

# 传统阴极射线管色度预测模型的 相干误差分析\*

廖宁放

(清华大学精仪系, 北京 100084)

石俊生 曾 华 余鸿飞 白凤翔 杨卫平

(云南师范大学物理系, 昆明 650092)

**摘 要** 传统阴极射线管(CRT)色度预测模型大都建立在三刺激值的可加性原理之上。但是在实际应用中由于红绿蓝(RGB)三个通道之间存在相互干扰,使得红绿蓝的颜色合成结果在一定程度上偏离了叠加原理,因此传统阴极射线管色度预测模型必然产生相干误差。通过实验表明,红绿蓝三个通道之间的干扰主要表现为一种相互抑制作用,因此造成的传统阴极射线管色度预测模型的预测色差随显示亮度的增加而加大。

**关键词** 阴极射线管色度, 色度预测, 彩色显示, 计算机图形。

## 1 引 言

阴极射线管彩色显示技术是计算机应用的重要基础之一,而阴极射线管彩色显示色度的预测方法则是近年来色度学研究领域内的一个热门课题<sup>[1~6]</sup>。迄今为止,在有关权威刊物上已发表了多种阴极射线管色度预测模型或方法。尽管这些传统模型各有其特点,但它们所遵循的理论基础是一致的,即都毫无例外地采用了传统色度学理论的三基色原理,或称三刺激值的可加性原理。从理论上说,三基色原理的正确性是无庸置疑的,但是在实际阴极射线管色度合成过程中该原理未必完全成立。主要原因之一就是由于红绿蓝三个通道之间存在相互干扰。事实上,阴极射线管三个通道间的相互作用问题早就被人们所认识,但是现有传统阴极射线管色度预测模型并没有把它的影响考虑在内,所以这类模型必然产生相干误差。然而,相干误差的作用机理是什么?它对传统阴极射线管色度预测模型的影响程度如何?这些问题还有待人们进一步探索,这也正是本文所要探讨的问题。

## 2 传统阴极射线管色度预测模型剖析

阴极射线管色度预测较有代表意义的是 PLCC 模型、PLVC 模型以及 Berns 模型等。

\* 云南省自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1998-01-04; 收到修改稿日期: 1998-11-11

## 2.1 PLCC 模型

PLCC 是 Piecewise linear interpolation assuming constant chromaticity coordinates —— 假定荧光粉色品恒定下的分段线性插值法”的缩写。该模型可用矩阵式表达:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r/y_r & x_g/y_g & x_b/y_b \\ 1 & 1 & 1 \\ z_r/y_r & z_g/y_g & z_b/y_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_r \\ L_g \\ L_b \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  代表阴极射线管显示的颜色三刺激值,  $L_r$ 、 $L_g$ 、 $L_b$  表示红绿蓝三个通道独立工作时所产生的屏幕亮度值,  $(x_r, y_r, z_r)$ 、 $(x_g, y_g, z_g)$ 、 $(x_b, y_b, z_b)$  则分别表示红绿蓝三种荧光粉的色品坐标。在具体应用时,  $L_r$ 、 $L_g$ 、 $L_b$  是通过下式与计算机中的阴极射线管色度控制参数红绿蓝相联系的:

$$L_r = f_r(R), \quad L_g = f_g(G), \quad L_b = f_b(B), \quad (2)$$

其中  $f_r(R)$ 、 $f_g(G)$ 、 $f_b(B)$  为亮度函数, 可以采用分段线性插值法来建立。

PLCC 模型的特点是使用起来较为简单。由(1)式不难看出, 该模型是建立在如下两个假设条件之上的: 1) 荧光粉的色品坐标是恒定的, 与驱动参数无关; 2) 红绿蓝三个通道的三刺激值具有可加性。

## 2.2 PLVC 模型

PLVC 是 Piecewise linear interpolation assuming variable chromaticity coordinates —— 把荧光粉色品变化考虑在内的分段线性插值法”的缩写。该模型可用下式表达:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dX_R/dR & dX_G/dG & dX_B/dB \\ dY_R/dR & dY_G/dG & dY_B/dB \\ dZ_R/dR & dZ_G/dG & dZ_B/dB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中,  $(dX_R/dR, dX_G/dG, dX_B/dB)$ ,  $(dY_R/dR, dY_G/dG, dY_B/dB)$ ,  $(dZ_R/dR, dZ_G/dG, dZ_B/dB)$  分别表示红绿蓝三个通道产生的三刺激对红绿蓝驱动参数的变化率。在具体应用中, PLVC 法首先把红绿蓝的数值按大小分为若干段, 然后用仪器测出在各段红绿蓝数值驱动下阴极射线管红绿蓝三个通道所显示的颜色三刺激值对红绿蓝的变化率, 这样就可以通过(3)式计算整个红绿蓝空间的输出色度。由于(3)式避开了荧光粉色品变化的影响, 所以 PLVC 模型比 PLCC 模型要准确一些, 但更复杂一些。不过它仍然要求红绿蓝三个通道的颜色合成满足叠加原理。

## 2.3 Berns 模型

Berns 是美国 Rochester 理工学院的孟塞尔(Munsell)颜色科学实验室的著名学者, 他提出的阴极射线管色度预测模型由下式表达:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r, \max} & X_{g, \max} & X_{b, \max} \\ Y_{r, \max} & Y_{g, \max} & Y_{b, \max} \\ Z_{r, \max} & Z_{g, \max} & Z_{b, \max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$R = f_r(D_r, Y_r, k_{gr}, k_{or}), \quad G = f_g(D_g, Y_g, k_{gg}, k_{og}), \quad B = f_b(D_b, Y_b, k_{gb}, k_{ob}).$$

其中,  $(X_{r, \max}, Y_{r, \max}, Z_{r, \max})$ ,  $(X_{g, \max}, Y_{g, \max}, Z_{g, \max})$ ,  $(X_{b, \max}, Y_{b, \max}, Z_{b, \max})$  分别表示红绿蓝三个通道在最大驱动参数的单独作用下产生的三刺激值,  $(D_r, D_g, D_b)$  表示计算机中的红绿蓝色度控制参数,  $(Y_r, Y_g, Y_b)$ 、 $(k_{gr}, k_{gg}, k_{gb})$ 、 $(k_{or}, k_{og}, k_{ob})$  等都是与阴极射线管硬件有关的参数。Berns 模型的特点是尽量用阴极射线管硬件参数来表达色度的计算过程以减少

实际测量工作量。但归根到底，它还是离不开叠加原理。

综上所述，虽然 PLCC、PLVC 以及 Berns 模型各有其特点，但它们在本质上是相同的，即都认为红绿蓝通道的三刺激值是可加的。而这正是问题的关键所在。

### 3 红绿蓝通道相干现象的定性分析

为了定性分析红绿蓝三个通道之间的相干现象，首先分别测量了三个通道单独工作时的光谱分布曲线，结果如图 1 所示。在实验中使用的光谱测量装置是由美国的“Ocean-Optical”公司制作的微型分光光谱仪。该仪器经过标定后，可以快速测定阴极射线管屏幕颜色的光谱分布，根据光谱分布还可以进一步计算颜色的 CIE 色度参数。用于实验的阴极射线管型号为 EMC PV-850D，其屏幕尺寸为 35.6 cm (14-inch)，显示控制模式为 640×480×16M 色，红绿蓝的驱动值分别为 0~255 之间。在每次测量过程中，阴极射线管都被设置为整屏显示单一种颜色，测量区域为屏幕中部。

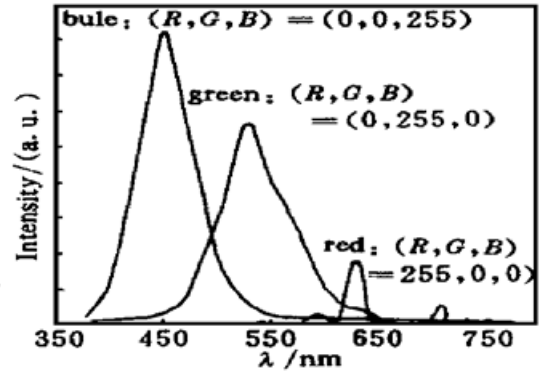


Fig.1 The spectrum curves produced by RGB channels independently

由图 1 可知，虽然红绿蓝三个通道单独产生的光谱曲线主要分布在各自的波段，但三条曲线之间总有少量的交叠。根据叠加原理可知，当把这三条光谱曲线简单相加时，其合成曲线的光谱响应值应当大于或等于三条曲线中任何一条的光谱响应值。

同理可知，如果阴极射线管三个通道的颜色合成过程符合叠加原理，则红绿蓝的合成光谱也应大于或等于单个通道产生的光谱，但事实并非如此。为了证实这一现象，我们通过固定或改变红绿蓝三个通道的驱动参数对阴极射线管显示光谱进行了一系列测量，并选择其中有意义的测量结果进行分析，如图 2~ 图 4 所示。在图 2 中有(0, 255, 255)和(0, 128, 255)两条曲线，它们都是绿蓝两个通道的合成结果。从叠加原理来看，前者的蓝峰值应当大于后者，但实际情况恰好相反，即后者大于前者。这说明随着绿通道的驱动参数增加，它对蓝通道的抑制作用也增加。图 3 和图 4 也出现了类似的现象。总之可以认为红绿蓝三个通道之间存在相互抑制作用。

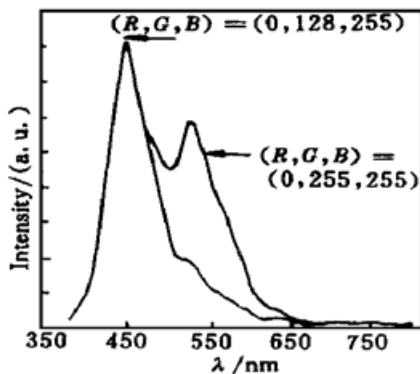


Fig. 2 The effect of B (blue)-channel influenced by G (green)-channel

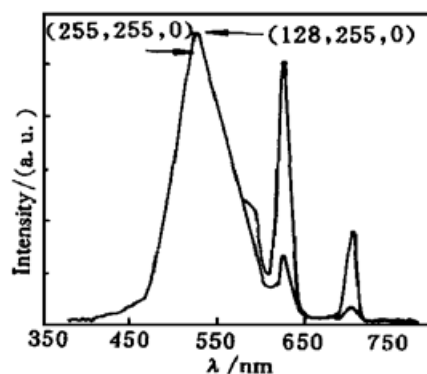


Fig. 3 The effect of G (green)-channel influenced by R (red)-channel

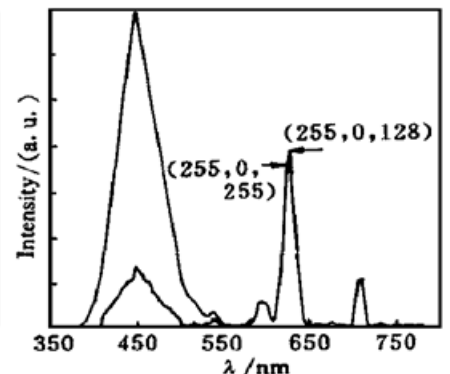


Fig. 4 The effect of R (red)-channel influenced by B (blue)-channel

通过以上分析可得到以下结论：阴极射线管中红绿蓝三通道之间存在明显的相干现象，

这一现象以红绿蓝的相互抑制作用为特征, 因此红绿蓝三个通道的颜色合成过程并不严格遵守叠加原理。

#### 4 相干误差的定量分析

由于红绿蓝通道间的相互抑制作用, 基于叠加原理的传统阴极射线管色度预测模型必然产生相干误差。为了定量分析该类误差, 进行了以下实验。

1) 选择阴极射线管的驱动参数红绿蓝值分别为 80、160 和 240, 用以单独驱动阴极射线管显示, 同时测量阴极射线管所显示的三刺激值, 结果如表 1 所示。

Table 1. Results of CRT display driven by single RGB values

<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>
240	0	0	38.9	19.3	2.6	0.64	0.32
160	0	0	15.6	7.6	1.1	0.64	0.31
80	0	0	6.4	3.1	0.7	0.63	0.30
0	240	0	65.1	144.2	22.4	0.28	0.62
0	160	0	27.3	60.5	8.9	0.28	0.63
0	80	0	5.8	12.8	1.8	0.28	0.63
0	0	240	42.8	23.6	227.0	0.15	0.08
0	0	160	17.7	9.4	94.3	0.15	0.08
0	0	80	3.6	1.8	18.1	0.15	0.08

2) 根据表 1 的数据, 采用叠加原理计算阴极射线管的显示色度三刺激值, 计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} X_p(R, G, B) &= X(R, 0, 0) + X(0, G, 0) + X(0, 0, B), \\ Y_p(R, G, B) &= Y(R, 0, 0) + Y(0, G, 0) + Y(0, 0, B), \\ Z_p(R, G, B) &= Z(R, 0, 0) + Z(0, G, 0) + Z(0, 0, B). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

计算结果列于表 2。

Table 2. The values of (*X*, *Y*, *Z*) and (*X<sub>p</sub>*, *Y<sub>p</sub>*, *Z<sub>p</sub>*) corresponding to RGB

<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>X<sub>p</sub></i>	<i>Y<sub>p</sub></i>	<i>Z<sub>p</sub></i>
240	240	240	143.1	160.7	218.2	146.8	187.1	252.2
160	160	160	59.2	74.1	95.2	60.6	77.5	104.3
80	80	80	14.8	16.1	20.2	15.8	17.7	20.6
240	240	160	118.4	151.7	102.5	121.7	172.9	119.3
240	240	80	106.4	148.9	39.6	107.6	165.3	43.1
240	160	240	99.7	89.5	209.9	109.0	103.4	238.5
240	80	240	78.1	50.2	207.6	87.5	55.7	231.4
160	240	240	119.4	158.4	223.4	123.5	175.4	250.5
80	240	240	110.3	154.8	225.4	114.3	170.9	250.1
240	160	160	79.5	82.5	93.4	83.9	89.2	105.8
240	80	80	45.4	32.3	21.8	48.3	33.9	22.5
160	160	240	81.2	83.1	216.7	85.7	91.7	237.0
80	80	240	53.4	39.4	218.5	55.0	39.5	229.5
160	240	160	96.2	148.1	105.4	98.4	161.2	117.8
80	240	80	72.4	136.1	39.4	75.1	149.1	41.2

3) 用上述红绿蓝参数 80、160 和 240 的组合值分别驱动阴极射线管显示, 并用光谱仪测

量所显示的三刺激值  $X(R, G, B)$ 、 $Y(R, G, B)$ 、 $Z(R, G, B)$ , 结果也列于表 2。

4) 计算  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  与  $X_p$ 、 $Y_p$ 、 $Z_p$  之间的 CIELUV 色差值。所采用的色差公式为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta E_{uv} &= \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta u)^2 + (\Delta v)^2}, \\ L &= 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16, & u &= 13L(u' - u'_n), & v &= 13L(v' - v'_n), \\ u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, & v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}, \\ u'_n &= \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}, & v'_n &= \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中  $X_n$ 、 $Y_n$ 、 $Z_n$  采用显示器白场( $T = 9300\text{ K}$ ) 的三刺激值。即  $x = 0.281$ ,  $y = 0.311$ , 且令  $Y_n = 100$ , 则  $X_n = 90.35$ ,  $Z_n = 131.19$ 。考虑到在(6)式中, 通常有  $Y \leq Y_n$ , 所以还要把表 2 中的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  和  $X_p$ 、 $Y_p$ 、 $Z_p$  的值进行归算处理, 如表 3 所示。注意归算后的亮度最大点( $R, G, B$ ) = (240, 240, 240) 的  $Y$  值为 100。色差计算结果如表 3 所示。

Table 3. CIELUV color differences Between ( $X, Y, Z$ ) and ( $X_p, Y_p, Z_p$ )

$R$	$G$	$B$	$X$	$Y$	$Z$	$X_p$	$Y_p$	$Z_p$	$\Delta E_{uv}$
240	240	240	89.0	100.0	135.8	91.4	116.4	156.9	29.7
160	160	160	36.9	46.1	59.2	37.7	48.2	64.9	6.9
80	80	80	9.2	10.0	12.6	9.8	11.0	12.8	4.4
240	240	160	73.7	94.4	63.8	75.7	107.6	74.2	25.1
240	240	80	66.2	92.7	24.6	67.0	102.9	26.8	22.0
240	160	240	62.0	55.7	130.6	67.8	63.3	148.4	9.5
240	80	240	48.6	31.2	129.2	54.4	34.7	144.0	7.0
160	240	240	74.3	98.6	139.0	76.9	109.1	155.9	16.1
80	240	240	68.6	96.3	140.3	71.1	106.3	155.6	14.4
240	160	160	49.5	51.3	58.1	52.2	55.5	65.8	7.8
240	80	80	28.3	20.1	13.6	30.1	21.1	14.0	4.8
160	160	240	50.5	51.7	134.8	53.3	57.1	147.5	8.9
80	80	240	33.2	24.5	136.0	34.2	24.6	142.8	5.0
160	240	160	59.9	92.2	65.4	61.2	100.3	73.3	14.4
80	240	80	45.1	84.7	24.5	46.7	92.8	25.6	13.5

## 5 结果分析

1) 由表 1 的几组色品坐标 ( $x, y$ ) 的值可以看出, 该显示器红绿蓝通道所采用的荧光粉与 PAL 制的“现代荧光粉”相近。由表 2 的头三行数据还可以分别计算出显示器在高、中、低亮度下的白场色品以及相关色温, 与 9300 K 的标准值很接近。与标准数据稍有偏差的原因, 一种可能是阴极射线管硬件本身性能的差别所致, 另一种可能是光谱测量仪器的相对测量误差所致。但小量的相对测量误差并不妨碍本实验结论的可靠性。

2) 在表 2 和表 3 中, ( $X_p, Y_p, Z_p$ ) 的值普遍大于相应 ( $X, Y, Z$ ) 的值, 这正是由于 ( $X, Y, Z$ ) 的值受到红绿蓝通道之间相互抑制的结果。所以, 传统阴极射线管色度预测模型按照迭加原理预测的色度值不能准确反映实际显示色度值。

3) 由表 3 还可以发现, 色差最大值和最小值分别出现在 ( $R, G, B$ ) = (240, 240, 240) 和 (80, 80, 80) 的地方, 且随着显示亮度值  $Y$  的增大, 预测色差值也相应增大。这一结果证

实,在较高亮度显示时,由于红绿蓝的取值较大,所以红绿蓝通道的相互抑制效应也较大。因此,对于传统阴极射线管色度预测模型来说,为了避免产生大的相干误差,应避免显示器工作在高亮度区域。

**结 论** 由于红绿蓝三个通道的相互抑制作用,三个通道的色度合成过程并不完全满足叠加原理。因此,基于叠加原理建立的传统阴极射线管色度预测模型必然产生明显的预测误差。实验结果表明,该误差随着显示亮度的增加而加大。而这种预测误差对于很多应用场合来说是不能接受的。因此有必要对传统色度预测模型进行改进,或者寻求一种新的色度预测方法。

### 参 考 文 献

- [1] Post D L. An evaluation of methods for producing desired colors on CRT. *Color Research and Application*, 1989, **14**(4) : 172~ 186
- [2] Brainard D H. Calibration of a computer controlled color monitor. *Color Research and Application*, 1989, **14**(4) : 23~ 30
- [3] Berns R S. CRT colorimetry part I: Theory and practice. *Color Research and Application*, 1993, **18**(5) : 299~ 314
- [4] del Barco L. Considerations on the calibration of color displays, assuming constant channel chromaticity. *Color Research and Application*, 1995, **20**(6) : 377~ 387
- [5] Bodrogi P, Schanda J. Testing a calibration method for color CRT monitors, a method to characterize the extent of spatial interdependence and channel interdependence. *Displays*, 1995, **16**(3) : 123~ 133
- [6] 王敬平. 阴极射线管的色度预测. *光学技术*, 1994, (5) : 34~ 38

## Analysis of Interactive Errors in Conventional CRT Colorimetric Prediction Models

Liao Ningfang

(Department of Precision, Tsinghua University, Beijing 100084)

Shi Junsheng    Zeng Hua    Yu Hongfei    Bai Fengxiang    Yang Weiping

(Department of Physics, Yunnan Normal University, Kunming 650092)

(Received 4 January 1998; revised 11 November 1998)

**Abstract** Up to now, almost all conventional cathode-ray tube (CRT) colorimetric prediction models are based on the “superposition principle of tristimulus values”. Through a series of experiments. It is found that there exists a kind of “suppressive effect” among RGB channels in practical CRTs, and this effect will invalidate the superposition principle and result in the interactive errors in conventional CRT colorimetric prediction models. The experimental results show the errors caused by this “interaction effect” will increase with the luminance values on the CRT screen.

**Key words** cathode-ray tube colorimetry, computer graphics, color display, colorimetric prediction.