

基于色块和服装色的颜色协调模型评测和优化

史春洁 黄 敏 李泽阳 刘 瑜 王慧哲

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

摘要 为了对现有颜色协调模型进行评测,选择了 CIELAB 颜色空间中均匀分布的 24 个颜色,分别以色块和服装为应用场景,组织观察者进行了颜色协调度评判实验。通过心理物理实验采集到了不同观察者的颜色协调度评判结果,分别对颜色协调原则和现有的颜色协调模型进行验证,发现以色块和服装为应用场景的颜色协调度呈现弱相关性($R^2 < 0.126$),现有颜色协调模型的预测结果与实验数据呈现弱相关性($R^2 < 0.5$)。对 Ou 模型(基于匀色色块建立)和 Luo&Ou 模型(基于服装色建立)进行优化后,预测不同场景的颜色协调度性能有较大地改善,研究成果可为颜色协调度的预测提供一种研究方法和参考依据。

关键词 视觉光学; 视觉色彩; 颜色协调度; 颜色协调模型; 应用场景

中图分类号 O432 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0533001

Evaluation and Optimization of Color Harmony Model with Context of Patch and Garment

Shi Chunjie Huang Min Li Zeyang Liu Yu Wang Huizhe

School of Printing and Packing Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China

Abstract In order to evaluate the existing color harmony models, 24 color centers uniformly distributed on the CIELAB color space are selected and the observers with normal color vision are organized to assess the color harmony of patches and garments scene. The results of color harmony obtained from the psychophysical experiment are used to test the existing color harmony principles and models. The results show that color harmony scores obtained from the patches and garments have a weak correlation coefficient ($R^2 < 0.126$). Predicting results by existing color harmony models are unsatisfactory with experimental data ($R^2 < 0.5$). Therefore a new patches color harmony model based on Ou model and a new garments color harmony model based on Luo&Ou model are optimized, and the performances are considerably improved in different application scenarios. The experimental results can provide a study method and reference for the prediction of color harmony.

Key words visual optics; color and vision; color harmony; color harmony model; application scenarios

OCIS codes 330.1720; 330.1730; 330.4060

1 引 言

颜色协调度的研究是颜色科学技术的基础研究。早在 19 世纪,Goethe^[1]和 Chevreul^[2]对颜色协调理论进行了研究,随后,大量研究者(如 Ostwald^[3], Munsell^[4], Moon 和 Spencer^[5-7]等)延续了该研究。直到 20 世纪后期,Judd 等^[8]提出的颜色协调概念(当相邻区域的两个或两个以上的颜色产生令人愉悦的效果,则称它们产生颜色协调)被广泛认可。然而,现有颜色搭配、方案设计等不同场合的一些实际应用需求对颜色协调度的评测提出了更高的要求。Ou 等^[9-11]分别结合不同应用场景开展了相关的研究,建立了相应的颜色协调度模型。

收稿日期: 2015-11-24; **收到修改稿日期:** 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(61308081)、北京市科技新星计划(Z151100000315076)、北京市教委青年拔尖计划(CIT&TCD201404127)、北京印刷学院青年英才项目(Byyc201316-005)

作者简介: 史春洁(1992-),女,硕士研究生,主要从事颜色匹配函数计算方面的研究。E-mail: 842980902@qq.com

导师简介: 黄 敏(1979-),女,博士,教授,主要从事均匀颜色空间及跨媒体颜色再现技术方面的研究。

E-mail: huangmin@bigc.edu.cn(通信联系人)

2006年, Ou等^[9]采用心理物理实验方法, 以色块为载体, 基于CIELAB颜色空间对颜色协调理论进行了计算, 量化颜色协调度与两色块组合色对颜色属性间的关系, 建立了关于两色块组合色对的颜色协调度模型, 简称Ou模型。2010年, Szabó等^[10]组织观察者分别对两色块组合色对和三色块组合色对的颜色协调度进行评判, 基于CIECAM02颜色空间对评判结果进行分析, 建立了Szabó模型。2011年, Luo等^[11]结合应用场景, 以90张时尚设计图为实验素材, 通过对实验数据进行分析, 建立了关于时装设计的颜色协调模型, 简称Luo&Ou模型。

但是在实际使用和模型评测的过程中发现, 不同的模型表现各异, 模型不具有的普适性^[12-13]。为了进一步研究颜色协调度模型的表现, 本文设计的实验选取了24色组成300对颜色对, 分别应用于色块和服装, 组织观察者进行颜色协调度评判, 检验现有模型, 并结合实验数据对现有模型进行优化。

2 实验设计

2.1 颜色的选择

为与Ou^[12]的颜色色块对组合协调度的实验结果进行比较, 实验沿用了其中选用的20个颜色; 另一方面为使选择的实验色包含Berlin等^[14]的11个基本色: 黑, 白, 灰, 红, 橙, 黄, 绿, 蓝, 紫, 粉和棕色, 又从中选择了Ou所用20色中不包含的4个基本色。共选择了24色作为本次实验的颜色。课题组前期组织不同年龄观察者进行了服装色的协调度评估实验^[13], 本次以色块为应用场景的实验所用24色, 与以服装为应用场景实验所用24色的平均、最大和最小CIELAB色差分别为0.38, 0.60和0.08, 可基本认为两次实验选用的是相同的颜色。图1为24个颜色在CIELAB颜色空间中的 a^*b^* 和 L^*C^* 散点分布图(以色块为应用场景)。

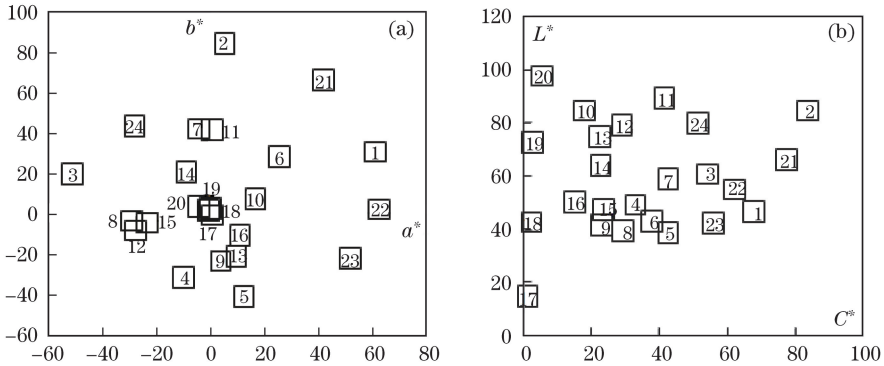


图1 颜色中心在(a) a^*b^* 和(b) L^*C^* 平面上的分布

Fig. 1 Distribution of color centers in (a) a^*b^* and (b) L^*C^* plane

2.2 颜色组合和显示

将选择的24色中第1个颜色应用于左边色块, 第1, 2, ..., 24个颜色依次用于右边色块, 将第2个颜色用于左边色块, 第2, 3, ..., 24个颜色依次用于右边色块, 以此类推, (与已开展的服装色组合相同)。共组合得到300(即 $24 \times 23 \div 2 + 24$ 个同色对)对颜色对, 分别用于以色块和服装为应用场景的颜色协调度评判实验中。

将300对色对随机分为3组, 每组由100对色对组成, 呈现顺序随机, 以服装为应用场景的实验中, 考虑到时装设计的对象多为年轻女性模特, 实验应用场景选用青年女性模特, 如图2(b)所示。每名观察者在3次不同的时间段内完成实验, 避免长期观察出现视觉疲劳。

实验界面上, 色对并列摆放, 但为了使色对在显示屏上易于观察, 色对中间加入一条细灰线(RGB值为190, 190, 190), 单个色块大小为 $8.5 \text{ cm} \times 8.5 \text{ cm}$, 观察者的观察距离为70~80 cm。

2.3 观察者

色块协调度实验的观察者为在校印刷和艺术专业大学生, 年龄在20~24岁; 为使两组实验数据具有可比性, 将服装色协调度实验中观察者的年龄划分为3段: 20~32岁(与色块协调度观察者年龄相近), 33~

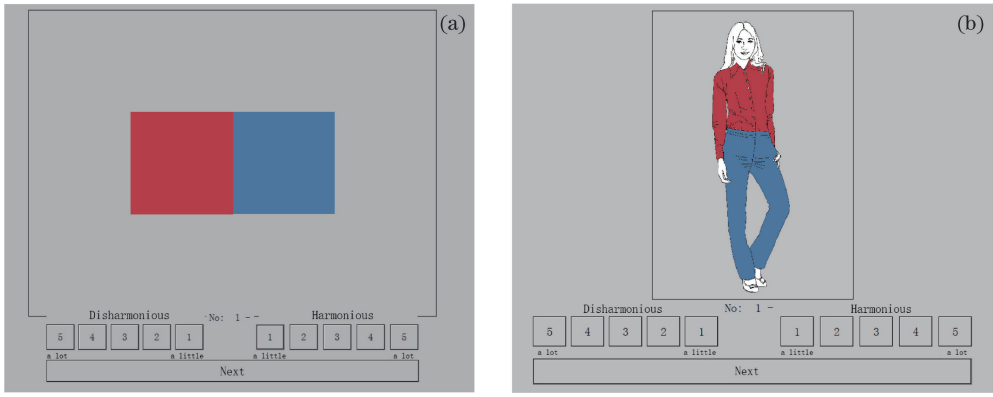


图 2 实验界面

Fig. 2 Experimental interface

45 岁, 46~79 岁。实验观察者的信息统计如表 1 所示, 观察者全部色觉正常, 70% 以上具有颜色科学基本知识。

表 1 观察者信息

Table 1 Information of observers

Application scenario	Age	Mean age	Number of observers	Total observation
Patch	20~24	21.7	43	65
Garment ^[13]	youth(20~32)	23.6	17	21
	middle-age(33~45)	36.4	14	21
	senior(46~79)	59.7	28	40

2.4 实验过程

实验在暗室中进行, 显示器是唯一的发光源。实验前显示器需预热 2 h, 使其达到稳定状态。观察者打开实验界面后需观察中性灰色 1 min 左右以完成亮适应, 随后对显示在屏幕中心的色对进行颜色协调度评判。界面下方为打分等级, 变化范围从 -5 到 5, 认为协调的打正分, 分别是 1~5 分, 5 分为最协调。认为不协调的打负分, 分别是 -1~-5, -5 分为最不协调。选择后点击下一个, 直到一组结束为止。点击下一个时, 中间会持续 2 s 的灰色, 以减小先前颜色观察导致的生理影响。完成一组即 100 对色对后需休息, 每一组评判大约需 20 min。

实验中, 部分观察者进行了 2~3 次的重复性实验以检验实验结果的稳定性, 实验共采集到 19500 个评判结果。

3 实验数据分析

3.1 观察者的重复性和准确性

在不同的目视评价实验中, 观察者精度(重复性和准确性)常见的表示方法有误判率(WD)^[15]、 S_{TRESS} 因子^[16]、均方根差(u' 和 v')^[17]、均方根误差(R_{MSE})^[9]等。此处将单个观察者对色块颜色协调度评判得分与观察者评分的平均值进行比较, 计算均方根误差, 以此来表示观察者的重复性和准确性。计算公式为

$$R_{MSE_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}, \quad (1)$$

式中 x_i 表示第 j 个观察者对第 i 对色对的评分 ($i=1, \dots, 300$), \bar{x} 表示第 i 对色对得分的平均值。对于观察者的重复性, \bar{x} 表示每个参与重复实验观察者对第 i 对色对评分的平均值; 对于观察者的准确性, \bar{x} 表示所有观察者对第 i 个色对评分的平均值。 R_{MSE} 值越小, 表明观察者评分结果与平均值比较的偏差越小。

用 R_{MSE} 表示观察者重复性和准确性。以色块为应用场景的实验中, 观察者重复性的平均值为 1.27, 准确性的平均值为 2.37。以服装为应用场景的实验中, 观察者重复性和准确性的平均值分别为 1.03 和 2.12。

与先前实验^[9-10,12]数据相比较,此次以色块和服装为应用场景的实验中,观察者重复性的平均值较小,而观察者准确性的平均值相差不大。说明此次实验中观察者的数据是比较可靠的。

3.2 色块和服装色实验数据的比较

如表 1 所示按年龄分段观察者(青年、中年和中老年组)的 300 对服装颜色和 300 对色块颜色协调度评判的数据绘制散点图,如图 3 所示。

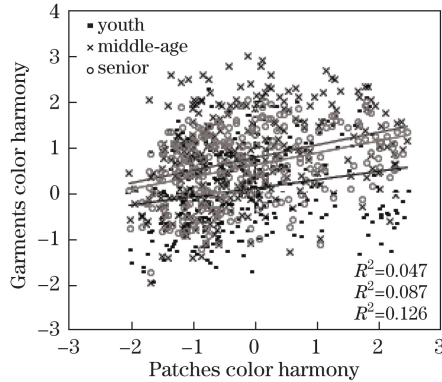


图 3 以色块和服装为应用场景的颜色协调度相关性

Fig. 3 Correlation of color harmony for patches and garments as application scenarios

由图 3 可知,数据分布的离散性较大,相同色对分别以色块和服装为应用场景的颜色协调度呈现弱相关性(R^2 分别取 0.047、0.087 和 0.126),其中,以服装为应用场景中,20~32 岁年龄段观察者的平均年龄(23.6 岁)与以色块为应用场景中观察者平均年龄(21.7 岁)较为接近,但二者颜色协调度相关性仅为 0.05,表明应用场景对颜色协调有较大的影响。

3.3 验证颜色协调原则

用实验所得协调度数据验证现有的颜色协调原则^[9]。为了有效地分析实验数据,对相关理论进行了量化:当色对的色调角差值、明度差值、彩度差值绝对值小于 5 时,即视为等色调、等明度和等彩度;绝对色调角差值为 $170^\circ \sim 180^\circ$ 时,即为互补。实验数据验证颜色协调原则的正确率为

$$D_c = \frac{\sum_i c_i}{N}, \quad (2)$$

式中对某一固定色对,观察者颜色协调度评分大于 0,则取 1,反之取 0, c_i 表示该色对评分的百分比, N 表示色对的对数。 D_c 的取值范围为 0~1, D_c 值为 0 时表示没有观察者认同本项颜色协调原则,为 1 时表示所有观察者都认同本项颜色协调原则。计算结果如表 2 所示(表中加粗字体表示与颜色协调原则符合度最高的情况)。

表 2 用 D_c 值验证颜色协调原则

Table 2 Color harmony principle using D_c values

	Patch	Garment (youth)	Garment (middle-age)	Garment (senior)
Equal lightness	0.53	0.50	0.67	0.64
Equal hue	0.76	0.49	0.72	0.71
Complementary hue	0.49	0.60	0.69	0.60
Equal chroma	0.64	0.51	0.70	0.69
Equal tone	0.80	0.46	0.71	0.69

从表 2 可以看出,对于色块协调度实验结果,除了互补色外,实验结果与颜色协调原则较为一致(D_c 值大于 0.5)。而表 2 中的第 2 列和第 3 列,来自相近年龄段观察者的数据分布表现了一定的差异性,如第 2 列的互补色协调与颜色协调原则符合度最低, D_c 值为 0.49,而应用在服装色上(第 3 列所示)符合度却最高, D_c 值为 0.60。同样,在以色块为应用场景时符合度最高的同阶调, D_c 值为 0.80;在服装色上的符合度却最低, D_c 值为 0.46。说明观察者年龄相同,但颜色应用场景不同,协调度分值也存在较大差异。不同年龄观

察者以服装为应用场景的 3 组实验(表 2 中的 3,4,5 列数据)评判结果也有一定的差异性表现,中年和中老年组观察者的实验结果与颜色协调原则的符合度较好,变化趋势也较为一致。

3.4 色对 CIELAB 色度值与颜色协调度的关系

鉴于比较颜色协调度的差异时,应用场景的影响程度大于年龄的影响。本实验主要研究不同应用场景下的颜色协调度差异性,因此后续的分析中,将服装色的 20~32,33~45 岁观察者的数据合并为 20~45(青年)与 46~79 岁(中老年)观察者数据,色块的协调度数据进行比较。分别计算 300 对色对的明度、彩度和色调角平均值/差值,并分类研究其色度值与颜色协调度的变化关系,如图 4 所示。

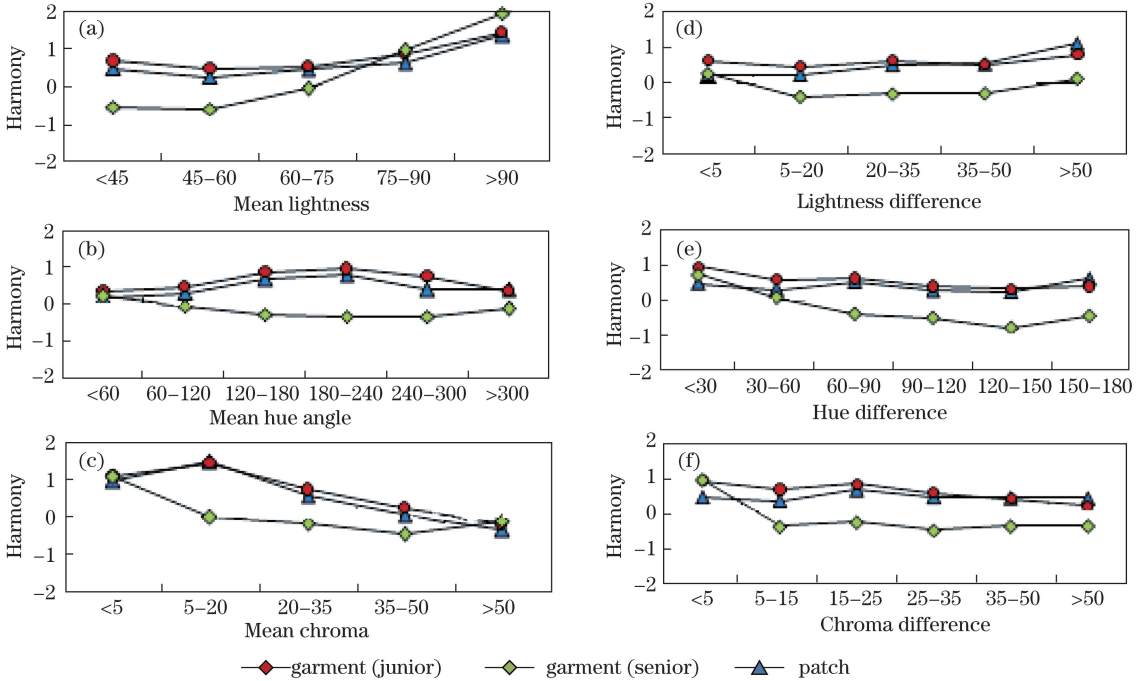


图 4 色对 CIELAB 色度值与平均颜色协调度的关系。(a)~(c)色度平均值;(d)~(f)色度差值

Fig. 4 Relationship between CIELAB values and mean color harmony. (a)~(c) Mean chromatic value; (d)~(f) chromatic difference value

由图 4 可知:1)图 4(a)~(c)中折线变化幅度较大,说明颜色色度值的平均值对协调度的影响高于图 4(d)~(f)中色度值差值的影响。2)以服装为应用场景的两组实验中,颜色协调度评分与色度值变化的趋势较为一致(中老年组略高于青年组,说明中老年观察者的宽容度高于青年组)。3)图 4(a),(c)中平均明度(色块)、彩度变化(色块和服装色)引起的协调度变化较为明显。4)以服装为应用场景的实验中,所有观察者的颜色协调度为正值,而以色块为应用场景的实验中,平均颜色协调度几乎为负值(除色块具有相近色度值,高明度值两种情况以外)。

同时,将相同颜色组成的 24 个色对单独分析,其颜色协调度评分如图 5 所示。

由图 5 可知,以色块为应用场景时,颜色协调度评分大约为 2,普遍认为协调,与颜色协调原则中的同色协调原则较为一致。以服装为应用场景时,青年组和中老年组的评分变化趋势相同(中老年组高于青年组),中老年组的数值均大于 0,即认为同色服装搭配协调。但青年组的评分普遍趋于 0,同时认为高彩度的黄色、橙色服装搭配不协调,彩度较低的蓝色和紫色服装搭配较协调(这与颜色的应用场景相关)。

比较图 4 和图 5 可知,24 色组成的 300 对颜色,无应用场景(匀色色块)的颜色协调度分值低于服装色的协调度分值(图 4)。而 24 色组成的同色色对,无应用场景(匀色色块)的颜色协调度分值明显高于服装色的协调度分值(图 5)。

3.5 验证颜色协调模型

将两种应用场景的实验数据分别代入上述 3 个颜色协调度计算模型,Ou 模型^[9],Szabó 模型^[10],Luo&Ou 模型^[11],检验颜色协调模型的表现。表 3 为模型计算结果与实验评价结果间的线性相关性(用相

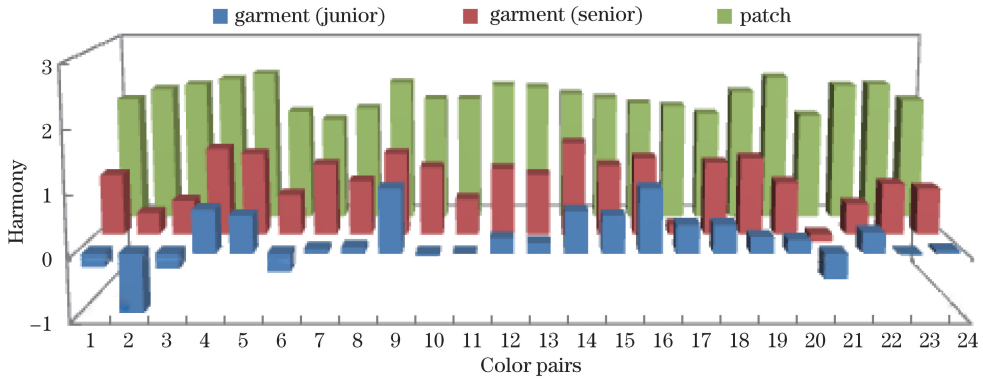


图 5 相同颜色组成的色对在两种应用场景下的颜色协调度评分

Fig. 5 Color harmony grades of the same color in two application scenarios

关系数 R^2 表示)。

表 3 用线性相关系数验证现有颜色协调模型

Table 3 Results of existing color harmony models in terms of linear correlation

Application Scenario	Ou	Szabó	Luo&.Ou
Patch	0.47	0.1	0.03
Garment(Junior)	0.24	0.05	0.11
Garment(Senior)	0.31	0	0.16

由表 3 可知,实验数据代入模型计算得到的相关系数 R^2 都呈现弱相关性(小于 0.5),验证结果并不理想,3 个模型中 Ou 模型表现优于另两个模型。模型预测只对建立模型的原始实验数据适用,对其他数据预测性较差(Ou 模型、Szabó 模型对各自实验数据预测的相关系数分别为 0.71、0.76,而用 Szabó 检验 Ou 数据的结果也仅为 0.30)。说明不同的应用场景、观察者(Szabó 模型中的观察者为匈牙利大学生,而 Ou 模型中的观察者为中国大学生)均对协调度的评价结果有较大影响。

4 新颜色协调模型的建立

针对实验中色块对协调度评估结果和项目组前期开展的服装色实验结果^[13],分别对 Ou 模型(以色块为应用场景建立)和 Luo&.Ou 模型(以服装色为应用场景建立)进行优化,分别建立适用于色块和服装色的颜色协调度计算模型。

4.1 以色块为应用场景的颜色协调模型的建立

由于 Ou 等^[9]实验中所用的色对不包含左右颜色相同的色对,由图 5 的分析也可见,同色构成的色对颜色协调分值都较高,为 2 左右。故分析中不包含颜色相同色对的数据。在不考虑同色色对数据的情况下, Ou 模型预测数据和实验数据的相关性如图 9(original)所示,可以发现相关系数 R^2 由 0.47 提高到 0.50。

Ou 模型主要由 H_L ($H_{L_{sum}}$ 和 $H_{\Delta L}$)、 H_C 和 H_H (H_S 、 E_C 和 E_Y) 构成,其中, H_L 为明度影响, H_C 为彩度影响, H_H 为色调角影响,根据实验数据分别对这些因素进行优化,建立以色块为应用场景的颜色协调模型。

第一步: H_L ($H_{L_{sum}}$ 和 $H_{\Delta L}$)

色对明度和 $L_{sum} = L_1 + L_2$ 、明度差值 $\Delta L = |L_1^* - L_2^*|$ 与实验颜色协调度关系的散点图分别如图 6 和图 7 所示。

根据图 6 中散点图的走势,利用规划求解的方法,对 Ou 模型中公式 $H_{L_{sum}} = 0.28 + 0.54 \times \tanh(-3.88 + 0.029 \times L_{sum})$ 的系数进行修正,修正后的计算公式为: $H_{L_{sum}} = 0.78 + 2.07 \times \tanh(-3.53 + 0.022 \times L_{sum})$ 。模型预测结果和实验数据的相关性 R^2 由 0.50 提高到 0.59。该变化趋势与图 4(a)中折线图的变化趋势较为一致。

同理,对 $H_{\Delta L}$ 公式由 $H_{\Delta L} = 0.14 + 0.15 \times \tanh(-2 + 0.2\Delta L)$ 修正为 $H_{\Delta L} = 0.14 + 0.28 \times \tanh(-10 + 0.2\Delta L)$,如图 7 所示。模型预测数据和实验数据的相关性 R^2 由 0.59 提高到 0.61。

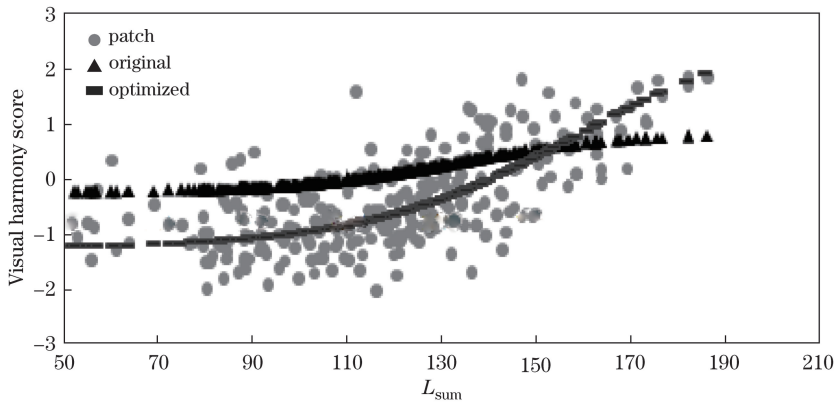


图 6 色对明度和与颜色协调度的关系

Fig. 6 Relationship between color lightness and color harmony

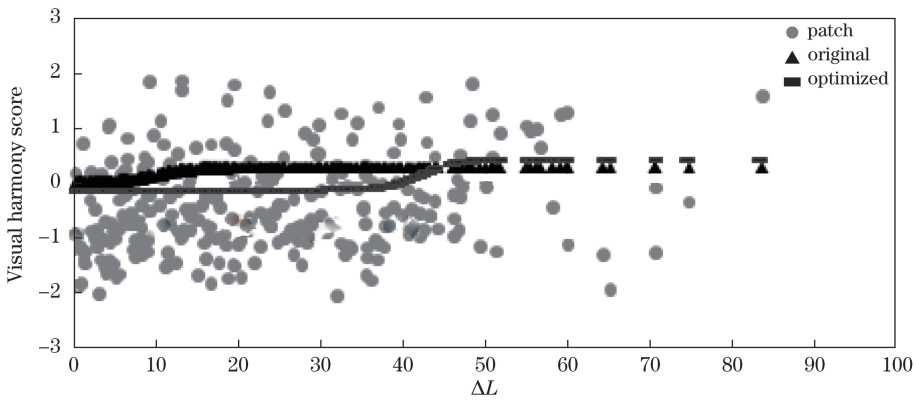


图 7 色对明度差与颜色协调度的关系

Fig. 7 Relationship between color lightness difference and color harmony

图 7 中 original 为 Ou 模型的原始计算公式中的计算值散点分布, optimized 为优化后的 ΔL 和 $H_{\Delta L}$ 间的关系散点分布。

第二步:同理,用规划求解的方法,对 H_H 中的各项进行优化,得到

$$E_C = -16 + 17.2 \tanh(-0.068 + 0.93 C_{ab}^*), \quad (3)$$

$$H_s = 0.12 - 0.14 \sin(h_{ab} + 50^\circ) - 0.1 \sin(2h_{ab} + 90^\circ), \quad (4)$$

$$E_Y = [(0.24L^* - 18.2)/2.4] \exp\{(90^\circ - h_{ab})/44.6 - \exp[(90^\circ - h_{ab})/36]\}. \quad (5)$$

Ou 原始模型与新模型预测数据与色调角的散点图如图 8 所示。

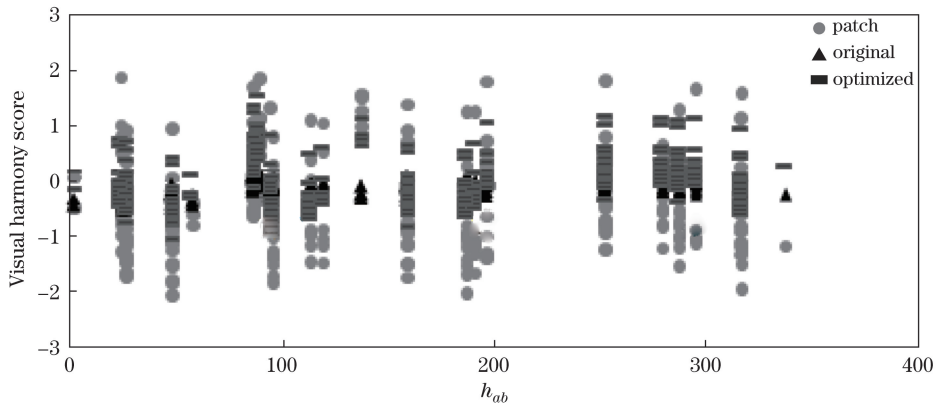


图 8 色对色调角与颜色协调度的关系

Fig. 8 Relationship between hue angle and color harmony

第三步:由于色块对彩度差变化与协调度 H_C 的计算结果与原始模型较为一致,故对公式 H_C 不作优化,保持原有公式中的计算参数。

结合上述优化,则系数优化后的新颜色协调模型为

$$C_H = H_C + H_L + H_H, \quad (6)$$

$$H_C = 0.04 + 0.53 \tanh(0.8 - 0.045 \Delta C), \quad (7)$$

$$\Delta C = [(\Delta H_{ab}^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*/1.46)^2]^{1/2}, \quad (8)$$

$$H_L = H_{L_{\text{sum}}} + H_{\Delta L}, \quad (9)$$

$$H_{L_{\text{sum}}} = 0.78 + 2.07 \tanh(-3.53 + 0.022 L_{\text{sum}}), \quad (10)$$

$$H_{\Delta L} = 0.14 + 0.28 \tanh(-10 + 0.2 L_{\text{sum}}), \quad (11)$$

$$L_{\text{sum}} = L_1^* + L_2^*, \Delta L = |L_1^* - L_2^*|, \quad (12)$$

$$H_H = H_{SY1} + H_{SY2}, \quad (13)$$

$$H_{SY} = E_C(H_S + E_Y), \quad (14)$$

$$E_C = -16 + 17.2 \tanh(-0.068 + 0.93 C_{ab}^*), \quad (15)$$

$$H_S = 0.12 - 0.14 \sin(h_{ab} + 50^\circ) - 0.1 \sin(2h_{ab} + 90^\circ) \quad (16)$$

$$E_Y = [(0.24 L^* - 18.2)/2.4] \exp\{(90^\circ - h_{ab})/44.6 - \exp[(90^\circ - h_{ab})/36]\}. \quad (17)$$

用优化后模型预测以色块为应用场景的颜色协调度,预测数据和实验数据的相关性如图 9(optimized) 所示,可以发现相关系数 R^2 由 0.50 提高到 0.67。

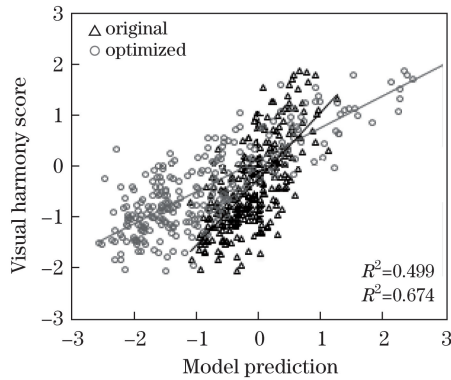


图 9 Ou 模型优化前后预测的颜色协调度值与实验测量值的相关性

Fig. 9 Correlation of Ou model before and after optimization for predicting color harmony values and experimental data

4.2 以服装为应用场景的颜色协调模型的建立

以服装为应用场景的颜色协调模型的建立在 Luo&Ou 模型基础上进行优化。利用上述相同的方法,建立以服装为应用场景的颜色协调模型。

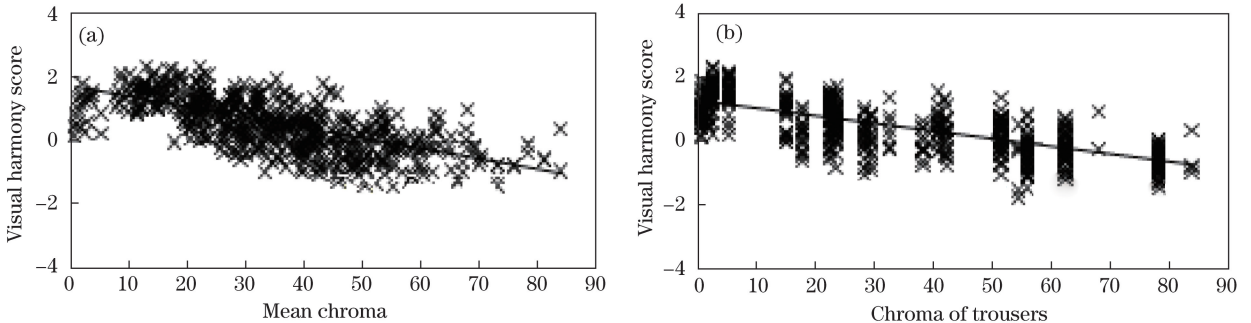


图 10 (a) 服装色对平均彩度值与颜色协调度的关系; (b) 下装颜色彩度与颜色协调度的关系

Fig. 10 (a) Relationship between dress color on average chroma value and color harmony;
(b) relationship between trousers color and color harmony

在以服装为应用场景的实验中, CIELAB 彩度与颜色协调度的关系如图 10 所示, 这与 Luo&Ou 模型预测的趋势相反。根据图 10(a)对 Luo&Ou 模型中 H_C 优化为

$$H_C = \frac{1.26 - 0.02(C_{ab,1}^* + C_{ab,2}^*) + 0.1051(C_{ab,1}^* - C_{ab,2}^*)}{1 + 0.096(C_{ab,1}^* + C_{ab,2}^*)}, \quad (18)$$

式中 $C_{ab,1}^*$ 和 $C_{ab,2}^*$ 分别为服装的上装和下装的彩度值。

将服装色的彩度和 C_{sum} (即 $C_{ab,1}^* + C_{ab,2}^*$) 与颜色协调度关系绘制散点图, 如图 11 所示。

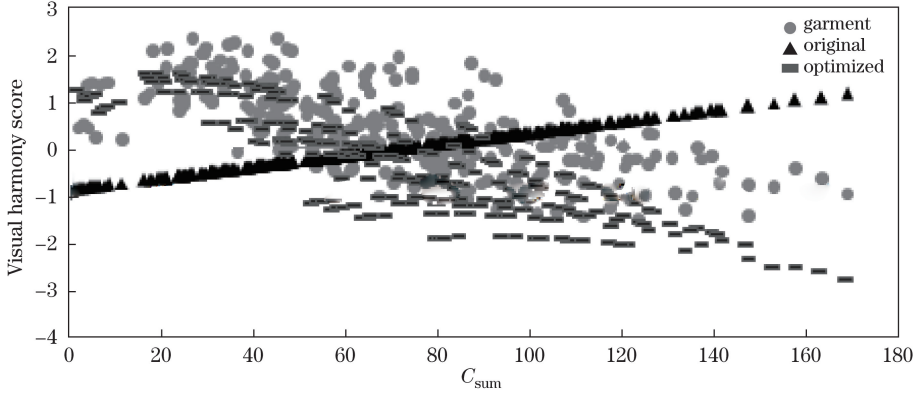


图 11 彩度和与颜色协调度的关系

Fig. 11 Relationship between chroma and color harmony

利用 Luo&Ou 模型优化后的新颜色协调模型为

$$C_{H-garment} = H_C + H_L + H_H, \quad (19)$$

$$H_C = \frac{1.26 - 0.02(C_{ab,1}^* + C_{ab,2}^*) + 0.1051(C_{ab,1}^* - C_{ab,2}^*)}{1 + 0.096(C_{ab,1}^* + C_{ab,2}^*)}, \quad (20)$$

$$H_L = H_{L_{sum}} + H_{\Delta L}, \quad (21)$$

$$H_{L_{sum}} = -0.72 + 0.01(L_1^* + L_2^*), \quad (22)$$

$$H_{\Delta L} = -0.24 - 0.04 \tanh(-2 + 0.2 |L_1^* - L_2^*|), \quad (23)$$

$$H_H = -0.22 - 0.10 \sin(h_{ab,1} + 50^\circ) + 0.05 \sin(2h_{ab,1} + 90^\circ). \quad (24)$$

用优化后模型预测以服装为应用场景的颜色协调度, 预测数据和实验数据的相关性如图 12 所示, 可以发现相关系数 R^2 由 0.11 和 0.16 提高到 0.63 (注: 实验中, 青年组和中老年组观察者的实验结果变化趋势较为一致, 因此优化公式中未考虑年龄的影响)。

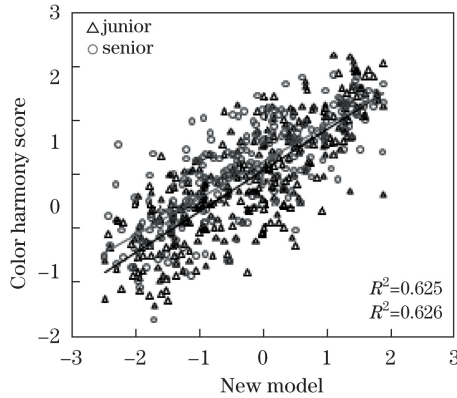


图 12 优化模型预测数据与实验数据的相关性

Fig. 12 Correlation of optimized model for predicting data and experimental data

5 结 论

利用 24 个颜色组成 300 对颜色分别应用于色块和服装, 组织观察者进行颜色协调度评判, 并将两种应

用场景下的评判结果进行比较,得出以下结论:

1) 以色块和服装为应用场景的颜色协调度评判实验中,颜色协调原则都表现得较好(除色块实验中的互补色正确率为 0.49,服装色中 20~32 岁观察者的同色、同阶调正确率为 0.49,0.46 外)。各应用场景正确率的大小有所差异,说明应用场景的不同、年龄的不同均对颜色协调度的评判有一定的影响。

2) 以色块和服装为应用场景的颜色协调度呈现弱相关性($R^2 < 0.126$),表明应用场景对颜色协调度的评判结果有较大的影响。

3) 现有颜色协调度模型只对建立模型的原始实验数据适用,对其他数据预测性较差。因此,分别对 Ou 模型和 Luo&Ou 模型进行优化得到新的颜色协调预测模型,可对不同实验场景和观察者的评价结果进行预测。

参 考 文 献

- 1 Goethe J W. Theory of colours[M]. Boston: MIT Press, 1970.
- 2 Chevreul M E. The principles of harmony and contrast of colors[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1981.
- 3 Ostwald W. The color primer[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1969.
- 4 Munsell A H. A grammar of color[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1969.
- 5 Moon P, Spencer D E. Geometric formulation of classical color harmony[J]. J Opt Soc Am, 1944, 34(1): 46-59.
- 6 Moon P, Spencer D E. Area in color harmony[J]. J Opt Soc Am, 1944, 34(2): 93-101.
- 7 Moon P, Spencer D E. Aesthetic measure applied to color harmony[J]. J Opt Soc Am A, 1944, 34(4): 234-242.
- 8 Judd D B, Wyszecki G. Color in business, science and industry[M]. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- 9 Ou L C, Luo M R. A colour harmony model for two-colour combinations[J]. Color Res Appl, 2006, 31(3): 191-204.
- 10 Szabo F, Bodrogi P, Schanda J. Experimental modeling of colour harmony[J]. Color Res Appl, 2010, 35(1): 35-49.
- 11 Luo M R, Ou L C. Colour harmony for fashion design[C]. AIC, 2011: 540-543.
- 12 Ou L, Luo M R, Sun P, *et al.*. Age effects on colour emotion, preference, and harmony[J]. Color Res Appl, 2012, 37(2): 92-105.
- 13 Huang M, Li Z, Cui G, *et al.*. Age effects on garments color harmony[C]. AIC, 2015, 1078-1081.
- 14 Berlin B, Kay P. Basiccolour terms: Their universality and evolution[M]. Berkeley: University of California Press, 1969.
- 15 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研究[J].光学学报,2010,30(6):1851-1856.
- 16 Zeng Wang, Xu Haisong, Wang Zhehong, *et al.*. Investigation of color discrimination threshold characteristics under different chromatic backgrounds[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0133001.
- 曾旺,徐海松,汪哲弘,等.基于不同颜色背景的人眼辨色阈值特性研究[J].光学学报,2011,31(1):0133001.
- 17 Wu Xudong, Shi Junsheng, Yun Lijun. New set of corresponding colors data between monitor and printer and evaluation of chromatic adaptation transforms[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0533001.
- 吴旭东,石俊生,云利军.一组显示器与打印体对应色数据及其色适应模型评价[J].光学学报,2011,31(5):0533001.