液晶与显示
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-14

电润湿电子纸显示器件驱动波形闭环优化

王　刚[1,2],林珊玲[2,3],魏　佳[1,2],郭太良[2],林志贤[1,2,3*]
(1.福州大学 物理与信息工程学院,福州 350116;
2.中国福建光电信息科学与技术创新实验室,福州 350116;
3.福州大学 先进制造学院,泉州 362200)

摘要:针对电润湿显示器油膜分裂及驱动波形优化依赖人工经验的问题,提出一种基于图像反馈与改进贝叶斯优化的闭环优化方法。该方法通过物理状态感知动态切换采集函数,并引入油膜分裂最差值惩罚与邻域禁采策略,将失效状态纳入优化约束,实现驱动参数的自动搜索。实验结果表明,优化波形的像素开口率达到57.38%,且未出现明显油膜分裂,较传统PWM矩形波和梯度上升波形分别提高10.36和10.71个百分点;平均亮度约为730 cd/m^2,并表现出更好的输出稳定性。消融实验验证了不同驱动阶段对降低瞬态冲击、稳定油墨边界及改善油墨回流的作用。跨器件实验表明,固定优化波形直接迁移会导致性能下降,而所提出方法能够根据不同器件的响应特性重新搜索适配参数。结果表明,该方法能够在有限实验次数内获得性能较优且安全可行的驱动波形,提高驱动波形优化的自动化程度、实验效率和可靠性。

关　键　词:电润湿显示;油膜分裂;闭环优化
中图分类号:TP27　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3724/CJLCD.2026-0195　　**CSTR**:32172.14.CJLCD.2026-0195

Closed-loop optimization of drive waveforms for electrowetting e-paper displays

WANG Gang[1,2], LIN Shanling[2,3], WEI Jia[1,2], GUO Tailiang[2], LIN Zhixian[1,2,3*]

(1. *The College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou* 350116, *China*;
2. *Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou* 350116;
3. *The College of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Fuzhou* 362200, *China*)

Abstract: Electrowetting displays(EWDs) suffer from oil film splitting, while the optimization of driving waveforms still relies heavily on empirical parameter tuning. To address these issues, a closed-loop driving waveform optimization method based on image feedback and improved Bayesian optimization is proposed. A physical-state-aware mechanism is introduced to dynamically switch acquisition functions, while a worst-value penalty for oil film splitting and a neighborhood exclusion strategy are incorporated to treat failure states as optimization constraints, thereby enabling automatic search of driving parameters. Experimental results show that the optimized waveform achieves a pixel aperture ratio of 57.38% without

收稿日期:2026-09-18;**修订日期**:2026-10-18.
基金项目:国家重点研发计划(No. 2021YFB3600603)
Supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFB3600603)
*通信联系人,E-mail:lzx2005000@163.com

obvious oil film splitting, representing improvements of 10.36 and 10.71 percentage points over the conventional PWM rectangular waveform and gradient-rising waveform, respectively. The average luminance reaches approximately 730 cd/m^2 with improved output stability. Ablation experiments further demonstrate the contributions of different driving stages to reducing transient electric-field impact, stabilizing the oil boundary, and improving oil recovery. Cross-device experiments indicate that directly transferring an optimized waveform to other devices results in performance degradation, whereas the proposed method can re-optimize the driving parameters according to device-specific response characteristics. These results demonstrate that the proposed method can automatically obtain high-performance and safe feasible driving parameters within a limited experimental budget, thereby improving the automation, efficiency, and reliability of EWD driving waveform optimization.

Key words: electrowetting display; oil film splitting; closed-loop optimization

1 引　　言

随着科技的不断进步,新型显示技术与光电信息材料的相关研究内容和应用场景不断向低功耗、轻薄化方向拓展,其响应速度、显示稳定性和驱动方式等性能也受到越来越多的关注[1-3]。而作为反射式显示技术代表的电润湿电子纸显示器(Electrowetting display, EWD)凭借其具有的低功耗、灵活性、阳光下可读性和宽视角等优点获得了广泛的关注[4-6]。它不仅具有电泳电子纸的优势,而且在视频播放和全彩显示方面引入了技术进步。其核心原理在于通过电场调控油/水界面的润湿性,从而实现像素的明暗或色彩变化[7-8]。尽管电润湿的相关技术目前已取得了极大的进展,但仍有一些设计缺陷影响着其发展,例如油膜分裂导致开口率下降,进而导致相同驱动电压下的亮度降低。此外,在长时间驱动过程中,分裂的油膜液滴会受到外部振动的影响,导致其发生聚结,引起开口率发生不规则变化。这一过程会削弱EWD的显示性能[9]。同时,在设计驱动方案时,若电压选择不当则可能因压力过大而对器件造成损伤。大量研究表明,驱动波形直接影响接触角滞后、电荷俘获与油膜分裂等缺陷,合理的爬坡曲线、反向复位脉冲和载波调制在改善开口率与抑制油膜回流/分裂方面效果显著,因此波形设计被视为提升单像素显示性能的关键工程手段[10]。

油膜分裂是限制可达开口率的主要原因之一。油墨分裂现象出现的原因在于薄液膜在强电场作用下的流体动力学不稳定性,其核心在于电场力、表面张力和粘滞力之间的复杂竞争与平衡。针对像素内的两相界面动力学,已有二维/三维数值模拟与实验研究揭示:电压幅值、上升斜率、占空比及复位脉冲等参数以非线性方式改变界面张力与接触线约束,从而决定分裂阈值与连通域演化[11];高精度仿真能复现回流与指状不稳定,并用于评估特定波形对分裂抑制的能力。基于此的仿真与实验相互结合的方法,为基线波形筛选与机理理解提供了重要支撑[12-13]。Lai等[14]构建了具有开关和关闭过程的二维EWD模型,通过对模型施加不同的电压值获得了油分解过程,分析不同上升斜率与分裂发生的关系,基于分析关系提出的驱动波形可以有效抑制油裂,开口率比相同电压的方波高2.9%。Lin等[15]采用高精度三维模拟模型对油膜分裂机理进行了研究和验证,先用正弦导向实现过开启,再在稳定期用梯度非对称交流抑制分裂,相较传统PWM,亮度方差降低72.3%,稳定性提升41.6%。Zeng等[16]提出了一种由上升级和驱动级组成的,能有效减少油膜分裂的驱动波形。Hu等[17]提出了一种基于指数函数和交流方波的新型驱动波形,该波形主要由收缩阶段和稳油阶段组成,显著降低了油膜分裂。

总体而言,从上述文献研究中可以看出,分阶段、带有梯度或极性调度的波形与机理与仿真联合指导是近年来的主流趋势,虽然目前的驱动设计能有效地提升电润湿显示器的稳定性,增大开口率并抑制油膜分裂,但仍然存在着驱动波形的设计依赖于经验、跨器件一致性的保证以及人工参数整定成本高等问题,缺乏把像素级在线成

像与带安全约束的闭环优化算法系统地结合用于实测整定的工作。因此寻找一种兼具效率与效果的驱动设计方案是当前研究重点。

作为一种近似逼近方法,贝叶斯优化通过采用各种代理函数来拟合超参数与模型评价之间的关系,然后选择有希望的超参数组合进行迭代,最后得出效果最好的超参数组合。近年来,贝叶斯优化已逐渐应用于光电器件参数优化领域,例如Gao[18]等利用贝叶斯优化实现了硅光子器件结构的自动设计,提高了复杂光子器件设计的搜索效率;Garcia-Santiago[19]等将贝叶斯优化应用于纳米光子结构优化,进一步提升了复杂结构设计的优化能力。然而,现有研究主要针对器件结构、材料参数或工艺条件等静态参数进行优化,针对标准贝叶斯优化在复杂工程问题中存在的采集策略固定、约束信息利用不足等问题,已有研究通过改进采集函数、引入约束机制等方式进行了优化[18,20]。对于电润湿显示器驱动波形优化而言,其优化过程不仅涉及驱动参数与显示性能之间的非线性关系,还受到油膜分裂等动态物理状态约束,现有贝叶斯优化方法难以直接利用此类状态反馈信息。

为解决上述问题,本文提出一种基于改进贝叶斯优化算法的驱动波形闭环优化方案,通过对传统的贝叶斯优化算法进行改进,实现基于物理状态感知的驱动波形优化系统的构建。针对电润湿显示器的固有特性,设计基于最差值惩罚与动态邻域排除的双重安全策略,确保优化过程主动规避高风险参数区域,通过分析模型不确定性、性能提升速率与破裂发生频率等关键指标,构建能够动态切换全局探索、定向开发与风险边界探索三种模式的状态机,使优化算法具备自主平衡探索与开发、性能与安全的能力。

2　电润湿电子纸驱动原理

2.1　电润湿电子纸显示原理与像素结构

电润湿显示器的主要结构如图1所示,主要由顶部基板、ITO电极、像素壁、极性液体、彩色油墨、疏水绝缘层和底部基板组成。其核心原理是通过外加电压改变疏水绝缘层表面的润湿性,从而驱动有色油墨与透明电解质溶液之间的界面形变,实现对油墨的精确操控,从而达成图像显示的目的。当未施加电压时,表面的疏水层使油墨自发铺展覆盖像素区域,呈现油墨颜色,此时EWD处于“关闭”状态;施加电压后,由于外加电场的作用,液体的表面张力发生变化,油墨被驱动收缩至像素边缘,暴露出下方高反射率的白色基底[21-24],从而实现光学对比度的切换。

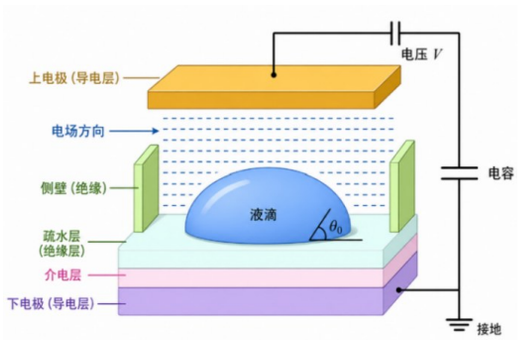


图1　EWD显示器像素结构

Fig. 1　Pixel structure of the EWD display

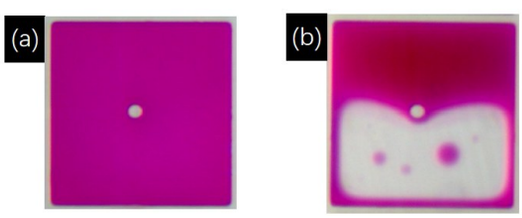


图2　电润湿开口示意图:(a)未开口;(b)开口。

Fig. 2　Diagram of electrowetting opening: (a) Not opened; (b) Opened.

电润湿效应本质上是电场作用下固—液界面表面能发生改变的结果。当外加电压施加于由电极、介电层、疏水层和导电液体构成的电润湿体系时,介电层两侧积累异号电荷并形成电场。在电场作用下,导电液体在疏水表面的接触角随外加电压的增加而减小,使液体在疏水表面的润湿程度增强,从而实现对液体界面形态的电控调节[25]。因此,外加电压能够改变极性液体在疏水绝缘层表面的接触角,使其由较大的接触角逐渐减小。电润湿过程中接触角与外加电压之间的关系通常可由Young-Lippmann方程描述,如公式(1)所示。式中,θ_x为驱动电压为V时的接触角,θ_y为驱动电压为0时的接触角,ε_0和ε_{hil}分别表示真空介电常数和介电层的相对介电常数,d是介电层的厚度,γ_{ol}是油膜与疏水绝缘层

之间的表面张力。

$$\cos\theta_x = \cos\theta_y + \frac{\varepsilon_0\varepsilon_{hil}}{2d\gamma_{ol}}V^2 \ . \tag{1}$$

2.2 油膜分裂机制

油膜分裂是电润湿显示器在驱动过程中常见的一种现象，主要表现为彩色油墨在像素开启过程中未能以完整连续的形态收缩至像素边缘，而是在像素区域内形成多个不规则油滴或残留油膜[26-27]。油膜分裂会降低像素开口区域的均匀性，使白色基底暴露不充分，从而影响像素亮度、对比度和灰度稳定性。对于需要精确灰度控制的电润湿显示器而言，油膜分裂还可能导致相同驱动条件下不同像素响应不一致，进而影响整体显示质量[28-29]。

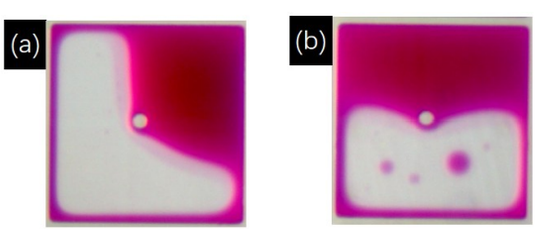


图3 电润湿电子纸显示器油墨分裂示意图：(a)无分裂；(b)有分裂。

Fig. 3 Schematic of oil splitting in electrowetting E-Paper display: (a) No splitting; (b) Splitting.

从机理上看，油膜分裂本质上是电场力、界面张力、黏滞阻力和像素边界约束共同作用下的界面失稳现象。在未施加电压时，彩色油墨在疏水绝缘层表面铺展，形成相对稳定的连续油膜。施加电压后，极性液体在电润湿作用下对疏水绝缘层的润湿能力增强，并逐渐挤压油墨层，使油墨发生收缩。当驱动力较为平缓且界面运动稳定时，油墨能够以整体形式向像素边缘收缩；但当驱动电压过高、电压上升速度过快或局部电场分布不均匀时，油墨界面会受到较强扰动，连续油膜容易被拉伸、撕裂并分裂为多个油滴[30-32]。驱动波形是影响油膜分裂的重要外部因素。简单的高幅值矩形波虽然能够快速提高开口率，但瞬时电场冲击较强，容易使油膜界面发生剧烈变形，从而增加分裂风险。相反，若采用缓升电压、分阶段驱动或保持阶段调节等方式，可以在一定程度上降低界面扰动，使油墨收缩过程更加平稳[33-35]。因此，合理设计驱动波形，使油墨在开启过程中实现平稳、连续、可控的收缩，是提升电润湿显示器显示稳定性的重要途径。

3 闭环反馈驱动系统设计

本文构建的电润湿显示器驱动波形闭环反馈系统主要包括驱动参数生成、波形加载与显示响应获取、图像反馈评价以及贝叶斯优化更新四个核心环节。首先，优化算法根据当前历史实验结果生成候选驱动波形参数组合，并通过信号发生器和功率放大器加载至电润湿显示器件；随后，显微成像模块采集驱动过程中的像素响应图像，并由图像处理算法提取像素开口率和油膜分裂状态等特征参数；上述评价结果作为优化反馈输入贝叶斯模型，用于更新代理模型并指导下一轮驱动参数搜索。通过上述循环过程，实现由参数生成到器件响应再到参数更新的闭环优化。

3.1 自动优化算法

由于EWD的性能与驱动波形之间存在着复杂的关系，数据驱动的优化算法对于波形优化而言不可或缺。贝叶斯优化算法是典型的数据驱动的优化算法，其流程如图所示。首先以若干初始样本点作为输入，本文中的样本点表示一组具体的驱动波形参数组合，例如不同阶段的电压幅值、持续时间或保持电压等。系统将该组波形参数加载至电润湿显示器样品，并通过图像采集模块获取油膜响应图像。随后，图像处理模块根据油膜开口率、油膜分裂程度、响应稳定性等指标计算该组参数对应的评价值，并将其作为贝叶斯优化算法的反馈结果。由于波形参数与油膜响应性能之间的关系受到器件结构、油墨状态、表面缺陷和实验环境等因素影响，难以直接建立精确解析模型，因此采用贝叶斯优化中的高斯过程回归对其进行近似建模，可以表示为如下公式所示：

$$f(x)\sim GP(m(x),k(x,x')) , \tag{2}$$

式中，$m(x)$为均值函数，$k(x,x')$为核函数，用于描述不同波形参数之间的相关性。通过高斯过程回归，系统不仅能够得到候选参数点的预测均值$\mu(x)$，还能够得到预测不确定性$\sigma(x)$。其中，$\mu(x)$反映该参数组合可能达到的油膜响应效果，$\sigma(x)$则反映模型对该区域预测结果的不确定

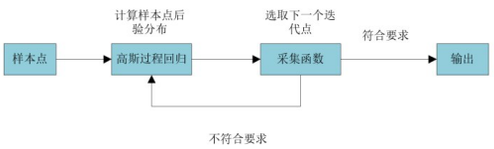


图4　贝叶斯优化流程图

Fig. 4　Bayesian optimization flowchart

程度。

在代理模型建立后,系统通过采集函数选取下一组待测试的波形参数。常见采集函数包括置信上界函数、期望提升函数和提升概率函数等。采集函数的作用是在当前预测性能较好的区域和模型不确定性较高的区域之间进行权衡,使算法既能够充分利用已有较优结果,又能够对潜在更优区域进行探索。通过这种方式,贝叶斯优化能够在较少实验次数下逐步逼近较优波形参数组合。

总体而言,基于贝叶斯优化的闭环反馈系统能够根据油膜图像反馈结果自动更新驱动波形参数选择方向。与传统人工调参方法相比,该方法不需要对整个参数空间进行遍历搜索,而是通过代理模型和采集函数在有限实验次数内逐步逼近较优参数组合。对于电润湿显示器而言,该闭环反馈机制有助于获得开口率较高、油膜分裂较少、响应过程更加稳定的驱动波形,从而提高显示器驱动波形优化的效率和可靠性。

3.2　本文驱动算法设计

在电润湿显示器驱动波形优化过程中,驱动参数与像素开口率、油膜分裂状态之间存在复杂的非线性关系。若采用传统人工扫参方法,不仅实验效率较低,而且容易在高压或快速上升电压条件下触发油膜分裂,造成无效实验甚至器件损伤。因此,本文在标准贝叶斯优化算法的基础上,引入物理状态感知、安全约束处理和动态采集函数切换机制,构建适用于电润湿显示器驱动波形优化的改进贝叶斯优化算法。设驱动波形参数向量为:$X=\{V1, N1, T1, V2, N2, T2, \cdots\cdots\}$。其中,$V$表示电压幅值,$N$表示持续时间或采样点数,$T$表示波形类型,下标表示波形的不同阶段。对于任意一组参数X,系统通过函数信号发生器和功率放大器输出对应驱动波形,并由图像处理模块计算开口率和油膜分裂状态。

为将油膜分裂这一物理失效状态融入优化过程,本文引入最差值惩罚机制。设$\mathrm{r}(x)$为油膜分裂判别结果,当$\mathrm{r}(x)=1$时表示发生油膜分裂,$\mathrm{r}(x)=0$表示未发生分裂。修正后的目标值可表示为:

$$\tilde{y}(x)=\begin{cases} y(x), & r(x)=0 \\ y_{min}-\lambda, & r(x)=1 \end{cases}, \tag{3}$$

其中,y_{min}为当前观测到的最差评价值,λ为安全惩罚系数,主要用于扩大油膜分裂样本与正常样本之间的评价差异,使代理模型能够识别失效区域。本文根据开口率归一化范围以及正常实验波动范围确定该参数,使发生油膜分裂的样本评价值明显低于正常状态,同时避免过大的惩罚导致算法过度规避搜索区域。当某组参数导致油膜分裂时,该样本点被赋予比当前最差结果更低的评价值,使高斯过程模型在该区域附近形成低性能预测,从而降低后续采样概率。在此基础上,本文进一步引入邻域禁采策略。对于已经发生油膜分裂的参数点集合$\mathrm{X_f}$,在其附近构建局部惩罚区域,采集函数修正为:

$$\alpha'(x)=\alpha(x)\cdot P(x), \tag{4}$$

$$P(x)=\prod_{x_f\in X_f}\left(1-\exp\left(\frac{\|x-x_f\|^2}{2R^2}\right)\right), \tag{5}$$

式中,$\alpha(x)$为原始采集函数,$\alpha'(x)$为加入禁采约束后的采集函数,$\mathrm{P}(x)$为用于修正采集函数的邻域禁采因子,X_f为已知分裂样本点,R为邻域排除半径,其大小根据参数空间归一化尺度设置,使禁采范围覆盖局部失效区域,同时保留足够探索空间。该策略能够在采集层面对危险区域进行抑制,避免算法反复选择靠近分裂区域的参数组合。

标准贝叶斯优化通常使用单一采集函数,如PI、EI或UCB。然而,在电润湿显示器实验中,仅依靠单一采集函数容易出现采样集中、后期停滞以及误入油膜分裂区域等问题。为此,本文采用基于物理状态的多采集函数动态切换策略。算法定义三个状态信号:探索信号Sexplore、开发信号Sexploit和停滞信号Sstagnation。当模型不确定性较高且未检测到油膜分裂风险时,系统进入全局探索阶段,采用UCB采集函数,具体如公式(6)所示,式中$\mu(x)$为代理模型在x处的预测均值,$\sigma(x)$为代理模型在x处的预测标准差,β_t为权衡参数用于控制探索与利用的比例;当最近若

干次实验开口率持续提升且无分裂发生时，系统进入定向开发阶段，采用LogEI采集函数，具体如公式(7)、(8)所示，式中f(x^+)为当前历史最大观测值，Φ(.)表示的是标准正态分布的累积分布函数，ξ为一个用于鼓励更多探索的权衡参数；当性能提升停滞或油膜分裂频繁发生时，系统进入风险边界探索阶段，采用带失败概率惩罚的采集函数，具体为在UCB采集函数上叠加公式(5)所述邻域禁采因子，使算法在保持一定探索能力的同时规避已知失效区域，从而增强算法跳出局部最优和规避风险区域的能力。

$$\alpha_{\mathrm{UCB}}(x)=\mu(x)+\beta_t\sigma(x)\,, \tag{6}$$

$$Z=\frac{\mu(x)-f(x^+)-\xi}{\sigma(x)}\,, \tag{7}$$

$$\mathrm{Log}EI(x)=\mathrm{Log}(\sigma(x))+\mathrm{Log}[Z(x)\Phi(Z(x))+\phi(Z(x))]\,. \tag{8}$$

3.3 图像处理与检测算法

闭环优化算法需要根据显微图像实时获取像素开口率和油膜分裂状态，因此，图像反馈结果的准确性和稳定性直接影响高斯过程代理模型的建立以及后续驱动波形参数推荐过程。由于贝叶斯优化算法并不直接获取驱动波形作用后的物理响应，而是依赖实验结果对代理模型进行更新，因此图像分析得到的像素开口率和油膜分裂状态直接决定当前驱动参数组合的评价结果，并影响后续参数搜索方向。若反馈结果存在较大误差，可能导致优化模型对驱动参数与显示性能之间关系产生错误判断，进而降低优化效率。因此，需要建立稳定可靠的图像检测方法，实现对EWD像素状态的准确量化。同时电润湿显示器像素尺寸较小，显微采集过程中容易受到光照不均匀、基板反射、局部污染以及像素边界模糊等因素影响，使传统基于整幅图像统一阈值的分割方法难以稳定提取有效像素区域。针对上述问题，本文结合电润湿显示器像素阵列具有规则周期排列的结构特点，提出一种基于像素周期结构约束的自标定图像分析方法，实现像素网格自动定位、开口区域识别以及开口率计算。

首先，对采集的显微图像进行灰度转换，并通过高斯滤波抑制低频光照变化和随机噪声干扰。由于电润湿显示器像素边界具有明显的周期性结构，其边缘位置在高通处理后会产生周期增强响应。因此，通过计算图像水平和垂直方向上的梯度响应，获得像素边界在不同方向上的投影特征，并利用自相关分析提取像素阵列空间周期。设水平方向和垂直方向的边缘投影信号分别为Px和Py，通过搜索自相关函数中的最大峰值确定像素周期：

$$T=\arg\max R(\mathrm{k})\,, \tag{9}$$

其中，R(k)表示投影信号的自相关函数，T表示像素单元在对应方向上的周期距离。通过该方法可以避免直接依赖灰度阈值定位边界，提高复杂光照条件下网格检测的稳定性。

然而，仅获得像素周期无法确定实际网格起始位置。由于显微采集区域通常不是从完整像素边界开始，因此进一步利用高通图像中的周期响应特征进行网格原点校准。对于已获得的像素周期Tx、Ty，分别搜索不同相位位置下的周期响应强度，并选择响应最大的位置作为网格起点：

$$O=\arg\max S(O)\,, \tag{10}$$

其中，S(O)表示不同候选原点位置对应的周期响应累积值，O表示最终确定的网格起始坐标。经过周期检测和原点校准后，根据获得的水平和垂直方向像素周期以及对应起始坐标，按照周期性排列规律逐步生成像素边界位置，从而构建完整的像素网格结构，并将显微图像划分为多个独立像素区域。完成像素区域划分后，在每个像素单元内部进行开口区域识别。由于电润湿驱动过程中油墨收缩后会暴露底层基板区域，开口区域通常表现为较高亮度和较低颜色饱和度。因此，本文在HSV颜色空间中结合亮度与饱和度特征提取候选开口区域，并通过形态学开闭运算去除孤立噪声、填补局部断裂区域。同时，利用连通域分析剔除面积过小的异常区域，从而获得最终有效开口区域。根据识别得到的开口区域面积计算像素开口率：

$$A=\frac{S_{\mathrm{white}}}{S_{\mathrm{pixel}}}\times 100\%\,, \tag{11}$$

其中，S_{white}表示像素内有效开口区域面积，S_{pixel}表示单个像素总面积。该指标作为贝叶斯优化算法的目标函数，用于评价不同驱动波形参数对应的显示性能。

3.4 实验验证平台的搭建与测试方案

如图5所示，为验证改进贝叶斯优化算法在

电润湿显示器驱动波形优化中的有效性,搭建了一套面向无源电润湿显示器的闭环反馈实验验证平台,对不同驱动波形参数下的油墨运动状态进行实时观测,并将开口率和油膜分裂判别结果作为反馈信号输入贝叶斯优化算法,从而完成驱动波形的闭环寻优。实验平台包括运行优化算法的PC主机、电润湿电子纸显示屏、函数信号发生器、功率放大器、光学显微镜。

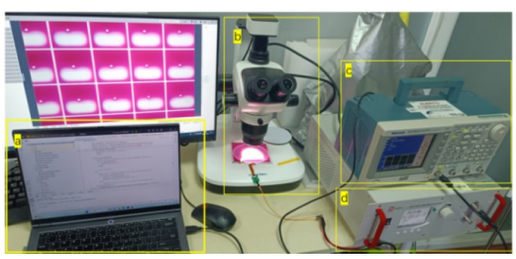


图5　实验测试平台。(a):pc主机,(b):光学显微镜,(c):函数信号发生器,(d):功率放大器。

Fig. 5　Experimental test platform. (a): PC host, (b): optical microscope, (c): function signal generator, (d): power amplifier.

所用到相关测试仪器型号如表1所示,待测EWD显示器的器件参数如表2所示。

表1　仪器及对应的型号

Tab. 1　Instruments and their models

Instrument	Model
Microscope	Chongqing Optec SZ680
Arbitrary waveform generator	Tektronix AFG3052C
Power amplifier	Aigtek Ata-122D
PC	Lecoo

表2　屏幕参数

Tab. 2　Screen parameters

Parameters	Value
Screen size	100 mm×100 mm
Pixel size	150 μm×150 μm
Resolution	320×240
Oil color	Magenta

实验采用改进贝叶斯优化算法对电润湿显示器驱动波形参数进行自动寻优。测试过程中,以驱动波形参数作为优化变量,以像素开口率作为主要评价指标,并将油膜分裂状态作为安全约束条件。实验开始前,根据设定的驱动参数范围生成初始实验样本,并依次加载对应驱动波形至EWD器件。每组驱动波形作用完成后,通过显微成像系统获取像素响应图像,经图像处理算法计算当前状态下的像素开口率,并判断是否发生油膜分裂。随后,根据实验结果更新优化模型,并由算法推荐下一组驱动参数。从闭环运行过程来看,系统单次优化迭代时间主要由驱动波形加载与器件响应、显微图像采集、图像处理以及贝叶斯优化模型更新和下一组参数推荐等环节共同决定。因此,本文所涉及的实时性主要体现为实验反馈完成后驱动参数的在线更新能力,而非显示刷新过程中的高速实时控制。电润湿电子纸通常以低功耗和静态保持显示为主要应用特点,对驱动波形参数优化的实时性要求相对低于视频显示等高速动态显示场景。

4　实验结果与分析

4.1　基于像素周期结构约束的自标定图像分析的性能验证

为提高电润湿显示器闭环优化过程中像素状态反馈结果的准确性和稳定性,本文提出了一种基于像素周期结构约束的自标定图像分析方法,并通过不同缺陷条件下的显微图像分割实验对该方法进行验证。实验选取具有不同油墨分布状态、局部亮度变化以及异常区域干扰的显微采集图像,分别采用传统Otsu全局阈值分割方法与本文提出的像素周期结构约束自标定方法进行处理,对比分析两种方法在油墨区域识别和异常干扰抑制方面的性能差异。

如图6所示,其中图(a)为存在油污的瑕疵图像,图(b)为未开口的图像,图(c)为有油墨分裂的开口图像。从图(a)可以看出,传统Otsu方法虽然能够实现油墨区域与背景区域的基本分离,但由于采用单一全局阈值进行分割,当图像中存在局部亮度波动或噪声干扰时,容易产生误分割现象。而采用本文方法后,通过利用电润湿显示器像素阵列具有周期排列的结构先验信息,首先对显微图像进行自动网格定位,将整幅图像划分为多个独立像素单元,再在单个像素区域内部完成自适应特征分析,有效降低了局部噪声干扰对

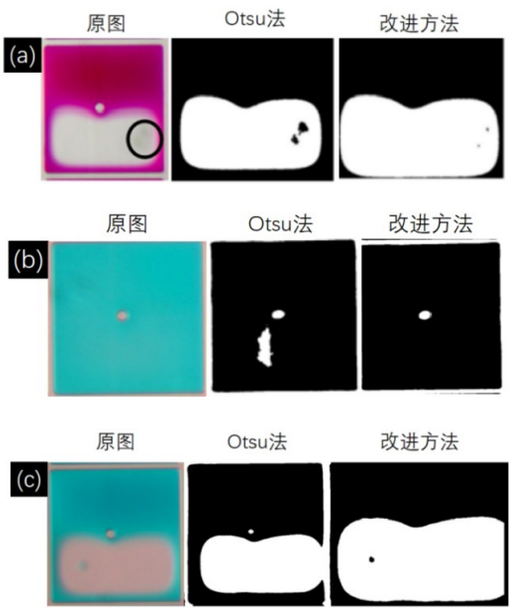


图6 (a)瑕疵图像;(b)无开口图像;(c)开口图像。

Fig. 6 (a) Flawed image; (b) Not opened image; (c) Opened image.

分割结果的影响,使油墨边界保持较好的连续性。

对于图(b)所示的未开启图像,理论上像素内部不存在明显有效开口区域。传统Otsu方法由于受到局部亮斑和显微反射影响,将部分孤立高亮区域识别为目标区域,产生虚假的开口候选区域,导致后续开口率计算偏高。而本文方法利用像素周期结构约束,仅在对应像素单元内部进行区域判断,并结合区域面积、形态特征等约束条件对异常亮斑进行过滤,可以有效避免小尺寸噪声和局部反光被误认为开口区域,使关闭状态下的开口率计算更加接近真实值。

从图(c)可以进一步观察到,在油墨发生一定移动、但仍存在局部缺陷或残余区域的情况下,传统Otsu方法容易受到整体灰度分布变化影响,使油墨区域出现过度分割或边界偏移现象,从而影响油膜分裂状态判断。相比之下,本文提出的方法首先依据像素周期信息确定独立分析区域,再结合像素内部统计特征完成开口区域识别,能够保持油墨边界完整性,同时减少局部异常区域对整体分析结果的影响。由此可见,本文方法能够有效提高开口率计算及油膜状态识别的稳定性,为后续闭环优化提供更加可靠的图像反馈。

4.2 改进贝叶斯优化算法消融实验

为验证本文所提出改进策略对贝叶斯优化性能的实际提升效果,进一步分析不同算法模块在驱动波形参数寻优过程中的作用,本文设置三组算法进行对比消融实验,分别为A组:论文提出的改进算法,B组:标准贝叶斯算法,C组:标准贝叶斯与最差值惩罚和邻域禁采结合的算法。本文以第120次迭代前获得的历史最佳开口率和收敛速度作为收敛性能指标,具体实验结果如图所示。

由图7(a),(c)可知,标准贝叶斯优化在前期经过若干次探索后,历史最佳开口率逐渐提升,但后续采样结果波动较大,历史最佳值提升有限,最终达到的开口率为0.4356,这是由于标准贝叶斯优化采用固定采集策略,当代理模型在局部高值区域形成较强预测偏好后,采样点容易在局部区域反复分布,同时缺少对油膜分裂区域的显式抑制,因此后期有效样本比例下降。由图7(a),(d)可知,在加入最差值惩罚和邻域排除后,已发生油膜分裂的参数区域被赋予较低评价并在采集层面受到抑制,使算法能够减少无效重复采样,因此前期搜索效率有所提升。但由于该方法仍采用相对固定的探索—开发策略,当搜索逐渐集中于当前较优区域后,继续发现更优参数组合的能力有限。由图7(a),(b)可知,改进算法在初始阶段即可快速获得较高开口率约第50次迭代后,采样结果逐渐向高开口率区域集中,并在第60~80次迭代连续获得更优解。后期大部分开口率稳定在0.54以上,说明改进算法能够根据优化状态调节探索与开发的平衡,在避免油膜分裂区域重复采样的同时,降低过早陷入局部最优的风险。

结合上分析,可以得出最差值惩罚与邻域排除策略主要提高了搜索有效性,而完整改进算法进一步增强了突破局部性能平台的能力,从而获得更高的最佳开口率。

4.3 不同方案下EWD像素开口率及油膜分裂情况分析

对EWD显示器使用设计的贝叶斯优化方案进行优化,最后获得的波形如图所示。所获得的波形为一种三段式驱动波形,首先是从10V平滑

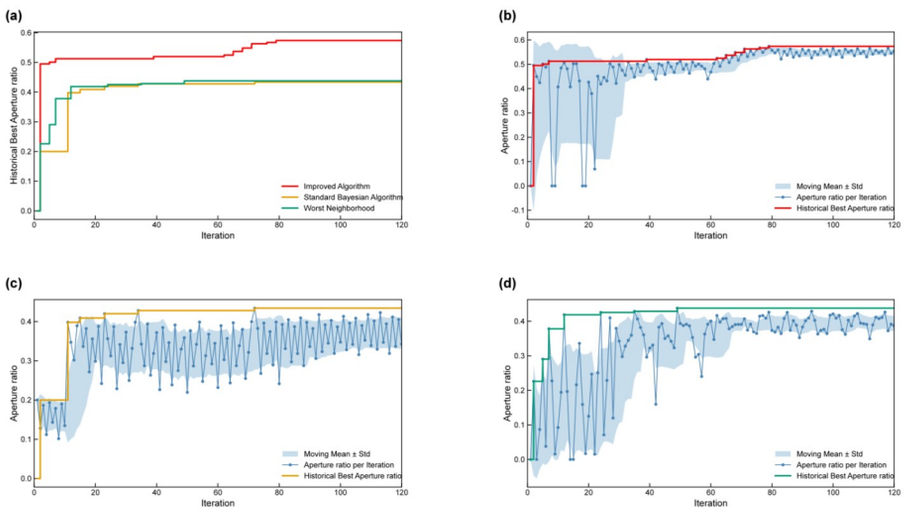


图7　算法消融实验:(a)三种算法比较;(b)A组开口率变化;(c)B组开口率变化;(d)C组开口率变化。

Fig. 7　Ablation experiments of the algorithm: (a) Comparison of three algorithms ; (b) Change in Aperture ratio for group A; (c) Change in Aperture ratio for group B; (d) Change in Aperture ratio for group C.

上升至19.5V的驱动阶段,其中存在一个短暂回撤至17V的阶段,其次是电压为19.5V的稳定阶段该阶段。最后是复位阶段,主要分为两段,第一段为主复位阶段,输出电压由正向保持电平迅速下降至-13V,随后,波形进入第二阶段的深度复位过程,电压进一步下降至约-15.5V,从而形成更强的负向复位电平。

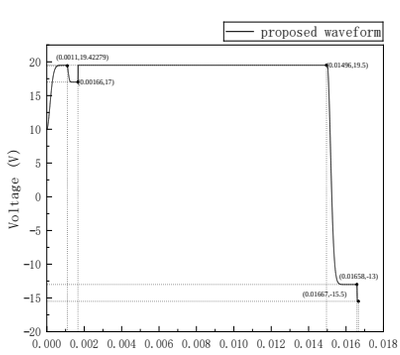


图8　闭环反馈系统得出的驱动波形

Fig. 8　Drive waveform obtained from the closed-loop feedback system

为了验证算法获得的波形的有效性,设计进行了一系列的对比消融实验。首先与两种传统的驱动波形进行性能比较,如图9所示。比较的两种波形分别是PWM矩形波以及带有上升梯度的驱动波形。为确保参数一致,矩形波的高低电平分别设置为19.5伏和-13.5伏。同时,带有上升梯度的驱动波形保持其最优参数。此外,两种比较波形的驱动周期与提出的驱动波形一致。

图10所示展示了使用三种不同的驱动波形的EWD的开口率大小及油膜分裂情况。根据对比实验的比较结果可以看到,使用传统的PWM矩形波进行驱动时,会存在油膜分裂现象且开口率不高的现象,开口率仅为47.02%,而使用幂函数上升加负电压复位的波形虽然可以减少油膜分裂现象的发生,但是却会导致开口率下降,仅为46.67%。而本文提出的波形,在消除了油膜分裂现象的同时,能够保留较大的开口率,实验测得开口率为57.38%。

为了明确造成效果差异的具体原因,对优化

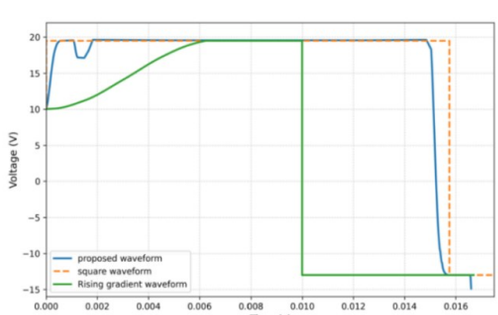


图9　不同驱动波形

Fig. 9　Different driving waveforms

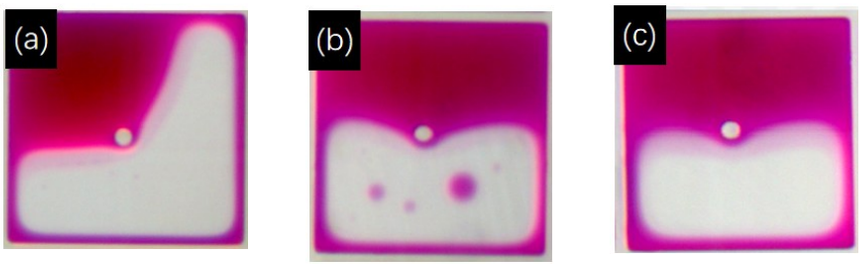


图10 不同驱动波形开口率比较:(a)算法提出的优化波形的开口率57.38%;(b)矩形波开口率47.02%;(c)幂函数上升+负电压复位的开口率46.67%。

Fig. 10 Comparison of Aperture ratio for different driving waveforms: (a) Aperture ratio of the optimized waveform proposed by the algorithm: 57.38%; (b) Aperture ratio of the rectangular wave: 47.02%; (c) Aperture ratio of the power function rise with negative voltage reset: 46.67%.

后的驱动波形进行了消融实验,具体实验分组为:A组为只保留了优化波形驱动阶段的上升部分的波形,剩余部分全部保持在19.5V;B组为把优化波形的上升阶段改为硬阶跃,其他保持不变的波形;C组为去除短暂回撤后的波形;D组为去除负电压复位后的波形;E组为算法得出的优化波形。这些波形的具体结果如下表所示:

消融实验表明,优化波形各阶段承担了不同功能。首先,初始渐增阶段主要影响油膜启动过程,相比硬阶跃加载能够降低瞬态电场变化带来的界面扰动,因此有利于降低分裂风险。其次,短暂回撤阶段并非简单降低驱动强度,而是在油墨快速迁移后提供短时间的动态缓冲,使界面重新趋于稳定,从而改善后续保持阶段的油墨聚集状态。最后,负电压复位阶段主要作用于驱动末期,通过改变界面受力方向促进油墨重新分布,减少回流对最终开口状态的影响。因此,完整优化波形的性能提升来源于多个阶段之间的协同,而非某一单独波形参数。

表3 消融实验

Tab. 3 Ablation experiment

Group	Aperture ratio/%	Oil film splitting situation
A	39.69	No
B	53.28	Yes
C	54.58	Yes
D	45.90	Yes
E	57.38	No

4.4 不同显示器下算法运行效果

为进一步验证本文提出闭环反馈优化方法对不同器件的适应能力,设计了将算法得出的波形移植到其他电润湿显示器件的对比实验,并分别针对其他电润湿显示器重新开展闭环优化实验,具体实验结果如下图所示:

图11所示为将本文设计的闭环反馈系统得出的优化波形运用到不同电润湿显示器下的比较效果,比较可以看到,因为工艺参数的不同,其电润湿响应过程具有明显的器件相关性。因此,针对单一器件优化得到的驱动波形并不能

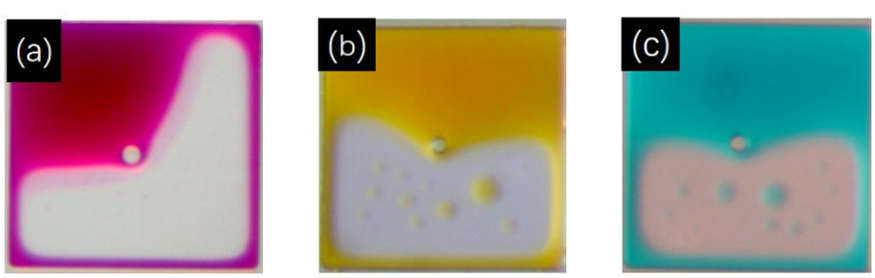


图11 驱动波形在不同电润湿显示器件下的效果:(a)品红;(b)黄色;(c)青色。

Fig. 11 Effects of driving waveforms on different electrowetting display devices: (a) Magenta; (b) Yellow; (c) Cyan.

直接适用于其他器件。由图11可以看出,将品红色器件上的优化波形直接应用于黄色和青色电润湿显示器时,虽然能够实现液滴驱动和基本显示功能,但显示质量明显下降。品红色器件在该波形驱动下开口率为57.38%,且未出现明显油膜分裂;当相同波形直接应用于黄色和青色器件时,开口率分别下降至49.56%和48.32%,并均出现油膜分裂,表明单一器件获得的优化波形难以直接适用于其他器件。图12为针对青色和黄色器件重新进行闭环优化后的结果。青色器件经优化后开口率达到56.34%,较直接迁移波形提高8.02%;黄色器件开口率达到58.21%,提高8.65%,且两种器件均未出现明显油膜分裂。

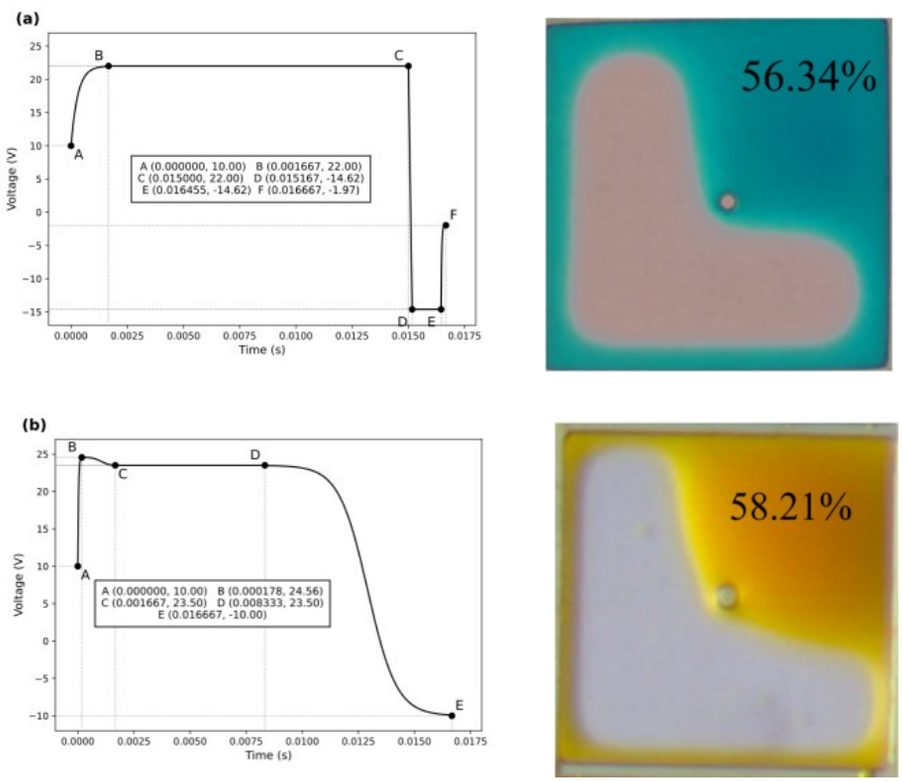


图12　算法在不同电润湿显示器件下得出的波形和显示结果:(a)青色;(b)黄色。

Fig. 12　Waveforms and display results obtained by the algorithm on different electrowetting display devices: (a) Cyan; (b) Yellow.

结果表明,虽然不同电润湿显示器件由于材料和结构差异表现出明显的器件特异性,优化后的驱动波形无法简单跨器件复用,但本文提出的基于图像反馈的改进贝叶斯优化方法能够根据不同器件的实际响应状态自动调整搜索过程,获得与目标器件相匹配的驱动波形。

4.5　不同驱动方案的EWD亮度效果

为了进一步评估不同驱动波形对电润湿显示器光学性能的影响,本文对三种驱动方案下像素亮度进行了多点测试分析。测试结果如图所示,分别记录了闭环优化波形、传统矩形波以及梯度上升波形驱动下的像素亮度响应。

从测试结果可以看出,三种驱动波形均能够实现像素开启状态,但不同波形对应的亮度水平存在明显差异。其中,闭环优化波形在9个测试点中的亮度均维持在较高水平,亮度范围约为727~734 cd/m^2,平均亮度约为730 cd/m^2,整体波动较小。相比之下,传统矩形波的亮度主要分布在619~641 cd/m^{2}之间,平均亮度约为630 cd/m^2;梯度上升波形的亮度最低,约为607~612 cd/m^2,平均亮度约为610 cd/m^2。

此外,从亮度曲线变化趋势可以看出,闭环

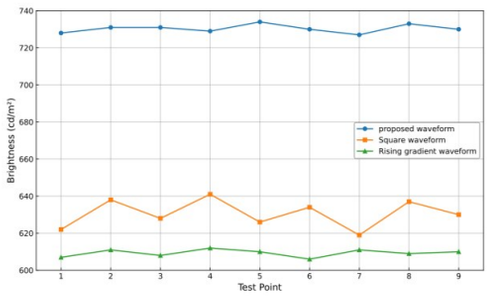


图13 不同驱动方案显示性能对比

Fig. 13 Comparison of display performance for different drive schemes

优化波形在不同测试点之间保持较好的稳定性，其最大亮度差仅约7 cd/m²，而矩形波和梯度上升波形分别存在约22 cd/m²和5 cd/m²的波动。该结果与前述开口率测试具有一致性。对于EWD，像素开口区域增大意味着更多高反射率基底暴露，因此通常能够获得更高亮度。同时，油膜分裂或局部残留会导致不同测试位置的有效开口程度产生差异，从而引起亮度波动。闭环优化波形能够在较大开口率的同时减少油膜分裂和局部残留，因此不仅提高平均亮度，也改善了不同位置之间的亮度一致性。

5 结 论

电润湿显示器具有低功耗、阳光下可读和宽视角等优点，但油膜分裂会导致像素开口率和亮度下降，影响显示质量；同时，传统驱动波形设计较依赖人工经验，优化效率有限。针对上述问题，本文构建了基于图像反馈与改进贝叶斯优化的驱动波形闭环优化方法。通过显微图像获取像素开口率和油膜分裂状态，并将其作为优化反馈信息，结合物理状态感知和动态采集策略，实现驱动参数的自动搜索与迭代更新。

研究过程中，详细对比了优化波形与其他传统波形之间的显示效果，突出优化波形在抑制油膜分裂方面的优势。与传统PWM驱动波形相比，闭环优化获得的波形使像素开口率提升10.36%，并有效抑制了明显的油膜分裂现象，在像素开启程度与界面运动稳定性之间取得了较好平衡。跨器件实验进一步表明，单一器件获得的优化波形直接迁移至其他器件时性能会有所下降，而利用目标器件自身响应重新进行闭环优化后，可获得与其动态特性相匹配的驱动参数，说明该方法具备一定的器件适应能力。因此，本文建立的基于图像反馈和改进贝叶斯优化的闭环驱动波形设计方法，不仅能够有效解决传统人工调参效率低和油膜分裂难以抑制的问题，同时具备针对不同器件自动调整驱动参数的能力，为电润湿显示器驱动波形的智能设计与性能优化提供了一定的研究方向。但是需要指出的是，本文研究仍存在一定局限性。目前优化过程主要针对单像素开口率和油膜分裂状态进行评价，尚未进一步考虑响应速度、功耗以及多灰阶显示一致性等多维性能指标，同时，当前优化方法在面对更大规模参数空间或不同类型电润湿显示器件时，优化效率仍有进一步提升空间。未来研究将进一步结合多目标贝叶斯优化方法，引入亮度、响应时间、功耗等多维评价指标，实现驱动波形综合性能优化。

参 考 文 献：

[1] 邸茵，刘莹，吴作用，等. 液晶光重构显示技术的发展与应用[J]. 液晶与显示，2024，39(11)：1454-1462.
DI Y，LIU Y，WU Z Y，*et al*. Development and application of liquid crystal optical rewritable display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*，2024，39(11)：1454-1462.

[2] CHEN B，LI C，LI X，*et al*. SiC diffractive waveguides for augmented reality：single-layer，full-color，rainbow-artifact-free display with vision correction[J]. *eLight*，2025，5：21. DOI：10.1186/s43593-025-00100-1.

[3] DONG Y，BAI Y，ZHANG Q，*et al*. High-throughput optical neuromorphic graphic processing at millions of images per second[J]. *eLight*，2025，5：29. DOI：10.1186/s43593-025-00106-9.

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

[5] YI Z，ZENG W，MA S，*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.

[6] YI Z, HUANG Z, LAI S, *et al*. Driving waveform design of electrowetting displays based on an exponential function for a stable grayscale and a short driving time[J]. *Micromachines*, 2020, 11(3): 313.

[7] 杨彬,邱莹,林哲,等. 柔性电润湿显示的发展现状与展望[J]. 液晶与显示,2024, 39(4): 436-446.
YANG B, QIU Y, YANG Z, *et al*. The Current State and Future Prospects of Flexible Electro-Wetting Displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(4): 436-446. (in Chinese)

[8] WANG L, LI X, LI C, *et al*. Plasma-enhanced electrowetting-on-dielectrics[J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 125(15).

[9] WANG J, WU X, LIN Y, *et al*. Polarity-Dependent Driving Scheme for Suppressing Oil Film Splitting in Electrowetting Displays[J]. *Micromachines*, 2025, 16(3): 338.

[10] GRAYDON O. OLEDs are more than just displays[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(3): 216-217.

[11] THEODOROU N T, SOURAIS A G, PAPATHANASIOU A G. Simulation of electrowetting-induced droplet detachment: A study of droplet oscillations on solid surfaces[J]. *Materials*, 2023, 16(23): 7284.

[12] WANG J, YI Z, JIANG M, *et al*. Driving waveform optimization of electrowetting displays based on pixel's 2-D model for reducing oil reflux[J]. *Optics Express*, 2024, 32(16): 28536-28551.

[13] YANG G, ZHUANG L, BAI P, *et al*. Modeling of oil/water interfacial dynamics in three-dimensional bistable electrowetting display pixels[J]. *ACS omega*, 2020, 5(10): 5326-5333.

[14] LAI S, ZHONG Q, SUN H. Driving waveform optimization by simulation and numerical analysis for suppressing oil-splitting in electrowetting displays[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 720515.

[15] WANG J S, YI Z C, JIANG M H, *et al*. Driving waveform optimization of electrowetting displays based on pixel′s 2-D model for reducing oil reflux[J]. *Optics express*, 2024, 32(16): 28536-28551.

[16] ZENG W, YI Z, ZHAO Y, *et al*. A driving method for reducing oil film splitting in electrowetting displays[J]. *Membranes*, 2021, 11(12): 920.

[17] ZHANG H, YI Z, LV J, *et al*. Improvement of aperture ratio and grayscale stability of electrowetting displays by designing a combined driving waveform of an exponential function and ac voltage[J]. *Displays*, 2022, 74: 102288.

[18] GAO Z, ZHANG Z, BONING D S. Automatic synthesis of broadband silicon photonic devices via Bayesian optimization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(24): 7879-7892.

[19] GARCIA-SANTIAGO X, BURGER S, ROCKSTUHL C, *et al*. Bayesian optimization with improved scalability and derivative information for efficient design of nanophotonic structures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(1): 167-177.

[20] MENOLD T, ONUSEIT V, BUSER M, *et al*. Laser material processing optimization using bayesian optimization: a generic tool[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5: 32. DOI: 10.37188/lam.2024.032.

[21] ZHOU K, HEIKENFELD J, DEAN K, *et al*. A full description of a simple and scalable fabrication process for electrowetting displays[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(06): 065029-065029.

[22] SUN B, ZHOU K, LAO Y, *et al*. Scalable fabrication of electrowetting displays with self - assembled oil dosing [J]. *Applied physics letters*, 2007, 91(1): 11106-11109.

[23] WU H, TANG B, HAYES R, *et al*. Coating and patterning functional materials for large area electrofluidic arrays [J]. *Materials*, 2016, 9(8): 707-718.

[24] YI Z, ZENG W, MA C, *et al*. A real-time touch control system design based on field-programmable gate array via optimizing Bresenham algorithm for electrowetting displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(7): 573-583.

[25] ZHAO Y R, LI Z S, ZHENG Y, *et al*. Non-aqueous electrowetting liquid lens with centimeter-level large aperture based on dielectric failure suppression principle[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 120. DOI: 10.1038/s41377-025-01777-2.

[26] 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.

[27] LUO Z, FAN J, XU J, *et al*. A novel driving scheme for oil-splitting suppression in electrowetting display[J]. *Optical Review*, 2020, 27(4): 339-345.

[28] TIAN L, ZHANG H, YI Z, *et al*. Inhibiting oil splitting and backflow in electrowetting displays by designing a power function driving waveform[J]. *Electronics*, 2022, 11(13): 2081.

[29] XU W, YI Z, LONG Z, *et al*. Stability study of multi-level grayscales based on driving waveforms for electrowetting displays[J]. *Micromachines*, 2023, 14(6): 1123.

[30] 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.

[31] 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.

[32] HE T, JIN M, EIJKEL J C T, *et al*. Two-phase microfluidics in electrowetting displays and its effect on optical performance[J]. *Biomicrofluidics*, 2016, 10(1).

[33] YI Z, FENG W, WANG L, *et al*. Aperture ratio improvement by optimizing the voltage slope and reverse pulse in the driving waveform for electrowetting displays[J]. *Micromachines*, 2019, 10(12): 862.

[34] LIU L, WU Z, WANG L, *et al*. Design of an AC driving waveform based on characteristics of electrowetting stability for electrowetting displays[J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8: 618752.

[35] TIAN L, BAI P. A combined pulse driving waveform with rising gradient for improving the aperture ratio of electrowetting displays[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 709151.

作者简介：



王　刚，男，硕士研究生，2024年于南昌航空大学获得学士学位，主要从事显示器驱动技术方面的研究。E-mail：2587559419@qq.com



林志贤，男，博士，教授，2010年于福州大学获得博士学位，主要从事图像处理技术以及平板显示器件驱动技术方面的研究。E-mail：lzx2005000@163.com