

文章编号 1004-924X(2014)06-1454-07

## 红外多目标复合仿真光学系统设计

张树青\*, 王敬洋, 王治乐, 初永强, 谭双龙

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 基于透射式复合投影以及微透镜阵列扩束设计了适用于  $1\sim 3\ \mu\text{m}$  和  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段的红外多目标复合模拟器的光学系统。该模拟器的干扰光路采用透射式复合投影并利用微透镜阵列完成扩束。此外, 采用前无焦系统和后聚焦镜组结合的方式, 通过在平行光路中引入平面耦合镜, 实现了目标和干扰光路共用一套投影系统。设计过程对目标光学系统、干扰光学系统和主投影光学系统分开优化, 之后对系统进行整体优化。该系统入瞳距为 200 mm, 视场为  $\pm 4^\circ$ , 全视场调制传递函数(MTF)在 20 lp/mm 时大于 0.6, 接近衍射极限。文中分析了加工装调完成后光学系统的实测 MTF 数据, 结果表明, MTF 在 20 lp/mm 时大于 0.3, 完全满足应用技术指标。该系统已成功应用于新型红外目标模拟器, 对未来红外仿真光学系统的设计有参考意义。

**关键词:** 红外目标模拟器; 微透镜阵列; 仿真光学系统; 光学设计; 多目标

**中图分类号:** TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142206.1454

## Design of infrared optical system for multi-target compounded simulator

ZHANG Shu-qing\*, WANG Jing-yang, WANG Zhi-le, CHU Yong-qiang, TAN Shuang-long

(*Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: sq.zhang@hit.edu.cn*

**Abstract:** An optical system for a multi-target infrared compounded simulator applicable to  $1\sim 3\ \mu\text{m}$  and  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  is designed based on the transmission compounded projection and microlens array expanding. The disturbance optical path of the simulator adopts transmission compounded projection and uses a microlens array as the beam expander. To allow the target/disturbance generator to share the same optical path, an afocal system and a back focal lens group are combined and a coupling plane mirror is inserted in the collimation light besides. Moreover, the target optical system, disturbance optical system and the main projection optical system are optimized respectively, then the whole system is optimized further. The designed system contains an entrance pupil distance of 200 mm, field of view of  $\pm 4^\circ$ , and the Modulation Transfer Function(MTF) no less than 0.6 at 20 lp/mm, approaching the diffraction limit. Finally, the measured data of assembled optical system is analyzed and it shows its MTF to be greater than 0.3 at 20 lp/mm. The infrared optical system satisfies application require-

收稿日期: 2013-12-12; 修订日期: 2014-01-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61308100)

ments completely and has been applied to a novel infrared simulator for providing reference for design of the infrared simulation systems

**Key words:** infrared target simulator; microlens array; simulation optical system; optical design; multi-target

## 1 引言

红外导引头的作用距离远、精度高,在用于被动探测时具有隐蔽性好,抗干扰能力强等优点,而在现代制导弹领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。目前,红外导引头性能的测试与评估是各国研究的重要课题之一。考虑到测评成本和时间等诸多限制因素,利用红外目标模拟器对导引头的性能进行模拟测试成为了世界各大红外武器试验中心的重点研究内容之一<sup>[3-5]</sup>。

红外目标模拟器的核心是红外仿真光学系统<sup>[6]</sup>。随着导引头探测识别能力的提高,在红外场景的仿真过程中,需要模拟的干扰场景越来越复杂,比如可变单干扰、多个固定单干扰和多个固定多干扰等。近年来,红外仿真光学系统采用了目标和干扰发生器共用一套投影光学系统的设计理念,这样不但简化了系统结构,而且实现了许多新功能。2009年,哈尔滨工业大学的潘洪涛等人采用无焦镜组和后聚焦镜组相结合的方式,在仿真光学系统中实现了目标和干扰景象的同步控制<sup>[7]</sup>。2012年,北京理工大学的于旭东等人采用类似方法,通过在投影光学系统上放置中间像面,实现了目标和多路干扰的复合<sup>[8]</sup>。

本文在借鉴相关设计的基础上,提出了改进的红外仿真光学系统设计方法。该方法运用透射式复合投影技术,使多路干扰景象首先复合,之后利用微透镜阵列实现干扰光路扩束,最后再将目标景象和干扰景象经投影光学系统投射到被测导引头上来完成对无穷远红外场景的模拟。提出的复合投影及扩束方法比较新颖。国内通常采用光纤面阵来实现干扰和目标的复合;主投影光学系统多采用折射式结构,口径较大<sup>[7]</sup>。考虑微透镜阵列具有体积小、重量轻、结构紧凑、耦合效率高等优点,本系统应用微透镜阵列作为扩束元件,与光纤面阵相比,透射光能量不会因为模拟目标发生位移时光点落在光缆端面不同位置而产生较大波动,故提高了系统的仿真精度。

## 2 技术条件分析

### 2.1 光学系统设计

根据需求,红外仿真光学系统工作在 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 和 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段,出瞳距离约为 $200\ \text{mm}$ ,视场为 $\pm 4^\circ$ ,装调后系统MTF在 $20\ \text{lp/mm}$ 时大于 $0.3$ 。同时,为了在复杂干扰状况下测试导引头的探测、识别及跟踪性能,要求系统完成1路目标景象和4路干扰景象的复合。

考虑到转台对系统重量的严苛要求,同时也为了同步控制目标和干扰,本文借鉴以往设计,光学系统采用前置望远镜组和后聚焦镜组组合的方式。通过在中间平行光路中设置与光轴成 $45^\circ$ 角的平面耦合镜来引入干扰光路,从而实现了1路目标景象和4路干扰景象共用一套投影光学系统。如图1所示,由于干扰光路多、波段宽且视场大,故光学系统不能采用反射系统,只能采用透射系统方案。

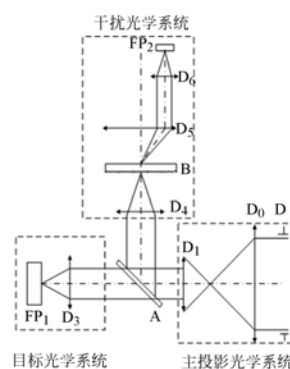


图1 光学系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of optical system

图中, $D$ 为系统的出瞳,与后续被测导引头的入瞳匹配,它与 $D_0$ 之间的距离为 $200\ \text{mm}$ 。由于采用逆向光路设计,因此在进行光学设计时, $D$ 为系统的入瞳。主投影光学系统是一个开普勒型望远无焦系统,作用是收集来自目标光路和干扰光路的景象,并将其投射到无穷远,与被测导引头匹配。其中 $D_0$ 作为目镜, $D_1$ 作为物镜。目标光学系统由图像产生器 $FP_1$ 和目标直物镜组 $D_3$ 组

成,  $FP_1$  在  $D_3$  的焦平面上。系统工作时, 由  $FP_1$  发出的红外景象经  $D_3$  准直后, 平行入射到平面耦合镜 A 内, 等待与干扰景象产生复合。干扰光学系统由 4 路干扰模拟光路构成, 图 1 只给出了其中 1 路干扰光路, 其它 3 路干扰采用与此完全相同的结构。4 路干扰模拟光路位于垂直于观察纸面的同一平面内且沿“十”字方向分布, 如图 2 所示。这种布置使得系统紧凑合理, 节省了大量空间。 $FP_2$  为干扰图像产生器, 由它发出的红外景象经干扰准直物镜  $D_6$  后, 平行入射到复合投影物镜  $D_5$ 。4 路干扰离轴细光束经过  $D_5$  后汇聚成同轴光束, 再经扩束元件 B 扩束后, 通过准直物镜  $D_4$  进入耦合镜 A, 与目标景象复合后被主投影系统投射到无穷远。

本文分别对目标光学系统、干扰光学系统和主投影光学系统进行设计并优化, 然后再对系统整体进行优化。

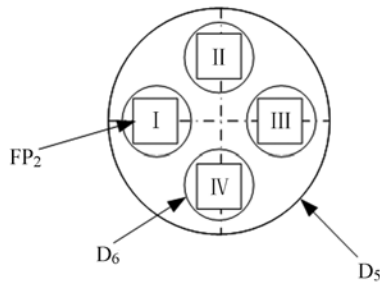


图 2 干扰光学系统俯视图

Fig. 2 Vertical diagram of disturbance optical system

## 2.2 微透镜阵列扩束设计

干扰光学系统设计的关键是扩束方案的选择。依据国内外发展现状, 当前的扩束方案主要有网纹镜扩束、光纤扩束、光散射元件扩束以及微透镜阵列扩束等 4 种<sup>[9]</sup>。由于系统干扰光路采用的是透射系统, 同时模拟的是点源干扰, 因此在综合考虑各方案的优缺点后, 本文采用微透镜阵列扩束方案。

会聚光束中, 当系统共轭距数值一定时, 利用“截距大的一方孔径角小, 截距小的一方孔径角大”的光学规律, 适当选取物、像距以及焦距便可以将一定孔径的细光束变为所需孔径的宽光束, 即达到扩束的目的, 如图 3 所示。

微透镜单元半径与焦距的关系为:

$$f = \frac{R}{n-1}, \quad (1)$$

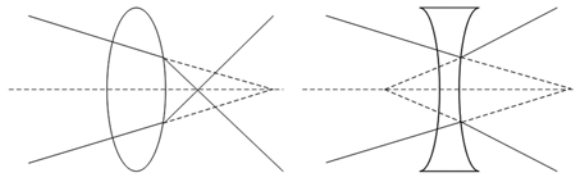


图 3 正、负透镜扩束模型

Fig. 3 Beam expander models of convex and concave lenses

式中:  $f$  为微透镜单元的焦距;  $R$  为微透镜单元的球冠半径;  $n$  为微透镜阵列材料的折射率。设计中微透镜阵列及其基底材料均选取红外材料硅, 其折射率  $n_{\text{Si}} = 3.42$ 。

图 4 为球冠形平凸微透镜的剖面图。圆形基底形式的微透镜单元几何参数之间的关系为:

$$(R-h)^2 = R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2, \quad (2)$$

式中:  $R$  为微透镜单元的曲率半径;  $h$  为球冠高度;  $D$  为口径。

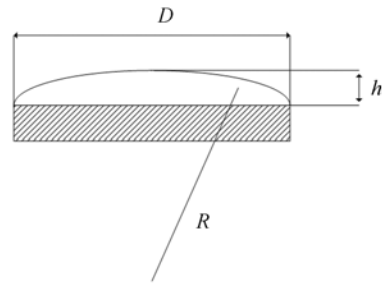


图 4 微透镜单元截面图

Fig. 4 Sectional diagram of microlens array unit

根据式(2), 在已知  $R, D$  的情况下可得出微透镜阵列单元的球冠高, 从而确定了加工参数。同时根据式(1)可得出微透镜阵列的焦距。之后在系统设计中再结合适当的物、像距等参数, 即可实现复合后干扰光路的扩束<sup>[10]</sup>。

设计中选定微透镜单元口径为  $20 \mu\text{m}$ , 曲率半径为  $40 \mu\text{m}$ , 得到单个微透镜球冠高度为  $1.27 \mu\text{m}$ , 微透镜阵列的焦距为  $16.5 \mu\text{m}$ 。根据上述参数完成微透镜阵列的加工。

## 3 系统的 optical 设计

如图 1 所示, 干扰通道包含干扰光学系统和主投影光学系统两部分, 目标通道包含目标光学

系统和主投影光学系统两部分。依据光学原理,干扰通道的焦距为:

$$f_G = f_{GZ} \times \frac{f_0}{f_1} \quad (3)$$

目标通道的焦距为:

$$f_M = f_{MZ} \times \frac{f_0}{f_1} \quad (4)$$

式中:  $f_{GZ}$  为干扰光学系统的焦距;  $f_{MZ}$  为目标光学系统的焦距;  $f_0$  为主投影光学系统目镜  $D_0$  的焦距;  $f_1$  为主投影光学系统物镜  $D_1$  的焦距<sup>[10]</sup>。

根据系统要求,采用  $f_{GZ} = 100 \text{ mm}$ ,  $f_{MZ} = 81 \text{ mm}$ 。同时确定主投影光学系统的放大倍率为 2,即要求:

$$\frac{f_0}{f_1} = 2 \quad (5)$$

上述设计可使耦合镜所在光路的光束尺寸减小一半,从而可以大大减小耦合镜尺寸,并且不产生非对称像差,便于像差校正<sup>[11]</sup>。

在前面分析的基础上,运用 CODE V 进行光学系统设计及优化。各系统的球差、彗差、畸变、色差等一系列像差得到了良好的校正,设计结果如图 5~图 7 所示。

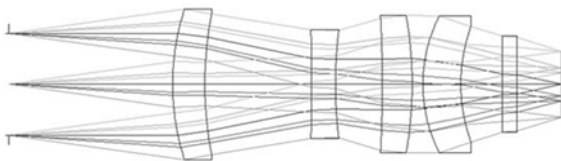


图 5 目标光学系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of target optical system

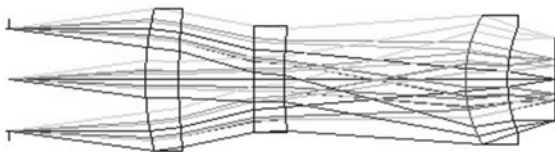


图 6 干扰光学系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of disturbance optical system

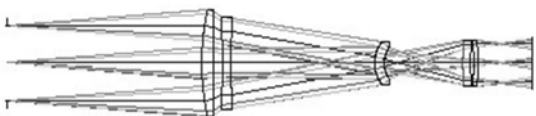


图 7 主投影光学系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of projection optical system

如图 5 所示,目标光学系统由 5 片透镜组成,最左边一片透镜是用于保护目标图像产生器的红外玻璃窗口,由用户规定并提供,材料为锗。除此之外,从左至右透镜材料分别为硅、硅、锗和硅。考虑到成本因素,透镜全为标准球面,这样使得色差的校正比较困难,因此采用多片透镜相配合。最后,为了保证系统的总体透过率,必须在透镜各个表面镀上增透膜,保证各透镜透过率大于 0.95。CODE V 最终优化结果为:焦距 81 mm,数值孔径 0.4,系统总长 130 mm。

在干扰光学系统中,4 路干扰光路经复合投影物镜  $D_5$  后转变为同轴系统。由于干扰光路模拟的是点源干扰,属于非成像光学系统,对系统成像质量的要求没有目标光路严苛。因此在前期光学设计时,只设计一路共轴干扰光路,如图 6 所示。从左至右透镜材料分别为硅、锗和硅。透镜表面同样全部采用标准球面。CODE V 最终优化结果为:焦距 100 mm,数值孔径 0.33,系统总长 135 mm。

由于光学系统整体采用逆向光路设计,因此主投影光学系统的出瞳变为入瞳,如图 7 所示。主投影光学系统为开普勒型望远系统,采用了 5 片透镜,从左至右透镜材料分别为硅、锗、锗、锗和硅。透镜表面全部采用标准球面。在主投影光学系统中引入场镜,一方面衔接了前后光瞳,同时也减小了后方镜组的横向尺寸,使系统变得紧凑。CODE V 最终优化结果为:出瞳距为 200 mm,放大倍率为 2,系统总长为 540 mm。

在目标光学系统、干扰光学系统和主投影光学系统设计优化后,对目标通道和干扰通道光路进行优化,结果如图 8 和图 9 所示。系统总光路如图 10 所示。

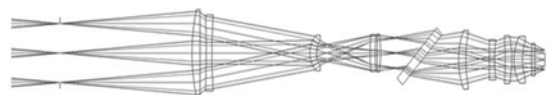


图 8 目标通道示意图

Fig. 8 Schematic diagram of target optical path

系统优化后,目标通道和干扰通道的调制传递函数分别如图 11 和图 12 所示。目标通道和干扰通道的径向能量图分别如图 13 和图 14 所示。

如图 11 和图 13 所示,目标通道全视场的

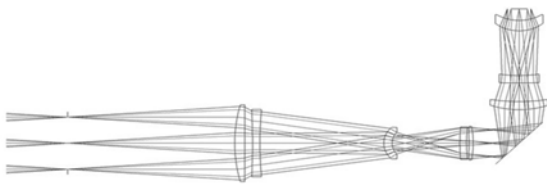


图 9 干扰通道示意图

Fig. 9 Schematic diagram of disturbance optical path

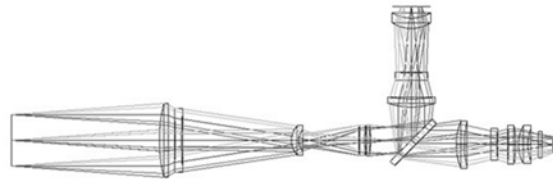


图 10 光学系统示意图

Fig. 10 Schematic diagram of optical system

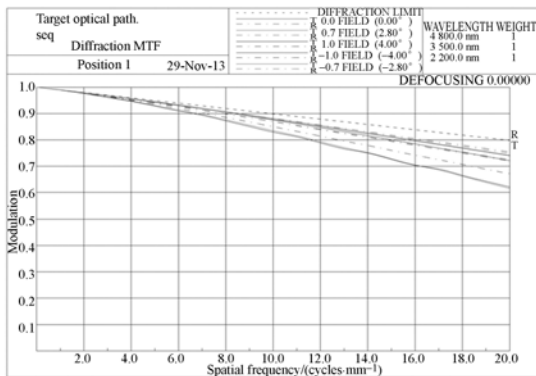


图 11 目标通道 MTF 示意图

Fig. 11 MTF of target optical path

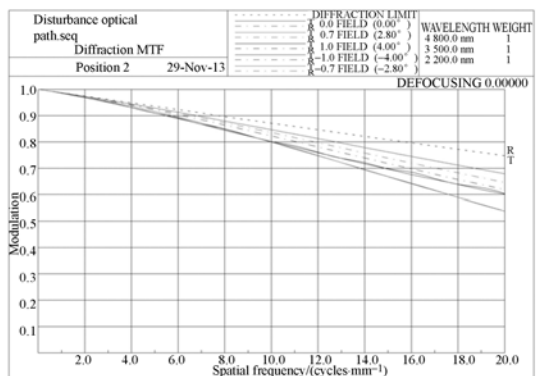


图 12 干扰通道 MTF 示意图

Fig. 12 MTF of disturbance optical path

MTF 在 20 lp/mm 时大于 0.6,同时 90%的能量集中在 27  $\mu\text{m}$  包围圆(衍射艾利斑直径为 20  $\mu\text{m}$ ),接近衍射极限,光学系统成像质量良好。

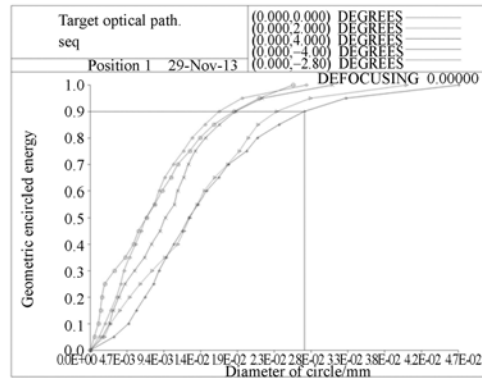


图 13 目标通道径向能量示意图

Fig. 13 Energy diagram in radial direction of target optical path

由图 12 和图 14 可知,干扰通道全视场的 MTF 在 20 lp/mm 时大于 0.5,同时 90%的能量集中在 28  $\mu\text{m}$  包围圆(衍射艾利斑直径为 24  $\mu\text{m}$ )。由于干扰光路为非成像系统,则它亦满足设计要求。

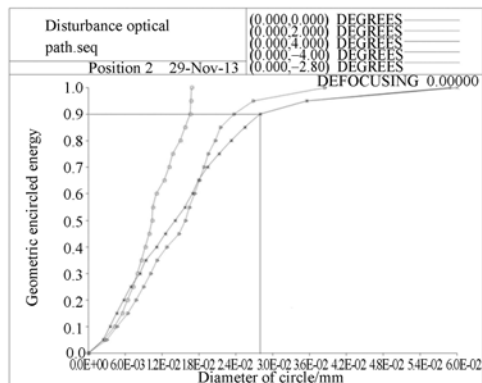


图 14 干扰通道径向能量示意图

Fig. 14 Energy diagram in radial direction of disturbance optical path

#### 4 实际光学系统 MTF 测量结果

CODE V 在近似理想条件下对光学系统进行设计,忽略了光学材料的性质均匀性、几何形状均匀性以及系统装调过程中各种误差的影响。这些因素势必会影响光学系统的性能,并表现为系统弥散斑增大、MTF 值下降等。例如,系统装调一般会使 MTF 值下降 0.1~0.2<sup>[12]</sup>。因此,在光学系统加工和装调完成后,必须利用调制传递函数测试仪对系统的 MTF 等参数进行测试,以检测系统是否符合技术指标。

设定检测温度为 20 °C,检测波长为 4 μm,红外传函仪在不同视场下对复合物镜、干扰物镜、目标通道、干扰通道的 MTF、TSF 值进行测试。目标通道为成像光学系统,对像质要求很严格,因此只给出系统目标通道关于视场和频率的 MTF 测量数据,如表 1 所示。由于存在测量误差,实际测量视场和理想视场有微小差别。

根据表 1 中实测数据,运用 Matlab 拟合出装调后的光学系统目标通道 MTF 与视场和频率的关系,如图 15 所示。

表 1 系统的 MTF 值

Tab.1 MTF values of optical system

视场 MTF		频率/(lp · mm <sup>-1</sup> )				
		0	5	10	15	20
-0.002 4° (0.000°)	子午	1.000	0.935	0.845	0.758	0.684
	弧矢	1.000	0.940	0.861	0.782	0.721
-2.000 2° (-2.000°)	子午	1.000	0.921	0.804	0.689	0.602
	弧矢	1.000	0.939	0.840	0.757	0.668
1.999 8° (2.000°)	子午	1.000	0.934	0.829	0.717	0.621
	弧矢	1.000	0.946	0.869	0.790	0.704
-3.999 9° (-4.000°)	子午	1.000	0.883	0.739	0.609	0.495
	弧矢	1.000	0.930	0.821	0.718	0.612
3.999 6° (4.000°)	子午	1.000	0.839	0.692	0.522	0.398
	弧矢	1.000	0.930	0.821	0.715	0.603

由图 15 可知,对于各个视场,红外光学系统目标通道总体上在弧矢方向的成像质量优于子午方向。在 20 lp/mm 处,全视场的 MTF 值都在 0.4 以上,高于 0.3 的指标要求。在考虑各种误差因素的情况下,系统完全满足使用要求。

## 参考文献:

- [1] 孙强,唐同斌,董国才.红外场景产生器折射/衍射准直光学系统设计[J].红外与激光工程,2007,36(6):881-882.  
SUN Q, TANG T B, DONG G C, et al.. Design of the diffractive / refractive optical system in optical collimator of infrared scene generator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 881-882. (in Chinese)
- [2] 王锐.激光红外主被动复合导引系统[J].中国光学,2013,6(4):536-543.  
WANG R. Compound guided system with active la-

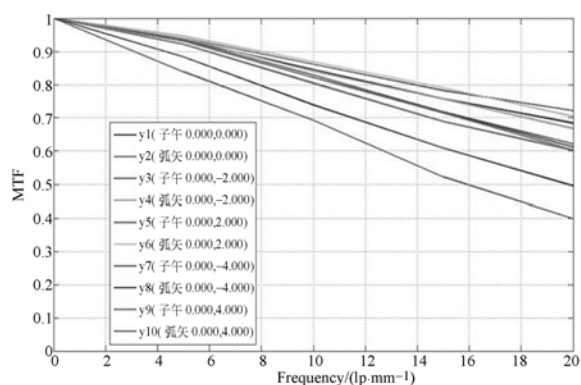


图 15 目标光学系统的实测 MTF 示意图

Fig.15 Measured MTFs of target optical path

## 5 结 论

针对短波和中波红外波段,本文提出了一种基于透射式复合投影以及微透镜阵列扩束的红外多目标复合模拟器。系统采用目标光学系统、干扰光学系统和主投影光学系统分开设计优化,之后进行系统整体优化的设计方式。详细介绍了微透镜阵列的扩束原理和设计,最后,通过 CODE V 软件和红外传函仪对装调后红外系统的 MTF 数据进行了分析和测量。实验结果表明,系统全视场 MTF 值在 20 lp/mm 时均在 0.3 以上。考虑系统本身像差以及光学加工、装调引起的误差后,系统成像质量优良,满足指标要求。目前,系统已成功应用于某新型红外目标模拟器中,对未来红外仿真光学系统的设计具有重要指导意义。

- ser imaging and passive infrared imaging[J]. *Chinese Academy of Sciences*, 2013, 6(4): 536-543.
- [3] 杨晓段,陈鸿林.红外制导武器仿真系统的发展概况[J].红外与激光工程,1998,27(6):16-19.  
YANG X D, CHEN H L. Development state of simulation system for infrared guided weapons[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, 27(6): 16-19. (in Chinese)
- [4] BEASLEY D B, SAYLOR D A, BUFORD J. Overview of dynamic scene projection at the US army aviation and missile command [J]. *SPIE*, 2002, 4717:136-147.
- [5] 曾嫦娥,鱼明哲,单长胜.美陆军制导武器试验半实

- 物仿真技术综述[J]. 飞行器测控学报, 2005, 24(3): 75-83.
- ZENG CH E, YU M ZH, SHAN CH SH. Evolution of HWIL simulation technology for guided weapons of the US army[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2005, 24(3): 75-83. (in Chinese)
- [6] 赵文才, 马军. 双向大视场消畸变低温红外目标模拟光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2619-2625.
- ZHAO W C, MA J. Design of cryogenic infrared target simulation system with bidirectional and wide field for eliminating distortion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2619-1625. (in Chinese)
- [7] 潘洪涛, 左保军. 大入瞳距双通道红外投影系统设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 505-508.
- PAN H T, ZUO B J. Dual-channel infrared projection system design with large entrance pupil distance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 505-508. (in Chinese)
- [8] 于旭东, 朱文超, 李卓. 红外多目标复合模拟器光学系统设计[J]. 光学技术, 2012, 38(5): 630-633.
- YU X D, ZHU W CH, LI ZH. Design of infrared optical system for multi-targets compound simulation [J]. *Optical Technology*, 2012, 38(5): 630-633. (in Chinese)
- [9] 于双双. 微透镜阵列光学耦合扩束技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 17-23.
- YU SH SH. *Research on Microlens Array-based Optical Expander and Coupling Beam Technology* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 17-23. (in Chinese)
- [10] UREY H, KARLTON D. Microlens-array-based exit-pupil expander for full-color displays[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(23): 4930-4936.
- [11] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 135-152.
- YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 135-152. (in Chinese)
- [12] YODER P R Jr, 周海宪. 光机系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 75-101.
- YODER P R Jr, ZHOU H X, et al.. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 75-101. (in Chinese)

#### 作者简介:



张树青(1982—),男,黑龙江东宁人,讲师,主要从事空间遥感光学系统设计、极紫外光刻收集系统方面的研究。

(版权所有 未经许可 不得转载)