

采用液晶透镜校正电润湿液体透镜调焦系统的单色像差

张嘉伦, 于涛, 黄志宇, 潘国彬

引用本文:

张嘉伦, 于涛, 黄志宇, 等. 采用液晶透镜校正电润湿液体透镜调焦系统的单色像差[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(7): 954–963.

ZHANG Jia-lun, YU Tao, HUANG Zhi-yu, et al. Correcting the monochromatic aberration of the electrowetting liquid lens focusing system using liquid crystal lens[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(7): 954–963.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0345>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

方块电阻阶梯分布的模式控制液晶透镜的仿真

Simulation of modal control liquid crystal lens with step sheet resistance distribution

液晶与显示. 2020, 35(9): 908–913 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0908>

异硫氰酸酯类化合物在混合液晶中的应用

Application of isothiocyanate compounds in liquid crystal mixtures

液晶与显示. 2015(2): 224–228 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153002.0224>

基于液晶透镜的电控式光学影像缩放系统

Electrically tunable optical zoom system based on liquid crystal lenses

液晶与显示. 2015(3): 375–380 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153003.0375>

基于大 Δn 液晶材料的短焦距透镜阵列

Short focal length lens array based on liquid crystal material with large Δn

液晶与显示. 2021, 36(4): 509–515 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0288>

快速响应模式电极pi-cell液晶透镜的研究

Fast response modal electrode pi-cell liquid crystal lens

液晶与显示. 2019, 34(8): 739–747 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193408.0739>

文章编号:1007-2780(2021)07-0954-10

采用液晶透镜校正电润湿液体透镜 调焦系统的单色像差

张嘉伦, 于 涛*, 黄志宇, 潘国彬
(大连海事大学 理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:为解决电润湿液体透镜调焦系统的单色像差随调焦过程中发生较大改变的问题,提出利用梯度折射率分布可调的液晶透镜对系统单色像差进行校正的设计方案。在 850 nm 波长下,采用液晶透镜对系统在无限远到 200 mm 间 6 种典型物距下的单色像进行校正。在系统像差最大的无限远物距下,边缘视场的点列图几何半径从 44.696 μm 减小到 7.423 μm ,其余视场下的弥散斑均减小到艾里斑以内,系统单色像差得到了较好的校正。为减少液晶透镜响应时间,将液晶透镜改为 5 个 1/5 盒厚的液晶透镜的叠层组合,大幅提高了响应速度。研究发现,此结构同样对系统在不同物距下的单色像差具有良好的校正作用。

关键词:电润湿液体透镜;液晶透镜;梯度折射率;单色像差校正;调焦系统

中图分类号:O439;O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2020-0345

Correcting the monochromatic aberration of the electrowetting liquid lens focusing system using liquid crystal lens

ZHANG Jia-lun, YU Tao*, HUANG Zhi-yu, PAN Guo-bin

(School of Science, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to solve the problem that the monochromatic aberration of the electrowetting liquid lens focusing system changes greatly with the focusing process, a design scheme of correcting the monochromatic aberration of the system by using liquid crystal lens with adjustable gradient refractive index distribution is proposed. At 850 nm wavelength, liquid crystal lens is used to correct the monochromatic images of the system at six typical object distances ranging from infinity to 200 mm. At the infinite object distance with the largest aberration, the geometric radius of the dot pattern of the edge field of view is reduced from 44.696 μm to 7.423 μm , and the speckle in other fields is reduced to the Airy spot. And the monochromatic aberration of the system has been corrected. In order to reduce the response time of the liquid crystal lens, the liquid crystal lens is replaced by laminated combination of five liquid crystal lenses with 1 / 5 cell thick, which enhances the response speed significantly. It has

收稿日期:2020-12-15;修订日期:2021-02-02.

基金项目:国家自然科学基金(No.11404048);中央高校基本科研业务(No.3132016349)

Support by National Natural Science Foundation of China (No.11404048); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.3132016349)

* 通信联系人, E-mail: yutao@dlmu.edu.cn

been found that this structure also has a favorable correction effect on the monochromatic aberration of the system at different object distances.

Key words: electrowetting liquid lens; liquid crystal lens; gradient index; monochromatic aberration correction; focusing system

1 引言

电润湿液体透镜通过电压驱动控制两种液体交界面处的曲率,来改变透镜的焦距,实现调焦的功能,具有结构简单,体积小,响应速度快等优点。因此电润湿液体透镜在调焦和变焦光学系统中得到了广泛应用^[1-2]。

基于电润湿液体透镜的调焦系统,随着物距的改变,电润湿液体透镜的曲率半径也随之改变,系统的像差特性将会发生变化。对不同物距下电润湿液体调焦系统的像差都能进行较好的校正,将会提高系统的成像质量。目前,国内外的许多学者对此进行了研究。Reichelt 等人^[3]和 Li 等人^[4]分别提出了具有 3 个两室液体透镜和 4 个两室液体透镜的多腔室结构液体透镜,通过这些腔室内注入性质不同的液体,来校正球差以及色差。Zhang 等人^[5]和 Li 等人^[6]都采用了多片电润湿液体透镜来进行变焦系统的设计,不同的电润湿液体透镜起到变焦以及校正像差的作用。Zohrabi 等人^[7]和 Lima 等人^[8]分别设计模拟了 8 电极电润湿液体透镜和具有 10×10 阵列电极的电润湿液体透镜,通过在每个电极单独施加电压来精确控制面型,从而实现对像差的校正。Edmund 公司已推出多款商品化产品,都为电润湿液体透镜结合玻璃透镜的结构,其中电润湿液体透镜作为系统变焦部分,玻璃镜头承担部分光焦度并校正部分像差。以上研究都取得了一定成果,但也存在着驱动复杂,不易实现、成本较高及只针对固定物距下的像差有较好的校正等局限性。因此,低成本,容易实现以及对不同物距下的像差都有较好校正的方案成为了需求热点。

液晶透镜是利用液晶的电光效应来实现的梯度折射率透镜,具有厚度薄、低功耗、稳定性高以及低成本等优点,并且可以精确控制其梯度折射率分布,已经被应用于光学系统像差的校正^[9]。Chung 等人^[10]提出了利用液晶透镜来补偿由于多层光盘的基板厚度差异而引起的球差。而

Tanabe 等人^[11]利用 4 片液晶器件来分别对双光子激发显微镜的像散和慧差进行了校正。同时穆全全等人^[12]利用液晶波前校正器对大口径望远镜由于大气湍流扰动而造成的波前畸变进行了动态校正。

在这些研究成果的启发下,本文提出利用液晶透镜对已商品化的电润湿液体透镜调焦系统在不同物距下的剩余单色像差进行校正。通过对比分析系统在加入液晶透镜前后像差特性的改变,发现液晶透镜对系统在不同物距下的单色像差都有较好的校正作用。为减少液晶透镜响应时间,把液晶透镜改为 5 个 $1/5$ 盒厚的液晶透镜的叠层组合,研究发现此结构同样对系统在不同物距下的单色像差具有良好的校正作用。

2 电润湿液体透镜调焦系统像差特性及其校正方法

本文采用了 Edmund 公司的 #33-565 型电润湿液体透镜调焦系统^[13],其中电润湿液体透镜为 Varioptic 公司的 A-39N0 型产品。利用 ZEMAX 软件对系统进行建模并对其像差特性进行分析,系统的 ZEMAX 模型由厂家提供,厂家在提供模型时对系统中的玻璃透镜使用了黑箱透镜功能,隐藏了内部具体结构,但并不会影响系统内的光线追迹。电润湿液体透镜模型中利用了 ZEMAX 中的宏编译功能,将两种液体的中心厚度和交界面的曲率半径设置为所施加电压的函数,在确定一个电压后,会自动求解出以上 3 个参数。

系统在 ZEMAX 中的模型如图 1 所示,系统总长 52.5 mm, C 型接口到像面距离为 17.526 mm,采用 16.9 mm (2/3 in) 英寸 CMOS 传感器(视场全像高为 11 mm),初始状态下系统 F 数为 4.8,由于应用 850 nm LED 作为光源的光学系统在机器视觉领域中有广泛的应用^[14],所以本文的工作波长选择为 850 nm。

选取了 6 种物距,分别为 200, 500, 800,

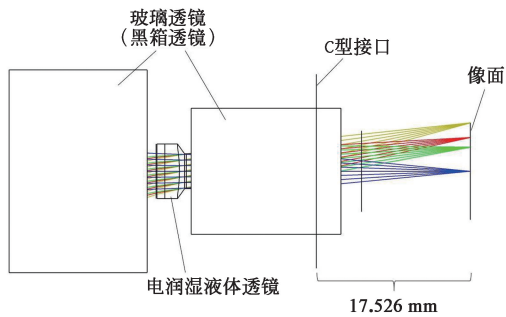


图 1 系统结构
Fig.1 System structure

1 000,2 000 mm 和无限远。将电润湿液体透镜电压设置为变量,优化目标设置为光斑半径,参考方式设置为主光线,然后利用软件自动优化求解。得到 6 种物距下,系统在 0 mm 视场(0 视场)、

2.741 mm 视场(0.5 视场)、3.841 mm 视场(0.7 视场)以及 5.5 mm 视场(1 视场)下的点列图(如图 2 所示)以及点列图数据(表 1)。其中结构 1~6 分别对应物距为 200 mm 至无限远下的系统点列图。

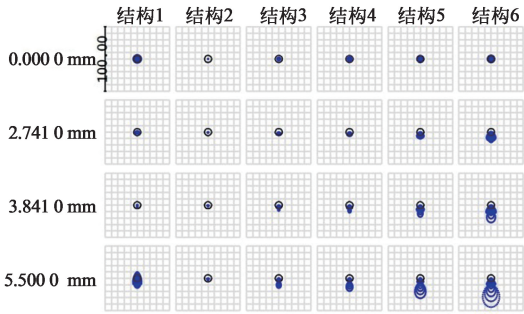


图 2 系统点列图
Fig.2 Diagram of system

表 1 系统在各物距下的点列图数据(μm)

Tab.1 Point diagram data of system at different object distances (μm)

物距	0 视场		0.5 视场		0.7 视场		1 视场	
	RMS 半径	几何半径	RMS 半径	几何半径	RMS 半径	几何半径	RMS 半径	几何半径
200 mm	5.200	6.097	2.381	3.236	1.460	4.451	6.667	13.156
500 mm	0.303	0.510	0.805	1.630	1.206	2.764	1.638	3.922
800 mm	1.775	2.412	2.585	4.819	3.535	8.819	5.686	15.007
1 000 mm	2.306	2.968	3.392	6.400	4.609	11.571	7.459	19.734
2 000 mm	3.456	3.977	5.369	10.455	7.241	18.279	11.634	30.891
无限远	4.703	5.374	7.875	15.929	10.527	26.906	16.772	44.696

从图表分析可得,物距为 500 mm 时系统在各视场的均方根半径以及几何半径均较小,0 视场均方根半径仅为 0.303 μm,球差较小,说明系统像差最小的工作距离在 500 mm 附近。随着物距的减小和增加,系统弥散斑增大,且同时随视场增大而增大,在物距为 2 000 mm 和无限远时,边缘视场弥散斑几何半径已大于 30 μm 和 44 μm;0 视场下的弥散斑相较于物距 500 mm 时也出现明显的增大,说明系统存在较大球差。物距为 800 mm 到无限远时,边缘视场出现明显的慧差。

系统在 6 种物距下的调制传递函数(MTF)图如图 3 所示。

调制传递函数可以反映系统的成像质量,调

制传递函数曲线越平滑且与横纵坐标轴所围的面积越大,表示系统成像质量越好^[15]。分析 MTF 图可得,物距为 500 mm 时,MTF 曲线平滑紧凑,接近衍射极限,各视场无明显差异。当物距减小和增加时,系统成像质量出现明显下降,各视场下子午曲线和弧矢曲线相差相对较大,说明系统存在一定像散。

通过上述分析可以看到,随着物距的改变,系统的像差特性也随之发生变化。系统像差最小时对应的物距在 500 mm 附近,随着物距的减小和增加,系统的像差也随之增大。液晶透镜是一种梯度折射率透镜,可通过施加不同电压来调整其梯度折射率分布。因此,在系统中加入液晶透镜,

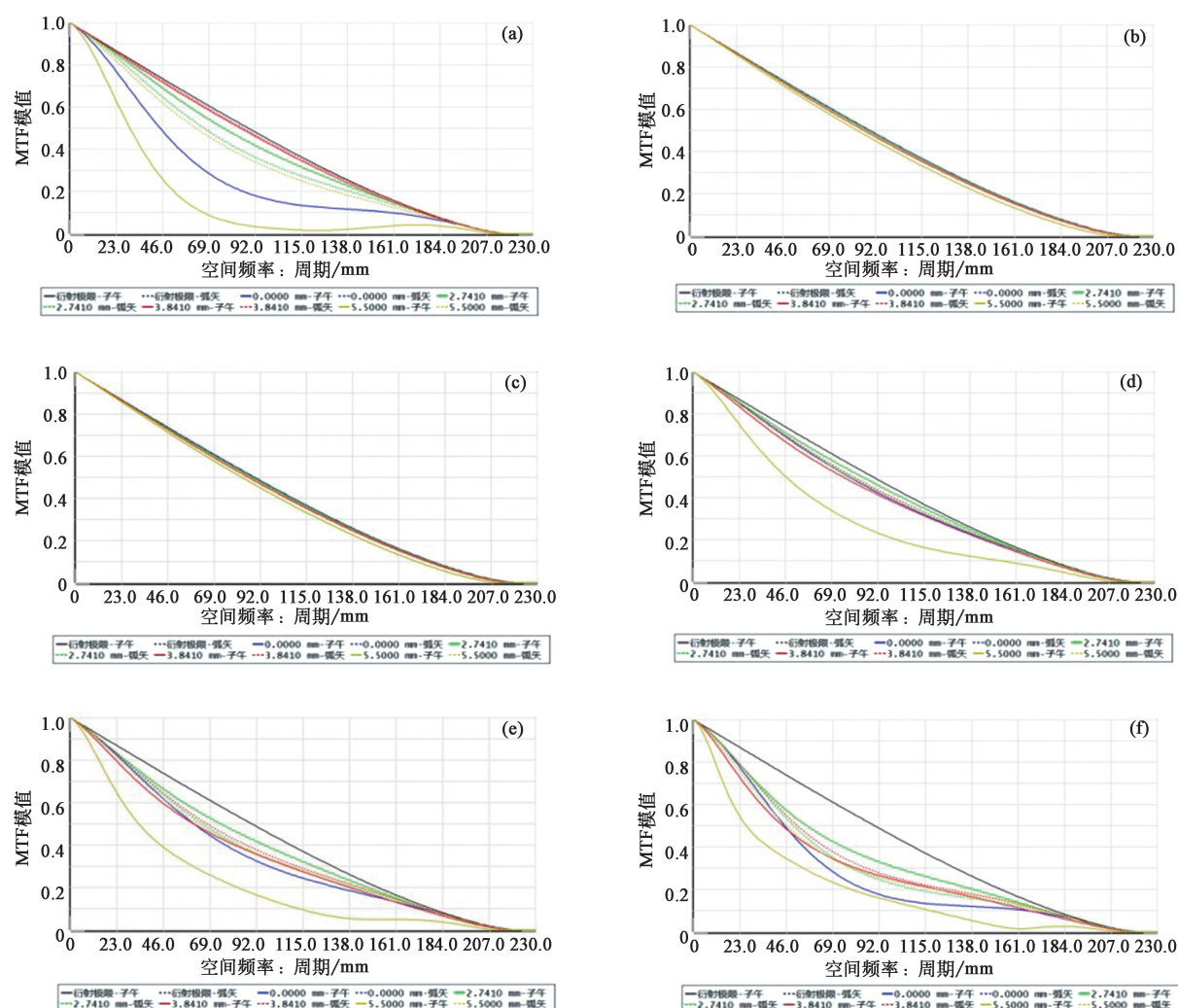


图 3 系统各物距下的 MTF 曲线。(a)200 mm; (b)500 mm; (c)800 mm; (d)1 000 mm; (e)2 000 mm; (f)无限远。
Fig.3 MTF curves of the system at different object distances.(a)200 mm; (b)500 mm; (c)800 mm; (d)1 000 mm; (e)2 000 mm; (f)Infinity.

根据不同物距下系统的像差特性,来调整液晶透镜的梯度折射率分布以产生相应的像差进行补偿,从而实现对系统在不同物距下的像差都可以进行校正的目的。下面给出加入液晶透镜后系统的赛德和数^[16],对上述原理进行具体解释。

$$\begin{cases} \sum S_I = \sum S_{I(\#33-565)} + \sum S_{I(LC)} \\ \sum S_{II} = \sum S_{II(\#33-565)} + \sum S_{II(LC)} \\ \sum S_{III} = \sum S_{III(\#33-565)} + \sum S_{III(LC)}, \\ \sum S_{IV} = \sum S_{IV(\#33-565)} + \sum S_{IV(LC)} \\ \sum S_V = \sum S_{V(\#33-565)} + \sum S_{V(LC)} \end{cases} \quad (1)$$

其中和数 $\sum S_I \sim \sum S_V$ 表示加入液晶透镜后系统总的球差、慧差、像散、场曲和畸变,和数 $\sum$

$S_{I(\#33-565)} \sim \sum S_{V(\#33-565)}$ 表示电润湿液体透镜调焦系统的上述 5 种初级单色像差,和数 $\sum S_{I(LC)} \sim \sum S_{V(LC)}$ 表示液晶透镜的上述 5 种初级单色像差。但赛德和数只能表征系统的初级像差,系统中还存在高阶像差,所以接下来将利用 ZEMAX 软件对系统进行光线追迹,调整液晶透镜梯度折射率分布,优化像差。

3 采用液晶透镜校正系统单色像差的仿真研究

3.1 单片液晶透镜结构

在原调焦系统的法兰面与像面之间加入单片液晶透镜。首先在 ZEMAX 中对液晶透镜进行

建模,液晶透镜上下玻璃基板材质为 BK7,厚度为 0.55 mm,液晶材料为 E7 型液晶。由于液晶透镜为梯度折射率透镜,且系统在单色波长下工作,本文中选用 ZEMAX 面型类型中的梯度 2 面型来表示液晶透镜的折射率分布情况,梯度 2 面型的定义如下:

$$n^2=n_0+n_{r2}r^2+n_{r4}r^4+n_{r6}r^6+n_{r8}r^8+n_{r10}r^{10}+n_{r12}r^{12}, \tag{2}$$

其中:

$$r^2=x^2+y^2, \tag{3}$$

式中, n_0 表示中心折射率, $n_{r2} \sim n_{r12}$ 表示折射率分布曲线的高次项系数,系统结构如图 4 所示。

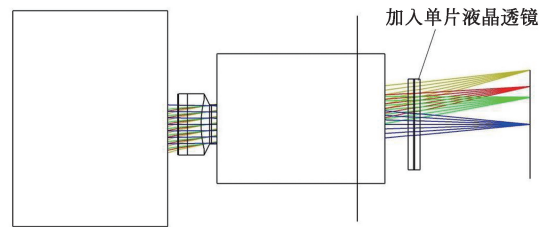


图 4 加入单片液晶透镜后的系统结构

Fig.4 System structure with a liquid crystal lens

将液晶透镜的液晶层厚度以及折射率分布曲线的高次项系数设为变量,根据文献[17]计算得到,在 850 nm 波长下,E7 型液晶的 n_e 为 1.716 2, n_o 为 1.509 8, Δn 为 0.206 4,所以还需在原评价函数中添加操作数将液晶透镜折射率分布限制在此范围之内,然后利用软件自动优化求解。得到加入单片液晶透镜后系统在上述 6 种物距 4 个视场下的点列图(图 5)以及点列图数据(表 2)。

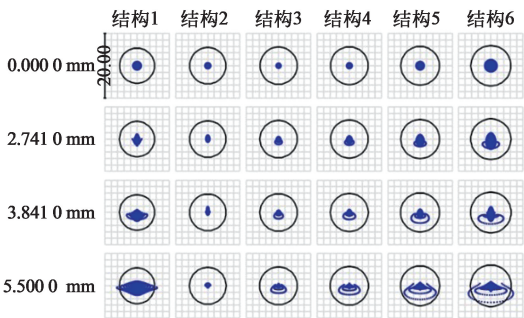


图 5 加入单片液晶透镜后的系统点列图

Fig.5 Diagram of system with a liquid crystal lens

表 2 加入单片液晶透镜后各物距下系统点列图数据(μm)

Tab.2 Point diagram data of system under different object distances after adding a liquid crystal lens (μm)

物距	0 视场		0.5 视场		0.7 视场		1 视场	
	RMS 半径	几何半径	RMS 半径	几何半径	RMS 半径	几何半径	RMS 半径	几何半径
200 mm	0.871	1.221	1.198	2.094	1.818	3.326	3.079	6.277
500 mm	0.476	0.845	0.511	1.211	0.640	1.746	0.526	0.804
800 mm	0.496	0.690	0.758	1.636	0.824	1.988	1.142	2.738
1 000 mm	0.637	0.821	0.956	1.876	1.032	2.37	1.557	3.600
2 000 mm	0.870	1.228	1.329	2.424	1.564	3.534	2.404	5.416
无限远	1.290	1.845	1.899	3.160	2.115	4.446	3.341	7.423

分析图表可以得到,物距从 200 mm 到 2 000 mm,系统 0 视场下的均方根半径值均小于 1 μm,球差得到了较好的校正。在各物距下,系统在 4 个视场的均方根半径以及几何半径都较为一致,边缘视场的慧差得到了较好的校正,0.7 视场以内系统弥散斑均在艾里斑以内,处于衍射极限状

态。物距为无限远时,边缘视场的几何半径为最大值 7.4 μm,但仅为未加入液晶透镜时几何半径的约 1/5。

加入单片液晶透镜后系统在上述 6 种物距下的调制传递函数(MTF)图如图 6 所示。

分析上图可得,仅在最近对焦物距 200 mm

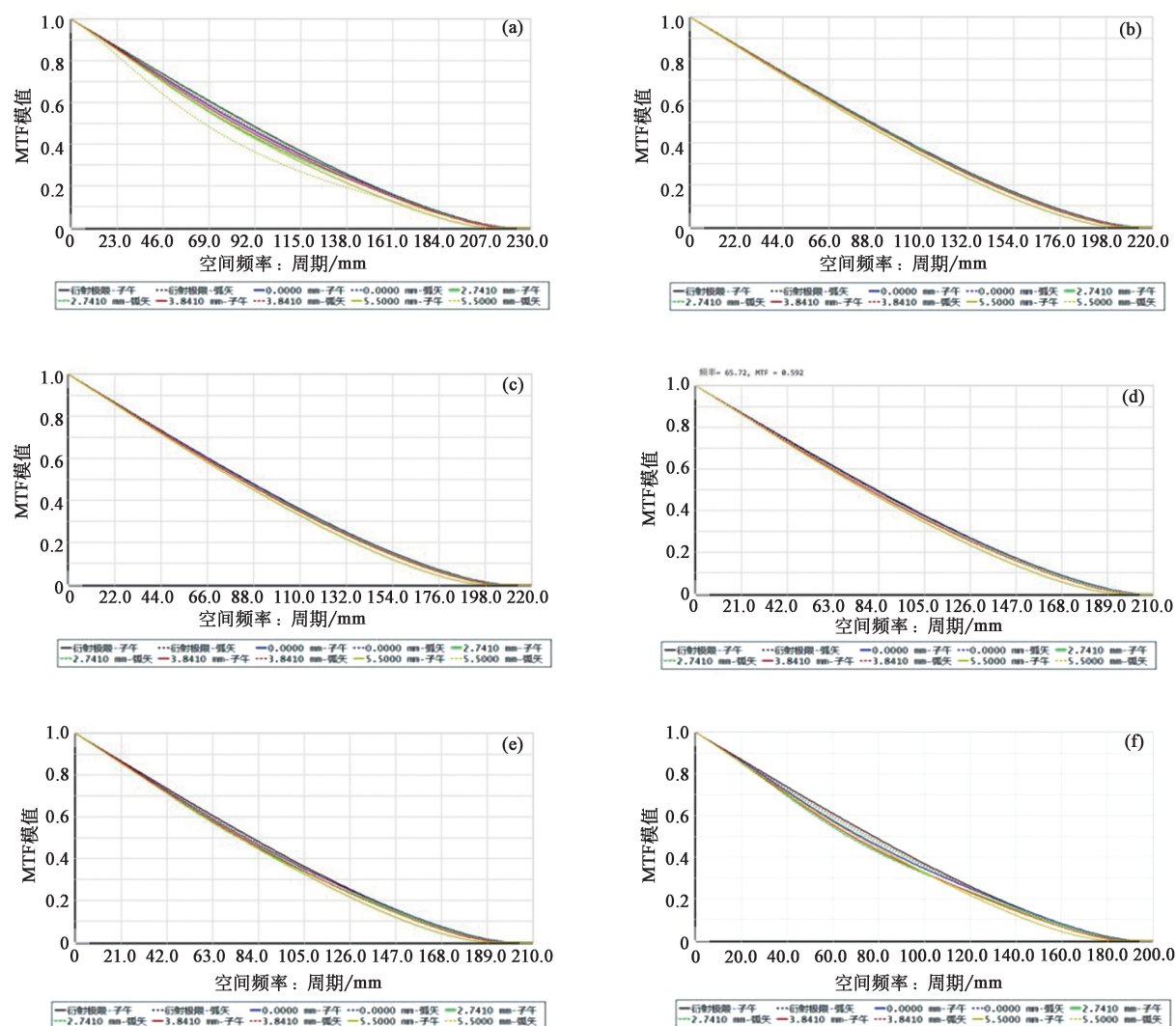


图 6 加入单片液晶透镜后系统在各物距下的 MTF 曲线。(a)200 mm; (b)500 mm; (c)800 mm; (d)1 000 mm; (e)2 000 mm; (f)无限远。

Fig.6 MTF curves of the system at different object distances after adding a liquid crystal lens.(a)200 mm; (b)500 mm; (c)800 mm; (d)1 000 mm; (e)2 000 mm; (f)Infinity.

时,1 视场的子午曲线和弧矢曲线相差相对较大,但相对未加入液晶透镜时已有明显改善;在其他物距下,MTF 曲线平滑紧凑,接近衍射极限,各视场无明显差异,系统的像散得到了较好校正。

各物距下液晶透镜在 X 轴截面的折射率分布曲线如图 7 所示。

从优化所得的液晶透镜折射率分布曲线可以看出,液晶透镜以负透镜的形式工作,最小和最大折射率值在 1.509 8~1.716 2 范围之内,且液晶透镜中心折射率到边缘折射率呈单调递增趋势,

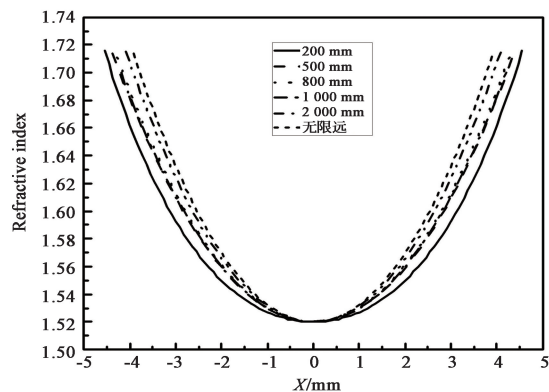


图 7 液晶透镜在各物距下的折射率分布曲线
Fig.7 Refractive index distribution curve of liquid crystal lens at different object distances

在实际中也较容易实现。Li 等人^[18]提出并制作了一种同心电极环结构的液晶透镜,通过在每个环单独施加相应电压,可精确控制液晶透镜的折射率分布,本文中的液晶透镜可采用此种方法实现。

3.2 多片液晶透镜系统结构

加入单片液晶透镜,物距为无限远时,通过软件自动优化得到所需液晶层厚度已达到 985 μm ,而液晶透镜的响应时间与液晶层厚度的平方成正比关系,为减少响应时间,提高实用性,需要减小液晶层的厚度。综合考虑驱动的难易程度以及液晶透镜玻璃基板带来的像差,最终选择在系统中加入 5 片液晶透镜的叠层组合,每片液晶透镜液晶层厚度为 200 μm ,玻璃基板的厚度为 0.2 mm。这样液晶层厚度下降为原来的约 20%,响应速度可大幅提升。新的系统结构如图 8 所示。

6 种物距下新系统在 4 个视场的点列图如图 9 所示,点列图数据如表 3 所示。新系统在 6 种物距下的调制传递函数(MTF)图如图 10 所示。

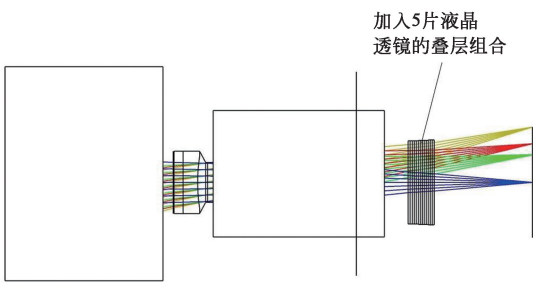


图 8 新系统结构

Fig.8 New system structure

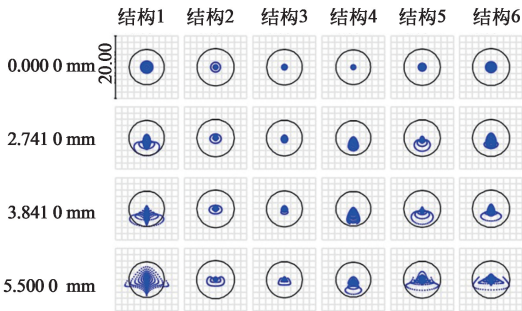


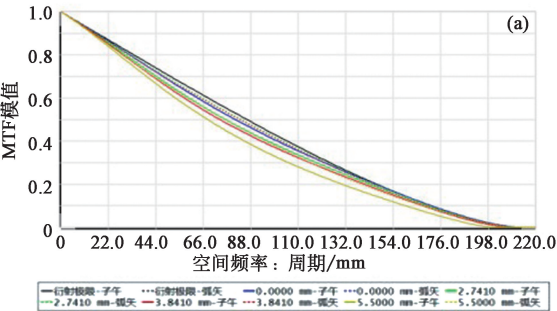
图 9 新系统点列图

Fig.9 Diagram of the new system

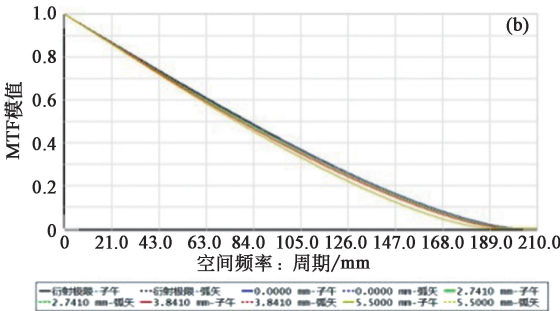
表 3 各物距下新系统点列图数据(μm)

Tab.3 Point diagram data of the new system at different object distances(μm)

物距	0 视场		0.5 视场		0.7 视场		1 视场	
	RMS 半径	几何半径	RMS 半径	几何半径	RMS 半径	几何半径	RMS 半径	几何半径
200 mm	1.431	1.928	2.704	5.688	3.360	6.519	3.333	7.142
500 mm	0.927	1.549	0.991	1.830	1.055	2.075	1.285	2.879
800 mm	0.596	0.849	0.923	1.524	0.853	1.719	0.991	2.317
1000 mm	0.562	0.744	1.989	4.101	2.459	4.901	1.990	4.698
2000 mm	0.786	1.219	1.663	4.249	2.038	4.966	2.494	5.565
无限远	1.176	1.677	2.042	3.351	1.876	4.229	2.791	6.127



(a)200 mm



(b)500 mm

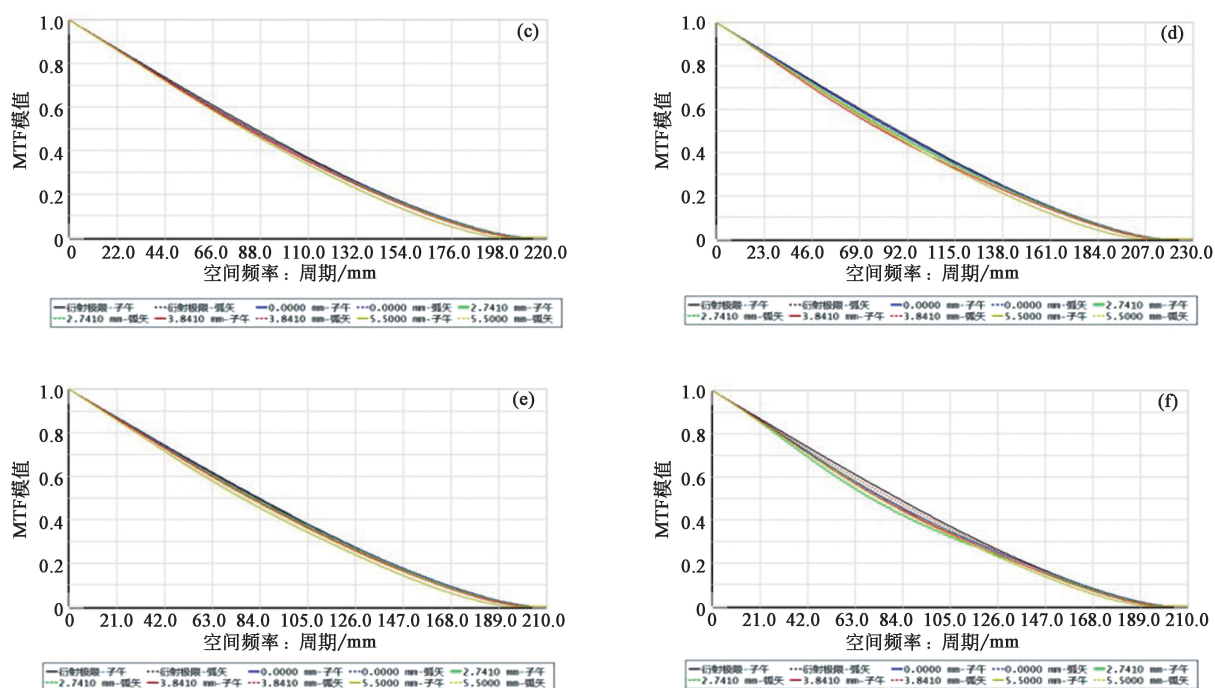


图 10 新系统在各物距下的 MTF 曲线。(a)200 mm; (b)500 mm; (c)800 mm; (d)1 000 mm; (e)2 000 mm; (f)无限远。

Fig.10 MTF curves of the new system at different object distances.(a)200 mm; (b)500 mm; (c)800 mm; (d)1 000 mm; (e)2 000 mm; (f)Infinity.

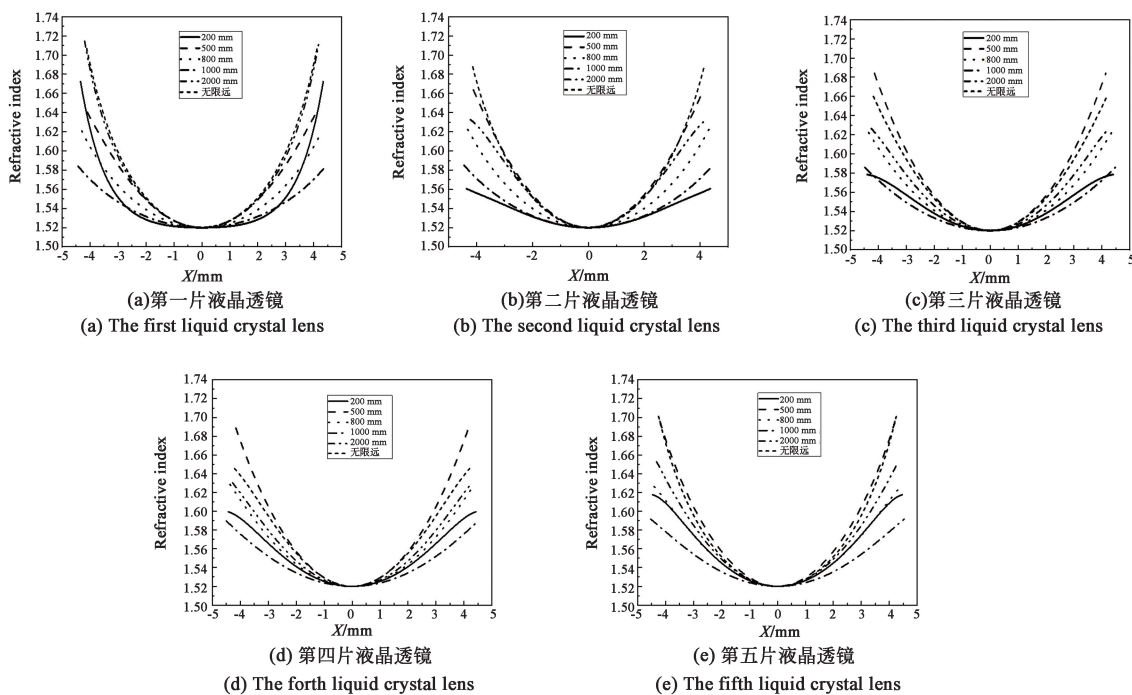


图 11 五片液晶透镜在各物距下的折射率分布曲线

Fig.11 Refractive index distribution curves of five liquid crystal lenses at different object distances

新系统在各物距下 5 片液晶透镜在 X 轴截面的折射率分布曲线如图 11 所示。

分析图表可得,新系统与加入单片液晶透镜时的效果相近,同样对系统的单色像差具有较好的校正作用,且每片液晶透镜在各物距下的折射率分布也均在限定范围之内。

4 结 论

本文仿真研究了液晶透镜对电润湿液体透镜调焦系统单色像差的校正情况。利用 ZEMAX 软件对比分析了波长为 850 nm,在无限远到 200

mm 间的 6 种典型物距下,系统在加入液晶透镜前后像差特性的变化,发现系统的单色像差得到了较好的校正。在系统像差最大的无限远物距下,边缘视场的点列图几何半径从 $44.696\ \mu\text{m}$ 减小到 $7.423\ \mu\text{m}$,其余视场下的弥散斑均减小到艾里斑以内。为减少液晶透镜响应时间,将液晶透镜改为 5 个盒厚为原来 1/5 的液晶透镜叠层组合结构,研究发现此结构同样对系统在不同物距下的单色像差具有良好的校正作用。仿真结果表明液晶透镜对电润湿液体透镜调焦系统在不同物距下各视场的像差均有较好的校正效果,系统的成像质量更为均匀。

参 考 文 献:

- [1] DU K, CHENG X M. Current trends of liquid lenses [C]//*Proceedings of 2014 International Photonics and OptoElectronics Meetings*. Wuhan, China: OSA, 2014.
- [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] REICHELT S, ZAPPE H. Design of spherically corrected, achromatic variable-focus liquid lenses [J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 14146-14154.
- [4] LI L, WANG Q H. Zoom lens design using liquid lenses for achromatic and spherical aberration corrected target [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(4): 043001.
- [5] ZHANG W, LI D, GUO X. Optical design and optimization of a micro zoom system with liquid lenses [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(5): 447-453.
- [6] LI L, LIU C, WANG Q H. Ultrathin zoom lens system based on liquid lenses [C]//*Proceedings of SPIE 9524, International Conference on Optical and Photonic Engineering*. Singapore: SPIE, 2015: 95241B.1-95241B.4.
- [7] ZOHRABI M, CORMACK R H, MCCULLOUGH C, *et al.* Numerical analysis of wavefront aberration correction using multielectrode electrowetting-based devices [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31451-31461.
- [8] LIMA N C, MISHRA K, MUGELE F. Aberration control in adaptive optics: a numerical study of arbitrarily deformable liquid lenses [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6700-6711.
- [9] 蔡文锋,李怡霏,蒋浩东,等.液晶微透镜阵列研究进展[J].液晶与显示,2020,35(7):749-761.
CAI W F, LI Y F, JIANG H D, *et al.* Research progress of liquid crystal microlens arrays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 749-761. (in Chinese)
- [10] CHUNG S H, KIM Y J, CHANG I C, *et al.* Liquid crystal lens for the compensation of spherical aberration in the multi-layer optical data storage [C]//*International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage*. Honolulu, United States: ISOM, 2005: 49.1-49.3.
- [11] TANABE A, HIBI T, IPPONJIMA S, *et al.* Transmissive liquid-crystal device for correcting primary coma aberration and astigmatism in biospecimen in two-photon excitation laser scanning microscopy [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, 21(12): 121503.
- [12] 穆全全,彭增辉,宣丽.大口径望远镜的高分辨率成像技术[J].物理,2020,49(3):164-173.
MU Q Q, PENG Z H, XUAN L. High resolution imaging with large aperture telescopes [J]. *Physics*, 2020, 49(3): 164-173. (in Chinese)
- [13] Edmund Optics. 35 mm Cx Series Lens Manual [EB/OL]. <https://www.edmundoptics.com/p/35-mm-cx-series-fixed-focal-length-lens/3232>.

- [14] PRASAD P S, BASWARAJ D. Iris recognition systems: a review [C]//*Proceedings of 2018 International Conference on Communications and Cyber Physical Engineering*. Singapore: Springer, 2019: 521-527.
- [15] 林晓阳.ZEMAX 光学设计超级学习手册[M].北京:人民邮电出版社,2014.
LIN X Y. *ZEMAX Optical Design Super Learning Manual* [M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2014. (in Chinese)
- [16] 张以谟.应用光学[M].4版.北京:电子工业出版社,2015.
ZHANG Y M. *Applied Optics* [M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)
- [17] LI J, WU S T, BRUGIONI S, *et al.* Infrared refractive indices of liquid crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(7): 073501.
- [18] LI L W, BRYANT D, VAN HEUGTEN T, *et al.* Near-diffraction-limited tunable liquid crystal lens with simplified design [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(3): 035007.

作者简介:



张嘉伦(1995—),男,河北张家口人,学士,2018年于大连民族大学获得学士学位,主要从事光学与显示技术的研究。E-mail:zgallon@163.com



于涛(1971—),男,黑龙江七台河人,博士,教授,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学与显示技术的研究。E-mail:yutao@dlmu.edu.cn