

应用 ESPI 研究水平热管的自然对流现象

何世平 汪柳生

(中国科学技术大学 合肥 230026)

Brian Dobbins Shobir Kapasi

(Nottingham Polytechnic, 英国)

提要 本文应用 Vintens ESPI、全息干涉及新发展的 Video 全息干涉技术,研究了水平热管的自然对流现象。介绍了这三种技术的光学系统,和关于气体温度场的测量原理和测量结果。与热电偶所测温度值比较,结果相当一致。文中还就可能的测量误差作了定性分析。

关键词 自然对流, ESPI, 全息, 水平热管

1. 引言

在许多能量转换设备的设计中,自然对流热交换是一个必须考虑的重要因素。为此,探索新的研究自然对流现象的测量手段是很必要的。光测技术具有精度高、非接触及全场显示信息等特点,是研究气体温度场和自然对流现象的有力工具。

近年来,已有若干应用全息干涉技术研究各种自然对流现象的文章^[1-4]。全息干涉的条纹质量好,分辨力高。但由于使用银盐干版作记录介质,对操作技术要求高,且费时,这就给全息干涉技术的实用推广带来一定的障碍。电子散斑干涉技术(ESPI)用摄像机(TV 或 CCD)取代全息干涉技术中的银盐干版作记录。它一方面具有全息干涉的测量精度,另一方面具有干涉图象电子处理的快速与方便。ESPI 在 1/25 秒内记录或刷新一幅图,能实时显示干涉条纹和记录全过程。显然,ESPI 是流场显示或自然对流动态现象研究的一个重要的实验手段。它使用方便,但价格昂贵。一种新发展的方法,称为 Video 全息,它利用 CCD 摄像机接收,由帧存贮器进行模拟运算,得到由显示器显示的条纹图。它具有 ESPI 的所有优点,价格只约其 1/6。所需要的光学元件均是通用的,可以根据需要灵活地安排光路。和全息干涉相比,ESPI 和 Video 全息干涉的共同缺点,是条纹图上有散斑噪声。

本文主要是探索和比较各种方法应用于测量气体温度场和研究自然对流现象的能力。实验结果表明,ESPI 和 Video 全息干涉都是方便的有力工具。与热电偶测量的温度值比较,非常一致。

2. 测量原理

全息干涉技术的测量原理已有不少介绍,本文着重讨论 ESPI 和 Video 全息干涉的测量原理。

本文于 1990 年 4 月 28 日收到第一稿,1990 年 8 月 25 日收到修改稿。

考虑物光和参光相干叠加得到的光强,由摄像机接收。参光和物光分别为

$$u = u_r e^{i\varphi} \quad (1)$$

$$u_1 = u_o e^{i\varphi_o} \quad (2)$$

第一次曝光记录的光强为 I_1

$$I_1 = u_r^2 + u_o^2 + 2u_r u_o \cos(\varphi - \varphi_o) \quad (3)$$

第二次曝光时,物光为

$$u_2 = u_o e^{i(\varphi_o + \Delta\varphi)} \quad (4)$$

其中 $\Delta\varphi$ 是在两次曝光之间,位相物体的变化所引起的物光位相改变量。第二次曝光记录的光强为

$$I_2 = u_r^2 + u_o^2 + 2u_r u_o \cos(\varphi - \varphi_o - \Delta\varphi) \quad (5)$$

这里假定位相物体的变化不改变振幅 u_o 。

光强分布 I_1 由摄像机接收,经 A/D 转换,存储于帧存贮器中。光强分布 I_2 ,也经 A/D 转换,经减法器与 I_1 实时相减,并经整流滤波,和 D/A 转换,在显示器上显示出与下式成正比的强度分布

$$\begin{aligned} I = I_1 - I_2 &= 2|u_r u_o [\cos(\varphi - \varphi_o) - \cos(\varphi - \varphi_o - \Delta\varphi)]| \\ &= 4|u_r u_o \sin(\varphi - \varphi_o - 1/2 \Delta\varphi) \sin \frac{1}{2} \Delta\varphi| \end{aligned} \quad (6)$$

在上述强度分布中,前一个正弦因子,是随机干涉形成的高频成分,亦即散斑调制因子。后一个正弦因子,将以条纹的形式,给出位相物体位相改变量的信息。这就是 ESPI 或 Video 全息干涉得到的信息。和全息干涉得到的条纹图相比,明暗条纹发生反转。因为 $\Delta\varphi = 2N\pi$ 时,得到黑条纹; N 为整数,是条纹级数。

气体折射率的变化是造成 $\Delta\varphi$ 的原因。现在讨论二维温度场。坐标系 ($O-xyz$), z 轴与光轴方向一致。假设初始时的位相物体,是未受扰动的均匀场,其折射率 n_o , 温度为 T_o , 密度为 ρ_o 。发生了变化的温度不均匀场,其折射率为 $n(x, y)$, 温度为 $T(x, y)$, 密度为 $\rho(x, y)$ 。被测气体考虑为沿 z 方向长度为 L 的一段。两次曝光之间所发生的相位变化,使通过试验段的相位变化量为

$$(n(x, y) - n_o)L/\lambda \quad (7)$$

(注意,如果采用图2的 ESPI 系统,光线通过试验段两次,上式中的 L 应取为 $2L$)。其中 λ 为激光波长。

根据 Gladstone-Dale 方程,有

$$\rho(x, y) = \rho_o + [n(x, y) - n_o]/K \quad (8)$$

式中 K 是 Gladstone-Dale 常数。对理想气体,利用气体状态方程,可导出二维温度场的公式。考虑到(7)式和(8)式,温度场中 N 级黑条纹上的温度,应为

$$T = \frac{K_\mu P L T_o}{K_\mu P L + \bar{R} N \lambda T_o} \quad (9)$$

式中, μ 是气体分子量, P 为气体压力, \bar{R} 是通用气体常数。 T_o 和 T 均用绝对温度。

当自然对流发生在空气中,方程(9)中的各气体参数为空气的参数,其数值如下:

$$K = 0.226 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (\text{当 } \lambda = 0.6328 \times 10^{-6} \text{m}),$$

$$\mu = 28.97(\text{kg/mol}),$$

$$\bar{R} = 8.309 \times 10^3(\text{N} \cdot \text{m/mol K}),$$

$$P = 0.10135(\text{MPa}).$$

利用这些关系和参数,就可以给出干涉条纹图上的温度分布。

3. 实验

被测试的水平圆管,管长为 260mm,管外径为 40mm,如图 1。圆管由铜材加工制成。内管为有机玻璃,其外表面被加工成螺旋状小槽,槽内缠绕电阻加热丝。为比较,铜管上表面中点处的温度,同时用热电偶测量。

图 2 是 Vintens ESPI 光路简图。为了使该装置适应于测量相位物体的变形或气体温度场,必须将照明光束改为准直光。为此,在照明光路中增加一个准直透镜。这个准直透镜的选择必须考虑合适的孔径和焦距。同时,准直透镜的插入会改变成

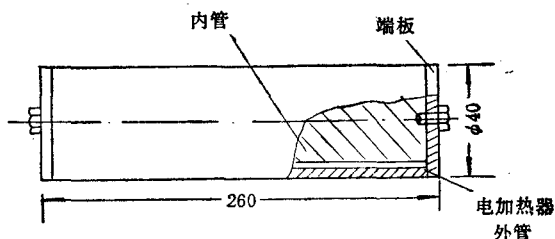


图 1 试验件

像放大倍数。放大倍数过大,则仅能记录一个小区域的温度场,无法记录全场信息;放大倍数过小,则可能造成条纹太密,以致无法分辨。

图 3(a)是 Video 全息干涉光路简图。采用了一个双透镜成像系统和一块毛玻璃。该成像系统将距离试验区出光端(图 2 中试验区右端) $L/3$ 处的平面,成像到毛玻璃上,以消除因折射率梯度引起光线偏折所造成的误差。毛玻璃的使用

是为了形成漫射场。应注意使参光与物光的光程差和夹角都尽可能小,且光强比为 1,以保证散斑图达到最佳的反差。

ESPI 和 Video 全息干涉的操作步骤相同,均包括以下 4 步:

- (1) 第一次曝光,记录初始散斑图,并存储于帧存贮器内;
- (2) 通过电加热器加热,热管表面温度升高,在空气中发生自然对流现象;
- (3) “第二次曝光”为实时采集受扰动的不均匀温度场的散斑图;
- (4) 由减法器将后一散斑图与初始散斑图实时相减,形成相关条纹图,在监视器上显示,并对此实时条纹图进行录像。

图 3(b)是全息干涉光路图。同样将距圆管右端 $L/3$ 处的平面成像在毛玻璃上。我们采用实时全息法,并用录像机记录了水平热管自然对流从发生到热平衡的全过程。

4. 实验结果和讨论

图 4(a)、(b)和(c),分别为由实时全息干涉、Video 全息干涉和 Vintens ESPI 得

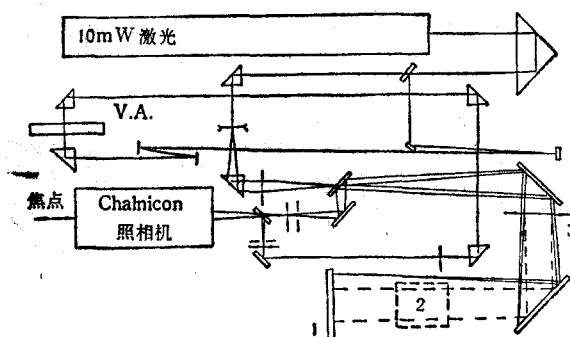


图 2 Vintens ESPI 光路简图

1 漫反射表面, 2 试验区, 3 外加准直透镜

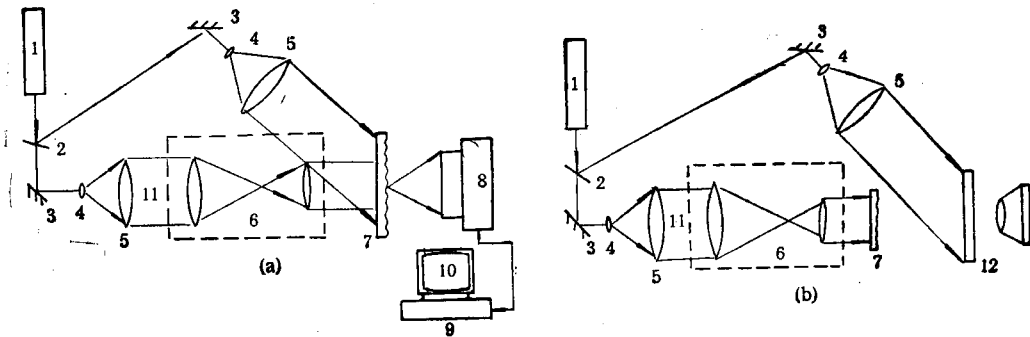


图3 光路简图

(a) Video 全息干涉 (b) 全息干涉

1 激光, 2 分光镜, 3 反射镜, 4 扩束镜, 5 准直镜, 6 成像系统, 7 毛玻璃, 8 CCD 摄像机, 9 帧存储器, 10 显示器, 11 试验区, 12 全息干版

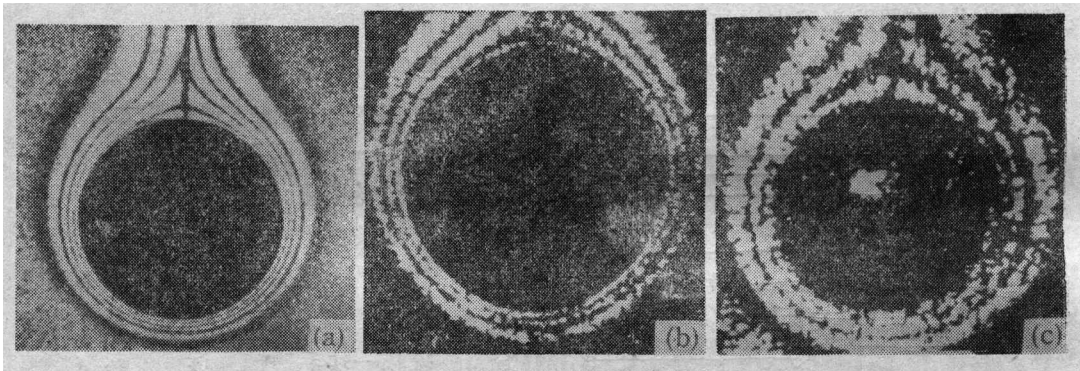


图4 水平热管自然对流干涉条纹图

(a) 实时全息干涉 (b) Video 全息干涉 (c) Vintens ESPI

到的, 关于水平热管自然对流的干涉条纹图。三种光学方法与热电偶测量结果比较如表 1。由表 1 可见, 测量结果相当一致。

表 1 测量结果比较

	光测法(°C)		热电偶(°C)	相对误差
	全息	Vintens ESPI		
实验 1	36.8		36.2	1.7%
实验 2		28.2	27.7	1.8%
实验 3	32.8		32.1	2.2%

实验中引起误差的因素较多, 主要有:

(1) 条纹读数误差。对非整数条纹, 一般只能估计到 1/4 级条纹, 这精度是不够的。可采用一些条纹细分方法, 提高分数级条纹级数的准确性。

(2) 在 ESPI 和 Video 全息干涉中, 还存在着背景光的漂移和条纹的漂移。

(3) 折射率梯度的存在, 造成光线经过时的偏折, 而计算模型中又忽略了这种偏折。我们在光路中增加一个成像系统, 就是为了消除这种误差, 但完全消除是难以实现的。

(4) 实验装置造成的误差。在理论分析时, 视圆管问题的温度场为二维问题, 但实际在端部有明显的误差。为修正这种误差, 用热电偶测量了热管上表面沿管长方向的温度分布, 用当量长度代替实际长度进行温度计算。

我们的实验研究表明, ESPI 和 Video 全息干涉是值得推广的测温新技术。它们既具有全息干涉的灵敏度, 又有处理信息快速、方便的优点。其实时处理和显示的能力, 便于流场显示和研究动态问题。

参 考 文 献

- [1] Vest, C. M. *Holographic Interferometry*, John Wiley and Sons, New York, 1979.
- [2] He Shiping, Wu Xiaoping. The application of holographic thermometry in engineering thermophysics. *International Conference on Experimental Mechanics*, Beijing, China, 1985.
- [3] Singh, P., Liburdy, J. A. Effect of plate inclination on natural convection from a plate to its cylindrical enclosure. *Transaction ASME J. Heat Transfer*, 1986, 108(4).
- [4] Schinkel, W. M. N., Hoogendoorn, C. J. An interferometric study of the local heat transfer by natural convection in inclined airfilled enclosures. *Sixth International Heat Transfer Conference*, Toronto, Canada, Aug. 1978, 7—11.

INVESTIGATION OF NATURAL CONVECTION PHENOMENA FROM A HORIZONTAL HEATED TUBE USING ESPI

He Shiping Wang Liusheng

(*University of Science and Technology of China*)

Brian Dobbins Shobir Kapasi

(*Nottingham, Polytechnic, United Kingdom, Hefei, 230026, China*)

Abstract The natural convection phenomena from a horizontal heated tube is investigated using Vintens ESPI, Video holographic interferometry and holography. Three different optical arrangements and the principle of gas temperature measurement are described. The experimental results obtained from the above techniques are compared with those from thermocouples. The comparison shows that they are consistent with each other. The sources of error which may affect the measurement are discussed and estimated qualitatively.

Key words natural convection, ESPI, holography, horizontal heated tube