

## 单 DMD 彩色视频显示系统的颜色控制

徐正平, 沈宏海, 黄厚田, 姚 园, 孙 超, 许永森

(中国科学院航空光学成像与测量重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,  
吉林 长春 130033)

**摘 要:** 对单 DMD 彩色视频显示系统中的颜色控制方法及其实现进行了深入研究。在简要分析三种 DMD 投影系统及空间灰度调制法、时间灰度调制法优缺点的基础上,提出了一种单 DMD 彩色视频显示系统方案,并着重分析了基于脉冲选通灰度调制的颜色控制方法:将帧周期均分为 R、G、B 时间段,并将各时间段等比例划分为各个位时间段,依据相应颜色分量灰度值控制 DMD 微镜的状态。由于 DMD 接收的是视频图像各像素的位平面数据,对图像灰度值到平面数据的格式转换进行了详细分析。最后,依据 DMD 工作特点,给出了 DMD 操作控制时序。整个方案切实可行,可为系统实现提供理论依据。

**关键词:** 颜色控制; 数字微镜器件; 彩色视频显示

**中图分类号:** N141 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1848-05

## Color control of video displaying system based on single DMD

Xu Zhengping, Shen Honghai, Huang Houtian, Yao Yuan, Sun Chao, Xu Yongsen

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The color controlling method and its realization of single DMD colorized video displaying system were studied in detail. Based on analyzing the advantages and shortcomings of three types of DMD projection system, spatial gray-level modulation and temporal gray-level modulation, one single DMD colorized video displaying system was proposed. The color controlling method based on pulse selection gray-level modulation was analyzed deeply. In this method, the frame-period was evenly divided into R, G, B section, and each of the R, G, B sections was divided proportionally to be some bit-time sections. In every bit-time section, the status of micromirror in DMD was controlled according to the bit value of corresponding pixel gray-level. Considering that the data sent to DMD was the bit-plane data of video pixels, the format conversion from image gray-value to bit-plane data was analyzed in detail. At last, considering the feature of DMD, the operating scheduling was given. The whole scheme is doable. The analysis could provide academic basis for the realization of the system.

**Key words:** color control; digital micromirror device; colorized video displaying

收稿日期: 2012-11-16; 修订日期: 2012-12-18

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项资助(201204515); 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放基金(Y2HC1SR12B)

作者简介: 徐正平(1983-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事航空遥感器电子学设计方面的研究。Email: xuzp090@163.com

## 0 引言

DMD 广泛应用于可见、红外模拟器及视频显示等领域<sup>[1-4]</sup>。相比于阴极射线管(CRT)投影技术和液晶显示(LCD)技术,DMD 投影显示系统存在诸如高像素填充因子与均匀性、高光学效率、高分辨率与高亮度、全数字化控制及高稳定性和长使用寿命等优点。DMD 彩色视频显示系统可分为单 DMD 投影系统、双 DMD 投影系统及三 DMD 投影系统<sup>[5-7]</sup>。单 DMD 投影系统成本低廉,但光能使用率低;三 DMD 投影系统采用三个 DMD 分别对应三原色,提高了光能利用率,但结构复杂度高;双 DMD 投影系统则是融合了单 DMD 投影系统顺序彩色轮及三 DMD 投影系统双色分光棱镜的概念,能够产生逼真的颜色,提高光学效率。在实际系统设计时,应综合考虑成本、光学效率、能耗、体积及质量等因素,选择合适的方案。

在 DMD 彩色视频显示系统中,视频的颜色控制至关重要。视频颜色控制建立在图像灰度调制的基础上。图像灰度调制可分为空间灰度调制法和时间灰度调制法<sup>[8]</sup>。空间灰度调制法是将显示像素分为若干个单独可控的子像素,通过对子像素控制实现灰度调制。若保持显示像素分辨率不变,需将显示像素划分成更小的子像素,实现工艺难度大;若保持子像素尺寸不变,随着显示灰度级的增大,显示像素分辨率随之下降。空间灰度调制法虽然简单,但不能实现较高的灰度级。时间灰度调制法则是将每帧分为若干个帧,分别控制各像素在各个子帧中的点亮与关闭。时间灰度调制法可实现较高灰度级,但时序控制复杂。

文中提出了一种单 DMD 彩色视频显示方案。在简要介绍 DMD 芯片的基础上,着重分析了单 DMD 彩色视频显示的颜色控制及其实现。

## 1 DMD 简介

DMD<sup>[9-10]</sup>内部包含一个二维微镜阵列,每一个微镜对应一个 CMOS 存储单元。微镜的状态有三种: $0^\circ$ 、 $+12^\circ$ 、 $-12^\circ$ 。置位微镜平置信号可将所有微镜状态置于 $0^\circ$ 。在正常工作状态下,微镜的状态与其所对应的 CMOS 存储单元值有关:当存储单元为 1

或 0 时,施加有效的微镜置位信号后,对应微镜位置将为 $+12^\circ$ 或 $-12^\circ$ 。通过 DMD 控制器的数字微镜接口可向 DMD 发送图像数据。微镜状态完成转变所需时间与所选择的模式无关,均为  $4.5 \mu\text{s}$ 。在微镜置位操作完成后  $8 \mu\text{s}$  时间内,不应改变对应 CMOS 存储单元数值,以使微镜可靠置位。

XGA DMD 微镜阵列大小为 1024(列) $\times$ 768(行),其数据时钟 CLK\_A/B 为双速率时钟,在时钟的上升沿和下降沿向 DMD CMOS 存储单元写入数据 D\_A(15:0)和 D\_B(15:0)。在向 DMD 写入数据时是以行为单位。数据线宽为 32 位,写入一行需 16 个时钟周期。在对 DMD 进行写操作时,行地址由行模式信号 ROWMD(1:0)、行地址信号 ROWAD(10:0)和行方向控制信号 NS\_FLIP 控制。系统选用行地址递增计数模式,即每次将行地址指针加 1 后将当前数据写入指针所在行,此时需设置 ROWMD(1:0)=1、ROWAD(10:0)=0 及 NS\_FLIP=0。行地址计数到最大时并不自动清零,须由程序清零,即设置 ROWMD(1:0)=3、ROWAD(10:0)=0 及 NS\_FLIP=0。

DMD 的置位操作由块模式信号 BLKMD(1:0)和块地址信号 BLKAD(3:0)控制,在正常向 DMD 进行写操作时,需设置 BLKMD(1:0)=0、BLKAD(3:0)为任意值。在 DMD 整个 CMOS 存储单元更新完毕,希望微镜依照各自 CMOS 单元的数值进行翻转时,可设置 BLKMD(1:0)=3、BLKAD(3:0)=8。置位操作的状态由 RST\_Active 信号指示:高电平指示置位操作正在进行;低电平指示置位操作已完成。在向 DMD 发送置位指令后,需不断向 DMD 发送空操作指令(ROWMD(1:0)=0、ROWAD(10:0)=0、BLKMD(1:0)=0、BLKAD(3:0)=0),只有这样,在置位操作完成后,RST\_Active 信号才会拉低。

DMD 写操作和置位操作均受 DValid\_A/B 信号控制:当 DValid\_A/B 信号为高时,依据控制信息进行写操作或置位操作;当 DValid\_A/B 信号为低时,DMD 控制器将不再向 DMD 发送数据。需要说明的是,CLK\_A/B、D\_A(15:0)、D\_B(15:0)、DValid\_A/B 均为差分信号。

## 2 单 DMD 彩色视频显示方案

以 R、G、B 灰度级为 3 位 8 级为例,给出单 DMD 彩色视频显示系统方案,原理框图如图 1 所示。

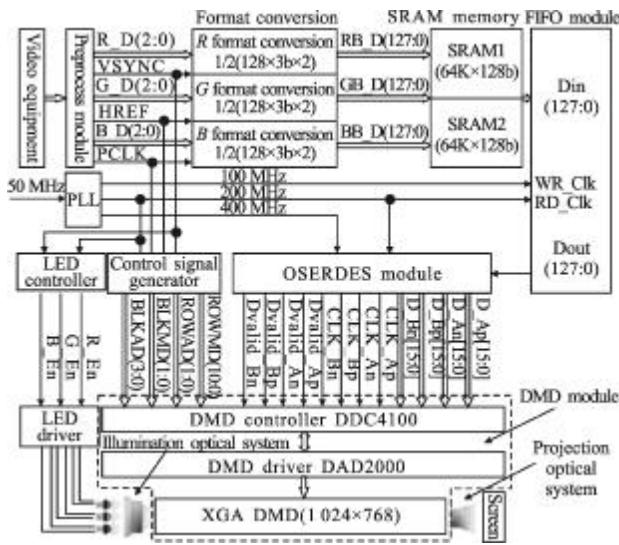


图 1 单 DMD 彩色视频显示系统原理框图

Fig.1 Principle diagram of single DMD colored video displaying system

模块输出的视频数据信息需通过格式转换器,将视频各像素的灰度值转换为 DMD 控制所需的位平面数据。格式转换器输出的位平面数据存储在 SRAM 存储器中,之后通过 FIFO 模块和 OSERDES 模块送入 DMD 控制器。对 DMD 操作所需的控制信息由 DMD 控制信号发生器产生。由于系统采用基于脉冲选通灰度调制的颜色控制方法,需在一个帧周期内循环依次点亮 R、G、B LED 灯,所需信号由 LED 控制器给出。颜色控制是彩色视频显示系统的关键技术之一,以下将对单 DMD 彩色视频显示系统中的颜色控制方法及其实现进行详细介绍。

### 3 颜色控制原理

假定 R、G、B 三种颜色的灰度级均为 3 位 8 级,视频帧频为 50 Hz,彩色图像各像素三基色灰度控制选用基于脉冲选通法的灰度控制,其颜色控制原理如图 2 所示。

该方法将一个帧周期(20ms)均分为三个时间段,每个时间段对应时间为 6.66 ms。如图 2 中“R\_En”、“G\_En”、“B\_En”所示,当信号为高或低电平时,相应灯点亮或关闭。在一个帧周期内,每个灯点亮的时间均为 6.66 ms,且在任一时刻,只有一盏灯点亮。在 R、G、B 灯所对应的时间段内,依据对应的彩色像素点中 R、G、B 颜色分量的灰度值控制 DMD 中微反

射镜打开的时间。注意,6.66 ms 对应某一颜色的最大灰度值。

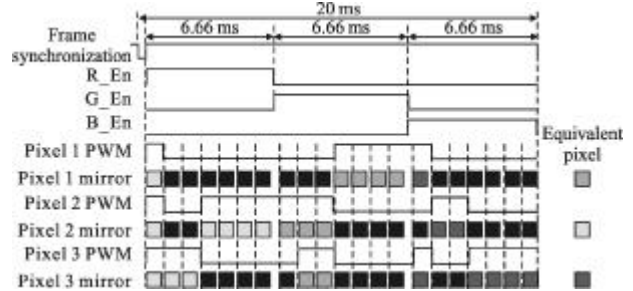


图 2 颜色控制原理图

Fig.2 Principle diagram of color controlling

图 2 中假定某一帧图像某三个彩色像元灰度值为 (R:1,G:4,B:1)、(R:5,G:3,B:2)、(R:3,G:2,B:5),则在 R、G、B 灯所对应的时间段内,DMD 微反射镜处于开态的时间分别为 (R:1/7,G:4/7,B:1/7)×6.66 ms、(R:5/7,G:3/7,B:2/7)×6.66 ms、(R:3/7,G:2/7,B:5/7)×6.66 ms,如图 2 中“Pixel 1 PWM”、“Pixel 2 PWM”、“Pixel 3 PWM”信号所示。为控制彩色图像各颜色分量的灰度值,将各灯点亮时间段又均分为 7 段,每段时间内各微镜的状态受相应颜色分量灰度值控制。最终在人眼看来,像元 1、2、3 分别呈现不同的颜色。

### 4 图像数据格式转换原理

图像数据格式转换原理图如图 3 所示。

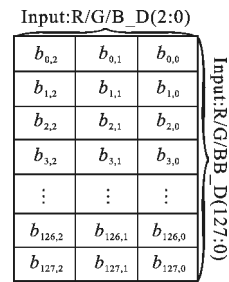


图 3 图像数据格式转换原理图

Fig.3 Principle diagram of image data formation conversion

如前所述,DMD 所接收的是图像信息的位平面数据,即 DMD 在某一时刻反映的是图像某一帧各像素某一颜色分量同一位的灰度值,需将各像素对应位的灰度值存储在 SRAM 中,以便后续 DMD 控制器读取并向 DMD CMOS 存储单元发送。由于外部视频数据是将各像素值依次输入,而格式转换需接收到一定数量的像素灰度值才能进行。由于 DMD

数据总线是 32 位，系统采用 Xilinx Virtex-5 中的 OSERDES 4 位并转串模块将图像信号转换成差分信号，因此，每次向 OSERDES 写入的数据宽度为 128 位，相应地，格式转换器在连续接收到 128 个像素灰度值后才开始转换，即输入信号是 128 个像素 3 位灰度值，输出是 3 个 128 位位平面信号。

由于视频预处理模块并行输出 R、G、B 分量的灰度值信号，因此，每个分量分别对应自己的格式转换器。由于格式转换器转换结果需存入 SRAM，需要一定时间，而此时外部视频灰度值依然连续不断地输入。因此，系统为每个颜色分量分配两个格式转换器进行乒乓操作，如图 1 所示。同样采用乒乓操作的还有 SRAM：外部视频依次输出的是各像素灰度值，只有在一帧周期结束时，才能够完全得到一帧图像各像素灰度值；而每次向 DMD 写入的是一帧图像各像素的位平面数据，而该位平面数据是在一帧图像全部像素灰度值的基础上得到的。一帧图像位平面数据所需存储空间为  $1024 \times 768 \times 3 \times 3 \text{b} = 54 \text{K} \times 128 \text{b}$ ，系统选用大小为  $64 \text{K} \times 128 \text{b}$  的 SRAM 存储器。

### 5 颜色控制实现

基于上述颜色控制原理，颜色控制实现的关键是生成位时序序列及对 DMD 操作时序的控制。位时序发生器时序图如图 4 所示。

图 4 以视频帧频 50Hz，各颜色灰度级 3 位 8 级为例进行说明。如前所述，为了实现颜色控制，将一个帧周期(20ms)均分为 R、G、B 时间段，每个时间段又等比例分为三个小的时间段： $t_{b0}(951 \mu\text{s})$ 、 $t_{b1}(1903 \mu\text{s})$ 、 $t_{b2}(3806 \mu\text{s})$ ，三个小的时间段被称为位时间(Bit\_Sec)。当图像各像素颜色分量灰度值某一位为 1 时，该位对

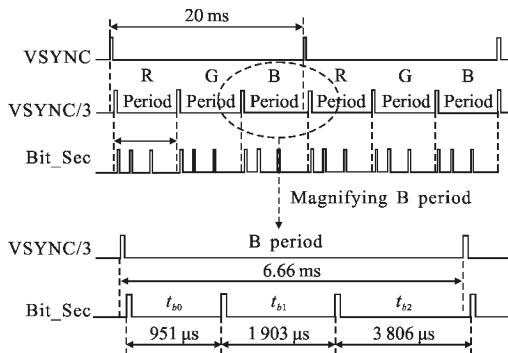


图 4 位序列发生器时序图

Fig.4 Operating scheduling of bit sequence generator

应位时间段内其对应的 DMD 微镜元处于开态(+12°)，否则处于关闭状态(-12°)。如图 4 所示，如果相邻两个像素蓝色分量灰度值分别为 010b、101b，则像素 1 对应的 DMD 微镜元在  $t_{b1}$  位时间段处于开态，而像素 2 对应的 DMD 微镜元在  $t_{b0}$ 、 $t_{b2}$  位时间段处于开态。

在位时序序列的基础上，需在每个位时间开始段，将其对应的各像素灰度值相应位数据写入 DMD 的 CMOS 存储单元，并在完成整个 CMOS 存储单元加载后，向 DMD 发送微镜置位命令。DMD 控制器时序图如图 5 所示。

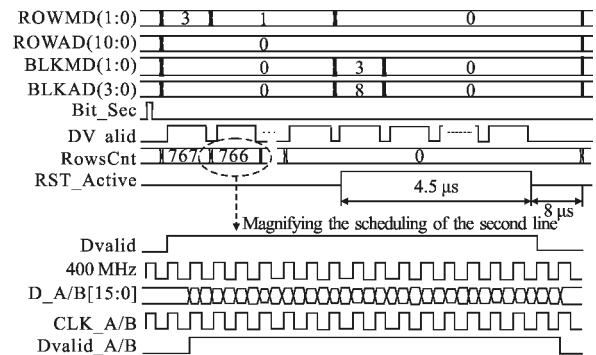


图 5 DMD 控制器时序图

Fig.5 Operating scheduling of DMD controller

从图 5 可以看出，在每个位时间开始段，首先向 DMD 的 CMOS 存储单元加载数据，共计 768 行。如前所述，行寻址模式采用递增计数模式 (ROWMD(1:0)=1、ROWAD(10:0)=0、NS\_FLIP=0)，但在写第一行时，需将行指针复位为 0 (ROWMD(1:0)=3、ROWAD(10:0)=0、NS\_FLIP=0)。在向 DMD 的 CMOS 存储单元加载数据时，设 BLKMD(1:0)=0、BLKAD(3:0)=0，数据加载完成后设置 BLKMD(1:0)=3、BLKAD(3:0)=8 启动置位操作。此时，置位信号 RST\_Active 信号变高指示置位操作正在进行。在此期间，不断向 DMD 发送空操作指令 (ROWMD(1:0)=0、ROWAD(10:0)=0、BLKMD(1:0)=0、BLKAD(3:0)=0)，在置位操作完成后，RST\_Active 信号拉低，供控制器读取。在完成置位操作 8  $\mu\text{s}$  时间内，不应向 DMD 发送新的数据与指令，以使微镜可靠置位。

### 6 结论

给出了一种单 DMD 彩色视频显示系统设计方

案,着重分析了颜色控制方法,提出了基于脉冲选通灰度调制的颜色控制方法:将帧周期均分为 R、G、B 时间段,并将各时间段等比例划分为位时间,在各个位时间段内,依据相应颜色分量灰度值控制 DMD 微镜状态。针对 DMD 工作特点,对图像灰度值到位平面数据的格式转换进行了详细说明,同时给出了 DMD 操作控制时序。提出的单 DMD 彩色视频显示系统设计方案切实可行,可为系统实现提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] Chen Erzhu, Liang Pingzhi. DMD dynamic infrared scene projection technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(4): 331-334. (in Chinese)  
陈二柱, 梁平治. 数字微镜器件动态红外景象投影技术[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(4): 331-334.
- [2] Kang Weimin, Li Yanbin, Gao Weizhi. Dynamic IR scene projector using a digital micro mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 753-756. (in Chinese)  
康为民, 李延彬, 高伟志. 数字微镜阵列红外动态景象模拟器的研制[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 753-756.
- [3] Easley D B, Bender M, Crosby J, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD[C]//SPIE, 2009, 7210: 721001/1-721001/2.
- [4] Guang Yingzi, Yang Liang. Digital micromirror array device dynamic infrared scene projection optical system design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 245-248. (in Chinese)  
关英姿, 杨亮. 数字微镜阵列动态红外景象投射器光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 245-248.
- [5] Chen Jianhua, Zhu Ming, Huang Detian. Dynamic infrared scene projection technology based upon digital micromirror device [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(4): 325-336. (in Chinese)  
陈建华, 朱明, 黄德天. 数字微镜器件动态红外外场景投影技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(4): 325-336.
- [6] Dudley D, Duncan W, Slaughter J. Emerging digital micromirror device(DMD) applications[C]//SPIE, 2003, 4985: 14-25.
- [7] Hornbeck L J. A digital light processing update: status and future applications[C]//SPIE, 1999, 3634: 158-170.
- [8] Liu Wan'er. Grayscale modulation with DMD in dynamic scene simulation system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)  
刘莞尔. 红外动态图像仿真系统中 DMD 芯片的灰度调制技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [9] Zou Jingxian, Wu Rongzhi. Digital micromirror device [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2003, 18(6): 445-449. (in Chinese)  
邹静娴, 吴荣治. 数字微镜器件 (DMD)[J]. *液晶与显示*, 2003, 18(6): 445-449.
- [10] Texas Instruments Corporation. DLP Discovery™ 4100 digital controller (DCC4100)[R]. America: Texas Instruments Corporation, 2009.