

文章编号:1007-2780(2014)03-0361-09

一种基于模拟 PWM 的全彩色 LED 显示屏

李相国*, 姚晓魁, 赵广河

(河南工业大学 信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:提出一种基于扫描方式模拟实现 PWM 功能的全彩色显示屏方案。该方案使用 D 触发器进行信息存储及 LED 通断控制,通过向 D 触发器写入信息控制 LED 的工作状态,按照 PWM 序列串值对 D 触发器周期循环写入来模拟实现 PWM 控制功能。详细介绍了系统的工作原理,设计实现了扫描控制器,并分析了系统参数及可行性。该方案的功耗及成本较低,具有功能上的灵活性,消除了传统扫描方式中闪烁及亮度损失问题,并具有较好的电源完整性及信号完整性。

关键词:LED 显示屏;脉宽调制;嵌入式系统;CPLD

中图分类号:TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142903.0361

Full-color LED display by simulation of PWM

LI Xiang-guo*, YAO Xiao-kui, ZHAO Guang-he

(College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology,
Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper presents a full-color LED display scheme based on simulation of PWM function. In this scheme, each LED is equipped with one D type flip-flop which is used to store information and control the LED on/off, and the LED status can be controlled by writing information into the D type flip-flop, thus the PWM function can be simulated and realized by writing the PWM binary code into the D type flip-flop cyclically and periodically. In the paper, the working principle of the system is introduced in detail, and the scan controller is designed carefully, and the parameters and feasibility of the system are also analyzed. Compared with traditional schemes, the proposed scheme has the advantages of lower power consumption and costs, as well as better functional flexibility; moreover, it eliminates the flickering and sacrificing brightness problem in traditional scanning scheme, and also has better signal and power integrity.

Key words: LED display; PWM; embedded system; CPLD

1 引言

发光二极管(LED)具有色彩鲜艳、亮度高、寿

命长及可靠性高等众多优点^[1],因而 LED 显示屏在户外多媒体广告、体育场馆赛事播报、市政广场及城市亮化工程、以及商场购物中心等众多场合获得广泛应用。从早期的单色发展到彩色全彩

收稿日期:2013-07-16;修订日期:2013-09-22.

基金项目:河南工业大学博士基金项目(No. 2010BS006)

* 通信联系人, E-mail:lxg@live.com

色,从简单的文本显示发展到复杂的图像视频显示,画面越来越完美,功能越来越强大。

根据人眼视觉系统的三基色原理,全彩色 LED 显示屏中每一个像素由红绿蓝 3 种颜色的 LED 组成,并通过调节 3 种 LED 的发光亮度来合成人眼视觉上的任意颜色^[2]。理论上,LED 的发光亮度与流经的前向电流大小成正比,但是,随着电流的变化,不但发光亮度有改变,色度也会发生偏移^[3]。因此,在全彩色 LED 显示屏设计中,不适合采用直接改变 LED 电流大小方式来调节其发光亮度,而普遍采用恒流驱动但改变 LED 通断时间的方式,利用人眼视觉系统的暂留效应,从而产生亮度改变的视觉效果。这种调节通断的方法可以采用脉宽调制(PWM)技术实现。由于全彩色 LED 显示屏需要对每一个 LED 进行独立的亮度控制,而在传统的静态驱动方案中,由于显示屏中 LED 数以万计,因此对 PWM 驱动芯片需求量较大,使得显示屏的功耗及成本较高;而在传统的动态扫描驱动方案中,由于对 LED 采用分时导通方式,因此可能存在闪烁问题,并牺牲掉部分亮度范围。

近几年来,随着信息技术的发展,嵌入式系统得到越来越广泛的应用。本文在分析比较传统静态驱动与动态扫描驱动优缺点基础上,结合嵌入式系统功能灵活的特点,提出一种基于模拟 PWM 功能的全彩色 LED 显示屏方案。在该方案中,每个 LED 都对应一个用于信息存储及通断控制的 D 触发器,阵列中所有 D 触发器构成一个存储阵列,对存储阵列进行信息更新就可以改变屏幕 LED 的通断状态,而按照每个像素 PWM 二进制序列串的值对存储阵列进行周期有序的扫描及信息更新,就可以对每一个 LED 实现 PWM 控制功能。实际上是利用 D 触发器的状态保持功能,并结合扫描方式来实现全部的 PWM 波形,从而代替实际的 PWM 硬件芯片。本文对该方案的组成及工作原理进行了详细的介绍,对扫描控制器进行了分析与设计,并对系统的参数及可行性进行了分析。

2 系统简介

该方案的系统组成如图 1 所示,它由数据处

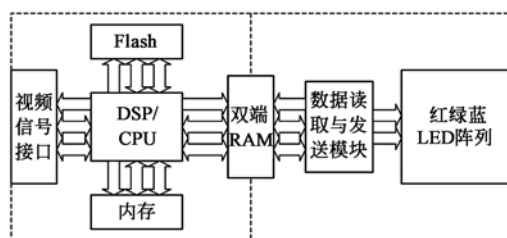


图 1 系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of the system

理模块和显示驱动模块组成,两个模块通过双端 RAM 进行数据传递。数据处理模块是一个嵌入式系统,它负责接收图像/视频数据,并依次对每帧图像数据进行校正处理、像素灰度值的 PWM 序列化展开与格式重组、写入双端 RAM 等步骤;它仅对新数据进行处理,若无新数据则处于等待状态。显示驱动模块主体是一个 LED 阵列,且每个 LED 均对应一个 D 触发器,用于信息存储及 LED 通断控制,并通过一个扫描控制器周期循环地从双端 RAM 中读取扫描数据然后写入 LED 阵列对应单元的 D 触发器,从而用模拟手段实现对全部 LED 的 PWM 亮度控制功能。

在该方案中,数据处理模块负责信号处理相关的所有工作。比如,对 LED 的亮度及色度校正处理,传统方案一般直接启用 PWM 驱动芯片的校正功能,本方案通过软件处理方式对数据进行校正处理。此外,软件处理方式具有相当的灵活性,可以方便地添加新功能及算法更新,比如,可以根据传感器的输入对数据进行实时调整,实现显示屏亮度匹配环境变化。从两个模块的工作模式看,数据处理模块仅在有新数据时工作,而显示驱动模块则是周期循环地工作。因此,两个模块之间任务分割清晰,从而使得两个模块可以独立工作。

3 数据处理模块

数据处理模块主要完成数据接收、数据校正、数据 PWM 序列化与重组、以及写入双端 RAM 等步骤,其工作流图如图 2 所示。其仅在新数据到来时触发一次完整的数据处理流程,若无新数据则处于等待状态。

3.1 校正处理

由于 LED 芯片、外围电路以及工作条件等方

面存在个体及局部差异因素,使得阵列中不同 LED 在发光特性方面可能存在差异,主要包括亮度和色度两个指标。具体来说,对于同一种颜色 LED,它们对于相同的数值驱动可能表现出发光亮度与发光色度等方面的不同,即 LED 面板阵列可能存在均匀一致性方面的问题。因此,在 LED 显示屏的设计与使用过程中需要进行亮度校正与色度校正处理^[4-5]。

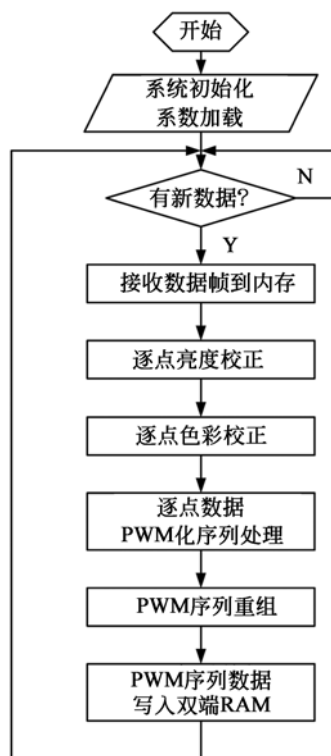


图2 数据处理模块工作流程图

Fig. 2 Flowchart of the data processing module

亮度与色度的物理含义截然不同,但是,根据人眼视觉系统的三基色原理,通过三基色的不同比例混合可以产生人眼视觉上的其它颜色,反过来说,假如某个 LED 发光时的色度发生了偏移,则可以看作是标准三基色 LED 以某种亮度比例混合的结果。因此,亮度校正和色度校正的含义不同但又密切联系在一起,实质上都是针对选定基准进行的亮度校正,其中,亮度校正以单个 LED 为基本单元进行校正,而色度校正以像素为基本单元对三色 LED 进行联合亮度校正。已有研究者提出了多种校正算法及方案^[6-9],这里不再展开论述。

经过校正系统的测量及分析处理后,即可获

得校正系数并用于校正处理。如前所述,传统硬件 PWM 驱动方案一般启用 PWM 芯片提供的“点校正”功能^[10]。本方案把校正处理移到前端的数据处理模块中,采用软件处理方式实现,这样可以灵活地选用校正算法,也可以方便地进行算法更新及添加新的功能,比如添加 γ 校正功能^[11]。

值得说明的是,校正处理针对面板阵列中不同 LED 在各自恒流工作时表现出来的差异问题,对各自驱动数据进行预补偿处理,使得最终显示效果保持一致;由于并不能调节 LED 本身及外围电路的参数,它属于事后补偿措施。以亮度校正为例,要实现所有 LED 亮度一致,必然需要以发光亮度最低的 LED 为基准,相应地下调其他 LED 的对应数值,即亮度校正会引起亮度损失;同时,尽管亮度校正不会引起数据溢出,即数据位数保持不变,但经校正 LED 的驱动数值减小,有效量化阶次也相应减少,从量化角度看,量化阶次减少对应信噪比变差,而且,LED 之间的量化差异可能影响视觉效果。因此,在显示屏装配前需要进行元器件筛选,尽量从源头上提高 LED 的一致性。

3.2 扫描数据生成

数据处理模块最主要的任务是生成显示驱动模块的扫描数据,这通过两个步骤来完成。首先,把图像数据转换为二进制序列串,其中‘1’的数目等于图像数据的数值大小。比如,对于 8 位整型数据,它最大数值为 255,则把每个数据分别展开为一个 255 长度的二进制序列串,如下面所示。

0———> 00000000.....00000;(0 个‘1’)

1———> 10000000.....00000;(1 个‘1’)

2———> 11000000.....00000;(2 个‘1’)

3———> 11100000.....00000;(3 个‘1’)

.....

255———> 11111111.....11111;(255 个‘1’)

上面的展开方式及表达式可以称作线性 PWM(LPWM),即序列串中‘1’从起始位置连续分布。这意味着绝大多数 LED 在每个 PWM 扫描周期开始时导通而在扫描周期结束时关闭,即 LED 阵列的工作状态出现整体性周期起伏,给电源系统带来很大压力。为了缓解这个问题,可以将 PWM 序列中‘1’打散,比如二值加权 PWM(BPWM)和谱增强型 PWM(ES-PWM)^[12]。

然后,对得到的 PWM 序列串重组,重组数据格式与显示驱动模块的工作模式相对应。显示驱动模块的工作特点是周期性地对 LED 阵列进行

逐行扫描,并把每行像素中的红绿蓝三色 LED 当作依次排列的三行 LED 对待。因此,在数据重组时,按照 LED 的行次序进行,如图 3 所示。

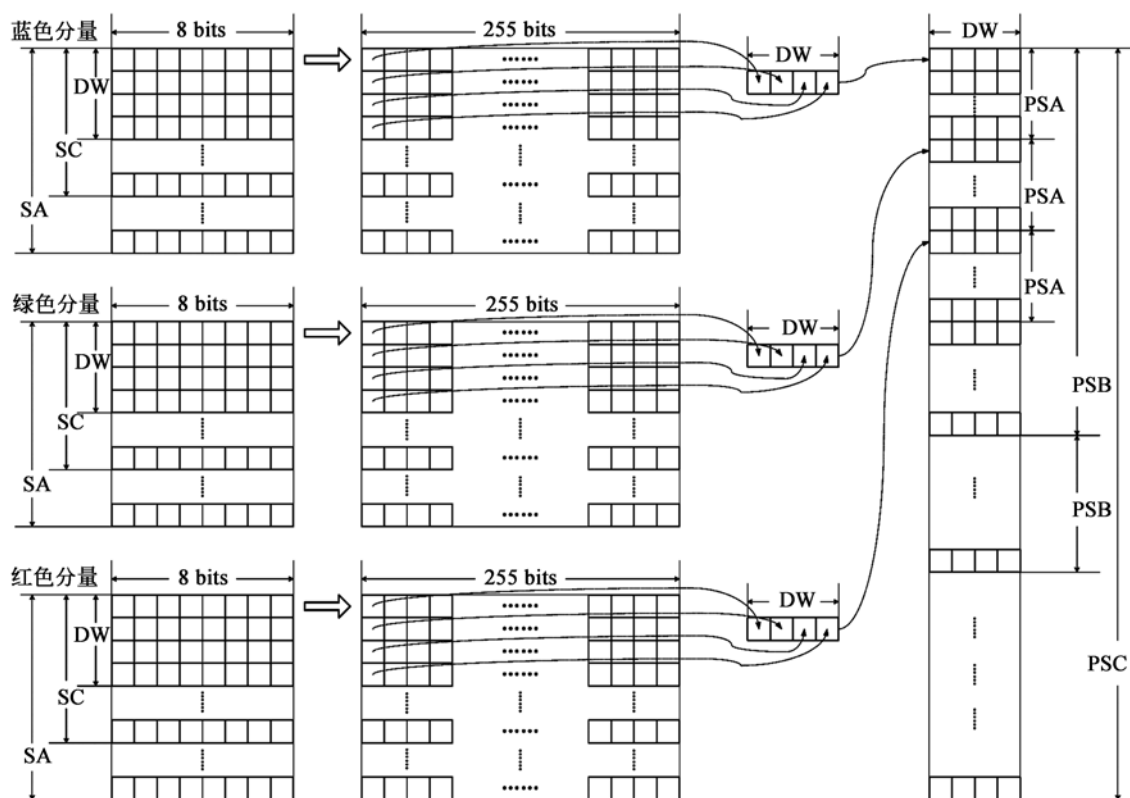


图 3 数据的 PWM 序列展开及重组示意图

Fig. 3 Illustration of data PWM expansion and reorganization

图 3 中各个参数的含义分别为:SC 表示 LED 阵列中每一行的 LED 个数,即阵列的列数;SA 为阵列中单色 LED 的个数,即像素行数乘以像素列数;DW 表示扫描时的数据宽度,即重组时每 DW 位作为一组;PSA 表示每一行生成的数据单元个数,它等于 SC/DW ;PSB 表示每一位生成的数据个数,它等于 $3 \times SA/DW$;PSC 表示全部数据个数,它等于 $255 \times PSB$ 。

数据重组依照序列串位次序进行,以扫描数据宽度 DW 为基本单位,DW 也等于双端 RAM 的数据宽度。在每一位数据重组时,按照行的次序进行重组,且三色 LED 交织进行;首先对蓝色分量的第一行进行重组,其次是绿色分量的第一行,然后是红色分量的第一行,之后转入蓝色分量的第二行,依次类推;在每一行重组时,依次把

DW 位组成一个数据单元后连续存放;待全部重组完成后,把得到的数据写入双端 RAM,并从起始位置开始存储。完成一次扫描数据生成后,等待下一帧数据的到来。

4 显示驱动模块

显示驱动模块是 LED 显示屏的主体,它由 LED 阵列和扫描控制器组成,并通过扫描控制器对 LED 阵列的周期循环扫描实现图像/视频显示。

4.1 LED 阵列结构与原理

LED 阵列中的红绿蓝三色 LED 采用如图 4 (a)所示倒“品”字型结构;电路连接如图 4(b)所示,其中,每一像素行被当作独立且连续的 3 行

LED; LED 单元有两种实现方式,如图 4(c)所示。LED 阵列通过地址总线 and 数据总线接收扫描控制器的输入,其中,高位地址总线经过地址译码器生成阵列的行地址信号,低位地址总线接入多路分解器的选通信号,并生成(分组)列译码地址信号,行地址信号与列地址信号两两经过与门后用于 LED 单元组的选通,接入相应组 D 触发器的

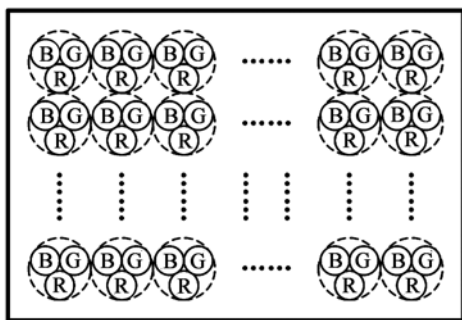
时钟输入端;数据总线输入经过多路分解器后生成相应列(组)单元的数据输出,每一列输出接入该列 LED 单元 D 触发器的数据输入端。由于使用 D 触发器控制 LED 通断,每组 LED 在下次扫描到来之前保持状态稳定,消除了传统扫描法常见的闪烁问题。

实际上,该面板阵列中 D 触发器构成一个数据宽度为 DW 的存储器,它只有数据写入功能而没有数据读出功能。因此,向存储器写入数据就可以操纵相应单元 LED 的通断状态,按照一定规则进行周期扫描就可以仿真实现 PWM 亮度控制功能。

4.2 扫描控制器工作原理

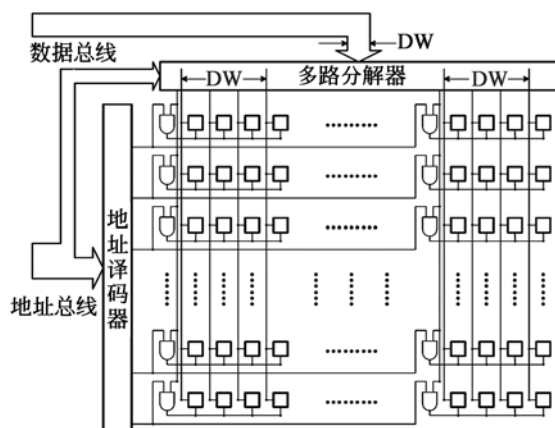
根据 LED 的 PWM 亮度控制原理,以一定占空比的方波控制 LED 的通断就可以产生人眼视觉上某个亮度。在本方案中,按照时间间隔要求周期性地把 PWM 二进制序列串值写入 LED 单元 D 触发器,就可以实现对该 LED 的 PWM 亮度控制;对于整个 LED 阵列,只要能够在一个时间间隔内把所有 D 触发器扫描一遍,并且周期性扫描就可以实现对整个 LED 显示屏的 PWM 亮度控制。在 3.2 小节已经按照 LED 阵列工作方式生成了逐行扫描数据。

扫描控制器的基本操作是从双端 RAM 读取数据,并写入 LED 阵列对应单元 D 触发器,其工作流程图如图 5 所示。使用两个计数器 C0 和 C1 分别用于生成读取地址和写入地址;由于从双端 RAM 起始位置开始读取,C0 的初始值为 0;把 C0 值作为地址向双端 RAM 读取数据,并把读得的数据连同 C1 值分别写入 LED 阵列的数据总线和地址总线接口;完成一次基本操作后等待下一次扫描时刻的到来,时刻到来则 C0 和 C1 计数一次,判断 C0 值是否到达上限(即扫描数据的最大存储地址),如是则回到起始状态,否则 C0 值仍有效,继续判断 C1 值是否到达上限(即 LED 阵列最后单元组的地址),如是则清零,否则 C1 值仍有效,之后根据 C0 和 C1 值进行下一次基本操作。通过这种周期循环扫描就可以实现 LED 阵列的 PWM 亮度控制及显示,若双端 RAM 中数据不更新则显示静态画面,若双端 RAM 中数据随着视频输入实时更新则 LED 阵列显示动态画面。



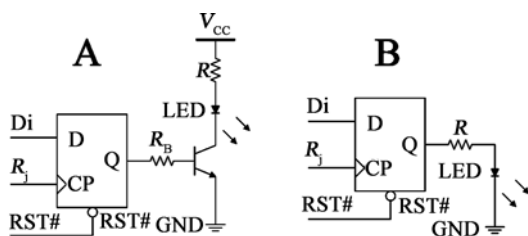
(a) LED 阵列结构示意图

(a) Arrangement of the LED array



(b) LED 阵列电路连接示意图

(b) Electronic diagram of the LED array



(c) LED 单元结构

(c) Electronic diagram of the LED cell

图4 LED阵列组成示意图

Fig. 4 Illustrations of the LED array

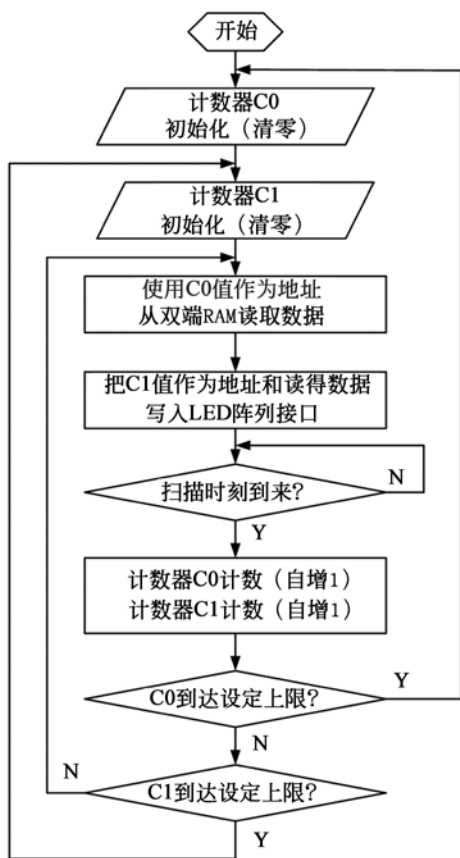


图 5 显示驱动模块工作流程图

Fig. 5 Flowchart of the display module

5 扫描控制器设计

如前所述,数据处理模块和显示驱动模块通过双端 RAM 进行数据传递,即前者向双端 RAM 写入扫描数据,而后者从双端 RAM 中读取数据。由于双端 RAM 的两个端口彼此独立,当两个端口同时向同一存储单元操作时,可能引起访问数据的冲突(Collision)问题。为保障数据安全可靠,双端 RAM 芯片一般都集成了冲突仲裁逻辑单元,其中,常用的防冲突机制包括中断方式、Busy 信号以及信号量(Semaphore)等^[13]。

本方案中两个模块之间是单向数据传递,且数据处理模块向双端 RAM 高速集中地写入,而显示驱动模块从双端 RAM 中周期读取,因此,可能出现的访问冲突情形比较简单,Busy 信号方式适合本系统。此外,扫描控制器的工作特点使得其更适合于 CPLD 硬件实现。

5.1 地址计数器设计

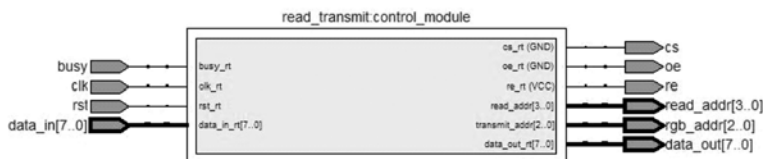
扫描控制器从双端 RAM 读入数据,并把读得的数据写入 LED 阵列的对应单元,即需要产生正确的地址信号。由于扫描控制器周期循环地工作,地址信号发生器使用两个循环计数器实现。

系统使用 Busy 信号防冲突机制,当 Busy 信号有效时扫描控制器暂停工作,即地址计数器需要暂停计数,因此,在计数器设计中添加了使能信号控制。而且,为实现自动循环计数,在计数器设计中添加了异步复位功能。

5.2 扫描控制器设计

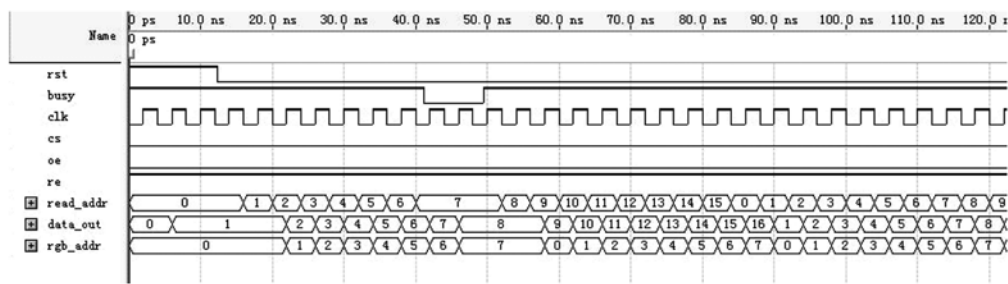
根据扫描控制器工作原理,进行扫描控制器的设计,代码综合后得到如图 6(a)所示模块。其中,信号 busy、clk、cs、oe、re、read_addr、data_in 属于双端 RAM 接口信号,rgb_addr 和 data_out 属于 LED 阵列接口信号,信号 rst 用于上电后地址计数器复位,确保两个地址计数器起始一致。

功能仿真结果如图 6(b)所示。由于扫描控制器仅从双端 RAM 中读取数据,为简单起见,仿真时使用一个 ROM 来代替双端 RAM,并通过调用 Quartus II 参数化模块库(LPM)中的 ROM 模块实现。仿真中设定 ROM 大小为 16 个单元,数据宽度为 8,并依次存储 1~16 的整型数据。此外,对地址信号 rgb_addr 做了延时处理使得与读出数据保持时间同步。从图中可以看出,当复位信号 rst 保持有效时(设计中使用高电平有效),地址信号 read_addr 和 rgb_addr 复位为 0 并保持不变,保证了两个地址计数器起始一致;复位信号 rst 失效后,扫描控制器开始正常工作,依次读取数据并传递给 data_out 接口;图中也仿真了冲突时



(a) 扫描控制器 RTL 图

(a)RTL diagram of the scan controller



(b)扫描控制器仿真结果

(b)Simulation results of the scan controller

图6 扫描控制器的RTL图与仿真结果

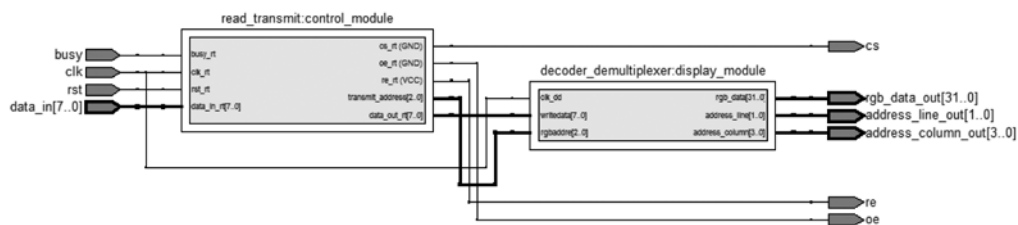
Fig.6 RTL diagram and simulation results of the scan controller

的情形,当 busy 有效时(低电平有效),计数器停止计数,接口信号保持不变;仿真中 PWM 序列每一位生成 8 个数据,当地址 rgb_addr 达到 7 时自动复位,回到 LED 阵列的起始位置;仿真中 PWM 序列生成 16 个数据,当地址 read_addr 达到 15 时自动复位,回到双端 RAM 的起始位置,实现了不间断循环读取。

5.3 显示驱动模块设计

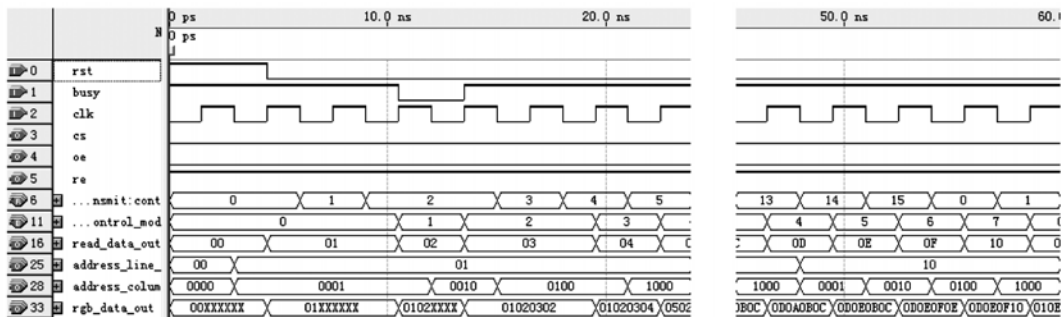
进一步设计 LED 阵列外围控制电路,并与扫描

控制器一起构成较为完整的显示驱动模块,得到如图 7(a)所示模块。在 LED 外围控制电路中,data_in 和 rgbaddr_in 分别为输入接口的数据信号和地址信号,address_line_out 和 address_column_out 分别为 LED 阵列的行译码输出和分组列译码输出,rgb_data_out 为输入数据 data_in 经过多路分解器的输出,其宽度等于 LED 阵列的列数。尽管每一像素行等价于 3 个 LED 行,从扫描角度看它们并没有区别;仿真中假定行译码 address_line_out 宽度为 2,即 LED 阵



(a)显示驱动模块 RTL 图

(a)RTL diagram of the display module



(b)显示驱动模块仿真结果

(b)Simulation results of the display module

图7 显示驱动模块的RTL图与仿真结果

Fig.7 RTL diagram and simulation results of the display module

列为 32 列 2 行;仿真中输入数据 data_in 宽度等于 8,即扫描时以 8 位进行分组,所以,列译码 address_column_out 宽度为 4,即每一行被分为 4 组。

功能仿真结果如图 7(b)所示。根据 LED 阵列电路设计, address_line_out 与 address_column_out 两两经过与门生成组选通信号,然后接入相应组 D 触发器的时钟信号端。因此,仅当行译码与列译码同时选通时,组选通信号才会产生一个从‘0’到‘1’的上升沿跳变,从而触发该组 D 触发器的数据选通,而其他组 D 触发器保持不变。从仿真图中可以看出,扫描控制器周期循环地从双端 RAM 读取数据并传递给 LED 阵列,在行译码与列译码的共同作用下选通对应 D 触发器,满足预期设计功能。

6 系统特点

该系统的基本原理是利用 D 触发器的状态保持功能,并结合扫描及信息更新来生成每个 LED 的 PWM 驱动波形,即用传统动态扫描方式实现了传统静态驱动方案中由 PWM 芯片完成的功能。如前所述,由于显示屏中 LED 数以万计,且每一个 LED 都需要独立的 PWM 亮度控制,因此,与传统静态驱动方案相比,本方案用模拟方式代替大量的 PWM 芯片,系统功耗及成本大为降低,更加绿色环保。另一方面,该方案不同于传统动态扫描中的分时导通方式,因此,它不存在传统动态扫描方案中的闪烁及亮度损失问题。

在传统硬件 PWM 驱动方案中,由于所有 PWM 芯片及 LED 单元并行工作,存在绝大多数 LED 同时导通或关闭的可能,即 LED 阵列工作状态可能出现整体性快速变化,从而产生浪涌电流(Inrush Current)现象^[12],引起电源完整性及电磁干扰等方面的严重问题。本方案采用逐组扫描方式,无论起始阶段还是正常工作中,阵列中

LED 状态是逐组变化,因此,它的电源波动较慢,易实现电压稳定,从而保证 LED 阵列的电流平衡及色度稳定。这是扫描方式带来的一个优点。

此外,该系统中的数据处理与显示功能分离,而且,把更多的工作转移到前端数据处理模块中,用软件方式完成相应处理。这样,软件处理的灵活性便于功能扩展及算法更新。

7 参数分析

假定输入每秒 25 帧的视频信号,每帧图像尺寸为 800×600 像素,采用 8 bit 量化,则每秒的输入数据量为: $800 \times 600 \times 3 \times 25 = 36\,000\,000$ 字节,完成 PWM 序列化后的数据量为: $36\,000\,000 \times 255 = 9\,180\,000\,000$ 位;假定扫描控制器按照 64 位数据宽度进行扫描,则所需工作频率为 $9\,180\,000\,000 / 64 = 143\,437\,500$ Hz,即大约 150 MHz 的时钟就可以满足扫描要求。我们注意到,该频率为双端 RAM 到 LED 外围控制电路的时钟速率,可以在电路板上实现,而每组 LED 的刷新频率仅为 $255 \times 25 = 6\,375$ Hz,即 LED 外围控制器到 LED 单元之间线路的工作频率不高,对时序及布线要求不高。假如使用传统 LED 显示屏中的模组概念,用较小尺寸显示屏作为基本单元,则对器件及线路指标要求大为降低,也更容易实现。

8 结 论

提出一种基于模拟 PWM 功能的全彩色 LED 显示屏方案,其基本特点是采用 D 触发器进行信息存储与 LED 通断控制,并用扫描方式实现 PWM 亮度控制功能。本文详细分析了其工作原理,对扫描控制器进行了分析与设计,分析比较了系统特点,并对系统参数及可行性进行了分析。

参 考 文 献:

- [1] 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)

- [2] 赵梓权,王瑞光,郑喜凤,等.基于视觉感受的LED显示屏系统精度分析[J].液晶与显示,2012,27(3):324-331.
Zhao Z Q, Wang R G, Zheng X F, *et al.* Systemic accuracy analysis of LED displays based on visual perception [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(3): 324-331. (in Chinese)
- [3] 刘祖隆,郭震宁,胡志伟,等.调光方式对LED色温和光通量的影响[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,34(1):14-17.
Liu Z L, Guo Z N, Hu Z W, *et al.* Effect of dimming on LED color temperature and luminous flux [J]. *Journal of Huaqiao University: Natural Science*, 2013, 34(1): 14-17. (in Chinese)
- [4] 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(7):5-9.
Li X L. A lecture on the technology of color and brightness correction of pixel of LED display screen [J]. *Advanced Display*, 2011(7): 5-9. (in Chinese)
- [5] 张俏梅.LED显示屏色度校正原理与应用[J].现代显示,2012(9):270-273.
Zhang Q M. The principle and application of LED display chroma correction [J]. *Advanced Display*, 2012(9): 270-273. (in Chinese)
- [6] 赵梓权,王瑞光,郑喜凤,等.LED显示屏的色域校正[J].液晶与显示,2013,28(1):92-98.
Zhao Z Q, Wang R G, Zheng X F, *et al.* Color gamut correction of LED displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 92-98. (in Chinese)
- [7] 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 Z J, Guo S W. Method of gray value correction in LED display screen based on LED electroluminescence response [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, 31(1): 145-149. (in Chinese)
- [8] 阮海蓉,夏贵勇.基于照相的LED显示屏亮度校正方法[J].液晶与显示,2012,27(2):193-197.
Ruan H R, Xia G Y. Brightness correction method of LED display based on photographing [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2): 193-197. (in Chinese)
- [9] 宋超,王瑞光,冯英翘.LED大屏幕显示校正系数配置系统[J].液晶与显示,2013,28(3):392-397.
Song C, Wang R G, Feng Y Q. Display calibration coefficient configuration system used in LED panel [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 392-397. (in Chinese)
- [10] Day M. TLC5940 PWM dimming provides superior color quality in LED video displays [J]. *Analog Applications Journal*, 2006: 10-13.
- [11] 李军,吴高英.彩色LED显示屏的 γ 校正[J].现代显示,2000(3):46-49.
Li J, Wu G Y. The γ correction of full color LED [J]. *Advanced Display*, 2000(3): 46-49. (in Chinese)
- [12] Ahn J H. Implementation of an LED tile controller for high-quality image display [J]. *Displays*, 2013, 34(1): 17-26.
- [13] 陈德明,熊列彬.双口RAM在自动化系统中的应用[J].国外电子元器件,2005(4):20-23.
Chen D M, Xiong L B. Application of dual RAM in automation system [J]. *International Electronic Elements*, 2005(4): 20-23. (in Chinese)

作者简介:李相国(1976—),男,河南林州人,博士,讲师,主要从事信号处理与图像处理方面的研究。E-mail:lxg@live.com