

doi:10.3788/gzxb20184707.0712002

离焦位置任意波长透射波前 Zernike 系数算法研究

张齐元¹, 韩森^{2,3}, 唐寿鸿^{2,4}, 王全召⁴, 姜志华⁵

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

(3 苏州慧利仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123)

(4 苏州维纳仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123)

(5 上海市计量测试研究院 机械与制造计量技术研究所, 上海 201203)

摘要:基于 Zernike 多项式波前拟合法, 提出计算离焦位置任意波长透射波前 Zernike 系数的算法, 在聚焦位置 Zernike 系数基础上补偿离焦距离内 Zernike 系数变化量. 以典型的消色差望远镜为例, 根据设计波长及权重优化其工作位置, 计算不同波长的聚焦位置与工作位置的离焦量, 使用该算法验证消色差系统工作位置任意波长 Zernike 系数. 与在工作位置直接使用 Conrady-Zernike 公式对比表明, 该算法对于与位置有关的 Zernike 系数计算效果明显, Z_1 的绝对误差由 6.78 降低到了 1.41, Z_4 的绝对误差由 6.83 降低到了 1.45.

关键词:波前检测; Zernike 系数; 离焦; 波长; 消色差

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)07-0712002-8

Estimation of Zernike Coefficients for Any Wavelength Transmitted Wavefront at Defocus Position

ZHANG Qi-yuan¹, HAN Sen^{2,3}, TANG Shou-hong^{2,4}, WANG Quan-zhao⁴, JIANG Zhi-hua⁵

(1 School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 College of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(3 Suzhou H&L Instruments LLC, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

(4 Suzhou W&N Instruments LLC, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

(5 Division of Mechanics and Manufacture Measurement Technology, Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract: Based on Zernike polynomials fitting wavefront, an algorithm of calculating Zernike coefficients for any wavelength transmitted wavefront at defocus position was put forward. The method compensates the change of Zernike coefficients of defocus distance based on Zernike coefficients at focus position. Using an achromatic system, the working position was optimized according to the wavelengths and weights, and the defocusing amount between focus position and working position was calculated, and the any wavelength wavefront Zernike coefficients at working position was verified by the algorithm. The result showed that the proposed algorithm is effective for calculating Zernike coefficients related to position, compared with using Conrady-Zernike formula in working position, the absolute error of Z_1 decreased from 6.78 to 1.41, and the absolute error of Z_4 decreased from 6.83 to 1.45.

Key words: Wavefront testing; Zernike coefficients; Defocus; Wavelength; Achromatic

基金项目: 国家重点研发计划(No.2016YFF0101903)资助

第一作者: 张齐元(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光学设计. Email: zhangqy@hl-instruments.com

导师(通讯作者): 韩森(1961—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为干涉测量技术. Email: senhanemail@126.com

收稿日期: 2018-01-21; 录用日期: 2018-03-20

<http://www.photon.ac.cn>

OCIS Codes: 120.3180; 160.4760; 220.4840; 260.3160

0 引言

随着光学设计与加工技术的快速发展,高性能的光学系统广泛应用于工业检测、光通信、数码产品等各个领域.对于性能较好的光学系统,波像差比几何像差能更好地反应其质量.在波前检测的主要手段中,激光干涉仪以检测精度较高成为行业标准^[1].为了便于描述波前,检测结果通常以一组 Zernike 多项式线性组合表示,并且 Zernike 多项式与初级像差有一定的对应关系^[2-5],可以用于分析波前像差,因此商用激光干涉仪测试分析软件中一般都集成 Zernike 多项式拟合功能.根据干涉测量原理,激光干涉仪需要使用相干性好的单色光源,所以只能准确检测特定波长波前.受成本和技术等原因限制,现阶段用于波前及面形检测的商用化激光干涉仪主要以 632.8 nm 为主,美国 ZYGO 和 4D 等主要干涉仪厂家会根据客户要求定制一些特殊波长激光干涉仪,如 405 nm 激光干涉仪检测 DVD 透镜,1 550 nm 激光干涉仪检测光通讯系统等.但是这些特殊波长激光干涉仪种类极其有限,并且只针对特定光学系统检测,这意味着仍有很多光学系统在其工作波段范围内的波前没有对应的检测仪器,极大地限制了激光干涉仪在光学系统波前检测的应用.在实际检测中,目前通行的办法是将波前检测结果采用波长等比例缩放的方式转为其它波长波前^[6],这样得到的数据准确度不高,只具有一定的参考价值,无法满足现代高精度测量的要求.

基于上述原因,本课题组提出了一种间接检测任意波长透射波前的方法.基本思路是将光学系统特定波长波前拟合为各项 Zernike 系数,利用 Zernike 系数与波长的函数关系,计算出其它波长时各项 Zernike 系数,再将其拟合为其它波长波前^[7-8].通过对一个单波长系统进行仿真模拟,采集其理想状态和含有几种误差状态的不同波长 Zernike 系数,采用曲线拟合和求解验证的方法,确定了 Conrady-Zernike 公式,即透射波前 Zernike 系数与波长存在类似材料折射率的关系,进而初步推断波前 Zernike 系数随波长的变化是由于材料折射率改变所引起的,这意味着在材料可透过的波长范围内可以计算任意波长波前.在实际测量波前时,一般要求系统的焦点(或像点)与参考球面球心重合^[9],即检测的是光学系统聚焦位置波前.对于单波长系统,通常聚焦位置就是最佳工作位置,但对于复色系统,如消色差系统,通常其工作位置并不是某个设计波长的聚焦位置,各波长的聚焦位置相对这个工作位置有一定离焦量,而对于消色差系统检测工作位置的波像差更有实用价值.为此基于 Zernike 系数研究离焦位置任意波长波前的检测,分析离焦位置任意波长波前 Zernike 系数的计算方法.

1 Zernike 系数与波长及位置的函数关系

波前 Zernike 系数不仅与波长有关,同时还受位置变化的影响,因此在离焦位置计算任意波长波前 Zernike 系数,需要建立 Zernike 系数与波长及位置的函数关系.

1.1 Zernike 系数与波长的函数关系

文献[7]详细介绍了透射式光学系统波前 Zernike 系数与波长函数关系的模拟及验证过程,原理如图 1 所示,其中所模拟的系统是单波长系统,透镜组使用同一种玻璃材料,因此波长改变时,所有透镜的折射率变化均相同,所以波前 Zernike 系数与波长可以使用 Conrady 公式形式表示.

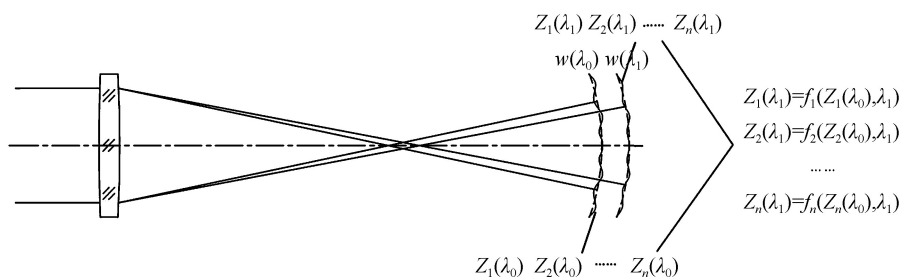


图 1 基于 Zernike 系数检测任意波长波前原理图

Fig.1 Testing the different wavelength wavefronts of the optical system based on Zernike coefficients

本文以一个消色差系统作为研究目标,见图 2,首先验证由不同种类玻璃构成的系统在聚焦位置处波前

Zernike 系数与波长的函数关系是否同样满足 Conrady-Zernike 公式.在镜头库中选择双胶合消色差望远物镜,具体参数如下:系统 F 数:8;视场: 0° 、 0.4° 、 0.75° ;设计波长:480 nm、510 nm、546.1 nm、590 nm、643.8 nm;权重分别为:0.3、0.6、1、0.6、0.3;透镜材料分别为 K9 和 ZF1,经过优化系统后工作距为 1 196.162 mm.

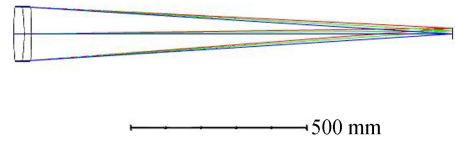


图2 消色差系统示意图

Fig.2 The achromatic system layout

采集消色差系统在聚焦位置波前 Zernike 系数,将系统波长更换为单波长,从 400 nm 开始只优化其聚焦位置,并记录其后截距位置及波前 Zernike 系数,每隔 10 nm 更换一次波长,直到 700 nm 为止.将采集 Zernike 系数与波长绘制成曲线,并使用 Conrady-Zernike 公式验证曲线.选择 540 nm、570 nm、660 nm 波长聚焦位置 Zernike 系数求解曲线并与采集数据对比,图 3 为聚焦位置轴上点(0° 视场) Z_1 求解曲线与数据曲线对比图,其中 Data1 为在聚焦位置采集的 Z_1 系数曲线,Conrady1 为使用聚焦位置 Z_1 系数通过 Conrady-Zernike 公式求解曲线,从图中可以看出,在聚焦位置 Conrady-Zernike 公式同样适用于消色差系统波前 Zernike 系数的计算.

但实际上模拟的消色差望远系统理论工作距离为 1 196.162 mm,相似的原理,按照计算聚焦位置 Zernike 系数使用聚焦位置 3 个波长 Zernike 系数的方式,计算工作位置 Zernike 数据就使用工作位置 3 个波长 Zernike 系数.具体验证方法是直接更换消色差系统波长,并采集 1 196.162 mm 处不同波长波前 Zernike 系数,使用 540 nm、570 nm、660 nm 波长工作位置的 Zernike 系数求解曲线并与采取数据对比.图 4 为工作位置轴上点 Z_1 求解曲线与数据曲线对比图,其中 Data2 为在工作位置采集的 Z_1 系数曲线,Conrady2 为使用工作位置 Z_1 系数通过 Conrady-Zernike 公式求解曲线,结果显示在工作位置处直接使用 Conrady-Zernike 公式计算波前 Zernike 系数出现了较大误差.

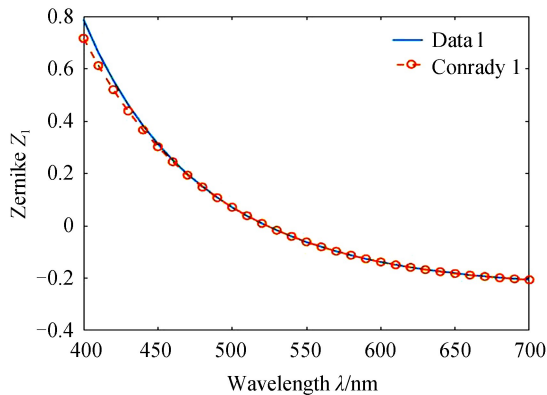


图3 聚焦位置求解 Conrady 公式曲线与采集数据曲线对比
Fig.3 Comparison between solved Conrady formula curve at focus position and data curve

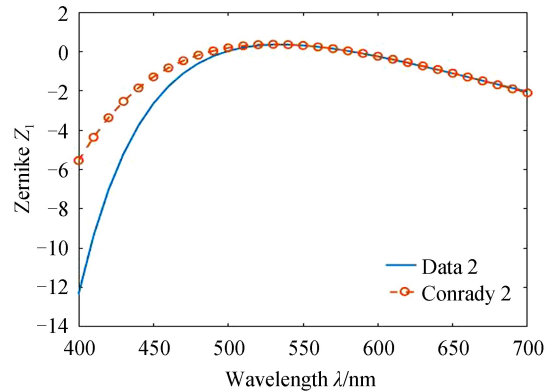


图4 工作位置求解 Conrady 公式曲线与采集数据曲线对比
Fig.4 Comparison between solved Conrady formula curve at working position and data curve

通过对比说明消色差系统在聚焦位置处波前 Zernike 系数与波长仍符合 Conrady-Zernike 公式关系,而系统固定位置处波前 Zernike 系数与波长的函数关系不能简单用 Conrady-Zernike 公式表示.

1.2 Zernike 系数与位置的函数关系

在光学系统固定位置实际上检测是某波长离焦位置处波前,由于波前 Zernike 系数大小也与位置有关,那么如果在聚焦位置 Zernike 系数基础上补偿离焦距离的 Zernike 系数变化量,就可以计算在其离焦位置的波前 Zernike 系数.实际上光学系统即使工作离焦位置,通常这个离焦量也不会很大,并且使用干涉仪检测光学系统波前时,如果参考球面镜的曲率中心偏离系统聚焦位置过多时,条纹会变得非常密集以致于无法测量,因此本文仅讨论在较短的距离范围内波前 Zernike 系数与位置的函数关系.

使用 Zemax 采集消色差系统不同波长在工作距离附近位置的 Zernike 系数,距离范围从 1 195 mm 到 1 202 mm,距离间隔为 0.2 mm,波长范围 420 nm 到 660 nm,波长间隔为 30 nm.将采集的数据绘制为不同波长 Zernike 系数与位置的曲线.

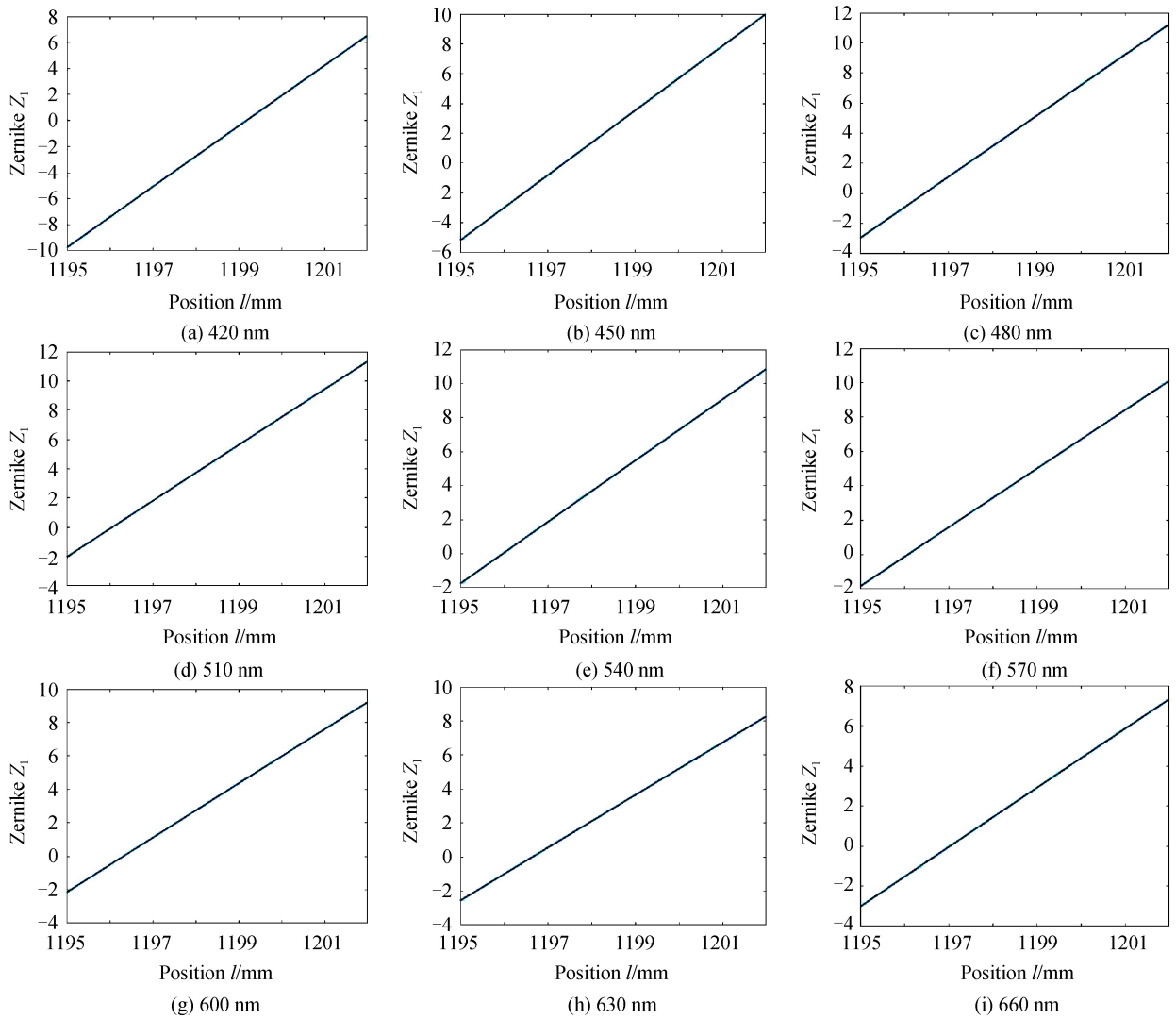


图5 零视场 Zernike Z_1 系数与位置曲线

Fig.5 Zernike Z_1 coefficients of zero field and wavelength curve

从图5可以看出 Zernike 系数与位置几乎呈线性变化,即单位长度 Zernike 系数变化量可以用一个常数表示(Zernike 系数变化量除以距离),记作 k_i .但不同波长单位长度 Zernike 系数变化量不同,由于聚焦位置 Zernike 系数与波长可以用 Conrady 公式表示,而 Zernike 系数与位置是近似线性关系,则 Zernike 系数单位长度变化量 k_i 与波长也应存在 Conrady 公式关系.因此通过 Conrady 公式判断 k_i 与波长的函数关系,使用 540 nm、570 nm、660 nm 波长 k_i 求解 Conrady 曲线并与采集的 k_i 曲线对比.图6为轴上点 Z_1 的求解 k_i 曲线与数据曲线对比图,其中 Data3 为 Z_1 的 k_i 系数曲线,Conrady3 为使用 3 个波长 k_i 求解曲线.

结果显示不同波长的 k_i 可以使用 Conrady 公式求解, k_i 与波长的关系可以以 Conrady 公式表示

$$k_i(\lambda) = A_{k_i} + \frac{B_{k_i}}{\lambda} + \frac{C_{k_i}}{\lambda^{3.5}} \quad (1)$$

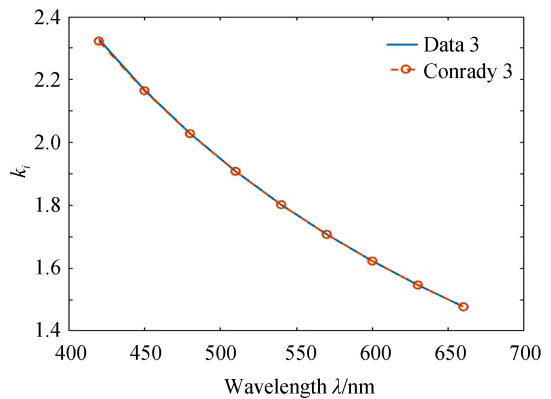


图6 k_i 求解 Conrady 公式曲线与采集数据曲线对比

Fig.6 Comparison between solved Conrady formula curve of k_i and data curve

因此光学系统在离焦位置计算任意波长波前 Zernike 系数可以写成

$$Z_i(\lambda, \Delta d) = Z_i(\lambda) + k_i(\lambda)\Delta d \quad (2)$$

式中, $Z_i(\lambda, \Delta d)$ 为离焦位置不同波长 Zernike 系数, $Z_i(\lambda)$ 为聚焦位置不同波长 Zernike 系数, $k_i(\lambda)$ 为不同波长单位距离内 Zernike 系数变化量, Δd 为某波长偏离该波长聚焦位置的距离. 其中 $Z_i(\lambda)$ 可以通过 3 个聚焦位置 Zernike 系数使用 Conrady-Zernike 公式求解, $k_i(\lambda)$ 也可以通过 3 个波长单位距离内 Zernike 系数变化量求解(测量某个波长不同位置 Zernike 系数得到), Δd 为偏离聚焦位置的距离, 这样就可以计算离焦位置任意波长 Zernike 系数.

2 消色差系统离焦量计算

在计算离焦位置任意波长 Zernike 系数公式中, Δd 并不是波长的函数, 而消色差系统的工作距离是一个定值, 由于不同波长的焦点位置不同, 即聚焦位置是波长的函数, 因此各波长相对工作距离的离焦量也是波长的函数. 消色差系统的不同波长离焦量的计算需要知道两个参量, 分别是不同波长的聚焦位置和工作距离. 图 7 为消色差系统不同离焦量示意图, l_1 、 l_2 和 l_3 分别为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 系统聚焦位置的后截距, l_0 为系统工作位置的后截距.

2.1 波长聚焦位置求解

首先需要确定不同波长的聚焦位置, 与 Zernike 系数与波长的函数关系类似, 波长聚焦位置的变化其实也是由材料折射率变化导致的^[10], 因此采用 Conrady 公式验证消色差系统的后截距与波长的关系, 使用 540 nm、570 nm、660 nm 波长后截距计算求解曲线并与采集的后截距波长曲线对比, 图 8 为后截距求解曲线与数据曲线对比图, 其中 Data4 为消色差后截距与波长曲线, Conrady4 为使用三个波长后截距求解曲线. 从图中可以发现消色差后截距曲线并不是一条单调曲线, 而 Conrady 公式仍然可以对其求解, 因此可以将后截距与波长的关系式也写成 Conrady 公式形式, 即

$$l(\lambda) = A_l + \frac{B_l}{\lambda} + \frac{C_l}{\lambda^{3.5}} \quad (3)$$

消色差望远系统任意波长后截距就可以通过 3 个波长的后截距数据求解得出.

2.2 计算系统工作位置

接着是确定系统的工作距离, 根据光学设计优化原理^[11], 系统的工作距离由波长及其权重决定, 在波长的最佳聚焦位置是该波长像差最小的位置, 设计时根据各波长的权重来平衡最终的工作距离. 因此可以根据设计波长所占比重计算这个位置, 将工作距离计算公式写为如下形式.

$$l_0 = \frac{\sum_1^n \tau_n l_n}{\sum_1^n \tau_n} \quad (4)$$

式中, l_n 为设计波长聚焦位置的后截距, τ_n 为对应设计波长的权重, l_0 为工作位置的后截距, 公式表达的意义是最后的工作距离由各设计波长权重所决定. 消色差系统的设计波长 480 nm、510 nm、546.1 nm、590 nm、643.8 nm, 权重分别为 0.3、0.6、1、0.6、0.3. 使用 540 nm、570 nm、660 nm 波长后截距数据通过式(3)可以求

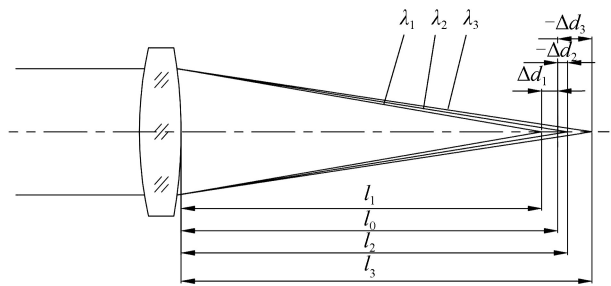


图 7 消色差系统不同波长离焦量示意图

Fig.7 Different wavelength defocusing amounts of the achromatic system

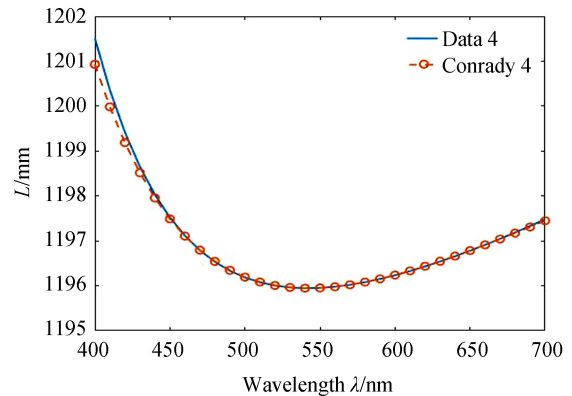


图 8 后截距求解 Conrady 公式曲线与采集数据曲线对比

Fig.8 Comparison between solved Conrady formula curve and collected data curve of optical back length and data curve

得5个设计波长的后截距分别为1 196.542 mm、1 196.083 mm、1 195.947 mm、1 196.154 mm、1 196.707 mm.将其带入式(4),可以得到 l_0 为1 196.166 mm,与设计结果1 196.162 mm非常接近.这样就可以计算任意波长聚焦位置相对工作距离的离焦量,消色差透射光学系统 Δd 可以表示为 $\Delta d(\lambda) = l_0 - l(\lambda)$,图9为各波长相对工作位置离焦量曲线图.

3 离焦 Zernike 系数算法验证

消色差系统在工作位置任意波长波前 Zernike 系数计算公式可以写成

$$Z_i(\lambda, \Delta d) = Z_i(\lambda) + k_i(\lambda) \Delta d(\lambda) \quad (5)$$

通过前面的分析计算,分别使用消色差望远镜 540 nm、570 nm、660 nm 的后截距数据、聚焦位置波前以及离焦位置波前,得到其不同波长聚焦位置波前 Zernike 系数、单位距离 Zernike 系数变化量以及相对工作位置的离焦量,带入离焦位置任意波长 Zernike 系数式(5),可以得到其工作距离 Zernike 系数与波长曲线,与采集的工作位置 Z_1 系数数据曲线对比,结果如图10所示,其中 Data2 为在工作位置采集的 Z_1 系数曲线,Conrady-offset 为使用式(5)求解曲线.

结果显示在聚焦位置 Zernike 系数基础上补偿离焦距离 Zernike 系数变化量的方法与直接在工作距离使用 Conrady-Zernike 公式方法(图4)相比,工

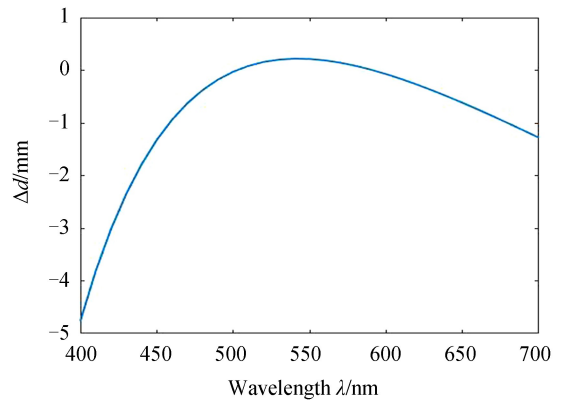


图9 各波长聚焦位置相对工作位置离焦量曲线

Fig.9 Different wavelength defocusing amounts curve between focus position and working position

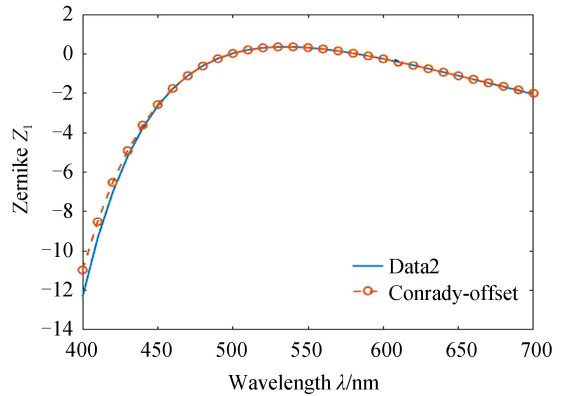


图10 离焦补偿算法求解曲线与采集数据曲线对比
Fig.10 Comparison between solved Conrady-offset formula curve and data curve

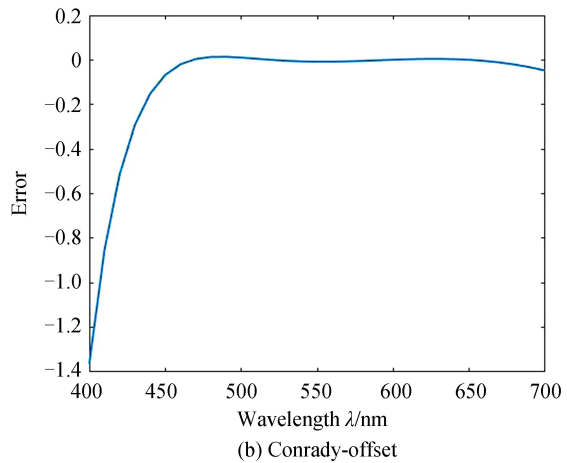
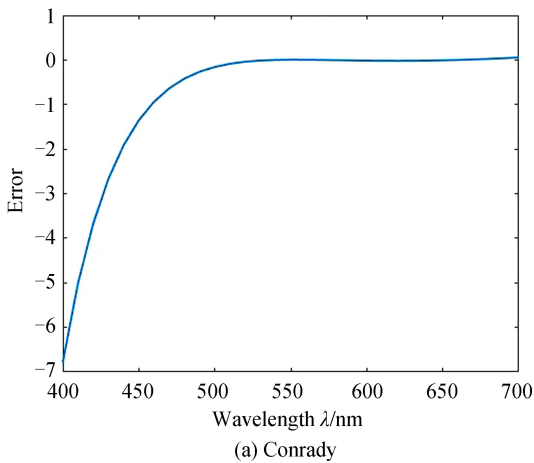


图11 两种算法的误差曲线

Fig.11 The error curves of two algorithm

作位置的波前 Zernike 系数计算精度大幅提高.图11为两种方法计算的 Zernike 系数与采集数据的差值.

其中两种方法在短波处都出现最大误差,式(5)中三个与波长有关的变量都会出现计算误差,因此随着波长的扩展误差逐渐累积增大,但使用离焦补偿算法可将 Z_1 的最大绝对误差由6.783 1降低到1.364 0.使用同样的方式验证其它项 Zernike 系数,表1给出全视场(1° 视场)消色差望远镜系统 $Z_1 \sim Z_9$ 项系数两种方法最大绝对误差(模拟的光学系统没有引入离轴或倾斜误差, Z_2 、 Z_6 和 Z_7 的数据均为0).

表 1 前 9 项 Zernike 系数两种方法计算绝对误差
Table 1 First 9 Fringe Zernike coefficients calculation errors of two algorithm

Zernike coefficient	Conrady	Conrady-offset
Z_1	6.780 2	1.410 6
Z_2	/	/
Z_3	0.009 9	0.025 4
Z_4	6.825 0	1.452 2
Z_5	0.002 3	0.000 625 4
Z_6	/	/
Z_7	/	/
Z_8	0.005 1	0.012 9
Z_9	0.045 4	0.042 2

从表 1 中可以看出,离焦补偿算法对 Z_1 和 Z_4 效果非常明显,而对其它 Zernike 项系数在固定位置使用两种方法计算结果相差并不大.这是因为 Z_1 和 Z_4 代表的物理意义是平移和离焦^[12],对位置变化很敏感.而其它 Zernike 项则代表光学系统的几种像差及其分量,在较小离焦距离内 Zernike 系数变化量也很小,位置的变化对其影响不大.

文献[7]中指出单波长系统和消色差系统聚焦位置波前 Zernike 系数与波长符合 Conrady-Zernike 公式,而复消色差系统不满足这一条件,因此离焦位置任意波长波前 Zernike 系数计算公式同样不适用于复消色差系统.本文对一个相对孔径较小的系统仿真,像差主要以初级像差为主,波前可由前 9 项 Zernike 系数决定.更复杂的系统根据光学设计原则通常需要使初级像差与高级像差进行平衡而减小系统的总体像差^[13-14],那么波前应该由更多项 Zernike 系数表示,而对于复杂系统以及前 9 项以后的 Zernike 系数计算还需要在理论上进一步完善.

4 结论

本文在光学系统聚焦位置任意波长波前检测方法基础上,根据消色差系统的实际应用提出了在离焦位置计算任意波长波前 Zernike 系数的公式,通过模拟对比发现对于与位置有关的 Zernike 系数,使用离焦补偿算法可以有效减小其离焦位置的计算误差.由于文中仅对简单结构的消色差系统进行了验证,该算法的适用范围仍有待研究.目前特殊波长激光干涉仪种类较少且并未普遍应用,所以本文只进行了理论上的推导和验证.同时文中检测消色差系统时需要知道波长的权重,系统工作距离计算也仅考虑波长而忽略了视场的影响,因此该方法与实际检测还有一段距离.另一方面通过模拟发现,光学系统中不仅波前 Zernike 系数与波长符合 Conrady 公式形式,后截距与波长也同样符合 Conrady 公式形式,进一步证明光学系统中部分与波长有关的参数符合折射率变化规律,因此利用折射率公式可以为准确检测光学系统参数提供新的思路和借鉴.

参考文献

- [1] 冯胜. 波前检测技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [2] FENG Jie, BAI Yu, XING Ting-wen. Fitting accuracy of wavefront using zernike polynomials [J]. *Electro-OpticTechnology Application*, 2011, **26**(2): 31-34.
冯婕, 白瑜, 邢廷文. Zernike 多项式波面拟合精度研究[J]. 光电技术应用, 2011, **26**(2): 31-34.
- [3] SHAN Bao-zhong, WANG Shu-yan, NIU Han-ben, et al. Zernike polynomial fitting method and its application[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(3): 318-323.
单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨, 等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学精密工程, 2002, **10**(3): 318-323.
- [4] GONG Dun, TIAN Tie-yin, WANG Hong. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1754-1759.
巩盾, 田铁印, 王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. 光学精密程, 2010, **18**(8): 1754-1759.
- [5] GAO Fei, LI Jin-hui, TIAN Ai-ling, et al. Error margin analysis of three-flat test based on Zernike polynomials fitting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(9): 0912008.
高飞, 李晋惠, 田爱玲, 等. 基于 Zernike 多项式拟合三平面互检的误差分析[J]. 光子学报, 2017, **46**(9): 0912008.
- [6] 朱波, 移相式斐索中波红外干涉仪关键技术及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [7] ZHANG Qi-yuan, HAN Sen, TANG Shou-hong, et al. Study on the relationship between transmitted wavefrontzernike

- coefficients and wavelengths[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(2): 0212002.
- 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.
- [8] 苏州维纳仪器有限责任公司. 检测任意波长光学系统的透射波前的方法: 中国, 201710615484.4[P]. 2017-12-12.
- [9] 马骅. 球面透射波前误差的绝对检测方法[D]. 成都: 中国工程物理研究院, 2014.
- [10] WARRENJ S. Modern optical engineering[M]. ZHOU Hai-xian, CHENG Yun-fang, transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- WARRENJ S. 现代光学工程[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [11] 林晓阳. ZEMAX 光学设计超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [12] JAMES C W, KATHERINE C. Basic wavefront aberration theory for optical metrology [J]. *Applied Optics & Optical Engineering*, 1992, XI: 1-13.
- [13] 张以谟. 应用光学(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [14] CHEN Li-xia, HU Xiao-chuan, HAN Kai, *et al.* Improvement method for fitting high-frequency phase by Zernike polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(3): 0314001.
- 陈丽霞, 胡小川, 韩开, 等. Zernike 多项式对空间高频相位拟合的改进方法[J]. 光学学报, 2016, **36**(3): 0314001.

Foundation item: The National Key Research and Development Program of China(No.2016YFF0101903)

引用格式: ZHANG Qi-yuan, HAN Sen, TANG Shou-hong, *et al.* Estimation of Zernike Coefficients for Any Wavelength Transmitted Wavefront at Defocus Position[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0712002

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**(7): 0712002