

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170606406

数码相机在染色织物色差测量中的应用

辛春莉, 王子玉, 周建, 潘如如, 高卫东

(生态纺织教育部重点实验室(江南大学), 江苏无锡 214122)

摘要 针对目前颜色及色差测量设备单一、价格昂贵等问题, 对应用数码相机进行织物色差预测的可行性进行研究。首先通过自制图像采集系统对样本图像进行采集; 然后从 RAW 格式图像中提取原始的 RGB 响应信息; 最后建立原始 RGB 响应信息和 CIE $L^* a^* b^*$ 值之间的非线性回归模型实现样本颜色的测量, 并对织物色差进行预测。480 张色卡样本的实验结果表明: 所构建的非线性回归模型参数数量并非越多越好, 其有效度依赖于所选择的特定参数。回归模型应用于纺织品 CNCS 色卡和染色样布的色差测量结果表明: 所得平均色差差值分别为 1.16 和 1.34, 接近于 DigiEye 测色结果, 且能与其保持良好的一致性, 说明此方法在织物色差预测与评价中有较好的可行性和实用价值。

关键词 数码测色; 织物色差; 色差预测; 分光光度计

中图分类号: TS 193 文献标志码: A

Color difference measurement of dyed fabrics using digital camera

XIN Chunli, WANG Ziyu, ZHOU Jian, PAN Ruru, GAO Weidong

(Key Laboratory of Eco-Textiles (Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract Aiming at solving single and expensive problem of current color measurement equipment, the feasibility of the prediction on the difference in fabric color difference measurement using a digital camera were studied. Firstly, the self-designed image acquisition system with a digital camera were used to capture sample images. Secondly, the original RGB response information was extracted from RAW format image. Finally, a non-linear regression model between original RGB response information and CIE $L^* a^* b^*$ was used to measure the sample color. Then, the difference of fabric color difference was predicted. The experiment results of 480 color card samples show that the number of parameters of the nonlinear regression model constructed is not as good as possible, and its validity depends on the specific parameters selected. The model was also applied to CNCS textile color card and dyed fabric, showing that the average color difference errors are 1.16 and 1.34, respectively, which is close to the results of DigiEye with a high consistency. The regression model designed in this paper has good feasibility in the prediction and evaluation on fabric color difference.

Keywords digital color measurement; fabric color difference; color difference prediction; spectrophotometer

在实际生产中, 纺织品颜色及色差控制是纺织品品质保证的重要因素。目前测量颜色及色差的方法有光电积分法、分光光度法和数码测色法^[1]。其中: 光电积分式仪器可测出 2 个色源之间的差别, 但不能精确测量出色源的三刺激值和色品坐标^[2]; 分

光光度法是通过测量光源的光谱功率分布或物体反射光的光谱功率得出各颜色参数, 其结果精度高, 但价格昂贵且对测量样本的尺寸有严格要求; 数码测色法是近些年较为热门的测色方法, 其主要原理是在标准光源下, 采用特定的标定色卡并配合相机参

收稿日期: 2017-06-22 修回日期: 2018-03-20

基金项目: 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2011]137号); 纺织之光应用基础研究项目(J201506); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP51631A)

第一作者简介: 辛春莉(1992—), 女, 硕士生。主要研究方向为染色纱线的图像测量与研究。

通信作者: 高卫东, E-mail: gaowd3@163.com。

数校正来实现样品 RGB 信息的测定,经过颜色校正后可得到样品的标准色度数据^[3]。数码测色法典型代表是英国 VeriVide 公司的 DigiEye 图像测色系统,其测色结果更加接近于人眼视觉,且可测量表面不平整以及不规整或粗糙的物体的颜色。随着测量精度的提高,目前数码测色法在各行业都得到了广泛应用,如服装、装饰纺织品、鞋类设计制造、木板、金属材料及化妆品等,但由于数码测色法采用电荷耦合原件作为图像采集传感器,其测量色域受到一定限制。

色差是指 2 个颜色在色觉上的差异,包括明度差、彩度差和色相差 3 个方面^[4]。纺织品的生产样颜色和标准样颜色存在一定差异,若同一批产品色差较大,则直接影响企业的经济效益,因此,为实现纺织品颜色及色差的测量和检测,找到一种既实用且价格低廉的方法测量纺织品色差是急需解决的问题。本文通过数码相机在标准光源下采集样本图像,经过对图像原始颜色信息提取及颜色空间转换,实现对织物色差快速、客观的测量。

1 实验装置

本文实验所涉及的仪器和材料包括: Datacolor 650 型分光光度计(Datacolor 公司),自制图像采集装置, DigiEye 测色系统,潘通(Pantone)标准色卡,纺织品 CNCS 色卡染色样布。

光源和几何照明条件是影响颜色测量结果的重要因素之一。数码相机能否在标准的光源环境和几何照明条件下采集图像是实验成功的关键,因此,自行创建的图像采集装置的照明条件和几何条件等要与 DigiEye 测色系统保持一致。本文自制装置系统可提供 d/8 几何条件以及 2° 和 10° 视场角。d/8 几何条件是指反射光束轴线与试样中心法线成 8°,在接收光束轴线 5° 内的所有方向上,采样孔径反射的辐射是均匀的^[5]。其装置示意图如图 1 所示。国际照明委员会(CIE)推荐的常用标准照明体有 A、B、C、D65、D50、D55、D75 等^[6]。严格的光照控制将显著影响样本间的色差辨别^[7],本文实验选用最常用的人工日光 D65 作为照明光源,几何条件为 d/8, 10° 视场角下进行观察。

2 图像颜色提取与转换

2.1 原始 RGB 信号提取

通常数码相机可获得多种格式的数字图像,如最为常见的 JPEG 格式,但该格式是一种有损压缩

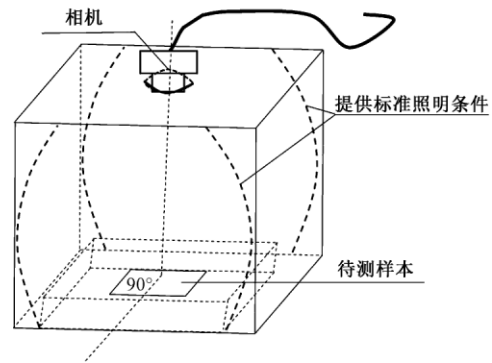


图 1 图像采集系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of image acquisition system

格式,不能直接应用其提取图像的颜色信息。而对于数码相机而言,通常都支持 RAW 格式的输出(RAW 格式是一种文件格式,不是图像格式),该格式文件是最原始且未被处理的数据。相比 JPEG, RAW 文件记录了更多的场景信息,保留了更宽广的色域以及动态范围,也留下了更为自由的后期处理空间^[8],因此,本文选用 RAW 文件进行图像采集,并在其上提取原始传感器三通道的响应信息(以下简称原始 RGB 信号)。

数码相机图像传感器(CMOS 或 CCD)所能采集到的原始 RGB 信号由其表面的特定滤光片(也称拜耳滤镜)决定。滤镜一般 4 个为 1 组,从左至右、从上至下的顺序一般有 RGGB、GBRG 和 GRBG 3 种。每个滤镜只能透过对应波长的光信号,剩余的 2 种颜色要经过差值计算得到,差值计算也称领域取平均法。滤镜下方对应的像素点的 r 、 g 、 b 响应信息就是此时计算得到的颜色信息,这个过程称为色彩插值或去马赛克。

首先实验采用标准白板拍照计算增益参数进行白平衡调校,然后在此基础上,根据所用数码相机拜耳滤镜的排列顺序,直接在其经过白平衡调校的 RAW 格式文件上提取红、绿、蓝 3 个通道的响应信息的平均值,作为原始 RGB 信号输出,用变量 r 、 g 、 b 表示。

2.2 颜色空间转换

通过数码相机输出的 R 、 G 、 B 值属于设备依赖,与 CIE 标准三刺激值响应并不完全对应,因此,不能直接转换到 CIE $L^* a^* b^*$ 空间进行色差计算。以往的数码相机颜色信号到 CIE 颜色的转换是 R 、 G 、 B 值到 X 、 Y 、 Z ^[9],之后还需再转换到 CIE $L^* a^* b^*$,过程繁琐,且结果不是非常理想,因此,本文采用最小二乘法将提取的原始 RGB 信号直接转换到 CIE $L^* a^* b^*$ 颜色空间,并通过转化计算色差,再得到色差值。其主要步骤包括以下几个方面。

步骤 1: 在 CIE 标准光源 D65 照明下, 利用 Datacolor 获得对应 Pantone 色卡的 CIE $L^* a^* b^*$ 空间下的亮度值 L 和色度值 a, b , 记为矩阵 $P_i = [L, a, b]^T$, 其中 $i=1, \dots, N$ 表示第 i 个色卡, 作为构建回归模型的标准颜色值。

步骤 2: 应用图 1 装置采集样本的 RAW 格式图像, 并提取样本的原始 RGB 信号, 记为矩阵 $C_i (i=1, \dots, N)$ 。考虑到颜色转换的非线性关系, 将所提取的原始传感器响应信息进行非线性展开, 展开方式包括以下 7 种模型:

- 1) $C_i = [r \ g \ b \ rg \ rb \ gb]^T$
- 2) $C_i = [r \ g \ b \ rg \ rb \ gb \ 1]^T$
- 3) $C_i = [r \ g \ b \ rg \ rb \ gb \ rgb \ 1]^T$
- 4) $C_i = [r \ g \ b \ rg \ rb \ gb \ r^2 \ g^2 \ b^2]^T$
- 5) $C_i = [r \ g \ b \ rg \ rb \ gb \ r^2 \ g^2 \ b^2 \ 1]^T$
- 6) $C_i = [r \ g \ b \ rg \ rb \ gb \ r^2 \ g^2 \ b^2 \ rgb \ 1]^T$
- 7) $C_i = [r \ g \ b \ rg \ rb \ gb \ r^2 \ g^2 \ b^2 \ rgb \ (rg)^2 \ (rb)^2 \ (gb)^2 \ 1]^T$

步骤 3: 将提取的原始 RGB 信号转换到标准 CIE $L^* a^* b^*$ 颜色空间的非线性关系表示为

$$P_i = M \cdot C_i \quad (1)$$

式中: C_i 为 3 个传感器通道响应构成的向量矩阵; P_i 为 CIE $L^* a^* b^*$ 空间下的 3 个向量矩阵; M 是待求解的转换矩阵, 其最小二乘解为

$$M = P_i \cdot C_i^T (C_i \cdot C_i^T)^{-1}$$

式中: T 表示矩阵的转置, “-1”表示矩阵的逆^[10]。

2.3 色差公式

目前最常用且发展比较成熟的色差公式是基于 CIE $L^* a^* b^*$ 均匀颜色空间的 CIE1976 $L^* a^* b^*$ 色差公式、CMC (2:1) 色差公式、CIE94 色差公式以及 CIEDE2000 色差公式。纺织品颜色控制及评价中, CIEDE2000 色差公式比 CMC 或 CIE1976 $L^* a^* b^*$ 更适合^[1], 因此, 本文实验采用 CIEDE2000 色差公式, 其色差 ΔE_{00} 计算式为

$$\Delta E_{00} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{K_1 S_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{K_c S_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{K_h S_h}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{K_c S_c}\right) \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{K_h S_h}\right)}$$

式中: $R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C$, 为旋转函数; $\Delta\theta = 30 \exp\left[-\left(\frac{\Delta h_{ab}^* - 275}{25}\right)^2\right]$, 为旋转角; $R_C =$

$$2 \sqrt{\frac{\Delta C_{ab}^*}{K_c S_c}}^7, \text{ 为旋转幅度; } \Delta L^*、\Delta C_{ab}^*、\Delta H_{ab}^* \text{ 分别为}$$

明度差、饱和度差和色调差; $K_1、K_c、K_h$ 分别为明度、饱和度和色调的权重; $S_1、S_c、S_h$ 分别对应明度、饱和度和色调的权重函数; $\overline{\Delta C_{ab}^*}^7$ 为 2 个颜色 ΔC_{ab}^* 的算

术平均值^[11], $\overline{\Delta h_{ab}^*}$ 为 2 个颜色心里色相角的算术平均值。

200 个训练样本和 280 个测试样本的实验用 Pantone 标准色卡的色品图见图 2, 图中横纵坐标分别代表色品图中色度坐标的 $x、y$ 值。

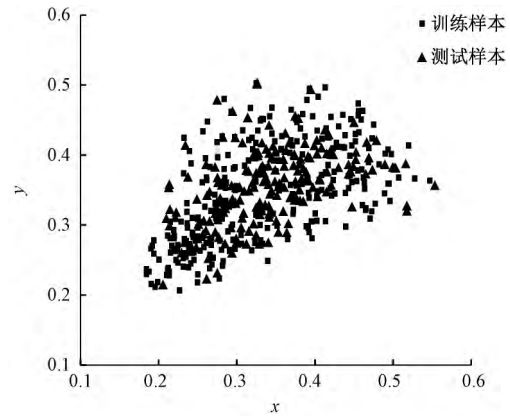


图 2 Pantone 标准色卡的色品图

Fig. 2 Color chart of Pantone standard color card

由图 2 可知, 本实验选用的训练和测试样本颜色分布均匀, 颜色约涵盖了标准色品图 Adobe RGB 空间的 2/3, 保证了得到的实验结果具有代表性和可靠性。

3 实验结果与分析

为得到准确、可靠的色差测量结果, 分别用不同尺寸的色块图像、不同的回归模型及不同模型训练样本数量对色差结果的影响进行分析。

3.1 色块尺寸

为分析同一镜头下, 不同尺寸色块对测量结果的影响, 选定大小分别为 100 像素 × 100 像素、200 像素 × 200 像素和 300 像素 × 300 像素的色块进行实验, 选取 32 张 Pantone 标准色卡作为测试样本, 比较每张 3 个不同色块图像生成的原始 RGB 信号的变化情况, 观察其变异系数, 结果如表 1 所示。

表 1 不同色块尺寸测量结果

Tab. 1 Results for different color block size

色块尺寸/ 像素	原始 RGB 信号 CV 值/%		
	r	g	b
100 × 100	0.18	0.12	0.19
200 × 200	0.16	0.13	0.16
300 × 300	0.16	0.10	0.19
平均值	0.17	0.12	0.18

表 1 表明: 不同尺寸的色块生成的原始 RGB 信号变异系数 (CV) 平均值分别为: 0.17 (r)、0.12 (g) 和 0.18 (b), 32 张 Pantone 色卡变异系数均远小于

1,说明所测不同尺寸的色块对所提取的原始 RGB 信号无影响,每次提取的原始 RGB 信号具有稳定性。为减少实验运算量,以下实验均选用 100 像素×100 像素的色块尺寸进行颜色提取。

3.2 训练样本数量和回归模型

为研究训练样本数量和不同回归模型对色差差值测量结果的影响,统一选取图像色块尺寸为 100 像素×100 像素。色卡样本总数量 480 张,其中 280 张用于测试,剩余 200 张用于训练。回归训练样本数量分别设为 60、80、100、120、140 对。

首先采用不同模型和不同样本数量,经过训练得到响应的回归模型,然后利用此模型计算剩余色卡样本的 CIE $L^* a^* b^*$ 颜色值,并计算样本之间的色差,最后将所计算的色差与 Datacolor 650 所测量色差做对比,计算二者差值的绝对值。不同训练样本数量和不同回归模型的色差差值测量结果如表 2 所示。

色差差值越小,表示本文方法测得的色差越准确,即越接近 Datacolor 的结果。从表 2 可以看出:训练样本数量相同时,模型 1 较其他模型的平均色差差值均大,说明常数项在模型参数中的重要性;随着训练样本数量增多,不同模型平均色差差值呈减小趋势,但是对于模型 6 和 7,样本数量从 100 对增加到 140 对,二者的平均色差差值先减小后略有增加,说明训练样本数量增加到一定程度,再增加其数量对色差测量精度的提高帮助不大;样本数量为 120 对时,模型 3 较模型 2 的平均色差差值大,分别为 0.89 和 0.83,而模型 6 较模型 5 的平均色差小,分别为 0.53 和 0.63,说明 rgb 这个参数项对模型色差精度影响不大;当样本数量同为 140 对时,将模型 5 和模型 2 进行对比,前者色差结果更好,说明 r^2 、 g^2 、 b^2 这 3 个平方参数项对色差差值结果的影响较大;当样本数量相同时,参数较多的模型较参数较少的模型的平均色差差值小,中位数也较小,说明模型构建中参数数量越多,对转化后色差差值减小的帮助越大,但样本数量为 140 对时,模型 6 和 7 的平均色差差值分别为 0.55 和 0.58,平均色差差值反而稍有增加;因此,所用回归模型参数数量并非决定性因素,其有效度依赖于所选择的特定参数^[9]。

采用本文实验所提出的所有模型计算所得的色差差值的标准差都较小,最大为 1.26,最小为 0.14,平均标准差为 0.72,数据变动小,说明本文方法得到的色差稳定性较好。故综合得出优选模型为模型 5 和 6,且对应的最优训练样本数量为 120 对。

表 2 不同训练样本数量和不同映射模型的色差测量结果
Tab.2 Results of color difference with different training samples and different models

模型编号	训练样本数量/对	平均色差差值	最大色差差值	最小色差差值	标准差	色差差值中位数
1	60	2.94	4.88	0.08	1.18	2.56
	80	2.73	4.09	0.05	1.02	2.04
	100	2.04	3.79	0.03	0.99	1.69
	120	1.97	3.56	0.02	0.85	1.53
	140	1.90	3.60	0.03	0.83	1.54
2	60	1.29	4.59	0.06	1.26	0.68
	80	1.09	3.48	0.03	0.77	0.65
	100	0.93	3.01	0.01	0.72	0.64
	120	0.83	3.02	0.01	0.70	0.67
	140	0.80	3.00	0.01	0.67	0.63
3	60	1.13	4.19	0.04	1.01	0.73
	80	1.06	4.33	0.03	0.85	0.69
	100	0.90	3.98	0.00	0.79	0.67
	120	0.89	4.02	0.02	0.76	0.68
	140	0.88	3.97	0.01	0.76	0.66
4	60	1.09	3.14	0.03	0.63	0.57
	80	0.87	2.87	0.02	0.58	0.54
	100	0.68	2.84	0.00	0.54	0.54
	120	0.64	2.80	0.00	0.53	0.49
	140	0.64	2.74	0.01	0.52	0.49
5	60	0.87	3.08	0.00	0.63	0.50
	80	0.64	2.02	0.01	0.50	0.49
	100	0.63	2.28	0.00	0.49	0.46
	120	0.63	1.98	0.01	0.46	0.45
	140	0.60	1.84	0.01	0.44	0.43
6	60	0.74	3.53	0.02	0.63	0.48
	80	0.59	2.80	0.00	0.51	0.41
	100	0.56	2.61	0.00	0.47	0.40
	120	0.53	2.31	0.01	0.44	0.39
	140	0.55	2.25	0.02	0.45	0.39
7	60	0.79	3.52	0.01	0.68	0.59
	80	0.62	2.58	0.02	0.60	0.52
	100	0.58	2.31	0.01	0.50	0.45
	120	0.56	2.30	0.03	0.52	0.46
	140	0.58	2.19	0.01	0.48	0.43

3.3 在纺织品色卡及染色样布中的应用

为验证上述实验方法所得的色差测量模型的有效性,将其应用于中国纺织行业的专业棉布 CNCS 色卡及染色样布的色差测量。

实验以上述 Pantone 标准色卡的 120 对训练样本和优选模型 5、6 为基础,色块尺寸为 100 像素×100 像素,测试了 100 对 CNCS 色卡和 30 对染色样布,测试结果如表 3、4 所示,表中包含 DigiEye 测色系统与对应的标准色差的对比结果。图 3 示出所测 CNCS 色卡和染色样布的色品图,图中横纵坐标分别代表色品图中色度坐标的 x 、 y 值。

由表 3 可知,模型 5、6 的平均色差差值分别为 1.16 和 1.47,与上述色卡测量结果相比,数值略有

表 3 CNCS 色卡色差测量结果

Tab. 3 Results of color difference for CNCS color card

模型编号	平均色差差值	最大色差差值	最小色差差值	标准差	色差差值中位数
5	1.16	3.54	0.08	0.95	0.94
6	1.47	3.82	0.10	1.05	1.23
DigiEye 图像测色系统	0.86	1.89	0.01	0.51	0.62

表 4 染色样布色差测量结果

Tab. 4 Results of color difference for dyed fabric

模型编号	平均色差差值	最大色差差值	最小色差差值	标准差	色差差值中位数
5	1.34	3.69	0.06	1.26	0.89
6	1.44	3.80	0.03	1.30	0.93
DigiEye 图像测色系统	1.11	2.25	0.07	0.79	0.59

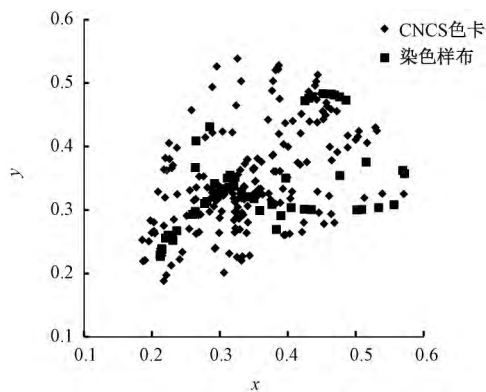


图 3 CNCS 色卡和染色样布的色品图

Fig. 3 Color chart of CNCS color card and dyed fabric

增加。其可能原因为: CNCS 色卡属于纺织品织物, 表面没有 Pantone 标准色卡光滑, 提取的图像像素会略有差异。与 DigiEye 相比: 模型 5、6 的平均色差差值略大, 但其标准差分别为 0.95 和 1.05, 色差波动较小。模型 5 平均色差差值较模型 6 小 0.31, 说明模型 5 较模型 6 更加适用于纺织品 CNCS 色卡色差测量。表 4 表明, 模型 5 和 6 应用于纺织染色样布时, 所得的平均色差差值分别为 1.34 和 1.44, 很接近于 DigiEye 测量结果, 且模型 5 较优于模型 6。此外, 模型 5 的标准差为 1.26, 其波动小、稳定性较好, 所得色差结果能与 DigiEye 测量结果保持良好的一致性。

4 结 论

1) 本文以分光光度计为标准测量仪, Pantone 标准色卡为训练样本, 采集色卡的 RAW 图像, 提取图像的原始 RGB 信号, 建立其与 CIE $L^* a^* b^*$ 值之间的非线性回归模型, 完成任意 2 个待测样本的色差预测, 为快速、成本低的色差的评价装置提供理论

基础。

2) 将回归模型 $[r \ g \ b \ rg \ rb \ gb \ r^2 \ g^2 \ b^2]^T$ 分别应用于纺织品 CNCS 色卡和染色织物样本的色差测量, 所得平均色差差值分别为 1.16 和 1.34, 略高于 DigiEye 测色系统的结果 (0.86 和 1.11), 但总体上与 DigiEye 测量结果保持良好的一致性, 尤其是对染色织物。

本文选用了有代表性的 Pantone 标准色卡颜色作为模型训练样本, 不同于 DigiEye 测色系统专用的标定色卡, 导致测量精度受限, 后续的研究方向需进一步改进回归模型和优化训练样本颜色组合。

FZXB

参考文献:

- [1] 金肖克, 张声诚, 李启正, 等. 色差公式的发展及其在织物颜色评价中的应用 [J]. 丝绸, 2013, 50(5): 33-38.
JIN Xiaoke, ZHANG Shengcheng, LI Qizheng, et al. Development of color difference formula and its application in fabric color evaluation [J]. Journal of Silk, 2013, 50(5): 33-38.
- [2] 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(3): 60-63.
LI Hongguang, WU Baoning, SHI Huanfang, et al. The comparison of multicolor measurement methods [J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(3): 60-63.
- [3] 肖金克, 李启正, 张声诚. 织物颜色测量方法的分类与发展 [J]. 纺织导报, 2012(9): 103-105.
XIAO Jinke, LI Qizheng, ZHANG Shengcheng. Classification and development of the fabric color measurement methods [J]. China Textile Leader, 2012(9): 103-105.
- [4] 陈东辉, 马仁汀. 色差判定的研究 [J]. 纺织学报, 1998, 19(3): 14-17.
CHEN Donghui, MA Renting. A study on color difference judgment [J]. Journal of Textile Research, 1998, 19(3): 14-17.
- [5] 张亚雯. 基于 DigiEye 数码测色系统的纺织品色牢度快速评级方法的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2016: 1-30.
ZHANG Yawen. Study on fast coloring method of textile color fastness based on DigiEye digital colorimetric system [D]. Shanghai: Donghua University, 2016: 1-30.
- [6] 宋慧慧. 多光谱颜色测量技术在印刷生产中的应用与发展 [J]. 印刷技术, 2013(20): 78-79.
SONG Huihui. Application and development of multispectral color measurement technology in printing production [J]. Printing Technology, 2013(20): 78-79.
- [7] 张建新, 常卫, 俞利国. 基于球面谐波理论的染色品

