

文章编号: 1003-501X(2011)10-0134-06

小型宽光谱低分辨率光谱仪器光学设计

吴从均^{1,2}, 颜昌翔¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 空间光学部, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 光栅作为小型光谱仪器分光系统的核心, 采用不同类型的光栅制作分光仪器时其结构形式也不尽相同。文中为设计一个工作波段在 340~800 nm, 分辨率优于 15 nm, 谱面长度 28.71 mm 的比色仪光学系统, 通过对比常见光谱仪结构的优缺点, 选择平场凹面光栅作为最终的结构形式, 采用长波通滤光片实现对二级光谱重叠的消除, 并对比色仪光源系统进行设计, 平场凹面光栅光学系统分辨率优于 10 nm, 全系统大小约为 190 mm×15 mm×60 mm 的光学装置, 平场凹面光栅采用市场现有的光栅。不仅满足设计要求, 而且元件较少, 有利于装调和批量化生产。

关键词: 光栅型光谱仪; 分光结构; 光源; 滤光片; 光学设计

中图分类号: O433

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.10.022

Optical Design of a Small-size, Long-spectrum Range and Low-resolution Spectrograph

WU Cong-jun^{1,2}, YAN Chang-xiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Diffraction grating is the core part of spectrum instruments. To get a good performance of the instruments, different structure should be designed with different type of the grating. A spectrograph, which works in the spectrum range from 340 nm to 800 nm, was designed, whose the resolution is higher than 15nm, and the dispersion size is 28.71 mm on the focal plane. According to comparison of structure of the common spectrographs, the flat field holographic concave grating structure with many advantages was chosen. The long pass filter was used to constrain the secondary spectrum, and the optical source was also considered. As a result, the resolution of the whole system is better than 10 nm, and the size is only 190 mm×15 mm×60 mm. The flat concave-grating can be got from the market, which greatly decreases the cost of the product. Besides, only a grating can act as the spectrometer system, which can make the system easily assembly and very convenient for mass production.

Key words: grating spectrograph; dispersing structure; optical source; filter; optical design

0 引言

在现代科研和生产中, 光谱仪器是最基本应用最广泛的仪器。在物质生产领域, 光谱仪器和光谱分析已经成为不可缺少的检测和分析手段, 在颜色分析和色度比较中也都有重要的应用, 温波等采用的交叉式 C-T 结构设计的小型分光测色仪器可以很好的达到便携、小型化的目的^[1], 随着应用范围的扩展, 对于光谱仪器的性能要求也越来越高。

比色仪器是一种通过分析宽波段的光谱通过容器物质后, 检测物质对于光谱的吸收特性, 进而确定物质颜色、色调、色值特性的一种装置, 在药品检测、颜料测量中有广泛的应用。光谱分析仪器的优化设计

收稿日期: 2011-04-02; 收到修改稿日期: 2011-07-25

作者简介: 吴从均(1986-), 男(汉族), 陕西安康人。硕士研究生, 主要研究方向是光谱仪分光系统和光谱仪器光学设计。

E-mail: wcjun1002@yahoo.cn.

已被相关文献详细讨论^[2], 其光学系统由光源和分光系统组成, 分光系统对于整个系统的性能和结构形式起着决定性作用, 在满足一定的指标情况下, 系统的小型化和批量化对于工业生产尤为重要。文中在比较了几种典型的光谱仪器装置的基础之上, 从中选择出平场凹面光栅作为一种宽光谱、低分辨率的分光系统, 大大简化了装置的复杂程度。

1 比色仪装置的基本结构

比色仪的光学原理和分光测色仪相似, 其光学部分由两部分组成: 光源部分和光谱仪部分, 光源发出的复色光经过比色杯后成像在入射狭缝上, 入射狭缝的光束通过分光系统, 将光源光束通过比色杯后的光谱信息分布到接收谱面上。光谱仪装置的色散系统主要有光栅和棱镜, 其各自特点已在相关文献中有过分析^[3], 在工业生产中, 和棱镜相比光栅分光元件可以大大减小仪器的体积和重量, 节省研制成本。

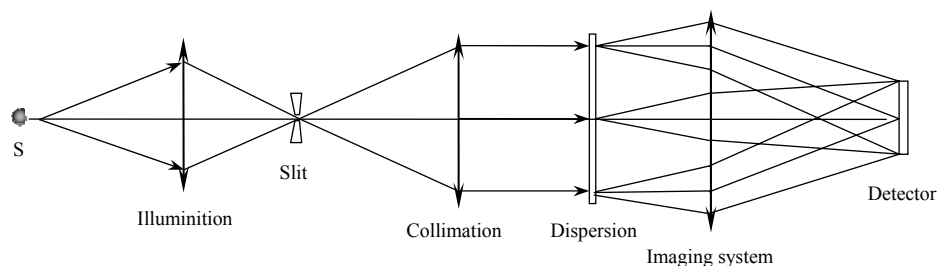


图 1 比色仪系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of colorimetry system

2 典型光栅光谱仪装置比较

光栅主要可分为平面光栅和曲面光栅两大类, 平面光栅在制作小型光谱仪器时主要有: 切尔尼-特纳 (Czerny-Turner)^[4]、艾伯特-法斯梯 (Ebert-Fastie)^[5]、李特洛 (Littrow) 自准直^[6]、夏帕-格兰茨 (Chupp-Gtantz)^[7] 系统四种形式; 凸面等间距光栅在 Offner 结构中得到很好的应用^[8]; 等间距凹面光栅采用罗兰装置, 在单色仪装置中应用极其广泛^[9]; 平场凹面光栅采用全息方法设计可以得到平直谱面^[10], 对摄谱仪的设计非常方便。下文中对于设计指标在 340~800 nm, 探测器像元数为 35 个, 像元有效敏感面积 4.39 mm×0.89 mm, 像元间距 0.99 mm 的比色仪装置中, 分别设置了在满足上述指标要求的结构形式, 并指出了上述几种装置的优缺点。

2.1 指标讨论

探测器有效像元数为 35 个, 根据需要, 选择 29 个像元就可以满足使用要求, 光谱面大小为 28.71 mm, 按照严格均匀分光计算光谱分辨率为 $(800 - 340) / 29 = 15.86 \text{ nm}$, 但是对于光学设计阶段光谱分辨率必须小于这个值, 初步确定为 10 nm, 物方数值孔径为 0.1, 狭缝为 1 mm×3 mm。光栅的选择根据具体结构形式和尺寸, 光栅周期太大需要很大的半径, 才能满足谱面要求, 周期太小光栅的价格也就相对较高。

2.2 平面光栅光谱仪系统

平面光栅系统的代表是切尔尼-特纳系统 (Czerny-Turner, C-T 系统)。该系统的设计结构如图 2 所示, 平面光栅采用 800 lp/mm 的形式。镜子的半径为 -156 mm, 在整个波段的分辨率优于 5 nm, 大小为 80 mm×20 mm×75 mm。

该结构的特点是准直镜和成像镜采用相同曲率的反射镜, 取光栅中心为坐标原点, 水平方向为光轴方向, 中心波长的光束在光栅表面的入射角度和出射角度相等, 系统成对称式结构, 对于中心波长可以有效的消除像差, 因此在单色仪设计中应用极为广泛。在非对称 C-T 结构中, 中心光路并不关于光轴对称, 而且两个镜面的曲率中心并不重合, 由此衍生了很多制作光谱仪的装置, 艾伯特-法斯梯系统的主要特点是将 C-T 结构形式中的两个反射镜利用一个镜面代替, 这种结构形式对称严格, 像差很小, 装调方便, 但是体积和质量较大。在衍生的系统中交叉式对称结构虽然像差较大, 但是对于杂散光的消除尤为方便^[11], 在某

种程度上还可以缩小整体尺寸。图3是该种设置在分辨率为5 nm时的结构图,其结构尺寸和C-T结构尺寸相当,光栅线对数为800 lp/mm,准直和成像镜半径都是130 mm。

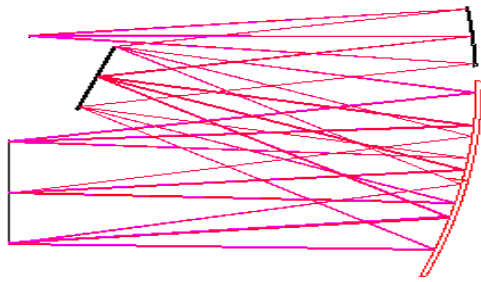


图2 切尔尼-特纳系统
Fig.2 Czerny-Turner system

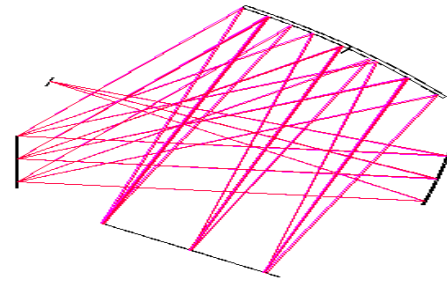


图3 交叉对称C-T系统
Fig.3 Crossed Czerny-Turner system

另一种平面光栅分光方式就是自准直系统。这种系统结构形式简单,元件紧凑,采用一块凹面反射镜起到准直和会聚的作用,入射和出射狭缝位于反射镜的焦面上。采用折叠镜可以将入射和出射光分开成一定角度,但是入射光束和出射光束距离较近,入射的杂散光会直接进入谱面,因此分辨率较低,而且对于谱面较宽、数值孔径较大、波段范围大的光谱仪器设计更为不便,并且存在二次衍射和多级衍射问题。当反射镜采用抛物面镜时可以对像差进行很大程度的消除,一般应用于数值孔径较小的单色仪系统中。图4是采用自准直系统设计满足指标要求的系统结构图,光栅采用1600 lp/mm,准直镜采用半径为126 mm,65 mm×15 mm×45 mm。

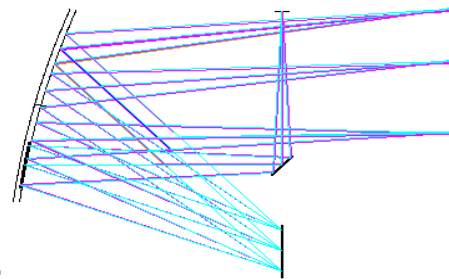


图4 李特洛系统
Fig.4 Littrow system

2.3 凸面光栅光谱仪系统

凸面光栅应用最多的就是 Offner 结构, Offner 光谱仪系统是由一个大凹球面镜和一个同心的凸面光栅组成的三反式结构,这种系统像差很小,拥有良好的成像特性,更多地应用于成像光谱仪系统。该系统可以保证仅剩五级像差,三级像差全部消除,将整个镜子分开还可以消除一部分五级相差。谱面(光谱维)大小 h_{spec} , 凸面光栅半径 R , 光栅刻线密度 N , 光谱范围 $\Delta\lambda$, 之间满足如下关系: $R = h_{\text{spec}} / mN\Delta\lambda$ 。

在 Offner 光谱仪器设计中光栅刻痕一般不会很密。在成像光谱仪设计中,谱面相对较小。对于谱面很宽的光谱仪系统,例如,当采用 $N=200$ lp/mm 时,得到结构形式如图5所示,光谱分辨率优于1 nm,整体结构达到460 mm×100 mm×300 mm,这不适合于便携式,而且整个镜子较大,加工和检测也不方便;但由于其拥有很高的光谱分辨率,因此,适用于光谱分辨率要求较高,利用 CCD 接收系统的小型成像光谱仪中。

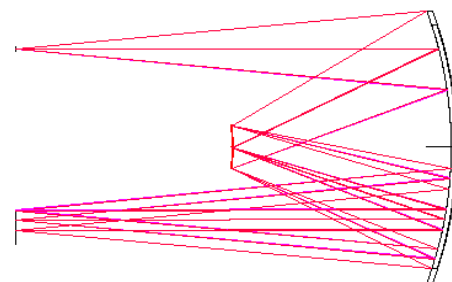


图5 Offner 光谱仪系统
Fig.5 Offner spectral system

2.4 平场凹面光栅光谱仪系统

平场凹面全息光栅具有一定的像差校正功能,基本原理如图6所示,采用 C 、 D 点作为全息记录的光源点,通过干涉理论在记录介质面形成间距不等的干涉条纹的光栅面。再现复色光波(A)经过光栅时,不等间距的干涉条纹会对入射的复色光源进行分光, $B(B', B'')$ 是不同波段光束所形成的 A 点的像,在空间中按照波长分开实现对复色光的分光功能。为使谱面满足平像场,根据文献[12]的理论,平场聚焦时出臂长度(L)

满足下式:

$$L_{\text{出}} = \frac{\cos^2 \beta}{m \frac{\lambda}{\lambda_0} H_{200} + \frac{\cos \beta}{R} + \frac{\cos \alpha}{R} - \frac{\cos^2 \alpha}{L_{\lambda}}} \quad (1)$$

式中: λ_0 表示全息记录波长, λ 是再现光波长, α 和 β 分别是再现光入射和出射角度, 二者满足光栅方程:

$$\sin \alpha + \sin \beta = m \frac{\lambda}{d} \quad (2)$$

H_{200} 和全息记录位置以及记录波长有关, 满足下式关系:

$$H_{200} = \frac{\cos^2 \gamma}{r_1} - \frac{\cos \gamma}{R} - \frac{\cos^2 \delta}{r_2} + \frac{\cos \gamma}{R} \quad (3)$$

δ 和 γ 表示记录光波相对光栅法线面的夹角, 与记录光波满足式(4)关系:

$$\sin \gamma + \sin \delta = m \frac{\lambda_0}{d} \quad (4)$$

在满足前述指标要求的情况下, 利用平场凹面光栅设计的光谱仪系统如图 7 所示: 光栅半径为 98.2 mm, 选择记录光波的波长为 632.8 nm, 记录点位置为 $C(0, 0, -100)$ 和 $D(0, -39.45, -100)$, 得到光栅中心处密度为 580 lp/mm。入臂长度 98.2 mm, 通过优化像面位置和像面倾斜角度得到, 590 nm 波长对应的臂长度为 104 mm, 短波 340 nm 对应的出臂长度为 103.5 mm, 800 nm 对应的出臂长度为 106.4 mm, 谱面倾斜-16°。取中心视场, 0.5 视场, 以及边缘视场得到的边缘波段和中心波长处的点列斑如图 8 所示(图中给出的是每隔 4 nm 的点列图), 从中可以看出, 中心视场处分辨率优于 4 nm, 边缘视场的光谱分辨近似为 4 nm。通过能量分布可知在边缘波段 85%以上的能量集中半径小于 0.35 mm, 在中心波长处小于 0.1 mm, 满足测量要求。

采用全息干涉的方法制造的平视场凹面光栅和刻划光栅相比在性能上有很大的改进^[13]: 其 F 数可以做到 $F/2$, 而一般的平面光栅光谱仪只能做到 $F/3$ 到 $F/10$, 因此可以获得很大的光通量; 和刻划光栅相比, 全息光栅不存在较大的表面粗糙度问题, 而且整个分光系统只有一个光栅, 不存在二次反射问题, 杂散光很小; 拥有很好的像差校正能力, 光栅不仅起到色散的功能, 还兼有成像功能, 更不需要准直装置, 大大减少了光学元件的数量, 对于仪器的重量和体积都会有很大程度的缩减; 平直谱面对于摄谱仪系统接收尤为方便, 可以同时得到各个谱段的信息量, 非常适合对于光谱的高速分析。

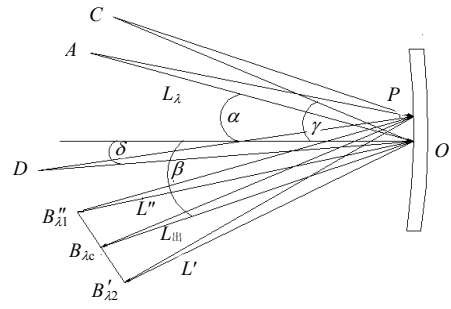


图 6 平场凹面光栅示意图

Fig.6 Structure of holographic flat concave-grating

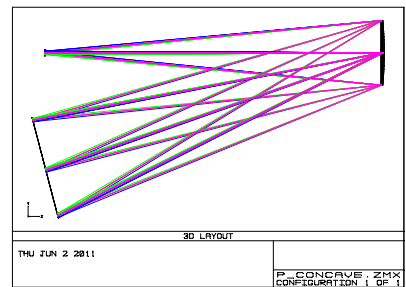


图 7 凹面光栅系统

Fig.7 Flat concave-grating system

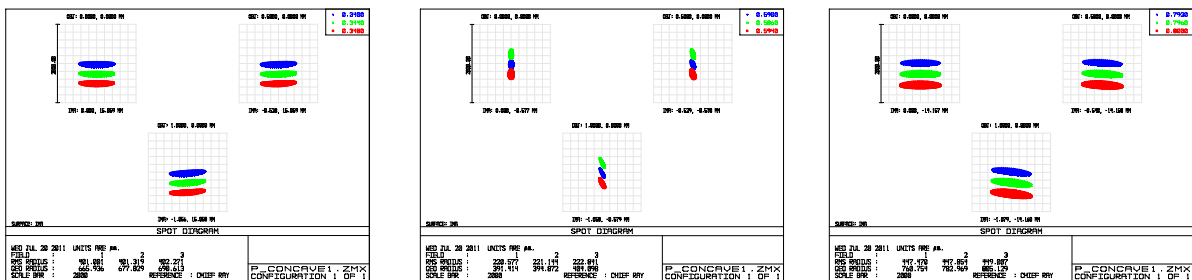


图 8 凹面光栅系统点列图分布

Fig.8 Spot diagram of the flat concave-grating system

3 比色仪总体光学设计

在前述的讨论中可以发现，全息凹面光栅和其他结构相比有很多优点，因此采用它作为光谱仪的核心部件设计整个比色仪，比色仪设计分成两个部分：光源部分和光谱仪部分，在前面已经讨论了凹面光栅在满足指标要求情况下的尺寸要求，以下主要讨论光源设计部分。

3.1 光源设计

根据要求光源采用 12 W 的卤素灯小米泡，光源灯丝大小为 0.5 mm×1 mm，由它确定光源视场大小。光源和狭缝之间必须预留至少 12.5 mm×12.5 mm 见方的石英比色杯空间。比色杯的通光口径大小为 5 mm×5 mm，设计时采用抛物面对光源进行准直，抛物镜的口径大小为 10 mm。由于在光源中有向右直接进入透镜的光线，为消除对其影响，将小米泡的右侧一部分采用涂黑处理消除影响(图 9 中未给出)。这种情况下会对它的整个光能有一定的影响，但是由于探测器响应度较高，经过计算仍能达到探测需求。汇聚透镜采用双胶合透镜消除色差和部分球差，光源点和双胶合透镜之间间距为 40 mm，可以满足整个小米泡的放置，比色杯放置在镜面汇聚透镜的后面。当整个系统的光通量较小时，可以通过加大抛物镜的口径，并且为保证从双胶合镜出射的光束能够全部进入比色杯可以将比色杯随着抛物镜的增大后移，从而增加系统的光通量。整个光源部分光路如图 9 所示，通过 ZEMAX 软件优化，色差和球差系数均小于四分之一波长，像方数值孔径大小为 0.1，Y 方向上 85%以上能量集中在半径为 10 μm 内，光源模块长度约为 90 mm，宽度约为 10 mm。

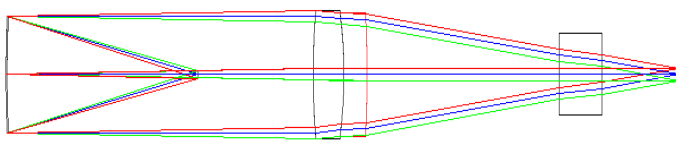


图 9 光源部分光路

Fig.9 Optical path of the optical source system

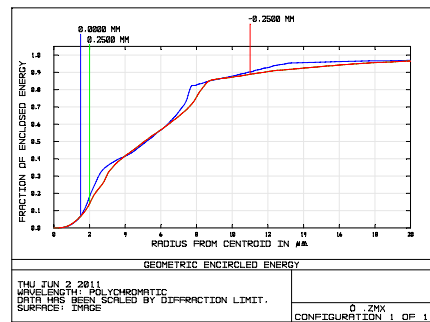


图 10 Y 方向能量集中程度

Fig.10 Geometric Y-enclosed energy

将比色杯加在会聚光路中虽然增大了系统的像差,但是像差可以经过双胶合透镜的曲率半径进行平衡,并且这样可以增加系统的光通量。双胶合透镜虽然不能对色差进行严格的校正,但是对于这种孔径不是很大的系统,分辨率要求不高的情况下,可以保证最后的分辨率,节省整个设计的成本。

3.2 整体性能分析

设计中将光源像面和光谱仪的狭缝对接,光源的出射像为像方远心光路,光源照射狭缝后采用前述的平场凹面光栅作为分光元件,实现对比色杯中物质属性的测定,整个系统的长度约为 190 mm,其光路如图 11,选取中心视场、边缘视场和中间视场的波长间隔为 10 nm 的点列图分布如 12 所示,从中可以看出

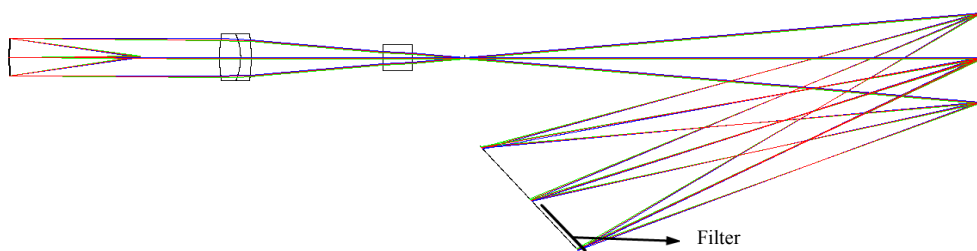


图 11 整体光路图

Fig.11 Layout of the whole system

完全满足指标提出的要求。

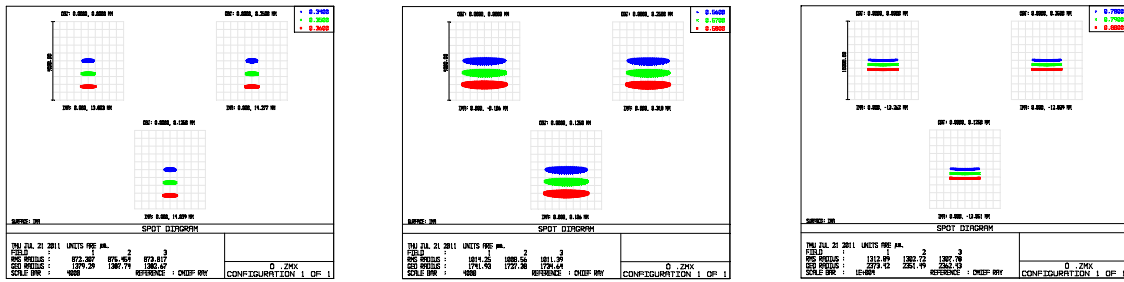


图 12 全系统点列图

Fig.12 Spot diagram of the whole system

上述所设计的系统在 680 nm 处的一级光谱会和 340 nm 的二级光谱会重合, 这会对光谱面上波段的探测产生很大的影响, 必须予以消除, 设计中采用长波通滤光片限制短波段光线到达长波谱面, 选择截止波长为 650 nm 的方形长波通滤光片, 固定在探测器长波谱面前表面上。

为了减少加工费用, 上述的平场凹面光栅的参数选用和岛津国际的 P0580-01 型号光栅参数基本吻合, 可以采用其现有产品。

4 总 结

一般的在光谱仪器设计中水平系统多适用于单色仪系统, 垂直系统更多的应用于摄谱仪系统。文中在满足设计指标要求的情况下, 通过分析几种典型的光栅分光方式结构, 讨论了每一种结构的优缺点和适用场合, 在为了追求结构简单, 易于装调和可市场化的前提条件下, 选择市场上现有的凹面全息光栅, 可以很好的满足指标要求, 和文献[1]相比, 光谱仪所采用的元件由 3 个减小到 1 个, 对于装配和设计都是很有利的。整个系统大小仅为 190 mm×15 mm×60 mm, 结构简单、装调方便, 光谱分辨率优于 10 nm, 光学元件均可以在市场中订购, 大大降低费用, 单个凹面光栅杂散光较小, 系统的稳定性能高, 对于该产品的市场化有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 温波, 颜昌翔. 便携式分光测色仪光学设计 [J]. 应用光学, 2011, 32(1): 18-22.
 WEN Bo, YAN Chang-xiang. Optical design of portable spectrophotometer for colorimetry [J]. **Journal of Applied Optics**, 2011, 32(1): 18-22.

[2] 李晓彤, 岑兆丰. 光谱分析仪光学系统的优化设计方法 [J]. 光电工程, 2004, 31(6): 41-43.
 LI Xiao-tong, CEN Zhao-feng. An optimized design method for optical system of a spectroanalyzer [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2004, 31(6): 41-43

[3] 郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2629-2637.
 ZHENG Yu-quan, WANG Hui, WANG Yi-fan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. **Optics and Precision Engineering**, 2009, 17(11): 2629-2637

[4] Shafer Arthur B, Megill Lawrence R, Droppleman Leann. Optimization of the Czerny-Turner Spectrometer [J]. **OSA(S1103-6167)**, 1964, 54(7): 879-888.

[5] 吴国安. 光谱仪器设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.
 WU Guo-an. **Design of Spectrometers** [M]. Beijing: Science Press: 1978.

[6] Overend John, Gilby A C, Russell J W, et al. A Littrow-McCubbin High Resolution Infrared Spectrometer [J]. **Applied Optics(S0003-6935)**, 1967, 6(3): 458-469.

(下转第 145 页)

- [4] Dauvillier Bibi S, Hubsch Pierre F, Aarnts Maxim P, *et al.* Modeling of viscoelastic behavior of dental chemically activated resin composites during curing [J]. **Journal of Biomedical Materials Research**(S1552-4973), 2001, **58**(1): 16-26.
- [5] Dauvillier Bibi S, Aarnts Maxim P, Feilzer Albert J. Modeling of viscoelastic behavior of dental light-activated resin composites during curing [J]. **Dental Materials** (S0109-5641), 2003, **19**: 277-285.
- [6] ANSYS Inc. Theory, Release 5.7 [Z]. 2001, 4-60-4-62.
- [7] 张肖宁. 沥青及沥青混合料的粘弹性原理及应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 127-146.
- [8] 宋天霞. 非线性结构有限元计算 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995: 278-308.
- SONG Tian-xia. **The Finite Element Calculation of Nonlinear Structures** [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995: 278-308.
- [9] 许金泉, 丁皓江. 现代固体理论力学及应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997: 222-237.
- [10] 郝如江. 聚合物熔体粘弹参数拟合及注塑件残余应力研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2002: 29-35.
- [11] 詹小丽, 张肖宁, 王端宜, 等. 改性沥青非线性粘弹性本构关系研究及应用 [J]. **工程力学**, 2009, **26**(4): 187-191.
- ZHAN Xiao-li, ZHANG Xiao-ning, WANG Duan-yi, *et al.* Study on Nonlinear Viscoelastic Constitutive Equation of Modified Asphalt and Its Applications [J]. **Engineering Mechanics**, 2009, **26**(4): 187-191.

~~~~~  
( 上接第 139 页 )

- [7] Chupp V L, Grantz P C. Coma Canceling Monochromator with No Slit Mismatch [J]. **Applied Optics**(S0003-6935), 1969, **8**(5): 925-929
- [8] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, Couce B, *et al.* Analytical design of an Offner imaging spectrometer [J]. **Optics Express** (S1094-4087), 2006, **14**(20): 9156-9168.
- [9] Savushkin Alexander V, Savushkin Oleg A. Conference on X-ray, Instruments, and Mission [J]. **Proc. of SPIE** (S0277-786X), 1998, **3444**: 338-339.
- [10] 陈吉武, 林中, 孟庆华. 平场全息凹面光栅的设计 [J]. **光学精密工程**, 1997, **5**(1): 96-102.
- CHEN Ji-wu, LIN Zhong, MENG Qing-hua. Design of Flat Field Holographic Concave Grating [J]. **Optics and Precision Engineering**, 1997, **5**(1): 96-102.
- [11] 吴雁, 唐义, 倪国强, 等. 一种交叉的切尔尼—特纳型远紫外成像光谱仪 [J]. **光电工程**, 2009, **36**(3): 125-129.
- WU Yan, TANG Yi, NI Guo-qiang, *et al.* FUV Imaging Spectrometer Based on Crossed Czerny-Turner Structure [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, **36**(3): 125-129.
- [12] 李朝明, 吴建宏, 赵艳皎, 等. 高分辨率平场全息凹面光栅的研制 [J]. **光电子·激光**, 2006, **17**(7): 828-831.
- LI Chao-ming, WU Jian-hong, ZHAO Yan-jiao, *et al.* Development of Flat Field Holographic Concave Gratings with High-resolution [J]. **Journal of Optoelectronics · Laser**, 2006, **17**(7): 828-831.
- [13] 张继彦, 杨国洪, 张保汉, 等. 小型平焦场光栅光谱仪的研制 [J]. **光学学报**, 2001, **21**(9): 1099-1102.
- ZHANG Ji-yan, YANG Guo-hong, ZHANG Bao-han, *et al.* Design of a Small-Sized Flat Field Grating Spectrograph [J]. **Acta Optica Sinica**, 2001, **21**(9): 1099-1102.