

Research on Driving and Features of Variable Focus Liquid Lenses

Jiao Liu¹, Hua Li^{2, #}

1. School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China

2. School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China

#Email: lihua@mail.usts.edu.cn

Abstract

The advantage of variable focus liquid lenses over solid lens systems is their tunability without the use of large actuators such as servo motors. It reviews and summarizes the domestic and the foreign scientific achievements on the varifocal-liquid techniques. Variable focus liquid lenses can be categorized as tuned by the curvature radius of the lens or the liquid in use according to the concept of tunability. Depending on the driving principle of different types, variable radius of curvature of liquid lenses are introduced in details, by introducing the design of the structure, analyze advantages and disadvantages of liquid lens. Finally, for the development status of liquid lenses, it points out a new structure for the investigation of variable focus liquid lenses techniques to eliminate the effects of temperature field.

Keywords: Optical Design; Variable-focus Liquid Lenses; Electrowetting; Piezoelectric Ceramic; Dielectrophoresis

液体变焦透镜的驱动及其特性研究

刘娇¹, 李华²

1. 苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009

2. 苏州科技学院机械工程学院, 江苏 苏州 215009

摘要: 液体透镜相对固体透镜最大的优点是无需使用伺服电机等大型驱动装置, 便可实现变焦。通过对国内外液体变焦技术的研究进行总结, 依据不同的变焦机理对液体透镜进行分类, 把液体变焦形式分为变曲率半径型和变内部液体型。变曲率半径型液体透镜的驱动原理繁多, 分别进行详细介绍。主要从变焦机理, 设计结构, 透镜的成像优缺点等方面分析。最后, 基于液体透镜研究现状, 提出一种新型变焦液体透镜结构来改善温度场对液体透镜性能的影响。

关键字: 光学设计; 液体变焦透镜; 电润湿; 压电陶瓷; 介电电泳

引言

焦距是几何光学中透镜成像的主要参数之一, 它是成像平面到透镜光心距离。变焦透镜的使用可以追溯到 20 世纪 20 年代末, 在这之前为了造成运动的幻觉, 大多采用推拉定焦透镜的方法。在推拉透镜中, 摄影机在空间运动, 通过三维的拍摄过程产生二维的画面。随着现代技术的发展, 变焦透镜在手机摄像头, 照相机^[1], 摄像机, 太空探测器、医学检查等领域有着越来越广泛的应用。由于现代精密光机电设备对变焦透镜的精密性和像质的要求越来越高, 这对传统机械系统变焦透镜提出了非常苛刻的要求, 使传统光学变焦透镜的机械结构变得越来越复杂, 同时复杂结构的光学变焦透镜易磨损, 使用寿命低, 而且对于像手机摄像头, 内窥镜等小尺寸的系统而言传统光学透镜要实现机械式变焦是非常困难的。因此研究简单、紧凑且响应快的变焦透镜具有重要的意义。

微光学液体透镜的提出正是为解决变焦透镜目前存在的问题, 在近年发展起来的一种小型化变焦透镜结

构^[2]。它采用液体作为光学介质，利用微流体技术控制来驱动液体改变液体几何形状或折射率从而实现变焦的目的。在微光学液体透镜中，透镜的几何外形可以采用各种各样的方式调控。对于由固液界面组成的透镜，如可调弹性材料聚二甲基硅氧烷（PDMS）可通过改变压力从而控制透镜形状。聚二甲基硅氧烷弹性模量低，在可见光范围内光吸收率较小，因此成为微光学液体透镜中模塑和复制工艺中的理想光学材料^[3,4]。如果透镜是由液液界面或者气液界面组成，则可采用流体力学，电润湿或者其他物理效应来改变透镜外形。微光流体装置内部液体折射率的改变可以通过物理场的调控来改变，如电磁力控制，热光控制，压力控制，电润湿控制，光学控制，以及电光控制等。溶液的浓度改变也可以用来控制折射率的变化。当液体的几何形状或混合液体溶液的折射率改变后，透镜成像的焦距也随之改变，从而达到变焦的目的。

微光学液体透镜可通过改变焦距调节出不同放大倍率，从而改变物体成像分辨率，得到超大景深，实现高清成像。这种液体变焦透镜最大的特点是小型化。它的功耗仅为传统拍照手机透镜的 5%-15%，而且其生产成本也仅为普通摄像头的 1/3。微光学液体透镜是微光学技术和微流体技术交叉结合的产物。它是利用液体，流体以及光之间的相互作用形成一种新型的功能性光学器件。基于这一技术，国内外的学者进行了广泛的探索，提出了多种各具特色的结构，本文主要从工作原理和结构等方面对液体变焦透镜的研究及发展趋势进行综述。

1 变形状透镜

1.1 电润湿液体透镜

润湿指固体表面的一种流体被另一种流体所取代的过程，而电润湿指由电场引起的润湿。电润湿现象于 1876 年由法国科学家布里埃尔·李普曼首次发现。通常情况下，研究人员研究电润湿现象时使用的液体为水或者无机盐的水溶液。而现在大多采用无机盐水溶液或不溶于水的油脂，而且要求油脂和水溶液的密度相同。最初设计的电润湿液体透镜只有水一种液体，改良后的电润湿液体透镜把水溶液和油脂这两种液体封装在固定体积的金属或橡胶壳内形成双液体透镜，两种液体的交界面相当于一个透镜。但是，这种透镜通电后水溶液的电解较为剧烈，严重影响透镜成像。为了解决这一难题，1993 年，法国科学家鲁诺·伯格创造性提出在金属电极和导电液体之间增加一层绝缘层形成介质上电润湿的想法，这一方案不仅可以隔离水溶液使之避免电解，而且使液滴形状变化幅度显著增大^[5]。介质上电润湿工作原理如图 1 所示。介质上电润湿在金属电极和水溶液之间增加了绝缘电介质层和疏水层，并采用水溶液和油脂组成的双液体透镜结构。电压加在电解液和金属电极之间，这时整个装置相当于一个可变电容器，改变外界电压，使电容器两端电压升高，从而电容器两极板电量增多，在面电荷密度固定的条件下，电容器极板表面积变化量必须与积聚在绝缘层两侧的等量异性电荷的变化量成正比。

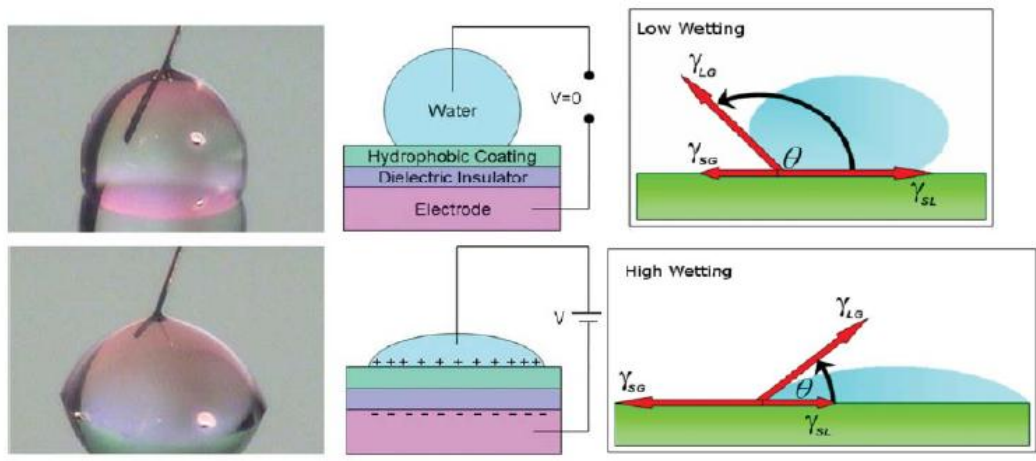


图 1 电润湿原理图

越来越多的异性电荷不仅使电容器极板表面积增大，而且促使电解液与电极之间相互吸引的静电力越来越强，静电力越来越强，静电力的增大最终导致电解液对油滴产生挤压作用。因此，电解液开始增大与疏水性材料接触的面积。与此同时，由于容器内空间和液体体积均不变，电解液沿容器周围液面上升，它会填补原本油占用的空间，从而使两种液体界面的弧度产生改变，改变透镜的曲率半径，最终达到改变透镜焦距的目的，这就是电润湿现象的机理^[6-7]。通常采用加盐的水溶液作为导电液体，加盐一方面是为了增强液体的导电性，另一方面是为了扩大透镜的可操作温度范围。电润湿效应的物理机制可以归结为杨氏（Lippman-Young）方程：

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_0) - \frac{\epsilon\epsilon_0}{2\gamma d} V^2 \quad (1)$$

其中 θ 为润湿角，润湿角是指在两个不同界面下，其中一个状态界面接触另一个界面所形成的夹角。因为溶液接触不同界面时，溶液表面的分子与内部的分子受力情况不同，在表面层中存在表面张力，润湿角用于表征表面张力的大小，衡量液体对固体的润湿程度的好坏。 θ_0 为没有施加电压时的初始润湿角， ϵ 为介质层的介电常数， ϵ_0 为真空介电常数， γ 为两种不相容液体之间的界面张力， d 是介质层厚度， V 是施加在固体介质与液滴之间的电压。由杨氏方程可以看出，当电压发生变化时，固-液之间的润湿角 θ 发生变化，透镜的曲率也随之而变。

Philips 公司和 Varioptic^[8-9] 公司根据电润湿透镜生产出透镜实体。Philips 的液体透镜的结构简图如图 2 所示。Philips 公司所推出的这款双液体透镜是由导电液体和绝缘液体组成，导电液体使用无机盐的水溶液，绝缘液体则采用硅油，两种液体被密封在圆筒状的金属电极内部。该透镜可在 5cm 到无穷远范围内变焦，反应时间不到 100ms，经测试 100 万次的操作对其毫无影响。Philips 公司所推出的这款双液体透镜具有变焦速度快，体积小，耗电量低，寿命长等诸多优点。但这种液体透镜的制作工艺复杂，光轴的稳定性和轴也不容易保证，而且由于使用的液体主要是水，因此适用的温度范围有限，温度太高或者太低都无法使用。

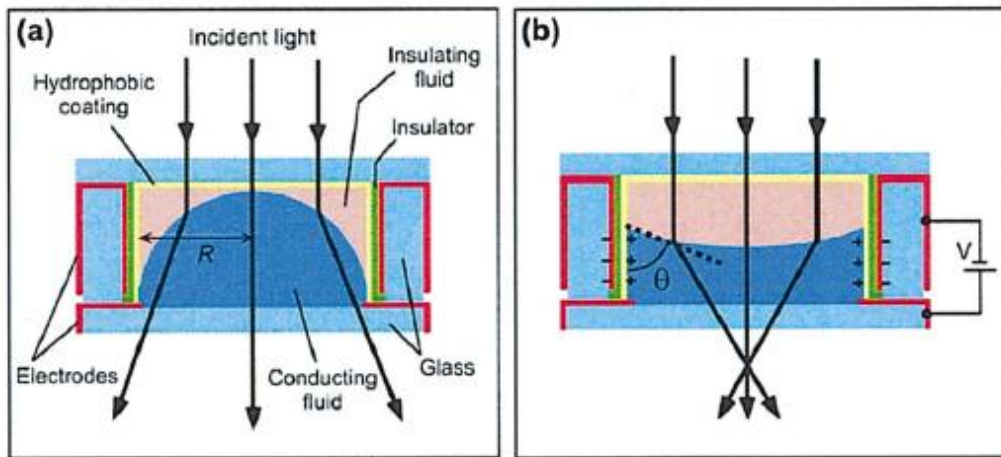


图 2 Philips 液体透镜工作原理

法国 VariOptic 公司研制的液体透镜变焦的基本原理依然是电润湿，其结构和工作原理如图 3 所示。这种液体透镜是由两个玻璃底板构成，其中一块玻璃底板上内嵌了一个圆形金属圈，将导电液体滴在这个金属圆圈的中央，使该导电液体与金属圆圈直接接触，二者共同作为液体透镜的一个电极。在另一块玻璃底板上内嵌的则是一个圆锥形状的金属圈，这个圆锥形金属圈表面必须涂覆一层绝缘层，然后在这块底板和绝缘层上再涂覆一层疏水层，在这之后向里面填充不具备任何导电性能的油性液体。最后把这两部分结合起来进行封装，并用一种绝缘介质将两个金属电极隔离开。这种结构的透镜在光轴的稳定性和轴方面较 Philips 公司的产品有很大改进。因为对于液体透镜而言，保持光轴的稳定性和轴是很大的难题。变焦时，由于液体与器壁及液体之间的粘滞作用，液体对称部分的变化步调不可能完全一致，从而使光轴在变焦过程中会发生偏离。如何在变焦

过程中保持光轴的稳定性是透镜设计和使用中非常重要的问题，如果单纯采用平面结构，则当光轴产生偏离时是无法自动恢复的。VariOptic 的液体透镜把透镜腔设计成了锥形，这种结构对光轴具有自动调节功能，使液体透镜在光轴稳定性方面有了很大的提高。但它的变焦范围较小，只有几毫米，反应时间较慢，最慢需要 300ms。

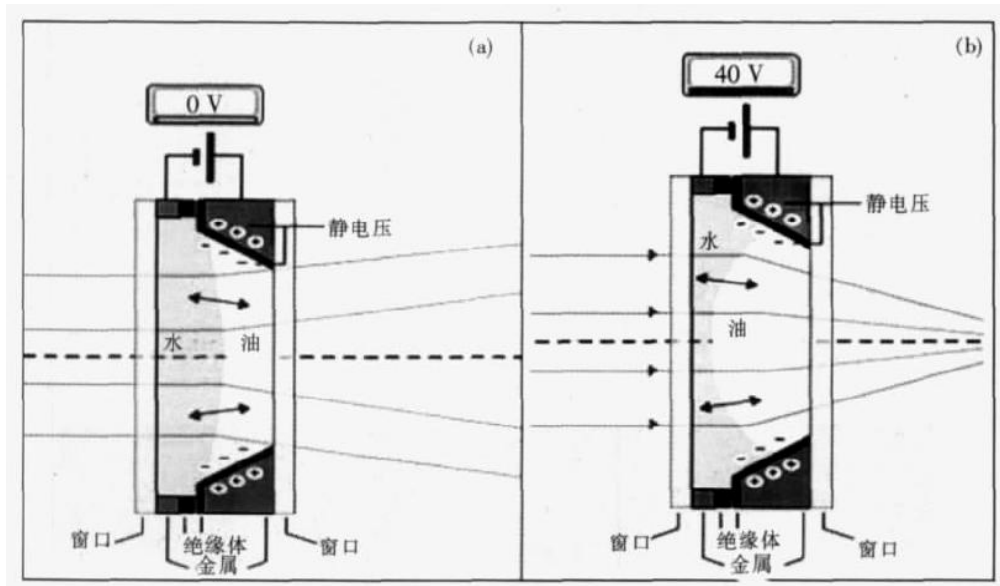


图 3 VariOptic 公司液体透镜结构和工作原理

1.2 声辐射压力液体透镜

声辐射压力是由于两种不同介质间相异的声能密度而产生的一种静压力，它由这两种介质的声速和密度决定。Loópez 和 Hirs 等开发了一种振荡液体透镜^[10]，它采用可听声声辐射压力驱动液体变形从而改变焦距，使其可被用作变焦透镜。图 4 为东京工业大学 Daisuke Koyama 组设计的声辐射压力液体透镜结构示意图^[11]，这款透镜由一个圆柱形铝壳内填充两种不相容液体（在此指水和硅胶油）构成。透镜底部是一个锆钛酸铅压电陶瓷（PZT）环换能器。透镜中心两块圆形石英玻璃做光通道。这种结构利用 PZT 的逆压电效应，把输入的电压信号转换为 PZT 的机械振动。锆钛酸铅压电陶瓷环在厚度方向极化。当透镜的电极被接通，PZT 的振动传输到透镜外表面，并在外表面产生全反射，这时 PZT 环中心的液体上产生一个声驻波，也就是说液体和固体的接触面上，固体的振动位移转化成了液体的声压，并且在透镜的中心轴上产生一个较大的声压^[12]。这款液体透镜反应时间较短，经测试它的最快反应时间是 6.7ms，比电润湿液体透镜快了一个数量级。在输入电压为 39V 时的焦距变化范围是 7-14.5mm。虽然这款液体透镜可以高速聚焦，并且能耗比较小，但是它会随着驱动声压的连续振荡而同步振荡，从而使焦点在光轴方向连续扫描移动，导致焦距不稳定。另一方面，这种透镜对周围温度非常敏感，因为透镜的光学性质依赖液体间的表面张力和运动粘度，表面张力又和润湿角直接相关，两种液体间的润湿角又决定透镜的轮廓，据报道，随着运动粘度的增加声波耗损逐渐增大，所以表面张力和运动粘度直接影响透镜轮廓。此外，空化气泡和乳状液滴的产生也将大大缩短透镜的使用寿命。为此，Daisuke Koyama 还提出了一种简单而紧凑的结构^[13-14]，这种透镜仅使用硅胶，使透镜结构更加简单，且受周围环境，温度等影响较小。从而最大限度降低温度对透镜的影响，且避免了空化气泡的干扰。这种改进的结构同样使用锆钛酸铅压电陶瓷换能器作制动装置，不同的是，它采用的是 PZT 的径向振动模式。透镜被驱动时 PZT 环中心的硅胶上将有一个声驻波产生，径向振动的振动位移在内径和外径方向上的相位是相反的。仿真得出硅胶上产生一个有两个节圆的声驻波，在中心轴上声压将达到最大。这种结构的透镜的变焦范围较前一种有了较大的改善，驱动电压为 21V 时的变焦范围是 20-89mm，但它最大的缺点是响应时间较长为 0.3s。采用高速摄像机得到的连续成像图像如图 5 所示。

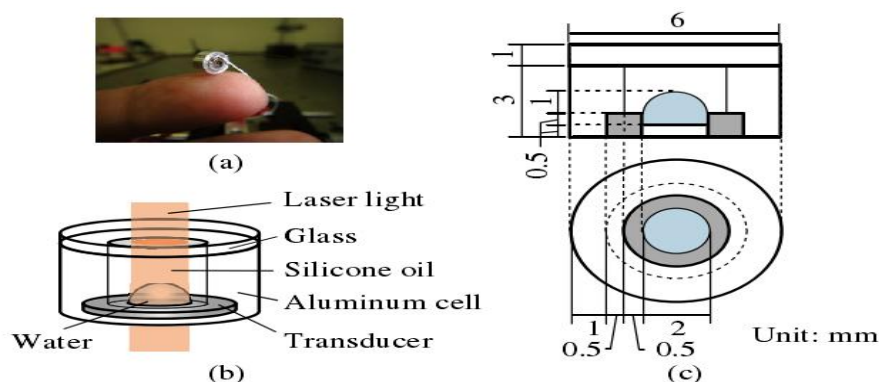


图4 PZT 液体透镜

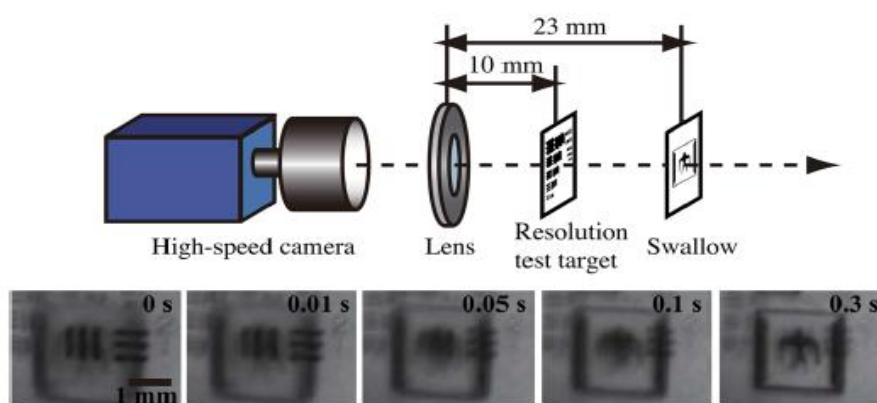


图5 径向振动 PZT 液体透镜成像图

1.3 液压力驱动液体透镜

采用液压力压缩液体，改变液面形状从而调节焦距的液体透镜也由两种不相溶液体组成。不相容界面存在表面张力差，因此在两种液体的交界面会形成一个弯曲的表面。考虑到两种液体的折光率也不同，当光通过这个交界面时就会出现折射现象，因而整个装置可以等效为一个透镜。透镜通过液压力改变液-液界面的曲率，从而达到变焦的目的。H. Oku^[15]等用压电换能器做变焦制动器，设计出液体变焦透镜。这种高速液体透镜的阶跃响应时间短至 2ms，最小均方根波前误差是 80.3nm，这表明透镜的响应时间相当短，成像像质也是比较优良的。但是由于压电制动器的行程是较小的，只有 10 μ m，所以不得不采用一个内置液压放大器，这个液压放大器的体积较大，使透镜整体体积增大，结构较为冗杂，不利于微小结构的实现，从而无法应用在内窥镜，照相物镜等实际应用中。两种液体分别为脱气水和聚二甲基硅氧烷（PDMS）。透镜结构简图如图 6 所示，它可以在 16-93mm 范围内变焦，最快响应时间为 35ms。体积过大是这款液体透镜的一大缺陷。

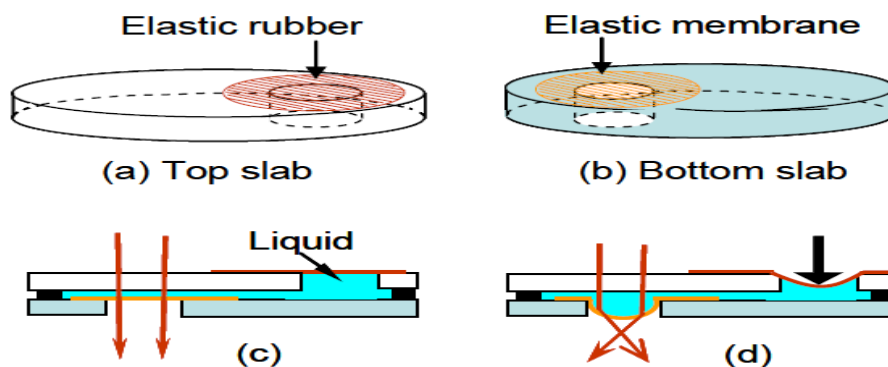


图6 液压液体透镜

1.4 介电电泳液体透镜

电泳指均匀静电场中，带自由电荷的物体如离子，胶体粒子等，因物体内部只有单一的正电荷或者负电荷，由于同性相斥异性相吸而受异性电荷吸引，向异性电极移动的现象。介电电泳描述的是位于非均匀电场的介电体由于介电极化的作用而产生的平移运动。由于电场非均匀，被极化的介电体的正负表面电荷中心相当于电偶极子，并且所处位置的场强不同，受到的作用力大小不同。当其中某一物体受作用力之差达到足够大时，该物体就被拉向强电场方向，这种由于物体的介电性质而引起的运动叫做介电电泳现象。这个由于两边的局部电场强度不同而产生的净力被称为介电电泳力。表征介电体的电性能的一个重要参数是介电常数 (ϵ)，电介质微粒向更强的电场强度的方向移动，称为阳性介电电泳，而向更弱的电场强度的方向移动，称为阴性介电电泳。介电电泳力的大小取决于悬浮微粒的大小，电场强度和频率，悬浮媒介的粘度等参数。所以，与电泳或其他常规分离方法相比，介电电泳拥有更高的选择性和更易的控制性。介电电泳力通常用于驱动液晶液体透镜。介电电泳力驱动液晶液体透镜的示意图如图 7 所示，液晶材料被封装在两片铟锡氧化物 (ITO) 导电玻璃之间，导电玻璃上焊接 50 μm 宽且间距为 50 μm 的 ITO 电极，电极上覆盖一层特氟龙作为疏水层。非均匀交流电场内的介电电泳力驱动液晶分子重新分布。和水相比，液晶材料不会产生微气泡和电解作用。拥有较低的电导率，从而使焦耳热效应大大降低，减小了能耗。和水相比，液晶还具有较低的饱和蒸汽压，从而降低了封装的要求^[16]，透镜焦距在 1.6-1.9mm 之间可变，200V 时的响应时间 220ms，透镜对字母“F”所成的像如图 8 所示，由图可以看出透镜边缘的球差和畸变比较严重。而介电电泳液体透镜的像差较为严重这一缺点是由于液晶的双折射效应引起的。液晶是一种光学各项异性的绝缘介质，双折射效应正是来源于液晶材料的光学各向异性，双折射效应使液晶透镜的成像变得模糊。为了消除液晶的双折射效应，主要方法是使液晶由各向异性相转为各向同性相，具体操作时必须使实际工作温度大于液晶的相转移温度。

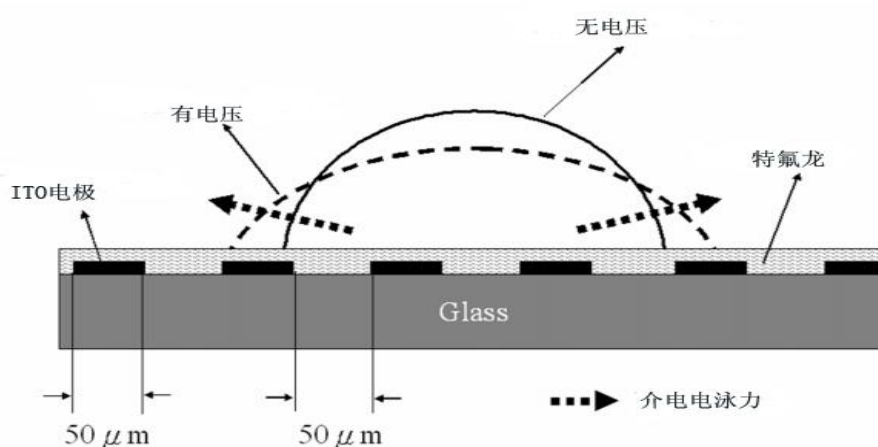


图 7 介电电泳液体透镜原理图

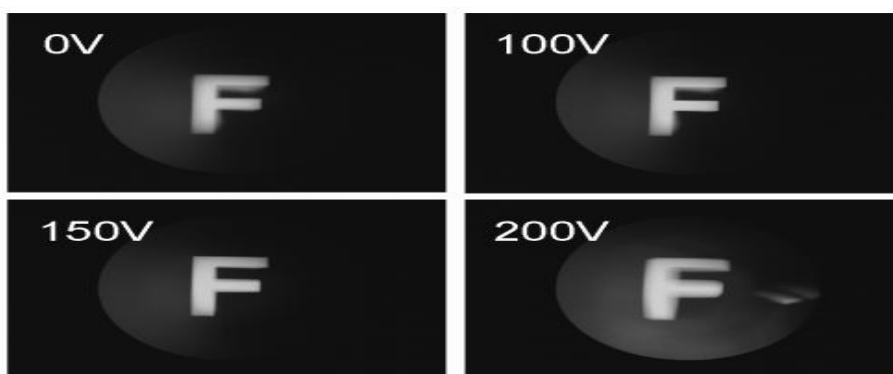


图 8 介电电泳液体透镜成像图

1.5 电动液体透镜

电动装置能调制透镜腔室的压力，改变透镜的形状，从而达到变化曲率的目的。电磁或者电化学驱动原理都能达到这个目的。Choi 和 Lee 等^[17-18]利用电活性聚合物（EAP）产生驱动压力。EPA 能诱导出很高的压力，而且这种驱动方式的电压只需达到 50V。Lee 和 Lee^[19]则使用金制的嵌入式微弹簧圈产生驱动压力。电场能控制表面张力，表面张力又可以转化为透镜的曲率半径。López^[20]等利用水溶二茂铁基活性物质的溶液的氧化还原反应控制表面张力。透镜是由一个填充在半径为 0.89mm 的小孔中的表面活性溶液组成。其原理图如图 9 所示。先在特氟龙基片上钻一个小孔，孔两边的基片上接上电极，电极被固定在基片的两面，表面张力随氧化反应增加，还原反应减小。因此，当给电极施加电压后，液滴一边的曲率半径会减小，而另一边的曲率半径则增大。

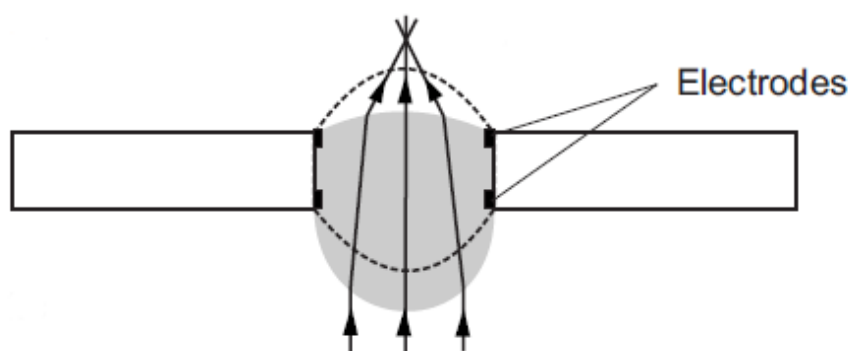


图 9 电活性聚合物透镜原理图

2 变液体透镜

传统光学器件设计时假设光学材料的折射率大于周围介质的折射率。高折射率的双凸透镜具有聚焦效应。随着 PDMS 和折射率匹配液体的使用，使得低折射率的双凹透镜的聚焦的实现成为可能。肉桂醛是一种由肉桂中提取出来的具有高折射率（ $n=1.62$ ）且相当稳定的液体。这种液体和折射率匹配液体一样有相当优质的粘性性质而且微溶于水和酒精。这一性质使肉桂醛能和上述液体形成稳定的不相溶的流体界面。

光学器件设计时所利用的光学材料的另一种特性是物质的扩散可控制性。微流控层流条件下，物质的浓度分布是由分子的扩散运动决定的。也就是说，浓度梯度或者折射率梯度可以在这种光学材料中产生。以 $CaCl_2$ 溶液为例，当 $CaCl_2$ 在水中的浓度由 0M 增加到 5M 时，溶液的折射率相应的由 1.33 增加到 1.44。通常用佩特莱系数表示平流输送和分子扩散之间的相对变化率，佩特莱系数是一个无量纲的系数，表达式为：

$$P_e = \frac{UL_{ch}}{D} \quad (2)$$

其中，U 是流动速度， L_{ch} 是特征扩散长度，D 是分子扩散系数。在平流输送相对分子扩散而言占主导地位时，佩特莱系数越大，流量越大。因此较高的佩特莱系数意味着更大的折射率梯度。较大的折射率梯度又意味着更清晰的光束弯曲度，从而可以得到更短的焦距。焦点沿液体流向方向和垂直于流向的方向上变化。通过改变周围液体的流量比率，高浓度面集中到一边，使得光束的焦点偏离了光轴。

另外一种可利用的光学材料的光学性质是悬浮纳米粒子的散射。和小分子比起来，纳米粒子有较小的散射率。较小的散射率使较小折射率的液体在流体中的存在成为可能。散射性质决定悬浮纳米粒子在波导中比透镜设备中更稳定^[21]。

通过改变浓度分布也可实现较为新颖的微光学液体透镜。Wolfe 等^[22]利用两种中心液流的扩散合并设计了一种新型分流器。两束乙二醇中心液体被周围的低折射率液体分开。控制佩特莱系数，使液体的佩特莱系数较低，这时两条中心液体合并成为一条具有高折射率的液体。这种中心液体的浓度分布可以把单一入射光分流成两条具有相同强度的出射光。乙二醇的扩散系数 $D=5 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{s}$ 时的光学分流器可混合出相同强度的

光，混合情况的好坏决定分流的好坏。

正如许多其他物理变量，折射率和温度紧密相连。通常情况下，折射率随温度升高而减小。由于液体的热扩散比分子的扩散系数高两个数量级，所以当佩特莱系数等于 100 时液体的流量大小也不同。使用温度场调制折射率的唯一缺点是大多数液体的热光系数 dn/dT 过小。Tang 等^[23]设计了一种温度场梯度，使对流液体的折射率相应的随温度场的变化而变化。

液晶的折射率也可以通过施加电场来改变。这种透镜采用特殊高分子聚合物向列相液晶材料，由于其分子结构的特点，液晶具有双折射效应，对不同的偏振光具有不同的折射率。在两边液晶平板电极上施加轴对称非均匀电场，这时液晶透镜折射率是电场平方的梯度，把液晶封装在两块平板 ITO 导电玻璃中，两端电极通电，则单个的液晶分子受电场力重新分布，透镜焦距在正常光轴和异常光轴之间连续地随施加电压的改变而变化^[24]。

3 基于压电驱动离子液体透镜研究

针对液体透镜中水溶液的温度限制问题以及蒸发和空化气泡等问题，我们使用更稳定的透明液体离子液体替代水溶液。离子液体是完全由阴、阳离子组成且常温下呈液态的离子化合物。与易挥发的有机溶剂相比，离子液体没有可测量的蒸汽压、不可燃、热容大、热稳定性好、离子电导率高、电化学窗口宽，被视为绿色清洁溶剂。我们组所设计的基于压电陶瓷的逆压电效应的离子液体变焦透镜如图 10 所示。

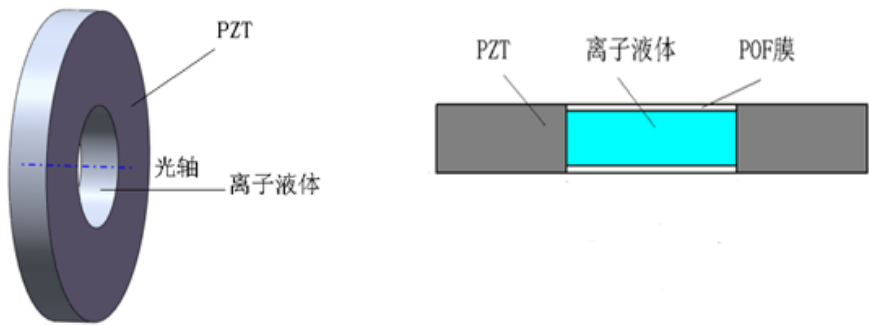


图 10 基于压电驱动离子液体变焦透镜结构图

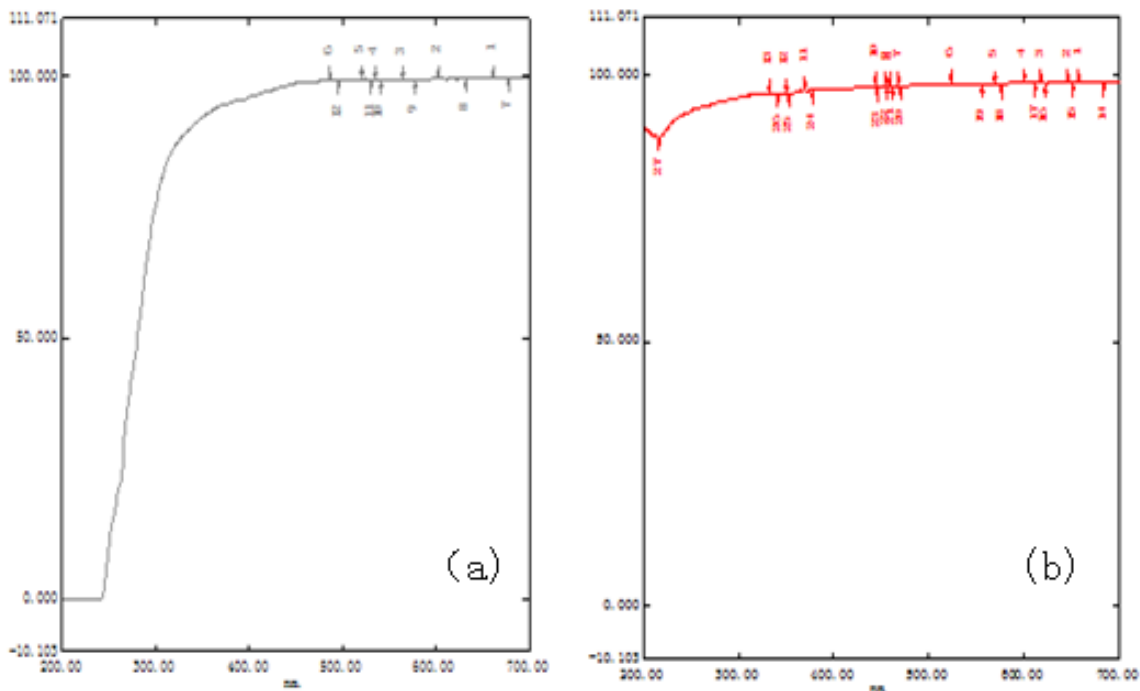


图 11 (a)离子液体透射率(b)去离子水透射率

轴向极化的压电陶瓷内孔填充一定量的离子液体，并用 POF 薄膜在无氧无水的手套箱中进行封装。在无水环境中封装可以防止离子液体吸水，离子液体透明且具有粘弹性。所用离子液体的熔点为 -71°C ，与盐水溶液相比具有较宽的液态范围，离子液体的熔点和凝固点随阴离子的变化而变化。离子液体的液态范围参数可调节，在低温环境下能更好地应用。相比于传统的有机溶剂，离子液体的蒸汽压极低，几乎不挥发。离子液体在可见光波段的透射率如图 11 所示，可见光波段透射率几乎达到百分之百，而紫外光波段则具有较大的可调范围。透射率表示透过后的光通量和入射光通量之比，为得到优质的成像结果，通常采用光圈来调节进入机身感光面的光量，而光圈的调节范围和镜头透光量的大小有关，离子液体透镜透射率可以通过改变阴阳离子的组分来调节。透镜所用离子液体粘度在 25°C 时为 98cp（厘泊），随温度的升高，离子液体的粘度逐渐降低，且降低的速率很快。密度为 $1.19\text{g}/\text{cm}^3$ ，其表面张力在 25°C 时测得 $37.44\text{mN}/\text{m}$ 和水（ $75.28\text{mN}/\text{m}$ ）相比具有较小的表面张力。表面张力和物质的属性有关，物质不同，表面微结构不同，表面分子间的作用力也就不相同。所以，不同物质表面张力差别很大。同时，我们发现离子液体的表面张力受温度的影响比较明显，温度升高离子液体的表面张力减小。压电陶瓷环在外电场的作用下的振动模态用商业 FEA 有限元软件模拟，选用耦合单元 solid98 来完成振动模态、谐振频率以及振幅的仿真。

我们采用的压电陶瓷为铅钛酸铅压电陶瓷（PZT），PZT 压电陶瓷具有压电效应。压电效应是法国物理学家居里兄弟（P&J.Curie）于 1880 年发现的。逆压电效应则由历柏门在 1881 年理论上预计并实验验证其确实存在。PZT 压电陶瓷压电性能优越，机械强度好，易于加工成各种不同的形状和尺寸，又因其具有非水溶性，能得到所需的各种振动模式等优点，因此有着广泛的应用。在适当的方向对 PZT 陶瓷施加作用力时，内部的电极化状态会发生变化，在电介质的相对表面内会出现与外力成正比的符号相反的束缚电荷，这种现象叫压电效应。反之，若在电介质上加一电场，在此电场作用下，电介质内部电极化状态会发生相应变化，产生与外加电场强度成正比的应变现象，我们称这一现象为逆压电效应。所设计新型液体透镜的驱动原理如图 12 所示。（A）是外部电压激励为零时透镜中心液滴形状，此时液滴呈自然平面。当透镜电极接上负载时，环形 PZT 压电陶瓷由于逆压电效应而产生轴向形变，与此同时 PZT 环径向也产生相应形变，这时压电陶瓷中心液滴形状将出现如图 12（B）所示的变化。液滴的形状和负载电压以及谐振频率相关。通过控制外部激励可以实现不同焦距的变焦。

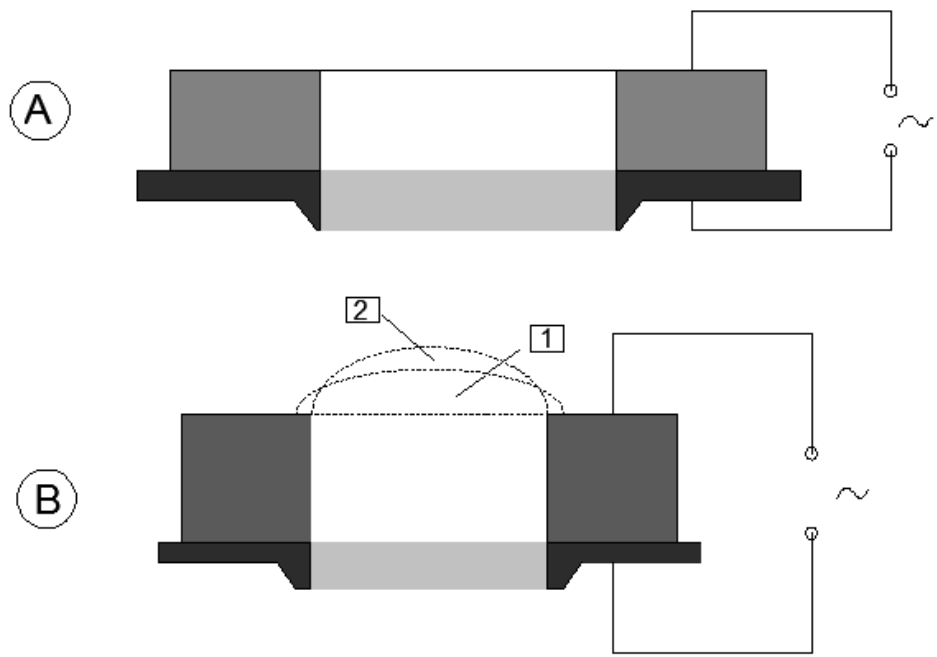


图 12 离子液体透镜变焦原理图(A)未加外部激励(b)施加外部激励

4 结论

液体透镜在小型化以及可调性方面的显著优势吸引着大批微流控以及微光流体透镜的研究团体的研究。已报导液体透镜可分为变形状型和变液体型。两种基本调控方式分别是控制透镜的曲率半径或者控制透镜的液体的折射率。透镜的形状可由许多驱动装置控制。从复杂的电润湿驱动到声压, 液压以及最简单的电压驱动。改变透镜液体和相应的折射率需要流体控制器件, 例如微型阀门和微型泵浦。由于许多液体的折射率和温度场以及电磁场有关, 这些物理场可用来调制折射率而不改变液体。利用透镜腔室以及出入口位置的变化设计, 有可能实现既包含凸面又包含凹面的复杂透镜。液体透镜解决了传统变焦透镜结构复杂, 体积庞大的问题, 而且液体透镜变焦机理多样化、结构可设计性多样化有利于在不同环境不同场合中实现变焦拍摄。

REFERENCES

- [1] Runling Peng, Jiabi Chen, Songlin Zhuang. "Design and Analysis of a Variable-focus Optical System Based on Electrowetting." *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1141~1146
- [2] ZhongCheng Liang, Rui Zhao. "Microfluidic optic optics and its application." *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(6): 16-18
- [3] X. Yu, Z. Wang, and Y. Han. "Microlenses Fabricated by Discontinuous Dewetting and Soft Lithography." *Microelectron. Eng.*, 2008, 85(9): 1878-1881
- [4] N. Chronis, G. Liu, K. H. Jeong, and L. Lee. "Tunable Liquid-filled Microlens Array Integrated with Microfluidic Network." *Opt. Express*, 2008, 11(19): 2370-2378
- [5] B. Berge. "Liquid Lens Technology: Principle of Electrowetting Based Lenses and Applications to Imaging." *IEEE*, 2005, 227-230
- [6] Emilie Seyrat and Robert A. Hayes. "Amorphous Fluoropolymers as Insulators for Reversible Low-voltage Electrowetting." *Journal Of Applied Physics*, 2001, 8(1), 90(3): 1383-1386
- [7] Frieder Mugele and Jean-Christophe Baret. "Electrowetting: from Basics to Applications." *J. Phys.: Condens. Matter*, 2005, 17: R705-R774
- [8] S. Kuiper and B. H. W. Hendriks. "Variable-Focus Liquid Lens Form Miniature Cameras." *Applied Physics Letters*, 2004, 8(16), 85(7): 1128-1130
- [9] B. Berge and J. Peseux. "Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting." *Eur. Phys. J. E*, 2000, 3: 159-163
- [10] C. A. López and A. H. Hirs, "Fast Focusing Using a Pinned-contact Oscillating Liquid Lens." *Nature Photon*, 2008, 2: 610
- [11] Daisuke Koyama, Megumi Hatanaka, Kentaro Nakamura etc. "Ultrasonic Optical Lens Array with Variable Focal Length and Pitch." *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5256-5258
- [12] Daisuke Koyama, Ryoichi Isago, and Kentaro Nakamura. "Compact, High-speed Variable-focus Liquid Lens Using Acoustic Radiation Force." *Opt. Express*, 2010, 11(22), 18(24): 25158-25169
- [13] Daisuke Koyama, Ryoichi Isago, and Kentaro Nakamura. "Ultrasonic Variable-focus Optical Lens Using Viscoelastic Material." *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100: 091102
- [14] D. Koyama, and K. Nakamura. "Ultrasonic High-Speed Variable-Focus Optical Lens." *IEEE Global Conference on Consumer Electronics*, 2012, 1: 54-55
- [15] Hongwen Ren and Shin-Tson Wu, "Variable-focus liquid lens," *Opt. Express*, 5(14), 15(10), 5931-5936 (2007).
- [16] Chih-Cheng Cheng, C. Alex Chang, J. Andrew Yeh. "Variable Focus Dielectric liquid Droplet Lens," *Opt. Express*, 2006, 5(1), 14(9): 4101-4106
- [17] S. T. Choi, J. Y. Lee, J. O. Kwon etc. *Proc.*, 2009, SPIE 7208: 7208P
- [18] J. Y. Lee, S. H. Choi, S. W. Lee etc. *Proc.*, 2009, SPIE 7426: 742603
- [19] S. W. Lee and S. S. L. "Focal Tunable Liquid Lens Integrated with an Electromagnetic Actuator" *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90: 121129
- [20] C. A. López, C.-C. Lee, and A. H. Hirs. "Electrochemically Activated Adaptive Liquid Lens" *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87: 134102

- [21] R.S.Conroy, B.T.Mayers, D.V.Vezenov etc. "Optical Waveguiding in Suspensions of Dielectric Particles" Appl. Opt,2005,44:7853
- [22] D.B.Wolfe, D.V.Vezenov, B.T.Mayers etc."Diffusion-controlled Optical Elements for Optofluidics."Appl.Phys. Lett,2005, 87: 181105
- [23] S.K.Y.Tang, B.T.Mayers, D.V.Vezenov etc."Optical Waveguiding Using Thermal Gradients across Homogeneous Liquids in Microfluidic Channels." Appl. Phys. Lett,2006,88: 061112
- [24] Susumu Sato."Applications of Liquid Crystals to Variable-Focusing Lenses,"Optical.Review.6 (6), 471-485(1999).

【作者简介】



¹ 刘娇（1990- ），女，汉族，研究生，主要从事光学仪器与技术方面的研究。2012-2015 苏州科技学院光学工程专业。
Email: ljusts@126.com

² 李华（1961-） ，男，汉族，博士，研究生部学科办主任，主要从事压电驱动技术应用，精密与超精密制造技术方面的研究。Email: lihua@mail.usts.edu.cn