

基于DMD的红外场景仿真系统光学引擎设计

蹇毅, 潘兆鑫, 于洋

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:针对DMD(Digital Micromirror Device)器件是针对可见光波段设计,直接用于红外波段会遇到问题,提出了一种远心投影光学引擎架构,包括投影光学系统和照明光学系统.该光学引擎采用柯勒远心照明架构,并引入一片场镜来分离投影和照明光束.这种光学引擎结构紧凑、照明均匀、光能利用率高.

关键词:红外仿真;数字微镜阵列(DMD);光学设计

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

Design of optical engine for infrared scene simulation system based on DMD

JIAN Yi, PAN Zhao-Xin, YU Yang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy Sciences of China, Shanghai 200083, China)

Abstract: DMD(Digital Micromirror Device) is originally designed for visible light spectrum, so it brings lots of problems when DMD is operated under infrared optics. To solve these problems, we provide a telecentric projection optical engine architecture, including projection optical system and illumination optical system. This optical engine employs Kohler telecentric illumination structure, and a field lens is introduced to separate the illumination beams and projection beams. This optical engine has good performance with compact structure, uniform lighting and high energy utilization efficiency.

Key words: infrared scene simulation, digital micromirror device(DMD), optical design

PACS: 42.79.Ag, 42.15.Eq

引言

红外成像制导技术已成为光学精确制导发展的主流技术之一^[1].红外制导系统的研发需要大量的测试工作,外场测试是对红外系统实用性最真实可靠的测试,然而外场实验条件往往不可控.研发过程中,需要控制某些条件变量,来测试系统对另一单一条件变量的反应,这一点外场测试很难做到.而且外场测试成本高,测试效率不高.实验室仿真是一般外场测试实验的有效替代方法.实验室仿真可以提供可控的测试条件,实验结果可重复、成本低、效率高.半实物红外场景生成技术是一种实验室仿真技术,在实验室模拟目标和背景的红外辐射特性,为被测试的红外成像系统提供红外目标和背景的图像源^[2-4].

1 DMD 红外场景生成原理

半实物红外场景仿真系统是一个闭环仿真系统.该闭环系统工作流程为:

(1) 仿真计算机根据各类算法产生红外场景图像的数据,并将这些数据发送至红外场景生成器;

(2) 红外场景生成器接受仿真计算机生成的仿真图像数据,并将这些图像数据生成为物理上的光学场景图像;这些光学场景图像投射系统与待测系统光学成像系统准直,使图像成像到待测系统中;

(3) 待测系统接受到仿真系统产生的光学图像,并做出对应的系统参数调整(例如制导系统的飞行姿态);调整后的参数反馈到仿真计算机,仿真计算机根据这些参数重新生成仿真图像数据;

收稿日期:2013-03-17,修回日期:2014-05-31

Received date: 2013-03-17, revised date: 2014-05-31

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2011AA7031002G);国家十二国防预研项目(41101050501)

Foundation items: The National High Technology Research and Development Program (2011AA7031002G), The National Five Year National Defense Pre-research Project Development Program(41101050501)

作者简介(Biography):蹇毅(1986-),男,湖北武汉人,博士研究生,研究方向为红外光学系统设计. E-mail: jianyi@mail.sitp.ac.cn

过程(1)~(3)不断重复,实现整个红外场景仿真测试的过程.其中红外场景生成器是整个红外仿真系统中重要的核心组件,它决定着生成光学场景图像的质量.

红外场景生成技术主要有三种类型^[5]:直接红外辐射类型、可见光图像转换类型和红外辐射调制类型.其中红外辐射调制型器件的基本思想是将均匀的红外辐射照明,通过空间光调制器件的一系列“开”“关”等操作,调制成所需的红外场景图像.这种类型的红外场景生成器一般具有高帧频、高分辨率的特点.

DMD (Digital Micromirror Device) 是 Texas Instruments 公司的一种 MEMS (Micro-electromechanical Systems) 器件.从功能上来说是一种空间光调制器件. DMD 器件上集成了成千上万个非常精细的正方形反射镜片.每个微小反射镜在工作状态下有两种稳态,对应的是数字存储电路中“0”“1”两种状态,也对应的是光开关的两种状态.最新的 0.7XGA 规格的 DMD 器件,每一个微镜的尺寸是 $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$,两种稳态的翻转角度是 $\pm 12^\circ$. DMD 光开关调制原理如图 1 所示,均匀照明光束以 24° 入射角照射到 DMD 微镜,如果微镜处在 $+12^\circ$ 状态,则照明光束反射进入正上方的投影系统的入瞳中;如果微镜处在 -12° ,则照明光束反射到投影系统入瞳之外.

DMD 器件是反射式调制,对调制光波长没有选择性;它使用纯数字信号处理技术,控制灵活;再加上其高帧频、高可靠性,使之非常适用于红外场景生成系统.

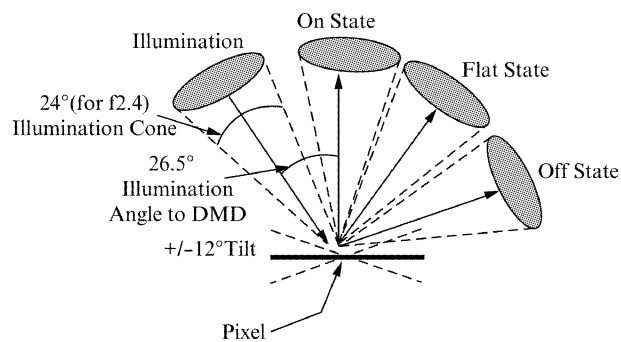


图 1 DMD 光开关调制原理
Fig. 1 Principle of light modulation by DMD

2 基于 DMD 的红外场景产生器光学引擎设计

DMD 器件本身不产生辐射,所以基于 DMD 的

红外场景产生系统必须要有照明系统,而且照明效果对最终仿真质量影响非常大^[6]. DMD 的光学引擎分为投影光学系统和照明光学系统两部分.照明光学系统的作用是将红外光源发生出的辐射均匀地照明 DMD 器件表面,而投影系统的作用是将 DMD 成像到待测红外系统的焦平面上.本文提供的引擎架构方案是针对中波红外 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) 设计的.

2.1 红外光学窗口更换

DMD 在商业上是用做可见光投影仪的光调制器,然而 DMD 器件是完全密封的,其原生的封装光学窗口是针对可见光波段透过率优化的,对中波红外和长波红外是不透的. Type-A 类型的 DMD 的原生封装的光学窗口用的是 Corning7056 材料,其透过波长范围是 $250 \sim 2700 \text{ nm}$. 原装窗口可以针对紫外,可见光和近红外分别来优化镀膜,镀膜后的透过率曲线见图 2.

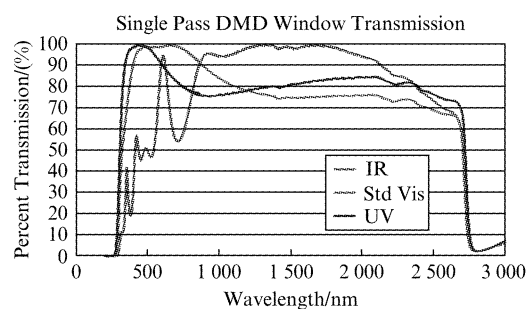


图 2 DMD 窗口透过率
Fig. 2 Transmittance of DMD's window

要利用 DMD 调制中长波红外光,必须将其更换为透红外的光学材料. DMD 是精密器件,其封装环境要求较高,如果操作不当,容易造成 DMD 的微镜损坏和微镜铰链失效^[7].

理论上能透红外的光学材料都可以作为 DMD 窗口的更换材料;但是考虑到为了方便调试和观察,窗口材料最好能够同时可透可见光;作为窗口材料,对硬度、耐腐蚀性等也有一定要求.蓝宝石 (Sapphire) 材料在 4.23 nm 波长的折射率为 1.664,在 $0.17 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的透过率在 80% 以上,硬度高达 1370 kg/mm^2 ,密度为 3.98 g/cm^3 ,常温下热膨胀系数 $5.6 \times 10^{-6} / \text{K}$ ^[8]. 因此蓝宝石材料可以满足本文设计的中波 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) 红外场景产生系统的光学窗口需求,最终采用蓝宝石 (Sapphire) 材料作为 DMD 更换红外窗口材料. DMD 是在完全密封的状态下工作的,为了防止封装透气,需要将窗口玻璃的接触面

(与金属保护罩接触)进行金属化处理. DMD 二次封装时需要在干燥无尘的环境下进行,最终更换好红外窗口的 DMD 见图 3.

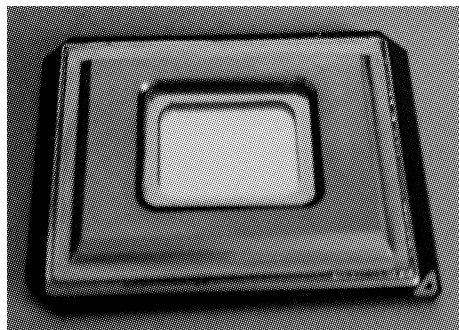


图 3 更换成红外窗口的 DMD
Fig. 3 DMD with infrared window

2.2 照明和投影架构设计

DMD 的微镜尺寸为 $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$. 为了充分利用 DMD 器件分辨率,投影系统的衍射极限需控制在单个微镜的尺寸范围内. 根据衍射极限公式,在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,投影系统的相对孔径 $F/\#$ 最小为 2.8,孔径角约为 10° . 而目前 DMD 的微镜的翻转角度为 12° ,为了得到最佳图像对比度,照明光线的主光线为 24° . 从图 4 可以看出,照明光束和投影光束只有 4° 的角度分离空间. 如果考虑到光学镜头余量和光学系统镜筒厚度,照明光学系统和投影光学系统会在空间上重叠.

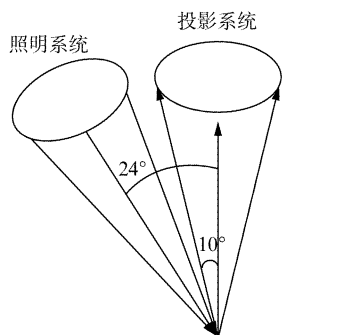


图 4 照明系统和投影系统的微小分离角度
Fig. 4 Narrow separation angle between illumination system and projection system

一般情况下,可以用 TIR (Total Internal Reflection) 棱镜分开照明光路和投影光路,如图 5 所示^[9]. 然而对于红外波段,红外光学材料的折射率较高,所以全反射临界角小,导致能透射的光束孔径角也小,会限制投影系统的相对孔径,对于 TIR 棱镜

分光设计也很不利. 红外材料的光吸收也比较大, TIR 棱镜内的光路较长,且 TIR 棱镜胶合材料对于红外的吸收较大,会吸收掉较多的能量. 所以在红外波段下,不适宜用 TIR 棱镜分离照明光学系统和投影光学系统.

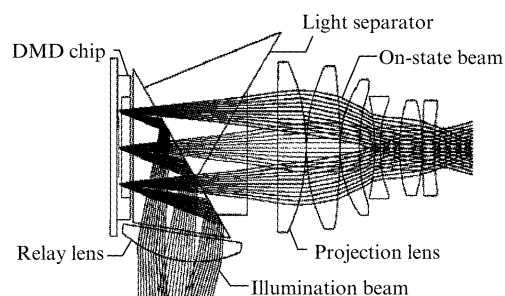


图 5 TIR 棱镜分离照明光束和投影光束
Fig. 5 Illumination beams and projection beams are separated by TIR prism

引入一种大场镜架构,解决投影光束和照明光束分离问题. 整体结构见图 6. 本架构里有一片场镜在 DMD 正上方. 它同时在照明光学系统和投影光学系统里产生光焦度;其镜片中心与 DMD 中心和投影光束光轴在一条直线上. 系统的照明光源采用硅碳棒,通过椭球反光碗和匀光棒的作用,产生均匀的光分布. 匀光棒内部多次反射光,在出口处形成均匀光分布,在匀光棒入口处形成一个虚拟光源阵列^[10]. 照明系统(包含场镜作用)采用柯勒照明方式,将匀光棒入口处的虚拟光源阵列通过照明透镜成像到投影系统的入瞳处,将匀光棒出口处成像到 DMD 表面.

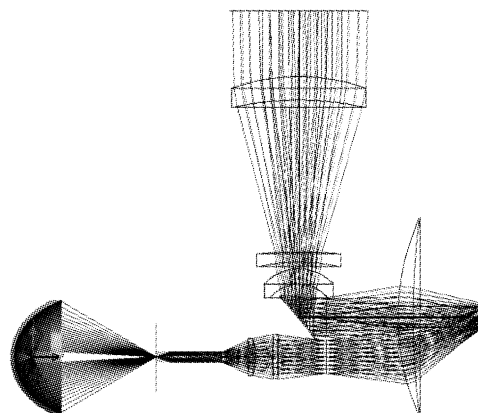


图 6 照明和投影整体架构
Fig. 6 Architecture of optical engine

系统中,照明系统孔径光阑和投影系统孔径光阑都放在同一平面上,孔径光阑到 DMD 之间只有

一片场镜. 将两个孔径光阑位置正好落在场镜的焦面上, 可以同时满足照明系统像方远心和投影系统物方远心的条件. 照明透镜组使匀光棒入口处与照明系统孔径光阑保持物象共轭, 可以让虚拟光源阵列最终成像到无限远处, 匹配投影系统入瞳, 实现柯勒照明条件. 所以这种架构下, 照明透镜要反复设计, 使之能同时保持两对共轭关系.

投影光学系统对像质要求较高, 不宜采用镜片偏心设计; 而照明光学系统对像质没有太高要求^[11], 所以设定照明系统偏心设计. 场镜对照明系统光路是偏置的, 照明光线以 24° 照射到 DMD 表面. 利用作图法分析场镜的光路, 见图 7. 照明角 θ 为 24° , h 为两个光阑中心之间的距离, d 为光阑的直径, f 为场镜的焦距. 为了满足光孔转接原则, 两个孔径光阑的直径应相等. DMD 的位置在场镜的另一个焦面上.

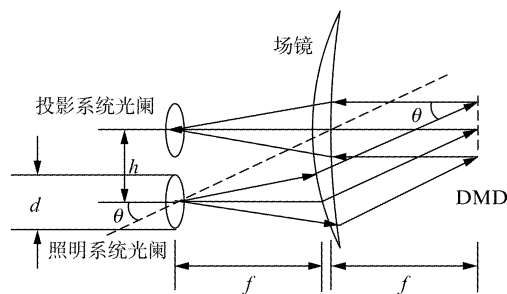


图 7 场镜分离照明光学和投影光束示意图
Fig. 7 Schematic diagram of separation by field lens

图 7 中的光线均为主光线, 在孔径光阑的中心相交. 将场镜当做薄透镜来分析, 焦面的点发出的光透过薄透镜, 方向与该点和主点的连线(图 7 中的虚线)平行. 所以从图中容易得出 h 和 θ 的几何关系:

$$h = f \cdot \tan\theta \quad (1)$$

照明系统和投影系统的孔径光阑在一个平面上, 所以光阑的直径须小于光阑中心之间的距离:

$$d < h \quad (2)$$

投影系统的相对孔径为 2.8, 由于 DMD 在场镜焦面上, 光锥进入通过场镜后变为平行光. 从图则得出投影系统的孔径光阑直径:

$$d = f/2.8 \quad (3)$$

比较式(1)和式(3), 发现可以满足式(2)的条件, 两个孔径光阑不会相互影响.

场镜是整个系统架构的重要元件, 它同时参与照明光学系统和投影光学系统, 所以照明系统

和投影系统需要同时一起设计. 对于投影光学系统, 由于孔径光阑在场镜的焦面上, 投影光束经过光阑时成平行光, 所以投影镜头(不含场镜)可以参考望远系统的设计方法来设计; 投影光学系统, 成像质量是最重要的性能指标, 但不能一味追求像质而引入过多的镜片来平衡像差, 因为红外镜片透过率较低, 镜片数量增多会降低投影系统透过率. 透过率低会造成仿真系统的对比度下降, 导致仿真动态范围下降. 所以设计投影系统, 需要平衡像质和透过率.

对于照明光学系统, 除了要满足光扩展量对光源匹配, 保证没有光能被拦截, 最重要的是照明的均匀性. 场镜虽然同时在照明光学系统和投影光学系统中, 但为了保证投影系统的成像质量, 一般放在投影系统中来优化设计. 在照明系统中, 由于场镜的偏心设置, 将匀光棒出口完美成像到 DMD 表面比较困难. 照明系统对像差要求不高, 只要保证柯勒照明的条件, 适当地优化就能得到均匀的照明效果.

3 设计结果

按照上一节论述的方法, 设计了一套 DMD 的照明投影光学引擎. 照明透镜系统采用的放大率为 2, 投影系统焦距 90 mm, 相对孔径 2.8, 视场角 12° . 照明均匀性是整个架构的关键指标. 用 Zemax 光学软件非序列模式进行光线追迹仿真, 得到 DMD 表面照明效果, 如图 8~10 所示.

从仿真结果可以看出系统的照明均匀度接近 90%, 照明角分布对称, 并集中在 24° .

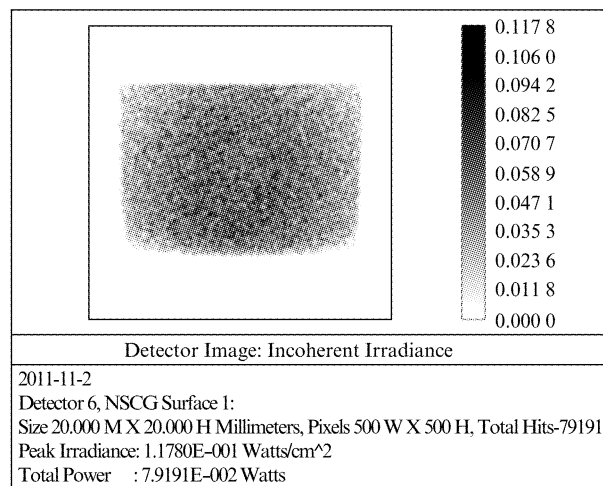


图 8 DMD 表面空间照明分布
Fig. 8 Ray tracing simulation for illuminance on DMD

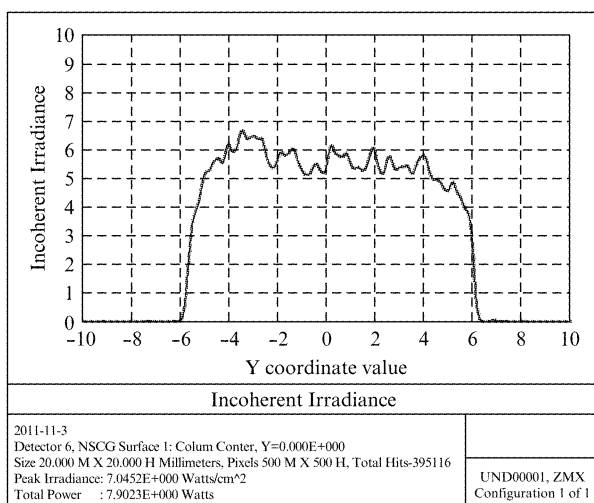


图 9 DMD 表面照度一维截面图

Fig. 9 Radiance at DMD in position space as cross section column

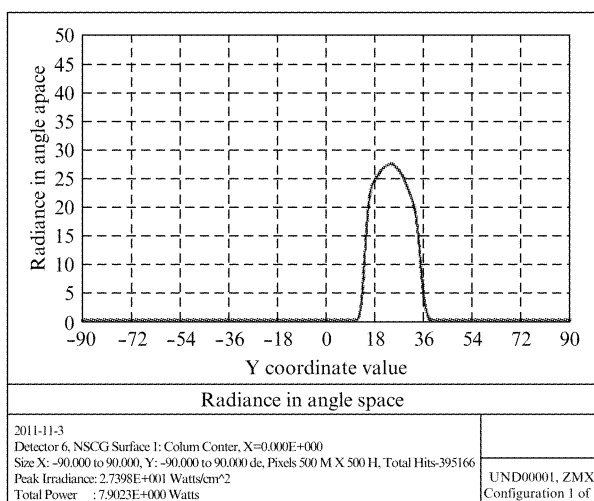


图 10 DMD 照明光线角度分布图

Fig. 10 Radiance at DMD in angle space as cross section column

4 结论

设计了一种场景架构的 DMD 中波红外仿真器光学引擎,利用场镜有效避免了投影光学系统和照

明光学相互遮挡的问题;采用柯勒远心照明方式,能得到均匀的空间照明和一致的照明孔径角;没有使用 TIR 棱镜,避免了光能损失,能量利用率高.在此架构上,若投影系统设计成连续变焦镜头,可以满足不同待测系统的视场角匹配.

References

- [1] ZHANG Li, TIAN Yi, LI Qi. Research status and prospect of dynamic infrared scenes project[J]. *Infrared and Laser Engineering* (张励,田义,李奇. 动态红外场景投影器的研究现状与展望. *红外与激光工程*). 2012, **41**(6): 1424 - 1430.
- [2] LI Zhuo, QIAN Li-Xun, LI Ping, et al. Technologies of dynamic infrared scenes projection and its new development [J]. *Infrared and Laser Engineering* (李卓,钱丽勋,李平,等. 动态红外场景生成技术及其新进展. *红外与激光工程*). 2011, **40**(3): 378 - 383.
- [3] LI Zhuo, LI Ping. Review of dynamic infrared scenes projection technology[J]. *Infrared and Laser Engineering* (李卓,李平. 动态红外图像生成技术综述. *红外与激光工程*). 2006, **35**: 283 - 294.
- [4] Zhou Q. Dynamic scene simulation technology used for infrared seeker[J], *Proc. of SPIE*, 2009, **7383**: 73832W - 1.
- [5] JIA Xin, LIAO Zhi-Jie, XING Ting-Wen, et al. Optical system design of dynamic infrared scenes projector based on digital-micromirror device[J]. *Infrared and Laser Engineering* (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. *红外与激光工程*). 2008, **37**(4): 693 - 696.
- [6] Pape D R, Carter III J A. Digital Mirror Device infrared scene projector[J], *Proc. of SPIE*, 1994. **2223**: 75.
- [7] Haskett B M, Patrick O' Connor J, Liu J W. Method and apparatus for forming a DMD window frame with the molded glass[P], US Patent No: US7476961B2, 2009.
- [8] Klocek P. *Handbook of infrared optical materials*[M]. Marcel Dekker, Inc, 1991: 197 - 201.
- [9] Chang C M, D. Shiel H P. Design of illumination and projection optics for projector with single digital micromirror device[J], *Applied Optics*, 2000, **39**(19): 3202 - 3208.
- [10] LV Yong, ZHENG Zhen-Rong. Analysis for optical extend in light-pipe illumination system[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. (吕勇,郑榛荣. 方棒照明系统的光学扩展量传递分析. *北京航空航天大学学报*). 2004, **30**(6): 569 - 571.
- [11] Winston R, Minano J C, Benitez P. *Nonimaging optics* [M]. Elsevier Academic Press, 2005: 159 - 180.