

用于刑侦检测的日盲紫外折衍混合变焦光学系统设计

宋逸辰, 唐玉凤, 赖涛, 袁沛琦, 丁骁炜, 毛珊*, 赵建林

西北工业大学物理科学与技术学院光场调控与信息感知工业和信息化部重点实验室, 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710129

摘要 基于ARTCAM-407UV-WOM型紫外探测器,结合光学系统成像性能要求和光学元件成像特性,提出一种基于 Q_{con} 非球面和衍射表面的日盲紫外折衍混合变焦光学系统设计方法。所设计的系统仅由5块透镜组成,采用氟化钙和熔融石英两种材料,工作波段为 $0.24\sim 0.27\ \mu\text{m}$,连续变焦范围为 $40\sim 100\ \text{mm}$ 。分析结果显示,该系统在整个变焦范围内,奈奎斯特空间频率在 $11\ \text{lp/mm}$ 处的调制传递函数值均高于 0.7 ,全视场畸变小于 0.06% ,表明该设计方法能够满足日盲紫外连续变焦系统结构简单、体积小、像质优良、像面稳定等设计和刑侦检测使用要求,对此类光学系统的设计具有一定借鉴意义。

关键词 光学设计; 混合光学系统; Q型非球面; 日盲紫外光; 变焦光学系统

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231476

1 引言

可见光到太赫兹波段成像技术的发展,推动着工业、商业和航空航天领域的快速发展。天空中的臭氧层对于波段范围为 $0.24\sim 0.28\ \mu\text{m}$ 的紫外光有着强烈的吸收作用,导致该波段范围内的太阳辐射无法顺利传输至地面,形成了“日盲紫外”波段^[1]。该波段的诸多特性在民用、军用、警用等领域存在着难以替代的优势,例如在刑侦科学领域,特别是在不破坏刑事现场的前提下提取潜在痕迹物证方面,利用“日盲紫外”波段光可以快速搜索并高质量地获取现场的可疑指纹、血迹、精斑、火炸药残留物等物证。

由于日盲紫外波段的特殊应用和光学材料的限制,传统光学设计难以满足使用要求。近年来,随着非球面、衍射表面的发展,这一问题得到了有效解决。超精密加工与检测技术的快速发展也使多种类型非球面的高精度加工与检测成为可能,Q型非球面在光学系统设计中能够提高优化效率,也便于加工和检测,因此受到业界重视。目前,相关研究的典型工作包括:文献[2]将拆分设计和单层衍射元件相结合,实现了深紫外侦察相机镜头的无热化设计;文献[3]基于Offner结构设计了一款高分辨紫外成像光谱仪,能够满足紫外遥感仪器小型化、轻量化的设计和使用要求;文献[4]提

出一种极紫外光刻离轴多镜系统初始结构求解的方法,并设计了两种离轴六镜物镜;文献[5]提出一种基于四分量的机械变焦法,采用多个球面透镜和一个Q型非球面透镜设计了一款紧凑型变焦全景环形透镜(PAL)系统,解决了传统PAL系统不能较好放大物体细节的问题;文献[6]基于球面分裂理论,采用 Q_{bis} 多项式描述非球面,并成功将一个强非球面分裂成两个弱非球面;文献[7]利用Q型非球面设计了一款工作在可见光波段的小畸变PAL,并与具有相同参数的偶次非球面PAL比较,验证了Q型非球面在PAL设计中的优越性;文献[8]利用Q型非球面设计了一款工作在可见光波段的电子内窥镜物镜(EEO),并在相同计算平台与结构参数下设计了一款含有幂级数非球面的EEO系统,验证了Q型非球面在系统设计中的优越性;文献[9]使用Q型非球面设计了一款非制冷中长波双波段红外光学系统,验证了其在双波段红外光学系统的优势。在日盲紫外波段,文献[10]设计了一个具有快焦比、长焦距的日盲紫外光学系统,该系统由8块球面透镜组成,总长与焦距之比为 1.5 ,兼容快焦比和长焦距的特点。

在设计日盲紫外变焦光学系统时,必须考虑多种因素。首先,光学材料的透过率、折射率和色散性能都会对系统最终成像质量产生影响;其次,光学元件的面

收稿日期: 2023-08-25; 修回日期: 2023-10-26; 录用日期: 2023-12-07; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(62375222, 61927810, 61905195)、陕西数理基础科学研究项目(22JSQ025)、西北工业大学中央高校基本科研业务(310202011QD001)

通信作者: *maoshan_optics@nwpu.edu.cn

形、系统布局以及变焦机制的选择都会影响系统的整体结构;最后,日盲紫外光学系统的特殊工作要求也对环境因素、系统制造和测试等提出了一定的要求。这些因素都会对这种类型光学系统的成像质量和实际工程领域的应用产生影响。因此,在进行日盲紫外变焦光学系统设计时,必须对每个环节进行严谨的考虑和科学的评估。

考虑到 Q 型非球面能有效避免偶次非球面系数相关性,解决优化停滞问题,衍射元件具有特殊的色散性质等优势,本文巧妙地将 Q 型非球面和衍射元件的优势同时融入日盲紫外光学系统的设计中。 Q 型非球面的引入在减少系统镜片数的同时,极大地提高了图像质量,而处于最后位置的衍射表面能够很好地消除整个系统的色差。此外,本文还将 Q 型非球面和衍射表面设置在 1 块透镜的基底上,设计了一款应用于刑侦检测的日盲紫外变焦混合光学系统。该系统仅由氟化钙和熔融石英两种材料构成的 5 块镜片组成,进一步简化了系统结构、提升了光学系统的整体性能,并完善了相关面形的可加工性分析以及刑侦检测成像仿真,设计结果将有助于推动紫外折衍混合成像光学系统的发展和应用。

2 基本原理

2.1 Q 型非球面

目前,在光学设计领域,许多设计者偏爱选用幂级数非球面进行透镜的面形设计。在光学设计和加工领域,采用幂级数附加多项式的形式表示最接近球面的偏离量是常用的非球面表征形式之一。其常见形式为基准二次曲面方程和高次幂级数项的叠加,即

$$z = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - \epsilon c^2 \rho^2}} + \sum_{m=0}^M A_m \rho^{2m+4}, \quad (1)$$

式中: $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$; c 为曲面的近轴曲率; ϵ 为圆锥曲线参数; A_m 为高次项系数。通常在表示非球面时,只采用少量的高次项。然而,为了满足更高的设计精度要求,使用的高次项数目逐渐增加。当使用的高次项超过 10 项时,多项式的表征将出现病态,导致表征不准确,且计算过程复杂,运算时间变长。

为了解决上述非球面存在的问题,2007 年美国 QED 公司 Forbes 博士^[11]提出一种新的非球面数学描述方式—— Q 型非球面。这种曲面采用单变量圆域内的正交多项式进行描述,利用正交基函数系生成并定义偏离基底面的高阶项,且各项系数都具有明确且唯一的物理含义。 Q 型非球面分为两类:基于最佳拟合球面(Q_{bfs})的非球面和基于圆锥面(Q_{con})的非球面。 Q_{bfs} 主要描述非球面度较低的曲面, Q_{con} 则主要描述非球面度较高的曲面,它们的定义为

$$z_{\text{bfs}} = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - c^2(x^2 + y^2)}} + \frac{u^2(1 - u^2)}{\sqrt{1 - c^2 R_{\text{max}}^2 u^2}} \sum_{n=0}^N a_n Q_{\text{bfs},n}(u^2), \quad (2)$$

$$z_{\text{con}} = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2(x^2 + y^2)}} + u^4 \sum_{n=0}^N a_n Q_{\text{con},n}(u^2), \quad (3)$$

式中: $u = (x^2 + y^2)/R_{\text{max}}$, R_{max} 为光学元件的半孔径; a_n 为多项式系数; $Q_{\text{bfs},n}(u^2)$ 和 $Q_{\text{con},n}(u^2)$ 分别为两类非球面中包含的阶次为 n 的正交多项式; N 表示多项式的最高次幂。

Forbes 提出的两类非球面有效避免了偶次非球面各个系数之间的相关性,解决了曲面拟合过程中由病态格莱姆矩阵导致的优化停滞等问题。其中 Q_{bfs} 非球面通过 QSL 控制曲面整体的 RMS 斜率偏离度, Q_{con} 非球面通过约束条件控制曲面整体的 RMS 矢高偏离度,这为此类非球面的设计、加工和检测提供了极大的便利^[12]。此外, Q_{con} 允许设计者在设计过程中通过对比决定某个具体项是否需要,降低了制造和检测的复杂性并减少成本。通过对比两种 Q 型非球面在系统中对于整体光学性能的表现,本文选用 Q_{con} 非球面。

2.2 衍射元件特性和设计

衍射元件是一种特殊的光栅结构,其色散性质与传统的折射透镜相反。这种元件的非均匀周期性结构使得它在色差校正方面具有一定的优势。衍射表面的形状与偶次非球面的形状类似,其面形和相位分布分别表示为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2 r^2}} + a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6 + \dots, \quad (4)$$

$$\phi = M \sum_{i=1}^K A_i \rho^{2i}, \quad (5)$$

式中: K 为级数中多项式系数的个数; A_i 为归一化的径向孔径坐标; M 为衍射级数。

衍射效率是评估设计衍射元件及折衍混合光学系统性能的重要指标之一,它决定了折衍混合光学系统在实际应用中的可行性。考虑到本文所涉及的日盲紫外波段较窄,采用单层衍射元件即可满足衍射效率的要求,并将其设置在平面基底上,符合现有加工工艺要求。基于标量衍射理论,具有连续面形的单层衍射元件的衍射效率为

$$\eta_m^\infty = \text{sinc}^2 \left[m - \frac{\phi(\lambda)}{2\pi} \right]. \quad (6)$$

由式(6)可知,当 $\phi(\lambda) = 2\pi$ 时,对应的衍射元件的一级衍射效率达 100%。此时,最大微结构高度 H 表示为

$$H = \frac{\lambda_0}{n(\lambda_0) - n_m(\lambda_0)} \quad (7)$$

2.3 变焦光学系统设计要求

变焦光学系统是一种通过透镜组的运动来实现焦距变化,并且像面位置保持稳定的光学系统^[13]。它通常由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组 4 块透镜组构成。系统放大倍率是通过改变变倍组的透镜位置来调整的。随着变倍组的连续移动,像面也会相应地进

行前后运动。为了确保像面的稳定,补偿组被用来对像面的移动进行补偿^[14]。变焦系统通常存在两种补偿形式,即光学补偿和机械补偿。机械补偿已被广泛使用,这是因为这种补偿方式即使在连续变焦的情况下也能保证像面位置稳定^[15]。图 1 所示为机械式变焦光学系统原理图,4 种组态分别为:前固定组 L1、变倍组 L2、补偿组 L3、后固定组 L4。变倍组和补偿组分别按照一定的规则产生非线性移动,从而实现连续变焦。

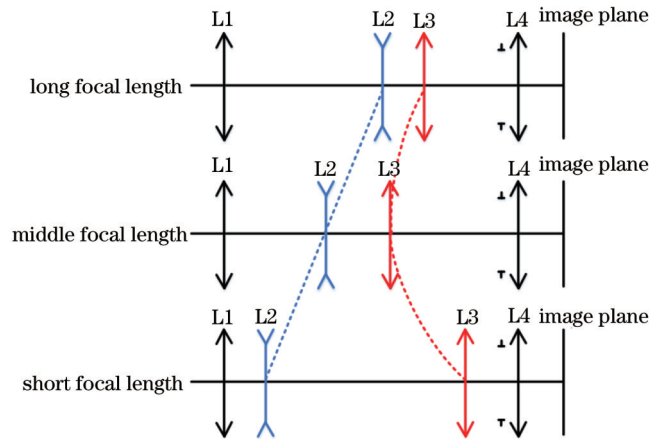


图 1 机械式变焦光学系统原理

Fig. 1 Principle of mechanical zoom optical system

机械式变焦光学系统方程的变焦过程如下:1)变倍组产生一定位移,其放大倍率随之发生改变;2)求解变焦补偿方程,从而获得确保像面位置稳定的放大倍率;3)通过分析补偿组放大倍率的变化,再进行反推,最终获得补偿组位移改变量。在设计光学系统时,本文将遵循这些原则来实现准确的变焦效果。

3 光学设计与像质评价

3.1 设计要求

针对日盲紫外光学系统适应实际应用环境及稳定变焦等需求,选择日本 Artray 公司的 ARTCAM-407UV-WOM 型紫外探测器。该探测器的分辨率为 $1360 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,像元大小为 $4.65 \mu\text{m}$,具有高灵敏度和低噪声特性;采样的截止频率为奈奎斯特频率,即 $R=1/(2p)=11 \text{ lp/mm}$, p 为探测器像元大小,能够确保光学系统的采样精度和稳定性。该光学系统具体设计指标如表 1 所示。

可见光波段与红外波段拥有较为丰富的光学材料可供人们选择,而对于紫外光学系统,合适的材料种类相对较少。综合考虑紫外材料本身的成本和性能因素,本设计最终采用熔融石英和氟化钙两种光学材料。这两种材料的组合使用能够显著改善光学系统的色差校正问题。由于氟化钙在空气中容易潮解,因此系统的第一块镜片材料选为熔融石英。

3.2 光学设计

参考光学镜头手册选择初始结构,该结构的变焦

表 1 紫外变焦光学系统设计指标
Table 1 Design index of ultraviolet optical system

Parameter	Value
Working waveband / μm	2.4-2.7
Field of view / ($^\circ$)	3.8-9.4
Effective focal length (EFL) / mm	40-100
F -number	4
MTF@11 lp/mm	>0.7
Distortion / %	<0.1

范围为 $12 \sim 32.3 \text{ mm}$,光圈值为 $F/2$,变倍比为 2.7。在此基础上,按照以下步骤进行初步优化:1)设置光学系统参数及边界条件,确保系统性能符合预期;2)对初始结构中的双胶合透镜进行分离,消除色差对系统性能的影响;3)缩放焦距,设置短焦($f'=40 \text{ mm}$)、中焦($f'=70 \text{ mm}$)和长焦($f'=100 \text{ mm}$) 3 种结构;4)保持三组态下系统总长一致,添加变量,进行自动优化。经过初步优化后,光学系统的二维结构如图 2 所示。

此时,光学系统由 6 块标准球面透镜组成,从左至右第 1、3、5 块透镜采用熔融石英,第 2、4、6 块透镜采用氟化钙。根据焦距的大小,该系统分为 3 个组态,依次为 40 mm 、 70 mm 和 100 mm ,该系统采用双移动组的变焦模式。具体来说,第 1 块透镜为前固定组,第 2 块透镜是变倍组,第 3、4 块透镜组成补偿组,第 5、6 块透镜组成后固定组。这样设计的目的,是保持系统的长

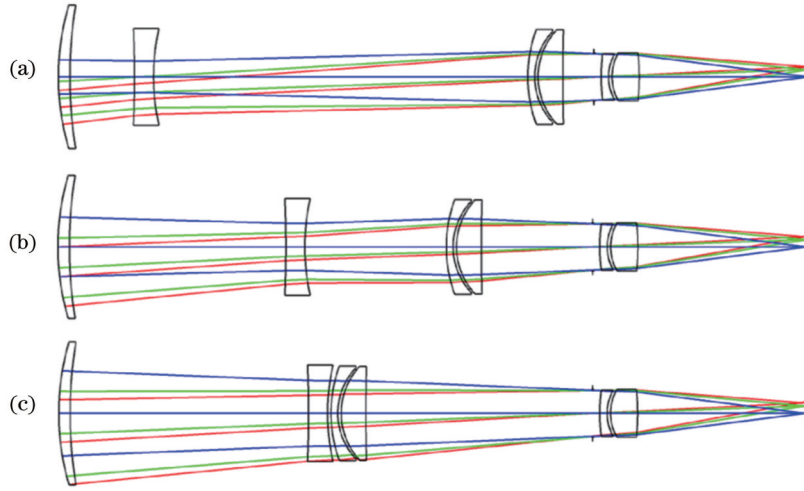


图 2 不同焦距下的光学系统结构二维图。(a) $f'=40$ mm; (b) $f'=70$ mm; (c) $f'=100$ mm

Fig. 2 Two-dimensional diagrams of optical system under different focal lengths. (a) $f'=40$ mm; (b) $f'=70$ mm; (c) $f'=100$ mm

度恒定,同时确保像面位置稳定。此外,为实现色差校正,第 3、4 块和第 5、6 块透镜分别采用分离式双胶合透

镜结构。光学系统的 MTF 及赛德尔像差结果分别如图 3、图 4 所示。

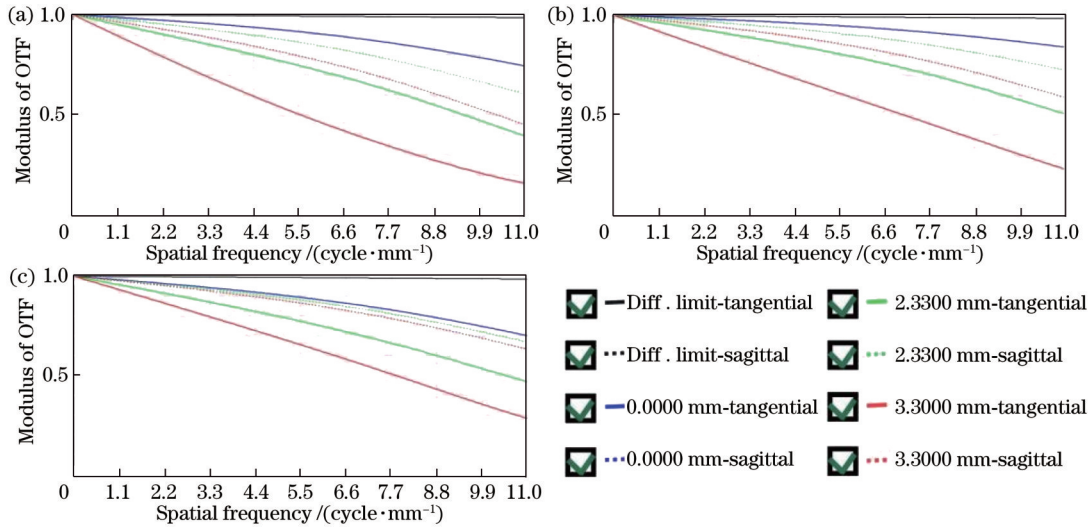


图 3 不同焦距下光学系统的 MTF。(a) $f'=40$ mm; (b) $f'=70$ mm; (c) $f'=100$ mm

Fig. 3 MTF of optical system under different focal lengths. (a) $f'=40$ mm; (b) $f'=70$ mm; (c) $f'=100$ mm

可以看出,当前的光学系统结构相对稳定,但存在较大像差,无法满足设计要求。因此,进一步按照以下步骤进行优化设计:1)基于赛德尔图,将对像差影响较大的曲率半径、厚度依次设置为变量,并通过添加像差操作数自动优化;2)将第 6、7 个表面设置为偶次非球面,并设置圆锥系数和高阶非球面系数为变量进行自动优化;3)为简化系统结构,将第 5、6 块透镜组合为一块透镜,同时缩短筒长进行优化计算;4)为了更好地校正系统色差,设置最后一个面为衍射面,并固定其为平面基底便于加工,设置高阶项数为优化变量进行自动优化;5)基于最佳非球面寻找结果,将最后一块透镜的前表面设置为 Q 型非球面,采用 Q_{con} 型非球面,并逐步增加多项式的项数到 4 项为变量,进行系统最后的优化调整和像差平衡,最终达到设

计要求。图 5 所示为不同焦距下紫外光学系统的二维结构。表 2 和表 3 分别列出了相应的系统结构参数和偶次非球面参数。

在变焦系统中,两个偶次非球面与标准球面面形的截面曲线如图 6 所示。可以看出,两个面形之间的差距微小,完全满足加工所需的条件。

在该变焦混合光学系统中,衍射面的参数如表 4 所示。经过计算,得出微结构的高度为 $H=0.556 \mu\text{m}$ 。衍射元件的衍射效率和相位分布分别如图 7(a)、(b) 所示。可以看出,在偏离所设计的中心波长后,衍射元件的衍射效率仅出现微小的下降,始终能够保持在 99% 以上。同时,即使面对最小的微结构,也能满足现有加工设备的精度要求。可见,衍射效率对通过光学系统的有效能量产生的影响非常小。衍射元件的相

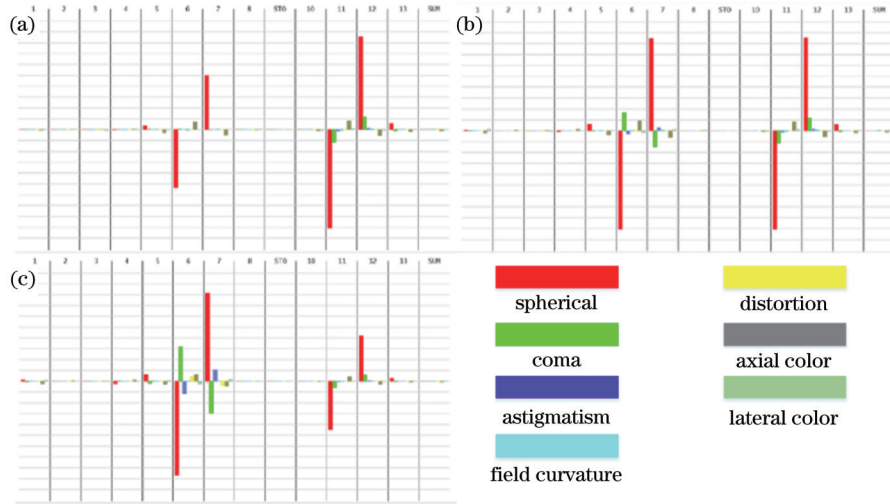


图 4 不同焦距下光学系统的赛德尔图。(a) $f' = 40$ mm; (b) $f' = 70$ mm; (c) $f' = 100$ mm

Fig. 4 Seidel diagrams of optical system under different focal lengths. (a) $f' = 40$ mm; (b) $f' = 70$ mm; (c) $f' = 100$ mm

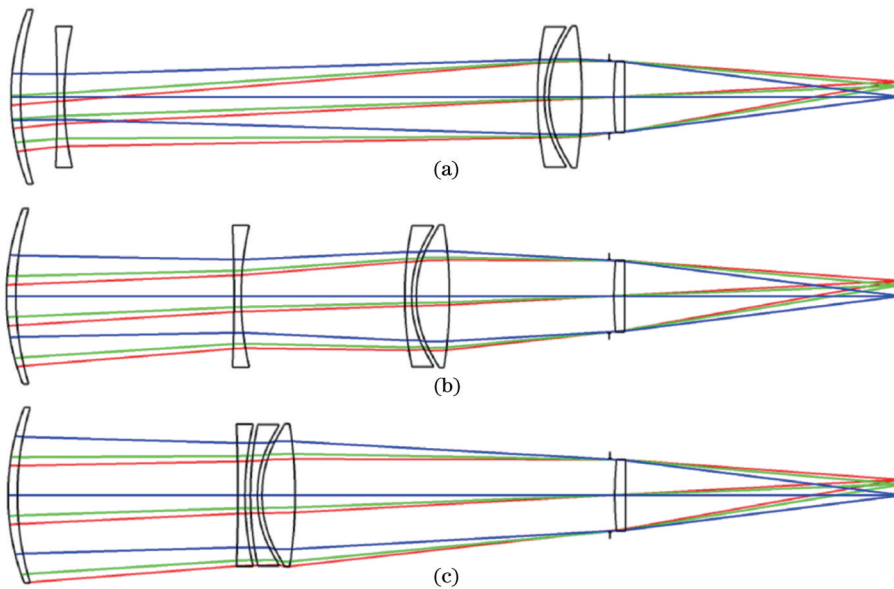


图 5 不同焦距下紫外光学系统二维结构图。(a) $f' = 40$ mm; (b) $f' = 70$ mm; (c) $f' = 100$ mm

Fig. 5 Two-dimensional diagrams of ultraviolet optical system under different focal lengths. (a) $f' = 40$ mm; (b) $f' = 70$ mm; (c) $f' = 100$ mm

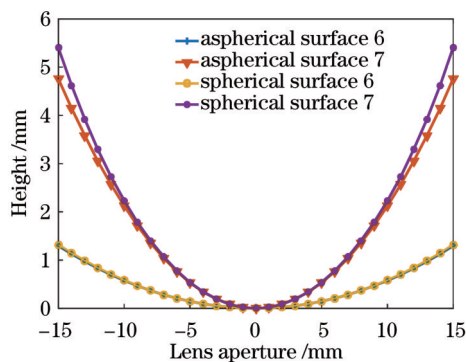


图 6 偶次非球面与标准球面面形的截面曲线

Fig. 6 Cross section curves of even aspherical surface and standard surface

位分布平缓且可加工性强。此外,引入衍射元件减少了光学系统的透镜数量和系统总长,从而有效提高了系统的透过率。

表 5 为 Q_{con} 非球面参数。使用 MATLAB 软件对这种面形进行仿真,并将其与标准球面进行对比,结果如图 8 所示。可以看出,两种面形的差距非常小,完全满足加工需求。

3.3 像质评价

当焦距大小依次为 40 mm、70 mm、100 mm 时,紫外变焦光学系统的 MTF 如图 9 所示。在探测器截止频率为 11 lp/mm 处,MTF 均大于 0.7。相应的场曲和畸变如图 10 所示,各波段内场曲小于 0.3 mm,畸变均小于 0.06%。在整个变焦范围内,成像质量良好。

表 2 光学系统结构参数
Table 2 Structure parameters of optical system

No.	Item	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Material
0	Object	Standard	Infinity	Infinity	—
1	Aper	Standard	51.487	2.000	F_SILICA
2	Aper	Standard	64.952	46.919	—
3	Aper	Standard	-335.201	1.498	CAF2
4	Aper	Standard	66.237	1.157	—
5	Aper	Standard	73.289	1.473	F_SILICA
6	Aper	Even asphere	86.075	0.998	—
7	Aper	Even asphere	23.528	7.024	CAF2
8	Aper	Standard	-100.994	66.985	—
9	Stop	Standard	Infinity	1.005	F_SILICA
10	Aper	Q_{con} asphere	77.086	2.258	—
11	Aper	Binary2	Infinity	58.684	—
12	Image	Standard			—

表 3 非球面参数
Table 3 Parameters of aspherical surface

Surface No.	Conic	2 nd orderterm	4 th orderterm	6 th orderterm	8 th orderterm
6	-1.707	0.012	1.894×10^{-5}	1.097×10^{-7}	-9.658×10^{-10}
7	-1.047	-2.627×10^{-3}	1.757×10^{-5}	1.082×10^{-7}	1.035×10^{-9}

表 4 衍射面参数
Table 4 Parameters of diffractive surface

Surface No.	Diffraction order	Norm radius	Coefficient on p^2	Coefficient on p^4
11	1	100	-3.318×10^{-5}	5.510×10^{-5}

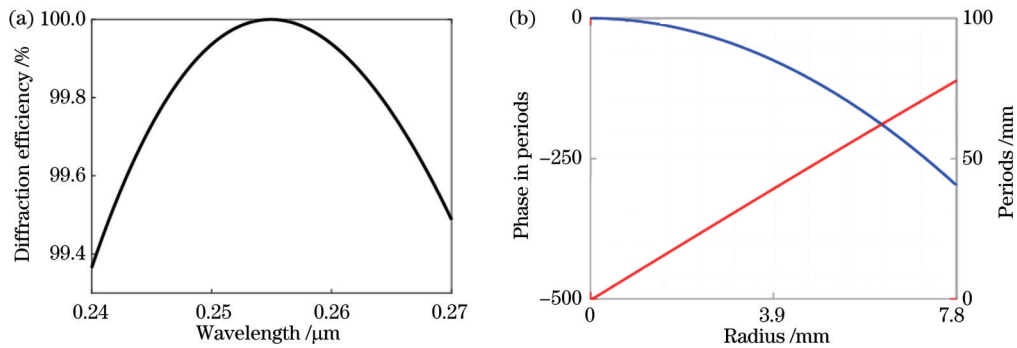


图 7 所设计衍射元件的衍射效率和相位分布。(a)衍射效率;(b)相位

Fig. 7 Diffraction efficiency and phase distribution of designed diffractive optical element. (a) Diffraction efficiency; (b) phase

表 5 Q_{con} 非球面参数
Table 5 Parameters of Q_{con} asphere

Surface	c_{con}	a_0	a_1	a_2	a_3
10	-0.748	-7.942×10^{-7}	3.449×10^{-9}	-1.044×10^{-11}	1.750×10^{-14}

3.4 凸轮曲线

紫外变焦镜头凸轮曲线如图 11 所示,横坐标代表紫外光学系统的焦距,纵坐标代表不同镜组之间的距离,TH1 和 TH2 分别表示变倍组和补偿组与前固定组的长度。由图 11 可知,紫外光学系统在整个变倍补偿过程中,其曲线走势平滑,并未出现拐点。这种特性使

其更容易满足工程应用的标准。

3.5 光学系统公差分析

以上设计结果表明光学系统在设计指标上已经达到要求,然而在真实环境中,光学系统会受到制造、加工、装配等环节的影响,成像效果可能有所下降。因此,为了评估各种影响因子对光学系统成像效果的干

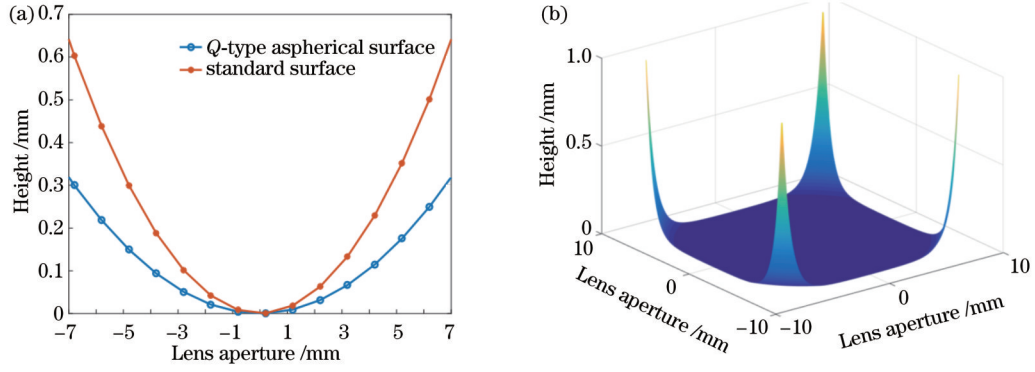


图 8 Q_{con} 非球面与标准球面示意图。(a) 二维图; (b) 三维 Q_{con} 非球面
Fig. 8 Diagrams of Q_{con} aspherical and standard surfaces. (a) Two-dimensional diagram; (b) three-dimensional Q_{con} aspherical surface

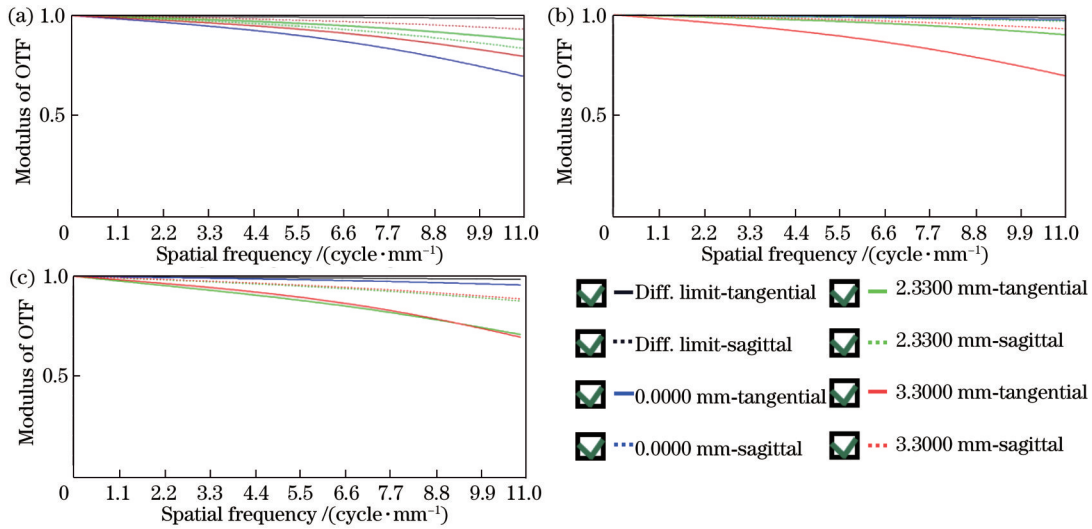


图 9 不同焦距下紫外光学系统的 MTF。(a) $f'=40$ mm; (b) $f'=70$ mm; (c) $f'=100$ mm
Fig. 9 MTF of ultraviolet optical system under different focal lengths. (a) $f'=40$ mm; (b) $f'=70$ mm; (c) $f'=100$ mm

表 6 公差设置

Table 6 Tolerance data of system

Tolerance type	Value
Refractive index	0.0008
Surface irregularity /fringes	0.25
Thickness /mm	± 0.025
Abbe number /%	0.08
Element decenter /mm	± 0.01
Element tilt /($^{\circ}$)	0.02
Test wavelength /nm	255

扰程度,并制定出合理的公差数据,对像质达标的光学系统进行公差分析是必不可少的。

本文使用灵敏度法对系统进行公差分析,依据目前国内工艺水平拟定初始公差范围,公差分析的标准如表 6 所示,设置测试波长为 255 nm,选择 MTF 值作为公差评判标准,空间频率设置为 11 lp/mm,设置蒙特卡罗法模拟次数为 500 次,得到的公差分析结果如表 7 所示。结果表明,该光学系统在短焦、中焦及长焦

状态下 90% 以上的 MTF 值大于 0.8,保持了良好的光学性能,并满足系统加工时的像差要求,具有较强的可实现性。

3.6 成像仿真

物证,例如指纹和血迹等关键物证,在紫外光源的照射下,其反射光线会被紫外光学系统收集,从而为刑侦人员提供物证样本。基于 Zemax 软件的图像模拟功能,利用所设计的紫外变焦光学系统对紫外光源照

表 7 公差分析结果

Table 7 Tolerance analysis results

Yield rate / %	MTF of short focal length	MTF of middle focal length	MTF of long focal length
98	0.761	0.775	0.774
90	0.805	0.817	0.812
80	0.830	0.835	0.835
50	0.870	0.868	0.873
20	0.893	0.895	0.897
10	0.902	0.903	0.905
2	0.912	0.913	0.914

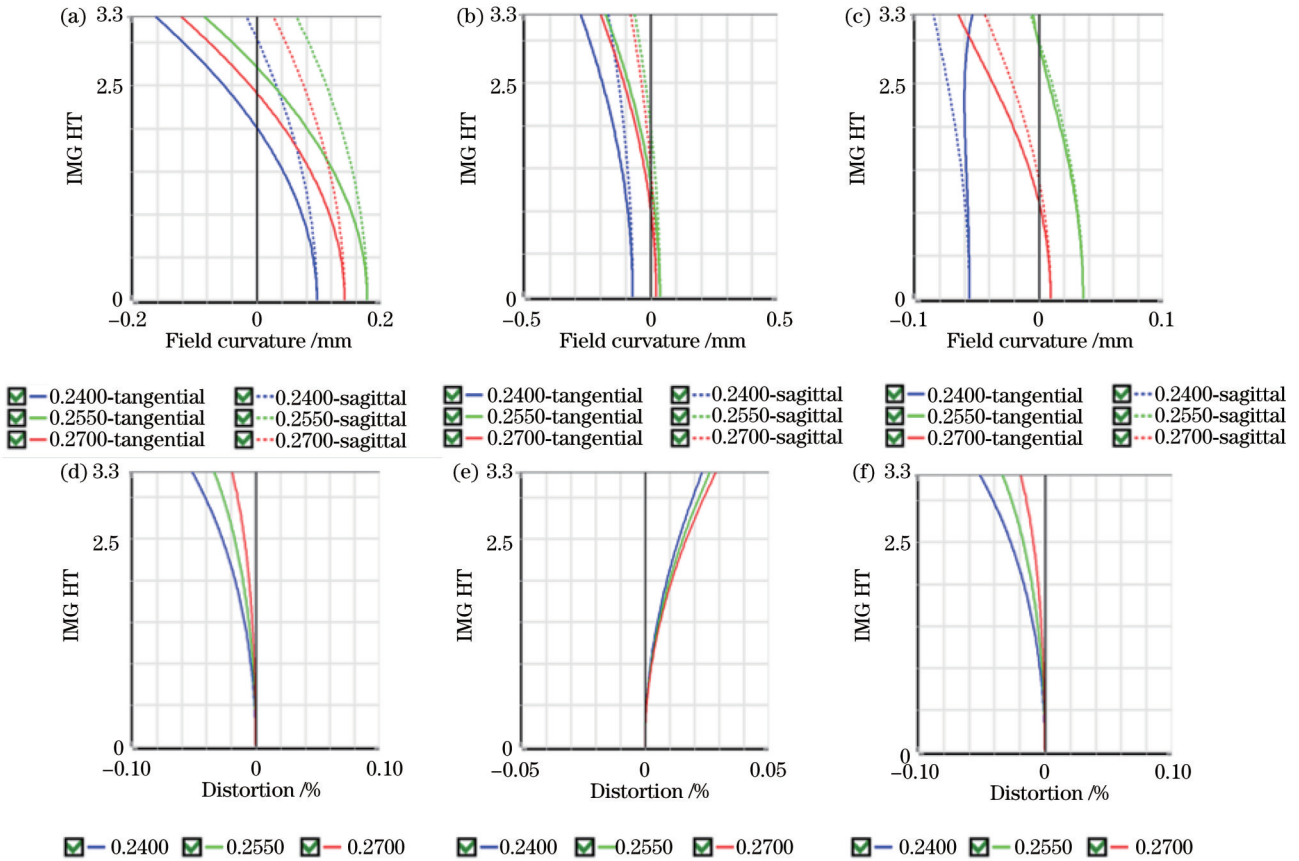


图 10 不同焦距下紫外光学系统的场曲和畸变。(a)(d) $f'=40$ mm; (b)(e) $f'=70$ mm; (c)(f) $f'=100$ mm
 Fig. 10 Field curvature and distortion of ultraviolet optical system under different focal lengths. (a)(d) $f'=40$ mm; (b)(e) $f'=70$ mm; (c)(f) $f'=100$ mm

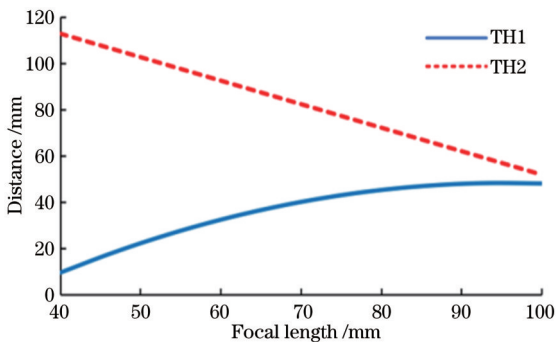


图 11 变焦镜头凸轮曲线
 Fig. 11 Cam curves of the zoom lens

射下的指纹图像进行仿真,结果如图 12(a)所示,不同焦距下的成像效果如图 12(b)~(d)所示。可以看出,3个焦距下的仿真结果均比较理想,可以获得清晰的指纹图像。

4 结 论

基于 ARTCAM-407UV-WOM 型紫外探测器,设计了一款基于 Q 型非球面与单层衍射元件的日盲紫外变焦光学系统。该系统由 5 块透镜组成,仅采用氟化钙和熔融石英这两种材料。将 Q_{con} 型非球面和衍射表面设置在一块凸平透镜上,不仅简化了加工流程,还提高了使用便捷性,且在奈奎斯特空间频率为 11 lp/mm

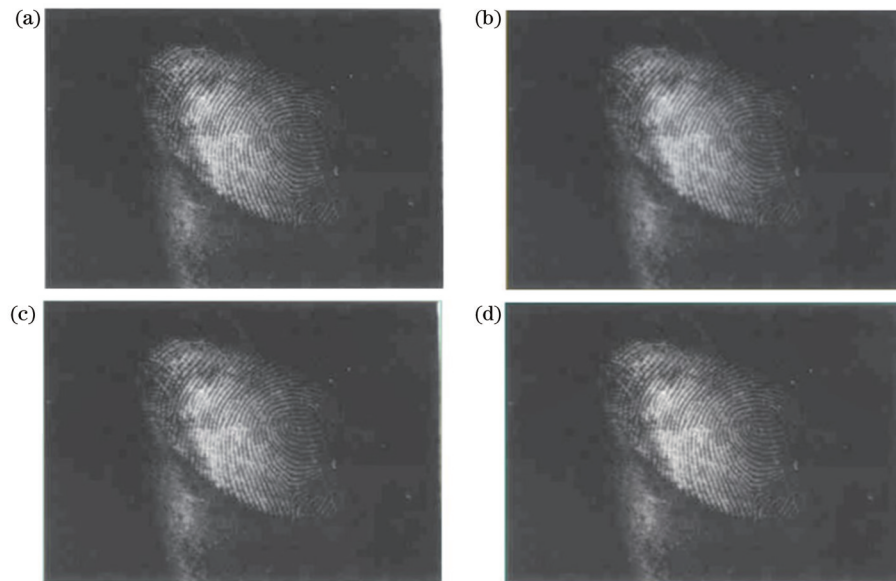


图 12 紫外光学系统在不同焦距下的图像模拟结果。(a) 指纹图像; (b) $f'=40$ mm; (c) $f'=70$ mm; (d) $f'=100$ mm

Fig. 12 Image simulation results of ultraviolet optical system under different focal lengths. (a) Fingerprint image; (b) $f'=40$ mm; (c) $f'=70$ mm; (d) $f'=100$ mm

处的 MTF 值均高于 0.7, 在工作波段内全视场畸变小于 0.06%。该光学系统结构简单、紧凑, 且具有较高的成像清晰度和分辨率, 在刑侦检测特别是提取潜在痕迹物证方面具有一定优势。

参 考 文 献

- [1] 李召辉, 申光跃, 庞程凯, 等. 日盲紫外单光子成像[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011023.
Li Z H, Shen G Y, Pang C K, et al. Solar-blind ultraviolet single-photon imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011023.
- [2] 高旭东, 崔庆丰, 郑汉青, 等. 宽温度范围的深紫外光学系统无热化设计[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1722001.
Gao X D, Cui Q F, Zheng H Q, et al. Athermalization design of deep ultraviolet optical system with wide temperature range[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1722001.
- [3] 朱雨霁, 尹达一, 陈永和, 等. 高光谱分辨率紫外 Offner 成像光谱仪系统设计[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0222001.
Zhu Y J, Yin D Y, Chen Y H, et al. Design of hyperspectral resolution ultraviolet offner imaging spectrometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0222001.
- [4] Tan W, Ji H R, Mo Y, et al. Automatic design of an extreme ultraviolet lithography objective system based on the Seidel aberration theory[J]. Applied Optics, 2022, 61(29): 8633-8640.
- [5] Wang J, Amani A, Zhu C X, et al. Design of a compact varifocal panoramic system based on the mechanical zoom method[J]. Applied Optics, 2021, 60(22): 6448-6455.
- [6] Yuan Q, Gao Z S, Zhu D. Applying slope constrained Q_{bs} aspheres for asphericity redistribution in the design of infrared transmission spheres[J]. Applied Optics, 2015, 54(22): 6857-6864.
- [7] 周向东, 白剑. Q-Type 非球面小畸变全景环带光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0722003.
Zhou X D, Bai J. Small distortion panoramic annular lens design with Q-type aspheres[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0722003.
- [8] 李闯, 薛常喜, 杨红芳, 等. 基于 Q-type 非球面的电子内窥镜物镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0622001.
Li C, Xue C X, Yang H F, et al. Optical system design of electronic endoscope objective with Q-type aspheres[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0622001.
- [9] 贾孟, 薛常喜. 基于 Q-type 非球面的双波段红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1022001.
Jia M, Xue C X. Design of dual-band infrared optical system with Q-type asphere[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1022001.
- [10] 丁家奎, 王振鹏, 宋真真, 等. 快焦比长焦距日盲紫外光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 192201.
Ding J K, Wang Z P, Song Z Z, et al. Design of solar blind ultraviolet optical system with fast focal ratio and long focal length[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 192201.
- [11] Forbes G W. Robust, efficient computational methods for axially symmetric optical aspheres[J]. Optics Express, 2010, 18(19): 19700-19712.
- [12] 程德文, 陈海龙, 王涌天, 等. 复杂光学曲面数学描述和设计方法研究[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822008.
Cheng D W, Chen H L, Wang Y T, et al. Mathematical description and design methods of complex optical surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822008.
- [13] 常宇梅, 王劲松. 轻小型宽波段变焦物镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822029.
Chang Y M, Wang J S. Design of lightweight and miniaturized zoom objective optical system with wide band[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822029.
- [14] 张洪博, 闫阿奇, 何双亮, 等. 大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 1222002.
Zhang H B, Yan A Q, He S L, et al. Optical system design of MWIR continuous zoom lens with high zoom ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 1222002.
- [15] Jiang Z, Wang D, Zheng Y, et al. Continuous optical zoom microscopy imaging system based on liquid lenses[J]. Optics Express, 2021, 29(13): 20322-20335.

Design of a Solar Blind Ultraviolet Refractive-Diffractive Hybrid Zoom Optical System

Song Yichen, Tang Yufeng, Lai Tao, Yuan Peiqi, Ding Xiaowei, Mao Shan^{*}, Zhao Jianlin
Key Laboratory of Light-Field Manipulation and Information Acquisition, Ministry of Industry and Information Technology, Shaanxi Key Laboratory of Photonics Technology for Information, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, Shaanxi, China

Abstract

Objective The ozone layer in the sky efficiently blocks ultraviolet light with a wavelength range of 0.24–0.28 μm , preventing this spectrum of solar radiation from reaching the ground. This creates the "solar blind ultraviolet" band, which has numerous advantages in civilian, military, and police applications. Especially, it plays a valuable role in criminal investigation science, particularly in retrieving physical evidence without destroying the scene. It can access and search scenes quickly while extracting high-quality images of fingerprint marks, bloodstains, semen spots, fire and explosive residues, and other physical evidence. Nevertheless, the unique application of solar blind ultraviolet (UV) bands and optical materials poses challenges that traditional optical design cannot meet. The development of aspherical and diffractive surfaces offers an effective new solution to this problem. The rapid advancement of ultra-precision machining and testing technology has made it possible to machine and test diverse aspherical surfaces with high precision. The advantages of Q-type aspherical surfaces, such as efficient optimization of optical systems and simplified processing of aspherical surfaces, are even more highly valued by the industry. Therefore, it is essential to introduce the benefits of Q-type aspheres and diffractive optical elements into the design of day-blind UV optical systems. We hope that our design results can facilitate the development and application of UV refractive-diffractive hybrid imaging optical systems.

Methods Based on the requirements of the actual application environment, the detector selection is conducted for the day-blind UV optical system, which includes the need for stable zoom. To meet these needs, we comprehensively consider two optical materials—fused silica and calcium fluoride due to their cost and performance in the UV range. We optimize the initial structure with Zemax OpticStudio software and set Q-type aspherical and diffractive surfaces on a lens substrate. Then, we reduce the number of system lenses to five and improve image quality. Finally, we design a day-blind UV zoom hybrid optical system for criminal investigation. The image quality of the system is evaluated, and the machinability analysis of the relevant surface types and the imaging simulation for criminal detection are improved.

Results and Discussions After the initial structure is optimized by Zemax OpticStudio software, we design a day-blind UV optical system with a configuration of five lenses. The 1st, 3rd, and 5th lenses are made of fused silica, while the 2nd and 4th lenses are made of calcium fluoride. Notably, the last lens features a Q-type asphere on the front surface and a diffractive surface on the back surface (Fig. 5 and Table 2). Machinability analysis is conducted for the parity aspheres, diffractive surfaces, and Q-type aspheres (Figs. 6–8). The evaluation of system image quality yields the following results. The modulation transfer function (MTF) exceeds 0.7 at all three focal lengths (Fig. 9). The field curvature remains below 0.3 mm across all wavebands, and distortion is less than 0.06% (Fig. 10). The cam curve of the lens exhibits a smooth trend without inflection points (Fig. 11). Tolerance analysis indicates that the system is highly feasible (Tables 6 and 7). Finally, imaging simulations are performed, which yield the desired results (Fig. 12).

Conclusions Based on the ARTCAM-407UV-WOM UV detector, we design an optical system for day-blind UV zoom using a combination of Q-type aspherical surfaces and single-layer diffractive elements in the UV band. The optimized system consists of five lenses with only two materials, calcium fluoride and fused silica, and the Q-type aspherical and diffractive surfaces are set on a convex flat lens, which is easy to process and use. The MTF values at Nyquist spatial frequency of 11 lp/mm are all higher than 0.7, and the full-field-of-view distortion is less than 0.06% in the working waveband. The optical system has a simple and compact structure and has high imaging clarity and resolution, which has certain advantages in criminal investigation detection, especially in the extraction of potential traces and physical evidence.

Key words optical design; hybrid optical system; Q-type aspherical surface; solar blind ultraviolet; zoom optical system