

## 摄远型红外 8~12 μm 波段消热差物镜设计

高铎瑞<sup>1,2</sup>, 付强<sup>1</sup>, 赵昭<sup>2</sup>, 钟刘军<sup>2</sup>

- (1. 长春理工大学 空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022;  
2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**介绍了一种摄远型长波红外消热差物镜的设计方法。将摄远物镜模型与消热差模型相结合, 推导出之间的光焦度分配关系, 并将二者统一起来, 直接得到摄远型消热差物镜的光焦度分配关系式。首先, 根据摄远物镜的设计方法进行物镜的设计, 在满足远摄比的情况下结合像差理论合理选择最优的前组和后组光焦度解; 然后采用光学被动消热差方法, 进行消热差设计, 选择材料组合, 分配组元内部各透镜的光焦度; 最后利用计算机辅助软件进行像差校正。为了验证该方案的可行性, 设计了一个工作于 8~12 μm, 焦距 100 mm, F 数为 2.0, 全视场角为 6°, 远摄比达到 0.8 的长波红外消热差光学系统。在 -40~60 °C 温度范围内, 成像质量稳定, 调制传递函数(MTF)接近衍射极限, 并且体积小、结构简单, 质量轻。所设计系统优化后的光焦度分配值和初始计算值非常接近。

**关键词:** 光学设计; 摄远型物镜; 红外光学系统; 消热差; 光焦度分配

中图分类号: TN216 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)11-3837-06

## Athermalized telephoto objective design for 8-12 μm infrared wavelength

Gao Duorui<sup>1,2</sup>, Fu Qiang<sup>1</sup>, Zhao Zhao<sup>2</sup>, Zhong Liujun<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Space-Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)  
2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A method of athermal infrared telephoto objective was introduced in this paper. Telephoto lens model was combined with athermal model to find out and unify the relationship of focal power distribution. First, distribute the optical power of the fore group and the rear group on the basis of the principle of telephoto objective, choose the reasonable solution of the optical power of the two groups; then choose the appropriate material and distribute the optical power within each group to realize the ability of athermalization, finally computer-aided software was used to correct aberration. In order to prove the feasibility of the scheme, an athermal optical system was designed which works at 8-12 μm, the focal length of 100 mm, F number is 2, and total length of the telephoto objective is 80 mm. The environment temperature analysis shows that the optical system has stable imaging quality, MTF is close

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(60677009); 国防重点基础科研项目

作者简介: 高铎瑞(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光学系统设计及激光大气传输特性方面的研究。Email: gaoduorui@126.com

导师简介: 姜会林(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学系统设计、激光通信技术等方面的研究。

Email: HLJiang@public.cc.lj.cn

to diffraction limit, the optical system has the character of small volume, simple structure and light. The optical power of optimized results were near the calculated results.

Key words: optical design; telephoto objective; infrared optical system; athermalization; distribution of optical power

## 0 引言

红外偏振成像探测技术已成为穿透雾霾、凸显目标、识别真伪的新探测手段,具有可增加雾霾、烟尘中的作用距离的优势。与传统红外热成像相比,红外偏振成像技术最显著的特点就是可以将目标与背景很轻松的加以鉴别。由于红外材料的折射率温度系数很大,温度变化使红外光学系统产生严重的热离焦,因而进行被动消热差设计非常有必要<sup>[1-3]</sup>。目前常规的光学消热差主要根据材料之间的热性能差异,通过不同材料的合理组合来进行温度补偿设计<sup>[4]</sup>;最新的则是引入衍射光学元件(DOE)构成折/衍射混合系统,运用衍射元件独特的温度特性(其光热膨胀系数始终为正值),用更简单的结构实现消热差<sup>[5-6]</sup>。在这些设计中消热差往往使物镜的总长增加,总长大于焦距,不利于系统向紧凑、轻小型方向发展。而采用远距型的摄远物镜可大大减小光学系统的体积,使总长与焦距之比小于 1,结构紧凑、质量轻<sup>[7]</sup>。

文中将摄远系统与消热差模型相结合,分析了一种摄远型红外长波消热差物镜的设计方法。推导出它们之间的光焦度分配关系,并将二者统一起来,直接得到摄远型消热差物镜的光焦度分配关系式。为了验证该方法的可行性,设计了一款远摄比 0.8,温度补偿范围为 -40~60℃ 的红外长波消热差摄远物镜。

## 1 设计原理

### 1.1 摄远型物镜设计原理

摄远物镜结构采取正负光焦度分离的形式,正光焦度透镜组在前,负光焦度透镜组在后。光线经前组收敛再经后组发散,使得主面位置向前移出光学系统之外,光学系统总长度小于焦距,从而缩小了物镜的结构长度<sup>[8]</sup>。前组主要是对目标生成实像,后组的作用就是放大其焦距,广泛应用于紧凑结构的长焦距系统中<sup>[9]</sup>。

摄远物镜的设计,首先要确定前后组的焦距和两透镜之间的间隔。所以先进行前组和后组的光焦度和间隔的计算。摄远物镜的高斯光学如图 1 所示。

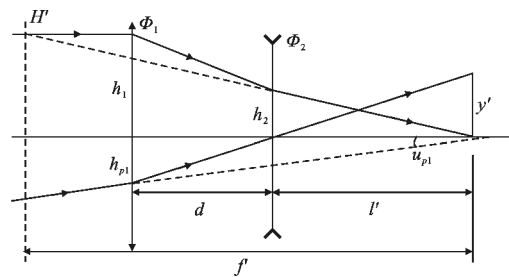


图 1 摄远物镜高斯光学

Fig.1 Gaussian optics of telephoto objective

摄远型光学系统的远摄比定义为光学总长与焦距的比值,远摄比是摄远物镜的重要指标。规划条件下,摄远物镜焦距  $f'=1$ ,  $h_1=1$ , 设定光阑在后组上,则  $h_{p2}=0$ , 令  $u_{p1}=-1$ , 则  $j=-h_1 u_{p1}=1$ 。可以得到:

$$k = \frac{L}{f'} = \frac{d+l_2'}{f'} = 1+d(1-\Phi_1) \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \frac{1-\Phi_1}{1-d\Phi_1} \quad (2)$$

式中:  $k$  为系统的远摄比;  $f'$  为系统总焦距;  $L$  为系统总长度;  $d$  为前组与后组间隔;  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  分别是前组和后组光焦度。

通常以前后两组之间的距离  $d$  作为变数,在远摄比确定后,求出前组和后组的光焦度  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$ 。但是,在远摄比确定后,也就是系统总长度  $L$  确定后,  $d$  的变化将导致前组和后组光焦度  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  的不同。希望前组和后组的光焦度尽可能小些,也就是希望它们的焦距长些,以减轻前组和后组相对孔径的负担。

当远摄比为  $L/f'=0.75$  时,前组和后组的焦距随两组之间距离的变化如图 2 所示。由图 2 可以看出,当两组之间的距离  $d=0.375$  时,后组的负焦距最长。即两组之间的焦距为光学总长度的 1/2 时,后组具有最小光焦度,前组的光焦度也相对较小,此时后组的相对孔径负担最小。根据以上分析便可合理取出

前组和后组光焦度, 以及两组间隔。

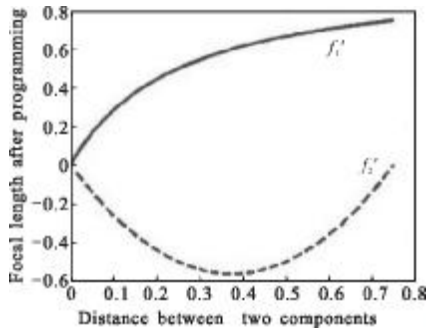


图 2 间隔 d 与前后两组焦距的关系

Fig.2 Relationship between distance and focal lengths of two components

### 1.2 消热差设计原理

光学材料的折射率随温度的变化而变化, 特别是红外光学材料。单晶锗是红外系统中的典型材料, 其  $dn/dT$  的典型值约为  $396 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ , 而 K9 玻璃  $dn/dT$  值只有  $2.8 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 。且温度变化时, 光学元件的厚度、曲率半径和间隔等都将发生变化, 进而影响光学系统的成像质量。可见, 对红外光学系统进行消热差设计的是相当必要的<sup>[10-11]</sup>。

红外消热差光学系统设计是采取一些补偿措施使光学系统在一定的温度范围内保持成像质量的稳定性<sup>[12]</sup>。现有的补偿方式有: 电子主动式补偿、被动式机械补偿和被动式光学补偿<sup>[13]</sup>。而电子主动式补偿和被动式机械补偿都只补偿像面位移, 不能校正热效应导致的像差失衡, 很难维持成像质量, 并且不可避免地使系统复杂化, 增加了系统尺寸和重量<sup>[14]</sup>; 光学被动式补偿具有结构更简单、质量更轻、尺寸小、系统可靠性高等优点。基于以上原因, 在红外光学系统消热差设计中, 选用光学被动式消热差设计。光学被动式消热差设计是利用光学材料热特性之间的差异, 通过匹配光学材料的  $dn/dT$ 、膨胀系数和镜筒材料的膨胀系数, 使其在一个较宽的环境温度范围内具有良好稳定的像质。光学被动消热差可以认为与色差的校正相类似, 即光学被动消热差是相对温度变化的, 而消色差是相对波长变化的。

由光学材料的色散特性和热特性, 引入规划色差系数  $C$  和规划热差系数  $T$ 。对单透镜而言, 设其光焦度为  $\varphi$ , 当温度变化  $1^{\circ}C$  时引起的光焦度变化量为  $\Delta\varphi_T$ , 工作波段  $\Delta\lambda$  引起的光焦度变化量为  $\Delta\varphi_\lambda$ <sup>[15]</sup>, 则:

$$C = \frac{\Delta\varphi_\lambda}{\varphi} = \frac{(n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2})}{n_{\lambda_0} - 1} = \frac{1}{V} \quad (3)$$

$$T = \frac{\Delta\varphi_T}{\varphi} = -\frac{1}{f'} \frac{df'}{dT} = \frac{1}{n - n_0} \left( \frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) - \alpha_g = -\alpha_f \quad (4)$$

式中:  $\alpha_g$  为透镜材料的热膨胀系数;  $n_{\lambda_0}$  为中心波长的折射率;  $n_{\lambda_1}$  和  $n_{\lambda_2}$  分别为波长是  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  时的折射率;  $\alpha_f$  为折射元件的光热膨胀系数。规划色差系数  $C$  和规划热差系数  $T$  仅与透镜材料有关, 通过合理地不同  $C$  值和  $T$  值的材料, 可以使不同材料的色差和热差都得到相互补偿, 系统实现在消热差的同时消色差。

为了使光学系统能够同时满足光焦度、校正色差和消热差的要求, 则应该满足以下 3 个方程:

$$\Phi = \frac{1}{h_1} \sum_i h_i \varphi_i \quad (5)$$

$$\Delta f_b^T = \left( \frac{1}{h_1 \Phi} \right)^2 \sum_i (h_i^2 C_i \varphi_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{df_b^T}{dT} = - \left( \frac{1}{h_1 \Phi} \right)^2 \sum_i (h_i^2 T_i \varphi_i) = \alpha_L L \quad (7)$$

式中:  $\Phi$  为系统的总光焦度;  $\varphi_i$  为第  $i$  个透镜的光焦度;  $h_i$  为第一近轴光线在第  $i$  个透镜上的入射高度;  $\Delta f_b^T$  为光学元件色散引起的离焦(即轴向色差);  $df_b^T/dT$  为光学元件温度效应引起的热离焦;  $T_i$  和  $C_i$  分别为第  $i$  个透镜的规划热差系数和规划色差系数;  $C_i$  数值上等于材料阿贝数的倒数 ( $C_i = -\Delta\varphi_i/\varphi = 1/V$ );  $\alpha_L$  为镜筒材料的线膨胀系数;  $L$  为系统结构总长度。

## 2 系统设计

### 2.1 光学系统参数

温度补偿摄远物镜技术指标如表 1 所示。

表 1 光学温度补偿摄远物镜技术指标

Tab.1 Technical indicator of athermalized telephoto objective

Parameter	Value
Spectral range/ $\mu m$	8-12
Focal length/mm	100
Field angle/ $^{\circ}$	6
F number	2
Telephoto ratio	0.8
Temperature range/ $^{\circ}C$	-40-60

该系统适用于像元尺寸 30 μm, 2/3 in(1 in=2.54 cm) 的非制冷焦平面阵列探测器。

2.2 材料选取

常用的长波红外材料如表 2 所示。折射率 n 值大的材料有利于像差的校正, 阿贝数 V 值相差较大的材料组合有利于消色差, 而热差系数 T 值相差较大的材料组合有利于消热差<sup>[16]</sup>。

表 2 常用长波(8-12 μm)红外材料 n、V、T 值  
Tab.2 n, V and T data of conventional long wavelength(8-12 μm) infrared materials

Material	n			V = $\frac{n_{\lambda_0} - 1}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}$	T/°C
	8 μm	10 μm	12 μm		
Ge	4.005 4	4.003 2	4.001 8	834.222 2	125.87×10 <sup>-6</sup>
AMTIR-1	2.503 0	2.498 0	2.490 5	119.84	36.14×10 <sup>-6</sup>
ZnSe	2.416 0	2.406 5	2.390 0	54.096 2	35.68×10 <sup>-6</sup>
ZnS	2.222 0	2.192 0	2.167 0	21.672 7	28.01×10 <sup>-6</sup>

长波红外需要选择至少三种材料搭配来实现同时消热差和消色差。为了减小系统的单色像差, 三种材料在 T-C 图上的对应点所围成的三角形面积尽量大些。从长波红外材料 T-C 图(见图 3)上可以看

出, 材料 AMTIR-1, Ge, ZnS 组合三角形面积相对较大, 故前组材料依次选取为 AMTIR-1、Ge 和 ZnS, 后组材料单独选用 Ge。

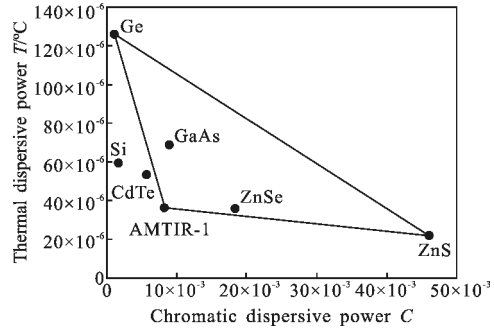


图 3 长波红外 T-C 图

Fig.3 T-C fig of long wavelength infrared

2.3 光焦度分配

为简化模型, 求解时将前组视为密接薄透镜组, 其光焦度为:

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^n h_i \varphi_i \tag{8}$$

由于红外光学系统的材料温度折射率变化对热差起主导作用, 因而在光焦度初始分配时, 可以忽略镜筒的热膨胀。根据上述条件和参数, 让前组和后组相互抵消热差和色差, 使系统总热差和色差为零, 可以得到光焦度分配的方程组:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_{12} &= \frac{h_2^2 \frac{k-1}{d(k-d)} [T_2(C_{13}-C_{11})+C_2(T_{13}-T_{11})] + \left(1 - \frac{k-1}{d}\right) (C_{11}T_{13}-T_{11}C_{13})}{(C_{13}-C_{11})(T_{12}-T_{11}) - (C_{12}-C_{11})(T_{13}-T_{11})} \\ \varphi_{13} &= \frac{h_2^2 \frac{k-1}{d(k-d)} [T_2(C_{12}-C_{11})+C_2(T_{12}-T_{11})] + \left(1 - \frac{k-1}{d}\right) (C_{11}T_{12}-T_{12}C_{11})}{(C_{12}-C_{11})(T_{13}-T_{11}) - (C_{13}-C_{11})(T_{12}-T_{11})} \\ \varphi_{11} &= 1 - \frac{k-1}{d} - \varphi_{12} - \varphi_{13} \end{aligned} \right. \tag{9}$$

式中:  $\varphi_{11}$ 、 $\varphi_{12}$  和  $\varphi_{13}$  分别是前组第一块透镜、第二块透镜和第三块透镜的光焦度;  $C_{11}$ 、 $C_{12}$  和  $C_{13}$  分别是前组第一块透镜、第二块透镜和第三块透镜的色差系数;  $T_{11}$ 、 $T_{12}$  和  $T_{13}$  分别是前组第一块透镜、第二块透镜和第三块透镜的热差系数。  $C_2$  和  $T_2$  分别是后组材料色差和热差系数。为了达到技术指标要求的远摄比, 初始光焦度计算时先取远摄比  $k=0.75$ , 为后续的计算机优化设计留有适当余量。希望前组和后组的光焦度尽可能小些, 由图 2 中的关系可以看出, 间隔  $d$  取 0.375 时, 此时后组具有最小光焦度, 前组光焦度也较小, 计

算得到  $\Phi_1=5/3$ ,  $\Phi_2=-16/9$ ,  $h_2=1-d\Phi_1=0.375$  是光线在后组上的投射高度。将表 2 中材料的参数带入上述方程, 便可求解出前组三片透镜各自的光焦度, 其值为  $\varphi_{11}=3.3025$ ,  $\varphi_{12}=-1.0730$ ,  $\varphi_{13}=-0.5629$ 。将各透镜焦距进行缩放, 缩放后初始焦距分配如表 3 所示。

表 3 初始的焦距分配(单位: mm)

Tab.3 Initial focal length distribution (Unit:mm)

Former group			After group		d
$f_{11}'$	$f_{12}'$	$f_{13}'$	$f_2'$		
30.280	-93.199	-177.658	-56.250	37.5	



2.4 光学系统设计结果

镜筒材料选用铝, 线型膨胀系数  $\alpha_L$  为  $23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。在 ZEMAX 光学设计软件中优化设计, 最终设计结果如图 4 所示, 系统总长 79.9 mm, 达到 0.8 的远摄比要求。值的提出的是, 该系统全部使用普通球面镜, 降低了加工难度和工程成本。表 4 为初始计算的焦距和系统优化后焦距的对比, 结果发现采用该方法初始计算的焦距与优化后数值非常接近。

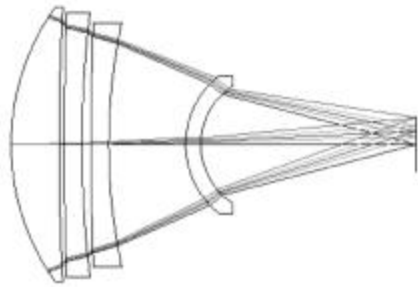


图 4 长波红外摄远物镜结构图

Fig.4 Configuration of long wavelength infrared telephoto objective

表 4 计算值和优化后值对比(单位: mm)

Tab.4 Comparison between calculated and optimized values (Unit:mm)

	$f_{11}'$	$f_{12}'$	$f_{13}'$	$f_2'$
Calculated	30.280	-93.199	-177.658	-56.250
Optimized	33.175	-99.150	-114.327	-62.245

3 像质评价

传递函数是评价光学系统的重要手段, 该光学系统在 20、-40、+60 °C 的 MTF 曲线如图 5(a)~(c)所示。由图可以看出, 系统在各温度下 17 lp/mm 处的 MTF

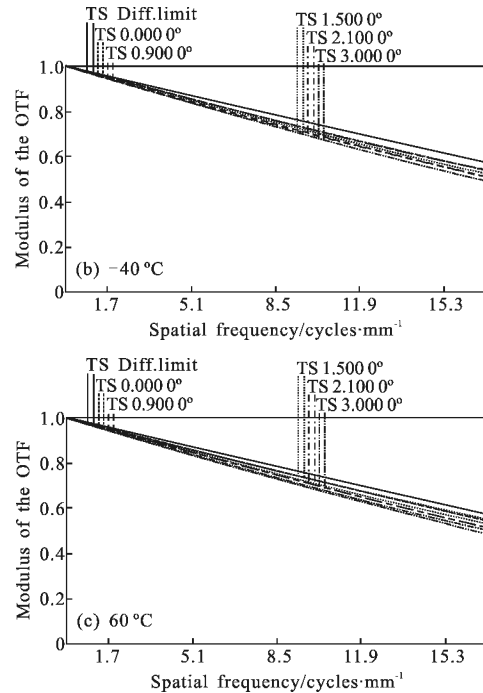
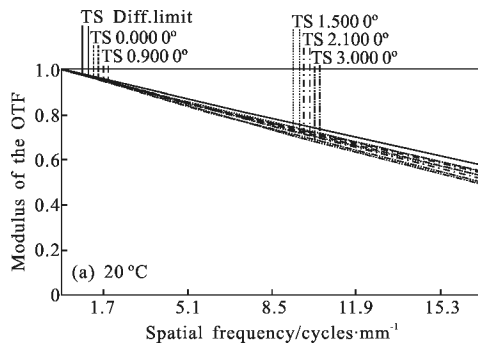


图 5 长波红外摄远物镜 MTF 曲线

Fig.5 MTF curves of long wavelength infrared telephoto objective

值均大于 0.5, 接近衍射极限, 说明该系统在全视场、-40~60 °C 温度范围内已具有较好的成像质量。

MTF 在 17 lp/mm 处, 0 视场、0.7 视场和全视场随温度变化关系如图 6 所示。可见, 系统在 -40~60 °C 温度范围内, 各个视场 MTF 值随温度的波动都很小。0 视场的 MTF 波动最小, 最大范围 0.001 1; 全视场子午方向的 MTF 波动最大, 波动范围 0.007 4。说明该摄远物镜具有很好的热稳定性, 满足消热差要求, 像质保持稳定。

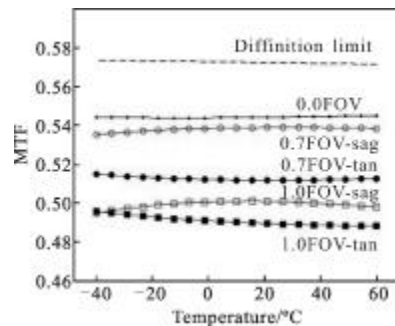


图 6 17 lp/mm 处 MTF 随温度的变化

Fig.6 Relationship between MTF and temperature at 17 lp/cm

4 结论

研究了摄远型红外长波消热差物镜的设计方

法, 利用该方法实现了焦距 100 mm, F 数为 2.0, 全视场角为  $6^\circ$ , 工作波段 8~12  $\mu\text{m}$ , 远摄比达到 0.8 的长波红外消热差光学系统。通过比对不同材料实现了 -40~60  $^\circ\text{C}$  温度范围内光学补偿设计。而且系统重量轻、结构简单、成像质量好。所设计系统优化后的光焦度分配值和计算值非常接近。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Yu, Yang Changcheng, Yang Kuntao. Design on athermal infrared diffractive/refractive hybrid optical system in 8-14  $\mu\text{m}$  [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25 (11): 1535-1538. (in Chinese)  
张羽, 杨长城, 杨坤涛. 8~14  $\mu\text{m}$  波段折衍射混合红外光学系统的热补偿设计[J]. 光学学报, 2005, 25(11): 1535-1538.
- [2] Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong, et al. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive/diffractive infrared objective[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 79-82. (in Chinese)  
陈潇, 杨建峰, 马小龙, 等. 折/衍混合红外物镜超宽温度消热差设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 79-82.
- [3] Bai Yu, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong, et al. Athermalization of long-wavelength infrared optical system [J]. Infrared Technology, 2008, 30(10): 583-585. (in Chinese)  
白榆, 杨建峰, 马小龙, 等. 长波红外光学系统无热化设计[J]. 红外技术, 2008, 30(10): 583-585.
- [4] Xi Xiao, Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Passive athermalized infrared optical system design[J]. Optical Instruments, 2005, 27(1): 42-46. (in Chinese)  
奚晓, 李晓彤, 岑兆丰. 被动式红外光学系统无热设计[J]. 光学仪器, 2005, 27(1): 42-46.
- [5] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Design of a hybrid infrared apochromatic optical system beyond normal temperature[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(10): 6298-6303. (in Chinese)  
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 实现复消色差的超常温混合红外光学系统[J]. 物理学报, 2008, 57(10): 6298-6303.
- [6] Sun Jinxia, Liu Jianzhuo, Sun Qiang, et al. Athermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 792-797. (in Chinese)  
孙金霞, 刘建卓, 孙强, 等. 折/衍射混合消热差共形光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 792-797.
- [7] Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, et al. Design of a low F-number compact athermalizing infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322003-1-8. (in Chinese)  
曲贺盟, 张新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322003-1-8.
- [8] Li Xiaoyan, Zhong Boliang. Optical design of telephoto lens with inner focusing [J]. Optical Technique, 2002, 28(4): 299-301. (in Chinese)  
李晓艳, 钟伯亮. 内调焦望远镜头的光学设计 [J]. 光学技术, 2002, 28(4): 299-301.
- [9] Liu Yingying, Pang Bo, Du Yunan, et al. Optical design of athermalized infrared telephoto objective lens [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(5): 858-862. (in Chinese)  
刘莹莹, 庞博, 杜玉楠, 等. 红外无热化望远物镜设计[J]. 半导体光电, 2013, 34(5): 858-862.
- [10] Yasuhisa Tamagawa. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design[J]. Appl Opt, 1997, 36(1): 297-301.
- [11] Tadeusz Kryszczyński. Material problem in athermalization of optical systems[J]. Opt Eng, 1997, 36(6): 1596-1601.
- [12] Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong, et al. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in 8-12  $\mu\text{m}$  [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2089-2092. (in Chinese)  
陈潇, 杨建峰, 马小龙, 等. 8~12  $\mu\text{m}$  折-衍混合物镜超宽温度消热差设计[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2089-2092.
- [13] Rogers P J. Athermalized FLIR optics[C]//SPIE, 1990, 1354: 742-751.
- [14] Li Shenghui, Yang Changcheng. Athermal design for infrared hybrid refractive/diffractive optical system [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(4): 1-3. (in Chinese)  
李升辉, 杨长城. 折/衍混合红外光学系统的消热差设计[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(4): 1-3.
- [15] Song Yanfeng. Design of modern infrared optical system[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2008: 11-12. (in Chinese)  
宋岩峰. 现代光学系统设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 11-12.
- [16] Zhang Xin, Jia Hongguang, Zhang Yue. Optical design of athermalized infrared telephoto objective [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 178-183. (in Chinese)  
张鑫, 贾宏光, 张跃. 远距型红外消热差物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 178-183.