

文章编号: 0253-2239(2005)11-1493-4

用双光收缩式径向剪切干涉仪测量气体温度场*

马 力 韩道福

(南昌大学物理系, 南昌 330047)

摘要: 为了适应大测试区的相位物体的测试研究和控制光学系统的成本,设计出双光收缩式径向剪切干涉光学系统。通过实验得到干涉条纹,用 CCD 摄入计算机,经 Matlab 编制傅里叶变换、相位去包裹和其他数值计算程序,解调干涉条纹的相位,计算出温度扰动产生的波面畸变量,它等于折射率变化引起的相位偏移值,用轴对称气体温度场重建方法,再现了气体温度场一个层面上的温度分布。实验结果与铜-康铜微型热电偶单点测温相比较,两者相差不大。实验表明该系统具有较高的精度和测试灵敏度,适于环境温度差较小的相位物体热物理量的测量。

关键词: 光学测量; 双光收缩径向剪切干涉; 干涉相位解调; 气体温度场重建

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Two-Beam-Contracted Radial Shearing Interferometer for Measuring the Gas Temperature Field

Ma Li Han Daofu

(Physics Department, Nanchang University, Nanchang 330047)

Abstract: A new two-beam-contracted radial shearing interference optical system is developed to study on the large field of gas temperature. Methods of fast Fourier transform (FFT) and phase unwrap were used to demodulate the phase of the interferogram obtained from experiment, distortion of wavefront disturbed by temperature fluctuation which equals to phase shift induced by refractive index change was calculated, and a way of axisymmetric temperature field reconstruction was put into reshewing a layer of the gas temperature distribution. By comparing, the difference is equivalent to that of the mini-thermocouple. Experimental result shows that the optical system is reasonably sensitive and precise. It is suitable for measuring the phase object of which the lateral size is the larger and the longitudinal size is the shorter, when the difference of the temperature is little compared with the environment.

Key words: optical measurement; two-beam-contracted radial shearing interferometry; interference phase demodulation; reconstruction of gas temperature field

1 引 言

在光学检测技术中,干涉技术因其测量精度高而倍受关注。而在各种干涉计量方法中,径向剪切干涉技术^[1]具有不需要参考波面,抗振动、抗干扰的优点。随着计算机应用技术和图像处理技术的发展,该技术正受到广泛的关注并取得了一些新的研究进展。目前,该技术主要用于小面形、相位调制特性等方面的测量^[2,3]。为扩展其应用领域,本文就

该技术用于相位物体的热物理量(如:温度场)测量进行研究。常见的径向剪切干涉光学系统中,剪切干涉是将经过测试区的波面进行缩放来实现。对于大测试区,采用这种方式将使系统的成本大大增加,不适合用于相位物体的测试研究。为解决上述问题,本文采用双光径收缩的方法设计适合于大测试区的径向剪切干涉测量光学系统,并将其用于测试轴对称分布的气体温度场。

* 南昌大学 2003 年度科学基金资助课题。

作者简介: 马 力(1957~),男,满族,辽宁人,教授,光学专业硕士生导师,主要从事相位物体的光测技术和光学条纹自动分析技术的研究。E-mail: lma@ncu.edu.cn

收稿日期: 2004-11-08;收到修改稿日期: 2005-03-16

2 测试原理

2.1 双光收缩式径向剪切干涉光学系统

当相位物体的横向尺寸较大,而与环境最大温差较小、且纵向尺寸(光传播方向)较小时(如:横向尺寸 90 mm,纵向尺寸 40 mm,温差 45 °C 左右),采用一般的径向剪切干涉光路不仅涉及成本问题,还涉及测量灵敏度的问题。

为了适合上述情况下的相位物体热物理量的测量,我们将进行剪切干涉的两束光的光径同时按不同比例进行缩小,使剪切干涉主系统光学元件尺寸变小。所设计的径向剪切干涉光学系统如图 1 所示。

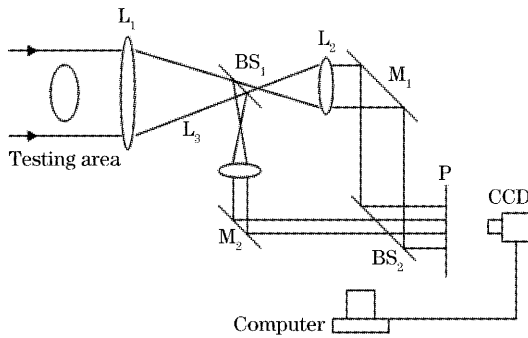


图 1 双光收缩式径向剪切干涉仪装置

Fig. 1 Setup of two wavefront-contracted radial shearing interferometer

图 1 中, L_1 和 L_2 、 L_1 和 L_3 分别构成望远镜系统。其不仅起到缩小光径的作用,而且还可将经过测试区发生偏折的光线进行偏折角放大,起到提高测量灵敏度的作用。

两束按不同比例缩小的光分别经反射镜 M_1 和 M_2 ,并通过半透半反镜 BS_2 实现共光路径向剪切干涉。在观察屏上出现的干涉条纹图用 CCD 摄像机记录进入计算机存储,以便进行后续的数据采集和计算。测量光学系统中的 M_1 、 M_2 和 BS_2 要求紧凑放置,达到尽可能不受外界影响。

2.2 径向剪切干涉的波面相位解调

设畸变波面在分束前的相位分布极坐标表示为 $W(r, \phi)$ (其中 r 为极径, ϕ 为极角,波面中心为极点),则其对应的复振幅分布为

$$E(r, \phi) = A \exp\{i[W(r, \phi)]\},$$

那么图 1 所示光路的干涉图强度分布为:

$$I(r/s, \phi) = |A \exp\{i[W(r/s, \phi)]\} + A \exp\{i[W(r, \phi)]\}|^2 = |A|^2 \{2 + 2 \cos[kW_{OPD}(r/s, \phi)]\}, \quad (1)$$

其中

$$W_{OPD}(r/s, \phi) = W(r/s, \phi) - W(r, \phi), \quad (2)$$

(1) 式中的振幅 A 近似认为是缓变的, (2) 式中 $W(r/s, \phi)$ 、 $W(r, \phi)$ 和 $W_{OPD}(r/s, \phi)$ 分别表示两不同束宽相干波面的相位和它们在相互重叠区域上的波相差, s 是径向剪切比,且 $s < 1$ 。

对(2)式作如下处理:

以 s 乘以(2)式左右两边的径向变量 r 得

$$W_{OPD}(r, \phi) = W(r, \phi) - W(sr, \phi), \quad (3)$$

重复以上步骤 n 次,并且将得到的等式左右累加,得

$$\sum_{i=0}^n W_{OPD}(rs^i, \phi) = W(r, \phi) - W(rs^n, \phi), \quad (4)$$

由(4)式知,当 n 比较大时,等式右边的第二项可以看成近似程度很好的平面波,因此产生径向剪切前的波面相位分布为

$$W(r, \phi) = \sum_{i=0}^n W_{OPD}(rs^i, \phi). \quad (5)$$

从(5)式可以看出,只要对径向剪切干涉图进行条纹相位解调^[4],得到两相干波面相差分布 $W_{OPD}(r/s, \phi)$,便可通过迭代运算得到畸变波面的相位分布。

2.3 轴对称气体温度场的重建

用图 1 所示光学系统测量轴对称气体的温度场。光波通过气体温度场的情形如图 2 所示,图中 $x-y$ 平面上的圆形为轴对称气体温度场的一个截面,平面波沿 x 轴向传播, ϕ_0 为通过测试区前的光波面, ϕ_1 、 ϕ_2 分别为通过测试区没有受到温度扰动和受到温度扰动的波面。 ϕ_1 、 ϕ_2 的面形差是由于温度扰动气体折射率变化引起的,由两波面上具有相同坐标值的点的相位差给出,因此重建温度扰动前后通过测试区的波面 ϕ_1 、 ϕ_2 ,求出它们的相位差,可导出温度中气体折射率的分布。

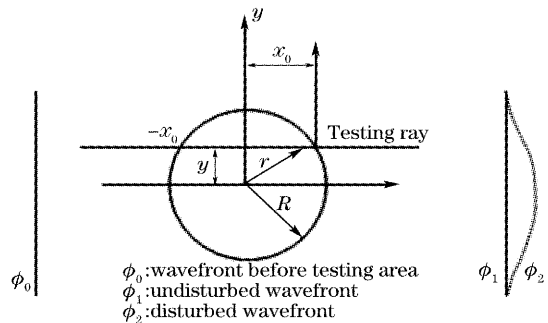


图 2 平行光束通过轴对称温度场的情形

Fig. 2 Scene of light going through the axisymmetric temperature field

以穿过测试区的一条光线考虑,图 2 中光波通过测试区因折射率变化引起的相位变化为

$$\Delta\varphi(y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-x_0}^{x_0} [n(r) - n_\infty] dx = \frac{4\pi}{\lambda} \int_0^{x_0} \Delta n(r) dx, \quad (6)$$

设受扰前后的波面相差为

$$\Delta W(y) = W_2(y) - W_1(y), \quad (7)$$

(7) 式中, $W_1(y)$ 和 $W_2(y)$ 分别为受扰前后的波面相位, 根据对图 2 的分析, 很显然有

$$\Delta\varphi(y) = \Delta W(y), \quad (8)$$

将(8)式代入(6)式, 并对(6)式变换为对 r 积分(阿贝尔变换)得到

$$\Delta W(y) = \frac{4\pi}{\lambda} \int_y^{r_0} \frac{\Delta n(r) r dr}{\sqrt{r^2 - y^2}}, \quad (9)$$

对(9)式作阿贝尔逆变换, 得到温度场气体折射率分布:

$$\Delta n(r) = -\frac{\lambda}{2\pi^2} \int_r^{r_0} \frac{d[\Delta W(y)]/dy dy}{\sqrt{y^2 - r^2}}, \quad (10)$$

由于研究对象为气体, (5)式再结合 G-D (Gladstone-Dale)公式和理想气体状态方程, 导出被测气体的温度场分布为

$$T(r) = T_\infty \left/ \left[1 + \frac{\Delta n(r) R T_\infty}{M P K} \right] \right., \quad (11)$$

式中 T_∞ 为测试时的环境温度, M 为气体分子量, P 为气体压强, R 为气体普适气体常数, K 为 G-D 常数。

3 实验测试

对单棒圆柱上部形成的相位空间(气体温度场)进行了实验测试。圆柱棒用来加热其上部空间的气体, 其直径为 27 mm。根据文献[5]所做的不同放大倍数(1/s)下波面重建精度的研究, 放大倍数越大则精度越高, 不同放大倍数的重建精度在同一数量级, 即使在较小的放大倍数下, 其测量结果也与实际相差很小。因此, 试验中综合考虑元件使用和数据采集的方便, 我们用 $s=3/4$ 作为剪切比。图 3(a) 为圆柱棒未加热时用图 1 系统得到的径向剪切干涉图, 图 3(b) 为圆柱棒加热到 75 °C (348 K) 时的径向剪切干涉图(环境温度 29 °C)。

选取圆柱棒上方空间某处(如 12.6 mm 处)的一个层面的温度场分析, 分别对图 3(a)、图 3(b) 上相同行像素进行傅里叶变换^[4]、低通滤波、傅里叶逆变换、相位去包裹等处理^[6], 求得(7)式中的 $W_1(y)$

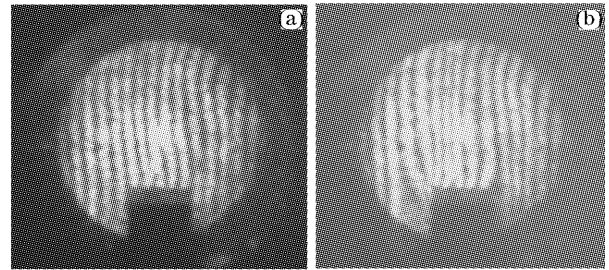


图 3 径向剪切干涉条纹图。(a)铜棒加热前, (b)铜棒加热后

Fig. 3 Radial shearing interferogram. (a) Before cylinder was heated, (b) After cylinder was heated 和 $W_2(y)$ 如图 4 所示, 其中粗线代表 $W_2(y)$, 细线代表 $W_1(y)$ 。

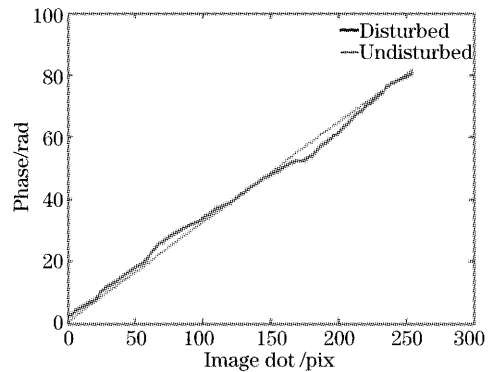


图 4 受到扰动与未受到扰动的波相差比较
Fig. 4 Comparison of phase between disturbed and undisturbed

由(10)式求得被分析层面的折射率场分布曲线(如图 5), 再用(11)式得到该层面的温度分布曲线(如图 6), 将图 6 曲线绕纵轴旋转一周得出该层面温度分布的三维示意图(如图 7)。

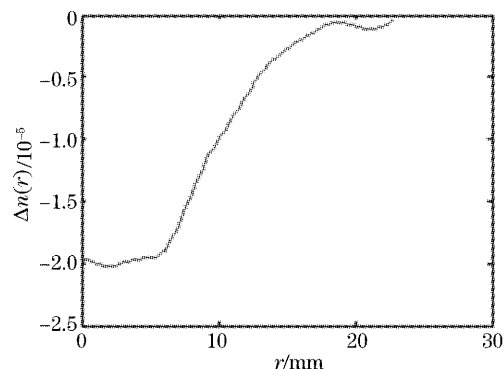


图 5 气体温度场沿径向的折射率变化
Fig. 5 Variety of refractive index along radius of the gas temperature field

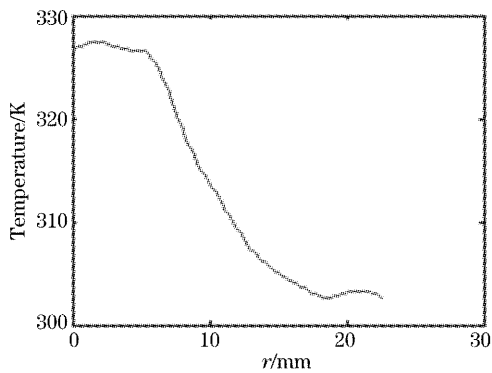


图 6 气体温度场沿径向的温度分布

Fig. 6 Variation of temperature along radius of the gas temperature field

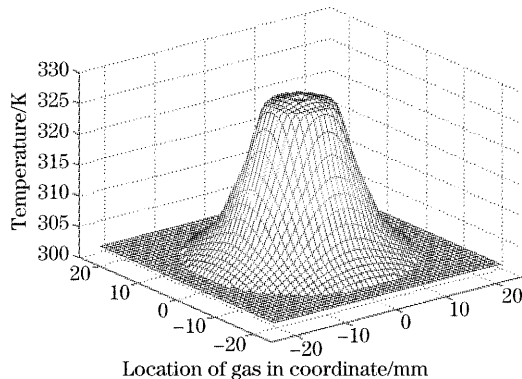


图 7 一个层面上温度分布的三维显示

Fig. 7 Three-dimensional show of temperature in one layer

4 比较和结论

为了对测量结果进行比较,我们用 0.125 mm 铜-康铜微型热电偶对气体流场中的部分点进行了测温比较(由于气流扰动,无法对所有位置点比较),测量值和(11)式的计算值如表 1 所示。

表 1 计算结果与热电偶单点测量结果比较

Table 1 Result comparison

Test position /r	Measured value /K	Calculated value /K
0.1	325	326.72
5.9	324	325.78
9.9	316	314.01
15.9	305	306.19

从表 1 可以看出,测量系统得到的结果与微型热电偶所测结果差别不大;同时发现当圆柱棒加热温度为 345 K 时,干涉条纹的形变就可以分辨,而同样的实验环境下,其它的光学测量系统(如散斑干涉、莫尔偏折等),圆柱棒的加热温度要达到与环境

温差在 90 °C 以上才能分辨,这说明所提出的径向剪切干涉测量光学系统具有高精度和高灵敏度的特点,适合纵向尺寸较小(本文测试尺寸 40 mm)、与环境最大温差较小(本文棒与环境温差在 50 °C 左右)时的相位物体的测量研究。

研究结果表明径向剪切干涉测试技术适用于相位物体的热物理量的定量测量,对工程热物理实验研究有着实际的应用价值。

参 考 文 献

- 1 D. Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1978
- 2 Tsuguo Kohno, Daiji Matsumoto, Takanori Yazawa. Radial shearing interferometer for in-progress measurement of diamond turning[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(10): 2696~2699
- 3 Zhao Xiaofeng, Li Dahai, Chen Zhenpei. Measuring phase modulation characteristics of liquid crystal spatial modulators by using cyclic radial shearing interference [J]. *J. Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2002, **39**(4): 675~679 (in Chinese)
赵晓凤, 李大海, 陈祯培. 利用径向剪切干涉法测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2002, **39**(4): 675~679
- 4 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashu. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- 5 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei *et al.*. Algorithm and accuracy study of wavefront reconstruction with different amplification ratio based on the cyclic radial shearing interferometer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(6): 503~508 (in Chinese)
李大海, 陈怀新, 陈祯培 等. 径向剪切干涉波前重建算法和不同倍数下重建精度的研究 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6): 503~508
- 6 K. Itoh. Analysis of the phase unwrapping problem[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(14): 2470~2470
- 7 Xie Mengmeng, Jiang Jinhu, Yang Yong. Grating big shearing digital speckle pattern interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 125~128 (in Chinese)
谢蒙蒙, 姜锦虎, 杨 勇. 光栅大错位数字散斑干涉术的研究 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 125~128
- 8 Zhao Jianlin, Tan Haiyun. Measuring three-dimensional temperature field by digital holographic interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1447~1451 (in Chinese)
赵建林, 谭海蕴. 电子学全息干涉术用于温度场测量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1447~1451
- 9 Wang Liwu, Su Xianyu, Zhou Libing. Correction algorithm of random phase shifting errors in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 614~618 (in Chinese)
王立无, 苏显渝, 周利兵. 相位测量轮廓术中随机相移误差的校正算法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 614~618
- 10 Wang Cheng, Han Changyuan. Wavefront measurement with synthesizing method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 723~725 (in Chinese)
王 成, 韩昌元. 利用合成方法检测波面[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 723~725