

介电弹性体驱动液体透镜的设计与分析

程阳, 曹杰, 王莹博, 宁妍, 郝群*

北京理工大学仿生机器人与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 介电弹性体具有结构紧凑、形变量大、响应速度快及易集成等特点, 为了降低驱动电压, 将介电弹性体应用于液体透镜中, 采用介电弹性体和透镜薄膜分离结构, 建立了介电弹性体主动薄膜变形、透镜薄膜变形以及液体透镜焦距的数学模型。仿真结果表明, 当初始液体压力为 500 Pa、驱动电压为 1000 V 时, 液体透镜的变焦范围为 15.13~22.80 mm, 焦距增加了为 51%。分析了介电弹性体的杨氏模量、残余应力、初始厚度及半径对液体透镜焦距的影响, 结果表明, 同等增加倍率下, 介电弹性体的初始厚度对液体透镜焦距的影响最大, 其次为残余应力, 该研究结果可为优化设计介电弹性体驱动的液体透镜提供参考。

关键词 自适应光学; 介电弹性体; 液体透镜; 主被动薄膜; 变形轮廓

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0522004

Design and Analysis of Liquid Lens Driven by Dielectric Elastomer

Cheng Yang, Cao Jie, Wang Yingbo, Ning Yan, Hao Qun*

Key Laboratory of Biomimetic Robots and Systems, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The dielectric elastomer has the characteristics of compact structure, large deformation, fast response speed, and easy integration. In order to reduce the driving voltage, the dielectric elastomer is applied to the liquid lens and the separation structure of dielectric elastomer and the lens membrane are used. Mathematical models of elastic body active membrane deformation, lens membrane deformation and focal length of liquid lens are established. Simulation results show that when the initial liquid pressure is 500 Pa and the driving voltage is 1000 V, the zoom range of the liquid lens is 15.13–22.80 mm, and the focal length increase is 51%. The effects of the Young's modulus, residual stress, initial thickness and radius of the dielectric elastomer on the focal length of the liquid lens are analyzed. The results show that the initial thickness of the dielectric elastomer has the greatest influence on the focal length of the liquid lens at the same increase in magnification, followed by the residual stress, the research results can provide a reference for the optimal design of liquid lens driven by dielectric elastomer.

Key words adaptive optics; dielectric elastomer; liquid lens; active and passive membrane; deform profile

OCIS codes 220.1080; 220.3630; 310.6845

1 引言

变焦透镜广泛应用于工业、生活、医疗、军事等领域, 传统变焦透镜通常由两片以上焦距固定的树脂或玻璃透镜组成, 通过凸轮和电机等机械装置改变透镜之间的相对位置, 从而实现变焦^[1-2]。多个透

镜和机械装置的存在, 导致传统变焦透镜存在结构复杂、容易磨损、体积庞大、使用寿命短等缺点; 且透镜需要沿精确计算的轨迹同步运动, 变焦速度慢, 不能满足人们对变焦透镜高速化、微型化及智能化的需求。与传统变焦透镜不同, 液体透镜可通过改变内部材料的折射率或液面形状实现变焦^[3], 无需机

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2020-10-12; 录用日期: 2020-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(61905014, 61871031)、全国博管会博士后国际交流派出计划(20190097)

* E-mail: qhao@bit.edu.cn

械装置和透镜间的同步运动,减小了变焦系统的体积,同时提高了变焦速度。根据驱动原理的不同可将液体透镜分为液晶型、电润湿型、充液型等方式^[4-5]。液晶型液体透镜通过施加电压改变内部液晶材料的折射率,具有体积小、功耗低、稳定性好等优点,但其变焦范围小、响应速度慢、能量损失大且具有偏振相关性^[6-7]。电润湿型液体透镜通过在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,从而改变液面的曲率半径。该方式结构紧凑、控制简单、响应速度较快,但存在通光孔径小(通常小于 3 mm)、变焦范围小(接触角易饱和)、易蒸发等缺点^[8-9]。充液型液体透镜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,从而改变液体透镜的焦距^[10]。驱动液体压力变化的方式包括外部泵驱动、静电力驱动、压电驱动、电磁驱动、环境敏感水凝胶驱动、介电弹性体驱动等^[11-12]。外部泵和电磁驱动等方式需要引入额外泵源和电磁系统,系统体积较大。静电力驱动和压电驱动等方式响应速度快,但形变量较小,液体透镜变焦范围也较小。环境敏感水凝胶对温度、pH、湿度等因素比较敏感,但响应时间较长,液体透镜变焦速度较慢。

介电弹性体作为一种智能材料,可将电能转换为机械能,具有结构紧凑、形变量大(最大应变可达 380%)、响应速度快及易集成等特点,在光学领域得到了广泛的应用^[13]。Carpi 等^[14]采用环形介电弹性体驱动弹性透镜,在 3.5 kV 的驱动电压下,透镜焦距的变化量为 26.4%。Maffli 等^[15]利用介电弹性体在 3 kV 的驱动电压下,使透镜焦距的变化量为 20%,响应时间为 175 μs 。基于介电弹性体驱动的液体透镜通常将液体置于介电弹性体中间的结

构,通过在介电弹性体上下表面的柔性电极上施加电压,改变液体透镜的形状^[16]。Lu 等^[17]对该结构建立了计算模型,分析了介电弹性体预拉伸、液体薄膜尺寸等参数对液体透镜焦距的影响,为基于介电弹性体薄膜的变焦透镜设计提供了理论指导,但该结构需要较高的驱动电压。Niklaus 等^[18]通过分离介电弹性体和透镜薄膜,在 1.7 kV 的驱动电压下,实现了 4~8 mm 的液体透镜焦距变化范围。Wei 等^[19]将环形介电弹性体作为驱动器,在 1.0 kV 的驱动电压下,实现了 25.4~105.2 mm 的液体透镜焦距变化范围。Keong 等^[20]将介电弹性体置于液体中并作为隔膜泵驱动液体透镜薄膜变形,在 1.8 kV 的驱动电压下,成像物距的变化范围为 15~50 cm。Maffli^[21]在 3 kV 的驱动电压下,实现了 28.5~45.5 mm 的液体透镜焦距变化范围。液体透镜的变焦性能和介电弹性体的参数息息相关,为了获得变焦性能更好的液体透镜,需进一步研究介电弹性体和透镜薄膜分离结构下的介电弹性体参数对液体透镜的影响。本文建立了分离结构下不同初始液体压力和驱动电压的介电弹性体、透镜薄膜变形以及液体透镜焦距的数学模型,分析了介电弹性体的参数对液体透镜焦距的影响,为优化设计基于介电弹性体驱动的液体透镜提供参考。

2 介电弹性体驱动的液体透镜

2.1 驱动透镜的变焦原理

基于介电弹性体驱动的液体透镜变焦原理如图 1 所示,液体透镜系统主要包括支撑框架、主动薄膜(介电弹性体)、被动薄膜(透镜薄膜)、透明玻璃、电压源、液体、液体进口、液体出口等。主动薄膜(半径为 r_a)、支撑框架和左侧液体组成驱动腔室。被动

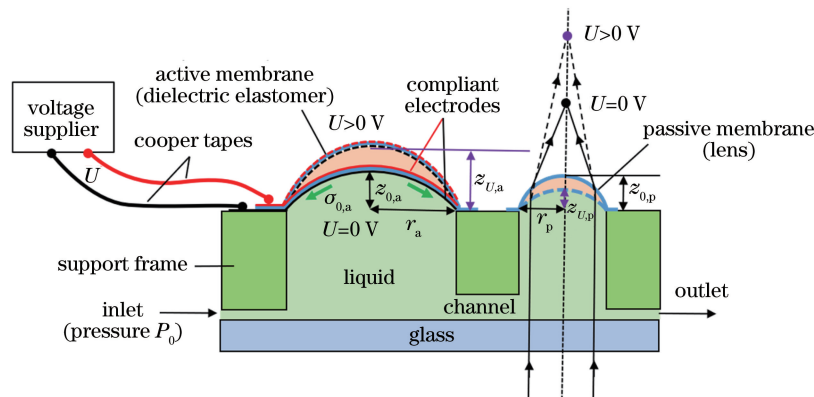


图 1 介电弹性体驱动的液体透镜变焦原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the tunable liquid lens driven by dielectric elastomer

薄膜(半径为 r_p)、支撑框架和右侧液体组成透镜腔室。两个腔室之间设置的流体通道使两个腔室内的液体可以进行体积交换。主动薄膜由介电弹性体组成,在介电弹性体上下表面均匀涂有柔性电极,柔性电极通过铜带与电压源相连。实现液体透镜变焦的步骤:1)关闭电压源(电压 $U=0$ V)并将液体从进口注入驱动腔室和透镜腔室,两个腔室内原有的空气从出口排出;2)当空气全部排出时,用密封胶密封出口;3)注入不同体积的液体使两个腔室的初始液体压力为 P_0 ,主动薄膜和被动薄膜均发生初始变形,主动薄膜的初始弓高为 $z_{0,a}$,被动薄膜的初始弓高为 $z_{0,p}$,此时液体透镜具有初始焦距;4)用密封胶密封进口,打开电压源($U>0$ V),在主动薄膜的上下柔性电极上施加电压,以减小主动薄膜的厚度并增大其表面积,从而减小主动薄膜内部的应力,降低驱动腔室内的液体压力。此时,主动薄膜向外侧弯曲,施加电压后主动薄膜的弓高为 $z_{U,a}$ 。液体压力的降低会增大驱动腔室内的液体体积,由于两个腔室的液体体积总和不变,液体会从透镜腔室流入驱动腔室,导致被动薄膜向内侧弯曲,此时被动薄膜的弓高为 $z_{U,p}$,最终使液体透镜的焦距发生变化。

2.2 主动薄膜变形模型

当液体透镜处于初始状态时,电压源关闭($U=0$ V)且仅有初始液体压力 P_0 作用于主动薄膜上。由于主动薄膜的厚度 $t_{0,a}$ 远小于其半径 r_a ,因此主

动薄膜内的应力 $\sigma_{0,a}$ 、初始弓高 $z_{0,a}$ 和初始液体压力 P_0 满足

$$P_0 = \frac{4\sigma_{0,a}t_{0,a}r_a^2z_{0,a}}{(r_a^2 + z_{0,a}^2)^2} \quad (1)$$

主动薄膜内的应力主要来源于两部分:一部分是由初始液体压力 P_0 驱动引起的主动薄膜应力;另一部分是主动薄膜在加工过程中和预拉伸后产生的初始应力,可表示为^[22]

$$\sigma_{0,a} \approx \frac{s_{0,a}(1-0.24\nu_a)E_a}{1-\nu_a} + \frac{(\lambda_{a,p}-1)E_a}{1-\nu_a} + \sigma_{a,fab} = \frac{[s_{0,a}(1-0.24\nu_a) + (\lambda_{a,p}-1)]E_a}{1-\nu_a} + \sigma_{a,fab} \quad (2)$$

式中, $s_{0,a}$ 、 ν_a 、 E_a 、 $\lambda_{a,p}$ 、 $\sigma_{a,fab}$ 分别为主动薄膜的应变、泊松比、杨氏模量、双轴预拉伸率以及加工过程中产生的应力。根据应变的定义,主动薄膜的应变 $s_{0,a}$ 可通过长度变化量除以主动薄膜直径得到,为了简化计算模型,将 arcsin 函数按照幂级数展开并取前两项,将主动薄膜的应变 $s_{0,a}$ 简化为

$$s_{0,a} = \frac{r_a^2 + z_{0,a}^2}{2r_a z_{0,a}} \arcsin\left(\frac{2r_a z_{0,a}}{r_a^2 + z_{0,a}^2}\right) - 1 \approx \frac{2z_{0,a}^2}{3r_a^2} \quad (3)$$

当主动薄膜的应变属于大应变即超过其线性应变范围时,真实的应变可表示为 $\ln(s_{0,a}+1)$ ^[21]。将(2)式、(3)式代入(1)式中,得到初始液体压力和主动薄膜形变量的关系为

$$\begin{cases} P_0 = \frac{8(1-0.24\nu_a)E_a t_{0,a} z_{0,a}^3 + 12E_a(\lambda_{p,a}-1)t_{0,a}r_a^2 z_{0,a}}{3(1-\nu_a)(r_a^2 + z_{0,a}^2)^2} + \frac{4\sigma_{a,fab}t_{0,a}r_a^2 z_{0,a}}{(r_a^2 + z_{0,a}^2)^2}, & \text{small strain} \\ P_0 = \frac{4\left[(1-0.24\nu_a)\ln\left(\frac{2z_{0,a}^2}{3r_a^2} + 1\right) + (\lambda_{p,a}-1)\right]E_a t_{0,a}r_a^2 z_{0,a}}{(1-\nu_a)(r_a^2 + z_{0,a}^2)^2} + \frac{4\sigma_{a,fab}t_{0,a}r_a^2 z_{0,a}}{(r_a^2 + z_{0,a}^2)^2}, & \text{large strain} \end{cases} \quad (4)$$

为了使液体透镜的焦距发生变化,在主动薄膜的上下表面柔性电极施加驱动电压。此时,主动薄膜的厚度和应力减小,腔室内的液体压力下降,导致主动薄膜形状发生变化,表现为主动薄膜向外侧弯曲且弓高减小。假设施加驱动电压 U 后的液体压力为 P_U 、主动薄膜的弓高为 $z_{U,a}$ 。施加电压后的主动薄膜应力可表示为

$$\sigma_{U,a} = \frac{[s_{U,a}(1-0.24\nu_a) + (\lambda_{a,p}-1)]E_a}{1-\nu_a} + \sigma_{a,fab} - \epsilon_r \epsilon_0 \left[\frac{U(r_a^2 + z_{U,a}^2)}{t_{0,a}r_a^2} \right]^2, \quad (5)$$

式中, ϵ_0 为真空中的介电常数, ϵ_r 为主动薄膜的相对介电常数, $s_{U,a} = 2z_{U,a}^2/3r_a^2$ 为施加电压后的主动薄膜应变。施加电压后的液体压力和主动薄膜形变量的关系可表示为

$$\begin{cases} P_U = \frac{8(1-0.24\nu_a)E_a t_{0,a} z_{U,a}^3 + 12E_a(\lambda_{a,p}-1)t_{0,a}r_a^2 z_{U,a}}{3(1-\nu_a)(r_a^2 + z_{U,a}^2)^2} + \frac{4\sigma_{a,fab}t_{0,a}r_a^2 z_{U,a}}{(r_a^2 + z_{U,a}^2)^2} - \frac{4\epsilon_r \epsilon_0 U^2}{t_{0,a}r_a^2} z_{U,a}, & \text{small strain} \\ P_U = \frac{4\left[(1-0.24\nu_a)\ln\left(\frac{2z_{U,a}^2}{3r_a^2} + 1\right) + (\lambda_{a,p}-1)\right]E_a t_{0,a}r_a^2 z_{U,a}}{(1-\nu_a)(r_a^2 + z_{U,a}^2)^2} + \frac{4\sigma_{a,fab}t_{0,a}r_a^2 z_{U,a}}{(r_a^2 + z_{U,a}^2)^2} - \frac{4\epsilon_r \epsilon_0 U^2}{t_{0,a}r_a^2} z_{U,a}, & \text{large strain} \end{cases} \quad (6)$$

2.3 透镜薄膜变形及焦距模型

当液体透镜处于初始状态时,透镜腔室的液体压力等于初始液体压力 P_0 ,透镜薄膜的初始弓高 $z_{0,p}$ 和初始液体压力 P_0 的关系可根据(4)式得到,被动薄膜的参数 $t_{0,p}$ 、 r_p 、 ν_p 、 E_p 、 $\lambda_{p,p}$ 、 $\sigma_{p,fab}$ 分别为透镜薄膜的初始厚度、半径、泊松比、杨氏模量、双轴预拉伸率以及加工过程中产生的应力。得到透镜薄膜的初始弓高 $z_{0,p}$ 后,液体透镜的初始焦距 f'_0 可表示为

$$f'_0 = \frac{r_p^2 + z_{0,p}^2}{2z_{0,p}(n-1)}, \quad (7)$$

式中, n 为填充液体的折射率。在主动薄膜上下表面的柔性电极施加电压时,由于驱动腔室和透镜腔室通过流体通道相互连通,因此两个腔室内的液体压力 P_U 相等。假设施加电压后透镜薄膜的弓高为 $z_{U,p}$,则施加电压后透镜薄膜液体压力和其弓高的关系可表示为

$$\begin{cases} P_U = \frac{8(1-0.24\nu_p)E_p t_{0,p} z_{U,p}^3 + 12E_p(\lambda_{p,p}-1)t_{0,p} r_p^2 z_{U,p} + 4\sigma_{p,fab} t_{0,p} r_p^2 z_{U,p}}{3(1-\nu_p)(r_p^2 + z_{U,p}^2)^2} + \frac{4\sigma_{p,fab} t_{0,p} r_p^2 z_{U,p}}{(r_p^2 + z_{U,p}^2)^2}, & \text{small strain} \\ P_U = \frac{4 \left[(1-0.24\nu_p) \ln\left(\frac{2z_{U,p}^2}{3r_p^2} + 1\right) + (\lambda_{p,p}-1) \right] E_p t_{0,p} r_p^2 z_{U,p}}{(1-\nu_p)(r_p^2 + z_{U,p}^2)^2} + \frac{4\sigma_{p,fab} t_{0,p} r_p^2 z_{U,p}}{(r_p^2 + z_{U,p}^2)^2}, & \text{large strain} \end{cases} \quad (8)$$

由于液体一般不可压缩,因此驱动腔室和透镜腔室内的液体体积总和保持不变,即变形前后驱动腔室内液体体积的增加量等于变形前后透镜腔室内液体体积的减小量,可表示为

$$\frac{\pi z_{U,a} (3r_a^2 + z_{U,a}^2)}{6} - \frac{\pi z_{0,a} (3r_a^2 + z_{0,a}^2)}{6} = \frac{\pi z_{0,p} (3r_p^2 + z_{0,p}^2)}{6} - \frac{\pi z_{U,p} (3r_p^2 + z_{U,p}^2)}{6} \quad (9)$$

联立(6)式、(8)式、(9)式,计算得到施加电压后,主动薄膜和透镜薄膜变形数学模型中的液体压力 P_U 、主动薄膜的弓高 $z_{U,a}$ 以及透镜薄膜的弓高 $z_{U,p}$ 。由透镜薄膜的弓高计算施加电压后的液体透镜焦距 f'_U ,可表示为

$$f'_U = \frac{r_p^2 + z_{U,p}^2}{2z_{U,p}(n-1)} \quad (10)$$

3 设计与结果分析

根据建立的主动薄膜和透镜薄膜变形模型可以发现,主动薄膜的结构和材料参数直接决定了液体透镜的焦距。为了分析作为主动薄膜介电弹性体参数对液体透镜焦距的影响,需对介电弹性体的参数进行优化设计。实验选取常用的聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为主动薄膜的介电弹性体材料以及透镜薄膜材料,PDMS的杨氏模量和残余应力可通过调节基底和固化剂的混合比例以及固化温度和固化时长得到。在匀胶机上施加不同的旋转速度可改变PDMS的薄膜厚度,驱动液体透镜变焦的介电弹性体厚度一般为 $10 \sim 100 \mu\text{m}^{[15]}$ 。当PDMS的应变小于 45% ,可认为是线性应变;当应变大于 45% ,可认

为工作在大变形区域^[23]。主动薄膜和透镜薄膜的结构和材料参数如表 1 所示。

表 1 主动薄膜和透镜薄膜的结构和材料参数

Table 1 Structural and material parameters of active and lens membranes

Material	Parameter	Value
Active membrane	E_a/MPa	0.5, 1, 1.5
	ν_a	0.49
	$\sigma_{a,fab}/\text{kPa}$	30, 60, 90
	$\lambda_{a,p}$	1.0
	$t_{0,a}/\mu\text{m}$	30, 60, 90
Lens membrane	r_a/mm	2, 4, 6
	ϵ_r	2.75
	E_p/MPa	1
	ν_p	0.49
	$\sigma_{p,fab}/\text{kPa}$	30
	$\lambda_{p,p}$	1.0
	$t_{0,p}/\mu\text{m}$	30
	r_p/mm	1
	ϵ_r	2.75

3.1 主动薄膜和透镜薄膜轮廓及液体透镜焦距

当透镜薄膜的参数为表 1 所示的参数,主动薄膜的杨氏模量 $E_a=1 \text{ MPa}$,残余应力 $\sigma_{a,fab}=30 \text{ kPa}$,初始厚度 $t_{0,a}=30 \mu\text{m}$ 、半径 $r_a=2 \text{ mm}$ 时,不同初始液体压力 P_0 作用下,主动薄膜和透镜薄膜的轮廓如图 2(a)和图 2(b)所示。可以看出,主动薄膜和透镜薄膜的弓高随初始液体压力的增加而增大。当初始液体压力为 100 Pa 时,主动薄膜和透镜薄膜的弓高分别为 0.101 mm 和 0.027 mm ;当初始液体压力增加到 500 Pa 时,主动薄膜和透镜薄膜的弓高分别为 0.299 mm 和 0.100 mm 。为了改变液体透镜的焦

距,在主动薄膜上下表面的柔性电极施加电压,使主动薄膜内的应力发生变化,导致主动薄膜和透镜薄膜的轮廓再次发生变化。当初始液体压力为 500 Pa 时,不同驱动电压下主动薄膜和透镜薄膜的轮廓如图

2(c)和图 2(d)所示。可以发现,随着驱动电压的增加,主动薄膜逐渐向外弯曲,形变量先缓慢然后再快速增大,由于两个液体腔室内的液体总体积不变,被动薄膜逐步向内弯曲,形变量也先缓慢然后再快速增大。

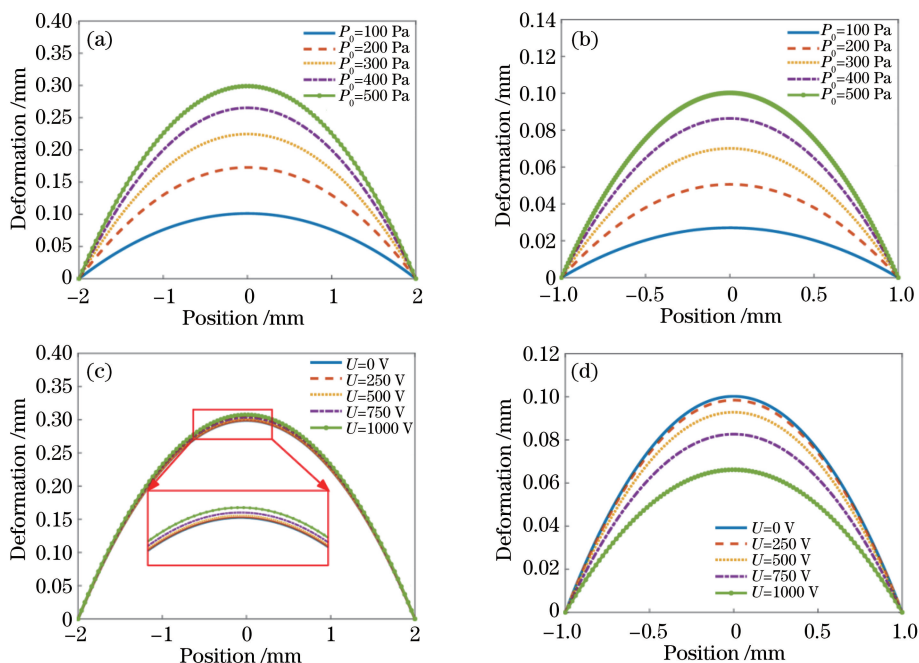


图 2 不同薄膜的轮廓。(a)不同初始液体压力下主动薄膜的轮廓;(b)不同初始液体压力下透镜薄膜的轮廓;
(c)不同驱动电压下主动薄膜的轮廓;(d)不同驱动电压下透镜薄膜的轮廓

Fig. 2 Contours of different membranes. (a) Contours of the active membrane under different initial liquid pressures; (b) contours of the lens membrane under different initial liquid pressures; (c) contours of the active membrane under different driving voltages; (d) contours of the lens membrane under different driving voltages

在不同驱动电压 U 下,腔室内的液体压力 P_U 和液体透镜焦距 f'_U 的变化如图 3(a) 所示。可以看出,随着驱动电压的增加,腔室的液体压力逐渐减小,液体透镜的焦距逐渐增加。当初始液体压力 P_0 为 500 Pa,驱动电压从 0 V 增加到 1000 V 时,腔室内的液体压力从 500 Pa 减小到 278 Pa,液体透镜的焦距从 15.13 mm 增加到 22.80 mm,增

加了 51%。当初始液体压力 P_0 为 400 Pa 时,腔室内的液体压力从 500 Pa 减小到 202 Pa,液体透镜的焦距从 17.52 mm 增加到 29.50 mm,增加了 68%。通过不同初始液体压力下的液体透镜焦距增加量发现,初始液体压力越小,在相同的驱动电压下,液体透镜的焦距增加量越大。不同初始液体压力及驱动电压下的液体透镜焦距如图 3(b) 所

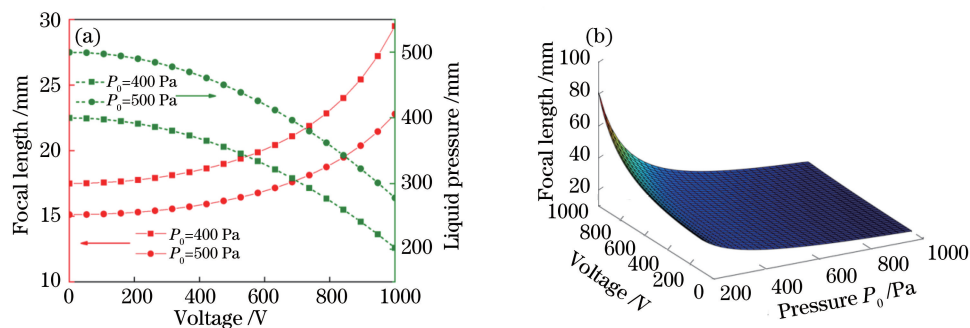


图 3 液体透镜的焦距。(a)不同驱动电压下的液体压力和液体透镜焦距;(b)不同初始液体压力及驱动电压下液体透镜的焦距
Fig. 3 Focal length of the liquid lens. (a) Liquid pressure and focal length of the liquid lens under different driving voltages; (b) focal length of the liquid lens under different initial liquid pressures and driving voltages

示,可以看出,液体透镜的焦距随驱动电压的增加而增加,随初始液体压力的增加而减小。

为了验证建立的液体透镜焦距数学模型的正确性,设计并制作了基于介电弹性体驱动的液体透镜。主动薄膜和被动薄膜均采用 Sylgard 186 材料,混合并充分搅拌基底和固化剂(质量比为 10:1),经抽真空、旋涂及加热固化后,得到杨氏模量为 1.2 MPa,初始厚度为 30 μm ,残余应力为 50 kPa 的 PDMS 薄膜^[24]。主动薄膜的半径为 10 mm,液体透镜薄膜的半径为 4 mm。搭建的测试装置如图 4(a)所示,激光器发出的光束经扩束器后变成平行光束,平行光束经过反射镜照射在液体透镜。通过精密调节位移平台的高度获得平行光束经过液体透镜后的最小光

斑位置,进而得到液体透镜的焦距。为了方便测量,选择测量液体透镜的后焦距。在不同初始液体压力和驱动电压下,通过理论计算和实验测量得到的液体透镜后焦距如图 4(b)所示。可以发现,当初始液体压力为 400 Pa、驱动电压为 1000 V 时,理论液体透镜的后焦距为 43.36 mm,实验测量值为 42.00 mm;当初始液体压力为 500 Pa、驱动电压为 1000 V 时,理论液体透镜的后焦距为 37.75 mm,实验测量值为 36.50 mm。随着初始液体压力的增加,液体透镜的后焦距逐渐减小;随着驱动电压的增加,液体透镜的后焦距逐渐增大,实验测量与理论计算结果相符,验证了液体透镜焦距模型的正确性。

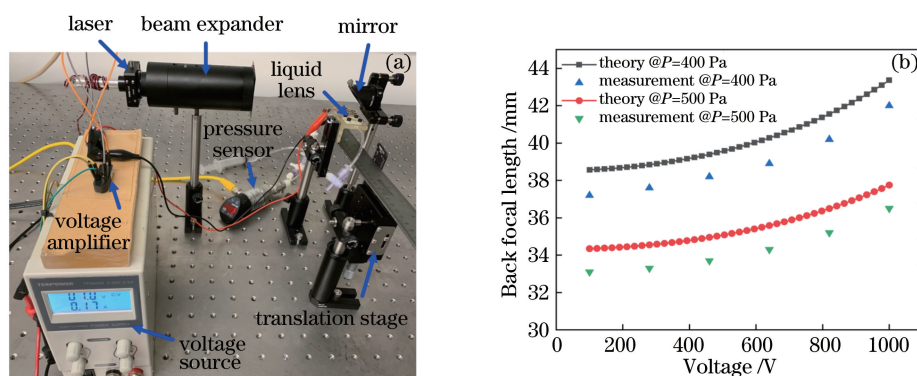


图 4 实验装置图。(a) 液体透镜后焦距的测量装置;(b) 理论与测量结果

Fig. 4 Setup diagram of the experiment. (a) Measuring device for back focal length of the liquid lens;

(b) theory and measurement results

3.2 介电弹性体杨氏模量对透镜焦距的影响

从(6)式可知,介电弹性体的杨氏模量直接影响了腔室内的液体压力,从而改变液体透镜的焦距。不同杨氏模量的介电弹性体可通过调节 PDMS 的基底和固化剂混合比例、固化温度和固化时长得到。为了研究介电弹性体杨氏模量和液体透镜的焦距关系,保持透镜薄膜的杨氏模量 $E_p = 1 \text{ MPa}$ 不变,只改变主动薄膜的介电弹性体杨氏模量。当主动薄膜的杨氏模量分别为 0.5, 1.0, 1.5 MPa 时,不同初始液体压力和驱动电压下主动薄膜和透镜薄膜的弓高如图 5(a)和图 5(b)所示。可以看出,随着主动薄膜杨氏模量的增加,在相同初始液体压力和驱动电压下,主动薄膜的弓高逐渐减小,透镜薄膜的弓高逐渐增加。在不同的主动薄膜杨氏模量下,液体透镜的焦距与初始液体压力和驱动电压的关系如图 5(c)所示。当初始液体压力为 500 Pa 时,液体透镜在不同主动薄膜杨氏模量和驱动电压下的焦距如图 5(d)所示。当驱动电压为

1000 V、主动薄膜的杨氏模量为 0.5 MPa 时、液体透镜的焦距为 26.13 mm。当杨氏模量增加为 1.0 MPa 和 1.5 MPa 时,液体透镜的焦距分别为 22.80 mm 和 21.38 mm,分别减小了 12.7% 和 18.2%,这表明减小介电弹性体的杨氏模量可增大液体透镜的变焦范围。

3.3 介电弹性体残余应力对透镜焦距的影响

主动薄膜和透镜薄膜在加工过程中难免会有残余应力的存在,从(6)式和(8)式可以看出,主动薄膜和透镜薄膜的残余应力会直接影响腔室的液体压力,进而对液体透镜的焦距产生影响。为了研究主动薄膜的介电弹性体残余应力和液体透镜焦距的关系,保持透镜薄膜的残余应力 $\sigma_{p, \text{fab}} = 30 \text{ kPa}$ 不变,主动薄膜介电弹性体残余应力分别为 30, 60, 90 kPa 时,液体透镜的焦距如图 6(a)所示。可以看出,在相同初始液体压力和驱动电压下,随着介电弹性体残余应力的增加,液体透镜的焦距变短。当初始液体压力为 500 Pa 时,液体透镜在不同残余应力和驱动电压

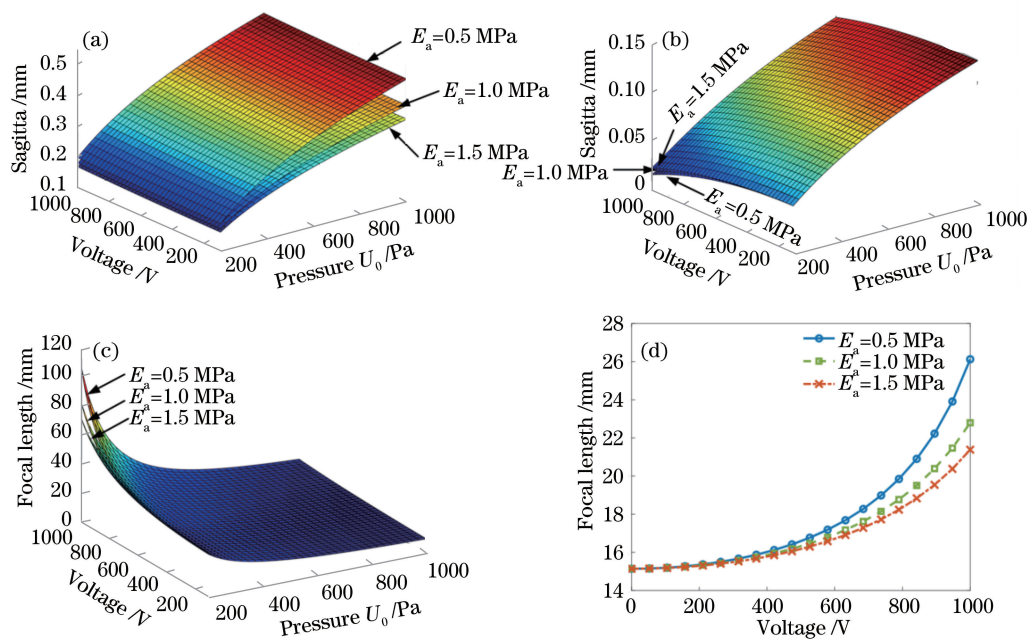


图 5 杨氏模量对透镜焦距的影响。(a)主动薄膜的弓高与初始液体压力、驱动电压的关系;(b)透镜薄膜的弓高与初始液体压力、驱动电压的关系;(c)液体透镜的焦距与初始液体压力、驱动电压的关系;(d)不同驱动电压下液体透镜的焦距

Fig. 5 Influence of the Young's modulus on the focal length of the lens. (a) Relationship between the sagitta of the active membrane and the initial liquid pressure and driving voltage; (b) relationship between the sagitta of the lens membrane and the initial liquid pressure and driving voltage; (c) focal length of the liquid lens and the initial liquid pressure and driving voltage; (d) focal length of the liquid lens under different driving voltages

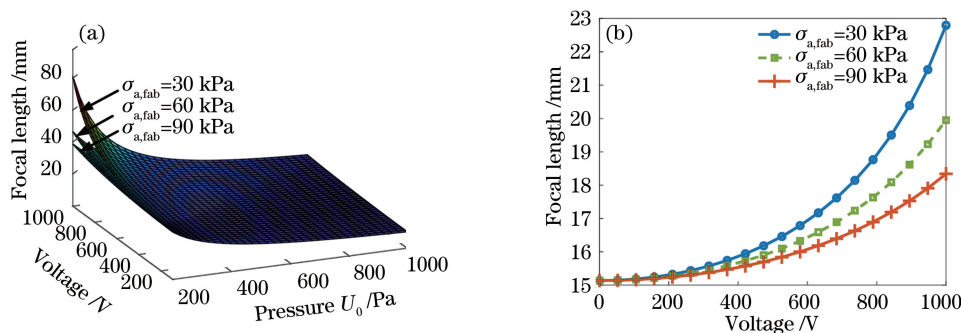


图 6 介电弹性体残余应力对透镜焦距的影响。(a)液体透镜的焦距与初始液体压力、驱动电压的关系;(b)不同驱动电压下的液体透镜焦距

Fig. 6 Influence of the residual stress of the dielectric elastomer on the focal length of the lens. (a) Relationship between the focal length of the liquid lens and the initial liquid pressure and driving voltage; (b) focal length of the liquid lens under different driving voltages

下的焦距如图 6(b)所示。可以看出,当主动薄膜的残余应力为 30 kPa 时,液体透镜的焦距为 22.80 mm。残余应力增加为 60 kPa 和 90 kPa 时,液体透镜的焦距分别为 19.45 mm 和 18.34 mm,相对减小量分别为 14.7% 和 19.6%,这表明减小介电弹性体的残余应力可增大液体透镜的变焦范围。

3.4 介电弹性体初始厚度对透镜焦距的影响

在介电弹性体上下表面的柔性电极上施加电压

时,介电弹性体的厚度会减小,导致其内部应力发生变化,从而引起液体透镜焦距发生变化。当介电弹性体的初始厚度分别为 30, 60, 90 μm 时,液体透镜的焦距在不同初始液体压力和驱动电压下的关系如图 7(a)所示。可以看出,在相同初始液体压力和驱动电压下,随着介电弹性体初始厚度的增加,液体透镜的焦距逐渐减小。初始液体压力为 500 Pa 时,液体透镜在不同介电弹性体初始厚度和驱动电压下的

焦距如图 7(b) 所示。当介电弹性体初始厚度为 $30\ \mu\text{m}$ 时,液体透镜的焦距为 $22.80\ \text{mm}$;当介电弹性体的厚度增加到 $60\ \mu\text{m}$ 和 $90\ \mu\text{m}$ 时,液体透镜的

焦距分别减小到 $16.75\ \text{mm}$ 和 $15.88\ \text{mm}$,相对减小量分别为 26.5% 和 30.4% ,这表明减小介电弹性体的初始厚度可以增大液体透镜的变焦范围。

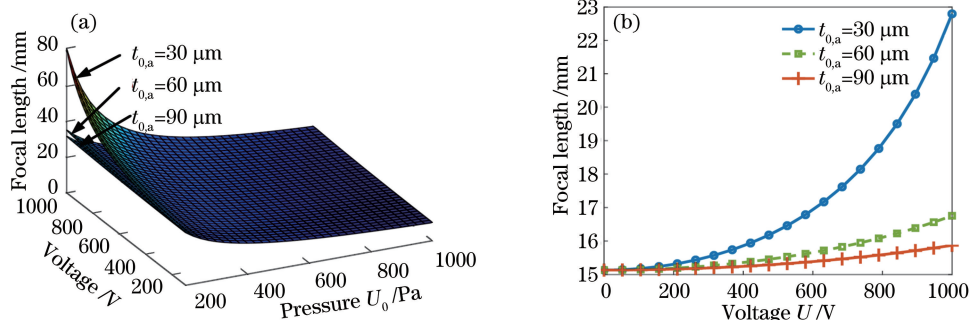


图 7 介电弹性体厚度对透镜焦距的影响。(a)液体透镜的焦距与初始液体压力、驱动电压的关系;
(b)不同驱动电压下的液体透镜焦距

Fig. 7 Influence of the thickness of the dielectric elastomer on the focal length of the lens. (a) Relationship between the focal length of the liquid lens and the initial liquid pressure and driving voltage; (b) focal length of the liquid lens under different driving voltages

3.5 介电弹性体半径对透镜焦距的影响

从(6)式可知,介电弹性体半径直接影响了腔室内的液体压力,从而改变液体透镜的焦距。为了研究介电弹性体半径和液体透镜焦距的关系,保持透镜薄膜的半径 $1\ \text{mm}$ 不变,主动薄膜的介电弹性体半径分别为 $2, 4, 6\ \text{mm}$ 时,液体透镜的焦距在不同初始液体压力和驱动电压下的关系如图 8(a) 所示。可以看出,在相同初始液体压力和驱动电压下,随着介电弹性体半径的增加,液体透镜的焦距变短。初始液体压力为 $500\ \text{Pa}$ 时,液体透镜在不同介电弹性体半径和驱动电压下的焦距如图 6(b) 所示。当介电弹性体半径为 $2\ \text{mm}$ 时,液体透镜的焦距为 $22.80\ \text{mm}$;当介电弹性体的半径为 $4\ \text{mm}$ 和 $6\ \text{mm}$ 时,液体透镜的焦距分别为 $19.94\ \text{mm}$ 和

$18.61\ \text{mm}$,相对减小量分别为 12.5% 和 18.4% ,这表明减小介电弹性体的半径可增大液体透镜的变焦范围。

综上所述,减小介电弹性体杨氏模量、残余应力、初始厚度以及半径,都可增加液体透镜的变焦范围。作为主动薄膜的介电弹性体在不同结构和材料参数下对液体透镜焦距的影响如表 2 所示,可以发现,在相同的增加倍率上,影响液体透镜焦距最大的因素为介电弹性体的初始厚度,其次为介电弹性体的残余应力,介电弹性体的杨氏模量和半径具有近似的影响。从图 5~图 8 可以发现,可通过减小介电弹性体的弹性模量、残余应力、初始厚度及半径等方式降低介电弹性体和透镜薄膜分离结构下的驱动电压。

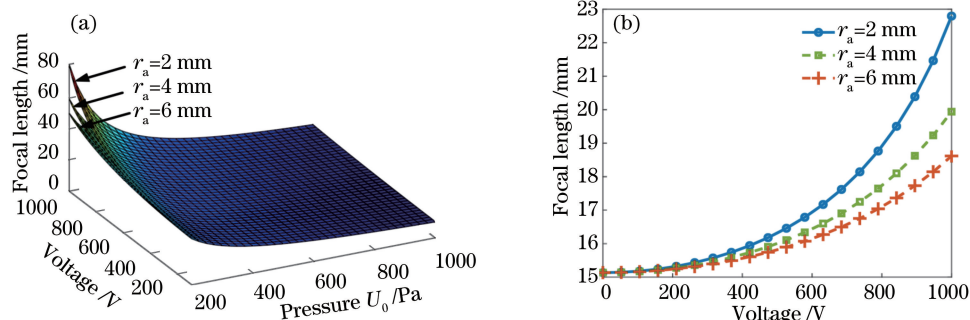


图 8 介电弹性体半径对透镜焦距的影响。(a)液体透镜的焦距与初始液体压力、驱动电压的关系;
(b)不同驱动电压下液体透镜的焦距

Fig. 8 Influence of the radius of the dielectric elastomer on the focal length of the lens. (a) Relationship between the focal length of the liquid lens and the initial liquid pressure and driving voltage; (b) focal length of the liquid lens under different driving voltages

表 2 介电弹性体不同结构和材料参数对液体透镜焦距的影响

Table 2 Influence of different structural and material parameters of the dielectric elastomer on the focal length of liquid lens

Parameters	E_a		$\sigma_{a, fab}$		$t_{0, a}$		r_a	
Multiple of increase	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0
Relative change ratio /%	-12.7	-18.2	-14.7	-19.6	-26.5	-30.4	-12.5	-18.4

4 结 论

介电弹性体可作为驱动单元实现液体透镜的变焦,高驱动电压是限制其应用的主要因素,为了降低介电弹性体的驱动电压,采用介电弹性体和透镜薄膜的分离结构。建立了该结构下的主动薄膜变形、透镜薄膜变形以及液体透镜焦距的数学模型,分析了介电弹性体参数(杨氏模量、残余应力、初始厚度以及半径)对液体透镜焦距的影响。结果表明,液体透镜的焦距随驱动电压的增加而增大,随初始液体压力的增加而减小。增加驱动电压和减小初始液体压力可增大液体透镜的焦距变化范围。增加介电弹性体杨氏模量、残余应力、初始厚度以及半径,会缩小液体透镜的变焦范围。对比 4 个介电弹性体参数发现,对液体透镜焦距影响最大的因素是介电弹性体的初始厚度,其次为介电弹性体的残余应力,介电弹性体的杨氏模量和半径具有近似的影响,本结论为优化设计基于介电弹性体驱动的液体透镜提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Pan W Q, Li X N, Lu S, et al. Gauss theoretical analysis of liquid crystal lens zoom system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1222003.
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.
- [2] Ma C, Cheng D W, Wang Q W, et al. Optical system design of a liquid tunable fundus camera based on Gaussian brackets method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1122001.
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.
- [3] Chen S H, Hao R, Zhang Y, et al. Optofluidics in bio-imaging applications [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(5): 532-542.
- [4] Liu J, Li H. Research on driving and features of variable focus liquid lenses [J]. *Journal of Optics Applications*, 2014(3): 25-35.
刘娇,李华.液体变焦透镜的驱动及其特性研究[J].*光学应用*, 2014(3): 25-35.
- [5] Xu R Q, Kong M M, Zhang H C, et al. Experimental research on reducing zoom time of electrowetting liquid lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1322003.
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.
- [6] Lin H C, Lin Y H. An electrically tunable-focusing liquid crystal lens with a low voltage and simple electrodes[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2045-2052.
- [7] Lee J, Park Y, Chung S K. Multifunctional liquid lens for variable focus and aperture[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 287: 177-184.
- [8] Wang L H, Oku H, Ishikawa M. Variable-focus lens with 30 mm optical aperture based on liquid-membrane-liquid structure [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(13): 131111.
- [9] Peng R L, Chen J B, Zhuang S L. Design and analysis of a variable-focus optical system based on electrowetting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1141-1146.
彭润玲,陈家璧,庄松林.电湿效应变焦光学系统的设计与分析[J].*光学学报*, 2008, 28(6): 1141-1146.
- [10] Choi S T, Son B S, Seo G W, et al. Opto-mechanical analysis of nonlinear elastomer membrane deformation under hydraulic pressure for variable-focus liquid-filled microlenses [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 6133-6146.
- [11] Huang H Y, Zhao Y. Optofluidic lenses for 2D and 3D imaging [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, 29(7): 073001.
- [12] Shi G F, Yang B, Shi G Q, et al. A review of the development of high-speed liquid lens [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(10): 777-781.
石广丰,杨彬,史国权,等.高速变焦液体透镜的发展动态综述[J].*红外技术*, 2014, 36(10): 777-781.
- [13] Kim B C, Lee Y, Nam J D, et al. Smart material actuators for micro optical zoom lens driving systems [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(7): 1999-2004.
- [14] 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.
- [15] Maffli L, Rosset S, Ghilardi M, et al. Ultrafast all-

- polymer electrically tunable silicone lenses [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(11): 1656-1665.
- [16] Nam S, Yun S, Yoon J W, et al. A robust soft lens for tunable camera application using dielectric elastomer actuators[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(6): 777-782.
- [17] Lu T Q, Cai S Q, Wang H M, et al. Computational model of deformable lenses actuated by dielectric elastomers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(10): 104104.
- [18] Niklaus M, Rosset S, Shea H. Array of lenses with individually tunable focal-length based on transparent ion-implanted EAPs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7642: 76422K.
- [19] Wei K, Domicone N W, Zhao Y. Electroactive liquid lens driven by an annular membrane [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1318-1321.
- [20] Keong G K, La T G, Shiao L L, et al. Challenges of using dielectric elastomer actuators to tune liquid lens [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9056: 90561J.
- [21] Maffli L. Fluidically-coupled dielectric elastomer actuator structures for tunable optics and microfluidics [D]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2014.
- [22] Small M K, Nix W D. Analysis of the accuracy of the bulge test in determining the mechanical properties of thin films[J]. *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6): 1553-1563.
- [23] Chen S. Study on the variable focus liquid lens using PDMS membrane[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
陈帅. PDMS 薄膜型可变焦液体透镜研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [24] Rosset S. Metal ion implanted electrodes for dielectric elastomer actuators [D]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009.