

高帧频 DMD 红外景象仿真设备电路与光学系统设计

张颖新,王云萍,侯军燕

(北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094)

摘要: 针对红外半实物仿真试验中 DMD 红外景象仿真设备存在的时序同步、高帧频显示、光学匹配等使用问题,设计与研制了一套能够与常见被测红外凝视成像设备匹配使用的基于 DMD 的红外景象仿真设备。首先提出了合理可行的同步延时驱动方案和显示控制方案,设计与研制了同步信号处理电路和驱动电路,实现了仿真图像的时序同步和高帧频显示;其次根据常见被测红外凝视成像设备的光学参数,进行了光学系统设计与仿真,研制了照明光学系统和投影光学系统,实现了与常见被测红外凝视成像设备光学匹配。检测结果表明:该设备能够与多种被测红外凝视成像设备在时序上保持同步,并实现光学匹配,输出的仿真图像帧频可达 300 Hz、最大可模拟温度为 160℃、最小可模拟温差为 0.03℃、最大图像对比度为 0.7、空间非均匀性优于 1%,已在红外半实物仿真试验中发挥了巨大作用。

关键词: 红外仿真; 红外景象生成; DMD; 关键技术; 检测

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0404003

Circuit and optical system design for high frame rate DMD infrared scene simulation equipment

Zhang Yingxin, Wang Yunping, Hou Junyan

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To improve the application question of the timing synchronization, high frame rate display and optical match caused by infrared scene simulation equipment based on DMD in the hardware-in-the-loop simulation test, a novel infrared scene simulation equipment based on DMD which can match application with several kinds of common infrared staring imaging system was designed and constructed. Firstly, the scheme of synchronization delay driving and the scheme of display control were proposed. The synchronization signal processing circuit and the driving circuit were designed and developed, the timing synchronization and high frame rate display were realized. Then, according to parameters of optical system of several kinds of common infrared staring imaging system which will be tested, the lighting optical system and the projection optical system were designed, developed and simulated, optical match with several kinds of common infrared staring imaging system was realized. Test results indicate that the equipment can realize timing synchronization and optical match between the equipment and several kinds of common infrared imaging system, the frame rate of the simulation image is 300 Hz, the maximum

收稿日期:2016-08-09; 修订日期:2016-09-10

作者简介:张颖新(1981-),男,助理研究员,硕士,主要从事光电仿真试验技术和光电对抗试验总体技术方面的研究。

Email:zhangyingxin8110@163.com

simulation temperature of the simulation image is 160 °C, the minimum simulation temperature of the simulation image is 0.03 °C, the maximum contrast of the simulation image is 0.7, the nonuniformity of the simulation image is 1%, the equipment play a key role in a large number of hardware-in-the-loop simulation tests.

Key words: infrared simulation; infrared scene generation; DMD; key techniques; test

0 引言

红外景象仿真设备是红外半实物仿真试验系统的关键设备,可以为被测红外设备提供信号环境,能够在时间和空间上模拟目标和背景的红外辐射,常见的红外景象仿真设备包括红外 CRT、红外电阻阵列、红外液晶光阀、微镜阵列(Digital Micro-mirror Device, DMD)等。红外 CRT 的原理与电视相似,但存在帧频低、分辨率低、图像闪烁、靶屏需要制冷等缺点,已逐渐被其他技术取代;红外电阻阵列对生产工艺要求较高,图像均匀性不好,目前国内只能生产中小规模的红外电阻阵列;红外液晶光阀可以将可见光图像转换为红外图像,但受材料的影响,存在帧频低、动态范围小等缺点,其应用也受到一定的限制;DMD 通过对入射红外光进行反射调制而得到红外图像,具有分辨率高、帧频高、动态范围大、均匀性好、全数字控制等优点,已成为红外景象仿真技术的主要发展方向^[1-2]。

根据工作原理,基于 DMD 的红外景象仿真设备仅适用于凝视型红外成像设备,而红外探测器只在其积分时间内才能响应,所以二者首先应保持时序同步,并且 DMD 的成像时间应小于红外探测器的积分时间即 DMD 需高帧频显示。此外,不同被测设备的光学系统参数也有很大差别。目前,很多被测设备都是型号产品,半实物仿真试验中都存在时序同步、高帧频显示、光学匹配等使用问题。为此,基于 DMD 的红外景象仿真设备都是根据被测设备的时序控制电路和光学系统进行专门研制的,很难与其他被测设备匹配使用,严重制约了 DMD 的通用性和使用范围。

为解决以上难题,在电子学方面,设计了合理可行的同步延时驱动方案和显示控制方案,研制了同步信号处理电路和驱动电路;在光学设计方面,根据常见被测设备的光学参数,进行了光学设计与仿真,

研制了照明光学系统和投影光学系统。最终,研制了一套能够实现时序同步、高帧频显示、并可以与常见红外凝视成像设备光学系统匹配的基于 DMD 的红外景象仿真设备。

1 设备工作原理

1.1 DMD 工作原理

DMD 采用微机械加工方式,通过铝溅射工艺在硅片上形成了一组二维微镜阵列。每个微镜都可以看成是一个独立的光开关,通过施加控制电压,都可以沿对角线实现正负两个角度的快速转动,从而控制入射光线的反射角度,如图 1 所示。当微镜顺时针偏转 θ 时,反射光线全部进入投影镜头,仿真图像中出现亮点;当微镜逆时针偏转 θ 时,反射光线与法线的夹角为 4θ ,反射光线不能进入投影镜头,仿真图像中出现暗点^[3-4]。

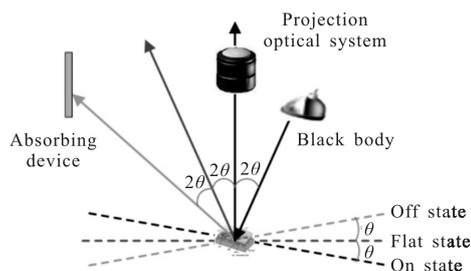


图 1 DMD 光开关原理示意图

Fig.1 Schematic map of DMD optical switching principle

1.2 设备组成

基于 DMD 的红外景象仿真设备由 DMD 微镜阵列、照明黑体、照明光学系统、投影光学系统、半透半反镜、同步信号处理电路、驱动电路等部分组成^[5-6]。外部的红外数字图像通过同步信号处理电路和驱动电路输入到 DMD,照明黑体发射的红外光通过照明光学系统和半透半反镜反射后均匀地照明 DMD,经反射调制产生红外仿真图像,透过半透半

反镜和投影光学系统后, 将红外仿真图像投射到被测红外凝视成像设备, 如图 2 所示。

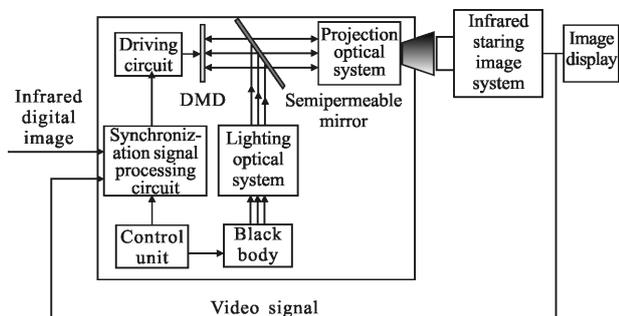


图 2 基于 DMD 的红外景象仿真设备框图

Fig.2 Frame map of IR scene projection equipment based on DMD

该设备选用了 0.7" XGA 型 DMD, 其分辨率为 1024×768, 尺寸为 0.7 in(1 in=2.54 cm), 偏转角为 ±12°。如果照明黑体直接照射 DMD, 则照明光学系统与投影光学系统的夹角只有 24°, 其空间过于紧凑, 导致光路不清晰, 而且两组光学系统容易发生碰撞和相互遮挡。系统设计时在光路中加入了一片半透半反镜, 使得两组光学系统的光轴相互垂直, 同时可以提高成像质量。由 DMD 的偏转角可知, 半透半反镜与 DMD 之间的夹角应为 33°。

为使设备结构紧凑, 半透半反镜应尽量靠近 DMD, 考虑为装调留有余量, 半透半反镜到 DMD 的距离取 30 mm 较为合理。由于 DMD 的反射光有 12° 的半孔径角, 照明光学系统距半透半反镜过近可能会遮挡透射光, 将照明光学系统到半透半反镜的距离取 30 mm 较为合理。考虑半透半反镜到 DMD 的距离及半透半反镜的厚度, DMD 到投影光学系统最后一个面的距离取 40 mm。

2 电子学设计

2.1 同步延时驱动

目前, 红外仿真试验时主要通过外同步方式实现 DMD 与被测红外凝视成像设备同步工作。但很多被测设备都是型号产品, 并不具备外同步触发工作方式或积分信号的输出功能, 使得二者难以同步。在不改动被测设备控制电路的前提下, 为实现仿真设备与被测设备同步, 提出了下述解决方案: 首先对被测设备输出的视频信号进行解码并分离出同步信号 T_1 , 但由于 T_1 与其积分信号存在延时 Δt , 据此可

以将同步信号调整为 $T_2=T_1+\Delta t$, 并用调整后的同步信号 T_2 和外部输入的红外数字图像驱动微镜偏转; 由于事先不知道 Δt 的准确值, 并且不同被测设备的 Δt 也不同, 需要逐步调整 Δt 用于驱动 DMD 成像, 并通过人工观察或自动计算被测设备输出的图像, 当图像亮度最大时, 可认为 Δt 最为合适, 此时二者刚好同步, 信号流程如图 3 所示。

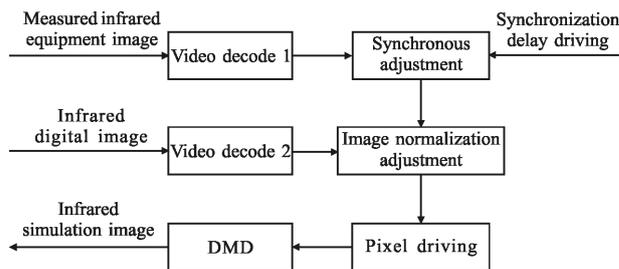


图 3 同步延时驱动信号流程

Fig.3 Signal processing of synchronization delay driving

2.2 显示控制

DMD 通常采用脉宽调制法进行灰度调制, 其原理是将每个像素的灰度信号分成 n 个位平面, 相邻位平面的保持时间相差 1 倍, 通过依次对各位平面进行加载、复位、清零等操作实现图像的刷新显示^[7]。加载操作只对微镜的存储单元装订数据, 不改变微镜状态。复位操作可以驱动微镜偏转至存储单元所对应的状态。清零操作对各存储单元快速加载数据 0, 但耗时较小。

对于 0.7" XGA 型 DMD, 其加载时间 t_L 为 30.72 μs , 清零时间 t_C 为 1.92 μs , 微镜偏转时间 t_F 为 5 μs , 最小稳定时间 t_W 为 8 μs 。根据 DMD 的成像方式和脉宽调制原理, 要提高显示帧频, 应尽量减小位平面 0 的保持时间 t_0 。传统方法直接采用位平面 1 的加载时间 t_L 作为位平面 0 的保持时间, 此时最高帧频仅为 127 Hz(8 bit), 此方法只需加载和复位两种操作, 时序控制比较简单。若以最小稳定时间 t_W 作为位平面 0 的保持时间, 此时最高帧频可达 472.2 Hz(8 bit), 但此方法需要使用加载、复位、清零三种操作, 并且各位平面的控制时序不一样, 比较复杂, 此时一帧图像时间内微镜处于开态的时间较短, 照明黑体的利用率的相对较低^[8]。综合考虑以上因素, 对该设备的显示控制方案进行了优化设计, 通过使用加载、复位、清零三种操作实现图像显示, 并确保每个位平面的

控制时序一样,其时序控制如图 4 所示。

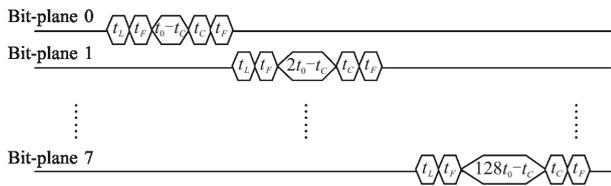


图 4 时序控制示意图

Fig.4 Schematic map of time control

图中,显示一帧 8 bit 灰度图像所需的时间 t 为:

$$t = 8 \times t_L + 16 \times t_F + 255 \times t_0$$

当 t_0 取 $11.5 \mu\text{s}$ 时, t 为 $3258.26 \mu\text{s}$, 其帧频可达 306.9 Hz , 完全满足 300 Hz 的显示要求。

2.3 电路设计

仿真设备的控制电路由同步信号处理电路和驱动电路^[9]两部分组成,如图 5 所示。

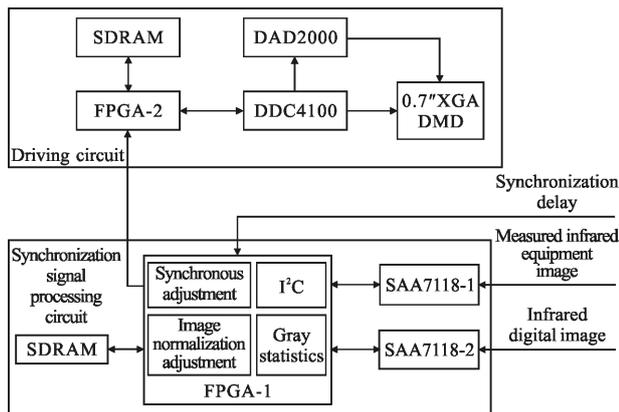


图 5 电路结构示意图

Fig.5 Schematic map of circuit structure

同步信号处理电路主要用于实现红外数字图像解码、被测红外凝视成像设备图像解码、同步调整、图像规格调整等功能。其中,两片视频解码芯片在 I²C 总线控制下对常见的 PAL、VGA、S-Video 等视频信号进行解码,并分离出同步信号。根据外部输入的延时量和被测设备的同步信号调整同步延时,作为驱动 DMD 偏转的同步信号。规格调整的作用是将不同的红外数字图像通过插值或压缩的方式调整为与 DMD 像数规模相匹配的 1024×768 格式。

驱动电路将图像的灰度信号转换为脉冲宽度信号,并根据时序信息控制微镜的偏转。其中,FPGA 的主要任务是图像数据的接收和缓存、同步信号的接收、脉宽调制变换、图像数据的发送等。DDC4100

作为一个转换中枢,主要功能是接收来自 FPGA 的高速数据与控制信号,并为 DMD 提供高速数据和控制命令,以及为 DAD2000 提供微镜复位和时序信息。DAD2000 作为 DMD 的复位芯片,主要功能是驱使微镜偏转到存储单元所指定的状态上,由 DDC4100 控制,为 DMD 提供复位信号和工作电压。

3 光学设计

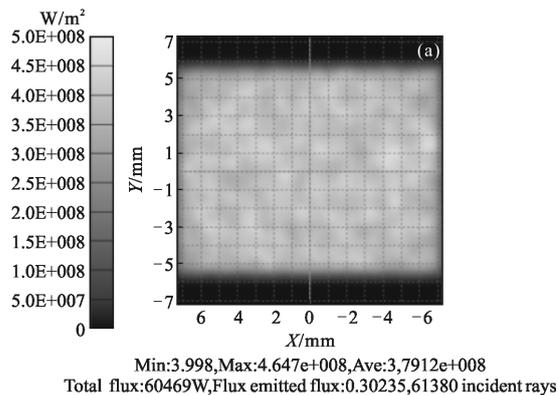
3.1 照明光学系统

照明光学系统是仿真设备的重要组成部分,它的着眼点在于光能量传递的最大化以及被照明面上的照度分布,其主要设计原则包括:

- (1) 应使黑体辐射尽可能多地照射到 DMD;
- (2) 应使黑体辐射尽可能均匀地照明 DMD;
- (3) 为充分发挥投影光学系统的性能,反射后的光束应充满投影光学系统的入瞳。

该设备采用临界照明方案,把黑体成像在 DMD 上,临界照明要求像方半孔径角稍大于投影光学系统的物方半孔径角^[10]。由于所选 DMD 的偏转角为 12° ,则投影光学系统的物方半孔径角为 12° ,照明光学系统的像方半孔径角也为 12° 。由于所选黑体的腔长与口径之比为 6,则照明光学系统的物方半孔径角为 4.73° ,照明光学系统的最大偏折角为 16.73° ,根据经验,照明光学系统选择一片透镜即可以实现偏折。经计算:照明光学系统的垂轴放大率为 0.4;已知 DMD 的尺寸为 17.5 mm ,则黑体的口径应为 43.75 mm ;已知照明光学系统到 DMD 的距离为 60 mm ,则黑体到照明光学系统的距离应至少为 150 mm 。

设计时,利用光机分析软件 Tracepro 对照明光学系统的 1000 万条照明光线进行模拟仿真,并对 DMD 位置处的辐射照度进行分析,其非均匀性模拟结果为 2.6%,如图 6 所示。



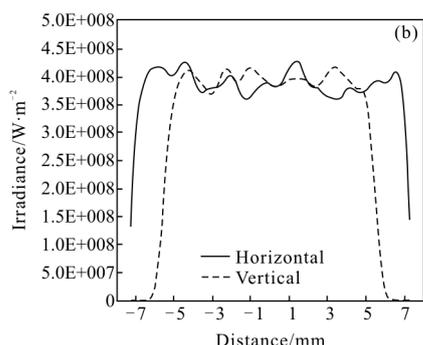


图 6 DMD 接收辐照度模拟结果

Fig.6 Simulation result of irradiance distribution on DMD

3.2 投影光学系统

投影光学系统可以将 DMD 反射调制的红外图像投射到被测红外凝视成像设备,是仿真设备的关键单元,其主要设计原则^[11]包括:

(1) 为使生成的红外图像能够覆盖被测设备,投影光学系统视场应稍大于被测设备视场;

(2) 根据光瞳衔接原则,为避免杂散光进入被测设备,并考虑一定的对准误差,投影光学系统的出瞳直径应稍大于被测设备的入瞳直径;

(3) 根据光瞳衔接原则,并考虑装调过程中可能存在的碰撞等问题,投影光学系统的出瞳距应稍大于被测设备的入瞳距。

根据常见被测红外凝视成像设备的光学参数,在留有余量的前提下,确定投影光学系统应满足如下要求:工作波段为 3~5 μm、视场为 5°、焦距为 200.5 mm、出瞳直径为 120 mm、出瞳距为 150 mm、几何畸变小于 3%。通过权衡视场、焦距、相对口径等指标,投影光学系统采用变形的 Cooke 式结构,选用了 Si、Ge 两种材料配合使用校正系统色差,并使用了一个非球面镜进行高级像差校正,光路设计如图 7 所示。

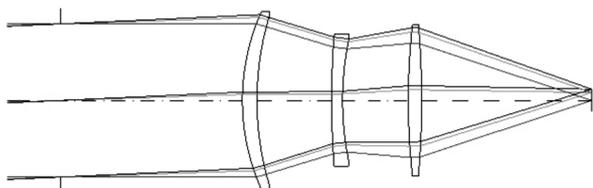


图 7 投影光学系统示意图

Fig.7 Schematic map of the projection optical system

投影光学系统的调制传递函数曲线、弥散斑、场曲和畸变分别如图 8、9、10 所示。在像元尺寸决定的

截止频率(36 lp/mm)处,镜头的 MTF 高于 0.5,可以保证投影图像具有较高的对比度;各视场的弥散斑直径分别为 10、8、12 μm,均小于 DMD 像元尺寸 13.68 μm;投影光学系统的畸变大小在 1%以内,完全满足要求。

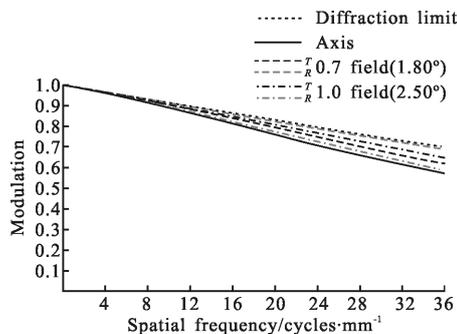


图 8 投影光学系统的调制传递函数

Fig.8 MTF curve of the projection optical system

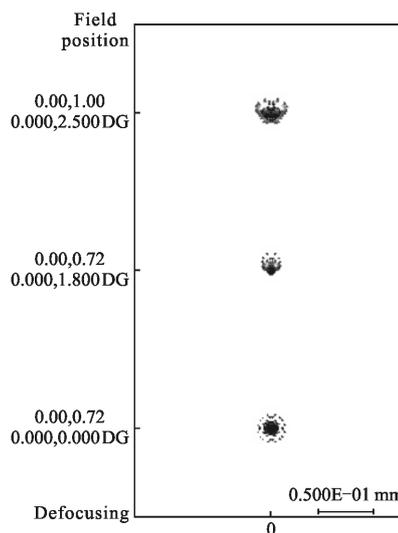


图 9 投影机光学系统的弥散斑

Fig.9 Spot diagram of the projector optical system

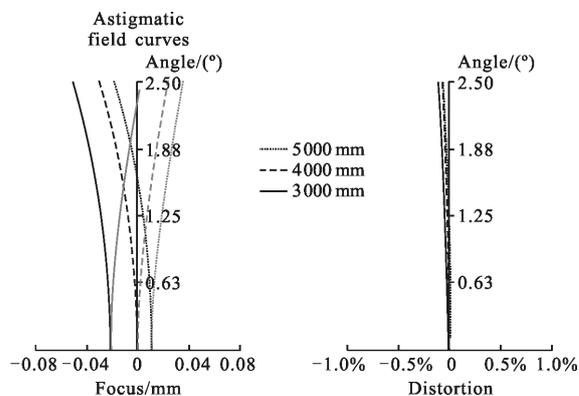


图 10 投影机光学系统的场曲和畸变

Fig.10 Field curvature and distortion of the projector optical system

4 设备性能测试

采用上述关键技术, 研制了一套基于 DMD 的红外景象仿真设备, 设备实物如图 11 所示。

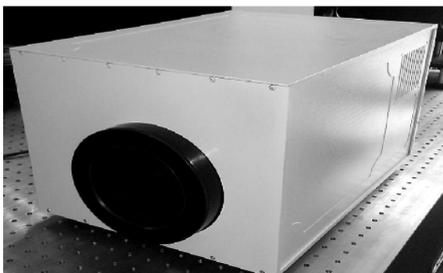


图 11 基于 DMD 的红外景象投影设备实物图

Fig.11 Practical map of IR scene projection equipment based on DMD

基于 DMD 的红外景象仿真设备以反射黑体的照射为基础, 输出的仿真图像与照明黑体的温度密切相关, 为此, 对设备的主要指标进行了检测。检测前, 调整红外测温热像仪 (波段 3.7~4.8 μm、视场 4.5°、积分时间 3.5 ms、测温精度 0.03 °C) 的空间位置, 确保二者空间对准; 并将红外测温热像仪输出的视频信号传输至仿真设备, 调整同步延时, 确保二者时序同步。通过设置照明黑体为不同的温度及输入不同灰度的红外数字图像, 对输出仿真图像的最大模拟温度、最小模拟温差、对比度、非均匀性等指标进行了检测^[12], 检测结果如图 12 所示。

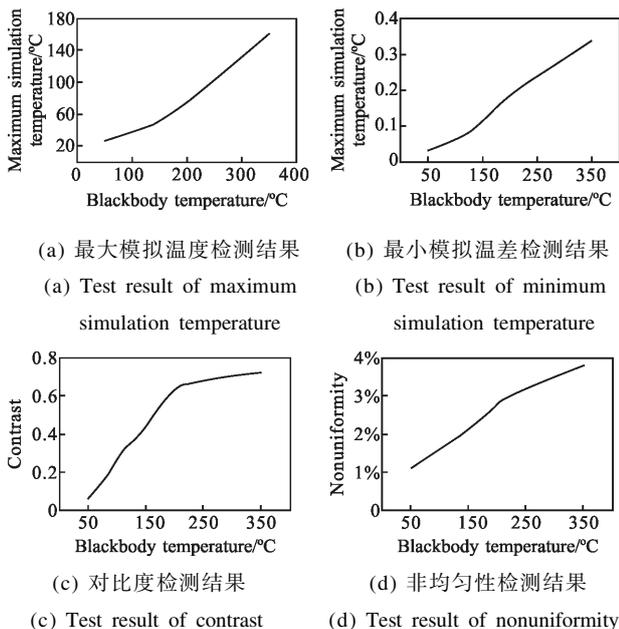


图 12 设备检测结果

Fig.12 Test result of the equipment

经检测, 在灰度等级不变的前提下, 输出的仿真图像与照明黑体切相关。当黑体温度越高时, 仿真图像的最大模拟温度、对比度越高; 而当黑体温度越低时, 仿真图像的最小模拟温差、非均匀性越好。当黑体温度为 350 °C 时, 最大可模拟温度为 160 °C、对比度为 0.7; 当黑体温度为 50 °C 时, 最小可模拟温差为 0.03 °C、非均匀性优于 1%。

半实物仿真试验时, 将不同战情的红外数字图像输入到仿真设备, DMD 将其转换为仿真图像后投射到红外测温热像仪, 利用红外测温热像仪采集 DMD 输出的图像, 结果如图 13、图 14 所示。并利用均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)来评价仿真图像的成像质量, 计算公式如下:

$$MSE = \frac{\sum \sum [F(i,j) - f(i,j)]^2}{M \times N}$$

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{255 \times 255 \times M \times N}{\sum \sum [F(i,j) - f(i,j)]^2}$$

式中: $F(i,j)$ 为红外数字图像在 (i,j) 处的灰度值; $f(i,j)$ 为 DMD 仿真图像在 (i,j) 处的灰度值; M 和 N 分别为图像的长和宽。经计算, MSE 为 6.25, PSNR 为 96.8%, 说明仿真图像质量较好, 完全满足红外仿真试验需求。

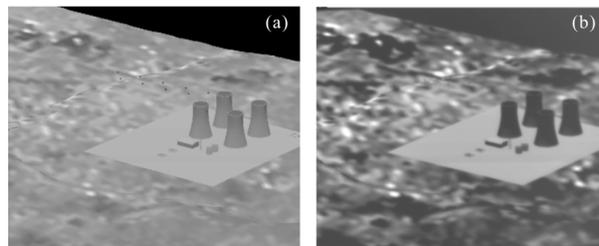


图 13 红外数字图像和 DMD 仿真图像(发电厂)

Fig.13 Infrared simulation image based on digital and DMD (power plant)

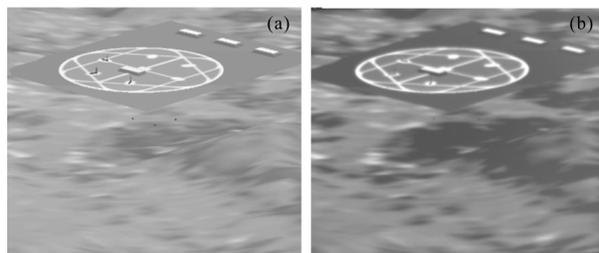


图 14 红外数字图像和 DMD 仿真图像(导弹阵地)

Fig.14 Infrared simulation image based on digital and DMD (missile position)

5 结论

针对 DMD 红外景象仿真设备在半实物仿真试验中存在的时序同步、显示帧频、光学匹配等应用难题,从 DMD 红外景象仿真设备的工作原理入手,重点在电子学和光学两个方面开展了设计与研制。在电子学方面,重点设计了同步延时驱动方案和高帧频显示控制方案,研制了同步信号处理电路和驱动电路;在光学方面,根据常见被测红外凝视成像设备的光学参数进行设计与仿真,研制了照明光学系统和投影光学系统。最终,研制了一套能够实现时序同步、高帧频显示、并可以与常见红外凝视成像设备光学系统匹配的基于 DMD 的红外景象仿真设备。该设备参加了多项红外半实物仿真试验,并发挥了巨大作用。下一步将重点研究 DMD 在 8~12 μm 长波红外波段的应用,以及如何提高该波段内仿真图像的显示帧频和对比度等。

参考文献:

- [1] Li Zhuo, Li Ping. Review of dynamic infrared scene Projection technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 283-294. (in Chinese)
李卓, 李平. 动态红外图像生成技术综述 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 283-294.
- [2] Beasley D B, Bender M, Crosby J. Advancements in the micromirror array projector technology II [C]//SPIE, 2005, 5785: 68-79.
- [3] Chen Jianhua, Zhu Ming, Huang Detian, et al. Dynamic infrared scene projection technology based upon digital micro-mirror device [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(4): 325-336. (in Chinese)
陈建华, 朱明, 黄德天, 等. 数字微镜器件动态红外景象投影技术[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(4): 325-336.
- [4] Knipe R L. Challenges of a Digital Micromirror Device modeling and design[C]//SPIE, 1996, 2783: 135-145.
- [5] Beasley D B, Bender M, Crosbyj, et al. Dynamic IR scene projector based upon the digital micromirror device [C]//SPIE, 2001, 4366: 96-102.
- [6] Wang Yunping, Zhao Changming. Dynamic infrared scene simulation system based on the digital micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 38(6): 966-970. (in Chinese)
王云萍, 赵长明. 基于 DMD 的动态红外景象仿真系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 38(6): 966-970.
- [7] Xu Zhengling, Yang Miaomiao, Liu Yanfang, et al. Time performance tesing of DMD dynamic infrared scene projector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 417-423. (in Chinese)
许振领, 杨淼淼, 刘艳芳, 等. DMD 的红外动态场景模拟器时间性能测试[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 417-423.
- [8] Zhou Hao. Research on high frame rate DMD driving technology based on FPGA[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physicals, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
周浩. 基于 FPGA 的高帧频 DMD 驱动技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [9] Zhang Kai, Sun Li, Yan Jie. Design and test of IR scene simulator based on the DMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 369-372. (in Chinese)
张凯, 孙力, 闫杰. 基于 DMD 的红外景象仿真器设计及测试[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 369-372.
- [10] Sun Yongxue. Research of dual-band infrared target simulator based on digital-micromirro device [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
孙永雪. 基于 DMD 的红外双波段目标仿真器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [11] Chang Hong, Fan Zhigang. Optical system design of DMD-based dual-band infrared scene projection [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(5): 838-840. (in Chinese)
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.
- [12] Zhang Kai, Ma Jun, Sun Siliang. Dynamic infrared target simulator driving and controlling system design [J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(1): 59-61. (in Chinese)
张凯, 马骏, 孙嗣良. 红外动态目标模拟器驱动及控制系统设计[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 59-61.