

doi: 10.3788/gzxb20164510.1022003

# 双波段大变倍比连续共变焦光学系统设计

李西杰, 刘钧, 陈阳

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

**摘 要:** 为了提高变焦光学系统在复杂环境下的高分辨率探测能力, 解决现有多波段光学系统中光路转换和波段切换耗时长、系统反应慢、不同波段目标信息存在差异的问题, 设计了一种可见光(0.38~0.76  $\mu\text{m}$ )、中红外(3~5  $\mu\text{m}$ )共口径连续共变焦光学系统, 系统工作焦距为 7.52~98.35 mm, 变焦比为 13 $\times$ . 基于正组补偿变焦理论分析了任意变焦位置处可见光、中红外变焦比的差异及其变化规律, 推导了三片薄透镜消色差理论和双波段焦距补偿表达式. 对变倍组和补偿组的光焦度进行合理匹配, 使系统在任意变焦位置处的焦距及变焦比都相同, 提高了双波段目标信息的一致性. 根据使用要求, 采用光学被动式完成双波段光学系统在-40~+60 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的消热差设计. 设计结果表明, 系统结构紧凑, 反应速度快, 整体成像质量良好, 可实现昼夜全天候工作.

**关键词:** 光学设计; 双波段; 大变倍比; 连续共变焦; 消热差

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1022003-10

## Design of Dual-Band, High Zoom Ratio and Continuous Co-focal Optical System

LI Xi-jie, LIU Jun, CHEN Yang

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to increase the high resolution detection capabilities of zoom optical system in a complex environment, and to solve the problems of the slow conversion speed of the optical path and differences among the object information of different bands in the multi-band optical system, a visible (0.38~0.76  $\mu\text{m}$ ) and middle infrared (3~5  $\mu\text{m}$ ) continuous co-caliber common zoom optical system with working focal length of 7.52~98.35 mm and zoom ratio of 13 $\times$  was designed. The zoom ratio variation of visible and middle infrared at any zoom position was analyzed based on the positive compensation zoom group theory. The three thin achromatic lens focal length compensation theory and dual-band expression were derived. The power of zoom group and compensation group were matched rationally, making the system have the same zoom ratio at any zoom position and focal length, which improved consistency of dual-band target information. According to requirements, the dual-band athermal optical system with the temperature of -40~+60 $^{\circ}\text{C}$  was designed with the use of optical passive. The results show that the system has compact structure, fast response and good overall image quality, which can achieve all-weather day and night work.

**Key words:** Optical design; Dual-band; High zoom ratio; Continuous co-focal; Athermalization

**OCIS Codes:** 220.2740; 040.3060; 080.2740; 090.1970

## 0 引言

快速发展的社会需求以及日趋复杂的应用环境对变焦系统的性能提出了越来越高的要求<sup>[1-3]</sup>, 因此设计一个大变倍比多波段连续共变焦光学系统显得尤为重

要. 可见、中红外(3~5 $\mu\text{m}$ )连续共变焦光学系统可通过双波段系统高分辨全天候观测来获取精确、全面的目标信息, 系统同时兼备了多焦距探测, 其中短焦实现范围广的快速搜索, 长焦进行精确观测, 有着对目标进行全天候、高分辨率侦察的优势<sup>[4-5]</sup>. 现有的可见光、红

基金项目: 陕西省自然科学基金(No. 2012JM8008)资助

第一作者: 李西杰(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学系统设计. Email: xijie\_li@163.com

导师(通讯作者): 刘钧(1964-), 女, 教授, 硕士, 主要研究方向为光学系统设计、激光大气传输理论及技术. Email: junliu1990@163.com

收稿日期: 2016-04-25; 录用日期: 2016-06-17

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

外双波段变焦系统大多由两个单独系统组成,系统体积大,侦察设备整体结构复杂<sup>[6]</sup>。此外,当外部环境发生变化,如目标被遮挡、伪装、烟雾干扰、昼夜交替,而进行光路和波段转换时,需要重新搜索目标,才能对目标进行观察,切换过程耗时长,系统反应速度慢,当跟踪、观测的目标移动速度较快时,很容易丢失目标。2010年, Jay N. Vizgaitis<sup>[7]</sup>设计了一款军用 11.7X 中波/长波红外连续变焦系统。系统采用折、反混合光路,并使用红外双色焦平面阵列对中波/长波红外同时成像。2011年 Jeong-Yeol Han 等<sup>[8]</sup>针对可见光/红外双波段系统体积过大的问题,采用多次反射的形式分别对可见光/红外两个系统进行折叠,在一定程度上减小了系统体积,但该系统视场角小,  $F$  数较大,仅适用于小视场系统中,应用范围非常有限。

针对上述问题,本文设计了一款可见、中红外(3~5  $\mu\text{m}$ )共口径连续共变焦光学系统,该系统结构简单,体积小,而且能满足大视场、大相对孔径的要求。通过双波段消色差和双波段焦距补偿原理,双波段变焦系统的变倍组用  $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{AlN}$  材料,补偿组用  $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$  材料,使系统在任意变焦位置处焦距和变焦比都相同,当用不同波段观察时,无需转换光路即可直接进行观察,保证了不同波段目标信息的一致性,实现了对目标同步观测、同步跟踪、同步测量的目的,提高了光学系统的反应速度,避免了光路转换过程中丢失高速移动的目标。

## 1 设计理论

### 1.1 可见、红外双波段间消色差原理

由于不同材料在不同波段的色散性能不同,因此系统不仅有各波段自身色差,同时也存在波段间的色差。对于可见、中红外光学系统,要求光学系统在可见波段和中红外波段的焦距尽量接近;同时为了在不调焦的情况下同时使双波段成像清晰,要求可见光波段的焦深处在红波红外的焦深范围内<sup>[9]</sup>。设计的关键是让可见光波段中心波长  $\lambda_1$  ( $\lambda_1 = 0.587 \mu\text{m}$ ) 和中红外中心波长  $\lambda_2$  ( $\lambda_2 = 4.2 \mu\text{m}$ ) 的光焦度相等。 $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  光焦度相等时两片薄透镜的光焦度的关系为

$$\begin{cases} \Phi_1(\lambda_1) + \Phi_2(\lambda_1) = \Phi \\ \frac{\Phi_1(\lambda_1)}{\nu_1(\lambda_2)} + \frac{\Phi_2(\lambda_1)}{\nu_2(\lambda_2)} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  分别为两片薄透镜在中心波长处的光焦度,  $\nu_1$  和  $\nu_2$  分别为两片透镜材料的阿贝数,

$$\nu_1(\lambda_2) = \frac{n_1(\lambda_1) - 1}{n_1(\lambda_1) - n_1(\lambda_2)}, \nu_2(\lambda_2) = \frac{n_2(\lambda_1) - 1}{n_2(\lambda_1) - n_2(\lambda_2)}.$$

为了进一步减小色离焦,可采用 3 片不同材料的光学元件<sup>[10]</sup>, 3 片薄透镜的消色差公式可以使系统在 3 个波段下的光焦度相等。针对可见、中红外光学系统,

将可见中心波长  $\lambda_1$ 、中红外中心波长  $\lambda_2$  和可见最短波长  $\lambda_3$  ( $\lambda_3 = 0.486 \mu\text{m}$ ) 光焦度设为相等。薄透镜光焦度分配计算方程为

$$\begin{cases} \Phi_1(\lambda_1) + \Phi_2(\lambda_1) + \Phi_3(\lambda_1) = \Phi \\ \frac{\Phi_1(\lambda_1)}{\nu_1(\lambda_2)} + \frac{\Phi_2(\lambda_1)}{\nu_2(\lambda_2)} + \frac{\Phi_3(\lambda_1)}{\nu_3(\lambda_2)} = 0 \\ \frac{\Phi_1(\lambda_1)}{\nu_1(\lambda_3)} + \frac{\Phi_2(\lambda_1)}{\nu_2(\lambda_3)} + \frac{\Phi_3(\lambda_1)}{\nu_3(\lambda_3)} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\nu_3(\lambda_2) = \frac{n_3(\lambda_1) - 1}{n_3(\lambda_1) - n_3(\lambda_2)} \quad (3)$$

$$\nu_3(\lambda_3) = \frac{n_3(\lambda_1) - 1}{n_3(\lambda_1) - n_2(\lambda_3)} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(2),计算出  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  光焦度相等时系统对应三片薄透镜的光焦度。材料组合选择的一般性原则为:最低平均离焦或最小的绝对光焦度对应的组合一般不是最佳的组合,两者之间的这种选择可能最佳,最佳组合的评定与所设计系统的相对孔径和视场角有关。一般大  $F$  数系统由于焦深大,可以容忍在比较大的绝对光焦度情况下,取得比较好的焦距稳定性,而对于  $F$  数比较小的,即使单色像差也难以校正。

### 1.2 双波段焦距补偿

以最简单的两片透镜组合为例,结合几何光学知识,可以推导满足双波段焦距相等的条件为

$$\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 - d(\Delta\Phi_1\Phi_2 + \Delta\Phi_2\Phi_1 + \Delta\Phi_1\Delta\Phi_2) = 0 \quad (5)$$

其中,

$$\begin{cases} \frac{1}{\Phi_i} = \frac{nr_i r_{i+1}}{(n_i - 1)[n_i(r_{i+1} - r_i) + (n_i - 1)d_i]} & i = 1, 2 \\ \Delta\Phi_i = \frac{\Delta n_i(r_{i+1} - r_i d_i)}{r_i r_{i+1}} + \frac{\Delta n_i d_i}{n_i(n_i + \Delta n_i)r_i r_{i+1}} & i = 1, 2 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$  为透镜 1、2 的光焦度,  $\Delta\Phi_1$ 、 $\Delta\Phi_2$  为两个波段透镜 1、2 的光焦度差值,  $d$  为透镜 1、2 的间隔,  $r_{i+1}$ 、 $r_i$ 、 $d_i$ 、 $n_i$ 、 $\Delta n_i$  分别为对应透镜的曲率、厚度、折射率及两个波段折射率差值。若透镜为双胶合结构,则系统曲率、厚度、折射率满足

$$\sum_{i=1,2} \frac{\Delta n_i(r_i - r_{i+1} + d_i)}{r_i r_{i+1}} + \frac{\Delta n_i d_i}{n_i(n_i + \Delta n_i)r_i r_{i+1}} = 0 \quad (7)$$

当材料选定时  $n_i$ 、 $\Delta n_i$  为定值,由式(7)可以得出,满足双波段焦距相同时,对应的两个透镜曲率及厚度关系,再结合像差校正进一步求得其数值。

有多个透镜时需满足

$$\begin{aligned} \Phi - \Phi' &= (\Phi_1 + \frac{h_2}{h_1}\Phi_2 + \dots + \frac{h_k}{h_1}\Phi_k) - \\ &(\Phi'_1 + \frac{h'_2}{h'_1}\Phi'_2 + \dots + \frac{h'_k}{h'_1}\Phi'_k) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $h_i$  为近轴光线在第  $i$  个透镜的高度,在实际系统中近似认为  $h_i = h'_i$ ,可得

$$\sum_i^k \frac{h_i}{h_1} \left[ \frac{\Delta n_i (r_i - r_{i+1} + d_i)}{r_i r_{i+1}} + \frac{\Delta n_i d_i}{n_i (n_i + \Delta n_i) r_i r_{i+1}} \right] = 0$$

## 2 光学系统设计

### 2.1 设计要求及指标

要求光学系统能做到多波段、高分辨、全天候观测,获取精确、全面的目标信息,因此选取可见、中红外两个波段.同时系统为了兼备多焦距探测,总变倍比设计为13×.具体的设计指标见表1.根据表1中的参数,选择可见光探测器为1/4"CCD,像元尺寸为6.5 μm × 6.25 μm.中红外探测器为1/4"非制型冷焦平面阵列,像元尺寸为25 μm × 25 μm.

表1 光学设计指标

Table 1 Optical design specifications

Parameter	Value
Work wavelength/μm	0.38~0.76/3~5
Zoom ratio	13×
F-number	4/3
Focal length range/mm	7.52~98.35
Temperature range/°C	-40~+60

### 2.2 变焦系统初始结构设计

设计采用易于实现大变倍比的机械补偿变焦方式,主要是利用光学系统中透镜组的移动,改变系统的组合焦距,同时保证所有运动组份共轭距任何瞬间的微分改变量,保证变焦过程中系统像质良好<sup>[1]</sup>.如图1,机械补偿变焦距光学系统一般由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组构成,通过改变变倍组和补偿组的放大倍率  $M_1$ 、 $M_2$  求得变焦高斯解、变倍组与补偿组相对移动量  $q_1$  和  $q_2$ ,最终实现大变倍比系统设计.

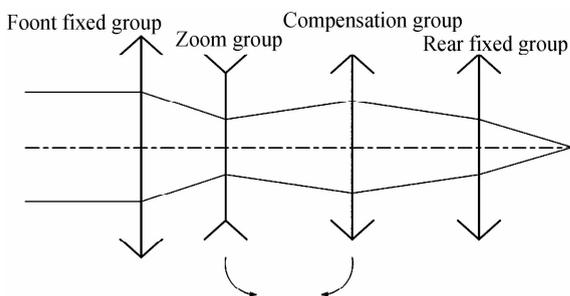


图1 机械补偿法正组补偿系统结构

Fig. 1 Schematic diagram of positive mechanical compensation system

为了像面位置稳定,两个像面移动的代数和为零,必须满足

$$M_2^3 (1 - M_2^2) dq_1 + (1 - M_3^2) dq_2 = 0 \quad (9)$$

$$dq_1 = \frac{f'_2}{M_2} dM_2 \quad (10)$$

$$dq_2 = f'_3 dM_3 \quad (11)$$

由式(9)~(11)可得变倍组和补偿组满足变焦过程微分方程,即

$$\frac{1 - M_2^2}{M_2^2} f'_2 dM_2 + \frac{1 - M_3^2}{M_3^2} f'_3 dM_3 = 0 \quad (12)$$

式中,  $f'_2$  为变倍组的焦距;  $f'_3$  为补偿组的焦距;  $M_2$ 、 $M_3$  为变倍组、补偿组倍率.

## 3 光学设计结果与分析

### 3.1 设计结果

由于可见光、中红外两个波段较宽,中心波长相差接近10倍,导致焦距值不统一,并且要求系统能够实现可见光、中红外两个波段同时连续变焦,因此普通变焦系统的结构形式无法满足设计要求,需要对普通变焦结构进行重新设计.重新设计后系统由公共变焦组、分光棱镜、可见光后固定组以及中红外后固定组四部分组成,系统结构如图2.

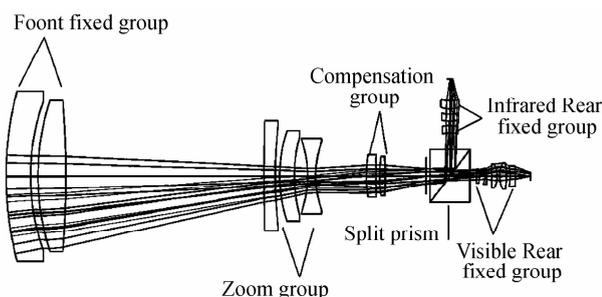


图2 光学系统结构

Fig. 2 Schematic diagram of the optical system

前固定组、变倍组和补偿组三部分构成公共变焦组,此部分同时透过可见光和中红外,并且实现二者同步变焦.分光棱镜<sup>[12]</sup>透射可见光,反射中红外波段.可见光后固定组、中红外后固定组,分别校正可见光、中红外的剩余像差,并会聚光线在各自的探测器上成像.

可见、中红外双波段在各焦距位置处高级像差不易校正,尤其球差、彗差和垂轴色差.由于双波段中心波长差距太大,使像差校正、消色差处理以及双波段共焦处理难度加大.因此,着重对系统的变焦组用换材料的办法进行光焦度的匹配,用于校正系统大量的垂轴色差.更换材料通常的办法可以试着保持透镜的折射率不改变,而仅改变阿贝数,这样可以保证系统原单色像差在没有大幅度影响的情况下,修正系统剩余的色差,并通过将非球面引入第一个面和第九个面,对像差进行重复调整 and 平衡,使系统的成像质量及焦距一致性有很好的改善.以变倍组的焦距为规范值,即取  $f_2 = -1$ .根据变焦系统设计的理论公式,结合焦距补偿理论,最终得到前固定组焦距  $f_1 = 6.327$ ,补偿组焦距  $f_3 = 1.094$ ,后固定组焦距  $f_4 = 0.26$ ,系统最终公共部分参量如表2.可见、红外系统总长分别为299.6 mm和272.13 mm.表3给出了系统焦距分别为7.52 mm、60.02 mm和98.35 mm时各组元的间距值  $d_{34}$ 、 $d_{23}$ 、 $d_{12}$ ,其中  $d_{34}$  为补偿组和后固定组之间的空气间隔,  $d_{23}$

变倍组和补偿组之间的空气间隔,  $d_{12}$  为前固定组和变倍组之间的空气间隔. 图 3 给出了变焦系统在短焦、中焦和长焦的结构图.

表 2 系统最终公共部分参量

Table 2 Last public detailed parameters of the system

Surface; type	Radius/mm	Thickness/mm
Object plane	Standard	Infinity
1	Even asphere	170.769
8	Standard	56.912
9	Even asphere	-42.1
13	Standard	84.576
Field stop	Standard	Infinity
		3.00

表 3 焦距为 7.52 mm、60.02 mm、98.35 mm 时各组元间距值

Table 3 Construction parameters of optical system with focal length of 7.52 mm, 60.02 mm and 98.35 mm

	Short focus	Middle focus	Long focus
$d_{34}$	2.1	30.07	41.32
$d_{23}$	203.03	41.33	17.61
$d_{12}$	13.95	147.68	160.15

用 ZEMAX 光学设计软件对光学系统进行优化, 为了简化系统结构和校正高级像差, 通过引入两个偶次非球面设计出较理想的变焦光学系统. 两个偶次非球面 Surface1 和 Surface9 的系数分别为:  $k=0, \alpha_1 = -1.755 \times 10^{-7}, \alpha_2 = -4.456 \times 10^{-11}, \alpha_3 = 2.236 \times 10^{-14}, \alpha_4 = -6.537 \times 10^{-16}$ ;  $k=0, \alpha_1 = -8.487 \times$

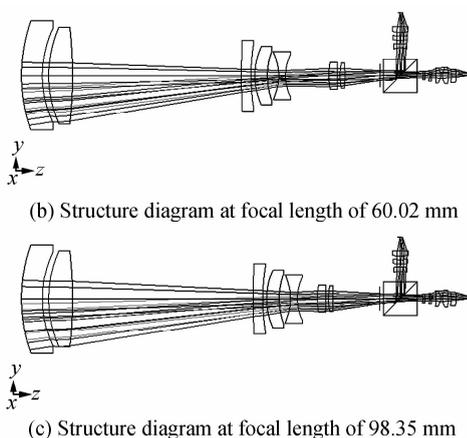


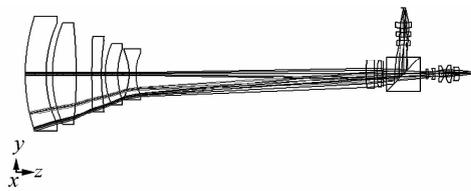
图 3 可见光、中红外在焦距 7.52 mm、60.02 mm、98.35 mm 处的结构

Fig. 3 Visible light and mid-infrared light structure diagram at each focal length of 7.52 mm, 60.02 mm and 98.35 mm

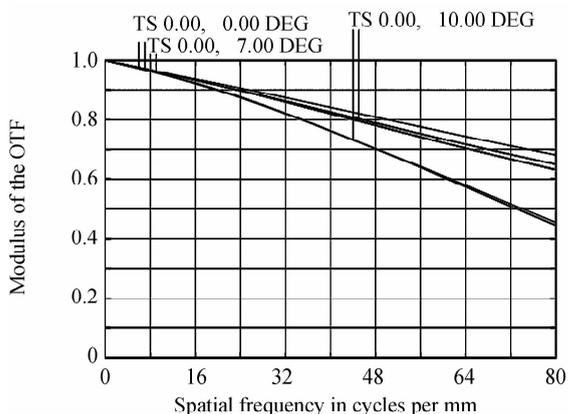
$10^{-6}, \alpha_2 = -1.523 \times 10^{-7}, \alpha_3 = 7.946 \times 10^{-11}, \alpha_4 = -2.341 \times 10^{-12}$ . 其中  $k$  为圆锥系数.

### 3.2 像质评价

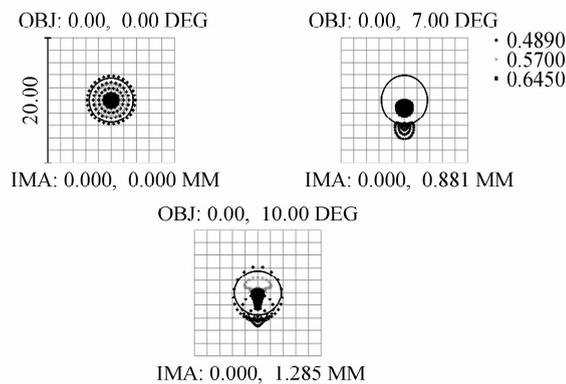
调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 和点列图是光学系统像质主要评价方式. 可见光传递函数如图 4. 从图中可以看出, 在内奎斯特频率 80 lp/mm 处可见光各焦距处传递函数值都大于 0.4, 成像质量良好. 从点列图可以看出, 在各焦距位置, 可见光波段弥散斑的均方值最大为 6.25. 中红外传递函数如图 5. 从图中可以看出, 在内奎斯特频率 20 lp/mm 处中红外各焦距处传递函数值都在 0.6 以上, 系统成像质量达到或接近衍射极限, 在各焦距位置, 中红外波段弥散斑的均方值最大为  $18 \mu\text{m}$ , 在一个像元尺寸 (像元尺寸为  $25 \mu\text{m}$ ) 内, 满足系统的成像质量要求.



(a) Structure diagram at focal length of 7.52 mm



(a) MTF diagram at focal length of 7.52 mm



(b) Spot diagram at focal length of 7.52 mm

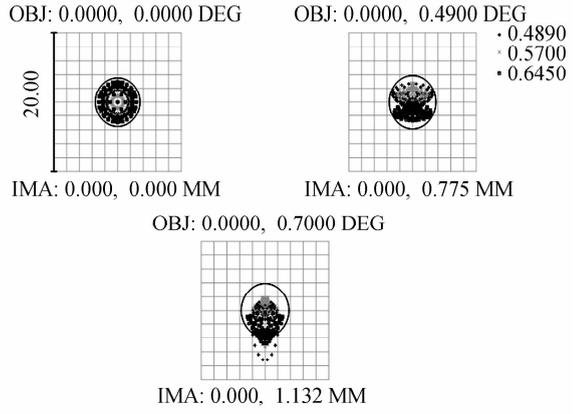
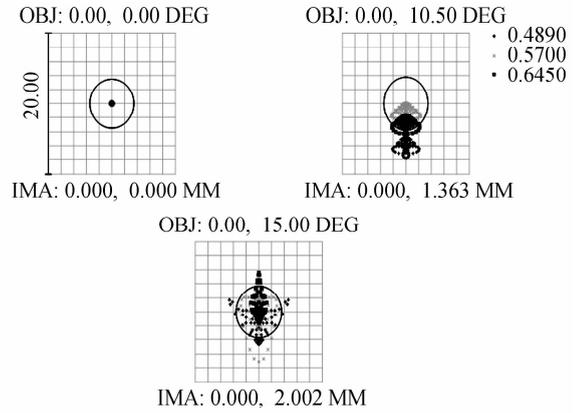
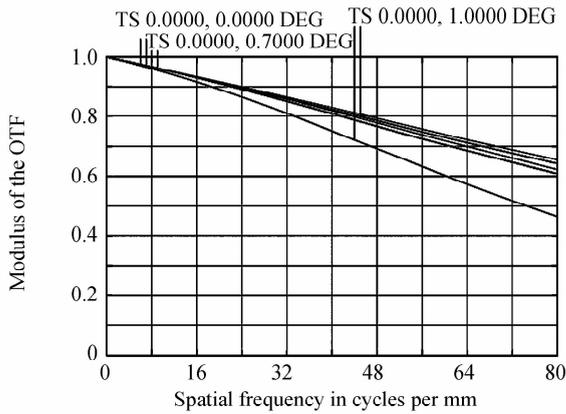
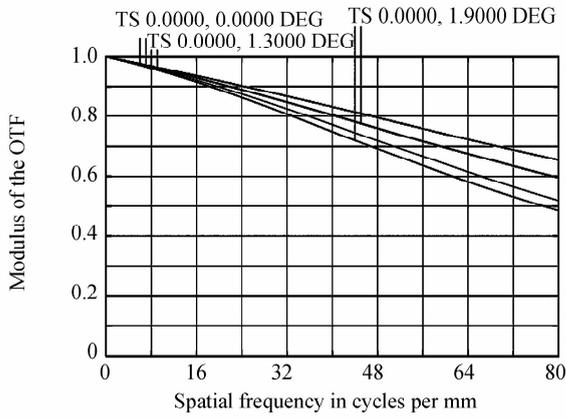
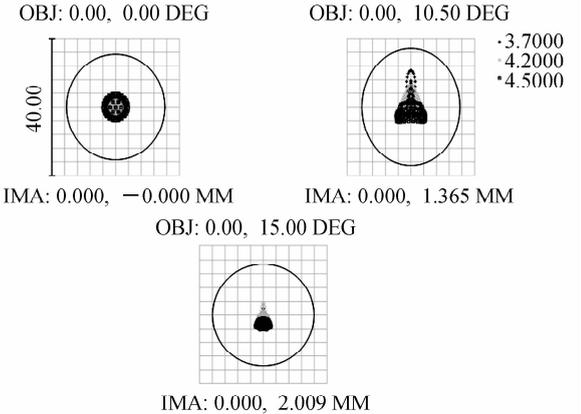
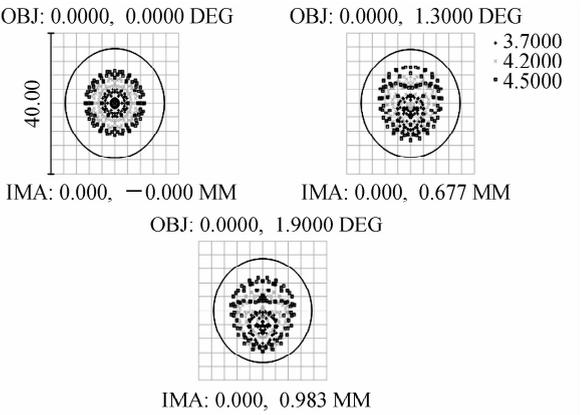
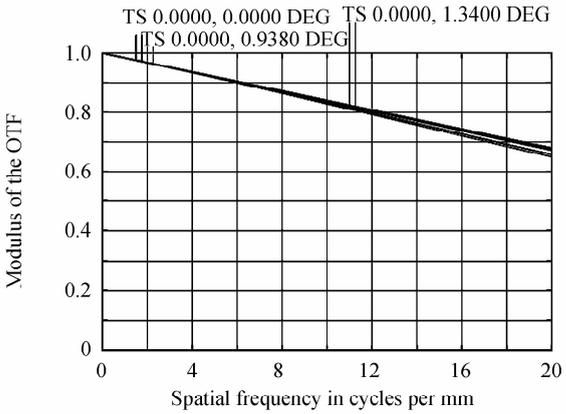
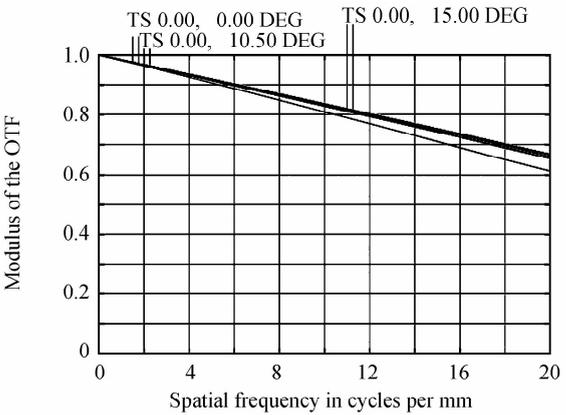


图4 可见光在焦距 7.52 mm, 60.02 mm 和 98.35 mm 处的传递函数图、点列图

Fig. 4 MTF diagram and Spot diagram of visible light at each focal length of 7.52 mm, 60.02 and 98.35 mm



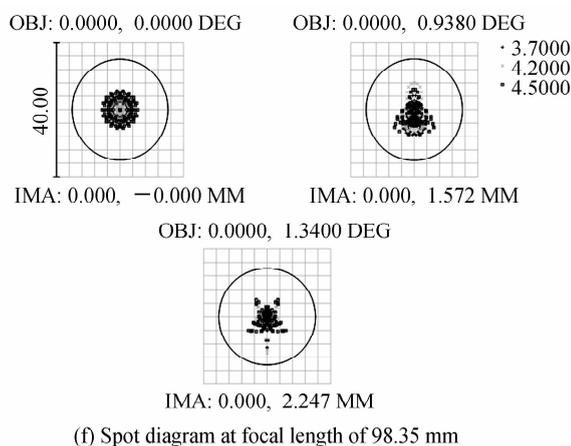
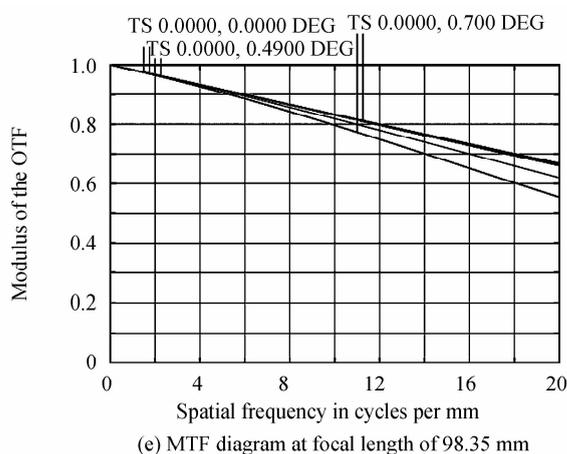


图 5 中红外在焦距 7.52 mm、60.02 mm 和 98.35 mm 处的传递函数图、点列图

Fig. 5 MTF diagram and spot diagram of mid-infrared light at each focal length of 7.52 mm, 60.02 mm and 98.35 mm

### 3.3 系统凸轮曲线拟合

凸轮曲线是机械补偿变焦光学系统后期设计的一个重要环节,只有沿着准确的凸轮曲线控制变焦距系统的活动组份,才能保证稳定良好的像质.运用差值法对系统采样取点,使变焦组和补偿组的共轭距之和始终保持不变,微调补偿组直到像成到焦平面上,保持像质良好且点列图在单个像元尺寸内.记录所有组态变焦组和补偿组相对于前固定组的位移变化量  $q_1$  和  $q_2$  及相对应的焦距值,在采样取点的过程中必须将系统的视场角设置改为实际像高,这样可以保证所有组态的像高相同.最后利用 Origin 软件对采样点进行拟合,得到如图 6 所示的变焦曲线.从图中可以看出,变焦曲线平滑,易于凸轮的加工.

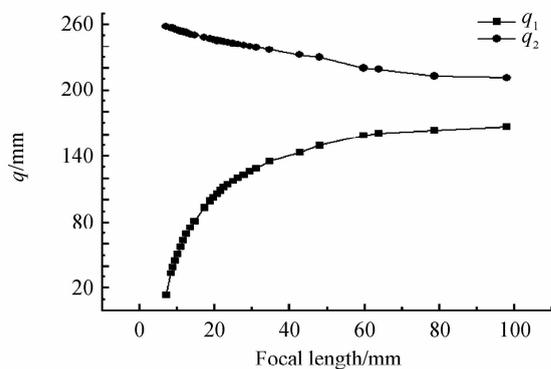


图 6 系统变焦轨迹

Fig. 6 Zoom paths of the system

## 4 消热差及双波段齐焦分析

### 4.1 双波段消热差分析

温度变化会引起光学系统的焦距、材料折射率、透镜曲率、材料中心厚度和空气间隔等因素的变化,从而使光学系统成像质量下降,甚至使光学系统失去使用价值.为了增强光学系统的环境适用性,需要对系统进

行无热化处理,防止环境温度的变化影响光学系统的成像质量.所谓无热化,即当温度发生变化时,通过一定的补偿技术保持光学系统焦距不变或者光学系统的成像质量在容限范围内.系统公共部分的材料能够同时透过可见光、中红外(3~5  $\mu\text{m}$ ),其中大部分材料受温度影响较大<sup>[13]</sup>,因此可见光、中红外都需要考虑消热差.消热差的方法主要有机械被动式、机电主动式和光学被动式.综合比较三种消热差设计方法,考虑到系统结构的简单性和可靠性,通过引入二元衍射面对系统在-40~+60 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内用光学被动式进行热差优化<sup>[14]</sup>.在实际应用中,光学系统不可能做到完全消热差,从广义上讲,温度变化造成的系统离焦也可以看成是产生像差现象,通常只要这种离焦小于一定的误差容限就可以.

根据瑞利原理,温度变化造成的像面离焦与系统离焦的关系为<sup>[15-16]</sup>

$$\Delta L \leq \pm 2\lambda_D (f'/D)^2 \quad (13)$$

由式(13)算出可见光和中波红外的系统焦深分别为 18.56  $\mu\text{m}$ 、75.6  $\mu\text{m}$ ,像面离焦( $\Delta L$ )必须小于等于系统焦深,其中  $\lambda_D$  为中心波长,  $f'$  为系统焦距,  $D$  为系统的入瞳口径.本系统的各焦距位置像面离焦情况见表 4、5.

表 4 消热差后可见光波段在不同焦距位置下离焦量和温度的关系

Table 4 Relation between defocus amount under visible light at different focal length position and temperature

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Short EFL/mm	Middle EFL/mm	Long EFL/mm	System depth of focus/ $\mu\text{m}$
20	7.44	60.01	98.31	18.56
-40	7.46	60.025	98.31	18.56
60	7.43	60.013	98.32	18.56
System depth of focus	0.02	0.01	0.04	

表 5 消热差后中红外在不同焦距位置下离焦量和温度的关系

Table 5 Relation between defocus amount under mid-infrared light at different focal length position and temperature

temperature / $^{\circ}\text{C}$	Short EFL/mm	Middle EFL/mm	Long EFL/mm	System depth of focus/ $\mu\text{m}$
20	7.43	60.08	98.38	75.6
-40	7.51	60.09	98.39	75.6
60	7.38	60.06	98.41	75.6
Defocusing amount	0.08	0.07	0.06	

4.2 双波段齐焦分析

变倍组和补偿组通过光焦度分配消除不同波段焦距的差异,单透镜无法消除不同波段之间的差异,因此设计时用透镜组代替单透镜,虽然每个单透镜焦距都存在差异,通过正负透镜的合理组合,总存在焦距相等的情况,通过焦距补偿原理,可以计算出满足在不同波段焦距相等的一组解.这种方法可以完全抵消不同波段间的焦距差异,保持双波段对应组态焦距的一致性.在不同温度下可见光、中红外的焦距值如图 7.

由图 7 可知,在不同温度下实现了可见光、中红外同时对同一目标清晰成像的目的,实现双波段对目标信息的同步观测、同步跟踪、同步测量.当目标被遮挡、

伪装,而进行光路和波段转换时,不需要重新切换通道,可以直接寻找并观测目标,大大提高了光学系统的反应速度和不同波段观测目标的一致性.

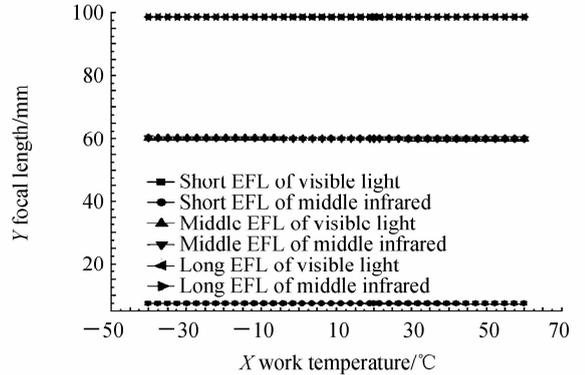
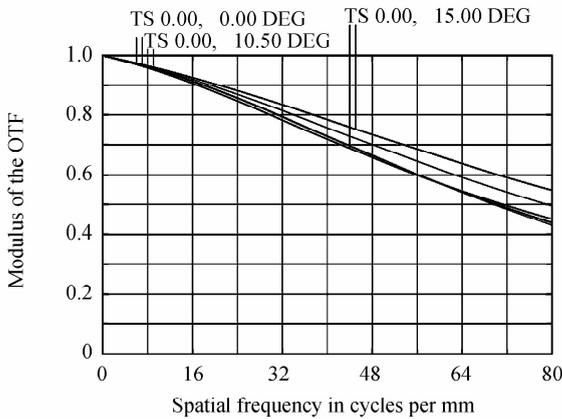


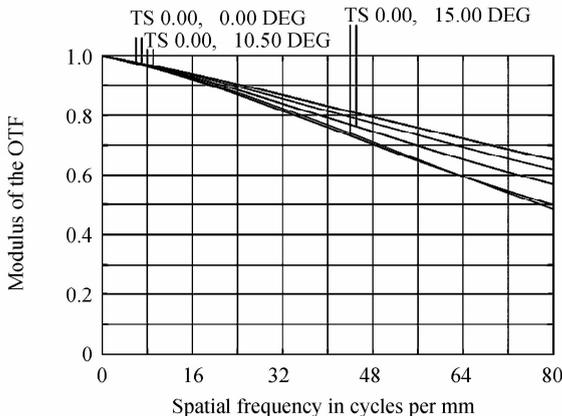
图 7 不同温度下可见光、中红外的焦距值  
Fig. 7 Visible light and mid-infrared light under different temperature

4.3 消热差后系统传递函数图点列图

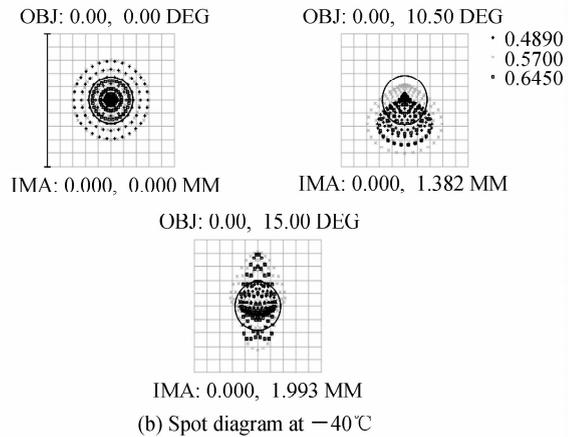
图 8~11 分别给出了温度在-40 $^{\circ}\text{C}$ 和+60 $^{\circ}\text{C}$ 时系统可见光、中红外在短焦、长焦位置系统的传递函数和点列图.从图中可以看出,消热差后双波段光学系统成像质量和点列图均满足工程实际需求.



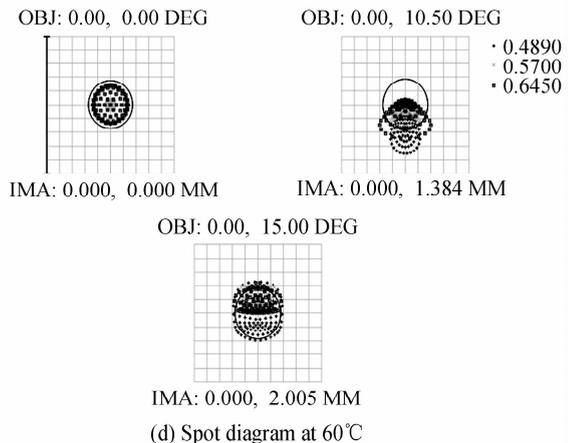
(a) MTF diagram at -40 $^{\circ}\text{C}$



(c) MTF diagram at 60 $^{\circ}\text{C}$



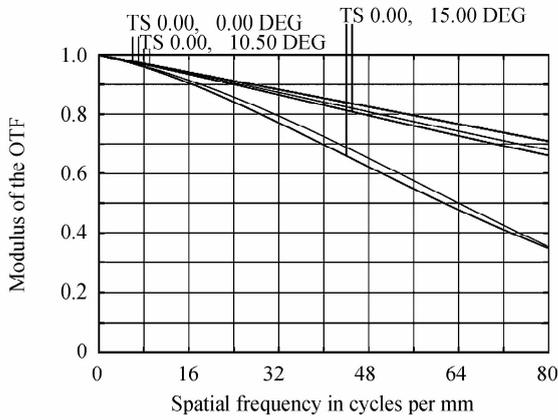
(b) Spot diagram at -40 $^{\circ}\text{C}$



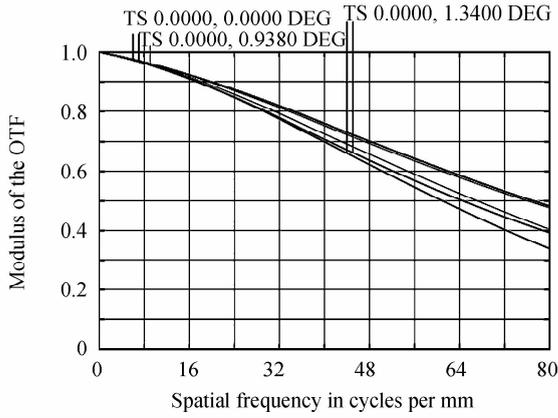
(d) Spot diagram at 60 $^{\circ}\text{C}$

图 8 -40 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ 时可见光在短焦处的传递函数图、点列图

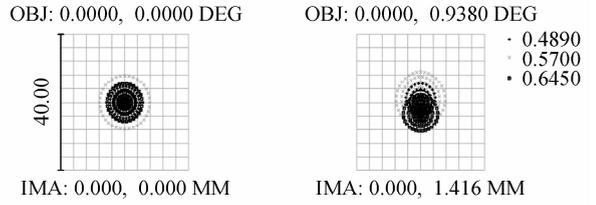
Fig. 8 The MTF diagram and spot diagram of visible light at short focal length with temperature of -40 $^{\circ}\text{C}$  and 60 $^{\circ}\text{C}$



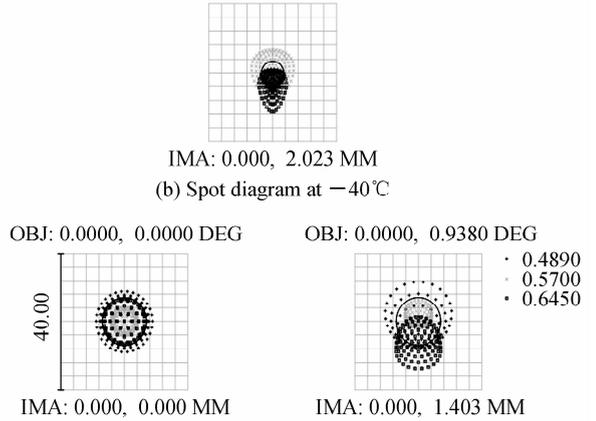
(a) MTF diagram at  $-40^{\circ}\text{C}$



(c) MTF diagram at  $60^{\circ}\text{C}$



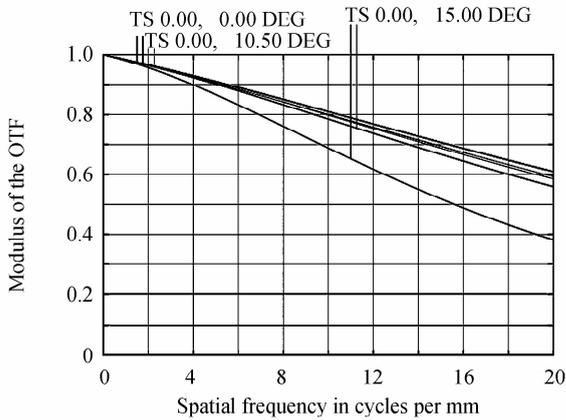
(b) Spot diagram at  $-40^{\circ}\text{C}$



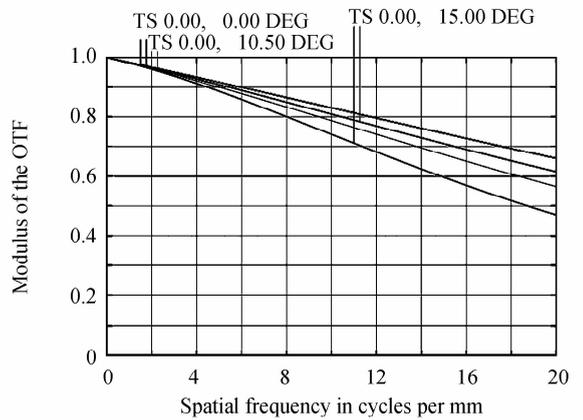
(d) Spot diagram at  $60^{\circ}\text{C}$

图9  $-40^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ 时可见光在长焦处的传递函数图、点列图

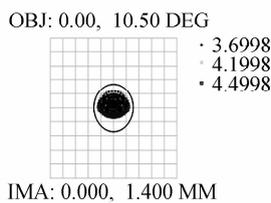
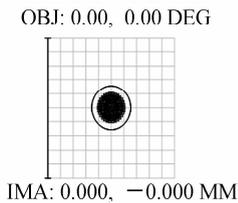
Fig. 9 The MTF diagram and spot diagram of visible light at long focal length with temperature of  $-40^{\circ}\text{C}$  and  $60^{\circ}\text{C}$



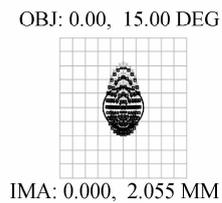
(a) MTF diagram at  $-40^{\circ}\text{C}$



(b) MTF diagram at  $60^{\circ}\text{C}$



(c) Spot diagram at  $-40^{\circ}\text{C}$



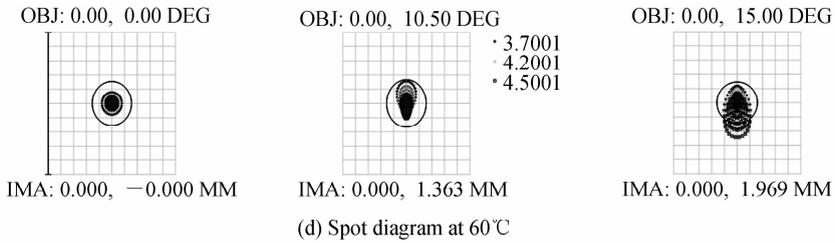


图 10 -40℃、60℃时中红外在短焦处的传递函数图、点列图

Fig. 10 The MTF diagram and spot diagram of mid-infrared light at short focal length with temperature of -40℃ and 60℃

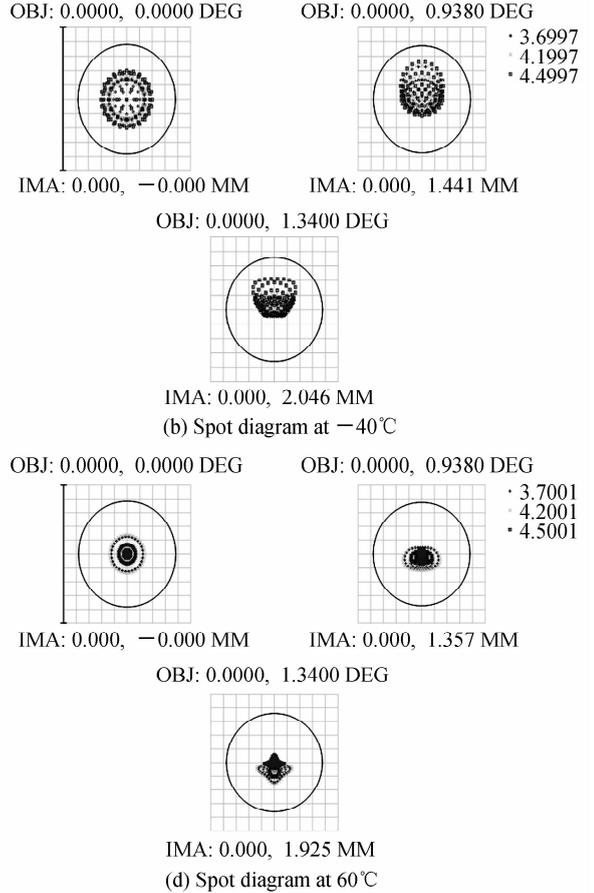
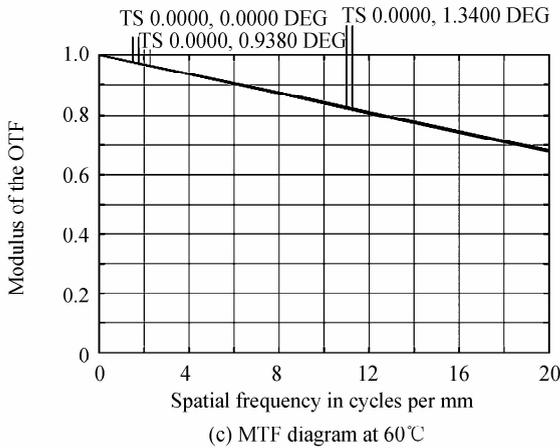
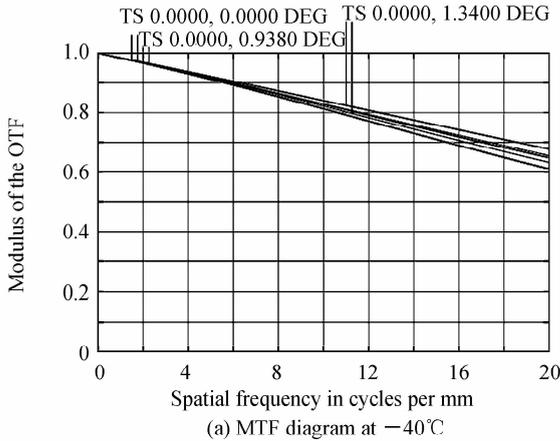


图 11 -40℃、60℃时中红外在长焦处的传递函数图、点列图

Fig. 11 The MTF diagram and spot diagram of mid-infrared light at long focal length with temperature of -40℃ and 60℃

### 5 结论

本文设计的双波段连续共变焦光学系统,属于大变形比光学系统,两个波段共用一组光路,实现系统同时接受可见、中红外波段目标信息的目的.通过三片薄透镜消色差和焦距补偿原理使得系统在任意变焦位置处可见,中红外的焦距相等,提高了双波段目标信息的一致性.系统具有结构紧凑,实时性高,反应速度快等优势.可见光在奈奎斯特频率 80 lp/mm 处传递函数数值高于 0.4,中红外在奈奎斯特频率 20 lp/mm 处传递函数数值高于 0.6.在-40~+60℃温度范围内,对光学系统更换材料并加入二元衍射面实现了光学被动式消色差,系统成像质量满足设计要求.这种快速、实时、同步

跟踪和同步检测的双波段共口径共变焦光学系统具有广阔的应用前景.

#### 参考文献

[1] NEVO Y. Dual-band optics[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(5): 053002.  
 [2] VIZGAITIS J N, HASTINGS A. Dual band infrared picture-in-picture systems[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(6): 061306.  
 [3] MIKŠ A, NOVÁK J. Three-component double conjugate zoom lens system from tunable focus lenses [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(4): 862-865.  
 [4] HONG Yong-feng, ZHANG Xue-ming, CHENG Xin. Miniaturization design of aerial zoom lenses[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2010, **37**(3): 61-65.  
 洪永丰, 张学明, 程欣. 航天变焦镜头的小型化设计[J]. *光电工程*. 2010, **37**(3): 61-65.

- [5] YAN Lei. The optical design of VIS/IR dual-band airborne reconnaissance systems[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010, 11.  
晏蕾. 可见/红外双波段航空光电侦察平台光学系统设计[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所. 2010, 11.
- [6] MANN A. Infrared zoom lenses in the 1980s and beyond[C]. SPIE, 1992, 31(5):1064-1071.
- [7] VIZGAITIS J N. Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lenses[C]. SPIE, 2010, **7652**:76522E.
- [8] HAN J Y, MARCHUK S, KIM H. Imaging EO/IR optical system for long range oblique photography[C]. SPIE, 2012, **8020**:802009.
- [9] KABAK A M. Optical design of a broadband (3 ~ 12 $\mu\text{m}$ ) athermal Infrared imager[C]. SPIE, 2010, **7660**:766029.
- [10] ZHANG Chun-yan, SHEN Wei-min. Design of an athermalized MWIR and LWIR dual-band optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(5):1323-1328.  
张春艳, 沈为民. 中波和长波红外双波段消热差光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, **41**(5):1323-1328.
- [11] NI Guo-qiang, QIN qing-wang, XIAO Man-jun, et al. Development of infrared imaging technology in China[J]. *Science & Technology Review*, 2008, **26**(22):88-93.  
倪国强, 秦庆旺, 肖曼君, 等. 中国红外成像技术发展的若干思考[J]. *科技导报*, 2008, **26**(22):88-93.
- [12] FLOREA C, SANGHERA J, AGGARWAL I. Broadband beam steering using chalcogenide-based Risley prisms[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(3): 3280-3286.
- [13] YANG H S, KIHM H. Three-shell-based lens barrel for the effective athermalization of an IR optical system[J]. *Applied Optics*. 2011, **50**(33): 6206-6213.
- [14] SHEN bi-yun, GAO ming. Passive optical athermalization desing for infrared optical system[J]. *Electronic Optics and Control*, 2012, **19**(6):71-78.  
申碧云, 高明. 红外光学系统被动式无热化设计方法[J]. *光电与控制*, 2012, **19**(6):71-78.
- [15] WU Wen-ting, LIANG Zhong-cheng, ZHANG Le. Optofluidic Uarifocal microlens [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(6)718-723.  
吴雯婷, 梁忠诚, 仇乐. 可调微流控光学变焦透镜[J]. *发光学报*, 2015, **36**(6)718-723.
- [16] LIU Jun, CHEN Yang. Visible/infrared dual-band large field shared-aperture and parfocal optical system[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2014, **34**(2):88-93.  
刘钧, 陈阳. 可见光/红外双波段大视场共口径齐焦光学系统[J]. *西安工业大学学报*, 2014, **34**(2):88-93.