

日盲紫外告警光学系统设计

宋珊珊 林丽娜 王文生

(长春理工大学现代光学测试技术研究室, 吉林 长春 130022)

摘要 紫外告警技术在导弹逼近告警中有重要的应用。针对工作波长范围为 240~280 nm 的日盲区紫外波段, 基于用户需求, 设计了一种日盲紫外告警光学系统。该系统为了提高接收的光通量、扩大搜索范围、简化系统结构, 在国内现有的相对孔径为 1:4、视场角为 30°、6 片透镜的基础上, 采用非球面和二元光学元件, 简化到 5 片透镜, 并使视场角扩大到 40°, 相对孔径扩大到 1:3。接收器采用 PIXIS 型 2048BUV 紫外 CCD, 像素尺寸为 13.5 μm×13.5 μm。像质评价结果表明, 该系统的能量集中度高, 弥散斑尺寸小于 CCD 的像素尺寸, 满足系统使用要求。其具有大视场角和大相对孔径特性, 技术指标优于现有的日盲紫外告警光学系统。

关键词 光学设计; 日盲紫外; 紫外告警系统; 非球面; 二元光学元件; 点扩展函数

中图分类号 TN23 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.102203

Design of Solar Blind Ultraviolet Warning Optical System

Song Shanshan Lin Lina Wang Wensheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Ultraviolet (UV) warning technology has been widely applied in missile approach warning. According to the user requirement, a solar blind UV warning optical system is designed for the wavelength range from 240~280 nm. In order to improve the luminous flux, expand the search scope and simplify system structure, an aspherical surface and binary optical elements are used. The initial optical data are based on the existing design that has a relative aperture of 1:4, the field of view of 30°, and consists of 6 pieces of lenses. As a result, the optical system is reduced to five pieces of lenses, the field of view is extended to 40°, and the relative aperture is increased to 1:3. PIXIS 2048BUV UV CCD whose pixel size is 13.5 μm×13.5 μm is applied as the detector. Image quality evaluation results show that this solar blind UV warning optical system is of high energy concentration, and the spot size is smaller than the pixel size of CCD, which satisfy the application requirements. The system has the advantages of large field of view and large relative aperture, and its technical characteristics are superior to the existing solar blind UV warning optical systems.

Key words optical design; solar blind ultraviolet; ultraviolet warning system; aspherical surface; binary optical element; point spread function

OCIS codes 220.1250; 120.4820; 040.7190; 050.1380

1 引言

在现代战争中, 导弹已成为攻击飞机、战车等空中和地面目标的强有力的武器, 战场上日趋严重的地空、空空导弹威胁, 使得研制导弹逼近告警系统、防止和减小精确制导导弹的攻击成为导弹告警技术的重要课题。导弹告警技术在过去 30 多年的发展史中, 以红外告警和雷达告警两种方式为主。紫外(UV)告警技术是 20 世纪 80 年代末期国外出现的一种导弹来袭告警技术, 同红外告警相比, 紫外告警具有虚警率低、不需要制冷、体积小和质量轻等优点^[1-3]。作为一项新型光电告警技术, 紫外告警经过 20 多年的迅速发展, 已

收稿日期: 2013-05-14; **收到修改稿日期**: 2013-07-08; **网络出版日期**: 2013-09-02

基金项目: 总装备部预研局十二五基金(5131XXX103)

作者简介: 宋珊珊(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: ssswawj@163.com

导师简介: 王文生(1944—), 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(通信联系人)

经成为国外装备量最大的导弹来袭告警系统之一，在光电对抗领域发挥着越来越重要的作用^[4]。

紫外告警技术的研究在我国相对起步较晚，紫外告警系统的文献也较少。文献[5]对紫外告警系统结构进行分析与设计，但仅是对系统结构数据的理论推导，未进行光学系统像差设计，且光学镜头的视场与所选 CCD 的尺寸不匹配。文献[6]设计了折衍射混合紫外告警光学系统，系统中采用一个非球面和两个衍射光学元件，使系统视场达到 40° ，相对孔径 1:3.5。文献[7]是对日盲紫外太阳跟踪预警系统的研究，采用了卡塞格林系统，结构简单，但视场角小，仅 1° ，不能满足大视场需求。本文使用一个衍射元件和两个非球面，仅用 5 片透镜，使系统相对孔径增加到 1:3，视场 40° 。由像面照度公式可计算出，本文光学系统的像面照度比文献[6]提高了 36.1%，从而提高了紫外告警系统的目标识别率。

2 紫外告警原理

由于太阳光穿透地球大气层时，在 220~280 nm 紫外波段的辐射被大气中的臭氧层强烈吸收，近地表范围的紫外辐射很微弱，存在所谓的“太阳光谱盲区”，因此，导弹羽烟在这一波长范围的紫外辐射在微弱的紫外背景下就容易显现出来。紫外告警系统是利用大气的“日盲紫外”特性来探测来袭导弹的羽烟紫外辐射实现导弹告警的装备。紫外告警设备从技术上可以分为第一代概略型和第二代成像型，其主要区别在于探测器。前者使用光电倍增管，后者是像增强器。成像型告警系统由探测单元、信息处理单元和显示控制单元组成。探测单元中的传感器主要由光学系统、紫外窄带滤光片和紫外探测器件组成。其中光学系统以大视场对空间目标的紫外辐射信息进行接收；紫外窄带滤光片抑制系统“日盲紫外”以外的光谱进入探测器件，降低系统的背景噪声；紫外探测器将光学系统接收的紫外辐射进行光电转换，实现目标探测。由于导弹羽烟中颗粒的散射作用，在不同方位上羽烟具有不同的辐射强度，紫外告警就是通过探测导弹羽烟的紫外辐射，确定导弹来袭方向并实时发出警报^[8-9]。图 1 为第二代成像型 AN/AAR-54(V) 紫外告警系统。该系统是由全视角、高分辨率紫外传感器和一个可调节的电子设备组成的，可使用 1~6 个传感器来提供全方位探测。



图 1 AN/AAR-54(V) 紫外告警系统

Fig. 1 AN/AAR-54(V) ultraviolet warning optical system

3 光学系统设计

3.1 系统设计要求

基于用户需求，该镜头的技术要求为：焦距为 35 mm，波长范围为 240~280 nm，视场角为 40° ，相对孔径为 1:3，接收器为 PIXIS 型 2048BUV 紫外 CCD，外形尺寸为 27.6 mm×27.6 mm，像素尺寸为 $13.5 \mu\text{m} \times 13.5 \mu\text{m}$ 。要求在像素尺寸为 $13.5 \mu\text{m} \times 13.5 \mu\text{m}$ 范围内，光能接收大于 85%。

3.2 光学系统结构选择

光电成像系统的物镜一般分为三类：折射系统、反射系统和折反系统。反射系统和折反系统都采用了反射镜。反射镜的主要优点是^[10]：完全没有色差，具有很大的工作波长范围，材料容易制造，可实现大口径、长焦距，常用在微光、红外和紫外系统中。但带有反射镜的物镜系统由于自身的结构特点必然导致其视场角不能太大，一般为几度或者更小，若要组成大视场的系统，则必须加摆镜或扫描设备等辅助设施。

对于紫外告警系统要求的光学系统，其前提条件是大视场，而且由于探测目标的特殊性，要求实时无视场遗漏，反应速度快，所以不能采用摆镜或扫描设备。因此，光学系统的结构将选用折射式光学系统。折射

系统的优点是:易于校正像差,能获得较大的视场,结构简单,装调方便。

首先根据系统要求,运用光学设计原理及方法确定系统的初始结构。初始结构的确定一般有两种方法:一种是根据初级像差理论用代数法求解初始结构;另一种是参考已有的文献资料确定结构参数。这里采用第二种方法。根据设计要求,查找文献可得初始结构,基本结构参数为:波长范围为 240~280 nm,焦距为 50 mm,相对孔径 1:4,全视场角 30°。初始结构如图 2 所示,初始结构数据如表 1 所示。

表 1 系统初始数据

Table 1 Initial data of the system

	Surf·Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard	20.235	3.648	CAF2	10.246
2	Standard	332.185	2.687		9.880
3	Standard	-24.593	5.890	F_SILICA	9.544
4	Standard	10.770	0.910		7.814
5	Standard	11.821	7.410	CAF2	8.413
6	Standard	-17.849	5.580		8.278
STO	Standard	Infinity	4.640		5.068
8	Standard	23.635	6.400	CAF2	6.098
9	Standard	38.075	2.778		6.347
10	Standard	-12.613	2.196	F_SILICA	6.416
11	Standard	-41.047	2.210		7.337
12	Standard	25.290	5.306	CAF2	8.811
13	Standard	35.400	17.314		9.244
IMA	Standard	Infinity	—		13.962

根据上述设计参数,不能满足大视场大相对孔径需求,由图 3 所示点列图可以看出弥散斑半径较大,其最大均方根半径为 513.366 μm 。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和二元光学透镜。

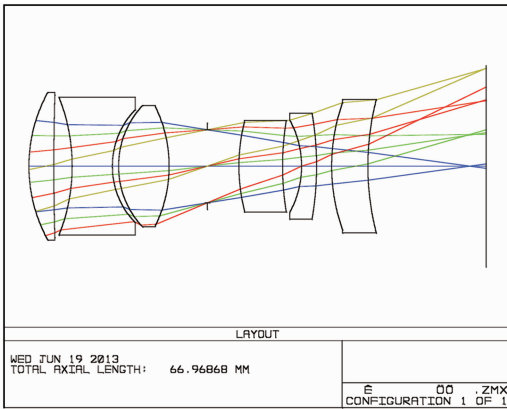


图 2 光学系统初始结构

Fig. 2 Initial structure of the optical system

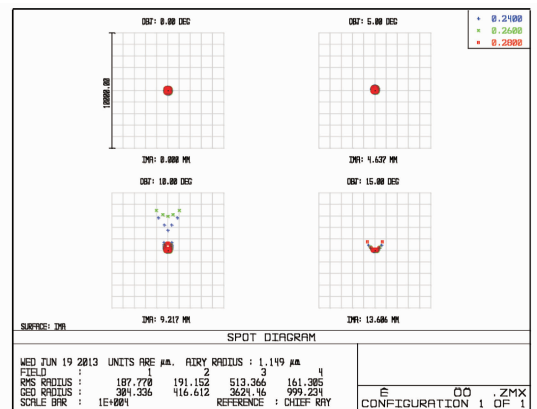


图 3 初始结构的点列图

Fig. 3 Spot diagram of the initial structure

3.3 非球面

非球面是指面形由多项高次方程决定、面形上各点半径均不相同的光学元件。在实际应用中,主要是轴对称二次非球面光学系统。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、像散、畸变,减少光能的损失,从而获得高质量的图像效果和高品质的光学特性。非球面的优势很大,它可以提高系统的相对孔径,扩大视场角,在提高光束质量的同时透镜数比球面构成的少,镜头的形状小型化,可减轻系统的重量。ZEMAX 软件中常用的是偶次非球面,其表达式是

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

式中 Z 为镜面的凹面度; r 为镜面的孔径半径 $r^2 = x^2 + y^2$; c 为近轴曲率半径的倒数; k 为二次曲面常量, $k = -e^2$; a_2, a_4, a_6 为 r 的各阶系数。

非球面可以看作是由球面和光楔组成, 而共轴非球面的初级像差可以在共轴球面的初级像差的基础上加一个由非球面相对球面的偏差引起的像差增量。由非球面初级像差公式可知非球面对球差的影响很大, 而对场曲无影响^[11-12]。

3.4 二元衍射元件

二元光学是基于光波的衍射原理, 用计算机设计和微电子技术制作, 在基片或传统光学元件表面上刻蚀生成多级台阶状的浮雕结构, 形成纯光学衍射光学元件。衍射光学元件可以通过对入射光波的相位调制, 改变光波的传播方向、振幅、相位和偏振态, 从而可产生传统光学元件可以产生或无法产生的多种功能。比起普通的光学元件来说, 二元光学元件有很多优点。

衍射光学元件在某衍射级的衍射效率定义为在该级的衍射能量与入射能量之比。计算得到具有 N 相位阶的表面浮雕结构的衍射光学元件在第 m 级衍射的衍射效率为

$$\eta_m^N = \frac{\sin^2(m\pi/N)}{(m\pi/N)^2}. \quad (2)$$

N 一般取 2, 4, 8, 16。当 $m = 1, N = 16$ 时, $\eta_1 = 97\%$ 。衍射光学元件的相位阶愈多, 理论衍射效率愈高。

衍射光学元件的光焦度表示为

$$\varphi = n\lambda, \quad (3)$$

式中 n 为与衍射级次和相位系数有关的常量, 文中所用紫外波段为 $0.24 \sim 0.28 \mu\text{m}$, 衍射光学元件的等效阿贝系数为

$$v = \frac{n_c - 1}{n_s - n_L} = \frac{\lambda_c}{\lambda_s - \lambda_L} = \frac{0.26}{0.24 - 0.28} = -6.5, \quad (4)$$

相对部分色散为

$$P = \frac{n_s - n_c}{n_s - n_L} = \frac{\lambda_s - \lambda_c}{\lambda_s - \lambda_L} = \frac{0.24 - 0.26}{0.24 - 0.28} = 0.5, \quad (5)$$

式中 $\lambda_c, \lambda_s, \lambda_L$ 分别为设计波长、光谱区的短波长和长波长, n_c, n_s, n_L 分别为相应的折射率。

由此可见, 衍射光学元件与常规材料色散系数正好符号相反, 具有负的色散系数, 即负的色散效应, 并且部分相对色散相差较大, 这都有利于校正光学系统的色差和二级光谱。

传统的折射光学系统或透镜设计中只能通过改变曲面的曲率或使用不同的光学材料来校正像差, 而在衍射光学元件的设计中, 可以调节相位台阶位置、宽度、深度的相应参数, 大大增加设计自由度^[13-15]。

4 设计结果及像质评价

为了能满足 CCD 器件像面尺寸, 同时保证视场角达 40° , 首先要对初始系统进行焦距缩放, 将焦距从 50 mm 缩减到 35 mm。如果继续增大视场容易使像面尺寸过大, 超出 CCD 约束范围, 虽然可以使用 CCD 并接来解决大视场问题, 但分束棱镜使光能减半, 且提高了系统复杂度。大口径物镜能够最大程度地接收目标的辐射, 但由于高级像差的限制, 不能任意增大系统的孔径和视场。与口径有关的像差有球差、彗差和色差, 由于初级球差的光束在高斯像面上的点像为一圆斑, 其直径正比于孔径的三次方, 则增大口径也增大了弥散斑半径。因此, 焦距一定时, 为了不过大地增加通光口径, 应适当提高相对孔径的数值, 提高系统的像面照度。光辐射在传输过程中会与介质发生反射、吸收、散射等作用而衰减, 为了减少传输过程的能量损失, 根据每个面上的赛德像差系数, 将初级像差贡献量较小的第 6 片透镜去掉, 同时也简化了系统结构。理论上当物像和透镜结构完全对称于光阑两边时, 若 $\beta = -1$, 则整个系统的垂轴像差如彗差、畸变和倍率色差自动校正, 而轴向像差包括球差、像散、场曲和位置色差是半部系统相应像差的二倍。本系统最终结构孔径光阑位于系统的第 7 个面, 除第一片透镜以外, 透镜系统近似于对称式系统, 使得系统像差校正被简化。为了更好地校正球差, 选取球差系数较大的第 2 个面和第 3 个面为偶次非球面。非球面在光阑附近使用主要是校正与孔径有关的像差, 在远离光阑的位置使用主要是校正与视场有关的像差。日盲紫外波段的光学材料极少,

本文采用熔融石英和氟化钙，而这两种材料的阿贝数差别不大，给色差校正带来了一定的困难。为了能够校正系统的色差和二级光谱，减小弥散斑尺寸，在系统第一个面添加二元衍射元件，且不产生场曲和畸变。

日盲紫外告警系统不是成像系统而是能量系统，不能用传统的光学成像系统的光学传递函数来评价像质质量，而是用点列图和能量分布曲线去评价能量集中程度，并用点扩展函数图和像点能量分布评价光强的分布。设计结果如图4~8所示。

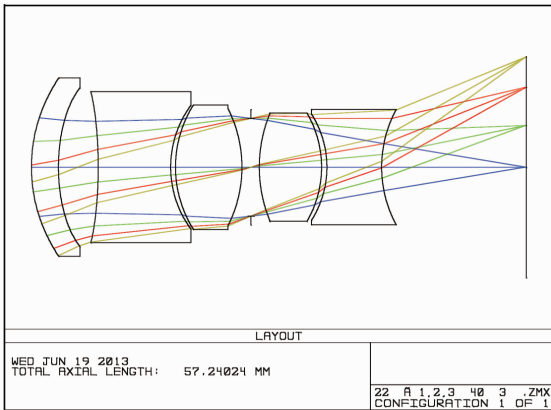


图4 光学系统结构

Fig. 4 Optical system structure

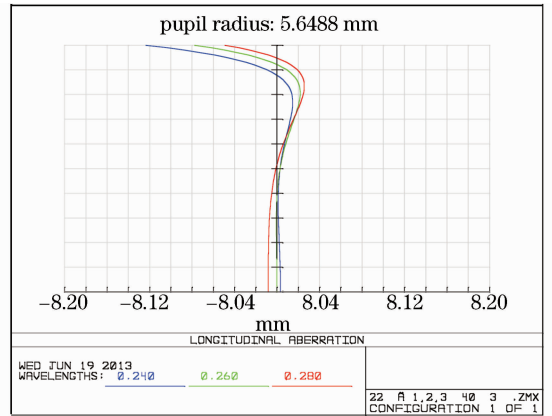


图5 位置色差

Fig. 5 Longitudinal chromatic aberration

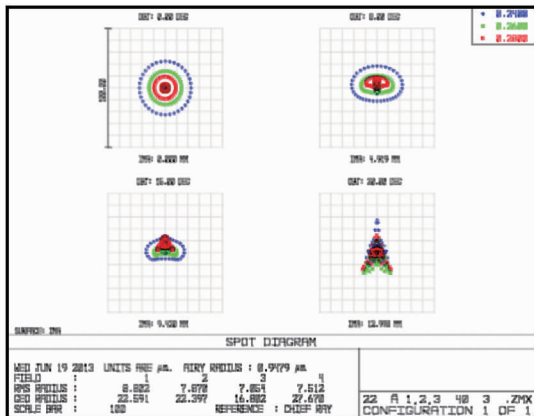


图6 点列图

Fig. 6 Spot diagram of the system

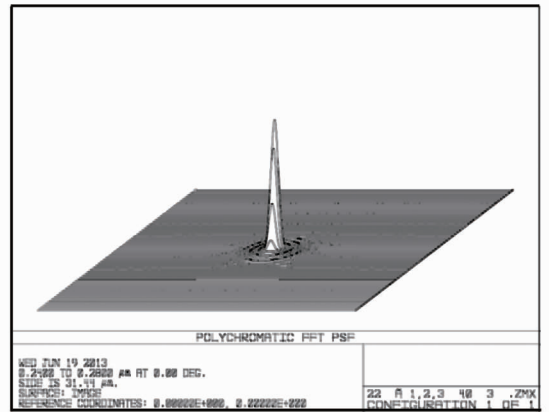


图7 点扩展函数

Fig. 7 Point spread function of the system

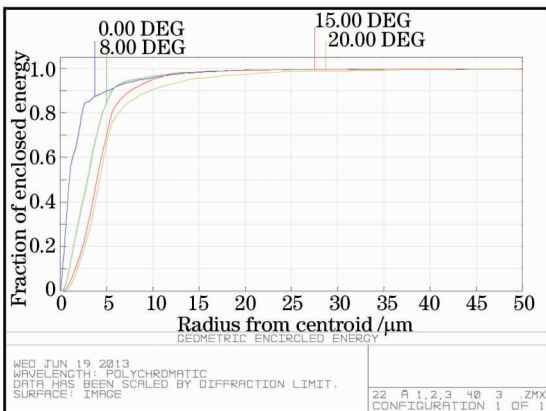


图8 像点能量分布

Fig. 8 Radial energy distribution of the system

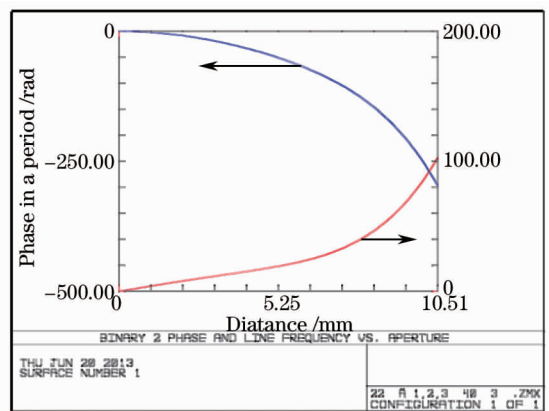


图9 衍射面的相位及周期同径向距离的关系

Fig. 9 Dependence of phase and period on radial distance of the diffractive surface

由图 4 可知,光学系统整体外形结构简单、合理。由图 5 位置色差可以看出波长为 0.24,0.26,0.28 μm 的球差曲线在 0.65 口径附近相交,表明在系统第一个面添加二元衍射元件后在此带实现了复消色差,减小了各色光弥散斑尺寸。从图 6 点列图可以看出,系统加入非球面使系统各个视场弥散斑圆度较好且大小较匀,点列图均方根半径均在 8.802 μm 以内,远小于紫外 CCD 的像素尺寸(13.5 μm),因而,各个视场的点列图都将在探测器像素以内。图 7 的点扩展函数表明,经光学系统的衍射像的光强分布集中程度较高。由图 8 像点能量分布可以看出,距离光斑中心 6.85 μm 的区域内集中了 90% 左右的能量,能量集中度高。设计结果表明,该系统具有大视场角(40°)和大相对孔径(1:3)特性,优于现有的日盲紫外告警光学系统的技术指标,满足系统技术指标的要求。

图 9 为 ZEMAX 软件中给出的该衍射面周期的特征曲线,图中上曲线表示衍射面的每个周期内含有的相位随径向坐标的变化情况,下曲线表示该衍射面每个毫米内含有的周期随径向坐标的变化情况。由图可知,在该衍射面边缘(10.51 mm)该衍射面每毫米内最大的变化周期为 102,而每个周期内的最大相位为 296 rad,可以满足金刚石加工衍射面的工艺要求。

5 结 论

基于用户需求,设计了一种日盲紫外告警光学系统,采用非球面与二元光学元件相结合,校正了系统的高级像差和色差,简化了系统结构,使系统具有大视场、大相对孔径和结构紧凑等优点。从点列图、点扩展函数图和能量分布曲线图三方面对系统进行评价结果表明,该系统能量集度高、弥散斑尺寸小(远小于紫外 CCD 的像素尺寸),满足用户的技术要求。

参 考 文 献

- 1 Fu Wei. Development of for missile approaching ultraviolet warning technology[J]. Aero Weaponry, 2002, (5): 41-44.
付 伟. 导弹逼近紫外告警系统的新发展[J]. 航空兵器, 2002, (5): 41-44.
- 2 Fu Wei. Development of missile approaching ultraviolet warning technology[J]. OME Information, 2002, (8): 26-29.
付 伟. 导弹逼近紫外告警技术的发展[J]. 光机电信息, 2002, (8): 26-29.
- 3 Zhang Jie. The composition and the working characteristics of UV warning device[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2002, (5): 34-36.
张 洁. 紫外告警设备的组成及工作特点[J]. 航天电子对抗, 2002, (5): 34-36.
- 4 Li Bingjun, Liang Yonghui. Development of ultraviolet warning technology[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(10): 1033-1035.
李炳军, 梁永辉. 紫外告警技术发展现状[J]. 激光与红外, 2007, 37(10): 1033-1035.
- 5 Wang Chunyang. Structure analysis and design of the ultraviolet warning system[J]. Modern Electronics Technique, 2007, (19): 87-91.
王春阳. 紫外告警系统结构分析与设计[J]. 现代电子技术, 2007, (19): 87-91.
- 6 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.
- 7 Tang Yi, Zhang Lijun, Bai Tingzhu, *et al.*. Research on sun-tracking warning systems in solar blind UV[C]. SPIE, 2008, 7156: 71560O.
- 8 Wang Liping, Li Chun, Jin Chunshui. Design of catadioptric omnidirectional imaging system in solar blind UV[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1503-1507.
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): 1503-1507.
- 9 Bai Tingzhu, Lou Ying, Guo Aiyan, *et al.*. Trajectory simulation solution of ultraviolet warning system detection aspect angle and evade time[J]. Optical Technique, 2009, 25(3): 373-376.
白廷柱, 娄 颖, 国爱燕, 等. 基于弹道的紫外告警系统探测方位角及规避时间仿真分析[J]. 光学技术, 2009, 25(3): 373-376.
- 10 Zou Yisong, Liu Yufeng, Bai Tingzhu. Photoelectricity Imaging Principle[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
邹异松, 刘玉凤, 白廷柱. 光电成像原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.

- 11 Gou Zhiyong, Wang Jiang, Wang Chu, *et al.*. The summary of aspheric optical design technology[J]. Laser Journal, 2006, 27(3): 1-2.
勾志勇, 王江, 王楚, 等. 非球面光学设计综述[J]. 激光杂志, 2006, 27(3): 1-2.
- 12 Wang Wensheng. Applied Optics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology press, 2010. 199-201.
王文生. 应用光学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010. 199-201.
- 13 Liang Shitong, Yang Jingfeng, Li Xiangjuan, *et al.*. Use of BOL in long focal-wide bands optical system[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(12): 1252-1254.
梁士通, 杨建峰, 李湘眷, 等. 二元光学透镜在长焦距宽谱段光学系统中的应用[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1252-1254.
- 14 Wang Zhijian, Wang Peng, Liu Zhiying[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009. 111-112.
王志坚, 王鹏, 刘智影. 光学工程原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009, 111-112.
- 15 Li Jingzhen. Handbook of Optics[M]. Xi'an: shaanxi Science & Technology Press, 2010. 1055-1057.
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010. 1055-1057.