

可调光焦度器件的变焦光学系统研究发展趋势

程洪涛¹ 郭世俊¹ 吕杰¹ 李恒宇^{2*}

¹上海健康医学院医疗器械学院, 上海 200093

²上海大学精密机械工程系, 上海 200072

摘要 基于变焦原理的理论分析了变焦光学系统的发展过程,详细论述了各种变焦原理的优缺点和应用情况。归纳了可调光焦度器件的相关技术,总结了光焦度补偿系统设计当前的研究热点,提出了下一代变焦系统理论设计和未来发展的研究策略。

关键词 光学器件; 机械补偿; 光学补偿; 光焦度补偿; 可调光焦度器件; 变焦系统

中图分类号 TB133 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.080007

Research Development Trends of Zoom System with Variable Focal Power Device

Cheng Hongtao¹ Guo Shijun¹ Lü Jie¹ Li Hengyu²

¹Department of Medical Engineering, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 200093, China

²Department of Precise Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract The principles of the development process of zoom optical system is analyzed based on the theory of zoom principle, we discuss the strong and weak points of each kind of zoom principle and their applications. Related technology of variable focal power device and current research focus of the optical power compensation system are summarized. The theoretical design and future development of next generation of zoom systems are proposed.

Key words optical devices; mechanical compensation; optical compensation; optical power compensation; variable focal power device; zoom system

OCIS codes 230.3720; 110.1085; 080.3620

1 引言

变焦系统是“具有可变焦距,但物与像的位置固定不变”的光学系统,已被广泛应用于电视、电影摄影、望远摄影(如人造卫星摄影)和显微摄影等科技领域,以及导弹实验、追迹观察、火箭记录、医学影像等方面,其理论和设计方法一直在改进和发展。最初简单变焦雏形是显微镜和望远镜,通过更换光学组元达到变焦目的,这种变焦是不连续的、间断的。产生这样的结果是由于当时在设计和制造上存在着不能克服的困难,才没有制造出连续变焦系统。

近十几年来,由于电子计算机在光学设计中应用及精密机械加工技术进步等,使折射面数少则 20 多面,多则 40 多面的复杂的移动光学组元连续焦系统生产制造成为现实。基于移动光学组元的光学变焦,透镜组元的来回移动需要大量的空间。然而在空间狭小的场合中^[1-7],或者光学组元太大^[8-14],由于系统的几何尺寸限制,这 2 种类型的系统并不适合移动组元获得变焦。当前这些系统的变焦都是数字变焦,不是实际意义的(光学)变焦。针对这类问题,可调光焦度器件可以很好地解决小空间变焦问题。基于人眼仿生学原理,各

收稿日期: 2016-03-29; **收到修改稿日期:** 2016-04-25; **网络出版日期:** 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61305106)、上海市自然科学基金(13ZR1454200)、上海市教委晨光计划资助项目(13CGB09)

作者简介: 程洪涛(1983—),男,博士,讲师,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: poyanglao@126.com

* **通信联系人。** E-mail: lihengyu@i.shu.edu.cn

国科学家都在研制可以模仿人眼功能的可调光焦度器件。随着自适应技术的发展,可调光焦度透镜(即通过改变透镜的形状,光焦度改变的光学器件)的概念被提出^[15-24],其可以应用在空间有限的变焦系统设计上。

基于可调光焦度器件的变焦原理,其最大优点是能够提供额外的设计自由度。光学系统能够更紧凑,可使用更少的和不需要移动的器件。另外一个优点是其使用的材料比玻璃轻,能够减少系统总的重量。当前应用可调焦器件变焦系统的设计理论和技术相对滞后,尚无专门系统理论形成。无光学器件移动是变焦光学系统未来的发展趋势。

2 变焦光学系统的原理分析

变焦系统是由多组透镜组成的光学系统,最简单的形式是 2 个光组光学系统的光焦度公式可以写为^[25]:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2, \quad (1)$$

式中 ϕ_1 、 ϕ_2 分别为第 1、第 2 光组的光焦度, ϕ 为光组的组合光焦度, d 为光组间隔。从(1)式可知光学系统的光焦度是各元件的光焦度与光组间隔的函数,也就是说 $\phi = f(\phi_1, \phi_2, d)$ 。因此改变光学系统的光焦度达到变焦目的有 2 种途径:1)可以改变光组间隔 d (变焦原理 I);2)可以通过改变各元件的光焦度 ϕ_i (变焦原理 II)。根据变焦系统对像面补偿的原理,变焦原理 I 分为:光学补偿变焦和机械补偿变焦。光学补偿变焦即指其焦距的不断变化根据具有线性的组元位移而实现的光学系统,机械补偿变焦即由组元的非线性位移而实现的 1 种变焦光学系统^[26-35];变焦原理 II 定义为光焦度补偿。变焦系统的研究原理正是基于(1)式来展开的,其发展历程如图 1 所示。图 2 为变焦系统的像面补偿示意图。

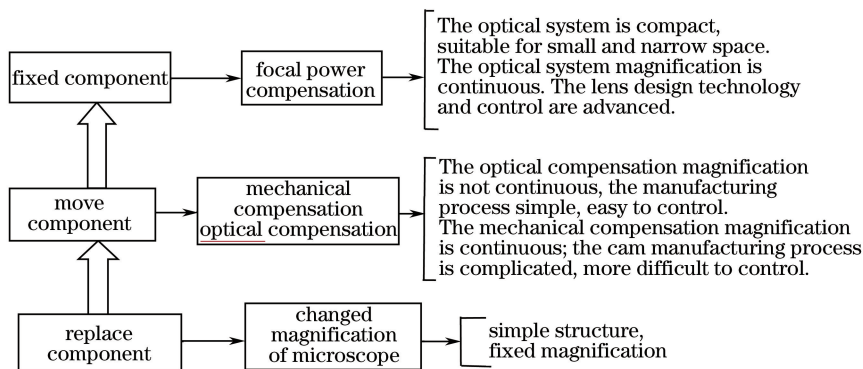


图 1 变焦原理发展过程

Fig. 1 Development process of zoom principle

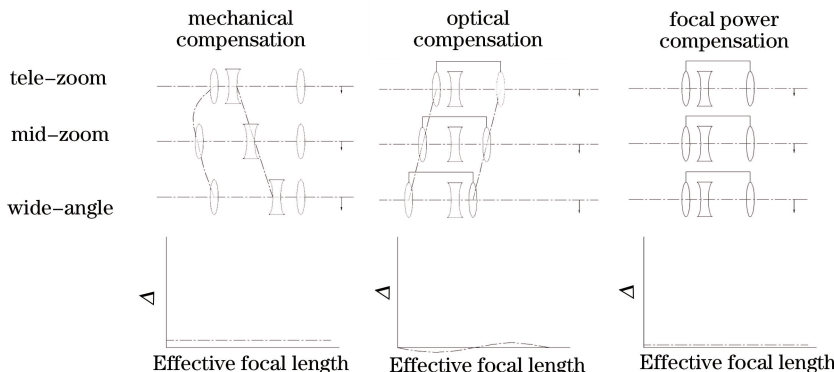


图 2 变焦系统的 3 种像面补偿示意图

Fig. 2 Three kinds of image plane compensation schematic for zoom system

由(1)式可知,变焦原理 I 对间隔 d 微分方程为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial d} = \phi_1 \phi_2 = \text{constant}, \quad (2)$$

(2)式中系统光焦度与间隔 d 的微分方程是恒量,因此变焦原理 I 表明光学系统光焦度是线性变化的,即影响变化因素为相对的一个变量决定。

进一步由(1)式可知,变焦原理 II 对光焦度 ϕ_i 微分方程为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \phi_1} = 1 - d\phi_2, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \phi_2} = 1 - d\phi_1, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \phi_1 \partial \phi_2} = -d, \quad (5)$$

$$d\phi = (1 - d\phi_2)d\phi_1 + (1 - d\phi_1)d\phi_2, \quad (6)$$

从(3)~(6)式可知光学系统光焦度的影响变化因素是由相对的 2 个变量决定,且它们之间的变化由(6)式给出。因此变焦原理 II 的设计自由度更多,能够更好地调节光学系统像差。

从光学原理上分析了变焦实现手段,根据像面补偿原理定义了变焦原理 II 为光焦度补偿变焦。下一节阐述变焦原理 II 所需要的核心器件可调光焦度器件的相关技术。

3 可调光焦度器件的相关技术

实现可调光焦度器件折射有 3 种方法,分别为:1)基于液体折射率变化的可调光焦度器件^[36-39];2)基于填充液体表面曲率变化的可调光焦度器件^[40-41];3)基于介质上电润湿流体接触角变化的可调光焦度器件^[42-47]。这些方法比较成熟、产业化的是基于介质上电润湿流体接触角变化的液体透镜。可调光焦度反射器件实现分为:1)变形镜(DM)^[8,10,13],其能够达到波阵面控制和校正光学系统像差,在自适应光学中,变形镜同波前传感器和实时控制系统结合,应用飞秒脉冲能够发展新的镜面形状,其控制方式有压电式驱动式、热驱动式、静电驱动式、分块平移式;2)液体反射镜^[11-12],利用液体表面镀膜技术的反射镜或利用水银去实现。

针对可调光焦度器件相关的技术分别进行述评,内容涉及其设计的产生和发展、方法及应用,现阐述如下。

Kuiper 等^[15]在 2004 年应用电润湿效应控制不可混合的液体制造了可调焦透镜。电润湿效应是一种物理化学现象,它通过改变液体-固体界面的外加电压来控制液体在固体面上的润湿特性。将 2 种互不相溶的液体注入到 1 个包含 2 个透明玻璃基板的腔体中。2 种液体中一种为导电液体,另一种为绝缘液体。同时在腔体的侧壁上需包含 2 个金属电极,并将金属电极及腔体侧壁涂覆疏水绝缘层,另一金属电极完全浸没于电活性介质中。当改变两电极间的外加电压时,可以有效地改变导电液体与介电层之间的界面张力,导致 2 种互不相溶的液体间接触角 D_1 发生变化。接触角 D_2 决定了 2 种液体的界面形状,通过控制接触角 L 的改变,可以控制液体透镜焦距的改变。这种类型的液体透镜,光焦度的大小取决于 2 种液体的接触角外加电压;同时绝缘层的厚度与介电常量也将影响对光焦度的控制,绝缘层厚度越大,介电常量越小,改变透镜光焦度所需的电压就越低,其原理示意图如图 3 所示^[15]。图 4 是使用可调光焦度器件使用在手机变焦光学系统的实验结果^[15]。

Carlos 等^[19]基于电湿效应论证了均匀改变光焦度可调光焦度器件,在给定的物距变化范围得到所预期可以获得的任何平面图像。通过使用改变液体透镜,能够有效改变液体透镜焦距。在 100 Hz 驱动反应时间上,一个毫米级的液体透镜能够产生高保真度的成像被论证了。从理论上预见具有重大意义的快速反应可调光焦度器件是可实现的。

法国 Varioptic 公司生产了一种可调光焦度器件,称为液体透镜,在 2005 年已经大量生产,并且已经应用在 Samsung 公司。其液体透镜的产品宣传中提供如图 5、图 6 所示的信息。图 6 中聚焦在光学系统前 5 cm 处。

瑞士 Optotune 公司已经形成了专利技术,其能够制造一系列模仿人眼的可调光学器件。这个可调焦功能提供了额外的自由度允许简化已经存在的光学系统。其连续可变调焦器件在相机和任何不适合移动的光学系统中,提供了光学变焦和自动对焦模式。其光学参数如表 1 所示。

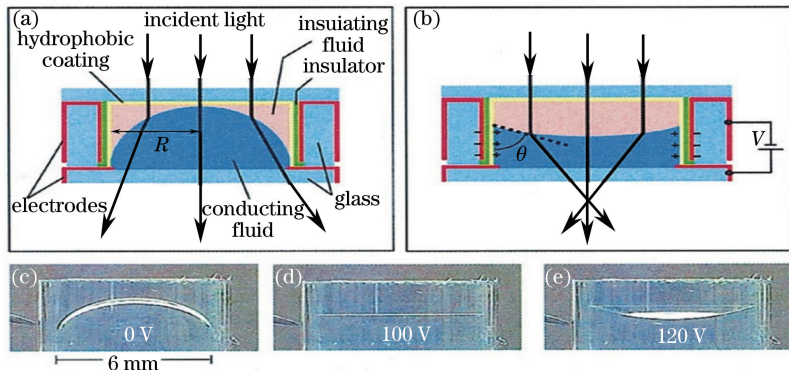


图 3 电润湿效应可调焦透镜原理示意图。(a)可调光焦度器件的截面图;(b)施加电压的结果;
(c)~(e)直径 6 mm 透镜在 0, 100, 120 V 的电压截取的视频帧

Fig. 3 Principle schematic of electrowetting variable focal power lens. (a) A schematic cross section of variable focal power lens; (b) result after applying voltage; (c)-(e) video frames of a 6 mm diameter lens taken at voltages of 0, 100, 120 V



图 4 实验结果。(a)固定焦距透镜;(b)液体透镜聚焦在 50 cm 处;(c)液体透镜聚焦在 2 cm 处

Fig. 4 Experimental results. (a) Fixed-focus lens; (b) liquid lens focused at 50 cm; (c) liquid lens focused at 2 cm

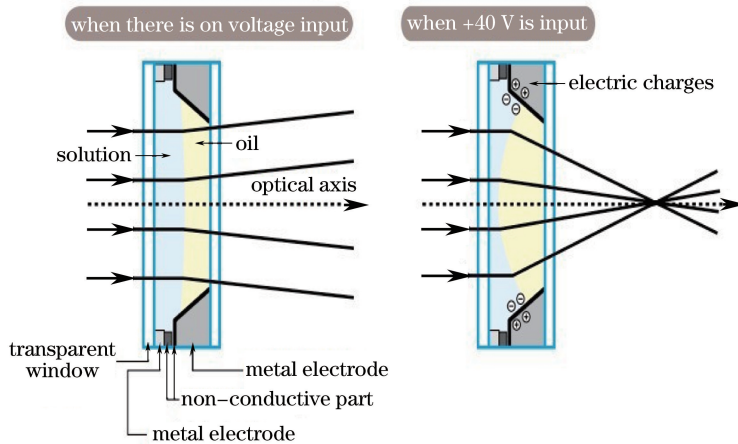


图 5 基本结构

Fig. 5 Basic structure

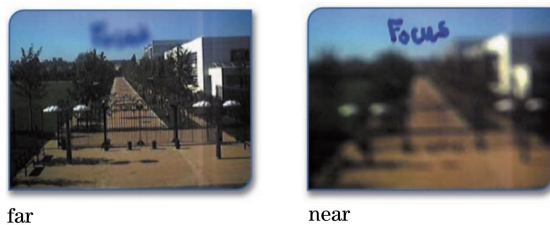


图 6 可调光焦度器件变焦的成像效果图

Fig. 6 Zoom imaging of variable focal power lens

表 1 光学参数
Table 1 Optical parameters

Item	Value /mm				
Size($\phi \times H$)	18×8.5	30×9.7	35×8	50×19	106×50
Range of focal length	(-500, +50)	(+15, +100)	(-40, +40)	(+37, ∞)	(+72, ∞)
Index of refraction	1.300	1.3/1.599	1.3 /1.599	1.3/1.382	1.3/1.382

图 7 是 Optotune 公司 ML-20-35 工作原理,其形状的改变从凹到平,再到凸。Optotune 公司的可调光焦度器件已经应用在生物、工业、医学和日常消费领域中,因此随着科学技术的进一步提高,相信在不远的将来会出现能更好地满足设计所需要的器件。

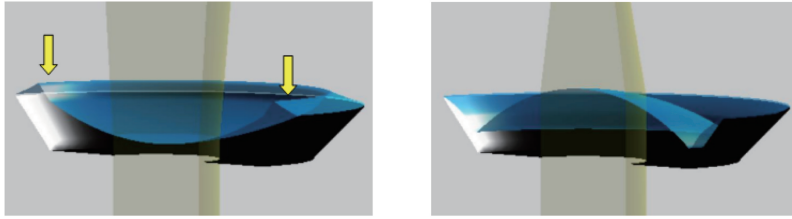


图 7 ML-20-35 工作原理

Fig. 7 Working principle of ML-20-35

Duncan G R^[48] 在 Nature Photonics 杂志上报道了依靠改变透镜形状的液体透镜能够自动调整焦点的光学器件,其可能应用在移动手机的摄像中,它的特点是小巧和灵敏。

图 8 所示为 Philips 展出所谓的液体镜片^[15,49-55],图 9 是电场来控制液珠成型变焦示意图,以电场控制液珠焦距的结构。图 10 是 Philips 展示的透镜原理。模仿人眼的水晶体,利用改变形状来调整焦距,发展出所谓的流体聚焦技术,其目标是能应用于照相机或数码相机等小型光学产品上。Philips 展出所谓的液体镜片直径和厚度均为 5.5 mm,可对范围在 5 cm 至无限远的物体做快速聚焦,聚焦所需时间不超过 10 ms。取像模组搭配了视频图形阵列(VGA)级别的互补金属氧化物半导体(CMOS)影像感测器。2 个液体镜片还可以进一步组合成变焦系统。自动对焦系统不需要机械式地移动镜片,所以成本比传统的镜片低,并且大幅度提升镜片寿命。



图 8 Philips 展示的透镜^[55]

Fig. 8 Lens shown by Philips

自适应光学技术的镜面可以改变细部的反射,将变形修正回来,因此自适应光学的可调镜面也要不断动作。图 11 中反射镜直径 1120 mm,厚度 2 mm,可见其非常薄。反射镜如此薄以至于能够像胶片一样易于弯曲,当变形镜安装在望远镜中通过精密的装置持续地矫正地球大气层的模糊效应和产生良好的像质,其可以应用在望远镜变焦设计中。

Borra 等^[57] 在 Nature 上报道了成功利用银电镀在等离子液体上,其表面非常光滑,镀膜非常稳定,覆盖在等离子液体上的镀膜没有蒸发在真空中,在 175 K 中仍保持液态,沉积在金属胶片上的等离子液体是作为太空望远镜的可靠器件,能够利用驱动控制其面形。

中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所主导建设的国家大科学工程郭守敬望远镜(LAMOST)利用主动光学变形镜技术产生了常规不能实现的反射式施密特望远光学系统,反射施密特改正

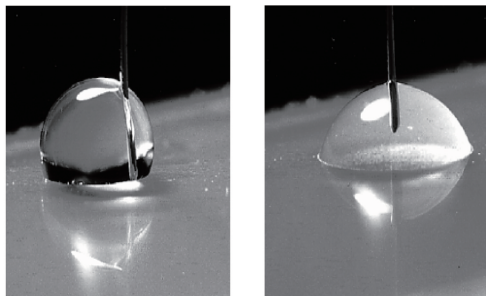
图9 变焦示意图^[55]

Fig. 9 Schematic of zoom

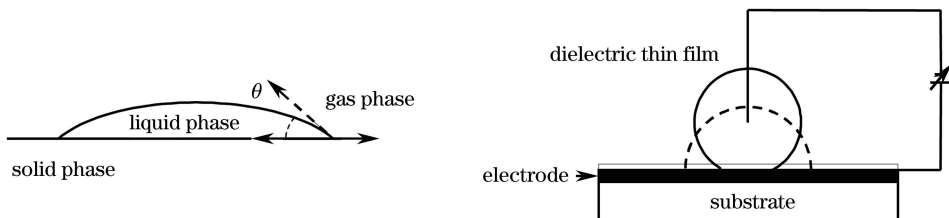
图10 Philips 展示的透镜原理^[15]

Fig. 10 Lens principle shown by Philips

图11 南欧洲天文台反射镜大型望远镜自适应光学设施^[56]

Fig. 11 Southern European observatory's large telescope adaptive optics mirror facilities

板应用既有控制拼接镜面的共面,又有控制单块薄镜面的非球面面形的主动光学新技术。它将2种主动光学技术集于一身,不仅用于校正望远镜的安装误差、加工误差和重力变形,更主要的是用于校正球面主镜的球差,达到施密特望远镜具有的大视场。中国科学院光电技术研究所周虹等^[58]研究的双压电片变形反射镜作为波前校正器具有结构简单、变形量大、成本低及制造周期短的优点,能代替传统分立式变形镜减少自适应光学系统的成本;后来周虹等^[59]又设计和制造了针对自适应光学视网膜成像系统的双压电片变形反射镜,并进行了一系列的性能分析,在实际系统中获得了人眼视网膜血管和视细胞层的成像结果。

可调光焦度器件是围绕透镜的形状改变作为出发点的光学器件,其核心是透镜的型腔、型腔中填入光学流体和弹性膜。实时精准控制弹性膜的形状是可调光焦度器件的关键。科学家在这方面已经获得了不错的预期和结果。可见,可调光焦度器件的制作和设计在理论和技术上都是可行的,因此可调光焦度器件应用于下一代变焦系统的设计理论研究是十分重要和有意义的。

4 光焦度补偿变焦系统理论的研究进展

Wang 等^[60]针对可调光焦度器件构成的变焦系统首先假定后焦距为常数,得到系统总的光焦度的公式 $\phi = \frac{1 - d\phi_1}{bfl}$, 针对赛德尔像差可以独立地校正像差和不能独立校正像差组成的变焦系统分别讨论 P 和 W 的取值范围,表明2个可调光焦度器件足以完成像差校正。

Zhang^[61] 基于 2 个可调光焦度器件制作了变焦系统, 利用高斯公式在一阶几何光学进行了理论分析, 并对其应用在摄远物镜系统, 使其可调视场达到 $6^\circ \sim 74^\circ$ 。

Miks 等^[62-63] 基于可调光焦度器件应用一阶近轴高斯光学和三阶像差理论分析了 2 个器件和 3 个器件的变焦系统特点, 计算了光焦度的分配及调整关系。同时对其进行了一阶色差分析, 计算机模拟了可调光焦度器件变焦系统的实例, 结果表明可以达到光学系统变焦要求, 其分析原理图如图 12、图 13 所示。

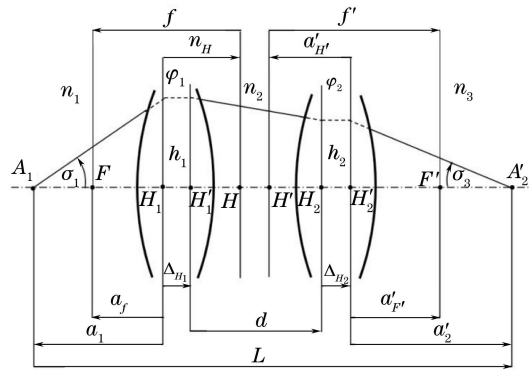


图 12 2 元件光学系统图^[62]

Fig. 12 Two elements optical system

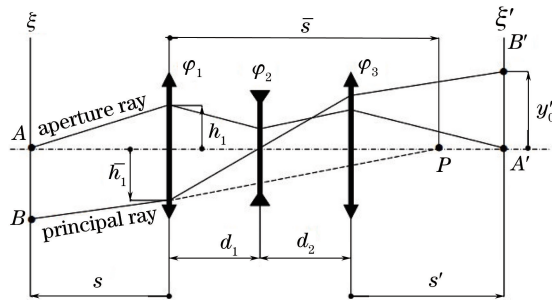


图 13 3 元件光学系统图^[63]

Fig. 13 Three elements optical system

后来 Miks 等^[64] 以赛德尔像差理论为基础, 假定可调光焦度器件胶合的 2 面是平面, 引入的 3 个参数是基于可调光焦度器件的折射率, 这些参数与器件的光焦度、位置、形状无关, 然后用这 3 个参数作为系统变量表示出此种器件的像差, 如图 14 所示。

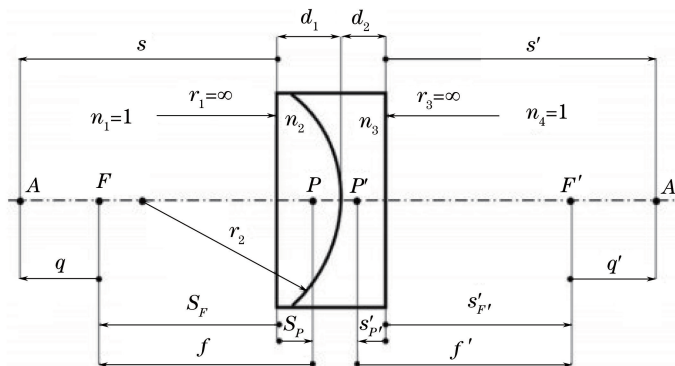


图 14 可调光焦度器件的分析对象^[64]

Fig. 14 Analysis object of variable focal power device

上海理工大学庄松林团队的彭润玲等^[65] 在国家自然科学基金项目“无机械运动变焦光学系统原理及设计方法研究, 2008-2010”支持下, 针对可变焦透镜器件的电湿效应设计原理进行了理论计算和实验制作。基于电湿效应从 2 个不相容液体间的界面形状来讨论; 分析了当 2 个不同液体密度差为 0 的时候界面方程的

微分形式是球面的;基于球面界面形状和能量最小化方法,计算和解释杨氏方程;最后利用其原理设计了4种不同结构的可调光焦度器件制作了1个变焦系统。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所张鹰^[66]以液体透镜的变焦系统设计方法为研究对象,就变焦系统设计过程可能遇到的问题展开研究。针对基于焦距可变元件的变焦系统高斯光学理论,推导出像面稳定的条件。在此基础上,推导出最大变倍比计算方法,可根据液体透镜保证焦距允许范围内合理选择结构参数。利用现代几何光学方法对单片液体透镜的像差特性进行了分析,并从3级像差理论入手,分析2种像差平衡方式的适用情况,为选择更有优化“潜力”的系统初始结构提供理论参考。

中国科学院西安光学精密机械研究所的张薇^[67]以液体透镜技术及其在微型变焦距系统中的应用为中心展开研究。考察了透镜口径、可变形表面曲率及填充液体密度与形变的关系;分析了2种液体密度失配对电润湿型液体透镜光焦度的影响;提出了透镜光焦度随温度变化的补偿方法。以几何光学及像差理论为基础,对2种液体透镜进行了成像模型像差理论分析,讨论了2种液体透镜在焦距变化时的像差变化情况。

北京理工大学 Hao 等^[68]围绕可调光焦度器件的变焦系统的理论研究,2013年获得了国家自然科学基金“基于可变形镜的变焦、调焦、稳像一体化变焦距光学系统研究”的资助。在其资助下展开了应用高斯括号法研究近轴条件下由2个可调光焦度器件构成的4组元变焦系统的一阶几何光学分析,针对变焦系统的变焦过程的稳定性的可调光焦度器件的光焦度进行了微分方程的求解,得到了随放大率之间的控制方程,最后提供了变倍比为2:1和5:1的变焦光学系统,提出了基于可调光焦度器件在变焦系统可以应用在微小的光学系统中。

国内外学者已经在基于可调光焦度器件的变焦系统的研究中取得了一定的成果^[69-74],纵观来看当前研究的主流思想是1)针对基本的高斯光学的几何代数计算展开工作,其方法求解冗长笨拙,不便于计算机来进行光路计算;2)针对光焦度补偿变焦系统在后焦距不变下进行一阶的高斯几何建立其光焦度分配公式;3)基于三阶赛德尔像差下针对1种和多种像差消除的可调光焦度器件的曲率控制的理论分析。总而言之,是围绕变焦系统的像面位置不变和成像质量符合要求进行理论分析,即发展了可调光焦度器件变焦系统理论分析的基本思路和对新的变焦设计理念进行了有益的探索。他们是从变焦系统最简单的变化量即透镜的光焦度来考虑的,没有进一步地深化变焦系统与可调光焦度器件的相关参数。

光焦度补偿变焦系统设计和未来发展趋势是形成高斯光学下薄透镜的一阶和三阶初始设计光学理论,进一步使用厚透镜模型和扩展到视场角较大的场合来讨论可调光焦度器件的变焦系统的详细设计和分析。通过对光焦度补偿变焦系统的一阶、三阶几何光学理论的探索和基于评价函数进行像质自动优化与校正。轴上物点的像的照度随变焦系统一直在变化,由系统的入射光瞳的大小和位置确定;轴外物点的像的照度依赖于另一个光阑——视场光阑,因此需要完成系统的视窗光阑、入射窗、出射窗的问题。最后依据光焦度补偿研究理论制造出实用的变焦系统,为在不适合透镜移动或为了减少设备的机械部分中实现变焦提供了可行的光学设计系统。

5 结 论

光学变焦系统的发展经历了3个阶段:第1阶段的思想是通过更换物镜使显微镜倍率改变从而达到变焦;第2阶段的思想是通过整体移动部分光学组件的光学补偿变焦;第3阶段的思想是透镜的移动方程是呈曲线的机械补偿变焦。随着科技的不断进步,产生了可调光焦度器件,当前阶段是无机械移动下达到光学变焦的光焦度补偿变焦。基于可调光焦度器件变焦系统的研究,是在不适合光学器件移动的情况下达到系统变焦的设计理论问题。下一代变焦系统将是应用可调光焦度器件设计,利用可调光焦度器件设计变焦系统是代替需要机械运动装置进行变焦的新思路,其将对变焦系统发展产生革命性的突破,为便携式PAD、可穿戴式设备、手机、内窥镜及军事作战头盔式瞄准系统、大型反射式望远镜变焦系统等更新换代提供有力的设计思想和研究方法。

参 考 文 献

- 1 Jabbour J M, Malik B H, Olsovsky C, *et al.* Optical axial scanning in confocal microscopy using an electrically tunable lens[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(2): 645-652.

- 2 Ozbay B N, Losacco J T, Cormack R, *et al.* Miniaturized fiber-coupled confocal fluorescence microscope with an electrowetting variable focus lens using no moving parts[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2553-2556.
- 3 Nakai Y, Ozeki M, Hiraiwa T, *et al.* High-speed microscopy with an electrically tunable lens to image the dynamics of *in vivo* molecular complexes[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(1): 013707.
- 4 Zou Y, Zhang W, Chau F S, *et al.* Miniature adjustable-focus endoscope with a solid electrically tunable lens[J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20582-20592.
- 5 Fahrbach F O, Voigt F F, Schmid B, *et al.* Rapid 3D light-sheet microscopy with a tunable lens[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21010-21026.
- 6 Chen J L, Pfäffli O A, Voigt F F, *et al.* Online correction of licking-induced brain motion during two-photon imaging with a tunable lens[J]. *The Journal of Physiology*, 2013, 591(19): 4689-4698.
- 7 Smeesters L, Belay G Y, Ottevaere H, *et al.* Two-channel multiresolution refocusing imaging system using a tunable liquid lens[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(18): 4002-4010.
- 8 Bayanna A R, Louis R E, Chatterjee S, *et al.* Membrane-based deformable mirror: intrinsic aberrations and alignment issues[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(7): 1727-1736.
- 9 Brousseau D, Borra E F, Thibault S. Wavefront correction with a 37-actuator ferrofluid deformable mirror[J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 18190-18199.
- 10 Liu W, Dong L, Yang P, *et al.* Zonal decoupling algorithm for dual deformable mirror adaptive optics system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(2): 020101.
- 11 Klimas P, Rowlands N, Hickson P, *et al.* Lunar liquid mirror telescope: Structural concepts[C]. *SPIE*, 2010, 7732: 77322U.
- 12 Detsis E, Doule O, Ebrahimi A. Location selection and layout for LB10, a lunar base at the lunar north pole with a liquid mirror observatory[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 85: 61-72.
- 13 Bitenc U, Bharmal N A, Morris T J, *et al.* Assessing the stability of an ALPAO deformable mirror for feed-forward operation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12438-12451.
- 14 Madec P Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics[C]. *Arlington: Adaptive Optics: Analysis, Methods & Systems*, 2015: AOTh2C.1.
- 15 Kuiper S, Hendriks B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Applied physics Letters*, 2004, 85(7): 1128.
- 16 Binh K N, Matsumoto K, Shimoyama I. Polymer thin film deposited on liquid for varifocal encapsulated liquid lenses[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 124101.
- 17 Ren H, Wu S T. Variable-focus liquid lens[J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 5931-5936.
- 18 Oh S H, Rhee K, Chung S K. Electromagnetically driven liquid lens[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 240: 153-159.
- 19 López C A, Hirs A H. Fast focusing using a pinned-contact oscillating liquid lens[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(10): 610-613.
- 20 Hornbeck L J. Multi-level deformable mirror device: US5600383 A[P]. 1992-01-28.
- 21 Mishra K, Murade C, Carreel B, *et al.* Optofluidic lens with tunable focal length and asphericity[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6378.
- 22 Fernández E J, Artal P. Membrane deformable mirror for adaptive optics: Performance limits in visual optics[J]. *Optics Express*, 2003, 11(9): 1056-1069.
- 23 Squires T M, Quake S R. Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77(3): 977-1026.
- 24 Wei K, Domicone N W, Zhao Y. Electroactive liquid lens driven by an annular membrane[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1318-1321.
- 25 Yuan Xucang. *Optical design*[M]. Beijing: Science Press, 1983.
袁旭沧. *光学设计*[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- 26 Cheng Hongtao. Design of three-mirror non-coaxial zoom objective based on deformable mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1222002.

- 程洪涛. 基于变形镜的三反射离轴变焦物镜设计[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1222002.
- 27 Tao C K. Design of zoom system by the varifocal differential equation[J]. Applied Optics, 1992, 31(13): 2265-2273.
- 28 Zhai Tingting, Zhu Jianqiang. New method for first-order structure design of continuous zoom lens system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0722002.
- 翟婷婷, 朱健强. 连续变焦系统的一阶结构设计方法研究[J]. 光学学报, 2015(7): 0722002.
- 29 Huang Hao, Li Xiangning, Song Qiang. New method for all movable zoom lens first order design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s122004.
- 黄浩, 李湘宁, 宋强. 一种全动变焦系统的高斯参数计算方法探究[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s122004.
- 30 Yamaji K. Design of zoom lenses[J]. Progress in Optics, 1967, 6: 105-170.
- 31 Clark A D. Zoom lenses[M]. Bristol: A Hilger, 1973.
- 32 Yan Jing, Liu Ying, Sun Quan, *et al.* Design of 10×MWIR continuous zoom optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 012201.
- 闫晶, 刘英, 孙权, 等. 10倍中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 012201.
- 33 Matter G H, Luszcz E T. A family of optically compensated zoom lenses[J]. Applied Optics, 1970, 9(4): 844-848.
- 34 Mikš A, Novák J, Novák P. Method of zoom lens design[J]. Applied Optics, 2008, 47(32): 6088-6098.
- 35 Jamieson T H. Thin-lens theory of zoom systems[J]. Optica Acta, 1970, 17(8): 565-584.
- 36 Henry C H, Logan R A, Bertness K A. Spectral dependence of the change in refractive index due to carrier injection in GaAs lasers[J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(7): 4457-4461.
- 37 Miks A, Novak J, Novak P. Generalized refractive tunable-focus lens and its imaging characteristics[J]. Optics Express, 2010, 18(9): 9034-9047.
- 38 Lancry M, Poumellec B, Chahid-Erraji A, *et al.* Dependence of the femtosecond laser refractive index change thresholds on the chemical composition of doped-silica glasses[J]. Optical Materials Express, 2011, 1(4): 711-723.
- 39 Bulutay C, Turgut C M, Zakhleniuk N A. Carrier-induced refractive index change and optical absorption in wurtzite InN and GaN: Full-band approach[J]. Physical Review B, 2010, 81(15): 155206.
- 40 Zhang Wei, Zhang Hongjian, Tian Weijian. Design of mechanically-actuated variable focus liquid lens[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(supp): 59-63.
- 张薇, 张宏建, 田维坚. 一种机械驱动式液体可变焦透镜的设计[J]. 应用光学, 2008, 29(supp): 59-63.
- 41 Chowdhury F A, Chau K J. Variable focus microscopy using a suspended water droplet[J]. Journal of Optics, 2012, 14(5): 055501.
- 42 Peng R, Chen J, Zhuang S. Electrowetting-actuated zoom lens with spherical-interface liquid lenses[J]. JOSA A, 2008, 25(11): 2644-2650.
- 43 Hendriks B H W, Kuiper S, Marco A J van As, *et al.* Electrowetting-based variable-focus lens for miniature systems[J]. Optical Review, 2005, 12(3): 255-259.
- 44 Ren H, Fox D, Anderson P A, *et al.* Tunable-focus liquid lens controlled using a servo motor[J]. Optics Express, 2006, 14(18): 8031-8036.
- 45 Mugele F, Baret J C. Electrowetting: From basics to applications[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2005, 17(28): R705-R774.
- 46 Washizu M. Electrostatic actuation of liquid droplets for micro-reactor applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(4): 732-737.
- 47 Krupenkin T N, Taylor J A, Schneider T M, *et al.* From rolling ball to complete wetting: The dynamic tuning of liquids on nanostructured surfaces[J]. Langmuir, 2004, 20: 3824-3827.
- 48 Duncan G R. Liquid lenses make a splash[J]. Nature Photonics, 2006: 2-4.
- 49 Kuiper S, Hendriks B H, Huijbregts L J, *et al.* Variable-focus liquid lens for portable applications[C]. SPIE, 2004, 5523: 100-109.
- 50 Hendriks B, Kuiper S. Through a lens sharply[J]. IEEE Spectrum, 2004, 41(12): 32-36.
- 51 Kuiper S, Hendriks B. Wet and wild[J]. Optoelectronics & Communications, 2005, 5(1): 20-23.
- 52 Kuiper S, Hendriks B, Benno Hendriks. Voltage reduction in electrowetting-ondielectric[C]. Edmonton: Proceedings of ESA Annual Meeting, 2005: 28-36.

- 53 S Kuiper, B H W Hendriks, R A Hayes, *et al.* Electrowetting-based optics[C]. SPIE, 2005, 5908: 59080R.
- 54 Krogmann F, Mönch W, Zappe H. Electrowetting for tunable microoptics[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17(6): 1501-1512.
- 55 Hendriks B H W, Kuiper S, van As M A J, *et al.* Variable liquid lenses for electronic products[C]. SPIE, 2006, 6034: 603402.
- 56 Super-thin mirror for sharper star images [EB/OL]. [2016-5-5]. <https://www.eso.org/public/announcements/ann12015/>.
- 57 Borra E F, Seddiki O, Angel R, *et al.* Deposition of metal films on an ionic liquid as a basis for a lunar telescope[J]. Nature, 2007, 447(7147): 979-981.
- 58 Zhou Hong, Ning Yu, Guan Chunlin, *et al.* Design and fabrication of prototype for bimorph deformable mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1437-1442.
周虹, 宁禹, 官春林, 等. 双压电片变形反射镜样镜的设计与研制[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1437-1442.
- 59 Zhou Hong, Guan Chunlin, Dai Yun. Bimorph deformable mirrors for adaptive optics of human retinal imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0211001.
周虹, 官春林, 戴云. 用于自适应光学视网膜成像系统的双压电片变形反射镜[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0211001.
- 60 Wang Z, Xu Y, Zhao Y. Aberration analyses for liquid zooming lenses without moving parts [J]. Optics Communications, 2007, 275(1): 22-26.
- 61 Zhang D Y, Justis N, Lo Y H. Fluidic adaptive zoom lens with high zoom ratio and widely tunable field of view[J]. Optics Communications, 2005, 249(1-3): 175-182.
- 62 Miks A, Novak J. Analysis of two-element zoom systems based on variable power lenses[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 6797-6810.
- 63 Miks A, Novak J. Analysis of three-element zoom lens based on refractive variable-focus lenses[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 23989-23996.
- 64 Miks A, Novak J. Third-order aberrations of the thin refractive tunable-focus lens[J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 1031-1033.
- 65 彭润玲. 电湿效应无机运动变焦光学系统的研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2008.
- 66 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.
- 67 Zhang Wei. Study on liquid lens technology and its applications in micro zoom optical system[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2009.
张薇. 液体透镜技术及其在微型变焦距系统中的应用[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2009.
- 68 Hao Q, Cheng X, Du K. Four-group stabilized zoom lens design of two focal-length-variable elements [J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7758-7767.
- 69 Reichelt S, Zappe H. Design of spherically corrected, achromatic variable-focus liquid lenses[J]. Optics Express, 2007, 15(21): 14146-14154.
- 70 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.
- 71 Jungwirth M E L, Wick D V, Dereniak E L. Theory and design of a MEMS-enabled diffraction limited adaptive optical zoom system[C]. SPIE, 2012, 8373: 83730T.
- 72 Miks A, Novak J, Novak P. Chromatic aberrations of thin refractive variable-focus lens[J]. Optics Communications, 2012, 285(10-11): 2506-2509.
- 73 Miks A, Novak J. Three-component double conjugate zoom lens system from tunable focus lenses[J]. Applied Optics, 2013, 52(4): 862-865.
- 74 Hao Q, Cheng X, Du K. Four-group stabilized zoom lens design of two focal-length-variable elements [J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7758-7767.