

连续变焦系统的一阶结构设计方法研究

翟婷婷^{1,2} 朱健强^{1,2*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 机械补偿变焦系统一阶结构设计的核心问题是确定各组元的光焦度和各组元的间隔。为了减少设计时对经验的过多依赖,提出了一种连续变焦光学系统一阶结构优化设计方法。以各组元的光焦度和间隔为优化变量,构造不同变焦位置的运动方程,以像面稳定、系统总长和 Petzval 场曲作为评价函数,用粒子群优化算法寻找多维约束空间的最优解。为了验证该方法,优化设计了一个 10~100 mm 变焦范围的一阶结构。为机械补偿变焦系统一阶结构的求解提供了一种新思路。

关键词 光学设计; 变焦系统; 粒子群算法; 机械补偿; 一阶结构

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0722002

New Method for First-Order Structure Design of Continuous Zoom Lens System

Zhai Tingting^{1,2} Zhu Jianqiang^{1,2}

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The core issue for first-order structure design of mechanical compensated zoom system is to determine the optical power and distance of components. In order to reduce excessive dependence on designing experience, a method is proposed for first-order structure design of continuous zoom lens system. Taking the optical power and distance of components as optimization variables, the motion equations are generated at different zoom positions. Regarding the image plane stability, total length of system and Petzval field curve as the evaluation function, the optimal solution is searched in multi-dimensional constraint space by particle swarm algorithm. In order to verify the feasibility of the proposed method, a first-order structure is optimized with the focal length ranging from 10 mm to 100 mm. This paper provides a new idea of solving the first-order structure of mechanical compensated zoom system.

Key words optical design; zoom system; particle swarm algorithm; mechanically compensated; first-order structure

OCIS codes 220.4830; 220.2740; 080.2468; 080.2740

1 引 言

变焦系统一般可分成两大类,一类是光学补偿变焦,另外一类是机械补偿变焦^[1]。光学补偿变焦只能低倍率变焦,并且系统焦距变化不连续,应用范围比较局限,实际应用中多用于换挡变焦设计^[2]。机械补偿变焦能够满足大倍率连续变焦,并且像面稳定,成像质量较好,因此被广泛应用^[3-6]。以变倍组和补偿组二个组元同时运动实现变焦距的系统是机械补偿变焦系统中最常用的形式^[7]。在求变焦光学系统过程中,组元间隔和各组元的光焦度分配一直是求解初始结构的重点和难点,能否合理地进行光焦度分配、确定各组元的

收稿日期: 2015-02-02; 收到修改稿日期: 2015-03-15

作者简介: 翟婷婷(1992—),女,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: 978757650@qq.com

导师简介: 朱健强(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等方面的工作。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

间隔,直接决定了所设计的光学系统是否合理。一般而言,四组元机械补偿变焦的初始结构设计时需要根据光学设计者的经验对变倍、补偿单元进行光焦分配,这种分配方式对光学设计人员的设计经验要求极高,同时这种方法无法对设计系统的好坏进行量化。为了解决这一问题,科研人员对变焦系统一阶结构的自动优化求解进行了很多探索^[8-12]。

北京理工大学的李林等^[8]对机械补偿、双组联动、全动型变焦光学系统的高斯求解均有较详细的研究,根据已知的各个组元光焦度,以组元间距作为优化量,利用乘子罚函数法求解得到变焦曲线。Sourav Pal等^[9]提出了一种基于遗传算法的变焦结构计算方法,根据一个已知的定焦结构,通过遗传算法全局搜索获得短焦到长焦时的各个组元间隔,得到变焦曲线。Xuemin Cheng等^[10]研究了一个确定变焦系统初始结构参数的智能化专家系统,采用非线性最小二乘法求解超定方程组,实现了对变焦距镜头初始结构参数的自动设计,包括对任一变焦方式的高斯光学参数的计算,以及对各组元结构参数的自动生成和优化。以上这些方法都需要预先给定系统的光焦分配或者构建一个初始定焦结构,给缺乏经验的光学设计工作者带了较大的困难。此外,为了解决这个问题,北京理工大学的张丽琴通过设置边界条件,利用序列二次规划算法得到满足要求的光焦分配和变焦曲线,但这种方法优化过程中运算量很大,耗用优化时间随变量数量的增加而呈指数性增长,对探寻新的运动方式有一定的局限性^[11]。也有研究人员提出一种根据两个变焦位置计算光焦分配的方法,但是仍然需要已知第一组元和最后组元的光焦,适用范围有限^[12]。

粒子群优化算法(PSO)是基于群智能的随机优化算法,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^[15]。在众多优化算法中,PSO算法在多维约束函数空间寻找最优值具有收敛速度快、解质量高、稳健性好等优点已经被广泛应用在镜头设计^[13-15]、光纤光栅参数优化^[16]、成像定位^[17]、光纤放大器结构优化^[18]等领域。为了简化变焦系统一阶结构的设计难度,减少对经验的过多依赖,本文在此算法的基础上,将其与机械补偿变焦理论结合,用于获取最佳变焦系统的一阶结构解。不同于以往的做法,把组元的光焦度和组元间隔都作为优化变量,以变焦系统像面稳定、系统总长和Petzval场曲作为评价函数,将变焦系统一阶结构求解问题转化为多维约束空间的数学优化问题,得到满足变焦需要的解,克服现有光学设计软件高度依赖具体初始结构的缺点,可以自由选择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,并且运行速度快,大大提高了设计效率。最后根据此思想优化了一个10~100 mm变焦范围的一阶结构,验证了该方法的可行性。

2 机械补偿变焦光学系统的高斯解

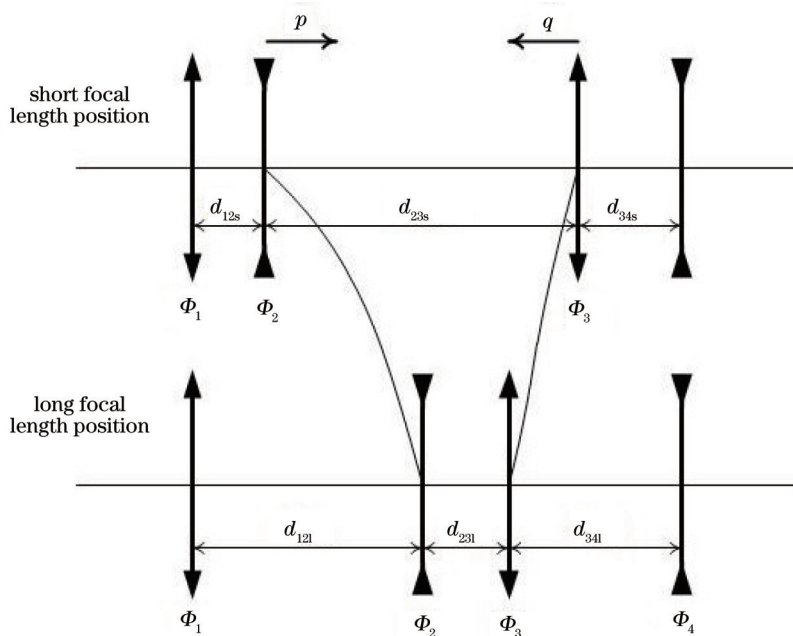


图1 机械补偿法正组补偿系统结构示意图

Fig.1 Positive compensating structure chart of a mechanical zoom lens

变焦过程可以理解为一个连续的微分方程,在变焦过程中,设变倍组和补偿组偏离初始状态位置的移动量分别用 p 和 q 表示。以正组补偿变焦系统为例,其组元的运动规律如图 1,变倍组和补偿组由系统的两端逐渐向中间靠拢。设计时,给出短焦时 d_{12s} 和 d_{34s} 和长焦时的 d_{23l} ,留出足够的间隔,使各组份不至于相碰。以长焦时的 m_{2l} 作为初始数据进行计算。

将变倍组的焦距 f_2' 取作规划值-1,再任设一组 $m_{2l}, f_3', f_4', d_{12s}, d_{34s}, d_{23l}$ (待优化,其中 m_{2l}, f_3', d_{23l} 三个参数决定系统的高斯解范围),可得补偿组的放大率为

$$m_{3l} = \frac{f_3'}{f_2'(1 - m_{2l}) - d_{23l} + f_3'} \quad (1)$$

变倍组 ϕ_2 每次移动量 p (p 为负值)后它的倍率 m_2 为

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2l}} - \frac{p}{f_2'}} \quad (2)$$

设系数 b :

$$b = -\frac{f_3'}{f_2'} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (3)$$

得补偿组 ϕ_3 的两个满足运动方程的解 m_{31} 和 m_{32} :

$$m_{31} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (4)$$

$$m_{32} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (5)$$

由补偿组 ϕ_3 的两个倍率 m_{31} 和 m_{32} ,得到满足运动方程补偿像面位移的移动量 q_1 和 q_2 :

$$q_1 = f_3'(m_{31} - m_{3l}) \quad (6)$$

$$q_2 = f_3'(m_{32} - m_{3l}) \quad (7)$$

于是,系统的总变焦比为

$$\Gamma_1 = \frac{m_{2old} m_{3old}}{m_2 m_{31}} \quad (8)$$

$$\Gamma_2 = \frac{m_{2old} m_{3old}}{m_2 m_{32}} \quad (9)$$

每一个变倍组 ϕ_2 的移动量 p ,对应 Γ_1 和 Γ_2 。选取 m_{31} 还是 m_{32} 作为补偿曲线,由系数 b 和起始位置的倍率决定。 m_3 有解的前提是 $|b| \geq 2$ 。

当 $b > 0$ 时, $m_{31} > 1$, $0 < m_{32} < 1$ 。若初始条件为 $|m_{3l}| > 1$,选取 m_{31} 作为补偿曲线;若 $|m_{3l}| < 1$,选取 m_{32} 作为补偿曲线。

当 $b < 0$ 时, $|m_{31}| < 1$, $|m_{32}| > 1$ 。若初始条件为 $|m_{3l}| < 1$,选取 m_{31} 作为补偿曲线;若 $|m_{3l}| > 1$,选取 m_{32} 作为补偿曲线^[1]。

从系统长焦位置开始计算,变倍组和补偿组一起运动,完成一次计算后,将计算的结果作为新的长焦位置,继续返回迭代计算,直到到达预定的总变焦比 N 为止,此时为短焦位置,变倍组 ϕ_2 向左移动到最左端。前固定组的焦距是

$$f_1' = d_{12s} + \frac{f_2'(1 - m_{2s})}{m_{2s}} \quad (10)$$

后固定组的放大率为

$$m_4 = \frac{f_4'}{f_4' + l_4} = \frac{f_4'}{f_4' + f_3'(1 - m_{3s}) - d_{34s}} \quad (11)$$

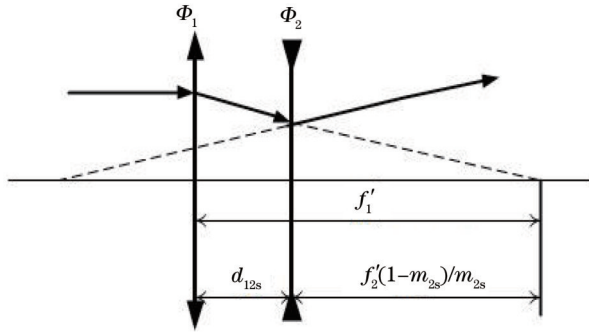


图2 短焦时变倍组位置

Fig.2 Positon of zoom lens at short focus

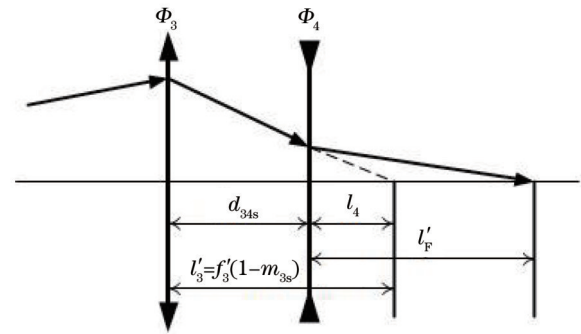


图3 短焦时补偿组位置

Fig.3 Positon of compensating lens at short focus

归一化系统短焦焦距为：

$$f'_s = f'_1 m_{2s} m_{3s} m_{4s}, \quad (12)$$

于是焦距缩放因子为：

$$V_{scale} = \frac{F_s}{f'_s}, \quad (13)$$

其中， F_s 表示实际要求变焦的短焦距。

长焦时满足：

$$d_{12l} = d_{12s} - \sum_{i=1}^k p, \quad (14)$$

$$d_{34l} = d_{34s} + \sum_{i=1}^k q, \quad (15)$$

其中， k 表示实际迭代次数。

对于任意变焦位置有：

$$d_{12}^j = d_{12l} + \sum_{i=1}^j p, \quad (16)$$

$$d_{34}^j = d_{34l} - \sum_{i=1}^j q, \quad (17)$$

$$d_{23}^j = d_{23l} - \sum_{i=1}^j p + \sum_{i=1}^j q, \quad (18)$$

其中， j 表示第 j 次迭代。

光学筒长：

$$L = (d_{12s} - \sum_{i=1}^k p + d_{23l} + \sum_{i=1}^k q + d_{34s}) \times V_{scale}, \quad (19)$$

系统总长即机械筒长：

$$L_{Total} = (d_{12s} - \sum_{i=1}^k p + d_{23l} + \sum_{i=1}^k q + d_{34s} + l'_F) \times V_{scale}. \quad (20)$$

将得到的 $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4, d_{12}, d_{23}, d_{34}$ 分别乘以 V_{scale} ，得到实际的参数。

对于负组补偿变焦结构，变倍组和补偿组两运动组元先相互靠近，然后一起向右运动，如图4所示。其高斯求解公式与正组补偿相同。

3 PSO 优化初始结构

PSO 是通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作最终达到群体最优的随机搜索算法^[11]。它于 1995 年由 Eberhart 博士和 Kennedy 博士发明，同遗传算法类似，系统首先初始化为一群随机粒子(随机解)，粒子通过迭代在解空间搜寻最优值。

在 PSO 算法中^[12]，粒子 i 在 N 维空间里的位置表示为一个矢量，所有的粒子都有一个被目标优化函数决

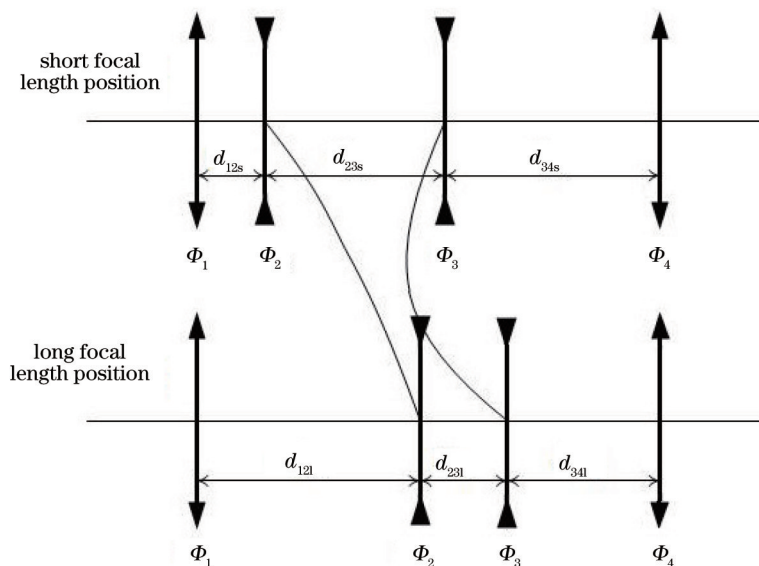


图4 机械补偿法负组补偿系统结构示意图

Fig.4 Negative compensating structure chart of a mechanical zoom lens

定的适应值,每个粒子还有一个速度矢量决定它们飞翔的方向和距离。假设 d 维搜索空间中的第 i 个粒子的位置和速度分别为 $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d})$ 和 $V_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d})$, 在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个最优解来更新自己,第一个就是粒子本身所找到的最优解,即个体极值 p_{best} , $P_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,d})$, 另一个是整个种群目前找到的最优解,即全局最优解 g_{best} 。在找这两个最优解后,粒子根据如下的公式更新速度和位置:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(t)], \quad (21)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), j = 1, 2, \dots, d, \quad (22)$$

其中, ω 为惯性权重, c_1 和 c_2 为正的学习因子, r_1 和 r_2 为 0 到 1 之间均匀分布的随机数。

变焦光学系统设计实践证明,变焦系统的高斯解取值是否合适,是带前提性、全局性的问题^[1]。高斯解的核心任务是选准在长焦时变倍组的倍率 m_{2l} , 变倍组和补偿组的间隔 d_{23l} , 补偿组的焦距 f'_3 三个关键参量。

由上一步变焦光学系统的高斯解的求解过程可知,需要 $m_{2l}, f'_3, f'_4, d_{12s}, d_{34s}, d_{23l}$ ($N=6$) 6 个初始参数。因此可以采用粒子群优化算法对这 6 个独立变量进行自动优化,得到使目标函数达到最优的一组变焦参数。

采用粒子群算法优化变焦参数的步骤如下:

1) 设置初始粒子位置 $x_0 = (d_{12s}, d_{34s}, d_{23l}, f'_3, f'_4, m_{2l})$, 上下限 a, b , 精度 c 和目标函数 G 。

目标函数设为

$$G = \omega_1 \sum_{i=1}^4 \varphi_i + \omega_2 L_{Total} \left(\varphi = \frac{1}{f'} \right), \quad (23)$$

其中 ω_1, ω_2 为目标权重, 因光学系统的场曲一般不能通过像差校正, 且系统总长不能为无限长, 因此目标函数控制光学系统的场曲和总长。

2) 随机初始化种群中 1000 个粒子的位置和速度:

$$x_i = a + \text{rand}(1, N)(b - a), i = 1, 2, \dots, 1000, \quad (24)$$

判断粒子是否满足变焦限制条件避免各组元变焦过程中相碰, 否则剔除:

$$d_{12s} > 0.1, d_{34s} > 0.1, d_{23l} > 0.1, \quad (25)$$

初始速度均设为 0.001。

3) 评价每个粒子的适应度 y_i (即目标函数值), 选取 40 个适应度最好的粒子, 将各粒子的位置和适应值存储在各粒子的 p_{best} 中, 将所有 p_{best} 中适应值最优个体的位置和适应值存储于 g_{best} 中:

$$p_{best}(i, :) = x(i, :), i = 1, 2, \dots, 40, \quad (26)$$

$$g_{best} = \min[p_{best}(i, :)]. \quad (27)$$

4) 用 (21),(22) 式更新粒子的速度和位置

$$v(i,:) = \omega v(i,:) + c_1 \text{rand}() [p_{\text{best}}(i,:) - x(i,:)] + c_2 \text{rand}() [g_{\text{best}} - x(i,:)], \quad (28)$$

$$x(i,:) = x(i,:) + v(i,:), \quad (29)$$

判断粒子是否满足 (25) 式在边界内, 若逃出边界则退回

$$x(i,:) = x(i,:) - v(i,:). \quad (30)$$

对每个微粒, 将其适应值与其经历过的最好位置的适应值作比较, 如果较好, 将其作为当前的最好位置, 更新 p_{best} :

$$p_{\text{best}}(i,:) = \min\{p_{\text{best}}(i,:), x(i,:)\}. \quad (31)$$

比较当前所有 p_{best} 和 g_{best} 的值, 更新 g_{best} 。

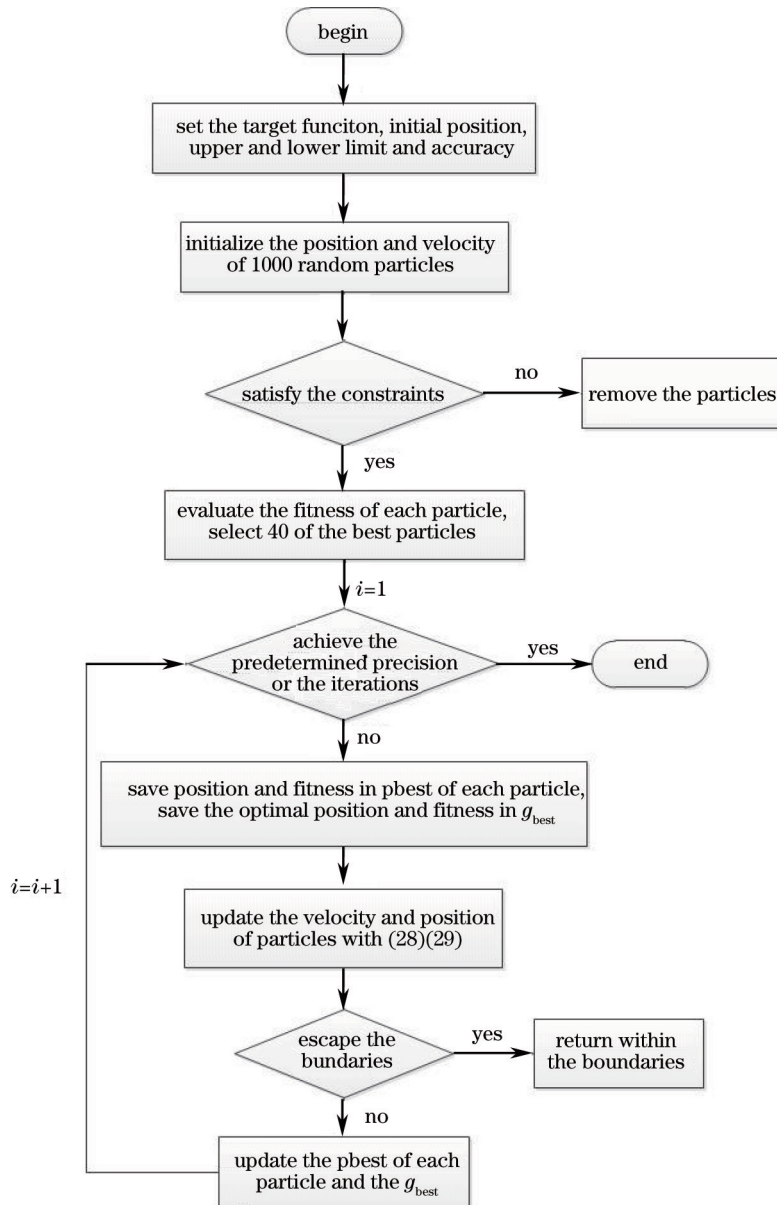


图5 粒子群算法优化变焦参数流程图

Fig.5 Flow chart of optimizing the zoom parameters with particle swarm algorithm

$$g_{\text{best}}(i,:) = \min\{g_{\text{best}}, \min [p_{\text{best}}(i,:)]\}. \quad (32)$$

若满足停止条件(预设的运算精度或迭代次数), 搜索停止, 输出结果; 否则返回 c) 继续搜索。

这里,停止条件为

$$\sum_1^N |g_{\text{best}} - \overline{p_{\text{best}}(i, :)}| < c, \quad (33)$$

或迭代次数大于 k ,跳出循环。采用粒子群算法优化的流程图如图 5 所示。

4 设计结果与分析

为了验证该方法,这里优化一个 10 倍的变焦系统,短焦 $F_s = 10$ 。采用粒子群算法优化的结果如图 6 和表 1 所示。

由图 6 和表 1 可以看出,随着粒子群优化算法迭代次数的增加,目标函数值不断下降,最终可接近为 0,精度达到 0.000001 以内。利用表 1 得到的优化后的初始参数可以计算变焦系统各个组元的焦距(光焦度分配)如表 2 所示。

表 1 粒子群算法优化参数及结果

Table 1 Optimized parameters and solutions with particle swarm algorithm

Optimized parameters	d_{12s}	d_{34s}	d_{231}	f_3'	f_4'	m_{21}	Iterations	Objective function	Accuracy
Value	0.1969	0.3179	0.4264	0.7041	-1.5940	-1.5129	104	1.0199×10^{-7}	8.9308×10^{-7}

表 2 变焦系统的各组元的焦距

Table 2 Focal length of components of the zoom lens system

Focal length	f_1'	f_2'	f_3'	f_4'
Value	142.9794	-29.6092	20.8478	-47.1971

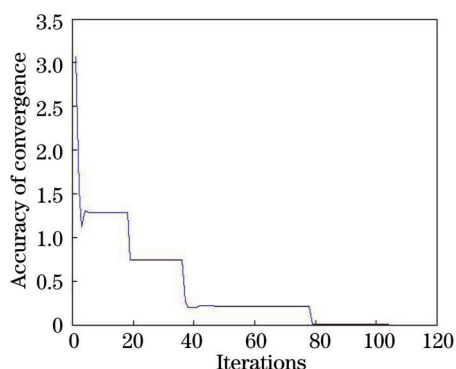


图 6 粒子群优化算法目标函数值的变化
Fig.6 Change of the accuracy of convergence with particle swarm optimization

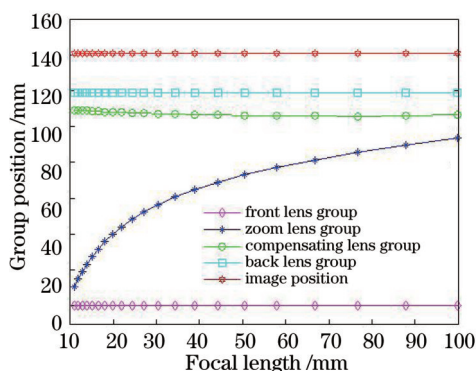


图 7 变焦系统各透镜组及像面的位置
Fig.7 Positon of lens groups and image surface of the zoom system

最终得到变焦系统各组元及像面的位置如图 7 所示,可以看出,设计的 10 倍变倍比变焦系统焦距范围在 10~100 mm;变焦组元凸轮曲线连续平滑;像面稳定,可实现连续变焦;系统总长在 140 mm 左右,结构紧凑;并且随着变倍组由短焦向长焦位置匀速运动,总焦距变化越来越快。选取中间 5 个变焦位置,其焦距、间隔如表 3 所示。

表 3 不同变焦位置的总焦距和间隔

Table 3 Total focal length and interval at different zoom positons

f' /mm	99.9312	78.0428	55.0031	33.0233	10.0000
d_{12} /mm	93.7694	85.9822	75.6189	59.3635	5.8301
d_{23} /mm	12.6508	19.8385	30.4063	47.6446	103.5536
d_{34} /mm	12.3763	12.9758	12.7712	11.7883	9.4128
L /mm	118.7964	118.7964	118.7964	118.7964	118.7964
l_f /mm	22.0807	22.0807	22.0807	22.0807	22.0807
Total /mm	140.8771	140.8771	140.8771	140.8771	140.8771

图 8 为变焦系统变倍组和补偿组的放大率变化。根据 Kazuo Tanaka 对机械补偿变焦系统的四种分类,优化出的结构属于机械补偿变焦系统中的第 II 类^[2]。将表 2,表 3 中的初始参数输入 Zemax 软件,可得最终高斯结构如图 9 所示,可以看出 PSO 得到的变焦系统布局合理,变倍组、补偿组移动均匀,可以实现连续变焦。

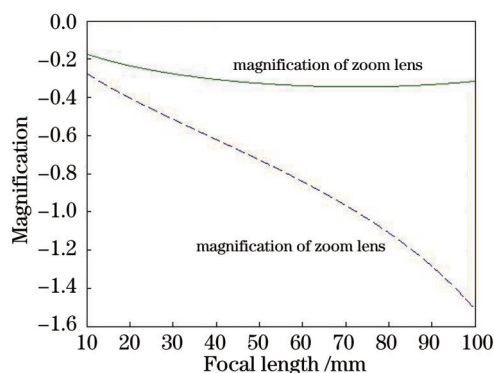


图8 变焦系统变倍组和补偿组的放大率变化

Fig.8 Magnification of zoom lens and compensating lens of the zoom system

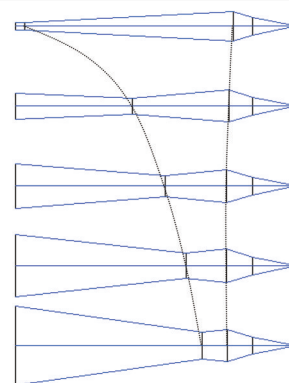


图9 变焦系统不同变焦位置的高斯结构

Fig.9 Gaussian structure layout at different zoom positions of the zoom system

5 结 论

变焦光学系统需要满足变焦过程中变焦组元凸轮曲线连续平滑、像面稳定、系统总长小等限制。传统的变焦系统设计更多地依赖经验进行光焦度及组元间隔分配,但这种方法无法对系统设计的质量进行量化。提出了一种基于粒子群优化算法的连续变焦系统的一阶结构优化设计方法,将各组元的光焦度和间隔作为优化变量,构造变焦系统运动方程,对组元间隔和Petzval场曲的要求分别设定为限制条件和目标函数,最终得到最优的变焦高斯结构,从而得到变焦曲线。该算法计算速度快,可以自由加入限制条件,计算出满足不同需求的最优变焦系统,为机械补偿变焦系统的后续设计提供了技术参考。

参 考 文 献

- 1 Tao Chuncan. Zoom Lens Design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 1-2.
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 1-2.
- 2 Xue Mingqiu. Photography Lens Design[M]. Beijing: Chinese Industry Press, 1971: 167-168.
薛鸣球. 电影摄影物镜光学设计[M]. 北京: 中国工业出版社, 1971: 167-168.
- 3 Zhou Hao, Liu Ying, Sun Qiang. Mid infrared zoom optical system with ratio of 25[J]. Acta Optic Sinica, 2012, 32(4): 0422001.
周 昊, 刘 英, 孙 强. 25倍中红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0422001.
- 4 Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Design of large zoom ratio middle wavelength infrared zoom optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422005.
李 岩, 张 葆, 洪永丰. 大变倍比中波红外变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422005.
- 5 R L Sinclair. High magnification zoom lens for 3-5um application[C]. SPIE, 1998, 3429: 11-18.
- 6 Grigoriy I Greisukh, Evgeniy G Ezhov, Il'ya A Levin, *et al.*. Design of the double-telecentric high-aperture diffractive-refractive objectives[J]. Appl Opt, 2011, 50(19): 3254-3258
- 7 Zhang Tingcheng, Liao Zhibo. Design of 6x cooled thermal imaging middle infrared continuous zoom optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122004.
张庭成, 廖志波. 6倍制冷型中红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122004.
- 8 Li Lin, Wang Yongtian, Zhang Liqin, *et al.*. An approach on the calculation of Gaussian parameters of zoom lenses[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(4): 424-427.
李 林, 王涌天, 张丽琴, 等. 变焦距物镜高斯光学参数的求解[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 424-427.
- 9 Sourav Pal, Lakshminarayan Hazra. Structural design of mechanically compensated zoom lenses by evolutionary programming[J]. Opt Eng, 2012, 51(6): 063001.
- 10 Xuemin Cheng, Yongtian Qang, Qun Hao, *et al.*. Expert system for generating initial layouts of zoom systems with multiple moving lens group[J]. Opt Eng, 2004, 44(1): 013001.
- 11 Gong Chun, Wang Zhenglin. Proficient in MATLAB Optimization[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
龚 纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

- 12 Kazuo Tanaka. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses.1: Four-component type[J]. Appl Opt, 1982, 21(12): 2174-2183.
- 13 Hua Qin. Particle swarm optimization applied to automatic lens design[J]. Optics Communications, 2011, 284(12): 2763-2766.
- 14 Hua Qin. Aberration correction of a single aspheric lens with particle swarm algorithm[J]. Optics Communications, 2012, 285(13-14): 2996-3000.
- 15 Qin Hua, Han Kezhen, Lei Chengxin, *et al.*. Correction of aberration for three-lens system by particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 64-72.
秦 华, 韩克祯, 类成新, 等. 用粒子群算法校正三片镜系统的像差[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 64-72.
- 16 Wei Fuya, Liu Hongwu, Fu Chunlin. Reconstruction of fiber grating parameters from reflectivity using quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0205004.
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.
- 17 Zhang Wenming, Wang Xin, Zhang Qiang, *et al.*. Positioning algorithm in multi-media refractive imaging system based on particle swarm optimization calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0515001.
张文明, 王 鑫, 张 强, 等. 基于粒子群标定的多介质折射成像定位算法[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0515001.
- 18 Alireza Mowla, Nosrat Granpayeh. Optimum design of a hybrider bium-doped fiber amplifier fiber Raman amplifier using particle swarm optimization[J]. Appl Opt, 2009, 48(5): 979-984.

栏目编辑: 韩 峰