

## 改善测量荧光色台间差的分光测色仪设计

秦梦丹<sup>1,3</sup>, 王国权<sup>2\*</sup>, 袁琨<sup>1,3\*\*</sup>, 王坚<sup>3</sup>, 张祥<sup>3</sup><sup>1</sup>中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;<sup>2</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;<sup>3</sup>杭州彩谱科技有限公司, 浙江 杭州 310034

**摘要** 设计了一种分光测色仪,使用氙灯作为分光测色仪的测量光源,设计机械结构调整紫外部分的能量在整个氙灯发光强度中的比例。使用荧光物质比例确定的标准色板作为标准物质对仪器和标准仪器进行校准。设计算法对照明光源进行修正,使得照明光源的紫外光谱辐射强度和标准仪器一致,进而降低台间差。此外,设计了实验对方案效果进行验证。未应用所提方案的仪器在 CIELAB 均匀颜色空间中:测量无荧光材料颜色台间差  $\Delta E_{ab}$  的最大值为 0.88,平均值为 0.44;测量有荧光色台间差  $\Delta E_{ab}$  的最大值为 13.69,平均值为 3.46。应用所提方案后仪器在 CIELAB 均匀颜色空间中:测量无荧光色台间差  $\Delta E_{ab}$  的最大值为 0.88,平均值为 0.38;测量有荧光色台间差  $\Delta E_{ab}$  的最大值为 3.88,平均值为 1.04。实验结果证明,使用所提方案可以较好地提升不同仪器之间对荧光色测量的台间差水平。

**关键词** 测量; 荧光颜色; 分光测色仪; 台间差

中图分类号 O432.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1412001

## Improvement of Design of Spectrophotometer for Measuring Fluorescence Color Inter-Instrument Agreement

Qin Mengdan<sup>1,3</sup>, Wang Guoquan<sup>2\*</sup>, Yuan Kun<sup>1,3\*\*</sup>, Wang Jian<sup>3</sup>, Zhang Xiang<sup>3</sup><sup>1</sup>College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;<sup>2</sup>School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;<sup>3</sup>Hangzhou CHNSpec Technology Co., Ltd., Hangzhou 310034, Zhejiang, China

**Abstract** In this paper, a spectrophotometer is designed. The xenon lamp is used as the measuring light source of the spectrophotometer, and a mechanical structure is designed to adjust the proportion of ultraviolet energy in the luminous intensity of xenon lamp. The standard color plate determined by the proportion of fluorescent substances is used as the standard substance to calibrate the instrument and the standard instrument. The algorithm is designed to modify the instrument light source to make the ultraviolet spectral radiation intensity of the illumination light source is consistent with that of the standard instrument, so as to reduce inter-instrument agreement. In addition, experiments are designed to verify the effect of the scheme. The maximum value and average value of inter-instrument agreement  $\Delta E_{ab}$  of non-fluorescent materials measured by instruments without the proposed scheme are 0.88 and 0.44 in CIELAB uniform color space, and that in the situation with fluorescence color are 13.69 and 3.46. After applying the proposed scheme, the maximum value and average value of inter-instrument agreement  $\Delta E_{ab}$  of non-fluorescent materials measured by instruments are 0.88 and 0.38 in CIELAB uniform color space, and that in the situation with fluorescence color are 3.88 and 1.04. The experimental results show that the proposed scheme can improve the inter-instrument agreement level of fluorescent color measurement between different instruments.

**Key words** measurement; fluorescence color; spectrophotometer; inter-instrument agreement

收稿日期: 2021-12-10; 修回日期: 2022-01-01; 录用日期: 2022-01-24

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2020C03095)、浙江省属高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020YW22)

通信作者: \*wangguoquan@ei41.com; \*\*yuankun@cjlu.edu.cn

## 1 引言

颜色评价已经成为纺织印染行业、涂料行业和造纸行业等诸多行业中评定产品质量的重要指标之一<sup>[1]</sup>。荧光材料在染料、颜料、塑料、油漆和包装材料中被大量使用。对荧光材料进行准确的颜色测量具有很重要的实际应用意义<sup>[1-2]</sup>。

荧光材料是由金属(锌、铬)硫化物或稀土氧化物与微量活性剂配合经煅烧而成的。无色或浅白色是紫外光(200~400 nm)照射下依颜料中金属和活化剂种类、含量的不同,而呈现出各种颜色的可见光(400~800 nm)混合而成的。荧光材料不仅能反射或透射一部分照明光源的光谱能量,在照明光源的激发下,还能在特定的光谱发射一定的能量,两部分能量综合影响颜色。因此,荧光材料颜色测量比一般材料复杂,一般使用单色光激发测量法和复合光照射测量法。单色光激发测量法原则上是一个完善的方法,但需要复杂的仪器和繁琐的计算,在实际工作中未被广泛应用。最有用的方法是用复合光直接照明样品后,用单色仪分光获得样品的全光谱辐亮度因数,再计算出三刺激值和色品坐标进而完成对样品的评价。即使使用复合光,光源的光谱功率分布对测试的影响也很大,国际照明委员会(CIE)要求颜色测量在标准照明体条件下进行<sup>[2-4]</sup>。然而,实际的照明光源的光谱功率分布与标准照明体不一致。当测量可见光光谱范围内的光谱反射率时,若不考虑荧光测量,在保证光源辐射强度的前提下,光源的光谱相对功率分布与标准照明体不一致并不会对物体表面反射率测量产生影响<sup>[5]</sup>。然而,当物体表面包含荧光物质时,光源的光谱相对功率分布与标准照明体不一致会对物体表面反射率测量产生影响。由于不同生产商制造的仪器,或同一生产商生产的同一型号仪器的照明光源光谱相对功率分布有一定的差异,故仪器在测量荧光色时,台间差会显著增大<sup>[1, 6-9]</sup>。

本文的目的是设计一台分光测色仪,在测量荧光材料的表面颜色时与标准仪器实现较小的台间差。本文使用氙灯作为分光测色仪的测量光源,利用滤光片对氙灯紫外部分的能量进行调整,利用机械结构修正

紫外部分的能量在整个氙灯发光强度中的比例。使用仪器对荧光物质比例确定的荧光标准板进行测量,通过该标准板的反射光谱强度计算照明光源中紫外部分能量的比例。根据测量结果设计算法对仪器照明光源光谱能量分布进行修正,进而降低台间差。

## 2 现有技术

根据 Stokes 定律,在荧光物质吸收入射的辐射能量后,被激励的荧光分子在返回正常状态时就会发出比吸收的入射波长更长的辐射。因此,含荧光的材料不仅能反射或透射照射光的光谱成分,在照明光的激发下还能发射一定成分的光谱<sup>[1, 3, 10]</sup>。荧光材料的颜色取决于它反射光谱和发射光谱的总和,用全光谱辐亮度因数  $\beta_T(\lambda)$  来描述,它由反射光谱辐亮度因数  $R(\lambda)$  和发射光谱辐亮度因数  $\beta(\lambda)$  组成,即

$$\beta_T(\lambda) = R(\lambda) + \beta(\lambda), \quad (1)$$

进一步计算出荧光材料表面颜色的 CIE 三刺激值,即

$$\begin{cases} X = k_1 \int [\Phi(\lambda)R(\lambda) + \Phi(\lambda_{in})\beta(\lambda, \lambda_{in})] \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = k_2 \int [\Phi(\lambda)R(\lambda) + \Phi(\lambda_{in})\beta(\lambda, \lambda_{in})] \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z = k_3 \int [\Phi(\lambda)R(\lambda) + \Phi(\lambda_{in})\beta(\lambda, \lambda_{in})] \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Phi(\lambda)$  为照明光源在波长  $\lambda$  处的相对光谱功率分布;  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  为标准观察者的光谱三刺激值响应;  $k_1, k_2, k_3$  为比例系数;  $\lambda_{in}$  为可以导致荧光材料在波长  $\lambda$  处产生荧光激发的入射光波长;  $\beta(\lambda, \lambda_{in})$  为荧光材料在波长为  $\lambda_{in}$  的光照射下产生荧光激发的波长为  $\lambda$  的发射光谱辐亮度因数。

当使用两种不同的照明光源对一块相同的荧光材料表面颜色进行测量时,若两种光源在  $\lambda_{in}$  处的光谱功率分布不一致,则会导致测量三刺激值结果不一致。

已有仪器分别为 KONICA MINOLTA CM-3600A, X-Rite 7000A, CHNSpec CS-826, 这三种仪器具体的基本参数对比如表 1 所示,其中重复性和台间差均在 CIELAB 颜色空间下测得。准备了两组样品: 一组是不含荧光物质的样品,由 12 块英国陶瓷研究协会(BCRA)色砖组成,如图 1(a)所示,其光谱分布如图

表 1 三种仪器基本参数对比

Table 1 Comparison of basic parameters of three instruments

Parameter	KONICA MINOLTA CM-3600A	X-Rite 7000A	CHNSpec CS-826
Measuring geometry	d/8°	d/8°	d/8°
Lighting source	Pulsed xenon lamp	Pulsed xenon lamp	Pulsed xenon lamp and light-emitting diode
Spectral range /nm	360-740	360-700	360-780
Wavelength interval /nm	10	10	10
Measuring reflectivity range /%	0-200	0-200	0-200
Resolution ratio /%	0.01	0.01	0.01
Repeatability	Within 0.02	Within 0.01	Within 0.01
Inter-instrument agreement	0.15	0.08	0.10

2(a)所示;另一组是含荧光物质的样品,由图1(b)中 I 所示的9块含有荧光材料的不同颜色的塑料板和图1(b)中 II 所示的14张含有荧光材料的不同颜色的纸张组成,其光谱分布如图2(b)所示。其中,样品的光谱数据是使用KONICA MINOLTA CM-3600A测量的,该仪器使用氙灯作为照明光源。从荧光材料测量

结果的光谱分布中可以看出,由于照明光源中有较强的紫外能量,故在测量荧光材料的表面颜色时,400~450 nm 波长范围内有较强的荧光激发。从无荧光材料测量结果的光谱分布中可以看出,400~450 nm 波长范围内无明显的荧光激发。

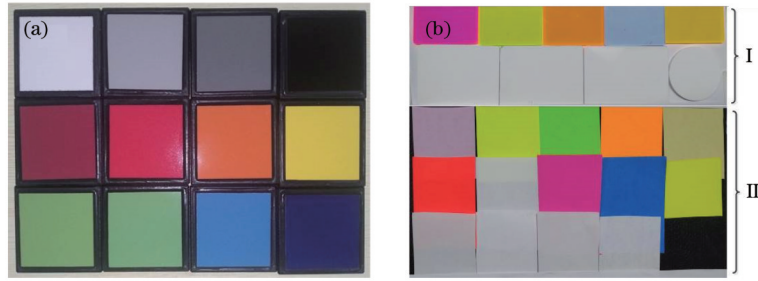


图1 样品实物图。(a)不含荧光物质样品;(b)含荧光物质的样品

Fig. 1 Physical drawings of samples. (a) Fluorescent free samples; (b) samples containing fluorescent substances

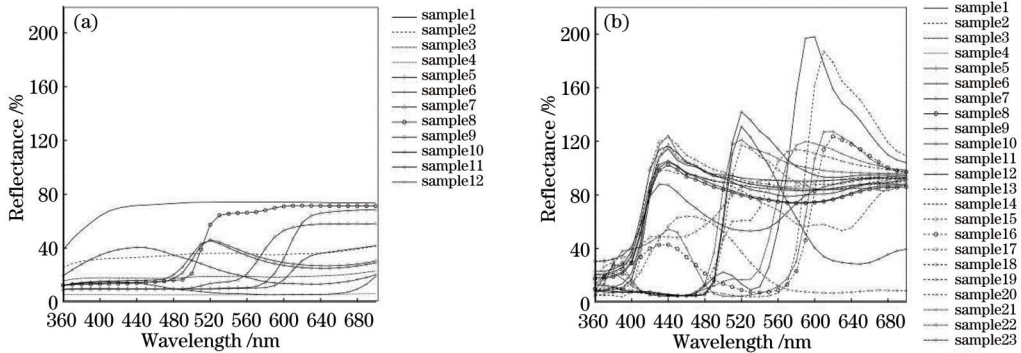


图2 样品的光谱分布。(a)不含荧光物质样品;(b)含荧光物质的样品

Fig. 2 Spectral distributions of samples. (a) Fluorescent free samples; (b) samples containing fluorescent substances

使用三种已有仪器(KONICA MINOLTA CM-3600A, X-Rite 7000A, CHNSpec CS-826)分别对两组样品进行测量,三台仪器均是在D65光源,包含镜面正

反射光(SCI)模式下,对样品的同一位置进行测量,获得样品的 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 颜色参数,测量结果如表2和表3所示。

表2 三种仪器测量12块BCRA色砖的颜色参数

Table 2 Color parameters of 12 BCRA color bricks measured by three instruments

Color brick No.	KONICA MINOLTA CM-3600A			X-Rite 7000A			CHNSpec CS-826		
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$
1	88.89	-0.70	1.77	88.72	-0.72	1.62	88.87	-0.59	1.86
2	66.17	-1.31	2.73	65.96	-1.31	2.65	66.24	-1.18	2.63
3	50.28	-0.63	2.23	50.03	-0.66	2.20	50.39	-0.51	2.07
4	27.48	0.63	0.22	26.76	0.65	0.34	27.68	0.41	0.65
5	49.33	40.58	21.33	49.08	40.93	21.82	49.83	40.68	22.05
6	42.46	22.27	9.10	42.15	22.61	9.40	42.70	22.49	9.15
7	58.23	34.05	36.58	58.03	34.10	37.06	58.60	33.90	37.17
8	80.52	2.12	59.41	80.35	1.95	59.43	80.71	2.09	59.45
9	65.03	-19.63	31.58	64.78	-19.74	31.47	64.99	-19.54	31.14
10	64.35	-21.62	26.44	64.05	-21.69	31.47	64.30	-21.50	26.01
11	53.21	-5.50	-25.92	52.87	-5.36	-26.07	53.13	-5.24	-26.14
12	30.77	4.68	-19.36	30.13	4.88	-19.55	30.99	4.45	-18.91

表 3 三种仪器测量 23 块含荧光样品的颜色参数  
Table 3 Color parameters of 23 fluorescent samples measured by three instruments

Fluorescent sample No.	KONICA MINOLTA CM-3600A			X-Rite 7000A			CHNSpec CS-826		
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$
1	96.96	0.96	-5.97	96.85	1.08	-6.10	98.09	0.96	-7.36
2	95.10	0.28	-9.75	95.10	0.63	-10.51	96.30	0.31	-11.67
3	95.22	1.60	-11.50	95.20	1.89	-12.06	96.40	1.94	-14.16
4	94.99	0.01	-9.18	94.80	0.12	-9.27	96.12	0.12	-10.96
5	91.30	1.74	-11.51	90.70	1.72	-10.68	92.35	1.94	-13.40
6	94.34	1.39	-7.38	94.19	1.48	-7.62	95.41	1.51	-9.24
7	93.70	2.55	-14.07	93.57	2.57	-13.68	94.84	2.82	-16.15
8	90.89	1.78	-10.77	90.69	1.93	-11.10	92.01	2.01	-12.80
9	85.07	22.21	-9.72	84.75	22.34	-9.16	85.72	22.34	-9.62
10	100.35	-27.82	109.65	100.22	-28.86	108.91	106.54	-35.26	114.55
11	89.35	-59.62	93.07	89.34	-61.26	92.11	94.31	-66.62	96.10
12	88.49	62.34	99.26	88.85	62.65	100.20	95.05	66.18	107.31
13	93.88	-4.12	29.09	93.75	-4.31	29.40	94.92	-4.14	29.14
14	71.06	85.61	75.50	71.36	85.99	76.45	77.95	91.01	84.13
15	96.48	2.67	-13.12	96.32	2.73	-12.95	97.49	2.92	-15.04
16	61.74	73.60	-4.33	61.44	72.98	-4.17	66.48	77.51	2.57
17	94.60	-20.26	108.30	94.54	-22.76	102.61	98.92	-25.23	111.30
18	55.81	-22.62	-41.35	55.09	-21.44	-41.84	56.47	-21.77	-41.69
19	92.20	8.41	99.53	91.41	7.52	98.30	94.66	7.07	100.22
20	88.30	-9.70	-15.35	87.63	-9.41	-15.39	88.71	-9.32	-16.42
21	82.49	41.37	91.29	81.06	40.76	89.90	85.74	40.27	93.83
22	98.86	-22.92	103.67	98.27	-23.46	102.19	100.81	-25.52	102.90
23	64.19	81.97	-9.76	63.35	80.97	-9.61	67.51	82.57	-3.64

对不含荧光样品组的 12 块样品, 三种仪器测量结果两两对比台间差, 如图 3(a) 所示。对含荧光样品组的 23 块样品, 三种仪器测量结果两两对比台间差, 如图 3(b) 所示。台间差在 CIELAB 颜色空间中用  $\Delta E_{ab}$

评价<sup>[1,6]</sup>, 公式为

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (3)$$

式中:  $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$  为同一个物体使用两台仪器测量的色坐标差值。

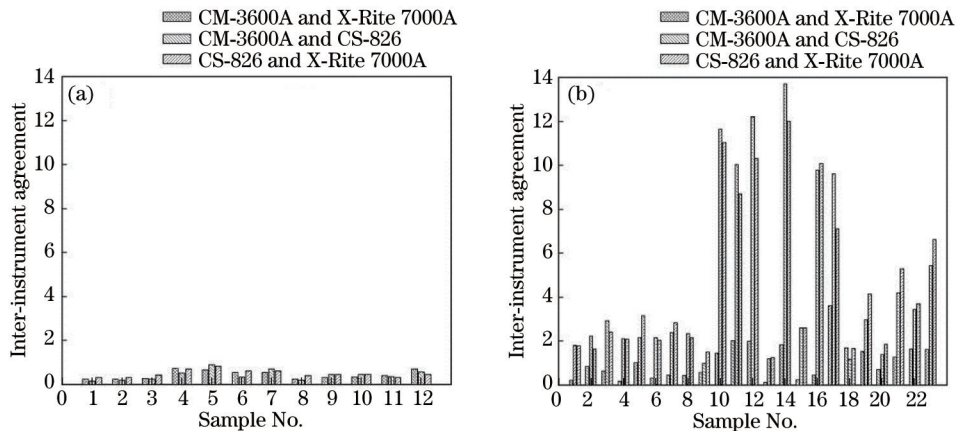


图 3 三台仪器间的台间差。(a) 不含荧光物质样品; (b) 含荧光物质样品

Fig. 3 Inter-instrument agreement between three instruments. (a) Fluorescent free samples; (b) samples containing fluorescent substances

由实验结果可知:对不含荧光物质的 12 块彩板进行测量,已有仪器(KONICA MINOLTA CM-3600A, X-Rite 7000A, CHNSpec CS-826)之间的台间差  $\Delta E_{ab}$  最大值为 0.88, 平均值 0.44; 对 23 种含荧光物质进行测量,已有仪器(KONICA MINOLTA CM-3600A, X-Rite 7000A, CHNSpec CS-826)之间的台间差  $\Delta E_{ab}$  最大值为 13.69, 平均值为 3.46。从测量结果可知:参与测试的三台仪器在测量无荧光的材料时,台间差表现较好;在测量荧光材料的颜色时,台间差显著增加。

现使用海洋光学光谱仪对三种仪器的光源光谱进行测试,图 4 是三台仪器的照明光源的相对光谱功率分布。现用紫外部分(360~400 nm)的总能量比上可见光部分(400~700 nm)总能量的值  $\delta$  表示光源中紫外部分的能量占比, $\delta$  的表达式为

$$\delta = \frac{Q_{uv}}{Q_{vis}} = \frac{\sum_{\lambda=360}^{400} \Phi(\lambda)}{\sum_{\lambda=400}^{700} \Phi(\lambda)}, \quad (4)$$

式中: $Q_{uv}(\lambda)$  是光谱中紫外部分的能量总和; $Q_{vis}(\lambda)$  是光谱中可见光部分的能量总和。

计算上述三种光源中紫外部分与可见光部分能量

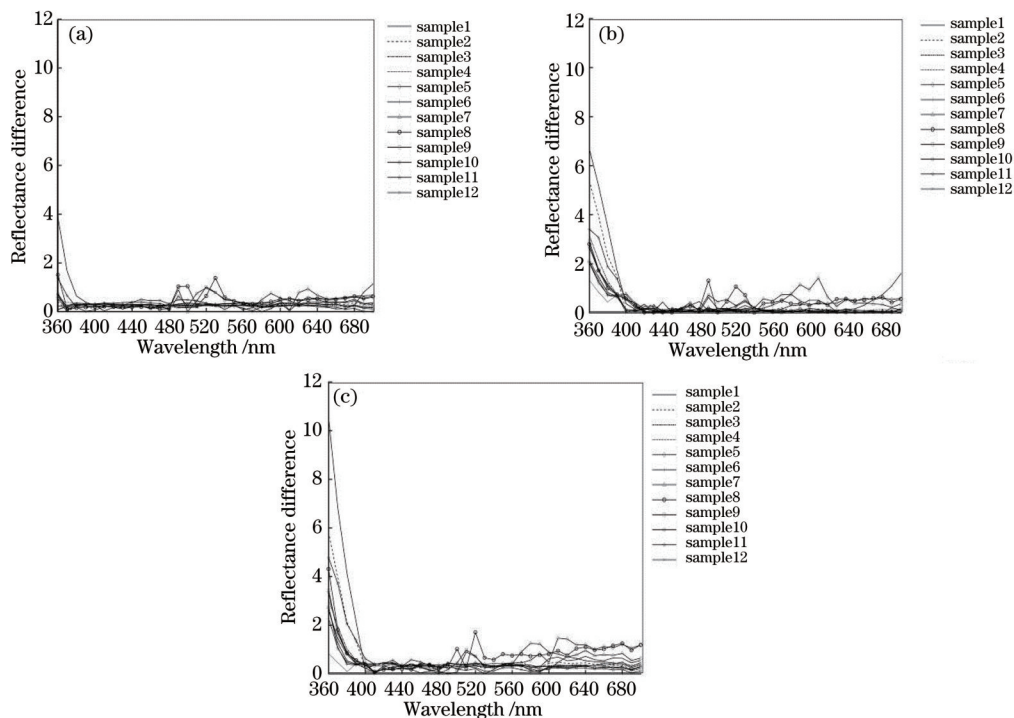


图 4 仪器光源的相对光谱功率分布

Fig. 4 Relative spectral power distributions of instrument light sources

的比值分别记作  $\delta_{CM}$ 、 $\delta_{X-Rite}$ 、 $\delta_{CHNSpec}$ , 它们的值分别是 0.00648, 0.00559, 0.00810。可以看出,三台仪器光源中的紫外部分含量不同。比较 KONICA MINOLTA CM-3600A, X-Rite 7000A, CHNSpec CS-826 测量样品的反射率,三台仪器之间样品反射率差值如图 5 和图 6 所示。这一结果也印证了图 3 所示的台间差差异,两台仪器  $\delta$  差值越大,仪器间测量台间差也越大。若能保证两台仪器的照明光源紫外部分与可见光部分能量占比相同,则可有效地降低台间差。

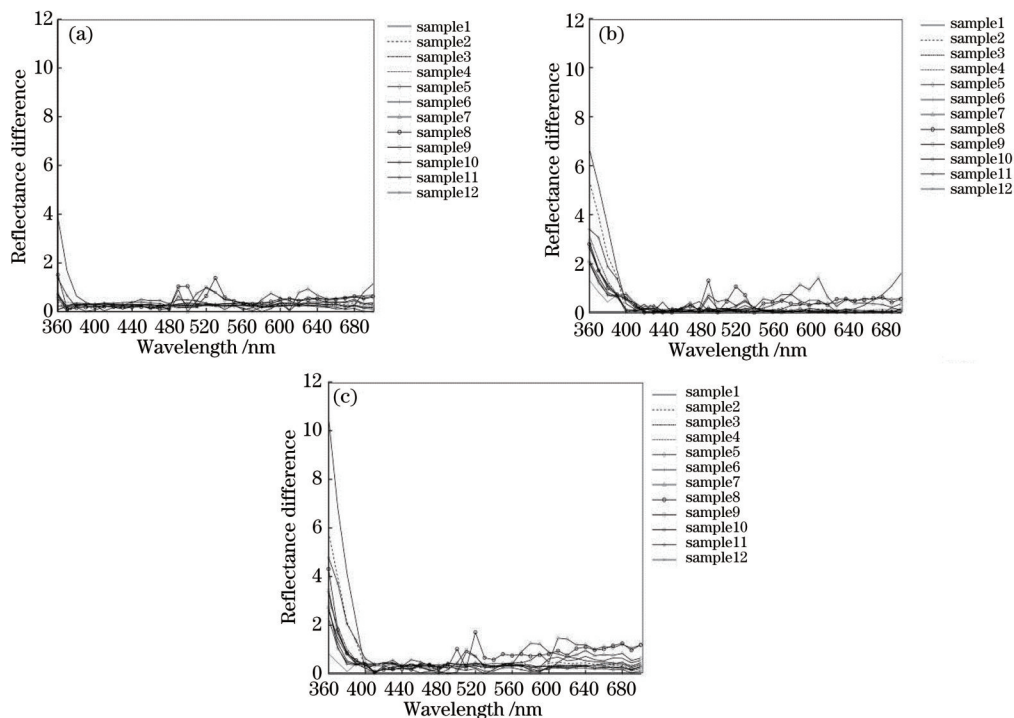


图 5 不含荧光样品颜色时各仪器间的反射率差。(a) KONICA MINOLTA CM-3600A 与 X-Rite 7000A; (b) KONICA MINOLTA CM-3600A 与 CHNSpec CS-826; (c) X-Rite 7000A 与 CHNSpec CS-826

Fig. 5 Reflectance difference between instruments without fluorescent sample color. (a) KONICA MINOLTA CM-3600A and X-Rite 7000A; (b) KONICA MINOLTA CM-3600A and CHNSpec CS-826; (c) X-Rite 7000A and CHNSpec CS-826

### 3 改善荧光颜色测量台间差的分光测色仪设计方案

#### 3.1 分光测色仪的设计

分光测色仪的组成包括照明系统、分光系统、传感

器和数据处理系统。照明系统采用脉冲氙灯作为照明光源,在紫外和可见光的光谱范围具有很好的光谱能量分布<sup>[11]</sup>。仪器光学结构采用  $d/8^\circ$  照明观测条件。在光源的两侧加上挡板,防止光源直接照射在样品上<sup>[11-12]</sup>。观察孔径设置在与被测样品表面法线方向

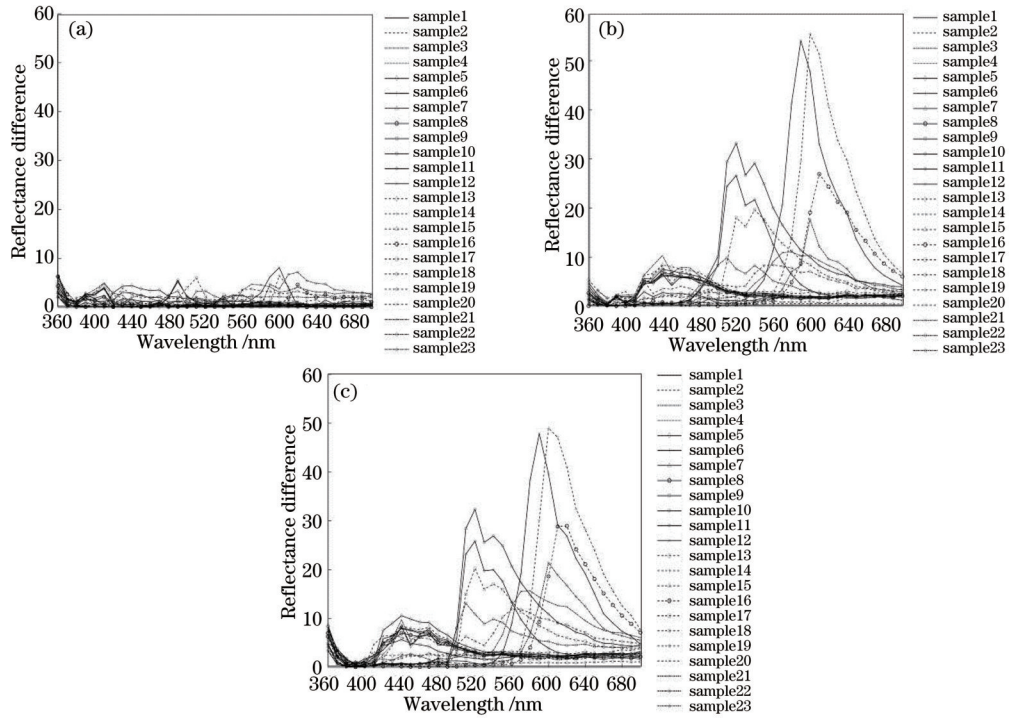


图 6 含荧光样品颜色时各仪器间的反射率差。(a) KONICA MINOLTA CM-3600A 与 X-Rite 7000A; (b) KONICA MINOLTA CM-3600A 与 CHNSpec CS-826; (c) X-Rite 7000A 与 CHNSpec CS-826  
 Fig. 6 Reflectance difference between instruments with fluorescent sample color. (a) KONICA MINOLTA CM-3600A and X-Rite 7000A; (b) KONICA MINOLTA CM-3600A and CHNSpec CS-826; (c) X-Rite 7000A and CHNSpec CS-826

成一 $8^{\circ}$ 角的积分球壁上,观察口径直径为 24 mm,测量口径直径为 39 mm。为了兼容 SCI 和排除镜面正反射光(SCE)测量条件,在与被测样品表面法线方向成 $+8^{\circ}$ 角的积分球壁上设置光阱。积分球直径为 150 mm,开口面积占积分球内壁总面积的 4.74%,积分球内壁喷涂高反射涂料(硫酸钡)<sup>[1, 11-13]</sup>。

光线照射到积分球内壁上形成漫反射光,漫反射光照射到被测材料表面,材料表面的反射光经过透镜通过光纤进入光栅光谱仪中<sup>[13-15]</sup>。光栅光谱仪的分辨率为 2.5 nm,光谱响应范围为 360~780 nm。仪器波长精度为 0.3 nm,光谱分辨率为 2.5 nm,测量重复性小于 0.01。积分球示意图和实物图如图 7 所示。

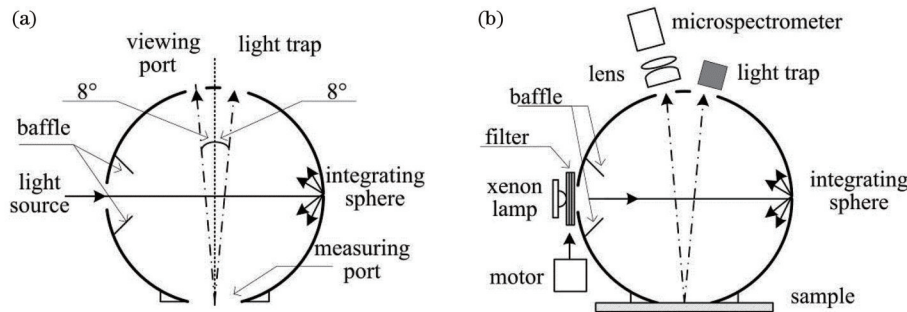


图 7 积分球示意图和实物图。(a) 积分球示意图; (b) 积分球实物图  
 Fig. 7 Schematic diagram and physical diagram of integrating sphere. (a) Schematic diagram of integrating sphere; (b) physical diagram of integrating sphere

本文的目的是设计结构对仪器的照明光源进行调整,保证照明光源中紫外部分(360~400 nm)与可见光部分(400~700 nm)的相对光谱功率与不同的目标仪器一致。设计了用电机推动滤光片的结构,并将其固定在积分球光源的入口处。调整滤光片结构示意图和装配口结构示意图如图 8(a)、(b)所示。

步进电机调整滤光片的位置来调整进入积分球的光线的光谱能量分布<sup>[16]</sup>,结构示意图如图 8(c)所示,光源光线的一部分通过滤光片后再进入积分球,另外一部分直接进入积分球。在照明光源发光均匀的前提下,进入积分球的光线的相对光谱功率分布 $\Phi'(\lambda)$ 可以表示为

在氙灯发出光线进入积分球前设置滤光片,利用

$$\Phi'(\lambda) = \frac{d-l}{d} \Phi(\lambda) + \frac{l}{d} T(\lambda) \Phi(\lambda), \quad (5)$$

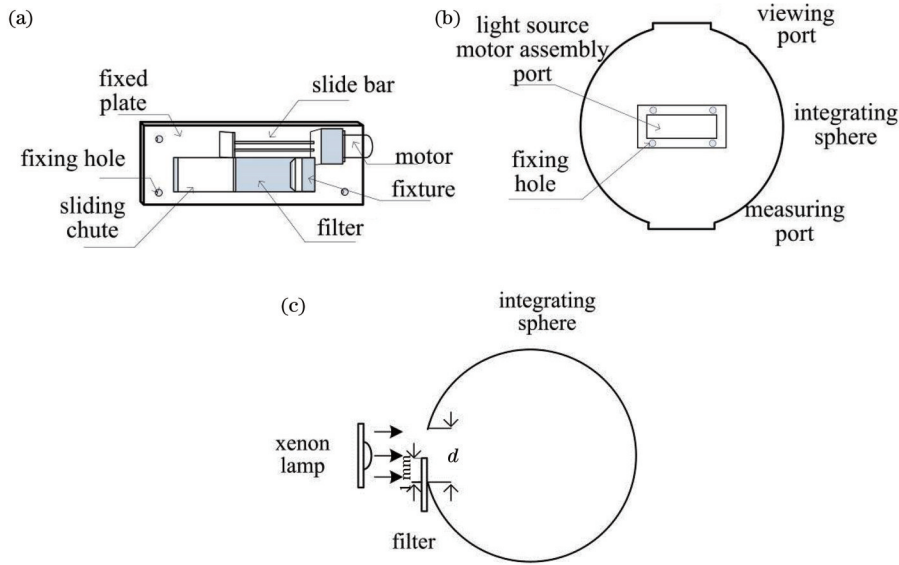


图 8 荧光调节装置图。(a)调整滤光片结构示意图;(b)装配口结构示意图;(c)测量装置示意图

Fig. 8 Fluorescence regulation device diagram. (a) Structural diagram of adjusting filter; (b) structural diagram of assembly port; (c) schematic diagram of measuring device

式中： $T(\lambda)$ 是滤光片的透过率光谱分布； $d$ 是积分球上照明光源的入口长度，其值为 66 mm； $l$ 是滤光片遮挡光源入口的长度。在实际的仪器设计中，不必保证照明光源发光均匀，可以通过测量调整滤光片位置后实际的发光光谱来找到合适的比例。

该结构需要既可以降低紫外部分的光谱能量比例，又可以提高紫外部分的光谱能量比例。设置了两个滤光片，滤光片 1 为有色玻璃 JB400，滤光片 2 为有色玻璃 ZBW2。两个滤光片的透过率光谱分布如图 9 所示。若仪器的紫外相对光谱能量分布需降低，则选择滤光片 1，反之，选择滤光片 2。

### 3.2 仪器的标定

以一块含荧光材料的白色塑料板作为标准校准板如图 10(a)所示。以 KONICA MINOLTA CM-3600A 作为标准仪器，使用 KONICA MINOLTA CM-3600A 测量标准校准板的光谱反射率，测量结果为  $R_1(\lambda)$ ，如图 10(b)中实线所示。使用自研仪器对标准校准板进行测量，首先将自研机器的滤光片位置都移动到初始位置，不对氙灯发出的光线进行任何阻拦。在此条件

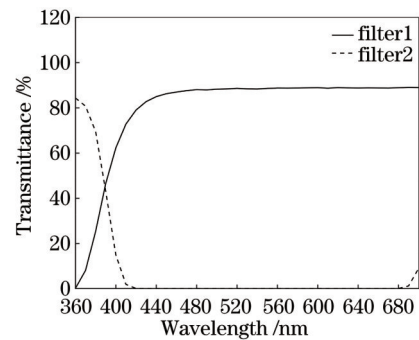


图 9 滤光片的透过光谱曲线

Fig. 9 Transmission spectrum curves of filters

下，对校准板进行测量，其光谱反射率为  $R_2(\lambda)$ ，测量结果如图 10(b)中虚线所示。可以看出，由于紫外部分光谱分布不一致，故光谱反射率有一定的差别，台间差为  $\Delta E_{ab,0} = 1.79$ 。用同一个光谱仪测量 KONICA MINOLTA CM-3600A 和自研仪器（自研仪器的滤光片位置都移动到初始位置，不对氙灯发出的光线进行任何阻拦）的光源光谱相对功率分布  $\Phi_{CM}(\lambda)$  和

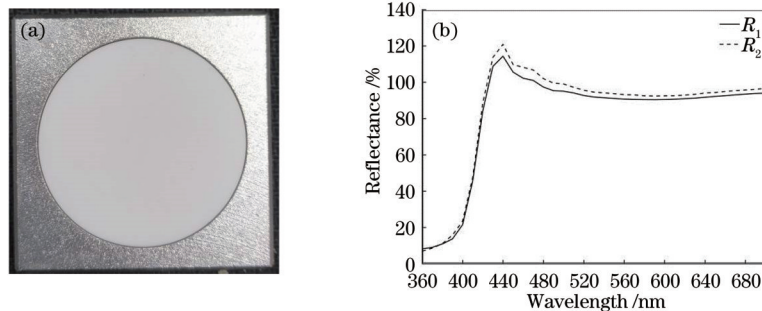


图 10 标准校准板实物图和光谱反射率。(a)标准校准板实物图;(b)标准校准板光谱反射率

Fig. 10 Physical drawing and spectral reflectance of standard calibration plate. (a) Physical drawing of standard calibration plate; (b) spectral reflectance of standard calibration plate

$\Phi_0(\lambda)$ , 并计算 KONICA MINOLTA CM-3600A 光源中紫外部分的能量占比  $\delta_{CM}$ 。比较  $R_1(\lambda)$  和  $R_2(\lambda)$ , 由于  $R_1(\lambda) < R_2(\lambda)$ , 故自研仪器的照明光源光谱分布中紫外部分的能量大于标准仪器。需要使用滤光片 1 对照明光源光谱进行调整。当滤光片移动的距离为  $l=4.75$  mm 时, 两台仪器光源中紫外部分的能量占比相同,  $l$  是根据式(4)和式(5)计算得出的。 $\delta_{CM}$  的表达式为

$$\delta_{CM} = \frac{\sum_{\lambda=360}^{400} \Phi'(\lambda)}{\sum_{\lambda=400}^{700} \Phi'(\lambda)} = \frac{\sum_{\lambda=360}^{400} \frac{d-l}{l} \Phi_0(\lambda) + \frac{l}{d} T_1(\lambda) \Phi_0(\lambda)}{\sum_{\lambda=400}^{700} \frac{d-l}{l} \Phi_0(\lambda) + \frac{l}{d} T_1(\lambda) \Phi_0(\lambda)}, \quad (6)$$

式中:  $T_1(\lambda)$  滤光片 1 的光谱透过率。

接着, 进行实验验证。移动步进电机调整滤光片 1 的位置, 每次调整距离为 0.5 mm, 总距离为 15 mm。每调整一次均计算测量结果和 KONICA MINOLTA

CM-3600A 测量结果的色差, 结果如图 11 所示。

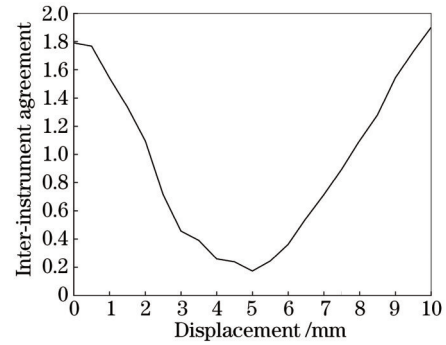


图 11 台间差随位移的变化

Fig. 11 Inter-instrument agreement varying with displacement

由图 11 可以看出, 当  $l=5$  mm 时, 色差取最小值, 其值为  $\Delta E_{ab,1}=0.17$ , 与计算结果较为接近。

将滤光片 1 固定在  $l=4.75$  mm 处的位置, 对含荧光和不含荧光的两组样品进行测量, 比较测量结果与 CM-3600A 测量结果的色差, 如图 12 所示。两者的反射率差值如图 13 所示。

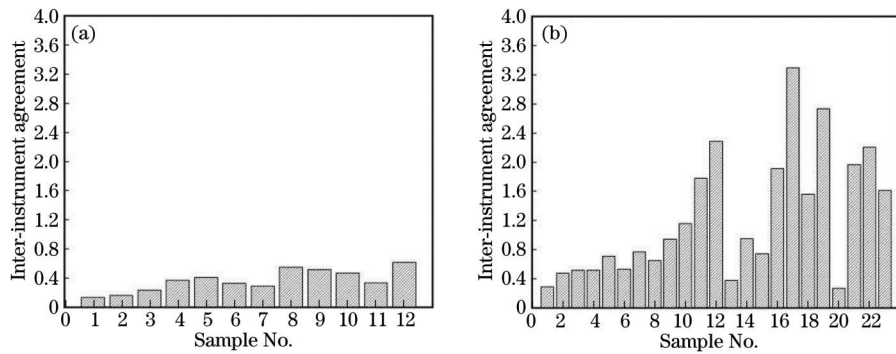


图 12 校正后的仪器与 KONICA MINOLTA CM-3600A 的台间差。(a) 不含荧光物质样品; (b) 含荧光物质样品

Fig. 12 Inter-instrument agreement between corrected instrument and KONICA MINOLTA CM-3600A. (a) Fluorescent free samples; (b) samples containing fluorescent substances

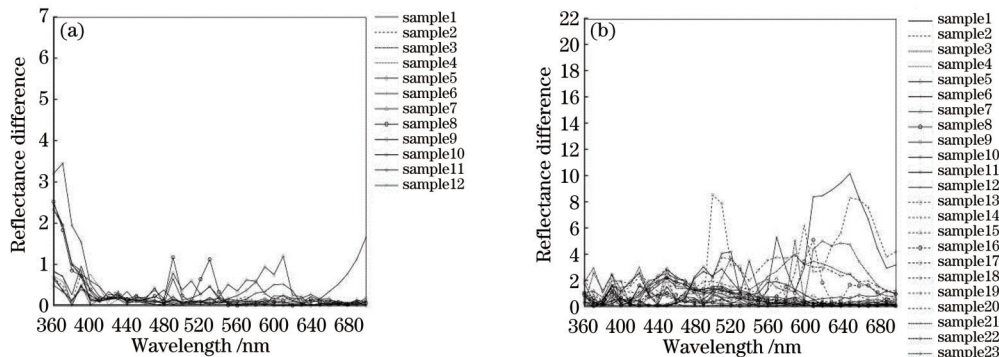


图 13 校正后的仪器与 KONICA MINOLTA CM-3600A 的反射率差。(a) 不含荧光物质样品; (b) 含荧光物质样品

Fig. 13 Reflectance difference between corrected instrument and KONICA MINOLTA CM-3600A. (a) Fluorescent free samples; (b) samples containing fluorescent substances

分别将 CHNSpec CS-826、X-Rite 7000A 作为标准机, 且都进行相同的调整。对含荧光和不含荧光的两个样品组进行测量, 比较二者测量结果与标准仪器

测量结果的差别, 如图 14 所示。校正后仪器测量样品的反射率与目标仪器 CHNSpec CS-826 和 X-Rite 7000A 测量样品反射率的差值如图 15 和图 16 所示。



由校正前后的台间差比较可知,校正光源后可以显著减小使用仪器的测量结果与标准仪器测量结果之间的

台间差。

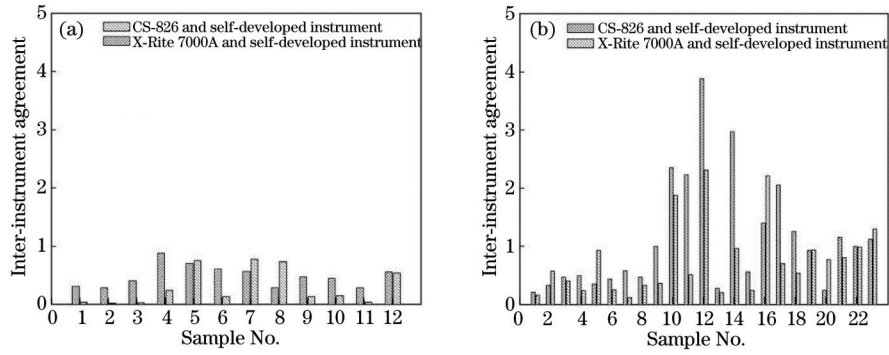


图 14 CHNSpec CS-826、X-Rite 7000A 与校正后仪器间的台间差。(a)不含荧光物质样品;(b)含荧光物质样品  
Fig. 14 Inter-instrument agreement among CHNSpec CS-826, X-Rite 7000A and corrected instrument. (a) Fluorescent free samples; (b) samples containing fluorescent substances

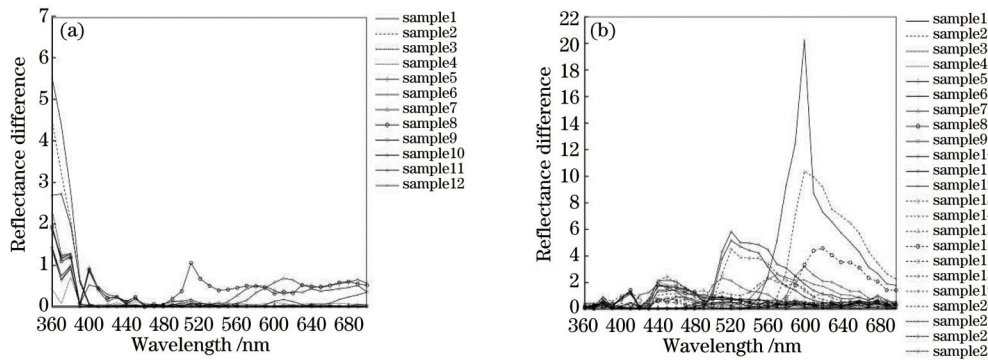


图 15 校正后的仪器与 CHNSpec CS-826 的反射率差。(a)不含荧光物质样品 ;(b)含荧光物质样品  
Fig. 15 Reflectance difference between corrected instrument and CHNSpec CS-826. (a) Fluorescent free samples; (b) samples containing fluorescent substances

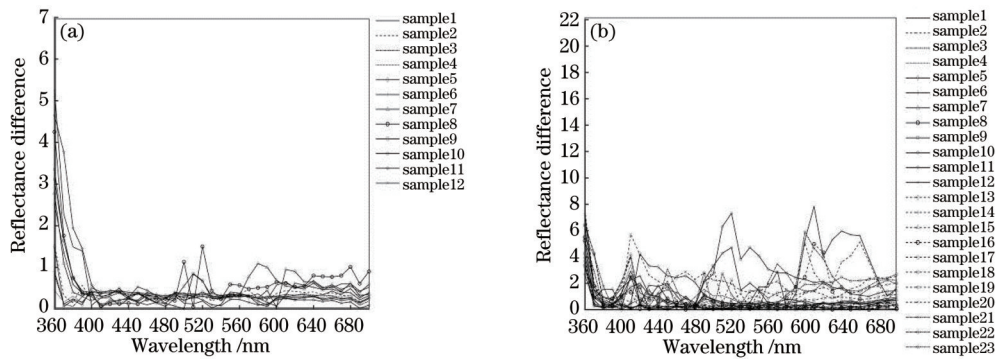


图 16 校正后的仪器与 X-Rite 7000A 的反射率差。(a)不含荧光物质样品 ;(b)含荧光物质样品  
Fig. 16 Reflectance difference between corrected instrument and X-Rite 7000A. (a) Fluorescent free samples; (b) samples containing fluorescent substances

## 4 结 论

针对荧光物质颜色测量各种分光测色器台间差大的问题,设计了可以减小荧光物质颜色测量台间差的分光测色仪,并提出了校正光源光谱功率分布的算法。所设计的仪器通过校正光源能够很好地减小台间差,校正之前测量荧光物质的颜色与 KONICA MINOLTA CM-3600A, X-Rite 7000A, CHNSpec CS-

826 的台间差  $\Delta E_{ab}$  最大值分别为 13.42, 12.20, 10.23, 校正后台间差  $\Delta E_{ab}$  最大值分别为 3.29, 2.31, 3.88。实验结果证明,使用所设计的仪器可以较好地提升不同仪器之间对荧光色测量的台间差水平。

### 参 考 文 献

[1] 徐海松. 颜色信息工程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005: 224-229.

- Xu H S. Color information engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005: 224-229.
- [2] 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: 397-505.
- Hu W J, Tang S Q, Zhu Z F. Modern color science and application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 397-505.
- [3] Billmeyer F W. Metrology, documentary standards, and color specifications for fluorescent materials[J]. Color Research & Application, 1994, 19(6): 413-425.
- [4] Gundlach D, Terstiege H. Problems in measurement of fluorescent materials[J]. Color Research & Application, 1994, 19(6): 427-436.
- [5] Fairchild M D. CIE 015: 2018 colorimetry, 4th edition [EB/OL]. [2021-03-05]. <https://cie.co.at/publications/colorimetry-4th-edition>.
- [6] 李森鑫, 位春傲, 万晓霞, 等. 基于可见光谱的古代壁画颜料识别与颜色分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0630002.
- Li M X, Wei C A, Wan X X, et al. Pigment identification and color analysis of ancient murals based on visible spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0630002.
- [7] 徐海松. 颜色技术原理及在印染中的应用(十三) 第九篇分光光度测色仪器[J]. 印染, 2006, 32(6): 41-44.
- Xu H S. Color technical principle and its application to dyeing and finishing (13): chapter 9 spectrophotometric color measuring instrument[J]. Dyeing & Finishing, 2006, 32(6): 41-44.
- [8] 王雨嫣, 杨凌岳, 李明, 等. 颜色不稳定黄色蓝宝石的谱学特征与颜色成因[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(8): 2611-2617.
- Wang Y Y, Yang L Y, Li M, et al. Spectral characteristics and color origin of unstable yellow sapphire[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(8): 2611-2617.
- [9] 黄敏, 王灵芳, 刘瑜, 等. 光柱辐射纸的光谱和色度测量分析[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0633002.
- Huang M, Wang L F, Liu Y, et al. Measurement and analysis of the spectral and chromaticity values of pillars of light pattern holographic paper[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0633002.
- [10] 刘怡轩. 在线式分光测色仪研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015: 62-82.
- Liu Y X. Study of spectrophotometer for on-line color measurement[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 62-82.
- [11] 袁琨. 颜色测量仪器关键技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- Yuan K. Research on the key technology of the color instrument and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [12] 袁琨, 严惠民, 金尚忠, 等. 基于D/8条件的颜色测量仪器SCE测量光泽修正模型的设计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1112006.
- Yuan K, Yan H M, Jin S Z, et al. Gloss modification model design of SCE measurement based on D/8 condition color spectrophotometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1112006.
- [13] 李佳伟, 陈洪耀, 张黎明, 等. 紫外波段大口径积分球辐射源研制[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2012005.
- Li J W, Chen H Y, Zhang L M, et al. Development of large aperture integrating sphere radiation source in ultraviolet band[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2012005.
- [14] 袁琨, 张淑琴, 吴逸萍, 等. 基于实时双光路校正的分光测色仪优化设计[J]. 光子学报, 2016, 45(7): 0712002.
- Yuan K, Zhang S Q, Wu Y P, et al. Optimization design of spectrophotometer based on real time calibration of dual optical path[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 0712002.
- [15] 朱嘉诚, 陆伟奇, 赵知诚, 等. 静止轨道中波红外成像光谱仪分光成像系统[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1122001.
- Zhu J C, Lu W Q, Zhao Z C, et al. Spectroscopic imaging system in mid-wave infrared imaging spectrometer on geostationary orbit[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1122001.
- [16] 袁琨, 严惠民, 金尚忠, 等. 光电积分式光源颜色照度测量仪器的滤光片优化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0812002.
- Yuan K, Yan H M, Jin S Z, et al. Filter optimization design for photoelectric integral light source color illumination instrument[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0812002.