

文章编号: 0253-2239(2001)04-426-07

用阴极射线管显示器研究影响色差知觉的因素*

崔桂华¹⁾ 李 为¹⁾ 范秋梅¹⁾ Luo M R²⁾

1), 北京理工大学光电工程系颜色科学与工程国家重点实验室, 北京 100081
2), CII, University of Derby, Derby DE 22 3HL, UK

摘要: 利用计算机控制的阴极射线管显示器研究影响色差知觉的因素。由一组观察者采用灰标法判断以 16 组不同参数显示的色样对的色差, 获取了大量的观察数据。初步分析处理的结果表明, 在本实验研究的各种观察因素中, 色样轮廓线和背景颜色对色差知觉的影响比较明显; 在所比较的国际照明委员会 1994 年推荐的色差公式 (CIE94)、国际照明委员会 1976 年推荐的颜色空间和色差公式 (CIELAB)、伯兰福特色差公式 (BFD) 和英国颜色测量协会色差公式 (CMC) 四种色差公式中, BFD 预测色差知觉的结果最好, CIELAB 最差。在分析比较阴极射线管模拟色样和纺织品表面色样的色差评估数据基础上, 得出了人眼对阴极射线管荧屏色的色差知觉与表面色的色差知觉达到最接近的两种观察条件。

关键词: 色差; 色差公式; 目视评估; 灰标法; 阴极射线管显示器

中图分类号: O432.3 文献标识码: A

1 引 言

色差是产品颜色质量控制的一个重要指标。为了精确地再现所需颜色并保持产品颜色的一致性, 必须有一套可靠的色差公式用于量化一对色样之间的色差。到目前为止, 除了国际照明委员会 (CIE) 分别于 1976 年推荐的 CIELAB^[1] 和 1994 年推荐的 CIE94^[2,3] 色差公式外, 还出现了 CMC^[4] 和 BFD^[5,6] 等多个不同的色差公式。尽管这些公式在小色差和中色差范围内能够给出较精确的数值, 但是所有的公式都是由在某一特殊观察条件下例如高亮度、小间隔和中灰背景的观察数据推导出来的。而在实际的工业应用中, 色差的评估可能是在不同的观察条件下进行的, 这就限制了已有色差公式的适用范围。

有很多因数会影响人的色差知觉。一个理想的色差公式应包括一些可变的因子, 这些因子应随观察条件的改变而有不同的取值。1995 年国际照明委员会在工业色差评估指导书^[7] 中公布了色差评估视觉实验的参考条件, 并建议在参考条件下对色样大小、色样间隔、色样质地、背景颜色、色样亮度、色样明度、色差大小等七种实验参数开展研究。为此, 必须做大量的视觉实验, 采取不同的实验方法, 对不同质地的色样, 在各种不同的观察条件下进行

色差评估, 获取大量的观察数据, 在此基础上确定在不同的色差评估环境下色差公式的权因子。

以往的色差视觉实验, 都要制作大量的实物表面色块, 这些色块的质地大多是纺织品、印刷品, 甚至金属等。但制作符合要求的表面色块费工费时且耗资多。近年来, 高品质的阴极射线管显示器在复制颜色上的精确度和稳定性不断提高, 尤其是在计算机控制下容易产生视觉实验所需要的各种刺激图形, 颜色再现和时空变换灵活方便, 省工省时省料。李为及袁晓磊曾用色对比较法评估阴极射线管显示的色差样对, 研究了色差大小对色差知觉的影响^[8]。本文报道用灰标法在阴极射线管上进行的色差评估实验, 着重研究色样大小、色样轮廓线、色样间隔和背景颜色等观察因素对色差知觉的影响, 并比较了四种常用的色差公式预测色差知觉的能力以及在各种观察条件下人对阴极射线管荧光色与纺织品表面色的色差知觉。

2 阴极射线管显示器的调整和标定

用 SyncMaster20GLs 型彩色显示器, 在 4 MB 显存、24 位元显示卡驱动下, 分辨率可达 800 × 600 像素, 并能显示 16 MB 种颜色。为了精确再现所需的颜色, 必须调整显示器的色温、中性灰色和亮度以及进行色度标定。

国际照明委员会公布的色差评估视觉实验参考

* 国家自然科学基金 (69578002) 资助项目。

收稿日期: 1999-11-09; 收到修改稿日期: 2000-02-09

条件规定,色样的照明光源应为国际照明委员会标准照明体 D65,因此要通过反复调整红、绿、蓝三枪的增益,使显示器白场($R = G = B = 255$)的色温尽量接近 6500 K,这里 R、G、B 分别表示红色、绿色、蓝色。为了保证在红、绿、蓝三枪的数字输入相同时,屏幕上显示的是中性灰色,可以在屏幕上显示一组 0~255 之间间隔为 15 的灰标,通过反复调整三枪的偏置,直到用肉眼观察和仪器测量都达到较理想的中性灰色为止,再反复调整显示器上的亮度和对比度旋钮,将白场亮度调整到 $80 \pm 2 \text{ cd/m}^2$ 。由于显示器点亮以后,白场亮度随时间会有较大的变化,因此,对亮度的调整和测量都应当在开机经过 3 小时至 4 小时的预热稳定之后进行。

阴极射线管显示器的色度标定是指将与阴极射线管显示器相关的颜色坐标,如控制红、绿、蓝三枪电平的数字量转换成与设备无关的国际照明委员会 1931 标准色度观察者三刺激值,色度标定有多种方法,如 Post 模型^[9]和 Berns 模型^[10,11]等。用这些模型色度标定都包括下面两个阶段。

1) 非线性转换——将三枪的数字输入转换成输出的亮度值或磷粉的三刺激值。不同的模型采用不同的参数来表示这种非线性关系,在 Berns 模型中,用系统的 Γ 特性来表示, Γ 可以通过直接测量或用有关增益 k_g 、偏置 k_o 和 γ 参数的理论模型来确定,如下式所示:

$$\begin{cases} R = \left[k_{o,R} + k_{g,R} \left[\frac{d_R}{2^N - 1} \right] \right]^{\gamma_R} \\ G = \left[k_{o,G} + k_{g,G} \left[\frac{d_G}{2^N - 1} \right] \right]^{\gamma_G} \\ B = \left[k_{o,B} + k_{g,B} \left[\frac{d_B}{2^N - 1} \right] \right]^{\gamma_B} \end{cases} \quad (1)$$

其中 R、G、B 分别为红、绿、蓝三枪的磷粉三刺激值, d_R 、 d_G 、 d_B 分别为红、绿、蓝三枪的数字输入值, $k_{o,R}$ 、 $k_{o,G}$ 、 $k_{o,B}$ 和 $k_{g,R}$ 、 $k_{g,G}$ 、 $k_{g,B}$ 以及 γ_R 、 γ_G 、 γ_B 分别为三枪的偏置、增益和 γ 参数, N 为数字模拟转换器的位元数。其中三枪的偏置、增益和 γ 参数可以通过测量一系列单色样块和数据拟合方法获得。

2) 线性转换——将输出的亮度值或磷粉的三刺激值转换成国际照明委员会三刺激值,在这一阶段要获得一个有关各枪的亮度或磷粉三刺激值与国际照明委员会 1931 标准色度观察者三刺激值之间关系的线性变换矩阵。如(2)式所示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中,矩阵元素可以通过测量三枪的峰值输出来确定。

我们采用 Berns 模型进行阴极射线管显示器的标定。所有的测量(包括显示器标定和标准色样与实验色样的测量)均用美国 Photo Research 公司生产的 PR1980B 型光谱辐亮度计完成,该仪器的色品坐标 x 和 y 的测量精度均小于或等于 ± 0.005 ,亮度测量精度为 $\pm 2\%$ 。

3 色差评估视觉实验

本文在进行色差研究时,采用的是目前使用较多的灰标法^[12,13]。表 1 列出了 16 种不同的实验条件。其中实验名称(表 1 中第 2 列)用 5 个字母表示:第一个字母代表色样大小——大色样(L)或小色样(S);第二个字母表示背景颜色——中灰背景(M)、白色(W)、黑色(K)、灰色(G)、红色(R)、黄色(Y)、绿色(E)或蓝色(B);第三个字母表示色样轮廓线——黑色(K)或无轮廓线(G);第四个字母表示色样间隔的大小——无间隔(0)、1 个像素(1)、2 个像素(2)或与色样等宽间隔(L);第五个字母表示色样分隔线的颜色——无分隔线(N)、中灰色(G)或黑色(K)。

为了在阴极射线管上进行灰标法的色差评估视觉实验,编写了色差视觉实验软件,使计算机自动按照灰标法在阴极射线管上向观察者呈现五级灰标和实验色样并记录观察者给出的实验数据。该软件可以按照表 1 中所列的 16 种实验条件,将 134 对选定的色样以随机的顺序显示在屏幕上(如图 1 所示)。显示在屏幕上上部的是表 2 所列的 5 级灰标(表中 ΔE_{ab}^* 是以国际照明委员会 1976 年推荐的颜色空间和色差公式(CIELAB)单位表示的灰标中某一级与明度最小的那一级之间的色差值);在屏幕中部左右两侧分别有一对实验色样对和一对标准色样对;在

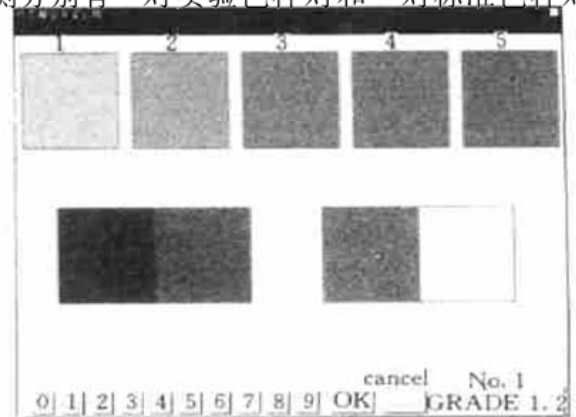


Fig. 1 Arrangement of the colour samples on CRT

屏幕下部有一个数字框, 观察者可用鼠标左键在数字框中点击数字以给出色差的判断结果。

本工作所用的 134 对实验色样分成围绕 5 个色中心的色样和中性灰色色样两部分:

Table 1 The parameters of 16 visual experiments

| No. | phase name | sample size/ pixel | | background colour | frame | width of separation/ pixel | | colour of separation | |
|-----|---------------|--------------------|-----------|----------------------|-------|----------------------------|--------|----------------------|----------|
| | | standard | sample | | | standard | sample | standard | sample |
| 1 | LMG0N | 140 × 140 | 140 × 140 | Mid grey | No | 0 | 0 | - | - |
| 2 | LMG1G | 140 × 140 | 140 × 140 | Mid grey | No | 1 | 1 | Mid grey | Mid grey |
| 3 | LMG2G | 140 × 140 | 140 × 140 | Mid grey | No | 2 | 2 | Mid grey | Mid grey |
| 4 | LMGLG | 140 × 140 | 140 × 140 | Mid grey | No | 1 | 140 | Mid grey | Mid grey |
| 5 | LMKLG | 140 × 140 | 140 × 140 | Mid grey | Black | 1 | 140 | Black | Mid grey |
| 6 | LMG1K | 140 × 140 | 140 × 140 | Mid grey | No | 1 | 1 | Black | Black |
| 7 | SMK1K | 25 × 25 | 25 × 25 | Mid grey | Black | 1 | 1 | Black | Black |
| 8 | SMG1K | 140 × 140 | 25 × 25 | Mid grey | No | 1 | 1 | Black | Black |
| 9 | SMKLG | 140 × 140 | 25 × 25 | Mid grey | Black | 1 | 25 | Black | Mid grey |
| 10 | LWK1K | 140 × 140 | 140 × 140 | White | Black | 1 | 1 | Black | Black |
| 11 | LKK1K | 140 × 140 | 140 × 140 | Black | Black | 1 | 1 | Black | Black |
| 12 | LGK1K | 140 × 140 | 140 × 140 | Grey | Black | 1 | 1 | Black | Black |
| 13 | LRK1K | 140 × 140 | 140 × 140 | Red | Black | 1 | 1 | Black | Black |
| 14 | LYK1K | 140 × 140 | 140 × 140 | Yellow | Black | 1 | 1 | Black | Black |
| 15 | LEK1K | 140 × 140 | 140 × 140 | Green | Black | 1 | 1 | Black | Black |
| 16 | LBK1K | 140 × 140 | 140 × 140 | Blue | Black | 1 | 1 | Black | Black |

Table 2 Chromatic data of the five grey-scales

| item grey scale | Y | x | y | ΔE_{ab}^* |
|--------------------|---------|--------|--------|-------------------|
| 1 | 18.0032 | 0.3145 | 0.3320 | 12.0592 |
| 2 | 13.6821 | 0.3145 | 0.3320 | 5.7019 |
| 3 | 11.5983 | 0.3145 | 0.3320 | 2.2294 |
| 4 | 10.7745 | 0.3145 | 0.3320 | 0.9917 |
| 5 | 10.3464 | 0.3145 | 0.3320 | 0 |

Note: The units of Y , x , y are colourimetry units.

The unit of ΔE_{ab}^* is CIELAB colour difference unit.

为了与表面色样的实验结果进行比较, 特意从 Cheung 的表面色样^[14]中选取本工作所用的实验色样。Cheung 的色样是用羊毛布缠绕在 75 mm 的方形白板上制备而成的, 围绕国际照明委员会推荐的五个色中心分别有 59 个~ 82 个色块与各自色中心组成色样对。本工作侧重研究各种因素对色差知觉的影响, 仅从 Cheung 的色样中选取部分色样。选取的方法是: 围绕每个色中心选取 19 个色样, 其中在色品坐标差 $\Delta x \Delta y$ 平面上, 均匀选取 12 个色样, 在色品坐标差和 Y 刺激值差 $\Delta x \Delta Y$ 和 $\Delta y \Delta Y$ 平面上各选取两个色样, 在 Y 刺激值差 ΔY 方向上选取 3 个色样, 因此, 围绕 5 个色中心共有 95 对色样。5 个色中心的 Y 刺激值和色品坐标如表 3 所示。

为了探讨各种因素对仅有明度差别色样的色差知觉的影响, 本工作中特别产生了 40 块中性灰色色样, 这些中性灰色色样的 CIELAB 明度值在 0~ 100 之间以平均 2.5 间隔均匀分布, 相邻的两块色样构成一对实验色对, 共有 39 对中性灰色色样对, 其 CIELAB 平均色差值大约为 2.5。

Table 3 Chromatic data of the five colour centers

| item colour center | Y | x | y |
|-----------------------|---------|--------|--------|
| grey | 23.9154 | 0.3156 | 0.3314 |
| red | 11.6306 | 0.4866 | 0.3410 |
| yellow | 56.4488 | 0.3907 | 0.4286 |
| green | 19.5216 | 0.2491 | 0.3631 |
| blue | 7.2207 | 0.2194 | 0.2151 |

Note: The units of Y , x , y are colourimetry units.

在实验色对的两个色块中, 如果是围绕 5 个色中心的色样, 则其中的一块为 95 个实验色块之一, 另一块的颜色为相应的色中心颜色; 如果是中性灰色色样, 则实验色对的两个色块分别是相邻的两个中性灰色色样。标准色对中的一块是五级灰标中明度最小的灰块, 用作固定不变的标准灰块, 另一块为五级灰标中任意的、可由观察者选择的可变灰块。实验色对中的两个色块和标准色对中的两个灰块呈现时的左右排列顺序都是随机的。实验色对和标准色对在屏幕上的左右位置要依次交替更换, 即如果

上次看到的实验色对在屏幕的左侧,则下一次,实验色对将会出现在屏幕的右侧。这种以随机形式呈现的色样可以避免观察者凭记忆去猜测实验结果。

20 名色觉正常的大学生作为观察者参加了本实验的工作。他们平均年龄在 20 岁左右,不具备色度学知识,但在实验前经过训练,了解了色差评估的意义,掌握了正确的观察和判断方法。

色差评估视觉实验在暗室中进行。要求观察者端坐在屏幕前 100 cm 左右处,两眼注视呈现实验图形的阴极射线管显示器屏幕至少 5 min 才开始实验。有近视或远视的观察者允许戴眼镜,但不允许戴滤色镜。

开始实验后,要求观察者比较实验色对和标准色对,判断两对色对的色差差别,然后用鼠标点击五个灰块中的某一个,实验软件会自动地用点击过的灰块替换标准色对中的可变灰块,与标准灰块一起组成新的标准色对,再与实验色对比较,直到两对色差的差异看起来最小为止。由于灰标中的灰块个数有限,实验色对的色差和标准色对的色差完全一致的几率很小,因此,需要观察者根据自己的判断,给出一个介于五个等级之间的中间值,如 3.8 表示实验色对的色差比第 3 级灰标的色差小,又比第 4 级灰标的色差大,但比较接近第 4 级灰标的色差。为

了方便观察者给出观察数据,实验软件在观察者用鼠标点击数字框给出第 1 个阿拉伯数字后,会自动将其作为整数部分并在其后加上一个小数点。当观察者给出完整的判断结果后,如果用鼠标点击“Cancel”按钮,就可以取消输入的数字以便重新进行评估;如果点击“OK”按钮,就完成一个实验色样对的评估,实验软件会自动将实验的有关数据记录在一个指定的文件中,然后自动进入下一个色样对的观察实验。

由此可见,灰标法色差评估相当于将由不同灰度等级的灰块组成的灰标作为一把“尺子”,来度量各种颜色实验样对的色差,不过这把色差“尺子”上的“刻度”单位不是色差的单位,而是灰标的“灰度级别”(简称灰级)。在以后的实验数据分析处理过程中,要把这种灰级转换成相应的色差知觉大小,从而可以与各种不同的色差公式计算的色差进行比较,判断出色差公式的好坏,还可以将不同条件下获得的色差知觉的大小进行比较,从而看出各种因素对色差知觉的影响。

4 实验数据的初步处理

表 4 列出了实验数据初步分析处理的结果。

Table 4 Experimental results

| No. | phase name | observer | | F_p | | | | e | |
|------|---------------|----------|-------|-------|--------|-------|-------|-------------------|-------------------------------|
| | | C_v | F_p | CIE94 | CIELAB | BFD | CMC | parametric effect | CRT colour vs. surface colour |
| 1 | LMG0N | 37.06 | 38.57 | 33.55 | 47.75 | 39.36 | 37.77 | 0.976 | 0.753 |
| 2 | LMG1G | 42.90 | 46.72 | 34.90 | 50.54 | 31.23 | 32.64 | 1.000 | 0.897 |
| 3 | LMG2G | 46.27 | 50.93 | 34.32 | 47.93 | 29.93 | 32.23 | 0.935 | 0.800 |
| 4 | LMGLG | 45.90 | 42.27 | 35.17 | 46.08 | 30.47 | 31.74 | 0.919 | 0.880 |
| 5 | LMKLG | 44.02 | 41.33 | 35.37 | 47.07 | 31.57 | 32.65 | 1.244 | 1.186 |
| 6 | LMG1K | 42.48 | 43.80 | 37.65 | 49.08 | 32.30 | 34.89 | 1.095 | 0.902 |
| 7 | SMK1K | 40.31 | 37.97 | 31.63 | 38.75 | 31.83 | 32.23 | 1.611 | 1.494 |
| 8 | SMG1K | 43.99 | 43.53 | 32.62 | 45.45 | 28.44 | 31.32 | 1.097 | 1.007 |
| 9 | SMKLG | 42.83 | 38.98 | 33.32 | 41.12 | 32.26 | 34.55 | 1.321 | 1.251 |
| 10 | LWK1K | 39.92 | 36.54 | 34.56 | 35.90 | 33.56 | 33.61 | 1.723 | 1.632 |
| 11 | LKK1K | 37.85 | 35.41 | 32.49 | 38.12 | 30.60 | 31.05 | 1.538 | 1.376 |
| 12 | L GK1K | 36.69 | 35.11 | 31.63 | 44.57 | 30.62 | 30.22 | 1.618 | 1.493 |
| 13 | LRK1K | 35.55 | 35.17 | 33.01 | 36.76 | 34.00 | 31.89 | 1.385 | 1.229 |
| 14 | LYK1K | 39.79 | 37.92 | 34.71 | 35.03 | 34.37 | 36.69 | 1.552 | 1.446 |
| 15 | LEK1K | 37.91 | 35.54 | 32.96 | 36.00 | 33.80 | 34.22 | 1.355 | 1.234 |
| 16 | LBK1K | 39.33 | 37.91 | 32.21 | 39.31 | 32.92 | 30.90 | 1.357 | 1.255 |
| MEAN | | 40.80 | 39.86 | 33.76 | 42.47 | 32.33 | 33.04 | 1.295 | 1.177 |

Note: The units of C_v , e and F_p are colourimetry units.

4.1 灰级 G 与色差知觉 ΔV 的转换

用数据拟合方法可以找出表 2 中的 5 个灰标的灰级 G 与对应的 CIELAB 色差 ΔE_{ab}^* 之间的解析关系式:

$$\Delta E_{ab}^* = 20.612 - 9.087G + 0.14G^2 + 0.449G^3 - 0.0558G^4. \quad (3)$$

用(3)式可以把观察者给出的灰级数据 G 转换成以 CIELAB 色差为单位的色差知觉 ΔV , 再通过分析不同实验条件下的色差知觉数据, 就可看出各种因素对色差知觉的影响。

4.2 实验数据的可靠性

目前, 用灰标法获得的实验数据多采用性能因子^[5,6,13]来评价观察结果的好坏。 F_p 的计算公式为

$$F_p = 100(\gamma - 1 + C_v/100 + V_{A-B})/3, \quad (4)$$

$$\ln(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \ln \left[\frac{\Delta E_i}{\Delta V_i} \right] - \ln \left[\frac{\Delta E_i}{\Delta V_i} \right] \right|^2},$$

$$C_v = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta E_i - f \Delta V_i)^2 / \overline{\Delta E} \right] \times 100,$$

$$f = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta E_i \Delta V_i}{\sum_{i=1}^N (\Delta V_i)^2},$$

$$V_{A-B} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta E_i - F \Delta V_i)^2}{\Delta E_i F \Delta V_i}},$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\Delta E_i}{\Delta V_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{\Delta V_i}{\Delta E_i}}.$$

从(4)式可以看出 F_p 是用百分数表示的, 由 3 个统计指标(γ 、 C_v 和 V_{A-B}) 加权组合而成的综合评价因子, 可用来比较两组数据, 度量两组数据的匹配程度。例如, 当两组数据 ΔV 和 ΔE 完全吻合时, γ 等于 1, C_v 和 V_{A-B} 等于 0, F_p 就等于 0。 γ 偏离 1 越大, 或 C_v 和 V_{A-B} 偏离 0 越远, F_p 值就越大, 表明两组数据偏离越大; 反之, F_p 值越小就表示两组数据吻合得越好。表 4 中第 3、4 列是 16 个实验的 C_v 和 F_p 的平均值, 表示每个观察者个体的色差知觉与所有观察者的平均色差知觉之间的偏离程度, 也就是观察者的观察精确度。从表 4 中可以看出 C_v 和 F_p 的最大值(用黑线框标出) 分别为 46.27 和 50.93, 最小值(用下划线标出) 分别为 35.55 和 35.11, 16 个实验的平均值(最后一行) 分别为 40.80 和 39.86, 这一结果与其他学者的研究成果^[13] 非常接近, 表明本工作获得的实验数据是合理可靠的。

4.3 各种色差公式的比较

通过用各种色差公式计算 134 对色样, 可以得

到每个公式预测同样色对时的色差大小, 再与本工作所获得的色差知觉 ΔV 相比较, 计算出每个公式的性能因子 F_p , 就可看出不同的色差公式与本工作观察结果的匹配程度。表 4 第 5、6、7、8 列是用本工作获得的色差知觉数据测试 CIE94、CIELAB、BFD、CMC 四个色差公式在 $l=1$ 时的 F_p 值。表中每个实验条件下(一行中) 的最大值和最小值分别用黑线框和下划线标出。从最后一行可以看出: CIE94、CIELAB、BFD 和 CMC 的 F_p 平均值分别为 33.76、42.47、32.33 和 33.04, 四个公式中, BFD 性能最好, 其次是 CMC 和 CIE94, 而 CIELAB 是四者中性能最差的一个。这一结果与四个公式导出的实际情况十分吻合, 因为 CMC、CIE94 以及 BFD 都是在 CIELAB 的基础上演化而来的, 而 BFD 则以复杂的公式结构去拟合各种不同的实验数据, 因而其 F_p 值较小, 预测人眼色差知觉的能力最强。

4.4 各种因素对色差知觉的影响

直接比较在不同的观察条件下所得到的色差知觉, 可获得色差知觉的大小与不同观察因素间的关系^[13]。以表 1 中序号 2(LMG1G) 为参考基准, 将在其他不同的观察条件下所获得的观察结果与参考基准进行比较, 计算出参数效应评价指标值 e :

$$e = \sum_{i=1}^N \left[\Delta V_{S_i} / \Delta V_{R_i} \right] / N, \quad (5)$$

其中 ΔV_{S_i} 是第 i 个色样对在某一观察条件下观察的色差知觉大小, ΔV_{R_i} 是相同的色样在基准条件下观察的色差知觉大小。如果色差知觉的大小不受观察条件的影响, 则 e 值应等于 1, 如果 e 值偏离 1 越远, 说明观察因素的影响越大。表 4 第 9 列是其他 15 个实验与参考基准的比较结果, 由该列数据可见:

1) 色样间隔的影响: 实验 LMG1G、LMG2G 和 LMGLG 等三个实验其他条件都相同, 只有色样之间分隔线的宽度逐渐增大(见表 1), 实验结果 e 逐渐减小, 说明色差知觉随色样间距的增大略有减小。然而, 实验 LMG0N 的色对无间隔, 其 e 反而比有间隔时小, 其原因有待进一步考察。

也可以如图 2 所示的散布图来表示两组数据之间的关系。受篇幅所限, 图 2 中只给出了序号 2(LMG1G) 和 3(LMG2G) 这两组实验数据的散布(图中纵、横坐标都是以 CIELAB 色差单位为单位的色差知觉 ΔV)。当两组实验数据完全吻合时, 所有的点都应当位于 45° 对角线上。图 2 中的数据点基本位于 45° 对角线的附近, 说明当色样间隔由 1 个像素增加到 2 个像素时, 对色差知觉的影响不大。

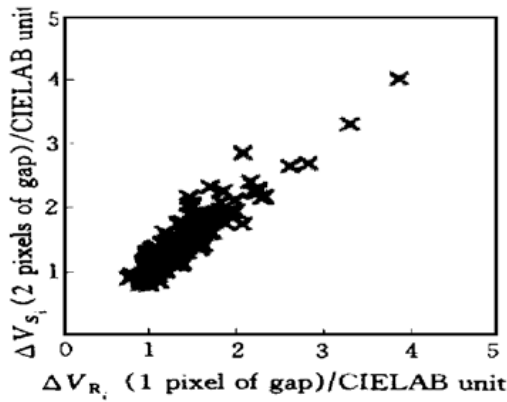


Fig. 2 Plot of ΔV for 2 pixels of gap vs that for 1 pixel of gap

2) 色样轮廓线的影响: 实验 LMKLG 与 LMGLG SMK1K 与 SMG1K 除色样轮廓线颜色不同外, 其他条件都基本相同。从 e 的数值来看, LMKLG (1.244) 比 LMGLG (0.919) 大, SMK1K (1.611) 比 SMG1K (1.097) 大, 说明色样轮廓线对色差知觉有明显影响, 有黑色轮廓线时的色差知觉比没有轮廓线时大。

3) 色样大小的影响: 实验 LMKLG 与 SMKLG LMG1K 与 SMG1K 除色样的尺寸或观察视角不同之外, 其他条件基本相同。从 e 的数值来看, LMKLG (1.244) 与 SMKLG (1.321) 相差不大, LMG1K (1.095) 与 SMG1K (1.097) 相差不大, 可见当观察视角从 10° 减小到 2° 时, 色差知觉略有增加但变化不明显。因此, 在阴极射线管上, 色样的大小对色差知觉影响不大。

4) 背景颜色的影响, 从序号 10~16 的七个实验结果看, 色差呈现的背景颜色对色差知觉的影响显著。当背景色由中灰色变成白色时, 色差知觉增大, 而变成其他颜色时, 色差知觉减小。

5) 分隔线颜色的影响: 实验 LMG1K 与 LMG1G 除了分隔线的颜色不同之外, 其他条件基本相同, 加上黑色分隔线后, e 值由 1.000 提高到 1.095, 说明有黑色分隔线时的色差知觉略大于中灰色分隔线。

4.5 荧屏色与表面色的色差知觉比较

以 Cheung 的表面色实验结果^[14]为参考基准 ΔV_R , 以本工作中用阴极射线管再现的相同色样在 16 种观察条件下的色差知觉大小 ΔV_S 为考察对象, 计算了 e 值, 结果如表 4 第 10 列所示。从该列数据可以看出, 与表面色判别结果相近的是 LMG1K 和 SMG1K 的情况, 即在阴极射线管的中灰背景上用无轮廓线的黑色小间隔大色样或大的标准样对和

小的实验样对, 可以获得与表面色相似的观察结果, 而在阴极射线管的其他各种条件下观察的结果与表面色的色差知觉相差较大。

结论

1) 色差知觉与色样轮廓线、色样对间距及其分隔线颜色和色样呈现的背景色等因素有关。判断色差时, 给色样加上黑色轮廓线, 将显著增大色差知觉; 两色样之间的间距增大会使色差知觉减小; 分隔线颜色对色差知觉大小有影响但不明显; 当色样的背景颜色改变时, 色差知觉有明显变化; 而当色对的观察视角由 10° 缩小到 2° 时, 色差知觉没有明显变化。

2) 在本实验的各种观察条件下, 色差公式 BFD 预测色差知觉的性能最好, 其次是 CMC 和 CIE94, 而 CIELAB 最差。

3) 当呈现在中灰背景上的实验色对和标准色对大小相同时, 阴极射线管上无轮廓线、小间距、黑色分隔线色对的色差知觉与表面色的色差知觉最接近; 当呈现在中灰背景上的两对色样大小不同时, 阴极射线管上无轮廓线、小间距、黑色分隔线、 2° 视角实验色对和 10° 视角标准色对的色差知觉与表面色的色差知觉最接近。

参 考 文 献

- [1] Wyszecki G, Stiles W S. *Color Science*. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons. 1982. 166~168
- [2] Alman D H. CIE Technical Committee 1~29, Industrial color difference evaluation progress report. *Color Res. Appl.*, 1993, **18**(2): 137~139
- [3] McDonald R, Smith K J. CIE94 a new colour difference formula. *J. Soc. Dyers Col.*, 1995, **111**(4): 376~379
- [4] Clarke F J J, McDonald R, Rigg B. Modification to the JPC79 colour difference formula. *J. Soc. Dyers Col.*, 1984, **100**(2): 128~132
- [5] Luo M R, Rigg B. BFD ($l:c$) colour difference formula, Part I-development of the formula. *J. Soc. Dyers Col.*, 1987, **103**(1): 86~94
- [6] Luo M R, Rigg B. BFD ($l:c$) colour difference formula, Part II-performance of the formula. *J. Soc. Dyers Col.*, 1987, **103**(2): 126~132
- [7] Witt K. CIE guidelines for coordinated future work on industrial colour difference evaluation. *Color Res. Appl.*, 1995, **20**(6): 399~403
- [8] Li Wei, Yuan Xiaolei. Visual evaluation of moderate and large color differences—effect of color difference size on color difference evaluation. *Progress in Natural Science*, 1999, **9**(9): 696~702
- [9] Post D L, Calhoun C S. An evaluation of methods for producing desired colours on CRT monitors. *Colour Res.*

- Appl.*, 1989, **14**(4): 172~ 186
- [10] Berns R S, Motta R J, Gorzynski M E. CRT colourimetry, Part I: theory and practice. *Colour Res. Appl.*, 1993, **18**(5): 299~ 314
- [11] Berns R S, Gorzynski M E, Motta R J. CRT colourimetry, Part II: metrology. *Colour Res. Appl.*, 1993, **18**(5): 315~ 325
- [12] Luo M R, Rigg B. Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours. *Colour Res. Appl.*, 1986, **11**(1): 25 ~ 42
- [13] Guan S S, Luo M R. Investigation of parametric effects using small colour differences. *Colour Res. Appl.*, 1999, **24**(5): 331~ 343
- [14] Cheung M, Rigg B. Colour-difference ellipsoids for five CIE colour centres. *Colour Res. Appl.*, 1986, **11**(3): 185~ 195

Study of the Parametric Effects in Colour-Difference Evaluation Using CRT Display

Cui Guihua Li Wei Fan Qiumei

(State Key Laboratory of Colour Science and Engineering, Department of Optics and Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Luo M R

(Colour and Imaging Institute, University of Derby, Derby DE 22 3HL, UK)

(Received 9 November 1999; revised 9 February 2000)

Abstract: Parametric effects in colour-difference evaluation were investigated using a CRT display controlled by a computer. A large number of visual data were obtained by a set of observers assessing colour-differences of sample pairs presented under 16 groups of parameters with grey-scale method. The results of preliminary processing and analyses indicated that the effects of sample frame and background colour on colour-difference perception were more obvious than other parameters considered in the experiments. The performance of BFD colour-difference formula for predicting colour-difference perception was the best and CIELAB the worst among four colour-difference formulae in comparison. Finally, two observing conditions were obtained for achieving the closest colour-difference perception of fluorescent colour on CRT and of surface colour on textile samples.

Key words: colour-difference; colour-difference formula; visual evaluation; grey-scale method; CRT display