文章编号:1007-2780(2026)07-0942-10

盒厚约束下液晶过压驱动光学反弹的非对称弛豫特性

孙海峰[1], 陈雅丽[1], 刘嘉乐[1], 刘　鑫[1], 孙敬伟[2], 姚丽双[1,3*]
(1. 汕头大学 理学院, 广东 汕头 515063;
2. 汕头大学 工学院, 广东 汕头 515063;
3. 广东省车载显示触控技术重点实验室, 广东 汕头 515047)

摘要:过压驱动技术在加速液晶器件响应的同时常引发显著的光学反弹现象,本文基于Ericksen-Leslie理论建立有限差分模型,揭示其物理根源在于指向矢在受限空间内的异步弛豫。通过模拟器件的指向矢转角及角速度空间分布,发现过压激发的层间转速差是引发光学反弹的微观源头。本文聚焦盒厚(5~15 μm)这一几何参量,揭示了异步弛豫受盒厚约束的演化规律及其对过压驱动模式下光学反弹非对称特性的调控机制。模拟与实验结果变化一致,结果表明,恒定电压差值驱动下,超压与欠压呈现相反的弛豫趋势:欠压驱动时,因弹性恢复力随盒厚平方级衰减,厚盒难以抑制层间异步弛豫,反弹凹陷率(BDR)由5 μm时的约2%增至15 μm时的20%以上;超压驱动时,因内部电场随厚度线性衰减,层间转速差被源头削弱,BDR由15.7%降至不足4%。通过恒定电场对照实验及等倾角模拟排除驱动场衰减干扰后,各模式的BDR均随盒厚单调上升。本研究从异步弛豫视角明晰了盒厚对光学反弹非对称特性的主导作用,为高速液晶器件的尺度优化提供了理论依据。

关　键　词:过压驱动技术;光学反弹;转速差;异步弛豫
中图分类号:O753.2　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.37188/CJLCD.2026-0130　　**CSTR**:32172.14.CJLCD.2026-0130

Cell-Gap-Constrained asymmetric relaxation characteristics of optical bounce in overdriven liquid crystal devices

SUN Haifeng[1], CHEN Yali[1], LIU Jiale[1], LIU Xin[1], SUN Jingwei[2], YAO Lishuang[1,3*]

(1. *College of Science*, *Shantou University*, *Shantou* 515063, *China*;
2. *College of Engineering*, *Shantou University*, *Shantou* 515063, *China*;
3. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Automotive Display and Touch Technologies*, *Shantou* 515047, *China*)

Abstract: Overdriving technology(OD) accelerates the response of liquid crystal(LC) devices but frequently

收稿日期:2026-06-06;**修订日期**:2026-06-19.
基金项目:广东省科技创新战略专项资金(省重点实验室)(No.2023B1212020004);广东省科技创新战略专项市县科技创新支撑(大专项+任务清单)项目(No.STKJ2023074)
Supported by Guangdong Provincial Science and Technology Innovation Strategy Special Fund (Provincial Key Laboratory)(No.2023B1212020004); Special Fund for Guangdong Provincial Science and Technology Innovation Strategy (City-County Science and Technology Innovation Support Project) (No.STKJ2023074)
*通信联系人,E-mail:lsyao@stu.edu.cn

induces significant optical bounce(OB). Based on the Ericksen-Leslie continuum theory, this paper establishes a finite-difference model and reveals that the physical origin of OB lies in the asynchronous relaxation of LC directors within the confined space. By simulating the spatial distributions of director tilt angle and angular velocity, it is found that the interlayer angular velocity difference induced by overdrive is the microscopic source triggering OB. Focusing on the cell gap (5～15 μm) as a key geometric parameter, this paper reveals the evolutionary laws of asynchronous relaxation constrained by cell gap and its regulatory mechanism on the asymmetric OB characteristics under overdrive modes. The simulated and experimental results exhibit consistent trends. The results demonstrate that, under a constant overdrive voltage difference, overshoot and undershoot driving exhibit opposite relaxation trends: during undershoot driving, the elastic restoring force decays quadratically with cell gap, making it difficult for thicker cells to suppress interlayer asynchronous relaxation; the bounce depth ratio(BDR) increases from approximately 2% at 5 μm to over 20% at 15 μm. During overshoot driving, the internal electric field attenuates linearly with cell gap, weakening the interlayer angular velocity difference at its source; the BDR decreases from 15.7% to below 4%. After eliminating the interference of driving field attenuation through constant electric field control experiments and constant average tilt-angle simulations, the BDR for both modes increases monotonically with cell gap. From the perspective of asynchronous relaxation, this study clarifies the dominant role of cell gap in governing asymmetric OB, providing a theoretical basis for the dimensional optimization of high-speed LC devices.

Key words: overdrive technology; optical bounce; angular velocity difference; asynchronous relaxation

1　引　　言

液晶显示(LCD)技术[1-2]凭借其超高分辨率、成熟的大规模光刻制造工艺以及卓越的长期光电稳定性，在当前的新型显示产业中仍居于新型显示产业的核心地位。目前市面上主流的LCD器件主要包括扭曲向列型(TN)[3-5]、面内切换型(IPS)[6-8]以及垂直排列型(VA)[9-11]。尽管它们在液晶盒的初始取向配置和外加电场的调制方向上存在显著差异，但其工作原理均基于液晶分子在基板表面锚定作用[12-14](Surface Anchoring)与外加电场力矩[15-17](Electric Field Torque)共同作用下的重新排列，进而实现对入射光偏振态的精准调制。

随着新型显示技术的不断演进，OLED[18-20]和Micro-LED[21-23]等自发光器件在绝对对比度和柔性形态上展现出一定优势，但LCD在全屏持续高亮度、高像素密度(PPI)制备以及规避烧屏等器件寿命表现上仍具有强大的综合竞争力。然而，LCD本质上依赖外场调制光学各向异性，其响应速度受限于向列相液晶的黏弹性物理本性[24-25]。在面对现代显示系统(如高频电竞显示器、AR/VR设备)[26]以及高速波前调制器[27-28]等器件对高刷新率的严苛需求时，液晶分子毫秒级的响应时间往往会引发显著的动态伪影[29-30](Motion Artifacts)。为了突破这一物理瓶颈，过压驱动技术[31](Overdrive, OD)成为目前最有效的改进方案之一。通过在灰阶转换瞬间施加瞬态偏置电压，过压驱动能为器件内部注入极大的瞬时电场力矩，强行加速液晶分子的弗雷德里克斯转变(Fréedericksz Transition)[32]。然而，极端的驱动电压不可避免地引起了液晶内部复杂的指向矢动力学耦合效应，即显著的光学反弹[33](Optical Bounce, OB)现象。

在液晶器件过压驱动中，光学反弹是指在施加过压后，其透射率或相位曲线发生振荡的现象，其严重影响光电调制的精准度。目前，抑制光学反弹的研究多聚焦于驱动波形的时序优化[[34-35]或材料掺杂[36]等。然而，光学反弹现象是一个受限于宏观几何边界的微观多场耦合动力学问题。现有的研究鲜有从空间尺度(即液晶盒厚度 d)角度来剖析指向矢异步弛豫对光学反弹的约束工作机制。

本文在恒压驱动条件下发现一种反常的非

对称动力学现象：随着液晶盒厚度d的增加，超压驱动的光学反弹受到显著抑制，而欠压驱动的反弹却明显加剧。本文分别用超压驱动（Overshoot Driving）与欠压驱动（Undershoot Driving）指代瞬态电压高于或低于目标稳态值的两种切换模式（对应从低相位向高相位、从高相位向低相位的切换）。本文研究发现，该非对称现象的根源在于不同弛豫阶段主导力矩的交替及其与空间尺度的不同标度关系。在欠压驱动阶段，系统由弹性恢复力主导，其约束强度$\propto 1/d^2$，厚盒难以抑制层间异步弛豫；而在超压驱动阶段，恒定过压差值下内部真实电场$E=V/d$随d增加而衰减（$\propto 1/d$），电场力矩减弱从源头上降低了层间的转速差，进而抑制了相应的反弹现象。

为了解耦驱动场与器件厚度几何尺度的物理关联，本文进一步引入恒定电场（Constant Electric Field，E）作为对照组。理论模拟与实验结果证明：当补偿超压驱动中的电场差异后，上述非对称现象随之消失，超压与欠压驱动的反弹规律趋于一致，均随盒厚的增加而上升。本研究从标度分析的维度厘清了过压驱动下光学反弹的非对称机理，可为高速液晶器件的驱动波形与尺度优化提供相应的理论参考。

2 理论模型与数值模拟

宏观的光学响应（相位或透过率）是微观指向矢分布沿空间的积分结果。因此，在分析过压驱动下的多场耦合效应之前，必须建立液晶层内指向矢倾角及其转动速度的动态演化模型。

设液晶盒厚度为d，建立一维笛卡尔坐标系，令z轴垂直于基板表面（即$z\in[0,d]$）。在反平行取向配置下，不考虑扭曲形变，液晶分子的指向矢可简化为$\boldsymbol{n}=(\cos\theta,0,\sin\theta)$，其中$\theta(z,t)$为$t$时刻、距离基板$z$处的分子长轴与基板平面的夹角（极角）。

根据连续体弹性理论，系统的总自由能最小化由弗兰克弹性形变能与外加电场能共同决定。引入向列相液晶的旋转黏度γ_1，并依据Ericksen-Leslie动力学方程，在忽略流体平动惯性项后，描述指向矢动态偏转的方程如式（1）所示：

$$\gamma_1\frac{\partial\theta}{\partial t}=\left(K_{11}\cos^2\theta+K_{33}\sin^2\theta\right)\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}+\left(K_{33}-K_{11}\right)\sin\theta\cos\theta\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)^2+\Delta\epsilon\left(\frac{V(t)}{d}\right)^2\sin\theta\cos\theta,\tag{1}$$

其中：K_{11}和K_{33}分别代表展曲（Splay）和弯曲（Bend）弹性常数，$\Delta\epsilon$为介电各向异性，$V(t)$为上下基板间施加的驱动电压。方程左侧代表黏滞阻尼力矩，等号右侧分别为弹性恢复力矩与电场力矩。

为了定量计算液晶层内部的指向矢倾角差值与层间速度分布，本文采用有限差分法（Finite Difference Method）对式（1）进行时空离散化求解。将液晶盒沿z轴均匀划分为N层（N=100），如图1（a）所示。空间步长设为$\Delta z=d/N$。记第i层（$i=1,2,\cdots,N-1$）分子在t时刻的倾角为θ_i^t。在强锚定边界条件（$\theta_0=\theta_N=\theta_{\mathrm{pre}}=2°$，$\theta_{\mathrm{pre}}$为预倾角）下，分子在各层位置的瞬时转动角速度$\omega_i^t$可表示为：

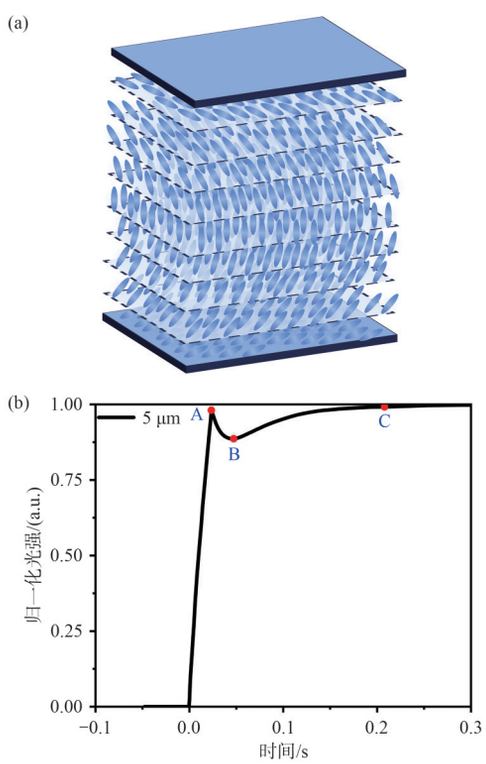


图1 （a）液晶盒分层示意图；（b）光学反弹模拟效果（从2 V驱动到3 V，过压值设置为6 V，盒厚为5 μm）。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the liquid crystal cell layers; (b) Simulated effect of OB (driven from 2 V to 3 V, overdrive voltage: 6 V, cell gap: 5 μm).

$$|\omega_i^t|=\left|\frac{\partial\theta(z,t)}{\partial t}\right|\approx\left|\frac{\theta_i^{t+\Delta t}-\theta_i^{t-\Delta t}}{2\Delta t}\right|,\qquad(2)$$

其中，设定该液晶器件的基本参数为：激光器波长 $\lambda=633$ nm，寻常折射率 $n_o=1.521$，双折射率 $\Delta n=0.225$，$K_{11}=11.5$ pN，$K_{33}=19.1$ pN，旋转黏度 $\gamma_1=235.5$ mPa·s，垂直介电常数分量 $\varepsilon_\perp=5.2$，介电常数各向异性 $\Delta\epsilon=13.8$。同时设定模拟步长为 5 μs。本文在求解指向矢动力学方程时忽略了背流效应（即未求解流体速度场），本模型中所采用的黏弹性参数与介电参数是基于实验所用液晶材料（LC-BYE7）在 25 ℃恒温条件下的实际测量值。

3　模拟结果与分析

基于上述模型，本文模拟了液晶器件过压驱动中，在相同相位值切换条件下不同盒厚的液晶分子指向矢运动情况。图 2 给出了光学反弹最剧烈处（图 1(b) 中 B 点）的指向矢角速度（$|d\theta/dt|$）分布，以及该处指向矢角度相对于其目标稳态（图 1(b) 中 C 点，记为 0 刻度线，如图 2(b) 中黄色直线所示）

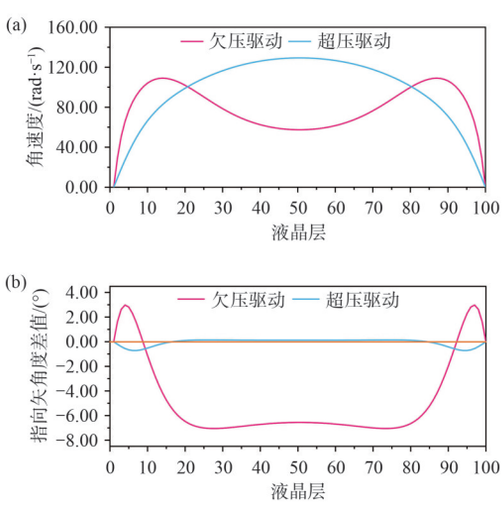


图 2　过压驱动下液晶盒内部指向矢动力学模拟。（a）不同驱动条件下光学反弹最剧烈处（图 1 中 B 点）的指向矢角速度空间分布；（b）对应位置的指向矢角度相对于目标稳态（图 1 中 C 点）的角度偏差。

Fig. 2　Director dynamics simulation inside the LC cell under overdrive. (a) Spatial distribution of the director angular velocity at the most intense OB (point B in Fig. 1) under different driving conditions; (b) Director angle deviation at corresponding positions relative to the target steady state (point C in Fig. 1).

的角度偏差。模拟结果表明，驱动方向对微观动力学的调制作用存在明显差异。

在超压驱动中，角速度空间分布呈平滑的“单峰抛物线”形态，如图 2(a) 中蓝色曲线所示。这是由于外加高频电场在液晶盒中间层达到最强，而中心层距离上下基板最远，受到的表面锚定束缚力最弱；因此，中心层分子翻转最自由、绝对角速度最大，形成“中间快、边缘慢”的显著层间转速差（$\Delta\omega$）。故最终造成其边缘层指向矢尚未到达稳态，但中间层已经远超稳态，在后续过程中需要缓慢回落的结果，如图 2(b) 中蓝色曲线所示。

在欠压驱动过程中，角速度空间分布呈“双峰 M 字形”形态。这是由于撤去驱动电场后，系统形变弛豫完全由弗兰克弹性恢复力矩主导。紧挨基板的边缘层分子因形变曲率最大，所受回弹力矩最强，所以转速极快；而处于对称中心的分子回弹迟缓由图 2(b) 中的指向矢角度差异也可以体现：在边缘处其指向矢倾角数值已经远大于稳态角度值，而中间层仍需缓慢向稳态移动。

上述层间转速差 $\Delta\omega$ 是打破系统动力学平衡、引发光学反弹的微观源头。由于 $\Delta\omega$ 的存在，当器件初次达到目标宏观相位时，液晶连续体实际上处于高度畸变的非平衡态：部分分子已越过稳态，部分尚未到达。随后，各液晶层分子为寻求真正的稳态，发生双向的异步弛豫（Asynchronous Relaxation）：超前的分子被迫回退，落后的分子继续原方向转动。由于液晶的双折射相位延迟是对折射率 $\Delta n(\theta)$ 沿厚度 d 的非线性空间积分，这种层间弛豫的严重异步性无法在积分中完全抵消，直接导致宏观累积，使相位值偏离单调路径，体现在响应曲线上即为光学反弹现象。

在确立了“转速差引发异步弛豫，进而影响反弹深度”的微观机制后，本文引入无量纲化空间坐标 $\tilde{z}=z/d$，重点考察液晶盒厚度 d 对宏观光学反弹的尺度约束效应。在实际工程中，驱动芯片通常输出恒定的绝对电压 V（即内部真实电场 $E=V/d$）。首先通过静态数值计算分别获取各厚度液晶盒达到 2π、1.5π 及 π 相位延迟所需的驱动电压 $V_{2\pi}$、$V_{1.5\pi}$ 及 V_π。其中，超压驱动对应从 2π 态切换至 1.5π 态，欠压驱动对应从 π 态切换至 1.5π 态。对于两种驱动模式，瞬态过压值均设为 $V_{over}=$

2 V，即其实际施加的过驱动电压为 $V_{target}\pm V_{over}$（V_{target} 为对应目标稳态（1.5π）的电压，超压取正号、欠压取负号）。在此条件下，盒厚 d 对系统动力学弛豫路径的调控呈现出显著的阶段非对称性，具体模拟结果如下：

欠压驱动过程中，电场力矩项减小，系统由弹性恢复力矩主导。由于弹性约束力场为 $\propto 1/d^2$ 衰减，较厚的液晶盒（d 增大）内部体态区域受到的边界弹性约束呈平方级削弱，对比边缘层分子的快速回弹，中心层分子在较弱的弹性约束下难以同步弛豫。这种滞后效应导致层间转速差 $\Delta\omega$ 增大，加剧了系统内部的非平衡畸变。因此，弛豫过程的异步性增强，宏观光学凹陷程度随盒厚增加而显著加深，如图 3(a)所示（横纵坐标均经归一化处理）。

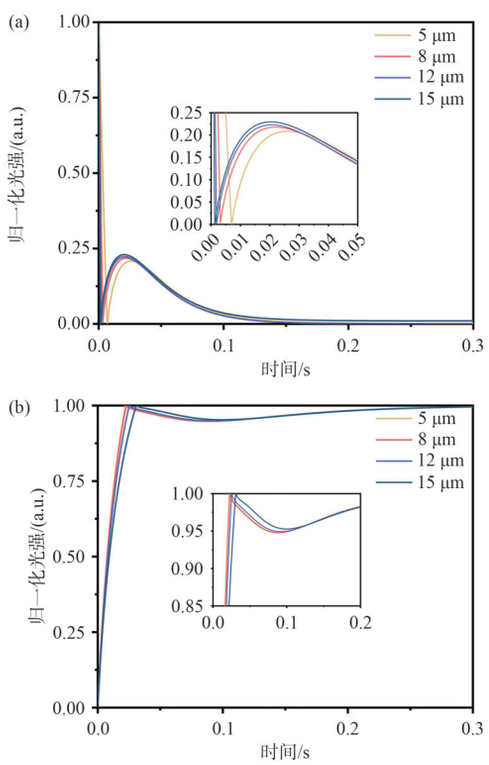


图 3 恒定过压差值下不同液晶盒厚度的光学反弹响应曲线模拟。(a) 欠压驱动；(b) 超压驱动。

Fig. 3 Simulated OB response curves for different cell gaps under a constant overdrive voltage difference. (a) Undershoot driving; (b) Overshoot driving.

超压驱动过程中，电场力矩占据主导。随着盒厚 d 的增加，内部真实驱动电场 E 随 $1/d$ 衰减。电场的减弱导致中心层分子的初始偏转驱动力下降，绝对转速相对放缓。这种相对缓和的体态偏转，客观上缩小了中心层与边缘层之间的转速差 $\Delta\omega$。由于内部畸变程度减轻，异步弛豫趋于缓和，宏观凹陷程度表现为随盒厚增加而减小，如图 3(b)所示。

因此，在恒定过压差值下，超压驱动与欠压驱动的光学反弹幅度随盒厚呈现相反趋势：超压驱动中凹陷程度与盒厚负相关，欠压驱动中则正相关。

为排除恒压驱动下内部电场衰减对器件动力学特性的干扰，并验证受限空间尺度的影响，本文进一步设计了恒定电场（E）驱动的纯物理对照模拟。通过对不同厚度 d 的液晶盒施加线性补偿的过驱动电压，确保超压驱动瞬间的电场力矩（$\propto \Delta\epsilon E^2$）等效。在此模拟中，对应相位值为从 2π 驱动到 1.5π，对不同厚度的液晶盒施加相同的电场强度 $E=10^6$ V/m。图 4 模拟结果显示，补偿驱动电场差异后，上述非对称现象消失。

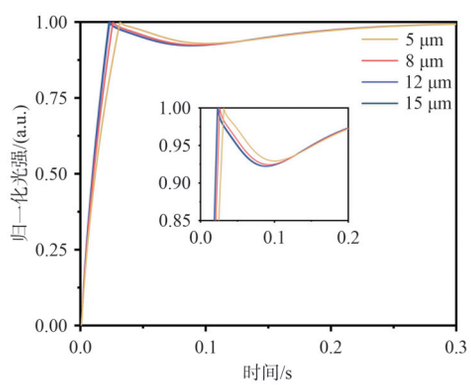


图 4 恒定电场下不同盒厚的超压驱动响应曲线模拟

Fig. 4 Simulated response curves of overshoot driving for different cell gaps under a constant electric field

在恒定电场条件下的超压驱动过程中，由于所有厚度的液晶盒在中心层都获得了同等强度的初始电场驱动力矩，层间转速差的唯一制约因素便回落到弹性约束上。厚盒的弹性恢复力（$\propto 1/d^2$）较弱，无法有效抑制电场带来的空间形变，导致内外层转速差 $\Delta\omega$ 增大。因此，在恒定电场下，不同驱动方式的规律趋于一致，宏观光学反弹均表现为随盒厚增加而增大。

这一纯尺度对照模拟证明：去除恒压驱动中电场衰减因素后，几何厚度的增加（即弹性约束边界的远离）是加剧非平衡态畸变、放大异步弛豫积分误差的物理根源。

4　实验验证

为了对上述理论模型与模拟预测进行验证，本文搭建了高精度的瞬态光电响应测试平台，对不同盒厚参数下液晶器件的光学反弹规律进行了系统性测试。

实验采用经典的正交偏振光路系统，以波长为 632.8 nm 的激光器作为探测光源。光束依次通过起偏器、相位补偿波片、待测液晶器件及检偏器，最终由高速光电探测器与示波器实时捕获瞬态透射光强曲线。将起偏器透光轴与液晶盒摩擦取向方向成 45°角放置，检偏器与起偏器正交，其光路如图 5 所示。为考察空间尺度效应，本文采用相同的向列相液晶材料（LC-BYE7），制备了不同厚度的反平行取向液晶空盒（厚度分别为 5 μm、8 μm、12 以及 15 μm），液晶空盒内部旋涂有聚酰亚胺（Polyimide，PI）作为取向层，并经过机械摩擦处理以诱导产生均匀的反平行初始排列及微小预倾角。所有器件均具备优良的初始平行排列均一性与相同的强表面锚定能。所有光电响应测试均在精确控温的光学平台上进行，环境及器件温度稳定控制在 25 ℃。

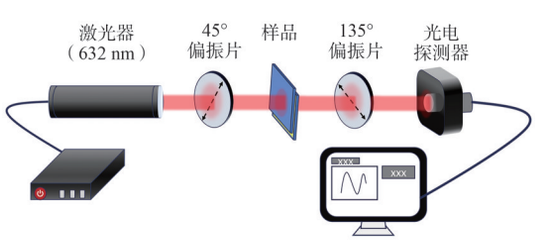


图 5　实验测试光路图

Fig. 5　Schematic of the experimental optical setup

首先，在工程实际常用的恒定过压差值条件下进行测试。在实验过程中，为了控制盒厚为唯一变量，本文首先测量不同盒厚的相位延迟量曲线，寻找该器件在 2π、1.5π 以及 π 相位下的电压值，结果如表 1 所示，分别将样品盒从 2π 调制至 1.5π 以及从 π 调制至 1.5π（分别对应超压驱动与欠压驱动）。超压驱动与欠压驱动的过压值 V 分别设定为从初始相位到目标相位所需的稳态电压 $V_{\text{target}}\pm V_{\text{over}}$，其中，$V_{\text{over}}=2$ V。实验中，驱动系统实时监测透射光强信号。当器件在过压驱动下，其相位延迟首次到达目标稳态相位（即透射光强首次到达对应目标值）瞬间，驱动电压立即切换至目标稳态电压，以此确保各组实验在统一的相位边界条件下发生后续的异步弛豫。

表 1　不同厚度液晶盒达到指定相位延迟所需驱动电压的实测值

Tab. 1　Measured driving voltages required to achieve specified phase retardations for LC cells with different cell gaps

盒厚/μm	V_{π}/V	$V_{1.5\pi}$/V	$V_{2\pi}$/V
5	5.42	4.74	4.2
8	4.03	3.57	3.16
12	3.14	2.81	2.48
15	2.66	2.42	2.13

对上述数据进行分析，得到其时间-光强曲线。为了消除稳态光强绝对值差异对反弹幅度的影响，所有测得的透射光强均已归一化到各自的目标稳态值。

为了定量评估不同驱动条件下的光学反弹程度，本文定义反弹凹陷率（Bounce Depth Ratio，BDR）。设目标稳态归一化光强为 I_{target}，响应曲线在弛豫过程中的极值光强为 I_{bounce}，则凹陷率定义为 $\text{BDR}=|I_{\text{target}}-I_{\text{bounce}}|/I_{\text{target}}\times 100\%$。下文将基于此指标对各组曲线进行定量提取与对比。

如图 6(a)所示，随着盒厚从 5 μm 增加至 15 μm，归一化光强曲线的凹陷深度逐渐减小。5 μm 盒的光学反弹幅度最大（BDR 达 15.7%），而 15 μm 盒的反弹幅度降至可忽略水平。这与理论模型中“厚盒内部电场减弱导致转速差降低”的预测一致。相反，在图 6(b)的欠压驱动中该趋势相反：5 μm 盒表现出优异的稳定性，而 15 μm 盒在撤去电压后出现了极深的光学凹陷。这印证了较弱的弹性约束（$\propto 1/d^2$）无法抵抗边缘层与中间层的转速差。

为了进一步排除驱动电场衰减对动力学的影响，考察几何尺度（即弹性约束边界）如何改变异步弛豫，我们设计了恒定电场对照实验。在此实验中，对不同厚度的液晶盒施加相同的电场强度阶跃 $E=10^6$ V/m，从而确保所有器件在驱动瞬间获得完全等效的电场力矩。此条件下各器件的稳态相位并不相同（正比于厚度），但本实验旨在比较相同电场力矩下的反弹动力学，而非相同相位切换。所得时间-光强曲线如图 7 所示。

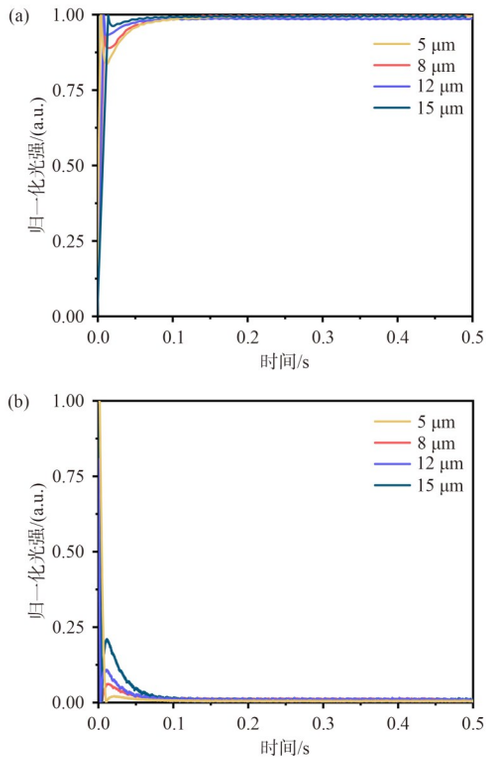


图 6 恒定过压差值下不同盒厚的光学反弹的时间-光强测试曲线。(a) 超压驱动;(b) 欠压驱动。

Fig. 6 Measured time-intensity curves showing OB for different cell gaps under a constant overdrive voltage difference. (a) Overshoot driving; (b) Undershoot driving.

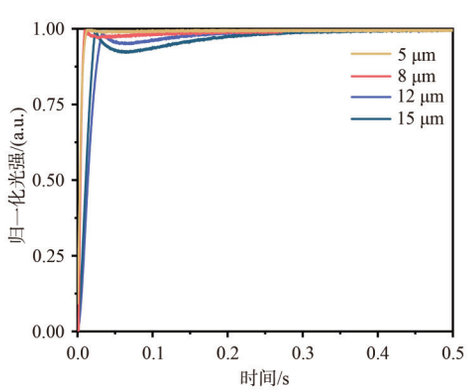


图 7 恒定电场下不同盒厚超压驱动的时间-光强测试曲线

Fig. 7 Measured time-intensity curves under overdrive for different cell gaps at a constant electric field

由图 7 可知,当各器件的内部驱动场强被统一为 1 V/μm 时,超压驱动的非对称现象消失。图中各条曲线的波谷深度呈现出与欠压驱动相同的规律:即盒厚越厚(如 15 μm 绿线),其光学反弹的凹陷程度越深。这一结果表明,去除电场衰减因素后,几何厚度的增加削弱了系统的弹性抗畸变能力,从而放大异步弛豫引起的光学误差。

在工程常用的恒定过压差值驱动下(图 8 红色与绿色曲线),超压与欠压驱动呈现出相反的尺度依赖性。欠压驱动(绿色曲线)的 BDR 随盒厚增加从约 2% 升至约 20% 以上,超压驱动(红色曲线)则从约 15.5% 降至约 4%,两者在各厚度点的误差棒(SD,$n \geqslant 3$)均处于可接受范围内,表明该趋势在不同样品间具有较好的复现性。

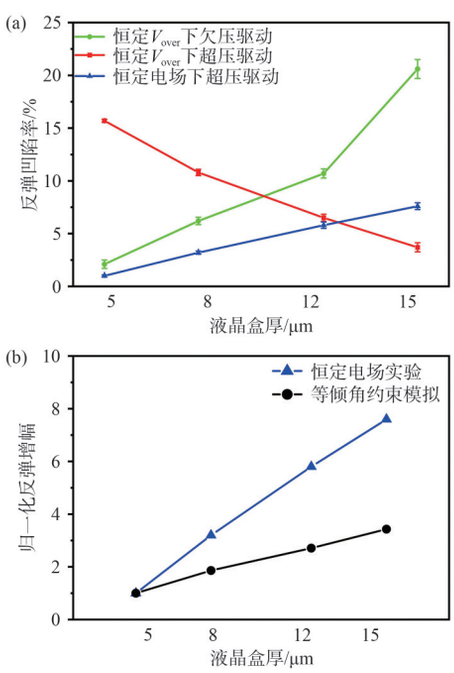


图 8 不同驱动条件下光学反弹幅度随液晶盒厚度的变化规律。(a) 恒定过压差值驱动(超压与欠压)及恒定电场超压驱动下 BDR 的对比;(b) 恒定电场实验与等体平均倾角切换模拟中归一化反弹增幅(η)的对比。

Fig. 8 Variation of OB magnitude with cell gap under different driving conditions. (a) Comparison of the BDR among constant overdrive voltage-difference driving (overshoot and undershoot) and constant-electric-field overshoot driving; (b) Comparison of the normalized OB increment (η) between constant electric-field experiments and constant average tilt-angle switching simulations.

恒定电场条件下的超压驱动结果(图 8 蓝色曲线)显示,当补偿驱动电压以确保各厚度器件获得等效的初始电场力矩后,原有的反常抑制现象消失,BDR 随盒厚增加呈单调上升趋势(由不足 1% 升至约 8%),其变化趋势与欠压驱动趋于一致。

这一结果表明，在剥离驱动电场衰减因素后，单纯增加受限空间尺度将导致系统弹性抗畸变能力下降，进而放大异步弛豫带来的光学累积误差。

为了进一步排除初始形变程度对恒定电场实验结果的混杂影响，本文基于数值模型开展了等体平均倾角切换的对照模拟。以 5 μm 器件在 2π 和 1.5π 稳态下的体平均倾角 $\theta_{2\pi}$ 与 $\theta_{1.5\pi}$ 为统一目标，通过反向电压扫描分别获取 8 μm、12 μm、15 μm 器件达到相同 θ 值所需的驱动电压，并施加统一的瞬态电场 $E=10^6$ V/m 进行超压驱动。模拟结果如图 8(b)黑色点线所示，其归一化反弹增幅 $\eta=\mathrm{BDR}(d)/\mathrm{BDR}(5\ \mu\mathrm{m})$ 随盒厚增加同样呈现单调递增的趋势。尽管模拟对厚盒反弹增量的预估较为保守（增长斜率缓于实验测试条件），但两者在单调递增的标度律上一致，证实了几何厚度增加导致的弹性抗畸变能力退化（$\propto 1/d^2$）是加剧光学反弹的重要物理机制，独立于初始形变程度和驱动电场衰减等混杂因素。

5　结　　论

本文研究了液晶器件过压驱动过程中的宏观光学反弹现象，探讨了空间尺度与外加驱动场对液晶指向矢弛豫特性的调控机制。通过构建连续体动力学演化模型并结合瞬态光电响应实验，揭示了过压驱动在液晶内部诱发的空间转速梯度是引发分子异步弛豫及光学反弹的微观原因。研究发现，在工程常用的恒定电压驱动下，器件的光学反弹随盒厚的增加表现出非对称规律：超压驱动时，内部真实电场随盒厚增大而衰减，导致中心层初始偏转力下降、层间转速差缩小，光学反弹相应受到抑制；欠压驱动时，弛豫由弗兰克弹性力主导，弹性恢复力与盒厚平方成反比，厚盒弹性约束减弱，层间异步弛豫加剧，凹陷率上升。

此外，恒定电场对照实验表明，在补偿初始电场力矩差异后，原有的超压抑制现象消失，超压与欠压驱动的反弹趋势趋于一致。这说明在排除驱动电场衰减因素后，单纯增加几何厚度削弱了系统的弹性抗畸变能力，放大了异步弛豫引起的光学误差。综上，本研究从标度分析视角阐明了液晶层间非平衡动力学的物理图像，可为高速液晶显示与波前调制器等器件的驱动设计及尺度优化提供理论与实验依据。

参　考　文　献：

[1] 李继军，聂晓梦，甄威，等. 显示技术比较及新进展[J]. 液晶与显示，2018，33(1)：74-84.
LI J J, NIE X M, ZHEN W, *et al*. New developments and comparisons in display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(1): 74-84. (in Chinese)

[2] 黄晓丽，孙玉宝，马红梅. 液晶显示器多种显示模式色彩表现的研究进展[J]. 液晶与显示，2021，36(3)：355-370.
HUANG X L, SUN Y B, MA H M. Research progress in color performance of LCD with various display modes [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 355-370. (in Chinese)

[3] 胡霄骁，孙玉宝. 新型多畴扭曲向列相液晶显示器[J]. 液晶与显示，2012，27(4)：481-485.
HU X X, SUN Y B. Novel multi-domain twisted nematic mode liquid crystal display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 481-485. (in Chinese)

[4] MAK H Y, CHIGRINOV V G, KWOK H S. Transflective twisted-nematic liquid-crystal display with double twisted-nematic cell and twisted liquid-crystal retarder [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2007, 15(7): 527-531.

[5] CHEN S H, YANG C L. Dynamics of twisted nematic liquid crystal pi-cells [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(20): 3721-3723.

[6] CHEN H W, PENG F L, LUO Z Y, *et al*. High performance liquid crystal displays with a low dielectric constant material [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(11): 2262-2273.

[7] CHOI T H, CHOI Y, WOO J H, *et al*. Electro-optical characteristics of an in-plane-switching liquid crystal cell with zero rubbing angle: dependence on the electrode structure [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15987-15996.

[8] HER J H, SHIN S J, LIM Y J, *et al*. Viewing angle switching in in-plane switching liquid crystal display [J].

Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2011, 544(1): 220-226.

[9] 王建国. VA型液晶屏周边Mura的分析与改善[J]. 液晶与显示,2013,28(5):716-719.
WANG J G. Analysis and improvement of edge Mura in VA liquid crystal panel [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(5): 716-719. (in Chinese)

[10] KIM S G, KIM S M, KIM Y S, *et al*. Stabilization of the liquid crystal director in the patterned vertical alignment mode through formation of pretilt angle by reactive mesogen [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(26): 261910.

[11] KUMAR P, JAGGI C, SHARMA V, *et al*. Advancements of vertically aligned liquid crystal displays [J]. *Micron*, 2016, 81: 34-47.

[12] 陈云昌,宣丽,姚丽双,等. 取向层参数对响应时间的影响[J]. 液晶与显示,2016,31(1):62-66.
CHEN Y C, XUAN L, YAO L S, *et al*. Effect of aligning layer parameters on response time [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(1): 62-66. (in Chinese)

[13] DADIVANYAN A K, NOAH O V, PASHININA Y M, *et al*. Anchoring energy of liquid crystals [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2012, 560(1): 108-114.

[14] LIN G J, CHEN T J, TSAI Y W, *et al*. Effects of U-shaped alignment and surface-anchored polymer morphology on the electro-optical properties of in-plane-switching vertically aligned liquid crystal devices [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(9): 3008-3019.

[15] DERFEL G, BUCZKOWSKA M. Electric field induced deformations of twisted flexoelectric nematic layers [J]. *Liquid Crystals*, 2015, 42(9): 1213-1220.

[16] 苑梦尧,邓罗根. 液晶盒边界效应对胆甾相液晶电控螺距的影响[J]. 液晶与显示,2010,25(1):21-28.
YUAN M Y, DENG L G. Effects of liquid crystal cell′s boundary conditions on electric tuning of cholesteric liquid crystal spiral pitch [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(1): 21-28. (in Chinese)

[17] VAN DOORN C Z. Dynamic behavior of twisted nematic liquid-crystal layers in switched fields [J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, 46(9): 3738-3745.

[18] SINGH R, UNNI K N N, SOLANKI A, *et al*. Improving the contrast ratio of OLED displays: an analysis of various techniques [J]. *Optical Materials*, 2012, 34(4): 716-723.

[19] SHINAR J. *Organic Light-Emitting Devices: a Survey* [M]. New York: Springer, 2004.

[20] BARDSLEY J N. International OLED technology roadmap [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(1): 3-9.

[21] 韩洪松,齐爱想,刘俊国,等. Micro-LED在机载上的应用[J]. 液晶与显示,2021,36(3):439-447.
HAN H S, QI A X, LIU J G, *et al*. Application of Micro-LED technology in airborne display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 439-447. (in Chinese)

[22] 季洪雷,张萍萍,陈乃军,等. Micro-LED显示的发展现状与技术挑战[J]. 液晶与显示,2021,36(8):1101-1112.
JI H L, ZHANG P P, CHEN N J, *et al*. Micro-LED display: recent progress and future challenges [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1101-1112. (in Chinese)

[23] KIM T S, RYU J E, PARK J, *et al*. Future trends of display technology: micro-LEDs toward transparent, free-form, and near-eye displays [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 335.

[24] 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.

[25] RAO L H, GAUZA S, WU S T. Low temperature effects on the response time of liquid crystal displays [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(7): 071112.

[26] HUANG Y G, HE Z Q, WU S T. Fast-response liquid crystal phase modulators for augmented reality displays [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32757-32766.

[27] LI B X, BABAKHANOVA G, XIAO R L, *et al*. Microsecond electro-optic switching of nematic liquid crystals with giant dielectric anisotropy [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(2): 024005.

[28] 胡红斌. 液晶波前校正器的过驱动研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2013.
HU H B. Research of overdriving of the liquid crystal wavefront corrector [D]. Changchun: University of Chinese

Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences), 2013. (in Chinese)

[29] CHEN H W, LEE J H, LIN B Y, *et al*. Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(3): 17168.

[30] QIN Q Q, TANG G Y, LIN Y C, *et al*. P-175: quantitative analysis of LCD motion ghosting based on visual perception model [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2024, 55(1): 2053-2055.

[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] DI PIETRO V M, JULLIEN A, BORTOLOZZO U, *et al*. Dynamical optical response of nematic liquid crystal cells through electrically driven Fréedericksz transition: influence of the nematic layer thickness [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10716-10728.

[33] WU J J, KUO L Y, FAN S H, *et al*. Optical bounce in a multi-domain vertical aligned liquid crystal display [J]. *Displays*, 2009, 30(4/5): 199-201.

[34] JIN Y H, ELSTON S J, FELLS J A J, *et al*. Backflow-assisted time-resolved phase modulation in nematic liquid crystal Pi-cells [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156: 108596.

[35] 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.

[36] YOKOTA J, MATSUMOTO K, USUI K, *et al*. Effect of host structure on optical freedericksz transition in dye-doped liquid crystals [J]. *Materials*, 2022, 15(12): 4125.

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