

文章编号 1004-924X(2015)07-1965-07

分光测色仪中的光谱仪系统

刘怡轩^{1,2}, 颜昌翔^{1*}, 李先锋¹, 代 虎^{1,2}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:根据分光测色仪的应用需要,对分光系统、光电接收系统及相关电路组成的光谱仪进行了模块化设计,以方便仪器的整体设计、装调和测试。考虑分光测色仪是非成像光学仪器,故提出用光纤来连接各光学模块。根据应用需求提出了光谱仪的主要技术指标,所设计光谱仪很好地完成了球差和彗差的校正。分析了用滤光片消除二级衍射光谱的方法,解决了光纤和光谱仪数值孔径不匹配的问题。研制了光谱仪系统,其外形尺寸为 130 mm×90 mm×45 mm。实验测试显示,在狭缝宽度为 50 μm 时,光谱仪各波段的光谱分辨率都可以达到 2 nm。对光谱仪进行了波长定标,定标精度小于 0.2 nm,整个工作波段占 401 个像元,满足 1 nm 的波长输出间隔的设计要求。该光谱仪的可弯曲光纤和电子线路便于整机灵活布局与模块拆卸,同时方便单独测试。所述方法为分光测色仪的整机研制与测试打下了良好的基础。

关键词:光学设计;分光测色仪;模块化设计;光谱仪;二级衍射光谱

中图分类号:O433.1;TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1965

Design of spectrometer in color measuring spectrophotometer

LIU Yi-xuan^{1,2}, YAN Chang-xiang^{1*}, LI Xian-feng¹, DAI Hu^{1,2}

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
- * Corresponding author, E-mail: yanca@ciomp.ac.cn

Abstract: According to the application demands of a color measuring spectrophotometer, the spectrometer composed of an optical system, a photoelectric receiving system and relevant circuits was proposed in a modular design to improve its facilitate design, alignment and test. As the spectrophotometer is a non-imaging optical instrument, every optical module was connected by optical fibers. The application requirements of the spectrophotometer were analyzed, its specifications were put forward, and spherical aberration and coma aberration were well corrected. A way to eliminate the secondary diffraction spectrum with an optical filter was analyzed in detail and the contradiction of unmatched numerical apertures between fiber optics and spectrometer was solved. A spectrometer with a dimension of 130 mm×90 mm×45 mm was established, and experimental test shows that the spectrometer achieves a spectral resolution of 2 nm in the whole band with the slit width of 50 μm. The

收稿日期:2014-09-15;**修订日期:**2014-10-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA12A103);中国地质调查局资助项目(No. 1212011120227)

spectrometer wavelength is calibrated and the accuracy is less than 0.2 nm. The entire band of the spectrometer uses 401 pixels, which meets the design requirements of the wavelength interval of 1 nm. The spectrometer with flexible fiber optics and electronic circuit is convenient for the layout of whole instrument, disassembly of modules and the individual test of the spectrometer, which lays a good foundation for the development and test of the whole spectrophotometer.

Key words: optical design; color measuring spectrophotometer; modular design; spectrometer; second order diffractive spectrum

1 序 言

分光测色仪是颜色测量中最重要的仪器,它不直接测量颜色,而是测量物体的光谱反射率因数或光谱透射比,然后通过色度学公式计算求得样品颜色的三刺激值及其他表征颜色的各种参数^[1-2]。作为分光光度计的一个分支,分光测色仪主要由光源和照明系统、分光系统、光电接收系统、控制和数据处理系统等组成^[3]。其中,分光系统把混合光分解成单色光,光电接收系统接收单色光并进行光电转换,这两部分合称为光谱仪。光谱仪是分光测色仪的核心组成部分,不仅要满足一系列的指标要求,而且对于整个仪器的性能和结构起着决定性作用。通常分光测色仪采用整体化设计^[4-5],各组成部分的相对位置固定,连接紧密,其优点是结构紧凑,便于小型化。然而整体化设计不利于各组成部分的分步装调、测试等,并且在一些应用需求中,特殊照明系统的使用加大了仪器整体化设计的难度。

由于分光测色仪的功能和结构较为复杂,采用模块化设计思想不仅便于仪器的整体装调和测试,而且有利于仪器的整机设计,以满足特殊的应用需求。模块化设计是按功能把一组相关的光学、机械等元件组装成一个独立模块,各模块分别装调、测试,最终将各模块进行总装调和测试,组成完整的仪器^[6],这给光学仪器的设计带来了非常大的便利^[7-8]。本文根据应用需要将分光测色仪中由分光系统、光电接收系统及相关电路组成的光谱仪进行了模块化设计,研制了光谱仪系统,并给出了实验结果。

2 应用要求及主要技术指标

分光测色仪的设计如图 1 所示,整个系统主要由照明系统和光谱仪系统组成。为满足一定的应用需求,照明系统采用国际照明委员会(CIE)推荐的 45/0 几何条件。45°照明系统中,由于结构干涉与光路遮挡,0°的接收光路无法直接与光谱仪连接,故采用反射镜将接收光路折转后,再用光纤连接光谱仪,从而巧妙地解决这个问题。由于分光测色仪是非成像光学仪器,所以用光纤连接各光学系统便可满足应用要求。

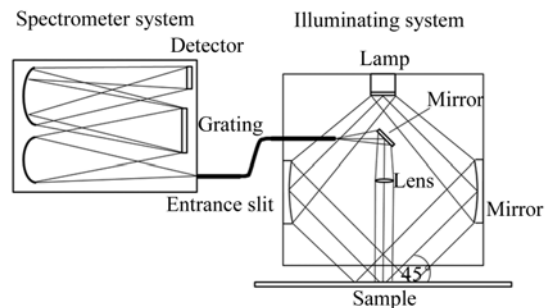


图 1 分光测色仪布局图

Fig. 1 Schematic diagram of color measuring spectrophotometer

常规的分光测色仪工作在 380~780 nm 可见光波段,由于可见光谱两端在色度学计算中贡献较小,有些分光测色仪产品的光谱仅为 400~700 nm^[9]。本文设计的分光测色仪可用于测量紫外光激发引起的荧光颜色,将光谱仪波长设置为 340 nm~740 nm。通常颜色样品的光谱曲线随波长的变化比较平缓,而且计算三刺激值时总是在很宽的光谱范围内进行,所以波长准确度和光谱分辨率对颜色测量准确度的影响较小^[10]。

在大多数应用中,5 nm 光谱带宽的分光测色仪就能达到应用要求。为实现颜色的高精度测量,光谱仪的光谱分辨率要小于 5 nm。CIE 推荐精确计算时波长间隔为 1 nm,而在大多数情况下波长间隔可取 5 nm 甚至更高。随着探测器技术的进步,当今分光测色仪广泛使用光电二极管(PD)阵列或光电耦合器件(CCD)等阵列光电器件作为光电接收器件。本文选择 Hamamatsu 公司的 S3923-512Q 光电二极管阵列作为探测器,其光谱为 200~1 000 nm,像元数为 512,像元大小为 25 μm×0.5 mm(宽×高)。该探测器可提供极大的信噪比和动态范围,为高精度的光度测量提供了保障,所以特别适合作为分光测色仪的探测器,而且 512 像元可获得 1 nm 间隔的数据。光谱仪系统与照明系统采用光纤进行连接,要求体积小于 150 mm×100 mm×60 mm。光谱仪的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 光谱仪的主要技术指标

Tab.1 Specifications of spectrometer

Parameter	Value
Spectral range/nm	340~740
Spectral resolution/nm	<5
Wavelength interval/nm	1
Wavelength accuracy/nm	0.2
Dimension/mm ³	150×100×60
Pixel size/μm ²	25×500
Number of active pixels	512

3 光谱仪光学系统设计及结果

采用 Czerny-Turner 型结构光谱仪,它用平面衍射光栅作为色散元件,两个球面反射镜分别作为准直镜和成像镜^[11]。传统的 Czerny-Turner 光谱仪考虑了消球差和消彗差条件^[12-13],可以保证良好的光谱分辨率。球差会使光谱线对称地扩展,使边缘不清晰,因此用凹球面反射镜时必须控制球差在像差容限以内,以尽可能达到最高的光谱分辨率。球面镜焦距 f 与系统 F 之间需满足^[14]:

$$\begin{cases} f \leq 256 \cdot \lambda \cdot F^4 \\ D \leq 256 \cdot \lambda \cdot F^3 \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $F = f/D$, λ 为波长。彗差对谱线轮廓的影

响很大,它使谱线单边扩散成为不对称的模糊像,严重影响分辨率。如图 2 所示,在 Czerny-Turner 型结构中,消彗差条件^[15]应满足:

$$\sin \alpha_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} \left(\frac{\cos i \cdot \cos \alpha_2}{\cos \theta \cdot \cos \alpha_1} \right)^3 \sin \alpha_1, \quad (2)$$

其中: α_1, α_2 分别为中心光线对准直镜和聚焦镜的离轴角, r_1, r_2 分别为准直镜和聚焦镜的曲率半径, i, θ 分别为光栅的入射角和衍射角。 i, θ 满足色散方程:

$$d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda, \quad (3)$$

其中: d 为光栅常数, m 为衍射级次。将式(3)微分变形,可得线色散率公式:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{f}{\cos \sigma} \cdot \frac{m}{d \cdot \cos \theta}, \quad (4)$$

其中: σ 为光谱平面的偏转角。

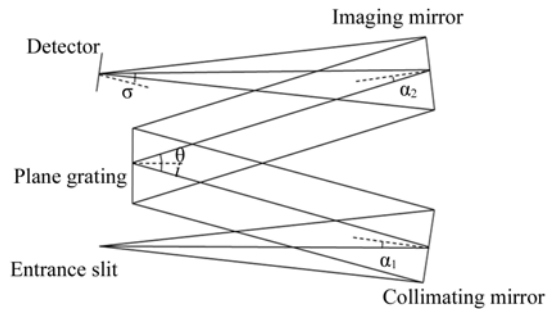


图 2 Czerny-Turner 光谱仪光路图

Fig.2 Layout of Czerny-Turner spectrometer

光谱为 340~740 nm 共 400 nm,设计时令线色散率 $dl/d\lambda = 25 \mu\text{m}/1 \text{ nm}$,以满足 1 nm 的波长采集间隔。选用光栅常数为 1/300 mm 的平面光栅。根据指标要求和上述公式计算初始结构,经优化设计的光谱仪光路结构如图 3 所示。其物方数值孔径为 0.1,光栅衍射级次采用 +1 级,准直镜和成像镜采用曲率半径相同的球面反射镜,焦距不足 80 mm,整体尺寸小于 90 mm×60 mm。

在工作波段内,光谱像点斑在色散方向的半径均方根值随波长的变化如图 4 所示。从图中可以看出,点斑色散方向半径的 RMS 值在整个工作波段内均小于 6 μm,部分波段优于衍射极限,这表明球差和彗差得到了充分校正,可达到最优的光谱分辨率。像面上各波长点列图如图 5 所示,由于该光谱仪未矫正像散,光谱像点斑在两个方向的尺寸差别很大,近乎成直线,垂直于色散方向的均方根值约为 100 μm。在整个工作波

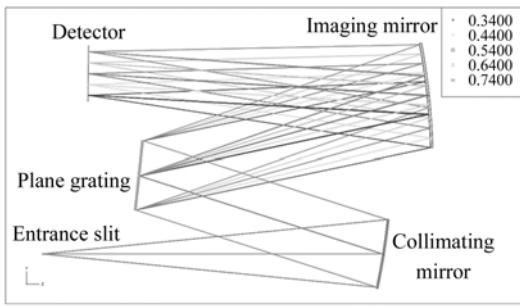


图 3 光谱仪光路结构

Fig. 3 Layout of optimized spectrometer

段内,总光谱长度为 10 mm,满足线色散率及 1 nm 的波长采集间隔的要求。

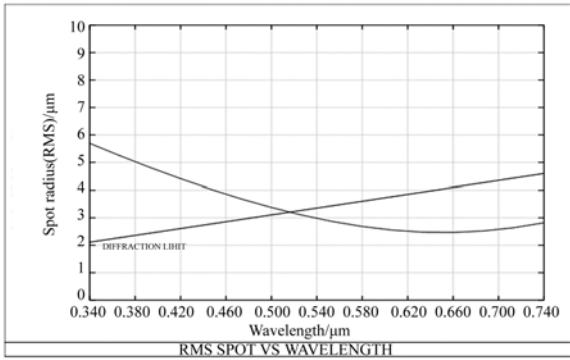


图 4 点斑色散方向半径的均方根值随波长的变化曲线

Fig. 4 Spot radius(RMS) versus wavelength

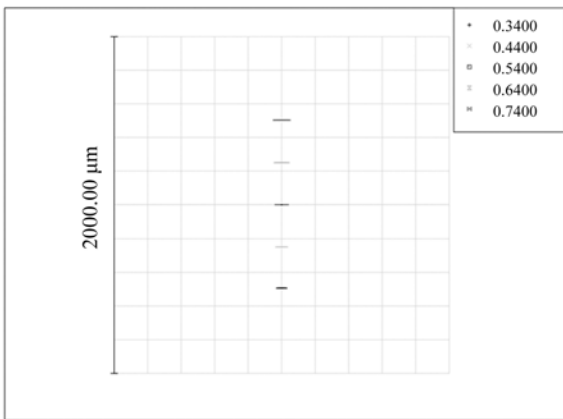


图 5 像面上各波长点列图

Fig. 5 Spot diagram on image plane

色散方向的像差得到了很好的矫正,所以该光谱仪的光谱分辨率主要受入射狭缝宽度的影响。狭缝像的几何宽度对应的光谱带宽为^[16]:

$$\delta\lambda_s = \frac{a_1 d}{m f_1} \cdot \cos i \cdot \cos \sigma, \quad (5)$$

其中: a_1 为入射狭缝宽度, f_1 为准直镜焦距。狭缝宽度设置为 50 μm , 计算可得 $\delta\lambda_s$ 为 2.048 nm。

取 340, 342, 440, 442, 540, 542, 640, 642, 740, 742 nm 10 个波长, 各波长的狭缝单色像如图 6 所示。可见在整个光谱波段内, 光谱分辨率全部可以达到 2 nm, 远小于 5 nm 的设计指标。由于光谱分辨率和光能利用率相互制约, 为了获得更大的光强, 狭缝宽可以取 100 μm , 在整个光谱波段内, 仍可以达到 4 nm 的光谱分辨率, 依然满足指标要求。

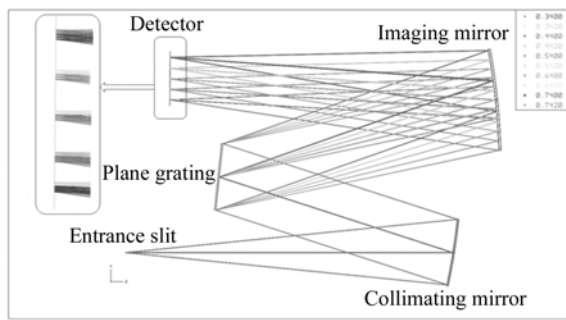


图 6 光谱分辨率说明

Fig. 6 Interpretation of spectral resolution

由于色散元件采用光栅, 不可避免地存在二级衍射光谱。本设计的光谱仪工作波段为 340~740 nm, 二级光谱的影响包括带内和带外两个部分, 工作波段内的 340~370 nm 的二级光谱会和 680~740 nm 的一级光谱重叠, 带外 340 nm 之前的光谱区的二级光谱将会和 680 nm 之前的一级光谱重叠, 所以需要在探测器前加前截止滤光片来消除二级光谱的影响^[17]。已知经光源发出到达光谱仪的带外光谱区为 300~340 nm, 即需要在 600~740 nm 波段消除 300~370 nm 的二级光谱。只在探测器前的部分光谱区域中插入滤光片消除二级光谱的办法是不可行的, 因为受滤光片厚度的影响, 通过滤光片的光线和未通过滤光片的光线光程不等, 从而产生了不同的焦平面, 这会大幅影响整个光谱区域的光谱分辨率。本文在滤光片基底部分区域镀前截止膜, 膜系厚度产生的光程差可以忽略。如图 7 所示, 将滤光片放置到探测器前, 滤光片上镀截止深度小于 0.1%、400 nm 的前截止膜, 区域完全覆盖 600~740 nm 的一级光谱, 可以有效消除 300~370 nm 的二级光谱; 而镀 400 nm 前截止膜的区域应尽量远离

400 nm 的一级光谱,以防对工作波段内的一级光谱产生影响;而未镀前截止膜的区域,一级光谱可以正常通过。

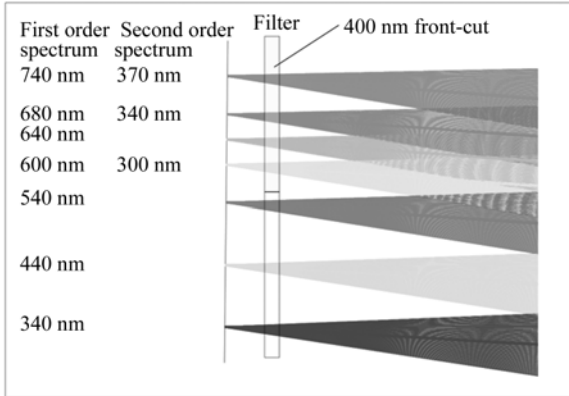


图 7 滤光片设置
Fig. 7 Set of optical filter

光谱仪与其他光学系统采用光纤连接,由光纤出射的光入射到光谱仪狭缝。通常采用数值孔径为 0.22 的光纤,这样经光纤出射进入光谱仪的光束的数值孔径为 0.22,大于光谱仪设计的数值孔径 0.1。数值孔径不匹配将会给光谱仪造成大量的杂散光,因此在狭缝到准直镜之间设置了消杂光光阑,以有效遮挡光纤发出的超过光谱仪数值孔径的光。考虑狭缝的长宽尺寸很小,可以忽略,光阑开口半径 r 与光阑到狭缝的距离 l 需满足关系:

$$r = l \cdot \tan u \approx l \cdot \sin u = 0.1l, \quad (6)$$

其中: u 为孔径角。式(6)即可解决光纤数值孔径大于光谱仪数值孔径的问题,有效地降低了光谱仪中的杂散光。图 8 为添加了滤光片和消杂光光阑后的光谱仪结构。

4 光谱仪系统集成

根据所设计的光学系统进行机械结构设计及光机零件加工,最终完成光谱仪光机系统的集成及装调。在光谱仪中的适当位置添加若干光阑以消除杂散光的影响,此外光谱仪系统中所有的机械件表面均做了发黑处理,以进一步减小杂散光的影响。本文研制的光谱仪实物如图 9 所示,壳体密封,外形尺寸为 130 mm×90 mm×45 mm,

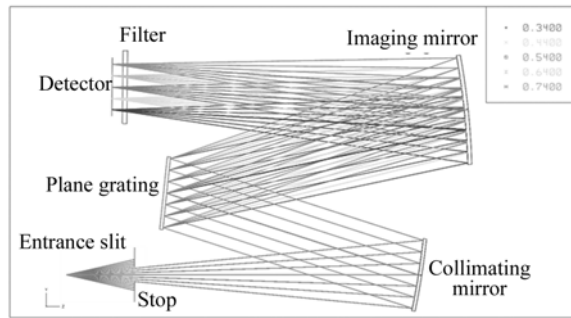


图 8 加滤光片和消杂光光阑后的光谱仪结构
Fig. 8 Layout of spectrometer with optical filter and glare stop

满足指标要求。光谱仪一端的光纤用于连接照明系统,电子线路接口用于连接主控电路板,底部有螺纹孔用于将该模块安装到分光测色仪整机中。可弯曲的光纤和电子线路的接口设计便于整机灵活布局与模块拆卸,同时方便该光谱仪单独测试,从而体现出模块化设计的优势。

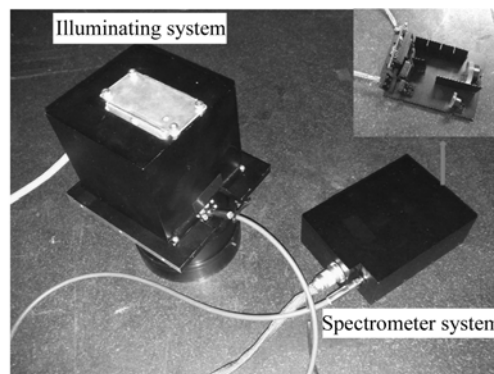


图 9 光谱仪实物图
Fig. 9 Photo of spectrometer

5 性能测试

这里用已知波长的谱线进行光谱分辨率测量^[18]。光源选用赛凡 7ILM3 波长校准低压汞灯,具有丰富的紫外及可见波段的特征谱线,同时也是光纤接口的模块化设备,可方便地与本光谱仪连接。用光谱仪测量低压汞灯的光谱,得到汞灯在工作波段内的特征谱线,结果如图 10 所示。由图可看到低压汞灯的 365.02,404.66,435.84,546.07,576.96,579.07 nm 的特征谱线和 253.65 nm 的二级谱线(507.3 nm),该光谱仪可以将 576.96 nm 和 579.07 nm 的两条特征谱线

分开,即在 580 nm 附近可以实现 2 nm 的光谱分辨率。各波长谱线的半高全宽(FWHM)皆约为两个像元,即 2 nm,因此可以认为工作波段内光谱分辨率都达到了 2 nm。所设计的光谱仪的光谱分辨率小于设计指标 5 nm,实验与分析的结果相同。

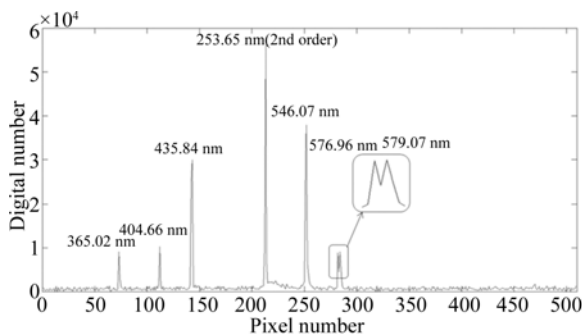


图 10 实测低压汞灯光谱图

Fig. 10 Spectrum of mercury lamp

用单色仪对光谱仪进行波长定标,通过三次多项式的最小二乘拟合^[19]得到波长 λ 和像元序数 x 的函数关系为:

$$\lambda = (-2.17897 \times 10^{-7}) \cdot x^3 + (9.135633 \times 10^{-5}) \cdot x^2 + (1.004418) \cdot x + 291.320003. \quad (7)$$

将汞灯谱线所对像元序数代入式(7),所得波长与真实波长最大相差 0.17 nm,即波长定标精

度小于 0.2 nm,满足设计指标要求。由式(5)得,340 nm 所对应的像元序数为 48,740 nm 所对应的像元序数为 448,整个工作谱段共计 401 个像元。由于式(7)所得拟合曲线近乎直线,所以整个谱段近似满足 1 nm 的波长输出间隔。

6 结 论

本文将分光系统、光电接收系统及相关电路组成的光谱仪进行了模块化设计,以便于仪器的整体设计、装调和测试,满足了分光测色仪的应用需要。首先分析应用需求并提出主要指标,设计了光谱仪系统,很好地校正了球差和彗差。然后详细分析了用滤光片消二级衍射光谱的方法,解决了光纤和光谱仪数值孔径不匹配的问题。根据设计研制了光谱仪系统,并对光谱仪进行了测试。结果表明在狭缝宽度为 50 μm 时,各波段光谱分辨率都可以达到 2 nm,满足设计指标。最后对光谱仪进行了波长定标,结果表明定标精度小于 0.2 nm,整个工作波段占 401 个像元,满足 1 nm 波长输出间隔的设计要求。

光谱仪系统采用可弯曲光纤和电子线路的接口设计,便于整机灵活布局与模块拆卸,同时方便光谱仪的单独测试,体现了模块化设计的优势,为分光测色仪的整机研制与测试奠定了良好的基础。

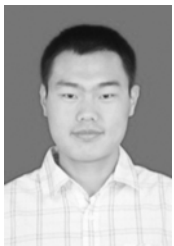
参考文献:

- [1] 汤顺青. 色度学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1990.
TANG SH Q. *Colorimetry*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. (in Chinese)
- [2] 刘怡轩,颜昌翔. 在线式分光测色仪发展现状[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 712-722.
LIU Y X, YAN CH X. Development and status of on-line spectrophotometer[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 712-722. (in Chinese)
- [3] 胡威捷,汤顺青,朱正芳. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2007.
HU W J, TANG SH Q, ZHU ZH F. *Modern Color Science and Application*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. (in Chinese)

- [4] 胡威捷,汤顺青,朱正芳. 快速分光光度计 SP-1000 的设计研究[J]. 仪器仪表学报, 1998, 19(4): 407-410.
HU W J, TANG SH Q, ZHU ZH F. Design and research of rapid spectrophotometer SP-1000 [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1998, 19(4): 407-410. (in Chinese)
- [5] IMURA K, SAKAKIBARA K. Colorimeter. U. S. Patent 6917429[P]. 2005-7-12.
- [6] 刘银年,薛永祺,王建宇,等. 实用型模块化成像光谱仪[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(1): 9-14.
LIU Y N, XUE Y Q, WANG J Y, et al.. Operational modular imaging spectrometer[J]. *J. Infra-red Milim. Waves*, 2002, 21(1): 9-14. (in Chinese)
- [7] 高卫国,徐燕中,陈永亮,等. 广义模块化设计原理及方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 48-45.

- GAO W G, XU Y SH, CHEN Y L, *et al.*. Theory and methodology of generalized modular design[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(6):48-45. (in Chinese)
- [8] MORLEY J U, MCARTHUR L J B, HALLIWELL D, *et al.*. CCD fiber optic spectrometer for the measurement of spectral irradiance[J]. *SPIE*, 2010, 7773: 77730U1-77730U-12.
- [9] 蒋月娟. 分光测色仪的设计研究[J]. *光学技术*, 2001, 27(3):281-282.
- JIANG Y J. The design of spectrophotometer for color measuring [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(3):281-282. (in Chinese)
- [10] ZWINKELS J C. Colour measure instruments and their calibration [J]. *Displays*, 1996, 16(4):163-171.
- [11] LINDBLOM P. Theory of two-mirror plane-grating spectrograph[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, 62:756-762.
- [12] SHAFER A B, MEGILL L R, DROPPLEMAN L. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. *JOSA*, 1964, 54(7): 879-886.
- [13] SHAFER A B. Correcting for astigmatism in the Czerny-Turner spectrometer and spectrograph[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(1): 159-160.
- [14] FUTAMATA M, TAKENOUCI T, KATAKURA K. Highly efficient and aberration-corrected spectrometer for advanced Raman spectroscopy[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(22):4655-6565.
- [15] XUE Q, WANG S R, LU F Q. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(1): 11-16.
- [16] 薛庆生, 王淑荣, 李福田, 等. 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 823-830.
- XUE Q SH, WANG SH R, LI F T, *et al.*. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 823-830. (in Chinese)
- [17] 郑玉权. 小型 Offner 光谱成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 650-657.
- ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 650-657. (in Chinese)
- [18] 薛庆生, 王淑荣, 李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1516-1521.
- XUE Q SH, WANG SH R, LI F T. Study on limb imaging spectrometer with grating dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5):1516-1521. (in Chinese)
- [19] SHUKLA R P, KUMAR S, SINHA A K, *et al.*. A simple method of calibration for multichannel spectrograph using charge-coupled device(CCD) as a detector for Raman spectroscopy [J] . *Journal of Optics*, 2004, 33(2) : 87-107.

作者简介:



刘怡轩(1987—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,2010年于太原理工大学获得学士学位,主要从事光谱仪器设计方面的研究。E-mail:liuyixuanhx@163.com

导师简介:



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士,研究员,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail:yan cx@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)