

文章编号: 0253-2239(2010)09-2674-06

# 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计

陆 强 季轶群 沈为民

(苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 根据所研制超光谱成像仪的性能指标和应用要求,设计可用作超光谱成像仪前置系统的连续变焦光学系统,具有相对孔径大、工作于可见光波段、中等焦距、光能利用率高和像方远心等特点。详细介绍变焦距光学系统的结构选型及其初始结构计算方法。设计的变焦距光学系统采用机械补偿法,变倍比为 $4\times$ ,相对孔径为 $1:2$ ,在宽视场( $8^\circ$ )和窄视场( $2^\circ$ )端的焦距分别为 $55\text{ mm}$ 和 $220\text{ mm}$ 。系统畸变小于 $0.6\%$ ,在 $66\text{ lp/mm}$ 空间特征频率处的调制传递函数值大于 $0.5$ ,能够满足超光谱成像仪的使用要求。

**关键词** 光学设计;变焦距光学系统;初始结构确定;二级光谱;像方远心;超光谱成像仪

中图分类号 TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2674

## Design of a Fore Continual Zoom System with High Speed

Lu Qiang Ji Yiqun Shen Weimin

(Modern Optical Technology Institute, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract** A continual zoom system, which can be used as the fore objective of the developed hyperspectral imager, is designed, according to the specification and application requirements of the imager. The lens have the advantages of high speed, visible light wavelength range, long effective focal length (EFL) high etendue and imagery telecentricity. The structural selection and the initial parameter calculation are introduced in detail. The designed zoom optical system with mechanical compensation is presented. The zoom ratio is  $4\times$ , and the relative aperture is  $1:2$ . The effective focal lengths are  $55\text{ mm}$  and  $220\text{ mm}$  respectively at short and long focus end, and the corresponding field of view angles from  $2^\circ$  to  $8^\circ$ . The distortion is lower than  $0.6\%$ . The modulation transfer function (MTF) value at the spatial frequency of  $66\text{ lp/mm}$  is higher than  $0.5$ . The designed zoom system can meet the application requirements of the hyperspectral imager.

**Key words** optical design; zoom system; initial structural determination; secondary spectrum; telecentricity in image space; hyperspectral imager

## 1 引言

与定焦镜头相比,变焦镜头的空间分辨率可变,无需调整光学系统的位置即可对不同分辨率目标成像,用作超光谱成像仪的前置物镜将有效提高探测效率。目前变焦镜头存在相对孔径较小和非像方远心的问题,焦距大于 $200\text{ mm}$ 时的相对孔径普遍小于 $1/2.8$ ,系统光能利用率较低,像面照度不均匀<sup>[1~5]</sup>,无法满足超光谱成像仪的使用要求。

本文对大相对孔径像方远心变焦物镜进行了研

究。首先根据超光谱成像仪的指标要求,分析前置变焦物镜的结构选型,并计算初始结构;然后利用PW法确定具体结构参数;最后给出优化设计结果和像质评价。所有元件采用普通光学玻璃,凸轮曲线平滑无拐点。

## 2 设计思想

### 2.1 指标要求

研制的超光谱成像仪<sup>[6]</sup>基于Offner中继系统,

收稿日期: 2009-12-01; 收到修改稿日期: 2010-01-18

基金项目: 国家863计划(2007AA12Z103)和江苏省高校自然科学基金计划(06KJA14003)资助课题。

作者简介: 陆强(1985—),男,硕士研究生,主要从事光学设计和仪器光学等方面的研究。E-mail: luqiangac@126.com

导师简介: 沈为民(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光学设计和仪器光学等方面的研究。

E-mail: swm@suda.edu.cn

工作于可见光波段,  $F$  数为 2.5, 狭缝长度为 8 mm, 采用像素尺寸是  $7.5 \mu\text{m} \times 7.5 \mu\text{m}$ 、像素数为  $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$  的二维面阵 CCD 探测器, 物方和像方均远心, 空间分辨率优于  $0.1 \text{ mrad}$ 。

设计的前置物镜须在数值孔径和视场上与超光谱成像仪相匹配, 其  $F$  数须小于 2.5, 有效焦距 (EFL) 在  $55 \sim 220 \text{ mm}$  之间, 视场可由超光谱成像仪的狭缝长度计算得到。具体地, 设计的前置物镜, 工作于可见光波段, 视场角为  $2^\circ \sim 8^\circ$ , 相对孔径为  $1/2$ , 在焦距  $55 \sim 220 \text{ mm}$  内连续变焦。

## 2.2 结构选型

根据补偿方式, 变焦光学系统有光学补偿法、机械补偿法和双组联动法三种。光学补偿系统长度较长, 只在几个位置处像面完全稳定, 通常适用于小孔径小视场变焦倍率不大的变焦系统。双组联动系统长度较短, 在整个变焦移动过程中成像质量好, 但双组联动系统的前固定组焦距较小, 有较大的二级光谱<sup>[6]</sup>, 且机械结构复杂。

采用机械补偿法, 系统的像质稳定性更高。按照补偿组焦距的正负, 机械补偿法又可分为正组补偿和负组补偿, 采用正组补偿的系统, 长度较长, 口径较小, 前固定组焦距较长, 二级光谱较小。采用负组补偿的系统, 长度较短, 但口径较大, 前固定组焦距较短, 二级光谱较大。本文采用正组机械补偿的形式。

本文设计的变焦镜头相对孔径为  $1/2$ , 变焦比为  $4 \times$ , 长焦端焦距为  $220 \text{ mm}$ , 系统相对孔径大、焦距长, 球差和二级光谱严重, 变焦过程中会引起较大的像面偏移量。优化设计时, 在后固定组中加入一个非球面, 减小球差。为校正二级光谱, 系统各组份采用“+ - + -”的形式, 各组份选用双单的结构, 用变倍组和后固定组产生的二级光谱来平衡前固定组和补偿组的二级光谱。

## 2.3 初始结构计算

图 1 所示是机械补偿法正组补偿系统, 其中,  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  和  $\Phi_5$  分别为前固定组、变倍组、补偿组、后固定组前组和后组, 它们的焦距分别为  $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4$  和  $f'_5$ , 短焦和长焦时各组间的间距分别是  $d_{12s}, d_{23s}, d_{34s}$  和  $d_{12l}, d_{23l}, d_{34l}$ 。在短焦端, 变倍组  $\Phi_2$  紧靠前固定组  $\Phi_1$ , 补偿组  $\Phi_3$  紧靠后固定组  $\Phi_4$ 。当系统向长焦端运动时, 变倍组  $\Phi_2$  向右运动, 补偿组  $\Phi_3$  向左运动, 最后在中部靠拢, 变倍和补偿组的间距  $d_{23l}$  最小。在设计时, 需要保证  $d_{12s}, d_{34s}$  和  $d_{23l}$  足够大, 以使各组份间有足够的间隔, 避免相碰<sup>[7~10]</sup>。

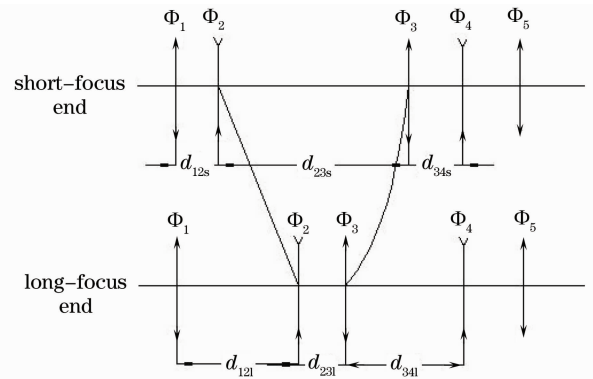


图 1 机械补偿法正组补偿系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of positive mechanical compensation system

令长焦端为起算位置, 变倍组倍率取  $m_{2l} = -1$ , 同时取归一化值  $f'_2 = -1, d_{23l} = 0.7$ , 由

$$m_{3l} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2l}) - d_{23l} + f'_3}, \quad (1)$$

$$|m_{3l}| < 1 \quad (2)$$

可得  $f'_3 < 1.35$ , 取  $f'_3 = 1.3$ 。式中  $m_{3l}$  是补偿组在长焦端的倍率。此外, 为保证短焦时各组份不至相碰, 取  $d_{12s} = 0.7, d_{34s} = 0.3$ 。变倍组的物距  $l_{2l}$ , 像距  $l'_{2l}$  和补偿组的物距  $l_{3l}$ , 像距  $l'_{3l}$  分别为

$$\begin{cases} l_{2l} = f'_2 \left( \frac{1}{m_{2l}} - 1 \right) = 2 \\ l'_{2l} = f'_2 (1 - m_{2l}) = -2 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} l_{3l} = l'_{2l} - d_{23l} = -2.7 \\ l'_{3l} = \frac{l_{3l} f'_3}{l_{3l} + f'_3} = 2.5 \end{cases}, \quad (4)$$

计算得到  $m_{3l}$

$$m_{3l} = l'_{3l} / l_{3l} = -0.93. \quad (5)$$

图 2 是变焦过程中任意位置处的变倍补偿系统。点 A 是变倍组的物点, 点 A' 是点 A 经变倍组和补偿组后的像点, D 是点 A 到点 A' 的距离,  $L_2$  是变倍组的共轭距,  $L_3$  是补偿组的共轭距。从起算位置开始, 变倍组沿光轴作线性移动, 其倍率从  $m_{2l}$  变为  $m_2^*$ , 此时像点 A' 会移动。为了满足像点 A' 不动的要求, 补偿组须作相应的移动, 倍率从  $m_{3l}$  变为  $m_3^*$ , 以保证距离 D 为常量。根据倍率变化要求, 可求出变倍组和补偿组的新物、像距:

$$\begin{cases} l_2^* = f'_2 \left( \frac{1}{m_2^*} - 1 \right) \\ l_2'^* = m_2^* L_2^* \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} l_3^* = \frac{1}{2} [-L_3^* + \sqrt{L_3^* (L_3^* - 4f'_3)}] \\ l_3'^* = L_3^* + l_3^* \end{cases}, \quad (7)$$

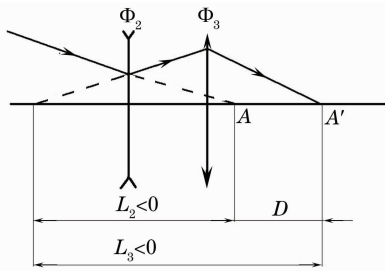


图 2 正组补偿的变倍补偿系统

Fig. 2 Zoom and compensation groups of positive mechanical compensation system

另外,可求出焦距的归一化值

$$f'_1 = d_{12s} + l_{2s}, \tag{8}$$

$$f'_4 = d_{34s} - l'_{3s}, \tag{9}$$

由(6)~(9)式可求出短焦、次短焦、中焦、次长焦和长焦五个位置处的各组份间隔

$$d_{12}^* = f'_1 - l_2^*, \tag{10}$$

$$d_{23}^* = l'_{2s} - l_3^*, \tag{11}$$

$$d_{34}^* = l'_{3s} - l'_{3s} + d_{34s}. \tag{12}$$

取  $f'_2 = -50$  mm,将归一化值缩放成实际值,最终的计算结果如表 1 和表 2 所示。从表 2 可计算出系统的机械总长约为 232 mm,总体尺寸较紧凑。

表 1 各组份的焦距

Table 1 Focal lengths of all groups

$f'_1$ /mm	$f'_2$ /mm	$f'_3$ /mm	$f'_4$ /mm	$f'_5$ /mm
193	-50	65	-82.7	101

表 2 不同变焦倍率时各组份间隔

Table 2 Distances between groups at different zoom ratios

$f'$ /mm	55	96.25	137.5	178.75	220
$d_{12}$ /mm	35	62.9	77.0	86.0	93.4
$d_{23}$ /mm	121	83.3	61.6	46.4	35
$d_{34}$ /mm	15	24.8	32.4	38.6	42.6

### 3 设计结果和像质评价

#### 3.1 根据 PW 法求各组份结构

用最小二乘法求解  $P^\infty, W^\infty$ , 编写相应的程序, 输入必要的高斯数据, 调整阻尼系数、权系数及初级像差目标值。若调整合理, 则解得的  $P^\infty, W^\infty$  值不会很大, 以保证透镜的胶合面半径较大, 且球差极小值  $P_0 = P^\infty - 0.84(W^\infty - 0.14)^2$  接近于零, 同时对应的初级像差系数也较小。经过反复调整, 最终得到各组份的  $P^\infty, W^\infty$ , 球差极小值  $P_0$  以及全系统对应于这些数据的初级像差系数, 如表 3 和表 4 所示。

根据表 3 中  $P^\infty, W^\infty$  和  $P_0$  的数值, 可求出各组份的具体结构。在分配光焦度时, 应使各组份内单

表 3 各组份的  $P^\infty, W^\infty$

Table 3  $P^\infty$  and  $W^\infty$  of all groups

Group	1	2	3	4	5
$P^\infty$	0.4450	1.5812	1.1177	-0.2903	-0.1480
$W^\infty$	-0.0692	1.4353	1.2355	0.9978	0.8713
$P_0$	0.4083	0.1717	0.1096	-0.9085	-0.5972

表 4 初级像差系数

Table 4 First-order aberration coefficients at different zoom ratios

$f'$ /mm	55	96.25	137.5	178.75	220
$S_I$	-0.0047	0.0055	0.0020	-0.0059	0.0030
$S_{II}$	-0.0068	-0.0016	0.0025	0.0044	0.0013
$S_{III}$	0.0075	0.0065	0.0054	0.0046	0.0043
$S_V$	0.0047	0.0014	0.0002	-0.0004	-0.0008

透镜的光焦度高于双胶合透镜的光焦度, 通过计算不同方案, 最终确定双胶合透镜与单透镜光焦度的比值为 0.35 : 0.65。单透镜可选择 ZK9, 双胶合透镜的玻璃选取需编制选玻璃程序。选玻璃程序中输入的已知数据包括规化色散  $C_1$ 、球差极小值  $P_0$ 、球差极小值的允许误差  $\Delta P_0$ 、以及各种玻璃的折射率  $n$  和阿贝数  $\nu$ 。其中各种玻璃是预先输入的, 包括 57 种冕牌玻璃和 78 种火石玻璃。根据所有玻璃组合, 当满足

$$|P'_0 - P_0| < \Delta P_0. \tag{13}$$

时即认为合格, 其中  $P'_0$  为计算出的球差极小值。最终可计算出各组份的玻璃组合和每个面的半径。

#### 3.2 优化设计结果

借助光学设计软件, 设置合理的优化函数, 对计算得到的初始结构进行优化设计。设计结果如图 3 所示, 共使用 6 种 14 片普通光学玻璃, 包括 K9,

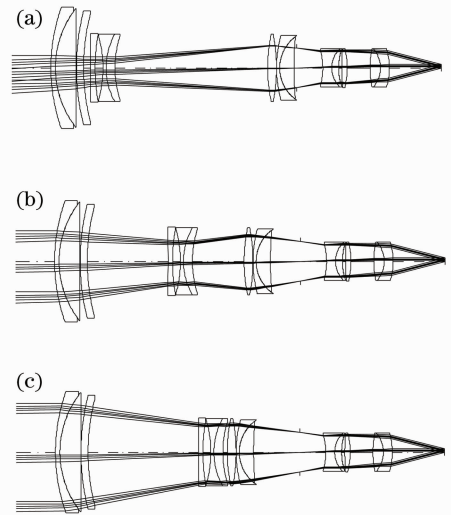


图 3 设计得到的变焦光学系统。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 3 Designed zoom lens. (a) short EFL;

(b) mid EFL;(c) long EFL

ZK7, ZK11, ZF2, ZF6 和 ZF14。其中,图 3(a)~(c) 分别是对应短焦、中焦和长焦时的光路图。按从物体侧起的顺序,变焦系统依次包括前固定组、变倍组、补偿组和后固定组,光阑固定于补偿组和后固定组之间。当系统由短焦向长焦变化时,变倍组移向像侧,补偿组移向物体侧。

图 4 是该变焦系统的凸轮曲线,横坐标代表变倍组和补偿组与前固定组的间距,纵坐标代表滚筒上的凸轮转角,最大转角为  $270^\circ$ ,可见该凸轮曲线平滑且无拐点,便于机械加工。

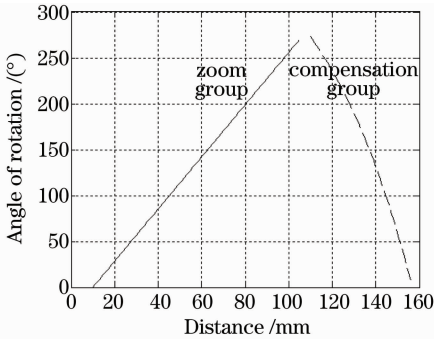


图 4 变焦系统的凸轮曲线

Fig. 4 Cam curves of designed zoom lens

### 3.3 像质评价

图 5(a)~(c)为三个典型变焦位置(即短焦、中

焦和长焦位置)处的球差、场曲和畸变曲线。可见该变焦镜头在可见光波段( $400\sim 700\text{ nm}$ )内边缘视场的像散最大值为  $0.015\text{ mm}$ ,接近系统的焦深  $9\text{ }\mu\text{m}$ ,二级光谱小于  $0.04\text{ mm}$ ,相对畸变小于  $0.6\%$ 。

图 6(a)~(c)为三个典型变焦位置处的调制传递函数(MTF)曲线。在 CCD 探测器尼奎斯特空间频率  $66.7\text{ lp/mm}$  处,变焦系统短焦、中焦和长焦各个视场的 MTF 值均大于  $0.5$ ,其中黑色虚线表示系统的衍射极限。

图 7(a)~(c)为三个典型变焦位置处的像平面点列图。各变焦位置的像面点列图 RMS 直径最大为  $0.008\text{ mm}$ ,基本在探测器的一个像素范围内。

图 8(a)~(c)为三个典型变焦位置处的几何能量集中度曲线图。在短焦端有  $65\%$ 以上、长焦端有  $55\%$ 以上的能量集中在探测器的一个像素范围内。

图 9(a)~(c)为三个典型变焦位置处的相对照度曲线图。各变焦位置的像面边缘照度均为中心的  $99.87\%$ ,没有明显下降,像面照度分布非常均匀,这是由于系统满足像方远心。

该变焦镜头在变焦过程中具有较好的成像质量,可用作相对孔径为  $1/2.5$  的超光谱成像仪前置物镜。

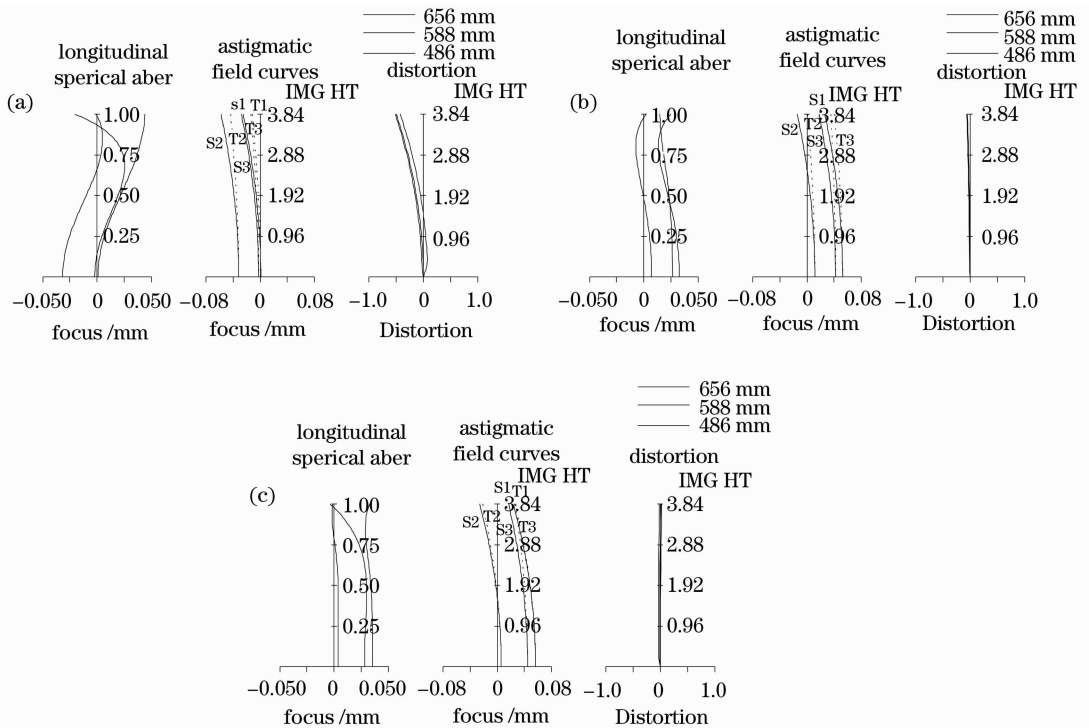


图 5 各变焦位置的像差曲线图。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 5 Aberration curves diagrams at different zoom ratios. (a) short EFL; (b) mid EFL; (c) long EFL

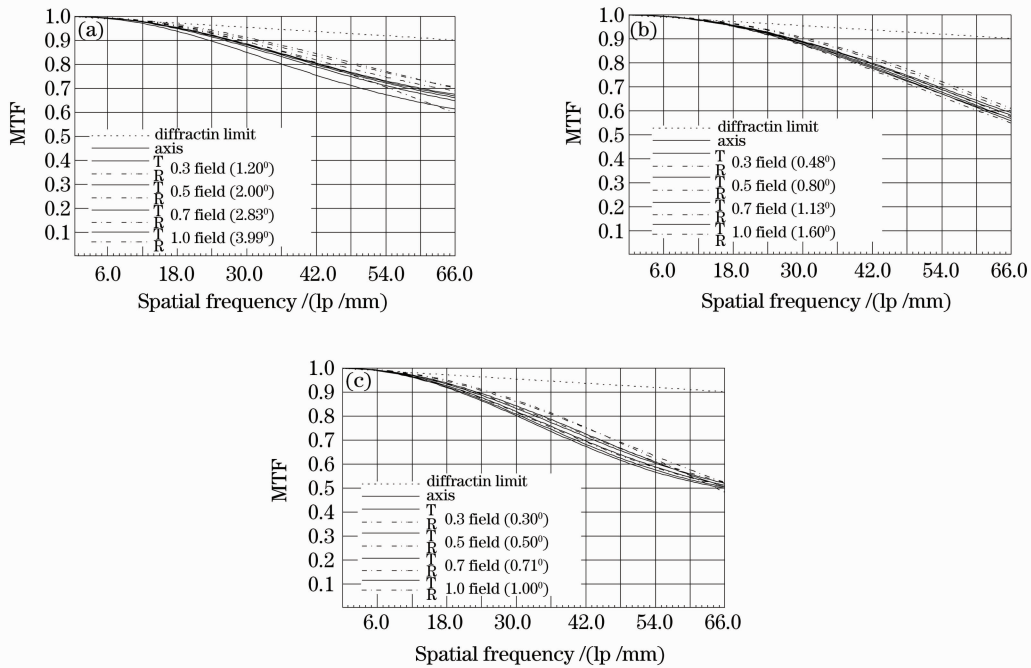


图 6 各变焦位置的 MTF 曲线。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 6 MTF at different zoom ratios. (a) short EFL; (b) mid EFL; (c) long EFL

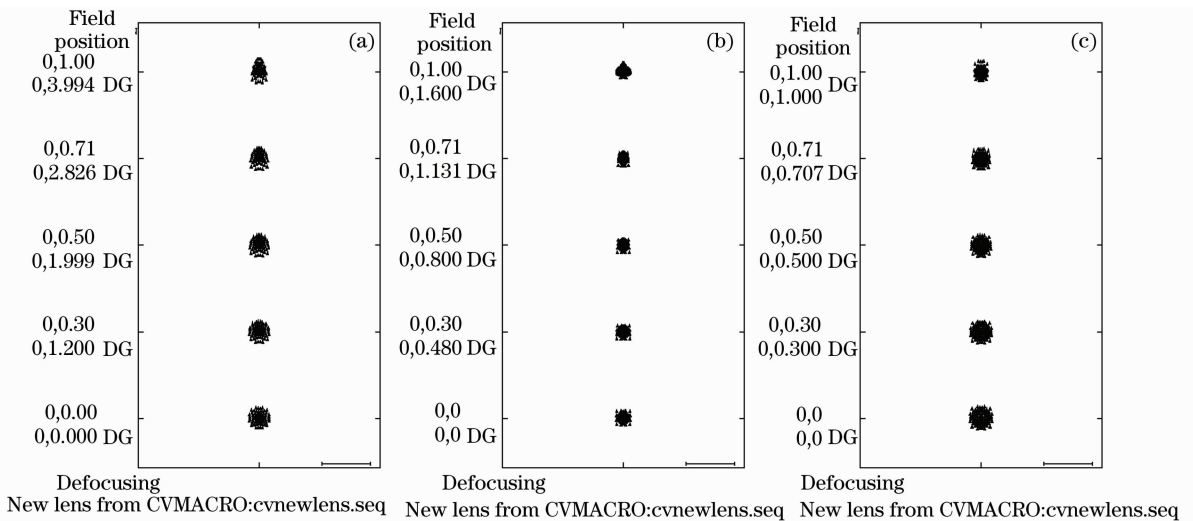


图 7 各变焦位置的点列图。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 7 Spot diagrams at different zoom ratios. (a) short EFL; (b) mid EFL; (c) long EFL

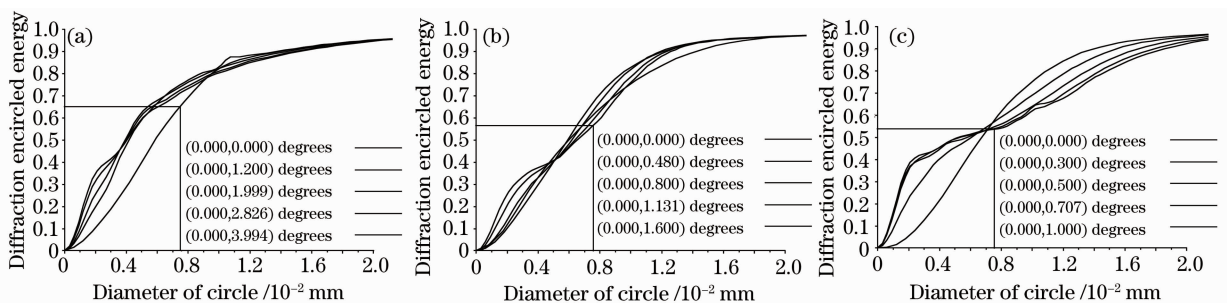


图 8 各变焦位置的几何能量集中度曲线图。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 8 Geometric encircled energy at different zoom ratios. (a) short EFL; (b) mid EFL; (c) long EFL

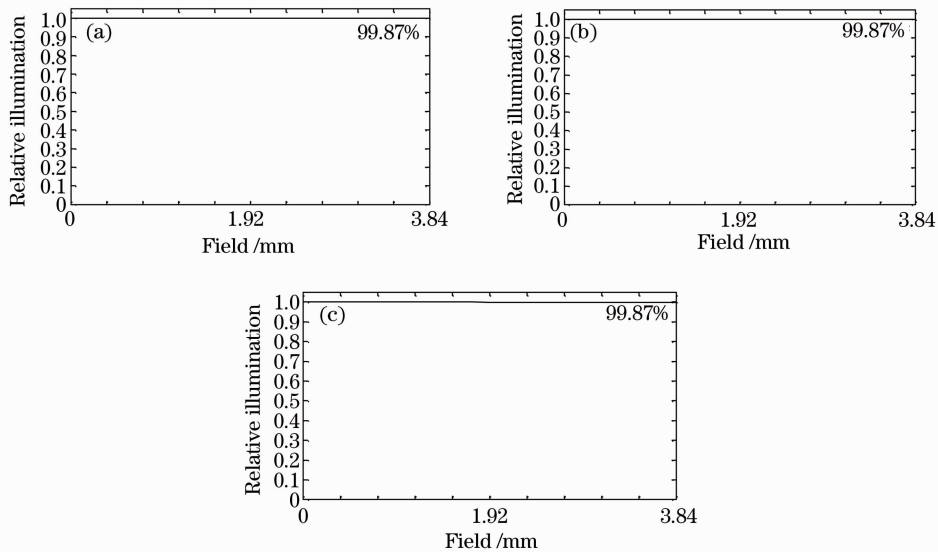


图 9 各变焦位置的相对照度曲线图。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 9 Relative illumination at different zoom ratios. (a) short EFL; (b) mid EFL; (c) long EFL

## 4 结 论

研究了一种相对孔径大、焦距中等、工作于可见光波段连续变焦光学系统,给出了初始结构选型计算的方法和设计结果,并对其作了详细的像质评价。通过优化设计得到的变焦光学系统,采用 6 种 14 片普通光学玻璃,凸轮曲线平滑无拐点,系统几何像差较小,光能利用率高,且满足像方远心光路,像面照度均匀,可用作超光谱成像仪的前置系统。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Peng, Zhao Wencai, Hu Mingyong *et al.*. Design of catadioptric large aperture three group elements infrared zoom system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 577~581  
王 鹏,赵文才,胡明勇等. 折反式大口径三组元红外变焦距系统设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 577~581
- 2 Fan Xuewu, Chen Rongli, Liu Bo *et al.*. Optical design of prefixing objective of imaging spectrometer [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(4): 498,499,503  
樊学武,陈荣利,刘 卜等. 一种成像光谱仪前置物镜的设计[J]. *光学技术*, 2003, **29**(4): 498,499,503
- 3 Iain A. NEIL. Review of recent zoom lens developments for 35 mm cinematography at Panavision [J]. *Opt. Rev.*, 2001, **8**(4): 214~217

- 4 Jin Choi, T. H. Kim, H. J. Kong. Zoom lens design for a novel imaging spectrometer that controls spatial and spectral resolution individually[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(15): 3430~3441
- 5 Hu Jixian. Design of long focal length large-aperture optical zoom system[J]. *J. Appl. Opt.*, 2007, **28**(5): 569~572,577  
胡际先. 长焦距大口径连续变焦光学系统的设计[J]. *应用光学*, 2007, **28**(5): 569~572,577
- 6 Ji Yiqun, Gong Guanbiao, Zhu Shanbing *et al.*. Minimal integrated hyperspectral imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(4): 727~731  
季轶群,宫广彪,朱善兵等. 微型集成超光谱成像系统[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(4): 727~731
- 7 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 122~124
- 8 Wang Qi, Wang Guangyu, Cheng Xuemin *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
- 9 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
- 10 电影镜头设计组. 电影摄影物镜光学设计[M]. 中国工业出版社, 1971, 9