

基于双 DMD 的红外场景投影仪光学系统设计

郑雅卫¹, 胡煜¹, 郭云强², 高教波¹, 王军¹, 李俊娜¹, 吴江辉¹, 刘方¹, 陈青¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 西安北方光电技术有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要:为提高中波红外场景投影仪的帧速和灰度等级,提出了一种基于双数字微反射镜器件(DMD)的光学系统方案。该光学系统包括照明系统和准直投影光学系统,照明系统采用可提供均匀照明的柯勒照明系统,利用 2 个非球面透镜简化结构,采用 3 片式全内反(TIR)棱镜来实现光路的折转衔接以及 2 个 DMD 调制的叠加;准直投影光学系统采用二次成像结构,通过合理分配各透镜组光学参数,并采用非球面透镜进行优化设计,得到的光学系统 F 数为 0.94,入瞳距为 850 mm,角分辨率为 0.19 mrad。投影仪的测试与仿真结果表明此光学系统完全满足红外场景投影仪的使用要求。

关键词:准直投影光学系统;照明系统;全内反(TIR)棱镜;二次成像结构

中图分类号:TN21 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.10.011

Design of optical systems for infrared scene projector based on dual-DMD

ZHENG Ya-wei¹, HU Yu¹, Guo Yun-qiang², GAO Jiao-bo¹, WANG Jun¹,

LI Jun-na¹, WU Jiang-hui¹, LIU Fang¹, CHEN Qin¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an North Optics Electro Technology Co., LTD, Xi'an 710043, China)

Abstract: In order to improve the frame rate and the grey level of the midwave (MWIR) infrared scene projector, the optical systems scheme based on dual-DMD (Digital micro-mirror device) is presented. The optical systems include the illumination system and the collimating projection optics. The Kohler illumination is used to supply uniform illumination for the projector. The two aspheric lenses are used to simplify configuration of the illumination system. The TIR prism containing three-sections are used to fold and connect the ray path of the illumination system and the collimating projection optics, meanwhile superposing the modulation of the two DMD. The collimating projection optics uses a re-imaging configuration. The optimization of the collimating projection optics is accomplished by distributing the parameters of the lenses and using aspheric surfaces in the lenses. The F /number of the collimating projection optics is 0.94. The entrance pupil distance is 850 mm. The angular resolution is 0.19 mrad. The results of the testing and simulation for the projector illustrate that the performances of the optical systems meet the requirements of the infrared scene projector.

Keywords: collimating projection optics; illumination system; TIR prism; re-imaging configuration

1 引言

随着红外成像传感器的发展,红外导引头、红外搜索与跟踪系统、红外告警系统等红外光电系统性能进一步提高,这对半实物仿真试验系统提出了更高的

要求。对于以数字微反射镜器件(DMD)作为红外场景生成器件的红外场景投影仪而言,红外成像传感器积分时间的缩短要求 DMD 在较短的积分时间内产生高灰度等级的红外场景,以提高半实物仿真测试的逼

真度,由于 DMD 器件内部微反射镜本身的偏转时间有上限,因此单个 DMD 无法在很短的积分时间内,通过脉冲宽度调制(PWM)生成高灰度等级的动态红外场景,为解决这个问题,可采用双 DMD 通过同步调制的模式来有效地提高红外场景投影仪输出红外场景的帧速和灰度等级。

本文重点讨论了基于双 DMD 的红外场景投影仪光学系统的设计,其中包括能够实现两个 DMD 调制叠加的照明系统和能够提供无穷远动态红外场景的特大相对孔径、长出瞳距的准直投影光学系统。

2 光学系统方案

2.1 双 DMD 工作方式

红外场景投影仪采用 DMD 作为红外场景生成器件。DMD 驱动器接收图形计算机输出的数字图像信号,将图形计算机输出的数字图像信号转换为红外辐射图像。由于被测红外光电系统只能在探测器积分时间内探测到目标和背景信号,DMD 调制时间与被测系统积分时间的相对关系决定了被测系统能否完全接收 DMD 调制产生的辐射信号。

脉冲宽度调制(PWM)的图像生成方式是利用 DMD 微反射镜的快速偏转,通过对前一位产生时间的倍数累加而生成相应的灰度等级^[1-2],在这种情况下,DMD 的物理特性限制了其产生较高灰度等级的最小时间,因此当光电系统探测器的积分时间大约小于 2.2 ms 时,接收基于单个 DMD 场景投影仪产生的场景,会出现灰度缺损、接收辐射能量下降的现象。双 DMD 同步调制模式采用两个 DMD 分别调制图像的红外辐射强度和图像的空间分布特征,通过同步控制器与被测光电系统同步工作,联合完成灰度等级和空间分布的调制,即 DMD1 在一帧时间内,以相同的时间间隔按照不同比例开态生成均匀分布的格纹或条形图案,再反射到产生二进制图像的 DMD2 上,DMD2 只需按照同一间隔时间产生灰度图像的 N 位二进制编码的分解二进制图像即可,这样原来 1 个 DMD 调制空间分布的同时利用时间积累调制辐射强度的任务分配给了 2 个 DMD 来完成,降低了单个 DMD 的数据处理带宽,使整个系统的帧速和显示灰度等级得到提高,即在很短的时间内实现高灰度等级。

2.2 投影仪光学系统的组成

如图 1 所示,红外投影仪光学系统由黑体、

DMD、照明系统和准直投影光学系统组成,DMD1 用于调制图像的红外辐射强度,DMD2 用于调制图像的空间分布特征;照明系统使 DMD1 上的红外辐射强度调制和 DMD2 上图像空间分布调制相叠加,实现对红外光束的同步调制;准直投影光学系统将经过 DMD2 调制得到的红外图像,准直投射出去,模拟来自无穷远的动态红外场景。照明系统中的 TIR 棱镜 1 连接光源和照明系统、TIR 棱镜 2 连接照明系统和准直投影光学系统,两组 TIR 棱镜是实现系统光路折转和衔接的关键元件。

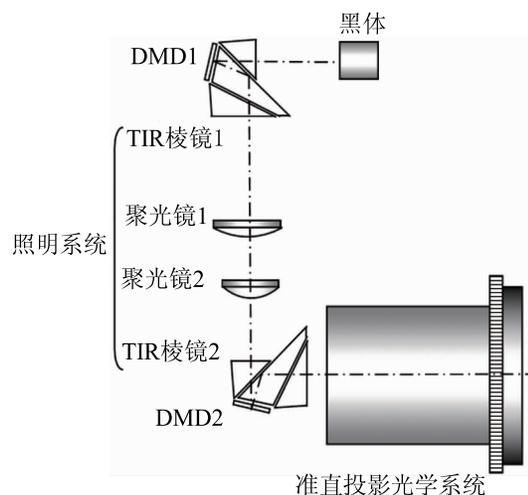


图 1 光学系统组成

Fig. 1 Composition of optical systems

3 照明系统设计

3.1 柯勒照明系统

如图 1 所示,照明光学系统包括 2 组 TIR 棱镜和 2 个聚焦镜。照明光学系统^[3-4]的作用就是尽可能多地收集光源发出的光,均匀地照射 DMD 器件。本设计选择柯勒照明系统,如图 2 所示,光源通过聚光镜 1、聚光镜 2 输出平行光,光阑通过聚光镜 1、聚光镜 2 成像在 DMD2 (照明系统的出瞳)上,这样 DMD2 就获得了均匀照明。

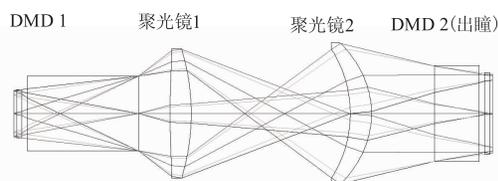


图 2 柯勒照明系统

Fig. 2 Kohler illumination system

在照明系统的设计中,为了保证光源的能量有效地照明 2 个 DMD,照明系统的物面及物方数值孔径应与 DMD1 的有效辐射口径及偏转角度相匹配,

照明系统的出瞳应与 DMD2 的大小相匹配或略大于 DMD2 的大小。系统反向设计,为校正 TIR 棱镜组带来的像差,两组 TIR 棱镜 1 展开为玻璃平板和照明系统透镜组一起优化计算。系统采用 2 片 Ge 透镜,并利用非球面来减小包括光阑像差在内的各种像差。

图 3 为光线经过照明系统后在 DMD 上的三维光强分布,表 1 为照明系统在 21 个视场点的相对照度。

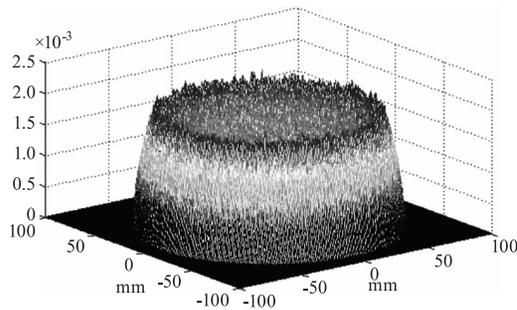


图 3 DMD 上的三维光强分布

Fig. 3 3D map of light distribution on the DMD

表 1 相对照度

Tab. Relative illumination of the Kohler illumination system

序号	视场	相对照度	序号	视场	相对照度
1	0 ω	1	12	0.55 ω	0.985703
2	0.05 ω	0.997988	13	0.6 ω	0.980062
3	0.1 ω	0.9721	14	0.65 ω	0.975115
4	0.15 ω	0.973523	15	0.7 ω	0.992507
5	0.2 ω	0.973315	16	0.75 ω	0.989804
6	0.25 ω	0.972842	17	0.8 ω	0.985136
7	0.3 ω	0.969925	18	0.85 ω	0.977202
8	0.35 ω	0.96752	19	0.9 ω	0.986872
9	0.4 ω	0.99006	20	0.95 ω	0.985254
10	0.45 ω	0.990904	21	1.0 ω	0.977803
11	0.5 ω	0.988346			

$$U = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E_{Av})^2}{(E_{Av})^2 (n-1)}} \quad (1)$$

由标准差公式得到照度的均匀性公式:式中, E_i 为 1~21 个视场点的相对照度, E_{Av} 为 21 个视场点相对照度的平均值,将表 1 的数据代入公式(1),得到照度的均匀性 $U = 99\%$ 。图 3 和照度均匀性计算结果表明照明系统的均匀性达到了设计要求。

3.2 三片式全反射棱镜设计

全反射棱镜是照明系统中的关键元件。DMD

是一种反射式空间光调制器,器件中的微反射镜阵列由七十八万多个(1024×768 分辨率)可转动的铝质方形微反射镜构成,它有“开”态、“平”态和“关”态三种状态,分别对应偏转 +12°、0°和 -12°,投影系统接收“开”态时的反射光线完成图像的投影。

为了保证 DMD 在“开”态时所有光线都能进入投影光学系统,避免 DMD 在“平”态和“关”态时所有光线进入投影光学系统。本文设计了 3 片式全反射棱镜^[5-7],光路如图 4 所示。当 DMD 偏转到 +12°(“开”态),出射光线由棱镜 III 出射,进入投影光学系统中,当 DMD 偏转到 0°(“平”态)和 -12°(“关”态),出射光线均由棱镜 II 尖角处出射,不会进入投影光学系统。

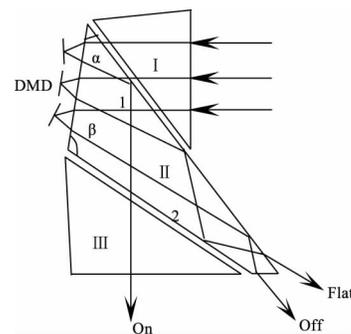


图 4 全反射棱镜光路

Fig. 4 Ray path of TIR prism

由全反射定律可知,入射光由光密介质进入光疏介质,入射角大于临界角时,入射光发生全反射。全反射棱镜设计就是利用全反射定律来确定各片的角度的,如图 4 所示光线进入棱镜后,经过 DMD 反射,“开”态、“平”态和“关”态三种状态的光线均在棱镜 II 的界面 1 上发生全反射,这就要求角 α 和角 β 要保证其入射光线的入射角不小于临界角,而对于其他界面上折射的光线,要保证其入射角要小于临界角。

对于中波红外波段,棱镜的材料可选择 CaF_2 、 BaF_2 等红外材料,这些材料在中波红外波段具有很高的透过率。本设计中采用 CaF_2 作为棱镜材料, CaF_2 在紫外、可见光到红外波段平均透过率高达 93%。和 BaF_2 相比, CaF_2 在 3~5 μm 波段的折射率为 1.4~1.42,折射率更小,有利于棱镜角度的设计,减小棱镜的外形, CaF_2 的密度为 3.181 g/cm^3 ,也小于 BaF_2 的密度,另外 CaF_2 硬度更高,化学性能更稳定,便于光学加工。图 5 为全内反 CaF_2 棱镜实物图,其外形尺寸为 45 mm×33 mm×30 mm。



图5 全反射棱镜
Fig.5 TIR prism

4 准直投影光学系统设计

4.1 设计指标

表2为准直投影光学系统的设计指标(按光路追迹方向)。光学系统入瞳位于透镜组前,大于800 mm处, F 数为0.94,系统入瞳距长,相对孔径特大,像差校正困难,所以合理选择光学系统结构、光学材料是满足投影仪对光学系统要求的关键^[8]。

表2 准直投影光学系统设计指标
Tab.2 Design specifications of the collimating projection optics

参数	指标
波段/ μm	3~5
视场/ $^\circ$	8
入瞳直径/mm	≥ 80
入瞳距离/mm	≥ 800
角分辨率/mrad	≤ 0.2
畸变/%	≤ 2

4.2 初始结构参数确定及优化

根据以往设计大口径、长入瞳距准直投影光学系统的经验,系统采用二次成像结构,压缩光束,减小透镜口径和重量。由于受视场、入瞳大小及入瞳距的制约,第一片的口径约为200 mm左右,轴外像差较大,因此合理选择前物镜组和后物镜组的片数和材料是得到良好的优化结果,满足像质要求的关键。

如图6所示,在二次成像结构中,前物镜组为无限远成像系统,后物镜组为近距成像系统。

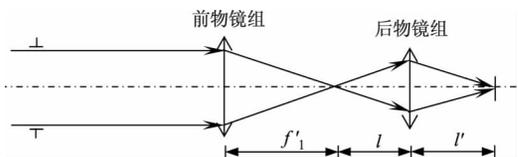


图6 二次成像结构光路
Fig.6 Ray path of re-imaging configuration

在二次成像系统设计中,确定初始结构时,要合理分配前物镜组和后物镜组的光焦度,并考虑两组光瞳的衔接。当2组透镜组合时,系统的总焦距 f' 、前物镜组的焦距 f'_1 以及后物镜组的放大倍率 β 之间存在以下关系:

$$f' = \beta f'_1 \tag{2}$$

前物镜组的 F_1 数和后物镜组的放大倍数 β 、整个系统的 F 数存在以下关系:

$$F_1 = \frac{F}{\beta} \tag{3}$$

而光学系统的 F 数和像方数值孔径 NA 的关系为:

$$F = \frac{1}{2NA} \tag{4}$$

由设计指标可知系统的总焦距 f' 为75.08 mm,后物镜组的焦距 f'_2 取40 mm左右,其放大倍率 β 取0.36左右,根据公式(2)得到前物镜组的焦距 f'_1 约为208 mm。整个系统的 F 数为0.94,由公式(3)得到前物镜组的 F_1 数为2.6,利用公式(4)即可得到前物镜组的像方数值 NA 即后物镜组的物方数值 NA 为0.19。

光学系统材料的选择要考虑光谱范围、材料的物理化学特性以及成本等因素。在中波红外波段常用的材料有Ge、Si、 CaF_2 、 BaF_2 等。红外材料具有较高的折射率,可有效地校正像差,但红外材料是以晶体生长或化学汽相沉积的方式制造,口径和厚度会受到限制,而且有些材料的物理化学特性会增加加工难度,比如 CaF_2 和 BaF_2 。由于Si密度小,价格相对便宜且容易得到较大口径,第1片口径200 mm的透镜可考虑使用Si,可减轻重量,节约成本。而 CaF_2 和 BaF_2 尽量用于口径较小的透镜。

系统优化可根据每组的参数先分别优化,再组合优化,三片式棱镜展开为平行平板和整个系统一起优化。系统光阑位于镜组前850 mm处,轴外光线在镜组上的投射高很大,造成慧差、像散、场曲、畸变和垂轴色差等轴外像差增大。不控制前物镜组的焦距有利于这些像差的校正,但会造成系统结构较长,因此在优化计算时,在保证像质的前提下应控制系统总长;另外畸变虽然不影响图像的清晰度,但会引起投影图像的变形和失真,随着系统长度,畸变有可能增加,这时可在优化操作数中加入畸变加以控制,系统还可使用非球面

提高像质,减少透镜片数,减小成本、增大系统的透过率。

4.3 设计结果

如图 7 所示,最终设计的光学系统由 8 片透镜组成。前物镜组由材料分别为 Si-Ge-Si-Ge 的 4 片透镜组成,后物镜组由材料分别为 Ge-Si-CaF₂-Si 的 4 片透镜组成,其中采用 2 个 2 次非球面进一步提高像质。



图 7 光学系统结构图

Fig. 7 Collimating projection optics layout

光学系统点列图、调制传递函数和畸变分别如图 8、图 9 和图 10 所示。

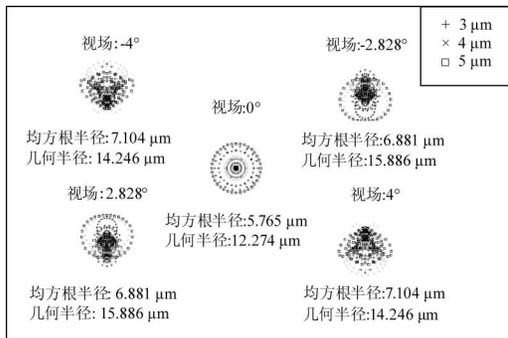


图 8 点列图

Fig. 8 Spot diagram

光学系统的光学参数及像质如表 3 所示。通过和设计指标对比,由均方根弥散圆计算得到的角分辨率小于 0.2 mrad,畸变小于 2%,达到投影仪系统的指标要求。被测系统探测器的分辨率为 640 × 512,像元为 15 μm ,其对应的空间频率为 33 lp/mm,此处的调制传递函数大于 0.45,光学系统像质良好,完全可以满足投影仪的使用要求。

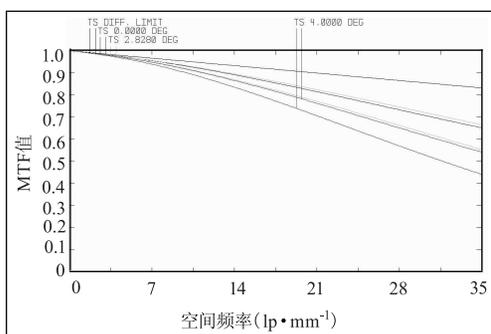


图 9 调制传递函数

Fig. 9 Modulation transfer function

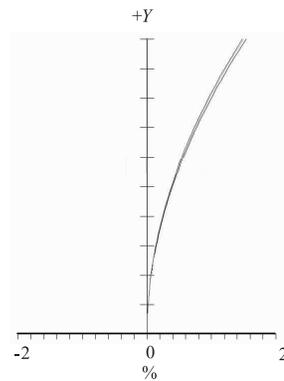


图 10 畸变

Fig. 10 Distortion

表 3 光学系统设计结果

Tab. 3 Design results of collimating projection optics

参数	指标	设计结果
波段/ μm	3 ~ 5	3 ~ 5
焦距/mm	75.08	75.07
视场/(°)	8	8
入瞳直径/mm	≥ 80	80
入瞳距离/mm	≥ 800	850
角分辨率/mrad	≤ 0.2	0.19
畸变/%	≤ 2	1.5

5 系统测试结果

图 11 为红外场景投影仪实物图。利用标定好的红外热像仪对投影仪进行测试与仿真,可以验证投影仪软件及硬件(包括光学系统)的性能。



图 11 红外场景投影仪

Fig. 11 Infrared scene projector

利用 FLIR 公司的中波热像仪对投影仪进行仿真测试实验。图 12 为系统输出的灰度图。图中的灰度曲线基本呈线性分布,图像具有良好的灰度。图 13 为当黑体温度为 600 $^{\circ}\text{C}$ 时,输入黑白图像的测试结果,图像全黑时,热像仪得到图像的非均匀为 0.5/22.2 = 2.2%,均匀性为 98.1%;图像全白时,热像仪得到图像的非均匀为 3.3/168.7 = 1.9%,均匀性为 97.8%,均大于 95%,优于技术指标要求。图 14(a)为计算机输入的静态源图像,图 14(b)为

热像仪得到仿真图像,像质优良,图像逼真。测试结果表明本文设计的光学系统完全可以满足投影仪的使用要求。

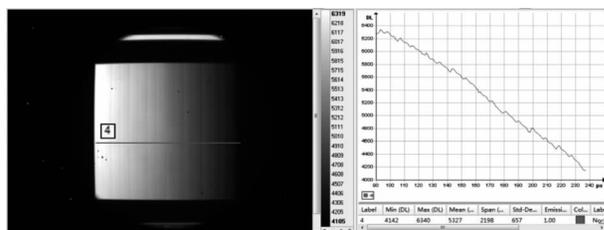


图 12 灰度测试结果

Fig. 12 Testing results of the grey level

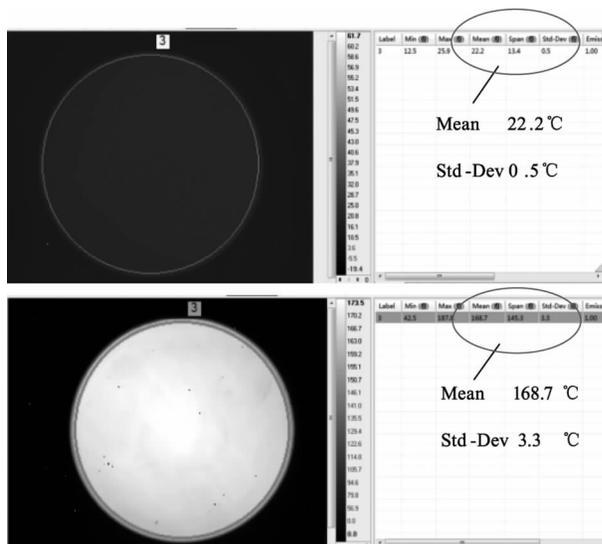
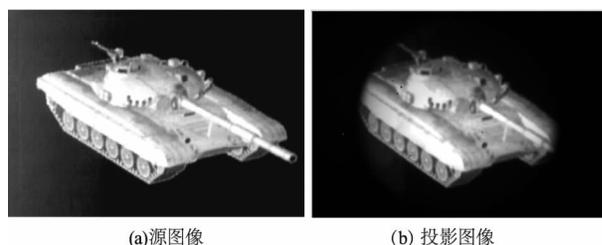


图 13 均匀性测试结果

Fig. 13 Testing results of the uniformity



(a)源图像

(b)投影图像

图 14 仿真图像

Fig. 14 Simulation images

6 结论

本文设计的场景投影仪采用双 DMD 同步调制模式来提高系统的帧速和显示灰度等级。照明系统采用柯勒照明系统来匀化光源,并采用三片式 CaF_2 全内反棱镜实现光路的折转、衔接。准直投影光学系统采用二次成像结构来减小系统的口径及重量,利用 Ge、Si、 CaF_2 等红外材料组合消像差,其 F 数小于 1,入瞳距 850 mm,像质优良,结构紧凑。采用此光学系统的红外场景投影仪实现了在较短积分时间内产生高灰度等级红外场景的目的。

参考文献:

- [1] Xu Jialin, Wang Xiaodong, Li Bingyu, et al. Method to transfer and store image data of infrared scene projector based on DMD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2622 - 2626. (in Chinese)
许家林, 王晓东, 李丙玉等. 基于 DMD 的红外场景模拟器图像数据传输和分割存储方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2622 - 2626.
- [2] Zhou Hao, Zhang Tao, Cui Wennan. Research on improving display frame rate of gray scale image based on digital micro-mirror device [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(21): 257 - 261. (in Chinese)
周浩, 张涛, 崔文楠. 基于数字微反射镜器件 (DMD) 灰度显示帧频提高技术研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(21): 257 - 261.
- [3] Qiao Yang. Investigation on optical engine applied to dual field angle infrared scene projector based on DMD [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013: 25 - 60. (in Chinese)
乔杨. 基于 DMD 的双视场红外目标模拟器光学引擎的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2013: 25 - 60.
- [4] Zhang Yimo. Applied optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 405 - 408. (in Chinese)
张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 405 - 408.
- [5] Vanderwerf, Dennis F. Applied prismatic and reflective optics [M]. Washington USA: SPIE Press, 2010: 172 - 173.
- [6] Jian Yi, Pan Zhaoxin, Yu Yang. Design of optical engine for infrared scene simulation system based on DMD [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014, 33(4): 375 - 379. (in Chinese)
蹇毅, 潘兆鑫, 于洋. 基于 DMD 的红外场景仿真系统光学引擎设计 [J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(4): 375 - 379.
- [7] Li Zhuo, Ye Zongmin, Mu Da. Design of spectrum frame of LWIR scene simulator based on DMD [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2019, 42(5): 38 - 40. (in Chinese)
李卓, 叶宗民, 牟达. 基于 DMD 的长波红外景象生成器分光构架设计 [J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2019, 42(5): 38 - 40.
- [8] Zheng Yawei, Gao Jiaobo, Wang Jun, et al. Design of the optical system for infrared dynamic scene simulation [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(8): 577 - 579. (in Chinese)
郑雅卫, 高教波, 王军, 等. 动态红外场景准直射光学系统的设计 [J]. 激光与红外, 2005, 35(8): 577 - 579.