

压电陶瓷驱动器疲劳特性对变形镜校正能力的影响

罗帅**, 王家秋, 张彬*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 基于变形镜(DM)的影响函数,采用有限元方法对波前校正过程进行了数值模拟,分析了压电陶瓷(PZT)驱动器的疲劳特性对变形镜校正能力的影响。研究表明,在压电陶瓷驱动器产生疲劳后,变形镜校正能力下降。待校正畸变波前的峰谷值越大或空间高频成分比例越高,变形镜在驱动器疲劳后的校正能力下降得越明显,且受前者影响更大。

关键词 光学器件; 疲劳特性; 有限元分析; 压电陶瓷; 光束质量; 校正能力

中图分类号 TP273.2; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0905002

Influence of Fatigue Characteristics of Piezoelectric Ceramics Actuators on Correction Ability of Deformable Mirror

Luo Shuai**, Wang Jiaqiu, Zhang Bin*

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract Based on the influence functions of the deformable mirrors (DMs), the wavefront correction process is simulated by the finite element method and the influence of the fatigue characteristics of piezoelectric ceramics (PZT) actuators on the correction ability of DMs is analyzed. The research results show that the correction ability of DMs decreases when the phenomenon of the fatigue occurs in PZT actuators. The larger the peak-valley value of the distorted wavefront to be corrected or the higher the proportion of the spatial high-frequency components is, the more obvious of the decrease of the correction ability of DMs after the occurrence of fatigue is. In addition, the influence from the former is relatively larger.

Key words optical devices; fatigue characteristics; finite element analysis; piezoelectric ceramics; beam quality; correction ability

OCIS codes 230.4040; 010.1080; 110.1080; 220.1080

1 引言

在高功率激光系统中,受腔镜失调、面形误差和激光热效应等因素^[1-3]的影响,激光器输出光束的波前往往存在畸变,光束质量降低。自适应光学技术^[4]是改善高功率激光器输出光束质量的有效手段之一。然而,在波前校正过程中,受到驱动器的长期循环驱动作用,变形镜(DM)的镜面会产生疲劳,并逐渐出现疲劳累积损伤^[5]。因此,变形镜对畸变波前的校正能力也受到影响,经校正后的光束质量也会下降。

在各类变形镜中,压电式变形镜因其具有响应

速度快、分辨率高、技术成熟等特点,在自适应光学领域得到了广泛应用^[6]。作为压电式变形镜的关键部件之一,压电陶瓷(PZT)驱动器通常在交变电场下服役,并在多场(电场、力场、温度场等)耦合情况下工作^[7]。PZT材料的电疲劳已成为影响变形镜性能的主要因素之一,主要表现为极化强度、矫顽场强及压电系数等电学参数发生变化^[8],驱动器的压电性能下降。王伟强等^[8]测得PZT材料的极化强度随着交变电场反转次数的增加而降低,在经过 2.6×10^6 次驱动器电压循环后,其压电常数数值也明显下降。Sakat等^[9]发现,A型系列压电陶瓷(PZT-A)在 10^8 次驱动器电压循环后,机电耦合系

收稿日期: 2018-01-29; 修回日期: 2018-04-11; 录用日期: 2018-05-03

基金项目: 苏州大学省级重点实验室开放课题(KSJ1404)、天津市薄膜光学重点实验室开放基金课题(KJWX170620)

* E-mail: zhangbinff@sohu.com; ** E-mail: 529951343@qq.com

数从初始约 0.65 下降至 0.5,但相对介电常数变化不大。Levstik 等^[10]研究发现,锆钛酸铅镧(8/65/35)材料在经过 2×10^4 次驱动器电压循环后,介电常数、压电常数及机电耦合系数均开始下降。本文基于 PZT 的疲劳特性,借鉴文献[9]中 PZT 材料的疲劳实验结果,利用变形镜的影响函数及有限元分析软件 ANSYS,仿真模拟了驱动器疲劳前后变形镜校正畸变波前的过程,定量分析和讨论了 PZT 驱动器电疲劳特性对变形镜校正能力的影响。

2 基本原理

2.1 变形镜的影响函数模型

变形镜受到各驱动器的共同作用,产生相应的形变,对畸变波前进行校正,其校正性能主要由影响函数^[11]决定。影响函数表示仅由单一驱动器驱动时镜面所产生的面形,其归一化形式为

$$I_i(x, y) = \exp \left[\ln b \cdot \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{d^2} \right], \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (1)$$

式中 (x_i, y_i) 为第 i 个驱动器的位置坐标; d 为驱动器的间距; b 为交连值。当 n 个驱动器同时作用时,变形镜面形 $W(x, y)$ 为每个驱动器作用产生的镜面面形的加权线性叠加,即

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i \cdot I_i(x, y), \quad (2)$$

式中权值 V_i 为第 i 个驱动器的等效控制电压。

假设待校正波前为 $\phi(x, y)$,则经变形镜校正后残余波前为

$$R(x, y) = \phi(x, y) - \sum_{i=1}^n V_i \cdot I_i(x, y). \quad (3)$$

采用最小二乘法对畸变波前进行拟合^[12],以残余波前 $R(x, y)$ 作为目标函数,使其方差取极小值,即可得到变形镜各驱动器的控制电压矩阵。

2.2 逆压电效应

在压电式变形镜中,当在 PZT 材料表面施加电场时,材料内的电偶极矩会因电场的作用而被拉长。压电材料为抵抗这种变化,也会沿着电场方向伸长,这种通过电场作用而产生形变的过程被称为“逆压电效应”。在实际系统中,PZT 驱动器往往由多层反方向极化的压电片堆叠而成。理想情况下,单个压电片在电场下沿极化方向产生的形变^[13]为

$$\Delta l = d_{33} U, \quad (4)$$

式中 d_{33} 为沿厚度方向极化的压电系数,表征压电材料将机械能和电能相互转换的能力,反映压电材

料弹性(机械)性能与介电性能之间的耦合关系; U 为外加电压,则单个驱动器产生的形变量为

$$L = N d_{33} U, \quad (5)$$

式中 N 为单个驱动器压电陶瓷片的层数。

根据文献[14]中的材料参数,采用有限元分析方法,对 PZT 驱动器的静态工作性能进行仿真计算,得到了与文献[14]一致的结果。

2.3 变形镜模型

以 61 单元分立式连续表面变形镜为例,其由镜面、极头、驱动器以及基座 4 部分组成,基本结构如图 1 所示。极头为变形镜镜面与驱动器之间的连接单元,其材料与镜面相同,为 Si,其密度为 $2329 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,杨氏模量为 130.91 GPa,泊松比为 0.266。驱动器的材料为 PZT-5A,沿厚度方向极化,其机电耦合系数为 65%,压电常数为 $2.23 \times 10^{-10} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$,相对介电常数为 $3000 \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[9]。驱动器采用叠堆型结构,由多层反方向极化的压电陶瓷片堆叠而成,其中负极接地。变形镜直径为 220 mm,长度为 2.5 mm;极头直径为 8 mm,长度为 10 mm,间距为 25 mm。

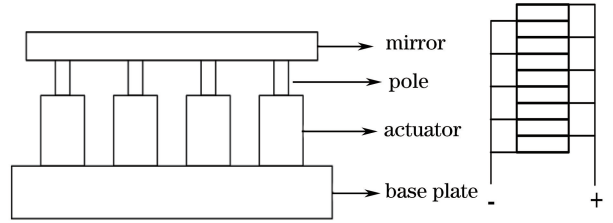


图 1 变形镜的基本结构

Fig. 1 Fundamental structure of DM

3 PZT 疲劳特性对变形镜校正能力的影响

利用随机相位屏^[15]构建畸变波前,并基于变形镜的影响函数模型,采用最小二乘法对畸变波前进行拟合,得到变形镜各驱动器的驱动电压。利用有限元分析方法对理想变形镜进行耦合场分析,得到变形镜对畸变波前的拟合面形,从而得到理想变形镜对畸变波前校正的残余波前及对应的校正光束质量。当 PZT 电学参数发生变化(驱动器疲劳)后,由于变形镜驱动器的控制电压不变,受驱动器影响的变形镜的驱动位移发生变化,导致变形镜的拟合面形发生变化,进而使残余波前发生变化。利用所得到的残余波前,分析了波前畸变的超高斯光束经变形镜校正后产生的光束质量退化问题。仿真流程如图 2 所示。

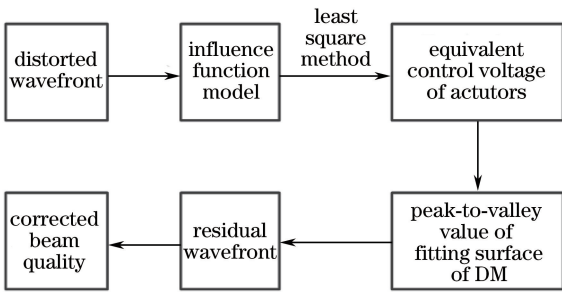


图 2 仿真流程
Fig. 2 Flow chart of simulation

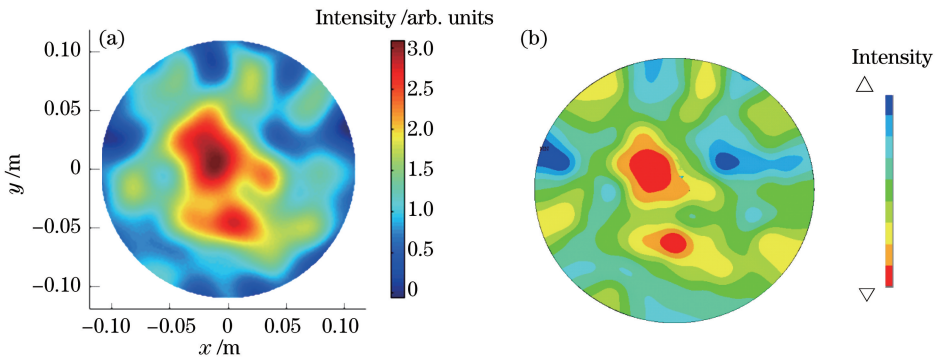


图 3 畸变波前与拟合面形。(a)畸变波前;(b)仿真得到的变形镜的理想拟合面形
Fig. 3 Distorted wavefront and fitted surface shape. (a) Distorted wavefront;
(b) ideal fitted surface shape of DM obtained by simulation

当驱动电压循环达到 10^6 次时,机电耦合系数明显下降;当驱动电压循环达到 10^8 次时,机电耦合系数下降约 23%^[9]。在相同的驱动电压下,利用有限元分析软件计算得到变形镜在疲劳后的拟合面形

3.1 PZT 疲劳特性对变形镜校正性能的影响

畸变波前如图 3(a) 所示,其峰谷(PV)值为 $3.18 \mu\text{m}$ 。计算中,截止频率 $\Delta\nu = 0.02 \text{ mm}^{-1}$ (对应驱动器间距为 25 mm),将波前中空间频率高于 $\Delta\nu$ 的部分划分为高频成分,占比为 2.73%。仿真计算得到理想变形镜的拟合面形如图 3(b)所示,拟合面形的 PV 值为 $2.86 \mu\text{m}$ 。

由图 3 可知,拟合得到的变形镜面形分布与待校正波前分布基本一致,也与文献[5]中计算结果一致,说明了该方法能有效地模拟变形镜的校正过程。

PV 值为 $1.86 \mu\text{m}$,小于理想变形镜的拟合面形 PV 值($2.86 \mu\text{m}$),表明当驱动器产生疲劳后,变形镜对畸变波前的拟合效果变差。变形镜在疲劳前后校正的残余波前如图 4 所示。

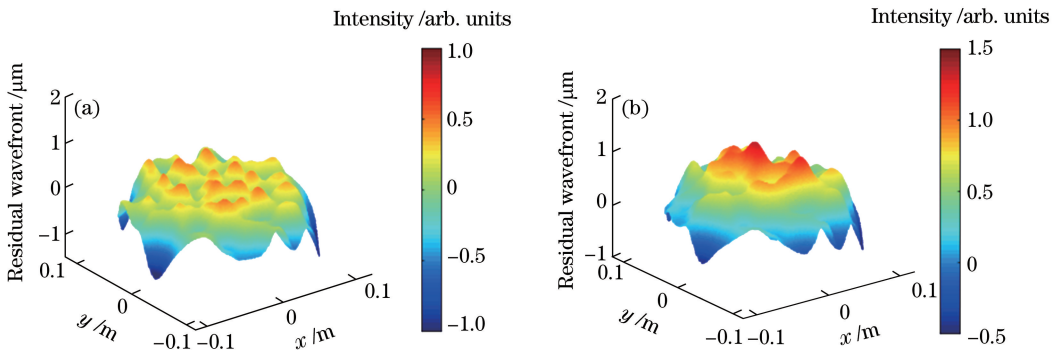


图 4 驱动器疲劳产生前后变形镜校正的残余波前。(a)前;(b)后

Fig. 4 Residual wavefronts corrected by DM before and after occurrence of fatigue in actuators. (a) Before; (b) after

由图 4 可知,在驱动器产生疲劳前,变形镜校正得到的残余波前 PV 值为 $0.91 \mu\text{m}$;在驱动器产生疲劳后,变形镜校正得到的残余波前 PV 值为 $1.48 \mu\text{m}$ 。据此可推断,PZT 驱动器疲劳后,变形镜对畸变波前校正的校正性能将变差。

3.2 PZT 疲劳特性对变形镜校正后光束质量的影响

采用光束质量因子 β (实际光束的远场发散角与理想光束的远场发散角之比)来表征波前畸变的超高斯光束经变形镜校正后的光束质量^[16]。对于理想光斑, $\beta = 1$ 。 β 越小,光束质量越好。

当畸变波前形态一致而 PV 值不同时,在 PZT 驱动器疲劳前后(电压循环 10^8 次后),具有波前畸

变的超高斯光束经变形镜校正后的残余波前的 PV 值及其对应的光束质量因子 β 见表 1。

表 1 不同畸变波前 PV 值下驱动器疲劳前后变形镜的校正性能和校正后的光束质量对比

Table 1 Correction performances of DM before and after occurrence of fatigue in actuators under different PV values of distorted wavefront and quality comparison of corrected beams

Parameter of correction ability	3.18 μm		6.63 μm		9.54 μm	
	Before fatigue	After fatigue	Before fatigue	After fatigue	Before fatigue	After fatigue
PV value of fitting surface / μm	2.86	1.86	5.72	3.72	8.59	5.58
PV value of residual wavefront / μm	0.91	1.48	1.82	2.97	2.72	4.46
β	1.08	1.14	1.16	2.11	2.42	3.21

由表 1 可知,对于给定的畸变波前,在驱动器产生疲劳后,变形镜拟合面形的 PV 值减小,导致校正后光束的残余波前的 PV 值变大, β 因子增大,表明在驱动器产生疲劳后,变形镜校正后光束的质量退化,变形镜校正能力降低。此外,随着入射光束畸变波前 PV 值的增大,校正后光束的残余波前的 PV 值及其 β 因子也随之增大。由此可见,当畸变波前

中高频成分占比较大时,变形镜校正畸变波前的难度增大。

当畸变波前形态与 PV 值不变,但面形包含的高频成分占比不同时,在 PZT 驱动器疲劳前后(电压驱动 10^8 次后),波前畸变的超高斯光束经变形镜校正后的残余波前的 PV 值及其对应的光束质量因子 β 见表 2。

表 2 不同面形高频成分占比下驱动器疲劳前后变形镜的校正性能和校正后的光束质量对比

Table 2 Correction performances of DM before and after occurrence of fatigue in actuators under different proportions of surface shape high frequency and quality comparison of corrected beams

Parameter of correction ability	0.31%		1.90%		3.61%	
	Before fatigue	After fatigue	Before fatigue	After fatigue	Before fatigue	After fatigue
PV value of fitting surface / μm	5.94	3.53	5.72	3.72	5.33	3.28
PV value of residual wavefront / μm	1.58	2.72	1.82	2.97	2.05	3.20
β	1.10	1.92	1.16	2.11	1.38	2.41

由表 2 可知,当初始畸变波前一定时,在驱动器产生疲劳后,变形镜拟合面形的 PV 值减小,导致校正后光束的残余波前 PV 值变大,光束质量因子 β 增大,这与前面的结论一致。对比表 1 可知,PZT 驱动器在产生疲劳后,畸变波前 PV 值的增大比高频成分占比的增大对变形镜校正能力的影响更大。但畸变波前高频成分占比越多,变形镜表面的应力

集中现象也越明显,会加速累积变形镜的疲劳损伤,即达到相同疲劳程度所需的时间越短^[5]。

图 5(a)所示为文献[9]中对 PZT-A 的疲劳实验结果,图 5(b)所示为 PZT 驱动器疲劳程度与变形镜校正能力(校正后光束质量)间的关系曲线,其中畸变波前形态与图 3(a)中的一致,PV 值为 $6.38 \mu\text{m}$ 。

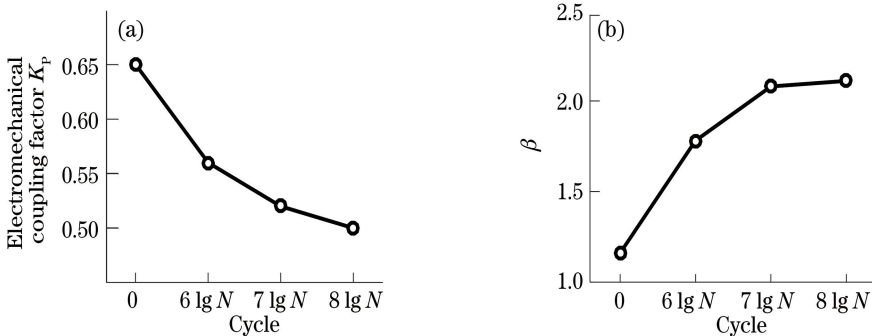


图 5 疲劳程度变化曲线。(a)机电耦合系数^[9]; (b)变形镜校正后光束质量

Fig. 5 Curves of fatigue degree. (a) Electromechanical coupling factor^[9]; (b) beam quality after DM correction

由图 5(a)可知,当 PZT 材料的驱动电压循环达到 10^6 次时,其机电耦合系数明显下降,并随着循环次数的增加而逐渐减小。对应图 5(b),随着循环次数的增加,变形镜校正后的光束质量逐渐变差,即变形镜的校正能力逐渐降低。

4 结 论

利用有限元分析方法,模拟了变形镜校正畸变波前的过程,并结合 PZT 驱动器的疲劳特性,分析了驱动器产生疲劳后对变形镜校正畸变波前能力,以及对校正后激光光束质量的影响。研究结果表明:当 PZT 驱动器产生疲劳后,变形镜的拟合面形 PV 值减小,残余波前变大,校正后光束质量变差,变形镜校正能力降低;畸变波前 PV 值或高频成分占比增大,残余波前变大,校正后光束质量变差,变形镜校正能力降低;畸变波前 PV 值的增大对疲劳后变形镜的校正能力及校正后光束质量的影响较大。此外,变形镜的校正能力随着驱动器电压循环次数的增加而逐渐降低。

参 考 文 献

- [1] Zhang Z B, Jin Y Q, Sang F T, *et al.* Beam quality investigation on misalignment and surface-shape error of cavity mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4): 491-494.
张增宝,金玉奇,桑凤亭,等.腔镜失调与面型误差对光束质量影响研究[J].*强激光与粒子束*, 2005, 17(4): 491-494.
- [2] Hu X C, Wang D, Chen L X, *et al.* Effect analysis of self-correction method based on the prediction model of deformable mirror with thermal deformation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1202001.
胡小川,王度,陈丽霞,等.基于变形镜热形变预估模型的自校正效果分析[J].*中国激光*, 2015, 42(12): 1202001.
- [3] Zhang X, Su L K, Cai Q. Analysis of thermal effect and experimental test of beam wavefront aberration in all solid-state Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 802-807.
张翔,苏礼坤,蔡青.全固态 Nd:YAG 激光器热效应及输出光束波前像差分析[J].*光学学报*, 2010, 30(3): 802-807.
- [4] Guo G Y, Fan Z W, Yu J, *et al.* Solid-state laser distortion wavefront adaptive correction technology and its research progress[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 030001.
郭广妍,樊仲维,余锦,等.固体激光器波前畸变自

适应校正技术及研究进展[J].*激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 030001.

- [5] Chen L X, Hu X C, Zhang B, *et al.* Fatigue damage characteristics deformable mirrors for wavefront correction [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1105002.
陈丽霞,胡小川,张彬,等.波前校正变形镜的疲劳损伤特性[J].*中国激光*, 2016, 43(11): 1105002.
- [6] Qiao R J, Chen M S. Research of DM in adaptive optics [J]. *Electronic Design Engineering*, 2010, 18(3): 74-75.
乔瑞杰,陈名松.自适应光学中变形镜的研究[J].*电子设计工程*, 2010, 18(3): 74-75.
- [7] Yang G, Yue Z X, Li L T. Research progress on the characteristics and mechanism of applied field-induced fatigue in piezoelectric ceramics[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2007, 22(1): 1-6.
杨刚,岳振星,李龙土.压电陶瓷场致疲劳特性与机理研究进展[J].*无机材料学报*, 2007, 22(1): 1-6.
- [8] Wang W Q. Study on field-induced fatigue and nonlinearity of piezoelectric ceramics [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007: 4-29.
王伟强.压电陶瓷的场致疲劳与非线性研究[D].北京:清华大学, 2007: 4-29.
- [9] Sakai T, Ishikiriya M, Shimazaki R. Durability of piezoelectric ceramics for an actuator [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31(9B): 3051-3054.
- [10] Levstik A, Bobnar V, Kutnjak Z, *et al.* Fatigue and piezoelectric properties of lead lanthanum zirconate titanate ceramics[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1998, 31(20): 2894-2897.
- [11] Ma X M, Han K, Zhang B. Prediction for wavefront correction effect of discrete deformable mirror based on filter function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0101002.
马雪梅,韩开,张彬.基于滤波函数的分立变形镜波前校正效果预估[J].*光学学报*, 2014, 34(1): 0101002.
- [12] Tyson R K, Byrne D M. The effect of wavefront sensor characteristics and spatiotemporal coupling on the correcting capability of a deformable mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 1980, 228: 21-25.
- [13] Lin X D, Liu X Y, Wang J L, *et al.* Progress of the continuous surface deformable mirror based on piezoceramic actuator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 090003.
林旭东,刘欣悦,王建立,等.基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展[J].*激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 090003.
- [14] Hui W A, He Z L. Modeling and analysis of

- laminated-type piezoelectric actuator based on finite element[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2010(5): 20-23.
- 惠伟安, 何再龙. 积层式压电驱动器的有限元建模分析[J]. 流体传动与控制, 2010(5): 20-23.
- [15] Chen L X, Hu X C, Han K, *et al.* Improvement method for fitting high-frequency phase by Zernike polynomials[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0314001.
- 陈丽霞, 胡小川, 韩开, 等. Zernike 多项式对空间高频相位拟合的改进方法[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0314001.
- [16] Gao W. Definition of laser beam quality β -factor[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(9): 1038-1040.
- 高卫. 激光束衍射极限倍数 β 的确定方法[J]. 光子学报. 2003, 32(9): 1038-1040.