

文章编号: 0258-7025(2010)02-0408-06

一种基于压电驱动器的新型高速激光扫描器的研制和测试

向思桦¹ 陈四海^{1,2} 吴 鑫¹ 郑夏威¹ 肖 丁¹

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

摘要 激光扫描器是激光雷达、激光检测和激光加工等系统的重要部件, 现有激光扫描器难以实现低惯量高频率匀线速扫描。设计了一种基于新型压电驱动器的激光扫描器, 该扫描器的机械扫描角度可达 $\pm 0.35^\circ$, 一阶谐振频率达 1872 Hz。利用有限元分析软件对扫描器结构进行了设计。频率响应曲线显示扫描器具有较复杂的模式, 测试了多个频率(100, 400, 700 Hz)下的三角波驱动扫描波形、频谱和扫描线照片, 结果显示压电迟滞效应和扫描器机械谐振对扫描线性度的影响很大。设计了软件补偿迟滞效应和串联硬件陷波器抑制谐振相结合的开环控制方法, 加控制器后的 100 Hz 和 400 Hz 三角波扫描非线性度分别从 6%, 27% 减小到了 2%, 7%, 实现了高速线性扫描。

关键词 光学器件; 激光扫描; 高速激光扫描器; 位移放大压电驱动器; 迟滞效应; 机械谐振; 频谱; 陷波器

中图分类号 TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103702.0408

Study and Test on a Novel Fast Laser Scanner Based on Piezo-Actuators

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

¹ College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Laser scanner is one of the most important components in lidar, laser detecting, laser processing, and so on. Existing scanners are difficult to realize fast linear scanning with low moment of inertia. A fast laser scanner based on novel piezoelectric actuators is designed, which has mechanical scanning angle of $\pm 0.35^\circ$ and first resonance frequency of 1872 Hz. Finite element analysis is used to design the scanner structure. Measured frequency response curve shows that the modes of the scanner are complicated. The scanning waveforms, spectrums and scan line images of triangle waveform actuated scanning at several frequencies are tested. The test results show that the hysteresis behavior and the resonances affect scanning linearity seriously. An open loop control method is designed, which consists of a software hysteresis compensator and notch filters in serials. The comparison of scanning waveforms and scan line photos of triangle waveform actuated scanning with and without open loop controller shows that the scanning linearity is improved effectively. The scanning nonlinearities of 100 Hz and 400 Hz triangle wave scanning reduce to 2% and 7% respectively from 6% and 27%. The scanner realizes fast linear scanning.

Key words optical devices; laser scanning; fast laser scanner; amplified piezoelectric actuator; hysteresis behavior; structure resonance; spectrum; notch filter

1 引 言

激光扫描器是激光加工、激光投影、激光电视、

生物医学、半导体工艺、激光雷达等系统中的重要部件。在很多激光扫描应用中, 经常希望实现高速线

收稿日期: 2009-02-20; 收到修改稿日期: 2009-04-27

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0319)资助课题。

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, 博士生导师, 主要从事微光机电技术及红外技术方面的研究。

E-mail: cshai99@163.com

性的光束扫描,而现有的扫描器很难达到这个要求。常见的扫描器有多面转镜扫描器、振镜扫描器(检流计式)、机电系统(MEMS)扫描器、基于音圈电机和压电陶瓷的快速反射镜等^[1~6]。多面转镜扫描器和振镜扫描器在许多激光扫描系统中都有应用,多面转镜存在入瞳漂移和扫描效率低等问题^[1],它们很难实现高频线性扫描(几百赫兹以上),另外上述两种扫描器都存在转动惯量大、功耗大、有摩擦等缺点。MEMS 扫描器有着扫描角度大、谐振频率高等优点,但是反射镜面较小,限制了它在很多方面的应用。基于音圈电机的快速反射镜扫描角度较大,但是谐振频率低,无法实现高速线性扫描。传统的基于压电陶瓷的快速反射镜采用压电陶瓷驱动器直接驱动,多用于自适应光学补偿,谐振频率较高,但是由于压电陶瓷驱动位移量小,导致扫描角度小,限制了其在扫描领域的应用。

压电驱动器在很多精密仪器中得到了广泛的应用,但是压电陶瓷固有的迟滞效应会影响其位移精度,对此,国内外学者研究了多种补偿方法或闭环控制方法^[7]。在快速控制反射镜(FSM)方面,机械谐振会引起振动,降低工作带宽,闭环控制被广泛应用于 FSM 的控制^[8],国内学者通过使用低通滤波器和陷波器抑制了谐振,提高了带宽,达到了稳定

控制^[9]。

本文设计了一种高速激光扫描器(简称扫描器),基于新型的弹性外壳式位移放大压电驱动结构^[10],可以实现比传统压电扫描器大的扫描角度和较高的扫描频率。对扫描器的机械结构进行了设计,并测试了其静态和动态性能,设计了软件补偿迟滞效应和串联硬件陷波器抑制谐振相结合的开环控制方法,对比控制前后的扫描波形、扫描非线性度和扫描线照片,可以发现扫描线性度得到了有效提高。

2 新型激光扫描器的设计

2.1 结构和工作原理

扫描器由一对位移放大的压电驱动器(Amplified piezoelectric actuator, APA)驱动,APA 底部固定于底座上,呈平行放置,顶部连接着弹性铰链支撑镜架,镜架上粘有反射镜片,镜片的尺寸为 $20\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,扫描器的尺寸为 $60\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,铰链中心最薄处厚度为 0.2 mm 。APA 平行放置有利于缩短两个驱动轴之间的距离,增大扫描角度。弹性铰链镜架只有一个偏转自由度,以保证扫描器沿着一个转动轴扫描。扫描器结构如图 1(a)所示。

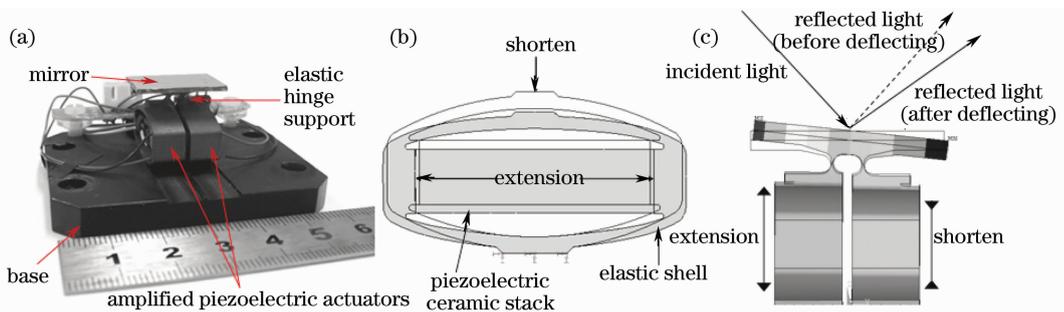


图 1 扫描器结构和工作原理。(a)扫描器结构;(b)位移放大压电驱动器的工作原理;(c)扫描器的工作原理

Fig. 1 Design of the scanner. (a) structure; (b) operation principle of the amplified piezoelectric actuator;

(c) operation principle of the laser scanner

APA 由压电陶瓷叠堆和弹性外框组成,弹性外框采用弹簧钢 60Si2Mn 制作,压电陶瓷在一定的预紧力作用下卡在弹性外框内,压电陶瓷的尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 18\text{ mm}$,其结构和工作原理如图 1(b)所示。当给压电陶瓷施加正电压时,压电陶瓷会伸长,迫使弹性外框变形,在与压电陶瓷伸长方向垂直的方向上缩短。因此 APA 可将压电陶瓷在横向的伸长运动转化为纵向的缩短运动,缩短的位移量按照一定比例放大。将驱动器近似为一个椭圆,位移放大率与 APA 的长短轴的比例近似成正比。APA 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。传统的杠杆式位移放大结构也可以将压电陶瓷的位移进行放大。利用有限元分析软件模拟了杠杆式和弹性外框式位移放大结构的模态频率(包含压电陶瓷),两种放大结构设计了相同的位移放大率(300%),模拟结果显示,杠杆式和弹性外框式的一阶模态频率分别为 1740.7 Hz 和 2788.6 Hz ,因此弹性外框式位移放大结构具有更好的高频特性。

当两个 APA 分别加载相同的电压时,扫描器处于平衡状态(即扫描零位)。当两个 APA 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),带动连接于其上的弹性铰链镜架和反射镜做偏转摆动,从而实现光束的偏转扫描,镜面偏转的角度与两个压电陶瓷的驱动电压之差成正比。扫描器的工作原理如图 1(c)所示。

2.2 结构设计与分析

扫描器的偏转角度、谐振频率是设计中最关注的指标,它们与 APA 的刚度、弹性铰链的刚度、弹性铰链之间的距离等有很大的关系。对扫描器结构模型进行适当简化,将 APA 视为只有驱动方向的刚度,扫描器的角自振频率为

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

式中 K 为 APA 和弹性铰链的等效刚度, d 为弹性铰链中心距, 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 APA 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,因此必须根据实际要求综合考虑。

使用有限元模拟软件分析扫描器的最大扫描角度及应力分布,施加压强和分析结果如图 2 所示。对扫描器其中一个 APA 内部与压电陶瓷相接触的平面施加压强 $P=4$ MPa,这两个平面的面积为 35 mm^2 ,因此施加的压力为 140 N ,以此模拟压电陶瓷两端所受的压力为 140 N ,另外一个 APA 不施加压强,两个 APA 的底部平面固定,如图 2(a)所示。图 2(b),(c)和(d)分别显示了静态受力分析的 x 方向位移分布, z 方向位移分布和等效(von Mises)应力分布。施加压强的 APA 内部两个平面中心的 x 方向位移量分别为 $5.1, -5.1 \mu\text{m}$,由此可以模拟压电陶瓷的伸长位移量为 $10.2 \mu\text{m}$,反射镜片的两端 z 方向位移量为 $45.6, -74 \mu\text{m}$,由此可以算得反射镜片的偏转角度

$$\theta = \arctan\left(\frac{0.0456 + 0.074}{20}\right) = 0.343^\circ. \quad (2)$$

在不考虑压电陶瓷迟滞效应的情况下,此时压电陶瓷施加的驱动电压 U 为

$$U = (F \cdot K_p + d) \frac{V_{\max}}{d_{\max}}, \quad (3)$$

式中 F 为压电陶瓷两端受到的压力, K_p 为压电陶瓷的刚度, V_{\max} 为压电陶瓷的标准最大驱动电压, d_{\max} 为压电陶瓷的标准最大输出位移。本扫描器采用的压电陶瓷叠堆为德国 PI 公司的 P-885.51,其刚度为 $50 \text{ N}/\mu\text{m}$,标准最大驱动电压为 100 V ,标准最大

输出位移为 $15 \mu\text{m}$,将各参数代入(3)式可以算出 $U=86.7 \text{ V}$,即给压电陶瓷施加的电压差为 86.7 V 的时候,可以达到机械偏转角为 0.343° 。当两个压电陶瓷之间的电压差为 $\pm 100 \text{ V}$ 时,扫描器机械偏转角可达到 $\pm 0.396^\circ$ 。von Mises 应力分布显示扫描器的最大应力出现在弹性铰链中心,其最大值为 212 MPa ,弹簧钢 60Si2Mn 的许用应力一般为 1500 MPa ,因此,在这种扫描角度下,扫描器完全可以正常工作。还可以看到,由于弹性铰链的刚度比镜架小很多,因此镜片和镜架不会由于弹性铰链的变形而发生变形,从而保证了扫描器镜面的平面度。

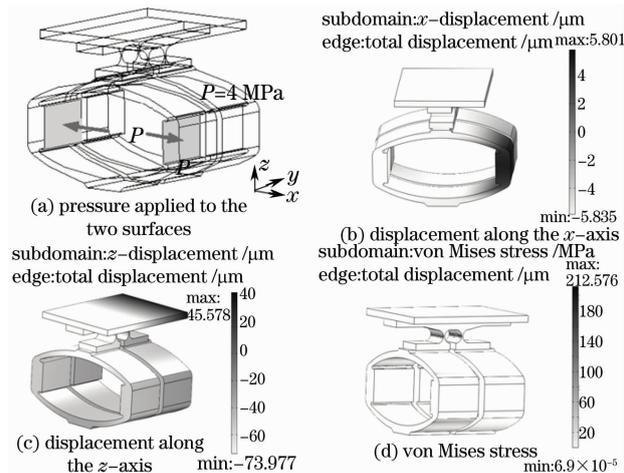


图 2 扫描器结构静态模拟

Fig. 2 Static analysis of the scanner structure

另外还模拟分析了扫描器的模态分布,图 3 显示了扫描器的前 3 阶模态频率分别是 $1950, 2092, 2553 \text{ Hz}$,前 2 阶模态主要是由于 APA 的结构和平行放置引起的,第 3 阶模态是由弹性铰链引起的。扫描器的谐振模态会限制其高频扫描性能,图 3 中还可以看出第 3 阶模态的位移量(DMX)最大,因此其对扫描线性度的影响也会最大。经以上模拟分析可以看到,由于新型压电驱动器的位移放大和两个驱动器的平行放置,使扫描器具有较大的扫描角度和较高的谐振频率。

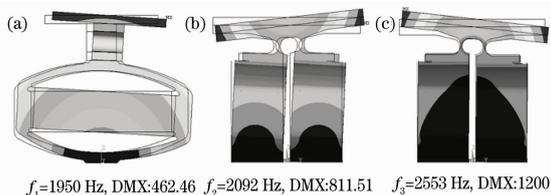


图 3 扫描器的前三阶模态分析

Fig. 3 First three modes of the scanner (simulated by ANSYS FEA software)

3 静态和动态性能测试

为了研究扫描器的实际扫描性能,搭建了如图 4 所示的测试平台。驱动波形经高压放大器驱动扫描器偏转扫描,扫描器将激光束反射扫描到位敏探测器,扫描波形经数据采集卡传到计算机中进行分析,此平台可以实时测试扫描波形、扫描角度、扫描波形频谱等。测量扫描器的频率响应曲线时,将波形发生器的波形作为输入,位敏探测器的波形作为输出。图 4 中的控制器(controller)是为了提高扫描线性度而设计的,在测试扫描器的静态和动态性能的时候未加入,而在后面的对比实验中才使用。

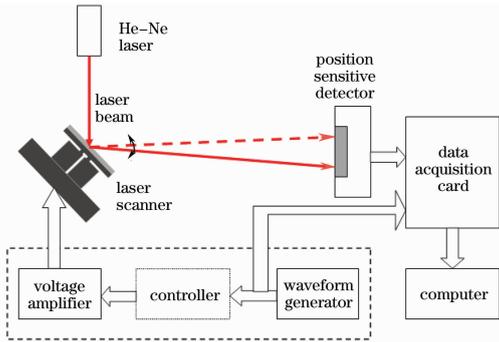


图 4 性能测试平台的结构框图

Fig. 4 Block diagram of the performance test bench

扫描器的扫描角度与驱动电压的关系如图 5 所示,其最大光学扫描角度为 $\pm 0.7^\circ$ (即机械扫描角度为 $\pm 0.35^\circ$),扫描角度比一般的压电驱动快速控制反射镜要大很多,传统压电驱动快速扫描反射镜的机械偏转角度通常不大于 $\pm 0.15^\circ$ 。扫描角度与前面模拟分析的值比较接近,证明了前面模拟分析和设计的方法是可行的,两者的误差主要是由三方面造成的:1)模拟分析时未加压电陶瓷,这对弹性外壳的形变会有影响;2)铰链的加工精度,铰链中心的厚度对偏转角度的影响很大;3)模拟时未考虑预紧力的影响。另外可以看出压电陶瓷引起的迟滞效应很

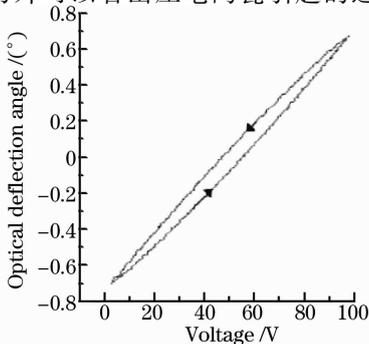


图 5 扫描角度与驱动电压的关系

Fig. 5 Relation of optical deflection angle and the driving voltage

明显,这将影响扫描器的扫描线性度。

图 6 为扫描器的频率响应曲线,可以看出,对频率响应曲线影响最大的为前 3 阶谐振频率:1872, 1960 和 2364 Hz,它们分别对应于模态分析中的前 3 阶模态。这 3 阶谐振频率的振幅都超过了 15 dB,其中第 3 阶谐振频率的振幅达到了 29 dB,它们会严重影响高频扫描时的线性度。

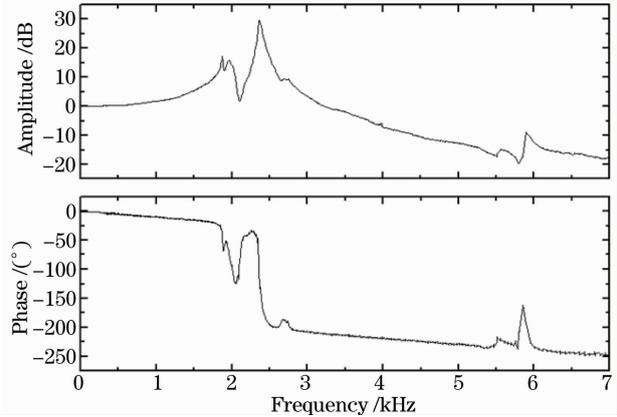


图 6 扫描器的频率响应图

Fig. 6 Bode plot of the scanner

4 高速线性扫描研究

在激光雷达等应用中,经常希望实现高速线性扫描,即高速三角波扫描。在低速三角波扫描中(如 10 Hz),机械谐振对线性度的影响不明显,压电迟滞效应会主要影响扫描线性度。在高速三角波扫描时(100 Hz 以上),机械谐振就会明显影响扫描线性度,引起机械振荡。标准三角波包含了大量高次谐波,高次谐波频率接近扫描器的谐振频率时,就会引起扫描器的谐振,严重影响扫描线性度。为了分析机械谐振的影响程度,测试了 100, 400 和 700 Hz 三角波驱动的扫描波形、频谱和扫描线照片如图 7 所示。

由图 7 可以看到,100 Hz 和 400 Hz 三角波驱动时引起了明显的振荡,这些振荡引起扫描速度的不均匀,振荡点在扫描线照片上表现为亮点。正如前面所分析,三角波包含的奇次谐波频率在扫描器谐振频率附近时就会引起振荡。100 Hz 的扫描频谱显示 1900 Hz 和 2500 Hz 处都出现了明显振荡,其中 1900 Hz 处的振幅比标准三角波增加了约 10 dB, 2500 Hz 处增加了约 16 dB。400 Hz 的频谱显示 2000 Hz 处出现了明显振荡,振幅增加了约 18 dB。但是在 700 Hz 的时候,由于 700 Hz 的奇次谐波频率刚好错开了扫描器的谐振频率,因此没有出现明显的振荡现象,只是由于扫描器的机械带宽限制,在扫描转

向外出现了迟滞。由以上分析可以看出扫描器的机械谐振对高频三角波扫描影响很大。

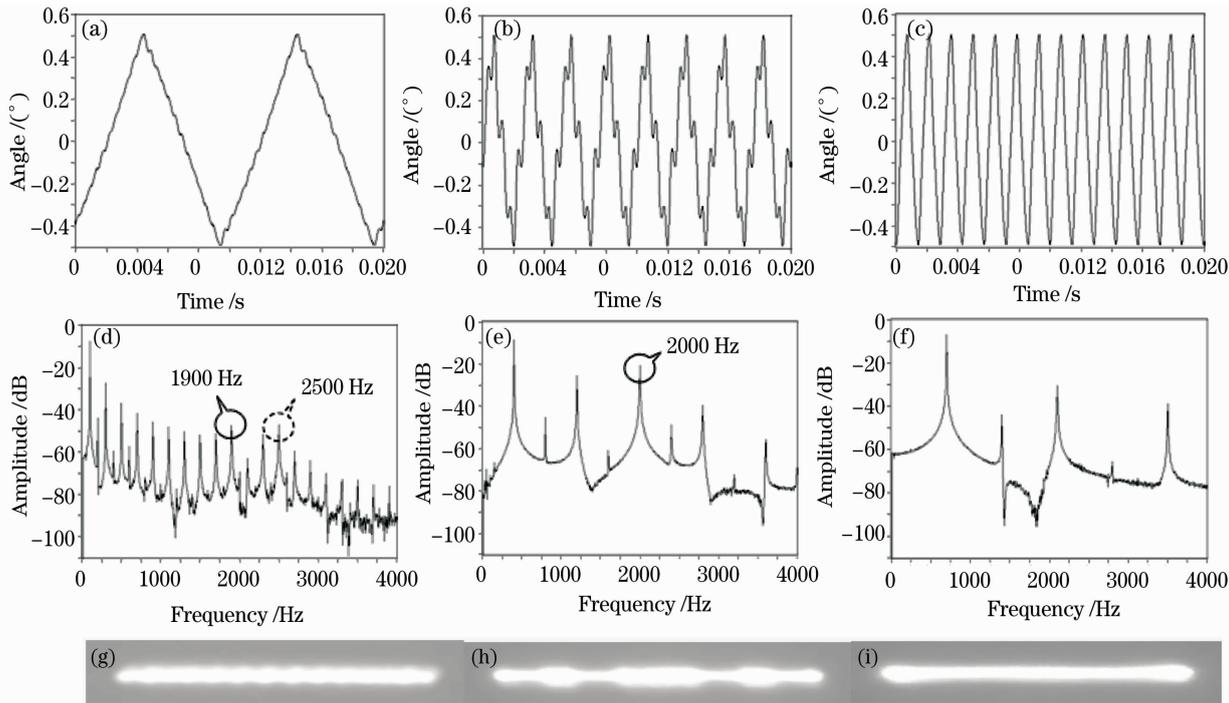


图 7 无控制器的高速(100,400 和 700 Hz)三角波驱动扫描波形(a, b, c)、频谱(d, e, f)和扫描线照片(g, h, i)

Fig. 7 Triangle waveform actuated scanning without controller, scanning waveform (a, b, c), spectrum (d, e, f), and scan line images (g, h, i)

闭环控制在许多扫描器和快速控制反射镜中得到了广泛应用,但是目前的闭环控制扫描器还难以实现高速线性扫描,主要原因有两方面:一是高速线性扫描会引起高频谐振,二是闭环控制带宽还不够宽,难以抑制复杂的高频谐振。因此,设计了开环控制方法来实现高速线性扫描。开环控制器由迟滞补偿器和串联陷波器组成,控制框图如图 8 所示。迟滞补偿器是一种软件算法,和波形发生器在同一块数字信号处理器(DSP)中实现。先测试扫描器的低频三角波扫描波形,得到其迟滞曲线,然后根据迟滞曲线对驱动波形进行修正,使修正后的扫描波形达到线性扫描,这样就可以补偿扫描器的迟滞效应影响。串联陷波器由硬件电路实现,由 3 个串联的陷波器组成,中心频率分别对应前 3 阶谐振频率,用来降低谐振振幅,抑制扫描器的谐振。图 9 显示了加开环控制器的扫描器频率响应曲线,可以看出前 3 阶谐振都得到了明显的衰减,最大的振幅只有 4 dB,相位得到了明显

的补偿, -180° 的频率从 2438 Hz 提高到了 3738 Hz。由于扫描器模态频率较复杂,且相距较近,因此陷波后的频率响应曲线还不够平坦。

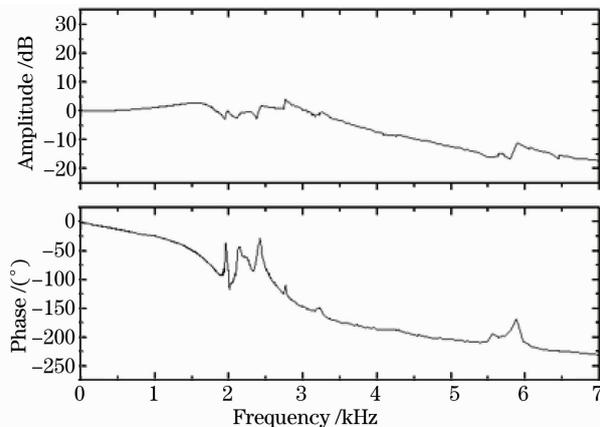


图 9 加开环控制器后的扫描器频率响应图

Fig. 9 Bode plot of the scanner with open loop controller

为了验证开环控制器的实际作用,测试了加控制器后的三角波扫描波形。图 10(a), (c) 显示的是加控制器的 100 Hz 和 400 Hz 三角波扫描波形,图 10(b), (d) 显示的是 100 Hz 和 400 Hz 加控制器前后的扫描非线性度对比,扫描非线性度定义为扫描波形和标准三角波的偏差占最大扫描角度的比例。对比图 7 可以看出,采用开环控制器后,扫描波形的线性度得到

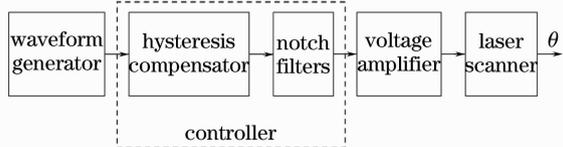


图 8 扫描器的开环控制框图

Fig. 8 Open loop control diagram

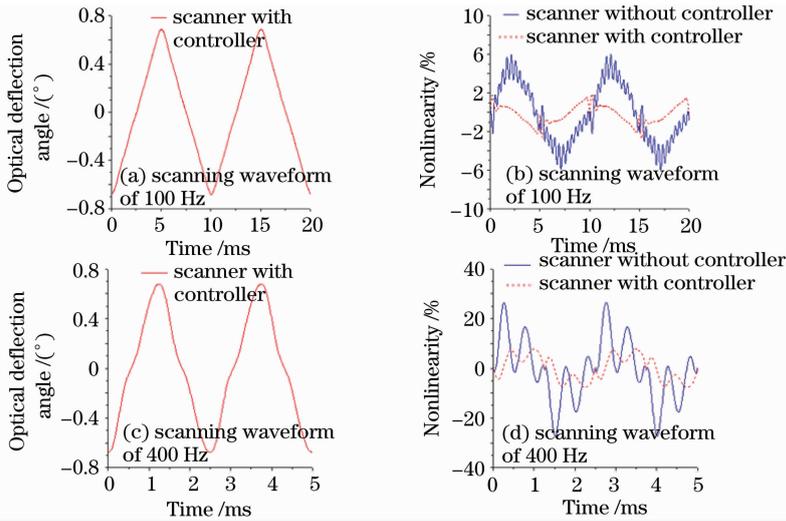


图 10 加开环控制器前后的 100 Hz 和 400 Hz 三角波扫描波形和非线性度

Fig. 10 Scanning waveforms and nonlinearities of the uncontrolled and controlled scanner at 100 Hz and 400 Hz

了明显提高,100 Hz 和 400 Hz 的最大扫描非线性度分别从 6%,27%减小到了 2%,7%。图 11 显示了加控制器后 100 Hz 和 400 Hz 三角波扫描线的照片,可以看出亮度均匀性得到了明显的提高,振荡亮点基本消失。

该扫描器还具有体积小、功耗低、转动惯量小等优点,可用于激光雷达亚视场高速扫描,在激光检测、激光加工等领域也有应用前景。

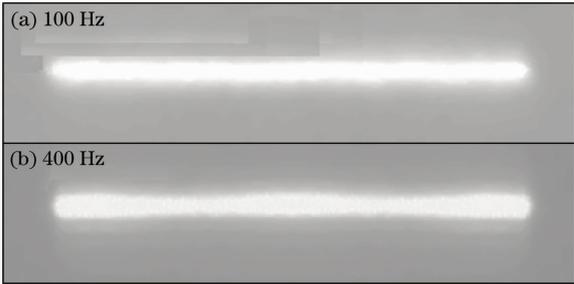


图 11 加开环控制器的 100 Hz 和 400 Hz 三角波扫描线照片

Fig. 11 Scan line images of the controlled scanner at triangle wave scanning of 100 Hz and 400 Hz

5 结 论

报道的高速激光扫描器采用了新型的位移放大压电驱动结构,机械扫描角度可达±0.35°,一阶谐振频率达 1872 Hz。频率响应曲线显示扫描器具有较复杂的模态,测试了多个频率(100,400,700 Hz)下的三角波驱动扫描波形、频谱和扫描线照片,结果显示压电迟滞效应和扫描器机械谐振对扫描线性度的影响很大。设计了软件补偿迟滞效应和串联硬件陷波器抑制谐振相结合的开环控制方法,加控制器后的 100 Hz 和 400 Hz 三角波扫描非线性度分别从 6%,27%减小到了 2%,7%,实现了高速线性扫描。

参 考 文 献

- Xu Min, Hu Jiasheng. Analysis and calculation of rotating polygonal scanner in laser scanning imaging system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 782~787
- 许敏,胡家升. 激光扫描成像中旋转多面体的分析计算[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 782~787
- 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**(S1): 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**(S1): 73~79
- A. Wolter, S. Hsu, H. Schenk *et al.*. Applications and requirements for MEMS scanner mirrors [C]. *SPIE*, 2005, **5719**: 64~75
- 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
- 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高带宽控制[J]. *光电工程*, 2004, **31**(8): 15~18
- M. Hafez, T. C. Sidler, R. P. Salathe *et al.*. Design, simulations and experimental investigations of a compact single mirror tip/tilt laser scanner [J]. *Mechatronics*, 2000, **10**: 741~760
- B. Jens, K. Thomas, G. Lothar. Hysteresis and creep compensation for piezoelectric actuators applied to the feedforward control command of flexible structures[C]. *ASME*, 2007, **1**: 1923~1932
- M. Sweeney, G. Rynkowski, M. Ketabchi *et al.*. Design considerations for fast steering mirrors (FSMs) [C]. *SPIE*, 2002, **4773**: 63~73
- Li Xinyang, Ling Ning, Chen Donghong *et al.*. Stable control of the fast steering mirror in adaptive optics system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(1): 31~36
- 李新阳,凌宁,陈东红等. 自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(1): 31~36
- F. Claeysen, R. L. Letty, F. Barillot *et al.*. Mechanisms based on piezoactuators[C]. *SPIE*, 2001, **4332**: 225~233