

文章编号: 1007-2780(2010)06-0771-05

HAN-IPS 液晶盒的引流效应

郑桂丽, 姜 丽, 张志东

(河北工业大学 理学院, 天津 300401, E-mail: zhengguili@hebut.edu.cn)

摘 要: 根据 Erickson-Leslie 流体动力学理论, 研究了混合排列向列相-共面转换液晶盒的引流效应。在强锚定边界条件下, 经过理论推导, 得出液晶指向矢与流速的关系方程, 进一步通过数值计算得出指向矢分布与时间的关系。发现引流效应加快了指向矢达到平衡态的速度, 而且破坏了指向矢分布的瞬态对称性, 特别在加电压的初始几毫秒这种现象非常明显。

关键词: 混合排列向列相; 共面转换; 引流效应; 指向矢分布

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A

Backflow in HAN-IPS Liquid Crystal Cell

ZHENG Gui-li, JIANG Li, ZHANG Zhi-dong

(School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China, E-mail: zhengguili@hebut.edu.cn)

Abstract: Based on the Erickson-Leslie continuum theory, the hybrid aligned nematic in-plane switching (HAN-IPS) liquid crystal cell is investigated with considering the backflow effect. The relation of liquid crystal director and flow velocity is obtained under the condition of strong surface anchoring. The results of computer simulation show that the backflow effect speeds up achieving equilibrium state and breaks the symmetry of the director configuration. The phenomenon is very obvious especially in the initial milliseconds after switching on the applied voltage.

Key words: hybrid aligned nematic; in-plane switching; backflow effect; distribution of director

1 引 言

流动对液晶分子施加了转矩使指向矢发生转动, 反之, 指向矢的转动又将导致液晶的流动。这种伴随着指向矢取向发生改变而引起的流动效应称为引流效应。在液晶显示的动力学研究中, 引流效应起着非常重要的作用。例如, 在扭曲液晶盒中, 当撤去电压时透过率出现反弹现象(optical bounce)^[1]。Van Doorn 最早用引流效应对这种现象做出了理论解释^[2]。

混合排列向列相(HAN)液晶盒的动力学研究引起了人们的广泛兴趣^[3]。目前, 在液晶显示领域中共面转换(IPS)模式、垂直排列(VA)模式等都有较宽的视角和快速的响应时间。最近 Lee 等人提出了混合排列-边缘场转换(HAN-FFS)模式, 这一模式具有制作简单、视角宽、驱动电压低和透过率高的特点, 改善了液晶显示的视角特性, 提高了显示质量^[4-8]。

本文把 HAN-FFS 模式简化为 HAN-IPS 模式, 研究了正性液晶构成的 HAN-IPS 液晶盒的

收稿日期: 2009-12-29; 修订日期: 2010-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60736042); 河北省高校重点学科资助项目

作者简介: 郑桂丽(1981-), 女, 河北唐山人, 硕士, 从事液晶物理方面的研究。

引流效应。通过两个简化条件得到 HAN-IPS 液晶盒的简化模型: (1) 将共面转换电场简化为均匀电场; (2) 单一常数近似, 即 $K = K_{11} = K_{22} = K_{33}$ 。在强锚定边界条件下, 根据 Ericksen-Leslie 流体动力学理论求得指向矢分布与流速的关系。通过数值计算发现: 开关电压时, 引流效应使指向矢达到平衡态的速度加快, 而且引流效应破坏了指向矢的瞬态对称分布, 这一现象在加电压的初始几毫秒时表现得尤其明显。

2 理论过程

在强锚定边界条件下, 假设在平行于 HAN 液晶盒表面的方向加一匀强电场 $E = \frac{U}{l}$ (l 为电极宽度), 如图 1 所示。建立图 2 所示的坐标系, 这时液晶指向矢和电场强度可以表示为:

$$\mathbf{n} = (\cos\theta\cos\phi, \cos\theta\sin\phi, \sin\theta) \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = (0, 0, E) \quad (2)$$

其中 θ, ϕ 都是空间和时间的函数, 即 $\theta = \theta(x, t)$, $\phi = \phi(x, t)$ 。在无外电场作用时, 指向矢在 xy 平面内 ($\theta = 0$) 由 ϕ 角描述, $\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\pi x}{2d}$ (单一弹性常数近似)。外电场作用诱导指向矢具有 z 分量, 通过引入 θ 角, 可给出指向矢的 3 个直角坐标分量, 并由公式 (1) 描写。

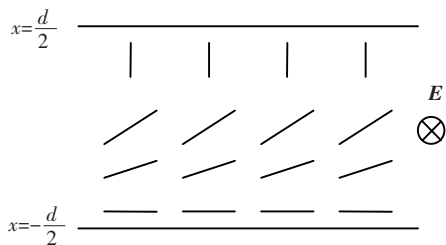


图 1 混合排列向列相液晶盒
Fig. 1 HAN liquid crystal cell

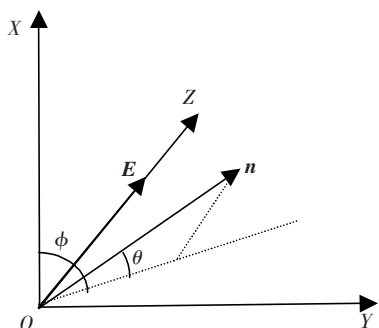


图 2 液晶指向矢在球坐标系中的表示

Fig. 2 Liquid crystal director in the spherical coordinate

假定指向矢的瞬时变化可以引起 y 轴和 z 轴方向的瞬时流动, 则液晶的流速可以表示为 $\mathbf{v} = [0, v_y(x, t), v_z(x, t)]$ 。在强锚定边界条件下, 边界处指向矢 \mathbf{n} 和速度 \mathbf{v} 分别为: 在上边界 $x = \frac{d}{2}$ 处, $\theta = 0, \phi = 0, v_y = v_z = 0$; 在下边界 $x = -\frac{d}{2}$ 处, $\theta = 0, \phi = \frac{\pi}{2}, v_y = v_z = 0$ 。

在单一弹性常数近似下, Frank 弹性自由能密度为:

$$F_{el} = \frac{1}{2}K[(\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + (\nabla \times \mathbf{n})^2] = \frac{1}{2}K[(n_{x,x})^2 + (n_{y,x})^2 + (n_{z,x})^2] \quad (3)$$

在施加外电场后, 由电场引起的自由能密度为:

$$F_d = \frac{1}{2}\epsilon_0[\epsilon_{\perp} E^2 + \Delta\epsilon(\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})^2] = -\frac{1}{2}(\epsilon_{\perp} E^2 + \Delta\epsilon n_z^2 E^2) \quad (4)$$

其中 $\Delta\epsilon$ 表示介电各向异性。

根据 Ericksen-Leslie 理论, 指向矢的运动方程和加速度的运动方程分别为^[9]:

$$\gamma_1 N_a + \gamma_2 n_{\mu} A_{\mu a} = \frac{\partial F}{\partial n_{a,\mu}}, \mu - \frac{\partial F}{\partial n_a} + G_a - \lambda n_a \quad (5)$$

$$\rho \frac{dv_{\beta}}{dt} = \sigma_{\alpha\beta, \alpha} \quad (6)$$

其中 ρ 为液晶密度; $\sigma_{\alpha\beta}$ 为应力张量; $A_{\mu a} = \frac{1}{2}(v_{\mu, a} + v_{a, \mu})$ 为速度梯度的对称部分; $N_a = \frac{dn_a}{dt} - \frac{1}{2}(v_{\alpha, \beta} - v_{\beta, \alpha})n_{\beta}$ 为指向矢相对于流体的变化率; λ 为拉氏因子; γ_1 为转动黏滞系数, γ_1 和 γ_2 均为 Leslie 黏滞系数 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 的组合; G_a 为电场项, 分量分别为 $G_x = 0, G_y = 0, G_z = \epsilon_0 \Delta\epsilon n_z E^2$ 。将各项带入式 (5), 可以得到液晶的速度和指向矢的关系:

$$\gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} = K \sin\theta \cos\theta \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \epsilon_0 \Delta\epsilon E^2 \sin\theta \cos\theta + (\alpha_2 + \alpha_3) \sin\theta \cos\theta \sin\phi \cos\phi v_{y,x} + (\alpha_3 \sin^2 \theta - \alpha_2 \cos^2 \theta) \cos\phi v_{z,x} \quad (7a)$$

$$\gamma_1 \cos\theta \frac{\partial \phi}{\partial t} = K \cos\theta \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - 2K \sin\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + (\alpha_3 \sin^2 \phi - \alpha_2 \cos^2 \phi) \cos\theta v_{y,x} + \alpha_3 \sin\theta \sin\phi v_{z,x} \quad (7b)$$

如果时间足够长,即 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial t}, v_{y,x} = v_{z,x} = 0$, 就可以得到液晶指向矢的平衡态方程。由式(6), 速度梯度方程变为^[10-11]:

$$v_{y,x} = 2\{[(\alpha_1 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_3 + \alpha_6) \sin^2 \theta + (\alpha_1 \sin^2 \theta - \alpha_2 + \alpha_5) \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_4] \times [C_1 + (\alpha_2 + \alpha_3) \sin \theta \cos \theta \sin \phi \cos \phi \frac{\partial \theta}{\partial t} + (-\alpha_2 \cos^2 \phi + \alpha_3 \sin^2 \phi) \cos^2 \theta \frac{\partial \phi}{\partial t}] - (2\alpha_1 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_3 + \alpha_6) \sin \theta \cos \theta \sin \phi \times [C_2 + (-\alpha_2 \cos^2 \theta + \alpha_3 \sin^2 \theta) \cos \phi \frac{\partial \theta}{\partial t} + \alpha_3 \sin \theta \cos \theta \sin \phi \frac{\partial \phi}{\partial t}]\} / \{[(\alpha_1 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_3 + \alpha_6) \cos^2 \theta \sin^2 \phi + (\alpha_1 \cos^2 \theta \sin^2 \phi - \alpha_2 + \alpha_5) \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_4] \times [(\alpha_1 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_3 + \alpha_6) \sin^2 \theta + (\alpha_1 \sin^2 \theta - \alpha_2 + \alpha_5) \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_4] - [(2\alpha_1 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_3 + \alpha_6) \sin \theta \cos \theta \sin \phi]^2\} \quad (8a)$$

$$v_{z,x} = 2\{-(2\alpha_1 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_3 + \alpha_6) \sin \theta \cos \theta \sin \phi \times [C_1 + (\alpha_2 + \alpha_3) \sin \theta \cos \theta \sin \phi \cos \phi \frac{\partial \theta}{\partial t} + (-\alpha_2 \cos^2 \phi + \alpha_3 \sin^2 \phi) \cos^2 \theta \frac{\partial \phi}{\partial t}] + [(\alpha_1 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_3 + \alpha_6) \cos^2 \theta \sin^2 \phi + (\alpha_1 \cos^2 \theta \sin^2 \phi - \alpha_2 + \alpha_5) \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_4] \times [C_2 + (-\alpha_2 \cos^2 \theta + \alpha_3 \sin^2 \theta) \cos \phi \frac{\partial \theta}{\partial t} + \alpha_3 \sin \theta \cos \theta \sin \phi \frac{\partial \phi}{\partial t}]\} / \{[(\alpha_1 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_3 + \alpha_6) \cos^2 \theta \sin^2 \phi + (\alpha_1 \cos^2 \theta \sin^2 \phi - \alpha_2 + \alpha_5) \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_4] \times [(\alpha_1 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_3 + \alpha_6) \sin^2 \theta + (\alpha_1 \sin^2 \theta - \alpha_2 + \alpha_5) \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_4] - [(2\alpha_1 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \alpha_3 + \alpha_6) \sin \theta \cos \theta \sin \phi]^2\} \quad (8b)$$

其中 C_1 和 C_2 为积分常数, 由边界处流速为零决定。

3 数值计算

在数值模拟过程中, 我们应用了以下液晶参数:

$$K = 11.0 \times 10^{-12} \text{ N},$$

$$\Delta \epsilon = 8.0,$$

$$U = 3.0 \text{ V},$$

$$l = 9.0 \times 10^{-6} \text{ m},$$

$$d = 6.0 \times 10^{-6} \text{ m},$$

$$\alpha_1 = 6.5 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2},$$

$$\alpha_2 = -79.5 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2},$$

$$\alpha_3 = -1.2 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2},$$

$$\alpha_4 = 83.2 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2},$$

$$\alpha_5 = 46.3 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2},$$

$$\alpha_6 = -34.4 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$$

其中 Leslie 黏滞系数引用于文献[12]。利用差分迭代的方法得到加电压和去掉电压两种情况下, θ 角和 ϕ 角随时间和无量纲的液晶盒厚 x/d 的变化情况, 如图 3、图 4、图 5、图 6 和图 7 所示。图中实线表示不考虑引流效应时的情况, 虚线表示考虑引流效应时的情况。图 8 和图 9 为 y 轴和 z 轴方向的流速随时间和空间的变化情况。

通过数值模拟, 我们发现: 考虑引流效应和不考虑引流效应两种情况下, 开关电压时随着时间的增加, 描述指向矢分布的 θ 角和 ϕ 角都能达到

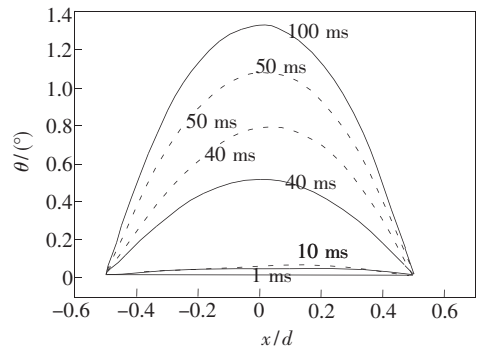


图 3 加 3 V 电压时 θ 角随时间和空间的变化情况
Fig. 3 Time-varying of θ after switching on $U = 3.0 \text{ V}$ versus dimensionless thickness

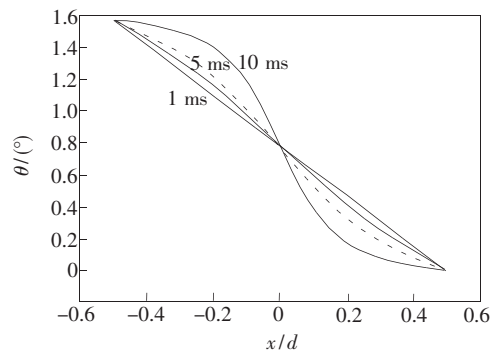


图 4 加 3 V 电压时 ϕ 角随时间和空间的变化情况
Fig. 4 Time-varying ϕ after switching on $U = 3.0 \text{ V}$ versus dimensionless thickness

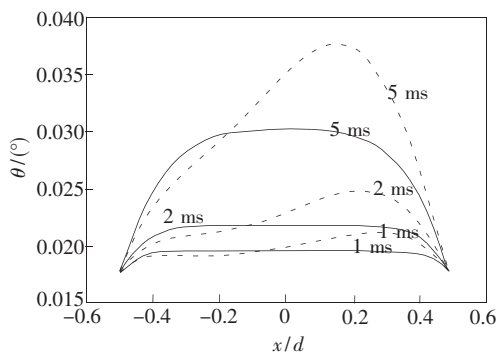


图 5 加 3 V 电压的初始几毫秒时, θ 角随时间和空间的变化情况。

Fig. 5 Time-varying of θ after switching on $U = 3.0$ V versus dimensionless thickness in the initial milliseconds

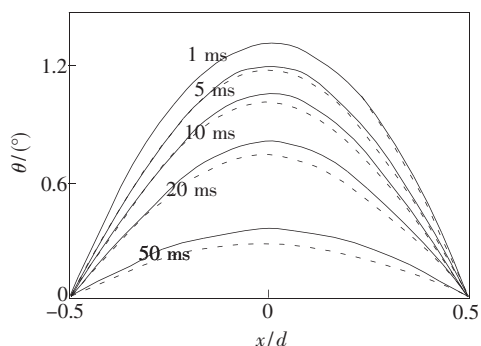


图 6 撤去电压时 θ 角随时间和空间的变化情况

Fig. 6 Time-varying of θ after switching off $U = 3.0$ V versus dimensionless thickness

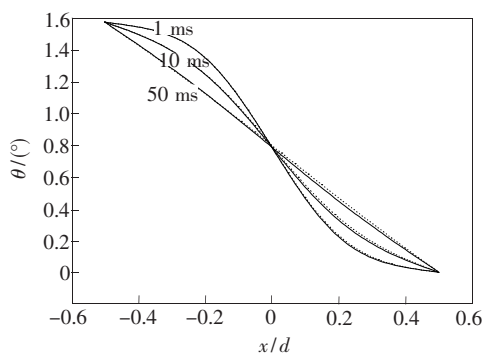


图 7 撤去电压时 ϕ 角随时间和空间的变化情况

Fig. 7 Time-varying of ϕ after switching off $U = 3.0$ V versus dimensionless thickness

平衡状态,但是引流效应使指向矢达到平衡态的速度增快,而且 θ 角和 ϕ 角的瞬态对称性被破坏,尤其在加电压的初始几毫秒时, θ 角的不对称性

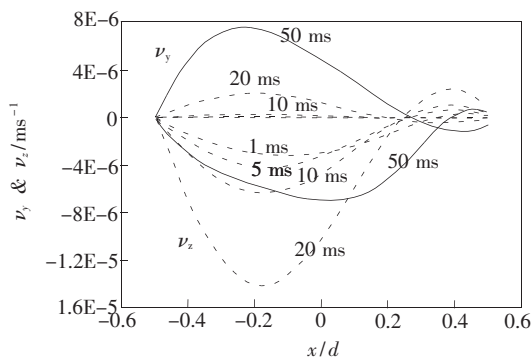


图 8 加 3 V 电压时流速分量 v_y 和 v_z 随时间和空间的变化

Fig. 8 Time-varying of flow velocity components v_y and v_z after switching on $U = 3.0$ V versus dimensionless thickness

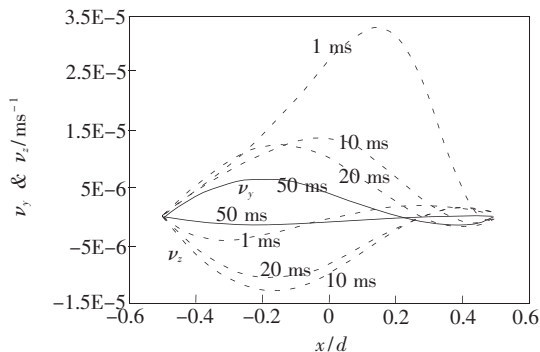


图 9 撤去电压时流速分量 v_y 和 v_z 随时间和空间的变化

Fig. 9 Time-varying of flow velocity components v_y and v_z after switching off $U = 3.0$ V versus dimensionless thickness

非常明显。

4 结 论

基于液晶的动力学理论研究了 HAN-IPS 液晶盒的引流效应。通过理论推导及对开态和关态两种情况的数值模拟计算,得到了对应的液晶指向矢的分布。研究发现:引流效应使指向矢达到平衡态的速度增快,而且破坏了 θ 角和 ϕ 角的瞬态对称性,特别是在加电压的初始几毫秒时, θ 角出现了非常明显的不对称性。

参 考 文 献:

- [1] Gerritsma C J, Van Doorn C Z, van Zanthen P. Transient effects in the electrically controlled light transmission of a twisted nematic layer [J]. *Phys. Lett. A*, 1974, 48(4):263-264.
- [2] Van Doorn C Z. Dynamic behavior of twisted nematic liquid-crystal layers in switched fields [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, 46(9):3738-3745.
- [3] Jewell S A, Samples J R. Back flow in the relaxation of a hybrid aligned nematic cell [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(19):3156 - 3158.
- [4] 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]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73(20):2881(1-3).
- [5] Hong S H, Jeong Y H, Kim H Y, *et al.* Novel nematic liquid crystal device associated with hybrid alignment controlled by fringe field [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, 40: 272-274.
- [6] Hong S H, Jeong Y H, Kim H Y, *et al.* Wide-viewing-angle hybrid aligned nematic liquid crystal cell controlled by complex electric field [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, 41: 4571-4576.
- [7] Kim W C, Jeong Y H, Lee S H. Electrooptic characteristics of a Fringe-field driven hybrid aligned nematic liquid crystal cell using a liquid crystal with positive dielectric anisotropy [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, 43(2): 637-641.
- [8] Song J H, Lim Y J, Lee M H, *et al.* Electro-optic characteristics and switching principle of a single-cell-gap trans-reflective liquid-crystal display associated with in-plane rotation of liquid crystal driven by a fringe-field[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87:011108(1-3).
- [9] De Gennes P G. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. Oxford : Clarendon Press, 1993:193 -209.
- [10] 张志东, 姜丽, 魏怀鹏. Backflow in an inverse twisted nematic liquid crystal cell [J]. *计算物理*, 2006, 23(2):199-203.
- [11] 周璇, 张志东, 孙玉宝. 有效粘滞系数对混合排列向列相液晶动力学的影响[J]. *液晶与显示*, 2009, 24(2): 168-173.
- [12] 孙玉宝, 范志新, 张志东. OCB 液晶显示的动力学计算[J]. *液晶与显示*, 2001, 16(1):26-32.