

doi: 10.3788/gzxb20164504.0412003

大口径高变倍比红外目标模拟系统的设计

刘智颖, 丁秋伟, 李丹, 栾晓宇

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘要: 为了模拟红外目标由远及近的飞行过程, 结合高变倍比红外连续变焦系统与大口徑投影系统设计了一款红外目标模拟系统. 连续变焦系统变倍比为 20 倍, 工作波段为 8~12 μm , 大口徑投影系统口径为 300 mm, 工作温度为 -30~40 $^{\circ}\text{C}$. 基于对系统参数的计算与分析, 通过推导的消热差及消色差方程对材料进行合理选择及光焦度分配, 实现了光学被动消热差设计, 应用动态光学理论对变焦凸轮运动曲线进行了计算与绘制. 系统成像质量分析结果表明, 变焦过程中像面稳定, 成像质量良好. 该系统可以实现高倍率红外目标飞行距离的连续变化模拟, 具有变倍比高, 体积小, 像质好, 环境适应能力强等特点.

关键词: 光学设计; 红外目标模拟; 连续变焦; 高变倍比; 大口徑投影

中图分类号: TH745

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0412003-7

Optical Design of Large Aperture and High Zoom Ratio Infrared Target Simulation System

LIU Zhi-ying, DING Qiu-wei, LI Dan, LUAN Xiao-yu

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to simulate infrared target flying process from far to near distance, a infrared target simulating system was designed, which is composed of high zoom ratio infrared continuous zoom system and large aperture projection system. The zoom ratio of continuous zoom system is $20\times$, the working wave-band is 8~12 μm . The large-aperture projection system has effective exit aperture of 300mm, and works under environment of -30~40 $^{\circ}\text{C}$. Based on calculation and analysis of system parameters, the material was reasonably selected and the optical power was distributed from the derived achromatic and athermal equations. Finally, the optical passive athermalized design was acquired. With dynamic optics theory, the zoom cam curve was calculated and plotted. The analysis results of system imaging quality show that the image plane is stable during the zoom process, and the imaging quality is good. The system can realize the continuous simulation of high zoom ratio target flying distance, which has advantages of higher zoom ratio, compact design and good image quality.

Key words: Optical design; Infrared target simulation; Continuous zoom; High zoom ratio; Large aperture projection

OCIS Codes: 120.1880; 120.3620; 120.4640; 120.4820; 110.6820

0 引言

近年来, 红外技术凭借其特有的优势在各领域的实际应用日益广泛, 将红外仿真系统有效地用于红外成像制导性能评价中, 能显著降低外场飞行试验次数, 节省资金并大大缩短武器研制周期^[1-2]. 国内目前半实物仿真系统中的关键子系统主要包括红外场景投影器

与红外目标模拟器等, 它不仅要模拟目标和背景的红外辐射特定, 还要反映目标、背景、被测系统和飞行平台的运动特征、几何特征等, 使被测系统如同在真实目标环境下工作. 采用变焦系统的五轴转台仿真系统可以适应不同焦距、不同视场导引头的测试和仿真^[3-4], 然而在这些仿真系统中还没有针对目标飞行距离模拟的研究.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11474037)资助

第一作者: 刘智颖(1981-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学设计与检测 Email: lzy@cust.edu.cn

收稿日期: 2015-09-28; 录用日期: 2016-01-28

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

红外系统应用于高分辨率的遥感和侦察等方面时,要求其温度范围很高,因此,具有减热差特性的红外光学系统设计尤为重要^[5]. Yasuhisa T 和 Toru T 提出了红外减热差系统材料的选择方法^[6], Kanagawa Y 提出了光学被动式减热差方法^[7]. 变焦系统需要在连续变焦过程中满足消热差方程,所以如何进行消热差设计也是红外变焦系统设计的重点.

本文将高变倍比连续变焦系统与大口徑投影系统对接,形成投影系统为被测系统提供平行光束. 系统的连续变焦过程可以实现对目标连续飞行时距离变化的模拟. 推导了适用于变焦系统的消热差和消色差方程,通过合理地分配光学材料及光焦度,使得大口徑高变倍比红外目标模拟系统实现了光学被动式消热差设计.

1 系统工作原理

目标首先经高变倍比红外变焦光学系统缩放成像,将有限远目标模拟为远距离处目标,并由变焦系统的变倍过程实现对目标由远及近飞行变化过程的模拟. 当变焦系统处于短焦位置时,在被测系统接收器中所获得的成像尺寸较小;当变焦系统处于长焦位置时,在被测系统接收器中所获得的接收像尺寸较大. 由于所需模拟的两端极限位置距离相差较大,所以变焦系统变倍比较高. 为了提供被测系统所需宽口径平行光束,变焦系统的聚焦光束需经由大口徑投影系统进行准直. 系统整体模拟原理如图 1.

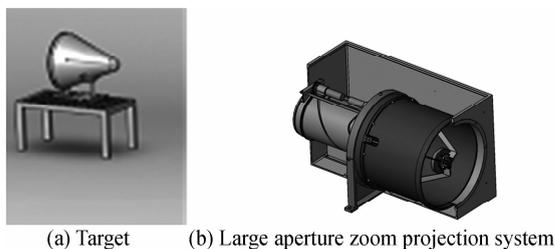


图 1 系统整体模拟原理图

Fig. 1 The principle diagram of the overall testing system

2 设计要求与思路

2.1 设计要求

尺寸为 1 000 mm 的室内仿真目标,经大口徑高变倍比变焦投影系统模拟后,被焦距为 300 mm 的被测系统接收,被测系统 $F\# = 1.5$,中心遮拦为 30%,要求被测系统接收器上获得的成像尺寸在 120~2 400 μm 范围内变化. 为了保证投影出射光束足够覆盖被测系统全口径,要求投影系统口径不小于 250 mm,系统工作波段为 8~12 μm ,且能满足在工作温度为 -30~40 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下使用.

2.2 设计思路

由被测系统出发采用逆光路设计方法,根据被测系统的有效口径对投影系统所需光学口径进行验算,通过对被测系统接收器上成像尺寸及范围的要求,推导高变倍比红外变焦系统的光学参数,并进行系统的组合设计.

2.3 系统参数的计算

为了保证红外变焦系统接收的能量,系统的 $F\#$ 不宜过大. 根据光路衔接原则,大口徑投影系统与高变倍比红外变焦系统的 $F\#$ 应保持一致. 由于投影系统的光学口径受到加工难度的限制,所以综合平衡各方面因素,选取系统的 $F\#$ 为 3.5.

根据要求,大口徑投影系统口径取为 300 mm,可对应求得投影系统的焦距为 1 050 mm.

经过推导,高变倍比红外变焦系统焦距与卡式系统焦距的关系为

$$\frac{f'_{\text{zoom}}}{f'_{\text{projection}}} = y'' \times L \times \frac{1}{y \times f'_{\text{UUT}}} \quad (1)$$

式中, y'' 为目标通过高变倍比变焦投影系统后在被测系统接收器上所成像的尺寸, L 为物距(这里选取室内为 22 m), y 为目标尺寸, f'_{UUT} 是被测系统的焦距. 经计算可得变焦系统的变焦范围为 $f'_{\text{zoom}} = 9.24 \sim 184.8 \text{ mm}$

2.4 大口徑投影系统的设计

为方便被测系统与投影系统的对接测试,投影系统的出瞳应位于系统外侧. 根据光瞳衔接原则,逆光路设计时,应将大口徑投影光学系统的入瞳设置于系统左端外侧,取入瞳位于系统左端 200 mm. 为压缩系统长度,大口徑投影系统采用经典的卡式系统结构型式,如图 2,光学总长为 396 mm,主镜口径为 300 mm,中心遮拦为 28.57%,小于 30%.

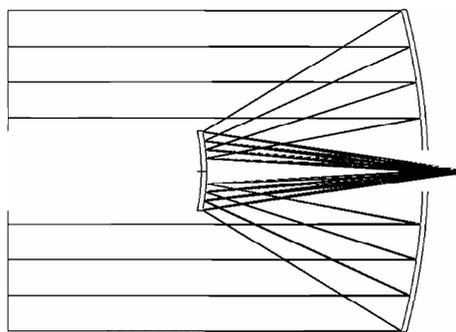


图 2 大口徑投影系统光路图

Fig. 2 Light path of large aperture projection system

由于该系统工作环境温差较大,所以投影系统的主、次镜均采用微晶玻璃材料,选取殷钢作为两镜之间支撑结构的材料,减小其线胀系数随温度变化对光学间隔的影响,降低温度变化对像质的影响.

2.5 变焦系统的设计

2.5.1 变焦系统的设计

变焦距光学系统的变焦方式分为光学补偿和机械补偿两种,光学补偿变焦方式结构简单,但是仅能在几个特殊位置实现清晰成像,无法实现连续变焦.随着机械加工精度不断提高,现多采用精确凸轮机构的机械补偿方式保证变焦过程中的像面稳定^[8].

机械补偿方式的变焦光学系统由前固定组、变倍组、补偿组及后固定组组成.按照补偿组镜片光焦度的正负可以分为正组补偿和负组补偿两种形式,正组补偿的系统细而长,负组补偿的系统粗而短;负组补偿由于变倍系统失对称严重,二级光谱和球差较大.由于高变倍比红外变焦系统的变倍比较大($20\times$),在像差校正方面正组补偿相对于负组补偿具有一定优势,且系统长度也可以满足要求,因此该连续变焦系统采用正组补偿方式^[9].

2.5.2 消热差原理

应用于复杂温度环境的系统材料的折射率将随温度变化发生变化,并且透镜的曲率半径、厚度等参数也将随温度变化而发生改变,从而导致焦距改变、像面漂移以及成像质量变差,由于应用红外材料的光学系统更为敏感,所以必须对该红外变焦系统进行消热差设计^[10-13].例如红外光学材料单晶锗的折射率温度系数为 $3.96 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$,而普通玻璃材料 K9 则为 $2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,相差近 200 倍.表 1 列举了常见长波红外(Long-wave Infrared, LWIR)材料的折射率、阿贝数、线膨胀系数与折射率温度系数.

现有的消热差设计补偿方法有机械被动式补偿、电子主动式补偿及光学被动式补偿.采用机械被动式一般会导致系统体积和重量较大;电子主动式需要电源、电路等器件,大大降低了系统的精度;光学被动式补偿方法是利用材料本身的热性能进行补偿,无需额外的机械结构,具有体积小、重量轻、可靠性高等优势.所以本系统采用光学被动式消热差方式^[14-15].

表 1 长波红外材料参数

Table 1 Long-wave infrared material parameters

LWIR material	n ($10.6 \mu\text{m}$)	Abbe number	α_g ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	dn/dT ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
Ge	4.0029	834.19	6.0	396.0
AMTIR-1	2.495 6	112	12.0	72.0
CdTe	2.677 8	108	5.0	98.0
ZnSe	2.402 8	58.61	7.8	61.0
ZnS	2.188 0	22.85	6.5	41.0

光学被动式消热差设计方法的原理是利用光学材料本身的温度特性和色差特性,通过合理选择材料并分配光焦度,使光学系统产生的像面离焦与仪器外壳热胀冷缩产生的像面离焦相互抵消,从而保证像面位置的稳定.由薄透镜成像理论,光学被动式消热差需

满足

$$\sum_{i=1}^n h_i \varphi_i = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n h_i^2 T_i \varphi_i = T' \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n h_i^2 C_i \varphi_i = C' \quad (4)$$

式中: φ_i 为各透镜光焦度除以系统总光焦度; $T_i = \frac{\Delta\varphi_{ii}}{\varphi_i}$ 、 $C_i = \frac{\Delta\varphi_{ci}}{\varphi_i}$ 为第*i*个透镜的归化热差系数及归化色差系数; h_i 为各透镜的归化入射高度; T' 、 C' 为系统归化热差系数和归化色差系数.

计算每个红外材料的 T 、 C 值,并以 T 、 C 为坐标系获得材料的 T - C 图,如图 3.为了尽可能地减小热差和色差,在密接系统的光焦度分配上必须保证各镜的光焦度最小,也就是优先选取三种材料点构成三角形面积需最大,而对于非密接系统需增加归化入射高度 h_i ,同理可推出其光学被动消热差方程.

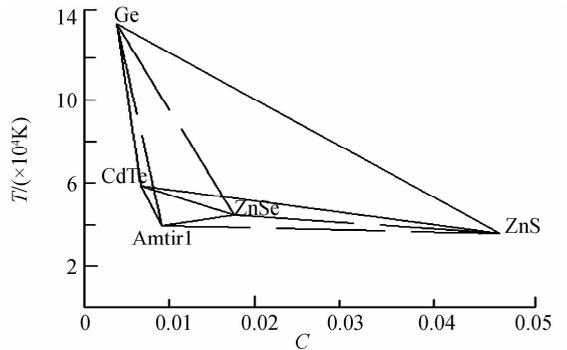


图 3 长波红外材料 T - C 图

Fig. 3 T - C chart for LWIR material

目前国内长波红外最常用的材料有 Ge、ZnSe、ZnS、Amtir1 及 CdTe,其中 CdTe、Amtir1 比较昂贵,难以批量加工.综合考虑材料加工难度、软化点、环境友好性、吸湿性等因素及 T - C 图,设计采用 Ge、ZnS、ZnSe 进行组合.由光学被动式热补偿条件出发,分配各透镜光焦度及材料搭配组合.

单透镜的消热差公式为

$$\frac{d\Phi}{dT} = \chi_i \Phi \quad (5)$$

式中 Φ 为单透镜的光焦度, χ_i 为透镜材料的热膨胀系数,即

$$\chi_i = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{dn}{dt} - \alpha_g \quad (6)$$

α_g 为透镜线膨胀系数.

焦距的组合公式为

$$\Phi_{12} = \Phi_1 + \Phi_2(1 - \Phi_1 t_1) \quad (7)$$

式中, Φ_{12} 为两个组元的组合光焦度, Φ_{123} 为三组元的组合光焦度, Φ_{1234} 为四组元的组合光焦度, Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 和 Φ_4 分别为各组合单元的光焦度, t_1 、 t_2 和 t_3 分别为一二

组元,二三组元与三四组元之间的厚度间隔.

式(7)对温度进行求导,得

$$d\Phi_{12} = d\Phi_1 + d\Phi_2(1 - \Phi_1 t_1) - \Phi_2 d\Phi_1 t_1 \quad (8)$$

同理对于4组元组合的变焦系统,可得出迭代方程为

$$d\Phi_{1234} = d\Phi_{123} + d\Phi_4(1 - \Phi_1 t_1 - \Phi_{12} t_2 - \Phi_{123} t_3) - \Phi_4(d\Phi_1 t_1 + d\Phi_{12} t_2 + d\Phi_{123} t_3) \quad (9)$$

消色差条件为

$$d\Phi_{1234} = 0 \quad (10)$$

为满足消色差方程,设 y_i 为像高, ν_{iw} 为折射率温度系数,得

$$\frac{y_1^2}{\nu_{1w}} + \frac{y_2^2}{\nu_{2w}} + \frac{y_3^2}{\nu_{3w}} + \frac{y_4^2}{\nu_{4w}} = 0 \quad (11)$$

为了保证整个系统的热稳定要求,有

$$\sum_{i=1}^j \chi_i \phi_i + \alpha_H \phi = 0 \quad (12)$$

式中 α_H 为镜筒材料的热膨胀系数,变焦系统结构部分采用铝合金材料($\alpha_L = 23.6 \times 10^{-6}$).

基于消色差分析,高变倍比红外变焦系统中前固定组、变倍组、补偿组和后固定组焦距的计算结果分别为 $f'_1 = 279.10$ mm, $f'_2 = -46.22$ mm, $f'_3 = 48.58$ mm, $f'_4 = 30.94$ mm. 设计结果如图4.

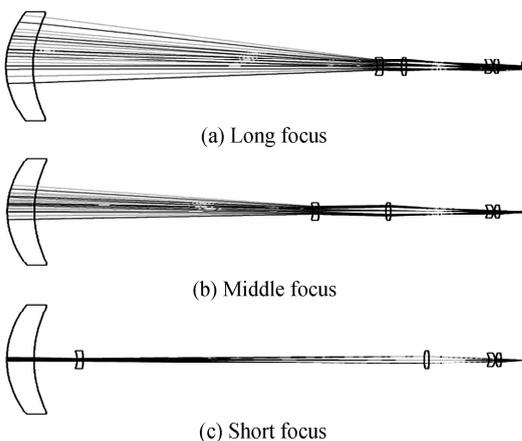


图4 各焦距位置时的变焦系统光路

Fig. 4 Sketch of zoom system in different focus position

设置焦距 96.5 mm 为该变焦系统的中焦位置,图4给出的分别为变焦过程中由长焦 184.8 mm 到短焦 9 mm 变焦三个特征位置的光路图.

系统总长为 304.67 mm,由五片透镜组成,其中后固定组由两片构成,前三组均由单片承担,系统材料依次为 Ge、Ge、ZnSe、ZnS、ZnS. 第一片透镜承担主要光焦度,减小后组口径. 前两片透镜采用 Ge 材料,由于其色散系数较小,折射率较高,可以保证系统整体的色差较小,利于校正轴上像差. 第三片透镜材料为 ZnSe,其 dn/dt 较小,可以消热差. 后固定组由两片 ZnS 构成,ZnS 具有较小的阿贝数和 dn/dt ,在分配光焦度达到平衡系统后起剩余像差和热差的作用.

3 设计结果

3.1 变焦曲线拟合

应用动态光学理论对凸轮的运动曲线进行计算与绘制,计算得出变倍曲线和补偿曲线的对应关系^[16-17],即

$$Aq_2^2 + Bq_2 + C = 0 \quad (13)$$

式中,

$$\begin{cases} A = (f'_1 - \beta_1 q_1) \beta \\ B = \beta_1 \beta_2 q_1^2 + [f'_2(1 - \beta_2^2) \beta_1 - f'_1(1 - \beta_2) \beta_2] q_1 - f'_1 f'_2 (1 - \beta_2^2) \\ C = \beta_2^2 f'_2 [\beta_1 q_1 - f'_1(1 - \beta_1^2)] q_1 \end{cases} \quad (14)$$

即

$$q_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (15)$$

根据式(13)~(15)在 Matlab 中建立数学模型,即可得到凸轮的运动曲线,如图5,图中直线为变倍组的运动行程,曲线为补偿组的运动行程.

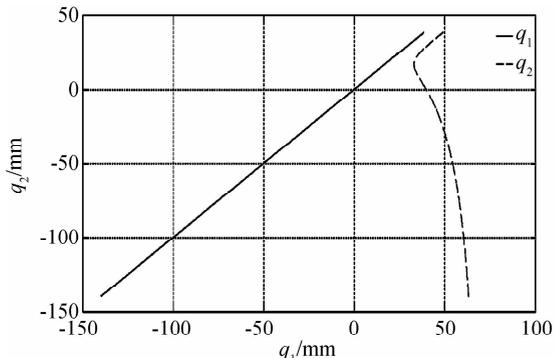


图5 变焦系统凸轮曲线

Fig. 5 Cam curve of zoom system

3.2 设计结果分析

为了验证变焦投影系统组合后的像质及在被测系统接收器中的成像尺寸,被模拟目标放置于距离图6最左端变焦系统 22 m 处,并经由高变倍比红外变焦系统与大口徑投影系统对接的目标模拟系统投射后,由图6最右端的标准透镜模拟被测系统的接收情况. 图6

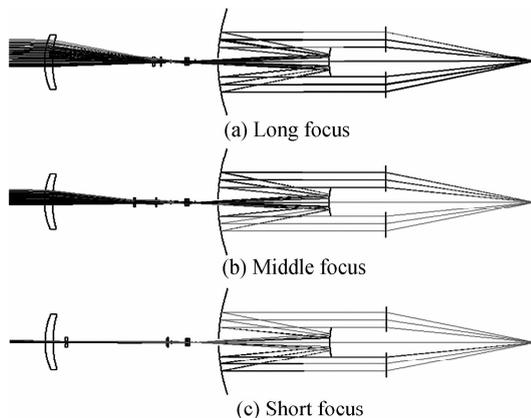


图6 各焦距位置时的系统光路

Fig. 6 Light path of system in different focus position

(a)~(c)分别反映了由长焦到短焦变化过程中被模拟目标在被测系统中成像尺寸的变化。

被测系统传感器尺寸对应的捕获范围较大,还可以观察到被模拟目标以外的部分,但其在被测系统中不成像,系统组合仅需考虑被模拟目标范围成像质量,传感器增大的捕获范围方便被测系统、目标模拟系统与被模拟目标的对接,并且可以更加真实地反映被测系统跟踪目标的过程。

图7为高变倍比红外变焦系统变焦过程中,在不同焦距位置、模拟目标为不同距离情况下对应在被测系统上接收的调制传递函数(Modulation Transfer

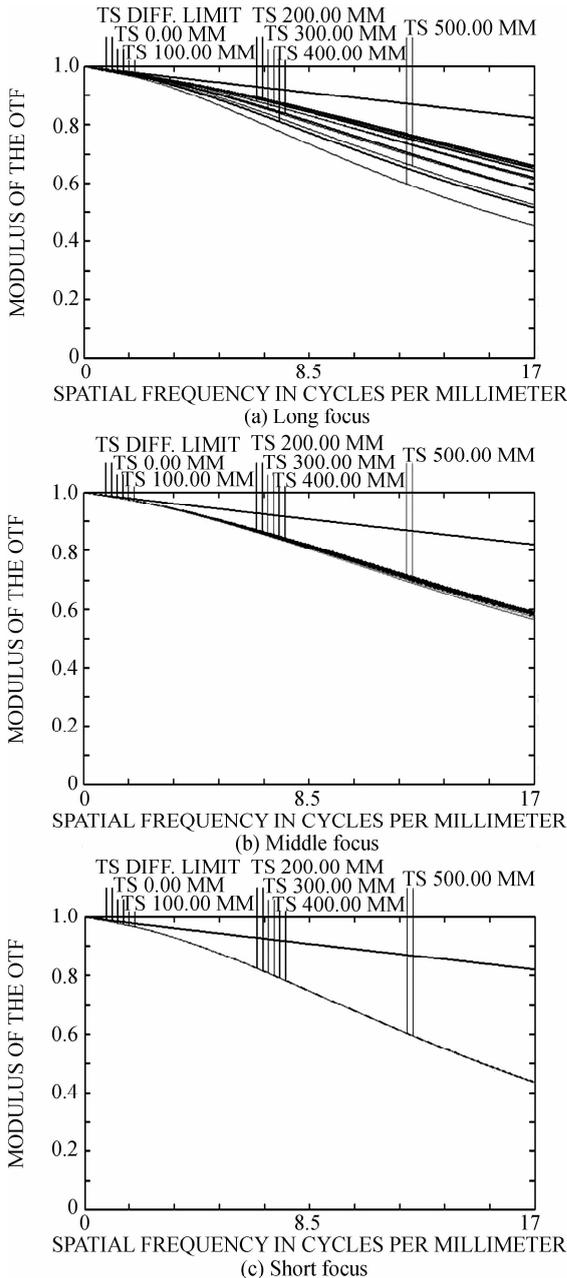


图7 变焦过程中接收被测系统的调制传递函数曲线
Fig. 7 MTF curves of unit under tested during zoom process

Function, MTF) 曲线变化情况. 由图7可以看出高变倍比红外变焦系统在变焦过程中像面稳定,成像质量良好。

3.3 无热化分析

在 $-30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 环境温度下,分别考察温度变化后系统的成像质量,图8(a)、(b)分别为长焦在 -30°C 及 40°C 时的MTF图,图9和图10的(a)、(b)分别为中焦和短焦对应 -30°C 及 40°C 时的MTF,可以看出,高变倍比变焦系统变焦过程中像面始终保持稳定,随着温度变化系统的MTF值基本没有改变,成像质量仍然满足使用要求,说明温度变化对系统像质影响不大,环境适应性良好,实现了系统的消热差设计。

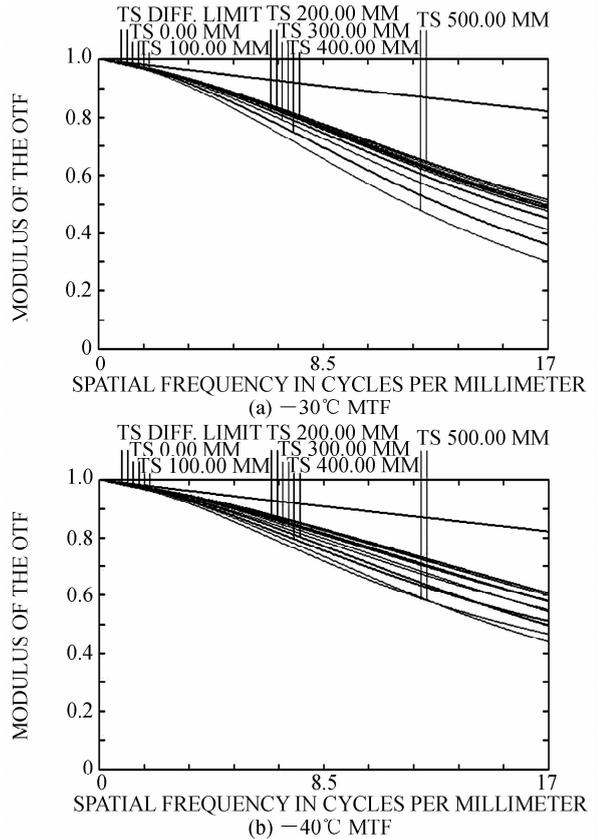
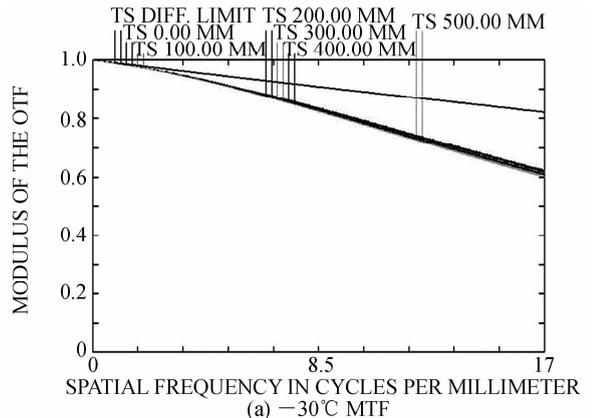


图8 长焦热分析传递函数
Fig. 8 MTF curves of long focus thermal analysis



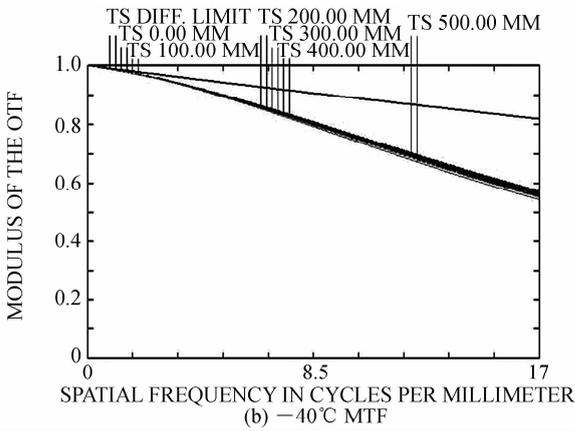


图 9 中焦热分析传递函数

Fig. 9 MTF curves of middle focus thermal analysis

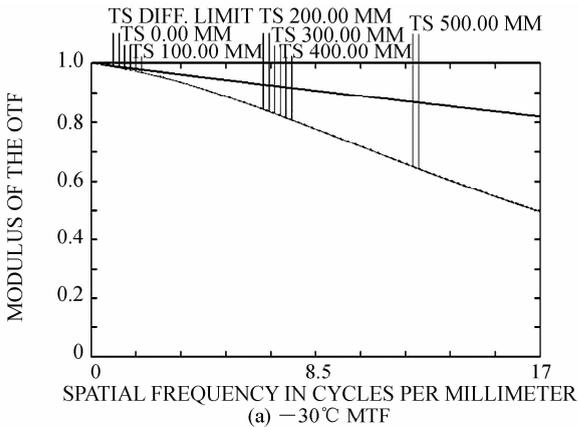


图 10 短焦热分析传递函数

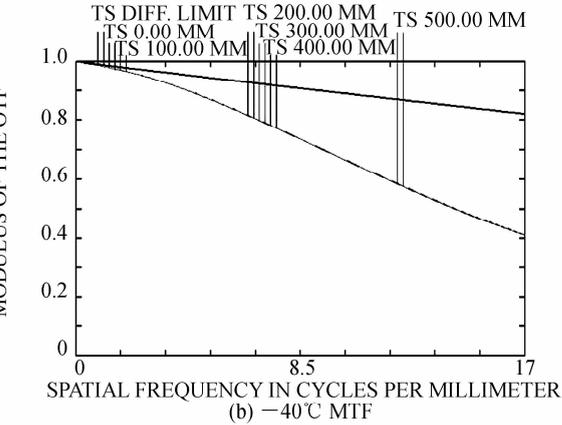


图 10 短焦热分析传递函数

Fig. 10 MTF curves of short focus thermal analysis

由于整个目标模拟系统出射为平行光,需要具备优良像质相应参数的被测系统接收,变焦系统最后一块到像面距离较近,传递函数测试将受到空间因素限制.为了突破实验条件限制进行系统成像效果验证,在变焦系统的像面处加设接收器,针对变焦系统变焦过程的成像变化进行了模拟实验,图 11 为实验装置图,图 12 为变焦系统对目标的成像效果.

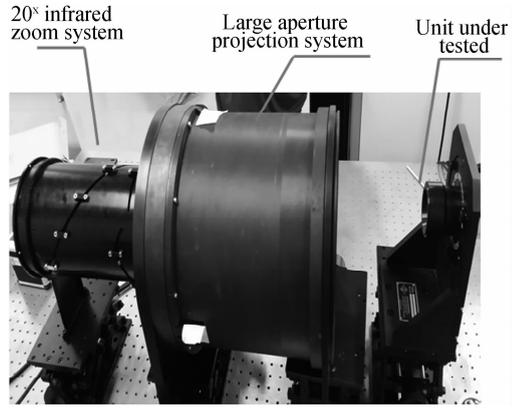
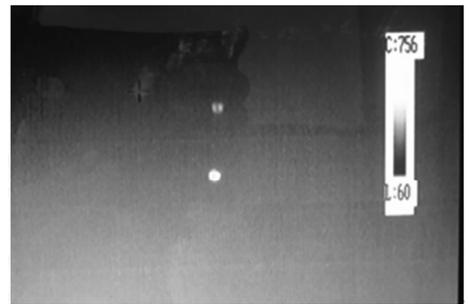
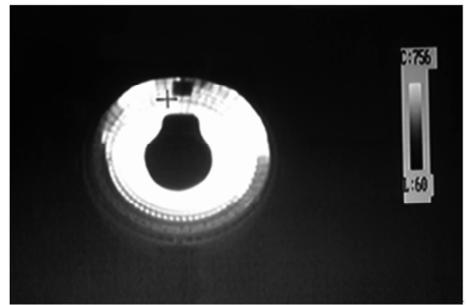


图 11 高变倍比红外变焦投影系统实物

Fig. 11 High zoom ratio infrared zoom projection system prototype



(a) Short focus



(b) Long focus

图 12 高变倍比红外变焦系统成像效果

Fig. 12 High zoom ratio infrared zoom system prototype image

4 结论

本文设计了高变倍比红外变焦投影系统.该系统结合了高变倍比红外变焦系统与倒置的卡式系统,可以实现 20 倍连续变焦的变倍比.通过对消热差和消色差方程的推导,实现了光焦度和红外材料的合理分配,从而完成了该高变倍比变焦投影系统的光学被动式消热差设计,在-30~40℃各温度环境下成像质量良好.

参考文献

- [1] GAO Jiao-bo, WANG Jun, LUO Yan-ling, *et al.* Progress in the development of dynamic infrared scene projector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(S): 3561-3564.

- 高教波,王军,骆延令,等. 动态红外场景投射器研究新进展[J]. 红外与激光工程,2008,**37**(S):355-357.
- [2] GONG Xue-ping, FEI Hai-lun. Situation and development of infrared imaging guidance hardware in the loop simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, **29**(2):51-56. 贡学平,费海伦. 红外成像制导半实物仿真现状与发展[J]. 红外与激光工程,2000,**29**(2):51-56.
- [3] WANG Zhi-le, DAI Jing-min, YANG Di. Optical design of zoom lenses in IR HWIL simulation system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008,**29**(6)936-939. 王治乐,戴景民,杨迪. 红外仿真变焦光学系统设计[J]. 应用光学,2008,**29**(6)936-939.
- [4] WANG Zhi-le, ZHANG Wei. Study of IR imaging target simulator based on zoom system [J]. *Optical Technique*, 2004,**30**(4): 420-422. 王治乐,张伟. 基于变焦系统的红外成像目标模拟器研究[J]. 光学技术,2004,**30**(4):420-422.
- [5] SUN Qiang, LIU Hong-bo, WANG Zhao-qi, *et al.* An infrared diffractive/refractive optical system beyond normal temperature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003,**32**(4):466-469. 孙强,刘宏波,王肇圻,等. 红外折射/衍射超常温光学系统[J]. 光子学报,2003,**32**(4):466-469.
- [6] YASUHISA T, TORU T. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design[J]. *Applied Optics*, 1997,**36**(1): 297-301.
- [7] KANAGAWA Y, WAKABAYASHI S, TIAJIME T, *et al.* Multi lens system design with an athermal chart[J]. *Applied Optics*, 1994,**33**(34):8009-8013.
- [8] KUO C W, LIN C L, HAN C Y. Dual field-of-view midwave infrared optical design and athermalization analysis [J]. *Applied Optics*, 2010,**49**(19):3691-3700.
- [9] TYAGUR V M, KUCHERENKO O K, MURAV'EV A V. Passive optical athermalization of an IR three-lens achromat [J]. *Journal of Optical Technology*, 2014,**81**(4):199-203.
- [10] TAO Chun-kan. Zoom optics system design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 45-48. 陶纯堪. 变焦距光学系统设计 [M]. 北京:国防工业出版社, 1988: 45-48.
- [11] ZHANG Liang. Optical design for middle infrared zoom system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006,**27**(1):32-34. 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.
- [12] HU Yu-xi, ZHOU Shao-xiang, XIANG Li-Bin, *et al.* Design of athermal optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000,**20**(10):1386-1391. 胡玉禧,周绍祥,相里斌,等. 消热差光学系统设计[J]. 光学学报,2000,**20**(10):1386-1391.
- [13] JIA Yong-dan, FU Yue-gang, LIU Zhi-ying, *et al.* Design of dual-FOV athermal optical system for infrared dual-color[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012,**41**(6):638-641. 贾永丹,付跃刚,刘智颖,等. 双视场/双色红外消热差光学系统设计[J]. 光子学报,2012,**41**(6):638-641.
- [14] WANG Qian, XUN Shi-wen. Athermal design for visible diffractive-refractive hybrid optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004,**24**(12):1596-1598. 王茜,许士文. 可见光折/衍射混合光学系统消热差设计[J]. 光学学报,2004,**24**(12):1596-1598.
- [15] WU Xiao-jing, SUN Chi-quan, MENG Jun-he. Relationship between athermalizing infrared optical system and zoom lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002,**31**(3):249-252. 吴晓靖,孙赤全,孟军和. 红外光学系统无热化设计与变焦距镜头的关系[J]. 红外与激光工程,2002,**31**(3):249-252.
- [16] GAO Tian-yuan, HOU Zhen-yan. Comparison and research of zoom curve fitting methods [J]. *Acta photonica sinica*, 2013, **42**(1): 94-97. 高天元,侯振岩. 变焦曲线拟合方法的比较与研究[J]. 光子学报,2013,**42**(1):94-97.
- [17] WANG Zhi-jian, WANG Peng, LIU Zhi-ying. Engineering optics Principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010:170-171. 王志坚,王鹏,刘智颖. 工程光学原理 [M]. 北京:国防工业出版社,2010:170-171.