

# 少驱动单元数的柱面变形反射镜设计和测试

解 昆 刘文广 魏斌斌 周 琼 习锋杰

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 对于高能激光输出波前的低阶像差, 可以使用柱面反射镜与球面反射镜组合对其中的离焦和像散进行补偿。根据悬臂梁理论设计了一种变形反射镜, 并通过有限元仿真, 对变形镜结构和各尺寸参数进行了优化, 镜面行程达到  $19\ \mu\text{m}$ , 残差峰谷值小于  $1.4\ \mu\text{m}$ 。依据优化设计结果制作了柱面变形镜样件, 使用非索干涉仪对柱面变形镜的面型精度及压电陶瓷驱动电压与形变量的关系进行了测试。测试结果表明, 通过控制压电驱动器的位移, 这一结构的变形镜能够产生所需的抛物柱面, 行程达到  $11\ \mu\text{m}$ 。

**关键词** 光学设计; 自适应光学; 变形反射镜; 低阶像差; 补偿; 柱面

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:**10.3788/AOS201535.s222001

## Design and Test of Less Actuators Cylinder Deformable Mirror

Xie Kun Liu Wenguang Wei Binbin Zhou Qiong Xi Fengjie

College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** There are usually large low order aberration in the output beam of high energy laser system. It's possible to compensate the defocus and astigmatism by a set of spherical concave mirrors and cylinder concave mirrors. According to the cantilever beam theory, a cylinder deformable mirror has been designed. By finite element simulation the structure and size parameters of the deformable mirror are optimized, and the deformation stroke reaches  $19\ \mu\text{m}$ , the residual peak to valley value is less than  $1.4\ \mu\text{m}$ . A prototype has been produced according to the optimal result. The surface precision and the relationship between deformation and driver voltage are measured by a Fizeau interferometer. The experimental results show that by controlling the displacement of the piezoelectric actuator, this deformable mirror structure can produce the desired parabolic surface, and stroke reaches  $11\ \mu\text{m}$ .

**Key words** optical design; adaptive optics; deformable mirror; low-order aberration; compensation; cylinder

**OCIS codes** 220.1000; 220.1080; 140.3300

## 1 引 言

板条固体激光由于具有光束质量好、转换效率高、结构紧凑、全电驱动、以及可靠性高等优势, 成为激光器的热点研究方向<sup>[1]</sup>, 并在工业、科研等诸多领域取得了广泛应用。但由于固体激光器运转时部分抽运光在增益介质内转化为热能, 使得增益介质内部出现温度梯度, 从而引起应力, 导致折射率变化、端面变形、热致双折射等<sup>[2-4]</sup>。由于热透镜效应的影响, 固体激光的输出光束会带有较大的低阶像差, 其中主要是离焦和像散<sup>[5-6]</sup>。当激光器的输出功率提高到一定程度时, 低阶像差会使得输出光束质量大幅下降。

为了提高固体激光的光束质量, 科研人员一方面提出了板条、光纤、盘片等新的激光器与热管理手段, 提高了输出功率、改善了光束质量, 并在光路中特定分布的相位板来抵消光路中的静态波前畸变。然而对于高功率固体激光, 上述方法尚不能完全消除输出波前的畸变; 同时对于激光器光路中光学元件受热引起的像差

**收稿日期:** 2015-01-24; **收到修改稿日期:** 2015-03-21

**基金项目:** 国家自然科学基金(61378065)

**作者简介:** 解 昆(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事自适应光学与光束控制方面的研究。E-mail: xiekun279@gmail.com

**导师简介:** 刘文广(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事高能激光、激光谐振腔、自适应光学和光束控制方面的研究。

E-mail: lwg.kevin@163.com(通信联系人)

也无法补偿。另一方面,高功率固体激光器中广泛采用自适应光学手段进行光束控制,其中的核心器件是变形反射镜。

目前用于高能激光光束控制的变形镜一般采用连续表面分立驱动结构,校正行程大部分在  $10\ \mu\text{m}$  以下。而随着激光器输出功率的不断提高,固体激光的热致波前畸变峰谷(PV)值可以达到几十微米,远远超出了现有变形镜的校正能力。目前一些特殊结构的变形镜行程达到  $20\ \mu\text{m}$ ,如 ALPAO 公司采用薄膜镜面和电磁驱动器的变形镜对离焦和像散的校正行程达到  $\pm 45\ \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>,但薄膜镜面难以承受较高的功率。Imagine Optic 公司的 ILAO 变形镜对离焦和像散的校正行程达到  $\pm 150\ \mu\text{m}$ <sup>[8-9]</sup>,但由于采用了步进电机驱动器,其响应频率只有  $1\text{Hz}$  左右,难以应用于高能激光的动态光束控制。一些方案采用多个变形镜组合实现大行程校正<sup>[10-12]</sup>,但系统复杂度和成本都将大大增加。

对于板条激光器,一般都需要通过整形光路将矩形光斑转换成近似正方形,以满足后续波前探测和校正的需要。这一整形光路可以由相互垂直的一组柱面反射镜和球面反射镜构成。通过对镜面间距的微调,可以在光束整形的同时实现对较大 PV 值离焦、像散的补偿<sup>[13-14]</sup>,将较大的波前畸变补偿到  $\pm 3\ \mu\text{m}$  以下,再通过变形镜对残差进行校正。这一系统中通过步进电机平台控制反射镜之间的间距来补偿像差,速度较慢。而采用变曲率反射镜,可以避免改变反射镜间距,提高系统的带宽。如果采用常规变形反射镜的结构设计变曲率反射镜,需要较多的压电驱动器,一方面成本较高;另一方面这种结构的变形镜在强激光辐照下驱动器与镜面的接触会引起镜面面型的变化,称之为“印透效应”<sup>[15-17]</sup>,引入高阶像差,反而会降低光束质量<sup>[18]</sup>。本文根据悬臂梁理论设计了一种柱面变形反射镜,通过两个压电驱动器施加推力,使镜面由平面变化为正曲率的抛物柱面。

## 2 理论计算

对于上述整形系统,理想的柱面镜面型应当是二次抛物柱面。这样的抛物柱面可以近似简化为一个宽悬臂梁结构,如图 1 所示。通过在梁的两端施加不同的弯曲力矩或集中载荷,可以产生所需的变曲率柱面。

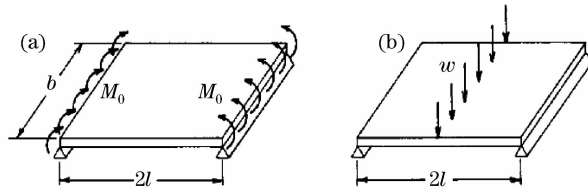


图 1 (a) 宽梁边缘施加弯曲力矩;(b) 宽梁边缘施加集中载荷<sup>[19]</sup>

Fig.1 (a) Apply bending moment at wide beam edge; (b) apply concentrated load at wide beam edge<sup>[19]</sup>

当宽梁边缘施加弯曲力  $M$  时,宽梁的挠度为<sup>[19-20]</sup>

$$\omega(x) = \frac{Mx^2(1-\nu^2)}{2EI}, \quad (1)$$

当宽梁边缘施加集中载荷  $F$  时,宽梁的挠度为

$$\omega(x) = \frac{Fx^2(1-\nu^2)}{6EI}(3l-x), \quad (2)$$

其中  $l$  为宽梁的长度, $E$ 、 $\nu$  分别为材料的弹性模量和泊松比; $I$  为宽梁相对于母线方向的惯性矩。对厚度  $h$ ,高度  $b$  的矩形截面为

$$I = \frac{bh^3}{12}. \quad (3)$$

可以看出,宽梁边缘施加弯曲力矩时,变形为理想的抛物柱面。当施加集中载荷时,挠度中含有三次方项。这一项相对是一个小量,当宽梁边缘挠度相同时,两种方式产生的柱面在全口径上误差约  $8\%$ ,在  $20\%$  口径上小于  $1.6\%$ ,如图 2 所示。由于低阶像差补偿的残差还将通过高阶变形镜进一步补偿,因此用边缘施加集中载荷的方式产生抛物柱面是可行的。

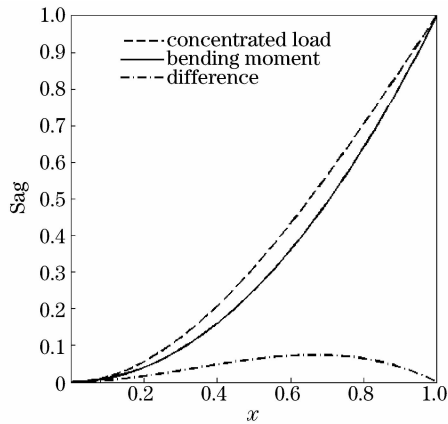


图2 宽梁边缘挠度相同时集中载荷与弯曲力矩产生的挠度对比

Fig. 2 Comparison of wide beam deflection between concentrated load and bending moment under the same deflection at edge

为了简化结构,采用宽梁边缘施加集中载荷的方式使镜面产生变形,对于  $20\ \mu\text{m}$  的行程,变形镜全口径  $1.6\ \mu\text{m}$ ,20%口径  $0.32\ \mu\text{m}$  的残差是可以接受的。

变曲率柱面镜结构如图3所示,镜面截面为T字形,镜面下表面中心由细梁连接固定的底面,细梁宽度为  $w_b$ ,两个压电陶瓷驱动器给驱动盘施加向上的推力,推力盘的两个圆柱面与镜面下表面接触,将推力传递给镜面,使镜面变成下凹的抛物柱面,接触位置距镜面中心线间距为  $F_p$ 。

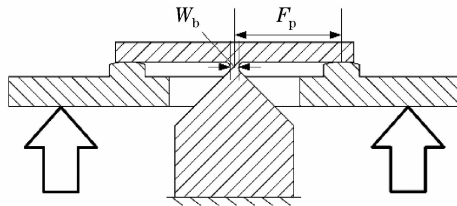


图3 柱面变形反射镜结构示意图

Fig. 3 Schematic of cylinder deformable mirror

### 3 有限元仿真

镜面的尺寸参数会影响变曲率柱面镜的变形能力和拟合残差,其中镜面厚度  $h$ ,推力盘圆柱面与镜面的接触位置  $F_p$ 、细梁宽度  $w_b$  起关键作用。根据(2)、(3)式,镜面厚度越小,其惯性矩越小,在同样的推力下就能产生越大的变形量。但考虑到镜面稳定性以及实际加工中存在的问题,镜面厚度不能太小,最终选择镜面厚度为  $3\ \text{mm}$ 。针对到固体激光整形光路中的光斑大小,变形镜主要考虑  $15\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$  矩形区域内的拟合精度,兼顾整个面型上的拟合精度,镜面宽  $40\ \text{mm}$ ,高  $50\ \text{mm}$ 。下面通过有限元(FEA)仿真选择理想的推力盘接触位置  $F_p$ 、细梁宽度  $w_b$ 。

在 COMSOL 软件中建立柱面变形反射镜的有限元模型,镜面为宽  $40\ \text{mm}$ ,高  $50\ \text{mm}$  的矩形。镜面材料为纯铜,弹性模量  $110\ \text{GPa}$ ,泊松比  $0.35$ ,推力盘材料为  $316\text{L}$  不锈钢,弹性模量  $210\ \text{GPa}$ ,泊松比  $0.28$ 。为减小计算量,模型中只包括镜面与推力盘,如图4所示。

通过最小二乘法对仿真所得到的镜面面型中心  $30\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$  的区域用抛物柱面进行拟合,得到镜面变形后等效的抛物柱面。当镜面厚度  $3\ \text{mm}$ ,推力盘总推力  $200\ \text{N}$  时,结果如图5所示。可以看出镜面变形廓线近似为抛物线,与拟合的抛物柱面廓线差异很小。

将拟合抛物柱面的焦距定义为镜面变形后的焦距,仿真得到的面型与拟合面型相减得到拟合残差。由于镜面变形量越大焦距越短,因此选择相同推力下镜面焦距与拟合残差 PV 值的乘积作为目标函数,通过仿真对比了不同的推力盘圆柱面与镜面的接触位置  $F_p$ 、细梁宽度  $w_b$ 。

首先考察细梁宽度对镜面特性的影响。当推力  $500\ \text{N}$ ,推力盘接触位置  $F_p = 25\ \text{mm}$  时,细梁宽度  $w_b$  从

0.8 mm 变化到 4 mm, 目标函数变化如图 6 所示。可以看出细梁宽度取 1.4 mm 时, 镜面在较小的拟合残差下取得较大的变形量。此时镜面焦距变化至 634 mm, 15 mm×30 mm 区域内残差 PV 值 1.64 μm。

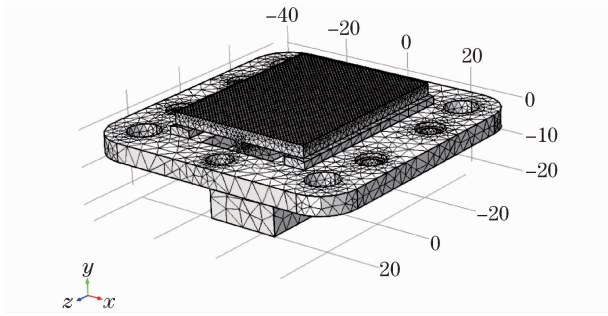


图 4 柱面变形反射镜有限元模型

Fig. 4 FEA model of cylinder deformable mirror

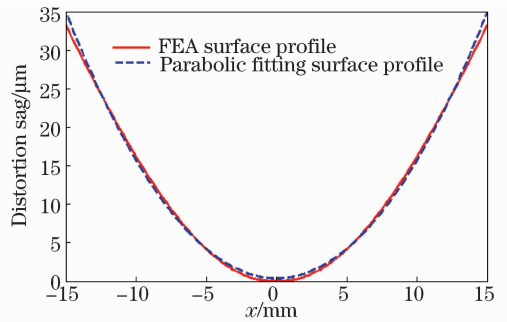


图 5 推力 200 N 时镜面矢高

Fig. 5 Mirror Sag at thrust 200 N

然后考察推力盘接触位置对镜面特性的影响。当推力 500 N, 细梁宽度  $w_b$  取 1.4 mm 时, 推力盘接触位置  $F_p$  从 15 mm 变化到 25 mm, 目标函数变化如图 7 所示。可以看出推力盘接触位置  $F_p$  取 18 mm 时, 镜面在较小的拟合残差下取得较大的变形量。此时镜面焦距变化至 927 mm, 15 mm×30 mm 区域内残差 PV 值 1.13 μm。

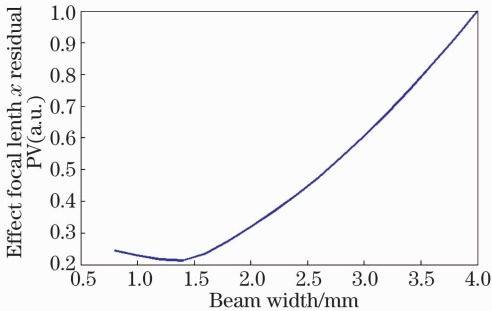


图 6 焦距与残差 PV 值的乘积随细梁宽度的变化

Fig. 6 Change of product of focal length and residual PV value to width of slender beam

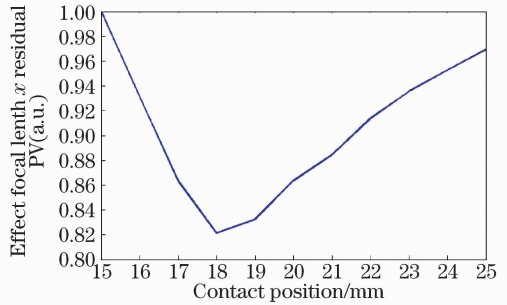


图 7 焦距与残差 PV 值的乘积随推力盘接触位置的变化

Fig. 7 Change of product of focal length and residual PV value to thrust plate contact position

根据上述结果, 在细梁宽度 1.4 mm, 推力盘接触位置 18 mm 时镜面拟合性能较好。在此条件下计算镜面焦距、拟合残差随推力的变化, 如图 8、图 9 所示。可以看出镜面焦距随推力增加由无穷远变化至 1 m 左右; 随着变形量的增大, 拟合残差 PV 值也增大, 在 15 mm×30 mm 的区域内小于 2 μm。

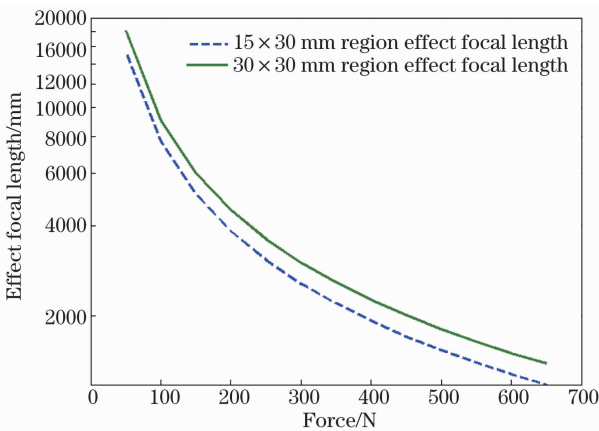


图 8 镜面拟合焦距随驱动器推力变化

Fig. 8 Change of focal length to actuator thrust

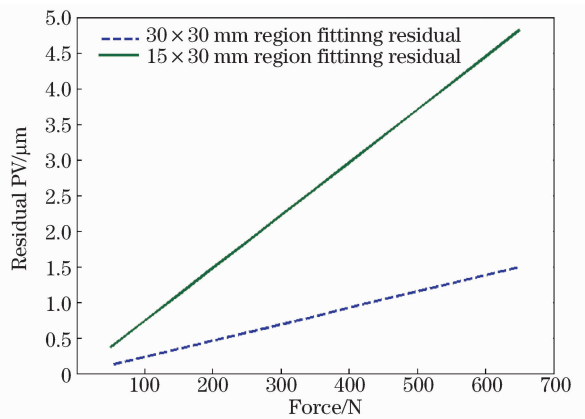


图 9 镜面拟合残差 PV 值随驱动器推力变化

Fig. 9 Change of residual PV value to actuator thrust

有限元仿真同时还给出了镜面变形时的应力分布情况, 镜面最大应力出现在下表面与细梁连接的位置, 如图 10 所示。由于纯铜属塑性材料, 采用 Von Mises 应力判断其是否发生失效<sup>[20]</sup>。当驱动器推力达到 550 N 时, 镜面最大 Von Mises 应力达到 185.23 MPa, 接近纯铜的极限应力 200 MPa, 如果继续增大推力, 镜面有

可能发生塑性变形从而失效。

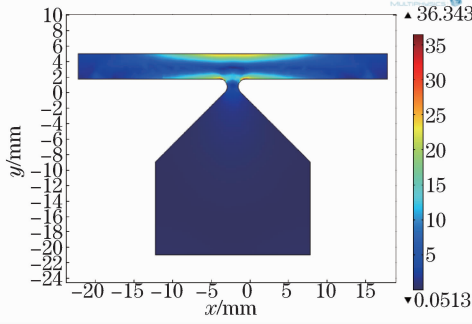


图 10 推力 200 N 镜面应力分布仿真结果(单位:MPa)

Fig. 10 Distribution of mirror stress at thrust 200 N (unit:MPa)

根据上述的仿真结果设计了实际的变形镜面,最终确定的镜面尺寸为厚度 3 mm,推力盘接触位置 18 mm,细梁宽度 1.4 mm。镜面在推力 550 N 时达到最大变形量,此时镜面在 15 mm×30 mm 区域内的焦距为 1.37 m,最大变形量 19.33 μm,拟合残差 1.37 μm。

### 4 实验研究

根据仿真结果选择的结构参数,设计加工了柱面变形反射镜样件。反射镜镜面采用无氧铜材料,通过单点金刚石机床加工将前表面加工成镜面;装夹等机械结构采用 316L 不锈钢加工。推力盘的推力通过两个压电陶瓷驱动器施加。镜面的面型通过 Zygo 干涉仪进行测量,测量结果如图 11 所示。

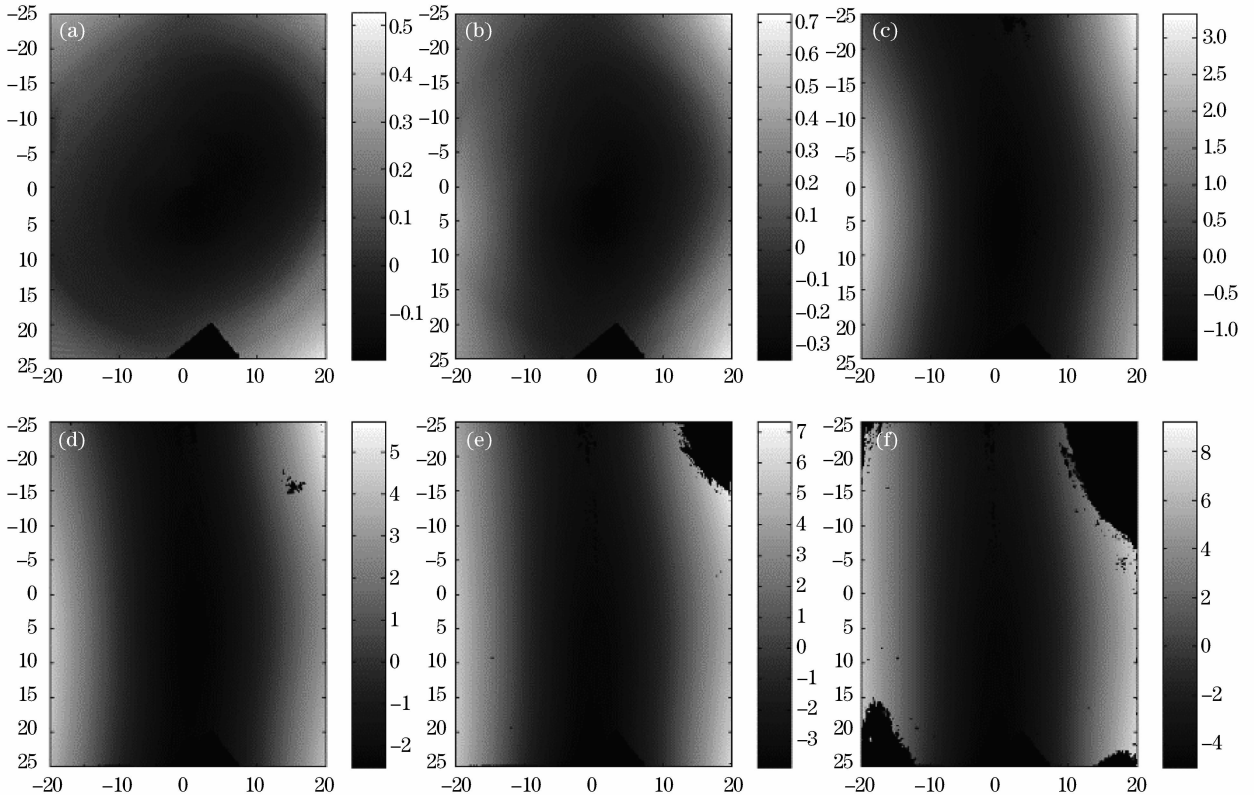


图 11 驱动电压(a) 0 V、(b) 2 V、(c) 4 V、(d) 6 V、(e) 8 V、(f) 10 V 时的面型

Fig. 11 Mirror surface at driver voltage of (a) 0 V、(b) 2 V、(c) 4 V、(d) 6 V、(e) 8 V、(f) 10 V

在驱动电压 0 V 时,推力盘与镜面未接触,此时镜面不受推力,面型如图 11(a) 所示。由于装夹过程中对镜面造成了一定应力,镜面初始面型带有一定的离焦,PV 值约 0.7 μm。增大压电陶瓷的驱动电压,驱动

器伸长,使推力盘前移,驱动电压约 2 V 时推力盘与镜面开始接触。继续增大驱动电压,镜面逐渐变化为抛物柱面。由于推力盘加工精度较低,与镜面并非完全平行,因此镜面受力不够均匀。对于图 11(e)、(f),当变形量较大时,由于镜面边缘处斜率较大,干涉条纹过密,超出了干涉仪的测量范围,因此缺失了一部分数据。

用抛物柱面对面型的测量结果进行拟合,并计算柱面焦距和拟合残差的 PV 值,如图 12、图 13 所示。考虑到柱面变形反射镜所应用的整形光路能够通过球面镜校正离焦,因此在拟合与残差计算中去除了离焦的影响。

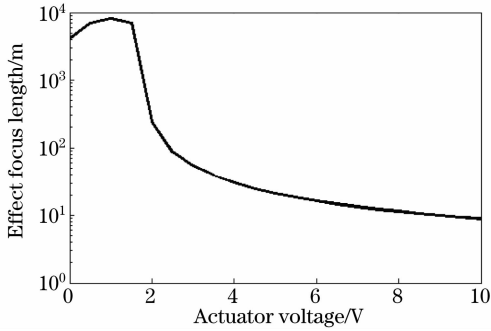


图 12 镜面焦距随驱动电压的变化

Fig. 12 Change of focal length to driver voltage

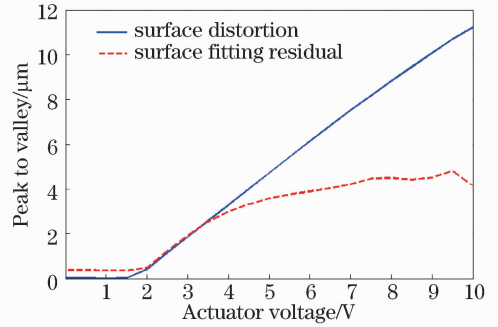


图 13 镜面变形量 PV 值,拟合残差 PV 值随驱动电压的变化

Fig. 13 Change of mirror distortion PV value and fit residual PV value to driver voltage

在驱动电压 2 V 以下,由于推力盘与镜面没有接触,镜面变形量很小,焦距变化不规律,近似为无穷远。随着电压的增大,推力盘与镜面开始接触,镜面变形量线性增大,焦距随之减小。由于镜面自身面型存在误差,且推力盘与镜面不完全平行,面型存在较大的拟合残差。在驱动电压较小时,推力盘与镜面接触不紧密,拟合残差不断变化。当电压增大到一定程度时,拟合残差 PV 值稳定在 4  $\mu\text{m}$  左右。受限于驱动器行程,变曲率柱面镜样件的变形量只能达到 11.2  $\mu\text{m}$ ,焦距从无穷远变化到 8.9 m。

与有限元仿真的结果对照,当驱动器推力约 102 N 时,仿真所得的镜面焦距为 8.9 m,拟合残差为 0.75  $\mu\text{m}$ 。实际镜面的拟合残差达到 4.1  $\mu\text{m}$ ,造成这一结果的主要原因是变形镜样件加工精度较低造成的。通过仿真得出此时镜面最大应力为 18.5 MPa,远小于无氧铜的极限应力 200 MPa,如果采用行程更大的驱动器,镜面变形量还有进一步提高的空间。

## 5 结 论

根据悬臂梁理论设计了一种用于校正低阶像差的柱面变形反射镜结构。通过有限元仿真优化了镜面的各结构参数,优化后的最大变形量达 19  $\mu\text{m}$ ,拟合残差小于 1.4  $\mu\text{m}$ 。依据优化得到的设计参数加工制作了柱面变形反射镜样件,并使用干涉仪对其面型和变形能力进行了检测。实验结果表明通过这一结构产生抛物柱面变形是可行的,使用现有的压电陶瓷驱动器时镜面变形量达到 11  $\mu\text{m}$ ,相比于目前大部分变形镜产品  $\pm 3$   $\mu\text{m}$  左右的行程有了一定的提高。在对镜面和机械结构进行精密加工的情况下,能够实现较小的拟合残差。相比于传统的连续表面分立驱动变形镜,这一结构仅使用两个压电驱动器,减小了系统的复杂度,并有利于避免印透效应,在高能激光的大行程低阶像差补偿应用中具有一定的优势。

现在制作的柱面变形反射镜样件还存在着一定的不足,由于镜面与装夹结构的加工和装配精度不足,镜面初始面型不够理想,变形后的面型相比理想抛物柱面的拟合残差比较大;两个驱动器的驱动电压与位移量未作标定,会导致镜面存在倾斜;现有驱动器行程较小,无法实现仿真中设计的变形量范围;现有干涉仪对大曲率面型的检测能力不足,需要改进检测光路。在下一步的设计和将着重提高样件的制作工艺,并研究相关的闭环控制技术。

## 参 考 文 献

- 1 Li Jinmin. Development trend and application of high average power diode pumped lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45

- (7): 16–29.
- 李晋闽, 高平均功率全固态激光器发展现状趋势及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(7): 16–29.
- 2 Wang Hui. Numerical simulation of thermal effect on beam quality[J]. Electronic Sci & Tech, 2010, 23(06): 14–18.  
王 慧. 热效应影响光束质量的数值模拟[J]. 电子科技, 2010, 23(06): 14–18.
- 3 Yang Sheng. Research of 500W solid-state laser beam quality[J]. Gansu Science and Technology, 2011, 27(12): 43–45.  
杨 晟. 500W 固体激光器光束质量的研究[J]. 甘肃科技, 2011, 27(12): 43–45.
- 4 Cai Jun, Zhang Xiaojuan, Xu Tao. Influence of thermal lens effect on output of solid state laser[J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(01): 15–17.  
蔡 军, 张晓娟, 徐 涛. 热透镜效应对固体激光器输出影响研究[J]. 光电技术应用, 2011, 26(01): 15–17.
- 5 Gatej A, Richmann A, Pütsch O, *et al.*. Thermo-Optical (TOP) analysis of transmissive elements for laser systems[C]. Proceedings of SPIE, 8490: 84900C.
- 6 Deng Qinghua, Zhang Xiaomin, Jing Feng, *et al.*. Scale length of optics low-frequency phase aberration[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(04): 508–510.  
邓清华, 张小民, 景 峰, 等. 光学元件低频位相噪声的空间尺度[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(04): 508–510.
- 7 Rooms F, Camet S, Curis J. Simultaneous correction of large low-order and high-order aberrations with a new deformable mirror technology [C]. Proceedings of SPIE, 7550: 755027.
- 8 Lefaudeux N, Lavergne E, Monchoce S, *et al.*. Diffraction limited focal spot in the interaction chamber using phase retrieval adaptive optics [C]. Proceedings of SPIE, 8960: 89601R.
- 9 Imagine Optic- ILAO™ Deformable Mirror for Intense Laser Adaptive Optics[EB/OL]. [2015-7-8] [http://www.imagine-optic.com/iop\\_products\\_adaptive-optics\\_ILAO-intense-laser-adaptive-optics-deformable%20mirror\\_en.php](http://www.imagine-optic.com/iop_products_adaptive-optics_ILAO-intense-laser-adaptive-optics-deformable%20mirror_en.php).
- 10 Hu Shijie. The Study of Technology of the Adaptive Optics for All Path Aberration Correction and Double Deformable Mirrors Adaptive Optics[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.  
胡诗杰. 全光路像差校正自适应光学技术和双变形镜自适应光学技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- 11 Hu Shijie, Xu Bing, Wu Jian, *et al.*. Aberration decoupling analysis for double deformable mirrors adaptive optical System[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1687–1692.  
胡诗杰, 许 冰, 吴 健, 等. 双变形镜自适应光学系统像差解耦研究[J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1687–1692.
- 12 Lei X, Wang S, Yan H, *et al.*. Double-deformable-mirror adaptive optics system for laser beam cleanup using blind optimization[J]. Opt Express, 2012, 20(20): 22143–22157.
- 13 Guo Jianzeng, Liu Tiegeng, Wang Zhenhua, *et al.*. Method for lower order aberration correction based on beam shaping[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(8): 1797–1800.  
郭建增, 刘铁根, 王振华, 等. 基于整形光路的低阶像差校正方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(08): 1797–1800.
- 14 Liu W, Zhou Q, Feng F, *et al.*. Active compensation of low-order aberrations with reflective beam shaper[J]. Optical Engineering, 2014, 53(9): 096103.
- 15 Vdovin G, Soloviev O, Loktev M, *et al.*. Optimal correction and feedforward control of low-order aberrations with piezoelectric and membrane deformable mirrors[C]. Proceedings of SPIE, 8165: 81650W.
- 16 Wei B, Liu W, Xie K, *et al.*. Dependence of the influence function on laser-induced thermoelastic deformation of deformable mirrors[C]. Proceedings of SPIE, 9255: 925535.
- 17 Wei B, Liu W, Xie K, *et al.*. Analysis on laser-induced thermoelastic deformation of DMs[C]. Proceedings of SPIE, 9266: 926608.
- 18 Xue Q, Huang L, Yan P, *et al.*. Research on the particular temperature-induced surface shape of a national ignition facility deformable mirror[J]. Appl Opt, 2013, 52(2): 280–287.
- 19 Young W C, Budynas R G. Roark's Formulas for Stress and Strain Seventh Edition[M]. New York, : McGraw-Hill, 2002.
- 20 Fan Qinsan, Yin Yajun. Material Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Publisher, 2008.  
范钦珊, 殷雅俊. 材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

栏目编辑: 韩 峰