

文章编号 1004-924X(2013)03-0709-08

应变式微型精密压电驱动器的一体化设计及其 PID 控制

王 耿^{1,2,3*}, 官春林^{1,2}, 张小军^{1,2}, 周 虹^{1,2,3}, 饶长辉^{1,2}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:基于有限元分析设计了一种利用应变片进行位移反馈的微型精密压电驱动器。该驱动器采用位移放大机构对微小应变进行放大,通过测量应变电桥的输出间接地测量出驱动器的微小位移。标定实验显示该传感器的精度为 80 nm。虽然该应变反馈式压电驱动器是一种含有迟滞特性的复杂受控对象,但是在准静态条件下 PID 算法可以对其进行有效的闭环控制。分别进行了准静态的定位实验和跟踪实验,结果表明,PID 控制算法对本驱动器的控制效果比较理想。在定位试验中,定位效果与开环相比有明显提高,定位误差不超过 0.059 μm ;单频正弦信号跟踪误差不超过 0.085 μm ;多频正弦信号跟踪误差不超过 0.092 μm 。实验证明了该方法在准静态条件下的有效性。

关键词:压电陶瓷;压电驱动器;迟滞;应变反馈;PID 控制;定位精度

中图分类号: TN384; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0709

Design and control of miniature piezoelectric actuator based on strain gauge sensor

WANG Geng^{1,2,3*}, GUAN Chun-lin^{1,2}, ZHANG Xiao-jun^{1,2}, ZHOU Hong^{1,2,3}, RAO Chang-hui^{1,2}

(1. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*

2. *Key Laboratory on Adaptive Optics of Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: wgmouse@yahoo.com*

Abstract: A kind of miniature precise piezoelectric actuator with strain gauges is designed. The actuator uses a displacement-amplified mechanism to amplify the small strain and measure the output change of the wheat-stone bridge composed of strain gauges to obtain the displacement output indirectly. The experiments show that the accuracy of the actuator is 80 nm. Due to the complex hysteresis characteristics, it is very difficult to control this actuator. However, PID control algorithm is suitable for control of this actuator effectively in the closed loop. A position test and a tracking test at the quasi-static condition are performed to verify the performance of the actuator. Experimental results show that the control performance of the PID control algorithm is good for this actuator. It has effective po-

收稿日期:2012-11-21;修订日期:2012-12-07.

基金项目:“西部之光”计划资助项目(No. A11K005)

sitioning performance, the positioning error does not exceed $0.059 \mu\text{m}$; the maximum tracking errors for single-frequency signal and multi-frequency signal do not exceed $0.085 \mu\text{m}$ and $0.092 \mu\text{m}$, respectively. These results prove the validity of the control algorithm in the quasi-static condition.

Key words: piezoelectric ceramic; piezoelectric actuator; hysteresis; strain feedback; PID control; positioning precision

1 引言

随着自然科学的发展,微位移驱动器已在微纳米操作、超精密加工、微电子制造、半导体光刻、光纤对接、能动光学等需要高精度定位的场合得到了越来越广泛的应用^[1-3],因此微位移技术已经成为前沿科学、工程技术领域的关键技术之一。通常选用压电陶瓷材料、磁致伸缩材料、形状记忆合金等各种智能材料作为微位移驱动器的驱动单元,在此基础上设计出各种各样满足不同需要的微驱动定位系统^[4-7]。

压电陶瓷材料具备响应速度快(ms量级)、动态性能好、定位精度高(理论分辨率无限制)、谐振频率高、单位质量驱动力大、结构简单、体积小易集成、功耗低、不受电磁干扰、适于真空和超净环境等优点,是制作驱动器的重要选择^[8]。然而,压电驱动器本身存在的固有缺点,如应变量小、发热、具有迟滞和蠕变等非线性特性^[9],给精密定位控制带来了一定的影响^[10]。如压电驱动器伸缩量较小时,其应变量会很小,若直接将应变片粘贴其表面,它的应变会很难探测或者探测不准确。

为了克服现有压电驱动器存在的缺点,本文提出了一种采用特殊结构的压电驱动器。首先采用位移放大机构来放大压电陶瓷的微小应变,使其达到可探测量级。然后,在有限元分析的基础上设计一种基于应变片进行位移反馈的微型精密压电驱动器。该驱动器应用于一个小型的倾斜反射镜中,由于驱动的镜面重量非常小,为了方便起见,文中采用空载进行实验。尽管压电陶瓷存在迟滞非线性,但是本文的实验表明在准静态条件下采用常规PID算法^[11]可以对其进行有效控制,并取得较好效果。在各种需要高精度定位的场合,本驱动器的设计与控制方法均具备一定的参考价值和指导意义。

2 微驱动器的设计

2.1 驱动器结构组成、材料选择与设计原理

如图1所示,本微型精密压电驱动器主要由压电陶瓷片(PZT)、位移放大机构、2个弹性体、4个应变片组成。首先将PZT加电缩短,然后放入位移放大机构内部,二者之间是过盈配合;同时使用高强度胶水将PZT两个端面与位移放大机构内部两个端面相粘连。两个弹性体是两个矩形的弹性薄片,用胶水将其粘贴在位移放大机构的对应位置(见图1)。每个弹性体上正中间位置处粘贴一个应变片,用于感受弹性体的应变(见图1);在位移放大机构的左右两侧各粘贴一个应变片,起温度补偿作用。

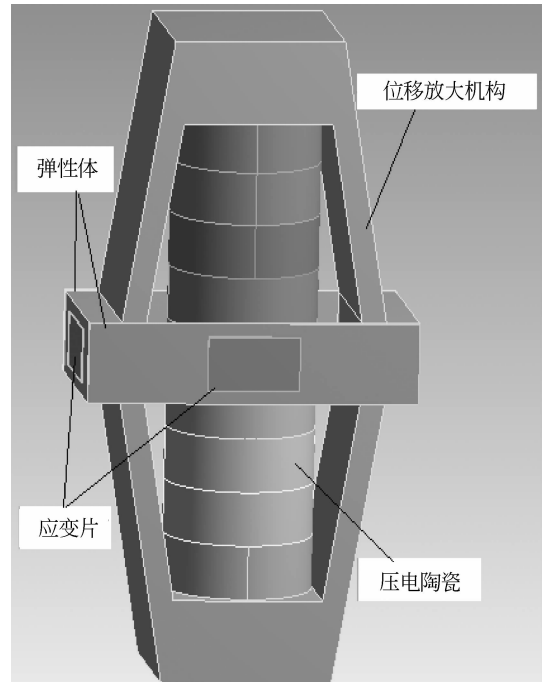


图1 微型精密压电驱动器的结构

Fig. 1 Structure of miniature precise piezoelectric actuator

本微型精密压电驱动器结构中,压电陶瓷片选用PZT材料;位移放大机构和弹性体使用了相同的硬铝合金材料(LY12),具有强度高、易加工、抗拉强度与弹性模量的比值较大等优越的机械性能;粘贴的应变片采用箔式应变片,型号为KFR-02-120-C1-23,由日本KYOWA(共和)公司生产,其温度系数与弹性体的温度系数相匹配。材料属性见表1、表2。

表1 PZT和LY12的机械性能

Tab.1 Properties of PZT and LY12

材料	杨氏模量 E/GPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{mm}^{-3})$
PZT	60.6	0.27	7.50×10^{-3}
LY12	70	0.3	2.7×10^{-3}

表2 应变片的主要性能参数

Tab.2 Properties of strain gauge

主要参数	值
应变系数(24 °C, 50%RH)	$2.01 \pm 1.5\%$
线胀系数($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)	23
电阻值(Ω)	120.2 ± 0.4
温度漂移(PPM/ $^\circ\text{C}$)	23
许用电流(mA)	20
栅长(mm)	0.2

在输入电压的激励下,PZT产生一定量的轴向位移伸长(缩短),其外围的位移放大机构由于推动(拉动)作用会在其中部产生一定量的横向位移缩小(放大),从而使得粘贴于位移放大机构中部的两个弹性体都产生一定量的应变,这个应变被粘贴在弹性体上的应变片所感知,通过电桥输出后即可由应变传感器采集,然后进行后续处理。

2.2 位移放大机构的原理分析

本微型精密压电驱动器结构紧凑,其位移放大机构符合三角形放大原理。当PZT在竖直方向上形成一个 y 位移时,位移放大机构便会在水平方向上形成一个 x 位移,对应的角度为 α 。设放大倍数为 A ,可得

$$A = x/y. \quad (1)$$

由图2知,当在竖直方向产生一个位移 y 时, α 有一个微小增量 $\Delta\alpha$,由此可得

$$y = L \times \cos \alpha - L \times \cos(\alpha + \Delta\alpha), \quad (2)$$

$$x = L \times \sin(\alpha + \Delta\alpha) - L \times \sin \alpha. \quad (3)$$

由(1)、(2)、(3)可得放大倍数

$$A = x/y = \frac{\tan\alpha \times (\cos\Delta\alpha - 1) + \sin(\Delta\alpha)}{(1 - \cos(\Delta\alpha)) + \tan\alpha \times \sin(\Delta\alpha)} \approx \frac{1}{\tan\alpha}. \quad (4)$$

显然,由(4)可知本设计的压电驱动器的位移放大机构的放大倍数只与角度 α 有关。最终经实验测定,实际放大倍数为 2.7,和理论放大倍数 3.0 相吻合。

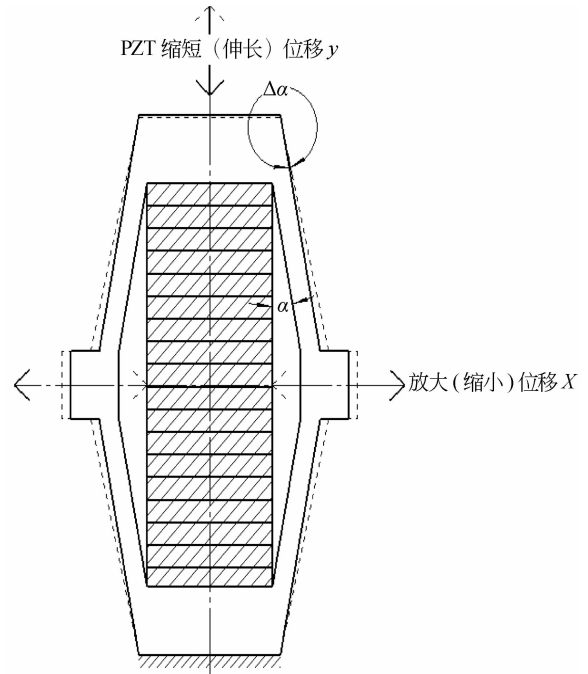


图2 放大原理

Fig.2 Principle of magnifying framework

2.3 应变片应变分析与仿真

弹性体上产生的应变在理论上可以由 $\epsilon = \sigma/E = \frac{F}{A \times E}$ 来计算,其中 F 为弹性体两端所受的拉力, A 为弹性体在垂直于 F 方向的横截面积, E 为材料的弹性模量。由于结构的复杂性, F 不便精确计算,而是采用有限元法进行压电场静力场耦合分析。

采用应变片进行位移测量时,弹性体产生的应变必须在应变片可测范围内,并且要求应变与输入载荷之间满足线性关系。应变片可测最小应变一般在 10^{-6} 量级,图3显示了有限元法分析的结果,当PZT的位移为 10 nm 时,应变片感受到的应变,其值的大小在 10^{-6} 量级;图4显示了仿真

的应变和位移之间的关系曲线,其满足线性关系。

采用应变片进行位移测量时,弹性体上粘贴应变片处产生的应变必须尽可能分布均匀,不能有应力集中。由图 5 的仿真结果可以看出 R_1 和 R_3 所在位置处应变分布比较均匀。

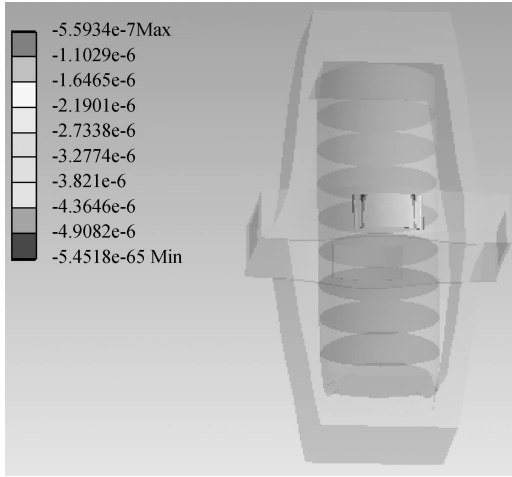


图 3 10 nm 位移时的应变值

Fig. 3 Strain at 10 nm displacement

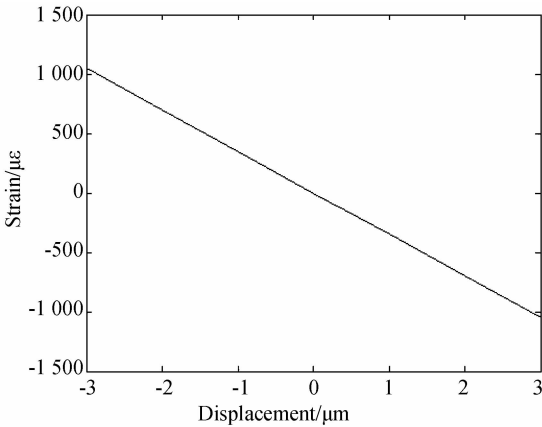


图 4 应变位移关系曲线

Fig. 4 Relation between strain and displacement

2.4 应变片粘贴位置与电桥分析

两个弹性体上各粘贴了 2 个应变片,图 5 中标注了其粘贴位置。其中 2 个工作片 R_1 和 R_3 分别粘贴于两个弹性体正中间位置,两个补偿片 R_2 和 R_4 分别粘贴于位移放大机构的左右两侧。当 PZT 伸缩产生位移时,由于应变相等,即 $\epsilon_1 = \epsilon_3$,因此 R_1 和 R_3 的阻值会发生同等大小的变化;而 R_2 和 R_4 的阻值在一定的误差范围内基本不变,其主要用于补偿温度的影响。

这 4 个应变片组成的电桥如图 6 所示。其

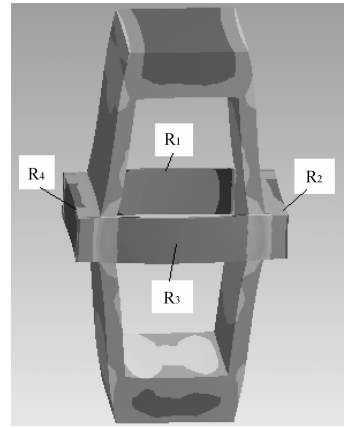


图 5 均匀的应变分布

Fig. 5 Uniform strain distribution

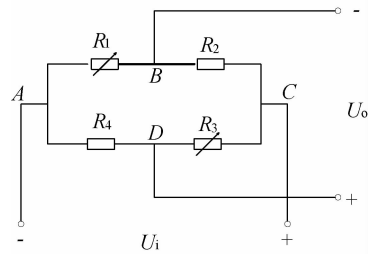


图 6 电桥组桥方式

Fig. 6 Electric bridge configuration

中, $R_1 = R_0 + \Delta R_1$, $R_3 = R_0 + \Delta R_3$, $R_2 = R_4 = R_0$, $\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R < 0$, U_i 为电桥供电电源, K 为应变片的灵敏系数, U_o 是电桥的输出,由公式(5)可知电桥输出与应变 ϵ 近似呈线性关系。

$$U_o = U_i \times \frac{\Delta R}{2 \times R + \Delta R} \approx U_i \times \frac{\Delta R}{2 \times R} \approx$$

$$\frac{U_i}{4} \times K(\epsilon_1 + \epsilon_3) = \frac{U_i}{2} \times K \times \epsilon. \quad (5)$$

在 2.3 节中也仿真得到了应变 ϵ 与位移呈线性关系,因此电桥的输出与本驱动器的位移输出之间也呈线性关系。

3 实验与结果分析

3.1 实验装置

为了验证本精密压电驱动器的性能,建立了驱动器的实验系统,其组成原理图如图 7 所示,实验实物装置见图 8。实验中采用了增量式 PID 闭环控制算法,其数学表达式如下:

$$u(n) = u(n-1) + K \times (k_p \times (e(n) - e(n-1)) + k_i \times e(n) + k_d \times (e(n) - 2 \times e(n-1) + e(n-2))). \quad (6)$$

其中, K 表示高压放大器的增益, k_p 、 k_i 、 k_d 分别代表 PID 控制器的 3 个参数。实验前, 首先采用北京机床研究所生产的 DWS 型电容传感器(精度 1 nm)对设计的应变式传感器进行了标定实验, 最终标定系数为 $0.8 \mu\text{m}/\text{V}$, 精度达 80 nm。实验平台中的高压放大器和应变传感器为自行研制, 其中高压放大器放大倍数 100 倍, 驱动器工作电压为 $0\sim 500 \text{ V}$; 应变传感器精度为 80 nm; 数据采集卡使用 PCI6221 型(NI 公司, 含 D/A 和 A/D 模块), 其转换位数 16 位; 试验中使用了江西连胜实验装备有限公司生产的隔振台。

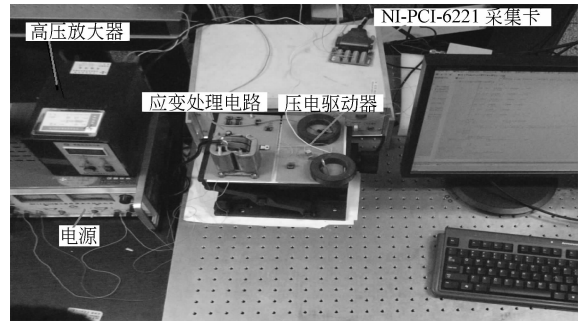


图 8 实验系统实物图

Fig. 8 Physical map of experiment setup

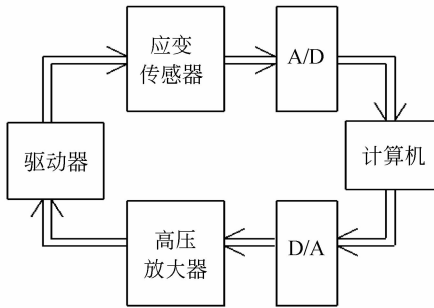


图 7 实验系统组成
Fig. 7 Test system

3.2 实验验证

为了检验本驱动器在准静态条件下的定位性能, 选用了图 9(a) 所示的 1 Hz 的阶梯状信号作为参考输入信号, 分别在开环和闭环 2 种方式下做了驱动器的控制实验。图 9(b) 为开环控制时本驱动器的位移时间曲线, 图 9(c) 为采用 PID 算法进行闭环控制时本驱动器的位移时间曲线, 图 9(d) 和图 9(e) 显示了开环和闭环时的定位误差分别为 $0.331 \mu\text{m}$ 和 $0.059 \mu\text{m}$, 可以看出闭环时的动态定位性能得到了明显提高。

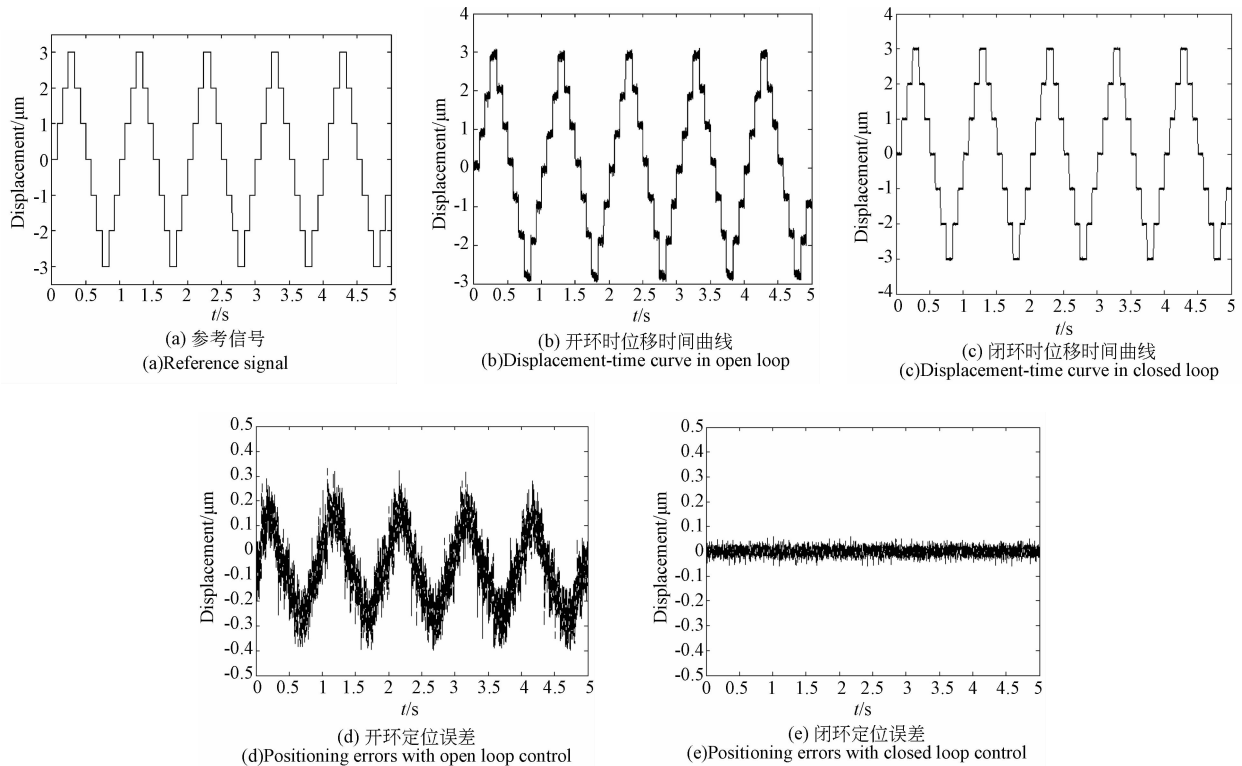


图 9 阶梯信号的开闭环定位控制对比试验

Fig. 9 Comparison of positioning performance for staircase signals in open loop and closed loop controls

为了检验本驱动器在准静态条件下的跟踪性能,选用了 0.1 Hz 的正弦信号作为参考输入信号,分别在开环和闭环两种方式下做了驱动器的控制实验。图 10(a)为开环控制时本驱动器的输入输出跟踪曲线;图 10(b)为其误差曲线,可以看出误差比较明显,跟踪误差达 $0.444 \mu\text{m}$;图 10(c)为此

时对应的迟滞曲线,平均迟滞达 8.3%。图 11(a)为采用 PID 控制算法进行闭环控制时本驱动器的输入输出跟踪曲线;图 11(b)为其误差曲线,可以看出控制效果比较理想,跟踪误差不超过 $0.085 \mu\text{m}$;图 11(c)为此时对应的迟滞曲线,平均迟滞不超过 1.0%。

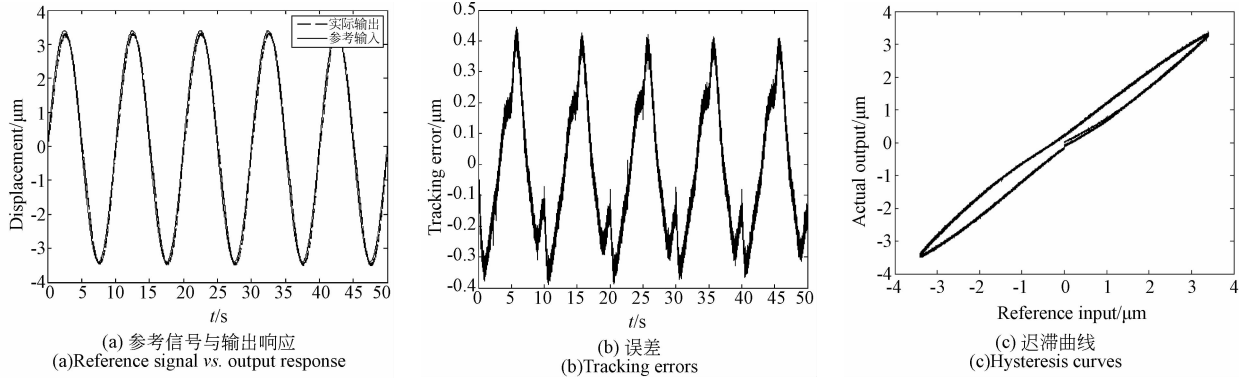


图 10 开环控制时的输入输出跟踪曲线(单频正弦信号作为参考输入信号)

Fig. 10 Tracking responses with open loop control(Single-frequency sinusoidal signal reference input signal)

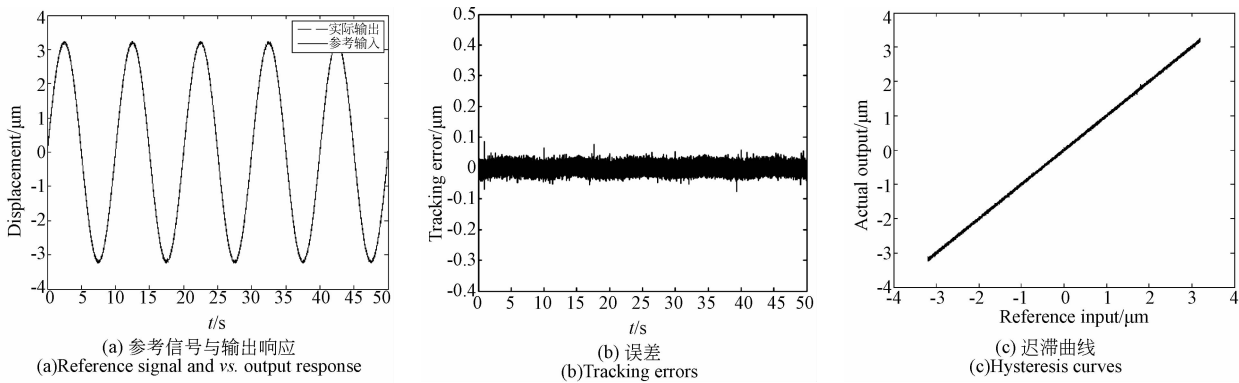


图 11 闭环控制时的输入输出跟踪曲线(单频正弦信号作为参考输入信号)

Fig. 11 Tracking responses with closed loop control(Single-frequency sinusoidal signal reference input signal)

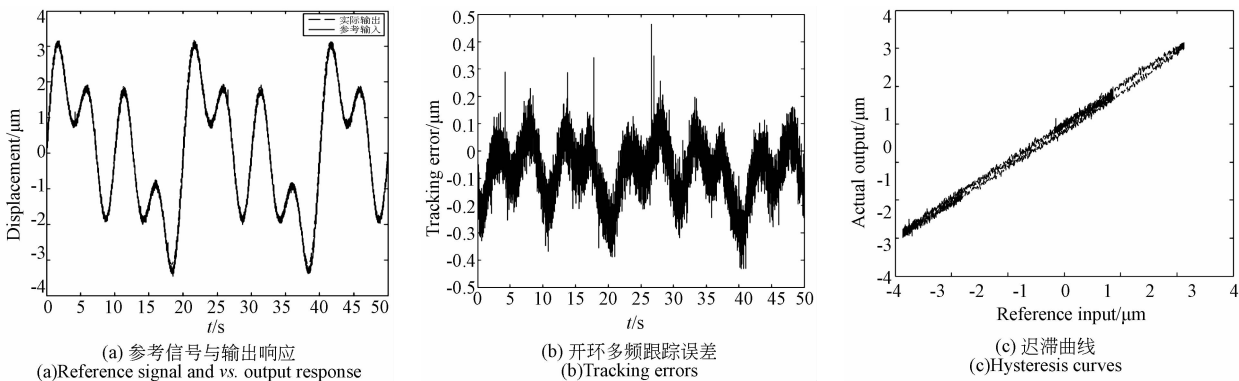


图 12 开环控制时的输入输出跟踪曲线(多频正弦信号作为参考输入信号)

Fig. 12 Tracking responses with open loop control(Multi-frequency sinusoidal signal as reference input signal)

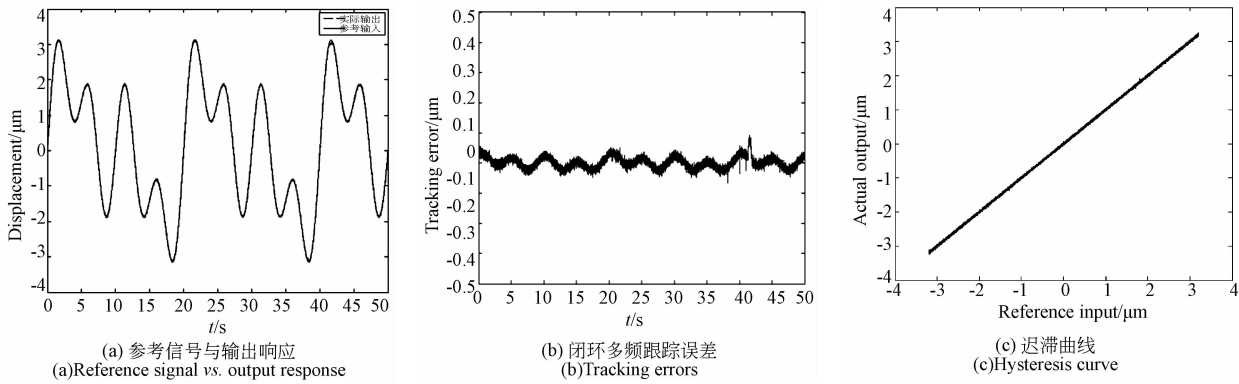


图 13 闭环控制时的输入输出跟踪曲线(多频正弦信号作为参考输入信号)

Fig. 13 Tracking responses with closed loop control(Multi-frequency sinusoidal signal as reference input signal)

为了检验本驱动器在准静态条件下对多频信号的跟踪性能,选用了正弦信号 $y = 1.414 \times \sin(2\pi \cdot 0.1t) + \sin(2\pi \cdot 0.05t) + \sin(2\pi \cdot 0.2t)$ 作为参考输入信号,分别在开环和闭环两种方式下做了驱动器的控制实验。图 12(a)为开环控制时本驱动器的输入输出跟踪曲线;图 12(b)为其误差曲线,可以看出误差比较明显,跟踪误差达 $0.465 \mu\text{m}$;图 12(c)为此时对应的迟滞曲线,迟滞达 7.1% 。图 13(a)为采用 PID 控制算法进行闭环控制时本驱动器的输入输出跟踪曲线;图 13(b)为其误差曲线,可以看出控制效果比较理想,跟踪误差不超过 $0.092 \mu\text{m}$;图 13(c)为此时对应的迟滞曲线,迟滞不超过 1.0% 。

4 结 论

为了满足高精度定位的需求,本文设计了一种

应变反馈式微型精密压电驱动器。为了克服压电陶瓷应变变量小的缺点,采用位移放大机构进行了应变的放大,并在有限元分析的基础上对应变片的粘贴位置和排布方式进行了分析。然后,加工并组装了一个驱动器,实现了基于应变来检测驱动器的位移。最后,为了验证其定位性能和跟踪性能,采用 PID 控制算法对驱动器进行了闭环控制。依据准静态实验效果,可以看出,闭环定位效果比开环有明显提高,定位误差达 $0.059 \mu\text{m}$;单频正弦信号跟踪误差不超过 $0.085 \mu\text{m}$,多频正弦信号跟踪误差不超过 $0.092 \mu\text{m}$;说明了其动态跟踪的有效性。虽然本文中对 0.1 Hz 的正弦信号进行了有效的跟踪,但是压电材料迟滞非线性会导致系统输出不稳定,采用一般 PID 算法在闭环控制高频信号时不能进行有效跟踪,因此下一阶段我们将对控制算法进行研究来解决高频跟踪的问题。

参考文献:

- [1] JANG J L, TARNG Y S. A study of the active vibration control of a cutting tool [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 95(1-3): 78-82.
- [2] MOHEIMANI S O R, GOODWIN G C. Introduction to the special issue on dynamics and control of smart structures[J]. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2001, 9: 3-4.
- [3] ZHANG D, CHANG C, ONO T, et al.. A piezo-driven XY-microstage for multiprobe nanorecording [J]. *Sensors and Actuators*, 2003, 108(1-3): 230-233.
- [4] 孙立宁,孙绍云,曲东升,等. 基于 PZT 的微驱动定位系统及控制方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2004,12(1):55-59.
- [5] SUN L N, SUN SH Y, QU D SH, et al.. Study of PZT based micro-drive positioning system and its control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1):55-59. (in Chinese)
- [5] 田延岭,张大卫,闫兵. 二自由度微定位平台的研制

[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 94-99.

TIAN Y L, ZHANG D W, YAN B. Development of a two-freedom micro-positioning platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 94-99. (in Chinese)

[6] 范伟, 余晓芬, 奚琳. 压电陶瓷驱动系统及控制方法研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 368-371.

FAN W, YU X F, XI L. Study of a piezoelectric driving system and its control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 368-371. (in Chinese)

[7] 杨志刚, 刘登云, 吴丽萍, 等. 应用于压电叠堆泵的微位移放大机构[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 884-888.

YANG ZH G, LIU D Y, WU L P, *et al.*. Micro displacement amplifying mechanism with application

to piezoelectric stack pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 884-888. (in Chinese)

[8] QIU J H, JI H L. Research on applications of piezoelectric materials in smart structures [J]. *Front. Mech. Eng.*, 2011, 6(1): 99-117.

[9] TAO G, KOKOTOVIC P V. Adaptive control of plant with unknown hysteresis [J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1995, 40: 200-212.

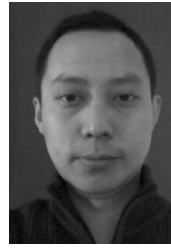
[10] GE P, JOUANEH M. Tracking control of a piezoceramic actuator [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1996, 4(3): 209-216.

[11] LI Y, ANG K H, CHONG G C Y. PID control system analysis and design [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, 26: 32-41.

作者简介:



王 耿(1984—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 2008 年于河南理工大学获得学士学位, 主要从事光机电系统等方面的研究。E-mail: wgmouse@ yahoo.com



周 虹(1983—), 男, 重庆人, 博士研究生, 2005 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 主要从事自适应光学等方面的研究。E-mail: Hong_zhou@ yahoo.com



官春林(1965—), 男, 四川宜宾人, 研究员, 1986 年于武汉测绘科技大学获得学士学位, 主要从事能动光学器件的研究。E-mail: clguan@ioe.ac.cn



饶长辉(1971—), 男, 江西人, 博士, 研究员, 1993 年毕业于武汉测绘科技大学电子工程系, 1997 年、2001 年于中国科学院光电技术研究所分别获得硕士、博士学位, 主要从事自适应光学技术研究及系统研制工作。E-mail: chrao@ioe.ac.cn



张小军(1973—), 男, 湖南永州人, 博士, 研究员, 2000 年于武汉理工大学获得博士学位, 主要从事能动光学器件方面的研究。E-mail: df_zxj@163.com