

激光与光电子学进展

液体透镜研究现状与发展综述

刘海渤, 胡源*, 李雨哲, 赵金辉

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 与传统光学透镜相比, 液体透镜具有响应速度快、变焦范围大以及可控性高等优势, 在视力校正、显微镜、手机相机、内窥镜和仿生光学等领域获得了广泛应用。本文主要对液体透镜的技术发展动态进行归纳总结, 简述了国内外液体透镜的工作原理, 分析了部分典型液体透镜的加工方法、性能指标以及应用前景, 并对未来发展趋势进行展望, 为液体透镜相关领域研究提供有益参考。

关键词 液体透镜; 液晶型; 电润湿型; 充液型

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231170

Review of Current Status and Development of Liquid Lens

Liu Haibo, Hu Yuan*, Li Yuzhe, Zhao Jinhui

School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, Jilin, China

Abstract Compared with traditional optical lenses, liquid lenses have the advantages of fast response, large zoom range, and high controllability, which are widely required in various fields, such as vision correction, microscopes, cellphone cameras, endoscopes, and bionic optics. This paper summarizes the technical developments in liquid lenses and briefly describes their working principle at home and abroad. Furthermore, it analyzes the related processing methods, performance indices, and application prospects of some typical liquid lenses. Finally, this work provides an outlook on the future development trend to provide useful references for further research on liquid lenses.

Key words liquid lens; liquid crystal; electrowetting; liquid-filled

1 引言

液体透镜是通过使用一种或多种液体制成的光学器件, 可以通过外部控制改变表面曲率半径, 或者改变填充液体的折射率, 从而达到改变光焦距的目的, 有着传统光学透镜无法比拟的变焦能力, 具有调节精度高、体积小、响应速度快等优势。

目前, 液体透镜的商业化发展迅速, 已广泛应用于医学、成像系统、投影系统等多个领域, 迄今为止, 已发展出许多种类型。根据驱动方式不同, 液体透镜主要分为三类: 液晶型、电润湿型和充液型。液晶型液体透镜主要通过施加电压来改变液晶腔内部的液晶材料的折射率从而实现变焦; 电润湿透镜主要是通过向液体和电极之间施加电压改变液体与接触面的润湿性, 引起接触角发生变化来实现焦距的改变; 充液型液体透镜则是通过改变腔室内的液体压力, 使弹性薄膜的形

状(薄膜曲率)发生变化来改变液体透镜的焦距。上述三种不同类型的液体透镜, 根据其技术特点均有不同的应用领域。

本文针对液体透镜的广泛应用前景, 简要介绍了不同类型液体透镜的原理和技术特点, 归纳和总结了液体透镜发展轨迹和现状等, 并分析不同类型的液体透镜的未来应用前景, 以供同领域研究者参考, 从而促进液体透镜技术的进一步应用和发展。

2 液晶型

世界上第一款液体透镜就是通过控制液晶作为光焦度变化的实现手段, 由 Sato^[1] 在 1979 年设计的。其主要原理是长棒状液晶分子受电场影响后, 长轴方向介电常数 ϵ_{\parallel} 与短轴方向上的介电常数 ϵ_{\perp} 不同, 从而会产生力矩 Γ_e , 使得液晶分子可以在电场中旋转, 从而改变透镜的折射率实现变焦, 如图 1 所示。

收稿日期: 2023-04-25; 修回日期: 2023-05-26; 录用日期: 2023-06-12; 网络首发日期: 2023-07-12

通信作者: huy@cust.edu.cn

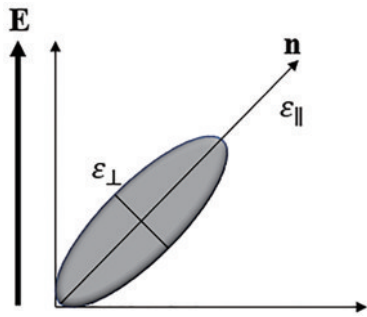


图 1 电场作用下液晶分子示意图^[1]

Fig. 1 Schematic diagram of liquid crystal molecules under the action of electric field^[1]

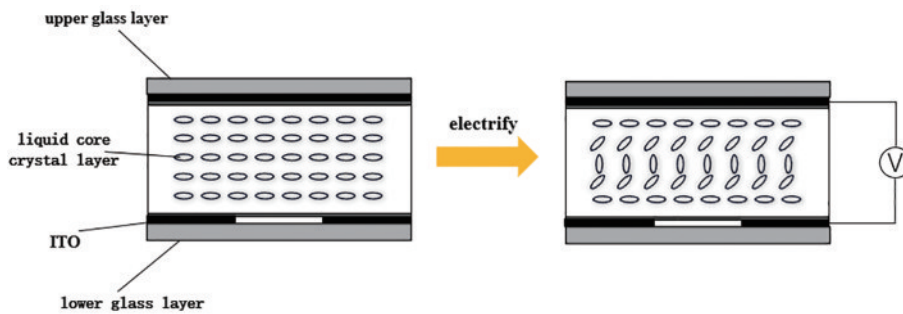


图 2 边缘电场驱动液晶透镜结构及原理示意图^[1]

Fig. 2 Schematic diagram of the structure and principle of edge electric field driven liquid lens^[1]

1991年, Nose等^[2]将液晶透镜系统设计为一个圆孔电极和一个平面电极的对称结构,优点是透镜结构简单,容易制得,但是当施加电压较低时,分子取向的垂直方向会有一条向错线,这会导致透镜性能的降低。

2005年, Wang等^[3]为了解决文献[2]所存在的向错线问题,提出了利用液晶层的堆叠结构来构建快速操作和大功率的液晶透镜,实现了双层液晶层的液晶透镜,具体原理如图3所示。最终使此透镜响应时间控制在1s左右,为未来更多层电极堆叠的液晶透镜提供了思路。次年,其课题组通过电压调节实现了可调节正负焦距的液晶透镜。成像结果如图4^[4]所示。

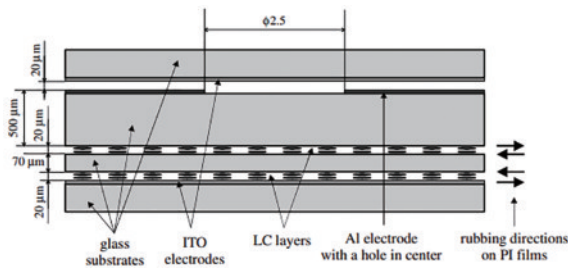


图 3 双液晶层液晶透镜^[3]

Fig. 3 Double liquid crystal layer liquid crystal lens^[3]

常规液晶透镜使用过程中需要配合偏光片来使入射光偏振方向和液晶层取向一致,但这样会降低成像质量,因此偏振无关的液晶透镜引起学者的重视。2005年, Ren等^[5]通过使用纳米级聚合物分散液晶(nano-PDLC),设计出一种与偏振无关的液晶透镜。

在液晶型液体透镜发展过程中,技术改进主要集中在液晶的驱动形式,由早期的边缘电场驱动,再逐渐增加驱动电极,到后来的离散电极驱动、高阻抗电极驱动甚至超声驱动,实现了驱动电压降低、响应速度提高、成像质量改善、加工成本降低等目的,使得液晶型液体透镜的商业和工程应用价值不断得到提升。

2.1 边缘电场驱动

边缘电场驱动即将液晶层置于两个电极之间,通过对电极施加电压使液晶分子产生变化。1979年的第一款液晶型液体透镜就是基于此种驱动方式,具体结构如图2^[1]所示。

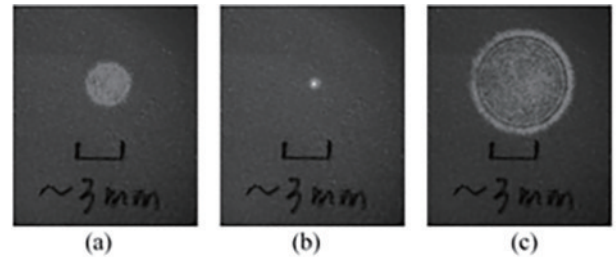


图 4 成像结果图^[4]。(a) $V = 0, V_2 = 0$; (b) $V_1 = 35 V_{rms}, V_2 = 0$; (c) $V = 0, V = 60 V_{rms}$
Fig. 4 Imaging result image^[4]. (a) $V = 0, V_2 = 0$; (b) $V_1 = 35 V_{rms}, V_2 = 0$; (c) $V = 0, V = 60 V_{rms}$

在低电压区域,由于光的散射,PDLC是半透明的,当电压超过饱和水平时,则会变为高度透明,并表现出一种纯相位调制能力。相较于普通液晶,PDLC具有更快的响应速度。

2011年 Kawamura等^[6]在之前的双电场液晶透镜基础上又加了一层电极,设计出了具有双圆孔电极的液晶透镜,此透镜可以在确保光学成像质量稳定的前提下,使液晶透镜的镜面功率和有效直径得到了提升,透镜结构如图5所示,并且制得的液晶透镜相较于传统单圆孔液晶透镜的功率为2.1倍左右。

2020年, Algorri等^[7]利用一个微结构的ITO(锡-铟氧化物)传输线,结合可以均匀地分布在整个设备的表面上的电压的同心电极,实现了一种允许正-负焦距可调的液晶透镜。这种结构为相位可调制液晶光学

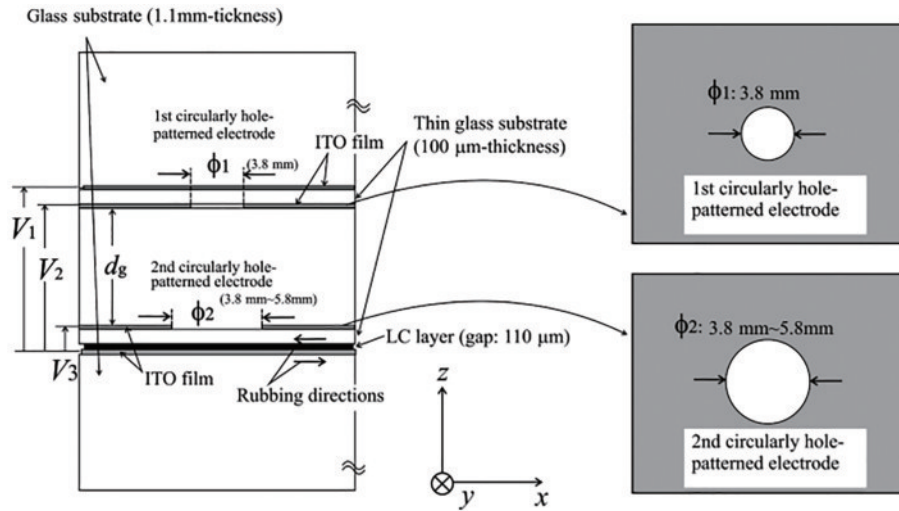


图 5 具有双孔图案电极的 LC 透镜的横截面^[6]

Fig. 5 Cross section of LC lens with double-hole patterned electrodes^[6]

器件的研究开辟了新的领域。

2.2 离散电极驱动

利用边缘电场原理驱动的液晶透镜仅能通过改变几何结构或使用多个电极调控的方式来对透镜内部的电场进行整体调控,缺乏局部调控电场的的能力。而与之相对应的离散电极驱动方式则是接入多个电极,并将这些电极进行一定程度的排列和划分,使得每个电极都可以设置并且产生单独频率的电场,以实现电场精准的调控来达到理想的电场分布。具有代表性的研究如下。

2010年,Kao等^[8]将奇数和偶数的圆环电极分别置于不同层中,使用绝缘体SU-8将其分开从而消除电极交叉所带来的成像质量的影响,如图6所示。基于此结构设计的液晶透镜具有良好的折射率分布,以及驱动电压小于10V等优点。

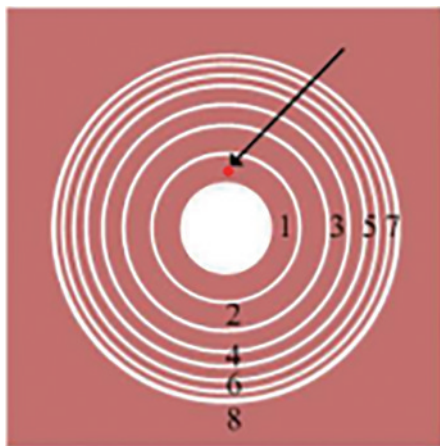


图 6 电极引线布局图^[8]

Fig. 6 Electrode lead layout diagram^[8]

Li等^[9]将菲涅耳透镜原理与液晶透镜结合,成功制备出菲涅耳液晶透镜,最终设计的液晶透镜在无电压驱动情况下可见光谱光透射率为85%,在8个优化

的驱动电压幅值在0~2V_{rms}之间产生的最大一级衍射效率为91%。

2.3 高阻抗层电极

为了解决透镜内电场分布不连贯的问题,同时确保透镜具有低功耗和不受限制的孔径大小等优势,提出的一种方法是在调制器的接地板上涂覆高导电性的ITO薄膜,并在玻璃衬底上涂覆氧化钛来获得高阻抗电极。这种方法可以轻松实现频率控制,从而解决电场分布不连贯的问题。

1998年,Naumov等^[10]首次利用高阻抗层实现了一种模态控制的液晶透镜,具体结构如图7所示。但此透镜存在的问题为成像质量较低。

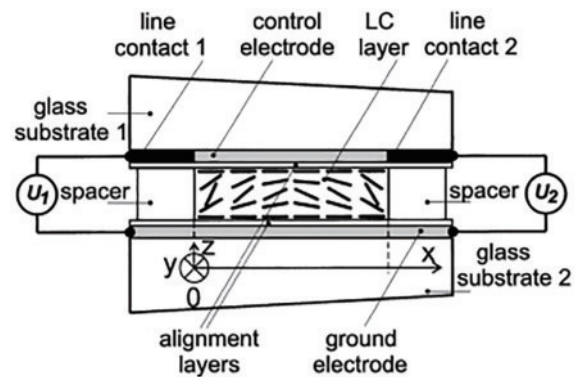


图 7 高阻抗电极层液晶透镜^[10]

Fig. 7 High impedance electrode layer liquid crystal lens^[10]

2016年,Galstian等^[11]通过添加浮动电极,在液晶透镜中引入了额外的电阻抗,可以显著优化电势的空间分布,从而可以显著改善透镜的球差。具体结构如图8所示。

2020年,巩伟兴等^[12]将液晶透镜等效成电阻电容电路,提出了高阻层的方块电阻阶梯分布的模式控制液晶透镜,实现液晶透镜的焦距可以从280mm到无穷远变化。同年,Pusenkova等^[13]讨论了温度对于型

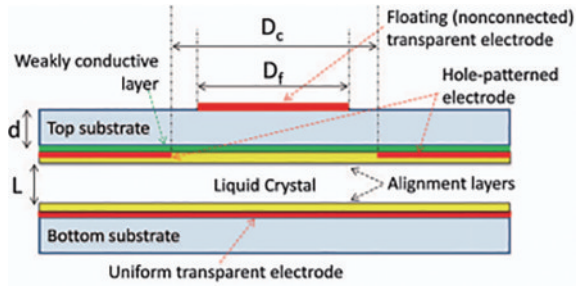


图 8 添加浮动电极液晶透镜^[11]

Fig. 8 Liquid lens with floating electrode^[11]

号为 5CB 的向列相液晶和超低黏度液晶制成的薄层液晶主要参数的温度依赖性,实验结果表明,在不同的温度条件下,液晶透镜需要调整驱动电压频率,以弥补温度对其光学性能的影响。

2.4 超声驱动

传统液晶透镜通常需要使用 ITO 电极作为驱动电极,而 ITO 电极的制备通常需要采用溅射沉积法、导致设备成本高,工艺要求复杂。2018 年,Shimizu 等^[14]利用超声振动来控制液晶粒子的方向,生产了一种基于超声波驱动的液晶透镜,此透镜主要是通过谐振频率处使用连续的正弦电信号激励,产生声辐射力,声辐射力作用于玻璃和液晶,朝向空气介质,从而使得透镜表面以及液晶层向着空气的方向产生形变,如图 9 所示。该结构透镜具有结构简单、成本低等优点。

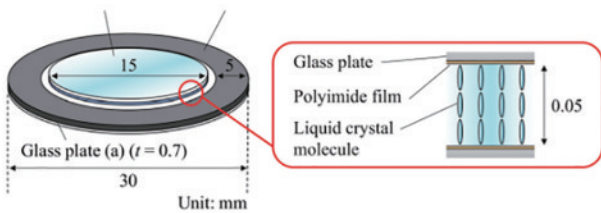


图 9 超声驱动液晶透镜结构示意图^[14]

Fig. 9 Structure diagram of ultrasonic driven liquid lens^[14]

在液晶透镜领域,众多学者的研究方向主要为通过改变驱动结构、电极材料以及衬底材料等来实现逐渐低电压驱动化、电场可控化等,液晶透镜工程性不断提高。但依然存在一些限制应用的问题,主要表现为:1)具有偏振相关性;2)可调范围取决于液晶层厚度,液晶层的厚度增加会导致驱动电压升高以及响应速度变慢等。这些液晶透镜的弊端使其在未来发展方向上,可以倾向于偏振无关性、寻求更合适的液晶结构以获得更快的响应速度以及更强的调焦效果等需求领域。

3 电润湿型

电润湿液体透镜最早在 2000 年由 Berge 等^[15]提出,主要工作原理如图 10 所示,通常采用两种密度接

近的液体,图中,1 为绝缘液体,2 为导电的电解质液体。对其施加外部电压,可以使两种液体分界面的接触角发生改变,从而实现透镜的调焦。不同于其他类型主要关注驱动方式的创新,此种类型液体透镜的研究聚焦于结构方案以及液体材料选择。

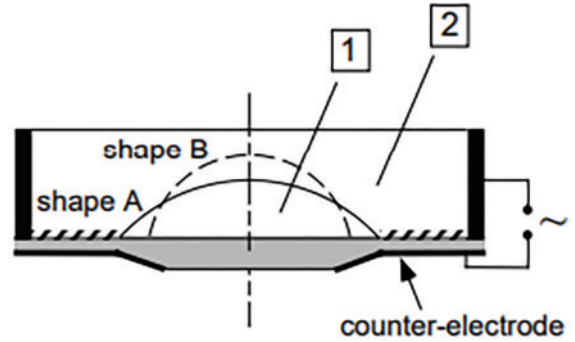


图 10 首个电润湿液体透镜工作原理图^[15]

Fig. 10 Working principle of the first electrowetting liquid lens^[15]

2003 年,Krupenkin 等^[16]通过改变施加到位于介电基板下方的一组电极上的电压,可以可逆地改变微透镜的位置和曲率,使得能够调节焦距和横向位置的液体微透镜成为可能。2004 年,飞利浦公司的 Kuiper 和 Hendriks^[17]推导出电润湿透镜的接触角与施加电压之间的关系为

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{wi} - \gamma_{wc}}{\gamma_{ci}} + \frac{\epsilon}{2\gamma_{ci}d_f} V^2, \quad (1)$$

式中: ϵ 为绝缘膜的介电常数; d_f 为其厚度; V 为外加电压; γ_{ci} 为液-液界面张力; γ_{wc} 为侧壁与导电液之间界面张力; γ_w 为侧壁与绝缘液体之间的界面张力。

它的实物结构如图 11 所示,选择了两种折射率随温度变化关系几乎相同的溶液,即氯化锂溶液和溶解少量四溴化碳的苯基甲基硅氧烷溶液,所以在工作温度内,温度对于焦距的影响很小。此外,中间的弯月面的形状是完美的球形,对外部振动和冲击不敏感。飞利浦公司还将电润湿透镜和相机系统结合,将此透镜作为消色差透镜使用来降低成本,可以获得很好的消色差效果。

清华大学岳瑞峰教授团队于 2006 年设计了一种基于电介质润湿效应的液体透镜^[18],其主要结构是一个由 ITO 透明导电膜和疏水电介质膜覆盖的底部电极板所包围的导电液,同时,将一个内壁和外壁都有疏水层的玻璃锥管悬浮在导电液滴中。当在控制电极与液滴间施加一定电压 V 时,施加的电压降低了固体与液滴间的表面张力,因此液滴与下极板间的接触角也相应地减小,进而使得锥管下方液体体积增加,玻璃管中液体的体积减小,玻璃管倾斜的内壁能将体积的变化转化为管内液体的上表面的位置及曲率的变化,从而实现液体透镜焦距的调节,具体结构如图 12 所

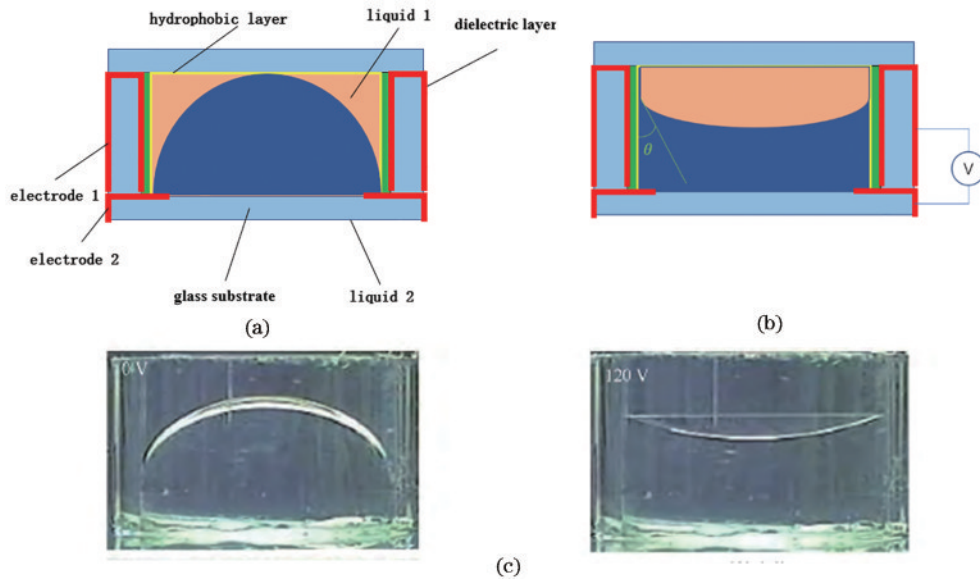


图 11 柱形液体透镜变焦原理及实物示意图^[17]。(a)初始状态；(b)施加电压后状态；(c)透镜实物图
Fig. 11 Columnar liquid lens zoom principle and physical diagram^[17]. (a) Initial state; (b) after applying voltage state; (c) lens physical diagram

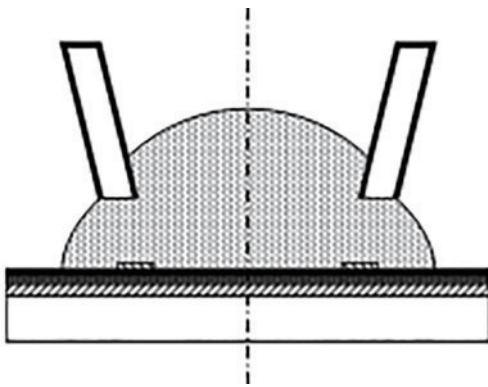


图 12 基于 EWOD 原理纵截面示意图^[18]
Fig. 12 Schematic diagram of longitudinal section based on EWOD principle^[18]

示,此透镜可以在 0~50 V 电压下,实现从 2 cm 到无限远的物体的对准。

2009 年,Smith 等^[19]制造出一种由大于 12000 个电润湿透镜组成的透镜阵列。单个的电润湿透镜的口径相较于之前传统透镜的 2~6 mm 口径缩小了 1/10,为以后电润湿透镜阵列制造技术提供了思路。

不完全对称的透镜腔会造成对于液滴的静电力不均匀,从而可能导致图像的失真^[20-21]。因此,2012 年 Lee 等^[22]采用半球腔来解决此问题,其次对硅片使用 HNA(HF, HNO₃, CH₃COOH)溶液进行湿法刻蚀,有效地为透镜制造孔径可控的透镜腔,最终的系统具有很低的光学畸变,焦距可控大约为 4.1 mm,同时具有很低的焦距滞后。

2015 年,王琼华团队^[23]提出了具有多重环形反射面的电润湿液体透镜,此方法使得光焦度增加 3 倍,具体反射路径如图 13 所示。随后,在 2016 年,其团队^[24]

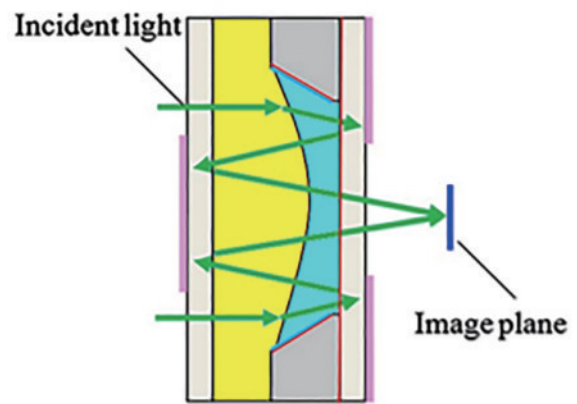


图 13 光在多重反射电润湿透镜中路径^[23]
Fig. 13 Path of light in multiple reflective electrowetting lens^[23]

在此透镜基础上,增加三个偏振片和一个液晶单元,实现了一种光可切换电润湿透镜,可以通过电压控制在高功率高分辨率或者低像差高质量图像之间切换,具有非常好的应用前景。

2017 年,Zopp 等^[25]利用密封圆柱形外壳内的两个独立可控液体透镜实现了全液体光学变焦系统。此透镜具有高功能性、出色的成像特性和高度灵活的可调性,进一步扩大了电润湿液体透镜的焦距变化范围。随后在 2021 年,该团队^[26]对电润湿液体透镜特性进行更细致的研究,实验装置如图 14 所示。研究发现界面张力以及液体黏度等对透镜响应时间有很大的影响,利用整形驱动电压驱动透镜,会使其调谐速度大大提升,超过了当时已知的所有同类透镜。

2020 年,王琼华团队^[27]利用多功能光流体多功能光流控(MO)设计了一款液体透镜,具有光束控制功能。当液体透镜腔由电压驱动时,液-液界面的曲率相

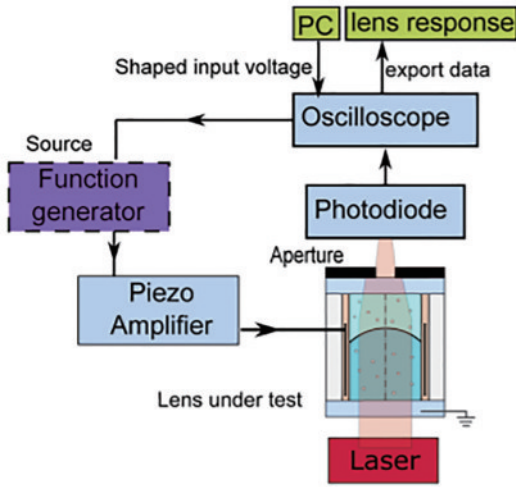


图 14 用于表征 EWOD 镜头响应时间的实验装置图^[26]

Fig. 14 Schematic diagram of the setup used to characterize the response time of the EWOD lens^[26]

应地改变,从而实现液体透镜的焦距的改变。同年,天津大学 Song 等^[28]为了扩大焦距范围,设计了一种三层液体透镜,具体结构如图 15 所示,其均方根波前像差误差小于 1/4 波长。2022 年,王琼华团队^[29]在此三层电润湿透镜基础上提出了一种大口径、高变焦比的三层球面电润湿液体透镜。此透镜的腔体是球形的,这可以扩大表观接触角范围。三层球面电润湿液体透镜可以使结构紧凑,并且在轻小型化的成像系统中具有很大的应用前景。

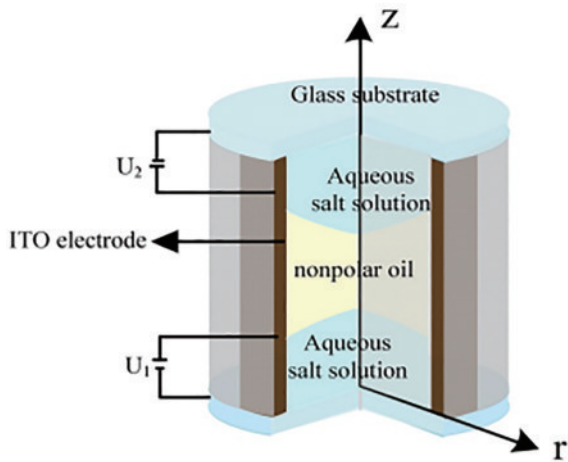


图 15 三种液体的电润湿透镜示意图^[28]

Fig. 15 Electrowetting lens schematics for three liquids^[28]

但是由于电润湿透镜中的导电液体一般为电解质溶液,使用时间过长后会产生水解现象,透镜失效或是性能降低,所以王琼华团队^[30]在 2022 年选用导电液体为有机盐纯溶液,绝缘液体则是芳香卤代烃混合溶液,从而制出无水有机溶液电润湿液体透镜,有效地延长电润湿透镜的使用时间。

基于电润湿原理制成的透镜主要优势在于结构简单、响应速度快、可控性高等优点。但是也存在液体材

料电解损耗较大,能实现的透镜口径偏小,接触角在电压升高过程中很容易饱和从而导致变焦范围较小等缺陷。可以预见,未来的电润湿液体透镜的主要研究方向在于寻找更合适的液体材料,使其获得更长的使用寿命,以及发现更合适的结构从而扩大其有效口径。

4 充液型

充液型液体透镜的本质为在透镜腔内部充入液体,通过液体压力的作用抑或是对弹性膜的作用,从而实现理想的调焦效果,工作原理如图 16 所示。其根据驱动方式的不同可分为外部泵驱动、电磁驱动、压电驱动、介电弹性体驱动以及静电力驱动等。

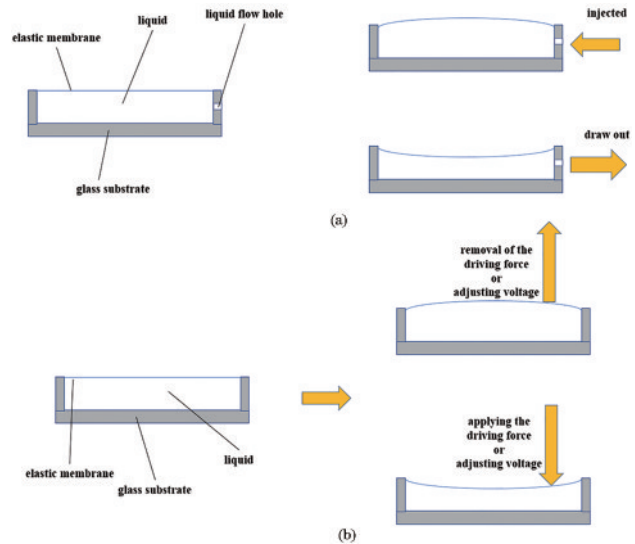


图 16 充液型液体透镜的总体结构及工作原理简图。(a) 泵入泵出液体型;(b) 外部作用使膜发生变形

Fig. 16 General structure and working principle of liquid-filled liquid lens. (a) Inject or draw out liquid type; (b) membrane is deformed by external action

4.1 外部泵驱动

外部泵驱动液体透镜结构简单,通过将透镜结构与外部泵连接将内部液体进行注入或吸出来改变薄膜的曲率,进而改变透镜焦距,大多数基于此原理的液体透镜成本很低,制造简单。

早在 1971 年,Knollman 等^[31]制作出了早期充液型液体透镜的初步模型,为未来充液型液体透镜发展打下基础。

2005 年,Ren 等^[32]在传统充液型液体透镜基础上,设计了一种具有正负焦距的液体透镜,这种透镜具有制作工艺简单、结构紧凑、操作方便、成本低等优点。

2010 年 Yu 等^[33]将高精度的单点金刚石车削 (SPDT) 引入到标准软光刻工艺中,来实现透镜一端的非球面,这种工艺使得与传统液体填充透镜的操作相关的球面像差得到补偿,光学性能得到明显提升。透镜结构如图 17 所示。同时,在透镜的另一端仍然采用可变形的弹性膜,从而保留了高焦距可调性。

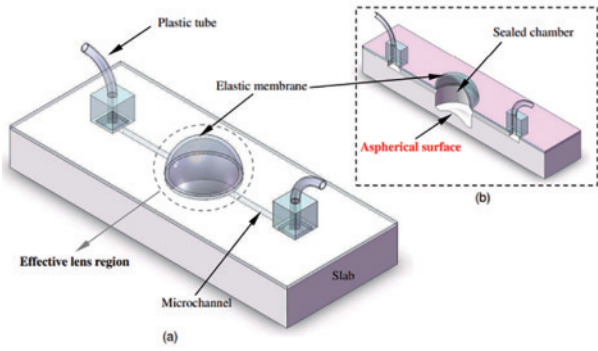


图 17 金刚石车削非球面液体透镜示意图^[33]。(a)整体装置图；(b)截面图

Fig. 17 Diamond turning aspherical liquid lens schematic diagram^[33]. (a) Overall device diagram; (b) cross section view

2018年, Jia等^[34]利用PMMA固体基板, 以及两个聚二甲基硅氧烷(PDMS)弹性膜, 两个弹性膜的厚度一个为不均匀, 另一个的厚度为固定, 得到了由液体压力变化引起非均匀弹性膜变形调节的渐进多焦点透镜, 透镜结构如图18所示。2020年, 其团队又利用相同原理^[35], 通过将双弹性膜换成单弹性膜并且与固体基板结合, 制成了液体渐进多焦点透镜, 此透镜在视力校正等领域具有潜力。

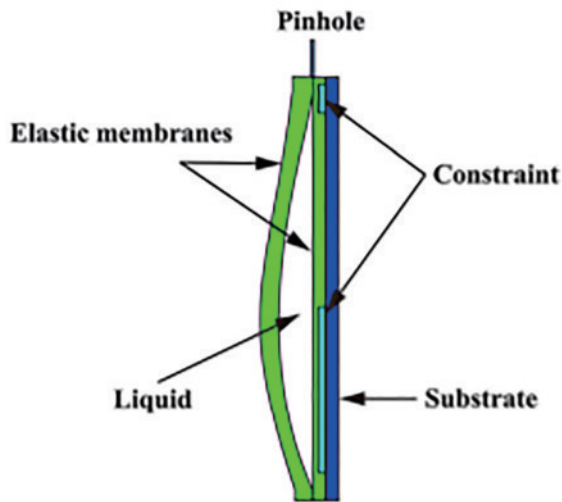


图 18 渐进式多焦点透镜示意图^[34]

Fig. 18 Progressive multifocal lens schematic diagram^[34]

4.2 电磁驱动

电磁驱动液体透镜主要由外部电磁场作为驱动源, 产生吸引力抑或是排斥力来进行液体的泵入或吸出, 从而实现透镜焦距的变化, 基于此原理的透镜可以大大提升调焦速率。

2011年, Yu等^[36]基于电磁驱动液体透镜原理, 提出了一种具有双边驱动能力的电磁驱动液体透镜, 并且实现了可同时调节凹凸透镜的双目装置结构, 工作原理如图19所示。2012年Yu等^[37]又讨论了充液透镜

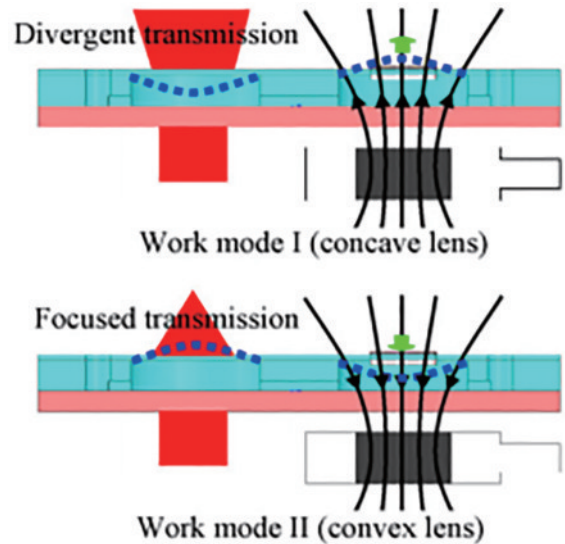


图 19 两种模式电磁驱动透镜^[36]

Fig. 19 Two modes of electromagnetic driving lens^[36]

的动态机械稳定性, 在实验过程中使用声激励作为宽带扰动源, 透镜的合成响应使用非接触式激光多普勒测振仪表征。这是第一次实验性地报道了充液透镜的机械稳定性。实验结果和理论分析都表明, 透镜的共振频率向高频移动, 振动速度和振幅相应减小。

2023年, Li等^[38]采用具有环状和不均匀的厚度分布的弹性薄膜, 提出了焦距可调节式透镜, 此透镜可以在全焦距调节范围内实现动态的光学调焦, 有效口径为4 mm, 可以在无限远至±40 mm范围内进行调谐, 并且工作性能稳定。

4.3 压电驱动

压电驱动液体透镜主要是将液体透镜与压电驱动器结合在一起, 通过压电驱动器的作用, 对液体进行挤压, 从而改变弹性膜的形状, 进而改变透镜的焦距。这样制成的透镜可以有非常快的响应速度, 但口径限制大。

2008年, Schneider等^[39]第一次将自适应微流体PDMS透镜系统与压电泵驱动器集成为一个液体透镜。具体结构如图20所示。2015年, Nicolas等^[40]对

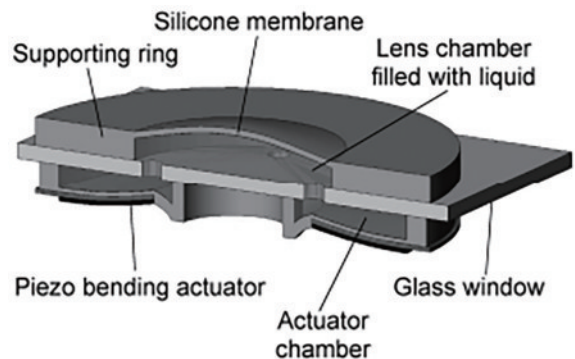


图 20 带有压电制动器的液体透镜^[39]

Fig. 20 Liquid lens with piezoelectric brake^[39]

其进行改进,制造了一种直径 3 mm,厚度 400 μm ,功率效率低于 0.1 μW ,响应时间可达 1 ms,电光性能优异和波前差小于 50 nm 的压电驱动液体透镜。

2019 年, Wang 等^[41]通过压电驱动器和可变形板,设计了一种压电弹性体充液变焦透镜,该透镜的主要驱动方式为:利用压电驱动器对变形板进行挤压,使内部液体产生形变,作用于成像部分的弹性膜,实现透镜变焦,如图 21 所示。

4.4 介电弹性体驱动

介电弹性体驱动的液体透镜主要有两种模式,二者共同点为都是在介电弹性体外部施加电压,不同点为一种通过弹性体的变形使得被动薄膜产生形变,另外一种为直接利用介电弹性体薄膜作为透镜薄膜,通过弹性体的变形直接实现透镜变焦。

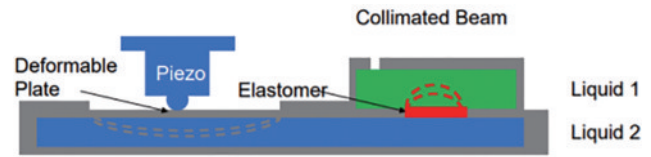


图 21 压电驱动弹性体变焦系统示意图^[41]

Fig. 21 Piezoelectric driving elastomer zoom lens schematic diagram^[41]

2011 年, Carpi 等^[42]根据人类眼睛的晶状体和睫状肌调节焦距的功能,设计出的光学系统具有体积小、重量轻、耐冲击、无过热、低功耗和成本低等优点,具体原理如图 22、23 所示。由此可见,将生物激励与介电弹性体作为人工肌肉替代品的独特性能相结合,可以为可调谐光学或是仿生光学开辟新的前景。

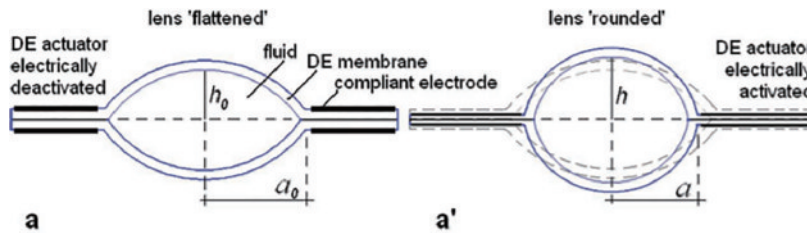


图 22 仿生介电弹性体镜片原理示意图^[42]

Fig. 22 Principle schematic of bionic dielectric elastomer lens^[42]



图 23 仿生镜片实物示意图^[42]

Fig. 23 Physical sketch of bionic lens^[42]

2019 年, Li 等^[43]设计了与人眼相结合对变焦进行控制的介电弹性体的液体透镜。该透镜结构如图 24 所示。2020 年史惠琦等^[44]对基于这种类型的液体透镜进行进一步设计和分析。分析结果显示,光学元件的几何形状、初始焦距、介电弹性体膜的预拉伸、电极面积、材料剪切模量等因素均会对光学元件的焦距调整效率产生影响。

2021 年,程阳等^[45]研究了介质弹性体在透镜中的作用,采用了一种介电弹性体与透镜薄膜相分离结构的液体透镜,分析了杨氏模量、残余应力、初始厚度和直径等因素,研究结果显示,在初始液压 500 Pa、

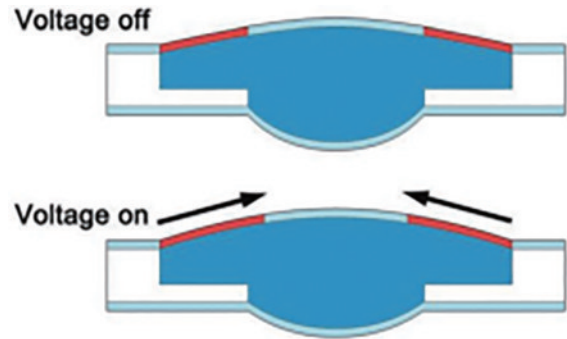


图 24 仿人眼透镜结构图^[43]

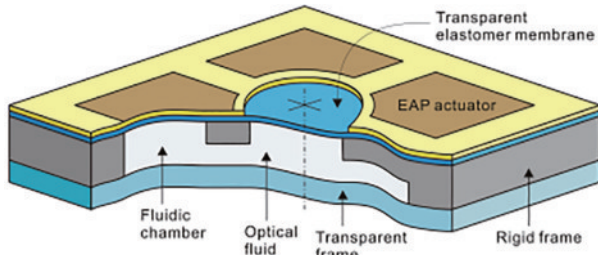
Fig. 24 Imitation eye lens structure diagram^[43]

1000 V 下,液体透镜可实现焦距变化范围为 15.13~22.80 mm,焦距增加量为 51%。发现在相同放大比下,介质弹性体的初始厚度对液面焦距的影响最大,残余应力次之。

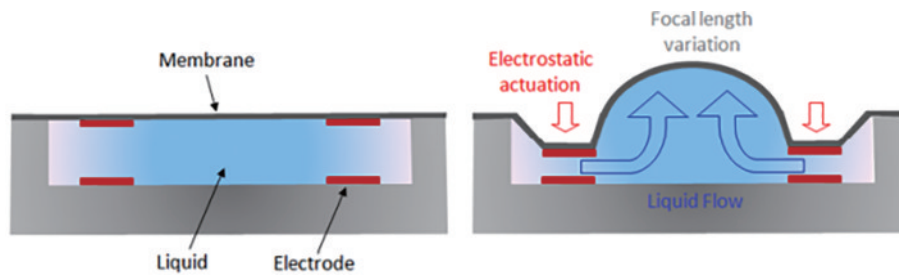
4.5 静电力驱动

由于传统充液透镜在液体流通入口和出口时,有源区空穴捕获会降低充液型透镜的光学性能,为了防止此类现象,2009 年, Choi 等^[46]将硅片加工成具有圆孔径、微流体通道以及四个腔室的基板,然后通过氧离子蚀刻将 PDMS 膜附着到硅表面,制成了一款可以防止空穴捕获的液体透镜。结构细节如图 25 所示。此透镜在外加电压为 40 V 时,可以改变 30 屈光度的光功率,焦距可以从无穷大变化到 10 cm。

2012 年, Pouydebasque 等^[47]提出了一种专利技

图 25 内部密封的液体透镜细节示意图^[46]Fig. 25 Detail schematic of internal sealed liquid lens^[46]

术,即 Wavelens 技术。将聚合物膜内部注入高介电常数液体,并且在膜下方以及玻璃基板上的环形电极之间形成一种静电微机电系统(MEMS)制动器。此液体透镜的主要驱动原理为通过在电极之间施加电压,静电驱动将液体推向透镜中心,从而改变膜的曲率,进而改变透镜焦距。过程如图 26 所示。

图 26 静电力驱动液体透镜工作过程示意图^[47]Fig. 26 Schematic diagram of working process of liquid lens driven by electrostatic force^[47]

5 结束语

从液体透镜发明至今,学者们一直致力于如何获得更稳定高效的变焦效果,如何提升透镜的成像质量以及如何利用更小的驱动电压来获得大倍率的焦距调节效果等。随着研究的逐渐深入,液体透镜已经在越来越多的场景下得到应用:液晶型液体透镜如今已经在内窥镜^[48]、成像系统^[49]、非成像光学^[50]、摄影系统^[51]等方面都有着一定程度的应用;电润湿液体透镜的应用和分析^[52]相对成熟,例如机器视觉^[53]、显微镜^[54-55]、仿生光学^[56-59]等,其商品化的发展进度也相较于两种透镜要更快;充液型液体透镜目前大多数还处在实验室研究阶段,但是技术上的优势使其极具发展潜力,其组成的液体透镜阵列已经开始应用于仿生复眼领域^[60-61]。未来,液体透镜以其独有的技术优势,将在机器人视觉、虚拟现实和无人驾驶等对微型化、快速响应等有需求的智能领域发挥更加重要的作用。

本文系统地梳理了液体透镜的发展脉络,归纳和总结了不同技术的基本原理和应用方向,为研究液体透镜方向的学者提供了有益的参考。

参 考 文 献

[1] Sato S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length

采用不同技术的充液型液体透镜具有不同的特点。外部泵驱动的液体透镜有结构简单、口径大、变焦范围大等优势,但是此类透镜体积很大,内部液体变多时会导致光轴不稳定,响应时间也会增加。电磁驱动类型的液体透镜优势在于响应速度快、透光口径小等,但同时也有体积偏大等缺陷。压电驱动液体透镜的优势在于响应速度非常快、驱动电压低、口径小等,但是压电板的形变量有限,从而导致变焦范围小。介电弹性体驱动的液体透镜优势在于可控性高、响应时间短,劣势在于驱动电压过大(千伏级)、焦距变化范围较小等。静电力驱动的液体透镜优势在于响应时间短、透镜形状可变性好以及能耗低等,劣势在于精度会受到电极尺寸、电场分布等因素的影响,同时其加工精度要求高,会导致成本上升。总的来看,不同类型的充液型液体透镜之间的优缺点明显,在未来可以倾向于发现更多结构,使得其驱动电压降低,光轴稳定。

[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(9): 1679-1684.

- [2] Nose T, Masuda S, Sato S. Optical properties of a hybrid-aligned liquid crystal microlens[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 1991, 199(1): 27-35.
- [3] Wang B, Ye M, Sato S. Liquid crystal lens with stacked structure of liquid-crystal layers[J]. Optics Communications, 2005, 250(4/5/6): 266-273.
- [4] Wang B, Ye M, Sato S. Liquid crystal lens with focal length variable from negative to positive values[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 79-81.
- [5] Ren H W, Lin Y H, Fan Y H, et al. Polarization-independent phase modulation using a polymer-dispersed liquid crystal[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(14): 141110.
- [6] Kawamura M, Ito Y. Liquid crystal lens with double circularly hole-patterned electrodes[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2011, 542(1): 176/[698]-181/[703].
- [7] Algorri J F, Morawiak P, Bennis N, et al. Positive-negative tunable liquid crystal lenses based on a microstructured transmission line[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 10153.
- [8] Kao Y Y, Chao P C P, Hsueh C W. A new low-voltage-driven GRIN liquid crystal lens with multiple ring electrodes in unequal widths[J]. Optics Express, 2010, 18(18): 18506-18518.

- [9] Li G Q, Mathine D L, Valley P, et al. Switchable electro-optic diffractive lens with high efficiency for ophthalmic applications[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(16): 6100-6104.
- [10] Naumov A F, Loktev M Y, Guralnik I R, et al. Liquid-crystal adaptive lenses with modal control[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(13): 992-994.
- [11] Galstian T, Asatryan K, Presniakov V, et al. High optical quality electrically variable liquid crystal lens using an additional floating electrode[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(14): 3265-3268.
- [12] 巩伟兴, 于涛, 王伟郅, 等. 方块电阻阶梯分布的模式控制液晶透镜的仿真[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(9): 908-913.
- Gong W X, Yu T, Wang W Z, et al. Simulation of modal control liquid crystal lens with step sheet resistance distribution[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(9): 908-913.
- [13] Pusenkova A, Galstian T. Electrically tunable liquid crystal lens in extreme temperature conditions[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2020, 703(1): 39-51.
- [14] Shimizu Y, Koyama D, Fukui M, et al. Ultrasound liquid crystal lens[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(16): 161104.
- [15] Berge B, Peseux J. Variable focal lens controlled by an external voltage: an application of electrowetting[J]. *The European Physical Journal E*, 2000, 3(2): 159-163.
- [16] Krupenkin T, Yang S, Mach P. Tunable liquid microlens [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(3): 316-318.
- [17] Kuiper S, Hendriks B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(7): 1128-1130.
- [18] 康明, 岳瑞峰, 吴建刚, 等. 基于 EWOD 的锥形管状结构液体变焦透镜[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(5): 1768-1770, 1774.
- Kang M, Yue R F, Wu J G, et al. Conical tube employed variable-focus liquid lens based on EWOD[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 1768-1770, 1774.
- [19] Smith N R, Hou L L, Zhang J L, et al. Fabrication and demonstration of electrowetting liquid lens arrays[J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(11): 411-413.
- [20] Lee J K, Park K W, Kim H R, et al. Durability enhancement of a microelectromechanical system-based liquid droplet lens[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(6S): 06GN11.
- [21] Krogmann F, Monch W, Zappe H. Electrowetting for tunable microoptics[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2008, 17(6): 1501-1512.
- [22] Lee J K, Choi J C, Jang W I, et al. Electrowetting lens employing hemispherical cavity formed by hydrofluoric acid, nitric acid, and acetic acid etching of silicon[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(6S): 06FL05.
- [23] Li L, Liu C, Ren H W, et al. Annular folded electrowetting liquid lens[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1968-1971.
- [24] Li L, Liu C, Ren H W, et al. Optical switchable electrowetting lens[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1505-1508.
- [25] Kopp D, Brender T, Zappe H. All-liquid dual-lens optofluidic zoom system[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3758-3763.
- [26] Zhao P P, Li Y, Zappe H. Accelerated electrowetting-based tunable fluidic lenses[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15733-15746.
- [27] Liu C, Wang D, Wang Q H, et al. Multifunctional optofluidic lens with beam steering[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7734-7745.
- [28] Song X M, Zhang H X, Li D Y, et al. Electrowetting lens with large aperture and focal length tunability[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 16318.
- [29] Xu J B, Zhao Y R, Liu C, et al. Triple-layer spherical electrowetting liquid lens with large-aperture and high zoom ratio[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 160: 107311.
- [30] Xu J B, Zhao Y R, Liu C, et al. Non-aqueous organic solution based on a large-aperture spherical electrowetting liquid lens with a wide tunable focal length range[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(17): 6778-6793.
- [31] Knollman G C, Bellin J L S, Weaver J L. Variable-focus liquid-filled hydroacoustic lens[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1971, 49(1B): 253-261.
- [32] Ren H W, Wu S T. Variable-focus liquid lens by changing aperture[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(21): 211107.
- [33] Yu H B, Zhou G Y, Leung H M, et al. Tunable liquid-filled lens integrated with aspherical surface for spherical aberration compensation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 9945-9954.
- [34] Jia W L, Xiang D, Li S J. A liquid progressive multifocal lens adjusted by the deformation of a non-uniform elastic membrane due to the variation of liquid pressure[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2018, 14: 17.
- [35] Jia W L, Li S J. Liquid progressive multifocal lenses based on asymmetrical freeform surface structure using non-uniform thickness membranes[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(3): 1-14.
- [36] Yu H B, Zhou G Y, Chau F S, et al. Tunable electromagnetically actuated liquid-filled lens[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 167(2): 602-607.
- [37] Yu H B, Guo B, Tsu-Hui A L, et al. Characterization of the dynamic mechanical stability of liquid-filled lenses[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23720-23727.
- [38] Li H T, Chen Y J, Wang Y, et al. Compact electromagnetically driven liquid-filled lens with bidirectional wide range focus tuning capability[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 349: 113950.
- [39] Schneider F, Eberhard D, Strohmeier D, et al. Adaptive fluidic PDMS-lens with integrated piezoelectric actuator [C]//2008 IEEE 21st International Conference on Micro

- Electro Mechanical Systems, January 13-17, 2008, Tucson, AZ, USA. New York: IEEE Press, 2008: 120-123.
- [40] Nicolas S, Allain M, Bridoux C, et al. Fabrication and characterization of a new varifocal liquid lens with embedded PZT actuators for high optical performances [C]//2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 18-22, 2015, Estoril, Portugal. New York: IEEE Press, 2015: 65-68.
- [41] Wang L H, Ishikawa M. Dynamic response of elastomer-based liquid-filled variable focus lens[J]. Sensors, 2019, 19(21): 4624.
- [42] Carpi F, Frediani G, Turco S, et al. Bioinspired tunable lens with muscle-like electroactive elastomers[J]. Advanced Functional Materials, 2011, 21(21): 4152-4158.
- [43] Li J R, Wang Y, Liu L W, et al. A biomimetic soft lens controlled by electrooculographic signal[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(36): 1903762.
- [44] 史惠琦, 王惠明. 一种新型介电弹性体仿生可调焦透镜的变焦分析[J]. 力学学报, 2020, 52(6): 1719-1729.
Shi H Q, Wang H M. Theoretical nonlinear analysis of a biomimetic tunable lens driven by dielectric elastomer[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(6): 1719-1729.
- [45] 程阳, 曹杰, 王营博, 等. 介电弹性体驱动液体透镜的设计与分析[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0522004.
Cheng Y, Cao J, Wang Y B, et al. Design and analysis of liquid lens driven by dielectric elastomer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0522004.
- [46] Choi S T, Lee J Y, Kwon J O, et al. Liquid-filled varifocal lens on a chip[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7208: 72080P.
- [47] Pouydebasque A, Bolis S, Jacquet F, et al. Thin varifocal liquid lenses actuated below 10 V for mobile phone cameras[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8252: 82520P.
- [48] Jen T H, Chang Y C, Ting C H, et al. Locally controllable liquid crystal lens array for partially switchable 2D/3D display[J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(10): 839-844.
- [49] Galstian T, Sova O, Asatryan K, et al. Optical camera with liquid crystal autofocus lens[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 29945-29964.
- [50] Xing Z B, Fan W, Huang D J, et al. High laser damage threshold reflective optically addressed liquid crystal light valve based on gallium nitride conductive electrodes[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2022, 10(6): e35.
- [51] Chen H S, Wang Y J, Chen P J, et al. Electrically adjustable location of a projected image in augmented reality via a liquid-crystal lens[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28154-28162.
- [52] 徐荣青, 李雷, 孔梅梅, 等. 电润湿液体透镜暂态过程的测试与分析[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1023001.
Xu R Q, Li L, Kong M M, et al. Measurement and analysis of transient process of electrowetting liquid lens [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 1023001.
- [53] 李洋, 王国名, 王颖, 等. 面向机器视觉测量的液体透镜调焦系统标定方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 313-322.
Li Y, Wang G M, Wang Y, et al. Calibration method of liquid lens focusing system for machine vision measurement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 20210472.
- [54] Kuang F L, Yuan R Y, Wang Q H, et al. Large zooming range adaptive microscope employing tunable objective and eyepiece[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 14644.
- [55] Li L, Xiao L, Wang J H, et al. Movable electrowetting optofluidic lens for optical axial scanning in microscopy [J]. Opto-Electronic Advances, 2019, 2(2): 180025.
- [56] 孔梅梅, 潘世成, 袁东, 等. 方腔结构的非球面液体透镜的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 1922002.
Kong M M, Pan S C, Yuan D, et al. Design and analysis of aspheric liquid lens with square cavity structure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(19): 1922002.
- [57] Shahini A, Zeng P, Zhao Y, et al. Individually tunable liquid lens arrays using transparent graphene for compound eye applications[C]//2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 24-28, 2016, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2016: 597-600.
- [58] Shahini A, Jin H, Zhou Z X, et al. Toward individually tunable compound eyes with transparent graphene electrode[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2017, 12(4): 046002.
- [59] 赵瑞, 彭超, 张凯, 等. 介电润湿液体透镜仿生复眼的设计与仿真[J]. 光电工程, 2021, 48(2): 0200120.
Zhao R, Peng C, Zhang K, et al. Design and simulation of bionic compound eye with electrowetting liquid lens[J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48(2): 0200120.
- [60] Cheng Y, Cao J E, Meng L T, et al. Reducing defocus aberration of a compound and human hybrid eye using liquid lens[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): 1679-1688.
- [61] Zheng Y, Wang D, Jiang Z, et al. Continuous zoom compound eye imaging system based on liquid lenses[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 37565-37579.