中国光学 Chinese Optics (中英文) Ei 核心期刊

基于联合仿真的电润湿三液体透镜结构参数优选方法

黄鹏 宋跃 周斐强 周益航 何国强 谢中毅 张鑫龙

Optimizing structural parameters of electrowetting triple-liquid lens based on joint simulation technology

HUANG Peng, SONG Yue, ZHOU Fei-Qiang, ZHOU Yi-Hang, HE Guo-Qiang, XIE Zhong-Yi, ZHANG Xin-Long

引用本文:
黄鹏, 宋跃, 周斐强, 周益航, 何国强, 谢中毅, 张鑫龙. 基于联合仿真的电润湿三液体透镜结构参数优选方法[J]. 中国光学, 2025, 18(1): 78−88. doi: 10.37188/CO.2024−0130
HUANG Peng, SONG Yue, ZHOU Fei-Qiang, ZHOU Yi-Hang, HE Guo-Qiang, XIE Zhong-Yi, ZHANG Xin-Long. Optimizing structural parameters of electrowetting triple-liquid lens based on joint simulation technology[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 78-88. doi: 10.37188/CO.2024-0130

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024−0130

文章编号　2097-1842(2025)01-0078-11

基于联合仿真的电润湿三液体透镜结构参数优选方法

黄　鹏*, 宋　跃, 周斐强, 周益航, 何国强, 谢中毅, 张鑫龙
（桂林理工大学 机械与控制工程学院 广西高校先进制造与自动化技术重点实验室,
广西 桂林 541006）

摘要: 电润湿三液体透镜具有优秀的变焦性能, 但其结构复杂度和设计难度较大, 因此, 本文提出了一种基于联合仿真的电润湿三液体透镜结构参数优选方法。在设计某三液体透镜时, 利用 Comsol 和 Zemax 软件建立了不同结构参数下的三液体透镜仿真模型, 得到了其在不同电压下的焦距, 分析了高度和锥度对变焦范围和初始焦距的影响, 确定了变焦范围最大且初始焦距最长的一组结构参数。为了验证该方法的可靠性, 制备了不同高度和锥度的三液体透镜模型, 并进行变焦实验。仿真与实验结果表明: 三液体透镜的初始焦距与高度和锥度正相关; 变焦范围与锥度正相关, 但高度为主要影响因素; 当高度为 12 mm, 锥度为 20°时, 透镜变焦范围最大, 初始焦距最长。当锥度小于 15°时, 仿真与实验结果的吻合度较高。

关　键　词: 电润湿三液体透镜; 联合仿真; 变焦实验; 参数优选
中图分类号: O439　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2024-0130　　**CSTR:** 32171.14.CO.2024-0130

Optimizing structural parameters of electrowetting triple-liquid lens based on joint simulation technology

HUANG Peng*, SONG Yue, ZHOU Fei-Qiang, ZHOU Yi-Hang, HE Guo-Qiang,
XIE Zhong-Yi, ZHANG Xin-Long
(*Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology in Guangxi Universities*, *School of Mechanical and Control Engineering*, *Guilin University of Technology*, *Guilin* 541006, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *hp*1981*hp@sina.com.cn*

Abstract: The electrowetting triple-liquid lens has excellent zoom performance, but its structural complexity and design difficulty are relatively high. Therefore, we propose a method for optimizing the structural parameters of the electrowetting triple-liquid lens based on joint simulation. To design a triple-liquid lens, Comsol and Zemax software are used to establish triple-liquid lens simulation models under different structural

收稿日期: 2024-07-12; **修订日期:** 2024-08-05
基金项目: 广西科技计划资助项目(No. AB22035041); 梧州市中央引导地方科技发展资金项目(No. 202201001); 桂林理工大学科研启动基金资助(No. GUTQDJJ2016014)
Supported by Guangxi Science and Technology Program (No. AB22035041); Wuzhou Central Leading Local Science and Technology Development Fund (No. 202201001); Guilin University of Technology Scientific Research Startup Fundation (No. GUTQDJJ2016014)

parameters, and its focal lengths under different voltages are obtained. The effects of height and taper on zoom range and initial focal length are analyzed, and a set of structural parameters with the maximum zoom range and the longest initial focal length is determined. To verify the method's reliability, we prepare the triple-liquid lens models with different heights and tapers, and conduct zoom experiments. The simulation and experimental results show that the initial focal length of the triple-liquid lens correlates positively with height and taper; the zoom range correlates positively with taper, but height is the main influencing factor. When the height is 12 mm and the taper is 20°, the lens has the most extensive zoom range and the longest initial focal length. When the taper is less than 15°, the simulation and experimental results are highly consistent.

Key words: electrowetting triple-liquid lens; joint simulation; zoom experiment; parameter optimization

1　引　言

传统的变焦光学系统主要依赖于机械变焦镜头，由一系列焦距固定的透镜组合而成，再结合复杂的运动实现变焦[1]，其制作成本高，且难以进行小型化和轻量化。随着微流控技术的迅速发展，液体透镜作为一种新型光学器件应运而生。其中，电润湿液体透镜通过调节外加电压来改变液体曲率进而改变焦距，具有体积小、集成度高、功耗低、无移动部件等诸多优势[2]。带有液体透镜的变焦光学系统。主要可分为两类：单液体变焦透镜和多液体变焦透镜[3-6]。多液体变焦透镜中，双液体透镜的应用更广泛，但其仍然存在一定的局限性：由于其变焦范围有限，故需要较大的驱动电压来克服两种液体之间的界面张力从而实现较大的曲率变化。而三液体透镜具有两层用于光学变焦的液-液界面[7]，在相同的驱动电压范围和空间尺寸下，三液体透镜具有比双液体透镜更大的变焦范围。鉴于电润湿三液体透镜优秀的变焦性能，学者们尝试将其应用于各类光学系统中。

2017 年，南京邮电大学的赵瑞等[8] 提出了一种基于介电润湿效应的三液体透镜与传统固定透镜组合的三组元结构的变焦光学系统，并利用 Zemax 软件进行系统设计与优化，优化后的三液体透镜系统变焦范围更大，但未对影响其变焦性能的因素做具体分析。2020 年，赵瑞等[9] 设计一种基于介电润湿效应的三液体透镜阵列，利用 Comsol 和 Zemax 软件进行联合仿真分析，验证了该透镜可以实现对不同类型波前误差的校正和补偿，在无机械波前校正领域中有着广阔的应用前景。同年，天津大学 Song 等[10] 设计了一种电润湿三液体透镜，扩大了其变焦范围，降低了其波前像差，使该电润湿三液体透镜的整体性能优于传统的电润湿透镜。2023 年，北京航空航天大学王琼华团队[7] 在此基础上提出了一种内腔为球形的三层球面电润湿液体透镜。她们利用 Comsol 软件对此透镜的液体界面变化情况进行仿真分析，并通过实验测得其焦距可从−35.2 mm 变化到 51.1 mm。此透镜具有结构紧凑、大变焦比和宽视场的特点，在光学成像系统中具有广阔的应用前景。然而仅利用 Comsol 仿真无法对透镜的变焦性能进行具体预测，需要联合其他仿真软件。

目前，关于电润湿三液体透镜的理论和实验研究主要聚焦于此类透镜的应用，对于其变焦性能的研究依然有所欠缺，评价液体透镜性能的指标有：初始焦距、变焦范围、驱动电压[11]、阈值电压[12]、响应时间[13-14] 等。根据三液体透镜的变焦原理，实际影响其变焦性能和稳定性的因素有很多，如透镜的结构参数、重复变焦精度[15]、内部液体间的密度差[16]、不同液体的体积占比及其物理特性。在根据变焦性能的需求确定三液体透镜设计方案时，如何实现结构参数的优选是关键，但是常用的实验试凑法往往难以选择出合适的结构参数，这一定程度上限制了三液体透镜的发展和应用。

高度 H 和锥度 α（与光轴夹角）作为设计三液体透镜的关键结构参数，会对初始焦距 f 和变焦范围 F 产生影响，因此，本文提出一种基于联合仿真的方法指导参数的调整和优选，并应用于某透镜的设计中。利用 Comsol 软件对不同高度和锥度三液体透镜进行仿真建模，得到不同电压下

的两层液体界面。再对其液体界面进行面型拟合，将拟合后的面型系数输入 Zemax 软件，得到其初始焦距和变焦范围曲线，分析高度和锥度的改变对透镜变焦范围和初始焦距的影响，确定变焦范围最大且初始焦距最长的一组结构参数。本研究主要聚焦于圆台形结构的电润湿三液体透镜。圆台形结构与方腔形结构和球腔形结构相比，具有较快的响应速度和较好的机械稳定性，且加工流程简单、成本低。所提出的联合仿真方法对于圆柱形结构的电润湿液体透镜同样具有一定的适用性，因为圆柱形结构是圆台形结构的一种特殊情况，即锥度为 0°。对于方腔形结构和球腔形结构等其他类型的电润湿液体透镜是否适用仍然有待验证。联合仿真结果得到的高度和锥度对初始焦距和变焦范围的影响趋势与实验结果基本相符，且实验得出的变焦范围最大的参数组合与仿真结果基本一致，验证了所提出方法的有效性。

2 三液体透镜的结构参数优选方法

基于介电润湿效应驱动的三液体透镜变焦原理如图 1(彩图见期刊电子版)所示。在导电液和金属电极之间依次沉积一层薄绝缘介质和薄疏水层，施加电压调节固-液界面的表面张力，从而改变液滴与固体基板之间的接触角，实现透镜的自变焦。通电状态下，导电液体的界面形状由实线变为虚线，初始接触角θ_0变为θ。

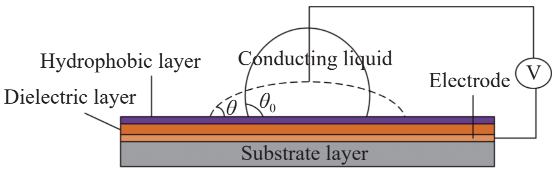


图 1 介电润湿效应的原理图

Fig. 1 Principle diagram of dielectric wetting on the medium

设计三液体透镜需要考虑到以下几点：容器的材料和形状、孔径、腔体的形状以及高度和锥度。某三液体透镜的结构示意图如图 2(彩图见期刊电子版)所示。其中：使用交流电压作为驱动电压，能提高透镜的变焦响应速度和精度，且实验过程中不易发生电解现象；使用 6061 铝合金作为容器，6061 铝合金硬度较小，加工简单且成本低，若要考虑加工透镜的微结构和实用性，则可选择综合性能更好的 7075 航空铝；铝制零件整体为圆柱形，腔体为圆台形，顶部和底部采用 ITO 导电玻璃封装。其中铝合金和 ITO 导电玻璃作为电极，透镜内部腔体采用既有疏水性又有绝缘性的 Parylene C(厚度约为 8 μm)作为介电涂层。8 μm 的介电涂层更加均匀，且不易被透镜加工表面的毛刺刺穿，能够确保实验不受介电涂层的影响，提高实验的准确性和效率。该透镜的结构参数如下：高度为 8~12 mm，锥度为 10~20°，底孔直径为 4 mm，腔体为圆台形。其中，高度和锥度作为关键结构参数，可能会对透镜的变焦范围和初始焦距产生影响。合理选择初始焦距能够确保透镜在变焦过程中的成像质量，而较大的变焦范围可以使透镜具有更高的灵活性和适应性，能够覆盖更多的成像场景。通过优化初始焦距和变焦范围，可以确保透镜能在不同应用场景中均保持良好的成像性能。因此，希望在其结构参数允许范围内，在获得最大变焦范围的前提下，初始焦距尽可能最长。然而，在设计需求范围内的高度和锥度组合非常多，通过实验试凑来选择最优参数组合的方法时间长、成本高、效率低。

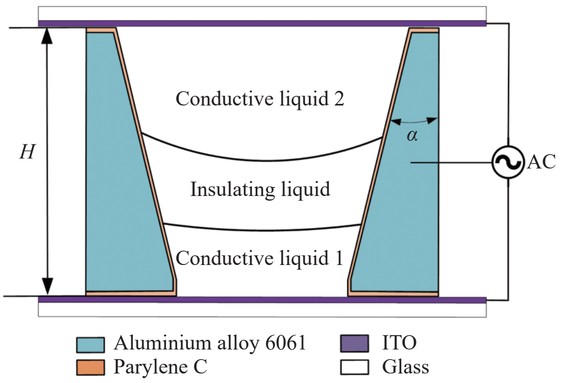


图 2 某电润湿三液体透镜截面图

Fig. 2 Cross section of a electrowetting triple-liquid zoom lens

为了解决该难题，可以先通过联合仿真来研究高度和锥度的改变对透镜变焦范围和初始焦距的影响，基于联合仿真结果，再选择合适的结构参数，以获得更大的变焦范围和初始焦距。Comsol 作为一款有限元分析软件，能够在同一个仿真环境中处理多物理场的耦合问题，常用于液体透镜的仿真分析。首先，利用 Comsol 软件建立仿真模型，得到三液体透镜液体界面的面型系数，再利用 Zemax 软件输出仿真模型的焦距。最后，从三液体透镜的仿真模型中选取部分结构参数，制备

实验样品进行变焦实验。将其与仿真结果进行对比,验证这种基于仿真优选结构参数的方法的可行性。基于联合仿真的三液体透镜结构参数优选流程如图 3 所示。

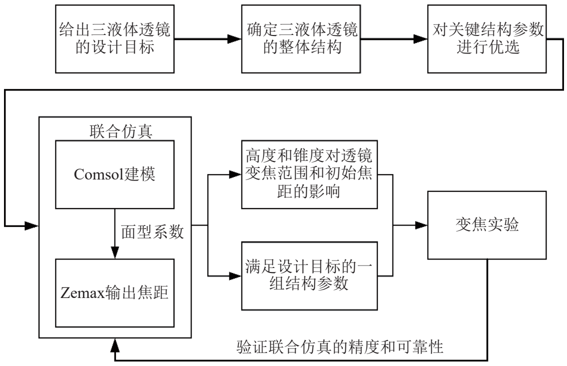


图 3　结构参数优选流程图

Fig. 3　Flowchart of structural parameter optimization

3　三液体透镜的联合仿真及分析

利用 Comsol 软件构建三液体透镜的仿真模型,得到不同电压时上、下两层液体界面。以高度为 8 mm, 锥度为 10°的透镜为例,该透镜的液体界面如图 4(彩图见期刊电子版)所示。

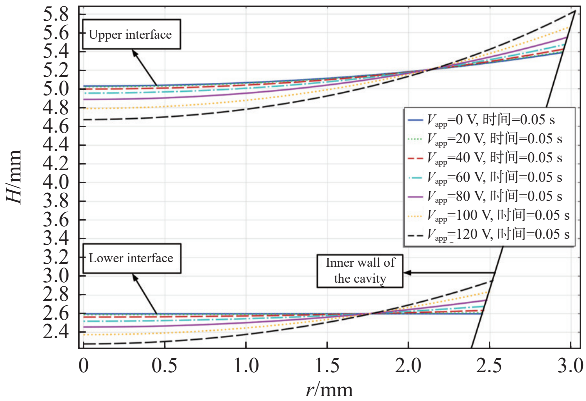


图 4　仿真的液体界面

Fig. 4　Simulated liquid interface

由图 4 可知,当施加的电压为 0~40 V 时,透镜的上、下两层液体界面无明显变化,当电压达到 60 V 时,液体界面开始发生变化,电压增加至 120 V 后,液体界面又不再发生变化。由此可知,仿真三液体透镜模型的驱动电压为 60 V, 阈值电压 120 V。仿真参数设置如表 1 和表 2 所示,参考文献 [9, 17]。3 个液体透镜的 3 种填充液体分别为:上层液体是质量分数为 1% 的 SDS 导电溶液,中层液体为溴代十二烷(C12H25Br)绝缘溶液,下层液体为 [EMIm][NTf2] 离子导电溶液。

表 1　参数设置

Tab. 1　Parameter settings

Parameter	Value	Remark
γ_1/N·m^{-1}	0.05	Surface tension1 ([EMIm][NTf2]& C12H25Br)
γ_2/N·m^{-1}	0.069	Surface tension2 (C12H25Br& 1%SDS)
ε	3.15	Relative dielectric constant
θ_0/°	80	Zero voltage contact angle ([EMIm][NTf2]& C12H25Br)
θ_1/°	65	Zero voltage contact angle (C12H25Br& 1%SDS)
d/μm	8	Dielectric thickness

表 2　液体参数设置

Tab. 2　Liquid parameter settings

Liquid	Density/kg·m^{-3}	Refractive index	Viscosity/10^{-3}Pa·s
[EMIm][NTf2]	1 380	1.422 7	32.00
C12H25Br	1 039	1.458	3.60
1%SDS	1 000	1.335	2.70

然后,将液体界面曲线导出为绘图的坐标数据,再将坐标数据转化为坐标曲线,并对该曲线的面型进行拟合。由于 Comsol 软件建立的三液体透镜模型为旋转对称模型,所以拟合得到的两层液体界面曲线是旋转对称的,而偶次非球面函数具有旋转对称性,并且通过调整系数能灵活适应各种非球面形状。因此,采用的拟合公式为偶次非球面公式,另外,为了便于后期在 Zemax 软件中的应用,选择一般多项式的形式[18],如式(1)所示:

$$z = a + b\left(x^2+y^2\right) + c\left(x^2+y^2\right)^2 + d\left(x^2+y^2\right)^3 + e\left(x^2+y^2\right)^4 \quad, \tag{1}$$

其中, a 指的是三液体透镜界面的相对位置; b、c、d、e 分别表示两层液体界面的偶次非球面系数,如表 3 所示。z、x、y 为液面各点的位置坐标[18-20]。对编号 L1 的三液体透镜在 120 V 电压时的两层液体界面进行曲面拟合,得到的拟合结果中 R-square 的值等于 1,说明拟合精度较高。

表 3　偶次非球面系数

Tab. 3　Even aspherical coefficients

Even asphere	b	c	d	e
Lower interface	0.099	0.001	0	0
Upper interface	0.106	0.002	0	0

最后，对不同结构尺寸的三液体透镜进行面型拟合，将面型系数值导入 Zemax 软件，构建三液体透镜的仿真模型。表 4 为编号 L1 的三液体透镜在 120 V 电压下的光学系统结构参数，OBJ 为物面、STO 为光阑面、IMA 为像面。

表 4　系统的结构参数

Tab. 4　Structural parameters of proposed system

Surface	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0
STO	Standard	Infinity	0.5	K9	2
2	Standard	Infinity	2.3	Conductive liquid1	2
3	Even asphere	Infinity	2.4	Insulating liquid	2
4	Even asphere	Infinity	3.3	Conductive liquid2	2
5	Standard	Infinity	0.5	K9	2
6	Standard	Infinity	20	K9	2
IMA	Standard	Infinity	—		4

STO 面到第 2 个面和第 5 个面到第 6 个面分别表示该液体透镜前后两端的导电 ITO 玻璃，厚度为 0.5 mm，第 2 个面到第 5 个面之间为组成该液体透镜的 3 种液体材料。Zemax 中三液体透镜的光路如图 5 所示，电压为 120 V 时，该三液体透镜为凹透镜形态，有效焦距为−51.3 mm。由于三液体透镜的实际液体界面不一定是旋转对称的，联合仿真得到的透镜焦距与实际焦距之间存在一定的误差。通过这种联合仿真的方式，可以对不同结构参数的三液体透镜的焦距变化趋势进行有效预测，便于后续的对比分析。

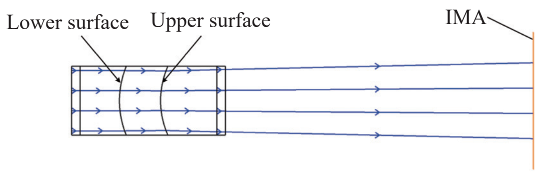


图 5　三液体透镜的光路图

Fig. 5　Optical path diagram of triple-liquid lens

图 6 和图 7 分别为三液体透镜仿真模型在不同高度和锥度下，初始焦距和变焦范围的变化关系。

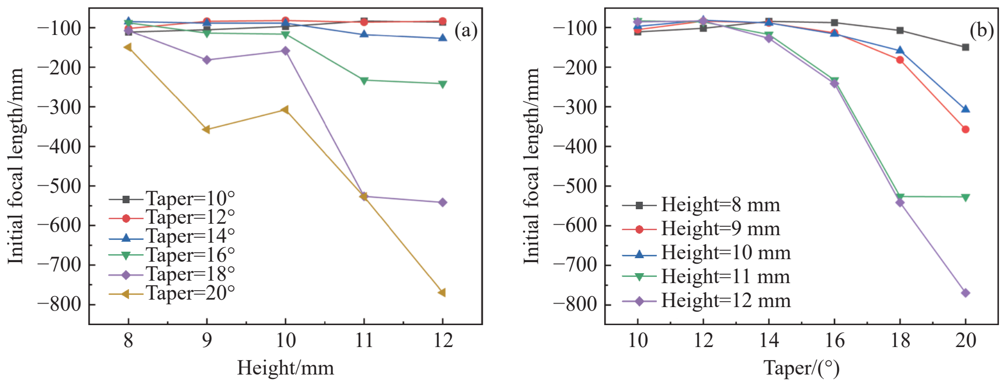


图 6　仿真初始焦距随 (a) 高度和 (b) 锥度的变化关系图

Fig. 6　Simulated initial focal length as a function of (a) height and (b) taper

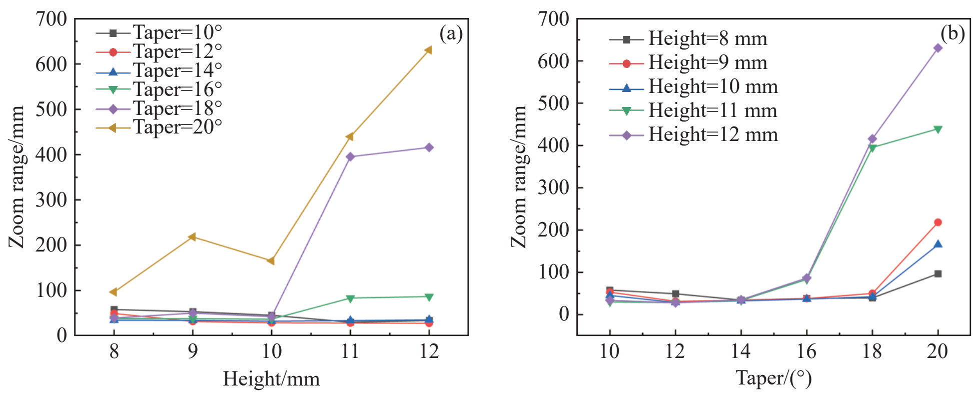


图 7　仿真变焦范围随 (a) 高度和 (b) 锥度的变化关系图

Fig. 7　Diagrams of simulated zoom range as a function of (a) height and (b) taper

由图 6(a)和图 7(a)可知, 锥度为 10~14°时, 高度改变, 初始焦距和变焦范围基本不变; 锥度为 16°~20°时, 随着高度的增大, 初始焦距和变焦范围增大。由图 6(b)和图 7(b)可知, 锥度增大, 初始焦距也逐渐增大。锥度为 10°~14°时, 锥度改变, 变焦范围基本不变; 锥度为 16°~20°时, 随着锥度的增大, 变焦范围增大。仿真结果表明, 三液体透镜的初始焦距和变焦范围均与高度和锥度正相关, 即高度和锥度增大, 初始焦距变长, 变焦范围增大。当高度为 12 mm, 锥度为 20°时, 仿真模型的变焦范围最大, 初始焦距最长。

将仿真的初始焦距和变焦范围的数据点拟合成曲面, 拟合结果如下:

$$f'(H,\alpha)=2.295H^2-5.633\alpha^2-12.2H\alpha+102.4H+261.9\alpha-2202\quad, \tag{2}$$

$$F'(H,\alpha)=11.36H^2+5.298\alpha^2+14.82H\alpha-409.3H-281.2\alpha+3786\quad, \tag{3}$$

其中, 式(2)为仿真初始焦距的拟合公式, 锥度 α 和 α^2 的系数均大于高度 H 和 H^2 的系数; 式(3)为仿真变焦范围的拟合公式, 高度 H 和 H^2 的系数均大于锥度 α 和 α^2 的系数。结果表明, 三液体透镜仿真模型的初始焦距主要受锥度影响, 变焦范围主要受高度影响。因此, 选用最大高度和最大锥度的设计参数组合能够获得最大的变焦范围和初始焦距。

4　三液体透镜的实验分析

4.1　三液体透镜变焦实验

为了验证仿真结果的准确性, 制作三液体透镜样品进行变焦实验 (图 8)。设计搭建了一套焦距测量装置, 如图 9 所示。该装置以自动焦度计原理[21] 为基础, 由交流电源(型号 GWINSTEK APS-7050、频率 50 Hz、波形为正弦波、上海爱泽工业设备有限公司)、滑台、导轨(型号 XLWZ60-L600)、平行光管(型号 5W-F550、上海光学仪器厂)、位移传感器(型号 KTC-400)、CCD(SHL-200WS、深圳顺华利电子有限公司)等设备装配组成。

假设 h、h'分别为未放置透镜和放置透镜时光斑的直径, Δx、x 分别为被测镜片后顶点至光阑的距离和光阑至面阵 CCD 的距离, 平行光经被测镜片后发生偏转, 经过孔径光阑落在光电位置探测器 CCD 上, 由此可以得到待测透镜的焦度:

$$D=\frac{h-h'}{xh+\Delta x(h-h')}m^{-1}\quad. \tag{4}$$

使用该装置测量液体透镜前, 首先选用了焦距分别为−50 mm 和−100 mm 的固定透镜进行多次测量, 测量结果的平均误差能够满足实验需求。该测焦装置的精度为 0.1 mm, 测量范围为−200 mm~−30 mm, 可以用于液体透镜的焦距测量。

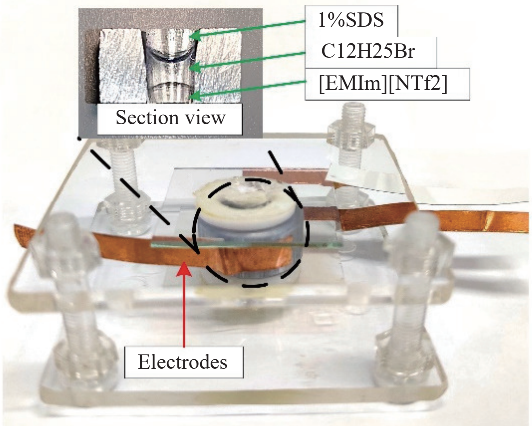


图 8　三液体透镜实物图

Fig. 8　Physical image of a triple-liquid lens

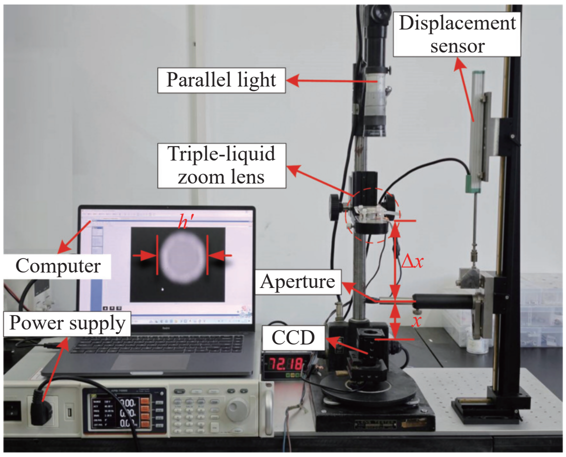


图 9　焦距测量装置

Fig. 9　Focal length measurement device

4.2　三液体透镜变焦影响因素对比实验

从三液体透镜的仿真模型中选取如表 5 所示的一部分结构参数, 制备实验样品, 进行变焦实验。分别测量其初始焦距和施加不同驱动电压时的焦距, 并且记录驱动电压、阈值电压、变焦范围等与三液体透镜变焦性能相关的参数。

表 5 三液体透镜零件参数值

Tab. 5 Parameter values of the triple-liquid lens component

Height/mm	Taper/°	Label
8	10	L1
	15	L2
	20	L3
10	10	L4
	15	L5
	20	L6
12	10	L7
	15	L8
	20	L9

三液体透镜制备步骤如下：

首先，用砂纸打磨透镜外壁去除 Parylene C 涂层，确保其能够导电并使用万用表测试，清洗打磨表面杂质后晾干水分，然后将导电胶带粘在去除 Parylene C 涂层的外壁上，作为三液体透镜的一个电极引出。再将透明 ITO 导电玻璃清洗干净并烘干，然后在处理好的透镜底部涂上一层薄薄的 AB 胶，将其粘在 ITO 导电玻璃的导电面上并引出电极。

其次，根据透镜零件腔体的体积（例如编号 L1 透镜的近似体积为 188 μL），先使用移液枪加入 45 μL 的 [EMIm][NTf2] 离子导电溶液；然后加入 80 μL 的 1%SDS 导电溶液填充透镜腔体；最后将移液枪倾斜一定角度深入到腔体底部缓慢注入 55 μL 的溴代十二烷（C12H25Br）作为中层绝缘溶液，再用透明的 ITO 玻璃封盖，确保整个操作过程中腔体内尽可能无气泡。

最后，将两块透明亚克力板分别贴合在制成的液体透镜的上下端面，并用螺栓固定，为了避免导电溶液外溢而导致上下两个电极相连通发生短路，透镜样品制备完成后用吸水纸擦拭溢出的导电溶液并且进行中低温烘干，以确保三液体透镜的外表面干燥，最终完成三液体透镜实验样品的制备。

将制备好的三液体透镜样品接通电源，放置于焦距测量装置上，进行变焦实验，测量并记录三液体透镜的各项参数。其初始焦距、驱动电压、阈值电压如表 6 所示，不同电压下的焦距如图 10（彩图见期刊电子版）所示。

表 6 实验数据表

Tab. 6 Experimental data

Number	Initial focal length /mm	Drive voltage /V	Threshold voltage /V
L1	−36.2	60	120
L2	−36.9	60	120
L3	−45.5	60	120
L4	−38.5	60	120
L5	−49.5	60	120
L6	−51.3	80	140
L7	−40.7	80	140
L8	−47.2	80	140
L9	−57.1	80	140

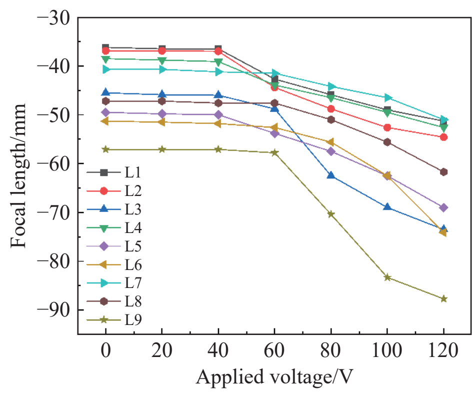


图 10 实验中不同电压下的焦距

Fig. 10 Focal lengths at different voltages in the experiment

从表 6 可以得知，编号 L6~L9 的三液体透镜在实际实验中阈值电压可以达到 140 V，但这不符合低阈值电压的设计初衷，同时为了便于进行对比，只记录透镜在 0~120 V 电压下的焦距。由图 10 可知，随着驱动电压的增大，透镜焦距逐渐变长，其中，L9 透镜的变焦范围为（−87.7 mm, −57.1 mm），初始焦距为−57.1 mm，该组结构的变焦范围最大，初始焦距最长。此时，透镜的高度为 12 mm，锥度为 20°，与仿真结果一致。

图 11 和图 12 分别为三液体透镜在不同高度和锥度下，初始焦距和变焦范围的变化关系。由图 11(a)和图 12(a)可知，随着高度的增大，锥度为 10°时，初始焦距增大，变焦范围减小；锥度为 15°时，初始焦距和变焦范围均先增大后减小；锥度为 20°时，初始焦距增大，变焦范围先减小后增

大。由图 11(b)和图 12(b)可知, 随着锥度的增大, 初始焦距和变焦范围随之增大。

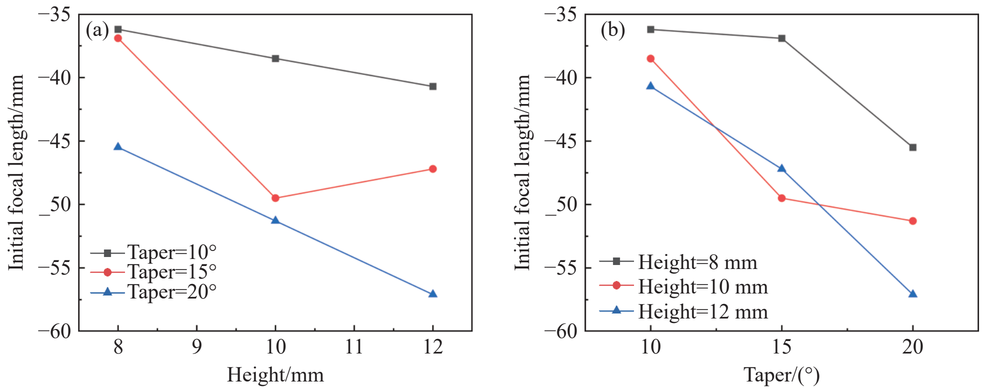


图 11　初始焦距随 (a) 高度和 (b) 锥度的变化关系图

Fig. 11　Diagrams of initial focal length as a function of (a) height and (b) taper

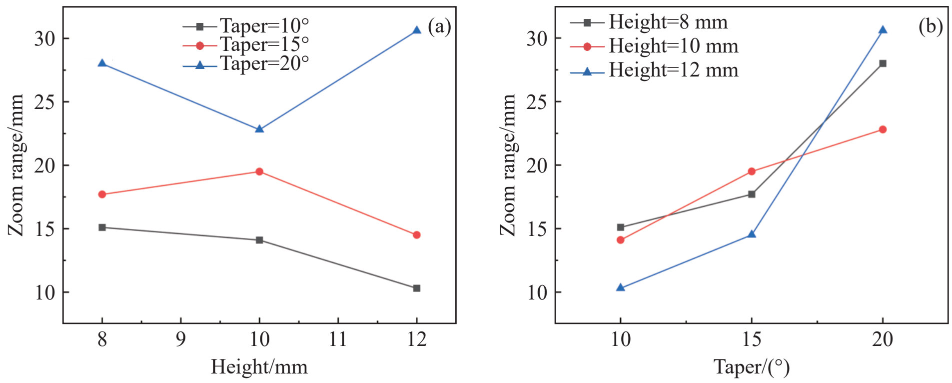


图 12　变焦范围随 (a) 高度和 (b) 锥度的变化关系图

Fig. 12　Diagrams of zoom range as a function of (a) height and (b) taper

将实验的初始焦距和变焦范围的数据点拟合成曲面, 拟合结果如下:

$$f(H,\alpha)=0.625H^2-0.014\alpha^2-0.177H\alpha-12.04H+0.912\alpha+27.78\ ,\qquad(5)$$

$$F(H,\alpha)=0.142H^2+0.118\alpha^2+0.185H\alpha-6.058H-3.953\alpha+68.57\ ,\qquad(6)$$

其中, 式(5)为初始焦距的拟合公式, 式(6)为变焦范围的拟合公式, 高度 H 和H^2的系数均大于锥度 α和α^2的系数。实验结果表明; 初始焦距与高度和锥度正相关, 高度和锥度增大, 初始焦距变长, 其中高度为主要影响因素; 变焦范围与锥度正相关, 锥度增大, 变焦范围增大; 高度改变与变焦范围无明显比例关系, 但变焦范围主要受高度影响, 与仿真结果基本相符。因此, 当设计的三液体透镜高度在 8~12 mm, 锥度在 10~20°范围内时, 可以选用最大高度和最大锥度的设计参数组合来获得最大的变焦范围和初始焦距。

初始焦距和变焦范围的仿真和实验误差如图 13 和图 14(彩图见期刊电子版)所示。可见, 当锥度小于 15°时, 仿真与实验误差为 50~100 mm, 拟合精度较高。当高度大于 10 mm, 锥度大于 17°时, 透镜的内腔液体体积增大, 仿真与实验的误差增大至 300 mm以上, 最大误差可达 600 mm 左右。随着液体体积的增大, 其受到的重力作用也会增强。重力可能会与电场力发生相互作用, 特别是在液滴体积较大时, 重力将成为不可忽视的因素, 会改变接触角的大小和稳定性[22], 从而影响介电润湿效应。但在 Comsol 仿真过程中可能难以完全模拟和预测重力因素, 从而导致了仿真与实验的误差。但是, 仿真和实验都验证了三液体透镜的初始焦距与高度和锥度正相关; 变焦范围与锥度正相关, 主要受高度影响。且仿真和实验中, 变焦范围和初始焦距的变化趋势相同, 变焦

范围最大和初始焦距最长的一组参数组合也一致。综上所述,根据联合仿真结果,对三液体透镜结构参数进行优选是可行的。

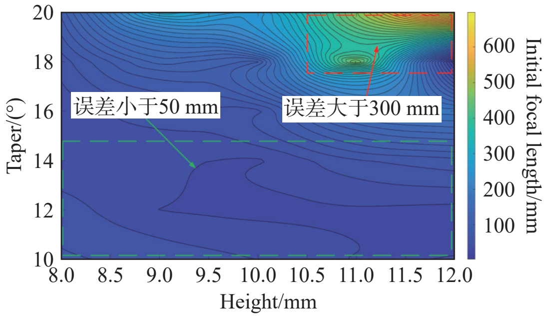


图 13 仿真与实验的初始焦距误差

Fig. 13 Initial focal length error in simulation and experiments

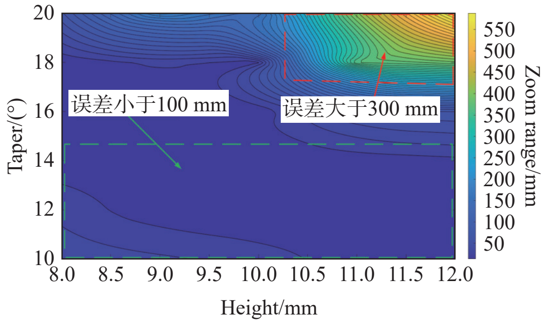


图 14 仿真与实验的变焦范围误差

Fig. 14 Zoom range error in simulation and experiments

5 结 论

为了更好地指导电润湿三液体透镜的设计,提出了一种基于联合仿真的电润湿三液体透镜结构参数优选方法,通过 Comsol 和 Zemax 软件对不同结构参数下的三液体透镜进行仿真分析,研究了高度和锥度对初始焦距和变焦范围的影响。在联合仿真的基础上,选出了使得透镜的变焦范围和初始焦距达到最大值的高度和锥度组合,并对联合仿真结果进行实验验证。实验结果得到的初始焦距和变焦范围的变化趋势与仿真结果基本相符,且实验结果得出的最优参数组合与仿真结果基本一致,证明了利用联合仿真实现三液体透镜结构参数优选的方法是可行的。仿真和实验结果均表明,三液体透镜的初始焦距与高度和锥度正相关;变焦范围与锥度正相关,主要受高度影响。利用该规律,实现了对某三液体透镜的结构参数优选,在其结构参数允许范围内,获得了最大的变焦范围和初始焦距。

由于实验条件有限,本文仅研究了高度在 8~12 mm 范围内,锥度在 10~20°时,高度和锥度改变对三液体透镜变焦性能的影响。因此,所给出的结构参数优选方法和初始焦距及变焦范围的变化趋势仅针对圆台形结构的三液体透镜,对于其他种类的三液体透镜是否适用有待验证。Comsol 软件为有限元分析软件,在对液体透镜进行仿真时,对于重力因素的影响无法进行完全模拟和预测,导致了液体体积增大时,仿真与实验误差增大。后续工作将针对以上问题对仿真模型进行优化,进一步提高仿真与实验的吻合度。优化液体透镜的制作工艺,例如减小介电涂层厚度、降低驱动电压、更换综合性能更优的金属和液体材料,以提高该液体透镜的实用性。

参考文献:

[1] 王潇枫, 石岩, 庄一, 等. 变焦结构光成像系统的光学设计[J]. 应用光学, 2018, 39(1): 22-27.
WANG X F, SHI Y, ZHUANG Y, *et al*.. Optical design of zoom structured light imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 22-27. (in Chinese).

[2] 黄翔, 林四英, 谷丹丹, 等. 液体变焦镜头的研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1179-1194.
HUANG X, LIN S Y, GU D D, *et al*.. Review on progress of variable-focus liquid lens[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1179-1194. (in Chinese).

[3] 王琼华, 李磊. 基于自适应透镜的光学成像系统[J]. 光电子技术, 2020, 40(3): 155-163.
WANG Q H, LI L. Optical imaging system based on adaptive lens[J]. *Optoelectronic Technology*, 2020, 40(3): 155-163. (in Chinese).

[4] 张鑫, 蒋世磊, 赵金, 等. 电润湿液体透镜变焦光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(1): 90-95.
ZHANG X, JIANG SH L, ZHAO J, *et al*.. Design of zoom optical system with electorwetting liquid lens[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2024, 22(1): 90-95. (in Chinese).

[5] 董健, 王春艳, 孙昊, 等. 腹腔镜用液体透镜变焦光学系统设计研究[J]. 中国激光, 2023, 50(21): 2107204.

DONG J, WANG CH Y, SUN H, *et al*.. Design and study of liquid lens zoom optical system for laparoscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(21): 2107204. (in Chinese).

[6] CHENG Y, CAO J, TANG X, *et al*.. Optical zoom imaging systems using adaptive liquid lenses[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021, 16(4): 041002.

[7] XU J B, ZHAO Y R, LIU CH, *et al*.. Triple-layer spherical electrowetting liquid lens with large-aperture and high zoom ratio[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 160: 107311.

[8] 赵瑞, 马建权, 党智勇, 等. 基于介电润湿三液体透镜的变焦光学系统的设计与分析[J]. 光子学报, 2017, 46(6): 622005.

ZHAO R, MA J Q, DANG ZH Y, *et al*.. Design and analysis of an optical zoom system using electrowetting-based triple liquid lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(6): 622005. (in Chinese).

[9] 赵瑞, 陈露楠, 孔梅梅, 等. 用于波前补偿的三液体透镜阵列的设计分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 212202.

ZHAO R, CHEN L N, KONG M M, *et al*.. Design and analysis of triple liquid lens array for wavefront compensation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 212202. (in Chinese).

[10] 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(1): 16318.

[11] 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. (in Chinese).

[12] SONG X M, ZHANG H X, ZHANG Z L, *et al*.. Design and characteristics of a Maxwell force-driven liquid lens[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8323-8332.

[13] ZHAO P P, LI Y, ZAPPE H. Accelerated electrowetting-based tunable fluidic lenses[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15733-15746.

[14] 徐荣青, 孔梅梅, 张宏超, 等. 减少电润湿液体透镜变焦时间的实验研究[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1322003.

XU R Q, KONG M M, ZHANG H CH, *et al*.. Experimental research on reducing zoom time of electrowetting liquid lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1322003. (in Chinese).

[15] 黄鹏, 杨晓营, 陈彬, 等. 电润湿透镜重复变焦精度指标及其优化方法[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(4): 868-877.

HUANG P, YANG X Y, CHEN B, *et al*.. Repeated zoom accuracy index of an electrowetting lens and its optimization method[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 868-877. (in Chinese).

[16] LIM W Y, SUPEKAR O D, ZOHRABI M, *et al*.. Liquid combination with high refractive index contrast and fast scanning speeds for electrowetting adaptive optics[J]. *Langmuir*, 2018, 34(48): 14511-14518.

[17] WANG D Y, HU D G, ZHOU Y W, *et al*.. Design and fabrication of a focus-tunable liquid cylindrical lens based on electrowetting[J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 47430-47439.

[18] 孔梅梅, 潘世成, 袁东, 等. 方腔结构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(21): 2122005.

KONG M M, PAN SH CH, YUAN D, *et al*.. Design and analysis of aspheric liquid lens with square cavity structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(21): 2122005. (in Chinese).

[19] 孔梅梅, 董媛, 徐春生, 等. 基于平板电极的非球面组合液体透镜的仿真与实验分析[J]. 光学学报, 2024, 44(8): 0823002.

KONG M M, DONG Y, XU CH SH, *et al*.. Simulation and experimental analysis of aspherical combined liquid lens based on flat electrode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(8): 0823002. (in Chinese).

[20] 孔梅梅, 董媛, 徐春生, 等. 基于平行平板电极的非球面双液体透镜的仿真与实验分析[J]. 物理学报, 2023, 72(24): 244203.

KONG M M, DONG Y, XU CH SH, *et al*.. Simulation and experimental analysis of aspherical double-liquid lens based on parallel plate electrode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(24): 244203. (in Chinese).

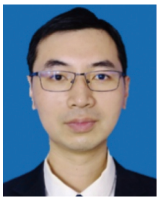
[21] 马小超. 自动焦度计使用注意事项及部分项目的自测方法[J]. 中国计量, 2023(9): 102-104,119.

MA X CH. Precautions for using the automatic lensmeter and self-testing methods for some items[J]. *China Metrology*, 2023(9): 102-104,119. (in Chinese)

[22] 李中杨, 马国鹭, 曾国英. 液态金属汞在硅片表面的润湿行为研究[J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(9): 817-820.

LI ZH Y, MA G L, ZENG G Y. Study on wetting behavior of liquid mercury droplet on silicon wafer surface[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(9): 817-820. (in Chinese).

作者简介：



黄　鹏（1981—），男，湖南衡阳人，博士，副教授，2016 年于浙江大学获得博士学位，主要从事机器视觉及液体光子器件方面的研究。 E-mail：hp1981hp@sina.com.cn