

# 方口径压电薄膜变形镜夹持应力控制研究

王德恩<sup>1</sup> 代万俊<sup>1</sup> 张军伟<sup>1,2</sup> 胡东霞<sup>1</sup> 李小群<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)  
<sup>2</sup> 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

**摘要** 基于有限元方法,以三点夹持为例,对压电薄膜变形镜(PFDM)的工作特性进行了仿真分析,发现变形镜与镜框之间因夹持带来的接触应力会导致镜面变形与电压之间呈现非线性变化。针对这一问题,提出了两种改进方式,仿真结果表明,两种改进方式均能够有效改善变形镜的非线性响应问题。

**关键词** 自适应光学;压电薄膜变形镜;夹持方式;有限元方法

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.012203

## Position-Setting Stress Control of the Square-Aperture Piezoelectricity Film Deformable Mirror

Wang Deen<sup>1</sup> Dai Wanjun<sup>1</sup> Zhang Junwei<sup>1,2</sup> Hu Dongxia<sup>1</sup> Li Xiaoqun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*  
<sup>2</sup> *College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

**Abstract** Based on finite element method, simulation about the property of piezoelectricity film deformable mirror (PFDM) under three-point position-setting is done. The results show that the contact between mirror and frame can cause nonlinear response. For solving this problem, two methods are proposed. Simulation results show that both of them can weaken the nonlinear response.

**Key words** adaptive optics; piezoelectricity film deformable mirror; position-setting manner; finite element method

**OCIS codes** 220.1080; 230.4040; 080.1005

## 1 引言

双压电片变形镜(BDM)是众多变形镜中的一种,具有动态范围大、结构简单、激光辐照破坏阈值高、易做到高的电极密度等优点,已广泛应用于国内外的大型激光装置<sup>[1,2]</sup>。压电薄膜变形镜(PFDM)结构与BDM类似,只有一层压电层,不具备离焦层,但其能反映BDM的性能,有助于BDM研究的开展。

夹持方式是影响变形镜性能的一个重要因素。PFDM在结构上与传统的压电堆驱动的变形镜不同,压电堆驱动的变形镜每一个驱动器都与镜面粘结,因此每一个驱动器就相当于一个支撑结构,这就相对放松了对镜框夹持的要求。而PFDM背后没有任何支撑结构,它的稳定性完全依赖于镜框的夹持。恰当的夹持方式不仅要充分保证镜面的稳定性,还应将其对变形镜所造成的不利影响降到最低。目前,国内外对该类变形镜的研究主要集中在电极排布<sup>[3,4]</sup>、响应函数分析<sup>[5,6]</sup>、性能测试<sup>[7]</sup>及实际应用<sup>[2]</sup>等方面,关于其夹持方式的研究尚未见报道。

本文针对方口径、方电极PFDM,通过有限元方法分析对比了三点夹持、整圈夹持两种夹持方式对变形镜响应函数所带来的影响,提出了解决方案并验证了方案的可行性。

**收稿日期**: 2011-09-01; **收到修改稿日期**: 2011-09-19; **网络出版日期**: 2011-10-30

**作者简介**: 王德恩(1986—),男,硕士研究生,主要从事高功率激光传输以及光束质量控制等方面的研究。

E-mail: sduwde@126.com

**导师简介**: 李小群(1952—),男,研究员,主要从事高功率固体激光装置电气控制方面的研究。

E-mail: lixiaoqun229@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

## 2 模型的建立

基于 ANSYS 软件建立了 PFDM 模型,模型在厚度  $Z$  方向上分为玻璃层、粘结层和压电层,模型电极数目设置为 16 个,如图 1 所示。整个变形镜模型尺寸为  $75\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ ,红色为电极,其尺寸为  $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ,边缘间隔为  $3\text{ mm}$ ,电极编号如图 1 中标示。只考虑主要因素,对与镜子接触的镜框部分建立了相应模型,如图 1 中蓝色所示,在夹持位置处设置变形镜与镜框的接触对。模型中除了镜面与镜框之间的接触,其他部分均做了粘结处理,整个变形镜为一个整体。

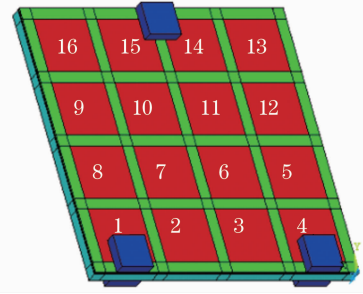


图 1 PFDM 有限元模型示意图

Fig. 1 Finite element model of PFDM

为了更有效地对比说明夹持方式的影响,夹持点的设置相比于实际值偏大,且将夹持模型外表面的  $Z$  向位移约束为 0,整个分析过程都忽略了压电迟滞效应的影响。这一系列近似导致模型与实际情况略有差别,但不影响问题的本质,为问题的分析带来了极大的便利。

## 3 仿真分析

### 3.1 变形镜非线性响应的评价参数

假定变形镜电极  $i$  在施加不同电压  $V_1, V_2$  时的镜面变形分别为  $W_1(x, y), W_2(x, y)$ , 定义电极随电压线性响应的描述参数

$$K = \frac{V_2}{V_1} W_1(x, y) - W_2(x, y). \quad (1)$$

若镜面变形随电压呈线性变化,则  $K = 0$ ,反之,则  $K \neq 0$ 。以  $K$  的峰谷值,即  $K_{P-V}$  描述电极的非线性响应情况,其值越大,表明线性度越差,反之,线性度越好。

### 3.2 三点夹持方式下面形随电压的变化

一般来讲,PFDM 的控制电压范围为  $-400 \sim 600\text{ V}$ ,若电压幅值过高,容易发生退极化或极化反转情况,因此所选电压值应位于上述范围,这里以中间值作为研究对象。以 1 号电极为例,对电极分别施加  $-200, 300\text{ V}$  电压,变形镜的面形分布分别如图 2(a), (b) 所示。利用(1)式求得  $K$  值,  $K$  的分布如图 2(c) 所示,  $K_{P-V} = 0.4\lambda$  ( $\lambda$  为光波长)。将电压分别调整为  $-100, 150\text{ V}$ ,重复上述计算过程,得到面形以及  $K$  的分布如图 3 所示,此时  $K_{P-V} = 0.2\lambda$ 。综合分析两种情况,发现  $K$  值均不为零,说明当电压发生正负跳变时,变形镜面形变化并非线性。

在同向电压下对变形镜面形进行对比,如图 4 所示。图 4(a) 为施加  $-50, -200\text{ V}$  电压时变形镜面形间的  $K$  值;图 4(b) 为施加  $150, 300\text{ V}$  电压时变形镜面形间的  $K$  值。两种情况下,  $K_{P-V}$  的值均在  $10^{-5}\lambda$  量级,可忽略,说明电压同向变化时,面形与电压之间呈线性变化。

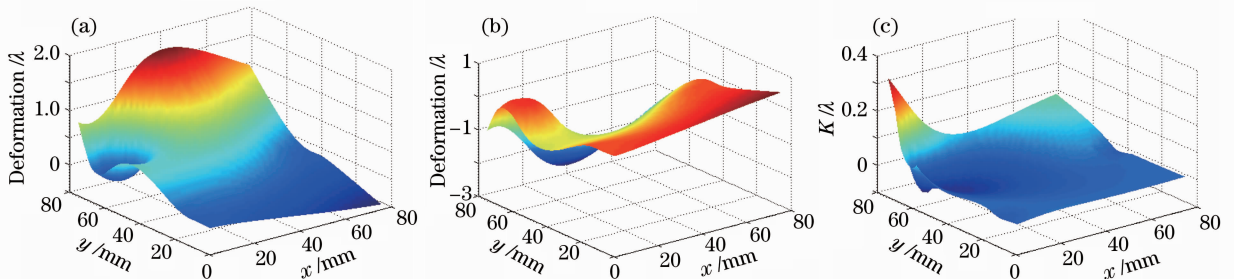


图 2 1 号电极施加不同电压时所产生的面形分布及  $K$  值。(a)  $-200\text{ V}$  时的变形镜面形;(b)  $300\text{ V}$  时的变形镜面形;(c)  $K$  值分布

Fig. 2 Deformation and  $K$  value when different voltages are applied to the electrode 1. (a) Deformation with  $-200\text{ V}$ ; (b) deformation with  $300\text{ V}$ ; (c)  $K$  value

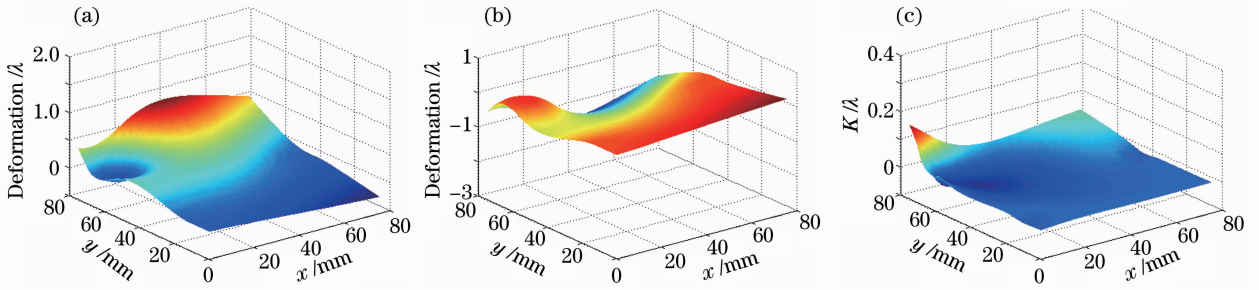


图 3 1 号电极施加不同电压时所产生的面形分布及  $K$  值。(a)  $-100$  V 时的变形镜面形;(b)  $150$  V 时的变形镜面形;  
(c)  $K$  值分布

Fig. 3 Deformation and  $K$  value when different voltages are applied to the electrode 1. (a) Deformation with  $-200$  V;  
(b) deformation with  $300$  V; (c)  $K$  value

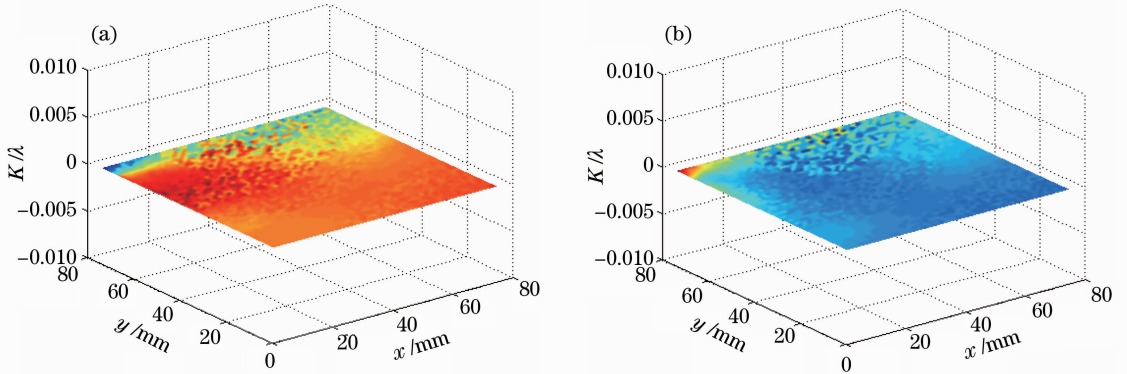


图 4 同极性电压下面形面形的  $K$  值分布。(a)  $-50$ ,  $-200$  V 电压下面形的  $K$  值;(b)  $150$ ,  $300$  V 电压下面形的  $K$  值  
Fig. 4  $K$  values with the same voltage polarity. (a)  $K$  value with  $-50$  and  $-200$  V; (b)  $K$  value with  $150$  and  $300$  V

选取变形镜的一个固定位置作为研究对象,对 1 号电极分别施加不同的电压,得到该位置处变形量与电压的关系如图 5 所示。从图中可以发现,曲线在电压为 0 处存在折点,也就是说发生正负电压跳变时,变形镜的面形随电压出现了非线性响应。

选取电极在  $-200$ ,  $300$  V 两个电压下的  $K_{P-V}$  值作为特征量,对 16 个电极进行分析,结果如图 6 所示。圆点表示全口径下的  $K_{P-V}$ ,方点表示除去夹持位置后,内部面形的  $K_{P-V}$ 。从图 6 可以看出,1、4 号电极的非线性响应最为强烈,而这两个电极恰好位于夹持位置,而与三个夹持位置综合距离最远的 6、7 号电极的非线性响应最弱。

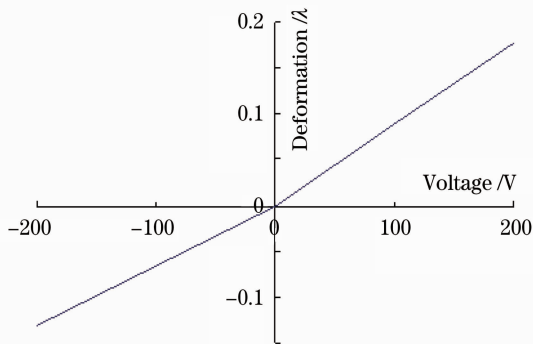


图 5 变形镜变形量随 1 号电极电压的变化情况  
Fig. 5 Relation between deformation and voltage

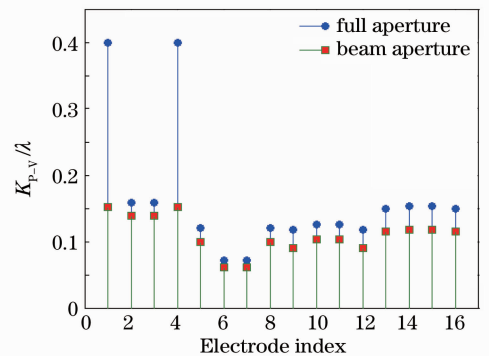


图 6 16 个电极分别施加  $-200$ ,  $300$  V 电压载荷下的  $K_{P-V}$  分布

Fig. 6  $K_{P-V}$  values of the 16 electrodes with  $-200$  and  $300$  V

### 3.3 改进方式

通过上面的分析可知,镜面与镜框之间的接触应力导致了面形随电压的非线性变化,且与夹持点距离越近,非线性响应越严重。基于此,提出两种改进模型:镜面扩展模型,可使夹持位置远离变形镜的实际工作位置,紧约束模型,可以避免镜面与镜框之间的接触应力。

#### 3.3.1 镜面扩展模型

将变形镜的玻璃层进行扩展,使夹持点远离变形镜的实际使用区域。以三点夹持为例,所设计的新的变形镜模型如图7所示,玻璃层在图中用蓝绿色表示。

沿用上面所提的分析方法,对16个电极分别施加一

200,300 V电压,计算 $K_{P-V}$ 值分布,如图8所示。从图8中可以看到 $K_{P-V}$ 明显变小,尤其是除去夹持点后的口径内部 $K_{P-V}$ 值大约减小了1个量级,平均为 $0.0197\lambda$ ,这在自适应光学的实际应用中基本可以忽略。

边缘扩展的变形镜模型具有两个优点:1)夹持点远离了镜面实际工作区域,较远的距离可以减弱电极的非线性响应;2)夹持点远离了电极所在位置,夹持点处相对小的变形量可减弱电极的非线性响应。

#### 3.3.2 紧约束模型

采用三点装夹紧约束模型,得到全口径下所有电极的 $K_{P-V}$ 值,如图9所示。量级在 $10^{-5}\lambda$ ,可以认为完全消除了非线性响应问题。

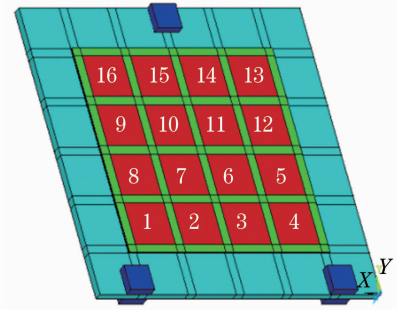


图7 改进后的PFDM有限元模型

Fig. 7 Improved finite element model of PFDM

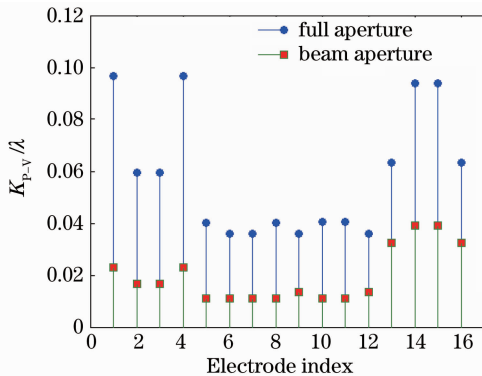


图8 改进模型16个电极分别施加-200,300 V电压载荷下的 $K_{P-V}$ 分布

Fig. 8  $K_{P-V}$  values of the 16 electrodes of the improved model with -200 and 300 V

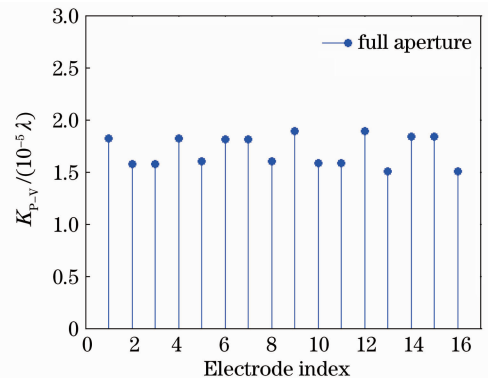


图9 边缘紧约束时,16个电极分别施加-200,300 V电压载荷下的 $K_{P-V}$ 分布

Fig. 9  $K_{P-V}$  values of the 16 electrodes with -200 and 300 V in tight restriction position-setting model

紧约束是一种理想夹持方式,实际应用中很难实现。如采用粘胶将变形镜边缘与镜框粘结,很容易出现因粘结不牢导致镜子边缘产生松动的现象,从而出现接触摩擦。因此可以将上述两种改进方式结合:将变形镜的玻璃层进行扩展,使其尺寸大于压电层,采用粘胶将变形镜玻璃层边缘与镜框进行粘结。

## 4 结论

通过有限元方法对压电薄膜变形镜夹持应力的影响进行了研究,发现镜面与镜框间的接触所导致的应力会使面形随电压呈现非线性变化。非线性响应程度与接触点的距离有关,距离越近非线性响应越强烈。

为消除夹持应力对变形镜所带来的不利影响,提出了两种改进方式:1)改进变形镜模型,通过扩展玻璃层尺寸,使夹持位置远离变形镜的实际工作区域,仿真结果表明,这种改进的变形镜结构能够有效地降低夹持所带来的不利影响;2)改进夹持方式,采用紧约束模型,避免接触摩擦,仿真结果表明,这种方式可以完全消除电极的非线性响应。但紧约束的夹持方式难以实现,因此在实际应用中可将上述两种改进方式进行结合。

## 参 考 文 献

- 1 K. Alexis, S. Vadim, R. Alexey *et al.*. High-power lasers and adaptive optics[C]. *SPIE*, 2004, **5333**: 45~52
- 2 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei *et al.*. Application of cavity deformable mirror in petawatt facility with U-turn reverser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2920~2923  
代万俊, 胡东霞, 周 维 等. 腔镜位置变形镜波前补偿与实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2920~2923
- 3 Yang Qiang, Cao Genrui. The optimization design of control electrode pattern for the 13-segment bimorph mirror [J]. *Optical Technology*, 1996, **22**(5): 15~20  
杨 强, 曹根瑞. 13 单元双压电晶片变形反射镜控制电极的优化设计[J]. *光学技术*, 1996, **22**(5): 15~20
- 4 Yang Qiang, Zhu Jianping, Cao Genru. The optimization design of bimorph deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1163~1169  
杨 强, 朱建平, 曹根瑞. 双压电变形镜反射镜的优化设计[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1163~1169
- 5 Yu Ning, Wenhan Jiang, Ning Ling *et al.*. Response function calculation and sensitivity comparison analysis of various bimorph deformable mirrors[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(19): 12030~12038
- 6 Yu Ning, Wenhan Jiang, Ning Ling *et al.*. Analysis on the influencing factors of deformation in bimorph deformable mirror [C]. *SPIE*, 2007, **6724**: 67241P
- 7 Ning Yu, Yu Hao, Zhou Hong *et al.*. Performance test and closed-loop correction experiment of a 20-element bimorph deformable mirror [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(7): 4717~4723  
宁 禹, 余 浩, 周 虹 等. 20 单元双压电片变形镜的性能测试与闭环校正实验研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(7): 4717~4723