

应用于超光谱定标的光谱可调光源光学设计

翟文超, 徐 骏, 郑小兵, 丁 蕾, 陆俊桦

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,
安徽 合肥 230031)

摘 要: 针对超光谱遥感中,传统定标光源和目标光源光谱精细结构不匹配、精确度量困难,影响定标精度的难题,提出了一种基于数字微镜器件和光谱仪结构的新型光谱可调光源,并设计了该光源的光学系统。详细描述了这种光源系统的工作原理,确定了光学系统的设计方案,计算了系统的结构参数,并说明了具体的设计过程。设计结果表明:在 0.4~1.0 μm 的设计波段上,光学系统整体性能接近衍射极限,各波长点列图 RMS 半径小于 3.5 μm ,各波长 MTFs 在 37 lp/mm 空间频率处都达到 0.8 左右,满足设计要求。这种新型的光谱可调光源,有望提高目标光谱精细结构模拟的准确度,可利用基于标准探测器的方法进行精确度量,有利于降低超光谱遥感仪的定标不确定度。

关键词: 超光谱; 光谱可调光源; 光学设计; 定标; 遥感

中图分类号: O432.1; O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0950-06

Optical design of spectrally tunable source for hyperspectral calibration

Zhai Wenchao, Xu Jun, Zheng Xiaobing, Ding Lei, Lu Junhua

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The fine structures of traditional calibration sources and target spectra may have differences, which could hinder the calibration accuracy of hyperspectral remote sensors. Furthermore, traditional sources are difficult to be measured accurately. To solve such problems, a novel spectrally tunable source based on digital micromirror device (DMD) and spectroradiometer structure was introduced. The optical system of the new source was designed. The principles of the system, structural parameter calculation of the system and the process of optical design were described in detail. The results indicate that the optical system's performances are near-diffractive-limit in the whole band from 0.4 μm to 1.0 μm . The RMS spot radii are less than 3.5 μm and the MTFs at 37 lp/mm are near 0.8 for all the design wavelengths, which meet the requirements of the source. The novel source is promising to improve the imitation

收稿日期: 2013-07-11; 修订日期: 2013-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(61275173)

作者简介: 翟文超(1985-), 男, 博士生, 主要从事光学辐射定标方面的研究。Email: wczhai@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学辐射定标、高精度光电检测技术、星上定标技术、海洋光学等方面的研究。Email: xbzheng@aiofm.ac.cn

accuracy of target spectra, and it could also be measured accurately by detector-based calibration method. With these features, the new source is helpful to reduce the calibration uncertainties of remote sensors.

Key words: hyperspectral; spectrally tunable source; optical design; calibration; remote sensing

0 引言

超光谱探测技术是目前一项前沿技术,已经广泛地应用在了遥感、农业、军事、地质勘探等领域,取得了巨大的效益。在超光谱遥感中,超光谱遥感仪的定标精度直接关系到后期获得的数据产品的有效性、准确度。超光谱探测系统光谱通道更多,光谱分辨率更高,探测的精度也越来越高,这就对超光谱遥感仪的定标提出了更高的要求。

对超光谱遥感仪器的传统定标手段仍然采用“标准灯-参考板-积分球”的传递定标方法,这种方式方便快捷,溯源的初级标准是标准黑体,相比较溯源于低温绝对辐射计,基于标准探测器的标准传递方法^[1],精度较低。实验室定标光源中,传统的积分球光源采用卤钨灯作为发光单元,存在和目标光源光谱不匹配的问题,影响定标的精度^[2],而且这种光源是宽波段的光源,如果要使用基于标准探测器的传递法定标,需要使用滤光片,容易引入较大的不确定度;基于发光二极管(LED)的光谱可调光源^[3],实现了定标光源光谱和目标光谱的匹配,但由于LED自身带宽和LED种类的限制,在超光谱定标中,难以精确模拟目标光谱的精细结构。激光导入积分球光源系统是一种光谱扫描式的单色光源^[4-5],不存在光谱匹配的问题,并且可以使用基于标准探测器的定标方法进行定标,精度很高,但过程较复杂,系统的维护比较麻烦。

针对超光谱遥感仪器的高精度的定标要求,而又不失传统定标方式的方便快捷性,提出了一种基于数字微镜器件(DMD)、采用光谱仪结构的新型光谱可调光源系统^[6-7]。文中将详细叙述该系统的工作原理、光学系统的设计方案及最终的设计结果。

1 光学系统原理介绍

DMD 是一种反射式面阵空间光调制器^[8-9],其像元可以绕对角线旋转 $\pm 12^\circ$,具有灵活的单像元、行、列控制功能。光束落在 DMD 像元后,可以通过控制

DMD 像元的旋转,控制光束进入主光路或离开主光路,对应于“开”、“关”状态,如图 1 所示。

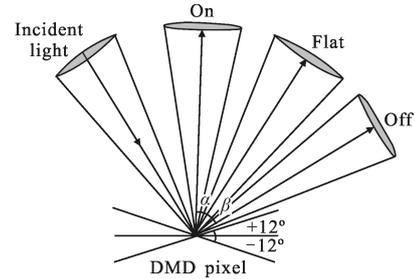


图 1 DMD 空间光调制示意图

Fig.1 Schematic diagram of spatial light modulation of DMD

光源系统的工作原理示意图如图 2 所示。

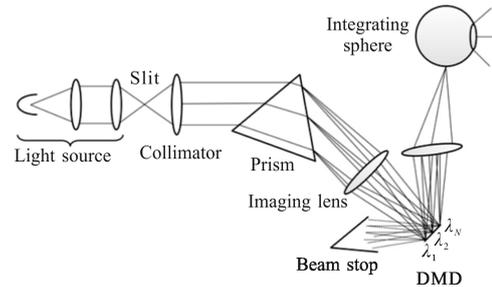


图 2 光源系统工作原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the source system

图 2 中,狭缝垂直纸面方向向里。可以看出,该光源系统的核心光路类似于光谱仪的光路结构,DMD 在此处类似于成像光谱仪中的面阵电荷耦合器件(CCD),DMD 本质上是一个反射镜。

光源耦合进狭缝的光束,经过准直物镜准直后,平行入射到色散元件上,经过色散元件的色散后,各波长组分的光束呈不同角度平行出射,经过成像镜头,成像在 DMD 面阵上,此时,相当于将狭缝分光谱地成像在了 DMD 像元上。理想情况下,DMD 的每一列像元就对应一个波长,DMD 另一维就代表了该波长的强度。控制 DMD 列的“开”、“关”状态,就可以选择波长;控制 DMD 行的“开”、“关”像元数目,就可以控制该波长的输出光强度。收集“开”状态的有用光,导入到积分球中,同时,用垃圾光收集器消除“关”状态的垃圾光,借助于光谱模拟程序,模拟

出目标光谱。

根据光谱仪的相关理论,在 1:1 放大倍率成像的系统中,狭缝对最终光学系统的光谱分辨率具有决定作用,狭缝越窄,光谱分辨率越高,光谱模拟越准确,但光通量减少;狭缝越宽,光通量越大,光谱模拟精度降低。因此,可以通过合理选取狭缝,进行光谱模拟准确度和光通量大小的折衷。

2 光学系统设计

2.1 系统结构参数的确定

要设计的光源系统其工作波段位于 $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$, 谱段比较宽,并且属于成像系统,在设计过程中,色差是需要重点关注的像差。采用反射式光学系统,可避免校正色差,但使用反射式系统,要校正其他像差,需要使用非球面^[10],加工、检测、装调困难。系统从校正像差、加工装调方面考量,选用了折射式系统。

色散元件选择了棱镜,原因是系统的工作波段位于 $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$,若使用光栅,会面临次级光谱的干扰,而且从光学效率上讲,棱镜的光学效率更高。棱镜的材料选择了 SCHOTT 的 SF2 光学玻璃,这种光学玻璃在 $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 透过率较好($>95\%$),且属于重火石玻璃,色散能力较强,有利于光谱分辨率的提高。

DMD 的有关参数见表 1。

表 1 DMD 参数列表

Tab.1 List of DMD's parameters

DMD's parameters	Data
DMD's length	14.008 mm
DMD's width	10.506 mm
DMD's resolution	1 024×768
Size of DMD's pixels	13.8 μm ×13.8 μm
Material of DMD's sealed window	Corning7056
Thickness of DMD's sealed window	2.997 2±0.127 mm
Distance between DMD's window and active area	0.482 6±0.152 mm

光源系统的核心部分几何示意图见图 3。

图 3 中,准直物镜的焦距为 f ,成像镜头的焦距为 f' ,定义主波长在 DMD 上的高度为 0 , H_L 为长波($1.0\ \mu\text{m}$)波长在 DMD 像元上的高度。 H_S 为短波($0.4\ \mu\text{m}$)波长在 DMD 上的高度。长波、短波和主光线的夹角分别为 β 和 α 。主光线以最小偏转角入射,这样有助于节省棱镜材料,引入的像差也较小。

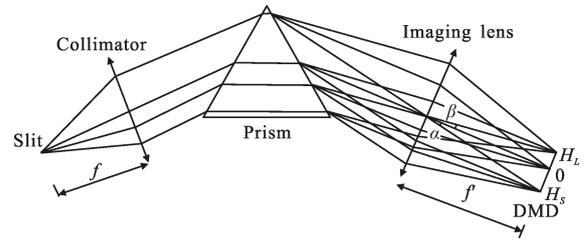


图 3 光学系统核心光路几何示意图

Fig.3 Geometric diagram of the optical system

根据图 3 的光路结构和表 1 中 DMD 的参数,可以得到成像镜头的焦距 f' ,见公式(1)~(4)。其中, L_{DMD} 为 DMD 的长度。

$$H_L = f' \tan \beta \quad (1)$$

$$H_S = f' \tan \alpha \quad (2)$$

根据公式(1)与公式(2)可得:

$$L_{\text{DMD}} = H_L - H_S = f' (\tan \beta - \tan \alpha) \quad (3)$$

$$f' = \frac{L_{\text{DMD}}}{\tan \beta - \tan \alpha} \quad (4)$$

计算时,从有利于准直物镜和成像镜头的像差校正考量,选择 $0.55\ \mu\text{m}$ 波长作为主波长。根据材料的折射特性,在短波附近折射率变化较快,主波长稍偏向短波段,有利于像差的平衡。经计算,将成像镜头的焦距设计为 $f' = 135\ \text{mm}$ 。系统设计时,物、像方放大倍率按照 1:1 进行设计,故准直物镜的焦距也设计为 $f = 135\ \text{mm}$ 。从系统光瞳匹配的角度出发,准直物镜和成像镜头均设计成光阑外置,且光阑位置重合。

有两个因素约束成像镜头和准直物镜的相对孔径大小,一个是 DMD 的照明要求,另一个是棱镜的大小要求。

如图 1 所示,DMD 的空间调制要求调制后“开”状态光锥和“平”状态的光锥充分分离,这约束成像系统的 $f/\#$,在临界情况下,对成像系统的 $f/\#$ 要求为:

$$f/\# = \frac{1}{2n_0 \sin \theta} = \frac{1}{2 \sin 12^\circ} \approx 2.4 \quad (5)$$

根据公式(5)可知,要让 DMD 的入射光束和调制光束充分分离,成像系统的 $f/\#$ 要保证大于 2.4。根据图 2 的几何关系,棱镜的大小和准直镜头和成像系统的光瞳直径成正比, $f/\#$ 越小,系统的光瞳直径就越大,导致棱镜的体积也越大。棱镜体积不能太大,这是棱镜材料限制的,因为体积很大,光学性能又非常好的材料较难获得。综合考虑,准直镜头和成像镜头的相对孔径设计成 $f/3.75$,对应棱镜的边长为

70 mm, 棱镜大小适宜。

为了兼顾不同应用情况下对高光通量和高光谱分辨率的要求, 将狭缝设计成可更换狭缝。狭缝的长度定为 10 mm, 和 DMD 的宽度维对应, 狭缝宽度最大设计至 500 μm, 此时可以得到准直物镜的半视场角度为 2.2°。成像镜头的视场角度由 DMD 决定, 按照半对角线计算, 成像镜头的半视场角度为 3.71°。

综合准直镜头和成像镜头的设计指标, 见表 2。

表 2 准直镜头和成像镜头的设计指标

Tab.2 Requirements of the collimator and imaging lens

lens		
Parameters	Collimator	Imaging lens
Half angle of view	2.2°	3.71°
<i>f</i> /#	3.75	3.75
Focal length	135 mm	135 mm
Others	Stop located outside	Stop located outside; Sharing a common stop with collimator; Back focal length>100 mm

2.2 准直物镜设计

准直物镜的设计关键在于结构的选型和材料的选择, 由于光阑外置, 系统的失对称较严重, 而且系统的工作波段较宽, 消色差设计后, 二级光谱比较突出。设计时, 考虑各种结构所能承担的孔径大小, 使用了三片式结构作为设计初始结构, 进行了复消色差设计。根据复消色差中有关材料选择的原则^[11], 分别选取了 SCHOTT 的 N-PK52A、N-KZFS5 和 SF2 玻璃材料。

参考光学设计复消色差理论, 在材料确定的情况下, 各透镜光焦度的分配需满足公式(6)~(8)所示的关系:

$$\varphi_a + \varphi_b + \varphi_c = \varphi \tag{6}$$

$$\frac{\varphi_a}{v_a} + \frac{\varphi_b}{v_b} + \frac{\varphi_c}{v_c} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\varphi_a P_a}{v_a} + \frac{\varphi_b P_b}{v_b} + \frac{\varphi_c P_c}{v_c} = 0 \tag{8}$$

公式(6)~(8)中, φ_a 、 φ_b 、 φ_c 分别为三个透镜的光焦度; φ 为准直镜头的总光焦度; v_a 、 v_b 和 v_c 以及 P_a 、 P_b 和 P_c 分别为根据修正阿贝数和部分色散公式计算得到的有效阿贝数和部分色散值^[12]。据公式(6)~(8), 获得系统的初始结构, 通过分裂透镜, 准直物镜共分裂成 6 片透镜, 借助于 ZEMAX 光学设计软件进行优化设计, 设计

了准直物镜(见图 4), 准直物镜性能接近衍射极限。

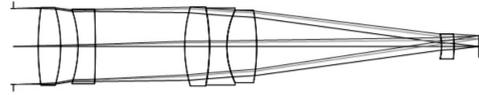


图 4 准直物镜设计结果示意图

Fig.4 Schematic diagram of the collimator

2.3 成像镜头设计

成像镜头的设计和准直物镜类似, 需要额外考虑的因素如下:

(1) 在 DMD (像面) 的前端有一个厚度 3 mm、Corning7056 材料的玻璃平板, 玻璃平板工作在会聚光束中时, 会贡献除场曲以外的其余 6 种初级像差。

(2) 成像镜头的后截距必须足够大, 该距离必须保证 DMD 调制后的“开”状态的光束有充分的空间从光路中引出。

(3) 成像镜头的光阑外置, 和准直物镜的光阑位置重合, 棱镜位于成像镜头光阑和镜头实体之间, 设计成像镜头时, 需要连同棱镜一起设计。

(4) 准直物镜残留的部分像差, 需要成像镜头补偿。

根据玻璃平板的像差特性, 玻璃平板在会聚光束中贡献的像差大小和玻璃平板在该会聚光束中的具体位置无关。因此, 设计时, 不需要过多考虑玻璃平板和 DMD 有效区之间公差过松的问题。同时, 由于玻璃平板可以贡献像差, 且接近像面, 成像镜头可以少分离一片透镜, 因此, 成像镜头设计时, 共分离成了 5 片透镜。

针对成像镜头后截距的要求, 通过计算模拟, 当成像镜头的后截距大于 100 mm 时可保证经过 DMD 调制后“开”状态的光束, 有充分的空间从入射光路中引出。通过 ZEMAX 光学设计软件的优化设计, 保持成像镜头的后截距大于 100 mm。成像镜头的设计结果如图 5 所示。

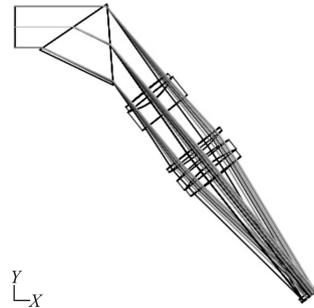


图 5 成像镜头示意图

Fig.5 Schematic diagram of the imaging lens

2.4 系统的整体优化设计

准直物镜和成像镜头完成后,将系统合为一体,整体进行优化,同时保持各自的焦距不变,保持成像镜头后截距大于 100 mm。最终,通过与加工单位的沟通,拆分了准直物镜中的三胶合透镜组,优化变量增加,同时也使光学系统呈现出一定的对称性,方便了像差的校正,带来的问题是增加了装调的复杂度,需要额外增加隔圈。整体优化后的光路结构见图 6。

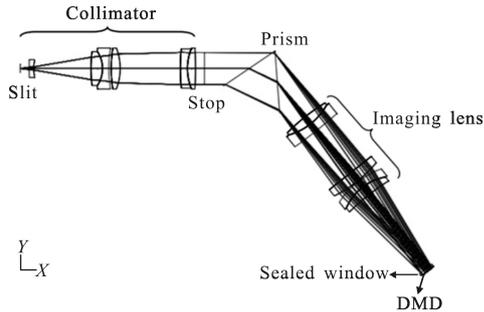


图 6 系统整体光路图

Fig.6 Schematic diagram of the whole optical system

3 系统设计结果

经过全系统优化,在主波长处,成像点列图结果见图 7。

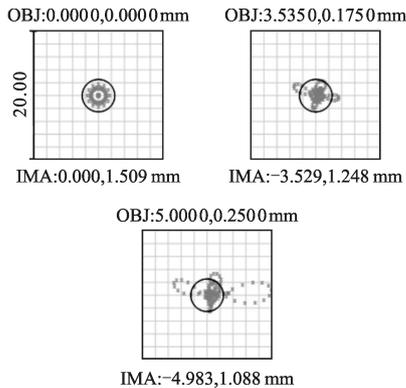


图 7 主波长(0.55 μm)处成像点列图

Fig.7 Spot diagrams of the system(@0.55 μm)

其他波长处的 RMS 点列半径见图 8。

根据图 8,几乎在整个工作波段,系统的 RMS 点列图都达到了衍射极限,最大 RMS 半径约 3.5 μm,弥散斑直径远小于 1 个 DMD 像元。0.4 μm、0.55 μm 和 1.0 μm 的 MTF 曲线见图 9~图 11 所示,在 37 lp/mm 的空间频率下,所有波长各视场的 MTFs 都达到了 0.8 左右。成像镜头的后截距大于 103 mm,也满足设

计要求。衍射环绕斑情况则是在 1.0 μm 波长处 85% 左右的能量都落在了一个 DMD 像元内,其他波长处,均达到了 90% 以上,此处仅给出 1.0 μm 波长的衍射环绕斑图示,见图 12。

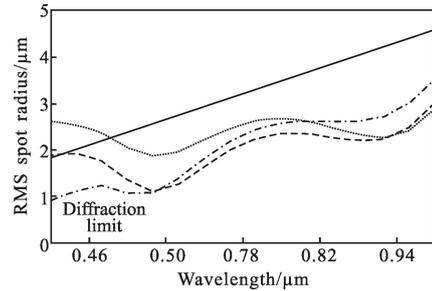


图 8 系统 RMS 点列半径和波长的关系曲线

Fig.8 Plots of RMS spot radius vs wavelength

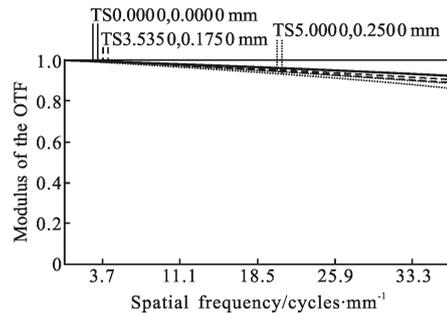


图 9 0.4 μm 波长 MTF 曲线

Fig.9 MTF curves of the system(@0.4 μm)

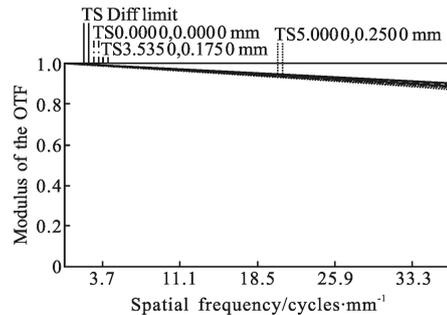


图 10 0.55 μm 波长 MTF 曲线

Fig.10 MTF curves of the system(@0.55 μm)

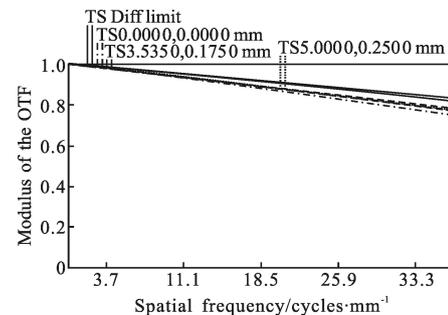
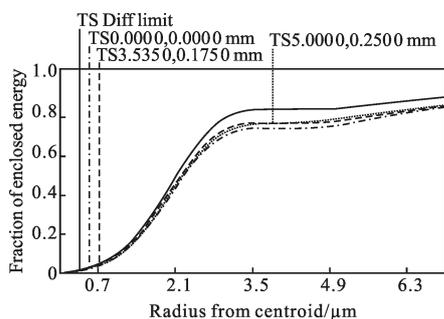


图 11 1.0 μm 波长 MTF 曲线

Fig.11 MTF curves of the system(@1.0 μm)

图 12 1.0 μm 波长的衍射能量分布图Fig.12 Diffraction encircled energy curves of the system
(@1.0 μm)

4 结论

针对超光谱遥感仪器的定标需求所设计的新型光谱可调光源光学系统,采用棱镜作为色散元件,数字微镜器件作为空间光调制器件,是一种综合了光谱细分技术和空间光调制技术的新型光学系统,采用光谱仪器设计理论和复消色差理论设计的光学系统,在 0.4~1.0 μm 工作波段上,性能接近衍射极限,满足光源系统的设计要求。

这种新型的光谱可调光源,有望提高目标光谱精细结构模拟的准确度,进一步降低光谱非匹配对遥感仪定标精度的影响。由于采用了光谱细分技术,该光源系统也可以工作在(准)单色模式下,类似于单色仪。因此,这种光源系统就兼有传统积分球光源方便快捷和窄带光源易精确度量的优点^[13],在超光谱遥感定标领域,具有重要的应用前景。

参考文献:

- [1] Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping, et al. Highly accurate primary and transfer standards for radiometric calibration [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45 (12): 1341-1344. (in Chinese)
郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 光辐射定标和标准传递方法 [J]. 科学通报, 2000, 45(12): 1341-1344.
- [2] Chen Feng, Zheng Xiaobing. Influence of spectrum non-matching on calibration precision of remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(3): 415-419. (in Chinese)
陈风, 郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 415-419.
- [3] Chen Feng, Yuan Yinlin, Zheng Xiaobing, et al. Design of spectral tunable LED light source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2060-2064. (in Chinese)
陈风, 袁银麟, 郑小兵, 等. LED 的光谱分布可调光源的设计 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2060-2064.
- [4] Brown S W, Eppeldauer G P, Lykke K R. Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources[J]. *Applied Optics*, 2006, 45: 8218-8237.
- [5] Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Li Jianjun, et al. Development of laser illuminated integrating sphere source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 738-744. (in Chinese)
徐秋云, 郑小兵, 李建军, 等. 外部导入激光的积分球辐射源的研制 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 738-744.
- [6] Brown S W, Rice J P, Neira J E, et al. Spectrally tunable sources for advanced radiometric applications [J]. *Journal of Research of National Institute of Standards and Technology*, 2006, 111(5): 401-410.
- [7] Mackinnon N, Stange U, Lane P, et al. Spectrally programmable light engine for in vitro or in vivo molecular imaging and spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(11): 2033-2040.
- [8] Dudley D, Duncan W, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [C]//Proceedings Of SPIE, 2003, 4985: 14-25.
- [9] Zhang Kai, Sun Siliang. Design of infrared scene target simulator system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 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, 40(1): 12-16.
- [10] Dang Dongni, Ji Yiqun, Shen Weimin. Projection lens design of wide band dynamic infrared scene simulator with digital micromirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1017-1021. (in Chinese)
党东妮, 季轶群, 沈为民. 宽波段 DMD 动态红外景象仿真器投影光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1017-1021.
- [11] Fischer R E, Grant A J, Fotheringham U, et al. Removing the mystique of glass selection [C]//Proceeding of SPIE, 2004, 5524: 134-146.
- [12] Chen Liwu, Yang Jianfeng, Hong Xinhua, et al. Wide bands long focal refracting lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(9): 1123-1126. (in Chinese)
陈立武, 杨建峰, 洪新华, 等. 宽波段折射式长焦光学镜头 [J]. 光子学报, 2004, 33(9): 1123-1126.
- [13] Brown S W, Saunders R D, Li Z, et al. An absolute detector-based spectral radiance source [C]//Proceeding of SPIE, 2010, 7807: 7807A-1-7807A-8.