

文章编号:1007-2780(2018)03-0213-08

电润湿电子纸多灰度动态显示驱动 系统设计与实现

单升起,林珊玲,林志贤*,郭太良

(福州大学 物理与信息工程学院,福建 福州 350100)

摘要:为了解决电润湿电子纸显示器存在的视频闪烁、电荷泄露问题以及实现电润湿多灰度动态显示,本文针对电润湿电子纸显示器研究设计了一套驱动系统。首先,根据完整的电润湿电子纸驱动系统必须具备的功能,提出了嵌入式+现场可编程门阵列(FPGA)的驱动系统架构,其中嵌入式平台可以对视频源进行实时图像处理,FPGA 根据接收到的处理后的数据进行相应的时序控制。接着,采用现有电泳电子纸的源栅驱动芯片作为电润湿电子纸的驱动芯片。最后,本文提出了不等子帧和复位帧的概念用以解决视频闪烁和电荷泄露问题从而更好地实现多灰度显示。实验结果表明:该驱动系统成功解决了电润湿视频闪烁、电荷泄露以及多灰度显示等问题,使电润湿电子纸的视频刷新率达到 30 Hz,像素最高灰度可以达到 16 灰阶并且在该灰度下的电润湿反射率接近 60%。整个驱动系统基本满足了多灰度动态显示。

关键词:电润湿电子纸;驱动系统;多灰度动态;视频闪烁;电荷泄露

中图分类号:TP368.1;TP311.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183303.0213

Design and implementation of electrowetting multi-gray dynamic display driving system

SHAN Sheng-qi, LIN Shan-ling, LIN Zhi-xian*, GUO Tai-liang

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350100, China)

Abstract: In order to solve the problems of video scintillation, charge leakage and achieving dynamic multi-grayscale display on electrowetting electronic paper displays, a set of driving system was designed for the study of electrowetting electronic paper displays. First of all, this paper proposes a driving system architecture of embedded platform + FPGA based on the functions that the complete electrowetting electronic paper drive system must have, in which the embedded platform can carry out real-time image processing on the video source. And the corresponding timing control will be achieved by FPGA according to the received processed data. Next, the source gate driver chip of the existing electrophoresis electronic paper is used as the driver chip of the electrowetting electronic paper.

收稿日期:2017-11-13; **修订日期:**2018-01-10.

基金项目:国家重点研发计划资助(No.2016YFB0401503);福建省科技重大专项(No.2014HZ0003-1);广东省科技重大专项(No.2016B090906001);福建省资助省属高校专项课题(No.JK2014002)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0401503); Fujian Science and Technology Major Project (No.2014HZ0003-1); Guangdong Science and Technology Major Project (No. 2016B090906001); Special Projects Funded by Provincial Universities in Fujian (No. JK2014002)

* 通信联系人, E-mail: lzx2005000@163.com

Finally, this paper proposes the concepts of unequal subframes and reset frames to solve the problem of video flicker and charge leakage so as to achieve a better multi gray scale display. The experimental results show that the drive system successfully solves the problems of electrowetting video flicker, charge leakage and multi-grayscale display problems. The video refresh rate of the electrowetting electronic paper reaches to 30 Hz, the maximum gray level of the pixel can reach 16 gray scale and the reflectivity is close to 60% at the highest gray level. The whole drive system basically meets the dynamic display of multi grayscale.

Key words: electrowetting display; driving system; multi grayscale dynamics; video flashing; charge leakage

1 引言

以 Amazon 和索尼公司的电泳电子纸显示器 (EPD) 为代表的电子纸显示器已经成为一种重要的信息可视化工具^[1], 目前 EPD 响应速度太慢而不能实现视频的播放^[2]。然而自 2003 年荷兰皇家飞利浦的 Rob. Hayes 团队在 Nature 杂志上发表了一篇关于电润湿的文章^[3], 电润湿显示才正式进入了大家的视线。电润湿其响应速度快, 可以用于播放视频。并且具有制造容易^[4]、透光率高^[5]和低功耗的优点。这些特性使得电润湿电子纸适合于便携式设备, 通常用于户外视频内容显示。针对电润湿电子纸的驱动, 不同的公司和研究机构也进行了不同的研究, 如韩国液晶显示器 (LCD) 研究和开发中心, Ho-Yong Jung 等人^[6]研发了一种符合电润湿电子纸频率和电压的专用驱动芯片, R.C. van Dijk^[7]提出一种用于电润湿电子纸的驱动波形。然而这些基本都是研究一些驱动芯片和驱动波形。很少有关于电润湿电子纸的整机驱动系统, 这种系统可以自动实现图像获取、图像处理、图像显示相关的操作。

而在本文中, 我们提出了一套完整的整机驱动系统, 可以实现 16 灰阶的动态视频显示。并且通过对驱动波形进行创新改进, 基本解决了电润湿电子纸的电荷泄露和视频闪烁的问题。

2 电润湿电子纸的驱动原理

电润湿电子纸的显示原理和像素结构如图 1 所示, 图 1(a) 是像素结构的剖面图 (横截面), 该结构包括白色衬底、透明电极、疏水涂层、油墨、像素墙。如图 1(a) 所示, 当没有施加驱动电压在像

素电极上时, 油墨将平铺在疏水层上, 光线通过水层到达油墨, 反射后显示油墨的颜色, 此时像素定义为关闭状态。如图 1(b) 所示, 当给像素电极施加驱动电压时, 油墨不再铺满整个像素格, 而是在界面张力的作用下被推挤到一边, 反射基板暴露在自然光下从而反射白色基板的颜色, 此时像素定义为打开状态。图 1(c) 是油墨平铺时的俯视图; 如图 1(d) 是油墨收缩时的俯视图。油墨收缩的程度和反射光的大小由驱动电压大小决定, 当驱动电压低于阈值电压时油墨收缩程度非常小, 反之当驱动电压高于阈值电压时电压越大油墨收缩程度越大。又由于油墨的伸缩有一定的延迟时间, 所以可以利用子帧实现多灰度显示, 通过不同大小电压子帧的组合达到对像素驱动时间和驱动电压的改变, 从而改变每个像素的反射光大小, 反射光的变化就会引起灰度变化^[8]。

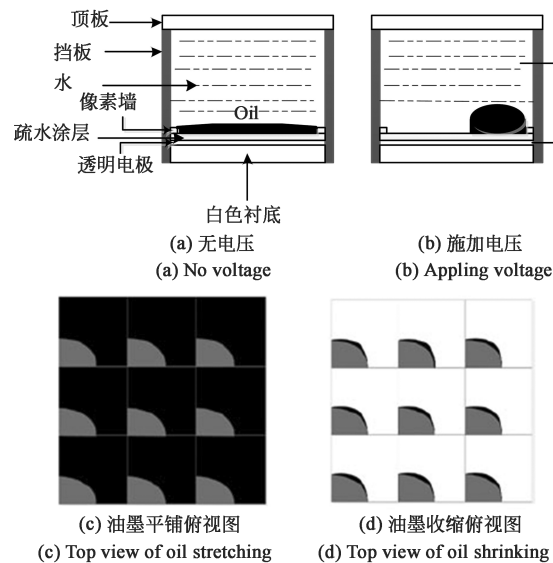


图 1 电润湿电子纸的显示原理和像素结构
 Fig.1 Display principle and pixel structure of electrowetting electronic paper

3 电润湿电子纸驱动系统框架

有源电润湿电子纸驱动系统工作框图如图2所示。驱动系统主要包括两大部分:嵌入式系统部分、时序控制电路部分。嵌入式部分由S5PV210平台实现,主要负责图像获取、图像处理、图像传输。电润湿时序控制电路包括FPGA和源栅驱动器,其中FPGA主要负责图像数据的接收和电润湿专有驱动波形的产生和控制。源栅驱动部分主要包含栅极驱动器和源极驱动器两个部分,主要负责将来自FPGA的像素信息进行移位锁存、D/A转换、信号放大。

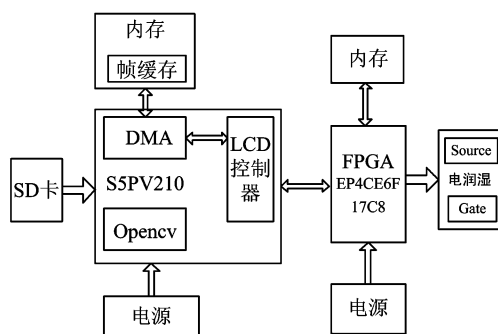


图2 驱动系统工作框图

Fig.2 Working diagram of driving system

已经有了一些相关的文章研究了电润湿电子纸的驱动系统^[8-10]。但是本论文提到的驱动系统与之前已经出现过的电润湿驱动系统相比有利于开发成独立的多媒体设备。系统的图像获取、图像处理由嵌入式系统自动完成,并将处理后的数据传输给后级的FPGA;FPGA负责系统的时序控制,可以灵活方便地控制时序的产生从而提高系统的可移植性,这意味着驱动系统不需要任何其他波形发生器或时序控制器等设备支持,因此驱动系统适合不同便携设备的应用。其次针对电润湿电子纸面板参数设计了特有的驱动波形-基于不等子帧的驱动波形。该驱动波形很好地实现了电润湿电子纸的多灰度显示。

4 电润湿电子纸驱动系统方案设计

电润湿驱动系统需要高性能的软硬件支持才能实现多灰度动态视频显示,因此整个系统分为嵌入式和FPGA两部分,其中嵌入式部分主要负

责图像的获取和图像的处理以及图像的传输控制,FPGA部分主要负责从嵌入式系统获取处理后的图像数据并进行时序控制。驱动系统工作流程图如图3所示。

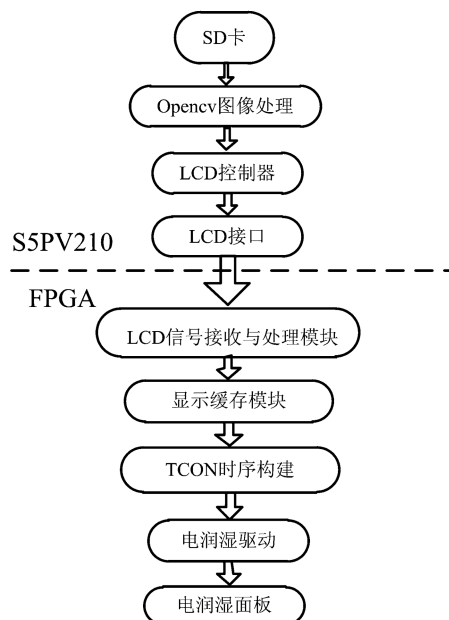


图3 驱动系统工作流程图

Fig.3 Working flow chart of driving system

4.1 嵌入式系统设计

在嵌入式部分选用S5PV210作为硬件平台。主要包括SD卡、图像处理、LCD控制3个模块。SD卡的串行外设接口(SPI)模式和1位模式位宽过小,传输速率太慢不适合高分辨率视频图像的显示,所以我们可以采用4位SD模式并行传输,其传输速率的快慢由公式(1)中B_Clock和divisor预分频数决定。其中B_Clock等于10~63 MHz, divisor ≥ 1,因此SD卡传输速率(SD-CLK)最高时钟频率达63 MHz,最高传输速率(4线模式)可达240 Mbit/s,最高支持1 920 × 1 080分辨率,因此完全可以支持高分辨率视频图像的输出。

$$SDCLK = B_Clock / divisor \quad (1)$$

图像处理模块通过移植Opencv到S5PV210上实现,Opencv是一种目前常用的图像处理开源库,S5PV210处理器可以支持Opencv库的移植,因此可以利用移植后的Opencv对从SD卡获得的视频数据进行视频分割、图像分辨率、图像位深等相应处理,从而达到对不同视频源的自适应处理以符合电润湿的面板结构与参数。

成部分,它可以为栅极和源极集成电路提供驱动数据,并为驱动系统提供各种驱动时序,控制屏幕刷新的速度和方向。TCON 驱动流程图如图 6 所示:程序先从 RAM 读取一帧图像的一行数据到 Source,再产生 Source 行锁存信号,控制 Gate 芯片打开电润湿电子纸显示屏的一行显示。

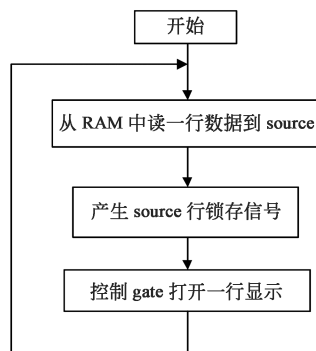


图 6 TCON 驱动流程图

Fig.6 TCON driving flow chart

4.2.4 电润湿电子纸显示驱动器

电润湿电子纸显示驱动器其主要功能是作为时序控制器产生定时信号,用于同步控制。通过打开 TFT,在有源扫描期间往像素电容上写入电压。视频帧数据通过该模块转换成驱动数据。最后将驱动数据编码为驱动源电极中像素电极的驱动电压。

4.3 驱动波形设计

将 FPGA 中的视频帧数据经过 TCON 模块编码,将编码后数据传输到源级驱动芯片后产生适合电润湿电子纸特性的驱动波形。驱动波形的质量直接决定了视频的播放速度、灰度级以及电润湿电子纸的播放效果。

一般来说,图像灰度的形成取决于驱动电压有效值和驱动电压的有效时间。灰度的形成主要有两种方法:幅度调制和脉宽调制^[12]。其中电压幅度调制与其他显示技术相比拥有不同的显示原理,所以并不适用于成熟的商业产品。而脉宽调制正好适用于大部分成熟的商业产品,因此本文在脉宽调制的基础上设计一个适合电润湿电子纸的特殊驱动波形。之前已有关于电润湿电子纸的相关驱动波形设计的研究^[9],这些波形主要是利用高低电压交互的驱动方法^[13]达到抑制电润湿电子纸的电荷泄露现象目的,但这种方法对于高性能显示器来说容易产生视频图像闪烁现象,并且之前的驱动波形也很少考虑怎样抑制电润湿电

子纸的电荷泄露问题。因此之前驱动波形的研究并不适用于高性能电润湿电子纸显示器。

在这篇论文中提出一个新的驱动波形以适应电润湿电子纸特性。针对高性能电润湿电子纸视频的刷新率、图像的多灰度级显示以及电荷泄露现象 3 个主要问题,因此新的驱动波形主要包括显示部分和复位部分,如图 7 所示是普通的动态非对称驱动波形,由华南师范大学提供的电润湿显示面板的最佳驱动电压是 30 V,因此该驱动波形采用在像素的公共电极持续保持 15 V,如图 8 所示。并在此基础上增加一种驱动电压 0 V 和 -15 V,这样驱动波形的驱动电压包括 0、15 V 和 -15 V 三种电压,为电润湿电子纸的像素提供从闭合状态到完全打开状态所需的各种电压。如图 7 所示驱动波形的显示部分采用了 4 个子帧实现像素的多灰度,其中每个子帧的持续时间均为 17 μ s,如图 7 所示的子帧组合可以实现 8 灰度显示,而该图中的 4 个子帧的不同电压状态可以组合 9 种状态,因此共可以实现 9 个灰度。同理,如果想实现更高灰阶的显示就需要增加子帧的数量,这样更多的子帧可以组合成更多的状态从而实现更高的灰度级。但是增加子帧的数量会给动态显示带来两个不可忽视的问题:(1)子帧数量的增加会导致显示一帧图像的周期增加,动态显示会出现视频闪烁现象(本文采用的电润湿电子纸

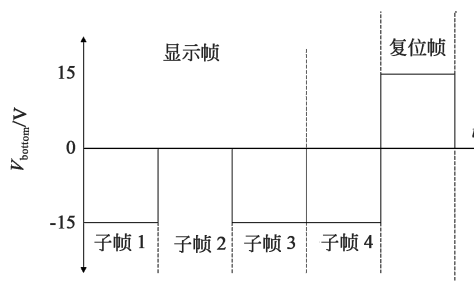


图 7 电润湿电子纸普通驱动波形

Fig.7 Common driving waveform of electrowetting electronic paper

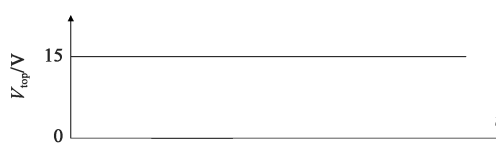


图 8 电润湿电子纸公共电极驱动电压

Fig.8 Common electrode driving voltage of electrowetting electronic paper

显示面板分辨率为 400×300);(2)由于电润湿面板的特性,子帧数量的增加比较容易出现电荷捕获现象^[11](驱动波形的设计原则是:持续 4 个子帧周期容易出现电荷捕获现象)

针对以上问题,设计了如图 9 所示波形,该波形在 4 个子帧的基础上将子帧 3 和子帧 4 继续分割(这里我们统一将短子帧分布在后两个子帧上)。采用长短子帧组合的驱动波形可以在驱动周期不变的情况下增加灰度级的数量和灰度级的准确性,这样既保持了刷新率的不变,又增加像素的灰度级和抑制了电荷捕获现象。如图 9 所示可以实现 14 灰度显示,该驱动波形最高可以实现 16 灰阶。

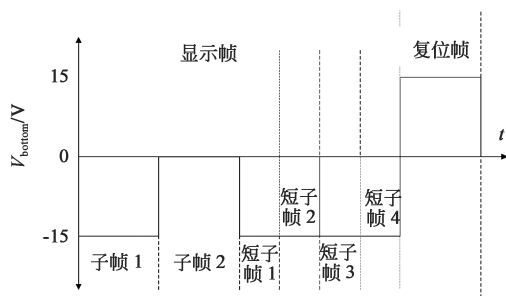


图 9 电润湿电子纸改进后驱动波形

Fig.9 Improved driving waveform of electrowetting electronic paper

驱动波形的复位部分可以在驱动过程中抑制像素电极的电荷泄露,如图 10 所示,在驱动过程中随着像素电极上电荷泄露,电润湿电子纸的反射率也随之减小,这样将会对灰度显示稳定性产生影响,因此在显示下一帧之前需要循环复位过程释放电荷。如果需要复位像素,则公共电极和像素电极都设置为 +15 V,则这两个电极的电压

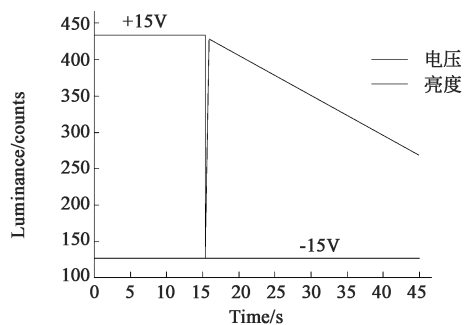


图 10 电荷泄露和电润湿电子纸反射率的关系

Fig.10 Relationship between charge leakage and electrowetting electronic paper reflectivity

差达到 0 V。在复位过程中像素将回到灰度变化之前的原始状态,总之,每次显示下一帧图像之前都必须从原始状态开始。

电润湿电子纸显示器的驱动波形的形成机制和多灰度形成原理如下:

(1)FPGA 中的 TCON 模块根据每个像素的目标灰度配置驱动波形。

(2)根据 FPGA 从嵌入式系统获得的帧数据得到电润湿电子纸的像素灰度。

(3)TCON 根据已设计的驱动波形编码成二进制序列,即每个像素驱动数据。

(4)二进制驱动数据被传送到源极驱动器,源极驱动器根据驱动数据形成相应的驱动波形驱动像素。

(5)根据电润湿目标像素灰度的不同,源极驱动器会产生相应的不同的驱动波形驱动像素,因此一帧图像可以实现多灰度显示。

5 实验结果与讨论

图 11 是用两种驱动波形驱动的显示对比图,其中图 11(b)是 16 灰度图,是改进后驱动波形作用所得结果,可以看出细节部分描述更清晰。图 11(a)是 9 灰度图,是正常的非对称驱动波形作用所得结果。从对比中可以看出后者的画面更加饱满清晰且画面效果更好。

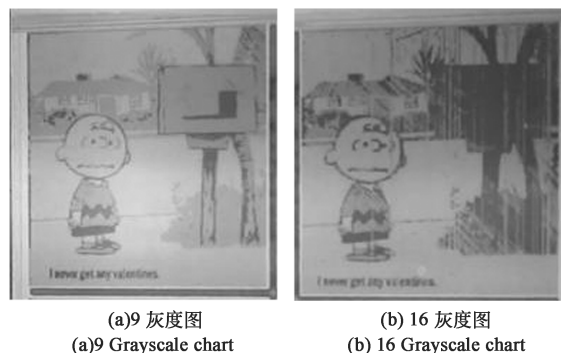


图 11 两种不同驱动波形作用后的对比图

Fig.11 Visual contrast between two kinds of driving waveform

图 12 中,电润湿电子纸显示的是一匹奔跑的马的视频。上面图像是由无复位功能的驱动波形驱动的画面,由于电荷泄露,驱动电压不断降低,像素变得非常暗,形成了一种阴影。下面是由一

个带有复位过程的驱动波形驱动的。图像质量好,视频显示无明显阴影。

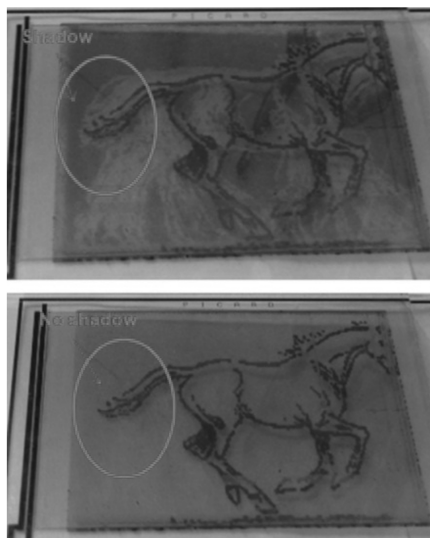


图12 采用复位帧后的图像对比

Fig.12 Visual contrast after reset frames

电润湿电子纸显示器的光学特性与灰度的关系曲线如图13所示。其中亮度在灰度3和12之间以恒定斜率增加,每灰度级亮度变化约9%~20%。人眼可以清楚地区分灰度变化,在灰度13和15之间,亮度变化约为4%。这可能会在明亮和白色部分导致一些图像细节的损失,但损失可以利用图像处理算法减轻。

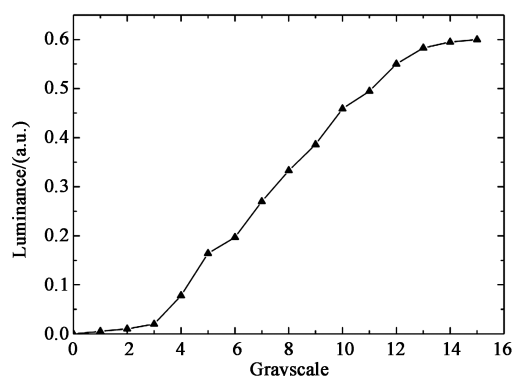


图13 光学性能灰度曲线

Fig.13 Gray scale curve for optical performance

6 结 论

为了解决电润湿电子纸显示器存在的视频闪烁、电荷泄露问题以及实现电润湿电子纸多灰度动态显示。本文首先提出嵌入式系统 + FPGA 的驱动系统架构,并对架构的每个模块进行了实验分析,然后提出一种改进型的驱动波形(不等子帧驱动波形)用于解决视频闪烁和电荷泄露问题。实验结果表明:所提的驱动方案基本实现分辨率 400×300 电润湿显示器的16灰阶动态无闪烁显示,并且在16灰阶下电润湿电子反射率接近60%。

参 考 文 献:

- [1] ZHOU G F, JOHNSON M T, CORTIE R, *et al.* Addressing an active matrix electrophoretic display [C]//*Proceedings of the IDW'04*. Utsunomiya Japan: IDW, 2004: 1729-1732.
- [2] KAO W C, LIU S C, CHANG W T. Signal processing for playing videos on electrophoretic displays [C]//*Proceedings of the IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems*. Boise, ID, USA: IEEE, 2012: 872-875.
- [3] HAYES R A, FEENSTRA B J. Video-speed electronic paper based on electrowetting [J]. *Nature*, 2003, 425 (6956): 383-385.
- [4] WEN C Y, REN J, XIA J, *et al.* Self-assembly oil - water perfusion in electrowetting displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(2): 122-127.
- [5] SCHULTZ A, HEIKENFELD J, KANG H S, *et al.* 1000:1 contrast ratio transmissive electrowetting displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(11): 583-585.
- [6] KAO W C. Electrophoretic display controller integrated with real-time halftoning and partial region update [J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(1): 36-44.
- [7] ROQUES-CARMES T, PALMIER S, HAYES R A, *et al.* The effect of the oil/water interfacial tension on electrowetting driven fluid motion [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, 267(1/3): 56-63.

- [8] YI Z C, SHUI L L, WANG L, *et al.* A novel driver for active matrix electrowetting displays [J]. *Displays*, 2015, 37: 86-93.
- [9] CHIU Y H, LIANG C C, CHEN Y C, *et al.* Accurate-gray-level and quick-response driving methods for high-performance electrowetting displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2011, 19(11): 741-748.
- [10] LI Y Y, LI H Z, BAKER R J. A low-cost and high-resolution droplet position detector for an intelligent electrowetting on dielectric device [J]. *Journal of Laboratory Automation*, 2015, 20(6): 663-669.
- [11] LUO Z J, ZHANG W N, LIU L W, *et al.* Portable multi-gray scale video playing scheme for high-performance electrowetting displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(6): 345-354.
- [12] VAN DIJK R, 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.
- [13] CHAE J B, KWON J O, YANG J S, *et al.* Optimum thickness of hydrophobic layer for operating voltage reduction in EWOD systems [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 215: 8-16.

作者简介:单升起(1991—),男,安徽省池州人,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统、FPGA、图像处理技术。E-mail: ssq1991427@163.com。

林志贤(1975—),男,福建省泉州人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:信息显示技术、平板显示器件驱动和图像处理技术等。E-mail: lzx2005000@163.com。