

文章编号:1007-2780(2026)09-1239-08

## 低功耗边缘场切换液晶显示器挠曲电系数 差值与闪烁的定量关系

仇梓豪, 李 双, 雍佳丽, 孙玉宝, 马红梅\*

(河北工业大学 理学院, 天津 300401)

**摘要:** 挠曲电效应是边缘场切换液晶显示器(FFS-LCD)低频驱动下产生图像闪烁的核心物理机制, 然而挠曲电系数( $e_1$ ,  $e_3$ )的精确测量长期受困于单参数拟合解的非唯一性。本文提出一种多物理量协同拟合方法, 通过同时匹配稳态电压-透过率( $V$ - $T$ )曲线与 1 Hz 方波驱动下的瞬态透过率响应曲线, 实现对挠曲电系数的唯一性标定。采用 TechWiz LCD 3D 仿真软件, 对两种商用负性向列相液晶(LC-1, LC-2)进行拟合, 得到挠曲电系数分别为( $e_1$ ,  $e_3$ )=(2.0, -7.9) pC/m 和( $e_1$ ,  $e_3$ )=(5.0, 7.94) pC/m, 模拟与实验的透过率偏差均低于 0.25%。研究发现, 闪烁幅值与挠曲电系数的绝对差值 $|e_1 - e_3|$ 呈正相关, 而非与单个系数值相关; 当 $e_1 = e_3$ 时闪烁最小。该发现为低功耗 FFS-LCD 的液晶材料设计提供了明确的定量准则。本文建立的标定方法可直接嵌入现有工业测试流程, 为挠曲电效应的工程化应用提供了可靠的技术路径。

**关键词:** 挠曲电效应; 挠曲电系数; 边缘场切换; 液晶显示; 图像闪烁; 多物理量拟合

**中图分类号:** O753.2; TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3724/CJLCD.2026-0123 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2026-0123

## Quantitative relationship between flexoelectric coefficient difference and flicker in low-power fringe-field switching liquid crystal displays

QIU Zihao, LI Shuang, YONG Jiali, SUN Yubao, MA Hongmei\*

(School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Flexoelectric effect is a critical factor causing image flicker in fringe-field switching liquid crystal displays(FFS-LCDs) under low-frequency driving, yet accurate measurement of flexoelectric coefficients( $e_1$ ,  $e_3$ ) remains challenging due to the ill-posed nature of single-parameter fitting. In this work, we propose a multi-physics co-fitting methodology that simultaneously matches the voltage-transmittance( $V$ - $T$ ) curves and the transient transmittance responses under 1 Hz square-wave driving. Using TechWiz LCD 3D simulation software, the flexoelectric coefficients of two commercial negative nematic liquid crystals(LC-1 and LC-2) are accurately determined as ( $e_1$ ,  $e_3$ )=(2.0, -7.9) pC/m and ( $e_1$ ,  $e_3$ )=(5.0, 7.94) pC/m, respectively, with simulation-experiment discrepancies below 0.25%. The study found that our systematic

收稿日期: 2026-07-03; 修订日期: 2026-07-28.

基金项目: 河北省自然科学基金 (No. F2022202017)

Supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (No. F2022202017)

\*通信联系人, E-mail: mhmtj@163.com

investigation reveals that the flicker magnitude correlates positively with the absolute difference  $|e_1 - e_3|$  rather than the individual coefficient values. When  $e_1 = e_3$ , the flicker is minimized, providing a clear design guideline for low-power FFS-LCD development. This work establishes a robust measurement protocol for flexoelectric coefficients and uncovers the underlying physical mechanism linking coefficient asymmetry to frame-to-frame optical instability.

**Key words:** flexoelectric effect; flexoelectric coefficients; fringe-field switching; liquid crystal display; image flicker; multi-physics co-fitting

## 1 引言

挠曲电效应 (flexoelectric effect) 由 Meyer 于 1969 年首次从理论上预言<sup>[1]</sup>, 随后 Tagantsev 将其推广至一般介电体系<sup>[2]</sup>。该效应描述了应变梯度与电极化之间的线性耦合: 当液晶受外界作用发生展曲 (splay) 或弯曲 (bend) 形变时, 相邻分子间相对位置和取向改变, 分子排列的非均匀性打破偶极矩的对称分布, 产生净极化强度  $P_f^{[3-5]}$ 。与压电效应不同, 挠曲电效应不依赖于晶体的非中心对称结构, 在向列相液晶中具有普适性, 因而成为液晶电-力耦合的核心机制之一<sup>[6-8]</sup>。

采用负介电各向异性 ( $\Delta\epsilon < 0$ ) 液晶的边缘场切换 (fringe-field switching, FFS) 模式, 因兼具高透过率、宽视角和低色偏等优势, 已成为移动终端显示的主流技术方案<sup>[9-11]</sup>。为进一步降低功耗, 低频驱动 (通常为 1~30 Hz) 作为一种有效的节能策略被提出<sup>[12-14]</sup>。然而, 在低频条件下, 单帧持续时间 (1 Hz 时约为 500 ms) 远超液晶响应时间 ( $\tau < 50$  ms), 挠曲电极化可在单帧内达到稳态; 在正负帧极性反转过程中, 边缘电场的空间非对称性与液晶本征挠曲电极化相耦合, 引发帧间指向矢分布的不对称重构, 最终表现为可感知的光学透过率差异 (通常称为闪烁)<sup>[15-19]</sup>。该挠曲电诱导闪烁现象已成为制约低频 FFS-LCD 商业化应用的关键瓶颈<sup>[16-17]</sup>。

挠曲电系数是研究液晶挠曲电效应特性的核心基础参数, 其精准度直接决定了仿真结果的可靠性与结构优化的有效性<sup>[20]</sup>。尽管研究者们通过器件结构优化、聚合物锚定和驱动波形调制等手段对闪烁抑制开展了大量研究, 但挠曲电系数的精确实验测定仍面临根本性困难<sup>[21-28]</sup>。由于  $e_1$  与  $e_3$  在控制方程中存在强相关性, 依赖电压-透过率 ( $V$ - $T$ ) 曲线的单维度拟合并不具有显著的非

唯一性, 导致同种材料的文献报道值可相差数个数量级, 严重制约了仿真指导器件优化的可靠性。此外, 挠曲电系数与闪烁幅值之间的定量关联尚未被系统揭示。

针对上述问题, 本文建立了多物理量协同拟合标定方法, 通过同时约束  $V$ - $T$  曲线与瞬态透过率曲线的模拟结果与实验值贴合, 实现挠曲电系数的精确测定。除此之外, 揭示了挠曲电系数绝对差值  $|e_1 - e_3|$  与闪烁幅值的正相关规律, 为低闪烁液晶材料的分子设计提供定量判据。该方法经两种商用负性向列相液晶验证, 模拟与实验结果高度吻合。

## 2 理论基础与物理模型

### 2.1 挠曲电效应的理论描述

向列相液晶体系的总自由能密度可以分为非挠曲电项与挠曲电自由能密度两部分。为简化推导、突出挠曲电效应的独立作用, 定义非挠曲电项为统一变量  $F_{\text{non-flexo}}$ , 包括弹性自由能与介电自由能:

$$F_{\text{non-flexo}} = f_{\text{elas}} + f_{\text{dielec}}, \quad (1)$$

$$f_{\text{total}} = F_{\text{non-flexo}} + f_{\text{flexo}}, \quad (2)$$

其中, 弹性自由能密度  $f_{\text{elas}}$  基于 Oseen-Frank 弹性理论描述液晶分子形变的弹性势能, 表达式如式 (3) 所示:

$$f_{\text{elas}} = \frac{1}{2} [K_{11}(\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_{22}(\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + K_{33}(\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n})^2], \quad (3)$$

其中:  $K_{11}$ 、 $K_{22}$ 、 $K_{33}$  分别表示液晶的展曲、扭曲和弯曲弹性常数,  $\mathbf{n}$  为液晶指向矢单位矢量。介电自由能密度  $f_{\text{dielec}}$  描述电场与液晶的介电相互作用, 表达式如式 (4) 所示:

$$f_{\text{dielec}} = -\frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta \epsilon (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_{\perp} E^2, \quad (4)$$

其中:  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$  为液晶介电各向异性,  $\epsilon_{\parallel}$ 、 $\epsilon_{\perp}$  分别为平行、垂直于分子长轴的介电常数,  $\mathbf{E} = (E_x, 0, E_z)$  为FFS结构内的电场矢量( $E_x$ 为垂直叉指电极长方向的水平电场,  $E_z$ 为沿液晶盒厚方向的垂直电场分量)。

挠曲电自由能密度描述挠曲电极化与外电场的相互作用,表达式如式(5)所示:

$$f_{\text{flexo}} = -\mathbf{P}_f \cdot \mathbf{E} = -[e_1 \mathbf{n} (\nabla \cdot \mathbf{n}) - e_3 \mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n})] \cdot \mathbf{E}. \quad (5)$$

本文采用de Gennes与Prost提出的挠电极化表达式形式,  $\mathbf{P}_f = [e_1 \mathbf{n} (\nabla \cdot \mathbf{n}) - e_3 \mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n})]^{[29]}$ ,  $\mathbf{P}_f$ 为挠曲电极化强度,  $e_1$ 、 $e_3$ 分别为展曲和弯曲挠曲电系数。

由于液晶指向矢在平衡态下的分布满足总自由能最小化原理,总自由能关于液晶倾角  $\theta$  (分子长轴与基板平面的夹角) 和方位角  $\varphi$  (分子长轴与电极长边的夹角) 求变分,即满足:

$$\delta \int_V f_{\text{total}} dV = 0. \quad (6)$$

对变分方程求解可得到描述指向矢平衡态的欧拉-拉格朗日方程,将式(5)代入得到的平衡态方程,结合FFS结构液晶形变弱梯度的特性,对欧拉-拉格朗日方程进行化简,最终推导出挠曲电效应对液晶分子的倾角和方位角的作用力矩:

$$\begin{aligned} \Gamma_{\theta, \text{flexo}} &= (e_1 - e_3) \cos^2 \theta \times \sin \varphi \left( E_z \frac{\partial \varphi}{\partial x} - E_x \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right), \\ \Gamma_{\varphi, \text{flexo}} &= (e_1 - e_3) \cos^2 \theta \times \sin \varphi \left( E_x \frac{\partial \theta}{\partial z} - E_z \frac{\partial \theta}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

可见,挠曲电对液晶分子的作用是一个相互影响的结果,水平与垂直电场分量都会改变液晶分子的倾角和方位角分布,且相比于挠曲电系数的绝对值,两者差值( $e_1 - e_3$ )才是直接的作用因素。

## 2.2 FFS-LCD 闪烁的量化定义

为量化闪烁程度,定义闪烁值为正帧与负帧透过率的相对差异,表达式如式(8)所示:

$$T_{\text{Flicker}} = \frac{\Delta T}{T_{\text{avg}}} = \frac{|T_+ - T_-|}{(T_+ + T_-)/2} \times 100\%, \quad (8)$$

式中,  $T_+$  与  $T_-$  分别表示正帧与负帧下的稳态透过率(帧内稳定后的透过率)。

## 3 实验方法与材料表征

### 3.1 FFS 液晶盒的制备与结构参数

制备的FFS模式液晶测试盒结构如图1所示。在玻璃基板上制备透明氧化铟锡(ITO)电极:下层为全覆盖的平面像素电极,上层为叉指状公共电极。绝缘层位于两层电极之间,形成边缘电场分布。液晶盒的关键结构参数如下:像素电极宽度  $W = 3 \mu\text{m}$ , 电极间距  $S = 5 \mu\text{m}$ , 绝缘层厚度  $h = 0.6 \mu\text{m}$ 。液晶层厚度由光阻间隔物控制,  $d = 3 \mu\text{m}$ 。在上下玻璃基板表面旋涂聚酰亚胺取向层,摩擦方向与叉指电极长边的垂直方向之间的夹角约为  $-7^\circ$ 。偏光片透光轴分别设置为  $-7^\circ$  和  $83^\circ$ , 构成典型的FFS模式光学配置。将表1所示的液晶材料注入制备的FFS液晶盒,测量其在1.0 Hz方波驱动下的电压-透过率(Voltage-Transmittance, V-T)曲线及饱和电压下的透过率响应曲线。

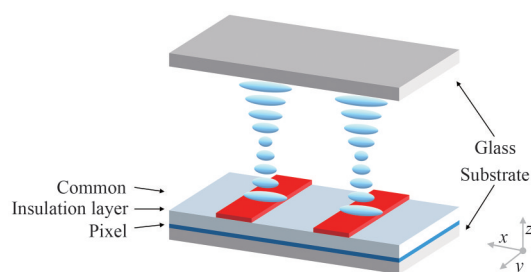


图1 典型FFS模式液晶盒结构

Fig. 1 Typical cell structure of FFS liquid crystal

表1 用于实验测量与数值模拟的液晶参数

Tab. 1 Liquid crystal parameters for experimental measurement and numerical simulation

| Parameters (25 °C)            | LC-1                                                                                | LC-2                                                                                |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Optical anisotropy (589 nm)   | $\Delta n = 0.1085$ ; $n_{\parallel} = 1.5929$ ; $n_{\perp} = 1.4844$               | $\Delta n = 0.0999$ ; $n_{\parallel} = 1.5816$ ; $n_{\perp} = 1.4817$               |
| Dielectric anisotropy (1 kHz) | $\Delta \epsilon = -6.4$ ; $\epsilon_{\parallel} = 3.7$ ; $\epsilon_{\perp} = 10.1$ | $\Delta \epsilon = -5.4$ ; $\epsilon_{\parallel} = 3.8$ ; $\epsilon_{\perp} = 9.2$  |
| Rotational viscosity          | $\gamma_1 = 106 \text{ mPa} \cdot \text{s}$                                         | $\gamma_1 = 80 \text{ mPa} \cdot \text{s}$                                          |
| Elastic constant              | $K_{11} = 16.2 \text{ pN}$ ; $K_{22} = 8.1 \text{ pN}$ ; $K_{33} = 17 \text{ pN}$   | $K_{11} = 14.2 \text{ pN}$ ; $K_{22} = 7.2 \text{ pN}$ ; $K_{33} = 15.2 \text{ pN}$ |

### 3.2 电光特性与闪烁测试系统

电光特性与闪烁测试系统如图 2 所示。采用 He-Ne 激光器(波长  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , 功率  $P = 10 \text{ mW}$ ) 作为光源, 光束依次通过起偏器、待测 FFS 液晶盒、检偏器后, 由硅光电探测器(响应时间  $< 1 \text{ ms}$ ) 接收。光强信号经示波器(采样率  $100 \text{ kHz}$ ) 实时采集, 通过自编程序计算帧间透过率差异, 按式(8)计算得到闪烁值  $T_{\text{Flicker}}$ 。整个测试过程在  $(25.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  的温控环境中进行, 温度波动由半导体制冷器控制在  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  以内。先对液晶盒施加以  $0.5 \text{ V}$  为间隔、范围在  $0 \sim 8 \text{ V}$  的低频交流电, 得到液晶的  $V$ - $T$  曲线; 之后对液晶盒施加

$1 \text{ Hz}$  的交流饱和电压, 利用示波器得出透过率-时间(Transmittance-Time,  $T$ - $T$ ) 曲线。模拟仿真部分采用韩国 Sanayi System 公司的 TechWiz LCD 3D 软件开展电光仿真; 该软件基于有限差分法自洽求解电场泊松方程与液晶指向矢平衡的欧拉-拉格朗日方程, 采用扩展琼斯矩阵法计算光学透过率。仿真  $1:1$  复刻实验样品结构, 设置网格步长为  $0.5 \mu\text{m}$ , 改变不同的挠曲电系数后得到多个  $V$ - $T$  曲线与  $T$ - $T$  曲线。对比模拟计算曲线和实验曲线, 曲线最相符时, 模拟计算中使用的挠曲电系数即为真实液晶的挠曲电系数。

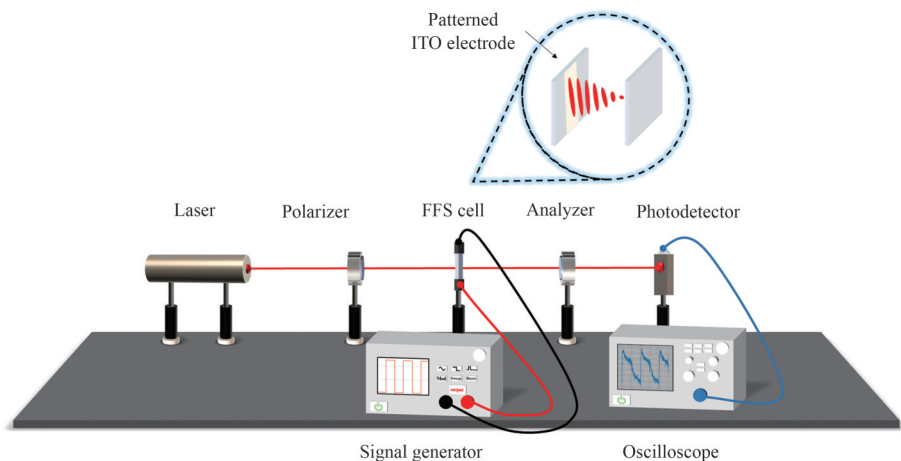


图 2 电光特性和闪烁测量实验装置

Fig. 2 Experimental setup for electro-optical and flicker effect measurement

## 4 挠曲电系数的多维度拟合标定与对闪烁的影响

### 4.1 多物理量协同拟合

传统挠曲电系数测量多采用单维度拟合策略, 即仅通过匹配实验与仿真的  $V$ - $T$  曲线来确定  $e_1$  和  $e_3$ 。然而, 在 FFS 模式的电场响应方程中,  $e_1$  和  $e_3$  以组合形式出现在挠曲电极化项中, 且与介电各向异性、弹性常数等参数存在耦合。仅依靠  $V$ - $T$  曲线无法区分具有相同  $|e_1 - e_3|$  但符号不同的系数组合, 造成标定结果的不确定性。

为克服单维度拟合解的偏差, 本文同时利用稳态  $V$ - $T$  曲线和瞬态透过率响应的实验曲线作为约束条件, 在  $(e_1, e_3)$  参数空间中进行全局优化。具体而言, 在 TechWiz LCD 3D 仿真软件

中, 以实验测得的  $1 \text{ Hz}$  方波驱动下的饱和电压瞬态透过率曲线和全电压范围  $V$ - $T$  曲线为基准, 通过变化  $(e_1, e_3)$  组合的数值, 最后确定最优的组合。

### 4.2 拟合结果与误差分析

考虑棒状液晶分子的典型取值范围, 限定挠曲电系数为  $|e_1| < 10 \text{ pC/m}$ ,  $|e_3| < 15 \text{ pC/m}$ 。如图 3(a)、(c) 中的透过率随时间变化的曲线所示, LC-2 的模拟计算透过率与实验透过率差异平均值小于  $0.23\%$ , LC-1 的透过率差异平均值则小于  $0.25\%$ , 均表现出了高度吻合的结果。图 3(b)、(d) 所示为模拟计算结果与实验测量的正负帧  $V$ - $T$  曲线, 变化趋势保持一致。因此我们认为得到了这两种液晶的具体挠曲电系数值。两种液晶材料的最佳挠曲电系数组合如表 2 所示。

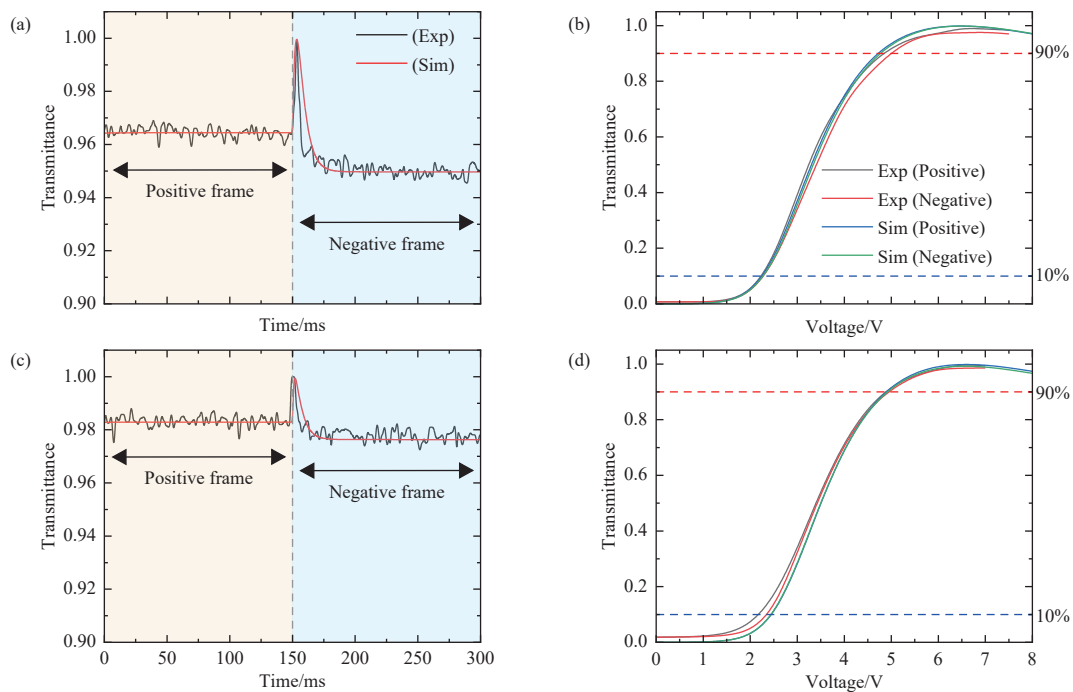


图3 饱和电压下的透射率-时间曲线与1.0 Hz方波驱动下的V-T曲线。(a,b) LC-1; (c, d) LC-2。

Fig. 3 Transmittance-time curves at saturation voltage and V-T curves under 1.0 Hz square-wave driving. (a, b) LC-1; (c, d) LC-2.

表2 样品液晶的测试与模拟结果

Tab. 2 Test and simulation results of liquid crystal samples

| Sample | Flicker (Exp) | Flicker (Sim) | $V_{\text{sat}}^*(\text{Exp})/\text{V}$ | $V_{\text{sat}}(\text{Sim})/\text{V}$ | $e_1/(\text{pC}\cdot\text{m}^{-1})$ | $e_3/(\text{pC}\cdot\text{m}^{-1})$ |
|--------|---------------|---------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| LC-1   | 1.62%         | 1.63%         | 7                                       | 7                                     | 2                                   | -7.9                                |
| LC-2   | 0.74%         | 0.74%         | 7                                       | 7                                     | 5                                   | 7.94                                |

注: \* $V_{\text{sat}}$  为饱和电压

#### 4.3 挠曲电系数差值与闪烁关联性分析

由表2可以看到,LC-2的展曲挠曲电系数( $e_1=5\text{ pC/m}$ )显著大于LC-1( $e_1=2\text{ pC/m}$ ),但其闪烁值(0.74%)却低于LC-1(1.62%)。如果比较挠曲电系数的绝对差值:LC-1的差值为 $|e_1-e_3|=|2-(-7.9)|=9.9\text{ pC/m}$ ,而LC-2的差值为 $|e_1-e_3|=|5-7.94|=2.94\text{ pC/m}$ 。这与式(7)的理论一致,LC-2具有显著较小的系数差值,与其较低的闪烁水平高度一致,表明 $|e_1-e_3|$ 可能是决定闪烁的主导参数,而非单个系数的绝对值。

为独立验证 $|e_1-e_3|$ 与闪烁的因果关系,固定 $e_1$ 为拟合值(LC-1:2.0 pC/m, LC-2:5.0 pC/m),令 $e_3$ 为 $e_1$ 的整数倍变化。如图4(a)、4(b)所示,两种液晶均在 $e_1=e_3$ (即 $|e_1-e_3|=0$ )时达到最小闪烁,分别为0.04%(LC-1)和0.1%(LC-2),

这个小的闪烁来自模拟计算中小的指向矢微变化,也小于显示器的基本要求;而在扫描范围内 $|e_1-e_3|$ 最大的点(LC-1: $e_3=-6.0\text{ pC/m}$ ,  $|e_1-e_3|=8.0\text{ pC/m}$ ; LC-2: $e_3=-15.0\text{ pC/m}$ ,  $|e_1-e_3|=20.0\text{ pC/m}$ )闪烁最大。图4(c)进一步揭示了在棒状液晶典型挠曲电系数范围内闪烁值随 $|e_1-e_3|$ 单调递增的定量规律。这两种液晶材料都表现出当展曲与弯曲挠曲电系数匹配时( $e_1\approx e_3$ ),帧间光学闪烁最小;而当 $|e_1-e_3|$ 增大时,帧间光学闪烁增大。与式(7)的理论推断相符,在FFS-LCD中挠曲电效应产生的极化力矩与挠曲电系数差值相关,而这种力矩将直接影响液晶分子的方位角( $\varphi$ )和倾角( $\theta$ )在正负帧电场的对称性,导致透过率分布不均匀。

基于上述发现可以得到:在保持其他光电性

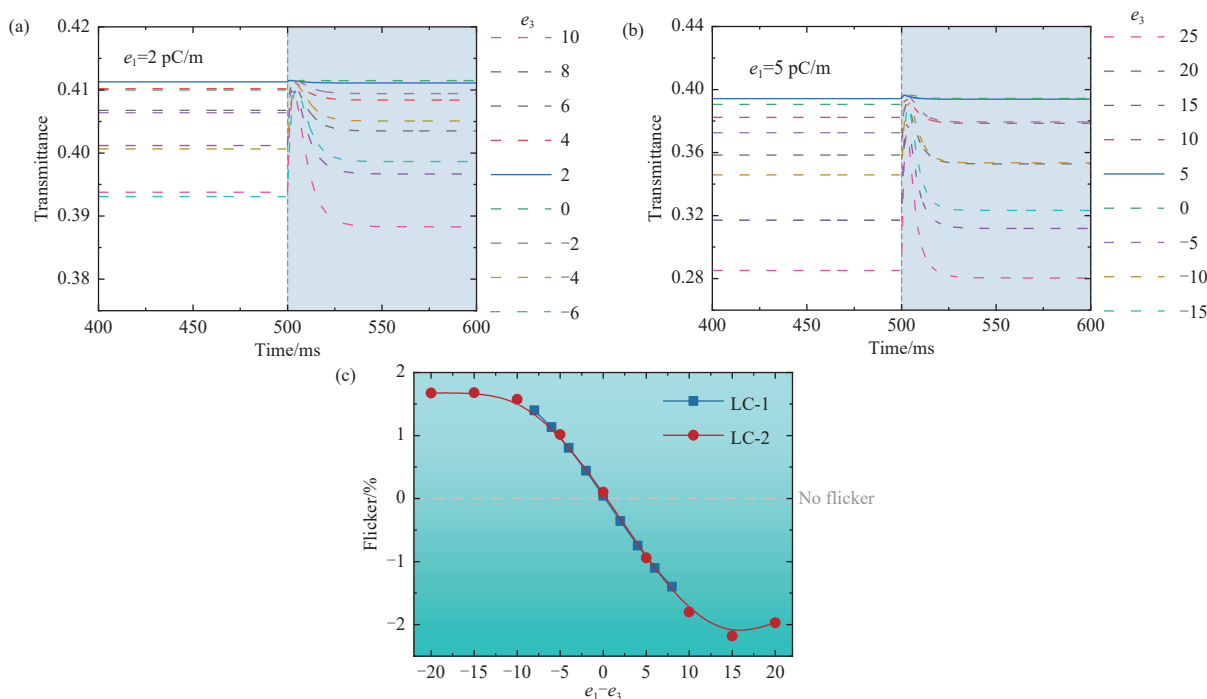


图4 (a,b)透过率-时间曲线;(c)闪烁值与挠曲电系数的关系。

Fig. 4 (a,b) Transmittance-time curves; (c) Relationship between flicker value and flexoelectric coefficients.

能满足显示要求的前提下,优先选择展曲与弯曲挠曲电系数相近的液晶配方,即最小化 $|e_1 - e_3|$ ,通过分子设计(如引入特定极性基团或调控分子弯曲度)使展曲与弯曲形变下的偶极矩响应趋于一致,可以从根本上抑制挠曲电诱导闪烁。

## 5 结 论

本文针对负性向列相液晶挠曲电系数的精确标定及其与FFS-LCD低频闪烁的关联机制开展研究,建立了多物理量协同拟合标定方法,通过同时匹配稳态V-T曲线与瞬态透过率响应,有

效克服了传统单维度拟合解的非唯一性问题。利用该方法对两种商用负性液晶进行验证,模拟与实验的透过率偏差均低于0.25%,精确获得了LC-1(2.0, -7.9 pC/m)、LC-2(5.0, 7.94 pC/m)的系数组合,证实了方法的可靠性。

理论推导与数值模拟一致表明,FFS-LCD的低频闪烁并非由单个挠曲电系数决定,而是遵循与系数差绝对值 $|e_1 - e_3|$ 正相关的标定关系;当 $e_1 \approx e_3$ 时,挠曲电极化产生的帧间力矩在正负极性下对称抵消,闪烁趋近于理论下限。该规律为低功耗FFS-LCD的液晶材料分子设计提供了明确的定量判据。

## 参 考 文 献:

- [1] MEYER R B. Piezoelectric effects in liquid crystals [J]. *Physical Review Letters*, 1969, 22(18): 918-921.
- [2] TAGANTSEV A K. Piezoelectricity and flexoelectricity in crystalline dielectrics [J]. *Physical Review B*, 1986, 34(8): 5883-5889.
- [3] CASTLES F, MORRIS S M, COLES H J. The limits of flexoelectricity in liquid crystals [J]. *AIP Advances*, 2011, 1(3): 032120.
- [4] ŠKARABOT M, MOTTRAM N J, KAUR S, *et al.* Flexoelectric polarization in a nematic liquid crystal enhanced by dopants with different molecular shape polarities [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(11): 9785-9795.
- [5] GRASINGER M, MOZAFFARI K, SHARMA P. Flexoelectricity in soft elastomers and the molecular mechanisms underpinning the design and emergence of giant flexoelectricity [J]. *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(21): e2102477118.
- [6] PONTI S, ZIHERL P, FERRERO C, *et al.* Flexoelectro-optic effect in a hybrid nematic liquid crystal cell [J]. *Liquid Crystals*, 1999, 26(8): 1171-1177.
- [7] STRÖEMER J F, RAYNES E P, BROWN C V. Study of elastic constant ratios in nematic liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(5): 051915.
- [8] HUMPERT A, ALLEN M P. Elastic constants and dynamics in nematic liquid crystals [J]. *Molecular Physics*, 2015, 113(17/18): 2680-2692.
- [9] JUNG J, PARK H B, JUNG H Y, *et al.* Recent progress in liquid crystal devices and materials of TFT-LCDs [J]. *Journal of Information Display*, 2024, 25(1): 121-142.
- [10] 李裕蓉,杨磊,陈明阳. 负性液晶边缘场切换模式的亮线不良分析[J]. 液晶与显示, 2020, 35(10): 1044-1050.  
LI Y R, YANG L, CHEN M Y. Analysis of line Mura for fringe field switching mode with negative liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(10): 1044-1050. (in Chinese)
- [11] 李裕蓉,杨磊,陈明阳,等. 负性液晶边缘场切换模式的性能分析及优化[J]. 液晶与显示, 2020, 35(9): 914-920.  
LI Y R, YANG L, CHEN M Y, *et al.* Performance analysis and optimization of fringe field switching with negative dielectric liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(9): 914-920. (in Chinese)
- [12] KIM M, HAM H G, CHOI H S, *et al.* Flexoelectric in-plane switching (IPS) mode with ultra-high-transmittance, low-voltage, low-frequency, and a flicker-free image [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 5962-5971.
- [13] KIM M S, BOS P J, KIM D W, *et al.* Flexoelectric effect in an in-plane switching (IPS) liquid crystal cell for low-power consumption display devices [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 35254.
- [14] LEE S H, LEE S L, KIM H Y. Electro-optic characteristics and switching principle of a nematic liquid crystal cell controlled by fringe-field switching [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(20): 2881-2883.
- [15] YAMAGUCHI H, KAWATA Y, MATSUURA Y, *et al.* Reflective full-color LCD using low-temperature polysilicon TFTs in low-frequency driving: analysis of image persistence and flicker with scientific CMOS camera [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(7): 439-448.
- [16] CHOI H S, KIM J H, HAM H G, *et al.* Studies on flickering in low frequency driven fringe-field switching (FFS) liquid crystal display [J]. *SID Symposium Digest of Technology Papers*, 2016, 47(1): 1610-1613.
- [17] INOUE D, MIYAKE T, SUGIMOTO M. Flexoelectric effect on image sticking caused by residual direct current voltage and flicker phenomenon in fringe-field switching mode liquid crystal display [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2021, E104.C(2): 45-51.
- [18] CHEN Y, LUO Z Y, PENG F L, *et al.* Fringe-field switching with a negative dielectric anisotropy liquid crystal [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(2): 74-77.
- [19] JEONG I H, JANG I W, KIM D H, *et al.* Investigation on flexoelectric effect in the fringe field switching mode [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 1368-1371.
- [20] CASTLES F, GREEN S C, GARDINER D J, *et al.* Flexoelectric coefficient measurements in the nematic liquid crystal phase of 5CB [J]. *AIP Advances*, 2012, 2(2): 022137.
- [21] HUANG K T, HUNG Y W, FANG R X, *et al.* Investigation on the flexoelectric effect of LC in the localized area of FFS pixel structure [J]. *SID Symposium Digest of Technology Papers*, 2015, 46(1): 1559-1562.
- [22] YOON T H, OH S W, BAEK J M, *et al.* Elimination of image flicker in a fringe-field switching liquid crystal cell [C]// *Proceedings of SPIE 9940, Liquid Crystals XX*. San Diego: SPIE, 2016, 9940: 994009.
- [23] KIM J W, CHOI T H, YOON T H, *et al.* Elimination of image flicker in fringe-field switching liquid crystal display driven with low frequency electric field [J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 30586-30594.
- [24] KIM M, LEE D, PARK H, *et al.* Ultralow power consumption liquid crystal display retaining superior image qualities [J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(9): 2301963.
- [25] JUNG J, JUNG H, CHOI G, *et al.* Flicker minimization in power-saving displays enabled by measurement of difference in flexoelectric coefficients and displacement-current in positive dielectric anisotropy liquid crystals [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2025, 8(9): 250022.
- [26] OH S W, PARK J H, BAEK J M, *et al.* Effect of electrode spacing on image flicker in fringe-field-switching liquid

- crystal display [J]. *Liquid Crystals*, 2016, 43(7): 972-979.
- [27] ZHOU Z Y, ZHANG X F, HALDER S, *et al.* Bistable polymer-stabilized cholesteric-liquid-crystal window based on flexoelectric and dielectric effects [J]. *Physical Review Applied*, 2024, 21(2): 024045.
- [28] OH S W, PARK J H, LEE J H, *et al.* Elimination of image flicker in a fringe-field switching liquid crystal display by applying a bipolar voltage wave [J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 24013-24018.
- [29] DE GENNES P G, PROST J. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1993: 135-139.

作者简介:



仇梓豪,男,硕士研究生,2024年于河北工业大学获得学士学位,主要从事液晶器件物理方面的研究。E-mail: 1247462400@qq.com



马红梅,女,博士,教授,2017年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶器件物理方面的研究。E-mail: mhmtj@163.com