

可变焦补偿的液体透镜结构设计与分析

罗远智, 彭润玲*, 喻治俊

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 基于液体透镜的光学变焦系统无需机械运动即可达到变焦的目的,因此近几年来在光学应用中备受关注。在双液体透镜的基础上,设计了一种导电层连通的三液体自变焦补偿透镜,该液体透镜采用圆柱形结构,可通过控制电压来改变透镜中两个液体界面的曲率半径,以达到自变焦补偿功能。对该液体透镜的结构进行了详细分析,并求得该液体透镜的最小化结构表达式。依据高斯理论探讨了透镜相关参数对新型液体透镜变倍比及视场角的影响。

关键词 光学器件; 液体透镜; 自变焦补偿透镜; 高斯光学; 变倍比; 电润湿

中图分类号 O435.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.122301

Structure Design and Analysis of Liquid Lens with Self-Zoom-Compensation

Luo Yuanzhi, Peng Runling*, Yu Zhijun

School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract Optical zoom system based on liquid lens is used in many optical fields in recent years because it can achieve zooming without mechanical movement. A new lens with three layers of liquids and connected conducting layer is proposed. This liquid lens is cylindrical and it can zoom and compensate by itself by changing the voltages applied to control the radius of liquid interfaces. The structure of the liquid lens is analyzed in detail, and the minimum structure expression of the liquid lens is obtained. On the basis of the Gaussian optics theory, the effects of lens parameters on zooming performance including zoom ratio and field angle of the system are studied.

Key words optical devices; liquid lens; self-zoom-compensation lens; Gaussian optics; zoom ratio; electrowetting

OCIS codes 230.3990; 080.3630; 120.4820; 220.3630

1 引言

基于介质上电润湿效应的双液体透镜是将两种互不相溶的溶液封装入一个腔体内,通过改变外加电压来改变双液体透镜自身的焦距。这种透镜采用电控的方式变焦,具有操作方便、响应速度快、体积小的优点,已引起研究人员的广泛关注,并且已有商业化成品出现,例如 Varioptic 公司的 ARCTIC 39N 以及 Optotune 公司的 ML-20-35^[1]。基于其自身能改变焦距的特性,液体透镜可用来改善便携式设备的像质^[2]。目前,这种液体透镜主要用于变焦系统中,可以利用两个或两个以上的液体透镜组合来实现无机械运动的变焦系统^[3-6]。虽然采用两个独立的双液体透镜即可组成一个变焦光学系统,但

这样的系统会受封装玻璃的影响,增加了额外的光学损耗,而且为了保证共轴性,安装也不方便。为了克服以上缺点,赵瑞等^[7-8]提出了一种三液体透镜元件方案,但其设计的三液体透镜元件的导电层中间有绝缘部分,不方便制备,而且也缺乏对所设计的液体透镜元件参数及结构的详细分析。本课题组设计了一款自变焦补偿透镜,该透镜也是基于三液体透镜设计的元件,导电层中间没有绝缘部分,可对导电层进行共极处理。分析了透镜的最小化结构,并从高斯理论角度对该元件的光学性能进行了详细分析,为后期制备该元件提供理论基础。

2 基本结构与原理

目前的双液体透镜的主要结构有锥形结构及圆

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-05-26; 录用日期: 2018-06-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0402004)

* E-mail: pengrunling@usst.edu.cn

柱形结构^[4-6],而自变焦补偿透镜是基于圆柱形结构的双液体透镜的拓展,其结构如图1所示。整个金属圆柱管为导电层,中间没有绝缘部分,将氧化发黑处理后的金属内壁氧化层作为介电层,最后在发黑处理后的内壁上镀一层疏水层。在圆柱管内先后注入导电溶液、绝缘溶液、导电溶液,3种液体都是密度相同的透明溶液,两种导电溶液相同,导电溶液与绝缘溶液互不浸润且折射率也不相同。透镜两边采用ITO玻璃进行密封。3种溶液在圆柱管内形成界面1以及界面2。由于3种溶液的密度相同,所

以界面1以及界面2在各个方向上都不受重力的影响,因此界面1、界面2均为完美球面。通过两侧的ITO玻璃以及导电层施加电压 U_1 和 U_2 来改变界面1、界面2的曲率半径。自变焦补偿透镜元件本身是一个简单的变焦光学系统,界面1作为变倍组,界面2作为补偿组;当电压 U_1 改变时,界面1的曲率半径也会随着发生改变,以至于改变了透镜的焦距,使像面的位置发生偏移;通过改变电压 U_2 来使界面2达到相应的曲率半径来补偿像面的偏移部分,使像面位置保持不变,即达到自变焦补偿的效果。

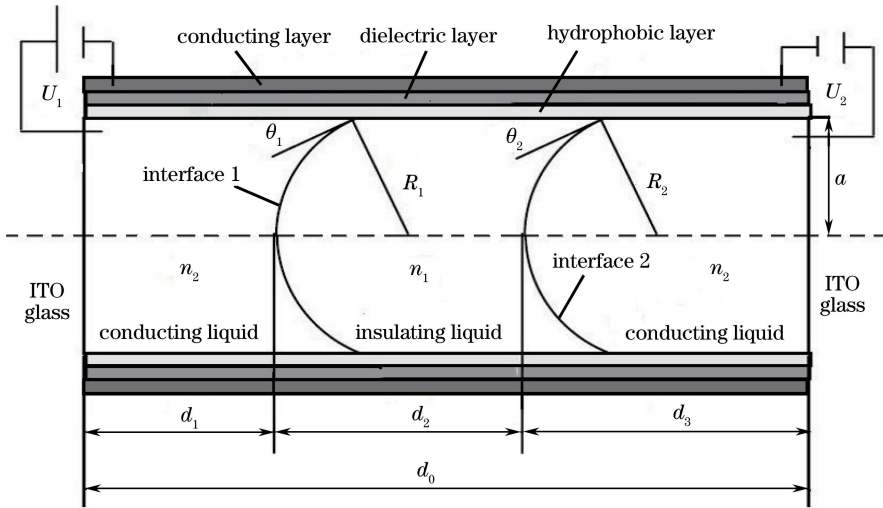


图1 自变焦补偿透镜的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of self-zoom-compensation lens

3 透镜的结构最小化分析

在制备自变焦补偿透镜时,为了能更好地满足微型化的要求,应求出透镜的最小化结构,即图1中透镜的总长 d_0 的最小值。图1中: a 为透镜内壁的

半径(即半通光口径); n_1 为绝缘溶液的折射率; n_2 为导电溶液的折射率; θ_1, θ_2 分别为两个界面的接触角; R_1, R_2 为两个界面的半径。根据图中各参数的几何关系可知 d_1, d_2, d_3 与 R_1, R_2 之间的关系^[9]为

$$\begin{cases} d_1 = k_1 d_0 + (2R_1^3 + 2R_1^2 \sqrt{R_1^2 - a^2} - 3a^2 R_1 - 2a^2 \sqrt{R_1^2 - a^2}) / (3a^2), & R_1 < 0 \\ d_1 = k_1 d_0 + (2R_1^3 - 2R_1^2 \sqrt{R_1^2 - a^2} - 3a^2 R_1 + 2a^2 \sqrt{R_1^2 - a^2}) / (3a^2), & R_1 > 0 \\ d_3 = k_3 d_0 + (-2R_2^3 - 2R_2^2 \sqrt{R_2^2 - a^2} + 3a^2 R_2 + 2a^2 \sqrt{R_2^2 - a^2}) / (3a^2), & R_2 < 0, \\ d_3 = k_3 d_0 + (-2R_2^3 + 2R_2^2 \sqrt{R_2^2 - a^2} + 3a^2 R_2 - 2a^2 \sqrt{R_2^2 - a^2}) / (3a^2), & R_2 > 0 \\ d_2 = d_0 - d_1 - d_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_1, k_3 为两侧导电溶液的体积占比。可以将(1)式整合为

$$\begin{cases} d_1 = k_1 d_0 + \frac{a^2 [-3 + 2\sqrt{1 - (a/R_1)^2}] R_1 + 2 [1 - \sqrt{1 - (a/R_1)^2}] R_1^3}{3a^2} \\ d_3 = k_3 d_0 + \frac{a^2 [3 - 2\sqrt{1 - (a/R_2)^2}] R_2 - 2 [1 - \sqrt{1 - (a/R_2)^2}] R_2^3}{3a^2} \\ d_2 = d_0 - d_1 - d_3 \end{cases} \quad (2)$$

在制备自变焦补偿透镜时,需要保证电压 U_1 、 U_2 改变过程中,界面 1、界面 2 仅改变曲率半径但不会损坏。所以当自变焦补偿透镜总长 d_0 取最小值时,在电压 U_1 、 U_2 改变的过程中,界面 1 与界面 2 必然刚好接触或不接触,并且两个界面与 ITO 玻璃

也应刚好接触或不接触。对于界面与 ITO 玻璃接触的情况,只需分析某一个界面与 ITO 玻璃的接触情况即可,可能的情况如图 2(a)、(b)所示;当两个界面刚好接触并且也刚好与 ITO 玻璃接触时,可能存在的情况如图 2(c)、(d)所示。

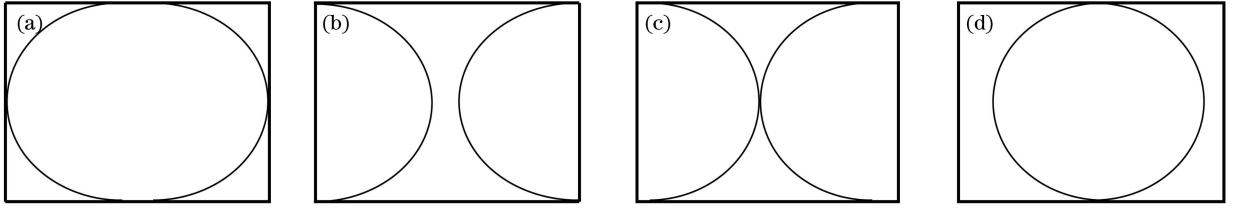


图 2 (a)~(b)界面与 ITO 玻璃接触时的可能情况;(c)~(d)两界面互相接触时的可能情况

Fig. 2 (a)-(b) Possible contact between the interface and ITO glass; (c)-(d) possible contact between two interfaces

为了分析上述提到的情况,可以先将新型液体透镜简化为两个双液体透镜来分析。而双液体透镜模型简图如图 3 所示,平面 C 是双液体透镜的液体界面 D 为平面时的情况。因为在电压变化过程中两种液体的体积不会发生改变,所以界面 D 的弧线段应分别位于平面 C 的两侧。设 A 点为弧线段与内壁的交点, B 点为弧线段与中心轴线的交点, t_1 、 t_2 分别为 A 点到平面 C 的距离以及 B 点到平面 C 的距离, θ 为接触角。 t_1 、 t_2 与内壁半径 a 的关系为

$$\begin{cases} t_1 = \frac{a}{3} \left| \frac{1}{\cos \theta} \right|^3 (1 - \sin \theta)^2 (2 + \sin \theta) \\ t_2 = \frac{a(1 - \sin \theta) [\sin \theta + 2(\cos \theta)^2 - 1]}{3 |\cos \theta|^3} \end{cases} \quad (3)$$

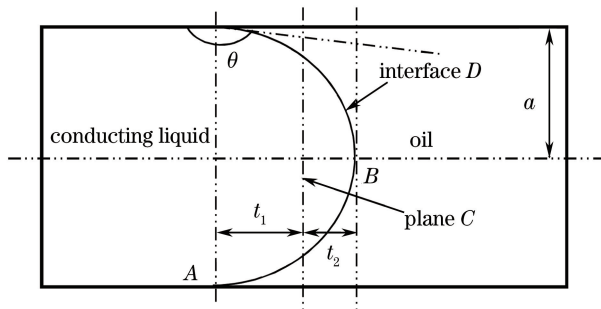


图 3 双液体透镜结构简图

Fig. 3 Structure diagram of double-liquid lens

当 $a = 5 \text{ mm}$ 时,在界面 D 改变的过程中, t_1 、 t_2 与接触角 θ 的关系曲线如图 4 所示。从图 4 所示的关系曲线可以明显地看出,整个改变过程中总有 $t_1 > t_2$ 。

因此,对于界面与 ITO 玻璃接触的情况,只可能是图 2(b)所示的情况。此时平面 C 到双液体透

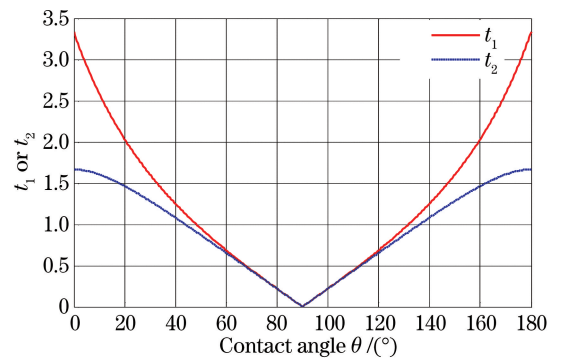


图 4 t_1 、 t_2 与接触角 θ 的关系曲线

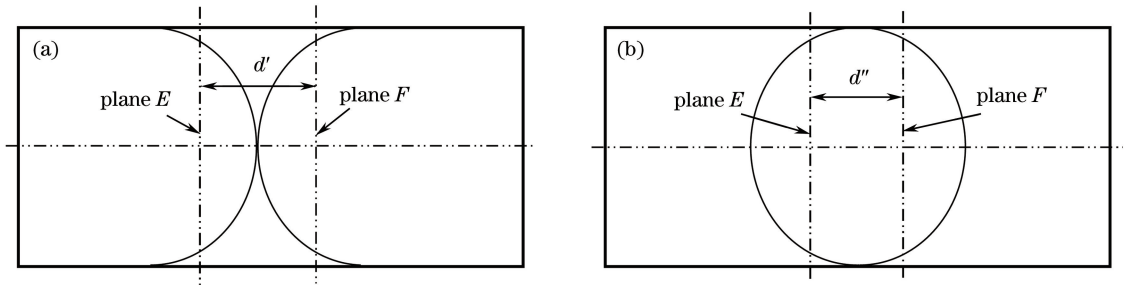
Fig. 4 Relation curves of t_1 or t_2 and contact angle θ

镜 ITO 玻璃或另一侧的距离只需取 $t_{1\max}$ 即可保证界面不会损坏。

对于两个界面刚好接触的情况,设界面 1 及界面 2 处于平面时的界面为平面 E、F,如图 5 所示。为了使界面 1、界面 2 在电压变化过程中不会损坏,应讨论界面 1、界面 2 为图 5(a)所示的情况时,平面 E 与平面 F 的距离 d' 的最小值 d'_{\min} ,以及图 5(b)所示情况时平面 E 与平面 F 的距离 d'' 的最小值 d''_{\min} 。再取 d'_{\min} 与 d''_{\min} 两者的较大值即可保证两个界面在曲率半径变化的过程中不会损坏。

因为透镜两侧的导电液体是相同的,所以 $d'_{\min} = 2t_{2\max}$, $d''_{\min} = 2t_{1\max}$ 。由图 4 所示的关系曲线可知 $t_{1\max} > t_{2\max}$,所以界面 1 与界面 2 接触的情况只能是图 2(d)所示的情况。此时,平面 E 与平面 F 的距离只要取 $2t_{1\max}$ 即可保证两个界面在曲率半径变化过程中不会损坏。

综合上述的讨论可知,当透镜总长 $d_0 = 4t_{1\max}$ 时即可保证自变焦补偿透镜的两个界面不会损坏。又由(3)式计算可得 $t_{1\max} = 2/3a$,所以新型液体透镜的透镜总长最小值 $d_0 = 8/3a$ 。

图5 U_1 、 U_2 改变过程中两界面可能的接触情况。(a)情况1;(b)情况2Fig. 5 Possible contact between two interfaces in the process of U_1 and U_2 changing. (a) Status 1; (b) status 2

4 双界面液体透镜的焦距

上一节分析了自变焦补偿透镜的最小化结构,这一节将对新型液体透镜的焦距 f' 进行分析。图6为平行光通过新型液体透镜的光路示意图。其中:平行光轴的光线经过透镜后与界面1、界面2以及最后一面的交点到光轴的高度分别为 h_1 、 h_2 、 h_3 ;焦点为 F' ;后截距为 l' ; d_1 、 d_2 、 d_3 分别为每一面到下一面的厚度; n_1 为油的折射率; n_2 为导电液体的折射率; R_1 、 R_2 分别为界面1和界面2的曲率半径。对平行光线进行光线追迹,并结合近轴多光组过渡公式^[10]可得该透镜焦距 f' 的表达式为

$$f' = \frac{n_1 R_1 R_2}{(n_1 - n_2) [d_2 (n_1 - n_2) + n_1 (R_2 - R_1)]} \quad (4)$$

设界面1的光焦度为 φ_1 ,界面2的光焦度为 φ_2 ,则有

$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{(n_1 - n_2)}{R_1} \\ \varphi_2 = \frac{(n_2 - n_1)}{R_2} \end{cases} \quad (5)$$

故,新型液体透镜的光焦度 φ 可以表示为

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{d_2}{n_1} \varphi_1 \varphi_2 \quad (6)$$

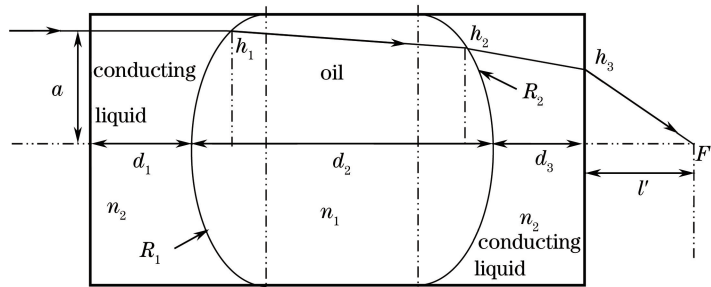


图6 自变焦补偿透镜光路简图

Fig. 6 Beam path diagram of self-zoom-compensation lens

5 透镜系统的变倍比 M

由第2节可知自变焦补偿透镜本身就是一个简单的变焦光学系统,对于变焦光学系统来说,变倍比及视场角是变焦光学系统的重要参数。因此这一节主要讨论该变焦系统的变倍比 M 及视场角。

变倍比 M 为系统最长焦 f_L 与系统最短焦 f_S 的比值,即

$$M = \frac{f_L}{f_S} \quad (7)$$

由第3节可知,可以把自变焦补偿透镜看成是两个单液体界面的双液体透镜的简单串联,只是两

片液体透镜中间填充的部分不是空气而是折射率为 n_1 的油。两片透镜的距离为 d_2 ,其高斯结构如图7所示,图7(a)描述了短焦时的情形,图7(b)描述了长焦时的情形。图7中: $n_0 = 1$ 为空气的折射率, n_1 为油的折射率, l' 为后截距, d_2 为界面1与界面2的距离(即界面1的厚度)。

由于透镜1与透镜2采用相同的材料,所以它们的光焦度范围都为 $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ 。处于短焦时,透镜1为负透镜,光焦度为 φ_a ,透镜2为正透镜,光焦度为 φ_b ;处于长焦时,透镜1为正透镜,光焦度为 φ_c ,透镜2为负透镜,光焦度为 φ_d 。设短焦及长焦时系统的组合光焦度分别为 φ_S 、 φ_L ,则联立(6)式以

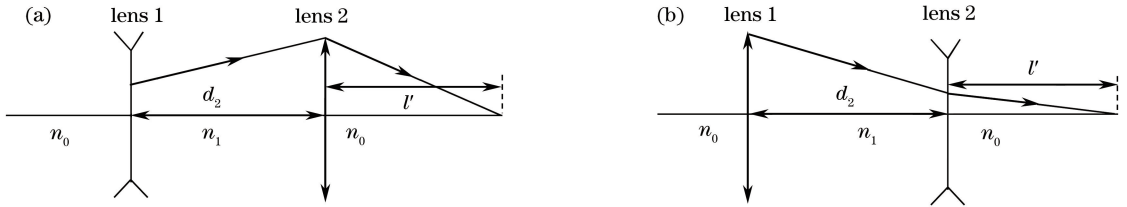


图7 自变焦透镜变焦系统高斯结构示意图。(a)短焦;(b)长焦

Fig. 7 Gauss structure diagrams of self-zoom-compensation lens. (a) Short-focus; (b) long-focus

及高斯公式可得

$$\begin{cases} \varphi_s = \varphi_a + \varphi_b - (d_2/n_1) \varphi_a \varphi_b \\ \varphi_b = \frac{1}{l'} - \frac{\varphi_a}{1 - (d_2/n_1) \varphi_a} \\ \varphi_l = \varphi_c + \varphi_d - (d_2/n_1) \varphi_c \varphi_d \\ \varphi_d = \frac{1}{l'} - \frac{\varphi_c}{1 - (d_2/n_1) \varphi_c} \end{cases} \quad (8)$$

由于光焦度为焦距的倒数,用 φ_d 代替 φ_c ,再结合(7)~(8)式可得自变焦补偿透镜的系统变倍比 M 的表达式为

$$M = \frac{1 - (d_2/n_1) \varphi_a}{1 - (d_2/n_1) \varphi_c} = \left(1 - \frac{d_2}{n_1} \varphi_a\right) \left(1 - \frac{d_2}{n_1} \varphi_d + \frac{d_2}{n_1 l'}\right). \quad (9)$$

因为 φ_a 、 φ_d 均小于零,所以由(9)式可知, φ_a 和 φ_d 的绝对值越大, d_2 的值越大, n_1 的值越小,则自变焦补偿透镜的变倍比 M 越大。假设在自变焦补偿透镜变焦过程中 d_2 、 n_1 的值不变,且单液体界面的双液体透镜的光焦度范围为 $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$,则当 $\varphi_a = \varphi_d = \varphi_{\min}$ 时,变倍比 M 最大,其表达式为

$$M_{\max} = \left(1 - \frac{d_2}{n_1} \varphi_{\min}\right) \left(1 - \frac{d_2}{n_1} \varphi_{\min} + \frac{d_2}{n_1 l'}\right). \quad (10)$$

根据(8)式可得后截距 l' 的表达式为

$$l' = \left(1 - \frac{d_2}{n_1}\right) / \varphi_s. \quad (11)$$

由(11)式可知, φ_s 越大, l' 越小。由(9)式可知, l' 越小,变倍比 M 越大。故由(8)式可知,若 $\varphi_a = \varphi_{\min}$,则当 $\varphi_b = \varphi_{\max}$ 时, φ_s 取得最大值,此时由

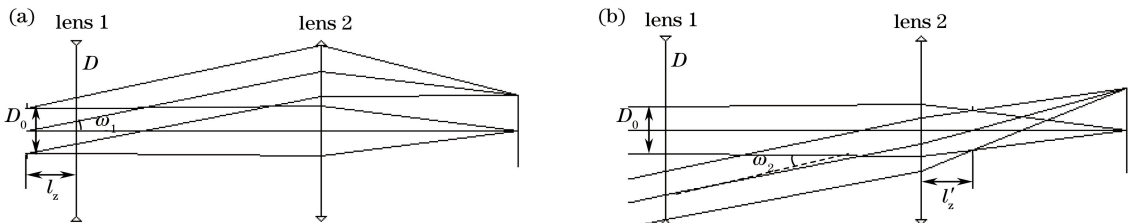


图8 短焦时最大视场示意图。(a)孔径光阑前置;(b)孔径光阑后置

Fig. 8 Schematics of maximum field of view in short-focus. (a) Aperture stop placed on the front aperture stop;

(b) aperture stop placed in the rear aperture stop

(11)式可知 l' 取得最小值,且可表示为

$$l' = \frac{1 - (d_2/n_1) \varphi_{\min}}{\varphi_{\min} + \varphi_{\max} - \frac{d_2}{n_1} \varphi_{\min} \varphi_{\max}}. \quad (12)$$

将(12)式代入(10)式可得

$$M_{\max} = \left[(-\varphi_{\min}) \left(\frac{d_2}{n_1}\right)^2 + \frac{d_2}{n_1} \right] \varphi_{\max} + \left(\frac{d_2}{n_1}\right)^2 \varphi_{\min}^2 + \frac{d_2}{n_1} (-\varphi_{\min}) + 1. \quad (13)$$

由(13)式可知, M_{\max} 的值与 d_2 、 n_1 、 φ_{\min} 、 φ_{\max} 的值有关。因为 $\varphi_{\min} < 0$, $\varphi_{\max} > 0$,所以由(13)式可知:当 φ_{\min} 及 φ_{\max} 的值一定时, d_2 的值越大, n_1 的值越小,则 M_{\max} 的值越大;当 φ_{\max} 、 d_2 及 n_1 的值一定时, M_{\max} 的值随 φ_{\min} 的减小而增大;当 φ_{\min} 、 d_2 及 n_1 的值一定时, M_{\max} 的值随 φ_{\max} 的增大而增大。因此在制备自变焦补偿透镜时,为了获得尽可能大的变倍比,应尽可能增大两个界面的距离 d_2 的值,选取小的通光口径,选取低折射率的油,选取与油折射率差别大的导电溶液。

6 透镜系统的视场角

接下来讨论视场角。由(13)式可知,当变焦范围 $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ 以及油溶液的折射率 n_1 不变时, d_2 的值越大,透镜的变倍比越大,但是由于受到通光口径的限制,透镜的视场角必然减小。同时由于透镜1与透镜2之间是油介质,无法将孔径光阑置于油中,只能将孔径光阑置于新型液体的前面或后面。而对于变焦系统而言,短焦时系统的视场角最大。图8为短焦时孔径光阑置于前面[如图8(a)所示]

以及孔径光阑置于后面[如图 8(b)所示]的光路情况。设 D 为透镜的通光口径($D=2a$), D_0 为入瞳大小, l_z 为图 8(a)情况时孔径光阑到透镜第一面的距离, l'_z 为图 8(b)情况时孔径光阑到透镜最后一面的距离。

光线追迹后可分别求出图 8(a)、(b)所示两种情况下自变焦补偿透镜的最大视场角。

对于图 8(a)的情况, 视场角公式为

$$\tan \omega_1 = \frac{D_0(n_1 - d_2\varphi_a) - n_1 D}{2(-\varphi_a d_2 l_z + d_2 + n_1 l_z)} \quad (14)$$

因为 $\tan \omega_1 < 0$, 所以这里取绝对值以便与图 8(b)所示的情况进行比较。根据(14)式可模拟得到视场角 ω_1 与孔径光阑到自变焦补偿透镜第一面的距离 l_z 的关系曲线, 如图 9 所示。其中, 设 $d_2=20, n_1=1.5, D=10, D_0=4, \varphi_a=-0.025$ 。

由图 9 可知, 当 $l_z=0$ 时, $\tan \omega_1$ 的绝对值最大, 则有

$$\tan \omega_{1\max} = -\frac{n_1 D_0}{2f'_1} - \left(\frac{D}{2} - \frac{D_0}{2}\right) \frac{n_1}{d} \quad (15)$$

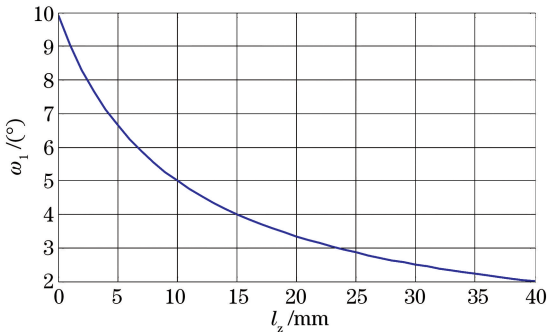


图 9 光阑前置时视场角与孔径光阑到第一面距离的关系曲线

Fig. 9 Relation curve of field of view and the distance between aperture stop and first surface when aperture stop placed on the front aperture stop

对于图 8(b)的情况, 视场角公式为

$$\tan \omega_2 = \frac{-\varphi_a \varphi_b d l'_z + n_1 \varphi_b l'_z - n_1 n_2 + \varphi_b n_2 d_2 + n_1 n_2 \varphi_a l'_z}{\varphi_b d_2 l'_z - n_2 (d_2 + n_1 l'_z)} \cdot \frac{(D_0 - D)}{2} \quad (16)$$

由(16)式可模拟得到视场角 ω_2 与孔径光阑到自变焦补偿透镜最后一面的距离 l'_z 的关系曲线, 如图 10 所示。其中, 设 $d_2=20, n_1=1.5, n_2=1.35, D=10, D_0=4, \varphi_a=-0.025, \varphi_b=0.025$ 。

由图 10 可知, 当 $l'_z=0$ 时, $\tan \omega_2$ 的绝对值最大, 则有

$$\tan \omega_{2\max} = \varphi_a \left(\frac{D}{2} - \frac{D_0}{2}\right) - \left(\frac{D}{2} - \frac{D_0}{2}\right) \frac{n_1}{d_2} \quad (17)$$

通过对比图 9 和图 10 可知, $|\tan \omega_{2\max}| > |\tan \omega_{1\max}|$, 所以孔径光阑应紧贴最后一面。令 $\varphi_a = \varphi_{\min}$, 可得视场角公式为

$$\tan \omega = \varphi_{\min} \left(\frac{D}{2} - \frac{D_0}{2}\right) - \left(\frac{D}{2} - \frac{D_0}{2}\right) \frac{n_1}{d_2} \quad (18)$$

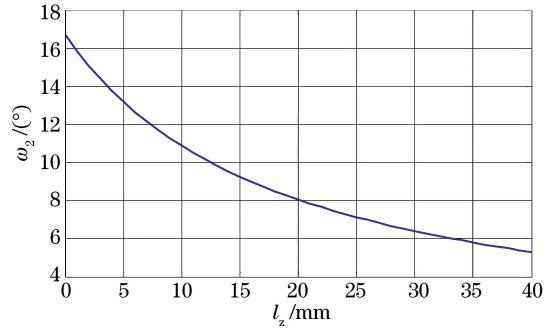


图 10 光阑后置时视场角与孔径光阑到最后一面距离的关系曲线

Fig. 10 Relation curve of field of view and the distance between aperture stop and last surface when aperture stop placed in the rear aperture stop

对 $\tan \omega$ 取绝对值, 有

$$|\tan \omega| = \left(\frac{D}{2} - \frac{D_0}{2}\right) \left(\frac{n_1}{d_2} - \varphi_{\min}\right) \quad (19)$$

由(19)式可知: 若 n_1 的值越大, d_2 与 φ_{\min} 的值越小($\varphi_{\min} < 0$), 则视场角越大; 并且当 n_1, d_2, φ_{\min} 的值一定时, 视场角随着通光口径 D 的增大而增大。因此, 为了获取尽可能大的视场角, 自变焦补偿透镜应尽可能地选择大的通光口径, 尽可能减小两个界面的厚度 d_2 , 选择高折射率的油溶液, 且应选择与油溶液折射率相差大的导电溶液。但是由上述讨论的最大变倍比的情况可知, 此时最大的变倍比反而减小了。图 11 所示为当变焦范围为 $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ 以及油的折射率 n_1 一定时, 视场角与变倍比

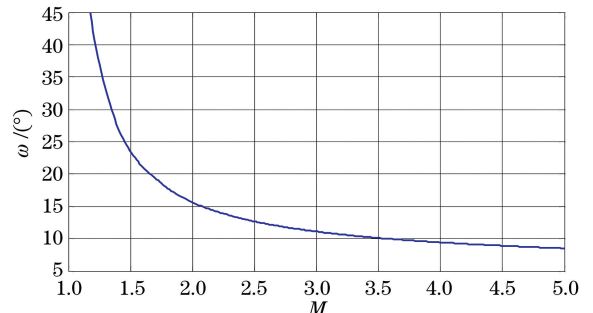


图 11 视场角随变倍比的变化

Fig. 11 Variation of field of view with zoom ratio

的关系曲线图。由图 11 可以明显地看出, 视场角随变倍比的增大而减小, 所以为了获取大的变倍比必然要牺牲视场角。

7 结 论

提出了一种新型结构的自变焦补偿透镜系统。从液体透镜变焦理论出发, 讨论了新型液体透镜的总长最小值以及每一面的最小厚度值; 从高斯光学理论出发, 讨论了该自主变焦补偿透镜系统的焦距、变倍比及视场角的关系式。相对于传统的变焦系统, 当该透镜元件的 d_2 值确定时, 可以选择合适的液体材料来满足对变倍比及视场角的要求, 液体的折射率可以通过阿贝折射仪或开放式法布里-珀罗干涉仪传感器^[11]测量得到。但是, 由于在选择液体材料时不仅要考虑材料的折射率, 还需要考虑材料的黏度系数以及透光性能等因素, 因此导电液体以及油性液体的选取并非像玻璃材料的选取那么容易, 能选择的范围相对也会更小。另一方面, 传统的玻璃透镜的折射面是固定不变的, 而液体透镜的折射面包含由两种液体构成的界面, 并且界面会在外加电压的作用下发生变化, 这就会给液体透镜的稳定性带来一定问题。实验表明: 通光口径 a 越小, 液体透镜的稳定性越好。所以整个透镜的参数应根据实际情况来选取。同时, 由于该新型液体透镜结构的金属层部分是导通的, 如果施加于自变焦补偿透镜两端的电压 $U_1=U_2$, 那么自变焦补偿透镜的变焦范围约为单个双液体透镜的 2 倍, 这大大提高了单个液体透镜的变焦范围。显然, 当整个透镜元件的参数确定之后, 像差分析是十分重要的, 这也与所选择的液体的种类密切相关, 这将是下一步工作的重点之一。

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] Oh S H, Seo J H, Jeon J P, *et al.* Liquid lens based on electromagnetic actuation for high-performance miniature cameras [C]. *Proceedings of the IEEE*, 2015: 15362319.
- [3] Cao C, Liao Z Y, Bai Y, *et al.* A new compound zoom optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1108001.
操超, 廖志远, 白瑜, 等. 一种新型复合变焦光学系统 [J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1108001.
- [4] Pan Y J, Li X N, Li Q, *et al.* Gauss optical analysis of double-liquid lens zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 198-202.
潘逸君, 李湘宁, 李强, 等. 双液体透镜变焦系统的高斯光学分析 [J]. *应用光学*, 2016, 37(2): 198-202.
- [5] Wang H H, Li X N, Pan W Q, *et al.* Design of large zoom ratio liquid lens 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.
- [6] 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.
- [7] Zhao R, Ma J Q, Dang Z Y, *et al.* Design and analysis of an optical zoom system using electrowetting-based triple liquid lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(6): 0622005.
赵瑞, 马建权, 党智勇, 等. 基于介电润湿三液体透镜的变焦光学系统的设计与分析 [J]. *光子学报*, 2017, 46(6): 0622005.
- [8] Kopp D, Brender T, Zappe H. All-liquid dual-lens optofluidic zoom system [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3758-3763.
- [9] Peng R L, Wang D Z, Chen J B, *et al.* Electrically-controlled and liquid-based optical imaging apparatus [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(10): 1836-1839.
彭润玲, 王大振, 陈家璧, 等. 基于液体的电控光学成像系统 [J]. *光子学报*, 2010, 39(10): 1836-1839.
- [10] Li X N, Jia H Z, Zhang R F, *et al.* *Engineering optics* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010: 37-42.
李湘宁, 贾宏志, 张荣福, 等. *工程光学* [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 37-42.
- [11] Song P, Jing G Z, Li A, *et al.* Refractive index measurement of liquid based on open fiber Fabry-Perot interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204007.
宋鹏, 荆振国, 李昂, 等. 基于光纤开放式法布里-珀罗干涉仪的液体折射率测量 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1204007.