

双液体变焦透镜变焦迟滞现象的研究

王大振 彭润玲 陈家璧 庄松林

(上海理工大学光电与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要 通过引入接触线摩擦力,建立了基于双液体变焦透镜内壁的液液固三相系统接触线的力学物理模型,重新对非理想状态下液液固三相系统接触线进行了受力分析。在此基础上,对杨氏方程进行了改进,合理地解释了双液体变焦透镜的变焦迟滞现象。通过对疏水介电层厚度为 $2\ \mu\text{m}$ 的双液体变焦透镜进行加电压变焦实验,给出了双液体透镜的焦距与电压之间的迟滞曲线,该实验结果与理论分析是一致的。

关键词 光学器件;变焦迟滞;接触线静摩擦力;杨氏方程;变焦透镜

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0612001

Variable-Focus Hysteresis of Double-Liquid Variable-Focus Lens

Wang Dazhen Peng Runling Chen Jiabi Zhuang Songlin

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract By introducing the contact-line static friction, a mechanical model for the contact line in a double-liquid variable-focus lens is established, which is a liquid-liquid-solid three phase system. The mechanical analysis on the contact line of the liquid-liquid-solid three phase system with non-ideal state is done again. On this basis, the Young's equation is modified, and a reasonable explanation is given for the phenomenon of variable-focus hysteresis. The variable-focus experiment of the double-liquid variable-focus lens with dielectric layer thickness of $2\ \mu\text{m}$ under the applied voltages is performed. A hysteresis curve between the focal length of the double-liquid variable-focus lens and the applied voltage is given. The experimental result agrees very well with the theoretical analysis.

Key words optical devices; variable-focus hysteresis; contact-line static friction; Young's equation; variable-focus lens

OCIS codes 120.1880; 080.3630; 350.3950; 350.4600

1 引 言

在现代光学变焦系统^[1~3]中,基于电湿效应^[4]的双液体变焦透镜以其突出的性能而越来越受到人们的重视。这种通过外加电压改变液面曲率来实现变焦的透镜无机械可动部件、结构紧凑小巧、价格低、响应速度快、功耗小、寿命长和成像质量好,具有广阔的应用前景^[5]。

随着对电湿效应研究的不断深入,许多学者发现固体平面上的电湿效应存在接触角滞后的现

象^[6~9],并且无法通过杨氏方程得到合理的解释。从理论上来说,将液滴放置在理想平板表面上并且保持平衡态时,杨氏方程中的三种界面张力是不变的。那么根据杨氏方程表达式,液滴与平板之间的接触角在这三种界面张力相互作用下也将是唯一确定的,也就不会存在接触角滞后现象。对于同样以杨氏方程为理论基础的双液体变焦透镜,其存在与接触角滞后相类似的变焦迟滞现象。即在进行加电压变焦实验时,液体透镜的焦距值在电压上升阶段

收稿日期: 2010-12-31; **收到修改稿日期**: 2011-02-14

基金项目: 国家 973 计划(2007CB935303, 2011CB707504)、国家自然科学基金(60778031)和上海市重点学科建设(S30502)资助课题。

作者简介: 王大振(1987—),男,硕士研究生,主要从事光电精密检测方面的研究。E-mail: show_0357@yahoo.com.cn

导师简介: 陈家璧(1946—),男,教授,主要从事信息光学和光学精密测量等方面的研究。E-mail: jbchen@163.com (通信联系人)

与电压下降阶段并不完全吻合。因此需要对双液体变焦透镜的理论基础重新进行分析。

早在 1925 年, Adam 和 Jcssop^[10] 在接触角迟滞现象的研究中认为, 在三相介质的接触线上存在一种具有阻力性质的静摩擦力。这种接触线静摩擦力可能是由于表面粗糙, 液体不完全干净, 均匀等原因造成的, 其方向应与液滴的运动趋势相反。这种观点虽然合理的解释了接触角滞后现象, 但是其物理模型只是适用于固液气三相的平板上液滴系统, 并不适用于双液体变焦透镜这样的液液固三相系统, 更没有对双液体变焦透镜的变焦迟滞现象进行实验验证。本文在杨氏方程的基础上, 通过在双液体变焦透镜的接触线处引入一个静摩擦力, 重新对接触线进行受力分析, 给出了适应于非理想状态下双液体变焦透镜的杨氏方程。在此基础上利用双液体变焦透镜的焦距与接触角的关系, 分析了在外加电压上升过程中以及外加电压下降过程中透镜焦距与电压的关系。最后从实验上验证了双液体变焦透镜中存在的变焦迟滞效应。

2 原理和结构

2.1 杨氏方程

图 1 是一个简单的电湿效应装置示意图。外加电压 U 为零时, 液体界面呈虚线所示面形, 此时液体与绝缘层之间的接触角为 θ_0 。根据杨氏方程可知

$$\cos \theta_0 = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}}, \quad (1)$$

式中 γ_{sg} 为固体和气体间的界面张力, γ_{sl} 为固体与液体间的界面张力, γ_{lg} 为液体与气体间的界面张力。

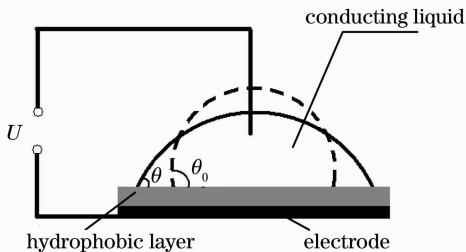


图 1 电湿效应示意图

Fig. 1 Schematic of electrowetting effect

图 2 为外加电压时导电液体接触角处与电极间所形成电场的示意图。通电后在液体与电极间的绝缘层中产生电场, 在电场的作用下绝缘层的疏水性会发生改变, 于是液体与固体表面间的界面张力发生改变。由于该液滴的体积不变, 所以液滴界面形状会在界面张力的作用下发生变化, 以致其与绝缘

层的接触角大小发生改变。因此图 1 中外加电压使得初始的虚线液体界面变成了图 2 中的实线液体界面, 即接触角从 θ_0 过渡到了 θ 。

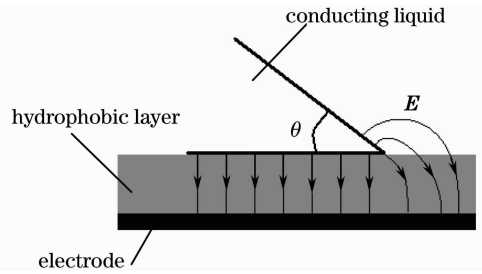


图 2 绝缘层电场示意图

Fig. 2 Schematic of electric field in hydrophobic layer

2.2 双液体变焦透镜的结构

以圆柱型双液体变焦透镜为例, 其结构如图 3 所示^[11]。双液体变焦透镜采用铜作为圆柱管的材料。在圆柱管内壁镀有一层疏水介电层。往圆柱管中注入两种透明且互不相容的液体, 一种为绝缘的非极性液体, 另一种为导电的水溶液, 两种液体的折射率不同, 但密度相同。折射率不同是为了保证液体界面曲率半径变化时, 可以实现透镜的变焦功能, 其中 n_1 和 n_2 分别代表绝缘液体和导电液体的折射率, 并且 $n_1 > n_2$ 。而密度相同可以保证两种液体界面在各个方位都不受重力影响, 从而使两种液体界面始终为完美的球形界面。圆柱管的两边分别用铜基片密封。铜基片中央嵌套有当做通光孔径的玻璃基片。

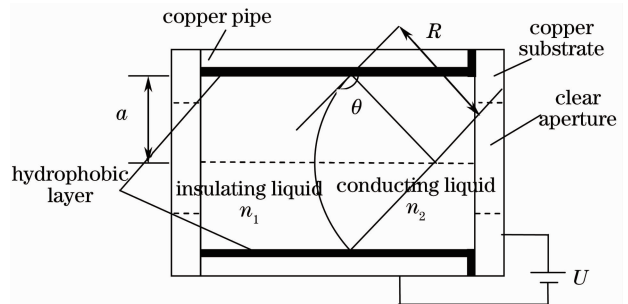


图 3 双液体变焦透镜的结构示意图

Fig. 3 Cross section view of the double-liquid variable-focus lens

3 变焦迟滞现象的理论分析

虽然对接触角滞后现象至今还没有统一的观点。但是有研究表明在光滑、干净、均匀的理想固体表面上, 接触角只有一个定值, 严格净化了的液体和固体表面实际上可以消除接触角的滞后现象^[12,13]。也就是说杨氏方程只能适用于严格净化了的液体和

固体表面。

假设在这样的理想条件下,当双液体变焦透镜所加电压相同时,液体与固体表面间积累的电荷是相同的,界面张力就是相同的,根据杨氏方程的表达式可知双液体变焦透镜的焦距也是相同的。即双液体变焦透镜变焦迟滞现象就会消失。考虑到在实际情况中,一般固体表面具有不同程度的粗糙度,液体也不可能是完全干净,均匀的。那么杨氏方程就不再适合基于电湿效应的双液体变焦透镜三相物理模型,需要进行一些改进。

如图 3 所示,当存在液液固三相系统时,在其结合处会形成一条三相系统接触线。如果在接触线上只存在三种界面张力,显然不会出现上文提到的变焦迟滞现象,因此在接触线的位置必然还有其他力的作用。假设在接触线上还存在一种方向与液滴的

运动趋势相反的静摩擦力,将此摩擦力用 f 表示,并规定 $f > 0$ 。那么重新考虑双液体变焦透镜粗糙内壁三相接触线的受力平衡,可以建立如图 4 所示的力学模型。图中的实线表示分界面的初始状态,虚线表示分界面变化后的状态。图 4(a)表示在电压上升过程中,双液体分界面从凸面向平面变化时的受力示意图,此时透镜从负透镜向平行平板过渡;图 4(b)表示在电压下降过程中,双液体分界面从平面向凸面变化时的受力示意图,此时透镜从平行平板向负透镜过渡;图 4(c)表示在电压上升过程中,双液体分界面从平面向凹面变化时的受力示意图,此时透镜从平行平板向正透镜过渡;图 4(d)表示在电压下降过程中,双液体分界面从凹面向平面变化时的受力示意图,此时透镜从正透镜向平行平板过渡。

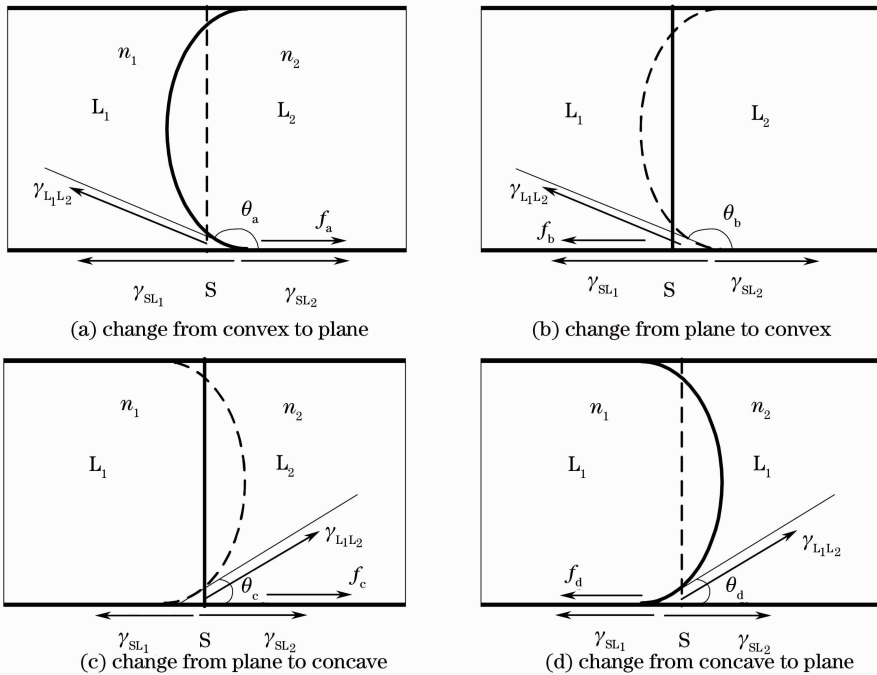


图 4 双液体变焦透镜三相系统接触线的受力示意图

Fig. 4 Force diagram of the contact line in three phase system of the double-liquid variable-focus lens

以图 4 中的(a),(b)两图为例,设图 4(a)的液体分界面与透镜内壁的接触角为 θ_a ,水平方向上的摩擦力为 f_a 。由于此时曲面是由从凸面向平面过渡,液液固三相系统的接触线有水平向左的运动趋势,那么该摩擦力 f_a 的方向为水平向右。同理可设图 4(b)的液体分界面与透镜内壁的接触角为 θ_b ,水平方向上的摩擦力为 f_b ,其方向为水平向左。从两图中分别可得水平方向的受力情况:

$$\gamma_{L_1L_2} \cos(\pi - \theta_a) + \gamma_{SL_1} = \gamma_{SL_2} + f_a, \quad (2)$$

$$\gamma_{L_1L_2} \cos(\pi - \theta_b) + \gamma_{SL_1} + f_b = \gamma_{SL_2}, \quad (3)$$

化简得

$$\cos \theta_a = \frac{\gamma_{SL_1} - \gamma_{SL_2} - f_a}{\gamma_{L_1L_2}}, \quad (4)$$

$$\cos \theta_b = \frac{\gamma_{SL_1} - \gamma_{SL_2} + f_b}{\gamma_{L_1L_2}}, \quad (5)$$

将(4),(5)式与杨氏方程作对比,可以看出当液液固三相系统的接触线受力平衡时,(4),(5)式后面多了一个与摩擦力有关的项。当理想的固体表面及完全纯净均匀的液体存在时,摩擦力 f 则为 0,此时即为理想状态的杨氏方程表达式,双液体变焦透镜也就

不会存在变焦迟滞的现象。

当双液体变焦透镜的外加电压值相同时,也就是说此时杨氏方程中的三种界面张力相同,对比(4),(5)式可得

$$\cos \theta_a < \cos \theta_b. \quad (6)$$

从图 3 中可以看出液体透镜的曲率半径 R 和接触角 θ 具有如下关系:

$$R = -\frac{a}{\cos \theta}, \quad (7)$$

根据双液体变焦透镜的焦距表达式:

$$f' = \frac{R}{n_2 - n_1}, \quad (8)$$

结合(7)式与(8)式可得

$$f' = \frac{a}{(n_1 - n_2) \cos \theta}. \quad (9)$$

由于图 4(a),(b)中接触角 θ 的取值范围为 $[\pi/2, \pi]$,所以可以得到,相同电压下的透镜焦距绝对值大小关系式为

$$|f'_a| < |f'_b|.$$

同理可以分析出如图 4(c),(d)所示的受力示意图,并设两图中的摩擦力分别为 f_c 和 f_d 。从图中可见图 4(c),(d)中的接触角 θ 的取值范围为 $[0, \pi/2]$,最终可以得到,相同电压下的透镜焦距绝对值大小关系式为

$$|f'_c| > |f'_d|.$$

4 变焦迟滞现象的实验验证

实验所用到的双液体变焦透镜内壁镀的疏水介电层材料为派瑞林,其膜层厚度为 $2 \mu\text{m}$ 。按照图 3 所示的方式将双液体变焦透镜连接在电源上。首先测出双液体变焦透镜在电压为 0 时的焦距,然后外加电压每升高 5 V 测一次双液体变焦透镜的焦距值,持续加电压到 120 V。接着外加电压每降低 5 V 测一次双液体变焦透镜的焦距值,一直降低到 0。由于测量工具的测量范围有限,其中 50~70 V 之间的趋近无穷大的焦距值没法测量。最后将所测得的所有点相连可以得到如图 5 所示的光滑曲线。其中实线表示电压上升阶段,虚线表示电压下降阶段。

从图 5 中可以看出在负透镜时实线对应图 4(a);负透镜时虚线对应图 4(b);正透镜时实线对应图 4(c);正透镜时虚线对应图 4(d)。实验结果显示在相同电压下,负透镜时实线上对应的焦距绝对值小于虚线上的焦距绝对值,这与理论分析的 $|f'_a| < |f'_b|$ 是一致的。正透镜时实线上对应的焦

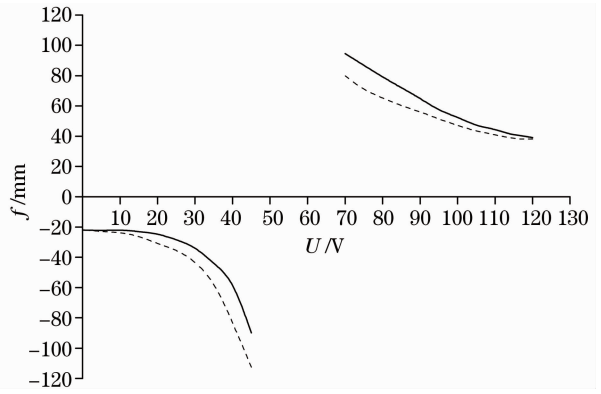


图 5 双液体变焦透镜的变焦迟滞曲线

Fig. 5 Variable-focus hysteresis curve of the double-liquid variable-focus lens

距绝对值大于虚线上的焦距绝对值,这与理论分析的 $|f'_c| > |f'_d|$ 也是一致的。

5 结 论

本文对双液体变焦透镜的变焦迟滞现象进行了深入的研究。首先从电湿效应的研究中出现的一些不符合杨氏方程的现象入手,在双液体变焦透镜中液液固三相系统的接触线上引入静摩擦力,重新对三相接触线进行实际受力分析,建立了一般情况下的双液体变焦透镜内壁接触线上液液固三相系统的力学模型,对杨氏方程进行了合理的改进。在此基础上利用双液体变焦透镜的焦距与接触角的关系,分析了在外加电压上升过程中以及外加电压下降过程中透镜焦距与电压的关系,给出了双液体变焦透镜变焦迟滞现象的原因。最终通过疏水介电层厚度为 $2 \mu\text{m}$ 的双液体变焦透镜的加电压变焦实验,给出了外加电压上升过程中以及外加电压下降过程中透镜焦距与电压的关系曲线。实验验证了双液体变焦透镜确实存在以上理论分析所给出的变焦迟滞现象。

参 考 文 献

- Li Yiyu, Chen Hao, Wang Yuanyuan *et al.*. Continuous zoom optical system for e-vision aid device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2387~2392
- 厉以宇, 陈浩, 王媛媛等. 用于电子助视器的连续变焦光学系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2387~2392
- Xu Liang, Zhang Guoyu, Gao Yujun *et al.*. Design of 8 × uncooled thermal infrared hybrid refractive-diffractive continuous-zoom lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 478~481
- 徐亮, 张国玉, 高玉军等. 8倍非制冷型红外折-衍射连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 478~481
- Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang *et al.*. Design of infrared (IR) hybrid refractive/diffractive lenses for target detecting/tracking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2084~2088

- 刘峰, 徐熙平, 孙向阳等. 折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 2084~2088
- 4 Zhan Zhenxian, Wang Keyi, Yao Haitao *et al.*. Study on curing control and focal spot measurement of aspherical liquid microlens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3212~3216
- 詹珍贤, 王克逸, 姚海涛等. 非球面液滴微透镜固化控制和焦距测量研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3212~3216
- 5 Zhu Cheng, Peng Runling, Chen Jiabi. Double-liquid lens based on electrowetting[J]. *College Physics*, 2007, **26**(6): 57~62
- 祝澄, 彭润玲, 陈家璧. 基于电湿效应的双液体透镜[J]. 大学物理, 2007, **26**(6): 57~62
- 6 M. Vallet, B. Berge, L. Vovelle. Electrowetting of water and aqueous solutions on poly (ethylene terephthalate) insulating films[J]. *Polymer*, 1996, **37**(12): 2465~2470
- 7 P. G. de Gennes. Wetting: statics and dynamics[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, **57**: 827~838
- 8 B. R. Ray, F. E. Bartell. Hysteresis of contact angle of water on paraffin [J]. *Colloid Sci.*, 1953, **8**(2): 214~223
- 9 Wang Xiaodong, Peng Xiaofeng, Min Jingchun *et al.*. Hysteresis of contact angle at liquid-solid interface [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2002, **23**(1): 67~70
- 王晓东, 彭晓峰, 闵敬春等. 接触角滞后现象的理论分析[J]. 工程热物理学报, 2002, **23**(1): 67~70
- 10 Cao Xiaoping, Jiang Yimin. Frictional property of wetting contact line and Wenzel's behavior of solid surface tension[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(5): 2202~2206
- 曹晓平, 蒋亦民. 浸润接触线的摩擦性质与固体表面张力的 Wenzel 行为[J]. 物理学报, 2005, **54**(5): 2202~2206
- 11 Sheng Jinxia, Peng Runling, Chen Jiabi. Analysis on property of double-liquid variable-focus lens based on electrowetting [J]. *Optics Instrument*, 2007, **29**(4): 23~26
- 绳金侠, 彭润玲, 陈家璧. 电湿效应双液体变焦透镜性能分析[J]. 光学仪器, 2007, **29**(4): 23~26
- 12 Simon Brandon, Amir Wachs, Abraham Marmur. Simulated contact angle hysteresis of a three-dimensional drop on a chemically heterogeneous surface: a numerical example[J]. *Coll Int Sci.*, 1997, **191**(1): 110~116
- 13 C. N. C. Lama, R. Wua, D. Lia *et al.*. Study of the advancing and receding contact angles: liquid sorption as a cause of contact angle hysteresis[J]. *Adv. Coll. Int. Sci.*, 2002, **96**(1-3): 169~191