

电泳电子纸驱动波形研究现状与前景

周国富^{1*}, 易子川¹, 王利^{1,2}, 卢伟雄²

(1. 华南师范大学华南先进光电子研究院, 广东广州 510006; 2. 华南师范大学物理与电信工程学院, 广东广州 510006)

摘要: 电泳电子纸的驱动波形对于电子纸的显示效果具有决定性的作用, 驱动波形算法的优化对于提升电泳电子纸的显示效果具有重要意义. 结合作者长期从事电泳电子纸的研究, 综述了电泳电子纸的显示原理及电泳电子纸驱动波形的技术现状, 总结了驱动波形中存在的技术难题, 并对电子纸在电子标签、电子书包和电子手表等领域的发展前景进行了展望.

关键词: 电泳; 电子纸; 驱动波形; 类纸显示

中图分类号: TN27

文献标志码: A

doi: 10.6054/j.jscnun.2013.09.007

平板显示技术在信息产业中具有重要地位, 被列为国家战略性新兴产业. 新型显示技术及其相关产业已占信息产业的三成以上, 其发展的快慢、技术水平的创新将直接影响电子信息产业的发展. 在主流的平板显示技术中, 液晶显示器(LCD)需要背光源才能显示^[1], 有机发光二极管(OLED)则依靠材料自身主动发光^[2]. 在户外显示时, 随着外界光源的加强, 显示器内部发光机制与外界光源相互抵消, 人眼所能感知的光强十分有限, 从而导致显示效果不佳. 另外, 上述平板显示器需持续供电来维持显示内容, 在电能有限的便携式系统中, 这些显示技术的续航能力明显不足. 因此, 寻求一种低功耗、符合人类生理习惯的平板显示器成为必然. 目前, 我国已成为平板显示产业的最大的市场消费国, 发展新型平板显示产业刻不容缓. 电泳电子纸显示(Electrophoretic Display, EPD)作为新型显示技术, 具备视角广^[3]、超低耗能^[4]和类纸显示^[5]等优点, 其创新能力必将影响我国平板显示产业的发展.

电泳电子纸的显示灰阶由粒子在微胶囊或者微杯的空间位置所决定, 黑色粒子与白色粒子在电压的作用下发生电泳现象, 这种促使粒子发生电泳运动的电压时序就是电子纸的驱动波形. 驱动波形为电子纸显示器的核心部分, 对驱动波形的优化将直接影响显示器的显示效果. 所以, 针对电子纸驱动波形的研究具有重要意义. 传统的电泳电子纸一般

包括 3 个阶段: 擦除原始图像、激活粒子和显示新图像^[6]. 每个阶段都需要开销显示器数帧的时间, 所以导致了电泳电子纸的驱动时间较长, 不适合进行视频播放; 由不同原始灰阶所形成的同一灰阶, 其反射率的同一性较差, 所以, 当灰阶级数过多时, 特定灰阶的反射率不稳定, 显示效果不佳; 在图形更新的过程中, 由于要擦除原始图像以及激活粒子, 电子纸驱动波形需要在高低电平之间相互转换, 电子纸显示屏需要在黑色与白色之间选择性刷新, 这样就导致了闪烁, 影响了阅读舒适度; 由于电子纸擦除原始图形的时间非常有限, 以至于原始图像不能够被很好地擦除, 进而原始图像的残影会继续留在显示屏上, 影响图像显示效果. 以上问题严重影响了电子纸显示器的适用性, 本文对以上问题进行了综述, 并提出了一些解决方案.

1 电泳电子纸显示原理

电泳电子纸是一种类纸显示器, 其工作原理是依靠黑色与白色颗粒在电压的作用发生电泳, 进而形成灰阶. 微胶囊和微杯的引入是一个重大的突破, 它们将粒子的电泳运动限制在一个较小的空间范围内, 使粒子的空间位置能够在电压作用下相对可控. 目前, 微胶囊型与微杯型电泳电子纸已经产业化, 其工作原理如图 1 所示^[7-11].

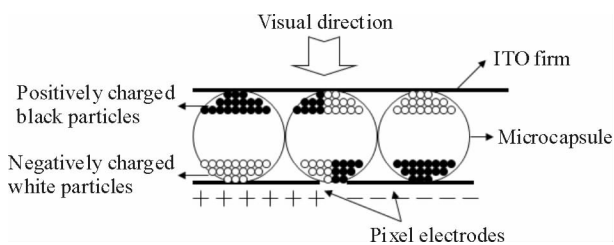


图1 微胶囊型电泳电子纸显示原理

Figure 1 The structure of microcapsule EPD

在电泳显示器中,黑色粒子与白色粒子分别携带不同种类的电荷(图2).在2种粒子的空隙间充满电荷控制剂,用来防止粒子团聚或者沉积,为黑色和白色粒子提供了良好的电泳特性.

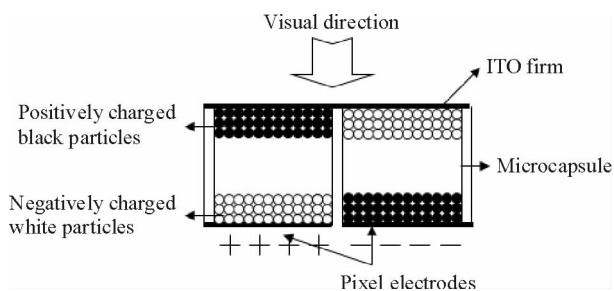


图2 微杯型电泳电子纸显示原理

Figure 2 The structure of microcup EPD

电荷控制剂可使半径为 $1\ \mu\text{m}$ 的带电粒子所带电荷为 $50 \sim 100$ 个^[12],相应电泳迁移率达到 $10^{-5} \sim 10^{-4}\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,则响应时间 T 可表示为:

$$T = \frac{6\pi d^2 \eta}{V\zeta\varepsilon}, \quad (1)$$

式中, d 表示像素电极和公共电极之间的距离, V 表示像素电极两端的电压, ζ 表示带电粒子的电势, ε 表示电荷控制剂的介电常数.

微胶囊中包含白色和黑色2种粒子,当向像素电极加正电压时,黑色粒子向像素电极移动,白色粒子向公共电极移动,从而显示黑色.相反,当向像素电极加负电压时显示白色.因此,在一定电压值的影响下,白色粒子和黑色粒子会向某固定的方向移动,从而可以通过改变像素电极上的电压值得到一系列灰阶.在显微镜下可以清晰地看到电泳电子纸的结构(图3),EPD的左半部分像素电极加正电压,白色粒子向公共电极移动,EPD显示白色;右半部分像素电极加负电压,白色粒子向像素电极移动同时黑色粒子向公共电极移动,EPD显示黑色.

2 驱动时间

传统的驱动波形分为3个阶段:首先擦除原始

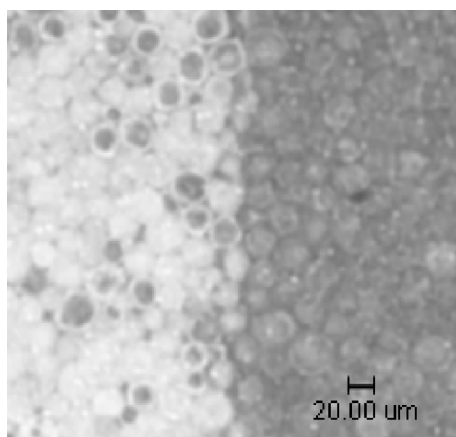


图3 微胶囊电泳显示屏的显微镜图

Figure 3 Microcapsule EPD enlargement image

灰阶至白色或者黑色;然后激活粒子便于刷写新的灰阶;最后写入新的灰阶^[6].图4是驱动波形的一个示例.在第二阶段的结束点便产生了参考灰阶点,以便进行新灰阶的刷写.传统驱动波形用于显示的开关时间非常长,长达几百毫秒.激活粒子的过程是一个占空比为50%的方波,但是,该激活方式并不适用于所有的灰阶转换过程.另外,这种激活方式使得电子纸显示屏在黑色与白色之间转换,灰阶转换的路径最长,严重影响了图像刷新速度.所以,粒子的激活需充分考虑原始灰阶与目的灰阶,适当减少激活时间,进而减少电子纸的灰阶响应时间^[11].

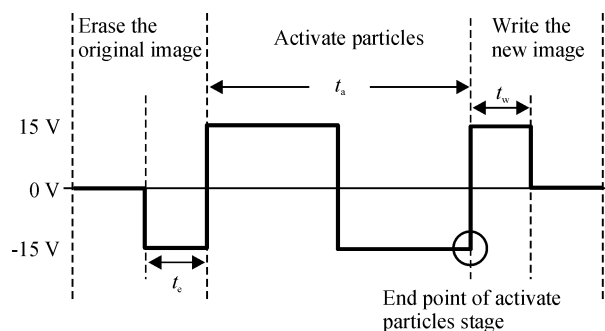


图4 驱动波形的一个例子

Figure 4 An example of driving scheme

在更新图像的过程中,驱动波形的长度决定了图像更新的时间.通过优化算法减少驱动波形长度进而提高两幅图像转换速度,缩短电子纸显示器的响应时间^[13].KAO等^[14]将擦除原始图像阶段与激活粒子阶段融合,减少了驱动波形的长度.该方法在很大程度上改进了驱动波形,但是电子纸显示器驱动时间远未达到理想,同时,在消除鬼影的过程中产生的直流残留对于显示器寿命是一个致命的危害.在提高电子纸显示器响应速度方面,信号处理

方式得到的效果也十分有限,对于视频播放是远远不够的^[15].

根据不同的显示需求,改变驱动波形模式,可以提高电子纸显示器的响应速度,进而提高阅读舒适度. 周国富等^[16]提出具有正常模式和卷轴模式的双稳态显示装置,在卷轴模式下,驱动波形先使像素进入特殊的卷轴光学状态,然后驱动像素快速地在两种卷轴状态之间切换,这种方法可以提高图像刷新速度,缩减图像刷新时间,且不会影响正常模式下图像的刷新. WANG 等^[17]将电子纸显示器的显示模式分为 4 种,控制器根据显示内容挑选合适的显示模式. 这种方式在一定程度上缩短了显示器的更新时间,但是其并没有缩短驱动波形的时间长度,对于多阶灰度的全屏显示,这种方法并没有提高显示器的响应时间. JOHNSON 等^[18]提出了电泳显示的黑白显示和灰度显示 2 种方案,根据显示内容调用相应的驱动波形,进而缩短驱动时间.

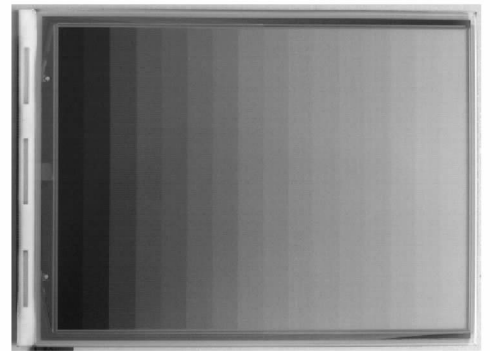
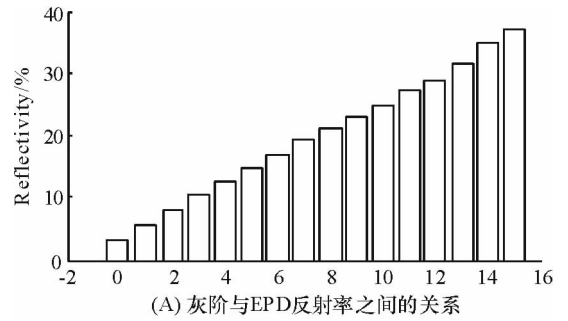
3 灰度

在微胶囊电泳电子纸中,一般把白色灰阶作为参考灰阶,其它灰阶通过驱动白色灰阶得到. 电泳电子纸显示的帧频和驱动粒子所需最短时间是固定的,因而 EPD 无法显示所有的灰阶. 能够显示灰阶的数量决定了显示的质量,通过优化驱动波形,可以有效增加灰阶数量^[19]. 目前,优化后的驱动波形可以从 4 级灰度提高到 16 级灰度,改善了图像的显示效果. 在多级灰阶驱动波形中,基于负电压补偿的多阶灰度电泳电子纸显示驱动波形方案,可以有效增加电泳电子纸灰阶数量.

电泳电子纸的灰度显示过程中,同一灰度显示的反射率并不能达到一致,显示效果还不够精确. 由于驱动波形实际长度的限制,2 种粒子不能被充分激活,由不同原始灰阶得到的相同目标灰阶的屏幕反射率还不能达到完全相同,并且,同样的驱动波形驱动电泳电子纸,屏幕反射率也不完全相同. 因此,在不同的刷新过程中,所得同一目的灰阶的反射率存在差异. 图 5A 所示,16 级灰阶的反射率数值并没有得到线性排列,但是这样的差异对于电子书的应用来说,已经足够达到视觉上的需求(图 5B).

4 闪烁

在驱动波形电平转换过程中,电泳粒子会改变



(B) 实物

图 5 EPD 的某 16 级灰阶显示

Figure 5 An example of sixteen level grayscales for EPD

原来的运动方向,从宏观角度看,一次电平的转换就会引起电子纸显示屏的一次闪烁. 对于电泳电子纸的应用来说,更新图像时产生的闪烁现象是影响阅读舒适度的一个主要问题. 因此在设计驱动波形方案时,应尽量减少低频的电压变化. 在电子纸驱动波形的设计过程中,通过优化算法可以减少闪烁次数或者提高闪烁频率以致人眼无法分辨,达到改善视觉效果的目的.

如图 6 所示,这种传统的驱动波形在图像更新过程中会产生强烈的闪烁,降低了阅读舒适度. 图 7 为在传统驱动波形作用下的显示屏实际切换过程.

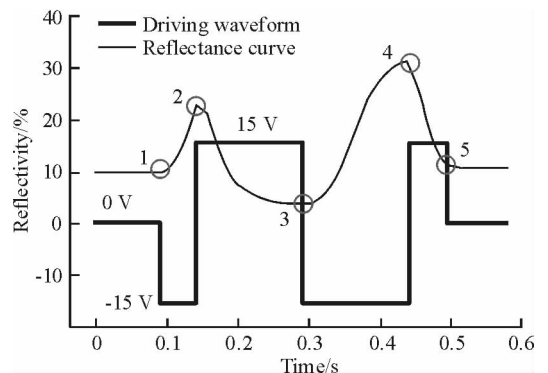


图 6 在传统的驱动波形作用下的电子纸显示屏反射率变化曲线

Figure 6 EPD reflectivity curve under the traditional driving waveform

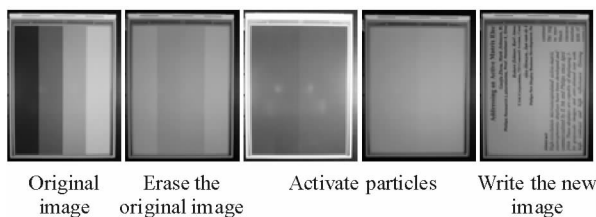
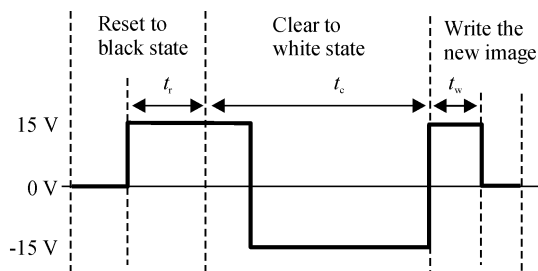


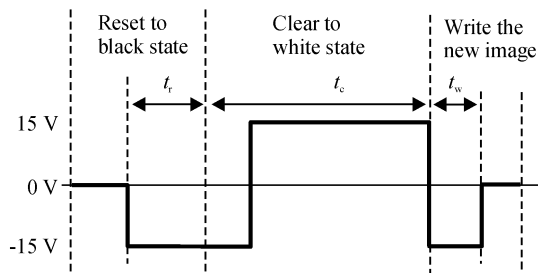
图7 传统驱动波形作用下的电子纸显示画面切换过程

Figure 7 EPD switching process under the traditional driving waveform

在图8所示的驱动波形方案中,减少了闪烁次数,提高了阅读舒适感. KAO等^[14]研究了悬浮液的黏性和响应延迟的特点,提出一种新的驱动波形,把白色灰阶作为参考灰阶,减少了闪烁. 然而并没有考虑到驱动波形的直流平衡问题,在消除鬼影的过程中产生的直流残留对于显示器的寿命是一个致命的危害. WANG等^[17]根据图像的灰阶信息使用4种不同的驱动方案,对于具有这4种特征的方案图像,提高了刷新速度减少了闪烁,但是对于4种特征以外的图像,并没有减少闪烁现象.



(A) 当目的灰阶偏向白色时,白色灰阶作为参考灰阶



(B) 当目的灰阶偏向黑色时,黑色灰阶作为参考灰阶

图8 新型驱动波形示意图^[11]Figure 8 New driving waveform schematic^[11]

5 残影

在电泳显示系统中,白色粒子为二氧化钛,黑色粒子为炭黑. 2种粒子的体积、密度、电荷量都不尽相同,所以两者的电泳性能也不同. 电泳显示屏从白色变为黑色的时间总是要短于相反的灰阶变换,

因此,驱动波形擦除图像的时间长短应充分考虑2种显示材料的性能. 在电子纸显示器切换画面之前,显示系统中的2种粒子在力学上达到平衡,在进行新图像的刷写之前,必须打破这种平衡才能准确的刷写新的灰阶. 否则,电泳粒子的活性降低,将导致刷写的新图像中存在原图像的鬼影. 因此,激活粒子的阶段也被认为是对原始图像的进一步擦除,消减鬼影图像的过程.

在传统驱动波形作用下,原始灰阶不能够被完全擦除,残留的鬼影图像影响了电子纸的显示效果. 在擦除原始灰阶的阶段,根据原始图像的灰阶,适当延长驱动波形的擦除时间,达到进一步删除原始图像的目的. 图9显示了4阶灰度图像在刷新下一幅图像时产生的残影现象. 传统的驱动波形下载到波形查找表中,由于原图像很难被完全擦除,因而下载到新的图像时候会产生残影. 电泳粒子脱离电压驱动时,其驱动性能会有所改变. 在更新图像的过程中,由于各个像素点的电泳粒子驱动性能不同,原始图像不能被有效擦除,进而在新图像上形成残影. 通过改善驱动波形前段的驱动形态,优化驱动算法,改善驱动性能,则可以有效地擦除原始图像,减弱残影. JOHNSON等^[20]和周国富等^[21]通过在电极端增加控制信号和电压补偿的方法来减少残影. 目前,市场上的电泳电子纸显示器画面质量均不是很高,灰阶级数有限,鬼影极易形成. 一些学者通过图像处理的方式在一定程度上改善了这一颓势^[14],同时这种方式也增加了处理器的负担.

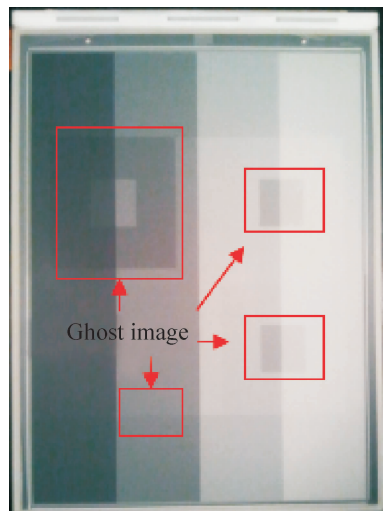


图9 EPD中四阶图像的残影现象

Figure 9 A four level gray scale image with ghost images

6 展望

随着电泳电子纸技术的日趋成熟,电泳电子纸的应用设备也越来越常见. 亚马逊电子书 kindle 的推出,使电子书为人们所熟悉并成为长时间阅读时的首选. 电泳电子纸驱动波形的进一步优化,提高电子书的显示分辨率,使读者更加健康舒适地阅读. 同时,电泳显示技术也将具有更加广泛的应用空间,例如电子标签、电子书包和电子手表等.

提高电泳显示器的响应速度以及显示效果,关键在于驱动波形的优化设计,驱动波形的设计必须综合考虑驱动时间、闪烁次数以及鬼影图像的影响. 研究内容的核心是探索电泳粒子在电压时序下的运动理论,并建立电泳粒子的运动数学模型,进而指导驱动波形的设计. 但是由于电泳显示技术材料的限制,显示屏从黑刷新到白及从白刷新到黑的时间需要 100 ms 以上,因此驱动波形只能不断改善显示效果,缩短刷新时间,减少残影,很难实现高清的视频播放. 若需要实现高质量的电子纸显示,还需要进一步发展电润湿显示技术.

参考文献:

- [1] WAYNE M, GIBBONS P J, SHANNON S T S, et al. Surface-mediated alignment of nematic liquid crystals with polarized laser light[J]. *Nature*, 1991, 351:49-50.
- [2] SEKIYA M, HIRANO T, NAKAYAMA T. Organic electroluminescence display[P]. US, B1, 6380673. 2002.
- [3] DANNER G M, FISKE T G, SILVERSTEIN L D. Display performance for mobile device applications [C] // Proceeding of the 21st International Display Research Conference, 2001:1635.
- [4] PITT M G, ZEHNER R W, AMUNDSON K A, et al. Power consumption of microencapsulated electrophoretic display for smart handheld applications[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2002, 33(1):1378-1381.
- [5] COMISKEY B, ALBERT J D, YOSHIZAWA H, et al. An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays[J]. *Nature*, 1998, 394:253-255.
- [6] KAO W C. Electrophoretic display controller integrated with Real-Time halftoning and partial region update[J]. *IEEE J Display Technol*, 2010(6):36-44.
- [7] ZHOU G F, JOHNSON M T, CORTIE R, et al. Driving schemes for active matrix electrophoretic displays[C] // Proc IDW'03: Fukuoka, Japan, 2003: 239-242.
- [8] ZHOU G F, JOHNSON M T, CORTIE R, et al. Addressing an active matrix electrophoretic display [C] // Proc IDW'04. Niigata, Japan, 2004: 1729-1732.
- [9] ZHOU G F, JOHNSON M T, ZEHNER R, et al. High-quality images on electrophoretic displays [C] // Proc SID'06. California, America, 2006: 175-180.
- [10] ZHOU G F, JOHNSON M T, ALEX H, et al. Perspectives and challenges of electrophoretic displays[C] // IM-ID. Auditorium Korea, 2005: 236-240.
- [11] BAI P F, YI Z C, ZHOU G F. An improved driving scheme in an electrophoretic display[J]. *Int J Eng Technol*, 2013, (3)4:436-441.
- [12] JACOBSON J, COMISKEY B, ALBERT J. Microencapsulated electrophoretic display: US, A, 5961804 [P]. 1999-10-05.
- [13] ZHOU G F, AILENEI N, VAN DE KAMER J, et al. Electrophoretic display activation with rapid drawing mode waveform: US, B2, 7804483 [P]. 2010-09-28.
- [14] KAO W C, CHANG W T, YE J A, et al. Driving waveform design based on response latency analysis of electrophoretic displays[J]. *IEEE J Display Technol*, 2012, 8(10): 596-601.
- [15] KAO W C, LIU S C, CHANG W T, et al. Signal processing for playing videos on electrophoretic displays [C] // 55th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Boise, USA, 2012: 872-875.
- [16] ZHOU G F, JOHNSON M T, VAN DE KAMER J, et al. Scrolling function in an electrophoretic display device: US, B2, 7796115 [P]. 2010-09-14.
- [17] WANG Z X, LIU Z Y. The key technology of e-reader based on electrophoretic display [C] // ICSTE 2010. San Juan PR, USA, 2010:333-336.
- [18] JOHNSON M T, ZHOU G F, VAN DE KAMER J, et al. Transition between grayscale and monochrome addressing of an electrophoretic display: US, B2, 7800580 [P]. 2010-09-21.
- [19] ALEX H, JOHNSON M T, ZHOU G F, et al. Driving method for an electrophoretic display with accurate grayscale and minimized average power consumption: US, B2, 7839381 [P]. 2010-11-23.
- [20] JOHNSON M T, JOHANNES E M, ZHOU G F, et al. Method of increasing image bi-stability and grayscale accuracy in an electrophoretic display: WO, A2, 2005088600 [P]. 2005-09-22.
- [21] ZHOU G F. Electrophoretic display with uniform image stability regardless of the initial optical states [P]. WO, A1, 2005093706. 2005-10-06.

Present Situation and Prospect of the Driving Waveform for Electrophoretic Display

ZHOU Guofu^{1*}, YI Zichuan¹, WANG Li^{1,2}, LU Weixiong²

(1. South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China;

2. School of Physics & Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The driving waveform of the electrophoretic display plays a decisive role for a good display effect, driving waveform algorithms optimization is of great significance for improving electrophoretic display effect. In this paper, the display principle of electrophoretic electronic paper is introduced. The current technologies of driving waveform for electrophoretic display are summarized, the technical problems in the driving waveform are proposed, and the development prospect of electronic paper is also discussed.

Key words: electrophoresis; electronic paper; driving waveform; paper like display

【中文责编:谭春林 英文责编:李海航】

· 简讯 ·

《华南师范大学(自然科学版)》编辑部荣获“2013年 中国高校科技期刊优秀团队”称号

受教育部科学技术司委托,中国高校科技期刊研究会组织了2013年中国高校科技期刊“优秀团队及优秀个人”评选活动,《华南师范大学(自然科学版)》编辑部荣获“2013年中国高校科技期刊优秀团队”称号,获该称号的只有20个团队。

近年来,《华南师范大学学报(自然科学版)》坚持开放办刊,加强同国内同行的交流和学习,跟踪学术研究前沿,加大高水平稿件的约稿力度,缩短发表周期,实现优先出版,在数字化、国际化及办刊水平上有了较大提高,此次获奖是对我刊办刊质量的充分肯定。