

基于 DMD 的红外成像制导目标模拟器研究

姚园 王德江 徐正平 黄厚田

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 数字微镜器件(DMD)作为红外景象生成器,以其帧频高、空间频率高、灰度等级高、均匀性好等优势,在红外成像制导目标模拟器的研究中受到普遍关注。分析了 DMD 的工作原理,提出了红外成像制导目标模拟器的组成方案,在实现高模拟温度(大于 400 °C)的同时,灰度等级能达到 2^{14} 。完成了照明系统的光学设计和灰度轮设计。

关键词 光学器件; 数字微镜器件; 目标模拟器; 灰度级; 照明设计

中图分类号 V249.32.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.072302

Design of Target Simulator Based on DMD for Infrared Imaging Guided System

Yao Yuan Wang Dejiang Xu Zhengping Huang Houtian

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract Digital micromirror device (DMD) as an infrared scene generator, which has high frame rate, high spatial frequency, high grayscale, good uniformity and other advantages, is generally concerned in the study of target simulator for infrared imaging guided system. The principle of DMD is analyzed. The composition of target simulator for infrared imaging guided system is proposed. The simulation temperature achieves a high level above 400 °C, and the grayscale could reach 2^{14} . Optical system and gray plate of the lighting system of the target simulator are designed.

Key words optical devices; digital micromirror device; target simulator; grayscale; lighting design

OCIS codes 120.1680; 120.2040; 120.3620; 120.3930; 120.4570

1 引言

红外成像制导技术的发展始于 20 世纪 70 年代。该技术具有实时性强、抗干扰性好、对气候环境依赖小等优点,能够有效提高导弹识别概率和命中精度^[1]。由于红外成像制导技术相对于红外点源制导技术具有突出的优点,因此红外成像制导导弹越来越受到各国军方的青睐^[2-3]。

伴随着红外成像制导导弹的出现,为了有效地对该类型导弹进行性能评估和测试,需要发展红外成像制导半实物仿真技术^[4-5]。在红外成像制导半实物仿真系统中,红外成像制导目标模拟器是核心器件,它的作用是模拟目标的几何形状、辐射特性、运动特性等,该装置结构复杂、研究难度大、成本高,其仿真性能直接影响到红外成像制导半实物仿真的可信度^[6]。而模拟器的设计主要是围绕景象生成器展开的,因此景象生成器的性能将决定了整个半实物仿真系统的性能^[7-8]。

本文基于数字微镜器件(DMD),提出了红外成像制导目标模拟器的组成方案,在实现高模拟温度的同时,达到 2^{14} 的高灰度等级。

2 数字微镜器件

数字微镜器件由美国 Texas 仪器公司生产的,它通过对入射红外辐射进行反射调制从而得到强度空间

收稿日期: 2013-01-22; 收到修改稿日期: 2013-04-10; 网络出版日期: 2013-06-06

基金项目: 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放课题(YZHC1SR12B)

作者简介: 姚园(1986—),男,硕士,研究实习员,主要从事航空相机成像仿真与光学设计等方面的研究。

E-mail: yaoy@ciomp.ac.com

分布的红外辐射景象^[9-10]。DMD 的外观及单个微镜结构如图 1 所示。

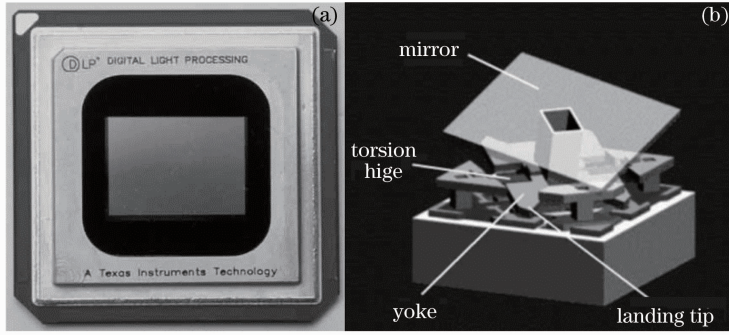


图 1 (a) DMD 的外观图及(b) 单个微镜的结构图

Fig.1 (a) DMD package and structure of (b) a single micromirror

图 1(a)所示为一个 1024×768 阵列的 DMD 器件外观图,图 1(b)是其中单个微镜的机械结构图^[11]。DMD 基底的表面上刻有一对互补金属氧化物半导体(CMOS)存储器,在基底上方设有镜架以及可绕镜架铰链偏转的镜面支架,镜面支架上为由特殊材料经过铝溅射工艺制成的镜面,镜面尺寸为 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$,镜面之间的间隔为 $1 \mu\text{m}$,镜面可绕其对角线翻转 $\pm 10^\circ$,每个微镜单元可代表 1 pixel。DMD 单个微镜的工作光路图如图 2 所示^[12]。

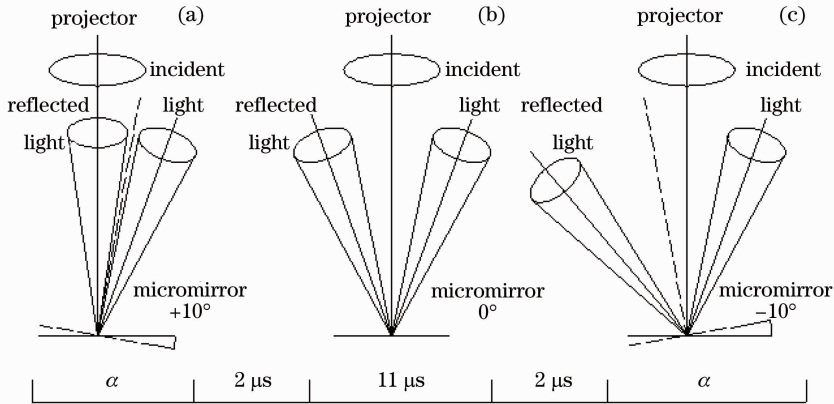


图 2 微镜单元的工作光路图及机械状态时序图。(a) 微镜单元偏转 $+10^\circ$; (b) 微镜单元偏转 0° ; (c) 微镜单元偏转 -10°

Fig.2 Micromirror optical switching principle and time sequence. (a) Micromirror deflected by $+10^\circ$;

(b) micromirror not deflected; (c) micromirror deflected by -10°

DMD 微镜单元的翻转状态是由二进制信号来调制的,每个微镜单元均可绕其对角线偏转 $\pm 10^\circ$ 。如图 2(a)所示,当微镜单元偏转 $+10^\circ$ 时,以一定孔径角入射的光经过微镜反射后进入投影物镜,进而被接收系统接收,对应像元被照亮;如图 2(c)所示,当微镜单元偏转 -10° 时,入射光经过微镜反射后射出投影物镜,没能投入接收系统,对应像元未被照亮^[13]。

DMD 器件的机械开关时间为 $15 \mu\text{s}$,它表示微镜单元从偏转 $+10^\circ$ 状态到偏转 -10° 状态所用的时间;光开关时间为 $2 \mu\text{s}$,它表示微镜单元从无偏转(0°)状态到偏转 $+10^\circ$ 或 -10° 状态所用的时间^[13]。微镜单元机械状态时序关系如图 2 所示。 α 时间为微镜单元处于 $\pm 10^\circ$ 状态的持续时间,即一个微镜翻转周期为 $\alpha + 15 \mu\text{s}$ 。 α 时间从时序上影响了 DMD 器件的光能利用效率, α 时间越长 DMD 器件的光能利用效率越高。但 α 时间越长,单帧时间内设定的微镜翻转周期数越少,灰度等级越低。因此,单片 DMD 器件的光能利用效率和调制灰度等级存在着制约关系。

3 红外成像制导目标模拟器方案

为了获得 2^{14} 灰度等级的红外图像,采用两片 DMD 串联调制增加可选光通道,并引入灰度轮器件对辐亮度再细分。红外成像制导目标模拟器方案组成框图如图 3 所示。

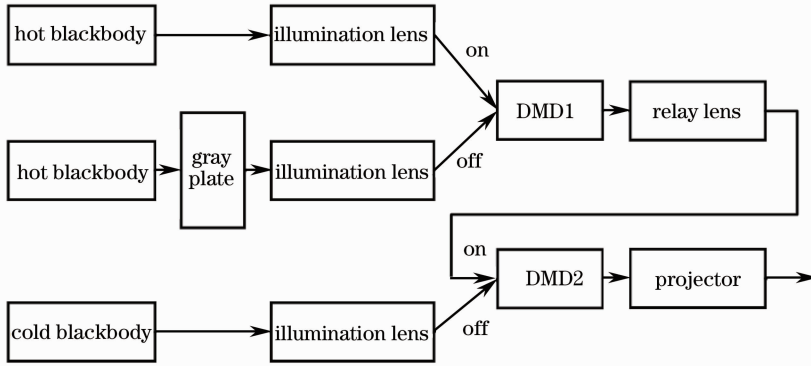


图3 红外成像制导目标模拟器组成框图

Fig. 3 Schematic sketch of dynamic infrared scene simulator

图3中,共有2个DMD、2个高温光源、1个低温光源、1个灰度轮。其中,2个高温光源和1个低温光源通过各自照明镜组以科勒照明的方式均匀照亮DMD表面;两块DMD通过中间的转向镜组成物像关系;投影物镜组将DMD调制后的反射光投射至无穷远处,并充满接收系统的入瞳。灰度轮的作用类似于标准数字光处理(DLP)投影系统中色轮的作用,色轮将一个帧频周期划分成红、绿、蓝3个阶段,而灰度轮则是将一个帧频周期划分成数个(2、3、4、……)透射率等级,其透射率顺序为 $1/2, 1/4, 1/8, \dots$ 。两块DMD的对应微镜单元形成串联光开关,这样的布局给每个像素在一个微镜翻转周期内提供3种可选择光通道:低温光通道、高温光通道和受调制高温光通道。两块DMD上每一个微镜单元的开关组合决定着该像素所选通的光通道,其关系如表1所示。

表1 DMD光开关组合与所选通光通道的关系

Table 1 Relation between situation of micromirror optical switch and selected illumination channel

DMD1 optical switch	DMD2 optical switch	Selected illumination channel
On	On	Hot illumination channel
On	Off	Dynamic illumination channel
Off	On	Cold illumination channel
Off	Off	Cold illumination channel

由DMD的工作特点可知,由DMD投射出去的光束孔径角不超过 20° ,即最小的 F 数为3,取 F 数为3的中波红外探测器典型积分时间 9 ms 为例,在单帧图像内设置DMD翻转周期数为256,此时机械开关时间为 $15\ \mu\text{s}$, α 时间为 $20\ \mu\text{s}$,能量利用率为 57% 。采用6级灰度轮,6个区域的灰度分布为 $1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64$,设置高温黑体辐亮度为 L_0 ,低温黑体起冷屏作用,为方便分析,取中波辐亮度近似为零。此时,各个光通道的辐射亮度与DMD翻转周期的关系如图4所示。

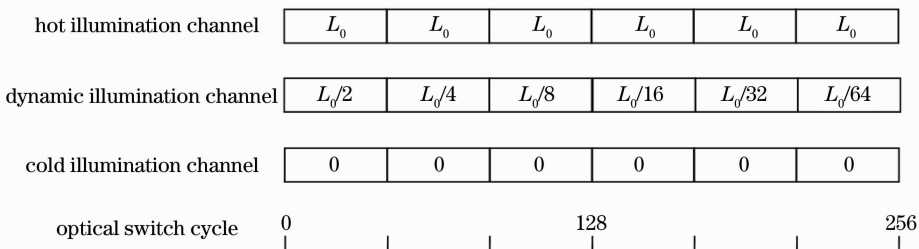


图4 各个光通道的辐射亮度与DMD翻转周期关系图

Fig. 4 Relation between radiance of illumination channel and optical switch cycle

如上文所述,在256个翻转周期内,通过两块DMD光开关组合可以选取任一光通道,设 A 为选通高温光通道的翻转周期数,最大值可取256; a_1, a_2, \dots, a_6 分别为灰度轮处于对应透射率等级时,选通受调制高温光通道的翻转周期数,取值为0或1。则各灰度等级的辐亮度 L_n 与DMD微镜状态的关系可以表示为

$$L_n = \frac{1}{256} \cdot \left(A \cdot L_0 + a_1 \cdot \frac{L_0}{2} + a_2 \cdot \frac{L_0}{4} + \dots + a_6 \cdot \frac{L_0}{64} \right). \quad (1)$$

通过(1)式可以看出,单帧图像内,每个像素最大辐亮度和最小辐亮度分别为 $L_N = L_0, L_1 = \frac{L_0}{256 \times 64} =$

$\frac{L_0}{2^{14}}$,且辐亮度呈等差排列,经过变化后(1)式可以表示为

$$\begin{aligned} L_n &= \frac{L_0}{2^{14}} \cdot (2^6 \cdot A + 2^5 \cdot a_1 + 2^4 \cdot a_2 + \dots + 2^1 \cdot a_5 + a_6) = \\ &= \frac{L_0}{2^{14}} \cdot [2^6 \cdot (2^7 \cdot A_1 + 2^6 \cdot A_2 + \dots + A_8) + 2^5 \cdot a_1 + 2^4 \cdot a_2 + \dots + 2^1 \cdot a_5 + a_6] = \\ &= \frac{L_0}{2^{14}} \cdot [2^{13} \cdot A_1 + 2^{12} \cdot A_2 + \dots + 2^6 \cdot A_8 + 2^5 \cdot a_1 + 2^4 \cdot a_2 + \dots + 2^1 \cdot a_5 + a_6]. \end{aligned} \quad (2)$$

式中,由于 A 的取值最大为 256,因此近似可以通过 8 阶二进制来表示, A_1, A_2, \dots, A_8 的取值为 0 或 1。可以看出,通过选取 14 阶二进制的系数组合可实现任一灰度级。需要注意的是 A, a_1, a_2, \dots, a_6 的和不能超过 256,因此,某些高灰度级是无法实现的,例如 $(A, a_1, a_2, \dots, a_6) = (255, 1, 1, \dots, 1)$ 通过本系统是无法实现的。

目前,小口径高温黑体的温度均能达到 500 °C,中波 500 °C 黑体辐亮度为 1188 W/(sr · m²),本系统的能量利用率为 0.57,经过衰减后辐亮度为 677 W/(sr · m²),大于 400 °C 黑体中波辐亮度[613 W/(sr · m²)],可以实现高温目标模拟。综上,该目标模拟器方案在实现高模拟温度(大于 400 °C)的同时,灰度等级能达到 2¹⁴。

4 照明镜组设计

投影镜组的作用是将 DMD 表面反射的光投射至无穷远处,且达到光阑前置的作用,设计较为常规,这里着重说明照明镜组的设计和灰度轮的设计。

转向照明镜组的作用是将两块 DMD1:1 无畸变成像,而灰度轮的作用是将高温辐亮度划分为 6 个灰度等级。

4.1 转向照明镜组设计

根据转向照明镜组的作用可以看出它对像质的要求高,设计难度大,且决定了整个系统的可行性,因此优先设计该镜组,再根据其光学参数设计其他的照明镜组。

分析转向照明镜组需要满足下列要求:

- 1) 两块 DMD1:1 成像, F 数为 3,由于镜面尺寸等于艾里斑半径,即 16 μm,因此设计要求达到衍射极限;
- 2) 系统畸变要非常小,整块 DMD 的畸变量大小为微镜单元间隙尺寸 1 μm 时能避免像素之间的串扰问题;
- 3) 由 DMD 工作特点可知,照明镜组从斜侧 20° 入射,因此对于转向照明镜组的设计而言,要求物像面均有 20° 的倾斜。

经过以上分析,同时考虑缩小前后镜组尺寸,采用对称式远心光路、物像面同向倾斜的设计结构。转向照明镜组设计结果如图 5 所示。

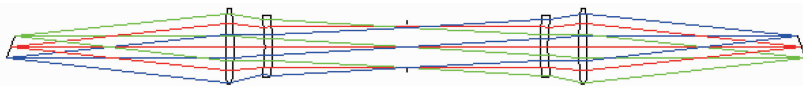


图 5 转向照明镜组光路图

Fig. 5 Sketch of the relay lens

图 5 中,出入光瞳处于无穷远处,光路完全对称,物高 $h = 10.88$ mm(DMD 半对角线长度)。系统调制传递函数(MTF)如图 6 所示,各视场均达到了衍射极限。

系统畸变最值如表 2 所示。可以看出全视场最大畸变量不超过 1 μm。

表 2 转向照明镜组畸变最值列表
Table 2 Distortion of the relay lens

Relative X Field	Relative Y Field	Paraxial X /mm	Paraxial Y /mm	Real X /mm	Real Y /mm
-1.00	1.00	8.704097	-6.528073	8.703462	-6.527597
1.00	1.00	-8.704097	-6.528073	8.703462	-6.527597
-1.00	-1.00	8.704097	6.528073	-8.704538	6.528403
1.00	-1.00	-8.704097	6.528073	-8.704538	6.528403

综上,光学设计结果满足成像要求。由于目前的光路布局造成两块 DMD 的法线相交,影响其他光学机构的布局,因此加入两块反射镜,使得物像面法平面互相平行,分层建设其他光路,并且在中间光瞳处设置冷光阑。转向照明镜组三维(3D)结构图如图 7 所示。

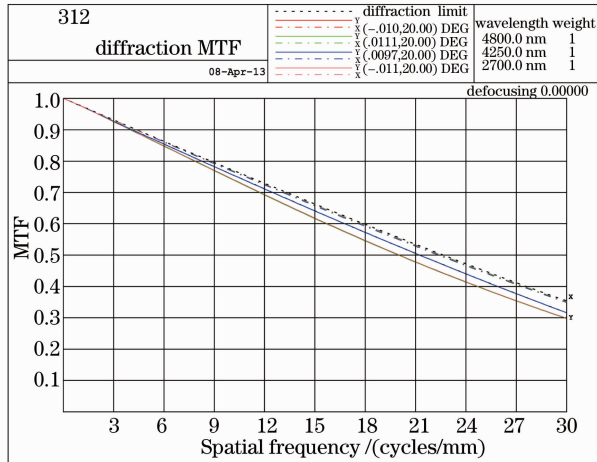


图 6 转向照明镜组 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curves of the relay lens

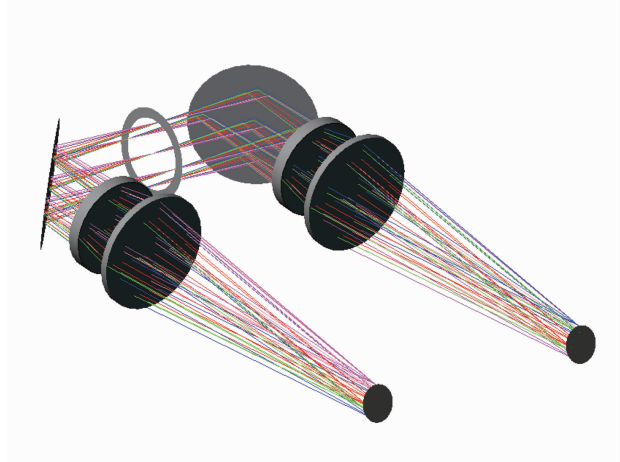


图 7 转向照明镜组 3D 结构图

Fig. 7 3D model of the relay lens

4.2 灰度轮的设计

红外成像制导目标仿真器的灰度等级要求为 2^{14} ,由前述可知,灰度轮需要将高温辐亮度划分为 6 个灰度等级,其透射率顺序为 $1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64$ 。透射率下降很快,最低的达到了 0.015625。

可以采用蒸发镀膜的方法来加工。选取透红外材料作为基底,保持镀膜室内的压强、蒸发温度恒定,通过控制镀膜时间的长短来获得基片上 5 个不同区域的 5 种透射率。但是蒸发镀膜工艺的特点是透射率较难控制,随着蒸发时间的进行透射率下降得很快。

为了提高透射率精度,可以采用激光刻蚀工艺来实现。先在红外材料的基底上镀一层不透光的金属膜层,然后将光刻胶均匀地涂上其表面,再用激光刻蚀技术,根据需要的图案,将部分光刻胶刻蚀到金属层的表面,最后用金属腐蚀溶剂,融掉暴露出来的金属层部分,洗去光刻胶,即可获得需要的金属层图案。

由于衍射图案的限制,最小光孔不能太小,为了获得均匀的透射率通光孔又不能选取过大,综合考虑选择灰度轮 6 个区域的刻蚀子图案如图 8 所示。

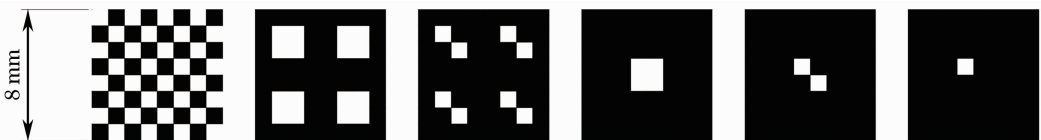


图 8 灰度轮 6 个扇区刻蚀的子图案

Fig. 8 Sculptured patterns of sectors on the gray plate

图 8 中,6 个子图案的大小为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,最小通光孔口径为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,通光面积分别为 $1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64$ 。将这 6 个子图案阵列的刻蚀在 6 个区域中,最终灰度轮的外观如图 9 所示。

5 结 论

经过分析 DMD 的光路控制原理以及微镜翻转时序,提出了一种基于 DMD 的红外成像制导目标模拟器的组成方案,并对其中的转向照明系统和灰度轮进行了设计。

通过对微镜单元机械状态时序展开分析得出结论:单个 DMD 的调制灰度等级和能量利用率存在制约关系,即能量利用率越高则调制灰度等级越低。提出一种采用两片 DMD 串联调制的方案,经过分析得出,该方案在提高灰度等级的同时,不会减小高温黑体的透过率。设计了一种用于两片 DMD 串联调制的对称远心光路结构的照明系统,该照明系统照明均匀,且能有效控制畸变;提出了采用激光刻蚀工艺来制作灰度轮的方法,并设计了刻蚀图案。

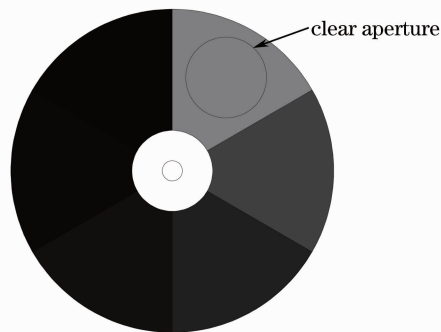


图 9 灰度轮外观图

Fig. 9 Sketch of the gray plate

参 考 文 献

- 1 D B Beasley, D A Saylor. Overview of dynamic scene projectors at the U. S. army aviation and missile command[C]. SPIE, 2002, 4717: 147–157.
- 2 D S Cocanougher, D B Card. Application of hardware-in-the-loop simulation to operational test and evaluation[C]. SPIE, 1999, 3697: 80–88.
- 3 Owen M Willians. Dynamic infrared scene projection: a review[J]. Infrared Physics and Technology, 1998, 39(7): 473–486.
- 4 Yu Qing, Yu Xiaofeng, Liu Wenwen, *et al.*. Re-studies on parallel confocal measurement system with digital micro-mirror device[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0523005.
余 卿, 余晓芬, 刘文文, 等. 数字微镜器件用于并行共焦测量的再研究[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0523005.
- 5 Zhou Wang. Study on enhancing dynamic range of CCD image based on digital micro-mirror device[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 638–642.
周 望. 基于数字微镜器件技术提高面阵 CCD 相机动态范围的研究[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 638–642.
- 6 Huang Dajie, Fan Wei, Lin Zunqi. Spatial laser beam shaping using digital micro-mirror device[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502008.
黄大杰, 范 薇, 林尊琪. 数字微镜器件用于光束空间整形[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502008.
- 7 Chen Lingzhi, Mu Da, Li Quanyong, *et al.*. Dual-color co-aperture infrared optical system design for irradiance measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(4): 042202.
陈灵芝, 牟 达, 李全勇, 等. 双色红外共光路辐照度测量系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 042202.
- 8 Dong Jianing, Mu Da, Xu Chunyun, *et al.*. Projection optical system design of infrared scene simulator based on DMD[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 122202.
董家宁, 牟 达, 徐春云, 等. 基于 DMD 的红外景象模拟投影光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 122202.
- 9 L J Hornbeck. Projection displays and MEMS: timely convergence for a bright future[C]. SPIE, 1995, 2641: 2–12.
- 10 M Daehler. Infrared display array[C]. SPIE, 1987, 765: 94–101.
- 11 Jinyang Liang, Rudolph N Kohn, Jr., Michael F Becker. High-precision beam shaper for coherent and incoherent light using a DLP spatial light modulator[C]. SPIE, 2011, 7932: 793208.
- 12 D Dudley, W Duncan, J Slaughter. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[C]. SPIE, 2003, 4985: 14–25.
- 13 Julia Rentz Dupuis, David Mansur. Contrast analysis for DMD-based IR scene projector[C]. SPIE, 2011, 8015: 801505.