

用粒子群算法设计的 5 镜系统与 ZEBASE 中 5 镜系统比较

秦 华,王立刚,张静华,类成新,韩克祯

(山东理工大学 理学院,山东 淄博 255049)

摘 要: 将粒子群算法用于 5 片镜光学系统的设计优化中。由球差、像距、畸变、场曲、彗差和光线弥散值构成光学评价函数,用这个评价函数作为粒子群算法的适应度函数,优化设计了一结构简单的 5 片镜系统,并把此 5 片镜系统与 ZEBASE 中 5 片镜系统的球差、畸变、子午场曲、弧矢场曲、子午光线弥散值、弧矢光线弥散值、子午彗差、弧矢彗差进行了对比。对比结果显示,用粒子群算法设计的 5 片镜系统的球差、畸变、子午场曲、弧矢场曲、弧矢光线弥散值较小,ZEBASE 中五片镜系统的子午光线弥散值、子午彗差、弧矢彗差较小。设计实例表明,粒子群算法可以克服现有光学设计软件高度依赖具体初始结构的缺点,可以自由控制结构参数的搜索范围,从而提高光学系统设计的智能化程度。

关键词: 光学设计; 像差; 粒子群算法; 适应度函数

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2724-08

Comparison between five-lens system designed with PSO and five-lens system from ZEBASE

Qin Hua, Wang Ligang, Zhang Jinghua, Lei Chengxin, Han Kezhen

(Department of Sciences, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Particle swarm optimization (PSO) technique is applied to design a five-lens system. The optical merit function composed of spherical aberrations, an image distance, distortions, field curvatures, comas and light dispersion values, were employed as fitness functions of the particle swarm algorithm. By using this function automatic searching for the optimal design, a simple five-lens system was carried out. Comparisons in terms of spherical aberrations, distortions, field curvatures, comas and light dispersion values were performed between a five-lens system designed with PSO and a five-lens system from ZEBASE. The result shows that spherical aberrations, distortions, meridional field curvatures, sagittal field curvatures, sagittal light dispersion values of a five-lens system designed with PSO are smaller, and meridional light dispersion values, meridional comas, sagittal comas of a five-lens system from ZEBASE are smaller. The example for a five-lens system design using particle swarm algorithm indicates that PSO can overcome the shortcomings of the modern optical design software which highly depends on an initial structure input by the user and can create arbitrarily search ranges of structure parameters, which is an important step towards automatic design with artificial intelligence.

Key words: lens design; aberrations; particle swarm optimization algorithm; fitness function

收稿日期: 2013-02-04; 修订日期: 2013-03-07

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2012FM001)

作者简介: 秦华(1964-),男,副教授,博士,主要从事光学设计、全固态激光器及透明导电薄膜方面的研究。Email: zfqinh@gmail.com

0 引 言

国内外现有的计算机辅助光学设计(OCAD)软件均采用阻尼最小二乘法或适应法等局部优化算法对光学系统进行优化设计,这些算法在找到解空间中某一局部极小值后就停滞不前,结束优化过程,得到局部最优而非全局最优的设计结果。为了解决局部极小值问题,光学设计研究人员提出了多种全局优化算法,有效地解决了优化过程中局部极小值问题。但是这些算法都是在选定了具体初始结构的基础上,这就需要有经验的设计者寻找系统的具体初始结构,因此光学系统设计的智能化程度不是很高。鉴于此,科学家不断地寻求光学自动设计的新方法,以解决过分依赖于系统具体初始结构并实现全局寻优的问题。这些方法在不同程度上或者实现了全局最优或者不再依赖于系统原始结构^[1],但这些算法或由于耗用优化时间随变量数量的增加而呈指数性增长或由于随机抽样而容易得到一些无法实现的系统(如出现负边、负中心厚度等)等缺点,并没有在光学自动设计领域广泛应用。

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是基于群智能(Swarm Intelligence)的随机优化算法,已广泛应用于函数优化,神经网络训练,模糊系统控制以及其他的应用领域。PSO 在多维空间函数寻优、动态目标寻优等方面具有收敛速度快、解质量高、鲁棒性好等优点,特别适合工程应用。韦芙芽^[2]提出了一种基于量子粒子群优化算法的光纤光栅参数重构方法,将待优化的光纤光栅参数以粒子表示,再让粒子在解空间模拟量子行为进行搜索;徐小慧^[3]设计了一种用于遥感图像目标识别的粒子群分类算法;Jiang H M^[4]用改进的粒子群算法成功对光子晶体光纤的结构进行了优化;Alireza Mowla^[5]用粒子群算法对掺铒光纤混合放大器(EDFA)和拉曼光纤放大器(FRA)的结构进行分析与设计,得到了一系列优化方案。丁晖^[6]采用粒子群优化算法对常用波长解调器 Fabry-Perot 型光纤滤波器(FPF)的透射光谱中心波长与控制电压之间存在的非线性和回滞特性进行了研究;秦华^[7-8]首次将 PSO 算法引入到球面及非球面像差的自动校正中,做了有益的探索性工作。文中研究在其原有^[7-8]的基础上进一步把粒子群算

法引入到更为复杂系统的像差自动校正和光学系统的设计中,并把设计结果与 ZEBASE 中的 5 片镜系统进行对比,说明用 PSO 设计的光学系统与同 Zemax 设计的光学系统具有同样好的性能,但是设计方法更为简单,所设计的光学系统结构也比用 Zemax 设计的结构简单。

1 用粒子群算法进行光学系统像差校正的步骤

用于文中进行光学设计的粒子群算法模型见参考文献[8],根据此模型,确定设计步骤如下:

(1) 确定系统的镜面数目、孔径光阑的位置、渐晕系数、光束孔径、最大视场及目标像距。

(2) 根据镜面数目确定自变量的个数,由自变量个数确定粒子位置维数和速度维数。

(3) 确定粒子位置每一维的范围,即位置的搜索范围。可根据系统中透镜的形状大体设定。为了找到更好的解也可以反复修改这个搜索范围。根据位置搜索范围确定粒子飞行速度的最大值 v_{\max} 和最小值 v_{\min} 。 v_{\max} 不能太大,不能一次飞行就能从搜索范围的一端飞出搜索范围的另一端, v_{\max} 太大,可能使得粒子飞过好的解;当然粒子的速度也不能太小,太小会导致粒子搜索速度太慢,或是被局部最优解所吸引,无法找到好的解。所以速度最大值和最小值要根据搜索范围确定。

(4) 粒子群位置和速度初始化。根据粒子的位置范围和速度范围,粒子群的初始位置和初始速度分别在位置范围和速度范围内随机取得。比如系统中一个面半径 r 的取值范围在 [100, 200] 之间, r 的初始值可以取 [100, 200] 之间的任意数,这个数是随机抽取的。

(5) 根据随机取得的系统初始结构,计算此初始结构所要校正的各种像差,像差值与目标值之差为 ΔF_i (i 为序号)。利用公式 $\Phi(X_i) = \sum_i q_i \Delta F_i^2$ 计算 Φ 值。 Φ 值在光学设计中叫光学评价函数,在优化算法中称为适应度函数,公式中 q_i 是一权重系数。评价函数 $\Phi(X_i)$ 越小像差残量越小,越接近我们的要求。

(6) 初始化个体最佳解和群体最佳解。每一个粒子的初始位置作为个体初始最佳解 P_{best} ,粒子群中适应度函数最小的粒子作为整体最佳解 G_{best} 。

(7) 根据公式(1)-(3)对粒子群的位置和速度进

行更新

$$\mathbf{v}_{in}^{k+1} = \mathbf{w} \times \mathbf{v}_{in}^k + c_1 \times \text{rand}() \times (\mathbf{p}_{in} - \mathbf{x}_{in}^k) + c_2 \times \text{rand}() \times (\mathbf{p}_{gn} - \mathbf{x}_{in}^k) \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_{in}^{k+1} = \mathbf{x}_{in}^k + \mathbf{v}_{in}^{k+1} \quad (2)$$

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}_{\max} - \frac{\mathbf{w}_{\max} - \mathbf{w}_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times \text{iter} \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M$, M 为该群体中粒子的总数; w 为惯性权重 (inertia weight); v_{in}^k 为第 k 次迭代粒子 i 飞行速度矢量的第 n 维分量; x_{in}^k 为第 k 次迭代粒子 i 位置矢量的第 n 维分量; p_{in} 为 i 粒子个体最好位置 P_{best} 的第 n 维分量; p_{gn} 为群体最好位置 G_{best} 的第 n 维分量; c_1 、 c_2 为权重因子, 亦称学习因子; $\text{rand}()$ 产生 $[0, 1]$ 之间的均匀随机数。

w_{\max} 和 w_{\min} 分别是 w 的最大值和最小值, iter 、 iter_{\max} 分别是当前迭代次数和最大迭代次数。惯性权重 w 较大则算法具有较强的全局搜索能力, w 较小则算法倾向于局部搜索。一般的做法是将 w 初始为 0.9 并使其随迭代次数的增加线性递减至 0.1, 以达到上述期望的优化目的。

(8) 根据步骤(5)和(6)计算更新后的粒子群每个个体的适应度值, 找出更新后的粒子群个体最佳解和群体最佳解。再回到步骤(7), 往复迭代直到符合中止条件为止。

2 设计与对比实例

选择 ZEBASE 中 F001 5 片镜系统作为对比实例,

物距: 物平面位于无限远, $L = \infty$, 视场角: $\omega_{\max} = 14.24^\circ$, 光束孔径: $H = 8.5$ (入瞳上最大入射高 $h_{\max} = 8.5/2$), 孔径光阑: 位在系统第 7 面上, 渐晕系数: $K^+ = 1, K^- = -1$, 即没有渐晕。目标像距 $l' = 55.0926$ 。以上及后文中有关长度的物理量, 其单位相同即可。

ZEBASE 中 F001 5 片镜系统结构参数见表 1, 表 1 中 r 和 d 下面的 (Z) 和 (P) 分别表示 ZEBASE 中的数据和用 PSO 算法得到的数据。 n_D 、 n_F 和 n_C 分别表示黄光、蓝光和红光的折射率。采用文中第二部分的设计方法, 根据 ZEBASE 中 F001 5 片镜的形状确定系统结构参数 r 和 d 的搜索范围。5 片镜的大体形状为, 第 1、2 片镜为凹凸透镜, 第 3、5 片为双凸透镜, 第 4 片为平凹透镜且第 4 片与第 5 片为双胶合镜, 孔径光阑在第 3 片和第 4 片之间, 共有 10 个面。把第 1~10 个面的曲率半径 r 搜索范围分别设定在 $[300, 500]$ 、 $[8, 35]$ 、 $[8, 35]$ 、 $[8, 35]$ 、 $[30, 100]$ 、 $[-70, -20]$ 、 $[\text{Inf}, \text{Inf}]$ (孔径光阑)、 $[\text{Inf}, \text{Inf}]$ 、 $[10, 50]$ 、 $[-65, -10]$ 。5 片镜镜面之间的距离 d 的搜索范围可以根据 ZEBASE 中 F001 5 片镜的镜面距离分别设定为 $[1, 5]$ 、 $[10, 20]$ 、 $[1.5, 3.5]$ 、 $[4, 10]$ 、 $[4, 10]$ 、 $[4, 8]$ 、 $[1, 4]$ 、 $[1, 4]$ 、 $[5, 7]$ 。也可以根据数学计算设定厚度搜索范围以保证正透镜的边缘厚度和负透镜的中心厚度不出现负数。玻璃材料一定, 不作为变量参加像差校正。表 2 为设定的系统结构参数的搜索范围, 所用玻璃材料的折射率与表 1 中的相同。

校正从 $t_1 h_{\max}, \dots, \sim t_5 h_{\max}$ 入射点处的 5 个球差

表 1 用 PSO 设计 5 片镜系统与 ZEBASE 中 5 片镜系统结构参数对比

Tab.1 Structural parameters of both a five-lens system designed with PSO and a five-lens system from ZEBASE

r		d		n_D	n_F	n_C
(Z)	(P)	(Z)	(P)			
411.342 84	416.666 7	2.438 40	6.000 0	1.0	1.0	1.0
13.573 76	14.992 5	14.960 60	15.274 2	1.520 54	1.525 712 43	1.518 247 20
14.665 96	14.992 5	2.997 20	5.000 0	1.0	1.0	1.0
13.495 02	13.245 0	6.858 00	4.000 0	1.717 36	1.734 673 0	1.710 365 93
59.888 12	64.935 1	7.721 60	8.000 0	1.0	1.0	1.0
-38.511 48	-38.610 0	5.486 40	8.000 0	1.575 010	1.584 777 79	1.570 920 89
Inf(aperture stop)	Inf(aperture stop)	1.879 60	4.000 0	1.0	1.0	1.0
Inf	Inf	1.803 40	4.000 0	1.0	1.0	1.0
18.379 44	20.000 0	5.334 00	8.000 0	1.717 36	1.734 673 0	1.710 365 93
-32.626 30	-30.487 8			1.640 49	1.647 899 29	1.637 244 80
				1.0	1.0	1.0

表 2 5 片镜系统结构参数的搜索范围

Tab.2 Scopes for structural parameters of a five-lens system

r	[300, 500], [8, 35], [8, 35], [8, 35], [30, 100], [-70, -20], [Inf, Inf](aperture stop), [Inf, Inf], [10, 50], [-65, -10]
d	[1, 5], [10, 20], [1.5, 3.5], [4, 10], [4, 10], [4, 8], [1, 4], [1, 4], [5, 7]

$\delta L_D'$ 、 $t_1\omega_{max} \sim t_5\omega_{max}$ 在 $1.0h_{max}$ 处的子午和弧矢光线弥散值 δy 和 $\delta z'$ 、 $1.0\omega_{max}$ 视场的 $\pm t_1h_{max} \sim \pm t_5h_{max}$ 处的子午场曲 Xt' 和弧矢场曲 Xs' 、 $t_1\omega_{max} \sim t_5\omega_{max}$ 的 5 个畸变 $\delta yz'$ ，以上 $t_1=1.0, t_2=0.85, t_3=0.7071, t_4=0.5, t_5=0.3$ 。像距 l' (系统最后一面到理想像面的距离) 作为广义的像差同以上像差一起参加校正。系统中所要校正的像差和它的目标值见表 3。可以看出，总共 36 个像差要校正，它们按照公式 $\Phi(X_i) = \sum_i q_i \Delta F_i^2$ 组成适应度函数。取光线弥散值和场曲的权重 $q_i=5$ ，其余像差的权重 $q_i=1$ 。

表 3 所要校正的像差及其目标值

Tab.3 Aberrations to be corrected and its target values

Aberrations	$\delta L_D'$	l'	$\delta y', \delta z'$	Xt', Xs'	$\delta yz'$
Target values	0	55.092 6	0	0	0

自变量 18 个： $r_1, r_2, r_4, r_5, r_6, r_8, r_9, r_{10}, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9$ ，它们构成粒子位置矢量即， $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_N) = (r_1, r_2, r_4, r_5, r_6, r_8, r_9, r_{10}, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9)$ 。 $r_7 = \text{Inf}$ ，为孔径光阑，是一固定值。每一个位置矢量的最大值与最小值之差作为粒子的最大速度，设置速度在最大速度与负最大速度之间。

表 4 用粒子群算法设计的 5 片镜系统与 ZEBASE 中 5 片镜系统的球差及像距对比

Tab.4 Comparison of spherical aberrations and image distance generated in five-lens system designed with PSO and five-lens system from ZEBASE

h_{max}	1.0	0.85	0.707 1	0.5	0.3	l'
$\delta L_D'(Z)$	-0.138 7	-0.187 7	-0.174 9	-0.110 1	-0.044 3	55.092 6
$\delta L_D'(P)$	-0.104 6	-0.051 5	-0.036 4	-0.022 8	-0.009 7	55.044 8
$q'(\%)(Z)$	-2.37	-1.71	-1.18	-0.59	-0.21	
$q'(\%)(P)$	-2.30	-1.66	-1.14	-0.57	-0.21	

定义粒子群粒子数目 30，较为复杂的寻优，种群数目可以适当增加。在大多数情况下，种群数目越大，适应度值收敛的速度越快。但是粒子数目太大，一是增加优化时间，二是不能保证一定就能找到全局最优，所以粒子数目的选择可根据具体情况设定。

把以上设定的粒子群优化算法的参数，代入到粒子群优化算法程序中，取进化代数 500，学习因子 $C_1=C_2=2$ 。在 Intel(R)Core(TM)i5-2300CPU 2.8 GHz，4 G 内存的联想 PC 上运行约 3 min 就会得到优化结果。表 1 记录了一次优化结果，得到了所要优化参数 r 和 d 的数值。从表 1 中的 d 数据可以看出，用 PSO 算法得到的系统结构的 d 值中除 15.274 2 外其余都是整数，如此，装配就简单。所以相对于 ZEBASE 中 5 片镜系统，用 PSO 算法得到的 5 片镜系统结构简单。下面把用 PSO 算法得到的系统结构与 ZEBASE 中系统结构的各种残留像差进行比较。为了节省文字和描述方便，文中把 ZEBASE 中的 5 片镜系统称为系统 Z，而把用 PSO 算法得到的 5 片镜系统称为系统 P。

表 4 列出了系统 P 与系统 Z 的球差、畸变及像距，从表中可以看出，系统 P 的球差显然比系统 Z 的球差小，系统 P 的相对畸变率也比系统 Z 的相对畸变率小。像距 l' 比目标值像差 0.006 9%。所以从球差和畸变方面来说，系统 P 优于系统 Z。

表 5 列出了系统 P 与系统 Z 的子午光线弥散值,从表中可以看到,系统 P 中靠近主光线的弥散值比系统 Z 中靠近主光线的弥散值小,而系统 Z 边缘光线的弥散值小于系统 P 的边缘光线的弥散值。一般光束靠近主光线的光能量较强,而边缘光线的光能量较弱,所以靠近主光线的弥散值更小,可以提高成像质量。如果用评价函数 $\Phi(X_i)=\sum_i q_i \Delta F_i^2$ 来评价弥散

值总的大小,取 $q_i=1$,那么,系统 Z 的 $\Phi(X_i)=0.0129$,系统 P 的 $\Phi(X_i)=0.1526$,系统 Z 优于系统 P。

表 6 是系统 P 与系统 Z 的弧矢光线弥散值,包括 $\delta y'$ 和 $\delta z'$ 。对于离主光线较近的 $\delta y'$ 值,系统 P 优于系统 Z,相反,对于靠近边缘光线的 $\delta y'$ 值,系统 Z 优于系统 P。对于离主光线较近的 $\delta z'$ 来说,同样,系统 P 优于系统 Z,而对于近边缘光线的 $\delta z'$,系统 Z 优于系统 P。

表 5 用粒子群算法设计的 5 片镜系统与 ZEBASE 中 5 片镜系统的子午光线弥散值(D 光)对比

Tab.5 Comparison of dispersions for meridional rays generated in five-lens system designed with PSO and five-lens system from ZEBASE

ω_{max}		h_{max}										
		1.0	0.85	0.707 1	0.5	0.3	0	-0.3	-0.5	-0.707 1	-0.85	-1.0
1.0	(Z)	-0.012 5	-0.032 7	-0.033 4	-0.023 1	-0.011 8	0	0.005 3	0.004 4	-0.003 1	-0.012 0	-0.014 3
	(P)	0.095 3	0.046 0	0.020 9	0.004 9	0.000 4	0	0.000 9	0.004 4	0.023 8	0.069 8	0.210 9
0.85	(Z)	-0.011 9	-0.029 0	-0.028 8	-0.019 0	-0.009 2	0	0.004 9	0.006 5	0.004 8	0.001 2	0.002 2
	(P)	0.082 1	0.039 5	0.017 9	0.004 2	0.000 3	0	0.001 8	0.006 3	0.024 1	0.062 0	0.172 2
0.707 1	(Z)	-0.012 1	-0.026 4	-0.025 1	-0.015 6	-0.007 1	0	0.004 2	0.007 5	0.009 9	0.010 0	0.012 7
	(P)	0.069 1	0.033 1	0.014 9	0.003 5	0.000 3	0	0.002 0	0.006 8	0.022 6	0.053 4	0.139 0
0.5	(Z)	-0.013 8	-0.023 9	-0.021 3	-0.011 8	-0.004 6	0	0.003 2	0.007 8	0.014 1	0.017 6	0.021 0
	(P)	0.048 7	0.023 3	0.010 4	0.002 5	0.000 3	0	0.001 8	0.006 1	0.018 2	0.039 6	0.096 0
0.3	(Z)	-0.016 6	-0.022 8	-0.018 9	-0.009 4	-0.002 9	0	0.002 3	0.007 6	0.016 0	0.021 1	0.023 5
	(P)	0.026 6	0.012 7	0.005 4	0.001 2	0.000 2	0	0.001 3	0.004 4	0.012 5	0.025 7	0.059 4

表 6 用粒子群算法设计的 5 片镜系统与 ZEBASE 中 5 片镜系统的弧矢光线弥散值(D 光)对比

Tab.6 Comparison of dispersions for sagittal rays generated in five-lens system designed with PSO and five-lens system from ZEBASE

ω_{max}		h_{max}					ω_{max}		h_{max}				
		1.0	0.85	0.707 1	0.5	0.3			-0.3	-0.5	-0.707 1	-0.85	-1.0
1.0	(Z)	-0.008 4	-0.005 3	-0.003 2	-0.001 3	-0.000 4	1.0	(Z)	-0.005 4	-0.010 3	-0.013 9	-0.017 8	-0.020 1
	(P)	0.021 2	0.019 2	0.016 7	0.012 4	0.007 6		(P)	-0.001 3	-0.004 9	-0.007 4	-0.010 0	-0.011 5
0.85	(Z)	-0.007 2	-0.004 7	-0.003 0	-0.001 5	-0.000 6	0.85	(Z)	-0.015 0	-0.017 4	-0.019 2	-0.020 9	-0.022 0
	(P)	0.009 9	0.009 3	0.008 3	0.006 3	0.004 0		(P)	0.001 1	-0.001 1	-0.002 7	-0.004 2	-0.005 0
0.707 1	(Z)	-0.005 3	-0.003 5	-0.002 3	-0.001 1	-0.000 5	0.707 1	(Z)	-0.014 7	-0.015 7	-0.016 3	-0.016 9	-0.017 1
	(P)	0.004 6	0.004 6	0.004 2	0.003 3	0.002 1		(P)	-0.000 1	-0.001 3	-0.002 1	-0.002 8	-0.003 1
0.5	(Z)	-0.002 9	-0.001 9	-0.001 2	-0.000 6	-0.000 3	0.5	(Z)	-0.008 8	-0.008 6	-0.008 4	-0.008 1	-0.007 9
	(P)	0.001 3	0.001 5	0.001 4	0.001 2	0.000 8		(P)	-0.001 2	-0.001 5	-0.001 6	-0.001 6	-0.001 5
0.3	(Z)	-0.001 3	-0.000 8	-0.000 5	-0.000 2	-0.000 1	0.3	(Z)	-0.003 5	-0.003 2	-0.002 8	-0.002 4	-0.002 1
	(P)	0.000 3	0.000 4	0.000 4	0.000 3	0.000 2		(P)	-0.001 0	-0.000 9	-0.000 8	-0.000 6	-0.000 5

系统 Z 的 $\sum \delta y_i'^2=2.599 1 \times 10^{-4}$, $\sum \delta z_i'^2=0.004 6$; 系统 P 的 $\sum \delta y_i'^2=0.001 7$, $\sum \delta z_i'^2=4.027 4 \times 10^{-4}$ 。从弧矢光线弥散值总评价函数来说,系统 P 稍优于系统 Z。

表 7 是系统 P 与系统 Z 的子午场曲 Xt' (D 光) 对比。首先从表 7 中数字计算子午场曲的评价函数,系统 Z 的 $\sum Xt_i'^2=0.529 7$, 系统 P 的 $\sum Xt_i'^2=0.505 9$, 系统 P 稍优于系统 Z。其次从表中每一组数字的对比可以明显看出,系统 P 近主光线部分的子午场曲比系统 Z 近主光线部分的子午场曲小,而边缘光线正好相反。表 7 中列出了 25 个子午场曲值,系统 P 子午场曲 Xt' 绝对值大于 0.1 的 7 个,而这 7 个较大值全部处在近边缘光线上;系统 Z 的子午场曲 Xt' 的绝对值大于 0.1 的有 19 个,而这 19 个值大多数处在光束中间部分。一般中心光线所携带能量较边缘光线大,其在成像光束中的地位更加重要,特别是在激光扫描装置中的光束结构,所以校正好中心光线的像差应该更重要。

表 7 用粒子群算法设计的 5 片镜系统与 ZEBASE 中 5 片镜系统的子午场曲(D 光)对比

Tab.7 Comparison of meridional field curvatures generated in five-lens system designed with PSO and five-lens system from ZEBASE(D light)

h_{max}		ω_{max}				
		1.0	0.85	0.7071	0.5	0.3
1.0	(Z)	0.006 5	-0.050 2	-0.088 8	-0.124 8	-0.143 7
	(P)	-0.451 4	-0.352 7	-0.274 2	-0.185 9	-0.129 1
0.85	(Z)	0.086 6	-0.126 6	-0.152 2	-0.174 1	-0.184 2
	(P)	-0.109 6	-0.103 9	-0.093 4	-0.075 2	-0.060 0
0.707 1	(Z)	-0.152 0	-0.168 4	-0.175 7	-0.177 6	-0.175 3
	(P)	-0.016 3	-0.034 7	-0.042 2	-0.043 1	-0.039 5
0.5	(Z)	-0.194 2	-0.179 8	-0.163 1	-0.138 9	-0.120 4
	(P)	0.003 8	-0.016 3	-0.025 3	-0.027 9	-0.025 4
0.3	(Z)	-0.200 2	-0.165 3	-0.132 6	-0.091 0	-0.061 6
	(P)	-0.005 4	-0.018 7	-0.022 6	-0.019 9	-0.014 2

表 8 是系统 P 与系统 Z 的子午彗差(D 光)对比。系统 P 的 25 个彗差值中,最大值是 $1.0\omega_{max}1.0h_{max}$ 处的彗差 0.153 1, 而系统 Z 弧矢彗差的最大值是 $1.0\omega_{max}0.85h_{max}$ 处的 -0.022 4。在 25 个子午彗差值中,

系统 P 除几个值小于系统 Z 外,其余都大于系统 Z。系统 Z 子午彗差的评价函数 $\sum Kt_i'^2=0.001 7$, 系统 P 子午彗差的评价函数 $\sum Kt_i'^2=0.068 4$ 。所以从子午彗差来看,系统 P 劣于系统 Z。

表 8 用粒子群算法设计的 5 片镜系统与 ZEBASE 中 5 片镜系统的子午彗差(D 光)对比

Tab.8 Comparison of meridional comas generated in five-lens system designed with PSO and five-lens system from ZEBASE (D light)

h_{max}		ω_{max}				
		1.0	0.85	0.707 1	0.5	0.3
1.0	(Z)	-0.013 4	-0.004 8	0.000 3	0.003 6	0.003 5
	(P)	0.153 1	0.127 2	0.104 0	0.072 3	0.043 0
0.85	(Z)	-0.022 4	-0.013 9	-0.008 2	-0.003 1	-0.000 9
	(P)	0.057 9	0.050 8	0.043 3	0.031 4	0.019 2
0.707 1	(Z)	-0.018 3	-0.012 0	-0.007 6	-0.003 6	-0.001 4
	(P)	0.022 4	0.021 0	0.018 8	0.014 3	0.009 0
0.5	(Z)	-0.009 4	-0.006 3	-0.004 1	-0.002 0	-0.000 9
	(P)	0.004 7	0.005 2	0.005 2	0.004 3	0.002 8
0.3	(Z)	-0.003 3	-0.002 2	-0.001 4	-0.000 7	-0.000 3
	(P)	0.000 7	0.001 0	0.001 2	0.001 1	0.000 7

表 9 是系统 P 与系统 Z 的弧矢场曲 (D 光)对比。系统 Z 的子午场曲的评价函数 $\sum Xs_i'^2=0.406 1$,

表 9 用粒子群算法设计的 5 片镜系统与 ZEBASE 中 5 片镜系统的弧矢场曲(D 光)对比

Tab.9 Comparison of sagittal field curvatures generated in five-lens system designed with PSO and five-lens system from ZEBASE(D light)

h_{max}		ω_{max}				
		1.0	0.85	0.707 1	0.5	0.3
1.0	(Z)	-0.038 9	-0.073 7	-0.099 9	-0.127 4	-0.144 0
	(P)	-0.010 6	-0.038 5	-0.058 6	-0.079 0	-0.090 7
0.85	(Z)	-0.125 8	-0.146 1	-0.160 8	-0.175 6	-0.184 2
	(P)	0.010 1	-0.010 4	-0.024 7	-0.038 6	-0.046 3
0.707 1	(Z)	-0.148 1	-0.157 7	-0.163 9	-0.169 2	-0.171 8
	(P)	-0.001 3	-0.014 5	-0.023 1	-0.030 7	-0.034 4
0.5	(Z)	-0.123 8	-0.122 2	-0.119 6	-0.115 1	-0.111 3
	(P)	-0.018 4	-0.023 0	-0.024 7	-0.024 7	-0.023 6
0.3	(Z)	-0.082 9	-0.074 6	-0.066 5	-0.056 1	-0.048 6
	(P)	-0.025 4	-0.024 3	-0.021 6	-0.016 7	-0.012 4

系统 P 的子午场曲的评价函数 $\sum Xs_i'^2=0.0316$, 系统 P 优于系统 Z。从表中数字对比可以看出, 系统 P 的 25 个弧矢场曲 Xs' 全部小于系统 Z 的 25 个弧矢场曲, 并且两种系统中 $1.0\omega_{max} \sim 0.3\omega_{max}$ 视场的 $0.85h_{max}$ 、 $0.7071h_{max}$ 、 $0.5h_{max}$ 处的弧矢场曲相差一个甚至两个数量级。因此, 对于弧矢场曲来说, 系统 P 大大优于系统 Z。

表 10 是系统 P 与系统 Z 的弧矢彗差 Ks' (D 光) 对比。从 25 个弧矢彗差对比中可以看到, 系统 P 主光线附近处的光线弧矢彗差小于系统 Z 的弧矢彗差, 而边缘部分光线正好相反。系统 P 的 25 个弧矢彗差最大值是 $1.0\omega_{max}1.0h_{max}$ 处的 0.0212, 系统 Z 的弧矢彗差最大值为 $1.0\omega_{max}1.0h_{max}$ 处的 -0.0084。系统 Z 的弧矢彗差的评价函数 $\sum Ks_i'^2=2.5991 \times 10^{-4}$, 系统 P 的弧矢彗差的评价函数 $\sum Ks_i'^2=0.0017$ 。从弧矢彗差对比及其评价函数可以看出, 系统 Z 好于系统 P。

表 10 用粒子群算法设计的 5 片镜系统与 ZEBASE 中 5 片镜系统的弧矢彗差(D 光)对比
Tab.10 Comparison of sagittal comas generated in five-lens system designed with PSO and five-lens system from ZEBASE (D light)

h_{max}		ω_{max}				
		1.0	0.85	0.7071	0.5	0.3
1.0	(Z)	-0.0084	-0.0053	-0.0032	-0.0013	-0.0004
	(P)	0.0212	0.0192	0.0167	0.0124	0.0076
0.85	(Z)	-0.0072	-0.0047	-0.0030	-0.0015	-0.0006
	(P)	0.0099	0.0093	0.0083	0.0063	0.0040
0.7071	(Z)	-0.0053	-0.0035	-0.0023	-0.0011	-0.0005
	(P)	0.0046	0.0046	0.0042	0.0033	0.0021
0.5	(Z)	-0.0029	-0.0019	-0.0012	-0.0006	-0.0003
	(P)	0.0013	0.0015	0.0014	0.0012	0.0008
0.3	(Z)	-0.0013	-0.0008	-0.0005	-0.0002	-0.0001
	(P)	0.0003	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002

图 1 是用 ZEMAX 作的系统 Z 与系统 P 的二维结构及光路图, 图 2 是用笔者自编的光学设计软件所作的系统 Z 与系统 P 的结构及光路图。用 PSO 算

法可以很容易得到一系列较好的优化结果, 图 3 用 ZEMAX 软件画出了部分结果的结构图。

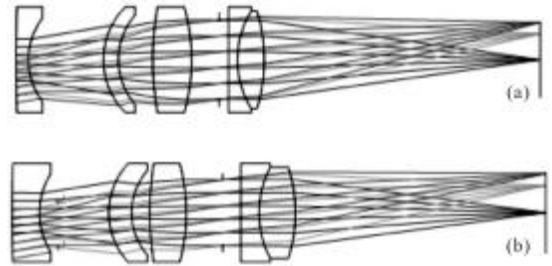


图 1 ZEBASE 中 5 片镜系统的二维光路图和用 PSO 算法设计的 5 片镜系统的二维光路图

Fig.1 Optical path layout of five-lens system from ZEBASE and optical path layout of five-lens system designed with PSO

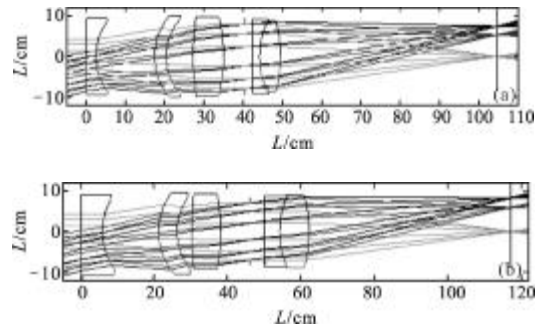


图 2 ZEBASE 中 5 片镜系统的二维光路图和用 PSO 算法设计的 5 片镜系统的二维光路图

Fig.2 Optical path layout of five-lens system from ZEBASE and optical path layout of five-lens system designed with PSO

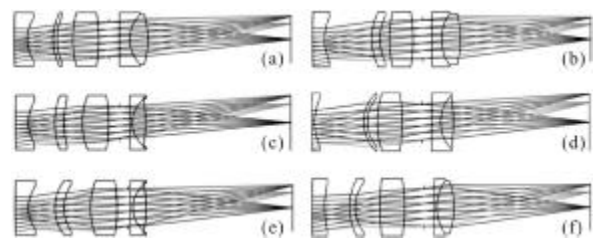


图 3 PSO 算法得到系列优化结果
Fig.3 PSO run results for five-lens system

4 结论

利用粒子群算法设计了一个 5 片镜系统, 并就球差、畸变、子午场曲、弧矢场曲、子午光线弥散值、弧矢光线弥散值、子午彗差、弧矢彗差对两种系统进行了对比。从对比结果看出, 系统 P 的球差、畸变、子午场曲、弧矢场曲、弧矢光线弥散值较小, 系统 Z 的

子午光线弥散值、子午彗差、弧矢彗差较小。系统 P 的 d 值中基本上都是整数,因此系统 P 结构简单。

从设计结果可以看出,用粒子群算法进行光学自动设计是一种简单有效的方法,使用这种方法只需要知道光学系统中每个透镜的大体形状(如,正透镜还是负透镜、凹面还是凸面、孔径光阑位置及光束孔径、系统总长度、像距等)和所要用的玻璃材料就可以进行设计,克服了现有光学设计软件要求必须先有一个具体的初始结构的限制。这种限制导致了找不到合适的初始结构就无法进入到下一个工作环节,大大浪费了设计人员的时间和精力。

现代光学设计软件大都采用最小二乘法,这种方法在初始结构的基础上需要计算结构参数的差商矩阵,如果变量或者校正的像差很多,则需要非常大的计算量,粒子群算法不需要计算差商矩阵,因此节省了大量的计算时间。利用粒子群算法进行光学系统设计可以得到一系列好的结果,可以根据实际需要选择其中的一种作为最佳选择。

参考文献:

- [1] Liu Lei, Gao Minghui, Li Lifu, et al. Primary mirror topological optimum design of space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1066-1069. (in Chinese)
刘磊, 高明辉, 李丽富, 等. 空间相机主反射镜结构拓扑优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1066-1069.
- [2] Wei Fuya, Liu Hongwu, Fu Chunlin. Reconstruction of fiber grating parameters from reflectivity using quantum particle swarm optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(2): 0205004. (in Chinese)
韦芙芽, 刘洪武, 付春林. 基于量子粒子群优化算法的光纤光栅参数重构[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0205004.
- [3] Xu Xiaohui, Zhang An, Duanmu Jingshun, et al. Remote sensing target recognition based on particle swarm classifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 551-554. (in Chinese)
徐小慧, 张安, 端木京顺, 等. 基于粒子群分类器的遥感图像目标识别[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(4): 551-554.
- [4] Jiang H M, Xie K, Wang Y F. C band single pump photonic crystal fiber Raman amplifier [J]. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54(13): 1927-1931.
- [5] Alireza Mowla, Nosrat Granpayeh. Optimum design of a hybrid erbium-doped fiber amplifier/fiber Raman amplifier using particle swarm optimization[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(5): 979-984.
- [6] Ding Hui, Wu Xiangnan, Liang Jianqi, et al. Application of PSO algorithm in wavelength detection of FBG sensors [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2): 563-566. (in Chinese)
丁晖, 吴相楠, 梁建奇, 等. 粒子群优化算法在光纤光栅传感器波长解调中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 563-566.
- [7] Hua Qin. Aberration correction of a single aspheric lens with particle swarm algorithm [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(13-14): 2996-3000.
- [8] Hua Qin. Particle swarm optimization applied to automatic lens design [J]. *Optics Communications*, 2011, 284 (12): 2763-2766.