

用 FPGA 实现二维压电扫描镜的磁滞补偿

梁增基¹, 陈四海², 罗 栋³

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 深圳市微觉未来科技有限公司, 广东 深圳 518057;

3. 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要:针对二维压电扫描镜中压电陶瓷的磁滞效应, 根据 Madelung 规则和汝长海等的理论建立模型, 采用精确计算目标偏转后位置对应的输出电压方法, 补偿磁滞带来的扫描角度非线性问题。首先测得主磁滞环的电压-位移曲线, 存入 FLASH 中构造磁滞对应表; 然后, 利用现场可编程门阵列 (FPGA) 具有的强大时序处理能力和高速运算能力精确地进行算法处理, 补偿压电陶瓷的磁滞效应; 最后, 通过 D/A 模块输出结果, 配合外围电压放大电路控制扫描镜的精确偏转。测试平台主要由 He-Ne 激光器、扫描镜、位置敏感探测器 (PSD) 和 NI 数据采集卡等搭建而成, 用 LabVIEW 编写测试程序, 可以直接测量扫描镜的偏转角度信息。校正前压电扫描镜偏转角度的最大误差为 2.5 mrad, 开环补偿算法校正后成功地 将偏转误差控制在 0.3 mrad 内, 磁滞效应的校正取得了理想的效果。

关键词:压电扫描镜; 磁滞效应; 开环补偿; 现场可编程门阵列; 位置敏感探测器

中图分类号: TN384; TP273.1

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.007

Hysteresis Compensation of Two-dimensional Piezoelectric Scanning Mirror Based on FPGA

LIANG Zengji¹, CHEN Sihai², LUO Dong³

(1. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Shenzhen Neovision Technology Co., Ltd, Shenzhen 518057, China;

3. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to compensate the hysteresis effect of piezoelectric ceramics in the two-dimensional piezoelectric scanning mirror, a model based on the Madelung rule and the theory of Ru Changhai is established. With the method of accurately calculating the output voltage corresponding to the position after the deflection, the scanning angle nonlinearity problem caused by the hysteresis is handled. First we need to measure the main hysteresis loop of voltage-position curve and store it in the FLASH memory to construct the corresponding hysteresis table. Then by taking the advantage of strong timing and high-speed computing power of FPGA, the piezoelectric hysteresis effect of piezoelectric ceramics can be accurately compensated. Finally, through the DA module output and the external voltage amplifier circuit, the FPGA can precisely control the deflection of the scanning mirror. The test platform is mainly composed of He-Ne laser, scanning mirror, position sensitive detector (PSD) and NI data acquisition card. The LabVIEW programming can be used in the test platform to directly measure the deflection angle information of scanning mirror. The maximum error of the deflection angle of the piezoelectric scanning mirror before correction is 2.5 mrad while it is less than 0.3 mrad after the open-loop compensation algorithm correction. The results show that the proposed algorithm can effectively compensate the hysteresis effect.

Key words: piezoelectric scanning mirror; hysteresis effect; open-loop compensation; FPGA; PSD

0 引言

激光扫描镜作为一种精确的光束控制器件, 是激光雷达中最重要的部件之一。极高的频域和空间分辨率, 良好的探测、识别和跟踪能力使得激光扫描镜广泛应用于民用和军事领域。

目前, 激光扫描镜的研究主要分为机械式、电子式和微机电系统 (MEMS) 扫描镜等。快速控制扫描要求转动惯量小, 扫描角度大, 扫描速度快和线性度高, 传统扫描镜已不能完全满足这些要求, 因此, 研究高性能快速控制反射镜^[1-3]十分必要。音圈电

收稿日期: 2017-04-11

基金项目: 国家预研基金资助项目 (51302060109)

作者简介: 梁增基 (1992-), 男, 河南南阳人, 硕士生, 主要从事压电陶瓷的开环控制方面的研究。E-mail: sunnoh@163.com。通信作者: 陈四海 (1973-), 女, 教授, 主要从事光电材料、微光电器件、微光机电系统 (MOEMS) 及红外技术等研究。

机驱动的激光扫描镜^[4]扫描角度较大,精度较高,扫描频率低,适合低频率、大角度扫描。压电陶瓷驱动的激光扫描镜可以实现高频率、小角度的扫描,且经过校正后可以得到较高的扫描线性度和偏转精度,应用场合更广^[5-6]。

压电陶瓷驱动的微位移结构是含有磁滞非线性的动力学系统^[7],现有的数学模型无法精确描述这种复杂的动力学特性,这给磁滞补偿器的设计带来了极大挑战。针对智能材料驱动器中的磁滞非线性特性,国内外研究学者提出了多种智能磁滞建模方法^[8-10],如 Priesach 模型、Prandtl-Ishlinskii 模型等,但这些模型的建模过程都较复杂,限制了其广泛应用。现在已有不少的闭环补偿法,如滑膜控制算法等,但闭环补偿需要实时的反馈器件,会增加硬件的成本。

为了校正压电陶瓷的磁滞效应,本文根据 Madelung 规则^[8]及汝长海等总结的规律构建模型^[9],采取精确计算目标偏转后位置对应的输出电压法补偿磁滞效应。考虑到需要大量数据构造查找表,以及与外部设备通信的需求,最终选择现场可编程门阵列(FPGA)^[11]作为控制核心。

1 二维压电扫描镜的机械结构与开环补偿算法的基本原理

图 1 为整个二维压电扫描镜的结构示意图。

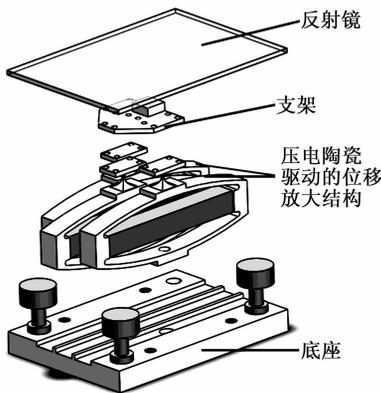


图 1 二维压电扫描镜的爆炸视图

如图 2 所示,假设:

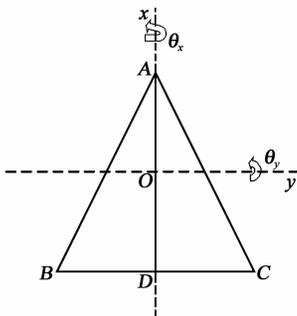


图 2 二维偏转的原理图

1) 反射镜底部和位移放大结构之间的连接点分别是 A, B 和 C, 且 D 是 BC 连线的中点。

2) 3 个压电陶瓷分别在 V_a, V_b, V_c 驱动电压作用下的位移为 a, b, c 。

两轴的偏转角度 θ_x 和 θ_y 可描述为

$$\begin{cases} \theta_x = \arcsin \frac{a - \frac{b+c}{2}}{AD} \approx \frac{a - \frac{b+c}{2}}{AD} \\ \theta_y = \arcsin \frac{b-c}{BC} \approx \frac{b-c}{BC} \end{cases} \quad (1)$$

本文设计中, $V_b = -V_c, b = -c$, 则由式(1)可看出, 扫描镜 x 轴的位移变化是由一个压电陶瓷控制的, 偏转角度与位移变化成正比; y 轴的位移由两个压电陶瓷(一个伸长, 一个缩短)控制, 偏转角度与两个压电陶瓷的位移差成正比。 x, y 轴的位移变化都符合 Madelung 规则, 最终实现反射镜的二维偏转。

根据实验观测的磁滞曲线的复杂性和滞环特性的多样性, Madelung 总结了著名的描述磁滞非线性特性的 Madelung 规则。如图 3 所示, Madelung 规则阐述如下:

1) 任何起始于输入、输出曲线 C 上的转折点 A, 其曲线 C_1 被 A 点的坐标唯一确定。

2) 当曲线 C_1 上的点 B 成为新的转折点, 起源于 B 的曲线 C_2 将趋向于点 A。

3) 如果曲线 C_2 越过点 A 继续下降, 曲线 C_2 将收敛到曲线 C。

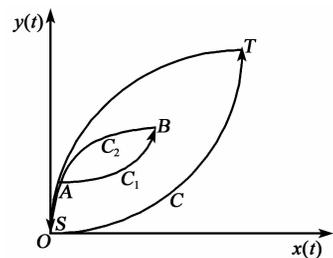


图 3 Madelung 规则示意图

汝长海等的理论基于两点基本假设:

1) 所有正向偏转的磁滞曲线都收敛于终点 T, 所有反向偏转的曲线都收敛于起点 S。

2) 主磁滞环和次磁滞环曲线之间存在着近似的线性比例关系, 可以用主磁滞环的轨迹曲线近似模拟次磁滞环的轨迹。

基于以上的假设和 Madelung 规则, 可用已知的主磁滞环的轨迹和次磁滞环的起始位置, 近似模拟计算出次磁滞环的轨迹, 精确计算每次偏转后的

位置对应的输出电压,实现磁滞效应的校正。

假设扫描镜是正向偏转,如图4所示,已知每次偏转的起点 (U_i, P_i) 以及主磁滞曲线的起点 (U_0, P_0) 和轨迹,且主、次磁滞曲线都收敛于 (U_n, P_n) 。假设每次偏转的终点 $(U(t), P(t))$,对应于主磁滞曲线上的某点 $(U(x), P(x))$ 。根据主磁滞环和次磁滞环曲线之间的比例关系可得

$$\frac{P_n - P(t)}{P_n - P_i} = \frac{P_n - P(x)}{P_n - P_0} \quad (2)$$

$$\frac{U_n - U(t)}{U_n - U_i} = \frac{U_n - U(x)}{U_n - U_0} \quad (3)$$

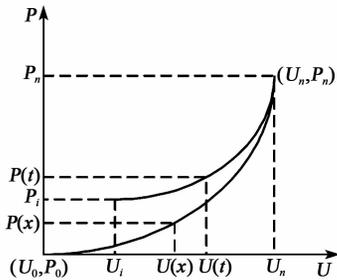


图4 压电扫描镜正向偏转曲线

每次偏转后的目标位移 $P(t)$ 是已知的,根据式(2)计算得到 $P(x)$ 的值:

$$P(x) = \frac{P_n - P_0}{P_n - P_i} \times P(t) - \frac{P_i - P_0}{P_n - P_i} \times P_n \quad (4)$$

通过 $P(x)$ 查找正向磁滞对应表格得到 $U(x)$,再根据式(3)计算出偏转后的位置对应的输出电压:

$$U(t) = \frac{U_n - U_i}{U_n - U_0} \times U(x) + \frac{U_i - U_0}{U_n - U_0} \times U_n \quad (5)$$

同样的,根据反向偏转的主、次磁滞曲线,如图5所示,有共同的收敛点 (U_0, P_0) ,以及偏转的起点 (U_i, P_i) ,偏转后的位置 $P(t)$ 和反向磁滞对应表可得

$$P(x) = \frac{P_n - P_0}{P_i - P_0} \times P(t) - \frac{P_n - P_i}{P_i - P_0} \times P_0 \quad (6)$$

$$U(t) = \frac{U_i - U_0}{U_n - U_0} \times U(x) + \frac{U_n - U_i}{U_n - U_0} \times U_0 \quad (7)$$

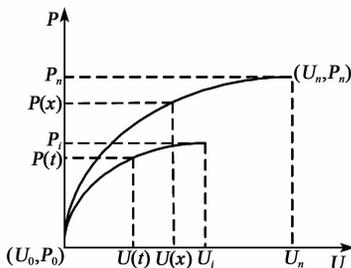


图5 压电扫描镜反向偏转曲线

2 开环补偿算法具体的实现过程

压电陶瓷控制扫描镜的偏转,选用的压电陶瓷是PI的P-885.91,其驱动电压为 $0 \sim 120$ V。FPGA控制板的信号输出电压为 $0 \sim 4$ V,通过电压放大电路控制压电陶瓷的形变,扫描镜最终可以实现光学角度 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 的偏转。

在算法运算前,需要构造磁滞对应表。由于主磁滞环曲线的数据量很大,且无法直接进行测试,具体的实现方法是:测出正向偏转时,从 $0 \sim 4$ V均匀分布的十几组电压对应的位移数据,通过数据拟合软件(1stopt)模拟出整个主磁滞环数据,同样可得到反向偏转的主磁滞环数据,得到数据后,构造相应的磁滞对应表存入FLASH模块中。

开环补偿算法如图6所示,控制器局域网(CAN)通信模块是连接上位机与FPGA控制板之间的桥梁,上位机通过CAN发送器发出偏转角度的命令,FPGA得到偏转角度信息后进行算法运算,计算结果用D/A模块转换成输出电压,通过电压放大电路驱动二维压电扫描镜精确偏转。

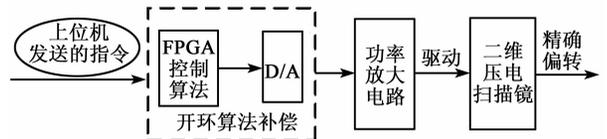


图6 压电扫描镜开环补偿算法示意图

开环补偿算法的具体实现如图7所示。上位机通过CAN发送器发出偏转角度指令,构造的磁滞对应表是随电压变化的位移信息,要把初始的偏转角度信息转换成对应的位移信息,考虑到FPGA进行浮点型运算和负数运算很难,对原来的数据进行

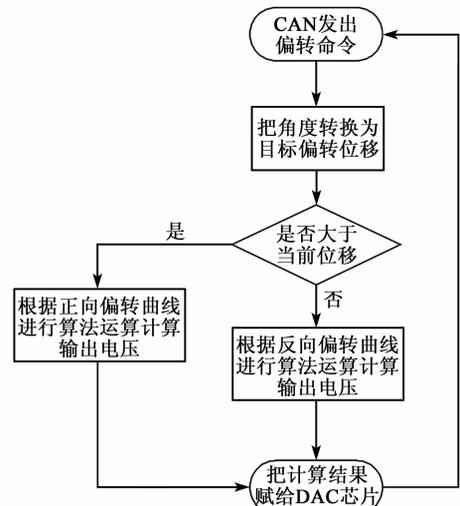


图7 压电扫描镜开环补偿算法流程图

放大和平移处理,既能保证精度,也方便运算。

将得到的目标偏转位移与当前位置位移进行比较。如果目标偏转位移大于当前位置位移,说明扫描镜正向偏转,根据式(4)、(5)运算得到光束偏转后的位置 $P(t)$ 对应的输出电压 $U(t)$,通过 DAC 芯片输出到电压放大电路,实现精确控制偏转的目的;如果目标偏转位移小于当前位置位移,则扫描镜反向偏转。同样也可以根据反向偏转曲线的算法,精确计算出反向偏转后的位置对应的输出电压。

3 实验测试系统的搭建

为了测试磁滞效应校正的效果,搭建了基于位置敏感探测器(PSD)的测试平台,如图 8 所示。

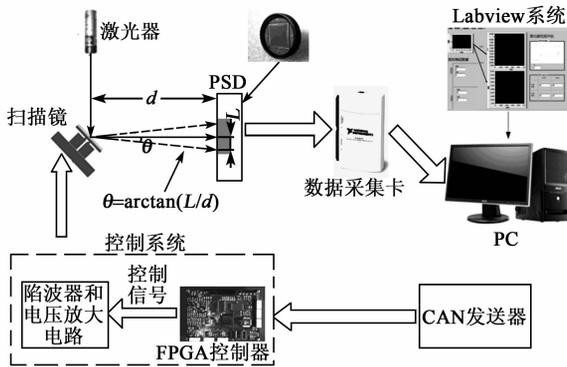


图 8 压电扫描镜基于 PSD 的测试平台

图 8 中, θ 为激光光束经扫描镜偏转的光学角度; d 为 PSD 与扫描镜上光斑之间的距离; L 为光斑在 PSD 上相对于原点的位移。CAN 发送器发出偏转角度的命令,经过 FPGA 的算法运算和电压放大电路后,驱动二维压电扫描镜偏转,He-Ne 激光器发出的光束被二维扫描镜反射到 PSD 上,PSD 上光斑的移动代表激光光束的偏移。图 9 为二维压电扫描镜的实物图。通过数据采集卡把读取到的数据传送到电脑,测量扫描镜与 PSD 之间的距离,通过 LabVIEW 程序可直接测出扫描镜的偏转角度。

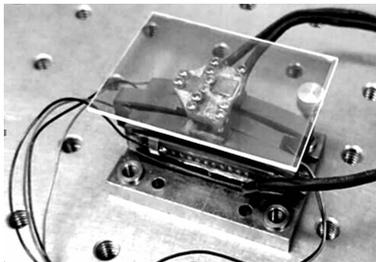


图 9 二维压电扫描镜实物图

4 实验结果与分析

实验结果是基于上述的测试平台进行的,假设每个轴上都进行多次不同方向的偏转,每 10 s 偏转

一次,分别测出 x 、 y 轴上的偏转结果。

图 10 为 x 、 y 轴多次偏转的测量结果。由图可看出,开环补偿算法校正前,曲线磁滞效应明显;校正后的曲线与标准偏转曲线很贴近,但未重合。

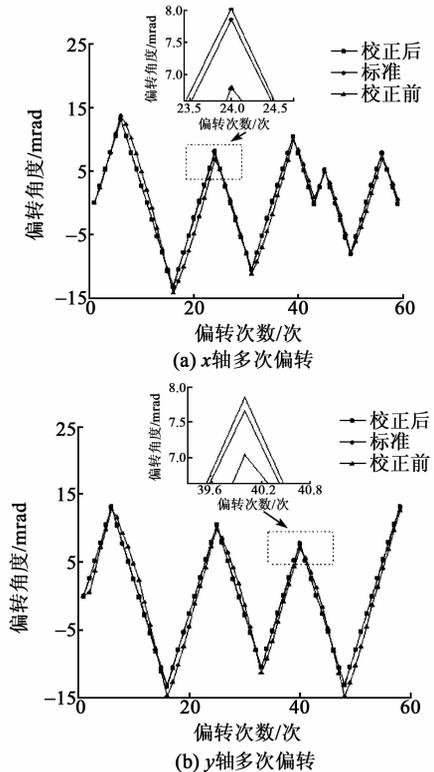


图 10 多次偏转的测量结果

图 11 为 x 、 y 轴多次偏转的误差测量。由图可

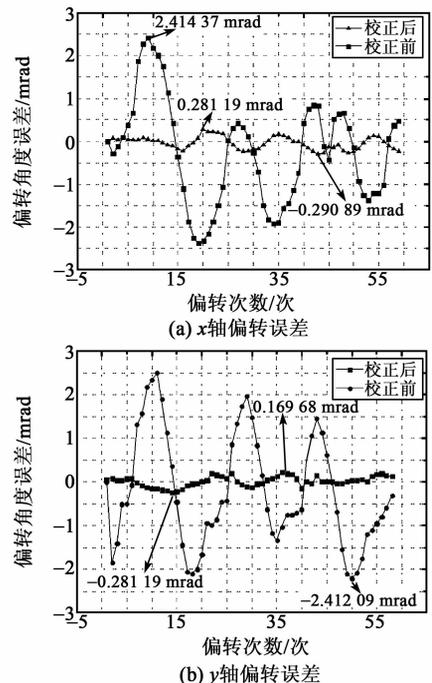


图 11 偏转误差

看出, x 、 y 轴开环补偿算法校正前偏转角度的最大误差达到 2.5 mrad, 且长时间偏转依旧存在; 校正后的偏转角度误差在 0.291 mrad 内, 大幅提升了偏转精度。

虽然用开环补偿算法校正使压电扫描镜的偏转精度得到了很大的提升, 但实际工作中依旧存在误差, 其原因: 一方面是由于压电陶瓷本身存在的蠕变效应, 会对扫描镜偏转角度产生影响; 另一方面是由开环补偿算法自身的局限性导致的。如果想继续提高偏转的精度, 可以从两方面入手:

1) 解决蠕变效应带来的误差, 采用对数函数拟合逼近蠕变效应曲线的方法, 但由于开环补偿算法的限制, 对偏转精度的提升有限。

2) 采用闭环控制, 如采用滑膜控制法, 不用考虑压电陶瓷的磁滞效应和蠕变效应, 能获得更高的偏转精度。

采用滑膜控制算法校正需要对实时角度信息进行测量, 即要安装高精度角度测量传感器, 成本和设备体积均会提高。

5 结束语

本文根据 Madelung 规则和汝长海等的理论建立模型, 补偿压电陶瓷磁滞带来的非线性效应。通过对比实验取得了理想的成果, 精度满足压电扫描镜绝大部分的应用需求。利用补偿压电陶瓷蠕变效应法或采用闭环补偿法, 可以使压电扫描镜的偏转精度进一步提高, 相关工作将继续进行, 对压电陶瓷的蠕变效应进行校正。开环补偿算法的实施过程通过 FPGA 完成, 通过上位机命令控制不同的 D/A 芯片输出, 实现多个二维扫描镜同时偏转, 扫描镜可以组成阵列, 进行系统化的集成; 同时, FPGA 控制板可与外部器件交互通信, 且能脱离 PC 运行, 为压电扫描镜工程化的应用提供了一种途径。

参考文献:

[1] 吴鑫. 高性能快速控制反射镜研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
[2] CHEN Wei, CHEN Sihai, LUO Dong, et al. A com-

pact two-dimensional laser scanner based on piezoelectric actuators[J]. Review of Scientific Instrument, 2015, 86: 013102.

- [3] CHEN Wei, CHEN Sihai, WU Xin, et al. A new two-dimensional fast steering mirror based on piezoelectric actuators[C]//Kingdom of Cambodia; IEEE International Conference on Information Science & Technology, 2014: 308-311.
- [4] WU Xin, CHEN Sihai, CHEN Wei, et al. Large angle and high linearity two-dimensional laser scanner based on voice coil actuators[J]. Review of Scientific Instrument, 2012, 82: 105103.
- [5] 赵灿兵. 新型压电扫描器的反馈控制的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [6] LUO Dong, CHEN Sihai, CHEN Wei, et al. Inverse hysteresis compensation of one-dimensional piezoelectric scanner with generalized Prandtl-Ishlinskii model [C]//Shanghai: Advanced Materials Research, 2014: 1956-1961.
- [7] 范伟, 林瑜阳, 李钟慎. 压电陶瓷驱动器的迟滞特性[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1112-1117.
FAN Wei, LIN Yuyang, LI Zhongshen. Hysteresis characteristics of piezoelectric ceramic actuators[J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 1112-1117.
- [8] 谷国迎. 压电陶瓷驱动微位移的磁滞补偿控制理论和方向研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [9] RU Changhai, SUN Lining. Hysteresis and creep compensation for piezoelectric actuator in open-loop operation[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 122: 124-130.
- [10] 王振华, 孙立宁, 曲东升, 等. 压电陶瓷驱动并联微动机器人位姿测量与误差补偿[J]. 压电与声光, 2005, 27(2): 182-184.
WANG Zhenhua, SUN Lining, QU Dongsheng, et al. Pose measurement and error compensation of piezoelectric element driven parallel microrobot[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(2): 182-184.
- [11] 李鹏. 基于FPGA的阵列式压电快速控制反射镜驱动控制电路研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.