

激光与光电子学进展

激光散斑干涉测量液体折射率的 误差分析与改进

罗劲明^{*}, 古家玮, 李俊豪, 周柔燕, 邓定南^{**}

嘉应学院物理与电子工程学院, 广东 梅州 514015

摘要 根据透明介质的光学折射特性, 分析了内标法的测量误差, 提出了一种激光散斑干涉测量液体折射率的改进方法, 设计了一种由完全相同的两个长方体槽组成的双槽结构, 其中一槽装有待测透明液体, 并以此搭建了一套像面散斑光学测量系统, 双槽结构则置于成像透镜和 CCD 相机之间。首先调节双槽至平行且垂直于光轴放置, 利用 CCD 相机采集一张散斑图, 接着调节双槽的夹角使其左右对称地偏转微小角度放置, 此时再采集一张散斑图, 然后采用数字散斑相关方法进行处理得到变化前后的散斑面内偏移量, 最后理论计算出透明液体的折射率。利用这一方法测量了水和乙醇的折射率, 并与内标法相比较, 结果表明改进方法具有误差小、精度高的特点。

关键词 测量; 散斑干涉; 折射率; 数字散斑相关; 内标法

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0512001

Error Analysis and Improvement of Liquid Refractive Index Measurement Using Laser Speckle Interferometry

Luo Jinming^{*}, Gu Jiawei, Li Junhao, Zhou Rouyan, Deng Dingnan^{**}

College of Physics and Electronic Engineering, Jiaying University, Meizhou, Guangdong 514015, China

Abstract According to the optical refraction characteristic of transparent medium, the measurement error of internal standard method is analyzed, and then an improved method of liquid refractive index measurement using laser speckle interferometry is proposed. This paper designs a double-groove structure composed of two identical rectangular grooves with one of the grooves filled with the measured liquid, and then an image speckle optical measurement system has been built, while the double-groove structure is placed between the imaging lens and CCD camera. First, adjusting the two grooves to be parallel and perpendicular to the optical axis, one speckle pattern is collected by CCD camera. Then adjusting the included angle of two grooves to make them symmetrically deflect to a small angle, another speckle pattern is collected. After that, a speckle in-plane displacement before and after the change is obtained by processing the above two speckle patterns using the digital speckle correlation method, and finally the refractive index of transparent liquid can be calculated theoretically. According to the above method, the refractive indices of water and ethanol are measured, and the results show that this improved method has the advantages of small error and high accuracy, compared with internal standard method.

Key words measurement; speckle interferometry; refractive index; digital speckle correlation; internal standard method

收稿日期: 2021-04-21; 修回日期: 2021-05-16; 录用日期: 2021-06-02

基金项目: 广东省 2018 年高等教育教学改革项目(542)、广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515110283)

通信作者: *zsjlm@163.com; **deenan@jyu.edu.cn

1 引言

折射率是表征物质光学性质的主要物理参数之一,在光学、材料、化工、食品、医疗等领域得到广泛应用,因此物质折射率的测量与科学研究、工业生产等息息相关,其中液体折射率的测量更是现代科学领域研究的一个重要课题。液体折射率主要是依据几何光学和波动光学的相关特性进行测量,测量方法包括最小偏向角法、CCD测量法、干涉法、光纤法和阿贝折射仪等^[1-7]。这些测量方法均有各自的优点,但也存在一定的局限性,如对测试样品的加工精度要求高、需要对标准样品的折射率进行标定或配制特定的测试液、测量结构复杂和成本高等。因此,液体折射率的测量是当前的热门研究方向之一。

激光散斑,是激光自散射体的表面反射或通过一个透明散射体时,散射光干涉形成的一种无规则分布亮暗斑纹,目前广泛应用于表面粗糙度研究、光学图像处理 and 成像质量评价等领域^[8-13],特别是微小位移的测量。近几年来,数字散斑相关方法作为非接触式全场光学测量技术发展极为迅速^[14-18],这是一种高精度的二维面内位移与应变的测量方法,在理论研究与实际工程中都有着广泛的应用前景,具有全场测量、抗干扰能力强和测量精度高等优点。利用激光散斑干涉测量透明液体的折射率,主要是通过测量散斑在放入液体前后,因折射效应而产生的微小面内偏移量来计算折射率,通常提及的方法是内标法^[19],即利用已知液体的折射率去测量待测液体的折射率。但是,内标法需要已知折射率的液体作为内标物,计算方式较为繁杂,且存在一定的测量误差。本文通过分析内标法的测量误差及其产生原因,提出了一种激光散斑干涉测量液体折射率的改进方法。

2 测量原理

如图 1 所示,当一束在空气中传播的激光散斑照射到一倾斜的透明介质时,将发生折射现象。由几何关系可知

$$\overline{AB} = \overline{AC} - \overline{BC} = D(\tan \theta - \tan \theta'), \quad (1)$$

以及

$$d = \overline{AB} \cos \theta = D(\tan \theta - \tan \theta') \cos \theta, \quad (2)$$

式中: θ 为入射角(等于透明介质的倾斜角); θ' 为折射角; D 为透明介质的厚度; d 为散斑面内偏移量。

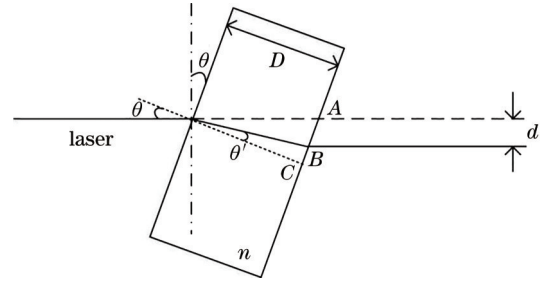


图 1 透明介质的光学折射特性

Fig. 1 Optical refraction characteristic of transparent medium

由折射定律可知

$$n_0 \sin \theta = n \sin \theta', \quad (3)$$

式中:空气的折射率 $n_0 = 1$; n 为透明介质的折射率。

联合(1)~(3)式,可得

$$n = \sqrt{\left(\frac{D \sin \theta \cos \theta}{D \sin \theta - d}\right)^2 + \sin^2 \theta}, \quad (4)$$

此式表明,如果已知透明介质的厚度 D 和倾斜角 θ ,只要测量出散斑面内偏移量 d ,即可计算透明介质的折射率 n 。

散斑面内偏移量 d 的测量,通常可以利用数字散斑相关法实现。首先采集一张偏移前的散斑图,选取一定大小的子散斑图像做傅里叶变换并取其共轭来制作相位滤波器;然后采集一张偏移后的散斑图,选取同样大小的子散斑图像进行傅里叶变换并对结果进行滤波,再对滤波后的结果做一次傅里叶变换,则在第二次傅里叶变换的输出面上就出现了一个相关亮点(相关峰)。假设子散斑图像的中心像素点位置坐标为 x_0 , 相关亮点(相关峰)的像素点位置坐标为 x_1 , 像素间距为 u , 则散斑面内偏移量为

$$d = |x_1 - x_0| \cdot u. \quad (5)$$

3 测量方法

3.1 内标法及其误差分析

内标法是利用激光散斑干涉技术测量液体折射率的常用方法,即将固体容器以一定的倾斜角放置在散斑测量光路中,先采集一张装有作为内标物的已知液体时的激光散斑图,再采集一张装有待测液体时的激光散斑图,然后通过数字散斑相关法测量出散斑面内偏移量,最后利用相关公式进行计算得到待测液体的折射率。然而,这一方法并未考虑激光散斑在放入内标物和待测液体时产生的轴向偏移量对测量结果的影响。

如图 2 所示,考虑在空气中传播会聚到感光平

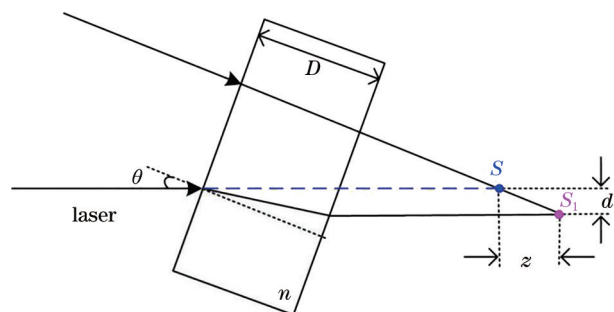


图 2 内标法的测量误差分析

Fig. 2 Analysis of measurement error using internal standard method

面上的某一散斑点 S , 在放入倾斜的透明介质并经折射后, 与之成对的散斑点 S_1 不仅在感光平面上有个面内偏移量 d , 而且在光轴方向也产生了一个轴向偏移量 z , 由几何光学可知

$$z = D \left(\cos\theta - \frac{\cos^2\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \right) \quad (6)$$

已知介质折射率 n 、厚度 D 和倾斜角 θ , 即可计算出不同介质相对空气的轴向偏移量 z 。这一轴向偏移量的存在使得感光平面两次采集到的散斑图之间存在着噪声, z 越大则散斑噪声越大, 散斑图的相关性越小, 从而导致数字散斑相关结果出现明显的测量误差。根据(6)式可知, 内标法只有在厚度很小, 且待测液体与内标物的折射率相差不大时, 轴向偏移量的影响才可以忽略。而要先预知待测液体的折射率, 再利用与之相近的内标物进行标定测量, 这显然是难以实现的。因此, 为了减小这一误差造成的影响, 本文提出了一种改进方法。

3.2 改进方法

如图 3 所示, 实验设计了一种由两个相同长方体槽组成的双槽结构, 其中一槽装有待测透明液体而另一槽为空槽。当双槽互相平行且均垂直于光轴放置 [图 3(a)] 时, 双槽和待测液体并不会引起散斑面内偏移, 但能够产生一个光轴方向的轴向偏移量 z_1 ; 当双槽对称地倾斜微小角度放置 [图 3(b)] 时, 双槽和待测液体同样会产生一个轴向偏移量 z_2 , 由

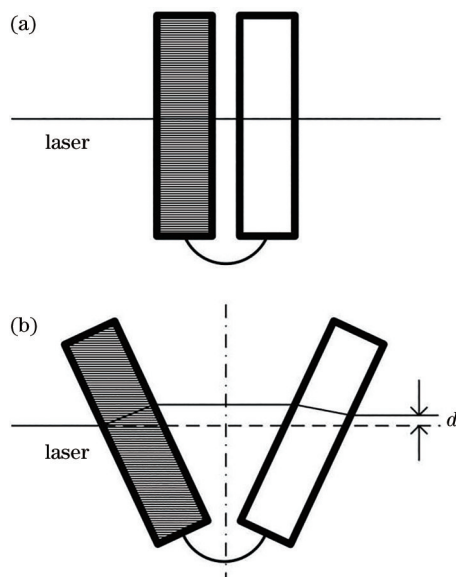


图 3 双槽结构俯视图, 左槽为待测液体。(a) 平行放置; (b) 倾斜微小角度放置

Fig. 3 Vertical views of double-grooves structure with the left measured liquid. (a) In parallel; (b) tilt small angle placement

(6) 式可知在倾斜角 θ 不大的情况下近似等于 z_1 , 从而可以极大地减小轴向偏移量对测量的影响。而且由于对称放置的固体双槽本身并不会引起散斑面内偏移, 实际采集到的仅是待测液体 (不包含固体双槽) 倾斜产生的面内偏移量, 因此可以直接利用(4)式计算出液体折射率。

图 4 显示了改进后的液体折射率测量系统。激光通过扩束准直变成平行光束, 照射毛玻璃后形成空间散斑图, 并经透镜成像在 CCD 感光平面上, 而双槽结构则被置于透镜和 CCD 感光平面之间。首先调节双槽相互平行且垂直于光轴放置, 利用 CCD 采集一张散斑图, 然后调节双槽的夹角使其左右对称地倾斜微小角度放置, 再采集一张散斑图, 并利用数字散斑相关法对采集到的两张散斑图进行处理, 得到待测液体倾斜前后的散斑面内偏移量, 最后通过理论计算得出透明液体的折射率。

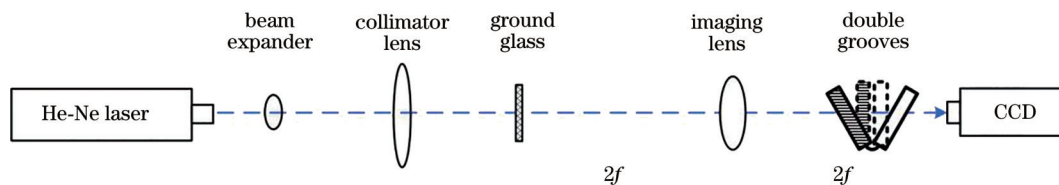


图 4 改进的液体折射率测量系统示意图

Fig. 4 Schematic of the improved liquid refractive index measurement system

4 结果与分析

本文利用内标法和改进方法进行了对比实验。实验使用的固体双槽为有机玻璃材料(折射率为 1.49),槽壁厚为 1.8 mm,槽宽(槽内宽度)分别为 5 mm、10 mm 和 20 mm,随机选取的倾斜角为 0.092 rad 和 0.123 rad,透明液体为去离子水(阿贝折射仪的折射率测量参考值为 1.3330)和乙醇(体积分数为 95%,阿贝折射仪的折射率测量参考值为 1.3670)。此外,CCD 相机的像素大小为 2592 pixel×1944 pixel,像素间距为 2.2 μm 。

4.1 内标法的实验结果

利用内标法测量了水的折射率,内标物选择了

表 1 内标法测量水折射率的数据

Table 1 Data of water refractive index using internal standard method

Internal standard	θ / rad	D / mm	d / μm	n	Relative error / %	z / μm
Air	0.092	5	204.6	1.7926	34.5	1250.7
		10	391.6	1.7327	30.0	2501.4
		20	822.8	1.8004	35.1	5002.8
Alcohol	0.092	5	15.4	1.3073	1.9	93.2
		10	35.2	1.2992	2.5	186.3
		20	107.8	1.2658	5.0	327.6

如图 5 所示,选择槽宽为 20 mm 的数字散斑相关结果为例,其中子散斑图像大小为 1000 pixel×1000 pixel,图像中心位置为(500,500)。图 5(a)的内标物为空气,由于空气和水两者折射率相差较大,其散斑轴向偏移量也大,产生的散斑噪声使两张子散斑图像的相关性较差,可见相关结果为明显

空气(折射率为 1)和乙醇(折射率为 1.367),以进行对比参考。并选取倾斜角为 0.092 rad 为示例,实验结果如表 1 所示。结果表明,利用两种内标物测量得到的水折射率与阿贝折射仪的测量参考值均相差较大,且空气作为内标物时的相对误差尤为明显。根据(6)式,代入乙醇和水的折射率参考值,可理论计算出不同内标物时的轴向偏移量 z 并示于表 1 中。从中可见, z 随槽宽的增大而增大,在相同倾斜角和槽宽下内标物为空气时的 z 远大于乙醇时的值,由上述原理可知此时散斑噪声的干扰很大,使测量产生更加明显的误差,这也可以从数字散斑相关结果中看出。

的弥散点,对散斑面内偏移量的测量形成干扰,从而使折射率的计算结果产生较大的误差。图 5(b)的内标物为乙醇,由于乙醇和水两者折射率相差较小,其轴向偏移量引起的散斑噪声要比空气的小很多,因而其相关结果有一个相关亮斑,但伴有不明显的弥散点,仍然对测量结果产生一定的影响。

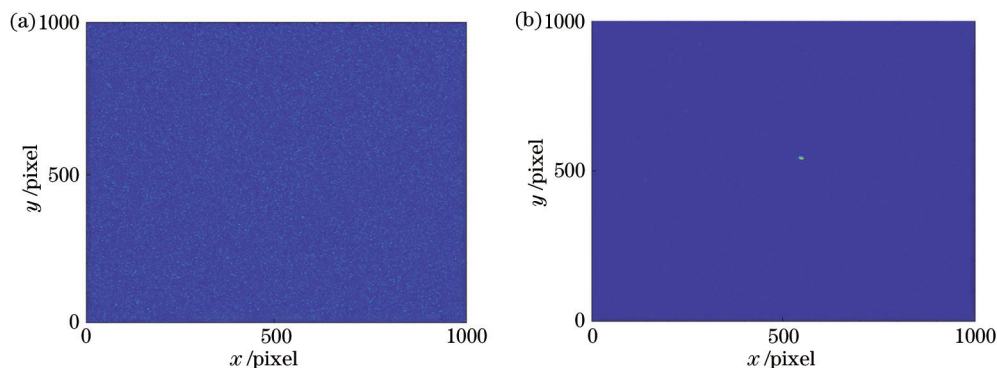


图 5 内标法测量水折射率的数字散斑相关结果。(a)空气;(b)乙醇

Fig. 5 Digital speckle correlation results of water refractive index using internal standard method. (a) Air; (b) ethanol

4.2 改进方法的实验结果

利用改进方法分别测量了水和乙醇的折射率,实验结果见表 2 和表 3。随着槽宽和倾斜角的增大,可见散斑面内偏移量和轴向偏移量均随之增大,但由于

轴向偏移量比内标法的值要小一个数量级以上,极大地降低了散斑噪声的干扰,从而使水和乙醇的折射率测量值与阿贝折射仪的测量参考值非常接近,相对误差均在 0.5% 以内。为了进一步讨论,选取倾斜角为

表 2 水折射率的测量数据

Table 2 Measurement data of water refractive index

D / mm	θ / rad	$d / \mu\text{m}$	n	Relative error / %	$z / \mu\text{m}$
5	0.092	114.4	1.3291	0.29	2.9
	0.123	151.8	1.3269	0.46	5.1
10	0.092	231.0	1.3333	0.02	4.5
	0.123	305.8	1.3301	0.22	8.0
20	0.092	459.8	1.3312	0.14	7.8
	0.123	618.2	1.3349	0.14	13.9

表 3 乙醇折射率的测量数据

Table 3 Measurement data of ethanol refractive index

D / mm	θ / rad	$d / \mu\text{m}$	n	Relative error / %	$z / \mu\text{m}$
5	0.092	123.2	1.3637	0.24	2.7
	0.123	167.2	1.3727	0.42	4.8
10	0.092	246.4	1.3637	0.24	4.2
	0.123	330.0	1.3660	0.07	7.5
20	0.092	492.8	1.3637	0.24	7.2
	0.123	657.8	1.3643	0.20	12.9

0.092 rad 时水的数字散斑相关结果为例,如图 6 所示,其中子散斑图像大小为 1000 pixel × 1000 pixel,图像中心位置为(500,500)。从图中可以看到,不同槽宽下得到的数字散斑相关结果均为一个非常明显的相关亮点(相关峰,峰值的像素点位置用虚线标注,

并放大显示)。这一结果符合上述原理,由于改进方法的轴向偏移量很小,由此产生的散斑噪声可以忽略,从而使子散斑图像的相关性很好,其数字散斑相关结果则是一个相关亮点,而随着槽宽和倾斜角的增大,仅仅是相关亮点的面内偏移量增大。

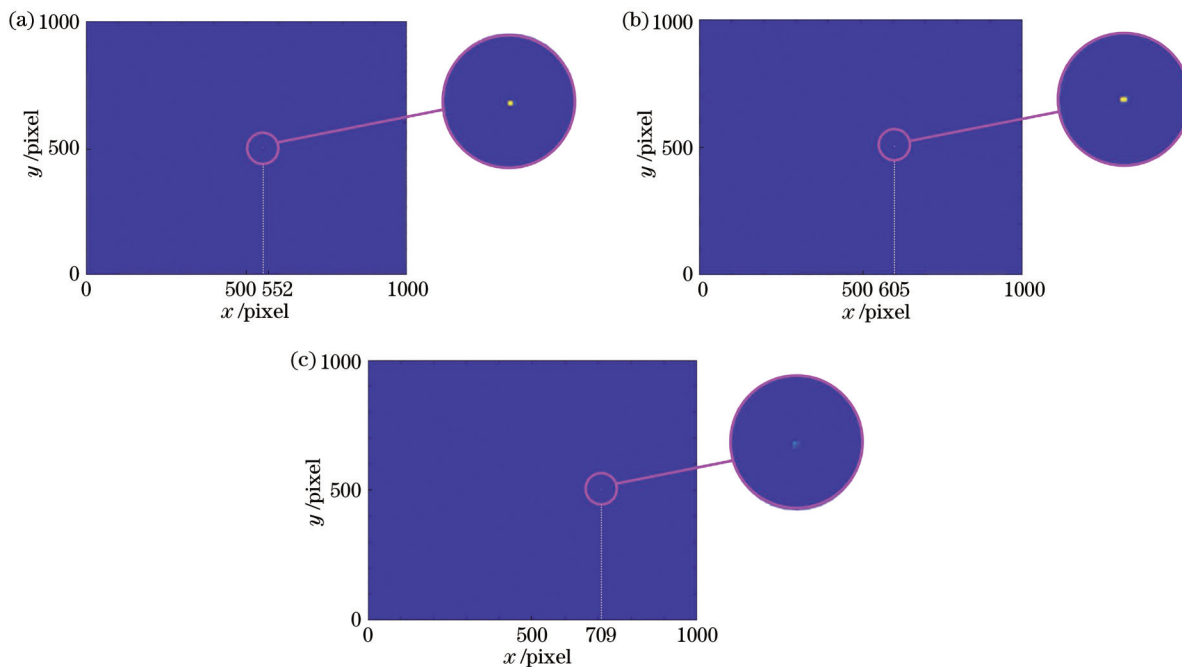


图 6 不同槽宽下,利用改进方法测量水折射率的数字散斑相关结果。(a) 5 mm;(b) 10 mm;(c) 20 mm

Fig. 6 Digital speckle correlation results of water refractive index using improved method under different groove widths. (a) 5 mm; (b) 10 mm; (c) 20 mm

综上所述,由于改进方法的轴向偏移量远小于内标法的值,从而极大地减小了测量误差,使实验结果更为精确。然而,如果槽宽和倾斜角持续增大,则轴向偏移量的影响将不可忽视,同样会对测量结果产生误差,因此尽量选取较小的槽宽和倾斜角进行测量。利用这一改进方法进行了多次实验,其误差来源主要在于双槽结构与光轴垂直和对称偏转时对角度的精准控制,这可通过进一步优化设计载物平台来实现。

5 结 论

本文分析了激光散斑干涉测量液体折射率中的轴向偏移量问题,讨论了由此产生的内标法测量误差,进而提出了一种改进方法,并进行了对比实验。实验结果表明,轴向偏移量的存在使得利用内标法获得的偏移前后的散斑之间噪声较大,导致数字散斑相关结果出现明显的测量误差,只有在槽厚较小且待测液体与内标物的折射率相近时才可忽

略,并不利于实际应用;而改进方法通过设计一种装有待测液体的双槽结构,可有效地减小这一轴向偏移量引起的散斑噪声,从而提高了测量精度,同时无需内标物,应用范围更为广泛。

参 考 文 献

- [1] Sun Y S, Chen Y, Han B, et al. Precision test technology of liquid refractive index using the method of minimum deviation angle[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 826-832.
孙一书, 陈怡, 韩冰, 等. 应用最小偏向角法的液体折射率精密测试[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 826-832.
- [2] Han C, Qiu C Y, Hou M D, et al. Measurement of liquid refractive index based on optofluidic single mode laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 081401.
韩超, 邱诚玉, 侯梦迪, 等. 基于光微流单模激光的液体折射率测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 081401.
- [3] Luo M, Zheng K L, Yu G X. Experimental study of liquid refractive index measurement based on grating diffraction[J]. *Experimental Technology and Management*, 2020, 37(7): 83-85.
骆敏, 郑凯璐, 余观夏. 基于光栅衍射的液体折射率测量实验[J]. *实验技术与管理*, 2020, 37(7): 83-85.
- [4] Nemoto S. Measurement of the refractive index of liquid using laser beam displacement[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(31): 6690-6694.
- [5] Abbas B, Alshikh Khalil M. An experimental method for determination of the refractive index of liquid samples using Michelson interferometer[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2016, 129(1): 59-63.
- [6] Zawisza R, Eftimov T, Mikulic P, et al. Dual-resonance long-period grating in fiber loop mirror structure for liquid refractive index measurement[J]. *Opto-Electronics Review*, 2018, 26(1): 24-28.
- [7] Rivera-Ortega U, Hernández-Gómez C R, Vega-Torres G, et al. Simple apparatus to calculate the refractive index of liquids based on Snell's law[J]. *Measurement*, 2019, 134: 658-661.
- [8] Zhou D, Cao J, Jiang Y H, et al. Speckle design method based on principal component analysis[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 201104.
周栋, 曹杰, 姜雅慧, 等. 基于主成分分析的散斑设计方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 201104.
- [9] Wang L G, Li Y Q, Gong L, et al. Inversion algorithm for micro-motion parameters of a cooperative target based on time-frequency feature of dynamic speckle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0228001.
王利国, 李亚清, 巩蕾, 等. 基于动态散斑时频特性的合作目标微动参数反演[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0228001.
- [10] Liu T C, Wu S J, Li W X. Spatial carrier digital speckle pattern interferometry system with large field of view[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0904001.
刘天承, 吴思进, 李伟仙. 大视场空间载波数字散斑干涉系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0904001.
- [11] Deng B H, Chen J H, Hu M H, et al. Application and imaging processing algorithm of biospeckle technology in fruit quality detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 090003.
邓博涵, 陈嘉豪, 胡孟晗, 等. 生物散斑技术在水果品质检测中的应用及图像处理算法进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(9): 090003.
- [12] Heikkinen J, Schajer G S. A geometric model of surface motion measurement by objective speckle imaging[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124: 105850.
- [13] Li Z S, Zhong P, Chen Y, et al. Simultaneous measurement of three-dimensional deformation based on digital speckle pattern interferometry technology [J]. *Optics Communications*, 2021, 480: 126423.
- [14] Wu R, Liu Y, Zhou J M, et al. Full-field strain measurement of rotating object using digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1312005.
吴荣, 刘依, 周建民, 等. 数字图像相关在旋转物体全场应变测量中的应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1312005.
- [15] Zhao T B, Zhang W, Gu S T, et al. Study on fracture mechanics of granite based on digital speckle correlation method[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 193/194: 192-199.
- [16] Sun Q, Cai C, Zhang S K, et al. Study of localized deformation in geopolymer cemented coal gangue-fly ash backfill based on the digital speckle correlation method[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 215: 321-331.
- [17] Wang F, Zhao L, Wu X D, et al. Measurement and analysis of concrete deformation field based on CT and digital image correlation method[J]. *Laser &*

Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 200401.

王凡, 赵亮, 吴晓东, 等. 基于 CT 及数字图像相关法的混凝土变形场测量分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 200401.

- [18] Wang X B, Dong W, Yang M, et al. Inhomogeneous strain measurement based on least absolute deviation fitting for digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0312001.

王学滨, 董伟, 杨梅, 等. 基于最小一乘拟合的非均匀应变的数字图像相关测量[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0312001.

- [19] Wang S F. Theory and application of information optics[M]. 4th ed. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2020: 275.
王仕藩. 信息光学理论与应用[M]. 4 版. 北京: 北京邮电大学出版社, 2020: 275.