

基于 DMD 的长波红外变焦投影系统设计

李卓^{1,2}, 牟达¹, 吕世龙³, 周强⁴

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 92785 部队 河北 秦皇岛 066200;
3. 63713 部队, 山西 太原 036301; 4. 61251 部队, 河北 秦皇岛 066102)

摘要: 基于数字微镜器件(DMD)的红外景象模拟器在室内环境下通过模拟真实景物及其环境的红外辐射来测试红外成像系统的性能。为实现基于 DMD 的红外景象模拟器能够满足不同待测系统的视场角匹配, 同时为避免投影系统与照明系统发生空间上的重叠, 设计了一套配有分光棱镜的红外变焦投影系统。该系统工作波段为 8~12 μm , F 数为 2.7, 采用光学补偿变焦方式, 可实现 50/100/150/200 mm 四档变焦。根据四组元系统负组补偿原理及其高斯光学公式对系统光学参数进行计算, 选用与参数相近的初始结构进行处理及优化。设计结果表明, 各焦距位置在 20 lp/mm 处的调制传递函数值均接近衍射极限, 符合使用要求。

关键词: 光学设计; 数字微镜器件(DMD); 光学补偿; 红外变焦; 投影系统

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1218003

Design of zoom LWIR projection system based on DMD

Li Zhuo^{1,2}, Mu Da¹, Lv Shilong³, Zhou Qiang⁴

(1. School of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Unit 92785, Qinhuangdao 066200, China;
3. Unit 63713, Taiyuan 036301, China; 4. Unit 61251, Qinhuangdao 066102, China)

Abstract: The infrared scene simulator based on digital micro-mirror device (DMD) can test the performance of infrared imaging system by simulating the infrared radiation of the real object and environment in the indoor environment. A set of the infrared zoom projection system with dispersion prism was designed by ZEMAX optical software. The system can match the different viewing angle of the system and avoid overlapping between projection systems and illumination systems on the space. The system can work for the band of 8–12 μm . The F number of the system is 2.7. A zoom optical compensation way was used in the system. And the system can realize the focal lengths of 50/100/150/200 mm through four zoom blocks. According to the principles and Gaussian optics formula of four-component system sub-group compensation, the optical parameters of the system were counted; the initial structure which was similar to the optical parameters was adopted and then optimized. The design results show that the image position is stable and the modulation transfer function (MTF) curve at 20 lp/mm of each focal length is closed to the diffraction limit during zoom process, which could conform to the requirements.

收稿日期: 2016-04-09; 修订日期: 2016-05-13

基金项目: 总装备部预研局“十二五”基金项目(5131xx05)

作者简介: 李卓(1988-), 男, 硕士生, 主要从事现代光学设计方面的研究。Email: 905455325@qq.com

导师简介: 牟达(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要从事目标辐射特性分析和现代光学测试技术等方面的研究。Email: md_79@126.com

Key words: optical design; digital micro-mirror device(DMD); optical compensation; infrared zoom; projection system

0 引言

红外技术凭借其在军事和民用领域广阔的发展前景,成为各国争相发展的重点技术。基于数字微镜器件(DMD)的红外景象模拟器可在室内环境下模拟真实景物及其环境的红外辐射,实现对红外成像系统性能的准确测试与评估^[1-2]。其中投影系统作为红外景象模拟器的核心,其性能直接影响到仿真测试的精确度^[3]。

目前,基于 DMD 的红外景象模拟器以单视场模拟为主体,文中提出的在 8~12 μm 工作波段采用光学补偿的变焦方式实现了 ±2.36°~±9.37° 四个视场的模拟,扩大了视场角的匹配区间,进一步提升了景象模拟器的工作效能。并且整个系统仅采用一个非球面,未有衍射面,系统结构简单,降低了加工的难度和成本同时具有良好的成像质量。可满足对更多的红外系统的测试需求,极大地提高了设备的校费比。

1 DMD 工作原理

DMD 本质是一个反射式数字半导体光分布调制器。根据微机械加工原理,应用铝溅射工艺,在由半导体硅片做衬底的 CMOS 存储芯片上用铰链结构方式构建数以百万记的微反射镜面,利用静电使每个微镜面发生独立偏转,控制图像灰度等级^[4]。DMD 的微镜偏转角通常为 ±12°,分别对应“开态”、“平态”和“关态”。DMD 通过精确控制每个微镜的偏转角度来实现图像成像,生成动态图像信息。市场上销售的 DMD 芯片保护光窗的材料只能透过可见光。为实现 DMD 芯片应用于长波红外波段的投影系统,需更换窗口^[5]。

2 分光棱镜设计

通过 DMD 芯片工作原理可知,照明系统的光轴与投影系统的光轴夹角为 24°,对离 DMD 芯片最近物镜空间尺寸计算可知,该设计中照明系统的镜筒与投影系统的镜筒空间上存在重叠的问题,需引

入分光系统^[6]。如果使用半反半透光棱镜,能量透过率低于 25%。为提高系统能量的利用率,应用全反射原理对分光棱镜进行设计。

文中选用高折射率、低色散的锗作为棱镜材料,通过手动计算与 CAD 绘图相结合的方法完成对参数的确定。如图 1 所示,先对左侧棱镜进行计算。根据光线在棱镜中的折返路线计算棱镜的内角,并考虑棱镜不宜过厚,选取 θ_1 为 16°,求出 α 和 β 。

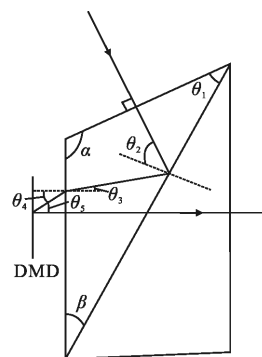


图 1 TIR 棱镜计算示意图

Fig.1 TIR prism calculation diagram

为了提高材料的利用率,需对棱镜进行切割设计。同时为了避免装调和误差的影响,应留有一定余量,最终设计结果如图 2 所示,两块棱镜的空气间隔按照 0.001 mm 计算。

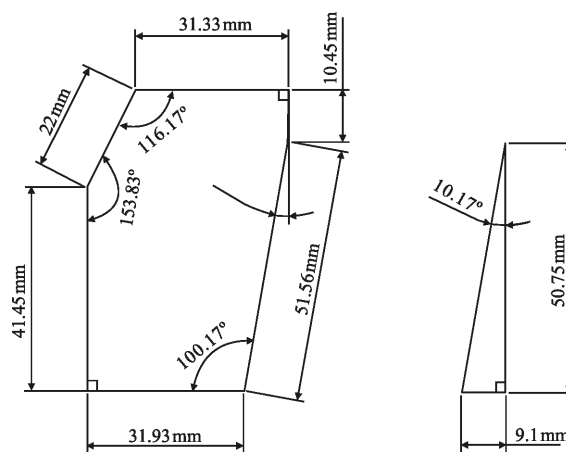


图 2 TIR 棱镜尺寸示意图

Fig.2 TIR prism size diagram

选用 POB 建模法, 在 Zemax 软件非序列模式下, 分别在 DMD 芯片三种工作状态下完成对所设计棱镜的模拟, 成功解决了光束分离的问题, 满足使用要求, 如图 3 所示。

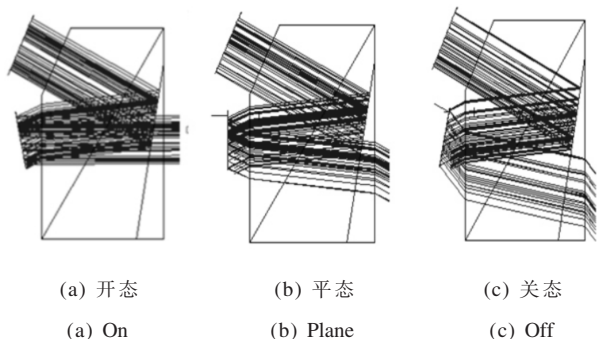


图 3 Zemax 软件模拟分光棱镜工作情况

Fig.3 Zemax simulation dispersion prism work situation

3 投影系统设计

投影系统作为景象模拟器与被测系统的衔接桥梁, 是仿真系统中核心部件, 对系统成像的照度均匀性、对比度、分辨率有直接的影响。采用变焦距设计可使得目标景物的像面位置保持不变, 只是像的大小发生改变, 从而实现对不同视场角的红外成像系统的测试与评估^[7]。

3.1 系统的技术指标

对于长波红外系统而言, 较大的 F 数可以降低衍射因素的影响, 提高系统的分辨率, 但同时减少进入系统的能量。为此, 该系统在保证与待测系统口径完美匹配的前提下, 选取合适的 F 数以平衡能量与衍射因素的相互作用。综合考量, 系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Tab.1 Performance parameters of system

Parameter	Value
Wavelength/ μm	8-12
Focal length/mm	50-200
$F\#$	2.7

DMD 参数: 尺寸 0.65 in (1 in=2.54 cm), 分辨率 1 920×1 080, 微镜倾斜角 $\pm 12^\circ$ 。

3.2 设计思路

根据投影系统的工作特点, 采用逆向设计, 即 DMD 芯片作为投影系统的物方焦平面^[7]。考虑到系

统的变倍率不大, 视场角相对较小, 采用机械结构简单的光学补偿法变焦。光学补偿变焦系统按照透镜组数可分为二组元、三组元和四组元。该变焦系统设置四个档位, 因四组元系统有四个完全补偿点, 相比其他系统能获得更好的成像质量, 所以选用四组元光学补偿变焦系统。

3.3 系统的设计及结果

四组元光学补偿式变焦系统由前固定组、移动组、中间固定组合、后固定组四部分构成, 可分为正组连动和负组连动。为降低投影系统长度, 采用负组连动实现变焦投影系统的设计。根据负组补偿的原理和高斯光学公式^[8]计算各透镜实际焦距与间距。系统变倍比为 $R=F_{\text{max}}/F_{\text{min}}=4$ 。像面位移 $\delta l'(z)$ 与变倍组移动距离 z 的关系:

$$\delta l'(z) = \frac{z^4 - r_1 z^3 + r_2 z^2 - r_3 z + r_4}{z^3 + b_1 z^2 + b_2 z + b_3} \quad (1)$$

四组元系统有四个完全补偿点, 即:

$$\delta l'(z) = \frac{(z-z_1)(z-z_2)(z-z_3)(z-z_4)}{z^3 + b_1 z^2 + b_2 z + b_3} \quad (2)$$

式中: z_1, z_2, z_3, z_4 为补偿点的位置。公式(1)与(2)联立有 $r_1 = 1 + z_2 + z_3; r_2 = z_2 + z_3 + z_2 z_3; r_3 = z_2 z_3; r_4 = 0$ 。在规划条件下, 取 $z_1 = 0, z_2 = 0.293 - \varepsilon, z_3 = 0.707 - \varepsilon, z_4 = 1$ 。对负系统引入符号 $\tau = -\frac{R-1}{R+1}$ 。其中 $\varepsilon = 0.17(1 + 0.154\tau^2 + 0.274\tau^4)$ 。

预先给定最后像距 l 的值, 经反复计算后 l 取为 0.8 mm 较为适宜, 利用下面公式求解 f_1 :

$$f_1^2 - 2 \frac{e_{10} - e_{11}l + e_{12}l^2 - l^3}{(1+S_{21})^2} f_1 - \frac{e_{00} - e_{01}l + e_{02}l^2 - e_{03}l^3 + l^4}{(1+S_{21})^2} = 0 \quad (3)$$

式中:

$$e_{10} = \frac{1}{2} \left[(r_1 - 2S_{21}) \left(r_2 + \frac{r_1 - 1}{r - 1} \right) - r_3 \right]$$

$$e_{11} = \left[(r_1 + 2S_{21}) \left(r_1 + \frac{1}{r - 1} \right) + \frac{r_1 - 1}{r - 1} \right]$$

$$e_{12} = \left[2r_1 + 3S_{21} + \frac{2}{r - 1} \right]$$

$$e_{00} = \left[\frac{r}{r - 1} (r_1 + 2S_{21}) r_3 \right]$$

$$e_{01} = \left[(r_1 + 2S_{21}) \left(r_2 + \frac{r_1 - 1}{r - 1} \right) + \frac{r + 1}{r - 1} r_3 \right]$$

$$e_{02} = \left[(r_1 + 2S_{21}) \left(r_1 + \frac{1}{r - 1} \right) + r_2 + \frac{2}{r - 1} (r_1 - 1) \right]$$

$$e_{03} = \left[2r_1 + 2S_{21} + \frac{2}{r - 1} \right]$$

变倍组在最前和最后的焦距比为 r 。主面距 S_{21}

预先给定 0.3 mm。由于选取负组补偿, f_1 的值选择小于 0 的解, 即为 -1.253 5 mm。通过求解的 f_1 , 可依下列顺序求解 f_2 值。

$$\begin{aligned} b_1 &= l - f_1 - r_1 \\ b_2 &= (l - f_1)b_1 - f_1^2 + r_2 \\ \beta_3 &= l + b_1 + b_2 \\ b_3 &= \beta_3 / (r_1 - 1) \\ a_1 &= \frac{(l - f_1)b_2 - b_3 - r_3}{f_1^2} \\ a_2 &= (l - f_1)b_3 / f_1^2 \\ d_{21} &= b_1 - a_1 \\ f_2 &= S_{21} - f_1 - d_{21} = 1.298 5 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4)$$

求解 f_3 的值:

$$f_3 = -\sqrt{a_2 + d_{43}d_{32}} = -1.210 6 \text{ mm} \quad (5)$$

式中: $d_{43} = (b_3 - d_{21}a_2) / f_2^2$; $d_{32} = d_{43} - a_1$ 。

求解 S_{32} 的值:

$$S_{21} = f_2 + d_{32} + f_3 = 1.5 \text{ mm} \quad (6)$$

求解 f_4 的值:

$$f_4 = S_{34} - f_3 - d_{43} = 2.9 \text{ mm} \quad (7)$$

式中: S_{34} 试取为 2 mm。

$$f_{\max} = f_1 f_2 f_3 / b_3 = 7.277 5 \text{ mm} \quad (8)$$

将所设计的系统焦距 (F_{\max}) 与计算规划焦距 (f_{\max}) 作比值 M , 用规划的值乘以比值 M , 得到实际的 $S_{34} = 55 \text{ mm}$, $S_{32} = 42 \text{ mm}$, $S_{21} = 8.2 \text{ mm}$ 。根据透镜间距的高斯解选取与之接近的初始结构, 如图 4 所示。利用光学设计软件中的多重结构, 通过设置每个档位

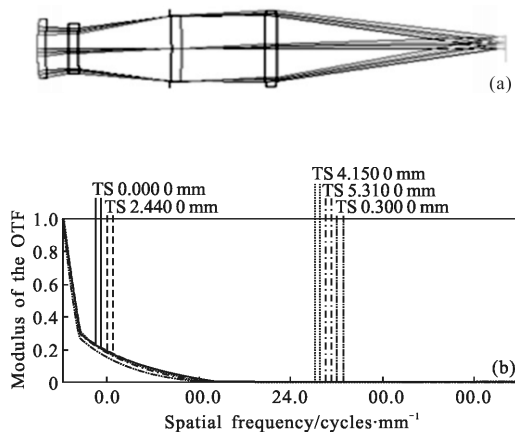


图 4 初始结构及其调制传递函数曲线

Fig.4 Initial structure and its MTF curve

的视场角度和透镜间距实现系统变焦。为使像差能够满足设计要求, 在结构后加入辅助光组进行优化处理, 最终获得结构简单、像质高的变焦系统。

设计结果如图 5 所示。该系统由七片透镜、一组 TIR 棱镜、一片 DMD 保护光窗构成, 工作总长为 244.5 mm。从左到右前五片透镜材料为 Ge, 后两片为 Amtir1 和 Znse, 采用三种材料的主要目的是消色差。图 5(a)~(d) 的系统焦距分别为 50、100、150、200 mm。为了平衡成像质量, 控制畸变, 在第六片透镜的前表面使用非球面。

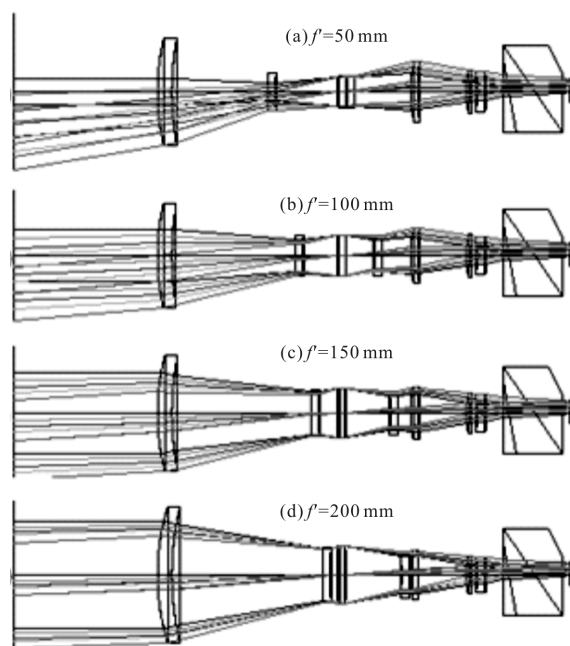
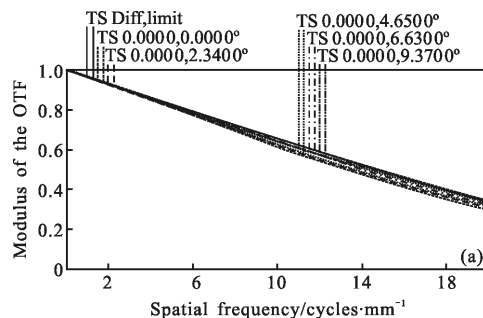


图 5 光学补偿变焦红外投影系统

Fig.5 Zoom compensation infrared projection system

该套系统主要借助调制传递函数 MTF 和点列图对其进行评价。经优化后, 在焦距为 50、100、150、200 mm 位置下传递函数曲线和点列图如图 6~9 所示。变焦系统各焦距位置的点列图中弥散斑均方根



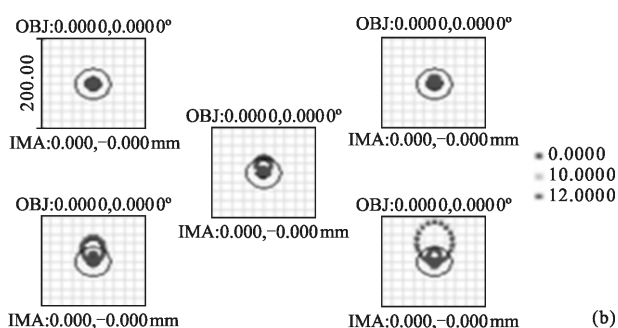


图 6 在焦距为 50 mm 位置下的传递函数图和点列图
Fig.6 MTF and spot diagram at 50 mm focal length position

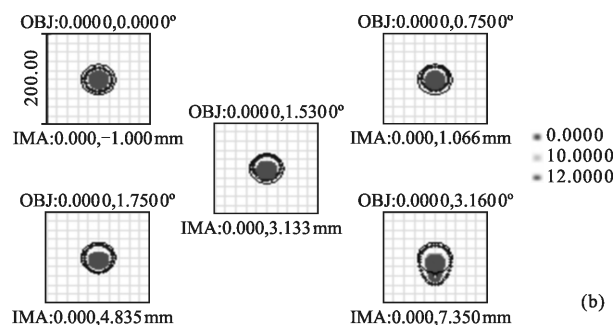


图 8 在焦距为 150 mm 位置下的传递函数图和点列图
Fig.8 MTF and spot diagram at 150 mm focal length position

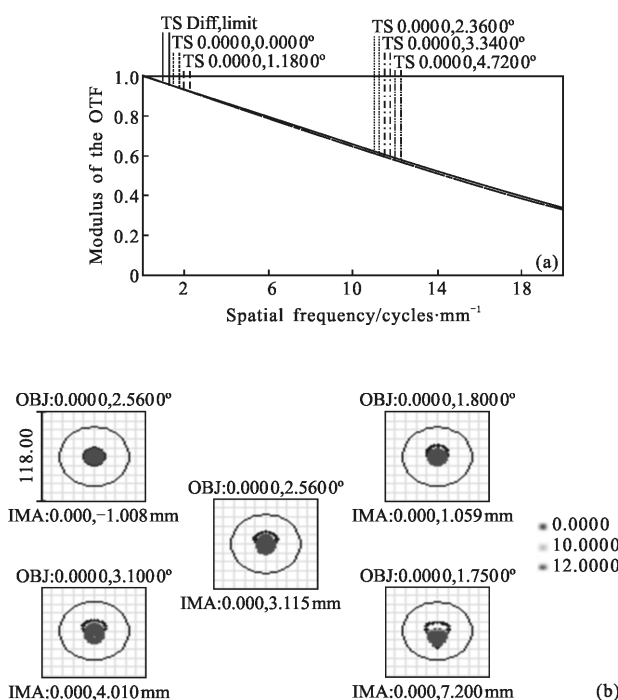


图 7 在焦距为 100 mm 位置下的传递函数图和点列图
Fig.7 MTF and spot diagram at 100 mm focal length position

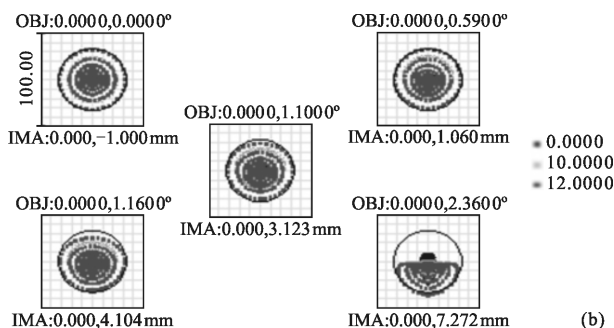


图 9 在焦距为 200 mm 位置下的传递函数图和点列图
Fig.9 MTF and spot diagram at 200 mm focal length position

值均小于红外探测元尺寸($30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$),在 20 lp/mm 处的 MTF 都接近衍射极限,表明所设计的投影系统在变焦过程中具有良好的成像质量。

4 结论

文中设计的基于 DMD 的红外景象模拟器投影系统可以实现焦距为 50~200 mm 的光学补偿变焦,不仅结构简单,而且成像质量高。根据 TIR 棱镜工作原理,选用锗材料的分光棱镜顺利解决了照明光束与投影光束分离问题,并且不会对投影系统的成像

产生影响。文中通过以计算高斯参数来选择初始结构的方式大大降低了光学设计的难度，是一种优质的解决方案。

参考文献：

- [1] Hu Chuqiang, Mu Da, Chen Lingzhi. Design of infrared target simulator's optical splitting system based on digital-mirror device [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42 (6): 655-658. (in Chinese)
胡初强, 牟达, 陈灵芝. 基于 DMD 的红外目标模拟器分光系统设计[J]. *激光与红外*, 2012, 42(6): 655-658.
- [2] Xu Zhenling, Yang Miaomiao. Time performance testing of DMD dynamic infrared scene projector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 417-423. (in Chinese)
许振领, 杨淼淼. 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.
- [3] Dong Jianing, Mu Da, Xu Chunyun, et al. Projection optical system design of infrared scene simulation based on DMD[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 144-148. (in Chinese)
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): 144-148.
- [4] Wang Yunping, Zhao Changming. Dynamic infrared scene simulation system based on the digital micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 966-970.
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*, 2009, 38(6): 966-970.
- [5] Yuan Xiong, Hu Wengang, He Yongqiang, et al. Investigation on replacement technology of digital micromirror device window [J]. *Laser & Infrared*, 2014 (8): 892-897. (in Chinese)
元雄, 胡文刚, 何永强, 等. DMD 窗口更换技术研究[J]. *激光与红外*, 2014(8): 892-897.
- [6] Jian Yi, Pan Zhaoxin, Yu Yang. Design of optical engine for infrared scene simulation system based on DMD [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2014, 33(4): 375-379. (in Chinese)
蹇毅, 潘兆新, 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] Liu Zhiyin, Luan Xiaoyu, Fu Yuegang, et al. Design of infrared zoom projection optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(6): 857-863. (in Chinese)
刘智颖, 栾晓宇, 付跃刚, 等. 红外变焦投影光学系统的设计. *应用光学*, 2015, 36(6): 857-863.
- [8] Wang Zhijiang, Gu Peisen. Technical Manual of Practical Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 416-423. (in Chinese)
王之江, 顾培森. 实用光学技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 416-423.