

文章编号: 0253-2239(2008)09-1638-05

# 20 单元双压电片变形反射镜的影响函数 有限元分析和实验测量

宁 禹<sup>1,2</sup> 周 虹<sup>2,3</sup> 官春林<sup>2</sup> 饶长辉<sup>2</sup> 姜文汉<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; <sup>2</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)  
<sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 影响函数是分析双压电片变形反射镜像差校正能力的重要参量,通过建立有限元模型预测实际器件的影响函数,以有限元模型的不断优化替代实际器件的尝试性改进,可以减小构造的盲目性,从而节约研发成本,缩短双压电片变形镜的实用化进程。采用 Veeco 干涉仪测量了 20 单元双压电片变形反射镜的影响函数,同时建立有限元模型进行了相应计算,并将计算结果与实际器件的测量数据进行了对比分析。结果表明,相对于实测数据而言,有限元模型计算得出的影响函数在量值上略有偏小,但其形状和峰值位置与测量数据一致性好,两者对前 35 项泽尼克像差的拟合曲线也基本吻合,各项拟合误差系数之差皆小于 0.1。这说明通过不断改进有限元模型实现对实际器件的优化设计是切实可行的。

**关键词** 自适应光学; 双压电片变形反射镜; 影响函数; 有限元法; 泽尼克拟合

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1638

## Finite Element Analysis and Measurement of a 20-Element Bimorph Deformable Mirror

Ning Yu<sup>1,2</sup> Zhou Hong<sup>2,3</sup> Guan Chunlin<sup>2</sup> Rao Changhui<sup>2</sup> Jiang Wenhan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *The College of Photon-Electron Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China*  
<sup>2</sup> *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*  
<sup>3</sup> *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

**Abstract** Influence function is a key parameter to evaluate the capability of bimorph deformable mirrors in correcting aberrations. Influence functions of a 20-element bimorph deformable mirror are measured by Veeco interferometer and simulated by a finite element model. Compared with the measured data, simulated results come out a little smaller. But they are consistent in both shape and the location of peak. And the finite element model can predict the correction on 1~35 Zernike aberrations of the 20-element bimorph deformable mirror correctly, with errors smaller than 0.1. It is feasible to improve the bimorph deformable mirror by optimization of its finite element model.

**Key words** adaptive optics; bimorph deformable mirror; influence function; finite element analysis; Zernike fitting

## 1 引 言

变形反射镜(Deformable mirror, DM)作为波前校正器的一种,是自适应光学(Adaptive optics, AO)系统中的核心器件,变形镜的小型化可以有效减小整个 AO 系统的体积,降低其成本。目前,微小

型变形镜按驱动方式可分为以下几类:基于纵向压电效应的传统压电变形镜,基于微机电系统(MEMS)技术构造的分立式变形镜和连续式薄膜变形镜(Membrane DM)、基于横向压电效应的双压电片变形镜(Bimorph DM)以及基于电光效应的液

收稿日期: 2007-12-10; 收到修改稿日期: 2008-01-22

基金项目: 国家 863 计划和国家自然科学基金(60438030)资助课题。

作者简介: 宁 禹(1979—),女,博士研究生,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: ningyu\_0205@126.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn

晶变形镜(Liquid crystal DM)等。其中,Bimorph DM(以下简称 Bimorph)的动态范围大、激光辐照破坏阈值高、结构相对简单,并可直接与曲率传感器配合使用来提高 AO 系统的响应速度。一些科研机构<sup>[1~3]</sup>通过设计构造满足自身需要的 Bimorph,以较低成本取得了较好的波前像差校正效果。

影响函数是用来评价变形镜像差校正能力的重要参量,获得较准确的影响函数并利用其对 Bimorph 波前校正能力进行仿真预测,可以为实际器件的优化设计提供有效理论参考,从而大大缩短 Bimorph 实用化进程。在影响函数的分析计算方面文献上已经报道了一些成果<sup>[4~9]</sup>,采用的主要分析方法分为解析法和有限元法两类。在器件设计之初,采用解析法定性分析 Bimorph 变形量随各主要因素的变化规律,可以为层结构的选择和各层厚度比例设定等因素提供有效的理论依据。而在实际器件变形量的模拟和共振等其他各项性能的仿真预测方面,有限元法往往更加便捷有效。因为相对解析法求解通常需要较多近似条件而言,有限元法所建立的模型及模型各项参数的设置都更加贴近实际器件。

本文针对中科院光电所自行研制的 20 单元双压电片变形镜样镜,对其影响函数进行了实际测量,并建立有限元模型进行了仿真计算,通过实测数据与计算结果的对比分析验证了有限元模型的合理性。

## 2 Bimorph 变形镜简介

目前,应用最为广泛的 Bimorph 可简化为两种层结构模型[图 1(a)、图 1(b)]。图中浅色代表被动层(一般由玻璃或硅材料构成),深色代表压电层(由具有压电性质的材料构成),g 代表公共地电极, $e_1$ 、 $e_2$  代表控制电极层位置。下面以图 1(a)为例说明 Bimorph 的工作原理。两层薄圆片被粘合在一起且初始状态下的面形平整[图 1(c)虚线所示],压电层沿旋转对称轴纵向极化。当在薄片两侧加载电压  $V$  后,由于横向逆压电效应压电层沿横向发生伸展而

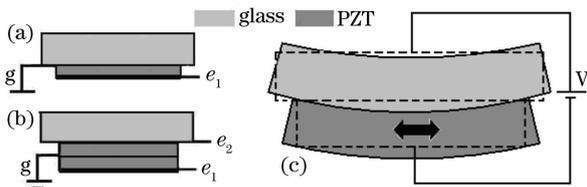


图 1 (a),(b)为两种典型的 Bimorph 层结构剖面图, (c)为结构(a)的变形原理示意图

Fig. 1 (a) and (b) two typical bimorphs structure in cross section, (c) deformation principle of (a)

被动层保持不变(双箭头代表伸展方向),横向尺寸的变化差异导致整个粘结层结构产生弯曲变形。也就是说,Bimorph 主要是依靠相邻粘接层之间横向变形量的差异完成形变的。

本文介绍的 20 单元 Bimorph 样镜主要由三层材料粘结而成[如图 1(b)],包括一层上表面抛光镀膜作为反射面的玻璃基底和两层材料、尺寸完全相同的压电薄片。每层压电薄片的上下表面都镀有金属电极层。如图 2 所示,控制层  $e_1$  上分布着 19 个分立电极,各电极在角向和径向都间隔 1 mm。控制层  $e_2$  上是一整块离焦电极,范围由图 2(b)中虚线标出, $r_1=14$  mm 为离焦电极和中间公共地极半径, $r_2=15$  mm 为压电层半径; $r_4=21$  mm 为玻璃层半径, $r_3=17$  mm, $r_4$  与  $r_3$  之间的灰色圆环代表玻璃层上的紧支撑装夹区域;在装夹边与压电层覆盖区之间留有一圈环状空白区域。

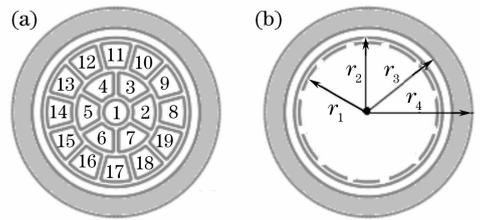


图 2 Bimorph 电极排布示意图。(a)  $e_1$  控制层上 19 单元电极排布,(b)  $e_2$  控制层上为离焦电极

Fig.2 Electrodes distribution of 20 elements bimorph, (a) Electrode distribution of 19 elements on control layer  $e_1$ , (b) defocus electrode on control layer  $e_2$

## 3 样镜测试结果

将 Bimorph 样镜置于 Veeco 干涉仪的光路中,通过干涉仪参考面的移动产生干涉图形的相位调制,用数据采集和处理系统即可测出变形镜的面形及各典型电极的影响函数。

### 3.1 各典型电极影响函数

在 200 V 电压驱动下,本文采用 Veeco 干涉仪测量得到了 39 mm 孔径范围内电极 1、2 和 8 的影响函数如图 3 所示。由于该干涉仪是以最小二乘面为参考面输出测量结果的,为了便于数据的处理分析,本文以图 3 中影响函数的外边缘所在平面为新的参考平面对测量数据进行了整体平移。这样处理的根据在于实验中测量孔径大于装夹区域的内缘口径(34 mm),而整个装夹区域在 Bimorph 变形过程中保持固定不动,因此本文认为以测量数据的外缘所在平面为零基准面显示测量数据是合理有效的。

经过上述处理,各典型电极的影响函数如图 3 所示。

遵照同样的处理原则,截得 30 mm 口径内离焦电极在 100 V 电压下产生的变形量如图 4(a)所示,

从该面形中去掉离焦项像差后,得到的残余面形如图 4(b),残余面形的均方差为  $0.138 \mu\text{m}$ ,PV 值约为  $0.663 \mu\text{m}$ ,可以看出离焦电极工作基本正常。

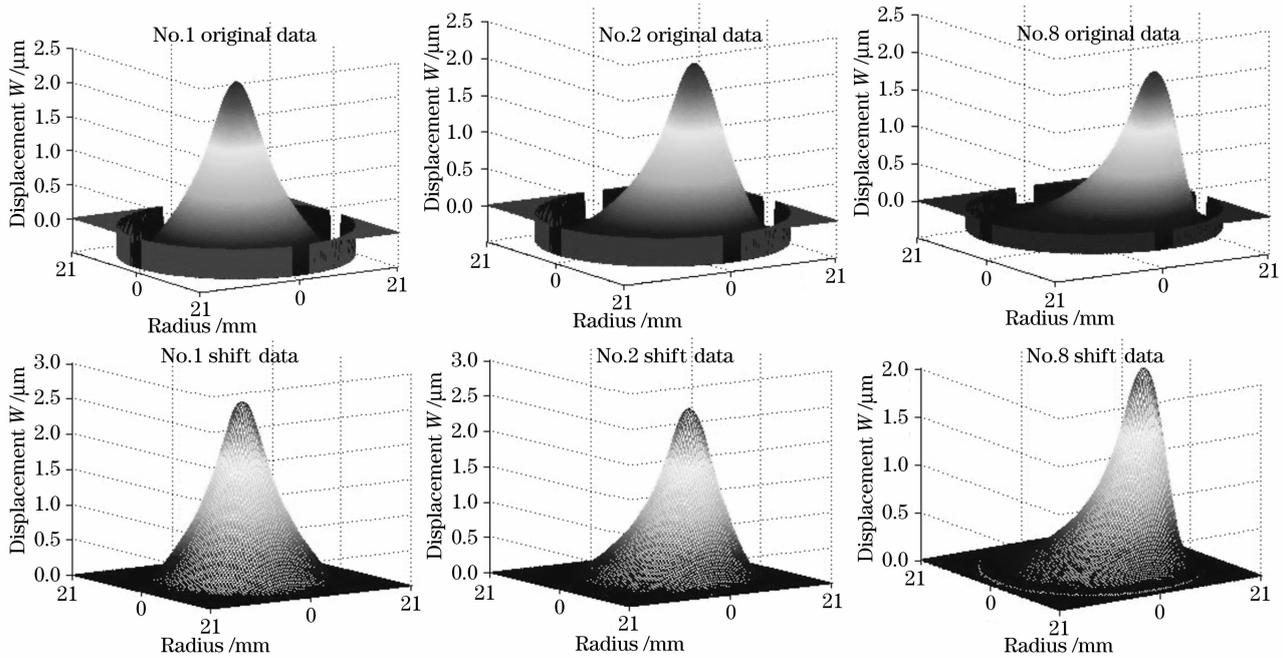


图 3 Veeco 干涉仪测得 1 号、2 号和 8 号电极的影响函数

Fig. 3 Influence functions of electrode No. 1, 2 and 8 measured by Veeco

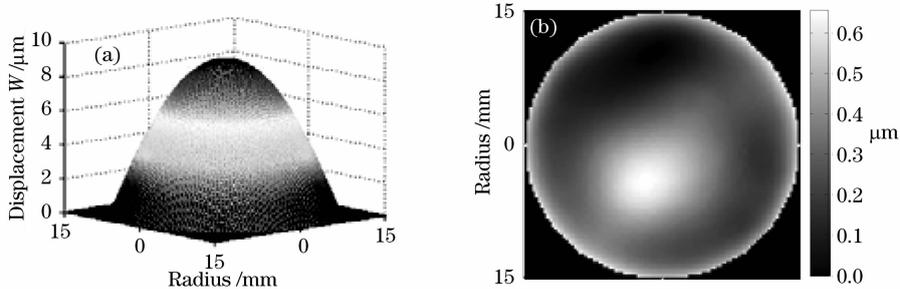


图 4 (a)离焦电极在 100 V 电压下产生的面形, (b)该面形去除离焦像差后的残余面形

Fig. 4 (a) Surface displacement generated by defocus electrode with loading 100 V, (b) residual surface displacement when defocus aberration is removed from (a)

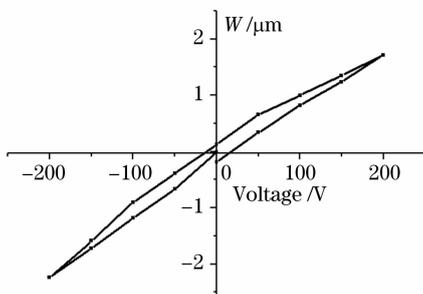


图 5 2 号电极中心位置变形量随加载电压变化曲线  
Fig. 5 Variation of the maximal displacement generated by electrode No. 2 as a function of loading voltage

### 3.2 变形量随电压变化曲线

除各典型电极的影响函数外,本文还测量了 2 号电极在不同加载电压下的变形量。测量过程中,加载电压以 50 V 为步长,从最初的 0 V 增至 200 V,又从 200 V 减少至 -200 V,最后回到 0 V。采用 Veeco 干涉仪测量了各电压下 Bimorph 面形函数,经分析 2 号电极中心位置变形量随加载电压的变化曲线如图 5 所示。

## 4 有限元模型的建立

本文基于 Algor 软件建立了 Bimorph 有限元

模型。双压电片变形镜的有限元分析属于耦合场分析范畴,涉及到结构和电场之间的相互耦合。因此,整个过程包括模型的建立、静电分析和应力分析三个步骤。

如图 6 所示,模型在厚度  $z$  方向上分为玻璃层、离焦电极所在压电层和分立控制电极所在的压电层,金属电极和粘结胶层(厚度一般为微米量级)在分析中忽略不计。为保证电极排布完全与设计图 2 中一致,整个模型采用平面投影、立体拖拽的方式建立,每层材料在厚度方向上划分至少两个网格。模型的材料特性参量及尺寸设置与实际器件完全相同。

模型建立后需要首先进行静电分析,静电分析的目的是要保证电场在压电材料内部纵向均匀分

布,而在横向对电场分布影响较大的是压电材料电导率,电导率越大,加载电压扩散到邻近区域的程度就越大[图 7(a)],也就是说 Bimorph 单电极产生变形的局域性就会越差。

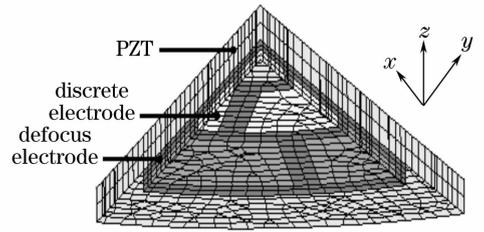


图 6 模型的建立和网格的划分

Fig. 6 Model of bimorph and mesh distribution in Algor

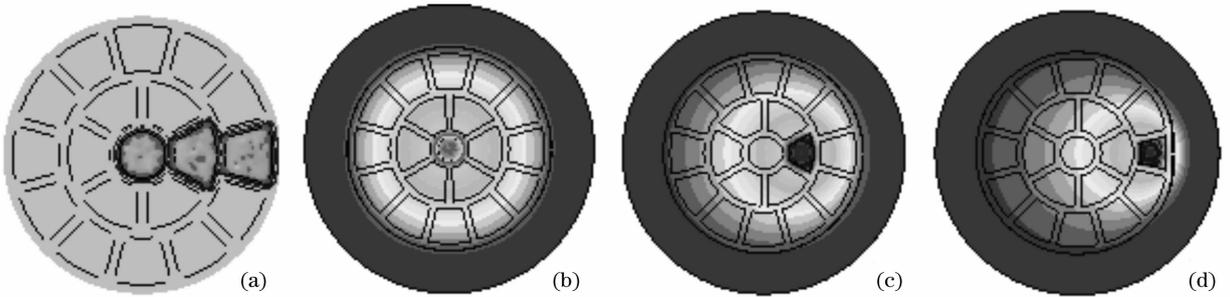


图 7 (a)1 号、2 号和 8 号电极加载电压沿压电材料横向分布,(b)~(d)电极的影响函数平面投影图

Fig. 7 (a) Transversal voltage distribution in piezoelectric material when electrode No. 1,2 and 8 are loaded, (b)~(d) projections of influence functions of electrodes

由于材料的厚度远小于其横向尺寸,因此假设结构形变对电压的响应属于线性范畴。线性应力分析中采用压电材料块单元,对玻璃层下表面的深色区域(图 2)施加全约束作为边界条件,再将静电分析得到的电压分布结果加载到模型上,即可计算得出各典型电极的影响函数如图 7(b)~图 7(d)所示。

### 5 有限元结果与实验数据对比分析

通过实验数据验证有限元仿真结果的准确性,以有限元模型的不断优化替代实际器件的尝试性改进,从而节约研发成本,缩短 Bimorph 实用化进程是本文研究的主要目的。经上两个小节分析,可得 1 号、2 号和 8 号电极的影响函数实测数据与有限元仿真数据对比曲线如图 8 所示。在相同的 200 V 电压驱动下,有限元模型产生的各电极影响函数数值要略小于实测数据,有效孔径(30 mm)范围内各电极的拟合误差分别为 18%、21%和 19%,但仿真数据和实测数据的峰值位置是基本一致的。

有限元结果与实测数据存在差异的原因可能存在于以下两个方面:1)玻璃基底和压电材料经过打

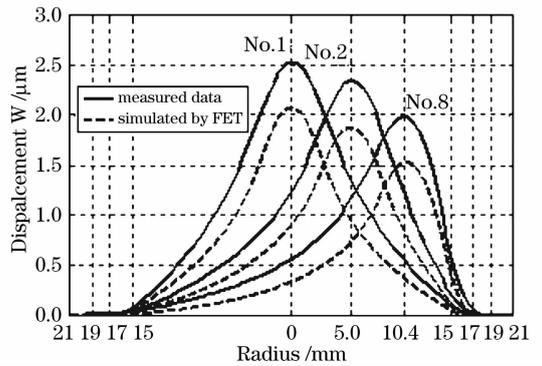


图 8 各典型电极影响函数实测数据和有限元仿真数据对比图

Fig. 8 Influence function comparison between measured data and simulated data by FET

磨抛光等工艺流程后,展弦比(直径与厚度的比值)较毛坯材料有所增大,因此其弹性模量很可能变小,也就是说实际器件的材料参量与厂家提供的出厂指标之间将有一定差别,这就使得按照标称材料参量构造的有限元模型的弹性模量偏大,计算得出的变形量偏小;2)器件在装夹过程中是用胶粘接在环形支架上的,粘接不牢或胶层过厚都会造成固定边缘

的松动产生较大的变形量。而有限元模型在设置边界条件时是采用周边紧支撑,这就使得在计算过程中模型边缘是固定不动的,因此相对于实际器件而言,仿真结果偏小很可能是由于边缘约束相对严格造成的,这一因素也导致了计算所得影响函数半峰全宽偏小。在下一步工作中,本文将进一步优化该有限元模型,考虑厚度减薄对材料参量的影响和更加准确的模拟粘结胶层的作用。

作为 AO 系统中的波前校正器, Bimorph 对波前像差拟合能力是评价其性能的重要指标之一。定义拟合孔径内(取为 24 mm, 以保证各电极加载电压不超过 400 V) Bimorph 对第  $i$  项泽尼克像差<sup>[10]</sup>的拟合误差系数为

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N [Z_{ij}(\rho, \theta) - W_j(\rho, \theta)]^2}{\sum_{j=1}^N [Z_{ij}(\rho, \theta)]^2}},$$

其中  $Z_{ij}$  为第  $i$  项泽尼克像差在第  $j$  个采样点的位移量,  $W_j$  为镜面在第  $j$  个采样点产生的位移量,  $N$  为有效孔径内的采样点个数。图 9 给出了实测 20 单元影响函数和计算得出的影响函数对前 35 项泽尼克像差的拟合误差。

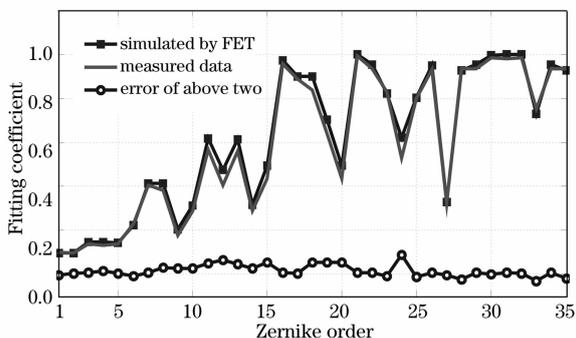


图 9 实测数据和有限元仿真数据对前 35 阶泽尼克像差的拟合误差曲线

Fig. 9 1~35 Zernike fitting error comparison between measured data and simulated data by FET

由图 9 中两组拟合曲线可见,有限元生成的影响函数对各阶像差的拟合非常接近于实测数据的拟合结果,除在少数几阶处有微小差异外,其他各阶拟合误差几乎完全一致。因此得到以下结论,尽管单个影响函数的仿真结果与实测数据在量值上有所偏差,但两者的形状和峰值位置还是一致的,从而使得有限元模型可以基本反映实际器件对波前像差的校正能力,也就是说通过不断改进有限元模型对实际器件进行优化设计是切实可行的。

## 6 结 论

本文简要介绍了 20 单元双压电片变形反射镜变形特性的测量结果,并建立有限元模型对该器件的影响函数进行了仿真计算,最后对实验测试数据和仿真计算结果做出了对比分析。分析表明,相对于实测数据而言,有限元计算得出的影响函数在量值上偏小,但形状和峰值位置与测量数据一致性好,对前 35 项泽尼克像差的拟合曲线也基本吻合。该结果说明了通过不断改进有限元模型对实际器件进行优化设计是切实可行的。

作为试验样镜,本文介绍的 20 单元双压电片变形镜达到了变形量设计要求,也验证了器件构造方法的合理性,但该器件距实用化还有一段差距,尤其在电极的排布上还需要进一步优化。在接下来的工作中,作者将通过本文建立的有限元模型对各控制电极的排布进行优化,针对目标像差提出更加合理有效的设计方案,为器件性能的不断改进提供理论参考。

## 参 考 文 献

- 1 T. Yu, Cherezova. Doughnut-like laser beam output formation by intracavity flexible controlled mirror[J]. *Opt. Express*, 1998, **3**(5): 180~189
- 2 Z. Jin, J. Zhang. Control of filamentation induced by femtosecond laser pulses propagating in air[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10424~10430
- 3 P. Wnuk, C. Radzewicz, J. Krasinski. Bimorph piezo deformable mirror for femtosecond pulse shaping [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(11): 4154~4159
- 4 S. A. Kokorowski. Analysis of adaptive optical elements made from piezoelectric Bimorphs [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(1): 181~187
- 5 C. Schwartz, E. Ribak, S. G. Lipson. Bimorph adaptive mirrors and curvature sensing[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(2): 895~902
- 6 E. M. Ellis. *Low-Cost Bimorph Mirrors in Adaptive Optics* [D]. University of London, 1999. 45~79
- 7 Yang Qiang, Zhu Jianping, Cao Genrui. The optimization design of Bimorph deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1163~1169  
杨 强,朱建平,曹根瑞. 双压电片变形反射镜的优化设计[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1163~1169
- 8 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
- 9 Yu Ning, Wenhan Jiang, Ning Ling *et al.*. Analysis on the influencing factors of deformation in Bimorph deformable mirror [C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6724**: 67241-1~5
- 10 Larry N. Thibos, Raymond A. Applegate. Standards for reporting the optical aberrations of eyes [J]. *J. Refractive Surgery*, 2002, **18**: 652~660