

〈系统与amp;设计〉

中波红外消热差双视场光学系统设计

陈吕吉, 李萍, 冯生荣, 胡海双

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 介绍了一种切换式双视场红外光学系统设计实例, 该系统工作波段为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$, 变倍比为3倍, 采用光学被动式消热差技术保证系统在 $-40\text{ }^\circ\text{C}\sim +60\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内保持良好的成像质量。该系统具有结构简单、体积小、重量轻、像质高、环境适应性好等优点。并用ZEMAX光学设计软件进行了像质评价。

关键词: 消热差设计; 双视场; 切换式

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2011)01-0001-03

Athermal Design for MW Infrared Dual Field-of-View Optical System

CHEN Lv-ji, LI Ping, FENG Sheng-rong, HU Hai-Shuang

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: A rotate-zoom optical system for medium wave 320×240 element IR FPA (Focal Plane Arrays) detector is designed in this paper. The operating waveband of the system is $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$, and zoom ratio is $3\times$. The optical passive athermalization method is introduced to realize a high image quality in a wide temperature range of $-40\text{ }^\circ\text{C}\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$. Design result showed the rotate-zoom system has simple mechanism, compact structure, light weight, excellent image quality, and reliable performance within required temperature range. The optical system image quality is evaluated with the ZEMAX optical design software.

Key words: athermalization, dual field of view, rotate-zoom

引言

军用红外光电产品通常要经受非常大的环境温度变化, 工作温度范围为 $-40\text{ }^\circ\text{C}\sim +60\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于光学材料与结构材料的热不稳定性, 当环境温度变化时, 光学元件的折射率、曲率、厚度以及间隔等都将发生变化, 从而引起系统焦距变化, 像面发生位移, 导致系统性能急剧下降, 图像质量恶化。这种热效应对红外光学系统的影响更明显, 因此在红外光学系统的设计过程中, 需要采用一定的补偿技术, 使红外光学系统在一个较大的温度范围内保持像面位移很小或不变, 从而保持成像质量良好。通常采用的设计技术主要有电子主动式消热差技术、机械被动式消热差技术、光学被动式消热差技术。其中光学被动式消热差技术具有结构相对简单、重量轻、系统光轴稳定性和可靠性高等优点, 受到特别重视, 更适合现代军用红外光学

系统的应用^[1,2]。

双视场红外光学系统具有大小不同两个视场, 大视场用于大范围搜索疑似目标, 小视场用于对疑似目标进行识别与跟踪。具有结构简单, 视场切换时间短, 成像质量高、简洁、实用等优点, 在现代红外光学系统中得到广泛应用^[3]。

本文针对中波 $320\times 240\text{CMT}$ 焦平面探测器, 设计了一个双视场消热差红外光学系统, 变倍比为3倍, 变倍方式为切换式。具有结构简单, 易于装调, 重量轻, 结构紧凑, 成像质量高, 环境适应性好等优点。

1 变倍原理

双视场红外光学系统变倍方式主要分为轴向移动式 and 切换式, 两种变倍方式各有优缺点^[4,5]。切换式作为一种传统的变倍方案, 通常应用在双视场 or 三视场红外光学系统中, 国外文献资料报导较多^[6,7], 并且

收稿日期: 2010-07-07.

作者简介: 陈吕吉 (1974-), 男, 高级工程师, 主要从事红外系统总体、红外光学系统设计与研究工作。

有多款成熟热像仪产品，如Ricor公司的CORAL中波双视场手持远距离热像仪，FLIR系统公司的ThermoVision™ 2000热像仪，南非KENIS公司kentron高分辨率热像仪等。

切换式双视场光学系统如图1所示，1（正透镜）和2（负透镜）固定，3（负透镜）和4（正透镜）构成变倍组，切入进光路构成宽视场模式，切出光路构成窄视场模式。该变倍方式视场切换时间短、装配调整简单，并且在窄视场光路中没有运动光学元件，其光学系统光轴稳定性好，透过率高，更适于对远距离目标的识别。

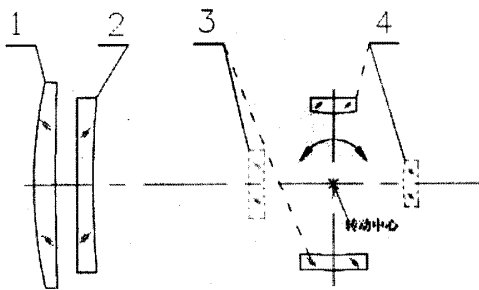


图1 切换式双视场红外光学系统
Fig.1 Rotate-Zoom optical system

2 消热差原理

当物体位于无穷远时，折射透镜的焦距公式为：

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

式中： $1/R_1$ 和 $1/R_2$ 是透镜前后表面的曲率。光热膨胀系数定义为透镜温度变化引起焦距的归一化变化，表示为：

$$x_{f,r} = \frac{1}{f} \frac{df}{dt} = \alpha_g - \frac{1}{n-1} \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

式中： α_g 为光学元件的线膨胀系数。系统的焦距变化为：

$$\Delta f = f x_{f,r} \Delta t = f \left(\alpha_g - \frac{1}{n-1} \frac{dn}{dt} \right) \Delta t \quad (3)$$

可知温度变化导致折射透镜焦距发生变化，主要由材料的热膨胀系数和材料的折射率温度系数决定。

光学被动消热差设计是利用不同材料的温度特性（线膨胀系数和折射率温度系数），在满足系统成像质量要求的同时，适当选配材料并合理分配光焦度，使整个光学透镜产生的像面离焦与镜筒材料热胀冷缩产生的离焦相互抵消。要实现光学被动消热差设计，系统必须满足总光焦度，消色差，消热差三个方

程^[8]：

总光焦度条件：

$$\sum_{i=1}^j \phi_i = \phi \quad (4)$$

消色差条件：

$$\sum_{i=1}^j \frac{\phi_i}{\nu_i} = 0 \quad (5)$$

消热差条件：

$$\sum_{i=1}^j \frac{\partial \phi_i}{\partial T} + \alpha_L \phi = 0 \quad (6)$$

式中： ν 为透镜的阿贝数； α_L 为镜筒材料的线膨胀系数。

3 光学设计指标

综合考虑体积、重量、性能等各种制约因素，中波双视场消热差红外光学系统的主要设计技术指标如表1所示。

表1 光学设计指标 Table1 Parameters of Optical design

探测器	320×240，像元尺寸 30 μm	
工作波段	3.7~4.8 μm	
像高	12 mm（对角线）	
变倍比	3*	
视场	9°×6.75°（WFOV）	3°×2.25°（NFOV）
焦距	60 mm	180 mm
F 数	4	
变倍方式	切换式变倍	
工作温度	-40℃~+60℃	
消热方式	光学被动式	

4 设计结果

按照技术要求，结合双视场变倍原理与消热差原理，算出系统的初始结构，然后利用ZEMAX光学辅助设计软件在多重结构中设置不同温度点进行优化，系统最终设计结果如图2所示，选用铝做镜筒材料（热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ）。整个系统采用单晶硅和硅两种常用红外光学材料（其中硅的折射率温度系数为 $5.1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，单晶硅的折射率温度系数为 $3.96 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ），仅由7片透镜组成，包括物镜组（2片）、变倍组（2片）、中继镜（3片），结构形式如图2所示。物镜组由一组正-负透镜构成。变倍组由一组负-正透镜组成，置于物镜组与中继组之间，由直流电机驱动切入/切出光路。中继组由硅/锗/硅三片透镜构成，将物镜组和变倍组形成的第一像面再成像到红外探

测器敏感面上，使物镜口径最小（小于 48 mm），并确保探测器具有近似 100% 的冷屏效率。系统总长短（小于 160 mm），结构紧凑，重量轻。

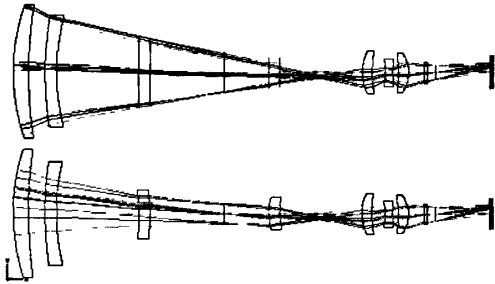


图2 双视场红外光学系统结构图

Fig.2 Dual-FOV Infrared Optical System

系统使用了2个高次非球面和1个二元衍射面提高像质及减少镜片数量，二元衍射面设置在锗材料上便于单点金刚石车床加工。通过计算得到二元衍射面参数为 Norm Radius=4.8 mm, $A_1=6.507377$, $A_2=3.148773$ 。

传递函数是光学系统的重要评价手段，经过优化设计，系统在-40℃~+60℃温度范围内宽、窄视场的像面稳定，像质优良。图3、图4分别给出了

宽、窄视场在不同温度下的光学调制传递函数图，由图可以看出，宽、窄视场在全温度范围内的MTF (17 lp/mm) 均大于 0.56，接近衍射限，足以保证光学系统在全温范围内成像质量优良。

点列图是光学系统对点目标成像时所形成的几何像斑，表2、表3分别给出了宽、窄视场在不同温度下的弥散斑直径均方根值 (RMS)，基本小于一个探测元尺寸 (30 μm×30 μm)，很好满足了系统的使用要求。

5 结论

本文针对法国SOFRADIR公司的中波红外 320×240 CMT焦平面探测器，通过合理搭配硅、锗两种常用红外材料，采用光学被动消热差技术，设计了一种切换式双视场红外光学系统。本系统可实现 180 mm/60 mm双视场变倍，在-40℃~+60℃温度范围内宽、窄视场都具有良好的成像质量。系统仅由7片透镜组成，结构简单，重量轻，体积小，易于装调，环境适应性好，可靠性高，符合热像仪高性能、多功能、小体积、轻量化，高可靠性的发展趋势，在导航、搜索、手持侦察等方面具有广阔的应用前景。

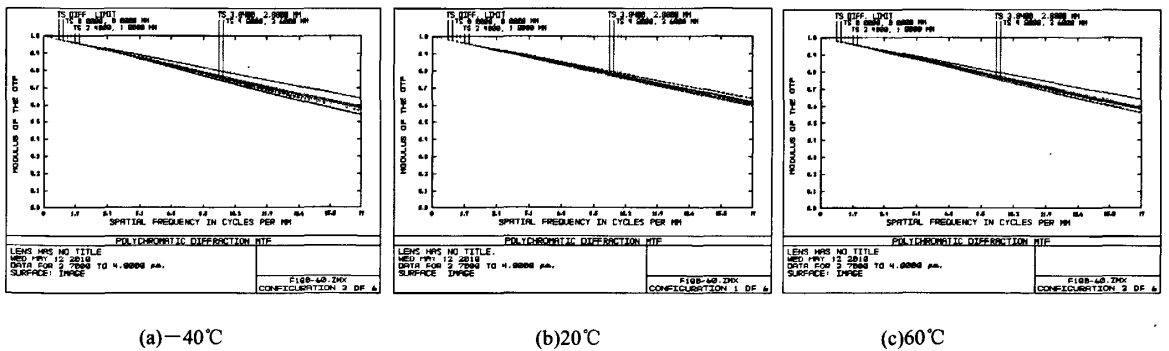


图3 宽视场光学系统传递函数

Fig.3 The MTF curve of NFOV

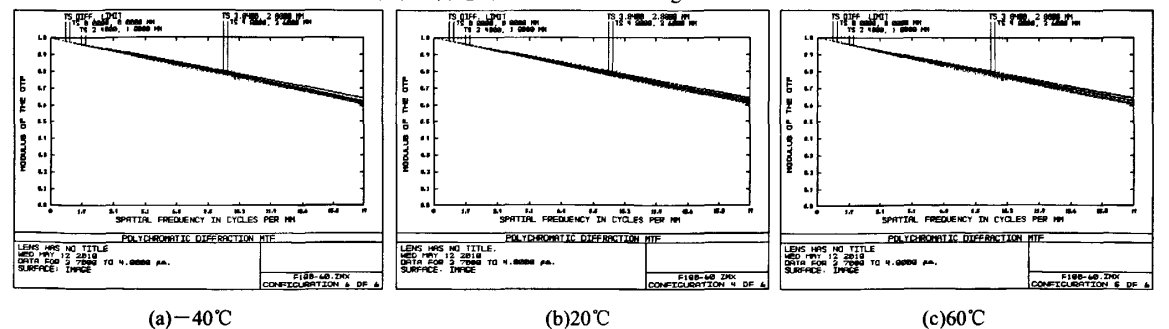


图4 窄视场光学系统传递函数

Fig.4 The MTF curve of NFOV

(下转第8页)

5 结论

本文针对极轴式望远镜的光学系统的特点,提出了模块化设计的思想,对光机结构部分进行了研究,分析了主镜室的变形和主镜在主镜室中的变形情况,并通过4D干涉仪检测进一步证明了支撑效果良好。优化分析了连接镜筒和校正镜筒的结构形式,通过最终的平行光管检测系统像质,证明了整个光机结构设计合理。这种模块化的设计在极轴式望远镜中具有装调简单,互换性好的优点,值得推广。

参考文献:

- [1] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2485-2490.
- [2] 孙宝玉. 基于 CAE 的光学反射镜柔性结构设计与分析[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 103-106.
- [3] 刘春霞. 空间遥感仪器卡塞格林镜筒的设计及轻量化研究[J]. 红外技术, 2006, 28(5): 253-256.
- [4] 张学军, 李志来, 张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 577-582.
- [5] 王富国, 杨洪波, 杨飞, 等. 大口径主镜轴向往支撑点位置优化分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 877-880.
- [6] 王富国, 张景旭, 杨飞, 等. 四翼梁式次镜支撑结构的研究[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 674-676.

(上接第3页)

表2 宽视场弥散斑直径均方根值

Table 2 The RMS spot diameter of WFOV

温度/℃	视场	RMS/μm
-40	0.5	4.610
	0.8	4.828
	1	6.377
20	0.5	3.734
	0.8	3.254
	1	4.894
60	0.5	3.771
	0.8	4.033
	1	7.815

表3 窄视场弥散斑直径均方根值

Table 3 The RMS spot diameter of NFOV

温度/℃	视场	RMS/μm
-40	0.5	9.418
	0.8	6.973
	1	7.037
20	0.5	3.776
	0.8	4.372
	1	5.106
60	0.5	7.250
	0.8	7.724
	1	8.081

参考文献:

- [1] 陈吕吉. 一种紧凑的红外消热差光学系统[J]. 红外技术, 2007, 29(4): 203-205.
- [2] 郭永洪, 沈忙作, 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.
- [3] Allen Mann. Infrared Zoom Lenses in the 1990s[J]. *Opt. Eng.*, 1994, 33(1): 109-115.
- [4] 任德清. 红外双视场透镜的光学设计[J]. 红外技术, 1998, 20(3): 19-22.
- [5] 陈吕吉, 明景谦, 马琳, 等. 四片式非制冷长波红外热像仪双视场光学系统[J]. 红外技术, 2010, 32(1): 25-28.
- [6] Muhammad Nadeem Akram, Design of a multiple-field-of-view optical system for 3μm to 5μm infrared focal-plane arrays[J]. *Opt. Eng.*, 2003, 42(6): 1704-1714.
- [7] Muhammad Nadeem Akram, Design of a Dual Field-of-View Optical System for Infra-Red Focal-Plane Arrays[C]//*SPIE*, 2002, 4767: 13-23.
- [8] 梁玲, 张良. 折衍混合红外光学系统无热设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(z): 120-124.