

文章编号: 0253-2239(2010)08-2387-06

# 用于电子助视器的连续变焦光学系统

厉以宇 陈浩 王媛媛 朱德喜 金成鹏 吕帆

(<sup>1</sup> 温州医学院眼视光学院, 浙江温州 325027; <sup>2</sup> 卫生部视觉科学研究重点实验室, 浙江温州 325027)

**摘要** 针对电子助视器的使用要求, 设计并开发出一款变倍比达 9.3 的有限远共轭距连续变焦光学系统, 给出了光学系统的结构数据与性能评价, 包括调制传递函数、点列图和弥散斑直径, 通过公差灵敏度分析和蒙特卡罗法对光学系统容差能力进行了研究。光学系统采用机械补偿方式, 分前固定组、变倍组、补偿组和后固定组, 共 11 片透镜, 光学筒长 76 mm, 前截距 262 mm, 可以实现 8.8~52 mm 的连续变焦, 变焦轨迹平滑, 整个变焦过程无渐晕, 图像质量清晰稳定。

**关键词** 几何光学; 变焦光学系统; 有限远共轭距; 调制传递函数

中图分类号 TN202 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2387

## Continuous Zoom Optical System for E-Vision Aid Device

Li Yiyu Chen Hao Wang Yuanyuan Zhu Dexi Jin Chengpeng Lü Fan

(<sup>1</sup> School of Optometry and Ophthalmology, Wenzhou Medical College, Wenzhou, Zhejiang 325027, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Vision Science Research, Ministry of Health P. R. China, Wenzhou, Zhejiang 325027, China)

**Abstract** A 9.3× continuous zoom optical system with fixed finite conjugate distance was designed for E-vision aid device. By using optical design software, the configuration of the optical system and the evaluation of the optical performance including modulation transfer function, spot diagram and diffuse spot in diameter were investigated. The stability of the system performance was forecasted by using the tolerance sensitivity analysis and Monte Carlo method. This mechanically compensated zoom lens combines four group components including a fixed front element, moving variator, compensator, and a fixed rear element with a total of 11 pieces of lens. The optical system which has a tube length of 76 mm and a front intercept distance of 262 mm can realize continuous zoom from 8.8~52 mm without any image vignetting or obvious fluctuation in image quality.

**Key words** geometric optics; zoom optics; finite conjugate distance; modulation transfer function

## 1 引言

电子助视器是低视力患者进行康复治疗的辅助设备, 基本结构包括变焦镜头、视频图像传输处理模块以及终端显示器三部分<sup>[1]</sup>。电子助视器是对近距离且位置固定的物面进行连续变倍成像, CCD 接收面始终保持不动, 所以镜头属于有限远共轭距连续变焦光学系统。显示器件的屏幕尺寸与被拍摄物体尺寸之比被视为电子助视器的放大倍数, 通常在 4×~60× 范围内, 放大倍数的变化幅度由变焦镜头的变倍比决定。对于变焦光学系统的研究以往大多

围绕无限远共轭距情况<sup>[2~6]</sup>, 现在因为安防监控和医疗检测诊断等领域的发展, 对有限远共轭距变焦光学系统提出了更多的需求, 因而对它的研究<sup>[7,8]</sup>也变得迫切起来。

本文主要讨论有限远共轭距变焦光学系统的设计方法, 结合电子助视器的实际应用, 设计开发一款变倍比达 9.3 的变焦光学系统。系统采用经典的四组元机械补偿结构, 通过高斯光学计算首先获得系统初始结构, 然后利用光学设计软件进行像差校正和平衡, 再从加工与装配角度计算结构公差对系统

收稿日期: 2009-10-15; 收到修改稿日期: 2009-10-28

基金项目: 卫生部科学研究基金(WKJ2009-2-031)、浙江省科技计划项目(2007C11083)和温州市科技计划项目(G20090036)资助课题。

作者简介: 厉以宇(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事医用光学仪器方面的研究。E-mail: liyiyu2008@gmail.com

性能的影响,最后对系统样机进行初步检验。

## 2 变焦原理

变焦光学系统通过改变镜组间距实现焦距的连续变化,同时保持像面位置的稳定。机械补偿式的四组元变焦光学系统是由前固定组、变焦组、补偿组和后固定组四部分构成<sup>[9~11]</sup>。当物距为无限远时,以系统焦距  $f'$  表征变焦光学系统的性能,  $f' = f_1' \times \beta_2 \times \beta_3 \times \beta_4$ ; 当物距为有限远时,改用系统倍率  $M$ 。

$$M = \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3 \times \beta_4, \quad (1)$$

式中前固定组和后固定组的垂轴放大率  $\beta_1$  和  $\beta_4$  是常数,主要用于调整物像关系和像差校正。系统倍率的改变主要依靠变倍组。为使像面位置在变焦过程中保持稳定,需要按一定规律移动补偿组。图 1 是采用的正组补偿式双移动组元的变焦光学系统,变倍组的物点  $A$  是前固定组的像点,补偿组的像点  $A'$  是后固定组的物点,在整个变倍过程中要保持这两点之间的距离  $D$  为常量。

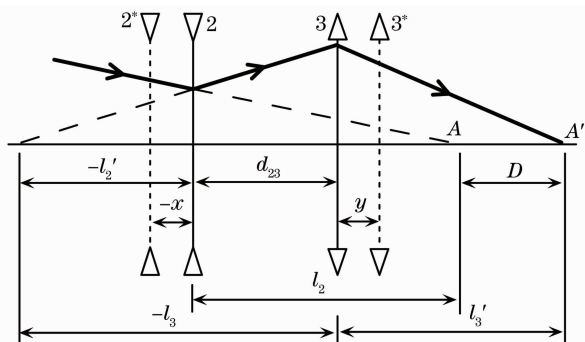


图 1 正组补偿式双移动组元的变焦距光学系统

Fig. 1 Zoom optical system of two moving groups with positive compensator

从图 1 中可以得到:

$$D = (l_3' - l_3) - (l_2 - l_2'), \quad (2)$$

由几何光学可得:

$$\begin{cases} l = f'(1/\beta - 1) \\ l' = f'(1 - \beta) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\beta$  为移动组的垂轴放大率,将(3)式代入(2)式得:

$$D = 2(f_2' + f_3') - f_2' \left( \frac{1}{\beta_2} + \beta_2 \right) - f_3' \left( \frac{1}{\beta_3} + \beta_3 \right), \quad (4)$$

当变倍组处于初始位置时,预先取定变倍组的焦距  $f_2'$ 、补偿组的焦距  $f_3'$ 、变倍组的倍率  $\beta_2$ 、变倍组与补偿组之间的距离  $d_{23}$ , 联立如下公式

$$\begin{cases} l_2' = f_2'(1 - \beta_2) \\ l_3 = l_2 - d_{23} = f_3'(1/\beta_3 - 1) \end{cases} \quad (5)$$

可求得

$$\beta_3 = \frac{f_3'}{f_3' + f_2'(1 - \beta_2) - d_{23}}, \quad (6)$$

于是(2)式中的不变量  $D$  为已知的常量。根据系统的总体变倍比要求,可计算出在任意变倍状态下移动组元的移动量、相对位置和垂轴放大率。在短焦时刻,根据前固定组与变倍组之间的最小距离  $d_{12}^*$ 、变倍组的物距  $l_2^*$  以及光学系统前截距  $l_1$  可得:

$$\beta_1 = \frac{l_2^* + d_{12}^*}{l_1}, \quad (7)$$

$$f_1' = \frac{l_1}{1/\beta_1 - 1}, \quad (8)$$

并由短焦时刻的系统倍率  $M_s$ 、变倍组的倍率  $\beta_2^*$  和补偿组的倍率  $\beta_3^*$  可得:

$$\beta_4 = \frac{M_s}{\beta_1 \beta_2^* \beta_3^*}, \quad (9)$$

最后由短焦时刻各组元的相对位置以及系统光学筒长来确定后固定组的焦距  $f_4'$ 。

## 3 设计实现

针对电子助视器的特殊应用,设计一款变倍比为  $9.3 \times$  的有限远共轭距变焦光学系统,设计要求如表 1 所示。依据(1)~(9)式计算可得变焦光学系统的四个组元的焦距分别为  $f_1' = 38.80 \text{ mm}$ ,  $f_2' = -7.81 \text{ mm}$ ,  $f_3' = 9.56 \text{ mm}$ ,  $f_4' = -11.54 \text{ mm}$ 。

表 1 光学设计规格

Table 1 Specification

Parameters	Value
CCD size /mm	8.5
Magnification	-0.03 ~ -0.28
Focal length /mm	8.7 ~ 52
Front intercept /mm	262
Rear intercept /mm	11
Optical tube length /mm	<77
Object size at short focus /mm	190
Vignetting	<10%
Wavelength	Visible

依据高斯光学计算结果,利用光学设计软件先对四个组元进行单独设计,初步校正球差和色差,再根据短焦时刻各组元相对位置进行组合,同时考虑表 1 中给定的设计要求,进行光学系统优化设计。优化时,将透镜表面曲率半径和组元间距设为变量,固定各组元的焦距值以保持变焦光学系统原有的高斯光学关系,还要兼顾相邻光学表面之间的中心厚度和边缘厚度等。

因为连续变焦光学系统既要求成像质量最佳,

又要求成像质量在变焦过程中保持稳定,所以选取短焦(8.8 mm)、中短焦(22 mm)、中焦(37 mm)、中长焦(45 mm)和长焦(52 mm)五个位置的各种初级像差系数以及各视场弥散斑直径的集合来构造评价函数,使用阻尼最小二乘法进行系统像差的校正和平衡。中短焦到中长焦是系统使用最为频繁的焦距范围,优化时适当提高它的像差系数权重。为使像面照度在变焦过程中保持不变,同时又便于控制系统像差,将孔径光阑设置在补偿组与后固定组之间,且位置固定。最终优化得到的光学系统结构如图 2 所示,共使用了 11 片透镜,结构数据见表 2,四个组元对系统光焦度的贡献分别为正、负、正、负,系统光学筒长 76 mm,最大光学零件口径 28 mm。整个变焦过程不存在渐晕现象。为降低加工成本和装配精度要求,所有光学表面都采用球面设计。

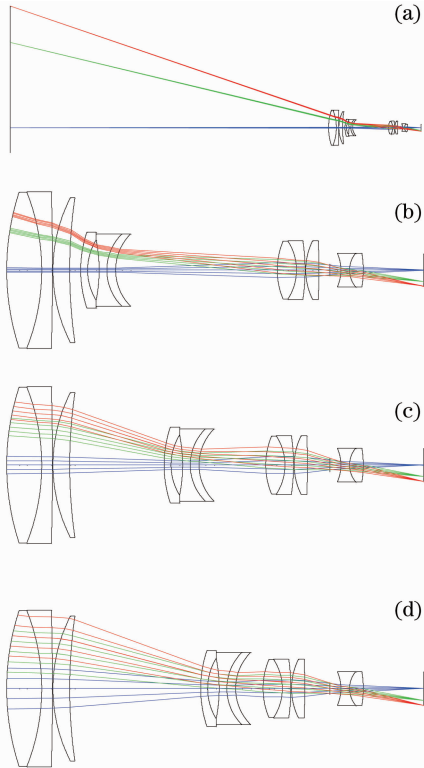


图 2 光学系统结构布局。(a)短焦时刻由物面至像面;(b)短焦时刻由第一个光学表面至像面;(c)中焦;(d)长焦  
Fig. 2 Layout of optical system. (a) from object to image surface at short-focus; (b) from first optical surface to image surface at short-focus; (c) mid-focus; (d) long-focus

图 3 为光学系统的变焦轨迹,T5 和 T15 两条曲线分别是变倍组和补偿组的变焦运动曲线,变倍组的运动行程为 21 mm,运动轨迹平滑。补偿组的行程只有 2.5 mm,定位精度要求较高。

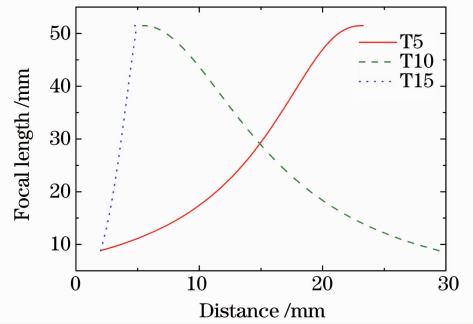


图 3 移动组元运动轨迹,实线:前固定组与变倍组的间距;虚线:变倍组与补偿组的间距;点线:补偿组与后固定组的间距

Fig. 3 Moving components trajectory, solid lines: spacing between the fixed front element and moving variator; dashed line: spacing between moving variator and compensator; dotted line: spacing between compensator and the fixed rear element

表 2 光学系统结构参数

Table 2 Lens data

		Radius /mm	Thick-ness /mm	Focal length /mm
OBJ		Infinity	262.02	
Fixed front element	1	44.30	6.38	
	2	-37.31	1.96	
	3	-510.64	0.10	38.80
	4	28.19	3.04	
	5	89.44	T5	
Variator	6	21.04	1.27	
	7	10.22	2.10	
	8	-26.94	1.40	-7.81
	9	9.03	1.60	
	10	9.03	T10	
Compensator	11	13.29	3.50	
	12	-9.42	1.57	
	13	-34.21	0.12	9.56
	14	11.62	2.40	
	15	-133.02	T15	
STO		Infinity	0.9	
Fixed rear element	17	-7.43	1.58	
	18	4.60	2.50	-11.53
	19	-18.25	11.0	
IMA		Infinity		

光学系统的调制传递函数(MTF)曲线如图 4 所示,0 视场和 0.707 视场(FOV)的 MTF 值较高。短焦与长焦时刻最大视场的 MTF 值偏低,可以通过缩小孔径光阑来解决。图 5 是光学系统的点列图,弥散斑直径数据见表 3,可以判断,从短焦到长焦的所有焦距位置,全视场范围内的弥散斑直径均小于  $10 \mu\text{m}$ ,成像质量良好。

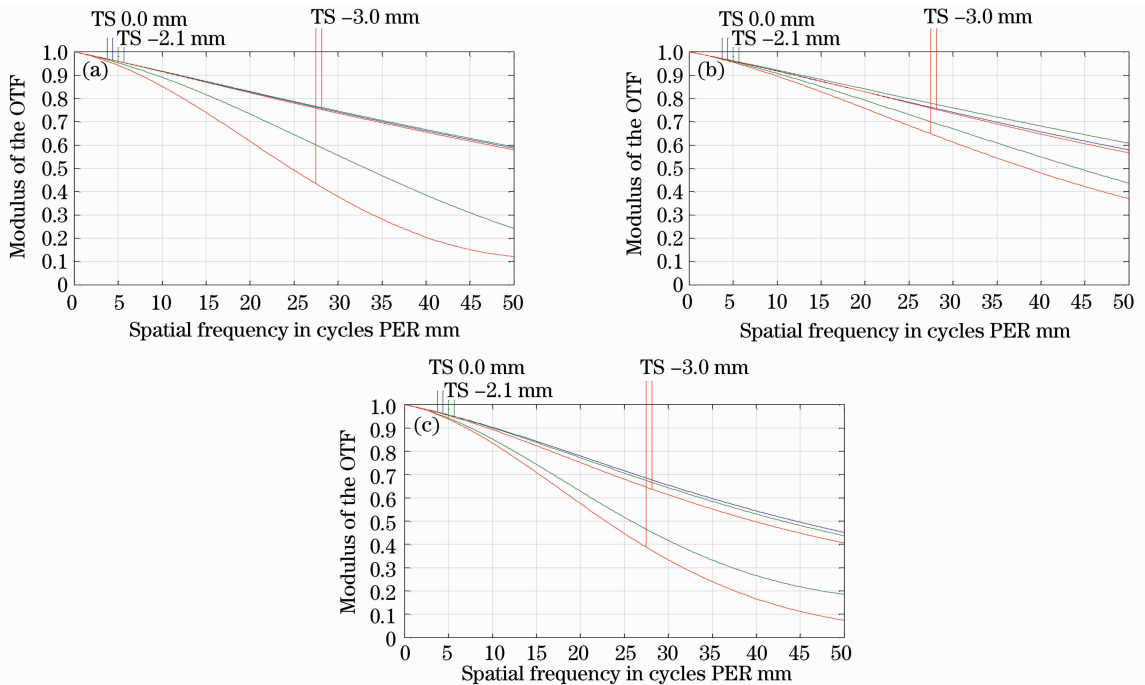


图 4 变焦光学系统的 MTF 曲线。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 4 MTF curve of zoom optical system. (a)short-focus; (b)mid-focus; (c)long-focus

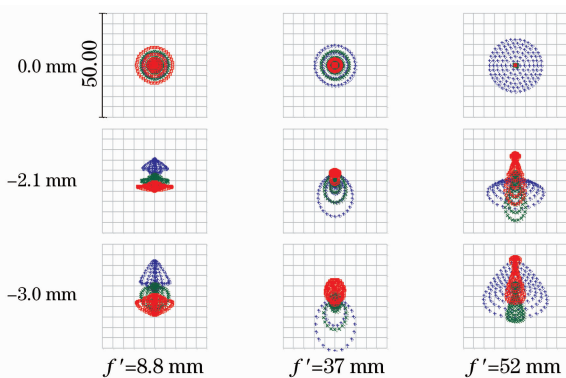


图 5 光学系统像面点列图

Fig. 5 Spot diagram of optical system

表 3 弥散斑直径的均方根值 / $\mu\text{m}$

Table 3 RMS Radius / $\mu\text{m}$

FOV	Short-focus	Mid-focus	Long-focus
0	4.46	4.41	5.60
0.707	5.38	4.80	8.33
1	7.53	6.27	9.85

## 4 公差分析

从光学零件加工与装配两方面综合考虑,设定变焦光学系统各结构参数的公差,数据见表 4。评价指标选用中焦 0.707 视场在子午方向与弧矢方向的 MTF(空间频率 30 lp/mm)平均值。首先,结构参数相互独立地在公差范围的上下极限内变化,通过公差灵敏度分析发现,对光学系统性能造成较大

影响的主要是补偿组最后一个光学表面的倾斜偏心误差,其次是补偿组第三个光学表面的倾斜偏心误差,这些误差会造成系统 MTF 值下降 0.01~0.02 左右。公差灵敏度分析没有包含公差的交互分析,分析结果不全面。采用蒙特卡罗方法对变焦光学系统进行公差交互分析,该过程在不同随机扰动作用下重复 50 次,合并后的计算结果如图 6 所示,MTF 值变化范围在 0.60~0.66 之间,变化幅度可以接受。

表 4 光学系统公差数据

Table 4 Tolerance data

Parameters	Range( $\pm$ )
Radius of curvature /fringes	5
Thickness /mm	0.03
Surface decenter /mm	0.03
Surface tilt (mm/radius)	0.03
Element decenter /mm	0.03
Element tilt /( $^\circ$ )	0.1
Surface irregularity /fringes	0.5
Index of refraction	0.0001

## 5 系统实现

图 7 是根据以上设计进行加工并组装而成的实际变焦光学系统和电子助视器样机,光学系统借助变焦筒机构对变倍组和补偿组的位置进行调节。在电子助视器样机中,变焦筒由微型电机通过齿轮进

行带动,从而驱动移动组元实现变焦。图 8 是样机在不同焦距下进行拍摄的结果,成像质量稳定,能够满足使用要求。

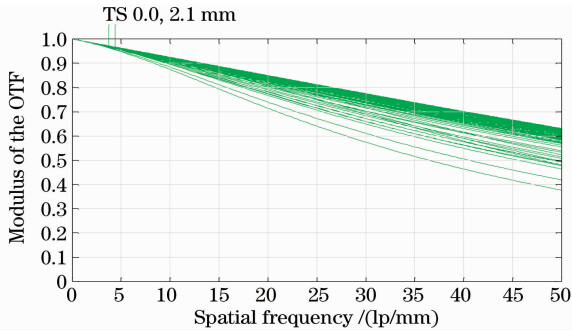


图 6 蒙特卡罗法计算公差对光学系统 MTF 的影响(中焦, 0.707 视场)

Fig. 6 Tolerance calculated with Monte Carlo method (MTF value of 0.707 FOV at mid-focus)

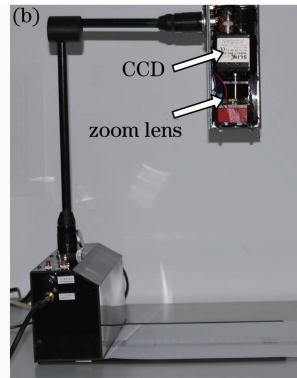
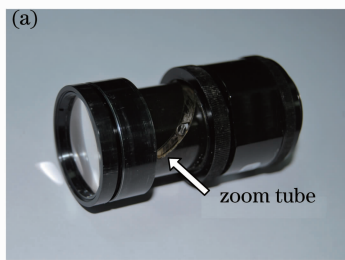


图 7 系统样机结构。(a)变焦光学系统机构;(b)电子助视器样机

Fig. 7 System prototype structure. (a) zoom optical system; (b) E-vision aids device prototype

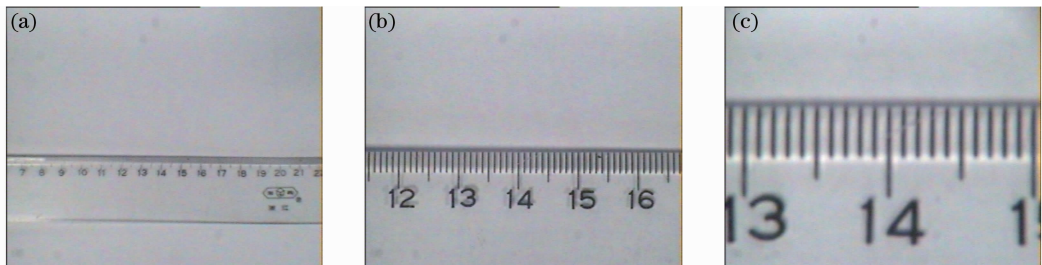


图 8 电子助视器样机拍摄效果。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 8 Shooting with E-vision aids device. (a) short-focus; (b) mid-focus; (c) long-focus

## 参 考 文 献

- 1 Sun Baochen. Low Vision Studies[M]. Beijing: People's Health Press, 2004. 21~41  
孙葆忱. 低视光学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004. 21~41
- 2 Meng Jianqi. Dual field zoom (6×) infrared imaging optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 89~92  
孟剑奇. 双视场 6 倍变焦红外热成像光学系统[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 89~92
- 3 Chen Xin, Fu Yuegang. Optical design of cam curve for zoom system[J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(1): 45~47

## 6 结 论

有限远共轭距变焦光学系统作为电子助视器的关键部件,在设计上同无限远共轭距变焦光学系统存在一定差别。设计并开发了一款变倍比为 9.3 的有限远共轭距变焦光学系统,系统采用机械补偿方式,可以实现 8.8~52 mm 的连续变焦,像质稳定。公差分析显示光学系统具有较大的结构容差,性能可靠。目前电子助视器正朝小型化方向发展,要求变焦光学系统的体积更加紧凑。对于本文设计的变焦光学系统可以考虑将后固定组去除,重新优化,以三组元结构进行变焦,实现小型化的目标。另外,还可以考虑以两个直线步进电机来代替变焦筒机构,分别控制变倍组与补偿组的运动,在变焦的同时实现手动或自动对焦的功能,这都是今后要开展的研究工作。

- 陈鑫,付跃刚. 变焦系统凸轮曲线的优化设计[J]. *应用光学*, 2008, **29**(1): 45~47
- 4 A. Mikš, J. Novák, P. Novák. Method of zoom lens design[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(32): 6088~6098
- 5 Hu Jixian. Design of long focal length large-aperture optical zoom system[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(5): 569~577  
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): 569~577
- 6 Wang Chunyan, Wang Zhijian, Zhou Qingcai. Solving the cam curve of the compensting group about zoom lens using dynamic optical theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 891~894

- 王春燕,王志坚,周庆才. 应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸轮廓曲线[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 891~894
- 7 Xu Zhengguang, Liang Laishun. Research of OZSAD system assistant design software[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(2): 235~240
- 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): 235~240
- 8 Peng Runling, Chen Jiabi, Zhuang Songlin. Design and analysis of a variable-focus optical system based on electrowetting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1141~1146
- 彭润玲, 陈家璧, 庄松林. 电湿效应变焦光学系统的设计与分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1141~1146
- 9 C. K. Tao. Design of zoom system by the varifocal differential equation[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(13): 2265~2273
- 10 Tao Chunkan. Zooming Optical System Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988. 49~81
- 陶纯堪. 变焦光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988. 49~81
- 11 Wang Zhijiang. Optical Technology Handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. 1119~1166
- 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 416~464