

基于 DMD 的红外场景仿真系统投影光路消热差设计

何永强,唐德帅,胡文刚

(军械工程学院 电子与光学工程系,河北 石家庄 050003)

摘要: 基于 DMD 的红外场景仿真系统投影光路是仿真系统的关键组成部分。设计了一种准直投影光学系统,利用不同材料热性能互补的无热化光学设计方法,得到系统的初始结构,将某一面设计为二元面,降低了系统像差,提高了光学传递性能,达到系统的消热差设计。投影光路采用折射式结构,工作在 8~12 μm 长波红外波段,焦距为 113 mm,半视场角为 4.5°,F 数为 1.3。利用 ZEMAX 软件对光学系统进行了优化,满足了仿真系统的使用要求。

关键词: 投影光路; 二元光学; 消热差; DMD; 红外场景仿真

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)09-2319-05

Optical athermalized design of infrared scene simulation system based on DMD

He Yongqiang, Tang Deshuai, Hu Wengang

(Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Projection optical system is the key component of the infrared scene simulation system based on DMD. The projection optical collimating system was designed. The initial structure of the system was obtained by use of athermal optical design method for the complementary of different thermal properties. The one side was designed to the dual surfaces, the aberration was reducing, and the optical transmission properties was improved, system athermalized designs was achieved. The refractive structure was used by projection light path, working in 8-12 μm long-wave infrared band, with focal length of 113 mm, half-field angle of 4.5° and F number of 1.3. Optical system using the software ZEMAX was optimized to meet the requirements for use of the simulation system.

Key words: projection optical; binary optics; athermalization; DMD; infrared scene simulation

0 引言

基于 DMD 的红外场景仿真系统可以用于各种红外成像系统的优化设计、性能评估以及搜索跟踪算法的测试评定等方面。具有高图像分辨率、高光学效率、全数字化控制以及高稳定性和长使用寿命等优势^[1-2]。

二元光学元件采用在波前相位上的直接操作,表面光焦度随着波长线性变化,能够有效校正系统的色差,在红外光学系统中,也兼有校正球差、彗差、像散等作用。自 20 世纪 90 年代以来,研究人员利用衍射元件的色散特性和温度特性,进行红外光学系统的消热差设计,取得了良好的效果^[3-4]。

投影光学系统是红外场景仿真的关键部分,其光学性能的优劣直接决定了红外场景仿真的效果。近几年,相继有人提出基于 DMD 的红外场景仿真系统投影光路的设计方案,但大多未考虑光学系统受温度变化产生的影响^[5-7]。文中设计了一种准直投影光学系统,采用二元光学元件进行了消热差设计,降低了系统像差,提高了传递性能,并利用 ZEMAX 光学设计软件对系统进行了优化,满足了红外仿真系统的使用要求。

1 基于 DMD 的红外场景仿真系统

基于 DMD 的红外场景仿真系统是利用美国 TI 公司研制的 DMD 芯片,通过输入二进制电信号控制微镜片的偏转以实现对入射光线的空间调制,利用 PWM 技术实现灰度图像的显示。

仿真系统由两大部分组成:投影机部分和控制计算机部分。其中,投影机部分包括 DMD 芯片、DMD 驱动电路、主板电路、照明光源和光学系统等,用于将控制计算机输出的红外场景通过投影光路投射出去;控制计算机采用普通个人计算机作为平台,通过控制软件操作,主要用于控制仿真系统的状态,设置照明光源的温度以及系统其他参数等。控制计算机与投影机之间通过 RS232 串口连接。

投影光学系统是红外场景仿真的关键组成部分,需要对其进行专门的设计,使其能够在不同的工作温度下具有良好的成像性能。

2 投影光路参数确定

以某型红外瞄准具为测试对象,其工作波段为

8~12 μm ,探测器像元为 320×240,视场角为 12°×9°,入瞳直径为 85 mm,焦距 f 为 68 mm, F 数为 0.8。

仿真系统工作在 8~12 μm 长波红外波段,出瞳直径应大于被测试对象的入瞳直径,取 90 mm,圆视场为 9°,由 $f=d/(2\tan\omega)$ 可得系统焦距为 113 mm, F 数为 1.3。系统选用 17.78 mm(0.7in)XGA(1024×768)格式 DMD 芯片,其规格为 14.22 mm×10.67 mm,入射光线与 DMD 基底法线夹角为 24°角入射时,要使投影光路不影响光线入射到 DMD 芯片的全部微镜片,投影光路与 DMD 芯片距离应不小于 40 mm。为了避免杂散光进入被测系统,投影光路最后一面距被测系统不应太远,该系统取 100 mm。

基于以上分析,确定投影光学系统指标如表 1 所示。

表 1 投影光学系统指标

Tab.1 Index of the projection optical system

Parameter	Value
Working band/ μm	8-12
Exit pupil/mm	90
FOV/(°)	9
Focal length/mm	113
F#	1.3
Entrance pupil distance/mm	40
After working distance/mm	100

3 投影光路消热差设计

3.1 消热差理论

红外光学系统设计的主要问题是透镜材料折射率随温度的变化而变化,记为 dn/dT 。锗的 dn/dT 为 $0.000\ 396/\pi$,相比之下,普通 BK7 玻璃的 dn/dT 仅为 $3.6\times 10^{-6}/\pi$ 。显然,红外光学系统的消热差设计是必要的。

目前,国内外采用的光学系统消热差方法大致分为三种,即机械被动式、电子主动式和光学被动式。机械被动式不能校正由热效应引起的像差失衡,而且需要增加机械补偿器件;电子主动式原理简单,但需要用精密的机械驱动结构来提高调节灵敏度和保持光轴稳定,降低了系统的可靠性;光学被动式利用光学材料在温度特性上的差异,通过对具有不同

折射率温度系数的光学材料进行组合,使光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦相互补偿,具有结构简单,系统可靠性好以及不需要供电等优点,综合效率最高^[8]。

3.2 消热差设计

实现光学系统消热差,系统结构参数应该同时满足光焦度、消热差和消色差方程。

光焦度方程为:

$$\frac{1}{h_i} \sum_{i=1}^k h_i \Phi_i = \Phi \quad (1)$$

消色差方程为:

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

消热差方程为:

$$\left(\frac{1}{h_i \Phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 \chi_i \Phi_i) = a_H L \quad (3)$$

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,阿贝常数 $v^{\#}$ 的定义为 $v^{\#} = \frac{n_{c\lambda} - 1}{n_{i\lambda} - n_{h\lambda}}$, $n_{c\lambda}$ 为中心波长的折射率; $n_{i\lambda}$ 为段波长的折射率; $n_{h\lambda}$ 为长波长的折射率; χ_i 为第*i*个透镜线膨胀系数; 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。

在红外光学系统设计过程中,光学材料的选择非常重要^[8]。表 2 列出了常用红外光学材料的物理性能参数。

表 2 常用红外材料的物理性能(8~12 μm)

Tab.2 Physical property of infrared material (8-12 μm)

Material	Refractive index(10 μm)	$\frac{\partial n}{\partial T} (10^{-6})$	$a_9 (10^{-6})$
Ge	4.003 1	396	6.1
Si	3.417 9	160	4.2
ZnSe	2.406 5	60	7.6
ZnS	2.200 2	50	7.9
GaAs	3.277 9	150	5.9
CdTe	2.6750	85	5.9

表中, $\partial n/\partial T$ 为温度折射率系数; a_9 为线膨胀系数。

投影光学系统采用折射式结构,投影光路类似于倒置的望远光路,采取逆向设计,DMD 芯片放置于投影系统的像方焦平面上,平行光线通过透镜成像于 DMD 芯片。由于该系统具有较小视场,较大的相对孔径及较长的工作距离,同时满足系统光焦度、消热差、消色差方程,系统需要采用三片以上透镜组合而成。综合考虑红外光学材料的物理性能,以及透镜制造成本,系统选用 Ge、ZnSe 和 ZnS 作为透镜材料。由于红外材料折射率较大,界面反射损失大,需要在透镜表面镀增透膜,以提高镜片的光学透过率,通过在透镜表面镀增透膜,使得在 3~12 μm 红外波段,具有大于 95%的单向透过率^[9]。

3.3 初始结构确定

通过分析比较^[5-7,10],系统选用折射式结构设计。计算方程(1)~(3),得出系统初始结构参数,利用 ZEMAX 软件得到系统的初始结构,如图 1 所示。

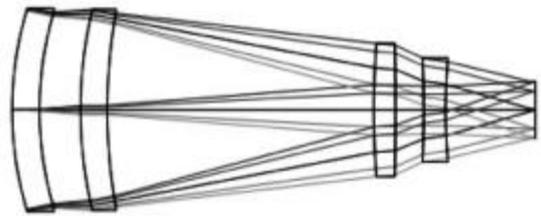


图 1 系统初始结构

Fig.1 Initial configuration of the system

投影系统由四片透镜组成,透镜材料从左至右分别为 Ge、Ge、ZnS、ZnSe,光焦度依次为+--+。

4 性能优化及分析

分析投影光路初始结构的像差和 MTF 曲线图可知,该系统存在较大的球差和畸变,MTF 曲线不理想。

利用 ZEMAX 软件将初始结构第三面类型设置为二元面,即将 Standard 改为 Binary2,并在 EDE 对话框中进行优化参数设置。通过操作数 MTFT 优化系统的子午调制传递函数、操作数 EFFL 限定系统的有效焦距、操作数 REAY 和 DIMX 对系统的像差和畸变进行优化、操作数 DMLT 和 TOTR 对镜头的最大口径和总长度进行优化等。经过优化,得到光路结构图如图 2 所示。

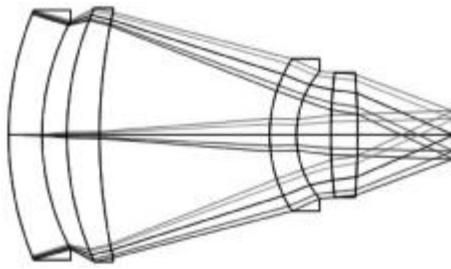


图 2 投影系统结构图

Fig.2 Structure of the projection system

优化后的投影光路总长 162 mm, 系统焦距为 113 mm, 出瞳直径为 91.4 mm, 图 3 为利用 ZEMAX 软件仿真得到投影系统的像差图, 系统像差比不使用二元面时得到明显改善, 成像质量较好。

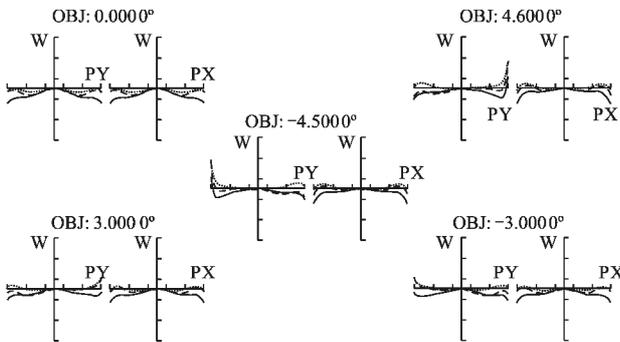


图 3 投影系统的像差图

Fig.3 Ray aberration of the projection system

系统在不同温度时的 MTF 曲线如图 4 所示, 系统衍射能量分布曲线如图 5 所示。分析可知, 空间频率为 20 lp/mm, 在 -20~60 °C 温度范围内, 投影系统具有较好的 MTF 曲线, 尤其是采用二元面设计, 使得系统在较宽的温度范围内保持稳定的性能, 温度变化对系统成像的对比度影响不大。系统接近衍射极限, 衍射能量集中度大于 0.8, 在较宽温度范围内系统成像质量稳定良好。

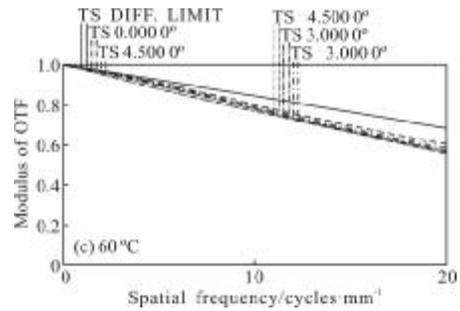
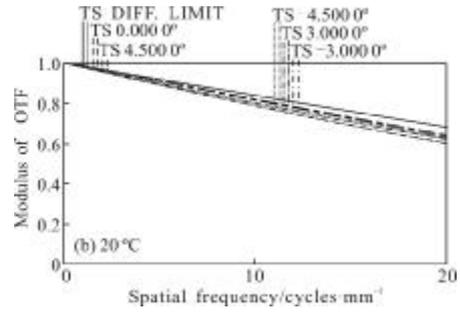


图 4 系统在 -20~60 °C 时的 MTF 曲线

Fig.4 MTF curves of the system working at -20~60 °C

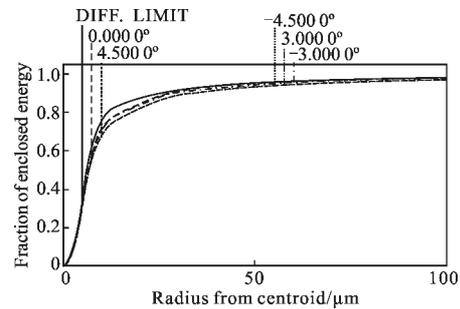


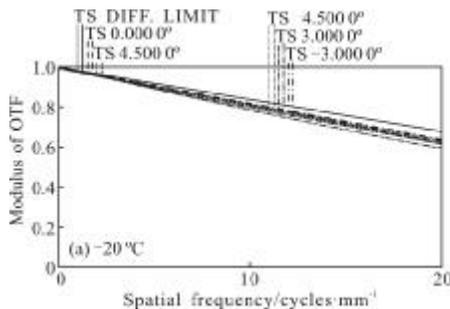
图 5 衍射能量分布曲线

Fig.5 Diffraction encircled energy

5 结论

通过选择透镜材料、计算结构参数得出投影光学系统的初始结构, 通过将第三面设置为二元面, 有效校正了系统的像差以及热差, 提高了成像质量, 利用 ZEMAX 软件对系统进行了优化, 在 -20~60 °C 温度范围内, 光路具有较好的 MTF 曲线, 能量透过率较高。

文中设计的投影光学系统结构简单、体积小、性能良好, 在较宽的温度范围内, 具有良好的成像效果, 可以广泛应用于红外场景仿真系统, 为仿真系统提供高清晰度图像提供了保证。



参考文献:

- [1] Chang Hong. Research on DMD-based dual band infrared imaging guidance simulation system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
常虹. 基于DMD的双色红外成像制导仿真系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [2] Li Zhuo, Qian Lixun, Li Ping, et al. Technologies of dynamic infrared scene projection and its new development [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 377-383. (in Chinese)
李卓, 钱丽勋, 李平, 等. 动态红外场景生成技术及其新进展[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 377-383.
- [3] Meng Jianqi. Diffractive optics and its application in infrared imaging system [J]. *Aero Weaponry*, 2006 (6): 38-41. (in Chinese)
孟剑奇. 衍射光学及其在红外成像系统中的应用[J]. *航空兵器*, 2006 (6): 38-41.
- [4] Zhang Yinan, Wang Zhaoqi, Sun Qiang. Athermalized design of extensive temperature range for infrared hybrid refractive-diffractive objective [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(3): 311-314. (in Chinese)
张铁楠, 王肇圻, 孙强. 折/衍混合红外物镜的超宽温消热差设计[J]. *中国激光*, 2005, 32(3): 311-314.
- [5] Jia Xin, Liao Zhijie, Xing Tingwen, et al. Optical system design of dynamic infrared scene projector based on digital-micromirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 692-696. (in Chinese)
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.
- [6] Guan Yingzi, Yang Liang. Optical system design of dynamic infrared scene projector based on DMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 245-248. (in Chinese)
关英姿, 杨亮. 数字微镜阵列动态红外景象投射器光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 245-248.
- [7] Geng Kang. Optical design of DMD based on infrared simulator [J]. *Optical Instruments*, 2010, 32(4): 25-28. (in Chinese)
耿康. 基于DMD的红外仿真光学系统设计[J]. *光学仪器*, 2010, 32(4): 25-28.
- [8] Zhao Xiuli. *Infrared Optical System Design* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986. (in Chinese)
赵秀丽. *红外光学系统设计*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [9] Rice Joseph P, Neira Jorge E, Michael Kehoe, et al. DMD diffraction measurements to support design of projectors for test and evaluation of multispectral and hyper-spectral imaging sensors[C]//SPIE, 2009, 7210: 0D-1-0D-9.
- [10] Lei Yuanping. Long-wave infrared optical subsystems design [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
雷媛萍. 长波红外系统光学设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2011.