

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905305

基于割率的线性方程抗迟滞方法*

傅雨晨, 范伟, 于欣妍, 金花雪

(华侨大学 机电装备过程监测及系统优化福建省高校重点实验室 厦门 361021)

摘要:针对压电陶瓷驱动器固有的迟滞特性对定位及控制精度的影响,找到了一种基于割率的线性方程抗迟滞方法。首先计算出迟滞曲线上升、下降轨迹各采样点及目标修正直线的割率比,即割率系数 β ;将采样电压与对应 β 的关系曲线分段拟合成线性方程组;最后将采样电压代入方程组求出修正电压,作出驱动控制曲线。结合上述抗迟滞原理,驱动器的最大迟滞误差从14.543%减小为1.268%,重复性误差小于1.497%,非线性误差小于4.497%。相对于繁琐复杂的建模算法,该方法能以比例放大及加法运算电路的形式实现对迟滞曲线的修正,算法仅为一次方程组,具有更高的可实施性和可操作性,为进一步提高压电陶瓷驱动器的定位及控制精度提供了科学的参考依据。

关键词: 压电陶瓷驱动器;割率;割率系数;线性方程;修正电压

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Anti-hysteresis method of linear equation based on cutting rate

Fu Yuchen, Fan Wei, Yu Xinyan, Jin Huaxue

(Key Laboratory of Process Monitoring and System Optimization for Mechanical and Electrical Equipment, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Aiming at the influence of the inherent hysteresis characteristics of the piezoelectric ceramic actuator on the positioning and control accuracy, a linear equation anti-hysteresis method based on cutting rate is found. Firstly, the sampling points of the rising and falling trajectories of the hysteresis curve and the cutting rate ratio of the target correction line are calculated, the ratio is the cutting rate coefficient β . The relationship curve between the sampling voltage and corresponding β is fitted segmentally into a linear equation group. Finally, the sampling voltage is inputted into the equation group to obtain the correction voltage, and the driving control curve is made. Experiment results: with the above anti-hysteresis principle, the maximum hysteresis error of the driver is reduced from 14.543% to 1.268%, the repeatability error is less than 1.497%, and the nonlinear error is less than 4.497%. Experiment conclusion: compared with the cumbersome and complex modeling algorithm, the proposed method can realize the correction of the hysteresis curve with the form of proportional amplification and addition operation circuit. The algorithm is only one-order equation group, which has higher implementation feasibility and operability. The algorithm provides a scientific reference for further improving the positioning and control accuracy of piezoelectric ceramic actuators.

Keywords: piezoelectric ceramic actuator; cutting rate; cutting rate coefficient; linear equation; correction voltage

0 引言

压电陶瓷具有响应快、稳定性好、精度高、易安装等优点,被广泛应用于微电子和精密加工^[1-3]、电源驱动^[4]、微定位平台^[5]等领域。

国内外学者对压电陶瓷迟滞特性的主要研究方为建模与控制。数学建模方面,PI模型^[6]结构简单,适用范围广,但它的实现形式较为繁杂,而且难以实现在线控制^[7];于志亮等^[8]将PI模型改进,进一步减少计算复杂度,通过前馈逆补偿使迟滞线性化;广义Bouc-Wen模型可以较好的描述非对称的迟滞环且其解析逆模型易于求

收稿日期:2019-06-25 Received Date:2019-06-25

* 基金项目:国家自然科学基金(51505161)、福建省自然科学基金(2017J01086)、泉州科技计划(2018Z001)项目资助

取^[9]、类似还有 Dahl 模型^[10]、Duhem 模型^[11]等;杨晓京^[12]等采用基于遗传因子的递推最小二乘法来辨识 Backlash-like 模型的参数;物理建模方面主要为基于神经网络方法的迟滞建模^[13]和基于能量守恒原理描述迟滞现象的 Jiles-Atherton 模型^[14]等,但上述算法严重依赖于模型精确性^[15];关于迟滞控制的研究,最为有效和最精密的办法就是运用前馈逆补偿控制方法^[16]来减小迟滞误差,其控制精度取决于所建迟滞模型^[17],与此同时为了限制开环逆补偿下扰动的影响,可在此基础上采用自适应控制^[18]、鲁棒控制^[19]、神经网络控制^[20]。

综上所述,为了尽量克服迟滞非线性带来的精度误差,需要研究一种简单易行又高效实用的修正方法,实验通过寻找迟滞特性曲线中各采样点与坐标原点的连线割率的规律,来得到修正电压,从而得到近似线性的输出位移。

1 基于割率的线性方程抗迟滞原理实验设计

1.1 实验装置系统

如图 1 所示,实验采用 HPV 系列 C 型压电陶瓷驱动电源,其具有的极低的静态纹波和优良的频率响应。PZT 系列压电陶瓷驱动器,标定行程为 20、40、60 μm。TT80 型电感测微仪,指示误差小于 0.15%;零点漂移小于 ±0.005%/℃;分辨率 0.01 μm。GJ-II-ZDT-P 型气浮隔振平台,重复定位精度为 ±0.1 mm。

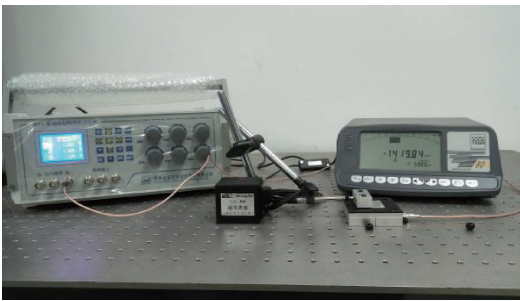


图 1 实验装置系统
Fig.1 Experiment device system

1.2 实验控制及数据处理软件

实验中压电陶瓷驱动电源的控制界面在计算机上用 C++编程,计算机通过串口通信对驱动电源进行控制;运用 Excel 对数据进行处理;运用 MATLAB 绘制图形并进行图像分析;运用 Origin 2017 对数据进行误差分析,曲线拟合及图像处理。

1.3 基于割率的线性方程抗迟滞实验原理

1) 建立压电陶瓷迟滞特性曲线

实验选取 20 μm 行程的压电陶瓷驱动器,计算机控

制界面设置采样电压间隔为 5 V,输出间隔为 2 s,区间为 0~150 V,驱动器末端连接电感测微仪,实时检测输出位移,往返循环驱动 3 次,去除粗大误差后取平均值,作出迟滞特性曲线,如图 2 所示。

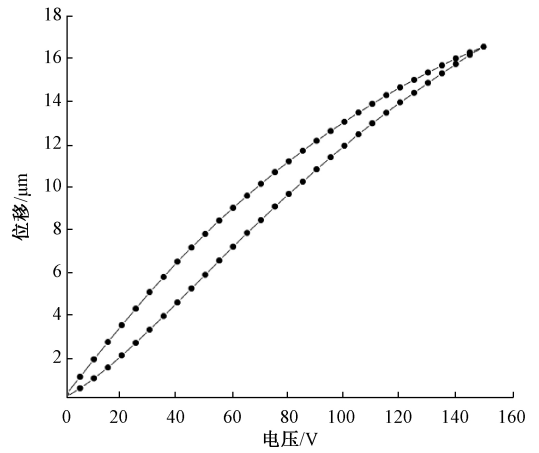


图 2 迟滞特性曲线

Fig.2 Hysteresis characteristic curve

2) 修正电压与割率的关系

如图 3 所示,以上升轨迹的 60 V 点 A(x₁, y₁) 为例,将坐标原点与该采样点相连,得到线段 L,设线段 L 的割率为 a,将迟滞特性曲线的首尾采样点相连,得到修正直线 y_{OB} = 0.11x,其中割率 k = 0.11,由点 A 向坐标 y 轴作垂线,交修正直线于点 B(x₂, y₂)。

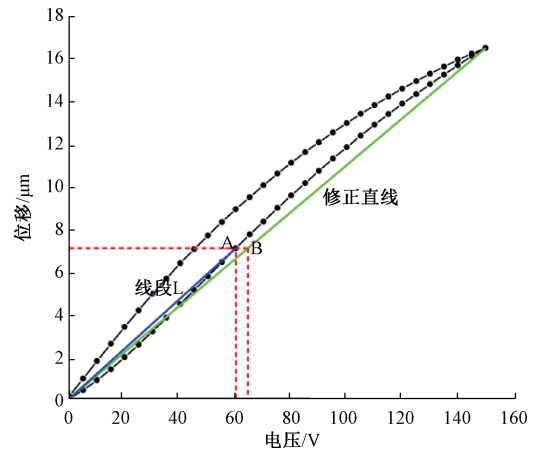


图 3 迟滞特性曲线及修正直线

Fig.3 Hysteresis characteristic curve and correction line

由图 3 可得: $a = \frac{y_1}{x_1}, k = \frac{y_2}{x_2} = 0.11, x_2 = \frac{y_2}{k} = \frac{y_1}{k}$ 。

令 $k = \beta * a$,其中 β 定义为割率系数,则 $\frac{y_2}{x_2} = \beta * \frac{y_1}{x_1}$,

因为 $y_1 = y_2$,则 $x_1 = \beta * x_2$ 。

由图 3 可知,为了达到理想的修正直线,如以位移 y₂

的修正直线的 B 点(x_2)为修正目标,实际应输入 A 点的电压 x_1 , x_1 即为 x_2 对应的修正电压,以此类推所有采样点对应的修正目标点,可以得到:修正电压(x_1) = β * 目标电压(x_2)。同理可知,当把采样点作为修正目标点,即 x_2 为采样电压,则仍然存在对应的 β , 上述关系仍然成立,即修正电压 = β * 采样电压,因此,只需要找出曲线各个采样电压所对应的 β 的规律,即可得到相应的修正电压,从而得到修正位移。

3) 建立采样电压与 β 的线性方程

以采样点编号为 x 轴, β 为 y 轴, 建立坐标系, 画出曲线图, 如图 4 和 5 所示。

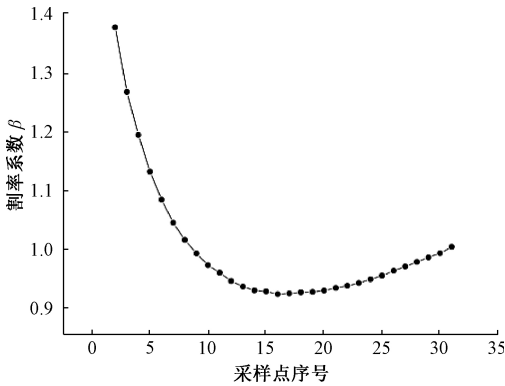


图 4 上升轨迹 β 规律曲线

Fig.4 Rising trajectory β law curve

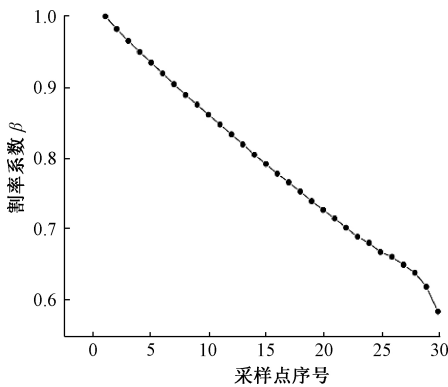


图 5 下降轨迹 β 规律曲线

Fig.5 Falling trajectory β law curve

以上升轨迹 β 规律曲线为例,将曲线分为 3 段,以下 3 段经过大量验证为最佳分段,第 1 段区间为 $2 \leq x \leq 7$ (因第 1 个采样点的 β 值无法取得,故从第 2 点开始计算),第 2 段区间为 $7 < x \leq 18$,第 3 段区间为 $18 < x \leq 31$,然后利用每段首尾两点坐标将 3 段 β 规律曲线近似为 3 个一次线性方程。

$$\begin{cases} y = -0.067x + 1.509, & 2 \leq x \leq 7 \\ y = -0.011x + 1.117, & 7 < x \leq 18 \\ y = 0.005x + 0.829, & 18 < x \leq 31 \end{cases} \quad (1)$$

将采样点带入上述方程组,求得不同采样范围内的采样点的对应的 β 值如表 1 所示。

表 1 采样点对应的 β 值

Table 1 The β values corresponding to the sampling points

采样点编号	采样电压/V	β	采样点编号	采样电压/V	β
1	0	/	17	80	0.93
2	5	1.375	18	85	0.919
3	10	1.308	19	90	0.924
4	15	1.241	20	95	0.929
5	20	1.174	21	100	0.934
6	25	1.107	22	105	0.939
7	30	1.04	23	110	0.944
8	35	1.029	24	115	0.949
9	40	1.018	25	120	0.954
10	45	1.007	26	125	0.959
11	50	0.996	27	130	0.964
12	55	0.985	28	135	0.969
13	60	0.974	29	140	0.974
14	65	0.963	30	145	0.979
15	70	0.952	31	150	0.984
16	75	0.941			

同理,得到下降轨迹中 β 的 3 段直线方程(此时第 31 个采样点的 β 值无法取得,故计算截止于第 30 个点),对应 β 值计算表同上,在此不详述。

$$\begin{cases} y = -0.014x + 1.014, & 1 \leq x \leq 26 \\ y = -0.011x + 0.948, & 26 < x \leq 28 \\ y = -0.028x + 1.41, & 28 < x \leq 30 \end{cases} \quad (2)$$

4) 建立压电陶瓷驱动控制曲线

根据上述找到的上升、下降轨迹对应的线性方程组,根据关系式:“修正电压 = β * 采样电压”,求得两条轨迹各采样点的修正电压,作为压电陶瓷驱动器的最终输入电压,如表 2 所示。

根据表 2,用上升、下降轨迹的修正电压“替代”采样电压,作为压电陶瓷驱动器的最终输入电压,得出位移,最后将采样电压和位移导入 Origin 2017 软件进行曲线拟合和误差分析,得出驱动控制曲线。

表 2 采样电压与修正电压
Table 2 Sampling voltages and correction voltages

采样电压/V	β	修正电压/V	采样电压/V	β	修正电压/V	采样电压/V	β	修正电压/V	采样电压/V	β	修正电压/V
5	1.375	6.875	80	0.930	74.400	150	1	150	75	0.790	59.25
10	1.308	13.080	85	0.919	78.115	145	0.986	142.97	70	0.776	54.32
15	1.241	18.615	90	0.924	83.160	140	0.972	136.08	65	0.762	49.53
20	1.174	23.480	95	0.929	88.255	135	0.958	129.33	60	0.748	44.88
25	1.107	27.675	100	0.934	93.400	130	0.944	122.72	55	0.734	40.37
30	1.040	31.200	105	0.939	98.595	125	0.930	116.25	50	0.720	36.00
35	1.029	36.015	110	0.944	103.840	120	0.916	109.92	45	0.706	31.77
40	1.018	40.720	115	0.949	109.135	115	0.902	103.73	40	0.692	27.68
45	1.007	45.315	120	0.954	114.480	110	0.888	97.68	35	0.678	23.73
50	0.996	49.800	125	0.959	119.875	105	0.874	91.77	30	0.664	19.92
55	0.985	54.175	130	0.964	125.320	100	0.860	86.00	25	0.650	16.25
60	0.974	58.440	135	0.969	130.815	95	0.846	80.37	20	0.651	13.02
65	0.963	62.595	140	0.974	136.360	90	0.832	74.88	15	0.640	9.60
70	0.952	66.640	145	0.979	141.955	85	0.818	69.53	10	0.598	5.98
75	0.941	70.575	150	0.984	147.600	80	0.804	64.32	5	0.570	2.85

2 基于割率的线性方程抗迟滞方法

2.1 压电陶瓷同行程、同驱动电压重复性实验

为了验证对压电陶瓷同行程、同驱动电压条件下的迟滞修正效果及重复性,选取 20 μm 行程的压电陶瓷驱动器,参数设置如 2.3 中 1) 所示,作出迟滞特性曲线,再根据抗迟滞原理得出修正电压,重复输入 5 次,求得驱动控制曲线。

如图 6 和 7 所示,5 次实验的驱动控制曲线及平均驱动控制曲线均近似成线性,满足基于斜率的抗迟滞驱动原理,修正后的驱动控制曲线上各采样点的迟滞误差相对较小,大部分处在 2% 以内,最小为 0.109%,最大迟滞误差为 3.074%,迟滞误差明显减小,其中非线性误差小于 2.594%,重复性误差小于 1.497%,证明该修正方法对行程、同驱动电压的迟滞现象具有较好的修正效果,且重复性较好。

2.2 压电陶瓷同行程、不同驱动电压实验

为了验证对压电陶瓷同行程、不同驱动电压条件下的迟滞修正效果,选取 20 μm 行程的压电陶瓷驱动器,控制界面分别设置为 5、10、15 V 驱动电压,其他设置条件如上,求得驱动控制曲线。

1) 20 μm 行程压电陶瓷 10 V 驱动电压实验

如图 8 和 9 所示,各采样电压的最大非线性误差均在 2.741% 以内,最大迟滞误差为 3.260%,最小迟滞误差

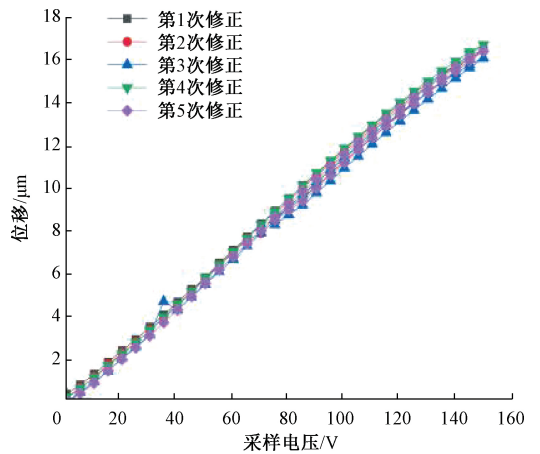


图 6 驱动控制曲线

Fig.6 Driving control curve

为 0.001%,证明了该抗迟滞方法的可行性。

2) 20 μm 行程压电陶瓷 15 V 驱动电压实验

如图 10 和 11 所示,修正后各采样电压的最大非线性误差均在 3.189% 以内,最大迟滞误差为 3.514%,最小迟滞误差为 0.002%,证明了该抗迟滞方法的可行性。

通过大量实验验证,采用基于割率的线性方程抗迟滞原理修正后的驱动控制曲线与迟滞特性曲线相比,在 20 μm 行程 5 V 驱动电压下的最大非线性误差为 2.594%,最大迟滞误差由 11.697% 变为 3.074%;10 V 驱

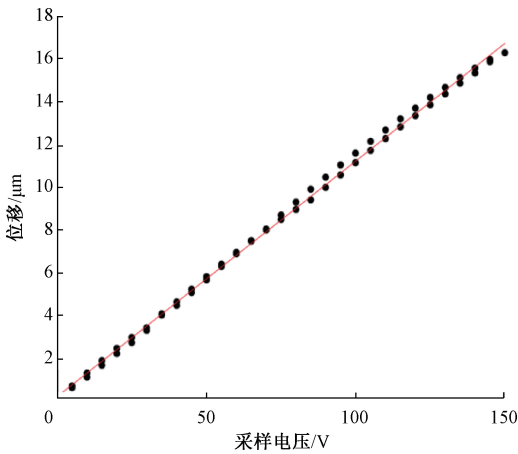


图7 平均驱动控制曲线

Fig.7 Average driving control curve

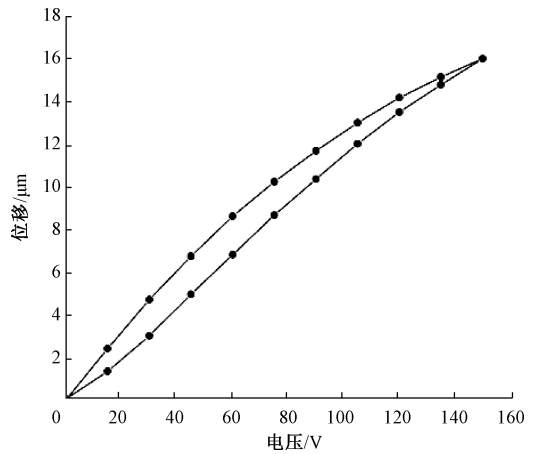


图10 迟滞特性曲线

Fig.10 Hysteresis characteristic curve

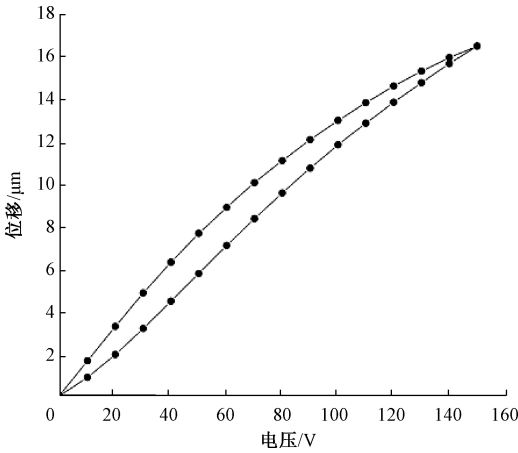


图8 迟滞特性曲线

Fig.8 Hysteresis characteristic curve

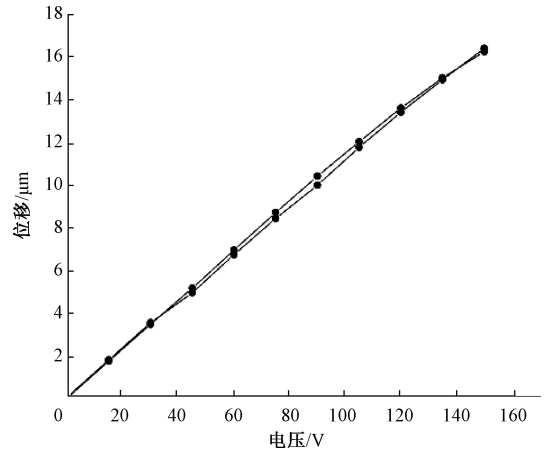


图11 驱动控制曲线

Fig.11 Driving control curve

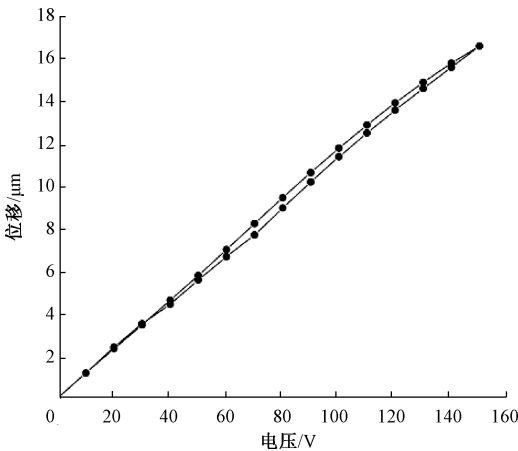


图9 驱动控制曲线

Fig.9 Driving control curve

11.455%变为3.260%;15 V驱动电压下的最大非线性误差为3.189%,最大迟滞误差由11.291%变为3.514%,最大迟滞误差分别减小了73.720%、71.541%和68.878%。结果表明,3种驱动电压下的迟滞误差与非线性误差均在3.5%以下,迟滞修正效率在70%左右,其中最大迟滞误差随驱动电压的增加而增加,这可能是由于驱动电压的增加导致采样点 β 数量的减小,当对 β 规律曲线进行线性拟合时,所得线性方程偏差较大,从而使线性方程组不能更好的描述 β 规律,导致修正位移偏差较大,使得最终的驱动控制曲线的迟滞误差偏大。实验证明,该抗迟滞方法对同行程、不同驱动电压下的压电陶瓷驱动器的迟滞非线性都具有较好的修正效果,且修正效率较好。

2.3 不同行程压电陶瓷、相同驱动电压实验

为了验证对不同行程压电陶瓷驱动器、同驱动电压条件下的迟滞修正效果,选取20、40、60 μm 行程的压

动电压下的最大非线性误差为2.741%,最大迟滞误差由

电陶瓷驱动器,控制界面设置为 5 V 驱动电压,其他设置条件如上,求得驱动控制曲线。

1) 40 μm 行程压电陶瓷 5 V 步长驱动电压实验

如图 12 和 13 所示,修正后各采样电压的最大非线性误差均在 4.497% 以内,最大迟滞误差为 4.899%,最小迟滞误差为 0.000%,证明了该抗迟滞方法的可行性。

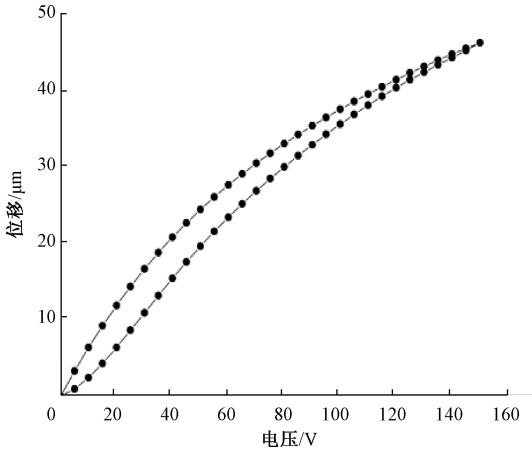


图 12 迟滞特性曲线

Fig.12 Hysteresis characteristic curve

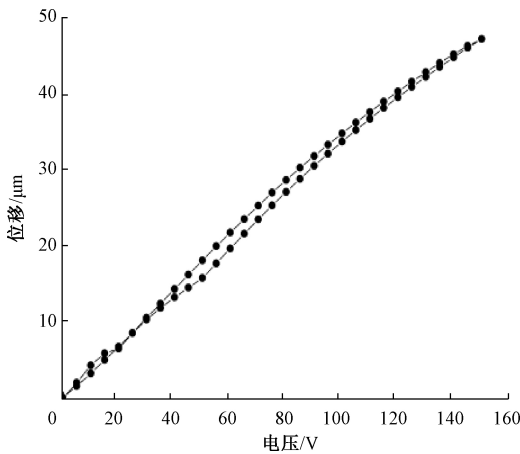


图 13 驱动控制曲线

Fig.13 Driving control curve

2) 60 μm 行程压电陶瓷 5 V 步长驱动电压实验

如图 14 和 15 所示,修正后各采样电压的最大非线性误差均在 2.084% 以内,最大迟滞误差为 1.286%,最小迟滞误差为 0.000%,证明了该抗迟滞方法的可行性。

通过大量实验验证,采用基于割率的线性方程抗迟滞原理修正后的驱动控制曲线与各自行程的迟滞特性曲线相比,在 20 μm 行程 5 V 驱动电压下的最大非线性误差为 2.594%,最大迟滞误差由 11.697% 变为 3.074%; 40 μm 行程下的最大非线性误差为 4.497%,最大迟滞误差由 12.418% 变为 4.899%; 60 μm 行程下的最大非线性

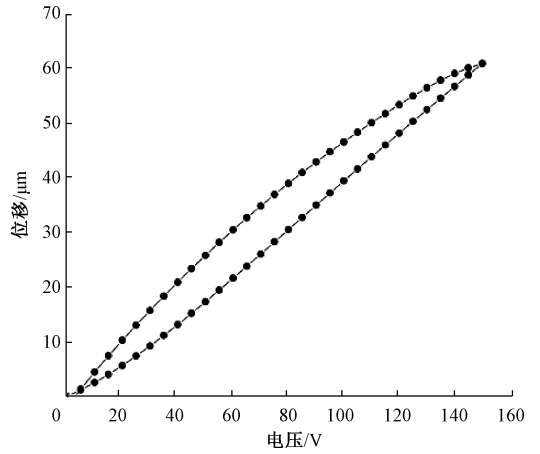


图 14 迟滞特性曲线

Fig.14 Hysteresis characteristic curve

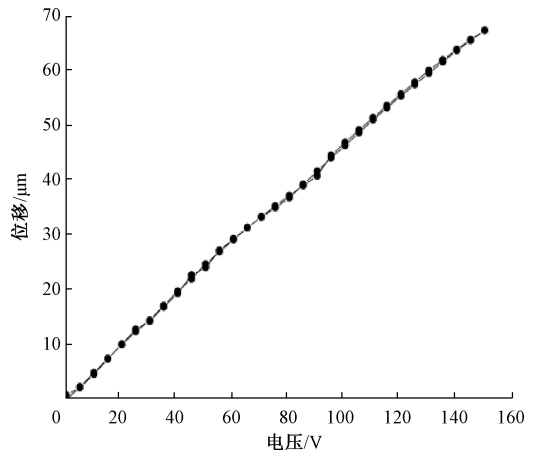


图 15 驱动控制曲线

Fig.15 Driving control curve

误差为 2.084%,最大迟滞误差由 14.543% 变为 1.286%,最大迟滞误差分别减小了 73.720%、60.549% 和 91.157%。结果表明,3 种行程下的迟滞误差与非线性误差均在 5% 以下,迟滞修正效率偏差较大,60 μm 行程修正效果最佳,40 μm 行程修正效果较差,其中最大非线性误差和最大迟滞误差均随着行程的增加而先变大后变小,这可能与不同行程迟滞特性曲线趋势有关,20 μm 和 60 μm 行程的迟滞曲线起伏较小,斜率变化缓慢,得到的 β 规律曲线线性度较好,40 μm 行程的迟滞曲线起伏较大,斜率变化明显,得到的 β 规律曲线线性度较差,所以在对 β 规律曲线进行线性拟合时,20 μm 和 60 μm 的拟合曲线残差平方和较小,更能准确地描述修正直线,因此就能更好地得出修正直线。实验证明,该修正方法对不同行程压电陶瓷驱动器的迟滞非线性都具有较好的修正效果,对 20、60 μm 行程压电陶瓷驱动器的迟滞非线性具有较好的修正效果,对 40 μm 行程压电陶瓷驱动器修正效果较差。

3 结 论

结合基于割率的线性方程抗迟滞原理,通过大量实验,对迟滞特性曲线进行修正,可以发现:1)压电陶瓷迟滞特性曲线的割率存在一定规律,由 β 规律曲线分段拟合构成线性方程组体现,且拟合程度较高,匹配性较好。2)相同行程、相同驱动电压、相同行程不同驱动电压、不同行程相同驱动电压实验均存在 β 规律曲线及线性方程组,均能实现对各自迟滞特性曲线的修正。3)运用上述规律所测实验的驱动控制曲线均近似成线性,非线性误差在0.164%~4.497%,修正效果较好。4)对于基于割率的线性方程抗迟滞方法,不同行程、不同驱动电压下的驱动控制曲线的最大迟滞误差绝大部分减小了70%以上,其中最大修正率为91.547%,最小修正率为60.549%,驱动控制曲线各采样电压的迟滞误差绝大部分处于3.500%以下,其中最大迟滞误差为4.899%,最小迟滞误差为0.000%;说明采用基于割率的线性方程抗迟滞方法能有效减小了压电陶瓷固有的迟滞特性,具有较好的重复性和实施性。

实验结论表明,在实际应用中,基于割率的线性方程抗迟滞方法中 β 的表达式都为一次线性方程组,可以通过一个同相比例运算电路加上一个加法器来实现对迟滞特性曲线的修正,且修正效果较好,电路的输出端可以直接得到修正电压。因此,相对于繁琐复杂且难以实现在线控制的控制算法,该抗迟滞修正方法具有更高的可实施性和可操作性,为进一步提高压电陶瓷驱动器的定位及控制精度提供了科学的参考依据。

参考文献

- [1] RANGASAMY M. Nano technology: Review [J]. Journal of Applied Pharmaceutical Science, 2011, 1(2) : 8-16.
- [2] 李伟,高思田,卢明臻,等.计量型原子力显微镜对的位移测量系统[J].光学精密工程, 2012, 20(4) : 796-802.
LI W, GAO S T, LU M ZH, et al. Displacement measuring system for measuring atomic force microscope [J]. Optical precision engineering, 2012, 20(4) : 796-802.
- [3] KOMMERPALLI H K R. Design, modeling and optimization of pennsylvania[M]. The Pennsylvania State University, 2010.
- [4] GREGORY M, HEINE F F, KEMPNER H, et al. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. Engineering, 2012, 53(3) : 031202.
- [5] HEMMATI H. 深空光通信[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [6] KLAUS K, PAVEL K. Compensation of complex hysteresis greep effects in piezoelectrically actuated systems—a new preisach modeling approach[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2009, 54(3) : 537-550.
- [7] 许素安,金玮,梁宇恩,等.压电陶瓷迟滞神经网络建模与线性补偿控制[J].传感技术学报, 2017, 30(12) : 1884-1889.
XU S A, JIN W, LIANG Y E, et al. Piezoelectric ceramic hysteresis neural network modeling and linear compensation control [J]. Journal of Sensing Technology, 2017, 30(12) : 1884-1889.
- [8] 于志亮,刘杨,王岩,等.基于改进 PI 模型的压电陶瓷迟滞特性补偿控制[J].仪器仪表学报, 2017, 38(1) : 129-135.
YU ZH L, LIU Y, WANG Y, et al. Hysteresis compensation control of piezoelectric ceramics based on improved PI model [J]. Journal of Instrumentation, 2017, 38(1) : 129-135.
- [9] 王贞艳,贾高欣.压电陶瓷作动器非对称迟滞建模与内模控制[J].光学精密工程, 2018, 26(10) : 2485-2492.
WANG ZH Y, JIA G X, Asymmetric hysteresis modeling and internal model control of piezoelectric ceramic actuators [J]. Optical precision engineering, 2018, 26(10) : 2485-2492.
- [10] XU Q, LI Y. Dahl model-based hysteresis compensation and precise positioning control of an XY parallel micromanipulator with piezoelectric actuation[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2010, 132(4) : 588-564.
- [11] WANG G, CHEN G. Identification of piezoelectric hysteresis by a novel Duhem model based neural network[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 264: 282-288.
- [12] 杨晓京,李庭树,刘浩.压电超精密定位台的动态迟滞建模研究[J].仪器仪表学报, 2017, 38(10) : 2492-2499.
YANG X J, LI T SH, LIU H. Research on dynamic hysteresis modeling of piezoelectric ultra-precision positioning table [J]. Journal of Instrumentation, 2017, 38(10) : 2492-2499.
- [13] LIU D, FUJII F. Adaptive internal model control design

for positioning control of a piezo-ceramic-actuator with rate-dependent hysteresis [J]. *Mechanical Engineering Journal*, 2015, 2(6): 15-00190.

- [14] 范伟, 六自由度纳米工作台驱动控制方法及系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.

FAN W. Research on driving control method and system of six degrees of freedom nano workbench [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.

- [15] 王昱棠, 张宇鹏, 徐钰. 压电陶瓷驱动快速反射镜双闭环控制[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(S1): 68-72.

WANG Y T, ZHANG Y P, XU Y. Piezoelectric ceramic driven fast mirror double closed loop control [J]. *Journal of Instrumentation*, 2014, 35(S1): 68-72.

- [16] XIAO S L, LI Y M. Modeling and high dynamic compensating the rate-dependent hysteresis of piezoelectric actuators via a novel modified inverse Preisach mode[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 99: 1-9.

- [17] 崔玉国, 蔡成波, 娄军强, 等. 压电微夹钳的位移自感知反馈复合控制[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(2): 330-338.

CUI Y G, CAI CH B, LOU J Q. Displacement self-sensing feedback composite control of piezoelectric micro-clamp[J]. *Journal of Instrumentation*, 2016, 37(2): 330-338.

- [18] 刘红军, 刘洁, 叶芳. 用于超磁致伸缩作动器的一种改进的控制方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(9): 91-95.

LIU H J, LIU J, YE F. An improved control method for a giant magnetostrictive actuator [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(9): 91-95.

- [19] YANG L, LI J. Robust output feedback control with disturbance estimation for piezoelectric actuator [J]. *Neurocomputing* 2016, 173: 2129-2135.

- [20] GUO W, LIU D, WANG W. Neural network hysteresis modeling with an improved Preisach model for piezoelectric actuators [J]. *Engineering Computations*, 2012, 29(3): 248-259.

作者简介



傅雨晨, 2019 年于华侨大学获得学士学位, 现为华侨大学硕士研究生, 主要从事压电陶瓷迟滞非线性特性修正方法的研究。

E-mail: fuyuchen_0107@sina.com

Fu Yuchen received a B. Sc. degree from Huaqiao University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate student at Huaqiao University. His the correction method of hysteresis nonlinear characteristics of piezoelectric ceramics.



范伟(通信作者), 博士, 讲师, 硕士生导师, 2002 年、2009 年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位, 主要从事微纳驱动控制技术、压电陶瓷特性领域的研究。

E-mail: fanwei@hqu.edu.cn

Fan Wei (Corresponding author) is a Ph. D., lecturer, master student supervisor, he received bachelor and doctoral degrees both from Hefei University of Technology in 2002 and 2009, respectively. His micro-nano driving & control technology and piezoelectric ceramics characteristics.



于欣妍, 2019 年于华侨大学获得学士学位, 现为江南大学硕士研究生, 主要从事压电陶瓷迟滞非线性特性修正方法的研究。

E-mail: 958769969@qq.com

Yu Xinyan received a bachelor degree from Huaqiao University in 2019. She is currently a M. Sc. candidate at Jiangnan University, and is mainly engaged in the research on the correction method of hysteresis nonlinear characteristics of piezoelectric ceramics.



金花雪, 2013 年于华侨大学获得学士学位, 现为华侨大学硕士研究生, 主要从事压电陶瓷抗迟滞驱动控制及柔性铰链位移放大机构的研究。

E-mail: 15985818837@163.com

Jin Huaxue received a bachelor degree from Huaqiao University in 2013. She is currently a M. Sc candidate at Huaqiao University, her main research interests include piezoelectric ceramic anti-hysteresis driving control and flexible hinge displacement amplification mechanism.