

基于数字全息显微术的液体透镜参数测量方法

刘俊江 李恩普 邸江磊 赵建林*

(西北工业大学理学院, 教育部空间应用物理与化学重点实验室, 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 提出了一种利用数字全息显微术测量液体透镜表面曲率半径及焦距参数的实验方法。针对液体透镜表面不能接触、直径较小、侧壁材料非透明等因素, 采用具有像差校正功能的立式马赫-曾德尔干涉仪光路实验记录液体透镜液面的数字全息图, 数值再现得到携带液面信息的物光波前相位分布信息, 并经数值计算和拟合得到液面轮廓曲线, 最终得出液面曲率半径以及液体透镜的焦距等参数, 进而利用该方法对标准平凹透镜的曲率半径和焦距等参数进行了测量, 以验证其正确性。结果表明, 所提出的方法是一种高精度、非接触测量液体透镜液面曲率及焦距参数的有效手段。

关键词 全息; 数字全息显微术; 液体透镜; 曲率半径; 焦距

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1109001

Measurement of Liquid Lens Parameters Based on Digital Holographic Microscopy

Liu Junjiang Li Enpu Di Jianglei Zhao Jianlin

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract We present an experimental method to measure the curvature radius and focal length of liquid lens based on digital holographic microscopy. Considering the features of liquid lens such as non-contact, small size and non-transparent wall, a vertical optical path based on Mach-Zehnder interferometer with aberration correction capacity is used to record the hologram of sample. The phase distribution of the object wavefront carrying the liquid level information is numerically reconstructed from the recorded digital hologram and the surface contour curve is achieved by numerical computation and fitting. Then the curvature radius and focal length of the liquid lens can be obtained. In order to certify the validity of this method, a standard plano-concave lens is measured. The experimental results show that this method is an effective approach with high precision and non-contact for measuring the curvature radius and focal length of liquid lens.

Key words holography; digital holographic microscopy; liquid lens; curvature radius; focal length

OCIS codes 090.1995; 110.1650; 110.3157

1 引言

液体透镜的最大优势是可动态改变其折射率或表面曲率半径, 方便调整焦距, 实现变焦功能^[1]。调节液体透镜表面曲率, 可以通过对液滴与固体接触面施加电压来改变其接触角, 或使导电液体内部产生电场梯度, 或者通过改变液体压力而控制包裹液体的薄膜面形的变化等途径实现^[2-3]。

光轴稳定性和焦距变化响应速率是反映液体透镜性能的重要参数, 而光轴位置和焦距由液体透镜的液面曲率半径直接决定。因此, 实现液体透镜液面曲率半径的有效测量至关重要。目前, 测量小曲率半径的方法主要有球面样板法、球径仪法和自准直显微镜法等。其中, 球面样板法人为因素影响较大, 测量精度不高; 球径仪法虽精度高, 但必须接触

收稿日期: 2014-05-23; 收到修改稿日期: 2014-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(61077008, 61127011)、航空科学基金(2012ZD53055)

作者简介: 刘俊江(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事数字光信息处理方面的研究。E-mail: 897934399@qq.com

导师简介: 李恩普(1960—), 男, 硕士, 教授, 主要从事光信息技术及应用方面的研究。E-mail: lienpu@nwpu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

被测表面,不能用于对液体透镜的测量,自准直显微法测量过程复杂,需要精密调节。通过高速 CCD 摄像机采集液体透镜表面轮廓图像并进行边缘提取,然后根据轮廓边缘数据进行曲线拟合,可建立液滴轮廓数学模型,计算液体与容器壁接触角,从而得出透镜的焦距^[4]。但由于液体透镜填充多为透明液体,而器壁为柱形,会使拍摄图像发生形变,影响该方法的测量结果。同时,对于侧壁为非透明材料的液体透镜,该方法并不适用。

根据液体透镜液面曲率半径测量的特殊性,将数字全息干涉术和显微技术相结合的数字全息显微术具有高灵敏度、非接触、全场测量等优点^[5-9],可用于液体透镜的液面曲率半径测量,通过准确、实时测量液体透镜内液面的高度分布信息,数值拟合获得其曲率半径特性。更重要的是,该方法中测量光束沿液体透镜光轴方向垂直入射,不受其侧壁材料透光性的限制。

本文提出利用数字全息显微术测量液体透镜的光学参数,包括液面曲率半径和焦距。通过实验记录液体透镜液面的数字全息图,数值再现获得携带液面信息的物光波前相位分布信息,并经数值计算和拟合得到液面轮廓曲线,进而得出液面曲率半径以及液体透镜的焦距等参数。同时,用该方法对标准平凹透镜的曲率半径及焦距等参数进行测量,以验证其正确性。

2 测量原理

利用数字全息显微术测量液体透镜表面的曲率半径时,透镜内光学液体液面的高度差异,会导致沿透镜光轴方向传播的物光波的光程发生变化,进而使其相位分布变化^[10-11]。假设经透镜调制后的物光波和参考光波在 CCD 靶面上的复振幅分布分别为 $O(x, y)$ 和 $R(x, y)$, 其干涉叠加形成的强度分布为

$$I(x, y) = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y), \quad (1)$$

由 CCD 记录该强度分布得到数字全息图,进而利用计算机模拟其衍射,可得到数值重建的物光波场的复振幅分布 $U(x, y)$, 其对应的波前相位分布为

$$\varphi = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[U(x, y)]}{\text{Re}[U(x, y)]} \right\}, \quad (2)$$

对该相位分布进行解包裹处理^[12-13],即可得到物光波场的真实相位分布。而该相位分布与液面高度有如下关系^[14]:

$$\varphi = \frac{2\pi h}{\lambda} \Delta n, \quad (3)$$

式中 λ 为测量光波的波长, h 为液面的高度, Δn 为液体透镜材料与空气的折射率差。根据(3)式,由物光波穿过液体透镜后所产生的相位分布,可得到其液面高度分布,进而通过曲线轮廓数值拟合等操作,即可求出到液面的曲率半径及透镜焦距等参数。

3 实验装置

数字全息图的记录采用图 1 所示立式马赫-曾德尔干涉仪光路。由激光器 [Cobolt Samba TM, $\lambda = (532 \pm 0.3) \text{ nm}$, $P = 50 \text{ mW}$] 输出的光经光纤分束器后分为两束:一束经透镜 L_1 准直后沿光轴方向照射液体透镜样品,透射光作为物光波依次经过显微物镜(MO)、成像透镜 L_2 、分光棱镜(BS)后,将液体透镜样品成像于 CCD 靶面位置;另一束自光纤末端出射后,以球面波形式作为参考光波经过分光棱镜反射后,到达 CCD 靶面,与物光波发生干涉,CCD 记录为数字全息图,并经计算机数值再现物光波。液体透镜样品为内部注入纯净水的圆柱形水槽,直径为 15 mm,高度为 8 mm,纯净水在表面张力作用下产生透镜效应。

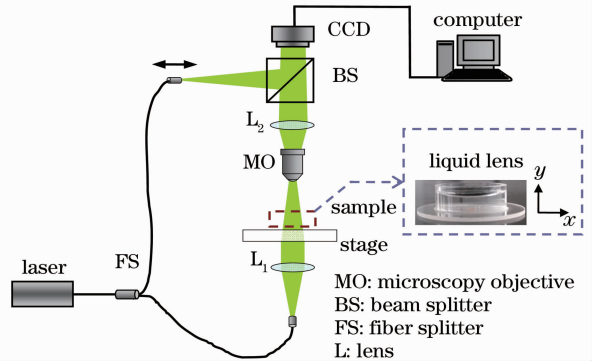


图 1 液体透镜参数测量光路

Fig. 1 Experimental setup for measuring parameters of liquid lens

在不放置任何实验样品的情况下,通过精密调节球面参考光波源点到 CCD 靶面的距离,使参考光波和物光波在 CCD 靶面处的波前曲率严格匹配,此时全息图的 ± 1 级频谱均为一个标准的“点”,在后续的数字重建过程中,可直接使用平面光波进行数值重建,且可消除全息再现像中的像场弯曲^[15]。图 2 所示为参考光波位置严格调节完毕后的实验结果,其中图 2(a)为数字全息图,图 2(b)为其频谱图,图 2(c)为其 $+1$ 级频谱的放大像,图 2(d)为由 $+1$ 级频谱数值再现的物光波场的包裹相位分布。对

图 2(d)中的包裹相位图进行相位去包裹操作,利用数值算法将相位包裹条纹展开并进行平滑滤波操作,即可得到物场的真实相位分布,如图 2(e)所示。可以看出,图中代表相位值大小的颜色均近似为绿色,表示其相位值大小近似一致,重建物光波场的波

前近似为一平面。由此可见,通过对参考光的精密调节,可消除全息再现像中由 MO 和 L_2 引入的像场弯曲,从而可以避免通常的二次曝光干涉测量过程中需要两次记录全息图的过程,简化数值重建中的对再现像场的数值处理过程,提高数值再现效率。

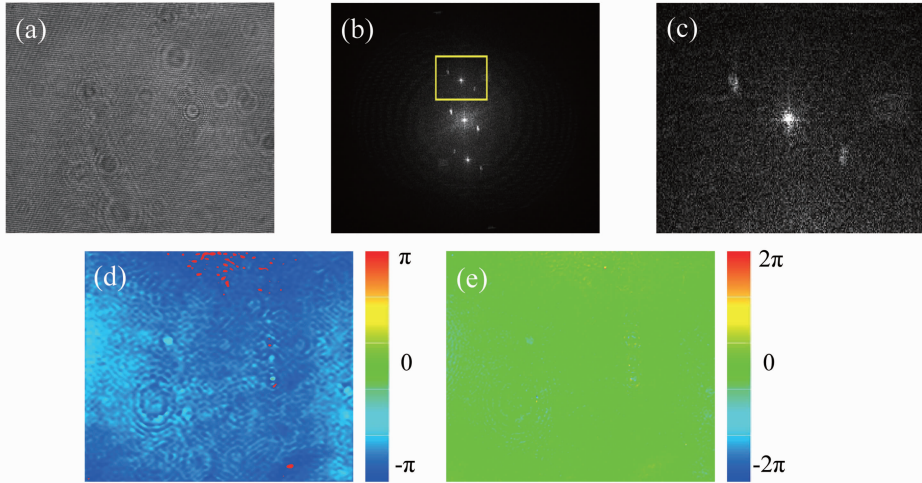


图 2 调节参考光消除全息再现像场弯曲的实验结果。(a)数字全息图;(b)全息图的频谱;(c) +1 级频谱放大像;(d)再现物光波场的包裹相位图;(e)再现物光波场的相位分布

Fig. 2 Experimental results of aberration correction. (a) Digital hologram; (b) Fourier spectra of the digital hologram; (c) enlargement of +1 spectra; (d) wrapped phase distribution; (e) unwrapped phase distribution

4 实验结果及讨论

图 3 为利用图 1 光路测量液体透镜表面相位分布的实验结果。其中,图 3(a)和 3(b)分别为液体透镜液面的数字全息图及其频谱,图中矩形框代表滤波窗口,利用(2)式对选择的+1 级频谱进行计算处理,可以得到图 3(c)所示的重建物光波前的包裹相

位图,图 3(d)和(e)分别为相位解包裹后得到的二维和三维相位分布,图中显示液体透镜的相位分布值由中心到边界均匀递增,表明所测透镜液面高度由中心向边界均匀变化。

由液体透镜液面的相位分布数值拟合可得到液面轮廓曲线,进而得出液面曲率半径以及液体透镜

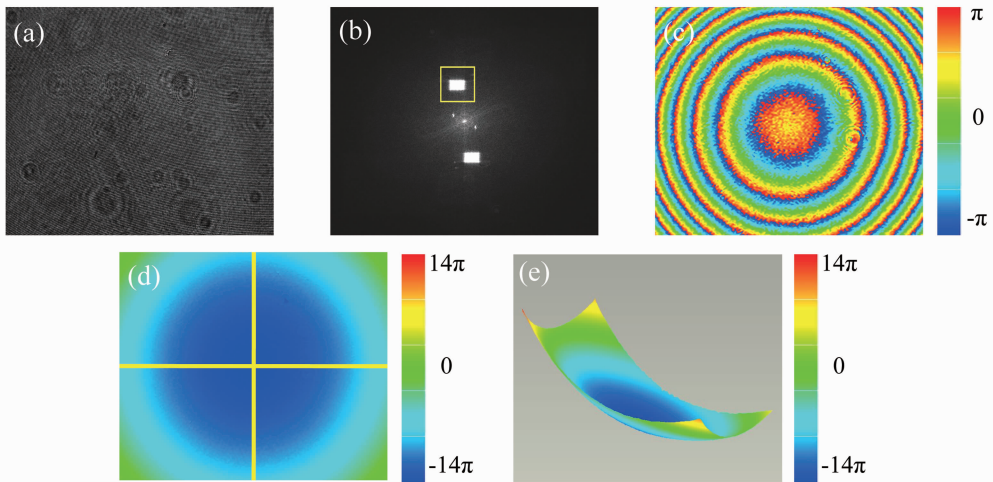


图 3 液体透镜液面相位分布实验测量结果。(a)液面的数字全息图;(b)全息图的频谱;(c)由+1 级频谱再现的物光波前包裹相位分布;(d)解包裹的二维相位分布;(e)三维相位分布

Fig. 3 Experimental results of liquid lens. (a) Digital hologram; (b) Fourier spectra of the digital hologram; (c) wrapped phase distribution; (d) unwrapped phase distribution; (e) three-dimensional phase distribution

的焦距等参数。取图 3(d)中的过中心垂直、水平两个方向上的相位分布信息,利用(3)式将其转化为液面高度分布并对其数值拟合,得到图 4 所示的液面轮廓曲线。图 4(a)中浅色折线表示垂直方向上的实验测量值,黑色光滑实线是垂直方向的拟合曲线,图 4(b)中浅色折线表示水平方向上的实验测量值,黑色光滑实线是水平方向的拟合曲线,两个方向的

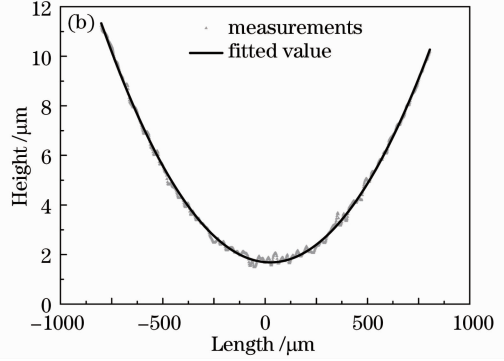
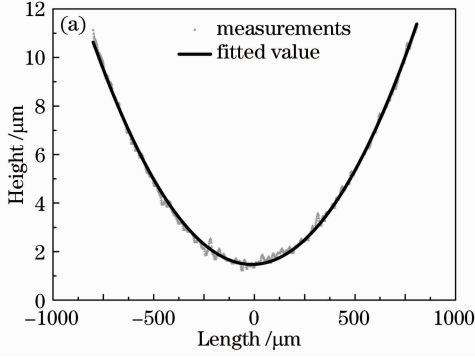


图 4 液面高度分布测量结果及拟合曲线。(a)垂直方向;(b)水平方向

Fig. 4 Measurement and fitted value of height distribution of liquid lens. (a) Vertical direction; (b) horizontal direction

根据曲率 k 的数学表达式

$$k = |y''/(1+y'^2)^{3/2}| \quad (6)$$

以及所得液体透镜液面轮廓的函数表达式,可得液体透镜的液面曲率 k 。而曲率半径 r 和曲率 k 互为倒数,于是可得液体透镜中心两个正交方向上的曲率半径 r_1 和 r'_1 分别为

$$r_1 = 0.05070 \text{ m}, r'_1 = 0.05068 \text{ m}. \quad (7)$$

液体透镜的液面高度相对于其液面的曲率半径是一个小量,因此可以将液体透镜视为薄透镜。空气中薄透镜焦距与曲率半径、透镜材料折射率有如下关系:

$$f = \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1)(r_2 - r_1)}, \quad (8)$$

式中 f 为透镜焦距, r_1 和 r_2 表示透镜前后表面的曲率半径, n 代表透镜材料的折射率。由于实验中液体透镜后表面为平面,即(8)式中的 r_2 趋于无穷大,则(8)式可简化为

$$f = r_1/(n-1), \quad (9)$$

代入数据,可得两个正交方向上液体透镜的焦距分别为

$$f = 0.15211 \text{ m}, f' = 0.15206 \text{ m}, \quad (10)$$

为验证上述测量方法的正确性,利用该装置对标准平凹透镜(材料为 BK7, 焦距为 250 mm, 折射率为 1.5168)进行了测量,结果如图 5 所示,图中浅色折线为平凹透镜高度分布的实验测量值,黑色实线为实验测量值的拟合曲线。拟合曲线的函数表达式为

拟合表达式分别为

$$y = 9.86573 \times 10^{-6} x^2 + 0.00282x + 0.85029, \quad (4)$$

$$y = 9.86168 \times 10^{-6} x^2 + 0.00262x + 0.85498, \quad (5)$$

(4) 式和(5)式分别为液体透镜垂直、水平方向上的拟合曲线, x 代表曲线沿液体透镜直径方向的坐标, y 代表对应的液面高度。

$$y = 3.87059 \times 10^{-6} x^2 - 5.50832 \times 10^{-4} x + 0.61486, \quad (11)$$

根据(6)式和(9)式,可得平凹透镜的曲率半径和焦距分别为

$$r = 0.12918 \text{ m}, f = 0.24996 \text{ m}. \quad (12)$$

实验测量焦距与标准透镜的焦距标称值相吻合,表明利用数字全息显微术可有效测量液体透镜的液面曲率半径及焦距。

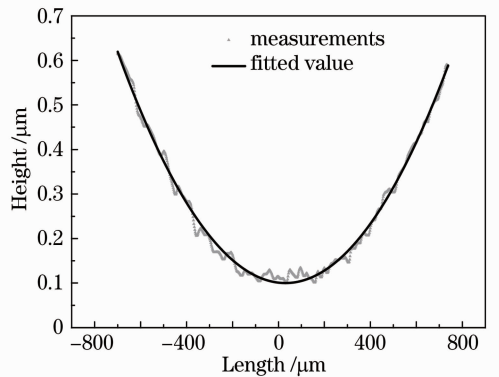


图 5 平凹透镜表面高度分布测量值及拟合曲线

Fig. 5 Measurement and fitted value of height distribution of the standard plano-concave lens

5 结 论

液体透镜结构的特殊性,显示了其光学参数测量的复杂性。数字全息显微术为液体透镜光学参数提供了一种非接触、高灵敏、全场的显微测量手段。

通过数值重建携带液面信息的物光波前相位分布信息,可拟合得到液面轮廓曲线,进而得出液面曲率半径以及液体透镜的焦距等参数。采用所提出的立式马赫-曾德尔干涉仪光路,通过调节参考光源的位置,有效消除了显微光路带来的全息再现像的像差,简化了数值重建中的对再现像场的数值处理过程。通过对标准平凹透镜的测量对比,证明了该方法的正确性。相信数字全息显微术在液体透镜的研究中具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Zhang Ying, Zhang Xin. 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, 张 新. 基于液体透镜的变焦光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- 2 S Kuiper, B H W Hendriks. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(7): 1128—1130.
- 3 S Grilli, L Miccio, V Vespini, *et al.*. Liquid micro-lens array activated by selective electrowetting on lithium niobate substrates [J]. Opt Express, 2008, 16(11): 8084—8093.
- 4 Zhang Dekui, Ma Junshan. Detecting technology for the outline of sessile drop based on the computer vision[J]. Applied Laser, 2007, 27(3): 228—230.
张德奎, 马军山. 基于计算机视觉的透明液滴外形的检测技术[J]. 应用激光, 2007, 27(3): 228—230.
- 5 Jun Wang, Jianlin Zhao, Chuan Qin, *et al.*. Digital holographic interferometry based on wavelength and angular multiplexing for measuring the ternary diffusion[J]. Opt Lett, 2012, 37(7): 1211—1213.
- 6 Di Jianglei, Zhao Jianlin, Fan Qi, *et al.*. Phase correction of wavefront reconstruction in digital holographic microscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 56—61.
邸江磊, 赵建林, 范 琦, 等. 数字全息显微术中重建物场波前的相位校正[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 56—61.
- 7 Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongzhen, *et al.*. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0309002.
马利红, 王 辉, 金洪震, 等. 数字全息显微定量相位成像的实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0309002.
- 8 Wang Huaying, Guo Zhongjia, Zhang Zhihui, *et al.*. Image-plane digital holography for quantitative imaging of cells of chinese medical decoction pieces[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0209002.
王华英, 郭中甲, 张志会, 等. 基于像面数字全息术的中药饮片细胞定量成像技术研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0209002.
- 9 Wang Yunxin, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. 3D profile measurement for micro-optical component by using digital holographic microscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412003.
王云新, 王大勇, 赵 洁, 等. 基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412003.
- 10 D Gabor. A new microscopic principle [J]. Nature, 1948, 161(4098): 777—778.
- 11 Schnars U, Jüptner W P O. Digital recording and numerical reconstruction of holograms[J]. Meas Sci & Technol, 2002, 13(9): R85—R101.
- 12 Zhang Lin, Li Enpu, Feng Wei, *et al.*. A study of acoustic levitation process based on laser holographic interferometry[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(5): 2038—2042.
张 琳, 李恩普, 冯 伟, 等. 声悬浮过程的激光全息干涉研究[J]. 物理学报, 2005, 54(5): 2038—2042.
- 13 Feng Wei, Li Enpu, Fan Qi, *et al.*. Diagnosing microwave plasma thruster's plume by digital holographic interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1833—1836.
冯 伟, 李恩普, 范 琦, 等. 数字全息干涉术用于微波等离子体推进器羽流场的研究[J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1833—1836.
- 14 Zhao Jianlin. Optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
赵建林. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 15 Qu W, Choo C O, Singh V R, *et al.*. Quasi-physical phase compensation in digital holographic microscopy[J]. J Opt Soc Am A, 2009, 26(9): 2005—2011.

栏目编辑: 何卓铭