文章编号:1002-2082(2011)01-0018-05

便携式分光测色仪光学设计

温 波[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，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院 研究生院， 北京 100039)

摘 要：光学系统是分光光度计的核心部分，以光谱仪基本原理和光学设计理论为基础，以便携化、低成本、且满足设计要求的光谱范围和分辨率为具体设计目标，对李特洛系统、艾伯特-法斯梯系统、切尔尼-特纳系统、交叉式切尔尼-特纳系统这4种可行的设计方案进行了比较与分析，提出以平面衍射光栅作为色散元件的非对称交叉式Czerny-Turner结构作为该设计的系统结构。用光学软件对该系统进行模拟和优化，设计结果表明：设计的系统光谱范围为360 nm～740 nm，光谱分辨率为10 nm、F数为5.25、光谱展开为44.1 mm、系统体积约80 mm×69 mm×62 mm，满足精度高、体积小及成本低等设计要求。

关键词：色度计；分光光度计；交叉式Czerny-Turner结构；平面衍射光栅；硅光电二极管阵列
中图分类号：O433；TH703 **文献标志码**：A

Optical design of portable spectrophotometer for colorimetry

WEN Bo[1,2], YAN Chang-xiang[1]
(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Optics is the key part of a spectrophotometer, which directly affects system performance and accuracy. With portable, low cost, appropiate spectral range and resolution requirements as design target, the crossed Czerny-Turner structure based on plane diffraction gratings was proposed based on the operation principle of spectrophotometer and the theory of optical design. Comparison of some feasible design solutions were made, which included Littrow system, ebert-Fastie system, Czerny-Turner system and crossed Czerny-Turner system. Optical software was used for simulation and optimization of optics. The system spectral range is 360 nm-740 nm, spectral resolution is 10 nm, F number is 5.25, spectrum width is 44.4 nm, and the volume of the optical system is 80 mm × 69 mm × 62 mm, which meets the design requirements.

Key words: colorimeter; spectrophotometer; crossed Czerny-Turner structure; plane diffracting grating; Si photodiode array

引言

随着工业的发展，颜色测量在很多方面都有着广泛的应用，甚至在很多行业，颜色都已经成为质量评价重要指标，因此颜色测量精度及测量速度的提高，对许多产品生产质量的提高起着至关重要的作用。近年来出现的自动分光式测色仪器，虽然在

收稿日期：2010-07-05； **修回日期**：2010-08-12
基金项目：国防预研基金资助项目(05001SA050)
作者简介：温波(1985—)，男，陕西渭南人，硕士研究生，主要从事光学系统设计方面的研究工作。
E-mail：wenbo2005ster@gmail.com

体积上有所减小，但由于价格昂贵、操作复杂、维护难等原因，这类仪器并不适合目前我国一般用户的需要,所以对研究测量精度高,价格低且便于携带与使用的颜色测量仪器有着重要的意义[1]。

光学系统结构是便携式测色仪中的核心部分,它设计的好坏直接影响测色仪的整体性能,其中光谱分辨率是衡量该系统质量好坏最重要的评价标准。本文重点在于对该光学系统设计与模拟,使其满足设计目标,为之后便携式分光测色仪的研制提供前提条件。

1　理论依据

1.1　基本工作原理

分光测色仪的基本组成可分为光源和照明系统、准直系统、色散系统、成像系统以及接收、检测显示系统5部分,其中准直系统和色散系统可以统称为分光系统,其工作原理如图1所示。光源发出的光照射在被测物体上,经过被测物体表面反射的光在积分球内壁多次反射后射向入射狭缝,该光包含有物质光谱信息。照明系统(在此指积分球)是把从被测物体表面反射的光能量传递给准直系统。准直系统一般由入射狭缝和准直物镜组成,由狭缝处发出的光束经过准直系统后变成平行光射向色散系统。色散系统利用色散元件(这里用平面光栅)把入射的平行光分成单色光。成像系统作用是将空间上分散开的各波长单色光会聚在成像镜的焦面上,形成一系列按波长排列的狭缝的单色像。接收系统与显示系统将焦面上的光谱能量接收,经过数据处理后以数据的形式输出颜色测量结果[2-5]。

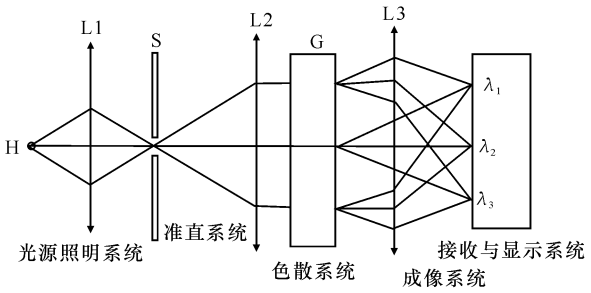

图1　分光测色仪工作原理图

Fig. 1　The principle structure of spectrophotometer for colorimetry

1.2　光学设计理论

一般光学仪器像差都分为单色像差和色差两种。对于单色像差来说,分为球差,彗差,像散,场曲和畸变5种。主要校正像差有球差、彗差和色差,由于所设计的分光测色仪中采用的元件都是反射元件,系统没有色差,因此只需校正球差与彗差即可。

球差是由于不同的孔径的平行光束不能会聚在一点而产生的。反过来,由于球差,准直镜不能把来自狭缝上任一点的全部光线变成平行光束。球差会导致光谱线轮廓增宽,谱线模糊,分辨率降低。准直镜和成像镜的球差无法用调整的办法来消除,因此设计时必须校正到像差容限以内。

由于有彗差,从非常近轴的狭缝高度上一点发出的光通过该准直物镜时也不能成为平行光束,且光束结构不对称。反过来,成像镜也不能把从色散系统射出的平行光束会聚到一点。彗差对谱线轮廓影响也严重,不仅是谱线轮廓单边扩散,降低仪器的分辨率,而且会使谱线轮廓极大值发生位移,甚至产生假的伴线。因此,彗差也必须限制在像差容限之内。

准直系统和成像系统的物镜都要校正球差和彗差,根据经验,一般都采用瑞利准则作为像差容限。所以瑞利准则,就是由剩余球差、剩余彗差所产生的最大波像差应当小于。按照轴向像差和波像差的关系,可以得到球差和彗差的容限如下:

轴向球差:

$$LA' \leqslant 16\lambda\left(\frac{f'}{D}\right)^2 \tag{1}$$

偏离正弦条件:

$$OSC' \leqslant \frac{\lambda}{n\eta}\left(\frac{f'}{D}\right)^2 \tag{2}$$

式中:D 为有效光阑孔径,在光谱仪器中就是色散元件的有效宽度;f' 为物镜的焦距;λ 为选定的光线波长;η 为边缘主光线或边缘谱线到光轴的距离。

在平面光栅光谱仪器中都采用反射镜作为物镜。因为抛物面镜的初级彗差比球面镜的大,多数采用球面镜。这样球差无法校正,而是控制相对孔径使球差小于像差容限,并从装置型式上想办法减小或消除彗差[2]。

2　系统设计

2.1　可行方案选择

光谱仪器光学结构的选择范围很大,经过全面分析可知,有3种结构比较适合。第1种是李特洛光学系统(如图2),该系统结构简单,紧促,但是入射狭缝与出射狭缝距离很近,入射光束在反射镜上产生的杂散光可直接到达出射狭缝,且存在二次衍射

和多次衍射问题。第2种结构是艾伯特-法斯梯系统(如图3),该系统优点是彗差小,且物镜的像差不会是狭缝像产生附加弯曲,缺点也是存在二次衍射。第3种结构是切尔尼-特纳系统(如图4),优点是可避免二次衍射和多次衍射,同时又方便反射镜的加工与装调。但是对便携式分光测色仪光学系统来说,考虑到该系统便携化的特点,所以我们使用非对称交叉式切尔尼-特纳系统,如图5所示。所谓交叉式切尔尼-特纳系统,就是改变成像物镜的位置,使入射光线和成像光线在路径交叉,这样既减小了整体尺寸又可以使光谱像面的位置与光栅、准直物镜及狭缝的位置在空间不发生干涉并且该交叉式结果对杂散光的抑制非常有利,再者使用硅光电二极管阵列探测器可以实现多通道分析,避免了单色仪复杂的光栅调节机构[4-12]。

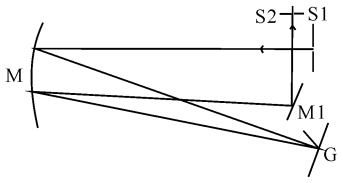

图2　李特洛系统

Fig. 2　Littrow system

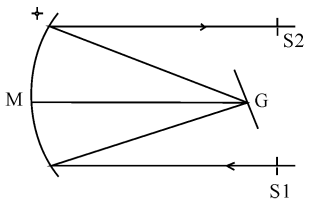

图3　艾伯特-法斯梯系统

Fig. 3　Ebert-Fastie system

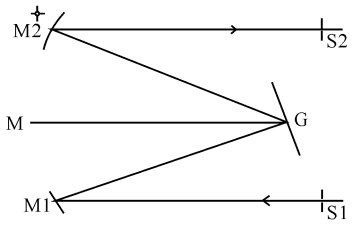

图4　切尔尼-特纳系统

Fig. 4　Czerny-Turner system

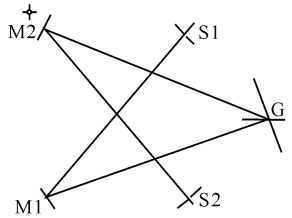

图5　交叉式切尔尼-特纳系统

Fig. 5　Crossed Czerny-Turner system

2.2　系统设计指标

该设计要求参考了国外同类仪器的性能指标,并考虑到设计及研发成本,在此基础上提出了设计的主要技术指标:光谱波段为360 nm～740 nm,光谱分辨率为10 nm,测量波长间隔为10 nm,系统的球差与彗差应控制在像差容限以内,仪器体积约为69 mm×96 mm×193 mm,此外在设计时应使用可降低生产成本的元件及并考虑尽量提高仪器灵敏度。

2.3　系统参数设计

本系统设计中,光源的选择与仪器所工作的光谱波段有关,由于光谱波段为可见光波段,所以选择用脉冲氙灯来模拟标准照明体D65的光谱功率分布。脉冲氙灯与日光的光谱能量分布相近,发光不连续,能在短时间内发出很强的光。准直镜与成像镜都使用凹球面反射镜,设计球面曲率半径时,必须使其产生的球差限制在像差容限之内。此处色散元件采用平面光栅,光栅的参数可由色散系统的光谱分辨率决定,设计要求光谱分辨率为10 nm,因为10 nm的分辨率对于色度测量来说已经足够精确。由于测量波长在可见波段,经过分析,探测器使用滨松公司的S4114-46Q型号硅光电二极管阵列[12]。

3　系统模拟及结果分析

3.1　参数模拟及优化

在使用Zemax光学软件模拟该系统时,衍射光栅常数采用1/1200 mm,狭缝宽度为0.2 mm,数值孔径为0.1,参考主波长为550 nm。

在优化该系统时,为了使系统在整个光谱范围内都有好的性能,所以采用以波长为多重结构参数来优化该系统,波长分别取360 nm、550 nm和740 nm,其中以反射镜半径,元件之间的距离以及元件的倾斜角为变量,以RMS为优化函数,使焦距、倾斜等变量适当地改变来优化系统,系统性能达到最优。在这里需要提出的是,常见的成像光学系统作用是为了有良好的成像质量,而分光测色仪的光学系统作用是为了分离光谱,而非成像,因此两者具有不同的评价标准。由此可见,常用的成像系统的评价标准例如几何像差、波像差、传递函数等在此不再适宜,而应该根据取一系列点列图去评价系统的性能,因为在较宽的入射波段里,各个波长的点列图都较集中且能分辨开才能真正说明整

个系统设计结果满足要求[13-14]。经过模拟和优化以后,所得到设计结果的分析图,如图6至图8所示。

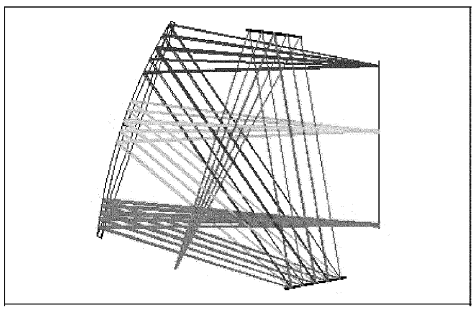

图6　系统3D结构图

Fig. 6　3D Layout of optical system

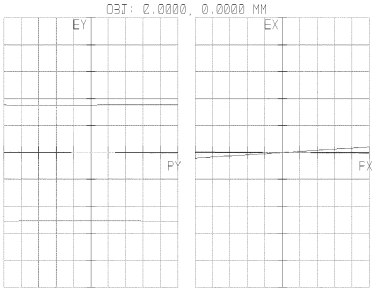

图7　光线像差光扇图

Fig. 7　Ray aberration fans plot

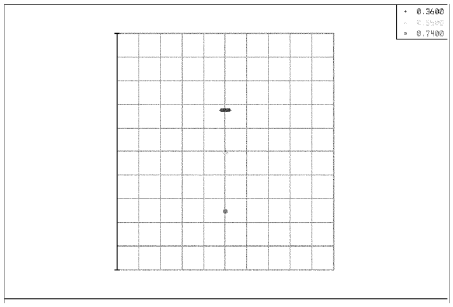

图8　点列图

Fig. 8　Spot diagrams

3.2　结果分析

由图6的3D结构图可以看出该系统结构小巧,利于便携。由图7光线像差曲线图可以看出,对于整个波段来说,曲线基本关于EY和EX对称分布,说明球差和彗差的校正已达到设计要求,即球差与彗差已控制在像差容限以内。由图8可知点列图比较集中,说明球差校正比较好,能量比较集中。由系统的模拟结果可知谱面展开为44.1 mm,而所选的硅光电二极管阵列长度为45 mm,基本符合设计要求。另外,从Zemax软件模拟结果可知,系统F数约为5.25,系统体积约为80 mm×69 mm×62 mm,基本符合系统小型化的要求。

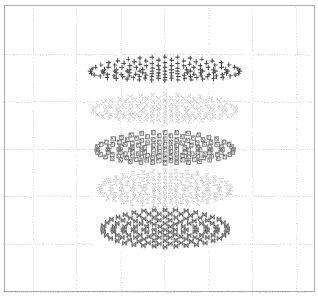

图9　360 nm～400 nm的点列图

Fig. 9　The spot diagrams of 360 nm-400 nm

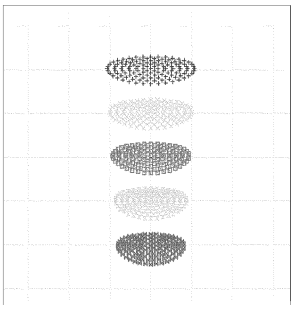

图10　510 nm～550 nm的点列图

Fig. 10　The spot diagrams of 510 nm-550 nm

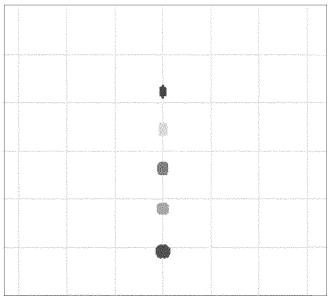

图11　700 nm～740 nm的点列图

Fig. 11　The spot diagrams of 700 nm-740 nm

最后,为了验证系统分辨率是否达到设计目标,分别取360 nm,550 nm以及740 nm附近的5个相隔10 nm的波长,并列出各自的点列图,分别如图9,图10,图11所示。由上面3个图可知,系统完全可分辨相隔10 nm的各个波长,即系统分辨率可以达到设计要求。

4　结论

针对设计需求,在比较和分析了几种可行的分光结构后,选择了交叉式Czerny-Turner分光结构作为本系统设计方案,然后进行设计、模拟及优化该系统,结果表明该系统在光谱波段,分辨率,体积,光谱展宽等方面都符合设计要求,尤其是在便携化及低成本方面满足设计目标。该系统的设计对

便携式分光测色仪的研制提供了参考数据。本文设计的便携式测色仪器精度高、体积小、成本低,因此具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 万峰,范世福. 小型模块化多通道分光光度计介绍[J]. 分析仪器,2005(4):48-52.
WAN Feng, FAN Shi-fu. An introduction of miniature modularized spectrometer[J]. Analysis Instrument, 2005(4):48-52. (in Chinese with an English abstract)

[2] 林中,范世福. 光谱仪器学[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
LIN Zhong, FAN Shi-fu. Spectral instruments[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989. (in Chinese)

[3] 姜晶,张国雄,叶关荣. 光纤型脉冲多通道快速分光颜色测量仪[J]. 仪器仪表学报,1997,18(6):567-572.
JIANG Jing, ZHANG Guo-xiong, YE Guan-rong. The fiber multichannel pulse fast spectral colorimeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1997,18(6):567-572. (in Chinese with an English abstract)

[4] 李宏光,吴宝宁,施浣芳,等. 一种小型光谱色彩分析仪的设计[J]. 应用光学,2005,26(6):66-69.
LI Hong-guang, WU Bao-ning, SHI Huan-fang, et al. Design of a miniature color measuring spectrophotometer[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(6): 66-69. (in Chinese with an English abstract)

[5] 李宏光,吴宝宁,施浣芳,等. 几种颜色测量方法的比较[J]. 应用光学,2005,26(6):60-63.
LI Hong-guang, WU Bao-ning, SHI Huan-fang, et al. The comparison of multicolor measurement methods[J]. Journal of Applied Optics, 2005,26(3): 60-63. (in Chinese with an English abstract)

[6] 张军,陈星旦,朴任官,等. 用于食品成分分析的双探测器近红外光谱仪[J]. 光学精密工程,2008,16(6):986-992.
ZHANG Jun, CHEN Xing-dan, PIAO Ren-guan, et al. Near infrared spectrometer with double detectors for food component analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(6): 986-992. (in Chinese with an English abstract)

[7] 李华,邢廷文,马文礼. 一种以光栅作为分光元件的远红外光谱仪[J]. 光电工程,2002,29(3):43-46.
LI Hua, XING Ting-wen, MA Wen-li. A far infrared spectrometer using grating as splitting elements[J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(3):43-46. (in Chinese with an English abstract)

[8] PALMER C. Diffraction grating handbook[M]. New York: Newport Corporation, 2005.

[9] 刘征峰,王术军,张保洲. 快速光谱测量分析系统[J]. 光电工程,2001,28(2):27-31.
LIU Zheng-feng, WANG Shu-jun, ZHANG Bao-zhou. A fast spectral measurement and analysis system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2001, 28(2):27-31. (in Chinese with an English abstract)

[10] 程梁. 微型光谱仪系统的研究及其应用[D]. 浙江:浙江大学,2008.
CHENG Liang. Research and application of micro spectrometers system[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)

[11] 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 Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian, et al. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sensing[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 823-830. (in Chinese with an English abstract)

[12] 徐海松,项震. 基于SPD的物体色快速分光测试系统设计[J]. 光电工程,2002,29(3):39-42.
XU Hai-song, XIANG Zhen. Design of fast spectral measurement system for object color based on self-scanning photodiode array[J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(3):39-42. (in Chinese with an English abstract)

[13] 王晗,李水峰,刘秀英. 微型光谱仪光学结构研究[J]. 应用光学,2008,29(2):230-233.
WANG Han, LI Shui-feng, LIU Xiu-ying. Optical structure of miniature spectrometer[J]. Journal of Applied Optics, 2008,29(2):230-233. (in Chinese with an English abstract)

[14] 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. (in Chinese with an English abstract)