

多组元全动型变焦物镜设计

钟刘军 安志勇 高铎瑞 赵 昭

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了寻找求解多组元全动型变焦系统更加简单而有效的方法,采用程序法的形式,通过给定初始参数(各组元倍率、间隔),对目标系统进行初始数据计算;然后通过给定其限制条件(正切差、变焦曲线曲率、视场角和系统总长)作为控制指令对数据进行优化;最终给出满足条件的光焦度分配,并计算出系统各组元数据参数。为了验证该方法的可行性,以四组元全动型变焦物镜为例,计算出了满足条件的系统参数,通过程序给出的初始数据在光学设计软件 Zemax 上完成光学系统仿真设计。将程序给出的光焦度分配与 Zemax 给出的焦距结果进行了对比,结果表明两者数据非常接近,从而证实了该方法的可行性。

关键词 光学设计;全动型变焦;光焦度分配;变焦曲线

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.122202

All Lens Elements Movable Zoom Lens Design

Zhong Liu jun An Zhiyong Gao Duorui Zhao Zhao

College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to find a more simple and effective method to solve the formula of the all lens elements movable zoom lens, in this article, the computer program is adopted. With the given initial parameters (magnification of all elements, distance), the initial data are computed for the target optical system and the system data are optimized using the restrictive conditions (two tangent data difference, curvature of the zoom curve and total length of the system) as the command. Then the optical-power distribution which satisfies the condition is given out and the data of the optical system are computed. In order to test the practicality of this method, a four movable components zoom lens is designed as an example by using the initial data, given by the computer program, on the optical design software. Comparing the data of the optical power distribution with the Zemax simulation results, we find they agree well with each other, which proves the practicality of the method.

Key words optical design; all lens elements movable zoom; optical power distribution; curves of zoom

OCIS code 220.4830; 220.3620; 220.3630

1 引言

随着现今理论的成熟及技术的发展,光学镜头已经面向多元化发展,变焦距光学系统正是其中之一。变焦光学系统是一种可以通过移动镜头组中一组或多组组元镜片来实现其焦距的变化并且像质在此过程中保持良好^[1-2]。因具有这种特性,在许多光学领域中其应用非常广泛,变焦距光学设计一直是光学设计的一大难点,组元数越多、自由性越大其设计难度越高。随着广大光学设计者的不断探索与实践^[3-4],变焦距物镜的设计方法不断增多,其实用性也越来越高^[5-7]。陶纯堪^[8]把放大倍率当作中间变量,推导出含有固定组元的多组运动型变焦系统的理论方程。崔军等^[9]通过讨论最速变焦路线和权重光焦度,提出了全动型变焦距物镜光焦度分配及倍率选段。张波等^[10]对等倍率全动型变焦距物镜做了理论分析,并推导出实用公式。这些方法在一定程度上都能实现对变焦各组元光焦度的合理分配。

收稿日期: 2014-07-17; 收到修改稿日期: 2014-07-23; 网络出版日期: 2014-11-12

作者简介: 钟刘军(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: daocaotianc@163.com

导师简介: 安志勇(1943—),男,教授,博士生导师,主要从事光学仪器和光电检测等方面的研究。

E-mail: an_zhiyong@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

本文在设计过程中通过对变焦曲线的分析得出其在满足最速变焦条件下各组元变焦曲线的变化规律,利用控制参数(正切之差、变焦曲线曲率,视场角和系统总长)作为控制条件,对每一次优化前的数据进行分析比较,通过返回指令来对初始数据进行校正,通过这样反复迭代操作,最终给出满足条件的光焦度分配。

2 变焦分析

2.1 变焦曲线分析

假设系统有 n 个变倍补偿组元,那么其变焦方程写为:

$$\left(m_1 + \frac{1}{m_1}\right) \cdot f_1 + \cdots + \left(m_i + \frac{1}{m_i}\right) \cdot f_i + \cdots + \left(m_n + \frac{1}{m_n}\right) \cdot f_n = C, \quad (1)$$

设 $b = \frac{k-C}{f_i}$, 其中 $C = 2 \cdot (f_1 + f_2 + \cdots + f_n) - c$, 式中 c 为第 1 移动组元物点与最后移动组像点之间的距离。

$$k = \left(m_1 + \frac{1}{m_1}\right) \cdot f_1 + \cdots + \left(m_{i-1} + \frac{1}{m_{i-1}}\right) \cdot f_{i-1} + \left(m_{i+1} + \frac{1}{m_{i+1}}\right) \cdot f_{i+1} + \cdots + \left(m_n + \frac{1}{m_n}\right) \cdot f_n, \quad (2)$$

当 $b^2 - 4 > 0$ 时, m_i 有两解 m_{i1}, m_{i2} , 且 $m_{i1} \cdot m_{i2} = 1$ 。

令 $m_i \neq \pm 1$, m_i 对 m_1 求一阶和二阶偏导得

$$m_i' = \frac{\left(1 - \frac{1}{m_1^2}\right) \cdot f_1}{\left(1 - \frac{1}{m_i^2}\right) \cdot f_i}, \quad (3)$$

$$m_i'' = \frac{-\frac{2}{m_1^3} \cdot f_1 + \frac{2}{m_i^3} \cdot (m_i')^2 \cdot f_i}{\left(1 - \frac{1}{m_i^2}\right) \cdot f_i}. \quad (4)$$

令 $m_i' = 0$ 得 $m_1 = \pm 1$ 。可知, m_i 有四条曲线且每条曲线只有一个极值点。

又根据高斯等式得

$$l_1 = \left(\frac{1}{m_1} - 1\right) \cdot f_1,$$

$$l_{ix} = f_i \cdot (1 - m_i),$$

可知 l_1 与 m_1 成反比, l_{ix} 与 m_i 负相关。

考虑有多种可能的情况,下面只讨论其中一种情况的两条曲线,其他情况同理讨论。当 $m_1 = -1$ ($f_1 < 0$, $f_i > 0$) 时: 1) 若 $-1 < m_i < 0$, 则 $m_i' > 0$, m_i 关于 m_1 函数曲线为极小值点, l_{ix} 为极大值点; 2) 若 $m_i < -1$, 则 $m_i' < 0$, m_i 关于 m_1 函数曲线为极大值点, l_{ix} 为极小值点; 3) 若 $0 < m_i < 1$, 则 $m_i' > 0$, m_i 关于 m_1 函数曲线为极小值点, l_{ix} 为极大值点; 4) 若 $m_i > 1$, 则 $m_i' < 0$, m_i 关于 m_1 函数曲线为极大值点, l_{ix} 为极小值点。

根据 $m_{i1} \cdot m_{i2} = 1$ 可知 $-1 < m_i < 0$ 与 $m_i < -1$, $0 < m_i < 1$ 与 $m_i > 1$ 的曲线有一一对应关系,所以当 $m_1 = -1$, $m_i \rightarrow \pm 1$ 时,两条对应曲线相交。在上述偏导数分析中是假设其他量不变,又 $l_1 = (1/m_1 - 1) \cdot f_1$, 所以

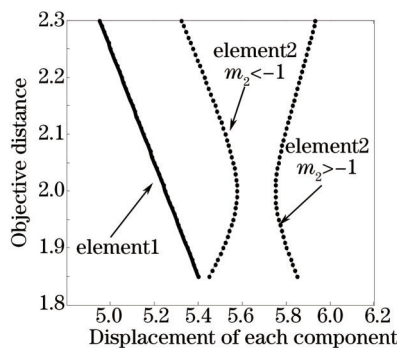


图 1 二组元变焦曲线 ($m_2 < 0$)

Fig.1 Curves of two components system ($m_2 < 0$)

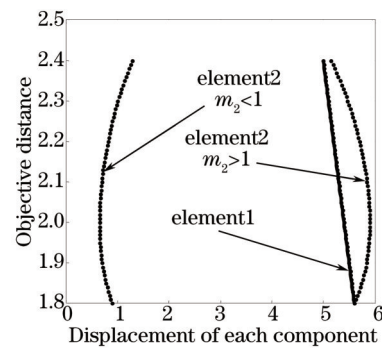


图 2 二组元变焦曲线 ($m_2 > 0$)

Fig.2 Curves of two components system ($m_2 > 0$)

可以将各组元位移与第2组元物距作为横纵坐标画出如图1、2所示正组补偿变焦曲线来反映上述四条曲线。

图1、2中 element1 代表的是第1组元的位移曲线, element2 代表第2组元位移曲线。图中可以清晰看出不同情况下的变焦曲线各自独立,且在 $l_1=2$ 处达到极值,这样在变焦曲线段的选择过程中选择以 $l_1=2$ 处的点作为分界点来对不同变焦曲线段进行选择。

应用文献[9]变焦系统总焦距

$$F = f_1 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdots m_n, \quad (5)$$

只要各组元倍率变化成单调递增或递减就能实现最速变焦的结论,根据上述分析可知实现最速变焦还需满足一个条件,即组元 l 倍率过 $m_l = -1$ 点时需实现平滑换根(即图1中 element2 的两条曲线在 $l_1=2$ 处交于一点)。根据这两个条件通过程序控制 $m_l = -1$ 两侧各组元倍率数据单调递增,可在最速变焦下给出各组元变焦曲线的初始数据。

2.2 正切差分析

在变焦物镜设计过程中,除第1组元以外的其他组元的物距是有限远的,所以在表征其相对孔径值时可用正切差偏向角的形式来反映其参量。

根据高斯等式

$$\frac{1}{L'} - \frac{1}{L} = \frac{1}{F}, \quad (6)$$

推出正切差

$$\Delta \tan u = \tan u' - \tan u = \frac{D}{2F} = \tan u \cdot \left(\frac{1}{m} - 1 \right), \quad (7)$$

式中 D 为透镜口径, m 为成像倍率。以4组元正组补偿型变焦为例,各组元正切差分别为:

$$\begin{cases} \tan u'_1 = \frac{F}{2 \cdot F^\# \cdot F_1} = \frac{1}{2 \cdot F^\#} \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4, \\ \Delta \tan u_2 = \frac{F}{2 \cdot F^\# \cdot F_1} \cdot \left(\frac{1}{m_2} - 1 \right) = \frac{1}{2 \cdot F^\#} \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot (1 - m_2), \\ \Delta \tan u_3 = \frac{F}{2 \cdot F^\# \cdot F_1 \cdot m_2} \cdot \left(\frac{1}{m_3} - 1 \right) = \frac{1}{2 \cdot F^\#} \cdot m_4 \cdot (1 - m_3), \\ \Delta \tan u_4 = \frac{F}{2 \cdot F^\# \cdot F_1 \cdot m_2 \cdot m_3} \cdot \left(\frac{1}{m_4} - 1 \right) = \frac{1}{2 \cdot F^\#} \cdot (1 - m_4). \end{cases} \quad (8)$$

根据上述分析,为满足最速变焦,各组元倍率的绝对值是单调递增函数,根据(8)式可推出各组元正切差也是单调函数。在程序控制优化变焦曲线时只要控制长焦和短焦两点处的正切差值即可。

2.3 变焦曲线曲率

$$\rho = \frac{|y''|}{(1 + y'^2)^{3/2}}, \quad (9)$$

y 为拟合后变焦曲线的函数。

根据前文可知变焦曲线每一时刻点的曲率与各组元相应时刻点的位置有关,只要推出控制各组元位置变化的比例关系即可控制变焦曲线曲率。

2.4 视场角

根据高斯等式视场角

$$\tan \omega = \left| \frac{m \cdot y}{l - l_p} \right| = \left| \frac{y}{[1 - (m/m_p)] \cdot f} \right|, \quad (10)$$

式中 l 为物距, l_p 为入瞳位置, y 为像高, m_p 为光瞳放大率。

2.5 系统总长

设各组元间距为 $d_{i-1,i}$, 系统总长为

$$L = d_{12} + d_{23} + \cdots + d_{n-1,n} + l_{nx} \quad (\text{其中 } l_{nx} \text{ 为后截距}). \quad (11)$$

由高斯等式得

$$L = f_1 + 2(f_2 + f_3 + \dots + f_n) - \left[\left(m_2 + \frac{1}{m_2} \right) \cdot f_2 + \dots + \left(m_n + \frac{1}{m_n} \right) \cdot f_n \right] = f_1 + c. \quad (12)$$

由(12)式可知只要控制第1组元焦距和第2组元物与系统像的共轭距即可达到控制系统总长的目的。

3 全动型变焦程序的建立

多组元全动型变焦的特点是变焦过程中所有组元都随着焦距 F 的变化而变化。通过(1)式可知,由于 C 是一个变量,当变焦组元数为 N 时,方程自由变量数也为 N ,其为无穷解。

采用程序法,第一步先给定各组元初始参数 $m_i, d_{i-1,i}$,从而解出各组元初始焦距。

$$\begin{aligned} f_1 &= -1, \\ f_2 &= \frac{m_2 \cdot [(1 - m_1) f_1 - d_{12}]}{(1 - m_2)}, \\ f_n &= \frac{m_n \cdot [(1 - m_{n-1}) f_n - d_{n-1,n}]}{(1 - m_n)}. \end{aligned} \quad (13)$$

根据前文分析,将 l_1 作为全局变量,给定其变化范围,令其总步数为 m ,解出系统在任一焦距 F_j 下变焦方程中的一个变量

$$m_{ij} = \frac{f_1}{l_{ij} + f_1}. \quad (14)$$

剩下的 $N-1$ 个变量通过 l_1 的采样步长 d_1 来给定其移动量采样步长 d_i ,由两者的关系函数 $d_i = d_1 \cdot f(l_1)$,解出 m_i ,

$$m_{ij} = \frac{f_i}{[(1 - m_{i-1,j}) f_{i-1} - d_{i-1,i,j}] + f_i}, \quad (15)$$

从而 m_n 可解

$$m_{nj} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2}, \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} b &= \frac{k-t}{f_n}, \quad c = 2(f_2 + f_3 + \dots + f_n) - c_0, \quad t = C - c_0 \\ k &= \left(m_1 + \frac{1}{m_1} \right) \cdot f_1 + \dots + \left(m_{i-1} + \frac{1}{m_{i-1}} \right) \cdot f_{i-1} + \left(m_{i+1} + \frac{1}{m_{i+1}} \right) \cdot f_{i+1} + \dots + \left(m_n + \frac{1}{m_n} \right) \cdot f_n. \end{aligned}$$

为了实现变焦曲线的平滑, c_0 是关于 l_2 的高次函数,一般以二次函数即可满足。在某一步长下,为了实现最速变焦各组元间距的选取过程中需要程序控制其倍率变化呈单调递增或递减。

通过计算即可给出初始变焦曲线数据。接下来,通过已解出的数据参数,计算出各组元正切差,变焦曲线曲率,视场角及系统总长,分别与给定的截止值作比较来判断是否满足条件,通过返回的指令对迭代前数据参数做相应的修改,这样通过反复迭代操作即可实现最终满足限制条件的光焦度分配。

4 光学系统设计

以4组元全动型变焦距为例设计一个焦距 $F=12\sim 120$,像方线视场 $2h=8\text{ mm}$, $F^\# = 4$ 为参数的变焦系统。为了验证此程序的计算结果能够满足设计需求,特选择输入初始参数如表1所示。

表1 输入初始参数值

Table 1 Input initial parameters

Input	m_2	m_3	m_4	d_{23}	d_{34}	F_{\max}/mm	F_{\min}/mm	$\Delta \tan u$	ρ	L	ω_0°
	-1	-1	0.8	12	20	120	12	0.25	0.008	160	50

输出各组元最大参数和系统总长如表2所示。由以上参数可知,程序计算的结果满足给定的设计要求。将计算结果与Zemax仿真对比,如表3所示。

表2 输出各组元最大参数值及系统总长

Table 2 Output the maximum parameters of each element and the total length of the system

	Element 1	Element 2	Element3	Element 4
Tangent difference	$\Delta \tan u_1$	$\Delta \tan u_2$	$\Delta \tan u_3$	$\Delta \tan u_4$
	0.125	0.25	0.25	0.1026
Curvature of the zoom curve	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4
	0.0036	0.0053	0.00795	0.0029
Field angle /($^\circ$)	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
	40.7782	40.7782	39.9383	49.7019
Total length /mm	159.681			

表3 计算结果与Zemax仿真对照

Table 3 Comparison the computing result with Zemax simulation

	f_1 /mm	f_2 /mm	f_3 /mm	f_4 /mm
Output focus length	157.7	-38	43.7	76
Zemax simulation result	168.7	-38.8	46.9	69

图3是由程序给出的变焦曲线图,纵坐标为系统总焦距,横坐标为各组元位置,从左向右依次为第1组,第2组,第3组,第4组,像面。

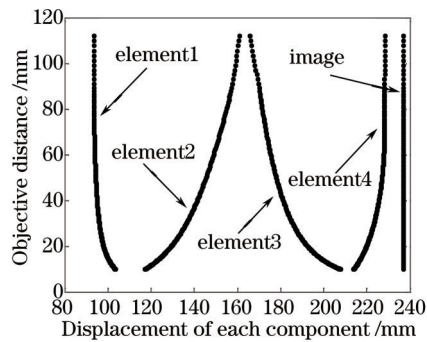


图3 程序给出的四组元全动型变焦曲线

Fig.3 Curves of four movable componenes zoom lens

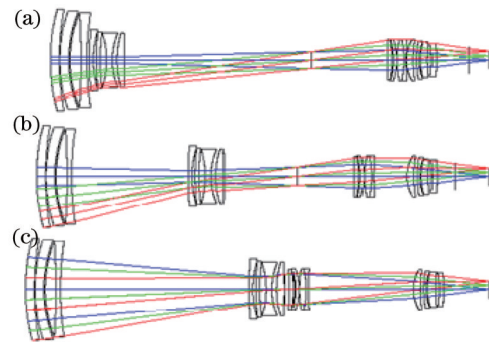


图4 Zemax 仿真结果。(a) 短焦;(b) 中焦;(c) 长焦

Fig.4 Result of Zemax simulation. (a) Short focus; (b) middle focus; (c) long focus

4.2 MTF 分析

Zemax 仿真结果如图4所示。三种组态下的调制传递函数(MTF)如图5所示。

5 结 论

变焦光学系统设计是一个逐步完善的过程,实例结果表明此方法是实用有效的,该方法的另一个好处是能够将系统变焦时各组元成像参数一并计算出,光学设计者可以借助此数据,完成从单组元到总体系统的全过程独立设计。

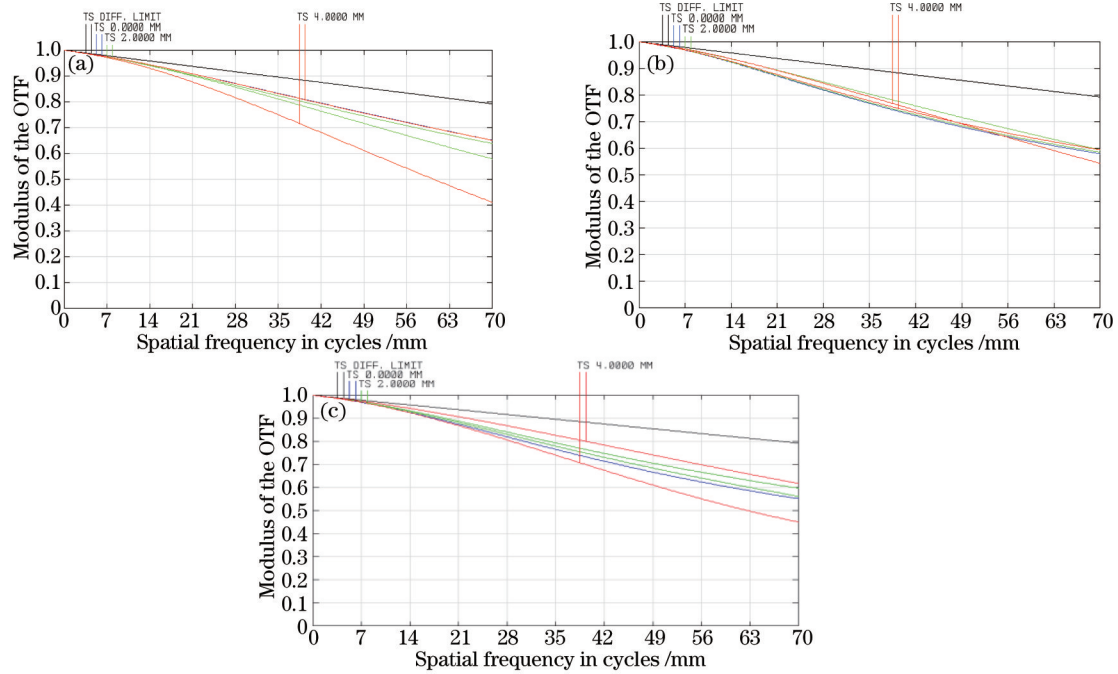


图5 3种组态下的MTF。(a)短焦 $F=12$ mm;(b)中焦 $F=35$ mm;(c)长焦 $F=120$ mm

Fig.5 MTF of three configurations. (a) Short focus $F=12$ mm; (b) middle focus $F=35$ mm; (c) long focus $F=120$ mm

参考文献

- 1 T H Jamieson. Thin-lens theory of zoom systems[J]. Optica Acta, 1970, 17(8): 565-584.
- 2 K Tanaka. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses.1: Four-component type[J]. Appl Opt, 1982, 21(12): 2174-2183.
- 3 Xu Zhengguang, Liang Laishun. Research of OZSAD system assistant design software[J]. Optical Technique, 2005, 31(2): 235-237.
许正光, 梁来顺. 二组元变焦距系统辅助设计的软件研究[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 235-237.
- 4 Cai Wei, Zhang Ying, Zhang Xin, *et al.*. New method for all movable zoom lens design[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322008.
蔡伟, 张鹰, 张新, 等. 多组元全动型变焦系统新型设计[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322008.
- 5 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2674-2679.
陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2674-2679.
- 6 Wang Qi, Wu Qiang, Huang Huijie, *et al.*. Gaussian optics of zoom lens with all lens elements movable[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(6): 830-834.
王琦, 吴强, 黄惠杰, 等. 多组元全动型变焦距物镜高斯光学[J]. 光学学报, 1999, 19(6): 830-834.
- 7 Zhang Liqin, Wang Yongtian, Li Lin. Method of determining gaussian parameter 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.
- 8 Tao Chunkan. Zoom Focus Optics System Design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- 9 Cui Jun, He Guoxiong. The optimization prescription for giving the power and magnification of each component of modern type zoom lenses[J]. Acta Photonica Sinica, 1994, 23(1): 59-64.
崔军, 何国雄. 全动型变焦距物镜光焦度分配及倍率选段的优化规范[J]. 光子学报, 1994, 23(1): 59-64.
- 10 Zhang Bo, Li Lin, An Liansheng, *et al.*. Theory of equivalent magnification zoom lens with all lens elements movable[J]. Optical Technique, 2001, 27(3): 226-228.
张波, 李林, 安连生, 等. 等倍率变焦全动型变焦距物镜理论分析[J]. 光学技术, 2001, 27(3): 226-228.