

文章编号: 1000-7032(2010)01-0145-05

基于 LED 电脉冲响应的 LED 显示屏像素灰度校正方法

邓宏贵, 李志坚, 郭晟伟

(中南大学 物理科学与技术学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于发光二极管 (Light-emitting Diode, LED) 的电脉冲响应过程, 建立了一个简便计算 LED 电脉冲响应模型。在此模型基础上研究了采用脉宽调制 (Pulse-width Modulation, PWM) 控制 LED 亮度时, 由于 LED 响应延迟所导致的发光强度随占空比的非线性误差的变化情况, 并进行了实验测试。结果表明: 在 PWM 频率为 2.5 MHz 时, LED 发光强度与占空比的平均非线性误差为 10% 左右。最后, 针对 LED 电脉冲响应模型, 提出了显示屏像素亮度校正方法。该方法有效减小了由 LED 响应过程所造成的显示屏亮度控制误差, 使得 LED 实际发光强度与所给亮度值近似成线性关系, 从而减小了 LED 显示屏的色彩偏离, 增强了显示效果。

关键词: LED 显示屏; 电脉冲响应; 脉宽调制; 亮度控制

中图分类号: TN911.73

PACS: 07.05.Pj; 42.30.Va

PACC: 4240F

文献标识码: A

1 引 言

LED 应用于图像显示已经有几十年历史^[1]。LED 显示屏由于视角大、亮度高、色彩鲜艳, 已经广泛应用于车站、码头等公共场所及银行、学校、政府等企事业单位^[2~5]。

LED 显示屏通过调节其像素亮度来实现彩色图像的显示。LED 像素发光强度的精确控制, 对提高显示屏色彩还原性、增强显示效果至关重要。由于 LED 发光强度正比于流过它的电流强度^[6], 普遍采用 PWM 方法通过调节 LED 平均电流脉冲宽度来实现 LED 亮度调节, 这种方式使 LED 显示屏实现了全数字方式控制, 减少了数模转换这一过程。普通线性 PWM 技术^[7]是在每个 PWM 周期开始, 给所有 LED 均通电, 通过控制各 LED 关断时间的先后来调节各像素亮度。运用这种方法, 无论显示屏整体亮度如何, 每个 PWM 周期开始时均会使所有 LED 导通, 造成一个瞬间电流尖峰, 反过来影响系统电源的稳定, 带来 EMI 问题。为此, 有人提出二进制权重^[8]和位角度^[9] PWM 方法以减小瞬间电流尖峰问题。在这种方法中, 根据给定亮度值的各二进制位来控制 PWM

各时间段内 LED 的通断, 当亮度值的第 n 位为 1 时, 该 PWM 时间段内 LED 点亮, 为 0 时熄灭。而各 PWM 时间段长短取决于该位的权重, 这种方法有效解决了瞬间电流过大的问题。但前面所有的研究中, 均假定 LED 响应为理想响应, 认为发光强度与 PWM 占空比成线性关系, 忽略了 LED 对电脉冲信号的响应过程。

本文针对 LED 电脉冲响应过程进行研究, 发现 LED 对电脉冲上升沿和下降沿响应均呈指数变化, 这导致 LED 发光强度与 PWM 占空比成非线性关系, 最终导致 LED 亮度出现偏差。基于简化后的 LED 电脉冲响应模型, 还提出了 LED 像素亮度校正方法, 并进行了实验测试。

2 LED 对电脉冲信号的响应过程

LED 通断响应时间一般为几纳秒到几百纳秒^[10], 对于高速 PWM 电信号, 这一延时不可忽略。LED 在电脉冲信号作用下, 发光强度会出现先缓慢增强后缓慢减弱的渐变过程^[2,10,11]。图 1 给出了 LED 在时间为 2.5 μs 的矩形电脉冲作用下发光强度的变化过程, 虚线为归一化电脉冲信号 V_{nor} , 实线为相应的发光强度变化。在电脉冲

收稿日期: 2009-03-11; 修订日期: 2009-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(60474041); 中南大学 2007 年“大学生创新创业启航行动”(CY03)资助项目

作者简介: 邓宏贵(1965-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士, 主要从事电子技术和信息处理的研究。

E-mail: denghonggui@163.com

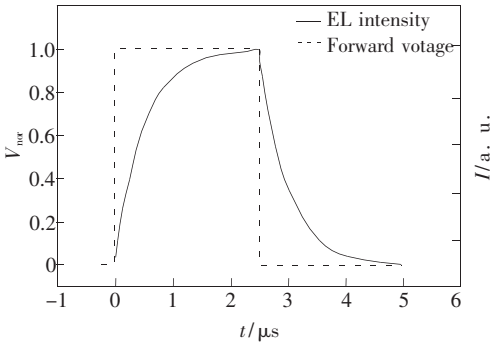


图 1 LED 电脉冲响应曲线

Fig. 1 LED voltage pulse response curve

上升沿, LED 发光强度 Y 随时间 t 变化可表示为

$$I(t) = \frac{\sigma\tau \frac{J}{q}}{\sigma\tau \frac{J}{q} + 1} I_{\max} \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\sigma \frac{J}{q} + \frac{1}{\tau}\right)t\right] \right\}, \quad (1)$$

其中 J 为流过器件的电流密度, q 为单位电荷, σ 为激发态的横截面积, τ 为辐射过程和非辐射过程中的激发态寿命。在电脉冲下降沿, 光强变化 $I(t)$ 表示为

$$I(t) = \frac{\sigma\tau \frac{J}{q}}{\sigma\tau \frac{J}{q} + 1} Y_{\max} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (2)$$

在 T 时间内, 平均光强 I 为函数 $I(t)$ 的平均值

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T Y(t) dt, \quad (3)$$

发光强度的非线性相对误差用 $\delta(\tau_{\text{on}})$ 来描述, 可表示为

$$\delta(\tau_{\text{on}}) = \frac{I - I_n \frac{\tau_{\text{on}}}{T}}{I_n} \times 100\%, \quad (4)$$

其中, T 为 PWM 周期, τ_{on} 为电源接通时间, I_n 为占空比为 100% 时的 LED 发光强度。从以上响应模型可以看出, LED 对电脉冲的上升沿和下降沿

响应均为指数函数形式, 考虑到人眼对光强的视觉感受误差^[12] 及 LED 驱动器的输出精度, 在 LED 通过电流较小时, 该指数响应接近于线性响应, 为计算方便, 本文将 LED 电光响应的上升沿和下降沿均近似为线性过程。定义 LED 光强从最大值 I_n 的 10% 增大到 90% 所需时间为导通响应时间 t_R , 光强从 I_n 的 90% 减小到 10% 所需时间为关断响应时间 t_F , PWM 周期为 T 。当所加电流脉冲时间 τ_{on} 为 $t_R < \tau_{\text{on}} \leq T - t_F$ 时, 简化后的电光响应为梯形模型, 如图 2 所示, 平均发光强度公式可简化为

$$I = \frac{1}{T} \left[\frac{1}{2} I_n t_R + I_n (\tau_{\text{on}} - t_R) + \frac{1}{2} I_n t_F \right], \quad (5)$$

采用 PWM 对 LED 亮度进行控制, LED 导通时间 τ_{on} 与所给像素亮度值 C_{in} 成正比。即

$$\tau_{\text{on}} = \frac{C_{\text{in}} T}{C_{\text{max}}}, \quad (6)$$

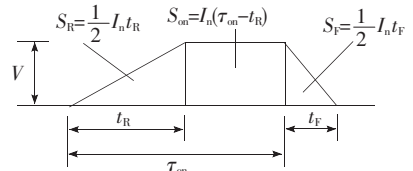


图 2 线性近似电光响应模型

Fig. 2 Linear approximation of light pulse response model

其中 C_{max} 和 T 分别为亮度值最大值和 PWM 周期。根据梯形电脉冲响应模型可知, LED 平均发光强度 I 与导通时间 τ_{on} 并不成绝对线性关系, 使实际发光强度与所给像素亮度值成非线性变化。

当 LED 导通时间 τ_{on} 从 0 逐渐增大时, 平均发光强度计算可分为三个过程, 当导通时间 τ_{on} 小于 LED 导通响应时间 t_R 时, LED 电光响应为一个简单三角形响应, 如图 3(a)。当导通时间 τ_{on} 逐渐增大, 响应模型逐渐由三角形变为梯形, 如图 3(b)。直到多边形, 如图 3(c)。相应的平均光强 I 与导通时间 τ_{on} 的关系可由分段函数给出:

$$I = \begin{cases} \frac{1}{T} \left(\frac{1}{2} I_n \frac{t_R + t_F}{t_R^2} \tau_{\text{on}}^2 \right), & \tau_{\text{on}} \leq t_R \\ \frac{1}{T} \left[\frac{1}{2} I_n (t_F - t_R) + I_n \tau_{\text{on}} \right], & t_R < \tau_{\text{on}} \leq T - t_F \\ \frac{1}{T} \left[T h + \frac{1}{2} (I_n - h) \left(T + \tau_{\text{on}} - \frac{I_n - h}{I_n} t_R \right) \right], & T - t_F < \tau_{\text{on}} \leq T \end{cases} \quad (7)$$

其中 $h = (\tau_{on} + t_F - T) \frac{I_n}{t_F}$ 。

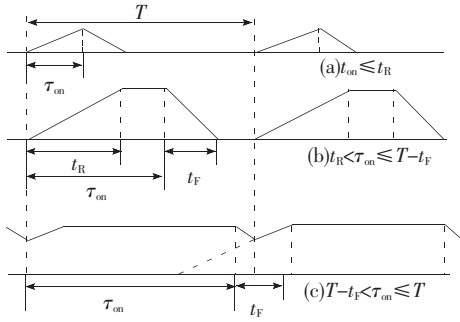


图 3 LED 响应随导通时间变化过程示意图
Fig. 3 LED response with different turn-on time

3 LED 电脉冲响应实验

选取红、绿、蓝三只 LED 发光管进行实验, 查找相关的厂商文件得知各 LED 参数: 红色 (628 nm, AlGaInP), 绿色 (527 nm, InGaN), 蓝色 (467 nm, InGaN), 它们的导通和关断响应时间分别为 $t_R = 110$ ns, $t_F = 45$ ns, $t_R = 130$ ns, $t_F = 50$ ns 和 $t_R = 140$ ns, $t_F = 55$ ns; 持续导通时光强度 $I_n = 700$ mcd, $I_n = 1\ 200$ mcd 和 $I_n = 400$ mcd。设定 PWM 频率为 2.5 MHz, 即周期 $T = 400$ ns, 调节其占空比从 0 逐渐增大, 理论平均发光强度 I 值可由式 (7) 计算得到。图 4 (a) 显示了红色、绿色和蓝色 LED 发光强度 I 随占空比的非线性变化过程。图 4 (b) 为由式 (4) 得到的三只 LED 发光管发光强度理论非线性相对误差变化曲线, 可以看出, 随着脉冲宽度逐渐增大, 理论非线性相对误差先增大, 直到 10% 左右保持不变, 然后又逐渐减小到 0。平均非线性相对误差为 -7.07%, -8.51% 和 -8.89%。

本文采用实验装置结构如图 5 所示, 光强传感器为 Texas Advanced Optoelectronic Solutions 公司的光频转换器 TCS230, 它将光强转化为输出信号频率的变化, 在弱光环境下线性度达到 1%。USB 部分完成所有的控制和数据采集过程。电流源采用台湾 Macroblock 公司的 16 位恒流 LED 驱动器 MBI5026, 典型非线性度为 0.001%。为快速关断 LED, 采用 N 通道的 MOSFET 与 LED 并联组成短路回路, 响应速度可达到几个 ns。由于光传感器的响应时间远大于 PWM 周期, 因此本实验中 PWM 周期的不稳定不会对结果造成太大影响。

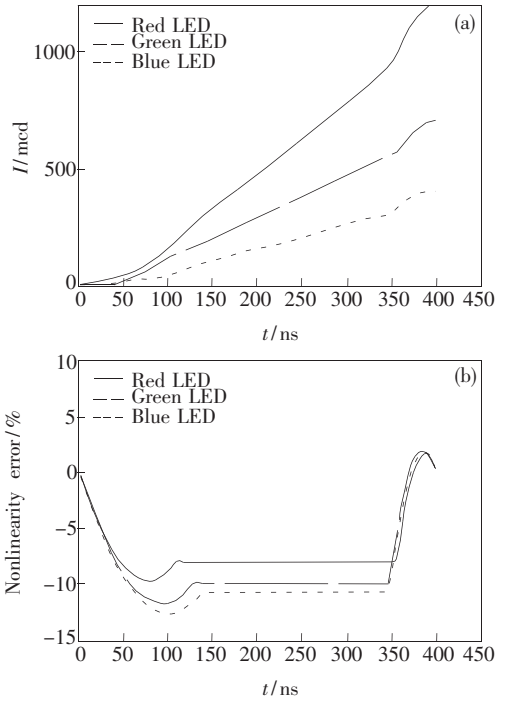


图 4 LED 发光强度 (a) 和非线性误差 (b) 曲线
Fig. 4 LED intensity (a) and nonlinearity error (b) curves

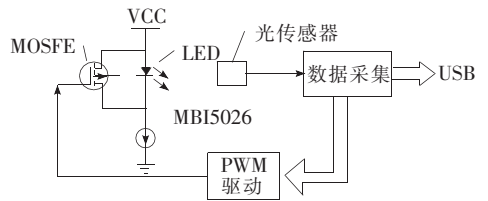


图 5 实验装置结构图
Fig. 5 Measurement system structure

实验时, PWM 周期设为 400 ns, 使 LED 电脉冲信号延时时间从 0 ns 开始, 以 10 ns 递增, 直到增大到 400 ns, 分别测试三只 LED 输出光强度 Y , 由式 (4) 计算出 LED 亮度值的非线性相对误差。实验结果如图 6。从图中可以看出, 三个 LED 最大相对误差分别为 -10%, -12% 和 -14% 左右。由于 PWM 频率较高, 测量时间很短, 本实验结果受环境温度变化的影响不是很明显。结果显示, 随着电脉冲宽度的增大, 三个 LED 非线性相对误差先增大, 后维持某一个值, 最后又逐渐减小到 0, 与理论误差变化相符。实验非线性相对误差值与理论值相比, 均比理论值稍大, 可分别达到 -9.53%, -10.34% 和 -11.72%, 这是由于实验时没有考虑 PWM 驱动器件响应、MOSFET 等的响应延时的原因。

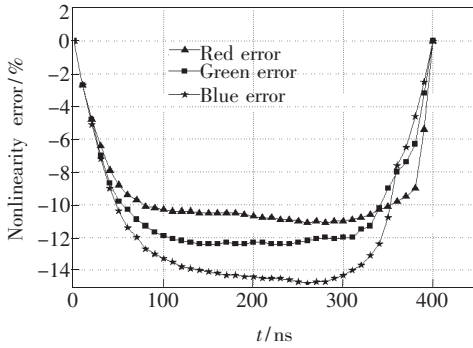


图 6 非线性误差随着 PWM 占空比的变化曲线

Fig. 6 Measured change curves of the nonlinearity error in growing pulse time

4 LED 显示屏亮度值校正方法

由于 LED 响应延时导致发光强度与 PWM 占空比成非线性关系,因此,实际 LED 显示屏需要对像素亮度值预先进行校正^[13,14],使校正后亮度值与发光强度成线性变化。考虑到非线性校正过程中,会使亮度值的某些区间压缩,某些区间拉伸,在压缩区段,会造成灰度级损失。通常采用进一步细化灰度级的办法以减小此误差,即 LED 显示屏像素亮度值位宽要大于原图像像素亮度值位宽。根据 LED 电光响应模型,为使校正后 LED 亮度值与实际发光亮度值成线性变化,校正公式应为

$$C = \text{round} \left[f \left(\frac{C_{in}}{2^n - 1} \right) \cdot (2^m - 1) \right], \quad (8)$$

其中 C_{in} 为原图像像素值, n 、 m 分别为原像素亮度值位宽和校正后位宽, round 为取整函数。 $f(x)$ 为 LED 对电脉冲信号的非线性响应关系,即式(7)给出的发光强度对电脉冲时间函数 $I(\tau)$ 。

图 7 为校正前后 LED 像素亮度值随 LED 发

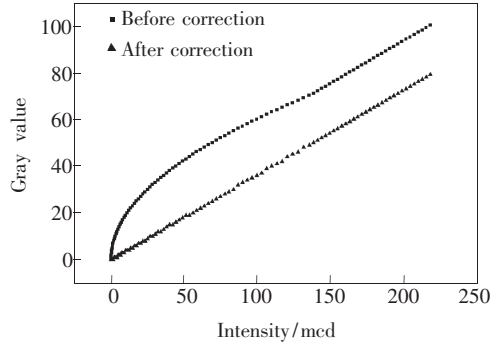


图 7 校正前后亮度值对比图

Fig. 7 Gray value comparison before and after correction

光强度变化曲线,可以看出,校正后 LED 像素亮度值非线性误差大大减小,有效提高了 LED 亮度控制精度。

5 结 论

对 LED 电脉冲响应过程进行了研究,将 LED 对电脉冲响应的非线性过程用线性来近似,建立了梯形 LED 电脉冲响应模型。利用此模型计算了 LED 发光强度在 PWM 方法控制过程中所产生的非线性误差。经过实验测试,在 PWM 频率为 2.5 MHz 时,LED 非线性相对误差随着占空比的变化情况与理论值完全吻合,均为先增大,后保持一定值,后又减小到 0,平均非线性误差为 10% 左右。研究发现,LED 发光强度非线性误差主要是因为 LED 对电脉冲的响应并不是理想响应,而存在一定的响应延缓。最后,本文针对 LED 电脉冲梯形响应模型提出了亮度值校正方法,校正后有效消除了由 LED 响应延迟所导致的亮度非线性误差。该算法提高了 LED 显示屏像素亮度控制准确度,消除了色彩偏差,进而增强了显示效果。

参 考 文 献:

- [1] Proceedings 1974 Electronic Components Conference Staller Hilton. 24th *Electronic Component Conference* [M]. Washington, D. C.: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1974, 2-10.
- [2] Abramov V S, Puisha A E, Polyakova I P, et al. LED modules for large screens [J]. *J. Optical Technology*, 2003, **70** (7):492-494.
- [3] Nguyen F. Challenges in the design of a RGB LED display for indoor applications [J]. *Synthetic Metals*, 2001, **122**(1): 215-219.
- [4] Zheng Xifeng, Song Xinli, Liu Guihua, et al. Luminance data extraction method of LED display panel based on regional maximum [J]. *Chin. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2008, **23**(4):453-457 (in Chinese).
- [5] Zhang Qi, Zheng Jinhui, Li Denghong, et al. Design and implementation of LED screen point by point detection system

- based on FPGA [J]. *Chin. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2008, **23**(5):605-610 (in Chinese).
- [6] Jiang Quan, Cheng Jianbo, Chen Wenbin, *et al.* LaB6 transparent cathode for organic light emitting diode [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2005, **16**(7):793-796 (in Chinese).
- [7] Kurdthongmee W. Design and implementation of an FPGA-based multiple-colour LED display board [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2005, **29**:327-336.
- [8] Zhao Dong, Geng Weidong, Wu Chunya, *et al.* Realizing the gray-scale display in OLED using FPGA [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2002, **13**(6):554-558 (in Chinese).
- [9] Howell W D. *An Overview of the Electronic Drive Techniques for Intensity Control and Colour Mixing of Low Voltage Light Sources Such as LEDs and LEPs* [M]. Berlin: Artistic Licence Ltd., Application Note 011, 2002, 15-21.
- [10] Isao Hino, Kuniakira Iwamoto. LED pulse response analysis considering the distributed CR constant in the peripheral junction [J]. *IEEE Transactions on Electron Device*, 1979, **26**(8):1238-1242.
- [11] Iain A Barlow, Theo Kreouzis, David G Lidzey. A polymer light-emitting diode as an optical communication light source [J]. *Organic Electronics*, 2007, **8**:621-624.
- [12] Steven A Murray, Barrett S Caldwell. *Measurement Instrumentation and Sensors Handbook* [M]. Boca Raton, Fla.:CRC Press, 1999,102-109.
- [13] Zhu Wei, Xu Wenhai, Yang Mingwei. High precision temperature control system of laser diodes based on error correction in reverse [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2005, **16**(6):682-685 (in Chinese).
- [14] Piao Yan, Wang Ruiguang, Ding Tiefu. LED color calibration technology based on RGB gamma curves [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2008, **19**(1):620-721 (in Chinese).

Method of Gray Value Correction in LED Display Screen Based on LED Electroluminescence Response

DENG Hong-gui, LI Zhi-jian, GUO Sheng-wei

(School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In this paper, the LED electroluminescence response was analyzed, a simple but useful model of LED voltage pulse response was built. Based on this model, we studied the nonlinear error of LED brightness caused by the voltage-to-intensity response when driven with PWM, and then we conducted an experiment. The test result shows that the average nonlinear error between the LED intensity and the PWM duty is about 10%. At last, a method for gray value correction in LED display screen is suggested based on the LED voltage-to-intensity response model. It effectively reduces the PWM brightness error caused in the process of LED response, makes the LED electroluminescence change linearly along with the pixel gray value, and reduces the color aberration, and furthermore improves the display effect of LED display screen.

Key words: LED display screen; electroluminescence response; PWM; brightness control

CLC number: TN911.73

PACS: 07.05.Pj; 42.30.Va

PACC: 4240F

Document code: A