

文章编号 1004-924X(2008)09-1727-05

尺蠖型压电驱动器的闭环控制

赵宏伟, 杨志刚, 范尊强, 张志宇, 吴博达, 程光明
(吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:针对尺蠖型压电驱动器的输出特性,提出了利用驱动电压与输出位移分段线性拟合曲线,逐步“搜索”驱动电压值,从而逼近目标位置的闭环控制方法。分析了控制方法的可行性,针对该方法,构建了闭环控制实验系统,对该方法进行了实验验证。实验结果表明,采用该方法可以实现对尺蠖型压电驱动器的闭环精确控制,系统闭环定位误差低于 $0.18 \mu\text{rad}$,定位精度比开环工作提高了14.4%。该方法具有控制精度较高、响应迅速、易于实现等优点。

关键词:压电驱动器;尺蠖运动;精密定位;闭环控制

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

Close-loop control of inchworm-type piezoelectric actuator

ZHAO Hong-wei, YANG Zhi-gang, FAN Zun-qiang, ZHANG Zhi-yu, WU Bo-da, CHENG Guang-ming

(College of Mechanical Science and Technology, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: According to the output performance of inchworm-type piezoelectric actuator, a novel close-loop control method based on the subsection experiential equation between actuating voltage and corresponding stepping motion displacement was proposed. Via the method, the control system could search for the optimal actuating voltage step by step so as to approach to the target position. A experiment on the closed-loop system of the inchworm-type piezoelectric rotary actuator was carried on. The experimental results show that the novel method can control the actuator for precision positioning in closed-loop mode, and the positioning error of the actuator system in close-loop mode is $0.18 \mu\text{rad}$, which is improved by 14.4% as compared to that of the open-loop working mode. The control method has the advantages of high accuracy, quick response and so on.

Key words: piezoelectric actuator; inchworm motion; precision positioning; close-loop control

1 引言

尺蠖型压电驱动器(压电步进驱动器)在实际工作中受温度变化、环境振动及压电元件自身的非线性特性等因素的影响,其定位精度的可控性

变差,因此需要采用适当的手段对其进行闭环控制,提高其运动的稳定性和运动精度保持性,以满足实际工作的需求。

近年来,针对压电驱动器的闭环控制,研究人员提出了多种方法,这些方法主要针对压电元件的非线性特性(如迟滞特性等)而言,压电叠堆元

收稿日期:2008-03-11;修订日期:2008-04-22.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2002AA423150);国家自然科学基金资助项目(No. 50475010);高等学校博士点专项科研基金资助项目(No. 20050183020)

件的迟滞特性主要是加载过程与卸载过程(这里将驱动电压视为载荷),其载荷与输出位移曲线不重合。研究人员提出了多种数学模型,如 Hysteron 模型、Bouc-Wen 模型、Chua-Stromsmoe 模型、Preisach 模型及 Dahl 模型等^[1-6],并利用相应数学模型对压电驱动器进行闭环控制。基于压电元件迟滞特性的这类闭环控制方法较为有效,在某种程度上可以实现对压电元件的精确控制。但是针对尺蠖型压电驱动器,其内部装配了多个压电叠堆元件,各个压电叠堆的作用不同,且每个压电叠堆的预紧状况及自身材料特性都存在微小的差异,此外驱动器系统的工作特性还受到摩擦等多种外界因素的影响^[7-8],采用上述方法对尺蠖型驱动器进行精确闭环控制,显然是不合适的。

本文借助相应的检测手段,结合尺蠖型驱动器的自身特点,提出一套新的检测方法,以实现对此类驱动器的精确闭环控制。

2 控制策略

以文献[9]开发的尺蠖型压电旋转驱动器闭环控制为例,研究了驱动器闭环控制方法,针对直线驱动器,其控制思想与旋转驱动器类似。图 1 为闭环控制的基本思想,工作中根据事先设定的目标位移,选择驱动电压和运动步数,驱动器在规定的驱动信号作用下,完成确定角位移输出,此时驱动器的实际输出被激光测位仪在线拾取,并送入控制系统,控制系统将实际位移同目标位移作比较,进而根据确定的控制规则,再次给尺蠖驱动器相应的控制信号,最终逼近目标位置。

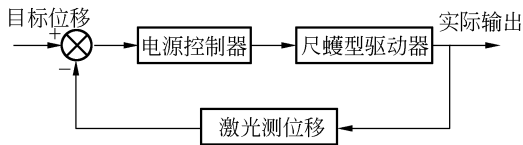


图 1 驱动器闭环控制方法

Fig. 1 Close-loop control method of actuator

分析图 2 的测试结果可以发现,尺蠖型驱动器输出的单步位移与相应驱动电压值之间具有一定的规律:就旋转驱动器而言,各组压电叠堆元件经过预紧调整后,工作状态较为稳定。在驱动电压较高的情况下(>20 V),转子的单步旋转角度近似为驱动电压的线性函数,参见图 2 中拟合曲

线的实线部分,其拟合方程的线性相关系数 R^2 为 0.998 6,接近于 1,说明各组曲线线性关系很好。当驱动电压值较低时(<20 V),同样近似满足线性关系,参见图 2 中拟合曲线的虚线部分,即应有^[7]:

$$\Delta\theta = \xi U + \theta_0,$$

式中: $\Delta\theta$ 为转子单步输出转角(μrad); ξ 为拟和方程的斜率($\mu\text{rad}/\text{V}$); U 为驱动电压(V); θ_0 为拟和方程的截距(μrad)。

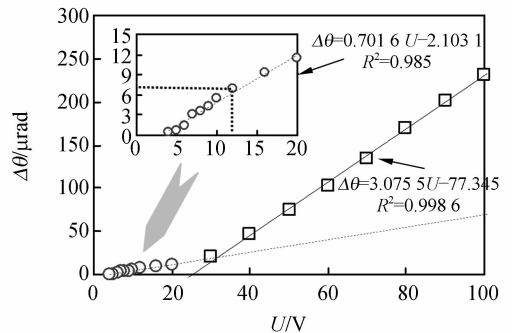


图 2 驱动电压-输出位移的分段拟合曲线

Fig. 2 Curve fitting of actuating voltage and displacement

针对上述规律,结合相应的检测手段,逐步搜索合理的驱动电压值,可以实现对尺蠖型驱动器的闭环控制。而为了达到上述目的,经验拟合方程的求取成为关键。在每一次工作中,驱动器开机后都要进行自检,这里所谓的自检,就是在线测定驱动电压值与对应输出步距,并针对测得的结果根据最小二乘法等拟合算法进行线性拟合,从而得到上述分段线性拟合方程的各参数;当不断积累实测值的拟合曲线对应的截距与斜率的偏差率发生剧烈跳跃并超过设定值时,系统便自动为拟合曲线分段。根据驱动器的工作情况,同时为了减少运算时间,将拟合曲线人为分为两段:驱动电压 20~100 V 为一段、最小驱动电压~20 V 为另一段。驱动器处于不同的工作环境,其性能可能会有微小的差异,因此上述测定的数据中,分段拟合方程的各参数和最小驱动电压及对应的运动分辨率是自检过程的关键。经过仔细调整后的驱动器,其驱动电压与输出位移间具有很好的可重复性规律。

综合上述分析,由于采用闭环控制方法,位移信号会被实时反馈给驱动器控制系统,因此,可以不考虑压电元件和机械系统自身的非线性因素,

将控制模型充分简化,提高控制系统运算速度,保证响应的及时性和准确性。

利用尺蠖型驱动器输出单步位移与相应驱动电压值之间分段线性拟合曲线,根据得到的经验拟合方程逐步“搜索”,提取合适的驱动电压值,根据当前位置距离目标位置的差值自动调整驱动器输出的单步位移,实现驱动器的精确闭环控制。图2描述了该方法的基本思想:根据自检过程中得到的分段经验线性拟合方程,针对高于驱动器运动分辨率的任意位移差值,理论上都可以找到一个合适的驱动电压值,并控制驱动器通过运行一步(或多步)从而不断逼近目标位置;为了保证系统的响应速度,闭环控制中首先从分段拟合曲线的高电压段进行“搜索”,当高电压段搜索完毕后,再切换到相应的低电压段,依此类推,通过控制算法的反复迭代,直至搜索到满足要求的驱动电压值。

控制方法确定后,要根据激光测位仪的测试量程确定闭环测试中转子的目标位移,本文采用的 LC2400 型激光测位仪可测试线位移量程为 $\pm 500 \mu\text{m}$,设定测量标杆上激光测试点距转子回转中心距离为 100 mm ,在可以被激光测位仪拾取位移信号的范围内,转子绕中心位置可回转 $\pm |\theta| = \pm 0.005 \text{ rad} (\pm 5\ 000 \mu\text{rad})$,因此在进行实验测试的时候,要充分考虑这个因素,以避免实验测试中,由于无法拾取位移信号而导致控制系统陷入无休止的死循环甚至崩溃。根据经验拟合方程,以驱动电压值从高到低顺序进行精细“搜索”,逐级设定驱动电压,最后根据位移差尽可能以最小分辨率对应的驱动电压进行扫描搜索,直至最接近目标位移的位置。

3 控制方法

针对上述控制方法,构建的尺蠖型压电旋转驱动器控制系统如图3所示。PC机作为整个闭环控制系统的核心,要读取激光测位仪测得的当前位移值,在线转换成转子转过的角度,还要根据转子当前转过的角度计算与目标位移间的差值,并根据分段经验拟合方程计算接下来的驱动电压对应的步距,并将两者做比较,从而“搜索”出下一个驱动过程合适的驱动电压值及对应的运动步数;最后将控制指令经 D/A 转化,通过 COM 接

口直接传送给驱动器电源控制器,实现对尺蠖型压电驱动器的连续闭环控制。控制过程中,PC机发出的数字信号经 D/A 卡转换成模拟信号并经放大装置进行放大,经放大的各路控制信号直接对驱动器电源控制器进行控制,并按给定的时序对错位压电叠堆和驱动压电叠堆供电。在控制系统回路中,由于压电陶瓷为电容性器件,为使其实现快速伸缩,必须针对压电叠堆设计出高频放电回路,使压电叠堆在断电时其内部存储的电荷能够迅速释放。系统中安装了激光精密位移测量装置,用于对驱动器转子输出的位移进行实时准确的测量,并送入 PC 进行详细处理;此外还可通过多功能 FFT 分析仪对驱动电压波形和精密测位移测得的位移波形进行实时监测。

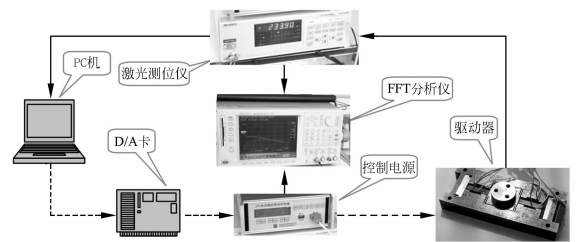


图3 控制系统原理图

Fig. 3 Principle of control system

针对上述硬件系统的工作原理和闭环控制系统的算法流程和相关数据通讯的接口协议,基于 Windows 平台采用 C/C++ 程序设计语言编写了驱动器闭环控制系统程序。为了充分保证控制



图4 驱动器控制系统工作界面

Fig. 4 Program interface of actuator's control system

过程的准确性,数据采集、相应运算及控制指令发送的程序按顺序执行过程编写,根据目前计算机的配置,上述简单的运算不会对控制系统的响应时间造成过大的影响。针对上述控制系统,所开发的控制程序具有对尺蠖型驱动器进行开环控制和闭环控制的双重功能,在开环控制中结合系统设定参数和实验测试结果,能实时计算出驱动器的运行速度和承载能力;在闭环控制方法中,根据实验测定数据在状态栏中可实时读取转子的当前位置。程序界面如图 4。

4 实验

图 5 是驱动器开环工作状态下的驱动电压与输出位移关系的实验测试曲线。从图 5 可以看出,驱动器单步输出位移随驱动电压升高而增大,随驱动步数增加而累积增加,但是如不能实现在线寻优调整驱动电压,则无法有效定位到目标位置。

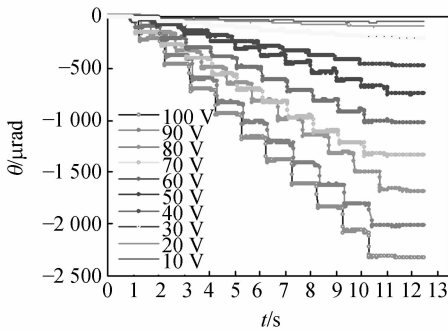


图 5 驱动器开环状态的电压信号与输出特性的关系
Fig. 5 Relationship between actuating voltage and displacement in open-loop mode

采用前述的闭环控制硬件系统和软件程序,对尺蠖型压电旋转驱动器进行了闭环特性的实验测试。在实验测试中,从验证控制方法的有效性出发,为了充分提高实验测试速度,采用驱动器转子向目标位置单侧逼近的方法,不允许转子在目标位置附近往复搜索。驱动器往复运动中会由于各连接系统的间隙导致其存在一定的往复定位误差^[10],如果采用转子在目标位置附近往复搜索的工作方式,可能导致闭环控制过程陷入“死循环”。根据上述规则,对尺蠖型压电旋转驱动器实施闭环控制,目标位移设定为驱动器动子沿驱动压电

叠堆推力作用方向旋转 $1\,500\ \mu\text{rad}$,测试结果如图 6 示。

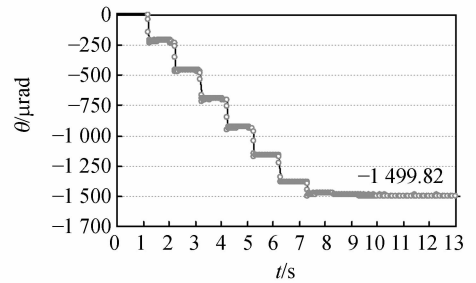


图 6 驱动器闭环控制实验结果

Fig. 6 Experimental result of actuator close-loop control

采用驱动电压值与输出位移分段经验拟合方程寻找最佳驱动电压的办法,针对机械结构及装配关系确定的驱动器,其闭环控制具有较好的效果。驱动器在控制系统作用下,连续转动 11 步逼近目标位置,累计转过角度 $1\,499.82\ \mu\text{rad}$,与目标位移 $1\,500\ \mu\text{rad}$ 差 $0.18\ \mu\text{rad}$,该差异小于驱动器的旋转分辨率(驱动器运转分辨率为 $0.206\ \mu\text{rad}$)。相比于开环工作而言,此时驱动器的定位精度提高了 14.4%。作为尺蠖型压电驱动器闭环控制方法的初步尝试,上述结果初步证明了该方法的有效性,采用该方法具有编程简单、系统响应速度快等优点。

图 7 是目标转角为 $500\ \mu\text{rad}$ 时,对驱动器实施闭环控制的实验测试结果。驱动器在控制系统作用下,连续转动 5 步逼近目标位置,累计转过角度 $499.85\ \mu\text{rad}$,与目标位移 $500\ \mu\text{rad}$ 仅差 $0.15\ \mu\text{rad}$ 。

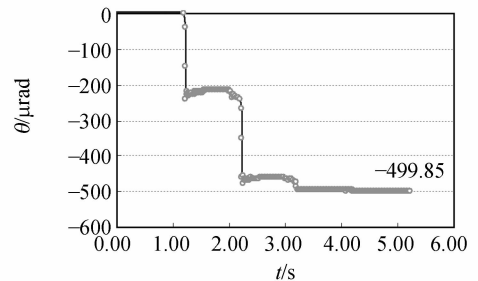


图 7 驱动器闭环控制实验结果

Fig. 7 Experimental result of actuator close-loop control

由于驱动器运行过程中存在一定的随机因素,如驱动器自检过程与实际闭环控制阶段输出

步距的差异、分段拟合方程分界电压值的漂移,以及测试系统稳定性和环境温度、震动等,这些都会对控制效果带来或大或小的影响。另外,参照图2,如果控制系统根据经验拟合方程恰巧选定下一步控制电压为12 V,此时驱动器转子实际输出位移要高于拟合曲线计算的结果,倘若动子当前位置与目标位置的位移差小于该步转子的输出位移,转子转动中则会出现“跃过”目标位置的情况,导致定位误差增大。因此,在后续工作中要将这类问题充分考虑进去,可采用有效方法实现转子在目标位置附近反复搜索“双侧逼近”的方式;还可采用多项式拟合等算法进一步提高经验拟合方程的准确性,进而有效地提高驱动器闭环控制过程的稳定性和可靠性,为驱动器应用到实际工作中奠定更为坚实的基础。

参考文献:

- [1] DOONG T, MAYERGOYZ I. On numerical implementation for hysteresis models[J]. *IEEE Trans. Magnetics*, 1985, 21:1853-1855.
- [2] PING G E, MUSA J. Modeling hysteresis in piezoceramic actuators[J]. *Precision Engineering*, 1995, 17(3): 211-221.
- [3] STRAIN P M, SAIN M K, APENCER B F. Models for hysteresis and application to structural control[C]. *Proceedings of the American Control Conference*, 1997:16-20.
- [4] GOLDFARD M, CELANOVIC N. Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation[J]. *IEEE Control System Magazine*, 1997, 17(3): 69-79.
- [5] HU H, MRAD R B. On the classical preisach model for hysteresis in piezoceramic actuators[J]. *Mechatronics*, 2002, 13(2): 85-94.
- [6] GALINATIS W S, ROGERS R C. Control of a hysteretic actuator using inverse hysteresis compensation[J]. *SPIE*, 1998, 3323: 267-277.
- [7] 赵宏伟, 刘建芳, 华顺明, 等. 压电型步进精密旋转驱动器[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3): 305-310.
ZHAO H W, LIU J F, HUA SH M, *et al.*. Piezoelectric-type stepping precision rotary actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 305-310. (in Chinese)
- [8] 刘国嵩, 赵宏伟, 曾平, 等. 新型压电步进型精密直线驱动器[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3): 291-297.
LIU G S, ZHAO H W, ZENG P, *et al.*. Novel sophisticated stepping linear piezoelectric actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 291-297. (in Chinese)
- [9] 赵宏伟, 吴博达, 程光明, 等. 基于压电驱动的精密步进旋转电机[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(10): 166-171.
ZHAO H W, WU B D, CHENG G M, *et al.*. Precise stepping rotary motor based on piezoelectric actuation[J]. *CSEE*, 2006, 26(10): 166-171. (in Chinese)
- [10] 赵宏伟, 吴博达, 华顺明, 等. 一种新型压电旋转驱动器[J]. *吉林大学学报工学版*, 2005, 35(增): 41-44.
ZHAO H W, WU B D, HUA SH M, *et al.*. A kind of new-type piezoelectric precision rotary actuator[J]. *Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition*, 2005, 35(Supp.): 41-44. (in Chinese)

作者简介:赵宏伟(1976—),男,工学博士,主要研究方向为超精密加工/纳米力学及其数值解析、微纳驱动控制技术。E-mail:Zhaohongwei_jlu@yahoo.com.

5 结 论

针对控制电源和尺蠖型压电驱动器的工作特点,提出采用驱动电压与输出位移分段线性拟合曲线,逐步“搜索”驱动电压值,从而逼近目标位置的闭环控制方法,对该方法进行了实验验证。实验结果表明:该方法在可以实现对驱动器的闭环精确控制,系统闭环定位误差低于 $0.18 \mu\text{rad}$,相比于开环工作而言定位精度提高了14.4%,并具有控制精度较高、响应迅速等优点,保证了驱动器实际工作中的运动稳定性和定位精度。论文研究工作为压电驱动器在超精密加工、微细操作、精密测试等领域的实际应用奠定了基础。