

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005359

基于填充液体表面曲率变化的液体透镜的优化设计*

李江霖¹ 渠吉庆¹ 刘玉琪¹ 孙科学^{1,2}

(1.南京邮电大学电子与光学工程学院微电子学院 南京 210023;

2.射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室 南京 210023)

摘要: 液体透镜具有许多传统玻璃透镜所不能比拟的优点,其成像质量一直是研究的重点。提出一种通过削弱像差提升成像质量的液体透镜设计方法,该液体透镜由PDMA薄膜层、纯水、二甲基硅油液体层和F2玻璃层组成,通过ZEMAX软件进行仿真,得到该液体透镜的几何像差、球差等,并使用COMSOL软件对不同形状薄膜的受力情况进行分析,选出合适的薄膜作为液体透镜的首选材料。结果表明边缘厚中间较薄的薄膜更适合用于制作液体透镜,且该液体透镜与传统透镜相比,可以较好的削弱像差,展现出良好的成像质量。

关键词: 液体透镜;光学器件;像差;ZEMAX;COMSOL

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Optimization design of liquid lens based on variation of surface curvature of filling liquid

Li Jianglin¹ Qu Jiqing¹ Liu Yuqi¹ Sun Kexue^{1,2}

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. Nation-Local Joint Project Engineering Lab of RF Integration & Micropackage, Nanjing 210023, China)

Abstract: Liquid lens has many advantages over the traditional glass lens, and its aberrations have always been the focus of research. A liquid lens is proposed to further improve the imaging quality and reduce aberration. This liquid lens is composed of PDMA thin film, pure water, dimethyl silicone oil liquid and F2 glass. This lens designed and emulated by ZEMAX, which shows the geometrical aberration, spherical aberration and so on. The forces on the films of different shapes are analyzed by COMSOL so that to Select the appropriate film as the preferred material for liquid lens. The results indicate that the thin film in the middle is more suitable for making liquid lenses. The liquid lens compared with the traditional lens can reduce aberration and shows better image quality.

Keywords: liquid lens; optical devices; aberration; ZEMAX; COMSOL

0 引言

变焦系统常被广泛应用于日常生活、航空航天和医疗教育等各个领域。其通常由多个透镜组成,并移动光学组件来实现焦距的变化^[1]。现代社会中许多变焦镜头越来越微型化,在小尺寸中实现一定变焦功能往往非常困难^[2]。液体透镜是一种可以独立完成变焦功能的新颖光学器件,它的出现简化了光学系统的结构,让集成设备更加的小型化和轻量化^[3]。

1995年,Gorman等^[4]首次在一块透明的电极上滴了一滴液体,并通过改变其上电压实现了液滴的表面曲率的

变化,由此实现了变焦的功能,这可以说是真正意义上的第一块液体透镜。机械力控制的液体透镜诞生于加州大学圣地亚哥分校,通过改变透镜面型,从而改变焦距。它的出现为光学系统的设计提供了全新的可能。

近年来,液体透镜在诸多领域都有所应用。例如基于液体透镜的仿生视觉光学系统,进一步推动了机器视觉的发展^[5]。又比如将液体透镜放入显微镜系统中,不用移动任何的组件,便可以轻松地实现调焦功能^[6-7]。在便携式的科技产品中,也有液体透镜的身影,比如手机镜头里应用液体透镜可以实现较大变倍比的变焦功能,并且由于单个液体透镜就可以实现变焦,所以在较轻便的电子产品内实现

收稿日期:2020-11-14

*基金项目:国家自然科学基金(11304160)、江苏省研究生科研创新计划(KYCX20_0803)、江苏省研究生实践创新计划(SJ CX19_0271)、南京邮电大学国自孵化项目(NY220013)资助

• 40 •

较大的变焦功能成为了可能^[8]。在医学领域,它也有其一席之地。美国加利福尼亚大学就有研究人员对其在医学方面的应用进行了研究。比如说在腹腔镜中的应用,并且成功地进行了胆囊切除相关的手术。仅仅使用两片液体透镜便可以使得其在变焦过程中像面能够保持一定的稳定性,这是普通透镜所不能比拟的^[9]。美国亚利桑那大学研究人员发明了一种可调式液体透镜,有望用于校正近视、远视及散光等眼部问题^[10]。

基于液体表面曲率变化的液体透镜根据原理的不同,可以分为两个小类。第1类方式是基于电润湿效应的液体透镜,将液滴滴在导电固体的表面(电极材料),并将该固体施加电压,使得液滴与接触面之间的接触角发生变化,随之而来的便是液体表面的曲率会发生变化,焦距会发生变化^[11]。第2类方式是通过改变液体透镜的薄膜及液体的曲率,使得薄膜的面形发生了一定的变化,得到不同的焦距,实现一定的变倍比^[12-15]。

本文设计一种基于填充液体表面曲率变化的液体透镜,首先利用 ZEMAX 软件仿真,进行像差分析,使其具备较好的成像质量。再使用 COMSOL 软件进行透镜薄膜的受力分析,发现薄膜中央及四周受到较大的压力。选用边缘厚中央较薄的薄膜制作该液体透镜可以延长其使用寿命,且单个液体透镜便可以矫正其原有像差,相较于传统玻璃透镜组,其表现出了较为良好的成像特性。

1 工作原理

1.1 液体透镜结构

基于填充液体表面曲率变化的液体透镜是通过改变液体透镜的薄膜及液体的曲率,使得薄膜的面形发生了一定的变化,得到不同的焦距,实现一定的变倍比。这种液体透镜的结构一般分为玻璃衬底、透明液体、薄膜材料3层,结构如图1所示。

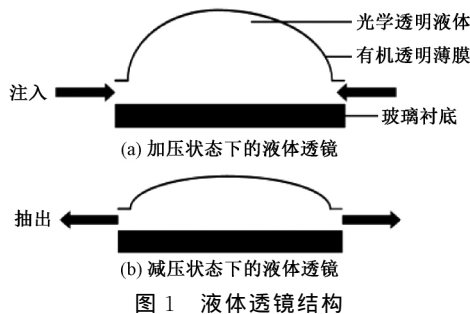


图1 液体透镜结构

当液体注入到薄膜与玻璃层之间时,由于液体对薄膜的压力,会使得薄膜向外隆起,曲率将会随之变化;当液体抽出一定量时,薄膜会因为外界压力的影响,使得曲率增大,或是向内凹陷,形成凹透镜。液体透镜利用液体的进出,实现对液体透镜焦距的调节。

1.2 液体透镜成像原理

液体透镜属于高斯光学的研究范畴,其光路如图2所示。

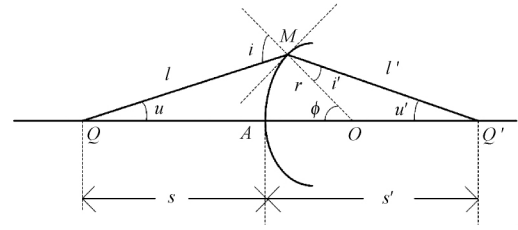


图2 透镜成像光路

由正、余弦定理可得:

$$\frac{l}{\sin\phi} = \frac{r}{\sin u} = \frac{s+r}{\sin(180^\circ-i)} \quad (1)$$

$$\frac{l'}{\sin\phi} = \frac{r}{\sin u'} = \frac{s'-r}{\sin i'} \quad (2)$$

$$l^2 = (s+r)^2 + r^2 - 2r(s+r)\cos\phi \quad (3)$$

$$l'^2 = (s'-r)^2 + r^2 - 2r(s'-r)\cos(180^\circ-\phi) \quad (4)$$

代入斯涅尔折射定律:

$$n \sin i = n' \sin i' \quad (5)$$

整理可得:

$$\frac{s^2}{n^2(s+r)^2} - \frac{s'^2}{n'^2(s'-r)^2} = -4r \sin^2 \frac{\phi}{2} \left(\frac{1}{n^2(s+r)} - \frac{1}{n'^2(s'-r)} \right) \quad (6)$$

由于是在傍轴条件下进行研究,所以 $\phi \approx 0$, 即

$$-4r \sin^2 \frac{\phi}{2} \left(\frac{1}{n^2(s+r)} - \frac{1}{n'^2(s'-r)} \right) \approx 0, \text{ 故:}$$

$$\frac{s^2}{n^2(s+r)^2} = \frac{s'^2}{n'^2(s'-r)^2} \quad (7)$$

整理得:

$$\frac{n}{s} + \frac{n'}{s'} = \frac{n'-n}{r} \quad (8)$$

式中: r 为透镜的曲率; n 为透镜所置环境的折射率; n' 为透镜本身的折射率,当透镜在空气中使用时,取 n 近似为1。该式表明光焦度 $\frac{n'-n}{r}$ 与透镜的曲率有关,且与透镜材料的折射率成正比关系,即液体透镜的曲率变化,其光焦度随之变化。

2 总体设计与像差分析

2.1 ZEMAX 模型参数

本文所研究的液体透镜可以看作是多个球面所组成的共轴球面光具组。薄膜层和液体层均是有一定曲率的球面,玻璃层可以看作是一个曲率为无穷大的球面。根据式(2),通过选择合适的材料,可以达到比较大的变倍比。表1所示为无色透明可作为候选的液体材料,而薄膜材料则直接选用PDMS薄膜,它具有较好的柔韧性,能够在受到压力时迅速做出相对应的形变反应,并具有一定的化学稳定性,不会轻易的和液体材料发生化学反应。

表 1 备选液体材料折射率

液体	折射率
纯水	1.333
二甲苯溶液	1.480
二甲基硅油	1.600

双胶合玻璃透镜由一正一负透镜胶合形成,由于正、负透镜有着符号相反的球差,相加即可相互抵消,从而实现削弱球差的目的。参考其原理设计了具有相似结构的液体透镜。

如图 3 所示,图 3(a)为普通液体透镜,图 3(b)在图 3(a)基础上增加了与原透镜表面曲率保持一致的凹液体透镜,并填充折射率 n 为 1.33 的纯水。二者共用一块 F2 玻璃。

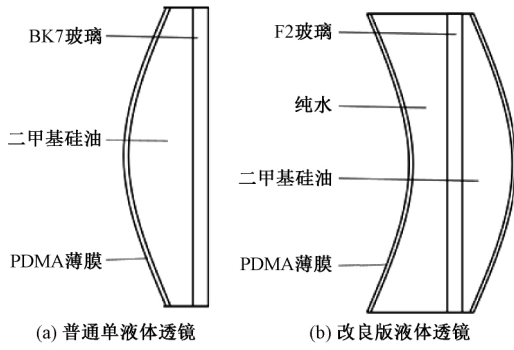
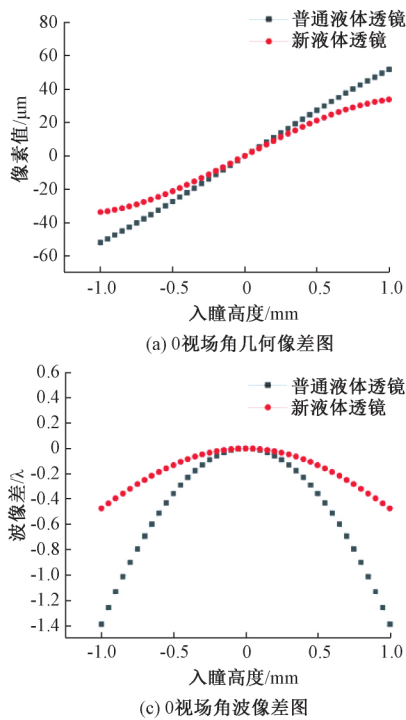


图 3 液体透镜结构



根据光焦度公式,选取折射率 n 较大的液体材料,可以获取较大的变倍比,即有较大的变焦范围,故而选择了二甲基硅油作为液体透镜的填充材料,液体透镜模型参数如表 2 所示。

表 2 液体透镜模型参数

表面	类型	半径/mm	厚度/mm	光学参数
物面	水平	无穷	无穷	—
光阑	水平	无穷	5.000 000	—
2	水平	-100	1.000 000	1.41,41
3	水平	-100	2.000 000	1.33,0.0
4	水平	无穷	1.000 000	F2
5	水平	无穷	2.000 000	1.60,0.0
6	水平	-100	1.000 000	1.41,41
7	水平	-100	360.490 134	—
像面	水平	无穷	—	—

2.2 像差分析

在实际应用中,光学系统往往偏离理想成像,产生像差,若能削弱像差,便可以改善光学系统的成像质量。

为进一步验证新结构液体透镜是否具备削弱像差的功能,对图 3 两种液体透镜进行仿真,像差比较结果如图 4 所示。图 4(a)、(b)表明,在入瞳高度为 $-0.25 \sim 0.25$ mm 时几何像差值几近重叠,当入瞳高度绝对值 > 0.25 ,二者有了明显的区分度,添加凹透镜补偿像差的新液体透镜几何

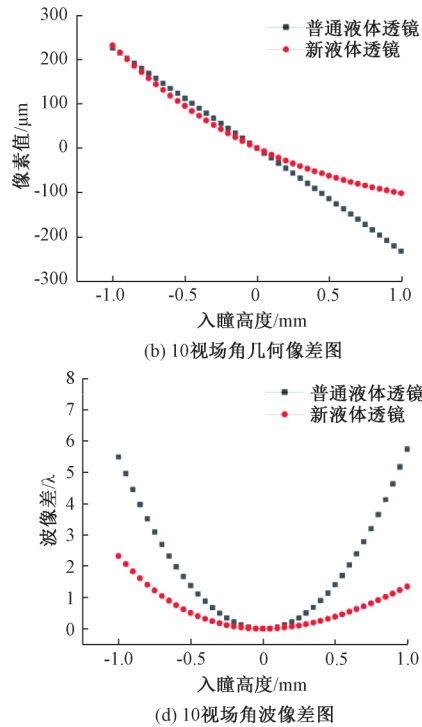


图 4 像差比较结果

像差值小于普通液体透镜。波像差 OPD 图如图 4(c)、(d) 所示,在 $-1 \sim 1$ mm 的入瞳高度范围内,新液体透镜的波像差值始终小于普通液体透镜,且由 0 视场角与 10 视场角的对比可知,二者间的这种差异将随视场角的增大愈发明显。由此可知,新结构的液体透镜展现出了良好的像差补

偿性。

10 视场角下普通液体透镜和本文设计的新结构液体透镜点列图如图 5 所示。新结构液体透镜在一定程度上减小了彗差,其光斑半径在两视场的条件下,与原液体透镜相比,分别减小了 30.7%、23.8%,成像质量得到提升。

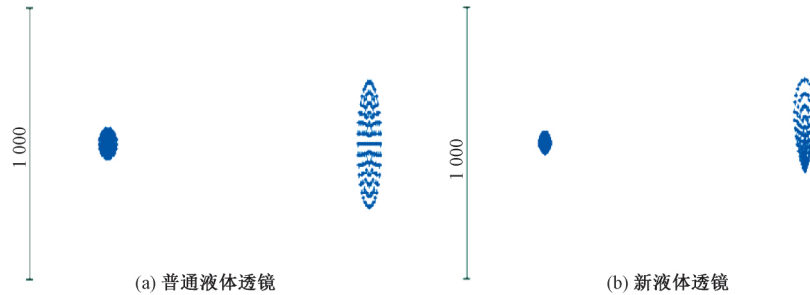


图5 点列图

光阑对入射光束的限制作用也可以在一定程度上削弱像差,球差、彗差的形成均是孔径角过大或者是入射光束太宽造成的,光阑可以在一定程度上减小二者带来的影响,图 6 为基于新结构液体透镜的仿真结果。

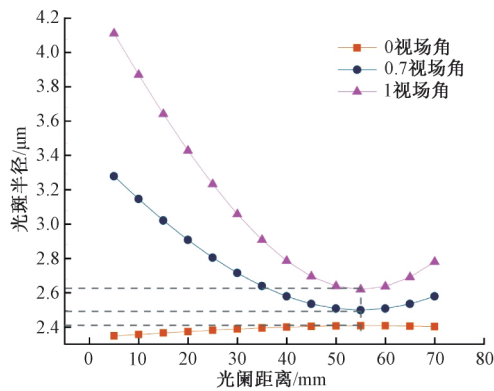


图6 不同光阑距离下的光斑半径大小

由图 6 知,0 视场时随着光阑距离的增加,光斑半径先增大后减小,而在 0.7 与 1 视场角时,光斑半径随光阑距离的增加先减小后增大,在光阑距离为 55 mm 时有最小值,在光学系统中,光斑半径过大会代表成像质量不佳,存在明显的球差或彗差,故在不同视场角的综合考量下,如有需要,可在距离透镜 55 mm 处放置光阑,进一步提升成像质量。

2.3 液体透镜薄膜形状

在实际应用中,透镜变化焦距,薄膜也随之发生形变,其受到的力一部分是外部空气中大气压强施加的力,另一部分是液体透镜内填充液体对其的作用力,参考前人对非均匀薄膜液体透镜的仿真研究^[14],使用 COMSOL 仿真软件绘制出 3 种薄膜模型。普通薄膜(图 7(a)所示),厚度均匀 1 mm;边缘加厚薄膜(图 7(b)所示),边缘厚度 1.5 mm,中央厚度保持不变;中央加厚薄膜(图 7(c)所示),中央厚度 1.5 mm,边缘保持不变。

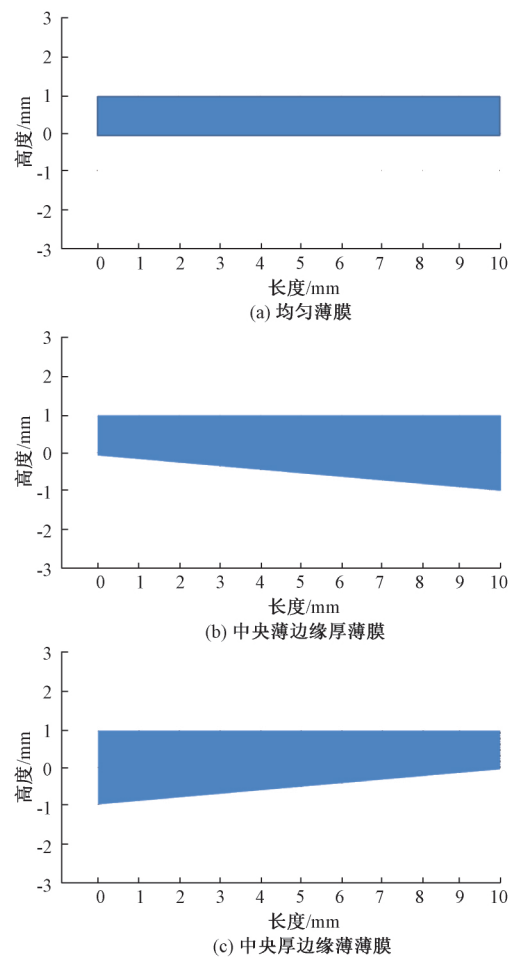


图7 不同形状的薄膜

模型选择固体力学稳态分析,设定边界载荷为单位面积力,初始设定在 Z 方向上向下表面施加 1.1 kPa 的力,研究结果如图 8 所示。

图 8(a)为普通均匀厚度的薄膜,在应力分析时,薄膜中央和边缘都受到了较大的压力,表现为 $6 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 左

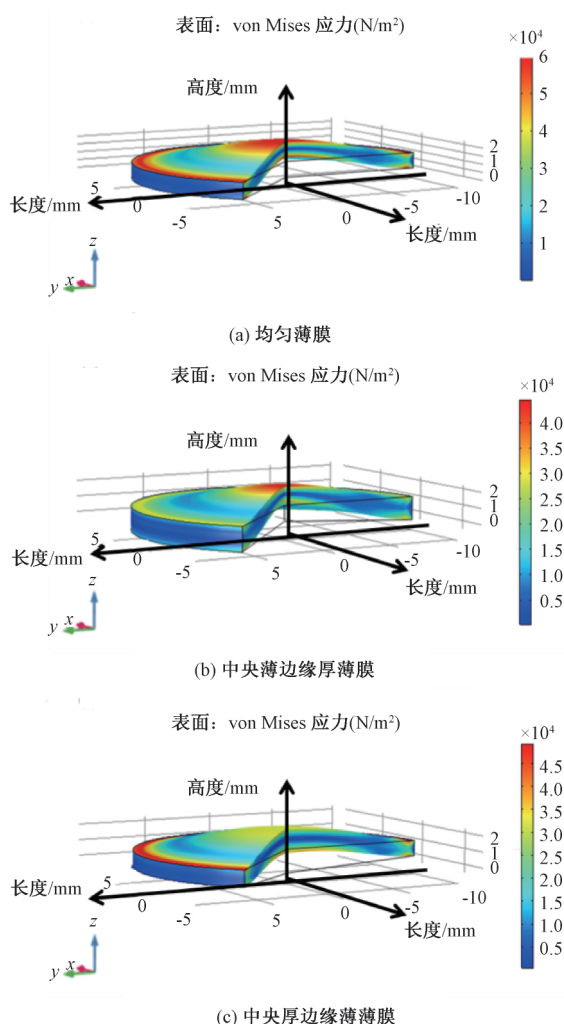


图 8 不同形状薄膜的 3D 应力图

右的压强。图 8(b)为薄膜在两边较厚条件下的仿真结果,其边缘所受应力为 $3 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 左右,中央所受应力为 $4 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 左右。图 8(c)是中央较厚条件下的仿真结果,与图 8(b)不同,中央所受应力为 $3 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 左右,薄膜边缘承受 $4.5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 左右的压强。

综合判断,在设计液体透镜薄膜时,应将边缘部分做加厚处理,从而延长其使用年限。

3 结 论

传统变焦系统往往需要两个及以上的透镜组通过机械移动实现变焦功能,这对精确度的要求很高,且此类系统体积大、响应时间较慢,无法满足人们对于微型化、轻量化的需求。本文设计的基于薄膜面型变化的液体透镜,仅用单个透镜就可以实现变焦功能,其新的结构与传统结构的液体透镜相比,在一定程度上削弱了像差,展现出了良好的成像质量。在液体透镜实际使用过程中,薄膜会在变焦过程发生形变,受到来自填充液体和大气压强的压力,使用 COMSOL 仿真不同形状薄膜,发现边缘厚中间较薄的薄膜所受应力相对较小,因此在

制作液体透镜时,对薄膜进行边缘加厚处理,可以延长其使用年限。若要进一步提升液体透镜的其他性能,可以考虑将液体透镜与图像传感器、图像处理等其他模块一起搭配设计出自动调焦系统,这相比于传统机械移动的透镜组,在反应时间上将会有更大的上升空间。

参考文献

- [1] 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):59-69.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] GORMAN B, BIEBUYCK H, WHITESIDES G. Control of the shape of liquid lenses on a modified gold surface using an applied electrical potential across a self-assembled monolayer[J]. Langmuir, 1995, 11: 2242.
- [5] 孟晓辰,樊凡,祝连庆,等.基于液体透镜的仿生视觉光学成像系统[J].应用光学,2018,39(5):595-599.
- [6] 王琼华,李磊.基于自适应透镜的光学成像系统[J].光电技术,2020,40(3):155-163.
- [7] 张祥翔.基于液体透镜的显微镜自动调焦技术[J].光电工程,2015,42(10):37-42.
- [8] 樊凡,孟晓辰,祝连庆,等.共光路宽光谱仿生视觉系统设计[J].电子测量技术,2020,43(4):163-167.
- [9] FRANK S T, JOHNSON D, FRANCIS C S, et al. Fluidic lens laparoscopic zoom camera for minimally invasive surgery[J]. Journal of Biomedical Optics, 2010, 15(3):030504-1-030504-3.
- [10] 顾海鹏,洪华杰,范纪红.液态透镜研究现状与发展分析[J].应用光学,2019,40(6):1126-1138.
- [11] 乔卫东,李跃,郭梁.航空航天相机成像性能测试系统研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(9):9-16.
- [12] YU H B, ZHOU G Y, LEUNG H M, et al. Tunable liquid-filled lens integrated with a spherical surface for spherical aberration compensation [J]. Optics Express, 2010, 18(10):99459954.
- [13] WAIBEL P, MADER D, LIEBETRAUT P, et al. Tunable all-silicone multi-chamber achromatic microlens [C]. International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2011: 728-731.
- [14] 李霖,李桂芝,韩璐.红外微扫超分成像系统设计应用研究[J].国外电子测量技术,2020,39(10):125-129.
- [15] 渠吉庆,陈禹,刘玉琪,等.基于语音识别智能家居系统的设计与实现[J].计算机技术与发展,2020,30(12):148-152.

作者简介

李江霖,硕士研究生,主要研究方向为信号采集与智能信号处理。

孙科学,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为光声信息检测与成像技术、模式识别与智能信号处理。

E-mail:sunkx@njupt.edu.cn