

文章编号 1004-924X(2017)10-2551-13

# 1.23 m SiC 主镜的本征模式主动光学校正

朱 熠, 陈 涛, 王建立, 李宏壮\*, 吴小霞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**采用直接最小二乘法和自由谐振法对大口径高刚度 SiC 主镜进行主动校正易引入较多解算误差,故本文提出以主镜的本征模式进行主镜面型校正来优化解算校正力幅值,以改进系统校正效果。该方法首先对主镜的响应矩阵进行一系列数学转换,得到一组相互正交的主镜本征模式,然后以各模式面形拟合校正目标,解算校正力。对 1.23 m SiC 主镜和主动支撑系统进行了有限元建模,通过仿真验证了提出方法的正确性。在此基础上,在搭建的 1.23 m SiC 主镜主动光学实验系统上进行了主动光学校正实验,并针对实验系统进一步优化了提出的方法。实验结果显示:利用该方法可将实验系统主镜面形误差由  $0.23\lambda$ RMS 校正至  $0.048\lambda$ RMS,表明以主镜本征模式进行主动校正,可有效抑制解算校正力幅值,提高系统校正能力。该方法适用于大口径、高刚度 SiC 主镜的主动校正。

**关键词:**主动光学;SiC 主镜;面形校正;本征模式;S-H 传感器

中图分类号:TH703; TH743 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172510.2551

## Active correction of 1.23 m SiC mirror using bending mode

ZHU Yi, CHEN Tao, WANG Jian-li, LI Hong-zhuang\*, WU Xiao-xia

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\*Corresponding author, E-mail: jilinbayan@163.com

**Abstract:** As active correction of a large aperture SiC mirror with high stiffness is vulnerable to many calculation errors by direction least square method or free resonance method, this paper proposes a primary surface correction algorithm using bending mode to calculate and optimize the active force and to improve the correction capability. Firstly, a series of mathematical transformations were performed on the influence matrix of the primary mirror, and a set of orthogonal bending modes of primary mirror were obtained. Then, correction targets were fitted in bending modes to calculate the correction force. An 1.23 m SiC mirror and a support system were modeled by finite element analysis and the algorithm was verified by simulation experiments. Moreover, an active support system for the 1.23 m SiC mirror was set up to correct primary surface and a further optimization for the algorithm was conducted based on this system. The experiments show that the surface error is corrected from  $0.23\lambda$  RMS to  $0.048\lambda$  RMS by the proposed bending mode. Results of analysis and experiment demonstrate that the algorithm by bending mode efficiently reduces active force ranges and improves correction capability. It is significant for the active correction of large aperture SiC mirrors with high stiffness.

**Key words:** active optics; SiC mirror; aberration correction; bending mode; S-H sensor

收稿日期:2017-06-01;修订日期:2017-07-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61605199)

## 1 引言

主动光学这个概念最早由 R. N. Wilson, F. Franza 和 L. Noethe 在 1987 年提出,并应用于 ESO New Technology Telescope (NTT) 3.6 m 大口径望远镜的主镜支撑<sup>[1]</sup>,采用大口径薄弯月型轻量结构,不仅减少了主镜和支撑结构的加工成本和加工工期,还保证了高品质的成像效果。受其启发,其后设计和制造的大口径望远镜的主镜都采用了主动支撑结构,并取得了良好的效果。时至今日,主动光学技术已经是口径望远镜设计中不可或缺的一部分。

大口径非薄弯月主镜一般具有高刚度和高重量,因此不易实现基于硬结构的被动支撑和主动校正,一般会用液压或气压方式来实现稳定支撑,如 MMT、LBT 等望远镜采用气压支撑<sup>[2-3]</sup>, WIYN、AEOS 等望远镜采用液压支撑<sup>[4-5]</sup>。还有一些望远镜采用混合支撑方式,GEMINI 通过镜室气压抵消一部分重力,主动支撑采用液压实现<sup>[6]</sup>;DAG 通过气压实现主动支撑,位置固定硬点采用液压实现<sup>[7]</sup>。本文采用液压混合支撑系统,通过液压系统和弹簧结构力促动器分别实现被动支撑和主动校正<sup>[8]</sup>,在保证主镜位置同时确保主动校正有充足的动态范围。

主动光学的基本原理为:用光学探测器采集系统光路的波像差,通过波像差解算出对应的主镜面形畸变,再由畸变解算出校正力。因此,主镜校正力调整量解算算法的设计,是实现主动光学应用的一个关键。目前,主动光学常用的校正力解算方法为直接最小二乘法和自由谐振法。直接最小二乘法是用各支撑点的响应面形以最小二乘方式直接拟合校正目标,从而解算出各点的校正力调整量,也有在此基础上改进的算法,如阻尼最小二乘法。GEMINI、LSST 等均采用最小二乘解算方法<sup>[9-10]</sup>。该方法解算结果幅值较大,且响应面形互相不交,导致校正过程一般需要多次迭代实现。自由谐振法是先求解出主镜的自由谐振面形和对应的各点的力,用谐振面形拟合校正目标,再解算校正力。VLT、AEOS 等均采用自由谐振法<sup>[5-11]</sup>。长春光机所在 620 mm 主动光学实验望远镜上对上述两种算法均进行了实验验证<sup>[12-13]</sup>。自由谐振面形虽然互相正交,但其反映

的是主镜镜体的结构特性,在包括侧支撑作用时不一定能够完好实现,因而影响校正效果。对于大口径高刚度主镜的主动校正,直接最小二乘法的解算结果容易超出支撑结构的校正能力,自由谐振法的面形不易实现,因而容易引入更大的解算误差,影响校正效果。

针对上述问题,本文以支撑结构能对应实现的主镜本征模式来解算校正力,由主镜响应矩阵通过一系列数学转换得到一组反映支撑结构对主镜校正能力的正交模式,用于拟合求解校正力,可有效缩减解算校正力幅值,并提高面形校正效果。

## 2 算法基本原理

### 2.1 主动光学原理

主动光学建立在主镜满足线性定律的基本条件下<sup>[1]</sup>,即镜面形变符合力的线性叠加,且相同的力变化将始终产生相同的弹性变形。在此基础上,如果知道了各个主动支撑点加单位力后的面形形变  $A_i(x, y)$ ,即响应矩阵  $A(x, y)$ ,则对一组施加在支撑点的力  $F$ ,引起的形变  $W(x, y)$  应满足:

$$W = A * F \text{ 或 } W(x, y) = \sum_{i=1}^n A_i(x, y) * F_{ij}, \quad (1)$$

$$F = A \setminus W. \quad (2)$$

此为直接最小二乘解算法的基本原理。

### 2.2 本征模式

由于响应面形  $A_i(x, y)$  一般不互相正交,进行拟合校正时一般需要多次迭代;且  $A_i(x, y)$  无法反映面形校正的难易度,无法做出取舍,解算力容易偏大。为了解决上述问题,一种方法是阻尼最小二乘法,能抑制解算力幅值;还有一种采用自由谐振面形去拟合,自由谐振面形两两正交,且刚度递增,但由支撑点不一定能实现。

上述问题的关键是需要一组相互正交、刚度有差异、且能够由支撑点实现的面形  $B_i(x, y)$  去拟合。由于响应矩阵  $A(x, y)$  对应各个支撑点的力,因此,本文参考 MMT、LBT 等大口径望远镜的校正算法<sup>[2-3]</sup>,将  $A(x, y)$  进行 SVD 奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)来得到一组相互正交、RMS 相等的面形,即本征模式面形  $B_i(x, y)$ ,及其对应的正交模式力  $BF_i$ 。由

于  $B_i(x, y)$  由  $A(x, y)$  分解而成, 则有:

$$B_i = A * BF_i \text{ 或 } B_i = \sum_{j=1}^n A_j(x, y) * BF_{ij}, \quad (3)$$

用  $B_i$  代替  $A$  对  $W$  进行拟合解算, 则有:

$$W = \sum_{i=1}^n B_i * b_i, F = \sum_{i=1}^n BF_i * b_i, \quad (4)$$

其中:  $b_i$  为各模式面形  $B_i$  对  $W$  的拟合系数, 即各模式面形  $W$  上的比重。通过  $b_i$  和各模式力  $BF_i$  相乘, 得到实现  $W$  所需的校正力  $F$ 。  $B_i$  为标准正交阵, 即:

$$b_i = B_i^T * W. \quad (5)$$

各  $BF_i$  的 RMS 递增, 即模式刚度递增, 同理于自由谐振法, 只选取低刚度的模式进行拟合, 可有效抑制校正力幅值, 同时保证良好的校正效果。如果选取全部模式去拟合目标面形, 则相当于在最小二乘直接拟合过程中进行一次分解, 然后再重新组合恢复, 其结果在理论上应该和最小二乘直接拟合一致。

### 2.3 响应矩阵

无论是直接最小二乘拟合还是本征模式拟

合, 其基础都是响应矩阵  $A(x, y)$ 。  $A_i(x, y)$  的理想定义是单独一个点  $i$  施加单位力时的面形形变, 但实际上单独加力于一点产生的是主镜的刚体位移, 为了定义一个点的响应函数, 其力值应该是该点产生的净力抵消净力矩之后的力值。抵消净力和净力矩的方法有很多, 基本思路都是尽量突出响应力施加点的力值。本文参考并整合 GEMINI 和 MMT 所采用的方法<sup>[2,9]</sup>, 使响应点以外各点的力幅值 RMS 最小。各响应点施加 200 N 再抵消净力和净力矩的力值  $F_1 \sim F_9$  如表 1 所示。

这样, 实际使用响应矩阵时, 要先求出各个响应面形的拟合系数, 再以该系数为权重对响应力进行叠加, 即拟合力有:

$$F = \sum F_i * a_i \quad i = 1, 2, \dots, 9. \quad (6)$$

由于进行了净力和净力矩的抵消, 力值矩阵的秩由原来的 9 降为 6, 即不是满秩阵。对应的响应矩阵的秩也降为 6, 因而能分解出的正交本征模式只有 6 个。

表 1 各支撑点响应面形对应力

Tab. 1 Forces of support points on influence surfaces (N)

	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$
1	168.2351	-17.4509	-17.4509	-43.2694	-43.2694	-22.2222	-1.17503	-1.17503	-22.2222
2	-17.4509	168.2351	-17.4509	-1.17503	-22.2222	-43.2694	-43.2694	-22.2222	-1.17503
3	-17.4509	-17.4509	168.2351	-22.2222	-1.17503	-1.17503	-22.2222	-43.2694	-43.2694
4	-43.2694	-1.17503	-22.2222	115.8824	-53.1699	8.725449	39.67312	8.725448	-53.1699
5	-43.2694	-22.2222	-1.17503	-53.1699	115.8824	-53.1699	8.725448	39.67312	8.725449
6	-22.2222	-43.2694	-1.17503	8.725449	-53.1699	115.8824	-53.1699	8.725449	39.67312
7	-1.17503	-43.2694	-22.2222	39.67312	8.725448	-53.1699	115.8824	-53.1699	8.725449
8	-1.17503	-22.2222	-43.2694	8.725448	39.67312	8.725449	-53.1699	115.8824	-53.1699
9	-22.2222	-1.17503	-43.2694	-53.1699	8.725449	39.67312	8.725449	-53.1699	115.8824

## 3 实验系统构成

### 3.1 主镜及支撑结构

实验系统的主镜为直径 1 230 mm、厚 130 mm 的轻量化主镜, 径厚比 9.31 : 1, 曲率半径为 3 600 mm, 材料为 SiC, 质量为 108.94 kg, 中心孔直径为 300 mm。

支撑为液压缸与力促动器混合系统, 由轴向 9 个主动支撑点和侧向 8 个被动支撑点组成。轴

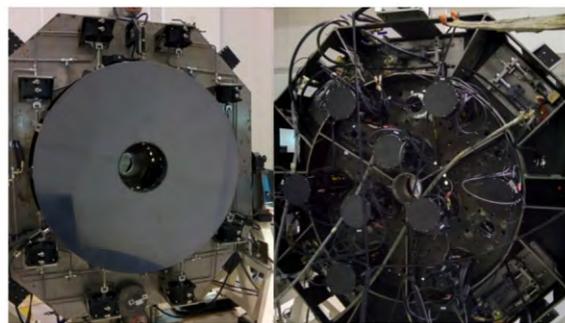


图 1 1.23 m SiC 主镜及其支撑结构

Fig. 1 Photos of 1.23 m SiC mirror and its support system

向支撑点由液压缸和力促动器组合而成,按 3、6 个分布在 2 圈。力促动器与轴向液压缸为并联结构,力促动器用于施加主动校正力;轴向液压缸分 3 个区连接,用于施加轴向被动支撑力<sup>[8]</sup>。侧向支撑点液压缸分 2 个区连接。轴向和侧向各有 3 个位移传感器,与 5 个液压区调节系统配合控制主镜的位置<sup>[14]</sup>。

### 3.2 促动器设计

力促动器由位移输出单元、弹簧单元和测力反馈单元构成。位移输出单元采用步进电机、减速器与螺纹丝杠结构;弹簧单元将位移转化为作用力;测力反馈单元采用 Stype-50kg 型 S 形 Loadcell。力促动器的动态范围为  $-400 \sim 400$  N,力分辨率为  $0.051\ 62\ \text{N}^{[15]}$ 。

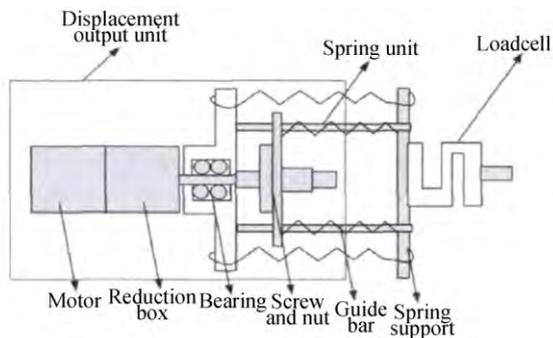


图 2 促动器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of force actuator

### 3.3 夏克-哈特曼(S-H)波前传感器

多功能模块化哈特曼波前传感器系统如图 3 所示,它包括光源模块、五维调整架模块、分光棱镜模块、微透镜模块及相机模块。模块间具有通用接口,便于拆卸更换<sup>[16]</sup>。传感器测出的波前误



图 3 夏克-哈特曼波前传感器系统

Fig. 3 Photo of Shark-Hartmann (S-H) wavefront sensor system

差采用 35 项 Zernike 多项式拟合。实验中采用子孔径  $200\ \mu\text{m}$ 、焦距  $22\ \text{mm}$  的微透镜阵列,哈特曼在反射镜上的采样点数为 640 个。

## 4 1.23 m 主镜有限元仿真

为了确认响应力产生的面形是否满足检测需求,并验证本征模式拟合算法的正确性,在进行主动光学实机实验前进行了有限元仿真验证。在 ANSYS 仿真环境下建立 1.23 m SiC 主镜的有限元模型,模型包含 34 141 个有限元,62 979 个节点,背面有 9 个点对应 9 个主动支撑点位置。仿真模型及其主动支撑点位置如图 4 所示。

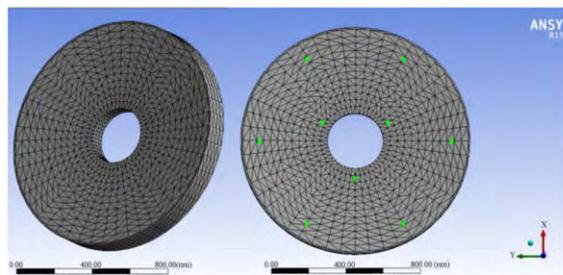


图 4 1.23 m 主镜有限元模型及轴向支撑点位置(俯视)

Fig. 4 Finite element model of 1.23 m mirror and location of axial support points (Top view)

为了使仿真结果收敛,需要定义合适的边界条件。Myung K. Cho 曾针对 GEMINI 的仿真边界条件和响应力进行了一系列的对比研究<sup>[9]</sup>,考虑到实际系统底支撑为三区液压结构,本文参考其文章内的 3-ZONE MPC 法,仿照液压系统特性,定义了 1.23 m 主镜有限元模型的边界条件如下:

$$\sum_{i \in C_j} d_i = 0 \quad j = 1, 2, 3, \quad (7)$$

其中: $d_i$  为某个支撑点的轴向( $z$  向)位移, $C_i$  为一个液压连通区。支撑点的  $x, y$  向位移约束为 0,即支撑点固定于主镜底面。这样定义边界条件比直接定义 3 个约束点更接近实际系统的工作状态。

将上一节的  $200\ \text{N}$  基底响应力施加在有限元模型上,方向为  $z$  轴正向,求解出各个面形形变。各个响应面形的 P-V 和 RMS 见表 2,解算出的响应面形 1,4,5 如图 5 所示。

表 2 各个响应面形的 P-V 和 RMS

Tab. 2 P-V and RMS of influence surfaces (nm)

	PV	RMS
1	341.06	70.883
2	342.63	70.596
3	341.03	70.396
4	738.74	126.93
5	744.81	128.60
6	734.42	127.22
7	725.80	125.92
8	751.62	129.71
9	745.51	127.94

由表 2 可看出,仿真上 200 N 基底产生的响应面形 RMS 最小为 70.396 nm,基本能满足波前探测器的检测需求。将仿真计算得到的响应矩阵分解出本征模式,得到 6 个本征模式及其对应的力值。各模式的面形如图 6 所示,前 2 个模式的像散较多,模式 3 为离焦和三叶混合,模式 4 近似

三叶,模式 5、6 类似彗差。类三叶的刚度小于类彗差的刚度,且类三叶模式只有一个,这与主镜的三区对称 9 点支撑结构相对应。上述仿真结果表明,本征模式与支撑结构相对应,反映了支撑结构对主镜的弯曲能力。

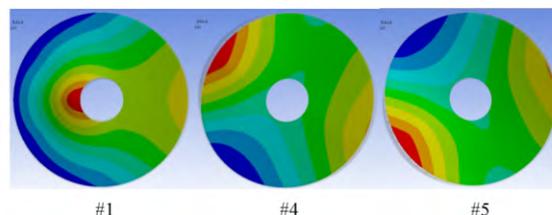


图 5 1,4,5 号响应面形

Fig. 5 Influence surfaces of #1 #4 #5

将 1、4、6 模式对应的力值施加在有限元模型上得到的面形如图 7 所示,其面形与解算面形基本一致,验证了本征模式可由主动支撑系统实现。

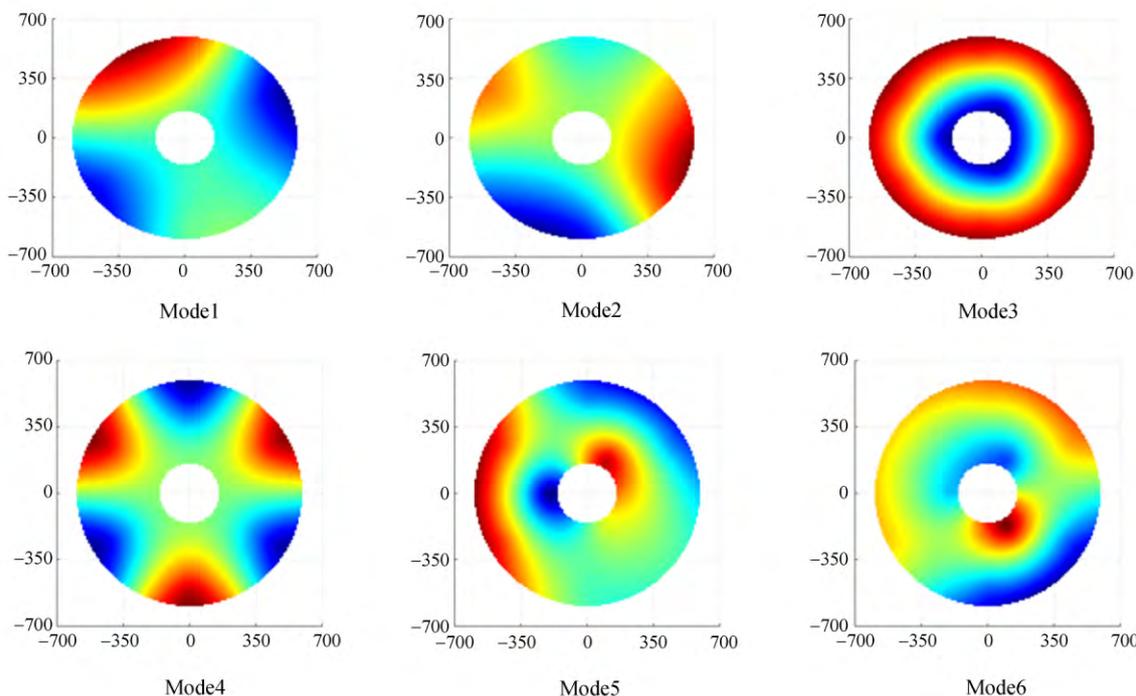


图 6 1~6 模式解算面形

Fig. 6 Calculated surfaces of modes 1-6

随机生成一组力施加在有限元模型上,生成的面形作为拟合目标,如图 8(a)所示。首先使用响应矩阵直接最小二乘拟合,拟合力在  $[-100, 187]$ ,幅值大于原力值。拟合力对应的面形如图 8(b)所示,拟合残差相对 RMS 为 0.91%。

将响应矩阵分解出本征模式,用得到的全部 6 个本征模式去拟合目标面形,解算和校正结果和直接最小二乘拟合基本一致,与之前分析相符。用前 4 模式拟合,力幅值在  $[-133, 71]$ ,幅值明显减小,拟合面形基本一致,如图 8(c)所示,拟合残

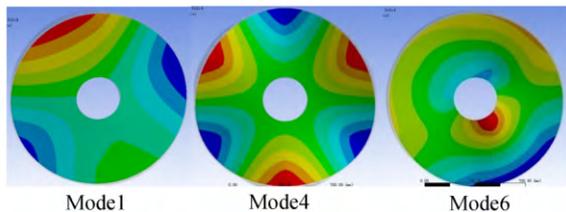
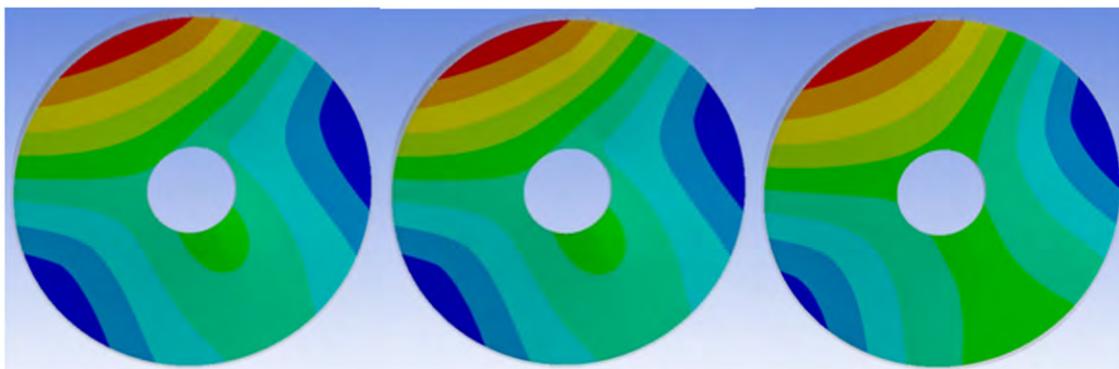


图 7 1,4,6 模式在有限元模型上实现的面形  
 Fig. 7 Surface of finite element model achieved by forces of modes #1, #4 and #6

差相对 RMS 为 17.5%。由此可见,通过模式选取可在保证一定校正能力的同时,明显地优化校正力幅值。

通过上述有限元仿真,确认 200 N 平衡的响应力满足实验系统的面形检测需求,验证了本征模式解算算法的正确性,并确认算法具有优化空间,可以进行下一步的主动光学系统实机实验。



(a) 拟合目标面形 (b) 最小二乘直接拟合 (c) 本征模式前 4 模式拟合  
 (a) Surface to be fitted (b) Surface fitted by least square (c) Surface fitted by the first 4 bending mode

图 8 不同方法拟合的面形

Fig. 8 Finite element models of surface fitted by different methods

### 5 主镜面形校正实验及结果分析

在 1.23 m SiC 主镜主动校正实验系统上验证校正的效果。将 1.23 m 主镜调整至水平状态,S-H 传感器放置在主镜焦点,如图 9 所示。S-H 传感器内光源经由主镜反射,再经过微透镜阵列在 CCD 上成点阵图像。主镜位置通过位置传感器和液压缸闭环来稳定。

S-H 传感器系统的光源照射主镜,主镜反射光通过微透镜阵列后在传感器 CCD 像面成像,通过像点偏移求解波像差,从而求得主镜面形。主镜面形误差对应 2 倍的波像差。

#### 5.1 响应面形确定及模式验证

为保证施加校正力后主镜处于稳定状态,除了通过位置闭环控制位置外,还要保持主动支撑力的净力和净力矩为 0。因此,作为校正力求解基底的各个响应力也应满足净力和净力矩为 0。响应力采用第 3 节分析计算的 200 N 平衡力,根

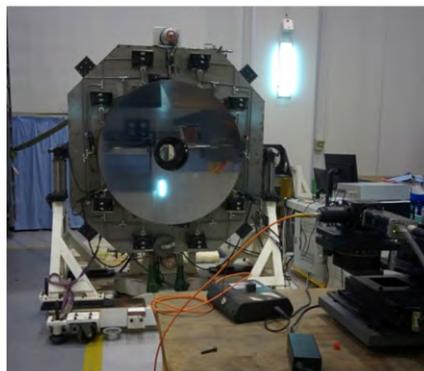


图 9 主动校正实验系统

Fig. 9 Photo of active correction system

据第 4 节的仿真分析,200 N 级的响应力能够产生可检测的面形形变。通过检测响应力施加前后的波像差变化确定各个支撑点的响应面形,全部 9 个支撑点的响应面形如图 10 所示。由图中可看出,响应面形 1 的凸起位置与支撑点位置不完全对应,6、9 响应面形与仿真结果不对应。这种现象说明在主镜校正时,除了轴向主动支撑点外,

还存在其他结构影响主镜的面形形变,主要是侧支撑存在的结构不平衡性,它导致在施加径向被动支撑的同时还存在轴向耦合,影响面形校正效果,对 6、9 号支撑点影响明显,加大了主镜面形校正的难度。由于该影响的存在,难以实现主镜的

自由谐振模式,自由谐振算法将引入大量解算误差,无法起到优化作用。而本征模式解算算法是基于主镜支撑结构自身校正特性的正交模式,即使上述影响存在,也能优化校正解算而不引入额外的误差,从而得到良好的面形校正结果。这是

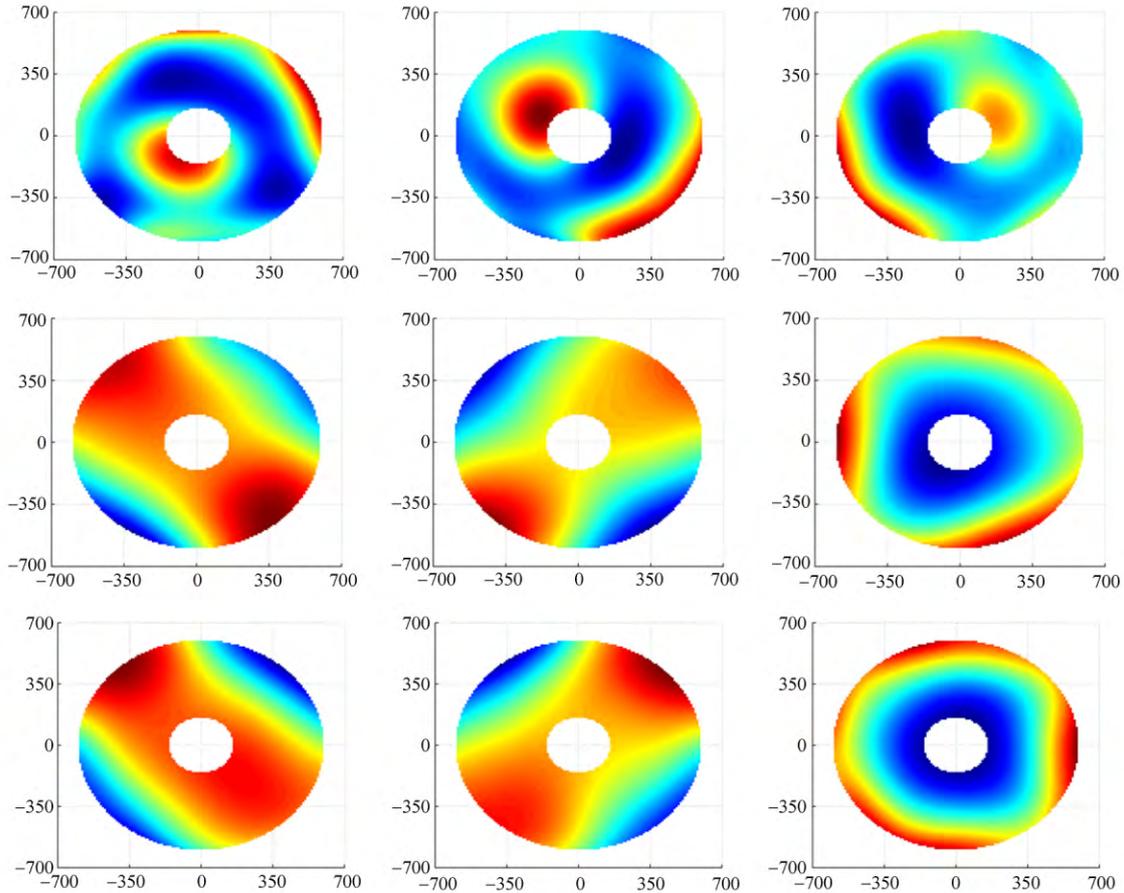


图 10 实验系统测量得到的 9 个响应面形

Fig. 10 Nine influence surfaces measured by experimental system

本征模式在主动光学应用上的一个优点。

对得到的响应面形矩阵进行分解,得到主镜支撑结构的本征模式和各模式力,各模式的相对刚度见图 11。可以看出,前 6 个模式满足模式刚度逐级递增。实验使用的响应力和响应面形理论上只有 6 个本征模式,后 3 个模式主要是由于高阶测量误差和主动支撑影响面形的外结构(如为完全解耦的侧支撑)产生,不应该参与解算校正。

前 6 模式面形如图 12 所示,归一化 Zernike 系数如图 13 所示。由图可知,随着模式阶次的升高,Zernike 系数向高阶集中,模式 1、2 主要集中在像散,其刚度是最低;模式 3 集中在  $x$  向三叶而不是彗差,说明该主动校正系统对主镜  $x$  向三叶

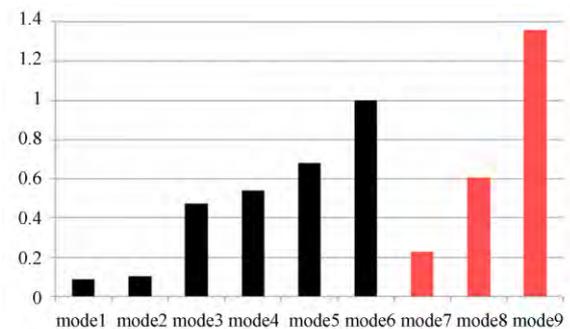


图 11 模式刚度柱状图

Fig. 11 Stiffness of each mode

的校正能力要优于彗差,这与系统的 3 区支撑分布相对应;模式 4、5 在彗差上较大,同时带有一定

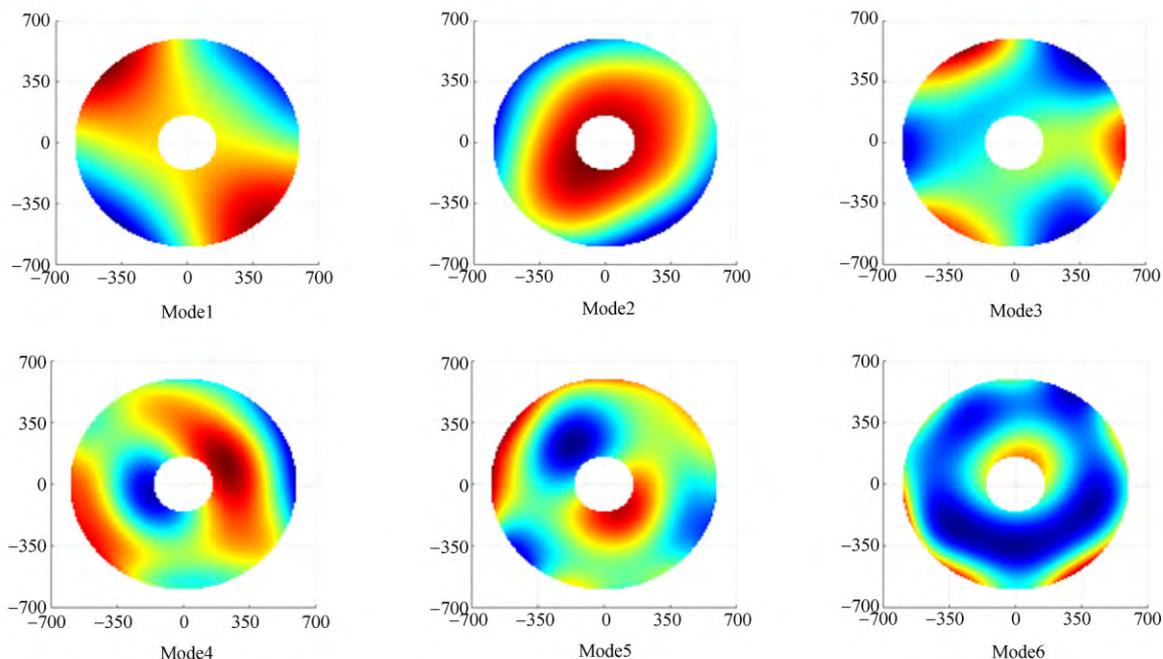


图 12 各模式解算面形

Fig. 12 Calculated surface of each mode

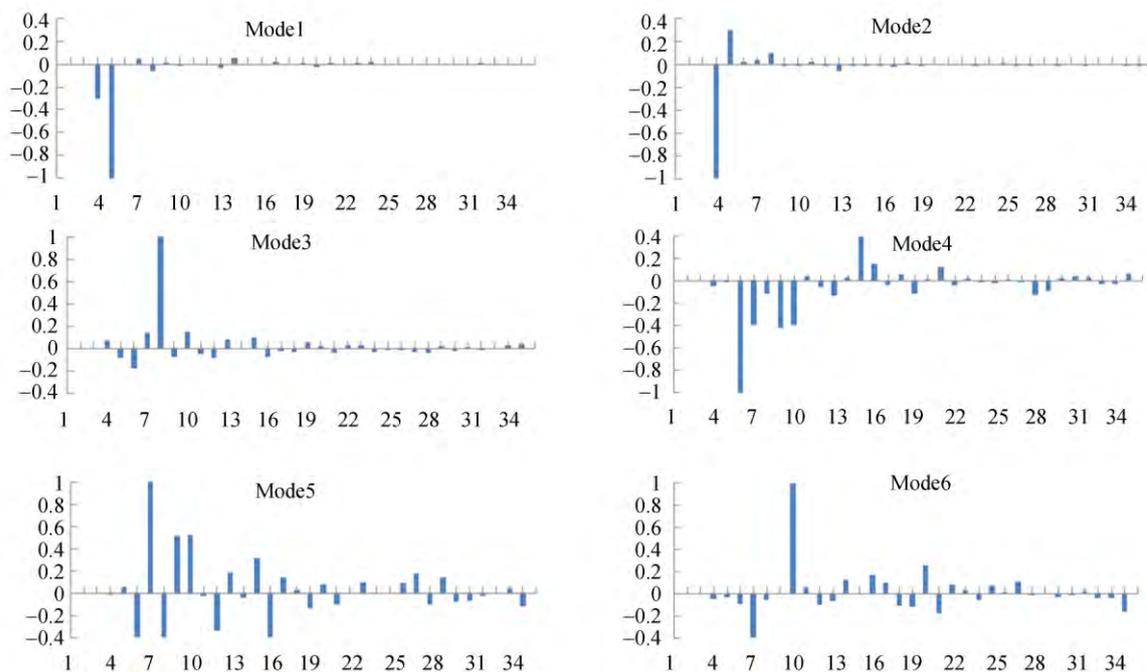


图 13 各模式的 Zernike 系数

Fig. 13 Zernike coefficient of each mode

的三叶和高阶像差,说明系统对彗差有一定的校正能力,但在校正时会引入高阶像差。

由于实验系统不考虑倾斜和离焦,因此实验数据解算结果无离焦模式,其余模式与有限元仿

真结果对应,模式 1、2 与有限元仿真模式 1、2 对应,模式 3、4、5 与有限元仿真模式 4、5、6 对应。

为了验证各模式在主动光学系统上的校正效果,将各个模式力施加在主镜上,测量面形变化是

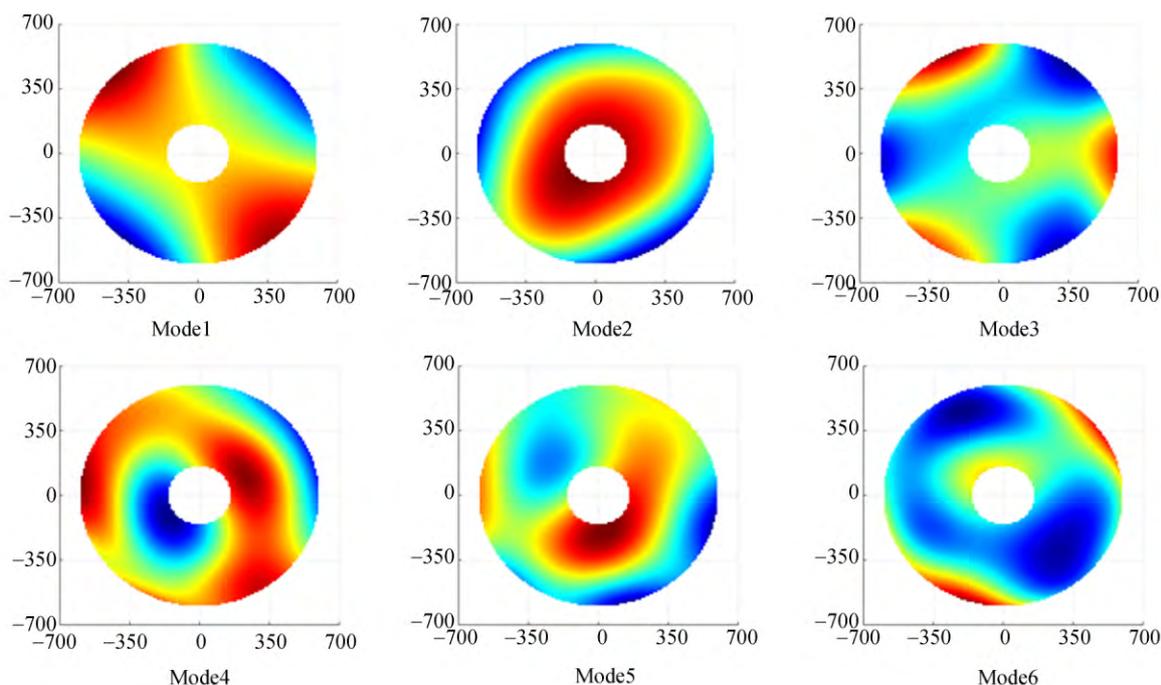


图 14 施加各模式力后的测量面形

Fig. 14 Measured surfaces of mirror exerted with forces of different modes

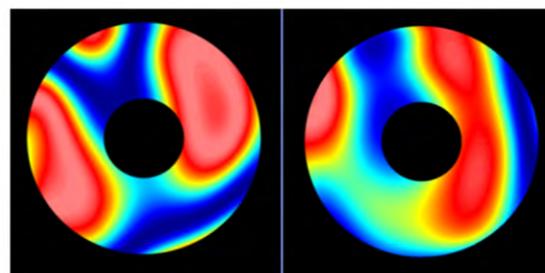
否与模式相对应。施力后的测量面形如图 14 所示。由结果可见,前 3 个模式解算和实际面形基本吻合;4、5 模式两者基本趋势一致,因为 Zernike 阶次提高,测量误差开始增加;6 开始有所差别。总体来说,主镜施加模式力后的面形与解算模式面形一致,说明各本征模式可以通过主动支撑结构实现,从侧面体现出检测的响应矩阵是基本可信的。

通过上述实验,得到了主动支撑系统的响应矩阵,并确认主镜的本征模式基本可由支撑系统实现,在此基础上可以进行面形校正实验。

### 5.2 面形校正及对比实验

#### 5.2.1 直接最小二乘拟合与本征模式拟合校正对比

将所有支撑点的校正力闭环在 0 N,使主镜处于无主动支撑的初始状态,检测得到初始面形的波像差如图 15(a)所示,面形误差 RMS 约为  $0.25\lambda$ 。由于主动支撑只有 2 圈 9 个点,理论上无法校正空间阶次高于 3 的面形误差,即 7 项以后的 Zernike 像差(不考虑倾斜和离焦)。像差主要集中在  $x$  向和  $y$  向像散( $x\_astigmatism$ ,  $y\_astigmatism$ )上,前 6 项中  $x$  向彗差和  $x$  向三叶较大。7 项以后的像差里球差和  $y$  向四叶较大。

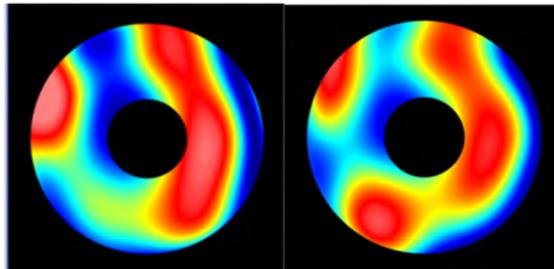


(a) p-v:1.163λ rms:0.248λ (b) p-v:0.702λ rms:0.115λ

图 15 初始面形(a)和直接最小二乘校正面形(b)  
Fig. 15 Initial surface (a) and surface corrected by least square (b)

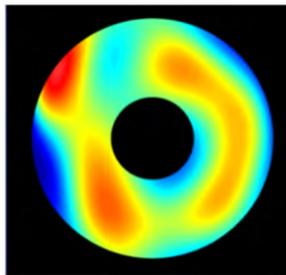
首先进行直接拟合解算。由于支撑结构校正能力有限,且直接拟合算法的本身缺陷,用之前测量得到的响应矩阵直接拟合时,解算的校正力幅值远大于 400 N,超出了促动器的校正范围。为了满足实验系统要求,尝试针对一部分像差进行拟合计算,在使用前 2 项 Zernike 直接拟合时,解算的校正力能满足要求,当包含 3、4 项,即彗差时,校正力超出了促动器极限。直接拟合解算的校正力施加后结果如图 15(b)所示,校正力最大值为 93 N。校正后面形误差 RMS 由  $0.248\lambda$  缩减到了  $0.115\lambda$ ,两个像散明显减小,校正效果明

显,但其余几项的像差基本不变。可见,对于大口径高刚度主镜实验系统,采用直接拟合会导致解算校正力幅值超出促动器的校正范围。而选择特定像差进行校正时,由于支撑结构的限制,只能针对像散等一小部分像差进行校正,校正效果一般。



(a) p-v:0.726λ  
rms:0.120λ

(b) p-v:0.464λ  
rms:0.093λ



(c) p-v:0.376λ rms:0.056λ

图 16 2,3,6 模式校正面形

Fig. 16 Surface corrected in modes 2, 3 and 6

然后采用本征模式拟合解算校正力。首先采用前 2 个模式解算校正力,校正力最大为 69 N,拟合校正的结果如图 16(a)所示。对比之前直接拟合校正的面形可发现,两次校正效果基本一致,但本征模式拟合的校正力幅值明显小于直接拟合的校正力幅值。

将拟合的模式增加为 3 个模式,校正结果如图 16(b)所示,校正力幅值增加为 120 N,校正后面形误差 RMS 缩减为 0.093λ,除了  $x, y$  向像散外,  $x, y$  向三叶也减少了。将模式增加到有效的全部 6 个模式,校正力幅值为 232 N,在促动器限位范围内,校正结果如图 16(c)所示,校正后面形误差缩减到了 0.056λRMS,接近  $\lambda/20$ ,前 6 项像差都得到了很好的校正,主要像差为球差,为支撑结构无法校正项。而高阶项,包括球差,也较原来有所缩减。

对比实验结果可见,在实现同样的校正效果时,采用本征模式拟合的校正力幅值小于最小二

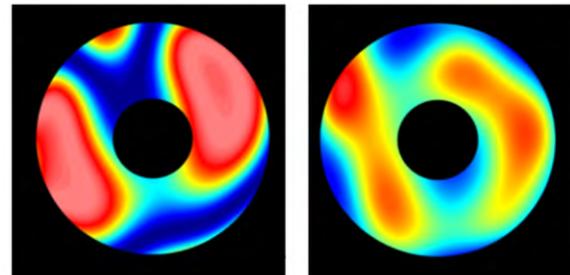
乘直接拟合,更易于实现主动校正系统;采用本征模式拟合校正能够对可实现的像差进行更良好的校正,得到更好的主镜面形。

### 5.2.2 本征模式优化

由于支撑结构和促动器输出的限制,通过选取有效的 Zernike 项和参与拟合的模式数,可以使校正力和面形达到最优。

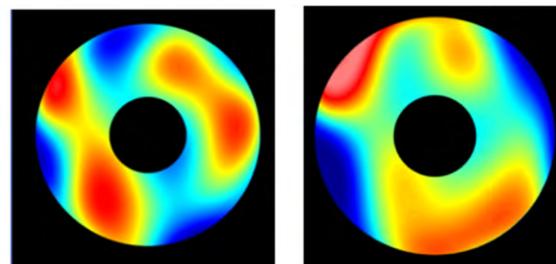
#### 5.2.2.1 拟合模式数优化

检测得到的初始面形如图 17(a)所示。分别采用 5、6、9 模式去拟合面形误差,对应的校正力幅值为 231,248,274 N。将校正力分别施加在主镜上,得到的面形如图 17(b)、17(c)和 17(d)所示。5、6 模式时校正效果相近,5 模式时前 6 项 Zernike 像差校正效果好一些,7 项以后校正效果差一些。使用 9 项时校正效果明显变差,  $x, y$  向像散较 5 模式或 6 模式时有明显上升。结合 5.1 节的本征模式校正实验结果发现,随着拟合模式数的增加,校正力幅值增大;5 模式或 6 模式拟合的校正效果较好,这与之前分析的前 6 模式为有效模式的结论相符。



(a) p-v:1.050λ  
rms:0.278λ

(b) p-v:0.307λ  
rms:0.063λ



(c) p-v:0.352λ  
rms:0.070λ

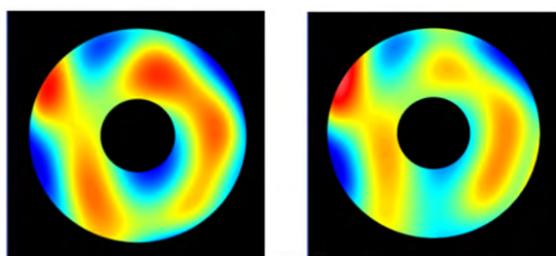
(d) p-v:0.593λ  
rms:0.088λ

图 17 初始面形(a)和 5、6、9 模式校正面形(b, c, d)

Fig. 17 Initial surface (a) and surface corrected in modes 5, 6 and 9(b, c, d)

### 5.2.2.2 有效 Zernike 项优化

由于实际支撑系统无法校正高阶像差,且像差阶次越高,越容易引入测量误差,因此考虑降低响应矩阵求解的有效阶次。分别采用前 6 项(3 阶)、前 11 项(4 阶)、前 17 项(5 阶)有效 Zernike 项,以 2,4,5,6,9 模式进行校正力解算和校正效果对比。对比结果发现,模式上依然是使用前 5、前 6 模式的校正效果较好,而使用前 17 项有效 Zernike 时校正效果较好,最优结果为前 17 项的前 6 模式校正,校正后面形误差 RMS 畸变缩减至  $0.052\lambda$ ,RMS 基本达到  $\lambda/20$ 。前 17 项的有效 Zernike、前 5 和前 6 模式的校正结果如图 18 所示。



(a) p-v:0.320λ rms:0.062λ  
(b) p-v:0.359λ rms:0.052λ

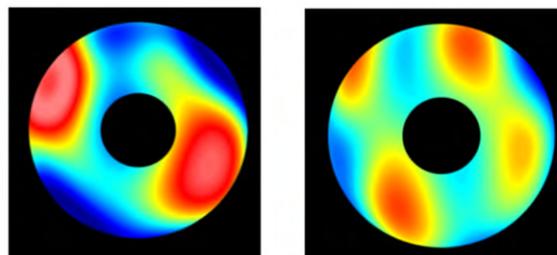
图 18 基于前 17 项有效 Zernike 的前 5 模式和前 6 模式的校正面形

Fig. 18 Surface corrected respectively in 5 modes and 6 modes using the first 17 valid Zernike polynomials

上述结果的产生原因如下:(1)支撑结构对极高阶像差基本无校正能力,而像差阶次越高,越容易引入测量误差,故缩减有效项数有助于提高校正能力;(2)高阶模式含有一定的 4 阶、甚至是 5 阶以上 Zernike 像差,如果不考虑这部分高阶像差的校正,采用前 6 项或前 14 项有效 Zernike 阶次,则降低了系统的校正能力。

### 5.2.3 优化后的面形校正结果

重新采用前 17 项有效 Zernike 前 6 模式校正,初始面形和校正面形如图 19 所示,校正前后 Zernike 像差的幅值对比如图 20 所示。校正后,面形误差畸变缩减至  $0.048\lambda$ RMS,达到  $\lambda/20$ RMS 以内。由图 20 可知,前 6 项像差得到了良好的校正,尤其是像散;第 7 项球差也得到了的校正,之后的高阶像差基本没有得到校正。



(a) p-v:0.683λ rms:0.120λ  
(b) p-v:0.209λ rms:0.048λ

图 19 初始面形(a)和前 17 项有效 Zernike、前 6 模式校正面形(b)

Fig. 19 Initial surface(a) and surface corrected in 6 modes using the first 17 valid Zernike polynomials(b)

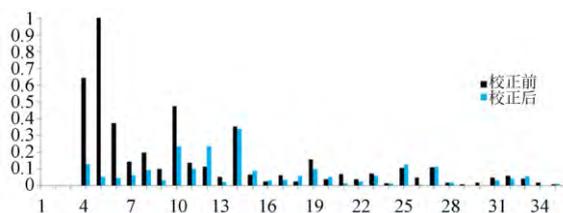


图 20 前 17 项有效 Zernike、前 6 模式校正前后的 Zernike 系数

Fig. 20 Zernike coefficients before and after correction in 6 modes using the first 17 valid Zernike polynomials

通过上述实验确定了本征模式解算算法的可行性和优越性,针对本实验系统选取拟合的模式数和有效 Zernike 项,进一步优化算法,最终校正结果达到  $\lambda/20$  以内。

## 6 结 论

本文提出使用主镜本征模式的主动光学校正算法,本征模式由主镜响应矩阵通过一系列数学转换得到,直接反映支撑结构对主镜的校正能力。使用本征模式拟合求解校正力,可有效缩减解算校正力幅值,并提高面形校正效果。通过该有限元仿真验证了该算法的正确性,并在 1.23 m SiC 主镜 9 点主动校正实验系统上进行了实验验证,结果发现该算法可以有效抑制解算校正力幅值,并提高校正效果。通过对算法的进一步优化,在

校正力满足系统限制的同时,面形校正达到了最佳效果,校正后面形误差 RMS 为  $0.048\lambda$ 。仿真

和实验结果证明,该算法适用于大口径高刚度 SiC 主镜的面形校正。

#### 参考文献:

- [1] WILSON R N, FRANZA F, NOETHE L. Active optics: I. A system for optimizing the optical quality and reducing the costs of large telescopes[J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, 34(4): 485-509.
- [2] MARTIN H M, CALLAHAN S P, CUERDEN B, *et al.*. Active supports and force optimization for the MMT primary mirror[J]. *SPIE*, 1998, 3352: 412-423.
- [3] MARTIN H M, CUERDEN B, DETTMANN L R, *et al.*. Active optics and force optimization for the first 8.4-m LBT mirror [J]. *SPIE*, 2004, 5489: 826-837.
- [4] STEPP L M, DIYDEN D, NICOLAS R, *et al.*. Actively controlled 3.5-m WIYN Telescope [J]. *SPIE*, 1991, 1542: 364-376.
- [5] KIMBRELL J E, GREENWALD D. AEOS 3.67-m telescope primary mirror active control system[J]. *SPIE*, 1998, 3352: 400-411.
- [6] STEPP L M, HUANG E, CHO M K. Gemini primary mirror support system [J]. *SPIE*, 1994, 2199: 223-238.
- [7] LOUSBERG G P, MUDRY E, BASTIN C, *et al.*. Active optics system for the 4m telescope of the Eastern Anatolia Observatory (DAG)[J]. *SPIE*, 2016, 9912: 99126F.
- [8] 吴小霞, 李剑锋, 宋淑梅, 等. 4 m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2451-2457.
- WU X X, LI J F, SONG SH M, *et al.*. Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2451-2457. (in Chinese)
- [9] CHO M K. Active optics performance study of the primary mirror of the GEMINI Telescopes Project [J]. *SPIE*, 1997, 2871: 272-290.
- [10] LIANG M, KRABBENDAM V, CLAVER C F, *et al.*. Active optics in large synoptic survey telescope[J]. *SPIE*, 2012, 8444: 84444Q.
- [11] SCHIPANI P, NOETHE L, MAGRIN D, *et al.*. Active optics system of the VLT Survey Telescope [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1573-1583.
- [12] 陈夫林, 张景旭, 吴小霞, 等. 620 mm 薄镜面的主动支撑结构及面形校正[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1022-1029.
- CHEN F L, ZHANG J X, WU X X, *et al.*. Supporting structure of 620 mm thin primary mirror and its active surface correction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1022-1029. (in Chinese)
- [13] 李宏壮, 张振铎, 王建立, 等. 基于浮动支撑的 620 mm 薄反射镜面形主动校正[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0511001.
- LI H ZH, ZHANG ZH D, WANG J L, *et al.*. Active surface-profile correction of 620 mm thin-mirror based on floatation support[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511001. (in Chinese)
- [14] 李剑锋, 吴小霞, 李玉霞, 等. 大口径主镜位置的实时检测[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2721-2729.
- LI J F, WU X X, LI Y X, *et al.*. On line measurement of position for large primary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2721-2729. (in Chinese)
- [15] 李剑锋, 吴小霞, 邵亮. 大口径 SiC 主镜主动支撑研究及促动器设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0718003.
- LI J F, WU X X, SHAO L. Study on active support for large SiC primary mirror and force actual-

- tor design[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0718003. (in Chinese)
- [16] 李宏壮, 刘欣悦, 王志臣, 等. 多用途、模块化哈特曼波前传感器的研制[J]. *光学技术*, 2011, 37(3): 362-365.

- LI H ZH, LIU X Y, WANG ZH CH, *et al.*. Develop of multi-application and modular Hartmann wavefront sensor[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(3): 362-365. (in Chinese)

## 作者简介:



朱 熠(1987—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,2011年于大连理工大学获得学士学位,主要从事主动光学和面型主动校正的研究。E-mail: 13998211017@139.com

## 通讯作者:



李宏壮(1980—),男,黑龙江巴彦人,博士,研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事主动光学、光学设计和光学测试的研究。E-mail: jilinbayan@163.com