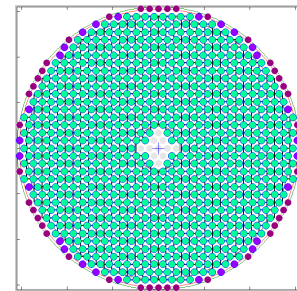




# 望远镜光学结构对自适应光学校正能力的影响分析

高洋<sup>1,2,3\*</sup>, 魏凯<sup>1,2</sup>, 张雨东<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209; <sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 成都 610209; <sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049



**摘要:** 自适应光学系统在高分辨力成像望远镜中发挥了重要作用。自适应光学系统对于望远镜系统中的低阶像差几乎可以完全校正, 但是会牺牲变形镜的校正行程量; 对于中高阶像差, 自适应光学系统不能完全校正, 如何减小高阶残余误差是望远镜系统设计需要考虑的问题之一。本文首先分析了望远镜光学结构中的主镜结构、次镜遮拦、次镜支撑筋、主次镜装调和光学加工等静态和准静态像差情况, 然后分析了这些因素如何影响自适应光学校正能力, 最后给出了对望远镜光学结构的要求。

**关键词:** 自适应光学; 光学结构; 高阶像差; 次镜支撑筋遮拦

中图分类号: TH743

文献标志码: A

## The influence of the telescope optical structures on adaptive optics compensation

Yang Gao<sup>1,2,3\*</sup>, Kai Wei<sup>1,2</sup> and Yudong Zhang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; <sup>2</sup>Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; <sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Adaptive optics has played an important role in high resolution telescope. The low order aberrations of the telescope can be completely compensated by adaptive optics, but it causes the loss of the compensation stroke of the deformable mirror. The middle and high order aberrations after compensating of the deformable mirror have some residual aberration, so we need control the residual aberration to ensure high resolution imaging quality, especially the high order residual aberration that can't be compensated, which should be strictly controlled in the beginning of the design of the telescope system. This paper analyzes the structure of primary mirror of the telescope optical system, secondary mirror block, secondary mirror support bars block, the primary mirror and secondary mirror alignment, and the static and quasi-static aberration of the optical machining. The influence of these factors on the adaptive optics compensation is analyzed, and the requirements of the aberration control are given.

**Keywords:** adaptive optics; optical structure; high aberration; secondary mirror support bars

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.06.004

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(6): 593-601

### 1 引言

地基高分辨力成像大口径望远镜中, 自适应光学

系统已是不可缺少的一部分<sup>[1]</sup>, 主要用于校正大气湍流带来的动态光学波前误差和望远镜系统内部的准静态光学波前误差。望远镜系统中影响自适应光学校正效果的主要因素包括: 主镜镜面结构、光学加工误差、装调误差、热变形误差等。上述因素带来的低阶光学

收稿日期: 2017-03-04; 收到修改稿日期: 2017-05-24

\*E-mail: gggy0222@163.com

波前误差可以被自适应光学系统较好地校正,但是会占用一定的变形镜行程;而高阶光学波前误差难以被自适应光学完全校正,直接影响成像质量<sup>[2]</sup>。近几年,国内外对天文望远镜光学结构形式的分析主要针对主动光学系统和拼接式望远镜,Schipani等人分析了VST望远镜中主动光学系统对低阶像差的校正<sup>[3,4]</sup>,自适应光学的高阶校正残差并没有提及;王金等人分析了拼接主镜中分块镜平移误差和倾斜误差对拼接望远镜系统远场的影响<sup>[5]</sup>,廖周等人分析了大口径拼接望远镜成像系统的远场特性<sup>[6]</sup>,但拼接式望远镜技术在国内还未成熟。本文针对自适应光学系统,通过4 m望远镜的自适应光学系统仿真,主要分析了望远镜系统中各主要光学结构形式的影响:主镜蜂窝结构对波面拟合误差的影响、次镜遮拦对变形镜布局的影响、次镜支撑筋对波面拟合误差的影响、主次镜装调和温度对变形镜校正行程的影响、光学加工静态高阶残差的影响。根据各光学结构形式对自适应光学系统校正能力要求进行分析,得到对望远镜系统中的主要光学结构形式误差量的控制要求。

## 2 变形镜驱动器和哈特曼子孔径布局仿真

自适应光学系统中,哈特曼子孔径布局只有和变形镜布局相匹配,才能获得良好的校正能力。变形镜单元数越多,哈特曼波前传感器的子孔径数也越多,系统能够探测和校正的高阶像差也越高。自适应光学系统设计时,变形镜驱动器和哈特曼子孔径布局既要具有很好的波面像差探测校正能力,又要满足系统稳定性的需求<sup>[7]</sup>。系统的像差校正能力可通过仿真分析系统对各阶 Zernike 像差的探测校正残差来判定,而系统的稳定性可通过复原矩阵的条件数来表征。一般情况下,条件数越小,表示基于设计的变形镜驱动器和哈特曼子孔径布局的自适应光学系统稳定性越高。

针对4 m口径望远镜,我们仿真优化了多种变形镜和哈特曼子孔径布局,从中选出最优布局,如图1所示。在后面的次镜遮拦、次镜支撑筋、光学加工静态误差分析中,都将根据此布局来进行系统像差校正能力分析。

此变形镜为847单元变形镜布局,有效驱动器单元数830。相应的哈特曼传感器子孔径排布为34×34,仿真分析得到复原矩阵的条件数为9.48。847单元变形镜布局对前65阶 Zernike 像差的校正能力见图2。

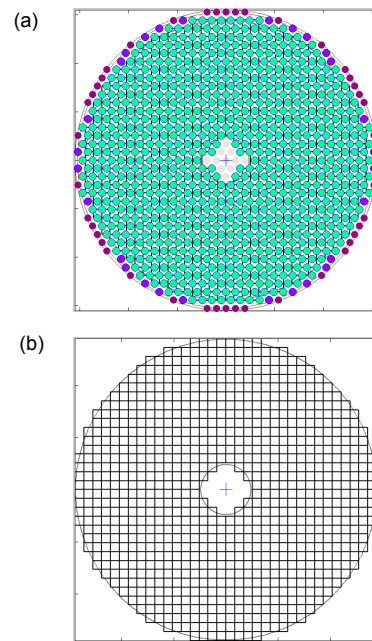


图1 变形镜驱动器和哈特曼子孔径布局。

Fig. 1 Deformable mirror layout and Hartmann wavefront sensor layout.

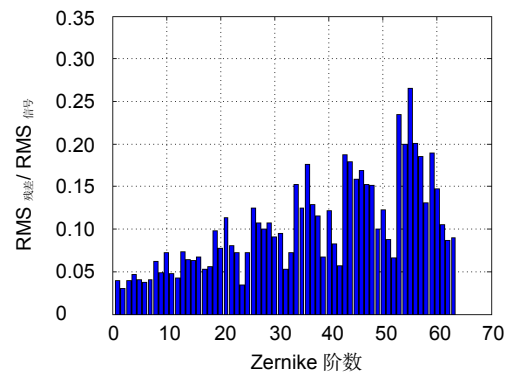


图2 校正能力分析。

Fig. 2 Correction capability analysis.

## 3 主镜结构对波面拟合误差的影响

在望远镜的建造过程中,主镜是望远镜最重要的部件,然而随着望远镜口径的增大,主镜质量随之增加,造成了主镜支撑结构设计困难、变形严重、望远镜整体重量增加及望远镜建造成本上升<sup>[8]</sup>。因此,望远镜主镜轻量化设计尤为重要。目前,研究者提出了很多关于大口径主镜轻量化结构的方案,如蜂窝镜面、薄型镜面、拼接镜面等<sup>[9]</sup>。本节主要针对蜂窝主镜结构的“压印”效应来进行面形分析,并和实心主镜进行比较,确定高阶像差影响以及加工的要求。此外还对主镜支撑结构、温度等低阶像差影响进行分析。

### 3.1 蜂窝镜结构影响

蜂窝主镜结构的主要思路是对镜体进行局部掏空,其优势在于蜂窝主镜结构的刚度和相同厚度的实心主镜几乎相当,而重量仅为实心主镜结构的五分之一;蜂窝主镜结构内部是空心结构,各处的厚度均较小,因此具有很小的热惯性,相应的温度梯度较小<sup>[10]</sup>;蜂窝主镜结构无需采用特别的支撑结构,其支撑结构可安装于主镜蜂窝结构内部,简化支撑结构的设计<sup>[11]</sup>。

由于实际加工的蜂窝镜为 1.8 m 的蜂窝镜,因此在分析蜂窝镜面形拟合时,我们应用原有的 127 单元变形镜自适应光学系统进行仿真分析。1.8 m 蜂窝镜的结构如图 3(a)所示,主镜口径为 1.8 m,中心遮拦比为 0.2,蜂窝结构尺寸为 85 mm;图 3(b)所示为蜂窝镜的检测面形,均方根(root mean square, RMS)为 18 nm。

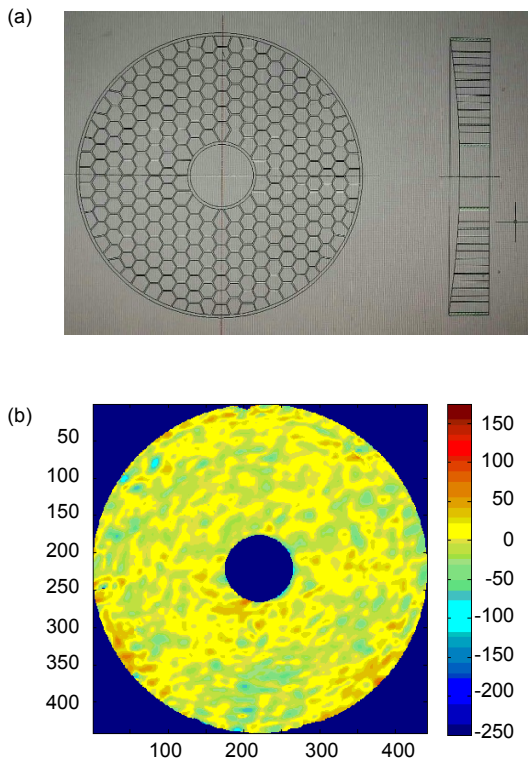


图 3 蜂窝镜结构和面形。

Fig. 3 Structure and surface wavefront of honeycomb mirror.

首先,我们比较了三种情况下的 1.8 m 蜂窝镜主镜面形像差分布情况:第一种情况为检测的原始面形;第二种为去除前 36 项 Zernike 像差之后的高阶残差量;第三种为去除前 65 项 Zernike 像差之后的高阶残差量,结果如表 1 所示。

根据上述面形检测数据可以看出,蜂窝镜结构中存在着较大的高阶像差,占面形检测像差量的 84%。

表 1 1.8 m 蜂窝镜面形像差量。

Table 1 Surface error of 1.8 m honeycomb mirror.

	RMS/nm
原始检测面形	18
去除前 36 阶后的高阶残差	16
去除前 65 阶后的高阶残差	15

随后,我们把面形检测数据共轭到 127 单元变形镜口径,通过 127 单元变形镜进行仿真拟合,在仿真过程中改变 127 单元变形镜驱动器间距,来比较对蜂窝镜主镜面形的拟合效果。对 1.8 m 蜂窝主镜而言,蜂窝结构尺寸为 85 mm,对应到 127 单元变形镜口径 125 mm,蜂窝结构尺寸为 6 mm。

图 4 是变形镜驱动器间距变化对蜂窝镜面形校正效果,图中蓝色线条为去除前 36 阶 Zernike 像差后的校正效果曲线,红色线条为去除前 65 阶 Zernike 像差后的校正效果曲线。由图中可以看出,蜂窝镜高阶像差的抑制随变形镜驱动器间距的变化有一定的规律性,其实质是高阶像差的分布有一定规律。随着驱动器间距的增大变形镜拟合能力线性减弱,当驱动器间距大于 8 mm 时,RMS 比值(拟合后 RMS 残差/拟合前 RMS 残差)约为 1,即变形镜没有能力对蜂窝结构的高阶像差进行校正,这和蜂窝结构的设计密切相关。

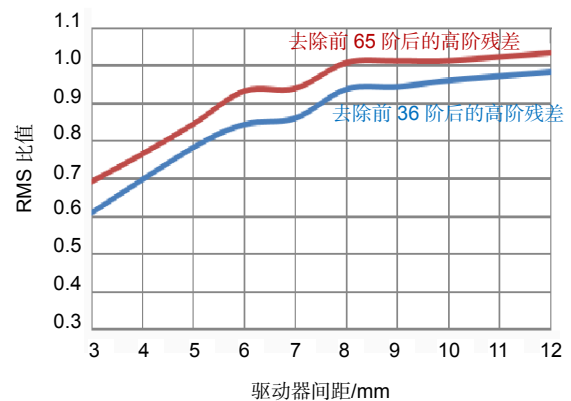


图 4 变形镜驱动器间距变化对蜂窝镜面形校正效果。  
Fig. 4 Compensation effect in surface error of 1.8 m honeycomb mirror by deformable mirror actuator spacing changing.

数据分析表明,蜂窝镜结构高阶像差比较难以校正,针对 1.8 m 蜂窝主镜而言,蜂窝结构在共轭到变形镜口径尺寸为 6 mm,要减小蜂窝结构的影响,变形镜驱动器间距要控制在 7 mm 以内,对应的经变形镜校正后的蜂窝结构高阶残差控制在 14.5 nm。

### 3.2 主镜结构其他影响因素

在望远镜系统中,主镜除了结构面形与自适应光学校正能力相关外,其他因素(如主镜支撑结构、温度梯度等)也会引入各种准静态光学误差。主镜支撑结构分为底支撑和侧支撑,以保证主镜在不同的工作状态下(如指向水平或指向天顶时),主镜的支撑受力始终合理分布。针对4 m望远镜,我们根据主镜底支撑的波面优化和侧支撑的波面优化,分析了主镜支撑结构在最极端的支撑情况下引入的光学误差,然后由上述的847单元变形镜布局对极端情况下的光学误差进行校正,分析变形镜对主镜支撑结构引入的误差校正

效果。经仿真分析,主镜在指向水平时面形误差最为严重,其值为RMS 24.4 nm, PV 182.5 nm,变形镜拟合后残差波面RMS 1.9 nm, PV 29.4 nm,如图5所示。可以看到,4 m自适应光学系统对主镜支撑结构引入的光学误差有良好的抑制能力,剩余的高阶残差量级RMS为1.9 nm,校正效果良好。

由主镜温度变形引起的波面像差如图6所示,图6(a)是主镜温度变化引入的原始面形误差,图6(b)显示的是去除离焦项后的面形误差,图6(c)为经过847单元变形镜布局仿真校正后残余的面形误差。温度变形的条件是-10℃,并在该温度下进行稳态温度仿真,

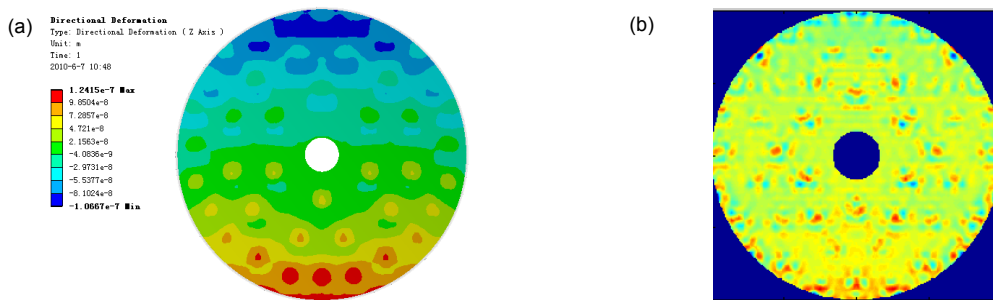


图5 主镜指向水平方向面形和变形镜校正残差面形。

Fig. 5 Surface wavefront of primary mirror pointing horizontal direction and the residual surface wavefront by deformable mirror compensated.

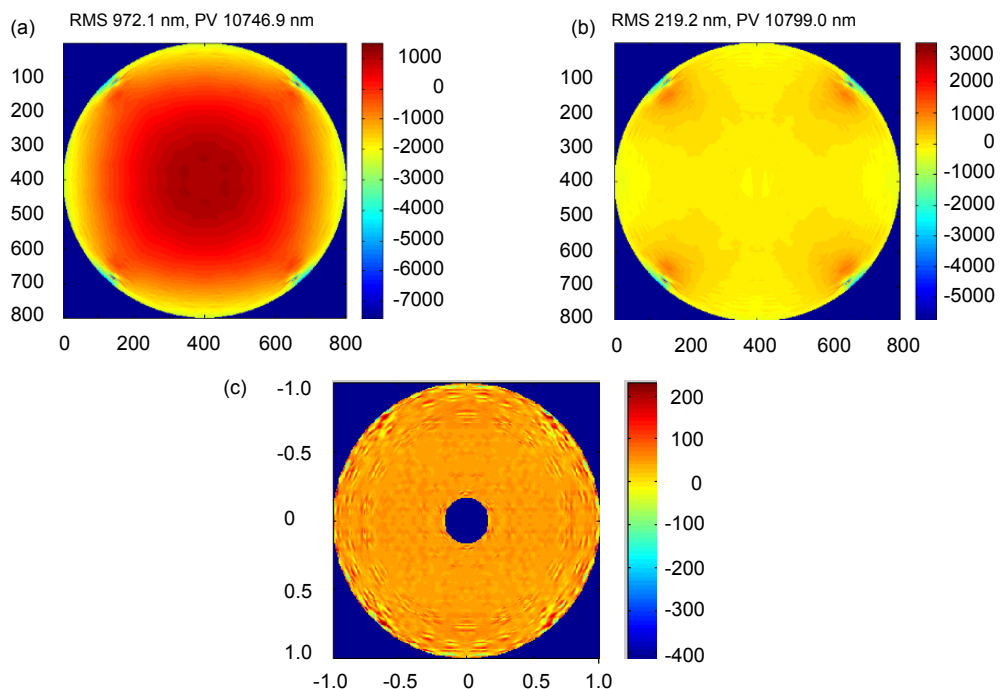


图6 温度变形引起的误差变化及变形镜拟合后的残差。(a) 原始面形。(b) 去除离焦之后的面形。(c) 变形镜拟合残差面。

Fig. 6 Surface wavefront of the temperature distortion and the residual surface wavefront by deformable mirror compensated. (a) Original surface. (b) The surface after removing defocus. (c) The residual surface by deformable mirror compensated.



零应力初始温度设为 22 °C(即温差为 32 °C)。

温度变形引入的像差 RMS 为 972.1 nm;由温度变化引入的像差主要是离焦,通过调整主次镜之间的位置就可以很好地进行补偿,因此我们针对除去离焦之后的像差 RMS 为 219.2 nm;通过变形镜来拟合,得到变形镜对温度变形误差进行拟合后的残差波面 RMS 为 23.6 nm。

由以上分析可知,4 m 自适应光学系统对主镜温度变形引入的光学误差同样有着很好的抑制能力。

#### 4 次镜遮拦对变形镜布局影响

地基天文望远镜光学系统一般为典型的卡塞格林系统(如图 7),望远镜的次镜及其支撑结构无法避免,在实际的波前探测过程中会造成被探测波面的分割。

针对 847 单元变形镜布局,不考虑变形镜和哈特曼的匹配关系,只单独考虑变形镜布局情况,可以看到在中心遮拦内的变形镜驱动器是不工作的,如图 8(a)

所示。但是子孔径的布局在遮拦内还有部分子孔径需要考虑,因此遮拦内的驱动器仍然需要参与到波面校正当中才能获得较好的校正能力,如图 1 中 847 单元变形镜布局,遮拦内需要有 8 个驱动器纳入到波面校正当中。

针对同一帧随机大气湍流像差波面,调整望远镜次镜遮拦大小,仿真分析了不同大小次镜遮拦条件下自适应光学系统的像差校正能力,如图 9。根据分析可知,随着次镜遮拦比的增大,RMS 比值也在增大,像差校正能力减弱;次镜遮拦比大于 0.21 时,像差校正的 RMS 比值为 0.03,随后在一定的遮拦比范围内,校正能力的退化达到收敛。

综上所述可知,次镜遮拦越小,经变形镜校正后的残差越小,而次镜遮拦在 0.2~0.25 之间时,像差校正能力的退化基本收敛,RMS 比值为 0.03,兼顾考虑次镜遮拦会影响系统的调制传递函数中频段的抑制能力,通常认为遮拦比在 0.2~0.25 间均可以接受。

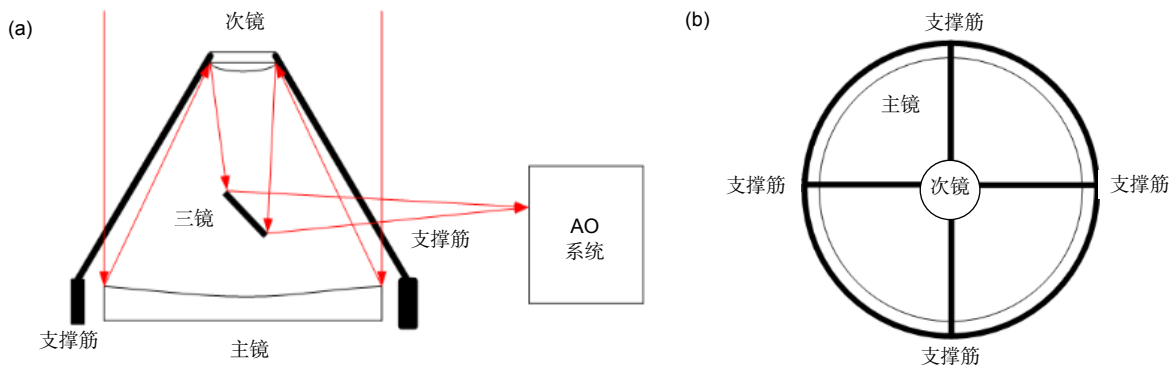


图 7 望远镜次镜遮拦示意图。(a) 正视图。(b) 俯视图。

Fig. 7 Secondary mirror block of telescope. (a) Front view. (b) Top view.

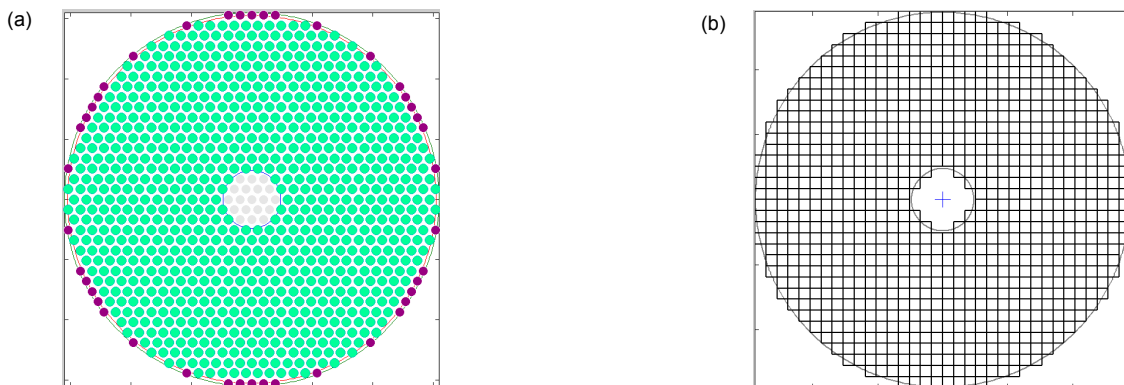


图 8 (a) 847 单元变形镜驱动器分布。(b) 哈特曼子孔径分布。

Fig. 8 (a) Deformable mirror layout of the 847 actuators. (b) Hartmann wavefront sensor layout.

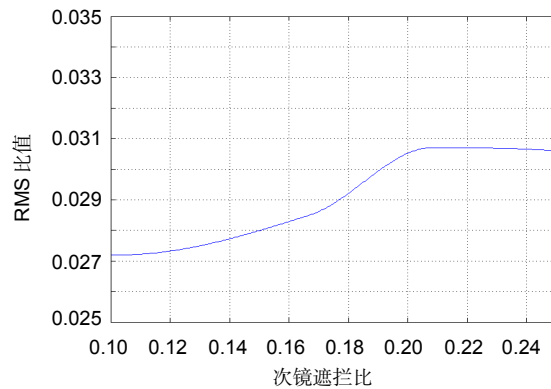


图9 变形镜校正能力随次镜遮拦变化曲线.

Fig. 9 Compensation capacity of deformable mirror by secondary mirror block changing.

## 5 次镜支撑筋对波面拟合误差的影响

### 5.1 次镜支撑筋分割波面

在望远镜系统中,理想情况下的原始波面应该是一个整体波面,如图 10(a)为原始波面。但是,次镜支撑筋遮拦会对望远镜探测波面造成分割,使得探测到的波面分成几个部分,波面不完整,如图 10(b)为加入支撑筋的波面。而经过哈特曼传感器探测,变形镜拟

合波面拟合出来的是一个整体波面,如图 10(c)为变形镜(deformable mirror, DM)拟合波面。由于实际远场成像时也是带有次镜支撑筋遮拦在里面,所以考虑支撑筋遮挡哈特曼子孔径后,进行波面复原是否会影响非遮拦处的波面复原。比较加入次镜支撑筋的复原波面和原始复原波面,变形镜布局用之前仿真的 847 单元布局。

我们设计并仿真了 50 mm 的次镜支撑筋对 4 m 口径望远镜的探测波面带来的影响,50 mm 支撑筋遮挡

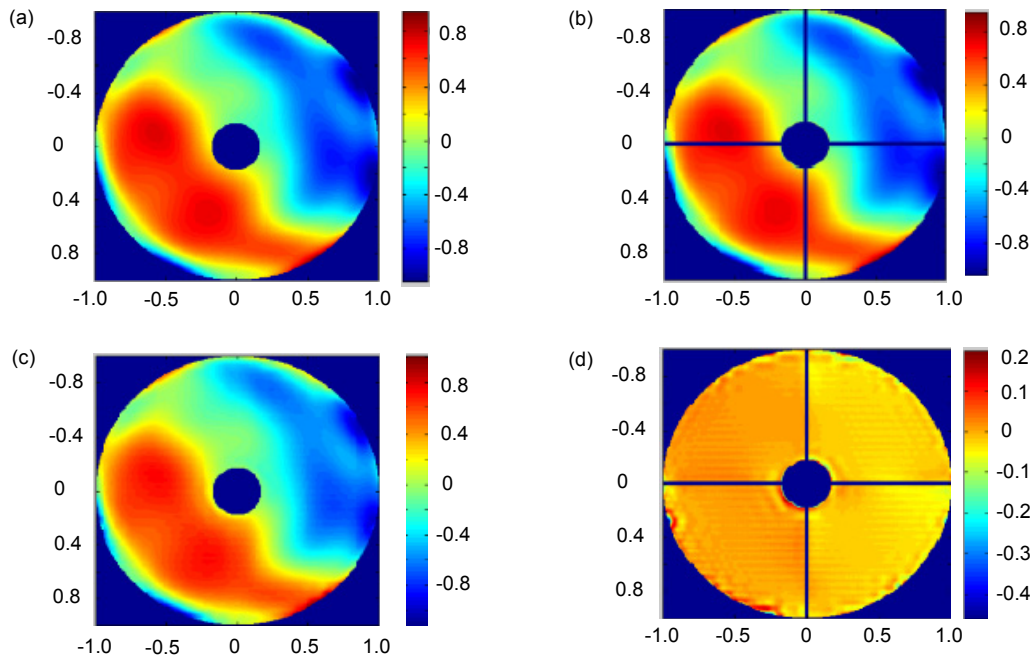


图 10 次镜支撑筋分割波面的影响. (a) 原始波面. (b) 加入支撑筋. (c) DM 拟合波面. (d) 加筋校正残余波面.

Fig. 10 Split wavefront of adding the secondary mirror support bars block. (a) Aberration source signal. (b) Aberration source signal. (c) DM's fitting surface. (d) Remainder error.

了 0.42 个子孔径, 用仿真优化的 847 单元变形镜布局进行波面拟合, 对比加入次镜支撑筋后波面校正残差和原始波面校正残差。生成 1000 帧去除整体倾斜后的随机大气湍流像差波面, 加入支撑筋的影响, 经过变形镜校正, 计算波面拟合误差的均值来评估支撑筋对变形镜布局校正能力的影响。

表 2 列出了原始波面校正的 RMS 比值和加入支撑筋后的波面校正 RMS 比值。从表中可以看出, 加入支撑筋后波面校正残差比原始波面校正残差大 1.8 倍左右, 表明次镜支撑筋的加入会使波面拟合误差增大, 成像质量变差。

## 5.2 次镜支撑筋尺寸大小和旋转对波面拟合误差影响

对应到望远镜 4 m 口径, 847 单元布局的哈特曼单个子孔径大小对应到物方为 118 mm, 表 3 给出了支撑筋尺寸大小对应所遮挡的子孔径比例。进一步分析次镜支撑筋尺寸大小以及支撑筋旋转一定角度对校正残差的影响, 针对图 10 中的像差波面进行校正分析。

如图 11 所示, 支撑筋尺寸大小和变形镜校正能力成线性关系, 支撑筋尺寸越大, 遮挡子孔径的比例也变大, 波面拟合误差也越大, 所以在能够支撑起次镜的前提下, 次镜支撑筋应该是越小越好; 支撑筋旋转带来的影响近似于正弦变化, 在  $45^\circ$  时变形镜校正拟合波面残差最大, 变形镜的校正效果最差。

得出结论: 次镜支撑筋遮挡 0.6 个子孔径时, 波面拟合误差可以控制在 RMS 比值为 0.07。

## 6 光学加工静态像差影响

考虑实际的望远镜主光学系统所有组成镜面的光学加工静态误差, 包括平面反射镜和非球面反射镜, 以及自适应光学系统的主要组成镜面的光学加工静态误差。

对 16 个 300 mm 口径平面反射镜光学加工静态波前误差的统计结果表明, 其平均 RMS 为  $0.051\lambda=32 \text{ nm}$  ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )。

表 2 847 单元次镜支撑筋分割波面对变形镜校正残差影响。

Table 2 The residual surface wavefront error of deformable mirror compensated for 847.

	RMS 残差/RMS 信号
原始波面校正	0.04
加入 50 mm 支撑筋校正	0.07

表 3 支撑筋大小对应所遮挡的子孔径比例。

Table 3 The size of the subaperture with the size of secondary mirror support bar changing.

支撑筋大小/mm	50	60	70	80	90	100
遮挡 847 单元子孔径比例	0.42	0.51	0.59	0.68	0.76	0.85

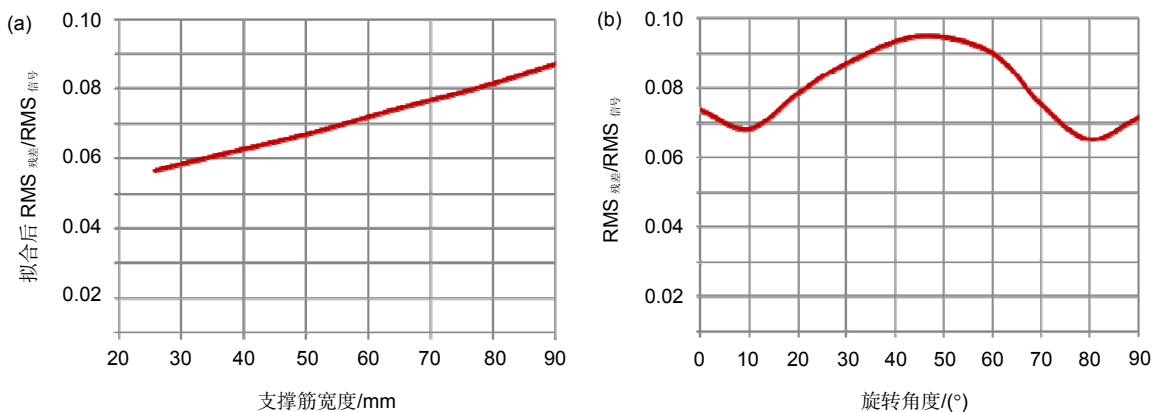


图 11 支撑筋尺寸大小(a)和旋转(b)对变形镜拟合效果的影响。

Fig. 11 The effect of compensation by deformable mirror with the size (a) and rotation of the secondary mirror bars changing (b).

图 12(a)是单个平面反射镜光学加工静态波前误差统计,图 12(b)是光学加工静态波前误差 RMS 分布情况,75%的 RMS 分布于  $0.02\lambda\sim 0.06\lambda$  区间。

对 19 个 300 mm 口径非球面主镜光学加工静态波前误差的统计结果表明,其平均 RMS 为  $0.102\lambda=65$  nm。同样,图 13(a)是单个非球面反射镜光学加工静态波前误差统计,图 13(b)为 RMS 分布情况,63.2%的 RMS 分布于  $0.01\lambda\sim 0.09\lambda$  区间内。

在设计 4 m 望远镜系统中,主要静态加工误差包括望远镜主光路中的 8 个大口径平面镜和 3 个非球

面镜,以及自适应光学系统中 2 个大口径平面镜和 5 个非球面镜的光学加工误差。根据上面的统计数据,计算整个望远镜系统的光学加工静态误差叠加后的 RMS 为 210 nm。通过 847 单元变形镜仿真校正,对前 35 阶 Zernike 像差的校正残差约为 1.8 nm,变形镜对前 65 阶 Zernike 像差的校正残差约为 3.1 nm,65 阶以后的校正残差按照校正能力约为 0.15 进行估算,残差约为 27.8 nm。因此计算得到的总的光学加工静态残差经变形镜校正后的 RMS 约为 28 nm。表 4 将像差估计进行了整理。

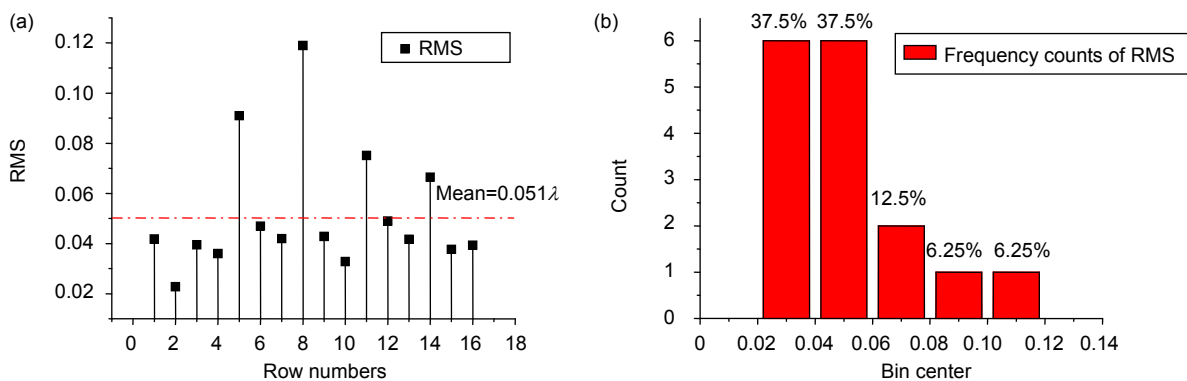


图 12 平面反射镜光学加工静态误差统计分布。

Fig. 12 The statistical distribution of optical processing static error of planar mirror.

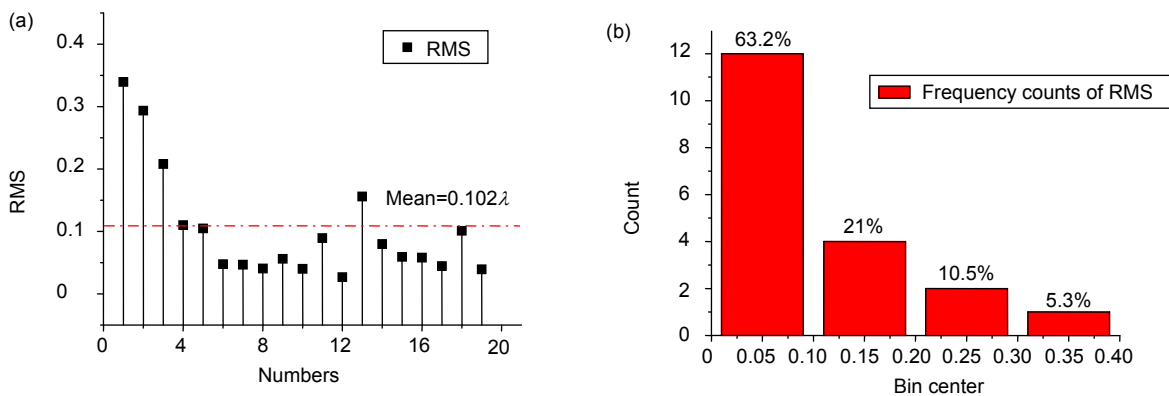


图 13 非球面反射镜光学加工静态误差统计分布。

Fig. 13 The statistical distribution of optical processing static error of aspheric mirror.

表 4 光学加工静态误差校正分析。

Table 4 Static error compensation analysis of optical processing error.

	原始 RMS/nm	前 35 阶 Zernike 项 RMS/nm	前 65 阶 Zernike 项 RMS/nm	65 阶以后 Zernike 项 RMS/nm
非球面镜	65	22	24.3	60
平面镜	32	18.5	21.5	23.7
系统静态误差	210	85	97	185
校正后残差	28	1.8	3.1	27.8



表 5 光学结构对自适应光学校正能力的影响和控制要求。

Table 5 The influence of the optical structures on adaptive optics compensation.

	影响因素	自适应光学控制要求
蜂窝主镜结构	主镜面形有很大的高阶残差	变形镜驱动器间距 $<7$ mm
主镜支撑	主镜在指向水平时面形误差最为严重	校正后 $<2$ nm
主镜温度变形	主要引入大的离焦	去除离焦后校正残差 23.6 nm
次镜遮拦	变形镜布局像差校正能力	遮拦比 0.2~0.25
次镜支撑筋	波面拟合像差	支撑筋遮挡子孔径比例 $<0.6$ 个子孔径
光学加工静态像差	变形镜校正高阶残差	校正后 30 nm
主次镜装调	变形镜校正行程	调整次镜位置

光学加工静态误差经自适应光学校正后的残差，主要是加工静态高阶像差，不能很好地被自适应光学校正。根据望远镜光学加工的实际要求，静态高阶像差控制在 200 nm 以内，自适应光学校正后的残差约为 30 nm，对成像的影响程度较小。

## 7 主次镜装调的影响

对于大口径地基望远镜，光学系统在装调过程中会存在对准误差，这些误差会导致望远镜视轴偏转，使望远镜的出瞳位置产生漂移，并造成望远镜成像质量变差。而主镜和次镜作为望远镜系统的关键光学器件，在装调过程和实际工作中，会有残余的主次镜偏角误差和弯沉误差。

根据 4 m 望远镜的误差分析，主次镜装调误差在 56.9 nm 左右，主要是由于主次镜之间的间距所造成的误差有 44 nm，这些误差可以通过调整次镜的位置来将其完全补偿。

## 8 各光学结构影响总结

考虑到望远镜系统中各个光学结构的加工限制和自适应光学像差校正能力，给出了各个光学结构对自适应光学校正能力的影响和控制要求，如表 5。

## 9 结论

望远镜中像差按照 Zernike 像差模式分为低阶像差、高阶像差。低阶像差如主次镜装调、支撑，热变形等引起的离焦、像散，可以通过调整次镜或者单独用一个大行程量的变形镜来完全校正；对于自适应光学校正能力之外的高阶像差，如蜂窝主镜结构等，可

以采用数据处理的方式来对高阶像差进行处理。

## 参考文献

- Jiang Wenhan. Adaptive optical technology[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, **28**(1): 7–13.  
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, **28**(1): 7–13.
- Thompson L. Adaptive optics for astronomical telescopes, by John W. Hardy adaptive optics in astronomy, by François Roddier[J]. *Physics Today*, 2000, **53**(4): 69.
- Schipani P, Noethe L, Magrin D, et al. Active optics system of the VLT survey telescope[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(7): 1573–1583.
- Schipani P, D'Orsi S, Ferragina L, et al. Active optics primary mirror support system for the 2.6 m VST telescope[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(8): 1234–1241.
- Wang Jin, Xian Hao, Wang Shengqian, et al. Effects of piston, tip-tilt and gap errors on image quality of the segmented telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(10): 55–62.  
王金, 鲜浩, 王胜千, 等. 拼接式望远镜子镜间平移、倾斜误差及子镜间隙对成像质量的影响[J]. 光电工程, 2014, **41**(10): 55–62.
- Liao Zhou, Qiu Qi, Zhang Yudong. The far-field characteristics for large aperture segmented telescope system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(2): 1–8.  
廖周, 邱琪, 张雨东. 大口径拼接望远镜成像系统的远场特性[J]. 光电工程, 2015, **42**(2): 1–8.
- Lu Changming, Rao Changhui, Huang Huiming, et al. Simulation of an astronomical adaptive optics imaging telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(1): 20–23.  
陆长明, 饶长辉, 黄惠明, 等. 天文学自适应光学成像望远镜的模拟[J]. 光电工程, 2006, **33**(1): 20–23.
- Baiocchi D. Design and control of lightweight, active space mirror[D]. Arizona: The University of Arizona, 2004: 22–32.
- Yellowhair J E. Advanced technologies for fabrication and testing of large flat mirrors[D]. Arizona: The University of Arizona, 2007: 27–34.
- Martin H M, Davison W B, DeRigne S T, et al. Active supports and force optimization for a 3.5 m honeycomb sandwich mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, **2199**: 251–262.
- Gray P M, Hill J M, Davison W B, et al. Support of large borosilicate honeycomb mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, **2199**: 691–702.