

文章编号:1007-2780(2026)05-0626-11

过压驱动下液晶器件的光学反弹抑制

孙海峰¹, 朱康¹, 刘嘉乐¹, 彭增辉², 孙敬伟³, 姚丽双^{1,4*}

(1. 汕头大学理学院, 广东汕头 515063;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033;

3. 汕头大学工学院, 广东汕头 515063;

4. 广东省车载显示触控技术企业重点实验室, 广东汕头 515047)

摘要:液晶显示技术凭借其成熟的制造工艺与优异的性价比,在显示面板市场占据重要地位,但其响应速度仍是制约高速动态显示及光调控的关键因素,过压驱动技术(Overdriving, OD)虽能有效缩短响应时间,却常伴随响应曲线的光学反弹(Optical Bounce, OB)现象,严重劣化高速、高精度显示质量。本文基于Frank弹性理论与Ericksen-Leslie流体动力学方程,通过分析过压下液晶分子指向矢的动态响应过程,深入揭示了光学反弹现象的形成机理:过驱动电压在液晶层内引发的分子转动速度的空间非均匀分布,中间层分子与基板附近分子之间的转速差造成了过压下器件的光学反弹现象。基于此机理,本文提出了一种通过精确调控过驱动电压幅值来抑制光学反弹的优化技术。实验采用10 μm反平行排列的LC-BYE7向列相液晶器件进行模拟结果验证。结果表明,优化过驱动电压可有效削弱液晶器件内部的转动速度差,光学反弹凹陷程度最高可降低57.2%,同时响应时间减小18 ms,可有效改善显示效果。本研究提出的方法不仅验证了理论模型的准确性,也为液晶器件在高品质动态显示与快速波前调制等领域的应用提供了具有工程实用价值的技术路径。

关键词:过压驱动技术;光学反弹;指向矢;响应曲线

中图分类号:O753.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2026-0066 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2026-0066

Suppression of optical bounce in overdrive liquid crystal devices

SUN Haifeng¹, ZHU Kang¹, LIU Jiale¹, PENG Zenghui², SUN Jingwei³, YAO Lishuang^{1,4*}

(1. College of Science, Shantou University, Shantou 515063, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. College of Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China;

4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Automotive Display and Touch Technologies, Shantou 515047, China)

Abstract: Liquid crystal(LC) display technology maintains a dominant position in the panel market due to its mature manufacturing processes and superior cost-effectiveness. However, its response speed is still a critical factor restricting high-speed dynamic displays and optical modulation. While overdriving(OD)

收稿日期:2026-04-02;修订日期:2026-04-16.

基金项目:广东省科技创新战略专项资金(No.2023B1212020004)

Supported by Guangdong Provincial Science and Technology Innovation Strategy Special Fund (No.2023B1212020004)

*通信联系人, E-mail:lsyao@stu.edu.cn

techniques can effectively shorten response times, they are frequently accompanied by the optical bounce (OB) phenomenon in the response curve, which severely degrades the quality of high-speed and high-precision displays. Based on Frank's elasticity theory and the Ericksen-Leslie hydrodynamic equations, this study thoroughly elucidates the formation mechanism of the OB phenomenon by analyzing the dynamic response process of the LC molecular director under overdrive conditions. It is revealed that the overdrive voltage induces a spatially non-uniform distribution of molecular rotational velocities within the LC layer; the rotational velocity difference between the molecules in the bulk layer and those near the substrates triggers the OB phenomenon. Based on this mechanism, we propose an optimization technique to suppress OB by precisely modulating the overdrive voltage amplitude. Experiments using a 10 μm anti-parallel aligned LC-BYE7 nematic LC device were conducted to verify the simulation results. The results demonstrate that optimizing the overdrive voltage effectively mitigates the internal rotational velocity difference, reducing the depth of the OB by up to 57.2% and decreasing the response time by 18 ms, thereby effectively improving display performance. The method proposed in this study not only validates the accuracy of the theoretical model but also provides a technically viable pathway with practical engineering value for the application of LC devices in fields such as high-quality dynamic displays and rapid wavefront modulation.

Key words: overdrive technology; optical bounce; director; response curve

1 引言

在显示技术领域,液晶显示技术^[1](Liquid Crystal Display, LCD)因制造成本低、制造工艺成熟,在市场中占据重要地位。与有机发光二极管(Organic Light Emitting Diode, OLED)显示技术相比,LCD在器件制备方面的要求较低,且通过量子点技术的助力^[2-5],其色彩饱和度几乎可以与OLED相媲美^[6-7]。然而,随着OLED等新型显示技术的迅速发展,其凭借自发光特性带来的无限对比度^[8]、纯净黑色表现以及微秒级的响应速度^[9-13],使LCD在高速动态显示性能方面的劣势日益凸显。与此同时,随着光场调控技术的不断突破,液晶器件的应用已不再局限于传统平板显示,正大步迈向高维矢量全息与波前调制^[14]与波前调制^[15]等前沿高端领域。在这些新兴应用中,液晶器件的动态响应速度和光调制质量显得尤为关键。

响应速度作为衡量显示器件性能的一个关键参数^[16-17],直接影响着动态图像的显示质量。传统LCD的响应时间受限于液晶分子的固有弛豫特性,在灰度切换过程中存在明显的延迟,运动模糊等现象^[18-19],严重影响视觉体验。为突破这一技术瓶颈,研究者们发展了多种优化策略,包括优化液晶层厚^[20]、改进液晶材料^[21]以及采用过压驱动技术等^[22-30]。其中,过压驱动技术凭借

其原理简单、效果显著且易于实现等优势,已成为提升液晶显示响应速度的主流技术方案。

然而,过压驱动技术在有效提升响应速度的同时,也引入了新的技术问题。在实际应用过程中,器件的光响应曲线常出现明显的凹陷现象,即液晶分子在达到稳定状态之前,透过率曲线产生波动,出现一定的凹陷现象。这种响应曲线的波动不仅造成响应时间的延长,还会在动态图像显示时产生伪影^[31-36],严重影响显示质量。

目前已有研究尝试通过材料掺杂^[37-39]、多帧输出^[40]等方法来减弱光学反弹,但效果有限且实现方式较为复杂。本文在现有研究的基础之上,通过改变驱动电压的方式,尝试减小光学反弹,优化响应时间,提升显示效果。该技术实现方式简单且效果明显,实现了对液晶器件光学反弹的有效优化,为液晶显示及相关光电器件的性能优化提供了新的技术途径。

2 过压驱动技术及光学反弹

液晶显示技术基于液晶的电控双折射效应^[41],通过施加不同大小的电信号调控光强以实现灰阶的变换。液晶分子作为棒状结构,在外加电场作用下会产生感应偶极矩,获得使分子转动的力偶作用,形成取向极化,其运动响应与外加

电场强度之间存在显著的相关性。然而,传统驱动方法直接从初始电压切换至目标电压时,液晶分子需要克服阻力矩和弹性力矩进行取向调整,响应速度受限于分子的固有弛豫特性,导致灰度切换过程缓慢。为突破这一瓶颈,过压驱动技术应运而生,如图 1 所示。其基本原理在于:当液晶分子需要发生偏转时,可以通过施加一个比目标电压更高的驱动电压的方法,扩大液晶分子的电

场转矩进而克服阻力矩和弹性力矩,使其更快地达到目标电压所对应的稳定状态;在液晶分子回落的过程中,则可以通过施加一个更低一些的驱动电压,增大弹性转矩来提升响应速度^[42]。即在显示应用时,在切换两种不同灰度级所对应的电压值时,通过施加一个更高(低)于目标电压的驱动电压,加速两灰度间的切换响应,显著加快图像显示切换速度并提升视觉观感效果。

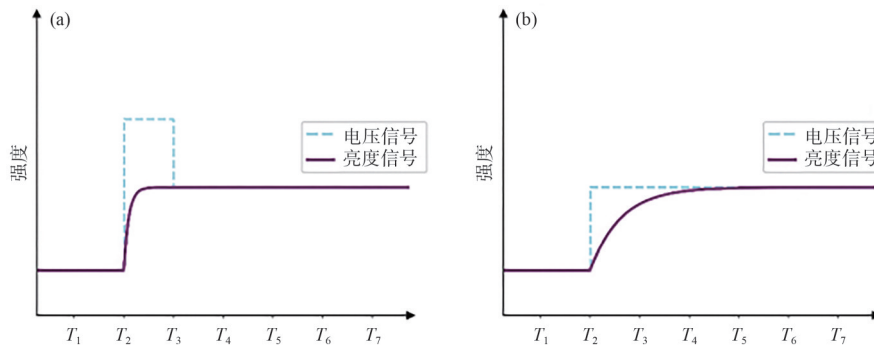


图 1 不同驱动方式图。(a) 过压驱动; (b) 普通驱动。

Fig. 1 Diagram of different driving methods. (a) Overdrive; (b) Conventional drive.

过压驱动技术的有效性依赖于对过驱动电压幅值及施加时间的精确控制:过驱动电压过高或持续时间过长会导致分子过冲^[26,43],而过低或过短则无法充分发挥加速作用。但在实际实验过程中,过压驱动技术虽然显著缩短了响应时间,却经常出现光学反弹现象。

液晶的光学反弹(Optical Bounce, OB)是指在过压驱动过程中,液晶器件的透过率响应曲线在达到目标稳定状态之前出现非单调波动的一种现象^[44-46],如图 2 所示,具体表现为光强或相位曲线在上升或下降过程中短暂出现结果超过或低于目标值的现象,使曲线产生波动,最终才趋

于稳定。这种现象在视觉上对应于像素灰度切换时出现的瞬时过亮或过暗效果。当动态图像与背景存在较大灰度差时,会在图像移动轨迹中形成明显的拖影、伪影,严重影响显示质量。

为探究光学反弹的形成机理,本文采用 Ericksen-Leslie 方程对液晶器件在不同驱动方式下的动态响应进行数值模拟^[47-48]。通过将平行排列液晶盒沿 z 轴方向等距离划分为 N 层,建立迭代方程求解各层分子倾角随时间的变化规律。在静态条件下,为了计算液晶分子指向矢的运动状态,考虑液晶指向矢的运动位置变化率时,需将其置于三维坐标系下进行分析:设 z 轴平行于液晶盒基板平面的法线方向, x 、 y 轴构成的平面平行于液晶盒基板平面,如图 2 所示,即可描述为:

$$\vec{n} = n_x \vec{i} + n_y \vec{j} + n_z \vec{k}, \quad (1)$$

其中: \vec{i} 、 \vec{j} 、 \vec{k} 为笛卡尔坐标系下分别沿 x 、 y 、 z 轴方向的单位矢量; n_x 、 n_y 、 n_z 分别表示指向矢在 3 个单位矢量方向上的标量值^[49]。则矢量微分算子可表示为:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}. \quad (2)$$

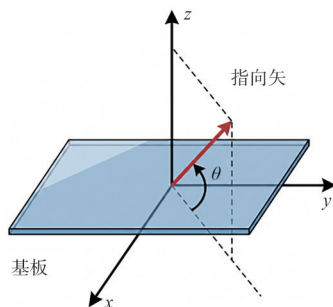


图 2 液晶分子指向矢在三维坐标系下的示意图

Fig. 2 Schematic of the liquid crystal director in 3D coordinates

将其类比于弹性形变的固体,通过联立上述公式,液晶弹性体单位体积内的弹性势能表示为^[50]:

$$E_{\text{elastomer}} = \frac{1}{2} \left[K_{11} (\nabla \cdot \vec{n})^2 + K_{22} (\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n})^2 + K_{33} (\vec{n} \times \nabla \times \vec{n})^2 \right]. \quad (3)$$

在平行排列的液晶盒中,其扭曲形变所产生的弹性势能相对较小,因此可忽略不计。为了更直观地观察液晶分子指向矢分布,将其从三维笛卡尔坐标系转为柱坐标系:

$$\vec{n} = (\cos \theta, 0, \sin \theta), \quad (4)$$

其中, θ 为指向矢与基板平面之间的夹角,如图2所示。

$$E_{\text{elastomer}} = \frac{1}{2} \left[K_{11} \left(\cos \theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + K_{33} \left(\sin \theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

在理想情况下,对于一个液晶器件,其电介质通常仅考虑液晶分子。电场作用时,应考虑向列相液晶的电场能。依据电磁学理论,电场能密度可表示为^[51]:

$$U_e = \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} = \frac{1}{2} E^2 (\epsilon_{\perp} + \Delta \epsilon \sin^2 \theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 (\epsilon_{\perp} + \Delta \epsilon \sin^2 \theta), \quad (6)$$

其中: ϵ_{\parallel} 、 ϵ_{\perp} 分别表示平行和垂直于指向矢方向的介电常数。 $\Delta \epsilon$ 为二者之差,即介电常数的各向异性。

至此,液晶分子的弹性势能密度和电场能密度已经表达,即液晶分子的总自由能可表示为^[52]:

$$F = \int_V (E_{\text{elastomer}} - U_e) d\tau. \quad (7)$$

再根据欧拉-拉格朗日方程,可得到自由能函数在稳定情况下的表达式^[53-54]:

$$\begin{aligned} & (K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \frac{d^2 \theta}{dz^2} + (K_{33} - \\ & K_{11}) \sin \theta \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 + \\ & \Delta \epsilon \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 \sin \theta \cos \theta = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

通过利用泰勒展开式,对一阶、二阶导数进行展开,实现降阶。通过之前的描述,将液晶盒沿 z 轴方向划分为 N 层,设定 θ_i 为第 i 层的液晶分子指向矢倾角大小, V_i 为第 i 层液晶分子所受的电压大小,最终得到 θ_i 的差分迭代表达式:

$$\begin{aligned} \theta_i = & \frac{\theta_{i+1} + \theta_{i-1}}{2} + \frac{1}{16} \sin 2\theta_i \times \\ & \frac{(K_{33} - K_{11})(\theta_{i+1} - \theta_{i-1})^2 + \Delta \epsilon (V_{i+1} - V_{i-1})^2}{K_{11} + (K_{33} - K_{11}) \sin^2 \theta_i}. \end{aligned} \quad (9)$$

对于动态的液晶调控过程,需将旋转黏度 γ_1 引入在稳定状态下的自由能函数表达式右侧,同时加入时间参量:

$$\begin{aligned} & (K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \frac{d^2 \theta}{dz^2} + \\ & (K_{33} - K_{11}) \sin \theta \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 + \\ & \Delta \epsilon \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 \sin \theta \cos \theta = \gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t}. \end{aligned} \quad (10)$$

根据上述公式,按照表1参量进行仿真模拟,调制电压为该液晶器件相位在 $0.3\pi \sim 0.8\pi$ 对应电压下的调制过程,其过驱动电压设置为 0 V 。分别模拟过压驱动与普通驱动下响应曲线的示意图(图3)以及驱动过程中盒内不同位置处液晶分子在不同时刻的指向矢分布情况(图4),其中A、B、C分别代表图3中所标记的3个时刻。

表1 模拟仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数名称	参数值
盒厚(d)	10 μm
波长(λ)	633 nm
寻常折射率(n_o)	1.521
双折射率(Δn)	0.225
展曲弹性常数(K_{11})	11.5 pN
弯曲弹性常数(K_{33})	19.1 pN
垂直介电常数分量(ϵ_{\perp})	5.2
介电常数各向异性($\Delta \epsilon$)	13.8
旋转黏度(γ_1)	235.5 mPa·s

该结果表明,相比于常规驱动,采用过压驱动技术进行初次调制并达到目标状态(A处)时,液晶分子并未处于稳定的排列状态,且其液晶器件的中间层和边缘层出现了明显的转速偏差。中间位置液晶分子的转速慢,基板位置液晶分子的转速快。即当突然撤去或减小电压时,液晶器件的边缘层对液晶分子具有极强的表面锚定作用。在电场撤除的瞬间,边缘层的液晶分子受到

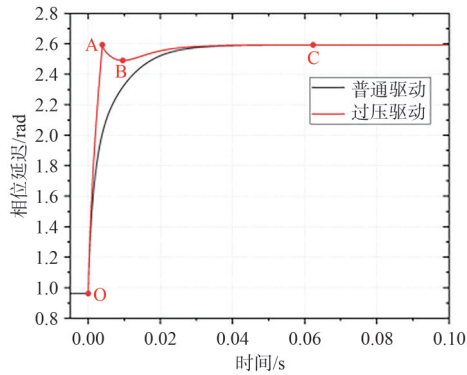


图3 不同驱动方式下的相位-时间响应模拟曲线(O、A、C、B分别代表初始相位、目标相位、最终相位和光学反弹)。

Fig. 3 Simulated phase-time response curves under different driving modes (where O, A, C, and B represent the initial phase, target phase, final phase and OB, respectively).

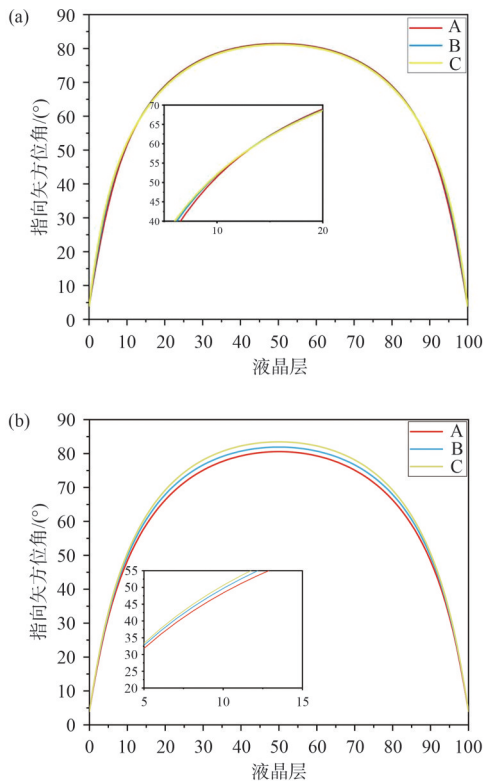


图4 A、B、C时刻下液晶分子指向矢分布模拟图。(a) 过压驱动；(b) 普通驱动。

Fig. 4 Simulated liquid crystal director profiles at moments A, B and C. (a) Overdrive; (b) Conventional drive.

的弹性恢复力矩最大,因此它们会迅速响应,以极快的速度恢复初始排列状态;而中间层分子不仅因为远离基板导致弹性恢复力矩传递存在延

迟,也因背流效应对液晶分子的排列产生干扰,故转动状态相对缓慢。这种液晶分子内部的转速差体现在相位曲线上即为光学反弹,如图3所示。故相比于普通驱动,当使用过驱动技术时,会在相位曲线或响应曲线中产生一定的波动,形成光学反弹,对液晶器件的显示效果产生影响。

由上述模拟可知,在过压驱动技术中,其施加的过驱动电压会对液晶分子的指向矢产生影响,使液晶器件中不同位置处的液晶分子之间产生转速差,造成光学反弹现象。为此本文提出通过调节过驱动电压的大小来抑制光学反弹现象。本文模拟了液晶器件在执行 $\pi \sim 1.5\pi$ 的相位切换(对应电压值为4.2~3.5 V)时,不同过驱动电压下的响应曲线,其结果如图5所示。由模拟可知,通过改变过驱动电压的大小,可以有效抑制光学反弹现象,实现响应曲线的优化。

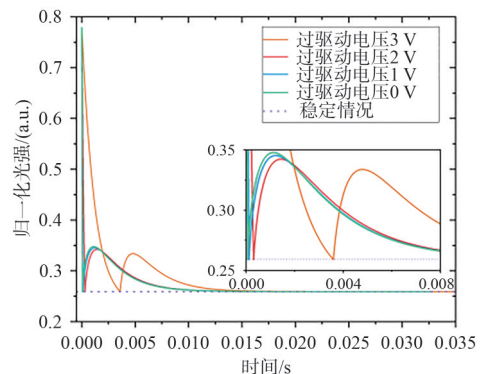


图5 不同过驱动电压下的下降响应模拟曲线

Fig. 5 Simulated decay response curves under different overdrive voltages

3 实 验

前述仿真结果已指出光学反弹的形成机理,即液晶器件内部因瞬时施加电场,造成内部不同位置处的液晶分子之间产生转速差。且理论模型表明,通过精准调控过驱动电压的幅值,可以对光学反弹进行抑制。为了验证上述理论预测的准确性,本节开展了针对性的实验论证,通过改变过驱动过程中的驱动电压,考察器件动态响应曲线的光学反弹特征。

3.1 液晶器件的制备

实验选用上海恒商精密仪器有限公司生产的LC-BYE7型向列相液晶材料,其关键物理参

数详见表1。实验在室温环境下进行,利用毛细效应将该液晶材料灌注于预设厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 的反平行取向液晶空盒中。选择该厚度是因为较大的盒厚会产生较大的相位延迟量,从而使实验中的光学反弹现象更加显著,易于观测与测量。灌注完毕后,将液晶盒垂直静置约1 h以确保填充均匀且封口处无残留,随后使用封口胶进行密封,并在365 nm紫外光源下固化10 min。偏光显微镜观测结果显示,所制备的液晶器件内部取向均匀性良好,未见气泡等宏观缺陷。进一步利用光谱仪测定器件的实际盒厚为 $(10\pm 0.1)\ \mu\text{m}$,完全符合实验设计要求。

3.2 优化电压法

实验测试平台采用波长为632 nm的激光器(索雷博光电科技有限公司,光输出功率最高10 mW)作为探测光源,具体的光路系统配置如图6所示。探测光束依次穿过起偏器、波片、待测液晶器件以及检偏器,最终由光电探测器采集并转化为电信号,接入示波器进行实时显示与记录。驱动电信号由信号发生器提供,采用频率为1 kHz的方波交流信号。

相位延迟量标定方法:首先在光路中插入 $1/2$ 波片,从高电压向低电压缓慢调节信号发生器,

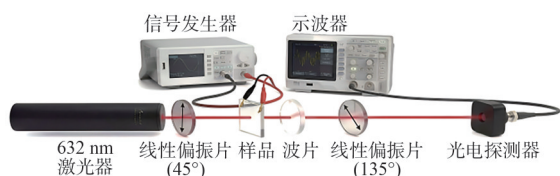


图6 实验测试光路图

Fig. 6 Schematic of the experimental optical setup

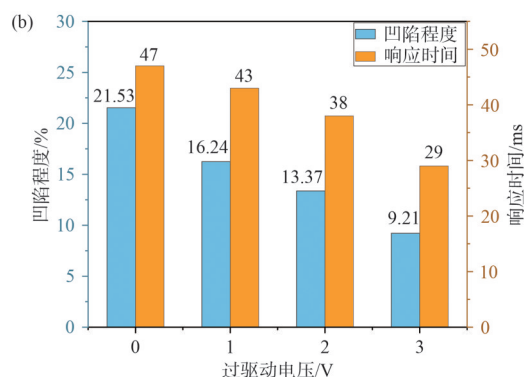
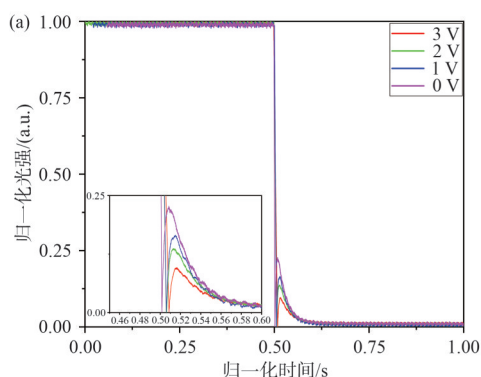


图7 (a) 不同过压驱动下光强随时间的变化曲线;(b) 不同过压驱动下凹陷程度对比(左轴)和响应时间对比(右轴)。

Fig. 7 (a) Experimental intensity-time response curves under different overdrive voltages; (b) Comparison of the depth of the optical bounce (left axis) and response time (right axis) under different overdrive voltages.

当光电探测器记录的透射光强达到极小值(趋于零)时,记录此时的电压值,该电压即对应液晶器件 π 的相位延迟量。随后依次将半波片替换为 $1/4$ 波片,重复上述测试流程,获得相位延迟量为 1.5π 时的调控电压。

3.3 结果分析

基于上述标定结果,采用过压驱动技术对液晶器件进行相位调制。具体方案为:在执行 $\pi\sim 1.5\pi$ 的相位切换时(对应电压值为4.2~3.5 V),过驱动电压分别设定为3 V、2 V、1 V及0 V。通过示波器同步记录各驱动条件下的光强响应曲线,测试结果如图7(a)所示。使用凹陷程度表征光学反弹现象,其定义为液晶分子波动最大处光强与达到稳定状态的光强之间的比值。

由图7(b)可知,过驱动电压的幅值对液晶器件响应曲线的反弹特征具有显著影响。过驱动电压与目标电压的差值越小,反弹改善效果越明显。就本实验而言,上述不同过驱动过程中,反弹程度优化幅度达57.2%。且其响应时间减小18 ms,优化效果达38.3%(本文定义的响应时间(下降时间)为光强从90%下降到10%时所需的时间)。常规情况下,过驱动电压与稳态电压差距越大,其响应时间应越小;但在实际中,过大的过驱动电压会造成更大的反弹情况,如图7(b)右轴中施加0 V电压的测试结果所示,会大幅延长最终的稳定时间。

为了明确在不同驱动电压调控下对相位的改善效果,根据光强与相位之间的关系,利用反三角函数,得到不同驱动方式下的相位偏差并得到相位-时间反推曲线,如图8(a)所示。本文定

义相位偏差为液晶分子在动态响应过程中,瞬时相位相对于目标稳定相位的变化量,其结果如图 8(b)所示。通过将过驱动电压调整至 3 V,成功将液晶内部的相位偏差从 0.483 rad 抑制至 0.308 rad,优化幅度达 36.2%。

为了更直观地评估光学反弹现象对宏观显示效果的具体影响,本文将上述不同过压驱动条件下的动态响应过程转化为宏观灰度演化图,如图 9 所示,其中过驱动电压分别为 0 V 和 3 V。在

0~255 灰度范围内,通过改变过驱动电压的方式,在其光学反弹最大处改善近 30 个灰度。由该组图可以清晰地观察到,随着过驱动电压幅值的优化与调整,响应曲线中的光学反弹得到了有效抑制(虚线划定的浅红色区域明显减小),器件在灰阶切换过程中的宏观视觉质量也获得了显著改善。这一结果直观地印证了优化驱动电压在消除动态显示拖影和伪影、提升整体显示性能方面的实际有效性。

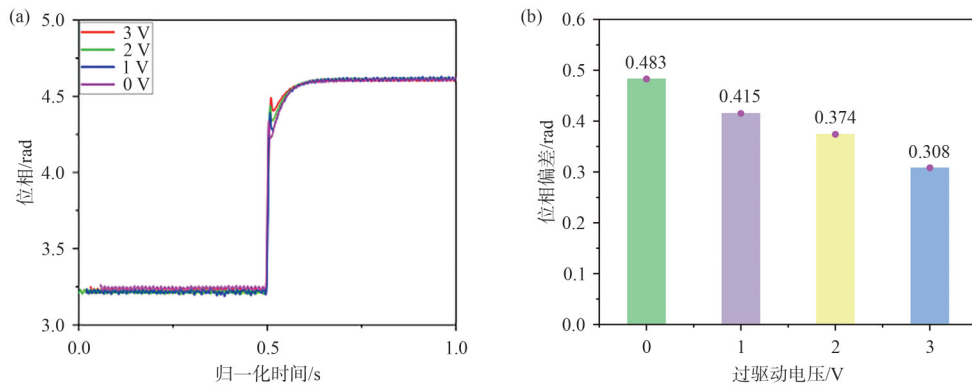


图 8 (a) 不同过驱动电压下的相位-时间响应曲线; (b) 不同过驱动电压引起的相位波动值。

Fig. 8 (a) Phase-time response curves under different overdrive voltages; (b) Phase deviation values under different overdrive voltages.

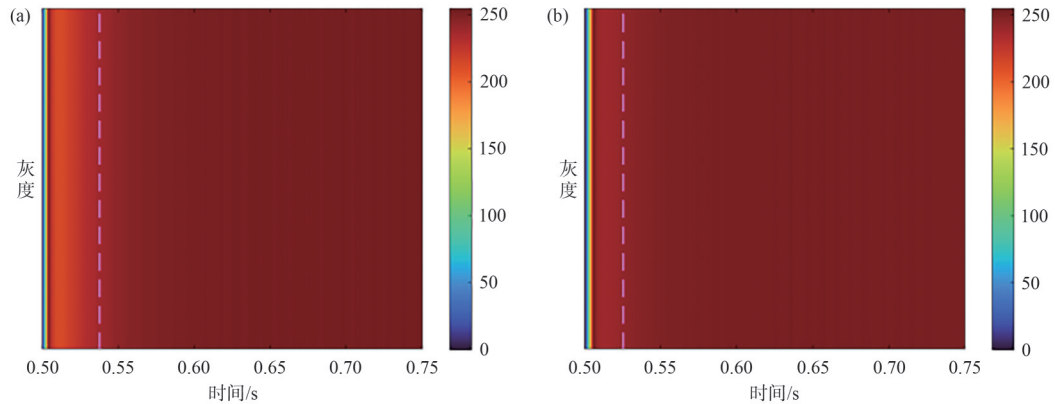


图 9 器件在 0 V (a) 和 3 V (b) 过驱动电压下的灰度变化图像

Fig. 9 Grayscale variation images of the device under 0 V (a) and 3 V (b) overdrive voltages

其机理与前期流体动力学模拟结果高度吻合:过压驱动技术会在液晶层内引入分子转动速度的空间分布差异——过驱动电压越高,不同位置处液晶分子所受电场力矩差异越大,导致分子转速差加剧,进而加深响应曲线的反弹程度。具体而言,液晶器件在电场作用下可视为弹性连续介质,其分子指向矢的重新排布遵循 Ericksen-

Leslie 方程所描述的流体动力学行为。当撤去电压时,液晶层内形成非均匀电场分布,靠近基板区域的分子受边缘层锚定作用,形成较快转动;而中间层分子受锚定效果较弱,电场对其影响较小,因而相比于边缘层,其转动较慢。这种层间速度失配使得器件初次达到目标相位时,分子指向矢呈非平衡态分布:中间层分子尚未完成取向

调整,而基板附近分子已超前转动到位。后续过程中,转速较快的分子需回退至稳定取向,转速较慢的分子则需继续转动补偿,两者弛豫过程的异步性导致光强调制曲线出现瞬时反弹现象。过驱动电压与目标电压的偏离程度越大,上述层间速度梯度越大,光学反弹现象越显著。

4 结 论

本文针对过压驱动下液晶器件的响应曲线光学反弹现象,开展了工作机理分析、指向矢模拟与实验验证工作。在理论层面,基于Frank曲率弹性理论与Ericksen-Leslie方程解析了液晶分子的动态响应过程,深入揭示了光学反弹的形成机理:过驱动电压在液晶层内引发分子转动速度的空间非均匀分布,电场对不同位置处液晶分子造成不同影响效果,使中间层与边缘层形成转速差,这种层间速度失配导致器件初次达到目标相位时分子指向矢呈非平衡态,后续弛豫过程的异

步性最终表现为响应曲线的瞬时波动,引起光学反弹。研究表明,过驱动电压与目标电压偏离越大,光学反弹现象越显著。基于该反弹机理,本文提出通过精确调控过驱动电压幅值实现对光学反弹的优化。通过采用平行排列的LC-BYE7液晶器件进行实验验证,系统研究了不同过驱动电压条件下的电光响应特性,实验结果与仿真效果吻合较好,证实了缩小过驱动电压与目标电压的差值可有效削弱反弹程度,最高可使响应曲线的光学凹陷程度降低57.2%,响应时间缩短18 ms,对相位波动幅度的优化可达36.2%,对应的显示效果中,光强波动可缩减近30个灰度。相比传统的材料掺杂等方法,本文提出的策略无需改变液晶配方或进行复杂的器件改造,便可实现响应提速与响应反弹抑制的双重优化,且优化效果良好。这种实现方式简单且效果显著,具有极高的工程适用性,为液晶光电器件在高品质动态显示与快速波前调制等方向的发展提供了新的技术途径。

参 考 文 献:

- [1] 李巍,高志强,密保秀,等. 液晶取向技术[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2009,29(4):90-96.
LI W, GAO Z Q, MI B X, *et al.* Progress in the liquid crystal alignment [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2009, 29(4): 90-96. (in Chinese)
- [2] XU B, ZHOU J K, ZHANG C R, *et al.* Research progress on quantum dot-embedded polymer films and plates for LCD backlight display [J]. *Polymers*, 2025, 17(2): 233.
- [3] XIE H X, LIN Q Z, CHEN X Y, *et al.* Ultrastable quantum dot composites with dense barrier layer for wide color gamut display [J]. *Ceramics International*, 2024, 50(1): 1351-1359.
- [4] KIM D H, KIM J Y, SEO M H, *et al.* Complete suppression of color dispersion in quantum-dot backlights by optimizing optical configuration of films[J]. *Photonics*, 2025, 12(9): 864.
- [5] HUANG B L, CHEN E G, SUN L, *et al.* Quantum-dot color conversion film patterned by screen printing and overprinting process for display backlights [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107486.
- [6] 项兴焜. OLED照明技术研究进展综述[J]. 电子测试,2022,36(24):139-140,138.
XIANG X K. Review of the research progress of OLED lighting technology [J]. *Electronic Test*, 2022, 36(24): 139-140, 138. (in Chinese)
- [7] 郑圣德. LCD/PDP/OLED的综合比较[J]. 电子工艺技术,2005,36(5):304-307.
ZHENG S D. Comparison of LCD/PDP/OLED [J]. *Electronics Process Technology*, 2005, 36(5): 304-307. (in Chinese)
- [8] SINGH R, UNNI K N N, SOLANKI A, *et al.* Improving the contrast ratio of OLED displays: an analysis of various techniques [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 221-230.
- [9] GU G, FORREST S R. Design of flat-panel displays based on organic light-emitting devices [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, 4(1): 83-99.
- [10] SHINAR J. *Organic Light-Emitting Devices: a Survey* [M]. New York: Springer, 2004.

- [11] KANNO H, HAMADA Y, TAKAHASHI H. Development of OLED with high stability and luminance efficiency by co-doping methods for full color displays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(1): 30-36.
- [12] BARDSLEY J N. International OLED technology roadmap [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(1): 3-9.
- [13] SO F. *Organic Electronics: Materials, Processing, Devices and Applications* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [14] WANG Z Y, ZHOU Z, ZHANG H, *et al.* Vectorial liquid-crystal holography [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 5.
- [15] 王启东, 穆全全, 刘璐璐, 等. 宽波段大视角液晶偏振转换器研究进展[J]. 液晶与显示, 2024, 39(5): 683-696.
WANG Q D, MU Q Q, LIU L L, *et al.* Research progress on liquid crystal polarization converter with a large field of view and broadband [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 683-696. (in Chinese)
- [16] GAUZA S, WEN C H, WU B, *et al.* Fast-response nematic liquid-crystal mixtures [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2006, 14(3): 241-246.
- [17] DE SOUZA R F, YANG D K, LENZI E K, *et al.* Effect of surface viscosity, anchoring energy, and cell gap on the response time of nematic liquid crystals [J]. *Annals of Physics*, 2014, 346: 14-21.
- [18] CHAN S H, WU T X, NGUYEN T Q. Comparison of two frame rate conversion schemes for reducing LCD motion blurs [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(9): 783-786.
- [19] 宋文, 李晓华, 杨晓伟, 等. 基于视觉感知模型的LCD运动模糊分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(2): 216-220.
SONG W, LI X H, YANG X W, *et al.* LCD motion blur analysis based on human perceptual model [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2008, 38(2): 216-220. (in Chinese)
- [20] WANG Q D, PENG Z H, YAO L S, *et al.* The optimal cell gap determination of a liquid crystal wavefront corrector from a single photoelectric measurement [J]. *Liquid Crystals*, 2014, 41(11): 1569-1574.
- [21] WANG Q D, PENG Z H, FANG Q Q, *et al.* Response time improvement of liquid-crystal wavefront corrector using optimal cell gap of numerical computation [J]. *Optics Communications*, 2013, 305: 236-239.
- [22] HU H B, HU L F, PENG Z H, *et al.* Advanced single-frame overdriving for liquid-crystal spatial light modulators [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3324-3326.
- [23] OKUMURA H. Birth of the innovative overdrive technology for liquid crystal: paving the way for practical use of LCD televisions [J]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2021, 10(3): 90-96.
- [24] CHEN C W, HUANG Y P, CHEN P C. Dual direction overdriving method for accelerating 2D/3D switching time of liquid crystal lens on auto-stereoscopic display [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(10): 559-561.
- [25] JEON D H, KIM J M, LEE S H, *et al.* A simple overdrive technology using behavioral circuit model for liquid crystal displays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 63(6): 2436-2441.
- [26] GUO H Y, LI Q, XU Y J, *et al.* Line of sight correction of high-speed liquid crystal using overdriving technology [J]. *Electronics*, 2020, 9(9): 1477.
- [27] 巩忠轩, 李子凡, 龚君豪, 等. 基于过压驱动的穆勒矩阵高速测量方法[J]. 中国光学(中英文), 2025, 18(5): 1132-1142.
GONG Z X, LI Z F, GONG J H, *et al.* High-speed measurement of Mueller matrix based on overdriving technique [J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1132-1142. (in Chinese)
- [28] YAO L S, MU Q Q, PENG Z H, *et al.* Optimising response of liquid crystal corrector with digital overdriving technique [J]. *Liquid Crystals*, 2013, 40(6): 817-821.
- [29] VANBRABANT P J M, VELTHOVEN-DESSAUD N, STRÖMER J F, *et al.* Temperature compensated overdrive in vertically aligned liquid crystal displays [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(26): 261112.
- [30] HAN J W, HWANG M C, KIM S G, *et al.* Vector quantizer based block truncation coding for color image compression in LCD overdrive [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2008, 54(4): 1839-1845.
- [31] 史文雄, 卢绮涵, 梁如标, 等. 用于液晶调控器件的过压驱动技术进展[J]. 液晶与显示, 2024, 39(3): 384-392.
SHI W X, LU Q H, LIANG R B, *et al.* Development of overdriving technology for liquid crystal modulatory devices [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(3): 384-392. (in Chinese)

- [32] HONG J J, KIM S E, SONG W J. A clipping reduction algorithm using backlight luminance compensation for local dimming liquid crystal displays [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(1): 240-246.
- [33] NAM H, LEE S W. Dithering artifacts in liquid crystal displays and analytic solution to avoid them [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(4): 2211-2215.
- [34] LEI J M, ZOU X C. Time-based dithering algorithm and frame rate control technique for STN LCD controller [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2004, 13(4): 711-713.
- [35] HAN Y S, LEE S. New and efficient dynamic capacitance compensation (DCC) system to reduce data size and artifacts for 120Hz Full-HD LCD panel [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, 57(3): 981-989.
- [36] NAM H, SONG E J, KIM S K. Weighted roll-off scheme to remove block artifacts for low power local dimming liquid crystal displays [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 58: 8-15.
- [37] DAI Y Y, GAO L, WANG M H, *et al.* Improvement of the dynamic responses of liquid crystal mixtures through $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticle doping and driving mode adjustment [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(11): 1643-1654.
- [38] LI W J, HU C X, ZHAO R, *et al.* Eliminate the backflow effect by polymer monomer RM257 in VA-LCD [J]. *Liquid Crystals*, 2021, 48(9): 1349-1356.
- [39] JOSHI V, PATERSON D A, STOREY J M D, *et al.* Tunable backflow in chiral nematic liquid crystals via twist-bend nematogens and surface-localised *in-situ* polymer protrusions [J]. *Liquid Crystals*, 2017, 44(14/15): 2327-2336.
- [40] THALHAMMER G, BOWMAN R W, LOVE G D, *et al.* Speeding up liquid crystal SLMs using overdrive with phase change reduction [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1779-1797.
- [41] HARENG M, ASSOULINE G, LEIBA E. La biréfringence électriquement contrôlée dans les cristaux liquides nématiques [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(12): 2920-2925.
- [42] WU S T, WU C S. High-speed liquid-crystal modulators using transient nematic effect [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 65(2): 527-532.
- [43] JEON D H, LEE S W. Unified overdrive technology applicable to liquid-crystal displays and organic light-emitting diode displays utilizing linearity of transitions in voltage domain [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(7): 2885-2891.
- [44] WU J J, KUO L Y, FAN S H, *et al.* Optical bounce in a multi-domain vertical aligned liquid crystal display [J]. *Display*, 2009, 30(4/5): 199-201.
- [45] LIN T C, LIU S F, CHAO C Y. Eliminating optical bounce of homeotropic liquid crystal cells with sputtered silicon dioxide alignment films by rubbing treatment [J]. *Displays*, 2011, 32(5): 244-248.
- [46] JHUN C G, CHOI J H, YOON T H, *et al.* Optical bouncing in bistable chiral splay nematic liquid crystal device [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(1R): 128-132.
- [47] KUZUU N, DOI M. Constitutive equation for nematic liquid crystals under weak velocity gradient derived from a molecular kinetic equation [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1983, 52(10): 3486-3494.
- [48] ERICKSEN J L. Conservation laws for liquid crystals [J]. *Transactions of the Society of Rheology*, 1961, 5(1): 23-34.
- [49] VÉRON A. An alternative approach to symmetric systems [J]. *European Journal of Physics*, 2016, 37(6): 065805.
- [50] 王伟,张平文,章志飞. 液晶理论研究中的若干数学问题[J]. *中国科学:数学*, 2016, 46(7): 895-914.
WANG W, ZHANG P W, ZHANG Z F. Some mathematical problems in liquid crystal theories [J]. *SCIENTIA SINICA Mathematica*, 2016, 46(7): 895-914. (in Chinese)
- [51] GONG X, LV G Q, HU Z A, *et al.* A simple model for investigating the force-optical performance of LCDs [J]. *AIP Advances*, 2020, 10(6): 065108.
- [52] FAETTI S, MUTINATI G, GERUS I. Measurements of the azimuthal anchoring energy at the interface between a nematic liquid crystal and photosensitive polymers [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2004, 421(1): 81-93.
- [53] EICHLER H J, MACDONALD R. Flow-alignment and inertial effects in picosecond laser-induced reorientation phenomena of nematic liquid crystals [J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(19): 2666-2669.

- [54] SANTAMATO E, ABBATE G, MADDALENA P. Interaction of liquid crystals with electromagnetic fields: mauguin theorem, angular momentum conservation, and optical Freédericksz transitions in twisted nematic liquid crystals [J]. *Physical Review A*, 1988, 38(8): 4323-4329.

作者简介:



孙海峰,男,硕士研究生,2024年于长春理工大学获得学士学位,主要从事液晶过压驱动及微流控技术的研究。
E-mail: 24hfsun@stu.edu.cn



姚丽双,女,博士,教授,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事液晶光调控技术的研究。E-mail: lsyao@stu.edu.cn