

# 三维打印球体的色差计算方法研究

潘洁, 黄敏\*, 李钰, 王宇, 赵姝怡, 李修, 刘瑜

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

**摘要** 为研究现有国际照明委员会(CIE)色差公式(基于平面色建立)对三维(3D)打印球体模型色差评价的适用性,基于 Sailner J400 彩色 3D 打印机,围绕 CIE 推荐的 5 个颜色中心(灰、红、黄、绿、蓝)制作了 200 对(150 对哑光和 50 对光泽)直径 4 cm 的球体模型。组织了 59 名年龄分布在 19~26 岁的色觉正常观察者,使用灰梯尺法开展色差评价实验。检验了基于 CIELAB、CIECAM02 和 CAM16 共 3 个颜色空间、8 个色差公式的表现性能,并对色差公式进行了幂指数和明度因子的优化计算。结果表明,各原始色差公式对 3D 球体色差的预测性能较为一致,标准化残差平方和(STRESS)值为 32.5~34.7;对光泽球体样本的预测性能优于哑光球体样本。 $F$  检验表明,针对 3D 球体样本建立的幂指数色差计算方法较原始色差公式的性能均有显著改善,优化后的 STRESS 值降为 24.5~27.3;经过明度因子优化后的改善不显著。

**关键词** 视觉与色彩; 三维打印; 色差公式; 幂指数优化; 标准化残差平方和

中图分类号 O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2333001

## Color Difference Calculation Method for Three-Dimensional Printed Spheres

Pan Jie, Huang Min\*, Li Yu, Wang Yu, Zhao Shuyi, Li Xiu, Liu Yu

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

**Abstract** In this paper, 200 pairs of sphere samples (150 pairs of matte ones and 50 pairs of glossy ones) with a diameter of 4 cm were prepared by a Sailner J400 color three-dimensional (3D) printer to study the applicability of the existing International Commission on Illumination (CIE) color difference formulas (based on two-dimensional colors) to the color difference evaluation of 3D printed sphere models. The colors of these samples are distributed around five color centers (gray, red, yellow, green, and blue) recommended by the CIE. A total of 59 observers with normal color vision aged from 19 to 26 were organized to carry out color difference evaluation experiments by the gray scale method. Eight color difference formulas based on three color spaces, namely CIELAB, CIECAM02, and CAM16, were tested on performance and optimized with the methods of the power function and the lightness factor optimization. The results indicated that the original color difference formulas deliver relatively consistent predictions of the color differences of the 3D printed sphere samples, with a standardized residual sum of squares (STRESS) value of 32.5–34.7. The prediction performance on glossy sphere samples was better than that on matte sphere samples. The  $F$  test showed that the performance of the power function method of color difference calculation developed for 3D sphere samples was significantly improved compared with that of the original formulas, with an optimized STRESS value of 24.5–27.3. No significant improvement was observed after  $k_L$  optimization.

**Key words** vision and color; three-dimensional printing; color difference formula; power function optimization; standardized residual sum of squares

**OCIS codes** 330.1720; 330.1710; 330.1730

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-06-04; 录用日期: 2021-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(61675029)、北京市委组织部青年拔尖计划(2018)、北京印刷学院校级研发计划(Ec202003)

通信作者: \*huangmin@bigc.edu.cn

# 1 引言

三维(3D)打印技术<sup>[1]</sup>,可直接以数字模型为基础构造物体,在医学<sup>[2]</sup>、工业<sup>[3]</sup>等领域得到了广泛应用。近年来,全彩色 3D 打印技术已逐渐成为增材制造领域的发展趋势<sup>[4]</sup>,其在教育、艺术创作、工业制造和建筑等领域均有较大的应用需求。3D 打印模型的颜色质量控制和颜色色差比较也逐渐成为研究热点<sup>[5]</sup>。CIE 国际照明委员会为定量化评价颜色样品的色差,先后建立了 CIELAB<sup>[6]</sup>、CIEDE2000<sup>[7]</sup>、CIECAM02-(LCD/SCD/UCS)<sup>[8]</sup>和 CAM16-(LCD/SCD/UCS)<sup>[9]</sup>等色差公式,上述色差公式的建立及视觉数据的收集通常是基于平面色,如印刷品、纺织品和自发光色等进行的。目前,对 3D 模型表面颜色的评价<sup>[10-11]</sup>仍使用 CIELAB 和 CIEDE2000 等色差公式。但三维物体在视觉感知上比二维物体更复杂,光照条件<sup>[12]</sup>、阴影、阶调、3D 物体形状<sup>[13]</sup>及表面性质<sup>[14]</sup>等均会影响人眼的视觉感知。因此,基于平面色建立的色差公式对三维物体模型的色差预测存在较多的不适用性。

CIE 成立了 TC 8-17 技术委员会,旨在研究“三维彩色物体颜色差异的评价方法”,并号召研究者开展心理物理实验采集 3D 物体色差评价的目视数据集<sup>[15]</sup>。2020 年,蒋兰<sup>[16]</sup>基于灰梯尺法研究了 CIELAB、CIEDE2000 等 10 个色差公式对 3D 球体(平均 CIELAB 色差为 10.3)感知色差的预测性能,

并对原始色差公式进行了明度因子  $k_L$  的优化,结果表明:10 个色差公式对 3D 物体色差预测性能较接近, $k_L$  优化后对色差公式的预测性能改善不大。该研究中样本的色差等级较大,且文中仅采用了  $k_L$  明度加权的优化方法。

为进一步研究现有色差公式对色差等级为中小色差、不同光泽度 3D 球体样本的评价性能,使用 Sailner J400 彩色 3D 打印机制作了直径为 4 cm 的 150 对哑光和 50 对光泽球体(平均 CIELAB 色差分别为 4.72 和 4.74),在检验现有色差公式评价性能的基础上,对其进行了幂指数( $\Delta E' = a \Delta E^b$ )和明度因子  $k_L$  的计算优化。研究成果可为优化、建立 3D 打印球体模型的色差公式提供原始数据集和计算依据。

## 2 实验

### 2.1 实验基本信息

实验分两组进行,分别为实验 I 和实验 II。实验 I 主要基于 150 对哑光球体开展,搜集 33 名观察者的色差比较数据,进行色差公式的优化、建立;实验 II 主要基于 50 对光泽球体开展,搜集 26 名观察者的色差比较数据,对优化后色差公式的计算性能进行检验。两组实验均使用心理物理实验方法中的灰梯尺法进行,为更好地检验优化后的色差公式是否具有普适性,两组实验的样本对、照明光源、观察者均不相同。实验基本信息如表 1 所示。

表 1 实验基本信息

Table 1 Information of the experiments

Exp.	Color centers	Sample pairs	Glossiness	Measured instruments	Observers	Age	Total assessments
I	5	150	Matte	X-Rite eXact	33	19—26	6450
II	5	50	Gloss	X-Rite Ci64	26	19—24	2500

### 2.2 样本准备和均匀性测量

围绕 CIE 推荐的 5 个颜色中心<sup>[17]</sup>(灰、红、黄、绿、蓝),使用 Sailner J400 彩色 3D 打印机打印、制作了直径为 4 cm 的哑光和光泽球体。其中,哑光球体作为色差公式优化、建立的样本,围绕每个颜色中

心各制作、挑选了 30 个,共 150 对样本。光泽球体作为优化后色差公式的检验样本,围绕每个颜色中心各制作、挑选了 10 个,共 50 对样本。实验样本如图 1 所示。其中,哑光球及光泽球的光泽度分别为 3.6、96.6(使用 GLOSS METER TC-108DPA 在

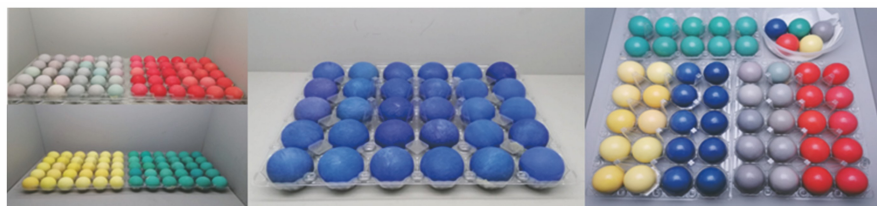


图 1 3D 实验样本外观图

Fig. 1 Appearance of 3D samples

60°角测量相同参数打印的平面色得到)。

用 X-Rite eXact 分光光度计测量哑光球的 5 个颜色中心的光谱反射率曲线如图 2 所示。

考虑到三维球体在制作过程中的均匀性受限,在心理物理实验中,需尽量选取球体颜色均匀的表

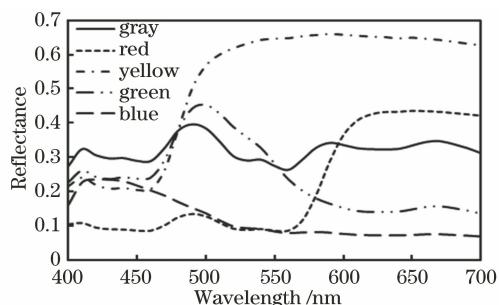


图 2 3D 打印哑光球体的光谱反射率曲线  
Fig. 2 Spectral reflection curves of 3D-printed matte sphere samples

面面向观察者,作为观测面。选取观测面均匀的颜色区域,使用颜色测量仪器(X-Rite eXact 或 X-Rite Ci64)以接触式测量的方式测量了 5 个点,求取平均值作为三维球体的表面光谱反射率。将测量得到的光谱反射能量及实验光源的相对光谱功率分布代入 CIE1964 颜色匹配函数计算其  $L^* a^* b^*$  色度值。制作、挑选的哑光及光泽球体的标样的色度值如表 2 所示,图 3 为待比较的哑光、光泽球体样本在 CIE  $a_{10}^* b_{10}^*$  和  $L_{10}^* C_{ab,10}^*$  平面上的散点分布。计算得到哑光球体的 CIELAB 色差分布在 0.55~12.63,平均色差为 4.72,其中 88 对样本色差小于 5.0,62 对样本大于 5.0,23 对样本大于 8.0;光泽球体的 CIELAB 色差分布在 0.46~13.08,平均色差为 4.74,其中 35 对样本色差小于 5.0,15 对样本色差大于 5.0,10 对色差大于 8.0。

表 2 球体颜色中心色度值

Table 2 Chromaticity values of the standard sphere

Color	Matte					Gloss				
	$L_{10}^*$	$a_{10}^*$	$b_{10}^*$	$C_{ab,10}^*$	$h_{ab,10}^*$	$L_{10}^*$	$a_{10}^*$	$b_{10}^*$	$C_{ab,10}^*$	$h_{ab,10}^*$
Gray	62.76	0.17	0.48	0.51	70.58	59.97	0.18	1.37	1.38	82.35
Red	48.38	33.06	19.77	38.52	30.88	50.85	41.82	33.53	53.60	38.72
Yellow	82.37	-8.52	43.52	44.35	101.08	86.96	-9.01	51.69	52.47	99.89
Green	59.04	-29.97	0.22	29.97	179.58	58.10	-34.81	3.53	34.99	174.21
Blue	37.33	5.14	-26.70	27.19	280.89	40.75	5.25	-28.45	28.93	280.45

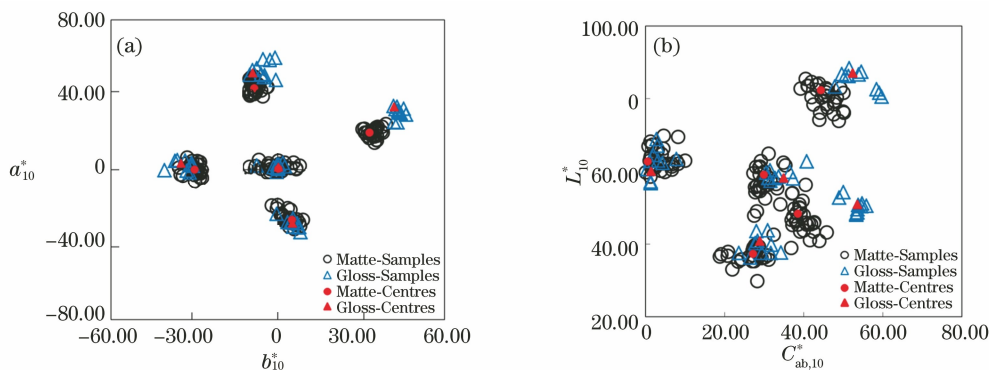


图 3 实验球体样本的散点分布。(a)  $a_{10}^* b_{10}^*$  平面;(b)  $L_{10}^* C_{ab,10}^*$  平面

Fig. 3 Scattered distributions of experimental sphere samples. (a)  $a_{10}^* b_{10}^*$  plane; (b)  $L_{10}^* C_{ab,10}^*$  plane

用离均色差(MCDM)<sup>[18]</sup>来表征实验样本的表面颜色均匀性

$$M_{MCDM} = \frac{\sum_{i=1}^N CIELAB(C_i, C_{ave})}{N}, \quad (1)$$

式中: $N$  是测量点数( $N=5$ ); $C_i$  是测量的第  $i$  ( $i=1\sim 5$ ) 个点的色度值; $C_{ave}$  是 5 个测量点色度值的平均值。

计算得到 155 个(150 个样本+5 个色中心)哑光球体和 55 个(50 个样本+5 个色中心)光泽球体的 MCDM 结果如图 4 所示。可见,用于实验的哑光球体和光泽球体样本的 MCDM 平均值分别为 1.40 和 1.51,有 172 个样本的 MCDM 小于 2.0(占 81.9%)。考虑到彩色 3D 打印的工艺限制,本研究样本集的颜色均匀性在可接受范围,可用于色差评价研究。

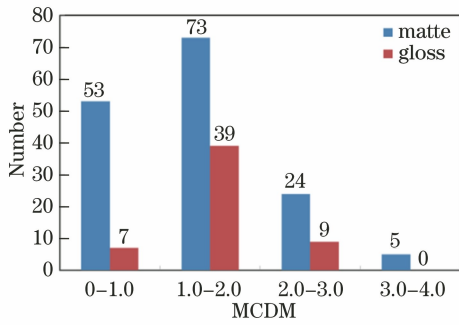


图 4 实验球体样本的离均色差

Fig. 4 MCDM of experimental sphere sample

### 2.3 观察者

共有 33 名观察者(11 男 22 女, 年龄 19~26 岁), 26 名观察者(5 男 21 女, 年龄 19~24 岁) 分别参加了实验 I 和实验 II 的色差评价。观察者均为北京印刷学院的学生, 具备色彩学基础理论知识。所有观察者均色觉正常, 通过了《新编色觉检查图》的色觉测试<sup>[19]</sup>。

### 2.4 观察条件

目视评价实验分两组进行。实验 I 在 GretagMacbeth The Judge II 多光源标准观察箱的 Day 模式光源下进行, 实验 II 在 THOUSLITE LED Cube 标准观察箱的漫反射光源下进行。使用 Photo-Research PR655 光谱辐射度计测量两组实

验照明光源的光谱功率分布, 如图 5 所示。

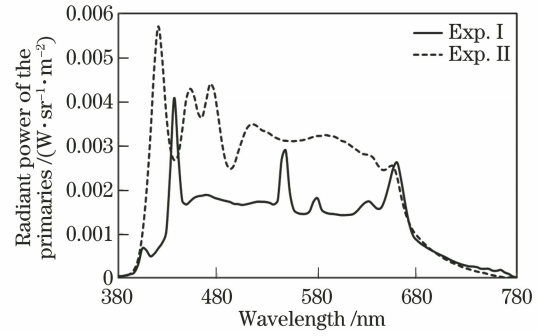


图 5 实验光源的光谱功率分布

Fig. 5 Spectral power distribution of experimental light sources

使用手持式照度计 UPRtek MK350N 测得实验 I 灯箱内光源色温为 6253 K, 照度为 878 lx, 显色指数 (CRI) 为 93.3; 实验 II 灯箱内光源色温为 6492 K, 照度为 1052 lx, CRI 为 96.9。

### 2.5 灰梯尺

使用心理物理实验方法中的灰梯尺法进行 3D 球体样本对间的色差评价<sup>[20]</sup>, 灰梯尺的示意图如图 6 所示。考虑到 3D 打印设备目前较难满足灰梯尺制作的要求(颜色不偏色, 且相邻等级间的色差主要是明度差), 本次实验使用 Epson Stylus PRO 7908 喷墨打印机在 Epson 哑光相纸上制作灰梯尺。

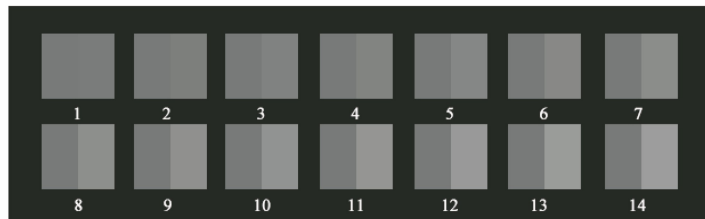


图 6 灰梯尺示意图

Fig. 6 Diagram of the gray scale

实验灰梯尺的等级范围为 1.0~14.0, 大于本次实验样本间的色差值。相邻灰梯尺的色差间隔约为 1 个 CIELAB 色差单位。由于实验 I 和实验 II 在不同阶段进行, 故制作了两组灰梯尺, 其色差主要由明度差( $\Delta L^*$ ) 贡献, 且  $\Delta L^* / \Delta E_{ab}^* \approx 1.0$ 。分别对两组灰梯尺的目视等级( $G_{grade}$ ) 与其 CIELAB 色差值间进行线性拟合, 灰梯尺 1(用于实验 I) 和灰梯尺 2(用于实验 II) 的线性拟合数学关系分别为

$$\Delta E_1 = 0.9577 \times G_{grade} + 0.3031, \quad R^2 = 0.9988, \quad (2)$$

$$\Delta E_2 = 0.9958 \times G_{grade} - 0.0199, \quad R^2 = 0.9969, \quad (3)$$

式中:  $R^2$  为线性回归系数。

### 2.6 实验过程

目视评价实验在光暗室的标准观察箱中进行, 样本对放置在灰梯尺的前方, 如图 7 所示。正式实验前, 需对观察者进行灰梯尺法的色差评价训练, 可给出不同色差等级的几个球体样本对, 让观察者进



图 7 目视评价示意图

Fig. 7 Diagram of visual assessment experiment



行预实验。观察者需参照灰梯尺间的色差给出待评价球体样本与标样的色差(建议观察者给出的目视色差保留一位小数)。正式开始实验前,观察者需适应灰背景约 1 min,样本对随机呈现给观察者。为避免视觉疲劳,色差评价实验需分组进行,实验每进行 15 min 左右后,观察者需休息约 5 min。

实验 I 的 33 名观察者中有 27 名观察者对 3D 哑光球体样本进行了 1 次评价,6 名观察者重复进行了 2~3 次评价,共采集到了 43 组、6450(=150 对×43 组)个色差判断。实验 II 的 26 名观察者中有 2 名观察者对 3D 光泽球体样本进行了 1 次评价,24 名观察者进行了 2 次评价,共采集到 50 组、2500(=50 对×50 组)个判断。将所有观察者对

表 3 实验观察者精度

Table 3 Observer variability in visual experiments

Item	Exp. I (matte)		Exp. II (gloss)	
	Intra-observer	Inter-observer	Intra-observer	Inter-observer
Max	37.0	55.4	36.8	45.9
Min	12.4	21.9	10.8	19.5
Mean	21.9	31.2	20.0	30.3

本实验观察者重复性和观察者准确性的 STRESS 值与同类目视评价实验相比<sup>[16,18,22]</sup>,均在可接受范围之内,说明本研究实验数据合理有效。

### 3.2 原始色差公式性能评价

基于实验 I 中 33 名观察者对 150 对哑光球体的目视评价数据,用 STRESS 性能因子评价 CIELAB、CIEDE2000、CIECAM02 (-LCD,-SCD,-UCS)、CAM16 (-LCD,-SCD,-UCS)共 8 个原始色差公式预测哑光球体色差的表現性能,计算结果如表 4 所示。

表 4 用 STRESS 因子检验原始色差公式的表現性能

Table 4 Performance of original color difference formulas in terms of STRESS

Magnitudes	Formulas							
	CIELAB	CIEDE2000	CIECAM02-			CAM16-		
			LCD	SCD	UCS	LCD	SCD	UCS
0—5 ( $\Delta E_{\text{mean}} = 3.01$ )	<b>41.3</b>	43.1	43.1	42.3	42.5	42.6	41.4	41.8
5—13 ( $\Delta E_{\text{mean}} = 7.15$ )	24.4	26.8	28.4	24.6	26.1	26.8	<b>23.3</b>	24.6
Total	34.3	36.6	37.0	34.7	35.6	36.1	<b>33.9</b>	34.7

### 3.3 优化色差公式

基于实验 I 的目视评价数据,对上述 6 个原始色差公式进行优化计算。优化目标为计算色差值与目视色差间的 STRESS 值最小。采用 3 种优化方法,分别如下。

1) 优化方法 1,即幂指数 (PF)方法, $\Delta E' = a \times (\Delta E)^b$ (其中  $\Delta E'$  为优化后色差公式, $\Delta E$  为原始色差公式, $a$  为线性调节因子, $b$  为功率压缩因子)。

每个球体样本的色差等级判断取平均值,作为每个样本的目视色差等级,并根据(2)式或(3)式中的线性关系,将其转换为视觉色差( $\Delta V$ )。

## 3 数据分析

### 3.1 观察者精度

观察者精度包括观察者重复性 (Intra-observer) 和观察者准确性 (Inter-observer)。观察者重复性是指观察者的每次判断与  $n$  次判断平均值间的差异;观察者准确性是指每名观察者的判断与所有观察者判断平均值间的差异,用标准化残差平方和 (STRESS) 值评价<sup>[21]</sup>。实验 I 和实验 II 的观察者重复性、准确性的 STRESS 值如表 3 所示。

由表 4 可知,各原始色差公式的预测性能差别不大,STRESS 值变化范围为 33.9~37.0,平均值为 35.4。其中,CAM16-SCD 色差公式表現性能最佳。在不同的色差等级内,各色差公式表现出了不同的预测性能,在小色差范围内预测性能较差,与预测平面色的趋势一致<sup>[23]</sup>。考虑到本次实验中有 84.7% 的实验样本 CIELAB 色差小于 8.0,且所有样本的平均色差为 4.72,以下将不再对 CIECAM02-LCD 和 CAM16-LCD 色差公式进行计算、分析。

2) 优化方法 2,即  $k_L$  因子优化方法, $\Delta E(k_L; k_C; k_H) = \sqrt{(\Delta L/k_L)^2 + (\Delta C/k_C)^2 + (\Delta H/k_H)^2}$  色差公式中,对明度因子  $k_L$  进行优化,设定  $k_C:k_H = 1:1$ 。

3) 优化方法 3,即对优化方法 1 和 2 中幂指数  $a$ 、 $b$  因子和明度  $k_L$  因子进行混合优化。

结果如表 5 所示,其中 PF<sub>2D</sub> 为使用文献[23]和文献[9]中计算平面色的幂指数因子  $a$ 、 $b$ 。

表 5 不同优化方法得到的各优化色差公式的  $a$ 、 $b$ 、 $k_L$  参数因子

Table 5  $a$ ,  $b$ , and  $k_L$  factors of color difference formula with different optimized methods

Formulas	Factor	CIELAB	CIEDE2000	CIECAM02-		CAM16-	
				SCD	UCS	SCD	UCS
PF <sub>2D</sub>	$a$	1.26	1.43	1.45	1.3		1.41
	$b$	0.55	0.7	0.75	0.75		0.63
Optimized 1 (PF <sub>3D</sub> ; $a$ , $b$ )	$a$	2.10	2.02	1.87	2.05	1.94	2.02
	$b$	0.55	0.50	0.53	0.52	0.50	0.53
Optimized 2 ( $k_L$ )	$k_L$	1.43	1.22	1.66	1.63	1.60	1.55
	$a$	2.21	2.27	2.11	2.29	2.12	2.30
Optimized 3 ( $a$ , $b$ , $k_L$ )	$b$	0.57	0.50	0.54	0.56	0.54	0.56
	$k_L$	1.56	1.77	2.25	2.09	2.24	2.08

文献[16]基于平均 CIELAB 色差为 10.3 的球体样本,对 CIELAB、CIEDE2000、CAM02-SCD、CAM02-UCS 的  $k_L$  因子优化结果分别为 1.09、0.83、0.86、1.07,均小于本研究的  $k_L$  因子。说明对于小色差等级的 3D 样本,视觉色差受明度差的影响较小。文献[22]中基于平面色的色差数据集优化结果为阈值微小色差的  $k_L$  因子小于小色差的  $k_L$  因子;文献[18]中对平面色的研究表明,随着色差等级的增大, $k_L$  因子先增后减,色差等级为 2 时的  $k_L$  值最大。上述研究结果说明,不论平面色<sup>[18,22]</sup>、立体色<sup>[16]</sup>, $k_L$  因子均在阈值小色差时较小;随着色差增加到中小色差时, $k_L$  因子增大;当色差增加到大色差等级时, $k_L$  因子减小。

表 5 中,除 CIELAB 色差公式外,PF<sub>3D</sub> 中的  $a$  值均大于 PF<sub>2D</sub> 中的  $a$  值;PF<sub>3D</sub> 中的  $b$  值均小于

PF<sub>2D</sub> 中的  $b$  值。其中  $b$  值大小决定了色差公式的压缩程度,说明基于 PF 方法优化的色差公式对于球体样本的计算色差压缩程度大于二维物体色。原始和优化后色差公式计算色差的散点分布,如图 8 所示。可见,对于不同色差公式,当色差值大于一定的临界值后,优化后的色差公式将以非线性的方式压缩原始色差公式的色差计算值,且不同色差公式的计算临界值不同;当色差值进一步增加后,优化后的计算色差结果会逐渐趋于饱和,与人眼目视色差结果更能较好的保持一致。图 8 (a)中,当 CIELAB 色差为 0.0~5.0 等级范围时,优化后的计算色差值会较原始色差值有一定程度的增加,图 8 (b)中,当 CIELAB 色差值大于 5.0 时,优化后的计算结果会有一定程度的降低(压缩)。

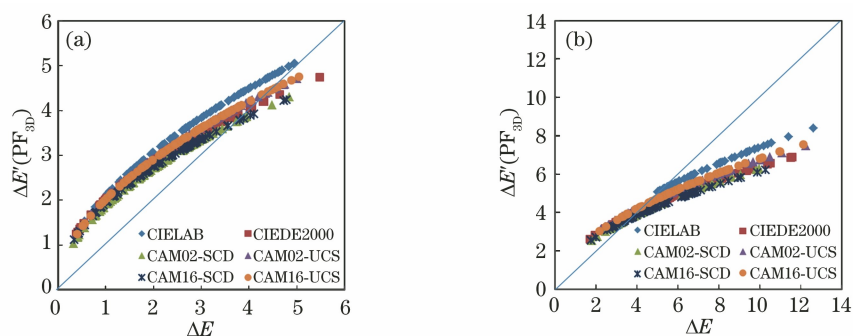


图 8 原始色差  $\Delta E$  与 PF<sub>3D</sub> 优化后色差  $\Delta E'$  的散点分布。(a) CIELAB 色差为 0.0~5.0; (b) CIELAB 色差大于 5.0

Fig. 8 Scatter distributions of the original  $\Delta E$  and PF<sub>3D</sub> optimized  $\Delta E'$ . (a) CIELAB color difference is 0.0—5.0;

(b) CIELAB color difference is greater than 5.0

各色差公式优化前后的计算色差与目视色差  $\Delta V$  间的 STRESS 值如表 6 所示。由于 Li 等在文献[9]的研究中,仅给出了 CAM16-UCS 色差公式用于幂指数计算的  $a$ 、 $b$  值,表 6 中未给出 CAM16-SCD 的 PF<sub>2D</sub> 幂指数优化 STRESS 结果。表 6 中,三种优化方法计算后的 STRESS 值均有所降低,预

测性能得到改善。通过  $F$  检验的方法比较不同优化方法得到的色差计算结果较原始色差计算结果改善的显著性,结果见表 7。检验的置信度为 0.95,服从自由度为(149, 149)的  $F$  分布, $F$  检验的临界值  $F_c = 0.76$ 。

表 6 原始和优化后各色差公式的表现性能

Table 6 Performance of original and optimized color difference formulas

STRESS	CIELAB	CIEDE2000	CIECAM02-		CAM16-	
			SCD	UCS	SCD	UCS
Original	34.3	36.6	34.7	35.6	33.9	34.7
PF <sub>2D</sub>	29.1	28.9	29.1	30.1		27.6
Optimized 1	29.1	27.0	27.0	27.9	26.2	27.2
Optimized 2	32.9	35.9	33.3	32.0	32.8	31.6
Optimized 3	28.1	25.3	24.9	24.8	24.0	23.9

表 7 优化和原始色差公式的  $F$  检验结果

Table 7  $F$  test results of the modified and the original color difference formula

$F$ -test	CIELAB	CIEDE2000	CIECAM02-		CAM16-	
			SCD	UCS	SCD	UCS
Original	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PF <sub>2D</sub>	0.72	0.63	0.70	0.71		0.63
Optimized 1	0.72	0.55	0.60	0.62	0.60	0.61
Optimized 2	0.92	0.96	0.92	0.81	0.94	0.83
Optimized 3	0.67	0.48	0.52	0.48	0.50	0.47

表 7 中,基于 PF<sub>2D</sub> 方法、优化方法 1 和优化方法 3 得到的  $F$  值均小于  $F_c$ 。说明使用幂指数的优化方法,可对球体模型的色差计算性能显著改善,基于二维物体色建立的 PF 因子仍适用于 3D 球体模型的色差计算。优化方法 2 中经过  $k_L$  的优化,各色差公式的计算性能均无显著性改善。

#### 4 优化后色差公式的检验

用实验 II 中 26 名观察者,基于 50 对光泽球体样本建立的目视评价数据检验优化后各色差公式的表现性能,计算色差与目视色差  $\Delta V$  间的 STRESS 值如表 8 所示。

表 8 原始公式及优化后色差公式的表现(实验 II)

Table 8 Performance of the original formula and the optimized color difference formula (Exp. II)

Formulas	CIELAB	CIEDE2000	CIECAM02-		CAM16-	
			SCD	UCS	SCD	UCS
Original	25.8	<b>25.4</b>	25.5	25.7	25.9	26.0
PF <sub>2D</sub>	18.6	<b>17.1</b>	18.3	19.1		17.6
Optimized 1	18.6	<b>16.8</b>	16.9	17.9	17.1	17.7
Optimized 2	27.8	24.3	23.3	<b>21.3</b>	24.1	22.3
Optimized 3	19.7	14.2	13.9	<b>13.8</b>	<b>13.8</b>	13.9

表 8 中,6 个原始色差公式的计算 STRESS 值分布在 25.4~26.0,低于实验 I 的 STRESS 值,说明基于本次实验 I 和实验 II 的目视评价数据组,原始色差公式预测光泽球体色差的性能优于哑光球

体。通过 PF<sub>3D</sub> 优化后 STRESS 值较原始色差公式有所降低,且  $F$  检验结果表明改善显著,如表 9 所示。 $F$  值均低于检验置信度为 0.95,自由度为(49, 49)的  $F_c$  值( $F_c=0.62$ )。

表 9 优化和原始色差公式对光泽球体的  $F$  检验结果

Table 9  $F$  test results of the modified and the original color difference formula for glossy sphere samples

$F$ -test	CIELAB	CIEDE2000	CIECAM02-		CAM16-	
			SCD	UCS	SCD	UCS
PF <sub>2D</sub>	0.52	0.45	0.52	0.55		0.46
Optimized 1	0.52	0.44	0.44	0.48	0.43	0.47
Optimized 2	1.17	0.92	0.83	0.69	0.87	0.73
Optimized 3	0.58	0.31	0.30	0.29	0.28	0.29

进一步地,将实验 I 和实验 II 中的 150 对哑光球体样本和 50 对光泽球体数据综合,用 PF<sub>2D</sub> 和

PF<sub>3D</sub> 幂指数计算方法,计算了优化前后各色差公式与目视色差  $\Delta V$  间的 STRESS 值,结果如表 10 所

示。可见,对于 200 对球体样本,  $PF_{3D}$  优化的色差公式较原始色差公式均有显著改善 ( $F < F_c = 0.79$ ); 优化前后均为 CAM16-SCD 的表现性能最好。

表 10 原始公式及优化后色差公式的表现

Table 10 Performance of the original formula and the optimized color difference formula

Formulas		CIELAB	CIEDE2000	CIECAM02-		CAM16-	
				SCD	UCS	SCD	UCS
Original	STRESS	32.8	34.7	33.1	33.9	<b>32.5</b>	33.2
$PF_{2D}$	STRESS	27.3	26.9	27.2	28.1		25.8
	$F$ -test	0.69	0.60	0.67	0.69		0.60
$PF_{3D}$	STRESS	27.3	25.1	25.1	26.1	<b>24.5</b>	25.4
	$F$ -test	0.69	0.53	0.58	0.59	0.57	0.59

### 5 色度椭圆

将基于心理物理实验建立的目视色差数据,分别在 CIELAB 和 CAM16-SCD 颜色空间拟合色度椭圆。CIELAB 颜色空间的色度椭圆方程为

$$\Delta E^2 = g_{11} \Delta a^{*2} + 2g_{12} \Delta a^* \Delta b^* + g_{22} \Delta b^{*2} + g_{33} \Delta L^{*2} + 2g_{13} \Delta a^* \Delta L^* + 2g_{23} \Delta b^* \Delta L^*, \quad (4)$$

式中: $g_{ij}$  是椭圆方程的系数; $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$  分别

为颜色空间中样与比较样的明度差和色度差。色度椭圆的建立目标为,使得(4)式中的  $\Delta E$  值和目视色差  $\Delta V$  值间具有最小的 STRESS 值。考虑到交叉项在色差计算过程中的权重较小,可略去,优化后的色度椭圆如图 9 所示。上述色度椭圆的分布与二维打印物体色的色度分布具有较好的一致性<sup>[18,24]</sup>,计算图 9 中色度椭圆的尺寸  $S = \sqrt{\pi AB}$ ,以评价基于 CIELAB 和 CAM16-SCD 颜色空间得到的哑光球和光泽球的目视色差影响程度,结果如表 11 所示。

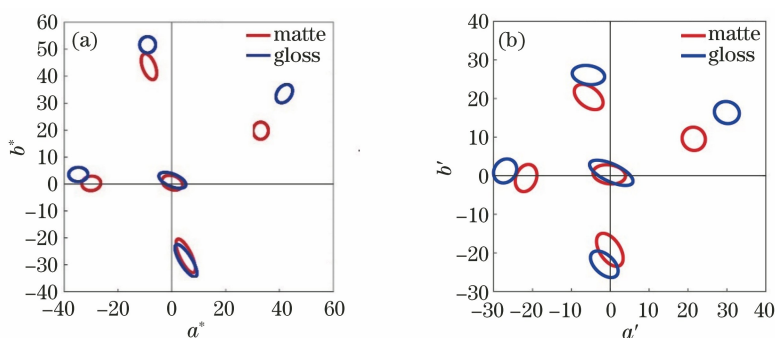


图 9 基于不同颜色空间的色度椭圆分布。(a) CIELAB 的  $a^*b^*$  平面;(b) CAM16-SCD 的  $a'b'$  平面  
Fig. 9 Chromaticity-ellipses plotted in different diagrams from different spaces. (a)  $a^*b^*$  plane from CIELAB space; (b)  $a'b'$  plane from CAM16-SCD space

表 11 各色度椭圆的尺寸信息

Table 11 Sizes of each chromaticity ellipses

CIELAB	Gray	Red	Yellow	Green	Blue	Mean	STDEV
Matte	1.88	1.78	2.05	1.82	2.28	1.96	0.21
Gloss	2.09	1.87	1.77	1.82	2.31	1.97	0.22
CAM16-SCD	Gray	Red	Yellow	Green	Blue	Mean	STDEV
Matte	1.90	1.77	1.94	1.83	2.10	1.91	0.13
Gloss	2.20	1.79	1.89	1.79	1.92	1.92	0.17

由表 11 可知,对哑光和光泽球体建立的色度椭圆平均尺寸相近,在 CIELAB 颜色空间中分别为 1.96 和 1.97,在 CAM16-SCD 颜色空间中分别为 1.91 和 1.92;且在不同颜色空间的椭圆尺寸的标准偏差(STDEV)也相近,光泽球体略大于哑光球体。

为了进一步定量研究 CIELAB 和 CAM16-SCD

颜色空间中 3D 物体的光泽度对色度椭圆的大小影响,用文献[24]的方法在 5 个颜色中心随机选取 1000 对模拟色样,利用(4)式中的椭圆方程系数  $g_{ij}$  计算各模拟色样与颜色中心间的色差  $\Delta E$  值,并计算两组椭圆计算色差  $\Delta E$  间的 STRESS 值,如表 12 所示。



表 12 模拟计算检验哑光和光泽球体的色度椭圆的 STRESS 值

Table 12 STRESS values for simulated chromaticity ellipses of matte and glossy spheres samples

Color space	Gray	Red	Yellow	Green	Blue	Mean
CIELAB	10.74	11.55	23.20	1.80	6.46	10.75
CAM16-SCD	17.18	4.69	16.49	6.85	8.95	10.83

由表 12 可知,不同光泽度球体样本在 CIELAB 及 CAM16-SCD 空间的色度椭圆间的差别分别为 10.75 和 10.83。文献[24]中基于平面色模拟计算的光泽度影响大小为 14.8,可见,基于本次实验对 3D 球体样本的研究,光泽度对球体样本色差的影响不大于平面色。

## 6 结 论

本文共组织了 59 名色觉正常的观察者,基于心理物理实验中的灰梯尺法,对 150 对平均 CIELAB 色差为 4.72 的哑光球体和 50 对平均 CIELAB 色差为 4.74 的光泽球体开展了色差评价实验。对现有色差公式计算球体色差的性能进行评价和优化修正,结果表明,CAM16-SCD 色差公式表现性能最佳,原始色差公式对光泽球体的预测性能优于哑光球体;基于幂指数方法优化的色差计算方法  $\Delta E' = a \times (\Delta E)^b$  计算性能有显著改善。对球体模型进行色差计算优化的  $PF_{3D}$ ,相较于优化计算二维物体色的  $PF_{2D}$  公式, $b$  值均在不同程度上有所减小,说明球体模型的计算色差较二维物体色的压缩程度更大。基于 3D 球体的目视色差数据在 CIELAB 颜色空间和 CAM16-SCD 颜色空间绘制的色度椭圆,拟合结果与二维物体色具有较好的一致性,且光泽度对色度椭圆的影响不大于二维物体光泽度的影响。

**致谢** 感谢珠海赛纳三维科技有限公司的陈保全总经理、陈伟和向东清工程师在三维样本制作过程中给予的帮助和支持;感谢参与目视评价实验的所有观察者。

## 参 考 文 献

- [1] Bhushan B, Caspers M. An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication[J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(4): 1117-1124.
- [2] Rengier F, Mehndiratta A, Tengg-Kobligk H V, et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications [J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2010, 5(4): 335-341.
- [3] Hao B T, Lin G M. 3D printing technology and its application in industrial manufacturing [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 782: 022065.
- [4] Babaei V, Vidimče K, Foshey M, et al. Color contouring for 3D printing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 1-15.
- [5] Yuan J P, Zhu M, Xu B H, et al. Review on processes and color quality evaluation of color 3D printing [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, 24(2): 409-415.
- [6] Burns P D. Accuracy of approximations for CIELAB chroma and hue difference computation [J]. *Color Research & Application*, 1997, 22(1): 61-64.
- [7] Luo M R, Cui G, Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 [J]. *Color Research & Application*, 2001, 26(5): 340-350.
- [8] Luo M R, Cui G H, Li C J. Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model [J]. *Color Research & Application*, 2006, 31(4): 320-330.
- [9] Li C J, Li Z Q, Wang Z F, et al. Comprehensive color solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS [J]. *Color Research & Application*, 2017, 42(6): 703-718.
- [10] Sohaib A, Amano K, Xiao K D, et al. Colour quality of facial prostheses in additive manufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(1/2/3/4): 881-894.
- [11] Xiao K D, Zhu Y T, Li C J, et al. Improved method for skin reflectance reconstruction from camera images [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14934-14950.
- [12] Pessoa L, Mingolla E, Arend L E. The perception of lightness in 3-D curved objects [J]. *Perception & Psychophysics*, 1996, 58(8): 1293-1305.
- [13] Giesel M, Gegenfurtner K R. Color appearance of real objects varying in material, hue, and shape [J]. *Journal of Vision*, 2010, 10(9): 10.
- [14] Xiao B, Brainard D H. Surface gloss and color perception of 3D objects [J]. *Visual Neuroscience*, 2008, 25(3): 371-385.
- [15] CIE Technical Committees. 8-17 methods for evaluating colour difference between 3D colour objects [EB/OL]. [2021-05-20]. <http://cie.co.at/>

- technicalcommittees/methods-evaluating-colour-difference-between-3d-colour-objects.
- [16] Jiang L. Study on 3D printed object color difference evaluation [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2020.  
蒋兰. 3D 打印物体色差评价研究[D]. 温州: 温州大学, 2020.
- [17] Tastl I, Bhachech M, Moroney N, et al. ICC Color management and CIECAM02 [C] // Proceeding of Thirteenth Color Imaging Conference (CIC13), November 7-11, 2005, Scottsdale, Arizona. [S.l.: s.n.], 2005: 217-223.
- [18] Xu T. Effect of sample separation and color-difference magnitude on perceived color difference [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2019.  
徐婷. 色样间隔和色差大小对视觉色差的影响[D]. 温州: 温州大学, 2019.
- [19] Li C H, Li Y H. New color vision testing chart[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1994.  
李春慧, 李育宏. 新编色觉检查图[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994.
- [20] Melgosa M, Martínez-García J, Gómez-Robledo L, et al. Measuring color differences in automotive samples with lightness flop: a test of the AUDI2000 color-difference formula [J]. Optics Express, 2014, 22 (3): 3458-3467.
- [21] Kirchner E, Dekker N. Performance measures of color-difference equations: correlation coefficient versus standardized residual sum of squares [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(9): 1841-1848.
- [22] Huang M, Wang L L, Liu H X, 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.
- [23] Huang M, Cui G H, Melgosa M, et al. Power functions improving the performance of color-difference formulas [J]. Optics Express, 2015, 23 (1): 597-610.
- [24] Huang M, Liu H X, Cui G H, 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.