2018年,第45卷,第1期

Article

DOI: 10.12086/oee.2018.170492

毛玻璃转速对干涉条纹成像 质量的影响

张佳莹,王红军^{*},朱学亮,刘丙才,田爱玲 西安工业大学陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室,陕西西安710021

摘要:针对大平面菲索干涉图像的相干噪声问题,采用旋转毛玻璃片的方法改变光束的相干性,来降低干涉系统的噪声。通过对毛玻璃的转速与条纹对比度和系统信噪比之间的关系进行仿真,获得最佳干涉条纹状态所需要的毛玻璃控制参数。在不同控制参数下获取干涉图像,并分别对各图像的条纹对比度和系统信噪比进行分析。研究结果表明,增加的毛玻璃转速,虽然在一定程度上降低了干涉图像的对比度,但却有效地提高了信噪比,便于后续的干涉图像处理。 关键词:系统噪声;旋转毛玻璃;菲索干涉;信噪比;对比度 中图分类号:O436.1 文献标志码:A 引用格式:张佳莹,王红军,朱学亮,等.毛玻璃转速对干涉条纹成像质量的影响[J].光电工程,2018,45(1):170492

Effect of speed of rotated diffuser on image quality of interference fringes

Zhang Jiaying, Wang Hongjun^{*}, Zhu Xueliang, Liu Bingcai, Tian Ailing

Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Film Technology and Optical Test, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract: Since the coherent noise affected the quality of the Fizeau's interferograms in the large aperture, the coherence of the beam was changed by rotated diffuser to reduce the noise of the interfering system. The relationships among the speed of the rotated diffuser, the contrast of the fringes and the SNR of the system were simulated. Then, the control parameters of rotated diffuser would be required in the optimum interference fringe. The interference images were obtained under different control parameters, and the fringe contrast and system SNR of each image were analyzed. The results showed that the contrast can be reduced by increasing the speed of the rotated diffuser in a certain extent, but the SNR can be improved effectively and it was convenient to process the interference image later.

Keywords: system noise; rotated diffuser; Fizeau interferometer; signal-to-noise ratio (SNR); contrast **Citation:** Zhang J Y, Wang H J, Zhu X L, *et al*. Effect of speeds of rotated diffuser on image quality of interference fringes[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(1): 170492

1 引 言

在干涉系统中,光学元件表面的缺陷(如凹陷、

气泡、灰尘、伤痕等)会成为新的光源,在激光 束的照射下产生相干噪声,使得干涉图中形成牛 顿环和靶心^[1],对图像效果产生破坏,使得图像



收稿日期:2017-09-12; 收到修改稿日期:2017-11-21

基金项目:科技部国际合作项目 (2015DFA10360); 总装备部项目 (JCKY2016208A001)

作者简介:张佳莹 (1992-),女,硕士研究生,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: 937069596@qq.com

通信作者:王红军 (1974-),男,副教授,硕士生导师,主要从事光学检测及光电测量技术方面的研究。E-mail: whj0253@sina.com

中的细节难以辨认,图像信息难以处理,降低了图像 数据处理的精度和质量。影响干涉结果的相干噪声就 是系统的本征噪声,抑制本征噪声是干涉仪设计的一 个难题。为了抑制本征噪声、多年来专家学者们做出 了诸多努力,如采用多根光纤耦合产生相位变化,通 过光楔改变光程:使用运动的散射体或移相器等方 法来降低激光的相干性 [2]。2004年, Pitter [3]等 人将旋转毛玻璃用于外差干涉显微镜抑制了相干全场 显微镜图像劣化的相干噪声。2010年, Morris^[4]等人 通过在干涉系统中加入旋转毛玻璃片的方法有效降低 了光源的相干性。2011年,徐建程⁵⁵等人对干涉系 统中的旋转毛玻璃的统计特性进行了计算。2015年, 北京师范大学的王森⁶⁶等人研究了不同毛玻璃转速 对热鬼成像衬噪比的影响,说明了毛玻璃转速不会影 响鬼成像的质量。利用毛玻璃抑制相干噪声的技术不 仅在干涉系统中使用,在全息、投影等系统中也被广 泛使用。2000年,Tziraki^[7]等人将旋转毛玻璃应用到 全息系统中来抑制系统的散斑噪声。2012年, Chen 等人^{18]}研究了在投影系统中使用旋转毛玻璃可以减 少散斑失真。2013年,Li^[9]将旋转毛玻璃引入到激光 投影仪中,有效抑制了激光散斑的对比度。2014年, 涂桥^[10]等人对旋转毛玻璃在全息系统中的去噪效果 进行研究。这些成果表明、使用旋转毛玻璃可以降低 系统的本征噪声、提高系统的信噪比。本文主要对大 口径菲索干涉仪中毛玻璃降噪性能进行分析、分析毛 玻璃转速与系统信噪比、对比度之间的关系,以达到 改善干涉图像质量的目的。

2 毛玻璃转速对干涉图像的影响

为了抑制干涉成像的噪声,一般将旋转毛玻璃置

于成像系统的焦平面附近处,实验测量原理如图 1 所 示。激光器发出的光经过空间滤波和扩束准直后,通 过分光棱镜后到标准反射镜(RF),一部分光被 RF 反射回分光棱镜,另一部分光透过 RF 照射到被测光 学元件(TF)后,再被反射回到分光棱镜。两束光 重合形成干涉,经成像系统到达旋转毛玻璃上,最后 通过变焦透镜组成像到 CCD 上。

假设在 *t* 时刻通过旋转毛玻璃后的光场为 $\mu(x, y, t)$,由毛玻璃引入的相位为 Φ_d ,其他静止的光 学元件引入的相位为 Φ_0 ,毛玻璃以角速度 ω 沿x轴 转动,则光场 $\mu(x, y, t)$ 可表示为

 $\mu(x, y, t) = \mu_0(x, y) \exp[i \Phi_d(r, \theta_0 - \omega t)]$, (1) 式中:r为毛玻璃旋转中心到光入射点的距离, θ_0 表 示毛玻璃转动的初始角度,光点位置如图 2 所示。在 测试过程中,对于任一位置入射光来说,r和 ω 保持 不变,则式(1)中的 $\exp[i \Phi_d(r, \theta_0 - \omega t)]$ 为时间的函数。

假设成像透镜的放大倍率为 1,则到达 CCD 上 的光场 *U*(*x*₁, *y*₁, *t*)可表示为

 $U(x_1, y_1, t) = \iint_{-\infty}^{\infty} k(x + x_1, y + y_1) \mu(x, y, t) dx dy$, (2) 式中: k(x, y) 表示成像系统的振幅点扩展函数。根据 散斑干涉理论,可得散斑光场的相干时间^[9] 为

$$\tau_{\rm c} = \frac{8\lambda z}{3\pi^2 \omega r D} \quad , \tag{3}$$

式中:z为毛玻璃到成像系统入瞳的距离,D为入 瞳直径, λ 为入射波长。在探测器的采集周期T内, 可采集到 $N = T / \tau_c$ 个完全不相同的散斑光强。当 $N = T / \tau_c$ 很大时,散斑对比度为

$$C_{\rm n} \propto \frac{1}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{8\lambda z}{3\pi^2 \omega r D T}}$$
, (4)

式中:T为 CCD 曝光时间, τ_c 为相干时间。根据干



170492-2



图 2 旋转毛玻璃示意图 Fig. 2 The rotated diffuser

涉理论,获得干涉条纹对比度为

$$C_{\rm s} \propto {\rm sinc}(\frac{3\pi^2 \omega r D \tau_{\rm RT}}{8\lambda z})$$
, (5)

式中: τ_{RT} 为测试光路和参考光的时间延迟。将干涉

条纹对比度和散斑对比度之比定义为干涉系统图像 的信噪比,因此带旋转毛玻璃的干涉系统图像的信噪 比可写成

$$RSN = \frac{C_{\rm s}}{C_{\rm n}} \propto \operatorname{sinc}(\frac{3\pi^2 \omega r D \tau_{\rm RT}}{8\lambda z}) / \sqrt{\frac{8\lambda z}{3\pi^2 \omega r D T}} \quad \circ \qquad (6)$$

由式 (3) 和式 (5) 可以看出干涉系统的信噪比与毛玻 璃转动角速度、探测器曝光时间和光场相干时间有关。

3 毛玻璃降噪作用仿真分析

根据测量原理,搭建了菲索(Fizeau)干涉实验系统,如图 3 所示。干涉系统中测试光和参考光的时间延迟 $\tau_{RI}=5\times10^8$ s,探测器的采集周期 T=1/714 s,圆形光瞳 直径(入瞳直径)D=7 mm,波长 $\lambda = 650$ nm。假设毛玻璃的角速度为 $\omega=2\pi f$,其中 f 为毛玻璃的转速,r=20 mm,z=35 mm。



图 3 带旋转毛玻璃的 Fizeau 干涉系统。1. 测试镜; 2. 参考镜; 3. 扩束镜; 4. 分光棱镜; 5. 激光器; 6. 毛玻璃; 7. 成像透镜; 8. CCD; 9. 调速装置

Fig. 3 Fizeau interference system with rotated diffuser. 1. TF; 2. RF; 3. Expansion lens; 4. BS; 5. Laser; 6. Rotated diffuser; 7. Imaging lens; 8. CCD; 9. Speed control device



图 4 毛玻璃转速对图像质量的影响。(a)条纹对比度与毛玻璃转速的相对关系; (b) 散斑对比度与毛玻 璃转速的关系; (c) 图像信噪比与毛玻璃转速的相对关系

Fig. 4 The influence of rotation frequency on image quality. (a) The influence to the fringes contrast; (b) The influence to the speckles images; (c) The influence to SNR

针对 Fizeau 干涉实验系统,利用已知参数,根 据式 (6) 对干涉条纹对比度、散斑对比度以及图像信 噪比与旋转毛玻璃转速的相对关系进行仿真分析,仿 真结果如图 4 所示。由图 4 可知,随着毛玻璃转速的 逐渐增加,干涉条纹对比度逐渐下降,下降速度缓慢, 约从 1.0 下降到 0.35。散斑对比度随着毛玻璃转速的 增加从 1.0 下降到 0.3,且下降速度较快。与此同时, 图像信噪比随着毛玻璃转速的增加呈现先增后减的 趋势,*f* 在 40 r/s~60 r/s 的范围内时,图像信噪比在 1.7~1.8 之间,图像质量良好,当*f*=50 r/s 时,图像 信噪比到达峰值,干涉图像质量最佳。结果说明,适 当增大毛玻璃的转速能很好抑制干涉图像的相干噪 声,但是需要牺牲一定的图像对比度。

4 实验与分析

采用 Taylor Hobson PGI Optics 轮廓仪测量所用毛 玻璃的表面粗糙度,得到其表面粗糙度为 0.3668 µm。 搭建斐索干涉系统,将该毛玻璃置于成像系统的焦点 附近,进行干涉降噪实验。之后采用维纳滤波的方法 对干涉图像进行处理,利用图像灰度值估算图像噪声, 得到在已知表面粗糙度的情况下,毛玻璃转速与条纹 对比度、散斑对比度、图像对比度以及图像信噪比的 相对关系,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,随着毛玻璃转速逐渐增大,干



图 5 毛玻璃转速与各参数的相对关系。(a)条纹对比度与毛玻璃转速的相对关系; (b) 散斑对比度与毛玻璃 转速的相对关系: (c) 图像信噪比与毛玻璃转速的相对关系

Fig. 5 The relationship between rotated diffuser and the parameters; (a) The influence to the contrast of contrast; (b) The influence to the speckles images; (c) The influence to SNR of the fringes



图 6 旋转毛玻璃不同转速时的干涉图像。(a) f = 10 r/s; (b) f = 20 r/s; (c) f = 30 r/s; (d) f = 40 r/s; (e) f = 50 r/s; (f) f = 60 r/s; (g) f = 70 r/s; (h) f = 80 r/sFig. 6 The interference images at different speeds of the rotated diffuser. (a) f = 10 r/s; (b) f = 20 r/s; (c) f = 30 r/s; (d) f = 40 r/s; (e) f = 50 r/s; (f) f = 60 r/s; (g) f = 70 r/s; (h) f = 80 r/s 涉图像的条纹对比度、散斑对比度都呈下降趋势,而 图像信噪比是先升后降。从图 5(a)、5(b) 可看出:条 纹对比度从 1.0 下降到 0.63, 散斑对比度从 1.0 下降 到 0.67, 虽然两者下降程度相当, 但是散斑对比度 的下降速度较快,可以更好地保留图像信息,有助 于提高图像信噪比。由图 5(c) 可看出:图像信噪比 在 f = 10 r/s~50 r/s 范围内呈上升趋势,从 1.0 上升到 1.12; 在 f = 50 r/s~80 r/s 范围内呈下降趋势,从 1.12 下降到 0.96; 在 f = 30 r/s~60 r/s 范围内,图像信噪 比 1.06~1.12 之间, 变化趋势平缓, 干涉图像较稳定。 另外还可得知:当f = 50 r/s 时,图像信噪比到达峰值, 为 1.12, 条纹对比度为 0.9, 散斑对比度为 0.82, 相 干噪声得到很好的抑制。以上结果,可以说明旋转毛 玻璃在抑制相干噪声的同时,以牺牲干涉图像的对比 度来获得高质量图像的信噪比。旋转毛玻璃不同转速 时的干涉图像如图 6 所示,可以看出:随着毛玻璃转 速的提高,虽然在一定程度上降低了图像的对比度, 但是提高了图像的信噪比,有效抑制了相干噪声。

5 总 结

本文分析了菲索干涉仪中旋转毛玻璃的转速与 干涉条纹对比度、散斑对比度、系统信噪比之间的关 系,并对其进行了实验验证。实验结果表明,在干涉 系统中加入旋转毛玻璃对干涉系统的噪声有明显的 抑制作用,同时干涉图像的条纹对比度、散斑对比度 会随着毛玻璃转速的增加而减小,但是图像的信噪比 会有所改善,很好地体现出了实验结果与仿真结果的 一致性。

参考文献

- Huang G W. Research on Fizeau phase-shifting laser interferometer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
 黄根旺. 菲索型移相式激光干涉仪研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业 大学, 2011.
- [2] Wu W. LRCS of absorbing coating target under coherent and partially coherent light[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. 吴文. 吸波涂层目标相干与部分相干光 LRCS 研究 [D]. 西安:西 安电子科技大学, 2014.
- [3] Pitter M C, See C W, Somekh M G. Full-field heterodyne interference microscope with spatially incoherent illumination[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(11): 1200–1202.
- [4] Morris M N, Naradikian M, Millerd J. Noise reduction in dynamic interferometry measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7790: 779000.
- [5] Xu J C, Liu Z C, Du Y W, et al. Statistical analysis of interferometric imaging system with rotating diffuser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 702–706. 徐建程,刘志超,杜雅薇,等.带旋转毛玻璃干涉成像系统的统计 分析 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23 (3): 702–706.
- [6] Wang S, Li H G, Zhang D J, et al. The influence of rotational speed of ground-glass on the quality of ghost imaging with thermal light[J]. Journal of Quantum Optics, 2015, 21(1): 9–13. 王森,李洪国,张德建,等. 毛玻璃转速对热光成像质量的影响 [J]. 量子光学学报, 2015, 21(1): 9–13.
- [7] Tziraki M. Jones R, French P M W, et al. Photorefractive holography for imaging through turbid media using low coherence light[J]. Applied Physics B, 2000, 70(1): 151–154.
- [8] Chen C Y, Su W C, Lin C H, et al. Reduction of speckles and distortion in projection system by using a rotating diffuser[J]. Optical Review, 2012, 19(6): 440–443.
- [9] Li J. Design of optical engine for LCOS laser display with rotated diffuser plate[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, **55**(1): 138–141.
- [10] Tu Q, Yu Y J, Zhou W J. A method to eliminate the noise of holographic system by using a rotated diffuser[J]. Optical instrument, 2014, 36(4): 337–341. 涂桥, 于瀛洁,周文静.基于旋转毛玻璃片的全息系统去嗓处理[J]. 光学仪器, 2014, 36(4)): 337–341.

Effect of speed of rotated diffuser on image quality of interference fringes

Zhang Jiaying, Wang Hongjun^{*}, Zhu Xueliang, Liu Bingcai, Tian Ailing

Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Film Technology and Optical Test, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China



Fizeau interferometer with rotated diffuser

Overview: In the interference system, the defects of the optical elements on the surface became a new light source, and coherent noise was generated under the irradiation of the laser beam. Then, a Newton ring and a bull's-eye would be formed. They would affect the quality of the interfereogram acquisition, further influence the subsequent of interference image processing, and bring the measurement error. These coherent noises which influenced the interference results were the intrinsic noise of the system. The intrinsic noise were a difficult problem when the interferometer was designed. Therefore, experts and scholars made a lot of efforts in order to suppress the intrinsic noise. This paper mainly analyzed the noise reduction performance of rotated diffuser in Fizeau interferometer, and analyzed the relationship among the speed of diffuser and the SNR , contrast of speckle, contrast of fringe in order to improve the quality of interference images.

In order to cope with the coherent noise existing in the interferometric system, the rotated diffuser was adopted to suppress the coherent noise. The relative relationship among the contrast of fringe, speckle contrast, the SNR and rotated diffuser speed on the quality of the interfering image were obtained. Then, the control parameters of rotated diffuser would be required in the interference fringe through the verification experiment. The interference images were obtained under different control parameters. With the speed of the rotated diffuser increased, the relative contrast of the speckle, the fringe contrast and the SNR of the interference images were analyzed. And a good consistency was shown through the simulation results.

According to the measurement principle, we set up the Fizeau interference experiment system. The time delay of test light and reference light in interfering the system is $\tau_{RT} = 5 \times 10^{-8}$, detector acquisition period T = 1/714 s, circular pupil diameter (entrance pupil diameter) D = 7 mm and wavelength $\lambda = 650$ nm. Assume that the angular velocity of the rotated diffuser is $\omega = 2\pi f$, where f is the rotational speed of the diffuser, r = 20 mm, z = 35 mm.

The experimental results showed that it was rotated diffuser that could suppress the noise of the system in the interfering system significantly. With the speed of the rotated diffuser increased, meanwhile, the fringe contrast of the images would be decreased. However, the SNR would be improved. It is indicated that the rotated diffuser did have the effect of suppressing coherent noise. It provided the basis for the processing design of the diffuser in the interferometer, so as to realize the high-precision surface inspection.

Citation: Zhang J Y, Wang H J, Zhu X L, *et al.* Effect of speeds of rotated diffuser on image quality of interference fringes[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(1): 170492

Supported by the International Cooperation Project of the Ministry of Science and Technology (2015DFA10360) and the General Armament Department (JCKY2016208A001)

^{*}E-mail: whj0253@sina.com