

doi: 10.7690/bgzdh.2015.08.015

基于压电陶瓷的快速反射镜驱动与控制研究

文江华, 赵创社, 姜粉娥, 胥青青, 谭名栋
(西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘要: 针对压电陶瓷驱动快速反射镜(fast steering mirror, FSM), 设计一种基于分立元件的驱动器和一种基于位置闭环的控制器。通过分析压电陶瓷特性, 建立 FSM 控制系统传递函数, 并通过理论计算、物理建模、仿真、实物检测, 对所设计的驱动器与控制器进行验证。验证结果表明, 所设计的驱动器及控制器可行且有效。

关键词: 快速反射镜; 压电陶瓷; 驱动器; 控制器
中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Study of Driving and Controlling with Fast Steering Mirror Based on PZT

Wen Jianghua, Zhao Chuangshe, Jiang Fen'e, Xu Qingqing, Tan Mingdong
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: According to the characteristic analysis of PZT and the transfer function of the controlling system of the fast steering mirror (FSM), a new type driving power supply for PZT is developed based on discrete component amplifier, which has the characteristics of high voltage and large current. Beside, a new controller of the FSM system, based on position feedback is designed with the theoretical calculation, the physical modeling, the simulation and the experiment, it was indicated that the driving power supply and the controller of the FSM system was feasible and effective.

Keywords: fast steering mirror; PZT; driving power supply; controller

0 引言

快速反射镜(fast steering mirror, FSM)最早应用于自适应光学补偿领域, 用于补偿波前误差, 随着技术的发展, 被应用到了光束扫描、光束定位、目标跟踪等领域。在这些应用中, 通常对 FSM 的性能要求很高, 要有很高的带宽, 很精确的微位移, 很高的线性度等, 而这些性能都与 FSM 的驱动和控制有很大的关系, 因此 FSM 的驱动与控制技术成为影响 FSM 性能的关键因素^[1]。目前, FSM 的驱动方式主要有压电陶瓷、音圈电机等方式。其中, 压电陶瓷以其响应速度快、功耗低、位移控制精度高等优点成为一种应用范围很广的驱动 FSM 的方式; 因此, 笔者基于压电陶瓷驱动 FSM 这种方式, 开展压电陶瓷控制系统建模、驱动器设计、以及基于位置闭环的控制器设计研究。

1 压电陶瓷的性质及快速反射镜结构

1.1 压电陶瓷的性质

压电陶瓷内含钛酸铅和锆酸铅, 这些化合物通常称为 PZT, PZT 是一种压电晶体, 压电晶体指能够产生压电效应的晶体, 天然的诸如石英、电气石和酒石酸钾钠。压电效应这一现象描述的是作用于

固体之上的机械应力与固体电气特性之间的相互关系。压电晶体在外力作用下发生形变时, 在它的某些相对应的面上产生异号电荷, 这种没有电场作用, 这种由于形变产生的现象称为正压电效应; 当压电晶体施加一电场时, 不仅产生了极化, 还产生了形变, 这种由电场产生形变的现象称为逆压电效应^[2]。

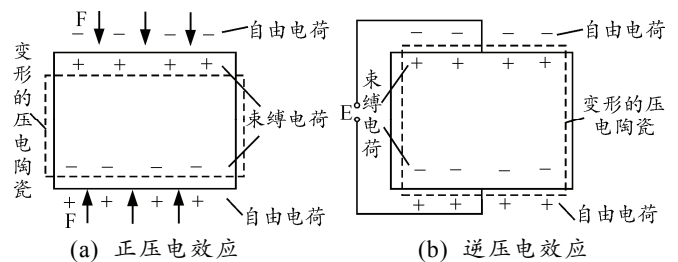


图1 压电晶体的压电效应

压电陶瓷微位移器正是利用了这种逆压电效应, 当给压电陶瓷加一电压时, 压电陶瓷会有一个微小的位移(通常可达纳米级), 而这个位移与所加的电压大致成正比。压电陶瓷微位移器是一种新型的执行器件, 实际应用中为了增大位移和输出力, 常常采用叠堆型压电陶瓷执行器。叠堆型压电陶瓷执行器是通过多片压电陶瓷按一定的方式组合而成的。与传统的电机驱动机构相比, 它具有以下优点:

- 1) 不需传动机构, 位移控制精度高, 可达 0.01

收稿日期: 2015-03-11; 修回日期: 2015-05-04

作者简介: 文江华(1990—), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 从事伺服控制研究。

μm 以内。

2) 响应速度快, 无机械吻合间隙, 可实现电压随动式位移控制。

3) 有较大的力输出。

4) 功耗低, 比电磁马达式的微位移器低 1 个数量级, 并且当使物体保持一定位置(高度)时, 器件几乎无功耗。

5) 它是一种固体器件, 易与电源、测位传感器、微机实现闭环自控, 且比磁控合金和温控形状记忆合金等其他微位移器的体积要小得多。

因此, 压电陶瓷微位移器是一种理想的驱动快速反射镜的驱动器, 德国 PI 公司是微驱动领域的先驱, 研制了多规格、应用于不同领域的精密定位系统。其研制的二维反射镜平台 S-330, 如图 2 所示, 具有 2 个自由度, 表面安装反射镜, 内部有精密位移检测传感器进行精密检测。



图 2 S330 反射镜平台

1.2 快速反射镜结构

压电陶瓷驱动的快速反射镜组件由反射镜、柔性铰链、压电陶瓷驱动器、基座、电阻应变片式传感器和相应的驱动控制电路等组成^[3], 如图 3 所示。

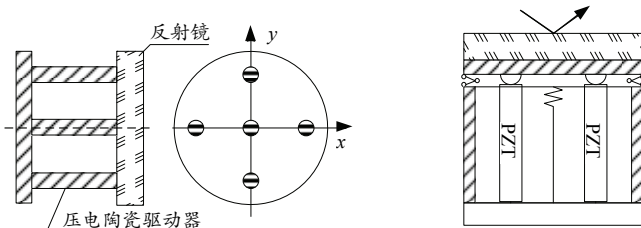


图 3 压电陶瓷驱动的快速反射镜结构

压电陶瓷反射镜组件采用 4 个压电陶瓷柱作为转动驱动器。镜面通过柔性铰链安装在驱动器上, 内置电阻应变片式传感器作为测角元件, 可以测量镜面的微量转动。压电陶瓷柱 2 个一组作为驱动机构, 以绕 y 轴转动为例, 工作时, 其一个驱动器伸长、一个缩短, 通过柔性铰链, 将驱动器的直线运动转化为旋转运动, 以推拉方式驱动反射镜绕 y 轴转动, 转动量通过测角元件测量。绕 x 轴转动的原理与此类似。

而具体的驱动方式如图 4 所示, 在一个运动方向上(X 或 Y 轴)的 2 个压电陶瓷柱外侧分别与一个高电压(100 V)和地相接, 中间为输入到压电陶瓷的控制电压(0~100 V), 这样, 当给这组压电陶瓷一个控制电压, 2 个压电陶瓷柱上的两端电压相对于 50 V 对称, 这样就可使其其中一个压电陶瓷柱伸长, 另外一个缩短^[4]。

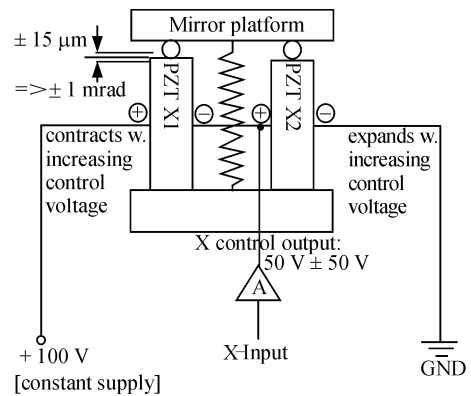


图 4 驱动原理

2 FSM 数学模型

2.1 FSM 结构组件数学模型

2.1.1 外加电压与压电陶瓷驱动力的传递函数

压电陶瓷致动器的输出位移随外力的增加而减小^[5]。设在某一驱动电压下, 压电陶瓷致动器所受外力为零时的输出位移为 ΔL , 其输出位移为零时所受的外力为 F , 且不考虑压电陶瓷致动器的迟滞非线性, 则在该驱动电压下, 作用在压电陶瓷执行器上的外力 $f(t)$ 同其输出位移 $\Delta l(t)$ 之间的关系为:

$$f(t) = \frac{F}{\Delta L} [\Delta L - \Delta l(t)] \quad (1)$$

输出位移为零时的外力 F 为

$$F = k_s \Delta L \quad (2)$$

外力为零时的输出位移 ΔL 为

$$\Delta L = k_e U_2(t) \quad (3)$$

式中 k_e 为电压位移转换系数。

由上可得在一定的驱动电压下, 作用在压电陶瓷致动器上的外力 $f(t)$ 同其输出位移 $\Delta l(t)$ 之间的关系为:

$$f(t) = k_s [k_e U_2(t) - \Delta l(t)] \quad (4)$$

可得:

$$f(t) \cdot \Delta l(t) = W = \int U_2 I dt \quad (5)$$

$$f(t)(k_e U_2(t) - f(t) / k_s) = \int U_2 I dt \quad (6)$$

$$I = C_p \frac{dU_2}{dt} \quad (7)$$

将式 (11) 代入式 (10)，可得：

$$f(t) = \frac{k_s k_e + \sqrt{k_s^2 k_e^2 - 2k_s C_p}}{2} U_2(t) \quad (8)$$

由于 C_p 很小，上式可化为

$$G_3(s) = \frac{f(s)}{U_2(s)} = k_s k_e \quad (9)$$

3.1.2 压电陶瓷的传递函数

快速反射镜机构可视为一质量-弹簧-阻尼二阶系统，其模型可简化为

$$G_4(s) = \frac{u_{bl}(s)}{f_1(s)} = \frac{k_a \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

因此，快速反射镜结构组件的数学模型为

$$G_F(s) = \frac{k_s k_e k_a}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (11)$$

其中 $k_x = k_s k_e k_a$ 。根据所采用的压电陶瓷型号可以得到， $\omega_n = 9\ 600\ \text{rad/s}$ ， $\xi = 0.7$ ， $k_s = 12\ \text{N}^2/\mu\text{m}^{[6]}$ ；

2.2 位置传感器数学模型

在快速反射镜组件中，角位置传感器精度直接决定系统的输出精度，此外，角位移测量、传感是制约系统带宽的主要因素。电阻应变片式位移传感器由弹性敏感元件、电阻应变计、补偿电阻和外壳组成，弹性敏感元件受到所测量的力而产生变形^[7]，并使附着其上的电阻应变计一起变形。电阻应变计将变形转换为电阻值的变化，从而可以测量位移量。测量原理图如图 5 所示：其中 R_1 、 R_2 代表电阻应变片，当反射镜发生转动时，电阻应变片 R_1 、 R_2 的阻值就会发生改变，这时， U_{bc} 就会发生变化，而 U_{bc} 的变化大约会在几毫伏范围内，因此需要将 U_{bc} 线性放大到 $0\sim 10\ \text{V}$ 的范围内^[8]。

因此，电阻应变片式位移传感器的输出要经过一个调理电路，将输出的小信号放大为和反射镜控制命令一个量级上的信号，并且为了去除高频信号干扰，需要再经过一个低通滤波器，如此，电阻应变片式位移传感器测量的偏转角度值与输出到控制器中的反馈量的传递函数为：

$$G_2(s) = K_r \cdot \frac{1}{s/2\pi f_c + 1} \quad (12)$$

其中： K_r 为反馈回路的增益； f_c 为低通滤波器的截止频率。

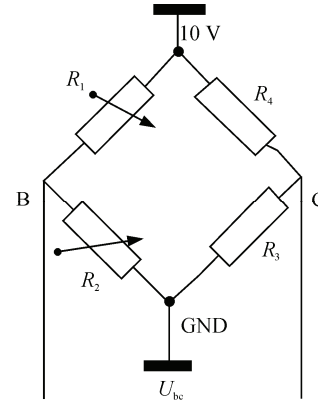


图 5 测量原理

2.3 功放电路数学模型

笔者采用误差放大驱动电路，直接从输出电压取得反馈，可以对电压进行实时监控，以保证电路工作在正常的范围之内。具体的原理如图 6 所示。

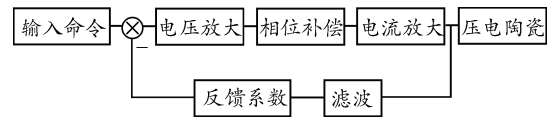


图 6 驱动电路设计原理

首先，输入命令与反馈电压做差，然后经过电压放大，信号从小电压，放大到 $0\sim 100\ \text{V}$ 之间，由于在电压放大时，信号的相位受到损失，因此，信号经过相位补偿，将损失的相位补回来，之后，通过一个电流放大电路，使得信号有一个大的电流输出能力，保证负载的电流输出。

将采集到的负载上的电压经过一个低通滤波器，再将反馈的电压缩小到与输入命令等同的范围内，作为反馈电压。整个电路的电压放大倍数由反馈回路的反馈系数确定，具体原理如下假设开环中的放大倍数为 K_o ，闭环中的反馈系数为 K_p ，则整个电路的放大倍数 K 为

$$K = \frac{K_p}{1 + K_p \cdot K_o} \quad (13)$$

由于开环中， K_o 很大，约为几千，因此

$$K = \frac{K_p}{1 + K_p \cdot K_o} = \frac{1}{1/K_p + K_o} \approx \frac{1}{K_o} \quad (14)$$

因此，在不考虑功放电路的延迟环节的情况下，功放电路的传递函数为

$$G_3(s) = \frac{1}{K_o} \quad (15)$$

3 驱动器设计

3.1 设计要求

对于驱动电路，具体要求如下：

- 1) 输入电压范围：0~10 V；
- 2) 输出电压：0~100 V；
- 3) 放大倍数：10；
- 4) 带宽：小信号(10%满信号)大于 200 Hz；
- 5) 峰值电流和峰值功率：假设输入为满量程的三角波，频率为 150 Hz，将压电陶瓷看作一个纯电

容其峰值电流和峰值功率为：

$$I_{\text{piezo}} = C \cdot \frac{dV}{dt} = 6 \times 10^{-6} \times \frac{100 - 0}{1 / (150 \times 2)} = 0.18 \text{ A} \quad (16)$$

$$P_{\text{PK}} = U_{\text{PP}} \cdot I_{\text{piezo}} = 0.18 \times 120 = 21.6 \text{ W}$$

3.2 电路实现

在电路实现中，采用运算放大器和晶体管两级放大的方法，并结合推挽式功率放大电路输出级以实现容性负载的高精度驱动。

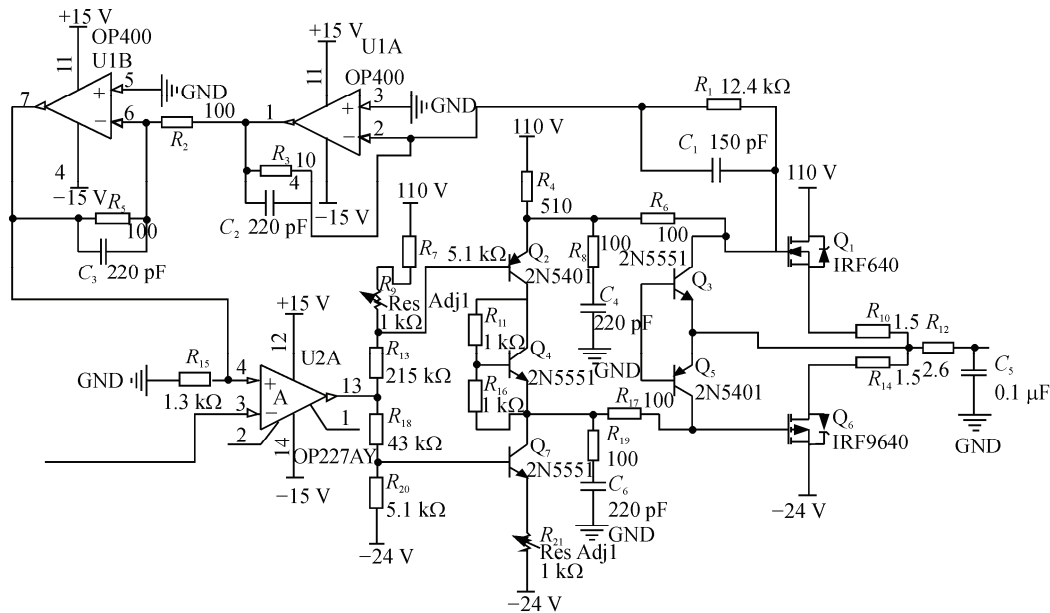


图 7 功放电路原理

功放电路的电源为-24 V, 110 V 稳压直流电源，电压放大电路由 R_2 、 R_4 、 R_8 、 R_{13} 、 R_1 、 R_{16} 、2N5401 和 2N5551 组成。Q1、Q5、2N5401 和 2N5551 一对 NPN 与 PNP 三极管；耐压超过 150 V，即 $V_{CE} > 150 \text{ V}$ (电源 24 V, 110 V, $150 > 120 + 24$)，放大倍数在 80~200 间。

正常工作时，输入命令与反馈信号做差之后 (V_A) 经过 Q2、Q7 组成的电压放大电路放大，当 $V_A > 0$ ，Q2 工作在放大区、Q7 饱和，而当 $V_A < 0$ ，Q7 工作在放大区、Q2 饱和。放大倍数在 200 左右。信号经过由电 Q3 和 Q5、 R_{10} 和 R_{14} 构成，Q2 和 Q4 构成的推挽式电流放大电路，特点是输出电压与输入电压保持一致，输出电流可以很大。Q2 和 Q4 选为 IRF9640、IRF640 一对对称的场效应管，它们的额定电压超过电路中的电源电压，可输出的电流超过所需要的最大电流 (0.5 A)。信号经过电流放大之后，通过限流电阻 R_{12} 之后，输出给压电陶瓷。同时，输出的电压信号通过 U_1 的滤波以及比例调节后反馈，反馈电压为输出电压的 1/10。

3.3 功放电路仿真

Multisim 软件是美国国家仪器公司 (NI 公司) 设计的一款电子设计自动化软件，用户可以使用 Multisim 交互式的搭建电路原理图，并对电路进行仿真。在 Multisim 仿真软件中，对设计的功放电路进行仿真，输入信号为-2~10 V 的正弦信号，输出信号采用示波器观测。仿真结果如图 8 所示。

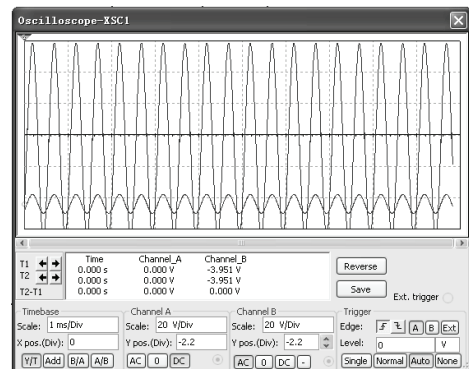


图 8 功放电路仿真结果

仿真结果表明：输出信号是-20~100 V 的正弦

信号，是输入信号的 10 倍，并且没有相位损失，符合功放电路的设计要求。

4 控制器设计

快速反射镜的控制是一个高带宽的位置闭环控制，功能框图如图 9 所示。控制系统由位置传感器和其信号调理电路采集 FSM 位置信号，位置反馈和位置命令信号比较后送入控制器进行计算，控制通道包含一个限波器，用于限制 FSM 机械谐振，输出信号送入功率放大器，驱动 FSM 运动。

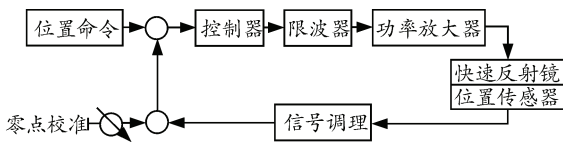


图 9 FSM 控制原理

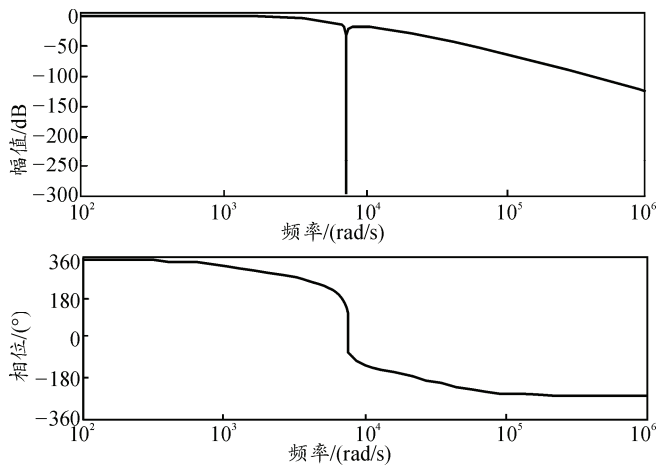


图 10 闭环控制 Bode 图

压电陶瓷的控制器功能主要包括：输入信号的滤波、预处理、算法、以及阈值限定。针对被控对象，对 FSM 组件的回路进行设计，其控制器设计为：

$$D_2 = \frac{k_R(T_1s + 1)}{T_1s} \cdot G_{f1} \cdot G_{f2} \quad (17)$$

其中 $G_{f1} = \frac{1}{T_2s + 1}$ 为低通滤波器，用于限制控制信号输出速度不超过驱动电路的能力；

$G_{f2} = \frac{s^2 + 2\xi\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2}{s^2 + 2\xi\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2}$ ，是一个陷波器，用于消除反射镜组件的机械结构谐振点。因此，

$$D_2 = \frac{k_R(T_1s + 1)}{T_1s} \cdot \frac{1}{T_1s + 1} \cdot \frac{s^2 + 2\xi\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2}{s^2 + 2\xi\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2} \quad (19)$$

对式 (17) 中的各参数进行优化设计，得：

$$k_R = 1.2, T_2 = 5.3 \times 10^{-5} \text{ s}, T_1 = 2.3 \times 10^{-4} \text{ s}, \xi = 0.1,$$

$$\omega_{n2} = 7650 \text{ rad/s}.$$

对控制器以及被控对象在 Matlab 中的 Simulink 中进行仿真，仿真结果如图 10 所示。

仿真结果表明：闭环带宽 380 Hz，相位裕度 60°。

5 实验测试

为了测试文中所设计的驱动及控制器的性能，搭建了如图所示的实验。

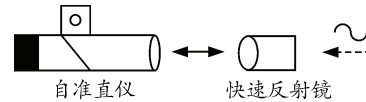


图 11 实验测试原理

一个恒定光源发出光线，光线通过自准直仪位于物镜焦平面的分划板后，经物镜形成平行光。平行光被垂直于光轴的反射镜反射回来，再次通过准直镜头后由分光棱镜转折汇聚在位于共轭焦平面的 CCD 表面，形成分划板像。当反射镜倾斜一个微小角度角时，反射回来的光束就产生一个倾角，位于 CCD 探测表面的分划板像就产生一个位移。通过 CCD 对分划板像位移的判读就可以得知反射镜的角位移。

笔者采用的自准直仪性能参数如下全视场：5°；精度：0.8" (200" 范围内) 分辨率；0.01" 测量频率；1 kHz。测试内容分为 4 个方面：

- 1) 静态实验条件下的实验装置的精度测试；
- 2) 驱动快反镜最大行程测试；
- 3) 最小分辨率测试；
- 4) 高频率正弦信号响应测试。

具体的实验结果图 12~图 15 所示。

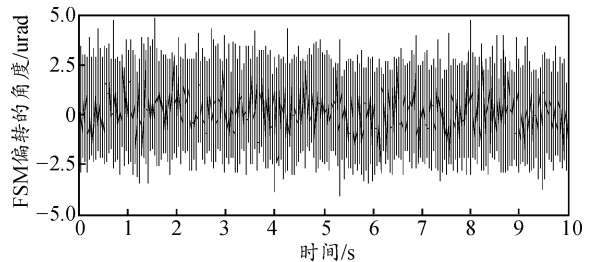


图 12 静态实验条件下的实验装置的精度测试

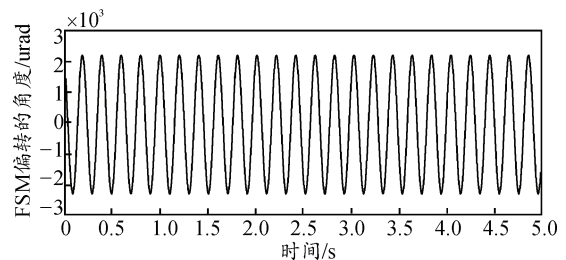


图 13 驱动快反镜最大行程测试

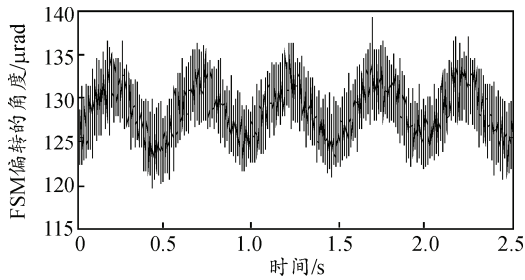


图 14 最小分辨率测试

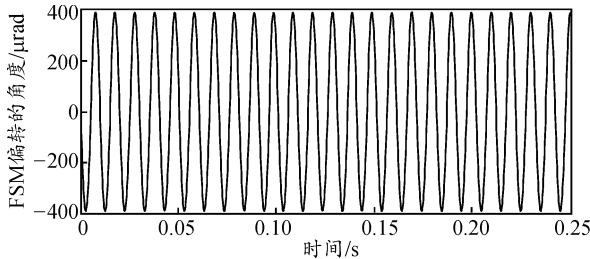


图 15 100 Hz 正弦信号响应测试

从以上实验数据可以看出：笔所设计的功放电路所驱动的压电陶瓷 FSM 组件行程超过 5 mrad，最小能够响应的角位移达到 10 μ rad，能够满足对快速反射镜的应用。

6 总结

快速反射镜的驱动与控制技术是快速反射镜应用中一项关键技术，而采用压电陶瓷驱动快速反射镜是一种可行、有效的解决方案。由于压电陶瓷是一种强容性负载，且需要高压驱动。这对驱动器的线性度、稳定性都提出了很高的要求，为此笔者设

(上接第 51 页)

4 结论

参照 Jill Dyché, Evan Levy 主数据管理 5 层成熟度模型^[6]，经过 2 年的实践应用，主数据管理已达到了第 3 层集中总线处理和第 4 层业务规则和政策支持的能力要求。全集团实现了人员数据，企业会计科目代码，固定资产代码，成员单位代码，往来单位代码，产品代码和原材料代码等 7 类主数据统一管理和维护，统一维护主数据 3 万余条，制定并实施了集团级基础代码类信息化标准规范 20 余项，集团总部设立代码管理机构，依据标准对代码进行管理和维护并指导代码实施，打破了业务系统边界，实现业务主数据在其他应用系统间的同步更新及主数据版本管理。

计了一种基于分立元件的驱动器，这种驱动器易于调节，且体积小、波纹小。另外，根据反射镜的结构以及数学模型，笔者设计了一种基于 PID 算法的控制器，提高了反射镜的动态性能。经过理论计算、仿真分析、试验验证，证明所设计的驱动器及控制器是可行且有效的。

参考文献：

- [1] 鲁亚飞. 快速反射镜机械结构特性设计问题研究[D]. 国防科学技术大学, 2009.
- [2] 徐飞飞, 纪明, 谢静, 等. FSM 在高精度瞄准线稳定系统中的应用研究[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 9-13.
- [3] Harry Marth, Michael Donat. Latest experience in design of piezoelectric driven fine steering mirrors[J]. Active and Adaptive Optical Components, SPIE 1992, 1543: 248-261.
- [4] 向思桦, 陈四海, 吴鑫, 等. 基于新型压电驱动器的快速扫描反射镜[J]. 中国激光, 2009, 36(S): 208-212.
- [5] Ultra-Fast Piezo Tip/Tilt Platforms S-330[EB/OL]. pdf. <http://www.pi.ws/>, 2009.
- [6] Suitea M R, Burrish H R, Moorea C I. Fast steering mirror implementation for reduction of focal-spotwander in a long-distance free-space communication link. Free-Space Laser Communication and Active Laser Illumination III[BE/OL]. Proc. of SPIE Vol. 5160. SPIE, Bellingham, WA, 2004.
- [7] 纪明. 多频谱光电综合系统高精度稳定技术研究[J]. 应用光学, 1996, 17(3): 55-60.
- [8] 刘廷霞. 光电跟踪系统复合轴伺服控制技术的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2004: 12.

参考文献：

- [1] David Butler. Oracle Master Data Management Overview [EB/OL]. 2011, <http://www.oracle.com/us/products/applications/master-data-management/mdm-overview-1954202.pdf>.
- [2] 百度百科. 主数据管理[EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/1823170.htm>.
- [3] 袁媛, 高林, 耿建光, 等. GB/T 29263—2012 信息技术面向服务的体系结构(SOA)应用的总体技术要求[S]. 2012: 3-4.
- [4] 郑裕显, 冯立健, 李萌, 等. 主数据分发规范[S]. 北京: 中国兵器装备集团公司, 2014: 3-4.
- [5] 杨帆, 李萌, 谢欣, 等. 信息代码管理与使用要求[S]. 北京: 中国兵器装备集团公司, 2013: 6-7.
- [6] Jill Dyché, Evan Levy. The Base line on Master Data Management: Five Levels of Maturity for Master Data Management[EB/OL]. 2009, <http://tdwi.org/articles/2009/01/05/baseline-on-mdm-five-levels-of-maturity-for-master-data-management.aspx>.