

液体透镜发展现状*

郑浩斌[†] 何焰蓝 丁道一 康强

(国防科学技术大学理学院 长沙 410073)

摘要 文章介绍了液体变焦透镜的发展现状. 从压力型液体透镜到纯电力控制的液体-空气界面的透镜,再到操作较为灵便的运用“电浸润”方法控制的封闭式液-液界面透镜,最后到能自动调节光轴的改进型透镜,文章均进行了介绍,其中着重介绍了改进型液体透镜的结构、运作机理、自动调节光轴的功能及其他优异的性能.

关键词 液体透镜,疏水性,电浸润法,电压

Milestone developments of liquid lenses

ZHENG Hao-Bin[†] HE Yan-Lan DING Dao-Yi KANG Qiang

(Science College, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The development of liquid zoom lenses is reviewed, ranging from pressure force lenses to liquid-air interface lenses controlled purely electrically, to sealed solution-oil interface lenses controlled by the convenient method of electro-wetting, and finally to advanced lenses that are capable of self-adjustment of the optical axis. An advanced type of liquid lens will be described in detail, covering its construction, operation, automatic adjustment of its optical axis, and its other excellent performance characteristics.

Keywords liquid lens, hydrophobia, electro-wetting, voltage

1 引言

随着人类生活的逐步提高,人们对各种各样产品的要求也越来越高.普通的多透镜组合的成像系统因其机械部件繁多、操作不灵便、制作成本高等固有缺点已不能完全满足人们的需要了,人们希望能在同样达到成像目的的前提下,拥有一个更为轻便的成像系统.

近几年来,国外一些公司破除了多年来人们对固体透镜的认识,另辟蹊径,使用液体作为透镜的主要组成部分,研制成功一种新型的透镜——液体变焦透镜,取得了很大成功.

2 液体透镜的定义

液体透镜是使用一种或多种液体制作而成的一个无机械部件,并通过控制液面形状无限可变的透镜.它与传统成像系统的最大区别在于:传统的成像

系统都是使用具有固定焦距的树脂或玻璃等透明物质做成的一系列透镜的组合,而新型的液体透镜成像系统却仅仅是由一个可变焦的透镜组成的.

3 液体透镜的发展阶段

早在1965年,弗兰克·赫伯特在他的科幻小说《沙丘》里就提到过一种叫做“油透镜”的可变焦透镜,是它给科学家们赋予了灵感.30多年后真正的液体透镜也终于诞生了,这就是美国科学家研发出的一种集成型液体变焦透镜(liquid zooming lens),一种以液压控制的液体透镜.

加州大学圣地亚哥分校(UCSD)的研究团队发明的液体透镜是由两个装满液体的透镜腔所组成,以背靠背方式紧贴在玻璃基板的两侧.腔体则是由具有弹性的聚二甲基硅氧烷(PolyDiMethylSilioxane,

* 2007-07-30 收到初稿,2007-09-26 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: serretzheng@163.com

PDMS)所制成,直径约20mm,厚度只有8mm,在每个腔体中注入63%的铬酸钠溶液(折射率=1.5),并以PDMS薄膜密封,透镜腔的出、入口设有活塞,并由一个与腔体集成在一起的微型泵来控制压力,进而改变透镜的焦距.这种集成型液体变焦透镜是利用液体的连通原理,通过作用于与液体透镜连通的另一个液体容器,用挤压或拉伸力使之产生物理形变来控制其焦距,这种控制方法属于机械力控制.

2003年1月28日, Lucent公司研究部门的科学家推出世界上第一款纯电力控制的液体变焦透镜,在电场作用下能改变自己的光学特性.这种液体透镜是在带有特殊涂层的基底上由一种导电液滴(例如硫酸钾溶液)形成的,在基底上安放有触点,在这些触点上加电就能控制透镜的焦距,做成的产品大小可从几十微米至几毫米不等.

由于它的透镜表面是液体与空气的界面,故变焦的效率很高,但同时也带来一个弊端,其表面只能平放,不好控制,而且对周围环境的要求苛刻.为改善其可控性,2004年5月5日,在CeBIT博览会上,菲利普公司展出了他们的新产品——具有里程碑意义的新型变焦液体透镜,这是一款特殊的无机械活动部件的可变焦液体透镜系统.

菲利普公司的这种液体透镜是由两种互不相溶且具有不同折射率的液体组成(如图1所示):一种是导电的水溶液,另一种则是不导电的油.把两者装在一个一端有透明盖板的短管里面,管的内壁和另一端的盖板上都涂有疏水性材料,这使得水溶液由于表面张力的作用向没有疏水性材料的一端弯曲成了一个半球状,通过在两片电极上加一直流电压,致使液面曲率发生改变,从而改变透镜焦距.这种方法叫做“电浸润法^[1]”.

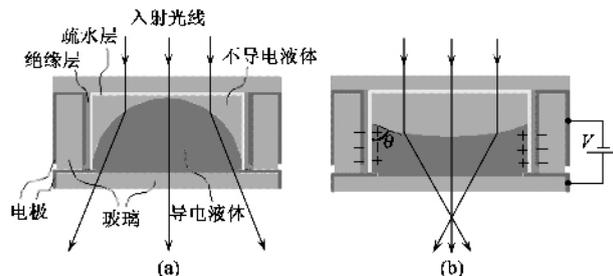


图1 菲利普公司的柱状变焦液体透镜

菲利普公司此次展示出的这种液体透镜具有诸多优点.例如:体积小,直径只有3mm,长度2.2mm,可以轻易地把它安放在缩微的光路中;变焦速度快,它的聚焦范围可以从5cm到无穷远快速改变

(只花了不到100ms的时间);耗电量小,由于直流电压相当于加载于一个电容器两端,几乎不耗电,只需要 $1\mu\text{J}$ 的能量足以改变其焦距,最适合应用于电池供电的袖珍产品中;寿命长,经测试,100万次的操作对其性能毫无影响,并且抗冲击性能高,激烈的冲击和颤动都不会影响它的正常使用,对温度的适应范围宽,适合作为移动设备使用;另外,成像的质量好,两种液体的界面是一个非常平滑的规则的表面,使得这种透镜的高光学性能足以满足作为医学内窥镜等的高要求与应用.

然而菲利普公司的此种液体透镜还是不完美的.据有关专业人士称:“其制作工艺非常复杂,特别是做成圆柱体,需要用到很高的电压才能改变液滴的形状,并且光轴很难稳定,制造这种透镜相对来说还是比较麻烦.”而法国VariOptic公司也研究液体透镜,他们在2004年12月2日推出了更新款的液体透镜,可以说是菲利普公司的升级版,特别是对于它里面一些固有的弊端都作了改进.

4 最先进的液体透镜技术

法国VariOptic公司的透镜用的也是“电浸润法”.如图2所示,该液体透镜是由两部分组成的:其中一半是玻璃底板,上置一金属圈,这是液体透镜其中一个电极,把电解液滴放在玻璃底板上金属圈中间;另一半也是一个玻璃底板,上面装一个圆锥形金属圈,就成为另一个电极,在金属圈上附着一层绝缘层,再在绝缘层和玻璃底板上均涂一层疏水性材料,在这样形成的圆锥形容器里面,放置不导电的油性液体,最后把两部分扣起来,两电极之间用绝缘介质隔开,封装之后,就是VariOptic公司的液体透镜.

这种液体透镜结构简单:液体用的是两种等密度的液体,它们的密度差以及它们的密度平均值的比例必须做到低于 10^{-2} .其中一种是能导电的电解液,另一种是绝缘的油,充当眼睑的作用,像三明治似的夹在一个圆锥形器皿的两个窗口中间,这使得可操作的液体是定量的,并可在一定程度上起到稳定光轴的作用.电解液与油之间界面的形状依靠加在电极上的电压来控制,不同的电压引起两种液体界面弯曲度的变化,从而导致透镜焦距的变化.当用施加电压的方法去改变这个界面的形状时,就可以获得所期望的折射率.不施加电压的时候,界面是稍微凹进去的(如图2所示);当电压加到40V时,界面变成高高凸起的了(如图3).

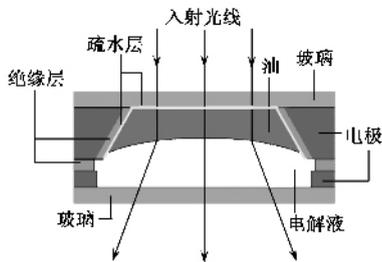


图2 VariOptic 公司的锥状变焦透镜

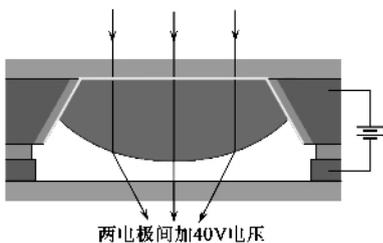


图3 当电压为40V时的界面形状

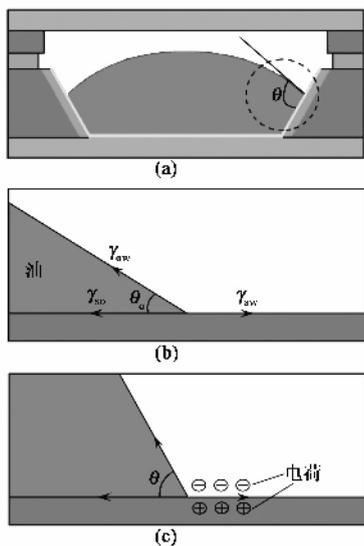


图4 “电浸润”机理分析

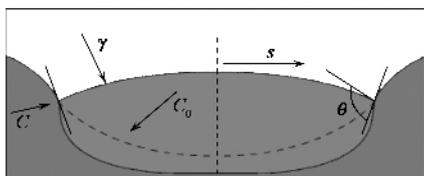


图5 实现光轴调节功能

从本质上讲,电压加在电解液和金属电极之间,就相当于一个可变电容器.如图1(b)和图4所示,当施加外界电压时,电容器两端电压升高,电容器两

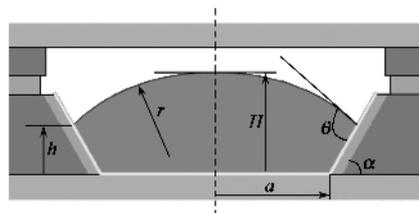


图6 透镜聚焦性能分析

极板电量增多,在面电荷密度 $\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta S}$ 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.越来越多的异性电荷又使电解液与电极之间产生越来越强的相互吸引静电力,静电力的增大使得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,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,油会填补原本是电解液占用的空间,从而使两种液体界面的弧度产生改变,最终达到改变透镜焦距的目的,这就是“电浸润”的机理.菲利普和 VariOptic 公司正是利用这种办法改变外加电压引起两种液体界面弯曲度的变化,做到在凹凸透镜两种形状上来回无缝地转换.

以上是定性地了解“电浸润”的机理,下面我们对这种变化进行定量的分析.

在尚未施加电压之前的状态是:水溶液及油之间的界面与电极所形成的角度 θ 比较小.若以 γ_{sw} 表示固体电极与水溶液之间的界面张力, γ_{ow} 表示油与水溶液之间的界面张力, γ_{so} 表示固体电极与油之间的界面张力,依据 YL 高序方程^[2]的推演,角度 θ 的表达式如下:

$$\cos\theta_0 = \frac{\gamma_{sw} - \gamma_{so}}{\gamma_{ow}} \quad (1)$$

施加电压后,此时 θ 角由下式^[3]决定:

$$\cos\theta = \cos\theta_0 - \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2d} \cdot U^2 \quad (2)$$

其中 ε 为绝缘介质层的介电常数, ε_0 为真空介电常数, d 为绝缘层的厚度, U 为外加电压.对(2)式两边求导数,稍作整理,就可以得出透镜面随外加电压的变化率:

$$\frac{d\theta}{dU} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U}{d\sin\theta} = \frac{\sqrt{2d\varepsilon\varepsilon_0(\cos\theta_0 - \cos\theta)}}{d\sin\theta} \quad (3)$$

再求 θ 对 U 的二阶导数:

$$\frac{d^2\theta}{dU^2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d\sin^3\theta} [\sin^2\theta_0 + (\cos\theta_0 - \cos\theta)^2] \quad (4)$$

式中 $\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d} > 0, \sin^3\theta > 0, \sin^2\theta_0 \neq 0$ 故 $\frac{d^2\theta}{dU^2} > 0$ 由此可得出如下结论 θ 随 U 变化率随 θ 的增加逐渐增加, 且透镜面变化的灵敏度随外加电压的增大而不断增大。

由于把透镜腔做成锥形, VariOptic 最突出的优势就是成功地实现了“一种能把小液滴稳定在平面上的某一给定点的方法。”这里讲的就是稳定液滴的中心轴。普通的透镜是通过镜头的伸缩来调焦, 它的光轴始终保持稳定。相比之下, 保持液体透镜光轴的稳定则不那么简单。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, 然而设计适当的透镜结构可以使其对光轴具有自动调节功能, 例如锥形结构就可以实现这一点。事实上, 透镜结构与光轴调节能力的关系可用图 5 作进一步的

说明。

当光轴发生距离为 s 的偏移时, 就会产生附加能量^[4] :

$$\Delta E = (C_0 - C)\gamma rs^2 \sin\theta \quad (5)$$

当 $\Delta E > 0$ 时, 透镜能够自动恢复光轴位置; 当 $\Delta E < 0$ 时, 光轴位置则无法自行恢复。(5)式中 C_0 与 C 分别为电解液和油性液体在接触点处的曲率半径, γ 为液体交界面的张力系数, r 为油滴半径, θ 为液面与器壁之间夹角。图 5 中所示的透镜结构就具有很好的稳定光轴的能力, 当其光轴发生偏离 s 时所产生的附加能量为

$$\Delta E = \left(a \tan \frac{\pi - \alpha}{2} \right)^{-1} \gamma_{ow} r s^2 \sin\theta \quad (6)$$

所以当光轴偏移 s 越大时, ΔE 就越大, 光轴会自适应地被牵引至透镜中心。

下面讨论当施加电压时透镜的聚焦性能: 将透镜镜面近似做球面处理, 如图 6 所示。设油性液体体积为 V , 球面半径为 r , 由几何关系, 有:

$$r = \left[\frac{\frac{3V}{\pi} + a^3 \tan\alpha}{\tan\alpha \sin^3(\theta - \alpha) + 2[1 - \cos(\theta - \alpha)] - \cos(\theta - \alpha) \sin^2(\theta - \alpha)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

由几何光学可知, 透镜焦距 f' 满足 $f' = \frac{n_2 r}{n_2 - n_1}$, 其中 n_1, n_2 分别为电解液和油性液体的折射率。由此可求得光焦度 $P (P = f'^{-1})$:

$$P = \frac{n_2 - n_1}{n_2} \cdot \left[\frac{\frac{3V}{\pi} + a^3 \tan\alpha}{\tan\alpha \sin^3(\theta - \alpha) + 2[1 - \cos(\theta - \alpha)] - \cos(\theta - \alpha) \sin^2(\theta - \alpha)} \right]^{-\frac{1}{3}} \quad (8)$$

再由角度与电压的关系(2)式可导出光焦度与电压的关系。

以上是理论分析, 由实验可测得光焦度 P 与电压 U 的关系曲线如图 7 所示: 由(3)式的推导结果可以得出, 当 $\theta = \theta_0$, 即一开始施加电压时 θ 随 U 变化较为缓慢。此时, P 变化也较为缓慢, 这与理论推导的 $\frac{d\theta}{dU}$ 在 $\theta = \theta_0$ 时变化缓慢的结果是一致的, 而当电压在 30—60V 之间时, 电压与光焦度近似成线性关系, 即 $U = c \cdot P$, 其中 c 为与透镜结构和材料相关的常数; 当电压继续增大, P 逐渐达到饱和, 所以透镜面的变化越来越迟缓, 这是因为随电压的增大, θ 增大, 此时虽然静电力不断增大, 但由于 θ 的影响, 使得电解液对油性液体边缘垂直挤压力越来越小, 从而使得透镜面的变化趋于饱和。

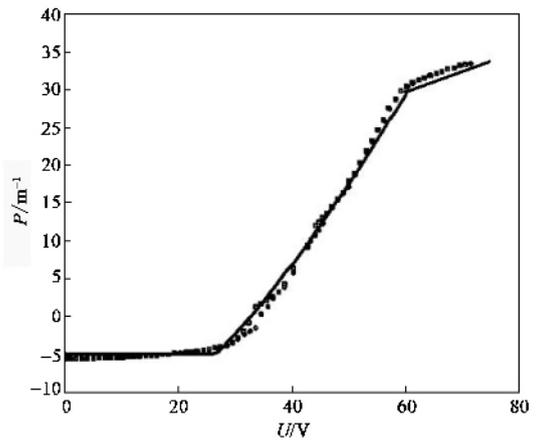


图 7 光焦度 P 随电压的变化曲线

