

doi:10.3788/gzxb20144310.1022005

# 大视场透射式红外平行光管系统设计

王劲松<sup>1</sup>, 牛津<sup>2</sup>, 马英<sup>3</sup>, 王明<sup>4</sup>, 胡迈<sup>1</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130000)

(2 中国兵器工业第二〇八研究所, 北京 102202)

(3 河北承德技师学院, 河北 承德 067000)

(4 中国人民解放军 63856 部队, 吉林 白城 137000)

**摘 要:**为了满足红外检测设备大视场、高像质、易便携的要求,设计了工作波段为 8~14  $\mu\text{m}$ 、全视场大于等于 24°、孔径为 130 mm 的大视场透射式红外平行光管系统.采用三片式摄远物镜结构,并加入一片非球面解决了三片透射式系统像差难以平衡的难题.根据光学设计理论对系统进行多层次优化设计,最终得到了在全视场内的红外平行光管设计结果,其中不同波长所对应的各焦距位置在 20 lp/mm 处的调制传递函数不低于 20%、畸变小于 1%,其优点是大视场、高分辨率、成像质量好、结构简单,可以为各种红外热像仪、军用红外瞄具的性能参数检测系统提供高像质、高分辨率的无穷远红外目标源.成功研制一台应用样机,并于加工装调后进行了应用验证试验,结果表明样机获取图像清晰准确,能够满足测试要求.

**关键词:** 光学; 红外平行光管; 光学设计; 摄远物镜; 大视场

中图分类号: TH703

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1022005-8

## Wide-field of Infrared Transmissive Collimator System Design

WANG Jin-song<sup>1</sup>, NIU Jin<sup>2</sup>, MA Ying<sup>3</sup>, WANG Ming<sup>4</sup>, HU Mai<sup>1</sup>

(1 Changchun University of Science and Technology, School of Electro-Optical Engineering, Changchun 130000, China)

(2 NO. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing, 102202 China)

(3 Hebei Chengde College of Technician, Chengde, Hebei, 067000, China)

(4 NO. 63856 People's Liberation Army troops, Baicheng, Jilin 137000)

**Abstract:** In order to meet wide-field, high image quality and easy portability of infrared detection equipments, a large field transmissive infrared collimator system with working band of 8~14  $\mu\text{m}$ , full field  $\geq 24^\circ$ , aperture of 130mm was designed. A simple three-type telephoto lens structure and a non-spherical were used to solve the problem that how to balance the three transmission systems aberration. According to the theory of optical design optimization of multi-level system design, eventually a infrared transmissive collimator system was obtained, the MTF at 20 lp/mm was not less than 20%, distortion resolution rate infinity was less than 1% in the whole field of view and the position of each focal length corresponding to different wavelengths. The advantages are wide field of view, high resolution, good image quality and simple structure, which can provide high image quality, high-resolution infrared target source at infinity for a variety of infrared imaging, military infrared detection system performance parameters sights. A prototype application was developed and applied to verify alignment test. The results show that the prototype can get clear and accurate images to meet testing requirements.

**Key words:** Optics; Infrared collimator; Optical design; Telephoto lens; Wide-field

**OCIS Codes:** 120.1680; 120.4820; 220.1000; 220.3620; 260.3060

**基金项目:** 吉林省重大专项——科技发展计划项目新型光电子器件及应用技术项目(No. 20100610)、吉林省科技发展计划资助项目(Nos. 20080331, 20090555)和高功率半导体激光国家重点实验室科研基金(No. 91400310405)资助

**第一作者:** 王劲松(1973-)男,副教授,硕士,主要研究方向为光电仪器检测. Email: soldier\_1973@163.com

**通讯作者:** 牛津(1988-),女,硕士,主要研究方向为光学设计与光电技术检测. Email: niujin0615@163.com

**收稿日期:** 2014-01-21; **录用日期:** 2014-07-22

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

红外平行光管作为一种光学度量仪器是各种红外成像光学系统性能检测的重要设备. 目前, 各种红外热像仪、军用红外瞄准镜朝大视场、高分辨率的方向发展, 且视场远远超出常规平行光管的适用范围. 因此, 有必要提出一个适合各类型号的红外热像仪、军用瞄准镜性能参数检测的总体方案, 并设计一套大视场透射式红外平行光管系统.

现阶段, 国内外在透射式红外平行光管的研制、方法和技术等方面的发展日新月异. 国外在开发用于对红外成像设备进行性能参数检测的多种类红外平行光管方面, 比较突出的有 OPTIKOS 公司和 CI 公司<sup>[1-3]</sup>. 美国研制了一种应用于高级陆地成像仪质量检测的准直仪, 准直系统在 $\pm 1.6^\circ$ 的视场范围内达到衍射极限. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所设计了一套 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的准直光学系统, 视场角为 $\pm 4^\circ$ , 光瞳直径为 $100\ \text{mm}$ , 并将其应用在红外场景产生器上. 为了满足导弹红外成像系统的调试和检验, 哈尔滨工业大学设计了一套检测系统, 其红外平行光管物镜采用柯克 3 片式结构, 且为像方远心光路, 视场角不小于 $-11^\circ\pm 0.3^\circ$ , 是目前国内可查阅的较大视场的透射式红外平行光管. 南京工业大学设计了一台大视场平行光管光学系统, 视场角设计为 $\pm 15^\circ$ , 用途是检测战斗机的仪表, 相当于平显仪, 但是成像质量较低, 物镜组重量较大, 不适用于便携式的小型热像仪、光学瞄准镜的检测. 为了扩展光谱应用范围, 目前普遍采用反射式光学系统, 但反射式系统存在中心遮拦导致调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 降低、次镜支撑对准困难、易受杂散辐射影响、安装误差灵敏度

高、装配难度大、机构设计复杂、成本高等问题<sup>[4-8]</sup>.

鉴于此, 设计的红外平行光管需要满足: 1) 相对孔径较大并且不能存在中心遮拦问题, 具有高的集光能力, 满足高指标的探测能力; 2) 视场足够大, 且可以提供稳定的平像场; 3) 提供成像质量具有接近衍射极限的无穷远目标源; 4) 针对有关探测弱信号的性能参数, 要求具有消除杂散光和抑制冷反射的能力; 5) 在宽的温度变化范围内不产生离焦现象, 具有良好的热稳定性; 6) 具有结构简单、质量轻、方便携带运输的特点.

本文设计了一套工作波段为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 、全视场大于等于 $24^\circ$ 、孔径为 $130\ \text{mm}$ 的大视场透射式红外平行光管系统, 且分辨率高、成像质量好、结构简单, 可以为各种红外热像仪、军用红外瞄具的性能参数检测系统提供高像质、高分辨率的无穷远红外目标源.

## 1 系统组成

大视场红外平行光管光学系统原理如图 1, 系统由黑体及控制系统、红外靶标组件和大视场红外平行光管物镜组成. 黑体发出的红外辐射通过红外靶标形成红外辐射温差, 与黑体连接的黑体控制器用于设定、显示黑体温度. 黑体控制器通过串口与计算机连接, 在计算机上也可以实现对黑体的温度显示、记录. 红外辐射温差通过大视场红外平行光管物镜投射到待测红外瞄准镜的入瞳内, 被红外瞄准镜接收, 由视频输出设备将红外瞄准镜的视频信号传入计算机, 进行信号采集、数据处理和红外瞄准镜相关性能参数的检测. 这样, 大视场红外平行光管就为被试红外瞄准镜提供了模拟自然环境不同温差的红外辐射温差, 作为被测系统的红外应力源.

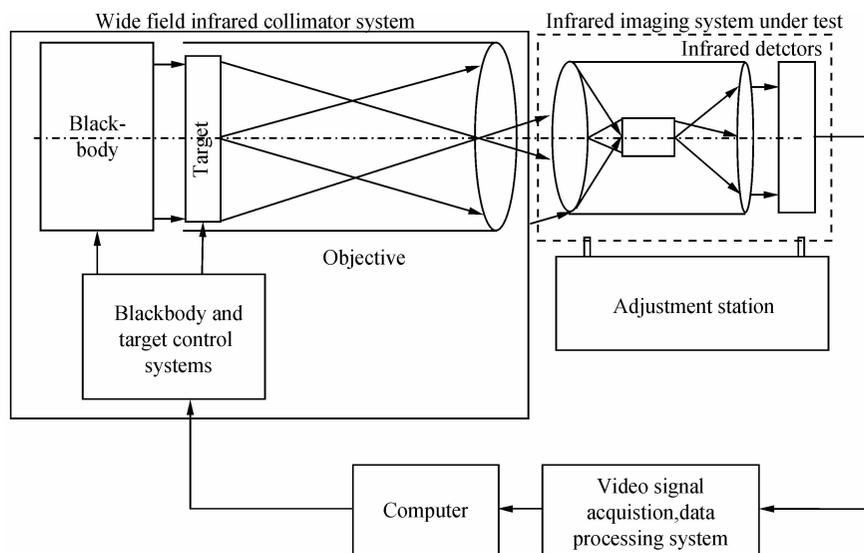


图 1 大视场红外平行光管系统原理

Fig. 1 The schematic of wide field infrared collimator system

## 2 光学系统设计

### 2.1 黑体及控制系统选取

黑体主要由温度控制器、热源、辐射孔、温度、背景传感器、放大器、电源、电缆、散热器等组成.其工作原理为:首先得由背景传感器和黑体表面的温度传感器得到的数值差输入到温差控制器中,经过温差控制器的计算后,将电能输送到热源上,此时热源温度就相应地改变到设定数值;之后,由热源发出的红外辐射通过辐射孔向外发射出去,透过不同类型的靶板之后形成相应图案的热图;最后,不同图案的热图经过挡板上的孔辐射出去,最终进入红外平行光管物镜系统,为测试提供相应的无穷远目标源.

对于轻武器红外瞄准镜,使用的红外探测器通常为制冷型,其有效探测波长范围为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ , $50\ ^\circ\text{C}$ 、 $20\ ^\circ\text{C}$ 及 $-40\ ^\circ\text{C}$ 的黑体对应此波长范围的相对辐射出射度分别为 $2.40\times 10^{-2}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $1.55\times 10^{-2}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $4.77\times 10^{-3}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ .由此可见,黑体温度不同,其相对辐射出射度不同,但相差不大,常温黑体就可以满足红外瞄准镜性能参数的检测需要.

根据当前红外瞄准镜实际情况,设计黑体波长范围为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ,工作温度为 $5\ ^\circ\text{C}\sim 70\ ^\circ\text{C}$ ,有效辐射面 $50\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$ ,温度分辨率 $0.01\ ^\circ\text{C}$ ,黑体有效发射率 $0.95$ ,控温精度 $\leq 0.5\ ^\circ\text{C}$ ,温度稳定性 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}/\text{h}$ .

红外靶标与背景温差由黑体控制器控制.采用差分控制,差分温度范围为 $-15.00\ ^\circ\text{C}\sim 50.00\ ^\circ\text{C}$ (以 $20\ ^\circ\text{C}$ 为标准温度).设置所需要的温差 $\Delta t$ ,将此差值送入温差控制器内部,与温差传感器送来的信号进行比较,黑体控制器就可以自动控制黑体与红外靶温差值.温差控制电路原理如图2.

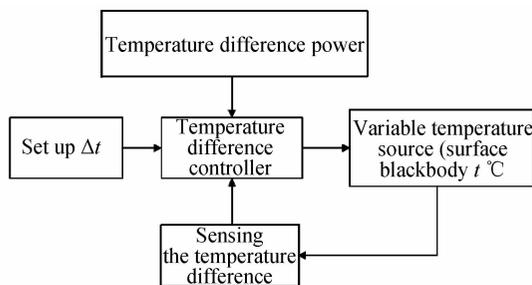


图2 黑体温度控制原理

Fig. 2 The temperature control schematic of blackbody

黑体温度控制有绝对温度和差分温度两种控制模式,可按照需要进行切换.

### 2.2 红外靶标组件设计

红外靶标设计为十字靶标、四杆靶标、圆孔靶标、狭缝靶标、半月靶标和空白靶标六种.靶标做成圆形,直径 $127\ \text{mm}$ ,通光口径 $50\ \text{mm}$ ;靶标基底厚 $0.2\ \text{mm}$ ,靶标误差 $\leq 4\%$ .靶标的分划形式及规格如图3.

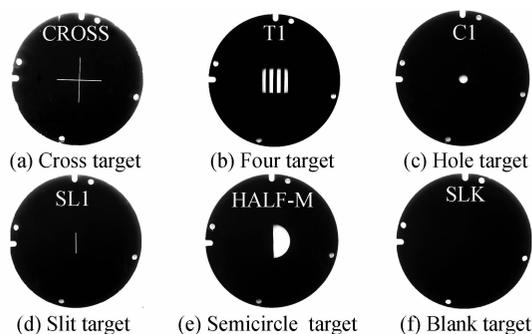


图3 红外靶标设计

Fig. 3 Infrared target design

十字靶标分划线宽设计了3种规格: $1\ \text{mm}$ 、 $2\ \text{mm}$ 、 $4\ \text{mm}$ ,使用时根据需要安装在靶标架上.四杆靶标分划线宽设计3种规格:等宽间距 $1\ \text{mm}$ 、 $2\ \text{mm}$ 、 $4\ \text{mm}$ ,长度 $50\ \text{mm}$ .使用时根据需要安装在靶标架上.其余靶标均有类似不同规格设计,由于靶标类型繁多,不再赘述.

靶板采用铜板制作,镂空部分直接透射红外辐射;未镂空部分一侧镀有高反射膜,另一侧喷涂长波红外吸收涂料.

靶标选择器由靶标控制器、位置传感器、步进电机、靶盘、靶标、角度调整器、挡板等组成.靶标控制器原理如图4.

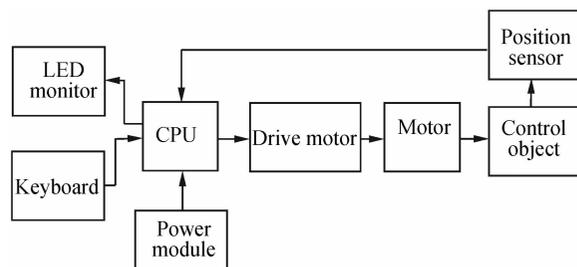


图4 靶标控制器原理

Fig. 4 The schematic of the target controller

选择靶位的控制信号进入转轮控制器,与位置传感器信号比较,计算出目标靶所在位置,确定所需靶标.按位置控制键,靶盘自动将所选靶对准辐射孔,若有偏差可进行微调.

位置控制器对角度位置进行精确的位置控制,可设置五个位置点.

### 2.3 物镜设计

大视场红外平行光管物镜是主要部件之一,用于出射所需要的平行光束,为红外检测系统提供一个高精度、像质清晰的无穷远红外目标像.红外平行光管的主要技术参数有视场 $2\theta$ 、光学系统 $F$ 数、焦距 $f'$ 、通光口径 $D$ .

#### 1) 视场

红外平行光管的视场依据红外被试品所需最大视场而确定,并适当增大.根据调研,目前常用红外瞄准

镜最大视场 $\leq 20^\circ$ ,民用的红外热像仪大致在 $10^\circ$ 左右,本文将红外平行光管的全视场角定为 $2\theta \geq 24^\circ$ ,这是目前可查阅范围内的透射式红外平行光管首次提出的最大视场,以满足目前市场上各种红外热成像仪和多种型号红外瞄准镜性能参数检测.

## 2) F数

由几何光学知,理想的点光源经过光学系统之后,在像空间的像面上的成像不是一个像点,而是一个弥散斑,称为艾里斑.艾里斑的尺寸是光学系统的性能的重要参数,光学系统性能好与艾里斑的尺寸成反比.与此同时,光学设计时还要考虑系统的能量利用率,这就要求系统的艾里斑落尽量落在探测器的1~2个像元内.

通过物理光学的衍射理论可知,艾里斑直径的计算公式为

$$D_{\text{airy}} = 2.44\lambda F = 2.44\kappa \frac{f'}{D_0} \quad (1)$$

式中, $\lambda$ 为光学系统波长, $F$ 是光学系统 $F$ 数.

由式(1)可知

$$F = f'/D_0 = D_{\text{airy}}/2.44\lambda \quad (2)$$

设计采用工作谱段 $\lambda = 8 \sim 12 \mu\text{m}$ ,当 $D_{\text{airy}} = 50 \mu\text{m}$ 时,代入式(2)计算得光学系统的 $F$ 数为

$$F = 1.70 \sim 2.56 \quad (3)$$

要想提高所设计的光学系统的通光能力和成像质量,理论上需要使得 $F$ 数尽可能的减小.但是,随着 $F$ 数的减小,光学系统的设计和加工难度就逐渐增大,因此,综合考虑选择大视场红外平行光管物镜的 $F = 2.3$ .

## 3) 焦距 $f'$

红外平行光管物镜的焦距 $f'$ ,视场角 $2\theta$ 和探测器尺寸 $L$ 的关系为

$$L = 2f' \tan \theta \quad (4)$$

可知,探测器尺寸 $L$ 与光管物镜的焦距 $f'$ 、视场角 $2\theta$ 成正比,随着 $f'$ 和半视场角 $\theta$ 的增大,探测器尺寸也成倍增加.

光学系统空间分辨率与焦距 $f'$ 之间的关系为

$$\delta = \alpha/f' \quad (5)$$

式中, $\delta$ 为空间分辨率, $\alpha$ 为探测器单个像元尺寸.

由式(4)、(5)可知,当探测器件尺寸保持不变,焦距 $f'$ 与空间分辨率 $\delta$ 成正比例关系,与视场角 $2\theta$ 成反比例关系.当焦距增大时,空间分辨率也成倍增大,视场角相应减小.因此,红外平行光管系统物镜焦距的选择要同时考虑空间分辨率 $\delta$ 和视场角 $2\theta$ 两个因素的影响.综合多方面考虑,本文设计的红外平行光管物镜的焦距定为 $f' = 300 \text{ mm}$ .

## 4) 通光口径 $D$ 的选取

由于 $F = 2.3$ , $f' = 300 \text{ mm}$ ,光学系统通光口径为

$$D = f'/F = 130 \text{ mm} \quad (6)$$

## 5) 红外光学材料

为了满足红外光学仪器的使用要求,要求红外光学材料具有特定的化学及物理特性.红外光学材料对光波的透过能力以及所能透射的光谱宽度受材料本身组成结构的影响,除了对红外波段具有一定的透过率,对其他光波段不具透过性.

通常情况下,红外光学系统要求红外透射材料的透过率 $T > 50\%$ ,才能满足使用要求.并且当红外光学材料处于高温环境中时,要保证工作谱段红外光线的自辐射足够小,才能避免部分失真信号传入红外探测器中从而影响成像质量.

红外光学材料的选取需要适应所需设计的大视场红外平行光管物镜系统的工作波段范围,本文设计要求的工作波段为 $\lambda = 8 \sim 14 \mu\text{m}$ ,不仅要求选用的红外光学材料对 $\lambda = 8 \sim 14 \mu\text{m}$ 光谱段的透过能力高,并且要求热学、力学等方面的性能好,在各种不同环境适应能力强.Ge材料是一种优质的红外透射型材料,它不仅色散系数小,折射率大,而且在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段内的透过能力很高.经过对比,三片镜片选用单晶锗作为红外光学材料.

## 6) 光学结构选取

正确的光学系统设计型式,即光学结构的选取,通常是光学设计工作的关键.目前面阵红外探测器不断向前发展,透射式光学系统的结构简单,装调相对容易,更不需要必要的光机扫描,并且可以加入非球面降低系统的像差校正难度,因而对于红外光学系统的结构选取,光学设计者大多使用透射式光学结构.相对于反射式平行光管结构,采用透射式红外平行光管结构,不仅不存在中心遮拦对成像质量的影响问题,而且能够较容易地解决防水、抗震、体积偏大、重量偏重等难题,一定程度上降低了对测试人员的要求.综合考虑,设计的红外平行光管物镜选用透射式光学系统.

常见的透射式物镜有单片新月形物镜、双胶合消色差物镜、匹兹伐物镜、三片式柯克物镜、天塞物镜、双高斯物镜、摄远物镜、广角物镜等多种形式的物镜,综合各物镜的适用范围和结构特点,选择摄远型光学结构.

摄远物镜是由一个正光焦度组和一个相对距离较远的负光焦度组所构成的长焦距物镜,有时也可以在双胶物镜后直接加一块厚的弯月形透镜作为摄远物镜的简单型式.具有正光焦度的前组主要用来对目标生成实像,具有负光焦度的后组可以在一定范围内加大整个物镜系统的焦距.首先在系统结构方面,摄远物镜的最大特点是其系统总长控制在焦距内,这样就大大减小了物镜系统的体积.另外,在成像质量方面,摄远物镜不仅能够校正色差、像散、球差和彗差,具有负光焦度的后组还可以对场曲、畸变也进行很好的校

正<sup>[53]</sup>.尤其是摄远物镜可以提供的视场角很大,使它校正像差的能力能够发挥的更加完善,完全可以满足结构小巧、像质优良的设计要求。

摄远物镜结构形式种类较多、改进角度各异,遵循系统简化、低成本的要求,采用非球面技术,选用三片式摄远型透射式结构作为大视场红外平行光管的光学基本结构。

分析、计算得到用于红外瞄具性能参数检测系统的红外平行光管光学系统初始参数如表 1。

表 1 红外平行光管光学系统初始参数

Table 1 Initial parameters of the infrared collimator optic system

Work-spectral	Field of view	F number	Focal length	Aperture	Optical materials
$\mu\text{m}$	$24^\circ$	2.3	300mm	130mm	Ge

通常红外透射式光学系统需要在最前面加一片保护平板,它具有高穿透、透射距离远、杂散信号干扰小等特点。

### 3 优化设计及象质评价

综合考虑光学系统透过率、成像质量和大视场要求,红外平行光管采用三片透射式光学系统,一片透镜为非球面,材料为锗玻璃,外露表面镀硬碳膜,光学系统前面加一片保护平板.工作波段为  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 、视场  $2\theta\geq 24^\circ$ 、孔径为  $\Phi 130\ \text{mm}$ .将初始结构参数输入 ZEMAX 软件,大视场红外平行光管系统光路图如图 5。

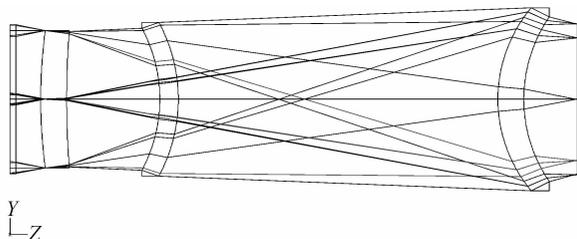


图 5 红外平行光管系统光路

Fig. 5 The optical path diagram of the infrared collimator system

光学系统所成的像应该足够清晰、物像相似、变形要小,评价光学系统成像质量好坏的标准是实际光学系统产生像差的大小.像差越小,光学系统的成像质量越好<sup>[10-11]</sup>。

大视场红外平行光管物镜初始结构参数只保证了系统在  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波长范围的近轴区域内像方焦点位置相同,使得诸如初级球差、初级彗差、色散等近轴像差得以减小.但当视场和孔径增大时,边缘视场的光线只要使用透镜元件的外围区域,就会产生很大的像散、畸变、横向色差、轴上高级球差、三级彗差等高级像差,这些像差既明显又不易校正。

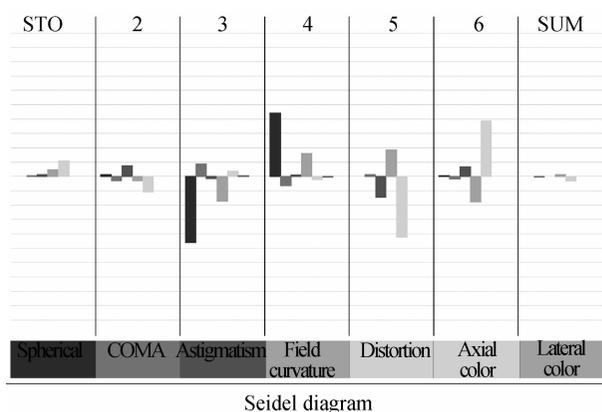


图 6 物镜初始结构的赛德尔条形图

Fig. 6 The bar graph structure Seidel of the initial objective

采用 ZEMAX 软件输出物镜初始结构的赛德尔条形图来对整个系统的像差情况进行分析,找到优化设计的方向,如图 6,设计的大视场红外平行光管物镜采用三片式结构,一共有 6 个透镜表面,每个表面产生的像差大小比例在赛德尔条形图上可以清楚地看到。

首先,轴上高级球差的产生主要是由第二块透镜的两个面(第 3 面和第 4 面)上产生的.由于光线的投射高度  $\Delta h$  比较大,第 3 面上产生负高级球差和第四面上产生的正高级球差所占比例最大,并且二者不能相互抵消.因此,减少高级球差的方法之一是减小光线的投射高度  $\Delta h$ ,并且需要使第 3 面和第 4 面距离减小而又不能影响 Petzval 和的校正,这就要求距离较远的第二块透镜和第三块透镜进行增厚处理.(此时,第 3、4 面产生的高级球差大致相互抵消后,加大第 1 面的曲率,可以使初级球差和高级球差相互平衡,从而减小整个物镜系统的球差值。

其次,高级色差是孔径的函数,表现为色球差的变化,孔径增大导致色差值也增大.平衡系统色球差要注意两个细节:1)必须降低系统的轴上高级球差;2)合理分配各个镜片的光焦度,使初级色差和高级色差相平衡,满足  $8\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $14\ \mu\text{m}$  波段的光在  $0.707\ 1$  孔径处尽量重合。

最后,由于第 5、6 个面的半径指向孔径光阑的反方向,不仅使得轴外主光线入射角  $i_p$  很大,而且使得主光线投射高度  $\Delta h_p$  也很大.从赛德尔条形图上可以明显看到物镜初始结构的像散、场曲值很大,全部集中在第 5、6 面上,并且第 6 面产生的正像散难以抵消第 5 面产生的负像散.解决的方法是尽量减小投射高度  $\Delta h_p$ .因此,想要平衡像散值,同样需要将第二块透镜和第三快透镜增厚处理.当第 5、6 面的像散得以相互抵消后,再调整第一块透镜(孔径光阑)与第二块透镜之间的相对位置,就降低整个系统的像散值。

根据分析,大视场红外平行光管物镜优化设计的第一步是将第二、三块透镜厚透镜化,也就是在保证初

始结构分离形式的光焦度分配和 Petzval 校正好的前提下,使光在透镜内部的光程与正负光焦度分离后的空气光程相等.这样厚透镜化的第二块透镜的前主面与第三块透镜的后主面之间的光程,等于正负光焦度分离之后的光程,因而减小了投射高度  $\Delta h_p$  和主光线投射高度  $\Delta h_p$ ,将系统的高级球差和像散相互抵消到最小.之后,在 ZEMAX 光学设计软件中仿真模拟出红外平行光管物镜的成像物体,将其位于无限远,并保持各个透镜的空气间隔不变,设置每个面的曲率为变量,使光线在光阑上高度不变.为了提高红外平行光管的象质,在设计中将平行平板后的第一面设计为非球面,从而得到大视场红外平行光管物镜的初步优化结构.最后,利用光学设计软件 ZEMAX 进行仿真优化,加入非球面后,深层优化设计后的系统光路图、垂轴像差曲线、点列图、MTF 曲线以及场曲、畸变曲线图、像点能量分布图、点扩散函数曲线图,分别如图 7~13 所示.

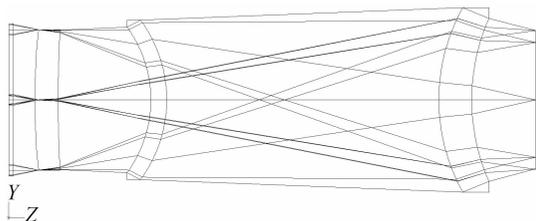


图 7 加入非球面优化后的系统光路图

Fig. 7 The optical path diagram of system added aspheric after optimization

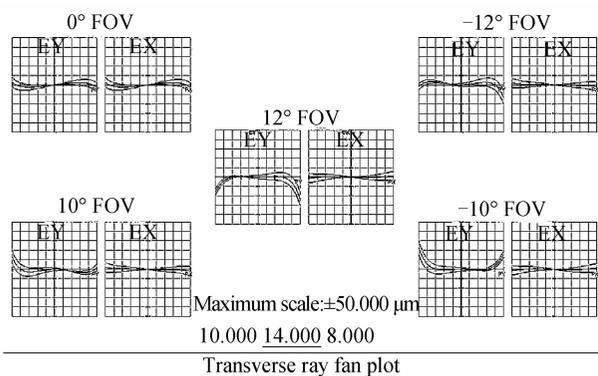
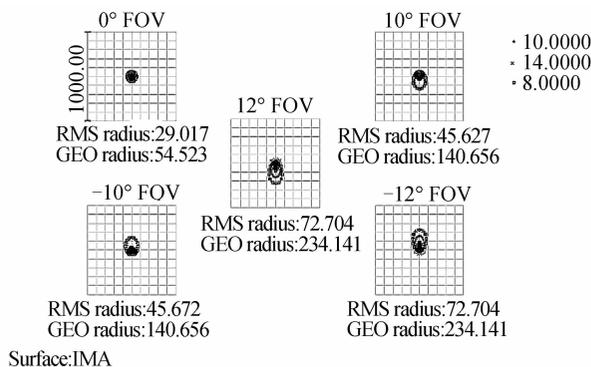


图 8 加入非球面优化后的垂轴象差曲线

Fig. 8 The vertical axis aberration after adding a aspheric

设计的系统加入非球面后,通过特性曲线可以看出,垂轴像差的最大值小于  $150 \mu\text{m}$ ,因为系统的垂轴像差一般小于  $2\lambda F^2$ ,故符合系统的要求.仔细观察系统的点列图可知,每个视场内光斑均方根半径都小于红外瞄准镜的象元尺寸  $50 \mu\text{m}$ ,而且都小于每个视场的艾利斑,85%的能量集中在一个象元内;由图 10 知,所有视场在  $20 \text{ lp/mm}$  空间频率下系统的 MTF 均不低于 20%,尤其是对轴外像差与孔径高级像差的校正效果明显.由图 11 可以看出,所设计的红外平行光管物镜的畸变值为 0.65%,完全符合要求.由图 12 和图

13 可以看出,从能量和衍射的角度来看,设计的红外平行光管物镜绝大部分能量主要集中在高斯像点附近,以高斯像点为中心半径为  $10.25 \mu\text{m}$  的包容圆内,所包容的能量达到 80% 以上.大视场红外平行光管物镜的成像质量优良,各个像差值完全符合红外平行光管的设计指标.



Surface:IMA

Spot diagram

图 9 加入非球面优化后的点列图

Fig. 9 The spot diagram after adding a aspheric

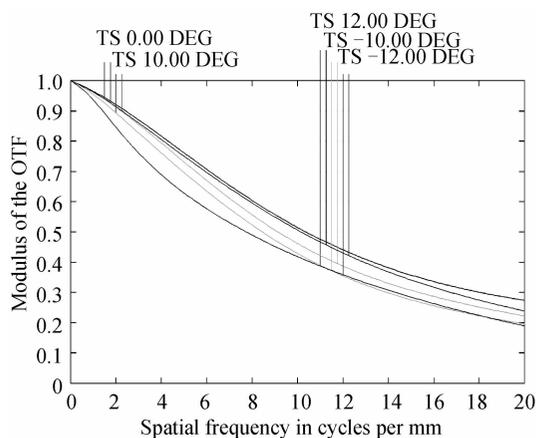


图 10 加入非球面优化后的 MTF 图

Fig. 10 The MTF diagram after adding a aspheric

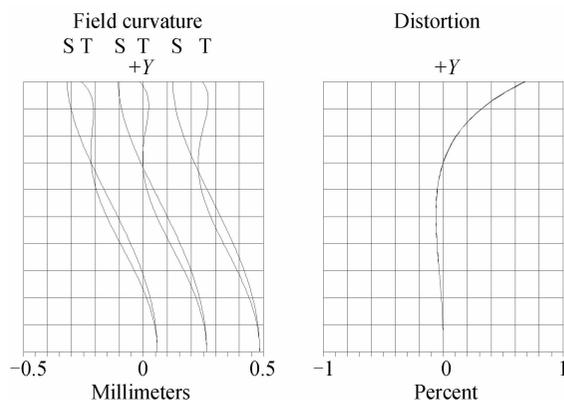


图 11 加入非球面优化后的场曲、畸变图

Fig. 11 The field curvature and distortion figure after adding a aspheric

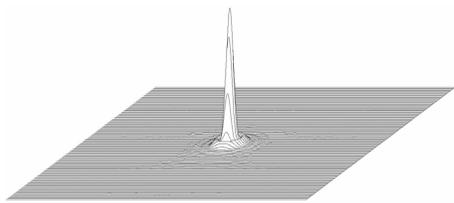


图 12 加入非球面优化后像点能量分布图

Fig. 12 The energy distribution points after adding a aspheric

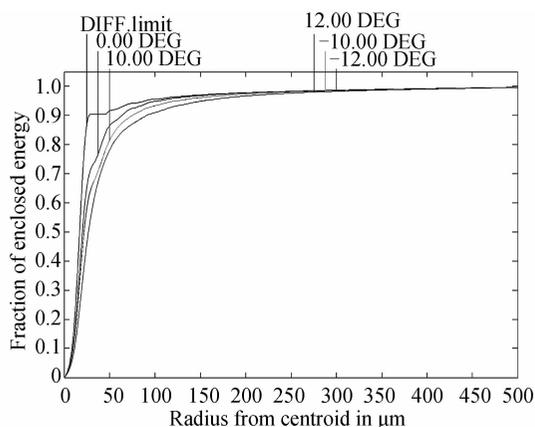


图 13 加入非球面优化后的点扩散函数图

Fig. 13 The spread function optimized aspheric after adding a aspheric

## 4 样机研制与应用实验

### 4.1 样机研制

根据设计结果,研制了一台大视场透射式红外平行光管系统实用样机,如图 14,图 15 为大视场透射式平行光管实物图。

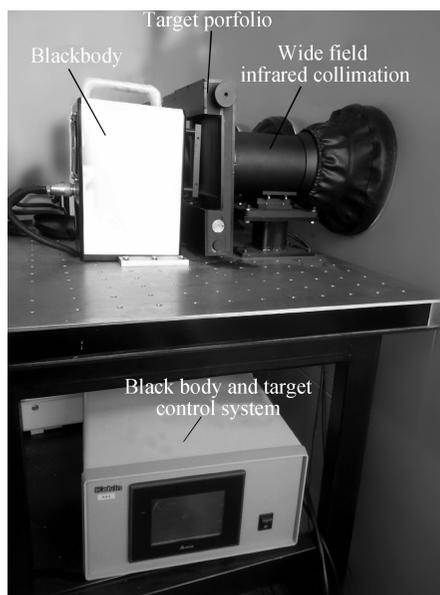


图 14 大视场透射式红外平行光管系统实物样机

Fig. 14 Wide field of infrared transmissive physical prototype collimator system



图 15 大视场透射式红外平行光管实物图

Fig. 15 Wide field of infrared transmissive collimator physical map

### 4.2 应用试验

将设计的大视场透射式红外平行光管样机的视场、畸变、MTF 值的参数进行分析和实验验证。

#### 4.2.1 视场的测试分析

采用红外瞄具结合精密转台(或多齿分度台)进行视场的测试,将一测试合格的红外瞄准镜固定在分辨率为  $0.01^\circ$  的 ABRT 精密转台上,放置在红外平行光管的出瞳处,通过红外瞄准镜瞄准设计的红外平行光管的左右视场边界,通过精密转台分别读出对应两个边界的角度值,其差值即为平行光管的视场。

采用此方法测量的平行光管水平视场为  $24.7^\circ$ ,垂直视场为  $24.6^\circ$ 。由测试结果可知,平行光管视场达到了设计的大视场要求。

#### 4.2.2 畸变的测试分析

利用红外瞄准镜和精密转台分别对准测量平行光管十字分划视场边缘宽度和视场中心宽度,进而计算出全视场畸变大小,实际测量结果水平方向畸变为  $0.66\%$ ,垂直方向畸变  $0.72\%$ ,达到了设计的畸变小于  $1\%$  的要求。

#### 4.2.3 MTF 的测试分析

这里只对平行光管的准直物镜进行测试,采用长波红外传函仪进行了传递函数的测量。结果表明:在  $20 \text{ lp/mm}$  时,衍射极限的 MTF 值为  $0.3$ ,而实际系统的实测结果为  $0.26$ ,基本达到衍射极限。

## 5 结论

设计了一套大视场透射式红外平行光管,工作波段为  $8\sim 14 \mu\text{m}$ 、全视场  $2\theta \geq 24^\circ$ 、孔径为  $130 \text{ mm}$ 。成像质量在要求温度范围内  $20 \text{ lp/mm}$  处的 MTF 值不低于  $20\%$ ,畸变小于  $1\%$ ,能够为各类型红外热像仪、军用瞄具的性能参数检测提供了一个高像质、高分辨率的大视场、无穷远红外目标源,解决了现有仪器无法满足目前新发展的大视场红外瞄准镜及红外热像仪检测要求的难题,从而可以完成对红外瞄准镜的零位走动量、最小可分辨温差、噪声等效温差、调制传递函数、视场角以及高低温环境下可靠性等性能参数的检测。

## 参考文献

- [1] KIM S, YANG H, LEE Y. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(08): 5059-5069.
- [2] GUAN Zi-ying, KANG Li-xin, GAO Wei-zhi, *et al.* Refractive infrared collimator design [C]. Second session infrared imaging system simulation, test and evaluation techniques Symposium, 2008: 586-588.  
关英姿, 康立新, 高伟志等. 折射式红外平行光管设计[C]. 第二届红外成像系统仿真、测试与评价技术研讨会论文集. 2008: 586-588.
- [3] KIM E W, KIM Y J. Advanced optical metrology using ultra short pulse lasers, [J]. *The Review of Laser Engineering*, 2008, **36**(Sup): 1254-1257.
- [4] MA Jie, ZENG Yu. Based on off-axis catadioptric collimator lens 1. 06/1. 54 $\mu$ m infrared laser technology Design [J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(2): 81-83.  
马洁, 曾宇. 基于 1.06/1.54 $\mu$ m 激光的离轴折反式平行光管物镜设计[J]. 红外技术, 2010, **32**(2): 81-83.
- [5] LI Hong-zhuang, ZHANG Zhen-duo, CAO Jing-tai, *et al.* High magnification zoom focal length optical system design [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 358-363.  
李宏壮, 张振铎, 曹景太, 等. 长焦距超高倍率变焦距光学系统设计[J]. 光子学报, 2012, **41**(3): 358-363.
- [6] HUANG Lei, HU Wen-wen, YANG Zhi-wen. Broad spectrum, long focal length collimating lens optical design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S2): 1252127.  
黄雷, 胡雯雯, 杨志文. 宽光谱、长焦距准直物镜光学设计[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(S2): 1252127.
- [7] MIAO Xing-hua, XUE Ming-qiu, AN Bao-qing. Long focal length collimator. Chinese patent. ZL Patent No. 99256104. 3. 苗兴华, 薛鸣球, 安葆青. 长焦距平行光管: 中国, 99256104. 3 [P].
- [8] CHENG Hui-quan, YAO Wei-yong, YANG Guo-guang. The imaging of the binary panoramic annular lens based on the combined perspective technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9): 1111-1114.  
程惠全, 姚炜勇, 杨国光. 基于二元光学色差校正的全景环形成象系统设计. 光子学报, 2001, **30**(9): 1111-1114.
- [9] WANG Hu, MIAO Xing-hua, HUI Bing. The distortion correct of short focus wide-angle optical svsteml [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11): 1409-1412.  
王虎, 苗兴华, 惠彬. 短焦距大视场光学系统的畸变校正[J]. 光子学报, 2001, **30**(11): 1409-1412.
- [10] ZHOU Rui, FANG Jian-cheng, ZHU Shi-ping. Spot size optimization and performance analysis in image measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, **21**(2): 177-179  
周锐, 房建成, 祝世平. 图像测量中光斑尺寸优化及性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2000, **21**(2): 177-179.
- [13] WU Xiao-ping, ZHOU Qi-bo, WU Man-chang. Large-caliber long focal length collimator system and its installation School optical instrument [J]. *Optical Instruments*, 1993, **15**(5): 26-28.  
吴小平, 周起勃, 吴满昌等. 大口径长焦距平行光管系统及其装校光学仪器[J]. 光学仪器, 1993, **15**(5): 26-28.
- [14] SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu, YU Jian-jun. Relatively large field of large aperture long-wave infrared lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 460-463.  
沈为民, 薛鸣球, 余建军. 大视场大相对孔径长波红外物镜[J]. 光子学报, 2004, **33**(4): 460-463.
- [15] SHI Jin-feng, WU Qing-wen, YANG Xian-wei. Large-caliber long focal length vertical axis collimator thermal design. [J]. *Red Outside and Laser Engineering*, 2013, **42**(6): 1617-1622.  
石进峰, 吴清文, 杨献伟. 光轴竖直大口径长焦距平行光管热设计[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(6): 1617-1622.