

连续变焦光学系统的像差自动设计

马迎军^{1,2} 张 葆¹ 洪永丰¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了避免连续变焦光学系统中, 各组元像差自动设计对设计者经验要求高、计算复杂且计算量大的难点, 提出了一种利用差值线性方程组进行像差自动设计的方法, 并用此方法设计了一套可见光波段连续变焦光学系统。利用高斯光学计算理想近轴系统的结构参数; 利用差值线性方程组进行系统像差自动设计, 使系统的初级像差系数 S_I 、 S_{II} 与 S_{III} 在各焦距位置处近似相等; 基于像差自动设计结果计算光学系统的初始结构参数; 利用Zemax自动设计软件进行像差校正平衡。优化结果表明: 系统可实现20~300 mm的连续变焦, 且在截止频率50 lp/mm处, 各焦距位置各视场的传递函数(MTF)均大于0.4。因此, 应用差值线性方程组法进行像差自动设计, 可以简化计算, 减少对设计者经验的依赖, 并且能够取得良好的像质。

关键词 光学设计; 连续变焦; 差值线性方程组; 像差自动设计; 可见光谱

中图分类号 TH74; V445.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0822003

Aberration Automatic Design of Continuous Zoom Optical System

Ma Yingjun^{1,2} Zhang Bao¹ Hong Yongfeng¹

¹Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract In the process of continuous zoom optical system design, the aberration automatic design demands prior experience, complicated algorithm and massive calculation. In order to overcome these difficulties, the method of using subtractive linear equations to carry out the aberration automatic design is proposed. With this method, a continuous zoom optical system of visible spectrum is designed. Using Gaussian optics to calculate the paraxial structural parameters of the system; the application of subtractive linear equations in the aberration automatic design make the value of primary aberration coefficients S_I , S_{II} and S_{III} approximately equal at different focal lengths positions; based on the results of the aberration automatic design, the initial structural parameters of system are calculated; the aberrations are corrected by Zemax optical design software. The design result indicates that the focal length could vary from 20 mm to 300 mm continuously for this system and the modulation transfer function is always bigger than 0.4 at the spatial frequency of 50 lp/mm and every focal length position. In conclusion, the method of subtractive linear equations in the aberration automatic design can simplify the calculation, reduce the degree of relying on the prior experience and achieve high quality of image.

Key words optical design; continuous zoom; subtractive linear equations; aberration automatic design; visible spectrum

OCIS codes 220.4830; 220.1000; 220.2740; 110.3000

收稿日期: 2015-01-30; 收到修改稿日期: 2015-03-16

基金项目: 长春光机所重大创新资助项目(Y3CX1SS14C)、中科院航空光学成像与测量重点实验室开放基金资助项目(Y3HC1SR141)

作者简介: 马迎军(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: yingjun_ma@163.com

导师简介: 张葆(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空光电成像技术方面的研究。

E-mail: cleresky@vip.sina.com(通信联系人)

1 引 言

连续变焦镜头是焦距在一定范围内连续变化,而像面位置保持稳定且像质保持良好的光学系统。能够满足目标在近距离时对大视场、小倍率的概观、搜索与跟踪要求和远距离时对长焦距、小视场、大倍率详细观察与识别的要求,且视场与倍率连续变化,得到定焦镜头和多档变焦镜头无法达到的视觉效果^[1-4]。在日常生活、科研教育、军事侦察、国防建设等领域得到了大量应用,且其不可替代的特点愈发明显^[5]。

目前,进行连续变焦光学系统设计主要采用两种方法。一是查找专利进行缩放并优化,此法简单快捷,但对特殊的设计指标适应性差;二是应用近轴高斯光学与像差理论进行初始结构计算,此种方法可根据设计指标选择系统的结构形式,方法灵活,适应性强,并能得到系统的像质、体积与重量都较优的设计结果。但进行初始结构计算,计算复杂,计算量庞大,且计算中经验权值的选取对系统结构有着显著的影响。尤其在得出系统的高斯解、进行像差自动设计时,经验权值的选取对计算结果的优劣起着至关重要的作用,如阻尼最小二乘法;使用适应法可取得较好的设计结果,但更加依赖于设计者的经验。同时,阻尼最小二乘法不能跳出局部最小值,适应法难于在相应的情况下选择合适的判据^[1]。

本文基于像差自动设计中,系统前三组的像差系数 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 与 S_V 在不同倍率位置时个别相等,再用后固定组进行补偿的思想^[1],采用差值线性方程组的方法进行像差自动设计,减小了像差自动设计中对设计经验的依赖,尤其对于初学者,大大降低了连续变焦光学系统的设计难度。

2 原 理

2.1 变倍原理

为节省系统空间尺寸并实现最速变倍,采用正组补偿换根的方法进行系统的高斯光学计算,实现系统的连续变焦^[6],其工作原理如图1所示,图中EFL为有效焦距。该光学系统由前固定组、变倍组、补偿组、后固定前组与后组组成。前固定组为正透镜,变倍组为负透镜,补偿组为正透镜,后固定前组为负透镜,后固定后组为正透镜。当系统由短焦状态连续变化到长焦状态时,变倍组由左往右做线性移动,补偿组由右往左做非线性移动且在中焦位置处实现换根。

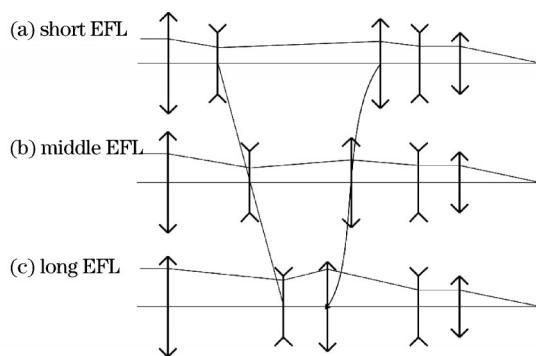


图1 变焦系统工作原理图

Fig.1 Diagram of zoom system

2.2 像差自动设计原理

在依据变倍原理解得系统的高斯解后,将系统焦距取为短、次短、中、次长与长焦5个位置,联立初级像差方程,求解连续变焦系统中前三组(前固定组、变倍组与补偿组)的 \bar{P}^∞ 和 \bar{W}^∞ ,使得前三组分别在短、中和长焦位置处的像差系数 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 近似相等,而畸变 S_V 没必要也不可能使其在不同焦距位置处相等^[3]。初级像差方程组为^[1,3]:

$$S_I = \sum_{i=1}^3 h_i^4 \varphi_i^3 P_i, \tag{1}$$

$$S_{II} = \sum_{i=1}^3 h_i^3 h_{pi} \varphi_i^3 P_i - J \sum_{i=1}^3 h_i^2 \varphi_i^2 W_i, \tag{2}$$

$$S_{III} = \sum_{i=1}^3 h_i^2 h_{pi}^2 \varphi_i^3 P_i - 2J \sum_{i=1}^3 h_i h_{pi} \varphi_i^2 W_i + J^2 \sum_{i=1}^3 \varphi_i, \tag{3}$$

$$S_V = \sum_{i=1}^3 h_i h_{pi}^3 \varphi_i^3 P_i - 3J \sum_{i=1}^3 h_{pi}^2 \varphi_i^2 W_i + J^2 \sum_{i=1}^3 \frac{h_{pi}}{h_i} (3 + \mu) \varphi_i, \quad (4)$$

式中拉氏不变量 $J = nu\eta$, $\mu = 0.6 \sim 0.7$ 。

近距离时各组 P_i 、 W_i 与无穷远时各组的 \bar{P}_i^∞ 、 \bar{W}_i^∞ 的关系为:

$$W_i = \bar{W}_i^\infty + (2 + \mu) \bar{u}_i, \quad (5)$$

$$P_i = \bar{P}_i^\infty + \bar{u}_i (4\bar{W}_i^\infty - 1) + \bar{u}_i^2 (3 + 2\mu), \quad (6)$$

$$\bar{u}_i = \frac{u_i}{h_i \varphi_i}, \quad (7)$$

将(5)~(7)式代入(1)~(3)式可将像差系数 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 用各组在无穷远处的 \bar{P}_i^∞ 、 \bar{W}_i^∞ 表示。系统前三组产生的像差系数在短、中和长焦位置处分别用 S_{IM} 、 S_{IIM} 和 S_{IIIM} 表示,其中, $M = 1 \sim 3$ 。它们的表达式如下所示:

$$S_{IM} = a_{M1} x_1 + a_{M2} x_2 + a_{M3} x_3 + a_{M4} x_4 + a_{M5} x_5 + a_{M6} x_6 + C_M, \quad (8)$$

$$S_{IIM} = a_{M+3,1} x_1 + a_{M+3,2} x_2 + a_{M+3,3} x_3 + a_{M+3,4} x_4 + a_{M+3,5} x_5 + a_{M+3,6} x_6 + C_{M+3}, \quad (9)$$

$$S_{IIIM} = a_{M+6,1} x_1 + a_{M+6,2} x_2 + a_{M+6,3} x_3 + a_{M+6,4} x_4 + a_{M+6,5} x_5 + a_{M+6,6} x_6 + C_{M+6}, \quad (10)$$

式中 a_{ij} 为像差系数 S_{IM} 、 S_{IIM} 和 S_{IIIM} 中 \bar{P}_i^∞ 、 \bar{W}_i^∞ 的系数, $i = 1 \sim 9, j = 1 \sim 6$; $x_1 \sim x_3$ 分别对应各组的 $\bar{P}_1^\infty \sim \bar{P}_3^\infty$, $x_4 \sim x_6$ 分别对应各组 $\bar{W}_1^\infty \sim \bar{W}_3^\infty$; $C_1 \sim C_9$ 为常数项。以上系数与常数项具体形式为:

$$a_{ij} = \begin{cases} h_{ij}^4 \varphi_j^3, & i = 1 \sim 3, j = 1 \sim 3 \\ 4h_{ij}^4 \varphi_{j-3}^3 \bar{u}_{ij-3}, & i = 1 \sim 3, j = 4 \sim 6 \\ h_{ij}^3 h z_{ij} \varphi_j^3, & i = 4 \sim 6, j = 1 \sim 3 \\ 4h_{ij-3}^3 h z_{ij-3} \varphi_{j-3}^3 \bar{u}_{ij-3} - J h_{ij-3}^2 \varphi_{j-3}^2, & i = 4 \sim 6, j = 4 \sim 6 \\ h_{ij}^2 h z_{ij}^2 \varphi_j^3, & i = 7 \sim 9, j = 1 \sim 3 \\ 4h_{ij-3}^2 h z_{ij-3}^2 \varphi_{j-3}^3 \bar{u}_{ij-3} - 2J h_{ij-3} h z_{ij-3} \varphi_{j-3}^2, & i = 7 \sim 9, j = 4 \sim 6 \end{cases}, \quad (11)$$

当 $i = 1 \sim 3, j = 1 \sim 3$ 时,

$$C_i = \sum_{j=1}^3 h_{ij}^4 \varphi_j^3 [-\bar{u}_{ij} + \bar{u}_{ij}^2 (3 + 2\mu)], \quad (12)$$

$$C_{i+3} = \sum_{j=1}^3 \{ h_{ij}^3 h z_{ij} \varphi_j^3 [-\bar{u}_{ij} + \bar{u}_{ij}^2 (3 + 2\mu)] - J h_{ij}^2 \varphi_j^2 (2 + \mu) \bar{u}_{ij} \}, \quad (13)$$

$$C_{i+6} = \sum_{j=1}^3 \{ h_{ij}^2 h z_{ij}^2 \varphi_j^3 [-\bar{u}_{ij} + \bar{u}_{ij}^2 (3 + 2\mu)] - 2J h_{ij} h z_{ij} \varphi_j^2 (2 + \mu) \bar{u}_{ij} + J^2 \varphi_j^2 \}, \quad (14)$$

则上述式与(8)~(10)式可组成包含6个未知数、9个方程的超定方程组。将(8)式展开可写为:

$$S_{I1} = a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + a_{13} x_3 + a_{14} x_4 + a_{15} x_5 + a_{16} x_6 + C_1, \quad (15)$$

$$S_{I2} = a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + a_{23} x_3 + a_{24} x_4 + a_{25} x_5 + a_{26} x_6 + C_2, \quad (16)$$

$$S_{I3} = a_{31} x_1 + a_{32} x_2 + a_{33} x_3 + a_{34} x_4 + a_{35} x_5 + a_{36} x_6 + C_3, \quad (17)$$

在进行像差自动设计时,令 S_{IM} 在三个位置处相等,故进行做差,(15)式减(16)式可得:

$$b_{11} x_1 + b_{12} x_2 + b_{13} x_3 + b_{14} x_4 + b_{15} x_5 + b_{16} x_6 = d_1, \quad (18)$$

(15)式减(17)式可得:

$$b_{21} x_1 + b_{22} x_2 + b_{23} x_3 + b_{24} x_4 + b_{25} x_5 + b_{26} x_6 = d_2, \quad (19)$$

上式中, $b_{ij} = a_{i,j} - a_{i+1,j}$, $d_i = C_{i+1} - C_1$ (其中 $i = 1 \sim 2, j = 1 \sim 6$)。同理,将(9)式和(10)式进行展开并做差,结果与(11)、(12)式联立,可组成包含6个方程、6个未知数的线性方程组,形式为:

$$Bx = D, \quad (20)$$

式中矩阵 B 的元素为 b_{ij} , D 的元素为 d_i , x 的元素为 x_i (其中 $i = 1 \sim 6, j = 1 \sim 6$)。

求解线性方程组(20),可解得各组的 \bar{P}_i^∞ 、 \bar{W}_i^∞ ,使 S_{IM} 、 S_{IIM} 、 S_{IIIM} 在各变倍位置处几乎相等 ($i = 1 \sim 3$)。将结果分别代入到(8)~(10)式,求得系统前三组在每个焦距位置处的像差系数。随后,用后固定组对求得的像差进行补偿,解得后固定组的 \bar{P}_{41}^∞ 、 \bar{W}_{41}^∞ 与 \bar{P}_{42}^∞ 、 \bar{W}_{42}^∞ 。系统对前三组的像差系数容忍度随着系统相对口径 D/f 和筒

长 L 的不同而变化:当 D/f 与 L 较小时,容忍度较小,反之则容忍度较大。在进行前三组像差自动设计时,应使前三组中各组的 P^* 与 W^* 尽量小,并且使前三组总的像差系数较小,否则需对系统重新进行高斯光学计算;采用后固定组进行像差系数补偿时,应使后固定组的 P^* 与 W^* 尽量小,并使系统的像差系数 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 和 S_V 尽量小。当同时满足这两点时,则认为系统的像差自动设计结果合理且后固定组补偿充分有效。

由初级像差方程得出各组分的 P^* 与 W^* 后,依据各透镜组负担的相对孔径确定各组由几个透镜组成;并对各组进行合理的光焦度分配,选择合适的玻璃材料,计算各透镜的初始结构参数,此处不再详细讨论。

3 设计实例

3.1 设计参数

依据上述变倍原理与差值线性方程组法,设计了一个连续变焦光学系统,其参数如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

Table 1 Optical design parameters

Parameter	Value
Wavelength / μm	0.4~0.7
Variable focal length /mm	20~300
Zoom ratio	15
F number	4
Image size /mm	6

3.2 近轴高斯解

根据系统设计参数与变倍理论,系统分别选取短、次短、中、次长与长焦 5 个位置进行高斯光学计算。计算结果如表 2 表 3 所示。由于篇幅有限,只列出在不同焦距位置处,各组之间间隔与移动量以及各组焦距。

表 2 各组间间隔与移动量

Table 2 Intervals and movement of each component

	d_{12} /mm	q_2 /mm	d_{23} /mm	q_3 /mm	d_{34} /mm	d_{45} /mm
Position 1	20.0000	-112.0000	203.1784	55.8831	20.0000	
Position 2	56.0000	-76.0000	160.6416	49.3469	26.5368	
Position 3	88.0000	-44.0000	118.5775	39.2822	36.6009	39.0782
Position 4	124.0000	-8.0000	56.0000	12.7047	63.1784	
Position 5	132.0000	0.0000	35.2953	0.0000	75.8831	

表 3 各组焦距

Table 3 Focal length of each component

f_1 /mm	f_2 /mm	f_3 /mm	f_{41} /mm	f_{42} /mm
204.0000	-40.0000	68.0000	-72.8216	70.4112

表 2 中, d_{12} 、 d_{23} 、 d_{34} 与 d_{45} 分别为前固定组与变倍组、变倍组与补偿组、补偿组与后固定前组和两后固定组之间的间隔; q_2 与 q_3 分别为变倍组与补偿组的移动距离,向右移动为正,向左移动为负;位置 1 至位置 5 分别对应系统的短、次短、中、次长和长焦位置。

3.3 像差自动设计结果

得出系统的高斯解后,应用差值线性方程组编写程序,对前三组进行像差自动设计,计算得到系统在短、次短、中、次长与长焦位置处的像差系数 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 和 S_V 如表 4 所示。由于对此系统来说,视场较小,系统存在的像差主要为球差与彗差,故用后固定组对球差与彗差进行补偿,并留有 1/3 左右的初级像差余量补偿高级像差。经过后固定组补偿后的系统像差系数如表 5 所示。补偿后系统中各组的 \bar{P}^* 与 \bar{W}^* 如表 6 所示,像差系数 S_I 、 S_{II} 和 S_{III} 变化曲线如图 2 所示。

表 4 系统前三组像差系数

Table 4 Aberration coefficients of first three groups of system

	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5
S_I	0.0212	0.0213	0.0212	0.0192	0.0212
S_{II}	-0.0084	-0.0085	-0.0084	-0.0078	-0.0084
S_{III}	0.0041	0.0041	0.0041	0.0039	0.0041
S_V	0.0063	0.0008	-0.0009	-0.0015	-0.0017

表 5 补偿后系统像差系数

Table 5 Aberration coefficients of system after compensated

	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5
S_I	0.0070	0.0071	0.0070	0.0050	0.0070
S_{II}	-0.0028	-0.0029	-0.0028	-0.0021	-0.0028
S_{III}	0.0021	0.0021	0.0021	0.0019	0.0021
S_V	0.0070	0.0015	-0.0002	-0.0008	-0.0009

表 6 系统各组 \bar{P}^* 、 \bar{W}^* 与 P_0

Table 6 \bar{P}^* , \bar{W}^* and P_0 of each group of system

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 41	Group 42
\bar{P}^*	0.3227	1.4713	1.3040	1.0000	1.2534
\bar{W}^*	0.3439	1.4042	1.3584	1.0000	1.2734
P_0	0.2878	0.1288	0.0570	0.3787	0.1743

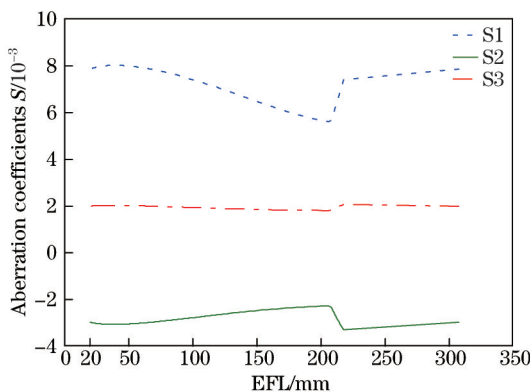


图 2 像差系数变化曲线

Fig.2 Variation curves of aberration coefficients

由表 4 和表 5 可知,经过差值线性方程组计算得到的前三组像差系数 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 的初始值和经后固定组补偿后的值在短焦到长焦这 5 个位置处的绝对值都较小且大小近似相等;由图 2 可知,系统焦距由短焦位置连续变化到长焦位置时,经过后固定组补偿的系统像差系数变化平缓,且 ΔS 最大值小于 0.002。所以,使用差值线性方程组在短焦、中焦和长焦三个位置进行像差自动设计,可使系统像差系数在变焦范围的任意焦距位置处大小近似相等,满足设计要求。由表 6 可知,系统各组的 \bar{P}^* 、 \bar{W}^* 与 P_0 都较小,这就使得各组可由比较简单的透镜结构实现,同时各组产生的高级像差也较小。

4 优化结果

依据系统各组的 \bar{P}^* 、 \bar{W}^* 与 P_0 值,计算系统各组的初始结构参数,并输入到 Zemax 软件进行优化,设计结果如图 3 所示。

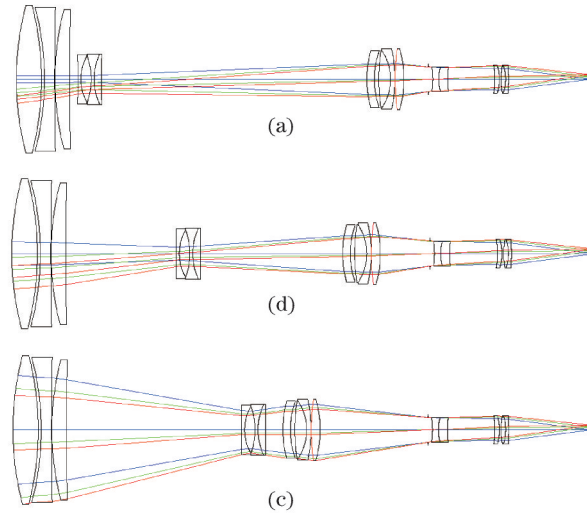


图3 光学系统外形结构图。(a) 短焦; (b) 中焦; (c) 长焦

Fig.3 Structure diagram of optical system. (a) Short EFL; (b) middle EFL; (c) long EFL

5 像质评价

光学系统的传递函数曲线如图4所示。在截止频率50 lp/mm处,各焦距位置、各视场的传递函数值均大于0.4。由于篇幅有限,这里只给出短焦、中焦和长焦位置的传递函数(MTF)曲线。

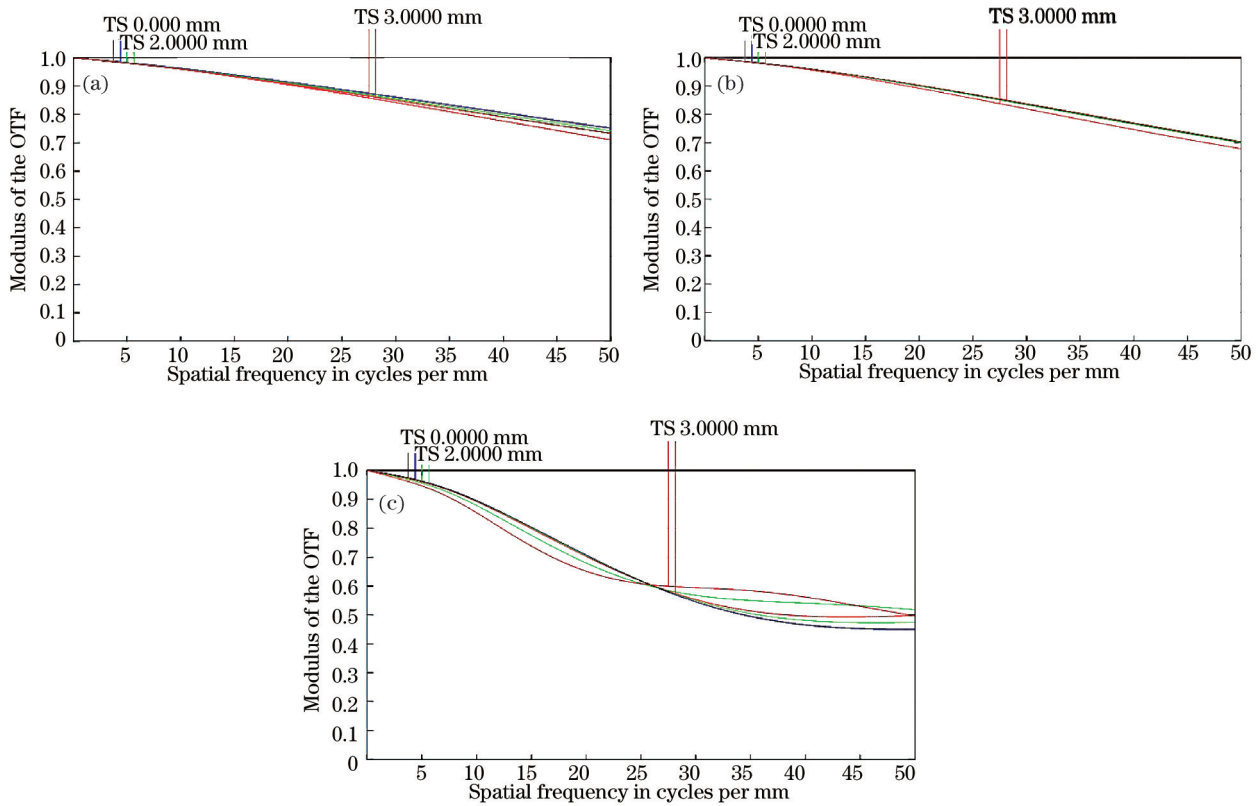


图4 变焦系统传递函数曲线。(a) 短焦; (b) 中焦; (c) 长焦

Fig.4 MTF curves of zoom optical system. (a) Short EFL; (b) middle EFL; (c) long EFL

6 结 论

讨论了一种基于差值线性方程组进行像差自动设计的方法,将连续变焦系统各组的 \bar{P}^* 与 \bar{W}^* 作为变量,构造在系统不同焦距位置处的像差系数方程,保证各像差系数在不同焦距位置处的值大小近似相等,并

将同种像差系数做差,以构造差值线性方程组,解得各组都较小的 \bar{P}^* 与 \bar{W}^* 用于计算系统初始结构参数。同时,应用高斯光学与差值线性方程组进行焦距为 20~300 mm 的可见光波段连续变焦光学系统设计,并取得了非常好的设计结果。设计结果表明:应用差值线性方程组进行像差自动设计,可以有效避免阻尼最小二乘法、适应法等算法对设计者设计经验的依赖,使连续变焦系统的像差自动设计变得简单易行,且能够取得较好的设计结果。特别对连续变焦光学系统的设计具有参考意义。

参 考 文 献

- 1 Chang Qun. Optical Design Anthology[M]. Beijing: Science Press, 1976: 16-17, 155-165, 27-29.
常 群. 光学设计文集[M]. 北京:科学出版社, 1976: 16-17, 155-165, 27-29.
- 2 Tian Tiejun, Wang Hong. Optical zoom system with long focal length and large aperture[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2369-2374.
田铁印,王 红. 长焦距大口径.连续变焦光学系统[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9): 2369-2374.
- 3 Hong Yongfeng, Zhang Xueming, Cheng Xin, et al.. Miniaturization design of aerial zoom lenses[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(3): 61-65.
洪永丰,张学明,程 欣,等. 航空变焦镜头的小型化设计[J]. 光电工程, 2010, 37(3): 61-65.
- 4 Wang Hong, Tian Tiejun. Miniature design of 5×zoom optical system[J]. Chinese Optics, 2014, 7(2): 315-319.
王 红,田铁印. 5倍变焦距光学系统小型化设计[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 315-319.
- 5 Cai Wei. Design of Large Zoom Ratio System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012, 05.
蔡 伟. 大变倍比变焦系统设计[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012, 05.
- 6 Tao Chunkan. Zoom Focus Optics System Design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 59-63.
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京:国防工业出版社, 1988: 59-63.

栏目编辑: 韩 峰