

# 测量温度场分布的激光散斑照相计量术

束继祖

李建一

(中国科学院力学研究所)

(中国科学院工程热物理所)

**提要** 本文讨论了激光散斑照相术在测量密度(或温度)场中的应用。提出了激光散斑——纹影干涉仪的光学系统,可在同一瞬时得到一张散斑图和一张差分干涉图。对沿竖直加热平板自然对流的温度边界层进行了定量地测量。从散斑图和从干涉图中获得的实验结果符合极好。为了说明本方法的应用范围,对一个非稳定的波动甚大的本申灯火焰进行了测量。实验结果表明,激光散斑照相术更适于研究湍流场,因为干涉术在这种情况下已失去其定量计量的作用。

**关键词** 激光散斑照相, 激光散斑纹影干涉系统。

## 1 前言

在固体力学领域中,激光散斑照相已被广泛地用来测量固体表面的应力或应变分布。经过20多年来的发展,已成为固体力学实验中的一项专门的测量技术。

激光散斑照相在流体力学或热力学中的应用,首先由U. Köpf<sup>[1]</sup>于1972年开创地用于密度场的测量。但直到80年代初期才逐渐被人们重视,应用于燃烧<sup>[2]</sup>,湍流射流<sup>[3]</sup>,自然对流<sup>[4]</sup>和气动力学<sup>[5]</sup>等方面的研究。同时为激光散斑照相应用于透明介质的密度或温度场,例如超声速风洞,叶栅风洞,以及等离子体等流场的定量计量开拓了方法。在这个领域中,散斑位移是由于光在密度(或温度)场(折射率场)中的折射而形成的;在固体力学中却是物体表面位移的结果。

激光散斑照相是一种非接触测量方法。其测量值和纹影仪、纹影(差分)干涉仪所测量的一样,均是流场中的密度或温度的梯度值。但散斑照相术提供的测量数据远大于纹影干涉图所能提供的。一张直径为100毫米的散斑图,通常可得到 $10^3-10^4$ 个测量值。

## 2 光学系统

光学系统如图1所示。红宝石脉冲激光器作为光源,激光束被扩展和准直后穿过实验场——相位物体折射场 $n(x, y, z)$ ,它是通过场镜 $L_1$ 成象于毛玻璃MG的平面上。照相物镜 $L_2$ 将距离毛玻璃MG为 $l$ 处的空间平面,成象在记录散斑图的照相干板PH上,形成为散

1987年7月14日收到。

斑照相系统。

通过实验场的光，一部份由分束镜  $BS$  送入干涉元件  $WP$ ，它是由 Wollaston 棱镜和检偏镜组成。它与激光器，扩束镜  $L_1$ ，准直镜  $L_2$ ，场镜  $L_3$ ，以及照相机组成了纹影(差分)

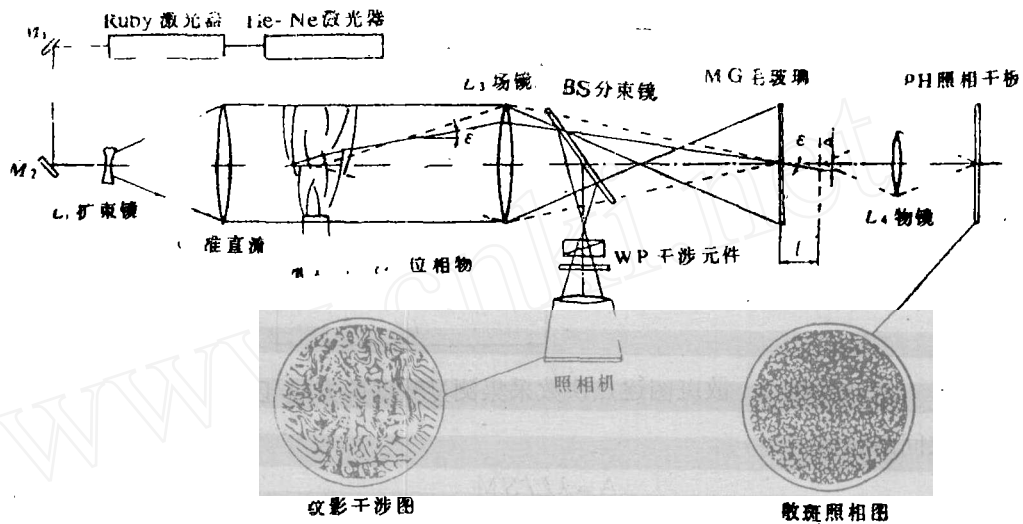


图 1 激光纹影(差分)干涉——散斑照相光学系统图

干涉仪<sup>[6]</sup>。应用这套光学装置，可在同一瞬间摄取一张散斑图，和一张作为流动显示的差分干涉图(如图 1 所示)。所以称之为激光散斑——纹影(差分)干涉仪系统。在这里散斑图记录的是毛玻璃  $MG$  上的随机的亮度分布；而纹影(差分)干涉图直接提供了流场显示图，其干涉条纹的相对漂移量，正比于垂直未扰动背景干涉条纹方向上的密度(或温度)梯度。干涉条纹相应不同方向上的漂移，标志着不同方向上的梯度值<sup>[6]</sup>。流场中干涉条纹变化剧烈和条纹密集处，显然是密度(折射率)梯度较大的地方。这样，差分干涉图可作为从散斑图中逐点采集数据的一个对照旁证。实际上，这两种图中所含有的信息，是一一对应的，而且均为流场密度(或温度)的梯度值。

### 3 实验应用

为了建立散斑图的相关性，采用了两次曝光法。一次曝光在被测试对象不存在的场合下进行的，这时所记录的散斑图案为毛玻璃  $MG$  上的非均匀随机分布的亮度场，称之为“参考散斑场”；另一次曝光，是在被测试对象在场中发生时进行的。由于光在实验场中产生折射，所记录的散斑图案不同于前次，光在实验场中的折射，是由于被测物场中密度或温度分布的不均匀，导致了不均匀折射率场  $n(x, y, z)$ 。因而，所记录下的散斑图案带有流场的信息，它称之为“测试散斑场”。

光在实验场中的折射角  $\varepsilon$  为：

$$\varepsilon = \Delta / l \quad (1)$$

式中  $\Delta$  为毛玻璃上各自散斑点，在两次曝光之间，由于实验场对光的折射所产生的位移量； $l$  为成象聚焦平面到毛玻璃之间的距离(图 1)。距离  $l$  可人为地改变，以控制散斑照相的

测量灵敏度和折射角  $e$  的测量范围。

为了得到光在流场中相应点上的折射角  $e(x, y)$ ，必须从散斑图中读出相应点上散斑对之间的位移量  $\Delta(x, y)$ 。为此，采用逐点分析法，具体如图 2 所示。散斑对的位移量  $\Delta$  由杨

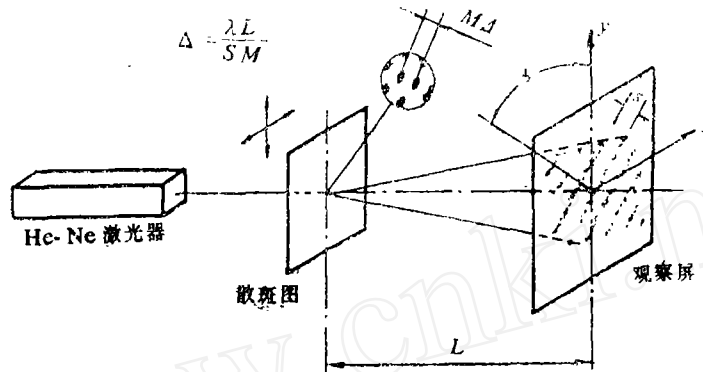


图 2 散斑图逐点读数采集测量数据的方法 [4]

氏干涉条纹间距  $S$  给出：

$$\Delta = \lambda L / SM \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为照明激光的波长， $M$  为散斑照相光学系统的放大率。

按杨氏干涉原理，可知干涉条纹的方向是垂直于散斑对位移  $\Delta$  的方向。因而就可直接地从杨氏干涉图中确定出光折射角的两个分量值  $e_x(x, y)$  和  $e_y(x, y)$ 。光线折射角与测试场的折射率  $n(x, y, z)$  的关系式为 [7]

$$\begin{aligned} e_x(x, y) &= \int \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} dz \\ e_y(x, y) &= \int \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y} dz \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $z$  为光线的传播方向。对于气体来说，流场的折射率与密度的关系，是由 Gladstone-Dale 公式给出：

$$n - 1 = k\rho \quad (4)$$

对于二维平面流场来说， $\partial\rho/\partial x$  和  $\partial\rho/\partial y$  与积分路线  $z$  无关，因而 (3) 式简化为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial\rho}{\partial x}(x, y) &= \mathcal{D} k e_x(x, y) \\ \frac{\partial\rho}{\partial y}(x, y) &= \mathcal{D} k e_y(x, y) \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\mathcal{D}$  为被测试场沿光线传播方向  $z$  上的尺度。(5) 式的右边均为已知量，对 (5) 式积分就可得到流场中的密度分布值  $\rho(x, y)$ 。

选用沿竖直加热平板的自然对流现象作为测试对象。平板温度约为  $80^\circ\text{C}$ ，环境温度为  $26^\circ\text{C}$ 。是一个层流对流现象，流场十分稳定。采用了 He—Ne 激光器为光源，用机械式快门控制曝光。图 3 为采用图 1 所示的光学系统得到的实验结果：左图为沿竖直加热平板自然对流温度边界层的差分干涉图；其余三张为平板中央截面上，从散斑图中获取的杨氏干涉图。

依据差分干涉图和散斑图所提供的测量数据,通过(5)式分别求得密度分布值 $\rho(x)$ 。按等压过程的假设,应用气体状态方程将密度 $\rho(x)$ 换算成温度分布值 $T(x)$ 。图4为上述两种方法得到的该自然对流温度边界层中的温度分布曲线。两者符合得相当好。在这种情况下,实验证明散斑干涉计量法与差分干涉术具有同等测量精度。

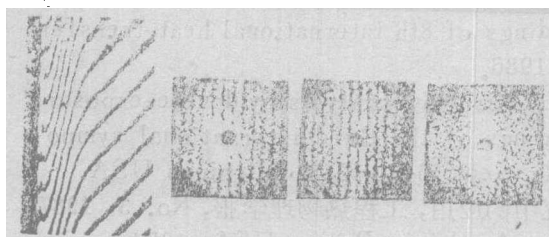


图3 沿竖直加热平板自然对流纹影(差分)干涉图(左)及边界层中相应点上的散斑杨氏干涉图(右)

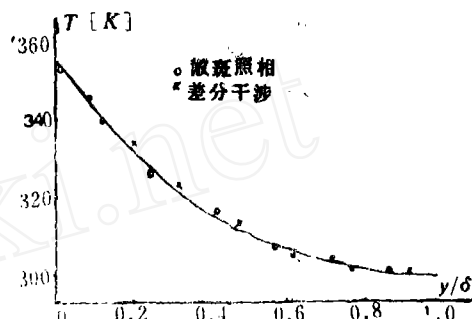


图4 散斑测量结果与纹影(差分)干涉测量结果比较

为了展示散斑照相的应用测量范围,对一非稳定的密度,或温度起伏波动甚大的高温火焰(本申灯),进行了测试。采用红宝石脉冲激光器为光源,曝光时间为30毫微秒。记录介质为Agfa 10E75全息平板。所得到的结果如图5所示。中央为一幅差分干涉图,显示了流场为湍流状态。十分明显地看出,干涉条纹的走向与漂移量已无法从干涉图中确定。在这种情况下,干涉图已失去其定量计量的作用。但散斑照相仍能提供出其测量值,逐点再现出来的杨氏干涉图(表示在图5的周围)十分清晰。这说明散斑照相术可作为研究湍流场的一个有效的测试手段。其优点还在于它同时提供出全场的信息,这是胜过激光测速仪的,为研究流动相关性提供了条件。

对于这样的一个流场,如前例一样,进行定量计算,就没有那样简单了。流场首先属于一个任意三维流场,其次这是一个高温场,光线穿过场时,折射相当大,光线的路径不能简化为直线处理,因此方程(3)中每一式子中均含有两个未知数。如何处理这样的问题,文献[8]中已有介绍。本文在此只作为一个方法的介绍。

#### 4 结论

激光散斑照相是一种适用于定量测量密度或温度场的非接触测试技术。实验证明,特别适用于对高温、湍流燃烧场,以及密度波动起伏剧烈的流场进行定量测量。因为在这些流场中,光学干涉计量术已失去其定量的作用;而散斑照相仍能提出测量数据;散斑照相系统对其光学元件的要求远低于干涉仪的要求,因而易于实现和操作;散斑照相系统对激光器的要求极低,远小于全息照相应具备的相干性;散斑照相记录的是全场信息,提供的测量数据远大于干涉术的能力;实验证明,图1所示的光学系统具有良好功能。对任一纹影仪系统稍加改装就可实现。

此项工作是在于1986年7月份在工程热物理研究所的全息实验台上进行的。此外,作者

感谢清华大学研究生, 原工程热物理研究员宋跃祖同志, 在此项工作中的协助。

### 参 考 文 献

- [1] U. Köpf, *Opt. Commun.* Vol. 5, 347—350, 1972.
- [2] Farrell P. V., Hofeldt, D. L., *Appl. Opt.* 23 (1984), 1055—1059.
- [3] Wernckinck; U., Merzkirch. W., Fomin. N. A., *Experiments in Fluids*, No. 3, 1985, 206—208.
- [4] Wernckinck, U., Merzkirch, W., Measurement of natural convection by speckle photography. In the proceedings of 8th international heat-transfer conference, San Francisco, USA, 1986.
- [5] Hinsch, K., Mach, D., Schipper, W., Air flow analysis by double-exposure speckle photography. In the proceedings of the third international symposium on flow visualization, 576-580, Sept. 6-9, 1983, Michigan USA.
- [6] 束继祖, 差分干涉仪及其在传热学研究中的应用, *工程热物理学报*, No. 3, 1987.
- [7] Merzkirch, W., *Flow Visualization*, Academic Press, USA, 1974.
- [8] 束继祖, 流动显示技术及其现代发展概况, *实验力学*, 2 (1987), No. 1, 1—14.

## Speckle Photography for Measuring Temperature Distribution

Shu Jizu

Li Jianyi

(*Institute of Mechanics*)      (*Institute of Engineering Thermophysics*)

**Abstract** Laser speckle photography applied to the density (or temperature) field is described. A laser Speckle-Schlieren interferometer system, with which a specklegram and a differential interferogram can be produced simultaneously, is suggested. The temperature boundary layer of a natural convection along a vertical heated plate is measured quantitatively. The experimental results from the specklegram and the differential interferogram have an excellent agreement. For demonstrating the application of the method, an unstable, fluctuating Bunsen flame is also measured. The experiment shows qualitatively that the laser speckle photography is more suitable for studying the turbulent flow field because the interferometry loses its function of the quantitative measurement in such flow field.

**Key words** Laser Speckle Photography, Laser Speckle-Schlieren Interferometer System.