

doi: 10.7690/bgzd.2013.12.009

长波红外景象模拟器投影光学系统无热化设计

李全勇¹, 李向天², 康玉思³, 牟达¹

(1. 长春理工大学光电工程学院, 长春 130022; 2. 中国兵器工业第五八研究所生产经营处, 四川 绵阳 621000;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130031)

摘要: 基于数字微镜器件 (digital micromirror device, DMD) 的红外景象模拟器能够为红外系统性能测试与评估提供先进的手段。根据 DMD 的工作原理, 确定了以分光棱镜来连接照明系统和投影系统的红外景象模拟器总体方案。探讨了红外景象模拟器投影光学系统的像差特性、光学设计和无热化的设计方法, 设计了一套工作在长波红外 8~12 μm, F# 为 2.8, 视场角为 3° 的投影光学系统, 并对该系统在 -40~60 °C 之间进行光学被动式无热化设计。结果表明: 该系统在所要求的温度范围内, 光学传递函数均接近衍射极限, 成像质量满足系统的设计要求, 并具有辐射能量损失小、分辨率高、结构紧凑等特点。

关键词: 红外景象模拟器; 投影光学系统; 长波红外; 光学设计; 无热化

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Athermalization for Projection Optical System of Long-Wave Infrared Scene Simulator

Li Quanyong¹, Li Xiangtian², Kang Yusi³, Mu Da¹

(1. School of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science & Technology, Changchun 130022, China;
2. Department of Production & Operation, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China;
3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics & Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China)

Abstract: The infrared scene simulator based on DMD provides the advanced means for the performance testing and evaluation of the infrared system. According to the working principle of DMD, the general scheme of infrared scene simulator is determined, that the illumination system is connected to projection system with the dichroic prism. The aberration properties and optical design and athermal design method of the projection optical system are discussed. A projection optical system is designed, which working waveband is 8~12 μm long wave infrared band, F# is 2.8, the field of view is 3°. The projection system was athermalized by optical passive athermal design method at -40~60 °C. The design result indicates that the optical transfer functions are close to the diffraction limit in the required temperature range, the image quality meet the design requirements, and the system has the characteristics with small loss radiation energy, high resolution and compact structure.

Key words: infrared scene simulator; projection optical system; long wave infrared band; optical design; athermalization

0 引言

红外景象模拟器能模拟不同气象条件、不同辐射背景下、不同目标的红外热图像, 为红外探测和传感设备的检测与评估提供精确可控、可重复的试验条件, 使得在研制阶段或者使用阶段实现对其性能的全面测试与评估, 不断优化设计结果, 可以降低系统的开发成本和周期、人力和物力以及测试成本。基于数字微镜器件 (digital micromirror device, DMD) 的红外景象模拟器具有较高的空间分辨率、较高的帧频、没有坏点、成像均匀性好、体积较小等优点, 具有广阔的应用前景。笔者从基于 DMD 红外景象模拟器的工作原理出发, 探讨了大相对孔径投影光学系统的结构设计和像差平衡方法, 采用分光棱镜的方案, 避免了投影系统和照明系统光轴重叠的情况, 提高了景象模拟器的稳定性^[1-3], 确

保了系统结构紧凑、无遮挡。

1 数字微镜式红外景象投影技术

1.1 DMD 的工作原理

数字微镜式红外景象投影技术是以 DMD 作为红外景象生成器件的红外投影技术, 从物理原理上讲, 是对红外辐射进行反射调制而得到红外景象的。DMD 是一种新型的、全数字化的平面显示器件, 由许多个可倾斜的铝合金微正方形反射镜片 (简称微镜) 按行、列紧密地排列在一起, 每个微镜对应着生成一个像素, 并且都有 ±12° 的偏转角分别对应“开”态和“关”态。微镜偏转 +12° 时反射光束几乎全部通过投影系统; 微镜偏转 -12° 时反射光束偏离投影系统, 被吸收装置吸收; 平态时, 微镜水平放置, 投影镜头置于像素微镜的中垂线上。根据需控制微镜的开关状态, 从而实现图像显示。

收稿日期: 2013-07-20; 修回日期: 2013-10-01

基金项目: 总装“十二五”预研基金项目“××××信号产生技术”

作者简介: 李全勇(1977—), 男, 河北人, 硕士, 讲师, 从事现代光学测试技术和光学设计研究。

1.2 DMD 红外景象投影系统

基于 DMD 的红外景象模拟器整体结构如图 1 所示。其工作原理为：由计算机图像生成器产生的图像数据，经数字光处理视频处理电路和 DMD 的驱动电路输入到 DMD 器件来控制每个微镜的翻转；黑体辐射源经过照明光学系统均匀照明 DMD，利用 DMD 反射功能来调制入射的红外辐射来产生红外图像。由于 DMD 的反射光束和入射光束之间是有一定的小角度，为了避免照明系统的结构与投影系统的结构发生重叠，利用分光棱镜将入射到 DMD 上的入射光束和由 DMD 反射的反射光束分开，相比利用半反半透镜进行分光，减少了光能损失，系统能量利用率更高、结构更紧凑。生成的红外景象通过分光棱镜至投影系统投射到被测单元，产生的红外景象与真实目标和背景在探测器上的辐射能量空间分布一致^[4-5]。

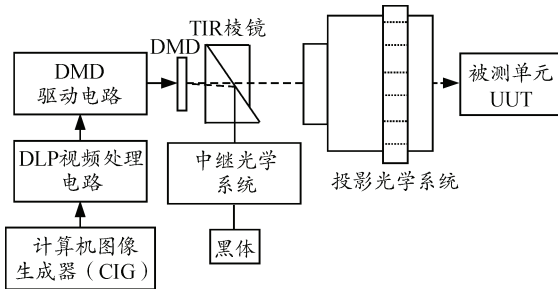


图 1 红外景象模拟器工作示意图

2 红外投影光学系统的设计

2.1 光学参数的确定和初始结构的选取

投影光学系统是红外景象模拟器中的关键部件，其成像质量的好坏决定了整个模拟器的性能。其设计参数一般由被测系统的特性参数和 DMD 器件的参数决定。由模拟器的工作原理可知，景象生成器件实际上是投影光学系统的物，应将其置于投影光学系统的物方焦平面上，此时由像方出射的为平行光。而设计时，可以采用反向设计的方法，将投影系统倒置，相当于平行光入射，而 DMD 则放置在投影物镜的像面上。

为提高出射光利用率，使其完全覆盖被测系统入瞳，投影光学系统的出瞳口径稍大于被测系统的入瞳口径。综合考虑能量的损失、衍射效应、像差校正等因素，确定以下参数：工作波段，8~12 μm；焦距，200 mm，相对孔径，1:2.8；DMD 分辨率，1 024×768；像元尺寸，10.8 μm；视场角：3°。

常用的红外波长约为可见光的 5~20 倍，可用于透射红外波段的材料很少，具有高折射、低色散等特点，且成本相对较高。锗、硫化锌和硒化锌是

常用于 8~12 μm 长波红外波段的红外材料。红外光学系统成像质量受几何像差、衍射影响，与可见光相比，像差校正困难，尤其是色差的校正。考虑折射式系统相比反射式系统具有同轴度好、结构简单等优点^[6]。因此，系统初始结构选择折射式。

2.2 无热化设计

同时，为了满足模拟器的使用环境要求，使投影系统在 -40~60 °C 温度范围内都具有良好像质，系统设计还应满足无热化要求。光学被动式消热差技术以其性能好、可靠性强、结构简单等优点，在光学系统的无热化研究中被广泛关注。

假设由 k 个薄透镜组成的光学系统的总光焦度为 φ ，组成系统的薄透镜的光焦度、热差系数和色差系数分别用 φ_i 、 T_i 和 $C_i (i=1,2,3,\dots,k)$ 表示。光学系统的色差只与光学材料有关而与机械材料无关，为实现消色差无热化方程组中的色差系数应为 0，即 $C=0$ ；而系统的热差包括了光学热差和机械热差，为满足消热差条件，二者应相互补偿。当物面位于无穷远时（平行光入射），系统满足式 (1)~式 (3) 3 个条件即可实现光学被动式消热差^[7]：

$$\sum_{i=1}^k h_i \varphi_i = \varphi \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^k h_i^2 C_i \varphi_i / \varphi = C = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^k h_i^2 T_i \varphi_i / \varphi = T = \alpha_m L \quad (3)$$

式中： h_i 为第 i 个透镜上近轴光线的归一化入射高度； α_m 为镜筒材料的热膨胀系数； L 为镜筒总长度。

式 (1) 表示系统的总光焦度方程，式 (2) 表示系统的消色差条件，式 (3) 为系统的消热差条件，3 个方程构成了光学系统的无热化方程组。求解该方程组之前首先需要确定各透镜的热差系数 T 和色差系数 C ，即首先要进行透镜材料的选择，再根据无热化方程组求解各透镜的光焦度，进行光焦度分配，最后在保持光焦度基本不变的条件下对光学系统的像差进行平衡校正。

3 设计结果分析

经过分析和比较，综合考虑材料的特性和设计要求，投影物镜选用硒化锌 (ZnSe)、锗 (Ge) 和硫化锌 (ZnS) 3 种常用的红外材料，有利于色差和热差的校正。通过像差分析和被动式消热差公式确定透镜的光焦度，初始结构采用“+”“-”“-”“+”组合的形式。光阑放置在第 3 片透镜的后面有利于垂轴像差的校正。在红外景象模拟器中，分光棱镜位于 DMD 和投影光学系统之间，光线由 DMD 反射后再

经过分光棱镜的全反射棱镜到达投影系统。因此，在对投影系统进行优化时需要将分光棱镜一起考虑，将棱镜展开为一等效平行平板放在像面前面进行优化，一起校正像差。

按照投影光学系统的设计指标，结合像差理论，利用光学设计软件 ZEMAX 对初始结构进行优化设计。第 1 片是材料为硒化锌 (ZnSe) 的正透镜。光焦度为正，使光束先开始会聚。第 2 片是材料为锗 (Ge) 的球面负透镜，用来补偿第 1 片正透镜产生的球差、彗差和色差，但仍然存在较大的正球差和负轴向色差以及少量的正彗差。第 3 片是材料为硫化锌 (ZnS) 的球面负透镜，其光焦度为负，用以平衡第 1 片正透镜和第 2 片负透镜所剩余的球差、彗差和色差。前三片透镜选择 3 种不同的材料，以满足校正色差的要求和热补偿的要求。第 4 片是材料为硒化锌 (ZnSe) 的正透镜，光焦度为正，其前表面是凹球面，后表面是凸球面，使光束进一步会聚。在优化的过程中要注意限制棱镜和 DMD 之间的间隔不能太小，要为 DMD 的外围封装保留一定的空间，方便光学元件加工完成后进行装配和调整。

经过反复优化，更改半径、厚度和空气间隔，发现系统的像质仍然不能满足要求。为了提高成像质量、简化结构，考虑到红外材料非球面的加工和检测技术已经发展得很成熟了，没有添加镜片而是引入非球面进行系统设计。添加非球面时，尽量将非球面应用在透镜的凸面上以方便进行面形检测，同时也要考虑材料加工的可行性。优化过程中发现第 1 个面和第 8 个面非常敏感，对成像质量的影响非常严重，因为第 8 个面的口径小于第 1 个面，更利于非球面加工，因此把第 8 个面设为偶次非球面。再次进行反复优化，得到偶次非球面的二、四次系数分别为 $6.398E-004$ 、 $1.856E-008$ 。

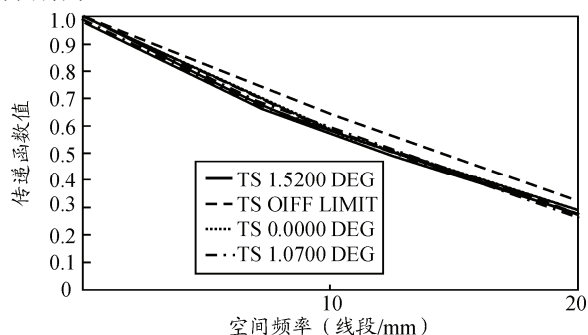


图 2 20 °C 投影系统 MTF 曲线

最终的设计结果，以光学传递函数 MTF 作为像质评价的标准，图 2、3、4 为红外投影系统在 20、-40、60 °C 时的 MTF 曲线图。从这些曲线中可以看出：所设计的红外双波段无热化投影系统在 -40~60 °C

的温度范围内，都能保持良好的光学性能，传递函数曲线没有出现明显的下降，满足红外景象模拟器使用要求。

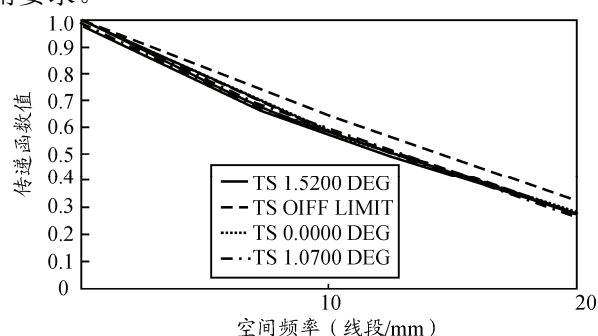


图 3 -40 °C 投影系统 MTF 曲线

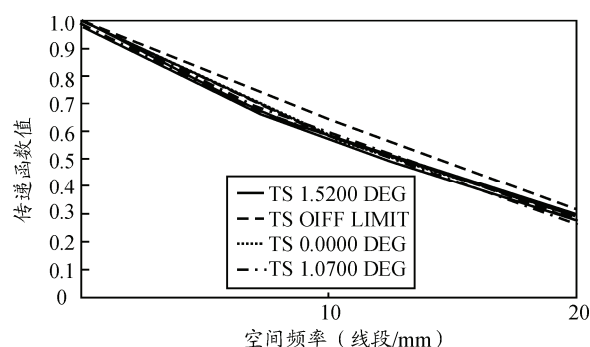


图 4 60 °C 投影系统 MTF 曲线

4 结束语

笔者设计的长波红外景象模拟器投影系统，解决了大相对孔径长波红外系统的结构设计和像差平衡问题。利用分光棱镜将照明系统光轴和投影系统光轴分离，避免了能量损失，使结构也更加紧凑。整个投影系统采用光学被动无热化设计，并且在 -40~60 °C 的温度范围内都具有良好的成像质量，提高了模拟器的稳定性和可靠性，可广泛应用于红外探测和传感设备的检测与评估中。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 王安, 周存宝. 基于直觉三角模糊数向量投影的多属性决策方法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(1): 23-25.
- [4] Brett Beasley D., Bender M., Crosby J., et al. Dynamic IR scene projector based upon the digital micromirror device[C]. Proceedings of SPIE, 2001, 4366: 96-102.
- [5] Beasley D B, Bender M W, Crosby J, et al. Advancements in the Micromirror Array Projector Technology[C]// Proceedings of SPIE, 2003, 5092: 71-82.
- [6] 余怀之. 红外光学材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 46-120.
- [7] 胡玉禧, 周绍祥, 相里斌, 等. 消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1386-1391.