

doi:10.3788/gzxb20174611.1122001

基于线性模型的聚焦光学系统静态公差优化算法

王川川, 岑兆丰, 李晓彤, 兰顺, 杨瑶, 陈灏

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要: 为了实现聚焦光学系统中元件公差的自动分配, 在实验室自主研发的 OTS 实际光线追迹软件平台构建公差分析模块, 并据此完成元件公差的优化。依据光学矩阵理论, 以公差的线性模型为基础, 从评价函数、元件公差分配和反馈系数三个方面研究公差优化问题, 结合蒙特卡罗方法和数值分析, 有效的为各光学元件制定了合理的加工公差。采用结合元件敏感度的公差分配方式, 根据现存的问题提出自适应优化法, 并给出了相应实现方法。搭建了多元件双通光学系统验证实际情况中公差模型的正确性。实例计算表明, 该方式使优化平均迭代次数下降了两轮, 相比 Zemax 分析过程, 在结果差异不大的情况下总运行时间下降了 40%, 表明了算法的合理性。整个分析流程对实际的光学系统加工装配具有一定参考价值。

关键词: 光学设计; 公差优化; 光学矩阵; 蒙特卡罗方法; 自适应逼近

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)11-1122001-8

Optimization Algorithm of Static Tolerance in Focusing System Based on Linear Model

WANG Chuan-chuan, CEN Zhao-feng, LI Xiao-tong, LAN Shun, YANG Yao, CHEN Hao
(State Key Laboratory of modern optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to assign the tolerances of focusing optical systems automatically, the tolerance allocation module is developed as a component of the optical simulation software OTS, and the tolerances of optical elements are optimized by this module. Based on the optical transmission matrix and the linear model of tolerance, the merit function, tolerance allocation and feedback are explored. The reasonable tolerances are assigned by Monte Carlo method and other numerical techniques. An adaptive optimization algorithm is proposed and implemented in the software according to the sensitivity of every element, and verified by a multielement bi-pass experimental optical system. The advantage of the algorithm is shown in examples that the average number of iteration is decreased by 2 loops, and the total runtime is 40% less than Zemax with the similar results. This analysis is valuable for manufacturing and assembling optical systems.

Key words: Optical design; Tolerance optimization; Matrix Optics; Monte Carlo method; Adaption approximation

OCIS Codes: 220.0220; 200.4860; 080.2730; 080.2720

0 引言

对于以光束聚焦为目的的光学系统, 其像面聚焦光斑容易受多种因素影响而发生偏移。这些环境因素既包含地表振动, 声波激励, 热应变等动态因素, 也包含玻璃材料, 装配误差, 加工误差等静态因素, 故需要对其进行严格控制^[1-3]。目前国内外已有多位学者对此问题进行了研究。为了降低光斑弥散对激光导星带来的探

基金项目: 国家自然科学基金(No.11275166)资助

第一作者: 王川川(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计以及公差优化。Email: wcc2014@zju.edu.cn

导师(通讯作者): 李晓彤(1962-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光学设计和光学软件开发。Email: lixt@zju.edu.cn

收稿日期: 2017-03-02; **录用日期:** 2017-06-08

<http://www.photon.ac.cn>

测误差,邵丽娜等^[4]设计了动态聚焦系统,实现了精确探测.更早之前,师智全等^[5-6]采用加权和法以一系列加权平方项和形式对于系统稳定性进行了分析;王大辉等^[7]利用 LABVIEW 和 MATLAB 相结合设计了靶面光斑重心的稳定性模拟仿真及分析软件,对光学元件稳定性测量结果和光学元件误差分配结果进行模拟仿真和验证,实现了系统误差分配的最优化.Michel Le Du^[8]将光学敏感载荷从主飞船上分离出来的独立设计分析方式实现了卫星系统的指向稳定性分析.常用光学软件的公差分析功能,如 Zemax 等,可以较方便地对偏心,倾斜等常见的静态因素进行分析,其在中小型光学系统中可以得到不错的效果,但是整个分析过程仍然不能按照设计者要求自动调整,即根据各元件特性分配权重,根据用户所需样本分析的最小合格率确定最终的公差范围等.一旦涉及到以光束聚焦为目的的光学系统,由于其一般公差范围控制严格,需要对各元件公差人为添加要求,此时就体现出一定的局限性.

本文立足于偏心、倾斜等元件加工装配时存在的静态公差,使用蒙特卡罗方法在 OTS 软件中对整个系统进行逐次实际光线追迹,同时根据光学矩阵理论构建系统数学模型.以此为基础,通过迭代得到各元件最优公差范围,很大程度上降低了分配所需人工操作并取得了良好的优化效果.

1 公差优化算法分析

1.1 公差模型建立

对于理想光学系统或只包含对称像差的光学系统,主光线是成像光束的中心光线;对于像差校正良好的聚焦光学系统,也可认为主光线像点接近像斑的中心.故可以选择使用实际主光线追迹对应聚焦点相对于理想位置的偏移来分析公差影响下光束聚焦光斑的偏移情况.若该点落在以理想聚焦点为圆心,允许的最大偏移量为半径的圆内,则可认为当前系统公差满足要求.根据光学矩阵理论,可以将光束传输过程表示为多个传输矩阵相乘^[9-10],其所得结果中就包含了关于靶点偏差信息,且最终可化为各元件公差为自变量、聚焦点偏移量为因变量的一个一阶线性函数模型.假设系统为轴对称,取定初始光线在子午面上,分析倾斜和偏心公差对聚焦点位置的影响,当忽略二阶小量影响时偏移量可表示为^[11]

$$a_1 y_1 + a_2 y_2 + \dots + a_m y_m = \epsilon \Delta y_{\max}^0 \quad (1)$$

Δy_{\max}^0 表示系统初始最大偏移量, y_1, y_2, \dots, y_m 表示优化后系统各个元件公差边界值. ϵ 是每一轮优化后最大偏移量与优化前最大偏移量的比值,即 1.3 节中反馈系数. a_1, a_2, \dots, a_m 表示各类元件公差使聚焦点位置产生偏移的距离程度,即公差敏感度,一般可视为常数.

根据实际经验可知,对于各元件公差希望在满足要求下其范围尽可能大,故可令每一轮优化后相对于原公差范围缩放比例值作为评价函数.针对每次优化,希望其取得尽可能大的值,评价函数为

$$\omega(k_1, k_2, \dots, k_m) = c_1 k_1 + c_2 k_2 + \dots + c_m k_m \quad (2)$$

$$k_i = \frac{y_i}{y_{i0}} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中 y_i, y_{i0} 分别为优化后和优化前元件公差边界值, c_1, c_2, \dots, c_m 表示一系列人工权值,可根据不同元件的特性设置不同值,默认都为 1.由式(1)~(3)是公差优化算法中的公差模型.

1.2 元件公差分配

根据 1.1 节,需要找到一种合适的分配方式使得 ω 值尽可能大.假定 $k_i = \frac{l c_i}{a_i y_{i0}}$, 其中 $l = \frac{\epsilon \Delta y_{\max}^0}{c_1 + c_2 + \dots + c_m}$.这个猜想的依据是对于初始范围较大的公差,可令其变化大一些,即 $k_i \propto \frac{1}{y_i}$;对于总偏移量贡献较大的敏感公差,要令公差小一些,即 $k_i \propto \frac{1}{a_i}$.把这种假设与常用的均匀分配方式进行比较,对于均匀分配每个元件的公差范围将会直接放缩至原来的 ϵ 倍.此时评价函数值为

$$\omega^0(k_1, k_2, \dots, k_m) = c_1 \epsilon + c_2 \epsilon + \dots + c_m \epsilon \quad (4)$$

在本文分配方式下目标函数值为

$$\omega(k_1, k_2, \dots, k_m) = c_1 \frac{\epsilon l}{a_1 y_{10}} + c_2 \frac{\epsilon l}{a_2 y_{20}} + \dots + c_m \frac{\epsilon l}{a_m y_{m0}} \quad (5)$$

经化简后利用柯西施瓦兹不等式可以得到

$$\omega^0(k_1, k_2, \dots, k_m) \leq \omega(k_1, k_2, \dots, k_m) \quad (6)$$

根据式(6)发现考虑各元件的敏感度以及初始公差范围的分配方式要比常用的均匀分配方式更为合理.进一步考虑不同迭代次数对于结果影响,计算得到当给定满足要求的最小合格率相同时,即优化的总反馈系数 ϵ 相同时,迭代的次数并不会影响最后各元件公差范围.故根据此种分配方式,在优化过程中只需保证时间效率即可,这为后续研究提供了极大便利.

1.3 反馈系数

使用蒙特卡罗方法进行公差分析即是在公差范围内产生一系列的随机数,再统计每个样本的总偏移量,最后比较允许的最大偏移量得到分析结果.这样根据模型就需要得到在当前元件公差范围内,聚焦点总偏移量满足要求的概率密度曲线.若记第 i 个元件公差值 t_i ,取值范围 $[-u_i, u_i]$,概率密度 $\phi(t_i)$ 为 $\frac{1}{2u_i}$,则其产生的偏移量 $\Delta_i = a_i t_i$, a_i 是该元件的敏感系数.由于各公差变量之间相互独立,则组合偏移量 $z_i = a_i t_i + a_{i-1} t_{i-1}$ 的概率分布^[12]由式(7)得到

$$P(z_i) = \iint_{|z_i| \leq a_{i-1} t_{i-1} + a_i t_i} \phi(t_i) \phi(t_{i-1}) dt_i dt_{i-1} \quad (7)$$

求解式(7),令 $L_i = a_i u_i$,根据1.2节公差分配方式以及式(3)可得 $a_i u_i = \frac{c_i \epsilon \Delta y_{\max}}{(c_1 + c_2 + \dots + c_m)}$,则 $L_{i-1} = \frac{c_{i-1}}{c_i} L_i$.

此时偏移量概率分布可以化简为

$$P(L_i, |z_i|) = 1 - \frac{\left(\frac{c_{i-1} + c_i}{c_i} \frac{|z_i|}{L_i}\right)^2}{2 \frac{c_{i-1}}{c_i}} \quad |z_i| \leq L_i + L_{i-1} \quad (8)$$

易得 $P(L_i, |z_i|)$ 是关于 L_i 的递减函数,即随着当前最大偏移量增大,聚焦点落在规定偏移量范围内的概率降低.类别可知,多个元件在总偏移量上限 $L_{\text{total}} = a_1 u_1 + a_2 u_2 + \dots + a_m u_m$ 时,偏移量概率分布函数可以表示为高阶多项式形式且依然是递减函数.故每一轮优化的反馈系数可以转化为求取当 $|z| = z_{\max}$,纵坐标 $P(L_{\text{total}}, |z|) = P_{\min}$ 时对应点横坐标与当前横坐标的比值.其中 z_{\max} 表示聚焦点允许的最大偏移量, P_{\min} 表示聚焦点样本的最小合格率.对于求解未知函数固定点问题的一种常用方式是采用均匀缩小公差范围的方式,即 $\epsilon = \sqrt{\frac{P_{\text{current}}}{P_{\min}}}$,其中 P_{current} 表示聚焦点样本合格率.另一种常用的方式是借助于函数的单调性,用二分法逐步缩小搜索区间最终获得所需要的点.以上两种方式由于没有完全利用每次求解失败的信息,因而其优化时间性能有待提高.

本文使用自适应逼近^[13]优化方式,依据上述偏移量概率分布函数递减性质,将每一轮蒙特卡罗分析后产生的新实验点与原来各实验点进行插值拟合,得到曲线估计点的横坐标.据此求得反馈系数,缩放元件公差并进行新一轮的分析,依次迭代直到取得 P_{\min} 对应横坐标.由于函数单调递减,每次重新估计就可以舍去一侧区域,从而降低了迭代次数.而每次迭代分析是对光学系统进行追迹的过程,不同算法之间运行时间基本相同,降低迭代次数就等同于减少了优化时间.这里拟合方式可以由用户指定,本文选取了一次和二次样条相结合的方式,如图1所示(以一次样条连接为例),图1中, r_{\max}, r_2, r_3 分别代表允许的最大总偏移量,优化迭代前估计的总偏移量和优化迭代后估计的总偏移量, P_{\min} 样本分析要求的最小合格率.经过不断迭代最终将取得所需固定点,由于使用了每次估计失败的信息,优化时间得以降低.

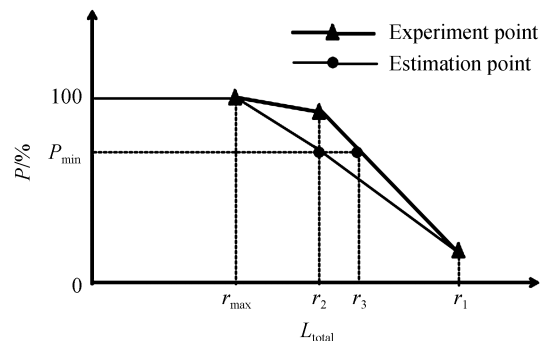


图1 自适应优化算法示意图
Fig.1 Schematic diagram of the adaptive optimization algorithm

2 光学系统公差分析实例

根据上述理论分析,选择三组只包含透镜和反射镜且复杂程度不同的光学系统,并在实验室自主研发 OTS 软件平台进行仿真,从中得到不同优化方法对不同结构的适应程度,用户操作界面和所选择的光学系统如图 2、图 3 所示。

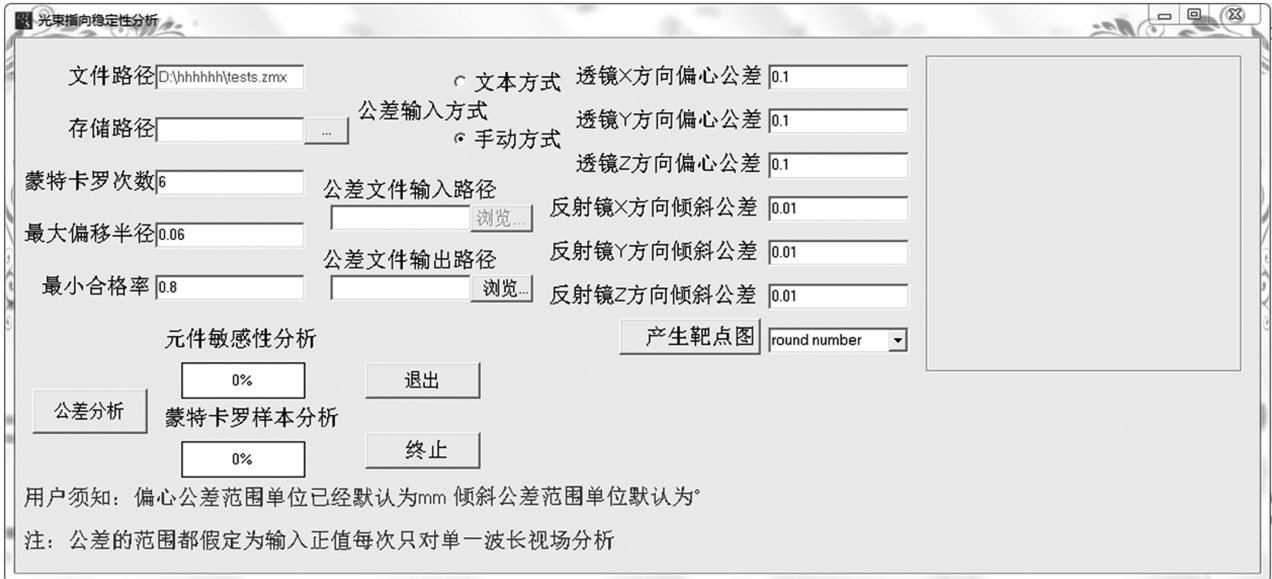


图 2 公差分析软件界面

Fig.2 The software Interface of tolerance analysis

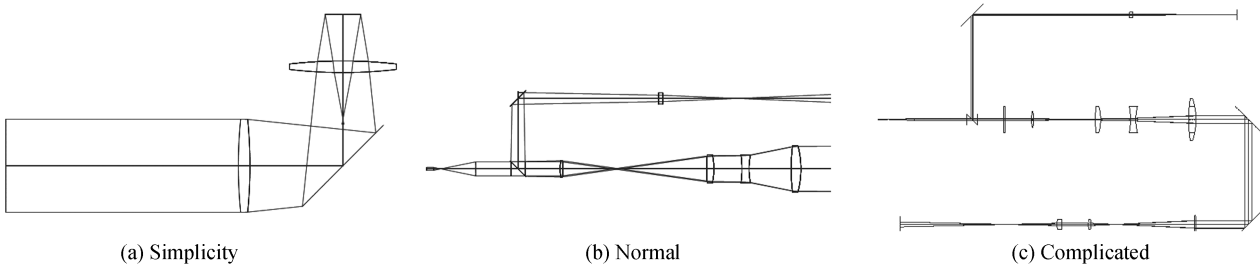
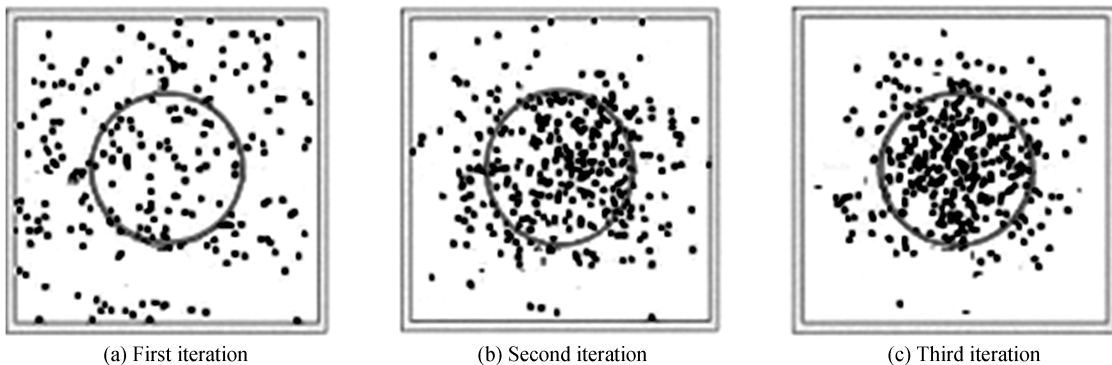


图 3 不同结构的仿真系统

Fig.3 Different structures of simulation systems

图 3(a)、3(b)、3(c)分别代表不同复杂程度的光学系统,每个系统模拟环境为主频 3.80 GHz、内存 4.0 GB、操作系统 Win7(64 位),使用不同优化方式分别进行 25 组实验,每次实验选取 400 个蒙特卡罗样本,并规定满足 0.06 mm 最大许可偏移量样本比例 $80\% \pm 2.5\%$ 为合格,统计不同方法最后得到的公差范围和迭代次数.最终仿真(以图 3(a)所示系统为例)平均总耗时 33 s,而相同条件下 Zemax 进行 inverse 分析实现公差分配耗时为 57 s.除此之外还发现在 $-2.5\% \sim 2.5\%$ 的许可范围内,不同优化算法所得到的各元件公



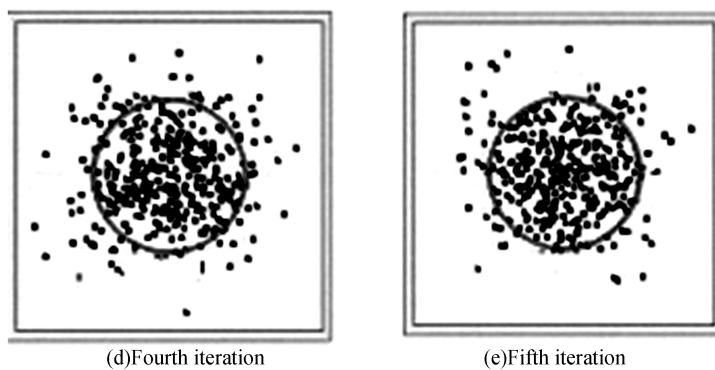


图4 均匀优化算法仿真结果

Fig.4 Simulation result of uniform optimization algorithm

差范围有所偏差,但是偏差不超过 3.5%。部分仿真图片和结果的统计值.图 4、图 5 和图 6 分别表示不同优化算法下聚焦点像面位置,其中实线圆表示允许的最大偏移圆.对本次实验数据进行统计,最终不同方式的优化时间如图 7.

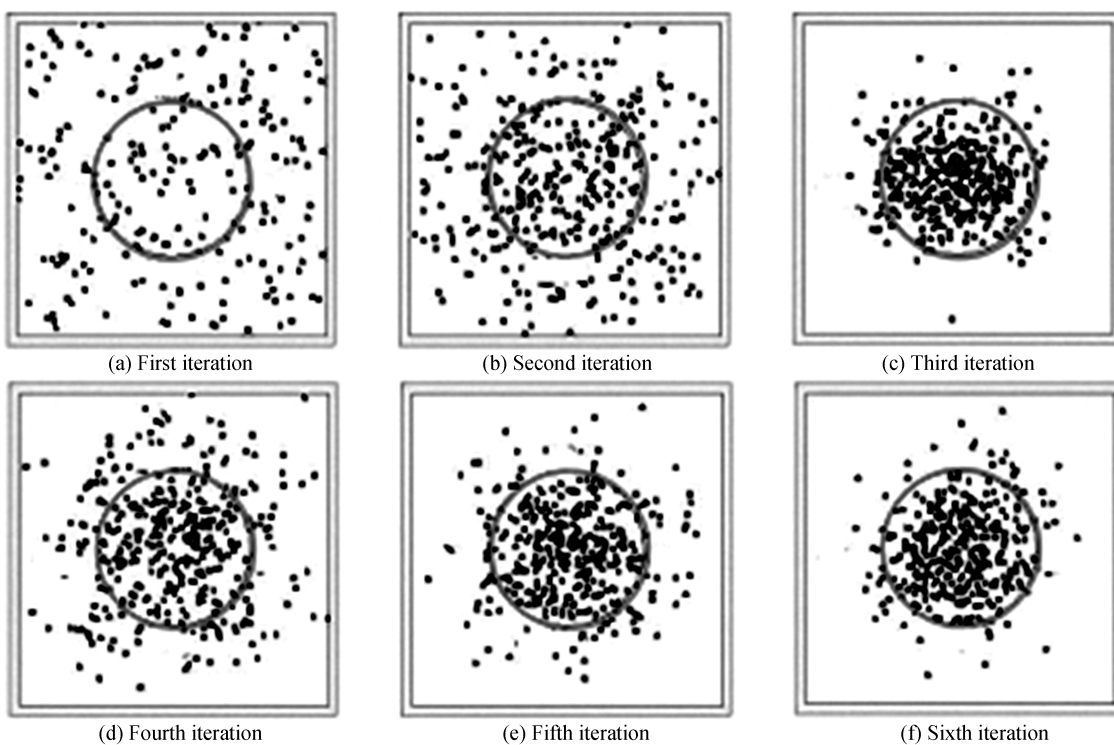


图5 二分优化算法仿真结果

Fig.5 Simulation result of dichotomy optimization algorithm

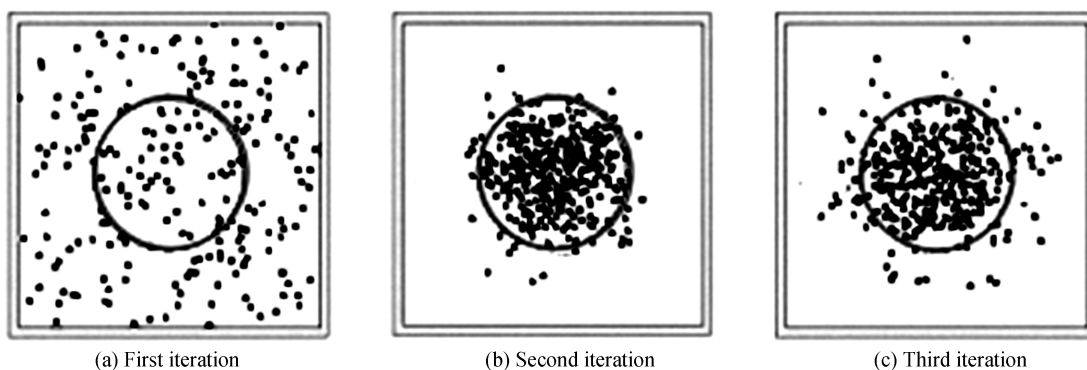


图6 自适应优化法仿真结果

Fig.6 Simulation result of adaptive optimization algorithm

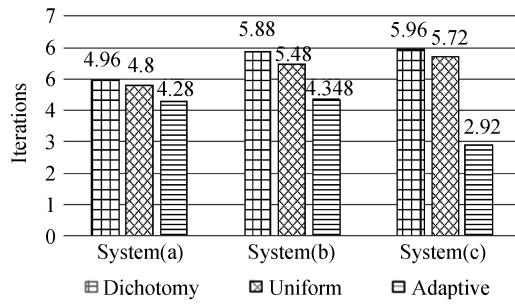


图 7 不同反馈系数选取方式平均迭代次数

Fig.7 Average iteration times of different optimization algorithm

由图 7 可知自适应优化算法平均迭代次数小于常用的二分和均匀算法,其原因在于自适应算法中每次插值时会添加计算所得的真实点,并进一步拟合出一条新曲线,这使得中间信息得以有效利用.由图 4 和图 5 可以发现均匀算法和二分算法在优化时会聚点出现多次分散、聚集、再分散、再聚集的循环震荡现象,而自适应算法则有效地控制这一过程,因而使得优化时间减少.

3 公差模型验证

本算法中的公差模型是根据近轴光学矩阵求得,但是对于实际光学系统同样适用,对此设计了一组双通光学系统并搭建了相应的实验装置,成功地完成了线性模型的验证.光学系统的原理图和装置图如图 8、图 9.

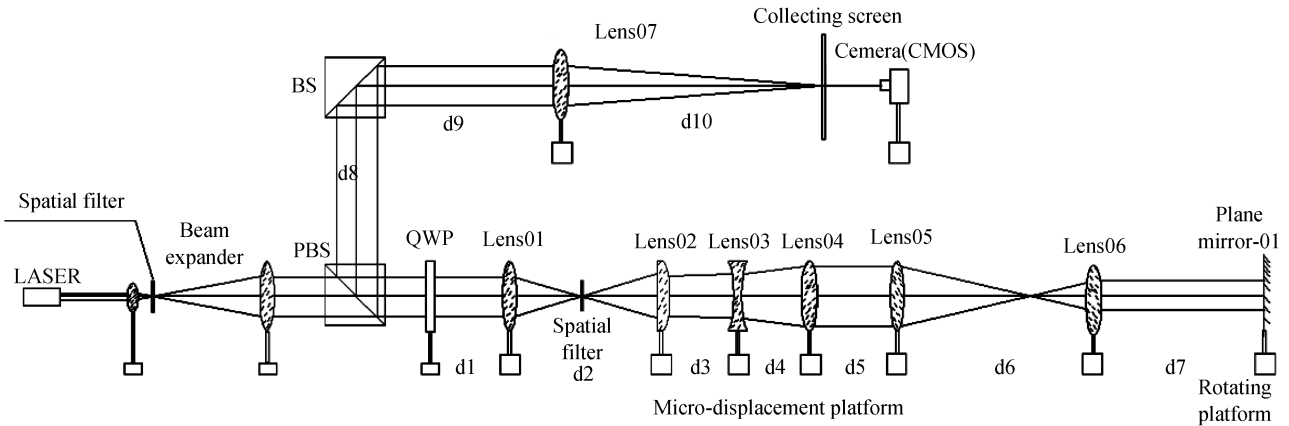


图 8 双通光学系统原理图

Fig.8 Schematic diagram of bi-pass optical system

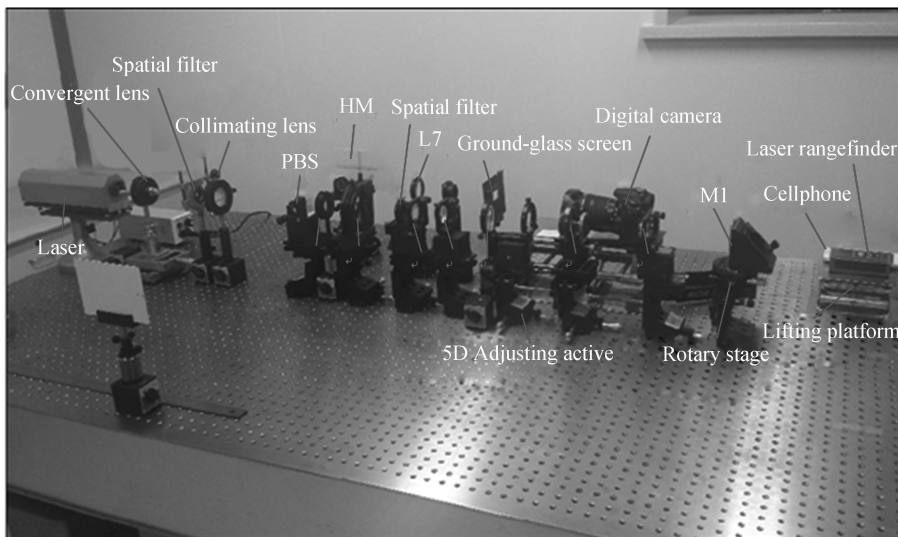


图 9 双通光学系统装置图

Fig.9 Setup of bi-pass optical system

实验过程中,调整好光路后逐步改变单个元件及元件组偏心倾斜公差,使用数码相机多次拍摄像面毛玻璃所显示光斑,经过相应的光斑提取算法^[14]计算后可以得到主光线偏移量.表1、表2列出了单一元件和组合元件偏心倾斜后的偏移量数据(表格中透镜改变偏心量,单位均为 mm;反射镜改变倾斜量,单位均为°).

表 1 单个元件偏心/倾斜时实测数据

Table 1 Measured data of single component with decenter or tilt

Decenter	L 1	L 2	L 3	L 4	L 5	L 6	Tilt	M 1
0.1	0.448	-0.266	0.564	-0.881	-1.434	1.487	0.1	1.2
0.2	0.913	-0.541	1.092	-1.78	-3.259	2.867	0.2	2.434
0.3	1.331	-0.792	1.629	-2.641	-4.54	4.279	0.3	3.636
0.4	1.787	-1.062	2.187	-3.509	-5.889	5.361	0.4	4.946
0.5	2.185	-1.332	2.754	-4.388	-7.081	7.111	0.5	6.285

表 2 组合元件偏心/倾斜时实测数据

Table 2 Measured data of combinational components with decenter or tilt

L 1	L 2	L 3	L 4	L 5	L 6	M 1	Offset
0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0	0	2.200
0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	-0.2	0	3.726
0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.4	-0.4	0	6.907
0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.4	-0.4	0.1	5.982
0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.4	-0.4	0.2	4.737
0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.4	-0.4	0.3	3.387
0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.4	-0.4	0.4	2.356
0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.4	-0.4	0.5	1.220

根据表1中数据绘制相应的曲线见图10,不同标记形状的曲线表示单独改变对应元件后的偏心倾斜公差.图中横坐标代表公差量,纵坐标代表聚焦点偏移量.根据表2中数据绘制相应的折线图11,不同标记形状的曲线表示单一元件公差的线性叠加与组合元件的公差.图中横坐标代表每次实验编号,其值依次表示表2中自上而下每一组测试数据,纵坐标代表聚焦点偏移量.

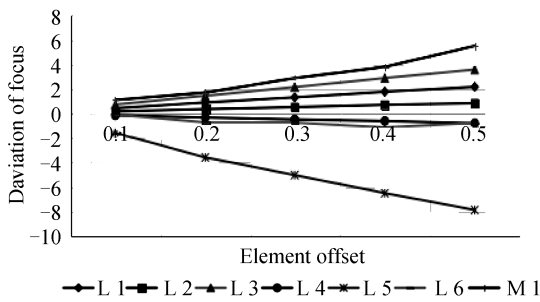


图 10 单一元件模型验证曲线

Fig.10 The curve to verify model of single component

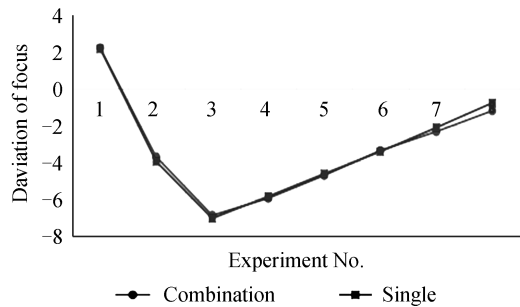


图 11 组合元件模型验证曲线

Fig.11 The curve to verify model combinational components

分析图10中数据可以发现当元件公差敏感度不大(斜率小)情况下,总偏移值的二阶小量可以忽略.曲线呈现一次函数状,随着单一元件偏心(倾斜)量的增加,聚焦点偏移量也随之增加且两者成正比关系.分析图11中数据可以发现当组合的各元件公差较小时(如表2中第一行和第二行各参数),总偏移值的二阶小量可以忽略.两组数据点基本重合,聚焦点偏移量约等于单一元件公差生成偏移量的累加和.综上可见实验结果与理论分析相吻合,即线性公差模型可以适用于实际光学系统分析.

4 结论

基于线性公差模型提出了一种自适应的优化算法,结合软件仿真和实验验证对不同复杂程度的光学系统公差分配进行了分析.发现当光学系统公差范围缩小到一定程度时,其聚焦点偏移量可以用一个一阶线性表达式来表示,利用该表达式对元件公差的静态影响因素进行分析.在公差分配时应该考虑每个元件的敏感度,这样会比常用的均匀分配获得更好的效果.使用自适应优化算法可以降低聚焦点位置的震荡,从而在较

短时间内完成公差范围计算.相比于 Zemax 等光学软件在用户自由度的局限性,本算法可以按照不同特性元件权重,用户所需样本分析的最小合格率等人为需求自动优化公差范围,对于一些以光束聚焦为目的的光学系统具有更好的适用性.由于线性公差模型主要考虑静态误差,对于环境振动、声波激励等动态误差影响无法完全适用,在后续工作中可以将两种误差结合起来,使用更为全面的公差模型来表述聚焦点偏差量.

参考文献

- [1] SWENSEN E A, BARRON A A, FARRAR C R, *et al.* Random vibration sensitivity studies of modeling uncertainties in the NIF structures[C]. SPIE, 1997, 3089.
- [2] LIU Fang, XU Jia, ZHANG Yan, *et al.* Analysis on beam directing stability problem caused by Micro-vibration of optical components[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011(11): 1120001.
刘芳, 徐嘉, 张燕, 等. 光学器件微振动引起的光束指向稳定性分析[J]. 光学学报, 2011(11):1120001.
- [3] NENG Fen. Imaging simulation for actual optical systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012:5-7.
能芬. 实际光学系统仿真成像研究[D]. 浙江大学, 2012:5-7.
- [4] SHAO Li-na, CAO Zhao-liang, MU Quan-quan, *et al.* Simulation analysis and design of a dynamic refocus system for laser guide star[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015(09): 0901006.
邵丽娜, 曹召良, 穆全全, 等. 激光导星动态聚焦系统模拟分析及设计[J]. 光学学报, 2015(09):0901006.
- [5] SHI Zhi-quan. Analysis on structure stability about optical elements of large-scale solid laser[D]. Mian Yang: China Academy of Engineering Physics, 2003: 33-36.
师智全. 大型固体激光装置光学元件结构稳定性分析研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2003:33-36.
- [6] SHI Zhi-quan, PENG Han-sheng. Estimate of beam location tolerance of ICF drive[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2): 275-278.
师智全, 彭翰生. ICF 驱动器光束定位误差估计[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(2):275-278.
- [7] WANG Da-hui, ZHAO Xue-qing, ZHANG Yong-sheng, *et al.* Simulation on beam pointing stability of high power excimer laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(8): 2039-2043.
王大辉, 赵学庆, 张永生, 等. 高功率准分子激光系统光束指向稳定性模拟[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(8):2039-2043.
- [8] DU M L. Optical pointing stability achievement through isolation[C]. SPIE, 1995:288-298.
- [9] LV Bai-da. Laser optics: beam description, propagation and physics technology of optical cavity[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 33-73, 461-488.
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 33-73, 461-488.
- [10] XU Jia, LIU Fang, YANG Peng-qian, *et al.* Beam pointing analysis based on dynamic distribution for high power laser facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011(10): 1002001.
徐嘉, 刘芳, 杨朋千, 等. 基于动态分布的高功率激光器光束指向稳定性分析[J]. 中国激光, 2011(10):1002001.
- [11] WANG C, HUANG P X, LI X, *et al.* Analysis method of beam pointing stability based on optical transmission matrix [C]. International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, International Society for Optics and Photonics, 2016: 101541B.
- [12] LIU Jian-ping. Probability and mathematics[M]. Shanghai: ECUST Press, 2003:72-74.
刘剑平. 概率论与数理统计方法[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2003:72-74.
- [13] DAVID KINCAID, WARD CHENEY write, WANG Guo-rong, YU Yao-ming, XU Zhao-liang, translate. Numerical analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 365-369.
大卫金凯德, 沃德切尼著, 王国荣, 俞耀明, 徐兆亮, 译. 数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005:365-369.
- [14] HUANG Ping-xian. Verification and simulation for transmission of laser system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016:43-45.
黄平贤. 激光系统中光传输仿真及其验证[D]. 杭州, 浙江大学, 2016:43-45.