

文章编号 1004-924X(2010)01-0088-06

Offner 补偿器的结构设计及装调

陈旭^{1,2}, 刘伟奇¹, 康玉思¹, 冯睿¹, 魏仲伦¹, 柳华¹, 苗二龙¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对 90 nm 节点光刻投影镜头中使用的非球面存在高次项,且与理想球面偏离量较大的特点,基于像差补偿理论,设计了一种三片式结构的 Offner 补偿器来实现非球面的高精度检测。采用等量轴向球差补偿非球面各阶系数的方法,主动引入一定量的轴向球差,补偿光线在非球面法线方向的偏离量。结果表明,初级像差和高级像差可很好地平衡,使剩余像差很小;MTF 远远超过衍射极限;系统工作波长为 632.8 nm, F 数为 1.64,均方波差 $RMS < \lambda/1250$;系统轴向像差 $< 0.47 \mu\text{m}$,满足基本干涉成像条件;各方面指标均满足高精度检测补偿器的设计要求。最后,根据现有检测装置的精度对所设计的结果进行了公差分析,给出了较宽松的公差容限。公差分配后,系统综合残余波像差 $< 0.00727\lambda$,满足系统装调精度要求。

关键词:非球面检测;Offner 补偿器;公差分配

中图分类号:TH703 文献标识码:A

Design and tolerance analysis of Offner compensator

CHEN Xu^{1,2}, LIU Wei-qi¹, KANG Yu-si¹,
FENG Rui¹, WEI Zhong-lun¹, LIU Hua^{1,2}, MIAO Er-long¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To test precisely the aspheric surface in a 90 nm nodal point lithography projecting lens, an Offner compensator with three pieces of lenses is presented based on the aberration theory. The equal quantity of spherical error is introduced to compensate all orders of aspheric coefficients and a certain quantity of axial spherical aberration is brought in to compensate the deviation of aspheric surface in a normal direction. The results indicate that primary and high order aberrations are balanced well, therefore the residual aberration is small enough. Furthermore, the design wavelength is 632.8 nm, the MTF exceeds diffraction limit, and the wavefront error(RMS) is less than $\lambda/1250$. As the F -number can achieve 1.64 and the longitudinal aberration is lower than $0.47 \mu\text{m}$, the system can satisfy the basic image formation condition. Finally, a loosen distribution of the tolerance is presented based on the accuracy of measuring apparatus. Analysis results show that the total residual wave aberration of

收稿日期:2009-06-04;修订日期:2009-08-06.

基金项目:十一五重大科技专项基金资助项目

the system is less than 0.00727λ , which satisfies the requirement of assembling accuracy.

Key words: aspheric surface null testing; Offner compensator; tolerance analysis

1 引 言

非球面镜是深紫外投影光刻物镜组的重要组成部分,承担着消除部分高级像差,增大系统数值孔径和减少透镜片数以增大像面照度的重要作用,而其面形质量也是影响整个系统性能的重要因素。本项目组已设计出的深紫外投影光刻物镜包含 9 个数值孔径的基准镜,6 个非球面镜,共需要设计 15 个镜组进行检测,其中所设计的非球面偏离量比较大,大多在亚毫米级。对大偏离量高次非球面的高精度面形检测一直是非球面检测的难题和热点,已有的方法和系统,如:商用干涉仪 zygo 采用波带法检测镜头,精度不能满足光刻投影镜头的检测要求;国内现有的 CGH 刻蚀工艺水平亦达不到检测精度要求。

本文针对深紫外光刻投影镜头中非球面的特点,设计了一种 Offner 型补偿器,实现了非球面面形的高精度零位检验。补偿器采用三片式结构,视场取 0.02° ,口径为 $30\sim 40$ mm。每个镜片的半径中等,便于加工、检测和装调且整个检测系统较易实现^[1-2]。文中给出了公差分析。

2 非球面面形检测

2.1 检测基本光路图

根据项目要求,采用了分波面且不需要参考面的点衍射干涉仪进行光刻透镜的检测。

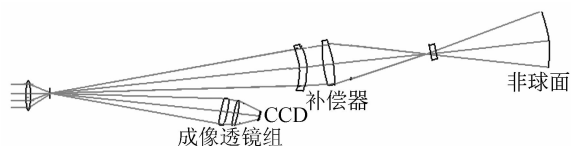


图 1 点衍射干涉仪相干原理图

Fig. 1 Coherent principle of point diffraction interferometer

图 1 为采用针孔获得高质量的参考球面波的点衍射干涉仪相干原理图^[3]。该补偿器置于照

明系统和小孔之后的被测光路中^[4]。经过照明光路聚焦后的光经过小孔衍射后形成了一个良好的衍射波面^[5-6],对于图 1 中波面的上半部分通过补偿器入射到被检非球面上,再由被检面返回再次通过补偿器形成检测光束。设计的补偿器能够产生等量轴向球差补偿非球面各阶系数引入的法线光线偏差,使反射回的检测波接近球面波,与衍射波面的下半部分波面发生干涉,由成像镜组成像到 CCD 上^[7]。参考光和被测光的光程差 $OPD=nd$,其中 d 为参考面和被测面的厚度间隔。如果补偿镜产生了与光轴夹角为 θ 的非平行光。则光程差表达式为

$$OPD=2d(1-\frac{\theta^2}{2})=2d(1-\frac{s^2}{2f^2}), \Delta OPD=2\frac{ds}{f^2}\leq\frac{\lambda}{4}, \quad (1)$$

式(1)中 s 为光源尺寸或由补偿镜横向球差引起的轴向偏差。可见,光程差越大,要求透镜的质量越高,要求基本干涉成像轴向偏差越小。

在光刻投影镜头系统中采用的非球面都是含有等于或高于四阶的非球面系数,属于高次非球面且有很大偏离量,这对检测精度要求很高,检测光学系统的成像质量已远高于传统衍射极限,属于超小像差系统^[8],用传递函数(MTF)和斯特列尔比(Strehl Ratio)已不能满足像质评价要求。国际上主要采用的是系统剩余波像(RMS wavefront error)来评价光刻检测系统中设计透镜的成像性能好坏。

2.2 待检非球面特点

在绝大多数情况下,光学系统均采用旋转对称型的非球面,在子午面内确定其表面形式的关系式如式(2)所示。

$$z=\frac{y^2/r}{1+\sqrt{1-(k+1)(\frac{y}{r})^2}}+A_4y^4+A_6y^6+A_8y^8+A_{10}y^{10}+\dots, \quad (2)$$

式(2)中 k 为二次曲面常数, r 为顶点相切球曲率半径, A_4 、 A_6 、 \dots 为各阶非球面系数。本文所讨论的被检测的非球面的各项基本参数如表 1 所示。

表 1 非球面结构参数

Tab. 1 Structure parameters of aspheric surfaces

顶点半径 R/mm	二次常数 k	有效孔径/ mm	
-800	-3.309 754	206, 774 8	
A_4	A_6	A_8	A_{-10}
$-2.414\ 14 \times 10^{-12}$	$-2.543\ 494 \times 10^{-19}$	-1.12×10^{-27}	-2.34×10^{-28}

根据表中数据得到该非球面的非球面度及非球面度梯度曲线如图 2、3 所示。

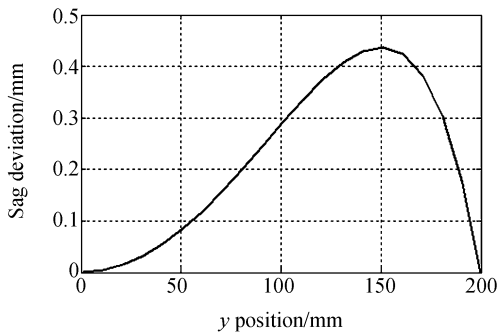


图 2 非球面与最佳比较球偏离量

Fig. 1 Aspheric surface departure to the nearest surface departure

上图为非球面与最佳比较球偏离量,其在口径 150 mm 处偏离量达到最大,接近 0.45 mm。

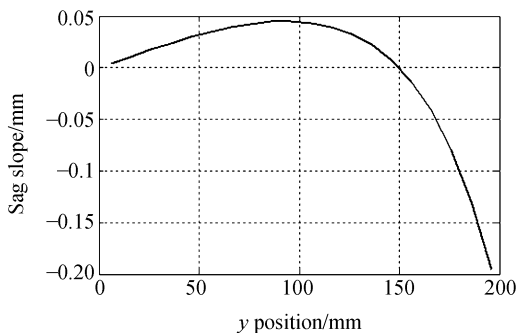


图 3 非球面偏离量切线曲线斜率图

Fig. 3 Slope of aspheric surface's departure

由图 3 可见,非球面陡度较大,对理想球面偏离量大,这会极大地增加面形检测的难度。

3 改进的 Offner 补偿器系统

补偿器成像性能基本要求如下:设计波长为 632.8 nm,MTF 远远超过衍射极限,由于补偿器

亦属于共光路部分,波前差只需保证在基本干涉成像偏差范围内即可。对于本文所讨论的三片式结构的补偿镜,参考面和被测面的厚度间隔较大(即非球面到小孔的距离),约 1 m,故除要保证设计精度的要求外,干涉仪所要求的基本干涉成像的轴向偏差需 $< \frac{\lambda f^2}{8d}$ 。对于焦距为 100 mm 的透镜,需保证经过透镜的轴向偏差 $< 0.791 \mu\text{m}$,对于补偿器使用的几片透镜的焦距均需 $> 100 \text{ mm}$ 。

3.1 三片式结构的补偿镜布局

补偿镜在干涉仪中属于中间成像系统。对非球面而言,其面形误差是以两倍关系引入光路的。此外,点衍射干涉仪光源为单色波长,不存在二级光谱,所以对材料的选择没有太大的约束,只需考虑透镜的折射率而不需要考色散系数;但由于补偿器透镜材料的均匀性对补偿效果的影响很大,故所设计的透镜材料均选择 schott 的均匀性性能良好的 BK7 玻璃。

根据补偿器的原理,采用了等量轴向球差来补偿非球面各阶系数,即通过主动引入一定量的轴向球差来补偿光线在非球面法线方向的偏离量。首先,建立非球面法向偏离量与轴向球差的关系式;再根据轴向球差 W_{040A} 与透镜形状因子的关系式计算出补偿器的第一片透镜的具体形状。以下为补偿器的推导过程,下标为 A 的代表非球面,G 代表补偿器第一片,T 代表第二片转向透镜:

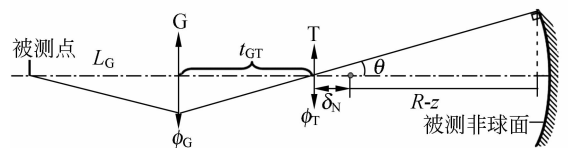


图 4 补偿器结构示意图

Fig. 4 Structural sketch of compensator lenses

非球面引入的轴向球差为:

$$W_{040A} = -\frac{1}{32}y^4\phi_A^3\sigma_A, \quad (3)$$

式(3)中 $\sigma_A = Y_A + k$ 为二次常数, $Y_A = (1+m)/(1-m)$ 为放大率。对被检面而言,检测非球面的整体放大率为 $m = -1, Y_A = 0$ 。故非球面引入的球差为:

$$W_{040A} = -\frac{1}{32}y_A^4\phi_A^3k, \quad (4)$$

至此可计算出非球面产生的表面法线像差为:

$$W_{040N} = \frac{1}{2}W_{040A} = -\frac{1}{64}y_A^4\phi_A^3k, \quad (5)$$

由图 4,可得到以下关系式:

$$\tan \theta = \frac{y}{-(R+\delta_N-Z)}, \quad (6)$$

$$y_G = \tan \theta \cdot t_{GT}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{L_G} + \frac{1}{f_G} = \frac{1}{L_G'}, \quad (8)$$

$$L_G' = t_{GT}, \quad (9)$$

$$m_G = \frac{t_{GT}}{L_G}, \quad (10)$$

$$\phi_G = \frac{1}{t_{GT}} - \frac{1}{L_G}, \quad (11)$$

$$W_{040G} = -\frac{1}{31}y_G^4\phi_G^3\sigma_G = W_{040N}. \quad (12)$$

由此可以求出 σ_G 的值。本设计中采用 BK7 玻璃,其球差结构偏差系数与透镜形状因子有以下关系式

$$\sigma_G = 8.74444X_G^2 - 12.8912X_GY_G + 4.32Y_G^2 + 8.6519, \quad (13)$$

式中放大率为:

$$Y_G = \frac{1+m_G}{1-m_G}. \quad (14)$$

由形状因子与透镜曲率半径的关系,可得下式:

$$C_{G1} = \frac{(X+1)\phi_G}{2(n-1)}, C_{G2} = \frac{(X-1)\phi_G}{2(n-1)}, \quad (15)$$

由此计算出补偿器第一片透镜的曲率半径。

转向透镜满足以下关系式:

$$L_T = t_{GT}, L_T' = R \quad (16)$$

$$\phi_T = \frac{1}{L_T}, -\frac{1}{L_T} \Rightarrow \phi_T = \frac{1}{R} - \frac{1}{t_{GT}},$$

转向透镜的制造方程:

$$\phi_T = (n-1)\left(1 - \frac{1}{R_T}\right), \quad (17)$$

由式(16)、(17)可以计算出平凸场镜第二面的曲率半径 R_T 。将计算初步结果代入设计程序中,光线基本收敛,对于无焦的补偿器系统,理想面近轴距离设为 20,焦距为 100。由于两片式补偿镜波像差 RMS 只能校正到百分之一波长,不能达到千分之一波长的波前差,引入一个有光焦度的透镜进行轴外像差的校正。分离后的两个透镜均为正透镜,最终承担轴向像差的前两片透镜形式为前者是弯月结构,后者是正负结构。所采取的透

镜的的曲率半径均大于 100 mm,光焦度由多个透镜承担,曲率半径大,这样的结构利于球差较好的平衡^[9]。在 ZEMAX 软件中用 SPHA,EFFL,PMAG,RAID 性能误差函数对半径优化,由各像差公式调节变量变化方向,充分优化。最终设计结果表明 MTF 达到并超过衍射极限^[9]。

所采用的透镜材料全部为肖特公司生产的 BK7 材料,补偿镜的 F 数为 1.64,最后一个透镜后表面到非球面表面距离为 832.389 mm。补偿器前部光路为经干涉仪良好会聚的会聚光,视场角很小,假定视场角为 0,0.01,0.02°,下图为三片透镜形式的 Offner 补偿器:

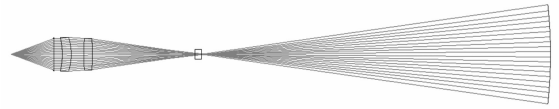


图 5 优化后的 Cooke 结构系统的补偿镜

Fig. 5 Compensator of Cooke structure after optimization

3.2 光学系统像质分析

经过对具体系统的设计,最终使系统的传递函数 MTF 曲线很好地匹配衍射极限曲线,但实际设计的光学系统已远远超过衍射极限,故采用波前图来衡量系统的性能:

图 6 为优化后的波前图。根据波前矩阵 $RMS < 0.0008\lambda$,已达到补偿器波前精度设计要求。这主要通过引入低光焦度透镜来实现高级像差的良好平衡。

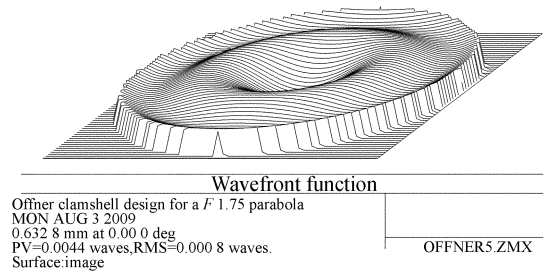


图 6 PV 波前图

Fig. 6 Pupil map of PV

图 7 为补偿器系统的光线偏差曲线,可以看出各阶像差得到非常好地平衡,光线很好地收敛。

图 8 为补偿器系统的轴向像差曲线,可以看出设计的系统轴向像差有效控制在 $0.47 \mu\text{m}$ 。由本文第三部分所述的设计方案中计算的基本干涉

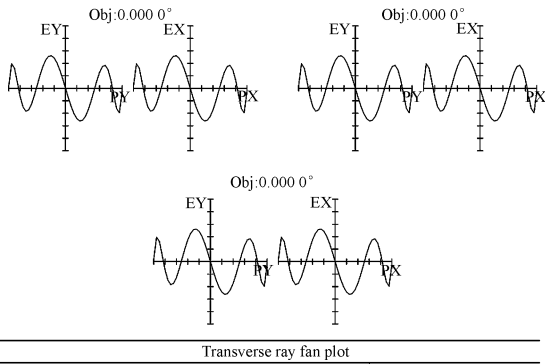


图 7 光线偏差曲线

Fig. 7 Ray aberration curve

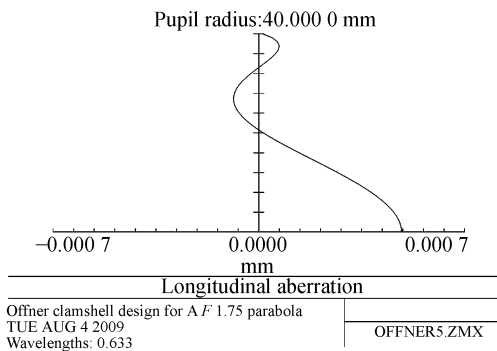


图 8 轴向像差曲线

Fig. 8 Ray aberration curve

成像条件,设计结果轴向偏差需 $<0.791 \mu\text{m}$ 。由图 8 的偏差图可知设计结果满足条件。

3.3 装调公差分析

对于补偿器而言,装调涉及的主要参数包括以下几个方面:第一,由于透镜材料的均匀性对补偿效果的影响很大,故采用折射率精度高的 schott-BK7 玻璃,精度可以达到 5×10^{-7} ,能够满足均匀性要求;第二,补偿器光圈公差 TFRN 装调一般预定公差范围为 $1 \mu\text{m}$,对最终的 RMS 影响大的面半径可给定严格的公差;第三,厚度公差 TTHI 一般优于 $10 \mu\text{m}$ 。据调研,现使用的高精度 lenscan 厚度定位仪可以测量的最高精度为 $\pm 0.15 \mu\text{m}$,这里给定 TTHI 最小量为较宽松的

参考文献:

[1] 伍凡.非球面零检验的 Offner 补偿器设计[J].应用光学,1993,14(3):12-17.

WU F. The design of Offner compensator for as-

pheric testing[J]. *Applied Optics*, 1993, 14(3): 12-17. (in Chinese)

8 μm ;第四,透镜的偏心先给定为 $6''$ 。基于以上所述,对设计结果进行敏感度分析,调整各面所给公差,使其均以工艺上最宽松的条件给出,同时考核最差情况对总公差的影响^[10-11]。

表 2 部分结构参数的公差预定值

Tab. 2 Tolerance preset parameters of part structural parameters

装调误差及引入误差的形式	给定公差—期望值
透镜折射率不均匀性 $2\Delta n_t$	1×10^{-6}
镜面 1 半径/mm	$-116.632 8 \pm 0.015$
镜面 2 半径/mm	$-92.970 405 \pm 0.01$
镜面 3 半径/mm	$686.186 698 + 0.012$
镜面 4 半径/mm	$-340.202 282 - 0.012$
镜面 5 半径/mm	Infinity
镜面 6 半径/mm	$-394.504 642 \pm 0.008$
透镜 1 厚度/mm	± 0.008
透镜 2 厚度/mm	± 0.008
透镜 3 厚度/mm	± 0.004
透镜偏心/ $''$	6
综合残余误差 $\text{Sqrt}(\sum \Delta w_i^2)$	$< 0.007 27$
波长 RMS	

装调过程是:先将其定心安装好,接下来将此元件组作为一整体装配到镜筒内。补偿镜的直径小,可能产生的同心度误差和倾角误差较小。经过分析,系统综合残余波像差小于 $0.007 27\lambda$,满足系统装调精度要求。

4 结 论

本文基于像差补偿理论设计了一种三片式补偿器的结构形式,设计结果可很好地平衡初级像差和高级像差,使剩余像差很小;MTF 远超过衍射极限, F 数达到 1.64,系统工作波长为 632.8 nm ,均方波差 $\text{RMS} < \lambda/1 250$,满足了高精度检测补偿器的设计要求。最后对透镜进行了公差分析和误差性能预算,通过光线追迹的结果,给出了各面的公差和系统综合残余波像差,各项指标均合理。

pheric testing[J]. *Applied Optics*, 1993, 14(3): 12-17. (in Chinese)

[2] 张忠玉,余景池.用补偿器测量非球面的研究[J].光学精密工程,1997,7(1):125-129.

ZHANG ZH Y, YU J CH. Research on aspheric

surface testing with compensator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997,7(1):125-129. (in Chinese)

- [3] SHANNON R R. *The Art and Science of Optical Design* [M]. Cambridge: Cambridge university press, 1997.
- [4] 刘国淦,张学军. 光纤点衍射干涉仪的技术研究[J]. *光学精密工程*, 2001,9(2):142-145.
LIU G X, ZHANG X J. Fiber point diffraction interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2):142-145. (in Chinese)
- [5] MEDECKI H, TEJNIL E, GOLDBERG K A, *et al.*. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Optics Letter*, 1996,21(19):1526-1528
- [6] MARLACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience Publication,1992.
- [7] FISCHER R E. *Optical System Design*[M]. Wash-

ington:SPIE Press,2008.

- [8] GEARY J M. *Introduction to Lens Design* [M]. Virginia: Willmann-Bell, Inc,2002.
- [9] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1988.
YUAN X C. *Optical Design* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,1988. (in Chinese)
- [10] WARREN J S. *Modern Lens Design* [M]. Washington:SPIE Press,2005.
- [11] 陈强,袁家虎,伍凡,等. $\Phi 1.2\text{mF}/1.5$ 抛物面主镜补偿器[J]. *光学精密工程*, 2008,16(8):1384-1388.
CHEN Q, YUAN J H, WU F, *et al.*. Null corrector for $\Phi 1.2\text{m F}/1.5$ paraboloidal mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(8):1384-1388. (in Chinese)

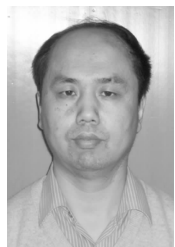
作者简介:



陈旭(1984—),女,内蒙临河人,博士研究生,主要从事光学设计,光学检测等方面的研究。E-mail: chxu2009@126.com



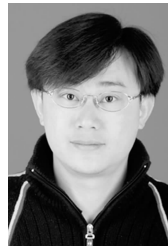
康玉思(1977—),男,黑龙江密山人,工程师,主要从事光学设计及光学检测方面的研究。E-mail: kyshdl@163.com



冯睿(1968—),男,吉林长春人,工程师,主要从事机械结构设计方面的研究。E-mail: musang3017@tom.com



魏忠伦(1977—),男,黑龙江嫩江人,工程师,主要从事图像处理软件的开发和研究。E-mail: wzl-0@126.com



柳华(1977—),男,海南海口人,博士研究生,主要从事光机结构设计方面的研究。E-mail: liuhua0898@sohu.com



苗二龙(1976—),男,甘肃兰州人,工程师,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: miaoxxl@gmail.com

导师简介:



刘伟奇(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事193光刻中用于光学检测的点衍射干涉仪和菲索干涉仪制造方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn