

文章编号 1004-924X(2021)04-0682-09

倾斜分束片型复色自准直仪光学系统

刘智颖^{1,2*}, 郑秋水^{1,2}, 李文博^{1,2,3}, 王晓燕⁴, 黄蕴涵^{1,2}

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;
3. 中船重工安谱(湖北)仪器有限公司, 湖北 宜昌 443000;
4. 北京控制工程研究所, 北京 100080)

摘要: 为了实现对倾斜分束片型自准直仪的设计, 针对由平板分束器引入的轴上像散提出了校正方法。对其轴上点像散产生的原因进行分析, 研究了柱面镜对轴上像散的校正方法。推导了柱面镜校正参数的计算方法, 针对复色自准直仪系统的残余色差, 提出柱面分束器与柱面镜组合的校正方法, 并与平板分束器与双柱面镜组合方法进行对比, 分析发现前者可减少元件数量, 更适合用于倾斜分束片型复色自准直仪中。设计结果表明, 柱面分束器与柱面镜组合型系统的波像差 RMS 值为 $\lambda/26$, PV 值为 $\lambda/5$, 系统的消像散、消色差效果良好, 成像质量得到有效复原。对样机的波前进行检测, RMS 值为 $\lambda/25$, PV 值为 $5\lambda/26$, 小于 $\lambda/4$, 系统成像质量良好。

关键词: 自准直仪; 倾斜分束片; 轴上像散; 消色差; 双柱面镜

中图分类号: TH741.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.2020.0540

Optical system of tilted beam splitter type multicolor autocollimator

LIU Zhi-ying^{1,2*}, ZHENG Qiu-shui^{1,2}, LI Wen-bo^{1,2,3}, WANG Xiao-yan⁴, HUANG Yun-han^{1,2}

- (1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology Ministry of Education, Changchun 130022, China;
3. CSIC AnPu (HuBei) Instruments Co. Ltd, Yichang 443000, China;
4. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China)

* Corresponding author, E-mail: lzy@cust.edu.cn

Abstract: To design a tilted beam splitter type autocollimator, a method of correcting the on-axis astigmatism introduced by the plate beam splitter is proposed herein. The reason behind the astigmatism of the points on the axis is analyzed, and the method of correcting this astigmatism using a cylindrical lens is studied. A method of calculating the correction parameters for the cylindrical lens is developed. To tackle the residual chromatic aberration problem of the polychromatic autocollimator system, the correction method of combining the cylindrical beam splitter and cylindrical lens is proposed and compared with the method of combining the plate beam splitter and double cylindrical lens. The former is found to be better through a

收稿日期: 2020-10-16; **修订日期:** 2021-11-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61805025, No. 61705018); 吉林省科学技术发展项目(No. 20200401055GX); 北京信息科技大学光电测试及仪器教育部重点实验室资助项目(No. OMTIKF2020001)

comparative analysis. The number of components can be reduced, and is more suitable for use in a tilted beam splitter type multicolor autocollimator. The design results indicate that the RMS value of the wave aberration of the system combining the cylindrical beam splitter and cylindrical lens is $1/26$ waves, and the PV value is $1/5$ waves. The system shows good astigmatism and achromatic effects. The image quality is effectively restored. Detecting the wavefront of the prototype, the RMS value is $1/25$ waves, and the PV value is $5/26$ waves, which is less than a quarter of the wave. The system imaging is good, verifying the correctness and feasibility of the design.

Key words: autocollimator; tilt beam splitter; on-axis astigmatism; achromatic; double cylindrical lens

1 引言

自准直仪作为光学测量中的重要仪器,在精密检测中发挥着不可或缺的作用。为了实现特定波段的高反或高透,自准直仪需要引入分束器。常见的分束器有倾斜分束片^[1]和分光棱镜^[2-5]两种。对比两种分光方式的特点,加入分光棱镜相当于在分光系统的反射部分和透射部分中加入了两块相同的平行平板,且因全偏振现象造成透过率的降低,因此,倾斜分束片在质量和透过率上都要优于分光棱镜。倾斜分束片通常为平板分束器,它在平行光路中不会引入额外的像差,而在非平行光路中会引起轴上点的像散。平板分束器在光路中通常倾斜 45° 放置,此时由它引入的像散不可忽略。通常轴上点是不存在像散的,但由于系统中加入了平板分束器,引入了轴上点像散,这会大幅降低系统的成像质量。如何降低由平板分束器引入的轴上像散,是解决成像质量问题的关键。

目前,像散校正主要有3种方法。闫亚东在复合式干涉仪中优化信号光收集光学系统,提出将平板分束器改为楔板来进行分光,在 $1\ 547\sim 1\ 553\ \text{nm}$ 波段下,系统的RMS值降低约 $20\ \mu\text{m}$,像质大幅提升;但由于楔角较小,且楔板的两个表面均为平面,其聚焦能力有限,因此对系统像散的校正能力一般^[6]。段相永提出采用相同的平行平板互相垂直放置来减小像散,同时可以消除光路的平移量,但要保证互相垂直会增加装调难度^[7]。于建东在焦距为 $400\ \text{mm}$ 的傅里叶变换成像光谱仪物镜设计中采用柱面镜校正像散,使像散降低几十个波长量级^[8]。张倩采用双胶合柱面镜对波长选择开关光学系统进行改

进,提高了成像精度^[9]。黄玮通过柱面镜校正指纹采集仪光学系统的投影畸变,使大部分视场的MTF提升至棱镜补偿方案的 1.6 倍^[10]。Xia G、FU X、张晓龙等分别在Czerny-Turner光谱仪中使用柱面镜对像散进行补偿校正,像质均得到有效的提升^[11-13]。徐鹤轩及陈芳使用反射式柱面镜进行消像散设计,使宽波段光谱仪系统的像散得到了有效控制^[14-15]。

本文设计了一款带有倾斜分束片的长焦距复色自准直仪,对平板分束器引入的轴上像散进行了分析。为达到既可以分光又能同时校正像散与色差的目的,因此在复色光波段下选取合适的材料,并选用柱面分束器与柱面镜组合的形式,使系统的成像质量较平板分束器大幅提升。

2 平板分束器引入像散分析

像散产生的原因主要是子午像点和弧矢像点并不重合,两者分开的距离称为像散。众所周知,像散随着视场的增大成倍地增大,因此像散主要针对的是轴外视场。而平板分束器会造成子午焦点和弧矢焦点的位移差,引起轴上像散。像散会导致光学系统的子午焦点与弧矢焦点不重合。

在自准直仪光路中插入平板分束器后,子午面和弧矢面均会产生焦移,两者焦移量的差值即为平板分束器的轴上像散,如图1所示。则平板分束器的轴上像散 B_{ASTI} 为:

$$B_{\text{ASTI}} = \Delta L_Y - \Delta L_X, \quad (1)$$

其中: ΔL_Y 为子午方向的焦移量, ΔL_X 为弧矢方向的焦移量。

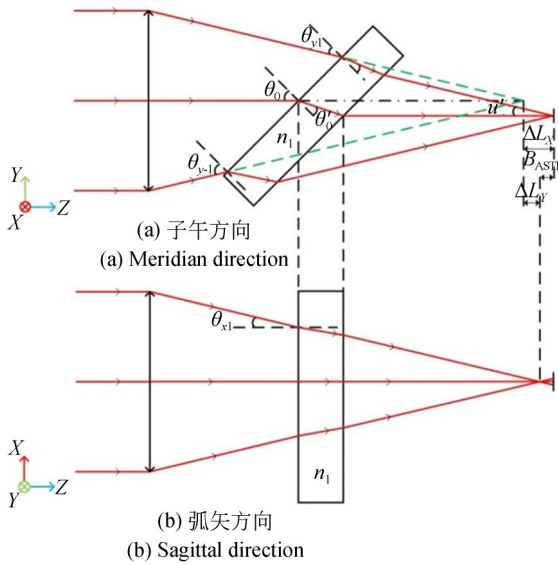


图1 平板分束器引入的轴上像散示意图

Fig. 1 Schematic diagram of on-axis astigmatism introduced by plate beam splitter

3 像散校正

目前,由平板分束器引入的轴上像散的校正方法主要有三种:第一种是将平板分束器改为楔板分束器,但它对像散的校正能力有限;第二种在光路中加入另一个相同的平行平板,使它互相垂直放置,但装调时难以保证完全对称;第三种使用柱面镜进行像散校正,校正效果理想且设计与装调简便。柱面镜与轴垂直的面为圆曲面,使光发生屈折聚焦成线,而与轴平行的面上光不发生屈折,使其子午方向与弧矢方向的光焦度产生变化,因此柱面镜可以校正系统像散。

以不改变原光学系统弧矢方向的焦距为例,子午像点应向其弧矢像点移动,且仅在子午方向存在曲率。本文采用的柱面镜靠近像点的表面为柱面,靠近平板分束器的表面为平面。Y像点经柱面镜成像于X像点,则柱面的Y方向为凸面,如图2所示。

柱面镜的后表面顶点到弧矢像点的中心距离为后截距 L_{BX} ,由物像关系式,柱面镜子午方向的凸面曲率半径 r_y 为:

$$\frac{1}{L_{BX}} - \frac{1}{L_{BX} + B_{ASTI}} = -\frac{(n_2 - 1)}{r_y}, \quad (2)$$

式中 n_2 为柱面镜的折射率。由式(2)不难看出,

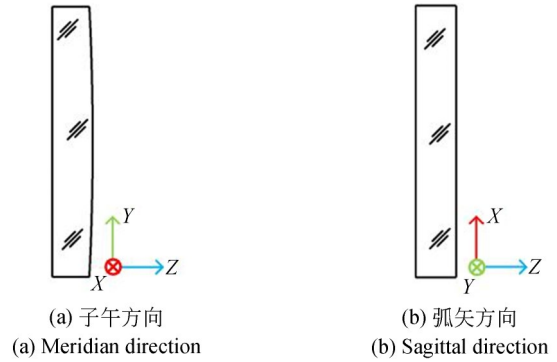


图2 柱面镜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cylindrical lens

通过改变后截距与柱面镜半径,可以对任意大小的轴上像散进行校正。

4 倾斜分束片型复色自准直仪的设计

4.1 自准直仪物镜的设计

自准直仪的设计参数如表1所示。考虑到系统焦距长、口径大,使用透射式结构会增加系统质量,且色差难以校正会使系统有着较大的二级光谱。反射式结构不会引入色差,但球面反射镜的球差难以校正,因此采用牛顿反射式结构,用抛物面反射镜对自准直仪物镜进行设计。

自准直仪物镜如图3所示,点列图如图4(a)

表1 自准直仪物镜设计参数

Tab. 1 Design parameters of autocollimator objective lens

参数名称	参数指标
F数	10
焦距 f'	1 500 mm
视场角 2ω	0.1°
波段	486~656 nm
分束器厚度	2 mm
倾斜角度	45°

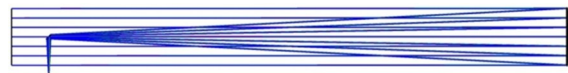
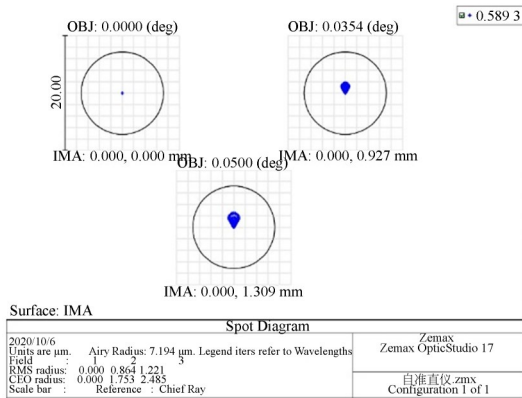


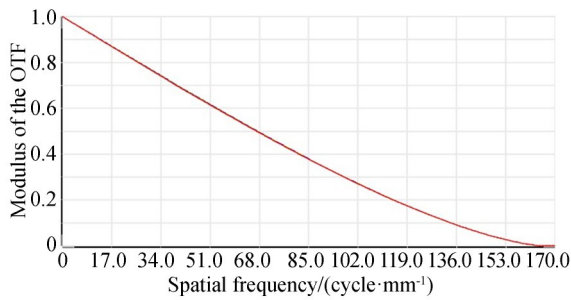
图3 自准直仪物镜

Fig. 3 Parabolic autocollimator

所示,可以看到 RMS 值小于艾里斑的半径, MTF 曲线如图 4(b)所示,可以看到 MTF 接近衍射极限,表明系统成像质量良好。



(a) 点列图
(a) Spot diagram



(b) MTF曲线
(b) MTF curve

图 4 自准直仪像质图

Fig. 4 Image quality map of autocollimator

4.2 柱面镜校正轴上像散

由前文所知,采用柱面镜可校正平板分束器所引入的轴上像散,且结构简单易于实现。根据式(1)可以计算出表 1 所示系统的像散为 0.54 mm。根据需要取后截距为 45 mm,根据式(2)可

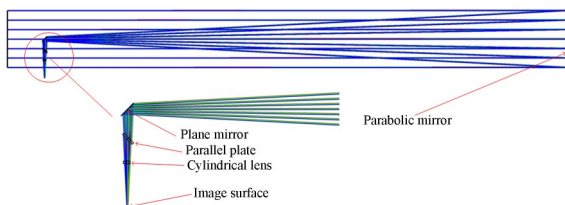
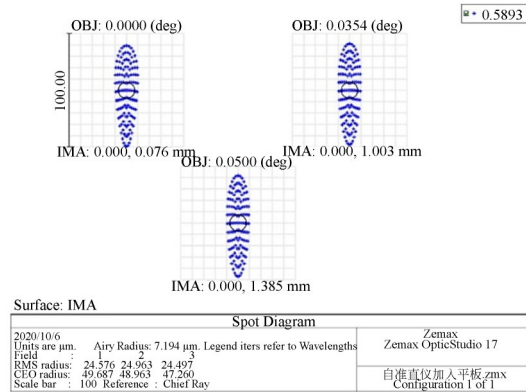


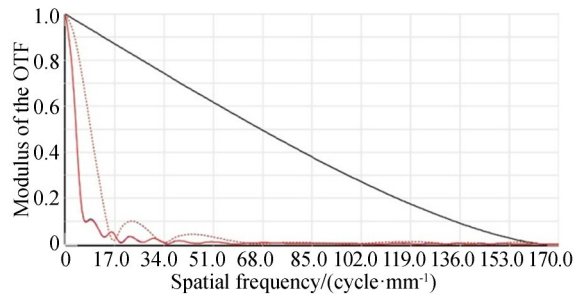
图 6 柱面镜校正轴上像散系统

Fig. 6 Correction system of on-axis astigmatism with cylindrical lens

由于前文所述的平板分束器会引起轴上像散,在加入平板分束器后可以看到像质明显下降,点列图及 MTF 曲线如图 5 所示。



(a) 点列图
(a) Spot diagram



(b) MTF曲线
(b) MTF curves

图 5 带有平板分束器的自准直仪像质图

Fig. 5 Image quality map of autocollimator with plate beam splitter

以计算出柱面镜半径为 -1 961.26 mm,加入柱面镜的系统如图 6 所示。

由图 7(a)~7(c)和图 8(a)~8(c)可知,经过优化系统在各个单色光波段下的轴上像散得到了有效的校正。但从图 7(d)和 8(d)发现,在复色波段下系统残余的色差较为明显,造成了像质的降低,因此要对系统残余的色差进行校正。

4.3 自准直仪色差校正

自准直仪物镜采用反射式结构,不存在色差。平板分束器是没有光焦度的,不会引入色差,因此系统的色差主要是柱面镜带来的。为了获得良好的像质,要对系统进行消色差设计。

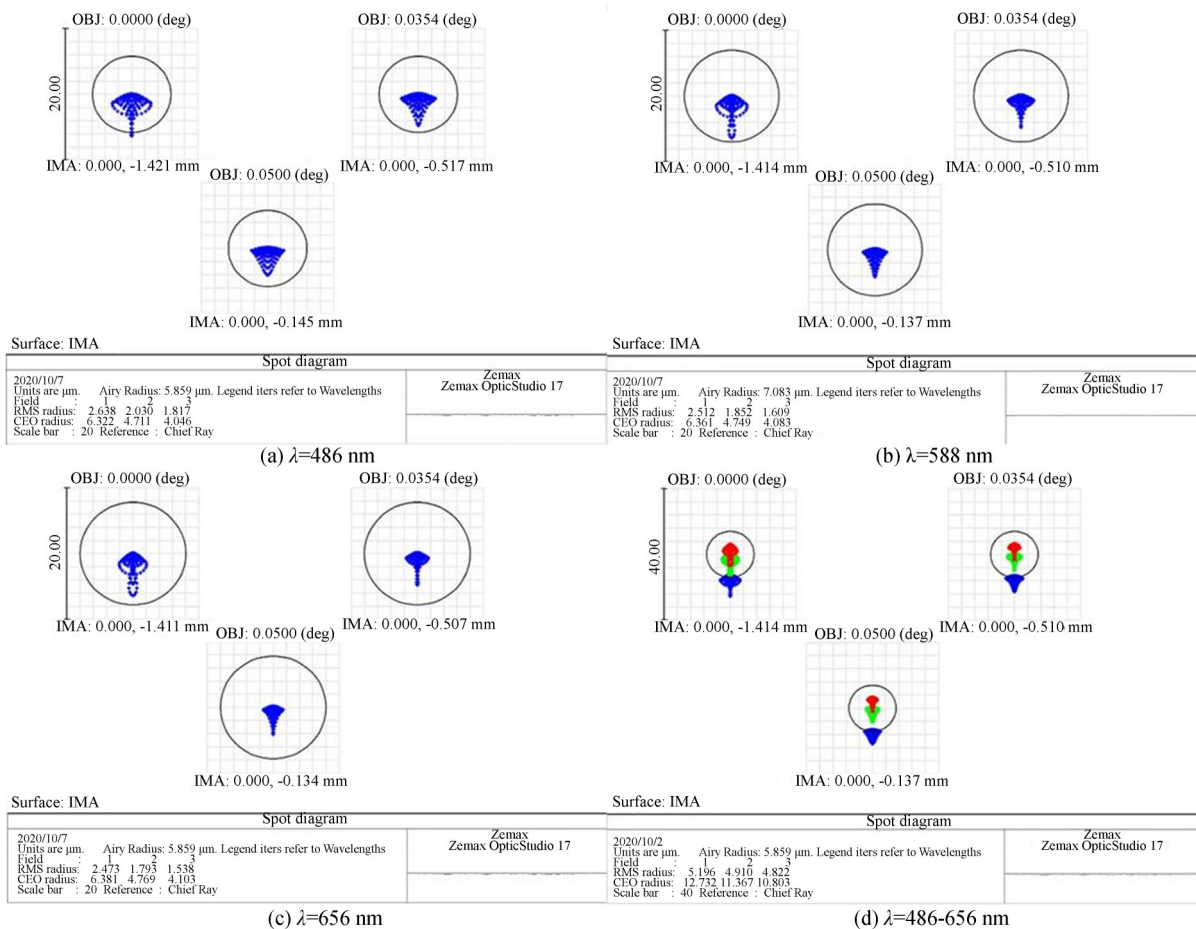


图 7 各个波段下柱面镜校正系统的点列图

Fig. 7 Spot diagrams of cylindrical lens correction system in each band

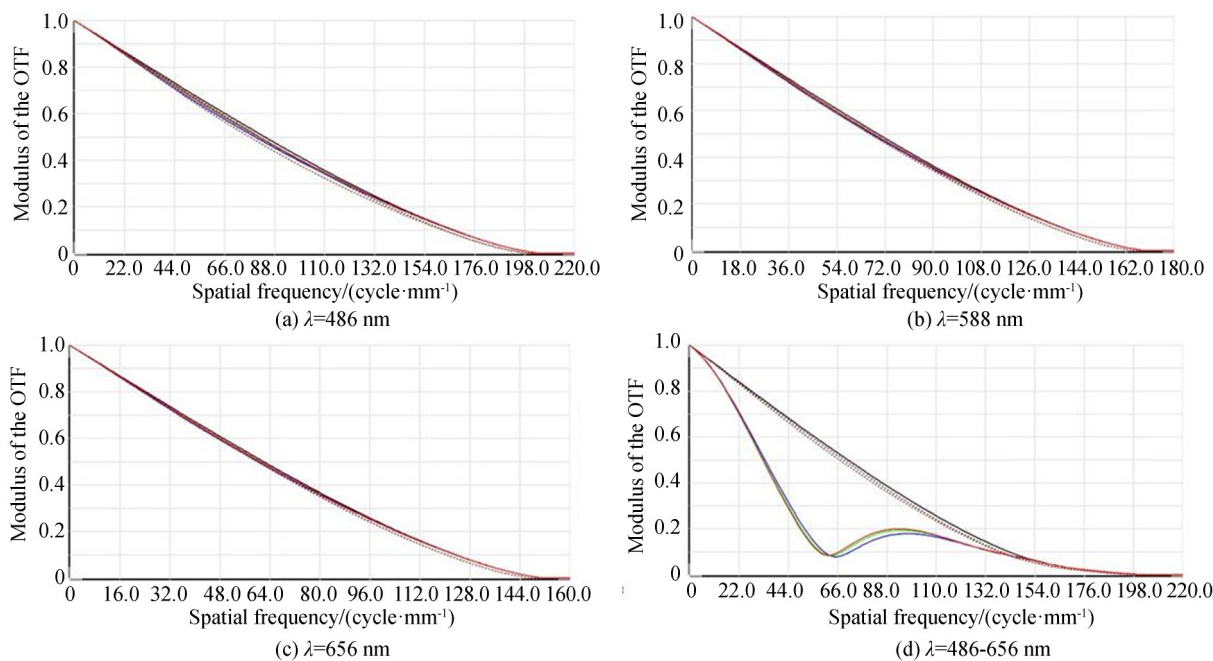


图 8 各个波段下柱面镜校正系统的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves of cylindrical lens correction system in each band

4. 3. 1 双柱面镜组合校正色差

光学系统的色差系数由各个透镜的色差系数相加,每块透镜的色差贡献都与光焦度 φ 和阿贝数 ν 有关。从初级色差的角度来考虑光学系统消色差问题,使色差系数为 0,得到每片透镜的光焦度为:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} \varphi \\ \varphi_2 = \frac{-\nu_2}{\nu_1 - \nu_2} \varphi \end{cases} \quad (3)$$

通过式(3)计算得到双柱面镜组合的曲率半径分别为 $r_{y1} = -461.10 \text{ mm}$ 及 $r_{y2} = 423.46 \text{ mm}$,得到在 486~656 nm 波段下的自准直仪如图 9 所示,系统的点列图及 MTF 曲线如图 10 所示。可以看到,色差得到了极大的改善,同时成像质量也有了显著的提升,满足自准直仪的设计要求。

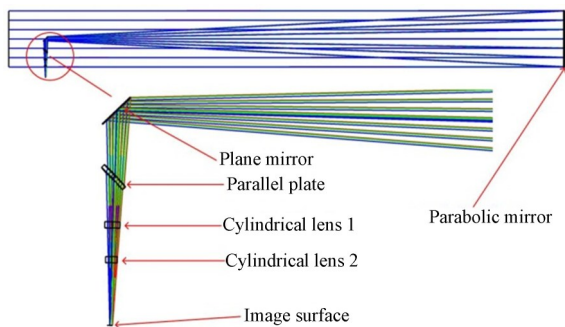


图 9 双柱面镜轴上像散、色差校正系统

Fig. 9 Correction system of on-axis astigmatism and chromatic aberration with double cylindrical lens

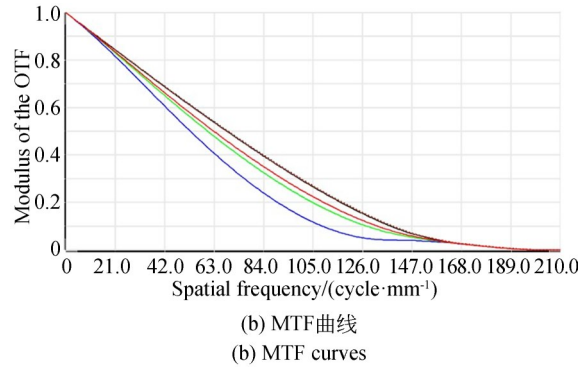


图 10 双柱面镜校正系统像质图

Fig. 10 Image quality diagrams of double cylindrical lens correction system

4. 3. 2 柱面分束器与柱面镜组合校正色差

基于双柱面镜组合的设计方法,将平板分束器与柱面镜 1 结合,改进为柱面分束器。反射光路一侧为平面,透射光路一侧为柱面,将柱面分束器与柱面镜组合对轴上像散与色差进行校正,在 486~656 nm 波段下带有柱面分束器的自准直仪如图 11 所示,包含光源、抛物面反射镜、折转平面反射镜、柱面分束器与柱面镜组合校正系统。

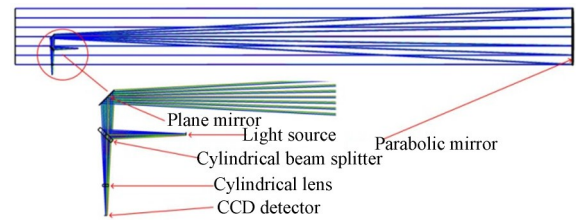
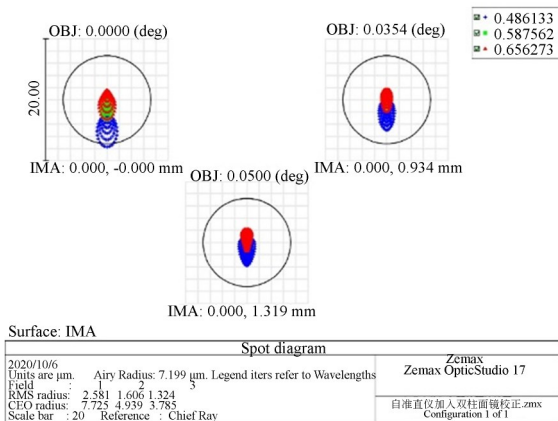


图 11 柱面分束器与柱面镜组合的复色自准直仪

Fig. 11 Cylindrical beam splitter and cylindrical lens combined multicolor autocollimator

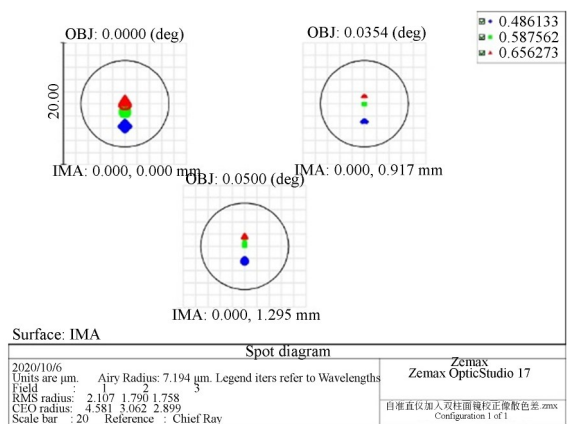


(a) 点列图
(a) Spot diagram

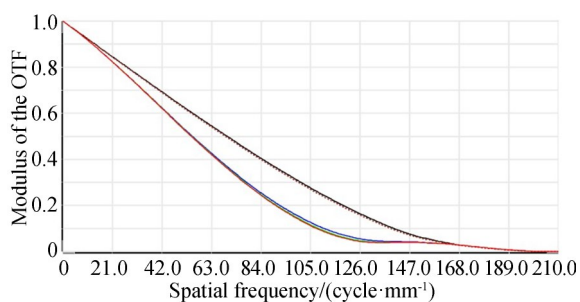
系统的点列图及 MTF 曲线如图 12 所示。可以看出,轴上像散与色差得到了有效的校正,成像质量良好。系统波前如图 13 所示,可以看出系统的 RMS 值为 $\lambda/26$, PV 值为 $\lambda/5$,满足设计要求。

柱面镜的加工与装调公差如表 2 与表 3 所示,系统的像质仍满足设计要求。

对比两种结构形式,发现采用柱面分束器与柱面镜组合代替双柱面镜结构校正时,轴上像散与色差均得到了有效的校正,自准直仪的成像质量得到了有效复原;而柱面分束器与柱面镜组合校正方法可减少元件数量,更易于装调,降低系



(a) 点列图
(a) Spot diagram



(b) MTF曲线
(b) MTF curves

图 12 柱面分束器与柱面镜组合系统的像质图

Fig. 12 Image quality diagram of cylindrical beam splitter and cylindrical lens combined system

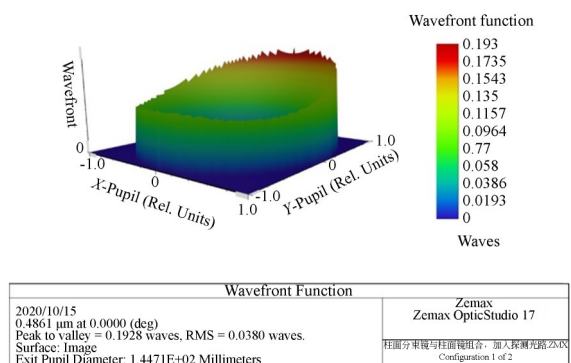


图 13 柱面分束器与柱面镜组合系统的波前图

Fig. 13 Wavefront diagram of cylindrical beam splitter and cylindrical lens combined system

系统的成本,因此最终本系统采用柱面分束器与柱面镜组合的方法。

表 2 柱面元件的加工公差

Tab. 2 Machining tolerances of cylindrical components

参数名称	参数指标
曲率	± 2 fringes
厚度	± 0.05 mm
偏心	± 0.02 mm

表 3 柱面元件的装调公差

Tab. 3 Assembly tolerance of cylindrical components

参数名称	参数指标
间隔	± 0.05 mm
偏心	± 0.02 mm
倾斜	± 0.1°

4.4 实验结果与分析

该自准直仪使用柱面分束器代替平板分束器,可以同时校正轴上像散及色差,提升系统像质并使用更少的光学元件。倾斜分束片型复色自准直仪样机如图 14 所示。光源发出的波长在 486~656 nm 的光经过一个柱面分束器及平面反射镜反射,再经抛物面反射镜出射后提供准直光,自准直光由柱面分束器透射及柱面校正镜透射后返回接收探测器。对系统波前进行检测,结果如图 15 所示,可以看出系统的波前平滑,RMS

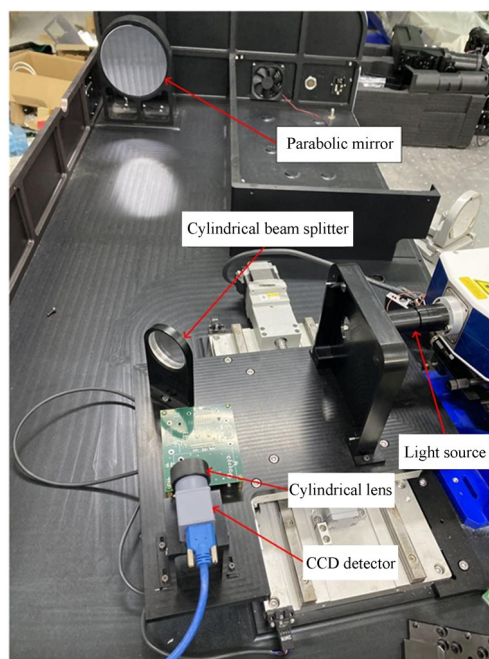


图 14 复色自准直仪样机

Fig. 14 Photo of multicolor autocollimator prototype

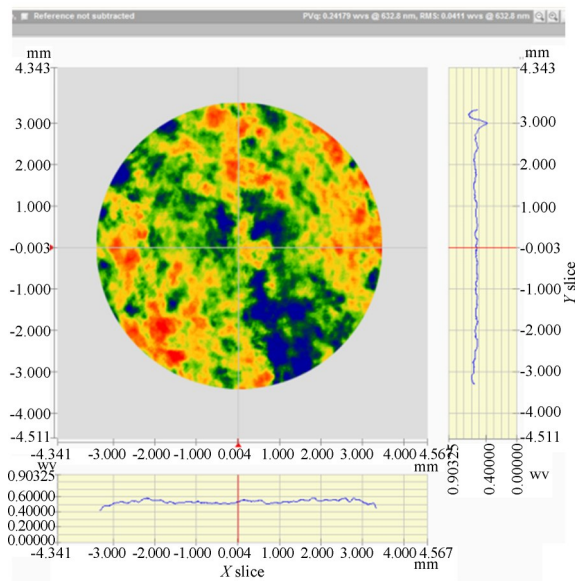


图15 复色自准直仪样机波前图

Fig. 15 Wavefront diagram of multicolor autocollimator prototype

值为 $\lambda/25$,PV值为 $6\lambda/25$,小于 $\lambda/4$,系统成像质量良好,验证了采用柱面镜分光的可行性。

5 结 论

本文设计了一款带有柱面分束器的长焦距复色自准直仪。自准直仪光路中加入平板分束器会引入轴上像散,对像散产生的原因进行了分析,采用柱面镜对轴上像散进行校正。通过光焦度的分配计算对系统进行消色差设计。最终将平板分束器与柱面镜结合,采用柱面分束器进行分光。设计结果表明,采用柱面分束器与柱面镜组合的自准直仪,可以在分光的同时校正轴上像散和色差,使系统的成像质量得到有效的提升,为复色自准直仪设计提供了新思路。最后对倾斜分束片型自准直仪样机进行波前检测,测得系统的RMS值为 $\lambda/25$,PV值为 $6\lambda/25$,成像质量良好。

参考文献:

- [1] 罗敬, 张晓辉, 何煦, 等. 自准直仪光电探测器失调对测角的影响[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 558-567.
LUO J, ZHANG X H, HE X, *et al.* Effects of a misaligned photodetector in autocollimators on angle measurements[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 558-567. (in Chinese)
- [2] PELLE N, EHINGER L, ZAUG C R, *et al.* An autocollimator with sub-microradian sensitivity[J]. *American Journal of Physics*, 2020, 88(7): 586-591.
- [3] GUO Y, CHENG H B, WEN Y F, *et al.* Small-angle measurement in laser autocollimation based on a common-path compensation method[J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, 66(18): 1818-1826.
- [4] 陈赞, 高胜英, 韩庆阳, 等. 多面体塔差及其安装偏心对光电编码器精度检测的影响[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1704-1709.
CHEN Y, GAO SH Y, HAN Q Y, *et al.* Impact of polyhedron pyramidal error and installation eccentricity on precision detection of photoelectric encoder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1704-1709. (in Chinese)
- [5] 姜志峰, 郝秀朋, 刘力, 等. 圆光栅配合自准直仪测量主轴径向运动误差[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 2053-2061.
LOU ZH F, HAO X P, LIU L, *et al.* Spindle radial motion error measurement using a circular grating and a autocollimator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(9): 2053-2061. (in Chinese)
- [6] 闫亚东, 何俊华, 许瑞华, 等. 复合式多点测量速度干涉仪光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2023-2028.
YAN Y D, HE J H, XU R H, *et al.* Optical system design of compound multi-point measurement velocity interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2023-2028. (in Chinese)
- [7] 段相永, 乔彦峰, 王永伟, 等. 菲索式合成孔径望远镜光学系统设计[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 380-387.
DUAN X Y, QIAO Y F, WANG Y W, *et al.* Design of optical system for FiZeau-type synthetic aperture telescope[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 380-387. (in Chinese)
- [8] 于建冬, 梁中翥, 梁静秋, 等. 成像光谱仪大孔径前置物镜设计研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0222002.
YU J D, LIANG ZH ZH, LIANG J Q, *et al.* Research and design of prefixing objective with large aperture in imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Si-*

- nica*, 2015, 35(2): 0222002. (in Chinese)
- [9] 张倩, 陈根祥, 宋菲君, 等. 多端口波长选择开关的光学设计与优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(14): 142201.
ZHANG Q, CHEN G X, SONG F J, *et al.* Optical design and optimization of multiport wavelength selective switch[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 142201. (in Chinese)
- [10] 黄玮. 柱面系统无畸变指纹采集仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 646-650.
HUANG W. Optical design of un-distorted fingerprint scanner using cylindrical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(5): 646-650. (in Chinese)
- [11] XIA G, WU S, WANG G D, *et al.* Astigmatism-free Czerny-Turner compact spectrometer with cylindrical mirrors [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(32): 9069-9073.
- [12] FU X, DUAN F, JIANG J J, *et al.* Astigmatism-corrected echelle spectrometer using an off-the-shelf cylindrical lens[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(28): 7861-7868.
- [13] 张晓龙, 范欣雨. 消像散 Czerny-Turner 光谱成像系统的设计[J]. *光学技术*, 2020, 46(1): 33-40.
ZHANG X L, FAN X Y. Design of anastigmatic Czerny-Turner spectral imaging system [J]. *Optical Technique*, 2020, 46(1): 33-40. (in Chinese)
- [14] 徐鹤轩, 李书成, 邱丽荣, 等. 柱面反射式消像散 Czerny-Turner 光谱仪高分辨探测技术研究[J]. *光学技术*, 2020, 46(3): 330-335.
XU H X, LI SH CH, QIU L R, *et al.* Research on detection technology of high resolution Czerny-Turner spectrometer using a cylindrical mirror to eliminate astigmatism [J]. *Optical Technique*, 2020, 46(3): 330-335. (in Chinese)
- [15] 陈芳, 徐彭梅. 满足消像散条件的 Czerny-Turner 光谱仪光路的防干涉设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1265-1271.
CHEN F, XU P M. Optical structure optimization of broadband astigmatism-free Czerny-Turner spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1265-1271. (in Chinese)

作者简介:



刘智颖(1981—),女,辽宁朝阳人,博士,教授,主要从事光学设计与测试方面的研究。E-mail:lzy@cust.edu.cn