

# 大孔径长焦距全画幅变焦镜头结构计算与优化设计

温林凯<sup>1,2</sup>, 刘英<sup>1\*</sup>, 姜洋<sup>1</sup>, 邢妍<sup>1</sup>, 孙强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 提出了广义拉格朗日乘子(GLM)算法、内点法和修正序列二次规划算法三种优化算法。采用像差分布合理的正-负-正-负-正镜头结构,设定合理的普适性参数,利用所提的三种方法计算获得了变焦范围为 30~100 mm、恒定  $F$  数为 2.8、视场角为  $24.421^\circ\sim 71.608^\circ$  的全画幅变焦镜头的高斯结构,并分析对比了三种优化算法。利用实际镜组替换由 GLM 算法获取的高斯结构,采用全球面设计,获得了满足成像要求的全画幅变焦镜头的优化设计,三条变焦和补偿曲线均具有良好的线性度,系统调制传递函数在 50 lp/mm 处的平均值均大于 0.1,该全球面设计为后期基于非球面优化设计提供了良好的初始结构。

**关键词** 光学设计; 全画幅变焦镜头; 最优化算法; 高斯结构

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.092201

## Structural Calculation and Optimal Design of Large-Aperture Long-Focal-Length Full-Frame Zoom Lens

Wen Linkai<sup>1,2</sup>, Liu Ying<sup>1\*</sup>, Jiang Yang<sup>1</sup>, Xing Yan<sup>1</sup>, Sun Qiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Precision Instrument and Equipment Research and Development Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Three optimization algorithms of generalized Lagrangian multiplier (GLM), interior point and modified sequence quadratic programming are proposed. By adopting a positive-negative-positive-negative-positive lens structure with a suitable aberration distribution and setting the reasonable and generally applicable parameters, the Gaussian structure of a full frame zoom lens with zoom range of 30-100 mm, constant  $F$ -number of 2.8, field-of-view angle of  $24.421^\circ\sim 71.608^\circ$  is obtained by the proposed three methods. These three optimization methods are analyzed and compared. The actual lens group is used to replace the Gaussian structure obtained by the GLM algorithm. The full spherical design is adopted and the obtained optimal design of the full-frame zoom lens meets the imaging requirements. Three zoom and compensation curves have good linearity, and the average value of the modulation transfer function of system is greater than 0.1 at 50 lp/mm. This full spherical design provides a good initial structure for the later aspheric optimal design.

**Key words** optical design; full-frame zoom lens; optimization algorithm; Gaussian structure

**OCIS codes** 220.2740; 080.3620; 110.5200

## 1 引言

大口径、长焦距、全画幅变焦镜头可以实现不同视场下高光通量、高分辨率的成像要求,是当前变焦系统发展的主要方向。变焦镜头高斯结构计算形

式、镜组光焦度分配、镜组间运动形式等因素对变焦镜头的实现至关重要,是变焦系统发展过程中研究的主要方向之一。早期,Herzberger<sup>[1]</sup>提出了高斯括弧法,Tanaka<sup>[2]</sup>将高斯括弧法应用到了机械补偿变焦镜头的设计中,首次实现了大视场变焦镜头的

收稿日期: 2018-11-21; 修回日期: 2018-11-25; 录用日期: 2018-11-28

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0307900,2018YFC0308102)

\* E-mail: liuy613@qq.com

设计,但由于其数学形式复杂,并未被广大的光学设计师所采用。近年来,Kryszczyński 等<sup>[3]</sup>利用矩阵光学获得了多组元变焦镜头高斯结构,Milde 等<sup>[4]</sup>将差分进化算法与序列二次规划、阻尼最小二乘相结合,求解变焦镜头的高斯结构。Pal 等<sup>[5-6]</sup>利用进化规划算法来计算三组与四组元变焦系统的高斯结构。陶纯堪<sup>[7-8]</sup>以垂轴放大倍率为参数提出了微分方程的计算方法。张丽琴等<sup>[9-10]</sup>将序列二次规划用于四组元全动型变焦镜头高斯结构的优化计算。Li 等<sup>[11-12]</sup>在变焦系统结构计算中考虑了赛德像差、镜组偏角等影响因素,实现了四组元全动变焦镜头高斯结构的优化计算。Song 等<sup>[13-14]</sup>提出将粒子群算法用于六组全动高变倍比高斯结构的求解当中。但是,当前计算方法的普适性不强,只能用于小靶面、小口径变焦系统的结构计算。

传统计算方法不利于获取大口径、长焦距、全画幅变焦系统合理的高斯结构,且在三组或四组全动设计中存在各镜组相对孔径较大、镜组负担重、轴上及轴外光束主光线入射高度大、初高级像差难以校正等问题。因此,本文从 5 组全动的变焦形式出发,将  $PW$ (像差特性参数)形式的三级赛德像差融入求解高斯结构的优化函数中,基于凸轮曲线为线性或者近线性形式便于实现的原则,分别利用三种最优化算法,即广义拉格朗日乘子法、内点法和修正序列二次规划算法来获得任意初始值的有效收敛的高斯

结构,并得出了三种算法的使用条件。以广义拉格朗日乘子法获得的初始结构为计算模型,通过实际镜组替换获得了焦距为 33~100 mm、恒定  $F$  数(系统焦距与入瞳的比值)为 3.0 的全画幅连续变焦系统的优化设计。此外,提出的算法对大口径、大靶面定焦镜头设计也具有普适性。

## 2 根据需求求解高斯镜头基本参数

在摄影领域,为了获取更好的观感效果,镜头焦距一般选为 35~85 mm,因此变焦系统焦距范围为 33~100 mm。为了获取较高的光通量,系统  $F$  数设定为 3,在整个变焦过程中保持恒定,从而保证了整个变焦过程能量不变。具体系统参数如表 1 所示。图 1 为变焦系统设计的具体流程图,首先确定所要设计的镜头参数,然后利用最优化算法进行高斯结构计算,再以此为基础进行实际镜片分配,最后利用光学设计软件 Zemax 进行优化设计。

表 1 变焦镜头参数

Table 1 Parameters of zoom lens

Serial number	Parameter	Technical indicator
1	Wavelength range	Visible light
2	Focal length /mm	33-100 (continuous)
3	$F$	3
4	Image size /mm	43.26 (diagonal length)
5	Angle of full field of view /( $^{\circ}$ )	24.421-66.510

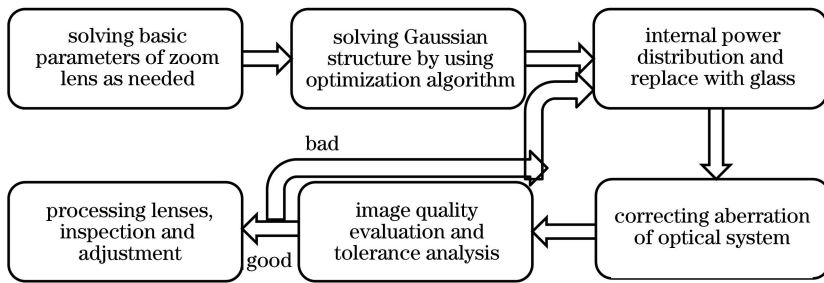


图 1 光学设计流程图

Fig. 1 Flow chart of optical design

## 3 高斯结构求解

### 3.1 变焦镜头高斯结构评价函数的构建

#### 1) 确定镜组运动形式

采用 5 组全动镜组结构,从便于实现大口径、大视场、长焦距变焦系统优化设计角度出发,取正-负-正-负-正结构形式。为了便于加工,变焦镜头凸轮曲线一般不超过四条,且运动形式越简单越好,即一般情况下线性度越高越好(斜率较小情况下)。图 2

为 5 组全动变焦镜头高斯结构示意图。图中取镜组 3 与镜组 5 线性联动,镜组 2 和镜组 4 分别线性运动,镜组 1 作为补偿组进行曲线运动,上、下两条光线分别为第一、第二辅助光线在各镜组上的入射高度及在光轴上孔径角,其中  $u(1) \sim u(5)$ 、 $u'(1) \sim u'(5)$ 、 $h_1 \sim h_5$  分别表示第一辅助光线在镜组 1~镜组 5 上的入射光线孔径角、出射光线孔径角和入射高度, $u_m(1) \sim u_m(5)$ 、 $u'_m(1) \sim u'_m(5)$ 、 $h_{m1} \sim h_{m5}$  分别表示第二辅助光线在镜组 1~镜组 5 上入射光线

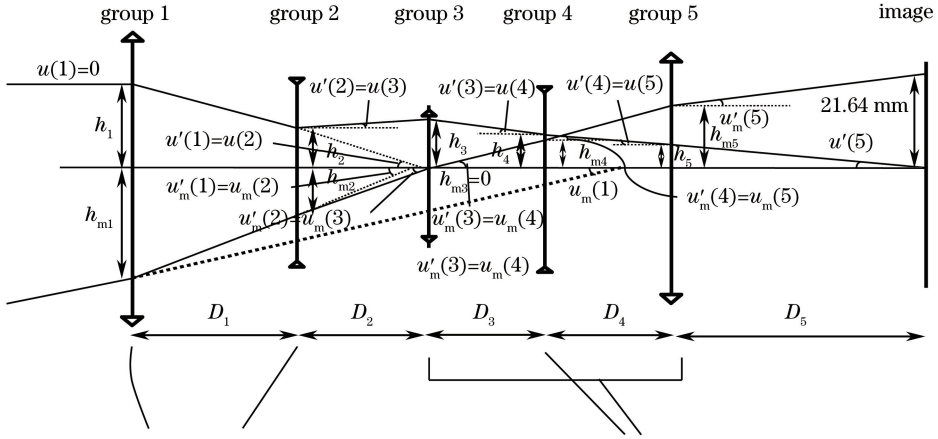


图 2 5组全动变焦镜头高斯结构示意图

Fig. 2 Diagram of Gaussian structure of five groups of motion zoom lenses

孔径角、出射光线孔径角和入射高度,  $D_1 \sim D_5$  分别为镜组 1 与镜组 2、镜组 2 与镜组 3、镜组 3 与镜组 4、镜组 4 与镜组 5、镜组 5 与像面之间的间隔。

## 2) 构建评价函数

本文的  $W$  取值以袁旭沧<sup>[15]</sup>《光学设计》里的定义为准, 定义满足像差及相对孔径的要求, 高斯结构的优化函数为

$$H_1 = \sum_{j=1}^n (\Delta_{j+1} - \Delta_j)^2, \quad (1)$$

$$\Delta_j = (D_{1j+1} + D_{2j+1} + D_{3j+1} + D_{4j+1} + D_{5j+1}) - (D_{1j} + D_{2j} + D_{3j} + D_{4j} + D_{5j}), \quad (2)$$

$$H_2 = \sum_{i=1}^5 [u'_w(i) - u_w(i)]^2, \quad (3)$$

$$H_3 = \sum_{i=1}^5 [u'_t(i) - u_t(i)]^2, \quad (4)$$

$$H_4 = 3 \times [u'_{wm}(1) - u_{wm}(1)]^2 + \sum_{i=2}^5 [u'_{wm}(i) - u_{wm}(i)]^2, \quad (5)$$

$$H_5 = 3 \times [u'_{tm}(1) - u_{tm}(1)]^2 + \sum_{i=2}^5 [u'_{tm}(i) - u_{tm}(i)]^2, \quad (6)$$

$$H_6 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2, \quad (7)$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^5 h_i^4 \varphi_i^3 P_i, \quad (8)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^5 (h_i^3 h_{mi} \varphi_i^3 P_i - J h_i^2 \varphi_i^2 W_i), \quad (9)$$

$$S_3 = \sum_{i=1}^5 (h_i^2 h_{mi}^2 \varphi_i^3 P_i - 2 J h_i h_{mi} \varphi_i^2 W_i + J^2 \varphi_i), \quad (10)$$

$$S_4 = \sum_{i=1}^5 [h_i h_{mi}^3 \varphi_i^3 P_i - 3 J h_{mi} \varphi_i^2 W_i +$$

$$J^2 \frac{h_{mi}}{h_i} (3 + \mu) \varphi_i], \quad (11)$$

$$W_i = W_i^\infty + (2 + \mu) \bar{u}_i, \quad (12)$$

$$P_i = P_i^\infty + \bar{u}_i (4W_i^\infty - 1) + \bar{u}_i (3 + 2\mu), \quad (13)$$

$$\bar{u}_i = u_i / (h_i \varphi_i), \quad (14)$$

$$H_7 = \sum_{j=1}^n [f_1 + (1 - 1/\beta_{2j}) \times f_2 - D_{1j}]^2, \quad (15)$$

$$H_8 = (f_1 \times m_t - f_t)^2 + (f_1 \times m_w - f_w)^2, \quad (16)$$

式中: 下标  $i, w, t, m$  分别表示第  $i$  镜组、广角端、摄远端、主光线; 下标  $j$  表示镜组移动到第  $j$  个位置;  $\beta_{2j}$  则表示第  $j$  个位置镜组 2 的垂轴放大率;  $n$  表示移动总数目;  $\Delta$  与  $S$  均表示记号参量;  $\mu$  表示平均折射率倒数;  $\varphi_i$  表示镜组光焦度;  $u_i$  表示摄远端或广角端的入射角;  $m_w, m_t$  分别表示系统广角端、摄远端的垂轴放大率;  $f_w, f_t$  分别表示广角端焦距、摄远端焦距;  $H_1$  表示补偿曲组线性度;  $H_2 \sim H_5$  表示轴上光线及主光线在各镜组上的偏折量;  $H_6$  表示系统的赛德像差 ( $PW$  表示法);  $P^\infty, W^\infty$  分别表示物距无穷远处薄透镜系统的基本像差参数;  $H_7$  表示由微量移动产生的光学系统像移量;  $H_8$  表示系统当前焦距与目标焦距的差距。综合考虑变焦曲线的线性度、光焦度分配, 以及像差特性等因素, 建立的系统综合评价函数为

$$f(x) = c_1 H_1 + c_2 H_2 + c_3 H_3 + c_4 H_4 + c_5 H_5 + c_6 H_6 + c_7 H_7 + c_8 H_8, \quad (17)$$

式中:  $c_1 \sim c_8$  表示相应的权重因子。根据 (1) ~ (16) 式, 可计算由变焦系统的高斯结构参数和像差向量参数组成的参数向量  $x_0$ 。

$$x_0 = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, P_1^\infty, P_2^\infty, P_3^\infty, P_4^\infty, P_5^\infty, W_1^\infty, W_2^\infty, W_3^\infty, W_4^\infty, W_5^\infty, D_2, D_3, D_4, D_5], \quad (18)$$

式中:  $f_1 \sim f_5$  表示镜组 1~5 的焦距值;  $P_1^\infty \sim P_5^\infty$  与  $W_1^\infty \sim W_5^\infty$  分别表示镜组 1~5 的像差特性参数;  $D_2 \sim D_5$  分别表示镜组 2~3 间距、镜组 3~4 间距、镜组 4~5 间距、镜组 5 与像面的间距。

### 3.2 优化算法

#### 1) 广义拉格朗日乘子法

广义拉格朗日乘子 (GLM) 法<sup>[16]</sup> 是结合罚函数与拉格朗日乘子来构造新的目标函数, 具体表达式为

$$L(x, M, v) = f(x) + \frac{M}{2} \sum_{p=1}^l h_p^2(x) - \sum_{p=1}^l v_p h_p(x), \quad (19)$$

式中:  $p$  表示边界序号;  $l$  表示总边界数;  $p = 1, 2, \dots, l$ ; 第一项表示原目标函数项, 第二项表示罚函数项, 第三项表示乘子项;  $h_p(x)$  表示边界条件;  $M$  表示常数;  $v_p$  表示拉格朗日乘子, 通过求解  $L$  的最小值可获得系统结构参量。求解  $L$  的最小值是一个无约束条件的优化问题, 采用拟牛顿法中广泛使用的方法——Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) 法进行优化处理, 即采用一个秩为 2 的矩阵来校正牛顿法中的 Hessian 矩阵, 既可以保证矩阵的正定性, 又可以使最终结果收敛到 Hessian 矩阵的逆矩阵上, 具体表达形式为

$$S_{k+1} = S_k + \left(1 + \frac{\gamma_k^T S_k \gamma_k}{\gamma_k^T \delta_k}\right) \frac{\delta_k \delta_k^T}{\gamma_k^T \delta_k} - \frac{(\delta_k \gamma_k^T S_k + S_k \gamma_k \delta_k^T)}{\gamma_k^T \delta_k}, \quad (20)$$

式中:  $S_k$  表示第  $k$  次 BFGS 算法中的代替矩阵;  $\delta_k$  表示第  $k$  次步长值;  $\gamma_k$  表示第  $k+1$  次与第  $k$  次梯度差值。

#### 2) 内点法

内点法在线性规划、二次规划, 以及凸规划计算中十分有效, 且已被用于非凸优化问题的求解<sup>[17]</sup>, 其表达式为

$$(x, y, \lambda, \tau) = f(x) - \tau \sum_{s=1}^q \ln y_s - \sum_{s=1}^q \lambda_s [c_s(x) - y_s], \quad (21)$$

$$c_s(x) \geq 0, \quad s = 1, 2, \dots, q, \quad (22)$$

式中:  $f(x)$  表示原目标函数;  $\tau$  表示屏障函数的常量参数;  $c_s(x)$  表示边界条件;  $y$  表示松弛变量;  $\lambda$  表示拉格朗日乘子; 下标  $s$  表示边界条件序号;  $q$  表示

边界条件数量。根据 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件可计算出每一次循环的变化方向。需要注意的是, 在利用内点法进行非凸优化问题求解时, 需要对凸优化问题求解中的对偶正规矩阵  $N_s$  进行修正<sup>[17]</sup>, 以使其在每次迭代过程中保持正定性, 修正算式表示为

$$N(x, y, \lambda) = \bar{H}(x, \lambda) + A^T(x) Y^{-1} A_s A(x), \quad (23)$$

$$\bar{H}(x, \lambda) = H(x, \lambda) + \eta I_E, \quad \eta \geq 0, \quad (24)$$

$$A(x) = [\nabla c_1(x), \dots, \nabla c_q(x)]^T, \quad (25)$$

式中:  $\bar{H}(x, \lambda)$  表示修正项;  $A_s$  表示边界条件的梯度;  $A_s = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q\}$ ;  $H(x, \lambda)$  表示拉格朗日函数的 Hessian 矩阵;  $\eta$  表示大于 0 的常数。由线搜索算法得到其步长值, 即可进行下一个循环迭代过程。

#### 3) 修正序列二次规划算法

文献[4, 9]中已经使用了二次规划算法讨论变焦镜头的设计, 对于非线性优化问题, 序列二次规划是行之有效的算法之一。其思想在于每次迭代运算, 通过求解一个二次规划子问题来确定目标函数下降的方向,

$$\min \frac{1}{2} \delta^T W_z \delta + \delta^T g_z, \quad (26)$$

$$\text{s.t. } A_{ez} \delta = -a_z, \quad (27)$$

$$A_{iz} \delta \geq -c_z, \quad (28)$$

式中:  $\delta$  表示待求量;  $W_z$  表示原函数的拉格朗日函数的 Hessian 矩阵;  $g_z$  表示原函数的梯度;  $A_{ez}$  与  $A_{iz}$  分别表示等式约束条件及不等式约束条件的梯度;  $a_z$  和  $c_z$  表示第  $z$  个等式约束条件及第  $z$  个不等式约束条件。使用序列二次规划算法解决非线性优化问题的关键点之一在于保证  $W_z$  的正定性, 确保寻找的方向是目标函数的下降方向, 而本文采用拟牛顿法中的 BFGS 校正公式<sup>[17]</sup> 对  $W_z$  进行校正, 保证了算法的任意值 (合理) 收敛性。

### 3.3 仿真计算及结果分析

为方便表示, 文中长度单位均为 mm 并省略。为了计算方法的通用性, 设每个镜组的焦距均为 100, 此时对应系统的摄远端、 $P^\infty$  和  $W^\infty$  值均为 0.1, 各组空气间隔随机依次设定为  $D_1, D_2 = 2, D_3 = 15, D_4 = 30, D_5 = 50, D_1$  数值通过高斯物像关系获得, 因此初始值可设定为

$$x_0 = [100, -100, 100, -100, 100, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 2, 15, 30, 50]. \quad (29)$$

针对三种优化算法对于边界条件的敏感性不



同,取不同的边界条件来定义合理的收敛域,如表2~4所示。

表2 广义拉格朗日乘子法下的镜组及总长度边界条件  
Table 2 Lens group and total length boundary conditions for generalized Lagrangian multiplier method

Mode	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	Total length
Long focal length	$\geq 25$	$\geq 0$	$\geq 1$	$\geq 0$	$\geq 155$
Short focal length	$\geq 1$	$\geq 0$	$\geq 0$		

表3 内点法下的镜组及总长度边界条件  
Table 3 Lens group and total length boundary conditions for interior point method

Mode	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	Total length
Long focal length	$\geq 0$	$\geq 0$	$\geq 0$	$\geq 0$	$\geq 130$
Short focal length	$\geq 2$	$\geq 0$	$\geq 0$		

表4 序列二次规划法下的镜组及总长度边界条件  
Table 4 Lens group and total length boundary conditions for sequence quadratic programming method

Mode	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	Total length
Long focal length	$\geq 0$	$\geq 0$	$\geq 0$	$\geq 0$	$\geq 49$	$\geq 120$
Short focal length	$\geq 0$	$\geq 0$	$\geq 0$	$\geq 0$		

结合(19)~(20)式,利用广义拉格朗日函数法拟牛顿算法可以得到参数矩阵为

表5 三种优化算法下各镜组焦距值与相对孔径

Table 5 Focal length and relative aperture of each lens group for three optimization algorithms

Algorithm	GLM method		Interior point method		SQP		
	Relative aperture	$f'$	$D/f'$	$f'$	$D/f'$	$f'$	$D/f'$
Group 1		67.36	1/0.80	113.05	1/1.17	138.78	1/1.30
Group 2		-25.33	1/0.54	-37.47	1/0.54	-44.12	1/0.72
Group 3		51.45	1/1.89	52.15	1/1.68	41.93	1/1.75
Group 4		-145.79	1/3.64	-118.83	1/3.25	-99.92	1/3.64
Group 5		74.86	1/1.48	84.85	1/1.82	85.23	1/1.97

### 3.4 总 结

在镜头运动形式确定的情况下,三种优化算法利用评价函数均可获得满足小像差要求的收敛值,且凸轮曲线均具有良好的线性度。对三种优化算法的比较分析如下:GLM算法属于无约束条件算法,收敛速度最快,适用于快速判断变焦镜头高斯结构运动形式与边界条件(收敛域)可行性;内点法稳健性好,获得的结果用于实际镜头设计中相对容易,但收敛速度最慢;修正序列二次规划算法收敛速度较

$$\mathbf{x}_0 = [67.35, -25.33, 51.45, -145.79, 74.86, 9.045, 0.8114, 1.3977, 0.0868, 0.1, 2.2546, -0.3491, 1.3077, 3.1401, 0.1, 25.60, 18.98, 32.84, 52.59]。$$

(30)

结合(21)~(25)式,利用内点法可以得到参数矩阵为

$$\mathbf{x}_0 = [113.05, -37.47, 52.15, -118.83, 84.85, -2.7570, 1.8765, 0.7060, 0.2884, 0.1700, 1.9598, -0.1374, 0.921, -1.1848, 1.0746, 34.11, 26.85, 23.31, 51.40]。$$

(31)

结合(20)式,(26)~(28)式,利用修正序列二次规划算法可以得到参数矩阵为

$$\mathbf{x}_0 = [138.78, -44.12, 41.93, -99.92, 85.23, 1.6369, -0.1237, 0.7590, -0.1342, 0.0754, -0.5208, 1.0841, 1.0917, 1.6040, -0.2275, 20.66, 0.26, 37.87, 52.30]。$$

(32)

利用高斯物像关系,计算三种优化算法所得高斯结构参数的 $D_1$ 分别为29.18、44.09、61.21,摄远与广角端总长分别为159.19、157.79、180.58、182.42、172.30、150.43。变焦过程 $F$ 数保持2.8不变。为确定镜组内的组份数及可行性,必须了解镜组相对孔径,三种优化算法得到的各镜组焦距值与相对孔径的大小如表5所示。

三种算法的凸轮曲线如图3所示,不同的曲线颜色表示不同的镜组,而不同的线型表示不同的算法,纵坐标为各镜组与像面的距离,横坐标为抽样点序号。

快,但是对边界条件非常敏感,算法容易发散。三种优化算法的计算结果如表6所示,GLM算法系统总长最短,口径最小,适用于变焦镜头的小型化设计,内点法得到的总长最长,口径较GLM大,而修正序列二次规划算法得到的口径最大。

## 4 基于GLM算法的实例设计

鉴于上述分析,选取GLM算法实现一个全画幅、恒定大光圈( $F \# 3.0$ )、33~100mm连续变焦镜

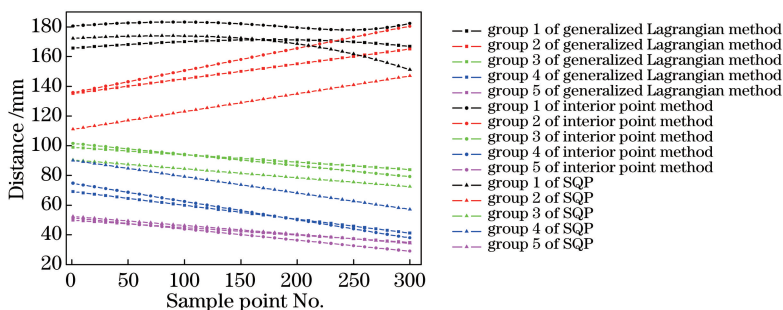


图 3 变焦镜头凸轮曲线

Fig. 3 Cam curves of zoom lens

表 6 三种优化算法计算结果

Table 6 Calculation results of three optimization algorithms

Algorithm	Total length of telephoto mode /mm	Total length of wide-angle mode /mm	Largest relative aperture value (aperture/focal length)	Aperture of group 1
Generalized Lagrangian method	159.19	157.79	1/0.54	84
Interiorpoint method	180.58	182.42	1/0.54	97
Modified sequence quadratic programming	172.30	150.43	1/0.72	106

头实际镜组的替换和优化。为避免各个镜组之间像差相互迭加,导致设计失败,本文设定各运动镜组自身具有像差平衡校正功能,故而每个镜组至少包含一组胶合镜,镜片数量的确定需考虑各镜组相对口径对像差的影响。例如:镜组 1 相对孔径为 1/0.8,属于大口径系统,需采取 3 片以上镜片,由视场与孔径带来的高级像差大,为了更好地校正像差,镜组 1 采用四组分形式;镜组 2 相对孔径为 1/0.54,属于超大口径系统,在整个系统变焦过程中运动总长最大,且第一辅助光线与第二辅助光线在其上的入射角及入射高度变化大,对于系统整体像差贡献最大,为了更好地校正镜组像差与系统整体色差,也应采用四组分形式,并引入两组胶合镜组;镜组 3~5 的相对

孔径小,一般采用单组胶合或一片单镜与胶合组合的形式。根据确定的各镜组结构形式,利用  $PW$  像差理论获得各镜组中镜片的结构参数,并通过光学系统优化设计软件将获得的结构作进一步的优化。为了保证实际各镜组凸轮曲线的线性度与初始计算高斯结构的一致性,并实现 3 倍变焦,必须使各个实际替换镜组主平面与初始计算高斯结构之间的偏差尽量小。通过实际镜组替换和光学设计软件的优化设计,获得的全球面光学系统的光路结构及分析结果如图 4~6 所示。由图可知,在  $F \# 3.0$  孔径下,光学系统的平均传递函数在 50 lp 处均大于 0.1,在控制主平面条件下进行像差校正得到的凸轮曲线与初始高斯结构相吻合。

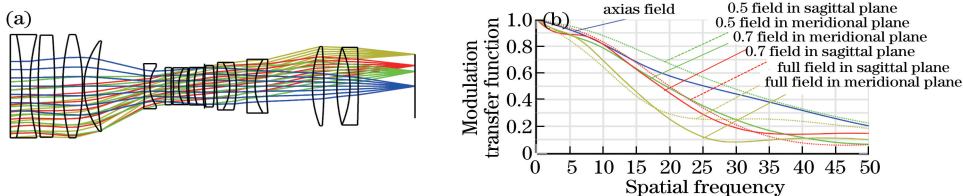


图 4 摄远端示意图及其调制传递函数。(a)摄远端示意图;(b)摄远端在  $F \# 3.0$  下传递函数

Fig. 4 Diagram of telephoto mode and its modulation transfer function. (a) Diagram of telephoto mode; (b) transfer function of telephoto mode under  $F \# 3.0$

## 5 结 论

高斯结构对于变焦镜头设计至关重要,其光焦

度分配、镜组间距大小、运动形式及凸轮曲线线性度等因素都将直接影响到后续镜头的像差校正与加工装调。考虑凸轮曲线的可加工与装调性,各镜组采

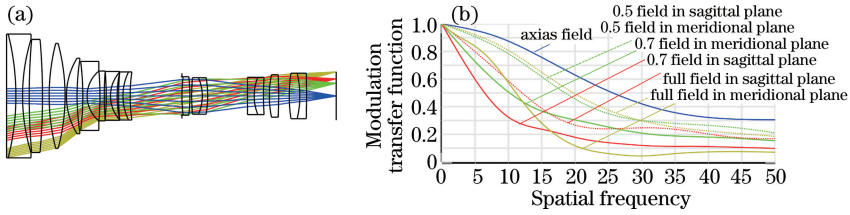


图 5 广角端示意图及调制传递函数。(a)广角端示意图;(b)广角端在  $F \# 3.0$  下传递函数

Fig. 5 Diagram of wide-angle mode and modulation transfer function. (a) Diagram of wide-angle mode; (b) transfer function of wide-angle mode under  $F \# 3.0$

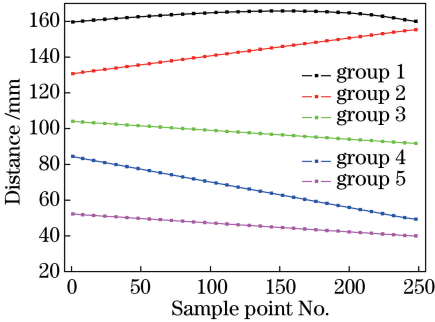


图 6 33~100 mm 全动变焦镜头实际凸轮曲线

Fig. 6 Actual cam curves of 33-100 mm motion zoom lenses

用简单的运动形式,曲线线性度好,在确定运动形式的情况下,利用三种最优化算法,即广义拉格朗日乘子法、内点法和修正序列二次规划算法得到 5 组全动、全画幅、恒定光圈的连续变焦镜头的高斯结构。所获得的高斯结构满足像差评价函数,具有很高的实用性。其中,广义拉格朗日法属于无约束条件算法,收敛速度最快,长度最短,口径最小,适用于变焦镜头的小型化设计,因此,本文利用广义拉格朗日乘子法获得的高斯结构进行实际镜组替换,在进行像差校正的同时,控制主平面间距与高斯结构的一致性,采用全球面设计,最终完成了变焦范围为 33~100 mm,恒定光圈为  $F \# 3.0$  的全画幅连续变焦镜头优化设计。该系统凸轮曲线线性度好,便于实现,成像质量基本满足使用需求,通过合理的引进非球面,对系统剩余高级像差进行校正,将进一步提高系统的成像质量。

参 考 文 献

[1] Herzberger M. Gaussian optics and Gaussian brackets [J]. Journal of the Optical Society of America, 1943, 33(12): 651-655.  
 [2] Tanaka K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses 3: five-component type[J]. Applied Optics, 1983, 22(4): 541-553.  
 [3] Kryszczyński T, Leśniewski M, Mikucki J. Use of

matrix optics to analyze the complex multi-group zoom systems[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8697: 86970I.  
 [4] Milde T, Zimmermann T. Toward a paraxial pre-design of zoom lenses [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9580: 958005.  
 [5] Pal S, Hazra L. Structural design of mechanically compensated zoom lenses by evolutionary programming[J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 063001.  
 [6] Pal S, Hazra L. Ab initio synthesis of linearly compensated zoom lenses by evolutionary programming[J]. Applied Optics, 2011, 50(10): 1434-1441.  
 [7] Tao C K. Zoomoptical system design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 33-40, 121-135.  
 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 33-40, 121-135.  
 [8] Tao C K. Design of zoom system by the varifocal differential equation I[J]. Applied Optics, 1992, 31(13): 2265-2273.  
 [9] Zhang L Q, Wang Y T, Li L. Method of determining Gaussian parameters for zoom systems with multiple moving lens groups[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(5): 572-576.  
 张丽琴, 王涌天, 李林. 多组元全动型变焦距透镜高斯光学参数的求解方法 [J]. 光学学报, 2002, 22(5): 572-576.  
 [10] Wang Q, Wang G Y, Cheng X M, et al. Gauss optics of zoom lenses[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 983-988.  
 王琦, 王光宇, 程雪岷, 等. 变焦距镜头高斯光学设计的新方法 [J]. 光学学报, 2002, 22(8): 983-988.  
 [11] Li X T, Cen Z F. Optmization design of zoom lens systems[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4927: 44-50.  
 [12] Li X T, He G X. Research of optimization design for zoom lens Gaussian parameters [J]. Journal of

- Zhejiang University(Natural Science), 1993, 27(1): 122-127.
- 李晓彤, 何国雄. 变焦距系统高斯解优化的研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1993, 27(1): 122-127.
- [13] Song Q, Huang H, Lv X B, *et al.* An approach for generating the first order structure of multi-movable zoom lens[J]. Optics Communications, 2016, 359: 399-404.
- [14] Huang H, Li X N, Song Q. New method for all movable zoom lens first order design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s122004.
- 黄浩, 李湘宁, 宋强. 一种全动变焦系统的高斯参数计算方法探究[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s122004.
- [15] Yuan X C. Optical design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 237-238.
- 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 237-238.
- [16] Zhang G D. Computational methods for nonlinear optimization[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 292-308.
- 张光澄. 非线性最优化计算方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 292-308.
- [17] Antoniou A, Lu W S. Practical optimization: algorithms and engineering applications[M]. Berlin: Springer, 2007: 501-529.