液晶与显示
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-11

动态滤光型彩色电润湿电子纸色彩转换算法研究

蔡翰宇,陈　睿,杨庭洪,邬志峰,赖嘉威*,袁　冬*
(华南师范大学 华南先进光电子研究院 广东省光信息材料与技术重点实验室,
广东 广州 510006)

摘要:针对传统平面加法混色彩色电润湿电子纸存在色度-亮度物理耦合、暗态漏光严重,后处理算法无法从器件底层突破性能约束的问题,提出动态滤光型彩色电润湿电子纸器件及两阶段亮度最大补偿色彩转换驱动算法。该器件以可调控彩色电润湿油墨替代固定滤光片,为RGB子像素配置独立驱动控制的黑色电润湿单元,实现色度、亮度逐通道物理解耦。为实现彩色图像再现,根据该动态滤光架构特性,以保证亮度最大为优先原则设计了两阶段色彩转化算法,算法第一阶段全开黑色单元,优化彩色电压锁定目标色度;第二阶段固定彩色电压,优化黑单元电压实现亮度补偿,并引入通道惩罚项抑制色偏。基于各单色像素实测光谱搭建正向光学虚拟仿真平台,仿真对比结果表明:相较于单层彩色以及传统图像处理算法,该器件-算法协同方案可有效抑制色彩失真,提升暗部细节复现能力,平衡色度精度与输出亮度。该研究为高画质彩色电润湿电子纸的驱动设计提供理论与仿真参考。

关　键　词:电润湿显示;电子纸显示;动态滤光;色度—亮度解耦
中图分类号:TP27　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3724/CJLCD.2026-0215　　**CSTR**:32172.14.CJLCD.2026-0215

Color conversion algorithm of dynamic filter type color electrowetting E-Paper

CAI Hanyu, CHEN Rui, YANG Tinghong, WU Zhifeng, LAI Jiawei*, YUAN Dong*

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

Abstract: In response to the challenges associated with the physical coupling of color and brightness in traditional planar additive mixed-color electrowetting display electronic paper, including significant light

收稿日期:2026-09-30;**修订日期**:2026-10-15.
基金项目:国家重点研发计划(No.2023YFB3609400);广东省粤港科技创新联合资助项目(No.2025A0505080021);教育部“长江学者和创新团队发展计划”资助(No.IRT_17R40);广东省光信息材料与技术重点实验室(No.2017B030301007);广州市类纸显示材料与器件重点实验室(No.201705030007);国家绿色光电子国际联合研究中心;国家“111”计划光信息创新引智基地
Supported by National Key R&D Program of China (No. 2023YFB3609400); Guangdong-Hong Kong Joint Funding Program for Technological Innovation (No.2025A0505080021); Program for Chang Jiang Scholars and Innovative Research Teams in Universities (No. IRT_17R40); Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Information Materials and Technology (Project number: 2017B030301007); Guangzhou Key Laboratory of Electronic Paper Displays Materials and Devices (201705030007); National Green Optoelectronics International Joint Research Center and the 111 Project

*通信联系人,E-mail:yuandong@scnu.edu.cn;jiawei.lai@m.scnu.edu.cn

leakage in the dark state and the limitations of post-processing algorithms imposed by the device′s bottom layer, we propose a dynamic filtering type color electrowetting display electronic paper device along with a two-stage brightness maximum compensation color conversion driving algorithm. This innovative device substitutes the fixed filter with controllable color electro-ink wet ink and incorporates independently driven black electro-ink wet units for each RGB sub-pixel, thereby achieving physical decoupling of color and brightness within each channel. To facilitate accurate color image reproduction, we designed a two-stage color conversion algorithm that prioritizes the maximization of brightness, leveraging the unique characteristics of this dynamic filtering architecture. In the first stage, the black unit is fully activated to optimize the target color of the color voltage. The second stage maintains the color voltage while optimizing the voltage of the black unit to achieve brightness compensation, introducing a channel penalty term to mitigate color deviation. We constructed a forward optical virtual simulation platform based on the measured spectra of each monochromatic pixel. The results of the simulation comparison indicate that, in contrast to single-layer color and traditional image processing algorithms, this collaborative device-algorithm scheme effectively suppresses color distortion, enhances the ability to reproduce details in dark areas, and achieves a balance between color accuracy and output brightness. This research offers both theoretical and simulation insights for the driving design of high-quality color electrowetting display electronic paper.

Key words: electrowetting display; electronic paper; dynamic color filter; color-luminance decoupling

1 引　　言

电润湿显示(Electrowetting Display,EWD)凭借高反射率、宽视角、视频级响应速度与低功耗特性,是下一代绿色反射式电子纸的重要技术方向[1-2]。不同于需要背光源的液晶显示,EWD依靠环境光成像,在户外强光环境下可视性优异;其原理是利用电场调控像素内油与水界面润湿性,改变油墨接触角以调制像素亮度与色彩[3]。当前EWD在材料[4]、器件结构[5]与驱动波形[6]方面已有大量研究,但高性能彩色化依旧是限制其商业化落地的核心难题。

电润湿的彩色化方案有RGB加法混色[7]和CMY减法混色两种[8],其中,CMY减法混色需要三层器件垂直堆叠,虽然可以获得较高的光效和显示色域,但器件结构复杂、成本较高,只适合用于高端场合,应用场景受限,并且由于光线在器件通过三层器件,光线在各功能膜层及界面的吸收与反射,也大幅限制了叠加后整体器件的显示性能,虽然已经取得了不错的彩色化显示效果,但在关键的反射率上仍需较大提升[9]。RGB加法混色目前有两种实现方式,一是黑色油墨搭配彩色滤光片,依靠黑色油墨收缩控制透过滤光片的光通量,但滤光片本身的光吸收会显著降低器件反射率,无法兼顾亮度和彩色显示色域,大大影响整体器件的显示性能;二是直接在单层子像素内集成RGB彩色油墨,省去滤光片,虽然现实亮度大幅提升,但无法实现有效的黑色,且色彩纯度不足[10]。单层结构最根本的缺陷在于色度与亮度共用同一彩色像素调控,油墨开口面积同时决定饱和度与亮度输出,高饱和度和高亮度难以同时实现[11]。

针对上述电润湿彩色化方案缺陷,现研究多采用图像处理与驱动补偿算法优化画质。灰度优化方面,Cai等[12]提出自适应误差扩散方法,将图像划分为边缘与平滑区域进行差异化处理,增强图像边缘清晰度与细节还原度。色彩校正方向,Mao等[13]结合色彩空间变换、CLAHE与改进Retinex算法,改善色彩均匀性并增强亮度;Chen等[14]基于像素开口率模型设计自适应色彩转换算法,完成灰度与色彩的精细化分配。也有研究结合直方图均衡Gamma校正提升画面亮度[15];谢等[16]针对EWD电压升降过程的迟滞效应建立模型,校正由此带来的灰度失真。传统静态彩色滤光片方案虽可通过底层黑色电润湿像素独立调节亮度,但上层彩色滤光片光谱固定,各通道

色度无法动态调整，色度亮度耦合问题依旧存在。图像处理类后处理算法本质仅对输入图像像素数值做变换，无法改变器件硬件固有的光谱响应、暗态漏光、色域边界等物理属性。即便将算法参数调至最优，也只能在器件本身的物理约束内做画质改善，不能实现色度通道与亮度通道的独立调控；而本文动态滤光器件通过硬件架构，分别使用上层彩色油墨、下层独立黑单元各自管控色度与亮度，实现硬件层面的物理解耦，二者存在本质区别。

为解决电润湿器件现有彩色化方案存在的亮度、色域、成本难以兼容的问题，本文提出动态滤光彩色电润湿电子纸器件，将传统滤光片方案中固定的彩色滤光片替换为可独立调控的彩色电润湿油墨层，并保留底层独立黑单元。通过调节彩色油墨开口率动态控制各通道色度，利用底层黑电压独立调节通道亮度，既可以通过把上层彩色油墨铺展达到滤光片方案中的高色彩饱和度及宽色域，又可以通过把两层油墨全部收缩达到单层三原色填充方案中的高亮度，在物理层面实现色度与亮度逐通道解耦。然而这一全新的彩色化实现方式，尚未建立对应的色彩转化算法，如何有效的将彩色图片的色彩刺激值转换成各子像素对应的驱动信号，最终实现彩色图像的高质量复现，是目前亟待解决的难题。

因此，本文基于该动态滤光型彩色电润湿器件结构，提出两阶段亮度最大补偿色彩转换及驱动算法：第一阶段全开黑层，优化彩色电压锁定目标色度；第二阶段固定彩色电压，优化黑电压完成亮度补偿，并引入通道选择性惩罚项，减小色彩偏差，提升显示一致性。本文基于各彩色电润湿单元实测光谱构建高保真正向光学虚拟器件模型，在该模型上部署本文算法与误差扩散、色彩空间变换等传统对比算法，结合主观图像效果与客观评价指标开展对比验证，为高画质动态滤光型彩色电润湿电子纸的器件驱动-色彩转换算法协同设计提供理论与技术支撑。

2 动态滤光彩色电润湿电子纸器件

2.1 器件结构与工作原理

动态滤光彩色电润湿电子纸器件像素的剖面结构及开关状态示意图如图1所示。该像素由上下两层共六个独立可控的电润湿单元构成：上层为并列排列的红、绿、蓝三个彩色子像素，腔内填充对应颜色的非极性彩色油墨；下层为三个与上层子像素一一垂直对应的独立黑色单元，腔内填充高吸光度黑色油墨；RGB三个彩色子像素的驱动电压 V_R、V_G、V_B 和对应下方三个黑色子像素的驱动电压 V_{KR}、V_{KG}、V_{KB} 独立控制。器件基于电润湿效应工作：电压改变油墨与疏水绝缘层间的界面张力平衡，电压升高时油墨收缩成团、露出高反射率白色基底，电压降低时油墨铺展、覆盖子像素区域[17]；彩色层决定出射光的光谱成分，黑色单元决定该光谱成分的总出射能量，二者串联构成“彩色滤光＋灰阶控制”的复合光学系统。三个黑单元独立控制，可选择性调节对应通道亮度。

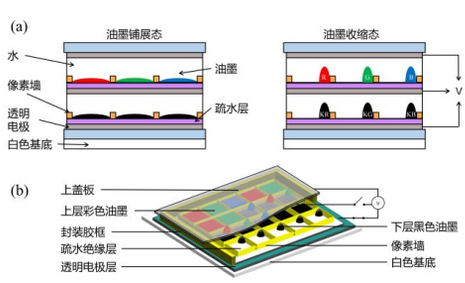


图1 动态滤光彩色电润湿电子纸器件结构。(a) 单个像素剖面结构及开关状态；(b) 像素阵列三维结构示意图。

Fig. 1 Structure of dynamic filter color electrowetting electronic paper device. (a) Cross-sectional structure and switching states of a single pixel; (b) Three-dimensional schematic of the pixel array.

图2以显示红色为例，对比了静态滤光、单层彩色和动态滤光三种彩色电润湿显示方案的油墨开口过程。图2(a)为静态滤光方案：上层为固定RGB彩色滤光片，下层为分别控制的黑色油墨。红色滤光片下的黑色油墨在梯度电压驱动下从铺展逐渐收缩，透过滤光片的红光强度增加，颜色从黑色过渡至暗红色，蓝色和绿色子像素无任何光线出射，虽然保证了红光具有较好的纯度，但像素整体亮度最高达到1/3光效，色度与亮度无法独立调节。图2(b)为单层彩色方案：仅含红、绿、蓝三个彩色油墨子像素，无下层黑色子像素。显示红色时，红色子像素油墨从铺展到收

缩，绿、蓝子像素保持最大开口，反射白色基底，颜色由淡红过渡至白色，可实现较大的亮度，但红色光受白光影响饱和度降低，色度与亮度仍然耦合。

图2(c)为本文动态滤光彩色电润湿器件，可通过彩色和黑色油墨的分别控制实现亮度与色度的解耦，具体如图2(d)所示：在其余两个颜色对应的四个子像素保持关闭时，红色子像素下层黑色单元KR开口过程对红色的调控与静态滤光方案类似，KR从铺展逐渐收缩，颜色从黑色过渡至暗红色；在KR开口基础上，上层红色彩色油墨R像素逐渐收缩，颜色从暗红过渡至灰色。在其余两个颜色对应的四个子像素保持开启时，KR从铺展逐渐收缩，颜色从淡灰色过渡至淡红色；在KR开口基础上，上层红色彩色油墨R像素逐渐收缩，颜色从淡红过渡至白色，此时红色子像素下层黑色单元KR开口过程对红色的调控与单层彩色方案类似。两步序贯调节使红色通道的色度与亮度分别由上层彩色油墨和下层黑色单元独立控制。配合其他子像素对整体亮度的调节，可实现全色彩的红色显示。

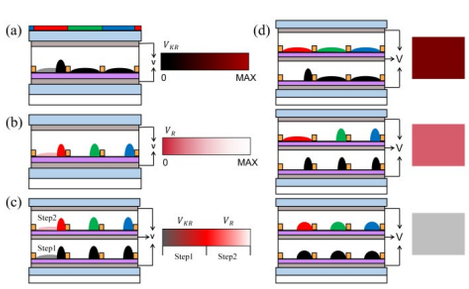


图2 三种彩色电润湿显示方案实现红色的油墨开口过程对比。(a)静态滤光方案；(b)单层彩色方案；(c)本文动态滤光彩色电润湿器件；(d)本文器件等效显示：上——静态滤光红色，中——单层彩色红色，下——开口率一致时的中性灰色。

Fig. 2 Comparison of oil aperture processes for three color electrowetting display schemes in displaying red. (a) Static filter solution; (b) Single-layer color scheme; (c) Proposed dynamic filter color electrowetting device; (d) Equivalent display of the proposed device: top—red of static filter, middle—red of single-layer color, bottom—neutral gray with identical aperture ratios.

2.2 器件制备与光谱测量

为准确地研究动态滤光型彩色电润湿显示器件的显色效果，本文基于各彩色与黑色像素的实际透射光谱及电压-开口率特性进行色彩计算，分别制作红、绿、蓝、黑单色单元，测量各单元的电压-透过率光谱。单色电润湿单元的制备工艺流程如图3(a)所示。在洁净的ITO导电玻璃基底上旋涂透明疏水绝缘层，通过光刻和刻蚀定义像素区域并构筑像素隔离墙，注入着色油墨并密封，最后将ITO顶盖对位封装。测量中电压以2V步长从开口电压递增至最大电压，在每个电压台阶稳定后采集380～780 nm波长范围的反射光谱。

图3(b-e)展示了各单色电润湿单元的电光特性测量结果。从图中可以看出，随电压升高，油墨逐渐收缩，透射率整体上升，进而可实现亮度等级和色彩纯度的分别调控。图3(f)为黑、蓝、绿、红四种单色单元的电压-开口率曲线，均呈现典型的电润湿阈值特性，开口率随电压增加而单调增大，通过该曲线，可以确定特定混色情形下每个子像素应有的驱动电压。图3(g)为CIE 1931标准色匹配函数，用于将光谱数据转换为三刺激值。上述透射率光谱、开口率曲线与色匹配函数共同构成了本文光学模型的基础数据，为从驱动电压到显示颜色的精确映射提供了实测依据。

2.3 显色效果对比

基于各色电润湿单元的实际光谱数据及开口特性，计算出三种彩色化方案在CIE 1931色度图上可实现的色域范围如图4(a)所示，三原色的实际显色效果如图4(b)所示。其中，静态滤光方案采用理想红、绿、蓝滤光片与黑色油墨组合，其色域三角形面积最大，三原色色坐标接近光谱轨迹，色纯度高，主要是由于采用的滤光片光谱比电润湿油墨的色纯度更高。然而，滤光片仅允许窄带光通过，且黑色油墨在开口状态下仍存在一定吸收，导致整体透射率低，亮度显著受限，从实际实现的三原色图像可以看出，整体颜色暗淡，显示效果较差。单层彩色方案直接使用彩色油墨，油墨光谱较宽、色纯度不足，且无下层黑色单元遮挡，各彩色子像素间存在白色串扰，漏光严重，其色域三角形明显小于静态滤光方案，但整体亮度较高。本文动态滤光方案的色域介于两者之间，一方面通过上层彩色油墨提供色度调

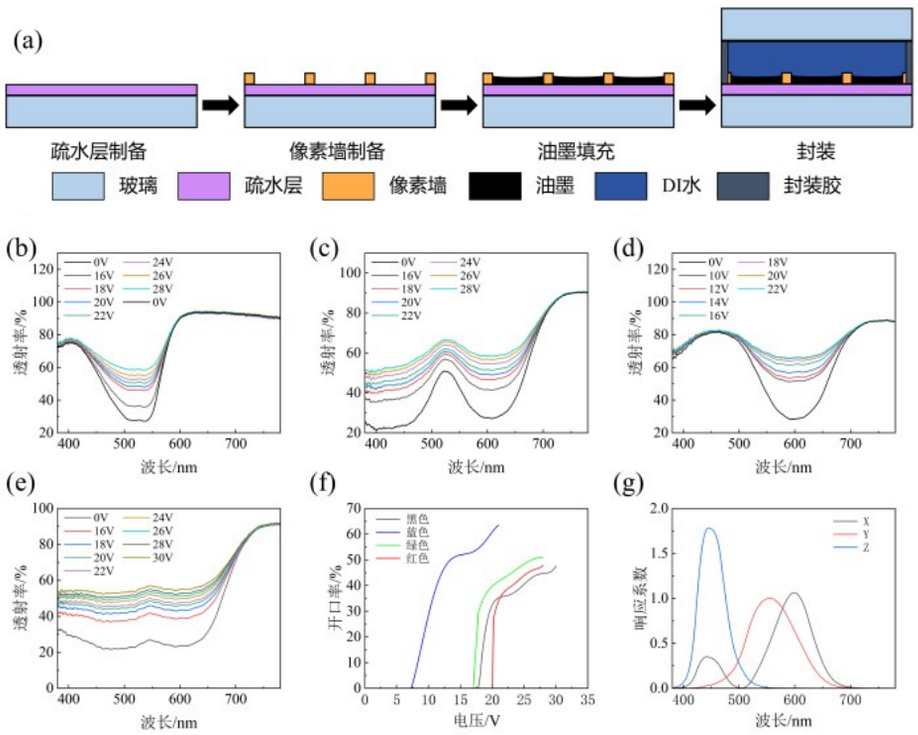


图 3 单色电润湿单元制备工艺与电光特性。(a) 制备工艺流程;(b) 红色像素电压-透射率曲线;(c) 绿色像素电压-透射率曲线;(d) 蓝色像素电压-透射率曲线;(e) 黑色像素电压-透射率曲线;(f) 四色单元电压-开口率曲线;(g) CIE 1931标准色匹配函数。

Fig. 3 Fabrication process and electro-optical characteristics of monochrome electrowetting units. (a) Preparation process flow; (b) Red pixel voltage-transmittance curve; (c) Green pixel voltage-transmittance curve; (d) Blue pixel voltage-transmittance curve; (e) Black pixel voltage-transmittance curve; (f) Four-color unit voltage-aperture ratio curve; (g) CIE 1931 standard color matching functions.

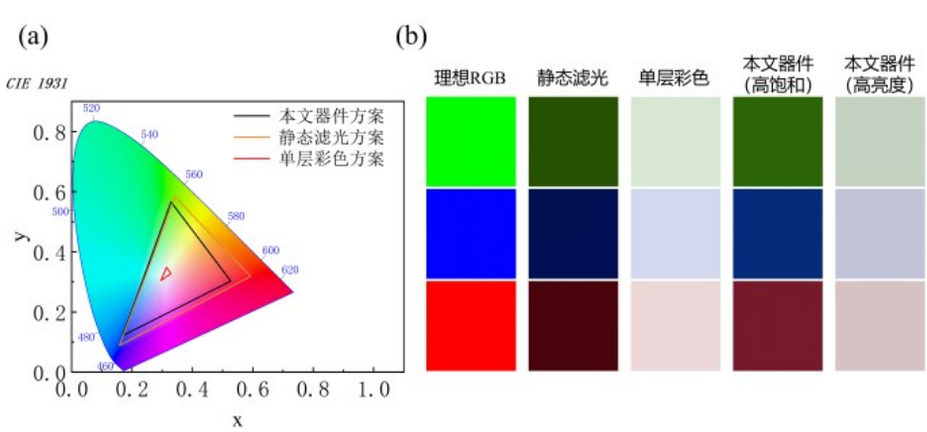


图 4 三种彩色电润湿显示方案显色效果对比。(a)色域对比;(b)三原色显色情况对比。

Fig. 4 Gamut comparison of three color electrowetting display schemes. (a) Gamut; (b) Color presentation of the three primary colors.

制,另一方面利用下层独立黑单元补偿亮度,既可以按照静态滤光的方式实现较高的色域,又可以按照单层彩色的方式实现较高的亮度,与图 2 中的理论模型具有较好的一致性。油墨光谱半高宽越大,不同原色光谱之间相互重叠越严重,会降低原色色纯度,进而压缩器件可实现色域范

围。受限于当前RGB油墨的色偏和较宽的光谱半高宽,动态滤光型器件的色域仍有待进一步扩展。未来可通过优化油墨配方、窄化油墨光谱、引入更多原色通道等方式提升色域覆盖率。

3 色彩转换算法设计

3.1 两阶段亮度最大补偿算法

在实际彩色图像驱动显示时,需要根据各像素的色彩确定六个子像素对应的开口率,并且转换成各自对应的驱动电压,才可以彩色图像再现,该过程中需要解决的显示驱动问题为:“给定目标颜色-求最优驱动电压”。传统的RGB加法混色均基于静态滤光方案,目标像素颜色的三刺激值可直接转换成三个黑色子像素的开口率,进而确定各自的驱动电压[18]。而对于本文提出的动态滤光方案,不仅要通过三个黑色子像素的开口率调控亮度,而且要同时通过三个彩色子像素调控色度,同一个目标颜色,可能对应多个不同的子像素调控方案,这是一个典型的不适定逆问题:六个未知电压,三个目标量,解空间是欠定的。动态彩色滤光电润湿的独立黑单元恰好为这个欠定系统提供了额外的自由度,使得器件可以在满足色度方程的前提下,引入额外的优化目标,从而获得更理想的显示效果。

电润湿电子纸属于反射式显示器件,通过反射环境光实现显示,虽然在室外高亮度环境中显示效果突出,但在正常的室内环境中,如何提高其显示亮度一直都是研究的重点[19]。因此,为保证动态滤光型器件实现最优的彩色显示效果,本文提出的亮度最大补偿驱动算法,其核心思想是:在保证色度精确复现的前提下,最大化器件在该色度下的亮度输出。算法遵循“预处理-粗配准-精补偿”的三段式架构,将六维欠定驱动问题解耦为色度匹配与亮度补偿两个序贯求解的子问题。算法总体流程如图5所示。

输入图像的sRGB值,按IEC 61966-2-1执行gamma展开,得到线性RGB,再经器件原色矩阵M转换为全亮度XYZ。器件亮度范围为$[Y_{min}, Y_{max}]$,需将全亮度Y_{full}线性映射至该范围:

$$Y_{target} = Y_{min} + \frac{Y_{max} - Y_{min}}{Y_{max}} \cdot Y_{full} \quad . \tag{1}$$

为保证彩色显示质量,亮度压缩不能改变色品坐标。令缩放倍数为$s = Y_{target}/Y_{full}$,则$X_{target} = s \cdot X_{full}$,$Z_{target} = s \cdot Z_{full}$。最后计算目标颜色在器件原色矩阵中的线性混合系数$g = M^{-1} \cdot XYZ_{target}$,用于确定主贡献通道。

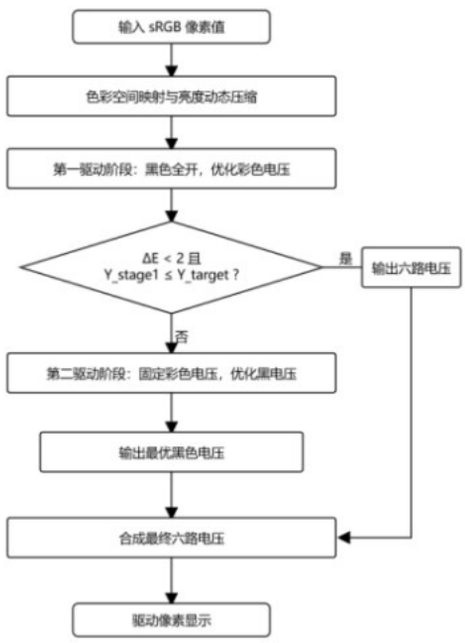


图5 两阶段亮度最大补偿驱动方法流程图

Fig. 5 Flowchart of the two-stage maximum luminance compensation driving method

第一驱动阶段固定三个黑色单元为最大电压V_{Kmax},此时黑油墨高度收缩,仅对光路产生固定衰减。六维问题降维为三维,在彩色电压空间中采用L-BFGS-B搜索使色差最小的电压组合。该算法由Byrd等[20]和Zhu等[21]提出,适用于带边界约束的优化问题。收敛判据为连续两次色品坐标变化量小于1×10^{-4}。输出上层三色收敛电压V_R^*,V_G^*,V_B^*,第一阶段实际亮度Y_{stage1}和第一阶段实际色彩误差ΔE_{stage1}^*。

分流判据为:若$\Delta E_{ab}^* < 2$且$Y_{stage1} \leqslant Y_{target}$,则说明当前目标色度已精确复现,且亮度已触及物理上限,直接输出六路电压;否则进入第二阶段。

第二驱动阶段固定彩色电压为第一阶段收敛值,待优化变量切换为三个黑电压。计算亮度缺口比$s = \min(1, Y_{target}/Y_{stage1})$并热启动黑电压。根据主贡献通道分配通道选择性惩罚系数γ_R,γ_G,γ_B。代价函数为:

$$J = 10 \times \Delta E^*_{ab} + 1 \times (Y_{pred} - Y_{target})^2 + \gamma_R (V_{KR})^2 + \gamma_G (V_{KG})^2 + \gamma_B (V_{KB})^2 , \quad (2)$$

式中 γ_R、γ_G、γ_B 为通道选择性惩罚系数。根据目标颜色线性混合系数 g 识别主贡献颜色通道，主贡献通道惩罚系数取较小值 0.1～1；非主贡献通道取较大惩罚系数 5～10。惩罚项约束非主导通道的黑色单元电压，避免非目标通道黑油墨过度铺展引入额外光谱吸收，从而抑制寄生色偏。

迭代采用采用梯度下降的方式，利用数值差分计算梯度，通过 Armijo 回溯线搜索确定步长，更新后进行边界投影。满足以下任一条件退出迭代：$|Y_{pred} - Y_{target}| < 0.01$ 且 $\Delta E^*_{ab} < 1.5$；连续 5 次迭代，代价函数 J 的变化量均小于 10^{-4}；迭代次数 $k > 300$，强制退出，取历史中最优的一组黑电压。合成完整的六维驱动向量：$[V^*_R, V^*_G, V^*_B, V^*_{KR}, V^*_{KG}, V^*_{KB}]^T$。

两阶段优化收敛特性与颜色演变如图 6(a)所示，第一阶段色差从 18 快速降至 10 附近后趋于平缓，第二阶段色差从约 4 进一步降至 2.6 左右。图 6(b)中色块渐变显示：图像预处理后色块为浅粉色，第一阶段收敛后色块为浅粉紫色，第二阶段收敛后色块为深灰紫色。两阶段色块差异明显，原因在于：第一阶段固定三个黑色单元为最大电压，此时黑油墨完全收缩，亮度达到器件物理上限，但由于动态滤光器件的色域受彩色油墨色偏与光谱半高宽的限制，色度无法完全匹配目标，色差仍较大，因此第一阶段收敛色块整体偏亮、饱和度不足，呈现浅粉色；第二阶段开始前进行电压热启动，根据亮度缺口比 将三个黑电压初始化，黑油墨铺展导致亮度大幅下降，色块随之整体变暗；同时第二阶段通过梯度下降在补偿亮度的同时进一步微调三个黑电压，在亮度与色度之间重新平衡，使色差降至约 2.1，颜色更接近目标色。因此，两阶段色块在亮度与色调上的显著差异，正是电压热启动与黑电压优化共同作用的结果。

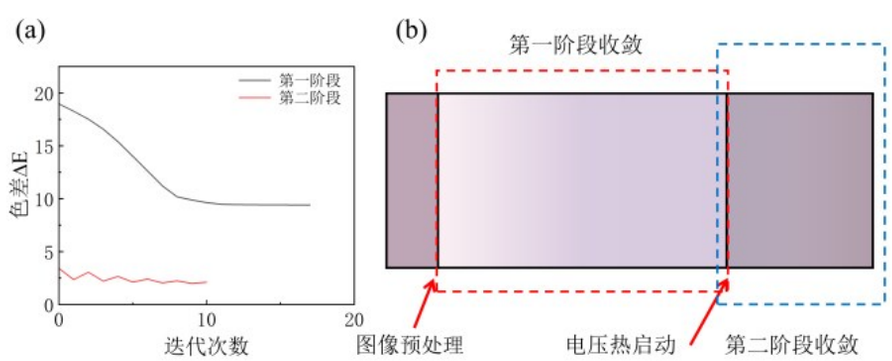


图 6 两阶段优化收敛特性与颜色演变。(a) 两阶段色差收敛曲线；(b) 优化过程颜色渐变。

Fig. 6 Convergence characteristics and color evolution of the two-stage optimization. (a) Color difference convergence curves of the two stages; (b) Color gradients during optimization.

3.2 转换算法验证方案

为了验证上述色彩转换与驱动算法的显示效果，本文建立了“给定电压——求显示颜色”的正向模型。基于单色单元实测光谱与电压的对应关系（图 3(b-e)），可以通过给定六路驱动电压，计算最终显示颜色的 CIE XYZ 三刺激值，进行彩色图像的重构。该模型基于 Roques-Carmes 等[22]提出的电润湿光开关物理模型。设油墨在波长 λ、驱动电压 V 下的单次透射率为 $T=(\lambda, V)$，光路两次穿过油墨层，忽略多次反射与界面反射，则单层油墨完全铺展时的等效反射率为：

$$R_{oil}(\lambda) = T^2(\lambda, V) . \quad (3)$$

考虑到开口率对于透射率的影响，设开口率为 $A_C \in [0,1]$，其物理含义是子像素面积中露出白基底的比例，开口部分光直达白基底，反射率近似为 1；铺展部分光两次穿过油墨。二者面积加权得到单层油墨的等效反射率：

$$R_C(\lambda)=(1-A_C)\cdot T_C^2(\lambda,V_C)+A_C,C\{R,G,B\}\ . \quad (4)$$

并针对双层结构进行了扩展考虑到光路两次穿过油墨层,每个子像素的有效反射光谱为:

$$R_C(\lambda)=R_C(\lambda)\cdot R_{KC}(\lambda),C\{R,G,B\}\ . \quad (5)$$

完整像素的总反射光谱为三个子像素的等面积叠加 $R_{pixel}(\lambda)=\frac{1}{3}\sum_{c\in\{R,G,B\}}R_C(\lambda)$。在D65照明体下,XYZ三刺激值为:

$$G=k\int_{380}^{780}R_{pixel}(\lambda)\cdot S_{D65}(\lambda)\cdot\bar{x}(\lambda)d\lambda,\quad G\in\{X,Y,Z\}, \quad (6)$$

其中k为归一化常数,使理想全反射白板Y=100。为提升计算效率,本文将六路电压离散为15级,预计算所有组合的XYZ并存储为多维插值查找表。后续所有算法调用LUT插值,单次查询耗时低于1 ms,较实时积分计算加速约三个数量级。

本文将正向模型作为展示彩色显示效果的"虚拟器件"使用,所有算法均在此虚拟器件上运行,输出显示图像与客观指标。该方式既避免了实物器件制备周期长、一致性差的问题,又保证了算法验证的物理可信度,为后续对比实验提供了公平、可重复的仿真平台。

4 结果与分析

4.1 主观对比分析

为验证本文中动态滤光器件结构及色彩转换算法的性能,设计五组对比实验,所有方案均在上节建立的正向光学模型上运行,确保对比条件一致。五组方案分别为:静态滤光方案、单层彩色方案、误差扩散、色彩空间变换与本文方案。为保证对比公平,本文对误差扩散与色彩空间变换两种对比算法的参数进行统一配置,且均已调试至最优。误差扩散算法采用Floyd-Steinberg扩散核,对R、G、B三通道独立处理。色彩空间变换算法在HSV空间执行,饱和度通道采用NORM_MINMAX归一化,最后将增强后的HSV结果转回sRGB。其中,静态滤光方案采用理想滤光片与黑色油墨组合,仅通过统一电压调节黑油墨开口率;单层彩色方案仅使用上层彩色油墨、无下层黑色单元;误差扩散与色彩空间变换为图像处理类算法,先对输入sRGB图像进行增强处理,再经预处理映射为六路驱动电压;本文算法则通过两阶段优化直接生成六路驱动电压,通过动态滤光的方式实现彩色显示。

图7为四种不同类型及色彩构成的测试图像在五种方案下的显示效果对比。图中第一行为低照度建筑图像,第二行为暖调条件下的猫咪图像,第三行为高色彩饱和度鹦鹉图像,第四行为秋色自然风景图像;列(a)为原始sRGB参考图像,列(b)为静态滤光方案,列(c)为单层彩色方案,列(d)为误差扩散算法,列(e)为色彩空间变换算法,列(f)为本文动态滤光方案及算法实现的显示效果展示。

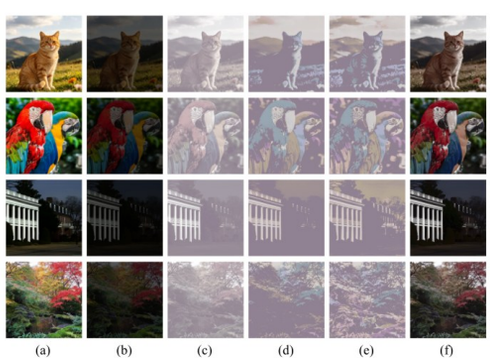


图7 四种测试图像在五种方案下的显示效果对比。(a)原始sRGB图像;(b)静态滤光方案;(c)单层彩色方案;(d)误差扩散算法;(e)色彩空间变换算法;(f)本文方案及算法。

Fig. 7 Comparison of display results for four test images under five schemes. (a) Original sRGB images; (b) Static filter scheme; (c) Single-layer color scheme; (d) Error diffusion algorithm; (e) Color space transformation algorithm; (f) Proposed algorithm of this work.

从显示效果图像可以看出,静态滤光方案(图7(b))采用理想彩色滤光片与整面黑色油墨组合,色域覆盖较广,但其亮度受滤光片吸收限制而明显偏低,整体严重偏暗,暗部细节丢失严重。针对此类色偏问题,刘等[23]研究了不同色温环境光下的色彩校正方法,但该方法未涉及器件层面的色度-亮度解耦。单层彩色方案(图7(c))仅使用上层彩色油墨,无下层黑色单元遮挡,虽然整体亮度较高,但存在暗态漏光、对比度极低,

图像整体泛白且色彩饱和度不足,高色彩饱和鹦鹉和低照度建筑图像的细节几乎完全湮没。相比之下,本文动态滤光方案(图7(f))通过上层彩色油墨与下层独立黑单元的联合调控,在保留一定亮度的同时显著抑制了暗态漏光,图像色彩更接近原图,暗部细节得到较好保留。

从色彩转换算法差异来看,误差扩散(图7(d))和色彩空间变换(图7(e))均为图像处理类算法,前者通过误差扩散增强局部对比度,后者在HSV空间对饱和度和亮度进行增强[13]。但两类算法均未考虑器件固有的色偏特性;且经增强后的色彩容易超出器件色域范围,直接颜色映射过程中将发生色域截断,引入显著的色彩失真。本文色彩转换算法则从驱动层面同时优化色度与亮度,通过两阶段解耦策略在窄色域条件下尽可能精确地复现目标颜色,视觉上明显优于误差扩散和色彩空间变换。

4.2 客观指标对比

四种测试图像在五种方案下的客观指标对比见表1,从数据可以看出,静态滤光方案在平均色差和部分SSIM、PSNR指标上表现最优,这得益于理想滤光片带来的较宽色域。然而,其亮度极低且颜色暗淡,视觉质量并不理想。单层彩色方案由于缺乏下层黑单元遮挡,色差和结构相似性均最差。误差扩散和色彩空间变换作为图像处理算法,未考虑器件色偏,增强后反而失真,各项指标均不理想。本文色彩转换算法在平均色差上略高于静态滤光方案,但在SSIM和PSNR上显著优于单层彩色、误差扩散和色彩空间变换,且视觉上色彩更自然、暗部细节更完整。综合考虑客观指标与主观视觉,本文算法在动态滤光器件上实现了色度精度与亮度匹配的较好平衡,验证了独立彩色与黑色调光结构与两阶段驱动算法的有效性。

表1 四种测试图像在五种方案下的客观指标对比

Tab. 1 Comparison of objective metrics for four test images under five schemes

图像	指标	静态滤光	单层彩色	误差扩散	色彩空间	本文算法
低照度	平均ΔE^*_{ab}	18.63	36.17	34.42	37.14	9.67
	SSIM	0.48	0.44	0.35	0.44	0.82
	PSNR/dB	12.52	8.84	9.51	9.07	21.17
猫咪	平均ΔE^*_{ab}	45.02	29.80	31.47	32.45	24.43
	SSIM	0.41	0.78	0.62	0.71	0.90
	PSNR/dB	7.95	13.31	15.79	15.13	18.76
鹦鹉	平均ΔE^*_{ab}	44.51	51.38	54.16	54.92	35.98
	SSIM	0.40	0.61	0.51	0.56	0.88
	PSNR/dB	11.63	10.22	11.90	11.48	20.02
风景	平均ΔE^*_{ab}	34.49	35.20	35.21	36.96	23.98
	SSIM	0.34	0.63	0.49	0.66	0.84
	PSNR/dB	10.76	11.55	13.65	12.18	17.83

为更完整地评价三种器件方案的光学性能,本文进一步计算了峰值反射率、暗态对比度与CIE1931色域覆盖率三项器件级指标。计算中采用光谱修正后的理想开口率状态,并引入器件非理想因素修正,包括填充因子、界面反射损耗与差异化暗态基线。结果表明:静态滤光方案的峰值反射率为6.44%,暗态对比度为10.12,色域覆盖率为63.88%;单层彩色方案的峰值反射率为72.19%,暗态对比度为3.64,色域覆盖率为0.38%;本文动态滤光方案的峰值反射率为72.19%,暗态对比度为56.78,色域覆盖率为49.18%。三种方案在亮度、对比度与色域三个维度上呈现明显的互补关系:静态滤光方案色域较宽但亮度极低,单层彩色方案亮度高但对比度与色域严重不足,本文方案则在三者之间取得折中,兼顾了亮度输出、暗态纯净度与色域宽度,进一步验证了动态滤光结构在器件级光学性能上的均衡优势。

5 结　　论

本文针对加法平面混色型彩色电润湿电子纸色度与亮度耦合、对比度与饱和度不足的问题，提出了一种新型动态滤光器件结构，并针对其色彩与亮度调控特性设计了两阶段亮度最大补偿驱动算法，实现了高质量的彩色图像复现。

该动态滤光型彩色电润湿器件通过为每个红、绿、蓝子像素配置可独立驱动的黑色电润湿单元，在物理层面实现了色度与亮度的逐通道解耦；算法采用“预处理-粗配准-精补偿”三段式架构进行色彩转化，第一阶段固定黑层全开、优化彩色电压以锁定色度，第二阶段固定彩色电压、优化黑电压以补偿亮度，并引入通道选择性惩罚项以抑制色偏；基于分立单色单元实测光谱构建了高保真正向光学模型，并将其作为虚拟器件验证算法可行性。

通过四种不同测试图像的色彩仿真对比，发现本文彩色化方案及色彩转算法较静态滤光、单层彩色、误差扩散、色彩空间变换四种方案具有明显优势。相较于单层彩色方案和图像处理类算法，本文算法显著降低了色差并提升了结构相似性；与静态滤光方案相比，虽然其平均色差略低，但亮度极低，视觉质量不理想。本文算法在色度精度与亮度匹配之间取得了更好平衡，验证了动态滤光结构与两阶段驱动算法的有效性，为该结构器件的彩色图像驱动显示奠定了基础。

需要指出的是，本文目前处于仿真验证阶段，所提出的动态滤光器件结构与两阶段驱动算法均基于分立单色单元实测光谱构建的正向光学虚拟模型进行验证，尚未完成完整像素阵列的实物制备与驱动测试。因此，本文结论主要反映算法在理想化模型下的性能表现，实际器件的显示效果仍需进一步实验验证。后续工作将开展完整像素阵列的实物制备与实测，评估算法在真实器件上的鲁棒性与显示性能，并进一步完善器件结构设计与驱动方案。

参　考　文　献：

[1] 杨斌，邱莹，林喆，等。柔性电润湿显示发展现状及展望[J]. 液晶与显示，2024，39(4)：436-446.
YANG B，QIU Y，LIN Z，*et al*. Development status and outlook of flexible electrowetting display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*，2024，39(4)：436-446.（in Chinese）

[2] Urazhdin S，Birge N O，Pratt W P，*et al*. Current-Driven Magnetic Excitations in Permalloy-Based Multilayer Nanopillars [J]. *Physical Review Letters*，2003，91(14)：146803.

[3] Liu F L，Cheng Y K，Zhang J H，*et al*.. Research progress of physics of electrowetting display devices [J]. *Acta Physica Sinica*，2023，72(20)：208501.

[4] Guo Y yuan，Jiang H wei，Yuan D，*et al*.. Progress in electrowetting display materials and device technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*，2022，37(8)：925-941.

[5] Zhou K，Heikenfeld J，Dean K A，*et al*.. A full description of a simple and scalable fabrication process for electrowetting displays [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*，2009，19(6)：065029.

[6] Yi Z，Zhang H，Zeng W，*et al*.. Review of Driving Waveform for Electrowetting Displays [J]. *Frontiers in Physics*，2021，9：728804.

[7] Kuo S，Chang Y，Cheng W，*et al*.. 34.3：*Novel Development of Multi-Color Electrowetting Display* [C]. SID Symp Dig Tech Pap，2009，40(1)：483-486.

[8] Heikenfeld J，Zhou K，Kreit E，*et al*.. Electrofluidic displays using Young - Laplace transposition of brilliant pigment dispersions [J]. *Nature Photonics*，2009，3(5)：292-296.

[9] Zhang B，Liao X，Xie L，*et al*.. Reflectivity enhancement of full color tri-layer electrowetting display with polymer cholesteric liquid crystal films [J]. *Frontiers in Physics*，2022，10：1013102.

[10] Ku Y，Kuo S，Huang Y，*et al*.. Single-layered multi-color electrowetting display by using ink-jet-printing technology and fluid-motion prediction with simulation [J]. *Journal of the Society for Information Display*，2011，19(7)：488-495.

[11] 潘定平，吴学忠. RGBW 显示映射算法策略[J]. 液晶与显示，2019，34(2)：194-199.

PAN D P, WU X Z. Strategy of RGBW display mapping algorithm [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34 (2): 194-199. (in Chinese)

[12] Cai B, Mei T, Lin S, *et al*. Image gray scale information adaptive error diffusion of electrowetting electronic paper [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(24): 3554-3565.

[13] 毛文杰. 基于色彩空间变换的电润湿电子纸色彩校正 [J]. 光电工程, 2025, 52(2): 240226
MAO W J. Color correction of electrowetting electronic paper based on color space transformation [J]. *Opto—Electronic Engineering*, 2025, 52 (2): 240226. (in Chinese)

[14] Chen M, Lin S, Lin J, *et al*. Adaptive Enhancement Display of Chromatic Electrowetting Based on Color Conversion [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 2389-2397.

[15] Chen M, Lin Z, Lin S, *et al*. Electrowetting display of multiscale Gamma based on dynamic histogram equilibrium [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 20471.

[16] 谢子昱,梅婷,林珊玲,等。电润湿电子纸迟滞特性的灰度失真校正方法 [J]. 光子学报,2024, 53 (7): 0712004.
XIE Z Y, MEI T, LIN S L, *et al*. Gray-scale distortion correction method for hysteresis characteristics of electrowetting electronic paper [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53 (7): 0712004. (in Chinese)

[17] Roques-Carmes T, Hayes R A, Feenstra B J, *et al*.. Liquid behavior inside a reflective display pixel based on electrowetting [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(8): 4389-4396.

[18] Hunt R W G. The Reproduction of Colour. [M]. New York: Wiley, 2004. ISBN 978-0-470-02425-6.

[19] Qian‐yi F, Lin S, Lin Z, *et al*.. Visual Enhancement by Contrast Model for Electrowetting Displays Under Ambient Light [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2026, 34(3): 75-84.

[20] Byrd R H, Lu P, Nocedal J, *et al*.. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1995, 16(5): 1190-1208.

[21] Zhu C, Byrd R H, Lu P, *et al*.. Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound-constrained optimization [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1997, 23(4): 550-560.

[22] 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.

[23] Liu Y, Lin S, Lin Z, *et al*.. Color correction of color electrowetting display under ambient light with different color temperatures [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(1): 32-39.

作者简介:



蔡翰宇,男,硕士研究生,2024年于湘潭大学获得学士学位,主要从事电润湿电子纸显示算法方面的研究。E-mail: chy140118@163.com



袁　冬,女,教授,2013年博士毕业于华南理工大学,长期从事电润湿电子纸显示器件研究,E-mail: yuandong@scnu.edu.cn



赖嘉威,男,副研究员,2018年博士毕业于华南理工大学,从事磁性功能材料及反射式显示方向研究,E-mail: jiawei.lai@m.scnu.edu.cn