

## 基于散斑干涉光谱分布变化量探测瞬态高温的研究

武锦辉<sup>1,2</sup>, 杨瑞峰<sup>1,2</sup>, 王 高<sup>1,2</sup>

1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051
2. 中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 为了提高瞬态高温检测的精度, 利用快速傅里叶变换(FFT)对散斑干涉条纹进行光谱分析, 提出了通过光谱分布的偏移及幅值变化反演温度的方法。当激光照射应变材料时, 瞬态高温使材料发生形变从而使散斑干涉条纹改变, 被测表面形变前后获得的干涉条纹由面阵 CCD 采集。由于其对应的光谱密度分布函数也会发生相应的改变, 即中心波长位置偏移及振幅变化, 通过其改变反演材料的瞬态温度。在分析推导了瞬态温度变化、材料应变及干涉条纹变化之间的函数关系后, 仿真分析得到了瞬态温度正比于压强系数、反比于温度系数。实验采用 660 nm 半导体激光器, SI6600 型面阵 CCD 探测器, 从获得的光谱分布函数中提取中心波长的偏移量, 经计算和标定所得数据与传统的干涉测温方法进行对比, 探测精度可达 0.3%。相比传统的直接检测干涉条纹的变化量, 由被测面形变量推导温度的方法精度提高近 3 倍。

**关键词** 散斑干涉条纹; 瞬态高温; 光谱分布函数; 面阵 CCD

**中图分类号:** O432 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)07-1852-04

### 引言

散斑干涉技术是对物体表面微小形变进行测量的一种非接触式测量方法。该技术在元器件和加工件的应力学实验、新材料测试、机械结构的振动检测等领域已被广泛应用<sup>[1-5]</sup>。散斑干涉技术<sup>[6-8]</sup>是在散斑干涉、图像采集与处理技术的基础上对瞬态微小形变进行测量的现代光电检测技术, 具有实时性强、全场检测、精度高等优点, 由面阵 CCD 探测器采集被测表面的散斑干涉条纹, 再通过图像处理系统分析干涉条纹的宽度与个数, 完成对被测表面形变的间接测量。

传统的散斑干涉检测系统, 对得到的干涉条纹采集以后进行简单的图像处理, 去除部分低频热噪声和高频毛刺噪声<sup>[9]</sup>, 通过图像分析软件直接对干涉条纹形变的尺寸进行分析, 从而得到被测面的形变量。由该方法分析被测面的形变量存在很大的误差, 因为本身被测材料内部结构不可能理想的均匀分布, 因而对于各个位置的形变量也有所不同, 所选取对应位置的干涉条纹变化量是片面的, 整个干涉图像上不同位置的变化差异大, 测量误差大<sup>[10]</sup>。其次, 由于干涉条纹距离变化是由被测面形变引起的, 而面阵 CCD 探测器采集的是平面图像信息, 所以干涉条纹距离变化量与被测面形变量的函数关系是由材料特性、温度、压强等参数决定的, 这

个函数本身非线性, 所以只通过干涉条纹距离变化量分析被测面形变量必然有非线性误差的引入。本系统是以光谱分布函数的变化对被测面垂直形变量进行分析, 通过光谱幅值比值细分形变量与温度的函数关系。

### 1 实验部分

实验采用 660 nm 半导体激光器, SI6600 型面阵 CCD 探测器, 傅里叶变换光谱分析模块采用实验室自行开发的软件程序及相应参数。

#### 1.1 散斑干涉系统设计

散斑干涉系统如图 1 所示, 激光通过准直系统入射到干涉模块中, 经分束器将入射激光分为两部分, 一部分照射到

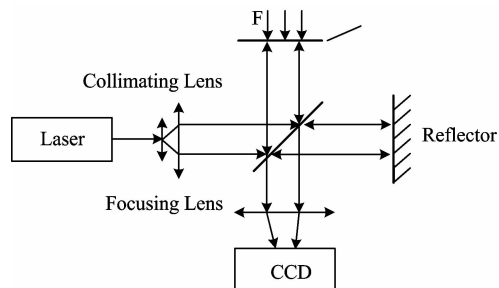


Fig. 1 Acquisition system of speckle interference fringe

收稿日期: 2012-02-08, 修订日期: 2012-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(60378019)和山西省自然科学基金项目(200911026-2)资助

作者简介: 武锦辉, 1978 年生, 中北大学讲师 e-mail: wujinhui\_1234@163.com; s20070384@163.com

被测表面,另一部分照射到反射镜上,被测表面到分束镜的距离与反射镜到分束镜的距离是相等的激光分束,分束后的两部分激光分别由两边反射回分束器,最终通过聚焦透镜在面阵 CCD 探测器上成像。当被测面由于受到爆炸产生的瞬态温度变化而形变时,会使在 CCD 上形成的干涉条纹发生改变,系统通过对干涉条纹对应频谱信息的分析推导被测表面形变程度以及对应的瞬态温度变化。

由热力学相关知识<sup>[11,12]</sup>可知,温度引起形变

$$\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (1)$$

体胀系数,压强不变的情况下,温度升高 1K 所引起的物体体积的相对变化。

$$k_T = - \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (2)$$

温度保持不变的情况下,增加单位压强所引起的物体体积的相对变化。

同时,固体膨胀符合物态方程

$$V(T, p) = V_0(T_0, 0)[1 + \alpha(T - T_0)] - k_T p \quad (3)$$

故

$$\frac{V(T, p)}{V_0(T_0, 0)} = \frac{l + \Delta l}{l} = 1 + \epsilon \quad (4)$$

即  $1 + \epsilon = 1 + \alpha(T - T_0) - k_T p$ 。又因为,对于弹性体拉伸形变有

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

变形后有  $p = E\epsilon$ , 整理得

$$\Delta l = \frac{\alpha l}{1 + k_T E} \Delta T \quad (6)$$

其中,  $\Delta l$  为被测物的形变量,  $\alpha$  为材料的温度变化系数,  $k_T$  为材料的压强温度变化系数,  $l$  为材料原始长度,  $\Delta T$  为温度变化量。

### 1.2 傅里叶变换模块

采集得到的干涉条纹在滤波去噪后,需要完成干涉条纹到频域光谱的傅里叶变换,变化过程由傅里叶变换模块完成。经过傅里叶变换后,干涉条纹变为光源的光谱分布,当被测面没有受到外界作用力或者温度的扰动时,中心光谱在入射激光光源的中心波长处,当爆炸产生的瞬态温度使被测表面发生形变后,其对应产生的光谱分布发生变化,主要体现在中心波长的偏移。由此偏移量与形变之间的函数关系可以求解对应瞬态温度的改变量。设入射激光的波长  $\lambda$ , 为波数  $\nu$ , 被测面的形变量为  $x$ , 则由傅里叶变换关系可推导出入射激光的光谱分布

$$E(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) e^{-i \frac{2\pi x}{\lambda}} dx \quad (7)$$

其中,  $I(x)$  为对应形变位置上的光强分布。

## 2 温度函数的仿真分析

根据温度与干涉条纹形变之间存在的关系,参考波和变化前的物面反射波叠加为

$$\begin{cases} E(x, y) = a_0(x, y)e^{i\phi_0(x, y)} + a_r(x, y)e^{i\phi_r(x, y)} \\ I_0(x, y) = E(x, y)E^*(x, y) = a_0^2 + a_r^2 + 2a_0 a_r \cos(\phi_0 - \phi_r) \end{cases} \quad (8)$$

物光相位变化后,  $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta l$ , 光强变为

$$I_1(x, y) = a_0^2 + a_r^2 + 2a_0 a_r \cos(\phi_0 - \phi_r + \phi) \quad (9)$$

采用减法模式,并取绝对值为

$$I(x, y) = |I_1 - I_0| = |2a_0 a_r [\cos(\phi_0 - \phi_r + \phi) - \cos(\phi_0 - \phi_r)]| = 4a_0 a_r \left| \sin\left[\frac{\varphi}{2} + (\phi_0 - \phi_r)\right] \sin\frac{\varphi}{2} \right| \quad (10)$$

当  $\varphi = 2n\pi (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$  时,相减后的光强为 0。

出现暗条纹,又  $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta l$ , 故  $\Delta l = \frac{n\lambda}{2}$ , 结合式(6)、式(8)和式(10),可得

$$\Delta l = \frac{\alpha l}{1 + k_T E} \Delta T, T = \frac{1 + k_T E}{\alpha l} \frac{n\lambda}{2} + T_0 \quad (11)$$

由式(11),可知温度函数是关于压强系数  $k_T$ 、温度系数  $\alpha$ 、初始温度  $T_0$ 、材料长度  $l$ 、激光波长  $\lambda$  和激光光波能量  $E$  的函数。当激光一定时,激光波长及功率就是常数了,所以被测试的瞬态温度主要取决于压强系数  $k_T$  和温度系数  $\alpha$  的变化,即被测表面的材料及其与形变相关的各个参数。由仿真数据图可以看出,当将初始温度设为 0 °C 时,激光波长选为 660 nm 半导体激光器时,对于不同压强系数和不同温度系数的被测表面而言,温度函数为一个接近线性的单调递增二次曲面。温度的变化与压强系数成正比,与温度系数成反比。在任意位置取点可求对应的瞬态温度,即建立了温度数学模型。

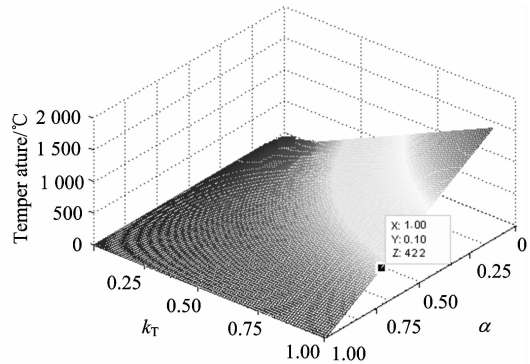


Fig. 2 Temperature function for pressure coefficient and temperature coefficient

## 3 结果与讨论

实验结果如图 3 所示,图 3(a)为散斑干涉条纹图像,在瞬态高温作用后的干涉条纹图像类似。图 3(b)为对散斑干涉条纹进行傅里叶变换得到的光谱分布函数。

在实验箱内通过钨铼热电偶监控产生标准的温度,温度范围 800~1 900 °C。采用传统干涉法测量干涉条纹形变量的方法获得的温度数据(A)与通过光谱分布函数的位移和幅值变量反演温度的数据(B)作对比,如表 1 所示。

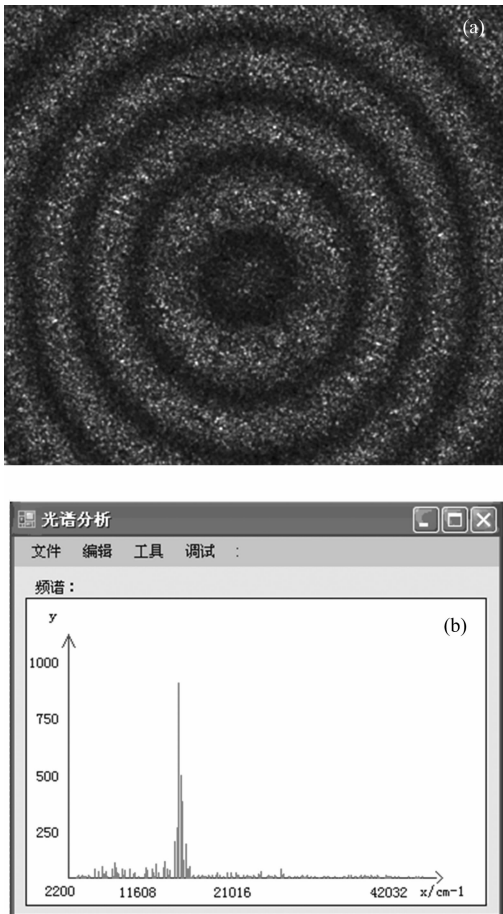


Fig. 3 Speckle pattern Interference fringes and spectral distribution

(a): Interference fringes; (b): Spectrum

由表 1 可知, 对标准温度进行测量时, 都采用散斑干涉的方法, 前者是传统的直接测量干涉条纹变化量求解温度,

后者是本职工作采用的先通过快速傅里叶变换获得光谱分布函数, 再由对应激光中心波长的位移和幅值变量反演温度。可以看出本方法得到的温度更接近真实温度, A 情况下(传统方法)得到的温度误差在 1% 以内, 而采用本方法(FFT 光谱分布反演算法)得到的温度误差几乎全部小于 0.3%, 相比传统的工作方式提高了探测精度。

Table 1 The spectrum data of two kinds of interferometer and the SPAKR 750A spectrometer

Standard Temperature/°C	Detection Temperature/°C	
	A	B
800	793	799
900	895	902
1 000	1 008	1 001
1 100	1 107	1 103
1 200	1 210	1 196
1 300	1 289	1 297
1 400	1 391	1 402
1 500	1 502	1 504
1 600	1 608	1 603
1 700	1 711	1 695
1 800	1 814	1 809
1 900	1 919	1 908

## 4 结 论

为了提高对在爆炸过程中对瞬态温度的检测精度, 设计了通过傅里叶变换获得光谱分布函数, 由中心波长的偏移量及幅值变化量反演温度的方法。通过实验可知, 采用此算法可以使探测温度更接近真实值, 相比传统的直接测量材料形变量的方法, 温度误差从 1% 减小到 0.3%, 同时, 避免了由于采集图像位置不同所造成的系统误差。

## References

- [1] TANG Chen, REN Hong-wei, CHEN Xia(唐 晨, 任宏伟, 陈 霞). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2010, 47: 021201-1.
- [2] Tang C, Zhang F, Li B. Appl. Opt., 2006, 45(10): 7392.
- [3] SUN Ping, HUANG Zhen-xian, LIU Fei(孙 平, 黄珍献, 刘 菲). Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2008, 19(4): 525.
- [4] WANG Shao-lin, XIE Jun, CAO Kai-fa(汪少林, 谢 军, 曹开法). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2008, 5(22): 98.
- [5] ZHANG Fang, LIU Wen-yao, XIA Lin(张 芳, 刘文耀, 夏 琳). Chinese Optics Letters(中国光学快报), 2009, 7(3): 210.
- [6] ZHANG Fang, LIU Wen-yao, DAI Lei(张 芳, 刘文耀, 代 雷). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2009, 36(1): 26.
- [7] Tang C, Lu W, Cai Y. Opt. Lett., 2008, 33(2): 183.
- [8] Xu C, Prince J L. IEEE Trans. Image Process, 1998, 7(3): 359.
- [9] Ruiz P D, Huntley J M, Wildman R D. Appl. Opt., 2005, 44(19): 3945.
- [10] LI Meng-wei, TANG Chen, WANG Gao(李孟委, 唐 晨, 王 高). Chinese Optics Letters(中国光学快报), 2009, 7(9): 788.
- [11] Hong L, Wan Y, Anil Jain. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777.
- [12] TAO Gang, LI Xi-de(陶 刚, 李喜德). Acta Optica Sinica(光学学报), 2001, 21(10): 1203.

## Research on Transient Temperature Detection by Spectrum Function Variation of Speckle Pattern Interferometry

WU Jin-hui<sup>1,2</sup>, YANG Rui-feng<sup>1,2</sup>, WANG Gao<sup>1,2</sup>

1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China

2. Science and Technology on Electronic Test and Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China

**Abstract** To improve the accuracy of the transient temperature detection system, transient temperature inversion processing algorithms was proposed based on spectrum analysis of speckle pattern interferometry. The interference fringes were formed by speckle interferometry in the system, and due to transient temperature changes that cause the material strain, the speckle interference pattern changes. The interference fringes on the measured surface were obtained by the area array CCD collection before and after deformation. The corresponding spectrum density function will change with the changes in the transient temperature, and the amplitude changes of center wavelength were inverted by the speckle pattern interferometry. Through detecting and calculating the ratio of the amplitude of the center wavelength, the transient temperature can be obtained by spectrum analysis. In the analysis and calculation for the function of transient temperature and material strain, material strain and interference fringes, the amplitude and phase function of the transient temperature change and interference fringes were derived, providing the necessary conditions for detecting spectral density function temperature. The experiment used 660 nm laser diode and SI6600 type area CCD detector. By extracting the offset of the center wavelength from the spectrum distribution function, the calculation and calibration data were compared to the data obtained with the traditional method of interference temperature detection, and the result showed that the detection accuracy can achieve 0.3%. Compared to traditional direct detection of interference fringes changes, the accuracy improved nearly three times by the method.

**Keywords** Speckle pattern interferometry; Transient temperature detection; Spectrum density function; Area array CCD

(Received Feb. 8, 2012; accepted Apr. 16, 2012)