

液晶表面物理——挠曲电效应研究及进展*

关荣华[†] 李向永

(华北电力大学应用物理系 保定 071003)

摘要 向列液晶的“挠曲电效应”在1969年由Meyer首先提出,30年后这一理论才被重视.文章回顾了挠曲电效应的研究历程,总结了已取得的成果,并就挠曲电研究中的基础问题、研究进展、研究现状及存在的问题进行了系统的介绍,为从事此方面研究的工作者提供参考.

关键词 向列液晶 挠曲电效应

The surface physics of liquid crystals and the flexoelectric effect

GUAN Rong-Hua[†] LI Xiang-Yong

(Physics Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract Flexoelectric effects in nematic liquid crystals were first studied by Meyer in 1969, but his theory only attracted attention thirty years later. Early studies of flexoelectric effects are reviewed, and recent developments summarized. The basic problems, *status quo* and current points of interest are discussed.

Keywords nematic liquid crystal, flexoelectric effect

1 引言

液晶从发现至今,经历了漫长的历史时期.在未找到实际用途之前,长期停留在少数科学家的实验室里,被当作珍品做一些探索性的实验研究.直到20世纪50年代末,随着人们对凝聚态物质研究的深入,液晶研究得到了迅速发展,逐渐建立了关于液晶的理论.50年代末期人们了解到,一些液晶材料在物理热图像方面有应用的价值,于是激发了人们进一步探索液晶在技术方面应用的热情.60年代末期,液晶的动态散射现象的发现使其显露出光明的应用前景.液晶显示器件消耗的功率小,比较容易达到显示面积大而占有体积小的要求,相对来说,也不难达到彩色显示的目的,而且可以用于多路驱动操作,这使得液晶显示器件迅速占领了市场.如今,从液晶彩色电视机到笔记本电脑,液晶的应用越来越广泛,液晶的研究也越来越深入.然而,由于液晶本身具有复杂性,液晶的许多宏观性质和微观理论都需要进行探索和深入研究.本文就液晶物理研究中挠曲电现象的研究历程、研究现状等进行介绍,为本领域及相关领域的研究工作提供参考,期望液晶界面物理研究的重大成果在广大物理研究者开创性的劳动中产生.

2 液晶及挠曲电效应

通常,固态物体加热至熔点就变成透明的液体,然而,有些分子结构特殊的物质不是直接从固态变为液态,而是先要经过一种被称为液晶的中间状态,然后才转变为液态.这种中间状态外观是流动的浑浊液体,同时又具有光学各向异性晶体所具有的双折射性,这种能在一定温度范围内兼有液态和固态二者特性的物质就叫液晶(liquid crystals).

液晶分子本身具有固有的偶极矩.通常情况下,由于它们垂直分布于液晶盒内,从统计的观点出发,这种偶极矩的正向分布与反向分布量值相同,因而液晶材料不表现出宏观的偶极矩.但是,如果液晶发生了畸变,就会诱导出一定的电偶极矩 P_d .在液晶中,展曲和弯曲形变有可能引起液晶的极化,反过来,电场也可能使液晶发生形变,这种效应称为挠曲电效应.

液晶中的挠曲电效应由Meyer在1969年首次

* 河北省自然科学基金(批准号:A2006000675)、河北省博士基金(批准号:05547001D-3)及华北电力大学重大预研基金(批准号:200513002)资助项目

2008-01-06收到初稿,2008-01-23收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: ronghua_guan@sohu.com

提出^[1] ,并被她称为“偶极压电效应”,因为 Meyer 的理论是通过类比固体中的压电效应进行阐述的. 所谓压电效应是指某些晶体在压力的作用下产生应变,应变诱导出一一定的电极化强度. Meyer 的基本观点是:宏观的展曲($\text{div } n$)和宏观的弯曲($n \times \text{rot } n$)形变会导致宏观的极化(图 1) ,其中 n 是单位矢量,被 Frank^[2]称之为液晶的指向矢,它体现的是液晶分子取向的平均方向, div 是数学中的散度符号, rot 是旋度等号. 由图 1 可以清楚地知道,向列相液晶初始的非形变状态,因为分子永久电偶的局部补偿而没有极化现象产生,但这种补偿可用两种方式移除:

(1) 将液晶限制在强加了均匀边界条件的非平面结构的容器中,导致了液晶的所谓“压电极化效应”的宏观极化.

(2) 在频率足够低的时候,液晶在直流或交流电压的作用下和适当条件下,可以观测到被称为逆压电效应的压电形变.

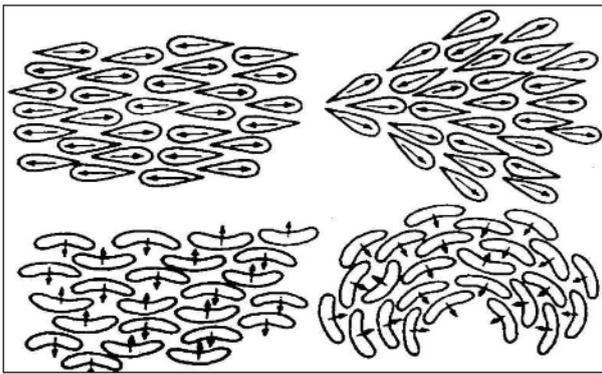


图 1 R. B. Meyer 提出的楔形和香蕉形分子包含极化分子未形变的向列结构的偶极模型(左),以及与非平面空间(直接挠曲效应)或应用外电场(逆挠曲效应)二者之一相联系的展曲和弯曲结构(右)

最初,对于这两个模型的压电效应, Meyer 称其为“偶极压电效应”. 应当指出,晶体的压电效应与液晶的压电效应既有相似之处,又有不同之处. 例如,一个相似点是液晶与压电晶体的拉伸和弯曲都会导致宏观的极化现象. 另一个相似之处是二者之中,晶体与液晶都存在逆压电效应. 但是,二者有一个应当提及的不同点,压电晶体宏观断层的存在会减少网状极化,因为晶体中的压电效应与晶格有关,而在绝缘的向列相液晶中,旋转的位移周围将存在一个十分强的网状极化现象^[3]. De Gennes 建议“压电”这个术语应该用“挠曲电”进行替换^[4]. 现在,在液晶术语中已经接受了“挠曲电”这个词并且在晶体术语中被借用^[5].

3 挠曲电现象的实验观测

向列相液晶中的挠曲电效应,由 Derzhanski 等人于 1974 年理论上提出,并在实验上观测到^[6],但这种效应在发现 30 年后才被考虑. Derzhanski 的观点主要有两方面,第一,在直流或低频电场作用下的三明治式的传统向列液晶盒内,由于电极上空间电荷的积聚,所以电场是不对称的;第二,这种有挠曲电性质的非对称电场的交界处应该会导致一种被他称为“倾斜挠曲电效应”的新的效应. 实际上,1972 至 1974 年间,在液晶材料为 MBBA, PAA, APAPA, 厚度为 10 到 100 μm 之间的薄向列液晶盒上施加一个较低直流电压后, Sofia 液晶组实验上就观测到了这一效应. 在这些条件下,由于挠曲形变,使通过液晶的偏振光的整体强度增加,而伴随着在稀释离子固定点上施加高频的周期电场,强度则降低,挠曲形变在毫伏大小的十分低的电压时就可能发生. 另外,在挠曲形变的实验研究中,两个观测挠曲电效应的重要条件被发现:液晶的弱锚定以及液晶指向矢 n 应存在初始形变.

实际上,最初于 1973 年报道的挠曲电效应,并没有受到液晶领域研究者的过多的注意. 在 H. P. Hinov^[7]的观点中,认为挠曲形变是“幽灵”形变. De Gennes^[4]一书中也曾提到,由于其敏感的特性,向列相液晶中挠曲电效应的实验观测是可疑的. 对挠曲电的认识是在 Prost 和 Marcerou 做了关于向列相液晶和近晶 A 相液晶工作, R. B. Meyer 等做了胆甾相液晶的挠曲电效应工作后,情况才发生了改变^[8]. 这几个作者,第一次注意到四极挠曲电效应的存在问题. 现在 Prost 和 Marcerou 的理论已经被 Goossens^[9]在“有序电场”的叙述中重新做了审视,但是这个问题要用 Derzhanski 等人的几篇论文才能在细节上解释清楚^[10-13]. 关于向列相液晶挠曲电效应的重要问题已由 Durand 认真地进行了讨论,需要指出的是,在 Derzhanski 等^[6]最初对挠曲电的研究中,考虑了两种类型的边界条件:强平面锚定且液晶中没有初始形变;还有一种为具有初始形变的强周期性锚定, H. P. Hinov 等^[7]称之为包含液晶形变理论的第一周期边界条件. 此外, Derzhanski 还介绍了两种电场:一种适合薄液晶盒的线性场;另一种适合厚液晶盒的双曲线场. 第二种边界条件下的数值解清楚地表明了挠曲形变的存在,这个解是总的挠曲电系数在线性电场的正极中会导致更大的挠曲形变,

而双曲电场的形变是在阴极区域. 必须提到的是文献 [6] 中计算的形变十分小, 约为百分之几的范围. 对于得到如此小的值, 有两个原因: 第一, 使用了一个非常小的总挠曲电系数值 $e = 4 \times 10^5 \text{ dyn}^{1/2}$ (或 $1.3 \times 10^{-12} \text{ C/m}$); 第二, 正如前面提到的, 假设液晶是强锚定.

挠曲电效应也可在任何非均一电场中观测到, 这个电场可在适当的液晶盒的形式下实现, 即限制液晶或在适当的电极布置下, 例如交叉指向型或四极子型 [14] 等等. 显然, 这种电场不仅可在直流电压下使用, 而且在频率较低的变化电场中也可使用, 因为挠曲电在这个低频区域仍然可以被观察到. 这里要强调的是, 区分出由于电场梯度产生的挠曲电形变和由于指向矢梯度而产生的挠曲电形变是完全可能的, 这个问题的数学计算已经由 Derzhanski 和 Petrov 第一次完成 [12], 他们在 Fan 观测的理论结果的基础上, 计算了挠曲电的大小分配, 结果表明, 在向列指向矢存在梯度, 或者是在外部电场存在梯度, 或者是在两者都存在梯度时可观测到挠曲形变. 第一种情况挠曲电与电场的关系是线性的, 并且他们与伸展或弯曲挠曲系数的差值有关. 第二种情况的结果是梯度的结果, 并且和两个挠曲系数的和有关. 文中同时指出, 当存在一个均匀电场时, 挠曲形变的唯一来源是来自表面扭矩.

实验上对挠曲电的观测也可借助观测 Fredericksz 转变的方法, 可以在垂直于玻璃板的方向上, 利用光学的方法进行观测. 在这里我们指出, 关于对挠曲电观测的问题, 大多数的分析已经由 Petrov 在其论文 [13] 中完成.

4 挠曲电系数的测定

挠曲电系数是反映挠曲电效应的重要参量, 对其数值的确定一直是挠曲电效应研究的重要内容. R. B. Meyer 首先对挠曲电效应进行了理论解释. 此外, Meyer 还给出了挠曲电效应的定量描述形式, 挠曲极化强度 P 为

$$P = e_1(\nabla \cdot n)n + e_3(\nabla \times n)n = e_1(\nabla \cdot n)n + e_3(n \cdot \nabla n),$$

式中 n 为液晶指向矢, e_1 , e_3 分别为表示展曲和弯曲的挠曲电系数, e_1 , e_3 可以是正值也可以是负值.

从理论上讲, e_1 和 e_3 的数值可以从具有展曲和弯曲形变的液晶中, 通过测量感应电荷来获得, 但是由于它们的数值很小, 杂质的导电性很容易掩盖这种挠曲电效应, 所以极难测得. 对 e_1 , e_3 的测定一直

是液晶物理界讨论的热点问题.

截止到 1974 年, 只有 Helfrich 提出一种测量弯曲挠曲电系数 e_3 的方法, 这种方法是基于 Haas 等人第一次观察到的横向电场中的向列液晶层中的挠曲现象 [15]. 后来相同的挠曲电系数 e_3 被 Schmidt 等人重新进行了测量 [16], 测得的挠曲电系数 e_3 十分小, 这大概是由于表面极化造成的. 表面极化这一现象首先是由 Prost 和 Pershan 提到 [17], 后被 Petrov 和 Derzhanski 进一步进行了论证.

挠曲电系数 e_1 和 e_3 的测量有几种不同的方法. 传统的方法是和观测 Fredericksz 转变的方法相似, 可以在垂直于玻璃板的方向上, 利用光学的方法进行测量 [18]. 光束射入液晶后, 发生双折射, 将有寻常光和非常光两条光束的传播. 由于挠曲电现象的存在, 光束透过液晶层后, 两束光的光程差受到挠曲电的影响, 我们可以通过测量光程差来确定挠曲电系数.

另一种测量挠曲电系数的方法是利用挠曲电对液晶指向矢分布的影响. 混合排列的液晶盒是测量向列相液晶挠曲电系数比较理想的结构 [19]. 在液晶盒的一个表面, 采用一种方法形成平行排列, 在相对的另一表面, 形成垂直排列. 液晶盒中的指向矢倾斜大约 90 度, 有一个比较大的展曲和弯曲形变度. 这样在液晶盒中, 产生了一个挠曲电场, 场的大小取决于展曲和弯曲的挠曲电系数的总和. 在液晶盒上加一个直流电压, 指向矢倾斜度和挠曲电场都可能改变. 电压的极性是其中很重要的因素, 在液晶盒中, 挠曲电场可以减弱也可以加强外加场. 在涂有一氧化硅的衬底上, 表面极化也会影响到混合排列向列相液晶盒的指向矢分布. 当模拟混合排列向列相液晶盒对外加直流场的感应时, 有必要考虑表面极化在内. 全漏光导模光波导技术可用于测量各种类型的液晶盒的指向矢分布. 在外加电压的情况下, 已经证明指向矢对微小改变极其敏感, 利用这一性质可测得挠曲电系数.

现在, 众所周知, MBBA 的总挠曲电系数的值要比其他材料大一个数量级 [20, 21]. 然而, 应当指出, 对于 MBBA 的总挠曲电系数的大小和符号并没有一致的意见. 最近这个系数的测量由 Blinov 等人采用集热电的方法完成 [22], 又一次得到了一个较小的值 $(1.7 \pm 0.7) \times 10^{-12} \text{ C/m}$ 或 $(5.1 \pm 2.1) \times 10^{-5} \text{ dyn}^{1/2}$. 获得如此小的挠曲电形变的计算结果, 其重要原因是假定向列相液晶界面是不考虑初始状态的强锚定: 平面和周期性形变.

2004年,我国有作者从理论上提出可以用不对称液晶盒测量挠曲电系数^[23].沿面排列弱锚定液晶盒,如上下两基板的锚定不同,称为不对称液晶盒.用电压作用到不对称液晶盒上,考虑到上下基板锚定能及约化挠曲电参量 $\alpha(e = (e_1 + e_3) / \sqrt{k_{11} \Delta \epsilon})$ 对阈值电压的影响,或指向矢分布对于液晶盒中央平面的对称性破缺参量 Δ_{in} 随上下基板锚定能及约化挠曲电参量 e 的变化关系,如果上下基板锚定能已知,则测定阈值电压 U_{th} 就可确定 $e_1 + e_3$.如果上下基板锚定强度未知,则可制作上下基板锚定强度 A_1, A_2 分别相同,厚度不同的三个不对称液晶盒,分别测定阈值电压和盒厚.用测得的三组阈值电压和盒厚,即可确定约化挠曲电参量 e ,同时还可确定出上下基板的锚定强度.遗憾的是,提出用不对称液晶盒测量挠曲电系数的作者,只从理论上分析了利用不对称弱锚定液晶盒测量挠曲电系数的可行性,但没有进行实际的实验测定,也没能给出挠曲电系数的确定取值.

直到现在,挠曲电系数的符号一直受到关注,文献[6, 22]指出其符号为“+”,而文献[21, 14]则认为取“-”(见文献[13]).关于此问题的研究,目前仍是液晶界讨论的热点内容.

5 挠曲电的物理效应

液晶显示器显示效果的好坏在很大程度上取决于液晶指向矢在液晶盒内的分布情况,液晶指向矢分布除了受到液晶自身弹性自由能、外加电场的介电能和玻璃基板表面能的影响,还会受到挠曲电的影响.研究挠曲电引发的物理效应已成为当今液晶物理研究的重要内容.

挠曲电一个重要的物理效应是对液晶盒表面锚定能的影响.仔细研究可以得知,研究挠曲电对液晶盒锚定能的影响,可以有两种机制.一种机制如文献[24]所述:液晶在界面附近选择性吸附离子,从而形成表面电场.挠曲极化强度与此表面电场耦合,直接导致一项表面能,这项表面能宏观表现为锚定能.这里,我们暂且称这种机制为直接机制.挠曲电对液晶盒锚定能的直接影响在文献[25, 26]中可以找到,该文献指出:与挠曲电相联系的一个重要问题是电极吸附离子时,液晶表面能量的真实值. Barbero^[27]等人研究离子弱吸附的模型,而 Barbero 和 Olivero^[28]研究了离子强吸附的模型.液晶中的混合离子(固有和掺杂质)的存在导致双电子层的形成,

电极附近电场的近似解在离子弱吸附的模型中是随距离成指数变化,然而对于强吸附,电场的这种解更加复杂.

按照直接机制,如果液晶在界面附近没有吸附离子,显然上述表面能不在存在.但是液晶对离子的选择吸收依赖于基板的表面处理的方法和工艺,也依赖于液晶材料的种类以及纯度,并依赖于环境,有很强的个体差异性,一般难以预测,例如,文献[29]指出,液晶表面层被吸附离子的浓度与对液晶基板的清洗时间有关,当基板清洗24小时及以上时,被吸附离子的浓度大大降低,甚至为零.因此需要研究不依赖于表面离子吸附的挠曲电效应对液晶盒的直接影响.假设液晶表面没有离子吸附,液晶盒内的电场完全由外加电压产生,此时挠曲电仅导致液晶体自由能的改变.然而,此体自由能经积分后,由高斯定理可视为上下基板处的表面能,在此我们称这种机制为间接机制.文献[30]研究了这种机制,指出纯挠曲电效应同样导致界面锚定能的改变,且该表面能在上下基板具有相反的符号,为了与通常实验上测定的锚定能统一,文献[30]引进了“等效锚定能”的概念.

挠曲电另一个物理效应是对液晶指向矢分布的影响.挠曲电的存在将引起液晶分子指向矢分布对液晶中间层对称性的破坏^[30].对称性破坏程度可由指向矢最大倾角出现的位置来反映,此位置与挠曲电系数 $\alpha(e = (e_1 + e_3) / \sqrt{k_{11} \Delta \epsilon})$ 密切相关,且与 e 近似成直线关系.除了对称性的破坏外,挠曲电同样可以改变液晶指向矢的体分布^[31].对充满负性液晶的液晶盒,无论是垂直排列还是平行排列盒,在不考虑挠曲电时,外加电场几乎不改变分子的初始排列方向.但如果考虑挠曲电的影响,液晶分子在盒内将重新分布,其排列方向与原来的方向有明显的偏离.在一定条件下,挠曲电还可使垂直盒或平行盒转变为混合盒.

挠曲电对阈值电压及饱和电压的影响也是显而易见的,多篇文献对此问题的研究进行了报道^[32].计算发现,挠曲电对阈值电压及饱和电压的影响主要体现在对锚定能的影响,一般地讲,阈值电压随挠曲电效应的增加而减小,而饱和电压随挠曲电效应的增大而增大.

除了以上挠曲电效应外,最近有文献报道^[33],利用挠曲电效应控制向列相液晶表面边界条件的方法,通过改变表面指向矢的方向,可以改变存在于液晶表面的缺陷.利用这一原理可以实现向列相液晶

中具有相似能量的两个状态之间的转化,这直接形成了一个双稳态装置.利用挠曲电效应,可使这两个状态之间发生转换.另外利用相干的细微沟纹表面及用垂直表面活性剂处理过的光滑的底层,也可以制作出标准的双稳态向列相液晶装置.在该装置中,可以观测到两个稳态,其中一个稳态是液晶垂直排列,另一个是在具有凹槽的表面平行排列,利用挠曲电常数可实现向列相液晶排列的转化,可以看出挠曲电在双稳态中的重要意义.

我们知道,双稳态之间的转变常伴有 Fredericksz 转变的存在,所以挠曲电与 Fredericksz 转变也应有一定的联系,但目前未见这方面的研究工作报道,挠曲电对双稳态的形成及对 Fredericksz 转变的影响,能否引起一级转变的存在等,仍成为目前挠曲电效应研究的热点问题,我们也正在对这个热点问题做进一步的研究.

6 结束语

液晶因其独特的存在形态及物理性质在信息显示中发挥着巨大的作用,并由此激发了人们的浓厚兴趣.液晶显示效果的好坏在很大程度上取决于液晶指向矢在液晶盒内的分布情况.液晶指向矢分布除了受到液晶自身弹性自由能、外加电场和磁场及玻璃基板表面能的影响外,还会受到挠曲电引起的自由能的影响.实验结果及理论计算均表明,挠曲电效应对液晶各物理量的影响非常复杂而又不可忽略,挠曲电现象一直是液晶表面物理的重要研究内容.目前在这方面的研究虽然取得了一些成果,但仍有许多问题值得深入研究.

参 考 文 献

- [1] Meyer R B. Phys. Rev. Lett. ,1969 ,22 :918
- [2] Frank F C. Disc. Faraday Soc. ,1958 ,25 :19
- [3] Kurik M V ,Lavrentovich O D. Izv. Akad. Nauk USSR ,Ser. Fiz. ,1989 ,53 :1880
- [4] de Gennes P G. The Physics of Liquid Crystals. Oxford :Clarendon Press ,1974
- [5] Tagantsev A K. Phys. Rev. B ,1986 ,34 :5883
- [6] Derzhanski A I ,Petrov A G ,Khinov C P *et al.* Bulg. J. Phys. ,1974 ,1 :165
- [7] Hinov H P. On the " Gradient Flexoelectric Effect " in Nematics Thirty Years Later. 2003
- [8] Prost J ,Marcerou J P. J. Phys. (Paris) ,1977 ,38 :315
- [9] Goossens W J A. Liq. Crystals ,1989 ,5 :1083
- [10] Derzhanski A ,Petrov A G ,Mitov M D. J. Phys. (Paris) ,1978 ,39 :273
- [11] Derzhanski A I ,Petrov A G. Acta Physica Polonica A ,1979 ,55 :747
- [12] Derzhanski A ,Petrov A G. In :Ed. Bata L. Advances in Liquid Crystal Research and Applications. Budapest : Pergamon Press ,1980. 515
- [13] Petrov A G. Measurements and Interpretation of Flexoelectricity. In :Eds. Dunmur D ,Fukuda A ,Luckhurst. Physical Properties of Liquid Crystals : Nematic and Smectic Data Reviews Series N25 ,INSPEC ,Publ. , IEE London. 2001 ,P. 251
- [14] Dozov I ,Penchev I ,Martinot - Lagarde Ph *et al.* Ferroelectrics Lett. ,1984 ,2 :135
- [15] Haas W ,Adams J ,Flannery J B. Phys. Rev. Lett. ,1970 ,25 :1326
- [16] Schmidt D ,Schadt M , Helfrich W. Z. Naturforsch. ,1972 ,27a :277
- [17] Prost J ,Pershan P S. J. Appl. Phys. ,1976 ,47 :2298
- [18] 李伯符. 液晶与显示 ,2001 ,3(16) 227 [Li B F. Chinese J. Liquid Crystals and Displays ,2001 ,3(16) :227(in Chinese)]
- [19] Jewell S A ,Sambles J R. J. Appl. Phys. ,2002 ,92 :19
- [20] Marcerou J P ,Prost J. Mol. Cryst. Liq. Cryst. ,1980 ,58 :259
- [21] Takahashi T ,Hashidate S ,Nishijou H *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. ,1998 ,37 :1865
- [22] Blinov L M ,Barnik M I ,Ohoka H *et al.* Phys. Rev. E ,2001 ,64 :031707 - 1
- [23] 陈贵锋 杨国琛 王永学等. 液晶与显示 ,2004 ,19(4) 278 [Chen G F ,Yang G C ,Wang Y X *et al.* Chinese J. Liquid Crystals and Displays ,2004 ,19(4) :278(in Chinese)]
- [24] Alexe-Ionescu A L ,Barbero G ,Petrov A G. Phys. Rev. E ,1993 ,48 R :1631
- [25] Barbero G ,Durand G. J. Phys. (Paris) ,1990 ,51 :281
- [26] Valenti B ,Grillo M ,Barbero G *et al.* Europhys. Lett. ,1990 ,12 :407
- [27] Barbero G ,Evangelista L R ,Madhusudana N V. Eur. Phys. J. B ,1998 ,1 :327
- [28] Barbero G ,Olivero D. Phys. Rev. E ,2002 ,65 :031701 - 1
- [29] Nazarenko V G ,Lavrentovich O D. Phys. Rev. E ,1994 ,49 :R990
- [30] Chen Y G ,Hua G R ,Long A H. Liq. Cryst. ,2003 ,30(8) :997
- [31] 叶文江 邢红玉 杨国琛. 计算物理 ,2007 ,24(3) 337 [Ye W J ,Xing H Y ,Yang G C. Chinese J. Computational Physics ,2007 ,24(3) :337(in Chinese)]
- [32] 李金伟 张素花 杨宇婴等. 液晶与显示 ,2007 ,22(3) :245 [Li J W ,Zhang S H ,Ying Y Y *et al.* Chinese J. Liquid Crystals and Displays ,2007 ,22(3) 245(in Chinese)]
- [33] Colin Denniston ,Yeomans J M. arXiv :cond-mat/0108074V1 [cond-mat. soft] ,3 Aug. ,2001