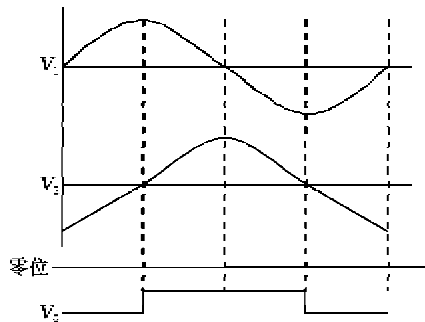


图5 圆光栅信号波形

2.4 控制及检测系统软件设计

TMS320LF2407 型 DSP 采用 C 语言编程为主，辅以汇编语言^[8]。整个软件流程如图 6 所示。

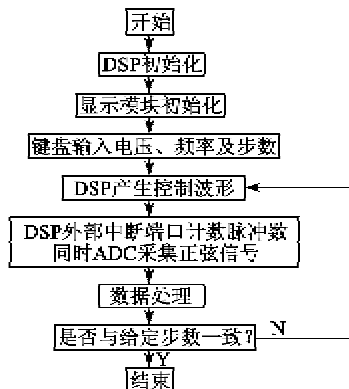


图6 软件流程图

由图 6 可见，软件采用模块化设计方法，共包括

系统初始化程序、液晶键盘处理程序、驱动控制程序、位移检测模块及数据处理模块 5 个模块。

3 系统实验

3.1 压电陶瓷伸缩实验

对系统使用的压电陶瓷变形量进行测试，以验证其是否符合系统要求。两款压电陶瓷型号分别为 PTBS200/8×8/10 和 PTBS200/8×8/20。实验选用天津大学开发的 JDC-200 型高精度非接触式电容测微仪，测得的变形量为 16 nm/mV。

实验过程中，采用直流信号驱动，驱动电压从 0 逐渐增大到 200 V，再减小到 0。已知 PTBS200/8×8/10 型压电陶瓷标称位移 10 μm ，最大位移 13 μm ；PTBS200/8×8/20 型压电陶瓷标称位移 20 μm ，最大位移 26 μm 。测试结果如图 7 所示。

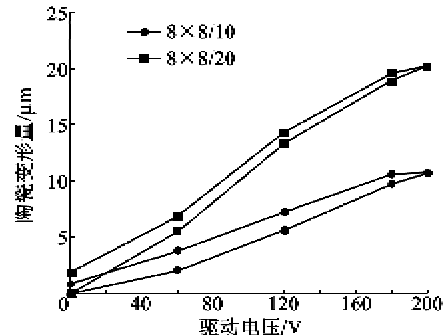


图7 两种压电陶瓷变形量

由图 7 可见，PTBS8×8/10 型压电陶瓷输出位移与驱动电压线性度较好，而 PTBS8×8/20 型压电陶瓷在高电压处呈现蠕变现象。

3.2 驱动器单周期角位移实验

三角波控制信号施加驱动电压 120 V，驱动频率 20 Hz。以 100 周期为间隔，逐渐增大到 1 000 周期，对驱动器进行单周期角位移实验。表 1 为测试结果数据。

表1 频率 20 Hz、电压 120 V 对单周期角位移

周期 n/s	线位移 $l/\mu\text{m}$	单周期角位移 $\theta/10^{-4} \text{ rad}$
100	1 158	3.08
200	2 342	3.10
300	3 720	3.29
400	4 920	3.26
500	5 962	3.16

圆光栅显示的结果是驱动器转过的线位移，通过 $\theta = l/r$ (r 为联动盘半径)，将线位移转换成角位移。由表 1 可得， $\theta = 3.178 \times 10^{-4} \text{ rad} \approx 1.09'$ ，标准差 $S \approx 1.94''$ 。

3.3 闭环控制系统性能测试

实验将压电陶瓷工作在驱动电压 120 V, 驱动频率 20 Hz。图 8 为系统开环控制与 PID 闭环控制的输出曲线进行仿真的结果。图 9 为 PID 闭环控制的误差变化曲线。

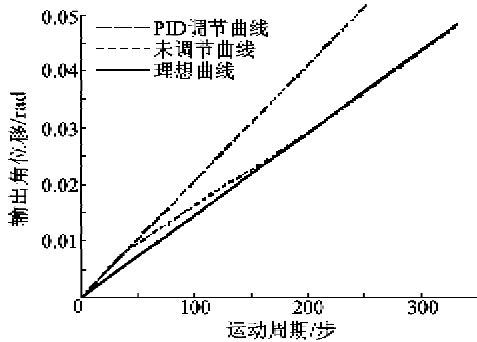


图8 闭环调节与开环调节输出曲线

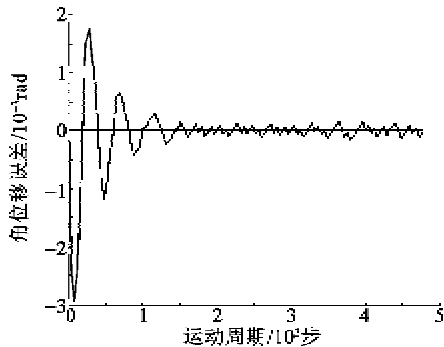


图9 闭环调节误差曲线

图 8 实验结果表明,开环控制的运动误差叠加在系统输出中,故随着系统运行周期增多,误差不断增大;采用闭环 PID 控制系统中,误差随着 PID 调节而减小。由图 9 可知,较好的选择 PID 参数,误差由开始的剧烈振荡,很快收敛于 2×10^{-4} rad 范围内,达到用 PID 调节提高系统精度的目的。

4 结束语

配合柔性铰链机构设计的全圆周压电微角度驱动器,在 TMS320LF2407 型 DSP 产生的控制信号下,实现单周期 $1.09' \pm 1.94''$ 的微角度输出。

机械设计方面,加工材料采用轴承钢 GCr15,增加了机构的耐磨性与抗腐蚀性等。配合使用的柔性铰链可预紧压电陶瓷,扩大压电陶瓷输出位移。实验证明,该机械结构稳定性良好,重复定位精度高,具有良好应用价值前景。

参考文献:

- [1] 温丽梅. 大行程压电微动台驱动控制系统的研究[D]. 天津:天津大学测试计量技术及仪器,2005.
- [2] 邓国红,余雄鹰,汤爱华. 压电驱动器和传感器的 ANSYS 模拟分析[J]. 重庆工学院学报:自然科学版,2007(11):45-48.
- [3] 陈大任. 压电陶瓷微位移驱动器概述[J]. 电子元件与材料,1994,3(1):2-7.
CHEN Daren. A survey of microdisplacement piezoelectric ceramic actuators[J]. Electron Compon Mater, 1994,3(1):2-7.
- [4] 陈翔宇,褚祥城,李龙土. 压电陶瓷直线驱动器[J]. 稀有金属材料与工程,2009,38(2):241-244.
CHEN Xiangyu, CHU Xiangcheng, LI Longtu. Design and experimental study of piezoelectric ceramics linear motor[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(2): 241-244.
- [5] 张磊,刘莹. 基于柔性铰链的微位移机构设计[J]. 机床与液压,2010,38(5):87-89.
ZHANG Lei, LIU Ying. Design of micro-displacement based on flexure hinges[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010,38(5):87-89.
- [6] 赵美蓉,温丽梅,林玉池. 大行程纳米级步距压电电动机[J]. 机械工程报,2004,40(8):119-122.
ZHAO Meirong, WEN Limei, LIN Yuchi. Nanoscale step distance piezoelectric motors with long-range[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8):119-122.
- [7] 姚栋伟,吴锋,杨志家. 基于增量式数字 PID 的汽油机怠速控制研究[J]. 浙江大学学报,2010,44(6):1122-1126.
YAO Dongwei, WU Feng, YANG Zhijia. Design of idle speed controller for an SI engine based on incremental digital PID[J]. Journal of Zhejiang University, 2010,44(6):1122-1126.
- [8] 赵美蓉,秦峰,林玉池. 回转式压电微角度电动机的反馈控制系统设计[J]. 压电与声光,2010,32(6):922-925.
ZHAO Meirong, QIN Feng, LIN Yuchi. Design of feedback control system of rotary piezoelectric micro-angle motor[J]. Piezoelectric & Acoustooptics, 2010,32(6):922-925.