

# 折反式远红外光学系统设计

柴利飞 唐勇 陈宝莹 孙浩 张远健 林森

(长春理工大学光电工程学院, 吉林长春 130022)

**摘要:** 针对红外搜索与跟踪系统在现代战争中体现出的优势和重要性, 提出了一种折反式红外光学系统设计方法。在折反系统中, 用同一种红外材料实现了像差特别是二级光谱的校正。该设计结果满足设定要求, 可用于机载红外搜索与跟踪系统, 并适用于像元尺寸为  $25\ \mu\text{m}$  的非制冷焦平面阵列探测器。

**关键词:** 红外热像仪; 红外光学设计; 复消色差

**中图分类号:** O439 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.06.002

## Optical Design of Far Infrared Catadioptric System

CHAI Li-fei, TANG Yong, CHEN Bao-ying, SUN Hao, ZHANG Yuan-jian, LIN Sen

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University  
of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** According to the superiority of an infrared search and track system in modern wars, a method for designing a catadioptric infrared optical system is proposed. In the catadioptric infrared optical system, both aberration and second spectrum are corrected by using the same infrared optical material. The design result meets the design requirements and is compatible with the uncooled focal plane array with a pixel size of  $25\ \mu\text{m}$ . It can be used in an airborne infrared search and track system.

**Key words:** IR thermal imager; IR optical design; apochromatism

## 0 引言

近年来, 红外光学系统在军事和民用领域都得到了广泛应用。但有些特殊场合对光学系统提出了结构尺寸小、系统质量轻等要求。比如, 各种飞行器上加载的前视红外系统就必须满足这一指标要求。由于机载红外热像系统的焦距比较长, 其球差和二级光谱校正比较困难。因此, 设计一种结构紧凑、质量小、装调简单、成像质量高的红外光学系统就显得非常有必要。

## 1 折反式远红外热像仪的设计指标

该红外热像仪主要由光学系统、探测器组件和信息处理组件等几部分组成, 其设计指标如下: 探测器为  $640 \times 480$  元非制冷探测器, 像元间距为  $25\ \mu\text{m}$ ; 焦距为  $285\ \text{mm}$ ; 视场为  $3.22^\circ \times 2.41^\circ$ ; 光学系统的 F 数为 1; 工作波段为  $8 \sim 14\ \mu\text{m}$ ; 体积小于  $400\ \text{mm} \times 350\ \text{mm} \times 350\ \text{mm}$ ; 对光学系统需要进行像差校正特别是二级光谱校正, 并要对其热稳定情况进行初步分析。

**收稿日期:** 2011-03-29

**作者简介:** 柴利飞 (1985-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事光学设计及光学仪器等方面的研究。

E-mail: chailifei1985@sina.com

## 2 热像仪设计

### 2.1 探测器选型

红外探测器组件主要负责完成光电转换和信号处理任务。为了提高系统分辨率,使图像变得更加清晰,我们选用 640×480 元长波非致冷型焦平面阵列探测器,其主要技术指标如下:工作波段为 8~14 μm;像元数为 640×480,像元间距为 25 μm。

### 2.2 光学系统设计

光学系统是热像仪的重要组成部分。在设计中,人们通常采用两块反射镜组成共轴双反射镜,其中次镜为内反射曼金结构。该设计具有如下优点:(1)利用反射镜折叠光路,可缩小镜头体积,从而减轻重量;(2)曼金结构可减少玻璃片数,降低成本,提高成像质量;(3)对于大口径尺寸来说,反射镜的材料更容易制造,而且还能够通过选择热膨胀系数小的材料来提高热稳定性。不过,由于光学系统的焦距和口径都比较大,系统的球差和二级光谱校正难以实施。就上述焦平面阵列的尺寸而言,系统的视场虽然不是很大,但采用折反系统会产生一定的像散和场曲<sup>[1]</sup>。

选取折射率高的锗作为所有透镜的材料,以尽可能减少镜片数目和材料种类,从而提高透过率和满足像质要求。采用 ZEMAX 软件对光学系统进行设计,焦距  $f=285$  mm,  $F\#=1$ ,视场为  $3.22^\circ \times 2.41^\circ$ ,工作波段为 8~14 μm,其中选择探测器最敏感的 11.3 μm 波长作为中心波长。图 1 所示为光学系统的结构图。

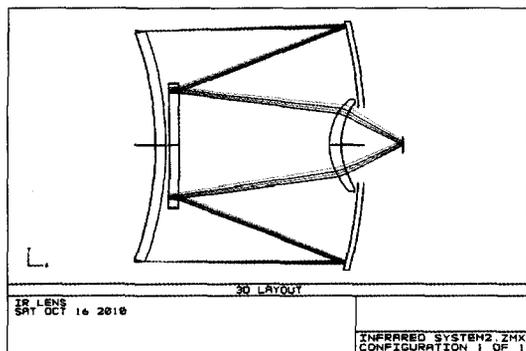


图 1 光学系统的结构图

光学系统由 3 块透镜和 2 块反射镜组成。为了校正系统的初级像差,主反射镜采用抛物面,次反射镜采用双曲面。

对于工作在宽波段的大口径、小  $F$  数光学系统,二级光谱色差是限制系统成像质量的主要因素。我们知道,二级光谱初级量的大小与系统的结构参数无关,而完全由玻璃的色散特性决定。它与系统焦距成正比,其比例系数与玻璃的组合情况有关。对于大多数玻璃而言,这个比例系数几乎就是一个常量。

### 2.3 二级光谱校正

二级光谱由本征二级光谱和衍生二级光谱组成。其中,本征二级光谱是由于每一组元对不同波长的光具有不同光焦度造成的;而衍生二级光谱是由于前一组元存在色差,使两边缘光在本组元上的投射高度不同,导致其光焦度也不再相等造成的。

最有效的二级光谱校正方法是采用特殊的光学材料,如萤石( $\text{CaF}_2$ )、氟冕或镧系玻璃等,但这种光学材料的理化性能不稳定且成本高;另外,采用三胶合透镜也能校正二级光谱,但在大视场情况下,物镜无法满足轴外像差校正;还有,通过多块普通玻璃的组合也能实现复消色差。近年来,随着衍射光学的发展,出现了由衍射光学元件与另一种玻璃组合成的混合复消色差透镜组,但衍射光学元件的加工难度大,且成本很高<sup>[2]</sup>。

下面先用本征二级光谱和衍生二级光谱理论对本文在折反系统中采用同一种光学材料实现复消色差的方法进行说明。在图 1 中,一束光线通过第一块透镜后会产生本征二级光谱,在后续透镜中也将会产生衍生二级光谱。要想达到整个系统复消色差的目的,就必须对本征二级光谱和衍生二级光谱进行相互补偿。因此在后续透镜中,我们可以把它当作是投射高度不同的单色光来考虑,并按球差来校正,这样就不必考虑第一块透镜所产生的本征二级光谱了(相当于一个分光器件)。从图 1 中可以看出,第一块透镜的后面有 2 块凹透镜和 2 块球面反射镜。

$$S_l = -2h^4/r^3 \quad (1)$$

由于凹透镜会产生正球差，由式(1)可知，主反射镜会产生正球差，副镜会产生很大的负球差，这样便能实现球差平衡，即实现二级光谱校正。

接着用波色差理论对本文的复消色差方法加以说明。康拉第在他所著的《应用光学和光学设计》一书中指出，各色波面经过系统后，将会因各自的像差不同而存在不同程度的变形，此时各色波面之间的偏离便可作为色差量度，称为波色差。用符号  $d$  表示光学系统中各介质的沿轴厚度；用符号  $D$  表示光线通过各介质的光路长度。因此，轴上点发出的某一孔径光线与光轴之间的光路长度差可表示为  $\sum(D - d)$ ，由此可得到波色差公式：

$$W'_{FC} = \sum(D - d)dn \quad (2)$$

这样，用该方法就可以方便地对二级光谱进行描述。当光学系统对 F 光和 C 光进行像差校正以后，对 D 光的二级光谱为 [5]：

$$\begin{aligned} W'_{FD} &= W'_F - W'_D = \sum(D - d)(n_F - n_D) \\ &= \sum(D - d)(n_F - n_C) \frac{n_F - n_D}{n_F - n_C} \\ &= \sum(D - d)dnP_{FD} \end{aligned} \quad (3)$$

为了同时校正位置色差和二级光谱，人们通常是寻求阿贝数相差很大而相对色散相同的光学材料。而在折反系统中，采用同一种材料便可实现两种校正。由式(3)可知， $dn$  和  $P_{FD}$  为

定值，因此当  $D = d$  时就能够复消色差。也就是说，在某一孔径处，当光线到达像面的几何光路长度与沿轴厚度相等时，便可实现二级光谱校正，而且工作波段内的所有波长都交于一点，如图 2 所示。

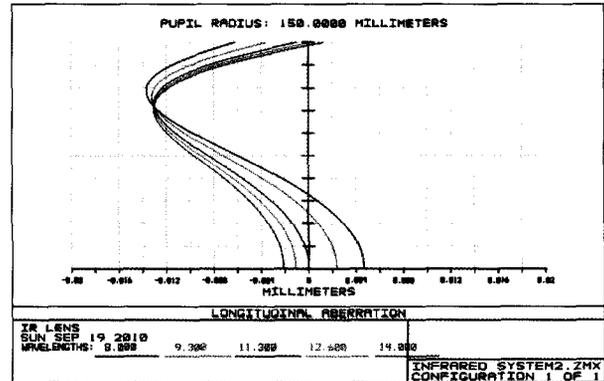


图 2 纵向像差

### 2.4 像差分析

红外系统的波段较宽。从像差曲线上来看，本系统的球差、色差和二级光谱都得到了很好的校正，而且像散和场曲也得到了很好的消除。选用的非致冷探测器的像元大小为  $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ ，系统的特征频率为 20 lp/mm。图 3 和图 4 分别为该系统的 MTF 曲线和能量集中度曲线。从图中可以看出，MTF 接近衍射极限，90% 的能量集中在一个小像元内。图 5 和图 6 为该系统的点列图和扇形图，图中轴上和轴外的一致性较好 [3]。

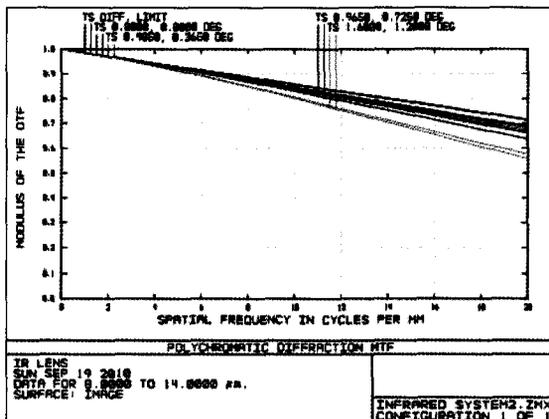


图 3 MTF 曲线

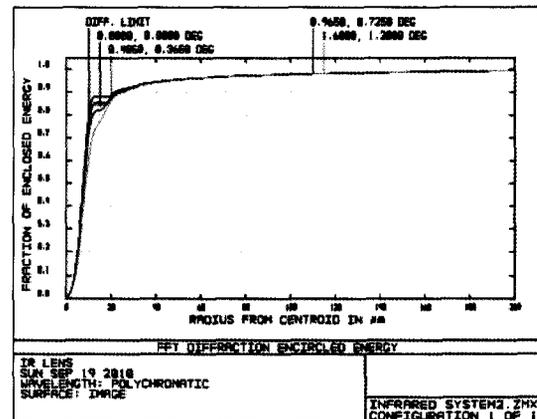


图 4 能量集中度曲线

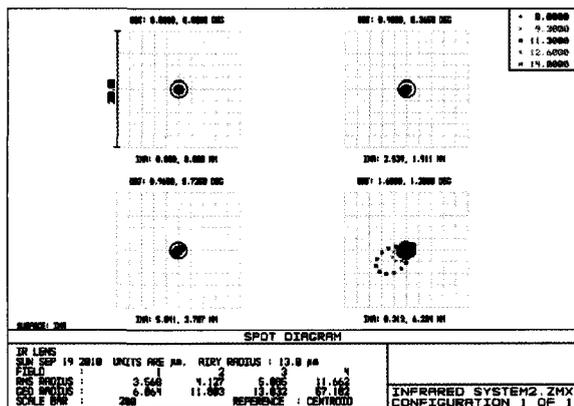


图 5 点列图

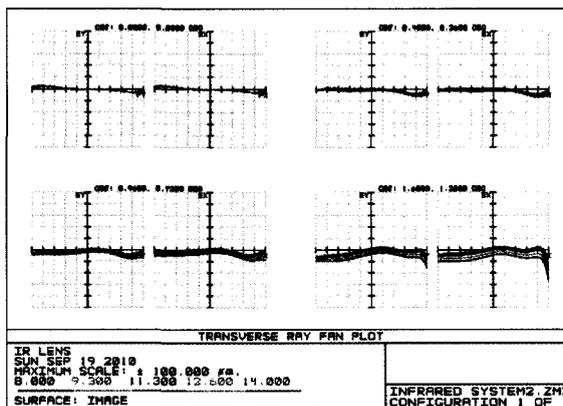
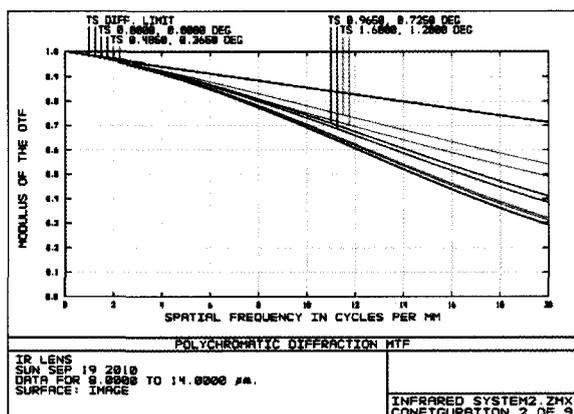
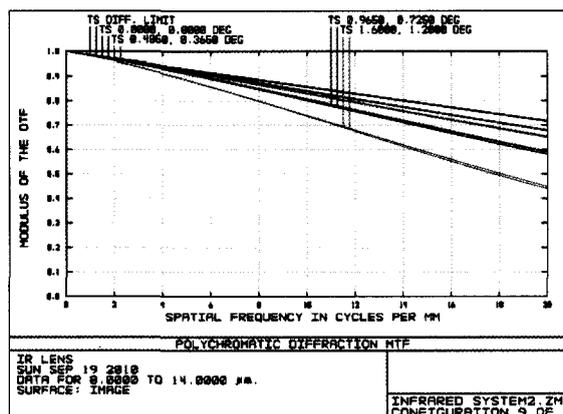


图 6 扇形图



(a) -40 °C



(b) 60 °C

图 7 MTF 曲线

### 2.5 初步热稳定分析

在 -40 ~ 60 °C 内对光学系统进行了温度分析。图 7(a) 和图 7(b) 分别给出了该系统在 -40 °C 和 60 °C 时的 MTF 曲线<sup>[4]</sup>。

光学系统的主反射镜采用金属材料。从图 7 中可以看出, 光学系统在 -40 ~ 60 °C 内的 MTF 有所变动, 但影响不大, 满足成像质量要求, 基本达到了热稳定目的。

### 3 结论

为了满足航空探测与搜索的特殊要求, 本文设计了一种轻型机载远红外热像仪, 对热像仪的光学系统进行了设计, 并在折反系统中用同一种红外材料实现了球差和二级光谱校正。

该设计结果满足设定要求, 可用于机载红外搜索与跟踪系统。

### 参考文献

- [1] 王志坚, 王鹏, 刘智颖. 光学工程原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 姜会林. 关于二级光谱问题的探讨 [J]. 光学学报, 1982, 2(3): 225-232.
- [3] 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [4] 李玉瑶. 基于大面阵 CCD 的复消色差航空相机物镜设计 [J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3183-3185.
- [5] Richard D Hudson. Infrared System Engineering [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 1969.