

doi: 10.3788/gzxb20134204.0451

高准确度光学系统中材料非均匀性对成像质量的影响

刘洋舟¹, 李晓彤¹, 岑兆丰¹, 许伟才², 尚红波², 阮望超¹

(1 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2 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, 长春 130033)

摘要:利用 Zernike 多项式对用 Zygo 干涉仪测得的离散材料折射率数据进行了拟合, 再使用光线光学的方法评价了系统的成像质量. 由于材料折射率分布的无规则性, 在对包含非均匀介质的实际光学系统的模拟仿真和优化时, 需要考虑选取材料不同部位加工成的透镜会对系统成像质量有不同的影响, 而且加工好的透镜在装配过程中, 绕着光轴旋转不同的角度同样会影响成像质量. 通过计算机模拟的方法预先选取材料的最佳部位以及找到最好的装配位置, 从而提高了光学系统的性能.

关键词:光学设计; 非均匀; 光线追迹; 成像质量

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)04-0451-5

Influence of Inhomogeneity of Optical Glass Used in High-precision Optical System on Imaging Quality

LIU Yang-zhou¹, LI Xiao-tong¹, CEN Zhao-feng¹, XU Wei-cai²,
SHANG Hong-bo², RUAN Wang-chao¹

(1 State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Inhomogeneity of optical glass used in high-precision optical system influences the imaging quality of the system. This kind of inhomogeneity can be expressed by Zernike polynomial expression with the discrete refractive-index data measured by ZYGO interferometer, in order to use the Fourth Order Runge-Kutta method for ray tracing. Due to the randomness of the material's refractive-index distribution, using different part of one piece of semi-finished optical glass to manufacture lenses with same parameter and rotating manufactured lens different degrees around the optical axis would influence the optical system's performance.

Key words: Optical design; Inhomogeneity; Ray tracing; Imaging quality

0 引言

光学玻璃在加工制造过程中, 因为加工工艺等因素, 使得玻璃折射率会有一定的非均匀性, 而这种非均匀性在现有的生产加工条件下是无法避免的.

通过 Schott 公司的技术文档了解到目前能够制造出的均匀性较好的光学玻璃的最大折射率偏差不超过 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$, 这样的准确度对于大多数的光学系统都可以看成是均匀的, 但对于高准确度光学系统, 比如光刻镜头、波面干涉仪使用的标准镜等, 这种程

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 10875105, 60977010)、航空科学基金 (No. 20090176001) 和应用光学国家重点实验室开放基金 (No. Y1Q03FQK09) 资助

第一作者: 刘洋舟 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计. Email: liuyz23@gmail.com

导师 (通讯作者): 岑兆丰 (1957-), 男, 教授, 硕士, 主要研究方向为光学设计. Email: cenzf@zju.edu.cn

收稿日期: 2012-07-19; 录用日期: 2012-09-29

度的折射率偏差则会对成像质量产生一定的影响. 所以在遇到类似成像质量对均匀性要求很高的问题时, 需要对其非均匀性进行深入的研究, 从而找到合适的方法来提高光学系统的性能.

近些年研究无规则非均匀介质主要针对大气等流场环境, 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室的袁仁民等较早地开始研究大气这种变折射率介质并进行了实验模拟^[1-2]; 哈尔滨工业大学空间光学工程研究所的范志刚、张亚萍等主要研究气动光学效应, 并对其进行了数值模拟^[3]; 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室的邓诗涛、李晓彤等针对变折射率介质中的光传输及像质评价等问题提出了自适应网格的方法用于描述变折射率场, 从而大大提高了数值模拟的效率^[4-5]. 虽然对于流场这种无规则非均匀介质的研究已经比较成熟, 但对于高准确度光学系统中的非均匀材料的相关研究比较少.

本文所讨论的非均匀介质主要针对用于制造高准确度光学系统的光学玻璃, 玻璃的气泡度、应力双折射等参量可以通过选材等手段使其控制在很好的范围内, 而表面粗糙度、划痕等加工误差不在本文讨论范围之内, 所以研究重点集中在折射率的非均匀问题上. 实验室用于模拟的玻璃材料是向 Schott 公司定制, 折射率非均匀性在 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ 的量级的光学玻璃.

在研究高准确度光学系统成像质量时, 系统的传递函数已经达到衍射极限, 所以不能通过传递函数来反映成像质量的好坏, 而瑞利准则所述的 $1/4$ 波长的波像差要求对于这种高准确度光学系统的像质来说已经远远不够了, 比如在评价波面干涉仪标准镜的成像质量时, 波像差值往往需要达到几十分之一波长^[6], 所以需要直接使用波像差值并通过考察它的变化来评价系统的像质情况.

1 折射率场的描述

要研究介质的非均匀性就需要先对其进行描述. 本文所涉及的非均匀介质是不能使用通常的渐变折射率公式描述的无规则介质. 对于这种类型的介质折射率场的描述方法主要有: 有限元法(网格法)和多项式拟合法.

有限元法根据网格划分的方法又可以分成很多种类, 包括规则网格、随机网格、自适应网格等. 这些方法各有其特点, 而且有各自适合的数据查找方法. 规则网格的查找方法比较简单, 可以根据自身的网格特点设计查找函数, 速度较快但适用性不高, 容易出现格点过少而降低准确度或者格点太多造成存储

空间的浪费; 随机网格的特点是根据需要任意的设定网格的位置和大小, 能够最大程度地平衡准确度和存储空间大小之间的矛盾, 但是这样的网格使用起来就比较麻烦, 其网格的随机性很大程度影响了查找的速度, 往往需要设计特殊的数据结构和查找方法; 自适应网格法^[5]是根据格点所在位置的折射率变化大小来确定网格大小, 同时利用八叉树的结构对数据进行存储, 能够合理地划分网格以及快速查找到所需要的数据.

多项式拟合法是利用 Zernike 多项式等拟合工具对离散数据进行拟合, 得到确定的折射率表达式, 然后再进行光追等运算. 这种方法的最大好处在于光追速度快, 准确度也较高; 但也存在缺点, 比如 Zernike 多项式只能用来拟合二维数据, 而且不能拟合含有突变的折射率场.

对于引言中提到的光学玻璃, 可以将其毛坯材料加工成圆形的平行平板玻璃, 再通过 Zygo 干涉仪对这样已知表面参量的平行平板进行测量, 使理想波面通过平板, 测量得到波前的变化就能反映出材料折射率的变化. 示例采用的是厚度 $d=20$ mm, 口径 $D=300$ mm 的圆形平板玻璃. 测量得到波前绝对值变化的最大值在 0.01 个波长 ($\lambda=632.8$ nm) 左右; 同时利用切片的方法对沿着光轴方向的切片折射率进行了测量, 结果显示这个方向的折射率变化很小, 可以近似看成是均匀的, 所以其折射率场能够用二维数据表示, 再考虑到这种折射率场是连续渐变的, 那么可以利用 Zernike 多项式对其进行拟合, 拟合后的结果如图 1. 从图中可以看出相对于毛坯材料的标准折射率 n_0 , 这块玻璃的非均匀折射率变化范围在 $(n_0 - 0.3 \times 10^{-6}, n_0 + 0.7 \times 10^{-6})$.

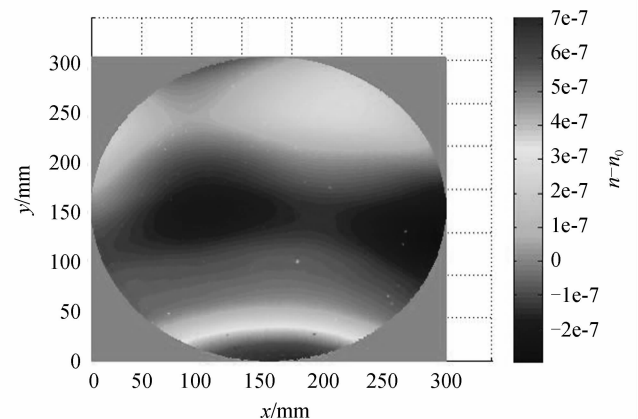


图1 毛坯玻璃折射率分布场

Fig.1 Refractive index distribution of semi-finished glass

2 建模和光学仿真

2.1 建模

对于非均匀介质, 不能直接使用折反射定理进

行光追,需要利用数值方法求解光线方程,如式(1)

$$\frac{d}{ds} \left[n(\mathbf{r}) \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right] = \nabla n(\mathbf{r}) \quad (1)$$

解方程(1)时,常用的数值方法有泰勒级数法^[8],三阶、四阶龙格库塔法^[9]等,后者较前者有更高的准确度.在使用龙格库塔方法时,用 h 表示光追步长, n 表示阶数.一般来说, n 阶方法的局部截断误差是 $O(h^{n+1})$,所以对于四阶龙格库塔方法,局部截断误差为 $O(h^5)$,这样的准确度能够达到本文所需的准确度要求.

在光线追迹的过程中,遇到非均匀介质时,先记录入射光线的位置(光线和介质前表面的交点)、方向矢量(光线传播方向);然后调用光追程序,计算并存储光线在介质中的传播路径;最后光线传播到介质以外时返回此刻出射光线的位置、方向矢量以及光程等相关信息.

由于材料折射率分布的无规则性,选取毛坯玻璃不同的部分来加工透镜,可能会对成像质量产生不同的影响,所以在程序中引入两个变量(x_{offset} 和 y_{offset}).它们分别表示透镜中心点坐标相对于毛坯材料中心点坐标的偏移量.针对不同的毛坯材料,可以取不同的 x_{offset} 、 y_{offset} 值使得加工出的透镜具有相对较好的成像质量.本文所使用的毛坯材料口径为300 mm,透镜的口径为280 mm.图2所示为 $x_{\text{offset}} = 0$ 且 $y_{\text{offset}} = 10$ 的情况.

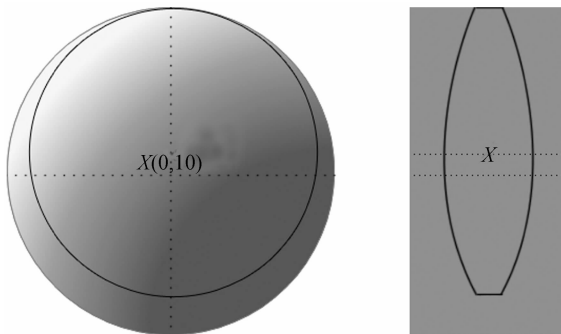


图2 透镜在毛坯玻璃中的位置

Fig. 2 Position of lens in the semi-finished glass

加工好的透镜在装配成光学系统时,虽然透镜形状往往是对称规则的,但由于材料折射率分布的不对称性和无规则性,将透镜绕着光轴旋转一定的角度,成像质量会有所变化,特别是对于多块非均匀材料做成的透镜系统,每个透镜的非均匀性可能会因为绕光轴旋转一定角度而相互抵消.也就是说,可以通过模拟仿真,找到每个透镜最合适其光学系统的旋转角度,以得到相对较好的成像质量.程序中引入变量 α 表示透镜绕光轴旋转的角度,如图3.因为同时会有多块透镜绕着光轴旋转不同的角度,所以可以采用阻尼最小二乘法^[10]等优化算法得到

系统像差最小时,每个透镜的旋转角度.

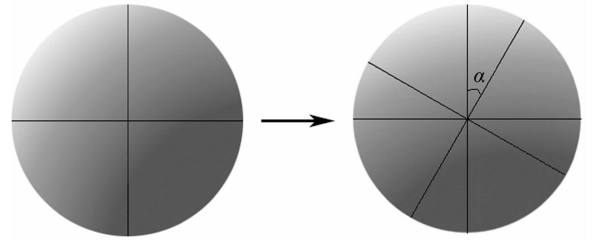


图3 透镜绕光轴旋转

Fig. 3 Rotation of lens around optical axis

2.2 模拟仿真

本文以两块单透镜组成的简单系统为例,说明材料非均匀性对高准确度光学系统的影响以及透镜加工装配过程的模拟与优化.系统如图4所示,由 Lens_A 和 Lens_B 两块透镜组成,系统的入瞳 $D = 280$ mm,参考波长 $\lambda = 632.8$ nm.为了使系统达到很好的成像质量,同时便于说明非均匀性对高准确度光学系统的影响, Lens_A 的第一面使用了非球面面型,那么当两块透镜都为均匀介质时(材料 silica, $n = 1.457\ 041\ 2$),这个系统波像差的峰谷值(Peak to Valley, PV)达到了 $0.005\ 382\lambda$,具有很好的成像质量.

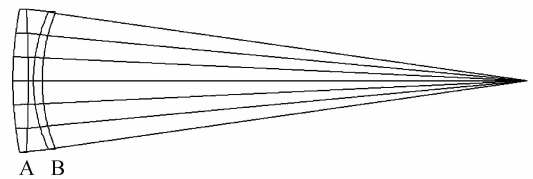


图4 光学系统结构

Fig. 4 Structure of optical system

将这两块单透镜的材料分别替换成用 Zernike 多项式表示的非均匀介质,且多项式的常量项和均匀介质(silica)的折射率相等,多项式各项系数是根据图1所示的材料拟合得到的.比较它和均匀介质透镜的波相差变化,如表1.

表1 使用不同材料的光学系统的波相差

Table 1 Wave aberration of optical systems with different material

	PV/ λ	RMS/ λ
Homogeneous material	0.005 382	0.001 445 2
Lens_A	0.018 282	0.003 907 0
Lens_B	0.015 546	0.002 829 5
Lens_A & Lens_B	0.033 823	0.006 803 8

表1中第2行表示 Lens_A 和 Lens_B 为均匀介质时系统的波相差;第3行表示 Lens_A 为非均匀介质, Lens_B 为均匀介质时系统的波相差;第4行表示 Lens_A 为均匀介质, Lens_B 为非均匀介质时系统的波相差;最后一行表示 Lens_A 和 Lens_B 都为非均匀介质时系统的波相差.第2、3列分别表示系统波像

差的 PV 和方均根值(Root Mean Square,RMS)。从数据可以看出,把 $Lens_A$ 和 $Lens_B$ 其中一个用非均匀材料表示时,波像差较均匀介质有所增大,而它们都为非均匀介质时,波像差的值线性叠加。模拟仿真结果显示采用非均匀介质代替均匀介质后波像差显著增大,对于这个实例,单个透镜采用非均匀介质时,PV 较均匀介质增大了两倍以上,这种程度的波像差变化对于高准确度光学系统是不能忽略的。

2.3 模拟优化

针对非均匀介质对系统成像质量的影响,通过对透镜加工过程以及光学系统装配过程的计算机模拟,可以找到提高系统成像质量的方法,比如选取毛坯材料中不同部位和透镜绕光轴旋转等。

2.3.1 加工透镜时,使用的毛坯材料不同位置对系统成像质量的影响分析

利用图 1 所示的口径为 300 mm 的毛坯玻璃,加工口径 $D=280$ mm 的透镜 $Lens_A$ 和 $Lens_B$ 。通过对 $Lens_A$ 加工时采用毛坯玻璃不同部位的模拟,说明位置对系统成像质量的影响。如图 2 的选取方法,分别取 $(x_{offset}=0, y_{offset}=10)$ 、 $(x_{offset}=0, y_{offset}=-10)$ 、 $(x_{offset}=10, y_{offset}=0)$ 、 $(x_{offset}=-10, y_{offset}=0)$ 四个位置,模拟出它们的波像差值,结果如表 2。

表 2 透镜材料选取毛坯玻璃不同部分时系统的波像差
Table 2 Wave aberration of optical systems which lens use different part of one piece of semi-finished glass

(x_{offset}, y_{offset})	PV/ λ	RMS/ λ
$(x_{offset}=0, y_{offset}=0)$	0.018 282	0.003 907 0
$(x_{offset}=0, y_{offset}=10)$	0.019 873	0.004 040 6
$(x_{offset}=0, y_{offset}=-10)$	0.021 749	0.004 120 8
$(x_{offset}=10, y_{offset}=0)$	0.019 212	0.004 131 0
$(x_{offset}=-10, y_{offset}=0)$	0.017 852	0.003 676 1

模拟结果符合图 2 所示的折射率场,针对表 2 中的 5 个位置,可以看出当 $(x_{offset}=-10, y_{offset}=0)$ 时,系统的波像差较小。

2.3.2 透镜装配时绕着光轴旋转的角度对成像质量的影响

如图 4 所示的系统, $Lens_A$ 和 $Lens_B$ 都采用非均匀毛坯玻璃加工而成,而且都取 $(x_{offset}=0, y_{offset}=0)$,将 $Lens_A$ 绕着光轴旋转 α_z ,观察光学系统波像差的变化。令 α_z 从 0° 变化到 360° ,得到它的波像差变化曲线如图 5。

从图中大致可以看出光学系统的波像差随 α_z 变化的趋势。当 $\alpha_z=30^\circ$ 时,波像差的 PV 最小 $(0.013 374\lambda)$,比没有旋转时的值 $(0.033 823\lambda)$ 减小了一半多,所以透镜绕着光轴旋转确实影响到系统的成像质量。

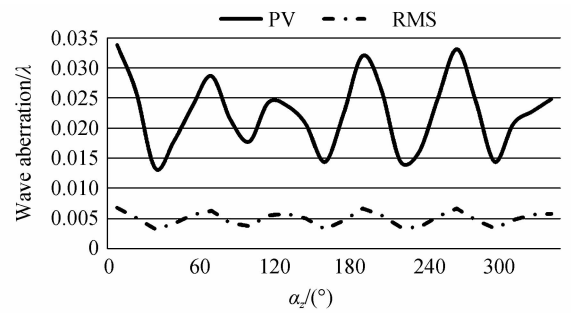


图 5 取不同值时系统的波像差

Fig. 5 System's wave aberration with different

2.3.3 系统的优化

表 2 中的结果是针对一块毛坯玻璃的模拟结果;图 5 是针对一个透镜的绕轴旋转的模拟。但对于实际的高准确度光学系统,会使用到不同的毛坯玻璃;每个透镜需要旋转不同的角度以达到最好的成像质量。那么就需要通过一些方法对每块透镜选择其最合适的 x_{offset} 、 y_{offset} 、 α_z 值,从而达到优化系统的目的。可以把光学系统中所有透镜的 x_{offset} 、 y_{offset} 、 α_z 值都设为变量,然后限定每个变量的变化范围,通过阻尼最小二乘法计算得到系统波像差最小时各个变量的值。

对于图 4 所示的光学系统,一共设置 6 个变量 x_{offset_A} 、 y_{offset_A} 、 α_{z_A} 、 x_{offset_B} 、 y_{offset_B} 、 α_{z_B} ,其中 x_{offset_A} 、 y_{offset_A} 、 x_{offset_B} 、 y_{offset_B} 变化范围是 $[0, 10]$, α_{z_A} 、 α_{z_B} 的变化范围是 $[0, 360^\circ]$ 。通过计算得到当 $x_{offset_A}=x_{offset_B}=-10$, $y_{offset_A}=y_{offset_B}=0$ 时, $\alpha_{z_1}=75^\circ$, $\alpha_{z_2}=105^\circ$ 时,该系统的波像差相对较小, PV 为 0.012265λ , RMS 为 0.0031956λ ,这个值比没有进行优化时小了一半多,达到了提高成像质量的目的。

3 结论

对于高准确度光学系统,材料的非均匀性会影响其成像质量,利用光线光学的方法能够得到光学系统的波像差来评价系统的成像质量。在使用高质量光学玻璃加工透镜制作高准确度光学系统时,可以利用计算机软件模拟仿真出不同情况下系统的成像质量:1)选取同一块毛坯玻璃的不同部分加工成的透镜;2)使光学系统中各个透镜分别绕着光轴旋转一定的角度。

通过对以上两点的计算机模拟仿真,能够预先选取用来加工透镜的毛坯玻璃的最佳部位以及找到最好的装配位置,从而获得更好的系统性能。

参考文献

- [1] YUAN Ren-min, ZENG Zong-yong, XIAO Li-ming, et al. Comparison of some methods of measuring refractive index structure parameter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6): 755-761.

袁仁民,曾宗泳,肖黎明,等. 不同方法测量折射率结构常数的比较[J]. 光学学报, 2000, **20**(6): 755-761.

[2] YUAN Ren-min, ZENG Zong-yong, MA Cheng-sheng, *et al.* Laboratory simulation of light propagation in atmospheric convective boundary layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 518-521.
袁仁民,曾宗泳,马成胜,等. 大气对流边界层光传输的实验室模拟[J]. 光学学报, 2001, **21**(5): 518-521.

[3] ZHANG Ya-ping, FAN Zhi-gang, LIU Jin-qiang. Study on aero-optical effect in the terminal infrared guidance[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(6): 487-490.
张亚萍,范志刚,刘金强. 红外末制导中的气动光学效应分析[J]. 激光与红外, 2006, **36**(6): 487-490.

[4] DENG Shi-tao. Image evaluation of the optical transmission through inhomogeneous medium [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
邓诗涛. 变折射率介质中的光传输及像质评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[5] DENG S, LI X, CEN Z, *et al.* Simulation of the inhomogeneous medium with a self-adapting grid[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(16): 3102-3106.

[6] ZHU Ri-hong, CHEN Lei, WANG Qing, *et al.* Phase-shift interferometry and its application[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(2): 0085.
朱日宏,陈磊,王青,等. 移相干涉测量术及其应用[J]. 应用光学, 2006, **27**(2): 0085.

[7] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. YANG Jia-sun, transl. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 433-436.

[8] 玻恩,沃耳夫. 光学原理[M]. 杨葭荪,译. 7版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 433-436.

[9] MONTAGNINO L. Ray tracing in inhomogeneous media[J]. *JOSA*, 1968, **58**(12): 1667-1668.

[10] SAKAMOTO T. Ray trace algorithms for GRIN media[J]. *Applied Optics*, 1987, **26**(15): 2943-2946.

[11] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学,像差,光学设计[M]. 2版. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 315-318.



• 下期预告 •

一维光子晶体全反射隧穿的色散特性

刘启能^a, 刘沁^b

(重庆工商大学 a. 计算机科学与信息工程学院; b. 设计艺术学院, 重庆 400067)

摘要:利用介质材料的色散关系和特征矩阵法研究了一维光子晶体中 TE 波和 TM 波的全反射隧穿效应随色散的变化特征. TE 波和 TM 波全反射隧穿导带的频率中心随色散强度的增加而降低, 频率宽度随色散强度的增加而增大. TE 波和 TM 波的全反射隧穿导带的频率中心随入射角的增加而升高, 频率宽度随入射角的增加而减小. 这些研究结果拓宽了对一维光子晶体中 TE 波和 TM 波波全反射隧穿效应的认识.

关键词:光子晶体; 色散; 全反射隧穿; 复折射率