

doi: 10. 3788/gzxb20174606. 0622005

基于介电润湿三液体透镜的变焦光学系统的设计与分析

赵瑞, 马建权, 党智勇, 孔梅梅, 梁忠诚

(南京邮电大学 光电工程学院 微流控光学技术研究中心, 南京 210023)

摘 要:提出了一种基于介电润湿效应的三液体透镜与传统固定透镜组合的三组元结构变焦光学系统。在一、三组元固定不变的情况下,通过移动中间三液体透镜组改变系统焦距,并通过三液体透镜的自变焦特性,确保系统在变焦的同时保持像面位置不变。采用光焦度高斯括号法求解系统的初始结构参量,利用 Zemax 光学软件进行系统设计与优化,最后对系统的成像质量进行分析。结果表明:该系统总长 22 mm,可实现 2.7~20.3 mm 范围内的连续变焦,系统变倍比接近 8,在空间频率 180 lp/mm 处调制传递函数值均大于 0.4。

关键词:变焦光学系统;介电润湿效应;三液体透镜;像质评价;Zemax

中图分类号:O435.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)06-0622005-9

Design and Analysis of an Optical Zoom System Using Electrowetting-based Triple Liquid Lens

ZHAO Rui, MA Jian-quan, DANG Zhi-yong, KONG Mei-mei, LIANG Zhong-cheng

(Research Center of Optofluidic Technology, College of Optoelectronic Engineering,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this paper, a three-group inner-focus zoom system using dielectrowetting-based triple liquid lens and conventional fixed lens is proposed. When the first and the third components are fixed, the focal length of the system is changed by moving the intermediate liquid lens group. The self-zooming property of the liquid lens is realized to maintain the image plane. The initial structural parameters of the system is deduced by the optical power Gauss brackets method. The optical system is designed and optimized by Zemax software, and then the image quality of the system is analyzed. Results show that the system can achieve continuous zoom in the range from 2.7 mm to 20.3 mm; the total length of the system is decreased to 22 mm; the zoom ratio reaches 8 and MTF value is more than 0.4 at 180 lp/mm.

Key words: Zoom system; Electrowetting; Triple liquid lens; Image quality assessment; Zemax

OCIS Codes: 220.0220; 220.3620; 110.3000

0 引言

随着变焦系统使用范围的显著扩大,特别是在眼底相机^[1]、光开关^[2]、内窥镜^[3]、智能系统^[4]等领域,系统结构的微型化和便携化,以及系统性能(比如变焦范围和成像质量)的优越化都显得极其重要。变焦光学系统的基本原理是通过焦距的连续变化使得像面的图像倍率连续变化,同时保持像面位置稳定^[5],即在不改变拍摄距离的情况下通过改变焦距来改变拍摄范围。一个传统的变焦光学系统由前固定组、变倍组、后固定组和补偿组四部分组成,利用机械装置调节透镜间的相对位置来实现变焦,然而这种传统的运动模式容易造成

基金项目:江苏省光通信工程技术研究中心项目(No. ZSF0402)资助

第一作者:赵瑞(1977-),女,教授,博士,主要研究方向为光信息检测与处理技术、光学设计及微流控光学。Email:zhaor@njupt.edu.cn

收稿日期:2017-01-04;录用日期:2017-02-22

<http://www.photon.ac.cn>

磨损,从而使得系统寿命短、准确度低,且不利于微型化。

基于液体透镜的变焦系统利用液体透镜自变焦特性进行光学补偿,代替传统光学系统中的机械补偿组,可大大降低系统的复杂程度,因此受到广泛关注.根据工作机理,目前液体透镜的实现方式大致可分为三种^[6],其中,基于介质上电润湿流体接触角变化的液体透镜以其独特的优势而成为研究热点,它通过改变施加在导电液体上的电压来控制液体界面的接触角,从而改变透镜曲率,实现变焦,具有成本低、功耗小、无噪声、快速变焦等诸多优点,由此类液体透镜组成的变焦光学系统也因此受到了研究学者的青睐。

2008年,彭润玲^[7]等利用介电润湿双液体变焦透镜,设计了无机械运动变焦光学系统,变倍比可达1:1.5,虽然该系统克服了传统电机调节带来的缺点,却很难应用在对变倍比要求较高的光学设备中;2009年,张薇^[8]基于介电润湿型液体可变焦透镜,采用三片式结构,设计了一种微型大焦深内窥镜系统,实现系统在3~100 mm物距范围内的成像;2010年,刘芳^[9]提出了以电湿效应圆锥双液体变焦透镜为基础的无机械运动变焦透镜系统,并通过数值逼近的方法计算系统的变焦范围,设计了以一个固定透镜和两个圆锥双液体变焦透镜为组分的变焦透镜系统,在外加电压作用下系统焦距变化范围为8.4~10.6 mm;2013年,韩国Sung-Chan PARK^[10]等将双液体自变焦透镜与传统固定透镜相组合,设计了一种基于介电润湿双液体透镜的可调相机系统,系统总长21 mm,变倍比达到5,系统调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)不低于0.3;2015年,台湾Chih-Ta Yen等^[11]通过级联两个三倍变倍比的液体透镜组元,实现了9倍变倍比变焦光学系统的设计,系统总长140 mm;2016年王鸿鹤^[12]等利用4片液体透镜,设计了6倍变倍比的光学系统,系统总长220 mm。

在光学系统的设计中,除了考虑系统变倍比,还需要考虑系统尺寸与像差.为了进一步提高系统性能、优化像面质量,本文设计了介电润湿三液体透镜,并将其应用于变焦光学系统结构.首先根据杨氏方程和几何光学知识推导出基于介电润湿效应的三液体透镜组的光焦度.并通过选择特定参量的电润湿液体材料,降低饱和接触角,进而扩大三液体透镜变焦范围;然后基于光焦度高斯括号法计算各系统参量间的函数关系,选择合理的初始结构并利用Zemax光学软件进行结构与优化,反复进行像差的矫正与平衡直到得到满意的成像质量,并分析影响成像质量的因素并给出系统的像质评价.为了矫正像差,提高系统MTF,本文通过增加凹凸透镜和非球面进行像面补偿.无论从结构还是性能上,本文设计的三液体透镜变焦光学系统都显示出其突出的优势.相关的研究成果,可丰富和发展可变焦光学系统的结构设计,为合理利用基于介电润湿效应的液体透镜提供理论依据。

1 工作原理

1.1 介电润湿效应

电润湿效应是通过在固体-液体界面施加外部电压来增加液体对固体的湿润程度,从而改变液滴在固体表面的接触角,最终导致液体界面曲率半径发生变化,实现透镜的自变焦功能.为了使固液接触角得到更大程度上的改变,在电解液和固体电极间插入一层绝缘介质,即介电润湿效应。

如图1所示,当电压为零时,液面如虚线所示弧形,此时液体与绝缘层之间的接触角为 θ_0 ;当施加工作电压 U 时,接触角 θ 与工作电压 U 之间的关系满足杨氏(Lippman-Young)方程^[13]

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon \epsilon_0}{2\gamma_{LG}d} U^2 \quad (1)$$

式中 ϵ 为绝缘层的介电常量, ϵ_0 为真空介电常量, γ_{LG} 为液体与填充环境之间的界面张力, d 为绝缘层厚度。

1.2 基于介电润湿效应的三液体变焦透镜

相比于双液体变焦透镜,三液体变焦透镜因为具有更多的平衡变量所以变焦范围更加广泛^[14],且基于三液体透镜的成像器件是一种可靠的变焦光学器件^[15].基于介电润湿效应的三液体变焦透镜如图2所示,

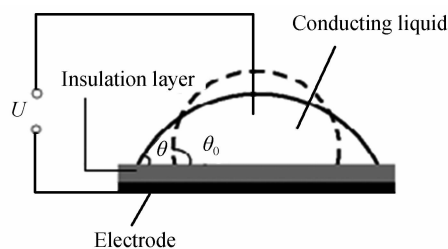


图1 电润湿效应示意图
Fig. 1 Schematic diagram of electrowetting

其中圆柱形容器的内壁依次镀有纳米级厚度的导电层、介电层和疏水层^[16]。为了实现两个电压独立控制左右两侧导电液体与容器壁面的接触角,圆柱形容器的内壁的中间部分未镀导电层,上盖片和下盖片均用透明 ITO 导电玻璃封装,容器内依次注入导电液体-非极性油溶液-导电液体,左右两侧导电液体可以采用同一种或者两种不同的电解质盐溶液。当工作电压为零时,双液体界面呈现弯曲形状。当在壁面施加电压不为零时,根据介电润湿原理,外加电场将改变导电液体和透镜壁面的接触角。根据 Young-Lippmann 方程^[13],接触角随电压的增大而减小,相应的双液体界面曲率发生变化。由于双液体界面两侧折射率不同,当入射光线沿双液体界面出射,不同的界面曲率将改变光线的扩散或会聚程度,从而实现透镜功能,即透镜焦距随电压发生变化。而三液体双变焦透镜系统,由于透镜腔体内壁导电层在中间部分不连续,使得两个工作电压可以互不影响地分别控制左右两侧导电溶液与内壁的接触角,进而有效控制两个界面面积变化,从而扩大了系统焦距变化范围。

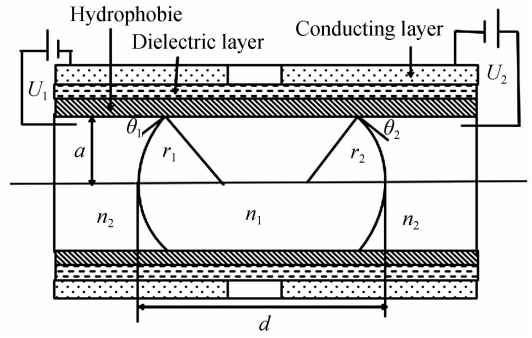


图 2 三液体变焦透镜结构

Fig. 2 Structure of the triple-liquid variable-focus lens

根据高斯光学理论,图 2 所示的三液体透镜光焦度与曲率之间的关系为^[7]

$$\frac{1}{f} = \frac{(n_1 - n_2) \left(n_1 r_1 + (n_2 - n_1) \left(\frac{n_1 r_1}{n_1 - n_2} - d \right) \right)}{n_0 n_1 r_2 r_1} \quad (2)$$

式中, $r_1 = -a/\cos \theta_1$, $r_2 = -a/\cos \theta_2$, a 为圆柱形容器的半口径, θ_1 和 θ_2 分别表示两液体界面与壁面间的接触角, n_0 为空气的折射率, n_1 和 n_2 分别为绝缘液体和导电液体的折射率, 且两种液体密度相同以确保液面在任何方位都保持球形^[17]; U_1 和 U_2 为施加在导电液体与疏水介电层之间的外加电压, r_1 和 r_2 分别为两球形液面的曲率半径, d 为两液体界面间的距离。

1.3 基于介电润湿三液体透镜的变焦光学系统

图 3 给出了基于介电润湿三液体透镜的变焦光学系统结构示意图, I、II、III 分别代表前固定组、变倍补偿组和后固定组, 各个组元的光焦度分别为 k_1, k_{2w}, k_{2t} 和 k_3 , 其中组元 II 变倍补偿组由基于介电润湿效应的三液体双变焦透镜构成, 沿着光轴左右移动来改变系统的焦距, 而系统像面位置的补偿和校正则是通过基于介电润湿效应的三液体双变焦透镜的自聚焦特性来完成。

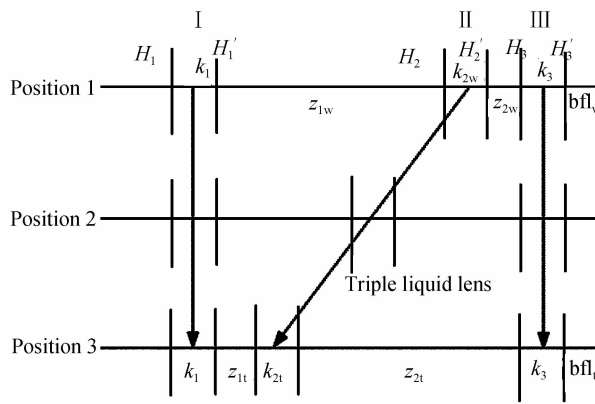


图 3 基于三液体透镜的变焦距光学系统结构

Fig. 3 Structure of variable-focus system based on triple-liquid lens

进行光学系统的设计前,需要初步计算系统的光学特性。根据式(2)求出三液体变焦透镜的光焦度,因此要求出系统其他各组元的光焦度,只需计算它们之间的函数关系式即可。高斯括号法是计算近轴光学系统光焦度的矩阵方法^[1],用高斯括号表示高斯常量为

$$\begin{aligned} A_{ki} &= [k_i, -z_i, k_{i+1}, -z_{i+1}, \dots, k_{k-1}, -z_{k-1}] \\ B_{ki} &= [-z_i, k_{i+1}, -z_{i+1}, \dots, k_{k-1}, -z_{k-1}] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, A, B 为高斯括号描述的高斯常量, k_i 是第 i 组镜片的光焦度, z_i 是第 i 组镜片到第 $i+1$ 组镜片间的光学间隔. 高斯括号的运算法则为

$$[a_1, a_2, \dots, a_n] = [a_1, a_2, \dots, a_{n-1}]a_n + [a_1 + a_2, \dots, a_{n-2}] \quad (4)$$

因此, 图 3 所示的三组元变焦系统的初始结构用高斯括号可表示为

$$K = [k_1, -z_1, k_2, -z_2, k_3] \quad (5)$$

$$T = z_1 + z_2 + \text{bfl} \quad (6)$$

式中, K 是光学系统的总光焦度, T 是系统总长度. 利用高斯括号性质对(5)式进一步化简, 得到

$$\begin{cases} K = C_1 k_3 + C_2 \\ C_1 = [k_1, -z_1, k_2, -z_2] = -z_2 [k_1, -z_1, k_2] + [k_1, -z_1] \\ C_2 = [k_1, -z_1, k_2] = k_2 [k_1, -z_1] + k_1 \end{cases} \quad (7)$$

由此, 可以得到三液体透镜组的光焦度 k_2 与其他系统参量的函数关系式

$$k_2 = K - \frac{k_3}{E_2} - \frac{k_1}{E_1} \quad (8)$$

式中, $E_1 = [k_1, -z_1]$, $E_2 = [1 - z_2, k_3]$.

2 变焦光学系统的设计与分析

2.1 参量设计

初始结构的选择是透镜设计的基础, 初始结构不合理, 再好的自动设计程序和有经验的设计者也无法使设计获得成功. 很多光学设计者都从已有的资料中选择合适的初始结构, 这是一种比较实用又容易获得成功的方法^[18]. 文献[10]中光学系统总光焦度 K 及系统组元间距 z_1, z_2 的取值代入式(8), 计算得出系统第二组元光焦度 k_2 、系统后焦距值 bfl 和系统有效焦距 efl 的值, 如表 1. 由表 1 可以看出, 在短焦处 z_2 达到最小值 1.40 mm, 在长焦处 z_2 达到最大值 10.46 mm.

表 1 不同光焦度处系统各参量

Table 1 Parameters of the system at different powers

K/mm^{-1}	efl/mm	z_1/mm	z_2/mm	bfl/mm	k_2/mm^{-1}
0.37	2.7	10.92	1.40	1.09	0.182
0.11	10.0	5.71	6.62	1.09	0.199
0.06	15.2	3.45	8.85	1.09	0.191
0.05	20.3	0.84	10.46	1.09	0.246

利用 Zemax 光学设计软件进行系统设计, 基于表 1 的计算数据, 合理选择透镜间隔、透镜曲率半径并进行反复迭代优化, 得到满足要求的光学系统, 最终设计的液体透镜口径(即 $2a$)为 4.00 mm, 高度(即第 7、8、9 面的厚度)为 1.02 mm, 三液体材料分别为 NaCl 溶液、硅油和 NaCl 溶液; 介电层及疏水层分别为约 15 μm 的派瑞林(parylene C)和约 50 nm 厚的特氟龙(Teflon)疏水层. 表 2 为整个变焦系统的光学设计参量. 由于篇幅有限, 表 3 为短焦时系统结构参量, 其中 Radius 为曲率半径, Thickness 表示各透镜间间隔, Glass 表示玻璃材料, Semi-diameter 为透镜的半口径. 为了消除系统球差将部分透镜设置为 Even Asphere, 即非球面结构^[19].

表 2 光学设计参量

Table 2 Design parameters of the optical system

Parameter	Value
Main wavalength/ μm	0.587
Field of view/ $^\circ$	0~6.23
Zoom ratio	~8.0
Variable focal length/mm	2.7~20.3
Overall length/mm	22.0

表 3 短焦时系统结构参量

Table 3 Structural parameters of system at short EFL

Surf; type	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Semi-diameter/mm
OBJ Standard	Infinity	Infinity		
1 Even Asphere	-1.251	0.597	N-LASF43	
2	1.957	0.610		
3	-122.368	0.908	BK7	
4 Even Asphere	-1.409	10.998		
STO	Infinity	-2.599		
6	5.316	0.374	N-LAF2	
7	Infinity	0.208	NaCl ($n_d=1.35, v_d=59.0$)	2.0
8	-16.709(V)	0.207	Silicone Oil ($n_d=1.45, v_d=44.0$)	2.0
9	8.197(V)	0.605	NaCl ($n_d=1.35, v_d=59.0$)	2.0
10	Infinity	0.374	N-SK16	
11	-12.502	0.285		
12 Even Asphere	2.869	1.830	FCD1	
13	-3.755	0.771	N-SF1	
14 Even Asphere	2.600	0.420		
15 Even Asphere	10.000	1.348	$n_d=1.64, v_d=23.0$	
16 Even Asphere	100.839	0.385		
17	Infinity	0.300	BSC7	
18	Infinity	1.090		
IMA	Infinity	-		

2.2 系统构建

图 4 为短焦 2.7 mm、中焦 10.0 mm、长焦 20.3 mm 时的系统结构图。由图 4 可知,该系统由三部分组成,第一、三组元为固定组,第二组元为变倍补偿组。如图 4(a)所示,系统共由 9 个透镜组成,其中正透镜会聚光线,负透镜发散光线,两者组合可以消除系统球差,优化像质;透镜 4 为三液体电润湿透镜,达到补偿系统像面位置的作用;透镜 8 和透镜 9 作为补偿板,用来消除光程差。

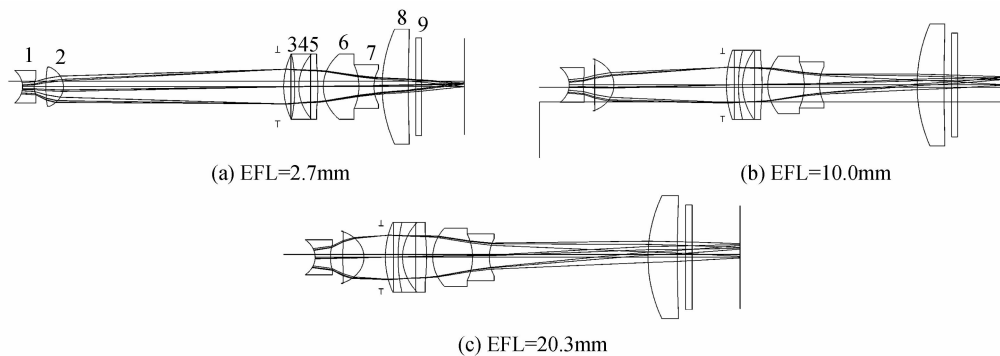


图 4 不同焦距处光学系统仿真图

Fig. 4 Simulation of optical system at different effective focal length(EFL)

图 5 为基于双液体/三液体的组元 II (见图 3) 的移动距离 z_1 与系统焦距 f 之间的关系。从图中可以看出,三液体透镜系统具有更广的变焦范围(2.7~20.3 mm);且当 $8 \text{ mm} < z_1 < 13 \text{ mm}$ 时,系统焦距的变化基本不受液体透镜结构的影响;当 $0 < z_1 < 8 \text{ mm}$ 时,采用三液体透镜作为组元的光学系统变焦能力更强。

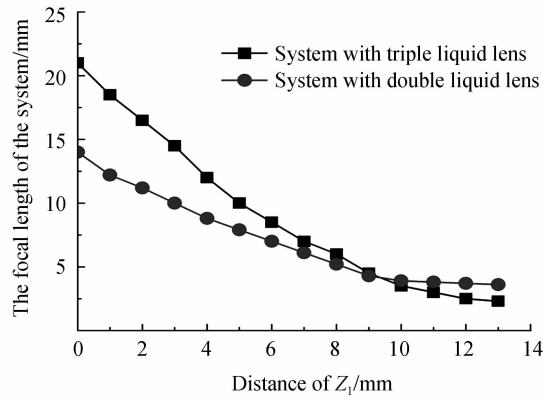


图 5 系统变焦轨迹
Fig. 5 Zoom paths of the system

2.3 像质评价

图 6 分别为三液体变焦透镜系统在短焦、中焦、长焦处的 MTF 图(MTF 即调制传递函数,是综合评价光学系统成像过程、特性与像质的标准图)。从图中可以看出,当空间频率为 180 lp/mm 时,短焦处系统的 MTF 值达到 0.6,接近于衍射极限,成像质量最好;中焦处的 MTF 高于 0.4,满足较高的成像要求;在长焦处受球差色散等影响较大,所以系统 MTF 值稍有降低,但是也完全可以获得优质的像质,可以通过增加固体透镜的方法弥补这方面的像差。

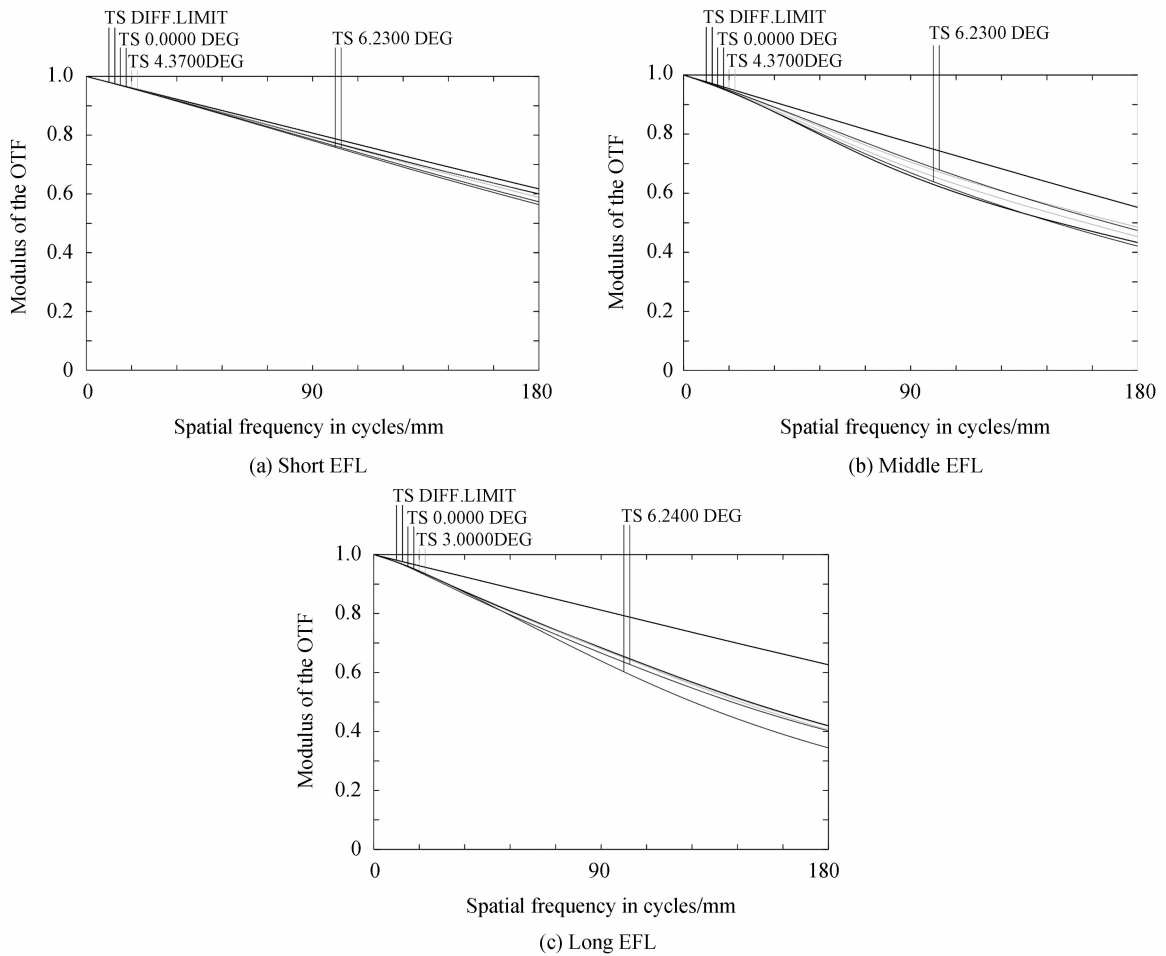


图 6 不同焦距处三液体变焦透镜系统的 MTF
Fig. 6 MTF of the system based on triple liquid lens at different focal length

本文从光线像差、场曲与畸变、点列图等方面分析了系统分别处在短、中、长焦处的性能。分析结果显示,随着系统焦距的增大,系统光线像差增加,点列图光斑半径变大,像面质量有所下降,但没有明显的畸变。由

于篇幅有限,本文仅给出短焦和长焦处的系统像质评价图,如图7所示.从图7中可以看出:系统光线像差都控制在 $50\ \mu\text{m}$ 之内;系统场曲和畸变分别控制在 $-0.05\ \text{mm}\sim 0.05\ \text{mm}$ 和 $-2\%\sim 2\%$ 之内(对于一般的光学系统,当光学畸变 $<3\%$ 时,就感觉不出像的变形^[20]);系统RMS均小于艾利斑半径,表4给出了三个不同视场处系统的RMS值,全视场仅在边缘孔径处出现较大值,但均小于 $2\ \mu\text{m}$,满足设计要求.

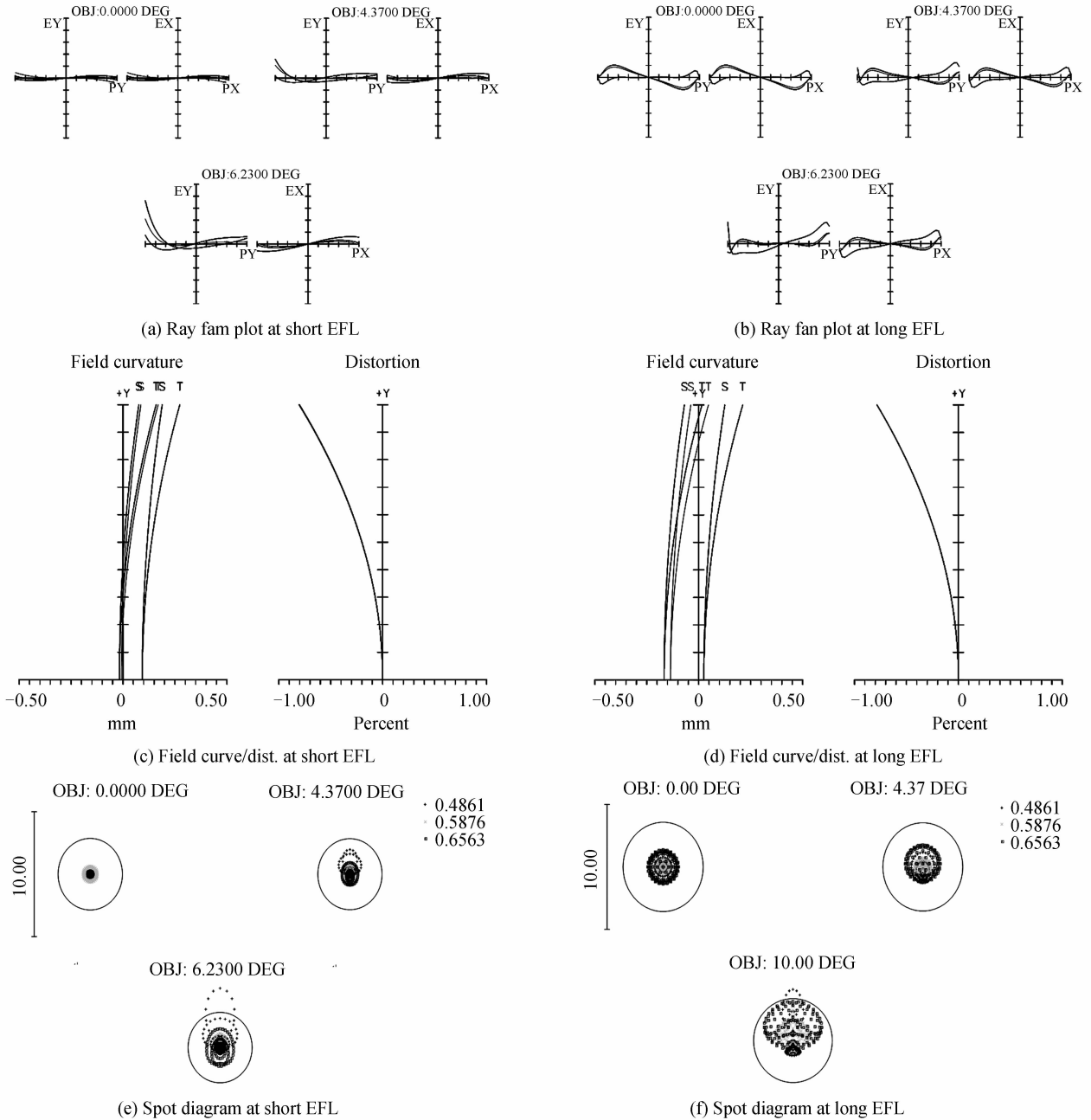


图7 不同焦距处系统的光学性能

Fig. 7 Optical property of the system at different focal length

表4 各变焦结构的RMS半径值

Table 4 RMS of each structure

	Focus/mm		
	2.70	10.0	20.3
On axis RMS/ μm	0.326	0.723	0.842
Field Half field RMS/ μm	0.532	0.823	0.973
Field Full field RMS/ μm	0.959	1.126	1.692

3 结论

根据现代光学对光学系统的微型化、大变倍比及像质良好的要求,设计了基于介电润湿三液体透镜的变焦光学系统,介绍了系统结构和工作原理,运用光焦度高斯括号法推导了系统参量之间的关系;利用光学设计软件 Zemax 对系统结构进行设计与优化,分析系统光学性能,并从 MTF、光线像差、场曲、畸变、点列图等方面进行像质评价。结果表明,在系统总长为 22 mm,其变焦范围可从 2.7 mm 变化到 20.3 mm,变倍比将近 8。此外,在空间频率 180 lp/mm 处该系统的 MTF 值大于 0.4。相比于双液体透镜系统,基于三液体透镜的系统变焦范围更广,像质更好。相关结果将为液体光学透镜的进一步实用化提供了理论参考。

参考文献

- [1] MA Chen, CHENG De-wen, WANG Qi-wei, *et al.* Design of optical system for liquid lens focusing fundamental camera based on Gaussian[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(11): 268-274.
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): 268-274.
- [2] LI L, LIU C, PENG H R, *et al.* Optical switch based on electrowetting liquid lens[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **111**(10): 609-611.
- [3] SANG W S, HAN S, SEO J H, *et al.* Liquid Lens module with wide field-of-view and variable focal length[J]. *Electronic Materials Letters*, 2010, **6**(4): 141-144.
- [4] LI H, CHENG X, HAO Q. An electrically tunable zoom system using liquid lenses[J]. *Sensors*, 2015, **16**(1): 45.
- [5] ZHANG Ying, ZHANG Xin, SHI Guang-wei, *et al.* Application of liquid lens in zoom system[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(1): 46-56.
张鹰,张新,史广维,等. 液体透镜在变焦系统中的应用[J]. *中国光学*, 2013, **6**(1): 46-56.
- [6] LI Ling-yin, WANG Yi-fan. Development and prospect of liquid zoom technology [J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(6): 578-582.
李零印,王一凡. 液体变焦技术的发展与展望[J]. *中国光学*, 2012, **5**(6): 578-582.
- [7] PENG Run-ling, CHEN Jia-bi, ZHUANG Song-lin. Design and analysis of optical damping effect optical system [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.
- [8] ZHANG-Wei, TIAN Wei-jian. Design of optical system for large focus deep endoscope[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(4): 558-560.
张薇,田维坚. 大焦深内窥镜光学系统设计[J]. *光学技术*, 2009, **35**(4): 558-560.
- [9] LIU Fang, PENG Run-ling, CHEN Jia-bi, *et al.* Study on the optical system of conical double liquid zoom [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 97-103.
刘芳,彭润玲,陈家璧,等. 圆锥双液体变焦光学系统的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 97-103.
- [10] PARK S C, LEE W S. Design and analysis of a one-moving-group zoom system using a liquid lens[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2013, **62**(3): 435-442.
- [11] YEN C T, SHIH J M. A study of optical design on 9× zoom ratio by using a compensating liquid lens[J]. *Applied Sciences*, 2015, **5**(3): 608-621.
- [12] WANG Hong-he, LI Xiang-ning, Pan wen-qiang, *et al.* Design of large zoom ratio liquid lens zoom system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0622001.
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.
- [13] KUIPER S, HENDRIKS B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(4): 1128-1130.
- [14] WANG Ping. Design and performance analysis of zoom optical system based on dielectric wetting liquid lens[D]. Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.
王评. 基于介电润湿技术液体透镜的变焦光学系统设计及性能分析[D]. 南京邮电大学, 2015.
- [15] PENG Run-ling, Wang Da-zhen, Chen Jia-bi, *et al.* Electrically-controlled and liquid-based optical imaging apparatus [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1836-1839.
彭润玲,王大震,陈家璧,等. 基于电控液体的光学成像装置[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1836-1839.
- [16] ZHAO Rui, HUA Xiao-gang, TIAN Zhi-qiang, *et al.* Electric wetting dual liquid zoom lens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(10): 2592-2597.
赵瑞,华晓刚,田志强,等. 电润湿双液体变焦透镜[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(10): 2592-2597.
- [17] BERGE B, PESEUX J. Variable focal lens controlled by an external voltage: an application of electrowetting[J]. *The European Physical Journal E*, 2000, **3**(2): 159-163.
- [18] WANG Zhao-hui. Optical system design tutorial[M]. Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2013.

王朝晖. 光学系统设计教程[M]. 北京邮电大学出版社, 2013.

[19] ZHAN Zhen-xian. Preparation and application of aspheric droplet microlens and its array[D]. China University of Science and Technology, 2010.

詹珍贤. 非球面液滴微透镜及其阵列的制作和应用研究[D]. 中国科学技术大学, 2010.

[20] SONG Dong-fan, Zhang Ping, Wang Cheng, et al. ZEMAX-based mobile phone camera design[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(1): 34-38.

宋东璠, 张萍, 王诚, 等. 基于 ZEMAX 的手机摄像镜头设计[J]. 应用光学, 2010, **31**(1): 34-38.