

文章编号: 1002-2082 (2020) 05-1037-10

光学系统纵向色差的仿真及验证

庄锦程¹, 张齐元², 王芳³, 吴鹏³, 王浩宇³, 王全召², 吴泉英¹, 韩森³

(1. 苏州科技大学 数理学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州维纳仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123;
3. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 现有的焦距检测方法通常由于检测仪器光源波长与光学系统不完全匹配从而产生纵向色差影响检测结果。针对这一问题, 研究光学系统纵向色差的变化规律, 并确定在 400 nm~1 000 nm 波段用于表示其函数关系的 Conrady 公式和复消色差特性公式。根据光学系统近焦位置的离焦量与位置呈线性关系的特性, 提出使用菲索干涉仪测量 5 种不同波长的焦距位置, 获得单透镜和双胶合镜头的纵向色差曲线。实验结果表明: 在 400 nm~1 000 nm 波段单色系统和消色差系统的纵向色差的函数关系分别符合 Conrady 公式和复消色差特性公式, 研究结果为焦距的理论计算和精确检测提供了新的思路 and 参考。

关键词: 纵向色差; 波长; 单色系统; 消色差系统; 菲索干涉仪

中图分类号: O435.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0503006

Simulation and verification of longitudinal chromatic aberration for optical system

ZHUANG Jincheng¹, ZHANG Qiyuan², WANG Fang³, WU Peng³, WANG Haoyu³,
WANG Quanzhao², WU Quanying¹, HAN Sen³

(1. School of Mathematical and Physical Sciences, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;
2. Suzhou W&N Instruments LLC, Suzhou 215123, China;
3. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In ordinary focal length measurement, the measurement accuracy is usually affected by the longitudinal chromatic aberration because of the different design wavelengths between the optical system and the testing equipment. In order to solve this problem, the variation rule of longitudinal chromatic aberration for optical system was established, and the Conrady formula and apochromatic characteristic formula used to express the functional relationship of longitudinal chromatic aberration in the 400 nm~1 000 nm wavelength were determined. According to the linear relationship characteristic of the optical system between defocus amount of near-focus and position, the focal length position at 5 different wavelengths was measured by using Fizeau interferometer to obtain the longitudinal chromatic aberration curve of the single lens and the double cemented lens. Experimental results show that the longitudinal chromatic aberration function relationship of the monochromatic system complies with the Conrady formula, and the longitudinal chromatic aberration function relationship of the achromatic system matches the achromatic characteristic formula in the 400 nm~1 000 nm wavelength. The research provides new ways and references for the theoretical calculation and accurate detection of focal length.

Key words: longitudinal chromatic aberration; wavelength; monochromatic system; achromatic system; Fizeau interferometer

收稿日期: 2020-02-27; 修回日期: 2020-04-19

基金项目: “十三五”江苏省重点学科建设经费 (20168765); 国家重点研发计划 (2016YFF0101903)

作者简介: 庄锦程 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: 819012855@qq.com

通信作者: 韩森 (1961-), 男, 博士, 教授, 主要从事干涉测量技术方面的研究。E-mail: senhanemail@126.com

引言

在高精度成像中,对给定光学系统的焦距进行测量是非常重要的。通常意义上的焦距是指某一特定波长(一般为设计波长)的焦距数值,目前主流的焦距检测设备的光源波长无法与被测光学系统完全匹配,纵向色差会对焦距的测量结果产生影响^[1-4]。纵向色差是描述光学系统在不同波长下如何沿不同纵向位置聚焦,也称位置色差或轴向色差。光学系统的性能经常受色差限制而非单像差限制,因此大多数成像镜头设计的目标都是让所有波长尽可能聚焦在同一平面^[5-7],在设计波段范围内所有波长聚焦位置越接近这个相同平面,在图像中观察到的问题就越少。纵向色差可以通过测量光学系统在不同波长下的焦点位移来评估,在一些简单的纵向色差检测实验中,对焦点位置的确定是影响测量结果的一个重要因素^[8-9]。为了准确检测光学系统的纵向色差,Seong等人提出一种利用马赫泽德干涉仪测量纵向色差的方法^[10],首先测量单透镜和双胶合镜头在多个波长下的透射波前,然后利用波前 Zernike 系数确定各波长的焦点位置,再使用 Sellmeir 公式计算 400 nm~700 nm 波段的色差曲线,进而得到被测系统的纵向色差。这种方法在测量前需要对被测系统进行建模,从结果上看该方法对单透镜的色差曲线影响误差较小,而对双胶合镜头的色差曲线影响误差较大。本文针对这一问题,重点分析了不同类别光学系统的纵向色差变化规律,并尝试使用 Conrady 公式和复消色差特性公式表示其函数关系,同时提出一种基于菲索干涉仪测量光学系统焦点位置进而获得光学系统纵向色差函数曲线的方法。

1 原理

传统透射系统主要分为单色系统、消色差系统和复消色差系统。单色系统通常只工作在单一波长或极窄的波段范围内,大部分情况下使用同一种材料设计。由于折射率是波长的函数,光学系统的焦距也随着波长变化,所以单色系统的纵向色差是一条单调曲线。消色差系统为了消除色差,采用多种玻璃进行设计,由色差校正原理可知,对于大部分消色差系统来说,只能使2个波长聚焦在同一位置,且由于大部分消色差系统(如照相物镜)都是对“F、d、C”光进行校正,所以它们的色焦移曲线具有类似的形状。复消色差系统可以

使3个波长同时聚焦在同一位置,其他波长情况下聚焦到这一平面的距离(即离焦量)相比消色差系统小很多,所以复消色差系统的像质远好于消色差系统,利用离焦量大小可以分析光学系统是否有效校正了色差,也可判断它们属于消色差系统还是复消色差系统。

不论是单色系统、消色差系统还是复消色差系统,它们的纵向色差都能用 Zemax 中的色焦移曲线(chromatic focal shift)表示,色焦移曲线可用于确定光学系统纵向色差的函数关系。为了验证得到的函数关系是否符合实际,使用菲索干涉仪测量光学系统不同波长的焦点位置进行验证,将采集的离散数据代入纵向色差的函数表达式求解,评估函数曲线与实际测量焦点位置数据的一致性^[11-15]。

对于实际光学系统而言,衍射和像差的存在会对准确确定焦点位置造成一定困扰^[16]。在光学检测中,Zernike 多项式 Z_3 的物理意义是离焦,若测量的透射波前 Z_3 为零,则表示该位置为光学系统的焦点位置。在零离焦位置,一些微小的机械调整误差会对 Z_3 的数值产生明显的影响,导致无法准确记录焦点位置。在离焦量较大的位置微小调整 X 和 Y 倾斜对 Z_3 的影响则可以忽略不计。鉴于 Zernike 系数 Z_3 与位置呈线性关系已通过仿真和分析得到验证^[17-19],本文通过测量离焦位置波前 Zernike 系数 Z_3 计算被测系统的焦点位置,原理如图1所示。通过旋转测微旋钮推动导轨上五维支架使反射球面镜沿 Z 轴方向移动,测量被测光学系统在焦点附近若干个离焦位置的透射波前,并记录对应位置的 Z_3 值,将 Z_3 与位置数据按线性方程进行拟合,再使用拟合曲线计算出 Z_3 为零时的位置。使用相同的步骤测量并计算被测系统在其他多个波长下的焦点位置,就可以得到纵向色差。

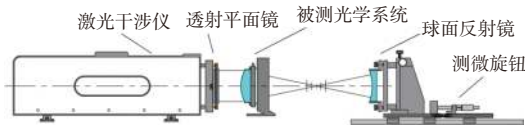


图1 测量离焦位置的透射波前确定焦点位置原理

Fig.1 Focus determination by measuring transmitted wavefront of defocus position

2 模拟仿真

2.1 单色系统

以一个单一材质的单色系统为例进行分析。

具体参数为 F 数 1.5, 入瞳直径 20 mm, 焦距 30 mm, 波长范围 400 nm~1 000 nm, 为方便数据采集分析选择 400 nm 作为主波长。镜头结构图和色焦移曲线如图 2 所示。

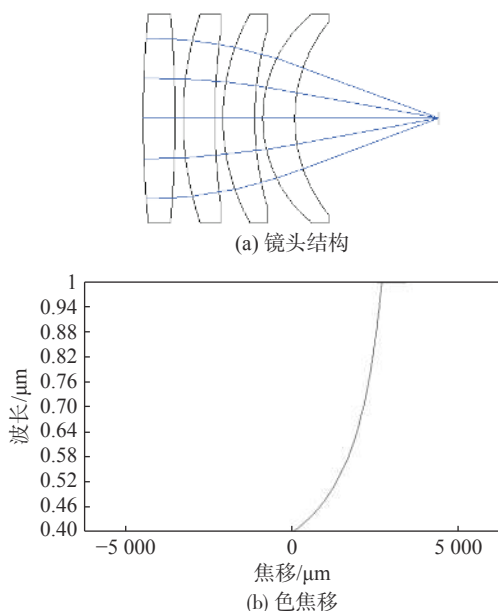


图 2 单色系统结构图与色焦移曲线

Fig. 2 Monochromatic system structure and chromatic focal shift curve

单色系统焦距随波长的变化主要由材料折射率引起, 单调的 Zernike 系数-波长曲线可以使用 Conrady 公式^[10]表示, 与之相近单调的焦距-波长曲线也可使用 Conrady 公式表示成:

$$f = A_f + \frac{B_f}{\lambda} + \frac{C_f}{\lambda^{3.5}} \quad (1)$$

式中: A_f 、 B_f 、 C_f 分别为常数项系数和波长项系数。选取 530 nm、560 nm 和 720 nm 的焦距-波长数据代入(1)式求解系数:

$$\begin{cases} 29.445 = A_f + \frac{B_f}{530} + \frac{C_f}{530^{3.5}} \\ 29.591 = A_f + \frac{B_f}{560} + \frac{C_f}{560^{3.5}} \\ 30.089 = A_f + \frac{B_f}{720} + \frac{C_f}{720^{3.5}} \end{cases} \quad (2)$$

计算后得到单色系统的焦距-波长曲线的函数表达式为

$$f = 31\,312.873\,82 - \frac{786\,190.394\,4}{\lambda} - \frac{1.318\,92E+12}{\lambda^{3.5}} \quad (3)$$

图 3(a) 为单色系统焦距-波长仿真曲线与求解

的 Conrady 公式曲线对比结果, 图 3(b) 为曲线对比残差图。根据图 3(b) 显示, 在 400 nm~1 000 nm 波段内仿真和求解曲线焦距的最大绝对误差为 23.11 μm ($\lambda=400$ nm), 相对误差 0.08%, 求解曲线基本符合仿真曲线。由于单色系统的焦距-波长曲线均为类似的形状, 因此 Conrady 公式可用于表示单色系统的纵向色差函数关系。

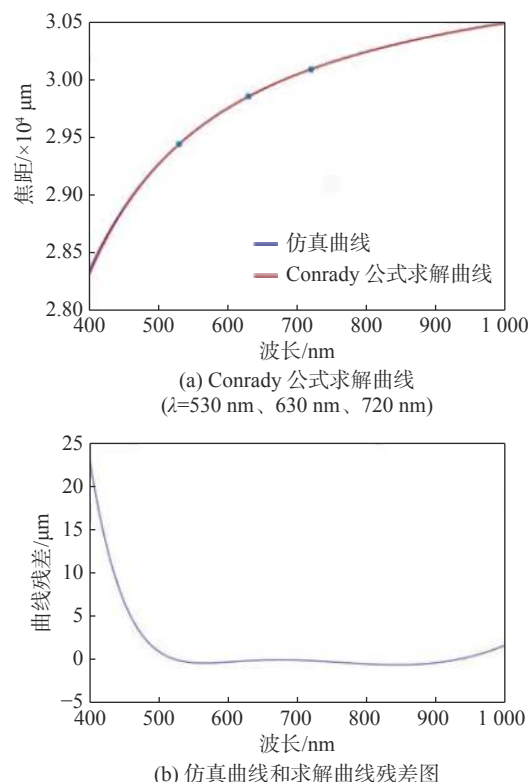
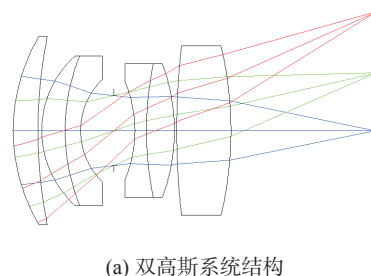


图 3 单色系统焦距-波长仿真曲线与 Conrady 公式求解曲线对比

Fig. 3 Comparison of focal length wavelength simulation curve for monochromatic system with Conrady formula solution curve

2.2 消色差系统

以双高斯系统作为研究对象分析消色差系统的纵向色差。具体参数为 F 数 2.5, 焦距 35 mm, 波长范围 400 nm~1 000 nm, 主波长 400 nm, 镜头结构图和色焦移曲线如图 4 所示。



(a) 双高斯系统结构

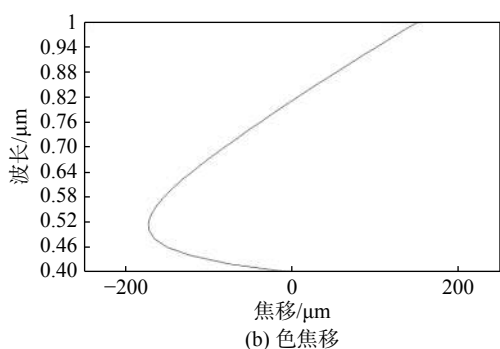


图4 双高斯系统结构与色焦移曲线图

Fig. 4 Double Gauss system structure and chromatic focal shift curve

消色差系统的色焦移曲线通常带有一个拐点,选取 530 nm, 560 nm 和 630 nm 的焦距-波长数据代入 Conrady 公式求解系数,得到双高斯系统的焦距-波长曲线的函数表达式:

$$f = 35\,589.955\,06 - \frac{472\,549.724}{\lambda} + \frac{8.003\,85 \times 10^{11}}{\lambda^{3.5}} \quad (4)$$

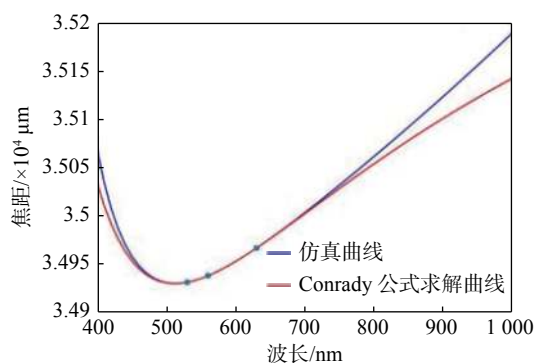
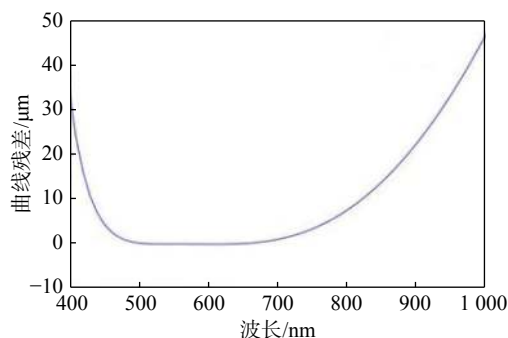
图 5(a) 为双高斯系统焦距-波长仿真曲线与 Conrady 公式求解曲线的对比结果。当波长范围较大时, Conrady 公式求解曲线会出现较大偏差,图 5(b) 是仿真曲线与 Conrady 公式求解曲线的残差图。从图 5 可以看出,在波长 1 000 nm 处仿真曲线和 Conrady 公式求解曲线的最大绝对误差为 47.47 μm, 相对误差为 0.1349%。

为了使求解曲线与理想曲线更吻合,尝试使用复消色差特性公式求解计算。复消色差特性公式是在 Conrady 公式基础上拓展一个波长项后得到的。复消色差特性公式^[12]为

$$f = A_f + \frac{B_f}{\lambda^{X1}} + \frac{C_f}{\lambda^{X2}} + D_f \lambda^{X3} \quad (5)$$

式中: A_f 、 B_f 、 C_f 分别为常数项系数和波长项系数, $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$ 为幂级数系数。

通过调整幂级数系数可以将求解曲线逼近仿真曲线。幂级数系数共有 3 个,它们之间相互影响着曲线的特性,因此幂级数系数的选取并非唯一的,它们存在着很多组合。本文主要在光学系统最常用的近紫外、可见光和近红外波段范围分析复消色差特性公式的幂级数系数的取值范围。最初分析复消色差特性公式时通过手动调节求解曲线的各项幂级数系数,然后与仿真曲线进行对比,这种方法效率很低,同时很难穷举确定 3 个幂级数系数。因此使用 Matlab 编写程序使得求解曲

(a) Conrady 公式求解曲线
(λ=530 nm、560 nm、630 nm)

(b) 仿真曲线和求解曲线残差图

图5 双高斯系统的焦距-波长曲线与 Conrady 公式求解曲线对比

Fig. 5 Comparison of focal length-wavelength curve for double Gauss system with Conrady formula solution curve

线在一定的幂级数系数范围内做循环运算,然后计算其与仿真曲线的误差大小。当求解曲线与仿真曲线偏离较大时舍弃结果,当求解曲线与仿真曲线偏离较小时则保留结果,幂级数系数范围确定的流程如图 6 所示。

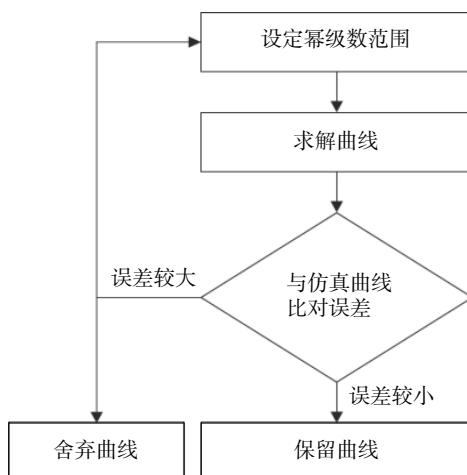


图6 确定复消色差特性公式幂级数系数范围流程图

Fig. 6 Flow chart of determination of power series range for apochromatic characteristic formula

为了能够获得合适的幂级数系数范围, 根据前期手动调节幂级数系数的经验, 将(5)式中幂级数系数 X_1 范围设定为 $0.1 \sim 5$, X_2 范围设定为 $5.1 \sim 10$, X_3 范围设定为 $0.1 \sim 5$, 循环时每个系数的数据间隔为 0.1 , 共进行 $125\,000$ 次循环测试。在循环之前, 设定合理的误差对于保留曲线的幂级数系数结果来说十分重要, 在 $400\text{ nm} \sim 1\,000\text{ nm}$ 波段求解的复消色差特性曲线与仿真曲线的差异, 可以采用绝对误差和相对误差两种方式进行评价。相对误差在求解曲线的较短波段起到限制作用, 绝对误差在求解曲线较长波段起到限制作用, 在这里针对双高斯系统将绝对误差设定在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 相对误差设定在 0.05% 以内。

满足要求的待求解双高斯系统复消色差特性公式为

$$f = A_f + \frac{B_f}{\lambda^{3.5}} + \frac{C_f}{\lambda^{5.5}} + D_f \lambda^2 \quad (6)$$

将 530 nm 、 630 nm 、 670 nm 、 720 nm 处的焦距-波长数据代入(6)式求解, 得到双高斯系统焦距-波长曲线的复消色差特性公式:

$$f = 34\,873.454\,23 - \frac{5.305\,55 \times 10^{11}}{\lambda^{3.5}} + \frac{1.151\,65 \times 10^{17}}{\lambda^{5.5}} + 0.000\,333\,215 \lambda^2 \quad (7)$$

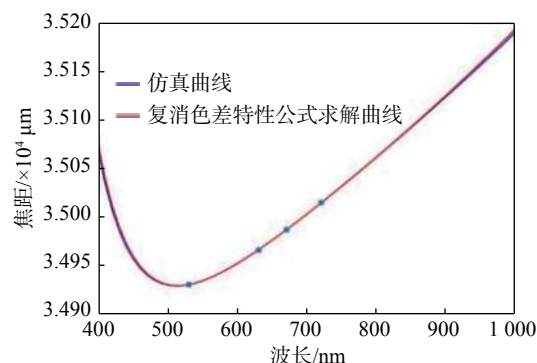
图 7(a) 是复消色差特性公式求解曲线与仿真曲线的对比结果, 在 $400\text{ nm} \sim 1\,000\text{ nm}$ 波段, 两者的最大绝对误差为 $6.1\text{ }\mu\text{m}$ ($\lambda=400\text{ nm}$), 相对误差为 0.02% , 残差图如图 7(b) 所示。由图 7 可看出, 相比 Conrady 公式, 复消色差特性公式求解曲线几乎与仿真曲线重合, 因此复消色差特性公式能用于表示消色差系统的纵向色差函数关系。

2.3 复消色差系统

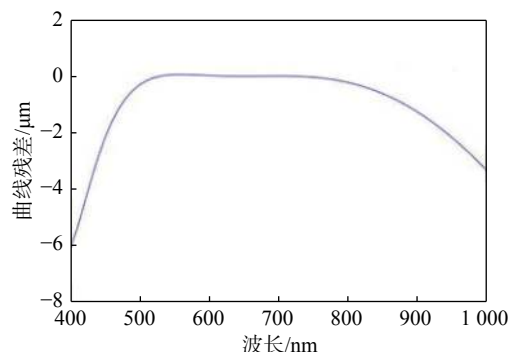
为了进一步校正色差, 复消色差光学系统通常需要使用特殊色散玻璃, 因此复消色差系统的色焦移曲线比消色差系统更加复杂, 图 8 为复消色差望远系统的结构图和色焦移曲线图。

复消色差系统的色焦移曲线具有 2 个拐点, 而 Conrady 公式最多只能产生带 1 个拐点的曲线, 因此只能使用复消色差特性公式(5)描述其焦距-波长曲线。图 9(a) 是求解复消色差特性公式曲线与仿真曲线的对比图, 图 9(b) 是曲线残差图。根据图 9(b) 可知, 在 $400\text{ nm} \sim 1\,000\text{ nm}$ 波段内焦距的最大绝对误差为 $1.1\text{ }\mu\text{m}$ ($\lambda=400\text{ nm}$), 相对误差小

于 0.01% 。求解曲线与仿真曲线高度重合, 此时选用的复消色差特性公式为



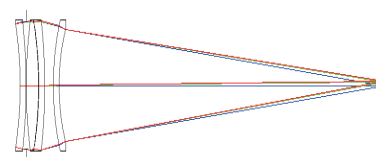
(a) 复消色差特性公式求解曲线
($\lambda=530\text{ nm}$ 、 630 nm 、 670 nm 、 720 nm)



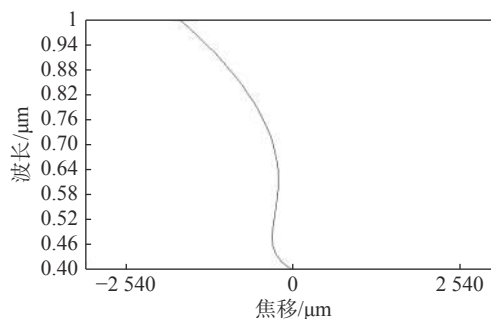
(b) 仿真曲线和求解曲线残差图

图 7 双高斯系统的焦距-波长曲线与复消色差特性公式求解曲线对比

Fig. 7 Comparison of focal length-wavelength curve for double Gauss system with apochromatic characteristic formula solution curve



(a) 复消色差望远系统的结构



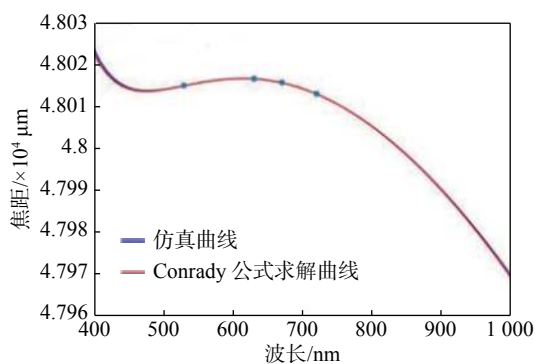
(b) 色焦移曲线

图 8 望远系统结构图和色焦移曲线

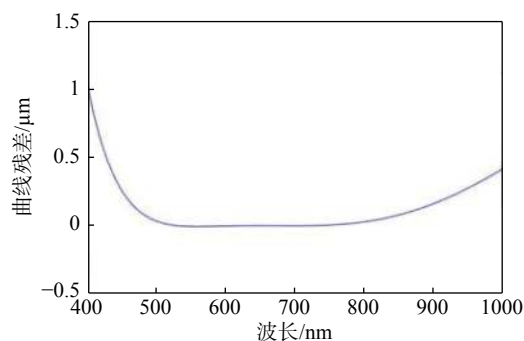
Fig. 8 Telescopic system structure and chromatic focal shift curve

$$f = 48\,226.592\,53 - \frac{94\,527.933\,12}{\lambda} + \frac{1.202\,32 \times 10^{16}}{\lambda^{5.5}} - 0.000\,163\,547\lambda^2 \quad (8)$$

由于复消色差特性公式能描述带 2 个拐点的曲线,因此可用于表示复消色差系统的纵向色差。



(a) 复消色差特性公式求解曲线
($\lambda=530\text{ nm}$ 、 630 nm 、 670 nm 、 720 nm)



(b) 仿真曲线和求解曲线残差图

图 9 望远系统焦距-波长曲线与求解复消色差特性公式曲线对比

Fig. 9 Comparison of focal length-wavelength curve for telescopic system with apochromatic characteristic formula solution curve

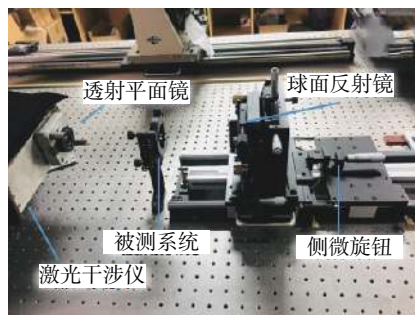
3 实验验证

利用波前 Zernike 系数与位置呈线性关系的特点,使用菲索干涉仪测量单透镜和双胶合镜头在 5 个波长下的若干个离焦位置波前,然后确定各波长的焦点位置,再使用实验数据求解得到被测系统在 $400\text{ nm} \sim 1\,000\text{ nm}$ 波段的纵向色差曲线并进行评估。

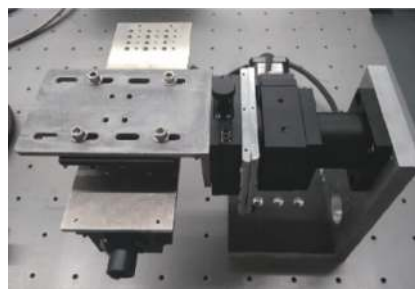
3.1 实验测量

根据实验原理,选用 5 种波长的激光光源(532 nm 、 561 nm 、 632.8 nm 、 671 nm 、 721 nm)用于测量光学系统的透射波前 Z_3 信息和焦点的位置变化,其中透射波前信息通过干涉仪测量后直接读取,焦点

的位置变化通过测微旋钮的刻度读取,精度为 0.005 mm ,实验装置如图 10 所示。首先校准干涉仪的光轴与导轨,然后将球面反射镜放置在五维支架托盘上,通过旋转固定在导轨托盘上的测微旋钮推动五维支架前后移动达到获取焦点位置的目的,这样球面反射镜在前后移动测量的过程中能够与光轴尽可能保持一致,同时为减少回程误差,测量每一组透射波前时球面镜的移动方向应相同。在完成一组波长的透射波前和焦点位置记录后需要在保证光学系统不变的前提下更换激光光源。图 10(b)是一个自制的光源调整台,激光器安装在该装置上能够调整 X 轴、 Y 轴位移以及倾斜,以便保证光轴不变。更换激光光源后,将剪切干涉仪放置在干涉仪的透射平面镜和被测系统之间,如图 11(a)~11(e) 所示,通过调整激光干涉仪的准直透镜位置保证各个波长的测试光束准直。



(a) 基于菲索干涉仪的纵向色差测量装置



(b) 光源调整平台

图 10 实验装置

Fig. 10 Experimental device



(a)



图 11 使用剪切干涉仪对出射光束准直

Fig. 11 Collimate optical path by using shear interferometer

3.2 实验结果及数据分析

因为单色系统的色焦移曲线形状基本一致, 根据实际条件选择最简单的单透镜代表单色系统进行实验。由于被测系统在不同波长测量时的焦点位置和焦深均不同, 因此测量每一个波长透射波前的离焦位置及范围略有不同。将 5 种波长的 Z_3 系数和位置数据进行线性拟合, 结果如图 12 所示。

根据各离焦位置的 Z_3 系数与位置的线性拟合计算出零离焦位置, 这比直接通过干涉仪软件测量零离焦时的位置更加精确, 计算结果如表 1 所示。使用计算的后截距数据求解 Conrady 公式, 获得后截距-波长曲线, 结果如图 13(a)所示。图 13(b)

为实验数据和求解曲线数据的残差图, 实测 532 nm 和 721 nm 处后截距与求解曲线吻合, 且求解曲线与仿真曲线基本一致, 说明单色系统的纵向色差可以使用 Conrady 公式表示。

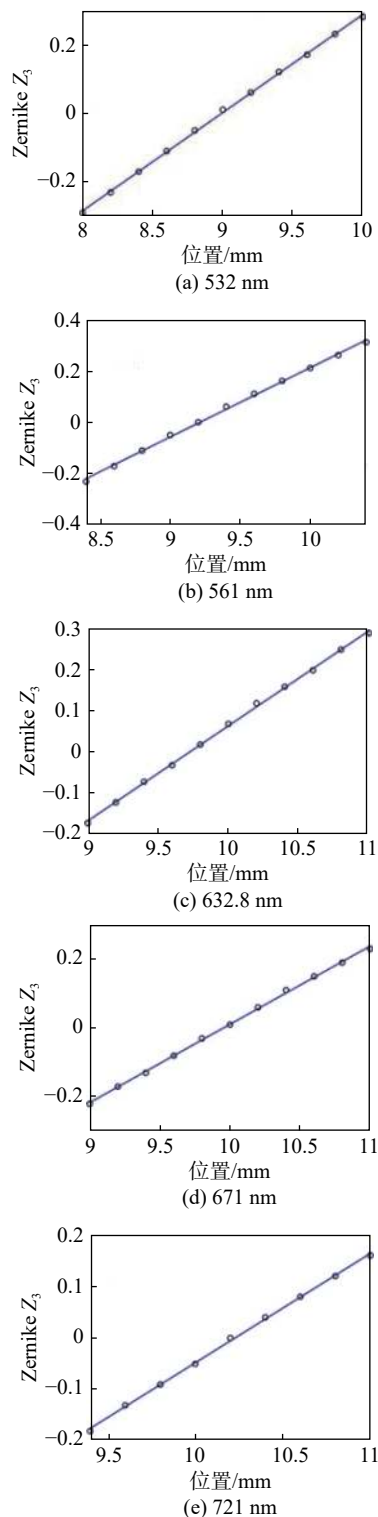
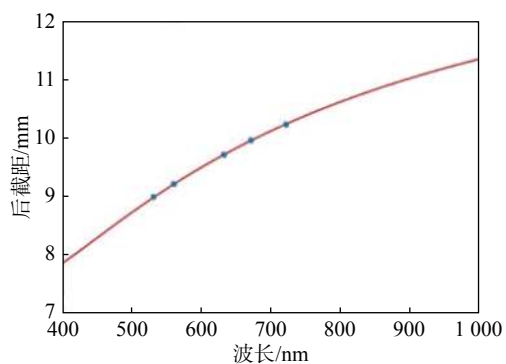
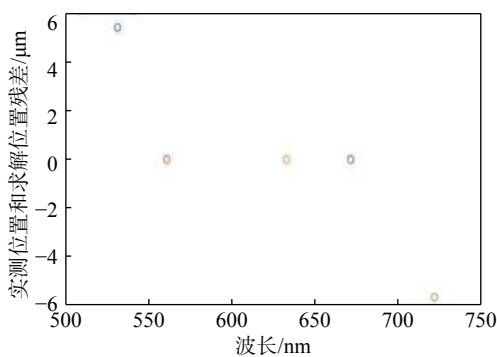
图 12 单色系统的 Z_3 系数与位置曲线图Fig. 12 Curve of Z_3 coefficient for monochrome system and position

表1 计算得到各波长焦点位置数据

Table 1 Focal position data of each wavelength

波长/nm	532	561	632.8	671	721
计算的后截距/mm	8.994	9.214	9.716	9.952	10.226

(a) 单透镜的 Conrady 公式求解曲线
($\lambda=561\text{ nm}$ 、 632.8 nm 、 671 nm)

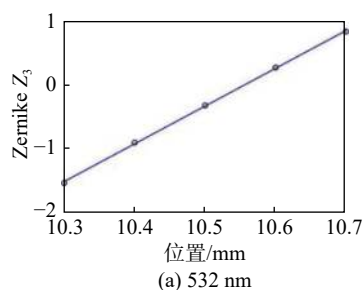
(b) 实验数据和求解曲线数据残差图

图13 Conrady公式求解的单透镜后截距-波长曲线和数据残差图

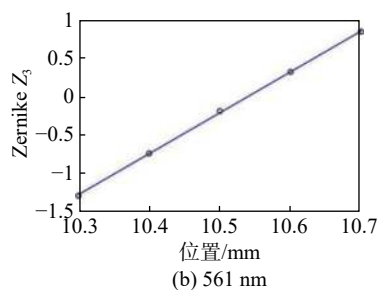
Fig. 13 Conrady formula solution curve of single lens and residual curve

按照相同的方法测量双胶合镜头的焦距位置,各波长近焦的 Z_3 系数和离焦位置的拟合曲线如图14所示。

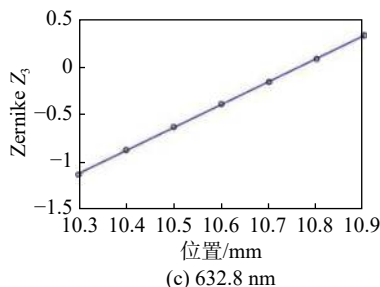
通过拟合曲线计算得到零离焦时的焦点位置,结果如表2所示。分别使用采集数据求解 Conrady 公式和复消色差特性公式纵向色差曲线,结果如图15所示。图15(a)和15(c)中求解 Conrady 公式曲线与实测的 671 nm 数据点吻合,而与 721 nm 处的后截距数据有较明显的偏离;图15(b)和15(d)中求解复消色差特性公式曲线能与实测的 721 nm 后截距数据吻合,这与仿真时的结果一致。实验及计算结果表明,消色差系统的纵向色差函数关系在 400 nm~1 000 nm 波段需要使用复消色差特性公式表示。



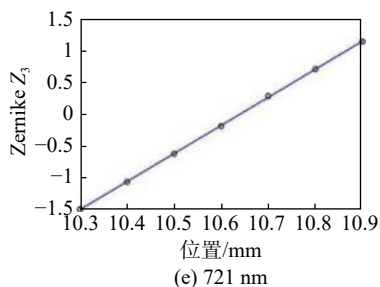
(a) 532 nm



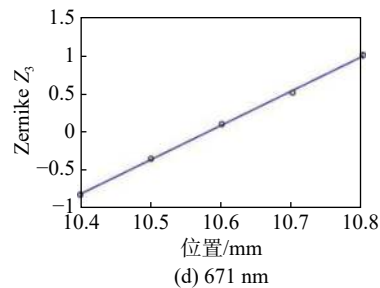
(b) 561 nm



(c) 632.8 nm



(d) 721 nm



(e) 671 nm

图14 消色差系统 Z_3 系数与位置的曲线图Fig. 14 Curve of Z_3 coefficient for achromatic system and position

表2 计算得到的各波长焦点位置

Table 2 Focal position of each wavelength

波长/nm	532	561	632.8	671	721
计算的后截距/mm	10.556	10.542	10.552	10.578	10.638

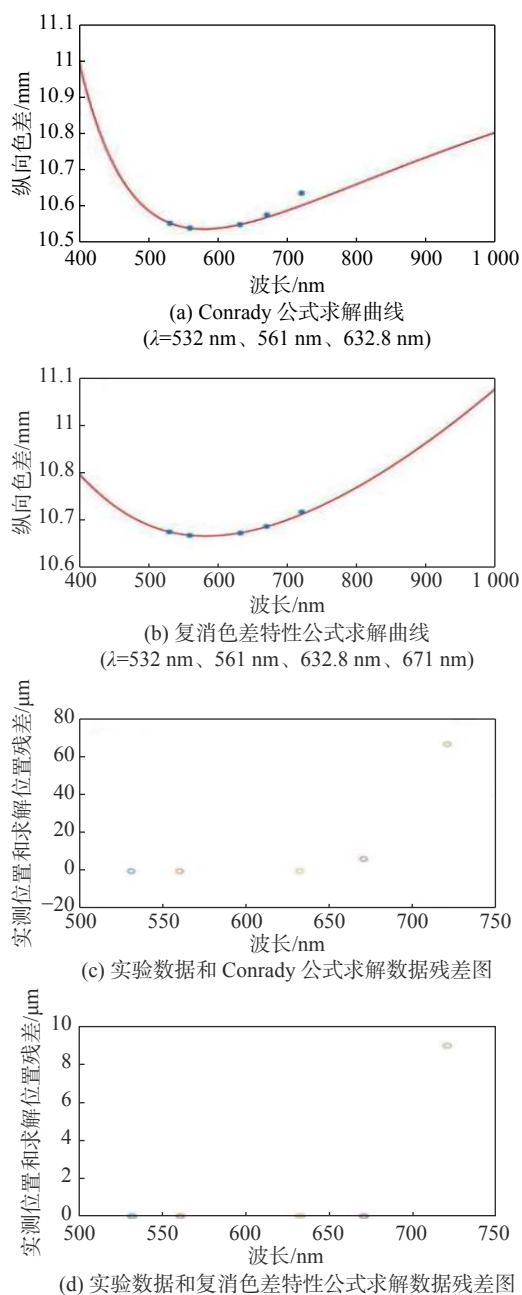


图 15 双胶合透镜的求解曲线

Fig. 15 Solution curve of double cemented lens

4 结论

焦距检测常会因为波长不匹配而引入色差, 本文分析了光学系统纵向色差的变化规律, 通过软件模拟和实验验证发现在 $400\text{ nm}\sim 1\,000\text{ nm}$ 波段, 单色系统的纵向色差曲线可使用大家熟知的 Conrady 公式有效表示, 而运用范围更广的消色差系统和复消色差系统的纵向色差曲线则需要使用复消色差特性公式表示, 同时给出了复消色差特性公式幂级数系数范围的选定方法。本文还提出

了一种基于菲索干涉仪测量光学系统纵向色差曲线的方法, 通过测量离焦位置的透射波前 Z_3 系数确定各波长的焦点位置, 利用离散数据求解模型公式后获得 $400\text{ nm}\sim 1\,000\text{ nm}$ 波段内光学系统的纵向色差函数曲线。本文的研究工作表明, Conrady 公式和复消色差特性公式除了适用于光学系统 Zernike 系数的变化规律外, 还同样适用于光学系统的纵向色差, 这对于焦距的精确测量具有指导意义。

参考文献:

- [1] SU Qiong. Measuring the focal length of thin lens by collimator method[J]. Journal of Southeast Guizhou National Teachers College, 2006, 24(6): 34-35.
粟琼. 用平行光管法测薄透镜焦距[J]. 黔东南民族师范高等专科学校学报, 2006, 24(6): 34-35.
- [2] LI Xiaolei. Focal length measurement for thin convex lens based on parallel tube method[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 859-862.
李晓磊. 基于平行光管法的薄凸透镜焦距测量[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 859-862.
- [3] XU Qiaoping. Experimental study on the influence of incident light on lens focal length[J]. Management and Technology of Small and Medium Sized Enterprises, 2012(3): 321.
许巧平. 入射光对透镜焦距影响的实验探究[J]. 中小企业管理与科技, 2012(3): 321.
- [4] QIAN Jiaxin. Relationship between convex lens focal length and incident light wavelength based on monochromator[J]. Guangxi Physics, 2017, 38(1): 9-13.
钱嘉欣. 基于单色仪探究凸透镜焦距和入射光波长的关系[J]. 广西物理, 2017, 38(1): 9-13.
- [5] CHEN Zhuyi, FANG Zhen. Detection of digital image forgery based on chromatic aberration[J]. Journal of Applied Sciences, 2015, 33(6): 604-614.
陈竺益, 方针. 基于色像差特性的图像篡改检测[J]. 应用科学学报, 2015, 33(6): 604-614.
- [6] LIU Zhiying, LI Shuqi, HUANG Yunhang, et al. Design and analysis of the transmitted inner focusing wide spectrum optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(3): 98-108.
刘智颖, 李曙琦, 黄蕴涵, 等. 透射式内调焦宽光谱光学系统的设计与分析[J]. 光子学报, 2020, 49(3): 98-108.
- [7] YU Dong, CHENG Qingqing. Terahertz broadband

- achromatic deflector design[J]. *Optical Instruments*, 2019, 41(6): 54-59.
- 于东, 程庆庆. 太赫兹宽带消色差偏折器设计[J]. *光学仪器*, 2019, 41(6): 54-59.
- [8] RAN Zhuyu. Improvement of longitudinal chromatic aberration experiment[J]. *Journal of Chongqing Normal University(Natural Science)*, 1988(1): 38.
- 冉竹玉. 纵向色差实验的改进[J]. *重庆师范学院学报(自然科学版)*, 1988(1): 38.
- [9] WANG Shenhao, TAO Zongming, YANG Lei, et al. Study on the triple prism dispersion experiment based on the three kinds of dispersion formula[J]. *Physical Experiment of College*, 2017, 30(3): 58-62.
- 王申浩, 陶宗明, 杨蕾, 张辉. 基于三种色散公式的三棱镜色散实验研究[J]. *大学物理实验*, 2017, 30(3): 58-62.
- [10] SEONG K, GREIVENKAMP J E. Chromatic aberration measurement for transmission interferometric testing[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(35): 6508.
- [11] ZHANG Qiyuan, HAN Sen, TANG Shouhong, et al. Study on functional relationship between transmitted wavefront Zernike coefficients and wavelengths[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0212002-1-8.
- 张齐元, 韩森, 唐寿鸿, 等. 透射波前Zernike系数与波长的函数关系研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0212002-1-8.
- [12] ZHANG Q Y, WANG H Y, WU P, et al. Estimating transmitted wavefronts in a broad bandwidth based on Zernike coefficients[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(9): 095601.
- [13] ZHUANG J C, ZHANG Q Y, WU P, et al. Chromatic focal shift of optical system expressed by related wavelength formulas[J]. *SPIE: Optical Modeling and System Alignment*, 2019, 11103: 111030W.
- [14] BRUNING J H, HERRIOTT D R, GALLAGHER J E, et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [15] KUMAR P Y, CHATTERJEE S. Technique for the focal-length measurement of positive lenses using Fizeau interferometry[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): 730-736.
- [16] YANG G Q, MIAO L, ZHANG X, et al. High-accuracy measurement of the focal length and distortion of optical systems based on interferometry[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(18): 5217-5223.
- [17] ZHANG Qiyuan, HAN Sen, TANG Shouhong, et al. Estimation of Zernike coefficients for any wavelength transmitted wavefront at defocus position[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 107-114.
- 张齐元, 韩森, 唐寿鸿, 等. 离焦位置任意波长透射波前Zernike系数算法研究[J]. *光子学报*, 2018, 47(10): 107-114.
- [18] MU Wenjuan. Detection and calculation method of defocus value in the auto-focus using laser[J]. *Optical Instruments*, 2019, 41(1): 14-17.
- 穆文娟. 激光自动对焦中离焦量的探测与计算方法[J]. *光学仪器*, 2019, 41(1): 14-17.
- [19] Suzhou Weiner Instrument Co., Ltd. A method to detect the transmitted wavefront of optical system with arbitrary wavelength at defocusing position: China, CN108225743A[P]. 2018-06-29.
- 苏州维纳仪器有限责任公司. 检测任意波长光学系统离焦位置透射波前的方法: 中国, CN108225743A[P]. 2018-06-29.