

基于 DMD 的红外景象模拟投影光学系统设计

董家宁 牟 达 徐春云 李全勇 王文生

(长春理工大学现代光学测试实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 数字微镜器件(DMD)动态红外(IR)景象模拟技术具有大动态范围、高空间分辨率、高帧频、空间均匀性好、体积小等特点,能够在实验室内模拟红外景象,降低红外系统的研发成本,缩短研发周期。根据基于 DMD 的红外景象模拟系统的要求,分析了红外投影光学系统的特点,确定了其技术指标。从初始结构选取入手,利用像差平衡理论和非球面技术,针对 DLP5500 DMD(1024 pixel \times 768 pixel),设计出一种成像质量高、性价比高,工作在 8~12 μm 波段的红外投影光学系统。系统采用三片透射式结构,焦距为 200 mm,相对孔径为 1:3。应用 Zemax 光学设计软件进行像质评价,各视场调制传递函数(MTF)接近衍射极限,各视场的点列图均方根(RMS)半径远小于艾里斑的半径,满足设计要求。

关键词 光学设计;红外景象模拟;数字微镜器件;投影光学系统

中图分类号 TN219 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.122202

Projection Optical System Design of Infrared Scene Simulator Based on DMD

Dong Jianing Mu Da Xu Chunyun Li Quanyong Wang Wensheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The characteristics of the dynamic infrared (IR) scene simulation technology based on digital micro-mirror device (DMD) include large dynamic range, high spatial resolution, high frame rate, good uniformity, small volume and so on. It can simulate infrared scene in the laboratory, reduce the research cost of the infrared system and shorten the development cycle. According to the requirements of the infrared scene simulation system based on DMD, the characteristics of the infrared projection optical systems are analyzed, and the technical indices of the projection system are determined. The selection of initial structure is presented. The infrared projection system of high image quality and high performance-price ratio is designed for the wave band of 8~12 μm based on the aberration balance theory and aspherical technology. This system for DLP5500 DMD (1024 pixel \times 768 pixel) is composed of three refractive lenses. The focal length is 200 mm and the relative aperture is 1:3. The optical system image quality is evaluated with Zemax optical design software. The result shows that modulation transfer function (MTF) of the system is close to the diffraction limited curve. The spot diagram root mean square (RMS) value of each field of view is smaller than the radius of Airy disk. The system meets the requirements of technical specification.

Key words optical design; infrared scene simulation; digital micro-mirror device; projection optical system

OCIS codes 220.3620; 220.1010; 220.2740; 220.1250

1 引言

红外(IR)系统不同于工作在可见光波段的光电系统,它接收来自于目标自身的红外辐射能量,可以全天候工作,具有很强的探测能力。基于数字微镜器件(DMD)的动态红外景象模拟器^[1,2]能在实验室环境下产生三维红外景象,用来模拟真实物体及其环境的红外辐射。这样在实验室内即可对红外系统的性能进行

收稿日期: 2012-06-01; 收到修改稿日期: 2012-08-06; 网络出版日期: 2012-10-19

基金项目: 总装“十二五”预研基金资助课题。

作者简介: 董家宁(1987—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: xxy0911@163.com

导师简介: 牟 达(1979—),女,讲师,主要从事光学设计及现代光学测试方面的研究。E-mail: md_79@126.com

测试和评估,以节约大量经费。

美国光学科学公司研制开发的一种以 DMD 为核心器件的动态景象生成方法,称为微镜阵列投影系统 (MAPS),已在美国陆军航空导弹司令部 (AMCOM) 的高级仿真中心 (ASC) 投入使用。虽然国内数家院校和科研机构已开始 DMD 动态红外图像生成器的研究,如北京理工大学、哈尔滨工业大学、中国科学院上海技术物理研究所等,但是我国在这个领域的研究比国外还是相对落后一些,迫切需求发展更为先进的模拟系统以推动红外系统和红外武器特别是精确制导武器的发展。投影光学系统的成像质量对于整个模拟器的模拟效果起到至关重要的作用,因此投影光学系统的研究具有重要意义。本文设计的长波红外投影光学系统,工作于 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段,满足动态红外景象模拟系统的要求,能够测试和评估军事上应用的大部分红外系统。给出了该系统具体的设计参数和设计步骤。

2 基于 DMD 的动态红外景象模拟系统工作原理

与其他红外景象生成技术相比,采用 DMD 的动态红外景象模拟技术可在更大动态范围内进行高速模拟,具有空间分辨率和温度分辨率较高、帧频高、空间均匀性好、体积小等特点^[3]。

2.1 DMD 的工作原理

DMD 是美国德州仪器公司 (TI) 研制的新一代空间光调制器,是一种新型、全数字化的平面显示器件^[4]。应用微机电系统 (MEMS) 原理,利用铝溅射的工艺,将反射微镜阵列和 CMOS SRAM 集成在同一块芯片上。DMD 是一种用二进制脉宽调制的数字光开关,可以用来调制入射光的振幅、相位和方向。DMD 由成千上万个可倾斜的铝合金微镜组成,成像靠微镜转动完成,每一个像素上都有一个可转动的微镜^[5],不同微镜的位置对应不同的出射角度。因此,每一个微镜相当于一个光开关。如图 1 所示,每个微镜都有 $\pm 12^\circ$ 的偏转角分别对应“开”态和“关”态。微镜偏转 $+12^\circ$ 时 (“开”态),反射光线几乎全部通过投影系统;微镜偏转 -12° 时 (“关”态),反射光线偏离投影系统,被吸收装置吸收。根据需要控制微镜的开、关状态,从而实现显示^[6]。由于普通的 DMD 器件开始是针对可见光而制作的,DMD 上的光学窗口材料是不能透过红外光的,不适用红外景象生成,因此在将 DMD 器件应用于动态红外投影时,DMD 光学窗口的材料必须进行一些改装。对于长波红外成像仿真应用,需要使用能够透射红外波段的光学材料代替原有的 DMD 保护玻璃。

2.2 基于 DMD 的动态红外景象模拟系统

DMD 的动态红外景象模拟系统^[7]由以下几个部分构成:照明系统、分光系统、核心器件 DMD、投影系统、计算机图像生成器 (CIG)、DMD 驱动电路等。整个模拟系统如图 2 所示。由计算机图像生成器产生的图像数据,经过数字光处理 (DLP) 视频处理电路和 DMD 驱动电路输入 DMD 器件。黑体发射红外光作为照明光源,经过照明光学系统,形成均匀的照明区域,照明 DMD,利用 DMD 反射调制入射的红外辐射产生红外图像。分光系统衔接投影光路和照明光路,将 DMD 的入射光束和反射光束分开,避免照明光路与投影光路重叠,减少光能损失,使系统利用率更高、结构更紧凑。生成的红外景象通过分光系统至投影系统投射到被测单元,使红外景象与真实目标和背景在探测器上的像斑大小、辐射能量空间分布一致,以达到评价系

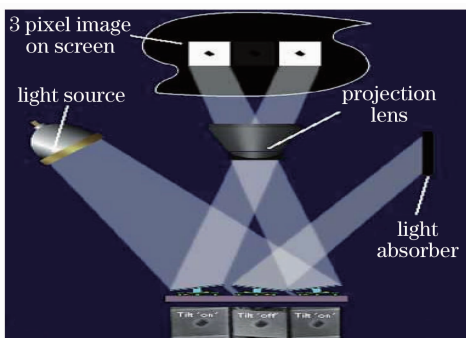


图 1 DMD 工作原理示意图

Fig. 1 Sketch of working principle of DMD

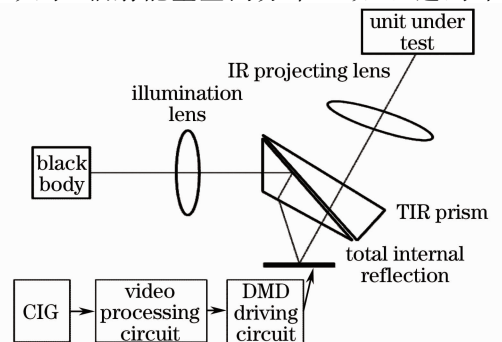


图 2 DMD 动态红外模拟系统示意图

Fig. 2 Schematic sketch of dynamic infrared scene simulator based on DMD

统性能的目的。

3 红外投影光学系统的设计

投影光学系统是 DMD 动态红外景象模拟技术中重要的组成部分。利用 DMD 反射调制生成的红外景象通过投影光学系统投射到被测单元。投影系统的设计参数是由被测系统的特性参数和 DMD 器件的参数决定的。

红外光学系统设计不同于可见光光学系统设计。红外光学系统工作波段非常宽,可用的透射红外辐射的材料很少,红外材料具有高折射、低色散的特点,不容易选取满足要求的红外材料,且成本相对较高。

红外投影光学系统成像质量受几何像差和衍射的影响,与可见光相比,像差校正困难,尤其是色差的校正。衍射艾里斑很可能大于 DMD 每个微镜的尺寸,因此设计时必须重视衍射效应的影响。由于衍射效应与波长成正比,因此长波(8~12 μm)图像质量会较差。

3.1 光学参数的确定

根据系统工作原理可知,整个光学系统倒置使用,分光棱镜位于 DMD 和投影光学系统之间,这就要求光学系统要有一定的工作距离。投影光学系统的物方为景象生成器件(即 DMD),且 DMD 置于投影光学系统的物方焦平面上,出射的光为平行光。为设计方便采用反向设计的方法,平行光入射,相当于无穷远物通过物镜成像,像面位于 DMD 位置上。选用德州仪器公司的 DMD,分辨率为 1024 pixel \times 768 pixel,微镜尺寸为 10.8 $\mu\text{m}\times$ 10.8 μm ,转角为 $\pm 12^\circ$ 。综合能量、衍射、像差等因素,确定以下参数:工作波段 8~12 μm ,焦距 200 mm,相对孔径 1:3,视场角 6.6 $^\circ$ 。

3.2 初始结构的选取

对于初始结构的选择,尽量选择相对简单的系统。简单的光学系统一般分为单片式、两片式和三片式^[8]。单透镜不能消除基本像差(梯度折射率透镜除外,但加工工艺要求太高,不易实现);双胶合结构胶合面材料不好选取和控制,双分离结构虽然能够满足基本的像差优化要求,传递函数响应高,但这种结构对像面位移很敏感,不适合要求较高的光学系统的设计。从以上参数可以看出此投影光学系统相对孔径较大,工作距离较长。因此,选定一种三片式红外系统作为初始结构进行优化设计。

红外光学系统工作的波段为 8~12 μm ,可选择的材料非常有限。锗、硫化锌和硒化锌等材料常用于 8~12 μm 光谱带^[9]。在选择材料时通过不同组合来保证最好的成像质量。在传统意义上,色差校正至少需要两种不同色差系数的材料,因此该结构选取锗-硫化锌-锗的组合,此材料组合在长波红外波段范围内有良好的透射率。

3.3 系统设计

通过分析,景象模拟系统中,分光棱镜位于 DMD 和投影光学系统之间,光线由 DMD 通过分光系统的全反射棱镜投射到投影系统,光经过棱镜时,棱镜展开可等效为一平行平板。设计投影物镜时用相同厚度的玻璃平板代替棱镜,一起校正像差,因此在第 3 片透镜后面加入 1 片材料为锗的平行平板。系统结构如图 3 所示,自左向右透镜的材料分别为 Ge、ZnSe、Ge、Ge。此时投影光学系统的调制传递函数(MTF)曲线如图 4 所示,在 17 lp/mm 处小于 0.3,点列图如图 5 所示,均未达到指标要求。

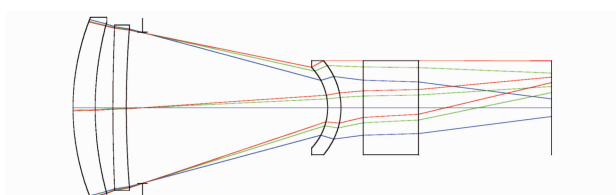


图 3 投影系统初始结构图

Fig. 3 Sketch of the initial projection system

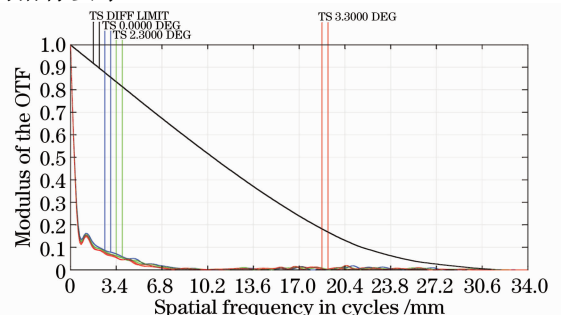


图 4 初始结构调制传递函数曲线

Fig. 4 MTF curves of the initial system

分析系统像差情况,此系统在第2、4、7面球差较大,需要添加辅助镜片来校正球差、畸变、彗差,达到像质要求^[10]。但在实际设计过程中,为了提高成像质量、简化结构,没有添加镜片而是引入非球面进行系统设计。使用非球面是一种减小和平衡像差的技术。非球面在此处的作用是控制像差,最主要的是控制球差。在手动修改各个面的半径和厚度值时发现第4个面非常敏感,特别是对传递函数曲线的影响严重,因此把它设为偶次非球面。利用Zemax软件对这个非球面系统进行反复优化,得到偶次非球面的二、四次系数分别为 6.618×10^{-4} 、 1.944×10^{-8} 。

4 设计结果

图6为投影系统的最终结构图,光学系统焦距为200 mm, F 数为3,视场角为 6.6° ,工作总长为200 mm。投影系统的入瞳直径67 mm,与第1面重合,出射窗在无限远,只要后续摄远系统的入瞳大于或等于零,即容易实现两个系统的光瞳和窗相衔接的要求。第2片正透镜的后表面采用了非球面,校正了第1片弯月球面负透镜和第3片球面负透镜产生的较大的球差。至此,第1片弯月球面负透镜、第2片非球面正透镜和第3片球面负透镜像差相互平衡,校正了系统的球差、彗差和轴向色差。

图7所示调制传递函数曲线表明,在17 lp/mm空间分辨率处大于0.3,各视场的调制传递函数与衍射极限非常接近,说明像差控制得很好。由图8点列图可以看出三个视场的均方根(RMS)半径分别为3.919、4.934、7.176 μm ,均远小于艾里斑的半径36.59 μm 。综上所述,投影光学系统的成像质量能够满足技术指标要求。

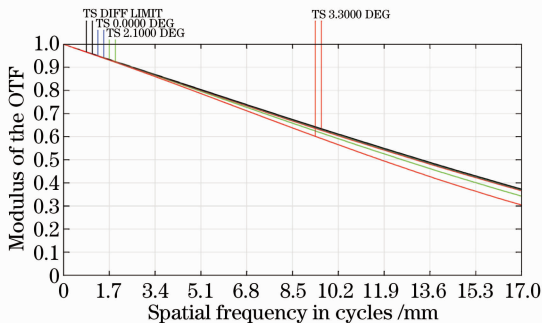


图7 设计结果的调制传递函数曲线

Fig. 7 MTF curves of the designed system

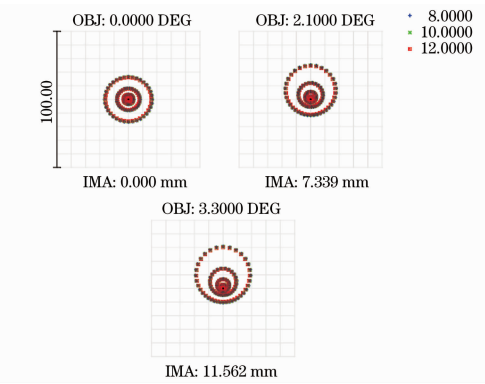


图5 初始结构点列图

Fig. 5 Spot diagram of the initial system

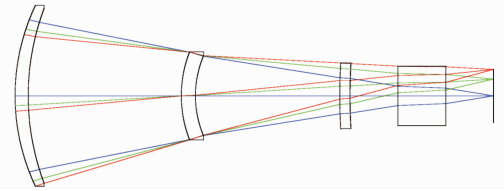


图6 投影系统结构图

Fig. 6 Sketch of the projection optical system

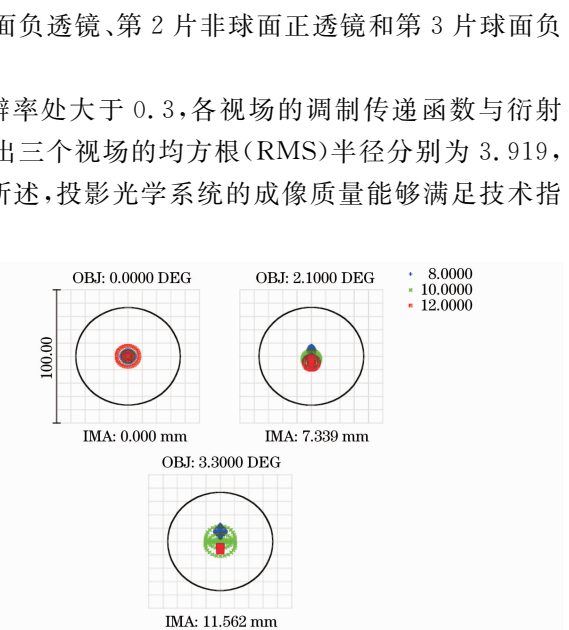


图8 设计结果的点列图

Fig. 8 Spot diagram of the designed system

5 结论

本文介绍了基于DMD的动态红外景象模拟技术以及DMD的工作原理。分析红外投影系统的设计难点是大相对孔径、宽波段、材料有限。确定了投影系统的设计指标,依据这些指标选择了一组具有相似特性的物镜作为初始结构,在设计中引入非球面,缩短了系统长度并得到更好的像质。用Zemax优化得到符合设计要求的投影光学系统,给出了设计结果。光学系统性能良好,能够满足设计指标要求。

参 考 文 献

1 Yu Hu, Jiabo Gao, Jun Wang. Study of dynamic infrared scene projection technology based on digital micro-mirror device

- (DMD)[C]. *SPIE*, 2007, **6835**: 68350T
- 2 Chen Jianhua, Zhu Ming, Huang Detian. Dynamic infrared scene projection technology based upon digital micromirror device[J]. *Chinese Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(4): 325~336
陈建华, 朱明, 黄德天. 数字微镜器件动态红外场景投影技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, **3**(4): 325~336
- 3 Zhang Kai, Sun Li, Yan Jie. DMD-based infrared scene simulator design and test[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(S): 369~372
张凯, 孙力, 闫杰. 基于DMD的红外场景仿真器设计及测试[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(S): 369~372
- 4 Yu Qing, Yu Xiaofen, Liu Wenwen *et al.*. Re-studies on parallel confocal measurement system with digital micro-mirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0523005
余卿, 余晓芬, 刘文文等. 数字微镜器件用于并行共焦测量的再研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0523005
- 5 Zhou Wang. Study on enhancing dynamic range of CCD image based on digital micro-mirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 638~642
周望. 基于数字微镜器件技术提高面阵CCD相机动态范围的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 638~642
- 6 Huang Dajie, Fan Wei, Lin Zunqi. Spatial laser beam shaping using digital micro-mirror device[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502008
黄大杰, 范薇, 林尊琪. 数字微镜器件用于光束空间整形[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0502008
- 7 Chang Hong, Fan Zhigang. Optical system design of DMD-based dual-band infrared scene projection[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2007, **39**(5): 838~840
常虹, 范志刚. 基于DMD的红外双波段景象投影光学系统设计[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, **39**(5): 838~840
- 8 Chen Lingzhi, Mu Da, Li Quanyong *et al.*. Dual-color co-aperture infrared optical system design for irradiance measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 042202
陈灵芝, 牟达, 李全勇等. 双色红外共光路辐照度测量系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 042202
- 9 Yu Huaizhi. *Infrared Optical Materials*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007
余怀之. *红外光学材料*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007
- 10 Yuan Xucang. *Optical Design*[M]. Beijing: Science Press, 1983
袁旭沧. *光学设计*[M]. 北京: 科学出版社, 1983