

doi: 10.3788/gzxb20134204.0462

# 大视场红外导引头光学系统消热差设计

姜洋<sup>1,2</sup>, 孙强<sup>1</sup>, 刘英<sup>1</sup>, 赵珑现<sup>3</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 沈阳仪表科学研究所, 沈阳 110043)

**摘 要:**为消除温度变化对共形光学导引头像质的影响,利用光学被动消热差理论对具体设计方法进行实际分析.根据消热差条件选择合理的透镜材料组合,利用衍射元件特殊的光热特性采用折/衍混合结构进行消热差设计.采用椭球形共形整流罩结构减小空气阻力,降低导弹头部气动加热效应,利用三片式反远距结构实现短焦大视场系统设计.该系统工作波段为 3~5  $\mu\text{m}$ ,系统  $F/\#$  为 2,视场角为  $\pm 90^\circ$ ;凝视结构的导引头光学系统后工作距达 22.8 mm,为制冷型探测器留有足够的空间;冷光阑效率为 100%;在  $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$  温度变化范围内,15 lp/mm 处全视场 MTF 值均大于 0.4,满足高准确度定位导引头系统对成像质量的要求,保证了系统的轻小型设计.

**关键词:**大视场;消热差设计;折/衍混合;红外;共形光学

中图分类号:TN21

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)04-0462-5

## Athermal Design for IR Optical Seeker System with Wide FOV

JIANG Yang<sup>1,2</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, ZHAO Long-xian<sup>3</sup>

(1 Institute Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 130039, China)

(3 Shenyang Academy of Instrumentation Science, Shenyang 110043, China)

**Abstract:** In order to stabilize the optical performance influenced by the temperature changes, an optical seeker with conformal dome on the basis of the passive optical athermalization method is discussed. Reasonable materials are chosen correctly according to athermal equations. The hybrid refractive-diffractive configuration is introduced for the design of athermal optical system design. Ellipsoidal conformal dome could optimize the aerodynamic performance and reduce the heating of the missile dome. missile dome heating. Inverted telephoto triplet is helpful to acquire short focal length and wide FOV. It is shown that an optical system with  $\pm 90^\circ$  unvignetted FOR,  $F/2$ , 100% cold stop efficiency was present. A back focal length of 22.8 mm is large enough for the cooled detector, and also MTF are higher than 0.4 at the spatial frequency of 15 lp/mm across the entire field with the working wavelength at 3~5  $\mu\text{m}$ . The specifications can satisfy the requirements of precise seeker, which can ensure the compact design of the system.

**Key words:** Wide FOV; Athermalization design; Hybrid refractive/diffractive; IR; Conformal optics

## 0 引言

红外光学材料的折射率随温度变化较大,并且

透镜的光焦度与镜筒材料的长度都会受到温度影响,直接导致像面位移.一个理想的无热化系统应在工作温度范围内拥有稳定的像面位置.采用椭球形

基金项目:国家自然科学基金(No. 60977001)资助

第一作者:姜洋(1984-),男,博士研究生,主要从事光学系统设计等方面的研究. Email:le\_zhi@yeah.net

导师:孙强(1971-),男,研究员,博士,主要研究方向为现代红外光学仪器、二元光学、红外系统仿真等. Email:sunq@ciomp.an.cn

收稿日期:2012-09-20;录用日期:2012-11-16

共形整流罩可以减小导弹在高速飞行时的空气阻力,提升导弹作战性能.飞行速度的提高必然会增强气动加热现象,红外成像导引头位于导弹的最前端,其工作环境温度变化较大.为使共形整流罩发挥更大的优势,对光学系统的消热差处理非常必要,以保证在一定温度范围内保持良好的成像质量满足使用要求.

目前的消热差方法主要有三种:机械被动补偿,光机主动补偿和光学被动补偿.最早出现的也是最直接的方法是利用材料自身的热膨胀来移动像面位置,利用高膨胀系数的基底材料使镜筒轴向位移来补偿温度变化引起的焦面位移.通常此种方法准确度低且补偿范围有限;随后出现的光机主动式补偿方法,是通过温度传感器测得温度变化信息,再反馈给电机传动结构产生相应的位移量对后焦面做出相应的补偿.这种方法适合温度变化较大的情况或者变焦光学系统,但是结构复杂、成本较高并且受机械准确度的影响<sup>[1-2]</sup>.

光学被动式消热差技术是利用镜片材料本身的光热差特性实现对系统离焦的补偿<sup>[3]</sup>.根据消热差条件指导材料的选择和光焦度的合理分配.随着加工工艺水平的不断进步,常见红外材料都可以采用金刚石点车削加工,因此衍射面被越来越多地应用于红外光学系统中. Behrmann 和 Bowen 研究了温度对衍射元件的影响,将衍射元件应用到消热差系统中<sup>[4]</sup>,衍射元件的光热特性仅与基底透镜材料热膨胀系数有关,在消热差系统设计中拥有更大的自由度.光学被动补偿的方法简单、可靠,并且不增加额外的移动机构,性能稳定.

本文利用光学被动消热差理论设计出 3 片折/衍射混合结构,采用共形整流罩的大视场凝视型导引头光学系统,实现了  $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$  温度范围内全视场消热差设计,全温度范围内满足使用成像要求.利用光学传递函数对像质进行评价,系统在各温度条件下均能保证成像质量.利用衍射面型和光学材料特性实现无热化,系统简单可靠能够满足军用系统在恶劣环境下的作战需求.

## 1 消热差基本理论

光学系统在工作温度变化时,对像质影响最大的是系统离焦,表现为焦面(Focal Plane Array, FPA)与探测器面的偏离.产生偏离的原因包括:透镜焦距的变化和系统因基体材料伸缩而产生的总长变化.

### 1.1 折射和衍射元件的光热特性

首先分析温度对单透镜产生的影响.薄透镜光

焦度的表达式为

$$\phi = \frac{1}{f} = (n - n_0) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

$n$  为透镜材料折射率,  $n_0$  为环境介质折射率,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为前后表面曲率半径.

当温度发生变化时,光焦度  $\phi$  随温度变化为

$$\frac{d\phi}{dT} = \left( \frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT} \right) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + (n - n_0) \cdot \left( -\frac{1}{R_1} \frac{dR_1}{dT} + \frac{1}{R_2} \frac{dR_2}{dT} \right) \quad (2)$$

式中,  $T$  为环境温度.定义材料热膨胀系数  $\alpha_g$  为

$$\alpha_g = \frac{1}{R_1} \frac{dR_1}{dT} = \frac{1}{R_2} \frac{dR_2}{dT} \quad (3)$$

系统焦距  $f$  与光焦度  $\phi$  满足  $f = \frac{1}{\phi}$ , 所以由式

(2)、(3)得到透镜的折射光热膨胀系数<sup>[5]</sup>  $x_{f,r}$  为

$$x_{f,r} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = -\frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dT} = \alpha_g - \frac{1}{n - n_0} \left( \frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (4)$$

常用镜筒基底材料铝的热膨胀系数为  $23.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . 空气中  $dn_0/dT \approx 0$ , 由表 1 可知常见中波红外材料  $x_{f,r} < 0$ , 当温度升高时,正透镜焦面左移.而基底材料膨胀使探测器像面右移,如图 1 所示,图中上半部分为温度为  $T$  时的情况,下半部分为温度变化了  $\Delta T$  后系统的相应变化<sup>[6]</sup>.透镜的焦移与基底材料的膨胀方向相反,所以单透镜无法消热差,只有通过合理正负光焦度透镜组合才能够消热差.

表 1 常见红外材料光学与热学特性参量  
Table 1 Optical characters and thermal properties of common IR materials

	$n_1$	$\nu_{3-5}$	$\alpha_g(^{\circ}\text{C})$	$dn/dT(^{\circ}\text{C}^{-1})$	$x_{f,r}$
Ge	4.0516	109.34	$6 \times 10^{-6}$	$396 \times 10^{-6}$	$-126 \times 10^{-6}$
Si	3.4253	236.50	$2.7 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	$-59.1 \times 10^{-6}$
ZnS	2.2525	109.63	$4.6 \times 10^{-6}$	$38.7 \times 10^{-6}$	$-26.3 \times 10^{-6}$
ZnSe	2.4332	177.99	$7.1 \times 10^{-6}$	$60 \times 10^{-6}$	$-34.8 \times 10^{-6}$
MgF <sub>2</sub>	1.3496	13.07	$8 \times 10^{-6}$	$20 \times 10^{-6}$	$-49.2 \times 10^{-6}$

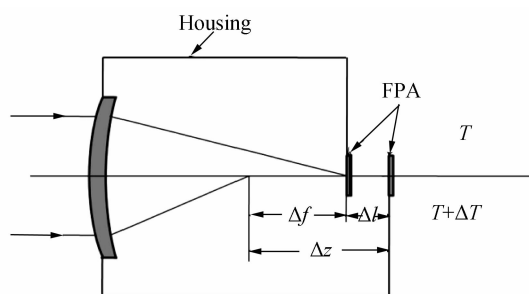


图 1 系统热离焦示意图

Fig. 1 Layout of thermal defocus

衍射元件的光热膨胀系数<sup>[4]</sup>为

$$x_{f,d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \quad (5)$$

由式(5)可知:衍射元件光热膨胀系数  $x_{f,d}$  只与透镜材料热膨胀系数  $\alpha_g$  有关,并且  $x_{f,d} > 0$ ,与折射

元件光热膨胀系数  $x_{f,r}$  符号相反. 折/衍混合系统可以相互抵消温度变化引起的焦面变化, 实现消热差设计. 由式(4)、(5)可以算出当温度变化  $\Delta T$  时, 焦距随之的改变量为

$$\Delta f = f x_f \Delta T \quad (6)$$

### 1.2 消热差条件

为了避免温度变化对系统像质产生影响, 透镜组产生的光学离焦量必须与镜筒基底材料所产生的机械离焦相抵消, 使整个系统的离焦量始终在焦深范围内. 对于非单色光系统, 还要考虑消轴向色差.

多片分离透镜系统消热差需满足下列三个条件<sup>[7]</sup>

$$\text{光焦度分配条件: } \sum_{i=1}^j h_i \phi_i = \varphi \quad (7)$$

$$\text{消色差条件: } \left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^j h_i \frac{\phi_i}{\nu_i} = 0 \quad (8)$$

$$\text{消热差条件: } \left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^j h_i x_i \phi_i + \alpha_H L = 0 \quad (9)$$

$\phi$  为系统总光焦度;  $h_i$  为第一近轴光线在各镜组的入射高度;  $\varphi_i$ 、 $\nu_i$  为各镜组光焦度和阿贝数;  $x_i$  为光热膨胀系数;  $\alpha_H$  为机械结构(镜筒基底材料)的线性热膨胀系数;  $L$  为机械结构的总长度. 通过合理选择透镜材料、适当地分配光焦度使其满足消热差条件, 即可获得理想的初始结构<sup>[7-8]</sup>.

## 2 设计实例

整流罩选用外表面为椭球形的共形整流罩(见图2), 流线型的外表面可以减小飞行阻力, 减小气动加热效应对像质的影响. 整流罩径长比为 1. 系统采用 HgTeCd 制冷探测器,  $F/\#$  为 2, 为了达到 100% 的冷屏效率采用光阑后置的结构, 红外光学系统出瞳与冷屏大小相匹配. 有效避免了杂散辐射对像质的影响<sup>[6]</sup>. 表 2 为光学系统主要参量.

整流罩为椭球形等厚罩, 光焦度很小所以在消热差设计初始暂不考虑整流罩的影响. 根据消热差条件理论, 导引头三片透镜分别选择 Ge、Si、ZnS 三种材料组合<sup>[9]</sup>. 系统采用反远结构以获得远大于焦

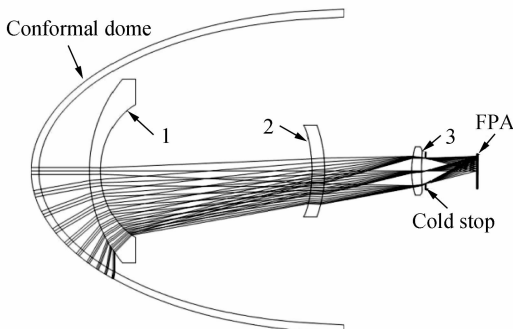


图 2 共形光学系统示意图

Fig. 2 Layout of the conformal optical system

表 2 光学系统参量

Table 2 Specifications of the conformal optical system

Parameter	Value
Fineness ratio	1
Diameter of dome/mm	127
$F/\#$	2
FOV/(°)	90
Work length/ $\mu\text{m}$	3~5
efl/mm	3.8
MTF(-40°C~60°C)	>0.4@15 lp/mm

距后工作距, 导引头第一片透镜完成主要的光线偏折, 所以选用高折射率小色散的锗材料. 并且镜筒基底材料的线膨胀系数为正值, 所以选用  $dn/dT$  较大的 Ge 透镜作为负透镜前组,  $dn/dT$  较小的 ZnS 和 Si 后组正透镜以满足消热差条件<sup>[10]</sup>.

衍射面位于在第一片透镜的后表面上, 其光焦度很小, 主要用来消色差, 并且衍射面具有较大的特征尺寸, 易于加工. 图 3 为衍射面相位与环带频率曲线图,  $a$  为相位函数曲线,  $b$  为环带频率曲线. 结果表明衍射面总环带数 54 个, 在孔径边缘处环带频率最高为 6.6 环/mm, 对应的最小环带宽度为 150  $\mu\text{m}$ , 利用现有技术金刚石点车削加工完全能够满足准确度要求.

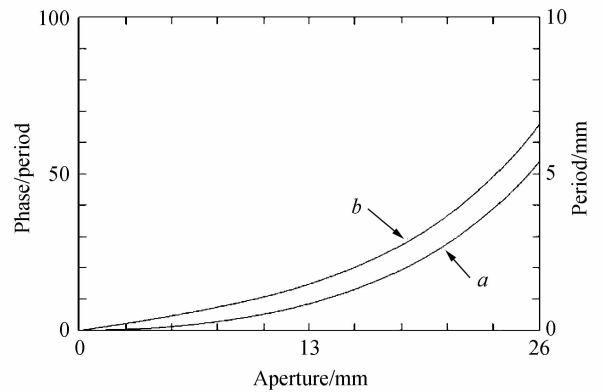


图 3 相位与环带频率曲线图

Fig. 3 Phase and line frequency vs. aperture

光学系统半视场角达  $90^\circ$ , 离轴像差严重. 面 2、3 均采用非球面, 远离光阑可以校正像散等离轴像差. 离光阑较近的非球面可以校正高级球差. 物像关系满足等距投影( $f-\theta$ )成像, 通过像位置可以直接获取目标的空间方位信息.

## 3 设计结果

图 4 为不同温度 MTF 对比曲线图, 在  $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$  温度范围内, 各视场 MTF 均能达到 0.4 以上. 最大离焦量 31.232  $\mu\text{m}$ , 小于系统焦深  $\Delta z = \pm 2\lambda(F/\#)^2 = 32 \mu\text{m}$ . 系统最佳像面的位置在焦深范围内, 实现了预期消热差设计要求<sup>[11-15]</sup>. 图 5 所示

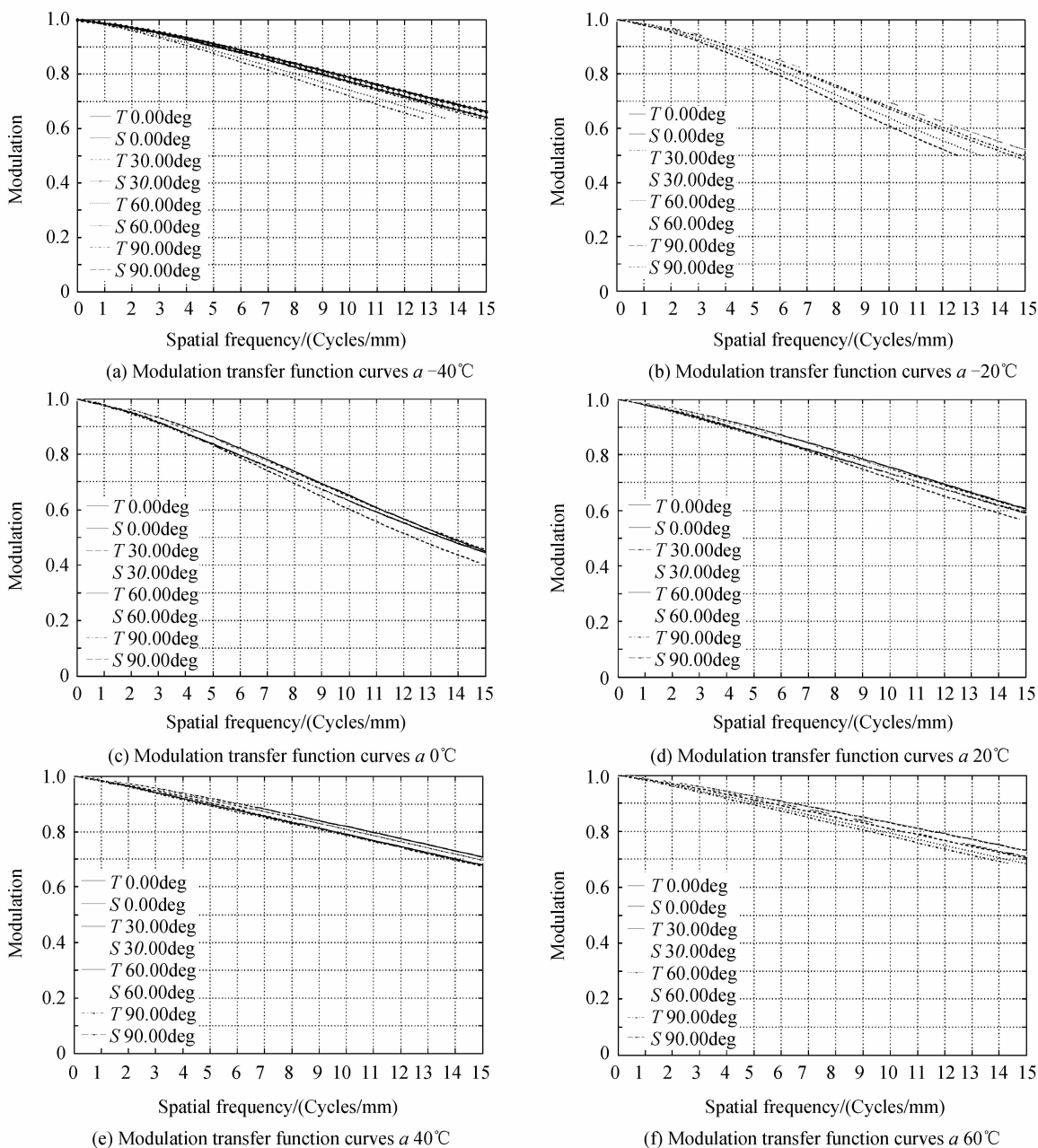


图 4  $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$  调制传递函数曲线

Fig. 4 Modulation transfer function curves at different temperature

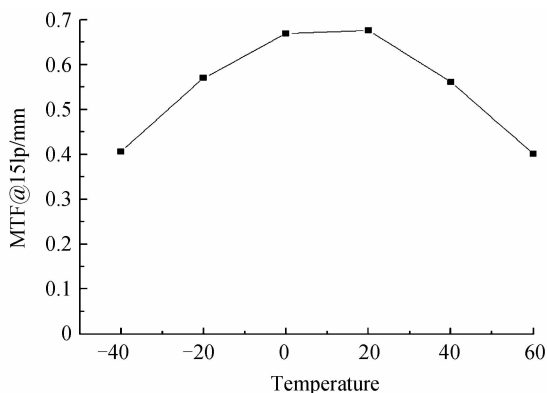


图 5 MTF 随温度变化曲线

Fig. 5 MTF performance over temperature

不同温度下边缘视场 15 lp/mm 处的 MTF 曲线, 曲线变化平滑成像像质稳定.

### 4 结论

本文分析了光学被动消热差的基本原理, 根据消热差条件设计了 3 片式结构的大视场凝视型共形光学系统. 系统具有  $180^{\circ}$  的全视场; 光阑后置结构有效避免了杂散热辐射, 冷光阑效率达 100%; 采用反远距结构获得了 22.8 mm 后工作距离; 在  $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$  工作温度范围内光学传递函数在 15 lp/mm 处均在 0.4 以上, 成像质量满足使用要求. 系统采用

衍射面辅助消热差设计,保证成像质量的同时简化了系统,符合军用系统简单可靠的使用需求。

#### 参考文献

- [1] MENG Qing-chao, PAN Guo-qing, ZHANG Yun-qiang, *et al.* Design of athermalizing infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**: 723-727.  
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**: 723-727.
- [2] SHEN Hong-hai, WANG Guo-hua, DING Jing-wei, *et al.* Application of active athermal compensation to airborne IR optical systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 593-601.  
沈宏海, 王国华, 丁金伟, 等. 主动补偿无热化技术在机载红外光学系统中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 593-601.
- [3] CHEN Xiao, YANG Jian-feng, MA Xiao-long, *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.  
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.
- [4] BOWEN G P, BEHRMANN, JOHN P. Influence of temperature on diffractive lens performance [J]. *Applied Optics*, 1993, **32**(14): 2483-2489.
- [5] THOMAS H J. Thermal effects in optical systems [J]. *Optical Engineering*, 1981, **20**(2): 156-160.
- [6] RIEDL M. J. Optical design fundamentals for infrared systems [M]. 2nd Ed. Washington. SPIE Press, 2001: 133.
- [7] YANG Fei, MING Ming, WANG Fu-guo, *et al.* Influence of thermal diversification to opto-mechanical system of 1.23m telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 26-30.  
杨飞, 明名, 王富国, 等. 温度变化对 1.23 m 望远镜光机系统的影响 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 26-30.
- [8] YANG Le, SUN Qiang, WANG Jian, *et al.* Athermalization for mid-wave infrared scene projector optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1521-1525.  
杨乐, 孙强, 王健, 等. 中波红外景象投影光学系统消热差设计 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(10): 1521-1525.
- [9] RAYCES J L, LAN L. Thermal compensation of infrared achromatic objectives with three optical materials [C]. *SPIE*, 1990, **1354**: 752-759.
- [10] LIU Lin, SHEN Wei-min, ZHOU Jian-kang. Design on athermalized middle wavelength infrared optical system with large relative aperture [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(3): 675-679.  
刘琳, 沈为民, 周建康. 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 675-679.
- [11] SUN Jin-xia, LIU Jian-zhuo, SUN Qiang, *et al.* Athermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 792-797.  
孙金霞, 刘建卓, 孙强, 等. 折/衍混合消热差共形光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(4): 792-797.
- [12] GAO Hong-yun, CHEN Meng-wei, YANG Ying-ping, *et al.* Novel long wavelength infrared diffractive/Refractive athermal optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2143-2146.  
郜洪云, 陈梦苇, 杨应平, 等. 新型长波红外折衍混合消热差系统 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2143-2146.
- [13] JIA Yong-dan, FU Yue-gang, LIU Zhi-ying, *et al.* Design of dual-FOV athermal optical system for infrared dual-color [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, (6): 638-641.  
贾永丹, 付跃刚, 刘智颖, 等. 双视场/双色红外消热差光学系统设计 [J]. *光子学报*, 2012, (6): 638-641.
- [14] LIU Qiang, HE Xin, ZHANG Feng, *et al.* Calculation and control of adhesive layer in reflector athermal mount [J]. *Optics and precision Engineering*, 2012, **20**(10): 2229-2236.  
刘强, 何欣, 张峰, 等. 反射镜无热装配中胶层厚度的计算及控制 [J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(10): 2229-2236.
- [15] XU Jie, JIANG Shanping, YANG Linhua, *et al.* Digital photogrammetry for thermal deformation of satellite structures in normal environment [J]. *Optics and precision Engineering*, 2012, **20**(12): 2667-2673.  
许杰, 蒋山平, 杨林华, 等. 卫星结构件常压热变形的数字摄影测量 [J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(12): 2667-2673.