

文章编号:1002-2082(2015)06-0857-07

红外变焦投影光学系统的设计

刘智颖, 栾晓宇, 付跃刚, 高子英

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:根据外场测试要求,设计一套精确变焦的大口径投影光学系统,为系统性能测试评估提供远场至近场的目标成像模拟,系统由精确变焦系统和大口径投影系统两部分组成。根据被测系统口径及所成像点大小要求,在保证光瞳衔接和口径匹配的前提下,对大口径投影光学系统和精确变焦系统进行了光学参数计算和像质优化。变焦系统工作波段为 $8\ \mu\text{m} \sim 12\ \mu\text{m}$,变倍比为 $16\times$,大口径投影光学系统口径为 $300\ \text{mm}$,模拟实验结果表明,该系统在变焦过程中像面稳定,各焦距位置 MTF 曲线接近衍射极限,满足外场测试实验要求。

关键词:光学设计; 红外变焦; 投影系统

中图分类号:TN216

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201536.0601007

Design of infrared zoom projection optical system

Liu Zhiying, Luan Xiaoyu, Fu Yuegang, Gao Ziyang

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: According to the validation requirements of the field test, a large aperture optical system with precisely zooming was designed, in order to provide target imaging simulation from near field to far field to test and evaluate the system performance. The system has two parts: zoom system and projection system. Based on the requirements of beam aperture and image size on the unit to be tested, and with the precondition of pupil connection and aperture matching principle, the optical parameters of projection system and zoom system were calculated and the image quality was optimized. The zoom system works between $8\ \mu\text{m} \sim 12\ \mu\text{m}$ in far-infrared band with a $16\times$ zoom ratio. The large-aperture projection system has a 300mm aperture. Simulation experiment results show that, the image position is stable and the modulation transfer function (MTF) curve of each focal length is close to the diffraction limit during zoom process, which could meet the test requirement exactly.

Key words: optical design; infrared zoom; projection system

引言

近年来,红外技术凭借其特有的优势得到了迅速的发展,并且实际应用范围不断扩大,红外变焦光学系统已成为红外技术发展和应用的重要研

究方向。由于将连续变焦性能应用到红外光学系统中,可以在不同视场通过改变焦距获得稳定的图像,使红外系统具备了在不同视场目标探测、目标跟踪、搜集信息的功能;特别是,随着红外对抗

收稿日期:2015-05-21; 修回日期:2015-07-28

基金项目:国家自然科学基金(11474037)

作者简介:刘智颖(1981—),女,辽宁人朝阳,副教授,博士,主要从事现代光学及工程应用方面的研究。

E-mail: lzyccccc@126.com

技术的发展,红外成像制导技术已经成为光电精确制导技术的一个发展方向。红外仿真系统能显著降低外场飞行试验次数,节省资金和大大缩短武器研制周期。所以,半实物仿真技术在导弹武器系统等研制中占有及其重要的地位。国内半实物仿真技术开始于20世纪80年代,多采用五轴转台仿真系统,但是其加工工艺较难,因此造价较高,而且局限性较大不能实现复杂目标的模拟^[1-3]。本文将设计可以模拟目标由近及远、由小到大动态过程的光学系统,并且使用起来灵活简便。

1 功能及技术指标

本系统作为模拟仿真系统,满足在实验室使用的条件,把15 m距离远250 mm大小的目标,经变焦投影系统在被测系统上所成像的大小为1~16个像素(一个像素大小为30 μm),波段为长波红外8 μm ~12 μm 。当变焦系统处于短焦位置时,在被测系统中所成像尺寸较小;当变焦系统处于长焦位置时,在被测系统中所成像尺寸较大,从而可以模拟出目标由远及近的过程。为了保证足够覆盖被测系统全口径,所以要求投影光学系统口径不小于300 mm。

在变焦系统变焦过程之前,启动能量精确控制装置,可以使得孔径由最小到最大进行变化模拟,从而可以模拟目标由更远位置变近时的能量变化过程。系统组成如图1所示。

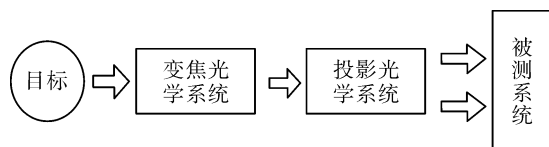


图1 系统组成

Fig. 1 System composition

2 设计思路

投影系统工作过程中,光束首先经过变焦系统然后经由投影系统射出提供测试出射光束。但是在设计时需要逆向设计,首先根据被测系统需求设计后面的大口径投影光学系统,然后推出变焦系统所需光学参数,最后进行组合设计。

2.1 F 数的选取

为了保证口径匹配,所以大口径投影光学系统的 F 数与变焦系统的 F 数应该相等。

大口径投影光学系统采用倒置的卡塞格林系统,其口径为300 mm,为了保证变焦系统与大口径投影光学系统的口径衔接,需要满足两者的相对孔径相同。若选取 F 数较大时,此时进入变焦系统的能量较少。在红外光学系统中,为了保证有更多的能量进入系统,一般选取较小的 F 数,但此时卡塞格林系统主镜的相对孔径较大,有一定的加工难度,不予采取。综合考虑到能量和加工的问题,选取 F 数为3.5较为适宜。此时经计算得到变焦系统的焦距为10.5 mm~168 mm。

2.2 大口径投影系统的设计及结果

大口径投影光学系统的焦距为1 050 mm,倒置设计的大口径投影光学系统像方视场应与前端变焦系统相衔接。

在卡塞格林系统的单独设计过程中,根据系统的使用要求,保证系统出射光口径,故在Zemax软件输入时,将光阑位置至于主镜前500 mm~600 mm处,并经过调整各曲面半径及副镜圆锥系数,在保证卡塞格林系统的成像质量的条件下,调整成像位置位于主镜之后,最终得到满足整个系统要求的卡塞格林系统。系统图如图2所示,像质评价如图3所示。

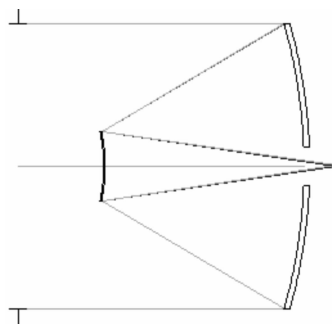


图2 大口径投影光学系统光路图

Fig. 2 Sketch of large aperture projection optical system

大口径投影光学系统光学总长为334.6 mm,主镜口径为300 mm,中心遮拦为24.49%,小于30%,出瞳位置在像面左侧335 mm处。

2.3 变焦系统的设计及结果

2.3.1 变焦系统的设计

变焦距光学系统从原理方案上来讲可以分

为光学补偿和机械补偿两种形式,光学补偿变焦系统虽然结构简单,但是只有在某几个特殊位置能够呈现较为清晰的像,无法实现连续变

焦,所以在机械加工精度不断提高的今天多采用精确的凸轮机构进行机械补偿来保证像面稳定。

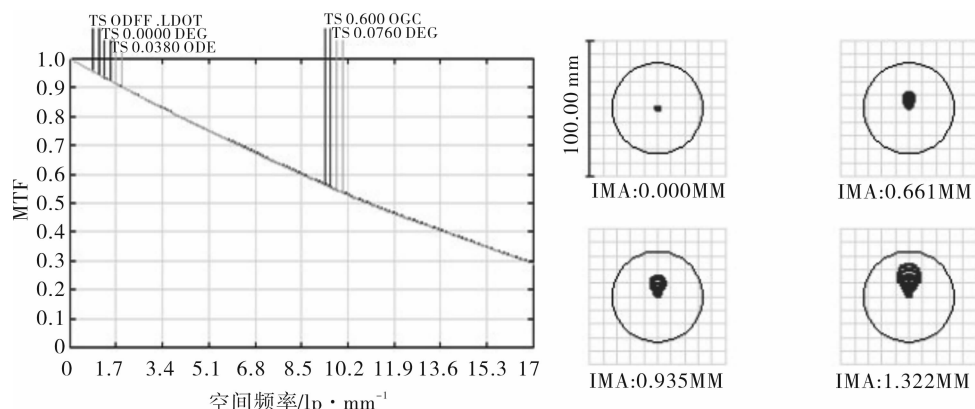


图3 大口径投影光学系统传递函数图与点列图

Fig. 3 MTF curves and spot diagram of large aperture projection optical system

机械补偿变焦光学系统是由前固定组、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(包括前固定组、变倍组和补偿组)失对称严重,造成二级光谱和球差大。由于该变焦系统的变倍比较大($16\times$),在像差校正方面正组补偿相对于负组补偿来说相对容易,且该系统对结构的长度要求不是很高,因此本文采用正组补偿方式实现连续变焦系统的设计^[4-5]。

1) 起始结构计算

根据正组补偿变焦光学系统的基本原理及高斯解分析公式,取中焦作为系统的初始位置。令变倍组和补偿组在中焦位置的垂轴放大倍率 $m_2 = m_3 = -1$,可实现平滑换根,变倍组的归一化焦距值为 $f'_2 = -1$ 。

由公式

$$l = \left(\frac{1}{m} - 1\right) f' \quad (1)$$

$$l' = (1 - m) f' \quad (2)$$

试取 $d_{23} = 0.8$,可计算出变倍组的物距 l_2 及像距 l'_2 ,补偿组的物距 l_3 及像距 l'_3 ,补偿组的归一化焦距值 f'_3 。

2) 求长焦时的参数

设变倍组在长焦时的倍率 $m_{2l} = -1.2$,由(1)式和(2)式可计算变倍组在长焦时的物距及像距

l_{2l}, l'_{2l} 。

变倍组的移动量由下式计算:

$$g_1 = l_2 - l_{2l} \quad (3)$$

由公式:

$$l_{3l} = l'_{2l} + g_1 - d_{23} + \Delta_1 \quad (4)$$

$$l'_{3l} = 2.8 + \Delta_1 \quad (5)$$

及高斯公式:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (6)$$

可得到补偿组的移动量 Δ_1 ,则变倍组和补偿组在长焦时的间隔为

$$d_{23l} = 0.8 - g_1 - \Delta_1 \quad (7)$$

因为 $m_{2l} \cdot m_{3l} = \Gamma_{\text{总}} \times m_{2s} \cdot m_{3s}$,所以可求得 $m_{2s} \cdot m_{3s}$ 。其中 m_{2s}, m_{3s} 为变倍组、补偿组在短焦时的垂轴放大率。

3) 求短焦时的参数

设定:

$$C = \left(m_{20} + \frac{1}{m_{20}}\right) \cdot f'_2 + \left(m_{30} + \frac{1}{m_{30}}\right) \cdot f'_3 \quad (8)$$

$$D = m_{2s} \cdot m_{3s} \quad (9)$$

则 $m_{2s} =$

$$\frac{CD \pm \sqrt{C^2 D^2 - 4(f'_2 D + f'_3)(f'_2 D + f'_3 D^2)}}{2(f'_2 D + f'_3)} \quad (10)$$

由(1)式和(2)式得到短焦时变倍组的物距及像距 l_{2s}, l'_{2s} ,同理由(3)式~(6)式可得到变倍组从中焦到短焦的移动量 g_2 ,补偿组的物距及像距 l_{3s}, l'_{3s} ,补偿组从中焦到短焦的移动量 Δ_2 。

4) 求前固定组参数(选短焦状态)

设 $d_{12s}=0.2$, 得到前固定组的焦距 f'_1 :

$$f'_1 = d_{12} + l_{2s} \quad (11)$$

5) 求后固定组参数(选短焦状态)

设 $d_{34s}=0.154$, 则后固定组的物距 l_4 由(12)式求出:

$$l_4 = l'_{3s} - d_{34s} \quad (12)$$

试取后固定组的放大倍率为 $m_4=0.7$, 则由(1)式和(2)式可求出后固定组的焦距 f'_4 。

缩放:

$$f'_s = f'_1 \cdot m_{2s} \cdot m_{3s} \cdot m_4 = 0.300\ 37$$

$$f'_l = f'_1 \cdot m_{2l} \cdot m_{3l} \cdot m_4 = 4.805\ 92$$

该 $16\times$ 变焦系统 $f'=10.5\text{ mm}\sim 168\text{ mm}$, 把上述所有线量放大 34.96 倍, 得到各组元焦距为

$$f'_1 = 171.43\text{ mm}, f'_2 = -34.96\text{ mm},$$

$$f'_3 = 48.94\text{ mm}, f'_4 = 138.79\text{ mm}$$

各组元的间隔如表 1 所示。

表 1 在不同焦距下各镜组之间的间隔

Table 1 Spacing between each glass in different foci

状态	组元间隔/mm		
	d_{12}	d_{23}	d_{34}
长焦	107.36	13.984	46.602
中焦	101.52	27.968	38.456
短焦	6.992	155.572	5.384

2.3.2 变焦系统设计结果

可见光光学系统有丰富的玻璃类型提供使用,但对于红外系统却只有极其有限的材料可以应用。对于红外透射光学材料,在波段匹配的前提下,还要求折射材料有较高的透过率,Ge 具有很高的折射率且有很低的色散系数,所以本系统大部分透镜使用 Ge,部分透镜选择 ZnSe 来校正色

差,使系统像质达到优良。考虑到系统能量透过率要求高,应该尽量降低变焦系统的镜片数。通过对光学材料的合理选择及光焦度的合理分配,该变焦系统由 5 片透镜构成^[6-8]。

根据系统设计指标的要求,利用变焦系统基本理论及高斯光学理论得到系统的高斯解以后,对变焦系统的各组元选取计算了适当的结构形式。在光学设计软件 Zemax 中,用多重结构实现系统的变焦,并对初始结构进行优化设计,得到系统的变焦部分。但初始设计的变焦系统的出瞳位置不满足与大口径投影系统的入瞳位置匹配衔接,导致光束无法全部进入到倒置的卡塞格林系统,此时在 ZEMAX 软件中加入优化操作数 EXPP 使其大于 335 mm,使得 2 个分系统光瞳对接,进行优化,最终得到像质优良的变焦系统。变焦系统光路图如图 4 所示。

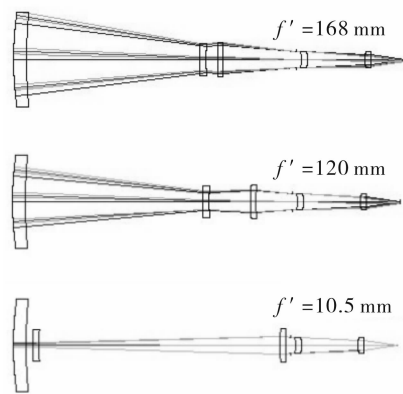


图 4 各焦距位置时的变焦系统光路图

Fig. 4 Optic paths of zoom system in different foci

变焦光学系统在短焦,中焦,长焦各个位置下传递函数曲线与点列图如图 5、图 6、图 7 所示。

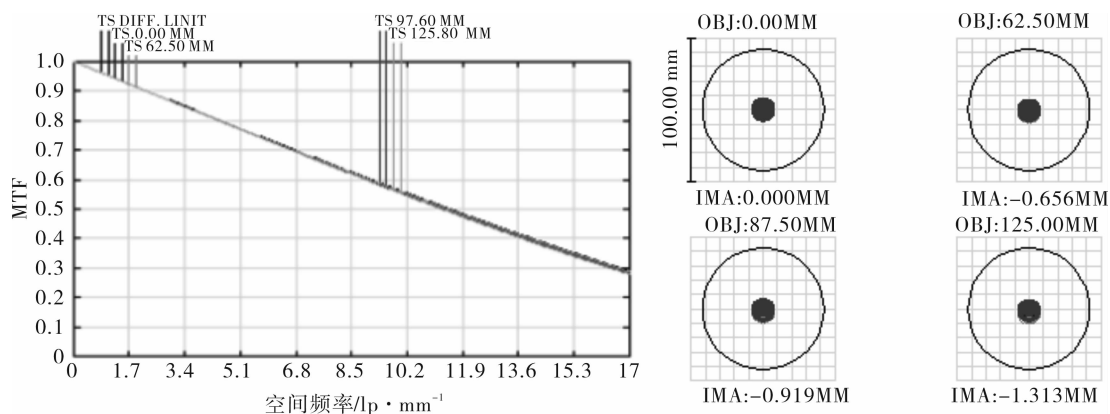


图 5 长焦位置时的传递函数图与点列图

Fig. 5 MTF curves and spot gram at long focus position

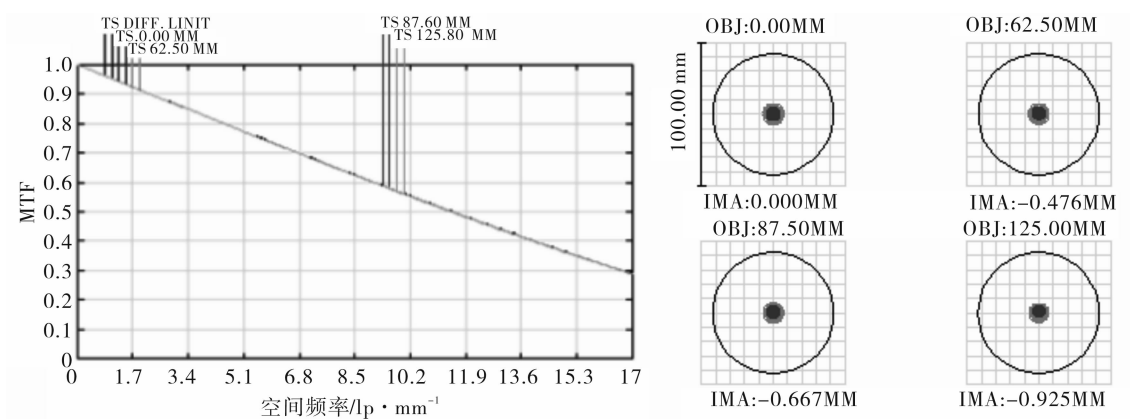


图 6 中焦位置时的传递函数图与点列图

Fig. 6 MTF curves and spot gram at middle focus position

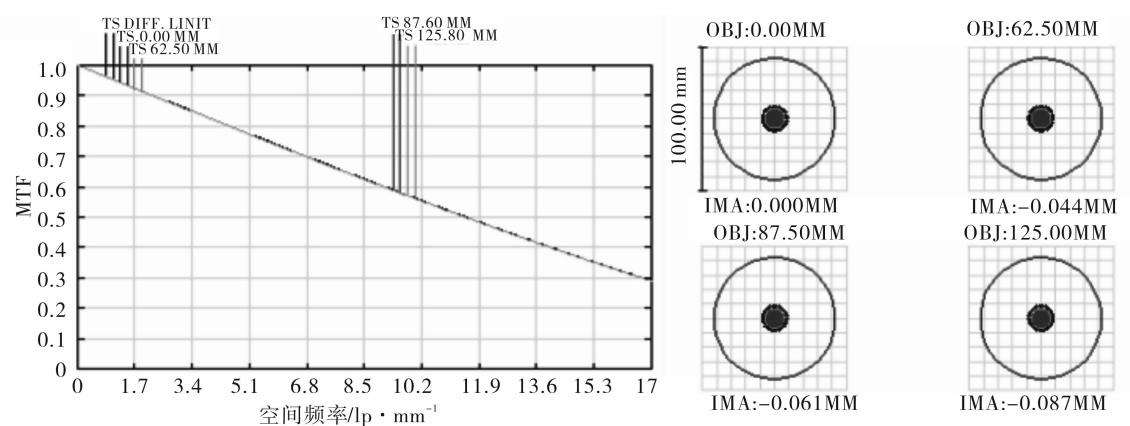


图 7 短焦位置时的传递函数图与点列图

Fig. 7 MTF curves and spot gram at short focus position

由图可知,变焦系统在各焦距位置点列图均较为圆整,弥散斑均方根半径均小于 $30 \mu\text{m}$,与红外探测像元相当。由各个焦距传递函数图可以看出传递函数曲线较为圆滑平整,并且均接近衍射极限,表明了变焦系统在变焦过程中像面稳定并且成像质量良好。

2.3.3 变焦曲线拟合

应用动态光学理论可以推导出像移补偿公式,从而计算出变倍曲线和补偿曲线的关系:

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

式中:

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

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

变焦系统凸轮曲线如图 8 所示。

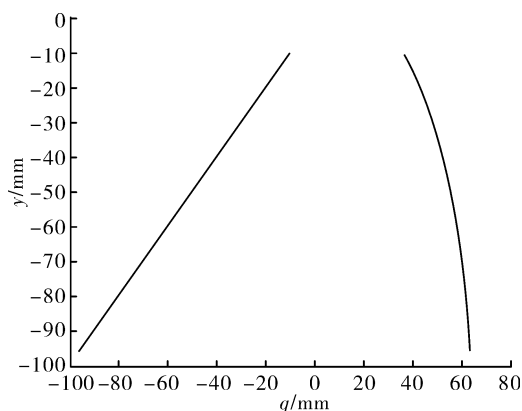


图 8 变焦系统凸轮曲线

Fig. 8 Cam curve of zoom system

2.4 变焦投影组合系统

为了验证变焦投影系统组合后的像质及在被测系统中成像大小,将变焦系统与大口徑投影光学系统对接。变焦系统与大口徑投影光学系统组合后的变焦投影系统图及像质评价图如图 9~图 11 所示。

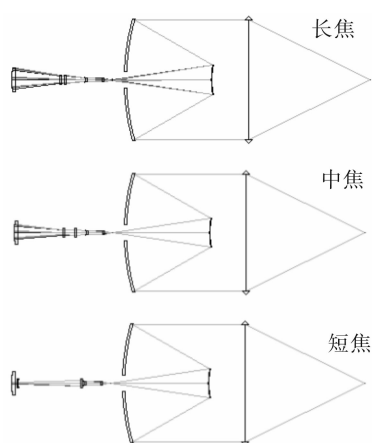


图9 各焦距位置时的系统光路图

Fig. 9 Optic paths of system at different focus positions

3 结论

为了模拟动态目标在有限远距离由近及远的过程,设计了该红外变焦投影光学系统。本系统将变焦系统与倒置的卡塞格林系统组合,可以 $16\times$ 连续变焦。目标经由大口径投影光学系统成像于被测系统上,有效地模拟了动态目标在外场由远及近的飞行过程,大大节省了实验经费。在设计的过程中很好地解决了卡塞格林系统与变焦系统光瞳衔接的问题,成像质量良好,经被测系统成像模拟,各焦距位置均接近衍射极限,满足实验要求。

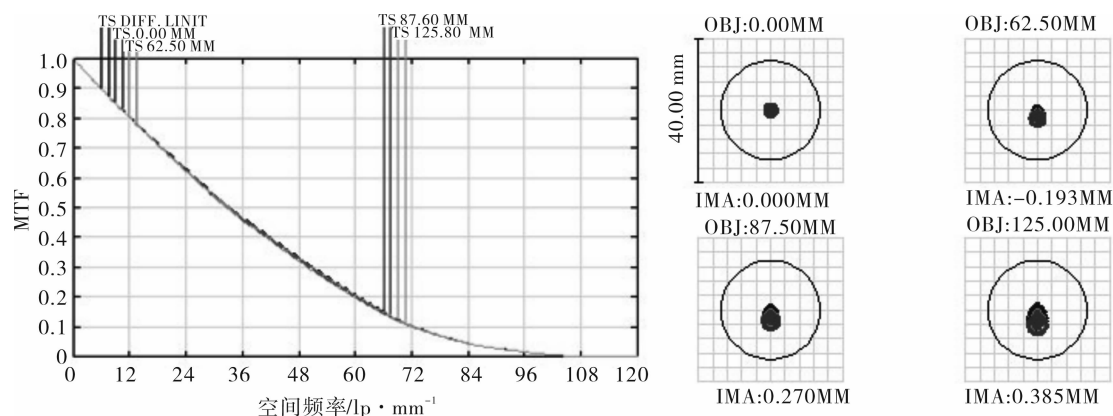


图10 长焦时的传递函数图及点列图

Fig. 10 MTF curves and spot gram at long focus position

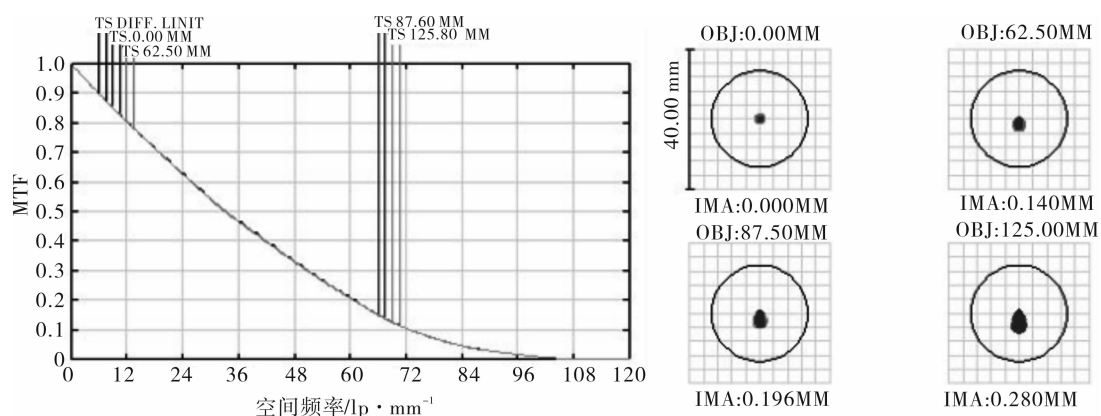


图11 中焦时的传递函数图与点列图

Fig. 11 MTF curves and spot gram at middle focus position

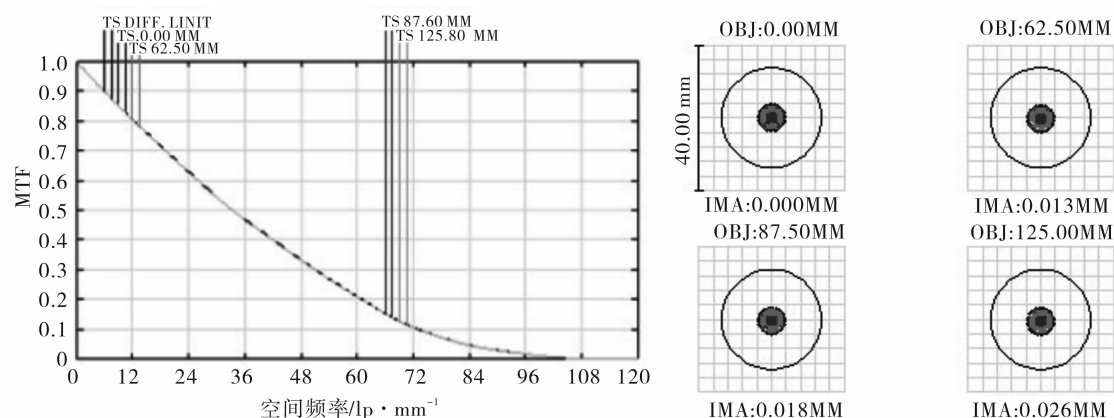


图 12 短焦时的传递函数图与点列图

Fig. 12 MTF curves and spot gram at short focus position

参考文献:

- [1] Gong Xueping, Fei hailun. 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.
- [2] Wang Zhile, 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.
- [3] Ding Quanxin, Liu Hua. Current development and thought on simulation, test and evaluation of the infrared imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5):753-758.
丁全心,刘华. 红外成像系统仿真、测试与评价的发展与思考[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5):753-758.
- [4] Tao Chunkan. Zoom optics system design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 45-48.
- [5] Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang. Design of high zoom ratio thermal infrared zoom optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 1020-1023.
刘峰,徐熙平,孙向阳. 高变倍比红外变焦距光学系统设计[J]. 应用光学, 2009, 30(6):1020-1023.
- [6] Pan Junhua. Design, fabrication and testing of optical asphere[M]. Suzhou: Publishing Company of Suzhou University, 2004: 22-26.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 浙江: 苏州大学出版社, 2004:22-26.
- [7] Zhang Liang, Liu Hongxia. Optical system design of long wave infrared zoom lens [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7):1279-1309.
张良,刘红霞. 长波红外连续变焦光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7):1279-1309.
- [8] Jamieson T H. Diffraction limited infrared zoom collimator [J]. SPIE, 1997, 3129:131-137.