

文章编号: 1002-2082(2007)03-0284-04

用矩阵方法设计变焦镜头

赵存华

(洛阳师范学院 物理与电子科学系, 河南 洛阳 471022)

摘要: 传统上, 在设计变焦距镜头时都要利用高斯光学求解变焦距的各组元焦距、组间隔。与传统方法不同的是, 该文利用矩阵光学理论, 建立变焦距镜头的光线传输矩阵, 并以此矩阵建立非线性方程组, 然后用数学软件对其进行求解, 得到各组元的焦距、组间隔等参数。最后以设计一个普通的摄像物镜为例, 演示了矩阵光学在设计变焦距镜头中的应用。

关键词: 矩阵光学; 变焦距镜头; 光学设计; Code V

中图分类号: TN942.2

文献标志码: A

Design of a zoom lens system with matrix method

ZHAO Cun-hua

(Department of Physics and Electronics Science, Luoyang Normal College, Luoyang 471022, China)

Abstract: The Gaussian optics is traditionally used to calculate the focus of every element and the distances between them in a zoom system. This design method is different from the traditional one. All the parameters of the zoom system are achieved with mathematic software, which solves a nonlinear equation group set up with a ray-transmission matrix of the zoom lens, based on the theory of the matrix optics. At last, the application of matrix optics is demonstrated in designing a zoom system of a general camera lens.

Key words: matrix optics; zoom lens; optical design; Code V

引言

在现代社会中, 变焦距镜头有很多应用, 比如数码相机镜头, 高速摄影镜头和某些现代化光电武器中的观瞄装置等。它们在像素和体积轻薄化方面不断地对变焦距设计提出更高的要求。

通常, 变焦距设计一般先进行变焦距的高斯光学计算^[1-4], 计算出前固定组、变倍组、补偿组和后固定组等各组的焦距、组间隔等; 然后用焦距、组间隔求得各组元第一、第二近轴光线在各组元上的投射高度和入射角; 再由初级像差理论计算赛德(Seidal)像差和, 最后由赛德像差和求解方程组, 得到各组元的 P^∞ 和 W^∞ , 分解 P^∞ 和 W^∞ 可得到各组元结构参数。与传统方法不同的是, 笔者从矩阵光学理

论出发, 首先建立变焦距光学系统的光线传输矩阵, 以此建立一个非线性方程组, 然后利用数学软件直接解出各组元的焦距、组间隔。最后, 以一个变焦距镜头的设计为例, 演示了此方法的设计过程。

1 用矩阵方法计算变焦距一阶特性

变焦距系统一般都由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组4部分组成(当然也可能去掉前固定组或后固定组, 或再加入前调焦组, 后固定组分离等变形)。通常的四组元变焦系统中, 前固定组和后固定组一般为正光焦度系统, 变倍组为负光焦度系统, 补偿组光焦度可正可负。补偿组光焦度为正, 称为正组补偿变焦系统, 反之为负组补偿变焦距系统^[5-6]。

正组补偿的变焦距系统原理如图1所示。图中四组元的焦距假定为 f_1, f_2, f_3 和 f_4 , 各组间隔

分别为 x, y, z 。这个四组元光学系统的光线传输矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_4 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & y \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 0 \end{pmatrix}$$

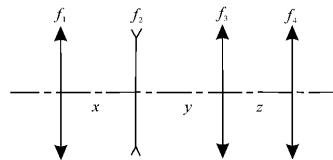


图1 变焦距系统

Fig. 1 Principle of zoom system

在使用数学软件进行求解方程组时,没有必要把 a, b, c, d 的具体表达式求出来,只需要直接使用即可。比如 Mathematica 中

$$a=M[1,1]; b=M[1,2]; c=M[2,1]$$

如果我们选取 3 个焦距为变焦位置(短焦, 中焦和长焦), 那么要想求出 4 个组元的焦距和各个焦距下的组间隔, 则应求取 4 个焦距加 3 个位置时的组间隔, 共 13 个变量。这需要找到这 13 个方程组然后求解之。

由矩阵光学可知:

$$f_{\text{total}} = -\frac{1}{c} \quad (2)$$

$$l'_{\text{F}} = -\frac{a}{c} \quad (3)$$

式中: f_{total} 是整个系统的焦距; l'_{F} 是系统的后焦截距。令(2)式为每个焦长时的焦距值, 可以得到 3 个方程; 令(3)式的后焦截距为一定值(比如 4 mm), 又可以得到 3 个方程; 为了变焦的需要, 使每个焦长状态下 3 个间隔 x, y, z 的和值保持不变(比如等于 8 mm), 又可得到 3 个方程。这样, 再找 4 个方程即可。

从矩阵光学理论可知, 光学系统的前焦面到后焦面的光线传输矩阵为

$$N = \begin{pmatrix} 0 & f_{\text{total}} \\ -1/f_{\text{total}} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -a/c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} M \begin{pmatrix} 1 & -d/c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

因此, 对 3 种焦长状态下计算的 3 个矩阵 N 的第一行第二项就是系统焦距值, 这样我们又得到 3 个方程。那么, 剩下的一个方程可以用任一焦长时矩阵 N 的后焦截距值为零给出。针对 13 个变量对应的

13 个方程, 它们应有唯一数值解, 我们可借助数学软件 Mathematica 来求解。

2 举例

以设计一个焦距为 8~24 mm, F/2.8~4.9, 像面大小为 6 mm×6 mm 的 3 倍变焦镜头为例, 给出矩阵法的使用过程。

在求解过程中, 为了使设计的系统最小化, 令 3 个面间隔之和为 8 mm, 后焦截距为 4 mm, 将无穷远成像在后焦面上(摄像物镜)。使用 Mathematica 求解后, 所得结果如表 1 和表 2 所示。

表1 四组元焦距

Table 1 Focus of four groups in zoom mm

$f_1 = 6.14775$	$f_2 = 1.20658$	$f_3 = 3.0277$	$f_4 = 17.7611$
-----------------	-----------------	----------------	-----------------

表2 各焦长状态下的组元间隔

Table 2 The separations of four groups at different focus

焦长	间 隔			mm
	x	y	z	
$f=8$	4.172 83	2.752 44	1.074 73	
$f=13$	4.330 83	1.629 4	2.039 77	
$f=18$	4.431 32	0.862 624	2.706 06	
$f=24$	4.508 04	0.135 71	3.356 25	

从表 1 和表 2 可以看出, 上面的解是合理的。因为不存在负值, 所以理论上这样的变焦距镜头是可以实现的。

3 求解初始结构

在求得以上变焦距各组元焦距和间隔的基础上, 我们求解它的初始结构, 这与传统的高斯光学计算之后的求解过程完全一样。先追迹第一和第二近轴光线, 求得各组上的投射高度和入射角度。在求解过程中, 使用的公式为

$$h_{i+1} = h_i - d \cdot u_{i+1} \quad (5)$$

$$u_{i+1} = u_i + \frac{h_i}{f_i} \quad (6)$$

在已求得各组元投射高度和入射角的情况下,

求解初级像差系数,令各系数为零。事实上,在各初级像差系数中,归一化的 \bar{P} 和 \bar{W} 在不同的入射角度下其值不同,需要把每一个归一化的 \bar{P} 和 \bar{W} 转化为物在无穷远处的 \bar{P}_∞ 和 \bar{W}_∞ ,即

$$\bar{P} = \bar{W}_\infty - \bar{u}(2 + \mu) \quad (7)$$

$$\bar{W} = \bar{W}_\infty - \bar{u}(4\bar{W}_\infty + 1) + \bar{u}^2(3 + 2\mu) \quad (8)$$

上式中符号上面的横杠代表归一化为 $f=1$ 和 $h=1$ 时的值。对于4个组元共有4对8个 \bar{P}_∞ 和 \bar{W}_∞ 值,但方程的总数为12个,即

$$S_{11} = S_{12} = S_{13} = 0 \quad (9)$$

$$S_{21} = S_{22} = S_{23} = 0 \quad (10)$$

$$S_{31} = S_{32} = S_{33} = 0 \quad (11)$$

$$S_{41} = S_{42} = S_{43} = 0 \quad (12)$$

如果任意拿出8个方程(初级像差系数为零)求解之,那么在这8个初级像差系数为零的情况下,其他初级像差系数可能很大,这并非最佳综合效果。所以,笔者使用最小二乘法编制程序,求解最佳的 \bar{P}_∞ 和 \bar{W}_∞ ,以获得最佳的初级像差系数组合,而不是完全使之为零。经过反复求解,得到一组 \bar{P}_∞ 和 \bar{W}_∞ 值,如表3所示。

表3 \bar{P}_∞ 和 \bar{W}_∞ 值Table 3 Values of \bar{P}_∞ and \bar{W}_∞

前固定组	变倍组	补偿组	后固定组
\bar{P}_∞	0.0023531534	0.297314855	-3.36558851
\bar{W}_∞	-0.253787356	0.384569448	4.501557253
\bar{P}_0	-0.127904	0.247071	-19.3451
			-173.184

在已知上组 \bar{P}_∞ 和 \bar{W}_∞ 值的情况下各状态像差值如表4所示。

表4 像差值

Table 4 Values of aberration

球差	彗差	像散	匹兹瓦场曲	畸变
$f=8\text{ mm}$	0.14138	0.000013	0.00324	1.45357
$f=18\text{ mm}$	-0.027714	0.000021	9.64086	15.9149
$f=24\text{ mm}$	0.00004	0.000035	0.000712	1.45362
				0.0012

分解上面的 \bar{P}_∞ 和 \bar{W}_∞ 值可以得到变焦镜头的初始结构。经通用光学设计软件CodeV优化处理后得到的最终结果如表5所示。

从表5可以看出,优化后的数据证明了矩阵求解的可行性和正确性。在3个焦长位置处($f=8\text{ mm}$, $f=18\text{ mm}$ 和 $f=24\text{ mm}$)的轮廓图如图2所示。它的MTF曲线如图3所示。在空间分辨率50 lp/mm处,镜头在任何状态下视场均大于0.2;在空间分辨率20 lp/mm处,除焦距为8 mm的镜头最大视场为0.48外,其他均超过0.6;在空间分

表5 优化后的变焦镜头结构参数

Table 5 Constructural parameters of

optimized zoom lens

mm

面号	半径	间隔	玻璃	面号	半径	间隔	玻璃
1	55.9006	3.9777	ZK1	11	5.7713	2.2898	ZK7
2	-114.9467	0.2		12	-8.1133	1	ZF5
3	17.0992	3.9654	ZK9	13	-24.2049	0.2	
4	94.7142	0.5075					1.5215
5	461.8329	1	ZF6				2.0043
6	37.1252			14	Infinity	1.0923	
					5.9384		
					9.1412		
7	78.1701	1	ZK9	17	-4.0082	1	BaF7
8	5.3534	1.3139		18	-28.8421	1.1049	LaF2
9	7.8578	1	QK3	19	-14.9868	6.3	
10	7.4381	10.6675		20	Image		
		3.3866			0.2		

辨率为5 lp/mm 处,镜头在任何状态下的视场均大于0.95。

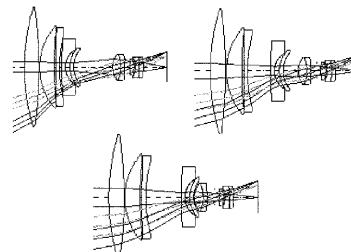


图2 3倍变焦镜头分别在焦距为8 mm, 18 mm 和 24 mm 时的轮廓图

Fig. 2 Layouts of 3^x zoom when its focuses are 8 mm, 18 mm and 24 mm

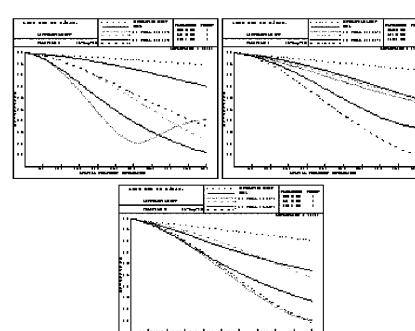


图3 3倍变焦镜头分别在焦距为8 mm, 18 mm 和 24 mm 时的 MTF(最大空间频繁为50 lp/mm)

Fig. 3 MTFs of 3^x zoom when focuses are 8 mm, 18 mm and 24 mm (Maximum spatial frequency is 50 lp/mm)

4 结 论

从矩阵光学理论出发,建立了四组元变焦距镜头的光线传输矩阵,并以此为基础构造了一个非线性方程组。此方程组完全可以利用数学软件对其进行数值求解,以得到变焦距系统的初始结构。文章以设计一个普通的变焦距摄像镜头为例,演示了矩阵方法在变焦距镜头设计中的运用。

参考文献:

- [1] 胡家升.光学工程导论[M].大连:大连理工大学出版社,2002.
HU Jia-sheng. Introduction to optical engineering [M]. 2th ed. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 林大健.工程光学系统设计[M].北京:机械工业出版社,1983.

LIN Da-jian. Optical engineering design [M]. Beijing: China Mechanic Press, 1983. (in Chinese)

- [3] 常群.光学设计文集[M].北京:科学出版社,1976.
CHANG Qun. Corpus on optical design [M]. Beijing: Science Press, 1976. (in Chinese)
- [4] 张良.中波红外变焦距系统的光学设计[J].应用光学,2006,27(1):32-34.
ZHANG Liang. Optical design for middle infrared zoom system[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(1):32-34. (in Chinese)
- [5] DITTEON R. 现代几何光学[M].詹涵菁,译.长沙:湖南大学出版社,2004.
DITTEON R. Modern geometry optics [M]. translated by ZHAN Han-jing. Changsha: Hunan University Press, 2004. (in Chinese)
- [6] WANG Shao-min, ZHAO Dao-mu. Matrix Optics [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2000.

第6届慕尼黑上海电子展及第2届慕尼黑上海激光、光电展 各项指标再创新高

2007年3月23日在上海新国际博览中心落下帷幕的慕尼黑上海电子展及慕尼黑上海激光、光电展再次证明了中国电子行业与激光、光电行业兴旺的发展势头。本届慕尼黑上海电子展在3天内吸引了逾23500名专业观众汇聚这个理想的平台寻觅商机,比去年增加了24%。来自20个国家的375名展商在上海新国际博览中心展示了他们最新的产品及服务,展商数较上届增长了13%。

与慕尼黑上海电子展同期举办的慕尼黑上海激光、光电展吸引了超过9000名观众。在去年首展大获成功之后,今年又齐集了德商罗芬、通快、GSI集团、美国相干、光谱物理与大族激光、楚天、华工科技、华北光电等国内外知名企业,展览总面积较上届增长了21%,国内展商数目增长了43%。此次展会的主办方慕尼黑国际博览集团在海外显示了其强大的号召力。德国再次组织了大型的国家展团。此外,英国、韩国、日本和台湾地区展团也共同参与了此次展会。仅慕尼黑上海电子展就有47%的国际展商慕名而来。慕尼黑国际博览集团董事总经理 Klaus Dittrich 先生说:“国际展商的持续增长显示了中国市场在全球电子产业链中的地位与日俱增,慕尼黑上海电子展正逐渐成为中国市场重要的电子展。”

作为光电技术类专业期刊——《应用光学》连续2次派员参加了慕尼黑上海电子展及慕尼黑上海激光、光电展,展会期间广交朋友,与新老客户进行广泛接触和沟通,进一步宣传了刊物。下届慕尼黑上海电子展,慕尼黑上海激光、光电展将于2008年3月18至20日在上海新国际博览中心举行。