

彩色 CRT 显示器描述颜色特性的数学模型*

王永宁 刘明亮 朱海红

(武汉测绘科技大学印刷工程系, 武汉市珞喻路 39 号, 430070)

摘 要 以 CRT 显示器的特征函数与特征矩阵来描述 CRT 显示器的输入/输出色度特性; 建立了 CRT 显示器数字驱动输入值与其显示颜色三刺激值之间关系的数学模型。

关键词 特征函数; 特征矩阵; 颜色三刺激值; CIE 标准色度学系统

分类号 P288

计算机制图及彩色电子出版系统的发展, 要求 CRT 显示器具有良好的色度特征和可控性、再现性^[1~6]。为了准确控制颜色信息的复制传递, 必须对 CRT 显示器呈色特性进行定量描述。本文将讨论彩色 CRT 显示器显色数字驱动值与其呈色的 CIE 标准色度值之间的关系。

1 彩色 CRT 显示器显示颜色特性的数学描述

光栅扫描或 CRT 显示器可产生高度逼真的图像。从计算机系统显示存储器中读出位图数据, 经查彩色表后, 获得 R 、 G 、 B 3 电子枪的数字驱动值, 再经 D/A 转换器转换成驱动 R 、 G 、 B 3

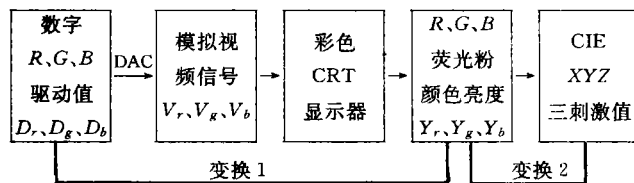


图 1 数字驱动值与 CIE 三刺激值之间的关系变换图

电子枪的模拟电压, 从而激发 R 、 G 、 B 3 电子枪荧光粉发光, 如图 1 所示。

1.1 CRT 显示器特征函数

彩色显示器有 R 、 G 、 B 3 个视频信号发生器, 设其特征函数为:

$$Y_r = f_r(D_r), Y_g = f_g(D_g), Y_b = f_b(D_b) \quad (1)$$

其中, D_i 为数字驱动输入值, Y_i 为显示器输出颜色亮度, $i=r, g, b$

为了确定式(1), 我们用美国 Photo Research 公司生产的 PR1980B 彩色亮度计测量显示器 R 、 G 、 B 3 电子枪在不同数字驱动值下驱动激发显色的三刺激值。图 2 中的 3 条曲线分别是实验测定的 CASPER 显示器 R 、 G 、 B 3 电子枪的数字驱动值与其产生颜色亮度的关系曲线。颜色亮度是以颜色三刺激值的 Y_i 值表

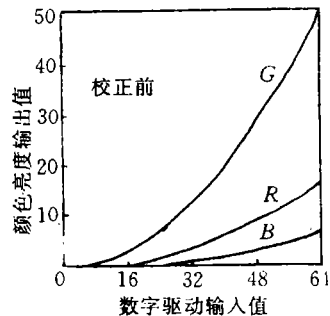


图 2 CRT 显示器电子枪数字驱动输入值与亮度输出值关系实验曲线

示的。

从图2可以看出,这个特征函数的典型表达式为指数形式,即

$$Y = KD^\gamma \quad (2)$$

R、G、B 3 电子枪的特征函数曲线形状基本相似,但不完全重合。假设通过合理的调整与控制,R、G、B 3 电子枪保持较好的独立性,这时 CRT 显示器的特征函数就为:

$$Y_r = K_r D_r^\gamma, \quad Y_g = K_g D_g^\gamma, \quad Y_b = K_b D_b^\gamma \quad (3)$$

其中, γ_i 是表征在特定的光强度域内的输入/输出特性的常数, K_i 是常数,其取值取决于 Y_i 、 γ_i 的单位。变换式(3)得:

$$\lg(Y_i) = \gamma_i \lg(D_i) + \lg(K_i), \quad i = r, g, b \quad (4)$$

式(4)是线性方程表示式。为求解 γ_i 和 $\lg(K_i)$, 我们采用线性回归分析,见表1。结果表明,线性回归效果是显著的。因此,CASPER 显示器的特征函数为:

$$Y_r = 0.0006885 D_r^{2.412}$$

$$Y_g = 0.002143 D_g^{2.452}$$

$$Y_b = 0.001388 D_b^{2.048}$$

表1 红、绿、蓝枪方程回归分析结果

	红枪方程回归	绿枪方程回归	蓝枪方程回归
方程系数 γ_i	2.412 4	2.451 6	2.084
方程系数 $\lg K_i$	-3.162 1	-2.669	-2.857 5
偏差平方和	0.000 233	0.003 49	0.003 49
平均标准偏差	0.004 83	0.018 7	0.018 7
回归平方和	0.788	0.813 9	0.588 5
相关系数	0.999	0.999	0.999

1.2 CRT 显示器特征矩阵

输入 D_r 、 D_g 、 D_b 数值到计算机系统中激发 R、G、B3 电子枪分别产生 Y_r 、 Y_g 、 Y_b 亮度的颜色。 Y_r 、 Y_g 、

Y_b 空间是线性色度空间,它们的加法混合产生一个颜色刺激。CIE XYZ 色度值与 CRT 显示器 R、G、B 荧光颜色亮度 Y_r 、 Y_g 、 Y_b 的关系为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_r \\ Y_g \\ Y_b \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} Y_r \\ Y_g \\ Y_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中矩阵 A 描述了 Y_r 、 Y_g 、 Y_b 色度空间与 XYZ 色度空间的线性变换关系。我们称 3×3 矩阵 A 为彩色监视器的特征矩阵,矩阵系数 a_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 是描述红、绿、蓝荧光颜色对形成 XYZ 三刺激值贡献的一组参数。求解特征矩阵就是要确定 a_{ij} 。

将 CRT 显示器特征函数代入式(5),则

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_r D_r^\gamma \\ K_g D_g^\gamma \\ K_b D_b^\gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

假设 CRT 显示器在其整个输入信号范围内激发产生荧光颜色的色度特性稳定,则 a_{ij} 的确定可以通过以最大输入数值分别驱动 R、G、B 电子枪中的一枪,并测定相应激发产生的颜色三刺激值 (X_i 、 Y_i 、 Z_i) 进行,即分别测量在 ($D_r = \max, D_g = D_b = 0$), ($D_g = \max, D_r = D_b = 0$), ($D_b = \max, D_r = D_g = 0$) 时驱动产生的颜色三刺激值 ($X_{i\max}$ 、 $Y_{i\max}$ 、 $Z_{i\max}$), 形成 3 个矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} X_{r\max} \\ Y_{r\max} \\ Z_{r\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_r a_{11} D_r^\gamma \\ K_r a_{21} D_r^\gamma \\ K_r a_{31} D_r^\gamma \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X_{g\max} \\ Y_{g\max} \\ Z_{g\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_g a_{12} D_g^\gamma \\ K_g a_{22} D_g^\gamma \\ K_g a_{32} D_g^\gamma \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X_{b\max} \\ Y_{b\max} \\ Z_{b\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_b a_{13} D_b^\gamma \\ K_b a_{23} D_b^\gamma \\ K_b a_{33} D_b^\gamma \end{bmatrix} \quad (7)$$

则特征矩阵 A 的系数 a_{ij} 分别为:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \frac{X_{r\max}}{K_r D_r^{\gamma_r}}, a_{21} = \frac{Y_{r\max}}{K_r D_r^{\gamma_r}}, a_{31} = \frac{Z_{r\max}}{K_r D_r^{\gamma_r}}, a_{12} = \frac{X_{g\max}}{K_g D_g^{\gamma_g}}, a_{12} = \frac{Y_{g\max}}{K_g D_g^{\gamma_g}} \\
 a_{32} &= \frac{Z_{g\max}}{K_g D_g^{\gamma_g}}, a_{13} = \frac{X_{b\max}}{K_b D_b^{\gamma_b}}, a_{23} = \frac{Y_{b\max}}{K_b D_b^{\gamma_b}}, a_{33} = \frac{Z_{b\max}}{K_b D_b^{\gamma_b}}
 \end{aligned} \tag{8}$$

将实验数据及 γ_i, K_i 值分别代入式(8), 求解特征矩阵 A 的系数 a_{ij} 。这样, CASPER 显示器的特征矩阵为:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1.781 & 0.530 & 2.393 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.008 & 0.165 & 12.478 \end{bmatrix} \tag{9}$$

1.3 CRT 显示器数字驱动值与输出颜色三刺激值间的关系模型

彩色 CRT 显示器的特征函数 $Y_i = f_i(D_i)$ 与特征矩阵 A 确定后, 则数字驱动值 D_r, D_g, D_b 与显示颜色三刺激值 X, Y, Z 之间关系的数学模型为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_r a_{11} & K_g a_{12} & K_b a_{13} \\ K_r a_{21} & K_g a_{22} & K_b a_{23} \\ K_r a_{31} & K_g a_{32} & K_b a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_r^{\gamma_r} \\ D_g^{\gamma_g} \\ D_b^{\gamma_b} \end{bmatrix} \tag{10}$$

根据 CASPER 显示器的实验数据, 将它们代入式(10), 则

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.23E-03 & 1.14E-03 & 3.32E-03 \\ 6.89E-04 & 2.14E-03 & 1.39E-03 \\ 1.00E-05 & 3.50E-04 & 1.73E-02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_r^{2.412} \\ D_g^{2.452} \\ D_b^{2.084} \end{bmatrix} \tag{11}$$

2 精度分析与评价

表 2 颜色样品色度数据的实测值与计算值以及它们的色差值

D_r	D_g	D_b	X_c	Y_c	Z_c	X_m	Y_m	Z_m	ΔE_{Lab}
50	30	0	19.556	17.480	1.507	19.320	17.630	1.580	2.05
40	60	0	32.91	54.00	7.63	32.80	54.38	7.54	1.52
20	20	0	3.29	4.25	0.53	3.15	4.38	0.532	4.16
50	0	30	19.06	10.17	20.48	19.20	10.01	20.34	1.98
40	0	60	25.40	11.98	86.39	25.53	11.72	86.54	2.51
20	0	20	3.34	1.64	8.76	3.49	1.57	8.90	4.55
0	50	30	19.29	33.01	25.19	19.43	33.29	25.01	0.78
0	40	60	25.45	25.15	89.12	25.58	25.47	89.31	0.96
0	20	20	3.30	4.03	9.26	3.48	4.26	8.95	2.45
51	0	0	15.90	8.94	0.10	16.11	9.08	0.08	1.44
63	0	0	26.25	14.73	0.14	26.41	14.83	0.12	1.40
0	51	0	18.48	34.25	5.08	18.26	34.56	5.28	0.67
0	63	0	27.50	51.55	8.26	27.194	51.308	8.48	1.97
0	0	51	11.57	5.38	60.37	11.68	5.14	60.57	4.11
0	0	63	18.48	7.43	95.20	18.31	7.65	95.46	1.40
45	25	60	31.12	19.35	87.30	31.50	19.24	87.61	1.96
55	60	30	47.04	61.40	28.08	47.37	61.24	28.10	1.32
20	50	40	24.16	35.30	41.93	24.25	35.35	41.74	3.72

为了检验数学模型的精度,我们将以 PR1980B 彩色亮度计实际测量由 D_r 、 D_g 、 D_b 驱动 CRT 显示器呈色的色度数据,另以相等的 D_r 、 D_g 、 D_b 代入关系模型中计算出色度数据,分析、比较实测数据与计算数据,计算它们的色差(见表 2)。

从表 2 可知,所检验的 18 个颜色样品,它们的计算值与实测值间的色差 $\Delta E_{\text{Lab}} < 5\text{NBS}$,可认为是视觉等效。实验表明,式(10)所示的数学模型是行之有效的。

参 考 文 献

- 1 王 选. 北大方正电子出版系统最新技术发展. 云南印刷, 1994(4): 14~18
- 2 肖建国. 北大方正彩色出版系统的技术路线. 印刷技术, 1994(6): 6~10
- 3 Durrett H J. Color and the Computer. Acadmic Press Inc. , 1987.
- 4 Laihanen P. Color Reproduction Theory Based on, the Principles of Color Science. Advances in Printing Science and Technology, 1992, 19(6): 1~36
- 5 Carli D. High Fidelity Color Rendering and Reproduction. TAGA, 1991. 8~19
- 6 Levenson H R. Color Electronic Prepress System; Developer/User Survey. TAGA, 1992. 1~12
- 7 Xu L. Color Space for Image Representation and Image Proceeding. TAGA, 1992. 114~138
- 8 Ronngren H. CIEXYZ Color Space Used for Image Compression. TAGA, 1992. 139~151
- 9 Johnson T. Device Independent Color... Is It Real. TAGA, 1992. 81~113
- 10 Burger R E. A Novel Calibration Target for Film Scanners. TAGA, 1992. 152~160
- 11 Jung E J. Use of Image Analysis and Colorimetric Calibration for Automatic Setting of Scanner—and Reproduction—Parameters. TAGA, 1992. 161~178
- 12 Gentile R S. Digital Display and Printing of Color Images Based on Uniform Color Space. SPIE, 1988, 901 (2): 194~204

The Mathematic Models Describing Color Property of Color CRT Monitor

Wang Yongning Liu Mingliang Zhu Haihong

(Dept. of Printing Engineering. WTUSM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

Abstract This paper presents the method for describing CRT (Cathode—Ray—Tube) monitor input/output color property by means of the monitor characteristic function and characteristic matrix, develops the mathematic models relating CRT monitor digital drive values with display color tristimulus values.

Key words characteristic function; characteristic matrix; color tristimulus values; CIE standard colorimetric system