

文章编号: 1005-5630(2020)04-0020-05

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.04.004

基于电润湿效应的自变焦补偿光学系统

喻治俊, 彭润玲, 谷 浩, 罗远智

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 变焦光学系统是照相机、摄像机等许多光学器件中的关键元件, 实现变焦光学系统的微型化及增大系统的变倍比是一个长期目标。研制了一种三液体自变焦补偿透镜, 可在外加电压作用下实现自变焦补偿功能, 因此该透镜元件本身可以作为一个简单的变焦光学系统。通过高斯光学理论分析及 Zemax 模拟仿真验证了该系统的自变焦补偿功能。结果表明, 该系统焦距变化范围为 378~424 mm, 变倍比为 1.217, 达到了预期目标, 对变焦光学系统的研究具有一定的参考价值。

关键词: 电润湿; 液体透镜; 自变焦补偿透镜; 光学器件; 光学系统

中图分类号: O 435.2 **文献标志码:** A

Optical self-zoom system based on electrowetting

YU Zhijun, PENG Runling, GU Hao, LUO Yuanzhi

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

Abstract: Optical zoom system is a key element in many optical devices such as cameras and video cameras. It is a long-term goal to realize miniaturization of optical zoom system and increase the zoom ratio of the system. In this paper, a three-liquid self-zoom lens is developed, which has the self-zoom function under the action of applied voltage. Therefore, the lens element itself can be used as a simple optical zoom system. The self-zoom function of the system is verified by the Gaussian optical theory and Zemax simulation. The results show that the focal length range of the system is 378–424 mm, and the zoom ratio is 1.217, which achieves the expected target and has a certain reference value for the research of optical zoom systems.

Keywords: electrowetting; liquid lens; self-zoom lens; optical devices; optical system

收稿日期: 2019-11-01

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0402004)

作者简介: 喻治俊(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为液体透镜。E-mail: 1483065980@qq.com

通信作者: 彭润玲(1978—), 女, 副教授, 研究方向为液体透镜及变焦系统。E-mail: pengrunling@usst.edu.cn

引 言

传统的变焦镜头通常利用机械装置来调节透镜间的相对位置从而实现变焦^[1], 由于其具有容易磨损、不易微型化等缺点, 因此新型变焦光学系统的研究已经成为全球研究热点。

基于介电润湿效应的双液体透镜^[2]具有操作方便、响应速度快、体积小等优点, 具有广泛的应用前景, 市场上已经出现了一些商业产品, 如 Varioptic 公司的 ARCTIC39N^[3] 和 Optotune 公司的 ML-20-35^[4]。目前, 这种液体透镜主要应用于变焦系统。与传统的变焦系统^[5]相比, 两个或更多的液体镜头可以组合在一起, 实现无机械运动的变焦^[6-9]。虽然变焦光学系统可以由两个独立的双液体透镜组成, 但是这样的系统会受到封装玻璃的影响, 增加了额外的光学损耗, 且为了保证元件同轴, 安装也不那么方便。为了克服上述缺点, 赵瑞等^[10]设计了一种三液体透镜方案, 但对所设计的液体透镜元件的参数和结构缺乏详细的分析。本文研制了一种三液体自变焦补偿透镜, 并利用高斯光学理论^[11]和 Zemax 模拟仿真对系统的自变焦补偿功能进行了验证, 得出该光学系统在保持像面位置不变的情况下焦距变化范围为 378~424 mm, 为后续的变焦光学系统的研究提供了参考。

1 基本结构与原理

自变焦补偿液体透镜是基于双液体透镜的圆柱形结构的拓展, 其结构如图 1 所示。自变焦补偿液体透镜的腔体是由双液体透镜的两个腔体通过 UV 胶中间固定而形成的, 因此自变焦补偿液体透镜的两个界面的外加电压之间互不干扰。将氧化处理后的金属内壁氧化层作为介电层, 最后在氧化处理后的内壁上镀一层派瑞林 C 膜作疏水层, 两种具有相同密度和不同折射率的透明液体按照导电液体—绝缘液体—导电液体的顺序依次注入圆柱管。透镜腔的两边用氧化钢锡 (ITO) 玻璃密封, 在圆柱管中形成两个球形的液体界面 (界面 1 和界面 2)。通过施加在介电层上的外加电压 U_1 和 U_2 来改变液体界面 1 和液体界面

2 的曲率半径, 最终改变透镜的焦距。自变焦补偿液体透镜元件本身是一个简单的变焦光学系统: 界面 1 作为变倍组, 界面 2 作为补偿组^[12-13]。当界面 1 的外加电压 U_1 改变时, 界面 1 的曲率半径随之发生改变, 从而改变了透镜的焦距, 使像面的位置发生偏移; 通过改变界面 2 的外加电压 U_2 使界面 2 达到相应的曲率半径来补偿像面的偏移部分, 使像面位置保持不变, 即达到自变焦补偿效果。

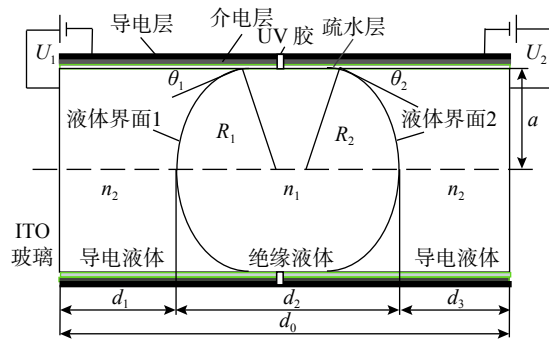


图 1 自变焦补偿液体透镜的结构示意图

Fig. 1 Structure of self-zoom liquid lens

如图 1 所示: U_1 、 U_2 表示液体界面 1、2 所施加的外部电压; θ_1 、 θ_2 表示两液体界面的接触角; R_1 、 R_2 表示两液体界面的曲率半径; d_1 、 d_2 、 d_3 分别为每一面到下一面的厚度; d_0 表示透镜的总长; a 表示透镜的底面半径; n_1 为油的折射率; n_2 为导电液体的折射率。对平行光线进行光线追迹^[14-15], 并结合近轴多光组过渡公式可得该透镜焦距 f 的表达式为

$$f = \frac{n_1 R_1 R_2}{(n_1 - n_2)[d_2(n_1 - n_2) + n_1(R_2 - R_1)]} \quad (1)$$

设界面 1 的光焦度为 $\varphi_1[\varphi_1=(n_1-n_2)/R_1]$, 界面 2 的光焦度为 $\varphi_2[\varphi_2=(n_2-n_1)/R_2]$, 则有

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{d_2}{n_1} \varphi_1 \varphi_2 \quad (2)$$

且由三液体透镜的几何结构可知 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_0 的关系式为

$$\begin{cases} d_1 = k_1 d_0 + \frac{a^2[-3+2\sqrt{1-(a/R_1)^2}]R_1+2[1-\sqrt{1-(a/R_1)^2}]R_1^3}{3a^2} \\ d_3 = k_3 d_0 + \frac{a^2[3-2\sqrt{1-(a/R_2)^2}]R_2-2[1-\sqrt{1-(a/R_2)^2}]R_2^3}{3a^2} \\ d_2 = d_0 - d_1 - d_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中 k_1 、 k_3 为两侧导电溶液的体积分数。

2 实验与测量

2.1 材料的选择及透镜的制备

实验使用的透镜腔内直径 $2a$ 为 10 mm；选用的 ITO 导电玻璃片的透过率大于 84%，方阻小于 7Ω ，氧化铟锡薄膜厚度为 185 nm；选用的介电层为 Parylene C，具有很好的渗透能力，采用真空气相沉积法^[16]可以在狭缝、尖锐的棱边或者盲孔等的表面快速涂覆一层厚度均匀的透明薄膜，其相对介电常数为 3.15；采用的两种液体分别为 DPM-7040 和 KCl 溶液，其质量浓度均为 1.073 g/mL，测得折射率分别为 $n_1=1.556$ ， $n_2=1.334$ 。

透镜腔是表面与内壁完全氧化的圆柱状铝管，上下端面均磨掉其表面的黑色氧化物质，从而作为电极引入外加电压；腔体内壁镀一层绝缘介电层；上端面用边缘部分涂抹 DYMAX(UV 胶)的 ITO 玻璃密封，再用微型移液管按一定的比例填充导电液体—绝缘液体—导电液体，下端面先用 ITO 玻璃密封，再用双面导通(磨掉表面氧化物的配套铝环)的密封圈固定，三液体透镜样品即制作完成。

2.2 透镜的测量

由于初始状态时，三液体透镜的两界面为一凹一凸，均为发散透镜，因此成缩小的像，如图 2 所示，并测得其初始状态的焦距为 -21.7 mm 。

为了方便测量单个三液体变焦透镜在不同电



图 2 三液体透镜的实物示意图
Fig. 2 Photos of the three-liquid lens

压组合下的光焦度，将三液体变焦透镜置于自动焦度计^[17]上，实时观测液体透镜的光焦度。该样品的光焦度测量结果如表 1 所示。

表 1 不同电压组合下样品的光焦度
Tab. 1 Focal power of the sample under different voltage combinations

No.	U_1/V	U_2/V	φ/mm^{-1}
1	0	0	-46.04
2	0	50	-44.87
3	0	100	-37.68
4	0	150	-14.78
5	0	200	-7.54
6	50	200	-6.27
7	100	200	0.84
8	150	200	23.19
9	200	200	30.38

如表 1 所示，当液体界面 1 的外加电压 $U_1=0$ 且保持不变时，随着界面 2 的外加电压 U_2 不断增大，液体界面 2 由凸面向平面再到凹面转化，其焦距(负值)绝对值逐渐增大，光焦度(负值)的绝对值逐渐减小。当液体界面 2 达到饱和状态($\approx 200 \text{ V}$)时， U_2 保持不变， U_1 开始增大。随着 U_1 逐渐增大，液体界面 1 由凹面向平面再到凸面，系统的光焦度逐渐增至最大。结合公式 $f=1/\varphi$ 和式(1)~(3)以及表 1 所示电压与光焦度的关系，通过 MATLAB 可求出外加电压 $U(U_1$ 或 $U_2)$ 与液体界面的曲率半径 $R(R_1$ 或 $R_2)$ 的关系，如图 3 所示。

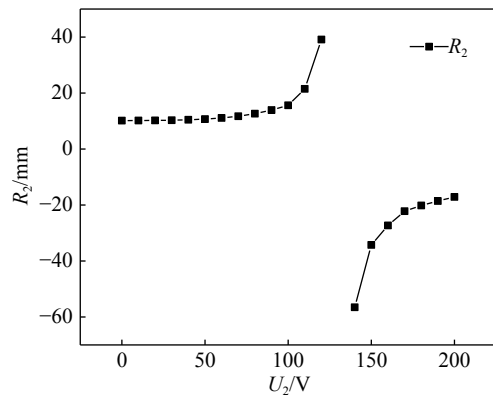


图 3 液体界面的外加电压 $U(U_1$ 或 $U_2)$ 与曲率半径 $R(R_1$ 或 $R_2)$ 的关系

Fig. 3 Relationship between the applied voltage $U(U_1$ or $U_2)$ at the liquid interface and radius of curvature $R(R_1$ or $R_2)$

如图3所示: 随着液体界面2的外加电压 U_2 的增大, 液体界面2从凸面逐渐变为平面, 即液体界面2的曲率半径 R_2 从初始值变为正无穷大, 如图3上方曲线所示; 然后, 随着液体界面2的外加电压 U_2 继续增大, 液体界面2从平面逐渐变为凹面, 即液体界面2的曲率半径 R_2 从负无穷大逐渐增大到饱和状态的极值, 如图3下方曲线所示。

3 系统成像分析

众所周知, 变焦光学系统必须满足两个基本条件: 改变焦距以及改变焦距过程中保持像面位置不变。本节利用高斯光学理论分析该系统满足变焦光学系统的两个基本条件时必须适合的条件, 并对其满足这些条件后的变焦性能进行初步分析。

为了使自变焦补偿透镜聚焦, 且变倍比最大化, 以液体界面1的外加电压 U_1 ($=130\text{ V}$) 和液体界面2的外加电压 U_2 ($=125\text{ V}$) 作为初始状态, 并确定其后截距 $l=400\text{ mm}$ 。通过 Zemax 模拟该光学系统, 可以得到使像面位置保持不变的两个液体界面的曲率半径 R_1 和 R_2 的关系曲线, 但由于该关系曲线中间存在断点(平面的曲率半径为无穷大), 因此将其转化为两个液体界面的曲率 $1/R_1$ 和 $1/R_2$ 的关系曲线, 如图4所示。

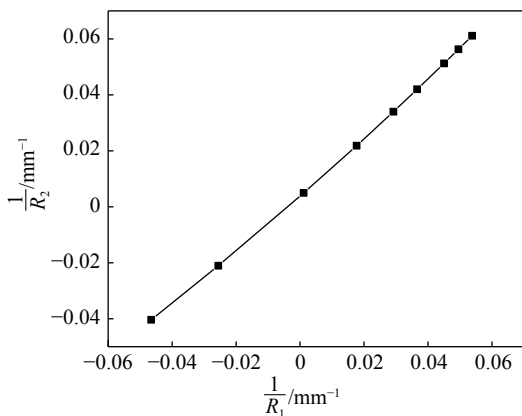


图4 两液体界面的曲率 $1/R_1$ 与 $1/R_2$ 的关系
Fig. 4 Relationship of curvature $1/R_1$ and $1/R_2$ of two liquid interfaces

如图4所示, 当液体界面1为凹面且发散程度减小时, 则 R_1 为负值且绝对值增大(即

$1/R_1$ 逐渐增大), 像面向左移动。为了补偿共轭距的变化, R_2 (负值) 的绝对值应该增大(即 $1/R_2$ 逐渐增大), 即液体界面2的会聚性能应该减弱, 从而使像面向右移动, 抵消共轭距的变化, 保持像面位置不变。根据图3所示液体界面的外加电压 U 和曲率半径 R 的关系曲线, 两个液体界面曲率 $1/R_1$ 和 $1/R_2$ 的关系曲线可以转化为外加电压 U_1 和 U_2 的关系曲线, 如图5所示。

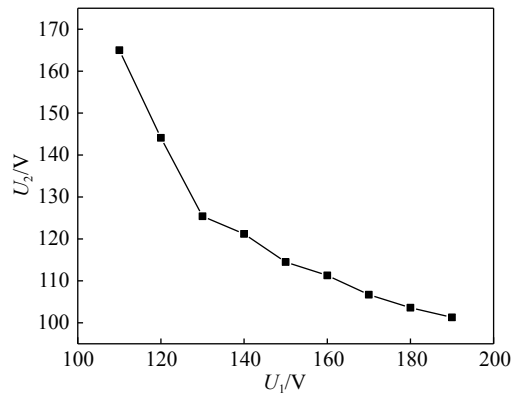


图5 两液体界面的外加电压 U_1 与 U_2 的关系

Fig. 5 Relationship between the applied voltages U_1 and U_2 at the two liquid interfaces

总之, 通过 Zemax 模拟该变焦光学系统, 可计算得到该变焦光学系统的焦距 f 。如果给定液体界面1的外加电压 U_1 , 通过上述分析结果可以获得外加电压 U_1 与系统焦距 f 之间的关系曲线, 如图6所示。该变焦光学系统的变焦范围为 $378\sim 424\text{ mm}$, 其变倍比约为 1.217。

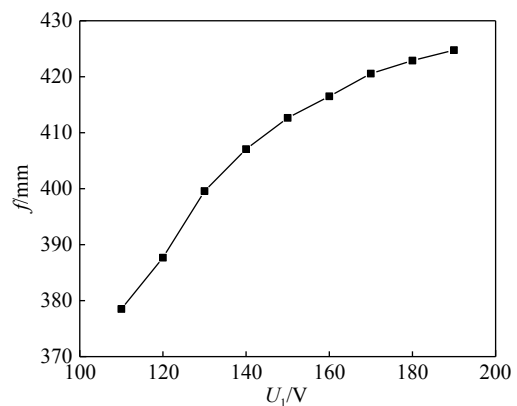


图6 液体界面1的外加电压 U_1 与系统的总焦距 f 的关系

Fig. 6 Relationship between the applied voltage U_1 and the total focal length f of the system

4 结 论

本文设计并制造了一种三液体自变焦补偿透镜, 通过自动焦度计测量了其双液体界面在 0~200 V 外加电压组合下的光焦度, 得出该三液体透镜的变焦范围约为 $(-\infty, -21.7 \text{ mm}) \cup (32.9 \text{ mm}, +\infty)$ 。通过实验测量与分析, 求出了使像面位置保持不变的三液体自变焦补偿透镜的两液体界面的曲率半径与其所施加的外加电压的关系, 并得出该变焦光学系统的变焦范围为 378~424 mm, 其变倍比约为 1.217, 从而为以后液体透镜的相关研究提供了理论与实验基础。此外, 当整个透镜元件的参数确定之后, 像差分析是十分重要的, 这也跟所选择的液体材料的种类密切相关, 这将是下一步工作的重点之一。

参考文献:

- [1] 马晨, 程德文, 王其为, 等. 基于高斯括号法的液体透镜调焦眼底相机光学系统设计 [J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1122001.
- [2] ZENG Z, PENG R L, HE M. Effect of oil liquid viscosity on hysteresis in double-liquid variable-focus lens based on electrowetting[C]//Proceedings of SPIE International Conference on Optical and Photonics Engineering. Chengdu, China: SPIE, 2017: 1025012.
- [3] 程洪涛, 郭世俊, 吕杰, 等. 可调光焦度器件的变焦光学系统研究发展趋势 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080007.
- [4] PENG R L, WANG D Z, CHEN J B, et al. Electrically-controlled and liquid-based optical imaging apparatus[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(10): 1836 – 1839.
- [5] OH S H, SEO J H, JEON J P, et al. Liquid lens based on electromagnetic actuation for high-performance miniature cameras[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Solid-state Sensors, Actuators and Microsystems. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2015: 2077 – 2080.
- [6] 操超, 廖志远, 白瑜, 等. 一种新型复合变焦光学系统 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1108001.
- [7] 潘逸君, 李湘宁, 李强, 等. 双液体透镜变焦系统的高斯光学分析 [J]. 应用光学, 2016, 37(2): 198 – 202.
- [8] 王鸿鹤, 李湘宁, 潘文强, 等. 大变倍比液体透镜变焦系统设计 [J]. 光子学报, 2016, 45(6): 0622001.
- [9] 潘文强, 李湘宁, 卢山, 等. 液体透镜变焦系统高斯理论分析 [J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1222003.
- [10] 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): 0622005.
- [11] 罗远智, 彭润玲, 喻治俊. 可变焦补偿的液体透镜结构设计与分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 122301.
- [12] KOPP D, BRENDER T, ZAPPE H. All-liquid dual-lens optofluidic zoom system[J]. Applied Optics, 2017, 56(13): 3758 – 3763.
- [13] 马迎军, 张葆, 洪永丰. 连续变焦光学系统的像差自动设计 [J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0822003.
- [14] 李湘宁, 贾宏志, 张荣富, 等. 工程光学 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 37 – 42.
- [15] LI H Z. Design of three-group flexible high ratio zoom optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 122203.
- [16] 朱凌峰, 孔梅梅, 宋驰, 等. 电润湿双液体透镜的界面面型分析 [J]. 光电工程, 2016, 43(12): 65 – 71.
- [17] XIE Y Y, LI X N. Quantitative formula for automatic focimeter[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2013, 35(2): 161 – 164.

(编辑: 张 磊)