

薄膜弯曲振动驱动液体变焦透镜的机理

许珂^{1**}, 李华^{2*}, 郝廷学²

¹苏州科技大学数理学院, 江苏 苏州 215000;

²苏州科技大学机械学院, 江苏 苏州 215000

摘要 提出了一种薄膜弯曲振动驱动液体变焦透镜的新型结构,理论分析和实验研究了该新型透镜的机理。结果表明,在薄膜弯曲振动驱动下,此透镜的压强为中心大边缘小,此透镜为凸透镜,其焦距随输入电压的增大而减小,焦距的变化范围为10~60 mm。该透镜结构简单、轻薄且变焦范围大于其他液体变焦透镜,具有较强的实际应用价值。

关键词 光学设计; 变焦系统; 超声驱动; 压强分布

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.092202

Mechanism of Focus-Variable Liquid Lens Driven by Bending Vibration of Thin Films

Xu Ke^{1**}, Li Hua^{2*}, Mao Tingxue²

¹ School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215000, China;

² School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215000, China

Abstract A novel structure for the focus-variable liquid lens driven by the bending vibration of thin films is proposed, and the mechanism of this proposed novel lens is theoretically analyzed and experimentally investigated. The results show that, under the driving of the bending vibration of the thin films, the pressure in this proposed lens is large in its center and small in its edge, which indicates that this lens is a convex lens. Meanwhile, its focal length decreases with the increase of input voltage, and the focal length range is 10-60 mm. This proposed lens has a simple and thin structure, and a larger zoom range than that of other liquid zoom lenses, and thus has the strong practical application value.

Key words optical design; focus-variable system; ultrasonic drive; pressure distribution

OCIS codes 220.4830; 220.3630; 220.4000

1 引言

随着科学技术的发展,变焦透镜在许多领域得到广泛应用,如手机或者照相机的镜头设备。传统的光学变焦系统需要大量的透镜作机械运动,不仅成本高,而且工艺复杂。新型的光学变焦系统不需要作机械运动^[1],且体积较小,适用于更多的领域^[2]。因此,研究结构简单、紧凑、响应速度快的新型变焦透镜具有重要的意义^[3],液体透镜就是一种新型变焦透镜。大多数液体透镜变焦是利用了电湿润现象,其原理是通过改变液体和绝缘基板之

间的电压来改变液滴在基板上的接触角,从而改变焦距^[4]。此外,利用液体折射率梯度变化的液晶变焦透镜^[5]也得到了迅速发展,如低电压驱动的液晶透镜^[6]和液晶透镜阵列^[7]。还可以通过对腔体内的液体加压来改变腔体内的液体分布,进而改变腔体表面透明弹性薄膜或物质自身表面的曲率半径,从而实现焦距的改变^[8]。本文利用薄膜弯曲振动驱动实现了液体变焦透镜的变焦,圆环压电陶瓷沿厚度方向的振动会带动薄膜弯曲振动,从而对内腔液面施加压力,当液体分界面中声波的折射压强呈一定规律分布时,液体表面发生形变,透镜的焦距发生变化。

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-03-22; 录用日期: 2018-04-02

* E-mail: 1667190497@qq.com; ** E-mail: yuanyuanzigz@163.com

2 驱动机理分析

2.1 透镜结构

所设计的变焦透镜结构如图 1 所示。中心位置是一个环形压电陶瓷片,材料选用较高灵敏度、机械激励振幅大、机械损耗低且介电损耗低^[9]的陶瓷材料 PZT4。硅胶的热稳定性好,粘滞系数比水溶液大,可以最大限度降低温度对透镜的影响,故空腔中的液体选择硅胶。圆环压电陶瓷底部用耐高温的环氧树脂胶粘连 PET 圆形薄膜,上表面硅胶直接接触空气。在 PZT 圆环镀银的上下表面焊接两根金属丝作为电极,在两个电极间施加一定频率的超声电源以驱动圆环压电陶瓷在厚度方向振动,薄膜发生弯曲振动。此时,透镜内有沿径向的压强分布,硅胶表面发生形变,透镜的焦距发生变化。

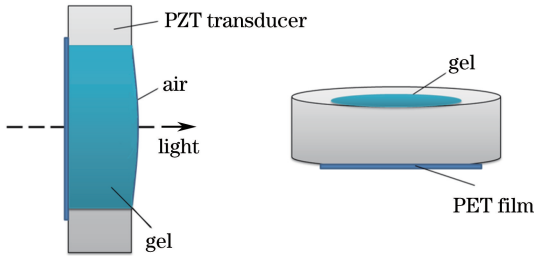


图 1 液体变焦透镜结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of focus-variable liquid lens

2.2 薄膜振动

根据薄板的弯曲振动理论^[10],薄圆盘弯曲振动的位移分布可以表示为

$$y(\rho, t) = [AJ_0(k_n \rho) + BI_0(k_n \rho)] \exp(j\omega t), \quad (1)$$

式中 $J_0(k_n \rho)$ 为第一类零阶贝塞尔函数; $I_0(k_n \rho)$ 为第一类零阶变型贝塞尔函数; $k_n^4 = \rho_v h \omega^2 / D$, 其中板的弯曲刚度 $D = Eh^3 / [12(1 - \sigma^2)]$, ρ_v 为薄板密度, h 为圆盘的厚度, σ 为泊松系数; ω 为圆环谐振角频率, ρ 为圆盘半径, t 为圆盘振动时间, k_n 为圆盘弯曲振动对应的波数, A 和 B 为待定系数。当边缘固定时,薄板振动方程表示为

$$J_0(k_n a) I_0(k_n a) + J_1(k_n a) I_0(k_n a) = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

式中 a 为圆盘的半径,正整数 n 表示节圆数。由(2)式得到薄圆盘振动的共振频率为

$$f_n = \frac{(k_n a)^2 h}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1 - \sigma^2)}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

式中 $a = 7.5$ mm, 圆盘厚度 $h = 0.7$ mm, E 为圆盘的弹性模量。将薄膜的参数代入弯曲振动薄圆环的频率方程可求 $k_n a$ 的值。PET 薄膜的弹性模量为 3.3×10^3 MPa, 泊松比为 0.37, 密度为 1.19×10^3 kg · m⁻³, 经过计算得到薄圆盘出现不同节圆数的共振频率, 结果见表 1。

表 1 共振频率计算结果

Table 1 Calculation results of resonance frequency

n	1	2	3	4	5
Frequency / kHz	10.47	40.76	91.32	162.11	253.14
$k_n a$	3.1962	6.3064	9.4394	12.5771	15.7164

2.3 声压分布

圆盘的半径为 a , 设圆盘的圆心为坐标原点, z 轴过原点且与圆盘垂直, x 轴、 y 轴为任意互相垂直的两个圆盘直径, 如图 2 所示。将圆盘表面分成无限多个微小的面元, 每一个微小面元可以看作一个点声源。

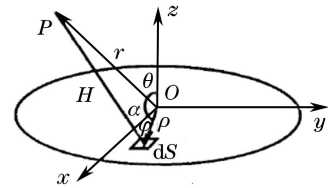


图 2 弯曲振动圆盘辐射声场的计算示意图

Fig. 2 Diagram for calculating acoustic field radiated by bending vibration disk

在坐标系中,声场中任一观察点 P 相对于坐标原点距离为 r , 与 z 轴夹角为 θ 。在圆盘上任取一微小面元 dS , 极径为 ρ , 极角为 φ , 则 dS 在观察点 P 处产生的声压^[11]为

$$dp = \frac{jk_1 c_0 \rho_0 u}{2\pi H} \exp[j(\omega t - k_1 H)] dS, \quad (4)$$

式中 k_1 为圆盘谐振频率时的波数, H 为观察点到面元的距离, c_0 为波速, ρ_0 为介质静态密度, u 为声源的振动速度, t 为时间。当频率为 162.11 kHz 时, 根据表 1 可知, 薄膜有四个节圆, 且 $k_4 a = 12.5771$ 。由图 2 可知, $H^2 = r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos(r, \rho)$, 对(4)式积分得到

$$p = - \iint \frac{k_1 \rho_0 c_0 \omega}{2\pi H} [AJ_0(k_1 \rho) + BI_0(k_1 \rho)] \cdot \exp[j(\omega t - k_1 H)] dS. \quad (5)$$

2.4 分界面压强分析

由于声波在两种阻抗不同的介质分界面上会发生反射和折射, 会有反射压强和折射压强产生。硅胶和空气都是流体, 故反射波和折射波中只有纵波

没有横波。

根据声波反射和折射定律,声波遇到分界面反射时,反射角等于入射角,则折射波压强与入射波压强之比为 $t_p = 2z_{s2}/(z_{s2} + z_{s1})$,其中 z_{s2}, z_{s1} 分别为入射波和折射波压强与相应质点速度法向分量的比值^[12]。声波在分界面反射的情况如图 3 所示,其中 p_t 为折射压强,在第一介质中声压 $p_1 = p_i + p_r$,在第二介质中声压 $p_2 = p_t$ 。分界面 $z=0$ 处满足边界条件^[13]:1) 声压的连续性,即 $p_1 = p_2$;2) 法线振动速度连续,即 $u_{1z}(x, z, t)|_{z=0} = u_{2z}(x, z, t)|_{z=0}$ 。

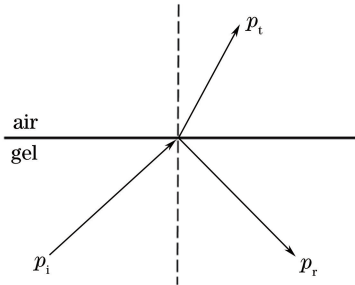


图 3 分界面斜入射情况

Fig. 3 Oblique incidence at interface

由边界条件可知,分界面上受到的力也是连续的,第一介质中受到的力为入射压强与反射压强施加的压力和,第二介质中受到的力为折射压强施加的力,这两个力大小相等方向相同,方向为从硅胶指向空气。透镜的表面形状由折射压强决定,且透镜的形貌规律与折射压强的分布规律相同。

压电陶瓷外径为 35 mm,内径为 15 mm,高为 5 mm,内腔中填充高 5 mm 的硅胶溶液。图 4 所示为分界面表面上任一直径上的折射压强分布,原点为圆环压电陶瓷的圆心,坐标原点处折射压强最大,且随着半径的增大折射压强减小,当减小到最小值时折射压强又会随着半径的增大而缓慢增大。薄膜弯曲振动产生不同的压强分布,在硅胶和空气的分界面处,声波会发生反射和折射,分界面的总压力由

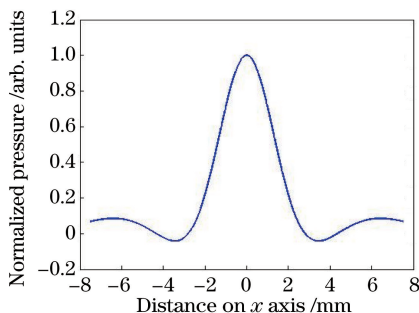


图 4 分界面折射压强分布

Fig. 4 Refraction pressure distribution at interface

折射压强产生,液体透镜的表面形状由折射压强的大小决定,压强大的地方形变比较明显,压强小的地方形变不明显,分界面表面凸起,故理论分析透镜为凸透镜。

3 实验研究

为验证理论分析的结果,搭建了实验平台,测试了分界面的压强分布和透镜表面形状,为了进一步测试透镜效果,进行了透镜成像实验。

3.1 实验条件及系统

制作了薄膜弯曲振动驱动液体变焦透镜,其由 35 mm×15 mm×5 mm 圆环压电陶瓷、0.7 mm 厚的 PET 薄膜和 5 mm 高的硅胶组成。搭建了液体透镜的实验系统,如图 5 所示。

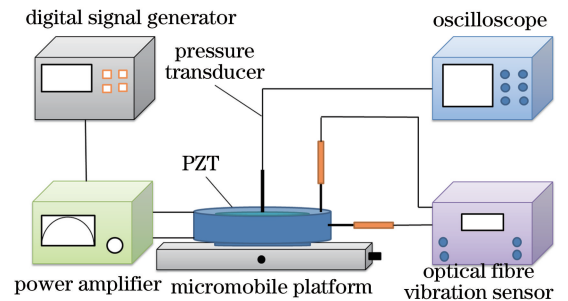


图 5 液体透镜实验系统

Fig. 5 Experimental system of liquid lens

3.2 压强分布实验

利用灵敏度为 0.145 mV/Pa 的探针式水听器作为传感器,测量硅胶表面沿径向方向上的压强。压强传感器连接示波器,圆环压电陶瓷连接数字信号发生器和功率放大器,微移动平台控制距离。输入电压分别为 40, 80, 120 V 时,使传感器距离底面薄膜 5 mm,即探针式水听器接触硅胶表面,并且水听器的侧面接触到圆环压电陶瓷内径,沿着圆环径向方向移动微移动平台,每隔 0.5 mm 测量一次,多次测量不同径向方向上的压强并取平均值,测量结

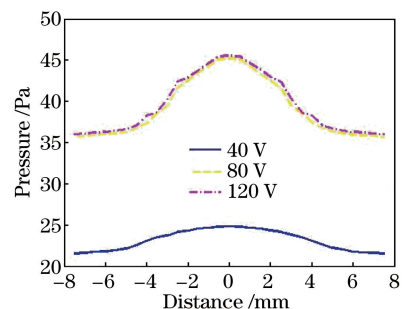


图 6 不同径向的压强分布

Fig. 6 Pressure distributions along different radial directions

果如图 6 所示。

坐标原点即圆环压电陶瓷中心压强最大,输入电压为 40, 80, 120 V 时,在距离圆心 4 mm 范围内压强随距离的增大而减小,当距离大于 4 mm 时,压强几乎不变。理论上,在距离圆心 3.5 mm 范围内压强随距离的增大而减小,大于 3.5 mm 时压强变化相对缓慢。实验结果与理论一致。并且随着输入电压的增大压强增大,当输入电压增大到 80 V 后压强几乎不变。

3.3 透镜表面形状实验

将制作好的圆环压电陶瓷变焦透镜放置在平台

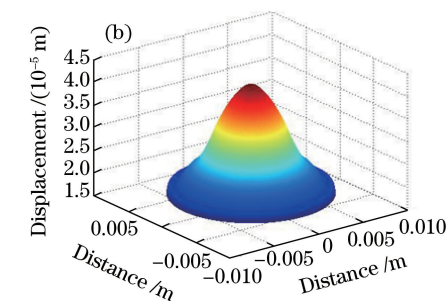
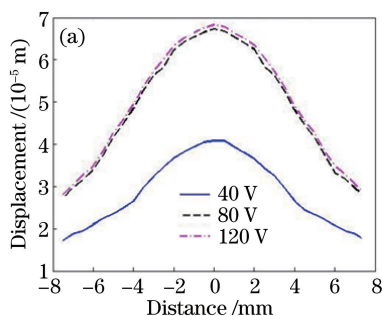


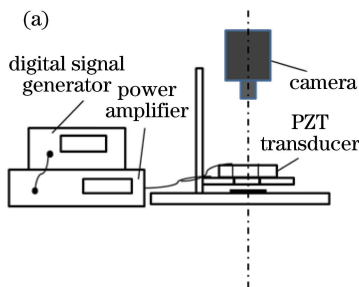
图 7 透镜表面变化。(a)位移变化;(b)三维图

Fig. 7 Surface changes of lens. (a) Displacement change; (b) three dimensional graph

从图 7(a)中可以看出,原点发生形变最大,且随着半径的增大形变减小,表明透镜为凸透镜。当电压增大时透镜形变也增大,到 80 V 后形变量几乎不变。对 40 V 时的位移变化曲线进行拟合,由于不同直径上的形变几乎相同,故将拟合后的曲线绕 z 轴旋转,得到透镜表面三维图像,如图 7(b)所示,可以清晰看出透镜为凸透镜。压强分布实验和透镜表面形状实验相比较发现,表面压强大的地方形变比较明显,压强小的地方形变相对较小,当驱动电压增加时,压强和表面形变都增大,电压大于 80 V 时两者趋于不变。

3.4 透镜的成像实验

搭建一个物距为 3.5 mm,像距为 295 mm 的光



学平台,如图 8(a)所示。改变透镜的输入电压,拍摄各个输入电压下成像的情况,通过 MATLAB 图像处理的方法得到变焦透镜的放大率,使用高斯公式计算得到变焦透镜在不同电压下的焦距,结果如图 8(b)所示。图 8(b)所示两条曲线分别代表水平方向和竖直方向的焦距,随着电压的增大,超声驱动变焦透镜的焦距减小,其焦距范围为 10~60 mm。在电压为 20~80 V 时焦距变化比较明显,电压 80 V 后焦距几乎不变,与声压实验和透镜表面形变实验结果相同。水平方向和竖直方向的焦距没有完全重合,表明透镜有畸变存在。

图 9 所示为实验成像效果图。将十字标准尺作

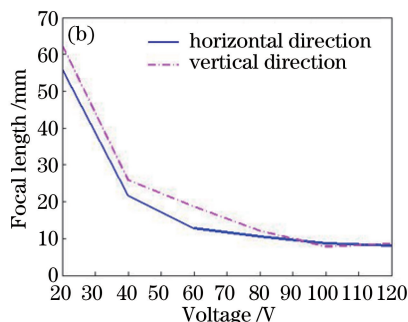


图 8 透镜的成像实验。(a)实验平台;(b)不同电压下的透镜焦距

Fig. 8 Imaging experiment by lens. (a) Experimental platform; (b) focal lengths of lens under different voltages

为观察物放置在金属架的底部,在两个电极之间施加一个频率为 164 kHz 的信号,当驱动电压为 0 V 时,成像效果如图 9(a)所示,当驱动电压为 40 V 时,液体表面形状发生改变,透镜的焦距也随之改变,成像效果如图 10(b)所示,十字标准尺中心边长为 1 mm 的正方形边长变大。

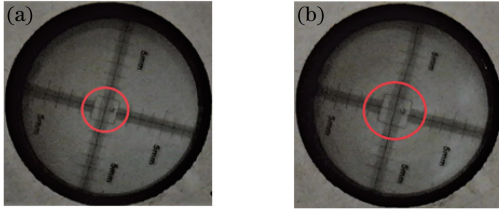


图 9 不同电压下的透镜成像效果图。(a) 0 V;(b) 40 V

Fig. 9 Imaging effects of lens under different voltages.

(a) 0 V; (b) 40 V

4 结 论

研究了薄膜弯曲振动驱动的液体变焦透镜的机理。实验证明了该透镜为凸透镜,透镜中心压强最大,随着半径的增大压强减小;透镜中心形变量最大,随着透镜半径的增大形变量减小;输入电压不同焦距不同,输入电压越大焦距越小,焦距的变焦范围为 10~60 mm。理论分析和实验结果相一致。

参 考 文 献

- [1] Cheng H T, Guo S J, Lü J, *et al.* Research development trends of zoom system with variable focal power device[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080007.
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.
- [2] Liang Z C, Xu N, Tu X H, *et al.* Novel integrated device of optofluidic variable-focus microlens array[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(9): 32-35.
梁忠诚, 徐宁, 涂兴华, 等. 新颖的微流控光学变焦透镜阵列集成器件[J]. *光电工程*, 2008, 35(9): 32-35.
- [3] 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.
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阴[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(5): 1768-1770.
- [4] Hu X D, Qu C, Zhang S G, *et al.* Variable focus ionic liquid lens based on electrowetting[J]. *Opto-*

Electronic Engineering, 2012, 39(2): 53-58.

胡晓东, 曲超, 张世国, 等. 电润湿离子液体变焦透镜[J]. *光电工程*, 2012, 39(2): 53-58.

- [5] Zheng J H, Wang Y N. Research on progress of liquid crystal micro-lens[J]. *Optical Instruments*, 2014, 36(2): 182-188.
郑继红, 王雅楠. 液晶微透镜技术研究新进展[J]. *光学仪器*, 2014, 36(2): 182-188.
- [6] Yang L, Wang M S, Xü G Q, *et al.* Design and optimization of low voltage driving variable focal length liquid crystal lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0922003.
杨兰, 王敏帅, 徐恭勤, 等. 低电压驱动液晶变焦透镜的设计与优化[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0922003.
- [7] Lei Y, Tong Q, Zhang X Y. Liquid crystal microlens array for dual mode imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0511004.
雷宇, 佟庆, 张新宇. 基于双模成像的液晶微透镜阵列[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0511004.
- [8] Ren H W, Wu S T. Variable-focus liquid lens[J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 5931-5936.
- [9] Tanaka T. Piezoelectric ceramic material[M]. Chen J Y, Tu Y J, Transl. Beijing: Science Press, 1982: 154-178.
田中哲郎. 压电陶瓷材料[M]. 陈俊彦, 土余君, 译. 北京: 科学出版社, 1982: 154-178.
- [10] Li H, Ren K, Yin Z, *et al.* Study on sonic focusing properties of ultrasonic vibration spherical focusing system based on longitudinal-bending vibration conversion[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2014, 36(6): 450-455.
李华, 任坤, 殷振, 等. 纵弯转换超声振动球面聚焦系统聚焦特性研究[J]. *压电与声光*, 2014, 36(6): 450-454.
- [11] Li J, Ren Z J, Lin S Y. Radiated sound field of ring plunger[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2003, 31(4): 28-31.
李锦, 任中杰, 林书玉. 环状活塞换能器辐射声场研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(4): 28-31.
- [12] Xu X M. Acoustics foundation[M]. Beijing: Science Press, 2003: 143-155.
许肖梅. 声学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 143-155.
- [13] Feng N. Ultrasonics handbook[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999: 54-59.
冯诺. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 54-59.