

文章编号:1007-2780(2010)03-0379-07

望远镜的紧凑型闭环液晶自适应光学系统设计

陈 浩^{1,2}, 宣 丽¹, 胡立发¹, 曹召良¹, 穆全全^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: chha7@126. com;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 在利用地基大口径光学望远镜进行天文观测时, 液晶自适应光学成像技术已经被应用于校正大气湍流所引起的波前像差。应用 Zemax 软件和尽量少的光学元件, 设计出了与 1 200 mm 望远镜匹配的紧凑型闭环液晶自适应光学系统。针对本套闭环自适应光学系统自身的特殊要求, 制定了具体的公差原则, 并应用 Zemax 软件进行了公差分析, 结果表明, 本套闭环液晶自适应光学系统具备较宽松的公差条件, 可以实现较容易的加工和装调。对该紧凑型闭环液晶自适应光学系统与 1 200 mm 望远镜对接匹配后的性能进行了相应的评价: 自适应光学系统与 1 200 mm 望远镜对接匹配后的组合焦距为 19. 13 m, F 数为 17. 92, P - V 值为 0. 122 λ , RMS 值为 0. 031 λ , MTF 曲线接近衍射极限, 光学传递函数的模在 33 lp/mm 时可以达到 0. 5, 而成像 CCD 的极限分辨率为 31 lp/mm, 充分地利用了 CCD 相机的分辨资源。

关 键 词: 自适应光学; 望远镜; 离轴抛物面反射镜; 公差; Zemax 软件

中图分类号: TH754 **文献标识码:** A

Design on Compact Type Closed-Loop Liquid Crystal Adaptive Optical System for Telescope

CHEN Hao^{1,2}, XUAN Li¹, HU Li-fa¹, CAO Zhao-liang¹, MU Quan-quan^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: chha7@126. com;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In astronomical observation and space object detection, larger-aperture telescopes are used widely. Liquid crystal adaptive optics imaging technology has been used in correction of the aberration caused by atmospheric turbulence. In order to verify the validity of the technology, Zemax software and the optical components as few number as possible are used to design the compact type closed-loop liquid crystal adaptive optical system, and the characteristic of the system is evaluated. The specific tolerance principle is established. According to the tolerance analysis, it can be seen that the compact type adaptive optical system has a more relaxed tolerance conditions. And it is easier to achieve processing and alignment. We designed the compact type closed-loop liquid crystal adaptive optical system and make it match 1 200 mm telescope. The property of the whole system was evaluated correspondently. The focal length of the whole optical system is 19. 13 m and the F number is 17. 92. The peak-valve(P - V) value is 0. 122 λ . The RMS value is 0. 031 λ . The modulation transfer function(MTF) of the whole system is almost the same as the diffraction limited. MTF is 0. 5 at 33 lp/mm. The limited resolution of the CCD is 31 lp/mm, we could see that the resources of CCD has been used effectively.

Key words: adaptive optics; telescope; off-axis parabolic mirror; tolerance; Zemax software

收稿日期: 2009-09-26; 修订日期: 2009-10-23
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60736042, No. 60578035, No. 50703039); 吉林省与中科院科技合作项目(No. 2008SYHZ0005)
作者简介: 陈浩(1985—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 研究方向为液晶自适应光学系统设计及控制软件调试。

1 引 言

由于大气湍流的存在,在使用地基大口径望远镜进行天文观测时,进入望远镜的目标光波会发生较大的波前畸变,严重地影响成像质量。1953 年,美国天文学家 Babcock 首次提出应用自适应光学技术来校正由大气湍流的动态扰动所引起的波前像差^[1],以提高天文望远镜的分辨能力。

许多大口径望远镜都匹配了自适应光学系统,以观测目标光非常弱的天体。自适应光学系统主要由波前探测器、波前控制器和波前校正器组成,并具有开环和闭环两种形式。开环形式的自适应光学系统的波前校正器在波前探测器的后面,待校正的目标光可以同时到达波前校正器和波前探测器;而闭环形式的自适应光学系统的波前校正器在波前探测器的前面,即待校正的畸变波前先通过波前校正器进行波前校正,然后再到达波前探测器进行波前探测。

在校正信号方面,闭环形式可以探测到校正后的残差,然后根据残差进行二次校正,因此对校正器的稳定性和重复性要求较低;而开环形式探测不到校正后的波前,因此无法根据校正结果进行二次校正,所以对波前校正器校正的稳定性和重复性要求较高。

在系统装调及测量响应信号方面,开环形式的探测光路和校正成像光路的差别较大,对系统的装调和元件加工精度的要求较高。在测量倾斜镜和波前校正器的响应信号时,需要各自的光源,不能统一测量;在测量响应矩阵时,CCD 无法正常工作,无法实时监控测量过程。而闭环形式的自适应光学系统则可以有效地规避上述开环形式

自适应光学系统的不足。闭环形式的自适应光学系统在利用大口径望远镜进行天文观测时是十分必要的。

目前使用的自适应光学系统光学元件较多,所占体积较大,光能透过率较低,设计和操作复杂,在一定程度上影响了自适应系统校正的效果。本文利用 Zemax 软件为 1 200 mm 望远镜设计了一套紧凑型闭环液晶自适应光学系统,实现了两者的匹配和对接。针对本套自适应光学系统自身的特点,制定了相应的公差原则,并应用 Zemax 软件进行了公差分析。结果表明,本套自适应光学系统具备较宽松的公差条件,可以较容易地实现加工和装调。

2 液晶自适应光学系统设计

1 200 mm 天文望远镜的光学结构简图如图 1 所示,其主镜和次镜均为双曲面,设计波段为 550~850 nm, F 数为 9.17,出瞳直径为 15 mm,出瞳距为 9.15 mm。

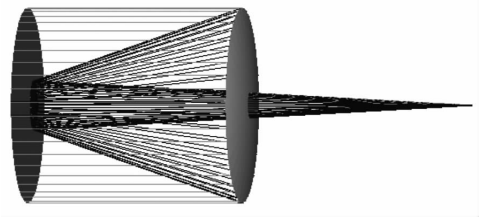


图 1 1 200 mm 望远镜的光学结构简图
Fig.1 Optical structure diagram of 1 200 mm telescope

2.1 自适应光学系统的设计参数

根据实际的应用需要,主要的设计参数如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

Table 1 Parameters of optical design

望远镜视场 (FOV)	望远镜与自 适应光学系统 组合后的 F 数	望远镜与自 适应光学系 统组合后的 工作波段	液晶波前 校正器的 校正波长	自适应光学 系统的透过率 (分光前)	CCD 相机 像元尺寸 (μm)	液晶波前 校正器像 元尺寸 (μm)	Hartmann 波前探测器 像元尺寸 (μm)	外形尺寸 (mm)
$2\times 0.004\ 7$	18	550~850 nm	785 nm	大于 80%	16×16	18×18	23×23	700×600

2.2 自适应光学系统设计的几点考虑

(1)系统的设计波段

1 200 mm 大口径天文望远镜的设计波段为 550~850 nm,为保证经过自适应光学系统校正

后的成像质量良好,所有光学元件也应依据该波段进行设计;

(2)液晶材料的色散

由于液晶波前校正器中的液晶材料本身具有

色散特性^[2],所以结合系统设计所用液晶波前校正器的校正特点,在液晶波前校正器之前放置窄带滤光片,对 650~850 nm 左右的波段进行校正成像。

(3)液晶波前校正器的偏振效应

由于液晶波前校正器只能对线偏振光进行有效校正,因此需要在液晶波前校正器之前设置偏振片,将非偏振光转化为偏振光。

(4)CCD 相机接收的能量密度的提高

应用大口径望远镜进行天文观测时,单位受照面积所接收的光通量是一定的,为保证 CCD 相机能够观测到天体目标所成的像,在其前面应用一对双胶合透镜,进行缩束比的多种搭配,以调节进入 CCD 相机中的光能密度。

(5)反射式离轴抛物面的应用

反射式离轴抛物面通常用来准直来自点光源的光线,或者将一束准直光束会聚于一点,在工程领域中应用甚广^[3-5],反射式光学系统还具有自动消除色差的优势^[6,7],本设计采用一片反射式离轴抛物面对光束进行会聚。

(6)双胶合透镜的应用

本套自适应光学系统的设计波段为 550~850 nm,波段较宽,需要考虑色差对探测精度和校正精度的影响,因此本设计应用双胶合透镜对色差造成的影响进行最大限度的降低。

(7)光学元件的数量

使用过多的光学元件不但增加了自适应光学系统的加工成本和装调的复杂性,而且光学元件的加工误差和装调误差还会加大液晶波前校正器的校正负担。尽量减少所用光学元件的数量的另一个好处是可以避免由于光学元件过多所造成的光能透过率大幅降低。本设计仅用 5 片成像光学元件(1 片反射式离轴抛物面和 4 片双胶合透镜)将倾斜镜、波前校正器、波前探测器和 CCD 相机等 4 种光学仪器设备组合起来,形成一套集波前校正、波前探测和最终成像于一体的小型化紧凑型闭环液晶自适应光学系统。

(8)大气等晕角

在设计过程中应考虑到自适应光学系统的视场受大气等晕角的限制因素^[8]。

(9)口径匹配

所设计的光学系统必须与液晶波前校正器、Hartmann 波前探测器、CCD 相机的通光孔径相

匹配。为了尽量排除天文观测时周围环境振动及系统装调误差的影响,要求上述 3 种自适应光学核心器件的通光设计口径要略小于器件的实际口径。

(10)系统公差

系统的设计公差必须在可控的加工、装调误差范围之内。

(11)CCD 相机的分辨资源

自适应光学系统与 1 200 mm 望远镜对接成像后,CCD 相机的分辨资源应该得到最大程度地利用(本设计所用 CCD 相机的像素尺寸为 $16\text{ }\mu\text{m}\times 16\text{ }\mu\text{m}$)。

2.3 光学系统中双胶合透镜的设计波段

液晶波前校正器中的向列相液晶分子呈长棒状,其极化率和折射率具有各向异性,相当于单轴晶体,具有非寻常光折射率 n_e 和寻常光折射率 n_o ,相位调制量的大小取决于 n_e 和 n_o 之差 Δn 。随着波长的增加, Δn 值也逐渐减小。在 400~700 nm 波段, Δn 变化量为 28%;在 780~900 nm 波段, Δn 的变化量为 2%。说明液晶波前校正器在可见光波段可以对较窄波段(50~100 nm)进行校正和成像,而在近红外波段,可以实现较宽波段的校正^[9-11]。

由于本套自适应光学系统的设计波段为 550~850 nm,波段较宽,所以不但要考虑色差对探测精度和校正精度的影响,而且需要将液晶波前校正器的校正波长与自适应光学系统的设计波段进行匹配。由于要在液晶波前校正器之前放置窄带滤光片,对 650~850 nm 波段进行校正成像,因此双胶合透镜的设计在 550~850 nm 的基础上应在 650,785,850 nm 波长处加大优化设计权重,以保证在上述波长处可以得到较好的校正成像效果。

2.4 光学系统设计

所设计的闭环液晶自适应光学系统如图 2 所示。从 1 200 mm 望远镜出射的发散光经双胶合透镜 L_1 准直为平行光,该平行光打到倾斜镜上并被其反射,再经离轴抛物面反射镜将该平行光会聚于一点,由该点出射的发散光经双胶合透镜 L_2 准直,并入射到液晶波前校正器进行波前畸变校正,经过校正的光波再经双胶合透镜 L_2 、平面反射镜和双胶合透镜 L_3 再次被准直为平行光,该平行光经过分光棱镜分为两束,一束进入波前探测

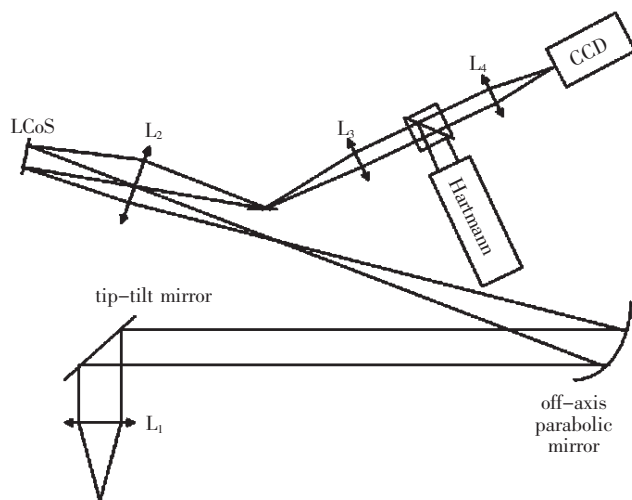


图 2 液晶自适应光学系统光路图

Fig. 2 Optical layout of the liquid crystal adaptive optical system

器进行波前探测,另一束经双胶合透镜 L_4 会聚到 CCD 相机进行成像。

2.5 光学系统设计特点

(1) 开环光路与闭环光路转化容易

对闭环光路设计而言,仅要求 CCD 相机前面的透镜 L_4 像差最小即可。但为了使闭环光路较容易地转换为开环光路,将加工成本和装调误差降到最低,设计时需要保证液晶波前校正器之后的光学元件(元件组)应尽可能低的引入像差。也就是说,在设计自适应光学系统的过程中,液晶波前校正器之后的光学元件(元件组)所产生的像差不能与在其前面的光学元件(元件组)所产生的像差进行像差补偿。

(2) 系统占用空间小

先前的同类自适应光学系统使用光学元件多,所占空间较大,为压缩系统体积,还必须设置多片平面反射镜,用以折转光线,不但增加了加工成本,而且增大了系统的装调难度和液晶波前校正器的校正负担。本套紧凑型自适应光学系统采用 1 片起到反射镜和透镜双重作用的离轴抛物面反射镜,在正常校正成像的同时,压缩了系统体积,不但减少了使用光学元件数量,压缩了系统所占空间,而且节约了加工成本,并尽可能地降低了装调误差和液晶波前校正器的校正负担。

(3) 最大限度地提高了系统的透过率

由于自适应光学系统需要考虑液晶波前校正器的色散特性和偏振效应,仅对一定波段的线偏

振光进行校正成像,光能利用率偏低。先前的同类自适应光学系统使用光学元件过多,不但增大了加工成本和系统的装调难度,而且使得光能透过率大幅降低;本套紧凑型自适应光学系统在大幅减少缩束透镜的前提下,采用 4 片双胶合透镜和 1 片起到反射镜和透镜双重作用的离轴抛物面反射镜,在正常校正成像的同时,较大地压缩了系统体积,最大限度地提高了光学系统的透过率。

3 波前校正器之前光学系统的设计评价

依据上述设计条件及考虑,首先应用 Zemax 软件对自适应光学系统与 1 200 mm 望远镜组合后,液晶波前校正器之前的部分进行设计和优化。光阑位置设置在望远镜主镜位置处。

由于射入到液晶波前校正器的设计光波为平行光,若要观测其成像质量,则必须在双胶合透镜 L_2 之后设置理想透镜。设置焦距为 100 mm 的理想透镜之后,组合系统的 F 数为 16。

图 3 为设置焦距为 100 mm 的理想透镜之后所成像的 MTF 曲线。可以看出,MTF 曲线接近衍射极限,轴上和轴外的 MTF 曲线与衍射极限基本重合。图 4 为系统的能量集中度曲线,在距质心半径 20 μm 处,能量集中度接近 90%。

图 5 和图 6 为系统的点列图和光程差曲线,从点列图中可以比较直观地看出光斑的大小和成像质量。一般认为,弥散斑的 RMS 半径控制在艾

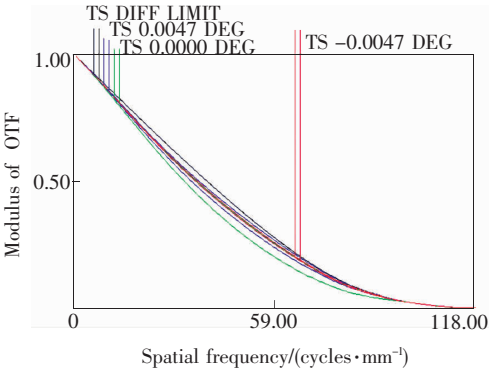


图 3 调制传递函数曲线

Fig. 3 Modulation transfer function curves

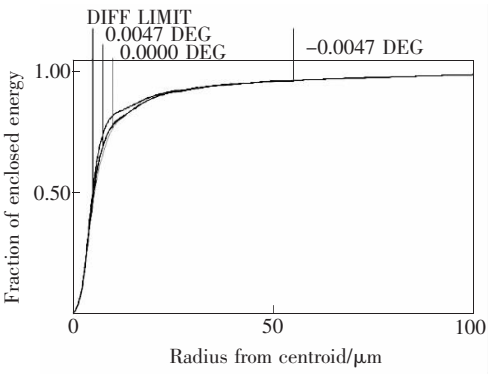


图 4 能量集中度曲线

Fig. 4 Encircled energy curves

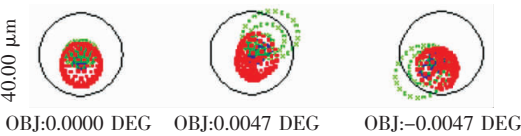


图 5 点列图

Fig. 5 Spot diagram

里斑之内,即表明光学系统是处于衍射极限状态的,是理想的光学系统。从图 5 可以看出:点列图的图案均在艾里斑的范围之内,因此可判定成像较理想。而从光程差曲线图中可以看出轴外和轴上的一致性很好。可以看出从双胶合透镜 L_2 出射(液晶波前校正器所接收)的光波面为平行光波面。从而可知,自适应光学系统与 1 200 mm 望远镜组合后,液晶波前校正器之前的光学系统设计比较完善。

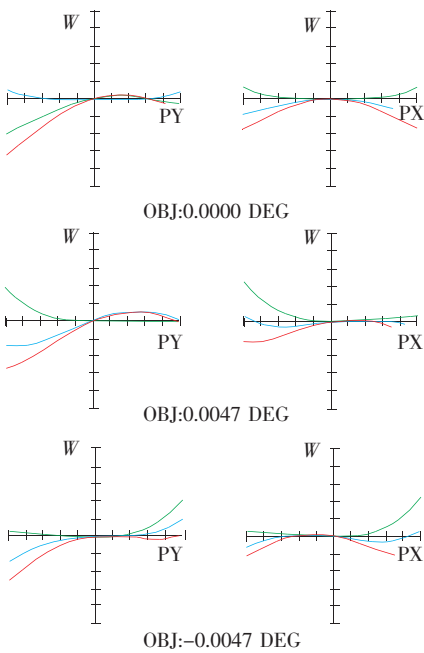


图 6 光程差像差曲线

Fig. 6 Curve of the optical path difference aberration

4 自适应光学系统与 1 200 mm 望远镜组合后的整体像质评价

所设计的自适应光学系统需要与 1 200 mm 望远镜进行匹配和对接。图 7 为对接后光学系统的 MTF 曲线,可以看出 MTF 曲线也十分接近衍射极限,光学传递函数的模在 33 lp/mm 时可以达到 0.5,而所用 CCD 相机的像素尺寸为 $16\text{ }\mu\text{m}\times 16\text{ }\mu\text{m}$,可知对接后的系统最大程度地利用了 CCD 相机的分辨资源。图 8 为系统的能量集中

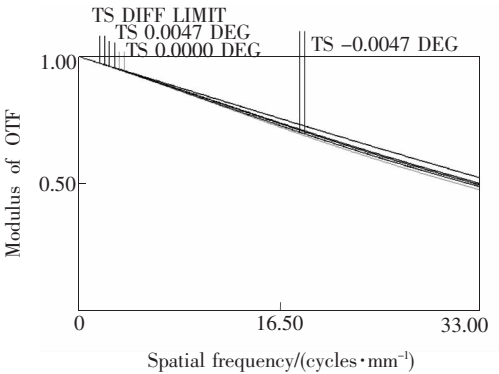


图 7 调制传递函数曲线

Fig. 7 Modulation transfer function curves

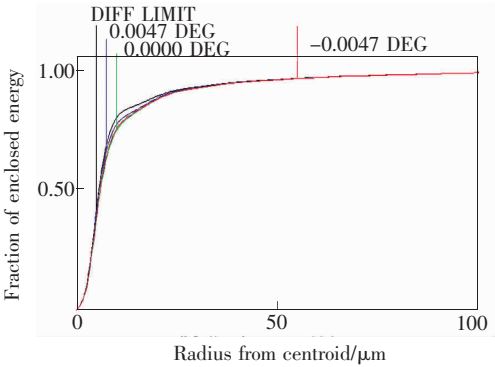


图 8 能量集中度曲线
Fig. 8 Encircled energy

度曲线,在距质心半径 20 μm 处,能量集中度接近 90%。

图 9 和图 10 为对接后系统的点列图和光程差曲线,可以看出点列图比较理想,光程差曲线中轴外和轴上的一致性仍然很好,光程差曲线限制在 $\pm 0.15\lambda$ 以内,满足设计要求。

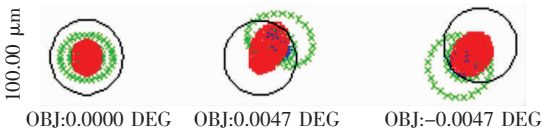


图 9 点列图
Fig. 9 Spot diagram

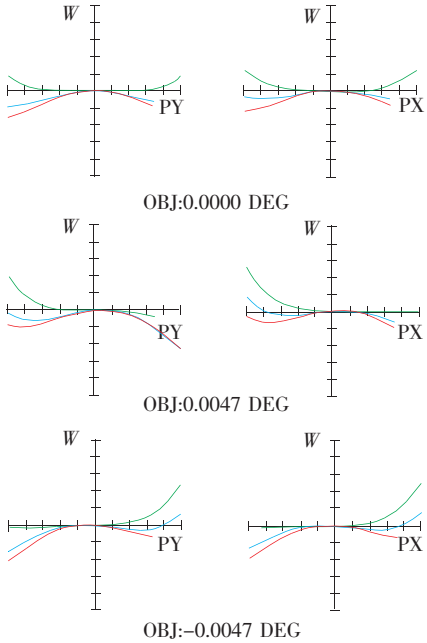


图 10 光程差像差曲线

Fig. 10 Curve of the optical path difference aberration

5 自适应光学系统的公差分析

公差的制定在许多工程设计中占据着极其重要的地位^[12-16]。合理地制定出系统的加工和装配公差,不但保证了光学系统的成像质量,而且还能够有效地降低该系统的加工成本。

针对本套自适应光学系统的特点,制定了具

表 2 公差参量
Table 2 Tolerance parameters

Decenter X (surface) (mm)	Decenter Y (surface) (mm)	Tilt X (surface) (°)	Tilt Y (surface) (°)	Decenter X (element) (mm)	Decenter Y (element) (mm)	Tilt X (element) (°)	Tilt Y (element) (°)
±0.10	±0.10	±0.10	±0.10	±0.15	±0.15	±0.20	±0.20

体的公差原则^[17]。如果某些双胶合透镜的厚度和空气间隔给出正公差,那么另一些则给出负公差。从第一片双胶合透镜算起,如果第一片透镜的厚度给出正公差,那么第二片透镜的厚度就给出负公差,以后交替变化;如果第一个间隔给出负公差,那么第二个间隔就给出正公差,以后交替变化。即双胶合透镜的厚度和空气间隔不能只存在一个方向的公差,公差分配应使自适应光学系统的等效轴向总长度接近其初始设计数据。而所有光学元件曲率半径的加工公差则必须严格加以控制。自适应光学系统的公差应用 Zemax 软件进

行分析。

在加工之前,使所有光学表面半径与现有的样板相匹配,介于自适应光学系统元件的特殊性,将所有表面半径与样板的偏差定为 3 个光圈,光学元件的厚度和空气间隔允差定为 $\pm 0.2\text{ mm}$ 。其余公差参量如表 2。

由于公差参量是建立在光学系统结构参数的基础之上的,在具体情况下还要对上述公差参量进行适当调整。

从上述公差参量可以得出如下结论:本套自适应光学系统具备较宽松的公差条件,可以较容

易地实现加工和装调。

6 结 论

提出了一种透射与离轴反射相结合的紧凑型闭环自适应光学系统设计方案,该系统由1片反射式离轴抛物面和4片双胶合透镜组成,整体结构更加紧凑,在很大程度上简化了自适应光学系统的复杂性。本套闭环自适应光学系统所用光学元件数量相比同类系统减少1/2左右,所占空间减小约1/3,系统的光能透过率得到了极大的提高。

设计出的紧凑型闭环液晶自适应光学系统与1 200 mm望远镜对接匹配后的焦距为19.13 m,其MTF曲线几乎与衍射极限重合, F 数为17.92, P - V 值为 0.122λ ,RMS值为 0.031λ 。光学传递函数的模在33 lp/mm时可以达到0.5,而成像CCD的像元尺寸为 $16\ \mu\text{m}\times 16\ \mu\text{m}$,充分地利用了CCD相机的分辨资源。光程差像差限制在 $\pm 0.15\lambda$ 以内,满足设计要求。通过公差分析可知,本套紧凑型闭环自适应光学系统可以较容易地实现加工和装调。

参 考 文 献:

- [1] Babcock H W. The possibility of compensating astronomical seeing [J]. *Publ Astron. Soc. Pac.*, 1953, 65: 229-236.
- [2] 李大禹,穆全全,胡立发,等. 液晶空间光调制器相位调制的色散特性研究[J]. 光子学报, 2007, 36(6): 1065-1067.
- [3] 田海雷,汪岳峰,张伟,等. 离轴抛物面反射式红外平行光管设计[J]. 红外技术, 2007, 29(12): 701-707.
- [4] 赵茗,黄德修,刘小英,等. 离轴抛物面反射式平行光管的结构设计[J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(4): 67-69.
- [5] 顾小超,胡雯雯,黄丽俐,等. 一种离轴抛物面准直光管的设计[J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 472-473.
- [6] 崔继承. 大口径折反射式变焦距物镜的设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2087-2091.
- [7] 李宏壮,林旭东,刘欣悦,等. 400 mm薄镜面主动光学实验系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2076-2083.
- [8] 曹召良,穆全全,胡立发,等. 600 mm望远镜液晶自适应系统成像光路设计[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1147-1150.
- [9] 曹召良,穆全全,胡立发,等. 液晶波前校正器特性研究[J]. 光子学报, 2008, 37(10): 2043-2046.
- [10] 曹召良,穆全全,胡立发,等. 液晶波前校正器位相调制非线性及闭环校正研究[J]. 液晶与显示, 2008, 23(2): 157-162.
- [11] 姜宝光,穆全全,曹召良,等. 液晶波前校正器校正水平方向上的大气湍流[J]. 液晶与显示, 2009, 24(3): 396-398.
- [12] 陈浩,宣丽,胡立发,等. 1 200 mm望远镜开环液晶自适应光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 29-36.
- [13] 陈旭,刘伟奇,康玉思,等. Offiner补偿器的结构与装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 88-93.
- [14] 黄文浩,雷双艳,胡衍雷,等. 用于DVD光学头的三焦点单片物镜设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1793-1799.
- [15] 林宝君,杨慎华,郑祺峰,等. 发动机连杆裂解槽激光加工机床的加减速控制[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1922-1927.
- [16] 康玉思,刘伟奇,冯睿. 弯月镜结构补偿镜的折反型望远系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 215-220.
- [17] Sharma K D, Jha S. Tolerances on lens parameters: a study [J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(12): 1917-1920.