

文章编号: 1001-3806(2015)02-0242-05

刑侦日盲紫外折衍混合变焦光学系统设计

朱海宇¹, 马 军², 张鸿佳¹, 王文生^{1*}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为了满足刑侦过程中紫外光学系统远距离搜索、近距离拍照的需求, 采用二元衍射元件和非球面元件, 设计了一种日盲紫外机械补偿变焦光学系统, 其中焦距为 40mm ~ 80mm, F 数为 4, 工作波段为 0.24 μm ~ 0.28 μm 。选用 S8844-0909 型 2.54cm 紫外 CCD, 像元尺寸为 24 μm × 24 μm , 对应视场角为 6° ~ 12°。系统由 7 块透镜组成, 结构简单、体积小。结果表明, 在整个变焦范围内, 后截距 10mm 处, 截止空间频率 21cycles/mm 时, 各视场的光学调制传递函数均在 0.7 以上, 接近衍射受限曲线, 畸变小于 5%, 像质优良, 像面稳定。该设计能满足光学系统的总体设计要求。

关键词: 光学设计; 日盲紫外变焦光学系统; 二元光学; 非球面

中图分类号: TN23 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.021

Design of solar blind ultraviolet refractive/diffractive zoom lens used in criminal investigation

ZHU Haiyu¹, MA Jun², ZHANG Hongjia¹, WANG Wensheng¹

(1. Photoelectric Engineering College, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to search at long distance and take photos at short distance in criminal investigation, a mechanical-compensation solar blind ultraviolet zoom lens system was designed with binary diffractive elements and aspherical elements. Its zooming region was 40mm ~ 80mm with F number of 4, operating at 0.24 μm ~ 0.28 μm wavelength. The 2.54cm S8844-0909 ultraviolet CCD was selected as a sensor with pixel size of 24 μm × 24 μm and corresponding field of view of 6° ~ 12°. The optical system was composed of seven lenses with simple structure and small size. The results show that in full zooming range, MTF over all fields of view is above 0.7 at back focus length of 10mm and cut off frequency of 21cycles/mm, close to the diffraction-limited curve. The distortion is less than 5%. The zoom lens system has good image quality and stable image plane, and meets the overall design requirements of the optical system.

Key words: optical design; solar blind ultraviolet zoom lens; binary optics; aspherical surface

引 言

在现代光电探测技术中, 紫外波段越来越受到人们的关注, 成为继激光探测技术和红外探测技术之后发展起来的又一种极其重要的光电探测技术。由于宇宙空间、火焰、石油、气体污染物分子, 以及高压线的电晕现象等都会含有紫外线辐射, 因此紫外探测技术在航天、通讯、民用检测等领域都有着广泛

的应用需求。在刑事犯罪现场, 由于人体的指纹印、体液(血液、精液、唾液)以及违禁的火药、麻醉品等物质, 对紫外线具有特殊的吸收、反射、散射及荧光特性。用刑侦紫外成像系统可在非渗透性的光滑表面如陶瓷、打蜡的地板、油漆家具等表面观察到反差强烈的犯罪分子遗留的无色汗液指纹。与常规照相技术相比, 刑侦紫外成像系统可实时搜索、实时观察、实时拍摄、即时存储^[1-2]。

我国对紫外成像技术的研究起步相对较晚, 相应的文献、专利、镜头较少, 且国内现有的紫外成像镜头多为定焦距镜头。参考文献[3]中使用的定焦距镜头焦距为 52mm、视场角为 9°; 参考文献[4]中的紫外数码相机工作在日盲紫外波段, 该专利没有给

基金项目: 总装备部预研局十二五基金资助项目

作者简介: 朱海宇(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wwscom@163.com

收稿日期: 2014-05-13; 收到修改稿日期: 2014-05-16

出结构参量,但属于定焦镜头;参考文献[5]中所选用的日盲紫外镜头和参考文献[6]中的也均为定焦镜头,都无法满足变焦距的要求;参考文献[7]中设计了两倍变焦日盲紫外光学系统,其由 7 片透镜组成。该专利没有给出结构参量,仅给出了 F 数小于 1.5。此系统可在两端位置实现两档变焦,但不能实现连续变焦。本文中基于用户要求,设计了两倍日盲紫外变焦光学系统,变焦范围为 40mm~80mm, F 数为 4,可在焦距范围内实现连续变焦。根据刑侦过程中要求紫外光学系统远距离搜索、近距离拍照的需求,选用 S8844-0909 型 2.54cm 紫外 CCD 作为探测器。

1 变焦距光学系统

变焦距光学系统要求焦距可在变倍比范围内变化,在变焦过程中要求像面保持稳定,相对孔径基本不变,并且像质保持良好。根据变焦补偿方式的不同可分为光学补偿法和机械补偿法。光学补偿法的变倍组和补偿组一起做线性移动,结构简单。缺点是存在像面漂移,故一般仅适用于小变倍比;另一缺点是结构较长。通用的机械补偿法,其变倍组做线性移动,补偿组做非线性移动,需要凸轮结构。本文中针对用户的实际需求选用机械补偿法。

本设计为变焦四组元系统,分别由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组组成,其对应的焦距分别为 f_1, f_2, f_3, f_4 。为了保持像面的稳定,由变倍组引起的像面漂移要得到补偿组的完全补偿,故该光学系统需要满足变焦方程^[8]:

$$\frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f_2 d_{m_2} + \frac{1 - m_3^2}{m_3^2} f_3 d_{m_3} = 0 \quad (1)$$

式中, f_2 为变倍组焦距, f_3 为补偿组焦距, m_2 为变倍组的垂轴倍率, m_3 为补偿组的垂轴倍率, d_{m_2} 为变倍组移动距离, d_{m_3} 为补偿组移动距离。

2 光学系统设计

2.1 初始结构选择

根据用户的实际需求确定此系统的工作波段为 0.24 μm ~0.28 μm ;根据刑侦紫外成像系统的探测距离确定变焦范围为 40mm~80mm;根据系统成照度的要求确定 F 数为 4;根据成像范围的要求确定选用 S8844-0909 型 2.54cm 紫外 CCD,其有效像元个数为 512×512,像元尺寸为 24 μm ×24 μm ,对应长焦和短焦的视场角为 6°~12°。要求在整个变

焦范围内光学调制传递函数(modulation transfer function, MTF)大于 0.4。

根据技术指标要求,通过查找相应专利、文献确定系统初始结构。由于尚无满足技术指标要求的日盲紫外变焦光学系统结构形式,而红外变焦系统发展又较为成熟,故本文中选择红外变焦光学系统作为初始结构进行设计。首先需选择紫外光学材料替换红外光学材料,尽量选择与初始结构材料阿贝数接近的材料进行替换^[9]。由于紫外材料非常少,根据消色差的要求,本文中选择了 MgF₂、F-Silica 两种紫外材料。两种材料的阿贝数相差较大,有利于校正色差。本文中选择四组元机械补偿:前固定组由 1 片正透镜组成;变倍组由两片透镜组成,是负透镜组;补偿组由一片正透镜组成;后固定组由 3 片透镜组成,是正透镜组。光学系统的初始结构如图 1 所示,其系统光学传递函数 MTF 如图 2 所示。

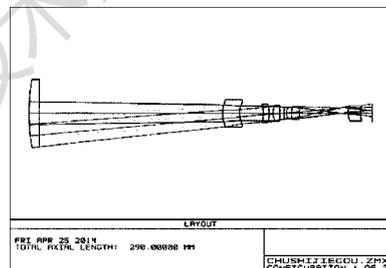


Fig. 1 Initial structure

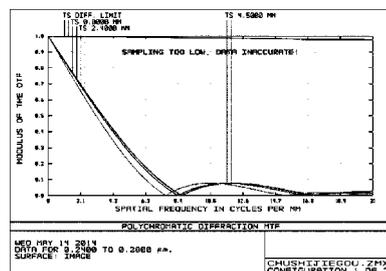


Fig. 2 MTF of initial structure

系统各面的像差贡献如图 3 所示,由图可知系统存在较大球差、慧差、畸变和色差。为了提高系统的性能,简化结构,决定在光学系统设计过程中引入

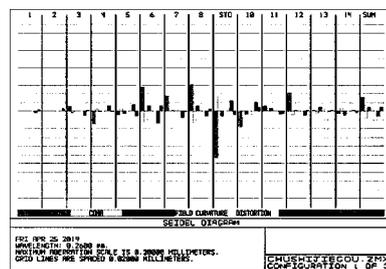


Fig. 3 Seidel diagram

非球面和二元衍射元件。

2.2 非球面

为了改善成像质量,一种方法是对光学系统进行复杂化设计,即增加透镜的片数,但是增加透镜的片数,会影响镜头的透过率;另一种方法是引入非球面,不仅可以提高成像质量,还可以简化结构。

非球面可以看作是由球面和光楔组成,它的引入增加了自变量的个数,因此系统校正像差的能力得到了加强^[9]。常用的偶次非球面可以表示为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_1)c^2r^2}} + \alpha_1r^2 + \alpha_2r^4 + \alpha_3r^6 + \dots + \alpha_8r^{16} \quad (2)$$

式中, k_1 为二次曲面系数, $\frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_1)c^2r^2}}$ 为二次曲线常量; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_8$ 为非球面多项式系数,这些参量的改变决定了球面的形状,从而可实现像差的校正。

非球面的主要作用是消除球差,其次是彗差、像散、畸变。在本设计中,系统存在着较大的球差,其次是畸变和彗差。将非球面设在接近光阑的位置可以校正系统的球差;将非球面设在远离光阑的位置可以校正像散和畸变^[10]。为了兼顾两种像差的校正,将远离光阑且球差系数较大的第 5 个面设为偶数次非球面。

2.3 衍射光学元件

衍射光学元件与普通玻璃色散性质不同,衍射光学元件不遵守反射定律,只遵守光栅方程。其阿贝数是个负值,用它可以校正 2 级光谱,减小弥散斑尺寸,且不会带来畸变和场曲^[11-12]。

针对本文中设计的日盲紫外波段,可以计算出衍射光学元件的光焦度为:

$$\phi = k_2\lambda \quad (3)$$

阿贝常数为:

$$\nu = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3} = -6.5 \quad (4)$$

相对部分色散为:

$$p = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3} = 0.5 \quad (5)$$

式中, k_2 为一个与衍射级次和位相系数有关的常量; λ_1, λ_2 和 λ_3 分别表示 $0.24\mu\text{m}, 0.26\mu\text{m}, 0.28\mu\text{m}$ 波长。根据以上公式可知,衍射光学元件的阿贝数很小且是负值,其相对部分色散只和波长有关,利用这个原理可以实现复消色。而旋转对称的衍射光学

元件有 3 个自由度,并且衍射光学元件的位置远离光阑时可以校正球差、彗差、像散,且不产生场曲和畸变,故本文中设计将衍射光学元件加在光阑前且远离着光阑的第 2 个面。

2.4 像差校正及设计结果

利用光学设计软件 ZEMAX 对初始结构进行优化。设计时采用多重结构的方法,将紫外的长焦、中焦、短焦同步优化,优化时为保证各个焦距共焦面,需设定其具有共同的后截距、筒长。在 ZEMAX 中对应的操作符为 CTGT 和 TOTR,目标值分别为 10mm 和 300mm,权重设为 1;变焦过程中为保持相对孔径不变,将光阑置于后固定组第 1 个面(即系统第 9 个面),既可以减小后固定组的畸变和倍率色差,又能有效地减小透镜的口径和系统的尺寸^[13]。分析系统各面像差贡献,把球差贡献比较大的表面曲率半径设为变量优化。为了提高成像质量,经过反复试验,在第 2 面和第 5 面引入非球面,优化后得到偶次非球面的 2 次,4 次,6 次,8 次相位系数分别为: $1.735 \times 10^{-3}, 1.234 \times 10^{-7}, -1.503 \times 10^{-11}, -2.801 \times 10^{-15}; 0.036, 8.801 \times 10^{-6}, 1.929 \times 10^{-9}, 4.084 \times 10^{-12}$ 。经过优化后,系统仍存在较大色差,故考虑引入二元光学元件。为了避免系统的复杂化,将第 2 面的非球面改为二元衍射面,衍射系数分别为 $-3571.93, -8.1 \times 10^4, 2.564 \times 10^5$ 。再次优化后,系统成像质量良好,此时筒长为 300mm。为使系统结构紧凑,在保证像质不变的前提下逐渐缩

Surf Type	Coatmt	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard	121.8028	7.406	MR2	38.257
2	Binary D	-2971.065	67.613		37.576
3	Standard	69.883	7.668	MR2	18.716
4	Standard	39.582	24.317		18.401
5	Elec Apht	-8.629	17.766	F_SILICA	14.716
6	Standard	-37.703	59.296		18.401
7	Standard	23.212	4.595	MR2	18.393
8	Standard	2679.200	1.373		9.868
9	Standard	514.892	4.287	F_SILICA	9.551
10	Standard	14.975	1.231		8.244
11	Standard	16.298	4.836	MR2	8.265
12	Standard	-34.769	44.779		8.143
13	Standard	24.638	12.896	MR2	8.897
14	Standard	23.253	18.003		7.656
TMA	Standard	Infinity	-		7.693

Fig. 4 Data after optimization

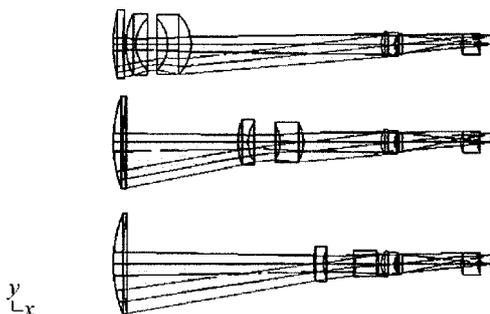


Fig. 5 3-D of zoom system

小筒长。最终得到了日盲紫外二倍变焦光学系统,系统由7片透镜组成,引入非球面和二元衍射面,筒长为288mm,后截距为10mm,在40mm~80mm范围内可实现连续变焦。在 $f=60\text{mm}$ 时最终结构数据如图4所示。图5为光学系统在短焦、中焦、长焦3个位置的3维图。

2.5 像质评价

利用ZEMAX对该系统的像质进行评价,由于该系统为成像光学系统,故用光学传递函数MTF和畸变来评价。图6为系统在短焦40mm、中焦60mm、长焦80mm 3个位置的MTF曲线。在整个变焦范围内,后截距10mm处,截止空间频率 21cycles/mm 时,各视场的MTF值均在0.7以上,接近衍射受限曲线,像质良好。将光学系统由于加工(光学、机械)、装调所产生的误差考虑进去,也可保证最终总体设计的MTF大于0.4。图7是系统在短焦40mm、中焦60mm、长焦80mm 3个位置的畸变曲线。纵坐标代表系统y方向的不同视场,横坐标代表系统畸变的百分比。在短焦40mm处,系统畸变大约为5%;在中焦60mm处,系统畸变大约为4%;在长焦80mm处,系统畸变大约为3.5%。一般目

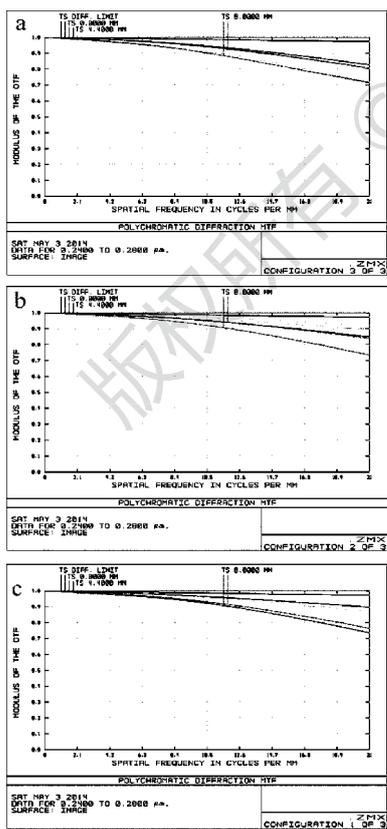


Fig. 6 Modulation transfer function
a— $f=40\text{mm}$ b— $f=60\text{mm}$ c— $f=80\text{mm}$

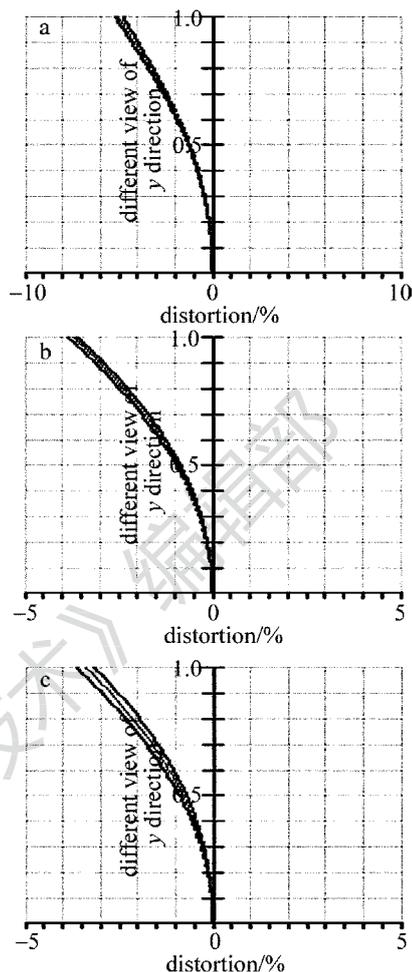


Fig. 7 Distortion of zoom lens

a— $f=40\text{mm}$ b— $f=60\text{mm}$ c— $f=80\text{mm}$

视光学系统的畸变小于5%,本文中所设计系统的畸变满足使用要求。

3 变焦曲线

本文中采用多点拟合法,在系统短焦和长焦中间选取10个焦距位置,利用MATLAB软件进行变焦曲线拟合,拟合后的变焦曲线如图8所示。此图以40mm短焦作为初始点,纵坐标为变倍组的线性

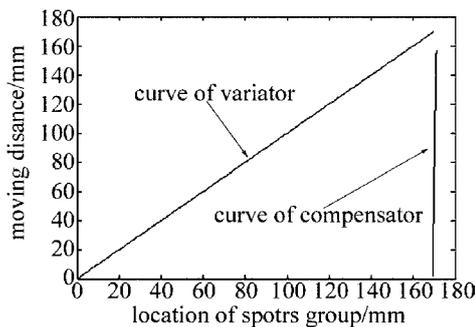


Fig. 8 Curve of zoom lens

移动距离,横坐标为两运动组元相对于初始点的位置。一般变倍组的变焦曲线为直线,补偿组的变焦曲线为曲线,需要用凸轮控制。但本文中的变焦曲线为直线,无需加入凸轮,结构简单^[14-15]。

4 结 论

根据用户的实际需求,采用二元衍射元件和非球面元件,设计了一种工作波段为 $0.24\mu\text{m} \sim 0.28\mu\text{m}$ 的刑侦日盲紫外机械补偿变焦光学系统。其结构简单,仅由 7 片透镜组成。在整个变焦范围内,后截距 10mm 处,截止空间频率 21cycles/mm 时,各视场的光学调制传递函数均大于 0.7,接近衍射受限曲线,畸变小于 5%,像质优良、像面稳定、满足用户总体设计要求。该变焦系统不仅可以应用于刑侦检测,也可以应用于火灾检测和预警、输变电系统巡检和故障检测、生物医学研究等领域。

参 考 文 献

- [1] YANG J. The application and development of UV detection technology [J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(4): 274-278 (in Chinese).
- [2] ZHANG T T. Research on with ultraviolet laser fingerprint identification system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008: 1-38 (in Chinese).
- [3] JIAN Zh Q. Infrared ultraviolet camera: China, CN02222816. 0 [P]. 2002-05-30 (in Chinese).
- [4] WAN J G, PANG Q C, LUO X D, *et al.* UV digital camera: China, CN201293905 Y [P]. 2009-08-19 (in Chinese).
- [5] JIN G P, PANG Q C. Ultraviolet imaging detection technology [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(3): 294-297 (in Chinese).
- [6] TANG C W, TAO X L, ZHU R T. A kind of UV lens: China, CN201020563108. 9 [P]. 2010-10-15 (in Chinese).
- [7] BEIJING UNIVERSITY of SCIENCE and TECHNOLOGY. UV zoom imaging optical system: China, CN 201210080196. 0 [P]. 2012-03-23 (in Chinese).
- [8] LI Zh. Optical system design of uncooled infrared zoom lens [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 6-15 (in Chinese).
- [9] YU Y H, WANG W Sh. Optical design of diffractive refractive hybrid ultraviolet warning systems [J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 421-423 (in Chinese).
- [10] WANG W Sh. Applied optics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science And Technology Press, 2010: 199-201 (in Chinese).
- [11] SONG Sh Sh, LIN L A, WANG W Sh. Design of solar blind ultraviolet warning optical system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013(10): 1022031 (in Chinese).
- [12] LIANG Sh T, YANG J F, LI X J, *et al.* Use of BOL in long focal-wide bands optical system [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(12): 1252-1254 (in Chinese).
- [13] XU L, ZHANG G Y, GAO Y J, *et al.* Design of $8 \times$ uncooled thermal infrared hybrid refractive-diffractive continuous-zoom lense [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 478-481 (in Chinese).
- [14] CHENG K, ZHOU S Zh, ZHANG H J. Design of short focal length zoom lens [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1825-1828 (in Chinese).
- [15] GAO T Y, HOU Zh Y. Comparison and research of zoom curve fitting methods [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 94-97 (in Chinese).