

一种新型双光栅光谱仪光学系统设计与优化

徐明明¹, 江庆五¹, 刘文清¹, 张寅超², 陈结祥¹, 曾 议¹

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 北京理工大学 信息科学技术学院 光电工程系, 北京 100081)

摘 要: 由于所需测量的光谱范围较宽(276~700 nm), 而 CCD 探测器的接收面尺寸较小(14.3 mm×10.5 mm), 根据所选用的平面光栅元件参数, 采用传统的车尔尼-特纳型结构是无法满足的。基于该结构, 利用光线相对光栅的入射角和衍射角与光栅转角的关系, 提出了使用两块反射式平面光栅进行光谱分离的方法。通过理论计算, 确定了两段光谱范围和两光栅的旋转及俯仰角度, 采用 ZEMAX 软件建立多重结构, 分别设置两块光栅的位置和波长参数, 对光学系统进行了模拟分析和优化。结果表明, 在像面上得到了两条谱面线展宽为 14mm, 中心间距 8mm 的光谱带, 光谱分辨率优于 1nm, 各像差得到了充分校正, 满足设计指标要求, 很好地解决了宽光谱和探测器接收面尺寸之间的矛盾。

关键词: 双光栅; 色散公式; 光谱分离; 像差校正

中图分类号: TH744.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0184-06

An improved method for optical system design and optimization of double grating spectrometer

Xu Mingming¹, Jiang Qingwu¹, Liu Wenqing¹, Zhang Yinchao², Chen Jiexiang¹, Zeng Yi¹

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Department of Optical Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Due to the onconflict between the wide spectral range of measuring (276–700 nm) and the limited imaging area of CCD detector (14.3 mm×10.5 mm), classical Czerny–Turner structure was not able to meet the requirements of design. Based on it, an innovative method applying two uniform plane diffraction gratings to separate the whole spectral range into two different sections was presented. The two separate spectral range, rotation and tilt angles of two gratings were obtained through theoretical computation. The optical software ZEMAX was used to simulate and optimize the optical system by multiple configuring parameters. The simulation results show that two spectral bands are detected on the imaging plane. Their spectrum width is 14 mm respectively, and the center distance between them is 8 mm. The spectral resolution is less than 1 nm and the aberration is substantially corrected. It indicates that the

收稿日期: 2013-05-07; 修订日期: 2013-06-17

基金项目: 中国科学院安徽光学精密机械研究所所长基金

作者简介: 徐明明(1985-), 男, 博士生, 主要从事光机结构设计与 CAE 分析方面的研究。Email: mmxu@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境光学特性和新型环境监测技术研究。Email: wqliu@aiofm.ac.cn

method is a good solution for the situation of wide spectral measurement range and limited imaging dimension of CCD detector in the meanwhile.

Key words: double grating; dispersion formula; spectrum separation; aberration correction

0 引言

光谱仪是一种利用光学色散原理而设计的光学仪器。它是应用光学及光谱技术,对物质的结构和成分进行观测、分析和处理的基本设备,具有分析精度高、测量范围广、速度快等优点。因此,广泛用于冶金、地质、石油化工、医药卫生、环境保护等部门^[1]。近年来,随着激光、光纤、CCD 阵列、光栅及计算机等技术的发展和成熟,光谱仪结构也发生了变化,形成光源、摄谱单元及采样单元相分离的结构形式,整个系统结构变得更加灵活。传统的车尔尼-特纳型结构是用两块小球面反射镜分别作为准直镜和聚焦镜来代替 Ebert-Fastie 型结构中的大凹面反射镜,两块中间分开的反射镜曲率中心重合。这样通过合理设计两块反射镜的口径,不仅可以避免二次衍射和多次衍射,同时也方便反射镜的加工和装调^[2]。

文中根据光谱仪的应用要求和技术指标,采用传统的车尔尼-特纳型(C-T)结构得到的光谱尺寸大于市售 CCD 探测器的接收面尺寸,所需光谱无法被完全接收。为解决宽光谱范围与 CCD 接收面有限尺寸之间的矛盾,薛庆生等人曾提出视场分离的方法^[3],通过一个刀口反射镜将全视场分离成两个半视场,分别使用各自独立的狭缝,采用两套 Offner 光谱仪分别成像。此方法对刀口反射镜的位置精度要求很高,且需要设计两套光谱仪,这给光路的装调和结构抗振性提出了更高要求。文中结合实际情况,对传统的车尔尼-特纳型结构进行了改进设计,提出了采用两块平面光栅进行光谱分离的方法。详细分析了光谱分离方法的原理,通过理论计算,确定了两段光谱范围和光栅旋转及俯仰角度,并利用 ZEMAX 光学设计软件对设计结果进行了仿真与优化。

1 结构原理及光学参数计算

对称式 C-T 结构的光学系统原理如图 1 所示。由点光源发出的光束通过入射狭缝 S 后,经准直反

射镜 M1 变为平行光束,投射到反射式平面光栅 G 的表面上。由于光栅的衍射效应使复合光束分解为按空间规律分布的多束单色光,再经过会聚反射镜 M2 聚焦在 CCD 探测器的光敏面上,最后由 CCD 转换成电信号传输给后继电路及计算机进行处理分析^[4-5]。

图 1 中,C 点为球面反射镜 M1 和 M2 的共同曲率中心, $f_1'=f_2'=f'$ 为两反射镜的焦距, W 为平面光栅的边长, N 为光栅平面的法线, H_1 和 H_2 分别是入射狭缝 S 和 CCD 探测器接收面的中心对中轴线的垂直距离, D 为光谱带焦平面上光谱方向的长度。

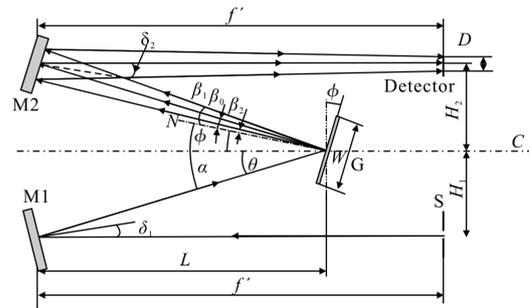


图 1 对称式 C-T 结构光学原理图

Fig.1 Optical schematic graph of symmetric C-T structure

设所分析光谱的边缘波长分别为 λ_1 和 λ_2 , 中心波长 $\lambda_0=(\lambda_1+\lambda_2)/2$ 。

对于中心波长 λ_0 , 由色散公式^[6]可知:

$$m \cdot \lambda_0 = d \cdot (\sin \alpha_0 + \sin \beta_0) = 2d \cdot \sin \left(\frac{\alpha_0 + \beta_0}{2} \right) \cdot \cos \left(\frac{\alpha_0 - \beta_0}{2} \right) = 2d \cdot \sin \phi \cos \theta \quad (1)$$

式中: m 为衍射级次; d 为光栅常数; α_0 和 β_0 分别是中心波长对光栅的入射角和衍射角; ϕ 为中心波长对应的平面光栅的转角; θ 为入射光线与中心光轴的夹角。

由公式(1),得

$$\phi = \frac{\alpha_0 + \beta_0}{2}, \quad \theta = \frac{\alpha_0 - \beta_0}{2} = \arctan \left(\frac{H_1}{L} \right) \quad (2)$$

对于两边缘波长 λ_n ,

$$m \cdot \lambda_n = d \cdot (\sin \alpha_n + \sin \beta_n) \quad (3)$$

式中: β_n 为波长 λ_n 对应的衍射角,取 $m=1, n=1$ 或 2 。

由公式(1)和公式(2)得:

$$\alpha_0 = \theta + \phi = \theta + \arcsin\left(\frac{\lambda_0}{2d \cdot \cos\theta}\right) \quad (4)$$

$$\beta_n = \arcsin\left(\frac{\lambda_n}{d} - \sin\alpha_0\right) \quad (5)$$

$$D \approx f' \cdot (\tan\beta_2 + \tan\beta_1) \quad (6)$$

文中所需测量的光谱范围为 276~700 nm, 两反射镜的曲率半径均为 400 mm, 使用的平面闪耀光栅参数是: 刻线密度为 300 条/mm, 闪耀角为 3°, 实际设计时采用的面积为 45 mm × 45 mm。

已知 $L=142$ mm, $H_1=H_2=42$ mm, 代入公式(2)得到 $\theta=16.4769^\circ$ 。

若文中系统采用一块平面光栅, 将 $\lambda_0=488$ nm, $\lambda_1=276$ nm, $\lambda_2=700$ nm 及其他参数带入公式(4)、(5), 求得 $\alpha_0, \beta_1, \beta_2$, 再代入公式(6)中, 得:

$$D \approx 200 \times (\tan\beta_2 - \tan\beta_1) = 27.3 \text{ nm}$$

由于使用的 CCD 探测器光敏面尺寸为 14.3 mm × 10.5 mm, 如果只使用一块平面光栅, 则 CCD 无法完全探测到整个光谱范围, 因此需对本结构进行改进, 以达到设计要求。

2 光谱分离原理

为了解决宽光谱范围与 CCD 接收面尺寸之间的矛盾, 文中提出了光谱分离分光的方法, 原理如图 2 所示。首先根据 CCD 接收面尺寸计算得到两段不同的光谱范围, 再将两块相同的光栅垂直排列, 分别调整两光栅的旋转角度, 使各自波段范围内的光线发生色散, 经聚焦镜反射后被 CCD 探测器接收。

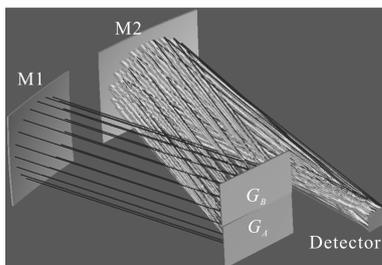


图2 基于双光栅的光谱分离原理图

Fig.2 Schematic graph of spectrum separation with two gratings

令 $D=14$ mm, 由公式(1)~(6)反推出两块光栅分别对应的 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ 和光栅转角 ϕ_1 和 ϕ_2 。经计算得到: 光栅 A 和 B 对应的光谱范围分别为 276~492 nm

和 480~700 nm, $\phi_1=3.4436^\circ$, $\phi_2=5.2954^\circ$ 。由此看出, 两光栅对应的光谱范围有小部分的重叠, 这不但保证了全光谱的接收, 而且使光路调整更容易。

同时, 为了使两段光谱在空间方向上分开, 可通过分别调整两光栅的俯仰角度实现, 如图 3 所示。俯仰角度 δ 可由下式求得:

$$\delta \approx \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2f'}{W}\right) \quad (7)$$

式中: W 是焦面上两条光谱带的中心距; f' 为聚焦镜 M2 的焦距。令 $W=8$ mm, 可求出 $\delta=0.5729^\circ$ 。

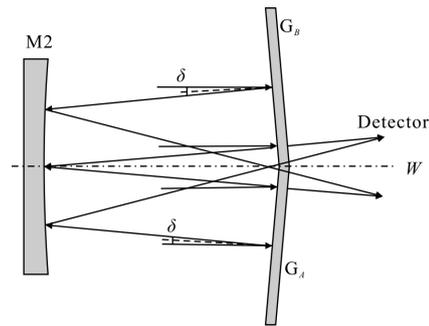


图3 两光栅俯仰调节示意图

Fig.3 Schematic graph of tilt adjustment of two gratings

3 像差理论及优化方法

3.1 球差

球差对称地扩展谱线宽度, 用凹球面反射镜作为准直镜时, 必须控制球差在像差容限以内, 使仪器尽可能达到最高的分辨率。根据瑞利准则, 由球差产生的波像差应小于 $\lambda/4$, 可得^[7]:

$$f' \leq 256 \cdot \lambda \cdot (F\#)^4 \quad (8)$$

式中: f' 和 $F\#$ 分别为球面镜的焦距和相对孔径。

3.2 彗差

由图 1 可看出, 由于光线对反射镜离轴入射而产生彗差。彗差不仅使谱线轮廓增宽, 而且使谱线单边扩散, 成为不对称的模糊像, 严重影响分辨率。在车尔尼-特纳型结构中, 消彗差的条件应满足 Shafer 方程, 如公式(9)所示:

$$\sin\delta_2 = \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{\cos\alpha\cos\delta_2}{\cos\beta\cos\delta_1} \right)^3 \sin\delta_1 \quad (9)$$

式中: δ_1, δ_2 分别为中心光线对准直镜和聚焦镜的离轴角; α, β 分别为对光栅的入射角和衍射角; r_1, r_2 为

别为准直镜和聚焦镜的曲率半径。公式(9)中,由于离轴角通常较小,所以可近似表示为:

$$\sin\delta_2 = \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{\cos\alpha}{\cos\beta} \right)^3 \sin\delta_1 \quad (10)$$

根据公式(10),先选定 $\delta_1, r_1, r_2, \alpha, \beta$, 通过优化对聚焦镜的入射角 δ_2 来校正彗差。

3.3 像散

由于像散的存在,在采用两个球面反射镜的传统车尔尼-特纳型光谱仪中,狭缝像沿狭缝高度方向上被扩展到几毫米。像散的产生主要由于反射镜在子午和弧矢方向的焦长不同,子午和弧矢方向的焦长可表示为:

$$\begin{aligned} f_{Tn} &= (r_{Tn}/2)\cos\delta_n \\ f_{Sn} &= r_{Tn}/(2\cos\delta_n) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $n=1,2$ 分别表示准直镜和聚焦镜。从式可看出,弧矢面内的光线比子午面内的光线具有更长的焦长。沿弧矢面的扩展焦长可表示为:

$$\Delta f = \Delta(f_{S1} - f_{T1}) + \Delta(f_{S2} - f_{T2}) \quad (12)$$

从公式(12)可见,可用一个超环面聚焦镜来校正像散,它在子午和弧矢方向产生不同的焦长,即 $f_{S2} < f_{T2}$, 从而使 $\Delta f \approx 0$ 。这样可通过控制对聚焦镜的入射角和聚焦镜的弧矢焦长来分别校正彗差和像散,从而得到光学结构初始参数。

同时,为了使中心波长和边缘波长像差同时得到校正,Masayuki Futamutati 提出并证明当光栅与聚焦镜的距离 $L_{g-cd} = r_{T2} \cdot \cos\delta_2$ 时^[8],探测器中心和边缘波长光线对聚焦镜的入射角近似相同,而且这种关系不依赖于探测器的尺寸、光栅刻线密度和聚焦镜的焦长。

4 双光栅光谱仪系统设计与优化

根据公式(1)~(7)计算得到的各初始参数,利用 ZEMAX 光学软件进行光路模拟,通过建立多重结构分别设置了两块光栅的位置和波长参数,如图 4~5 所示。根据图 5 点列图中两端坐标之差可计算像面上两条光谱带的谱面展宽约 14 mm,中心间距约 8 mm,仿真结果与设计值基本吻合。待测光由芯径为 $50 \mu\text{m}$, $NA=0.11$ 的多模渐变型光纤引入,这种光纤的芯径折射率随着半径的增加而减小,可获得比

较小的模态色散。将光纤放置于入射狭缝处,入射的圆形光束被上下两块光栅分割成两部分,因此得到的各像点形状为半圆形。

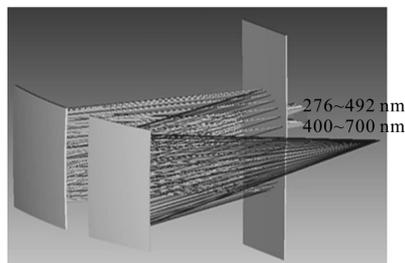


图 4 双光栅光谱仪光路图

Fig.4 Optical path of double grating spectrometer

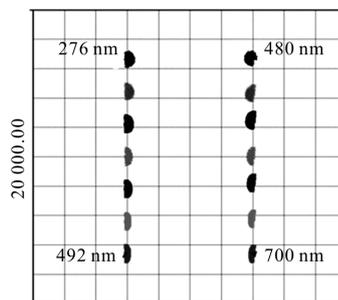


图 5 像面全视场点列图

Fig.5 Spot diagram of imaging plane

下面根据第 4 节中的像差理论对初始光路进行优化。已知 $r_{T1} = r_{S1} = r_{T2} = 400 \text{ mm}$, $\delta_1 = 8.238^\circ$, 由公式(10)得到两谱段对应的 δ_2 分别为 7.948° 和 7.796° , 由于使用同一块聚焦镜,因此暂取 $\delta_2 = 7.87^\circ$ 。根据公式(11)~(12),由 $\Delta f = 0$ 得到 $r_{S2} = 391.64 \text{ mm}$,光栅与聚焦镜的距离 $L_{g-cd} = 396.25 \text{ mm}$ 。表 1 为优化前后各光学参数的变化值, σ 为像面倾角;图 6~7 为两谱段 RMS 半径值随波长变化的关系曲线和优化后的像面全视场点列图。

表 1 优化前后各光学参数变化值

Tab.1 Optical parameters of modified double grating spectrometer

Specifications	Initial values	Optimal values	
		Before	After
$\delta_2/(\circ)$	8.238	7.87	7.501
r_{S2}/mm	400	391.64	385.556
L_{g-cd}/mm	148.081	396.25	393.523
$\sigma/(\circ)$	0	0	14.366

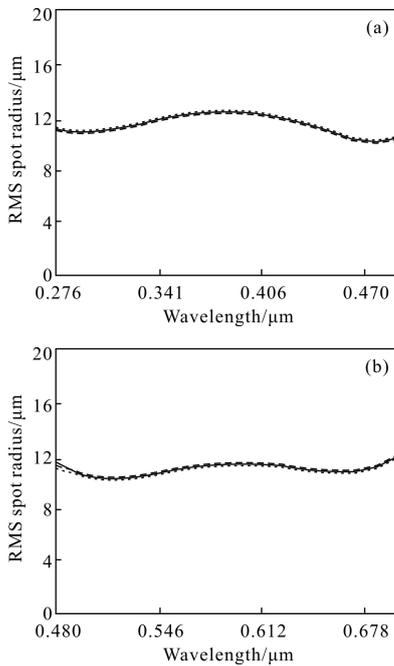


图 6 像点 RMS 半径值随波长的变化关系曲线
Fig.6 Curves of RMS spot radius versus wavelength

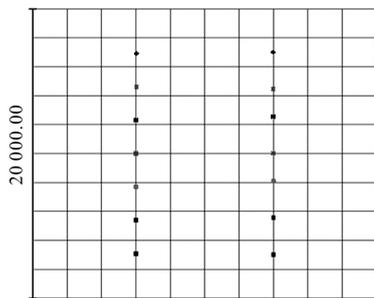


图 7 优化后的像面全视场点列图
Fig.7 Spot diagram of imaging plane by optimization

从图 5~图 7 可看出,在整个工作谱段内(270~700 nm),经优化后各视场下像点的 RMS 半径值均小于 13 μm ,彗差和像散均得到了校正,在宽谱段内获得了良好的成像质量。为了检验优化后的光谱分辨率,分别在两谱段的中心和边缘波长附近取相隔 1 nm 的三个波长点^[9],模拟结果如图 8 所示。从图中可看出,系统的光谱分辨率优于 1 nm,相比优化前的 20 nm,光学质量得到明显提高。

需要说明的是,经优化后的光学系统失去了原有的对称性,且由于 L_{g-cd} 的存在,系统距离变长,可在光栅与聚焦镜之间增加一块平面反射镜使光路转折从而减小系统的尺寸。使用两块相同光栅进行光谱分离时,276~700 nm 波段内的入射光束被分割成了 276~492 nm 和 480~700 nm 两段光谱后分别会

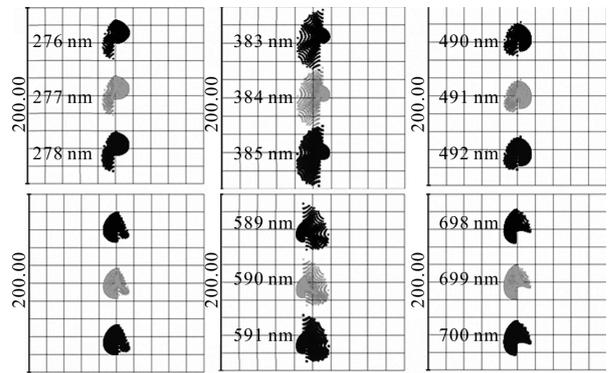


图 8 系统光谱分辨率的检验图

Fig.8 Validation figure of system spectral resolution

聚在 CCD 光敏面上,而 493~700 nm 和 276~479 nm 的光线因无法会聚到焦点而形成杂散光,且这种光谱分离方法使 CCD 探测器接收到的光谱能量降低了近一半。两块光栅尺寸均为 50 mm×50 mm,而用到的通光口径各只有一半,因此,应在两光栅和两凹面反射镜前各放置孔径光阑,光谱仪箱体内壁和各机械件需做表面氧化处理以减少杂散光对光谱探测的影响,且在 CCD 探测器的选择上应予以重视。

5 结 论

为了解决光谱范围较宽与 CCD 探测器接受面尺寸较小之间的矛盾,文中基于对称式车尔尼-特纳型结构,提出了采用两块平面光栅进行光谱分离的方法,进行了光路设计和各参数计算,得到了两块光谱范围和各自的光栅转动及俯仰角度。通过采用 ZEMAX 光学软件对双光栅光谱仪进行模拟并利用像差理论对初始光路进行了优化,得到了两条光谱带,系统各像差得到了充分校正,光谱分辨率提高到优于 1 nm。文中提出的光谱分离方法很好地解决了宽光谱和探测器接收面尺寸之间的矛盾。

参 考 文 献:

[1] Lin Xuling, Zhou Feng, Wang Huaiyi, et al. Spatially modulated interference imaging spectrometer based on Wollaston prisms [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1798-1802. (in Chinese)
林栩凌,周峰,王怀义,等.采用 Wollaston 棱镜的空间调制干涉成像光谱仪 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1798-1802.

[2] Wang Lingfang, Wen Zhiyu, Xiang Xianyi. Design and

- simulation of the NIR micro-spectrometer optical system [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(6): 1721-1725. (in Chinese)
- 王玲芳, 温志渝, 向贤毅. 近红外微型光谱仪光学系统设计与模拟[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1721-1725.
- [3] Xue Qingsheng, Lin Guanyu, Song Kefei. Optical design of spaceborne shortwave infrared imaging spectrometer with wide field of view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(5): 673-678. (in Chinese)
- 薛庆生, 林冠宇, 宋克非. 星载大视场短波红外成像光谱仪光学设计[J]. 光子学报, 2011, 40(5): 673-678.
- [4] Cheng Xin, Zhang Bao, Hong Yongfeng, et al. Optical design of an airborne dual-wavelength imaging spectrometer with high throughput [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 690-695. (in Chinese)
- 程欣, 张葆, 洪永丰, 等. 机载高光通量双波段成像光谱仪的设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3):690- 695.
- [5] Gong Guangbiao, Ji Yiqun, Zhu Shanbing, et al. Design of a fore-optical objective with large relative aperture for spectral imagers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 889-892. (in Chinese)
- 宫广彪, 季轶群, 朱善兵, 等. 一种大相对孔径成像光谱仪前置物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 889-892.
- [6] Tian Qian, Liao Yanbiao, Sun Liqun. Engineering Optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- 田芊, 廖延彪, 孙利群. 工程光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [7] Xue Qingsheng, Wang Shurong, Lu Fengqin. Aberration correction of Czerny-Turner imaging spectrometer carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 29(1): 35-40. (in Chinese)
- 薛庆生, 王淑荣, 鲁凤芹. 星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正的研究[J]. 光学学报, 2008, 29(1): 35-40.
- [8] Masayuki Futamata, Takehiko Takenouchi, Kei-ichi Katakura. Highly efficient and aberration-corrected spectrometer for advanced Raman spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4655-4665.
- [9] Li Yangyu, Fang Yonghua, Liu Yang. Optical design of a miniature long-wave infrared grating spectrometer[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(4): 351-357. (in Chinese)
- 李扬裕, 方勇华, 刘洋. 小型长波红外光栅光谱仪光学设计[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(4): 351-357.