

机载红外推扫成像光谱仪光学设计

刘子寒, 季轶群, 石荣宝, 陈宇恒, 沈为民

- (1. 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006;
2. 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要: 红外成像光谱仪适用于火山活动探测、森林火灾监测、城市化影响分析、地球表面研究及军事伪装识别等方面。文中基于 Dyson 中继系统, 设计使用波长范围为 $7.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 的长波红外成像光谱仪, 采用凹面衍射光栅分光, 系统 F 数达到 1.2, 视场角 18° , 空间分辨率为 1 mrad, 光谱分辨率为 50 nm, NETD 小于 0.3 K, 调制传递函数接近衍射极限, 光学系统体积为 $72\ \text{mm}\times 39\ \text{mm}\times 39\ \text{mm}$ 。该系统具有集光本领强、固有像差小、结构紧凑等优点。对其杂散热辐射分析表明, 采用实入瞳作为冷光阑和整体制冷的方法, 能有效地抑制光机系统自身的热辐射。

关键词: 成像光谱仪; 同心系统; 凹面光栅; 光学设计

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2941-06

Optical design of airborne infrared pushbroom imaging spectrometer

Liu Zihan, Ji Yiqun, Shi Rongbao, Cheng Yuheng, Shen Weimin

- (1. Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;
2. Key Laboratory of Modern Optical Technology of Jiangsu Province, Suzhou 215006, China)

Abstract: Infrared imaging spectrometers are applied to volcano behavior detection, forest fire survey, urbanization effect analysis, terrestrial composition and change monitoring, and camouflage recognition. In this paper, based on Dyson relay, a long wave infrared imaging spectrometer with wavelength range of 7.5 to $10\ \mu\text{m}$ was designed, which used a concave diffraction grating as its dispersive element. Its F number reached 1.2, field angle of view was 18° and spatial pixel resolution was 1 mrad, spectral resolution was 50 nm and noise equivalent temperature difference (NETD) was less than 0.3 K. The size of this designed optical system was about $72\ \text{mm}\times 39\ \text{mm}\times 39\ \text{mm}$, and its modulation transfer function approached to diffraction limitation. It has advantages of high throughput, low inherent aberration, and compactness. Analysis of its stray thermal radiation shows that its own thermal radiation of optical-mechanical system can be effectively suppressed by use of real entrance pupil as cool stop and of cryogenic optics.

Key words: imaging spectrometer; concentric optical system; concave grating; optical design

收稿日期: 2014-01-11; 修订日期: 2014-02-14

基金项目: 民用高分辨率对地观测系统专项重大科技工程(高分专项)项目(52-H33A01-8358-12/12)

作者简介: 刘子寒(1986-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计与光学仪器方面的研究。Email: aaron1130@126.com

导师简介: 沈为民(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学设计和仪器光学、以及航天遥感技术等方面的研究。

Email: swm@suda.edu.cn

0 引言

长波红外成像光谱仪是一种用来获取物体自身长波红外辐射二维空间信息和一维光谱信息的仪器,由前置物镜、分光系统和探测器组成,主要应用在航天器昼夜识别、化学气体流检测、地雷探测、水下目标探测、军事伪装识别^[1-3]等领域。

国外长波红外高光谱成像仪已经比较成熟。著名的有九十年代中期的 SEBASS^[2]系统,采用棱镜分光,光透过率高,工作于 7.5~13.5 μm 波长范围,光谱分辨率达到了 40 nm, F 数为 3。美国 NGST 研制的 LWHIS^[3] 采用 Offner 型的分光系统,工作于 8~13.5 μm ,光谱分辨率为 21 nm, F 数达到了 2.5,理论等效噪声温差(NETD)达到了 75 mK。美国陆军实验室应用制冷型光子探测阵列和谐衍射元件建立了中波红外(3~5 μm)和长波红外(8~10 μm)波段的双波段超光谱成像仪^[4]。美国 JPL 研制的 QWEST 使用量子阱探测器,采用 Dyson 型分光系统,波段范围 8~12 μm ,光谱分辨率为 20 nm, F 数达到了 1.6^[5]。

国内仅有少数几个机构展开长波红外高光谱成像仪的研究^[6-7],中国科学院上海技术物理研究所研制的 CMODIS 和 OMIS 在长波红外波段仅有几个波段,均采用光栅分光。其最近研制高光谱成像系统采用平面光栅分光系统, F 数为 2,光谱范围为 8~13.5 μm ,光谱分辨率为 54 nm。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、天津大学等单位主要采用谐衍射元件进行了设计研究。文中介绍基于 Dyson 中继系统的长波红外高光谱成像仪的设计。首先,给出了性能指标要求和设计思想;然后给出设计结果、像质评价和杂散热辐射分析结果。

1 指标要求与分析

期望设计与研制的长波红外成像光谱仪要达到技术指标如表 1 所列。

表 1 期望技术指标

Tab.1 Expected index parameters

Parameter	Value
Spectral range/ μm	7.5-10.0
Spectral resolution/nm	50
Full FOV/(°)	18
Spatial resolution/mrad	1.0
Scanning method	Pushbroom
NETD/K	≤ 0.3

表 1 中 NETD 为等效噪声温差,是热红外系统灵敏度的主要判据之一,集中体现系统中探测器电路、背景辐射抑制和分光系统设计的优劣,其表达式为^[8]:

$$\text{NETD} = \frac{4F^2(\Delta f_n)^{1/2}}{A_d^{1/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D \cdot \frac{\partial M_\lambda(T)}{\partial T} \tau_a \tau_0 d\lambda} \quad (1)$$

式中: F 为系统的 F 数; A_d 为探测器像元光敏面积; D 为探测器在工作波段内的平均探测率; τ_0 为系统的透过率; τ_a 为大气透过率; Δf_n 是噪声等效带宽; $M_\lambda(T)$ 为目标光谱辐射出射度; λ_1 、 λ_2 对应于工作波长范围。假设目标辐射特性接近于黑体,则可由普朗克公式^[6]得到,

$$\frac{\partial M_\lambda(T, \lambda)}{\partial T} = \frac{(2\pi hc^2)(hc/k)e^{hc/(\lambda kT)}}{\lambda^6 T^2 (e^{hc/(\lambda kT)} - 1)^2} \approx M_\lambda(T, \lambda) \frac{c_2}{\lambda T^2} (e^{hc/(\lambda kT)} \gg 1) \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常数; c_2 为第二辐射常数; T 为目标温度。

为了满足全视场 18°、光谱分辨率、光谱范围的指标,选用尺寸为 320×240、像元光敏为 30 μm 的探测器。为了满足航空遥感的应用,根据要求飞行平台的高速比 $V/H=0.04/\text{s}$,因为像元空间分辨率要达到 1 mrad,根据

$$\text{FF} = \frac{V}{H} \times \frac{1}{\text{IFOV}} \quad (3)$$

得到探测器帧频率为 40 Hz,即所要求的探测积分时间要快于 $1/40=0.025$ s,取值为 0.025,即 Δf_n 为 3.072 MHz^[8]。工作波段为 7.5~10 μm ,像元面积为 $9 \times 10^{-6} \text{cm}^2$,一般红外探测器的占空比为 0.8, D^* 为 $1 \times 10^{11} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{1/2}$, τ_0 取值 0.5, τ_a 取值工作波段内的大气平均透过率 0.7。将数值代入公式(2),当 F 数取不同数值,分别计算工作波段内的平均等效噪声温差,其曲线如图 1 所示。

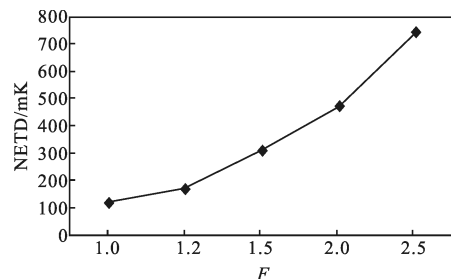


图 1 各谱段的平均等效噪声温差随 F 数的变化

Fig.1 Variation of average NETD of all waveband as a function of F number

由图1可知,为了满足 $NETD \leq 0.3\text{ K}$ 的指标要求,光学系统的 F 数选为1.2。图2为系统参数确定后计算得到的各个谱段的等效噪声温差。

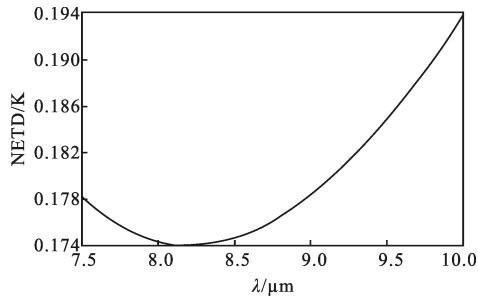


图2 系统等效噪声温差随波长的变化曲线

Fig.2 Variation of NETD of the system as a function of wavelength

由于分光系统的放大率为1,为了满足像元空间分辨率1 mrad的指标要求,前置物镜的焦距可由下式求得:

$$f=a/I\text{FOV} \quad (4)$$

式中: a 为探测器像元尺寸; $I\text{FOV}$ 为像元空间分辨率。可计算得到前置物镜的焦距为30 mm。

2 设计思想

由上文的设计指标要求及分析可知,前置物镜属于短焦距大相对孔径中小视场的情况,可选用匹兹万结构。传统热像仪为了抑制背景热噪声,将冷光阑放在探测器前,与出瞳重合,达到100%冷光阑效率。但对于成像光谱仪而言,各波长的出瞳像不能完全重合,所以将冷光阑放在物镜的最前面,采用整体制冷的方法以实现100%冷光阑效率。由中继系统的放大率为1,及探测器的尺寸可知,狭缝的长度为9.6 mm,为了满足成像光谱仪谱线弯曲和色畸变的值不超过 $15\ \mu\text{m}$ 的要求。对前置物镜的畸变有比较严格的要求,不应超过像高(狭缝半高度)的0.1%,所以分别将两组正透镜分离进行优化设计。因为锗在长波红外具有很好的透过率和良好的机械性能,并且其大折射率低色散有利于校正像差,物镜中三片镜子选用了锗材料,另外一片采用材料硒化锌,以校正色差。

Dyson型中继系统是同心系统^[9],可以满足大相对孔径、小体积的要求。结构如图3所示,由一块平凸厚透镜A和一块凹面反射镜B组成。透镜凸面的曲率中心和反射镜凹面的曲率中心重合在P点。当

厚透镜的凸面的曲率半径 r 和凹面的曲率半径 R 满足 $R/r=n/(n-1)$ 时, n 为厚透镜的折射率,此系统赛得尔像差为零,视场对高级像差的影响远远小于大相对孔径对其的影响^[9]。用凹面光栅代替凹面反射镜实现分光,光栅引入扩大了有效视场,合理地选择凹面光栅基片的曲率和厚透镜凸面曲率的比值、厚透镜的折射率及光栅线对数可以高级像散进行校正。

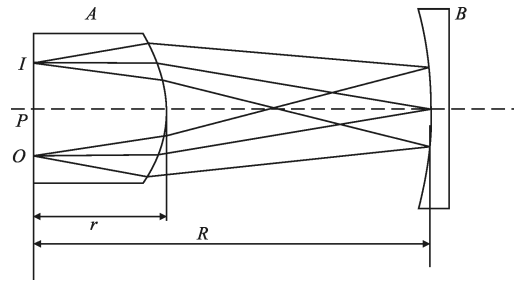


图3 Dyson结构示意图

Fig.3 Structure of Dyson type

对于成像光谱仪分光系统,探测器保护窗口的存在要求光敏面与厚透镜的平面有一定的轴向距离。需要重新改变凹面和凸面的曲率半径比值来满足这一需求,此时系统偏离了同心结构,会引入像差,其中最主要是球差^[10],采用在厚透镜和光栅中间加入非球面校正镜的方法进行校正。校正镜的加入会增加一个非球面系数,一个曲率半径、两个间距四个个优化参量,可以用来校正、平衡像散等像差同时也增大相对孔径。光栅分光后,因为不同波长的光经透镜聚焦后的最小弥散斑位置不在同一垂直面内,采用像面倾斜作为补偿。下面给出优化设计和结果评价。

3 设计结果及分析

3.1 设计结果

图4为系统的优化设计结果,工作波段为7.5~10 μm ,系统的 F 数为1.2,前置物镜焦距为30 mm,视场角为 18.2° ,像高4.8 mm,狭缝 S 的长度为9.6 mm,狭缝垂直于纸面, M 为转折平面反射镜, D 为探测器。 L_1 、 L_2 和 L_4 的材料为锗, L_3 的材料为硒化锌。前置物镜的体积为 $83\text{ mm} \times 42\text{ mm} \times 42\text{ mm}$ 。 L_5 为厚透镜,厚度为24.5 mm, L_6 为非球面校正镜, L_5 、 L_6 的材料均为硒化锌。 G 为凹面光栅,槽密度约为16 lp/mm,光栅槽的方向与狭缝方向一致分光系统的体积为 $72\text{ mm} \times 39\text{ mm} \times 39\text{ mm}$ 。谱面宽度为1.5 mm。

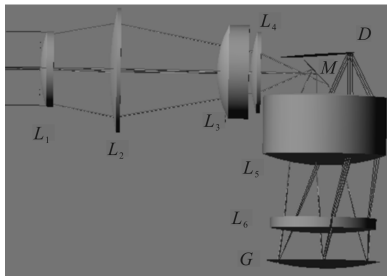


图 4 光学系统结构图

Fig.4 Structure of optical system

图 5 为系统的调制传递函数曲线，可见接近衍射极限，在探测器奈奎斯特空间频率 16.7 lp/mm 处的 MTF 最小值为 0.701。图 6 为光学系统的光线追

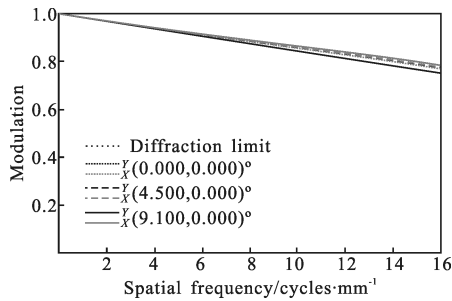


图 5 系统的 MTF

Fig.5 MTF of the system

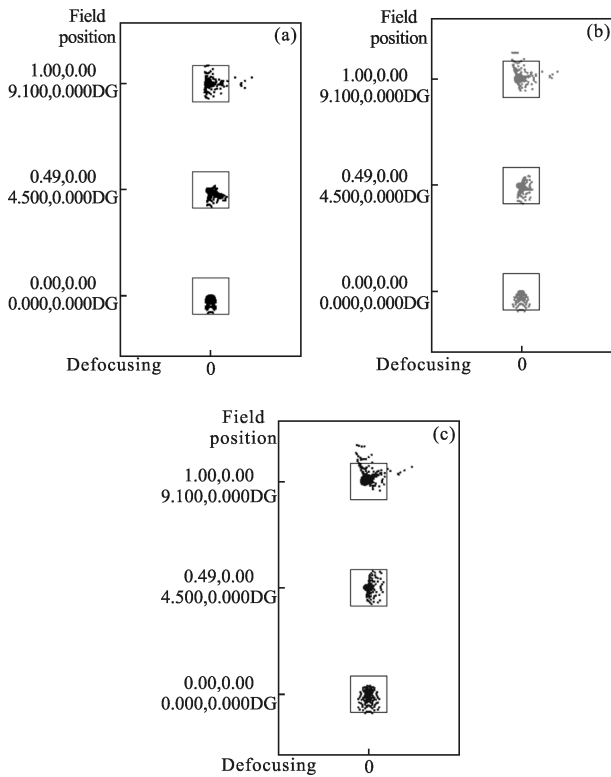


图 6 系统的光线追迹点列图

Fig.6 Spot diagram of the system

迹点列图，图中的黑色方框表示探测器像元大小，从左至右分别对应于工作波长 7.5 μm、8.75 μm、10 μm，可见像面上不同波长的各视场处的点列图基本落在单个像元内。图 7 所示的三个波长的衍射能量集中度曲线表明，80%的能量集中在探测器的一个像元范围内。

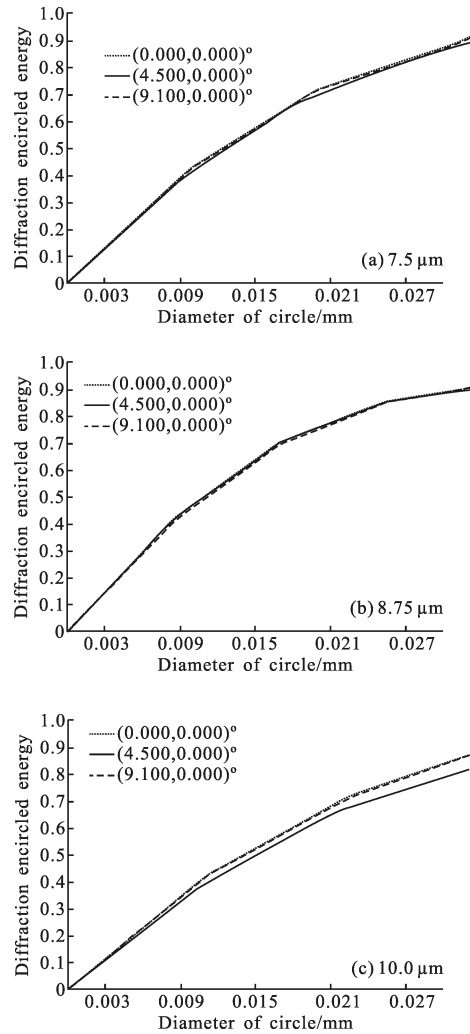


图 7 光学系统能量集中度曲线图

Fig.7 Encircled energy curves of the system

图 8 和图 9 分别为系统的谱线弯曲和色畸变。随着视场的增大，谱线弯曲和色畸变的值都随之增大。对于狭缝上同一个视场，长波处谱线弯曲和色畸变的值大于短波处的，谱线弯曲的最大值为 4.051 μm，色畸变最大值为 4.154 μm，小于像元大小的 15%。一般要求两个参数控制半个像元内，有利于后期图像处理光谱混叠。文中设计的结果完全满足这一要求。

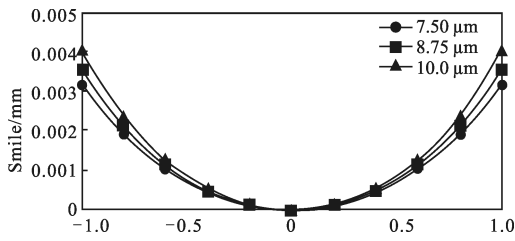


图 8 系统的谱线弯曲

Fig.8 Smile of the system

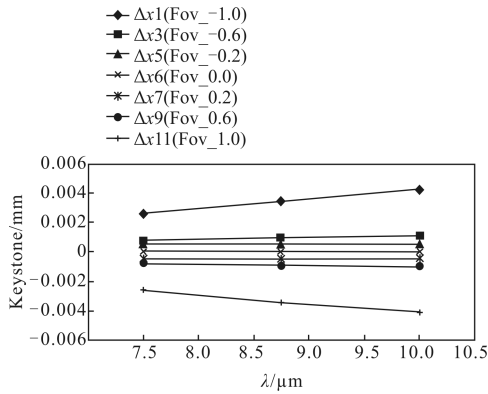


图 9 系统的色畸变

Fig.9 Keystone of the system

系统采用整体制冷的方法抑制杂散辐射。光机系统整体的降温至 120 K 时,机械结构键和光学材料的热胀冷缩会影响到光学系统成像质量,降温后的 MTF 如图 10(a)所示。采用像面离焦的方法对降温后

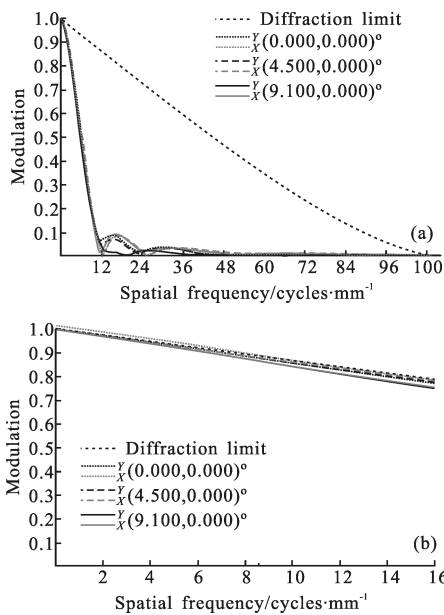


图 10 系统 MTF 对比图

Fig.10 Comparison of system MTF

的系统进行像质补偿,前置物镜成像处(狭缝处)的离焦量为 0.089 mm, 而最终像面离焦量为 0.105 mm, 系统 MTF 如图 10(b)所示。在实际装调过程时,应该在常温下预先留出这段距离。

3.2 自身杂散辐射分析

文中已经提到为了保证设计的长波红外成像光谱仪系统达到 100%冷光阑效率,采用了整体制冷的方法。其目的就为抑制系统机械件及光学元件自身的热辐射,使其不能干扰探测器获取目标信号。

用 Lighttools 软件对系统进行整体的背景辐射分析。设置透镜的透过率设为 98%,其余表面的吸收率设为 95%。图 11(a)是前置物镜对狭缝杂散辐射分析的示意图,常温下到达狭缝处的热辐射为 $4.5 \times 10^{-5} \text{ W}$ 。图 11(b)是分光系统和机械结构对探测器杂散辐射分析的示意图,常温下到达像面的辐射量为 $3 \times 10^{-4} \text{ W}$,此时的内部热辐射量已经足以淹没平台在 3 000 m 高空获取地面信息约为 $2.3 \times 10^{-4} \text{ W}$ 的信号。所以采用整体制冷的方式进行背景噪声抑制。当温度降到 120 K 时,狭缝处收到的热辐射为 $2.3 \times 10^{-8} \text{ W}$,到达像面的热辐射几乎可以忽略不计。分光系统及其机械结构引起的热辐射量在探测器处为 $9.7 \times 10^{-7} \text{ W}$,比信号小约三个数量级。

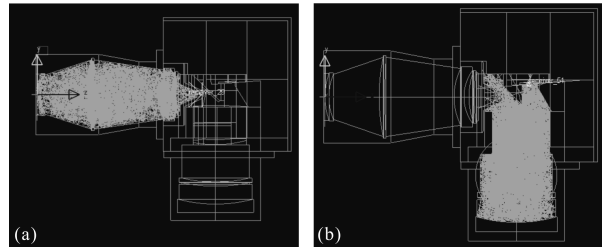


图 11 背景噪声模拟

Fig.11 Simulation of background noise of the system

文中的光学系统结构紧凑,体积小,在使用制冷机制冷时可有效地提高制冷机效率。机械结构件的材料选用铝合金,对于上文中所描述的系统光学系统的体积,机械件的重量大约为 872.3 g。所有 ZnSe 透镜的重量为 177.1 g,Ge 的重量为 58.68 g。当光机系统从室温的 20 °C 整体制冷到所需要的 120 K 时,需要与外界交换的热量为 147 832.6 J。

4 结论

报导一种大相对孔径的长波红外成像光谱仪。

前置物镜采用了匹兹万结构, 分光系统基于 Dyson 中继系统进行了设计, 采取了整体制冷方法抑制系统自身热辐射。给出了系统的设计结果及像质评价, 并用光学软件进行了自身热辐射分析, 给出了合理的制冷温度及热交换量。

所给出的光谱成像系统的显著特点是相对孔径大、像质好、光谱分辨率高、体积小, 便于整体制冷。

参考文献:

- [1] Alan D Stocker, Ara Oshagan. Analysis of infrared hyperspectral measurements by the joint multispectral program[C]//SPIE, 1995, 2469: 587-602.
- [2] John A Hackwell, David W Warren. LWIR/MWIR imaging hyperspectral sensor for airborne and ground-based remote sensing[C]//SPIE, 1996, 2819: 102-107.
- [3] Harold Miller, Jr., Karen E Yokoyama. Long wave hyperspectral imaging spectrometer design & implementation [C]//SPIE, 2003, 5159: 255-261.
- [4] Dale J, Snith D, Neelam G. Data collection with a dual-band infrared hyper-spectral imager [C]//SPIE, 2005, 5881: 1588106-1-588106-11.
- [5] Simon J Hook, Bjorn T Eng, Sarath D Gunapala. QWEST and HyTES: two new hyperspectral thermal infrared imaging spectrometers for earth science[C]//IEEE, 2001, 1559: 1-8.
- [6] Yuan Liyin, Wang Jianyu, Lin Ying, et al. Optical design and test of a infrared hyperspectral imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1075-1078. (in Chinese)
袁立银, 王建宇, 林颖, 等. 红外高光谱成像系统光学设计及检测[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1075-1078.
- [7] He Zhiping, Liu Qiang, Xu Weiming, et al. Equipment of performance testing and calibration of shortwave infrared hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(S): 531-535. (in Chinese)
何志平, 刘强, 徐卫明, 等. 短波红外成像光谱仪性能检测与定标装置[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(S): 531-535.
- [8] 罗纳德 考克斯 爱德华兹. 红外及光电系统导论[M]. 阿泰克出版社, 1999.
- [9] Dyson J. Unit magnification optical system without seidel aberrations [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1959, 49(7): 713-716.
- [10] Smith W J. Modern Optical Engineering [M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1990.