

doi: 10.3788/gzxb20164507.0712002

基于实时双光路校正的分光测色仪优化设计

袁琨^{1,2}, 张淑琴¹, 吴逸萍², 金尚忠¹

(1 中国计量学院 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

(2 杭州彩谱科技有限公司, 杭州 310034)

摘 要:设计了一种基于实时双光路校准的分光测色仪结构,在现有双光路设计中加入校准光源对主光路和辅助光路进行实时双光路校准.构建算法对由温度变化引起的传感器响应效率变化进行修正,并设计实验在不同温度下对仪器采样稳定性进行评价.实验表明,采用了实时双光路校正仪器的工作温度从 10℃ 变化至 30℃ 后,测量数据稳定性标准偏差小于等于 0.03,最大偏差小于等于 0.04,相对于现有技术有显著改善.

关键词:颜色测量;反射光谱;双光路;分光测色仪;光学结构;算法优化;实时校正

中图分类号:O438.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)07-0712002-5

Optimization Design of Spectrophotometer Based on Real Time Calibration of Dual Optical Path

YUAN Kun^{1,2}, ZHANG Shu-qin¹, WU Yi-ping², JIN Shang-zhong¹

(1 College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(2 Hangzhou Colorspec Technology CO. LTD, Hangzhou 310034, China)

Abstract: A improved double-beam structure in spectrophotometer was proposed which has an extra calibration light source in the design of the double-beam to calibrate both the main beam and the auxiliary beam in real time. The related optimisation spectral data sampling algorithm was presented to modify the change of sensor response efficiency caused by temperature change, the effect of the proposed structure with a series of customised experiments at at different ambient temperatures was evaluated. Experiment results show that when operated in an environment with a temperature change from 10℃ to 30℃, double-beam correction instrument is able to produce measurements repeatability, the standard deviation with an average is less than or equal to 0.03, and the maximum is less than or equal to 0.04, which is a significant improvement to existing products.

Key words: Color measurement; Reflection spectra; Dual-optical path; Spectrophotometer; Optical structure; Algorithm optimization; Real-time correction

OCIS Codes: 120.4640; 330.1710; 330.7325; 300.6550

0 引言

颜色测量仪器是将颜色量化的常规测量仪器,广泛应用于化学^[1]、轻工业^[2]、医学检验^[3]和计量测试^[4]中.分光测色仪通过获得被测样品表面可见光范围内的光谱反射率曲线计算得到颜色三刺激值和其它色参量^[5],测量准确度高,是近年来颜色测量的主流技术手段.在分光测色仪设计中,为了保证测量重复性,通常

采用双光路设计方案,即一条光路传感器检测被测物体表面反射光谱信号,另一条光路传感器检测光源能量波动.通过两传感器的信号对比即可消除光源波动对测量产生的影响,保证测量重复性^[6].在实际使用中,仪器的操作很多是在生产线上或质检工位上进行的,尤其在纺织、印染等行业质检工序中,仪器的操作环境可能会存在短时间内较大范围的温度变化,影响仪器重复性.具体表现在仪器在短时间测量时可保证

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2014YQ491015)和质检公益性行业科研专项项目(No. 201410110)资助

第一作者:袁琨(1982-),男,讲师,博士,主要研究方向为光谱检测仪器. Email:10930014@zju.edu.cn

收稿日期:2015-12-17;录用日期:2016-04-07

<http://www.photon.ac.cn>

良好的重复性,而当仪器使用环境发生变化后重复性变差^[7].

分光测色仪的测量重复性作为仪器的关键技术指标受到了研究人员的关注. David R. 等^[8]对 12 种分光颜色测量仪器的重复性进行了充分的短期测量重复性实验研究,提出了一种基于统计学的重复性评价方法. Rosenberg 等^[9]通过为分光测色仪设置自动校准白板改善了装置测量重复性. 王聪等^[10]设计了仪器结构,通过双光路对仪器短期测量重复性进行了改善,短期测量重复性 $\Delta E \leq 0.05$. Radencic^[11]等在对印刷行业中使用的分光测色仪进行了数据一致性评价,评价了环境温度变化和湿度变化对测量结果和示值传递的影响. 谷玉海等^[12]为了减少温度变化对测量的影响,改进电路设计控制光源发热,从而提高了短期测量重复性,在稳定温度情况下连续测量 30 min,测量结果 $\Delta E \leq 0.14$,但并没有对温度变化情况下的长期重复性进行测试. 这些研究均未在光路设计上对温度影响长期重复性做针对性的改进.

本文从光路设计角度提出了分光测色仪长期重复性的改进设计方案,在光路设计中采用双光路结构分别测量样品信号和光源信号. 在光路结构中设置校准光源,设计相关算法对由温度变化引起的传感器响应效率变化进行了修正,改善了仪器测量长期重复性.

1 分光测色仪的优化设计

1.1 分光测色仪

在分光测色仪的设计中,需要遵循一定的照明、观测几何条件. 国际照明委员会(International Commission on illumination, CIE)在 CIE15:2004 中对反射色的测量推荐了反射样品测量几何条件^[13-14],颜色测量仪器中应用较多的是漫射照明和与法线 8° 角观察的几何条件,结构示意图如图 1. 在仪器结构设计中,为了达到良好的测量重复性,用两路传感器同时测量样品表面反射信号和一部分积分球内壁的反射信

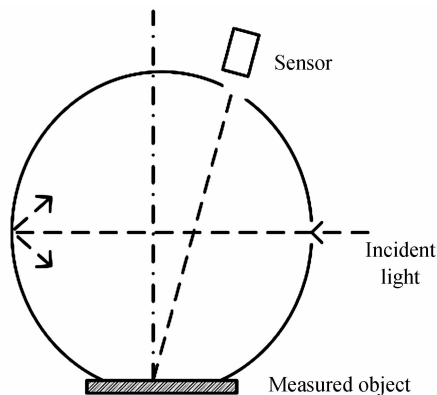


图 1 漫射照明 8° 观察角

Fig. 1 Diffuse illumination, 8° viewing angle

号^[15]. 取积分球内壁的反射信号作为参考光来检测光源能量波动,如图 2.

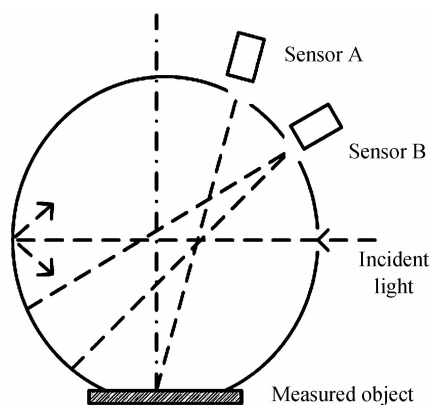


图 2 仪器双光路结构

Fig. 2 Diagram of dual-light path structure

为了保证仪器测量重复性,通常采用光敏面积较大的光电二极管阵列(Photo Diode Array, PDA)作为传感器^[16]. 目前,颜色测量仪器生产厂商在参量标注中对于测量重复性的测试条件均为:在仪器白板校正后,对白色校正板进行测量,以 10 s 间隔测量 30 次,对 30 次的测量结果评价重复性. 这种测量条件下由于测试时间较短,温度不会有较大范围波动,性能较好的仪器短期测量重复性可以达到标准偏差 $\Delta E \leq 0.01$. 但是,当温度变化较大时,由于传感器温度特性的不一致,环境温度的变化会使得两路传感器的光谱灵敏度也不同,导致仪器的测量长期重复性不佳. 外部温度条件发生改变后,通常需要用仪器对外部标准板进行校准测量才能保证测量数据的准确性.

1.2 优化设计方案

为了改善仪器测量重复性,本文对现有技术方案进行改进设计,在已有光路中加入校准标准光源,每次测量时对两光路传感器的光谱灵敏度进行实时校准. 具体结构如图 3.

该结构基于漫射照明、 8° 观察角照明观测条件,积分球 1 开孔作为仪器测量孔径,被测样品夹持在该测量孔径处. 在与被测样品法线 $+8^\circ$ 角的方向积分球内壁开孔,作为主光路光线出射孔;在与被测样品法线 $+30^\circ$ 角的方向积分球内壁开孔,作为参考光路光线出射孔. 仪器照明光源为氙灯,光源发出的光从积分球侧面的照明光源入射孔入射至积分球内部,在积分球内经充分均匀化后,光线照射至被测样品表面. 样品表面的反射光通过主光路光线出射孔进入透镜组 1,经透镜组 1 对光线进行聚焦,通过合束镜进入主分光光路的人射狭缝. 积分球内壁的反射光通过参考光路光线出射孔进入透镜组 2,经透镜组 2 对光线进行聚焦,通过合束镜进入参考分光光路的人射狭缝.

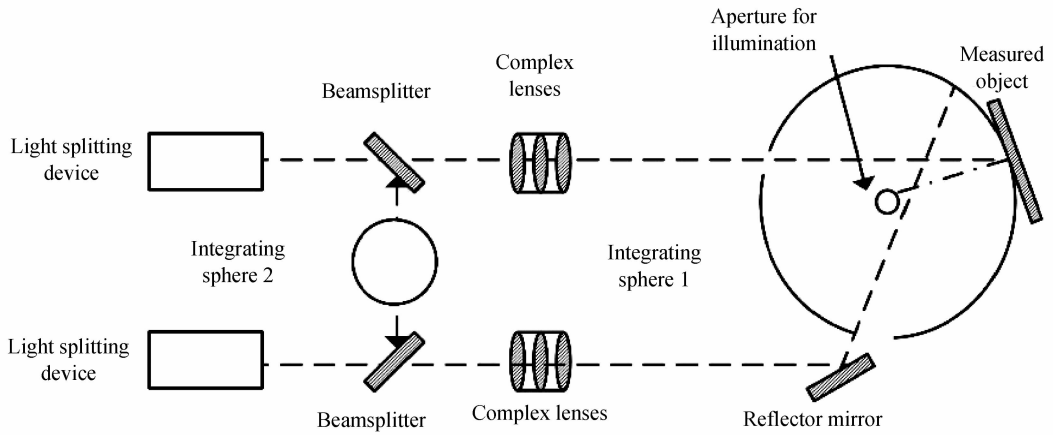


图3 仪器结构示意图

Fig. 3 Diagram of instrument structure

积分球2的作用为对主光路和参考光路进行校准,其内部结构如图4,积分球内部左侧开一光源入射孔,照明光源为卤钨灯,光线入射至积分球内部,积分球内表面涂覆白色漫反射涂料,使入射光线在积分球内部均匀化.在卤钨灯光源和两个出射狭缝间设置两个挡板,防止光源光线不经匀化直接出射.积分球上下两端分别开出射狭缝,狭缝外置凸透镜,对出射光线进行准直.积分球2上下两个出射狭缝发出的光线经过合束镜反射后,入射至主、辅分光光路的入射狭缝处.在仪器使用过程中,每次点亮卤钨灯时,通过积分球2从上下两个狭缝出射的光线进入主光路和参考光路入射狭缝的光辐射强度遵循一稳定的比例.

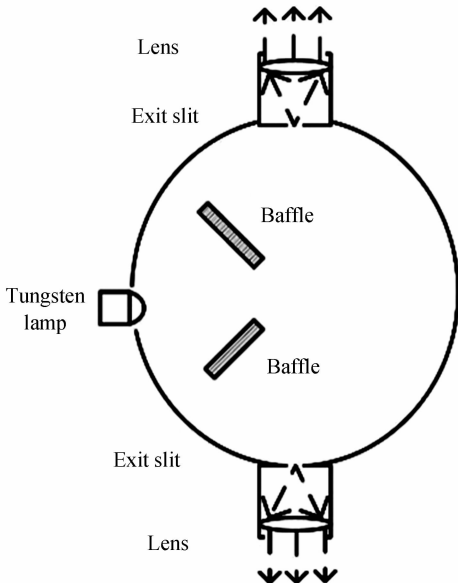


图4 积分球2的内部结构

Fig. 4 Internal structure of integrating sphere2

主光路和参考光路采用平场凹面光栅对入射光线进行分光,然后投射到线阵传感器上.传感器采用了256像元线阵传感器,经波长定标后,每个像元可对应一特定的波长,再通过线性插值运算即可得到在400~700 nm范围内,每间隔10 nm处的信号强度.在

仪器的实际使用中,仪器内部器件、涂层等部分的老化会对仪器测量结果产生影响.通常建议在每天使用仪器时对其进行一次校准测试,对标准白板和标准黑板进行定标测量以保证数据的准确.

在仪器进行测试时,首先点亮卤钨灯,对主光路和参考光路同时进行一次测量.得到主光路传感器的采样结果为 $I_1[\lambda]$,参考光路传感器的采样结果为 $I_2[\lambda]$.其中, λ 为波长,具体值为400~700 nm范围内每间隔10 nm的波长.在仪器实际使用时,点亮卤钨灯对主光路传感器和辅助光路传感器同时进行一次采样.得到主光路传感器的采样结果为 $I'_1[\lambda]$,辅光路传感器的采样结果为 $I'_2[\lambda]$.

在理想情况下,传感器采样结果应满足

$$\frac{I_1[\lambda]}{I_2[\lambda]} = \frac{I'_1[\lambda]}{I'_2[\lambda]} \quad (1)$$

但是实际情况下客观条件的变化导致式(1)不能成立,仪器测量重复性不佳,所以需要在实际测量时对采样数据进行相关修正.修正方法为:

1) 计算仪器开机时得到的主光路和辅光路传感器的采样结果 $I_1[\lambda]$ 和 $I_2[\lambda]$ 的比例系数 k ,即

$$k = \frac{I_1[\lambda]}{I_2[\lambda]} \quad (2)$$

2) 每次测量时,点亮卤钨灯得到主光路和辅光路传感器的采样结果 $I'_1[\lambda]$ 和 $I'_2[\lambda]$ 后,熄灭卤钨灯,点亮氙灯,对被测样品进行测量,获得仪器主通道采样结果 $I_1^m[\lambda]$ 和参考通道的采样结果 $I_2^m[\lambda]$.对采样数据进行修正,得

$$I_1^m[\lambda] = I_1^m[\lambda] \cdot k \cdot \frac{I_2[\lambda]}{I_1[\lambda]} \quad (3)$$

$$I_2^m[\lambda] = I_2^m[\lambda] \quad (4)$$

式中, $I_1^m[\lambda]$ 为修正后的主通道采样值, $I_2^m[\lambda]$ 为修正后的辅通道采样值.取每个波长的最终采样强度为

$$I[\lambda] = \frac{I_1^m[\lambda]}{I_2^m[\lambda]} \quad (5)$$

通过定标,可将 $I[\lambda]$ 转化为被测样品的反射率数据。

2 实验验证

设计实验对日本柯尼卡美能达公司^[17]的 CM-700D 和本文设计的仪器进行测试。CM-700D 采用氙灯作为照明光源,漫射照明,8°角观测照明观测几何条件。该仪器采用双光路结构,一路通过检测积分球内壁的反射光检测照明光源的强度,一路对材料表面反射光谱信号进行测量,仪器结构如图 2。说明书中标注的短期测量重复性标准偏差为 $\Delta E \leq 0.04$,仪器标称使用温度为 5~35℃。本文设计的仪器同样采用氙灯作为照明光源,照明观测条件与 CM-700D 相同,区别在于在光路中加入了传感器光谱响应校准光路,每次测量时对两个传感器进行光谱影响效率进行校准,仪器结构如图 3。

2.1 短期重复性评价

对两种仪器的测试结果进行短期重复性的测量方法为:采用仪器测量英国陶瓷研究协会(British Ceramic Research Association,BCRA)陶瓷标准色板系列标准色板中白色色板的色坐标 L, a, b ,以 10s 间隔测量 30 次,计算 30 次测量结果的标准偏差 S_L, S_a, S_b ,即

$$S_L = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2} \quad (6)$$

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} \quad (7)$$

$$S_b = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2} \quad (8)$$

式中, L_i, a_i, b_i 为第 i 次测量值; $\bar{L}, \bar{a}, \bar{b}$ 为测量平均值; n 为测量次数,本实验中为 30 次。计算总色差的标准偏差,即

$$S_{\Delta E} = \sqrt{S_L^2 + S_a^2 + S_b^2} \quad (9)$$

测得 CM-700D 和本文设计仪器的总色差的标准偏差分别为 0.017 7 和 0.028 9。

2.2 温度稳定性评价

对两台仪器的测量结果进行温度稳定性评价^[18]时,将仪器放置于 JKS-1000 型可编程恒温恒湿试验箱中,对白色标准板进行测量。JKS-1000 型可编程恒温恒湿试验箱温度调整范围为: -20~120℃,湿度调整范围为 30%~98% R. H. .

将恒温恒湿试验箱设置为温度 10℃,湿度 50% R. H. 仪器开机,将该仪器放置在恒温恒湿试验箱中,静置 1h 后,进行一次校准操作,之后对标准白板进行测量,并记录数值。将温度升高至 15℃,静置 1 h 后,对标准白板进行测量。重复操作,每次将温度升高 5℃,直至 30℃,保证湿度 50% R. H. 不变,共测量 5 次。对两台仪器的测量结果分别见表 1 和表 2。

表 1 CM700D 不同温度测量值

Table 1 CM700D measured values at different temperatures

Temperature/℃	X	Y	Z	L	a	b	ΔE	$S_{\Delta E}$
10	84.38	89.20	91.76	95.66	-0.36	2.69	0.00	
15	84.61	89.52	91.96	95.80	-0.50	2.78	0.21	
20	85.03	89.80	92.22	95.91	-0.21	2.80	0.32	0.40
25	85.41	89.91	92.50	95.96	0.31	2.69	0.74	
30	85.61	90.18	92.96	96.07	0.21	2.57	0.71	

表 2 本文设计的仪器结构不同温度测量值

Table 2 The proposed instrument measured values at different temperatures

Temperature/℃	X	Y	Z	L	a	b	ΔE	$S_{\Delta E}$
10	84.38	89.20	91.76	95.66	-0.36	2.69	0.00	
15	84.40	89.21	91.74	95.67	-0.34	2.71	0.03	
20	84.40	89.24	91.77	95.68	-0.40	2.71	0.04	0.03
25	84.39	89.19	91.74	95.66	-0.33	2.70	0.04	
30	84.39	89.23	91.78	95.68	-0.40	2.70	0.04	

从实验数据可以看出,两台仪器的短期重复性差别不大,分别为 0.017 7 和 0.028 9。但是在温度稳定性评价结果中,未使用双光路矫正的仪器在温度从 10℃ 变化至 30℃ 后,测量数据标准偏差 $\Delta E = 0.40$,而采用了双光路矫正的仪器测量数据标准偏差 $\Delta E = 0.03$ 。以 10℃ 测量数据为标准数据,评价每次温度变化后产生的

数据绝对值偏差,两仪器测量结果如图 5。未使用双光路矫正的仪器在温度从 10℃ 变化至 30℃ 后,测量数据最大偏差达到了 $\Delta E = 0.74$,在实际使用中这种情况需要重新进行校准测量;而采用了双光路矫正的仪器测量数据最大偏差只有 $\Delta E = 0.04$,不需要校准测量。

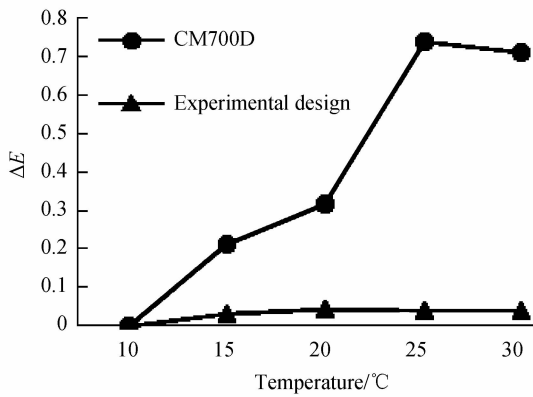


图5 不同仪器的色差随温度的漂移

Fig.5 Drift caused by temperature of different instrument

3 结论

本文引入校准光源对目前分光测色仪双光路设计方案进行改进,在每次测量中,用校准光源对主光路和辅助光路进行实时校准.在不同温度下对改进后的仪器和没有改进措施的仪器进行测量稳定性评价.实验中仪器工作环境温度从10℃变化至30℃,采用双光路实时校准结构的分光测色仪测量数据稳定性标准偏差 $\Delta E \leq 0.03$,最大偏差 $\Delta E \leq 0.04$;未采用双光路实时校准结构的分光测色仪数据稳定性标准偏差 $\Delta E \leq 0.40$,最大偏差 $\Delta E \leq 0.74$.表明温度变化对未采用双光路结构的分光测色仪测量稳定性有较大影响;采用校准光源对双光路分光测色仪的主光路和辅助光路进行实时校准,可以有效减小温度变化导致的测量数据波动.该研究可有效改善分光测色仪在实际应用中温度变化对测量数据长期重复性的影响.

参考文献

[1] RAJAK A, MUNIR M, ABIDIN M, *et al.* A simple spectrometer using various LEDs and a photodiode sensor for photocatalytic performance evaluation[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, **771**: 17-20.

[2] HESHMAT H, GANGKAR M, ARIOMAND M, *et al.* Color stability of three composite resins following accelerated artificial aging: an in-vitro study[J]. *Original Article*, 2014, **26**: 9-14.

[3] TIAN Yi-bin, XU Zhi-hai, FENG Hua-jun, *et al.* Auto-focus Based on Skin Detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 56-60.

田宜彬,徐之海,冯华君等,基于皮肤探测的自动对焦[J]. *光子学报*, 2003, **32**(1):56-60.

[4] WANG Chen, ZHENG Chen-dong, CHE Rong, *et al.* Research on information quantity on aerial film and CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**: 259-261.

王陈,郑承栋,车嵘等.航空摄影胶片与CCD信息量的研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**:259-261.

[5] SHIH M. The development of a portable spectrophotometer for noncontact color measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2004, **53**(1): 155-162.

[6] WEN Bo, YAN Chang-xiang. Optical design of portable spectrophotometer[J]. *Applied Mechanics*, 2011, **32**(1): 18-22.

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.

[7] YOSHI O, HARDIS J E. Four-color matrix method for correction of tristimulus colorimeters[J]. *Color & Imaging Conference*, 1997, **23**(4): 65-68.

[8] WYBLE D, RICH D. Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part I: Repeatability[J]. *Color Research & Application*, 2007, **32**(3): 166-175.

[9] ROSENBERG S, ADKINS D. Online/robotic integrated thickness and color measurement[J]. *Industrial Paint and Powder*, 2006, **82**(1): 21-25.

[10] WANG Cong, JIN Shang-zhong, YUAN Kun. The improvement of the structure of double optical path d/0 in the spectrophotometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**: 134-137.

王聪,金尚忠,袁琨.分光光度测色仪中双光路d/0结构的改进[J]. *光电工程*, 2012, **39**:134-137.

[11] GREG R, ERIC N, MARK B. Spectrophotometer inter-instrument agreement on the color measured from reference and printed samples [C]. *Proceedings of the Technical Association of the Graphic Arts*, 2008, 232-251.

[12] GU Yu-hai, JI Xin, LI Jiang-jie. Measuring stability improvement of photoelectric colorimeter [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013, **9**: 41-43.

谷玉海,冀欣,李江洁.提高光电式测色仪测量稳定性的方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2013, **9**:41-43.

[13] CIE, CIE色度学标准[S]. 2004.

[14] FEN Hai-yan, Color measurement methods and basic principles[J]. *Printing Industry*, 2008, **6**: 78-82.

樊海燕,颜色测量方法及基本原理[J]. *印刷工业*, 2008, **6**: 78-82.

[15] YUAN K, YAN H, JIN S. The design of color spectrophotometer based on diffuse illumination and compatible SCE/SCI geometric condition [C]. *SPIE*, 2013, **90460V**: 8-8.

[16] 徐海松,颜色信息工程[M]. 浙江:浙江大学出版社, 2005.

[17] 美能达(2015). 产品介绍. <http://www.konicaminolta.com.cn/instruments/index.html>.

[18] JJG595-2002, 测色色差计检定规程[S]. 2002.