

基于 Zemax 的部分补偿透镜的优化设计

孟晓辰 郝 群 朱秋东 胡 摇

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 用部分补偿法检测非球面时,部分补偿透镜的优化设计是关键技术之一。针对这一难点,提出了一种以剩余波前斜率作为优化目标的基于 Zemax 的部分补偿透镜设计方法,分析了剩余波前斜率与干涉条纹密度以及弥散圆之间的关系,得到了弥散圆可以定量表征剩余波前斜率的结论,并将弥散圆半径作为优化函数。针对 3 种不同参数的非球面进行了部分补偿透镜的优化设计,设计结果表明,该方法可在保证干涉条纹可探测的前提下,简单、快速、全面直观地实现部分补偿透镜的优化设计,减小剩余波前斜率,降低干涉条纹密度,从而扩大干涉仪可测非球面面形误差的测量范围,提高可测的空间频率。

关键词 光学设计;部分补偿透镜;剩余波前斜率;弥散圆

中图分类号 O435 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0622002

Optimization Design of Partially Compensating Lens Based on Zemax

Meng Xiaochen Hao Qun Zhu Qiudong Hu Yao

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

Abstract Optimization design of partially compensating lens is one of the key problems for aspheric surface testing using partially compensating lens. A design method for the partially compensating lens based on Zemax, which takes the slope of wave-front as the optimization objective, is proposed. First the relation among residual wave-front slope, and interference fringe density and dispersive spot are analyzed, leading to the conclusion that the dispersive spot can quantitatively characterize the residual wave-front slope and its radius is taken as the optimization target. Then the method is applied to the optimization design of partially compensating lenses corresponding to three kinds of aspheric surfaces. The results indicate that, on the precondition that the interference fringes are detectable, the method can help complete the optimization design of partially compensating lens more simply, faster and more visually, resulting in decrease of the residual wave-front slope and reduction in the interference fringes density. Therefore, the measurement range of the interferometer for testing aspheric surface is expanded, and aspheric surfaces with higher spatial frequency can still be measured without increasing the resolution of interferogram detector.

Key words optical design; partially compensating lens; residual wave-front slope; dispersive spot

OCIS codes 220.1250; 220.2740; 220.1000; 220.3620; 220.4840

1 引 言

干涉检测是非球面检测最常用的高精度定量方法^[1],其中传统的零补偿检验是一种小剩余波前的检验方法,需要通过零补偿器的波前完全补偿被测非球面的法线像差^[2],因此通常需要使用复杂的透镜组作为零补偿器^[3,4],设计和加工难度较大^[5~10]。部分补偿检测法则不同于零补偿检验^[11],它不要求

通过部分补偿透镜后的光线完全补偿非球面的法线像差,因此系统本身可以有较大的剩余波前,部分补偿透镜的结构可以很简单,甚至只需单片透镜即可实现,降低了补偿器的设计和加工难度。

另一方面,剩余波前的斜率与干涉条纹密度相关,部分补偿检测法存在较大的剩余波前,将导致待探测的干涉条纹变密。由于探测器分辨率的限制,

收稿日期: 2010-12-31; 收到修改稿日期: 2011-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(60578053)资助课题。

作者简介: 孟晓辰(1985—),女,博士研究生,主要从事光学精密测量方面的研究。E-mail: mengxc316@gmail.com

导师简介: 郝 群(1968—),女,博士,教授,主要从事光电信息技术及精密光学测量等方面的研究。

E-mail: qhao@bit.edu.cn

要保证干涉条纹可被探测,在部分补偿检测法的应用中就必须保证剩余波前的最大斜率不高于某一特定值。因此需对所设计的部分补偿透镜进行合理的优化,尽可能减小剩余波前斜率,降低干涉条纹密度,以扩大干涉仪检测非球面面形误差的测量范围,提高可测的空间频率。

在现有非球面检验部分补偿透镜的设计方法中,通常采用波像差^[12~15]作为优化目标,设计时对波像差较大的位置附近的几条光线进行约束控制,从而实现波像差曲线最大斜率的控制,并不是对全口径的光线进行优化。而且干涉条纹密度与剩余波前斜率对应,单纯控制波像差与干涉条纹密度不直接相关,因此优化结果存在不直观不全面的问题。为了解决上述问题,本文提出一种以波前斜率作为优化目标的基于 Zemax 的部分补偿透镜优化方法,可对全口径的光线进行优化,在保证干涉条纹可被探测的前提下,尽可能降低部分补偿透镜的设计难度,提高补偿透镜的补偿效果,减小系统的剩余波前斜率。

2 系统剩余波前的斜率与弥散圆

基于部分补偿法检测非球面的泰曼型干涉仪基本光路图如图 1 所示。参考平面镜反射的参考平面波,与被测非球面反射后经部分补偿镜补偿的、带有剩余波前的波前,在成像物镜焦面上干涉,探测器实际采集的条纹密度是由上述两束干涉光之间光程差(OPD)的斜率决定的^[16],即对于干涉场中的任一点来说都有

$$\mu\lambda = \frac{dl_{\text{OPD}}}{d\mathbf{R}}, \quad (1)$$

式中 l_{OPD} 为干涉光路中两束干涉光之间的光程差, μ 为 \mathbf{R} 方向上的条纹密度, λ 为检测光波长, \mathbf{R} 为单位方向矢量,则可以得到该点 \mathbf{R} 方向上的条纹密度为

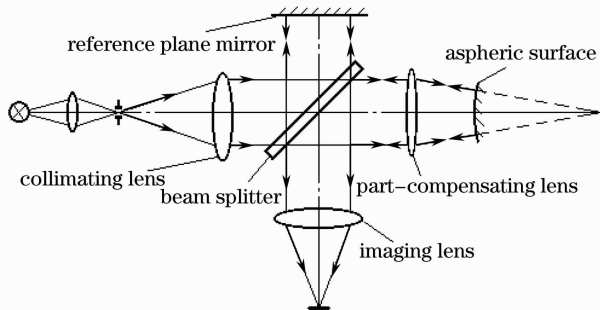


图 1 泰曼型干涉仪检测非球面光路图
Fig. 1 Twyman-Green interferometer layout for aspheric surface testing

$$\mu = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{dl_{\text{OPD}}}{d\mathbf{R}}. \quad (2)$$

因光路中的参考光为平面波,则该点 OPD 的斜率与对应剩余波前的斜率相等,即干涉条纹密度与剩余波前斜率成正比。

实际上,应用部分补偿法探测到的实际干涉条纹中既包含被测面形误差,也包含系统剩余波前,干涉条纹的空间频率反映的是这两者在空间频谱上带宽的综合效果。如果被测面形误差的空间频率范围已给定,那么容许的系统剩余波前斜率的上限,即系统容许最大剩余波前斜率也唯一确定。在设计部分补偿透镜时,需对全局系统剩余波前的斜率进行控制优化,使之小于容许的最大剩余波前斜率,降低实际干涉条纹密度,从而在满足探测要求的前提下,给被测面形误差留出足够的带宽,扩大干涉仪检测非球面面形误差的测量范围。

为了考察全局剩余波前斜率的分布,研究了弥散圆与波前斜率之间的关系。图 2 给出的是弥散圆的形成过程。对于一束平行光线来说,经过透镜后与透镜焦面的交点高度 y' 只与光线入射的角度 ω 有关, $y' = f' \tan \omega$, f' 为透镜焦距,理想情况下交点大小可由远场衍射艾里斑尺寸求得。对于带有像差的平面波来说,通过波前各点光线的传播方向不完全相同,经过透镜后各点光线与透镜焦面的交点位置不同,因而会形成一个弥散圆,对于大波像差系统,该弥散圆的尺寸远大于艾里斑直径,其尺寸只与入射光线偏离中心光线的最大角度有关,且与波前斜率成正比,即弥散圆的最大半径与波前的最大斜率相对应。

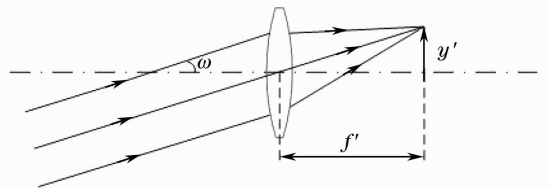


图 2 光线在焦面交点高度与光线入射角度关系
Fig. 2 Relation between the height of the image and the angle of incidence with parallel beam

对于部分补偿非球面检测光路来说,经过部分补偿透镜后返回的剩余波前近似平面波,并不聚焦,因此在设计部分补偿透镜时,在补偿镜后插入一个理想透镜,则在理想透镜的焦面上会形成一弥散圆,如图 3 所示。弥散圆大小的变化对应剩余波前斜率的变化,若取 s_0 为系统容许最大剩余波前斜率,根据弥散圆半径 r 与剩余波前的斜率 s 之间的关系,可

知系统容许最大弥散圆半径 $r = s_0 f'$, f' 为理想透镜的焦距。在 Zemax 中可以很方便直观地看到系统的弥散圆图形和各项参数,因此可以通过控制优化弥散圆半径方便快速地对剩余波前斜率的优化,使得全局系统剩余波前斜率小于被测面形误差所限定的容许值。

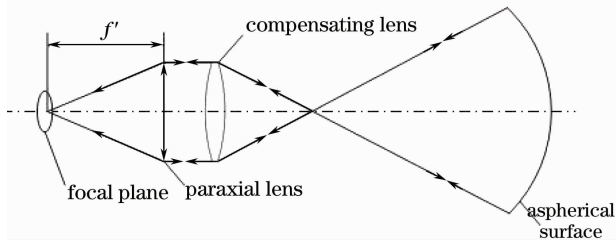


图3 部分补偿法检测非球面光路图

Fig. 3 Layout for aspheric surface testing using partially compensating lens

3 Zemax 中相关操作的设置

在现有的光学设计软件 Zemax 中^[17,18],不具有直接优化波前斜率的操作数,因此要实现以波像差斜率为目标的优化设计,必须通过特殊的转换和设置才能实现,主要是弥散圆的获取和相关设置。

首先,在补偿系统最后插入一面,设置其面型类型为 Paraxial,即表示理想透镜,在其焦面上可记录分析弥散圆相关参数。判断记录得到的弥散圆半径 r' 是否小于系统容许最大弥散圆半径 r ,如果 $r' \leq r$,则系统剩余波前斜率小于系统容许最大波前斜率 s_0 ,干涉条纹可被探测,即设计的部分补偿透镜满足要求,否则探测到的干涉条纹出现失真,需重新设定部分补偿透镜参数,再次优化,直至满意为止。

同时,在 Zemax 中输入设计的初始光学系统参数后,需对 Merit Function Editor 作如下设置:设置 Merit Function 菜单 Tools 子菜单下 Default Merit Function 的优化目标为 Dispersive Spot Radius,即弥散圆半径,设置类型为 PTV,即将弥散圆最大半径设置为优化目标。通过上述设置,Zemax 软件即可对全口径光线进行分析控制,以优化弥散圆半径。

4 部分补偿透镜设计实例及设计结果

针对相对孔径参数分别为 $D/R_0 = 1/2$ 的凹非球面、 $D/R_0 = 1/1$ 的凸非球面和 $D/R_0 = 1/4$ 的凸非球面,分别以波像差为初步设计优化目标,以剩余波前斜率为改进设计优化目标,进行部分补偿透镜的优化设计,并以设计所得部分补偿透镜对应的

弥散圆半径为优化评价指标,比较分析部分补偿透镜的功能如下。

4.1 $D/R_0 = 1/2$ 的凹椭球面对应部分补偿透镜设计

被测非球面为 F_2 的凹椭球面,参数如表 1 所示,针对非球面设计部分补偿透镜。其中 K 为二次曲线系数, e 为二次曲线的偏心率。

表 1 $D/R_0 = 1/2$ 的凹椭球面的参数

Table 1 Parameters of a concave aspheric surface with $D/R_0 = 1/2$

Parameter	Value
Diameter D /mm	580
Aspheric coefficient $K = -e^2$	-0.499365
Radius of curvature R_0 /mm	1179.447
Relative aperture D/R_0	1/2
Asphericity / λ	107.1

凹椭球面的法线像差为正值,部分补偿透镜需产生负球差,用一个单透镜就可以实现。测试光路结构如图 4 所示,所示设计部分补偿的入射口径为 80 mm。

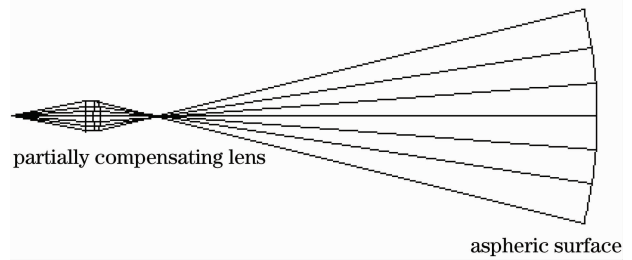


图4 针对 F_2 非球面设计的部分补偿测试光路结构图

Fig. 4 Structure of testing optical path using partially compensating lens for aspheric surface F_2

以波像差为初步设计优化目标,以剩余波前斜率为改进设计优化目标进行设计的部分补偿透镜的结构参数如表 2 所示,对应理想焦面上的弥散圆如图 5 所示,用 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的 CCD 采集得到的干涉图如图 6 所示。

以波像差为初步设计优化目标进行设计的部分补偿透镜系统在理想焦面的弥散圆最大半径为 $116.811 \mu\text{m}$ 。以剩余波前斜率为改进设计优化目标进行设计的部分补偿系统在理想焦面处的弥散圆的最大半径为 $71.587 \mu\text{m}$,小于原设计方法,对应剩余波前斜率减小,干涉条纹密度降低。

表 2 初步设计优化和改进设计优化后得到的 F_2 的部分补偿透镜结构参数

Table 2 Structural parameters of partially compensating lens for F_2 in preliminary design and after improved design optimization

Surface number	Preliminary design			After improved design optimization		
	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
1	240.4	19.776	F7	342.192	17.451	BAK7
2	-153.504			-159.285		

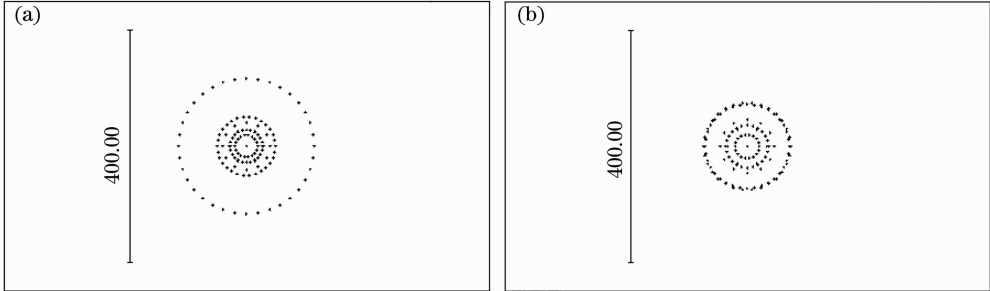


图 5 针对 F_2 部分补偿透镜优化设计后的弥散圆图形。(a)以波像差为优化目标,(b)以剩余波前斜率为优化目标

Fig. 5 Dispersive spot of partially compensating lens for F_2 after optimization design. (a) taking the wave-front aberration as the optimization objective, (b) taking the slope of wave-front as the optimization objective

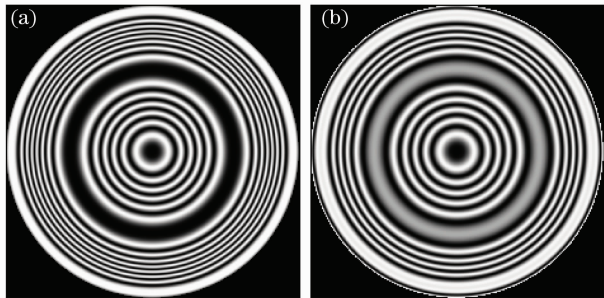


图 6 针对 F_2 部分补偿透镜优化设计后的干涉图图形。

(a)以波像差为优化目标,(b)以剩余波前斜率为优化目标

Fig. 6 Interferogram of partially compensating lens for F_2 after optimization design. (a) taking the wave-front aberration as the optimization objective, (b) taking the slope of wave-front as the optimization objective

4.2 $D/R_0 = 1/1$ 的凸非球面对应部分补偿透镜设计

被测面为 F_1 的凸非球面,参数如表 3 所示,针对此非球面设计部分补偿透镜。

此非球面不仅相对孔径大,非球面度也很大,而且是凸面,需要部分补偿透镜产生很大的正球差,用简单的透镜难以实现。设计入射口径为 80 mm 的三片式结构的部分补偿透镜,测试光路如图 7 所示。以波像差为初步设计优化目标,以剩余波前斜率为改进设计优化目标进行设计的部分补偿透镜的结构参数如表 4 所示,对应理想焦面上的弥散圆如图 8 所示,

其最大半径分别为 $171.267 \mu\text{m}$ 和 $57.663 \mu\text{m}$ 。用 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的 CCD 采集得到的干涉图如图 9 所示。

表 3 $D/R_0 = 1/1$ 的凸非球面的参数

Table 3 Parameters of a convex aspheric surface with $D/R_0 = 1/1$

Parameter	Value
Diameter D/mm	80
Aspheric coefficient $K = -e^2$	-0.84
Radius of curvature R_0/mm	80
Relative aperture D/R_0	1/1
Asphericity $/\lambda$	200

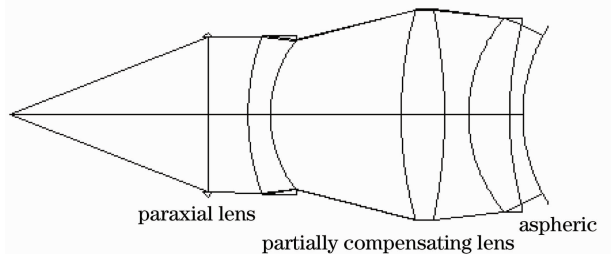


图 7 针对 F_1 非球面设计的部分补偿测试光路结构图

Fig. 7 Structure of testing optical path using partially compensating lens for aspheric surface F_1

4.3 $D/R_0 = 1/4$ 的凸椭球面对应部分补偿透镜设计

针对相对孔径为 $1/4$ 的凸非球面设计部分补偿透镜,非球面参数如表 5 所示。

表 4 初步设计优化和改进设计优化后得到的 F_1 的部分补偿透镜结构参数

Table 4 Structural parameters of partially compensating lens for F_1 in preliminary design and after improved design optimization

Surface number	Preliminary design			After improved design optimization		
	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
1	120	13	BaK7	117	11.13	BaK7
2	65	63		62.02	64.99	
3	205	23	ZF6	203.14	21.51	ZF6
4	-260	13		-258.46	11.99	
5	79	24	ZF6	76.77	20.38	ZF6
6	178			174.42		

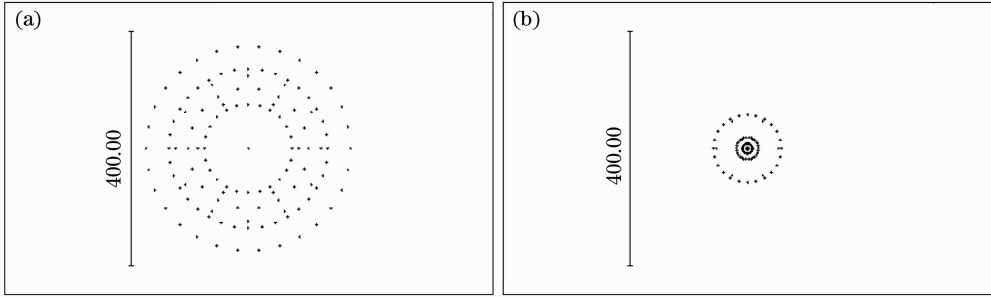


图 8 针对 F_1 部分补偿透镜优化设计后的弥散圆图形。(a)以波像差为优化目标,(b)以剩余波前斜率为优化目标

Fig. 8 Dispersive spot of partially compensating lens for F_1 after optimization design. (a) taking the wave-front aberration as the optimization objective, (b) taking the slope of wave-front as the optimization objective

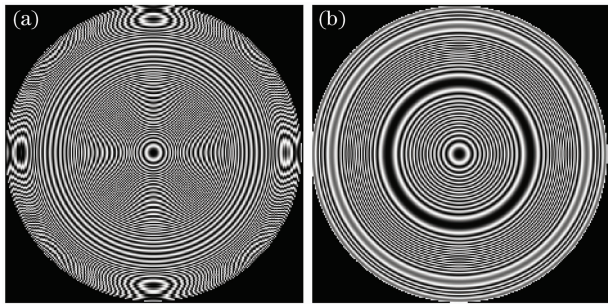


图 9 针对 F_1 部分补偿透镜优化设计后的干涉图图形。

(a)以波像差为优化目标,(b)以剩余波前斜率为优化目标

Fig. 9 Interferogram of partially compensating lens for F_1 after optimization design. (a) taking the wave-front aberration as the optimization objective, (b) taking the slope of wave-front as the optimization objective

表 5 $D/R_0=1/4$ 的凸椭球面的参数

Table 5 Parameters of a convex aspheric surface $D/R_0=1/4$

Parameter	Value
Diameter D /mm	60
Aspheric coefficient $K=-e^2$	-1
Radius of curvature R_0 /mm	240
Relative aperture D/R_0	1/4
Asphericity $/\lambda$	2.88

对于法线像差较小的凸非球面,可以用球差尽

量小的单透镜来补偿。此非球面相对孔径较小,非球面度也不大,设计口径与被测非球面口径尽量接近的单透镜对此非球面进行补偿,设计部分补偿透镜的口径为 65 mm,测试光路如图 10 所示。

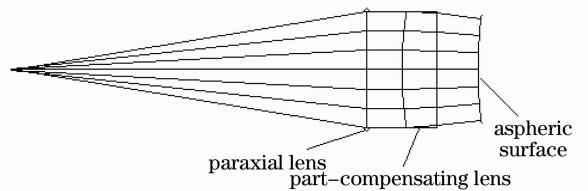


图 10 针对 F_1 非球面设计的部分补偿测试光路结构图

Fig. 10 Structure of testing optical path using partially compensating lens for aspheric surface F_1

以波像差为初步设计优化目标,以剩余波前斜率为改进设计优化目标进行设计的部分补偿透镜的结构参数如表 6 所示,对应理想焦面上的弥散圆如图 11 所示,其最大半径分别为 $256.996 \mu\text{m}$ 和 $173.544 \mu\text{m}$ 。用 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的 CCD 采集得到的干涉图如图 12 所示。

由上述实例可知,对于不同相对孔径参数的非球面,应用提出的优化设计方法设计的部分补偿系统在理想焦面处的弥散圆最大半径均小于原设计方法,可有效减小系统剩余波前斜率,降低系统剩余波像差对干涉条纹密度的贡献,从而增大干涉仪可测量的非球面面形误差范围,提高可测空间频率。

表 6 初步设计和改进优化后的 F_4 部分补偿透镜结构参数

Table 6 Structural parameters of partially compensating lens for F_4 in preliminary design and after improved design optimization

Surface number	Preliminary design			After improved design optimization		
	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
1	202	18	ZF6	200.27	15.8	ZF6
2	Infinity			Infinity		

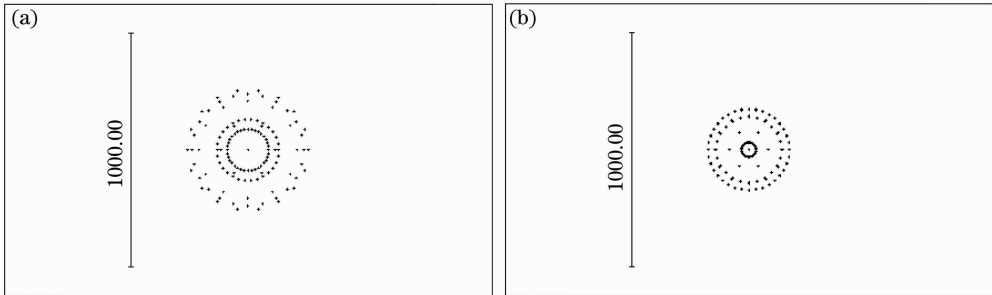


图 11 针对 F_4 部分补偿透镜优化设计后的弥散圆图形。(a)以波像差为优化目标,(b)以剩余波前斜率为优化目标

Fig. 11 Dispersive spot of partially compensating lens for F_4 after optimization design. (a) taking the wave-front aberration as the optimization objective, (b) taking the slope of wave-front as the optimization objective

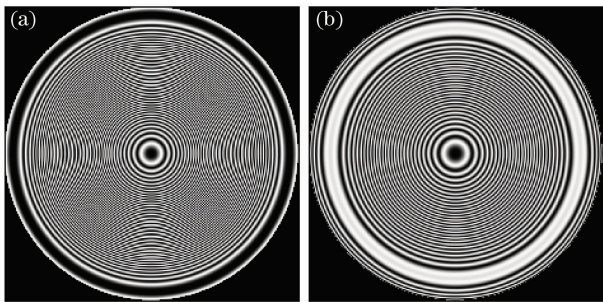


图 12 针对 F_4 部分补偿透镜优化设计后的干涉图图形。

(a)以波像差为优化目标,(b)以剩余波前斜率为优化目标

Fig. 12 Interferogram of partially compensating lens for F_4 after optimization design. (a) taking the wave-front aberration as the optimization objective, (b) taking the slope of wave-front as the optimization objective

5 结 论

提出了一种以波前斜率作为优化目标的基于 Zemax 的部分补偿透镜设计方法,论述了剩余波前斜率与干涉条纹密度以及弥散圆之间的关系,通过 Zemax 中设置适当的操作数来优化弥散圆半径,实现对全口径的光线斜率进行优化,并就 3 个不同相对孔径的非球面给出了设计实例。结果表明,应用提出的优化设计方法,可有效实现对剩余波前最大斜率的控制,优化后的波前斜率小于原设计方法。相对于直接用波像差做优化目标的设计方法,本方法可在保证干涉条纹可探测的前提下,简单、快速、全面直观地实现部分补偿透镜的优化设计。

参 考 文 献

- Zhu Yongjian, Pan Weiqing. Measurement of aspheric surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 11202
朱勇健, 潘卫清. 非球面面形测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 11202
- Pan Junhua. Design, Fabrication and Testing of Optical Aspheric [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验 [M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004
- John E. Greivenkamp. Design and calibration of large dynamic range optical metrology systems[J]. *SPIE*, 2005, **6024**: 602403
- Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *et al.*. Concave aspherical surface testing with twin computer-generated holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1313~1316
谢意, 陈强, 伍凡等. 用计算机全息图检测凹非球面[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1313~1316
- Li Kexin, Yuan Liyin, Hao Peiming *et al.*. Design of null compensator to concave aspheric mirror with large diameter and large relative aperture [J]. *Opt. Instruments*, 2009, **31**(4): 44~48
李可新, 袁立银, 郝沛明等. 大口径大相对孔径非球面凹镜的零位补偿器设计[J]. *光学仪器*, 2009, **31**(4): 44~48
- Fan Wu, Jianguan Tang. Design and application of dall compensator for null testing of large aperture aspherical surface and convex lens[C]. *SPIE*, 2001, **4451**: 368~374
- Pan Junhua, Li Xinnan. Compensator for even high order aspheric surfaces[C]. *SPIE*, 2000, **4231**: 36~38
- Guo Peiji, Yu Jingchi, Shun Xiafei. Null lens design for small aspherical surface with large NA [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(5): 518~522
郭培基, 余景池, 孙侠非. 一种大数值孔径小非球面检测用补偿器设计[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(5): 518~522
- Chen Xu, Liu Weiqi, Kang Yusi. Design and tolerance analysis of Offner compensator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(1): 88~93
陈旭, 刘伟奇, 康玉思. Offner 补偿器的结构设计与装调 [J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(1): 88~93
- Shen Guiping. Design of compensator for large relative aperture

- aspherical surface [C]. *SPIE*, 2007, **6723**: 67233L
- 11 Liu Huilan, Hao Qun, Zhu Qiudong *et al.*. Testing an aspheric surface using part-compensating lens[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2004, **24**(7): 625~628
刘慧兰, 郝群, 朱秋东等. 利用部分补偿透镜进行非球面面形测量[J]. 北京理工大学学报, 2004, **24**(7): 625~628
- 12 Liu Huilan, Zhu Qiudong, Hao Qun *et al.*. Design of novel part-compensating lens used in aspheric testing [C]. *SPIE*, 2003, **5253**: 480~485
- 13 John E. Greivenkamp, Robert O. Gappinger. Design of a non-null interferometer for aspheric wavefronts [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(27): 5143~5151
- 14 John J. Sullivan, John E. Greivenkamp. Design of partial nulls for testing of fast aspheric surfaces [C]. *SPIE*, 2007, **6671**: 66710W
- 15 Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao *et al.*. Partial null lens for general aspheric testing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 323~325
刘东, 杨甬英, 田超等. 用于非球面通用化检测的部分零位透镜[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(2): 323~325
- 16 Wang Bao. Design compensation system of parabolic mirror in Zemax[J]. *Opt. Instruments*, 2006, **28**(1): 39~43
王宝. 用 Zemax 设计非球面补偿系统 [J]. 光学仪器, 2006, **28**(1): 39~43
- 17 Zemax Development Corporation. Zemax Optical Design Program User's Guide[OL]. [2009-06-09]. <http://www.zemax.com>
- 18 Daniel Malacara, Zacarias Malacara. Handbook of Optical Design [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 2004