

# “日盲”紫外电晕检测变焦光学系统设计

张鸿佳<sup>1</sup> 马 军<sup>2</sup> 朱海宇<sup>1</sup> 王文生<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 基于电晕检测过程中要求紫外光学系统大视场搜索、小视场探测的需求, 针对工作波长范围为0.24~0.28  $\mu\text{m}$  的日盲区紫外波段, 设计了“日盲”紫外机械补偿变焦光学系统。根据用户要求, 其焦距为30~60 mm,  $F$ 数为3.5, 选用PIXIS型1024BUV 1 inch(1 inch=2.54 cm)紫外CCD, 像元尺寸为13  $\mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ , 对应视场为8°~16°。系统由8片透镜组成, 引入两个非球面, 使系统具有结构简单、成本低等优点。像质评价表明, 在截止频率38 lp/mm处, 各视场的光学调制传递函数均在0.7以上, 接近衍射极限, 畸变小于3%, 在整个变焦范围内像质优良, 满足用户总体设计的要求。

**关键词** 成像系统; “日盲”紫外; 电晕检测; 变焦光学系统; 调制传递函数; 畸变

中图分类号 TN23 文献标识 A doi: 10.3788/LOP51.102201

## Design of “Solar Blind” Ultraviolet Zoom Optical System Used in Corona Detection

Zhang Hongjia<sup>1</sup> Ma Jun<sup>2</sup> Zhu Haiyu<sup>1</sup> Wang Wensheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** According to the requirements of corona detection on searching targets with large field of view and detecting objects with small field of view, a refractive zoom optical system using mechanical compensation technology and working at “solar blind” ultraviolet wavelength (0.24~0.28  $\mu\text{m}$ ) is designed. According to the requirements of users, the focal length spreads from 30 mm to 60 mm, and  $F$  number is 3.5. PIXIS 1024BUV CCD with size of 1 inch (1 inch=2.54 cm) and pixel size of 13  $\mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$  is used as a sensor. The field of view of the system is 8°~16°. The zoom lens consists of eight lenses with two aspherical surfaces, so it has the advantages of low cost and simple structure. The design results show that the modulation transfer function (MTF) of the zoom system is higher than 0.7 at cut off frequency of 38 lp/mm. The optical performance at all fields of view and all zooming conditions is close to the diffraction-limited image, and the distortion is less than 3%. So the zoom optical system presents a good image quality, and can meet users' requirements.

**Key words** imaging system; “solar blind” ultraviolet; corona detection; zoom optical system; modulation transfer function; distortion

**OCIS codes** 220.1250; 220.4830; 110.4190; 040.7190

## 1 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<sup>[1]</sup>。随着科学技术的进步, 紫外探测技术在军事、工业、民用等方面的作用日益突出。高压线的电晕放电会腐蚀绝缘体, 导致短路事故的发生, 也造成无线电干扰和电磁污染, 所以必须对电晕放电进行检测, 确定电晕发生的位置, 采取应对措施, 减小电力损耗, 预防事故发生<sup>[2]</sup>。由于“太阳光谱盲区”(简称“日盲”)具有低噪的特点, 探测高压线电晕放电过程中辐射的紫外信号可精确判断

收稿日期: 2014-04-09; 收到修改稿日期: 2014-05-06; 网络出版日期: 2014-09-09

基金项目: 总装备部预研局十二五基金(5131xxxx103)

作者简介: 张鸿佳(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 451661370@qq.com

导师简介: 王文生(1943—), 男, 教授, 主要从事光学设计及现代光学测试等方面的研究。E-mail: wwsciom@163.com

故障的位置并及时判断其有无危险<sup>[3-4]</sup>。

紫外成像技术的研究在我国相对起步较晚,相应的文献、专利较少。文献[5]所选用的“日盲”紫外镜头为定焦镜头,文中仅给出其焦距 105 mm,  $F$  数 4.5;参考文献[6]设计了一种便携式电晕检测紫外相机,文中仅给出其像质评价:在截止频率为 30 lp/mm 时,系统的调制传递函数(MTF)大于 0.3,点列图的均方根半径小于 15  $\mu\text{m}$ ;文献[7]设计了 2 倍变焦“日盲”紫外光学系统,系统采用 7 片透镜,没有结构参数,仅给出其  $F$  数小于 1.5,且不能实现连续变焦,仅在两端部位置实现两档变焦;文献[8]是定焦成像系统,采用 9 片透镜及 1 片紫外滤光片,无法满足变换焦距的要求。

本文基于用户要求,设计 2 倍变焦“日盲”紫外光学系统,其变焦范围为 30~60 mm,  $F$  数为 3.5,可实现焦距范围内的连续变焦。选用 PIXIS 型 1024BUV 作为探测器。满足了高压线电晕检测过程中要求紫外光学系统大视场搜索、小视场观测的需求。

## 2 变焦距光学系统

变焦系统的基本原理是通过焦距[指有效焦距(EFL)]的连续变化使得像面上图像的倍率连续变化,同时保持像面位置稳定<sup>[9]</sup>。变焦光学系统按不同的补偿方法可分为光学补偿法和机械补偿法两种。光学补偿变焦组和补偿组一起线性移动,结构简单。但存在像面漂移,一般只用于低变倍比、小相对孔径系统。通用的机械补偿法,其变倍组线性移动,补偿组非线性移动,需要凸轮结构,但像面稳定,适用于高变倍比。为保证像面稳定,这里选用机械补偿法。

对于四组元机械补偿连续变焦系统,应满足变焦微分方程

$$\frac{1-\beta_2^2}{\beta_2^2} f_2' d\beta_2 + \frac{1-\beta_3^2}{\beta_3^2} f_3' d\beta_3 = 0, \quad (1)$$

式中  $\beta_2$  为变倍组垂轴放大率,  $\beta_3$  为补偿组垂轴放大率。为补偿为保证变倍组和补偿组在长焦时不相碰,应适当选取长焦时变倍组、补偿组之间距离  $d_{231}$ 。选取适当  $f_2'$ 、 $f_3'$ 、 $\beta_{21}$ ,可得

$$\beta_{31} = \frac{f_3'}{f_2'(1-\beta_{21}) - d_{231} + f_3'}, \quad (2)$$

式中  $f_2'$ 、 $f_3'$  分别为变倍组、补偿组焦距;  $\beta_{21}$ 、 $\beta_{31}$  分别为长焦时变倍组、补偿组垂轴放大率。

令变倍组作线性移动,移动量为  $\xi$ ,得

$$\beta_2 = \frac{f_2' \beta_{21}}{f_2' + \xi \beta_{21}}, \quad (3)$$

由(1)、(2)式得

$$\beta_3^2 - b\beta_3 + 1 = 0, \quad (4)$$

其中

$$b = \frac{-f_2'}{f_3'} \left( \frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_{21}} + \beta_2 - \beta_{21} \right) + \left( \frac{1}{\beta_{31}} - \beta_{31} \right). \quad (5)$$

由(4)式可解出

$$\beta_3 = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2}. \quad (6)$$

求出补偿组移动量为  $\delta = f_3'(\beta_3 - \beta_{31})$ ,此时系统的总变倍比  $M = \frac{\beta_{21}\beta_{31}}{\beta_2\beta_3}$ ,通过适当的  $d_{231}$ 、 $f_2'$ 、 $f_3'$ 、 $\beta_{21}$  使  $M$  达到变倍要求。

## 3 光学系统设计

### 3.1 初始结构选择

根据用户需求,“日盲”紫外电晕检测变焦光学系统技术指标为:工作波段为 0.24~0.28  $\mu\text{m}$ ;变焦范围为 30~60 mm,满足系统探测距离要求;  $F$  数为 3.5,满足系统成像照度要求;探测器选用 PIXIS 型 1024BUV 1 inch (1 inch=2.54 cm)紫外探测器,有效像元为 1024 pixel×1024 pixel,像元尺寸为 13  $\mu\text{m}$ ×13  $\mu\text{m}$ ,对应长

焦和短焦的视场角为 $8^{\circ}\sim 16^{\circ}$ ,满足系统成像范围要求;要求在整个变焦范围内MTF大于0.4,畸变小于4%。

根据技术指标要求,参考专利文献资料确定结构参数。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,故这里是在红外变焦光学系统的结构形式基础上进行设计。

选择紫外光学材料替换红外光学材料。在紫外光学系统设计中,可供选择的紫外材料非常少,增加了设计难度。根据消像差的要求,这里选择了 $MgF_2$ 、 $CaCO_3$ 两种紫外材料,两种材料的阿贝数相差较大,有利于校正系统色差。选择四组元正组机械补偿:前固定组、变倍组、补偿组和后固定组组成,其光焦度分别为正、负、正、负。变倍组由2片组成,补偿组由1片组成,系统结构简单,共由7片组成。在 $f=45\text{ mm}$ 时初始数据如表1所示,光学系统图如图1所示。

表1 初始数据  
Table 1 Initial data

Surface	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
1	standard	-111.435	8.697	MGF2
2	standard	-133.159	94.989	
3	standard	72.306	5.812	MGF2
4	standard	78.948	6.122	
5	standard	139.455	8.404	CACO3
6	standard	89.935	46.146	
7	standard	124.758	10.136	CACO3
8	standard	-3396.265	37.591	
STOP	standard	-26.328	8.708	MGF2
10	standard	-31.272	33.636	
11	standard	45.379	8.796	CACO3
12	standard	91.744	3.129	
13	standard	3340.397	7.782	MGF2
14	standard	111.665	20.053	

初始结构的点列图如图2所示。由图可知,弥散斑半径较大,最大均方根半径为 $6615.95\ \mu\text{m}$ 。为了提高系统的性能,使其拥有良好的像质,简化系统结构,方便机械加工、装调,在此光学系统设计过程中引入了非球面。

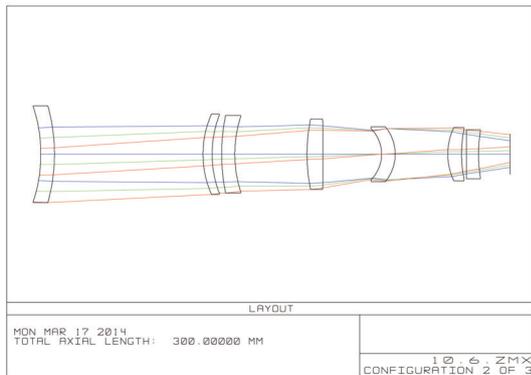


图1 初始结构

Fig.1 Initial structure

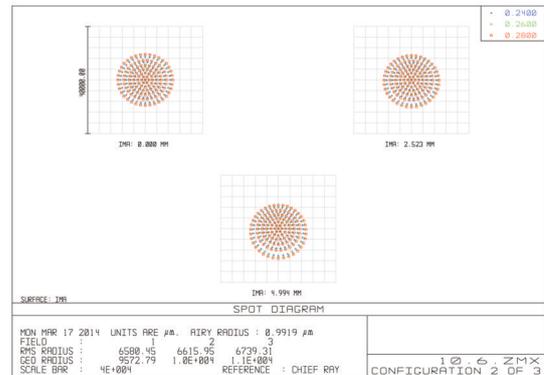


图2 初始结构点列图

Fig.2 Spot diagram of initial structure

### 3.2 非球面

非球面可以看作是由球面和光楔组成,可以提高光学系统成像质量,减少透镜数量,从而减轻系统的重量<sup>[10-12]</sup>。Zemax软件中常用的是偶次非球面,其表达式是

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_2r^2 + a_4r^4 + a_6r^6 + \dots \quad (7)$$

采用非球面技术设计的光学系统,主要可以消除球差,其次是彗差、象散,在接近系统孔径光阑的位置

引入非球面主要校正系统的球差;在远离系统孔径光阑的位置引入非球面主要校正轴外像差。

### 3.3 像差校正及设计结果

为保证变焦过程中相对孔径保持不变,光阑与后固定组第一个面重合,并能减小后固定组的畸变和倍率色差,有效减小透镜的口径和系统的尺寸,故设计将光阑置于第9面,即后固定组第1面。

图3为该系统的Seidel和,由图分析可知,该系统的剩余球差较大,且后固定组的第2片透镜较厚,故采用分裂透镜的方法增加1片透镜,以减小球差。为了更好地校正轴外像差,提高成像质量,在第2面和第16面引入非球面,优化后得到偶次非球面的4、6、8次相位系数分别为 $2.84 \times 10^{-8}$ 、 $3.515 \times 10^{-12}$ 、 $-7.493 \times 10^{-16}$ ;  $2.002 \times 10^{-5}$ 、 $-4.992 \times 10^{-7}$ 、 $6.337 \times 10^{-9}$ 。由于变焦光学系统要求机械筒长恒定,故在优化过程中除了设定焦距EFL外,还要加入TOTR操作数来限制机械筒长,并给定目标值和权;变焦光学系统要求像面稳定,故优化过程中须设定后工作距离为常数。经反复优化设计,系统成像质量良好,但筒长偏长,为使系统结构紧凑,在保证像质不变的前提下逐渐缩小筒长。

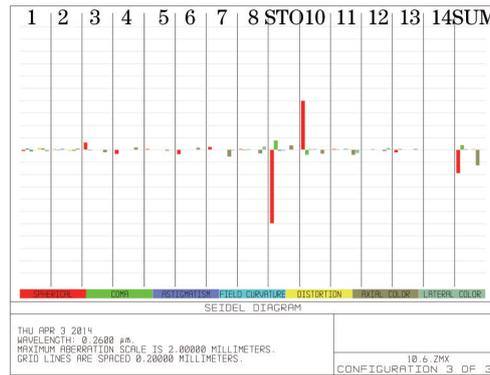


图3 Seidel和( $f=45$  mm)

Fig.3 Diagram of Seidel sum ( $f=45$  mm)

对系统进行反复优化后,最终得到了“日盲”紫外2倍变焦光学系统,系统由8片透镜组成,引入2片非球面,筒长为265 mm,后截距为10.06 mm,在30~60 mm范围内可实现连续变焦。在 $f=45$  mm时最终数据如表2所示,图4为变焦系统从短焦到长焦3个位置光学系统的三维图。

表2 优化后数据

Table 2 Data after optimization

Surface	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
1	standard	108.439	8.500	MGF2
2	even asphere	278.493	86.306	
3	standard	5878.725	6.000	MGF2
4	standard	50.107	13.260	
5	standard	52.892	6.000	CACO3
6	standard	64.597	62.780	
7	standard	36.999	6.000	CACO3
8	standard	-153.847	1.588	
STOP	standard	-56.218	7.545	CACO3
10	standard	17.143	0.958	
11	standard	21.758	5.701	MGF2
12	standard	-64.027	4.000	
13	standard	75.061	13.797	MGF2
14	standard	-20.096	20.120	
15	standard	18.998	12.386	CACO3
16	even asphere	12.516	10.062	

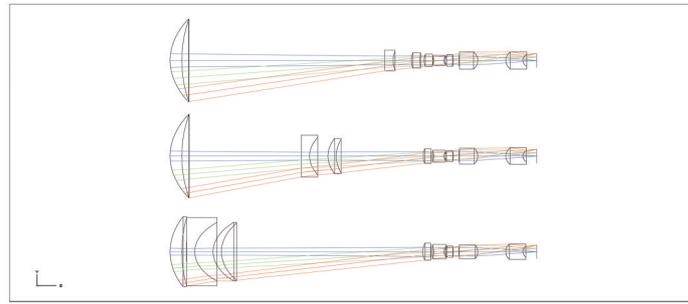


图4 变焦系统三维图

Fig.4 3D diagram of zoom system

3.4 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MTF来评价。这里给出该设计在 $f$ 为30、36、45、54、60 mm 5个位置的MTF曲线。图5为系统在 $f$ 为30、36、45、54、60 mm 5个位置的MTF曲线,在整个变焦范围内,在截止频率为38 lp/mm时,各视场的MTF值均在0.7以上,接近衍射受限曲线,具有良好的像质。MTF不包括畸变,所以必须对畸变单独分析。图6是系统对应上述5个位置的畸变曲线,在短焦位置最大畸变小于3%。目视光学系统畸变小于4%,人眼不能识别,故所设计系统的畸变满足使用要求。

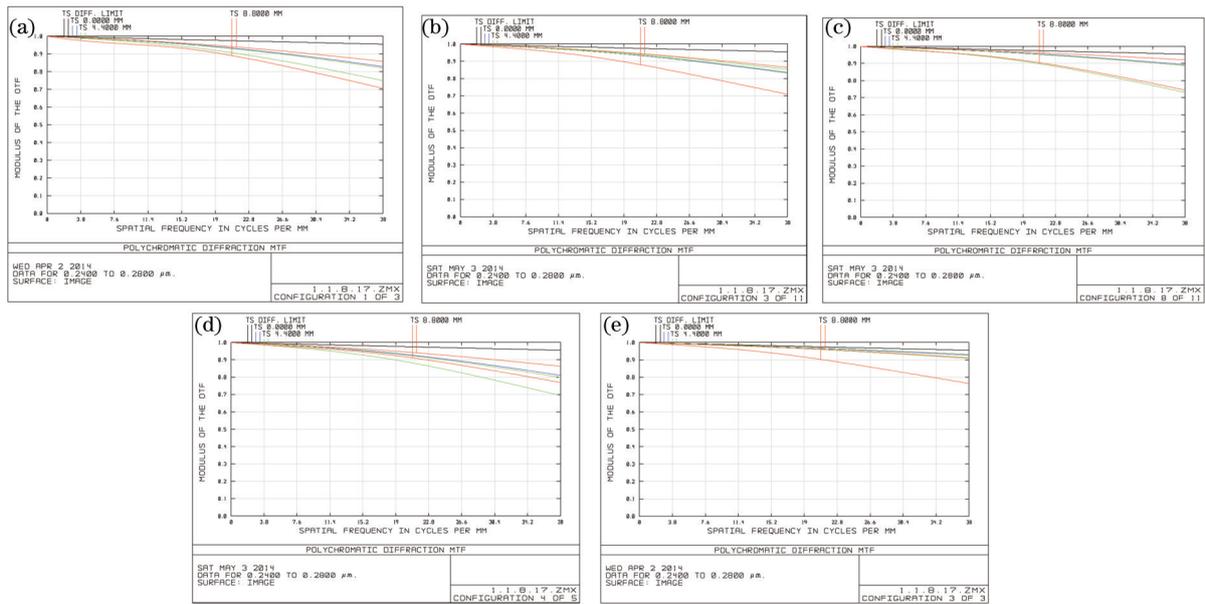


图5 不同焦距下的调制传递函数。(a) $f=30$  mm; (b) $f=36$  mm; (c) $f=45$  mm; (d) $f=54$  mm; (e) $f=60$  mm

Fig.5 Modulation transfer function under different focal lengths. (a)  $f=30$  mm; (b)  $f=36$  mm; (c)  $f=45$  mm; (d)  $f=54$  mm; (e)  $f=60$  mm

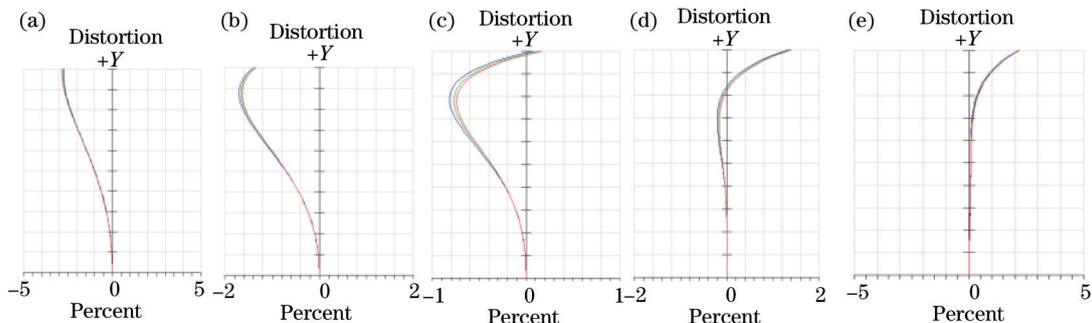


图6 变焦系统的畸变。(a) $f=30$  mm; (b) $f=36$  mm; (c) $f=45$  mm; (d) $f=54$  mm; (e) $f=60$  mm

Fig.6 Distortion of zoom system. (a)  $f=30$  mm; (b)  $f=36$  mm; (c)  $f=45$  mm; (d)  $f=54$  mm; (e)  $f=60$  mm

### 3.5 变焦曲线

采用多点拟合法,在短焦位置和长焦位置中间插入 11 个点,利用 Matlab 软件,得到其变焦曲线如图 7 所示。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<sup>[13-14]</sup>;但这里的变焦曲线均为直线,无需加入凸轮,结构简单。

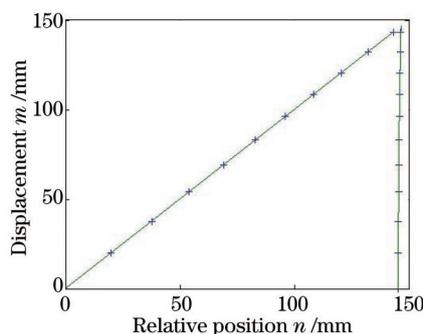


图7 变焦曲线

Fig.7 Curve of zoom system

## 4 结 论

基于用户需求,采用机械补偿法,设计了工作波段为 0.24~0.28  $\mu m$  的日盲紫外变焦光学系统,其结构简单,像质优良,在截止频率为 38 lp/mm 处,在变焦范围内各视场的光学 MTF 均大于 0.7,接近衍射极限,畸变小于 3%,满足用户总体设计的要求。该变焦系统虽为电晕检测设计,但也可用于森林防火、刑侦痕迹拾取等方面。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Jie. The application and development of UV detection technology[J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(4): 274-278.  
杨 杰. 紫外探测技术的应用与进展[J]. 光电子技术, 2011, 31(4): 274-278.
- 2 Zhang Haifeng, Pang Qichang, Li Hong, *et al.*. Detection of high-voltage corona based on UV spectrum technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(8): 1162-1166.  
张海峰, 庞其昌, 李 洪, 等. 基于 UV 光谱技术的高压电晕放电检测[J]. 光子学报, 2006, 35(8): 1162-1166.
- 3 Wang Liping, Li Chun, Jin Chunshui. Design of catadioptric omnidirectional imaging system in solar blind UV[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1503-1509.  
王丽萍, 李 春, 金春水. “日盲”紫外折反射全景光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(7): 1503-1509.
- 4 Wang Liping. Optical design for dual spectral panoramic imaging system applied in corona detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(10): 1770-1774.  
王丽萍. 双谱段全景电晕探测光学系统[J]. 光子学报, 2010, 39(10): 1770-1774.
- 5 Jin Guiping, Pang Qichang. Key points of UV imaging and detecting system [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(3): 294-297.  
靳贵平, 庞其昌. 紫外成像检测技术[J]. 光子学报, 2003, 32(3): 294-297.
- 6 Ye Baisong, Yuan Yonggang, Wang Jiqiang, *et al.*. Design of a portable UV camera for corona detection[J]. Infrared, 2013, 34(4): 24-46.  
叶柏松, 袁永刚, 王继强, 等. 一种便携式电晕检测紫外相机的设计[J]. 红外, 2013, 34(4): 24-46.
- 7 Chang Jun, Wei Aman, Zhang Lifei, *et al.*. Ultraviolet Zoom Imaging Optical System: China, 201210080196[P]. 2012-08-01.  
常 军, 魏阿满, 张利飞, 等. 紫外变焦成像光学系统: 中国, 201210080196[P]. 2012-08-01.
- 8 Tang Changwen, Tao Xinlan, Zhu Rangtian. An Ultraviolet Lenses: China, 2010205631089[P]. 2010-10-15.  
汤昌文, 陶新兰, 朱让甜. 一种紫外镜头: 中国, 2010205631089[P]. 2010-10-15.
- 9 Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Design of large zoom ratio middle wavelength infrared[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 33(4): 0422005.  
李 岩, 张 葆, 洪永丰. 大变倍比中波红外变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422005.

- 10 Song Shanshan, Lin Lina, Wang Wensheng. Design of solar blind ultraviolet warning optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 102203.  
宋珊珊, 林丽娜, 王文生. 日盲紫外告警光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 102203.
- 11 Yu Yuanhang, Wang Wensheng. Optical design of diffractive refractive hybrid ultraviolet warning systems[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(3): 421-427.  
于远航, 王文生. 折衍混合紫外告警光学系统设计[J]. *激光技术*, 2012, 36(3): 421-427.
- 12 Zhang Tingcheng, Liao Zhibo. Design of 6× cooled thermal imaging middle infrared continuous zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 32(11): 225-229.  
张庭成, 廖志波. 6倍制冷型中红外连续变焦光学系统设计[J]. *光子学报*, 2012, 32(11): 225-229.
- 13 Cai Wei, Zhang Ying, Zhang Xin, *et al.*. New method for all movable zoom lens design[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 32(3): 0322008.  
蔡伟, 张鹰, 张新, 等. 多组全动型变焦系统新型设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322008.
- 14 Xu Liang, Zhang Guoyu, Gao Yujun *et al.*. Design of 8× uncooled thermal infrared hybrid refractive-diffractive continuous-zoom lenses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 29(2): 478-481.  
徐亮, 张国玉, 高玉军, 等. 8倍非制冷型红外折/衍射连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 478-481.