

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

袁 琨^{1,2} 严惠民¹ 金尚忠² 岑松原² 王 坚²

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

(² 中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 对表面光泽度较高的物体表面颜色进行测量,常采用漫射照明、8°观察角、消除镜面反射光的几何条件。在结构设计中,通过积分球内设置的光阱来消除镜面反射光。由于光阱的尺寸、大小的不同,导致不同结构的仪器在测量表面光泽度不同的样品时会产生较大的器间差。从理论上分析了漫射照明、8°观察角、消除镜面反射光的几何条件下不同结构的测量仪器的器间差产生原因;设计了一种可以兼容包含镜面反射光(SCI)和去除镜面反射光(SCE)几何条件的测量结构,通过对样品表面 SCI 和 SCE 数据进行同时测量获得样品表面的光泽数据;提出了一种根据被测材料表面光泽数据对 SCE 测量数据进行修正的修正模型,并设计相关实验进行验证。实验结果证明,应用该修正模型对测量结构进行修正可以显著减小不同仪器结构之间的测量偏差,有显著的工程应用价值。

关键词 测量;颜色测量;器间差;光泽;算法修正

中图分类号 O438.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1112006

Gloss Modification Model Design of SCE Measurement Based on D/8 Condition Color Spectrophotometer

Yuan Kun^{1,2} Yan Huimin¹ Jin Shangzhong² Cen Songyuan² Wang Jian²

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

(² College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract The geometric conditions of diffuse illumination, 8° observation, and specular light exclusion (SCE) are often employed to measure the surface color. The SCE condition is usually realized by setting light trap on the integrating sphere. Due to the size of the optical trap, different structures of the measurement instrument will lead to inter-instrument disagreement among the measurement of sample with different gloss. The reason of inter-instrument disagreement caused by different measuring structures is analyzed in theory; a measuring structure is designed to measure the SCE and specular light inclusion (SCI) results simultaneously. The gloss value is calculated from the SCE and SCI results. A computing model is proposed to modify the SCE measuring result based on the gloss value, and experimental verification is also carried out. Experimental results show that the modified model effectively reduces inter-instrument disagreement caused by different measuring structures, and is very suitable for engineering applications.

Key words measurement; color measurement; inter-instrument disagreement; gloss; algorithm correction

OCIS codes 120.2440; 120.4640; 120.5240

1 引 言

为了保证颜色数据的可对比性,颜色测量必须在标准照明和观察几何条件下进行^[1-2]。国际照明

委员会(CIE)在 1971 年推荐了四种用于反射样品测量的标准照明与观察几何条件:垂直/45°(0°/45°),45°/垂直(45°/0°),垂直/漫射(0°/D),漫射/垂

收稿日期: 2013-04-28; 收到修改稿日期: 2013-06-17

基金项目: 质检公益性行业科研专项(201210094)

作者简介: 袁 琨(1982—),男,博士研究生,主要从事光谱检测仪器方面的研究。E-mail: 10930014@zju.edu.cn

导师简介: 严惠民(1961—),男,博士,教授,主要从事光学测量技术和仪器等方面的研究。E-mail: yhm@zju.edu.cn

直($D/0^\circ$)。为了便于讨论,可以将各种不同的照明与观察条件简化成三种最普通的几何条件:1)漫射照明、 8° 观察角、包含镜面反射成分($D/8:I$);2)漫射照明、 8° 观察角、消除镜面反射成分($D/8:E$);3) 45° 环形照明、垂直观察($45^\circ/0^\circ:C$)^[3-5]。对表面颜色进行观测时,光泽会对颜色判定产生极大的影响^[6-10]。为了得到与目视检测相符的检测结果,通常选择 $D/8:E$ 的测量条件,一般使用积分球的光泽陷阱来消除反射光中的规则反射^[11-12]。但是,由于 CIE 没有规定积分球的尺寸和光泽陷阱的尺寸,采用 $D/8:E$ 几何条件仪器的测量结果相互间缺少一致性^[13]。虽然不同厂家生产的颜色测量仪器在技术参数上都标称了同一种测量几何条件,但是由于具体尺寸上的区别,导致不同仪器的测量结果有较大的偏差。在进行颜色量值传递时,需要说明测试仪器的具体型号,给实际应用带来不便。

为了减小这种情况对测量带来的影响,本文提出了一种矫正模型和测量结构,应用于分光光谱颜色测量仪器中,在 $D/8:E$ 几何条件下,对由于光泽陷阱的大小不同产生的器间差进行修正。对材料表面分别进行包含镜面反射光(SCI)和去除镜面反射光(SCE)条件下的两次测量得到材料表面光泽数据^[14],用光泽数据对其表面光谱进行修正。实验证明,模型和测量结构可以显著减小 $D/8:E$ 条件下由于测试仪器结构差异产生的器间差。

2 理论分析

对于积分球结构的 $D/8$ 结构下测试条件,从光源发出的光,在积分球内部经过积分球壁漫反射后,可认为是各向同性光照射至样品表面。如图 1 所示,在样品表面发生三种形式的反射:镜面反射[图 1(a)]、漫反射[图 1(b)]、和方向反射[图 1(c)、(d)]^[15]。实际上多数自然表面对辐射的波长而言都是粗糙表面,而对于表面有一定光泽的被测样品,如图 1(c)和(d)所示,表面发生的反射实际上应属于介于镜面反射和漫反射之间的方向反射。

在 CIE 推荐的 $D/8:E$ 几何条件下,通过设置如图 2 所示的光阱来消除表面反射光。在不设置光阱的情况下,光阱位置应为完整的积分球内壁,如图 3 所示。测试光源发出的光经过在积分球内部的光阱位置反射后,分为两部分:一部分光直接入射到被测材料表面,此部分光经过表面的非朗伯反射后,一部分镜面反射光直接入射至传感器中,如图 3 中 $A \rightarrow B \rightarrow D$ 光线;另一部分光在被测材料表面发生漫反

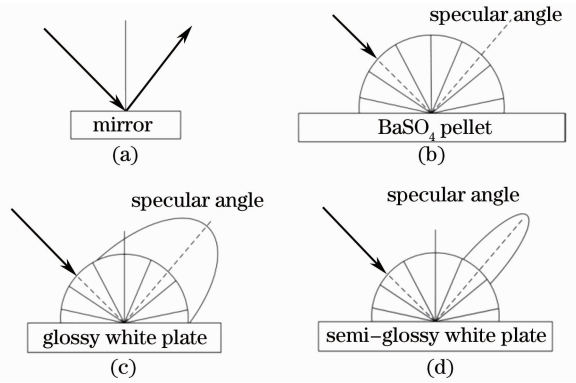


图 1 (a) 镜面反射; (b) 完全漫反射; (c) 高光泽白板; (d) 半光泽白板

Fig. 1 (a) Mirror reflection; (b) complete diffuse reflection; (c) highly glossy white plate; (d) semi-glossy white plate

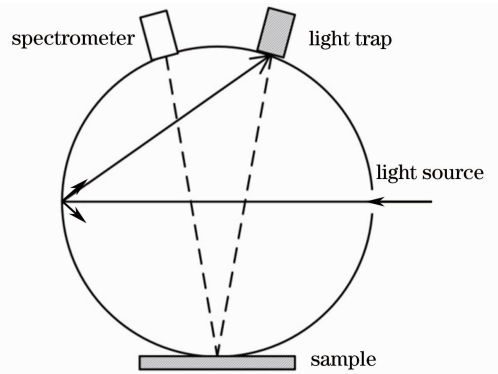


图 2 $D/8:E$ 几何条件下设置的光阱

Fig. 2 Light trap with $D/8:E$ geometry condition

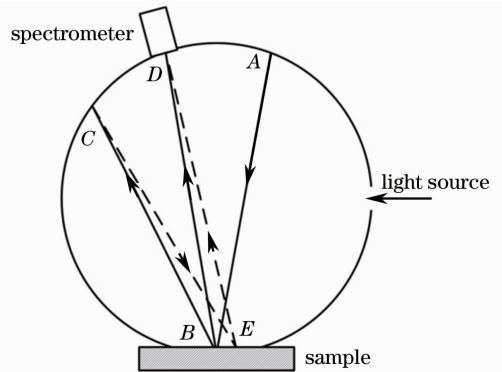


图 3 光线在积分球和样品间的多次反射

Fig. 3 Reflection in integrating sphere

射后,经过积分球的均匀再次入射至被测材料表面发生非朗伯反射,如图中 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D$ 光线。而每一次在样品表面的反射,既包括光源光谱,也包括物体表面光谱。在发生镜面反射时,光源光谱能量相对物体表面光谱能量占主要成分,而在非镜面反射的情况下,物体表面光谱能量相对光源光谱能量占主要成分。

对于特定尺寸的光阱位置为完整的积分球内壁的情况,在波长 λ 处经过被测材料表面的光线直接反射至传感器的光线 $A \rightarrow B \rightarrow D$,传感器接收到的光谱辐射强度为

$$I_0(\lambda) = \alpha_0 \cdot I_s(\lambda) + \beta_0 \cdot R(\lambda) \cdot I_s(\lambda), \quad (1)$$

式中 $I_0(\lambda)$ 为传感器接收到的光谱辐射强度, $I_s(\lambda)$ 为光线 $A \rightarrow B$ 的光谱辐射强度, α_0 为光线 $A \rightarrow B$ 在材料表面发生非朗伯反射时,光线 $B \rightarrow D$ 中所包括的入射光线光谱信息系数; $R(\lambda)$ 为材料表面光谱反射率, β_0 为光线 A 在材料表面发生非朗伯反射时,光线 $B \rightarrow D$ 中包括的材料表面光谱信息系数。

而经过被测材料表面的光线没有直接反射至传感器的光线,以光线 $B \rightarrow C$ 为例,在积分球内壁发生了一次反射后入射至被测材料表面,之后入射至传感器;入射至传感器的光辐射量为

$$I_1(\lambda) = \alpha_1 \cdot I'_s(\lambda) + \beta_1 \cdot R(\lambda) \cdot I'_s(\lambda), \quad (2)$$

式中

$$I'_s(\lambda) = \alpha'_0 I_s(\lambda) + \beta'_0 \cdot R(\lambda) \cdot I_s(\lambda). \quad (3)$$

实际情况下,光源发出的光可能会经过若干次反射后再入射至传感器,传感器接收的光辐射量可以表示为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) + I_1(\lambda) + I_2(\lambda) + \dots + I_n(\lambda). \quad (4)$$

由(2)式和(4)式可知,

$$I(\lambda) = K_a \cdot I_s(\lambda) [a_0 + a_1 \cdot R(\lambda) + a_2 \cdot R^2(\lambda) + \dots + a_n \cdot R^n(\lambda)]. \quad (5)$$

从(5)式可知,在积分球内部不设置光阱的情况下,光源发出的光经过对应位置的积分球球壁漫反射,再经过被测物体表面的若干次反射后,入射传感器的光辐射量与该积分球球壁位置的光辐射强度 $I_s(\lambda)$ 和被测材料表面光谱反射率 $R(\lambda)$ 相关。当在积分球内部安装光阱后,积分球球壁位置对被测材料表面的光辐射强度 $I_s(\lambda)$ 与光阱面积成反比。

在不同仪器的设计中,由于光阱的开口尺寸、位置等差异,(5)式中 $I_s(\lambda)$ 和系数也会有差异。光阱尺寸不同的结构,进入传感器的光辐射量差可以表示为

$$\Delta I(\lambda) = K \cdot I_s(\lambda) [k_0 + k_1 \cdot R(\lambda) + k_2 \cdot R^2(\lambda) + \dots + k_n \cdot R^n(\lambda)]. \quad (6)$$

设计 D/8:E 几何条件下的测量结构模型 A 和模型 B,分别如图 4、5 所示,两种模型的区别为光阱处的开口面积不同。其中,模型 A 的开口为直径为 8 mm 的圆孔,模型 B 的开口为直径 12 mm 的圆孔。用这两种不同的结构对样品进行测量。样品分别为: MUNESLL 半光泽明度色卡 37 个样品,

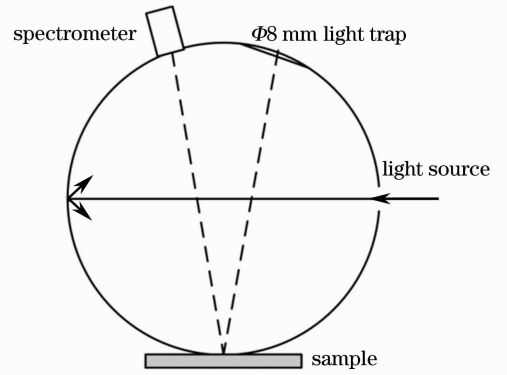


图 4 模型 A 测试结构(光阱直径 8 mm)

Fig. 4 Model A structure (light trap diameter 8 mm)

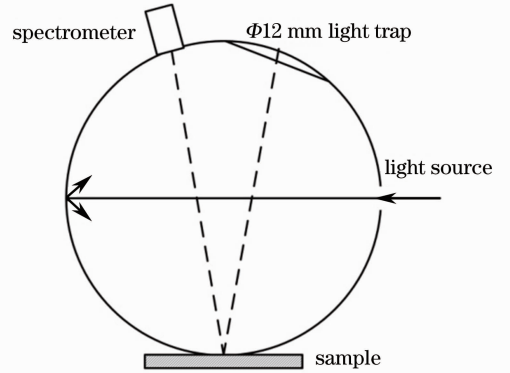


图 5 模型 B 测试结构(光阱直径 12 mm)

Fig. 5 Model B structure (light trap diameter 12 mm)

MUNESLL 全光泽明度色卡 31 个样品,高光泽包装纸 21 个样品。比较两种测量结构的测试数据之间的相关性。

由图 6 和图 7 可知,在分别测试半光泽或全光泽明度卡时,在 600 nm 处两种测量结构测试数据呈现较好的线性相关。但是由图 8 可知,综合半光泽和全光泽明度卡测试数据后,在样品光泽不同的情况下,两种结构测试数据的线性相关程度变差。当添加光泽度更高的样品后,两种结构的测试数据的线性相关程度进一步变差。在颜色测量中,希望测试数据只和材料表面的光谱反射率相关,当表面光泽有变化时,两种测量结构的测试数据仍然有较好的线性相关性,消除因为仪器的不同测量结构而对测量数据引入的光泽影响。

3 修正模型的设计

为了使不同测量结构的数据有良好的线性相关性,引入光泽数据对测试数据进行修正。因此,在对材料表面进行测试时,需要同时对光泽数据和表面反射率数据进行测量。为实现这一目的,设计测量结构模型 C 对模型 B 的测量结构进行改进,在光阱

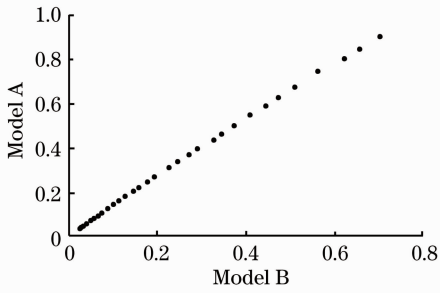


图 6 模型 A 与模型 B 测量半光泽明度卡数据对比(600 nm)

Fig. 6 Model A versus model B with measurement results of semiglossy gray card (600 nm)

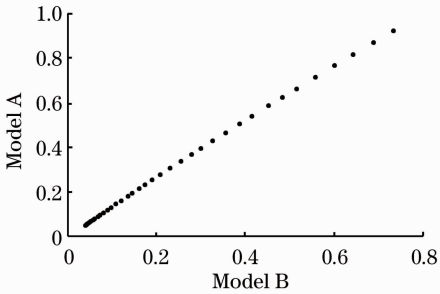


图 7 模型 A 与模型 B 测量全光泽明度卡数据对比(600 nm)

Fig. 7 Model A versus model B with measurement results of full glossy gray card (600 nm)

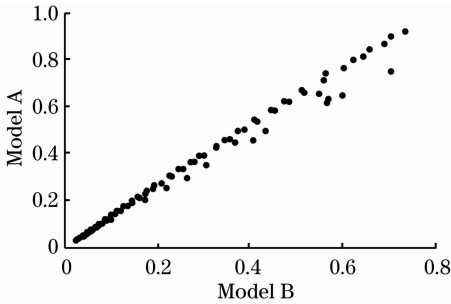


图 8 模型 A 与模型 B 测量所有样品数据对比(600 nm)

Fig. 8 Model A versus model B with measurement results of all samples (600 nm)

处设置了一个拨片,由步进电机控制。拨片上涂覆与积分球内壁相同的白色漫反射涂料。积分球下部开孔,对样品表面进行测量。当步进电机控制拨片堵住积分球开孔时,测量条件是无光阱的 SCI 测量条件,如图 9 所示。当步进电机控制拨片打开时,测量条件是有光阱的 SCE 测量条件,如图 10 所示。每次测量时,分别测量样品在 SCI 和 SCE 条件下的数据。

以 600 nm 处为例,模型 A 和模型 C 下对 31 张半光泽明度卡进行测量,分别测得样品在两种结构

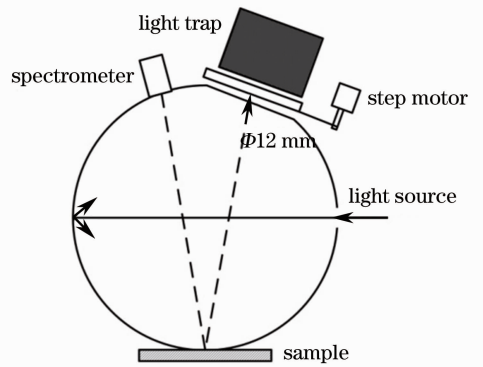


图 9 模型 C 结构下的 SCI 测量模式

Fig. 9 Model C SCI measuring structure

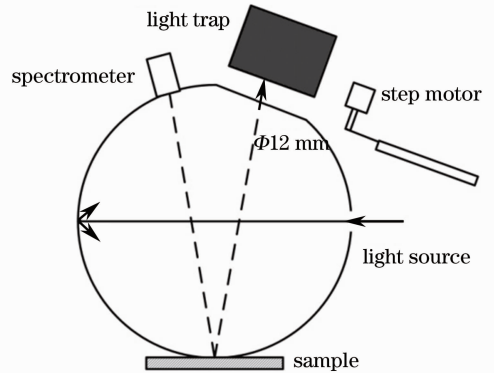


图 10 模型 C 结构下的 SCE 测量模式

Fig. 10 Model C SCE measuring structure

下 SCE 测试条件下的数据($R_1^{A-HG}, R_2^{A-HG}, \dots, R_{31}^{A-HG}$)和($R_1^{C-HG-SCE}, R_2^{C-HG-SCE}, \dots, R_{31}^{C-HG-SCE}$)。由图 6 可知,两组数据有良好的线性关系,对两组数据进行一阶线性拟合,得到

$$R_n^{A-HG} = k \cdot R_n^{C-HG-SCE} + b, \quad (7)$$

式中 R_n^{A-HG} 为模型 A 下测量的第 n 张半光泽明度卡的光谱强度, $R_n^{C-HG-SCE}$ 为模型 C 下测量的第 n 张半光泽明度卡的光谱强度, k 为一阶拟合的比例系数, b 为常数项。由图 8 可知,当用模型 C 测量光泽不同的其他样品时,模型 C 和模型 A 的测量数据并不满足(7)式。对不同光泽的样品,根据样品光泽进行修正,构建矫正值 ΔI ,使得对任意光泽的样品,都能满足

$$R_n^A = k \cdot R_n^C + b + \Delta I, \quad (8)$$

式中 R_n^A 为编号为 n 的被测样品在模型 A 结构下的测量结果, R_n^C 为编号为 n 的被测样品在模型 C 结构下的测量结果。 k, b 分别为半光泽样品的定标系数。 ΔI 为根据被测样品表面光泽计算的矫正值。对模型 A 用 m 种不同光泽的样品进行测量,得到数据 R_m^{A-SCE} 。模型 C 分别在 SCI 和 SCE 条件下对 m 种不同光泽的样品进行测量,得到测量结果 R_m^{C-SCI} 和 R_m^{C-SCE} , 计算样品的光泽值为

$$G_m = R_m^{C-SCE} - R_m^{C-SCE}. \quad (9)$$

其矫正值为

$$\Delta I = R_m^{C-SCE} - \frac{R_m^{A-SCE} - b}{k}. \quad (10)$$

对 G_m 和 ΔI 进行拟合,可以得到 G_m 和 ΔI 的关系为

$$\Delta I = k_2 \cdot G_m + b_2, \quad (11)$$

式中 k_2 为比例系数, b_2 为常数。综合(8)式和(11)式可得由模型 C 测量结果经光泽修正后计算的模型 A 测量结果:

$$R_n^A = k \cdot R_n^C + b + k_2 \cdot G_m + b_2. \quad (12)$$

4 实验验证

为了验证模型的矫正效果,参照柯尼卡美能达公司的 CM-700D SCE 模式的测量数据对模型 C 的测量结果进行矫正。测试样品由 MUNESLL 半光泽明度色卡 31 个, MUNESLL 全光泽明度色卡 37 个, 高光泽包装纸样品 10 个, NCS 高光泽色卡 29 个组成。以 600 nm 处的测试数据为例, 测试 MUNESLL 半光泽明度色卡 31 个样品数据如图 11 所示, 数据的线性相关性较差。两种结构测试 MUNESLL 半光泽明度色卡的测试结果体现了很好的线性相关性, 如图 12 所示。所有样品的光泽值和矫正值之间的关系如图 13 所示。在光泽 G_m 数值大于 0.1 的情况下, G_m 和 k_1 体现出了比较明显的线性关系。而当 G_m 小于 0.1 时, 对应关系不明显, 由于此时 k_1 的值较小, 对于样品光泽较低的情况, 可以不对测试结果进行修正。对模型 C 的所有测试数据进行光泽矫正后, 模型 C 和 CM-700D 的采样结果对应关系如图 14 所示。

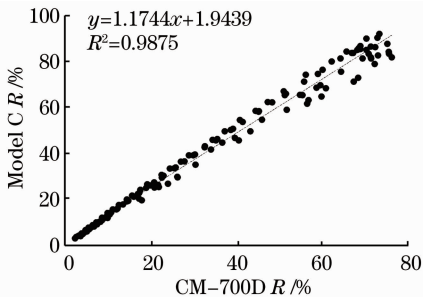


图 11 模型 C 与 CM-700D 测量所有样品对比
Fig. 11 Measurement results of all samples, model C versus CM-700D

上述实验以 600 nm 为例, 为了对整个可见光范围内的数据进行矫正, 可对其他波长处的采样数据做相同算法的矫正, 如图 15 所示为 450、550、

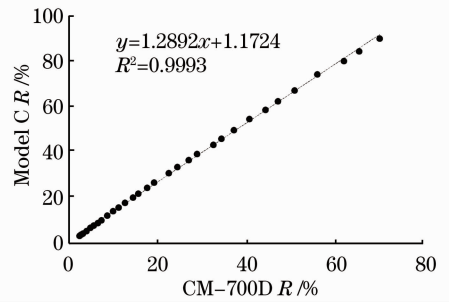


图 12 模型 C 与 CM-700D 测量 MUNESLL 半光泽明度色卡对比

Fig. 12 Measurement results of semi-glossy gray card, model C versus CM-700D

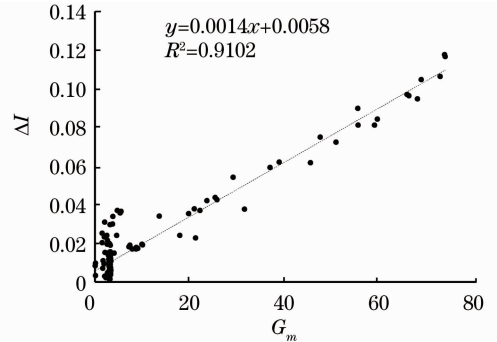


图 13 ΔI 与 G_m 的关系

Fig. 13 Relationship between ΔI and G_m

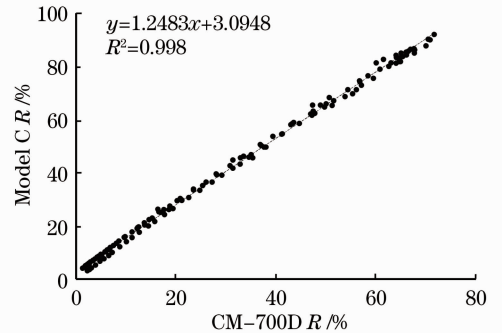


图 14 经光泽矫正后的模型 C 和 CM-700D 的测量结果对比

Fig. 14 Comparison of measurement results between model C calibrated by gloss value versus CM-700D

650 nm 处经光泽矫正的结果。其中图 15(a)、(c)、(e) 分别为 450、550、650 nm 模型 C 光泽矫正前的测试数据与 CM-700D 测试数据的对比, 图 15(b)、(d)、(f) 分别为 450、550、650 nm 模型 C 光泽矫正后的测试数据与 CM-700D 测试数据的对比。CM-700D 的光谱检测范围为 400~700 nm, 光谱分辨率为 10 nm。对模型 C 的测试数据 400~700 nm 每间隔 10 nm 应用该矫正模型, 即可实现对样品光谱反射曲线的矫正, 矫正结果如图 16 所示。图 16(a) 和

(b)分别表示两个高光泽样品,在没有经过光泽矫正时,CM-700D 测试数据和模型 C 测试数据有较大

区别,经过光泽矫正后,两种仪器的测试结果体现出较好的一致性。

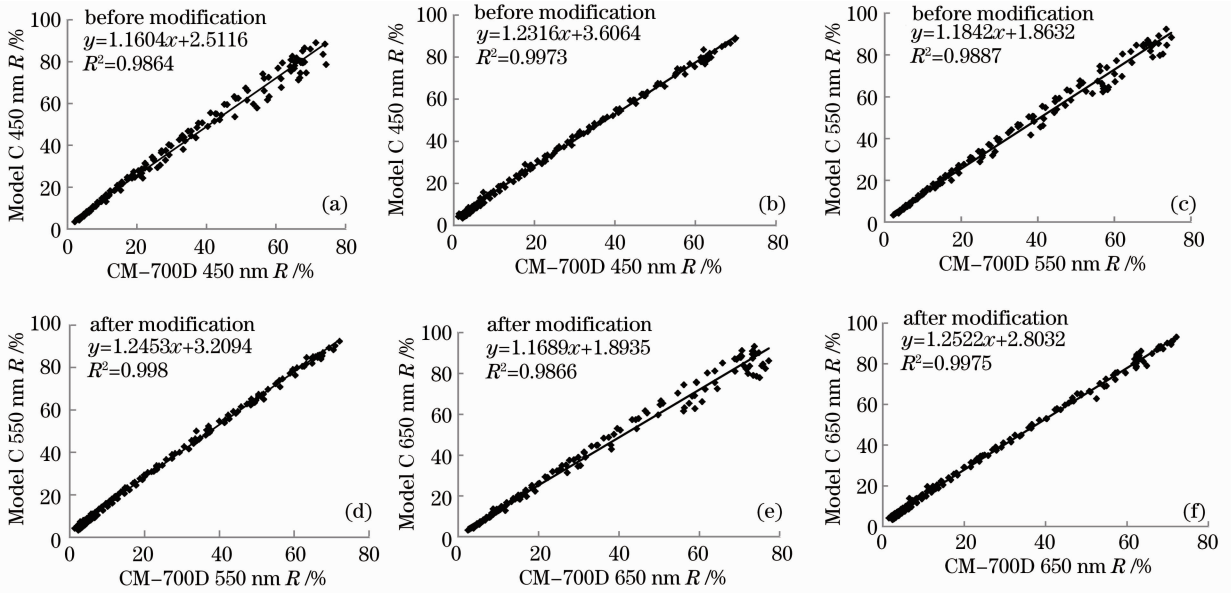


图 15 不同波长处的矫正效果

Fig. 15 Modification results at different wavelengths

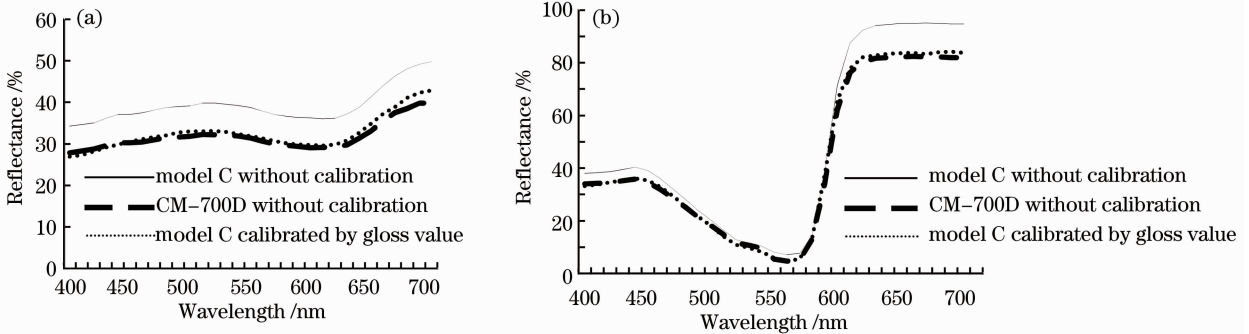


图 16 对两个高光泽样品应用矫正模型对 400~700 nm 进行矫正

Fig. 16 Measurement result of two different high gloss samples calibrated by gloss value (spectral curve 400~700 nm)

5 结 论

通过对大量不同光泽的样品表面进行测试,认为对于 D/8 照明 SCE 几何条件下的分光光谱颜色测量,应考虑由于测量仪器结构不同而导致的在测量不同光泽物体表面时产生的器件差。介绍了一种依据物体表面光泽对器间差进行修正的测试结构和修正算法。实验证明对减小 D/8 照明 SCE 几何条件下颜色测量仪器的器间差有很好的效果。对于相同测量几何条件、不同结构的颜色测量仪器进行量值传递时,可以对不同仪器应用所提方法进行矫正,可以有效减小器间差对测量结果带来的影响。

参 考 文 献

- 1 Y Pan, G Cui, M R Luo. Gloss effect on color difference evaluation [C]. Hangzhou: AIC 2007 Color Science for Industry, 2007. 199-202.
- 2 E N Dalal, K M Natale-Hoffman. The effect of gloss on color [J]. Color Research & Application, 1999, 24(5): 369-376.
- 3 Jian Ma, Haisong Xu, M Ronnier Luo, et al.. Color appearance and visual measurements for color samples with gloss effect [J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(9): 869-872.
- 4 L Simonot, M Elias. Color change due to a varnish layer [J]. Color Research & Application, 2004, 29(3): 196-204.
- 5 L Simonot, M Elias. Color change due to a surface state modification [J]. Color Research & Application, 2003, 28(1): 45-49.
- 6 Huang Min, Wang Lili, Liu Haoxue, et al.. Study on small color difference evaluation using printed samples with different gloss [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1851-1856.

黄敏, 王丽丽, 刘浩学, 等. 不同光泽印刷样品的微小色差评价

- 价研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1851—1856.
- 7 Huang Min, Liu Haoxue, Cui Guihua, *et al.*. Testing uniform color spaces using printed samples with different gloss and color difference magnitudes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0733002.
- 黄敏, 刘浩学, 崔桂华, 等. 用不同光泽和色差等级的彩色印刷样品检验均匀颜色空间 [J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0733002.
- 8 Liang Jing, Liao Ningfang, Song Li, *et al.*. Establishment and evaluation of color appearance datasets about low-glossiness color printing atlas [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0533002.
- 梁静, 廖宁放, 宋莉, 等. 低光泽度印刷色谱色貌数据组的建立与评价[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0533002.
- 9 Huang Min, Wang Lili, Liu Haoxue. Study on the influence of gloss on printed samples medium-small color difference with the psychophysical method of comparison [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3359—3366.
- 黄敏, 王丽丽, 刘浩学. 用比较法研究光泽度对印刷样品的中小色差影响[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3359—3366.
- 10 Zhongning Huang, Haisong Xu, M Ronnier Luo, *et al.*. Assessing total differences for effective samples having variations in color, coarseness, and glint [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(7): 717—720.
- 11 CIE-15:2004. Colorimetry [S]. Vienna: CIE Central Bureau, 2004.
- 12 ASTM-E2214-08. Standard Practice for Specifying and Verifying the Performance of Color Measuring Instruments [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2008.
- 13 Xu Haisong. Color Information and Engineering [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005. 199—201.
- 徐海松. 颜色信息工程 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005. 199—201.
- 14 Weixel Sandra. Measure color and gloss at the same time [J]. *Industrial Paint and Powder*, 2005, 81(8): 27—31.
- 15 W Ji, M R Pointer, R M Luo, *et al.*. Gloss as an aspect of the measurement of appearance [J]. *J Opt Soc Am A*, 2006, 23(1): 22—23.

栏目编辑: 何卓铭