

文章编号: 1002-2082 (2021) 01-0030-06

一款小型化可见光两档 $7.5\times$ 变焦系统的设计

陈 悦, 谢洪波, 杨 童, 潘俊旭, 杨 磊

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 许多应用都期望以大视场搜索定位目标, 以小视场瞄准跟踪目标。提出并设计一款小型化两档 $7.5\times$ 变焦距成像系统, 其工作于 $486\text{ nm}\sim 656\text{ nm}$ 的可见光波段, 短焦视场为 $\pm 15^\circ$, 长焦视场为 $\pm 2^\circ$, 两视场下 F 数均为 2.8, 系统总长仅为 60 mm。系统由玻璃镜片及注塑镜片混合组成, 包含一个前固定组和一个可动组, 通过可动组在 2 个变焦位置间的切换完成广角搜索功能和长焦凝视功能的转换, 具有小型化、轻量化、低成本的优势。

关键词: 两档变焦; 光学设计; 注塑非球面; 小型化; 轻量化

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0101005

Design of miniaturized two-steps $7.5\times$ zoom system in visible band

CHEN Yue, XIE Hongbo, YANG Tong, PAN Junxu, YANG Lei

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Many applications expect to search for targets with a large field of view (FOV), and identify the targets in a relative small FOV. A miniaturized two-step $7.5\times$ zoom system was proposed and designed, which worked in the visible band of $486\text{ nm}\sim 656\text{ nm}$ with a wide-angle FOV of $\pm 15^\circ$, telephoto FOV of $\pm 2^\circ$, F-number in both FOV of 2.8, and overall length of 60 mm. The system consisted of glass lenses and plastic-injection lenses, which contained one front fixed group and one movable group. The conversion of wide-angle search function and long-focus gaze function was completed by switching the movable group between two zoom positions, which had the advantages of miniaturization, lightweight and low cost.

Key words: two-step zoom; optical design; plastic-injection aspheric surface; miniaturization; lightweight

引言

无人机目标侦察、消防搜救和医疗诊断等许多应用场合都期望以大视场搜索目标位置, 再以小视场追踪目标, 分辨细节, 这就要求系统具备变焦能力。同时, 此类系统经常作为光电载荷搭载在运动机构上, 对系统提出了小型化、轻量化、低成本的设计要求^[1-3]。

由变焦系统的物像交换原理可知, 若一个变焦系统仅要求在 2 个位置保持像面稳定, 那么仅需一组可动透镜即可达到目的^[4], 大大简化了系统光学和机械结构, 这种结构称为两档变焦系统。

根据上述应用场景与设计的要求, 提出并设计一款两档光学补偿变焦距成像系统, 其工作于 $486\text{ nm}\sim 656\text{ nm}$ 的可见光波段, 由注塑镜片与玻璃镜片混合组成, 包含一个前固定组和一个可动组, 具有小型化、轻量化、低成本的优势。

1 系统原理与初始结构

1.1 两档变焦系统原理

两档变焦系统至少应包含前固定组与变倍组。以正变倍组为例进行分析, 简化后的两档变焦系统原理如图 1 所示^[5]。

收稿日期: 2020-05-28; 修回日期: 2020-06-27

基金项目: 天津大学自主创新基金

作者简介: 陈悦 (1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: chen Yue9543@163.com

通信作者: 杨磊, E-mail: yang lei@tju.edu.cn

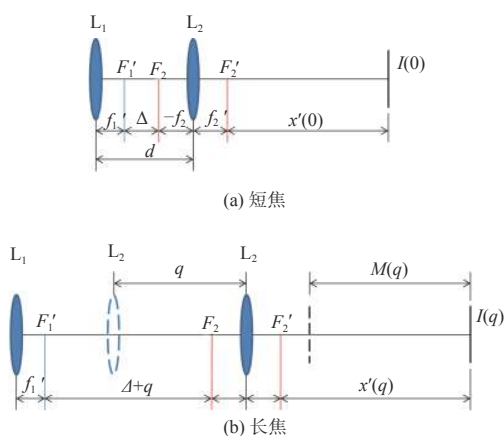


图1 从短焦切换到长焦的两档变焦系统原理

Fig. 1 Two-step zoom system shifting from wide-angle state to telephoto state

图1中变倍组由原位置向右移动距离 q ,使得原来位于 $I(0)$ 处的像面向右移动 $M(q)$ 到达 $I(q)$,系统由短焦状态切换为长焦状态。图1中 Δ 与 $(\Delta+q)$ 分别是短焦状态与长焦状态下前固定组与变倍组间的光学间隔, f_1' 与 f_2' 分别是前固定组与变倍组的焦距, $d=(f_1'+f_2'+\Delta)$ 是变焦过程中两组透镜的最小间距。

设计变焦系统必须满足3个条件:1)为保证像面位置不变,必须使像面移动量 $M(q)=0$;2)为避免变焦过程中2组透镜发生碰撞,必须使最小间距 $d>0$;3)为保证系统机械总长不超过设计值 l ,必须使长焦状态下的系统总长 $l_t=(f_1'+2f_2'+\Delta+q+x'(q))<l$ 。由图1中几何关系可将3个条件写为数学表达式:

$$M(q) = \frac{q^2\Delta + q\Delta^2 - q \cdot f_2'^2}{q\Delta + \Delta^2} = 0 \quad (1)$$

$$d = f_1' + f_2' + \Delta > 0 \quad (2)$$

$$l_t = f_1' + 2f_2' + \Delta + q + \frac{f_2'^2}{\Delta + q} < l \quad (3)$$

两档变焦系统初始结构参数 Δ, f_1' 与 f_2' 需满足(1)式~(3)式。

将系统的长焦与短焦焦距分别记为 f_t' 和 f_w' ,则这2个焦距的比值为系统的变倍比,记为 Γ ,即:

$$\Gamma = \frac{f_t'}{f_w'} \quad (4)$$

使用双光组组合焦距公式^[6]:

$$f' = -\frac{f_1' \cdot f_2'}{\Delta} \quad (5)$$

分别计算长焦与短焦焦距 f_t' 和 f_w' ,并代入(4)式,得到:

$$\Delta = \frac{q\Gamma}{1-\Gamma} \quad (6)$$

设计时,合理确定移动距离 q 后,代入(6)式得到光学间隔 Δ 。对变倍组使用牛顿公式^[6]:

$$x \cdot x' = f \cdot f' \quad (7)$$

分别计算移动前后像距 $x'(0)$ 和 $x'(q)$,并代入(1)式中,得到:

$$f_2' = \sqrt{q\Delta + \Delta^2} \quad (8)$$

将距离 q 与光学间隔 Δ 代入(8)式,求出变倍组焦距 f_2' 。将(6)式和(8)式代入双光组组合焦距公式(5)中,得到:

$$f_1' = \sqrt{\Gamma} \cdot f_w' \quad (9)$$

将短焦焦距 f_w' 和系统变倍比 Γ 代入(9)式,求出前固定组焦距 f_1' 。

将(6)式、(8)式和(9)式分别代入(2)式和(3)式,可计算得到同时满足3个设计条件的变倍组移动距离 q 的取值范围。根据系统机械和光学设计要求合理确定 q 后,代入(6)式、(8)式和(9)式,求出 Δ, f_1' 与 f_2' ,搭建初始结构。

1.2 初始结构搭建

本文所设计系统的技术指标如表1所示。

表1 两档变焦系统设计指标

Table 1 Specifications of two-step zoom system for design

Specifications	Value
Telephoto field of view $\omega_t/(\circ)$	± 2
Wide-angle field of view $\omega_w/(\circ)$	± 15
Zoom magnification Γ	7.5°
Detector	1/2.7"CCD
Pixel diameter/ μm	3.275
Aperture(F number)	2.8
Mechanical total length l/mm	< 60

可见光系统达到CCD的极限分辨率难度较大。根据像元直径 $3.275\mu\text{m}$,考虑2个视场状态的应用场景和设计难度后,本文设计系统的像质评价指标定为:长焦状态中心视场RMS光斑半径小于2倍像元直径;短焦状态各视场RMS光斑半径小于2倍像元直径。2个视场状态下的最大畸变均小于2%。

由表1可知,机械总长设计值 $l=60\text{mm}$,代入(2)式和(3)式计算得到变倍组移动距离 q 的取值范围: $0 < q < 46.88\text{mm}$ 。根据机械系统总长较短,变倍组光焦度较小及前固定组与变倍组间机械间隔

足够大这 3 个设计要求, 选定 $q=20\text{ mm}$ 。

根据上述分析可知, 将选定的系统设计指标依次代入(6)式、(8)式和(9)式, 得到系统初始结构设计参数如表 2 所示。

表 2 两档变焦系统初始设计参数

Table 2 Initial parameters of two-step zoom system for design

Parameters	Value
Wide-angle state optical spacing Δ/mm	-23.08
Focal length of front fixed group f_1'/mm	34.33
Focal length of movable group f_2'/mm	8.43

考虑到系统小型化、轻量化、低成本的设计要求, 本文系统不设置后固定组。根据表 2 中参数, 利用 PW 法计算出符合前固定组和变倍组焦距要求的薄透镜光焦度分配。参照双胶合薄透镜参量表^[7], 在 CODE V 中将薄透镜替换成实际材料的厚透镜。加入非零视场后, 在 2 个焦距状态的视场分散处各增加一片透镜, 并初步优化彗差和场曲。优化时, 根据表 2 中参数约束前固定组与变倍组焦距和两组间光学间隔。搭建的系统初始结构如图 2 所示。

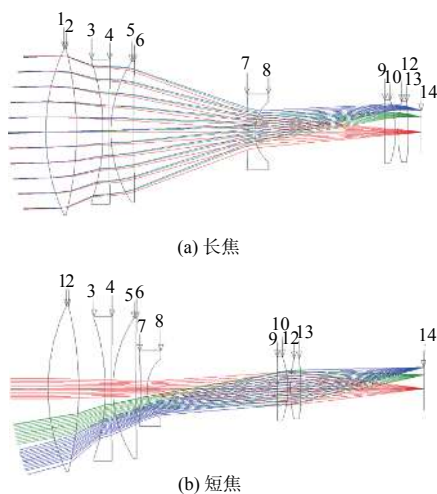


图 2 初始结构

Fig. 2 Diagram of initial structure

2 个焦距状态下的光阑位置不同, F 数相同。本文将短焦状态光阑设置在第 9 面, 以达到各组透镜口径与厚度的平衡。

2 系统的优化与分析

2.1 初始结构的优化

初始结构仅在理想数值解上针对非零视场进

行初步优化。此时系统口径不符合设计指标, 且球差与色差仍较严重。为增加系统口径, 同时减小球差, 向前固定组中加入一片透镜。为消色差, 向变倍组中加入 3 片透镜并将两组正负透镜分别胶合。优化后得到的结构如图 3 所示。

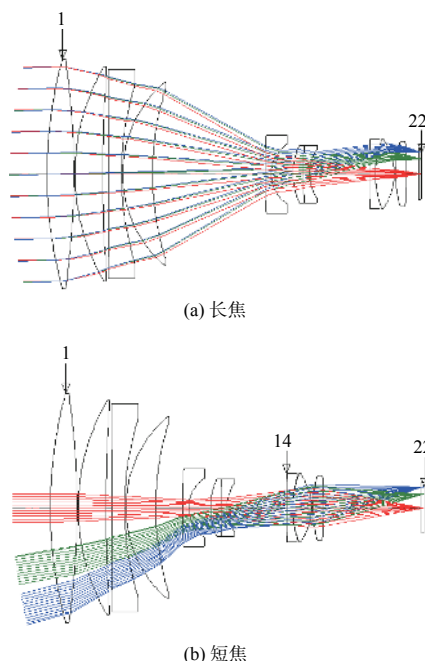


图 3 优化后的系统结构

Fig. 3 Diagram of optimized system structure

优化后的结构由 4 片前固定组镜片与 6 片 4 组变倍组镜片组成, 所有镜片均为球面玻璃镜片。长焦状态和短焦状态光阑分别位于第 1 面和第 14 面。变焦过程中第 1 面通光口径不变, 第 14 面通光口径变化, 为一可变光阑。2 个焦距状态下 F 数不变, 均为 2.8。

2.2 系统的像差分析

基于优化后系统的点列图, 长焦状态下的弥散斑大于短焦状态下的弥散斑, 且大于 3 个 CCD 像元大小, 成像质量一般。其根本原因在于长焦状态下焦距约 94 mm, 设计中总长压缩至 60 mm, 摄远比达到 0.6, 导致长焦状态设计难度高于短焦状态^[8]。

对长焦状态系统影响最大的像差是球差和彗差。根据图 4 进行分析, 系统各表面球差的方差达到 0.894 5, 一般来说会导致公差过紧, 不利于后续加工^[9]。若在前固定组中引入负透镜进行校正, 则会增加系统质量和系统复杂度。因此, 决定引入非球面镜片进行后续设计。

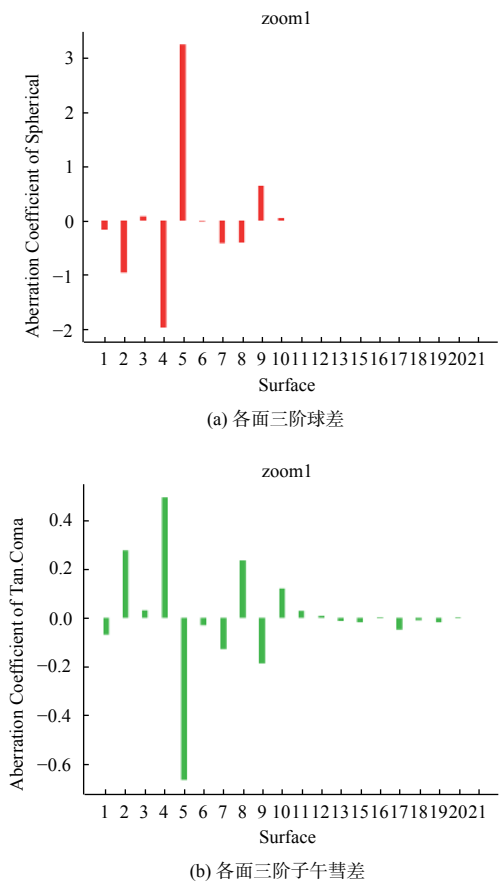


图4 优化后的系统长焦状态三阶像差分布图
Fig. 4 Third-order aberrations of optimized system structure in telephoto state

与玻璃材料相比,光学塑料材料密度低,易成型,使用注射压缩成型工艺能够降低非球面加工成本^[10]。为实现小型化、轻量化、低成本的设计要求,决定引入塑料非球面镜片替代大口径玻璃镜片。

3 系统的轻量化与低成本化设计

以图3所示优化结果为基础,为降低系统质量和成本,同时提高成像质量,引入塑料材料进行优化。由于塑料材料的折射率及阿贝数选择范围均小于玻璃材料^[11],替换材料时系统必须满足光焦度分配方程和消色差方程^[12]:

$$\Phi=\frac{1}{f}=\frac{1}{h_1}\sum_{i=1}^kh_i\cdot\Phi_i \tag{10}$$

$$\omega=\frac{1}{h_1^2\cdot\Phi}\cdot\sum_{i=1}^kh_i^2\cdot\omega_i\cdot\Phi_i=0 \tag{11}$$

式中: Φ 和 Φ_i 分别是系统整体光焦度和第 i 片透镜光焦度; ω 和 ω_i 分别是系统整体色散系数和第

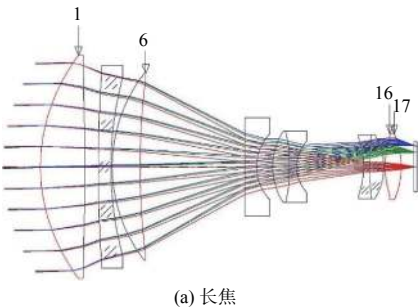
i 片透镜色散系数; h_i 为零视场近轴光线入射到第 i 片透镜的高度; k 为镜片数。

由于成像系统整体光焦度为正,将两变焦位置处各镜片零视场入射高度代入(11)式可知,口径较大的负透镜应选取色散系数大的高折射率材料,故将图3结构中第3片和第8片负透镜材料确定为火石玻璃。考虑火石玻璃与低折射率塑料材料的线膨胀系数差异,与第8片胶合的透镜也保留玻璃材料。使用CODE V宏语言编写自建的光学塑料材料库,将其余透镜全部替换为塑料材料。优化时,在视场集中的塑料表面上设置非球面以消除单色球差,在满足(10)式的条件下,将前固定组各片正透镜和变倍组塑料胶合透镜更换为折射率相近、阿贝数相异的其他塑料材料,以消除色球差^[13];分别调整各组透镜的曲率半径以消除彗差,约束各面球差和彗差的方差以保证公差满足要求。优化后得到的设计结果如表3所示。

表3 混合材料结构各镜片表面类型及使用材料
Table 3 Surface types and materials of mixed material structure

Lens	Surface types	Material
1st	asphere/sphere	APEL-APL5514ML
2nd	sphere/sphere	CDGM-HZF88
3rd	sphere/asphere	APEL-APL5014DP
4th	sphere/sphere	APEL-APL5514ML
5th	sphere/sphere	lupizeta-EP8000
6th	sphere/sphere	APEL-APL5014DP
7th	sphere/sphere	CDGM-HZF88
8th	sphere/sphere	CDGM-HZK11
9th	asphere/asphere	APEL-APL5014DP

图5中第2,7,8片透镜为玻璃镜片,其余为塑料镜片,第1,6,16,17面为非球面。优化后系统减少了一片前固定组透镜,同时仅保留3片玻璃镜片,光学部分质量下降了30%。非球面全部使用塑料镜片,由于模具可重复利用,在大批量生产时可



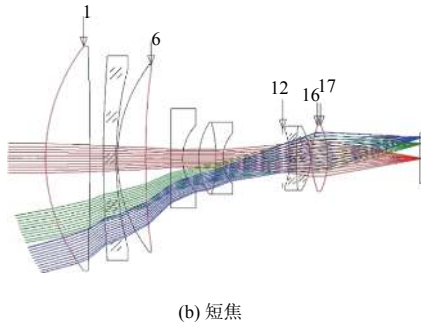
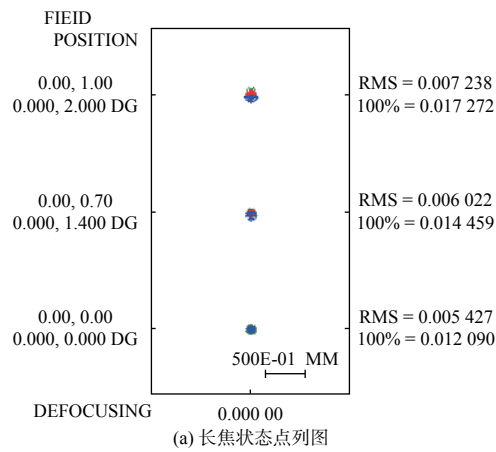


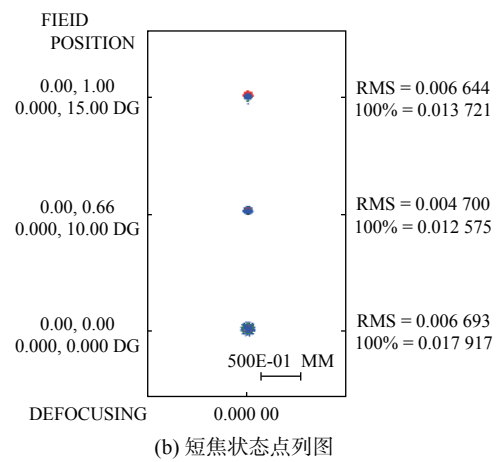
图5 混合材料结构

Fig. 5 Diagram of mixed material structure

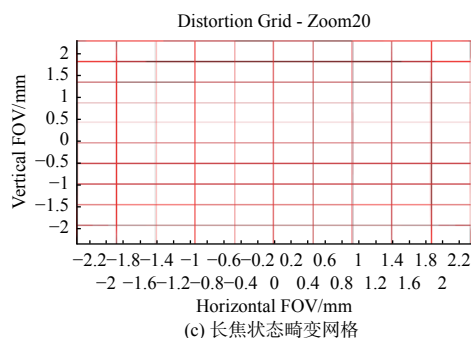
以显著降低生产成本^[14]。混合材料结构像质如图6所示。



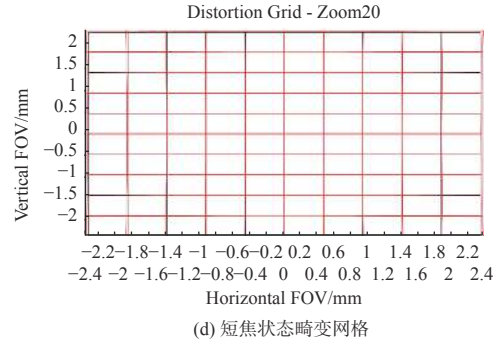
(a) 长焦状态点列图



(b) 短焦状态点列图



(c) 长焦状态畸变网格



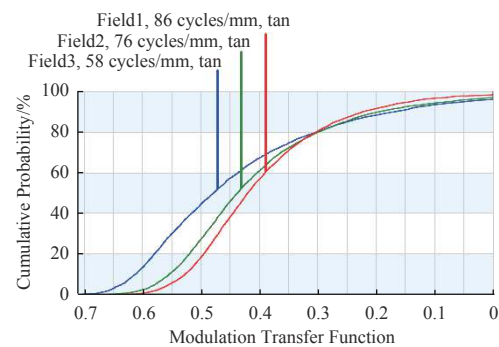
(d) 短焦状态畸变网格

图6 混合材料结构像质

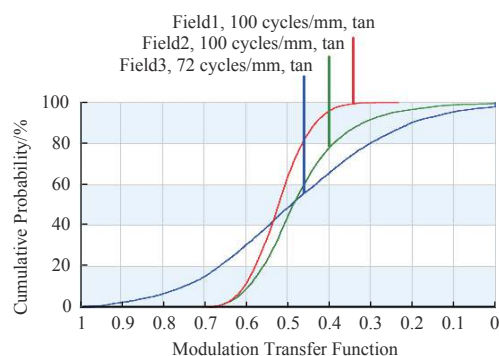
Fig. 6 Mixed material structure image quality

系统长焦状态下 RMS 光斑直径小于 2 倍 CCD 像元直径, 边缘视场 RMS 光斑直径小于 2.5 倍像元直径, 满足系统像质评价指标。短焦状态下中心视场的 RMS 光斑直径约为 2 倍像元直径, 边缘视场 RMS 光斑直径小于 2 倍像元直径, 满足搜索与发现目标的使用要求。2 个视场状态下的最大畸变均小于 2%, 满足系统像质评价指标。

对混合材料结构进行 MTF 公差分析, 按照普通工厂加工能力给出球面公差项目, 非球面表面另加一项 $\pm 20 \mu\text{m}$ 的表面矢高公差^[15]。使用 CODE V 得到 Monte Carlo MTF 公差分析结果图7所示。



(a) 长焦



(b) 短焦

图7 混合材料结构 MTF 公差分析

Fig. 7 MTF tolerance analysis of mixed material structure

由图7可知,实际加工系统的中心视场80%可以达到长焦状态86 lp/mm,短焦状态100 lp/mm以上的分辨率,边缘视场可以达到长焦状态58 lp/mm,短焦状态72 lp/mm的分辨率。系统公差分析结果良好,满足加工和使用要求。

4 结论与展望

相对于全玻璃镜片结构,混合材料结构像质更好,质量更轻,量产成本更低,同时有良好的可加工性,因此将混合材料结构作为最终的设计结果。

综上所述,为达到小型化、轻量化、低成本的设计目标,本文提出并设计了一款小型化两档变焦成像系统,其工作于486 nm~656 nm的可见光波段,由球面玻璃透镜与塑料透镜混合组成,仅包含一个可动镜组。设计结果表明系统结构简单,两视场下 F 数均达到2.8,总长仅为60 mm,具有良好的像质和公差,符合小型化、轻量化、低成本的设计目标。

参考文献:

- [1] HU Jixian, DANG Chenlang. Design of switch-zoom TV measuring optical system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(6): 93-96.
胡际先, 党晨朗. 两档变焦测量电视光学系统的设计[J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(6): 93-96.
- [2] HE Lei, ZHANG Jianlong, YANG Zhen. Design of a 6.5 times microscale continuous visible zoom optical system[J]. *Optical Instruments*, 2019, 41(2): 46-52.
贺磊, 张建隆, 杨振. 6.5倍微小型可见光变焦光学系统设计[J]. *光学仪器*, 2019, 41(2): 46-52.
- [3] XIE Hongbo, ZHANG Chunhui, LI Baoan, et al. Design of a micro zoom lens[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007(10): 2343-2345.
谢洪波, 张春慧, 李保安, 等. 一种微型变焦系统的设计[J]. *科学技术与工程*, 2007(10): 2343-2345.
- [4] ALDRICH R E. Three-element infrared optically compensated two-position zooms for commercial FLIRs[J]. *SPIE*, 1995, 2539: 87-107.
- [5] ZHOU Ke. Optical design of two-steps zoom system under visible light for a certain theodolite[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Graduate school of the Chinese Academy of Sciences, 2012.
- 周珂. 某经纬仪可见光波段两档变焦系统设计[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2012.
- [6] YU Daoyin, TAN Hengying. *Engineering Optics*[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [7] YUAN Xucang. *Optical design*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988.
袁旭沧. *光学设计*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- [8] CHEN Xiuping, SUN Ting, GAO Jing, et al. Design of long-focal length athermal NIR TV optomechanical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 377-380.
陈秀萍, 孙婷, 高婧, 等. 长焦距小型无热化电视光机系统设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(3): 377-380.
- [9] DENG Pinghu, LIN Feng. Method of tolerance sensitivity reduction of optical design[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 182-189.
邓桦湖, 林峰. 光学设计中降低公差灵敏度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 182-189.
- [10] HUANG Yongcheng. Study of technological parameter optimization for injection compression molding of aspherical lens[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
黄永程. 非球面透镜注塑压缩成型工艺参数优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [11] DISLICH H. Plastics as optical materials[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 1979, 18(1): 49-59.
- [12] HUANG Qiu, CHEN Yiqing, GAO Zhifeng, et al. Athermalization and test validation of infrared imaging system[J]. *SPIE*, 2009, 7383: 73830.
- [13] LI L K, YI A Y. An affordable injection-molded precision hybrid glass-polymer achromatic lens[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69: 1461-1467.
- [14] MARUYAMA T, TAKAGI M, NORO Y, et al. Zoom lens systems with aspherical plastic lens[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1987, 33(3): 256-266.
- [15] ZHAO Yang, GONG Yan, HU Yining. Method of tolerance sensitivity reduction of zoom optical system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(7): 121-125.
赵阳, 巩岩, 胡宜宁. 变焦距光学系统降低公差灵敏度的方法[J]. *光电工程*, 2009, 36(7): 121-125.