

# 三维温度场的激光全息与干涉层析

贺安之 闻大鹏 倪晓武 赖天树  
(华东工学院应用物理系)

## 提 要

本文论述了多方向干涉层析再现三维温度场的原理,提出了多方向象面全息干涉法,并利用这种方法测量了三维温度场分布;进一步提出了一种更有实用价值的多方向法布里-珀罗干涉法,它具有实时性,能用于真实瞬态流场的测量。

关键词: 温度测量,全息术,干涉度量法。

## 一、引 言

早在70年代, Vest等人<sup>[1,2]</sup>利用漫射式多方向全息法研究水中的三维温度分布。80年代,国内也有人重复了 Vest等人的研究工作<sup>[3]</sup>。作者在重复 Vest等人的研究工作时发现,漫射式多方向全息法存在的一些缺点,本文提出一种多方向象面全息干涉法获得多方向干涉图,这种方法观察角度大,能够在180°范围内获得干涉图,进行完全数据采集计算,由于条纹是定域在一个平面上,干涉图清晰,并能用白光再现,但它不是实时的,光路复杂、防震性能差,难于用在强干扰真实场的研究。在此基础上,文中进一步提出了一种多通道法布里-珀罗干涉层析法,它能够在180°范围内实时地记录同一时刻不同方向的干涉图,光路简单,实用性强,抗强震动,是一种可望作为瞬态三维场测量的方法。

## 二、三维场的干涉层析再现原理

光线通过介质的光程差为

$$\Phi = \int_L [n(x, y) - n_0] ds, \quad (1)$$

式中  $L$  为光线穿过扰动区域的路程,  $n(x, y)$  是介质的折射率,  $n_0$  是环境折射率。它与干涉图上的条纹位移关系是

$$\Phi = \lambda \epsilon, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为波长。所以干涉图实际上可看作是流场沿光线方向的投影,(1)式的反演就是由投影求原场。由干涉图再现三维场分布,实际上是在同时获得几个不同方向干涉图的基础上,把三维场分成一组平行截面,分别对不同的截面层析再现,从而获得三维场的结构与分布,故这种干涉再现方法也称为干涉层析法。

任意三维场的再现可按强折射和弱折射两种情况分别讨论,弱折射三维场的再现方法

比较成熟,方法较多<sup>[4,5]</sup>,而强折射三维场的再现方法正处在发展之中,一般的温度场再现可按弱折射的方法来处理。

从考虑测量的精度和节省计算时间出发,本文选用直接反演法<sup>[6]</sup>来再现三维场分布,但它需要在  $180^\circ$  范围内采集干涉数据,如图 1 所示,假定取  $z$  的某一截面,则光程差为

$$\Phi(\rho, \theta) = \int_L [n(x, y) - n_0] ds, \quad (3)$$

采用适当变换<sup>[7]</sup>,变换示意图如图 2 所示,有

$$\Phi(\rho, \theta) = \iint_{-\infty}^{+\infty} [n(x, y) - n_0] \delta[\rho - r \sin(\psi - \theta)] dx dy, \quad (4)$$

它的逆变换是

$$n(r, \psi) - n_0 = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\partial \Phi(\rho, \theta)}{\partial \rho} \frac{d\rho}{r \sin(\psi - \theta) - \rho}. \quad (5)$$

从(4)式中消除偏导数,令  $\rho_0 = r \sin(\psi - \theta)$ , 并在某一截面上扰动半径最大值  $r$  为  $R_{\max}$ , 则有

$$n(r, \psi) - n_0 = -\frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\theta \left\{ \int_0^{3R_{\max}} [\Phi(\rho_0 - \rho, \theta) + \Phi(\rho_0 + \rho, \theta) - 2\Phi(\rho, \theta)] \frac{d\rho}{\rho^3} - \frac{2}{3R_{\max}} \Phi(\rho_0, \theta) \right\}, \quad (6)$$

此式要求  $\rho_0 \leq 2R_{\max}$ , 则(5)式变为

$$n(r, \psi) - n_0 = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I(\theta) d\theta, \quad (7)$$

$$I(\theta) = \int_0^{3R_{\max}} [\Phi(\rho_0 - \rho, \theta) + \Phi(\rho_0 + \rho, \theta) - 2\Phi(\rho, \theta)] \frac{d\rho}{\rho^3} - \frac{2}{3R_{\max}} \Phi(\rho, \theta),$$

如果实验中进行等间隔观察的角度为

$$-\frac{\pi}{2} = \theta_0 < \theta < \dots < \theta_{2N-1} < \theta_{2N} = \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

用辛普生近似积分有

$$n(r, \psi) - n_0 = \frac{1}{12\pi N} \sum_{i=0}^{N-1} [I(\theta_{2i}) + 4I(\theta_{2i+1}) + I(\theta_{2i+2})]. \quad (9)$$

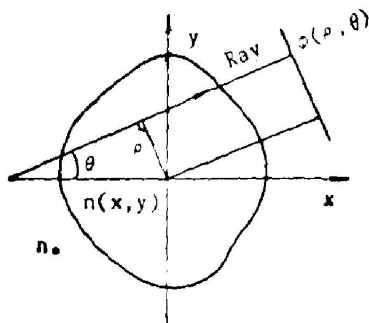


Fig. 1 Cross section of any field

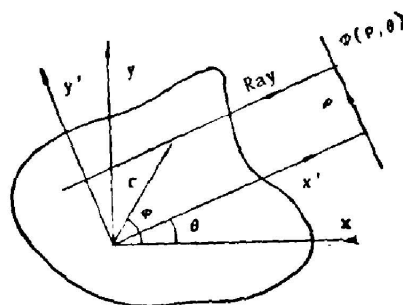


Fig. 2 Sketch map of Radon transform

要计算(9)式,必须先计算(7)式,它的精度直接关系到测量结果的精度,对它的结果要有一定的精度要求,本文采用变步长辛普生法计算其值。

从干涉图上得到的条纹位移数据  $\{\Phi(\rho_i, \theta_j)\}$  是离散数值,要求得(7)式的数值,需对离散的条纹位移值进行拟合,本文采用样条函数拟合。我们把(7)式、(10)式及拟合条纹位移值的样条函数编译了 Fortran 语言程序,对已获得  $180^\circ$  范围内的多方向干涉图,只要从干涉图上读出条纹位移值,就可以得到整个三维场折射率变化分布值。

### 三、层析再现方法及实验结果

#### 1. 漫射式多方向全息法

实验光路如图 3 所示,采用双物光照明是在于使各方向的光强尽量均匀,以获得更大的观察角度,实验模型可看作两根无限长的平行加热杆直立于水中所产生的温度场,得到的干涉图如图 4 所示,尽管我们所获得干涉图比早期的工作所获得的干涉图要清晰些,但实验结果表明,漫射式多方向全息法中存在干涉条纹的定域性和观察角度小的缺点,给定量计算带来困难。正是由于这几方面的原因使漫射式全息法不能在三维场的应用中发挥更大的作用。本文提出了多方向像面全息干涉测量三维场的方法。

#### 2. 多方向像面全息干涉法

多方向像面全息干涉法的原理光路如图 5 所示,各方向的夹角

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{6}, \quad (10)$$

这是利用计算机模拟计算的最合适夹角,当  $\Delta\theta > \frac{\pi}{6}$  时,再现结果的精度较差,当  $\Delta\theta \leq (\pi/6)$  时,再现结果的精度大大提高,然后减小  $\Delta\theta$ ,再现结果的精度提高不明显,但却非常明显地增加计算量,因此从精度和计算工作量两个方面考虑,选择  $\Delta\theta = (\pi/6)$  为最合适的观察角。

实验模型仍为两根相距 1 cm 的平行加热圆柱体,竖立于水中产生稳定的温度场,由于所用的模型所产生的场具有平面对称性,只需在  $90^\circ$  范围内获得干涉图,在  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  四个方向上获得同一时刻的像面全息干涉图如图 6 所示,利用测微光度计判读干涉图

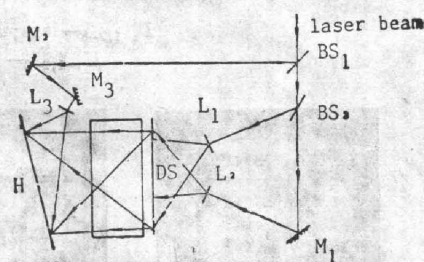


Fig. 3 Optical layout of diffused illumination holographic interferometry

$BS_1, BS_2$ —beam splitter;  $L_1, L_2, L_3$ —lens;  $M_1, M_2, M_3$ —mirror;  $DS$ —diffused screen  $H$ —holographic plate

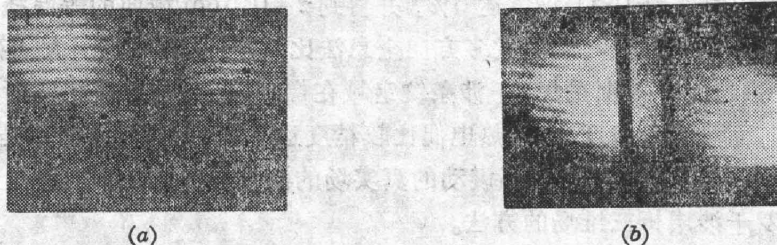


Fig. 4 Interferograms obtained by diffused illumination holographic interferometry

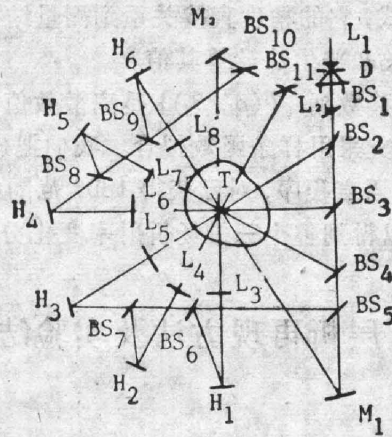
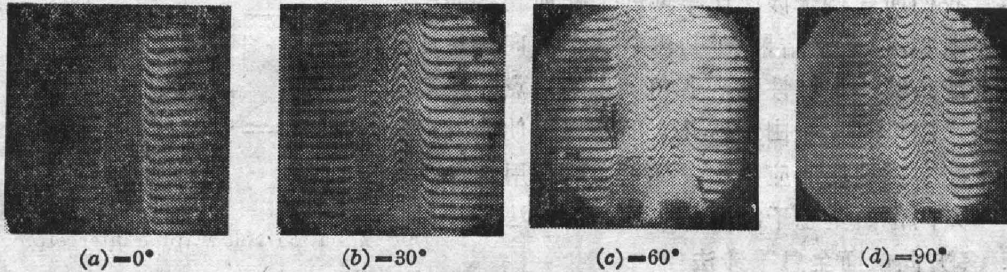


Fig. 5 Optical layout of multi-directional image plane holography

$L_{1-1,2-8}$ —lens;  $D$ —diaphragm;  $BS_{1-1,2,\dots,11}$ —beam splitter;  
 $H_{1-1,2-6}$ —holographic plate;  $M_1, M_2$ —mirror



(a)  $-0^\circ$  (b)  $-30^\circ$  (c)  $-60^\circ$  (d)  $-90^\circ$

Fig. 6 Interferograms of the temperature field generated by two heated cylinders shown at four viewing angles

上的条纹位移, 采集了  $z=0.5\text{ cm}$  截面上各个观察方向上的干涉数据, 根据场的平面对称性, 可求出  $-30^\circ, -60^\circ, -90^\circ$  方向的干涉数据, 即

$$\left. \begin{aligned} \Phi(\rho, -30^\circ) &= \Phi(-\rho, 30^\circ), \\ \Phi(\rho, -60^\circ) &= \Phi(-\rho, 60^\circ), \\ \Phi(\rho, -90^\circ) &= \Phi(-\rho, 90^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

这样就获得了  $180^\circ$  范围内的干涉数据, 用直接反演积分再现折射率场, 然后利用经典公式<sup>[8]</sup>

$$n - 1.3331733 = -(1.936T + 0.1699T^2) \times 10^{-5}. \quad (12)$$

可再现温度场, 再现的温度场分布曲线如图7所示, 并与热电偶同时的测量值比较, 获得了一致的结果。最大的偏差为  $15^\circ\text{C}$ 、精度达  $6\%$ , 并得到  $z=0.5\text{ cm}$  截面的等温线如图8所示。显然, 多方向像面全息干涉法与漫射式多方向全息法比较, 具有观察范围大、能在  $180^\circ$  范围内获得干涉图并进行完全数据采集, 干涉条纹定域在像平面上, 能够获得清晰的干涉图, 也可在白光下再现, 而且测量精度高; 与热电偶比较精度达  $6\%$ , 但这种方法不是实时的, 光路复杂, 防震性能差, 难于用在强干扰强震动的真实场的测量。为此, 作者进一步提出一种多通道法布里-珀罗干涉层析三维场的方法。

3. 多通道法布里-珀罗干涉层析法



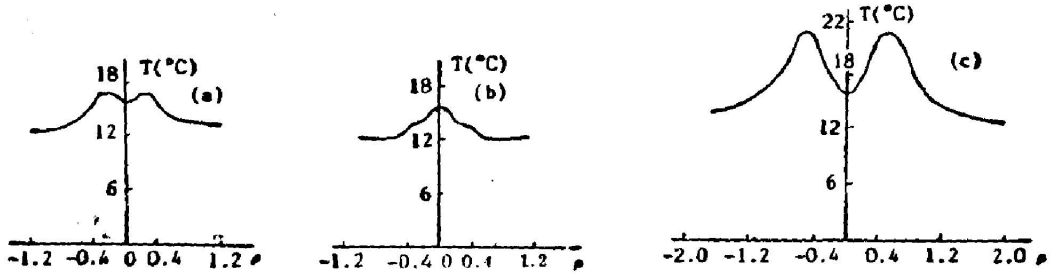


Fig. 7 Temperature distribution vs  $\rho$  on  $Z=0.5$  cm cross-section for different direction  
(a)  $y=x$ ; (b)  $x=0$ ; (c)  $y=0$

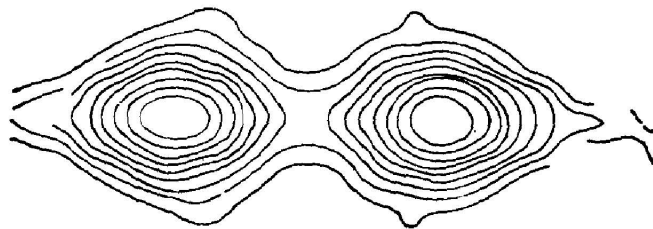


Fig. 8 Temperature contour map on  $Z=0.5$  cm cross section

多通道法布里-珀罗干涉层析法是利用多通道法布里-珀罗干涉仪来获得同一时刻多方向干涉图,从而再现三维场,而多通道法布里-珀罗干涉仪是由单通道法布里-珀罗干涉仪组成,单通道法布里-珀罗干涉仪<sup>[9]</sup>光路简单,口径大,可做成分离式长程干涉仪,具有自差分性质,对光学元件的质量要求不高,能抗强震动,干涉条纹锐利,判读精度高、对工作环境条件无特殊要求,其光线经过扰动场所引起伪光程差是

$$\Phi(y) = 2 \int_s [n(x, y) - n_0] ds. \quad (13)$$

(13)式与(1)式比较只是多了一个因子2。计算机模拟结果表明,各通道之间的最合适夹角  $\Delta\theta = \pi/6$ ,即由六个单通道法布里-珀罗干涉仪组成多通道法布里-珀罗干涉仪,具有精度高,

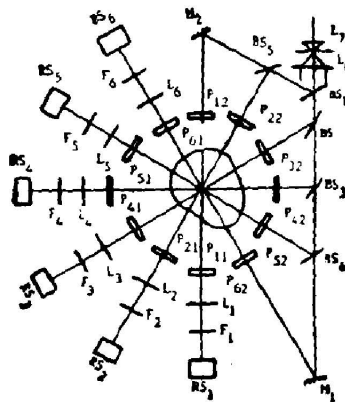


Fig. 9 Optical layout of multi-path F-P interferometer  
 $L_{1,2,3}$ —lens;  $BS_{1,2,3}$ —beam splitter;  $M_1, M_2$ —mirror;  $BS_{4,1,2,3,4}$ —record system;  $F_{1,2,3,4}$ —filter;  $D$ —diaphragm;  $P_{1,2,3,4}$ —plate mirror

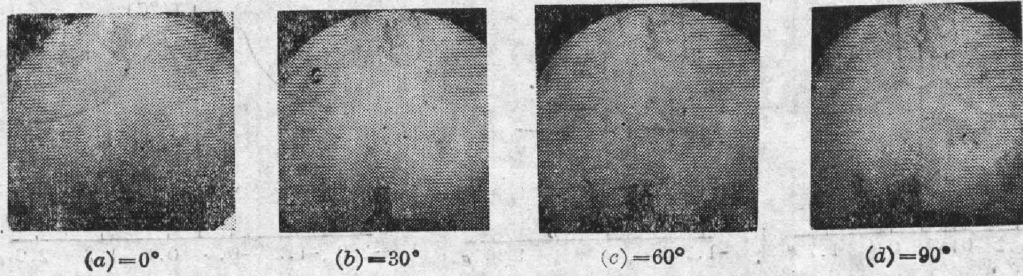


Fig. 10 Interferograms of flame temperature field obtained by multi-path F-P interferometer shown at four viewing angles

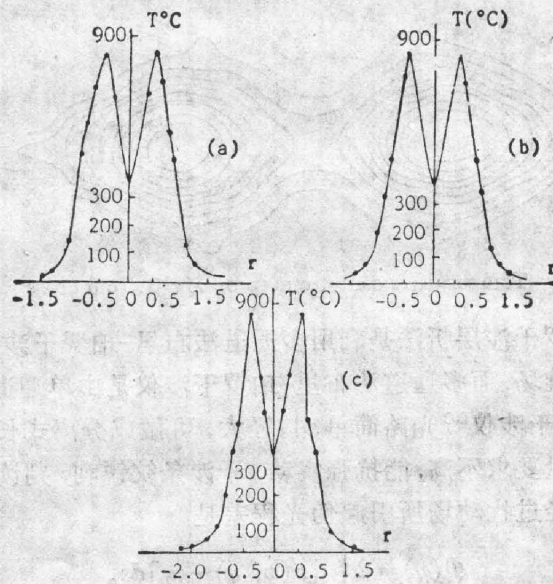


Fig. 11 Temperature distribution vs  $r$  on  $Z=0.5$  cm cross section for different direction  
(a)  $y=0$ ; (b)  $y=x$ ; (c)  $x=0$

计算工作量不大的优点、组合的多通道法布里-珀罗干涉仪的原理光路如图 9 所示。我们利用它测量了非对称的火焰温度分布, 由于非对称火焰是平面对称的, 只需四个通道, 获得四个方向( $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ )的干涉图见图 10, 从干涉图上获得三维温度分布见图 11, 并用于强振动环境条件下的真实场测试获得成功。实验结果表明, 这种方法观察范围为  $180^\circ$ , 能够实时地记录多方向干涉图, 光路简单, 防震性能好, 可用于任何真实场的测量, 可达到单通道法布里-珀罗干涉仪所能达到的精度。

#### 四、结 论

(1) 漫射式多方向全息法在三维温度场测量中, 只能在  $90^\circ$  范围内观察, 测试区域小, 干涉条纹是定域于空间曲面, 无法获得清晰的干涉图, 给定量计算带来困难, 难于应用在真实流场的测试。

(2) 多方向像面全息法能够在  $180^\circ$  范围内观察, 干涉条纹定域在像面上, 能够获得清晰的干涉图, 并可在白光下再现。由于全息的自差分性质, 能够用于具有窗口密闭容器中的三维场测量, 精度可达 6%, 但不是实时的, 光路复杂, 防震性能差, 尚难于用在真实场的测量。

(3) 多通道法布里-珀罗干涉层析法能够在  $180^\circ$  范围内实时地获得多方向干涉图, 干涉图条纹锐利, 判读精度高, 光路简单, 抗强干扰震动, 能用于三维真实场的测量, 如果与高速记录装置配合, 可用于瞬态三维流场的测试, 是一种可望成功的三维瞬态流场的测试工具。

### 参 考 文 献

- [1] D. W. Sweeney, C. M. Vest; *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1974, 17, No. 12 (Dec), 1443~1454.
- [2] C. M. Vest and P. T. Radulevic *«Application of Holography and Optical data Processing»*, (Pergmon Press Oxford, 1977) 241~249.
- [3] 汪铸, 姜伟群, 魏福清; “用全息干涉度量术测流体三维温度场”*«燃烧科学与技术»*(清华大学出版社, 第一辑, 北京, 1982. 1) 41~47。
- [4] Bacey P. Medott, William R. Brocly *et al.*; *J. O. S. A.* 1983, 73, No. 11 (Nov), 1493~1500.
- [5] Yoshihisa Marhyama, Kouchi Iwata and Ryc Nagata *Japa J. Appl. Phys.*, 1977, 16, No. 7 (Jul), 1171~1176.
- [6] Paul Edgar, Van. Houten AD-756535 1972.
- [7] C. M. Vest AD-A017596 1975.
- [8] C. M. Vest; *«全息干涉度量学»*, (机械工业出版社, 北京, 1984 年), p. 403。
- [9] 贺安之, 闫大鹏; *«光学学报»* 1986, 6, No. 3 (Mar), 284~288。

## Laser holographic and interference tomography of three-dimensional temperature field

HE ANZHI, YAN DAPENG, NI XIAOWU AND LAI TIANCHU

(Department of Applied Physics, East China Institute of Technology, Nanjing)

(Received 30 March 1987; revised 5 June 1987)

### Abstract

This paper discussed the principle of tomographic reconstruction of 3-D temperature field from multi-directional interferogram and a multi-directional image plane holography is presented. It solves the problems of poor fringe clearness and small observation angle in diffused illumination holographic interferometry. 3-D temperature distribution has been measured using this method. Furthermore, a multi-directional *F-P* interferometry is put forward. It has more practical value and possesses real time characteristics and can be used to measure real transient field.

**Key words:** temperature measurement; holography; interferometry.