

末组补偿变焦镜头设计

张振洲 张庭成 宗肖颖 廖志波

(北京空间机电研究所, 北京 100090)

摘要 阐述了一种新型的末组补偿变焦镜头的设计方法。以最小偏折角为目标函数优化薄透镜系统, 推导了便于编程的像差系数的矩阵形式, 构建了基于点列弥散圆的目标函数对各薄透镜 P, W 参数进行优化, 编写宏语言实现了薄透镜的实例化, 最终得到变焦镜头的初始结构。充分结合了传统 PW 法获得有潜力初始结构的能力和现代优化算法强大高效的优点。依据给出的方法, 得到了一个焦距为 5~50 mm, F 数为 1.6, 且具有优良成像质量的 10 倍末组补偿连续变焦镜头, 证明了所述方法的优越性和实用性。

关键词 光学设计; 变焦镜头; 优化

中图分类号 TN942.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP50.122201

Design of Rear-Focus Zoom Lens

Zhang Zhenzhou Zhang Tingcheng Zong Xiaoying Liao Zhibo

(Beijing Space Mechanics and Electronics Institute, Beijing 100090, China)

Abstract The principle and method of designing rear-focus type zoom lens are presented. The main ideas include optical power determination of each lens group, P, W parameters optimization based on system aberrations balance, and getting the initial real lens groups. By this method, a rear-focus continuous zoom lens, with focal length of 5~50 mm, F -number of 1.6 and good image quality, is obtained. The effectiveness of the method is proved by this example.

Key words optical design; zoom lens; optimization

OCIS codes 220.3620; 220.4830; 080.2740

1 引言

末组补偿变焦镜头属于典型的四组机械补偿变焦形式, 但异于通常第三组作为补偿组、而采用末组进行焦移补偿的变焦镜头, 兼顾了补偿变倍过程中像面移动和调焦的功能。它避免了调焦过程中光线高度的剧烈变化, 具有像面稳定、焦距连续可变、易实现大变倍比和结构紧凑等优点, 在照相摄影和视频监控等领域有着广泛的应用^[1-2]。

此种结构的镜头最早由 Tanaka^[3] 提出并给出实例, 后续又有不少基于此结构的专利出现^[3-5], 但鲜有针对此种结构变焦镜头设计方法的详细阐述。Park 等^[6] 提出了一种基于商业光学软件 Code V 中 Lens Module 模型的初始结构的设计方法, 将每组透镜看作薄透镜, 将其初级像差作为变量对系统优化, 进而得到满足要求的初始结构。由于忽略了薄透镜的初级像差间内在的关联性, 因而据此优化得到的薄透镜难以实例化。

本文提出一种将传统的 PW 法和现代优化软件相结合的设计方法, 对这种结构的变焦镜头进行了详细的设计。首先使用商业光学软件, 以外形参数、光线偏折角最小为约束, 以各组光焦度、间隔为变量优化得到薄透镜系统; 然后用遗传算法对各薄透镜组的归一化像差参数 P, W 进行优化, 得到最小的弥散斑; 最后由求得的 P, W 参数为目标函数, 优化得到薄透镜的实例, 得到整个系统的初始解。

根据文中所述方法, 设计了一款 1/3 inch (1 inch=2.54 cm) CCD 的 10 倍变焦镜头, 此镜头在不同焦距、各视场 125 lp/mm 的调制传递函数(MTF)值在 0.3 以上, 中心视场 MTF 优于 0.5, 具有良好的成像质量。

收稿日期: 2013-08-12; **收到修改稿日期:** 2013-09-06; **网络出版日期:** 2013-11-08

作者简介: 张振洲(1984—), 男, 硕士工程师, 主要从事光学设计、光学检测与装调等方面的研究。

E-mail: zzz0921@163.com

2 末组补偿变焦镜头设计方法

2.1 薄透镜系统

末组补偿变焦镜头的原理如图 1 所示,第二组负透镜为变倍组,第四组正透镜为补偿组,以补偿由变倍组引起的焦面变化,保证像面的稳定。图中 W, M, T 分别表示短焦中焦和长焦。

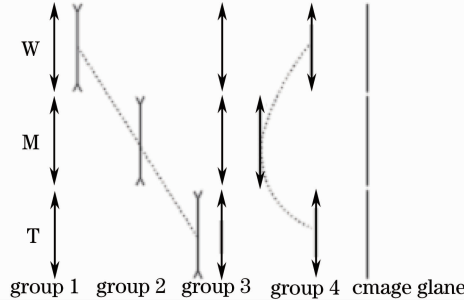


图 1 末组补偿变焦镜头变焦示意图

Fig. 1 Zoom layout of rear focus zoom lens

商业光学设计软件中,均可将透镜作为薄透镜处理,甚至能够预先考虑实体化后的厚度。将各组透镜的焦距、间隔作为变量,以系统的焦距、总长、后焦以及避免碰撞的预留间隔作为约束,构造光线最小偏折角的目标函数^[7]对系统进行优化。

本文中光线偏折角的目标函数为

$$F = \sum_{N_z=1}^3 \sum_{N_g=1}^4 [(\Delta u_m)^2 + (\Delta u_c)^2], \quad (1)$$

式中 Δu_m 为边缘光线的偏折角, Δu_c 为主光线的偏折角, N_z 和 N_g 分别为变倍位置和透镜线编号。

需要指出的是,高斯解是在外形参数约束下的优化,是满足外形条件的最优解。这种方法得到的高斯解在满足外形条件的基础上能够使光路更加顺畅、光焦度分配更加合理,避免了人为分配光焦度的不合理性,在以后的优化中也会更有潜力提高像质。优化完成后可以得到各组薄透镜的光焦度和间隔。

2.2 求解 P, W 值

初级像差系数^[8-9]可以写成矩阵的形式以便于计算和编程,将归一化后无穷远处的 \bar{P}_∞ 、 \bar{W}_∞ 参数代入到初级像差系数公式中,可整理成如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} S_{1j} \\ S_{2j} \\ S_{3j} \\ S_{4j} \\ S_{5j} \end{bmatrix} = C_{Pj} \begin{bmatrix} \bar{P}_{\infty 1} \\ \bar{P}_{\infty 2} \\ \bar{P}_{\infty 3} \\ \bar{P}_{\infty 4} \end{bmatrix} + C_{Wj} \begin{bmatrix} \bar{W}_{\infty 1} \\ \bar{W}_{\infty 2} \\ \bar{W}_{\infty 3} \\ \bar{W}_{\infty 4} \end{bmatrix} + C_{Cj} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中 S_{1j} 、 S_{2j} 、 S_{3j} 、 S_{4j} 和 S_{5j} 分别为光学系统在第 j 个焦距值下的球差、彗差、像散、场曲和畸变; C_{Pj} 、 C_{Wj} 和 C_{Cj} 是与各组元的边缘光线投射高、主光线投射高、归一化的边缘光线与光轴的夹角等相关的系数。在各组光焦度、间隔已求得的情况下,可以通过追迹近轴光线得到这些常数参数,因此(2)式实际上是关于 \bar{P}_∞ 、 \bar{W}_∞ 的线性方程组。

对于一个最优的变焦系统,并非对应各焦距段的所有像差系数都最小,而通常是不同的焦距段分别残留不同的像差,以达到各焦距段的均衡像质。如果直接优化该线性方程组使初级像差最小,则人为地使解空间更加严格,对于实际系统而言未必最优。光学设计软件的发展过程也证明了单纯对初级像差进行优化的不合理性。针对这个问题,通过使系统点列弥散斑最小化的思路来构造一个新的评价函数^[10]:

$$F_M = \sum_{N_z=1}^3 \sum_{N_f=1}^2 \sum_{N_r=1}^{24} \sqrt{x_{\text{img}}^2 + y_{\text{img}}^2}, \quad (3)$$

式中 N_f 和 N_r 分别为视场和光线的编号,

$$x_{\text{img}} = S_1(x_{\text{ep}}^2 + y_{\text{ep}}^2)x_{\text{ep}} + S_2 h_{\text{img}}(x_{\text{ep}}^2 + y_{\text{ep}}^2) + h_{\text{img}}^2(S_3 + S_4)x_{\text{ep}}, \quad (4)$$

$$y_{\text{img}} = S_1(x_{\text{ep}}^2 + y_{\text{ep}}^2)y_{\text{ep}} + 2S_2h_{\text{img}}x_{\text{ep}}y_{\text{ep}} + h_{\text{img}}^2(3S_3 + S_4)y_{\text{ep}}, \quad (5)$$

式中 h_{img} 为像高, $x_{\text{ep}}, y_{\text{ep}}$ 为光线在入瞳的归一化坐标, $x_{\text{img}}, y_{\text{img}}$ 为光线在像面上相对主光线的坐标。在实际的计算过程中, 对每个变焦位置选取中心和边缘两个视场并对每一视场充满入瞳且均布的 24 条光线进行追迹, 如图 2 所示。

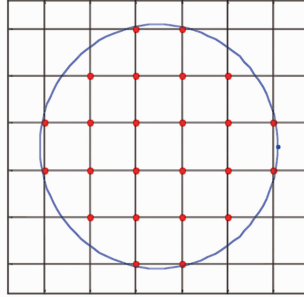


图 2 光线在光阑处分布图

Fig. 2 Footprint points of rays at the entrance pupil

想要求解的四对像差参数 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty$ (共 8 个变量), 作为变量隐于上述四个初级像差系数中。 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty$ 的求解实际上是超定线性方程组求解问题, 为了保证运算的稳定性和精度、避免陷入局部极小值, 采用遗传算法对上述目标函数进行优化获得每组像差参数 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty$ 。经验证采用遗传算法得到的结果明显优于通常采用的阻尼最小二乘法, 得到的系统像差系数小很多。

2.3 薄透镜的实例化

得到各组的 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty$ 后, 需要据此对薄透镜进行实例化。为了省去繁琐的计算和光焦度分配的多次尝试以提高设计效率, 根据 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty$ 的定义编写了 Code V 宏程序, 追迹近轴光线得到实际镜组的 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty$ 参数, 以 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty$ 以及轴上色差为目标函数, 通过对初始镜组优化即可得到薄透镜的实例。这样既可以把玻璃的厚度直接考虑进去 (由于加入了镜片厚度, 在优化过程中选取小视场、小口径光束进行初级像差计算), 以保证合理的中心、边缘厚度和曲率半径, 又不需要提前分配光焦度; 玻璃材料也可作为优化变量, 扩大了材料的选择空间。

薄透镜实例化后, 还需要对组间间隔进行微调, 确保实际系统与薄透镜系统一致。至此可得到满足要求的初始结构。

3 设计实例

首先给出系统的设计要求, 如表 1 所示。

表 1 变焦镜头的设计要求

Table 1 Specifications of zoom lens

Parameter	Value
Effective focal length /mm	5~50
F number	1.6
Half image height /mm	3
Pixel size / μm	4
Overall length /mm	≤ 75
Wave length	435~656
MTF at 100 circles per millimeter	0.3
Distortion /%	≤ 8

根据上述方法, 以最小光线偏折角和外形参数为目标优化薄透镜结构, 得到高斯解。其中各组薄透镜焦距和不同焦段间隔如表 2、3 所示。然后以(4)式为目标函数, 利用遗传算法对薄透镜组的 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty$ 参数进行全局优化, 得到各组薄透镜最优的 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty$, 如表 4 所示。表 5 为在此参数下系统的初级像差以及弥散斑半径 [均方根 (RMS) 值], 从结果可以看出, 在短焦和长焦端残留部分的球差和彗差更有利于变焦系统像差的

平衡,从而证明以弥散斑为目标函数的优越性。

表 2 每组薄透镜焦距

Table 2 Normalized focal length of each group

f_1	f_2	f_3	f_4
45.77	-8.94	27.33	18.57

表 3 短、中、长焦位置的系统焦距和每组之间的间隔

Table 3 Normalized focal length of three configurations and thickness of each group

Contiguration	W	M	T
Effective focal length	5	15.8	50
Group1	6.956	23.256	33.456
Group2	34.400	18.100	7.900
Group3	11.911	9.242	10.623
Group4	13.911	16.581	15.199

表 4 每组的像差参数

Table 4 Aberrations of Each Group

Group	1	2	3	4
\bar{P}_∞	0.25147	2.32958	-2.4999	0.46785
\bar{W}_∞	0.19835	1.61016	0.53621	1.43978

表 5 优化后变焦系统的像差和光束弥散半径

Table 5 Aberrations and spot radii of three zoom positions after optimization

Configuration	W	M	T
S_1	0.02491	-0.00656	-0.01037
S_2	-0.00119	0.00093	-0.00173
S_3	0.00105	0.00187	0.00082
S_4	-0.00648	-0.00343	-0.00288
S_5	0.13344	0.00955	-0.00691
RMS spot radius /mm	0.04922	0.02498	0.03237

然后根据上述 \bar{P}_∞ 、 \bar{W}_∞ 参数对各组薄透镜进行实例化。其中第一组透镜变焦过程中像差变化大,采用双胶合和单透镜的组合;第二组透镜同样像差变化大,采用单透镜加双胶合的结构;第三组透镜像差变化不大,采用双分离透镜组即可满足要求;第四组透镜负担光焦度较多,故采用双胶合与单透镜的组合。将初步选定的结构后代入 Code V 软件,利用编写的宏程序,以表 4 中的 \bar{P}_∞ 、 \bar{W}_∞ 参数为目标函数分别对其优化,即可得到符合要求的初始结构。然后将各组实例透镜组代入系统,调整组间间距,使主点间隔与薄透镜系统间隔一致,对初始结构进行优化,最终得到的设计结果如图 3 所示。其 MTF 曲线和变焦曲线如图 4、图 5 所示。各视场 MTF 均大于 0.3,中心场大于 0.5。系统总长仅有 75 mm,最大口径为 34 mm;广角端畸变小于 8%,长焦端畸变小于 1%。可满足两百万像素相机使用。

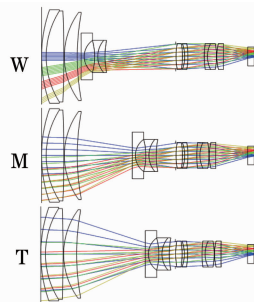


图 3 优化后的光学系统

Fig. 3 Layout of rear zoom system

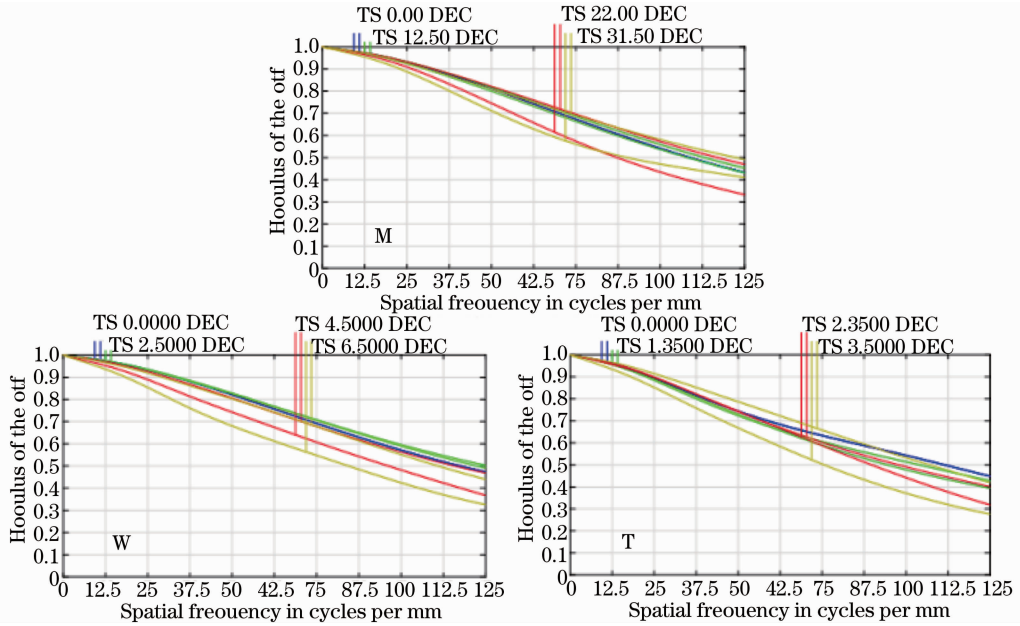


图4 短、中、长三个焦距的MTF曲线

Fig. 4 MTF curves of three zoom configurations

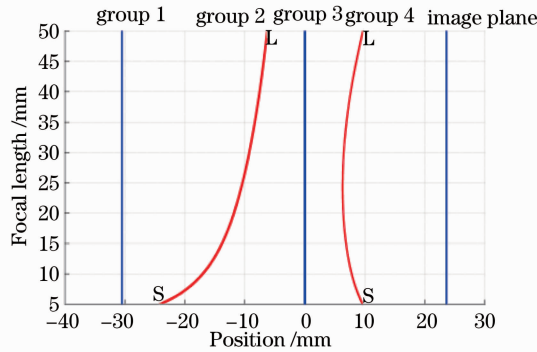


图5 变焦曲线

Fig. 5 Zoom curves

4 结 论

总的说来,光学设计有两种截然不同的设计方式:一种是解析方式,通过像差公式解出系统的结构;另外一种为现今广泛流行的数值优化,通过相关文献获得初始结构,再由数值优化得到需要的系统。两种方法各有优缺点,而由于计算机技术的发展,解析方式渐渐不再流行。尽管如此,解析方法能够获得有潜力的初始结构。本文的指导思想是将两种方法结合起来,如 Sergey 等^[11]也做了类似的工作。

基于此思路,提出了行之有效的末组补偿变焦镜头设计方法,构建了优化初级像差的新的目标函数,并在设计的过程中融合了PW法和现代数值优化算法,提高了光学设计的效率和实用性。通过10倍末组补偿变焦镜头的成功设计,证明了此方法的合理性和有效性。

参 考 文 献

- 1 Ellis Betensky. Fourty years of modern zoom lens design[C]. SPIE, 2005, 5865: 586506.
- 2 Kazuo Tanaka. Recent development of zoom lenses[C]. SPIE, 1997, 3129: 13-22.
- 3 Kazuo Tanaka. A novel configuration of zoom lens[J]. Optik, 1989, 73(4): 157-159.
- 4 Kazuo Tanaka. Zoom Lens[P]. US Patent, 4859042, 1989-08-22.
- 5 Hiroyuki Hamano. Rear Focus Type Zoom Lens[P]. US Patent, 5430576, 1995-07-01.
- 6 Sung Chan Park, Keun Bae Kim. Video camera zoom lens design using lens modules[C]. SPIE, 1995, 2539: 192-199.

- 7 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Optimization design of zoom lens systems[C]. SPIE, 2002, 4927: 44–49.
- 8 Video Lens Design Group. Optical Design of Video Photographic Lens [M]. Beijing: China Industry Press, 1971. 176–273.
电影镜头设计组. 电影摄影物镜光学设计[M]. 北京: 中国工业出版社, 1971. 176–273.
- 9 Yuan Xucang. Optical Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. 111–119.
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. 111–119.
- 10 Chao-Hsien Chen. Modelling the first-and third-order properties of conceptual thick lenses by using three air-spaced thin lenses[J]. J Mod Opt, 2009, 56(16): 1785–1796.
- 11 Sergey G, Vitaly M Klimov. Automated zoom lens design and second-order derivative optimization methods[C]. SPIE, 2006, 6289: 628914.