

折反射中波红外探测无热化成像系统设计分析

白 瑜^{1,2,3}, 廖志远¹, 李 华¹, 程习敏^{1,3}, 邢廷文¹, 蒋亚东²

- (1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
2. 中国电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 系统研究分析了红外光学系统中各个光学参数随温度变化的影响情况, 根据红外硫系光学材料折射率温度系数较小的特点, 并结合折反射结构良好的消热差特性, 应用 Code-v 光学设计软件设计了一种折反式中波红外探测无热化成像系统, 系统工作波段为 3.7~4.8 μm , 焦距为 109.7 mm, 全视场角为 6.4°, $F/\#$ 为 2.0, 满足 100% 冷光阑效率, 采用锗、硫化锌和硫系玻璃 AMTIR1 三种红外材料, 设计结果表明, 该系统在低温 -40 °C、高温 60 °C 时的成像质量和常温 20 °C 的成像质量变化不大, 取得了良好的成像性能, 可匹配像元尺寸为 30 μm , 像元数 320×256 的凝视型焦平面阵列中波红外探测器。

关键词: 红外探测; 中波红外; 应用光学

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0407-06

Design and analyse on catadioptric MWIR athermal imaging system

Bai Yu^{1,2,3}, Liao Zhiyuan¹, Li Hua¹, Cheng Ximin^{1,3}, Xing Tingwen¹, Jiang Yadong²

- (1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Institute of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The temperature influence of each parameter in infrared detection imaging system was analyzed in the paper. Benefitting from infrared chalcogenide glasses less index temperature coefficient and catadioptric configuration excellent thermalization performance, a catadioptric MWIR detection thermalization imaging system by Code-v optical design software was presented. The working wavelength is 3.7~4.8 μm , effective focal length is 109.7 mm, field of view was 6.4°, $F/\#$ is 2.0 and cold shield efficiency was 100%. The design results indicate that the image quality in -40 °C and 60 °C have little changed, which compared with in 20 °C. The system is compatible with staring focal plane array MWIR detector which has a format of 320×256 and the pixel pitch of 30 μm .

Key words: infrared detection; MWIR; applied optics

收稿日期: 2014-06-12; 修订日期: 2014-07-27

基金项目: 国家 863 计划

作者简介: 白瑜(1982-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事红外探测总体设计, 光电信息处理等方面的研究。Email: baiyu91258@163.com

导师简介: 邢廷文(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间目标探测技术等方面的研究。Email: xtw@ioe.ac.cn

蒋亚东(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信息处理等方面的研究。Email: jiangyd@uestc.edu.cn

0 引言

与可见光探测系统相比,红外探测系统是通过探测目标的红外辐射特性对目标进行探测与识别,具有被动探测、隐蔽性强、抗干扰性强、可实现全天候探测搜索等优点,同时在烟、雾、雪、霾、风沙等能见度差的不良气象条件下可穿透上述气象的限制,对目标进行识别探测,因此广泛应用于航空吊舱、光电经纬仪、天文观测、红外搜救、警戒、安防、消防员头盔显示仪、空间探测等领域。

与可见光光学玻璃相比,红外光学玻璃的折射率温度系数 dn/dT 都较大,光学系统中的光学元件的曲率半径、玻璃厚度、非球面系数、光学材料的折射率,以及光学元件的元件间隔等参数都会随着环境温度的改变而改变,红外探测器的光敏面也发生了漂移,导致红外探测成像系统的像面离焦,系统的探测性能急剧下降,因此红外探测成像系统的无热化是红外探测系统研制的关键技术之一,目前报道文献中多采用衍射光学元件实现无热化^[1-6],在红外探测系统中引入适当数量的衍射光学元件和折射器件组成折/射混合系统来实现无热化,但考虑到实际工程应用中衍射器件的衍射效率不高,除主衍射级次的出射光为有效光外,其他衍射级次的出射光都为杂散光,杂散光进入红外探测器会降低红外探测系统的对比度、信噪比,影响红外探测成像系统的探测性能,且衍射面不易加工、检测,不利于实际工程应用的批量化生产。

随着新型红外光学材料的长足发展,为红外探测成像系统的实现良好的无热化性能提供了新的契机,该文在系统研究分析红外成像光学系统中各个光学参数随温度变化的影响情况的基础上,基于红外硫系光学玻璃折射率温度系数较小的特点并结合折反射结构良好的消热差特性,设计了一种折反式中波红外探测无热化成像系统,给出了具体的设计参数、设计思路和设计结果,结果表明,将硫系红外光学材料和折反射结构有效结合,合理匹配其他红外光学材料,可大幅提升红外探测系统的消热差性能。

1 理论分析

红外光学玻璃的折射率温度系数 dn/dT 都较

大,当系统工作温度改变时,光学器件的曲率半径、玻璃厚度、元件间隔、光学面型中的非球面系数、玻璃折射率等参数都会随温度变化而变化,导致红外光学系统像面的离焦量超过系统焦深,系统无法正常使用。

表 1 给出了温度 $T^{\circ}\text{C}$ 时各个参数随温度变化的关系,其中 $R(T)$ 、 $T_G(T)$ 、 $D(T)$ 、 $T_i(T)$ 、 $n(T)$ 分别为温度 $T^{\circ}\text{C}$ 时曲率半径、玻璃厚度、通光孔径、空气间隔、玻璃折射率, $K(T)$ 、 $A(T)$ 、 $B(T)$ 、 $C(T)$ 、 $D(T)$ 、 $E(T)$ 为温度 $T^{\circ}\text{C}$ 时的非球面系数, $R(20)$ 、 $T_G(20)$ 、 $D(20)$ 、 $T_i(20)$ 、 $n(20)$ 分别为常温 20°C 时曲率半径、玻璃厚度、通光孔径、空气间隔、玻璃折射率, $K(20)$ 、 $A(20)$ 、 $B(20)$ 、 $C(20)$ 、 $D(20)$ 、 $E(20)$ 为常温 20°C 时非球面的各项系数, α_g 、 α_m 、 n_λ 分别为光学材料的线膨胀系数、机械材料的线膨胀系数、光学材料在波长 λ 处的折射率。

表 1 温度 $T^{\circ}\text{C}$ 时各个参数的计算公式

Tab.1 Formula of each parameter in $T^{\circ}\text{C}$

Number	Parameter	Formula
1	Radius	$R(T)=R(20) \cdot [1+\alpha_g \cdot (T-20)]$
2	Glass thickness	$T_G(T)=T_G(20) \cdot [1+\alpha_g \cdot (T-20)]$
3	Aperture	$D(T)=D(20) \cdot [1+\alpha_g \cdot (T-20)]$
4	Air thickness	$T_i(T)=T_i(20) \cdot [1+\alpha_m \cdot (T-20)]$
5	Glass index	$n(T)=n_\lambda+(dn/dT) \cdot (T-20)$
6	Conic	$K(T)=K(20)$
7	4th order coefficient	$A(T)=A(20)/[1+\alpha_g \cdot (T-20)]^3$
8	6th order coefficient	$B(T)=B(20)/[1+\alpha_g \cdot (T-20)]^5$
9	8th order coefficient	$C(T)=C(20)/[1+\alpha_g \cdot (T-20)]^7$
10	10th order coefficient	$D(T)=D(20)/[1+\alpha_g \cdot (T-20)]^9$
11	12th order coefficient	$E(T)=E(20)/[1+\alpha_g \cdot (T-20)]^{11}$

根据表 1 可知,温度变化时,各个参数中,非球面的系数 K 值是唯一不发生改变的参数,除非球面系数 K 、 A 、 B 、 C 、 D 、 E 外,曲率半径、玻璃厚度、通光孔径、空气间隔、玻璃折射率随温度均为线性变化。

由于光学材料的折射率和工作波长有关,光学设计时一般选取三个有代表性的波长来进行优化设计和像质评价,因此实际工程使用时,应选取三个有代表性的波长,分别计算系统中使用到的光学材料在该三个波长处的折射率,利用 Code-v 软件中的 prv 命令模块进行相应的编程来自定义玻璃。

此外,红外探测器光敏面随温度变化而产生的漂移也是必须要考虑的因素,红外探测器一般由保护窗口、滤光片、探测器底座、仓体、光敏面等部件组

成,随着温度的变化,探测器底座、仓体等部件都会发生相应的膨胀,且各个部件的机械材料一般都不一样,因此温度变化会造成红外探测器光敏面有一定的漂移,为了真实的仿真分析红外探测成像系统的热性能,必须把红外探测器光敏面有一定的漂移。

红外探测成像系统的无热化设计核心就是要控制像面离焦量在一倍焦深之内,若系统的离焦量超过一倍焦深,系统探测成像性能变差。

红外光学材料数量很有限,如实际工程上可用于中波红外波段的常用红外光学材料仅有 Ge、Si、ZnSe、ZnS、MgF₂、CaF₂,可用于长波红外波段的常用红外光学材料仅有 Ge、ZnSe、ZnS,表2给出了常用红外光学材料的线膨胀系数和折射率温度系数。

表2 常用红外玻璃的线膨胀系数和折射率温度系数

Tab.2 Linear expansion coefficient and index temperature coefficient of infrared glass

Glass	Linear expansion coefficient	Index temperature coefficient
Ge	5.8×10^{-6}	3.96×10^{-4}
ZnSe	7.5×10^{-6}	6.3×10^{-5}
ZnS	6.7×10^{-6}	4.3×10^{-5}
MgF ₂	1.4×10^{-5}	2.6×10^{-5}
Si	3.9×10^{-6}	1.59×10^{-4}

硫系玻璃是一种以硫族元素 S、Se 和 Te 为主,同时混合含有 Ge、Si、As、Sb 等一定量的其它类金属元素的一种新型的红外光学材料^[7],与常用红外光学材料锗相比,新型硫系玻璃具有较小的折射率温度系数,锗的温度折射率系数为 $3.96 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$,而硫系玻璃 AMTIR 的温度折射率系数为 $7.7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,因此,新型硫系玻璃可作为优良的消热差红外材料应用于红外探测成像系统实现消热差。

由于硫系玻璃中锗含量较少,因此和价格昂贵的锗相比,具有价格上的优势,更适用于低成本、批量化的红外探测成像系统的制造。在长波红外探测波段,ZnS 的透过率不高,ZnSe 的价格昂贵,而硫系玻璃的色散特性在长波红外探测波段与 ZnSe 相近,因此可利用硫系玻璃和锗配合实现长波红外探测波段消色差。

综上所述,硫系玻璃 AMTIR 具有成本低、更小的折射率温度系数、可模压成型、色散特性在长波红外探测波段与 ZnSe 相近等诸多优点,对于红外探测

系统的消热差、消色差、批量化生产具有很好的应用前景。

2 主要技术指标

根据红外相机的研制要求,红外镜头的主要设计指标如下。

- (1)光谱范围:3.7~4.8 mm;
- (2)焦距 f' :109.7 mm;
- (2)相对孔距 D/f' :1/2;
- (3)对角线视场角:6.4°;
- (4)总长:小于 100 mm
- (5)探测器阵列:320×256;
- (6)像元大小:30 μm×30 μm;
- (7)环境温度:-40~60 °C。

3 设计分析与设计结果

目前主要的无热化设计方法有光学被动式、机械被动式、机械主动式三种方法。光学被动式方法是巧妙的匹配合适的光学材料和合适的机械材料,并巧妙分配各个元件的光焦度,使得像面离焦量在一倍焦深之内,不同于机械主动式和机械被动式方法,该方法无需引入额外的调节装置,因此其结构简单、重量轻,因此文中选用光学被动式方法实现无热化。

红外光学结构形式包含折射式、反射式、折反射三种,反射式结构没有色差,同时其加工、装配公差较紧,不利于大批量化制造。折射式结构结构宽松,对于文中的焦距 109.7 mm,视场角 6.4°的红外镜头,实现难度不大,但折射式结构长度难以作短,且片数较多,口径较大,导致成本增加。折反射结构集折射式和反射式于一体,系统中既有折射元件,又有反射元件,该类系统由反射元件承担系统大部分光焦度,折射元件用于校正轴外像差,反射元件和其间镜筒选用同一种机械材料时,温度改变时,镜筒和反射元件同时热胀或同时冷缩,此时反射元件和其间镜筒引起的光学像面漂移量为 0,而折反射结构中大部分光焦度由反射元件承担,因此因光学元件参数变化引起的光学像面漂移仅由折射元件引起,有效减小了无热化的实现难度,因此文中采用折反射结构作为光学被动无热化的光学结构。

假设系统由 j 个光学元件组成,光学被动式无热化方法设计时,系统须同时满足光焦度、消色差、消热差三个方程。总光焦度分配须满足:

$$\sum_{i=1}^j h_i \phi_i = \phi \quad (1)$$

$$\Delta f = (1/h_1 \phi)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 \omega_i \phi_i = 0 \quad (2)$$

$$d_f/dt = (1/h_1 \phi)^2 \sum_{i=1}^j (h_i^2 x_i \phi_i) = \alpha_h L \quad (3)$$

式中: ϕ 为总光焦度; ϕ_i 为第 i 个光学元件的光焦度; h_i 为第一近轴光线在第 i 个光学元件入射面的径向高度; Δf 为轴向色差; ω_i 为第 i 个光学元件的色散因子; x_i 为热膨胀系数; α_h 为镜筒的线膨胀系数; L 为机械件的长度。

光学被动式无热化的设计思路将系统等效视为变焦系统,将常温、低温、高温视为变焦系统的短焦、中焦、长焦,首先根据系统的技术指标设计出常温下满足要求的镜头,然后依据表 1 温度 T °C 时各个参数的计算公式,建立高温、低温时和常温时光学元件的曲率半径、厚度、元件间隔、非球面系数、折射率的数学关系,利用 Code-v 软件中的 zoom 模块建立高温、低温时和常温时各个参数的关联关系。

此外,根据第 1 节的分析可知,温度变化时红外探测器的光敏面也会有一定的漂移,经过计算可知,红外探测器 -40 °C 时光敏面漂移量为 -0.152 4 mm, 60 °C 时光敏面漂移量为 0.101 6 mm,无热化分析时必须高低温时必须把红外探测器光敏面的漂移量考虑在内。

选定系统主镜、次镜材料为铝合金,镜筒和隔圈等机械材料也选用铝合金,校正镜先按照 3 片设计,材料分别选用锗玻璃、硫化锌玻璃和硫系玻璃 AMTIR,根据光学系统的指标要求,通过公式(1)~(3)求解得到各个元件的光焦度,计算得到主镜、次镜、校正镜组的光焦度分别为 0.51、0.28、0.21,主镜为系统中口径最大的光学元件,其面型精度直接决定着系统成像质量的好坏,为了保证高精度的反射面面型,有效降低制造成本,减小光学镜片的加工、检测和装调难度,主镜采用抛物面。

编写自定义优化程序,对系统进行初步优化,起初校正镜中锗的光焦度分配较多,低温和高温的像质下降较多,尝试将校正镜中锗的部分光焦度转移

到硫化锌玻璃和硫系玻璃 AMTIR,低温和高温的性能还是无法满足要求,最后在系统中增加了一片低折射率温度系数的硫系玻璃 AMTIR,有效分担了其他校正镜校正轴外像差的压力,也未引入太多的热像差。利用 Code-v 光学设计软件对系统进行反复多次优化设计,保证高低温时像面离焦量在一倍焦深之内,最终高低温时像面离焦量为 0.014 9 mm,而该系统焦深为 0.033 6 mm,高低温时像面离焦量在一倍焦深之内,光学系统可用。

折反射中波红外探测无热化成像系统结构图如图 1 所示,系统结构紧凑,红外探测无热化成像系统筒长为 92 mm,为满足 100%冷光阑效率,系统光阑须与制冷型红外探测器的冷光阑重合,为节省制造成本减小主反射镜通光口径并满足冷屏匹配,通过反射系统后成一次像面,再经校正镜组成像到红外探测器靶面上,根据经验,校正镜组的放大倍率控制在 $-1 \times \sim -2 \times$ 区间对于像差校正最为有利。

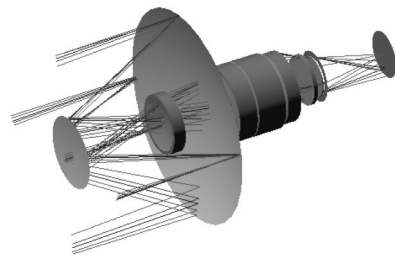


图 1 光学系统结构图

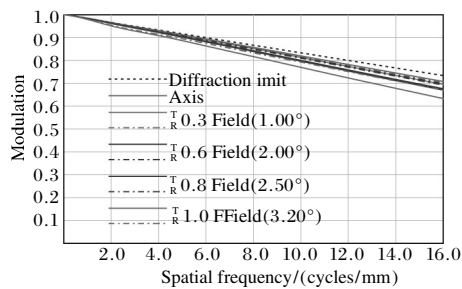
Fig.1 Schematic of system structure

4 像质评价

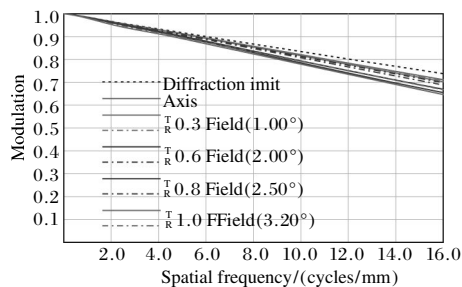
4.1 传递函数和能量集中度

传递函数是红外探测成像系统重要的综合评价指标,图 2(a)、(b)、(c)分别为该系统在 20 °C、-40 °C、60 °C 温度时的调制传递函数曲线 Modulation Transfer Function(MTF),可知在探测器奈斯特频率 16 lp/mm 时,20 °C、-40 °C、60 °C 的 MTF 均接近衍射极限,常温和高低温时性能良好。

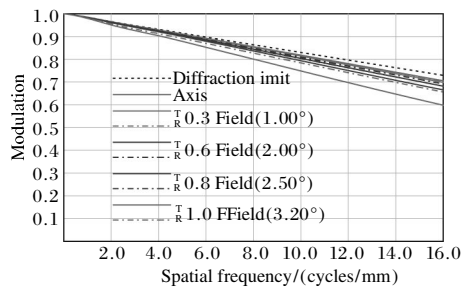
能量集中度是红外探测成像系统重要的评价指标,它综合了衍射和几何像差对系统的影响,反映了红外成像系统能量集中的情况,图 3 为该系统 20 °C、-40 °C、60 °C 温度时能量集中度曲线,由图可知,



(a) 20 °C



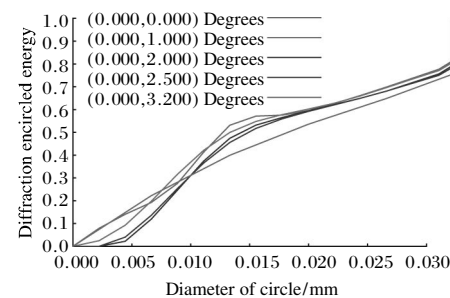
(b) -40 °C



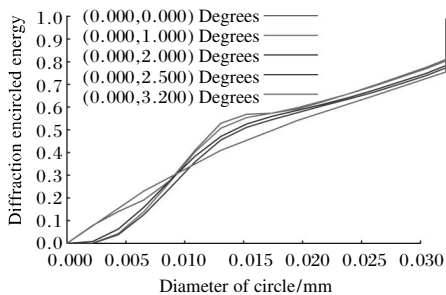
(c) 60 °C

图2 传递函数曲线

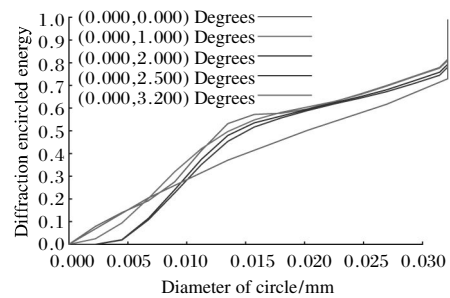
Fig.2 MTF curves



(a) 20 °C



(b) -40 °C



(c) 60 °C

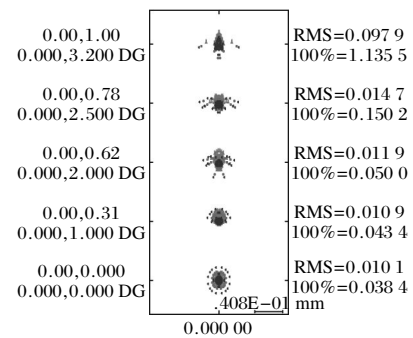
图3 能量集中度曲线

Fig.3 Encircled energy curves

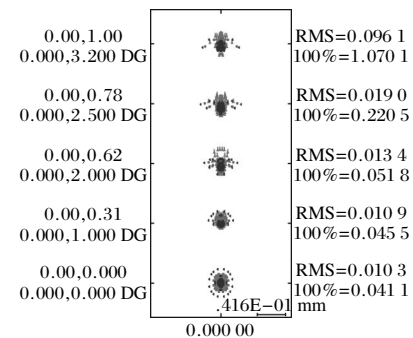
20 °C、-40 °C、60 °C不同温度时的 60%能量集中度处的最大弥散斑直径分别为 23.1 mm、23.7 mm、25.9 mm,都集中在探测器一个像元内,系统具有良好的消热差特性。

4.2 点列图

利用点列图中点的密集程度来评价光学系统的成像性能。系统 20 °C、-40 °C、60 °C不同温度时的点列图如图 4 所示,根据图 4 可知,系统 20 °C、-40 °C、60 °C不同温度时各个视场的最大弥散斑直径的均方根值分别为 14.7 mm、15.1 mm、15.4 mm,都小于 30 μm,在探测器的一个像元内,成像质量良好。



(a) 20 °C



(b) -40 °C

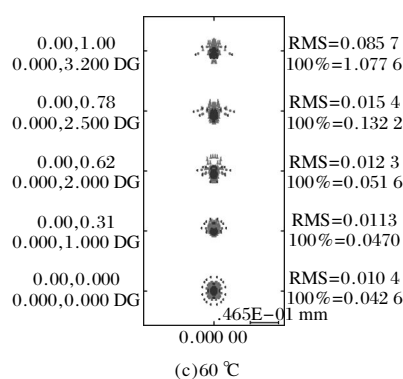


图 4 点列图

Fig.4 Spot diagram

5 结 论

无热化设计是红外相机研制过程中的关键技术,如何能保证红外探测成像技术能在更短、更小的尺寸下有良好的成像质量,是工程应用领域研究热点。文中基于硫系红外光学材料小折射率温度系数的特性并结合折反式结构紧凑、良好的消热差特性,设计了一种折反式中波红外探测无热化成像系统,系统焦距为 109.7 mm,全视场角为 6.4°, $F/\#$ 为 2.0,满足 100%冷光阑效率,设计结果表明,在各个温度时都具有较好的成像质量,验证了文中所述方法的正确性。硫系玻璃 AMTIR1 具有成本低、更小的折射率温度系数、可模压成型、色散特性在长波红外探测波段与 ZnSe 相近等诸多优点,对于红外探测系统的消热差、消色差、批量化生产具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] Sun Jinxia, Lliu Jiangzhuo, Sun Qiang. Athermal design for hybrid refractive/ diffractive conformal optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18 (4): 792–798. (in Chinese)
- [2] Meng Jianqi. Dual field zoom 6x infrared imaging optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (1): 89–92. (in Chinese)
- [3] Muhammad Nadeem Akram. Design of a dual field-of-view optical system for infrared focal-plane arrays [C]//SPIE, 2002, 4768: 10–21.
- [4] Ming Jinqian, Jin Ning, Guo Lan. An Athermal design of infrared hybrid refractive/diffractive optical system in 7.5 ~ 10.5 μm spectrum [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28 (5): 261–266. (in Chinese)
- [5] Shen Liangji, Feng Zhuoxiang. Athermal design of refractive diffractive hybrid infrared optical system working at 3.7 ~ 4.8 μm [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30 (4): 683–685. (in Chinese)
- [6] Liu Feng, Sai Jiangang, Zhao Jianke. Athermalization design of 8–12 μm infrared hybrid refractive/reflective/diffractive lenses for tank scan [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2459–2463. (in Chinese)
- [7] Shi Guangwei, Zhang Xin, Wang Linjie. Application of the new chalcogenide glass in design of low cost thermal imaging systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 615–620. (in Chinese)