文章编号：1007-2780(2026)08-1118-16

电泳电子纸驱动波形设计研究进展与挑战

冯子康，熊　昕*，刘学清*
（江汉大学 光电材料与技术学院，湖北 武汉 430056）

摘要：电泳电子纸（electrophoretic display，EPD）通过外加电场调控微胶囊或微杯内带电粒子的空间分布，实现低功耗、双稳态的反射式显示。驱动波形决定粒子从历史状态向目标灰阶或颜色状态的迁移路径，是影响响应时间、残影、闪烁、功耗、直流平衡和可靠性的核心控制变量。针对已有综述中横向比较不足、评价指标与工程对标脱节、彩色及智能驱动挑战讨论不够深入等问题，本文选取1998—2025年间与驱动波形、局部刷新、三色/黑白红电子纸、视频化更新及智能优化直接相关的代表性研究，围绕黑白电泳电子纸、三色与黑白红电子纸、智能优化设计3条主线进行归纳。文章进一步从机理、适用工况、量化指标和工程局限4个维度比较参考灰阶、直流平衡、多电压等级、高频激活、阻尼振荡、自适应生成、卷积神经网络和动态规划等方法。分析表明，电泳电子纸驱动波形设计正由经验规则优化转向物理机理约束、实验反馈和算法搜索协同驱动的发展阶段；温度敏感性、不同尺寸面板的边缘场差异、彩色粒子多阈值控制、统一评测规范和控制器部署成本仍是后续研究的关键问题。

关　键　词：电泳电子纸；驱动波形；残影抑制；三色电子纸；智能优化
中图分类号：TN27　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.3724/CJLCD.2026-0098　　**CSTR：**32172.14.CJLCD.2026-0098

Research progress and challenges in driving waveform design for electrophoretic e-paper

FENG Zikang, XIONG Xin*, LIU Xueqing*

(*School of Optoelectronic Materials and Technology*, *Jianghan University*, *Wuhan* 430056, *China*)

Abstract: Electrophoretic displays(EPDs) realize low-power and bistable reflective imaging by electrically controlling the spatial distribution of charged particles in microcapsules or microcups. The driving waveform determines the transition path from a historical state to a target grayscale or color state, and therefore strongly affects response time, ghosting, flicker, power consumption, DC balance, and reliability. In response to the insufficient cross-comparison, weak connection between evaluation indicators and engineering benchmarks, and limited discussion of color and intelligent driving challenges in existing reviews, this paper surveys representative studies published from 1998 to 2025 on driving waveforms, partial update, three-color and black-white-red e-paper, video-oriented refresh, and intelligent optimization. The literature is discussed along three lines: black-and-white EPD waveform design, three-color and black-white-red EPD waveform design, and intelligent waveform optimization. Major strategies, including reference grayscale, DC balance, multilevel voltage, high-frequency activation, damped oscillation, adaptive generation, convolutional neural networks, and dynamic programming, are compared in terms of mechanism, applicable scenarios, quantitative indicators, and engineering limitations. The analysis shows that EPD waveform

收稿日期：2026-06-01；**修订日期：**2026-07-17.
*通信联系人，E-mail：xqliu@jhun.edu.cn；scysxiongxin@hotmail.com

design is moving from empirical rule-based tuning toward coordinated optimization combining physical constraints, experimental feedback, and algorithmic search. Temperature sensitivity, panel-size-dependent fringing fields, multi-threshold control of color particles, unified benchmarking, and controller-level deployment remain the key challenges.

Key words: electrophoretic display; driving waveform; ghost suppression; three-color e-paper; intelligent optimization

1　引　　言

电泳电子纸依靠环境光反射成像，具有双稳态保持、静态显示功耗低和户外可读性较强等特点。Comiskey等较早提出可用于反射式电子显示的电泳墨水体系，随后电泳显示逐步成为电子阅读器、电子价签、低功耗信息终端和可穿戴状态显示的重要技术路线[1-2]。在电泳显示单元中，外加电场并非只控制“亮”与“暗”的切换，而是改变不同带电粒子在显示层内的空间分布。驱动波形不仅承担图像写入功能，也承担历史状态消除、粒子活化、灰阶稳定、残余电荷补偿和局部刷新调度等功能。

从应用需求看，当前电泳显示面临的核心矛盾是“双稳态低功耗”与“快速动态显示”之间的物理矛盾：双稳态要求粒子在无电场时具有较强保持能力，而动态图像、电子价签批量刷新、可穿戴终端和低帧率视频显示又要求粒子在短时间内完成可重复迁移。提高电压幅值或压缩复位阶段可以缩短响应时间，但可能带来残影、闪烁、直流残留和功耗上升；增加振荡或激活阶段有利于粒子活化，却可能延长总体刷新时间。因此，驱动波形设计本质上是对粒子迁移速度、显示质量、电气可靠性和控制器资源之间进行约束优化。近年来低功耗波形、动态多波形调用和视频化补偿研究的出现，正反映了这种需求从静态阅读向彩色化、柔性化和动态化场景扩展的趋势[3-5]。

从近年产业资料看，彩色电子纸正在从电子阅读器扩展到电子价签、公共信息牌、零售海报和可穿戴/移动终端。现有反射式显示技术研究指出，电子纸的核心优势在于低功耗、日光可读和柔性基底兼容，但其动态图像刷新、颜色饱和度和大面积均匀性仍是限制因素[6]。E Ink Kaleido 3、Gallery 和 Spectra 6 等彩色电子纸路线分别面向阅读/书写、全彩反射式显示和零售标牌场景，说明终端需求已由黑白静态文本逐渐转向彩色图文、低功耗标牌和局部动态提示[7-9]。这种产业变化要求驱动波形同时兼顾多颜色粒子路径、刷新速度、残影控制和控制器资源，而不再只是黑白灰阶转换问题。

周国富等较早对电泳电子纸驱动波形进行了系统梳理，主要总结了阶段式复位、灰阶转换及典型工程需求[10]。然而，随着三色电子纸、黑白红（black-white-red，BWR）电子纸、局部刷新、视频化更新及算法优化研究的推进，驱动波形设计所面对的问题已从黑白灰阶转换扩展至多色粒子分离、红色残影控制、视觉质量评价、多目标权衡和控制器部署。若仍以传统黑白电泳电子纸的阶段结构概括全部研究进展，则难以完整反映近年来彩色化和智能化方向的发展变化。

本文以“电泳电子纸驱动波形设计”为主题边界，不将电润湿显示[11-12]、光子晶体显示或液晶取向等不同显示机理的研究纳入核心比较。全文按照“基本原理与评价指标-黑白电泳电子纸驱动优化-三色与黑白红电子纸驱动-智能优化方法-发展趋势”的逻辑展开，重点回答4个问题：驱动波形优化主要改变了哪些可控变量；不同方案在机理、适用工况和短板上有何差异；已有研究报道的响应时间、残影、闪烁和功耗等指标如何对标；物理建模与智能搜索如何为后续研究提供可迁移、可部署的设计路径。

为保证本综述范围清晰且比较过程可追溯，本文对文献检索与筛选方法作如下说明。本文以 Web of Science、IEEE Xplore、ScienceDirect、SpringerLink、MDPI、CNKI 等数据库为主要来源，选取“electrophoretic display”、“electronic paper”、“driving waveform”、“ghost image”、“three-color electrophoretic display”、“BWR EPD”、“dynamic programming”、“convolutional neural network”以及“电泳电子纸”、“驱动波形”、“残影”、“三色电子

纸”等作为关键词，检索1998—2025年相关文献。纳入标准为：研究对象为电泳电子纸或与其驱动控制直接相关的反射式显示器件；研究内容涉及驱动波形、灰阶转换、残影抑制、局部刷新、彩色粒子控制或智能优化方法。排除文献：仅涉及材料合成且未讨论驱动控制的论文、其他显示机理且与电泳驱动无直接关联的论文、重复报道或缺少实验验证的论文等。

2 基本原理与评价指标

电泳电子纸的显示状态由粒子的空间分布、遮挡关系以及反射光学响应共同决定。对于典型的黑白电泳电子纸，正负电场使带相反电荷的黑、白粒子朝不同电极方向迁移；对于三色或黑白红体系，黑、白、红粒子的电荷极性、阈值电压、迁移率及初始空间位置差异使驱动过程更加复杂。需要区分的是，文中所称“参考状态”包含两个层面：光学层面指屏幕亮度、灰阶或色度达到可重复的中间状态；内部物理层面则指粒子位置、残余电荷和局部电场历史趋于可预测状态。灰阶或颜色转换并非瞬时到达的二值过程，边缘电场等因素还会影响粒子运动控制与局部显示效果，相关研究已针对边缘效应提出波形改进方案[13]。

因此，一个完整波形通常需要完成3个基本任务：首先削弱历史图像带来的记忆效应；其次通过复位或激活阶段形成可重复的光学参考态和粒子空间参考态；最后在限定时间和电压约束下将粒子驱动至目标灰阶或目标颜色位置。粒子激活阶段并不是简单的“预摇晃”，其微观作用可理解为通过交变电场或短脉冲改变粒子局部聚集、极化、界面吸附和迟滞状态，使后续写入阶段的迁移率更稳定。不同电压幅值、频率和占空比会改变粒子受力、碰撞和回弹过程，因此激活参数必须与材料体系和目标转换任务相匹配。驱动波形的可控变量主要包括电压极性、电压幅值、脉冲持续时间、频率、阶段顺序、参考灰阶选择以及区域刷新策略。

评价驱动波形不能仅以刷新速度为依据。响应时间体现动态性能，灰阶误差和色差体现光学准确性，残影与闪烁体现视觉舒适度，直流平衡与残余电荷影响器件可靠性，而功耗、查找表(look-up table，LUT)规模与控制器复杂度决定工程部署能力。已有文献常分别报道某一类指标，例如响应时间缩短、红饱和度提升、残影消除率或闪烁降低比例，但测试温度、面板尺寸、初始灰阶、目标转换和刷新次数并不完全一致，因此横向比较时应同时说明适用工况和测量边界，主要评价指标及其物理含义、常用测量方式与横向比较局限汇总于表1。

表1 电泳电子纸驱动波形评价指标体系

Tab. 1 Evaluation indicators for driving waveforms of electrophoretic e-paper

指标	物理含义	常用测量方式/对标输出	适用场景	横向比较局限
响应时间	粒子由初始状态达到目标光学状态所需时间	亮度/反射率随时间曲线；达到阈值的时间	快速刷新、电子价签、动态信息显示	快响应可能伴随闪烁或残影增加
灰阶/色彩准确性	目标灰阶或颜色与实际显示状态的一致程度	反射率、L^*值、CIE坐标、色差	多灰阶、三色与全彩显示	易受面板批次和环境温度影响
残影/鬼影	旧图像对新图像的遗留影响	图像差分、残影值、对比度、色度漂移	局部刷新、连续页面切换、视频化更新[5,14-16]	不同研究的指标定义不统一
闪烁	刷新过程中黑白或颜色剧烈切换的可感知程度	亮度振荡次数、峰谷幅值、主观可见性测试	阅读舒适度与动态图像	与刷新速度及清除效果存在权衡
直流平衡/残余电荷	正负电压积分及历史电荷消散情况	电压时间积分、重复刷新稳定性、残余电荷模型	长期可靠运行与多次刷新	难以仅凭单次光学测量直接判断
功耗与部署复杂度	刷新能耗、峰值电流及控制器/LUT负担	峰值电流、单次刷新能耗、LUT容量、计算量	电池设备、物联网终端与工程产品	可能牺牲波形自由度或画质

如图1所示，电泳电子纸波形设计可视为由材料体系、初始状态、目标状态、波形参数、评价指标与反馈优化构成的闭环过程。材料及环境条件限定可用波形空间；初始状态与目标状态确

定转换任务；评价指标用于检验响应、残影、闪烁、功耗与可靠性；实验测量或物理仿真结果则进一步反馈至参数修正和算法搜索。与单纯结果罗列相比，本文后续比较更强调“同类方案之间的机理差异-适用场景-量化效果-短板限制”这一分析链条。

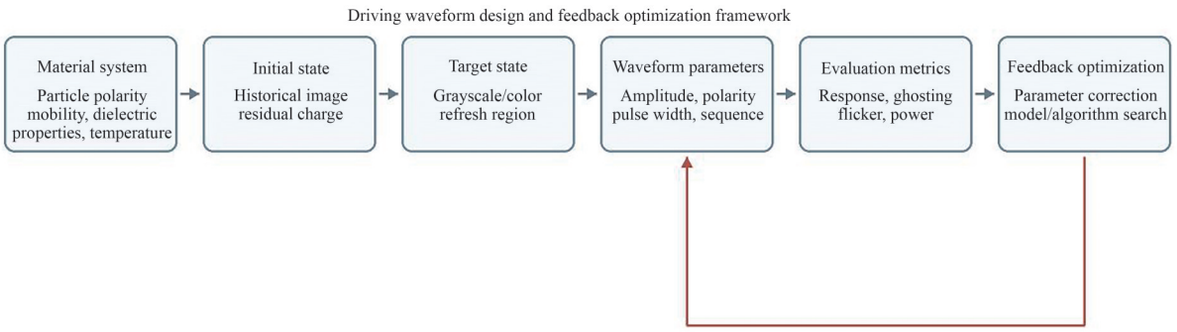


图 1　电泳电子纸驱动波形设计与反馈优化框架

Fig. 1　Driving waveform design and feedback optimization framework for electrophoretic e-paper

基于上述物理机理与评价框架，下面首先从技术体系相对成熟的黑白电泳电子纸(EPD)出发，梳理参考灰阶、直流平衡、粒子激活和局部刷新等方法的演进，再进一步讨论彩色体系与智能优化方法。

3　黑白 EPD 驱动波形优化

3.1　传统阶段式波形与参考灰阶

传统黑白电泳电子纸波形一般由擦除原始图像、复位或激活、写入目标灰阶等阶段组成。阶段式驱动方法能够降低初始图像对最终显示状态的影响，但较长的复位链条容易引起驱动时间增加和黑白状态切换幅度过大，从而加剧可感知闪烁。尹倩等从驱动流程角度讨论了传统波形压缩，Kao 教授团队则从响应延迟、实时半色调、局部区域更新和 LUT 压缩等方面开展了系统性工作，为后续局部刷新控制器设计奠定了基础[17-20]。针对这一问题，相关研究逐渐从固定的 4 阶段模板转向参考状态与转换路径的优化。

Bai 等提出改进驱动方案，通过选择更接近目标灰阶的参考状态缩短粒子运动距离[21]；Wang 等进一步以黑参考灰阶融合复位与写入过程，在满足直流平衡的前提下缩短驱动时间[22]。从机理上看，参考灰阶方法主要缩短粒子迁移路径，过程融合方法主要减少重复复位阶段，二者均属于规则型波形压缩；从适用工况看，它们更适合灰阶数量有限、温度和面板批次较稳定的黑白显示，而不适合直接处理同极彩色粒子分离和复杂边界残影。

总体而言，阶段式波形和参考灰阶方法具有结构清晰、控制器实现难度较低、便于构建查找表等优点，适合黑白或灰阶数量有限的电泳电子纸应用；其短板在于参数通常依赖特定面板、温度和初始显示历史。当面板由小尺寸电子价签扩展到大尺寸阅读器或广告屏时，边缘场分布、像素负载和区域刷新边界也会发生变化，原有参考态和脉冲时间需要重新校准。

3.2　直流平衡、多电压等级与粒子激活

直流平衡是黑白 EPD 长周期运行的重要约束。段飞波等在传统驱动结构基础上引入直流平衡补偿，使正负电压作用时间符合平衡关系，并在其实验条件下使刷新时间缩短约 200 ms，同时使刷新过程中的闪烁次数减少约 25%[23]。需要强调的是，图 2 所体现的优势建立在特定面板、电压范围和波形参数基础上，不能直接推广为所有 EPD 系统的一般规律。

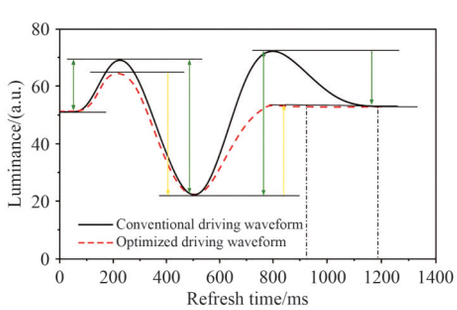


图 2　直流平衡优化前后的亮度变化与刷新时间对比[23]

Fig. 2　Comparison of luminance variation and refresh time before and after DC-balance optimization[23]

多电压等级驱动通过增加可选电压幅值和中间电压状态、扩展电压-时间组合空间，使灰阶转换可在更细粒度的电场作用下完成。Kim 等在传统三电平基础上引入额外电压等级，使灰阶数量由 8 级扩展至 165 级，平均响应时间由 90 ms 降至 61 ms[24]。从物理机制上看，中间电压等级使粒子在迁移过程中获得更细的电场强度和停留时间组合，可将连续亮度响应离散为更多稳定灰阶，从而缓解传统三电平驱动在中间灰阶控制中的跳变和过冲问题。然而，商用电泳显示源极驱动芯片受成本、功耗和 TFT 背板寻址能力限制，通常只支持 3～5 个离散电压等级；若实现高达 165 级的多电压等级驱动，需要更复杂的数模转换、电源轨切换或时间复用硬件支持，这会显著增加驱动 IC 面积、LUT 容量、线负载和一致性校准难度，因此在现有有源矩阵大面积阵列中仍难以规模化部署。该方法在实验层面证明了多电压细分的有效性，但其工程落地仍需要在灰阶数量、驱动芯片复杂度和面板一致性之间进行折中。

粒子激活优化关注的是粒子在写入前的可运动状态。Yi 等通过改进激活模式降低了不必要的激活强度[25]；He 等将亮度变化曲线及其特征点用于确定合适的激活时间，在保证参考状态形成的同时减少无效驱动时间[26]，其亮度变化与闪烁过程如图 3 所示。

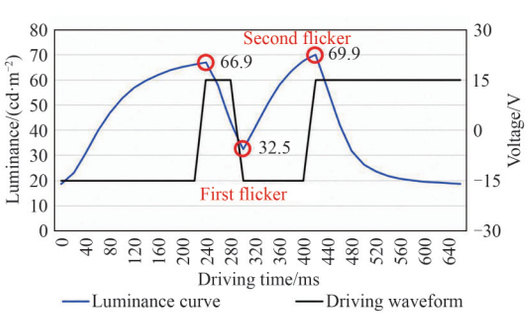


图 3 优化粒子激活波形下的亮度变化与闪烁过程[26]

Fig. 3 Luminance variation and flicker process under the optimized particle-activation waveform[26]

在现实使用中，直流平衡更适用于长期重复刷新和可靠性要求较高的场景；多电压等级适用于高灰阶与快速响应需求；激活优化适用于粒子迟滞或活性下降明显的面板。3 类方法均需依托面板参数标定，电压等级增多和参数组合扩展还会增加测试与存储成本。需要进一步指出，电泳液黏度随温度变化而明显改变，低温下粒子迁移速度下降、响应延迟增加，高温下残余电荷消散和粒子过冲风险又可能上升，因此主流工程方案通常采用温度分区 LUT、温度补偿脉冲、预刷新校准和实时亮度反馈来减小温度敏感性。

3.3 局部刷新、低功耗与视频化更新

当电子纸由静态阅读向电子价签、动态图文与低帧率视频应用拓展时，局部刷新和功耗管理的重要性显著上升。Kao 等将实时半色调与局部区域更新集成于 EPD 控制器，并进一步提出精简波形查找表的控制器架构，以降低局部更新场景下的存储负担[19-20]。这表明波形设计不仅涉及像素电压序列，还与图像预处理、存储组织和控制器调度协同相关。

在低功耗与动态图像方面，Lin 等提出的低功耗驱动波形兼顾峰值功率和显示效果[3]；Li 等通过动态多波形调用与局部分时刷新降低视频显示过程中的闪烁[4]。此类研究将优化对象从单次灰阶转换扩展到内容变化程度、刷新区域划分和时间调度策略。

相较于前面几种波形驱动方法，局部刷新与低功耗策略更适用于电子价签、可穿戴终端和物联网信息屏等内容局部变化场景，能够减少不必要的全屏更新和能量消耗；但区域边界残影、不同刷新区域的状态不一致以及控制器资源限制问题仍需进一步解决。对于大尺寸面板，边缘场和行列寻址负载更容易造成局部灰阶漂移；对于小尺寸标签和可穿戴屏，峰值功耗、刷新噪声和芯片存储则更敏感。因此，局部刷新并不是单一波形问题，而需要结合面板尺寸、驱动芯片、电源设计和图像分区策略共同设计。表 2 从策略、关键调节变量、主要目标、量化指标和局限等方面汇总了上述黑白电泳电子纸驱动波形代表性研究。

上述黑白 EPD 研究构成了波形压缩、直流补偿和局部刷新的方法基础。然而，彩色体系同时引入同极粒子分离、多阈值电压和颜色纯度控制等新问题，因此有必要进一步考察三色及 BWR 电子纸的专用驱动策略。

表 2　黑白电泳电子纸驱动波形代表性研究比较

Tab. 2　Comparison of representative driving waveform studies for black-and-white electrophoretic e-paper

代表研究	策略	关键调节变量	主要目标	量化指标/方法结果	适用场景/局限
尹倩等(2016)[17]	阶段式波形优化	阶段组合、刷新过程	降低冗余驱动	梳理传统复位、激活和写入过程；强调阶段压缩	适合黑白电泳电子纸；量化指标有限，依赖经验调参
Bai等(2013)[21]	参考灰阶方案	参考状态选择	缩短灰阶转换路径	通过接近目标的参考态改善转换一致性	需根据目标灰阶和面板材料重新标定
Wang等(2021)[22]	黑参考灰阶与过程融合	复位/写入融合	响应时间与直流平衡	融合阶段后驱动时间明显缩短	适合灰阶路径可控场景；不直接解决彩色粒子分离
段飞波等(2016)[23]	直流平衡补偿	正负脉冲积分	可靠性、闪烁、速度	特定实验下刷新时间缩短约200 ms，闪烁次数降低约25%	需给出电压范围、温度和循环条件；效果不能直接外推
Kim等(2014)[24]	多电压等级	幅值与中间电压	多灰阶与速度	灰阶由8级扩展至165级；平均响应时间90 ms降至61 ms	驱动IC、电源和LUT负担增大
He等(2020)[26]	粒子激活优化	激活持续时间、亮度曲线拐点	快速响应、低闪烁	依据亮度曲线确定有效激活段，减少无效驱动	需离线或在线测量反馈
Kao等(2010)[19-20]	局部更新与LUT压缩	区域刷新、存储架构	工程实现	支持实时半色调、局部区域更新和LUT压缩	区域边界残影和显示一致性仍需控制
Lin、Li等(2024)[3-4]	低功耗与动态多波形	功率、区域时序、内容变化	视频化、低闪烁	面向动态内容调用不同波形并降低闪烁	系统复杂度和控制器调度成本上升

4　三色与BWR电子纸驱动

本文所称三色电泳电子纸主要指在黑白粒子体系中引入第3种有色粒子的显示器件，其中采用黑、白、红粒子体系的器件通常称为黑白红(black-white-red，BWR)电子纸。

4.1　三色EPD的粒子响应与参考状态

三色电泳电子纸通常在黑白粒子体系中引入红色粒子。在常见设计中，黑、红粒子可能具有同向电场运动趋势，但二者的阈值电压、迁移率和空间分布不同；如果波形不能有效利用这些差异，便容易出现黑红混色、红色响应迟缓和颜色饱和度不足等问题。Kao等指出，三粒子体系需要借助阈值电压差异与时序控制实现目标颜色分离[27]。与黑白体系相比，三色体系的关键不只是“粒子到达前后电极”，而是如何通过多阈值电压和阶段性振荡控制不同颜色粒子的相对顺序。

在响应速度方面，Zeng等通过优化参考灰阶形成过程，使红粒子响应时间缩短65.57%，闪烁次数减少66.67%[28]。该研究采用色度坐标评价红色显示效果，重点考察改进后红色色度分布是否更加集中并接近目标红色坐标。图4反映了参考状态优化对红色显示分布一致性的改善。

Zhang等针对黑、白粒子响应迟缓问题优化激活阶段，使黑粒子和白粒子的响应时间分别缩短45%和40%[29]。上述研究表明，三色EPD的

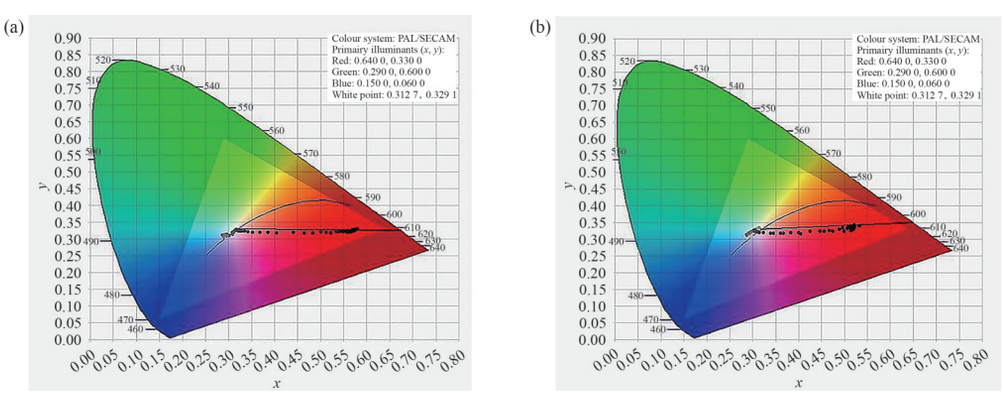


图4　参考状态优化前后红色显示色度分布对比[28]。(a) 优化前；(b) 优化后。

Fig. 4　Comparison of red chromaticity distributions before and after reference-state optimization[28]. (a) Before optimization; (b) After optimization.

波形设计必须在写入目标颜色之前调节不同粒子的相对位置与活化状态，而不能简单套用黑白EPD的转换时序。

参考状态的调整以及不同颜色粒子响应过程的优化，能够提高三色电子纸在静态图像显示中的颜色写入效率，改善颜色呈现效果。但这种驱动方案对粒子组成、阈值电压差异、介质黏度和环境温度较为敏感，一旦材料体系、胶囊尺寸或工作条件发生变化，原有参数的控制效果可能下降。因此，三色波形设计需要同时报告粒子体系、温度、初始颜色状态和目标转换路径，避免只给出单一响应时间缩短比例。在参考状态优化明确基本颜色写入路径之后，后续研究进一步转向利用高频激活、阻尼振荡和专用消影阶段，以此改善粒子活性、颜色纯度与连续刷新质量。

4.2 高频激活、阻尼振荡与红色残影控制

高频激活可通过快速交变电场改善彩色粒子的运动状态。Zhang等提出基于高频电压的快速响应波形，去除传统擦除阶段并调节激活频率、持续时间与红色驱动电压，使黑、白、红粒子响应时间分别缩短40%、47.8%和44.9%[30]。图5显示，在该实验条件下，新波形的亮度变化相较传统波形更为平缓，反映出其在抑制强烈闪烁方面的作用。

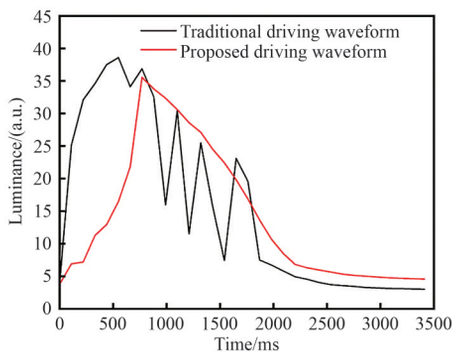


图5 高频电压驱动下传统波形与改进波形的亮度变化对比[30]

Fig. 5 Comparison of luminance variation between conventional and improved waveforms under high-frequency voltage driving[30]

为改善红色饱和度，Yi等设计阻尼振荡波形，在红色写入前增加红色粒子净化阶段，并利用逐渐衰减的正负电压促进同极性红、黑粒子分离。结果显示，最大红饱和度达到0.583，相比传统波形提高27.57%[31]，其波形结构及红色饱和度变化如图6所示。

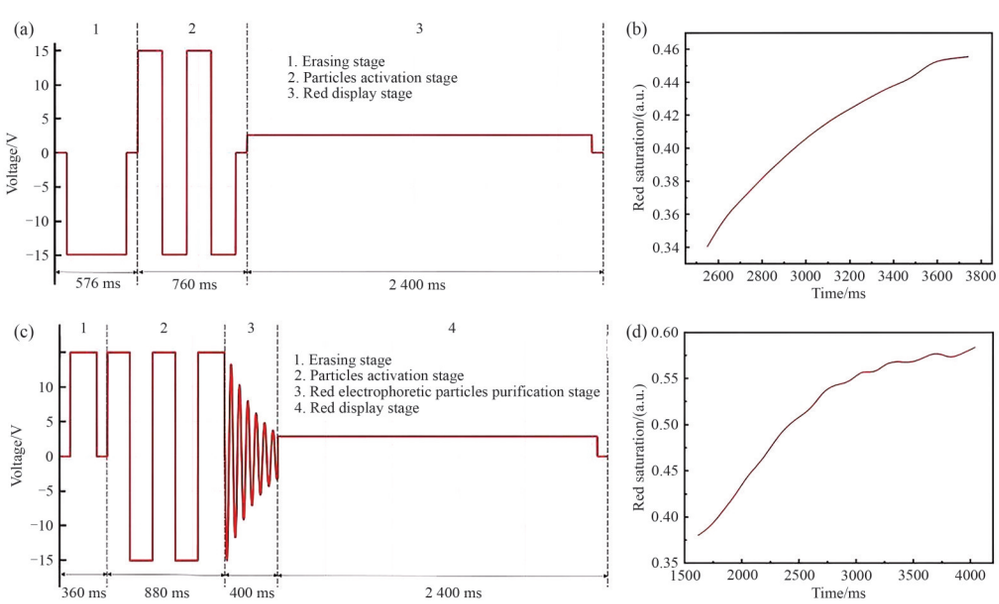


图6 阻尼振荡波形结构及红色饱和度变化[31]。(a)传统驱动波形；(b)传统波形下红色饱和度随红色显示阶段的变化；(c)阻尼振荡驱动波形；(d)阻尼振荡波形下红色饱和度随红色显示阶段的变化。

Fig. 6 Damped-oscillation waveform structure and red-saturation variation[31]. (a) Conventional driving waveform; (b) Red saturation versus red-display stage under the conventional waveform; (c) Damped-oscillation driving waveform; (d) Red saturation versus red-display stage under the damped-oscillation waveform.

红色残影是三色 EPD 连续刷新中的突出问题。Wang 等提出面向红色残影的驱动波形方案，实验中红色残影消除率达到 80.43%，闪烁强度降低 79.63%[14]。Jiang 等进一步结合三维有限元模拟与驱动方案优化，分析红粒子残留与高频振荡过程对红色残影抑制的影响[15]，图 7 对比了传统波形与改进波形下红色饱和度及亮度变化。

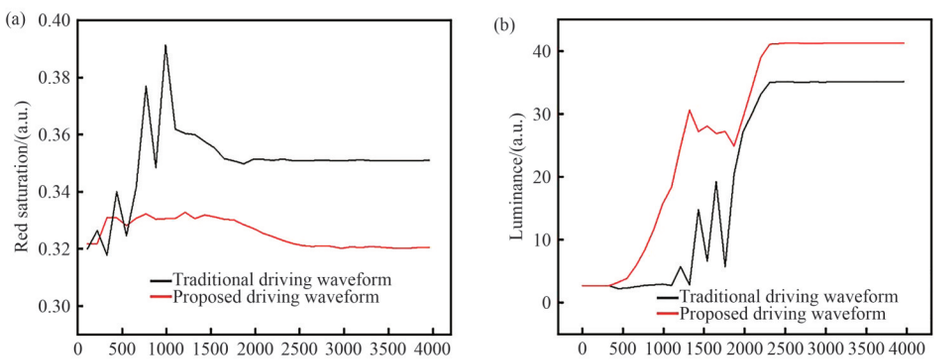


图 7　传统波形与改进波形下红色饱和度及亮度变化对比（引自文献[15]图 5）。(a) 红色饱和度对比；(b) 亮度变化对比。

Fig. 7　Comparison of red saturation and luminance variation under conventional and improved waveforms (adapted from Fig. 5 in Ref. [15]). (a) Comparison of red saturation; (b) Comparison of luminance variation.

高频激活、阻尼振荡以及红色残影抑制等方法，都是根据彩色粒子的运动特点对驱动过程进行调整，能够在一定程度上加快红色粒子的响应，提高红色显示的饱和度，并减轻连续刷新过程中产生的残影问题。从横向比较看，高频激活侧重提高粒子活性和响应速度，阻尼振荡侧重黑红同极粒子净化与分离，红色消影波形侧重擦除阶段残留粒子的清除。3类方法的共同短板是增加了参数维度：频率、振荡次数、衰减幅度和净化时间均需要重新标定，且可能带来刷新时间、功耗和闪烁之间的新权衡。在此基础上，BWR 体系还需要处理黑红同极粒子在多次刷新中的状态累积问题，使研究重点由单次颜色写入进一步转向阶段间的状态恢复与动力学连续性。

4.3　BWR 电子纸的状态恢复与连续刷新

黑白红电子纸将黑、白、红粒子集成在同一显示体系中，黑红同极性所带来的粒子混合与历史状态累积，使连续刷新更加容易产生边界污染和残影。Yang 等提出面向黑白红电子纸的改进波形，将黑、白、红粒子作为具有动力学属性的运动对象，并引入 Com 状态。本文将该术语解释为“compensated intermediate state”，即补偿型中间恢复状态，表示在快速振荡与最终成像阶段之间，通过短时电压序列使粒子运动、残余电荷和颜色分布重新趋于可控制的中间状态。该状态的作用不是形成最终光学颜色，而是在阶段之间协调粒子运动连续性，减少黑红同极粒子混合和连续刷新残影[16]。

由图 8 和图 9 可以看出，在该研究的实验条件下，新波形相较传统波形能够降低多种颜色转换过程中的残影水平。图 9 中，ΔE 值越小，表示刷新前后残留色差越小，即残影越弱。文献[16]以 $\Delta E<1$ 作为肉眼不可见残影的判定标准。BWR 研究体现出一个重要转变：彩色电子纸驱动设计不仅要使粒子到达目标位置，还需关注阶段间动力学连续性以及刷新后的状态可恢复性。

黑白红专用驱动波形主要面向三色图像显示及连续刷新场景，能够改善不同颜色之间的分离效果，并减轻刷新过程中产生的混色和残影现象。但由于该类波形需要考虑多种粒子的运动状态以及不同阶段之间的衔接关系，整体设计和参数调节相对复杂。在实际应用中，还需要根据具体面板的粒子特性、温度、面板尺寸和刷新需求进行标定，并通过长期循环测试验证显示效果与运行稳定性。

4.4　多色/全彩化与新型器件中的驱动短板

多色和全彩电子纸进一步放大了多阈值控制问题。若采用更多颜色粒子或叠层/滤色结构，每一类粒子或颜色层都对应不同的阈值电压、迁移率、保持能力和光学遮挡关系，波形必须在有限刷

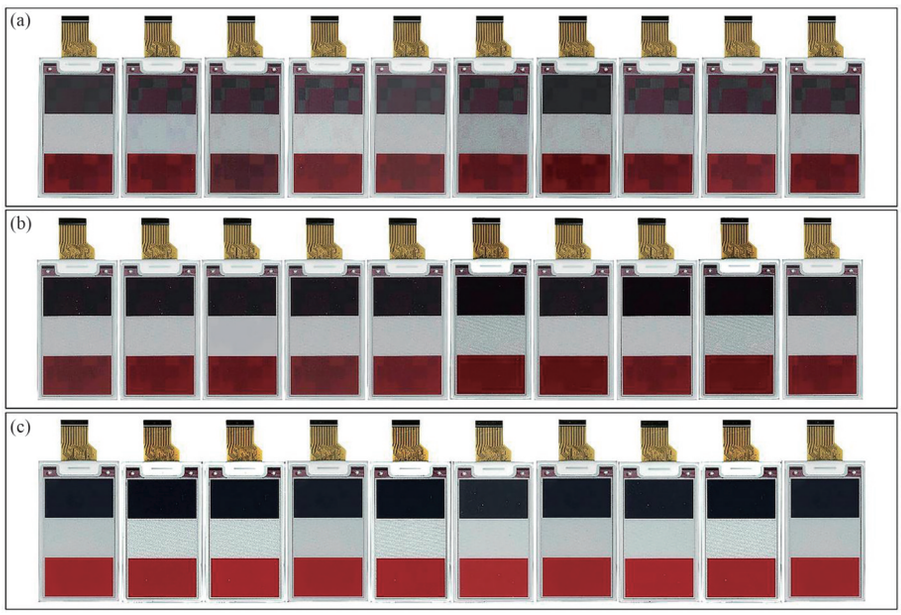


图 8 黑白红电子纸在不同驱动波形下的显示效果对比[16]。(a) 传统驱动波形;(b) 增加红粒子刷新阶段的驱动波形;(c)新型驱动波形。

Fig. 8 Display results of black-white-red e-paper under different driving waveforms[16]. (a) Conventional driving waveform; (b) Waveform with refreshed red particles; (c) New driving waveform.

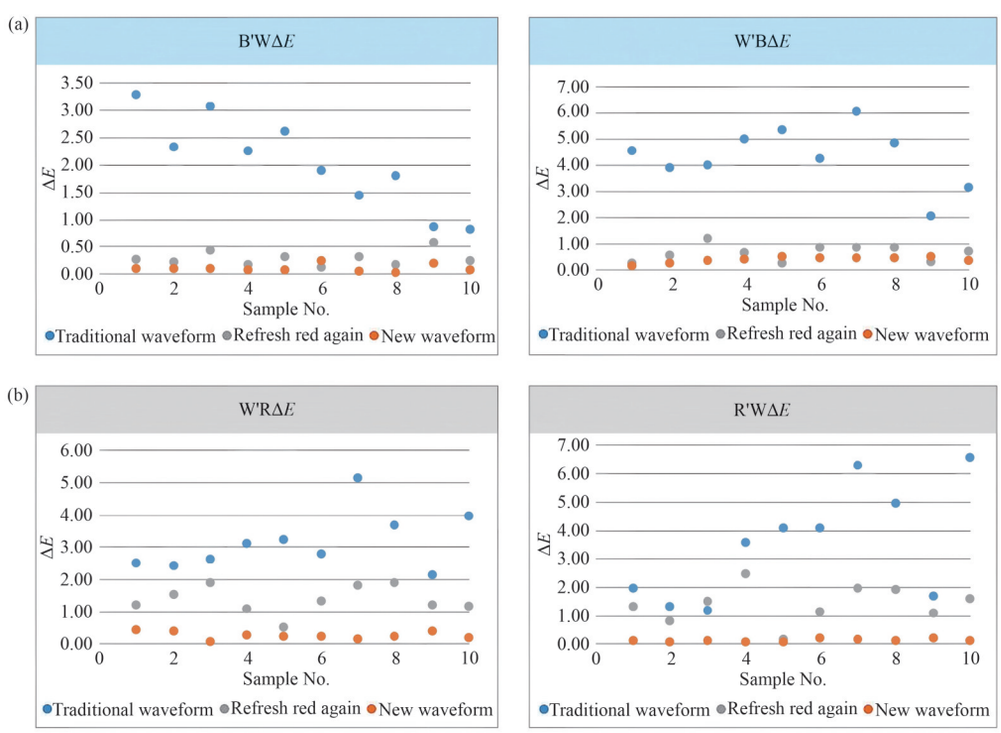


图 9 黑白红电子纸不同颜色转换条件下的残影数据对比[16]。(a) 黑白转换;(b) 红白转换。

Fig. 9 Ghosting data of black-white-red e-paper under different color-transition conditions[16]. (a) Black-white transitions; (b) Red-white transitions.

新时间内完成粒子分选、颜色纯化和残余电荷补偿。此时,传统黑白波形中“先统一参考态、再写入目标态”的思路仍有价值,但需要扩展为多参考态、多阶段净化和颜色路径规划。例如三色研究中的

红粒子响应优化、阻尼振荡和红色消影，本质上都是对多阈值粒子进行分阶段分离的尝试[14-15,28,31]。

此外，电泳显示的应用形态仍在持续拓展。荧光防伪快速响应电泳显示[32]、基于介电电泳沉积的超高分辨率量子点像素[33]等工作表明，新型器件对像素级精确驱动和多色协同提出了更高要求；近眼三维显示[34]、增强现实波导[35]和超像素光谱滤波阵列[36]等研究显示，像素级光场调控与视觉质量评价正在成为各类新型显示技术的共性需求，其方法可借鉴用于电泳电子纸多色/全彩像素设计与残影质量评价。

柔性、可穿戴和大面积电子纸则进一步提出工程约束：柔性基底弯折可能改变微胶囊间距和局部电场分布，大面积面板会增加行列寻址延迟和边缘场非均匀性，动态图像显示又要求低闪烁、低功耗和区域一致性同时满足[3-5]。因此，面向新型器件的驱动波形不应只追求单次颜色转换效果，还应建立面向多批次、多温度、多尺寸和多循环刷新条件的鲁棒性评价。

从器件形态看，柔性电子纸并不是简单地把刚性屏替换为柔性基底。Rogers 等将有机晶体管塑料背板与微胶囊电泳墨水结合，为大面积、柔性电子纸提供了早期制造路径[37]；Chen 等进一步展示了薄型柔性有源矩阵电子墨水显示，说明弯折条件下显示对比度、像素密度和背板可靠性需要同时考虑[38]。因此，柔性/可穿戴电子纸的波形短板主要体现在弯折引起的局部间距变化、像素电容和线阻变化、边缘场不均匀以及温度-机械耦合条件下的重复标定需求。

由表 3 可见，彩色波形设计的参数维度和场景依赖性显著高于黑白体系，单纯依靠经验逐项调参已难以覆盖复杂状态空间，这也构成引入反馈校准、图像学习和动态规划等智能优化方法的直接动因。

表 3　三色与黑白红电子纸驱动方法比较

Tab. 3　Comparison of driving methods for three-color and black-white-red e-paper

体系类型	关键问题	代表性波形策略	量化改善指标	主要短板/适用工况
三色电泳电子纸	红粒子响应慢、闪烁	参考状态优化（Zeng 等，2021）[28]	红粒子响应时间缩短 65.57%；闪烁次数减少 66.67%	依赖阈值差异、目标颜色路径和面板标定
	黑白粒子响应迟缓	激活阶段优化（Zhang 等，2021）[29]	黑、白响应时间分别缩短 45% 和 40%	主要改善黑白粒子，需与红粒子路径协同
	整体快速响应	高频电压激活（Zhang 等，2022）[30]	黑、白、红响应时间分别缩短 40%、47.8%、44.9%	频率、功耗和闪烁需权衡
	红饱和度不足	阻尼振荡/粒子净化（Yi 等，2021）[31]	红饱和度提升 27.57%，最大红饱和度达 0.583	增加额外净化阶段，可能延长刷新
	红色残影	专用消影波形与模型优化（Wang 等，2022；Jiang 等，2024）[14-15]	红色残影消除率 80.43%；闪烁强度降低 79.63%	需多温度、多循环和色度稳定性验证
黑白红电子纸	连续刷新残影与混色	补偿型中间恢复状态与新波形（Yang 等，2025）[16]	多种颜色转换残影整体降低	模型和参数复杂度较高；适用于 BWR

5　智能优化设计方法

5.1　反馈式自适应波形生成

传统规则方法通常需要围绕不同面板、温度和灰阶转换关系进行反复调参。Duan 等提出自适应波形生成方法，在一定材料体系和预设约束范围内，根据测量反馈调节驱动时间和电压参数，从而降低人工调参成本[39]。这一方法仍以可解释的阶段结构为基础，但通过引入反馈使波形参数从固定设定转向迭代校准。其优势在于工程实现路径较直接，适合已有面板的快速校准；不足在于候选动作空间、评价函数和参数边界仍需人工设定，当面板变化超出预设范围时，自动生成结果的稳定性可能下降。因此，反馈式方法主要解决参数校准效率问题，但对空间分布复杂的残影和区域性缺陷识别仍较为有限，下一步需要引入图像评价方法。

5.2　图像评价与学习型残影识别

残影最终表现为视觉图像质量下降，因此利用图像特征评价刷新结果并反向修正波形，是智

能驱动的重要路线。Cao等将卷积神经网络用于残影图像识别与波形设计，使残影评价能够从单点亮度测量扩展至图像区域特征分析[40]。Qin等以感知图像质量与驱动电流作为联合目标，对数字半色调过程进行优化，说明图像生成与驱动能耗可以在同一评价框架中协同考虑[41]。

学习型方法适合残影形态复杂、区域变化明显或需要内容感知更新的应用，但训练数据质量、标签一致性和模型可解释性仍是其进入工程流程的重要限制。为降低纯数据驱动方法在可解释性和跨面板迁移方面的风险，物理建模与规划搜索提供了另一条互补路径。

5.3 物理建模与动态规划搜索

相较于直接从图像学习结果，物理建模与动态规划方法更强调粒子运动路径和状态转移的可解释性。Kang等将物理响应信息与动态规划结合，把电压幅值、阶段持续时间和目标状态表示为可搜索的状态转移过程，据此求解兼顾显示效果与驱动成本的波形路径[42]。Zeng等基于粒子动力学与光散射模型分析微胶囊电子纸边缘残影，为边界失真评价和代价函数构建提供了物理依据[43]。

可将第 k 个驱动阶段的系统状态记为 S_k，控制动作记为 $u_k=(V_k,\tau_k,f_k)$，其中 V_k 为电压幅值，τ_k 为持续时间，f_k 为振荡频率或阶段类型。状态转移关系可表示为式(1)：

$$S_{k+1}=F(S_k,u_k;\theta),u_k=(V_k,\tau_k,f_k)\ , \tag{1}$$

式中，θ 表示粒子电荷量、介质黏度、胶囊尺寸、温度和初始灰阶等面板参数。若以响应时间、残影、闪烁、功耗和直流残留为联合目标，动态规划代价函数可写为式(2)：

$$J=\sum_{k=0}^{N-1}(\alpha_T T_k+\alpha_G G_k+\alpha_F F_k+\alpha_P P_k+\alpha_C C_k), \tag{2}$$

式中：T_k、G_k、F_k、P_k 和 C_k 分别表示时间代价、残影代价、闪烁代价、功耗代价和直流残留/可靠性代价；α_T、α_G、α_F、α_P 和 α_C 为不同应用场景下的权重系数。与经验波形相比，该形式可以将“快速刷新”和“低残影”等目标冲突显式量化，但状态变量、模型参数和权重系数仍需通过实验或仿真标定。图10给出了不同驱动策略下电子纸显示效果的对比。

动态规划的价值在于能够将电压、时间、阶段顺序、目标灰阶以及残余状态共同纳入搜索空间，并通过代价函数显式表达响应时间、残影、闪烁、功耗和可靠性之间的权衡。其局限在于物理模型和实验数据的标定成本较高；粒子电荷量、介质黏度、粒径分布、温度和历史状态均会改变状态转移结果。因此，智能优化方法进入工程应用时，需要把物理模型简化为控制器可执行的有限状态、查找表或轻量推理模型。当优化对象由单次状态转换扩展到连续内容更新时，还需要把区域变化程度、多帧历史和控制器调度共同纳入设计，从而形成内容感知的刷新策略。

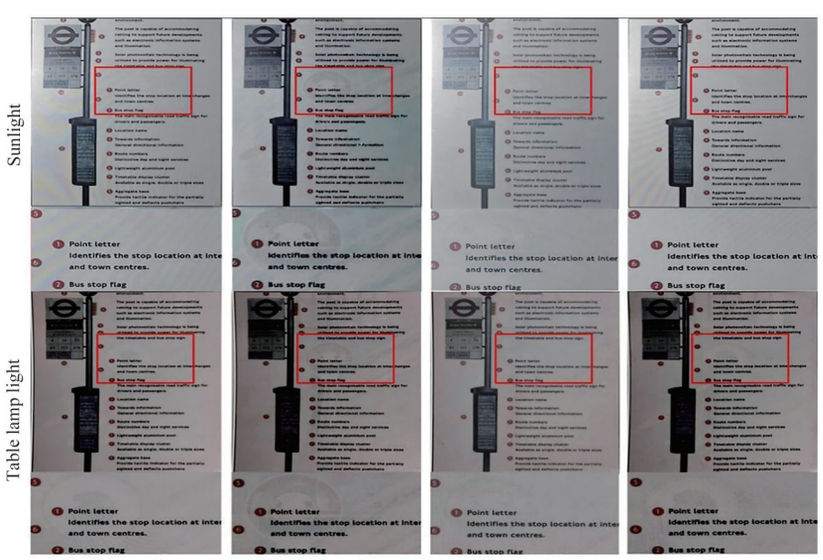


图10 不同驱动策略下电子纸显示效果对比[42]

Fig. 10 Display results of e-paper under different driving strategies[42]

5.4　内容感知与视频化刷新

在动态显示场景中，显示区域变化程度、边界更新频率和多帧刷新一致性成为全新的显示优化变量。Wang等提出基于纵向与横向时间共享振荡波形的图像补偿方法，用于提升电泳显示的一致性[5]；Li等的动态多波形调用策略则侧重不同区域的分时刷新与低闪烁控制[4]。这些工作表明，智能波形设计正从单像素、单次转换优化拓展到面向内容变化区域、视觉质量和硬件资源的系统级协同优化。

综合表4可以看出，各类智能方法在可解释性、数据依赖和部署成本之间各有侧重。由此，未来研究的关键不只是提出新的算法，而是建立可比较、可迁移并能够在控制器中实现的整体方法体系。

表4　电泳电子纸智能优化方法比较

Tab. 4　Comparison of intelligent optimization methods for electrophoretic e-paper

方法类型	主要输入	输出或优化对象	量化目标/评价指标	物理模型依赖	工程部署特征	代表文献
反馈式自适应生成	测量亮度、约束范围、候选参数	驱动阶段时间与电压	灰阶误差、响应时间、亮度稳定性	较低	易与现有LUT结合；受候选边界限制	Duan等(2016)[39]
卷积神经网络残影识别	刷新图像与残影标签	残影评价或波形修正	残影类别、图像区域差异、视觉质量	低	需训练数据、标签一致性和部署算力	Cao等(2020)[40]
图像质量-电流联合优化	图像内容、驱动电流	半色调与驱动选择	感知图像质量、驱动电流、功耗	低	适合内容感知处理链	Qin等(2020)[41]
物理模型＋动态规划	电场、粒子响应、状态代价	最优波形路径	响应时间、残影、闪烁、功耗、直流残留	高	可解释性强；标定和搜索成本高	Kang等(2025)[42]；Zeng等(2023)[43]
视频化补偿/多波形调度	区域变化、多帧状态	区域刷新序列	一致性、闪烁、功耗、局部残影	中等	适合动态图像；控制器调度复杂	Li等(2024)[4]；Wang等(2024)[5]

6　发展趋势与关键挑战

6.1　统一评价体系与多目标权衡

现有研究分别使用响应时间、亮度变化、色度坐标、残影值、闪烁次数、峰值功率和图像质量指标评价波形效果，不同实验条件与计算方式导致结果难以直接横向比较。后续研究应围绕表1所列指标建立统一测试流程，至少报告初始状态、目标转换组合、温度、面板尺寸、刷新次数、供电电压和测量方法，并同步给出速度、残影、闪烁、功耗与电气可靠性指标。只有将指标与已报道波形方法对标，评价体系才能从理论罗列转化为可复现实验规范。

在建立统一评价体系和明确多目标权重之后，驱动波形设计的核心挑战转向如何从物理层面刻画不同面板和工况下的可迁移规律。本节从直流平衡机理与残余电荷建模、彩色及视频化面板跨参数迁移、以及温度-尺寸-形态耦合约束3个方面展开讨论。

在统一评价体系的基础上，还需要进一步处理快速响应与视觉质量之间的定量权衡。压缩复位阶段、增加电压等级或采用高频激活均可能提高响应速度，但也可能带来闪烁、功耗或长期稳定性变化。未来研究需要将响应时间与残影、色差和闪烁联合纳入目标函数，并针对阅读显示、电子价签、柔性可穿戴终端和低帧率视频等不同应用设定差异化权重，而不是仅以单一最快刷新时间作为优化终点。对于阅读器，视觉舒适度和直流平衡权重应更高；对于电子价签，低功耗和局部刷新一致性更重要；对于视频化显示，区域边界和多帧补偿则成为关键。

6.2　物理建模、器件约束与跨面板迁移

要实现上述多目标权衡，必须进一步强化直流平衡、残余电荷与粒子状态的机理建模。直流平衡和残余电荷直接关联重复刷新性能与器件可靠性，也是智能搜索能够保持物理可解释性的关键状态变量。未来可将电压时间积分、历史灰阶、边缘场与粒子活性等因素转化为模型状态或代价约束，结合有限元仿真、小样本实验标定与在线反馈，建立能够跨刷新周期追踪电历史的波形优化框架。尤其在彩色电子纸中，残余电荷不仅影响亮度，还会改变不同颜色粒子的相对位置，因此

需要与色度漂移和颜色纯度一并建模。

在能够描述电历史和粒子状态的基础上，波形参数的有效性高度依赖于具体面板的物理特性。三色和全彩面板中的粒子配方、黏度、阈值电压和胶囊尺寸差异使得固定波形难以跨面板复用，因此需要建立可反映材料差异的物理描述并结合少样本反馈优化实现快速重标定。

在能够描述电历史和粒子状态之后，下一步是提升模型与波形参数在不同面板之间的迁移能力。三色、黑白红以及全彩电子纸面临红色饱和度、同极粒子分离、边界残影、颜色纯度和连续刷新一致性等问题。由于粒子配方、黏度、阈值电压、胶囊尺寸和温度均会改变波形效果，未来应重视参数迁移和少样本校准：一方面建立可反映材料差异的物理参数描述，另一方面利用反馈优化在有限测试量下完成波形快速重标定。对于叠层或多色粒子体系，还需要把不同颜色层或不同阈值粒子的响应顺序纳入路径规划，而不能只根据最终光学颜色评价波形。

除材料参数外，环境温度、面板尺寸和器件形态同样构成波形的实际约束。电泳液黏度、粒子电荷和界面吸附均具有温度敏感性，面板尺寸变化会改变边缘场分布和区域刷新边界，柔性器件还需应对弯折导致的局部电场扰动。从产业化角度看，不同彩色技术路线对驱动方案的要求亦存在差异。

除材料参数和算法结构外，环境温度、面板尺寸与器件形态也会直接影响波形的可迁移性。电泳液黏度、粒子电荷和界面吸附均具有温度敏感性，面板尺寸又会改变边缘场、行列寻址延迟和区域刷新边界。小尺寸电子价签更关注低功耗、低成本和批量刷新一致性，大尺寸阅读器或广告屏更容易受到边缘场和区域不均匀影响，柔性/可穿戴电子纸还需考虑弯折导致的胶囊间距变化与局部电场扰动。因此，主流应对方案应从固定波形扩展为“温度分区LUT＋面板尺寸参数＋局部反馈校准”的组合策略。

产业化角度还需要区分彩色技术路线对波形的不同要求。Kaleido类滤色阵列方案更重视黑白底层响应与彩色滤光层之间的视觉补偿，Gallery/ACeP类全彩粒子体系则需要在单像素内实现多颜料分选，Spectra 6类零售标牌方案更强调静态图像的色彩表现、低功耗和局部动效提示[7-9]。因此，不同彩色路线对应的驱动难点并不相同：阅读/书写设备更关注翻页速度和残影，零售标牌更关注色彩一致性和长期稳定，视频化设备则更关注局部刷新和帧间一致性。

6.3 算法搜索与控制器部署协同设计

在明确材料、环境和器件约束之后，还需要推动算法搜索与控制器部署协同设计。自适应生成、卷积神经网络和动态规划分别体现了反馈校准、图像评价和物理搜索的优势，但从实验室算法走向量产控制器仍存在现实障碍：一是测试样本和灰阶转换组合过多，完整标定成本高；二是复杂模型难以直接嵌入低功耗驱动芯片；三是LUT容量、存储带宽、驱动电源和电池寿命会限制波形自由度；四是不同批次面板和不同环境温度会造成参数漂移。更可行的路线是以物理约束保证可解释性，以小样本反馈完成面板校准，以轻量化搜索或模型推理实现实时调用，并将波形优化与区域刷新调度、图像预处理和控制器架构共同设计。

7 结　论

电泳电子纸驱动波形研究已经由传统阶段式复位与经验调参，逐步发展为面向多颜色、多场景和多指标的协同设计。黑白电泳电子纸研究奠定了参考灰阶、直流平衡、多电压等级、粒子激活和局部刷新的方法基础；三色与黑白红电子纸进一步提出了红色响应、颜色纯化、多阈值控制和残影抑制的专用策略；反馈生成、图像识别、物理建模和动态规划则推动波形设计转向可计算、可解释的优化过程。

后续研究的重点不在于孤立追求某一个指标的最优值，而在于建立统一评价体系，在物理可解释、跨面板可迁移和工程可部署的前提下，实现响应速度、显示质量、功耗与可靠性的综合平衡。本文认为，下一阶段更有价值的方向是把传统波形经验转化为状态变量和约束条件，把有限元仿真、实验反馈和轻量化算法统一到同一设计流程中，并针对黑白、三色、黑白红、柔性和视频化电子纸分别建立可复用的测试基准。只有解决温度、尺寸、批次和控制器资源约束下的稳定部署问题，智能波形设计才能真正从论文算法走向终端产品。

参　考　文　献:

[1] COMISKEY B, ALBERT J D, YOSHIZAWA H, *et al*. An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays [J]. *Nature*, 1998, 394(6690): 253-255.

[2] BAI P F, HAYES R A, JIN M L, *et al*. Review of paper-like display technologies (invited review) [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2014, 147: 95-116.

[3] LIN S L, ZHANG J H, WEI J, *et al*. Low-power driving waveform design for improving the display effect of electrophoretic electronic paper [J]. *Micromachines*, 2024, 15(9): 1076.

[4] LI S X, WANG Z Y, ZHANG H, *et al*. Optimized electrophoretic display: dynamic multiwaveform invocation with localized time-division for low-flicker video display [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, 71(8): 4751-4759.

[5] WANG Z Y, CHEN J W, ZHANG H, *et al*. Highly consistent image compensation method based on a time-sharing longitudinal and transverse oscillation driving waveform for electrophoretic video display [J]. *Optics Express*, 2024, 32(19): 33232-33246.

[6] HERLE D, MARTIN O J F, VILLANUEVA L G, *et al*. Emulating paper: a review of reflective display technologies [J]. *Journal of Optical Microsystems*, 2024, 4(2): 020901.

[7] Ink Holdings IncE. E Ink Kaleido™ 3 [EB/OL]. [2026-07-02]. https://www.eink.com/brand/detail/Kaleido3.

[8] Ink Holdings IncE. E Ink Gallery™ advanced color ePaper [EB/OL]. [2026-07-02]. https://www.eink.com/brand/detail/Gallery.

[9] Ink Holdings IncE. E Ink Spectra™ 6 [EB/OL]. [2026-07-02]. https://www.eink.com/brand/detail/Spectra6.

[10] 周国富,易子川,王利,等. 电泳电子纸驱动波形研究现状与前景[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2013,45(6):56-61.
ZHOU G F, YI Z C, WANG L, *et al*. Present situation and prospect of the driving waveform for electrophoretic display [J]. *Journal of South China Normal University* (*Natural Science Edition*), 2013, 45(6): 56-61. (in Chinese)

[11] 刘予敏,林珊玲,林志贤,等. 不同色温环境光下彩色电润湿电子纸的色彩校正[J]. 液晶与显示,2024,39(1):32-39.
LIU Y M, LIN S L, LIN Z X, *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. (in Chinese)

[12] 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)

[13] SHEN S T, GONG Y X, JIN M L, *et al*. Improving electrophoretic particle motion control in electrophoretic displays by eliminating the fringing effect via driving waveform design [J]. *Micromachines*, 2018, 9(4): 143.

[14] WANG L, ZENG W J, LIANG Z P, *et al*. Red ghost image elimination method based on driving waveform design in three-color electrophoretic displays [J]. *Micromachines*, 2022, 13(2): 275.

[15] JIANG M H, YI Z C, WANG J S, *et al*. Optimized driving scheme for three-color electrophoretic displays based on the elimination of red ghost images [J]. *Micromachines*, 2024, 15(10): 1260.

[16] YANG Y, XIE Y Y, YUAN J H, *et al*. A new waveform to solve the ghosting of BWR EPD [J]. *Micromachines*, 2025, 16(4): 420.

[17] 尹倩,白鹏飞,周国富. 电泳电子纸驱动方式的优化[J]. 电子技术应用,2016,42(4):25-27.
YIN Q, BAI P F, ZHOU G F. Driving waveform optimization based on electrophoretic displays [J]. *Application of Electronic Technique*, 2016, 42(4): 25-27. (in Chinese)

[18] KAO W C, CHANG W T, YE J A. Driving waveform design based on response latency analysis of electrophoretic displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(10): 596-601.

[19] 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.

[20] KAO W C, CHU M I, YE J A, *et al*. Design of flexible electrophoretic display controller with reduced waveform lookup tables [C]//*Proceedings of the* 2010 *Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics* (*ICCE*). Las Vegas: IEEE, 2010: 49-50.

[21] BAI P F, YI Z C, ZHOU G F. An improved driving scheme in an electrophoretic display [J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2013, 3(4): 436-441.

[22] WANG L, MA P C, ZHANG J T, *et al*. Driving waveform design based on driving process fusion and black reference gray scale for electrophoretic displays [J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 723106.

[23] 段飞波,白鹏飞,ALEX H,等. 基于直流平衡的电泳电子纸驱动波形的优化研究[J]. 液晶与显示,2016,31(10): 943-948.

DUAN F B, BAI P F, ALEX H, *et al*. Driving waveform optimization in electrophoretic display based on DC-balance [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(10): 943-948. (in Chinese)

[24] KIM J M, KIM K, LEE S W. Multilevel driving waveform for electrophoretic displays to improve grey levels and response characteristics [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(25): 1925-1927.

[25] YI Z C, BAI P F, WANG L, *et al*. An electrophoretic display driving waveform based on improvement of activation pattern [J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(8): 3133-3137.

[26] HE W Y, YI Z C, SHEN S T, *et al*. Driving waveform design of electrophoretic display based on optimized particle activation for a rapid response speed [J]. *Micromachines*, 2020, 11(5): 498.

[27] KAO W C, TSAI J C. Driving method of three-particle electrophoretic displays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(3): 1023-1028.

[28] ZENG W J, YI Z C, ZHOU X C, *et al*. Design of driving waveform for shortening red particles response time in three-color electrophoretic displays [J]. *Micromachines*, 2021, 12(5): 578.

[29] ZHANG H, YI Z C, MA S M, *et al*. Design of driving waveform for shortening response time of black particles and white particles in three-color electrophoretic displays [J]. *Micromachines*, 2021, 12(11): 1306.

[30] ZHANG H, YI Z C, LIU L M, *et al*. A fast-response driving waveform design based on high-frequency voltage for three-color electrophoretic displays [J]. *Micromachines*, 2022, 13(1): 59.

[31] YI Z C, ZENG W B, MA S M, *et al*. Design of driving waveform based on a damping oscillation for optimizing red saturation in three-color electrophoretic displays [J]. *Micromachines*, 2021, 12(2): 162.

[32] LIU G Y, WU X Z, XIONG F, *et al*. Fluorescent, multifunctional anti-counterfeiting, fast response electrophoretic display based on TiO_2/$CsPbBr_3$ composite particles [J]. *Light*: *Science & Applications*, 2024, 13(1): 198.

[33] LUO C Z, DING Y H, REN Z W, *et al*. Ultrahigh-resolution, high-fidelity quantum dot pixels patterned by dielectric electrophoretic deposition [J]. *Light*: *Science & Applications*, 2024, 13(1): 273.

[34] FAN Z B, CHENG Y F, CHEN Z M, *et al*. Integral imaging near-eye 3D display using a nanoimprint metalens array [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 3.

[35] CHEN B Q, LI C, LI X X, *et al*. SiC diffractive waveguides for augmented reality: single-layer, full-color, rainbow-artifact-free display with vision correction [J]. *eLight*, 2025, 5(1): 21.

[36] WILLIAMS C, COUSINS R, MELLOR C J, *et al*. Hyperpixels: pixel filter arrays of multivariate optical elements for optimized spectral imaging [J]. *Light*: *Advanced Manufacturing*, 2025, 6(4): 67.

[37] ROGERS J A, BAO Z N, BALDWIN K, *et al*. Paper-like electronic displays: large-area rubber-stamped plastic sheets of electronics and microencapsulated electrophoretic inks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, 98(9): 4835-4840.

[38] CHEN Y, AU J, KAZLAS P, *et al*. Flexible active-matrix electronic ink display [J]. *Nature*, 2003, 423(6936): 136.

[39] DUAN F B, BAI P F, HENZEN A, *et al*. An adaptive generation method for electrophoretic display driving waveform design [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(11): 676-685.

[40] CAO J X, QIN Z, ZENG Z, *et al*. A convolutional neural network for ghost image recognition and waveform design of electrophoretic displays [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2020, 66(4): 356-365.

[41] QIN Z, WANG H I, CHEN Z Y, *et al*. Digital halftoning method with simultaneously optimized perceptual image quality and drive current for multi-tonal electrophoretic displays [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(1): 201-209.

[42] KANG D L, ZHAO X Y, WEI X J, *et al*. Effective e-paper driving waveform design based on dynamic programming [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2025, 33(12): 1114-1122.

[43] ZENG Z, LIU Y H, LIU G Y, *et al*. Simulation and analysis of edge ghosting for microcapsule e-paper based on particle dynamics and light scattering model [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2023, 31(10): 587-598.

作者简介:



冯子康,男,硕士研究生,2025年于江汉大学获得学士学位,主要从事电泳电子纸驱动波形方面的研究。E-mail: fengzikang054@gmail.com



熊　昕,女,博士,副教授,2017年于法国巴黎索邦大学获得博士学位,主要从事电泳电子纸驱动波形设计方法方面的研究。E-mail: scysxiongxin@hotmail.com



刘学清,女,博士,教授,2004年于四川大学获得博士学位,主要从事光电功能材料方面的研究。E-mail:xqliu@jhun.edu.cn