

文章编号:1007-2780(2012)03-0324-08

# 基于视觉感受的 LED 显示屏系统精度分析

赵梓权<sup>1,2</sup>, 王瑞光<sup>1\*</sup>, 郑喜凤<sup>1</sup>, 郝亚茹<sup>1</sup>, 陈 宇<sup>1</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, E-mail:zhzq169@yahoo. com. cn;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 根据 LED 发光的物理特性和 LED 控制系统脉宽调制的驱动方式, 构建了线性的 LED 显示颜色的数学模型, 并通过 CIE1976LUV 色彩空间直接与人眼的视觉感受联系起来。分析了 LED 的相邻灰度级与相邻颜色的色差在人眼视觉感受中与控制系统精度之间的关系, 并结合 LED 发光的离散性, 对控制系统精度需求进行了讨论, 给出了基于人眼视觉感受的控制系统精度需求的计算方法。该方法在工业制造前就可以根据人眼的视觉感受特性对 LED 显示屏的控制系统精度进行优化和设计。

**关 键 词:** LED 显示屏; 色差; 视觉感受; 系统精度

**中图分类号:** TN312+.8      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3788/YJYXS20122703.0324

## Systemic Accuracy Analysis of LED Displays Based on Visual Perception

ZHAO Zi-quan<sup>1,2</sup>, WANG Rui-guang<sup>1\*</sup>, ZHENG Xi-feng<sup>1</sup>, HAO Ya-ru<sup>1</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail:zhzq169@yahoo. com. cn;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A linear mathematical model is established to describe LED displays' colors according to LED's optical characters and the the pulse width modulation method of LED displays' control system. Furthermore, the mathematical model is connected with the visual perception in CIE1976LUV color space. This paper analyzed the relationship between visual perception and accuracy requirement of control system when the neighbouring gray levels and neighbouring colors of LEDs are discussed. Moreover, to calculate the control system's accuracy according to visual perception, the uniform problems of LED are discussed. This paper gives an algorithm to calculate the systemic accuracy of LED displays based on visual perception. With the algorithm, it is possible to design and optimize the LED displays' control system according to visual perception before the LED displays are produced.

**Key words:** LED displays; color difference; visual perception; systemic accuracy

## 1 引 言

LED 显示屏由于其高亮度、宽色域和高可靠

性等优点, 已经广泛应用于图像显示的各个场所。随着 LED 显示在视觉领域应用的不断发展, 大众对其显示质量的要求也越来越高。早期的 LED

收稿日期: 2012-01-29; 修订日期: 2012-03-22

基金项目: 国家科技支撑计划基金项目(No. 2009BAE73B01)

作者简介: 赵梓权(1983—), 男, 四川自贡人, 博士研究生, 主要从事 LED 显示领域的研究。

\* 通讯联系人, E-mail: wangruihuang1957@126. com

显示屏控制系统,主要从功能实现的角度进行电路设计,对于人眼视觉感受的考虑主要集中在相邻灰度级之间的过渡是否自然,控制系统精度通常通过经验来判断。随着技术水平和市场需求的不断发展,高均匀度、高保真度等一系列有关视觉感受的应用对 LED 的控制系统精度提出了全新的要求,LED 显示屏的亮度和色度校正系统的逐步普及<sup>[1]</sup>,也提供了精确控制 LED 颜色和亮度的手段。基于人眼的视觉感受特性对 LED 显示屏的控制系统精度进行优化和设计也越来越具有现实意义。当 LED 显示屏控制系统精度足够高时,图像质量达到一定程度时,针对 LED 显示屏的图像处理算法才有了用武之地,可以得到良好的硬件平台支持。本文针对这种需求建立了 LED 显示的数学模型,并对人眼视觉与控制系统的精度之间的关系进行了数据分析,提供了一种简单有效的判断人眼视觉感受与控制系统精度需求关系的办法。

LED 发光具有特殊的物理特性,当驱动电流、温度等发生变化时,LED 的发光波长会产生漂移,从而使得显示色域不稳定。因而对于全彩 LED 显示屏而言,颜色是由红、绿、蓝 LED 通过三原色混色理论混色而成。控制系统大都采用脉宽调制(PWM)的方法进行单基色的灰度级控制<sup>[2]</sup>,通过脉冲宽度来控制 LED 的发光时间。从而使得单基色的各个灰度级显示时,不会因为电流、温度等原因出现色坐标的漂移。

## 2 LED 显示的视觉感受

### 2.1 LED 显示色差评价的颜色空间

LED 显示屏为自发光器件,使用三原色混色原理来表示颜色,本文以 CIE1976LUV 为颜色空间进行其色差的视觉评价<sup>[3-5]</sup>,其色差公式如下:

$$\begin{cases} L = 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16\left(\frac{Y}{Y_n} > 0.008\ 856\right) \\ L = 903.25\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\left(\frac{Y}{Y_n} \leqslant 0.008\ 856\right) \\ u = 13L \times \left(\frac{4X}{X + 15Y + 3Z} - \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}\right) \\ v = 13L \times \left(\frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} - \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}\right) \\ \Delta E = (\Delta L^2 + \Delta u^2 + \Delta v^2)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为测量物体的三刺激值, $X_n$ 、 $Y_n$ 、 $Z_n$

为标准光源 D65 的三刺激值, $\Delta L$  为两个测量物体之间  $L$  值的差值, $\Delta u$ 、 $\Delta v$  类似。CIE1976LUV 的色差单位近似于 NBS(National Bureau of Standard),故本文直接采用 NBS 单位对 LED 的色差程度进行判断。

表 1 色差值与人眼视觉感受之间的关系

Table 1 Relationship between color difference and visual perception

| 色差值(NBS) | 视觉感受 |
|----------|------|
| 0~0.5    | 可忽略  |
| 0.5~1.5  | 轻微   |
| 1.5~3    | 可接受  |
| 3~6      | 可识别  |
| 6~12     | 非常明显 |

当  $NBS \leqslant 0.5$  时,人眼不能识别两个颜色之间的差异,视觉感受的差异可忽略。本文中,均以式(2)作为人眼对于颜色差异程度的接受水平。

$$\Delta E \leqslant 0.5 \quad (2)$$

### 2.2 LED 显示的数学模型

全彩色 LED 显示屏以显示像素为单位,每个 LED 像素中封装有红、绿、蓝三个 LED,这 3 个基色的 LED 分别所发出的光被视为 LED 显示屏的三原色。LED 显示屏多采用脉宽调制的驱动方式,仅工作在高电平或低电平状态下,灰度级由脉冲宽度来表示<sup>[2]</sup>。LED 发光时总是工作在相同的状态下,其灰度级与发光时间  $t$  为线性关系。 $(x,y)$  为 LED 发光时的色坐标,根据式(3),无论其灰度级如何变化,其色坐标始终不变。

$$\begin{cases} x = \frac{tX}{tX + tY + tZ} = \frac{X}{X + Y + Z} \\ x = \frac{tY}{tX + tY + tZ} = \frac{Y}{X + Y + Z} \end{cases} \quad (3)$$

假设当 LED 以最高灰度级发光时,其三刺激值为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 。由于脉宽调制的灰度级产生方式,灰度级和 XYZ 三刺激值之间存在线性关系,当总灰度级为  $N$  时,每一个灰度级步长“1”所对应的 XYZ 三刺激值为:

$$X' = \frac{X}{N}, Y' = \frac{Y}{N}; Z' = \frac{Z}{N} \quad (4)$$

同理,我们可以得到一个 LED 以灰度级  $k$  发光时,它的三刺激值为:

$$X' = k \frac{X}{N}; Y' = k \frac{Y}{N}; Z' = k \frac{Z}{N} \quad (5)$$

当一个 LED 像素中的红、绿、蓝 LED 分别以灰度级  $m$ 、 $n$ 、 $k$  显示时( $m$ 、 $n$ 、 $k$  的取值为从 0 到  $N-1$ ),该 LED 像素的三刺激值为 3 个颜色的 LED 发光灰度级所对应的三刺激值叠加之和:

$$\begin{cases} X' = m \frac{X_R}{N} + n \frac{X_G}{N} + k \frac{X_B}{N} \\ Y' = m \frac{Y_R}{N} + n \frac{Y_G}{N} + k \frac{Y_B}{N} \\ Z' = m \frac{Z_R}{N} + n \frac{Z_G}{N} + k \frac{Z_B}{N} \end{cases} \quad (6)$$

### 3 LED 显示的精度需求分析

#### 3.1 单基色 LED 发光的精度需求

单基色的 LED 发光时,色坐标始终不变,但在人眼感受中,由显示灰度级不同带来的亮度差异仍可能被人眼识别,建立 LED 发光时相邻灰度级的数学描述,可得:

灰度级为  $k$  时:

$$X_k = \frac{k \cdot X}{N}; Y_k = \frac{k \cdot Y}{N}; Z_k = \frac{k \cdot Z}{N} \quad (7)$$

灰度级为  $k+1$  时:

$$X_{k+1} = \frac{(k+1) \cdot X}{N}; Y_{k+1} = \frac{(k+1) \cdot Y}{N};$$
$$Z_{k+1} = \frac{(k+1) \cdot Z}{N}$$

当控制系统的总灰度级为  $N$  时( $N=2^M$ , $M$  为颜色深度 color depth),式(7)所示的相邻灰度级的色差通过式(1)进行计算,可以得到  $\Delta E$ 。只要  $\Delta E \leq 0.5$ ,人眼就无法区分灰度级  $k$  和  $k+1$  之间的差异。以表 2 中所示蓝色 LED 三刺激值典型值为例,当  $M$  取值为 8~12 时,计算灰度级  $k$  取值为从 0 到  $N-1$  时,相邻灰度级  $k$  和  $k+1$  之间的色差如图 1 所示。

在图 1 中,每一条曲线代表在对应的  $M$  值下,

表 2 一组 LED 的三刺激值

Table 2 XYZ tristimulus values of a couple of LEDs

|              | 典型值     | 分布值           |
|--------------|---------|---------------|
| 红色 LED 的 X 值 | 249.5   | 179.94~283.7  |
| 红色 LED 的 Y 值 | 109.9   | 74.3~130.44   |
| 红色 LED 的 Z 值 | 0.04551 | 0~0.06        |
| 绿色 LED 的 X 值 | 54.49   | 31.47~82.28   |
| 绿色 LED 的 Y 值 | 259     | 231.83~281.46 |
| 绿色 LED 的 Z 值 | 49.51   | 36.46~67.4    |
| 蓝色 LED 的 X 值 | 104.4   | 75.92~134.16  |
| 蓝色 LED 的 Y 值 | 46.89   | 38.08~58.02   |
| 蓝色 LED 的 Z 值 | 625.1   | 505.82~741.86 |

以灰度级  $k$  为横坐标时,相邻灰度级  $k$  和  $k+1$  之间的色差大小。由图 1 可知,当  $M \geq 10$  时,蓝色 LED 所有相邻灰度级之间的色差均小于 0.5。此时,人眼已经无法察觉相邻灰度级之间的变化,对于人眼的视觉感受来说,此时  $M$  值(颜色深度 color depth)的大小已经使得灰度级变化平滑自然。同理,对表 2 中红色和绿色 LED 典型值进行相同的分析,可以得到表 3。

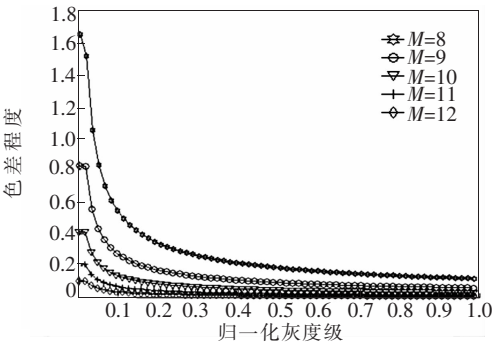


图 1 蓝色 LED 相邻灰度级的色差曲线

Fig. 1 Color difference between neighbouring gray levels of blue LED when  $M$  was set from 8 to 12

表 3 单色 LED 发光时的系统精度需求

Table 3 Accuracy requirements for the LEDs when they are emitting separately

|     | 红色 LED | 绿色 LED | 蓝色 LED |
|-----|--------|--------|--------|
| $M$ | 11     | 12     | 10     |

需要说明的是,在满足上述分析结论情况下,LED 发光时相邻灰阶的差异虽然难以直接察觉,但这仅意味着在没有对照物的情况下,人眼对颜色差异不敏感。举例来说,相同的 LED 屏幕,都能满足相邻灰度级间色差值  $\Delta E \leq 0.5$ ,分别以 12 bit 精度和 14 bit 精度进行显示,人眼不能区分工作在 12 bit 或 14 bit 时的颜色差异,但却能明显感觉出 14 bit 精度时所显示的画面质量会比 12 bit 要更舒服,过渡更加自然,这是因为 14 bit 时的  $\Delta E$  必然小于 12 bit 时的  $\Delta E$ 。此外,现在的 LED 屏幕,大都以 12 bit 以上的数据精度进行显示,单基色 LED 能显示 16 384 种颜色,而目前大多数视频源还是 8 bit 精度,仅有 256 种颜色,对于 LED 的颜色显示能力来说,这是一种巨大浪费,选择高精度的视频源或对视频源进行图像处理,也将明显改善图像的显示质量。

### 3.2 LED 显示屏显示颜色的精度需求分析

一个 LED 显示像素点红、绿、蓝 LED 的色坐标所围成的三角形区域构成了这个 LED 像素点能够显示的色域。从式(6)中可知,控制系统灰度级  $N$  决定了这个色域范围内颜色的种类,当  $N$  足够大时,红、绿、蓝 LED 才能通过不同比例的灰度级组合来产生足够多的颜色种类,使得相邻颜色之间的色坐标距离足够小,此时,LED 在显示图像时才能充分表现出图像细节,相邻颜色在人眼视觉感受中才能平滑过渡,不会感觉到明显的颜色差异。LED 显示颜色以三原色混色理论作为理论基础,单个 LED 发光时,色坐标始终不变,必须依靠其他颜色的 LED 发光才能混合出其他颜色。此处对 LED 进行混色后的色差分析,以在一定强度的蓝色中混入不同比例的绿色为例:

当蓝色 LED 发光强度为 100%,绿色 LED 发光灰度级为  $k$  ( $k$  取值从 0 到  $N-1$ ) 时,混色产生的颜色的三刺激值为:

$$\begin{cases} X = X_B + k \frac{X_G}{N} \\ Y = Y_B + k \frac{Y_G}{N} \\ Z = Z_B + k \frac{Z_G}{N} \end{cases} \quad (8)$$

当蓝色 LED 发光强度为 100%,绿色 LED 发光灰度级为  $k+1$  ( $k$  取值从 0 到  $N-1$ ) 时,混色产生的颜色的三刺激值为:

$$\begin{cases} X = X_B + (k+1) \frac{X_G}{N} \\ Y = Y_B + (k+1) \frac{Y_G}{N} \\ Z = Z_B + (k+1) \frac{Z_G}{N} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)和式(9)表示了 LED 混色显示颜色时,在一定强度的蓝色中混入不同比例的绿色过程中所有相邻颜色的组合。通过式(1)分析所有相邻颜色组合之间的色差,就能得到在混入绿色成分从小到大的过程中,相邻颜色之间色差的变化趋势。如图 2 所示,当  $M=8$  时,在蓝色中混入绿色,随着绿色分量的逐渐增大,相邻颜色之间的色差呈减小的趋势,色差的极大值出现在混入绿色最少处。在对蓝色中混入红色进行分析后,也会得到相同的结论,如图 2 中所示。

对红色中混入绿色、蓝色,绿色中混入红色、蓝

色进行相同的分析,可以得到类似于图 2 的相同结论。即:在一个颜色中混入另一个颜色时,混色后产生的所有相邻颜色中,最大色差出现在混入其他颜色的量最少的位置。红、绿、蓝 LED 有 6 种基本混色模式,在一个混色模式中只需要讨论在一个颜色的 LED 从 0 到  $N-1$  的灰度级中混入另一种颜色的最小强度时,产生的所有相邻颜色组合之间的色差水平,就可以估计这个混色模式的色差水平。以不同强度的蓝色混入最小强度绿色为例进行讨论:

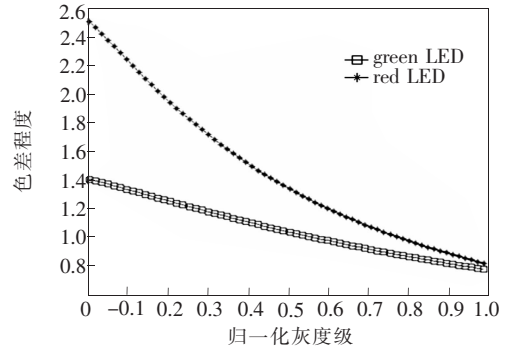


图 2 当  $M$  为 8 时,蓝色 LED 混入不同比例的红色和绿色时的色差曲线。

Fig. 2 When  $M$  is set as 8, the color difference between newly neighbouring colors which were mixed by the maximum power of blue LED and the alterable power of red or green LED.

蓝色 LED 以第  $k$  个灰度级发光时所对应的三刺激值为:

$$X = k \frac{X_B}{N}; Y = k \frac{Y_B}{N}; Z = k \frac{Z_B}{N} \quad (10)$$

而混入最小强度的绿色后,混色产生的颜色所对应的三刺激值为:

$$\begin{cases} X = k \frac{X_B}{N} + \frac{X_G}{N} \\ Y = k \frac{Y_B}{N} + \frac{Y_G}{N} \\ Z = k \frac{Z_B}{N} + \frac{Z_G}{N} \end{cases} \quad (11)$$

仅改变蓝色强度时,与此颜色最相邻的颜色的三刺激值则表示为

$$\begin{cases} X = (k+1) \frac{X_B}{N} + \frac{X_G}{N} \\ Y = (k+1) \frac{Y_B}{N} + \frac{Y_G}{N} \\ Z = (k+1) \frac{Z_B}{N} + \frac{Z_G}{N} \end{cases} \quad (12)$$

当  $M$  设置为从 8~14 时,通过式(1)计算  $k$  取值为 0 到  $N-1$  时(即蓝色 LED 的全灰度级范围内),式(11)和式(12)所代表的颜色之间的色差,如图 3 所示。式(11)和式(12)所表示的相邻颜色之间的色差随着灰度级  $k$  的增大逐渐减小,最大色差出现在最小灰度级处。图 3 中  $M=13$  时,可以实现所有相邻颜色组合之间的色差均小于 0.5,这些颜色之间的差异对人眼而言,可以忽略不计。控制系统对于蓝色中混入绿色这一混色过程的精度要求为 13 bit。

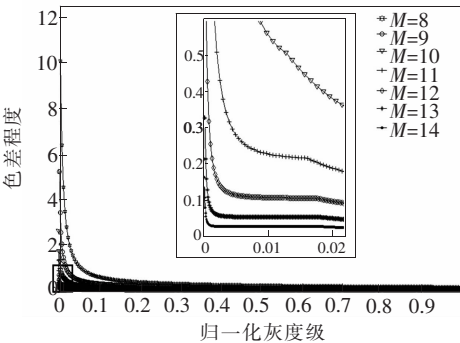


图 3  $M$  的值为 8~14 时,蓝色 LED 发光混入最小强度的绿色后产生的相邻颜色之间的色差曲线。

Fig. 3 Color difference between newly neighbouring colors which were mixed by the alterable power of blue LED and the lowest power of the green LED, when the  $M$  was set from 8 to 14.

对红、绿、蓝 LED 的 6 种基本混色模式做上述分析,可以得到各种混色模式下的系统精度需求如表 4 所示。

表 4 LED 显示屏三基色混色的精度要求  
Table 4 Values of  $M$  required when the primary colors of LEDs are compound into various colors

| $M$    | 混入红色 | 混入绿色 | 混入蓝色 |
|--------|------|------|------|
| 红色 LED |      | 13   | 12   |
| 绿色 LED | 13   |      | 13   |
| 蓝色 LED | 12   | 13   |      |

表 4 显示了 LED 混色时,在满足人眼感觉需求的条件下,不同混色情况对于系统精度的要求。例如,当红色 LED 发光,用绿色 LED 进行混色时,所需要的  $M$  值为 13。通常,LED 显示屏的控制系统精度将取最大的  $M$  值。此时,LED 显示屏显示的相邻颜色的色坐标之间的距离会非常小。根据迈克亚当椭圆<sup>[6]</sup>,处于同一个椭圆内的两个颜色的

色坐标之间的距离小到一定程度时,人眼对于两个颜色之间的差异将不能区分。本文中用式(2)作为这个椭圆的限制范围,在满足式(2)的情况下,混色而成的相邻颜色被一个一个的椭圆“级联”起来,如图 4 所示。当整个 LED 显示色域范围的颜色都被一个一个这样的椭圆“级联”起来时,LED 显示的颜色就能在整个色域范围内均匀过渡。

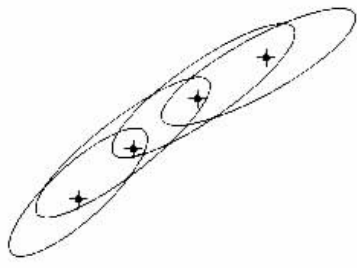


图 4 混色后的相邻颜色“级联”  
Fig. 4 Newly neighbouring colors were connected by Macadam's ellipse one after one.

### 3.3 LED 离散性对系统精度需求的影响

由于 LED 亮度和发光波长有一定的离散性,单个 LED 像素的灰度级精度需求并不能代表整个屏幕中所有 LED 像素的灰度级精度需求,这是由不同 LED 之间的亮度和颜色差异所决定的。为了解决 LED 屏幕的离散性,提高 LED 屏幕的显示效果,亮度和色度校正系统被广泛应用在 LED 的控制系统中,它通过差异化的驱动控制来使 LED 在相同信号源情况下显示相同的亮度和颜色。因而对 LED 显示屏进行精度需求估计时,必须充分考虑到 LED 发光特性的离散性和亮、色度校正系统的影响。此处以表 2 中所示的 LED 发光的边界值数据为例进行分析。当 LED 屏幕屏中的蓝色 LED 发光时,掺加绿色进行混色时产生的颜色的三刺激值可由式(13)表示:

$$\begin{cases} X = k \frac{X_{B_{\text{边界值}}}}{N} + m \frac{X_{G_{\text{边界值}}}}{N} \\ Y = k \frac{Y_{B_{\text{边界值}}}}{N} + m \frac{Y_{G_{\text{边界值}}}}{N} \\ Z = k \frac{Z_{B_{\text{边界值}}}}{N} + m \frac{Z_{G_{\text{边界值}}}}{N} \end{cases} \quad (13)$$

$X_{B_{\text{边界值}}}$  表示蓝色 LED 三刺激值中的  $X$  值分布,分布从极小值到极大值,  $Y_{B_{\text{边界值}}}$ ,  $Z_{B_{\text{边界值}}}$  等类似,具体数据见表 2。根据图 2 所得到的结论,我们可以用式(14)来代替(13)进行这两种 LED 混色后相邻颜色之间的色差分析。

$$X = k \frac{X_{B_{\text{边界值}}}}{N} + \frac{X_{G_{\text{边界值}}}}{N}$$
$$Y = k \frac{Y_{B_{\text{边界值}}}}{N} + \frac{Y_{G_{\text{边界值}}}}{N}$$
$$Z = k \frac{Z_{B_{\text{边界值}}}}{N} + \frac{Z_{G_{\text{边界值}}}}{N} \tag{14}$$

在式(14)所表示的颜色中,本文把与灰度级  $k$  相关的蓝色 LED 发光部分定义为颜色的“主色”部分,而绿色 LED 发光部分定义为“辅色”部分,其余混色而成的颜色做类似的定义。

表 5 在考虑 LED 发光的离散特性后,各个混色组合对于控制系统的精度要求

Table 5 Considering the uniform problems of LEDs, the values of  $M$  are calculated when the primary colors of LEDs are compound into various colors

| $M$    |     | 混入红色 |     |
|--------|-----|------|-----|
|        |     | 极小值  | 极大值 |
| 绿色 LED | 极小值 | 13   | 13  |
|        | 极大值 | 13   | 13  |
| 蓝色 LED | 极小值 | 12   | 12  |
|        | 极大值 | 12   | 12  |
| $M$    |     | 混入绿色 |     |
|        |     | 极小值  | 极大值 |
| 红色 LED | 极小值 | 13   | 13  |
|        | 极大值 | 13   | 13  |
| 蓝色 LED | 极小值 | 13   | 13  |
|        | 极大值 | 13   | 13  |
| $M$    |     | 混入蓝色 |     |
|        |     | 极小值  | 极大值 |
| 红色 LED | 极小值 | 12   | 12  |
|        | 极大值 | 13   | 13  |
| 绿色 LED | 极小值 | 13   | 13  |
|        | 极大值 | 13   | 13  |

由于 LED 亮度和波长的离散性,不同 LED 的边界值组合种类会非常多,通过式(14)计算表 2 中的 LED 的相邻颜色之间的色差,以三刺激值的最大值和最小值作为边界值,对 LED 显示的系统精度需求进行计算,结果如表 5 所示。

从表 5 中可知,不管是主色部分还是辅色部分,发光强度越大的 LED 所需的精度越高。因此,主色部分和辅色部分中的三刺激边界值都可以用 LED 三刺激值的极大值代替,式(14)可以简化为式(15):

$$\begin{cases} X = k \frac{X_{B_{\text{极大值}}}}{N} + \frac{X_{G_{\text{极大值}}}}{N} \\ Y = k \frac{Y_{B_{\text{极大值}}}}{N} + \frac{Y_{G_{\text{极大值}}}}{N} \\ Z = k \frac{Z_{B_{\text{极大值}}}}{N} + \frac{Z_{G_{\text{极大值}}}}{N} \end{cases} \tag{15}$$

根据图 2 的结论,所有相邻颜色间的最大色差总是出现在最小灰度级的相邻颜色之间,因而可以用式(16)来表达混色过程中的灰度级需求。

$$\begin{cases} X_1 = \frac{X_{\text{主色极大值}}}{N} + \frac{X_{\text{辅色极大值}}}{N} \\ Y_1 = \frac{Y_{\text{主色极大值}}}{N} + \frac{Y_{\text{辅色极大值}}}{N} \\ Z_1 = \frac{Z_{\text{主色极大值}}}{N} + \frac{Z_{\text{辅色极大值}}}{N} \\ X_2 = 2 \frac{Y_{\text{主色极大值}}}{N} + \frac{X_{\text{辅色极大值}}}{N} \\ Y_2 = 2 \frac{Y_{\text{主色极大值}}}{N} + \frac{Y_{\text{辅色极大值}}}{N} \\ Z_2 = 2 \frac{Y_{\text{主色极大值}}}{N} + \frac{X_{\text{辅色极大值}}}{N} \end{cases} \tag{16}$$

在通过式(16)进行色差计算时,色差公式式(1)中  $Y/Y_n \leq 0.008\ 856$  在  $Y=Y_1$  或  $Y=Y_2$  时始终成立,因而在根据式(16)进行精度估计时,式(1)中可以直接采用  $L=903.25(Y/Y_n)$ 。对混色过程中色差与系统精度需求的关系进行归纳总结后如式(17)所示。

$$\begin{cases} \Delta L = 903.25 \left( \frac{Y_2 - Y_1}{Y_n} \right) \\ \Delta u = \frac{13 \times 903.25}{Y_n} \left[ Y_2 \left( \frac{4X_2}{X_2 + 15Y_2 + 3Z_2} - \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \right) - Y_1 \left( \frac{4X_1}{X_1 + 15Y_1 + 3Z_1} - \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \right) \right] \\ \Delta v = \frac{13 \times 903.25}{Y_n} \left[ Y_2 \left( \frac{9Y_2}{X_2 + 15Y_2 + 3Z_2} - \frac{9X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \right) - Y_1 \left( \frac{9Y_2}{X_1 + 15Y_1 + 3Z_1} - \frac{9X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \right) \right] \\ \Delta E = (\Delta L^2 + \Delta u^2 + \Delta v^2)^{\frac{1}{2}} \leq 0.5 \end{cases} \tag{17}$$

直接求解式(17)难度较高,而  $M$  必定为整数,故最简单的方法是将  $M=8,9,10\cdots$  依次代入式(17)中,能够使得  $\Delta E\leq 0.5$  的最小整数即为此混色过程所要求的系统精度值。分别对红、绿、蓝相互混色的 6 个组合进行分析,就会得到类似与表 4 的 6 个  $M$  值,LED 的控制系统精度值应为其中的最大值。式(17)中,仅有  $M$  未知,而  $X_1、Y_1、Z_1$  和  $X_2、Y_2、Z_2$  中的主色和辅色的最大值为对应颜色 LED 的最大三刺激值,它由 LED 的制造者提供, $X_n、Y_n、Z_n$  为标准光源 D65 的三刺激值。式(17)可以进一步描述为:

$$M = f(X_{\text{主色最大值}}, Y_{\text{主色最大值}}, Z_{\text{主色最大值}}, X_{\text{辅色最大值}}, Y_{\text{辅色最大值}}, Z_{\text{辅色最大值}}) \quad (18)$$

而 LED 的系统精度应为各种混色模式的精度需求中的最大  $M$  值:

$$M_{\text{system}} = \max[f(X_{m_{\text{最大值}}}, Y_{m_{\text{最大值}}}, Z_{m_{\text{最大值}}}, n_{m_{\text{最大值}}}, Y_{n_{\text{最大值}}}, Z_{n_{\text{最大值}}})] \quad (19)$$

其中,  $m, n$  表示红、绿、蓝 LED,且  $m \neq n$ 。

在 LED 显示屏的实际生产中,式(19)中所需的 XYZ 三刺激值可从 LED 芯片的生产商处得到。图 5 和图 6 分别为控制系统精度为 8 bit 和 14 bit 时,LED 显示屏在经过色度校正后进行低亮度的“白场”显示时,相邻像素间的色差分布。在经过色度校正后,14 bit 精度下的色差水平远远低于 8 bit 精度下的色差水平,证明了提高系统

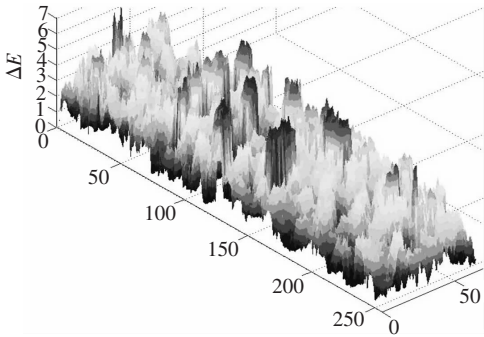


图 5 系统精度为 8 bit 时,LED 显示屏色度校正后低亮度“白场”显示时相邻像素间的色差.

Fig. 5 Color difference of LED display's low brightness white-point between neighbouring LED pixels when  $M$  was set as 8 and the LED display was dealt with color correction.

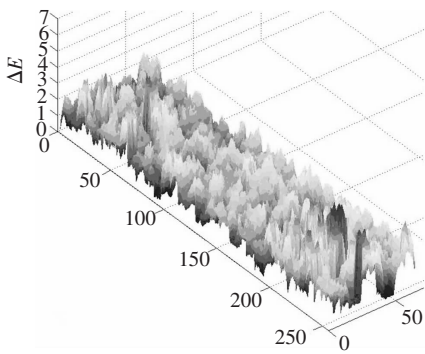


图 6 系统精度为 14 bit 时,LED 显示屏色度校正后“白场”显示时相邻像素间的色差.

Fig. 6 Color difference of LED display's low brightness white-point between neighbouring LED pixels when  $M$  was set as 14 and the LED display was dealt with color correction.

精度对校正系统降低色差的有效性。但需要注意的是,LED 显示屏经过校正后,LED 像素间的色差大小不仅受控制系统精度影响,还受到 XYZ 三刺激值测量精度、电路设计、光环境等诸多因素的影响。因此,图 6 中,即使 14 bit 的控制系统精度也未能使得  $\Delta E\leq 0.5$ 。要进一步降低色差水平,需要对 LED 控制系统精度分析外的色度采集、色度校正理论等领域进行进一步的分析。

### 4 结    论

针对 LED 显示屏设计中系统精度依靠经验值进行判断,且无法与人眼的视觉感受联系起来的现状,文中根据 LED 显示屏的发光特性和控制系统的工作原理建立了线性的 LED 显示颜色的数学模型,并对 LED 显示颜色时系统精度与人眼视觉感受之间的关系进行了分析。文中详细讨论了 LED 显示屏在单基色显示和色彩显示时对控制系统的精度要求,并进一步讨论了在考虑 LED 发光特性的离散性的情况下,确定系统精度需求的方法。该方法只需要对红、绿、蓝 LED 的最大三刺激值进行分析,就能准确估计出系统所需要的控制系统精度。通过文中所介绍的方法,制造商在 LED 显示屏制造之前就可以根据不同的视觉感受质量要求来设计和优化 LED 的控制系统精度,从而生产出高质量的 LED 屏幕。

参 考 文 献:

[ 1 ] Harris S. Color and luminance uniformity correction for LED video screens [EB/OL]. [2011-11-29]. <http://www.signindustry.com/led/articles/2007-10-15-SH-PulseWidthModulationPWMCorrectionOfLEDDisplays.php3>.

[ 2 ] Svilainis L. LED brightness control for video display application [J]. *Displays*, 2008, 29(5):506-511.

[ 3 ] Schanda J. CIE colorimetry and colour displays[C]// *Proceedings of the Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*, Scottsdale, Arizona; Society for Imaging Sci. & Technology, 1996;230-234.

[ 4 ] Carter R C, Carter E C. CIE  $L^*, U^*, V^*$  color difference equations for self luminance displays [J]. *Color Research and Applications*, 1983, 8;252-253.

[ 5 ] CIE. Colorimetry(Publication CIE NO15.3)[S]. Third edition, Austria; Central Bureau of the CIE, 2004.

[ 6 ] Macadam D L. Visual sensitivities to color differences in daylight [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1942,32;247-273.

欢迎订阅 欢迎投稿  
《光学 精密工程》

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问,陈星旦院士任编委会主任,国家科技部副部长曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位,集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新能力。本刊自 2007 年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国科学技术协会择优支持期刊  
中国百种杰出学术期刊  
第一届北方优秀期刊  
吉林省双十佳期刊

国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compendex)  
《美国化学文摘》(CA)  
《英国 INSPEC》(SA)  
《俄罗斯文摘杂志》(PЖ)  
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

|             |                |
|-------------|----------------|
| 中国科技论文统计源期刊 | 中文核心期刊要目总览(北大) |
| 中国学术期刊(光盘版) | 中国学术期刊综合评价数据库  |
| 万方数据系统数字化期刊 | 中国光学与应用光学文摘    |
| 台湾华艺中文电子期刊网 | 中国科学期刊全文数据库    |
| 中国科学引文数据库   | 中国光学文献数据库      |
| 中国物理文献数据库   | 中国学术期刊文摘       |
| 中国期刊网       | 中国物理文摘         |

地 址:长春市东南湖大路 3888 号

《光学 精密工程》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176855

传 真:(0431)84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp. ac. cn

gxjmgc@sina. com

<http://www.ope.net.cn>

国内邮发代号: 12-166

国外发行代号: 4803BM

定 价: 50.00 元/期

帐 户: 中国科学院长春光学  
精密机械与物理研究所

银 行: 中行吉林省分行营业部

帐 号: 220801471908091001