

文章编号:1001-5078(2016)11-1369-06

· 光电技术与系统 ·

基于棱镜的红外目标模拟器光学系统研究

刘 收¹, 刘宁敏²

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041; 2. 中国民航科学技术研究院, 北京 100028)

摘 要:针对某型装备测试仿真用中波红外目标模拟器,研制配套透过率高、空间均匀性好、结构紧凑的高性能红外光学系统,以满足模拟器总体设计指标和具体使用需求。根据 DMD 核心器件红外光调制工作原理,采用了基于 TIR(全内反射)棱镜的中继光学子系统,从 DMD 转动夹角的限制出发,利用光学全反射定理,采用最小的角度空间设计,用一对光学棱镜使照明系统入射的光线与 DMD 反射的光线分开,在衍射混合式红外成像光学子系统设计匹配下,该光路系统相比反射式光路镜组结构紧凑,相比透射式棱镜方式能量透过率高。在经过光路设计仿真验证的基础上,开展了光学机械设计和研制加工及测试,最终红外光学镜组成功应用到红外目标模拟器研制中,满足了模拟器总体指标体系要求和用户需求,取得了良好效果。

关键词:红外目标模拟器;红外光学系统;全内反射棱镜;数字微镜器件

中图分类号:TN21;O43 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.11.014

Research on optical system of infrared target simulator based on TIR prism

LIU Shou¹, LIU Ning-min²

(1. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co. Ltd, Beijing 100041, China;
2. PBN Flight Procedure Design Center Technology Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: To improve the performance of infrared dynamic scene target simulator, an infrared optical system based on TIR prism was developed. According to the principle of infrared target simulator based on DMD, relay optical subsystem based on TIR is used. Because of the limit of DMD rotation angle, a pair of optical prisms is used to separate incident light of illuminating system and reflected light of DMD according to total reflection theory and smallest angle space design. Due to the match of refractive - diffractive hybrid infrared imaging optical subsystem, optical system has the characteristics of compact structure and high transmittance. Through optical design simulation, the feasibility of optical system was verified. This infrared optical system has been applied to infrared target simulator successfully, and it meets the requirement of infrared target simulator.

Key words: Infrared target simulator; infrared optical system; total internal reflection prism; DMD

1 引 言

装备测试用红外动态目标模拟技术是红外成像精制导装备、前视红外(FLIR)系统等红外成像装备

的半实物模拟与动态性能指标测试中的关键技术,也是其研制和保障的重要手段。基于 DMD (Digital Micro-mirror Device, 数字微镜阵列器件) 的红外动

基金项目:总装预研项目(No. 51317020104)资助。

作者简介:刘 收(1979 -),男,高工,硕士研究生,主要从事装备综合测试与故障诊断方向的研究。E-mail: liushou010@163.com

收稿日期:2016-03-24; **修订日期:**2016-05-04

态目标模拟器系统以全数字化、高图像质量等优越的性能,在红外成像系统半实物仿真性能测试中得到越来越多的关注^[1]。

针对红外成像制导武器测试仿真需求,研制高性能红外动态目标模拟系统,以解决该类型武器装备测试保障或半实物仿真试验中的动态红外目标模拟技术问题。可有效缩短其研制周期,节省试验经费,大幅提升作战效能,具有显著军事效益和经济效益^[1-2]。而红外光学系统是红外动态目标模拟器的核心组成部分之一,其性能设计对模拟器的工作波段、口径、对比度、均匀性、分辨率、畸变、图像锐度和视场范围等重要性能指标以及对模拟器整机的体积、重量和构型都有直接影响。

本文旨在针对某型装备测试仿真用中波红外目标模拟器,研制配套透过率高、空间均匀性好、结构紧凑的高性能红外光学系统,以满足模拟器总体设计指标和具体使用需求。

2 基于 DMD 的红外目标模拟器光学系统总体设计

2.1 基于 DMD 的红外目标模拟器工作原理

红外动态目标模拟器是动态红外场景生成硬件平台中的核心设备^[2]。如图1所示为基于数字微镜芯片(DMD)的模拟器的工作原理框图。其工作原理是,由计算机图像生成器 CIG 产生图像数据,通过 DLP(数字光源处理系统)视频处理电路和 DMD 驱动电路输入 DMD 器件,用微型黑体辐射源做光源均匀照射 DMD 器件,利用 DMD 反射调制入射辐射产生红外热图像。生成的红外场景通过光学准直投影系统投射到被测对象 UUT 的入瞳处,使红外场景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。

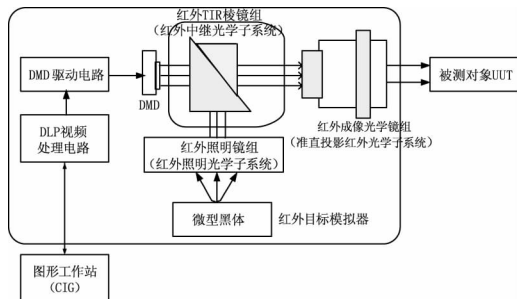


图1 基于 DMD 的红外目标模拟器工作原理框图

Fig. 1 Principle diagram of infrared target simulator based on DMD

2.2 红外目标模拟器光学系统功能组成

模拟器采用 1024×768 像元、0.7" DMD, 光窗更换后作为红外光调制核心器件。研制集成微型高温腔式黑体作为红外光源, 并以一定的光束角, 将 DMD 微镜阵面均匀照亮, 同时其温度稳定可调。红外目标动态成像光学系统针对 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 红外波段设计。

采用基于 TIR 棱镜的红外光学系统设计方案, 其原理框图如图2所示。外成像系统将 DMD 芯片的图像按照光学系统的比例投射至被测红外成像装备的入瞳处。DMD 芯片置于投影系统的物方焦面上, 出射的光为平行光。模拟器投影系统的出瞳应与被测装备入瞳衔接, 以有效地利用辐射能量, 同时避免不必要的杂散光进入被测装备光学系统的视场。

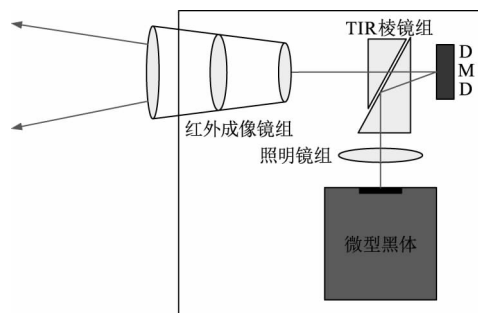


图2 基于 TIR 棱镜红外光路系统原理框图

Fig. 2 Principle diagram of infrared light system based on TIR prism

3 红外目标模拟器光学系统设计仿真

3.1 基于全内反射棱镜(TIR 棱镜)的红外照明及中继光学系统设计仿真

红外动态目标模拟器采用 DMD 作为光学调制器, 受 DMD 的反射特性限制, 入射至 DMD 的入射光束和出射至投影系统的光束有 $\pm 12^\circ$ 的夹角。这在一定程度上影响了照明系统和成像投影系统的结构和位置, 还会造成光束的部分重叠^[3]。为了使照明系统的投影系统的系统结构不发生重叠, 且结构更紧凑和系统利用率更高, 采用分光系统将入射和反射光束分开。如采用普通半透半反平板或半透半反棱镜, 则仅在照明光路处损失的能量就达到 75%。本系统利用了全反射原理, 并设计了特殊棱镜, 使照明光路对能量的损耗降至最低^[4]。

TIR 棱镜又称全内反射棱镜, 是利用光学材料对光束的全反射和透射特性实现分离光路系统内照明光束和成像光束的重要光学元件。它由两块棱镜直接贴合而成, 贴合面间留有极薄的空气层。光路

如图3所示,棱镜的材料选用了 CaF_2 。来自黑体辐射面的光线经硅透镜会聚后进入全反射棱镜,经全反射后照射 DMD,然后经全反射棱镜和补偿棱镜透射进入投影光学系统。补偿棱镜用于补偿投影光束经全反射棱镜透射产生的光程差,使得照明光学系统对投影光学系统的影响相当于在投影光路中加入了一块 CaF_2 平板^[5]。

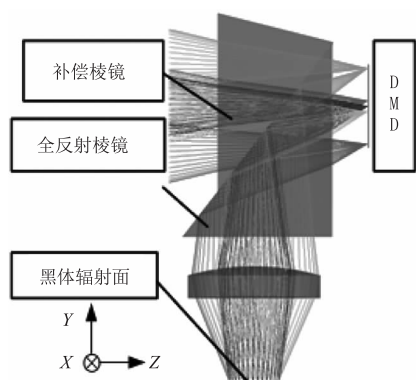


图3 照明光学系统光路仿真图

Fig.3 Optical path simulation of infrared illumination system

照明系统中的棱镜光路分析如图4所示,图中仅对来自黑体的零度视场 $4\text{ }\mu\text{m}$ 波长的光线进行了分析。光线垂直入射面1,在面2发生全反射,再经面3折射,经 DMD 反射垂直入射面3,穿过面2和面4,由面5垂直出射进入投影光学系统。

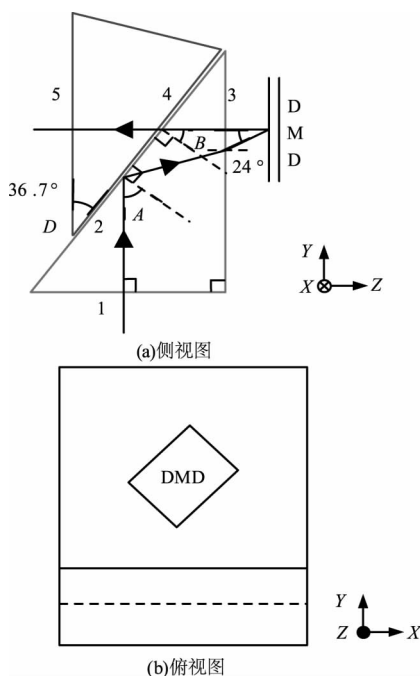


图4 TIR 棱镜内光线分析图

Fig.4 Relative illumination curve of $\angle D = 36.7^\circ$

角 A 应大于全反射角,角 B 应小于全反射角。

红外光线由 CaF_2 入射进入空气时,全反射角 C 计算公式如下: $C = \arcsin(1/n)$, $4\text{ }\mu\text{m}$ 时 CaF_2 折射率为 1.40963, $C_{4\text{ }\mu\text{m}} = \arcsin(1/1.40963) = 45.187^\circ$; 所以:入射角只有大于 45.187° 时, $4\text{ }\mu\text{m}$ 的光线才能全部发生全反射,入射角只有小于 45.187° 时才能不发生全反射。即图4中角 B (与角 D 相等) 应小于 45.187° ; 角 A 应大于 45.187° 。

以上只是对 0° 视场角 $4\text{ }\mu\text{m}$ 波长的主光线进行了分析,实际情况中光线具有一定孔径角,且光线不是单一波长。需要在光学设计软件中根据全波段及全视场进行分析,微调棱镜的角度参数。经过光学设计软件仿真,设计 $\angle D = 36.7^\circ$, 此时面1可垂直于 DMD 所在平面,且黑体发出的零度视场角主光线可以垂直入射面1。图5给出了在设计的棱镜角度下,经棱镜出射的黑体辐射能量的相对照度。由图可以确定,在棱镜 $\angle D = 36.7^\circ$ 的条件下,出射的辐射照度,其能量均匀且无损失。

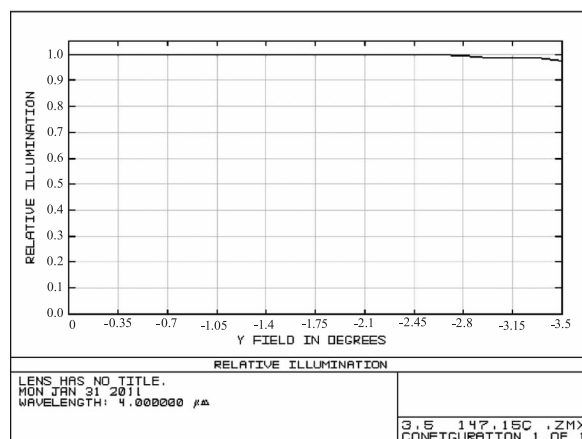


图5 $\angle D = 36.7^\circ$ 时相对照度曲线

Fig.5 Relative illumination curve of $\angle D = 36.7^\circ$

本文定制红外黑体光源是腔式黑体,处于一定状态下时能以一定强度向腔体外辐射红外光线,并通过柯勒式照明光路进行光源汇聚准直。照明范围必须覆盖整个 DMD 投影显示芯片,红外动态目标模拟器中采用对角线为 0.7 in 的 DMD 投影显示芯片,显示比例 4:3,其尺寸为 $0.56\text{ in} \times 0.42\text{ in}$, 即 $14.224\text{ mm} \times 10.668\text{ mm}$ 。图6所示为照明效果仿真,从图中可以看出图像能量分布均匀,达到了 90% 以上。

3.2 基于折衍混合式红外成像光学系统设计仿真

根据红外目标模拟器投影物镜光学参数要求,设计红外成像光学系统指标体系。0.7 in DMD 投

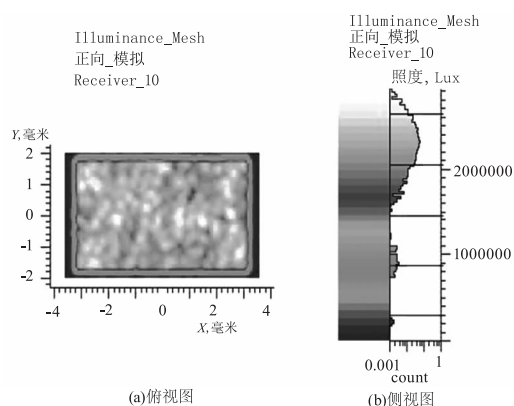


图6 红外照明系统仿真结果图

Fig. 6 Simulation results of infrared lighting system

影显示芯片的单元像素尺寸为 $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$, 分辨单元像素尺寸所对应的最大分辨频率为: $f_{13.68 \mu\text{m}} = 1000 / (2 \times 13.68) = 36.55$ (lp/mm), 因此规定成像系统设计中 MTF 最大可分辨频率 40 lp/mm。在 5 lp/mm 处, MTF 值不低于 0.8; 在 15 lp/mm 处, MTF 值不低于 0.5; 在 40 lp/mm 处, MTF 值不低于 0.2。

设计选用中波红外的常规材料单晶硅和锗, 在设计软件 ZEMAX 中进行像差平衡和优化。由于系统焦距较长, 入瞳距离远, 仅由初始结构的 4 片透镜很难消除全视场的球差和色差, 为了不增加系统的元件数目和体积, 采用非球面和衍射面校正系统像差, 同时缩小系统轴向尺寸和口径大小。经过折衍混合光学系统的优化设计, 平衡了各级像差, 达到了较好的设计结果。系统最终光路如图 7 所示。

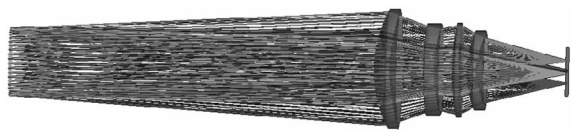


图7 红外成像光学系统光路仿真图

Fig. 7 Optical path simulation of infrared imaging system

图 8 给出了调制传递函数曲线仿真。从图中可以看出, 在 37 lp/mm 空间频率处, 四个视场的子午和弧矢调制传递函数都达到 0.4 以上, 而投影系统分辨率要求在 37 lp/mm 空间频率处调制传递函数达到 0.2 以上, 有效分辨出每个像素, 发挥了 DMD 芯片高分辨率的效能, 投影系统在工作时预计都能完全满足投影系统技术指标的要求。

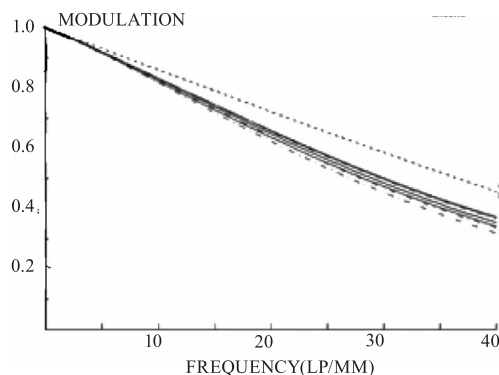


图8 投影系统各视场的传递函数

Fig. 8 Transfer function of each field of view of the projection system

4 红外目标模拟器光学系统研制及测试试验

4.1 红外目标模拟器光路总体设计仿真

红外光学系统总体光路仿真如图 9 所示, 红外光线照射 DMD 芯片表面后由成像镜组成像至无穷远处以便与被测探测器(红外成像装备)相对接, 系统出瞳光阑位置在成像镜组第一面透镜前表面 300 mm 处, 出瞳大小 55 mm, 足以满足现有大多数红外成像装备的测试。

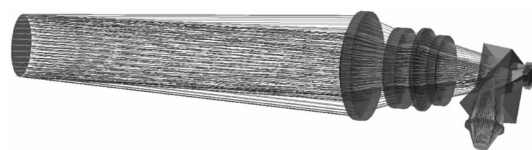


图9 红外目标模拟器整体光路仿真图

Fig. 9 Infrared target simulator integrated optical path simulation

在投影镜头成像过程中, 由于存在着光学像差, 物体上同一点发出的光线在像面上形成的是一个分布在一定范围内的弥散图形, 称之为点列图。点列图忽略了光学系统中的衍射效应, 但在投影镜头这种大像差光学系统中, 点列图中点的分布近似地代表了点像的能量分布, 因此可以用点的密集程度来衡量光学系统的成像质量。在模拟结果图 10 中, 五幅图分别为各视场处(中心位置、子午弧矢的四个边界点)的点列图分布, 单幅图像的尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 由图中可以看出点列图中弥散斑的主要能量汇聚于像素尺寸内。

4.2 红外目标模拟器光学系统研制及测试

在对红外目标模拟器光路及光学系统设计仿真的基础上, 开展了红外光学系统镜组的光学机械结构设计, 并完成各红外光学镜组的研制, 实物如图 11 所示, 包括红外成像镜组、红外照明镜组和 TIR 棱镜中继光学镜组等。

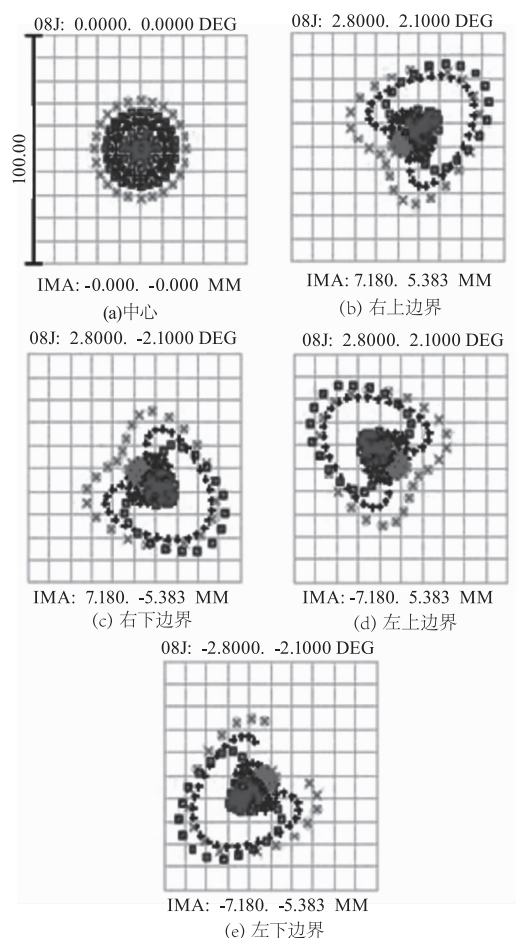


图 10 红外目标模拟器成像光学系统点列图

Fig. 10 Image optical system of infrared target simulator



图 11 红外目标模拟器光学镜组件实物图

Fig. 11 Optical mirror group of infrared target simulator

为验证光学系统研制效果,采用美国 OPTICS 公司 Optest MTF 传函测试仪对红外投影系统的成像效果进行了测试,MTF 传递函数仪的测试结果显示,红外投影系统成像清晰,分辨率高,具有良好的

显示效果。传函测试结果如图 12 所示。

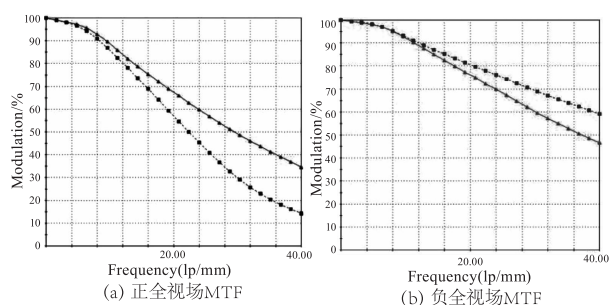


图 12 不同视场情况下红外光学系统调制传递函数 MTF 测试结果

Fig. 12 MTF test results of infrared optical system under different field of view

4.3 红外目标模拟器光学系统的应用

基于测试合格的红外光学系统研制了某型中波红外目标模拟器,整机结合红外目标场景生成软件,与某型中波制冷凝视红外成像装备进行了光路耦合及对接测试验证试验。红外目标模拟器整机实物和模拟器输出的标准红外图像实物如图 13 所示。从图中可以看出模拟器结构紧凑、输出图像分辨率高、清晰度高,取得了良好的应用效果。

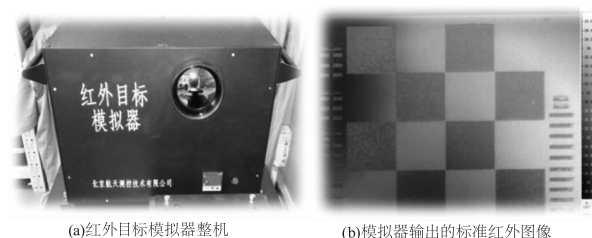


图 13 红外光学系统应用效果

Fig. 13 Application effect of infrared optical system

5 结 论

本文针对基于 DMD 的红外动态目标模拟器研制,提出了一种基于全反射棱镜(TIR 棱镜)的红外光学系统设计方案,并对红外成像镜组、照明及中继镜组进行了设计仿真,仿真结果满足总体设计要求,达到了良好效果。相比传统反射式红外光学系统大幅缩小了体积,相比传统透射式红外光学系统提高了能量透过率,红外光学系统设计有利于高性能小体积的红外目标模拟器整机研制。最终完成了红外光学系统镜组的研制和调试,测试结果满足设计要求,已成功应用于某型红外装备测试用红外动态目标模拟系统研制中,验证试验表明红外光学系统设计满足使用要求,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] LIU Shou, YANG Yang. Based on digital micromirror device (DMD) dynamic infrared scene projection[C]. Proceedings of the Symposium on general testing and fault diagnosis techniques for general assembly, 2012. (in Chinese)
刘收, 杨旸. 基于数字微镜器件(DMD)的红外动态场景生成系统[C]. 总装通用测试与故障诊断技术研讨会论文集, 2012.
- [2] ZHANG Kai, SUN Siliang. Design of infrared dynamic scene target simulator system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, (3): 12–16. (in Chinese)
张凯, 孙嗣良. 红外动态场景目标模拟器系统设计[J]. 红外与激光工程, 2011, (3): 12–16.
- [3] WANG Xiaoli, FENG Qibin, LÜ Guoqiang, et al. Design of relay system used in solid volumetric true 3D display [J]. Advanced Display, 2010, (10): 24–27. (in Chinese)
王小丽, 冯奇斌, 吕国强, 等. 固态体积式真三维立体显示器中继系统设计[J]. 现代显示, 2010, (10): 24–27.
- [4] JIA Xin, LIAO Zhijie, XING Tingwen, et al. Optical design of splitter prism on digital-micromirror device-based infrared scene projector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, (6): 366–368. (in Chinese)
贾辛, 廖志杰, 邢廷文, 等. 基于DMD的动态红外投影系统分光系统设计[J]. 红外与激光工程, 2008, (6): 366–368.
- [5] CHEN E Z, Liang P Z. DMD dynamic infrared scene projection technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(4): 331–334.