

用载波电子散斑与计算机层析技术 实现温度场的三维重建*

李喜德 伍小平

(中国科学技术大学力学与机械工程系, 合肥 230026)

摘 要 将载波电子散斑干涉与计算机层析(CT)技术相接合, 实现了温度场的三维重建, 并就这一技术用于三维温度场重建时的各种特性进行了讨论。

关键词 载波电子散斑干涉, 计算机层析, 温度场重建。

计算机层析分为吸收型计算机层析计量技术和干涉型计算机层析计量技术。前者适用于对光有较强吸收的场合, 如 X 射线断层扫描成像、缺陷探测等, 后者则主要适用于对所用光源透明的情形, 如某些流场, 温度场, 粒子场等。在干涉计算机层析计量中, 主要采用散斑干涉^[1, 2]或全息干涉技术^[3, 4]获得投影数据, 然后进行计算机层析重建。然而, 不论是散斑干涉还是全息干涉, 均需进行双曝光操作, 并冲洗干板。这对于需大量投影数据进行数字重建的计算机层析技术来说, 干板所记录信息的后处理工作量很大, 且干板记录的信息都以强度条纹的方式表现, 这不论是对投影数据的正确判读还是对投影数据精度的提高都带来困难。本文将载波电子散斑干涉技术引入计算机层析重建中, 可以直接给出某一投影方向上全场数字化相位结果, 显著提高了计算机层析重建中数据后处理的效率与投影数据的精度。

1 理 论

计算机层析应用不同方向的积分投影将二维截面信息重建出来, 而这些积分投影可以是吸收系数, 也可以是光所通过路径上的光程。被测截面经历不同的物理或力学过程, 都可以通过这些投影的变化从计算机层析重建场中表征出来。

1) 计算机层析的基本原理。计算机层析技术经过多年的发展, 有很多种方法可以用来重建截面信息。通常可以简单地分为两类: 其一为迭代重建法, 其二为直接重建法。迭代重建法明显不足的是编程复杂, 计算时间长, 计算结果与算法关系密切, 平均特性严重。直接重建法能获得满意的重建结果, 编程简单, 计算效益高。但一般需要较多的投影参与重建。本文采用计算机层析重建中, 有效且常用的卷积反投影重建法, 可显著提高重建效率。

设 $n(s, \theta)$ 为二维截面函数 $f(x, y)$ 沿 θ 方向的投影, 二者通过 Radon 变换有

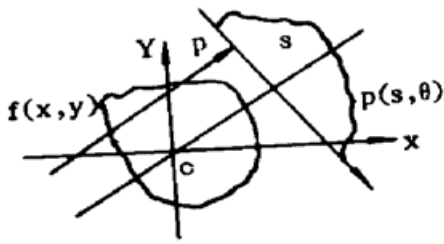
* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996-12-19

$$p(s, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) dx dy \quad (1)$$

式中 δ 为狄拉克函数,其他参数如图 1 所示。当 θ 在 $0 \sim \pi$ 范围时, (1) 式的反 Radon 变换为

$$f(x, y) = \int_0^\pi Q(s, \theta) d\theta \quad (2)$$



其中, $Q(s, \theta)$ 可表述成下述卷积方式:

$$Q(s, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t, \theta) h(s - t) dt \quad (3)$$

(3) 式中, $p(t, \theta)$ 为投影函数, $h(s - t)$ 为等效滤波器的点扩展函数。由于 $h(s - t)$ 取不同形式而形成了不同的滤波算法。实际计算中, 由于投影不可能在 $0 \sim \pi$ 范围内取连续值, 因此(2)式与(3)式在计算时分别取下述离散方式:

$$f(x, y) \approx \frac{\pi}{M} \sum_{i=1}^M Q(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) = \frac{\pi}{M} \sum_{i=1}^M Q(m, \theta_i) \quad (4)$$

$$Q(m, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} p(n, \theta) h(m - n) \quad (5)$$

(4)、(5) 两式已取采样间隔为一, 且 $m = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ 。由上述两式可见, 只要获得足够的投影数据, 并选择适当的滤波器, 即可重建出二维截面函数 $f(x, y)$ 的近似值。

2) 载波电子散斑干涉。在干涉计算机层析中, 散斑干涉方法应用光束在通过被测场后, 由于温度或压力等的变化使折射率发生变化, 从而引起光束在所通过的路径上连续偏折。该方法给出的是偏折角或成像面上位移的积分, 通过计算机层析重建得到被测截面密度或折射率分布。全息方法则是应用光在通过被测场时, 由于折射率的变化而使接收面上光场的位相发生变化。它以强度条纹方式直接显示光束所通过路径上折射率变化的积分结果。由于上述两种方法均要通过复杂的强度干涉条纹获得投影数据, 因此使得投影数据的判读、处理困难, 精度不高。载波电子散斑干涉技术的引入, 使得在只有扰动前后两幅载波场的情况下, 能直接给出光束通过方向上被测场数字化相位变化分布。具体原理如图 2 所示, 在相减平方载波电子散斑干涉模式下^[5], 扰动前、后载波场可表示为:

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) \{1 - \cos[2\pi f_0 x + \mathcal{Q}(x, y)]\} \quad (6)$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) \{1 - \cos [2\pi f_0 x + \mathcal{Q}(x, y) + \mathcal{Q}(x, y)]\} \quad (7)$$

式中 f_0 为引入的空间载波频率, $I_0(x, y)$ 为合成背景强度, $\mathcal{Q}(x, y)$ 为初相位。对(6)、(7)两式应用傅里叶变换技术^[6], 可直接求出由扰动引起的位相 $\mathcal{Q}(x, y)$ 为:

$$\mathcal{Q}(x, y) = \mathcal{R} \arctg \left[I_{2M}(x, y) / I_{2R}(x, y) \right] - \mathcal{R} \arctg \left[I_{1M}(x, y) / I_{1R}(x, y) \right] \quad (8)$$

式中 \mathcal{R} 表示对 ζ 进行去包裹运算, $I_{iR}(\zeta)$, $I_{iM}(\zeta)$ 分别表示第 i 个经滤波与反傅里叶变换后载波场的实部与

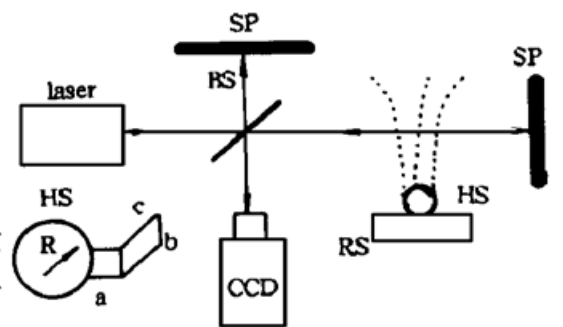


Fig. 2 Optical system of CESPI

BS: Beam splitter, HS: Thermal source, SP: Scattering plate, RS: Swivel stage $R = 5.77$ mm, $a = 3.70$ mm, $b = 3.74$ mm, $c = 7.00$ mm

虚部。(8)式直接给出了光传播方向上被测区域积分相位的分布场,该场中的行或列数据即计算机层析重建时所用的投影 $p(n, \theta)$ 。

3) 折射率的分布与温度场的关系。对于均匀透明介质,折射率是介质密度的函数。在温度场情形下,如果压力可以认为是常数,并且理想气体状态方程成立,则有^[7]:

$$T = [(n_0 - 1)/(n - 1)] (P_0 T_0/P) \quad (9)$$

式中 T 、 T_0 分别为测量温度与参考温度,对应的压力与折射率分别为 P 、 P_0 、 n 、 n_0 。

由图 2 可知,被测场相位变化 $\varphi(x, y)$ 可表示为

$$\varphi(x, y) = 2k \int_{\sigma} [n(x, y) - n_0] d\sigma \quad (10)$$

其中, σ 为光束通过被测场时的单程路径, $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢数值。考虑到(4)式结果,则可得折射率分布

$$n(x, y) - n_0 = \frac{f(x, y)}{2k} \approx \frac{\pi}{2kM} \sum_{i=1}^M Q(m, \theta_i) \quad (11)$$

于是,由(9)、(11)两式有

$$T(x, y) = 2kMT_0P_0(n_0 - 1)/[P\pi \sum_{i=1}^M Q(m, \theta_i) + 2kMP(n_0 - 1)] \quad (12)$$

(12)式在给出重建截面的折射率分布时,即可由其求出该截面的温度场分布。由这些不同截面的温度场分布即可求出被测场的三维温度场分布。

2 实验与结果分析

本文应用载波电子散斑干涉技术首先获得不同投影方向上光场的位相分布,然后根据上述原理,以给定截面的位相分布为投影进行计算机层析重建。实验中,热量由电热陶瓷提供,表面由不锈钢片电极覆盖,其它部分则由铝合金片覆盖。热源功率约 5 W,大小见图 2 中所标。热源放在一回转台上,精度为 1'。实验中,热源与周围环境隔离。投影角步长为 $\Delta\theta = 6^\circ$,均布 180°范围。其他参数为:测量区域 $42.2 \times 42.2 \times 28.1$ (mm), $T_0 = 306$ K, $M = 30$, $n_0 = 1.0002575$, $P = P_0$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 。图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)分别为 $\theta = 12^\circ$ 时所对应的扰动前后的载波场和该方向上的投影相位分布。图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)分别为距热源平面约 40.4 mm、50.0 mm 及 63.2 mm 截面上的温度场分布。从上述实验结果中可以看到,温度场的分布较能符合热源情形,且三个截面温度分布基本相似,数值略呈下降趋势。这是由于实验段较短,热源又与周围环境隔离,从而使温度场在垂直热源平面方向上变化不明显。为了验证测量温度,曾在被测场稳定后,在热源上方 50.0 mm 处近光束中心点进行了测量,结果为 37.5° 。可见其与图 4(b)的温度符合。在实验中为了保证实验的可靠性,除了用隔离墙使热源

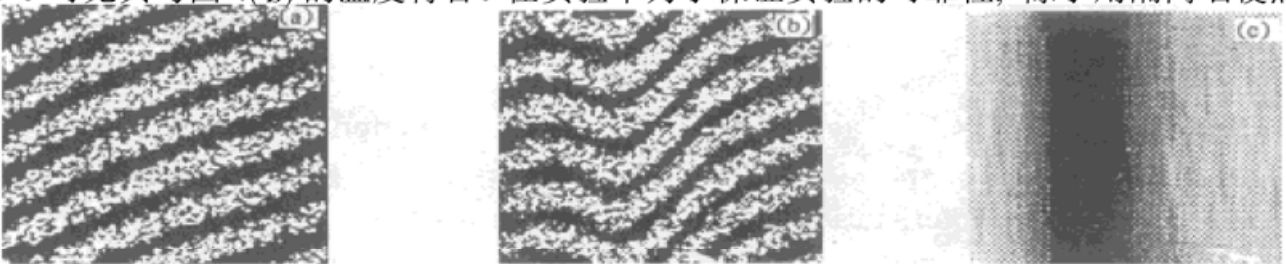


Fig. 3 Carrier patterns: (a) carrier, (b) modulation carrier, (c) demodulation phase map. Projection direction is 12°

与周边环境隔开并使热源上方气流畅通外,采集扰动后的载波场还需要等其稳定下来。同时,为确保被测场相位的正确解调,载波频率应取一适当值,既不能向投影测量那样取较高,导致测量后期由于干涉场严重的退相关而无法解调;又不能取太低而使相位解调失真。

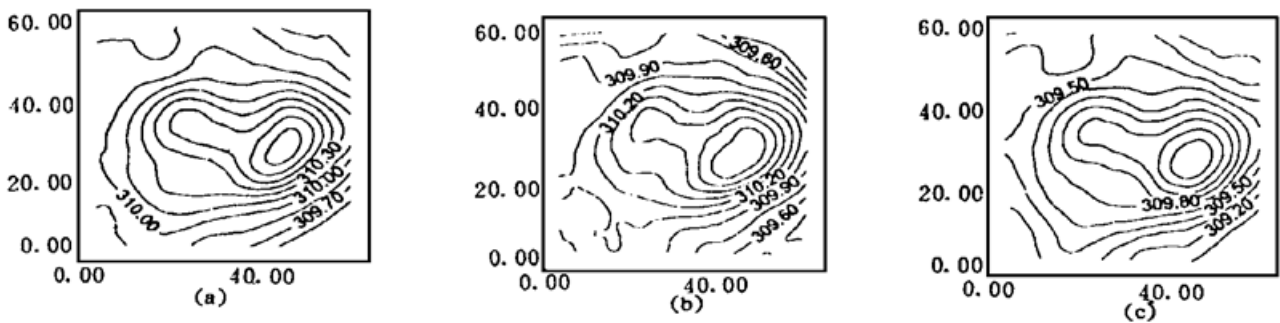


Fig. 4 Temperature contour distributions distance to thermal source are: (a) 40.4 mm, (b) 50.0 mm and (c) 63.2 mm. Contour interval= 0.15 K

结 论 本文应用载波电子散斑干涉与计算机层析技术实现了稳态温度场的三维数字重建。由于载波电子散斑干涉可以给出投影场全场数字位相分布,因此能高精度地重建被测场的信息。同时,由于整个过程由计算机控制自动完成,这对计算机层析数据的取得与后处理具有明显的优越性。

参 考 文 献

- [1] T. C. Liu, W. Merzkirch, K. O. Lehn, Optical tomography applied to speckle photographic measurement of asymmetric flows with variable density. *Experiments in Fluids*, 1989, **7**(1) : 157~ 163
- [2] G. N. Bkinkov *et al.*, Speckle tomography of a gas flame. *Experiments in Fluids*, 1989, **8**(1/2) : 72 ~ 76
- [3] D. W. Watt, C. M. Vest, Digital interferometry for flow visualization. *Experiments in Fluids*, 1987, **5**(6) : 401~ 406
- [4] E. V. Russanov *et al.*, Tomographic interferometry. *Proc. SPIE*, 1991, **1843** : 127~ 130
- [5] 李喜德, 张 政, 伍小平, 载波电子干涉, 实验应力分析专业委员会编, 第八届实验力学学术会议论文集, 哈尔滨, 哈尔滨工业大学出版社, 1995 : 494~ 497
- [6] M. Takeda, *et al.*, Fourier transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1) : 156~ 160
- [7] 朱德忠, 热物理激光测试技术, 第一版, 北京, 科学出版社, 1990 : 1~ 27

Temperature Field Reconstruction by Carrier Electronic Speckle Pattern Interferometry and Computerized Tomography

Li Xide Wu Xiaoping

(Department of Mechanics and Mechanical Engineering,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(Received 19 December 1996)

Abstract Three dimensional temperature field reconstruction has been carried out by using carrier electronic speckle pattern interferometry (CESPI) and computerized tomography. The characteristics of this technique are discussed.

Key words carrier electronic speckle pattern interferometry, computerized tomography, temperature field reconstruction.