

# Auto-Focus Technique of Microimaging System Based on Liquid Lens

Zihui Zhang, Shurong Wang, Yu Huang

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin  
Email: zhangzihui123@126.com

Received: Sep. 9<sup>th</sup>, 2018; accepted: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2018; published: Sep. 29<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

A new auto focusing micro imaging system was designed. The liquid lens was used to adjust the focal length of the system's tube lens to compensate the defocus of the objective distance without moving the microscope or the image plane. This paper introduced the focusing method of the micro fluid lens. The relationship between the objective length and the focal length of the tube lens was deduced. And the auto focusing micro imaging system was designed by ZEMAX optimization. The numerical aperture of the 10× objective lens is equal to 0.25. And the tube lens includes one liquid lens and four lenses. The spatial resolution of the optical system is less than 1.22  $\mu\text{m}$  within the scope of the object distance  $\pm 0.5$  mm. The system's modulation transfer function (MTF) of all fields at Nyquist frequency (72 lp/mm) is larger than 0.2. This optical system not only could compensate the distance of the object, but also has the advantages of compact structure, no mechanical moving parts, fast reaction speed etc.

## Keywords

Optical Design, Liquid Lens, Micro Zoom System, No Moving Elements, Microscopic Imaging

---

# 基于液体透镜自动聚焦显微成像系统设计

张子辉, 王淑荣, 黄煜

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春  
Email: zhangzihui123@126.com

收稿日期: 2018年9月9日; 录用日期: 2018年9月22日; 发布日期: 2018年9月29日

---

## 摘要

设计一种新型自动聚焦显微成像系统, 该设计在不移动显微镜或像面情况下, 利用液体透镜调节显微成

像系统筒镜焦距,对物距离焦进行补偿。本文介绍了微流体透镜调焦方法,理论推导出物距与筒镜焦距的关系曲线。通过ZEMAX优化,设计出一套自动聚焦显微成像系统。该系统以数值孔径为0.25的10×无穷远平常消色差显微为物镜,以液体透镜和4片球面透镜为筒镜,空间分辨率达到1.22微米,物距可离焦范围为±0.5 mm。在不同物距离焦情况下,系统光学传递函数在72 lp/mm处均大于0.2。该设计具有结构紧凑、无机械运动部件、反应速度快等特点,大幅降低了光机系统复杂性。

## 关键词

光学设计, 液体透镜, 微调焦系统, 无运动部件, 显微成像

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

光学显微镜作为一种应用广泛的仪器,其应用已经不仅仅局限于最初的生物显微镜,已经延伸到了各个行业,包括电子工业、半导体工业、IT产业、以及植物学、生物学等领域。随着大面阵探测器出现,成像显微镜也成为工业检测的重要手段。而在工业流水线中工作的成像显微镜由于观测条件存在振动,会引起显微镜离焦,需要对显微镜进行自动聚焦。传统的调节方式采用电机驱动光学调焦机构或移动显微镜改变物距进行调焦,不但聚焦效率低下,而且极易引入振动干扰造成成像误差[1]。需要发展新型调焦方法进行改进。基于液体透镜的显微成像系统可以通过改变液体透镜的电流实现光焦度变化,实现物距补偿,具有反应迅速、能耗低、操作方便、无运动部件等特点,是未来显微镜发展的一个重要方向,具有广泛的应用范围。

## 2. 液体透镜

传统透镜由玻璃或光学塑料制成,一旦生产完成,其光学参数固定。而液体构建是利用液体表面张力,通过控制液体工作层的外部形状或改变折射率分布来改变透镜焦距。与传统的对焦方式相比,液体透镜具有体积小、反演速度快、耗电量小、精确度高等优点。鉴于此,发展基于液体透镜调焦的自动式显微镜聚焦技术,可以提高成像系统的聚焦性能[2] [3]。

液体透镜主要分为基于电润湿的双液体透镜、微流体透镜和液晶透镜三种[4] [5] [6] [7] [8]。本文以微流体透镜为例,介绍其变焦原理。Optotune公司的EL型微流体透镜结构如图1所示,主要部分为隔膜及其内部的流体,隔膜外圈上有线圈,随着电流变化,线圈给隔膜的压力随之变化,使流体流入或流出隔膜中心,改变中心部位曲率半径,改变焦距。根据产品说明书,微流体透镜光焦度随电流变化曲线如图2所示。该液体透镜具有结构简单,功耗低,调制时间(15 ms)短等优点,适合应用于快速调焦机构。

## 3. 液体透镜工作原理

如图3所示,该系统由显微物镜 $L_1$ 和可变焦筒镜 $L_2$ 两部分组成[9]。图中 $l_1$ 和 $l_1'$ 分别为 $L_1$ 物距和像距; $l_2$ 和 $l_2'$ 分别为 $L_2$ 物距和像距; $L_{12}$ 为 $L_1$ 和 $L_2$ 之间的距离。在实际工业观测过程中,被观测物体摆放距离很难保持理想距离,即 $l_1$ 的值变化,需要筒镜进行调焦对 $l$ 变化进行补偿。其中, $L_1$ 焦距 $f_1'$ 、 $L_{12}$ 和 $l_2'$ 为固定值。

对高斯公式进行求导[10],当物距有微量变化时, $L_1$ 像距变化情况由公式(1)可知:

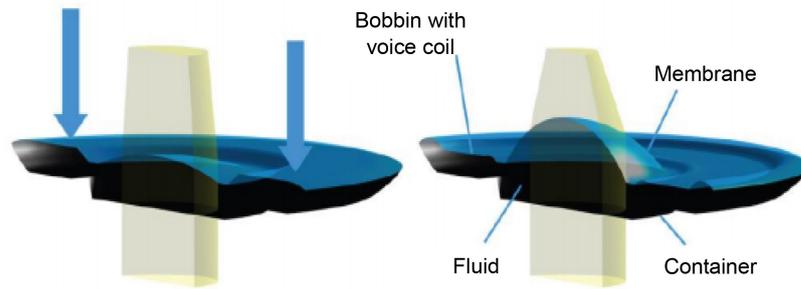


Figure 1. Scheme of the liquid lens

图 1. 液体透镜结构图

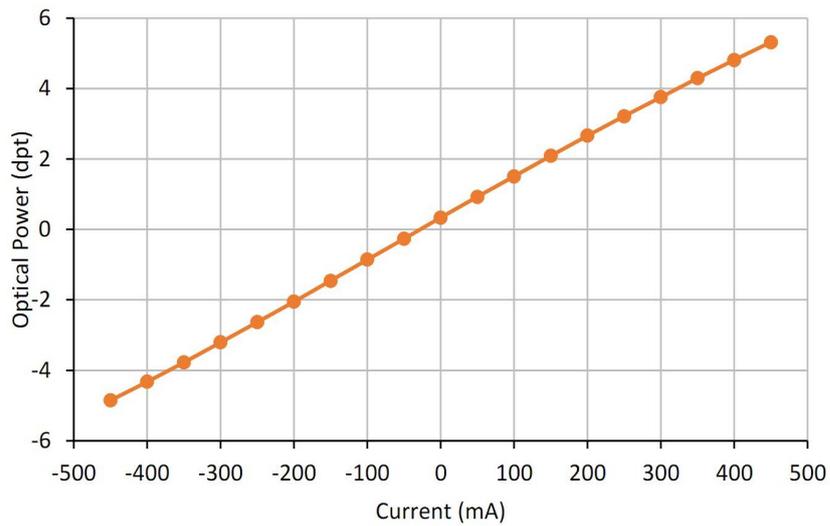


Figure 2. The relationship between optical power and electrical current

图 2. 液体透镜光焦度随电流变化曲线

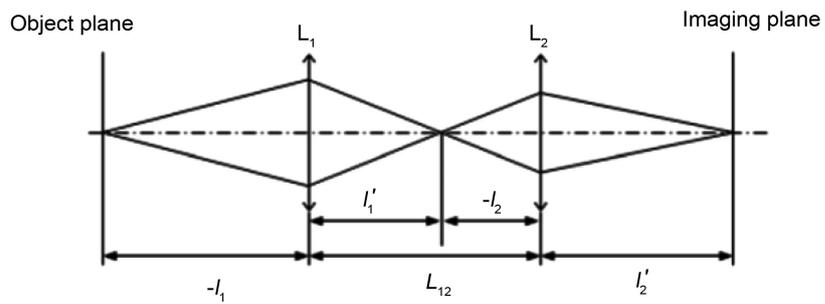


Figure 3. Schematic of two-liquid-lens zoom system

图 3. 双透镜变焦补偿物距示意图

$$dl'_1 = \frac{l_1'^2}{l_1^2} dl_1 = \frac{f_1'^2}{(f_1' + l_1)^2} dl_1 \quad (1)$$

根据几何关系， $L_2$  的物距  $l_2 = l'_1 - L_{12}$ ，对公式两侧求导可得：

$$dl_2 = dl'_1 \quad (2)$$

在实际应用过程中， $l'_2$  为固定值， $f_2'$  为变量，根据高斯公式可知：

$$dl_2 = -\frac{l_2'^2}{(f_2' - l_2')^2} df_2' \quad (3)$$

将公式(1)~(3)联立可得:

$$\frac{f_1'^2}{(f_1' + l_1)^2} dl_1 + \frac{l_2'^2}{(f_2' - l_2')^2} df_2' = 0 \quad (4)$$

对公式(4)两端求积分, 得到  $l_1$  和  $f_2'$  的关系公式。

$$\frac{f_1'^2}{f_1' + l_1} + \frac{l_2'^2}{f_2' - l_2'} = k \quad (5)$$

其中  $k$  为常数, 通过选择不同的常数  $k$ , 可以给出  $l_1$  和  $f_2'$  确切关系。

#### 4. 理论计算

根据应用需要, 显微物镜选择数值孔径  $NA = 0.25$  的 10X 无穷远平场消色差物镜, 即物镜焦距为 20 mm。根据瑞利判据(公式(6)), 当入射光波长为 500 nm 时, 该显微物镜的理论空间分辨率为 1.22  $\mu\text{m}$ 。

$$\sigma = 0.61\lambda/NA \quad (6)$$

如图 4 所示, 成像显微镜由无穷远平常消色差显微物镜和筒镜组成。在理想情况下, 物面位于显微物镜的前焦点处, 出射平行光, 再经筒镜聚焦到像平面上。光学系统的放大倍率等于筒镜焦距与物镜焦距的比值[11]。

当探测器像元尺寸为 7  $\mu\text{m}$ , 为匹配显微物镜的空间分辨率, 光学系统的放大率应为 7  $\mu\text{m}/1.22 \mu\text{m} \approx 5.7$  倍, 光学系统后焦距  $l_2'$  约为 20 mm  $\times$  5.7 = 114 mm。根据公式(5)计算出不同  $k$  值时,  $l_1$  和  $f_2'$  之间的关系曲线, 如图 5 所示。只有  $k = 3$  时,  $l_1 = 20$  mm 对应的  $f_2' = 114.8$  mm, 最接近理想情况下后焦距  $l_2' = 114$  mm 的要求。

#### 5. 光学设计

根据上述计算, 得到显微系统各个主要参数。根据实际需要, 显微物镜在物距变化  $\pm 0.5$  mm 时, 能够通过调节液体透镜进行补偿, 并保持成像质量不变。应用光学设计软件 ZEMAX 进行系统优化设计, 设计流程如图 6 所示[12][13]。

经过优化设计, 设计出基于液体透镜聚焦显微系统, 如图 7 所示。图中物面距第一片透镜的距离和对应的液体透镜前表面曲率半径分别如表 1 所示。通过改变液体透镜前表面曲率实现了不同物距的聚焦。

在不同的聚焦情况下, 光学系统的点列图如图 8 所示, 光学传递函数曲线如图 9 所示。从设计结果

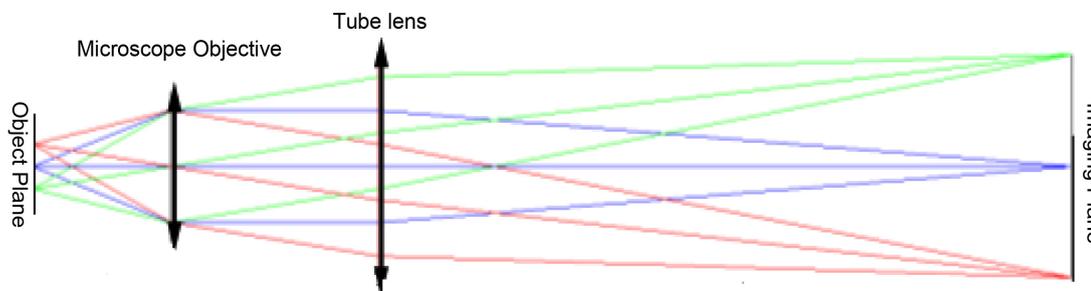
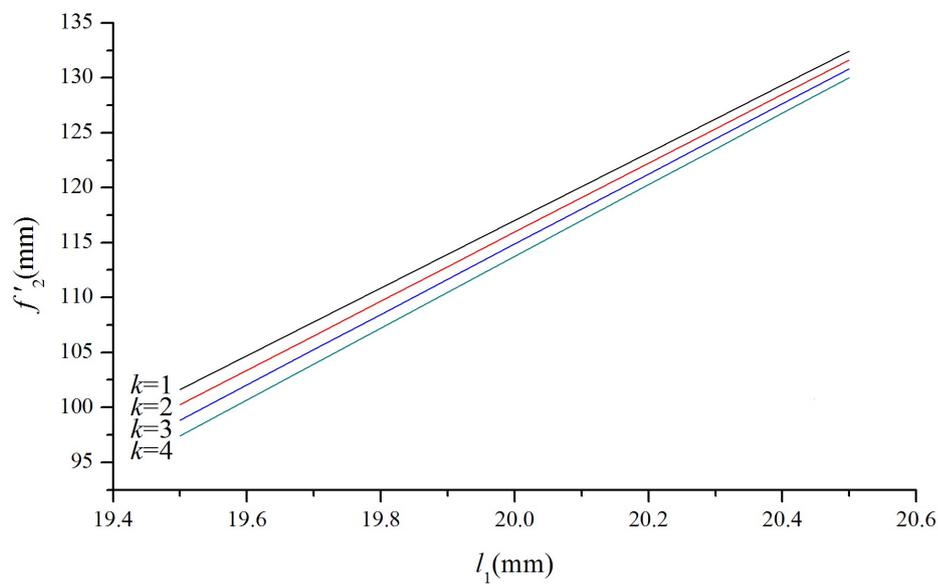


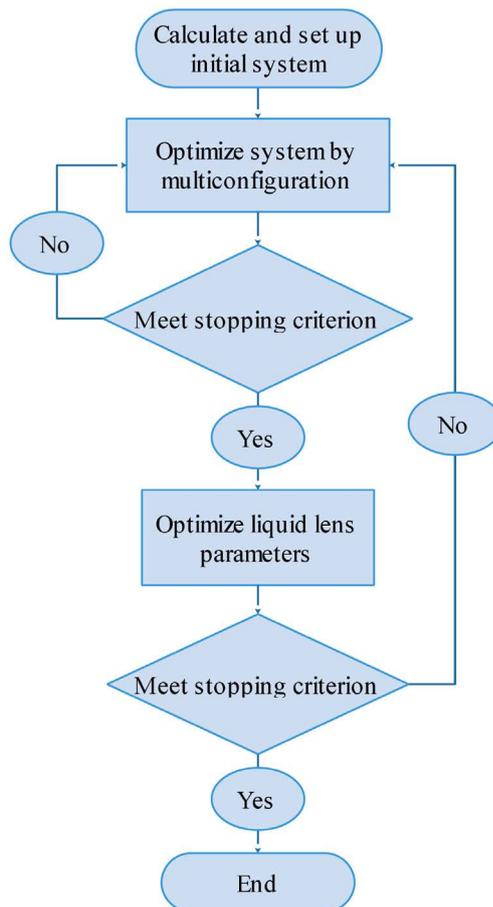
Figure 4. Schematic of micro-imaging system

图 4. 显微成像系统结构图



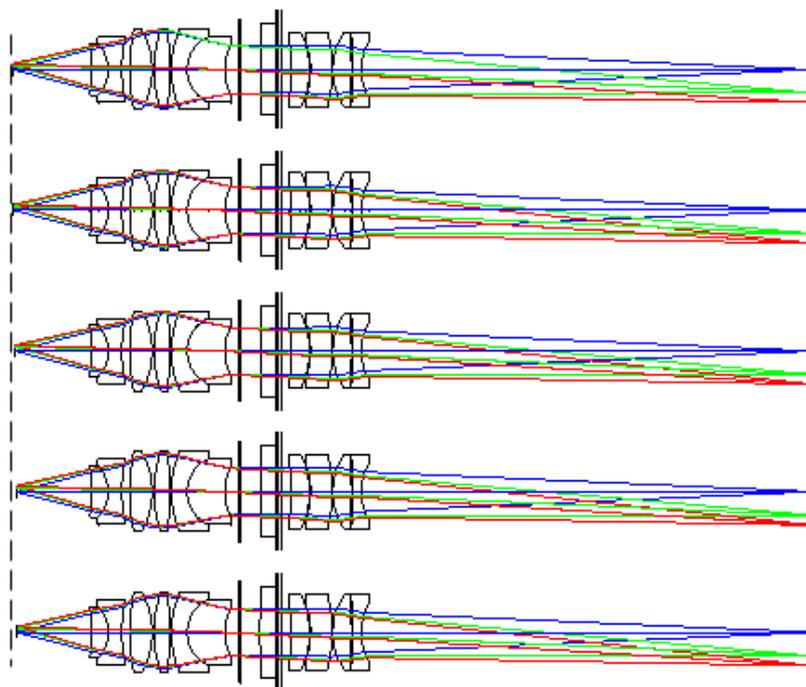
**Figure 5.** The relationship between object distance and the focal length of tube lens at different  $k$  value

**图 5.** 不同  $k$  值物距和筒镜焦距关系曲线

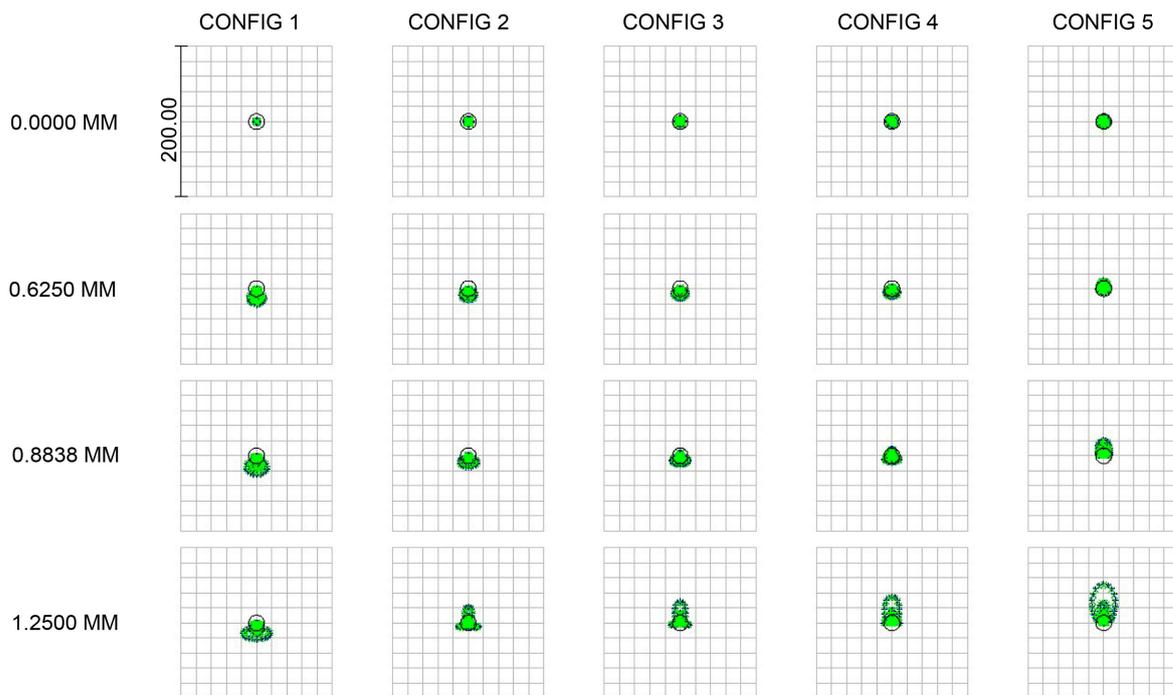


**Figure 6.** The design flow chart

**图 6.** 设计流程图

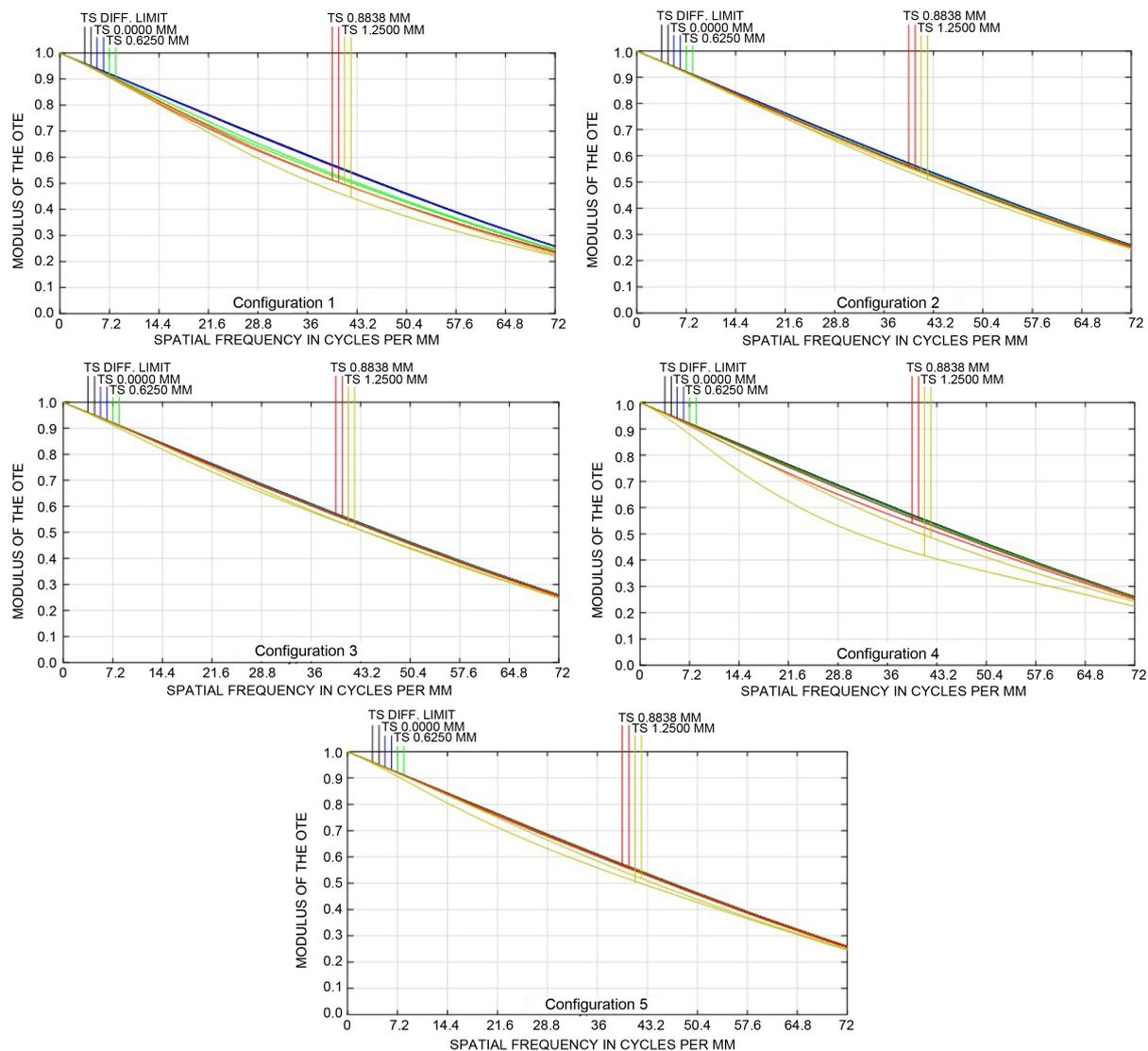


**Figure 7.** The micro-imaging system based on liquid lens  
**图 7.** 基于液体透镜的显微成像系统



**Figure 8.** The spot diagram with multi-configuration  
**图 8.** 多重结构点列图

可以看出，在物距离焦 $\pm 0.5$  mm 范围内，光学系统光学传递函数在 721 p/mm 处均大于 0.2。液体透镜成果实现了调焦，对物距离焦进行补偿，使光学系统始终保持清晰成像。



**Figure 9.** The MTF with multi-configuration

**图 9.** 多重结构光学传递函数

**Table 1.** The table of main parameters

**表 1.** 主要参数表

Configuration	Object distance (mm)	Liquid lens curve (mm)
1	15.80	111.371
2	16.05	147.433
3	16.30	217.660
4	16.55	414.282
5	16.80	4143.090

## 6. 误差分析

光学系统的误差主要来源于光学加工装调误差和液体透镜重复性误差，而光学加工误差可以由系统

后焦距进行补偿,而液体透镜的重复性误差则无法得到有效补偿修正。液体透镜采用电流驱动曲率半径,改变光焦度,其重复性误差小于 0.01 dpt。由于液体透镜为平凸或平凹透镜,其光焦度  $D$  公式可以如下所示:

$$D = \frac{n-1}{r} \quad (7)$$

其中,  $D$  为透镜光焦度,  $r$  为曲率半径,  $n$  为透镜折射率。

根据公式(7),可以得到光焦度和曲率半径的关系曲线,如图 10 所示。

将曲率半径误差带入光学设计软件,得到加入误差后光学系统多重结构的点列图 RMS 半径,如图 11 所示。根据表中的点列图半径可知,液体透镜存在的 0.01 dpt 误差,对成像质量影响较小,液体透镜的调节精度满足实际需求。

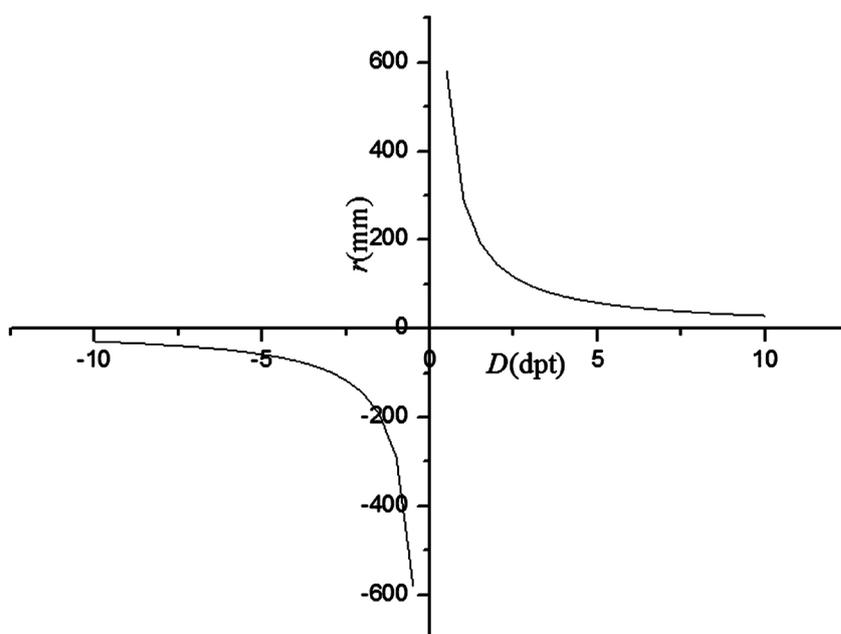


Figure 10. The relationship between  $D$  and  $r$   
图 10. 光焦度与曲率半径关系曲线

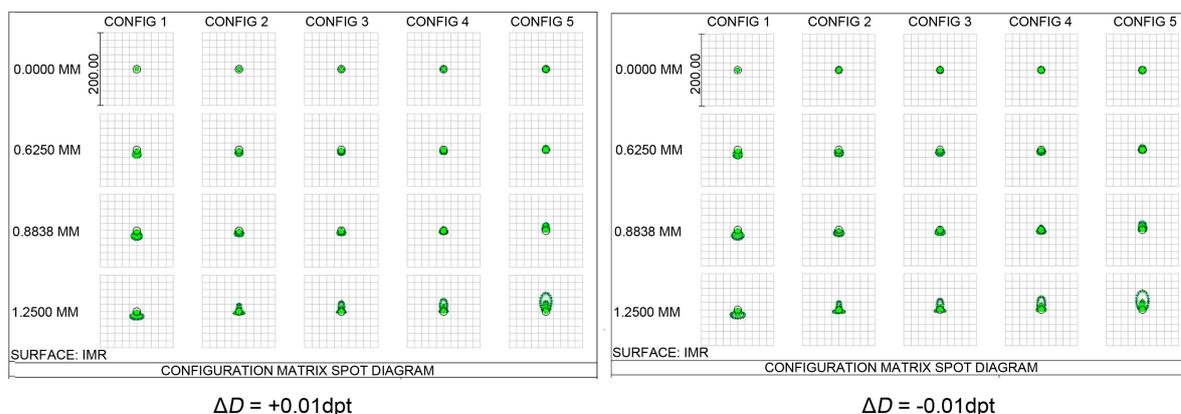


Figure 11. The spot diagram with multi-configuration with error  
图 11. 加入误差后多重结构点列图

## 7. 结论

本文设计了一种基于微流体透镜的自动聚焦显微系统, 具有反应迅速、能耗低、操作方便、无运动部件等特点。该系统主要由无穷远平场消色差显微物镜、液体透镜和成像透镜组组成。通过改变液体透镜的电流, 实现透镜前表面弯曲, 用以补偿物距离焦。通过 ZEMAX 优化设计, 设计出自动聚焦显微成像光学系统。当物面离焦 $\pm 0.5$  mm 时, 在不移动像面的情况下, 通过调节液体透镜补偿离焦, 实现高质量成像。该系统在不同离焦情况下, 在探测器 Nyquist 频率(721 p/mm)处, 光学传递函数均优于 0.2。通过误差分析, 当液体透镜存在 $\pm 0.01$  dpt 误差时, 显微成像系统的成像质量变化较小, 达到了实际应用的需求。

## 致 谢

感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所紫外光谱与成像研究室提供的光学平台, 同时感谢黄煜、杨小虎和李占峰等人提供的帮助。

## 基金项目

吉林省重点科技攻关项目(No. 20170204019SF)。

## 参考文献

- [1] 卢洋, 鄢志丹, 崔芳芳, 等. 光学显微镜聚焦系统设计[J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40(11): 1399-1403.
- [2] Wilson, T. (1990) Confocal Microscope. Academic Press, New York.
- [3] Pawley, J.B. and Masters, B.R. (2008) Handbook of Biological Confocal Microscopy. *Journal of biomedical Optics*, **13**, 029902. <https://doi.org/10.1117/1.2911629>
- [4] Amberg, M., Oeder, A., Sinzinger, A., *et al.* (2007) Tuneable Planar Integrated Optical Systems. *Optics Express*, **15**, 10607-10614. <https://doi.org/10.1364/OE.15.010607>
- [5] Li, J., Baird, G., Lin, Y.H., Ren, H., *et al.* (2005) Refractive-Index Matching between Liquid Crystals and Photopolymers. *Society for Information Display*, **13**, 1017-1026. <https://doi.org/10.1889/1.2150371>
- [6] Robert, A.H. and Feenstra, B.J. (2003) Video-Speed Electronic Paper Based on Electrowetting. *Nature*, **25**, 383-385.
- [7] Ren, H. and Wu, S.T. (2005) Variable-Focus Liquid Lens by Changing Aperture. *Applied Physics Letters*, **86**, 211107. <https://doi.org/10.1063/1.1935749>
- [8] Lee, J.-K., Park, K.-W., Lim, G.-B., *et al.* (2012) Variable-Focus Liquid Lens Based on a Laterally-Integrated Thermopneumatic Actuator. *Journal of the Optical Society of Korea*, **16**, 22-28. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2012.16.1.022>
- [9] 许谊, 徐毓娴, 惠梅, 等. 微分相衬干涉显微镜定量测量表面形貌[J]. 光学精密工程, 2001, 3(9): 226-229.
- [10] Zhang, W., Li, D. and Guo, X. (2013) Optical Design and Optimization of a Micro Zoom System with Liquid Lenses. *Journal of the Optical Society of Korea*, **17**, 447-453. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2013.17.5.447>
- [11] 汪伟, 沈志学. LCTF 机载高光谱相机光学系统设计[J]. 光子学报, 2015, 44(7): 0711003.
- [12] 卢宝莉, 刘育梁, 王新伟. 基于单相机 - 双棱镜的小型三维质问获取系统[J]. 光子学报, 2016, 45(7): 0710004.
- [13] 高永锋, 张变, 宋光辉, 等. 虹膜识别镜头的光学设计[J]. 激光与光电子进展, 2017(54): 012204.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5450，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[oe@hanspub.org](mailto:oe@hanspub.org)