

文章编号:1004-4213(2011)10-1521-5

中波红外景象投影光学系统消热差设计

杨乐^{1,2}, 孙强¹, 王健¹, 郭帮辉¹, 刘英¹, 姜洋^{1,2}

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:针对红外成像系统性能测试与评估的应用需求,设计了一套基于数字微镜器件的消热差的中波红外景象投影光学系统.探讨了红外视景仿真用投影光学系统的像差特性和设计方法,并对投影系统的无热化进行了分析.采用分光板和补偿板方案,解决了大相对孔径条件下投影系统的远心照明分光 and 像差平衡问题,提高了分辨率和均匀性,增大了视场.系统由远心投影光学系统和像面倾斜的柯勒照明光学系统组成,使用光学被动消热差,提高了系统的稳定性.系统焦距为255 mm, $F/\#$ 为2.6,视场 5.1° ,出瞳距200 mm,在空间频率17 lp/mm处,在 $-20^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 全温度范围内 $\text{MTF}>0.6$,接近衍射极限.本文所设计的投影光学系统具有分辨率高、均匀性好、结构紧凑等优点.

关键词:光学设计;红外仿真;景象投影;DMD

中图分类号: TN21

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114010.1521

0 引言

随着红外成像系统在警戒、侦察、地面防空和制导等众多领域的广泛使用,其性能的测试和评估也成为一项重要课题.动态红外景象投影系统能在系统工作波段内,模拟真实目标和背景在被测系统入瞳处的红外辐射空间分布和时间变化,供被测系统进行探测和识别,进而对系统的捕获概率、跟踪准确度及抗干扰能力等各项性能进行测试,为系统的研发提供可重复、可控的试验条件,利用红外景象投影的仿真测试已经成为红外检测的有效手段和性能仿真的主要趋势^[1-2].自从美国 OSC 公司首次将数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)应用于红外视景仿真器^[3],其在红外视景仿真上的比较优势就显现出来,与其他器件相比,DMD具有像元规模大、分辨率高、均匀性好等优点,已应用于美国陆军高级仿真中心(ASC)和美国波音宇航公司等建立的硬件闭环(HWIL)仿真系统中^[4],成为当前红外仿真器的一个主要发展方向.而现有的DMD型仿真器^[5-7]受光学系统的制约,尚难以充分发挥DMD的技术优势.美国 David J. Mansur^[5]等设计的焦距315 mm、 $F/3.15$ 投影系统,其视场为 3.6° ,分辨率仅为0.22 mrad,国内常虹^[6]、贾辛^[7]等设计

的系统,其分辨率则低于0.25 mrad,且存在着均匀性差、体积大等问题,其技术指标不仅无法满足新型红外成像系统的仿真测试需求,也难以与当前红外仿真与测试领域高准确度、小型化、轻量化的发展趋势相适应.

本文从DMD工作原理出发,探讨了大相对孔径、大出瞳距投影光学系统的结构设计和像差平衡方法,采用分光板和补偿板方案,解决了大相对孔径条件下投影系统的远心照明分光和像差平衡问题,确保系统结构紧凑、无遮挡.仅使用Ge、Si和ZnS等普通红外材料设计了片数少、重量轻的远心投影光学系统和像面倾斜的远心柯勒照明光学系统,系统焦距255 mm, $F/\#$ 为2.6,视场为 5.1° ,提高了分辨率和均匀性,增大了视场.使用光学被动消热差,在 $-20^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 温度范围内成像质量均接近衍射极限,提高了系统的稳定性.

1 目标模拟器工作原理

DMD是反射式数字光调制器件,利用静电原理和脉冲幅度调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术,通过控制DMD上每个像元的偏转方向及频率,从而选通光线进入系统入瞳,并形成不同亮度和对比度的图像.

基金项目:国家自然科学基金(60977001)资助

第一作者:杨乐(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为红外光学设计和信号处理. Email: yangle352@163.com

导师(通讯作者):孙强(1971-),男,研究员,主要研究方向为红外光电仪器. Email: sunqiang_sklaol@yahoo.com.cn

收稿日期:2011-03-04;修回日期:2011-04-06

目标模拟器由 DMD、DMD 驱动电路、投影和照明光学系统、照明源和照明源控制器等部分组成. 光学系统示意图如图 1. 红外图像数据通过视频处理电路和 DMD 驱动电路输入 DMD 器件. 用照明光源(黑体)均匀照射 DMD 表面, 利用 DMD 反射调制入射辐射, 产生红外热图像, 再通过准直光学系统投射到被测系统的入瞳处, 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, 以达到评价被测系统性能的目的.

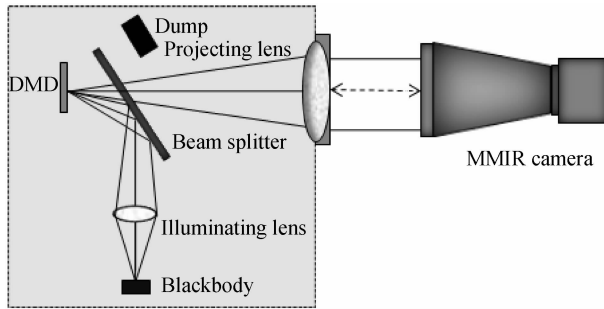


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of optical system structure

2 设计思想

2.1 光学参量确定

由系统的工作原理可知, DMD 芯片应置于投影系统的物方焦平面上, 系统出瞳处为平行光出射. 投影系统出瞳与被测系统入瞳衔接, 以有效利用辐射能量和避免不必要的杂散光进入被测系统视场. 为保证误差容限, 可要求投影系统出瞳稍大于被测系统入瞳. 同时, 使投影系统视场与被测系统视场一致. 投影系统焦距由 DMD 的尺寸和投影系统视场确定. 根据测试要求, 采用 TI 公司 0.9 英寸 XGA 格式 DMD 芯片, 确定指标如表 1.

表 1 光学设计参量

Table 1 Optical design parameters

Parameter	Value
Waveband	3~5 μm
Effective focus length	255 mm
F/#	F/2.6
Field of view	5.1°
Entrance pupil distance	200 mm
Resolution	0.1 mrad

2.2 像差分析及初始结构确定

投影系统具有大相对孔径、大出瞳距等特点, 受孔径光阑远离系统主面的影响, 主光线位置偏向透镜边缘, 由此也引起像差特性的改变. 保持系统中各个透镜组的光焦度和间隔不变, 仅改变孔径光阑与主面距离, 当孔径光阑远离系统时, 主光线入射高由 y 变为 y' , 则各初级像差系数变化为^[8]

$$\begin{cases} S_I^* = S_I \\ S_{II}^* = S_{II} + \frac{y'}{y} S_I \\ S_{III}^* = S_{III} + 2 \frac{y'}{y} S_{II} + \left(\frac{y'}{y}\right)^2 S_I \\ S_{IV}^* = S_{IV} \\ S_V^* = S_V + \frac{y'}{y} (3S_{III} + S_{IV}) + 3 \left(\frac{y'}{y}\right)^2 S_{II} + \left(\frac{y'}{y}\right)^3 S_I \end{cases} \quad (1)$$

此时, 光学系统的球差不变, 而慧差、像散通常都将增大, 场曲则近似为一个与透镜组结构无关的常量. 如果对球差完善校正, 则慧差和像散也不受光阑位置影响. 因此, 系统需重点校正球差、彗差和场曲, 且系统工作在较宽波段, 受可选红外材料限制, 轴向色差也较难校正. 同时, 为使投影系统在 $(-20 \sim 60)^\circ\text{C}$ 温度范围内都具有良好像质, 系统设计还应满足消热差要求. 因此, 系统必须同时满足总光焦度、消轴向色差和热补偿方程^[9], 即

$$\sum_1^i h_i \Phi_i = \Phi \quad (2)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum_1^i (h_i^2 \omega_i \Phi_i) = 0 \quad (3)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum_1^i (h_i^2 \chi_i \Phi_i) = a_H L \quad (4)$$

式中: Φ_i 为第 i 个透镜的光焦度; h_i 为近轴光线在第 i 面上的入射高度; Φ 为系统的总光焦度; ω_i 为第 i 个透镜的色散因子, 数值上等于材料的阿贝常量的倒数; χ_i 为光热膨胀系数; a_H 为光学系统外部结构的线膨胀系数; L 为结构的总长度. 式(3)为消色差方程, 应使光学元件的色散所引起的离焦, 即轴向色差为零; 式(4)为消热差方程, 当温度变化时, 光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦相互抵消, 从而使整个系统不产生温度离焦.

综合考虑材料特性和设计要求, 准直投影系统选用 Ge, Si 和 ZnS 等材料, 使用四片透镜, 通过消轴向色差和热补偿方程(2~4)确定密接薄透镜组的光焦度. 初始结构采用+ - + - 的光焦度分配, 以利于同时校正球差、彗差和轴向色差^[10]. 该结构形式在绝对对称的情况下, 初级像差中的垂轴像差可以自动消除, 球差和像散通过透镜弯曲的三个变量来校正, 而场曲和轴向色差则需要综合考虑玻璃组合、光焦度以及正负透镜的间距, 根据式(5)和(6)来求解.

$$\frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2} = \sum S_{IV} \quad (5)$$

$$\frac{h_1^2 \varphi_1}{\nu_1} + \frac{h_2^2 \varphi_2}{\nu_2} = \sum C_1 \quad (6)$$

孔径光阑远离系统破坏了原来的对称特性,结构也要相应地进行失对称变化.调整光焦度以校正垂轴色差,曲率半径的失对称变化用来校正彗差和畸变,而场曲依靠正透镜与负透镜之间的距离调整来校正,这样,系统的全部初级像差都得到校正,据此建立系统的初始结构.在像差校正阶段,根据像差特点调整初始结构,并结合照明光学系统和温度补偿对系统总体进行优化设计.

3 设计结果

3.1 投影光学系统设计

投影光学系统由四片透镜组成,光焦度依次为+ - + -,材料分别选用 Ge、ZnS、Si 和 Ge,所有表面均为球面,便于加工.光阑置于系统第一个透镜之前 200 mm 处,系统工作在 3~5 μm 波段,光学系统总长为 372 mm,后工作距 230 mm,焦距 255 mm, $F/\#$ 为 2.6,视场 5.1°,图 2 为系统外形结构图.

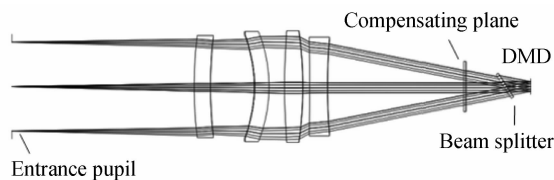


图 2 准直光学系统结构图

Fig. 2 Schematic of projection optical system

为提高目标模拟器性能,投影光学系统设计为远心光路,出射光瞳被置于无穷远,照明系统出射光瞳与之衔接,从而使投影系统主光线与光轴平行,照明光路在整个视场范围内具有一致的入射角,提高了视场的均匀性水平,且避免了非远心光路照明中引入的离心量.

由于 DMD 是反射式光调制器,照明和投影光路共用 DMD 前的空间,为了避免遮挡和压缩尺寸,在投影光路中引入半反半透镜将照明和投影光路分开.在会聚光束中引入倾斜的分光板,使得光学系统不再旋转对称,并且引入彗差、像散和横向色差等视场像差.为了校正像差,在系统中引入第二块平板作为补偿板,在与第一块平板的倾斜平面相垂直的平面内倾斜,这样,彗差和像散在很大程度上得到校正,再通过透镜前组校正残余像差.

该系统在不同温度条件下的调制传递函数曲线如图 3,在空间频率 17 lp/mm 处,在 -20 °C~60 °C 温度范围内,MTF 均大于 0.6,接近衍射极限.系统衍射能量分布曲线如图 4,在弥散斑 RMS 直径 30 μm 内,衍射能量集中度大于 80%.由此可见,系统在宽温度范围内成像质量稳定良好.

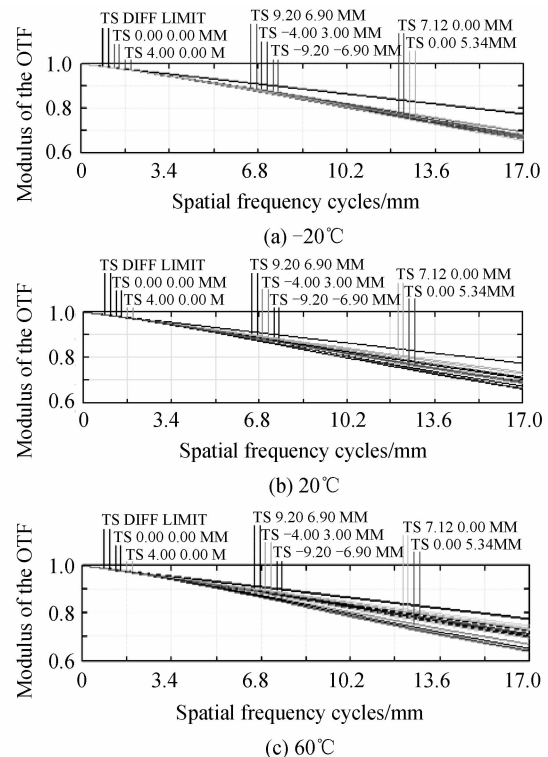


图 3 系统在 -20 °C~60 °C 的调制传递函数曲线

Fig. 3 MTF curves of the system working at -20 °C~60 °C

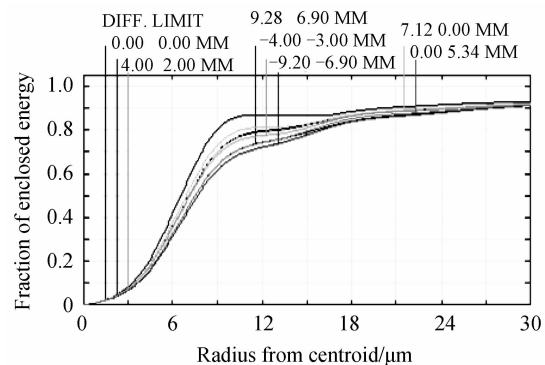


图 4 系统的衍射能量分布曲线

Fig. 4 Diffraction energy curves of the system

3.2 照明光学系统设计

照明光源选用腔式黑体,黑体温度在室温~750 °C 之间可调,最小可控温差为 0.1 K,黑体的腔口尺寸为 $\varphi 12$ mm.为了在 DMD 表面获得均匀照明,并充分利用了光源的光能,照明光路采用柯勒照明,黑体通过照明光路成像于无穷远. DMD 照明光束孔径与投影系统的光束孔径相匹配,且被照明区域应该严格限制在 DMD 有效区域,避免引入杂散光和引起 DMD 驱动板发热.照明光学系统由三片透镜组成,光学系统总长为 325 mm,后工作距 100 mm,视场为 5.1°,照明光学系统结构图如图 5. DMD 平面法线方向相对于照明光轴倾斜 24°,照明光路应保证倾斜像面的远心均匀照明.

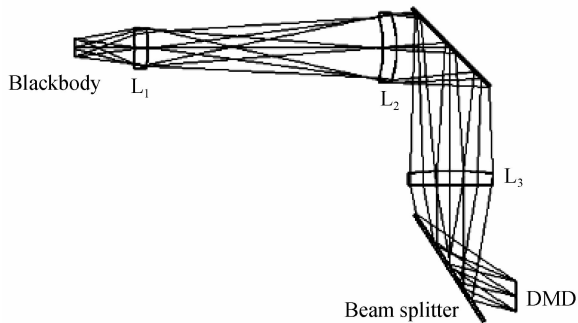


图5 照明光学系统结构图

Fig. 5 Schematic of projection optical system

黑体通过透镜 L_1 成像在 L_2 上, L_2 与 L_1 的间距为 L_2 的焦距, 同时 DMD 处在 L_3 的焦点位置上, 这样, 设在 L_1 上的孔径光阑便成像在 DMD 上, 实现远心照明. 透镜 L_3 的后工作距应保证照明系统不与投影系统发生遮挡. 在 Light tools 软件里使用蒙特卡罗法追击光线, 对照明均匀性进行评价, 图 6 为光线追击结果, 在全视场范围内照明均匀性大于 96.75%. 图 7 为景象投影光学系统总体结构图, 采用反射镜折叠光路, 系统总体封装尺寸为 $395\text{ mm} \times 210\text{ mm} \times 195\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 结构紧凑.

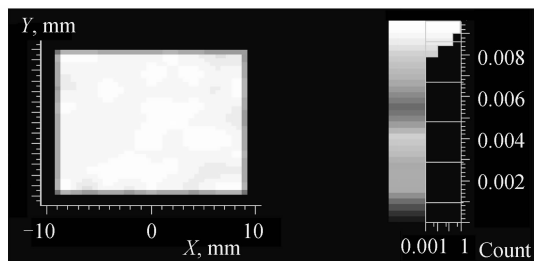


图6 照明均匀性分析图

Fig. 6 Schematic of illumination uniformity analysis

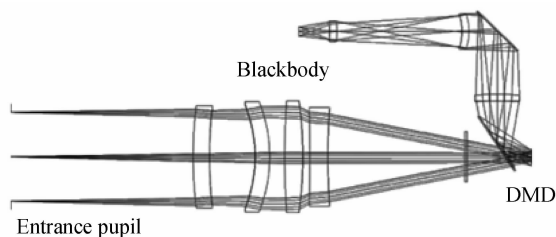


图7 景象投影光学系统总体结构图

Fig. 7 Schematic of scene projection optical system

4 结论

红外目标模拟技术是红外硬件闭环仿真和红外

成像系统测试与评估的关键技术. 为了得到更高帧频和更高空间和温度分辨率的红外景象, 设计了一套基于 DMD 的中波红外景象投影光学系统, 解决了大相对孔径、大出瞳距投影光学系统的结构设计和像差平衡问题, 以及倾斜像面的远心照明问题. 系统采用分光板引入照明光路, 使用补偿板平衡像差, 并采用光学被动消热差设计, 提高了系统的稳定性, 具有分辨率高、均匀性好、结构紧凑等优点, 可广泛应用于红外成像系统性能测试与评估.

参考文献

- [1] TOOLE B E O. Real-time infrared scene simulator (RISS) [C]. *SPIE*, 1996, **2741**: 209-218.
- [2] 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.
- [3] BEASLEY D B, BENDER M, CROSBY J, *et al.* Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [C]. *SPIE*, 2009, **7210**(721001): 1-12.
- [4] SAYLOR D A, BEASLEY D B, BRASELTON B, *et al.* Current status of IR scene projection at the U. S. Army Aviation and Missile Command [C]. *SPIE*, 2006, **4366**(147): 1-11.
- [5] DUPUIS J R, MANSUR D J, VAILLANCOURT R, *et al.* Two-Band DMD-Based Infrared Scene Simulator [C]. *SPIE* 2009, **7301**(73010E): 1-11.
- [6] CHANG Hong, FAN Zhi-gang. Optical system design of DMD-based dual-band infrared scene projection [J]. *Journal of 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.
- [7] JIA Xin, LIAO Zhi-jie, XING Ting-wen. Optical system design of dynamic infrared scene projector based on digital-micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 692-696. 贾辛, 廖志杰, 邢廷文, 等. 基于 DMD 的动态红外场景投影光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(4): 692-696.
- [8] 张以谟. 应用光学 [M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 331-334.
- [9] YASUHISA T, TORU T. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Optical Engineering*, 1996, **35**(10): 3001-3006.
- [10] LAIKIN M. Lens design [M]. 4th ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2006: 51-61.

Athermalization for Mid-wave Infrared Scene Projector Optical System

YANG Le^{1,2}, SUN Qiang¹, WANG Jian¹, GUO Bang-hui¹, LIU Ying¹, JIANG Yang¹

(1 *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: For the requirements of the infrared imaging system performance testing and evaluation applications, an athermalized mid-wave infrared scene projector was designed, based on Digital Micro-mirror Device(DMD). The aberration and design method of the optical system for infrared scene projector were analyzed, and the athermalization for the scene projector was also discussed. A splitting lens and a compensation lens were used to address the light splitting and aberration balancing problems in the illumination of the telecentric projection systems with a large relative aperture. So the resolution and uniformity were improved, and the field of view was increased. The optical system is composed of a telecentric projection lens and a Kohler illumination lens with tilted image plane. The optical passive athermalization method was introduced into the design, which improved the stability of the system. The spectral band of the system is $3\sim 5\ \mu\text{m}$, the focal length is 255 mm with a $F/2.6$ relative aperture, the field of view is 5.1° , and the exit pupil distance is 200 mm. The image quality of the system approaches diffraction limit with $\text{MTF} > 0.6$ at spatial frequency 17 lp/mm in the whole operating temperature range of $-20\ ^\circ\text{C} \sim 60\ ^\circ\text{C}$. The proposed athermalized mid-wave infrared scene projector has the advantages of high resolution, excellent uniformity, compact size and low weight.

Key words: Lens design; Infrared simulation; Scene projection; Digital Micro-mirror Device(DMD)