

# 基于迭代方法的补偿器系统设计

李 乐<sup>1,2</sup> 高松涛<sup>1,2</sup> 隋永新<sup>1</sup> 杨怀江<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对 $F$ 数为4的高次非球面,设计了一套基于平行光束照射的高精度补偿器。系统工作波长为632.8 nm,设计残差为 $0.0018\lambda$ 。提出了求解两片检测透镜组成补偿器初始结构的新方法。该方法合理假设补偿器部分结构参数,通过判断补偿器与非球面的Seidel系数之和最小获得未知参数。比较非球面在补偿器第一面位置处的高斯像高与假设的入射平行光高度,通过MATLAB迭代计算得到高度差小于预设误差,进而确定平行光入射高度。重新复算得到最终的初始结构。最后将迭代计算得到的各个面Seidel系数和ZEMAX给出的结果进行比较,证实了该方法的可靠性。

**关键词** 光学设计; 非球面检测; 补偿器; 迭代; Seidel系数

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.072203

## Compensator System Design by Iteration Method

Li Le<sup>1,2</sup> Gao Songtao<sup>1,2</sup> Sui Yongxin<sup>1</sup> Yang Huaijiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** To test a aspheric surface with  $F$ -Number of 4, a highly precise compensation system which is parallel light compensator system is designed. The design wavelength is 632.8 nm and the design residual is  $0.0018\lambda$ . A new method of solving the initial compensator structure which is composed of two lenses is discussed. Partial structure parameters are assumed in reason and the other parameters are calculated when the sum of Seidel coefficients from compensator and aspheric surface is the smallest. With the help of MATLAB, the Gauss image height of aspheric surface at the first surface of the compensator is compared with that of parallel light until the iterative error is less than preinstall. Thus the height of parallel light is fixed. Finally, retry to calculate the final initial compensator structure. Each surface's Seidel coefficient from iterative calculation is compared with that from ZEMAX, and the result verifies the reliability of this method.

**Key words** optical design; aspheric surface test; compensator; iteration; Seidel coefficient

**OCIS codes** 220.1250; 220.1000; 220.4840

## 1 引言

由于非球面比球面具有更多的自由度,在一些光刻物镜和高精度相机的光学设计中,非球面元件被广泛用来简化结构和提高像质<sup>[1]</sup>。但高精度非球面面形检测一直是一个难题,限制着非球面元件的大范围应用。非球面面形的检测,通常采用补偿器和计算全息图<sup>[2-3]</sup>(CGH)两种方法对比检测,确保所测面形精确度。当CGH的相对口径较大或者刻划条纹较密时,现有的加工水平难以达到实际要求<sup>[4-5]</sup>,因此补偿器在非球面面形检测过程中起到非常重要的作用。其设计原理主要是从干涉仪发出的光经过补偿器后到达非球面,补偿器产生的轴向球差补偿非球面在其近轴曲率中心处产生的法线像差。

补偿器有很多种结构类型。如果按照光源类型分类,可分为点光源入射的发散光束补偿器和平行光入

收稿日期: 2014-02-18; 收到修改稿日期: 2014-03-12; 网络出版日期: 2014-06-18

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 李 乐(1988—),女,硕士研究生,主要从事光学非球面面形检测方面的研究。E-mail: lile1226@126.com

导师简介: 杨怀江(1965—),男,博士生导师,研究员,主要从事高精度光学加工、检测技术和信息安全等方面的研究。

E-mail: yongzhu@cqu.edu.cn

射的平行光束补偿器两类<sup>[6-7]</sup>。由于在点光源入射的情况下,需要精确测量光源与补偿镜的距离,这无疑增加了装调难度。为了避免上述问题,现在通常都采用平行光入射的形式。现在最为常用的补偿器类型是Dall型和Offer型。Dall型补偿器一般由1~3片透镜组成,共同来分担非球面的球差和高阶球差,对于中等偏离度的非球面,可以达到比较好的补偿效果。而且通常情况下Dall型补偿器的干涉腔较短,更容易避免环境的干扰。Offer型补偿器一般由两片透镜组成,其中第一片透镜用于补偿非球面的球差,第二透镜为场镜。该结构可用较小口径的补偿器来检测大口径的非球面。

本文针对高次非球面,设计了一种改进型的Dall型平行光束补偿器。在分析平行光束补偿器系统优缺点的基础上,提出了一种基于迭代思想的求解由两片透镜组成的补偿器初始结构的新方法。

## 2 待测非球面

实际应用的非球面一般为偶次非球面,具有旋转对称性,以光轴为 $z$ 轴,非球面顶点为原点坐标,在子午面内其方程如下:

$$z_A = \frac{y^2/R_0}{1 + \sqrt{1 - (1+K)y^2/R_0^2}} + A_4y^4 + A_6y^6 + A_8y^8 + A_{10}y^{10} + \dots, \quad (1)$$

式中 $z_A$ 是非球面表面矢高; $y$ 是非球面上任一点与原点的距离; $K$ 是二次系数; $R_0$ 为非球面顶点球的曲率半径; $A_4$ 、 $A_6$ 、 $A_8$ 等是高次项系数,表示非球面相对于基准二次曲面的偏离。待测非球面为凹面,结构参数如表1所示,其中 $D$ 为通光口径。

表1 待测非球面的结构参数

Table 1 Structure parameters of tested aspheric surface

$R_0$ /mm	$D$ /mm	$K$	$A_4$	$A_6$	$A_8$	$A_{10}$
-550	136.289	0	$-1.70 \times 10^{-8}$	$-6.43 \times 10^{-13}$	$-2.41 \times 10^{-17}$	$2.97 \times 10^{-22}$

根据结构参数作出该待测非球面的非球面度和非球面度梯度曲线<sup>[6]</sup>,分别如图1(a)和图1(b)所示。由图可知,在 $y=50$  mm处,非球面度达到最大值0.135 mm;在 $y=30$  mm处,非球面度梯度达到最大值0.008 mm,整个非球面的检测和加工难度较大。

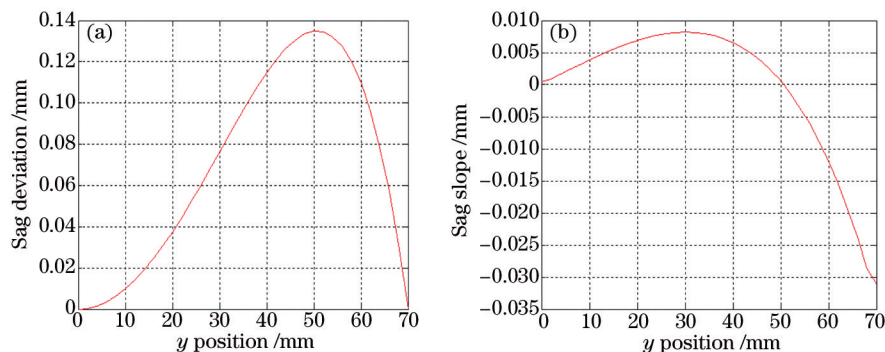


图1 非球面度分析。(a) 非球面度曲线; (b) 非球面度梯度曲线

Fig.1 Analysis of aspheric surface departure. (a) Aspheric surface departure; (b) slope of aspheric surface departure

## 3 平行光束补偿器结构

根据实际要求补偿器的设计指标为:入射波长为632.8 nm,设计精度优于3 nm。根据待测非球面的特点,设计了平行光束补偿器系统。该补偿器均由两片透镜组成,透镜材料选用二氧化硅。像质分析时采用波前图作为评价指标。详细的设计过程如下。

### 3.1 基于迭代方法的补偿器初始结构推导

补偿器结构如图2所示。

由于补偿器的具体结构尚不清楚,因此设定使用的两片透镜形状用虚线表示,补偿器初始结构的推导过程如下:

1) 如图2所示,设定6个结构参数的数值,它们分别是补偿镜1和补偿镜2的间隔 $t_1$ 、补偿镜2和非球面

之间的间隔  $t_2$ 、平行光入射高度  $h_1$ 、补偿器第一面的曲率半径  $R_1$ 、第四面的曲率半径  $R_4$  和两片透镜的厚度  $T$  (设定两片透镜厚度相同);

2) 研究假设平行光入射, 则第一面的物方孔径角  $u_1 = 0$ 。令第二面和第三面的曲率半径 (即  $R_2$  和  $R_3$ ) 在相同的范围内变化, 利用 MATLAB 中的 meshgrid 命令生成一个二维矩阵。

3) 利用近轴光线追迹公式<sup>[8-9]</sup>, 求出补偿器 4 个面每一面上的入射高度  $h$ , 物方孔径角  $u$  和像方孔径角  $u'$ , 得到补偿器各个面的 Seidel 系数; 利用非球面的三级球差计算公式求出非球面上的 Seidel 系数, 当整个补偿器系统的 Seidel 系数和  $\sum S_i$  取得最小值时, 找出对应的唯一一对  $R_2$ 、 $R_3$  值。

4) 利用找到的  $R_2$ 、 $R_3$  和给定的  $R_1$ 、 $R_4$ , 将非球面作为物, 已知其物高 (即非球面的通光口径), 利用高斯公式使其对两块补偿透镜成像, 求出在补偿镜第一面的位置处像高。若非球面像高的一半与  $h_1$  之差小于设定的误差值  $\varepsilon$ , 则认为  $h_1$  是合理的; 否则, 将像高的一半作为  $h_1$ , 重新计算  $R_2$ 、 $R_3$ , 直到找到满足误差值的  $h_1$  为止。

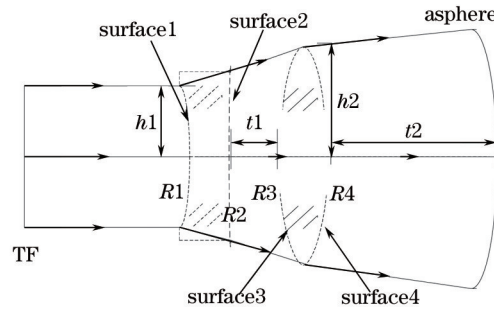


图2 补偿器的示意图

Fig.2 Diagrammatic sketch of compensator

设定参数值的选取原则为: 元件间隔的选择既要满足实验台的实际长度, 又要能够保证高精度测量。在保证各镜安全距离的同时, 补偿器结构尽量紧凑。入射光束的宽度根据实际干涉仪的出射口径, 且小于口径的一半。各曲率半径选择在 70~700 mm 范围内, 既方便加工检测, 又利于较好的平衡球差<sup>[10]</sup>。透镜厚度值的选择是经验值。综上分析, 最终给定的值为:  $t_1 = 20$  mm,  $t_2 = 50$  mm,  $h_1 = 50$  mm,  $R_1 = -100$  mm,  $R_4 = -100$  mm,  $R_2$  和  $R_3$  的变化范围均为  $-700 \sim 700$  mm,  $T = 10$  mm。

对系统各个面依次利用近轴光线追迹公式(2)式、(3)式和 Seidel 系数表达式(4)式, 可获得第一至第四面的 Seidel 系数, 即  $S_{i1}$ 、 $S_{i2}$ 、 $S_{i3}$  和  $S_{i4}$ 。

$$n'u' = nu - \frac{h(n' - n)}{R}, \quad (2)$$

$$h_{j+1} = h_j + u'_j t_j, \quad (3)$$

$$S_1 = -n^2 (hc + u)^2 h \Delta \left( \frac{u}{n} \right). \quad (4)$$

首先推导待测非球面的 Seidel 系数  $S_{iA}$ <sup>[6]</sup>。待测非球面与其顶点球的矢高差  $\Delta z$  为

$$\Delta z = z_A - z_S = \frac{1}{8} K \left( \frac{y^4}{R_0^3} \right) + \frac{1}{16} [(1 + K)^2 - 1] \left( \frac{y^6}{R_0^5} \right) + A_4 y^4 + A_6 y^6 + \dots \quad (5)$$

二者之间的波像差  $\Delta W = \Delta n \times \Delta z$ 。由于初级像差只需取到  $y^4$ , 且  $W = S_i/8$ , 所以 Seidel 系数差  $\Delta S_1$  为:

$$\Delta S_1 = 8 \Delta W = (\Delta n) \left( \frac{K}{R_0^3} + 8A_4 \right) y^4. \quad (6)$$

用  $S_{iS}$  表示待测非球面顶点球的 Seidel 系数, 则有  $S_{iA} = S_{iS} + \Delta S_1$ 。因为顶点球是反射球,  $u' = -u$ 、 $n' = -n$ , 由(4)式得  $S_{iS} = 0$ , 则  $S_{iA}$  为

$$S_{iA} = S_{iS} + \Delta S_1 = (\Delta n) \left( \frac{K}{R_0^3} + 8A_4 \right) y^4. \quad (7)$$

由于补偿系统为双通光路, 因此非球面的球差是以 2 倍的关系引入到补偿系统中的, 则系统的 Seidel 系数和  $\sum S_i$  为

$$\sum S_i = S_{i1} + S_{i2} + S_{i3} + S_{i4} + \frac{1}{2} S_{iA}. \quad (8)$$

利用 MATLAB 软件编程进行上述计算。程序中  $R2$  和  $R3$  的变化步长均设为 3 mm,  $h1$  的迭代误差值  $\varepsilon$  设为 0.1 mm。经 48 次迭代后(用时为 1.606 s)得到:  $h1 = 51.3172$  mm,  $R2 = 305$  mm,  $R3 = -295$  mm。将上述值作为补偿器的初始结构代入 ZEMAX 中,为研究方便将光路倒置,设置孔径类型为 Float By Stop Size,设置光源的 Glass 的 Solve Type 为 Model,并输入 Index Nd 为  $1 \times 10^{-8}$ 。如果在像面处加一近轴面,无像差的平行光经此近轴面后应会聚成一个光点。而该初始结构中的平行光,ZEMAX 显示出其会聚后形成的是一个点斑,且半径值为 0.216 mm。因该点斑的半径值很小,可见经过补偿器后形成的平行光较为理想,该初始结构较为合理。图 3 为 ZEMAX 呈现的补偿器初始结构输出。

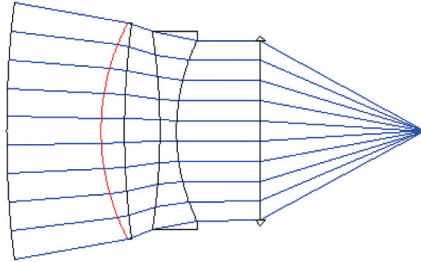


图 3 ZEMAX 补偿器初始结构输出

Fig.3 Initial compensator structure layout from ZEMAX

表 2 为 MATLAB 计算补偿器各面的 Seidel 系数与 ZEMAX 呈现的 Seidel 系数的对比。

表 2 MATLAB 和 ZEMAX 的 Seidel 系数对比

Table 2 Seidel coefficients comparison from MATLAB and ZEMAX

	$S_{i1}$	$S_{i2}$	$S_{i3}$	$S_{i4}$	$0.5 S_{iA}$	$\sum S_i$
MATLAB	-1.494738	-2.578267	0.095206	1.055413	2.932663	0.010278
ZEMAX	-1.456070	-2.575777	0.096473	1.032070	2.932663	0.029360
$\Delta S_i$	-0.038668	-0.002490	-0.001267	0.023343	0	-0.019082

以 ZEMAX 显示结果为基准,  $\Delta S_i$  为二者之差。分析表中数据可知,补偿器第一面的误差较大,为  $(-0.038668) \div (-1.456070) = 2.66\%$ 。MATLAB 迭代方法计算所得的初始结构与 ZEMAX 得到的数据基本一致,证明了该迭代方法的可靠性。

需要注意的是,在计算过程中最开始设定值的确定和选取会对计算出的  $R2$ 、 $R3$  有影响,且  $\sum S_i$  会出现虚数。因此在寻找  $\sum S_i$  的最小值时,需要判断该最小值是否为实数,只有在实数的情况下,找到的  $R2$  和  $R3$  才是有意义的。并且该迭代方法只适用于两片透镜组成的补偿器,如果增加或减少透镜片数,设定值的数目也相应发生变化,迭代的收敛结果将会受到影响。

### 3.2 优化后的结构

将上述初始结构经 Default Merit Function 优化后带入双通结构。Ray Aiming 选用 Real,再经 Default Merit Function 进行优化,并适当微调透镜的厚度。优化后补偿器的具体参数见表 3。

表 3 平行光补偿器参数

Table 3 Parameters of parallel light compensation system

Type	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	K
Parallel light	Infinity	Infinity		
Surface 1	-97.659	10	SILICA	
Surface 2	314.222	20.859		
Surface 3	-341.037	15.029	SILICA	
Surface 4	-110	52.626		
Asphere	-550		Mirror	0

图 4 给出了最终优化后平行光束入射的补偿器系统。图 4(a)为平行光束补偿器结构示意图,图 4(b)为该补偿系统的波前图。从图中可以看出,获得了 Wavefront Map 中显示的  $x_{rms} = 0.0035 \lambda$  的比较理想的补偿

器结构。

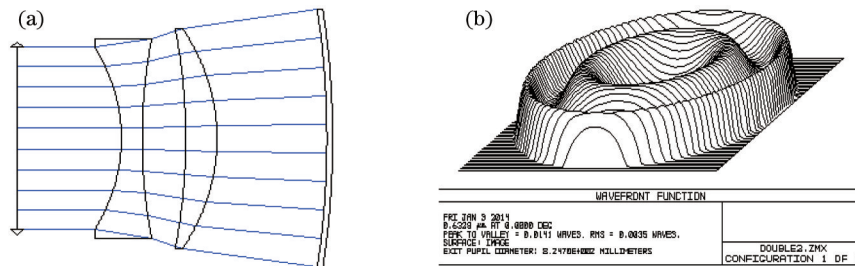


图4 平行光束补偿器系统。(a) 补偿器结构; (b) 波前图

Fig.4 Parallel light compensation system. (a) Structure of compensator; (b) wavefront map

在补偿器方法中,关键的部分是补偿器的设计、加工和装调对准<sup>[11]</sup>。分析表4数据可知,补偿器半径值的大小在97.659~341.037 mm范围内,易于加工。并且第一面为明显的凹面,也易于稳固安装于补偿器机械结构的镜框内<sup>[12]</sup>,直接卡在卡槽上即可。否则,若第一面是凸面,则需要另行设计固定装置。

## 4 结 论

设计了非球面检测的平行光束补偿器补偿系统,系统波长为632.8 nm,设计残差为0.0035  $\lambda$ 。提出了求解两片透镜组成的补偿器初始结构的新方法。通过合理设定补偿器的一些结构参数,通过判断补偿器与非球面的Seidel系数之和最小获得未知参数。比较非球面在补偿器第一面位置处的高斯像高与假设的入射平行光高度,通过MATLAB迭代计算得到高度差小于预设误差,进而确定平行光入射高度。重新复算得到最终的初始结构。最后将迭代计算得到的各个面Seidel系数和ZEMAX给出的结果进行比较,证实了该方法的可靠性。在非球面应用越来越广泛的今天,该初始结构求解方法对以后设计更大偏离度非球面的补偿系统具有参考意义。

## 参 考 文 献

- Zhang Jian, Dai Lei, Wang Fei, *et al.*. Restraint of mid-spatial-frequency error aspheric surface by small-tool adaptive polishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0822002.  
张 健,代 雷,王 飞,等. 小磨头自适应抛光抑制高精度非球面中频误差[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0822002.
- Li Junchang, Gui Jinbin, Lou Yuli, *et al.*. Study of creation algorithm of Computer-Generated Hologram didduse reflection 3D object[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020903.  
李俊昌,桂进斌,楼宇丽,等. 漫反射三维物体计算全息图算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020903.
- Feng Jie, Deng Chao, Xing Tingwen. Design and error analysis of the Computer-Generated Hologram used for concave aspheric surface testing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 110902.  
冯 婕,邓 超,邢廷文. 用于凹非球面的计算全息设计及其误差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 110902.
- Zeng Xuefeng, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer-generated hologram[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1109003.  
曾雪峰,闫 锋,薛栋林,等. 计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1109003.
- Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huaijiang. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612003.  
高松涛,隋永新,杨怀江. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0612003.
- Chen Xu, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design and tolerance analysis of Offner compensator[J]. *Optics Precision Engineering*, 2010, 18(1): 88-93.  
陈 旭,刘伟奇,康玉思,等. Offner补偿器的结构设计与装调[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 88-93.
- Srahl H P. Aspheric surface testing techniques[C]. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, 24: 86-102.
- Geary J M. Introduction to Lens Design with Practical ZEMAX Examples[M]. Richmond: Willmann-Bell, 2002. 399-340.
- Tao Chun, Pan Junhua, Hu Mingyong. A new method of convex aspheric surface compensation tests[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1): 123-126.  
陶 春,潘君骅,胡明勇. 一种凸非球面镜补偿检验的新方法[J]. *光学技术*, 2009, 35(1): 123-126.
- Yuan Xucang. *Optical Design*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988.

- 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- 11 Hidehiro Kaneda, Takao Nakagawa, Yoshio Tange, *et al.*. Optical testing activities for the SPICA telescope[C]. SPIE, 2010, 7731: 77310V.
- 12 You Rui, Wang Yifan, Wang Wenge, *et al.*. Structural design and adjustment for compensational device of aspherical[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2008, 31(4): 71-73.
- 尤 锐, 王一凡, 王文革, 等. 非球面补偿器的结构设计与装调分析[J]. 长春理工大学学报, 2008, 31(4):71-73.