

文章编号: 1000-7032(2019)09-1159-13

# 基于 LED 显示屏基色亮度变化的白场亮色度偏差分析

毛新越<sup>1,2</sup>, 苗 静<sup>3</sup>, 陈 宇<sup>1,3</sup>, 郑喜凤<sup>1,3\*</sup>, 王瑞光<sup>1,3</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. 长春希达电子技术有限公司, 吉林 长春 130103)

**摘要:** LED 显示屏白场显示品质成为行业内日益关注的焦点, 白场显示品质主要表现为白场的亮度和色度, 而显示屏的基色亮度是影响白场亮度和色度的重要因素之一。为了得到基色亮度与白场亮色度的数学关系, 量化基色亮度变化引起白场亮色度的偏差, 本文在 CIE- $Y_{xy}$  颜色空间中建立三基色亮度与白场亮色度的映射模型, 得到红基色、绿基色、蓝基色各自亮度变化以及混合变化引起的白场亮色度偏差的空间模型, 并在空间模型的正投影平面上着重分析了三基色亮度对变化白场的色度影响。该关系式在 CIE- $Y_{xy}$  颜色空间中具有通用性, 可以快速确定任意 LED 显示屏基色亮度变化引起的白场亮色度偏差。

**关键词:** 基色亮度; 白场亮色度; 亮色度偏差

中图分类号: TN383

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20194009.1159

## Analysis of White Field Luminance Deviation Based on LED Panel Primary Luminance Variation

MAO Xin-yue<sup>1,2</sup>, MIAO Jing<sup>3</sup>, CHEN Yu<sup>1,3</sup>, ZHENG Xi-feng<sup>1,3\*</sup>, WANG Rui-guang<sup>1,3</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: zhengxf@ccxida.com

**Abstract:** The white field display quality of LED panel is increasingly focused. The white field display quality is mainly the luminance and chromaticity, and the primary luminance of the LED panel is one of the important factors affecting the luminance and chromaticity of the white field. In order to obtain the mathematical relationship between primary luminance and brightness and chromaticity of white field, quantification the deviation of luminance and chromaticity of the white field caused by primary luminance deviation, according to establish the mapping model of the three primary luminance and the luminance and chromaticity of the white field in the CIE- $Y_{xy}$  color space, this paper obtains the spatial model of deviation of the luminance and chromaticity of the white field deviation caused by the brightness variation of red, green and blue primary individually or compounded. The influence on luminance and chromaticity of the white field by the primaries variation has been analyzed in the orthographic plane of the color space model. The mathematical relationship has a general form in CIE- $Y_{xy}$  color space, and can quickly determine the deviation of luminance and chromaticity of white field caused by the variation of primary luminance of any LED panel.

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-04-10

基金项目: 国家十三五科技重点专项(2017YFB0404800); 长春市科技创新“双十工程”重大科技攻关项目(19SS002)资助  
Supported by National Key Research and Development Program of China(2017YFB0404800); Changchun Major Science and Technology Projects(19SS002)

**Key words:** primary luminance; luminance and chromaticity of the white field; deviation of the luminance and chromaticity

## 1 引 言

随着半导体技术和显示技术的快速发展,LED(发光二极管)显示屏作为信息显示载体被广泛应用在各个领域,显示屏白场的亮色度作为重要指标也受到了重点关注<sup>[1-3]</sup>。

LED 显示白场是由红、绿、蓝三基色按比例组合而成,白场的亮色度与红、绿、蓝的亮度和色度具有相关性<sup>[4-6]</sup>,而 LED 三基色的亮度受到诸多因素的影响,例如 LED 的温度特性、LED 的衰减特性以及驱动电路、电源等,使三基色的亮度随着使用时间的增加产生波动,导致白场的亮色度产生偏差<sup>[7-9]</sup>。目前针对基色亮度与白场亮色度相关性的研究很少,岳明晶等的《基于色谱测量 LED 显示屏白场偏差分析》<sup>[10]</sup>也只是对白场色度产生偏差的原因进行了分析,并没有说明白场的亮色度与基色亮度具体的空间量化关系。所以,为了确定基色亮度与白场亮色度的相关性,本文在 CIE- $Y_{xy}$  颜色空间中针对显示屏红、绿、蓝三基色的亮度与白场亮色度之间的关系进行分析,量化基色亮度变化与白场亮色度偏差的关系,建立三维空间模型,并在空间模型的正投影平面上对白场色度偏差进行了着重分析,详细说明了单基色亮度变化和多基色亮度混合变化对白场亮色度的影响。

## 2 LED 显示屏三基色与白场亮色度的关系

### 2.1 CIE- $Y_{xy}$ 颜色空间

颜色空间指的是用一种客观的方式描述颜色在人眼上的感知,用三刺激值(或者 3 个颜色)来表示所有能被感觉到的颜色<sup>[10]</sup>。CIE- $Y_{xy}$  颜色空间是 CIE(国际照明委员会)建立的标准颜色空间,用  $X, Y, Z$  表示三刺激值,同时采用  $X, Y, Z$  的数值来表示颜色,用  $X, Y, Z$  的占比表示色度,记为  $x, y, z$ <sup>[11]</sup>,如公式(1)所示:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z},$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (1)$$

由于  $x + y + z = 1$ ,所以只用  $x, y$  即可表示一个颜色的色度。定义  $x-y$  构成的平面为色度平面,将  $(x, y)$  定义为色度坐标点,这样任意颜色的色度在色度平面都有唯一的色度坐标点。CIE- $Y_{xy}$  颜色空间色度平面图如图 1 所示。

图 1 的  $x$  轴表示色度坐标  $x, y$  轴表示色度坐标  $y$ 。图形边缘曲线轨迹是由可见光谱的色度坐标点连接而成,对应于可见光谱。整个曲线围成的区域叫做色域,在色域内的任意一点的色度坐标都代表一种混合光或者单色光。

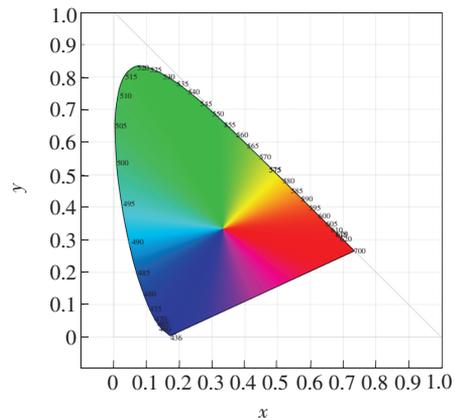


图 1 CIE- $Y_{xy}$  颜色空间色度平面图

Fig. 1 Chromaticity plane of CIE- $Y_{xy}$  color space

### 2.2 三基色亮度与白场亮色度在 CIE- $Y_{xy}$ 空间中的关系

根据 Grassmann 亮度相加定律,LED 显示白场的亮度是由红、绿、蓝三基色(下面简称为 RGB)混合构成,如公式(2)所示:

$$LW_k = R_k + G_k + B_k \quad k \in [1, n], \quad (2)$$

其中,  $R_k, G_k, B_k$  为第  $k$  个显示像素的三基色亮度,  $n$  为显示屏显示像素数量。  $LW_k$  为显示白场的亮度。

将公式(2)进行线性变换,构建 CIE- $Y_{xy}$  空间中的白场与三基色关系。如公式(3)所示:

$$W_k = H [R_k \ G_k \ B_k]^T \quad k \in [1, n], \quad (3)$$

其中,  $H = (h_{ij})_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$  是三基色的

转换矩阵, 记  $I_k = [R_k \ G_k \ B_k]^T$ 。  $W_k$  为 CIE- $Y_{xy}$  空间中的白场, 包括亮度和色度。为了更直观地说明白场的亮色度, 用三刺激值代替  $W_k$  得到公式(4):

$$[X_k \ Y_k \ Z_k] = HI_k \quad k \in [1, n], \quad (4)$$

$X_k, Y_k, Z_k$  为白场在 CIE- $Y_{xy}$  颜色空间中的三刺激值, 根据色度原理可知,  $Y_k$  既是三刺激值之一同时也表示 CIE- $Y_{xy}$  颜色空间中白场亮度大小。将  $X_k, Y_k, Z_k$  带入公式(1)中得到公式(5):

$$x_k = \frac{\sum_{j \in [1,3]} h_{1j} I_k}{\sum_{j \in [1,3]} h_{1j} I_k + h_{2j} I_k + h_{3j} I_k} \quad k \in [1, n],$$

$$y_k = \frac{\sum_{j \in [1,3]} h_{2j} I_k}{\sum_{j \in [1,3]} h_{1j} I_k + h_{2j} I_k + h_{3j} I_k} \quad (5)$$

$x_k, y_k$  是白场在 CIE- $Y_{xy}$  颜色空间色度平面的色度坐标点的  $x$  轴坐标和  $y$  轴坐标。

为了求解三基色转换矩阵, 令  $C_j = \sum_{i \in [1,3]} h_{ij} + h_{2j} + h_{3j}$ , 再利用公式(1)的性质对转换矩阵进行

等价变换  $H = \begin{bmatrix} C_{1x2} & C_{2x2} & C_{3x3} \\ C_{1y1} & C_{2y2} & C_{3y3} \\ C_{1z1} & C_{2z2} & C_{3z3} \end{bmatrix}$ ,  $x_1, y_1, z_1$  是  $R$  在

CIE- $Y_{xy}$  颜色空间中色度平面的色度坐标,  $x_2, y_2, z_2$  是  $G$  在 CIE- $Y_{xy}$  颜色空间中色度平面的色度坐标,  $x_3, y_3, z_3$  是  $B$  在 CIE- $Y_{xy}$  颜色空间中色度平面的色度坐标, 其数值大小由 LED 显示像素的波长和色纯度共同决定, 认为同一显示屏上的所有显示像素 RGB 的色度坐标相同、恒定且已知。  $C_1, C_2, C_3$  为 3 个待定系数。此时公式(4)和(5)转化成公式(6)和(7):

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1x1} & C_{2x2} & C_{3x3} \\ C_{1y1} & C_{2y2} & C_{3y3} \\ C_{1z1} & C_{2z2} & C_{3z3} \end{bmatrix} [R_k \ G_k \ B_k]^T \quad k \in [1, n], \quad (6)$$

$$x_k = \frac{\sum_{j \in [1,3]} C_j x_j [R_k \ G_k \ B_k]^T}{\sum_{j \in [1,3]} (C_j x_j + C_j y_j + C_j z_j) [R_k \ G_k \ B_k]^T}$$

$$y_k = \frac{\sum_{j \in [1,3]} C_j y_j [R_k \ G_k \ B_k]^T}{\sum_{j \in [1,3]} (C_j x_j + C_j y_j + C_j z_j) [R_k \ G_k \ B_k]^T} \quad k \in [1, n]. \quad (7)$$

为了得到 RGB 亮度变化对白场亮色度的影响, 设 RGB 的亮度变化为  $\Delta R_x, \Delta G_x, \Delta B_x, X'_k, Y'_k, Z'_k$  是亮度变化后的白场三刺激值, 带入公式(6)和(7)中并与公式(6)和(7)做差得到公式(8):

$$\begin{cases} \Delta X_k = X'_k - X_k \\ \Delta Y_k = Y'_k - Y_k \\ \Delta Z_k = Z'_k - Z_k \\ \Delta y_k = y'_k - y_k \\ \Delta x_k = x'_k - x_k \end{cases}$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X'_k \\ Y'_k \\ Z'_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1x1} & C_{2x2} & C_{3x3} \\ C_{1y1} & C_{2y2} & C_{3y3} \\ C_{1z1} & C_{2z2} & C_{3z3} \end{bmatrix} [R_k + \Delta R_k \ G_k + \Delta G_k \ B_k + \Delta B_k]^T \\ x'_k = \frac{\sum_{j \in [1,3]} C_j x_j [R_k + \Delta R_k \ G_k + \Delta G_k \ B_k + \Delta B_k]^T}{\sum_{j \in [1,3]} (C_j x_j + C_j y_j + C_j z_j) [R_k + \Delta R_k \ G_k + \Delta G_k \ B_k + \Delta B_k]^T} \quad k \in [1, n], \\ y'_k = \frac{\sum_{j \in [1,3]} C_j y_j [R_k + \Delta R_k \ G_k + \Delta G_k \ B_k + \Delta B_k]^T}{\sum_{j \in [1,3]} (C_j x_j + C_j y_j + C_j z_j) [R_k + \Delta R_k \ G_k + \Delta G_k \ B_k + \Delta B_k]^T} \end{cases} \quad (8)$$

$X'_k, Y'_k, Z'_k$  是 RGB 亮度变化后的白场三刺激值,  $x'_k, y'_k$  是 RGB 亮度变化后的白场色度坐标。  $\Delta X_k, \Delta Y_k, \Delta Z_k$  是白场三刺激值的变化量, 其中  $\Delta Y_k$  也是白场的亮度变化量, 同时它们都

是 RGB 亮度变化量的线性函数。  $\Delta x_k, \Delta y_k$  是白场色度坐标变化量, 与 RGB 的亮度变化量具有非线性关系, 大小受到 RGB 亮度变化量的综合影响。

### 3 RGB 亮度变化引起白场亮色度偏差分析

针对具体实例分析 RGB 亮度变化对白场的亮色度影响,本文采用色度坐标为  $(x_1 = 0.697\ 0, y_1 = 0.302\ 7)$  的红色、 $(x_2 = 0.161\ 0, y_2 = 0.738\ 5)$  的绿色以及  $(x_3 = 0.126\ 5, y_3 = 0.077\ 5)$  的蓝色作为显示屏的三基色。选择 D65 标准光源作为参考白光,已知 D65 光源的三刺激值分别为  $X_{D65} = 95.00, Y_{D65} = 100.00, Z_{D65} = 108.89$ ,归一化后作为 CIE- $Yxy$  颜色空间白场的参考三刺激值,即  $X_k = 0.95, Y_k = 1.00, Z_k = 1.088\ 9$ 。设构成 D65 标准白光的 RGB 分别为  $R = G = B = 1.00$ ,将  $R, G, B, X_k, Y_k, Z_k, x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$  带入公式(6),得到唯一解  $C_1 = 0.940\ 8, C_2 = 0.836\ 0, C_3 = 1.262\ 1$ 。

$$\text{最终求得转换矩阵 } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} C_{1x1} & C_{2x2} & C_{3x3} \\ C_{1y1} & C_{2y2} & C_{3y3} \\ C_{1z1} & C_{2z2} & C_{3z3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6557 & 0.1346 & 0.1597 \\ 0.2848 & 0.6174 & 0.0978 \\ 0.00028 & 0.0840 & 1.0046 \end{bmatrix}。 \text{将 } \mathbf{H} \text{ 带入公式}$$

(6)和(7)中,得到 D65 参考光源情况下的三基色亮度与白场色度在 CIE- $Yxy$  颜色空间中的关系式。如公式(9)和(10)所示:

$$\begin{bmatrix} X_k & Y_k & Z_k \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.6557 & 0.1346 & 0.1597 \\ 0.2848 & 0.6174 & 0.0978 \\ 0.00028 & 0.0840 & 1.0046 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_k & G_k & B_k \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$k \in [1, n],$$

$$x_k = \frac{0.6557R_k + 0.1346G_k + 0.1597B_k}{0.9401R_k + 0.8361C_k + 1.2630B_k}$$

$$y_k = \frac{0.2848R_k + 0.6174G_k + 0.0978B_k}{0.9401R_k + 0.8361G_k + 1.2630B_k} \quad (10)$$

$$k \in [1, n],$$

这样整个显示屏所能显示的亮色度空间模型与正投影示意图如图 2 所示,图中的所有亮度分量全部用  $Y$  来表示。

图 2(a)是显示屏所能显示的所有亮色度的空间模型,其中  $Y_{wk}$  是 RGB 亮度均为最大时显示屏显示的白场,也是整个模型的顶点。点  $Y_{rk}$  是  $G, B$  亮度为零,  $R$  亮度最大时显示屏显示的颜色;点  $Y_{gk}$  是  $R, B$  亮度为零,  $G$  亮度最大时显示屏显示的颜色;点  $Y_{bk}$  是  $R, G$  亮度为零,  $B$  亮度最大时显

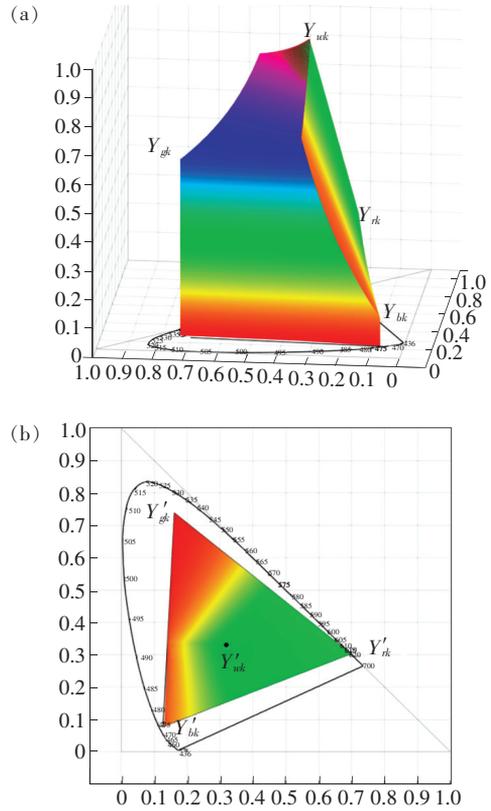


图 2 (a) 显示屏的亮色度空间模型; (b) 显示屏的亮色度空间模型的正投影示意图。

Fig. 2 (a) Spatial model of the LED panel luminance and chromaticity. (b) Orthographic plane of the spatial model of the LED panel luminance and chromaticity.

屏显示的颜色。以点  $Y_{wk}$  为起点向  $x-y$  平面投影,与  $x-y$  平面交于点  $Y'_{wk}$ ,为图 2(b) 中的点  $Y'_{wk}$  ( $x_k = 0.312\ 6, y_k = 0.329\ 1, Y_{wk} = 0$ ),同理,  $Y_{rk}, Y_{gk}, Y_{bk}$  分别向  $x-y$  平面投影,得到点  $Y'_{rk}$  ( $x_1 = 0.697\ 0, y_1 = 0.302\ 7, Y_{rk} = 0$ ),  $Y'_{gk}$  ( $x_2 = 0.161\ 0, y_2 = 0.738\ 5, Y_{gk} = 0$ ),  $Y'_{bk}$  ( $x_3 = 0.126\ 5, y_3 = 0.077\ 5, Y_{bk} = 0$ )。同时图 2(b) 也是显示屏的色度平面图,  $Y'_{rk}, Y'_{gk}, Y'_{bk}$  为 RGB 的色度坐标点,  $Y'_{rk}, Y'_{gk}, Y'_{bk}$  作为顶点在  $x-y$  平面构成显示屏的色度三角形,色度三角形即为该显示屏的最大色域。

对 RGB 的亮度进行归一化,使 RGB 的亮度在  $[0, 1]$  之间,并将  $R = R_{k0}, G = G_{k0}, B = B_{k0}$  作为 RGB 亮度初始值。设 RGB 的亮度变化为  $\Delta R_k, \Delta G_k, \Delta B_k$ ,在实际使用过程中,LED 显示屏的基色亮度波动小,约为基色亮度的 10%,所以  $\Delta R_k, \Delta G_k, \Delta B_k \in [-\delta, \delta], \delta = \frac{1}{10}$ 。将  $\Delta R_k, \Delta G_k, \Delta B_k,$

$R = G = B = \frac{1}{2}$  和转换矩阵  $H$  带入公式(8)中, 得:

$$\begin{cases}
 X'_k = 0.6557(R_{k0} + \Delta R_k) + 0.1346(G_{k0} + \Delta G_k) + 0.1597(B_{k0} + \Delta B_k) \\
 y'_k = 0.2848(R_{k0} + \Delta R_k) + 0.6174(G_{k0} + \Delta G_k) + 0.0978(B_{k0} + \Delta B_k) \\
 Z'_k = 0.00028(R_{k0} + \Delta R_k) + 0.0840(G_{k0} + \Delta G_k) + 1.0046(B_{k0} + \Delta B_k) \\
 x'_k = \frac{0.6557(R_{k0} + \Delta R_k) + 0.1346(G_{k0} + \Delta G_k) + 0.1597(B_{k0} + \Delta B_k)}{0.9408(R_{k0} + \Delta R_k) + 0.8361(G_{k0} + \Delta G_k) + 1.2621(B_{k0} + \Delta B_k)} \\
 y'_k = \frac{0.2848(R_{k0} + \Delta R_k) + 0.6174(G_{k0} + \Delta G_k) + 0.0978(B_{k0} + \Delta B_k)}{0.9408(R_{k0} + \Delta R_k) + 0.8361(G_{k0} + \Delta G_k) + 1.2621(B_{k0} + \Delta B_k)} \\
 \Delta x_k = x'_k - x_k = \frac{(0.4216G_{k0} + 0.6774B_{k0})\Delta R_k + (-0.4261R_{k0} + 0.0364B_{k0})\Delta G_k + (-0.6774R_{k0} - 0.0364G_{k0})\Delta B_k}{1.5732R_{k0}G_{k0} + 2.3748R_{k0}B_{k0} + 2.1104G_{k0}B_{k0} + 0.8851R_{k0}^2 + 0.6991G_{k0}^2 + 1.5929B_{k0}^2 + (0.8851R_{k0} + 0.7866G_{k0} + 1.1874B_{k0})\Delta R_k + (0.7866R_{k0} + 0.6991G_{k0} + 1.0552B_{k0})\Delta G_k + (1.1874R_{k0} + 1.0552G_{k0} + 1.5921B_{k0})\Delta B_k} \\
 \Delta y_k = y'_k - y_k = \frac{(0.2674R_{k0} + 0.6974G_{k0})\Delta B_k}{1.5732R_{k0}G_{k0} + 2.3748R_{k0}B_{k0} + 2.1104G_{k0}B_{k0} + 0.8851R_{k0}^2 + 0.6991G_{k0}^2 + 1.5929B_{k0}^2 + (0.8851R_{k0} + 0.7866G_{k0} + 1.1874B_{k0})\Delta R_k + (0.7866R_{k0} + 0.6991G_{k0} + 1.0552B_{k0})\Delta G_k + (1.1874R_{k0} + 1.0552G_{k0} + 1.5921B_{k0})\Delta B_k}
 \end{cases}$$

(11)

当  $R_{k0} = G_{k0} = B_{k0} = \frac{1}{2}$  时,  $\Delta R_k, \Delta G_k, \Delta B_k, \Delta x_k, \Delta y_k$  关系如下:

(1)  $\Delta G_{k0} = \Delta B_{k0} = 0, \Delta R_k = 0$  时: 白场运动轨迹与  $Y_k$  点重合, 白场的色度坐标  $(x'_k, y'_k) = (x_k, y_k)$ ; 当  $\Delta R_k = \Delta G_k = \Delta B_k = K, K \in [-\delta, \delta]$  时, 白场运动轨迹与点  $Y_{wk}$  及点  $Y'_{wk}$  在  $x$ - $y$  平面投影  $Y'_k$  组成的线段上的  $Y_{-\delta k} - Y_{\delta k}$  重合,  $\eta \in Y_k Y'_k$ , 白场色度坐标  $(x'_k, y'_k) = (x_k, y_k)$ , 亮度改变, 色

度坐标恒定, 如图 3 (a) 所示。  $\eta_c = (0.3126, 0.3291)$  为白场的色度坐标点, 并设定该点为色度初始点, 如图 3 (b) 所示。

(2)  $\Delta G = \Delta B = 0, \Delta R \in [-\delta, \delta]$ , 白场运动轨迹与  $Y_{-\delta} - Y_k - Y_{\delta}$  重合, 如图 4 (a) 所示。白场的色度坐标运动轨迹与  $Y'_{-\delta} - Y'_{wk} - Y'_{\delta}$  如图 4 (b) 所示。点  $Y_{-\delta}$  和  $Y'_{-\delta}$  分别是  $R = -\delta$  时白场的空间坐标点和白场的色度平面坐标点, 点  $Y_{\delta}$  和  $Y'_{\delta}$  分别是  $R = \delta$  时白场的空间坐标点和白场的色度平面坐标点。

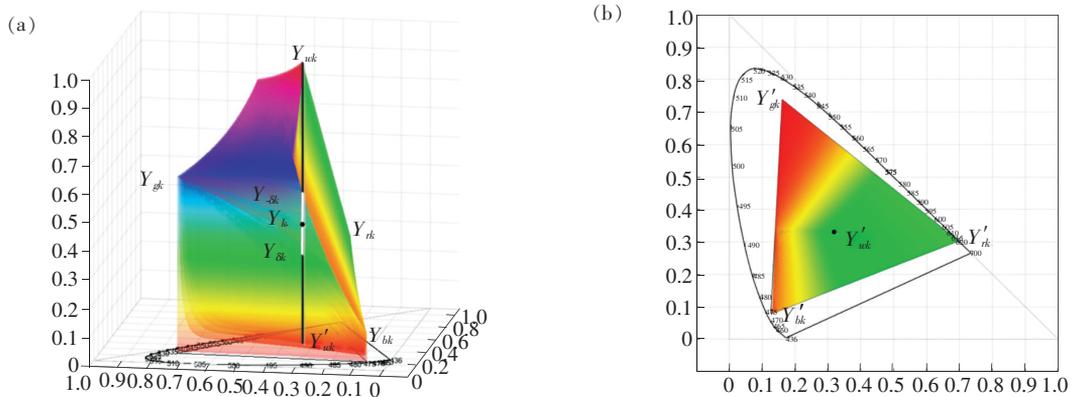


图 3 (a) 白场的运动轨迹; (b) 色度初始点。

Fig. 3 (a) Trajectory of the white field. (b) Initial point of chromaticity.

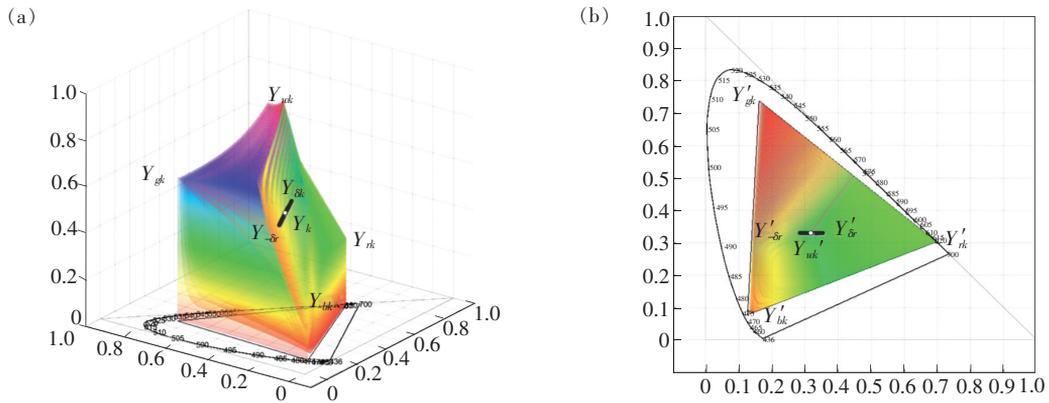


图 4 (a) 白场的运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 4 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

$\Delta R = \Delta B = 0, \Delta G \in [-\delta, \delta]$ , 白场运动轨迹与  $Y_{-\delta g} - Y_k - Y_{\delta g}$  重合, 如图 5 (a) 所示。白场的色度坐标运动轨迹与  $Y'_{-\delta g} - Y'_{uk} - Y'_{\delta g}$  如图 5 (b) 所示。点

$Y_{-\delta g}$  和  $Y_{\delta g}$  分别是  $G = -\delta$  时白场的空间坐标点和白场的色度平面坐标点, 点  $Y_k$  和  $Y'_k$  分别是  $G = \delta$  时白场的空间坐标点和白场的色度平面坐标点。

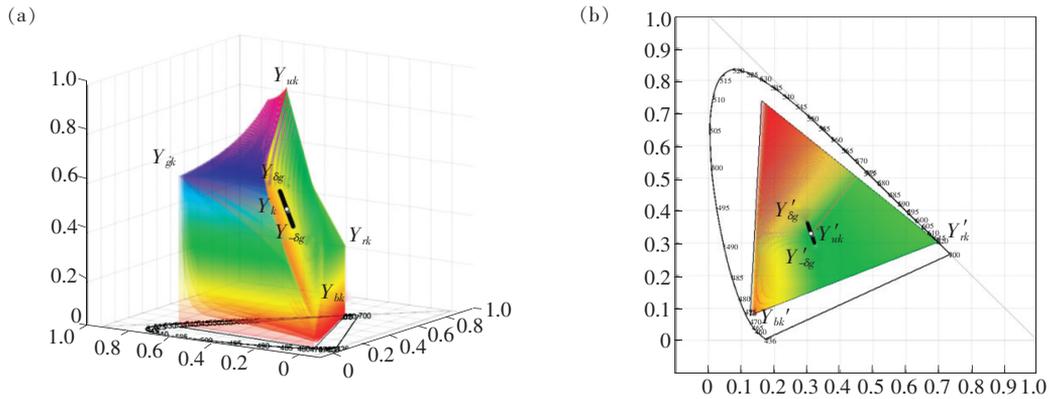


图 5 (a) 白场的运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 5 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

$\Delta R = \Delta G = 0, \Delta B \in [-\delta, \delta]$ , 白场运动轨迹与  $Y_{-\delta b} - Y_k - Y_{\delta b}$  重合, 如图 6 (a) 所示。白场的色度坐标运动轨迹与  $Y'_{-\delta b} - Y'_{uk} - Y'_{\delta b}$  如图 6 (b) 所示。点  $Y_{-\delta b}$  和

$Y'_{\delta b}$  分别是  $B = -\delta$  时白场的空间坐标点和白场的色度平面坐标点, 点  $Y_{\delta b}$  和  $Y'_{\delta b}$  分别是  $B = \delta$  时白场的空间坐标点和白场的色度平面坐标点。

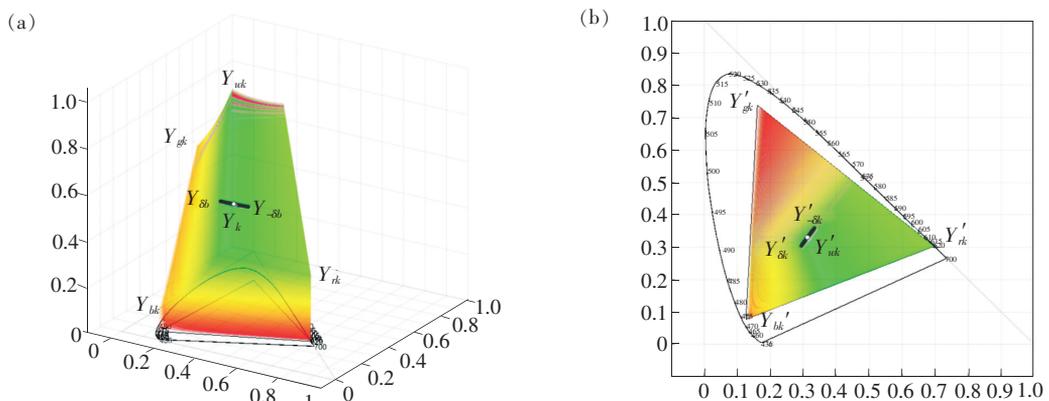


图 6 (a) 白场的运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 6 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

(3)  $\Delta G = [ -\delta, 0 ]$ ,  $\Delta B = [ -\delta, 0 ]$ ,  $\Delta R = [ -\delta, 0 ]$ , 白场运动轨迹为  $q_1$ - $q_2$ - $q_3$ - $q_4$ - $q_5$ - $q_6$  构成的区域,  $\eta_l \in q_1 q_2 q_3 q_4 q_5 q_6$ , 如图 7 (a) 所示。

白场色度坐标的运动轨迹为  $p_1$ - $p_2$ - $p_3$ - $p_4$ - $p_5$ - $p_6$  所围成的区域,  $\eta_c \in p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6$ , 如图 7 (b) 所示。

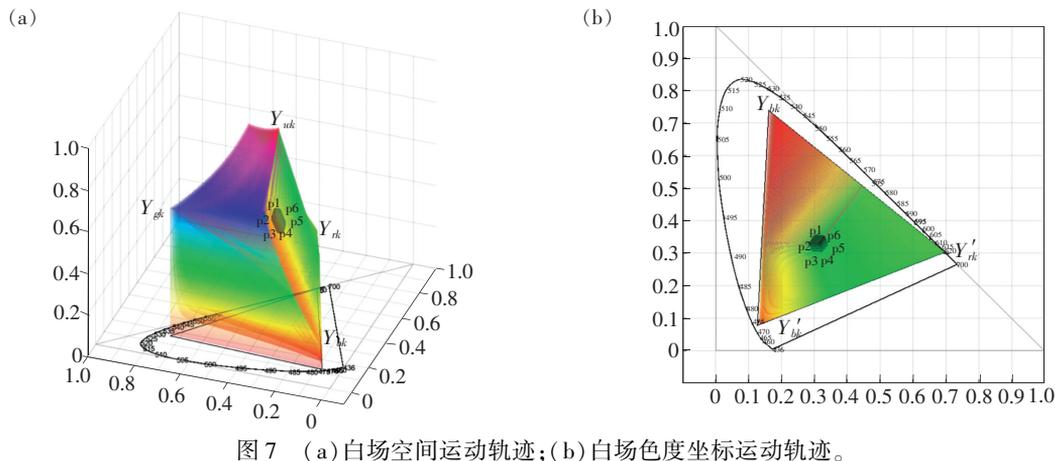


图 7 (a) 白场空间运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 7 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

当  $R$ 、 $G$ 、 $B$  亮度都向小于  $\frac{1}{2}$  方向波动时, 白场的运动轨迹为以  $Y_k$  为中心的空间闭环区域, 且白场的色度坐标运动轨迹以白场色度初始点为中心, 形成平面闭环区域。

(4)  $\Delta G = [ \delta, 0 ]$ ,  $\Delta B = [ \delta, 0 ]$ ,  $\Delta R = [ -\delta, 0 ]$ , 白场运动轨迹为  $q_1$ - $q_2$ - $q_3$ - $q_4$ - $q_5$ - $q_6$  构成的区域  $\eta_l \in q_1 q_2 q_3 q_4 q_5 q_6$ , 如图 8 (a) 所示。白场色度坐标的运动轨迹为  $p_1$ - $p_2$ - $p_3$ - $p_4$ - $p_5$ - $p_6$  所围成的区域,  $\eta_c \in p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6$ , 如图 8 (b) 所示。

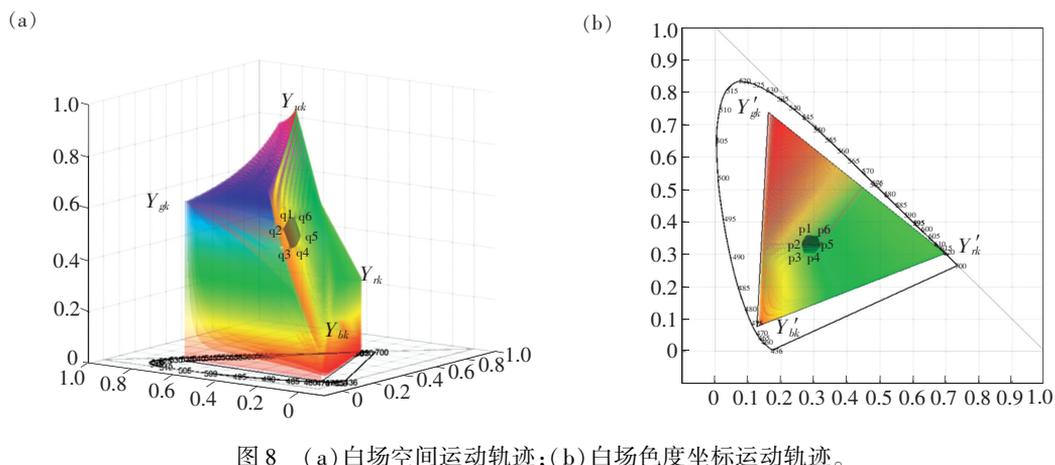


图 8 (a) 白场空间运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 8 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

当  $R$  亮度向小于  $\frac{1}{2}$  方向波动、 $G$ 、 $B$  亮度都向大于  $\frac{1}{2}$  方向波动时, 白场的运动轨迹为包含  $Y_k$  空间闭环区域, 且白场的色度坐标运动轨迹为包含白场色度初始点的平面闭环区域, 色度初始点在区域的  $p_5$  点处, 整个区域向蓝、绿混合色的色度坐标方向偏移。

域,  $\eta_l \in q_1 q_2 q_3 q_4 q_5 q_6$ , 如图 9 (a) 所示。白场色度坐标的运动轨迹为  $p_1$ - $p_2$ - $p_3$ - $p_4$ - $p_5$ - $p_6$  所围成的区域,  $\eta_c \in p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6$ , 如图 9 (b) 所示。

(5)  $\Delta G = [ -\delta, 0 ]$ ,  $\Delta B = [ 0, \delta ]$ ,  $\Delta R = [ -\delta, 0 ]$ , 白场运动轨迹为  $q_1$ - $q_2$ - $q_3$ - $q_4$ - $q_5$ - $q_6$  构成的区

当  $B$  亮度向大于  $\frac{1}{2}$  方向波动、 $R$ 、 $G$  亮度都向小于  $\frac{1}{2}$  方向波动时, 白场的运动轨迹为包含  $Y_k$  空间闭环区域, 且白场的色度坐标运动轨迹为包含白场色度初始点的平面闭环区域, 色度初始点在区域的  $p_6$  点处, 整个区域向蓝基色色度坐标方向偏移。

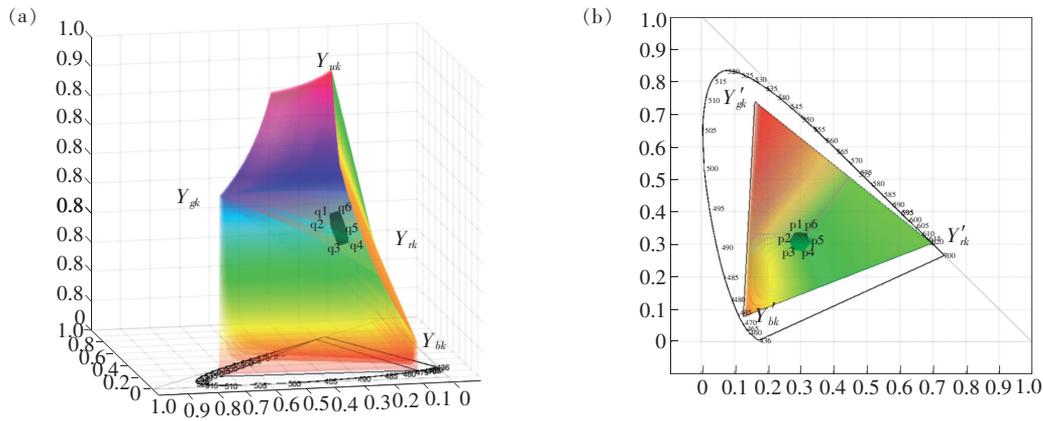


图 9 (a) 白场空间运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 9 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

(6)  $\Delta G = [\delta, 0], \Delta B = [\delta, 0], \Delta R = [\delta, 0]$ , 白场运动轨迹为  $q_1$ - $q_2$ - $q_3$ - $q_4$ - $q_5$ - $q_6$  构成的区域,  $\eta_l \in q_1 q_2 q_3 q_4 q_5 q_6$ , 如图 10 (a) 所示。白场色度坐标的运动轨迹为  $p_1$ - $p_2$ - $p_3$ - $p_4$ - $p_5$ - $p_6$  所围成的区域,  $\eta_c \in p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6$ , 如图 10 (b) 所示。

当  $R$ 、 $G$ 、 $B$  亮度都向大于  $\frac{1}{2}$  方向波动时, 白场的运动轨迹为以  $Y_k$  为中心的空间闭环区域, 且白场的色度坐标运动轨迹以白场色度初始点为中心, 形成平面闭环区域。

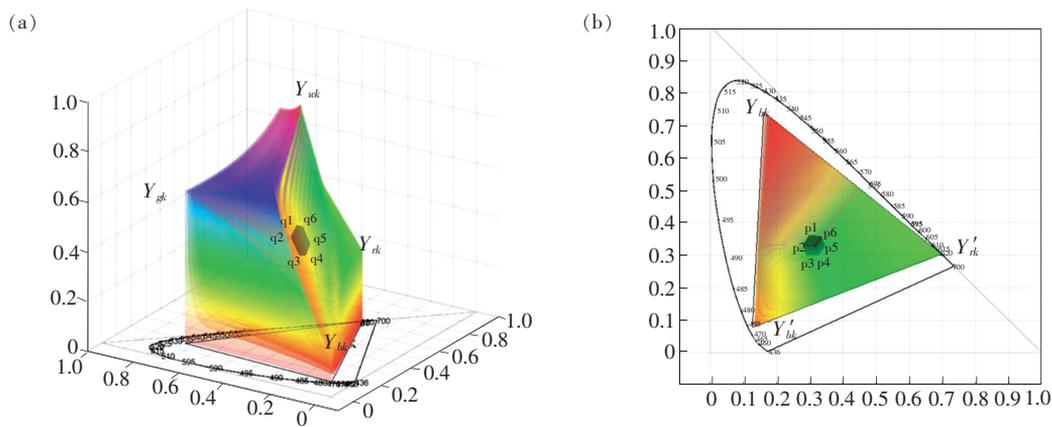


图 10 (a) 白场空间运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 10 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

(7)  $\Delta G = [0, \delta], \Delta B = [-\delta, 0], \Delta R = [-\delta, 0]$ , 白场运动轨迹为  $q_1$ - $q_2$ - $q_3$ - $q_4$ - $q_5$ - $q_6$  构成的区域,  $\eta_l \in q_1 q_2 q_3 q_4 q_5 q_6$ , 如图 11 (a) 所示。白场色度坐标的运动轨迹为  $p_1$ - $p_2$ - $p_3$ - $p_4$ - $p_5$ - $p_6$  所围成的区域,  $\eta_c \in p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6$ , 如图 11 (b) 所示。

(8)  $\Delta G = [0, \delta], \Delta B = [-\delta, 0], \Delta R = [0, \delta]$ , 白场运动轨迹为  $q_1$ - $q_2$ - $q_3$ - $q_4$ - $q_5$ - $q_6$  构成的区域,  $\eta_l \in q_1 q_2 q_3 q_4 q_5 q_6$ , 如图 12 (a) 所示。白场色度坐标的运动轨迹为  $p_1$ - $p_2$ - $p_3$ - $p_4$ - $p_5$ - $p_6$  所围成的区域,  $\eta_c \in p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6$ , 如图 12 (b) 所示。

当  $G$  亮度向大于  $\frac{1}{2}$  方向波动、 $R$ 、 $B$  亮度向小于  $\frac{1}{2}$  方向波动时, 白场的运动轨迹为包含  $Y_k$  的空间闭环区域, 且白场的色度坐标运动轨迹为包含白场色度初始点的平面闭环区域, 色度初始点在区域的  $p_4$  点处, 整个区域向绿基色色度坐标方向偏移。

当  $R$ 、 $G$  亮度向大于  $\frac{1}{2}$  方向波动、 $B$  亮度向小于  $\frac{1}{2}$  方向波动时, 白场的运动轨迹为包含  $Y_k$  的空间闭环区域, 且白场的色度坐标运动轨迹为包含白场色度初始点的平面闭环区域, 色度初始点在区域的  $p_3$  点处, 整个区域向红、绿基色混合色的色度坐标方向偏移。

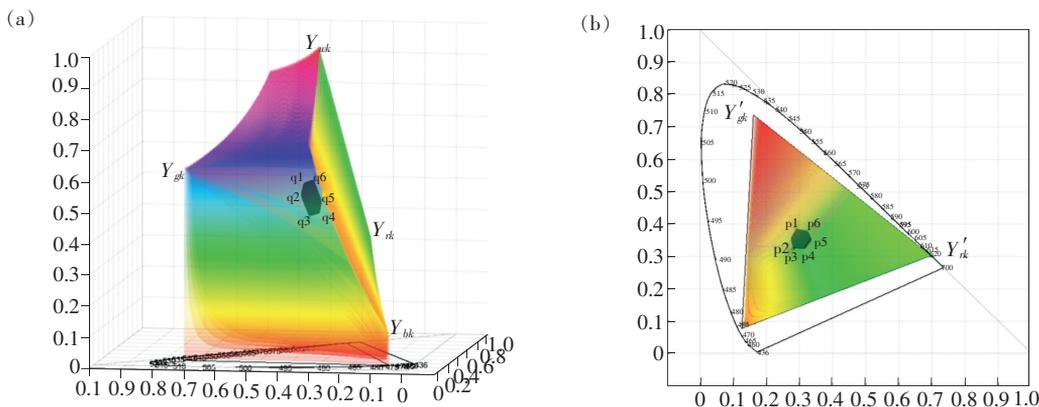


图 11 (a) 白场空间运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 11 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

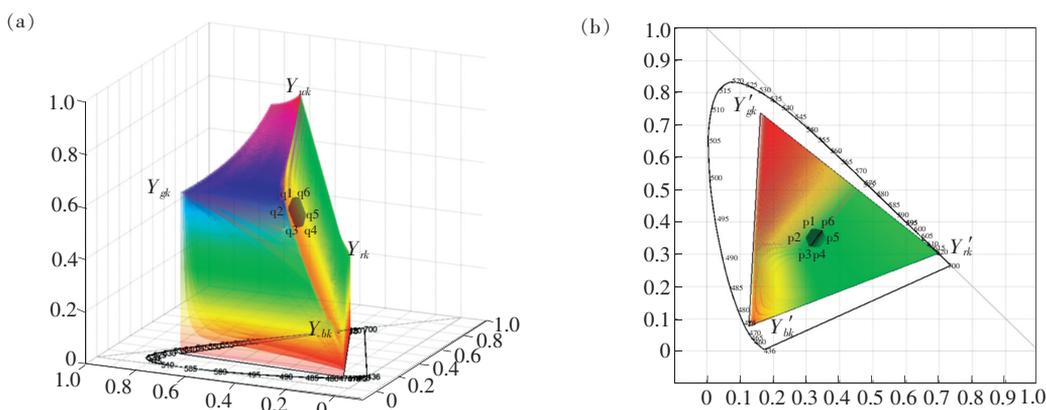


图 12 (a) 白场空间运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 12 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

(9)  $\Delta G = [ -\delta, 0 ]$ ,  $\Delta B = [ -\delta, 0 ]$ ,  $\Delta R = [ 0, \delta ]$ , 白场运动轨迹为  $q_1$ - $q_2$ - $q_3$ - $q_4$ - $q_5$ - $q_6$  构成的区域,  $\eta_l \in q_1 q_2 q_3 q_4 q_5 q_6$ , 如图 13 (a) 所示。白场色度坐标的运动轨迹为  $p_1$ - $p_2$ - $p_3$ - $p_4$ - $p_5$ - $p_6$  所围成的区域,  $\eta_c \in p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6$ , 如图 13 (b) 所示。

当  $R$ 、 $G$  亮度向大于  $\frac{1}{2}$  方向波动、 $B$  亮度向小于  $\frac{1}{2}$  方向波动时, 白场的运动轨迹为包含  $Y_k$  的空间闭环区域, 且白场的色度坐标运动轨迹为包含白场色度初始点的平面闭环区域, 色度初始点在区域的  $p_2$  点处, 整个区域向红基色度坐标方向偏移。

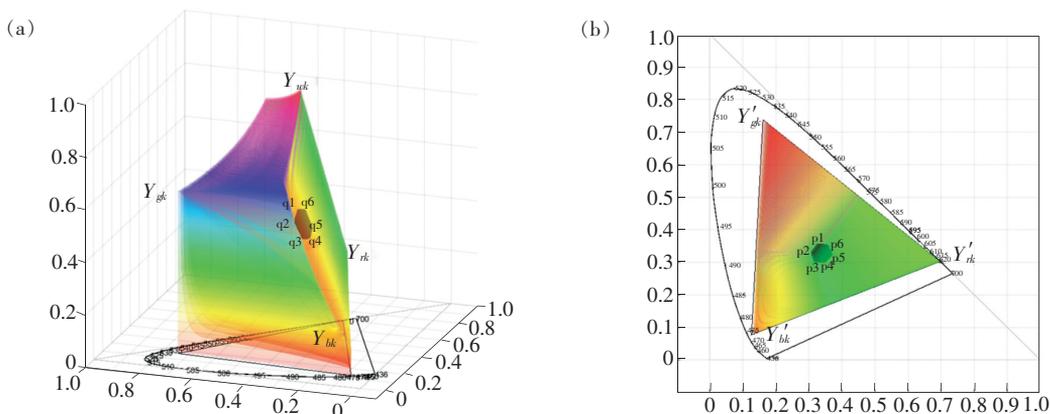


图 13 (a) 白场空间运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 13 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

(10)  $\Delta G = [-\delta, 0]$ ,  $\Delta B = [0, \delta]$ ,  $\Delta R = [0, \delta]$ , 白场运动轨迹为  $q1-q2-q3-q4-q5-q6$  构成的区域,  $\eta_l \in q1q2q3q4q5q6$ , 如图 14(a) 所示。白场色度坐标的运动轨迹为  $p1-p2-p3-p4-p5-p6$  所围成

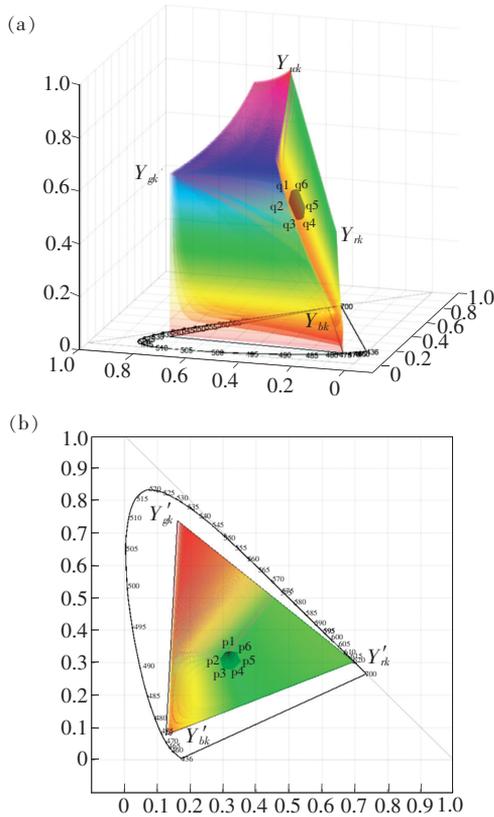


图 14 (a) 白场空间运动轨迹; (b) 白场色度坐标运动轨迹。

Fig. 14 (a) Trajectory of the white field. (b) Trajectory of the white field chromaticity coordinates.

的区域,  $\eta_c \in p1p2p3p4p5p6$ , 如图 14(b) 所示。

当  $R, B$  亮度向大于  $\frac{1}{2}$  方向波动、 $G$  亮度向小于  $\frac{1}{2}$  方向波动时, 白场的运动轨迹为包含  $Y_k$  的空间闭环区域, 且白场的色度坐标运动轨迹为包含白场色度初始点的平面闭环区域, 色度初始点在区域的  $p1$  点处, 整个区域向红、蓝基色度混合色的色度坐标方向偏移。

### 4 实验与分析

实验采用显示像素为  $256 \times 256$  的 LED 显示屏, 测量仪器采用 CS-2000 光谱色度计。

(1) 利用 CS-2000 测量红、绿、蓝原始色度坐标和亮度、白场的亮度和色度坐标, 如表 1 所示。

表 1 红、绿、蓝三基色原始色度坐标和亮度

Tab. 1 Chromaticity coordinate and brightness of the original tristimulus, red, green and blue

颜色	$x$	$y$	$Y$
R	0.697 0	0.302 7	123.71
G	0.161 0	0.738 5	290.46
B	0.126 5	0.077 2	44.60
W	0.312	0.329 9	457.90

(2) 令红、绿、蓝单基色每个基色亮度按照 3% 递增和递减, 其他两基色亮度不变; 红、绿、蓝每两个基色亮度按照 3% 递增和递减, 另一个基色亮度不变; 3 个基色都按照 3% 递增和递减。测量上述情况的白场亮度和色度坐标, 如表 2 所示。

表 2 白场的色度坐标和亮度测量值

Tab. 2 Chromaticity coordinates and brightness measurements of the white field

颜色	$R_{reality}$	$G_{reality}$	$B_{reality}$	$WL_{reality}$	$x_{reality}$	$y_{reality}$
R 0.97Y	119.90	290.46	44.60	453.04	0.308 8	0.329 5
G 0.97Y	123.71	282.86	44.60	449.45	0.313 0	0.325 5
B 0.97Y	123.71	290.46	43.30	455.80	0.314 9	0.332 0
R,G 0.97Y	119.90	282.86	44.60	446.90	0.310 2	0.325 4
R,B 0.97Y	119.90	290.46	43.30	451.08	0.310 8	0.332 0
G,B 0.97Y	123.71	282.86	43.30	449.10	0.316 0	0.328 7
R,G,B 0.97Y	119.90	282.86	43.30	444.98	0.312 5	0.329 9
Y	123.71	290.46	44.60	457.90	0.312 0	0.329 9
R 1.03Y	127.00	290.46	44.60	459.98	0.315 9	0.328 9
G 1.03Y	123.71	299.50	44.60	464.59	0.311 7	0.331 8

表 2(续)

颜色	$R_{\text{reality}}$	$G_{\text{reality}}$	$B_{\text{reality}}$	$WL_{\text{reality}}$	$x_{\text{reality}}$	$y_{\text{reality}}$
B 1.03Y	123.71	290.46	45.93	4 560.13	0.310 5	0.326 0
R,G 1.03Y	127.00	299.50	44.60	470.10	0.314 8	0.332 0
R,B 1.03Y	127.00	290.46	45.93	462.50	0.313 0	0.325 0
G,B 1.03Y	123.71	299.50	45.93	467.00	0.309 0	0.329 2
R,G,B 1.03Y	127.00	299.50	45.93	473.20	0.312 6	0.329 5

(3)为符合上述实例中公式(9)的求解条件, 将表 2 中的原始红、绿、蓝、白的亮度分别针对自身进行归一化, 得到红基色的归一化比例为 123.71, 绿基色的归一化比例为 290.46, 蓝基色的归一化比

例为 44.60, 白场的归一化比例为 457.90。将表 3 中的测量数据按照红、绿、蓝、白各自亮度比例进行归一化, 带入公式(9)中求出白场理论亮度和色度坐标, 再进行逆变换。如表 3 所示。

表 3 测量值与真实值

Tab. 3 Measured value and real value

颜色	$R_{\text{reality}}$	$G_{\text{reality}}$	$B_{\text{reality}}$	$WL_{\text{reality}}$	$x_{\text{reality}}$	$y_{\text{reality}}$	$WL_{\text{theory}}$	$x_{\text{theory}}$	$y_{\text{theory}}$
R 0.97Y	119.90	290.46	44.60	453.04	0.308 8	0.329 5	453.9 8	0.308 9	0.329 2
G 0.97Y	123.71	282.86	44.60	449.45	0.313 0	0.325 5	449.42	0.313 8	0.325 6
B 0.97Y	123.71	290.46	43.30	455.80	0.314 9	0.332 0	456.55	0.314 9	0.332 2
R,G 0.97Y	119.90	282.86	44.60	446.90	0.310 2	0.325 4	445.54	0.310 8	0.325 8
R,B 0.97Y	119.90	290.46	43.30	451.08	0.310 8	0.332 0	452.67	0.311 3	0.332 5
G,B 0.97Y	123.71	282.86	43.30	449.10	0.316 0	0.328 7	448.10	0.316 2	0.328 8
R,G,B 0.97Y	119.90	282.86	43.30	444.98	0.312 5	0.329 9	444.16	0.312 5	0.329 0
Y	123.71	290.46	44.60	457.90	0.312 0	0.329 9	457.90	0.312 6	0.329 0
R 1.03Y	127.00	290.46	44.60	459.98	0.315 9	0.328 9	461.79	0.316 1	0.328 7
G 1.03Y	123.71	299.50	44.60	464.59	0.311 7	0.331 8	466.37	0.3113	0.332 3
B 1.03Y	123.71	290.46	45.93	456.13	0.310 5	0.326 0	459.23	0.310 3	0.325 9
R,G 1.03Y	127.00	299.50	44.60	470.10	0.314 8	0.332 0	470.26	0.314 8	0.332 1
R,B 1.03Y	127.00	290.46	45.93	462.50	0.313 0	0.325 0	463.12	0.313 8	0.325 7
G,B 1.03Y	123.71	299.50	45.93	467.00	0.309 0	0.329 2	467.70	0.309 0	0.329 2
R,G,B 1.03Y	127.00	299.50	45.93	473.60	0.312 6	0.329 5	471.59	0.312 5	0.329 0

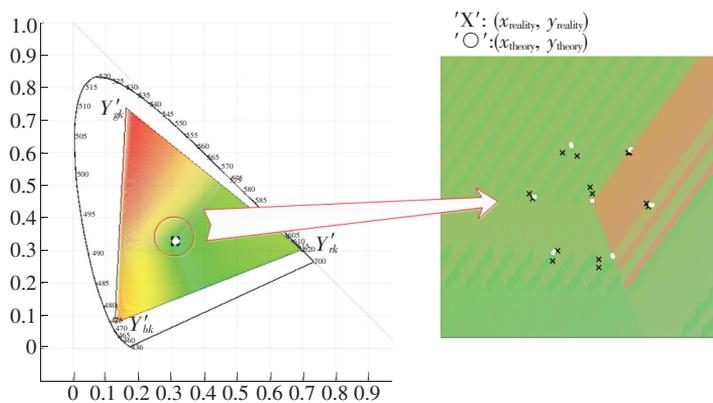


图 15 所有色度坐标点  $(x_{\text{reality}}, y_{\text{reality}})$  和  $(x_{\text{theory}}, y_{\text{theory}})$

Fig. 15 All chromaticity coordinates  $(x_{\text{reality}}, y_{\text{reality}})$  and  $(x_{\text{theory}}, y_{\text{theory}})$

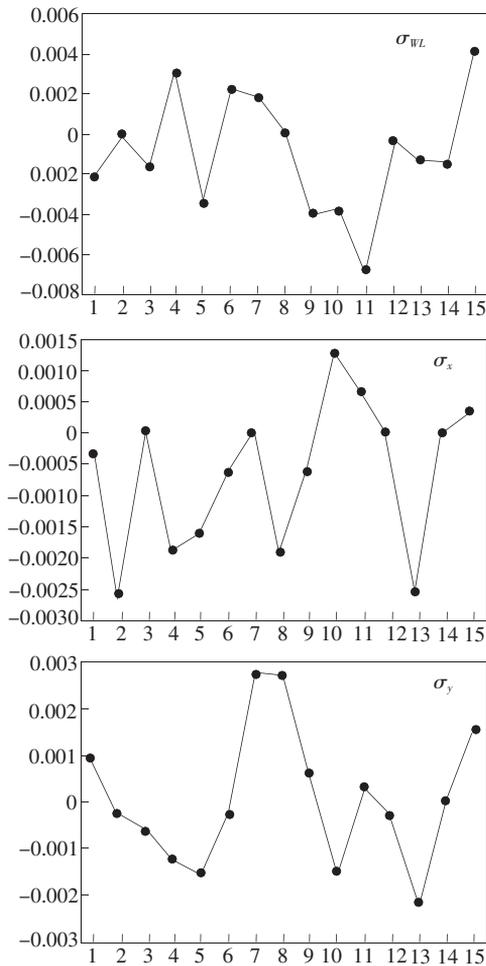


图 16  $\sigma_{WL}$ 、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  各自的相对误差。

Fig. 16  $\sigma_{WL}$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  relative errors.

在图 3(b) 中画出表 3 中所有  $(x_{\text{reality}}, y_{\text{reality}})$  和  $(x_{\text{theory}}, y_{\text{theory}})$ , 如图 15 所示。

将表 3 中白场的亮度和色度坐标的实际测量值和理论值带入公式 (12) 求出相对误差, 公式 (12) 如下所示:

$$\sigma_{WL} = \frac{WL_{\text{reality}} - WL_{\text{theory}}}{WL_{\text{theory}}}$$

$$\sigma_x = \frac{x_{\text{reality}} - x_{\text{theory}}}{x_{\text{theory}}} \quad (12)$$

$$\sigma_y = \frac{y_{\text{reality}} - y_{\text{theory}}}{y_{\text{theory}}}$$

最终求出的  $\sigma_{WL}$ 、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  如图 16 所示。

最终求得白场亮度的最大误差为  $\sigma_{WL} = -0.0067$ , 色度坐标  $x$  最大误差为  $\sigma_x = -0.0026$ , 色度坐标  $y$  最大误差为  $\sigma_y = 0.0027$ 。

## 5 结 论

本文在 CIE- $Y_{xy}$  颜色空间中建立了显示屏红绿蓝三基色的亮度与白场亮度空间关系模型, 在空间与正投影方向上详细描述了单基色亮度变化白场运动轨迹和多基色亮度混合变化白场运动轨迹, 确定了白场亮度与基色亮度的映射关系, 该关系式在 CIE- $Y_{xy}$  色域模型中具有通用性, 可以快速确定任意 LED 显示屏基色亮度变化引起的白场亮度偏差。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 李焘霖. LED 显示屏逐点色度亮度校正技术讲座 [J]. 现代显示, 2011,22(7):5-9.  
LI X L. A lecture on the technology of color and brightness correction of pixel of LED display screen [J]. *Adv. Disp.*, 2011,22(7):5-9. (in Chinese)
- [ 2 ] HARRIS S. Color and luminance uniformity correction for LED video screens [R]. Signindustry. Com, 2007
- [ 3 ] 张强, 邵喜斌, 杨虹. 大尺寸 8K 显示行业关键技术分析 [J]. 液晶与显示, 2018,33(5):389-396.  
ZHANG Q, SHAO X B, YANG H. Key technology analysis of large size 8K display [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2018,33(5):389-396. (in Chinese)
- [ 4 ] 李焘霖. LED 全彩色显示屏的白平衡和色均匀问题 [J]. 现代显示, 2004(2):15-18.  
LI X L. White balance and color uniform of full color LED Display Screen [J]. *Adv. Disp.*, 2004(2):15-18. (in Chinese)
- [ 5 ] WEN S. Display gamut comparison with number of discernible colors [J]. *J. Electron. Imaging*, 2006,15(4):043001.
- [ 6 ] 王骁, 苏寒松, 李昌禄. 一种基于 LCD-LED 双调制显示器的 HDR 图像显示方法 [J]. 液晶与显示, 2019,34(1):14-23.  
WANG X, SU H S, LI C L. HDR image display algorithm based on LCD-LED dual modulation HDR display [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2019,34(1):14-23. (in Chinese)
- [ 7 ] 胡莹, 苏宙平, 曹晶辉. 实现白光 LED 阵列色温分布均匀化技术研究 [J]. 液晶与显示, 2018,33(4):326-337.

- HU Y, SU Z P, CAO J H. Design of white LED array for uniform correlated color temperature distribution [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2018, 33(4):326-337. (in Chinese)
- [8] 赵梓权. LED显示屏的色度校正技术和封装技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- ZHAO Z Q. *LED Displays Color Correction Technology and Packaging Technology* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 荆其诚, 焦书兰. 色度学[M]. 第2版. 北京:科学出版社, 1983.
- JING Q C, JIAO S L. *Colorimetry* [M]. 2nd. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese)
- [11] SCHANDA J. CIE colorimetry and colour displays [C]. *Proceedings of The 4th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings*, Scottsdale, AZ, United States, 1997:230-233.



毛新越(1989-),男,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,2015年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事平板显示、高清显示方面的研究。

E-mail: bfmxyun@126.com



郑喜凤(1965-),女,吉林长春人,博士,研究员,2000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,主要从事平板显示、图像处理及通讯技术的研究。

E-mail: zhengxf@ccxida.com