

应用 ESPI 和实时全息测量轴 对称温度场*

何世平 汪柳生 伍小平
(中国科学技术大学力学系, 合肥 230026)

Brian Dobbins Shabir Kapasi
(Nottingham Polytechnic, UK)

摘要: 本文应用电子散斑干涉法(ESPI)和实时全息干涉法,从互相垂直的两个方向,同时测量了酒精灯火焰温度场和喷射(jet impingement)温度场。文中应用交互式高速数字图像处理系统处理了全息和散斑条纹图,并定量计算了剖面上的温度分布。还就可能出现的实验误差进行了分析。

关键词: ESPI, 全息干涉, 数字图像处理, 温度测量, 气流喷射

Measurement of axis-symmetric temperature fields by using ESPI and real-time holography

He Shiping, Wang Liusheng, Wu Xiaoping
(University of Science and Technology of China, Hefei)

Brian Dobbins, Shabir Kapasi
(Nottingham Polytechnic, United Kingdom)

Abstract: The temperature fields of alcohol flame and impinging jet are measured by simultaneously using ESPI and real-time holography in two orthogonal directions. An interactive high-speed image processing system is used to process the fringe patterns obtained by holography and ESPI. Temperature distributions of certain cross-sections are calculated quantitatively. Sources of error in the experiment are discussed.

Key words: ESPI, holographic interferometry, digital image processing, temperature measurement, jet-impingement

一、前 言

探索测量气体温度场的新方法,一直是工程热物理领域中的一个重要课题。光测技术具有精度高、非接触、显示全场信息等特点,尤其为人们所重视。随着全息干涉技术的发展,不少学者应用该技术研究了火焰温度场测量及流场显示问题^[1~5]。全息技术条纹质量好,空间分辨率高。但用银盐干版作记录介质,处理和操作过程复杂费时,影响了全息干涉技术的推广使

收稿日期:1990年10月11日。

* 国家自然科学基金资助项目。

用。

电子散斑干涉技术(ESPI)使用 TV 摄像机或 COD 摄像机,取代了全息干版作记录,从而使得 ESPI 不仅具有全息技术的测量精度和灵敏度,而且还具有电子技术处理信息快速方便的优点,可用于稳态和非稳态问题的研究。但该技术目前主要应用于漫射物表面的变形测量和振动测量,对于温度测量和流场显示方面的应用研究,报道极少。

喷射(jet impingement)温度场的测量和显示,是机械工程部门的一个热门课题。目前用于测温的技术,主要有热电偶和液晶技术。都是接触式的,且只能测量壁板表面的温度,无法测量气体温度的空间分布。

本文主要探索用电子散斑干涉技术测量气体温度场的方法,特别是喷射温度场的测量和显示方法;同时研究散斑和全息干涉条纹的图像处理。文中将 ESPI 和实时全息结合起来,从互相垂直的两个方向同时测量和显示喷射温度场。为了比较这两种技术的测量精度,首先测量了轴对称的酒精灯火焰温度场。这两种测量方法所得结果基本上是一致的,最大差别不超过 4%。最后,用交互式高速数字图像处理系统,分析处理了全息和散斑干涉条纹图。

二、实验装置及光学技术

图 1 是 jet impingement 实验装置,喷嘴内径为 10.26 mm,两壁面之间的间距为 60 mm,下壁面可以更换,以改变边界条件。对两种不同边界条件进行了实验研究:导热表面(由铝板制成)和绝热表面(由 20 mm 厚的泡沫塑料板制成)。气流经电热器加热,成为热喷流。火焰温度场由酒精灯产生,酒精灯和火焰都是轴对称的。

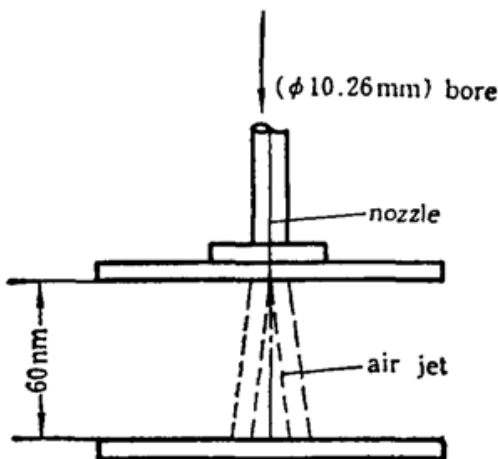


Fig. 1 Jet impingement

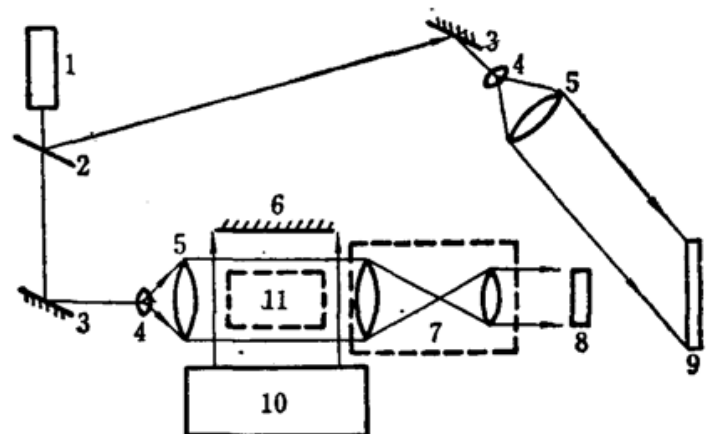


Fig. 2 Optical arrangement combined ESPI and holography

1-laser; 2-splitter; 3-mirror; 4-expander; 5-collimator; 6-diffusing surface; 7-imaging system; 8-ground glass; 9-plate; 10-ESPI; 11-test space

图 2 是 ESPI 与全息干涉相结合的光路。图中,10 是一台 ESPI 仪器,6 是与之配合的参考漫射面,其作用是产生一个随机分布的散斑场,用以调制物光光场。为了适应测量相位物体的变形或温度场,在其照明光路中必须增加一个准直透镜。这个透镜的引入,改变了原光学系统的参数。因此,选择此透镜的焦距时,必须综合考虑光场大小足够,以及成像放大倍数与原系统匹配等因素。

在全息干涉系统中,也用准直光照明。准直光与 ESPI 装置的准直照明光方向互相垂直。光路中使用了一对透镜组成的成像系统 7 及毛玻璃 8。成像系统将火焰或喷流的对称面成像到毛玻璃 8 上,为的是尽量缩小因折射率梯度引起光线偏折而造成的误差^[4]。

关于 ESPI 的测量原理和操作,简述如下:

1. 在物体变形前进行第一次曝光

到达摄像机靶面的物光和参考光分别为

$$F_1 = U_0 e^{i2\pi\nu t} e^{i\phi_0} \quad (1)$$

$$F_r = U_r e^{i2\pi\nu t} e^{i\phi_r} \quad (2)$$

其中,振幅 U_0 和 U_r 是实的, ν 为光频, ϕ 为位相。到达靶面的初始光强分布为

$$I_1 = U_r^2 + U_0^2 + 2U_r U_0 \cos(\phi_r - \phi_0) \quad (3)$$

由摄像机获取的上述视频信号,经 A/D 转换器数值化,并存储于帧存贮器中。

2. 在物体变形后,进行第二次曝光

由于物体变形,物光变为

$$F_2 = U_0 e^{i2\pi\nu t} e^{i(\phi_0 + \Delta\phi)} \quad (4)$$

靶面上光强分布和相应的视频信号变为

$$I_2 = U_r^2 + U_0^2 + 2U_r U_0 \cos(\phi_r - \phi_0 - \Delta\phi) \quad (5)$$

式中, $\Delta\phi$ 是变形引起的物光位相改变量。

3. 上述变形前后的两个光强信号 I_1 和 I_2 被实时相减。经过整流,在监视器上显示出实时干涉条纹图,其强度分布与下式成正比:

$$\begin{aligned} |I_1 - I_2| &= 2|U_r U_0 [\cos(\phi_r - \phi_0) - \cos(\phi_r - \phi_0 - \Delta\phi)]| \\ &= 4 \left| U_r U_0 \sin\left(\phi_r - \phi_0 - \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\frac{\Delta\phi}{2} \right| \end{aligned} \quad (6)$$

上述光强分布中,前一个正弦因子,是由于物光与参考光的随机干涉所形成的散斑高频调制因子;后一正弦因子,给出一组条纹,与普通全息干涉的结果相同,只是明暗反转。黑条纹是整数级条纹。

三、气体温度测量原理

根据全息或 ESPI 条纹图,在确定出条纹级数之后,由下式可以求出气体折射率 n 的变化:

$$\int [n(x, y, z) - n_0] dz = N(x, y) \cdot \lambda \quad (7)$$

式中, n_0 是第一次曝光时的气体折射率,为常数; λ 是所用激光波长; $N(x, y)$ 是干涉条纹级数。公式中使用坐标系 $(o-xyz)$, z 轴与物光光轴方向一致。

由于 ESPI 的物光两次经过位相物体,条纹加倍。所以在处理 ESPI 的相关条纹图时,必须注意,相邻黑条纹只差 0.5 级。

对于图 3 所示的轴对称温度场,干涉条纹不再是等温线。由图 3 可得

$$dz = \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - x^2}} \quad (8)$$

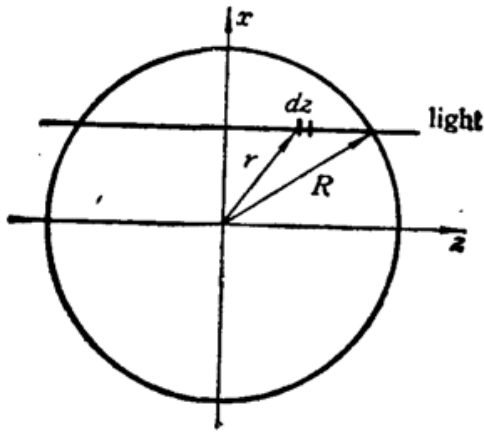


Fig. 3 Axisymmetric phase object

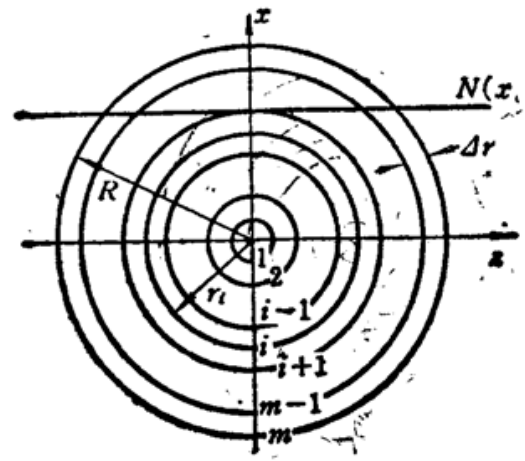


Fig. 4 Computing model

式中, r 是 $(x \cdot y)$ 平面上的极坐标。由此, 方程(7)可以写成

$$2 \int_0^{\infty} \frac{f(r) r \cdot dr}{\sqrt{r^2 - x^2}} = N(x, y) \lambda \quad (9)$$

式中, $f(r) = n(r) - n_0$, 是折射率的改变量。

由方程(9)计算 $f(r)$ 的方法很多, 现介绍一种常用而又简单的数值法。首先, 如图4所示, 将位相物体中的受扰区, 分成 m 个间隔为 Δr 的同心圆环。近似地假设每个圆环中的折射率变化 $f(r)$ 是常数。这样, 方程(9)就可以用下列方程组代替:

$$\sum_{k=i}^{m-1} A_{ki} f_k(r) = N_i \left(\frac{\lambda}{2\Delta r} \right) \quad (10)$$

式中

$$A_{ki} = \{ \sqrt{(k+1)^2 - x^2} - \sqrt{k^2 - x^2} \} \quad (11)$$

根据 Gladstone-Dale 方程, 气体折射率 n 与气体密度 ρ 有如下关系式

$$n - 1 = K\rho \quad (12)$$

其中, K 是 Gladstone-Dale 常数。

对于理想气体, 利用气体状态方程和(12)式, 可以导出如下的计算气体温度场的公式

$$T = \frac{K_{\mu} P T_0}{K_{\mu} P + \bar{R} f(r) T_0} \quad (13)$$

式中, $K = 0.226 \times 10^{-8} (\text{m}^3/\text{kg})$ (当 $\lambda = 0.6328 \times 10^{-6} \text{m}$ 时); $\mu = 28.97 (\text{kg}/\text{mol})$, 是空气分子量; $P = 0.10135 (\text{MPa})$, 是气体压力; $\bar{R} = 8.309 \times 10^8 (\text{N} \cdot \text{m}/\text{mol} \cdot \text{K})$, 是通用气体常数。

Gladstone-Dale 常数与气体成份有关。火焰点燃前后的气体成份不一样, 所以 K 值也不一样。但通常在计算温度中忽略这种变化, 用空气的 K 值代替火焰中实际气体的 K 值。

四、实验数据处理

本文用交互式高速图像处理系统分析处理了所得实验数据。该系统由主板 DT 2862 和高速协处理板 DT 2858 组成。主板带 1 Mbyte 帧存, 可存放 4 幅 $512 \times 512 \times 8 \text{bit}$ 图像。主从板本身都带有算术逻辑运算器 (ALU) 和多个输入、输出及结果查找表 (LUT), 信号可用伪彩色方式显示。

条纹图由录像机输入图像处理系统。根据散斑条纹噪声高、火焰条纹图垂直成份较多的特点,对图像进行 3×5 和 5×7 的低通滤波,以减小散斑噪声的影响,提高信噪比。此外,还进行了线性拉伸与直方图均衡化处理,以扩大条纹的灰度范围和增强对比度。

为计算某一剖面内的温度分布,首先必须求出该剖面内条纹级数的分布。由于干涉条纹图的光强极值点,获得离散点上的整数级条纹级数,再通过最小二乘法,用多项式将条纹级数拟合为

$$N(x) = \sum_{j=0}^k a_j x^j \quad (14)$$

式中, k 是多项式的次数, a_j 是多项式的系数, 本文用 10 次多项式来拟合火焰条纹级数分布。在求出条纹级数的连续分布后, 各圆环(图 4)上的条纹级数 N_i 得以确定。利用公式(10), 求出每个圆环内折射率的改变量 $f(r)$ 。最后, 再利用公式(13)求出气体的绝对温度 T 。全部计算均由计算机完成。

五、实验结果和讨论

图 5 是酒精灯火焰的条纹图。其中(a)是全息干涉条纹图, (b)是散斑相关条纹图。这两个条纹图, 是用如图 2 所示的两种技术, 从互相垂直的两个方向上同时测到的结果。注意到 ESPI 的物光两次通过火焰, 测量灵敏度加倍, 所以散斑条纹图中的条纹数, 是全息条纹数的两倍。

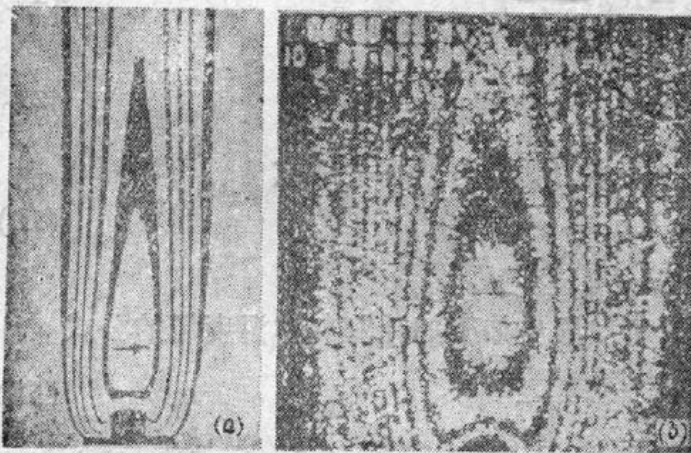


Fig. 5 Alcohol flame fringe patterns

- (a) Holographic interferometric fringe pattern;
(b) Speckle correlation fringe pattern

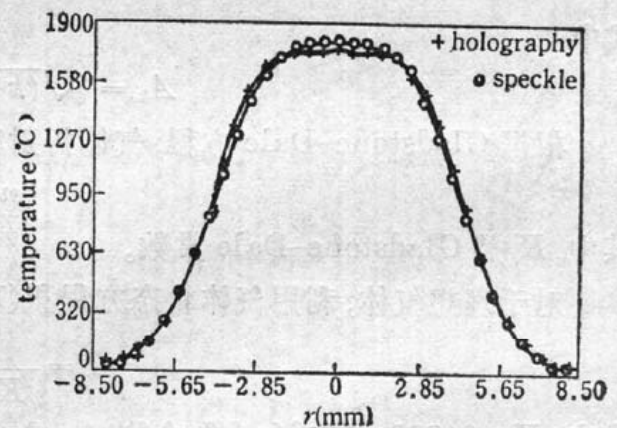


Fig. 6 Flame temperature distribution profiles

图 6 是根据图 5 计算出来的温度分布曲线。扫描剖面如图中箭头所示, 在灯芯以上 7.36 mm 处。由温度分布曲线可以看出, 两种光学方法的测量结果基本上是一致的, 两者的最大偏差小于 4%。

图 7 是空气喷射温度场的全息干涉条纹图。空气喷射的温度为 66°C , 雷诺数为 $R_e = 6400 \pm 300$ 。其中(a)为导热表面, (b)是绝热表面。图 8 是喷射温度场的散斑相关条纹图, 喷气参数同图 7。图 8(a)为导热表面, (b)为绝热表面。图 9 是全息干涉有限条纹图, 其中图 9(a)是加了载波的载波条纹图。空气喷射温度是 70°C , 导热表面的雷诺数为 $R_e = 8330 \pm 350$ 。图 9 中干涉条纹图是半场, 喷气中心为图 9 中箭头所示。因温度不高, 加上温度场变化迅速, 所

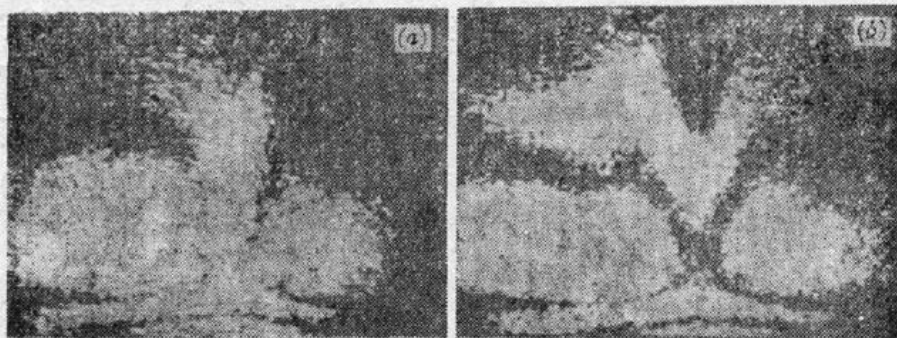


Fig. 7 Jet impingement holographic interferometric fringe patterns

- (a) Heated air jet (66°C), conductive surface, $R_e=6400\pm300$;
 (b) Heated air jet (66°C), adiabatic surface, $R_e=6400\pm300$

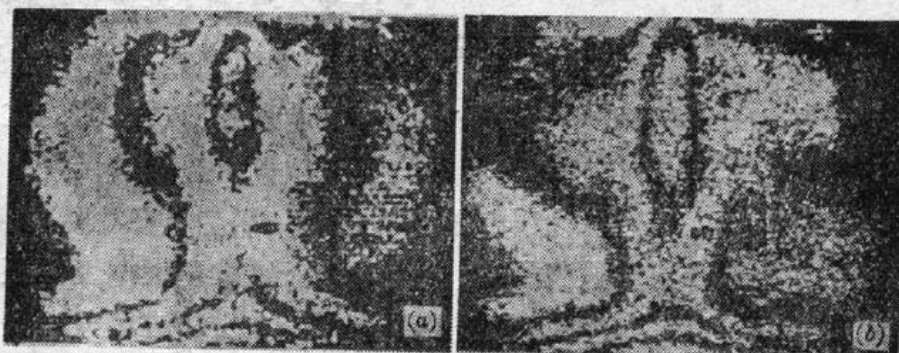


Fig. 8 Jet impingement speckle correlation fringe patterns

- (a) Heated air jet (66°C), conductive surface, $R_e=6400\pm300$;
 (b) Heated air jet (66°C), adiabatic surface, $R_e=6400\pm300$

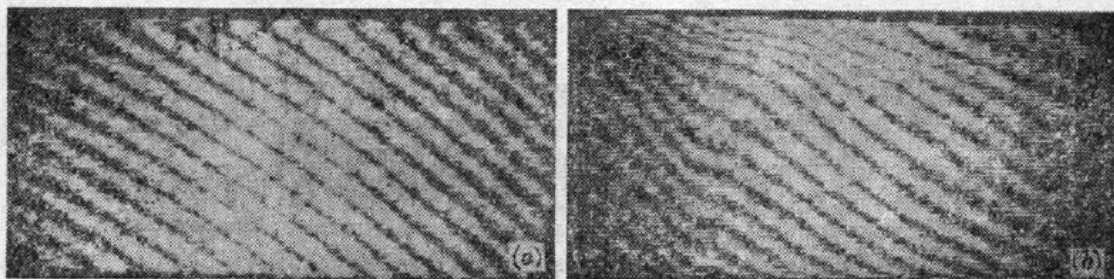


Fig. 9 Holographic interferometric finite fringe patterns

- (a) Carrier fringe pattern; (b) Jet-impingement (conductive surface; $R_e=8330\pm350$)

以, 引进载波条纹是极其必要的。这不仅能增加条纹读数点, 提高测量精度, 还使得干涉条纹的振动幅度大大下降, 从而提高了条纹的质量。图 10 是根据图 9 的干涉条纹图计算出来的喷射下壁板表面的温度分布曲线。为了比较测量结果, 在壁板表面上不同的半径处, 安装了 6 个热电偶。测量结果如图中的实心圆点标记所示。两种方法的测量结果基本一致, 除个别点相差达 6% 以外, 在其它各点相差不超过 2%。

引起实验误差的因素较多, 主要有以下几方面:

1. 实际温度场分布的非轴对称性。由于计算模型是按轴对称问题处理的, 所以, 实际温度分布的非轴对称性, 必然会引进实验误差。为消除或减小这部分误差, 除要求实验装置本身的轴对称外, 还应保证实验环境的轴对称性。此外, 在干涉条纹的处理中, 也可采用左右对应条纹间隔取平均的办法, 以减小非轴对称分布对实验结果的影响。

2. 条纹读数的偏差。这种误差对实验结果的影响很大, 尤其是火焰温度场, 因为其温度

很高,而条纹又不太多。为减少这部分实验误差,可以采用这样一些措施:(1)采用高灵敏度的

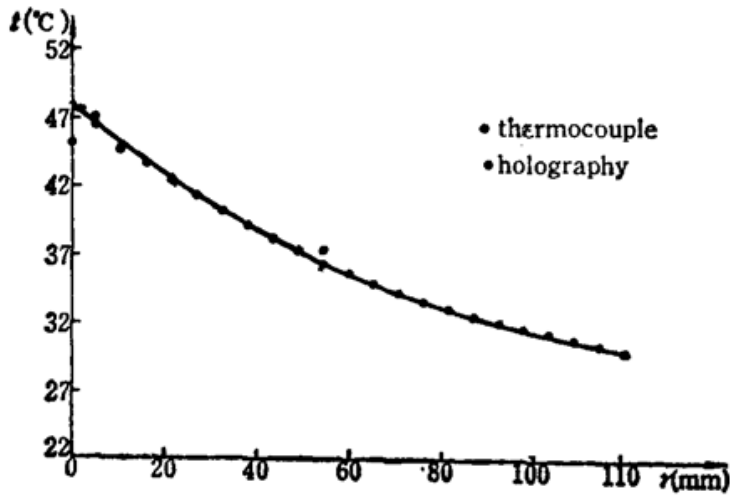


Fig. 10 Jet impingement temperature distribution profile within lower-wall surface

测量技术,如 ESPI,其测量灵敏度加倍了;(2)采用图像处理技术分析干涉条纹图,以保证条纹读数的精度;(3)引进载波条纹,以增加条纹读数点。

3. 光线通过温度场时的偏折造成的误差。由于折射率梯度的存在,使得物光通过被测温度场时发生偏折。而计算模型,是按光线沿直线传播来考虑的。为了减少这部分误差,光路系统中引进了一个成像系统,将温度场的对称面成像到毛玻璃上。有关的理论分析表明,这一措施大大减少了光线偏折造成的误差。

4. 喷气温度场随时间发生迅速变化引起的实验误差。因为喷气温度场随时间发生快速的近于周期性的变化,加上干涉条纹数又很少,使得干涉条纹发生大幅度的振动。即使是实时全息条纹,也很难用 Video 记录下高质量的条纹图。为此,本文引进了载波条纹。这不仅增加了条纹读数点,还大大降低了条纹的振动幅度,使得用 Video 记录到高质量的条纹图成为可能。为了兼顾水平和垂直两个方向上条纹读数的精度,引进了斜向分布的载波条纹。

参 考 文 献

- 1 C. M. Vest, *Holographic Interferometry*, John Wiley and Sons, New York, 1979, pp. 329~334
- 2 He, S. P., Wu, X. P., The application of holographic thermometry in engineering thermophysics, *Int. Conference on Experimental Mechanics, Beijing, China (1985)*, pp. 307~311
- 3 D. L. Reuss, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, **955**, 92(1988)
- 4 C. M. Vest, *Optical Metrology and computer tomography for measurement of temperature and density*, *Proc. of the NATO Advanced Study Institute, Viana do Castelo, Portugal 16-27 July (1984)*
- 5 A. Ito, T. Kashiwagi, *Appl. Opt.*, **26**, 954~959(1987)