

·光电系统·

## 一种改进型的红外三反射镜探测成像系统

白瑜<sup>1,2,3</sup>, 廖胜<sup>1</sup>, 李华<sup>1</sup>, 邢廷文<sup>1</sup>, 蒋亚东<sup>2</sup>, 冯成<sup>4</sup>, 王白凤<sup>5</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 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; 4. 中国南方玻璃集团成都南玻有限公司, 四川 成都 610200; 5. 西华师范大学物理与电子信息学院, 四川 南充 637002)

**摘要:**长焦距、多谱段、轻量化成像系统具有分辨率高、轻小型等优点,是目前成像系统设计的一个重要研究方向。针对制冷型红外同轴三反射镜中心遮挡大的不足,提出了一种改进型的同轴三反射镜成像系统,在系统三镜后加平面反射镜,将系统光线进行折转,利用三个反射镜的二次曲面系数校正轴外像差,给出了具体的设计思路及考虑问题,并给出了一个焦距 $f=400$  mm,  $F/\#$ 为4,全视场角为 $1.72^\circ$ 的设计实例。设计结果表明,系统成像质量接近衍射极限。

**关键词:**红外探测;成像系统;多谱段

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-06-0031-04

## Improved Three-mirror Infrared Detection Imaging System

BAI Yu<sup>1,2,3</sup>, LIAO Sheng<sup>1</sup>, LI Hua<sup>1</sup>, XING Ting-wen<sup>1</sup>, JIANG Ya-dong<sup>2</sup>, FENG Cheng<sup>4</sup>, WANG Bai-feng<sup>2</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Chengdu South Glass Limited Company of China South Glass Group, Chengdu 610200, China; 5. School of Physics and Electronic Information, China West Normal University, Nanchong 637002, China)

**Abstract:** The imaging system with long focal length, multi-spectrum and light weight has the advantages of high resolution and small volume, which is an important research direction in imaging system design. According to the large shelter in cooled infrared coaxial three-mirror, an imaging system with the improved coaxial three-mirror is introduced. A piece of mirror is added behind the third mirror, the light from the system is reflected by the mirror. Off-axis aberration is corrected by second surface coefficients of three pieces of reflective mirror. The detailed design ideas and relative problems are given. A design example with 400 mm focal length, 4  $F/\#$  and  $1.72^\circ$  full field of view is given. The result shows that the imaging quality of the system approaches to diffraction limit.

**Key words:** infrared detection; imaging system; multi-spectrum

长焦距红外成像系统可获得高分辨率的红外图像,因此广泛应用于安防、地面观测、空间遥感系统等领域,在各种应用领域中占据着越来越重要的地位<sup>[1-5]</sup>。对于制冷型长焦距红外成像系统,光学元件的口径一般都比较大,若选用折射式光学结构,大口径光学元件的制造、加工、检测都很困难,且增大了生产成本,尤其对于红外光学系统,透射式光学玻璃

的可选材料不多,大口径的红外材料较难获得,同时由于系统的焦距较长,设计时还需要考虑消色差和二级光谱,需要选用特殊的光学玻璃和常规玻璃搭配,在紫外波段和长波红外波段,在技术方面难度更大,因此对于制冷型长焦距红外成像系统,基于制造、加工、检测、成本、质量等方面的考虑,反射式成像结构为最佳的结构形式,不同于其他的反射式光

收稿日期: 2013-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(10874181)

作者简介: 白瑜(1982-),男,山西原平人,博士研究生,助理研究员,主要从事红外探测、光电信息处理、红外弱小目标检测、图像处理等方面的研究。

学系统,使用制冷红外探测器的反射式光学结构中因探测器中的保护窗口而会产生一定量的色差和二级光谱,但数值很小。同时反射式光学结构可选用蜂窝状的碳化硅等新型材料,因此更容易实现轻量化设计,可以极大降低成像系统的质量,减小系统成本。

反射式成像结构最早的系统为两反射结构,包括卡塞格林结构和格里高利结构,卡塞格林结构由于轴外像差没有得到较好的校正而受到一定的限制,格里高利结构由于其主、次镜间间隔较长等缺点使得其应用范围很小。由于两反射结构优化自由度少,不能满足大视场、大相对孔径、长焦距的要求,因此出现了三反射结构,同轴三反射结构系统存在中心遮拦过大,影响进入探测器的能量,从而降低了成像系统的分辨率,离轴三反射结构,通过离轴可实现系统的无遮拦,但实现无遮拦会使系统体积较大,同时离轴结构的加工、装调难度大<sup>[6-10]</sup>。介绍了一种改进型的三反射镜光学系统的设计方法,该系统从同轴三反射镜系统出发,对其进行一系列的改进而得出,并给出了具体的设计实例,成像质量接近衍射极限。

## 1 共轴三反射镜参数计算

共轴三反射结构由同轴的三块反射镜组成,其光学示意图如图1所示,其中 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 分别为主镜、次镜和三镜。

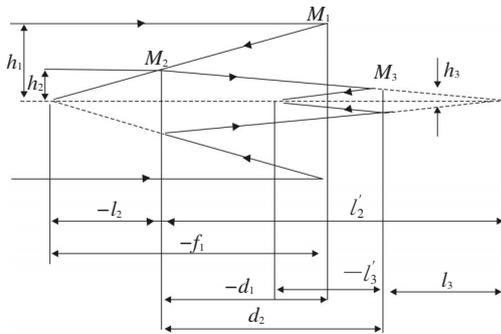


图1 共轴三反射系统光学示意图

共轴三反射系统结构参数包括以下几个数据:三个反射镜的曲率半径 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ ;主次镜的间隔 $d_1$ ,次镜到三镜的间隔 $d_2$ ,三镜到像面的距离 $d_3$ 。

当物体位于物方无穷远时,即 $l_1 = \infty$ ,  $u_1 = 0$ ;假设入瞳位于主镜上,

即 $x_1 = y_1 = 0$ 。引入以下四个参数:

$$\text{次镜对主镜的遮拦比} \quad \alpha_1 = \frac{l_2}{f_1'} \approx \frac{h_2}{h_1} \quad (1)$$

$$\text{三镜对次镜的遮拦比} \quad \alpha_2 = \frac{l_3}{l_2'} \approx \frac{h_3}{h_2} \quad (2)$$

$$\text{次镜的放大率} \quad \beta_1 = \frac{l_2'}{l_2} = \frac{u_2'}{u_2} \quad (3)$$

$$\text{三镜的放大率} \quad \beta_2 = \frac{l_3'}{l_3} \approx \frac{u_3'}{u_3} \quad (4)$$

欲确定共轴三反射系统的结构参数,需要给定三个与结构相关的条件。对于长焦距光学系统而言,往往需对系统的总长度加以限制。一般来说先按照系统总长度的要求给定相应的 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ ,即将 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 作为已知量,规定光线从左向右入射为正,显然有 $d_1 < 0$ 、 $d_2 > 0$ 、 $d_3 < 0$ 。根据同轴三反射系统结构参数的计算公式,可以得到下面的三个公式

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_3} = \frac{1}{r_2} \quad (5)$$

$$\frac{r_1 r_2 - 2r_2 d_1}{2r_1 - 4d_1 - 2r_2} - d_2 = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$\frac{2(r_1 r_3 - 2r_3 d_1 - r_2 r_3) + 1}{2r_1 r_2} = \frac{d_3}{f} \quad (7)$$

将系统总焦距 $f$ 、两个间隔 $d_1$ 和 $d_2$ 以及给定的工作距离 $d_3$ 作为已知量代入式(5)~式(7)中,可以求解出三个面的曲率半径 $r_1$ 、 $r_2$ 和 $r_3$ 。由 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $f$ 可以求出次镜对主镜的遮拦比 $\alpha_1$ ,三镜对次镜的遮拦比 $\alpha_2$ ,次镜的放大率 $\beta_1$ ,三镜的放大率 $\beta_2$ ,具体计算公式如式(8)~式(11)所示。

$$\alpha_1 = 1 - \frac{2d_1}{r_1} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = 1 - \frac{2d_2(r_1 - 2d_1 - r_2)}{r_2(r_1 - 2d_1)} \quad (9)$$

$$\beta_1 = \frac{-r_2}{r_2 - r_1 + 2d_1} \quad (10)$$

$$\beta_2 = \frac{r_3}{\beta_1 r_1 - 2\beta_1 d_1 - 2d_2 - r_3} \quad (11)$$

至此,系统的结构参数 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 全部确定。

## 2 设计实例

### 2.1 设计指标

成像系统的技术指标要求如下:

(1)光谱范围:8~12  $\mu\text{m}$ ; (2)焦距:400 mm; (3)

F/#:4;(4)视场:1.72°;(5)红外探测器:320×240凝视型焦平面阵列探测器,单个探测器像元尺寸为30 μm×30 μm;(6)100%冷光阑效率。

## 2.2 设计结果及像质评价

根据成像系统的技术指标要求,首先按照上面式(1)~式(11),通过求解方程组得到共轴三反射系统的各个结构参数,建立系统的初始结构,再利用CODE-V软件进行优化设计,为了校正轴外像差,在三块反射镜都使用了二次曲面,优化中要注意次镜对主镜的遮拦,在保证系统性能的情况下,尽量减小次镜对主镜的遮拦,设计过程中通过以下程序来控制: $@ratio == (sd\ s2)/(sd\ s1); @ratio < \hat{target}$

不断改变 $\hat{target}$ 的控制量来合理控制次镜对主镜的遮拦,最后得到的光阑位于主镜上的共轴三反射成像系统结构图见图1,三块反射镜的二次曲面系数分别为-0.535 76、-0.391 996、-0.273 788。系统使用的是制冷红外探测器,需要系统的出瞳和制冷红外探测的冷光阑重合,由于共轴三反射光学系统的像面会遮挡进入三镜的一部分光线,沿着光线方向若在三镜后像面前设置冷光阑,考虑到制冷红外探测器带有体积较大的制冷装置,在此处设置冷光阑一方面势必会增大系统的总长。另一方面,制冷探测器的部件会遮挡进入三镜的光线而影响成像质量。为解决该难题,文中提出了一种改进型的三反射镜成像系统,改进的成像系统结构图如图3所示。

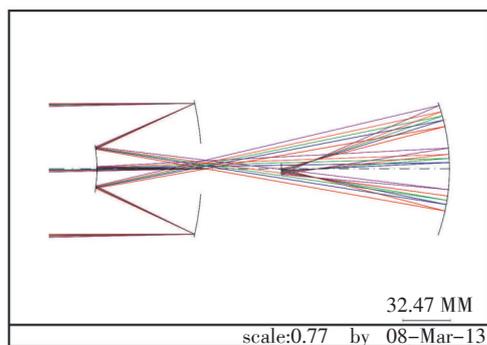


图2 共轴三反射系统示意图

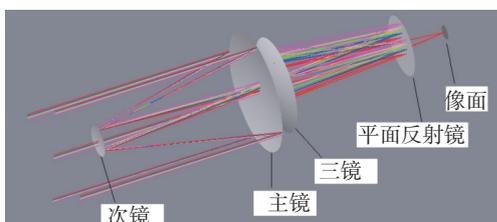


图3 改进型的三反射镜成像系统示意图

在三镜附近引入一块平面反射镜,该平面反射镜只改变光线的方向,不改变系统的光焦度,通过引入这块平面反射镜将三镜曲率半径和主镜的曲率半径优化为反向,使得主镜和三镜可以制作在同一块反射镜上进而减轻系统质量,该系统为二次成像系统,通过在主镜和三镜之间设置一次像面,并在一次像面处设置光阑以减小杂光进入光学系统,探测器窗口和平面反射镜间隔为3 mm,冷光阑位于探测器窗口后1 mm处,光学系统后工作距离为25 mm,系统总长为165.7 mm,系统结构紧凑简单,主镜、次镜、三镜均为二次曲面,加工检测难度小,三个镜子的二次曲面系数分别为-0.777 233、-1.247 351、-0.344 894。

调制传递函数是成像系统的综合评价指标,图4给出了改进型的三反射镜成像系统的调制传递函数曲线,该系统采用的红外探测器像元大小是30 μm×30 μm,故成像系统的奈奎斯特频率为16 lp/mm。由图可知,奈奎斯特频率16 lp/mm处,各个视场的传函值都接近衍射极限,成像质量良好。

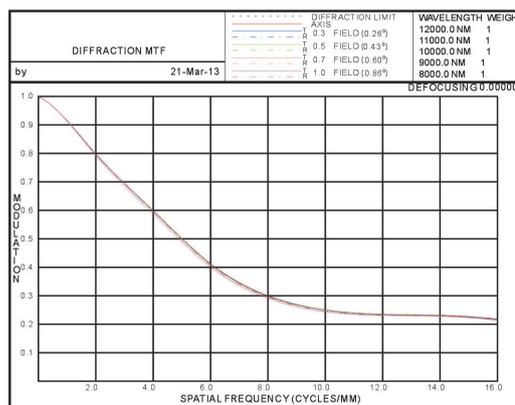


图4 改进系统的调制传递函数曲线

图5是改进型的三反射镜成像系统的点列图。可知系统的最大RMS弥散斑直径为4.5 μm,远小于红外探测器的像元尺寸30 μm,满足设计要求。图6给出了改进型的三反射镜成像系统的场曲和畸变曲线,由图可知,系统最大场曲小于0.5 μm,最大畸变出现在全视场处,为0.6%,小于1%。为了分析系统的遮拦情况,分析了各个镜子上的遮拦情况,由于篇幅有限,此处只给出了改进系统主镜上不同视场的遮拦分析,如图7所示,其中图7a~图7e分别为0视场、0.5视场、0.7视场、0.85视场、1.0视场的遮拦分析,最终该系统的整体遮挡小于0.4,满足使用要求。

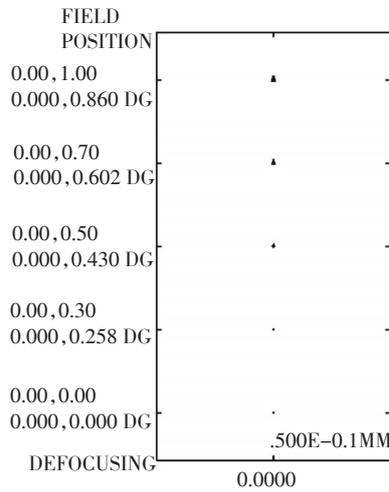


图5 改进系统的点列图

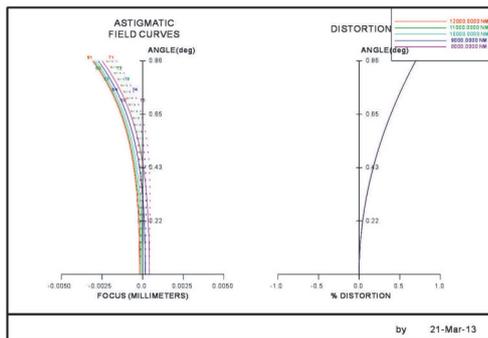


图6 改进系统的场曲和畸变

### 3 结论

针对以往同轴三反射结构系统中心遮拦过大的不足,从同轴三反射镜系统出发,提出了一种改进型的三反射镜成像系统,进行了理论分析,介绍了具体的设计思路以及设计步骤,并给出了具体的设计实例,验证了该方法思路的可行性。像质评价结果,改进型三反射镜成像系统具有成像质量优良、中心遮拦小、结构紧凑、易于制作加工等优点,该系统还可应用于其他光谱范围,如可见光波段、近红外波段、紫外波段。

#### 参考文献

- [1] 郜洪云,熊涛,杨长城.中波红外连续变焦光学系统[J]. 光学精密工程,2007,15(7):1038-1043.
- [2] 白瑜,杨建峰,马小龙,等.8~12  $\mu\text{m}$  波段折/衍混合红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外技术,2008,30(9):505-508.
- [3] 陈吕吉.非制冷红外焦平面热像仪用双视场红外光学系

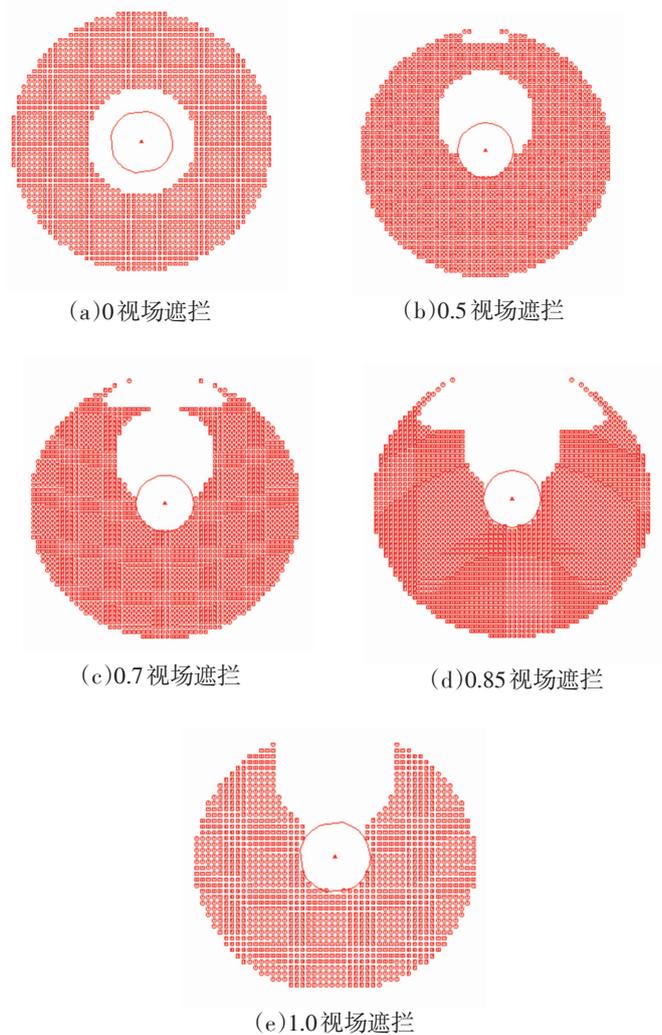


图7 改进系统主镜上不同视场的遮拦分析

统[J]. 红外技术,2007,29(11):645-647.

- [4] 沈为民,薛鸣球,余建军.大视场大相对孔径长波红外镜头[J]. 光子学报,2004,33(4):460-462.
- [5] 张云翠,孙强,卢振武.非制冷红外热像仪的Petzval型物镜的研制与分析[J]. 光电子·激光,2007,18(3):270-272.
- [6] 郭永祥,李英才,吕保斌.一种新型的两镜三反射光学系统设计[J]. 应用光学,2009,30(6):916-921.
- [7] 刘琳,薛鸣球,沈为民.提高离轴三反射镜系统成像质量的途径[J]. 光学技术,2002,28(2):1812184.
- [8] 潘君骅.二次曲面三反射镜的光学系统研究[J]. 光学学报,1988,8(8):7172721.
- [9] 常军,翁志成,姜会林.大视场长焦距空间光学系统设计[J]. 光学学报,2003,23(2):2162219.
- [10] 许世文,付苓,徐波.小轻型CCD遥感相机全反射光学系统设计[J]. 光学学报,2000,20(9):126821271.