

长波红外双视场扫描型光学系统

乔明霞, 曾威

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要:介绍了一种长波红外双视场扫描型光学系统。描述了扫描型双视场光学系统的设计模型,利用摆镜扫描实现视场扩展,采用光路中径向切入镜组实现变倍比为2.5倍的双视场设计,其F数为1.67,摆镜扫描角度为 $\pm 6.5^\circ$ 。光学系统采用Ge、ZnS两种红外材料,使用非球面技术很好地校正了系统像差,传函接近衍射极限,在 $-40 \sim +60^\circ\text{C}$ 环境温度范围内系统具有良好的成像质量,可用于机载或车载光电系统。

关键词:红外探测;扫描成像系统;双视场;线列探测器;像质评价

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0077-04

A Long-Wave Infrared Dual-FOV Scanning Optical System

QIAO Mingxia, ZENG Wei

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: A long-wave infrared (LWIR) dual-field scanning optical system is introduced. The design model of dual-field scanning optical system is depicted. Through the oscillating mirror scanning, the field of view (FOV) is enlarged. By inserting vertically a set of lens in the system, the dual-FOV design for 2.5 zoom ratio is realized. The F number is 1.67, and the scanning angle of the oscillating mirror is $\pm 6.5^\circ$. The optical system is designed by using two common optical materials, Ge and ZnS. The aberration can be well corrected by use of non-spherical technology. The MTF approaches the diffractive limit, and the system has fine image quality in the temperature range from -40°C to 60°C . It can be used in the electro-optical system onboard the aircrafts and ground vehicles.

Key words: infrared detection; scanning imaging system; dual field of view; linear array detector; image evaluation

0 引言

为了满足红外系统搜索、跟踪、探测等不同功能,红外光学系统一般需要双视场设计,甚至多视场设计,既能在搜索时提供大的观察视野与场景以捕获可能存在的目标,又能在发现目标后,迅速切换至小视场高分辨率工作状态,进行近距离观察和分辨探测到的目标。近年来,关于双视场的系统已有很多报道,从变焦方式上讲,以轴向移动透镜的光学变焦方式^[1-2]较多,国内对切换式红外双视场的报道很少。从探测器方面来讲,中波、长波红外系统设计多以焦平面探测器^[3-5]为应用对象,然而线列探测器是实现大视场、高性能、低成本红外系统的器件。为此,基于 288×4 线列探测

器,采用光路中径向切入透镜组的变倍方式,设计一个波段为 $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$ 的双视场扫描型光学系统,使用U型结构,缩小系统体积。由于长波红外可供选择的红外材料有限,且大口径、高质量的红外材料制备困难,因此红外系统的设计比可见光系统设计要困难。

1 设计思路

1.1 构型分析

对于线列扫描成像系统,为了实现扫描视场,可以采用下面两种方式:1)在系统前放一块大的平面反射镜;2)在望远光路出瞳处放一块小的平面反射镜。两种方式对比,后者采用望远光路压缩光束口径,减小了扫描摆镜尺寸,小摆镜比较易于加工,制造成本比大反射镜要低得多,因此,系统采取这种结构方式。系统由望远光路、摆镜加会聚光路组成,会聚光路采取二次成像光路设计,孔径光阑放在探测器冷光阑上,保证冷光阑效率100%,使会聚光路入瞳与望远光路出瞳匹配,

收稿日期:2012-03-14

修回日期:2012-04-17

作者简介:乔明霞(1979—),女,河南焦作人,硕士,工程师,研究方向为红外系统设计。

减小渐晕、减小摆镜口径。

1.2 变倍方式

双视场系统实现方式可分为轴向变倍和切换变倍两种方式。

轴向变倍方式是通过透镜组轴向间隙变化而改变系统焦距。其缺点是需要更多的透镜校正像差,导致系统透过率较低,且在材料选择上有较大的困难,其变倍时间受到变倍行程长、变倍组元口径和重量大等问题制约,难以满足现代光电装配快速变倍要求,对于大变倍比的光学系统更是如此,所以目前应用较少。

切换变倍方式是通过光路中切入或切出透镜组改变系统焦距。其特点是窄视场中没有运动元件,光学系统稳定性好、切换时间短、透过率高。此方式是红外成像应用较多、工程化较好的变倍方式,在军用和民用方面得到越来越广泛的应用。

经分析,系统采用径向切换方式实现扫描型双视场系统设计,两视场保证像面位置一致。

1.3 扫描光学系统模型

线列扫描型光学系统模型如图1所示,由望远光路、摆镜、二次成像光路构成,望远光路包含物镜组、目镜组、变倍组。光线经望远光路准直后,扫描反射镜以 $\pm\theta$ 角运动,将望远系统出射的不同视场的平行光反射进入会聚光路,聚焦在探测器组件的像面上,图像处理电路将连续一段时间内采集到的信号拼接起来就可以形成具有一定视场的视频图像。

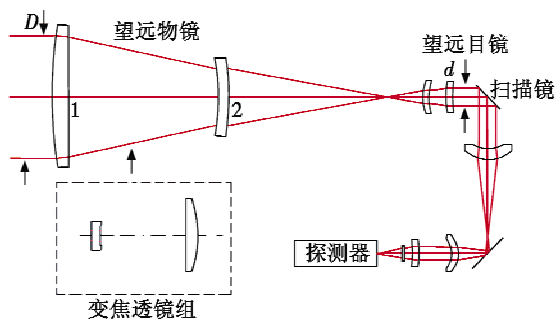


图1 扫描光学系统模型

Fig.1 Model of scanning optical system

假设系统视场角为 $\pm\alpha$,摆镜的扫描角度为 $\pm\theta$, D 为系统的入瞳, d 为望远光路的出瞳,其放大率 M 为

$$M = \frac{D}{d} \quad (1)$$

为了扫描 $\pm\alpha$ 全视场,在望远光路的出瞳处放置扫描摆镜,减小扫描摆镜尺寸,提高扫描速率,扫描角度为

$$\pm\theta = \pm\alpha * \frac{M}{2} = \pm\alpha * \frac{D}{2d} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可以看出,放大率主要影响扫描

摆镜的镜面尺寸以及扫描角度,放大率越大,扫描摆镜尺寸越小,同时摆镜的扫描角度越大。由于扫描摆镜是线列扫描成像系统的关键组成部分,摆镜摆动的线性度影响成像质量,重复性则影响成像稳定性,而高频、大线性扫描角度正是摆镜的技术难点。因此在设计时应合理设计,保证摆镜所能实现的扫描速率及精度。

2 设计实例

2.1 系统设计参数

系统采用长波 288×4 线列探测器,光学系统指标如表1所示。

表1 光学设计参数

Table 1 Parameters of optical design

波段/ μm	视场/ $(^\circ)$		焦距/mm		F数	工作温度/ $^\circ\text{C}$
	窄视场	宽视场	窄视场	宽视场		
7.7~10.3	3.73×2.8	9.34×7	165	66	1.67	-40~+60

2.2 设计实现

设计时,望远光路和二次成像光路分开设计,最后把两者组合在一起进行优化设计、平衡像差。透镜材料选用性能稳定的单晶锗和硫化锌,锗材料因具有较高的折射率和较低的色散,可利用像差校正;硫化锌因较小的折射率和较高的色散,在系统中作为负透镜,能更好地校正色差和平衡像差。系统中(见图1)望远物镜2选用硫化锌材料,其余透镜为锗材料。

窄视场中望远目镜和会聚透镜上引入7个非球面,用于提高像质、透过率,校正系统的球差、彗差、像散、场曲和畸变等像差;为了实现宽视场设计,变倍透镜由1个负透镜和2个正透镜构成负正分离的形式,用于校正色差和像差,其中引入3个非球面。

热红外系统经常显示在可见光系统中看不到的非期望图像变形^[6],这些效应包括冷反射^[7-8]、鬼像、杂散光等。最终图像可能是图像范围内的轻微亮度变化,也可能是明显的亮或暗区域。虽然机制不同,但都源于探测器在视场范围内或扫描过程中探测到比景物能量自身更多(或更少)的能量。针对此问题,系统采取以下措施,较强地抑制了这些效应,有效地提高了系统灵敏度,降低了噪声。

光机结构设计时需采取以下措施。

1) 将探测器冷屏直接作为光学系统的孔径光阑,会聚光路采用二次成像光路构型,保证100%冷光阑效率,抑制杂散光。

2) 对透镜镀膜提出要求,保证透过率大于98%,降低冷反射、鬼像等效应。

3) 在优化过程中,对可能产生冷反射的面,控制

其曲率半径,改变该面近轴主光线和边缘光线的角度;约束透镜之间间隔,改变光线在透镜上的入射高度,减小冷反射量值。

4) 镜筒内壁涂黑,在会聚光路镜筒壁上增大螺纹,并且在一次像点处设置消杂光光阑,光阑口径为23.6 mm×2.2 mm的长方孔,有效地减少最终到达像面的杂光、冷反射等效应。

2.3 设计结果

扫描摆镜是扫描光学系统的核心部件,放大率决定摆镜的尺寸,设计时若望远光路的放大率过大,光路不好设计;倍率过小将导致望远光路出瞳直径大,摆镜变大。经分析控制会聚光路焦距为24 mm,变倍镜组的焦距为95.12 mm,则窄视场放大倍率为6.87×,宽视场放大倍率为2.75×,两视场变倍比为2.5倍,摆镜的扫描角度达到±6.5°。

机载光电成像系统对传感器体机要求严格,系统采用反射镜将光路折成U型,整体外形尺寸为320 mm×180 mm×135 mm。

窄视场、宽视场光路设计如图2、图3所示。

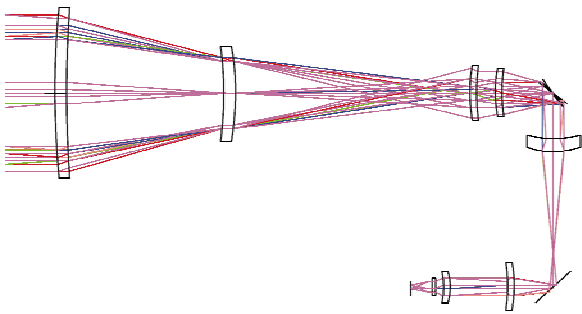


图2 窄视场光路图

Fig.2 Optical layout of narrow FOV

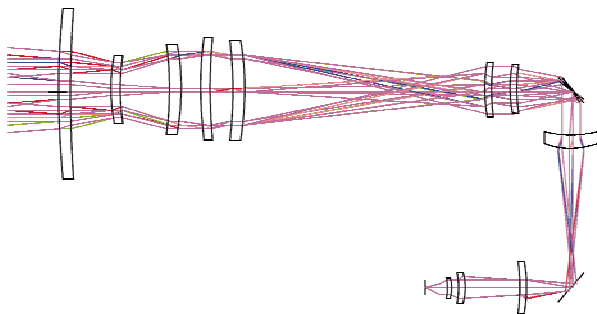


图3 宽视场光路图

Fig.3 Optical layout of wide FOV

2.4 光学系统性能分析

2.4.1 传函分析

传递函数是光学系统像质评价的重要评价手段。图4、图5分别为窄视场、宽视场传函曲线图,轴上和轴外传函均接近衍射极限,在特征频率20 lp/mm处全视场MTF不小于0.45。

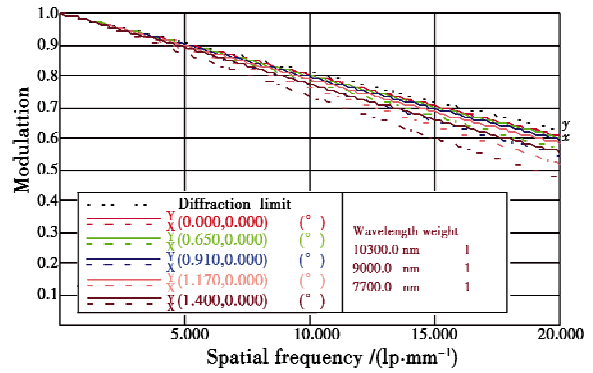


图4 窄视场 MTF 曲线

Fig.4 MTF of narrow FOV

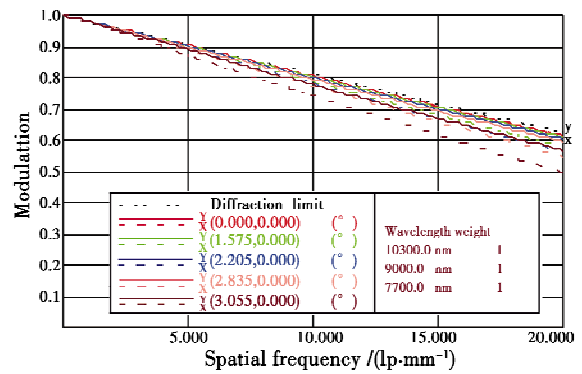


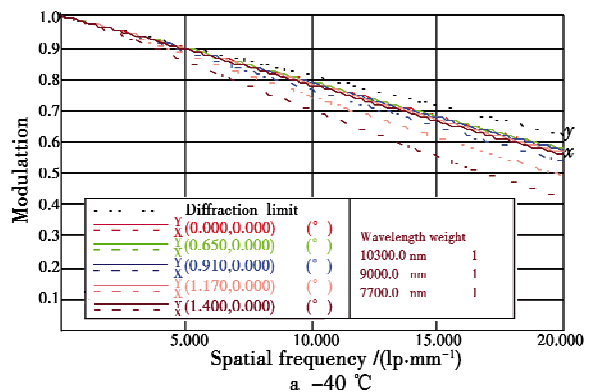
图5 宽视场 MTF 曲线

Fig.5 MTF of wide FOV

2.4.2 温度分析

现代军用光电设备经常工作在温度变化范围较大的环境中,典型的工作温度范围是-40~+60℃,温度变化会引起光学材料折射率、镜面形状和镜片间距产生变化^[9-10]。由于红外光学材料折射率温度系数较大,温度改变后将使整个光学系统的焦距发生变化,探测器靶面与光学系统的焦平面不再重合,导致图像发虚甚至不能成像,为此,采用电子主动方式^[10],轴向移动望远目镜组补偿温度引起的焦移,保证全温度范围内像质清晰。

图6、图7分别为窄视场-40℃、60℃传函曲线图。从图中看出,全温度范围内MTF变化较小,在20 lp/mm处MTF值不小于0.42,能满足在全温度范围内成像清晰。



a -40℃

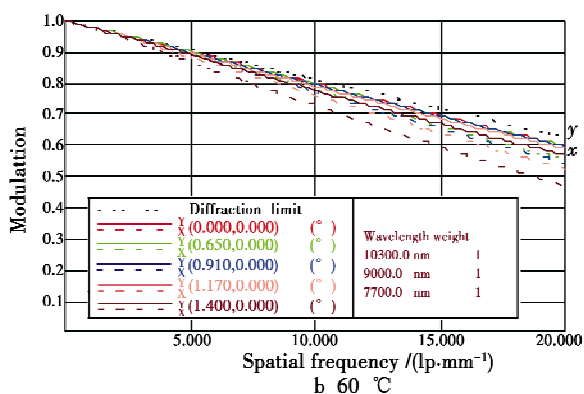


图6 窄视场 MTF 曲线

Fig. 6 MTF of narrow FOV

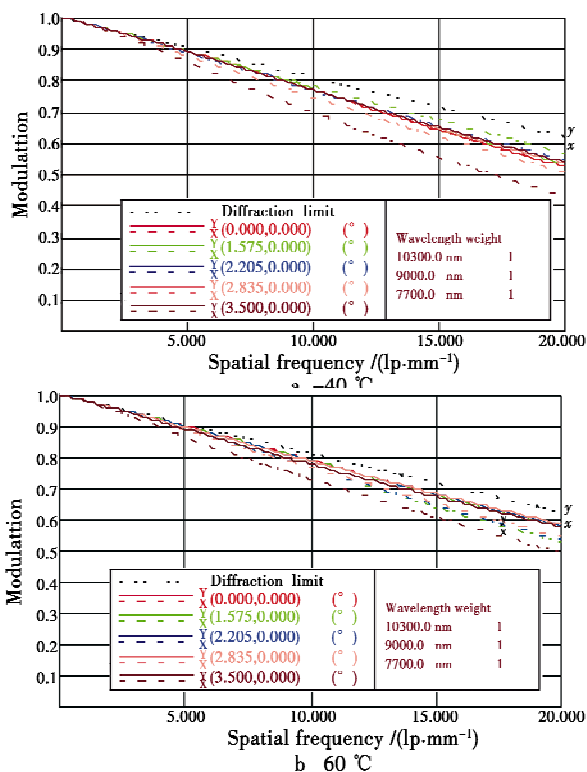


图7 宽视场 MTF 曲线

Fig. 7 MTF of wide FOV

2.4.3 畸变分析

图8、图9给出了窄视场、宽视场的畸变,两视场畸变都小于1.5%。

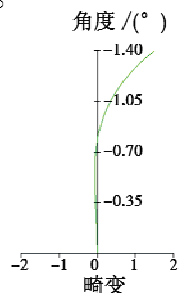


图8 窄视场畸变

Fig. 8 Distortion for narrow FOV

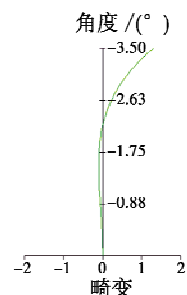


图9 宽视场畸变

Fig. 9 Distortion for wide FOV

3 结论

完成了工作波段为 $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$ 的双视场扫描型光学系统,具有结构紧凑、分辨率高等特点。系统使用摆镜扫描实现扫描视场,采用U型结构使结构紧凑,且为了提高窄视场的精度、透过率,采用在窄视场光路中径向切入镜组实现宽视场,光机结构设计时采取一定措施提高系统灵敏度、降低噪声。结果表明,在 $-40 \sim +60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的全温度范围内,两视场都获得了优良的像质,无冷反射现象,满足系统性能指标要求。该系统可集成在机载或车载光电系统,用于观察、导航、探测及跟踪等方面。

参考文献

- [1] 张良. 中波红外变焦距系统的光学设计[J]. 应用光学, 2006, 27(1): 32-34.
- [2] 孟剑奇. 双视场6倍变焦红外热成像光学系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 89-92.
- [3] AKRAM M N. Design of a multiple-field-of-view optical system for 3 to 5 μm infrared focal-plane arrays[J]. SPIE, 2003, 42(6): 1704-1714.
- [4] AKRAM M N. Design of a dual field-of-view optical system for infrared focal-plane arrays[J]. SPIE, 2002, 4647: 13-23.
- [5] 李荣刚, 杨栋梁, 刘琳, 等. 中波红外双视场光学系统的设计[J]. 激光与红外, 2009, 39(6): 640-642.
- [6] FISCHER RE. 光学系统设计[M]. 吴晓靖, 张振, 等译. 天津:《红外与激光工程》编辑部, 2004.
- [7] 王涌天, 崔桂华. 红外扫描成像系统中冷像的分析与控制[J]. 光学学报, 1994, 14(6): 650-655.
- [8] 金宇. 对红外热成像系统中冷反射现象的分析[J]. 红外技术, 1998, 20(3): 10-14.
- [9] JAMIESON T H. Thermal effects in optical systems[J]. Opt. Eng, 1981, 20(2): 156-160.
- [10] 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(s): 723-727.