

文章编号: 0258-7025(2004)03-0347-03

便携式散斑干涉仪的光路安排

庞向阳¹, 刘 诚², 朱健强¹

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800
² 徐州师范大学物理系, 江苏 徐州 221009

摘要 数字散斑干涉(DSPI)是精密检测领域常用的一种测量技术,目前一般的数字散斑干涉系统使用大功率激光光源和大型光学实验平台,仅适用于实验室研究工作。为实现数字散斑干涉的工程现场应用,本文提出一种新的便携式数字散斑干涉仪的光路安排,它采用和小功率激光器相适应的光路配置,结构紧凑,体积小巧,在光源小型He-Ne激光器输出功率仅为5 mW的条件下,仍然能在实验中获得良好的干涉条纹图,其对比度可以和利用20 mW的激光得到的条纹图相比拟,有效地提高了激光的利用率。通过理论分析和实验验证,对该便携式数字散斑干涉仪的合理性进行了论证。

关键词 测试计量仪器;散斑干涉仪;弱光源;变形测量

中图分类号 TH 744.3 文献标识码 A

Optical Arrangement for Portable Digital Speckle Pattern Interferometer

PANG Xiang-yang¹, LIU Cheng², ZHU Jian-qiang¹

¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Xuzhou Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221009, China

Abstract Digital-speckle-pattern interferometer (DSPI) is a wide-used technology in fined-measure. Nowadays common DSPI system employs high-power laser source and great experimental facilities, which is only suitable for lab research work. In order to extend its application into fieldwork, a new optical layout for portable DSPI meter is proposed in this paper, which is suited for low-power laser and has some advantages such as optimized compact framework and small size. Driven by a He-Ne laser of 5 mW output power, it shapes fine interferogram whose contrast is as well as that shaped by laser of 20 mW power. Thus utilization efficiency of laser is promoted. Based on the study in theory and experiments, the paper demonstrates rationality of the portable DSPI meter.

Key words instrument for measurement and metrologic; speckle pattern interferometry; low-power laser; deformation measurement

本文通过理论分析与实验验证,设计了一种新型便携式数字散斑干涉仪,它的结构和体积不仅比一般的数字散斑干涉(DSPI)系统简单小巧,而且整个干涉系统可放进一个手提箱内,便于携带和使用。

1 数字散斑干涉测量原理简介

图1给出了在实验室中测量离面变形时所用的

一般光路图。它的基本原理是:扩束以后的激光由半透镜6分成等强度的两束光,分别照到被测物体和参照物体上,由于参考物体和被测量物体同时在CCD摄像机靶面成像,因此靶面上得到的是被测物体的像和参考物体的像的相干叠加。若设被测物体在靶面上一点P形成的光振幅为 U_1 ,位相为 ϕ_1 ,对应的参考物体在这点形成的光的振幅为 U_2 ,位相为 ϕ_2 ,那么P点的总光强 I_0 为

收稿日期:2002-11-13;收到修改稿日期:2003-06-18

作者简介:庞向阳(1975.9—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所联合实验室助理工程师,主要从事光学仪器设计。

E-mail: xiangyang@sohu.com

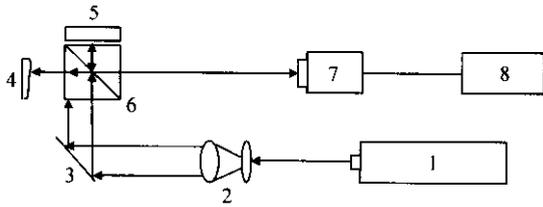


图 1 一般数字散斑干涉光路图

- 1: He-Ne 激光器; 2: 扩束器; 3: 反射镜; 4: 被测物体;
- 5: 参照物体; 6: 半透棱镜; 7: CCD 摄像机; 8: 计算机

Fig. 1 Setup of common DSPI

- 1: He-Ne laser; 2: beam extender; 3: reflecting mirror; 4: specimen; 5: reference object; 6: half transmitting prism; 7: CCD camera; 8: computer

$$I_0 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (1)$$

在物体未发生变形前先摄取第一幅图像,并将总光强 I_0 数字化后存入计算机,然后在被测物体发生变形后记录第二幅图像,同样对光强 I_1 数字化后存入计算机。这样,在物体的变形量不大的情况下,可设被测物体在靶面上 P 点形成的光的振幅大小仍为 U_1 ,位相变为 $\phi_1 + \Delta\phi^{[1]}$ 。保持参考物体不变,则此时 P 点的光强可写为

$$I_1 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2 + \Delta\phi) \quad (2)$$

在计算机内存中将两幅图像相减,即由式(2)减式(1)得

$$\begin{aligned} \Delta I &= 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2 + \Delta\phi) - \\ & 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) = \\ & 4U_1U_2 \sin(\phi_1 - \phi_2 + \Delta\phi/2) \sin(\Delta\phi/2) \end{aligned}$$

如果当将 ΔI 显示于监视器的屏幕上时,则屏幕的亮度 Q 正比于 $(\Delta I)^2$, 写为^[1]

$$\begin{aligned} Q &= \eta \Delta I^2 = \\ & \eta 16 U_1^2 U_2^2 \sin^2(\phi_1 - \phi_2 + \Delta\phi/2) \sin^2(\Delta\phi/2) = \\ & 8 \eta U_1^2 U_2^2 \sin^2(\phi_1 - \phi_2 + \Delta\phi/2) [1 - \cos(\Delta\phi)] \quad (3) \end{aligned}$$

式中, η 为装置的反应系数。由式(3)可见,如果从屏幕上得到有关物体离面位移大小的余弦条纹图,由条纹图经过后续的信息提取计算^[1]就能够获得物体的离面变形大小。

2 对普通测量光路的分析

公式(3)中 $\sin^2(\phi_1 - \phi_2 + \Delta\phi/2)$ 为随机系数, $U_1^2 U_2^2$ 决定了余弦条纹图的对比度,若 $U_1^2 U_2^2$ 较小则条纹图对比度变差,从而影响测量精度。另外,由于 CCD 的噪声因素影响, $U_1^2 U_2^2$ 过小则会减少图像的信噪比,使图像质量下降。 U_1^2, U_2^2 分别为参考物体和

被测物体在 P 点的光强,它由激光器功率和物体(参考物体和被测物体)的反射率及具体光路安排决定。在一般情况下,由于对物体表面进行斑化处理(如涂上银粉漆等),使物体的散射光有较大的发散角,加上成像透镜孔径有限和光线通过半透角镜时每次有二分之一的损耗,所以在普通的数字散斑干涉系统中虽然激光器的功率较大,但实际上真正起到测量作用的只是很少一部分。

3 改进后的数字散斑干涉光路

从上面普通数字散斑干涉光路的分析可以看出,造成光的损失因素有两个:第一是角镜的半透作用,第二是物体对光散射的作用。若从这两方面对实验光路进行改进,设法减小散射光的发散角并去掉半透角镜,将可以提高对激光的利用率,降低实验对激光器功率的要求,从而以小功率的激光器实现数字散斑干涉测量,解决数字散斑干涉系统的小型化问题。按照这个思路,本文提出图 2 的光路设置。

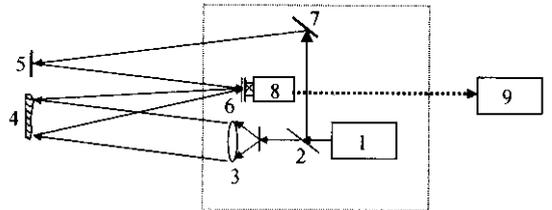


图 2 改进后的数字散斑干涉光路图

- 1: He-Ne 激光器; 2: 渐变分束器; 3: 扩束器; 4: 被测物体;
- 5, 7: 全反射镜; 6: 小区域磨砂玻璃板; 8: CCD 摄像机; 9: 计算机

Fig. 2 Improved optical setup for DSPI

- 1: He-Ne laser; 2: beam splitter; 3: beam extender; 4: specimen; 5, 7: totally reflecting mirror; 6: glass plate with sanded center; 8: CCD camera; 9: computer

3.1 光路简介

比较图 1 和图 2,可以看出图 2 用全反射镜 5 代替了图 1 中的参考物体,6 是一块平板玻璃,在其中心 2 mm 见方的区域进行磨砂处理,并使 5 的反射光射在磨砂点上。图 2 中激光器发出的光仍然分成两束,一束扩束后照射物体,并由物体反射后被 CCD 成像于靶面上,另一束经过 5 和 7 反射后入射到 6 的磨砂点上并经过镜头后在 CCD 靶面上形成散斑场,起到参考光的作用。在实际系统中,图中虚线框内的元件固定在一块底座上,既便于调节又增加系统的稳定性。测量时 5 直接固定在被测物体上。

全反射镜 5 和 7 的反射率很高,基本可以认为

是100%反射,6的引入是为了对参考光束进行斑化处理,使参考光由细光束变成一个散斑场,而且由于6紧靠 CCD 摄像机镜头,可以认为透射光完全进入 CCD 摄像机,这样参考光束的能量利用率就几乎达到100%;同时和成像透镜的孔径相比6的磨砂点较小,不会影响 CCD 镜头的正常成像。由于图2中没有使用半透角镜,很显然这样使图2的系统对光的总利用率提高了一倍。

3.2 两种光路要求的激光功率比较

在图2的光路中,如果设激光器总功率为 w ,渐变分束器的反射率为 c ,即参考光功率 $w_r = cw$,物光功率 $w_o = (1-c)w$,设被测物体光束由于散射的缘故利用率为 x ,那么 CCD 靶面上的光功率 $w' = w_r + w_o x$,考虑到参考光和物光强相等时干涉效果最好,即 $w_r = w_o x$,则

$$cw = w(1-c)x$$

所以 $c = x/(1+x)$, $w' = 2x/(1+x)w$

在图1中,设激光器的总功率为 p ,被测量物光束和参考光束由于散射的缘故利用率仍为 x ,再考虑到角镜的半透作用,那么 CCD 靶面上的光的功率 $w'' = px/2$,令 $w' = w''$,则

$$2x/(1+x)w = px/2$$

$$w = p(1+x)/4 \quad (4)$$

$$a = w/p = (1+x)/4 \quad (5)$$

式中, a 表示在 CCD 靶面上光照度相同时,两个光路所要求的激光光源功率之比。图2的光路对激光功率的要求远低于普通光路,且光束的利用率 x 较低时,这种优点更为突出,极限情况下图2光路的激光功率为普通光路的1/4时仍可达到相同的效果。

4 实验验证

实验用试件为经典周边固定均布载荷圆板,图3为试件正面和侧面图,载荷以气体为中介施加,当充气嘴向试件气室中充气时,试件圆板上各部分将受到均匀压力,而向外突起变形,这种变形上述两光路都能测量出,在相同测量效果时,哪个光路要求的激光功率更小在实验中可以直接得到。

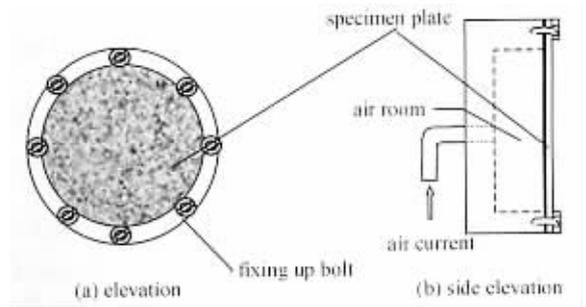


图3 试件示意图

Fig. 3 Schematic figure of specimen

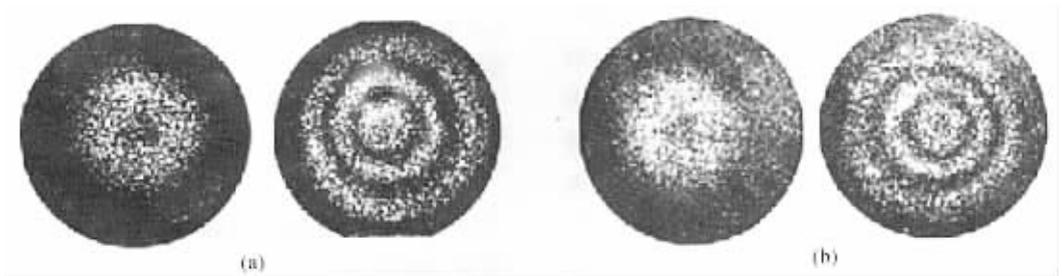


图4 实验结果

- (a) 利用图1光路,激光功率 p 为20 mW,载荷分别为100 g,400 g时的条纹图;
(b) 利用图2光路,激光功率 p 为5 mW,载荷分别为100 g,400 g时的条纹图

Fig. 4 Experimental result

- (a) Experimental result obtained with Fig. 1, laser power is 20 mW, and the loads are 100 g and 400 g, respectively;
(b) Experimental result obtained with Fig. 2, laser power is 5 mW, and the loads are 100 g and 400 g, respectively

试件表面用3号铜金粉进行斑化处理,试件距离 CCD 摄像机2 m, CCD 镜头孔径为4 cm。根据实验结果,利用5 mW的激光器在第一光路下完全作不出条纹图,但在图2光路下作出的条纹很清楚,其对比度可与图1光路中利用20 mW激光得到的

相比拟。图4是两种条件下的变形条纹图照片。

参考文献

- 1 M. S. Fernando, J. M. Andrew, R. T. John *et al.*. Noise reduction in twin-pulsed addition electronic speckle pattern interferometry fringe patterns [J]. *Opt. Eng.*, 1994, 33(5): 1712~1716