

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0208-05

基于新型压电驱动器的快速扫描反射镜

向思桦¹ 陈四海^{1,2} 吴鑫¹ 郑夏威¹ 肖丁¹ 戴君¹

(¹ 华中科技大学光电子与工程学院, 湖北 武汉 430074; ² 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 设计了一种基于新型压电驱动器的快速扫描反射镜, 反射镜面尺寸为 20mm×15mm, 具有大扫描角度范围(光学扫描角度范围可达±0.7°)和高扫描带宽(其一阶谐振频率为 1872Hz)。反射镜基于一对新型的位移放大压电驱动器, 对机械结构进行了有限元模拟分析和数学建模, 测试了扫描反射镜的频响特性。用软件补偿压电驱动器迟滞效应和串联硬件陷波器抑制谐振相结合的控制方法, 提高了扫描器的开环扫描线性度, 实现了高频三角波扫描。设计了基于重复控制原理的数字比例积分微分(PID)控制器, 实现了精确的正弦扫描。测试结果表明该扫描器可以实现一维快速精确光学扫描控制。另外该扫描反射镜还具有体积小, 结构简单等优点。

关键词 光束控制; 快速扫描反射镜; 位移放大压电驱动器; 机械谐振; 陷波滤波器; 重复控制

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0208

Research on Novel Piezoelectric Fast Steering Mirror

Xiang Sihua¹ Chen Sihai^{1,2} Wu Xin¹ Zheng Xiawei¹ Xiao Ding¹ Dai Jun¹

(¹ Institute of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² National Optoelectronic Laboratory, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A fast steering mirror based on novel piezoelectric actuator was designed. The size of the mirror was 20 mm×15 mm. The optical scanning angle reached ±0.7°. The first step resonance frequency was 1872 Hz. Fast steering mirror was based on two amplified piezoelectric actuator. The structure was analyzed by finite element analysis software, and the frequency response was measured. The linearity of open loop scanning was improved by using the method of combining software which compensated the hysteretic behavior of piezoelectric actuator and notch filter circuit which restrained the structure resonance of the scanner. Accordingly, the triangle wave with high rate scanning was achieved. The sine wave with high precision scanning was realized by using the digital proportional-integral differential (PID) controller based on repetitive control principle. Test results shown that the scanner can steer the beam at high speed with high precision. The scanner also had other advantages such as small size and simple structure.

Key words laser beam control; fast steering mirror; amplified piezoelectric actuator; structure resonance; notch filter; repetitive control

1 引言

光学扫描器, 如多面转镜扫描器、振镜扫描器(检流计式)等, 在激光加工、激光投影、激光电视、生物医学、半导体工艺、激光雷达等领域中获得了广泛的应用。多面转镜扫描器虽然具有扫描速度快、扫描角度大、回扫快和速度稳定性高等优点, 但也有半径差引起的非线性误差和各小面不平行度引起的塔形误差, 会影响扫描精度^[1]。振镜扫描器在高频扫描时, 扫描最大角度和线性度都会严重下降。另外

上述两种扫描器都有转动惯量大、功耗大、有摩擦等缺点, 难以实现高速矢量指向和扫描, 在空间领域应用也受限。

传统的压电光学扫描器^[2]采用压电陶瓷驱动器直接驱动, 多用于自适应光学补偿, 扫描器频率较高, 但是扫描角度小, 限制了在其他领域的应用。音圈电机扫描器^[3]扫描角度较大, 但是扫描频率较低, 扫描精度不如压电扫描器。

本文设计了一种高性能的新型快速扫描反射镜

作者简介: 向思桦(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事光束扫描控制系统方面的研究。E-mail: xiang_s_h@163.com

导师简介: 陈四海(1973—), 女, 教授, 主要从事光电材料、微光电器件和微光机电系统等方面的研究。

E-mail: cshai99@163.com

(以下简称扫描器),基于新型的压电驱动结构^[4~7],采用一对位移放大的压电陶瓷驱动器,结构紧凑,可以实现比传统压电扫描器大的扫描角度,扫描频率和扫描精度都较高。

2 结构原理

2.1 新型压电驱动器的工作原理

新型压电驱动器由压电陶瓷叠堆驱动器和弹性外框组成,弹性外框采用弹簧钢 60Si2Mn 制作,压电陶瓷叠堆驱动器在一定的预紧力作用下卡在弹性外框内。它有放大压电陶瓷叠堆驱动器位移量的作用,又可叫作位移放大压电驱动器,其结构和工作原理如图 1 所示。当给压电陶瓷施加一定正电压时,压电陶瓷会伸长,迫使位移放大驱动器的弹性外框变形,在与压电陶瓷伸长方向垂直的方向上缩短。因此位移放大的压电陶瓷驱动器可将压电陶瓷在横向的伸长运动转化为纵向的缩短运动,缩短的位移大小按照一定比例放大。将驱动器近似为一个椭圆,位移放大比例系数与驱动器的长短轴的比例近似成正比。位移放大的驱动器改善了普通压电陶瓷驱动器位移量很小的缺点,将其位移量成倍地放大,当然也以降低压电陶瓷刚度为代价。经有限元分析和实际测试,该驱动器的工作频带较宽,其一阶谐振

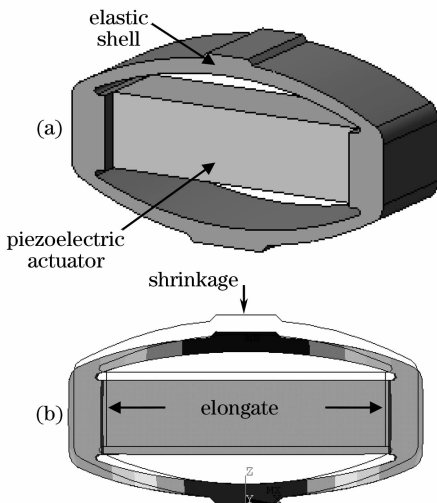


图 1 位移放大压电驱动器。(a)结构;(b)工作原理,实体部分为变形后的结构,线框部分为未变形前的结构,ANSYS有限元分析

Fig.1 Amplified piezoelectric actuator. (a) Structure; (b) work principle. The solid part is the structure deformed, and the full line part is the structure at rest. The result was simulated by ANSYS FEA software

频率可达 2.8 kHz 以上。同时,这种驱动器改善了压电陶瓷叠堆驱动器承受拉力和扭转力差的缺点。

2.2 扫描器的工作原理

如图 2(a)所示,扫描器采用一对位移放大的压电陶瓷驱动器作为驱动器件,驱动器固定于底座上,弹性轴镜架通过两个弹性铰链固定于两个驱动器上方,镜架上粘有反射镜片。扫描器的工作原理如图 2(b)所示,在平衡状态时(即扫描零位),两个驱动器分别加载相同的电压。当两个驱动器的加载电压分别增大和减小时,驱动器就会分别做缩短和伸长运动(相对于平衡状态),可带动固定于其上的弹性轴镜架和反射镜做偏转摆动,从而实现光束的偏转扫描。

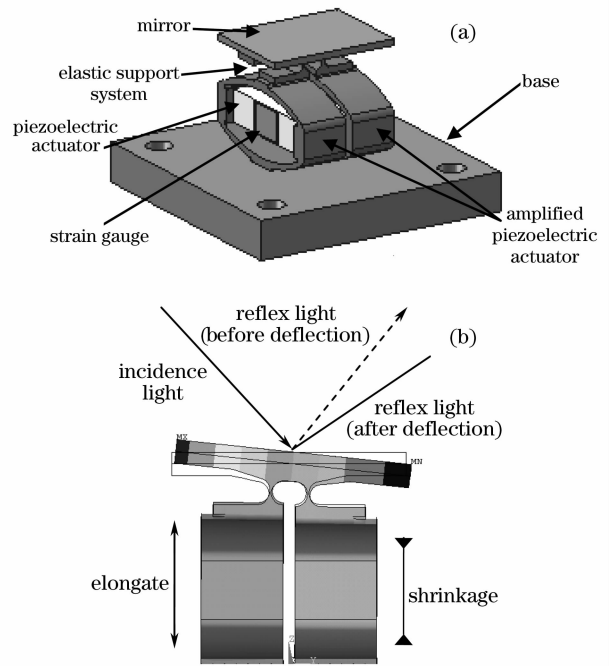


图 2 扫描器。(a)机械结构;(b)工作原理

Fig.2 Scanner. (a) Structure ; (b) work principle

对扫描器结构模型进行适当简化,将位移放大压电驱动器视为只有驱动方向的刚度,则扫描器机械结构模型如图 3 所示。系统的角自振频率为

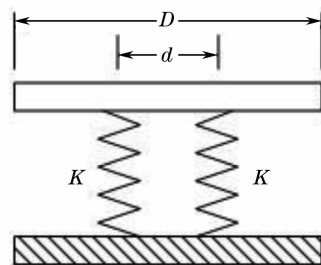


图 3 扫描器的结构模型

Fig.3 Structure model of the scanner

$$\omega = \frac{d}{D} \sqrt{\frac{2K}{m}}, \quad (1)$$

式中 K 为位移放大压电驱动器和弹性铰链的等效刚度; d 为铰链中心距; D 为反射镜口径; m 为反射镜和镜架的质量。

由(1)式可以看出,增大铰链中心距、增大压电驱动器和弹性铰链的刚度可以增大角自振频率,但这样同时会减小最大扫描角度,因此需要综合考虑。

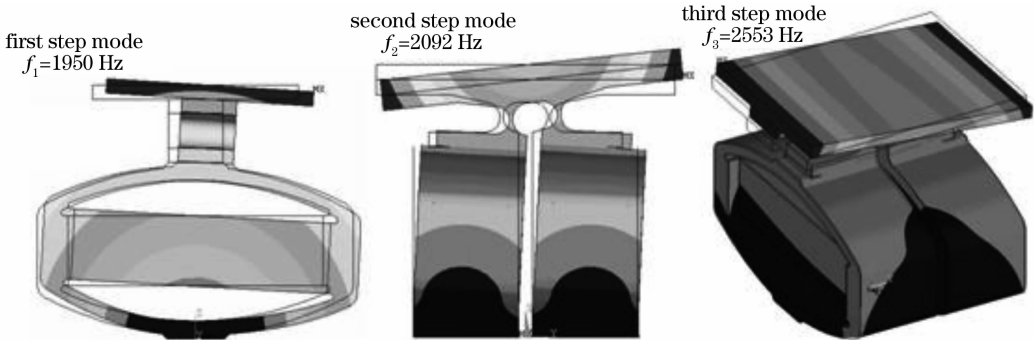


图 4 扫描器前 3 阶振动模态(ANSYS 模拟)

Fig. 4 First three steps resonance modes of the scanner (simulated by ANSYS software)

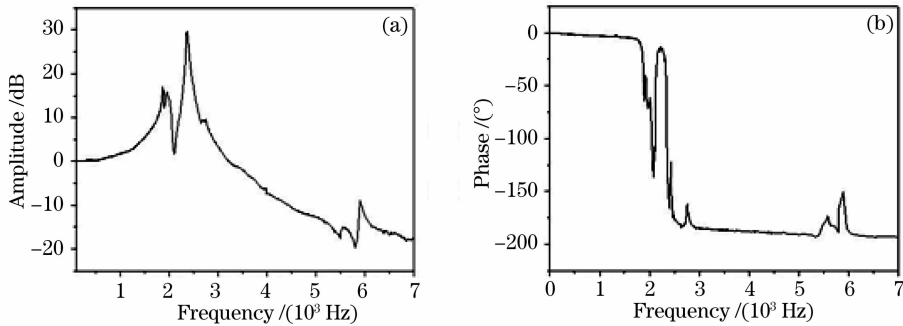


图 5 扫描器的实测频响曲线

Fig. 5 Test curve of frequency response

3 应用研究

3.1 开环控制

在实际应用中,扫描波形都为正弦波或者三角波,如果扫描频率较大(100 Hz 以上),特别是三角波,含有大量高频谐波成分,会激发扫描器的谐振,严重影响扫描线性度。另外压电驱动器固有的迟滞效应也会明显影响扫描线性度。采用软件补偿和串联硬件陷波器^[8]相结合的控制方法可以补偿迟滞效应和抑制谐振,有效提高扫描线性度,其开环控制的控制框图如图 6 所示。先测试扫描器的低频三角波扫描波形,然后对驱动波形进行修正,使修正后的扫描波形达到线性扫描,可以对修正后的驱动波形建立修正表,这样就可以补偿扫描器的迟滞效应。观

2.3 扫描器的频响曲线测试

使用 ANSYS 有限元分析软件对机械结构进行了模态分析。图 4 显示了在 ANSYS 分析下,扫描器结构前 3 阶固有频率的模态,其前 3 阶固有频率为 1950 Hz,2092 Hz 和 2553 Hz。再用正弦扫频的方法测试得出扫描器的实际频响曲线,如图 5 所示,前 3 阶共振频率为 1872 Hz,1960 Hz,2364 Hz。

察扫描器的振动模态和频响曲线,并分析实际扫描波形的频谱,发现对扫描线性度产生影响的主要是频率为 2364 Hz 的振动模态,因此在高压放大器前串联硬件陷波电路,其陷波中心频率为 2364 Hz。

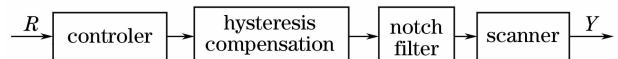


图 6 扫描器的开环控制框图

Fig. 6 Open loop control diagram of the scanner

分别测试了不加补偿和陷波器、加补偿和陷波器两种情况下的三角波扫描波形,扫描频率为 200 Hz,光学扫描角度为 $\pm 0.5^\circ$,扫描曲线和误差如图 7 所示。可以看出,采用补偿和陷波器后,最大误差从 0.085° 减小到了 0.03° 。

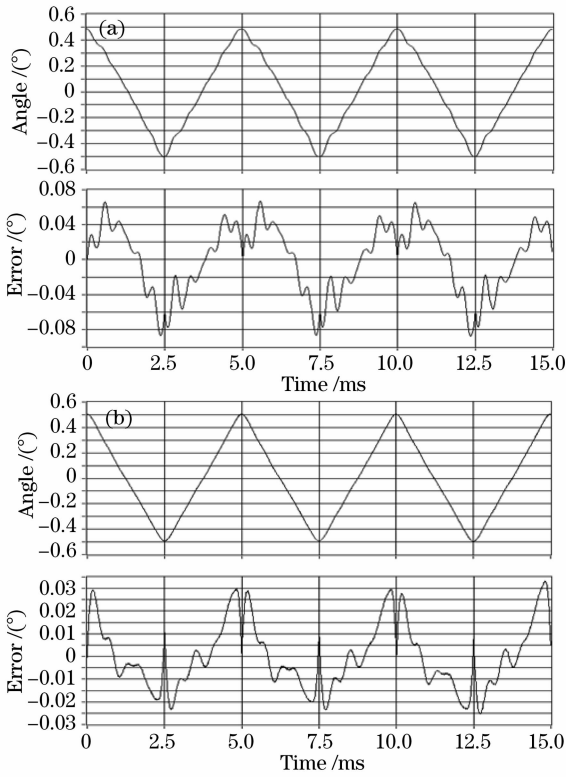


图7 扫描波形及误差。(a)采用软件补偿和陷波器前；
(b)采用软件补偿和陷波器后
Fig.7 Scan curve and the error. (a) Scanning without software compensating and notch filter; (b) scanning with software compensating and notch filter

3.2 闭环控制

当需要较高的控制精度时,扫描器需要采用闭环控制方式,其广泛用于慢速光学扫描、自适应光学补偿、目标跟踪和光束定位等场合。闭环控制电路框图如图8所示。控制处理器采用TI公司的DSP芯片 TMS320F2812,系统时钟可以达到150 MHz,足以保证高速的运算控制要求。扫描光束的位移探测采用位移探测器(PSD),数模转换器(ADC)采用12位4通道同步转换芯片,使用时其采样频率为10 kHz,高压放大电路的输出电压范围为0~100 V。PSD的信号经过低通滤波器后再进行A/D转换,以滤除高频噪声干扰,提高系统稳定性和控制精度。

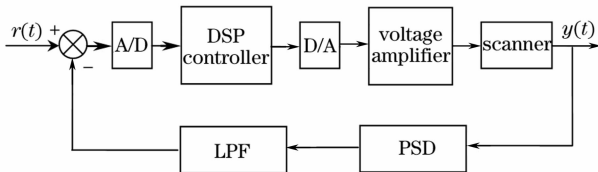


图8 扫描器闭环控制电路框图

Fig.8 Feedback control circuit diagram of the scanner

使用变积分的比例积分微分(PID)控制方法测试了扫描器的阶跃响应时间,如图9所示,光学扫描角度为 0.5° ,上升时间为1.8 ms, $\pm 1\%$ 精度稳定时间为4 ms,稳态精度在 $\pm 0.5\%$ 以内。

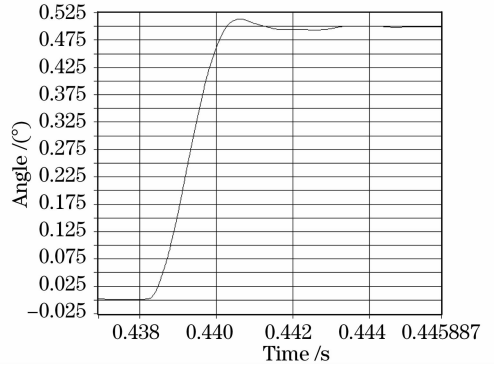


图9 扫描器阶跃响应曲线

Fig.9 Step response curve of the scanner

实际使用中,扫描波形多为周期性波形,采用基于内模原理的重复控制方法可以提高扫描精度。

对扫描器做了扫描频率为62.5 Hz的正弦波扫描实验,分别采用基本PID控制和重复PID控制,图10显示了两种控制方法下的扫描曲线和误差,可以看出,采用重复控制后,最大误差从 0.02° 减小到

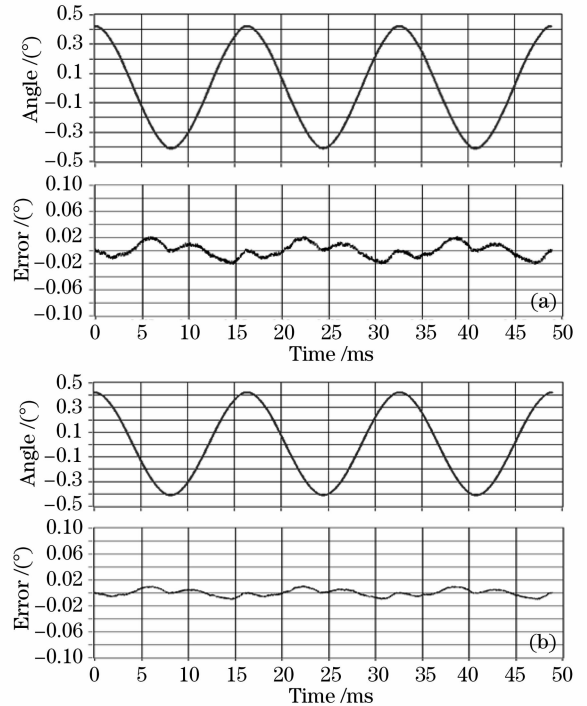


图10 扫描曲线及误差。(a)采用基本PID控制；
(b)采用重复PID控制

Fig.10 Scan curve and error. (a) Test result used basic PID controller; (b) test result used PID controller based on repetitive control principle

了约 0.01° 。

表 1 扫描器实际测试结果

Table 1 Test results of the scanner

Optical scanning range	$\pm 0.7^\circ (\pm 12 \text{ mrad})$
The first three steps resonance modes	1872 Hz,
(size of the mirror is 20 mm \times 15 mm	1960 Hz,
\times 1.5 mm, weight is 1.2 g)	2364 Hz
Size of the scanner	60 mm \times 50 mm \times 23 mm
Drive voltage range	0~100 V
Closed-loop resolution	10 μrad
Closed-loop repeatability	30 μrad
Response time (0.5°)	1.8 ms (rising time)
	4 ms (settling time)

4 性能测试

在基于 PSD(位敏探测器)和 Lab VIEW 的测试平台上,对扫描器进行了一系列性能测试,测试结果如表 1 所示。

5 结 论

本文报道的新型高速压电光学扫描器采用了新型的位移放大压电驱动结构,具有比传统压电扫描器大的扫描角度,适用于光束扫描、定位、目标跟踪、自适应光学补偿等领域,可实现高速一维精确光束扫描控制,并具有体积小、功耗低等优点,通过改进

控制电路和控制算法,还可以进一步提高控制精度。

参 考 文 献

- 1 Wang Xianqi, Liao Sheng, Huang Jianming. Study on the amplitude-frequency performance testing and position demarcating of optical scanner[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31** (Suppl.): 73~79
王先起,廖 胜,黄建明. 扫描振镜幅频特性测试及位置标定的研究[J]. *光电工程*, 2004, **31**(增刊): 73~79
- 2 Ling Ning, Chen Donghong, Guan Chunlin. Two-dimensional piezoelectric fast steering mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, **22**(1): 51~60
凌 宁,陈东红,官春林. 两维高速压电倾斜反射镜[J]. *光电工程*, 1995, **22**(1): 51~60
- 3 Wu Qiongyan, Wang Qiang, Peng Qi. Wide bandwidth control of fast-steering mirror driven by voice coil motor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(8): 15~18
吴琼雁,王 强,彭 起. 音圈电机驱动的快速控制反射镜宽带宽控制[J]. *光电工程*, 2004, **31**(8): 15~18
- 4 R. Le Letty, F. Claeysen, N. Lhermet *et al.*. New amplified piezoelectric actuator for precision positioning and active damping [C]. *SPIE*, 1997, **3041**: 496~504
- 5 F. Claeysen, R. Le Letty, F. Barillot *et al.*. Mechanisms based on piezo actuators[C]. *SPIE*, 2001, **4332**: 225~233
- 6 H. Bruneaua, R. Le Lettya, F. Claeysena *et al.*. Semi-passive and semi-active vibration control using new amplified piezoelectric actuators[C]. *SPIE*, 1999, **3668**: 814~821
- 7 Philippe Bouchilloux, F. Claeysen, R. Le Letty *et al.*. Amplified piezoelectric actuators: From aerospace to underwater applications[C]. *SPIE*, 2004, **5388**: 143~154
- 8 Yang Yijun, Ling Ning. The improvement of the mechanical resonant frequencies of fast steering mirrors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, **26**(2): 57~62
杨驿军,凌 宁. 高速倾斜反射镜机械谐振频率的改善[J]. *光电工程*, 1999, **26**(2): 57~62