

文章编号 1004-924X(2013)12-3248-07

# 发光二极管显示屏分段灰度调制与优选扫描时钟获取

严 飞<sup>1,2\*</sup>, 王瑞光<sup>1</sup>, 邓意成<sup>1,2</sup>, 郑喜凤<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;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**构建了一种发光二极管(LED)显示屏灰度等级调制模型以实现其灰度调制并获取优选扫描时钟。根据脉宽调制的特点,将灰度调制过程分为基本灰度等级调制和扩充灰度等级调制来构建灰度等级的调制模型。通过分析模型各参数关系,提出一种优选扫描时钟的选取方法和扫描时钟富裕系数的概念,并在此基础上总结了 LED 显示屏显示控制优化途径。最后,通过硬件平台验证并实现了该灰度等级模型。实验结果表明:对于 4 扫的 LED 显示屏,选取最小响应脉宽小于等于 40 ns 的驱动芯片可使刷新率为 300 Hz、移存长度为 128 个像素点、灰度等级为 14 bit 的优选扫描时钟为 10 MHz,同时其亮度利用率达到 90%,最大扫描时钟富裕系数达到 3.5。采用该模型实现灰度等级调制,可以满足 LED 显示屏的显示要求,可应用于实际工程项目。

**关键词:**发光二极管显示屏;控制系统;驱动系统;显示控制;扫描;灰度调制

**中图分类号:** TN27; TN941.1      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3248

## Segmented gray scale modulation of LED display and optimal scan clock access

YAN Fei<sup>1,2\*</sup>, WANG Rui-guang<sup>1</sup>, DENG Yi-cheng<sup>1,2</sup>, ZHENG Xi-feng<sup>1</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 100039, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: vicy831208@163.com*

**Abstract:** A gray scale modulation model was established to achieve the Light Emission Dode(LED) display gray scale modulation and obtain the optimal scan clock. According to the characteristic of pulse width modulation, the gray modulation process was divided into the basic gray scale modulation and the expansion gray scale modulation to construct a gray scale modulation model. Through the analysis of the parameters of the model, a kind of selection method for the optimal scan clock was put forward and a concept of scan clock affluent coefficient was proposed. On the basis of these, an approach to optimize display screen control was summarized. Finally, the gray scale model was verified and implemented through the hardware. The experimental results show that for the four-scanning LED display screen, selecting the driving chip whose minimum pulse width is less than or equal to 40 ns can realize the optimal scan clock to be 10 MHz at a refresh rate of

收稿日期:2013-06-05;修订日期:2013-07-23.

基金项目:吉林省重大科技成果转化项目(No. 09ZDZH006)

300 Hz, a shift register length of 128 pixels, and the gray scale of 14 bit. Meanwhile, its brightness utilization rate reaches 90% and the maximum scanning clock affluent coefficient reaches 3.5. The model can be used to achieve gray scale modulation, and can meet the requirements of LED screen display in practical engineering applications.

**Key words:** Light Emission Diode(LED) display screen; control system; driving system; display control; scanning; gray modulation

## 1 引 言

20 世纪 90 年代以来,发光二极管(LED)显示屏的制造技术和应用水平日益提高。在 LED 器件材料方面不断涌现新的成果,而高亮度蓝色 LED 和纯绿色 LED 芯片的问世和商品化,使得全彩色 LED 显示屏成为现实,并被广泛应用于商业广告、交通诱导、银行显示和舞台演出等领域<sup>[1-3]</sup>。如今,全彩 LED 显示屏的使用范围越来越广,除了常规意义上用于显示信息的这一作用外,时代赋予了它更广泛的内涵,比如:像素点间距的缩小使其有望取代投影仪,走进会议室和家庭;结构的精细化与多样性使其能够满足舞台舞美对异型屏的需求;3D 技术的进步也使 LED 显示屏在立体显示领域开创了一片新天地<sup>[4]</sup>。

LED 显示屏作为多媒体设施的显示终端,其最终目标是完成高质量的图像显示,而灰度调制的性能直接影响着图像的显示效果。通常,灰度调制的关键技术指标包括扫描行数、刷新率和灰度等级等<sup>[5]</sup>。扫描行数是指在一定的显示区域内,整个区域行数与同时点亮行数的比例,扫描行数有 1、2、4、8、16 等;刷新率是指每秒钟内显示屏显示数据被重复的次数;灰度等级决定了显示图像层次的细腻程度。LED 显示屏的控制系統经历了从 4 bit 低灰度到 16 bit 高灰度的发展过程,其图像层次越来越细腻。在信号传输方面,从最初简单的模拟通信方式到现在的实时数字信号远距离传输,通讯技术的进步使得显示屏快速实时显示高清信号成为可能;在刷新率方面,从最初几十赫兹发展到现在高达上千赫兹,使显示屏图像的稳定性更好,更适用于各种影像器材拍摄<sup>[6-9]</sup>。

灰度调制是控制系统的主要性能之一,国内通用全彩 LED 显示屏控制系统的厂商不过数十家,而显示屏企业却有几百家。从使用角度可将控制系统分为通用控制系统和专用控制系统。通

用控制系统具有通用性好、适用面广、操作简便的特点。但因为其需考虑到方方面面的适应性,所以很难发挥出最佳性能,会在灰度级、扫描时钟、刷新率等方面做出一些牺牲。专用控制系统可以结合自身显示屏的特点,将系统与显示屏的整体设计融为一体,可将性能做到最佳。国际上知名的 LED 显示屏供应商,如美国的 Daktronics、比利时的 Barco,他们从控制到显示进行统筹考虑,设计出了适合自身特点的控制系统。而国内对专用控制系统的研究还不够深入,大多停留在简单的应用层面。

本文针对专用控制系统构建了一种 LED 显示屏分段灰度等级调制模型,并深入分析了模型各参数之间的关系,从而寻求优化的解决方案,为 LED 显示屏控制系统设计提供依据。

## 2 灰度等级调制模型

LED 显示屏的驱动控制大多基于移位锁存脉宽调制方式,也就是常说的脉宽(Pulse Width Modulation, PWM)调制方式<sup>[10-13]</sup>。该方式的主要控制信号有扫描时钟  $f_{clk}$ 、锁存 latch 和消隐 oe。工作时,串行数据在时钟的驱动下,逐级移存,当移存至所需要长度时,锁存信号将并行数据捕获至另一级寄存器,同时在消隐信号的控制下,调节每位数据的显示脉宽,实现了灰度等级的调

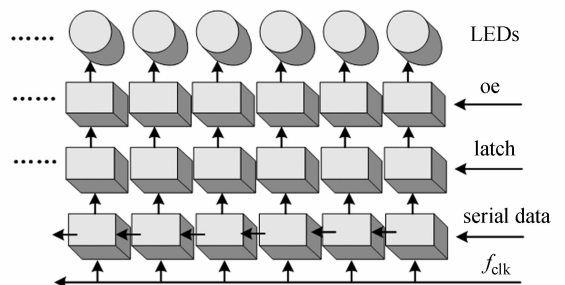


图 1 显示驱动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of display driver

制,示意图参见图 1。

结合图 1,对于任意一条移存长度为  $N_{\text{latch}}$  的数据链路,最近两次 latch 信号的间隔时间  $\tau_{\text{latch}}$  为:

$$\tau_{\text{latch}} = \frac{1}{f_{\text{clk}}} \times N_{\text{latch}}. \quad (1)$$

这里将  $\tau_{\text{latch}}$  定义为扫描模型的基准时间,亦称作一个基准时间片占有的时间。可以看出,在扫描时钟一定的情况下,基准时间会随着移存长度的增加而增加。若维持基准时间不变,扫描时钟需随着移存长度的增加而增加。

LED 显示屏的灰度等级可由 LED 灯所能够表现的亮度级差来反映。由于 LED 灯的亮度和导通时间成线性关系,因此可以构建基于时间的灰度等级调制模型。该灰度等级调制可分为基本灰度等级调制和扩充灰度等级调制。

基本灰度等级是指以基准时间  $\tau_{\text{latch}}$  为最小调制周期所产生的灰度等级。若 LED 显示屏的刷新率为  $f_{\text{frame}}$ ,则一帧数据的周期  $T_{\text{frame}}$  为:

$$T_{\text{frame}} = \frac{1}{f_{\text{frame}}}, \quad (2)$$

若扫描行数为  $K$ ,则行周期  $T_{\text{line}}$  为:

$$T_{\text{line}} = \frac{T_{\text{frame}}}{K}, \quad (3)$$

行周期最多包含的基准时间片数量  $n_{\text{int}}$  为:

$$n_{\text{int}} = \frac{T_{\text{line}}}{\tau_{\text{latch}}}, \quad (4)$$

于是,基本灰度级数量  $N_{\text{int}}$  为:

$$N_{\text{int}} = \text{fix}(\log_2 n_{\text{int}}). \quad (5)$$

扩充灰度等级是指在基准时间  $\tau_{\text{latch}}$  内,以最小响应脉宽  $\tau_{\text{oe}}$  为最小调制周期所产生的灰度等级。于是,基准时间内含有  $\tau_{\text{oe}}$  的数量  $n_{\text{fra}}$  为:

$$n_{\text{fra}} = \frac{\tau_{\text{latch}}}{\tau_{\text{oe}}}. \quad (6)$$

这样,可以得到扩充灰度等级数量  $N_{\text{fra}}$ :

$$N_{\text{fra}} = \text{fix}(\log_2 n_{\text{fra}}), \quad (7)$$

LED 显示屏的灰度等级  $N_{\text{all}}$  是基本灰度等级与扩充灰度等级的叠加:

$$N_{\text{all}} = N_{\text{int}} + N_{\text{fra}}. \quad (8)$$

## 3 模型分析

### 3.1 关键参数

LED 显示屏控制系统的性能与所选的驱动

芯片息息相关,而最大扫描时钟和最小响应脉宽直接受驱动芯片本身参数的影响,表 1 列举了 4 种不同厂家的驱动芯片参数。

表 1 不同厂家驱动芯片参数

Tab. 1 Parameters of driving chips for different manufacturers

驱动芯片型号	MBI5024	TLC59282	SM16126	SD16739
最小响应脉宽/ns	70	30	30	30
最大扫描时钟/MHz	25	35	25	30

从表 1 可以看出,驱动芯片的扫描时钟都在 35 MHz 以下。这是因为一方面过大的扫描时钟可能超出驱动芯片本身的极限速度,另一方面过大的扫描时钟会对显示模组的印刷电路板(PCB)布局布线提出更高的要求;最小响应脉宽都在 30 ns 以上,过小的脉宽时间会导致驱动芯片不能正确响应。

由式(5)、式(7)及其相关联的公式可知,基本灰度等级每提高一级,基准时间片数量需要提高 2 倍,可以采取的方法及分析如下:(1)扫描时钟加倍,但无法突破驱动芯片本身对时钟频率的限制。(2)移存长度减半或者扫描行数减半,这样会导致控制系统的控制范围减小。(3)刷新率减半,这样会影响视觉效果。总体来说,基准灰度等级的提高,会受器件性能的限制,也会使其他性能严重降低。

扩充灰度等级每提高一级,可以采取的方法及分析如下:(1)最小响应脉宽减半,但无法突破驱动芯片本身能够响应的最小时间。(2)扫描时钟减半或者移存长度加倍,这样会导致基本灰度级数量减半,无实际意义。

另外,由于扩充灰度等级是以损失亮度为前提换来的,因此,采用该灰度级调制模型需充分考虑 LED 显示屏的亮度效率  $\eta_L$ ,其求解公式为:

$$\eta_L = \left( 1 - \frac{(N_{\text{fra}} - 1) + 2^{-N_{\text{fra}}}}{(2^{N_{\text{int}}} - 1) + N_{\text{fra}}} \right) \times 100\%. \quad (9)$$

### 3.2 优选扫描时钟的选取

专业控制系统设计需综合考虑驱动灯板走线、箱体大小、用户需求等因素,同时也要结合控制系统自身的资源情况。由于基本灰度等级调制和扩充灰度等级调制均与扫描时钟及移存长度有关,而这 2 个参数的变化所引起的 2 种灰度调制的改变情况正好相反,如何权衡考虑参数调节和

灰度等级调制,以使他们发挥最大功效是一个重点,这里提出优选扫描时钟的选取步骤如下:

(1)确定最小响应脉宽  $\tau_{oe}$ ;

(2)确定用户需求的刷新率  $f_{frame}$ ,若无要求可按 300 Hz 选取;

(3)确定显示屏模组的扫描行数  $K$  和实际移存长度  $N_{latch}$ ;

(4)根据扫描模型确定优选扫描时钟  $f_b$ ,这里定义:

$$f_b = f_{clk} (N_{all} = N_{max}, \eta_L \geq 80\%), \quad (10)$$

其中: $N_{max}$ 表示取最大值。

### 3.3 扫描时钟富裕系数

确定优选扫描时钟的意义在于得到扫描时钟的富裕区,设定驱动芯片的最大数据传输速度为  $f_{max}$ ,富裕区中某一扫描时钟为  $f_r$ ,则:

$$f_b \leq f_r \leq f_{max}. \quad (11)$$

在控制系统设计时,扫描时钟可以采用合适的  $f_r$ ,这样扫描时钟就有了一定的冗余度。该冗余度可以适配给其他参数,用于改善整个系统性能。为了定量评价该冗余度,定义扫描时钟的富裕系数  $\delta_{clk}$  为:

$$\delta_{clk} = \frac{f_r}{f_b}. \quad (12)$$

扫描时钟的富裕系数可用于评估硬件资源的有效利用情况。最大扫描时钟富裕系数当然是  $f_r = f_{max}$  时的取值,该值越大,表明系统可提升的空间越大。

对于不同类型的全彩 LED 显示屏显示控制系统,将它们的刷新率、移存长度、灰度等级、扫描行数设置成一致时,最大扫描时钟富裕系数就可作为判断控制系统硬件性能的一个指标。

### 3.4 显示控制优化途径

针对专用控制系统来说,为了使 LED 显示屏控制系统的需求与性能获得较佳匹配,寻找一种合理有效的设计途径显得尤为重要,这样不仅可以缩短设计周期、提高设计效率,而且,可以定量分析系统性能。这里提出一种合理有效的优化途径,实现步骤如下:

(1)构建 LED 灰度等级调制模型;

(2)获取优选扫描时钟;

(3)计算最大扫描时钟富裕系数;

(4)结合扫描时钟富裕系数和系统性能要求,选取适当扫描时钟后进行设计。

## 4 设计实现

### 4.1 逻辑原理

为配合模型验证,需要的硬件条件有 LED 显示屏模组、现场可编程门阵列(FPGA)主控电路板、带 DVI 显卡的电脑一台、视频发送卡及其它配件。采用 64 pixel  $\times$  32 pixel 4 扫 LED 显示屏模组,FPGA 采用 XILINX 的 XC3S500E。

主控逻辑器件 FPGA 的内部逻辑框图如图 2 所示,从中可以看到,FPGA 内部的输入数据处理模块接收来自前端的视频数据,在截取所需数据后,经过动态内存的一帧缓存,并进入乒乓 RAM 中,随后,数据处理模块会对数据进行 gamma 校正<sup>[14]</sup>,并按照 LED 显示屏的模组线序进行调整和重组,最终按照 LED 显示屏需要的信号输出。输出控制器会根据具体的数据位调整每位数据的显示时间,达到灰度级控制的目的。

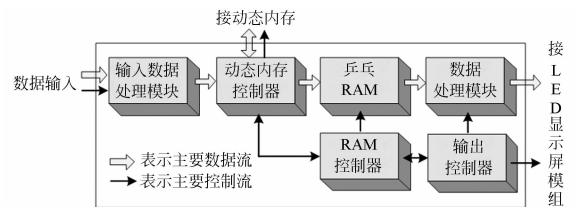


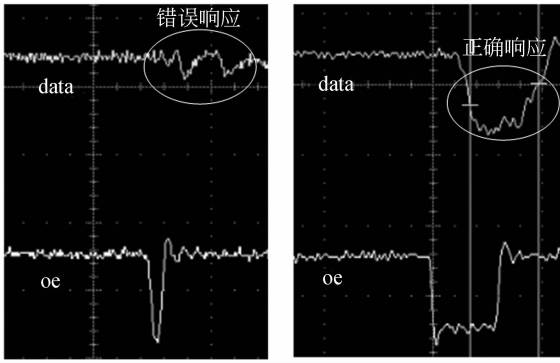
图 2 FPGA 内部逻辑框图

Fig. 2 FPGA internal logic diagram

### 4.2 脉宽响应

驱动芯片中,最小响应脉宽是在能够维持所有信道输出电流线性度的条件下,oe 可打开的有效宽度。若给定脉宽小于最小响应脉宽,则信道输出不响应或者响应非线性,如图 3(a)所示。若给定脉宽大于等于最小响应脉宽,则信道输出可以正确响应,如图 3(b)所示。由于芯片厂商参差不齐,厂家给定的技术指标也有准有误,因此在选定驱动芯片后,必须对驱动芯片的最小响应脉宽进行测试,测试时使用值要略比测试值大 5~10 ns,这可以在一定程度上抵消芯片脉宽响应的不一致性。

LED 显示屏模组上的驱动芯片采用 TI 公司的 TLC59282,串行数据输入给定为高电平;时钟为 10 MHz;锁存为周期性变化的脉冲,周期为 13



(a) 给定脉宽  $\tau < \tau_{oe}$  (b) 给定脉宽  $\tau \geq \tau_{oe}$   
 (a) Given pulse width  $\tau < \tau_{oe}$  (b) Given pulse width  $\tau \geq \tau_{oe}$

图 3 脉宽响应测试波形

Fig. 3 Test waveform of pulse response

$\mu\text{s}$ , 高电平宽度为 200 ns, 给定的响应脉宽为 40 ns。这些均由 FPGA 编程实现, 根据技术手册可选取 oe 为 40 ns, 并将其作为预测试对象, 测试 10 组芯片的通道输出响应, 如表 2 所示。响应结果最大为 41.8 ns, 偏离给定脉宽幅度为 4.5%, 其他响应结果都大于给定脉宽 40 ns, 这种偏差主要是芯片本身引起的, 可以通过后期逐点一致化校正技术纠正, 这里结合灰度级调制, 最终选定  $\tau_{oe}$  为 50 ns。

表 2 脉宽响应测试结果

Tab. 2 Test results of pulse response (ns)

测试点	芯片 1	芯片 2	芯片 3	芯片 4	芯片 5
通道 1	通道 1	通道 1	通道 1	通道 1	通道 1
响应	41.3	40.5	41.8	41.4	40.2
测试点	芯片 1	芯片 2	芯片 3	芯片 4	芯片 5
通道 2	通道 3	通道 4	通道 5	通道 6	
响应	41.8	40.4	41.5	41.4	40.1
测试点	芯片 6	芯片 7	芯片 8	芯片 9	芯片 10
通道 1	通道 1	通道 1	通道 1	通道 1	通道 1
响应	40.2	41.5	41.6	40.6	41.1
测试点	芯片 6	芯片 7	芯片 8	芯片 9	芯片 10
通道 7	通道 8	通道 9	通道 10	通道 11	
响应	40.3	41.4	41.4	40.7	41.1

### 4.3 参数确定

显示屏的刷新率达到 300 Hz 时已基本满足人眼观看和视频摄像的要求, 刷新率再高固然好, 但同时也要以牺牲硬件资源为代价。当选择扫描行数  $K=4$ , 移存长度  $N_{\text{latch}}=128$  时, 由模型公式可以得到 LED 显示屏灰度等级与扫描时钟的关

系如图 4 所示。

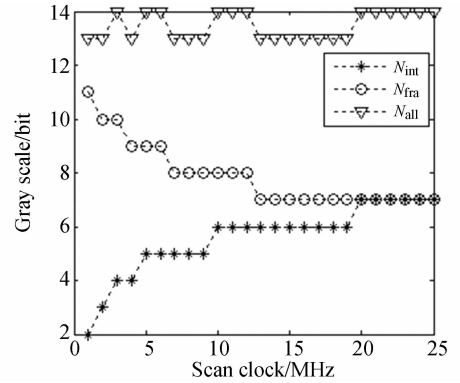


图 4 灰度等级与扫描时钟的对应关系

Fig. 4 Correspondence of gray scale and scan clock

不同的扫描时钟会产生不同的灰度等级, 同时也会带来不同的亮度效率, 由表 3 可以看出, 扫描时钟呈现振荡的变化趋势, 而亮度效率呈现递增的变化趋势。

表 3 不同扫描时钟下的灰度等级和亮度效率

Tab. 3 Gray scales and brightness utilization rate under different scan clocks

扫描时钟/MHz	灰度等级/bit	亮度效率/(%)
1	13	28
2	13	47
3	14	63
4	13	66
5,6	14	79
7,8,9	13	82
10,11,12	14	90
13,14,15,16,17,18,19	13	91
20,21,22,23,24,25	14	95

由图 4 和表 3 可知, 当灰度等级为 14 bit, 亮度效率为 95% 时, 扫描时钟可选择 20 MHz; 当灰度等级为 14 bit, 亮度效率为 90% 时, 扫描时钟可选择 10 MHz。二者具有相同的灰度等级, 后者虽比前者损失了 5% 的亮度, 但扫描时钟却降低了一半。

根据式(10)可知, 确定优选扫描时钟  $f_b=10$  MHz, 由该驱动芯片最大允许的扫描时钟为 35 MHz, 容易得出最大扫描时钟富裕系数为 3.5, 对 LED 显示屏显示控制来说, 该系数的引入最大可以使显示性能提高 3.5 倍。当然, 一般情况下没有必要取这种极端情况。在本设计中, 若在扫描

时钟富裕区中选定 25 MHz 的扫描时钟,在保持 14 bit 灰度等级的基础上,可将刷新率提高至 750 Hz。

#### 4.4 测试结果

控制系统各参数确定后,通过 FPGA 编程,实现了全彩 LED 显示屏的分段灰度调制和显示控制。

图 5 为使用泰克示波器 DPO4104 测得的控制时序波形,该时序用来控制数据的移存和锁存,并在 oe 的调节下实现了灰度控制。其中: $\tau_{latch} = 256\tau_{oe}$ 。oe 波形显示出 8 级扩充灰度等级,每一级显示时间分别是  $\tau_{oe}$ 、 $2\tau_{oe}$ 、 $4\tau_{oe}$ 、 $8\tau_{oe}$ 、 $16\tau_{oe}$ 、 $32\tau_{oe}$ 、 $64\tau_{oe}$ 、 $128\tau_{oe}$ ,与设计参数相符。最终,在 10 MHz 扫描时钟下,实现了刷新率为 300 Hz,灰度等级为 14 bit 的显示控制,从显示效果看,灰度细腻,无闪烁感,拍摄无横纹,可流畅播放动态视频。

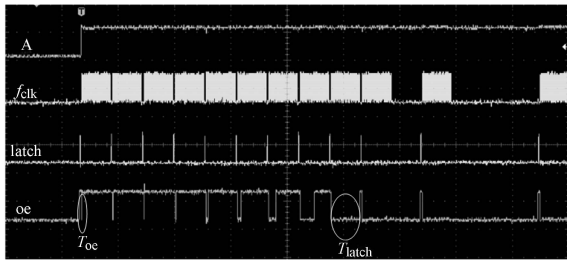


图 5 LED 显示屏扫描时序图

Fig. 5 Screen scan timing diagram of LED display

表 4 为某通用控制系统参数的测试结果,通过近似参数对比可以看出,在 305 Hz 刷新率的情况下,本设计的扫描时钟低于 2.5 MHz,灰度等级高于 1 bit,亮度相当,最小响应脉宽低于 30 ns。在 339 Hz 刷新率和 14 bit 灰度等级的情况

#### 参考文献:

- [1] 关积珍. 2008、2009 中国 LED 显示应用行业发展报告[J]. 现代显示, 2010, (112):9-17.  
GUAN J ZH. Report about LED display industrial development of China in 2008, 2009 [J]. *Advanced Display*, 2010, (112):9-17. (in Chinese)
- [2] 陆荣庆. LED 显示屏行业发展 20 年[J]. 建设科技, 2009, (12):72-73.  
LU R Q. The LED display screen industry development in 20 years [J]. *Construction Science and Technology*, 2009, (12):72-73. (in Chinese)
- [3] 李熹霖. 技术创新:造就 LED 显示屏的制造强国

下,依公式算得扫描时钟富裕系数为 1.4,小于本文提出的 3.5,说明该灰度调制下硬件资源利用率并不高。

表 4 某通用控制系统灰度调制结果

Tab. 4 Gray modulation results of a general control system

$N_{latch} = 128, K = 4$ 时的 $f_{frame}$ (Hz)			
$f_b$ (MHz) / $\tau_{oe}$ (ns)	$N_{all}$ (bit) / $\eta_L$ (%)		
	12/78	13/89	14/95
25/40	1 017	610	339
15.6/64	635	381	211
12.5/80	508	305	169
10.4/96	423	254	141

## 5 结论

本文根据 LED 显示屏专业控制系统性能好、资源利用率高的要求,构建了分段灰度等级调制模型。在分析模型各参数关系的基础上,提出了一种优选扫描时钟的选取方法,并提出最大扫描时钟富裕系数的概念,同时指出该系数可作为硬件资源有效利用的评估参数。最后,通过硬件平台实现并验证了该灰度等级模型。实验结果表明:对于 4 扫的 LED 显示屏,选用最小脉宽小于等于 40 ns 的驱动芯片,计算出刷新率为 300 Hz,移存长度为 128 个像素点,灰度等级达到 14 bit 的优选扫描时钟为 10 MHz,同时,其亮度利用率达到 90%,最大扫描时钟富裕系数达到 3.5。采用该模型实现灰度等级调制,可以满足 LED 显示屏的显示要求,可用于实际的工程应用。

[J]. 现代显示, 2010, (112):18-20.

LI X L. Innovate technology: to elevate the LED display industry of China [J]. *Advanced Display*, 2010, (112):18-20. (in Chinese)

[4] 李超,时大鑫. 超高清晰度显示技术[J]. 现代显示, 2010, (112):99-103.

LI CH, SHI D X. Super high-vision development in the world [J]. *Advanced Display*, 2010, (112):99-103. (in Chinese)

[5] 张晓光.《LED 显示屏测试方法》的修订[J]. 现代显示, 2008, (89), 54-58.

ZHANG X G. The amendment of (Test Methods of LED Panels) [J]. *Advanced Display*, 2008, (89):

- 54-58. (in Chinese)
- [6] 范赐恩,吴敏渊,张立国,等. 12 位图像数据的压扩变换显示[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(6): 1421-1428.  
FANG C E, WU M Y, ZHANG L G, *et al.*. Companding transformation display for 12 bit image data [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1421-1428. (in Chinese)
- [7] 常锋,孙志远,王瑞光,等. LED 显示图像的非均匀度校正改进方法[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(4): 929-937.  
CHANG F, SUN ZH Y, WANG R G, *et al.*. Improvement of nonuniformity correction of LED display images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 929-937. (in Chinese)
- [8] 陈龙,鲁宝春,庄明照,等. 全彩 LED 显示屏的灰度改进研究[J]. 辽宁工业大学学报: 自然科学版, 2011, 31(1): 9-12.  
CHEN L, LU B CH, ZHANG M ZH, *et al.*. Gray improvement research on full color LED display [J]. *Journal of Liaoning University of Technology: Natural Science Edition*, 2011, 31(1): 9-12. (in Chinese)
- [9] 林琳,乔彦峰,苏宛新. 应用灰度控制减轻平板显示器中运动图像的拖尾[J]. 光学 精密工程, 2011, 18(8): 1877-1885.  
LIN L, QIAO Y F, SU W X. Reduction of trailing for moving images in FPD by grayscale control[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 18(8): 1877-1885. (in Chinese)
- [10] 邓宏贵,李志坚,郭晟伟. 基于 LED 电脉冲响应的 LED 显示屏像素灰度校正方法[J]. 发光学报, 2010, 31(1): 145-149.  
DENG H G, LI ZH J, GUO SH W. Method of gray value correction in LED display screen based on LED electroluminescence response [J]. *Journal of Luminescence*, 2010, 31(1): 145-149. (in Chinese)
- [11] SVILAINIS L. LED PWM dimming linearity investigation [J]. *Displays*, 2008, (29): 243-249.
- [12] LED brightness control for video display application[J]. *Displays*, 2008, (29): 506-511.
- [13] 邓宏贵,梅卫平,曹文晖,等. 基于 PWM 的 LED 显示屏像素亮度控制方法[J]. 光电子技术, 2010, 30(2): 131-134.  
DENG H G, MEI W P, CAO W H, *et al.*. Based on the PWM of the LED display pixel a brightness control method [J]. *Optoelectronic Technology*, 2010, 30(2): 131-134. (in Chinese)
- [14] 马晓阳. LED 显示屏  $\gamma$  校正的研究和实现[J]. 电光与控制, 2010, 17(6): 92-96.  
MA X Y. Research and implementation of  $\gamma$  correction of LED display screen [J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(6): 92-96. (in Chinese)

#### 作者简介:



严飞(1983—),男,江苏南京人,博士研究生,2007年于天津大学获得学士学位,主要从事LED大屏幕图像评估、显示控制等方面的研究。E-mail: vicy831208@163.com



邓意成(1985—),男,吉林长春人,博士研究生,2008年于吉林大学获得学士学位,主要从事LED大屏幕光色参数采集、机器视觉等方面的研究。E-mail: kevin\_dyc@163.com

#### 导师简介:



王瑞光(1957—),男,吉林松原人,研究员,博士生导师,1984年于长春光机学院获得学士学位,主要从事LED大屏幕平板显示技术、图像评估等方面的研究。E-mail: wangruiguang1957@126.com



郑喜凤(1965—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,1988年于吉林大学获得学士学位,1991年于中国科学院长春物理研究所获得硕士学位,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,主要从事数字信号处理等方面的研究。E-mail: xfzheng6598@yahoo.com.cn