

文章编号: 0258-7025(2010)03-0675-05

# 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计

刘 琳<sup>1,2,3</sup> 沈为民<sup>2,3</sup> 周建康<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup> 苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006; <sup>2</sup> 苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)  
<sup>3</sup> 苏州大学江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 设计了基于非制冷探测器工作的  $f'=100\text{ mm}$ ,  $D/f'=1$ ,  $2\omega=5^\circ$  的中波红外光学系统。该光学系统结构简单紧凑, 具有较大的相对孔径, 能够在  $-20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$  空间环境温度变化范围内保持良好的成像质量。光学系统选用了佩茨瓦尔结构型式, 通过材料的选择以及光焦度的合理分配, 实现了光学被动消热差。采用折衍混合透镜, 简化了整个光学系统的结构, 减小了系统体积和重量。此外, 该系统还具有较大的后工作距。

**关键词** 光学设计; 非制冷探测器; 红外系统; 消热差

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0675

## Design on Athermalised Middle Wavelength Infrared Optical System with Large Relative Aperture

Liu Lin<sup>1,2,3</sup> Shen Weimin<sup>2,3</sup> Zhou Jiankang<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

<sup>2</sup> Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

<sup>3</sup> Jiangsu Key Laboratory of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** Based on uncooled detector, an optical system is designed with 100 mm focal length, 1  $F$  number,  $\pm 2.5^\circ$  field of view, working in the  $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$  wave band. The optical system has the advantages of large relative aperture and compact construction. While working under the condition of  $-20\text{ }^\circ\text{C}\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$  the system can keep high quality image. With the Petzval objective, carefully selected optical material and reasonable optical power distribution, passive optical athermalization can be realized by using this system. The hybrid lens is used to simplify construction and decrease the volume and weight of the optical system. Also, large back focal length is another feature of the optical system.

**Key words** optical design; uncooled detector; infrared system; athermalization

## 1 引言

中波红外  $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$  波段是对地球观测的重要窗口之一。目前工作于该波段的卫星大多数使用了技术发展成熟的制冷型探测器, 具有较高的辐射分辨本领和地面分辨本领, 但卫星体积、重量和功耗均较大。使用非制冷探测器具有不需要机械扫描装置、光阑位置无限制、功耗低、重量轻、体积小、可靠性好等优点, 为设计和制造低成本的中波红外对地观测卫星提供了可能性<sup>[1]</sup>, 但同时也对光学系统的设计提出了新的要求。首先, 光学系统需要有较大的相对孔径以弥补非制冷探测器辐射分辨率低的缺点, 其次, 与采用非制冷探测器目的相配合, 整个光

学成像系统应具有尽可能紧凑的结构, 即光学元件个数尽可能少, 重量尽可能轻, 体积尽可能小。

基于非制冷探测器, 本文设计了用于对地观测的大相对孔径中波红外光学系统。为了适应典型的空间环境温度变化 ( $-20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ ), 系统采用了结构简单、可靠性好的被动消热差光学系统以及折衍混合元件, 以达到减轻系统体积和重量的目的。

## 2 系统设计

### 2.1 指标参数

针对法国 Sofradir 公司  $320\times 240$  阵列, 像元大小为  $35\text{ }\mu\text{m}$  的中波红外非制冷探测器, 轨道高度

收稿日期: 2009-04-16; 收到修改稿日期: 2009-07-10

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z103)资助课题。

作者简介: 刘琳(1977—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事光学仪器设计方面的研究。E-mail: liulin@suda.edu.cn

700 km,达到中等地面分辨率即地面像元分辨率为250 m,设计了配合其使用的大相对孔径( $F$ 数为1)的光学系统以弥补探测器辐射分辨率较低的不足,系统的具体指标参数如表1所示。

表1 光学系统指标参数

Table 1 Optical system specifications

Parameters	value
Wavelength range / $\mu\text{m}$	3~5
Effective focal length /mm	100
$F$ -number	1
Field of view/( $^\circ$ )	$\pm 2.5$
Back focal length/mm	$\geq 10$
Working temperature range / $^\circ\text{C}$	-20~60

## 2.2 设计思想

### 2.2.1 结构选型

与反射系统相比,折射系统不存在中心遮拦问题,在保证有效相对孔径不变的情况下,折射透镜的尺寸较小。同时折射系统可用于校正像差的变量多于反射系统,较容易实现轴外像差的校正,因此选用折射式光学系统。

由于设计要求有一定的视场角,分离的两组透镜有利于轴外像散的校正。分离的两组透镜的结构主要有:摄远结构、反远结构和佩茨瓦尔结构。其中摄远结构系统总长较小,但由前组承担的相对孔径大于系统的相对孔径,使用这种结构前组负担的相对孔径太大。反远结构由于前组为负透镜,增加了第一近轴光线在后组的高度,将导致后组承担的相对孔径过大,且系统总长较长。佩茨瓦尔结构由于前后组均为正光焦度透镜,能够较为合理地在前后组间分配光焦度。虽然前后组均为正光焦度,会带来无法校正场曲的困难,但在上述设计参数规定的视场角条件下,场曲主要为初级场曲,选择高折射率红外材料并利用过校正像散平衡初级场曲,可以将场曲控制在焦深范围内。因此,本系统选用佩茨瓦尔结构。

### 2.2.2 温度变化对光学系统的影响

空间环境温度变化范围较大,典型值为-20~60 $^\circ\text{C}$ 。环境温度变化对折射系统的影响主要有两方面:1)材料折射率随温度变化,导致成像面位置移动,即热离焦;2)透镜材料和连接件的热膨胀导致的透镜表面曲率半径、厚度和透镜间间隔的变化<sup>[2]</sup>。红外材料折射率随温度变化的数值要远大于工作于可见光波段的光学玻璃,因此大范围的温度变化对红外系统影响不可忽略。以 $\chi_i$ 表示红外透镜的归一化热差系数,代表温度变化时引起的透镜的相对

光焦度变化<sup>[3~7]</sup>为

$$\chi_i = \frac{\Delta\Phi_i}{\Phi} = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha, \quad (1)$$

式中 $\Phi$ 为透镜的光焦度, $\Delta\Phi_i$ 为温度变化引起的光焦度变化量, $n$ 为透镜材料的折射率, $dn/dt$ 为折射率随温度变化的导数, $\alpha$ 为透镜材料的热膨胀系数。

设空气折射率随温度的变化可忽略,推出分离薄透镜在空气中的热离焦公式为

$$\frac{d\xi'}{dt} = -\frac{1}{u_k'^2} \sum_{i=1}^k h_i^2 \chi_i \Phi_i - \frac{1}{u_k'^2} \sum_{i=1}^{k-1} u_i'^2 \frac{dd_i}{dt} - \alpha_H \cdot s', \quad (2)$$

式中 $\xi'$ 代表实际像点位置相对于成像记录面的位置,其值为 $\xi' = l_k' - s'$ , $l_k'$ 为最终像面相对于最后一个折射面的距离, $s'$ 为成像记录面相对于最后一个折射面的距离。 $u_i'$ 为第一近轴光线在第 $i$ 块透镜后的出射角, $h_i$ 为第一近轴光线在第 $i$ 块透镜上的高度, $d_i$ 为透镜间的间隔, $\alpha_H$ 为连接件材料的热膨胀系数。

由于是大相对孔径光学系统,焦深小,实际允许成像质量良好的温度变化范围很小,因此光学系统的设计必须同时考虑消像差和消热差的要求。为了消除温度变化的影响,必须采取热补偿的措施实现无热化,以保证在空间环境温度变化范围内成像性能稳定。光学系统的无热化技术主要有机械式、机电式和光学式3种,其中机械和机电式无热技术使系统复杂,体积变大,重量增加,可靠性降低,这与使用非制冷探测器减小系统体积和重量的目的相违背。本设计所采用的光学被动消热差的方法,主要利用光学材料热特性之间的差异,通过不同特性材料的合理组合消除温度影响。该方法具有增加重量小、无功耗、可靠性好等优点,也是空间光学系统消热差的主要方法<sup>[8]</sup>。

### 2.2.3 光学材料的选择

在确定结构型式和消除热差的方法后,对材料的选择必须在考虑消除热差的同时还要考虑消除色差的要求。以 $\omega_i$ 表示透镜的归一化色差系数,代表波长变化时透镜相对光焦度的变化,其值为阿贝数 $\nu$ 的倒数

$$\omega_i = \frac{\Delta\Phi_\lambda}{\Phi} = \frac{1}{\nu}. \quad (3)$$

取系统的总光焦度为单位光焦度,并且令等效光焦度 $\Phi'_i = \frac{h_i}{h_1} \Phi_i$ ,等效归一化色差系数 $\omega'_i = \frac{h_i}{h_1} \omega_i$ ,等效归一化热差系数 $\chi'_i = \frac{h_i}{h_1} \chi_i$ ,则系统需要同时满足的3个条件<sup>[4,5,9]</sup>为

$$\sum_{i=1}^k \Phi'_i = 1, \quad (4a)$$

$$\sum_{i=1}^k \Phi'_i w'_i = 0, \quad (4b)$$

$$\sum_{i=1}^k \chi'_i \Phi'_i = - \sum_{i=1}^{k-1} m_i^2 \frac{dd_i}{dt} - \alpha_H \cdot s'. \quad (4c)$$

(4a)式表示系统总的等效光焦度之和为 1, (4b)式表示满足消色差要求时, 系统中各透镜的等效光焦度和等效归一化色差系数需要满足的关系。(4c)式表示满足消热差要求时, 系统中各透镜的等效光焦度和等效归一化热差系数需要满足的关系, 其中  $m_i$  为第  $i$  组薄透镜的横向放大率。

在选取佩茨瓦尔结构, 前后组光焦度近似相等的情况下, (4c)式中  $m_i \approx \frac{1}{2}$ , 如使用同一种连接件材料, 由(4c)式可知满足消热差要求时系统中各透镜的等效光焦度与等效归一化热差系数乘积之和等于  $-\frac{3}{4}\alpha_H$ 。同时满足(4a)~(4c)的 3 个条件, 佩茨瓦尔结构最少需要有 3 块透镜构成。

确定 3 块透镜的材料及其在佩茨瓦尔结构中的位置后, 由线性方程组(4a)~(4c)即可确定透镜的等效光焦度  $\Phi'_i$ 。通过材料选择能够使透镜在光焦度绝对值较小的情况下实现消热差, 从而减轻系统消除单色像差的压力。使用热差图能够较方便地根据材料特性选择合适的透镜材料(图 1)。热差图的横坐标为等效归一化色差系数  $w'$ , 纵坐标为等效归一化热差系数  $\chi'$ [6]。某透镜在热差图中的坐标位置由等效归一化色差系数  $w'_i$  和等效归一化热差系数  $\chi'_i$  确定, 因此透镜在热差图中的位置不仅与透镜材料特性  $w_i, \chi_i$  有关, 还与透镜在系统中的位置  $\frac{h_i}{h_1}$  有关。若 3 块透镜在热差图中的位置分别为  $Z_1, Z_2, Z_3$  3 个点, 满足消色差和消热差要求所对应的  $P$  点位置由(4b)和(4c)式右侧的数值决定, 则由线方程组(4a)~(4c)确定的等效光焦度非常直观地表示为

$$\Phi'_1 = \frac{S_{\Delta PZ_2 Z_3}}{S_{\Delta Z_1 Z_2 Z_3}}, \quad (5)$$

$$\Phi'_2 = - \frac{S_{\Delta PZ_1 Z_3}}{S_{\Delta Z_1 Z_2 Z_3}}, \quad (6)$$

$$\Phi'_3 = \frac{S_{\Delta PZ_1 Z_2}}{S_{\Delta Z_1 Z_2 Z_3}}. \quad (7)$$

当由消色差和消热差要求确定的  $P$  点位置一定时, 由  $Z_1, Z_2, Z_3$  3 点构成的三角形的面积对等效光焦度的值有影响, 三角形面积越小, 等效光焦度

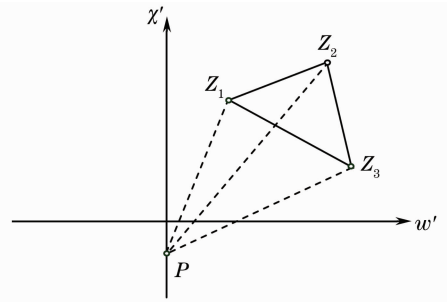


图 1 利用热差图求解 3 块透镜光焦度的示意图  
Fig. 1 Obtaining optical power among three lenses on athermal chart

的绝对值越大, 不利于单色像差的校正[3]。

图 2 给出了连接材料为 Al, 由 3 块透镜组成的佩茨瓦尔结构中透镜等效光焦度绝对值较小的一组解所对应的热差图, 其中前组为 Ge 和 ZnS 透镜, 后组为 Si 透镜。但此组解实际对应为反远结构, 不符合佩茨瓦尔结构要求。必须增加 1 块透镜才能找到满足方程组(4a)~(4c)以及佩茨瓦尔结构要求且等效光焦度绝对值较小的解, 但增加透镜会加大系统的总重, 因此考虑使用由衍射元件与折射透镜组合而成的折衍混合透镜。由于衍射元件以折射透镜为基底, 因而折衍混合透镜的运用既相当于增加 1 块透镜又几乎不增加光学系统的重量[10,11]。

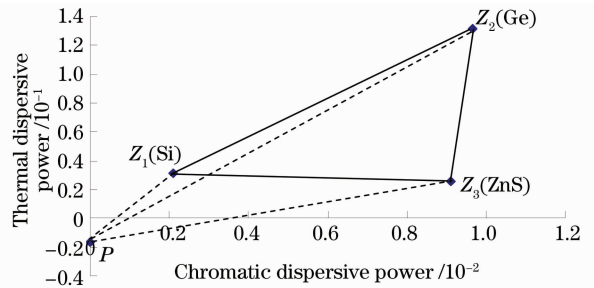


图 2 3 块透镜构成的佩茨瓦尔结构的最佳材料选择  
Fig. 2 Optimal material choice for three lenses Petzval objective

衍射元件的色散特性和热差特性与一般折射透镜大相径庭, 衍射元件的归一化热差系数只与基底材料的热膨胀系数有关[4,5,12,13]:

$$\chi_d = -2\alpha_g, \quad (8)$$

其归一化色差系数与基底材料无关

$$w_d = \frac{\lambda_s - \lambda_l}{\lambda_m} = -0.5, \quad (9)$$

式中  $\lambda_s, \lambda_m, \lambda_l$  分别为工作波段内短波波长、中心波长和长波波长。由于衍射元件热差、色差的特殊性, 使得各种基底材料的衍射元件在热差图上位置相差不大。在现有红外透射材料较少的情况下, 相当于

增加了一种特殊的红外透镜材料。

引入衍射元件后,佩茨瓦尔结构的后组中保留使用色散较小的硅透镜以使前组需要补偿的色差较小。在后组透镜的光焦度、材料确定的条件下,前组的3块元件(2块透镜和1块衍射元件)的材料仍然可以通过热差图确定。此时整个前组3块元件满足消色差和消热差要求所确定的 $P$ 点位置应在(4b)式的右侧减去后组硅透镜所产生的对色差的影响 $w'\Phi'$ ,在(4c)式的右侧减去后组硅透镜所产生的对热差的影响 $\chi'\Phi'$ ,此时 $P$ 点位置较图2中 $P$ 点位置偏左偏下。因为Ge材料具有良好的加工性能,所以采用以Ge基底的衍射元件。图3和图4分别给出了两组不同材料满足消色差和消热差的热差图。第一组为Ge透镜,Ge的衍射元件以及Si透镜的组合,第二组选为Ge透镜,Ge的衍射元件以及ZnS透镜的组合。由图3和图4可以看出,在热差图上衍射元件的位置距任一材料折射透镜的位置都较远,满足消热差和消色差要求时衍射元件的光焦度必然较小,而折射透镜的光焦度与材料选择的关联度不大。比较图3和图4,可以看到第二组材料对应的 $\Delta Z_1 Z_2 Z_3$ 面积大于第一组材料对应的面积,选择第二组材料的折射元件光焦度绝对值小于第一组。但具体计算当总焦距为100 mm时,第二组的

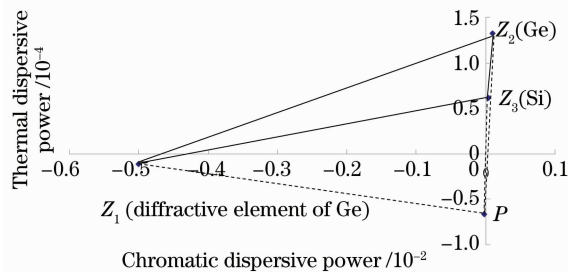


图3 前组为Ge透镜, Si透镜, Ge的衍射元件的热差图

Fig. 3 Front group composed of Ge, Si and Ge diffractive element in athermal chart

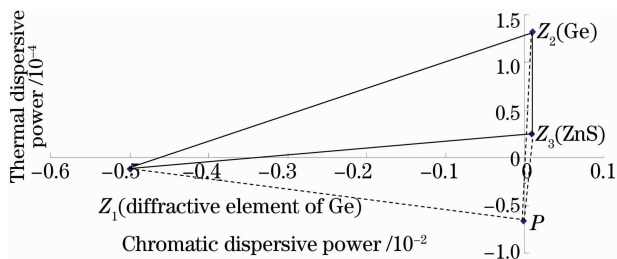


图4 前组为Ge透镜, ZnS透镜, Ge的衍射元件的热差图

Fig. 4 Front group composed of Ge, ZnS and Ge diffractive element in athermal chart

二级光谱为0.0715 mm,较第一组的二级光谱0.0352 mm大。同时考虑到Si的折射率高,重量轻,因此前组采用第一组材料,即最终选用:前组由Si透镜,Ge透镜及其衍射元件组成,后组为Si透镜的佩茨瓦尔型物镜。

### 3 设计结果

完成前组的材料选择后利用(4a)~(4c)式可确定前组各元件的光焦度分配,进而给出佩茨瓦尔物镜的初始结构参数,并用CODE V软件对其进行优化设计。优化设计过程中,对系统的后工作距进行了控制。表2给出了优化设计前后各个组元的光焦度,优化设计后的各个元件的光焦度有所变化。从表2中可见优化后各个组分的光焦度变化不大,初始计算的光焦度分配较合理。具体的光学结构如图5(a)所示。第一块为Si球面正透镜,第二块为负的Ge透镜,前表面使用了非球面,以减小由大相对孔径引起的球差,后表面为如图5(b)所示的衍射面,在通光孔径范围内具有12个环带,易于用金刚石车床加工实现,第三块为Si球面正透镜。光路的最后为蓝宝石窗口,已考虑了大相对孔径系统中平板窗口对系统像质的影响。

表2 佩茨瓦尔透镜各组成部分的光焦度

Table 2 Element power of Petzval objective

	Element power	Element power (after optimization)
Si (refractive lens)	0.014173	0.013249
Ge (refractive lens)	-0.009137	-0.009495
Ge (diffractive lens)	-0.000036	-0.000042
Si (refractive lens / the rear group)	0.010000	0.011299

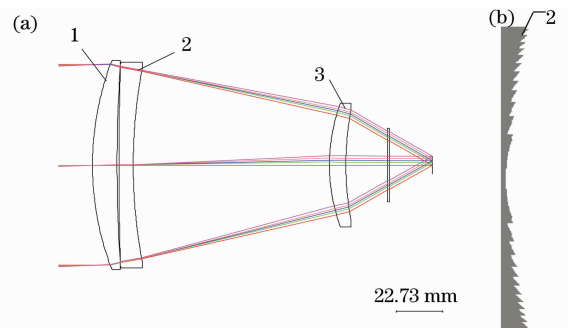


图5 光学结构图。(a)光路图;(b)衍射元件结构图

Fig. 5 Optical layout. (a) optical layout of the hybrid athermalised Petzval objective; (b) profile of diffractive element

图 6 给出了一 20~60 °C 范围内调制传递函数在耐奎斯特频率 15 线对/mm 处数值的变化情况, 调制传递函数(MTF)的最小值出现在 60 °C 时边缘视场处, 接近于 0.7。可见光学系统能够在 -20~60 °C 范围内保持较好的成像质量。

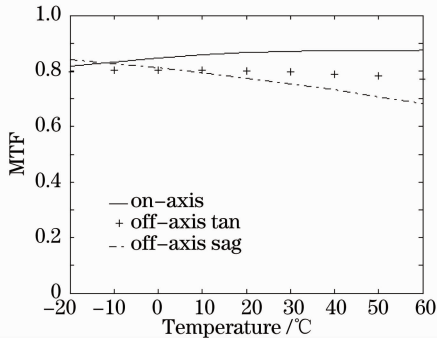


图 6 15 线对/mm 处传递函数值随温度变化的曲线

Fig. 6 MTF value at 15 line pair /mm under different temperature

## 4 结 论

推导了分离透镜组由于温度变化引起的热离焦计算公式, 从而得到光学被动消热差所满足的条件。讨论了利用热差图对满足消色差、消热差要求的光学系统的材料进行合理选择的方法。在此基础上完成了基于非制冷探测器工作的大相对孔径中波红外空间成像系统的 optical 设计。该光学系统设计为佩茨瓦尔型物镜, 共由 3 块透镜组成, 其中 1 块为折衍混合透镜, 结构简单紧凑。通过不同特性材料的组合, 实现了光学被动消热差, 保证了一定温度变化范围内成像质量良好, 与此同时该系统具有较大的后工作距。

## 参 考 文 献

- 1 Brian D. Oelrich. Low-cost mid-wave IR microsatellite imager concept based on uncooled technology[C]. *SPIE*, 2004, **5570**: 209~217
- 2 Chen Lüji, Feng Shengrong. A compact athermalizing infrared optical system [J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(4): 203~205

- 3 陈吕吉, 冯生荣. 一种紧凑的红外消热差系统[J]. *红外技术*, 2007, **29**(4): 203~205
- 3 Yasuhisa Tamagawa, Satoshi Wakabayasi. Multilens system design with an athermal chart[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(34): 8009~8013
- 4 Bai Jian, Sun Ting, Shen Yibing *et al.*. Athermalization analysis of infrared hybrid refractive diffractive optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 997~1002
- 白 剑, 孙 婷, 沈亦兵 等. 红外折射-衍射混合光学系统的热差分析[J]. *光学学报*, 1999, **19**(7): 997~1002
- 5 Guo Yonghong, Shen Mangzuo, Lu Zukang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1392~1395
- 郭永洪, 沈芒作, 陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1392~1395
- 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 Zhang Yinan, Wang Zhaoqi, Sun Qiang. Athermalized design of extensive temperature range for infrared hybrid refractive-diffractive objective [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 311~314
- 张铁楠, 王肇圻, 孙 强. 折/衍混合红外物镜的超宽温消热差设计[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 311~314
- 8 Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang, Yang Jianfeng *et al.*. The optical-mechanical integrated design of athermal infrared optics [J]. *Infrared Technology*, 2002, **22**(2): 32~35
- 胡玉禧, 周绍祥, 杨建峰 等. 红外系统的光机热一体化设计[J]. *红外技术*, 2002, **22**(2): 32~35
- 9 Zhang Yimo. *Applied Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1982. 231~243
- 张以谟. *应用光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 231~243
- 10 Zhang Huijuan. Plastic hybrid diffractive-refractive eyepiece for head-mounted display [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 856~859
- 张慧娟. 用于头盔显示器的折/衍混合全塑料目镜[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 856~859
- 11 Liu Qi, Liu Liping, Yuan Pusheng. Design of hybrid refractive-diffractive optical system of infrared laser scanning testing equipment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 263~267
- 刘 琦, 刘丽萍, 原蒲升. 折-衍混合红外激光扫描检测设备的光学系统设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 263~267
- 12 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
- 张 羽, 杨长城, 杨坤涛. 8~14  $\mu\text{m}$  波段折衍混合红外光学系统的热补偿设计[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1535~1538
- 13 G. P. Behrmann, J. P. Bown. Influence of temperature on diffractive lens performance[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2483~2489