

文章编号:1007-2780(2017)03-0182-08

纯位相液晶调制器的响应特性计算

胡立发^{1*}, 彭增辉², 王启东², 刘永刚², 姚丽双²,

鲁兴海², 朱华新¹, 苏宙平¹, 宣 丽²;

(1. 江南大学 理学院, 江苏 无锡 214122;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:液晶位相调制器在非显示领域有广泛的应用,例如自适应光学中的波前校正、大气湍流模拟、光学相控阵的光束指向等。在这些应用中液晶的响应速度、位相调制范围、色散等特性非常关键。围绕对这些特性的改进,本文总结了近年来人们在液晶器件设计、驱动方法改进以及液晶色散研究方面的理论计算方法,这为人们在提高液晶器件电光响应特性、预期其性能等方面的需求,提供了非常有价值的参考。

关键词:液晶;位相调制;自适应光学;响应时间;色散

中图分类号:0753+.2;TN141.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173203.0182

Calculation of electro-optical characteristics of phase-only liquid crystal modulator

HU Li-fa^{*1}, PENG Zeng-hui², WANG Qi-dong¹, LIU Yong-gang¹,

YAO Li-shuang¹, LU Xing-hai², ZHU Hua-xin¹, SU Zhou-ping¹, XUAN Li²

(1. School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. State Key Lab of Applied Optics, Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China)

Abstract: Recently, liquid crystal (LC) with its promising electro-optical characteristics arouses the interest in many non-display applications, such as the wavefront corrector in adaptive optics, atmospheric turbulence simulator, and optical steering as a optical phased array. In these applications, the key LC parameters include its response time, phase stroke and dispersion. In the paper, we focus on these key parameters and report the advancement of theoretical calculation algorithms in LC optimal parameters design, driving improvement and LC dispersion description. And these are valuable and helpful to improve the LC device design and estimate their electro-optical properties.

Key words: liquid crystal; phase modulation; adaptive optics; response time; dispersion

收稿日期:2016-06-24;修订日期:2016-07-11.

基金项目:国家自然科学基金(No.61475152, No.11174274, No.61205021, No.61405194)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61475152, No.11174274, No.61205021, No.61405194)

* 通信联系人, E-mail: hulifa@ciomp.ac.cn

1 引言

近20余年来,液晶在显示领域得到了越来越广泛的应用,例如,电视、电脑、手机、平板电脑、车载导航、钟表、3D显示等等^[1-2]。除了在显示领域的广泛应用,液晶在光学^[3]和光子学^[4]方面的应用也有大量报道,出现了各种市售的液晶空间光调制器。液晶空间光调制器(Liquid crystal spatial light modulator, LCSLM)是一种能够对入射光的强度和位相进行调制的器件,其中,纯位相的液晶空间光调制器中液晶采用反平行取向^[5],能只对入射光的位相进行调制,它可以用作自适应光学系统中的波前校正器,对入射的畸变波前进行补偿,得到近衍射极限的目标图像。众所周知,入射光的相位 $\delta = n \cdot d$,从位相调制原理比较,传统的变形镜是通过改变它的各个压电陶瓷(PZT)驱动器上的电压,使对应的驱动器伸缩,即改变 d 来改变它的变面形;与此相反,液晶的盒厚 d 不变,它是通过改变外加电压来改变液晶的取向,从而引起它的双折射 Δn 变化,即改变 n 来调制入射光的位相。

利用配备有自适应光学系统的望远镜对人造卫星、火箭等空间目标观测,人们可以分析出其姿态、结构形状、尺寸、运动轨迹、光谱等信息,可以为空间防卫提供重要的数据。空间目标高分辨力成像自适应光学望远镜,要求人们在提高自适应光学系统规模(变形镜单元数和波前探测器子孔径数)、波前探测能力、校正带宽等方面都需要有重大突破。但增加变形镜的驱动单元数、提高驱动单元密度极其困难,目前驱动单元数只能做到千单元级,这是变形镜自适应光学系统的瓶颈问题之一;而液晶波前校正器(liquid crystal wave-front corrector, LC WFC)具有高像素数密度,没有这方面的障碍,与变形镜相比,液晶波前校正器具有如下优势:

(1)驱动单元多。基于目前成熟的工业液晶显示器的集成电路工艺技术,液晶位相调制器的像素数目可以很容易达到几百万个。

(2)位相调制量大。由于液晶位相调制器采用了位相包裹(phase wrapping)法,调制量在可见光波段甚至可以达到十微米以上,完全满足校正大气湍流引起的波前畸变的需要。

(3)驱动电压低(0~10 V),易与集成电路匹配。液晶位相调制器的驱动电压一般在10 V以内,功耗很低。而常规的PZT变形镜要求数百伏电压,所需功耗大。

(4)位相电压特性没有回滞。液晶校正器无机械运动,产生的波面精度高。由于液晶位相调制器是利用液晶分子轴的转动调制折射率,实现波前位相调制,因此,它没有宏观的机械运动,不存在过冲现象和迟滞效应,故利用它产生的波面精度很高。

(5)体积小重量轻。有助于自适应光学系统向着小型化、微型化方向发展,有望实现机载或星载自适应光学系统。

(6)价格低廉。变形镜单个驱动器平均约1 000美元,一个千单元变形镜的价格高达百万美元。而普通的液晶空间光调制器的价格远比它低。

正是由于以上的优点,近20年来,国内外研究者在提高液晶响应速度或液晶校正器研制方面进行了大量努力,从最初的原理性、验证性的研究,到近年来长春光机所宣丽研究员等提高它的能量利用效率和校正速度两个主要的问题,使其逐步实用化、工程化^[6-12]。

从光学成像的应用要求来看,自适应光学系统中所使用的液晶空间光调制器一般采用纯相位调制模式^[11-13],如果不特别声明下文中所讨论的都针对纯相位的向列液晶空间光调制器,以下几项关键参数对应用来说非常重要:1)响应速度;2)位相调制特性;3)色散特性。本文分别详述了这三个特性的理论计算方法的进展,给出了相关的公式;对液晶器件的性能进行理论预期对于不同的应用来说非常关键,可以做到有的放矢,提高设计效率,这为特定的应用选择液晶空间光调制器的合理参数提供参考。

2 液晶器件参数的优化计算

为了提高液晶器件的响应速度,多年来,国内外研究小组对液晶器件的响应特性从理论和实验上进行了大量研究,在液晶器件盒厚、工作温度等参数优化,以及液晶材料改进方面获得了明显的进展,其中液晶响应特性的理论计算和分析,在优化设计液晶器件方面起到了关键的作用。在下文

的讨论中,如果没有特殊说明,都是针对反平行取向的纯位相调制向列液晶器件。

2.1 液晶盒厚的优化

液晶的响应时间包括增加电场的上升时间 τ_{on} 和降低电场的下降时间 τ_{off} ,可以分别表示成如下:

$$\tau_{\text{off}} = \tau_0 = \frac{\gamma_1 d^2}{K_{33} \pi^2}, \quad (1)$$

$$\tau_{\text{on}} = \tau_0 \frac{1}{\left[\left(\frac{V}{V_{\text{th}}} \right)^2 - 1 \right]}, \quad (2)$$

其中: τ_0 是液晶指向矢变化到原来 $1/e$ 的时间; γ_1 是粘滞系数; K_{33} 是弯曲弹性常数; d 是液晶盒厚度。 V_{th} 是阈值电压; V 是外加电压。通常情况下,上升时间比下降时间短得多,因此,在考虑提高液晶材料的响应速度时,主要针对它的下降时间。Nie 等考虑到预倾角的影响得到如下公式^[14]:

$$\tau_{\text{off}} = \tau_0 = \frac{\gamma_1 d^2}{4K_{33} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_p}{\theta_m} \right)^2}, \quad (3)$$

$$\tau_{\text{on}} = \tau_0 \frac{1}{\left[\left(\frac{V}{\left(1 - \frac{2\theta_p}{\pi\theta_m} \right) V_{\text{th}}} \right)^2 - 1 \right]}, \quad (4)$$

其中: θ_p 和 θ_m 分别是预倾角和液晶分子最大的倾角。当预倾角为 0 时,式(3)和式(4)分别与式(1)(2)相同。由上式可以看出,预倾角变小会导致上升时间变长,下降时间变短。

液晶位相调制器要求位相调制量至少为一个波长,即 2π 弧度,在此约束条件下彭增辉研究员等给出了计算最佳盒厚的解析公式和更精确的差分数值计算的方法^[15-16]。液晶分子平均倾角为 θ 时液晶器件的位相调制量可以由下式计算:

$$\delta = d \cdot \Delta n \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2d\pi}{\lambda} \left(\frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}} - n_o \right), \quad (5)$$

其中: n_e 和 n_o 分别为液晶分子长轴和短轴方向的折射率; θ 是液晶分子的平均倾角。从初始状态下液晶分子的平均倾角 θ_0 经过 t 时刻变化到 θ_t ,位相变化一个波长时有如下关系:

$$\delta(t_{2\pi}) = \delta_0 + 2\pi, \quad (6)$$

其中: δ_0 为初始角度 θ_0 对应的位相; $t_{2\pi}$ 为位相变化一个波长所用的时间。外加电压减小,液晶分子平均倾斜角度从初始的 θ_0 经过时间 t 变化到 θ

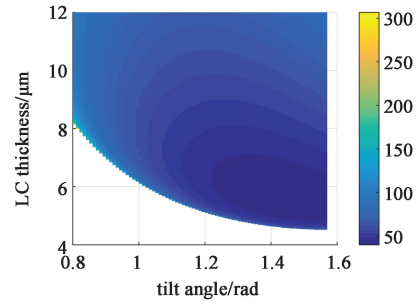
时,可以用式(7)计算:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{\left(-\frac{t}{\tau_{\text{off}}} \right)}. \quad (7)$$

将式(3)、(5)、(7)代入式(6),经过变换后可以得到时间随厚度 d 变化的函数,如公式(8)所示:

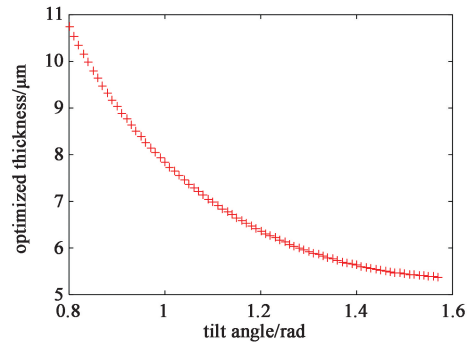
$$t(d, \lambda) = -\tau_{\text{off}} \ln \left\{ \theta_0^{-1} \arcsin \left[\frac{1}{n_e^2 - n_o^2} \left(\frac{1}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_0 + n_e^2 \sin^2 \theta_0}} + \frac{\lambda}{dn_e n_o} \right)^{-2} - \frac{n_o^2}{n_e^2 - n_o^2} \right]^{1/2} \right\}, \quad (8)$$

以5CB为例,其参数如下: $K_{11} \approx K_{33} = 6.4 \times 10^{-12}$,液晶器件的快速响应要求小的预倾角,在小预倾角的情况下, K_{11} 和 K_{33} 不同引起的差别较小^[15]; $n_e = 1.70$, $n_o = 1.526$, $l = 785 \text{ nm}$, $\gamma = 0.064$; 根据(8)的模拟结果如图1(a)所示,左下



(a) 不同初始倾角 θ_0 和不同厚度下的响应时间, x 轴:倾角 θ (rad); y 轴:盒厚 d (mm); z 轴:响应时间 t (ms)

(a) Response time as a function of θ_0 and LC thickness, x : tilt angle θ (rad); y : thickness d (mm); z : response time t (ms)



(b) 最优盒厚随倾角的变化 θ_0

(b) Optimized LC thickness as a function of θ_0

图1 最优盒厚的模拟

Fig.1 Simulation of optimized LC thickness

角白色区域不满足位相调制达到一个波长的条件,没有实数解;图(b)为图(a)中模拟的最优厚度的结果,也就是 t 关于 d 的一阶偏导为零时计算得到的最佳液晶盒厚值。由图 1 可见,不同初始倾角 θ_0 都对应一个优化的盒厚值,优化的盒厚处响应最快;另外,外加电场越大初始倾角越大,优化的盒厚越小。

2.2 工作温度的优化^[17]

液晶材料的双折射和黏度系数都随温度的升高而降低,黏度系数降低可以提高液晶器件的响应速度,但双折射的降低会使液晶器件的位相调制深度减小。吴诗聪提出了评价液晶电光特性的品质因子(merit of figure)FM:

$$FM = \frac{K \Delta n^2}{\gamma_1}, \quad (9)$$

它的值越大,表示液晶材料的电光特性越好。FM 中各个参数都与温度有关:

$$FM \propto \left(1 - \frac{T}{T_{NI}}\right) 3\beta \exp(-E/kT), \quad (10)$$

其中: T 是工作温度,单位为开尔文; T_{NI} 是向列相-各向同性相之间的相变温度,即清亮点温度,单位 eV; β 是与液晶材料有关的指数,约 0.1 到 0.3; E 是液晶的活化能; k 是波尔兹曼常数;在最优的温度 T_{op} 处 FM 有最大的值。为了求最佳工作温度,取 FM 关于温度 T 的偏导数并使它为 0,求解该方程可以得到优化的工作温度为:

$$T_{op} \simeq T_{NI} (1 - 3\beta k T_{NI} / E). \quad (9)$$

从上式可以看出,最佳工作温度比清亮点温度低 $3\beta k T_{NI} / E$; 同时,对于具有高的双折射、低黏度、高的相变温度的液晶材料,在优化工作温度处品质因子也会更大。但是,工作温度比较高的时候,硅基集成电路中的暗电流会增加,对液晶器件的性能带来不利影响。

另一方面,温度的升高会导致液晶材料的双折射减小,从而减小位相调制量,LI 等人提出了一种四参数的模型来描述液晶材料的折射率随温度的变化关系^[18]:

$$\begin{cases} n_e(T) \approx A - BT + \frac{2(\Delta n)_o}{3} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta \\ n_o(T) \approx A - BT - \frac{(\Delta n)_o}{3} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta \\ \Delta n = (\Delta n)_o \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta \end{cases}, \quad (10)$$

其中:为了得到参数 A 和 B ,需要测量寻常光和非寻常光的折射率随温度变化的数据,并进行拟合;对双折射随温度变化的测量数据拟合,可以得到 β 和 $(\Delta n)_o$ 。对于 5CB 液晶,这 4 个参数的值分别为 $A = 1.7674$, $B = 5.79 \times 10^{-4}$, $(\Delta n)_o = 0.3505$, $\beta = 0.1889$, $T_c = 308.6$ K,将这些参数代入式(10)中,结果如图 2 所示,温度的升高导致 5CB 双折射率的减小。以液晶在自适应光学中作为波前校正器的应用考虑,温度升高导致黏度降低,响应速度加快,但另一方面,温度升高也会双折射减小,位相调制量降低,但其调制量不能低于一个波长,因此,在盒厚固定、不同工作波长条件下,根据图 2 可以找到合适的工作温度,既能加快响应速度,又能满足一个波长的要求。在加快液晶材料响应速度、满足不同波长的位相调制量之间能找到一个最佳的工作温度,这对于液晶在光学的应用十分重要。

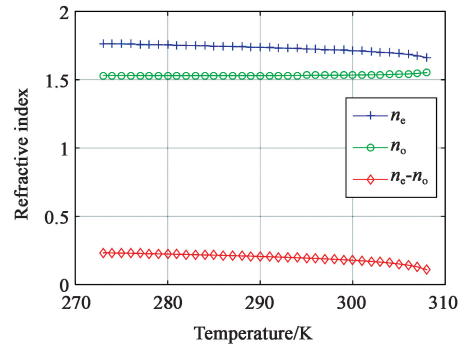


图 2 5CB 液晶折射率随温度的变化

Fig.2 5CB refractive index as a function of temperature

2.3 液晶材料及器件结构的优化

Prasenjit Nayek 等人^[19]2015 年报到了在液晶材料中添加纳米粒子来提高液晶响应速度的结果,他们将 BiFeO_3 (BFO) 纳米粒子按最佳的质量百分比 0.15% 掺入液晶 E7 中,对 5 mm 厚的液晶盒在约 7 V_{rms} 得到 2.5 ms 的响应时间。纳米粒子的引入,增加了局域相互作用,提高了液晶在降压时的恢复力,从而提高了它的响应速度。Xu 等人^[20]为液晶器件设计了新型电极结构和驱动方式,在降压过程中施加一个恢复的脉冲电压,加速液晶分子取向的恢复速度,大幅提高了液晶的响应速度。这种方法虽然有效,但需要对液晶空间光调制器的电路设计、驱动方法设计、制备工艺等方面进行修改,成本太

高不利于实际应用。

另外,国内外围绕液晶分子设计、合成也进行了大量的工作,制备出了高双折射、低黏度的快速液晶材料^[3, 21-23],双折射达到 0.47~0.52^[23]。通常情况下,液晶材料的这两种特性是矛盾的,因此,为了满足液晶器件应用需要,需要利用多种不同性能的液晶材料进行合理混配,制备出能满足实际应用的快速液晶材料。

3 灰度级间响应特性计算

上一节中所讨论的响应速度是指最大电压和最小电压之间的响应速度,实际上不同电压之间,或者不同灰度之间的响应更具有实际意义,更准确地体现了液晶器件的动态响应性能。利用瞬态

向列效应,人们提出过压(overdriving)或低压(undershoot voltage)驱动的方法^[3, 24-25],来提高液晶器件在不同灰度驱动的响应速度。

液晶分子在不同厚度处倾角不同,精确的数值解由差分方程可以求得,Abdulhalim 等人提出了解析解^[26],但参数近 20 个,公式比较复杂;作为近似,我们用式(11)来描述液晶的平均倾角 θ 和外加电压 V 的关系:当外加电压低于阈值电压时,液晶分子不发生转动;当外加电压超过阈值电压时,液晶分子的平均倾角 θ 和外加电压 V 之间的关系如下:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - 2 \arctan \exp\left(-\frac{V - V_{th}}{V_0}\right), \quad (11)$$

其中: V_0 是常数。由上式代入式(5)可以得到外加电压 V 下的相位延迟为:

$$\delta(V) = \frac{2d\pi}{\lambda} \left(\frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 + (n_e^2 - n_o^2) \cos^2\left(2 \arctan \exp\left(\frac{V_{th} - V}{V_0}\right)\right)}} - n_o \right). \quad (12)$$

数字电路中不同的灰度级对应不同的电压,灰度级一般采用 8 位,即 256 个灰度;因此,式(12)即可以表示不同灰度级对应的相位延迟。

不同灰度级之间的响应时间可以用有限时域差分迭代的方法进行计算^[24]、或进行实验测量^[25],但这些方法比较复杂,可以用下面的方法进行快速的估算。

3.1 下降时间

从高电压 V_2 对应的灰度级 G_2 降低到低电压 V_1 对应的灰度级 G_1 时,由式(7)可以得到液晶的下降时间 dt_d 如下:

$$dt_d = \frac{\tau_{off}}{2} \ln \left(\frac{\delta(\theta_1)}{\delta(\theta_2)} \right), \quad (13)$$

其中: θ_1 和 θ_2 分别是电压 V_1 和 V_2 下的相位延迟,它们可以分别从式(11)计算得到;相应地,电压从 V_2 降低到 V_1 下的相位延迟 δ 可以从式(12)计算得到。

3.2 上升时间

类似地,从低电压 V_1 对应的灰度级 G_1 升高到电压 V_2 对应的灰度级 G_2 时,经过变换^[24] 上升时间 dt_r ,随位相 $d\delta$ 的变化可以用式(4)计算:

$$dt_r = -\frac{\tau_{on}}{2} \ln \left[\frac{\delta_0 - d\delta}{d\delta \left(\frac{\theta_\infty^2}{\theta_0^2} - 1 \right)} \right], \quad (14)$$

其中: θ_∞ 和 θ_0 分别是在最大的外加电压下稳定后液晶分子的平均倾角和电压 V_1 时液晶分子的平均倾角,它们可以用式(11)分别求出; δ_0 为总的位相延迟。 $d\delta$ 为电压增加导致的位相变化:

$$d\delta = \delta(V_2) - \delta(V_1), \quad (15)$$

其中: $\delta(V_1)$ 和 $\delta(V_2)$ 可以由式(12)得到。因此,仍以 5CB 为例,可以得到不同灰度级下液晶的响应时间如图 3 所示。计算中仍以 5CB 为例,液晶盒厚为 5 μm ,其余参数与前面相同。有了不同灰度级之间的响应特性,就可以了解液晶器件的响应特性,有针对性地提出最优的过压驱动方法,提高器件的动态响应性能;在液晶显示应用中可以减小运动模糊的问题;在光学位相调制器中,可以精准地优化控制调控的位相和调控时间,从而提高校正带宽。

胡红斌博士等提出了单帧过压驱动的方法^[25]。该方法的特点是不对液晶纯位相调制器的硬件进行改造,在充分测量液晶的位相-时间特性的基础上,从驱动方法上入手,只用软件的方法来加速液晶的响应,原理如图 4 所示。图 4(a)为过压驱动下的外加电压波形,先用高电压 V_2 驱动,到达目标相位后用电压 V_1 保持,图 4(b)中‘-o’曲线为过压响应的示意图,蓝实线和点划线分

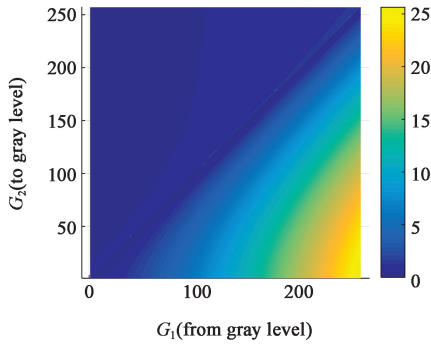
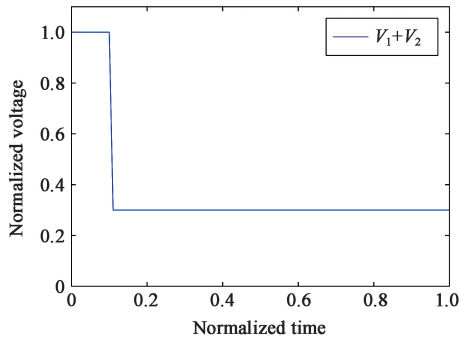


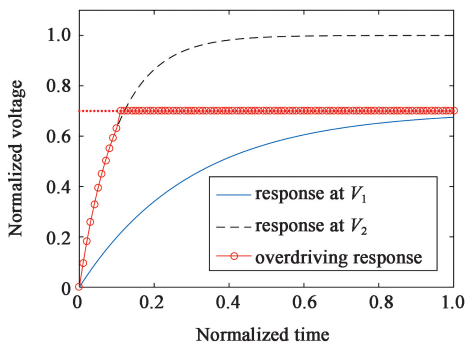
图3 5CB液晶盒在不同灰度级之间的响应时间, x 轴:初始灰度 G_1 ; y 轴:目标灰度 G_2 ; z 轴:响应时间,单位:ms

Fig.3 Gray-to-gray response times for 5CB, x : initial gray level; y : objective gray level; z : responsetime(ms)



(a) 过压驱动电压波形示意图

(a) Schematic diagram of overdriving voltage wave



(b) 不同驱动电压下液晶响应的对比示意图

(b) Schematic diagram of LC response at different driving voltages

图4 过压驱动原理

Fig.4 Principle of the overdriving method

别为不过压时 V_1 和 V_2 的响应;在没有过压时,响应按 e 指数缓慢接近目标位相,但在过压驱动下,

达到目标位相的时间明显提前。

4 液晶的色散特性计算

液晶色散特性描述了液晶的双折射随波长的变化。实用的液晶材料都是用多种液晶混配而成,因此,用通常描述单一材料色散的柯西公式无法准确定义,因此,人们又提出了其它色散公式^[27],例如,三带方程、扩展的柯西方程(extended Cauchy equations)。其中,扩展的柯西方程克服了上述缺点,可以用来描述多个单体液晶材料混合而成的液晶。具体公式如下^[27]:

$$n_e = A_i + \frac{B_i}{\lambda^2} + \frac{C_i}{\lambda^4} + GS \frac{\lambda^2 \lambda^{*2}}{\lambda^2 - \lambda^{*2}}, \quad (16)$$

$$n_o = A_i + \frac{B_i}{\lambda^2} + \frac{C_i}{\lambda^4} - GS \frac{\lambda^2 \lambda^{*2}}{\lambda^2 - \lambda^{*2}}, \quad (17)$$

其中: A_i 、 B_i 和 C_i 分别是各向同性相时的系数,它们可以由测量液晶在某一温度环境下折射率虽波长变化的数据拟合得到; S 为液晶的序参数; λ^* 为共振波长(resonance wavelength)。对上述公式进行简化得到扩展的柯西方程:

$$\begin{cases} n_e = A_e + \frac{B_e}{\lambda^2} + \frac{C_e}{\lambda^4} \\ n_o = A_o + \frac{B_o}{\lambda^2} + \frac{C_o}{\lambda^4} \end{cases}, \quad (18)$$

其中: $A_e = A_i + A_e' S$, $B_e = B_i + B_e' S$, $C_e = C_i + C_e' S$, $A_o = A_i + A_o' S$, $B_o = B_i + B_o' S$, $C_o = C_i + C_o' S$ 。序参数 S 是温度的函数,因此,公式(18)既描述了色散关系,也描述了液晶的折射率随温度的变化关系。根据文献[26]所给的参数得到如图5所示的结果。图5中,5CB液晶材料的双折射随波长的变长而减小,这是典型的正

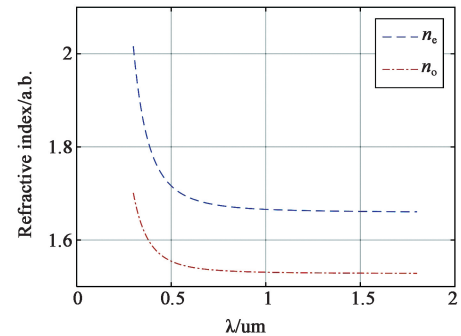


图5 液晶材料5CB的色散

Fig.5 Dispersive characteristics of 5CB

色散(positive dispersion)特性;另外,双折射特性在红外波段减小的非常少,特别是在 $1\ \mu\text{m}$ 波长以后接近饱和值。2015 年 Yang 等人报道了负色散(negative dispersion)特性的近晶相液晶材料的实验结果^[28],该材料的双折射随波长的增加而变大;负色散液晶的理论模型还没有见到相关报道。这一特性非常有希望扩展液晶在可见光、红外方面进行位相调控的应用,克服目前常用的正色散向列液晶材料在红外波段调制量变小、增加液晶盒厚又导致响应变慢的矛盾问题。

另外,基于该公式,我们可以预期所研究的液晶材料在近红外、红外波段的性能;或者为合成无色散液晶材料、设计无色散的液晶器件提供理论依据。

5 结 论

对液晶快速响应特性方面的研究国内外非常

多,这些研究基于液晶显示领域的应用,但其方法可以推广到其他非显示领域,纯相位液晶空间光调制器作为液晶波前校正器的研究就是其中之一。国内外对于设计液晶器件的新型电极结构、 π 盒、快速液晶材料设计和合成等方面有大量工作报道,这些方面的工作涉及更基础、更核心的研究内容,也非常重要,受限于篇幅尽管没有详细介绍。本文侧重介绍有关液晶电光特性的计算,都是基于现有的液晶材料、现有的液晶器件硬件结构,来优化改变盒厚、温度特性提高液晶器件在工作条件下响应速度;另外,给出了计算灰度级之间的响应的方法,可以预期液晶器件在动态响应下的性能;最后给出了液晶的色散特性的研究。这些关键参数的计算,为设计合理的液晶器件的参数、提高其响应速度、预测它在特定波长或温度下的相位调制性能提供了设计依据。未来,在计算结果的准确性、计算方法的简便性和实用性、挖掘液晶的潜力和拓展其应用等方面还需要进一步的提高。

参 考 文 献:

- [1] YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2014: 199-239.
- [2] 黄子强. 平板显示中的双稳态技术: 现状与进展(二)[J]. 现代显示, 2009, 20(5): 5-10.
HUANG Z Q. Bistable technology in flat panel display: actuality and headway(二) [J]. *Advanced Display*, 2009, 20(5): 5-10. (in Chinese)
- [3] 宣丽, 李大禹, 刘永刚. 液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望[J]. 液晶与显示, 2015, 30(1): 1-9.
XUAN L, LI D Y, LIU Y G. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 1-9. (in Chinese)
- [4] 杨傅子. 从晶体光学到液晶光学—液晶物理的光学研究方法进展[J]. 液晶与显示, 2016, 31(1): 1-39.
YANG F Z. From crystal optics to liquid crystal optics—the development of optical techniques for studying liquid crystal physics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(1): 1-39. (in Chinese)
- [5] HU L F, XUAN L, LIU Y J, *et al.* Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6403-6409.
- [6] MILLER D T, THIBOS L N, HONG X. Requirements for segmented correctors for diffraction-limited performance in the human eye [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 275-289.
- [7] LOVE G D. Liquid-crystal phase modulator for unpolarized light [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(13): 2222-2223.
- [8] DAYTON D, GONGLEWSKI J, RESTAINO S, *et al.* Demonstration of new technology MEMS and liquid crystal adaptive optics on bright astronomical objects and satellites [J]. *Optics Express*, 2002, 10(25): 1508-1519.
- [9] MU Q Q, CAO Z L, LI D Y, *et al.* Open-loop correction of horizontal turbulence: system design and result [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(23): 4297-4301.
- [10] HU L, XUAN L, LI D Y, *et al.* Wavefront correction based on a reflective liquid crystal wavefront sensor [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, 11(1): 015511.
- [11] 曹召良, 李小平, 宣丽, 等. 液晶自适应光学研究进展[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 12-19.
CAO Z L, LI X P, XUAN L, *et al.* Recent progress in liquid crystal adaptive optical techniques [J]. *Chinese Op-*

- tics, 2012, 5(1): 12-19. (in Chinese)
- [12] SHRESTHA P K, CHUN Y T, CHU D P. A high-resolution optically addressed spatial light modulator based on ZnO nanoparticles [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(3): e259.
- [13] ZHANG Z C, YOU Z, CHU D P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e213.
- [14] NIE X Y, XIANYU H Q, LU R B, *et al.* Pretilt angle effects on liquid crystal response time [J]. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(3): 280-283.
- [15] PENG Z H, LIU Y G, YAO L S, *et al.* Improvement of the switching frequency of a liquid-crystal spatial light modulator with optimal cell gap [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3608-3610.
- [16] 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.
- [17] WU S T, LACKNER A M, EFRON U. Optimal operation temperature of liquid crystal modulators [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(16): 3441-3445.
- [18] LI J, GAUZA S, WU S T. Temperature effect on liquid crystal refractive indices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(1): 19-24.
- [19] NAYEK P, LI G Q. Superior electro-optic response in multiferroic bismuth ferrite nanoparticle doped nematic liquid crystal device [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10845(1-9).
- [20] XU D M, CHEN H W, WU S T. A fringe field switching liquid crystal display with fast grayscale response time [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(4): 353-359.
- [21] DABROWSKI R, KULA P, HERMAN J. High birefringence liquid crystals [J]. *Crystals*, 2013, 3(3): 443-482.
- [22] KIM Y B, HUH I K. High-speed response time of LC mixtures containing fluoro-isothiocyanato liquid crystal compounds for LCD monitor and TV applications [C]//*Proceedings of the SPIE 4658, Liquid Crystal Materials, Devices, and Applications VIII*. Liang-Chy Chien; SPIE, 2002: 67-78.
- [23] PENG Z H, WANG Q D, LIU Y G, *et al.* Electrooptical properties of new type fluorinated phenyl-tolane isothiocyanate liquid crystal compounds [J]. *Liquid Crystals*, 2016, 43(2): 276-284.
- [24] WANG H Y, WU T X, ZHU X Y, *et al.* Correlations between liquid crystal director reorientation and optical response time of a homeotropic cell [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(10): 5502-5508.
- [25] 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.
- [26] ABDULHALIM I, MENASHE D. Approximate analytic solutions for the director profile of homogeneously aligned nematic liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2010, 37(2): 233-239.
- [27] LI J, WU S T. Extended Cauchy equations for the refractive indices of liquid crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(3): 896-901.
- [28] YANG S, LEE H, LEE J H. Negative dispersion of birefringence of smectic liquid crystal-polymer composite: dependence on the constituent molecules and temperature [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2466-2471.

作者简介:胡立发(1974—),男,湖北武汉人,博士,教授,2003年于东北大学获得博士学位,2003年9月至2016年3月,历任中科院长春光机所助理研究员、副研究员、研究员,2016年4月至今为江南大学理学院教授,主要从事液晶、自适应光学、波前测量、大气湍流模拟与探测方面的研究。E-mail: hulifa@ciomp.ac.cn