文章编号 1004-924X(2015)08-2143-06

高数值孔径投影光刻物镜波像差的自动平衡优化

徐明飞[1,2*],黄 玮[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. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:考虑高数值孔径(NA)投影光刻物镜视场较大、波像差分布不均匀,本文提出了一种自动优化设计方法来降低设计过程中出现的全视场最大波像差。该方法通过将一个自动调节采样视场权重的循环程序附加在光刻物镜的局部优化程序之外来自动平衡全视场的波像差,进而降低全视场的最大波像差。设计实例证明,运用该方法后光刻物镜全视场波像差的均匀性显著提高,最大波像差降低为原来的 63%。该方法在光学设计软件 Code V 中有良好的应用效果,应用该方法不但能节省光刻物镜设计者的时间,而且会降低设计对设计者设计经验的依赖性。同时,该方法也可推广应用在其他对成像质量要求较高的光学系统设计中。

关 键 词:投影物镜;光刻物镜;波像差;光学设计;自动优化
中图分类号:TN305.7 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20152308.2143

Automatic balancing of wavefront aberrations in high-numerical aperture lithographic lenses

XU Ming-fei[1,2*], HUANG Wei[1]

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: stone*870914@163.*com*

Abstract: As high-numerical aperture (NA) lithographic lenses have larger fields of view(FOVs) and nonuniform wavefront aberration distributions, this paper proposes an automatic optimized design method to reduce the the largest wavefront aberration of all FOVs in design processing. The method adds an external loop optimization procedure which can automatically adjust sampling weight into the local optimization procedure of a lithographic lens to balance wavefront aberrations and to reduce the largest wavefront aberration automatically. By using the proposed method, the uniformity of wavefront aberrations gets better and the largest wavefront aberration has been reduced to 63% of the primary value. It shows that the method has a better application in Code V. Meanwhile, it not only reduces the design time consumption but also the dependence on the design experiences of the designers. this method can also be applied in design of other optical systems with higher imaging quality.

Key words: projective lens;lithographic lens; wavefront aberration; optical design; automatic optimization

收稿日期:2014-10-09;**修订日期**:2014-12-22.
基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2012ZX02701001-007)

1 引　言

目前，世界上最先进的投影光刻物镜已经能够实现小于 22 nm 节点的曝光复制。作为最复杂与最精密的光学系统，在投影光刻物镜的设计和制造过程中，要求系统具有很小的残余像差，同时还要采用相应的像质补偿措施来降低加工难度[1-3]。由于现代投影光刻物镜大多是折反式离轴非旋转对称系统，系统在其全视场内的波像差变化较大，而人们关注的是其视场内的最大波像差，因此平衡全视场内的系统波像差以降低最大波像差值十分重要。

一般情况下，光学设计人员通过手动调整光学系统采样视场的权重来平衡视场内的波像差。然而光刻物镜与传统成像系统不同：一方面，光刻物镜需要在大视场内具有更小、更均匀的波像差；另一方面，高成像质量需要系统内有较多且非球面度较大的非球面[4-5]，系统会设置更多的采样视场。因此，通过全视场的波像差分布情况来手动调节采样视场权重，进而平均各视场波像差需要操作人员在光学设计方面具有非常丰富的经验。此外，重复进行视场权重设定及优化是一项十分枯燥且耗时的工作。

本文将一个自动调节采样视场权重的循环程序附加在光刻物镜的局部优化程序之外，从而实现了全视场波像差的自动平衡。设计实例表明，该方法在光学设计软件 Code V 中的应用效果良好。

2 误差函数

在光学设计软件中，误差函数值是一个用来综合评判系统成像质量的正数[6]。理想成像系统的误差函数值为零，意味着该系统没有像差。但在大多数情况下，误差函数值都是非零正值，因为在误差函数中存在一些相互关联的误差函数子项，即其中一些误差函数子项的降低会使另一些相关联子项增大。因此在光学设计过程中，要尽可能地降低误差函数。

考虑到光刻物镜是一个近衍射极限的成像系统，所以用波前差作为系统成像质量的评判指标。每一条追迹光线对误差函数的贡献值 E 表示为公式(1)[7]。最终的误差函数值是所有成像光线 E 值的平方根。

$$E=4\cdot W_{\mathrm{F}}\cdot W_{\mathrm{W}}\cdot W_{\mathrm{A}}\cdot WTGX\cdot WTGY\cdot OPD+\frac{4}{3}\cdot WVB\cdot W_{\mathrm{W}}\cdot W_{\mathrm{A}}[W_X\cdot WTGX^3\cdot(EN\cdot\Delta X)^2+W_Y\cdot WTGY^3\cdot(EN\cdot\Delta Y)^2], \tag{1}$$

其中：OPD 是相位延迟，$(\Delta X,\ \Delta Y)$ 是几何像差的 X,Y 分量，$(EN\cdot\Delta X)^2$ 和 $(EN\cdot\Delta Y)^2$ 是波前倾斜，$(W_X,\ W_Y)$ 是 $(\Delta X,\ \Delta Y)$ 的视场权重，$(WTGX,\ WTGY)$ 是孔径整合界限，EN 是光线在 Z 轴方向的余弦，W_{W} 是波长权重，WVB 是波前倾斜的权重。W_{A} 是光线相对于孔径位置的权重，可表示为：

$$W_A=\frac{1}{A}\cdot\frac{1}{(X_0^2+Y_0^2)^{\alpha}}, \tag{2}$$

其中：X_0 和 Y_0 是光线在光瞳内的坐标，A 是该权重的归一化因子，α 是用于增大光瞳边缘光线影响的因子。

因为在近衍射极限光学系统中 $(\Delta X,\ \Delta Y)$ 分量的大小相近，所以在光刻物镜设计中可以给予 $(\Delta X,\ \Delta Y)$ 相同的权重，于是结合公式(3)，公式(1)可以转化为：

$$W_{\mathrm{F}}=\sqrt{W_X^2+W_Y^2}, \tag{3}$$

$$E=W_{\mathrm{F}}\cdot W_{\mathrm{W}}\cdot W_{\mathrm{A}}\cdot\{4\cdot WTGX\cdot WTGY\cdot OPD+\frac{4}{3\sqrt{2}}\cdot WVB\cdot[WTGX^3\cdot(EN\cdot\Delta X)^2+WTGY^3\cdot(EN\cdot\Delta Y)^2]\}. \tag{4}$$

3 波像差平衡方法

由式(4)可知，通过调节采样视场权重 W_{F} 可以平衡全视场的波像差。所有采样视场权重可以通过公式(5)、(6)、(7)来计算。

$$W(F)_{i+1}=\left(\frac{\omega'(F)}{\overline{\omega(F)}}\right)^k\cdot S_{\mathrm{h}}\cdot W(F)_i\ (\omega'(F)>\omega(F)), \tag{5}$$

$$W(F)_{i+1}=\left(\frac{\omega'(F)}{\overline{\omega(F)}}\right)^k\cdot S_{\mathrm{l}}\cdot W(F)_i\ (\omega'(F)<\omega(F)), \tag{6}$$

$$\overline{\omega(F)}=\frac{\sum_f^{nf}\omega'(F)}{nf}, \tag{7}$$

其中：$\omega'(F)$ 是采样视场的波像差值，$\overline{\omega(F)}$ 是所有

采样视场波像差的平均值，i 是自动优化程序的循环次数，k，S_h 和 S_l 是用来调节优化程序收敛速度的因子，$W(F)_0$ 是采样视场的初始权重值。

在光学设计软件中，视场权重值是相对值，它们仅反映各采样视场的重要程度[8]。因此，在程序每一轮循环之后，可以将各采样视场的权重归一化，归一化后的权重在像差平衡的过程中具有收敛性。视场权重的归一化公式为：

$$W(F)=\frac{W(F)}{W(F)_{\max}}\ . \tag{8}$$

根据公式(8)，像差平衡后的最大视场权重为 1。

本优化程序是通过权重迭代方式实现的，因此需要考虑该程序的收敛性及优化迭代的终止条件[9]。程序的流程如图 1 所示：首先，优化程序先计算出全视场的波像差值；然后通过式(5)和式(6)增大具有较大波像差采样视场的权重，减小具有较小波像差采样视场的权重；下一轮局部优化将会使较大的波像差减小，其代价就是较小的波像差增大；经过多轮优化，全视场波像差的最大值和最小值之差逐渐减小，最终趋于某一稳定的值。根据程序的收敛过程，可以认为波像差平均化的过程就是降低最大波像差的过程。由此本文提出两个程序终止条件：其一，定义一个波像差的不一致性参数 P：

$$P=\frac{\omega'(F)_{\max}-\omega'(F)_{\min}}{\overline{\omega(F)}}\ , \tag{9}$$

将 P 小于某一正数作为一个迭代终止条件；其二，程序的最大迭代次数作为另一个迭代终止条件。

需要注意的是，该波像差平衡算法仅是在局部优化程序外部附加一个循环程序，算法的主要作用是平衡视场的波像差，而在全面提高系统像质方面的作用很小。所以应用该算法的前提是光刻物镜已经通过手动优化获得了较好的像质，剩下的工作就是平衡全视场的波像差。

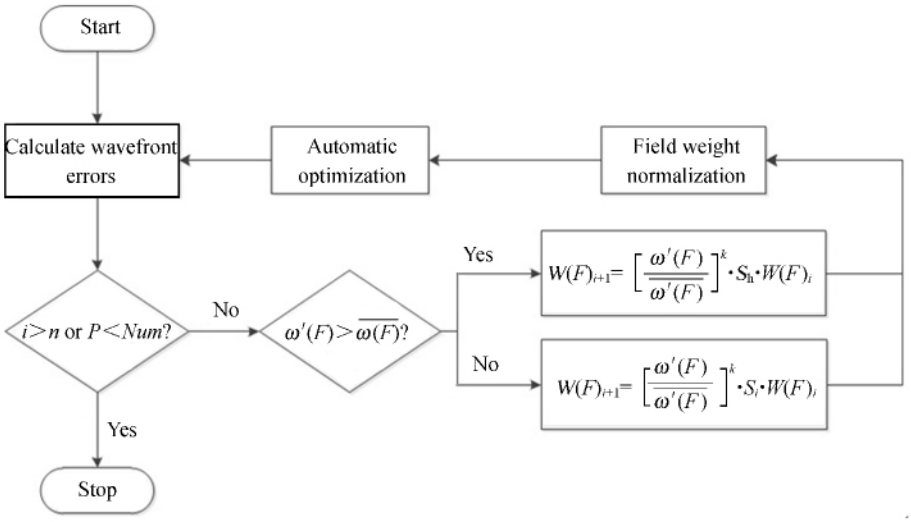


图 1　波像差平衡算法的流程图

Fig. 1　Flow chart of aberration balancing program

4　波像差平衡算法的实现

本文用一个高 NA 投影光刻物镜的设计实例来验证所提出的波像差平衡算法。该光刻物镜是根据一个国际专利进行优化设计得到的[10]，如图 2 所示，主要的光学参数见表 1。

表 1　投影光刻物镜的系统参数

Tab. 1　Specifications of lithographic lens

Parameter	Specification
Central wavelength	193.368 nm
Numerical aperture (NA)	1.30
Field of image	26 mm × 5.5 mm
Magnification	0.25
Number of aspheric surfaces	20

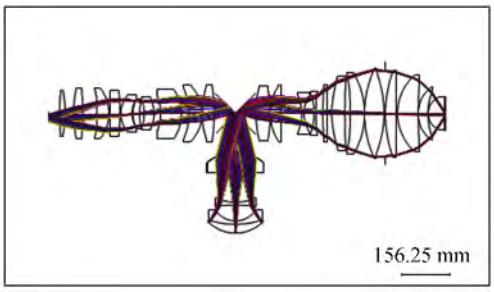


图 2　投影光刻物镜系统二维图

Fig. 2　Layout of lithographic lens

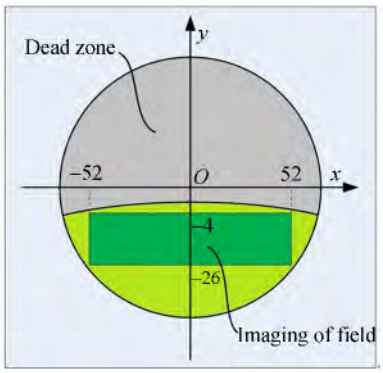


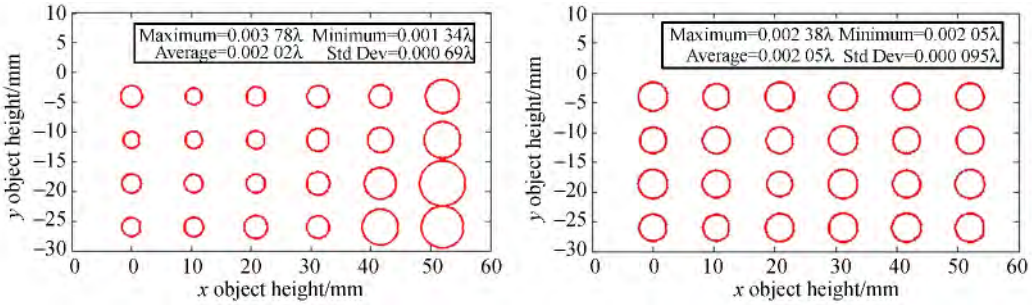
图 3　物方视场示意图

Fig. 3　Sketch of object field

如图 2 所示，该光刻物镜是非旋转对称系统，其整个矩形物方视场位于光轴的下方。图 3 展示了该系统工作时所用的物方视场区域，图中浅灰色区域表示该区域不能成像或者部分成像光线被遮拦。

这里使用 RMS 波像差表征系统波像差。由于该系统的视场关于 Y 轴对称，本文在 Y 轴所分割出的半视场内均匀取 24 个采样视场。将所有采样视场的初始权重设为 1，经过初步优化后系统的波像差分布如图 4(a)所示。系统 RMS 波像差的最小值、最大值和平均值分别为 0.001 34λ、0.003 78λ 和 0.002 02λ。图中圆半径值代表该视场 RMS 波像差的大小。很显然，全视场波像差的均匀性并不好，波像差的最大值较大，需要进行波像差平衡及优化。

采用 CodeV 自定义宏程序实现了前文所提出的波像差平衡算法。这里，公式(5)、(6)中的收敛因子 k，S_h，和 S_l 分别设为 1.2，1 和 1.2；公式(2)中的 α 为 0；公式(4)中 WVB 为 1；两个迭代终止参数 i 和 P 分别为 30 和 0.15。经过 24 轮优化后该优化算法到达了迭代终止条件 $P<0.15$，完成了光刻物镜全视场波像差的平衡。



(a)使用自动优化算法之前　(b)使用自动优化算法之后

(a) Before optimization　(b) After optimization

图 4　物方视场的波像差 RMS 分布

Fig. 4　RMS wavefront aberrations as a function of object height

图 4(b)给出了优化后的波像差数值，RMS 波像差的最小值、最大值和平均值分别为 0.002 05λ、0.002 38λ和 0.002 25λ。对比图 4(a)和图 4(b)可知，优化前后波像差的均匀性有了显著的提高，而 RMS 波像差的最大值降低为原来的 63%。虽然优化后 RMS 波像差的平均值略微增大，但是全视场 RMS 波像差的最大值是关键参数，平均值仅是光刻物镜优化过程中的一个参考指标。

为了进一步说明该优化算法的收敛性及有效性，图 5 给出了在优化过程中 RMS 波像差随循环次数变化的曲线。在优化过程中最初的 3 至 4 轮内，最大 RMS 波像差迅速减小，同时最小 RMS 波像差迅速增大；经过 15 轮优化后，各 RMS 波像差值趋于平稳。图 6 给出了误差函数随循环次数的变化曲线。最终的误差函数值略大于误差函数的初始值，这是因为误差函数值与 RMS 波像差的平均值间有很大的相关性。实际上，在光学设计过程中，当误差函数接近最小误差函数值时，

其微小变化对系统成像质量的影响可以忽略[11]。所有采样视场的权重变化如图 7 所示。整个波像差的平衡程序使用 Xeon W3565 CPU@3.2GHz 执行，共耗时约 7 min。

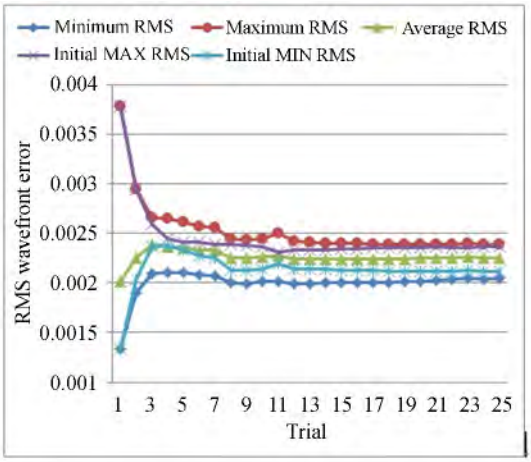


图 5　波像差变化曲线

Fig. 5　Curves of RMS wavefront aberration variation

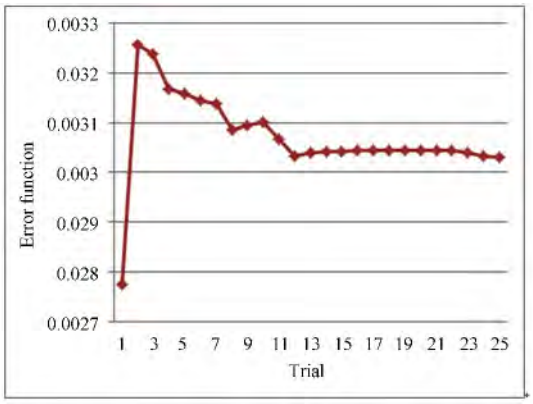


图 6　误差函数变化曲线

Fig. 6　Curve of error function variation

特别地，通过该优化方法得到的采样视场权重结果并不是唯一的，初始结构的微小不同或者局部优化约束条件的微小变化都会影响最终的采样视场权重结果，但是全视场波像差分布的均匀性几乎不变，即该优化算法效果相同。此外，相邻采样视场权重相互关联，某一采样视场的权重变化不仅影响该视场的波像差，同样也会影响该视场附近区域的波像差。这也是通过手动调节采样视场权重实现平衡全视场波像差较为困难的原因之一。

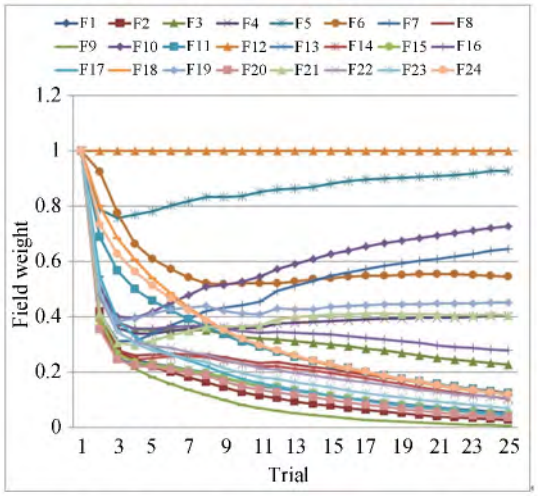


图 7　采样视场权重变化曲线

Fig. 7　Weight variation curves

5　结　论

本文针对高 NA 投影光刻物镜设计过程中降低全视场最大波像差的问题，提出了一种自动优化方法。该方法通过将一个自动调节采样视场权重的循环程序附加在光刻物镜的局部优化程序上来自动平衡全视场的波像差，进而降低全视场的最大波像差。该方法不但能节省光刻物镜的设计时间，而且降低了设计时对设计者设计经验的依赖性。实验结果显示，该方法可将最大波像差降低为原来的 63%，具有重要的实用价值。该方法还可推广至其他对成像质量要求较高的光学系统（如显微镜）的设计过程中。

参考文献：

[1] MA B, LI L, HUANG Y F, CHANG J, *et al*.. Application and influence of aspheric surfaces in lithographic objectives design [J]. *SPIE*, 2010, 7657: 76570A.

[2] 赵阳，巩岩. 投影物镜小比率模型的计算机辅助装调[J]. 中国光学，2012，5(4)：394-400.
ZHAO Y, GONG Y. Computer aided alignment of small scale projected objective [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 394-400. (in Chinese)

[3] 赵菲菲，唐剑宇，黄玮，等. 投影光刻物镜的计算机辅助装调[J]. 光学学报，2014，34(6)：0622001.
ZHAO F F, TANG J Y, HUANG W, *et al*..

Computer-aided alignment for the lithographic lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0622001. (in Chinese)

[4] AURELIAN D. Toward the global optimum in lithographic lens design [J]. *SPIE*, 2010, 7652: 76522B-1.

[5] WILLI U, HANS J R, RUSS H. Development of dioptric projection lenses for deep ultraviolet lithography at Carl Zeiss [J]. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 2004, 3(1): 87-96.

[6] SEPPALA L G. Optical interpretation of the Merit function in Grey's lens design program [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(3): 671-678.

[7] Synopsys, Inc.. CodeV 10.6 reference manual 2013[Z/OL]. http://www.opticalres.com.[2014-6-15]

[8] CHENG D, WANG Y T, HUA H. Automatic image performance balancing in lens optimization [J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11574-11588.

[9] 孙靖民, 梁迎春. 机械优化设计[D]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
SUN J M, LIANG Y CH. *Optimal Design of Machine* [D]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)

[10] EPPLE A. High aperture catadioptric projection objective [P]. World Intellectual Property Organization, 2009040011A2, 2009.

[11] MASAKI I, LEO G, GROOT G. Automated control of manufacturing sensitivity during optimization [J]. *SPIE*, 2004, 5249: 343-352.

作者简介：

徐明飞(1987—)，男，吉林磐石人，博士研究生，2010 年于天津大学获得学士学位，主要从事光学设计方面的研究。E-mail: stone870914@163.com

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

(版权所有　未经许可　不得转载)