

文章编号:1004-4213(2010)05-0871-5

薄镜面主动光学对光学像差的校正能力分析

王富国,李宏壮,杨飞

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

摘 要:建立了薄镜面主动光学的仿真模型,并进行了仿真分析,结果表明薄镜面主动光学可以对低频误差完成较好的校正.为了进一步验证,建立了一套薄镜面主动光学实验系统,开展了薄镜面主动光学实验.结果表明,通过主动光学校正可以把镜面面形校正到磨制时的面形即 $\lambda/10$.同时发现,薄镜面主动光学对三阶像散和三阶球差的校正能力最好,三叶彗差的校正能力也较好,而三阶彗差最难校正,这对于磨制大型薄镜面具有一定的指导意义.

关键词:薄镜面;主动光学;像差;仿真分析

中图分类号:TH745

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103905.0871

0 引言

主动光学(Active optics)技术最早由欧洲南方天文台提出,并率先开展研究,1989年主动光学技术成功的应用于3.5 m NTT 望远镜^[1-2].经校正后的镜面面形误差 RMS 值可达 16.8 nm.1998年欧南台又成功的完成了另外一架甚大望远镜 VLT^[3],VLT 的直径为 8.2 m,厚度仅有 175 mm,径厚比达到 47:1,校正后的镜面面形 RMS 值达到 20 nm.

美国对主动光学技术的研究虽然开展较晚,但是应用却更为广泛,其中在军事和国防方面比较有代表性的主要有 AEOS 和 SORT. AEOS 安装在夏威夷毛伊岛光学站,是目前最新最大的卫星跟踪望远镜^[4],主要是获取低轨卫星的高分辨率图像,能有效地跟踪和识别空间目标.该望远镜的主镜直径 3.67 m,径厚比 23:1,主镜采用背部 84 点支撑,主动校正后的面形误差为 44 nm. SORT 位于美国新墨西哥州柯特兰的星火光学靶场^[5].该望远镜主镜直径为 3.5 m 的薄弯月形,采用硼硅酸盐材料,56 点主动支撑.主动校正后的镜面面形 RMS 值可达 18 nm.

日本也较早的开展了主动光学技术的研究和应用^[6].1999年日本的 Subaru 红外光学望远镜建成,该望远镜同时采用了主动光学技术和自适应光学技术,其主镜口径为 8.2 m,厚 20 cm,轴向 264 个支撑点中有 261 个主动支撑点,经主动光学校正后的镜面面形误差 RMS 值可达到 65 nm.

国内开展主动光学技术相对较晚,其中比较早

的是南京天文光学技术研究所,在苏定强院士的带领下于 1993 年建立了薄镜面主动光学试验系统^[7],其试验镜面的直径为 500 mm,厚 6 mm,采用了 161 个子孔径的 Shack-Hartmann 波面检测系统,波前校正精度达到均方根值 0.04 μm .

本文在查阅了相关国内外文献的基础上,建立了一套薄镜面主动光学实验系统,主要目的是分析薄镜面主动光学对各个光学像差的校正能力,以便指导光学加工.

1 仿真分析

在仿真分析采用了准 Zernike 多项式波面拟合,考虑到对高阶像差的校正能力较弱,取 Zernike 多项式前 18 项,然后通过阻尼最小二乘法求解校正力的大小,具体的算法过程见文献[8-10].

实验采用的主镜直径为 400 mm,厚度为 11 mm,镜面为球面,曲率半径为 2 400 mm,材料为 K9 玻璃,12 点支撑,其中 3 个硬点,另外 9 点可以通过促动器进行调节,分布形式见图 1.

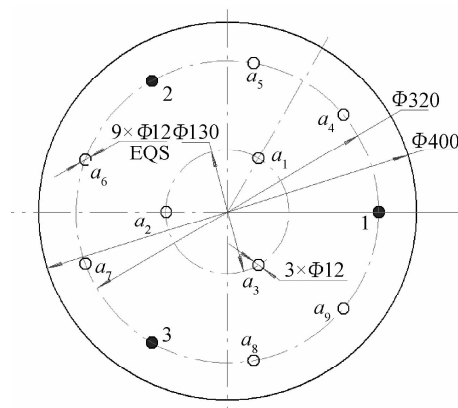


图 1 优化后的薄镜支撑点分布
Fig. 1 The optimized support points distribution

[†] Tel:0431-86708873

Email:wfg109@163.com

收稿日期:2009-06-16

修回日期:2009-09-08

假设校正前 9 个促动器不承受镜面的重力,即 $a_1 \sim a_9$ 施加的力 $f_1 \sim f_9 = 0$. 只有三个“硬点”承受镜面重力,可以想象对于此薄镜面只有三点支撑,镜面面形一定很差,在这种情况下,求解为了校正这种较差的面形 9 个促动器所需要的力的大小.

校正前镜面面形去掉刚体位移后的面形值为 $PV = 2.68e-003$ mm; $RMS = 6.80e-004$ mm,变形云图见图 2. 根据前面求得的 Zernike 系数组成镜面的刚度矩阵,见表 1 第二列,利用阻尼最小二乘法对该镜面求得校正力,进行第一次校正,校正力的大小如表 2.

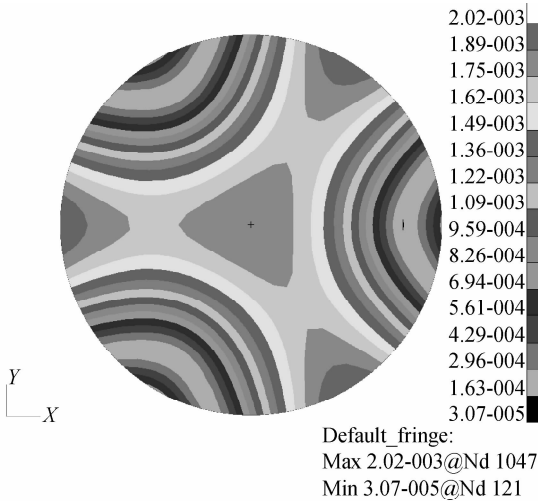


图 2 校正前的镜面变形云图
Fig. 2 The mirror surface figure plot before correction

表 1 每次校正后的 Zernike 系数比较 (仿真)

Table 1 The Zernike coefficient of the mirror surface figure after each correction

Number of terms	Zernike coefficient before correction	Zernike coefficient after the first correction	Zernike coefficient after the second correction
1	1.199e-3	-1.779e-5	-1.762e-5
2	1.249e-6	3.495e-7	-1.375e-7
3	6.484e-7	-9.794e-8	-3.968e-8
4	5.532e-4	-7.573e-6	-7.623e-6
5	-4.121e-7	-1.685e-7	3.954e-7
6	3.760e-7	8.648e-9	7.324e-8
7	3.813e-7	1.408e-7	1.417e-8
8	-3.9873e-7	-4.195e-8	7.537e-9
9	-1.150e-4	-8.038e-6	-8.028e-6
10	1.554e-3	-1.102e-5	-1.127e-5
11	1.821e-6	-3.948e-8	2.671e-8
12	1.986e-6	3.511e-7	3.098e-7
13	-3.377e-7	-1.229e-7	-1.162e-7
14	7.6841e-7	1.133e-7	1.127e-7
15	5.092e-7	1.056e-8	-1.311e-8
16	6.287e-6	-6.591e-6	-6.592e-6
17	4.226e-8	7.173e-8	8.762e-8
18	1.301e-8	-4.551e-8	-5.733e-8

表 2 校正前后镜面面形值比较
Table 2 Mirror surface figure plot before and after correction

	PV/mm	RMS/mm
Before correct	2.686e-003	6.799e-004
First correct	4.590e-005	1.050e-005
Second correct	4.553e-005	1.047e-005

把求得的校正力施加在各个支撑点上,模拟促动器的效果,校正后的变形云图如图 3,校正后的 Zernike 系数如表 1 第三四列.

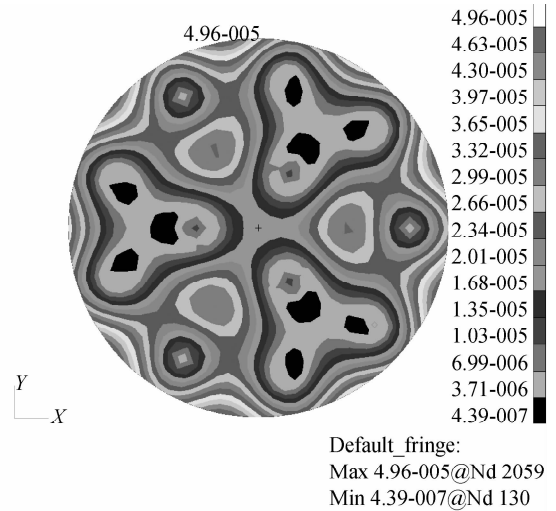


图 3 第一次校正后的变形云图
Fig. 3 The mirror surface figure plot after the first correction

提取镜面节点坐标,求得第一次校正后,去掉刚体位移后的镜面面形值 $PV = 4.59e-005$ mm; $RMS = 1.05e-005$ mm. 然后把第一次校正后的面形作为待校正的面形进行第二次校正,校正力的大小如表 2,方法和步骤和第一次校正相同.

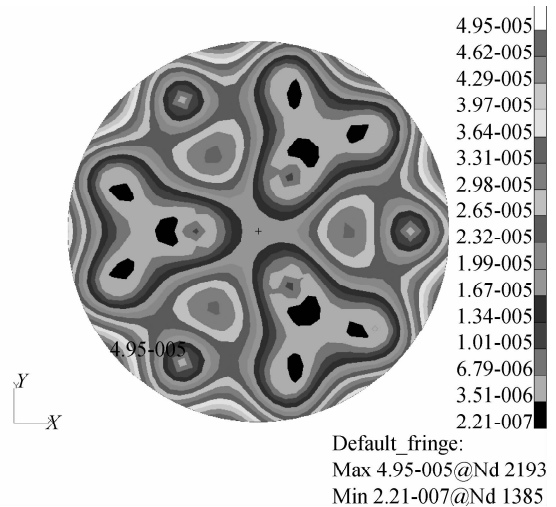


图 4 第二次校正后的变形云图
Fig. 4 Whiffle tree structural type

和第一次校正后的效果比较,从镜面的变形云图(图 4)基本看不出校正效果的变化,从 Zernike 多项式系数(表 1)看,镜面的面形得到一定的改善. 仍

然提取镜面节点变形数据,经计算去掉刚体位移后的镜面面形值 $PV=4.55e-005$ mm; $RMS=1.04e-005$ mm. 和第一次校正后的面形值比较,见表 2,第二次校正的效果不明显,而且校正力和第一次校正力的差值 Δf 很小,而 Δf 即是促动器的分辨率, Δf 很小就要求促动器的分辨率很高,但是目前促动器的分辨率很难达到这个数值,而且也没有必要. 因此只须进行一次校正即可,不必进行第二次校正. 从变形云图和镜面面形值的比较中均可以认为,较好的完成对扰动力的校正.

从本文所有的校正过程可以看出,主动光学技术对各种低阶像差可以完成较好的校正,但是对高阶像差校正能力较弱. 虽然面形值可能已经校正的较好,但是仍然存在着高阶像差,例如前文中 Zernike 多项式的第十项,对它的校正能力就比较弱,这时只能通过自适应光学技术进行校正,自适应光学的长处就是可以较好的完成对高频误差的校正.

2 实验系统

为了进一步验证主动光学的校正效果,构建了一套实验系统,见图 5. 实验系统主要有薄镜的支撑系统和次镜的桁架系统构成,薄镜支撑系统的促动器和控制器采用德国 PI 公司的产品,促动器的行程移动行程为 $60 \mu\text{m}$,集成有应变片式位置传感器,闭环分辨率为 1.2 nm ,推/拉力为 $800/300 \text{ N}$,在实验的第一阶段先通过干涉仪进行检测,第二阶段通过哈特曼检测,通过对面形的分析验证实验效果.

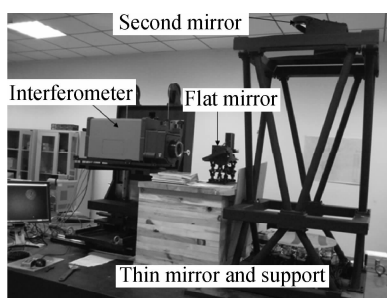


图 5 实验系统实物图
Fig. 5 The experiment system picture

3 试验结果与分析

Zernike 多项式前四项-平移、倾斜和离焦可以通过调整次镜的方式加以校正,因此试验中不对前四项校正;考虑到主动光学对高阶像差的校正能力较弱,因此试验中只对 Zernike 多项式的前 15 项(去掉前 4 项,实际只有 11 项)进行了校正.

为了求得校正力,必须知道系统的刚度矩阵. 因此在试验之前必须测得系统的刚度矩阵,按照每个支撑点承受相同大小的镜面重力,在每个促动器上施加 2.41 N 的力,测得镜面的 Zernike 多项式系数,然后依次在每个促动器上施加单位大小的力,同时记录下 Zernike 多项式系数,用这些 Zernike 多项式系数减去重力状态下的 Zernike 多项式系数,进而就可以求得系统的刚度矩阵,并把这个刚度矩阵保存在计算机中,以备每次校正时调用.

假设初始状态是每个支撑点承受相同的重力,即把每个促动器的力为 2.41 N 时的状态作为初始状态. 由干涉仪的测量结果可以看出,在这种被动支撑状态下,面形的 RMS 值为 1.163λ ,见图 6,而镜子在磨好时的面形为 0.1λ ,镜子的面形已经变坏了,主要是存在较大的像散,本文的目标就是要把面形校正到磨好时的面形.

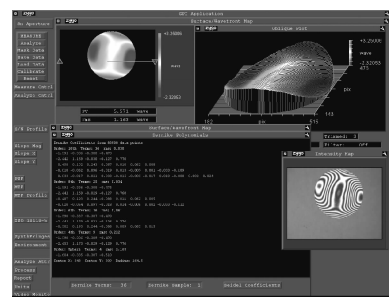


图 6 初始状态的面形检测结果
Fig. 6 The initial mirror surface figure

经过七次校正后,每次校正后的 Zernike 系数见表 3,其中第七次校正后的干涉仪检测检测结果见图 7,从中可以看出经过校正后,镜面面形可以达到 0.114λ ,达到了磨制时的面形. 表 4 为每次校正后的 PV, RMS 变化情况,把表中的几个主要的像差绘制成曲线图的形式,如图 8.

表 3 每次校正后的 Zernike 系数比较(试验)

Table 3 The Zernike coefficient of the mirror surface figure after each correction

Number of terms	Astigmatism	Original state	First correct	Second correct	Third correct	Forth correct	Fifth correct	Sixth correct	Seventh correct
5	Pri Astig. -X	-2.441	-0.035	0.034	0.085	0.073	-0.013	0.047	-0.017
6	Pri Astig. -Y	1.169	0.092	-0.001	-0.043	-0.052	-0.045	0.042	-0.019
7	Pri Coma-X	-0.029	-0.067	-0.008	-0.060	-0.045	0.008	-0.040	-0.032
8	Pri Coma-Y	-0.127	-0.143	-0.129	-0.196	-0.148	-0.168	-0.109	-0.148
9	Pri Spherical	0.768	0.586	0.445	0.292	0.215	0.202	0.195	0.142

(续表)

10	Pri Trefoil-X	-0.497	-0.017	0.067	0.060	0.065	0.012	-0.013	0.040
11	Pri Trefoil-Y	0.193	0.013	0.024	0.102	-0.035	0.017	0.036	-0.036
12	Sec Astig-X	0.244	0.112	0.065	0.066	0.103	0.109	0.113	0.123
13	Sec Astig-Y	-0.088	-0.034	-0.013	-0.038	0.067	0.008	0.005	0.006
14	Sec Coma-X	0.011	0.042	-0.006	0.070	0.009	0.002	0.035	-0.004
15	Sec Coma-Y	0.062	0.084	0.067	0.065	0.087	0.064	0.054	0.064
16	Sec Spherical	0.005	0.011	0.026	0.035	0.045	0.055	0.0610	0.078
17	Pri Tetrafoil-X	-0.020	0.051	0.073	-0.010	-0.004	0.025	0.010	0.040
18	Pri Tetrafoil-Y	-0.064	0.048	-0.011	0.028	0.062	0.031	0.021	0.020

表 4 每次校正后的面形比较

Table 4 The mirror surface figure after each correction

	Original state	First correct	Second correct	Third correct	Forth correct	Fifth correct	Sixth correct	Seventh correct
PV(λ)	5.571	1.273	0.970	0.820	0.714	0.662	0.651	0.613
RMS(λ)	1.163	0.277	0.214	0.172	0.138	0.128	0.121	0.114

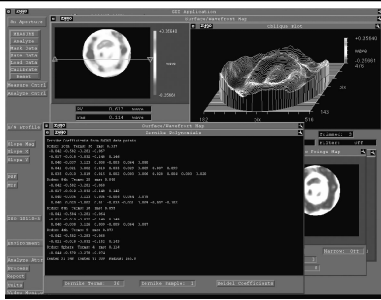


图 7 第七次校正后的面形结果

Fig. 7 The mirror surface figure after the seventh correction

从图 8 可以看出,主动光学对三阶像散和三阶球差的校正能力最好,三叶彗差的校正能力也较好,而三阶彗差最难校正,对于高阶的 Quadratic 像散因为其系数本来就较小,因此看不出对它的校正能力。

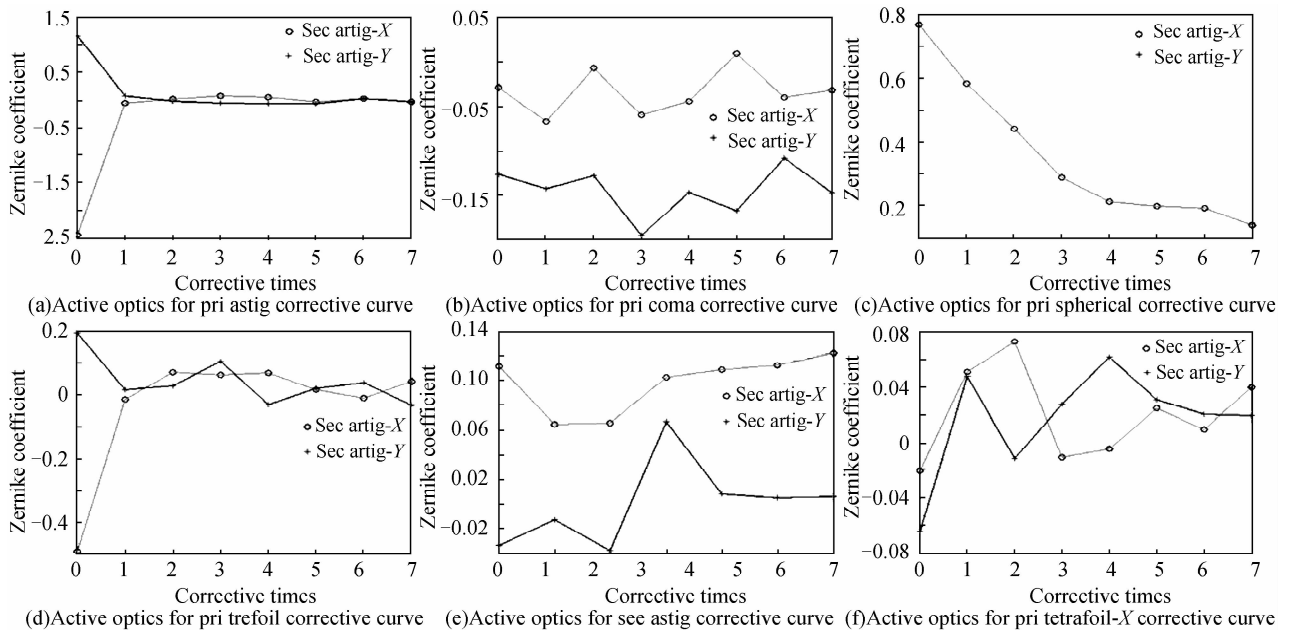


图 8 主动光学对光学像差的校正能力曲线

Fig. 8 Active optics for astigmatism corrective curve

从图 9 可以看出,第一次校正的效果最为明显,镜面的 RMS 值得到明显改善,对于第一次不能校正的像差,虽然通过继续迭代仍然可以提高面形精

度,但是校正能力越来越弱,再继续校正的意义不大,因此第一次的校正能力很重要,这和仿真分析的结果基本一致。

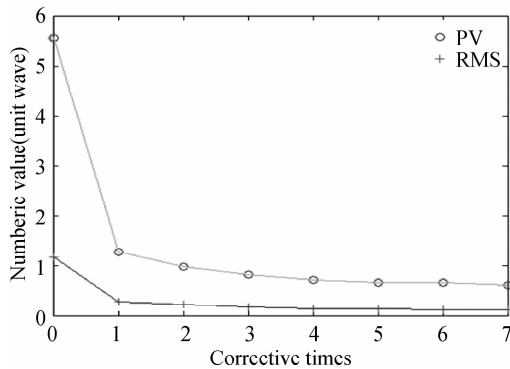


图9 镜面PV、RMS值随校正次数的变化曲线

Fig. 9 PV、RMS with corrective numbers variety curve

4 结论

从实验结果看,基本达到了预期的目标,能将已经变坏了的镜面恢复到磨制时的面形,说明校正方法是正确的.虽然十分之一波长的面形精度还不足以用于成像,主要是镜面磨制时面形仅为十分之一波长,为了更进一步探索其中的规律,本课题组正在把镜面磨制到二十分之一波长.但是从本试验中可以对磨制镜面得出:在薄镜面磨制时,对三阶像散和三阶球差可相应降低要求,因为通过主动光学可以很容易加以校正.而对三阶彗差要严格控制,因为通过主动光学很难校正,要在磨制时尽量去除.对中高频像差,主动光学校正效果不明显,可以通过自适应光学校正.

参考文献

- [1] SU Ding-qiang, CUI Xiang-qun. Active optics-the key technology of the new large telescope [J]. *Progress in Astronomy*, 1999, **17**(1):1-14.
苏定强, 崔向群. 主动光学-新一代大望远镜的关键技术[J]. *天文学进展*, 1999, **17**(1):1-14.
- [2] NOETHE L, ANDREONI G, FRANZA F, *et al.* Latest developments of active optics of the ESO NTT and the implication for the ESO VLT[C]. *SPIE*, 1991, **1542**: 293-296.
- [3] KNOHL E-D. VLT primary support system[C]. *SPIE*, 1994, **2199**: 271-283.
- [4] KIMBRELL J E, GREENWALD D. AEOS 3.67 m telescope primary mirror active control system[C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 400-411.
- [5] FUGATE R Q. The starfire optical range 3.5 m adaptive optical telescope[C]. *SPIE*, 2003, **4837**:934-843.
- [6] LYE M, KODAIRA K. Primary support system system for the SUBARU telescope[C]. *SPIE*, 1994, **2199**:762-772.
- [7] SU Ding-qiang, JIANG Sheng-tao, ZOU Wei-yao, *et al.* Experiment system of the thin-mirror active optics[C]. *SPIE*, 1994, **2199**:609-621.
- [8] WANG Fu-guo, YANG Hong-bo, LI Hong-zhuang, *et al.* Application and algorithm research of active optics in thin mirrors[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(12):704-708.
王富国, 杨洪波, 李宏壮, 等. 主动光学技术在薄镜面中的应用及算法研究[J]. *红外技术*, 2007, **29**(12):704-708.
- [9] WANG Fu-guo, YANG Fei, WU Xiao-xia, *et al.* Based on householder transform of the zernike polynomial wave front fitting method to solve active optics correction force [C]. *SPIE*, 2008, **6835**:683522-1-683522-5.
- [10] WANG Fu-guo. Research on the key technology of thin mirror active optics[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000.
王富国. 薄镜面主动光学关键技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2009.

Ability of the Thin Mirror Active Optics to Correct Optical Astigmatism

WANG Fu-guo, LI Hong-zhuang, YANG Fei

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

Abstract: The thin mirror active optics simulation model is built based on a great deal of domestic and international reference, and the model is analyzed. The simulation result indicates that the active optics can correct low-frequency error. And a thin mirror active optics experiment system is set up, thin mirror active optics experiment is carried on, and the result indicates that the surface figure can be corrected to the coated surface figure ($\lambda/10$) through the active optics. And the thin mirror active optics is able to correct Pri Astig best, Pri Spherical and Pri Trefoil better, but Pri Coma hardly, which has some instructions for coating large aperture thin mirrors.

Key words: Thin mirror; Active optics; Astigmatism; Simulation analysis



WANG Fu-guo was born in 1979. He works as an associate researcher with the Ph. D. degree, and his research interests focus on optical-mechanics system design and finite element analysis of large aperture primary of optical instruments.