

## 基于超磁致伸缩材料的高速倾斜镜的设计与应用

姚佰栋<sup>1</sup>, 时晶晶<sup>2</sup>, 侯再红<sup>1</sup>, 谭逢富<sup>1</sup>, 吴毅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽合肥 230031; 2. 合肥师范学院 电子信息工程学院, 安徽合肥 230601)

**摘要:** 在目标跟踪系统中, 由于大气湍流的影响导致光波振幅和相位起伏。为了提高跟踪性能, 降低大气湍流造成的光斑倾斜成为了首要目标, 而高速倾斜镜(FSM)则是达成这一目标的关键器件。文中介绍的高速倾斜镜利用超磁致伸缩材料(GMM)作为位移驱动元件, 通过线圈的电流产生磁场控制材料的伸缩, 从而驱动倾斜镜的偏转。该倾斜镜已经被应用于激光大气传输倾斜校正系统中, 使湍流造成的倾斜减少了 90%, 光斑稳定性和光斑质量得到了明显提高。

**关键词:** 高速倾斜镜; 超磁致伸缩材料; 倾斜校正; 激光大气传输

**中图分类号:** P415.3+4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0096-06

## Design and application of fast steering mirror based on GMM

Yao Baidong<sup>1</sup>, Shi Jingjing<sup>2</sup>, Hou Zaihong<sup>1</sup>, Tan Fengfu<sup>1</sup>, Wu Yi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of the Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In the fine tracking systems, the amplitude and phase of the beacon light is fluctuated which is caused by the atmosphere turbulence. In order to enhance the tracking system's performance, reducing the facula's vibration induced by the atmosphere turbulence becomes the primary goal, and the fast steering mirror (FSM) is the key instrument to reach that goal. In this paper giant magnetostrictive material (GMM) was used as the offset-generating component of the FSU, which was actuated by the elasticity of the GMM, which was controlled by the magnetic field generated by the current in the coil around the GMM. This fast steering mirror was applied in the tilt correction system for atmospheric laser beam propagation, and the tilt introduced by the turbulent current was reduced by 90%, the stability and concentration of the laser facula was enhanced greatly.

**Key words:** fast steering mirror; GMM; tilt correction; atmospheric laser beam propagation

### 0 引言

高速倾斜镜(FSM)作为在目标和接收器之间控制光束方向的反射镜装置, 已广泛应用在天文望远镜、激光通讯、图像稳定、复合轴精密跟踪、光学瞄准

系统中。而微致动器作为高速倾斜镜的关键部件, 其性能指标直接影响整个系统的性能。目前, 用来作为倾斜镜驱动元件的主要有压电陶瓷、音圈电机和磁致伸缩材料等, 其中压电陶瓷和音圈电机的应用比较广泛。压电陶瓷具有很高的分辨率(nm 级), 但其

收稿日期: 2012-05-22; 修订日期: 2012-06-19

基金项目: 中国科学院安徽光学精密机械研究所所长基金(Y03AG11141); 安徽省高校优秀青年人才基金(2012SQRL157)

作者简介: 姚佰栋(1984-), 男, 博士生, 主要从事大气探测仪器方面的研究。Email: yaobodong1@163.com

导师简介: 侯再红(1968-), 男, 研究员, 主要从事激光大气传输系统的研究。Email: zhhou@aiofm.ac.cn

驱动电压高(通常几百伏)、输出位移小、输出力小,难以驱动质量比较大的镜片;音圈电机的输出位移大、驱动电压低,但分辨率不高。与以上两种材料相比,超磁致伸缩材料(GMM)具有大的输出变形、高分辨率(nm 级)、高输出力、响应速度快(<1  $\mu\text{s}$ )、机电耦合系数高(约为 0.73)等特点,因此,选用超磁致伸缩材料作为高速倾斜镜的驱动元件。

## 1 超磁致伸缩材料及其特性

磁致伸缩指磁性体在外加磁场情况下,在磁化方向上产生伸长或者缩短的现象。这是因为该材料中存在大量磁畴,各磁畴的自发磁化方向不相同,在没有外加磁场的情况下,自发磁化引起的形变互相抵消。外加磁场后,各个磁畴的自发磁化都转向外施磁场方向,于是产生了宏观的磁致伸缩,其相对伸长量称为磁致伸缩系数  $\lambda$ 。 $\lambda$  随磁场强度的增加而增加,当磁场强度达到某一临界值时,磁致伸缩系数就不再增加而达到一饱和值,此时的磁致伸缩系数  $\lambda$  称为饱和磁致伸缩系数  $s$ 。磁致伸缩材料是指在室温和低磁场下能产生较大磁致伸缩应变的材料,如 Ni、Ni-Cr-Co 合金的饱和磁致伸缩系数仅有  $\theta$ ,由于其饱和磁致伸缩系数较小,没有得到广泛应用。目前,国际上应用最多的三元稀土铁系化合物 Terfenol-D,其饱和磁致伸缩系数已达到  $1500 \times 10^{-6}$ ~ $2000 \times 10^{-6}$ ,相当于传统磁致伸缩材料的 20~50 倍,所以称为超磁致伸缩材料。

稀土磁致伸缩材料属于立方晶体,沿长度方向取向,当给它沿长度方向施加一压应力时,其磁致伸缩系数大幅度提高,即具有“跳跃效应”,因此在使用时一般要给材料施加一定的压应力,以提高性能。其磁致伸缩系数一般通过测量沿主轴方向长度变化得到。在物体各向同性的特殊情况下,有:

$$\Delta L/L = \frac{3}{2} \lambda_s (\cos^2 \theta - \frac{1}{3}) \quad (1)$$

其中,  $\theta$  为磁化向量和测量方向之间的夹角。

## 2 超磁致伸缩致动器的设计和工作原理

选用甘肃天星稀土材料有限公司产的 GMM 棒材,规格为  $\phi 7 \times 30 \text{ mm}$ 。其特性参数如表 1 所示。

图 1 为 GMM 的  $\lambda$ -H 曲线,从图中可以看出,在

表 1 GMM 特性参数

Tab.1 GMM's characteristics parameters

Parameter	Value
Magnetostriction $\lambda$	$1500 \times 10^{-6}$ (240 kA/m, 10 MPa)
Young's modulus/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	$(2.5-6.5) \times 10^{10}$
Tensile-strength/MPa	28
Pressure-strength/MPa	-700
Electromechanical ratio	0.65-0.75
Relative permeability	9
Response time/ $\mu\text{s}$	< 1
Precision/ $\mu\text{m}$	$10^{-1}-10^{-3}$
Response Frequency band/kHz	0-1

$H \leq 20 \text{ kA/m}$  和  $H \geq 40 \text{ kA/m}$ , 磁致伸缩系数  $\lambda$  上升很慢。而在  $20 \text{ kA/m} \leq H \leq 400 \text{ kA/m}$  时,磁致伸缩系数  $\lambda$  随磁场强度  $H$  变化很快,而且线性良好。因此选用这个区域为工作区域,以保证 GMM 致动器具有很快的响应速度和比较好的线性度。

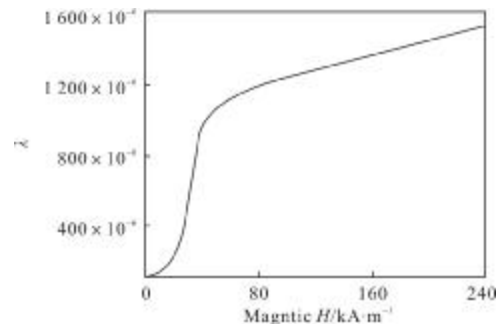


图 1  $\lambda$ -H 曲线

Fig.1  $\lambda$ -H curve

在设计致动器时,由于其被用来驱动倾斜镜片,要求该致动器既能伸长,也能缩短,以保证镜片能够前后偏转。为了达到要求,先给致动器加一固定的偏置磁场,使 GMM 材料处于伸长状态,当工作磁场与偏置磁场的方向一致时,驱动器就会继续伸长,当工作磁场与偏置磁场方向相反时,驱动器就会缩短。添加偏置磁场主要有两种方式,一是加一偏置线圈,通过一定强度的电流产生固定的磁场;二是通过永磁铁产生固定的偏置磁场。前面的方法能够灵活控制偏置磁场强度,不足之处是偏置线圈产生的热量会导致 GMM 的精度降低,而且线圈会增加致动器的体积。而第二种方法可以解决线圈发热和体积的问题,缺点是偏置磁场控制不够灵活。由于倾

斜镜需要很高的定位精度, 所以选择第二种方法来产生偏置磁场。在确定偏置磁场强度时, 因为 GMM 工作的磁场区域选定为 20~40 kA/m, 所以偏置磁场强度选为 30 kA/m, 这样工作线圈只要产生  $\pm 10$  kA/m 的磁场强度就可以保证 GMM 工作在选定区域内。

图 2 为设计的致动器原理图, 永磁铁为 GMM 提供偏置磁场, 通电工作线圈提供工作激励磁场, 通过改变线圈中电流大小和方向实现对磁场大小和方向的控制, 从而控制 GMM 的伸缩, 再通过输出顶杠驱动倾斜镜实现偏转。

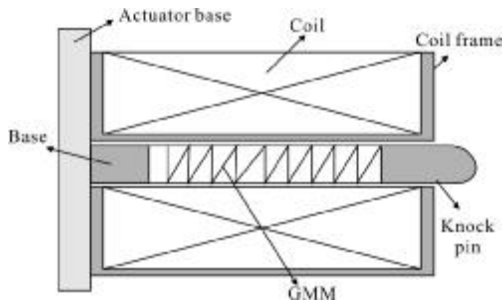


图 2 GMM 致动器

Fig.2 GMM actuator

为了使工作磁场尽量通过 GMM, 线圈骨架采用磁导率为 1 的铝制成, 由于薄壁线圈在轴线上产生的磁场强度<sup>[1]</sup>为:

$$H(0,0,z) = \frac{NI}{4l} \left[ \frac{z+1}{\sqrt{R^2+(z+1)^2}} - \frac{z-1}{\sqrt{R^2+(z-1)^2}} \right] \quad (2)$$

式中:  $z$  为轴线上距离线圈中心的距离;  $N$  为线圈的匝数;  $I$  为线圈电流;  $l$  为线圈的轴向长度的一半;  $R$  为线圈的半径。

厚壁线圈轴线磁场可以看成是无数个薄壁线圈的积分, 所以得到厚壁线圈轴线磁场强度为:

$$H(0,0,z) = \frac{j}{2} \left[ (z+1) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (z+1)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (z+1)^2}} - (z-1) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (z-1)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (z-1)^2}} \right] \quad (3)$$

式中:  $j = NI/2(R_2 - R_1)I$ ,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为线圈内外径。其中  $R_1 = 6$  mm,  $R_2 = 20$  mm,  $N = 500$ ,  $l = 25$  mm,  $I = 1.5$  A, 通过 Matlab 空间磁场模型仿真程序, 运行结果如图 3 所示。

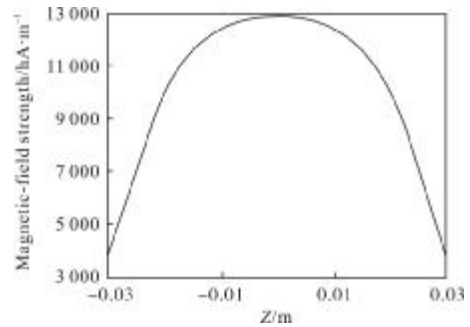


图 3 GMM 轴线磁场分布图

Fig.3 Magnetic-field strength of GMM's axial direction

从仿真结果中看出, 在范围内取值, 此时在线圈轴线上产生 12 000~12 800 A/m 的较均匀的磁场。

### 3 高速倾斜镜的结构与主要参数

#### 3.1 高速倾斜镜的结构

如图 4 所示, 高速倾斜镜由底座、柔性支撑轴、两个 GMM 致动器、弹簧和反射镜组成, 反射镜的中心固定在柔性轴的一端, 而柔性轴的另一端固定在一个底座上面。两个 GMM 致动器呈  $90^\circ$  固定在底座上面, 致动器的输出杠顶在反射镜背面, 每个致动器外侧平行安装一个弹簧, 弹簧的一端固定在反射镜背面, 另一端连在底座上, 当驱动器伸长时, 反射镜在输出杠推动下向前偏转; 致动器缩短时, 在弹簧拉力作用下, 反射镜向后偏转, 实现反射镜在正反两个方向转动。

为了防止倾斜镜工作时, 由于致动器高频振动时带动倾斜镜底座一起振动, 降低了倾斜镜的精度, 底座必须要有大质量以及高稳定性。另外, 由于 GMM

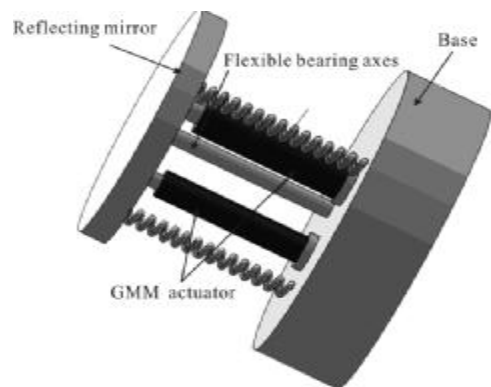


图 4 高速倾斜镜

Fig.4 Fast steering mirror

特有的“跳跃效应”,通过倾斜镜底座上与致动器底座中心的螺丝使 GMM 材料顶在底座和反射镜之间,使 GMM 处于约 10 MPa 的预压力下,这样能够大幅提高 GMM 的机电耦合系数和磁致伸缩系数,使倾斜镜的速度更快,行程更大。另外,由于 GMM 的抗拉强度仅为 28 MPa,而抗压强度可达 700 MPa,所以施压一定强度的预压力可防止 GMM 由于拉伸过度而损坏。

### 3.2 高速倾斜镜的谐振频率

倾斜镜主要是用来校正光斑的抖动,保证光斑处于靶面的指定位置。由于光斑的抖动具有一定的频率,这要求高速倾斜镜自身要有足够的控制带宽,以满足校正光斑抖动的需要。倾斜镜由许多元件组成,这些元件形成了许多不同的惯性—弹性系统,它们有不同的谐振模式,因此有不同的谐振频率,而限制倾斜镜带宽的是其中的某个最低谐振频率。这个最低谐振频率是由驱动器的弹性和镜面的惯性构成谐振模式决定,假设反射镜为刚体,支撑在一个弹性系统下,这个系统的角自振频率为:

$$\omega = \left( \frac{C_0}{J} \right)^{1/2} \quad (4)$$

其中,弹性支撑的角刚度  $C_0 = CL^2$ ,  $C$  为驱动器拉伸

$$\text{或者压缩刚度: } C = \frac{E'S}{l} \quad (5)$$

其中,  $E'$  为驱动弹性模量;  $S$  为驱动器的截面积;  $l$  为驱动器的长度。

对支点的转动惯量:

$$J = J_0 + mr_0^2 \quad (6)$$

其中,  $r_0$  为驱动器到支撑轴的距离。

$$\text{当 } r_0 = 0 \text{ 时: } J = J_0 = \frac{\pi \rho h D^4}{64} \quad (7)$$

综上所述,得角频率  $\omega$  为:

$$\omega = \left( \frac{64E'SL^2}{\pi \rho h D^4} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$\text{而 } l = \frac{\delta}{d_{33}^2 H_0}; \quad d_{33}^2 = d\lambda/dH_0$$

其中,  $H_0$  是施加于驱动器的磁场强度,  $d_{33}^2$  是 GMM 的磁致伸缩应变系数。代入公式(8)得:

$$\omega = \frac{8}{D^2} \left( \frac{d_{33}^2 E' H_0}{\pi \rho} \right)^{1/2} \left( \frac{SL^2}{\theta h} \right)^{1/2} \quad (9)$$

令:

$$k = \left( \frac{d_{33}^2 E' H_0}{\pi \rho} \right)^{1/2}, \quad \omega = \frac{8k}{D^2} \left( \frac{SL^2}{\theta h} \right)^{1/2} \quad (10)$$

由公式(7)可以看出,频率  $\omega$  与倾斜镜直径  $D$ 、倾斜角度  $\theta$ 、倾斜镜厚度  $h$  以及驱动器离支撑轴距离的关系,一般来说倾斜镜的厚度  $h \approx D/10$ ,以保证倾斜镜面型不会受力变形。另外,适当提高驱动器的截面积  $S$  和驱动器离支撑轴距离  $L$  可以提高谐振频率。当这些数值一定时,就可以算出  $\omega$ 。将设计好的倾斜镜各参数代入公式(7),计算出振幅为 200  $\mu\text{rad}$  时倾斜镜的最低谐振频率  $f = \omega/2\pi = 203 \text{ Hz}$ 。

对倾斜镜的最低谐振频率进行了测量,在 0~200 Hz 之间每隔 10 Hz 给倾斜镜驱动电路施加幅度一定的正弦电压信号,然后测量出倾斜镜的最大倾斜角度,测量结果如图 5 所示。

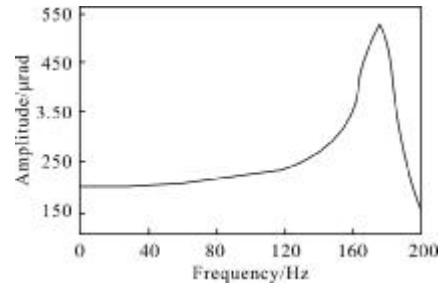


图 5 倾斜镜频率特性

Fig.5 FSM's frequency characteristics

从图 5 可以看出,倾斜镜的谐振频率出现在 180 Hz 左右,比理论计算值略小,主要是由于在确定倾斜镜刚度时作了一定的近似,另外倾斜镜的底座也认为是理想固定的。

### 3.3 高速倾斜镜的振动范围

光斑的抖动有一定的幅度范围,这要求利用高速倾斜镜在进行实时校正时,倾斜镜本身就具有大于光斑最大抖动量的振动范围,从而对光斑进行修正。之前选定的 GMM 工作磁场区域为 20~40 kA/m,偏置磁场强度为 30 kA/m。在这个区域内,磁致伸缩系数变化量  $\Delta\lambda \geq 700 \times 10^{-6}$ ,故 GMM 的长度变化量  $\pm 10 \mu\text{m}$ 。由于致动器输出顶杠与镜片中心距离  $r$  为 3 cm,理论上倾斜镜振动范围通过公式计算出倾斜镜的最大振动幅度为  $\theta = \Delta L/r$ ,由于 GMM 致动器一开始处于中心偏置磁场下,所以倾斜镜理论最大振动幅度为  $\pm 10 \mu\text{rad}$ 。

为了对倾斜镜的振动范围进行精确测量,用一束激光器照射到倾斜镜上,反射后进入卡塞格林系统聚焦,最后聚焦到高速 CCD 靶面上。通过信号发生器给倾斜镜驱动电路时施加 5 Hz 的电压信号,调整信号幅度和方向,使倾斜镜产生不同幅度和方向的振动,将高速 CCD 测量到的光斑抖动量  $A$  和系统焦距  $f_0$  代入倾斜角计算公式  $\theta=A/f_0$  计算,即可得出倾斜镜振动量  $\theta$ 。表 2 是测量的结果,图 6 是根据表 2 画出的折线图。

表 2 倾斜镜振动幅度

Tab.2 FSM deflection amplitude

Current/A	Forward/ $\mu\text{rad}$	Backward/ $\mu\text{rad}$
0.2	35.3	35.3
0.4	78.8	78.8
0.6	129.4	136.5
0.8	188.2	200.0
1.0	215.3	235.3
1.2	260.0	290.6
1.4	292.9	324.7
1.6	320.0	371.8

通过表 2 可以看出,正向幅度最大值为  $320 \mu\text{rad}$ ,负向幅度最大值为  $371.8 \mu\text{rad}$ ,与理论计算值  $350 \mu\text{rad}$  比较吻合。当电流较小时,正向幅度和负向幅度基本相等,电流较大时,负向幅度逐渐大于正向幅度,这主要由两方面原因造成,一是选取的磁致伸缩材料的线性工作区域存在一定的非线性;二是因为选用永磁铁来产生偏置磁场,由于测量的不准确性产生了一定程度的误差。图 6 是正向幅度和负向幅度随线圈电流变化的曲线,从中可以看出,两方向曲线线性度良好,其中,正向幅度曲线非线性度为 3.95%,

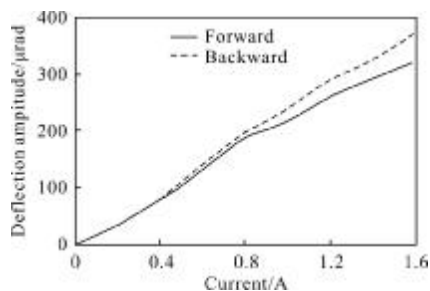


图 6 倾斜镜振动幅度

Fig.6 FSM deflection amplitude

负向幅度非线性度为 0.25%。

#### 4 高速倾斜镜在激光大气传输倾斜校正系统中的应用

将设计的高速倾斜镜应用到激光大气传输倾斜校正系统的精跟踪回路中,精跟踪回路主要包括一块倾斜镜、PSD 位敏探测器、单片机跟踪控制器和倾斜镜驱动电路,用来校正激光光束在大气湍流中传输时产生的倾斜,提高光束质量。实验原理图如图 7 所示,望远镜系统接收到的激光光束通过倾斜镜反射到分光镜上,光束被分光镜分光,一部分进入成像系统,一部分进入位敏传感器(PSD)。由位敏传感器采集光斑位置,形成四路电流信号,经电流电压转换放大之后,由单片机进行 A/D 转换并计算出光斑的偏移量,并根据光斑的偏移量计算出驱动 GMM 所需要的电压。最后将驱动电压值进行 D/A 转换,并通过倾斜镜驱动电路驱动 GMM 来改变倾斜镜的角度,从而使光斑始终在成像系统的中心。

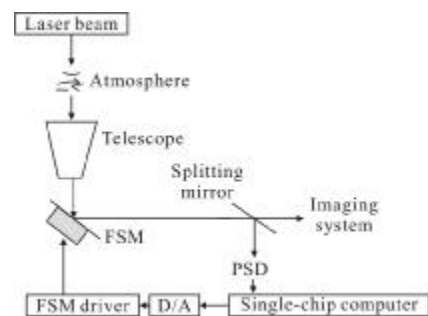


图 7 跟踪系统框图

Fig.7 Fine tracking system

图 8 是采集光斑开环长曝光图像经 matlab 图像处理程序处理后的灰度图像,可以看出,系统闭环后光斑集中度明显提高,开环峰值亮度值为 196,闭环峰值亮度值 637,比开环提高了 2 倍以上。

图 9 为望远镜接收到的一公里外的激光光斑的一组开环倾斜数据以及经过跟踪后的闭环残余倾斜均方差数据。

如图 9 所示,计算出精跟踪回路 X 方向开环倾斜均方差为  $4.385 \mu\text{rad}$ ,Y 方向开环倾斜均方差为  $2.778 \mu\text{rad}$ ;X 方向闭环跟踪后残余误差为  $0.405 \mu\text{rad}$ ,Y 方向闭环跟踪后残余误差为  $0.327 \mu\text{rad}$ 。图中,虚线表示开环误差数据,实线表示闭环残余误差数据。其中,残余误差中包含望远镜的抖动和系统噪声引起的部

分误差。

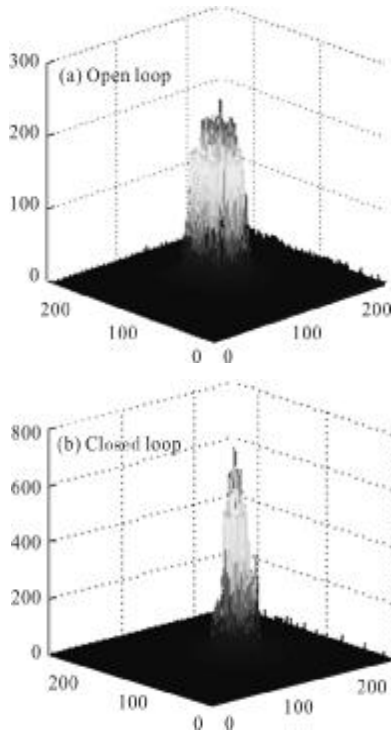


图 8 采集光斑开闭环长曝光图像

Fig.8 Long exposure of facula open-loop and closed-loop

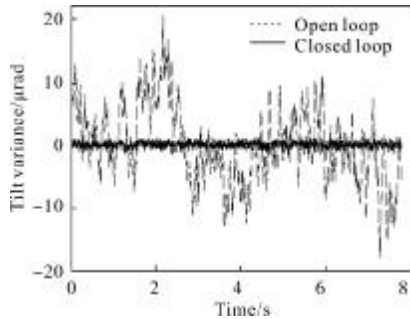


图 9 开闭环倾斜均方差

Fig.9 Open-loop and closed-loop tilt variance

图 10 为开闭环时 X 及 Y 方向的倾斜功率谱曲

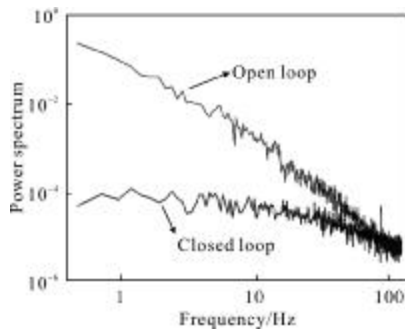


图 10 开闭环倾斜数据功率谱曲线

Fig.10 Tilt power spectrum of open-loop and close-loop

线。湍流造成的倾斜主要集中在低频段,利用高速倾斜镜的精跟踪系统可以将低频段倾斜减少 1~4 个数量级。而在高频段,由于受整个系统带宽和精度的限制,倾斜没有明显改善。

### 5 结 论

我们设计的 GMM 高速倾斜镜具有驱动电压低(0~10 V)、大直径(155 mm)、响应速度快、分辨率高的特点,目前,已经将设计好的高速倾斜镜应用到激光大气传输倾斜校正实验中,用来校正激光在大气中传输时由于大气折射率的变化而造成的光斑的倾斜,校正后的光斑质量明显提升,光斑集中度大大提高,峰值亮度值比未校正时提高了 2 倍以上,光斑的抖动幅度降低了约 90%,达到了亚微弧度的精度。

### 参考文献:

- [1] Yang Lise, Li Chengying, Zhou Huiqun, et al. An experimental research of electro-magnetic parameters on rare earth super-magnetostriction materials[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 1999, 19(1): 14-18. (in Chinese)
- [2] Sun Lining, Sun Shaoyun. Micro drive positioning system based on PZT and its control [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(1): 55-58. (in Chinese)
- [3] Li Ming, Huang Yong, Ai Yong. Design of fine tracking controller for free space optical communication [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 270-274. (in Chinese)
- [4] Tan Fengfu, Chen Xiutao, Yao Baidong, et al. Tilt correction system for atmospheric laser pro-pagation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (3): 429-432. (in Chinese)
- [5] Xia Chunlin, Ding Fan, Lu Yongxiang. Experimental study on giant magnetostrictive transducer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14 (4): 14-16. (in Chinese)
- [6] Mei Deqing, Pu Jun, Chen Zichen. Design of rare earth giant magnetostrictive actuator for ultra precision vibration isolation system. [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(6): 766-769. (in Chinese)
- [7] Zheng Bin, Ling Ning. Measurement for frequency response function of a fast steering mirror [J]. Opto Electronic Engineering, 1999, 26(5): 58-62. (in Chinese)