

光栅光谱仪光谱响应误差校正

施建华*, 伏思华, 谢文科

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对由器件光谱特性引起的光栅光谱仪测量误差问题, 提出了一种误差校正方法, 并对该技术中的理论模型、数值提取算法和精度、误差校正精度进行了研究。首先, 在深入剖析光栅光谱仪工作原理的基础上, 建立了光谱误差校正的理论模型; 其次, 在研究光栅、探测器、反射镜等核心器件光谱特性曲线典型特征的基础上, 提出了器件光谱响应参数提取算法, 并对该算法的精度进行了实验研究; 最后利用本文所建立的理论模型和数值提取算法对光栅光谱仪测得的溴钨灯光谱进行了校正, 并将校正后的结果与溴钨灯标准谱线进行了比较。实验结果表明, 本文所提出的数值提取算法的平均误差为 0.39%, 校正后的光谱曲线与溴钨灯标准光谱曲线一致, 说明本文所提出的校正技术能够有效消除器件光谱特性引入的误差。

关键词: 光栅光谱仪; 光谱特性; 误差校正; 数值提取

中图分类号: TH744.1; O436.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20140703.0483

Error correction of spectral response characteristic of grating spectrometer

SHI Jian-hua*, FU Si-hua, XIE Wen-ke

(College of Opto-electric, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: gexin7651@sina.com

Abstract: Aiming at the big measuring error from grating spectrometer caused by the devices' spectral characteristics, an error correction method is brought forward and validated. Firstly, the grating spectrometer's principle is analyzed deeply and the theoretical model of error correction is built. Then, the spectral characteristics of key devices, such as grating, detector, mirror *etc.*, are studied and the algorithm of numerical extraction is brought forward to acquire the value of each point on the spectral curve. Finally, the theoretical model and the method of numerical algorithm are used to correct the bromine-tungsten lamp's spectrum which is obtained by the grating spectrometer. The result of the experiment shows that the mean error of the numerical extraction algorithm is only 0.39%, and the corrected spectrum is very close to the standard spectrum, which certifies that the correction method brought forward in this paper can eliminate the errors brought by the devices' spectral characteristics.

Key words: grating spectrometer; spectral characteristic; error correction; numerical extraction

收稿日期: 2013-12-10; 修订日期: 2014-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40901215, No. 61008037)

1 引言

光栅光谱仪在现代工业、农业和空间遥感等方面有着重要的应用^[1-5],它的改进乃至革新一直深受国内外学者的关注^[6-14]。目前,光栅光谱仪的研究主要集中在高分辨率^[1-2]、光谱波长的高精度标定^[3,7,12,15]和小型化^[6]上。由于光栅光谱仪绝大部分核心器件的核心参数(如探测器的光电灵敏度、光栅衍射效率、镜片的反射率等)是光波长的函数,因此功率相等、波长不同的光经光栅光谱仪后输出的功率并不完全相等,致使测量结果出现一定的偏差。由于国内外对此研究相对较少,许多人不能完全正确使用光栅光谱仪,不能敏锐地意识到测量误差,并对结果进行准确的分析。20世纪80年代末,中国科学院物理研究所的王彦云等人^[9]对该问题进行了分析,并提出通过测量标准灯光谱来确定光谱仪系统的光谱特征函数,以校正这一误差。这种方法的优点在于将光谱仪作为一个整体,算法相对简单,但也存在一些不足:该方法使用前提是要有标准光源及其光谱,另外,若光谱仪的器件或者待测光源的偏振态发生改变,则需重新测量系统的光谱特征函数。本文在对光栅光谱仪工作原理深入剖析的基础上,建立了一种基于数值处理的光栅光谱仪误差校正理论模型,并利用溴钨灯光谱曲线对该方法进行了实验验证。

2 光栅光谱仪的工作原理

典型的光栅光谱仪基本结构如图1所示,其中入射狭缝和出射狭缝分别位于柱凹面镜1和2的焦点上。光源发出的光经入射狭缝、柱凹面镜1后成平行光照射到光栅上,经光栅色散后,不同波长的光以不同的衍射角度平行出射,经柱凹面镜2后聚焦到出射狭缝不同的点上。

光栅光谱仪通常采用平面反射式衍射光栅,其基本结构如图2所示,相邻两刻痕对应的光程

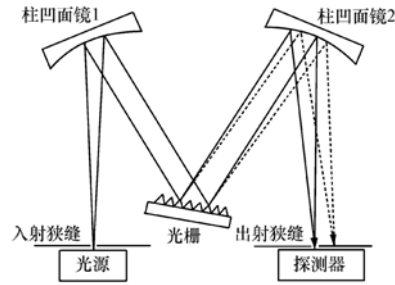


图1 光栅光谱仪结构示意图

Fig.1 Schematic illustration of the grating spectrometer

差为:

$$\Delta = d(\sin i + \sin \theta), \quad (1)$$

式中, $-i$ 为光线的入射角, θ 为衍射角, d 为光栅常数。

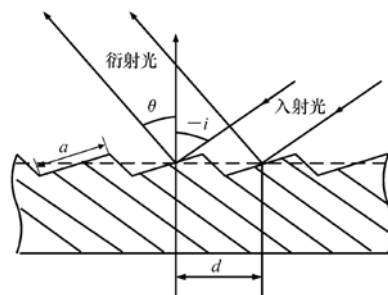


图2 平面反射式衍射光栅示意图

Fig.2 Schematic illustration of flat reflecting diffraction grating

相邻两光线干涉极大值的条件为:

$$m\lambda = d(\sin i + \sin \theta), \quad (2)$$

式中, m 是光谱衍射级次, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。上式可改写为:

$$\theta = \arcsin\left[\frac{m\lambda}{d} - \sin i\right]. \quad (3)$$

由式(3)可得,当光栅常数 d 及入射角 i 一定时,除零级外,在确定的光谱级次中波长越大,衍射角越大。

探测器的输出信号:

$$I(\lambda) = S(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau_2 \cdot \tau_1 \cdot r_1(\lambda) \cdot r_2(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda), \quad (4)$$

式中, $\Phi_0(\lambda)$ 为入射到狭缝上、波长为 λ 的光通量, τ_1 和 τ_2 分别为入射狭缝和出射狭缝的透过率, $r_1(\lambda)$ 和 $r_2(\lambda)$ 分别为两块柱凹面镜的反射率, $\varepsilon(\lambda)$ 为光栅的绝对衍射效率, $S(\lambda)$ 为光电探测器的光电灵敏度。

3 光栅光谱仪误差分析

3.1 光栅衍射效率引入的误差

光栅的绝对衍射效率^[15]:

$$\varepsilon(\lambda) = C \cdot \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin A\nu}{\sin \nu}\right), \quad (5)$$

式中, C 为比例常数, $u = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$, $\nu = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}$, a 为光栅中单个刻槽的宽度, A 为光栅总缝数。

由式(5)可得,光栅的绝对衍射效率是光波长的函数,不同波长的光,其衍射效率不同。图 3 给出了本文所用的 1-120-500 型光栅衍射效率随波长的变化情况。

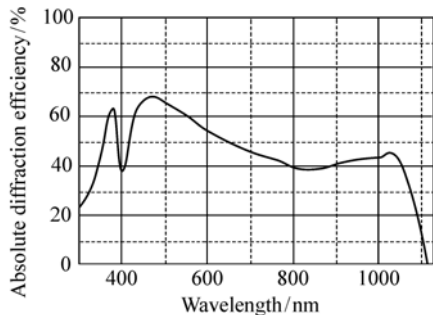


图 3 1-120-500 型光栅衍射效率曲线图
Fig. 3 Curve of absolute diffraction efficiency of 1-120-500 grating

因此,对于同一块光栅,相同强度、不同波长的光经光栅衍射后,在同一衍射级次中所得到的光强不同,这是光栅光谱仪测量宽带光谱的主要误差源之一。

3.2 探测器光谱响应灵敏度引入的误差

光电倍增管具有极高的探测灵敏度,在扫描式光栅光谱仪中,通常用其测量光源在可见光波段的光谱分布。光电倍增管阳极的输出信号电流为:

$$I(\lambda) = S_k(\lambda) \cdot M \cdot \Phi(\lambda), \quad (6)$$

式中, $\Phi(\lambda)$ 为入射到光电倍增管光电阴极上、波长为 λ 的光通量; M 为光电倍增管的增益,与光波长无关; $S_k(\lambda)$ 为光电倍增管阴极光谱灵敏度,其表达式为^[17]:

$$S_k(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc}(1-r)(1-e^{-\frac{4\pi\mu l}{\lambda}}), \quad (7)$$

式中, q 为电子电荷, λ 为入射光波长, h 为普朗克常数, c 为光速, r 和 μ 分别为光电阴极的反射系数和消光系数, l 为光波在光电阴极中传播距离。

由式(7)可知,灵敏度 $S_k(\lambda)$ 与光波波长 λ 有关,相同功率、不同波长的光入射到光电倍增管上,探测器的输出电流不同。图 4 给出了本文所用的 CR131 型光电倍增管阴极光谱特性曲线^[18]。

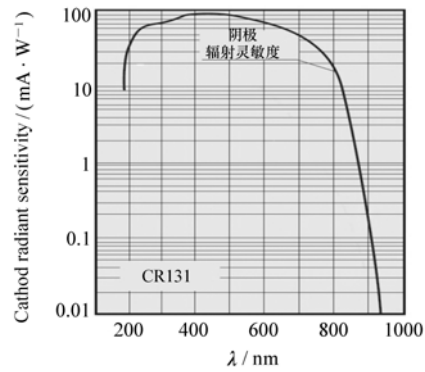


图 4 CR131 型光电倍增管光谱响应曲线
Fig. 4 Spectral responsibility curve of CR131 PMT

3.3 柱凹面镜反射率引入的误差

柱凹面镜的反射率随着波长的变化也略有变

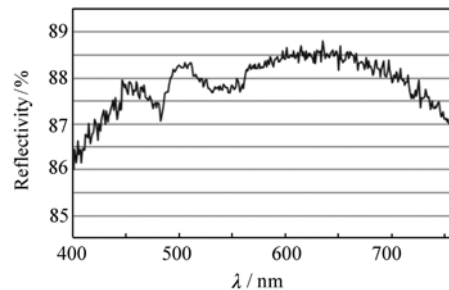


图 5 柱凹面镜反射率曲线
Fig. 5 Reflectivity curve of concave cylindrical lens

化,图5给出了本文所用的柱凹面镜的反射率曲线。

除了上述误差源外,光栅光谱仪还存在其他一些误差源,如光栅摆放位置不准确,光栅生产时本身参数不标准,反射镜放置位置不精准,狭缝调节时宽度移动位置不准等^[12],这些误差可以通过提高生产工艺来消除。

3.4 溴钨灯的标准光谱与实测光谱

由于上述误差源的存在,导致光栅光谱仪在测量光源发射光谱特性曲线时存在一定的误差。图6和图7分别给出了可见光波段溴钨灯的标准光谱曲线和利用光栅光谱仪测得的光谱曲线。

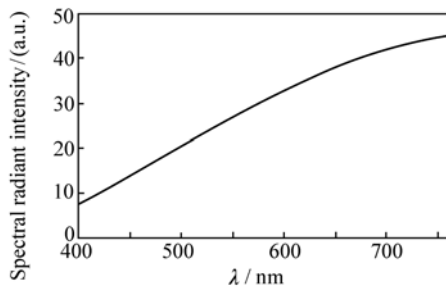


图6 溴钨灯标准谱线

Fig. 6 Standard spectrum of bromine-tungsten lamp

图6显示在可见光波段内,随着波长的增加,溴钨灯辐射的光强增大;而图7表明,溴钨灯在610 nm附近的光强最强,当光波长小于610 nm时,光强随波长增加迅速增大;当光波长大于610 nm时,光强随波长增加缓慢减小。由此可见,利用光栅光谱仪测量连续谱时存在明显的误差。

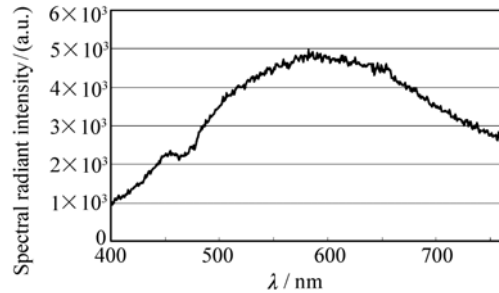


图7 光栅光谱仪测得的溴钨灯光谱曲线

Fig. 7 Spectrum curve of bromine-tungsten lamp obtained from grating spectrometer

4 光栅光谱仪误差校正

4.1 光栅光谱仪误差校正的理论模型

根据式(4)和式(6)可得,入射到光栅光谱仪入射狭缝上、波长为 λ 的光功率:

$$\Phi_0(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{S_k(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot M \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot r_1(\lambda) \cdot r_2(\lambda)}. \quad (8)$$

由于光源发射光谱曲线反映的是光源发射的功率随波长的相对分布,而 M 、 τ_1 、 τ_2 与波长无关,因此可设

$$M \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 = 1. \quad (9)$$

在典型的光栅光谱仪中,两个柱凹面镜的反射率相同,即

$$r_1(\lambda) = r_2(\lambda) = r(\lambda). \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入式(8)得:

$$\Phi_0(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{S_k(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot r^2(\lambda)}. \quad (11)$$

4.2 光谱特征曲线数值提取算法

为了计算 $\Phi_0(\lambda)$,必须知道 $r(\lambda)$ 、 $\varepsilon(\lambda)$ 和 $S_k(\lambda)$ 的值。鉴于目前厂家通常只提供器件的特性曲线,而不是具体的特性参数值,作者对大量的器件特性曲线特征进行了分析,提出了基于最小灰

度值的曲线数值提取方法,其基本过程为:

(1)首先利用图像每一列像素中曲线上的点的灰度值最小这一特点,确定曲线上每一点的像素坐标 (i, j) ;若同一列中出现多个连续的最小值点,则 j 取它们的平均值。

(2)对于普通坐标系下的曲线(如图3中光栅衍射效率曲线和图5中柱凹面镜反射率曲线), (i, j) 点的物理量坐标 (x_i, y_j) 为

$$x_i = x_0 + \frac{j \times \Delta x}{n}, \quad (12)$$

$$y_j = y_0 + \frac{(m - i) \times \Delta y}{m}, \quad (13)$$

式中, x_0 、 y_0 分别是 x 轴和 y 轴所代表的物理量的初始值, Δx 、 Δy 分别为 x 轴和 y 轴的物理量范围, m 、 n 是图像总的行、列数。

图8是利用该方法将图3中曲线上的数值提

取出来后重新绘制的 1-120-500 光栅在 400 ~ 760 nm 的衍射效率。

(3) 对于对数坐标系的曲线(如图 4 所示的

光电倍增管的阴极灵敏度曲线), 纵坐标物理量的数值 y_j 为(x_i 的值仍由式(12)计算):

$$y_i = \begin{cases} a \times 10^{\frac{(m-i) \times (N-1)}{m}}, & (m-i) \leq \frac{m}{N-1} \\ b \times 10^{\frac{(m-i-\frac{m}{N-1}) \times (N-1)}{m}}, & \frac{m}{N-1} < (m-i) \leq \frac{2 \times m}{N-1} \\ c \times 10^{\frac{(m-i-\frac{2 \times m}{N-1}) \times (N-1)}{m}}, & \frac{2 \times m}{N-1} < (m-i) \leq \frac{3 \times m}{N-1} \\ d \times 10^{\frac{(m-i-\frac{3 \times m}{N-1}) \times (N-1)}{m}}, & \frac{3 \times m}{N-1} < (m-i) \leq \frac{4 \times m}{N-1} \\ \dots\dots \end{cases} \quad (14)$$

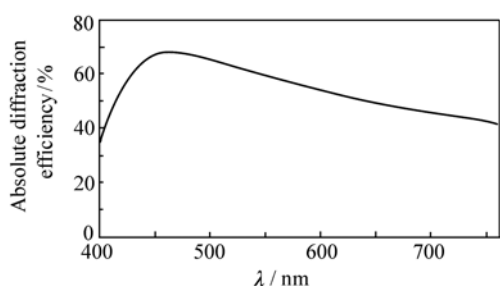


图 8 利用本文方法提取出的光栅衍射效率

Fig. 8 Absolute diffraction efficiency curve of 1-120-500 grating obtained by the method brought forward in this paper

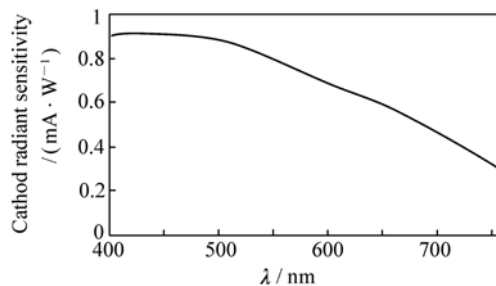


图 9 利用本文方法提取出的 CR131 型光电倍增管阴极灵敏度曲线

Fig. 9 Spectral responsibility curve of CR131 PMT obtained by the method brought forward in this paper

式中, N 为坐标系的主刻度数, a, b, c, d 分别为纵坐标从小到大的主刻度值。对于图 4 所示的曲线, $N=5, a=0.01, b=0.1, c=1, d=10$ 。

图 9 是利用上述方法将图 4 中曲线上的数值提取出来后重新绘制的 CR131 光电倍增管的阴极灵敏度。

4.3 数值提取精度分析

为了分析 4.2 中曲线数值提取算法的精度, 在利用光栅光谱仪采集图 7 所示的光谱曲线的同时, 记录各波长处的光强数值 $I_0(\lambda)$, 并利用本文所建立的方法提取图 7 中曲线在各个波长处的数值 $I_1(\lambda)$ 。将 $I_0(\lambda)$ 和 $I_1(\lambda)$ 绘于同一幅图中, 如图 10 所示。可以看出, 利用本文的方法提取出来的数据与原始数据基本一致。

为了进一步分析曲线数值提取精度, 利用

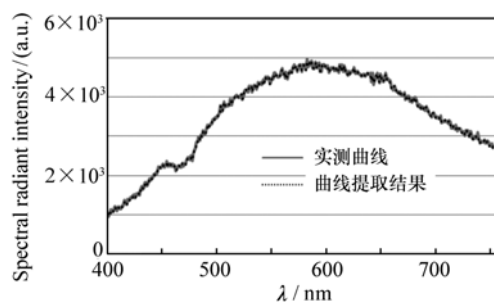


图 10 实测光谱曲线和利用本文方法提取出的光谱曲线

Fig. 10 Spectrum of bromine-tungsten lamp obtained from grating spectrometer and the method brought forward in this paper

$$\delta(\lambda) = \frac{I_0(\lambda) - I_1(\lambda)}{I_0(\lambda)} \times 100\% \quad (15)$$

计算出各波长处数值提取的相对误差,并绘出误差曲线如图 11 所示,其中最小误差为 0,最大误差的绝对值为 2.68%。

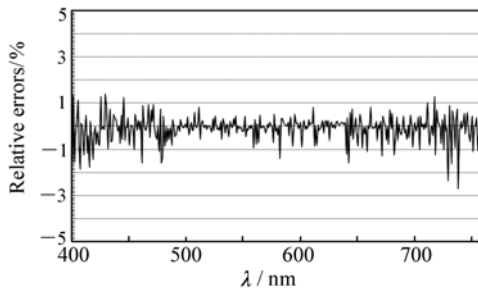


图 11 数值提取误差曲线

Fig. 11 Errors between the true values and the values obtained from the method brought forward in this paper

根据

$$|\overline{\delta(\lambda)}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta(\lambda_i)|, \quad (16)$$

式中, n 为曲线离散点数, 计算得到平均误差为 0.39%。由此可见, 本文所提出的数值提取算法具有较高的数值提取精度。

4.4 光栅光谱仪误差校正结果

利用式(11)对光栅光谱仪测得的溴钨灯的谱线(图 7)进行校正, 并对结果进行三次方数值拟合, 得到溴钨灯的光谱曲线如图 12 所示。将其

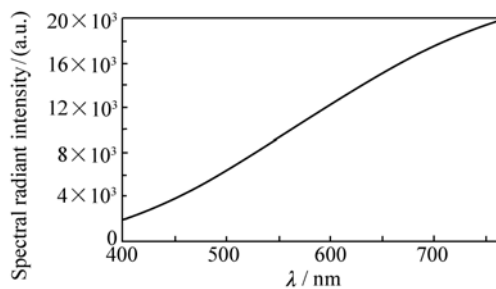


图 12 校正后的溴钨灯光谱曲线

Fig. 12 Revised spectrum curve of bromine-tungsten lamp light

参考文献:

- [1] 薛庆生, 王淑荣. 基于超环面均匀线距光栅的成像光谱仪优化设计研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(5): 1433-1437.

与图 6 相比可以看出, 在可见光波段内, 校正后的溴钨灯光谱曲线与标准曲线变化趋势一致。

为了进一步分析本文方法的校正效果, 利用公式:

$$I'_i(\lambda) = \frac{I_i(\lambda)}{I_i(760)} \quad i = 0, 1, 2. \quad (17)$$

将光栅光谱仪测得的谱线、本文校正后的谱线以及溴钨灯标准谱线归一化, 并重绘于一幅图中, 如图 13 所示。可以看出, 利用本文所提出的方法可以有效地消除光栅光谱仪在测量宽带光谱时的误差, 校正后的结果与标准谱线非常接近。

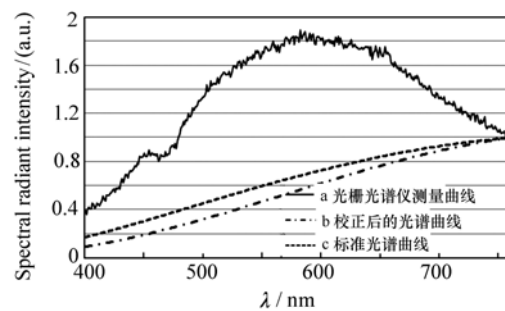


图 13 溴钨灯光谱曲线

Fig. 13 Spectrum curved of bromine-tungsten lamp (a. obtained by grating spectrometer; b. revised by the method brought forward in this paper; c. Standard)

5 结 论

针对由器件光谱特性引起的光栅光谱仪测量误差问题, 提出了一种基于数值处理的误差校正技术, 并以溴钨灯的标准光谱为参考, 对该技术的校正效果进行了验证。实验结果表明, 本文所提出的数值提取算法的平均误差为 0.39%, 校正后的光谱曲线与溴钨灯标准光谱曲线一致, 说明本文所建立的误差校正模型和数值提取算法可以有效校正光谱仪中由各种器件光谱响应带来的误差。

- XUE Q SH, WANG SH R. Optimum design of imaging spectrometer based on toroidal uniform-line-spaced(TULS) spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013,33(5):1433-1437. (in Chinese)
- [2] 郑玉权,高志良. CO₂探测仪光学系统设计[J]. *光学精密工程*,2012,20(12):2645-2653.
ZHENG Y Q, GAO ZH L. Optical system design of CO₂ sounder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(12):2645-2653. (in Chinese)
- [3] 赵敏杰,司福祺,江宇,等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标[J]. *光学精密工程*,2013,21(3):567-574.
ZHAO M J, SI FU Q, JIANG Y, *et al.*. In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(3):567-574. (in Chinese)
- [4] 周海金,刘文清,司福祺,等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制[J]. *光学精密工程*,2012,20(11):2331-2337.
ZHOU H J, LIU W Q, SI F Q, *et al.*. Stray light suppression of space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(11):2331-2337. (in Chinese)
- [5] 陈少杰,齐向东,巴音贺希格,等. 用于激光诱导等离子体光谱分析的便携式中阶梯光栅光谱仪设计[J]. *发光学报*,2013,34(5):672-677.
CHEN SH J, QI X D, BA Y H X G, *et al.*. A portable echelle spectrograph design for laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013,34(5):672-677. (in Chinese)
- [6] PUEGNER T, KNOBBE J, LAKNER H, *et al.*. Basic angles in microelectromechanical system scanning grating spectrometers[J]. *Appl. Optics*, 2011,50(24):4894-4902.
- [7] DU X W, LI CH Y, XU ZH, *et al.*. Accurate wavelength calibration method for flat-field grating spectrometers[J]. *Appl. Spectroscopy*, 2011,65(9):1083-1086.
- [8] 刘玉娟,崔继承,巴音贺希格,等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. *光学精密工程*,2012,20(1):52-57.
LIU Y J, CUI J CH, BA Y H X G, *et al.*. Design and application of imaging spectrometer with convex grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(1):52-57. (in Chinese)
- [9] 王彦云,贾惟义. 光栅光谱仪的光谱特征函数和偏振响应[J]. *光谱学与光谱分析*,1989(1):1-5.
WANG Y Y, JIA W Y. The spectral characteristic function and polarization response of a grating spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1989(1):1-5. (in Chinese)
- [11] 潘明忠,刘玉娟,陈少杰,等. 中阶梯光栅光谱仪 CCD 相机的设计[J]. *光学精密工程*,2012,20(8):1725-1731.
PAN M ZH, LIU Y J, CHEN SH J, *et al.*. Design of echelle spectrograph CCD camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(8):1725-1731. (in Chinese)
- [11] 杨怀栋,陈科新,黄星月,等. 光栅光谱仪的整体建模与分析[J]. *光谱学与光谱分析*,2009,29(1):281-284.
YANG H D, CHEN K X, HUANG X Y. Global modeling and analyzing of grating spectrometers[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009,29(1):281-284. (in Chinese)
- [12] 刘倩倩,郑玉权. 超高分辨率光谱定标技术发展概况[J]. *中国光学*,2012,5(6):566-577.
LIU Q Q, ZHENG Y Q. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions[J]. *Chinese Optics*, 2012,5(6):566-577. (in Chinese)
- [13] 张春雷,向阳. 超光谱成像仪图像均匀性校正[J]. *中国光学*,2013,6(4):584-590.
ZHANG CH L, XIANG Y. Correction of imaging uniformity for imaging spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2013,6(4):584-590. (in Chinese)
- [14] 刘汉臣,王秋萍,张崇辉,等. 光栅扫描光谱仪参数的研究[J]. *应用光学*,2008,29(4):595-598.
LIU H CH, WANG Q P, ZHANG C H, *et al.*. Investigation into parameters of grating scanning spectrometer[J]. *J. Appl. Optics*, 2008,29(4):595-598. (in Chinese)
- [15] 张军强,邵建兵,彦翔翔,等. 成像光谱仪星上光谱定标的数据处理[J]. *中国光学*,2011,4(2):175-181.
ZHANG J Q, SHAO J B, YAN CH X, *et al.*. Data processing of on-orbit spectral calibration of space-borne high resolution imaging spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(2):175-181. (in Chinese)

- [16] 林中,范世福. 光谱仪器学[M]. 北京:机械工业出版社, 1989.
LIN ZH, FAN SH F. *Spectrometer*[M]. Beijing:China Machine Press, 1989. (in Chinese)
- [17] 江文杰,曾学文,施建华. 光电技术[M]. 北京:科学出版社, 2009.
JIANG W J, ZENG X W, SHI J H. *Opto-electronic Technology*[M]. Beijing:Science Press, 2009. (in Chinese)
- [18] 光电倍增管探测器. [EB/OL]. [2014-02-27]. <http://www.instrument.com.cn/netshow/SH100487/C96200.htm>

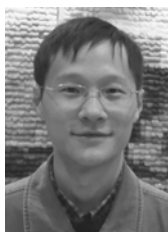
作者简介:



施建华(1976—),女,江苏盐城人,博士,副教授,2004年于国防科学技术大学获得博士学位,主要从事光学精密测量方面的研究。E-mail: gexin7651@sina.com



谢文科(1977—)男,湖南衡山人,博士,副教授,2007年于国防科学技术大学获得博士学位,主要从事气动光学等方面的研究。E-mail: wenkexiedan@163.com



伏思华(1978—)男,河南商丘人,博士,副教授,2006年于国防科学技术大学获得博士学位,主要从事光学精密测量方面的研究。E-mail: fusihua2002cn@hotmail.com

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址:<http://www.eope.net>

定价:50.00 元/册