

引用格式: CHEN Zhe-liang, LIN Shan-ling, LIN Zhi-xian, *et al.* Design of Video Display Driving System for Low-power Electrowetting Display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(2): 0222002

陈哲亮, 林珊玲, 林志贤, 等. 低功耗电润湿显示器视频显示驱动系统设计[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0222002

低功耗电润湿显示器视频显示驱动系统设计

陈哲亮^{1,2}, 林珊玲^{1,2}, 林志贤^{1,2}, 廖钦楷^{1,2}, 李甜甜^{1,2}, 唐彪³

(1 福州大学 平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福州 350116)

(2 福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350116)

(3 华南师范大学 广东省光信息材料与技术重点实验室 华南先进光电子研究所, 广州 510006)

摘 要: 针对电润湿显示器在播放视频时功耗较大的问题, 设计了一套基于人眼视觉特性的低功耗视频显示驱动系统。该系统采用直方图修正与直方图匹配的方法, 结合人眼视觉特性设定阈值, 减少显示图像中高亮像素的数量从而降低系统功耗; 同时提出一种低功耗多灰度驱动波形, 结合电润湿显示器的光电特性, 在实现灰度精准调制的同时进一步降低系统的功耗。实验结果表明: 该系统改善了油墨分裂、油墨回流等问题, 成功驱动了 $1\ 024 \times 768$ 分辨率的电润湿显示器且视频显示效果良好, 像素的最高灰度等级达到 16 阶, 在测量同一段视频时, 平均功率降低至 1.75 W, 功耗减少约 20%。

关键词: 电润湿; 现场可编程门阵列; 低功耗; 视觉特性; 驱动波形

中图分类号: TN27

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204902.0222002

Design of Video Display Driving System for Low-power Electrowetting Display

CHEN Zhe-liang^{1,2}, LIN Shan-ling^{1,2}, LIN Zhi-xian^{1,2}, LIAO Qin-kai^{1,2}, LI Tian-tian^{1,2}, TANG Biao³

(1 Institute of Optoelectronic Display, National & Local United Engineering Lab of Flat Panel Display Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

(2 College of Physics and Telecommunication Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

(3 Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Information Materials and Technology, South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the problem of high power consumption of electrowetting display during playing video, a low-power video display driving system based on human visual characteristics was designed. Adopting histogram correction and histogram matching, the system set a threshold value in combination with human visual characteristics to reduce the number of high-brightness pixels in the image, thereby reducing system power consumption. At the same time, a low-power multi-grayscales driving waveform was proposed, which combines the photoelectric characteristics of the electrowetting display to further reduce the power consumption of the system while achieving accurate gray-scale modulation. The experimental results show that the system improves the problems of oil-splitting and oil reflow, drives the $1\ 024 \times 768$ resolution electrowetting display successfully and the display effect is good. Besides, the highest gray level of the pixel reaches 16. When measuring the same video, the average power is reduced to 1.75 W and the power consumption is reduced by about 20%.

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2016YFB0401503), 广东省科技重大专项 (No. 2016B090906001), 福建省科技重大专项 (No. 2014HZ0003-1), 广东省光信息材料与技术重点实验室开放基金 (No. 2017B030301007)

第一作者: 陈哲亮 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电子纸显示驱动系统及图像处理. Email: fjczl@163.com

导师 (通讯作者): 林志贤 (1975—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电子纸显示和平板显示器件及其驱动技术. Email: lzx2005000@163.com

收稿日期: 2019-08-03; 录用日期: 2019-11-04

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Electrowetting; Field-programmable Gate Array; Low power consumption; Visual characteristics; Driving waveform

OCIS Codes: 220.4830; 230.0250; 040.7290; 110.4155

0 引言

近年来,反射式显示技术越来越引起人们的关注.与传统液晶等显示器不同的是,反射式显示器无需背光源,依靠环境光就可以显示,更适合在户外使用.电润湿显示器(Electrowetting Display,EWD)即是反射式显示器的一种,相比于电泳电子纸显示器(Electrophoresis Display,EPD),电润湿显示器具有更丰富的色彩以及更快的响应速率^[1],可实现实时视频播放,并且电润湿显示器还具有高反射率、广视角、可用于柔性显示等优点^[2-4].当然,电润湿显示器的研究进展也并非一帆风顺,依然存在着如油墨回流、油墨分裂等问题^[5],这些问题都会导致功耗的增加,严重影响电润湿显示器的显示性能.目前,针对电润湿显示器的低功耗研究主要集中在驱动方案、结构工艺等方面.在驱动方案上,GIRALDO A等^[6]运用动态改变刷新率技术,在显示静态图像时降低屏幕刷新率,达到降低功耗的目的;LIANG Chao-chiun等^[7]和 LI Ying-jia等^[8]通过降低电润湿背板的工作电压来减少显示器的功耗.在结构工艺上,ZHAO Qing等^[9]设计了一套可实现双稳态的电润湿显示器架构,通过双稳态达到某些场景的低功耗显示.然而这些方法鲜有结合电润湿自身的光电特性.

本文设计了一套低功耗的电润湿显示器驱动系统.提出了一种基于人眼视觉特性的低功耗算法,用于降低视频显示带来大量功耗并改善显示质量.还提出了一种低功耗多灰度驱动波形,可有效改善油墨分裂、油墨回流等现象,并且在精准调制灰度的同时进一步降低系统功耗.

1 电润湿显示原理及功耗分析

电润湿显示面板由一个个电润湿像素组成,如图1,单个像素由上下基板、像素墙、水、油墨、疏水绝缘层以及透明电极等组成,图中 V_s 为薄膜晶体管(Thin Film Transistor,TFT)的源极驱动信号, V_G 为TFT的栅极驱动信号, V_{COM} 为公共电极, C_{st} 为像素存储电容.当需要“打开”电润湿像素时,输入 V_G 电压,使TFT导通,源极驱动器就通过数模转换将数据转化为模拟电压通过 V_s 施加在电极之间,改变油墨与绝缘层之间的界面张力,使油墨发生扩张或者收缩现象^[10],进而呈现出不同的显示效果.

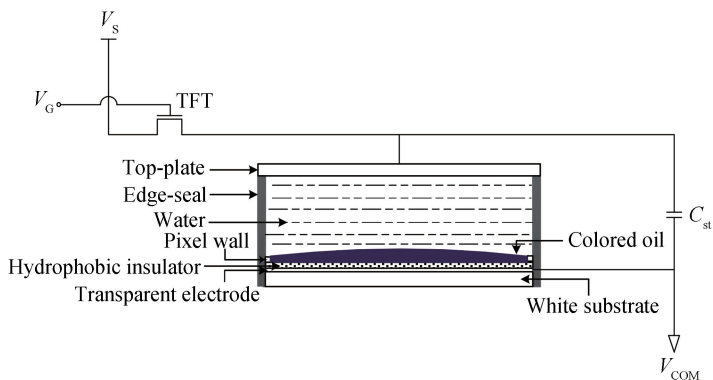


图1 电润湿显示器像素单元结构

Fig.1 Pixel structure of EWD

开口率是描述电润湿显示性能的重要指标,是指当像素处于“打开”状态时,裸露出来底下白色基板的面积占整个像素面积的百分比,图2(a)为电润湿像素处于“关闭”状态时的俯视图,图2(b)为电润湿像素处于“打开”状态时的俯视图.

通过改变施加的电压,便可以控制像素开口率的变化,从而实现多灰度显示^[11].图3(a)为电润湿显示器灰度等级(开口率)随电压变化的关系图^[12],可知,电润湿显示器灰度等级(开口率)与电压大小是非线性的,但是整体趋势不变即越高的灰度等级需要更大的电压来驱动.图3(b)为电润湿显示器电流与电压的关系图,可以看出,电流与电压呈正相关的,即电流随着电压的增大而增大.所以电润湿显示器在显示高灰度等级时,需要耗费的电能明显大于低灰度等级时所需要的电能.



图 2 电润湿显示器油墨状态
Fig.2 Oil state of EWD

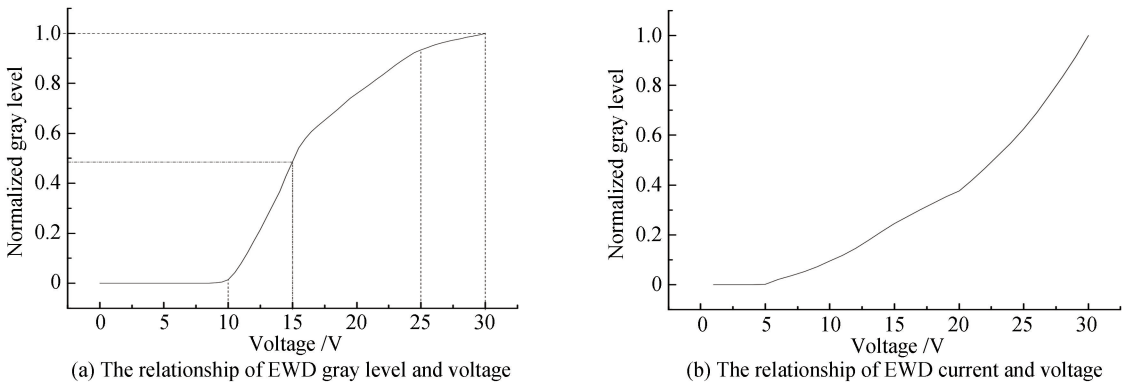


图 3 电润湿显示器功耗分析
Fig.3 Power analysis of EWD

2 电润湿显示器驱动系统方案设计

电润湿显示器驱动系统框架如图 4.整个系统分为两个子系统,视频图像编解码系统主要负责获取信号源,并对图像数据进行编解码传输,时序控制系统主要负责数据的缓存、处理以及相应电润湿驱动波形的时序控制.后级驱动部分主要由栅源驱动器组成,通过接收来自前级传输过来的视频图像数据,最终将其显示在电润湿显示器上.驱动系统实物如图 5.

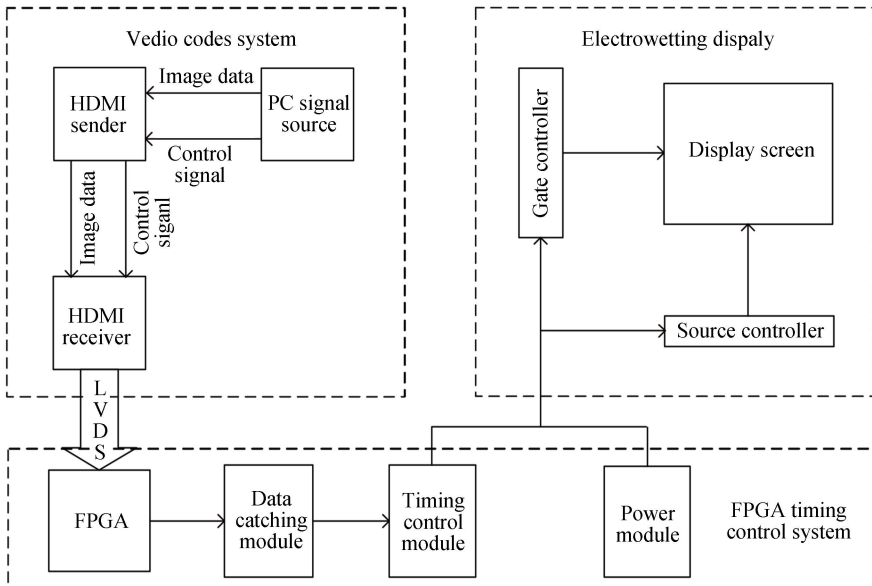


图 4 驱动系统工作框图
Fig.4 Working diagram of driving system

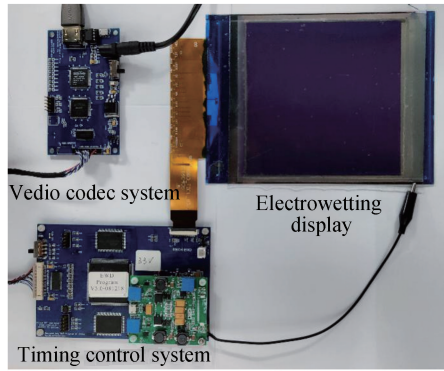


图 5 驱动系统实物

Fig.5 Practicality of driving system

2.1 视频图像编解码系统设计

视频图像编解码系统主要负责获取优质的信号源并对图像数据进行编解码操作,主要包括计算机和视频图像解码电路。

本系统采用高清晰度多媒体接口(High Definition Multimedia Interface, HDMI)^[13],与数字视频接口(Digital Visual Interface, DVI)技术最主要的差别在于它可以同时传输视频信号和音频信号.HDMI 接口技术采用最小变换差分信号(Transition Minimized Differential Signal, TMDS)技术作为基本电气连接,其包含用来传输视频、音频和辅助数据(如行场同步信号)的 3 个 TMDS 数据通道以及 1 个 TMDS 时钟通道,每个通道提供 165 MHz 带宽,传输速率为 1.65 Gb/s,三个通道传输速率可高达 4.95 Gb/s.此外, HDMI 还有一个显示数据通道(Display Data Channel, DDC)通道,连接在发送端与接收端之间,通过对接收端扩展显示标识数据(Extended Display Identification Data, EDID)的读取,发送端可以获取接收端显示器的相关参数,用于自动配置相应的传输格式。

本系统中,计算机显卡作为高质量信号源,发送 24 位 RGB 图像数据到 TMDS 发送端, TMDS 发送端对每通道的 8 位数据转化为 10 位直流平衡的最小化转化序列进行传输,传输速度快,可靠性强.接收端的 HDMI 解码芯片对接收到的图像数据进行解码,将对应的图像信号还原并送到后级的时序控制系统.视频图像编解码系统的工作流程如图 6.

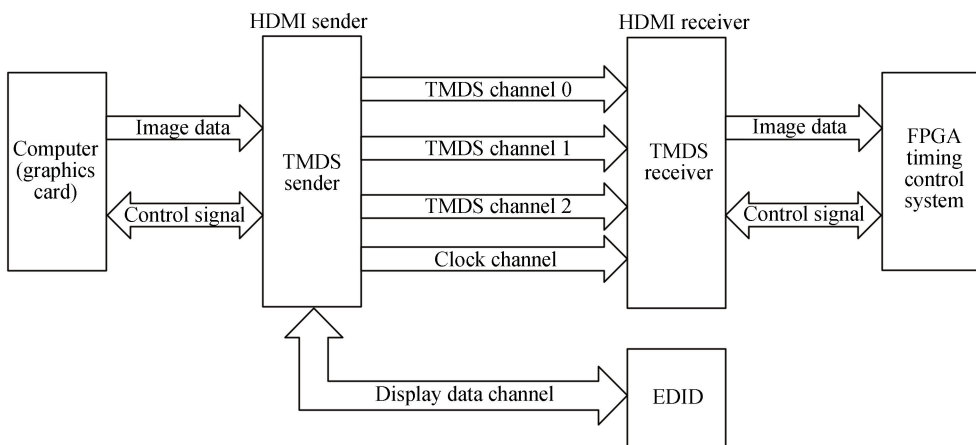


图 6 视频图像编解码系统框图

Fig.6 Diagram of video image codec system block

2.2 时序控制系统设计

2.2.1 数据缓存模块

图像数据通过低电压差分信号(Low-voltage Differential Signaling, LVDS),从视频图像编解码系统传输至数据缓存模块.由于本系统分辨率较高,一帧图像的数据量较大,现场可编程门阵列(Field-programmable Gate Array, FPGA)内部存储无法缓存这么大的数据量,且目前外部存储器主要使用是静态

随机存取存储器 (Static Random-Access Memory, SRAM) 和动态随机存取存储器 (Dynamic Random Access Memory, DRAM) 两种, SRAM 因其采用对称电路结构和单次接收全部地址位的特点, 使其访问速度通常要比 DRAM 快, 而本系统在存储数据的过程中, 需要频繁访问外部存储器, 因此采用低功耗 SRAM 作为外部存储器, 通过两片 SRAM 的乒乓操作存储图像数据^[14]。

图 7 为双 SRAM 乒乓操作流程图. 通过场同步信号 VS 来控制读写切换信号 GW 的翻转, 用来判断输入数据选择存储在 SRAM1 中还是 SRAM2 中. 以 SRAM1 读, SRAM2 写为例, 当 SRAM1 处于读状态时, 数据总线设置为输出状态, 读取存储在 SRAM1 里面的数据, 与此同时, SRAM2 处于写状态, 数据总线处于输入状态, SRAM2 根据数据采集时钟将写地址自加, 直到读写切换信号 GW 翻转时停止. 在下一个时钟周期, SRAM1 进行写操作, SRAM2 进行读操作, 如此反复。

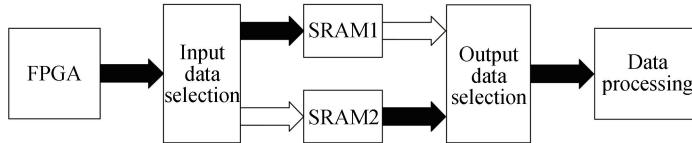


图 7 双 SRAM 乒乓操作流程

Fig.7 Flow chart of dual SRAM ping-pong operation

2.2.2 时序控制模块

时序控制模块是将从前级模块接收到的数据按照设定的时序送入后级的栅源控制器中, 最终驱动电润湿显示器显示. 在进行时序逻辑设计时, 还可以通过一些操作替换来降低电路中由指令翻转引起的功率损耗, 例如常采用移位操作来替代某些乘法运算, 设置寄存器来替代某些内存的操作等。

电润湿显示器是由一个个独立的电润湿像素组成, 由栅极控制器负责每一行电润湿像素的打开, 随后由源极控制器根据图像数据与驱动电压之间的查找表, 产生相应的驱动电压, 作用于每一个电润湿像素上. 由于电润湿的光电特性, 不同的电压, 油墨的收缩程度也不相同, 最终实现多灰度的视频显示。

2.2.3 电源模块

电源模块负责产生后级栅源驱动器所需要的驱动电压以驱动显示屏显示. 电润湿显示器栅源控制器所需电压 VGH、VGL、VPOS、VNEG 分别为 +15 V、-15 V、+20 V、-20 V。

本系统采用 RT9266 升压芯片, 最低输入电压低至 1 V, 效率高达 90%, 且单片 RT9266 芯片可以同时产生两个值相同的正负电压, 所以仅需要两片芯片即可实现四个所需电压, 相比于其他电源, 在满足功率需求的同时降低了功率的损耗. 为了方便后续实验测量, 使用精密可调电位器进行调压, 达到所需要的幅值。

3 电润湿显示器低功耗驱动方案设计

本系统分别采用低功耗算法模块以及低功耗驱动波形对电润湿显示器进行功耗限制. 低功耗算法模块通过减少高灰度等级像素数量来限制功耗, 低功耗驱动波形通过减少驱动低灰度等级像素时需要的功耗, 进一步降低系统的功耗。

3.1 低功耗算法模块

基于电润湿显示器的光电特性, 可以观察到越高灰度等级的像素将会消耗越多的能量, 因此, 为了降低系统的功耗, 提出一种基于人眼视觉特性的低功耗算法, 与传统低功耗算法^[15]不同的是, 传统低功耗算法主要通过降低高灰度像素的数量补充到低灰度像素中, 在阈值的选定上采用该图像最高灰度等级减去最低灰度等级得到, 这样的阈值划分往往会使得图像整体偏暗, 丢失暗部细节, 影响最终显示质量. 本算法通过结合人眼对灰度分辨能力的关系^[16]设定阈值, 在降低功耗的同时可以达到更好的显示效果。

如图 8 所示, 在图像灰度等级很低或者很高的情况下, 人眼分辨灰度的能力比较弱, 例如在 0 级灰度附近人眼只能感知到 0 级灰度与 6 级灰度的区别, 而在 0 级灰度至 5 级之间的所有灰度等级都无法区分. 而在中间灰度等级, 人眼分辨灰度的能力就比较强。

可知, 人眼对于灰度的分辨能力是非线性的, 为了更方便地进行数据处理, 将曲线分段拟合成 4 段线性函数, 如表 1。

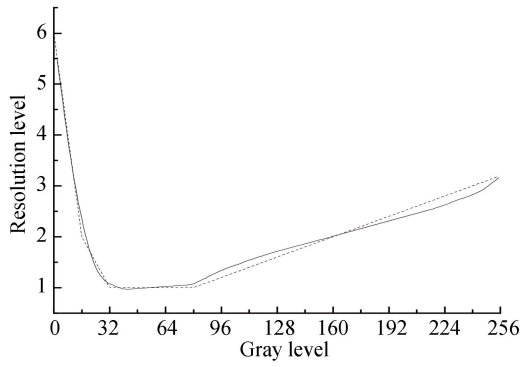


图8 人眼对灰度等级的分辨能力

Fig.8 The resolution of human eye for gray level

表1 人眼对灰度分辨能力的近似函数关系

Table 1 Approximate functional relationship between human eye and resolution of gray level

Function expression	Gray level/ i
$-0.25i + 6$	0~16
$-0.063i + 3$	16~32
1	32~80
$0.0125i$	80~255

当分辨能力值为2时,代入 $-0.25i + 6$ 和 $0.0125i$ 函数表达式中,得 $i = 16$ 或 160 ,即在 $(16, 160)$ 这个灰度区间中,人眼的分辨能力较好,所以高灰度等级的阈值设为160,减少灰度等级高于160的像素数量,为方便程序设计以及后续的驱动波形设计,将减少的数量增加在灰度等级为 $(16, 112)$ 这个区间中。

进行直方图修正,首先需要统计出当前帧的直方图,通过上述人眼对灰度分辨能力的分析,确定修正的阈值,当灰度等级高于160的像素数量较多时,提出一个可调因子 k ($0 < k < 1$),使得修正后的像素数量为修正前的 k 倍,将减少的数量添加在灰度等级为 $(16, 112)$ 区间中,并且其他区间像素数量不变.当灰度等级高于160的像素数量较少时,则直接输出。

综上所述,直方图修正式可表示为

$$H'_i = \begin{cases} H_i, & i \in [0, 16) \\ H_i + (1 - k) \times H_{i+144}, & i \in [16, 112) \\ H_i, & i \in [112, 160) \\ k \times H_i, & [160, 255] \end{cases} \quad (1)$$

式中, i 为灰度等级变量, H_i 为原直方图, H'_i 为修正后的直方图.在完成直方图修正后,需将修正后的直方图与原直方图相匹配,通过直方图匹配即可以得到与修正后直方图相似的直方图.首先需要分别统计出修正前后直方图累加和,如式(2)、(3), H_1 、 s_r 、 r 分别表示原图的直方图、累加和面积以及最高灰度等级, H_2 、 $G(z)$ 、 z 分别表示修正后直方图、修正后累加和面积以及修正后最高灰度等级.随后根据式(4)即可得到灰度的更新值 z_r .

$$s_r = \sum_{i=0}^r H_1[i] \quad (2)$$

$$G(z) = \sum_{i=0}^z H_2[i] \quad (3)$$

$$z_r = G^{-1}(s_r) \quad (4)$$

当 $k = 0.5$ 时,使用Matlab对算法进行的仿真,如图9所示,图中(a)~(c)分别是原图、采用了传统低功耗算法的效果图以及采用了本文基于人眼视觉特性的低功耗算法效果图.从图中可以看出,传统算法整体偏暗,也丢失了部分低灰度的细节信息如实线圈中Lena的头发,而采用了本文改进的算法后,在减少了部分高亮像素数量如虚线圈中的背景的同时保留了部分高亮像素如Lena的眼睛等,图像的视觉效果基本上得以保持.图9(d)~(f)分别为原图直方图、采用了传统低功耗算法的直方图以及采用了本文基于人眼视觉特性的

低功耗算法的直方图.



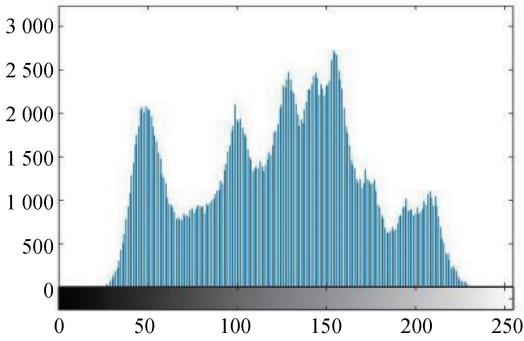
(a) Original



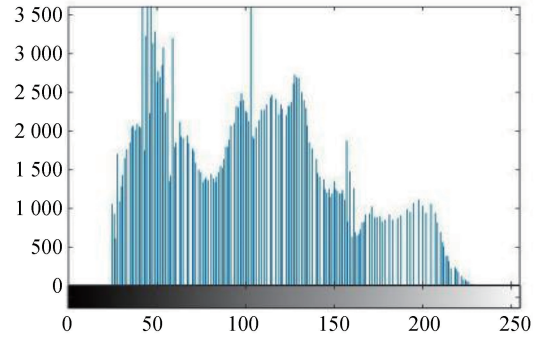
(b) Traditional algorithm



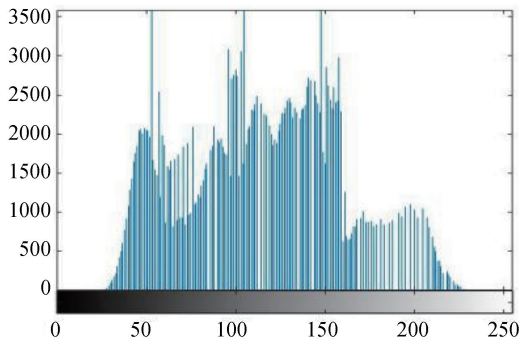
(c) Improved algorithm



(d) The histogram of original



(e) The histogram of traditional algorithm



(f) The histogram of improved algorithm

图9 Matlab 仿真图

Fig.9 Diagram of Matlab simulation

使用 FPGA 进行直方图修正及匹配时,最主要的问题在于数据处理时的实时性,这是由于直方图统计至少需要一帧的数据才能实现,而当前帧数据统计累加的时间,已经足够传输下一帧数据了,如果要使用当前帧的统计累加数据映射当前帧的像素值,就必须缓存当前帧的数据,这将浪费大量的资源且增加了不必要的功耗,所以采取一种近似的方法^[17],在建立当前帧的直方图统计结果时使用前一帧得到的映射.低功耗算法流程如图 10,其中双口随机存取存储器(Dual Port Random Access Memory,DPRAM)为片内双口存储器,其输入地址为像素灰度值,数据为计算值.

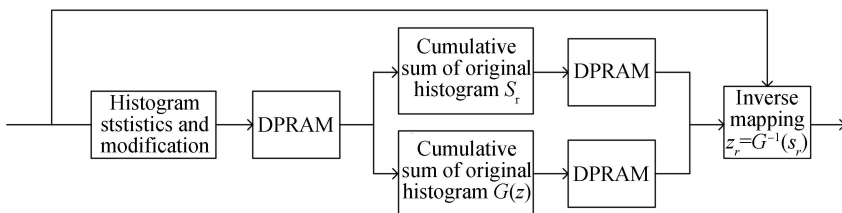


图 10 低功耗算法流程

Fig.10 Flow chart of low-power algorithm

3.2 驱动波形设计

在使用电润湿显示器显示时,可能会出现油墨分裂、油墨回流以及灰度调制不准确等问题.经过多次实验测试,发现当给像素施加一个足够大的电压时,大部分的导电离子聚集在油墨的中间位置,油墨就会从中间发生破裂,产生油墨分裂现象.还发现当像素电极上施加的电压保持不变时,油墨在收缩一段时间后,会发生自动扩张,从而产生油墨回流现象.这些问题都严重影响了电润湿显示器的显示性能,而一个好的驱动波形,可以有效地改善这些问题,因此需要设计一个适用于电润湿光电特性的驱动波形.

灰度等级取决于施加在电润湿显示器像素单元上的电压大小以及持续时间.图 11(a)~(c)为三种常见的电润湿多灰度驱动波形^[18].通过三个驱动电压(+15 V、0 V、-15 V,其中+15 V是固定的公共电极电压)在多个子帧的不同组合下,可以分别产生 9 阶、15 阶、16 阶的灰度等级.驱动波形最后都施加一个复位帧用于改善直流残留,使油墨复位到最初的状态^[19].

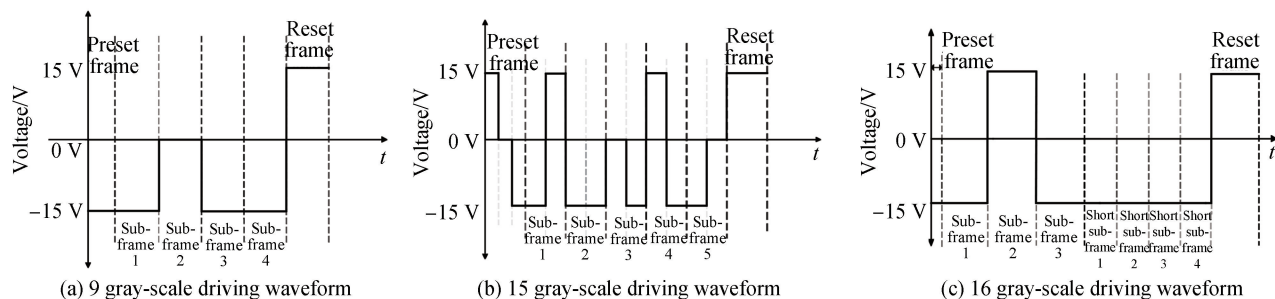


图 11 传统电润湿显示器驱动波形

Fig.11 Traditional driving waveform of EWD

上述驱动波形虽然可以调制出多阶灰度等级,但是并没有做到精准的灰度调制.如图 3(a)所示的电润湿灰度等级与电压关系图中,在等间距的电压调制下,由于电润湿光电特性的非线性,将会导致相邻灰度等级差距或大或小,如在 25~30V 的电压区间下,灰度差距远小于在 10~15 V 的电压区间下,还可以观察到当电压在 15 V 左右,电润湿显示器的灰度等级就已经接近全部灰度等级的一半.基于此特性,将电压调制范围划分为三个区间,分别为(10,15)、(15,25)以及(25,30),在第一个区间上,需要调制出一半的灰度等级,后面两个区间调制出另一半的灰度等级.

本文在此基础上提出了一种新的低功耗多灰度驱动波形,在精准调制灰度的同时,还能抑制油墨分裂、油墨回流等现象.驱动波形如图 12(a)、(b)所示,分为预置帧、显示帧以及复位帧.预置帧用于使油墨达到待激活的临界状态,又分为 3 个短子帧,并且让驱动电压步进增大,降低稳定油墨运动所需的瞬时静电力,可有效抑制油墨分裂^[7].显示帧分为 4 个子帧,每个子帧是等间距的,子帧 1 再分为 4 个短子帧,子帧 2、3 分别分成 2 个短子帧,因此,子帧 1 对应于电压 10~15 V 之间,子帧 2、3 对应于电压 15~25 V 之间,子帧 4 对应于电压 25~30 V 之间.子帧 1 的 4 个短子帧类似于传统 9 灰度电润湿驱动波形组合,可以调制出 9 个灰度等级.与传统驱动波形不同的是,子帧 1 中 4 个短子帧的持续时间远低于传统波形中 4 个子帧的持续时间,也即在驱动低灰度等级像素时,拥有更低的功耗,配合之前设计的低功耗算法,可以达到更好的功耗限制效果.同时为了改善油墨回流现象,将连续 4 个短子帧的都处于打开状态的情况舍去,即子帧 1 可以调制出 8 个灰度等级;子帧 2、3 的调制需要确保子帧 1 处在最高的灰度等级,其 4 个短子帧也可以调制出 8 个灰度等级,但是还需要舍去 4 个短子帧都关闭的状态避免与子帧 1 调制出的最高灰度等级重复,这样子帧 2、3 共可以调制出 7 个灰度等级;子帧 4 单子帧持续时间较之前子帧最长,为了避免与子帧 2、3 组合出来的最高灰度等级压差相同,形成同一压差持续时间过长,导致油墨回流现象,舍弃最大电压差的情况,所以子帧 4 可以调制出 1 个灰度等级.综上所述,本文提出的低功耗多灰度驱动波形最终可以调制出 $8+7+1=16$ 个灰度等级,改善了油墨分裂、油墨回流等现象且功耗较传统驱动波形更低.

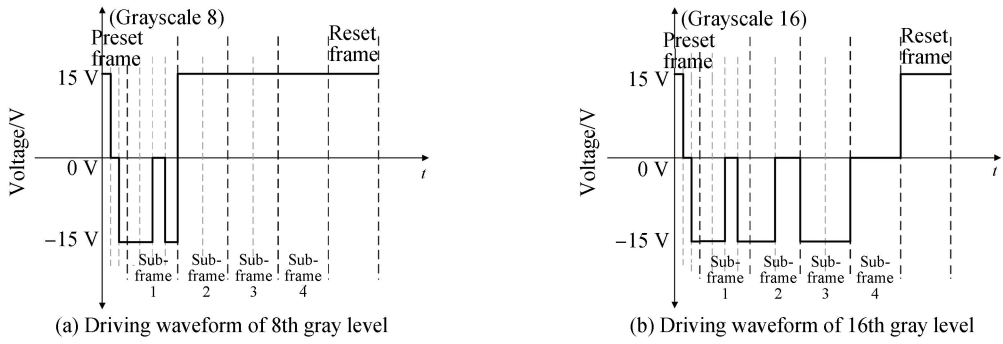


图 12 低功耗多灰度驱动波形

Fig.12 Driving waveform of low-power and multi-gray

4 实验结果与讨论

4.1 系统显示效果测试

图 13(a)~(c)分别为采用传统驱动波形出现的油墨分裂、油墨回流现象以及采用了本文提出的驱动波形的油墨状态,可以看出本文的驱动波形基本消除了油墨分裂现象,并更有效地抑制了油墨回流。

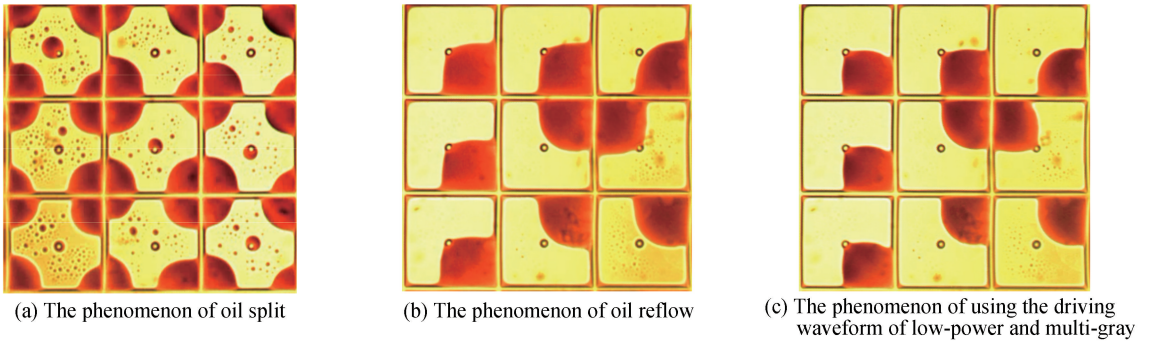


图 13 两种驱动波形下油墨状态

Fig.13 Oil state between two kinds of driving waveforms

图 14(a)、(b)分别为采用传统 16 灰度驱动系统图和本文的低功耗多灰度驱动系统图.可以看出与传统驱动系统相比,本系统在低灰度等级的细节更加清晰如 Lena 的头发,且在降低部分高亮像素同时保留部分高亮细节,如 Lena 的眼睛,图像效果更好.除上述主观评价外,本文还采用了平均梯度和均值对成像的效果进行了客观评价,平均梯度可敏感地反映图像的清晰度和纹理变化,平均梯度越大,图像层次越多,即越清晰.均值表征了图像的亮度,通过图像的均值可以反映出图像相对亮度的大小.由表 2 可知,图 14(b)的平均梯度比图 14(a)高,从而证明了在显示细节上图 14(b)的效果更好.而在均值上,图 14(a)略高于图 14(b),也印证了高亮像素的减少。

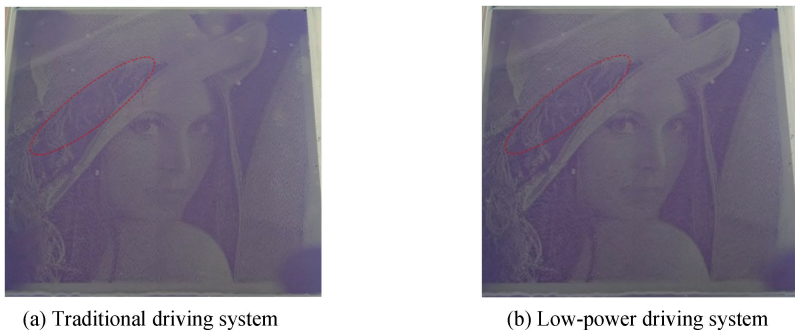


图 14 两种驱动系统显示效果对比

Fig.14 Visual contrast between two kinds of driving system

表 2 图像客观质量评价
Table 2 Evaluation of image objective quality

	Average gradient	Mean
Traditional driving system	1.528 05	106.369
Low-power driving system	1.563 36	101.814

4.2 显示系统功耗测试

本系统的功耗测量主要采用串联电流表读出系统总电流再乘以系统输入电压得到,因为直流电压源的电压基本可以认为是恒定的,因此系统功耗只与电流相关.在设计时,系统在总开关处预留了一个测试口,将电流表串联接在测试口两端,即可读出当前系统的电流值.通过播放同一段视频,采样多组同时刻的电流值取平均得到.图 15 对比了两个驱动系统采样到的数据,可以看出在功耗较低时(高灰度等级像素数目较少时),本系统功耗降低的幅度较小,而在原本功耗较大的情况下,本系统可以明显降低功耗.经计算,本系统可以降低约 20% 的功耗.

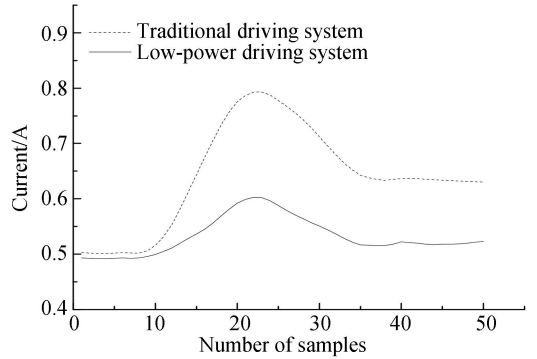


图 15 两种驱动系统对比

Fig.15 Contrast between two kinds of driving system

5 结论

本文提出了一套低功耗电润湿驱动系统,相比于传统的驱动系统,该系统通过结合人眼视觉特性以及电润湿显示器光电特性,在降低功耗的同时改善图像显示质量.实验结果表明,该系统所测得的各项指标与理论一致,图像在细节有更好的视觉效果且功耗降低约 20%,有效延长了便携式电润湿显示系统的续航时间.下一步的工作将集中在研究当显示图像高灰度等级像素较少时的功耗限制,进一步降低系统的功耗.

参考文献

- [1] HAYES R A, FEENSTRA B J. Video-speed electronic paper based on electrowetting[J]. *Nature*, 2003, **425**(6956): 383-385.
 - [2] DIJK R V, FEENSTRA B J, HAYES R A, et al. 68.3: Gray scales for video applications on electrowetting displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2006, **37**(1): 1926-1929.
 - [3] ROQUES-CARMES T, HAYES R A. Liquid behavior inside a reflective display pixel based on electrowetting[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **95**(8): 4389-4396.
 - [4] ROQUES-CARMES T, HAYES R A, SCHLANGEN L J M. A physical model describing the electro-optic behavior of switchable optical elements based on electrowetting[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **96**(11): 6267-6271.
 - [5] ZHANG Xiao-mei, BAI Peng-fei, HAYES R A, et al. Novel driving methods for manipulating oil motion in electrofluidic display pixels[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, **12**(2): 200-205.
 - [6] GIRALDO A, MASSARD R, MANS J, et al. 10.3: Ultra low-power electrowetting-based displays rusing dynamic frame rate driving[J]. *Sid Symposium Digest of Technical Papers*, 2012, **42**(1): 114-117.
 - [7] LIANG Chao-chiun, CHEN Yi-cheng, CHIU Yung-hsiang, et al. 27.3: A decoupling driving scheme for low voltage stress in driving a large-area high-resolution electrowetting display[J]. *Sid Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, **40**(1): 375-378.
 - [8] LI Ying-jia, ECHTERMEYER D, CAHILL B P, et al. Non-linearity and dynamics of low-voltage electrowetting and dewetting[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2019, **21**: 18290-18299.
 - [9] ZHAO Qing, TANG Biao, BAI Peng-fei, et al. Dynamic simulation of bistable electrofluidic device based on a combined design of electrode and wettability patterning[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, **26**(1): 27-35.
 - [10] PRINS M W J, WELTERS W J J, WEEKAMP J W. Fluid control in multichannel structures by electrocapillary pressure[J]. *Science*, 2001, **291**(5502): 277-280.
 - [11] YI Zi-chuan, SHUI Ling-ling, WAND Li, et al. A novel driver for active matrix electrowetting displays[J]. *Displays*, 2015, **37**: 86-93.
 - [12] LIN Shan-ling, LI Tian-tian, ZENG Su-yun, et al. Study on nonlinear correction method of electrowetting display brightness based on human visual system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(8): 0812004.
- 林珊玲,李甜甜,曾素云,等. 基于人眼视觉的电润湿电子纸显示器亮度非线性校正方法研究[J]. 光子学报, 2019, **48**(8): 0812004.

- [13] 杨坤明. 现代高速串行通信接口技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [14] LI Rui, LI Xiao, WANG Zhi-bin, *et al.* Design of data acquisition system based on SRAM ping-pong operation[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2015, **29**(2): 120-124.
李芮,李晓,王志斌,等. 基于SRAM乒乓操作的数据采集系统的设计[J]. 济南大学学报(自然科学版),2015, **29**(2): 120-124.
- [15] HUANG Cheng-qiang, ZHANG Zhen, PAN Jin-he. A low-power display driving algorithm based on the combination of histogram correction and histogram matching of three basic channels[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2019, **30**(3): 310-316.
黄成强,张真,潘金和. 直方图修正和匹配的低功耗显示驱动算法研究[J]. 光电子·激光,2019, **30**(3):310-316.
- [16] LIU Heng-shu, HUANG Lian-qing. A medical image processing method based on human eye visual property[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(4): 38-41.
刘恒殊,黄廉卿. 基于人眼视觉特性的医学图像处理方法[J]. 光电工程,2001, **28**(4):38-41.
- [17] MU Xin-gang. Principle and application of digital image processing based on FPGA[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2017.
牟新刚. 基于FPGA的数字图像处理原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2017.
- [18] 华南师范大学. 一种电润湿显示器灰度显示调制方法:中国,104867460A[P]. 2015-05-20.
- [19] 刘海娜. 基于STM32和FPGA的电润湿电子纸显示系统设计[D]. 广州:华南师范大学,2015.