

硫系玻璃在民用红外车载成像系统中的应用

姜波, 吴越豪, 戴世勋, 张巍, 张培晴, 王训四, 沈祥, 聂秋华

(宁波大学 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对324×256非制冷探测器, 设计了一个工作波段为8~12 μm, 有效焦距为9 mm, F 数为1.3, 视场角为33.26°×26.28°的红外车载镜头。镜头采用了硫系玻璃材料 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 制备的两片镜片, 结合常规红外材料锗以及硫化锌材料制备其他两片镜片, 通过合理分配各个镜片的光焦度达到系统整体无热化设计的效果。利用硫系玻璃易于精密模压制备非球面的特点, 仅在一片硫系玻璃镜片上设计了一处非球面。设计结果表明该系统在-40~60 °C的温度范围内具有良好的消色差/热差性能, 且调制传递函数(MTF)接近衍射极限。

关键词: 车载镜头; 红外系统; 无热化设计; 光学被动式

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1739-07

Application of chalcogenide glasses in designing vehicle-mounted infrared imaging lens for civilian applications

Jiang Bo, Wu Yuehao, Dai Shixun, Zhang Wei, Zhang Peiqing, Wang Xunsi, Shen Xiang, Nie Qiuha

(Laboratory of Infrared Materials and Devices, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A vehicle-mounted infrared lens was designed based on 324×256 uncooled detector. The operating wavelength range of the lens is from 8 μm to 12 μm, the effective focal length(EFL) is 9 mm, the F number is 1.3, and the field of view (FOV) is 33.26°×26.28°. The proposed lens was designed as a combination of two singlet lenses fabricated with the novel chalcogenide glass material $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ and two singlet lenses fabricated with conventional infrared materials Germanium (Ge) and Zinc Sulfide (ZnS). Utilizing the differences in the thermal-optical properties of the utilized infrared materials, an athermalized optical design was realized by carefully adjusting the optical powers of the four singlets. Moreover, taking advantage of the superior property of chalcogenide glasses for molding preparation of aspherical surfaces, the imaging quality of the proposed lens could be further improved by introducing one aspherical surface on one of the chalcogenide glass singlets. The imaging quality of the proposed lens is close to the diffraction-limited system for the designed spectral range and for the temperature range from -40 to 60 °C.

Key words: vehicle-mounted lens; infrared system; athermalized design; optical passive

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-11-10

基金项目: 国家科技部重大国际合作项目(2011DFA12040); 发光材料与器件国家重点实验室开放基金(2014-skllmd-01); 浙江省重中之重学科开放基金项目(XKXL1320, XKL141039); 宁波市自然科学基金(2014A610125)

作者简介: 姜波(1990-), 男, 硕士生, 主要从事红外光学系统设计方面的研究。Email: nbu_jiangbo@163.com

导师简介: 吴越豪(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事硫系玻璃光学设计、硫系玻璃光器件方面的研究。

Email: wuyuehao@nbu.edu.cn

0 引言

配备红外车载成像系统的车辆可在全黑夜间,浓雾、沙尘、雾霾等复杂天气,或者逆向车灯眩光等人眼能见度较低的情况下获得关于前方路况的清晰热成像,从而有效增强驾驶员在复杂路况下的视觉观察能力,提升驾驶安全性。民用车载成像系统主要包含三种:微光车载成像系统、近红外车载成像系统以及长波红外车载成像系统^[1]。对比于微光和近红外成像系统,长波红外成像系统具有更远的探测距离和更直观的温度体现,因此这种技术更受红外夜视厂商以及消费者的青睐。

长波红外车载成像系统的无热化设计难点在于成像波段较宽(8~12 μm)以及成像环境温度变化较大(漠河-海口的温差可达 100 $^{\circ}\text{C}$)。较宽的成像波段增加了系统消色差的设计难度;而较大的外界温度变化不仅将导致透镜材料和镜头机械结构膨胀收缩,也将引起透镜材料的折射率发生相应的改变。这些因素都将导致红外光学系统产生离焦,严重影响成像质量。目前通常采用以下四种方式实现长波红外波段成像系统无热化的设计目的(即同时消除系统的色差和热差):机械主动电子式(机电式)、光学被动式、机械被动补偿式、光机混合式。其中光学被动式是设计无热化长波红外成像系统最常采用的设计方式^[2]。

光学被动式无热化设计的核心技术在于使用不同的红外材料制备具备不同光焦度的镜片。通过多片具有不同光焦度的镜片组合,结合考虑镜筒材料的热胀冷缩,可实现长波红外成像系统无热化设计的目的。常规长波红外成像材料包括了晶体锗(Ge)、硫化锌(ZnS)、硒化锌(ZnSe)、碲化镉(CdTe)和砷化镓(GaAs)等。这些材料只能采用昂贵费时的单点金刚石车削技术加工高品质成像所需要的非球面或衍射面^[3-4]。昂贵的制备加工成本也限制了此类镜头在车载夜视等民用领域的推广。此外,常规红外材料种类有限,折射率、折射率温度系数、阿贝常数、热膨胀系数等关乎镜头无热化设计要求的光学参数的选择也较为有限,不利于拓展红外成像镜头研发种类的多样性。

近年来,硫系玻璃在红外夜视系统中的应用备

受关注。对比于常规红外材料,硫系玻璃材料不仅制备工艺较为经济,而且可采用高精度模压的方式制备非球面和衍射面,从而有效降低制作高品质红外镜头的时间和经济成本。此外,通过合理的组分优化,也可有针对性地设计制备具有特殊折射率、折射率温度系数、热膨胀系数等光学参数的硫系玻璃,有效拓展红外成像系统的设计自由度。近年来,国内外多公司已经可以提供可用来制备高质量镜片的硫系玻璃,其中包括了美国Amorphous Materials和Lightpath公司、德国Schott公司和法国Umicore公司。国内硫系玻璃生产单位有宁波舜宇红外技术有限公司、宁波大学红外材料及器件实验室、北京国晶辉公司等。

文中展示了一种采用光学被动式无热化设计的长波红外车载成像镜头。此项设计使用硫系玻璃材料 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{60}$ 局部替代常规红外材料,以达到降低系统成本和提升成像品质的目的。这种硫系玻璃材料由美国Lightpath公司以Black Diamond 2(BD2)的牌号进行销售。考虑到加工成本以及成像质量的要求,在易于模压成型的硫系玻璃镜片上引入了一个非球面,以更有效地控制光学像差。整体设计结果实现了一个有效焦距为9 mm,工作波段为8~12 μm ,有效视场角为 $33.26^{\circ}\times 26.28^{\circ}$ 的红外车载镜头。设计结果表明该系统在-40~60 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,在整个工作波段和在整个视场角范围内达到了接近衍射极限的成像质量。由于系统采用了硫系玻璃制备的非球面镜片,与整体采用常规红外材料的类似系统相比,此镜头有望在加工研制成本降低的情况下实现较好的成像质量,有利于民用领域的推广。

1 光学被动式无热化设计基本原理

热成像系统由于在车辆行驶过程中受到外界温度变化的影响,系统包含的各个镜片的曲率、厚度、镜片基质材料以及介质的折射率都将发生变化。镜头壳体的热胀冷缩也将导致系统性能的急剧下降。光学系统无热化设计的目的是为了消除由外界温度变化引起的成像质量的下降。无热化设计主要有主动式和被动式两种方式。主动式无热化设计的基本原理是移动探测器或镜头的某一片透镜来补偿温度离焦。这种方式需要反馈系统和执行机构,增大了系统的体积并降低了系统的可靠性。被动式无热化设计又分为光学无热化式、机械无热化式以及光机

混合式。后两者对机械结构提出了较高要求,通常会使得系统复杂性增加、体积和重量增大,不利于红外车载热成像系统的应用。由光学无热化式设计实现的无热化系统具有设计灵活、结构简单、体积小、成本低等优点,目前已成为红外热成像领域的研究热点。一种典型的光学无热化式设计方法是 Yasuhisa Tamagawa 等人在 1994 年提出的色差/热差系数坐标法^[5]。该方法有效地避免了其它光学系统无热化设计中出现的设计繁琐的问题,提升了设计效率和系统性能,因而被众多研究者所采用。1996 年, Yasuhisa Tamagawa 通过构建分离透镜色差/热差系数坐标系工作做了进一步的改进,实现了分离透镜组的无热化设计^[6]。西南技术物理研究所、西安应用光学研究所、中国航空工业洛阳电光设备研究所等国内科研单位也利用这种方法设计了种类众多的无热化红外镜头^[7-10]。

色差/热差系数坐标法的基本原理是通过合理选择具有特定色差/热差系数的光学材料制备 2 片或多片镜片组,合理设计各片镜片的光焦度及摆放位置,使光学系统在温度变化情况下产生的像面离焦与系统壳体热胀冷缩产生的像面离焦相抵消,从而保证光学系统成像位置以及成像质量的稳定。常规单片透镜的光焦度可描述为:

$$\varphi = \frac{1}{f} = (n-1)(r_1^{-1} - r_2^{-1}) \quad (1)$$

式中: φ 为单透镜光焦度; f 为单透镜系统焦距; r_1 和 r_2 分别为单透镜第一面和第二面的曲率半径; n 为单透镜材料折射率。公式(1)对波长求导可得:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = \left(\frac{\partial n}{\partial \lambda} \cdot \frac{1}{n-1} \right) \cdot \varphi \quad (2)$$

定义消色差系数 ω 为:

$$\omega = \frac{\partial n}{\partial \lambda} \cdot \frac{1}{n-1} \quad (3)$$

将公式(3)代入公式(2)可得到消色差方程:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = \omega \cdot \varphi \quad (4)$$

同理,公式(1)对温度求导并化简得:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = -\frac{\partial f}{\partial T \cdot f^2} = \left(\alpha_s - \frac{1}{n-1} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \right) \cdot \varphi \quad (5)$$

式中: $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为折射率温度系数; $\alpha_s = \frac{\partial r_1}{\partial T \cdot r_1} = \frac{\partial r_2}{\partial T \cdot r_2}$ 为单透镜所用材料的热膨胀系数。

令

$$\theta = \alpha_s - \frac{1}{n-1} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \quad (6)$$

式中: θ 为消热差系数。将公式(6)代入公式(5)消热差:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = \theta \cdot \varphi \quad (7)$$

如果消热差系统由 i 个单透镜组成,则光学被式无热化设计要求满足以下要求。

(1) 光焦度分配满足:

$$\frac{1}{h_1} \sum_i (h_i \cdot \varphi_i) = \varphi \quad (8)$$

(2) 消色差满足:

$$\frac{1}{h_1} \sum_i \left(h_i \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial \lambda} \right) = \frac{1}{h_1} \sum_i (h_i \cdot \omega_i \cdot \varphi_i) = 0 \quad (9)$$

(3) 消热差满足:

$$\frac{1}{h_1} \sum_i \left(h_i \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial T} \right) = \frac{1}{h_1} \sum_i (h_i \cdot \theta_i \cdot \varphi_i) = 0 \quad (10)$$

式中: h_1 为第一近轴光线在第一片镜面的入射高度; h_i 为第一近轴光线在第 i 片镜面的入射高度。如果透镜组为密接型,忽略镜片厚度引起的相邻镜片间高度差异,则近似认为 $h_i = h_1$; φ_i , ω_i , θ_i 分别为第 i 镜片组的光焦度、消色差系数和消热差系数。

以 ω 、 θ 值分别作为一个直角坐标系的 x 轴和 y 轴可制成用来直观衡量各种红外材料色差/热差特性的 ω - θ 图。各种红外材料根据各自 ω 、 θ 值可在 ω - θ 图中标出相应的位置。图 1 标出了几类典型红外材料在 8~12 μm 波段 ω - θ 图中所代表的位置。色差/热差系数法要求在 ω - θ 图中选择三种不同材料进行无热化设计。所选择的三种材料在 ω - θ 图中所代表点可组成一个三角形。称这个三角形为无热化设计三角形。无热化设计三角形面积的大小和形状决定了系统无热化设计的效果和综合成像性能。总体而言,大而直挺的三角形所代表系统的性能优于小而扁平的三角形所代表系统的性能^[5-8]。由图 1 可见, Ge 和 ZnS 代表了两种距离最远的红外材料,因此可以选用这两种材料在 ω - θ 图中位置的连线作为无热化设计三角形的底边。同样从图 1 中可见,硫系玻璃(BD1、BD2、GASIR1、GASIR2)的 ω - θ 值分布区域(图 1 虚线圆圈区域)与常规红外材料 CdTe、GaAs 和 ZnSe 材料的 ω - θ 值分布区域较为接近。假设设计包含三种材料的镜头系统且已选定 Ge 和

ZnS 材料, 第三种材料可选择常规红外材料 CdTe、GaAs、ZnSe 和硫系玻璃材料。根据色差/热差系数坐标法, 三种不同材料的坐标点可以组成三角形。在图 1 中, 笔者标记由 Ge、ZnS 与硫系玻璃 BD2 组成的三角形为 S_1 ; 由 Ge、ZnS 和 GaAs 组成的三角形为 S_2 ; 由 Ge、ZnS 和 ZnSe 的组成的三角形为 S_3 ; 由 Ge、ZnS 和 CdTe 组成的三角形为 S_4 。由图 1 可见, 三角形 S_1 和 S_4 的面积大于三角形 S_2 和 S_3 的面积。这意味着选用由三角形 S_1 和 S_4 所代表的材料进行无热化设计更有利于形成高质量的光学系统。虽然三角形 S_1 和 S_4 具有接近的面积, 但是从图 1 可明显看出三角形 S_4 相对 S_1 呈现出更扁平的形状。根据色差/热差坐标系无热化设计的基本原理, 这意味着对比于三角形 S_1 , 三角形 S_4 所代表的三种材料设计的光学系统需要为每块镜片分配更大的光焦度, 这将导致镜片制备难度的提升以及控制系统其它像差难度的增大^[5-8]。因此选择三角形 S_1 所代表的红外材料进行无热化设计。表 1 给出了所选择红外材料的主要光学/热学性能参数。

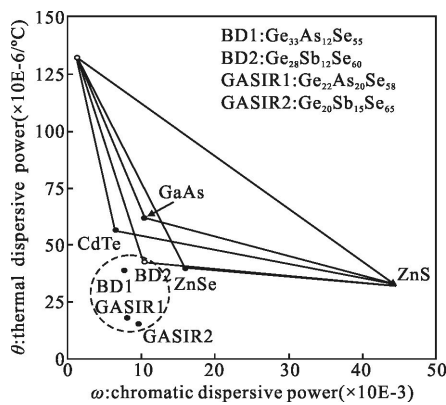


图 1 各类红外材料在 8~12 μm 波段的 $\omega-\theta$ 图

Fig.1 $\omega-\theta$ chart of typical infrared materials in the 8-12 μm spectral band

表 1 所选用红外材料的主要性能参数

Tab.1 Properties of infrared materials selected for the proposed lens

Material	$n(10.0 \mu\text{m})$	$\alpha_g(10^{-6}/\text{K})$	$dn/dt(10^{-6}/\text{K})$
Ge	4.003 2	5.80	400
BD2	2.602 3	14.00	91
ZnS	2.198 6	6.60	43

2 镜头设计

2.1 主要技术指标

文中的红外车载成像系统配合市场上通用的像素规格为 324×256 的红外探测器, 像元尺寸为 $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$ 。为了满足车载镜头体积小、视场大、性能好和结构简单的要求, 确定系统的主要技术指标如表 2 所示。

表 2 系统设计参数

Tab.2 System design parameters

Optical parameter	Value
Effective focal length/mm	9
Work wavelength/ μm	8-12
F number	1.3
Detector specifications	324×256
Pixel size/ μm	17×17
Temperature range/ $^{\circ}\text{C}$	-40-60
FOV/ $H^{\circ} \times V^{\circ}$	33.26×26.28
Working length/mm	≤ 10
Lens number	4

2.2 初始光学设计

红外车载成像系统的无热化设计需满足 3 个方程, 即光焦度的分配关系公式(8), 补偿像面离焦的消色差条件公式(9)及消热差条件公式(10)。通过解 3 个方程可以得到系统各个镜片的光焦度分配以及镜片相对位置。考虑到硫系玻璃的机械强度较弱, 不适宜用作光学系统的第 1 片镜片, 因此选定由 Ge 材料制备系统的第 1 片镜片。初步确定四块镜片顺序为 Ge、BD2、ZnS、BD2。设定第一近轴光线在每个镜片的入射高度分别为 $h_1, 1.2h_1, h_1, 1.2h_1$, 将参数代入公式 (8)、(9)、(10) 并解方程组可获得系统的初始设计结构如图 2 所示。在图 2 中, 非制冷焦平面前安装

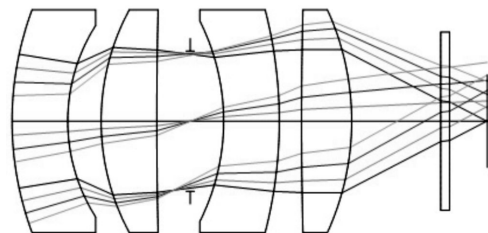


图 2 光学系统的初始设计图

Fig.2 Layout of the original optical design

了1片薄光学平板(材料:Ge,厚度:0.4 mm)以保护探测器阵列不受外界灰尘的污染。镜筒材料选用铝,其线膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6}/K$ 。

2.3 设计优化及性能分析

根据上述的初始结构,利用光学设计软件ZEMAX进行光学系统的性能优化。首先,设定优化函数使得系统能在常温下形成高质量的热图像。其次,利用ZEMAX软件的环境分析功能建立多重结构,优化在-40~60℃的温度区间光学系统的成像质量,并要求系统在此温度区间内的离焦量始终小于系统焦深。设计过程中,考虑到矫正像差的需要,第四透镜(硫系玻璃镜片)的前表面设计为非球面。其中,非球面二次曲面系数 $k=0, a_4=-4.1 \times 10^{-4}, a_6=4.1 \times 10^{-6}, a_8=-8.8 \times 10^{-8}$,完全可以满足精密模压的要求。优化后得到的光学系统如图3所示。

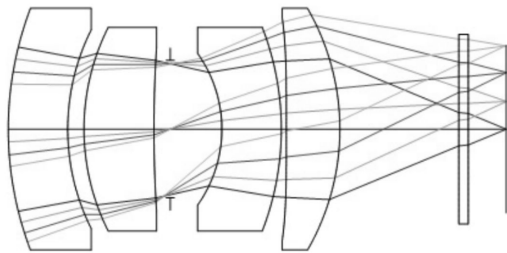


图3 光学系统的外形结构图
Fig.3 Layout of the optimized system

优化后系统总长度为20.9 mm,后焦距长度为7.0 mm,可以满足装调的需要。另外该系统像高为7.0 mm,恰好匹配探测器阵列的规格。

对于系统离焦量的考虑,此镜头在中心波长 $10 \mu m$ 的焦深为 $\delta_{10 \mu m} = \pm 2 \lambda_{10 \mu m} (f/\#)^2 = \pm 33.8 \mu m$ 。表3列出镜头优化后在-40℃、20℃和60℃时的总长度和离焦量。由表3可知,在-40~60℃的温度范围内,温度变化产生的离焦量均小于系统焦深。

表3 光学系统离焦量

Tab.3 Defocuses of the optimized lens at different temperatures

Temperature/℃	Length/mm	Defocus/ μm	Depth of focus/ μm
-40 minimum	20.910 87	-21.14	± 33.8
20 standard	20.932 01	0	± 33.8
60 maximum	20.946 10	14.09	± 33.8

表4展示了1个点物体发出的光由各个视场角入射系统时形成的弥散斑的均方根半径。由表4可见,在温度为-40℃、20℃和60℃时,系统所有视场的均方根弥散斑大小均满足 $17 \mu m \times 17 \mu m$ 的像元尺寸。

表4 系统弥散斑半径

Tab.4 RMS radius of the system

Temperature/℃	FOV/H°×V°	RMS radius/ μm
-40	0	8.272
	11.64×9.20	7.844
	23.28×18.40	7.891
	33.26×26.28	8.482
20	0	3.437
	11.64×9.20	3.543
	23.28×18.40	5.295
	33.26×26.28	6.939
60	0	3.723
	11.64×9.20	4.270
	23.28×18.40	6.250
	33.26×26.28	7.720

光学系统在-40℃、20℃和60℃,最佳像面-后截距为7.0 mm时的MTF曲线如图4~6所示。由图可以看出,在3个不同温度点各角度处系统的MTF曲线没有明显的下降,在截止频率20 lp/mm时,调制度均大于0.5,接近衍射极限值。

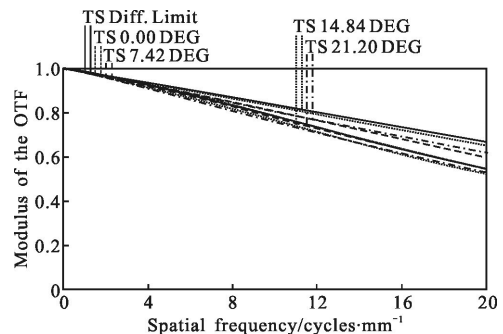


图4 系统在-40℃时系统MTF

Fig.4 MTF of the system at -40℃

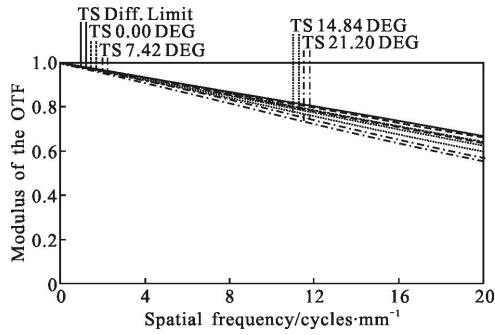


图 5 系统在 20 °C 时系统 MTF

Fig.5 MTF of the system at 20 °C

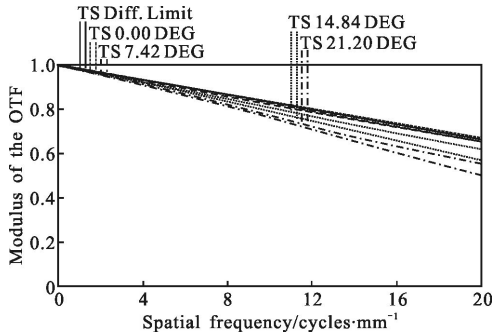


图 6 系统在 60 °C 时系统 MTF

Fig.6 MTF of the system at 60 °C

图 7~9 分别展示了光学系统在温度为 -40 °C、20 °C 和 60 °C 时的垂轴像差。可以看出,系统在不同温度点时垂轴像差起伏不大且各波长吻合较好。图 7~9 的最大垂轴像差分别为 33.62 μm、22.9 μm 和 20.29 μm。系统在各个视场角无热化温度范围内都较好地校正了热差和色差,满足成像条件。

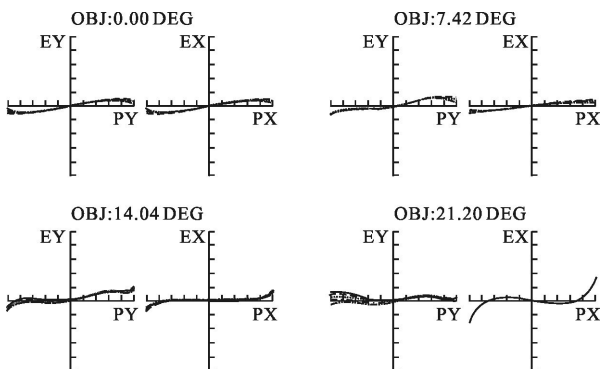


图 7 系统在 -40 °C 时垂轴像差曲线

Fig.7 Transverse ray fan plot at -40 °C

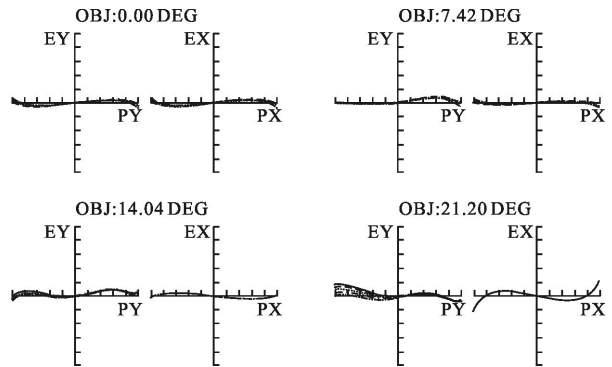


图 8 系统在 20 °C 时垂轴像差曲线

Fig.8 Transverse ray fan plot at 20 °C

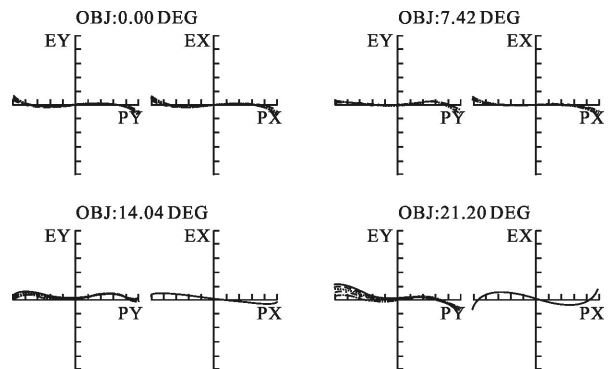


图 9 系统在 60 °C 时垂轴像差曲线

Fig.9 Transverse ray fan plot at 60 °C

3 结论

验证了局部使用硫系玻璃替代常规红外材料制备长波红外车载成像镜头的可能性,从而为降低该类镜头在制备过程中所需的经济成本和技术难度提供了一种有益思路。采用光学被动式无热化的设计方案,根据各类红外材料的色差系数、热差系数的特点,有针对性地选择了硫系玻璃 $Ge_{23}Sb_{12}Se_{60}$ 与常规红外材料 Ge、ZnS 结合,设计了工作在 8~12 μm 波段的无热化红外车载成像镜头。利用了硫系玻璃易于模压成型的优点,在硫系玻璃镜片中设计了一处非球面,以更好地控制系统像差。系统整体设计结构简单、体积小、像质佳。仅使用了 4 片镜片(包括了 2 片硫系玻璃镜片,1 片 Ge 镜片,1 片 ZnS 镜片),满足了在 -40~60 °C 范围内和在 33.26°×26.28° 的视场范围内均可保持良好的成像质量的镜头设计要求,符合民用红外车载镜头的使用要求。

参考文献:

- [1] Wang Yuanfangzhou, Shi Xiaoguang, Bai Yuzhuo, et al. Statuses and trends on night vision enhancement systems [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(8): 490–495. (in Chinese)
王远方舟, 石晓光, 白玉琢, 等. 民用车载视觉增强系统发展现状[J]. 红外技术, 2012, 34(8): 490–495.
- [2] Meng Qingchao, Pan Guoqing, Zhang Yunqiang, et al. Design of athermalizing infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 723–727. (in Chinese)
孟庆超, 潘国庆, 张运强, 等. 红外光学系统的无热化设计[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 723–727.
- [3] Chen Guorong, Zhang Xianghua. Development of fine molded chalcogenide glasses for IR night version [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 1(1): 3–7. (in Chinese)
陈国荣, 章向华. 红外夜视仪用精密模压硫系玻璃研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2004, 1(1): 3–7.
- [4] Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, et al. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 847–852. (in Chinese)
戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 847–852.
- [5] Yasuhisa Tamagawa, Satoshi Wakabayashi, Tajime T, et al. Multilens system design with an athermal char[J]. *Appl Opt*, 1994, 33(34): 8009–8013.
- [6] Yasuhisa Tamagawa, Toru Tajime. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Opt Eng*, 1996, 35(10): 3001–3006.
- [7] Zhao Yan, Deng Jian, Yu Dezhi, et al. Design of dual field-of-view optical system in long wave infrared with optical passive athermalization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1545–1548. (in Chinese)
赵延, 邓健, 于德志, 等. 光学被动消热差的长波红外双视场光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1545–1548.
- [8] Wang Xuexin, Jiao Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(1): 129–133. (in Chinese)
王学新, 焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 129–133.
- [9] Shen Biyun, Gao Ming. Passive optical athermalization design for infrared optical system [J]. *Electronics Optic & Control*, 2012, 19(6): 70–73. (in Chinese)
申碧云, 高明. 红外光学系统被动式无热化设计方法[J]. 电光与控制, 2012, 19(6): 70–73.
- [10] Zhang Xin, Jia Hongguang. Optical design of infrared athermalized objective with large relative aperture [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 374–379. (in Chinese)
张鑫, 贾宏光. 大相对孔径红外消热差物镜设计 [J]. 中国光学, 2011, 4(4): 374–379.