

DOI:10.16136/j.joel.2023.12.0497

激光剪切干涉系统的设计与应用

彭子明¹, 吴义云¹, 郑梦超¹, 李国友², 吴建光^{1*}, 邹勇^{1*}

(1. 安徽工业大学 微电子与数据科学学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 南京宁基物联网技术有限公司, 江苏 南京 210031)

摘要: 针对以光相干为基础的无损、非接触测量研究, 利用沃拉斯顿棱镜(Wollaston prism, WP)作为剪切元件, 设计了共光路激光剪切干涉的方法并组建系统。本文详细分析了其各个部件对所得干涉条纹成像质量的影响, 得到了获取最优干涉条纹所需要满足的一系列条件。随后利用组建的系统获得了透明方腔内流体在温度梯度作用下的对流涡胞结构以及温度分布情况, 初步验证了该系统在此研究领域应用的可行性。在以上研究的基础上, 配合图像处理及迭代算法技术, 该系统在三维场的重建中有较大的应用前景。

关键词: 干涉条纹; 剪切干涉仪; 沃拉斯顿棱镜(WP); 流场; 温度场

中图分类号: TN247 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2023)12-1249-07

Design and application of laser shear interference system

PENG Ziming¹, WU Yiyun¹, ZHENG Mengchao¹, LI Guoyou², WU Jianguang^{1*}, ZOU Yong^{1*}

(1. School of Microelectronics and Data Science, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China; 2. Nanjing Ningji Internet of Things Technology Co. LTD, Nanjing, Jiangsu 210031, China)

Abstract: Aiming at the research of nondestructive and non-contact measurement based on optical coherence, the method of designing and constructing common optical path laser shear interference system is proposed using Wollaston prism (WP) as the shear component. In this paper, the effects of its components on the imaging quality of interference fringes are analyzed in detail, and a series of conditions to obtain the optimal interference fringe are acquired. Subsequently, the convective vortex cell structure and temperature distribution of the fluid in the transparent square cavity under the action of temperature gradient are obtained by using the constructed system, which preliminarily verifies the feasibility of the system in this research field. On the basis of the above research, combined with image processing and iterative algorithm technology, the system has a great application prospect in three-dimension field reconstruction.

Key words: interference fringes; shear interferometer; Wollaston prism (WP); flow field; temperature field

0 引言

近年来, 随着人们对物质表面形态检测和内部物理量测量的逐步研究, 无损检测、非接触测量等检测手段受到了广泛的关注^[1-4], 进而促进了各

类检测系统的诞生。而在这些系统之中, 对以光学为基础的测量技术的研究一直具有独特的意义, 尤其是在精密测量的领域中, 光学测量技术以超高分辨率的优势扮演着重要的角色^[5]。无论是以光谱学为基础的测量技术, 还是以光相干层析

* E-mail: wjg0724@ahut.edu.cn; yongzou@ahut.edu.cn

收稿日期: 2022-07-04 修订日期: 2022-10-26

基金项目: 安徽高校自然科学基金重点项目(KJ2021A0388)、安徽工业大学国家级大学生创新创业训练项目(202210360090, 202210360084)、安徽工业大学省级大学生创新创业训练项目(S202110360324)和安徽工业大学实验技术开发基金项目(10)资助项目

为基础的测量技术,它们都是研究物体内部结构信息的有效手段,成为了国际无损检测领域的研究热点^[2]。其中光谱学检测技术依托于光谱分析来实现,主要用于环境检测、物质微结构检测等领域^[6]。而光相干层析测量技术依托于光干涉仪来实现,通过干涉条纹变化反映光程差的变化,进而揭示物体内部物理量的微弱变化^[2]。

近年来围绕光干涉仪结构的设计大致可以分为共光路干涉仪和非共光路干涉仪两类^[7]。如马赫-曾德尔干涉仪就是非共光路干涉仪,参考光波和样品光波通过不同路径传播。但是由于两束光波不共光路,测量时,周围环境的变化(如振动、位移等)在参考光路和样品光路中引起扰动,从而使得传输光束的光程差、偏振态发生变化,造成干涉条纹不稳定。而共光路干涉仪的参考光路与样品光路共路,进而使参考光与样品光受到相同的干扰,避免了外界干扰对成像效果造成影响^[8]。而光波剪切干涉仪就属于共光路干涉仪中的一种,因而具有其相应的检测优点。

光波剪切干涉仪的发展具有巨大的潜力,从1931年苏联著名物理学家列别捷夫用偏振干涉仪首次实现光波的剪切干涉到1947年贝茨基于马赫-曾德尔干涉仪设计的一台新型剪切干涉仪,再到德鲁改进的贝茨剪切干涉仪,光波剪切干涉仪逐步实现了光路的自动补偿,并且简化了镜片的数量。2018年,董振兴^[8]针对普通剪切干涉仪在测量反射表面形貌中只能逐点测量而导致测量效率低的问题,设计了线光测量横向剪切干涉的测量方案,光波剪切干涉仪逐渐深入到实际应用领域之中。2019年,林世宗^[9]提出了一种低相干短波红外源、两台 Savart 剪切装置组合的剪切干涉仪,引出了相移技术。同年,杜克大学 PALMERLEY^[10]提出了剪切波干扰成像的医疗手段,以表征和量化硬化皮肤的刚度,标志着光波剪切干涉仪技术的逐渐成熟。

本文利用沃拉斯顿棱镜(Wollaston prism, WP)作为主要的剪切元件,组建了共光路激光剪切干涉系统,并分析了各个部件对所得干涉条纹成像质量的影响,随后利用组建的系统研究了透明方腔内的流体在温度梯度作用下的流动情况,以及透明方腔内的温度分布情况。关于该系统所提及的其他相关应用,后续将进一步深入研究。

1 实验原理

1.1 光剪切原理

实验采用的光剪切元件是 WP。WP 由两个光轴互相垂直的棱镜胶合而成。*o* 光和 *e* 光首先分别以

不同的速度 v_o 和 v_e 沿同一方向无折射地入射第一个棱镜,由于第二个棱镜的光轴与第一个棱镜的光轴垂直,*o* 光在穿过第二个棱镜时相当于转换成了 *e* 光,而 *e* 光相当于转换成了 *o* 光。若入射光为圆偏振光,正交分量相同,在进入第二个棱镜时,光束以光轴为对称轴被剪切为两束偏振方向互相垂直的线偏振光^[11]。WP 的剪切原理图如图 1 所示。

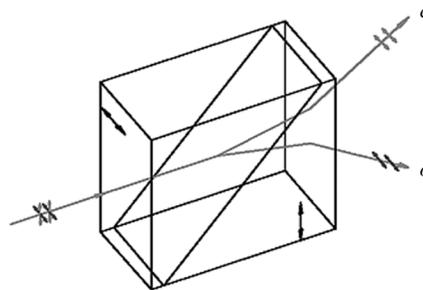


图 1 沃拉斯顿棱镜剪切原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of Wollaston prism shearing principle

1.2 双光束干涉原理

以待测方腔的一个底角为坐标原点,建立 x - y - z 坐标轴,其中 z 轴平行于光轴, y 轴垂直于 z 轴。假设平行光沿 z 轴正方向穿过待测区域,穿过待测区域的每条光线与之共轭的光线间的距离为 d 。在 y - z 面,如图 2 所示,两条共轭光线在 y 方向上的坐标分别为 $y + d/2$ 和 $y - d/2$,待测区域在 $\varphi_1(x, y)$ 和 $\varphi_2(x, y)$ 之间。

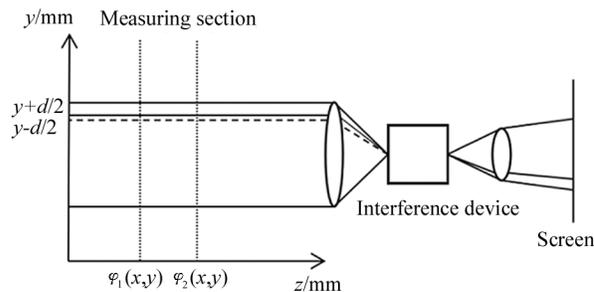


图 2 光线通过待测场示意图
Fig. 2 Schematic diagram of light passing through the field to be measured

两条共轭光线的光程差 ΔL 为:

$$\Delta L(x, y) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} n(x, y + d/2, z) dz - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} n(x, y - d/2, z) dz, \quad (1)$$

式中, n 为所述待测区域的折射率。

$$n(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z) = n(x, y, z) + \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial z} \Delta z, \quad (2)$$

干涉明条纹产生的条件是:

$$\frac{\Delta L(x, y)}{\lambda} = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \quad (3)$$

干涉暗条纹产生的条件是:

$$\frac{\Delta L(x, y)}{\lambda} = \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \pm \frac{5}{2}, \dots. \quad (4)$$

在观察屏上显示的条纹图携带了待测场的折射率信息。如果观察屏上能获得清晰的干涉条纹,那么通过干涉条纹就可以获得待测场介质折射率的分布情况^[12]。

2 干涉条纹成像质量分析

本文设计的激光剪切干涉系统光路图如图 3 所示,对应实物图如图 4 所示。首先,利用半导体激光器(laser diode, LD)作为光源,发射波长为 630 nm 的激光(准直),之后放置扩束镜(beam expander, BE)对其扩束。在 BE 后放置偏振片 1(polaroid 1, P1),控制激光的偏振方向。接着在偏振片 1 后放置一个四分之一波片(quarter wave plate, QWP),将线偏振光转化为圆偏振光。将两个焦距均为 150 mm

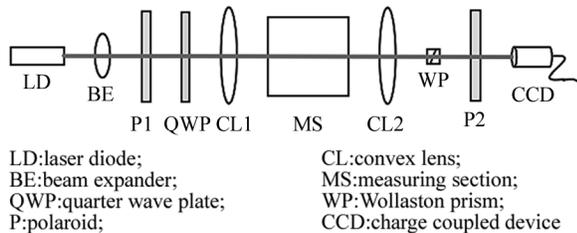


图 3 激光剪切干涉系统光路图

Fig. 3 Beam path diagram of laser shear interference system

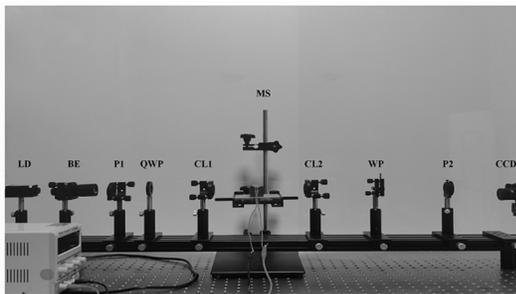


图 4 激光剪切干涉系统实物图

Fig. 4 Actual photographic of laser shear interference system

的透镜放置在测试段两侧,调整透镜 1(convex lens 1, CL1)的位置,使光束平行经过待测场后再经透镜 2(convex lens 2, CL2)汇聚。将 WP 放置在 CL2 的焦点处,光束通过 WP 后被剪切成两束偏振方向相互垂直的光束。在 WP 后再放置偏振片 2(polaroid 2, P2),使被剪切的两束光偏振方向相同,两束光在叠加处会发生干涉,最后利用 CCD(charge coupled device)相机进行图像采集。图 5 显示的是未加入待测物时的初始干涉条纹。

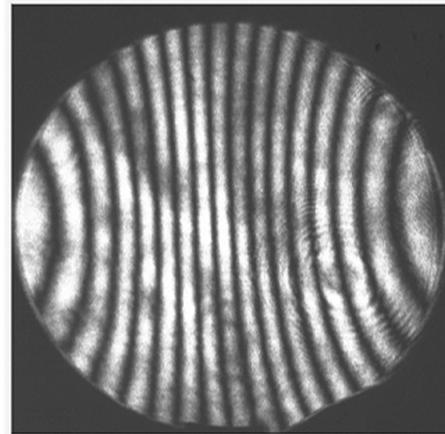


图 5 初始干涉条纹

Fig. 5 Initial interference fringe pattern

2.1 激光器和偏振片 1

激光器功率的大小对所得干涉条纹的明暗有着直接的影响。同时,放置在激光器前的偏振片 1 也会影响所得干涉条纹的亮度。根据马吕斯定律,当偏振片 1 的偏振化方向与光偏振方向成某一特定角度(假设入射光为线偏振光,则该特定角度就是平行于该线偏振光的偏振方向)时,所获得的干涉条纹最为明亮;而光轴方向与该特定角度垂直时,所获得的干涉条纹最为灰暗。图 6 显示的是最亮和最暗时的干涉条纹,对比发现两干涉条纹图案互补。

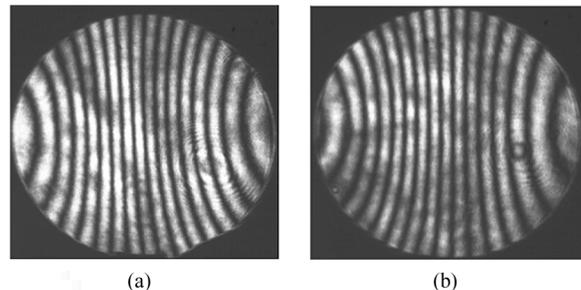


图 6 偏振片 1 对干涉条纹的影响:

(a) 最亮条纹; (b) 最暗条纹

Fig. 6 Influence of the P1 on the fringes:

(a) The brightest stripe; (b) The darkest stripe

2.2 QWP

当振幅正交分量相同的偏振光入射 WP 时,WP 的分光效果是最好的,而圆偏振光的振幅正交分量相同,恰能满足最优分光效果的入射条件,因此必须使 QWP 的光轴方向与经偏振片 1 出射的偏振光偏振方向成 45° 。QWP 光轴与偏振片 1 偏振方向成不同角度时对干涉条纹成像质量的影响如图 7 所示。

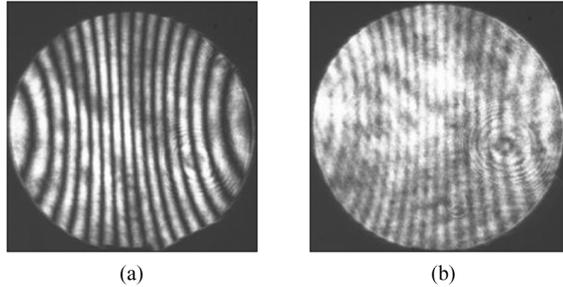


图 7 四分之一波片对干涉条纹的影响:
(a) 45° 角; (b) 其他角度

Fig. 7 Influence of quarter wave plate on fringes:
(a) 45° angle; (b) Other angles

2.3 WP

WP 的放置方式对干涉条纹也有很大的影响。将 WP 绕光轴旋转 90° ,干涉条纹将由原来的竖直条纹转变为水平条纹,如图 8 所示。如果被剪切的光束完全平行,则其干涉条纹方向平行于波面剪切方向,当 WP 旋转后,其波面剪切方向发生了如图 9 所示的变化,所以干涉条纹会发生相应的变化。

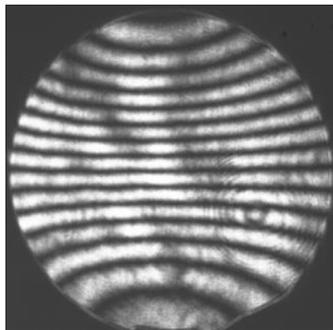


图 8 水平干涉条纹

Fig. 8 Horizontal interference fringe pattern

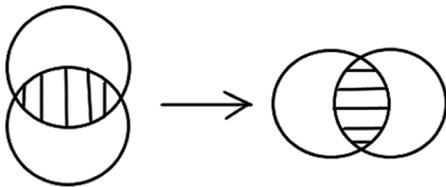


图 9 剪切波面变化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of shear wave surface change

2.4 偏振片 2

偏振片 2 的作用是使被剪切的两束线偏振光的偏振方向相同。想要得到清晰的干涉条纹,必须将偏振片 2 偏振方向调节至与通过 WP 后出射的两束互相垂直的线偏振光偏振方向均成 45° ,此时两偏振光偏振化方向的振幅大小相同,干涉效果最好。当偏振片 2 的偏振方向与通过 WP 后出射的两互相垂直的线偏振光的偏振方向不成 45° 时,获得的图像如图 10(a)所示。当偏振片 2 的偏振方向与其中某一线偏振光的偏振方向垂直时,该偏振光将无法通过偏振片 2,所以无法形成干涉条纹,如图 10(b)所示。

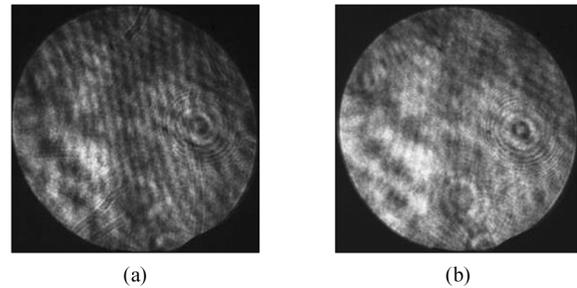


图 10 偏振片 2 对条纹的影响:

(a) 不成 45° ; (b) 垂直

Fig. 10 Influence of the P2 on the fringes:

(a) Except 45° ; (b) Vertical

2.5 获得最优干涉条纹的条件

综上所述,为了得到最优的干涉条纹,系统的各个部件需要满足以下要求:

- 1) 调节偏振片 1 使通过偏振片 1 的光强最大;
- 2) 调节 QWP 光轴方向与偏振片 1 的偏振化方向成 45° ;
- 3) 调节两个透镜和 WP,使 WP 放置在透镜焦点处,且通过透镜主光轴的光垂直入射 WP;
- 4) 调节偏振片 2 至其偏振方向与通过 WP 后出射的两偏振光的偏振方向均成 45° ;
- 5) 调节 CCD 相机光圈以及焦距,获得最佳拍摄条件。

经过上述所有调节操作后,得到最优的初始干涉条纹图像,如图 11 所示。

2.6 MATLAB 模拟干涉条纹

根据该激光剪切干涉仪的结构可以判断,其干涉模型可以等效为两个点光源的干涉。为了验证实验所得条纹的准确性,利用 MATLAB 软件对干涉现象进行模拟,得到的干涉条纹如图 12 所示。可以看出:实验得到的条纹和模拟得到的条纹基本一致,干涉图案中央为接近竖直、等间距的明暗条纹,而图案两侧为弯曲的明暗条纹。

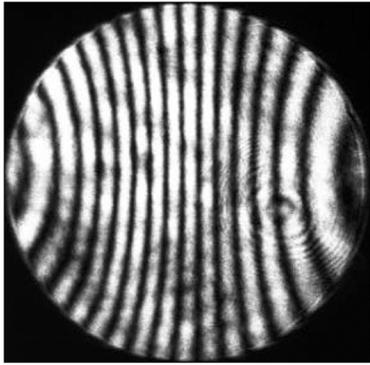


图 11 最优干涉条纹

Fig. 11 Optimal interference fringes

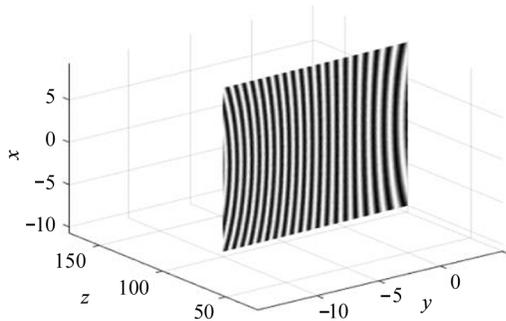


图 12 MATLAB 模拟的干涉条纹

Fig. 12 Interference fringes simulated by MATLAB

3 剪切干涉系统的应用

3.1 光学材料均匀度检测

在光学工业生产中,对一些光学仪器关键部件材料的均匀性有着极为严苛的要求,一旦均匀性没有达到标准,仪器的功能将受到影响。如在光刻工艺中,光学薄膜的均匀性会极大影响光刻精度^[13],因此需要对光学材料的均匀度进行检测。利用激光剪切干涉仪,将待检验的光学材料放在测试段中,材料的折射率分布情况会影响干涉条纹的成像质量,若材料折射率分布不均匀,则最后形成的干涉条纹必然会出现变形^[12]。

当测试段中未加入待测材料时,由于空气的折射率较为均匀,形成的干涉条纹较为平整,条纹的间距也大致相同,如图 13(a)所示。当在测试段中加入具有一定厚度的透明玻璃材料后,形成的干涉条纹就出现了变形,如图 13(b)所示,从干涉条纹的变形程度就可以判断该玻璃材料的均匀度。

3.2 液体流场和温度场的显示

激光剪切干涉系统还可以用来观测透明液体的流场。以水在不同温度下的流场为例,在如图 14 所示的矩形液池内装入适量水,该容器两侧为导热良好的铜块,右侧铜块黏贴有加热片,用来加热液体。

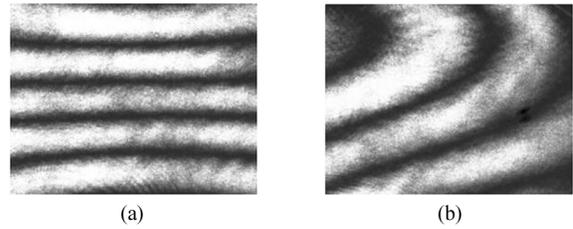


图 13 不同材料的干涉条纹:(a) 空气;(b) 玻璃材料

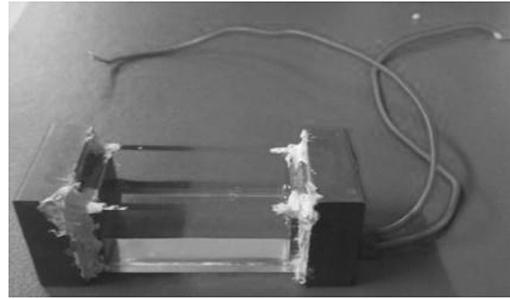
Fig. 13 Interference fringes of different materials:
(a) Air; (b) Glass materials

图 14 矩形液池

Fig. 14 Rectangular liquid tank

将该容器放入激光剪切干涉仪系统的测试段中,容器内水的初始温度为 25 °C,此时干涉条纹如图 15(a)所示,水平条纹数为 5 条。在 15 V 电压下以稳定的功率进行加热,将水温依次加热至 30 °C、35 °C 和 40 °C,分别拍摄不同温度时的干涉条纹,如图 15 所示。

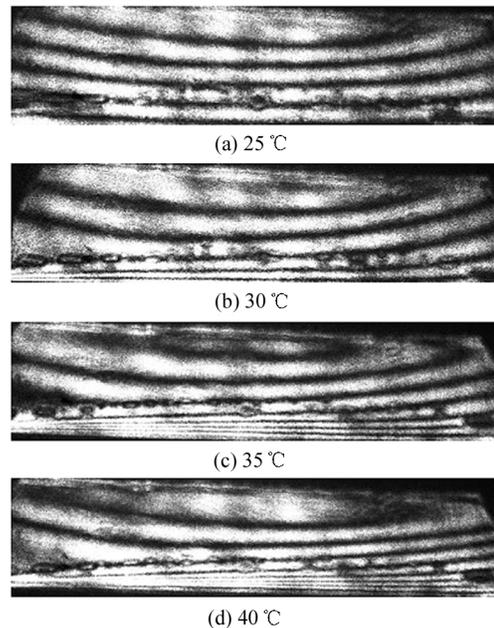


图 15 不同温度下水的水平干涉条纹

Fig. 15 Horizontal interference fringes of
water at different temperatures

水的温度越高其密度越小、折射率越小。由于热源在液池的右端，液池右侧水和空气的交界面(水面)附近温度梯度很大，导致附近折射率变化较大，从上述干涉条纹可以看出，干涉条纹左下角比较密集(干涉条纹成像为上下左右均颠倒的像)。随着水温度的升高，其表面张力逐渐减小，表面张力梯度驱动水流沿着水面向左端低温区流动^[14]。向低温区流动的水到达最左端后经底部回流，再次回到右端高温区，因此在液体的内部形成了闭合的涡胞，干涉图样可以直观地显示液体流场的涡胞结构。

利用竖直干涉条纹可以观察液体的温度场。以粘度为 350CS 的硅油为例进行测量，将适量硅油倒入矩形液池中，并将其放入激光剪切干涉系统的测试段中，将 WP 旋转 90°，获得的干涉条纹将由原来的水平条纹变为竖直条纹。容器内硅油的初始温度为 25 °C，获得的干涉条纹如图 16(a)所示。以 15 V 电压恒定的功率加热，将 350CS 硅油依次加热至 30 °C、35 °C 以及 40 °C，分别拍摄不同温度时的竖直干涉条纹，如图 16 所示。

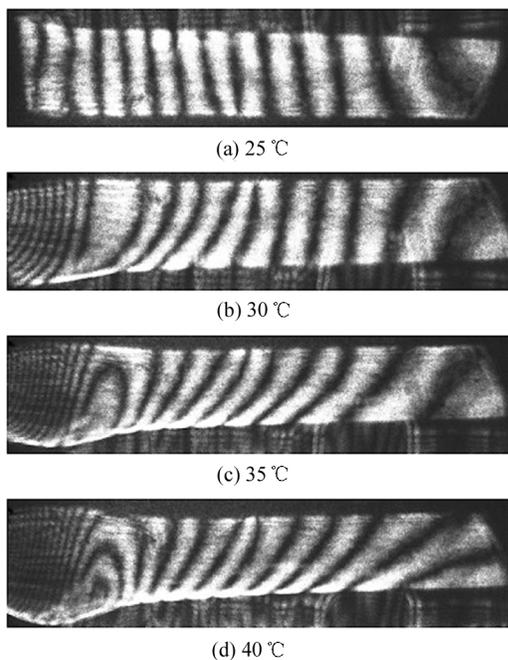


图 16 不同温度下硅油的竖直干涉条纹
Fig. 16 Vertical interference fringes of silicone oil at different temperatures

从所得到的干涉图像可以清晰地观察到：初始时，干涉区域的大部分条纹是竖直等距分布的，当液池从右端被加热时，干涉条纹也随之发生了变化，整个温度场可以分为 3 个区域：右侧高温区、过渡区和

左侧低温区。右侧高温区的温度梯度最大，温度的改变导致了硅油密度的改变，其折射率也随之改变，光束通过该区域后光程差发生了较大的变化，所以干涉图像左侧的条纹分布较为密集。随着右侧温度的升高，由于热扩散作用，热量向左侧传递，液池中中部区域的温度开始升高，在干涉图像上反映为条纹由竖直状态逐渐向右倾斜。在由细干涉条纹向粗干涉条纹过渡的区域，该处为高温与低温的交界区域，干涉条纹较左右两侧的条纹更加稀疏，同时伴有较大程度的弯曲，其原因是该处存在较强的热对流。热对流和热扩散的共同作用，使温度场的分布极不均匀，由此可以判断，该处等温线也将存在较大程度的弯曲。

3.3 三维物理量重建

光线通过激光剪切干涉仪所得到的干涉图像是光线沿路径方向折射率的线积分，所携带的是二维平面的信息。如果要通过二维干涉图来获得三维折射率的分布，就需要运用断层成像技术。断层成像技术^[15]就是把需要重建的三维物理量按照某一个平面分割成若干个截面(如 $x-y$ 平面)，再利用合适的数学算法获得每个截面上物理量的二维分布，然后再把获得的截面按照一定的顺序堆叠起来，进而还原成该物理量的三维分布，实现场的可视化^[16]。

在进行三维重构时，需要对实验得到的干涉图样预先进行优化处理，并且将三维物理量的信息叠加到一个平面容易产生误差，此外光学仪器的分辨率及重建算法的精度也会影响物理量的重建。关于三维物理量重建的工作，将另文叙述。

4 结 论

本文利用 WP 作为剪切元件设计了一套共光路激光剪切干涉系统，确定了获得最优初始干涉图像的条件，并通过实验获得了不同透明流体在特定研究背景下的干涉条纹，定性分析了液体的流场及温度场分布，同时通过实验验证了该激光剪切干涉系统可以检验光学材料的均匀度，并给出利用此剪切干涉仪结合代数重建算法进行物理量三维重建的思路。

参考文献：

[1] WANG H B, YAN H H, CUI X Q, et al. Study of microscale surface morphology changing of the retroreflector in EAST by means of laser speckle interferometry technique[J]. Nuclear Materials and Energy, 2021, 29: S50.

- [2] XIE S L, LIAO W J, BAI Y L, et al. Application of phase-contrast optical coherence tomography in the field of non-destructive testing[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2021, 38(6): 20-28.
谢胜利, 廖文建, 白玉磊, 等. 相衬光学相干层析在无损伤检测领域的应用[J]. *广东工业大学学报*, 2021, 38(6): 20-28.
- [3] TONG R X. Experimental study on detecting the disease state of fresco paint layer by optical coherence tomography[D]. Xi'an: Northwestern University, 2020: 5-15.
同荣鑫. 壁画颜料层病害状态的光学相干层析成像检测实验研究[D]. 西安: 西北大学, 2020: 5-15.
- [4] ZHU S J, LIU J B, GUO A X, et al. Non-contact measurement method for reconstructing three-dimensional scour depth field based on binocular vision technology in laboratory[J]. *Measurement*, 2022, 200: 111556.
- [5] ZHANG P, CUI J J. Research progress in nonlinear error compensation suppression and measurement of heterodyne interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1100003.
张鹏, 崔建军. 外差干涉仪非线性误差补偿抑制与测量研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1100003.
- [6] SHI J, ZHAO Y X, LI M, et al. Multi-energy point X-ray spectrometer based on multi-cone crystal[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2022, 33(4): 342-348.
施军, 赵雨鑫, 黎森, 等. 基于多锥晶体的多能点 X 射线光谱仪[J]. *光电子 • 激光*, 2022, 33(4): 342-348.
- [7] WU G L. Thermal drift suppression and test method of heterodyne laser interferometer set with non-common optical path[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 2-15.
吴国龙. 非共光路外差激光干涉镜组热漂移抑制及测试方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 2-15.
- [8] DONG Z X. Research on the application of shear interferometry in topography measurement of reflection surface [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018: 17-18.
董振兴. 剪切干涉技术在反射表面形貌测量中的应用研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018: 17-18.
- [9] LIN S T, TRINH X H, HOANG H H. Detecting phase-type defects of transparent samples using infrared phase-shifting shearing interferometer[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, 38(4): 1-7.
- [10] PALMERI M. Constructive shear wave interference imaging to characterize skin sclerosis[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2019, 7: 576.
- [11] LOU Y T, LI Z Y, YAN L P, et al. A phase differential heterodyne interferometer for simultaneous measurement of straightness error and displacement[J]. *Optics Communications*, 2021, 497: 127195.
- [12] SALCEDA-DELGADO G, MARTINEZ-RIOS A, TORRES-GOMEZ I, et al. Experimental analysis for refractive index sensing by using a compact, simple and robust Mach-Zehnder interferometer based on an air gap inside of a fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 72: 102983.
- [13] LIU C D. Optimization of spectral uniformity of 193 nm antireflective film on the surface of spherical optical element[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronics Technology, Chinese Academy of Sciences), 2019: 7-8.
柳存定. 球面光学元件表面 193 nm 增透膜光谱均匀性优化技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2019: 7-8.
- [14] ZHU C Z, PENG L, YU J J, et al. A numerical study on the thermal capillary-buoyancy convection of a binary mixture driven by rotation and surface-tension gradient in a shallow annular pool[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 171: 121035.
- [15] VIDAL-ROSAS E E, ZHAO H B, NIXON-HILL R W, et al. Evaluating a new generation of wearable high-density diffuse optical tomography technology via retinotopic mapping of the adult visual cortex[J]. *Neurophotonics*, 2021, 8(2): 025002.
- [16] YANG S G, GAO Z Q, GAN L Q, et al. Color based on the technology of calculating holographic CT true three-dimension visualization[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2018, 29(2): 212-217.
杨上供, 高志强, 甘亮勤, 等. 基于计算全息技术的彩色 CT 真三维可视化[J]. *光电子 • 激光*, 2018, 29(2): 212-217.

作者简介:

吴建光 (1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电检测、光镊及其应用方面的研究。

邹勇 (1981—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事光电检测、光电材料及功率器件热设计方面的研究。