

低阶像差校正的压电驱动变形镜测试与仿真优化*

范占斌^{1,2}, 戴一帆^{1,2}, 宁禹³, 关朝亮^{1,2}, 刘俊峰^{1,2}, 付天洋³

(1. 国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 超精密加工湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073;

3. 国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 光纤激光器输出光束带有波前畸变, 制约了光学系统的性能和工作效率。搭建实验系统分析了超连续谱光纤激光器系统输出光束的像差特性, 不同波长的滤波片测试像差均以离焦为主。根据这一特点制备了3单元单层横向压电驱动变形镜样镜, 并进行特性测试。变形镜影响函数有限元仿真和实测吻合度可达77%以上, 一阶谐振频率12.1 kHz。以实际像差为对象进行闭环仿真, 校正精度达到0.77。另外, 从校正精度及行程两个方面对变形镜进行了有限元优化仿真。结果9单元变形镜(有效口径7.5 mm)校正精度达到0.9左右。镜片与压电片厚度比存在最优值约0.3, 行程可提升60%以上。

关键词: 光纤激光器; 横向压电驱动变形镜; 闭环仿真; 仿真优化

中图分类号: TH161; O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2018)04-106-06

Test and simulation optimizing of the unimorph deformable mirror for low-order aberration correction

FAN Zhanbin^{1,2}, DAI Yifan^{1,2}, NING Yu³, GUAN Chaoliang^{1,2}, LIU Junfeng^{1,2}, FU Tianyang³

(1. College of Artificial Intelligence, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Key Laboratory of Ultra-precision Machining Technology, Changsha 410073, China;

3. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The fiber laser beam has wave-front aberration, which restricts the performance and efficiency of optic systems. The aberrations' character of the super-continuum fiber laser beam was analyzed with a building experiment system, and defocus was the main ingredient. According to the character, a prototype of 3-element unimorph DM (unimorph deformable mirror) was manufactured and tested. The simulation accuracy of the influence functions is more than 77% and the frequency response is 12.1 kHz. The results of closed loop correction simulation show that the 3-element unimorph deformable mirror's correction accuracy for the actual aberration is 0.77. Meanwhile, the finite element analysis is used to optimize the fitting accuracy and displacement. At last a 9-element unimorph DM with the aperture 7.5 mm can reach the accuracy level of about 0.9. The thickness ratio of the mirror and the piezoelectric disk is optimized about 0.3, which further promotes more than 60% of the initial displacement.

Key words: fiber laser; unimorph deformable mirror; closed loop simulation; optimizing simulation

由于激光器腔内热效应、增益介质的不均匀性、光路中反射镜的加工误差等使得激光器输出光束质量变差。采用自适应光学技术对激光器进行光束净化, 是目前提升激光器光束质量的重要手段^[1-2]。自适应光学系统包含波前探测、波前校正和波前控制三大部分, 其中波前校正器件主要是各种形式的能动变形镜^[3-8]。

双压电驱动变形镜(bimorph Deformable Mirror, bimorph DM)和单压电驱动变形镜

(unimorph Deformable Mirror, unimorph DM)由于其高激光辐照阈值和擅长于校正大幅度低阶像差的特点, 使得其在激光光束整形方面得到了广泛的应用。2012年Long等设计了以铜为镜面的低成本9单元unimorph DM, 用于校正CO₂激光器光束像差^[9]。2006年Gerber等制备了6单元的Bimorph DM应用于Yd:YAG激光器, 该变形镜由环形电极和离焦电极组成^[10]。2007年Ilyina等设计了一个17单元的Bimorph DM用于腔内激

* 收稿日期: 2017-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91323302, 51405151, 61378065, 61505257); 国家重点研究发展计划资助项目(2016YFB1102304)

作者简介: 范占斌(1989—), 男, 内蒙古武川人, 博士研究生, E-mail: 15507488059@163.com;

关朝亮(通信作者), 男, 副研究员, 博士, E-mail: chlguan@nudt.edu.cn

光器控制远场激光强度分布^[11]。2009年Lubeigt等设计了仅有18 mm的Bimorph DM^[12]。2015年Kudryashov^[13]等对180 mm口径的CO₂激光器利用Bimorph DM进行了光束校正。光纤激光器是实验研究和商业最常用的激光器之一,但由于激光器腔内热效应和光源系统等因素,光纤激光器输出光束往往带有一定的波前畸变。这给光学系统应用带来了很大困扰,需要对光束的畸变进行补偿。在光纤激光器超连续谱光束中,测试发现存在着以离焦为主的低阶像差成分。为了进一步提升激光器光束质量,需要进行针对特定像差的变形镜设计和优化。

横向压电变形镜为光纤激光器系统输出光束质量的提升提供了可行的方法。本文对不同波长光纤激光器光束进行测试和像差特性分析。试制横向压电驱动变形镜,并测试其性能。为满足像差校正需求,采用有限元仿真分析的方法优化其行程和校正精度。

1 光纤激光器系统输出光束像差特性分析

为了对光纤激光器系统的输出光束像差特性进行测试分析,搭建了测试实验平台,如图1所示。激光器为自主研制的超连续谱光纤激光器,该激光器具有0.4~1 μm的谱宽范围,总功率为1 W。光纤激光器输出光束经准直器、滤光片和衰减片后入射到哈特曼传感器中,在计算机上观察激光器输出光束的波前形态并记录其波前像差数据。利用衰减片调节光强至哈特曼传感器探测适合值,对哈特曼波前传感器探测得到的波前数据进行分析。

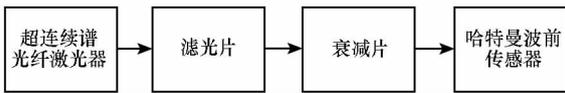
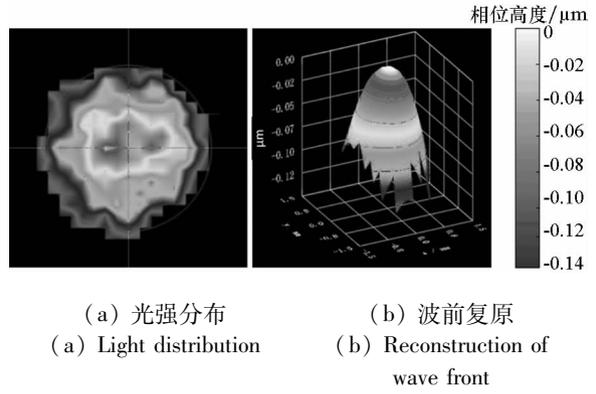


图1 超连续谱光线激光器测试系统

Fig. 1 Test system of the super-continuum fiber laser

取不同波长的滤光片(600~1500 nm)进行波前测试,得到了一系列的测试结果。以800 nm波长为例,哈特曼传感器探测结果如图2所示。图2(a)为激光光束的强度分布图,从图中可以看出光纤激光器800 nm波长的输出光束光强大致呈中间高边缘低的分布状态;图2(b)为哈特曼复原的光束波前相位分布图,输出像差类似一个离焦项,其幅值有30 nm左右。

图3是像差的Zernike系数分解图,此超连续谱光纤激光器的800 nm波长输出光束像差以第3项离焦为主,其次是第6项彗差。对光纤激光



(a) 光强分布 (b) 波前复原
(a) Light distribution (b) Reconstruction of wave front

图2 800 nm波长波前测试结果

Fig. 2 Test result of 800 nm wave front

器整个波段的输出光束像差特性测试和分析,离焦具有较大的畸变幅值,整体像差的峰谷值(Peak to Valley, PV)值在 0.5λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)以内。本文的目标是对以离焦成分为主的像差进行校正,且校正精度达80%以上。后续像差补偿器件设计和研究都以此为需求背景,制备出针对光纤激光器特定像差的补偿器件——横向压电驱动变形镜。

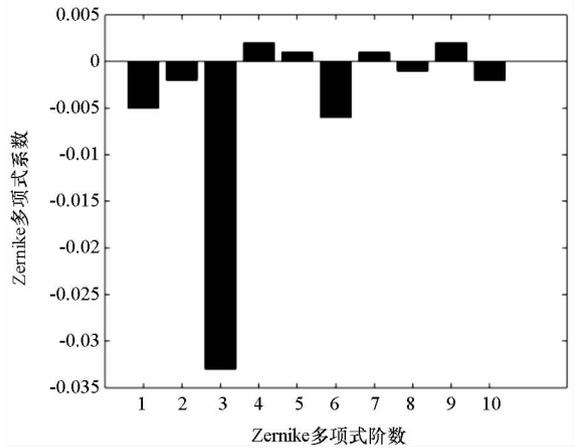


图3 800 nm波长波前Zernike系数分解

Fig. 3 Decomposition coefficient of 800 nm wave front for Zernike polynomial

2 横向压电驱动的3单元变形镜样镜

2.1 原型样镜

根据上一节对光纤激光器输出光束像差特性的分析,像差补偿器件需要有很好的针对离焦像差的校正能力和 0.5λ 以上的变形量。本文选用双压变形镜的基本结构,设计了单层压电驱动变形镜作为像差补偿器件。离焦像差通常可以利用中心圆形电极和环形电极配合构成背部的区域电极。变形镜的样镜及背部电极分布如图4所示。在设计时考虑了空间利用率,整体尺寸控制在

40 mm 以内,有效口径为 15 mm。引线采用 0.1 mm 的铜导线,与相应的电极和电路板相连接。压电陶瓷采用 PZT-5H,镜片为单晶 Si,二者厚度均为 1 mm。变形镜部分材料和参数如表 1 所示。

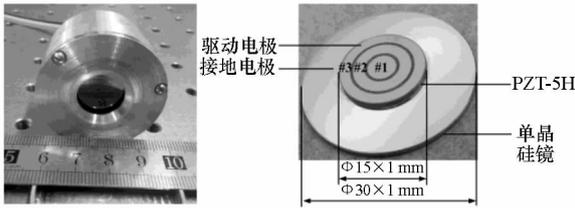


图 4 变形镜原型样镜及其背部的电极分布

Fig.4 Prototype DM and its electrodes' distribution

表 1 变形镜部分材料参数和尺寸

Tab.1 Part material properties and dimensions of the unimorph DM

部件	性能	数值
镜片	材料	单晶 Si
	直径/mm	30
	厚度/mm	1
	泊松比 γ	≈ 0.22
	杨氏模量 E/Gpa	170
压电片	材料	PZT-5H
	直径/mm	15
	厚度/mm	1
	泊松比 γ	0.34
	杨氏模量 E/Gpa	60
	压电常数 $d_{31}/\text{pC}/\text{N}$	-283
支撑夹具	材料	硬铝

2.2 影响函数和频响

变形镜的影响函数是指当对变形镜的驱动电极施加驱动电压时变形镜表面产生的形变。影响函数反映了变形镜的像差校正能力。变形镜的控制电压在 400 V,采用立式干涉仪进行测试。下

面是实测和仿真得到的三个电极的影响函数截线情况^[14-15]。从图 5 中可以看出,三个电极的最大变形量分别为 0.4 μm 、0.6 μm 和 0.5 μm 。中心 #1 电极以及 #2 电极的影响函数实测和仿真非常接近,PV 值误差不超过 0.02 μm 。而 #3 电极略大,有 0.093 μm 的偏差。从变形量数值来看,光纤激光器实际像差的 PV 值在 0.5 μm 以内,变形镜满足行程需求。表 2 是对仿真和实测结果进行比较。三个电极影响函数截线的仿真 PV 值吻合误差和均方根 (Root Mean Square, RMS) 值吻合误差均在 24% 以内,表明了仿真模型的有效性。

利用激光多普勒测振仪 (Polytec PSV500) 进行了变形镜的频响测试。中心电极加载 50 V 的白噪声信号,测试镜面的响应速度,结果如图 6 所示。一阶谐振频率达到了 12.1 kHz,表明变形镜对光纤激光器以及一般的自适应光学系统完全可以满足频率需求。

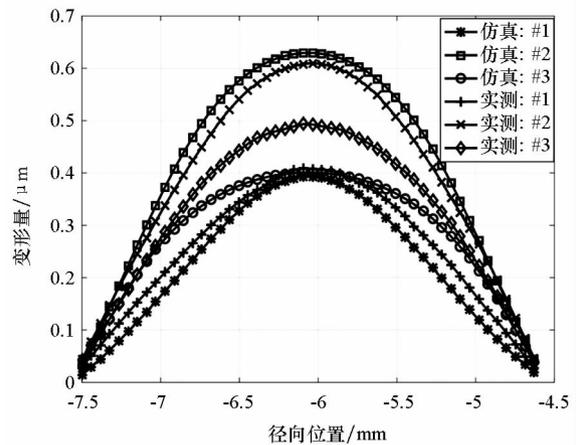


图 5 三个电极的影响函数实测和仿真结果截线

Fig.5 Influence function curves of simulation and measurement for 3 electrodes

2.3 闭环仿真校正结果

采用具有自主知识产权的闭环校正仿真软件 (Seelight) 来验证变形镜的校正能力。将变形镜影响函数和校正对象导入闭环仿真软件,设置相关参数后即可得到闭环迭代校正的结果,如图 7 所示。从拟合残差的图形来看,存在着类似球差

表 2 影响函数截线实测和仿真对比 (有效口径 15 mm)

Tab.2 Cooperation of influence function curves between simulation and measurement (aperture is 15 mm)

电极	仿真 PV/ μm	实测 PV/ μm	PV 值误差/ μm	PV 值吻合误差/%	RMS 吻合误差/%
#1	0.393 1	0.409	0.016	3.91	8.72
#2	0.629 5	0.610	0.020	3.27	8.51
#3	0.400 9	0.493 9	0.093	18.8	22.49

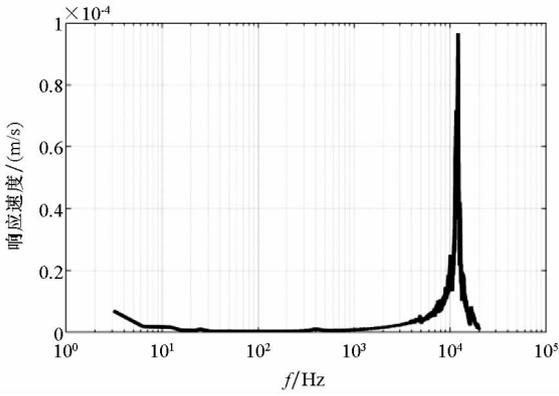
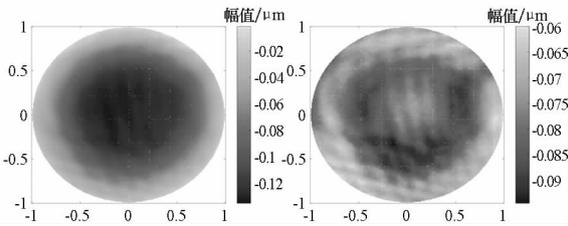


图6 白噪声频率响应

Fig. 6 Frequency response of white noise

和彗差的误差,但在环带上分布不均,并不完全对称。由于环形电极影响函数在圆周方向是对称的,无法校正这些残差。拟合误差由式(1)计算,即残余波前 C 的 RMS 值和原始波前 ϕ 的 RMS 值的比值 Fe 。其中 $\varphi(x, y)$ 与 $c(x, y)$ 分别为有效孔径内点 (x, y) 的波前幅值, S 为通光孔径面积。经计算,光纤激光器像差的拟合误差为 0.232 7。

$$Fe = \frac{RMS_c}{RMS_\varphi} = \frac{\sqrt{\frac{1}{S} \iint_S [c(x, y) - \bar{c}]^2 dx dy}}{\sqrt{\frac{1}{S} \iint_S [\varphi(x, y) - \bar{\varphi}]^2 dx dy}} \quad (1)$$



(a) 拟合面形 (a) Fitting surface
(b) 校正后残差 (b) Residual error

图7 闭环仿真结果

Fig. 7 Results of closed loop simulation

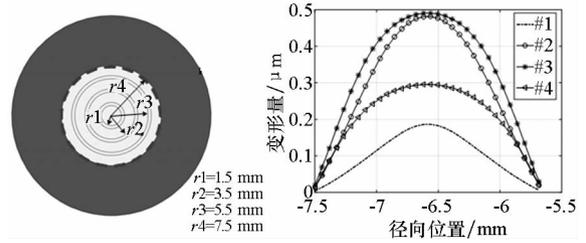
3 有限元优化

变形镜的拟合精度与空间行程受到多种因素的影响,比如电极的空间排布、电极形状、有效口径、层结构的结构尺寸以及控制方法等。从 2.1 节已经知道有限元仿真影响函数的吻合度较高,因此利用有限元分析的方法,针对拟合精度与变形量两个方面对现有变形镜结构进行仿真优化,有望提升光纤激光器输出光束质量。

3.1 电极环数

对于三单元变形镜的闭环仿真结果的残差中类似球差的误差,考虑增加一环,构成四单元的变

形镜,结构如图 8(a) 所示。从影响函数的截线图 8(b) 也可以看出,其二、三环电极的影响函数极为接近,而每一环的电极宽度减小,各电极的最大变形量较 3 单元变形镜有所减小,所以增加环形电极意义较小。



(a) 电极分布 (b) 影响函数截线

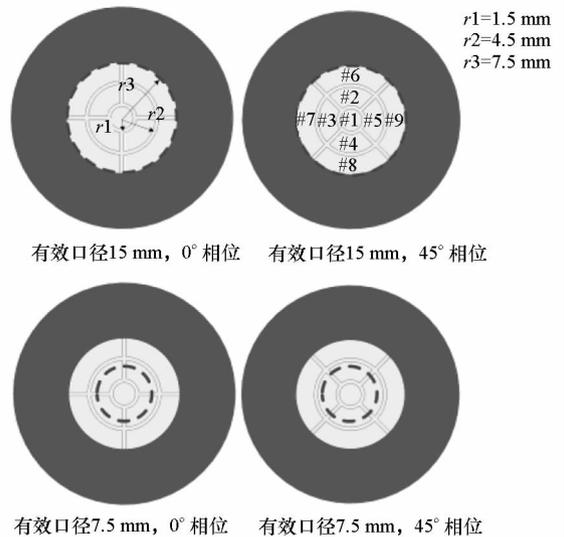
(a) Electrodes' distribution (b) Influence function curves

图8 4单元变形镜

Fig. 8 4-element unimorph DM

3.2 分割电极及有效口径

残差的每一环都有大约 1/4 不同,可以考虑将二、三环电极分割为八块扇形,构成 9 单元的变形镜。由于分割后产生了相位,可对 0° 和 45° 相位两种情况进行仿真对比,以观察优化的效果。得到仿真影响函数后,经过闭环校正仿真, 0° 和 45° 相位的实际拟合误差分别为 30.69% 和 32.07%,全口径下的校正效果比三单元还要差。



有效口径15 mm, 0° 相位 有效口径15 mm, 45° 相位

有效口径7.5 mm, 0° 相位 有效口径7.5 mm, 45° 相位

图9 9单元变形镜

Fig. 9 9-element unimorph DM

观察 9 单元中 45° 相位变形镜二、三环电极的影响函数仿真结果(见图 10),有效口径的边缘不是最高点,而面形残差中可以看出最高点位置在边缘。因此,可将有效口径缩小,这里根据第三环电极影响函数最高点的位置,将有效口径设置

为 7.5 mm。同时,在光路中增加扩束镜即可实现原有 15 mm 的有效口径。因此在有效口径外存在影响函数最高点可对内部边缘的变形进行控制。进一步仿真 0°和 45°相位的结果,拟合误差减小(见表 3)。9 单元 45°相位在 7.5 mm 有效口径下光纤激光器像差校正后仅有 11.66% 的残余误差,0°相位是 16.76%。最大与最小的拟合误差之间有 5% 的差异,但均满足校正需求。因此 9 单元 45°相位在 7.5 mm 口径下可将光纤激光器波前畸变降低至 1/10 左右,提升了变形镜的校正能力,相比于原始的 3 单元样镜提升了一倍的拟合精度。

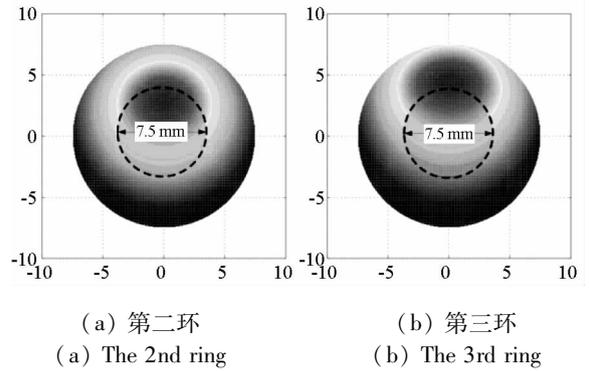


图 10 9 单元 45°相位变形镜影响函数
Fig. 10 Influence functions of 9-element unimorph DM of 45° phase position

表 3 3 单元与 9 单元变形镜拟合误差对比

Tab. 3 Cooperation of fitting error between 3-element and 9-element unimorph DM

	3 单元(15 mm)	9 单元 0°(15 mm)	9 单元 45°(15 mm)	9 单元 0°(7.5 mm)	9 单元 45°(7.5 mm)
<i>Fe</i>	0.232 7	0.306 9	0.320 7	0.167 6	0.116 6

3.3 层结构厚度比

在轮廓尺寸、有效口径一定的情况下,变形镜的行程 w 主要受到层结构的厚度 h 的影响。图 11 是压电陶瓷在三种厚度下,9 单元变形镜的行程 w 与厚度比 h_g/h_p (镜片与压电陶瓷片厚度之比)的关系。仿真时,取有效口径 7.5 mm,9 个电极全部通 400 V 电压。从图中可以发现, h_p 越小,行程 w 反而越大。并且, h_p 越小, w 随 h_g/h_p 的变化敏感度越来越小。在同一 h_p 下, h_g/h_p 在 0.1 ~ 1.5 之间, w 有一个最大值 w_{max} ,此时 $h_g/h_p \approx 0.3$ 。三种厚度的 h_p 下, w_{max} 分别为 2.55 μm 、1.20 μm 、0.65 μm 。相比于 3 单元样镜的行程(7.5 mm 口径,0.41 μm)均有大幅提升(>60%)。因此,当压电陶瓷厚度确定时,可根

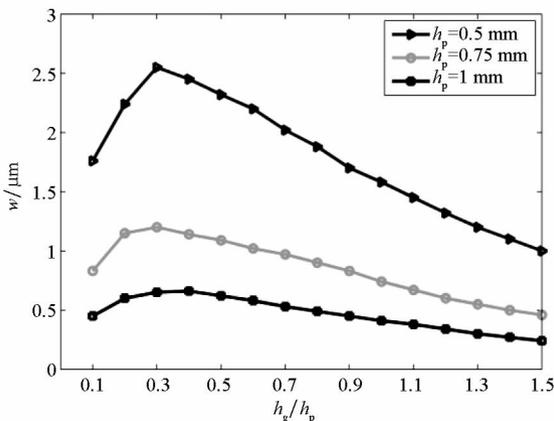


图 11 9 单元变形镜行程与厚度比的关系
Fig. 11 Relationship between displacement and thickness ratio

据此规律选择合适的镜片厚度,从而得到更大的行程。

4 结论

在超连续谱光纤激光器中针对其特定的像差加入横向压电驱动变形镜,有望提升激光器输出光束质量。对光纤激光器的输出光束特性进行了测试分析,其波前畸变主要以 Zernike 多项式第三项离焦为主。根据其像差特性试制了 3 单元的横向压电驱动变形镜样镜。仿真与实测的影响函数 PV 值及 RMS 值吻合度在 70% 以上,一阶谐振频率在 12 kHz 以上。闭环仿真校正结果拟合精度为 0.77。为进一步提升变形镜校正能力,分析了残差的特点,并利用有限元分析的方法优化了变形镜参数。优化的 9 单元变形镜在 7.5 mm 口径下最终可将校正精度提升至 0.9。镜片与压电陶瓷厚度比在 0.3 左右时,镜片的行程达最大,相比于 3 单元样镜行程增加 60% 以上。

参考文献 (References)

[1] 宁禹. 双压电片变形反射镜的性能分析与应用研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2008.
NING Yu. Performance test and application study of a bimorph deformable mirror [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)

[2] 周虹. 双压电片变形反射镜研制与应用研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
ZHOU Hong. Research on bimorph deformable mirror and its application in adaptive optics [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

- [3] 林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 337-351.
LIN Xudong, XUE Chen, LIU Xinyue, et al. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. Chinese Optics and Applied Optics Abstracts, 2012, 5(4): 337-351. (in Chinese)
- [4] 黄盛炆, 习锋杰, 宁禹, 等. 非均匀光强对曲率型自适应光学系统的影响[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(1): 9-12.
HUANG Shengyang, XI Fengjie, NING Yu, et al. Influence of nonuniform intensity on curvature adaptive system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 31(1): 9-12. (in Chinese)
- [5] Liu Y, Ma J Q, Chen J J, et al. Robustness properties of hill-climbing algorithm based on Zernike modes for laser beam correction[J]. Applied Optics, 2014, 53(10): 140-146.
- [6] Pribošek J, Diaci J, Sinzinger S. Simple unimorph deformable mirrors fabricated from piezo buzzers[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2016, 26(5): 055009.
- [7] Rausch P, Verpoort S, Wittrock U, et al. Unimorph deformable mirror for space telescope: design and manufacturing[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19469-19477.
- [8] Dai Y, Zhao L, Zhang Y D, et al. Adaptive optics vision simulation and perceptual learning system based on a 35-element bimorph deformable mirror [J]. Applied Optics, 2015, 54(5): 979-985.
- [9] Long C S, Loveday P W, Forbes A. Zernike polynomial based Rayleigh-Ritz model of a piezoelectric unimorph deformable mirror[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2012, 8(3): 237-245.
- [10] Gerber M, Graf T, Kudryashov A. Generation of custom modes in a Nd:YAG laser with a semipassive bimorph adaptive mirror[J]. Applied Physics B, 2006, 83(1): 43-50.
- [11] Ilyina I V, Cherezova Y T, Kudryashov A V. Far-field laser intensity distribution formation by means of intracavity adaptive optics[J]. Laser Resonators and Beam Control IX, Proceedings of SPIE, 2007, 6452: 1-10.
- [12] Lubeigt W, Griffith M, Laycock L, et al. Reduction of the time-to-full-brightness in solid-state lasers using intra-cavity adaptive optics [J]. Optics Express, 2009, 17(14): 12057-12069.
- [13] Kudryashov A, Alexandrov A, Rukosuev A, et al. Extremely high-power CO₂ laser beam correction [J]. Applied Optics, 2015, 54(14): 4352-4358.
- [14] 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(5): 15-20.
YANG Qiang, CAO Genrui. The optimization design of control electrode patten for the 13-segment bimorph mirror[J]. Optical Technology, 1996(5): 15-20. (in Chinese)
- [15] 吴伟彬, 戴一帆, 关朝亮, 等. 横向压电效应变形镜优化设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0818003-1-0818003-7.
WU Weibin, DAI Yifan, GUAN Chaoliang, et al. Optimization design for transversal piezoelectric effect deformable mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 0818003-1-0818003-7. (in Chinese)