

doi:10.3788/gzxb20144308.0822002

红外干扰模拟器的微光学扩束技术

任智斌¹, 马驰¹, 金传广¹, 赵焕义²

(1 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

(2 中航工业江西洪都航空工业集团 660 所, 南昌 330024)

摘 要: 基于双干扰光路红外干扰模拟器的光束扩束技术, 设计了微透镜阵列扩束系统, 利用光刻胶热熔技术对微透镜阵列进行加工并对干扰模拟系统的能量收集效率进行测试. 实验结果表明两干扰光路的能量收集效率分别为 27.3% 和 26.9%, 与设计结果 30.8% 基本符合; 验证了微透镜阵列作为扩束元件在红外干扰模拟器中的应用价值, 为红外成像仿真技术及多干扰光路红外成像目标模拟器的工程化研究提供了参考.

关键词: 红外干扰模拟器; 微透镜阵列; 扩束; 光能收集效率; 光刻胶热熔

中图分类号: TN216; TN219

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)08-0822002-5

Micro-optics Beam Expander Technology for Infrared Jamming Simulator

REN Zhi-bin¹, MA Chi¹, JIN Chuan-guang¹, ZHAO Huan-yi²

(1 School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2 No. 660 Institute, AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Group Co. Ltd., Nanchang 330024, China)

Abstract: A microlenses array beam expander system was design based on the infrared jamming technology with two jamming light paths. The microlenses array was fabricated by melting photoresist technology, the energy collection efficiency of the jamming simulation system was tested. The results show that the tested energy collection efficiencys of two jamming light paths are 27.3% and 26.9%, which are consistent with the design result 30.8%. This study verifies the application value of microlenses array as the beam expander element in the infrared jamming simulator and can provide references for the engineering research of infrared imaging simulation technology and infrared imaging target simulator with multiple jamming light paths.

Key words: Infrared jamming simulator; Microlenses array; Beam expander; Light energy collection efficiency; Melting photoresist

OCIS Codes: 110.3080; 120.4640; 130.3990

0 引言

随着红外制导技术的发展与制导装置的研制, 红外干扰技术与红外仿真技术也得到了飞速发展. 由于仿真技术具有成本低、系统适应性强、仿真参量可精确控制等优点, 以仿真技术模拟实弹打靶可大幅度降低导弹研制成本和研制周期^[1-2]. 全数字仿真技术虽然成本很低, 但不能获得足够的仿真准确度. 半实物仿真技

术在仿真实验系统的链路中接入了部分实物, 能获得比全数字仿真更高的仿真准确度, 在红外制导武器研制过程中仿真结果的真实性更高^[3-5]. 红外目标/干扰模拟器能模拟导弹跟踪目标、干扰目标及其背景的外形特征、光谱辐射性能、运动状态, 是半实物仿真系统的重要组成部分.

美国通用电气公司于 1971 年设计了一套红外制导导弹半实物仿真系统, 系统采用多目标复合方法来

基金项目: 航空科学基金(20130177004)资助

第一作者: 任智斌(1976-), 男, 副教授, 博士后, 主要研究方向为空间光学、红外目标模拟技术. Email: rzb@hit.edu.cn

收稿日期: 2013-12-13; **录用日期:** 2014-03-12

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

产生复杂的实战景象.英国宇航公司于70年代初研制了一个红外制导导弹半实物仿真系统,它采用五轴转台式方案.借鉴美国半实物仿真系统,哈尔滨工业大学成功仿制了一套相似的红外制导导弹半实物仿真系统,并对其进行了改进.目前,红外目标/干扰模拟器一直沿用五轴转台式方案,主要集中在红外模拟器的性能评估,模拟准确度分析和模拟系统控制等方面^[6-12].

由于干扰弹的数目较多,且实际情况较复杂,单独一个干扰光路无法准确完成模拟实验.多干扰光路可获得良好的模拟效果,但由于导引头口径有限,干扰光路的光线只有很少一部分能进入导引头,光能收集效率很低.本文采用一种带有两个干扰光路的红外成像式模拟器,将干扰光路进行复合、扩束,经准直物镜准直后投射给导引头.当不使用扩束元件对干扰光束扩束时,每个干扰光路光能收集效率的设计值仅为7.2%.当使用微透镜阵列进行扩束后,扩束系统两干扰路的能量收集效率测试结果分别为27.3%和26.9%,略低于理论值30.8%.

1 红外干扰成像模拟器的基本原理

红外干扰模拟器配备两个干扰光路,如图1.两路干扰光路经复合物镜会聚于扩束元件左端面,两路离轴细干扰光束经扩束元件变成共轴宽光束,扩束光束通过准直物镜系统供导引头接收.若在准直物镜与导引头之间的光路中加入目标光路,则构成红外目标/干扰模拟器,可同时仿真目标与干扰.

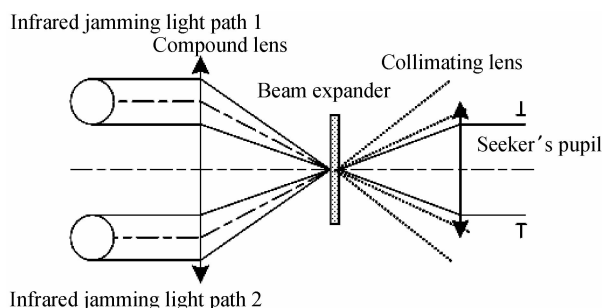


图1 红外干扰模拟器系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of Infrared jamming simulator system

若图1的光路中未放置扩束元件,由于导引头的口径有限,则干扰光路1和干扰光路2发出的光线经复合物镜后无法充满准直物镜与导引头入瞳,如图1中虚线所示,干扰光能量的收集效率非常低.若在光路中加入扩束元件,经过复合物镜后两路干扰光束的发散角变大,使干扰光线充满准直物镜,可提高干扰光能量的收集效率.

干扰光路中的扩束元件可采用网纹镜、传像光缆^[13]、光散射元件等,但由于网纹镜扩束元件需采用反射式光路会导致光路变长,模拟系统体积较大,不适

合图1所示的光路结构.而传像光缆虽能实现扩束功能,但光在光纤中多次发生全反射,使光线的轨迹无法精确计算,经光纤传输后,干扰光的扩束效果存在很大的随机性,且扩束效果不均匀.常规光散射元件有衍射光栅和毛玻璃两种,衍射光栅扩束效果不均匀且在不同位置出现衍射光强极值,而毛玻璃虽然扩束效果均匀,但能量损失非常严重.

微透镜阵列可使入射到其前表面的平行光线产生会聚效果,在微透镜的焦平面上产生与各单元微透镜中心位置相对应的光斑点阵,光斑点阵继续向前传播,形成更发散光束,从而实现扩束效果^[14].将微透镜阵列放置在复合物镜焦平面前面并靠近焦平面,此时微透镜阵列会使焦平面前的光线进一步会聚,光线通过微透镜阵列后发散角会变大.所以,微透镜阵列可以实现扩束功能,具有扩束光分布均匀,阵列参量可优化设计和加工可行性高等优点,且有良好的扩束效果与较高的光能收集效率.

2 微透镜阵列参量的优化与系统光能收集效率分析

2.1 微透镜阵列扩束系统设计

未采用扩束元件的红外干扰模拟系统的光路如图2(a)所示,其中,干扰光路离轴细光束的宽度为42 mm、偏心距为35 mm,干扰光路后第一片透镜的直径

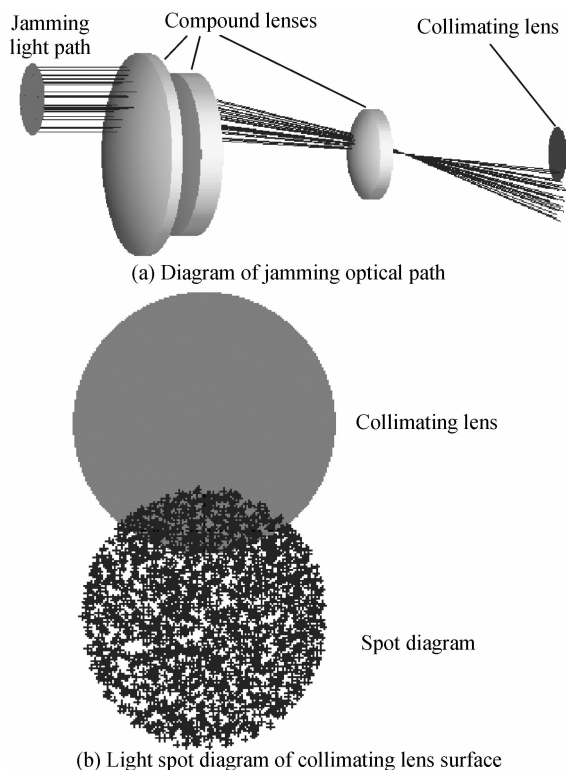


图2 没有扩束元件的干扰光路和准直物镜表面的光斑分布
Fig. 2 Diagrams of jamming optical path and light spot on collimating lens surface without expander

为128 mm,准直物镜的口径为35 mm,工作波段为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$.干扰光路1发出的平行光束经复合物镜(由3片透镜组成)会聚后经准直物镜准直供导引头接收.由于复合物镜后未放置扩束元件,干扰光束只有很少一部分能进入到准直物镜.从图2可知,进入准直物镜的那部分光线是斜入射的,其中心光线与水平光轴的夹角为 7.41° ,不利于导引头的接收.图2(b)给出了准直物镜表面处的干扰光束光斑分布情况,可以看到,进入准直物镜的光线数目占总入射干扰光线数目的比例很少,通过计算可知,此时的干扰光能收集效率仅为7.2%.

采用单元口径为 $20\ \mu\text{m}$ 、曲率半径为 $50\ \mu\text{m}$ 、基底厚度为4 mm的硅材料微透镜阵列扩束元件的红外干扰模拟系统的光路如图3(a),入射到微透镜阵列前表面的干扰光束被进一步会聚,改变了光束的传播方向,扩大了光束的发散角.

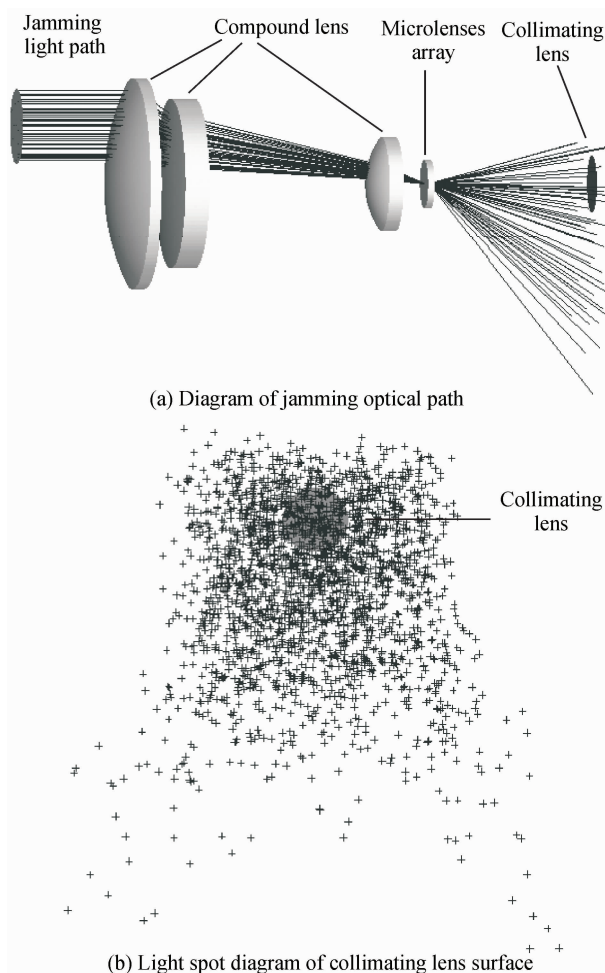


图3 带有微透镜阵列的干扰光路和准直物镜表面的光斑分布
Fig. 3 Diagram of jamming optical path and light spot on collimating lens surface with microlenses array expander

从图3(a)可知,进入准直物镜的那部分光线中心光线与水平光轴的夹角接近 0° ,有利于导引头的接收.另外,从图3(b)可以看到,光线能够均匀地充满准直

物镜,进入准直物镜的光线数目占总入射干扰光束光线数目的比例大幅增加.计算可知,此时干扰光能收集效率提高到30.8%.

2.2 微透镜阵列扩束系统光能收集效率的分析

2.2.1 微透镜曲率半径变化对光能收集效率的影响

当选取不同微透镜曲率半径 r 时,其焦距发生变化,从而影响光线会聚程度和系统的扩束效果.图4为单元口径 $d=20\ \mu\text{m}$ 、基底厚度4 mm时,准直物镜的干扰光能量收集效率与 r 的变化关系.可以看到,在 r 从 $28\ \mu\text{m}$ 增大到 $50\ \mu\text{m}$ 的过程中,准直物镜的能量接收效率从9.9%单调递增至30.8%.其原因是小曲率半径的微透镜阵列会聚能力强,扩束后光斑面积过大,从而导致能量接收效率低;随着 r 的增大,扩束后的光斑面积逐渐减小,准直物镜接收的光能量占总光斑能量的比例逐渐提高. r 取值为 $50\sim 57\ \mu\text{m}$ 之间时,扩束后光斑面积趋于稳定,能量接收效率基本保持稳定.而在 r 大于 $58\ \mu\text{m}$ 时,扩束后光斑面积进一步减小,导致光斑无法覆盖准直物镜的整个口径,准直物镜上端部分没有扩束光线通过,随着曲率半径的进一步增大,扩束后光斑所覆盖的准直物镜面积逐渐减小,光能接收效率单调递减.

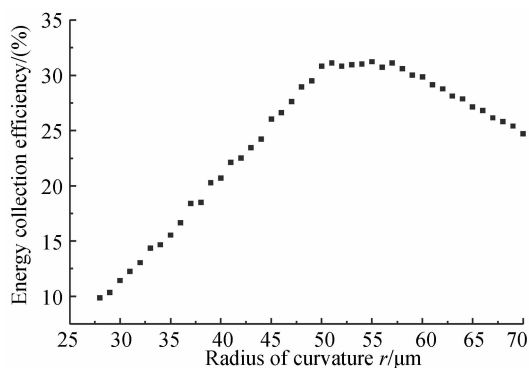


图4 微透镜曲率半径与能量接收效率关系

Fig. 4 Relationship between radius of microlenses array and energy receiving efficiency

2.2.2 单元微透镜口径变化对光能收集效率的影响

微透镜阵列中各单元微透镜将入射光线分割成若干局部面元,对每个面元上的细光束分别扩束,当单元微透镜的口径 d 增大时,光线被分割的局部面元会变大,从而使扩束后光能分布的均匀性变差.所以,从扩束均匀性的角度来说, d 越小,扩束光能量分布越均匀.

从微透镜阵列的加工技术角度来说,若采用光刻胶热熔加工技术,单元透镜口径 d 选取 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 时较易加工.若 d 进一步减小,加工准确度则难以保证.图5给出了基底厚度4 mm, $r=50\ \mu\text{m}$ 时,准直物镜光能接收效率与 d 的关系,可以看到,随着 d 的增大,光

能收集效率逐渐降低. 当 d 在 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 变化时, 光能收集效率基本保持在 31% 左右, 考虑到微透镜阵列的加工难度, 单元口径小于 $20 \mu\text{m}$ 时, 投影光刻环节及光刻胶热熔环节的加工参量都不易精确控制. 所以, d 选取为 $20 \mu\text{m}$ 是比较合理的.

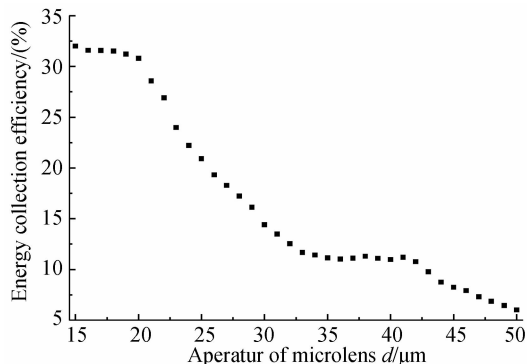


图5 单元微透镜口径 d 与能量接收效率关系

Fig. 5 Relationship between aperture of microlens unit and energy receiving efficiency

2.2.3 基底厚度变化对光能收集效率的影响

微透镜阵列以硅基底为载体, 当基底具有一定的厚度 t 时才能保证整个微透镜阵列的坚固与稳定. t 值太大时, 基底厚度的均匀性难以保证且阵列的重量会增加; 若 t 取值过小, 则该元件的坚固与稳定性差, 容易变形甚至损坏. 图 6 给出 t 值在 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 之间变化时, 准直物镜能量收集效率的变化规律. 可以看到, 对于 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 之间不同的 t 值, 准直物镜的能量收集效率随 t 的变化范围不超过 0.6% . 虽然当 $t < 1.6 \text{ mm}$ 时, 能量收集效率超过了 31% , 但由于基底厚度过薄, 机械强度差, 不予采纳. 因此, t 取 4 mm 兼顾了能量接收效率与微透镜阵列的机械强度, 是比较合理的取值.

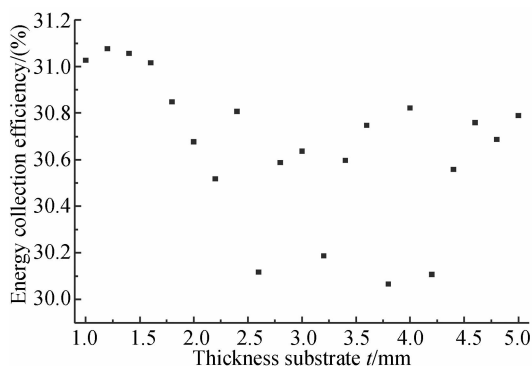


图6 基底厚度与能量接收效率关系

Fig. 6 Relationship of the thickness of substrate and energy collection efficiency

3 微透镜阵列的加工及扩束性能测试

由分析可知, 硅基底上微透镜阵列的加工参量取 $d=20 \mu\text{m}$, $r=50 \mu\text{m}$, $t=4 \text{ mm}$ 比较合适, 文献[15]表明, 采用光刻胶热熔制作技术, 通过合理地选择显影时

间, 可使微透镜阵列之间没有缝隙的排列在一起. 实验中通过多次加工, 遴选出实际面形与设计面形最相符的样品. 图 7 为遴选出的微透镜阵列加工样品元件的原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 检测出的三维表面面形, 图 8 为该微透镜阵列的二维面形曲线的 AFM 测试结果与设计结果, 可以看到, 加工样品的面形与设计结果基本相符, 加工误差很小.

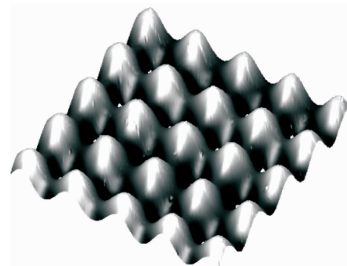


图7 微透镜阵列元件的三维 AFM 镜面形图

Fig. 7 3-D surface profile of microlenses array by AFM

采用最小二乘法对图 8 中的数据点进行曲线拟合, 将拟合出的面形参量作为微透镜阵列的实际面形, 代入到图 3(a) 所示的光路中进行仿真分析. 由于微透镜阵列元件存在加工误差, 两干扰路的光能收集效率仿真分析结果均为 29.7% , 略低于理想微透镜阵列面形条件下的理论值 30.8% .

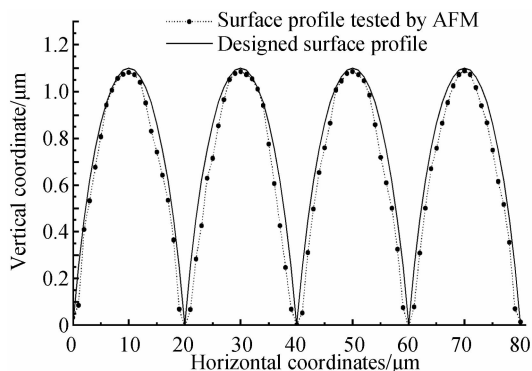


图8 微透镜阵列的二维面形曲线的 AFM 测试结果与设计结果

Fig. 8 2-D surface profile of microlenses array by AFM and its design result

用氙灯作为干扰光路的照明光源, 按照图 3(a) 搭建光路, 用红外热像仪对准直物镜接收到的光能量与入射到微透镜阵列之前的光能量分别进行测试, 将两个位置的光能量测试结果相除, 得到微透镜阵列扩束后准直物镜两干扰路的能量收集效率测试结果分别为 27.3% 和 26.9% , 略低于仿真分析结果 29.7% , 也略低于理想微透镜阵列面形条件下的理论值 30.8% , 验证了微透镜阵列具有良好的扩束性能的特性.

4 结论

本文设计了微透镜阵列扩束系统, 将光能收集效率提高到 30.8% . 并对微透镜阵列扩束元件进行加工

和能量收集效率的测试,两干扰路的能量收集效率测试结果分别为 27.3% 和 26.9%。研究结果可为红外成像仿真技术及多干扰光路红外成像目标模拟器的工程化提供参考。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ZENG Chang-e, YU Ming-zhe, SHAN Chang-sheng. The semi-physical simulation technology of United States army guided weapon test [J]. *Journal of Spacecraft Test and Control Technology*, 2005, **24**(3): 75-83.
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.
- [3] ZHAO Xun-jie, LI Cheng-jin. Key-tech in a hardware-in-the-loop IR simulation system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3): 326-336.
赵勋杰, 李成金. 红外半实物仿真系统的关键技术研究[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(3): 326-336.
- [4] JI Dong-chao, XIAO Ming-qing, HE Zhong-wu. Design of semi physical simulation system for missile infrared control and guide system[J]. *Fire Control & Command Control*, 2003, **28**(6): 78-79.
姬东朝, 肖明清, 贺中武. 红外导弹制导系统的半实物仿真系统设计[J]. 火力与指挥控制, 2003, **28**(6): 78-79.
- [5] WANG Ji-guang, WANG Min-shuai, ZANG Shou-hong. Development of surface-type infrared decoys at home and abroad and study of testing methods[J]. *Infrared*, 2011, **32**(10): 17-20.
王继光, 王敏帅, 臧寿洪. 国内外红外面源诱饵弹的发展和试验方法研究[J]. 红外, 2011, **32**(10): 17-20.
- [6] TONG Zhong-xiang, LIU Peng-fei, WANG Xiao-dong, et al. Research optimal jamming method of IR decoy[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, **21**(1): 69-72.
童中翔, 刘鹏飞, 王晓东. 红外诱饵弹最佳干扰方法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, **21**(1): 69-72.
- [7] SU Jian-gang, HUANG Yan-jun, LIU Shang-qian, et al. Research on the hardware-in-the-loop simulation technology for the energy characteristics of laser guided weapons[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1722-1725.
苏建刚, 黄艳俊, 刘上乾, 等. 激光制导武器能量特性半实物仿真技术研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(9): 1722-1725.
- [8] ZENG C, YANG D, SU J, et al. Study of infrared point source simulator for generating the multi-decoy[C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2013, **8912**: 1-4.
- [9] WILLERS C, WILLERS M. Simulating the DIRCM engagement; component and system level performance [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2012, **8543**: 1-16.
- [10] JACKMAN J, BUTTERS B, WALMSLEY R, et al. Countermeasure effectiveness against a man-portable air-defense system containing a two-color spin scan infrared seeker[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(12): 1-7.
- [11] HUANG C, CHEN H, LI J, et al. System design and description of infrared simulator system based on the multidimensional flight table [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008, **7276**: 1-8.
- [12] YU J, XU B, HAO W, et al. Research on target scene generation for hardware-in-the-loop simulation of four-element infrared seeker [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2006, **6358**: 1-7.
- [13] LI Run-shun. The application of UV-IR image translation fiber in simulation [J]. *Optical Electronic Technology and Information*, 2001, **14**(3): 24-26.
李润顺. UV-IR 传像光缆在仿真中的应用 [J]. 光电子技术与信息, 2001, **14**(3): 24-26.
- [14] UREY H, POWELL K. Microlens-array-based exit-pupil expander for full-color displays[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(23): 4930-4936.
- [15] REN Zhi-bin, LU Zhen-wu. Improving the fill factor and F number of refractive microlens array by reducing developing time[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(2): 250-254.
任智斌, 卢振武. 通过缩短显影时间提高微透镜阵列的填充因子与 F 数[J]. 光电子 · 激光, 2005, **16**(2): 250-254.