

材料折射率非均匀性对极小像差光学系统像质的影响

杨添星^{1,2} 黄 玮¹ 尚红波¹ 许伟才¹ 赵菲菲^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了分析光学材料折射率非均匀性对极小像差光学系统成像质量的影响, 从而指导系统的进一步优化设计, 提出一种三维仿真和光线追迹方法。该方法是在 Zemax 中通过自定义的程序, 构建材料折射率均匀性的三维分布, 设置光线追迹的步长, 并控制整个光线追迹的过程, 以提高仿真分析的精度。利用所提出的三维仿真和光线追迹方法, 对一个数值孔径为 0.7、工作波长为 632.8 nm、波像差均方根(RMS)值为 1.5 nm 的小像差光学系统进行了仿真分析。结果表明, 相比于传统的二维处理方法, 提出的方法仿真精度有较大提高。

关键词 光学设计; 极小像差光学系统; 非均匀性; Zernike 多项式; 光线追迹

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.112202

Effect of Material Inhomogeneity on the Image Quality of Optical Systems with Extremely Small Aberration

Yang Tianxing^{1,2} Huang Wei¹ Shang Hongbo¹ Xu Weicai¹ Zhao Feifei^{1,2}

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to analyze the effect of optical material inhomogeneity on the image quality of optical systems with extremely small aberration, and guide the optimization of the optical systems, we propose a three-dimensional simulation and ray-tracing method. This method works in Zemax, using a self-defined program to build the three-dimension distribution of the material inhomogeneity. By setting the setp of the ray-tracing process and controlling the ray-tracing process, the simulation precision is enhanced. As an example, We study an optical system with numerical aperture (NA) of 0.7, wavelength $\lambda=632.8$ nm, wavefront aberration root-mean-square (RMS) value of 1.5 nm. The simulation result shows that the simulation precision of this three-dimensional simulation and ray-tracing method is obviously better than other two-dimensional methods.

Key words optical design; extremely small aberration optical system; inhomogeneity; Zernike polynomial; ray tracing

OCIS codes 220.3620; 220.3740; 220.4830

1 引言

极小像差光学系统是光学研究领域一个很重要的研究方向。一般而言, 对于一个已经经过初步设计和优化的极小像差光学系统, 各项像差都已经得到了很好的校正, 影响其成像质量的主要因素就是应力双折射效应、材料的折射率非均匀性等^[1]。根据光学系统结构和所用镜片材料的不同, 折射率非均匀性对系统均方根(RMS)值的影响可以从几纳米到几十纳米不等^[2]。对一般的光学系统而言, 这样的像差或许是可以容忍

收稿日期: 2013-06-18; 收到修改稿日期: 2013-06-19; 网络出版日期: 2013-09-10

基金项目: 国家重大专项基金(2009ZX02205)

作者简介: 杨添星(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: ytx123147@163.com

导师简介: 黄 玮(1965—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: huangw@ciopm.ac.cn

的,但是对高数值孔径(NA)投影光刻物镜等极小像差光学系统而言,这可能导致整个系统无法实现预期的功能,甚至无法正常工作^[3]。因此,在进行光学设计时,就必须对材料折射率非均匀性进行建模和仿真分析,从而指导系统的进一步优化设计。传统的分析折射率非均匀性的方法,主要是在镜片表面附加波像差等二维(2D)处理方法^[4]。这些方法的主要缺陷是只能对非均匀性进行二维的描述,而不能将其三维(3D)地体现在整个光线追迹中,导致其仿真精度不高。

目前,国内在这方面的研究报道很少^[5]。由于光学材料毛坯和实际光学元件的非均匀性分布是三维的,而且不同材料的折射率非均匀性分布是无规则的^[6],因此,对于高数值孔径投影光刻物镜、超高分辨显微镜等极小像差、超高精密的光学系统而言,二维的处理方法往往无法满足精度要求。本文提出一种三维仿真和光线追迹方法,在 Zemax 中通过自定义的宏程序,构建镜片材料折射率的三维分布,设置光线追迹的步长,并控制整个光线追迹的过程,从而完成对材料折射率非均匀性的三维建模和仿真分析。这可为系统的进一步优化设计起到指导性的作用。

2 三维仿真和光线追迹方法

2.1 传统二维分析方法

传统的二维分析方法主要是附加波像差法。这种方法的基本思想是将镜片材料的干涉信息直接附加到系统波前像差中。

在 Zemax 中,将干涉得到的镜片干涉像差转换成以 Fringe Zernike 多项式描述的波像差形式,然后再通过将镜面设置为 Fringe Zernike Sag 型,再将对应的各项 Zernike 系数输入,即可实现对非均匀性的二维仿真。

这种处理方法在对精度要求不高的情况下,一定程度上是能够符合应用要求的。但是,在用干涉仪对毛坯进行干涉测量时,光线都是垂直入射到平板毛坯表面的,而实际光学系统中的镜片在工作时,表面被加工成各种形状,镜片各处厚度与毛坯厚度不相同,而且入射光线也不都垂直于镜面。附加波像差法直接将毛坯干涉像差引入光学系统中,没有充分考虑光线追迹过程中镜片厚度变化和斜入射光线的影响。因此,这种近似处理方法的仿真精度不高。

2.2 三维仿真和光线追迹方法

针对传统二维仿真分析方法的缺陷,本文提出了三维仿真和光线追迹方法,在传统的二维(镜面 XY 面)仿真方法的基础上,通过增加对镜片厚度方向(Z 向)的建模和仿真分析,构建镜片折射率均匀性的三维分布并进行光线追迹,从而提高仿真精度。

三维仿真和光线追迹方法的主要思想是根据精度要求选择光线追迹步长,将每一个镜片分割为若干个步长厚度的紧密连接的超薄镜片,然后再对每一个超薄镜片完成光线追迹。在对每一个超薄镜片进行光线追迹的过程中,都重新计算各点的折射率和折射率梯度。这样做的目的是将材料折射率的非均匀性在每一个步长的追迹计算中都体现出来,同时,充分考虑镜片各处厚度变化和斜入射光线对系统像差的影响,从而实现三维仿真。通过自定义的宏程序用 Fringe Zernike 多项式的第 1~36 项来构建材料的折射率非均匀性,并通过设置光线追迹步长,控制仿真精度。

2.2.1 三维仿真和光线追迹方法的数学模型

材料的折射率非均匀性信息,最主要、最直接的来源就是干涉图^[2,7]。通过干涉仪的测量结果,再进行一定的数据处理,就可以得到用 Zernike 多项式表示的折射率非均匀性。

以镜片 1 为例,图 1 给出了镜片材料在 XZ 面上和 XY 面上的干涉图。从图中可以看出,材料折射率在光轴(Z 轴)方向的非均匀性远小于垂轴方向(XY 面)上的非均匀性,因此可以近似认为材料折射率在 Z 轴方向是均匀的。采用 Fringe Zernike 多项式的第 1~36 项来描述对镜片材料的折射率非均匀性干涉得到的像差,即

$$\Delta W(x, y) = \sum_{i=0}^{36} A_i Z_i(x, y), \quad (1)$$

式中 $\Delta W(x, y)$ 为干涉仪测量得到的镜片上坐标为 (x, y, z) 的点的折射率非均匀性所导致的像差, $Z_i(x, y)$ 为第 i 项 Fringe Zernike 多项式, A_i 为对应项的 Fringe Zernike 系数,可由干涉仪输出的数据处理后得到。

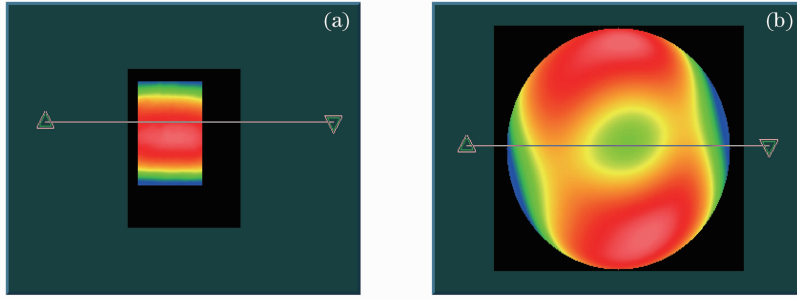


图1 镜片1毛坯在(a) XZ面干涉图和(b) XY面上的干涉图

Fig. 1 Interferograms of lens 1 blank in (a) XZ plane and (b) XY plane

正如镜片1毛坯的干涉结果所示,一般光学材料在光轴方向上的非均匀性远小于垂轴方向的非均匀性,因此可以近似认为光轴方向上材料是均匀的,那么有

$$\Delta W(x, y) = \Delta n(x, y)d, \quad (2)$$

式中 d 为镜片厚度, $\Delta n(x, y)$ 为镜片上坐标为 (x, y, z) 的点由于折射率非均匀而导致的折射率差

$$\Delta n(x, y) = n(x, y) - n_0, \quad (3)$$

n_0 是理想折射率值。

联合(1)~(3)式,可以得到镜片上各点折射率为

$$n(x, y) = n_0 + \Delta n(x, y) = n_0 + \sum_{i=0}^{36} A_i Z_i(x, y)/d. \quad (4)$$

折射率梯度可以表示为

$$\frac{\partial n(x, y)}{\partial x} = \sum_{i=0}^{36} \frac{A_i}{d} \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial n(x, y)}{\partial y} = \sum_{i=0}^{36} \frac{A_i}{d} \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial y}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial n(x, y)}{\partial z} \equiv 0. \quad (7)$$

根据干涉仪的测量结果处理得到 Fringe Zernike 各项系数,就可以描述材料的折射率均匀性。由(4)~(7)式,将各项 Fringe Zernike 系数输入,就可以计算得到每一步光线追迹过程中该点的折射率和折射率梯度。最后,利用折射率和折射率梯度数据构建材料折射率模型,从而进行光线追迹,就能够在每一个步长的光线追迹中都将材料折射率的均匀性信息体现出来,从而实现镜片材料非均匀性的三维仿真。

2.2.2 光线追迹步长的选择

本文提出的三维仿真和光线追迹方法,通过自定义的宏程序,允许用户自己设置每一个镜片上光线追迹的步长,以便根据实际应用的需要选择追迹精度。对每一个镜片,用户都可以根据自己的需要,在系统参数输入界面上,定义该镜片上光线追迹的步长,从而保证对折射率均匀性三维仿真的精度。用户输入追迹步长 Δt ,就相当于把该镜片分割成为若干个厚度为 Δt 的紧密相接的薄镜片,由(4)~(7)式对各薄镜片逐次进行追迹计算,就可以得到镜片上各点的折射率和折射率梯度。

理论上,追迹步长设置得越小,光线追迹的精度就越高。但是,对某一选定的光学系统和既定的材料折射率非均匀性而言,当步长小到一定值以后,步长的改变对仿真结果就几乎没有影响。再一味降低追迹步长不仅没有积极意义,反而会大大增加仿真计算的时间,甚至会导致软件无法运行。因此,用户在输入的时候,需要根据实际应用的需要和试验经验,选择合适的步长。针对本文的研究对象,将各镜片的追迹步长均设置为: $\Delta t = 1 \text{ mm}$ 。

2.2.3 斜入射光线和镜片厚度的影响

就传统的附加波像差法等均匀性二维分析方法而言,其主要的缺陷就是没有考虑非均匀性对斜入射光线像差的影响不同于对垂直入射光线像差的影响,以及实际镜片各点的厚度与毛坯厚度不同。

在三维仿真和光线追迹方法中,由于将镜片划分成若干个超薄镜片进行光线追迹,当光线由一个薄镜片

传播到下一个紧密连接的薄镜片表面时,无论光线折射到什么位置,都由(5)、(6)式重新计算该点的折射率和折射率梯度,因而保证了非均匀性对每个视场、各角度的斜入射光线像差影响的仿真精度。

由(2)式,在对毛坯进行均匀性分析时,将非均匀性导致的像差近似处理为折射率非均匀 $\Delta n(x,y)$ 和毛坯厚度 d 的乘积;而在对实际镜片非均匀性进行仿真计算时,对每一个超薄镜片,都是将均匀性导致的像差影响近似处理为 $\Delta n(x,y)$ 和 Δt 的乘积。因此,在镜片厚度和毛坯厚度不同方面,与传统的附加波像差法等二维分析方法仿真失真相比,三维仿真和光线追迹方法的仿真精度提高了 $d/\Delta t$ 倍。

3 小像差光学系统的仿真及其结果分析

以一个数值孔径 $NA=0.7$ 、工作波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$ 的小像差光学系统为例。如图 2 所示,该系统由 9 个镜片组成,总长 760.4 mm,入瞳直径 96.6 mm,出瞳直径 450.7 mm,最大镜片厚度 50 mm,最小厚度 18 mm。除第 3 表面为偶次非球面外,其余表面均为标准球面。简便处理,不考虑非球面镜(第 2 镜片)的非均匀性。选择中心视场为研究视场。

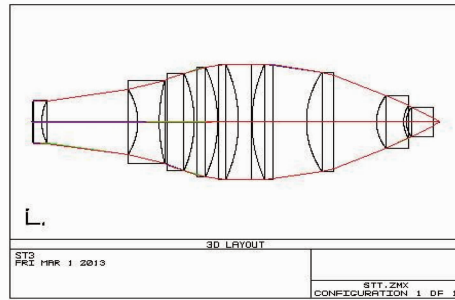


图 2 $NA=0.7$ 光学系统

Fig. 2 Optical system with $NA=0.7$

3.1 不考虑材料非均匀性的理想情况

波像差 RMS 值是衡量光学系统成像质量好坏的一个重要指标,它表征了系统波前偏离理想球面波的程度。图 3 给出了系统在理想情况下的波前图和干涉图。从图中可以看出,此系统还有少量的剩余球差。其波前像差峰谷(PV)值为 0.0178λ ,RMS 值为 0.0028λ 。

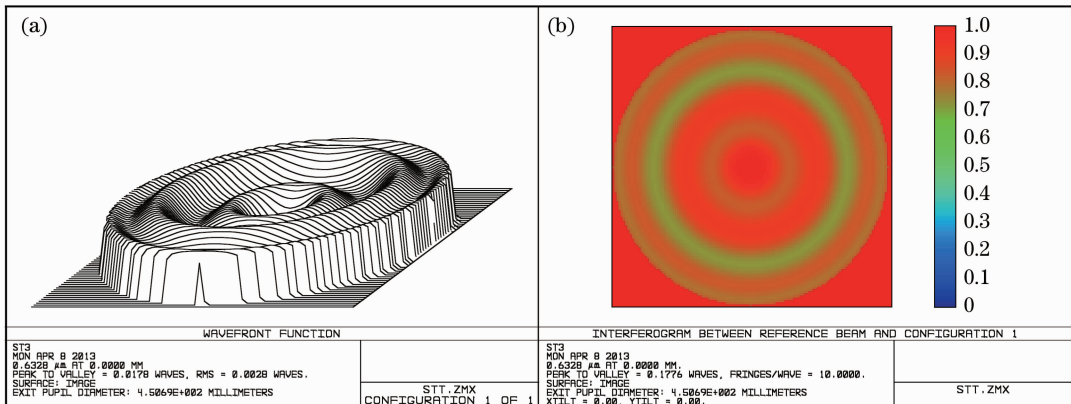


图 3 理想情况下的(a)波前图和(b)干涉图

Fig. 3 (a) Wavefront map and (b) interferogram for perfect condition

3.2 三维仿真和光线追迹方法和附加波像差法仿真结果对比分析

在 Zemax 中,将材料的折射率非均匀性分别用附加波像差法和三维仿真和光线追迹方法进行仿真,并将结果进行对比分析。

用干涉仪对各镜片毛坯平板进行干涉,得到各毛坯的干涉像差 RMS 值分别如表 1 所示。

表1 各毛坯的 RMS 值
Table 1 RMS of the blanks

Number	1	3	4	5	6	7	8	9
RMS of interferogram / λ	0.013	0.007	0.009	0.011	0.013	0.010	0.007	0.010

3.2.1 附加波像差法仿真结果

在 Zemax 中,将各镜片表面设置为 Fringe Zernike Sag 型,依次将对应的各项 Zernike 系数输入,仿真得到图 4 所示波前图和干涉图。仿真结果显示,在将材料的折射率均匀性用 Zernike 多项式表示,并将其相应系数输入用来描述镜片表面后,系统波前像差变为 PV 值为 0.1375λ ,RMS 值为 0.0227λ 。

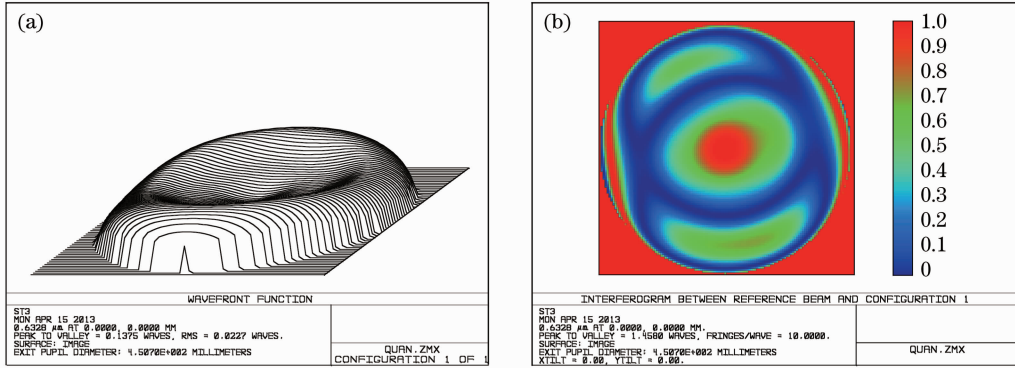


图 4 附加波像差法仿真结果。(a) 波前图;(b) 干涉图

Fig.4 Simulation result after adding wavefront aberration. (a) Wavefront map; (b) interferogram

3.2.2 三维仿真和光线追迹方法仿真结果

如图 5 所示为在 Zemax 中用三维仿真和光线追迹方法仿真得到的波前图和干涉图。仿真结果显示,系统波像差变为 PV 值为 0.1364λ ,RMS 值为 0.0136λ 。

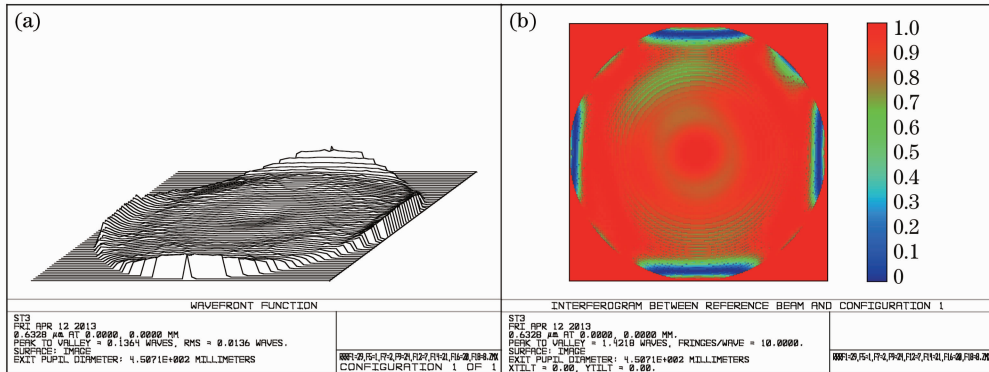


图 5 三维光追法仿真结果。(a) 波前图;(b) 干涉图

Fig.5 Result of 3D simulation. (a) Wavefront map; (b) interferogram

3.2.3 结果分析

将以上用三种不同的折射率非均匀性处理方法得到的仿真结果如表 2 所列。

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation result

Method	Ideal simulation	2D simulation	3D simulation
PV / λ	0.0178	0.1375	0.1364
RMS / λ	0.0028	0.0227	0.0136

结果显示,三维仿真和光线追迹方法仿真得到的波像差 RMS 值明显小于附加波像差法得到的 RMS 值。这是由于在附加波像差法中,将镜片毛坯的干涉像差直接附加到系统波前中,而没有考虑将毛坯加工成镜片后镜片厚度的变化;此外,也没有考虑到在实际的光学系统中,光线斜入射传播和垂直入射传播时,非均

匀性对波前像差的影响是不同的。而在三维仿真和光线追迹方法中,通过设置光线追迹的步长,将每个镜片划分为若干个超薄镜片分别进行光线追迹,充分考虑了镜片厚度和光线斜入射对系统波前的影响。由于实际镜片各处的厚度小于加工前毛坯的厚度,因此,镜片材料折射率非均匀性对系统波前像差 RMS 值的实际影响,小于通过附加波像差法仿真得到的非均匀性对系统 RMS 值的影响。

相比于附加波像差法,三维仿真和光线追迹方法的仿真精度(以 RMS 值计)提高了

$$(|0.0136 - 0.0227|)/0.0227 \approx 40.1\%$$

4 结 论

针对材料折射率非均匀性对极小像差光学系统像质影响的问题,提出了一种三维仿真和光线追迹方法。该方法通过自定义的宏程序,以 Zernike 36 项多项式构建材料的折射率非均匀性,同时,允许用户自定义光线追迹步长,在每一个步长的光线追迹过程中,都重新计算各点折射率和折射率梯度,实现了对材料折射率非均匀性的三维仿真。通过在相同软件中、两种仿真方法的对比分析结果表明,用三维仿真和光线追迹方法分析得到的仿真结果,相比于传统的二维处理方法,其仿真精度明显提高。该方法对于分析材料折射率非均匀性对极小像差显微镜、高数值孔径投影光刻物镜等极小像差光学系统的成像质量影响有十分重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Xu Weicai. Optical Design and Imaging Performance Compensation for the Lithographic Lens[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2011. 15—35.
许伟才. 投影光刻物镜的光学设计与像质补偿[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011. 15—35.
- 2 Julie L Ladison, Joseph F Ellison, Douglas C Allan, *et al.*. Achieving low wavefront specifications for DUV lithography: impact of residual stress in HPFS[®] fused silica[C]. SPIE, 2001, 4346: 1416—1423.
- 3 Richard N Pfisterer. Design of an objective for night vision application using axial GRIN materials[C]. SPIE, 1995, 2537: 270—278.
- 4 Harry J Levinson. Principles of Lithography (Third Edition)[M]. Bellingham: SPIE Press, 2010. 16—20.
- 5 Xu Weicai, Huang Wei, Yang Wang. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1122003.
许伟才, 黄 玮, 杨 旺. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1122003.
- 6 Anurag Sharma, D Vizia Kumar, A K Ghatak. Tracing rays through graded-index media: a new method[J]. Appl Opt, 1982, 21(6): 984—987.
- 7 G Hunter, L Sutton. Measurement of homogeneity of optical materials[C]. OSA, 1990 Technical Digest, 1990. 11.