

文章编号: 0253-2239(2009)06-1437-06

双压电片变形反射镜样镜的设计与研制

周 虹^{1,2} 宁 禹^{1,3} 官春林¹ 姜文汉¹

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

摘要 双压电片变形反射镜作为波前校正器具有结构简单、变形量大、成本低及制造周期短的优点,能代替传统分立式变形镜从而降低自适应光学系统的成本。为验证工艺的可行性和了解双压电片变形反射镜的性能,制造了一块 20 单元的试验样镜。样镜采用了双层压电陶瓷的结构,其中一层作整体离焦电极以校正大幅值的离焦像差。利用 Veeco 干涉仪测量了样镜单元电极影响函数,分析了其对前 36 项 Zernike 像差的校正能力。结果表明,样镜对离焦像差能获得高达 8 μm 以上的校正量,对其它高阶像差也能适量校正,但校正能力随空间频率升高而降低,显示出其适合校正低阶像差的特性。此外,讨论了不同有效孔径下样镜对 Zernike 像差的拟合能力。

关键词 自适应光学;耦联变形反射镜;泽尼克像差;影响函数

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092906.1437

Design and Fabrication of Prototype for Bimorph Deformable Mirrors

Zhou Hong^{1,2} Ning Yu^{1,3} Guan Chunlin¹ Jiang Wenhan¹

¹*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*
²*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*
³*College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract Compared with conventional stack actuator deformable mirrors, the bimorph deformable mirrors have more simple structures, larger stroke, lower cost and less time consumption. Therefore, they are potential substitutes of stack actuator deformable mirrors in adaptive optics systems. A prototype of 20-element bimorph deformable mirror is designed and fabricated in order to verify the process and investigate its basic characters. This prototype has two PZT layers, the outer one is divided into 19 electrodes, and the inner one has a whole defocus electrode. The influence functions of the fabricated prototype are measured by using a Veeco interferometer and the correction ability for the first 36 Zernike aberrations is simulated. The results show that it has a good fitting ability for low order Zernike aberrations, especially for defocus, and it achieves an amplitude more than 8 μm . And this ability decreases as the increase of space frequency, which indicates that this bimorph deformable mirror is very suitable for correcting low order aberrations. In addition, fitting abilities of the fabricated prototype for correcting Zernike aberrations with different clear apertures are discussed.

Key words adaptive optics; bimorph deformable mirror; Zernike aberrations; influence function

1 引 言

变形镜(DM)作为波前校正器一直以来都是自适应光学系统中不可或缺的关键器件,但是在实际

应用中它已经成为自适应光学系统发展的瓶颈,主要原因是其苛刻的精度要求所导致的制造工艺的复杂性。因此,在系统理论相对完善的情况下,对变形

收稿日期: 2008-05-06; 收到修改稿日期: 2008-10-17

作者简介: 周 虹(1983—),男,博士研究生,主要从事自适应光学技术研究。E-mail: hong_zhou@yahoo.com

导师简介: 官春林(1965—),男,研究员,主要从事能动光学器件的研究。E-mail: clguan@ioe.ac.cn

镜的改进就成为推动自适应光学发展的重要环节。

经过几十年的发展,已产生了多种不同类型的变形镜:常用的是传统的分立式层叠致动压电变形镜(SAM)^[1];另外基于 MEMS 技术的微变形镜也有较为成功的应用^[2];还有就是本文要讨论的双压电片变形镜(Bimorph DM)。每一种变形镜都有自己的特点,分立式层叠致动压电变形镜虽较为成熟,但是工艺复杂,制造周期长,造价也极其昂贵,结构的相对庞大也不利于系统的小型化。MEMS 变形镜虽然很好地实现了集成化,但是目前其变形量仍然较小,只适合校正小像差。相比之下双压电片变形镜则同时具有结构简单,造价低廉,变形量大的优点。

国外主要是俄罗斯、法国和美国,在双压电片变形镜的研制上较为成功^[3, 4],而国内在我们之前还未见研制成功的报道。我们的变形镜研究组从 2007 年初开展这方面的工作,已经成功制作出一块样镜,本文介绍了相关工作及样镜的性能测试和分析。

2 双压电片变形镜的设计与仿真

2.1 简介

所谓双压电片变形镜,是因其最初的结构而得名。1978 年, S. A. Kokorowsky, S. G. Lipson 和 E. Steinhaus 等^[5, 6]提出的 Bimorph 变形镜的结构是将两片压电材料的薄片按相反的极化方向粘接而成,如图 1 所示。由于压电材料的横向逆压电效应,在极化方向上施加一定电压就会引起材料沿垂直于极化方向伸展或收缩(视电压极性而定),如果两片压电材料的伸缩量不一致就会导致结构的弯曲变形。这样,通过控制电压大小和施以特定的边界条件即可实现对面形的控制。

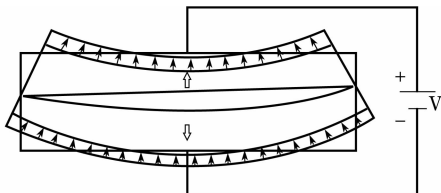


图 1 双压电片变形原理

Fig. 1 Schematic of bimorph deformation

然而在实际制造过程中发现,对压电材料进行高光学质量的抛光难度较大,难以达到反射镜面的要求。而现在的双压电片变形镜的结构大多已做了改进。图 2 是本文的样镜结构示意图。两片圆形 PZT 薄片按相反的极化方向粘接在一起作为驱动层,再将其粘接到一片薄玻璃片上。玻璃片的外表面精密抛光后镀膜作为反射面,并固定玻璃层的外圈。里面的一层 PZT 两面都是整体的电极,其主要

目的是校正离焦像差。外层 PZT 的一面是整体电极,而另一面则划分成 19 个分立的电极,如图 2(b)所示。分别在不同电极上加上特定电压便可以控制镜面面形。

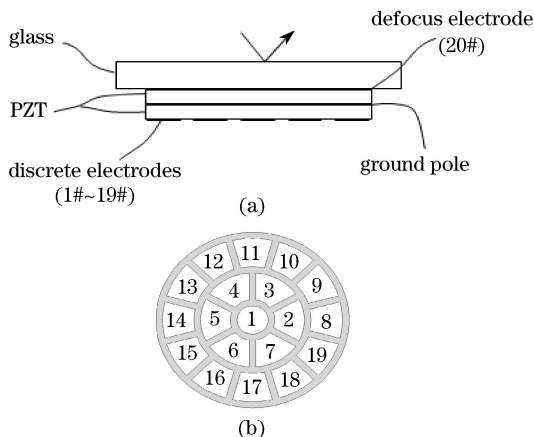


图 2 20 单元双压电片耦合变形镜结构图。

(a) 侧视图; (b) 分立电极的布局

Fig. 2 Configuration of 20-element bimorph DM.

(a) side view; (b) distribution of discrete electrodes

2.2 设计参数

初始阶段我们的目标是针对自适应光学实验室的光束净化系统。现有系统的 30 mm 孔径要求镜面也要保持相当尺寸。此外,系统像差主要是较大尺度的低阶像差,一般要求校正到 Zernike 前 15 项。低阶的校正幅度要求较高,特别是离焦像差,之前采用的分立式变形镜对大幅值的离焦校正能力有限,而双压电片变形镜可在此发挥出优势。因此在设计阶段,本文主要关注的是变形量。已知边缘完全固定条件下双压电片变形镜的面形与电压分布满足泊松(Poisson)方程^[7],即

$$\nabla^2 Z = -AV, \tag{1}$$

其中 ∇^2 是拉普拉斯算子, Z 是加电压后的镜面面形, V 是所加的驱动电压分布, A 是与材料以及结构相关的常数。根据 C. Schwartz 等得出的经验公式:

$$A = \frac{12d_{31}(t_1 + t_2)}{t_1^3 k}, \tag{2}$$

$$k = 4 + \frac{t_1}{t_2} + 6 \frac{t_2}{t_1} + 4 \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^3, \tag{3}$$

其中 t 为厚度, d_{31} 是横向压电常数;下标 1 表示压电材料, 2 表示基底材料。按此推理, A 越大越好,比较直接的方法是选取 d_{31} 大的材料,故本文选用了一种 d_{31} 高达 -270×10^{-9} mm/V 的压电材料。

玻璃层和压电材料边缘完全固定的方式显然限制了镜面边缘部分的斜率,这样变形量会受到限制。本文采用了玻璃层比 PZT 层直径稍大而只固定玻

璃层边缘的结构,相比于传统的完全夹持 PZT 和玻璃边缘的结构能够获得更大变形量。但是这种结构要求玻璃片要有足够强度来支撑镜体,而纤薄的镜面则有利于增大变形量,所以综合考虑结构强度和工艺水平以及初步计算后确定镜面厚度为 1.5 mm,压电层的厚度为 0.6 mm。

分立电极的划分采用比较常见的扇块形状,如图 2(b)。有经验公式证明单个电极加单位电压所引起的变形量与电极面积的平方成正比,而明显地,单个电极面积增加则在有限面积内所能分布的电极数就较少,空间频率就会降低。所以 Bimorph 变形镜的电极数并不是越多越好。由于是第一块样镜,出于简化加工工艺的目的我们只是划分出了三圈共 19 个分立电极,各个电极大小则遵从空间频率一致的原则,即各个电极的面积大致相等。

为了更好地校正离焦像差,本文外加一片压电陶瓷单独作为整体离焦电极,即 20# 电极。在此电极上加电压即可产生一个较大幅值得以接近标准的离焦面形。

2.3 有限元仿真

确定上述基本结构参数后,利用有限元软件 ALGOR 分析其预期性能。主要目的是分析单个分立电极所能产生的变形量以及影响函数的大致形状。建模过程中忽略粘接胶层和电极层,因为它们相对来说都较薄(微米量级),完全按实际情况建模不仅不必要而且会导致有限元软件无法求解。加载条件则完全模拟实际情况:玻璃层外圈完全约束,两层 PZT 中间接地(加载 0 V 的电压),分别对各个驱动电极区域加 200 V 电压,典型的求解结果如图 3,其中分别列出了 1#, 5#, 14# 和 20# 电极的影响函数。

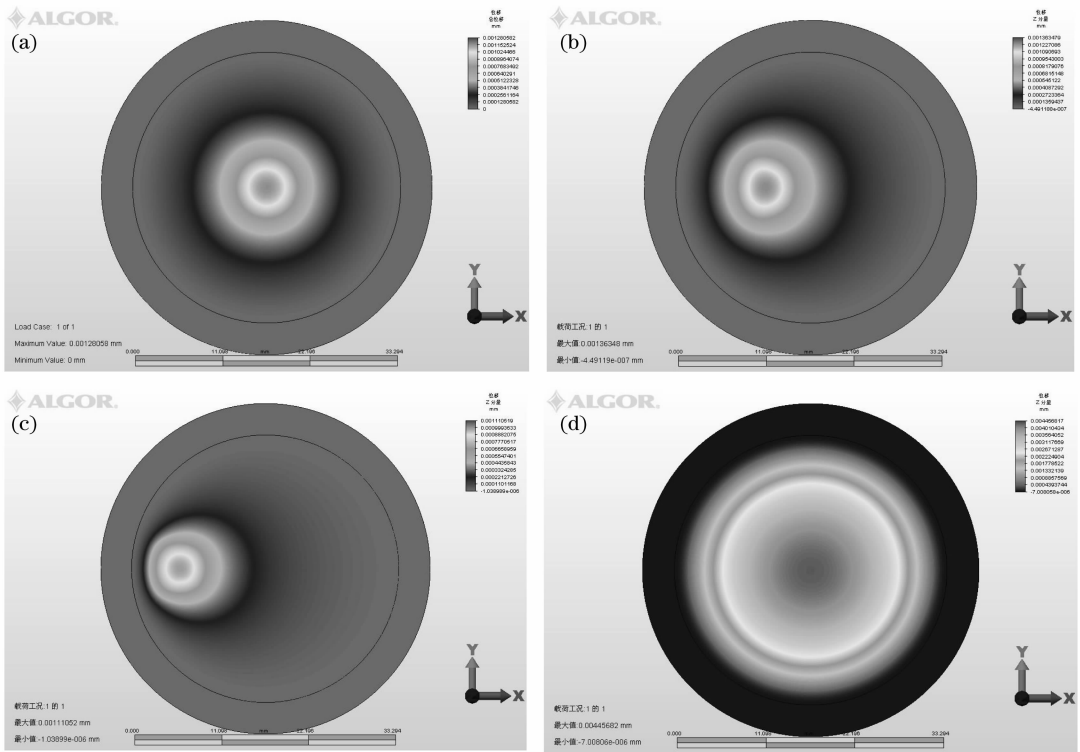


图 3 有限元分析的典型电极的影响函数。(a) 1# ;(b) 5# ;(c) 14# ;(d) 20#

Fig. 3 Typical influence functions of electrodes simulated by ALGOR. (a) 1# ;(b) 5# ;(c) 14# ;(d) 20#

1#, 5#, 14# 三个电极在 200 V 驱动电压下的变形量分别为 1.28 μm 、1.34 μm 、1.08 μm ,该变形量等同于传统变形镜。而 20# 电极变形量达到 4.46 μm ,相对于分立式变形镜更优越。

3 20 单元双压电片变形镜样镜研制结果

在解决了压电陶瓷薄片的加工、电极制备、粘接

组装、镜面抛光与镀膜等一系列工艺技术的基础上,研制出了第一块 20 单元双压电片变形镜样镜,如图 4 所示。

3.1 影响函数的测量

利用连续可调高压电源为各个电极施加驱动电压,镜面面形由 Veeco 数字波面干涉仪测量记录。处理时采用求差的办法,即对同一个电极将 +200 V 电压下测得的面形减去 0 V 电压时的原始面形才是 +200 V 电压的实际数据。这样消除了测



图 4 20 单元双压电片变形镜样镜

Fig. 4 Prototype of the 20-element bimorph DM

量过程中的系统误差。初始面形峰值 (PV) 为

393.41 nm,均方根值(RMS)为 74.608 nm;去除前 15 项 Zernike 像差的残差 PV 为 149.80 nm,RMS 为 18.985 nm。典型电极的影响函数结果如图 5, 从上到下依次为 1#、5#、14#、20#。左边一列是 3D 面形图,右边一列是模拟的干涉条纹图案(一个条纹不代表半波长)。它们都是在 200 V 驱动电压下测得,四个影响函数的 PV 值分别为 1.665 μm 、1.831 μm 、1.533 μm 、15.265 μm 。电极影响函数的 PV 和 RMS 见表 1。

从图中可看出,同一圈电极(2#~8#,9#~19#)的影响函数的 PV 和 RMS 差异都在可接受的范围,说明其一致性比较好。但是仍然有个别电极

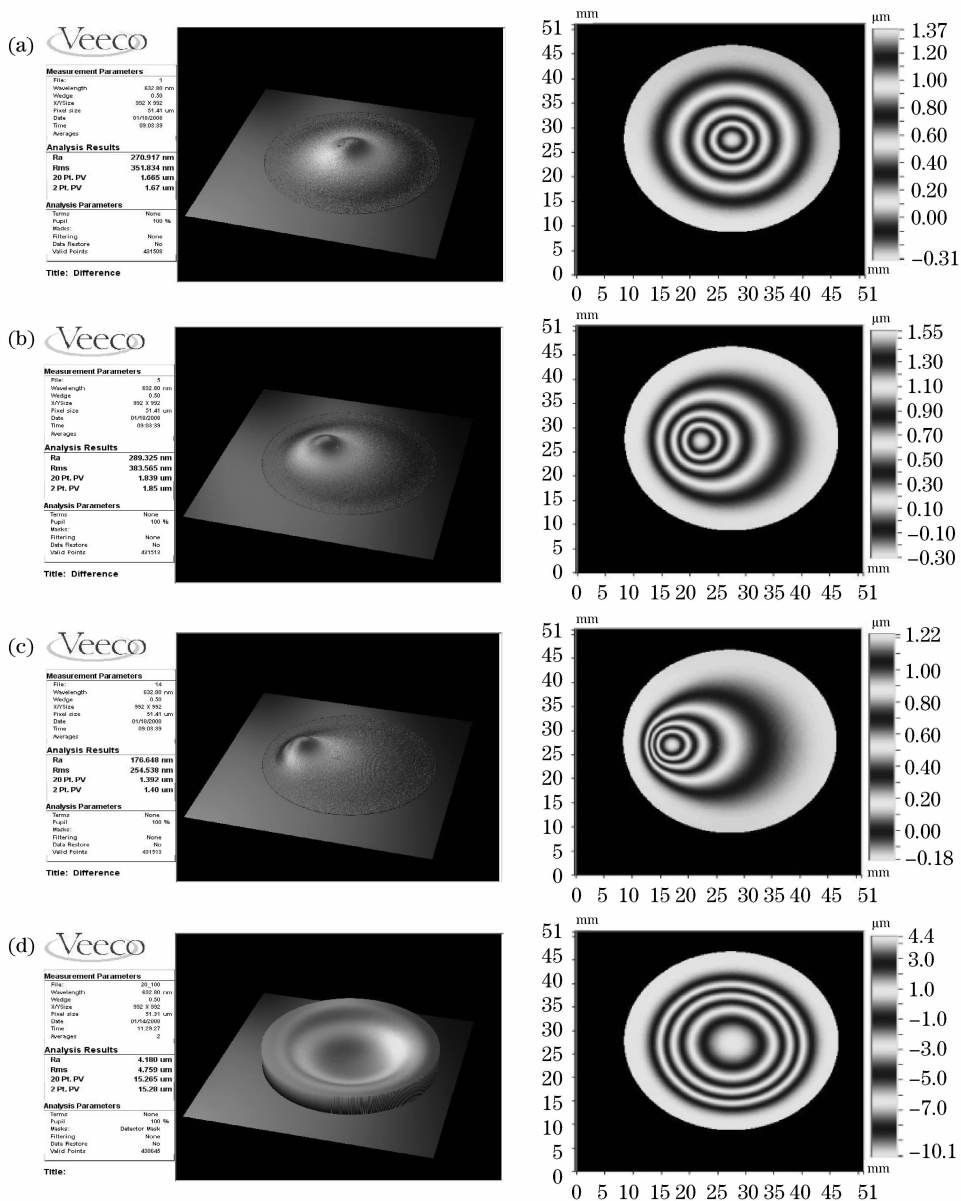


图 5 实测典型电极的影响函数。(a) 1#;(b) 5#;(c) 14#;(d) 20#

Fig. 5 Typical influence functions of electrodes measured by interferometer. (a) 1#;(b) 5#;(c) 14#;(d) 20#

表 1 实测电极的 PV 和 RMS
Table 1 PV&RMS of all measured influence functions of electrodes

Number	PV / μm	RMS /nm	Number	PV / μm	RMS /nm
1	1.665	351.834	11	1.643	301.819
2	1.831	384.087	12	1.626	296.701
3	1.818	382.144	13	1.553	283.544
4	1.602	338.604	14	1.392	254.538
5	1.839	383.565	15	1.565	287.306
6	1.836	381.420	16	1.591	291.829
7	1.445	299.995	17	1.620	297.583
8	1.533	284.649	18	1.645	301.668
9	1.641	307.276	19	1.682	309.621
10	1.650	300.510	20	15.265	4259

的影响函数异常,变形量偏小,比如 4#、7#、8#、14#,这可能是压电材料性能不均匀所造成。此外,单个电极影响函数的 PV 值,除离焦电极以外,都在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以下,不及传统变形镜的变形量大,对像差幅度较大的系统可能还需进一步提高变形量。而 20# 电极的影响函数是一个近乎完美的大幅值离焦形状,这跟之前预期一致。说明单独的离焦电极工作非常有效。

对比有限元分析的数据与实测数据可看到它们在幅值上存在差距。对 1#、5#、14# 电极的两组数据进行最小二乘拟合,得出的最小二乘系数为 1.68,残差的 RMS 分别只有 $0.048 \mu\text{m}$, $0.039 \mu\text{m}$, $0.070 \mu\text{m}$ 。该结果说明有限元计算在整体形状上能反映实际的结果。至于实测的幅值较大,其主要原因可能是仿真计算时材料参数的误差^[8],随着实验数据增多就可得到较为可靠的经验数据来对其进行修正。

3.2 拟合能力分析

根据文献[9]中的分析方法,将待拟合波面和各个影响函数都进行 Zernike 分解,以求取驱动电压。由于在系统试验中,整体位移(Piston 像差)不会影响系统性能,而倾斜可借助倾斜镜来补偿。所以本文在进行拟合时不考虑这些项,只用影响函数分解出的 Zernike 系数的 3~36 项来拟合。此外由于采用了圆周完全固定的方式,镜面边缘部分的自由度仍然受到限制,所以截取不同“有效孔径”(Clear Aperture)对拟合性能有着直接影响。在之后分析中,分别取 $\phi 30 \text{ mm}$ (PZT 层直径), $\phi 23 \text{ mm}$ (外圈电极中径), $\phi 16 \text{ mm}$ (内圈电极外径)三种不同有效孔径来对比分析其拟合性能。

分别考察在所有电极的驱动电压都不超出允许范围内($\pm 200 \text{ V}$)的情况下,变形镜能够复原各个

Zernike 像差的幅值和精度。幅值由复原波面 PV 值表示,精度则表示为残差 RMS 和目标面形 RMS 的比值

$$\alpha = \frac{\text{RMS}_{\text{residual wf}}}{\text{RMS}_{\text{target wf}}} \quad (4)$$

需要说明的是这里使用的 Zernike 像差排列顺序依据的是 ISO10110-5:1996(E)标准。分析结果如图 6、图 7 所示。

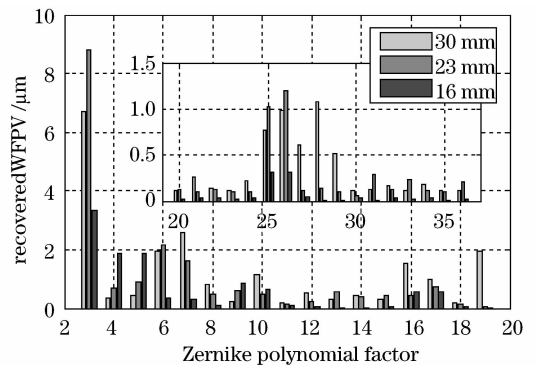


图 6 不同有效孔径的拟合幅值

Fig. 6 Fitting amplitude with different net apertures

从图 6 可看出,样镜对这些 Zernike 像差都有一定校正能力,特别是在低阶部分表现出了很好的性能,在校正离焦像差时能够得到 $3 \mu\text{m}$ 以上甚至高达 $9 \mu\text{m}$ 的变形量。高频部分幅值相对较小,但部分仍可达到 $0.5 \mu\text{m}$ 以上。另外,截取不同有效孔径对拟合幅值有明显影响。相对来说,23 mm 有效孔径时对各项 Zernike 像差的拟合能力要强一些。30 mm 有效孔径时由于受边缘约束的影响较大,拟合结果不如 23 mm 口径。而 16 mm 孔径的拟合幅值较低是截取的镜面过小,影响函数的有效部分幅值太低所导致的结果。

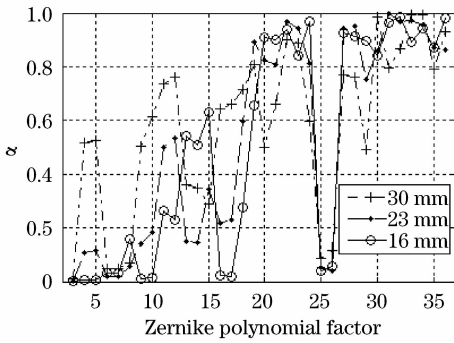


图 7 不同有效孔径的拟合精度

Fig. 7 Fitting precision with different net apertures

不同的有效孔径对拟合精度也有显著影响,如图 7 所示。很明显,30 mm 口径时的拟合精度对大多数 Zernike 像差是难以接受的。而当有效孔径取到 23 mm 和 16 mm 后对 19 项以前的 Zernike 像差的拟合精度基本令人满意。其它高频像差,除 25 和 26 项之外,则无论取何种有效孔径都很难得到满意的精度。值得注意的是,25 和 26 项都有较高的拟合精度,其拟合幅值在高频部分也稍显突出。分析这些项的标准 Zernike 像差发现,像差的起伏分布基本都在边缘部分而且圆周均布,符合本文分立电极的排布特点。照此规律不难理解对 16、17 项具有相对较高拟合精度的原因。

拟合能力应该综合考虑幅值和精度,然而从分析结果来看,幅值和精度并不是随有效孔径变化而一致提高或降低,而是互有起伏。因此,就某一特定双压电变形镜来说,电极分布虽然确定,但仍可根据目标像差的特性来决定合适的通光口径,从而在精度和幅值中找到一种平衡来获得最理想的拟合性能。

4 结 论

实验样镜的成功制造证明了工艺的可行性,性能测试及分析也显示了双压电片变形镜适合校正低阶像差的特点,而其中专门增加的离焦电极大大提高了对离焦像差的校正能力。此外,有限元分析结

果虽与实际值在幅值上有差距,但整个面形的吻合程度基本令人满意。需要指出的是,实验样镜还存在一些缺陷,主要表现为压电材料的非线性滞后较大,不利于系统的闭环控制。此外,样镜的结构以及电极的优化排布等方面也有待改进。下一步工作是要尝试使用其它的压电材料制造第二种双压电片变形镜,同时基于本文结果采用有限元方法进行仿真优化,作一些有针对性的结构改进。

致谢 感谢张小军博士对本文提出的宝贵意见,感谢杨梅、叶清秀等人在具体组装和测试阶段所付出的辛勤劳动。同时向变形镜组其他老师和师傅们一并致谢,本文的顺利完成离不开他们的积极配合。

参 考 文 献

- 1 Ling Ning, Guan Chunlin. The development of deformable mirrors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, **22**(1): 14~22
- 2 凌 宁, 官春林. 变形反射镜的发展[J]. *光电工程*, 1995, **22**(1): 14~22
- 3 T. Bifano, J. Perreault, P. Bierden *et al.*. Micromachined deformable mirrors for adaptive optics[C]. *SPIE*, 2002, **4825**: 10~13
- 4 Y. Cherezova, L. N. Kaptsov, A. V. Kudryashov. Cw industrial rod YAG:Nd³⁺ laser with an intracavity active bimorph mirror[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(15): 2554~2561
- 5 S. Laut, S. Jones, H. Park *et al.*. Bimorph deformable mirror: an appropriate wavefront corrector for retinal imaging? [C]. *SPIE*, 2005, **6007**: 142~156
- 6 S. A. Kokorowski. Analyses of adaptive optical elements made from piezoelectric bimorphs[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(1): 181~187
- 7 C. Schwartz, E. Ribak, S. G. Lipson. Bimorph adaptive mirrors and curvature sensing[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(2): 895~902
- 8 E. Steinhaus, S. G. Lipson. Bimorph piezoelectric flexible mirror [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(3): 478~481
- 9 Ning Yu, Zhou Hong, Guan Chunlin *et al.*. Influence function finite element analysis and measurement of a 20-element bimorph deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1638~1642
- 10 宁 禹, 周 虹, 官春林等. 20 单元双压电片变形反射镜样镜的影响函数有限元分析和实验测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1638~1642
- 11 D. A. Horsley, H. Park, S. P. Laut *et al.*. Characterization for vision science applications of a bimorph deformable mirror using phase-shifting interferometry[C]. *SPIE*, 2005, **5688**: 133~144