

液体透镜变焦系统高斯理论分析

潘文强¹ 李湘宁^{1,2,3} 卢 山⁴ 刘超镇⁴

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

²上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093

³教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093

⁴上海航天控制技术研究所, 上海 200233

摘要 基于液体透镜的变焦系统不需要移动光组即能实现变倍的功能,这种变倍工作方式可应用于具有特定需求的成像系统,近年来备受关注。探讨了液体透镜参数(变焦范围,通光口径)对变焦系统变焦性能的影响,从理论上得到了液体透镜变焦系统最大变倍比以及最大视场角的计算公式。根据理论计算的结构,求得该结构下液体透镜变焦系统的变焦曲线表达式。从变焦曲线可知,系统从短焦向长焦方向变化时,系统变倍比增长速度越快,系统焦距变化越灵敏。利用上海理工大学研发的液体透镜进行仿真,设计了一款变倍比为 6,全视场角为 60°的液体透镜变焦系统高斯结构。该设计不仅验证了理论推导的正确性,也可作为实际液体透镜变焦系统的初始结构。

关键词 光学设计; 变焦系统; 液体透镜; 变倍比; 变焦曲线; 高斯光学

中图分类号 O435 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1222003

Gauss Theoretical Analysis of Liquid Crystal Lens Zoom System

Pan Wenqiang¹ Li Xiangning^{1,2,3} Lu Shan⁴ Liu Chaozhen⁴

¹ School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

² Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China

³ Research Center of Optical Instruments and System Engineering, Ministry of Education, Shanghai 200093, China

⁴ Shanghai Aerospace Control Technology Research Institute, Shanghai 200233, China

Abstract Zoom system based on liquid crystal lenses can realize zoom without moving elements. This zoom working mode is applicable to some specific imaging systems, and has attracted much attention in recent years. The effects of liquid crystal lens parameters including zoom range and clear aperture on zooming performance of zoom system are studied. The calculation formulas of the maximum zoom ratio and the maximum field of view of the liquid crystal lens zoom system are theoretically obtained. According to the theoretically calculated structure, the zoom curve expression of the zoom system is obtained. The zoom curve shows that the zoom ratio grows faster and the focal length varies more sensitively when the system changes from short focus to long focus. Using the liquid crystal lenses developed by the University of Shanghai for Science and Technology, we design a Gauss model of liquid crystal lens zoom system with zoom ratio of 6 and full field of view of 60°. The design does not only verify the theoretical derivation, but can also be used as the initial structure of an actual liquid crystal lens zoom system.

Key words optical design; zoom system; liquid crystal lens; zoom ratio; zoom curve; Gauss optics

OCIS codes 220.2740; 220.3620; 220.4830

1 引 言

液体透镜是在一个密封容器内装满液体,通过某种控制办法改变容器内液体的折射率或者曲率半径,从

收稿日期: 2016-07-22; **收到修改稿日期:** 2016-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(11104184)、国家 863 计划(2011CB707504)、教育部博士点新教师类基金(2011312012011)、上海市教育部委员会创新项目(12YZ108)

作者简介: 潘文强(1991—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: 1548222539@qq.com

导师简介: 李湘宁(1956—),女,硕士,教授,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: lxning@usst.edu.cn(通信联系人)

而使得自身焦距发生改变的透镜。这种新型光学元件具有独特的变焦方式,且响应速度快,体积小,操作便捷,使其在相关领域得到了广泛的应用。利用液体透镜自身焦距的实时变化,液体透镜可应用于便携摄像机、手机摄像头等移动设备改善像质^[1]。与传统变焦系统结合,利用焦距的实时可调节功能可补偿传统变焦系统变焦过程中的像面偏移^[2]。通过两片或者两片以上的液体透镜的配合,还可以实现具有变倍功能但无任何运动元件的光学系统(以下称之为液体透镜变焦系统)。对于液体透镜变焦系统而言,可以选用任意变焦原理的液体透镜,且各种液体透镜的变焦原理在许多公开的资料都能找到^[3-6]。因此,近年来这种变焦方式备受关注,虽然市场上还没有相应的产品,但是已经有一些研究机构开始对这种变焦系统展开了研究。三星高级技术研究所用两片液体透镜和若干个固定透镜组设计了一款4倍变焦的内窥镜液体透镜变焦系统^[7]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所对液体透镜变焦系统进行了探索,理论上计算了液体透镜变焦系统变倍比,并且设计了一款变倍比为2.5的液体透镜变焦系统^[8-9]。上海理工大学对电湿润液体透镜进行了研究分析,并模拟了变倍比为1.5的液体透镜变焦系统^[10-12]。这方面的研究并不多,原因不仅在于液体透镜成本高,更重要的原因是液体透镜自身性能的限制。随着液体透镜的变焦性能逐步加强,国内外的科研机构都在开发这种新型光学元件的应用。上海理工大学正在研发一款大口径、大变焦范围的高性能液体透镜,并将其应用于液体透镜变焦照相系统中。本文将液体透镜等效为有一定焦距和口径的理想透镜,主要对液体透镜变焦系统进行分析 and 讨论,从理论上确定液体透镜参数对变焦系统性能的影响,并在此基础上,根据已有的液体透镜参数,达到的设计指标。

2 液体透镜变焦系统

基于液体透镜变焦系统的简化模型如图1所示。系统仅由两片液体透镜(lens 1, lens 2)、物面和像面组成,它们之间的间隔分别为 d_1, d_2, d_3 。当透镜1(相当于变焦镜组)焦距发生改变时,像面位置也发生变化,此时透镜2(相当于补偿镜组)焦距也随之变化,以补偿像面的偏移,确保像面位置稳定,从而使系统具备变焦变倍的功能。对于照相系统,利用最长焦与最短焦距的比值作为变倍比,可以表示为

$$M = \frac{f_L}{f_S}, \quad (1)$$

式中 M 为变倍比, f_L, f_S 分别为最长焦和最短焦时的系统组合焦距。这种变倍方式最独特的地方在于变倍过程中系统没有移动的组件。相比于传统变焦系统,基于液体透镜的变焦系统具有结构简单、操作方便、功率低、无噪声、响应速度快等优势。

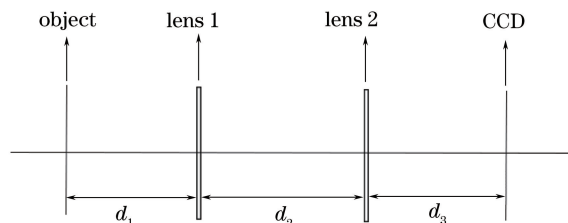


图1 液体透镜变焦系统模型

Fig. 1 Model of liquid lens zoom system

3 基于液体透镜变焦系统的高斯理论分析

3.1 液体透镜变焦系统变倍比的计算与分析

尽管不同的液体透镜变焦原理不同,但是液体透镜变焦系统首先要考虑的都是系统的变倍比以及能获得的最大视场角,而影响这两个指标的最重要因素是液体透镜的焦距范围和通光口径。为此,分析时可以将液体透镜用高斯面代替,高斯面的焦距范围以及通光口径与实际液体透镜一致。

根据液体透镜变焦系统最简模型,在Zemax软件中利用高斯面型代替液体透镜,假设物体位于无限远,此时变焦系统高斯结构如图2所示。

变焦过程中两片液体透镜间距 d ,像距 l' 保持不变。液体透镜光焦度范围为 $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ 。短焦时,第一

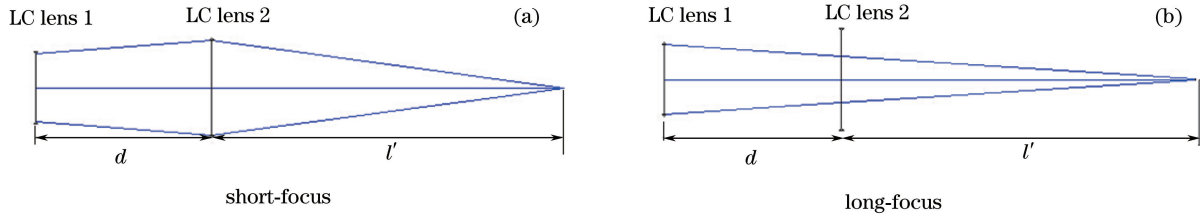


图 2 液体透镜变焦系统高斯结构示意图。(a) 短焦距；(b)长焦距

Fig. 2 Gauss structure of liquid lenses zoom system. (a) Short-focus; (b) long-focus

片液体透镜光焦度为负,用 φ_a 表示,第二片液体透镜光焦度为正,用 φ_b 表示,组成反远距系统;长焦时,第一片液体透镜光焦度为正,用 φ_c 表示,第二片液体透镜光焦度为负,用 φ_d 表示,组成望远系统。根据系统组合焦距公式^[13]可以得到最长焦和最短焦时系统的组合焦距,结合(1)式,得到系统变倍比的表达式为

$$M = \frac{1 - d\varphi_a}{1 - d\varphi_c} = (1 - d\varphi_a) \left(1 - d\varphi_d + \frac{d}{l'} \right) \quad (2)$$

因为 φ_a, φ_d 均为负值,从(2)式可以明显看出, φ_a, φ_d 绝对值越大, d 值越大,则系统变倍比越大。当 $\varphi_b = \varphi_{\max}$ 时,像距 l' 最短,此时变倍比最大。当像距 l' 为无穷远时,系统属于无焦系统,是变焦系统的一种特例^[14]。尽管无焦系统变倍比公式可以得到化简,但是不具有普遍性。通过(2)式还可以看出,像距 l' 无穷远时,系统变倍比最小。对于相同的液体透镜,要获得相同的变倍比,系统结构必然更长。因此对于给定的两片液体透镜间距 d ,以及液体透镜光焦度范围 $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$,当 $\varphi_a = \varphi_d = \varphi_{\min}, \varphi_b = \varphi_{\max}$ (此时 $\varphi_c < \varphi_{\max}$),则系统可获得最大变倍比

$$M_{\max} = (1 - d\varphi_{\min})(1 - d\varphi_{\min} + d/l'), \quad (3)$$

$$l' = \frac{1 - d\varphi_{\min}}{\varphi_{\min} + \varphi_{\max} - d\varphi_{\min}\varphi_{\max}} \quad (4)$$

用 $\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$ 表示液体透镜自身的变焦范围,当 d 一定时,液体透镜变焦系统变倍比与液体透镜变焦范围的关系曲线如图 3 所示。

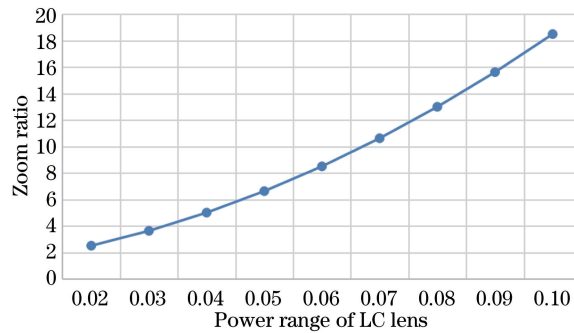


图 3 变倍比随液体透镜光焦度范围的变化曲线

Fig. 3 Curve of zoom ratio versus power range of liquid lenses

从图 3 可以看出,当两片液体透镜之间的间距 d 一定时,液体透镜光焦度范围越大,系统变倍比越大,且系统变倍比与液体透镜光焦度范围呈指数关系。

3.2 液体透镜变焦系统变焦曲线

当液体透镜变焦范围 $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ 一定,两透镜之间间距 d 也一定时,可根据 3.1 节求出系统的最大变倍比 M ,以及透镜间距和其他系统参数。在变焦过程中,第一片液体透镜光焦度 φ_a 改变时,第二片液体透镜光焦度 φ_b 也随之变化,以保证像面稳定。可以得到系统组合光焦度 φ 关于 φ_a 和 φ_b 的表达式为

$$\begin{cases} \varphi = \frac{1}{l}(1 - d\varphi_a) \\ \varphi = \frac{1}{d(1 - l\varphi_b) + l} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 l 为系统后截距,是一个常数。所以系统光焦度与第一片液体透镜光焦度呈正比关系,系统光焦度的倒数(系统焦距)与第二片液体透镜光焦度呈正比关系。由于系统变倍比是利用系统焦距计算而来,所以绘图时以系统焦距为横轴。为了保持曲线的连续性,以单个液体透镜的光焦度为纵轴得到系统的变焦曲线如图 4 所示,其中第一片液体透镜的光焦度等差递增。

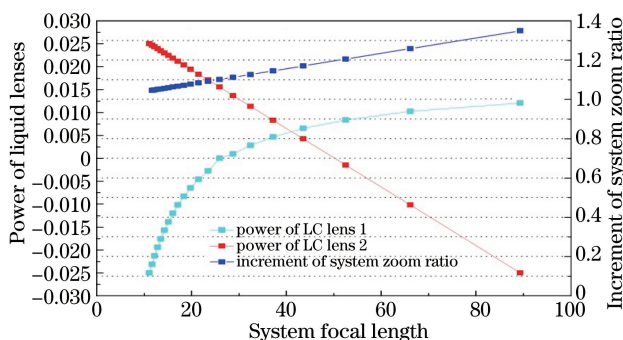


图 4 液体透镜系统变焦曲线

Fig. 4 Zoom curves of liquid lens system

图 4 不仅反映了单个液体透镜光焦度与系统总焦距的关系,还反映了系统焦距变化率的情况。若从短焦到长焦取 n 组数据, f_1, f_n 分别表示最短焦和最长焦时系统总焦距,则 f_i 表示第 i 组系统总焦距, M_i 表示第 i 组时系统变倍比。其中蓝色线表示的系统焦距变化率表达式为

$$dM_i = \frac{f_i}{f_{i-1}}, i = 2, 3, \dots, n. \quad (6)$$

从曲线图可以看出,系统从短焦变化到长焦时,焦距变化率也在增加,即系统焦距的增量在逐渐增大,说明液体透镜光焦度对系统长焦方向的影响更为敏感。

3.3 液体透镜变焦系统视场角的计算与分析

根据 3.1 节可知,对于给定的液体透镜变焦范围,要获得较大的变倍比,可通过增加两片液体透镜之间的间距来实现。但是实际液体透镜受自身通光口径限制,当间距增大时,变焦系统的视场角必然减小。图 5 截取了液体透镜变焦系统中两片液体透镜之间的光线传播情况。不发生渐晕时,最大视场角上边缘光线正好通过第二片液体透镜的上端点,下边缘光线正好通过第一片液体透镜的下端点。

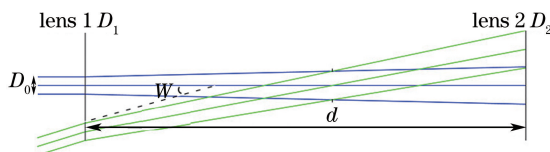


图 5 无渐晕时最大视场示意图

Fig. 5 Maximum field of view without fading

对于变焦系统,短焦时系统视场角最大。此时第一片液体透镜的光焦度为 φ_{\min} ,第二片液体透镜的光焦度为 φ_{\max} ,两片液体透镜的口径 $D_1 = D_2 = D$ 。 D_0 为短焦时入瞳直径,由系统焦距和 F 数求得。根据光线追迹公式以及几何关系,可以得到视场角公式为

$$\tan W = \left(\frac{D}{2} - D_0 \right) \varphi_{\min} - \frac{D - D_0}{d}. \quad (7)$$

当液体透镜变焦范围为 $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ 、系统变倍比一定时,液体透镜变焦系统最大视场角主要由液体透镜自身的口径范围决定。图 6 为液体透镜变焦系统最大视场角与液体透镜通光口径的关系曲线。联立(3)式和(7)式,可以得到系统变倍比与视场角的关系曲线,如图 7 所示。

从图 6 可以看出,系统视场角与液体透镜的通光口径成正比,所以为了获得较大视场的液体透镜变焦系统,应尽可能选择大口径的液体透镜。从图 7 可以看出,对于给定焦距范围以及通光口径的液体透镜,组成变焦系统时系统变倍比越大,视场角越小。在实际设计过程中,往往需要在获得大变倍比的同时,依然保证

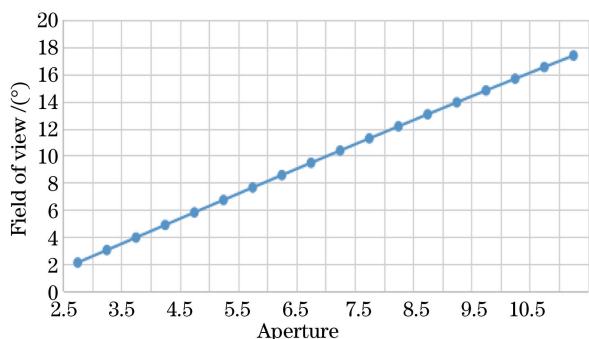


图 6 视场角随通光口径的变化

Fig. 6 Relationship between field of view and clear aperture

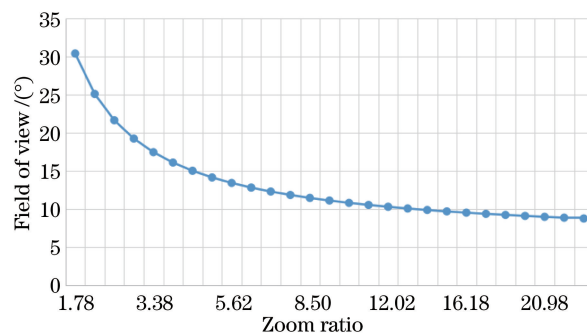


图 7 视场角随变倍比的变化

Fig. 7 Relationship between field of view and zoom ratio

视场范围较大。因此,设计之前可根据 3.1~3.3 节的理论,对系统性能进行初步估计,选择合适的液体透镜。之所以称之为预估计,是因为通过增加部分组还可以将系统的视场角增大,提高系统的性能。

4 实例分析

上海理工大学自主研发了一款液体透镜,其光焦距范围为 $[-25, 25]$,通光口径为 10 mm。光学模型如图 8 所示,两种液体的折射率和阿贝数如表 1 所示。

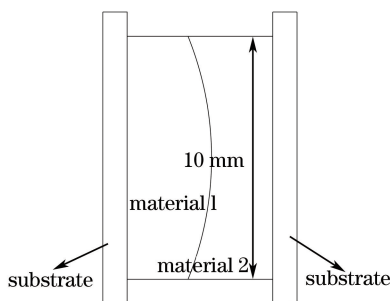


图 8 液体透镜等效光学模型

Fig. 8 Equivalent optical model of liquid lens

表 1 液体透镜材料参数

Table 1 Material parameters of liquid lens

	Material 1	Material 2
Refractive index	1.501	1.349
Abbe number	37.47	41.429

利用此款液体透镜的光学参数设计组成变焦系统,要求变倍比至少为 6,视场角尽可能大。根据第 3 节的理论分析和计算,利用此款液体透镜设计的变焦系统,系统最大全视场角约为 34° ,但是由于液体透镜自身具有一定厚度,实际系统必然产生部分渐晕,为此实际系统视场角小于理论值。所以设定 6 倍变倍比的液体透镜变焦系统获得的全视场角为 30° 。图 9 所示为系统最长焦和最短焦两种状态的结构示意图,图中的粗线表示液体透镜。

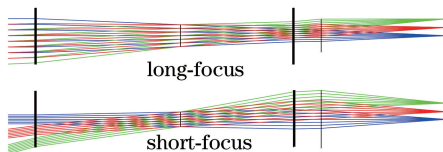


图 9 液体透镜变焦系统高斯结构

Fig. 9 Gauss structures of liquid lens zoom system

为了获得更大的视场角,提出两种方法以保证系统变倍比的同时,还可增大系统的视场角。第一种方法是在变焦系统前加入反远距无焦系统,类似激光扩束系统,其结构模型如图 10 所示。两组透镜的焦距以及

间隔可根据需要放大的视场角倍率计算得到。第二种方法是利用固定组与液体透镜组合等效单片液体透镜,根据第3节的理论分析,调整组合后透镜组的光焦度范围,使其在短焦时全视场角达到 60° ,结构如图11所示。对于这种等效模型,液体透镜焦距改变的过程中,光组的主点也发生变化,所以不能简单地仅利用一片透镜代替。所以图11中用透镜组代替之前的单片液体透镜。利用上述两种方法,分别获得满足变倍比为6,短焦时系统全视场角达 60° 的模型,如图12、13所示。

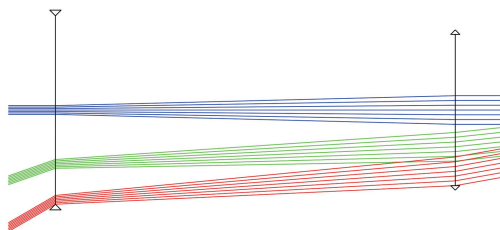


图 10 反远距光学系统示意图

Fig. 10 Inverted telephoto optical system

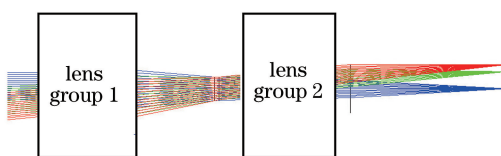


图 11 等效模型

Fig. 11 Equivalent model

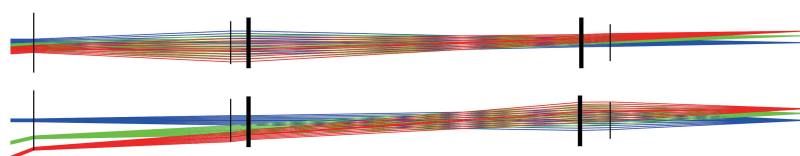


图 12 增加反远距光学系统组成液体透镜变焦系统

Fig. 12 Liquid lens zoom system with inverted telephoto optical system

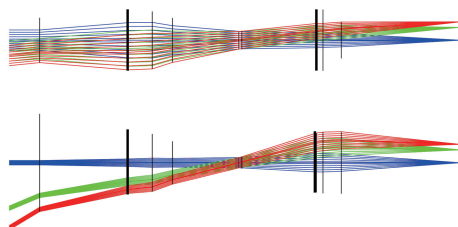


图 13 等效模型组成液体透镜变焦系统

Fig. 13 Liquid lens zoom system with equivalent model

通过上述两种方法都能在保证系统变倍比的同时增大系统的视场角。但是第一种方法对应的液体透镜变焦系统结构很长,且视场角放大倍率越大结构越长,一般不采用。第二种方法相比更为实用,这种液体透镜变焦系统结构总长较短,且加入的固定透镜组除了承担焦距分配的功能,还可以很好地校正像差。

5 结 论

基于高斯光学理论分析,将相关的理论延伸扩展至液体透镜变焦系统中,进而对液体透镜变焦系统性能指标展开讨论。液体透镜变焦系统最大变倍比以及最大视场角公式,可以为液体透镜变焦系统设计提供很大的帮助。可以根据设计要求选择合适的液体透镜,也可以根据给定的液体透镜确定合理的设计指标。获得液体透镜变焦系统初始结构的方法有很多,所提的两种方法是基于理论计算的,可以通过计算得到,具有很好的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Chung S K, Seo J H, Oh S H, *et al.* Liquid lens based on electromagnetic actuation for high-performance miniature cameras[C]. 18th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2015: 2077-2079.
- 2 Yen C T, Shih J M. A study of optical design on $9\times$ zoom ratio by using a compensating liquid lens[J]. Applied Sciences, 2015, 5: 608-621.
- 3 Shi Guangfeng, Yang Bin, Shi Guoquan, *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.
- 4 Peng Runling, Chen Jiabi, Zhuang Songlin. 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.
- 5 Wang B, Ye M, Sato S. Liquid crystal lens with focal length variable from negative to positive values[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 79-81.
- 6 Ren H W, Wu S T. Variable-focus liquid lens[J]. Optics Express, 2007, 15(10): 5931-5936.
- 7 Lee S, Choi M, Jung K D. Zoom lens design liquid using liquid lens for laparoscope[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1751-1761.
- 8 Zhang Ying. Research on zoom lens design with liquid lenses[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
张 鹰. 基于液体透镜的变焦距光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- 9 Zhang Ying, Zhang Xin, Shi Guangwei, *et al.* Applications of liquid lens in zoom systems[J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 46-56.
张 鹰, 张 新, 石广维, 等. 液体透镜在变焦系统中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 46-56.
- 10 Zhu Cheng, Peng Runling, Chen Jiabi. Double-liquid lens based on electrowetting[J]. College Physics, 2007, 26(6): 57-62.
祝 澄, 彭润玲, 陈家璧. 基于电湿效应的双液体透镜[J]. 大学物理, 2007, 26(6): 57-62.
- 11 Wang Dazhen, Peng Runling, Chen Jiabi, *et al.* Variable-focus hysteresis of double-liquid variable-focus lens[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612001.
王大振, 彭润玲, 陈家璧, 等. 双液体变焦透镜变焦迟滞现象的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0612001.
- 12 Sheng Jinxia, Peng Runling, Chen Jiabi. Analysis on property of the double-liquid zoom lens based on electrowetting[J]. Optics Instrument, 2007, 29(4): 23-26.
绳金侠, 彭润玲, 陈家璧. 电湿效应双液体变焦透镜性能的分析[J]. 光学仪器, 2007, 29(4): 23-26.
- 13 Zhang Yimo. Applied optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 43-53.
张以漠. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 43-53.
- 14 Pan Yijun, Li Xiangning, Li Qiang, *et al.* Gauss optical analysis of double-liquid lens zoom system[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 199-201.
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): 199-201.