第35卷，第7期
2015年7月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 35, No. 7, pp2060-2064
July, 2015

# 测色分光光度计的双光束分光系统设计

刘怡轩[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，吉林 长春 130033
2. 中国科学院大学，北京 100049

**摘 要** 通常测色分光光度计均由两个独立且完全相同的分光系统组成，为实现测色分光光度计小型化、轻量化，提出一种双光束分光系统设计。将传统的分光系统进行改进，使一个分光系统实现双光束分光系统的功能，用两个小狭缝代替一个狭缝，即可实现两束光谱同时探测。分析了双光束分光系统的工作原理及设计要求，设计了一个用于便携式测色分光光度计的分光系统。设计的Czerny-Turner结构双光束分光系统采用超环面成像镜，可以较好的校正像散，防止两束光谱串扰，两束光谱在探测器上完全没有重叠，光谱分辨率小于10 nm，谱面长度9.12 mm，体积仅为57 mm×54 mm×23 mm，满足设计指标要求。通过与相同设计指标的单光束分光系统比较得出，采用双光束分光系统的改进型测色分光光度计比传统的测色分光光度计减少了一整套分光系统，从而使体积大幅缩小。该方法特别适用于便携式测色分光光度计，也可适用于其他双光束分光光度计。

**关键词** 光学设计；测色分光光度计；双光束分光系统；双光束分光光度计；便携式；双狭缝
**中图分类号**：O433.1 **文献标识码**：A **DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2015)07-2060-05

## 引 言

测色分光光度计是颜色测量中最基本的仪器，通过测量物体的光谱反射率因数或光谱透射比，计算求得样品颜色的三刺激值。它使用方便，精度高，获得表征颜色的各种参数方便，如今已经成为颜色测量行业应用最为广泛的仪器[1]。其典型的组成部分有：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。其中，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，不仅需要满足一定的指标要求，而且在某些应用中系统的小型化尤为重要。

高精度的测色分光光度计均为双光束分光光度计[2,3]，如Datacolor 650，Color-Eye 7000A，相对于单光束分光光度计能够补偿光源发射不稳定对测量结果的影响，提高测量精度和数据的重现性。通常双光束分光光度计是由两个完全相同的分光系统组成，这种设计方法无疑会增加仪器的体积和成本，不利于仪器小型化、轻量化。文献[4]提出一种双光束分光系统的设计方法，一个分光系统具有两个按色散方向(狭缝宽度方向)并排排列的狭缝，分别入射样品光和参考光，两束光经过色散后分布在同一个线阵探测器的不同区域，从而实现在一个分光系统中双光束同时测量。该方法的缺点是，如果进入分光系统的每束光的光谱范围限制不严格，则两束光谱容易出现重叠而造成测量错误，再者，其中一束光的二级及多级衍射光谱也容易与另一束光谱产生重叠而造成测量误差。

提出一种双光束分光系统设计方法，使一个分光系统实现双光束分光系统的功能，从而大幅减小测色分光光度计的体积。详细分析了双光束分光系统的工作原理，并运用此方法设计一个用于便携式测色分光光度计的分光系统，对设计结果进行了分析与评价。

## 1 双光束分光系统原理及设计要求

如图1所示，在一个分光系统中，将一个较长狭缝用两个相距一定间隔的小狭缝代替，这两个狭缝按长度方向(垂直于色散方向)排列，分别输入样品光和参考光，色散后两束光谱在像面上并排排列，互不干扰，从而使一个分光系统实现双光束分光系统的功能。选用面阵探测器可以同时探测两束光谱。使用定制的双芯光纤可以将不同的两束光导入各自狭缝[5]。双芯光纤由两根纤芯组成，两个单芯端接口和一

收稿日期：2014-02-28，修订日期：2014-05-20
基金项目：国防(863)高新技术发展项目(2011AA12A103)和中国地质调查局工作项目(1212011120227)资助
作者简介：刘怡轩，1987年生，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail：liuyixuanhx@163.com
*通讯联系人 e-mail：yancx@ciomp.ac.cn

个双芯端接口，外观成“Y”型。两个单芯端接口分别输入参考光和样品光。双芯端接口与狭缝相连，双芯端面处两根纤芯沿端面直径方向对称排列，两纤芯隔开一定的距离，分别与两狭缝匹配。

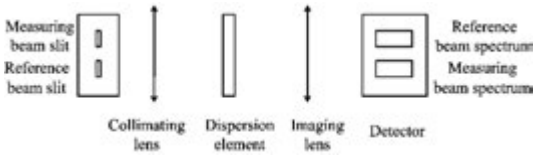


Fig. 1　Schematic diagram of dual-beam spectrometer

双光束分光系统的设计要求是，在色散方向和垂直于色散方向都需要较好地校正像差，用来保证光谱分辨率的同时又防止两束光谱相互重叠串扰。

## 2　设计实例和结果分析

### 2.1　应用实例及主要技术指标

运用提出的双光束分光系统设计方法，设计了一种用于便携式测色分光光度计的双光束分光系统。脉冲氙灯和两个分光系统的组合是测色分光光度计的常用配置，被广泛采用[1-3]。如图 2 所示，系统由样品测量支路和光源监测支路(参考支路)组成，采用 CIE 规定的 d/8 标准照明观察条件，光源为脉冲氙灯。样品测量支路光束和光源监测支路光束分别由双芯光纤输入双光束分光系统。前者对待测样品和参照标准进行测试，后者对光源(或照明光束)进行测试。由于脉冲氙灯每次闪光能量波动较大，严重影响测量精度，光源监测支路监测照明光源光谱功率变化，用于校正光源变化的影响。采用该设计方案可以很好地补偿光源波动带来的影响。

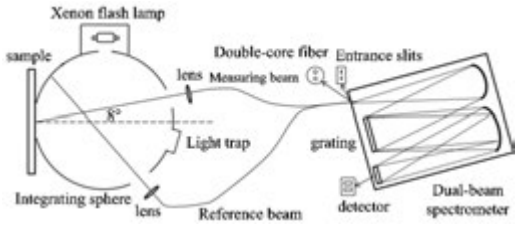


Fig. 2　Schematic diagram of modified spectrophotometer for colorimetry

分光系统主要技术指标如表 1 所示，其特点是体积小、双光束同时探测。选用面阵 CCD 作为探测器，其封装大小为 34 mm×23 mm。为了充分利用探测器像元区域宽度及防止两束光谱重叠，设置两个狭缝中心距 1 mm，每个狭缝长度 0.2 mm。为了与狭缝匹配，两根光纤线芯直径均为 0.2 mm，双芯端接口处两纤芯中心距 1 mm。由探测器有效像元区域宽度确定两狭缝长度及间隔，因此分光系统狭缝长度方向横向放大率需按 1∶1 设计。

### 2.2　分光系统光学设计

选用光栅常数为 1/400 mm 的平面光栅作为色散元件。在传统的平面光栅分光系统中，采用最多的是 Czerny-Turner 结构[6]。传统的 Czerny-Turner 结构分光系统考虑了消球差和彗差条件[7,8]，可以保证良好的光谱分辨率，但在狭缝长度方向有很严重的像散。像散会使得两束光谱重叠串扰。我们使用文献[9]中改进的 Czerny-Turner 设计方法，通过超环面成像镜在子午和弧矢方向上的曲率半径的不同来校正沿狭缝长度方向上的像散。

Table 1　Specifications of spectrometer for portable spectrophotometer

| Parameter | Value |
|---|---|
| Wavelength range/nm | 360～740 |
| Spectral resolution/nm | 10 |
| Dimensions/mm | 80×80×60 |
| CCD pixel size/μm | 24×24 |
| Number of active pixels | 512×58 |
| Active area/mm | 12.288×1.392 |
| Slit width/μm | 100 |

根据指标要求，优化设计的双光束分光系统设计参数如表 2 所示，光路结构如图 3 所示。考虑探测器封装大小，双光束分光系统体积为 57 mm×54 mm×23 mm，远小于设计指标要求。另外，360～370 nm 的二级衍射光谱会和 720～740 nm 的一级衍射光谱重叠，将长波通滤光片放置在探测器前可以消除二级衍射光谱。

Table 2　Design specifications for dual-beam spectrometer

| Parameter | Value |
|---|---|
| Spectral length/mm | 9.12 |
| Grating density/g/mm | 400 |
| i/° | −14 |
| $r_1$/mm | 100 |
| $r_{t2}$/mm | 106.602 |
| $r_{s2}$/mm | 99.277 |
| Diffraction order | 1 |
| Numerical aperture | 0.1 |

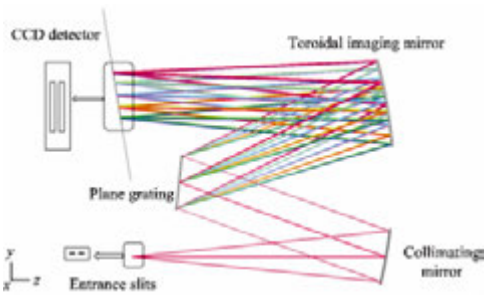


Fig. 3　Layout of dual-beam spectrometer

### 2.3　设计结果分析

在工作波段内，分光系统光谱像点斑的均方根值随波长的变化如图 4 所示，其中(a)为点斑垂直于色散方向半径的均方根值，(b)为点斑色散方向半径的均方根值。从图中可以看出，点斑垂直于色散方向半径的均方根值在整个工作波段内均小于 28 μm，表明使用超环面成像镜使像散得到充分

校正，可以防止像散而导致的两束光谱重叠串扰；点斑色散方向半径的均方根值在整个工作波段内均小于 30μm，可以保证较高的光谱分辨率。

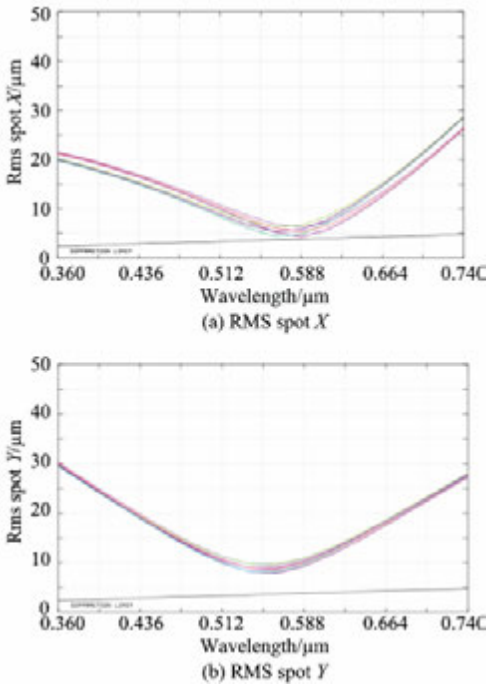


Fig. 4 RMS spot radius versus wavelength

分光系统中，一个至关重要的指标就是光谱分辨率的大小，两条谱线能否被分开，与色散率和两条谱线强度分布有关[10]。光谱分辨率由线色散率和谱线宽度共同决定，谱线宽度可用狭缝像宽度和像面上色散方向点斑半径的均方根值表示。设狭缝宽度 $a$，色散方向横向放大率为 $\beta$，像面上色散方向点斑半径的均方根值为 $R$，则谱线宽度可表示为

$$W = a.\beta + 2R \tag{1}$$

根据瑞利判据，若形状相同的两谱线相隔一个谱线半宽度时刚好能够分辨，则能分辨的最小波长间隔可表示为

$$\delta\lambda = (\lambda_2 - \lambda_1)W/2L \tag{2}$$

其中，$(\lambda_2 - \lambda_1)$ 为光谱范围，$L$ 为光谱在像面上的展宽。本设计中，狭缝宽度 100 μm，垂直于色散方向横向放大率 1，色散方向点斑半径的均方根值小于 30 μm，光谱范围 380 nm，光谱展宽 9.12 mm。尽管垂直于色散方向横向放大率不严格等于色散方向横向放大率，但是在光谱分辨率不高的情况下可以近似相等。将以上数据分别代入式(1)和(2)，得到谱线宽度 $W$ 为 160 μm，光谱分辨率 3.33 nm，满足指标要求。如图 5 所示，间隔 10 nm 波长的狭缝像，没有重叠，完全可以分辨。

在光学设计软件模拟时，在入射狭缝上选取 12 个物点，如图 6 所示，以入射狭缝 O 为原点建立坐标系，入射狭缝宽度方向为 Y 轴，长度方向为 X 轴。所选取的两个狭缝的 12 个物点的坐标分别为(0.4，0.05)，(0.5，0.05)，(0.6，0.05)，(0.4，−0.05)，(0.5，−0.05)，(0.6，−0.05)，和(−0.4，0.05)，(−0.5，0.05)，(−0.6，0.05)，(−0.4，−0.05)，(−0.5，−0.05)，(−0.6，−0.05)。图 7 为像面上光谱分布情况，从图中可以看出，两束光谱在探测器上既完全没有重叠，又充分利用了探测器宽度，可见两狭缝的设置是合理的。整个工作波段光谱长度 9.12 mm，狭缝上(0.5，0.05)和(−0.5，0.05)两物点，在波长 550 nm 处两个像点中心距 1.006 672 mm，满足分光系统狭缝长度方向横向放大率 1∶1 的设计要求。

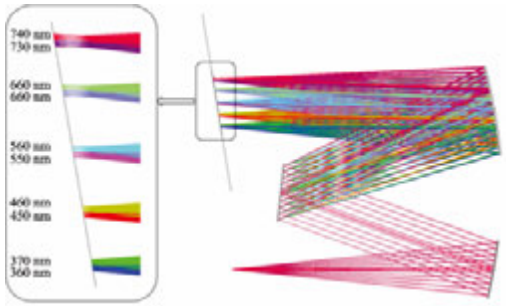

Fig. 5 Interpretation of spectral resolution

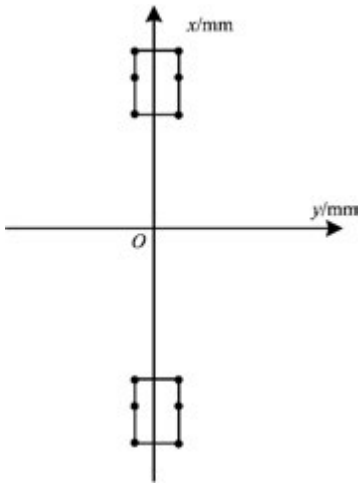


Fig. 6 Coordinate system of the entrance slits

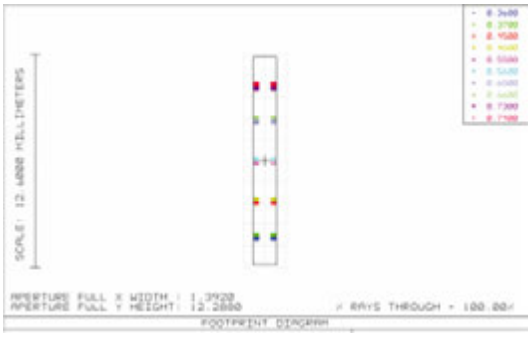

Fig. 7 Footprint diagram on image

## 2.4 双光束分光系统与单光束分光系统对比分析

为了进一步将双光束分光系统与单光束分光系统作比较，依据表 1 所列的技术指标，设计单光束分光系统。选择与上述面阵探测器有效像元区域长度接近的线阵探测器，其像元数 512，像元大小 25 μm×0.5 mm，封装大小 32 mm×

11 mm。采用球面镜作为成像镜，半径为 112.883 mm，整个工作波段光谱长度 9.5 mm，狭缝尺寸 0.1 mm×0.2 mm(宽×长)，其他设计参数与表 2 中设计参数相同，光学元件的尺寸与双光束分光系统相同。单光束分光系统光谱像点斑的均方根值随波长的变化如图 8 所示，结合公式(1)和(2)可得，单光束分光系统的光谱分辨率为 2.71 nm，略优于双光束分光系统，但球面镜不能消像散，能量集中度差，不利于提高仪器信噪比。线阵探测器尺寸小于面阵探测器，成像镜尺寸成为限制单光束分光系统厚度的因素。单光束分光系统体积约为 57 mm×54 mm× 17 mm，与双光束分光系统体积几乎相同。采用两个单光束分光系统组成的测色分光光度计布局

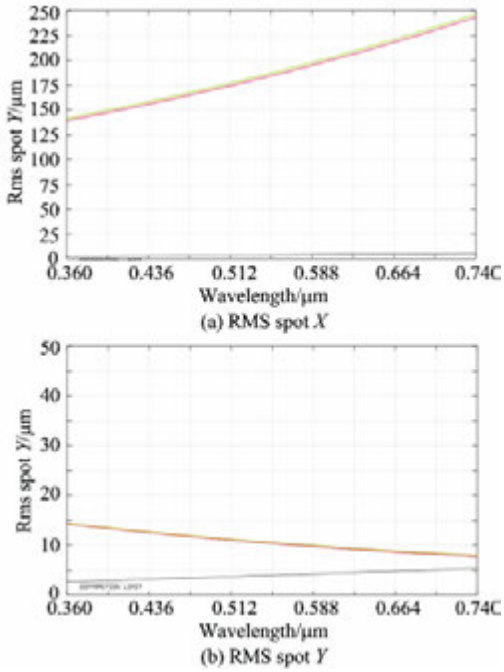


Fig. 8　RMS spot radius versus wavelength

如图 9 所示，对比图 2 可得，改进型测色分光光度计比传统的测色分光光度计体积大幅缩小。

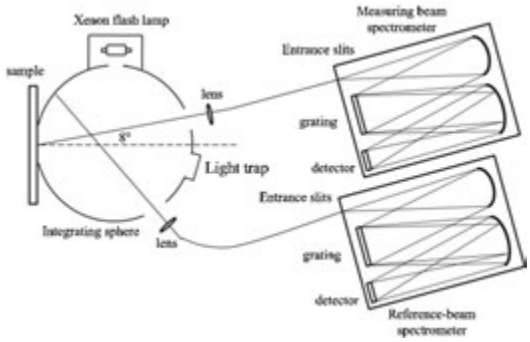


Fig. 9　Schematic diagram of traditional spectrophotometer for colorimetry

## 3　结　论

提出一种双光束分光系统设计方法，将传统的分光系统进行改进，使一个分光系统实现双光束分光系统的功能。给出双光束分光系统设计要求，保证较好的光谱分辨率同时防止两束光谱串扰。通过设计实例结果表明，各项指标均满足要求，且体积远小于设计指标，表明该设计方法切实可行。从双光束分光系统与单光束分光系统比较得到，双光束分光系统光谱分辨率略低，但是消像散的设计使能量集中度更好，有利于提高仪器信噪比。双光束分光系统体积与一个单光束分光系统几乎相同，采用双光束分光系统的改进型测色分光光度计比传统的测色分光光度计减少了一整套分光系统，从而使体积大幅缩小。双光束分光系统设计方法特别适用于便携式测色分光光度计。这种设计方法也广泛适用于对小型化、轻量化要求高的双光束分光光度计，为双光束分光光度计设计提出新的设计思路。

## References

[1] HU Wei-jie, TANG Shun-qing, ZHU Zheng-fang(胡威捷，汤顺青，朱正芳). Chinese Journal of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 1998, 19(4): 407.
[2] Imura K, Sakakibara K. Colorimeter. U.S. Patent, 6917429, 2005.
[3] Hirschler R, Gay J. Proc. SPIE, 2002, 4421: 773.
[4] Rinke G. U.S. Patent, 5251007, 1993.
[5] LIU Kang, YU Fei-hong(刘　康，余飞鸿). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2013, 10: 1218.
[6] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LU Feng-qin(薛庆生，王淑荣，鲁凤芹). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 29(1): 35.
[7] Shafer A B. Applied Optics, 1967, 6(1): 159.
[8] Lee K S, Thompson K P, Rolland J P. Optics Express, 2010, 18(22): 23378.
[9] Xue Qingsheng, Wang Shurong, Lu Fengqin. Applied Optics, 2009, 48(1): 11.
[10] Futamata M, Takenouchi T, Katakura K Applied Optics, 2002, 41(22): 4655.

# Design of Dual-Beam Spectrometer in Spectrophotometer for Colorimetry

LIU Yi-xuan[1,2], YAN Chang-xiang[1*]
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

**Abstract** Spectrophotometers for colorimetry are usually composed of two independent and identical spectrometers. In order to reduce the volume of spectrophotometer for colorimetry, a design method of double-beam spectrometer is put forward. A traditional spectrometer is modified so that a new spectrometer can realize the function of double spectrometers, which is especially suitable for portable instruments. One slit is replaced by the double-slit, than two beams of spectrum can be detected. The working principle and design requirement of double-beam spectrometer are described. A spectrometer of portable spectrophotometer is designed by this method. A toroidal imaging mirror is used for the Czerny-Turner double-beam spectrometer in this paper, which can better correct astigmatism, and prevent the dual-beam spectral crosstalk. The results demonstrate that the double-beam spectrometer designed by this method meets the design specifications, with the spectral resolution less than 10 nm, the spectral length of 9.12 mm, and the volume of 57 mm×54 mm×23 mm, and without the dual-beam spectral overlap in the detector either. Comparing with a traditional spectrophotometer, the modified spectrophotometer uses a set of double-beam spectrometer instead of two sets of spectrometers, which can greatly reduce the volume. This design method can be specially applied in portable spectrophotometers, also can be widely applied in other double-beam spectrophotometers, which offers a new idea for the design of dual-beam spectrophotometers.

**Keywords** Optical design; Spectrophotometer for colorimetry; Dual-beam spectrometer; Dual-beam spectrophotometer; Portable; Double-slit

(Received Feb. 28, 2014; accepted May 20, 2014)

* Corresponding author