

文章编号: 1000-7032(2023)02-0346-10

## 温度波动对LED显示屏白平衡主要参数及图像色调的影响

宿 然<sup>1,2</sup>, 郑喜凤<sup>1,3</sup>, 陈 宇<sup>1,3\*</sup>, 刘凤霞<sup>1,2</sup>, 张 鑫<sup>1,3</sup>,  
汪 洋<sup>1,3</sup>, 曹 慧<sup>3</sup>, 苗 静<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长春希达电子有限公司, 吉林 长春 130103)

**摘要:** LED显示屏的图像显示质量一直是显示行业内重点关注的问题,而LED显示屏的白平衡参数决定了其复现和还原的显示图像的亮度和色调,是影响图像显示质量的重要因素。一般情况下,显示屏的白平衡由红、绿、蓝三基色的亮度配平比例确定,而且该配平比例相对稳定;但是对于LED的各个基色来说,环境因素的变化会引起基色参数的变化,从而导致显示屏白平衡的漂移,严重影响图像显示质量。本文基于色度学理论和LED显示特性,构建了特定LED显示颜色空间模型;并在设定颜色空间探究不同温度环境各个基色仅在亮度变化条件下对白平衡参数的影响,重点研究了在温度波动条件下白平衡的漂移规律以及显示图像产生的色调的畸变情况;通过归纳不同波动参数定量分析温度变化对LED显示屏白平衡主要参数的影响,为高清LED显示控制系统提供较有价值的图像修正理论依据,有助于提升高端LED显示产品的显示质量。

**关键词:** LED显示; 温度波动; 白平衡

中图分类号: TN952; TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20220257

### Effect of Temperature Fluctuation on White Balance Main Parameters and Hue of LED Panel

SU Ran<sup>1,2</sup>, ZHENG Xifeng<sup>1,3</sup>, CHEN Yu<sup>1,3\*</sup>, LIU Fengxia<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1,3</sup>,  
WANG Yang<sup>1,3</sup>, CAO Hui<sup>3</sup>, MIAO Jing<sup>3</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Changchun Cedar Electronics Technology Co., Ltd., Changchun 130103, China)

\* Corresponding Author, E-mail: chen@caxida.com

**Abstract:** Image quality has always been a hot topic in LED display field, one of momentous contributing factors is white balance parameter, which directly determines the luminance and chroma fidelity. Generally, white balance is adjusted by fixed ratio of luminance of the primaries. Furthermore, balance ratio is relatively stable. But for each primary of the LED, changes in environmental factors will cause changes in the primary parameters. As a result, the white balance of the display panel drifts, which seriously affects the image display quality. Based on the theory of chromaticity and characteristics of LED, this paper builds a gamut model of a specific LED display to discuss the effect of each primary on white balance parameters in different temperature environments only when the brightness changes. The variation of white balance parameters and hue distortion under temperature fluctuation are mainly quantitative analyzed. In that, this paper provides a valuable theoretical basis for the revision of the high-definition LED display control system, which helps to enhance the qualities of high-end LED display products.

**Key words:** LED display; temperature fluctuation; white balance

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2022-07-25

基金项目: 吉林省科技发展计划重大科技专项(20210301002GX); 长春市科技发展计划项目(21ZGG18)

Supported by Key Projects of Jilin Province Science and Technology Development Plan(20210301002GX); Changchun Science and Technology Development Plan Item(21ZGG18)

## 1 引言

随着科技的发展和社会的进步,LED(Light emitting diode)大屏幕显示器作为新型显示的重要分支,发展越来越迅速,应用领域也在不断拓展。其中LED全彩色显示屏因其具有大尺寸、高亮度、无缝拼接等优点,在服务业、金融业、交通等方面应用十分广泛。LED全彩显示屏的每个像素的颜色是由红、绿、蓝三种颜色的LED按规定比例的灰度级组合而成<sup>[1]</sup>。所以LED显示屏白平衡的主要特性与红、绿、蓝的亮度和色度具有相关性,稳定各个基色的匹配比例参数不但能够保证显示器的白平衡正确复现,而且能使显示图像的色调得到正确还原。LED显示产品虽然优点众多,但是LED的发光易受诸多内部和外部因素的影响,例如LED的温度特性、衰减特性以及驱动电路电源等因素会使各个基色的亮度随着时间而产生变化,导致白平衡的亮度产生偏差<sup>[2]</sup>。本文基于LED的温度特性展开了温度波动对LED白平衡主要参数影响的研究。

LED的发光是P-N结中载流子相互作用的结果,随着温度的不断升高,LED中载流子发生复合的几率逐步下降,则LED的发光效率降低,造成发光亮度减弱,且各种颜色的LED对温度波动敏感度不同<sup>[3]</sup>。因此温度波动会对各个基色LED的发光亮度产生不同影响,从而会使LED屏幕白平衡的主要参数——亮度及色度坐标产生偏移。因此,在实际应用中必须考虑温度这一因素带来的误差影响。国内外研究人员对不同温度条件、不同发光材料、不同发光颜色的LED芯片的发光特性、人体的视觉感知进行了一系列研究<sup>[4-9]</sup>。另外,对色温与白平衡点的确定、控制与配平比的关系也有一定的研究<sup>[10-13]</sup>。但是温度波动对LED亮度和白平衡的影响定量分析的相关研究和报道很少。为了确定温度波动对LED显示屏带来的误差与影响,本文基于色度学理论和LED显示器特性,构建了LED显示颜色空间模型;研究各个基色的亮度在不同温度条件下的变化情况;设定颜色空间探究不同温度环境白平衡参数的变化规律以及对显示图像色调畸变的影响;并定量分析温度波动对白平衡主要参数的影响。为高清LED显示控制系统提供较有价值的图像修正理论依据,为RGB LED背光液晶显示器的色域校准提供

参考依据,有助于提升高端LED产品的显示效果。

## 2 LED显示色域模型的建立

### 2.1 RGB到CIE xyY颜色空间的映射

CIE XYZ是国际照明委员会在1931年推出并在1964年修订的CIE颜色系统(CIE Color System),该系统与显示设备无关。CIE XYZ颜色空间表示的所有颜色都可以通过红、绿、蓝三种基色中导出<sup>[14]</sup>。鉴于计算的简化性,CIE XYZ用虚拟的X、Y、Z表示实际的三基色刺激值,并且可以表示对应颜色。同时考虑到色度的规格化,国际照明委员会定义了CIE xyY颜色空间,用X、Y、Z的占比表示色度,记为x、y、z<sup>[15]</sup>。其中X、Y、Z与x、y、z的转换关系如下:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z}, \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad (1)$$

根据Grassmann定律<sup>[14]</sup>,LED显示白平衡的亮度是由红、绿、蓝三基色的亮度混合得到

$$L_w = R + G + B, \quad (2)$$

其中R、G、B为显示的某个像素的三基色亮度, $L_w$ 为该像素白平衡的亮度。

为了研究白平衡的变化,本文将公式(2)进行线性变换,构建颜色空间中白平衡与三基色的关系:

$$\mathbf{W} = \mathbf{H}[\mathbf{R} \ \mathbf{G} \ \mathbf{B}]^T = (h_{ij})_{3 \times 3} \mathbf{I}, \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{I} = (I_{ij})_{3 \times 1} = [\mathbf{R} \ \mathbf{G} \ \mathbf{B}]^T, \quad (4)$$

$\mathbf{W}$ 为CIE xyY颜色空间中的白场。为了建立起RGB空间与显示色域模型的关系,用三刺激值来表示CIE xyY颜色空间中的白平衡,得到:

$$[\mathbf{X} \ \mathbf{Y} \ \mathbf{Z}]^T = (h_{ij})_{3 \times 3} [\mathbf{R} \ \mathbf{G} \ \mathbf{B}]^T, \quad (5)$$

其中X、Y、Z为 $\mathbf{W}$ 对应的三刺激值,根据色度学原理以及CIE xyY颜色空间的定义可知,三刺激值中的Y表示CIE xyY颜色空间中白平衡点亮度的大小。

为了使转换矩阵形式简洁并容易求解,设

$$\begin{aligned} h_{1j} &= C_j \times x_j \\ h_{2j} &= C_j \times y_j, \\ h_{3j} &= C_j \times z_j \end{aligned} \quad (6)$$

则有:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} C_1 x_1 & C_2 x_2 & C_3 x_3 \\ C_1 y_1 & C_2 y_2 & C_3 y_3 \\ C_1 z_1 & C_2 z_2 & C_3 z_3 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中  $x_1, y_1, z_1$  是红基色在 CIE  $xyY$  颜色空间中的色度坐标,  $x_2, y_2, z_2$  是绿基色在 CIE  $xyY$  颜色空间中的色度坐标,  $x_3, y_3, z_3$  是蓝基色在 CIE  $xyY$  颜色空间中的色度坐标, 其数值根据不同的显示标准中三基色的色纯度波长的差异而有所不同, 其中  $C_1, C_2, C_3$  为待确定的系数。带入公式 (5) 可得:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 x_1 & C_2 x_2 & C_3 x_3 \\ C_1 y_1 & C_2 y_2 & C_3 y_3 \\ C_1 z_1 & C_2 z_2 & C_3 z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (8)$$

将三刺激值转换成颜色空间坐标可以得到:

$$x = \frac{\sum_{j=1}^3 C_j x_j I_{j1}}{\sum_{j=1}^3 (C_j x_j + C_j y_j + C_j z_j) I_{j1}}, \quad (9)$$

$$y = \frac{\sum_{j=1}^3 C_j y_j I_{j1}}{\sum_{j=1}^3 (C_j x_j + C_j y_j + C_j z_j) I_{j1}}, \quad (10)$$

$$Y = \sum_{j=1}^3 C_j y_j I_{j1}.$$

## 2.2 Rec. 709 标准下的色域模型及 LED 显示色域模型

Rec. 709 色域是 1990 年国际电信联盟指定的高清晰度电视的统一色彩标准, 该标准的色坐标如表 1 所示。选择 D65 标准光源为目标白平衡坐标<sup>[14]</sup>, 其中红、绿、蓝的色坐标见表 1。

表 1 Rec. 709 色彩标准色坐标

Tab. 1 Rec. 709 color standard color coordinates

Rec. 709	$x$	$y$
Red	0.64	0.33
Green	0.30	0.60
Blue	0.15	0.06

由于有  $x+y+z=1$ , 可以得到:  $x_1=0.64, y_1=0.33, z_1=0.03; x_2=0.30, y_2=0.60, z_2=0.10; x_3=0.15, y_3=0.06, z_3=0.79$ 。针对 LED 红、绿、蓝三基色不同波长, 通过调整红、绿、蓝在白场中的平衡关系, 抵消偏色的现象并使 LED 显示屏图像更接近人眼视觉习惯, 使颜色达到白平衡状态<sup>[16]</sup>。为了计算简便, 对颜色参数进行规格化处理。假设屏幕发出白光即颜色保持白平衡的理想状态时有  $R=G=B=$

1.00, 此时当显示为白光即颜色保持白平衡时有  $Y_k=1$ , 则根据公式 (1) 与 D65 标准光源的三刺激值  $X_{D65}=95.05, Y_{D65}=100.00, Z_{D65}=108.91$ , 计算其对于  $Y_{D65}=100.00$  的相对值作为 CIE  $xyY$  颜色空间的三刺激值, 记为  $X_k=0.9505, Y_k=1.00, Z_k=1.0891$ 。将白平衡这一点的  $X_k, Y_k, Z_k$  和  $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3$  带入公式 (8), 并求解矩阵即可计算得到唯一解:  $C_1=1194/1853 \approx 0.64, C_2=1273/1068 \approx 1.19, C_3=1877/1560 \approx 1.20$ , 则根据其精确值可以继续计算出转换矩阵:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} C_1 x_1 & C_2 x_2 & C_3 x_3 \\ C_1 y_1 & C_2 y_2 & C_3 y_3 \\ C_1 z_1 & C_2 z_2 & C_3 z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.41 & 0.36 & 0.18 \\ 0.21 & 0.72 & 0.07 \\ 0.02 & 0.12 & 0.95 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

将转换矩阵  $\mathbf{H}$  带入公式 (8) 和 (9) 中得到在 Rec. 709 标准颜色标准和 D65 光源情况下的三基色亮度与白场色度在颜色空间中的转换关系:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{Rec.709}} \\ Y_{\text{Rec.709}} \\ Z_{\text{Rec.709}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.41 & 0.36 & 0.18 \\ 0.21 & 0.72 & 0.07 \\ 0.02 & 0.12 & 0.95 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$x_{\text{Rec.709}} = \frac{\sum_{i=r,g,b} m_i \cdot I_i}{\sum_{i=r,g,b} n_i \cdot I_i} \begin{cases} m_r = 0.41 \\ m_g = 0.36 \\ m_b = 0.18 \end{cases} \begin{cases} n_r = 0.64 \\ n_g = 1.19 \\ n_b = 1.20 \end{cases} \quad (13)$$

$$y_{\text{Rec.709}} = \frac{\sum_{i=r,g,b} l_i \cdot I_i}{\sum_{i=r,g,b} n_i \cdot I_i} \begin{cases} l_r = 0.21 \\ l_g = 0.72 \\ l_b = 0.07 \end{cases} \begin{cases} I_r = R \\ I_g = G \\ I_b = B \end{cases}$$

以下建立 LED 显示屏的亮色度空间模型, 为了得到 LED 三基色的颜色标准, 本文对 LED 显示屏进行色坐标参数测量的实验。目前, LED 显示屏的主流芯片有华灿光电股份公司的 LED 芯片、三安光电股份公司的 LED 芯片等。本实验选用华灿的红绿蓝三色 LED 芯片, 在环境温度为 25 °C 左右、供电电流满足红光芯片 6.58 mA、蓝光与绿光芯片 4 mA 的条件下, 对使用该种芯片的多个不同批次的 LED 显示屏模组进行色坐标参数的测量。将得到的色坐标通过直方图进行统计, 如图 1 所示, 红色的直方图组距为 0.001, 绿色组距为 0.006, 蓝色的组距为 0.004; 其中红色坐标落在 (0.694 0~0.695 0, 0.305 0~0.305 5)、绿色坐标落在 (0.173 0~0.179 0, 0.736 0~0.742 0)、蓝色坐标落在 (0.128 0~0.132 0, 0.062 0~0.066 0) 区域内的样本数量最多, 具有明显集中趋势, 将落在该区域内所有样本的色坐标的均值作为 LED 三基色的颜色标准记为  $R_1, B_1, G_1$ 。同理计算出图中

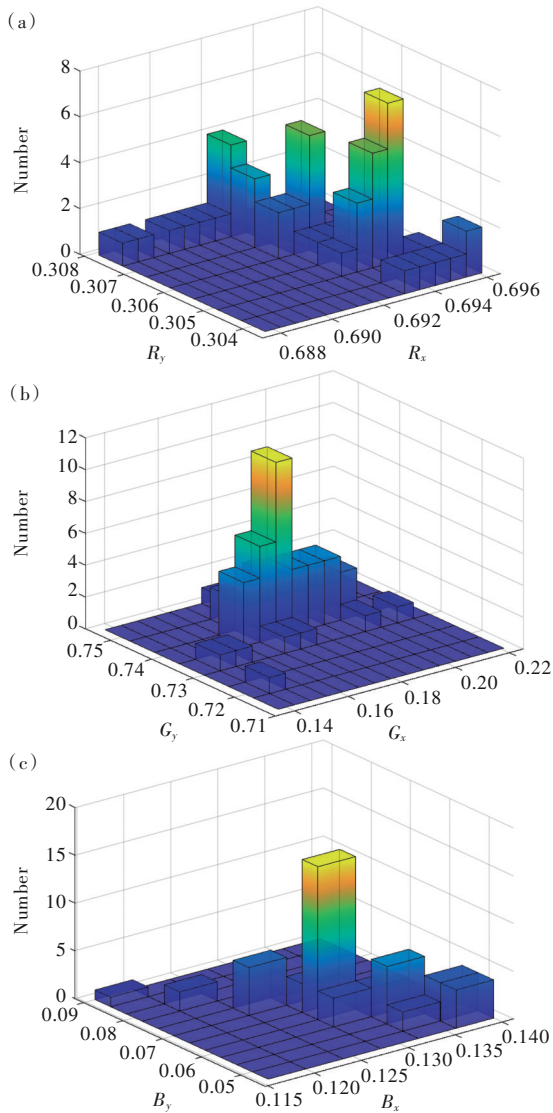


图 1 三基色管芯坐标分布情况。(a)红色管芯坐标分布直方图;(b)绿色管芯坐标分布直方图;(c)蓝色管芯坐标分布直方图。

Fig.1 Coordinate distribution of three primaries die. (a) Coordinate distribution of red. (b) Coordinate distribution of green. (c) Coordinate distribution of blue.

数量显著比其他区域多的区域内样本色坐标的均值  $R_2$ 、 $R_3$ 、 $B_2$ , 它们的色坐标如表 2 所示。

以  $R_1$ 、 $B_1$ 、 $G_1$  这组数据为例, 将  $X_k=0.9505$ 、 $Y_k=$

表 2 LED 管芯的色坐标

Tab. 2 The main distribution of color coordinates of LED

LED	x	y
$R_1$	0.694 6	0.305 2
$R_2$	0.694 1	0.305 3
$R_3$	0.693 2	0.306 4
$G_1$	0.174 9	0.739 1
$G_2$	0.171 0	0.739 1
$B_1$	0.130 1	0.064 4

1.00、 $Z_k=1.0891$  和  $R_1$ 、 $B_1$ 、 $G_1$  对应的  $x_1$ 、 $y_1$ 、 $z_1$ 、 $x_2$ 、 $y_2$ 、 $z_2$ 、 $x_3$ 、 $y_3$ 、 $z_3$  带入公式(8), 并求解矩阵即可求出唯一解:  $C_1=1049/1147 \approx 0.9146$ ,  $C_2=1359/1570 \approx 0.8656$ ,  $C_3=3437/2729 \approx 1.2594$ 。则可根据精确值继续计算出转换矩阵, 并将矩阵  $H$  带入公式(8)和(9)中得到在 LED 色域和 D65 标准色坐标情况下的三基色亮度与白场色度在颜色空间中的转换关系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6353 & 0.1514 & 0.1639 \\ 0.2791 & 0.6398 & 0.0811 \\ 0.0002 & 0.0744 & 1.0145 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$x_{LED} = \frac{\sum_{i=r,g,b} m_i \cdot I_i}{\sum_{i=r,g,b} n_i \cdot I_i} \begin{cases} m_r = 0.6353 \\ m_g = 0.1514 \\ m_b = 0.1639 \end{cases} \begin{cases} n_r = 0.9146 \\ n_g = 0.8656 \\ n_b = 1.2594 \end{cases}$$

$$y_{LED} = \frac{\sum_{i=r,g,b} l_i \cdot I_i}{\sum_{i=r,g,b} n_i \cdot I_i}, \begin{cases} l_r = 0.2791 \\ l_g = 0.6398 \\ l_b = 0.0811 \end{cases} \begin{cases} I_r = R \\ I_g = G \\ I_b = B \end{cases}$$

(15)

LED 显示屏的输入数据为  $R$ 、 $G$ 、 $B$ , 将各个数据归一化得到范围为  $[0,1]$  的  $R_0$ 、 $G_0$ 、 $B_0$  值。对于 LED 显示色域, 公式(4)中采用的  $I_k$  向量一般是指输入的光学亮度, 但是从显示数据亮度的转换即电光传递函数是非线性函数<sup>[17]</sup>, 满足:

$$I = k \cdot V^\gamma, \quad (16)$$

其中,  $\gamma$  值是光电转换的参数, 根据目前电视信号通道特性 LED 的  $\gamma$  值一般取 2.79;  $k$  为光电转换系数, 本文简化为  $k=1$ ;  $V$  为输入图像数据, 这里指某像素的  $R_0$ 、 $G_0$ 、 $B_0$  值, 范围为  $[0,1]$ ;  $I$  为在当前图像数据下该像素的显示亮度, 范围为  $[0,1]$ 。输出由公式(16)可得显示的三基色亮度值, 将这些亮度值经过公式(15)颜色空间的转换一一映射到 CIE  $xyY$  三维颜色空间的坐标。

将表 2 中的管芯坐标排列组合, 共得到 6 个不同的转换矩阵:  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 、 $H_4$ 、 $H_5$ 、 $H_6$ , 记为一个矩阵簇  $H^*$ , 通过  $H^*$  将颜色一一映射到 CIE  $xyY$  三维颜色空间, 可以得到 LED 显示屏显示色域模型簇  $M^*$ , 如图 2 所示。

在图 2 的 CIE  $xyY$  三维颜色空间内,  $x$ 、 $y$  代表色度, 作为颜色空间的水平面的横纵坐标;  $Y$  代表亮度, 为颜色空间的垂直水平面的坐标; 底面的马蹄形曲线为可见光谱所对应的色坐标连成的曲线, 三维颜色空间表面由多个不规则的空间多边



形组成,空间中每一点的高度即表示当前色度值颜色的亮度信息。内部被包裹住的彩色空间即为标准色域空间,而外部的轮廓是LED显示屏的色域空间簇  $M^*$ ,由此可知LED显示屏的显示范围大大扩展了当前颜色标准可以显示的范

围。从图2中可以看出,在显示同一颜色时,LED显示的亮度比标准色域空间中显示的亮度更大;在显示同一亮度时,LED显示的颜色范围比 Rec. 709 标准色域空间中显示的颜色范围更广。

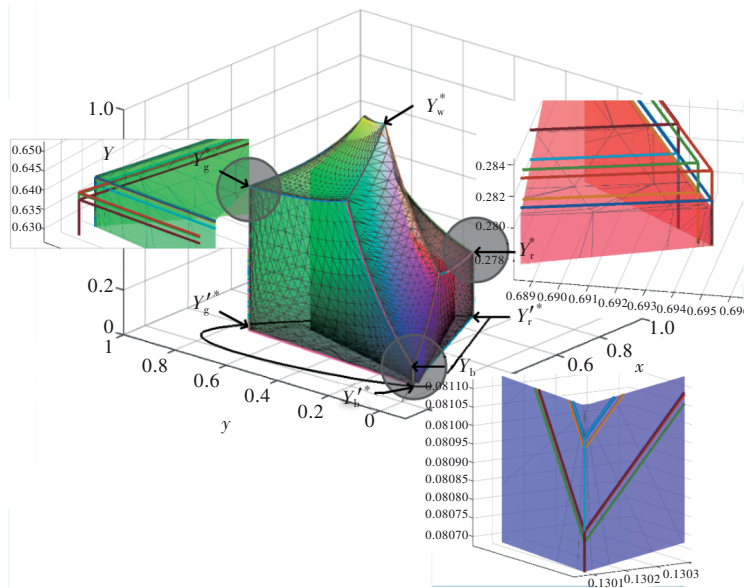


图2 标准色域空间与宽色域LED显示屏 CIE xyY 色域空间

Fig.2 Standard and wide-gamut LED in CIE xyY gamut

另外,在图2中外层的色域空间簇即为特定的LED显示屏所能显示的所有亮色度的三维空间,该色域空间表面上最高的顶点簇  $Y_w^*$  是当三基色亮度均达到最大时,显示屏所显示出的白场,即为显示屏达到白平衡时的白平衡点。点簇  $Y_r^*$  是蓝色、绿色亮度为零仅有红色亮度存在并为最大值时显示屏所显示的颜色;点簇  $Y_g^*$  是红色、蓝色亮度为零仅有绿色亮度存在并为最大值时显示屏所显示的颜色;点簇  $Y_b^*$  是红色、绿色亮度为零仅有蓝色亮度存在并为最大值时显示屏所显示的颜色。点簇  $Y_r'^*$ 、 $Y_g'^*$ 、 $Y_b'^*$  分别为  $Y_r^*$ 、 $Y_g^*$ 、 $Y_b^*$  在  $xoy$  平面的投影,以  $M_1$  为例

给出各点坐标,如表3所示。

### 3 温度波动引起白平衡亮色度偏差

#### 3.1 模型中白平衡点关于温度的变化情况

在显示屏进行显示的过程中,温度会随时间产生波动,而这种温度变化引起LED管芯的亮度输出和电压变化,最终导致屏幕的亮度色度都会产生严重的漂移<sup>[12,18]</sup>。而红、绿、蓝三基色的亮度对温度波动的敏感程度有很大的区别。综合日亚化学等测试的实验数据<sup>[19]</sup>,根据部分温度相对亮度的实验得出的结果得到各个基色不同温度条件的相对亮度如表4所示。

由于多项式拟合具有快速建模、数据量小、关系相对简单的优点,且亮度曲线相对简单并呈线

表3 LED颜色空间  $M_1$  各点坐标

Tab. 3 LED color standard color coordinates

	x	y	Y
$Y_{w1}$	0.3127	0.3290	1
$Y_{r1}$	0.6946	0.3052	0.2791
$Y_{g1}$	0.1749	0.7391	0.6398
$Y_{b1}$	0.1301	0.0644	0.0811
$Y_{r'1}$	0.6946	0.3052	0
$Y_{g'1}$	0.1749	0.7391	0
$Y_{b'1}$	0.1301	0.0644	0

表4 不同温度的LED管芯的相对亮度

Tab. 4 Relative brightness of LED at different temperatures

温度/°C	蓝相对亮度	绿相对亮度	红相对亮度
-30	1.01	1.03	1.34
0	1.005	1.02	1.155
25	1	1	1
60	0.99	0.94	0.765
80	0.98	0.905	0.63

性,所以本文优先选择用多项式进行曲线拟合。在 25 °C 时,标定三基色相对亮度为 1。

温度对三基色亮度产生影响的程度是不同的。当温度改变时,红绿蓝三种颜色的亮度会随之变化。为了达到高精度的拟合要求,经过运算分析采用多项式:

$$f(x) = p_n x^n + p_{n-1} x^{n-1} + p_{n-2} x^{n-2} + \dots + p_1 x^1 + p_0, \quad (17)$$

对表 4 中的数据进行拟合。根据曲线性质,对红蓝光进行  $n=1$  的多项式拟合,对绿光进行  $n=2$  的多项式拟合,其中红绿蓝拟合的误差平方和分别为  $1.593 \times 10^{-4}, 3.048 \times 10^{-5}, 2.302 \times 10^{-5}$ 。

$$f_R(T) = \sum_{r=0}^1 m_r \cdot T^r, \begin{cases} m_0 = 1.153 \\ m_1 = -6.463 \times 10^{-3} \end{cases}$$

$$f_G(T) = \sum_{g=0}^2 l_g \cdot T^g, \begin{cases} l_0 = 1.02 \\ l_1 = -6.524 \times 10^{-4} \\ l_2 = -1.017 \times 10^{-5} \end{cases}, \quad (18)$$

$$f_B(T) = \sum_{b=0}^1 n_b \cdot T^b, \begin{cases} n_0 = 1.004 \\ n_1 = -2.659 \times 10^{-4} \end{cases}$$

从 LED 的亮度特性图 3 可知,随着温度的变化,LED 的三基色相对亮度的偏移状况差距很大。其中红色的亮度对温度最敏感,在温度为 60 °C 时,红色相对亮度减少了 23.5%;温度为 -30 °C 时,红色相对亮度约增加 34%。而绿色在 -30~60 °C 范围内相对亮度变化为 9%,蓝色在 -30~60 °C 范围内相对亮度变化为 2%。

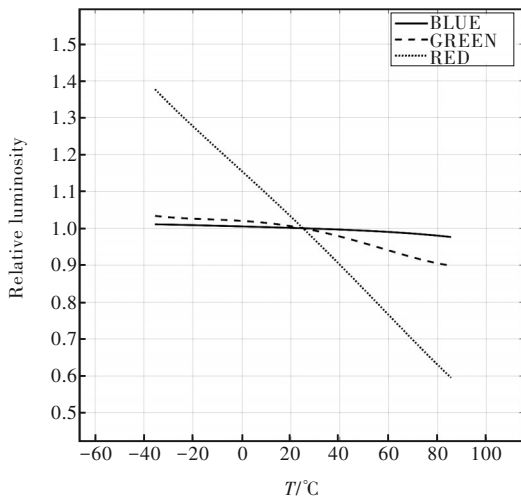


图 3 三基色相对亮度对温度变化拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of relative luminosity of three primaries to temperature change

### 3.2 模型中白平衡点关于温度的变化情况

当温度改变时,白平衡点在模型中的位置会随之漂移。为了得到温度波动对白平衡的亮度和色调的影响情况,本文设  $C_1', C_2', C_3'$  为该模型中随温度

变化的量,其中  $C_1', C_2', C_3'$  与  $C_1, C_2, C_3$  关系为:

$$\begin{aligned} C_1'(T) &= C_1 f_1(T) \\ C_2'(T) &= C_2 f_2(T), \\ C_3'(T) &= C_3 f_3(T) \end{aligned} \quad (19)$$

其中  $f_1(T), f_2(T), f_3(T)$  分别为红绿蓝基色的相对亮度对于温度波动的函数。带入公式(8)、(9)、(10)可以得到:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 f_1(T) x_1 & C_2 f_2(T) x_2 & C_3 f_3(T) x_3 \\ C_1 f_1(T) y_1 & C_2 f_2(T) y_2 & C_3 f_3(T) y_3 \\ C_1 f_1(T) z_1 & C_2 f_2(T) z_2 & C_3 f_3(T) z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$x_{LED} = \frac{\sum_{j=1}^3 C_j f_j(T) x_j I_{j1}}{\sum_{j=1}^3 (C_j f_j(T) x_j + C_j f_j(T) y_j + C_j f_j(T) z_j) I_{j1}},$$

$$y_{LED} = \frac{\sum_{j=1}^3 C_j f_j(T) y_j I_{j1}}{\sum_{j=1}^3 (C_j f_j(T) x_j + C_j f_j(T) y_j + C_j f_j(T) z_j) I_{j1}}, \quad (21)$$

$$Y_{LED} = \sum_{j=1}^3 C_j f_j(T) y_j I_{j1}, \quad (22)$$

将公式(18)与  $M^*$  模型中所对应的  $C_1, C_2, C_3, x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3, R, G, B$  带入公式(21)~(22)可以得到白平衡的温度波动的曲线簇  $[L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6]$ , 记作  $L^*$ , 其亮度与温度变化的关系如公式(23)所示:

$$Y_{L^*LED} = \sum_{j=0}^2 c_j \cdot T^j,$$

$$L_1: \begin{cases} c_0 = 1.056 \\ c_1 = -2.246 \times 10^{-3} \\ c_2 = -6.502 \times 10^{-6} \end{cases} L_2: \begin{cases} c_0 = 1.056 \\ c_1 = -2.257 \times 10^{-3} \\ c_2 = -6.486 \times 10^{-6} \end{cases}$$

$$L_3: \begin{cases} c_0 = 1.056 \\ c_1 = -2.248 \times 10^{-3} \\ c_2 = -6.499 \times 10^{-6} \end{cases} L_4: \begin{cases} c_0 = 1.056 \\ c_1 = -2.259 \times 10^{-3} \\ c_2 = -6.482 \times 10^{-6} \end{cases},$$

$$L_5: \begin{cases} c_0 = 1.056 \\ c_1 = -2.257 \times 10^{-3} \\ c_2 = -6.483 \times 10^{-6} \end{cases} L_6: \begin{cases} c_0 = 1.056 \\ c_1 = -2.268 \times 10^{-3} \\ c_2 = -6.467 \times 10^{-6} \end{cases} \quad (23)$$

其颜色坐标  $(x, y)$  随温度变化的偏移情况如公式(24)所示:

$$x_{L^*LED} = \frac{\sum_{i=0}^2 a_i \cdot T^i}{\sum_{i=0}^2 b_i \cdot T^i}, \quad y_{L^*LED} = \frac{\sum_{j=0}^2 c_j \cdot T^j}{\sum_{j=0}^2 b_j \cdot T^j}$$

$$\begin{cases} L_1: \begin{cases} a_0 = 1.052 \\ a_1 = -4.255 \times 10^{-3} \\ a_2 = -1.539 \times 10^{-6} \end{cases} \begin{cases} b_0 = 3.202 \\ b_1 = -6.820 \times 10^{-3} \\ b_2 = -8.797 \times 10^{-6} \end{cases} \\ L_2: \begin{cases} a_0 = 1.053 \\ a_1 = -4.280 \times 10^{-3} \\ a_2 = -1.501 \times 10^{-6} \end{cases} \begin{cases} b_0 = 3.203 \\ b_1 = -6.857 \times 10^{-3} \\ b_2 = -8.775 \times 10^{-6} \end{cases} \\ L_3: \begin{cases} a_0 = 1.052 \\ a_1 = -4.256 \times 10^{-3} \\ a_2 = -1.538 \times 10^{-6} \end{cases} \begin{cases} b_0 = 3.202 \\ b_1 = -6.825 \times 10^{-3} \\ b_2 = -8.793 \times 10^{-6} \end{cases} \\ L_4: \begin{cases} a_0 = 1.053 \\ a_1 = -4.281 \times 10^{-3} \\ a_2 = -1.500 \times 10^{-6} \end{cases} \begin{cases} b_0 = 3.203 \\ b_1 = -6.862 \times 10^{-3} \\ b_2 = -8.771 \times 10^{-6} \end{cases} \\ L_5: \begin{cases} a_0 = 1.052 \\ a_1 = -4.258 \times 10^{-3} \\ a_2 = -1.534 \times 10^{-6} \end{cases} \begin{cases} b_0 = 3.202 \\ b_1 = -6.834 \times 10^{-3} \\ b_2 = -8.772 \times 10^{-6} \end{cases} \\ L_6: \begin{cases} a_0 = 1.053 \\ a_1 = -4.282 \times 10^{-3} \\ a_2 = -1.496 \times 10^{-6} \end{cases} \begin{cases} b_0 = 3.203 \\ b_1 = -6.872 \times 10^{-3} \\ b_2 = -8.749 \times 10^{-6} \end{cases} \end{cases}, (24)$$

结合 LED 屏实际使用的场景温度, 本文取  $T$  的范围为  $[-30, 60]$ , 在颜色空间里白平衡  $Y_w$  随温度变化情况如图 4 所示。

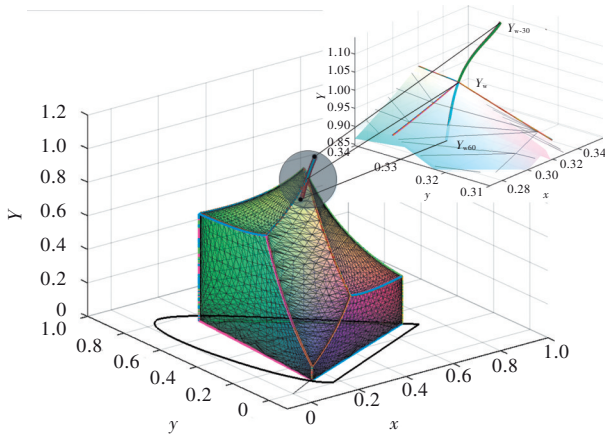


图 4 白平衡  $Y$  随温度变化的漂移情况

Fig.4 Drift of white balance  $Y$  with temperature

在  $25\text{ }^\circ\text{C}$  白平衡亮度不发生偏移, 颜色为标准 D65 白场。当温度升高时, 白平衡坐标最大偏差  $\Delta x_{\max} = -0.0262$ 、 $\Delta y_{\max} = -0.0039$ 、 $\Delta Y_{\max} = -0.1029$ , 白平衡亮度降低, 色调偏蓝绿; 当温度降低时, 白平衡坐标最大偏差  $\Delta x_{\max} = 0.0343$ 、 $\Delta y_{\max} = 0.0002$ 、 $\Delta Y_{\max} = 0.1186$ , 白平衡亮度升高, 色调偏红。随温度逐渐升高, 白平衡点的运动轨迹为  $Y_{w-30} - Y_{w-60}$ 。

由于温度波动曲线是点随温度变化的轨迹, 所以这里引用轨迹重复性来计算轨迹簇中各个轨迹的一致程度。轨迹重复性<sup>[20]</sup>可以表示为:

$$\begin{aligned} RT_p &= \max [\bar{l}_i + 3S_{l_i}] \quad i = 1, \dots, m \\ \bar{l}_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij} \\ S_{l_i} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \bar{l}_i)^2}{n-1}} \\ l_{ij} &= \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + (z_{ij} - \bar{z}_i)^2} \end{aligned}, (25)$$

其中  $n$  代表轨迹条数,  $m$  代表曲线上的采样点数量。如图 5 所示, 其中黑色曲线表示这一簇曲线的平均水平, 把它作为中心线,  $RT_{pi}$  为正交平面上集群中心线上圆的半径。

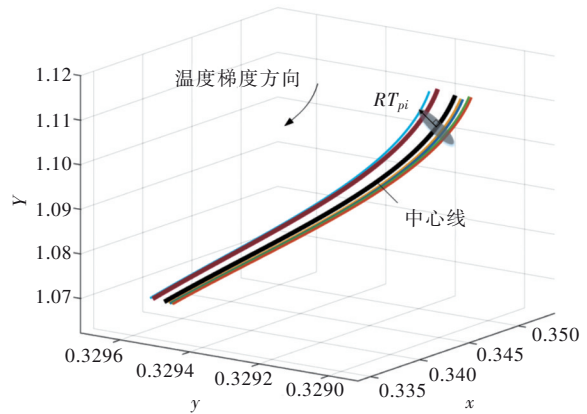


图 5 白平衡漂移曲线簇  $L^*$

Fig.5 White balance drift curve cluster  $L^*$

设置  $n=6, m=300$ , 根据轨迹方程式 (23)、(24) 和公式 (25) 计算得到  $RT_p = 1.905 \times 10^{-4}$ , 表示所有轨迹计算的在正交平面上且圆心在集群中心线上圆的半径的最大值为  $1.905 \times 10^{-4}$ , 则该轨迹簇的距中心轨迹的误差  $\delta < 0.0002$ , 表明在允许误差  $\delta < 0.0002$  的范围内, 中心线可以代表这一簇曲线。实际上, 根据目前观察者的颜色分辨能力, 该中心轨迹可以代表这一簇。

另外, 黑体在不同温度下的变化轨迹如图 6 所示, 在绝对温度为  $6500\text{ K}$  附近时, 黑体所发出的光被定义为 D65 标准光源; 当黑体温度不断升高时, 它的最大光谱辐射功率随温度急剧上升, 其最大功率部位向短波方向变化, 红色波长的光逐渐减少, 蓝色波长的光逐渐增多, 黑体的发光颜色逐渐由红黄变成白最后变成蓝, 其色坐标变化趋势如图 7 所示。

白场温度漂移曲线与黑体轨迹在  $xoy$  平面上的投影如图 7 所示, 红色曲线是白平衡的漂移曲线, 蓝色曲线为黑体轨迹, 两条曲线在 D65 点相

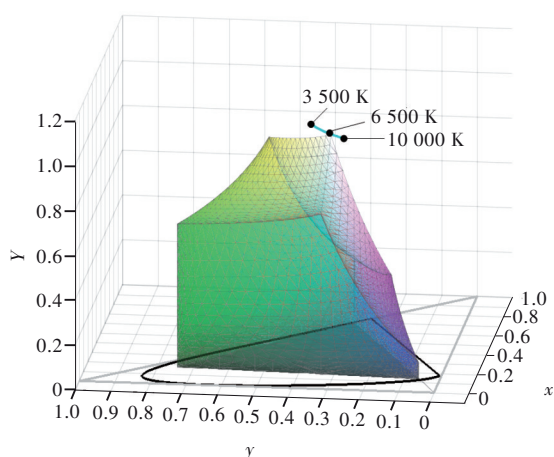


图 6 LED 显示模型中的黑体轨迹

Fig.6 LED displays blackbody tracks in the model

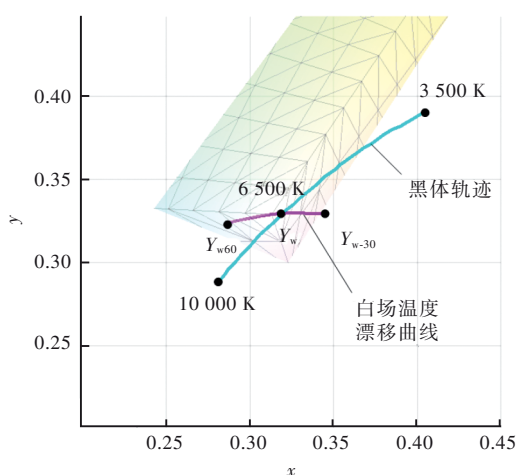


图 7 白场温度漂移曲线与黑体在不同色温下的变化曲线在  $xoy$  平面下的投影

Fig.7 Projection of white field temperature drift curve and black body change curve under different color temperatures on  $xoy$

交,并呈现一定角度。在研究过程中发现白场参数随温度变化情况同黑体轨迹的温度方向有一定趋同性:对于观察者来说,观察的是白场色温相关颜色的变化,同光波的光谱分布无关,因此本文发现,抛除温度的梯度差异,两者在 D65 中心的两侧表现出白场色温变化相似性。事实上,黑体色温变化同 LED 白场配平的原理基本不相关,然而产生这样的原因都是升温引起的红色光部分减弱造成的,在显示方向表现是完全一致的;不考虑深一层次的机理,本文发现的白场(白场中心也是根据黑体 D65 所定)色度变化与黑体温度趋势有一定相关性。

### 3.3 结果验证

为了更直观地观察颜色波动对亮度、色度的

影响,本文采用白场与经典图片来进行温度波动对显示效果影响的仿真验证。通过改变温度分别模拟出不同温度下在  $\gamma$  值为 2.79 时显示屏对图片的显示情况。在温度取值范围  $-30\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$  内每隔一段距离分散地选取  $-30, 0, 25, 60\text{ }^\circ\text{C}$  4 个温度点进行结果模拟。

如图 8 所示,在  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  时,白场产生明显偏色,色调偏红;在  $0\text{ }^\circ\text{C}$  时,白场色调稍稍偏红;在  $25\text{ }^\circ\text{C}$  时,白场不发生偏色;  $60\text{ }^\circ\text{C}$  时,白场产生明显偏色,色调偏蓝。

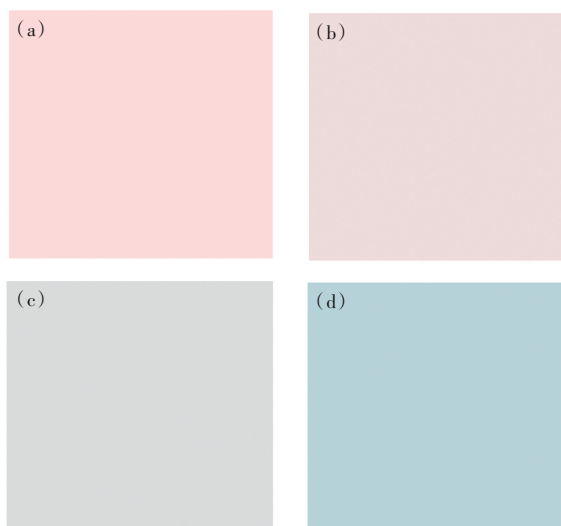


图 8 (a)~(d)白场在  $-30, 0, 25, 60\text{ }^\circ\text{C}$  时的仿真显示效果。  
Fig.8 (a) - (d) The simulation display effects of standard pictures at  $-30, 0, 25, 60\text{ }^\circ\text{C}$  respectively.

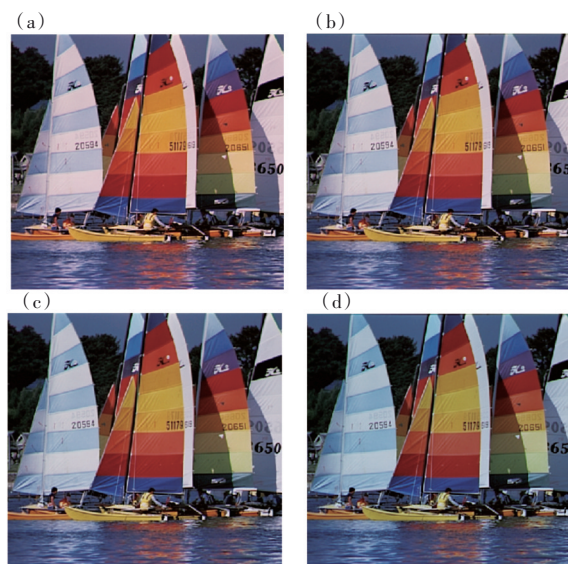


图 9 (a)~(d)经典图片在  $-30, 0, 25, 60\text{ }^\circ\text{C}$  时的仿真显示效果。

Fig.9 (a) - (d) The simulation display effects of standard pictures at  $-30, 0, 25, 60\text{ }^\circ\text{C}$  respectively.



如图9所示,根据表4改变不同温度下三基色的亮度配比,在-30℃时,经典图片的亮度整体变高,红色分量增多,蓝色分量和绿色分量减少;在0℃时,图片的亮度也整体较高,颜色稍稍偏红;25℃时,图片的亮度色度不发生偏移;60℃时,图片的亮度整体变低,红色分量减少,蓝色分量和绿色分量增多。除了白平衡点之外,色域模型中其他区域的点也会有相似的偏移规律,所以导致了

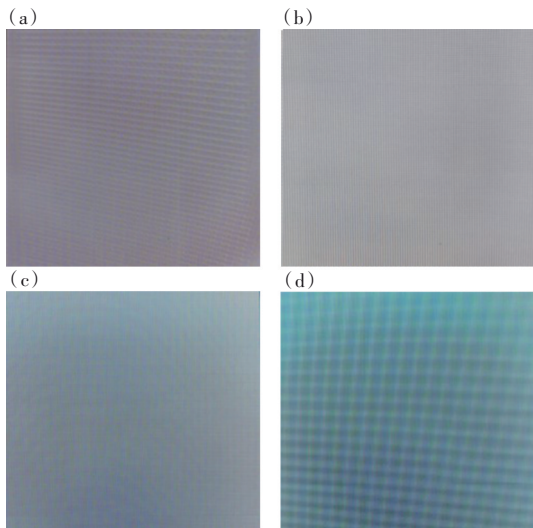


图10 (a)~(d)显示白场在-30,0,25,60℃时的LED实际显示效果。

Fig.10 (a) - (d) The actual display effect of LED at -30, 0, 25, 60℃ respectively.

图像色调的整体变化。

本文继续进行了白场的高低温试验。我们将25℃时色温约为6500K并显示白场的LED显示模组放入高低温试验箱内,调整试验箱温度,通过测温枪多次检测LED管芯周围温度使其达到-30,0,25,60℃时,记录白场显示情况,如图10所示。

## 4 总 结

本文主要研究了LED显示屏中白平衡显示亮度、色调等主要参数在温度改变时的漂移情况。根据色坐标对LED管芯进行分类统计建立LED显示色域模型;分析温度对红绿蓝芯片的亮度数据,计算得出了白平衡漂移的规律,得到各个坐标的温度偏差量,在-30~60℃的范围内,白平衡坐标最大偏差 $\Delta x_{\max}=0.0605$ 、 $\Delta y_{\max}=0.0041$ 、 $\Delta Y_{\max}=0.2215$ ;进一步讨论了温度变化对图像显示色调产生的影响,并进行了实验验证。实际上,其他非白平衡点受温度影响也有相似的变化规律。此外,通过比较发现,温度漂移曲线与黑体变化轨迹变化趋势相同。但是,本文并未重点关注这些温度漂移的规律,有待未来继续进行总结和验证。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220257>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 罗涛. LED全彩显示屏控制技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
LUO T. *Research on Control System of the LED Full Color Display* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese).
- [ 2 ] 毛新越, 苗静, 陈宇, 等. 基于LED显示屏基色亮度变化的白场亮度偏差分析[J]. 发光学报, 2019, 40(9): 1159-1171.  
MAO X Y, MIAO J, CHEN Y, *et al.* Analysis of white field luminance deviation based on LED panel primary luminance variation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(9): 1159-1171. (in Chinese)
- [ 3 ] 李广涛. 光度色度多参数检定测试系统的研制[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.  
LI G T. *R&D of A Multi Parameter Calibration and Test System for Luminosity and Chrominance* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [ 4 ] 田媛, 陈雷雷, 赵琳娜, 等. GaN高压LED在极小电流与极低温度下的光电特性[J]. 微电子学, 2020, 50(5): 709-714.  
TIAN Y, CHEN L L, ZHAO L N, *et al.* Study on photoelectric characteristics of GaN high voltage LEDs at extremely low currents and temperatures [J]. *Microelectronics*, 2020, 50(5): 709-714. (in Chinese)
- [ 5 ] 唐燕如, 赵帝, 易学专, 等. 电流与温度对蓝光LED和白光LED发光性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2103003-1-7.  
TANG Y R, ZHAO D, YI X Z, *et al.* Current and temperature effects on luminescence properties of blue and white LEDs [J]. *Chin. J. Lasers*, 2021, 48(21): 2103003-1-7. (in Chinese)

- [ 6 ] 李剑飞,周晓明. 基于LED电流、温度光谱模型的照明系统研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 20210727-1-8.  
LI J F, ZHOU X M. Research on lighting system based on LED current and temperature spectrum model [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2022, 51(7): 20210727-1-8. (in Chinese)
- [ 7 ] CHIU T L, LEE J H. Color gamut variation of LED-lit LCD at different module temperatures [J]. *Opt. Commun.*, 2010, 283(3): 373-378.
- [ 8 ] 朴燕,王瑞光,丁铁夫. 基于RGB Gamma曲线的LED显示图像的色散校正技术[J]. 光电子·激光, 2008, 19(1): 125-127.  
PIAO Y, WANG R G, DING T F. LED color calibration technology based on RGB gamma curves [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2008, 19(1): 125-127. (in Chinese)
- [ 9 ] LEE J, JI Y. Analysis of the effect of color temperature of white LED lighting on color recognition in the elderly [J]. *J. Korea Soc. Color Stud.*, 2012, 26(1): 55-67.
- [ 10 ] 王聪,姚晒晖,马佳飞,等. 三基色激光显示中白平衡点的选择研究[J]. 激光技术, 2021, 45(4): 411-416.  
WANG C, YAO B H, MA J F, et al. Selection of white balance point in three primaries laser display [J]. *Laser Technol.*, 2021, 45(4): 411-416. (in Chinese)
- [ 11 ] 颜博霞,王延伟,元岩,等. 激光显示光源颜色配比和色温研究[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401004-1-5.  
YAN B X, WANG Y W, QI Y, et al. Study of color proportion and color temperature in laser display [J]. *Chin. J. Lasers*, 2018, 45(4): 0401004-1-5. (in Chinese)
- [ 12 ] 詹永波,张健伟,曾建雄,等. 小电流LED屏白平衡色温的控制[J]. 发光学报, 2016, 37(11): 1390-1398.  
ZHAN Y B, ZHANG J W, ZENG J X, et al. Control of white balance color temperature for low current led screen [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(11): 1390-1398. (in Chinese)
- [ 13 ] AFIFI M, PUNNAPPURATH A, ABDELHAMED A, et al. Color temperature tuning: Allowing accurate post-capture white-balance editing [C]. *Color and Imaging Conference, Paris, France*, 2019: 1-6.
- [ 14 ] 荆其诚,焦书兰,喻柏林,等. 色度学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.  
JING Q C, JIAO S L, YU B L, et al. *Colorimetry* [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [ 15 ] SCHANDA J. CIE colorimetry and colour displays [C]. *Color and Imaging Conference, Scottsdale, USA*, 1996(1): 230-234.
- [ 16 ] 岳明晶,陈宇,苗静,等. 基于色谱测量LED显示屏白场偏差分析[J]. 光机电信息, 2011, 28(8): 45-50.  
YUE M J, CHEN Y, MIAO J, et al. Analysis of white-field deviation of LED display based on chromatographic measurement [J]. *OME Inf.*, 2011, 28(8): 45-50. (in Chinese)
- [ 17 ] ZARACH J S, MORRIS N M. *Television Principles and Practice* [M]. London: Macmillan, 1979.
- [ 18 ] GUO W J, CHEN N, LU H, et al. The impact of luminous properties of red, green, and blue mini-LEDs on the color gamut [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2019, 66(5): 2263-2268.
- [ 19 ] 日亚化学工业株式会社. 全彩LED(NESM026DT)规格书[EB/OL]. [2021-06-06]. [https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/led/NESM026DT-C\(3640B\).pdf](https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/led/NESM026DT-C(3640B).pdf).  
NICHIA. Full color LED (NESM026DT) Datasheet [EB/OL]. [2021-06-06]. [https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/led/NESM026DT-C\(3640B\).pdf](https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/led/NESM026DT-C(3640B).pdf). (in Chinese)
- [ 20 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12642-2001 工业机器人性能规范及其试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 24-26.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 12642-2001 Industrial robots—Performance criteria and related test methods [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004: 24-26. (in Chinese)



宿然(1998-),女,吉林四平人,硕士研究生,2020年于吉林大学获得学士学位,主要从事平板显示、图像处理的研究。

E-mail: suran987@126.com



陈宇(1968-),男,吉林长春人,博士,研究员,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事新型平板显示、信息传输等方面的研究。

E-mail: chenyc@ccxida.com