

基于条纹傅里叶变换的二维温度场激光干涉测量

陈宇, 张海峰, 卢荣德, 陈越, 何立群

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要: 提出基于条纹傅里叶变换的激光干涉温度测量方法, 并采用 Mach-Zehnder 干涉仪, 以蜡烛轴对称火焰温度场为对象进行验证. 在恢复相位的过程中, 结合未受温度场扰动的干涉图像, 修正了相位中因图像数字化离散的线性偏差. 对比几种滤波器的计算结果, 表明滤波器的特征对结果有明显影响, 采用适当参数的余弦形边界滤波器可有效提取频谱信息. 蜡烛火焰及其外围温度分布的测试结果表明, 干涉条纹傅里叶分析法可方便快捷地用于测量二维轴对称温度场分布.

关键词: 干涉计量; 温度测量; 条纹傅里叶变换; Mach-Zehnder 干涉仪

中图分类号: TK39 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.06.016

引用格式: 陈宇, 张海峰, 卢荣德, 等. 基于条纹傅里叶变换的二维温度场激光干涉测量[J]. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(6): 832-838.

CHEN Yu, ZHANG Haifeng, LU Rongde, et al. Two-dimensional temperature field measurement by laser interference based on fringes Fourier transformation[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020, 50(6): 832-838.

Two-dimensional temperature field measurement by laser interference based on fringes Fourier transformation

CHEN Yu, ZHANG Haifeng, LU Rongde, CHEN Yue, HE Liqun

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A temperature measurement method using laser interference fringe Fourier transformation was presented. Based on the Mach-Zehnder interferometer, the candle axisymmetric flame temperature field was used to verify the presented method. Using interferogram undisturbed by temperature field in the process of recovering phase shift, the linear deviation caused by image digitization in the phase was corrected. By comparing the results of various filters, it is shown that features of the filter have a significant impact on the result, and the cosine-shaped edge filter with appropriate parameters can effectively extract the spectrum information. Experimental results of candle flame indicate that the presented method can be used to measure two-dimensional temperature distributions quickly and conveniently.

Key words: interferometry; temperature measurement; fringes Fourier transformation; Mach-Zehnder interferometer

0 引言

准确测量温度一直是一个重要的研究课题. 传统的接触式测温, 如热电偶, 尽管稳定可靠, 但在实际应用中只能实现点温测量. 同时, 在一些微小空间内的温度场分布, 如微流道内、电子器件附近的温度场等, 热电偶的布置会引进干扰. 相较而言, 非接触式测温能够较好地克服上述缺点. 其中, 激光干涉法采用激光作为光源, 利用光的干涉性质, 将被测物理量的信息记录在干涉图像中. 通过对干涉图像的分析处理, 实现对组分、粒子密度、浓度和温

度等物理量的测量.

目前的干涉测温研究往往通过对干涉图片上的条纹进行计数来获得温度场的分布. Divya 等^[1]使用 Michelson 干涉仪与 Mach-Zehnder 干涉仪, 将平行于加热面的干涉条纹作为分析基准, 采用在空间上对条纹计数的方法研究了紧凑通道中水在不同质量流率和加热功率下的受迫对流的温度场. Sajith 等^[2]采用 Mach-Zehnder 干涉仪, 用数字干涉法研究了水力直径为 3 mm 与 4 mm 的微流道中水的受迫对流换热. 通过对干涉条纹计数, 他们计算了不同流量、不同加热量、不同平均雷诺数情况下的平均温度分布, 并从中获得了传热系数和努塞尔

收稿日期: 2020-03-13; 修回日期: 2020-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(31670866, 31970754)资助.

作者简介: 陈宇, 男, 1993 年生, 硕士生. 研究方向: 热物理测量. E-mail: cy930329@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 何立群, 博士/副教授. E-mail: heliqun@ustc.edu.cn

数的局部和平均值. 由此可见, 激光干涉法适合用于测量微小几何尺寸中的温度场. Karaminejad 等^[3]使用 Mach-Zehnder 干涉仪研究了合成气/空气、氢气/空气层流火焰的结构与温度场. 通过对条纹计数并在火焰温度场轴对称分布的假设下, 直接从条纹移动量来实现阿贝尔逆运算, 得到了折射率相对环境折射率的变化分布, 进而获得温度场的分布情况.

上述对于干涉条纹计数的方法基于对干涉图片的灰度值进行处理, 首先需要提取条纹骨架并确定其极值, 然后再对条纹标记计数, 计算出测量参数. 这种方法自动化程度较差, 往往只利用干涉图的极值信息而丢失了大多数灰度值信息, 受噪音的干扰影响较大.

干涉条纹的傅里叶变换法对整张干涉图片进行处理, 是一种能够同时获取全场空间相移变化分布的方法, 具有很强的抗噪音能力; 傅里叶变换法基于矩阵运算, 能自动高效处理数据, 适用于动态测量, 有较广阔的应用前景. 干涉条纹的一维傅里叶条纹分析法由 Takeda 等^[4]首次提出; Bone 等^[5]将其推广到二维情况, 并证明在二维傅里叶条纹分析法中, 适当选择载波频率可以避免因欠采样引起的混叠误差. 此后, 学者们对于干涉条纹傅里叶分析方法做了大量的研究与改进, 并成功将其应用于多领域的测量分析^[6-11]. 同时, 计算机技术的发展与快速傅里叶变换算法的提出^[12], 也为条纹傅里叶变换方法提供了必要的基础. 目前尚未见到将条纹傅里叶变换法用于激光干涉温度测量的报道.

本文提出了基于条纹傅里叶变换的激光干涉温度测量方法, 建立了 Mach-Zehnder 激光干涉系统和数字图像处理程序, 并以蜡烛火焰温度场为实例进行了测量, 分析了影响干涉测量的因素. 通过对数字图像的傅里叶变换、滤波和傅里叶逆变换, 得到二维轴对称温度场的相位图, 再经相位解包裹和阿贝尔逆变换得到折射率图, 最后求解得到温度分布. 分析研究了蜡烛火焰发光强度、滤波器、数字化离散误差等因素对干涉测量的影响, 给出相应的改进措施. 最后, 通过对比热电偶温度测量的结果, 验证了本文方法的可行性.

1 原理

傅里叶条纹分析方法是一种对于干涉条纹处理的高效的方法. 在接收平面上的光强分布可写为

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \varphi_s) \quad (1)$$

式中, $a(x, y)$ 是背景光强, $b(x, y)$ 是调制项, f_x, f_y 为条纹空间频率, φ_s 为待求相位. 利用欧拉公式 $e^{jx} = \cos x + j \sin x$, 上式可重新写为

$$i(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] + c^*(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] \quad (2)$$

式中, $c(x, y) = 0.5b(x, y) \exp(j\varphi_s)$, 上标 * 代表复共轭. 对其做傅里叶变换以后, 其在频谱面上的结果表示为

$$I(u, v) = A(u, v) + C(u - f_x, v - f_y) +$$

$$C^*(u + f_x, v + f_y) \quad (3)$$

式中, $A(u, v)$, $C(u - f_x, v - f_y)$, $C^*(u + f_x, v + f_y)$ 分别表示 $a(x, y)$, $c(x, y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)]$, $c^*(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)]$ 的傅里叶变换, 分别称为零级、+1 级、-1 级频谱. 对频谱在 u, v 方向分别移动 f_x, f_y 个单位将 $C(u - f_x, v - f_y)$ 平移至频谱面原点, 得到

$$I(u + f_x, v + f_y) = A(u + f_x, v + f_y) + C(u, v) + C^*(u + 2f_x, v + 2f_y) \quad (4)$$

采用一个低通滤波器 $H(u, v)$ 过滤出 $C(u, v)$, 即

$$C(u, v) = I(u + f_x, v + f_y) \cdot H(u, v) \quad (5)$$

从而 $c(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{C(u, v)\} = \mathcal{F}^{-1}\{I(u + f_x, v + f_y)\} \otimes \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v)\}$, 其中 $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ 表示逆傅里叶变换, \otimes 表示函数的卷积.

在得到 $c(x, y)$ 以后, 待测相位 φ_s 可以由下式得到

$$\varphi_s = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(c)}{\text{Re}(c)} \quad (6)$$

由于反正切函数求出的角度范围是 $(-\pi, \pi]$, 式(6)得到的为包裹相位. 进一步使用最小二乘法处理包裹相位, 经余弦变化来实现相位解包裹^[15-17].

蜡烛火焰产生的温度场可视为轴对称分布, 如图 1 所示, 激光沿 z 轴方向传播, 蜡烛沿 x 轴方向放置. 定义相对折射率差为 $\Delta n(r) = n(r) - n_\infty$, 其中 $n(r)$ 和 n_∞ 分别是局部受热空气的折射率跟参考温度下的折射率, 则光程差为

$$\Delta \text{OPL}(y) = \int_{-z_0}^{z_0} \Delta n dz = 2 \int_0^{z_0} \Delta n dz \quad (7)$$

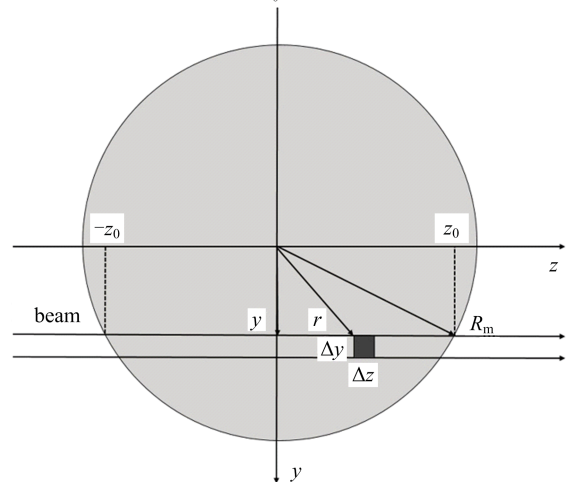


图 1 轴对称火焰温度场横截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross section of axisymmetric flame temperature field

利用坐标变换 $z = \sqrt{r^2 - y^2}$, 微分得到 $dz = r dr / \sqrt{r^2 - y^2}$, 其中 r 是测量点到中心的距离. 将其代入公式(7)可得到阿贝尔积分方程

$$\Delta \text{OPL}(y) = 2 \int_y^{R_m} \frac{\Delta n(r) r dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} \quad (8)$$

式中, R_m 是热分布的最大影响边界. 相位差与光程

差的关系可以写为 $\varphi_s = \frac{2\pi\Delta\text{OPL}}{\lambda}$, 其中 λ 为光的波长. 测量过程是一个逆过程, 即由相位差计算折射率的阿贝尔逆变换, 即

$$\Delta n(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{R_m} \frac{d\Delta\text{OPL}}{dy} \cdot \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 由于存在积分奇点, 只能通过数值方法求解阿贝尔积分方程^[13-14, 18-20]. 本文采用离散环带法求解^[19].

根据折射率与温度的关系^[21],

$$n \approx 1 + \frac{\gamma_{\text{mol}} P}{2k_0 T} \quad (10)$$

式中, $k_0 = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 是玻尔兹曼常数, $P = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 是室内大气压, $\gamma_{\text{mol}} = 2.1865 \times 10^{-29} \text{ m}^3$ 是空气的平均分子极化率, 可以得到计算温度的公式为

$$T(r) = \left(\frac{2k_0 \Delta n}{\gamma_{\text{mol}} P} + \frac{1}{T_\infty} \right)^{-1} \quad (11)$$

通过编写图像处理程序, 对干涉图像做傅里叶变换, 然后平移频谱, 把所需要的频谱信息平移到频谱面中心, 采用低通滤波器滤波去噪后再作逆傅里叶变换即可得到待测相位变化. 再由离散环带法计算出折射率, 最后根据式(11)得到蜡烛火焰温度场的分布.

2 实验

获取干涉图像的 Mach-Zehnder 干涉实验装置如图 2 所示, 图 3 为干涉系统示意图.

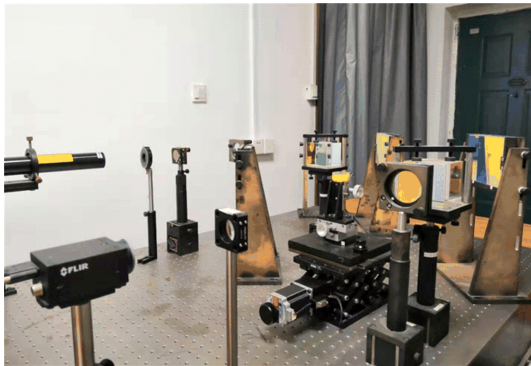
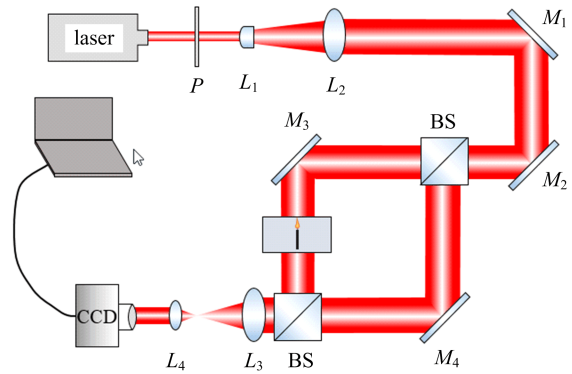


图 2 Mach-Zehnder 干涉系统实验装置图

Fig. 2 Mach-Zehnder interferometer in the experiment

实验用光源为波长 632.8 nm 的氦氖激光器, 激光束经过扩束镜 L_1 (直径 4 mm, 焦距 $f = 8 \text{ mm}$) 和一个非球面镜 L_2 (直径 60 mm, 焦距 $f = 240 \text{ mm}$) 后, 扩束为直径 55 mm 的平行光. 经过两个反射镜 M_1 、 M_2 改变光轴方向, 光束经过分光镜 BS (80 mm × 80 mm) 被分为两束, 一路为物光, 另一路为参考光. 物光光轴方向垂直于待测火焰的对称轴. 实验用蜡烛放置于 3 维载物台上, 可精确调节蜡烛的位置. 由于火焰的加热作用, 蜡烛附近的空气折射率降低, 物光经过火焰区域后波前发生改变, 即相位分布发生改变. 物光与参考光经分光镜 BS 合束后发生干涉, 干涉光斑经过透镜 L_3 (直径 60

mm, 焦距 $f = 240 \text{ mm}$) 和透镜 L_4 (直 25.4 mm, 焦距 $f = 150 \text{ mm}$) 缩小后被 CCD 记录下来.



P—偏振片, L—透镜, M—反射镜, BS—分束镜

图 3 实验中采用的 Mach-Zehnder 干涉仪示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Mach-Zehnder interferometer in the experiment

实验用 CCD (型号 GS3-U3-32S4M-C) 空间分辨率为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$, 最大像素为 1536×2048 , 最快帧率为 121 帧/s. 为了扩大视场, 光路中采用了透镜缩放光斑, 因此实际的空间分辨率为 $5.47 \mu\text{m} \times 5.47 \mu\text{m}$. 在激光器出口处放置的偏振片 P 用以调节光强, 提高干涉图像质量.

3 结果和讨论

3.1 干涉图像的获取

按照光路图 3 调节好光路, 实验过程中尽量避免室内空气扰动. 首先拍摄没有蜡烛火焰时的背景干涉图像, 然后调整好蜡烛位置并点燃, 待火焰稳定后拍摄火焰加热后的干涉图像. 由于蜡烛火焰本身具有一定的发光强度, 增加 CCD 的感应电荷, 使得亮光处的像素更快地趋于饱和, 因而影响干涉图片的质量. 当 CCD 感应光强达到饱和掩盖掉干涉条纹时, 会使烛光所在的区域信息失真. 为了避免这个问题, 实验需要调节激光光强和减小 CCD 的曝光时间, 以获得高质量干涉图像. 干涉法测量温度场中, 外边界的参考温度确定是非常重要的^[3]. 由于蜡烛温度场为轴对称, 因而只需要保证 CCD 视场涵盖蜡烛轴对称中心到室温边界的范围.

在用傅里叶变换法处理干涉图片时, 式(2)中各级光的频谱中心在频域取样区间的对角线上将能最有效地利用频谱空间^[23]. 根据傅里叶变换的性质, 要使各频谱中心在频域取样区间对角线上, 干涉条纹应当在空间取样区间上沿图片的对角线变化. 同时由于二维离散傅里叶变换是二维空间的周期函数, 当载波频率选取过大时, 会使带有相位信息的频谱中心过于偏移, 逸出周期边界的 +1 级频谱将叠加到 -1 级频谱上, 同时 -1 级频谱也将将在 +1 级频谱一侧混叠, 此时会使滤波后的相位恢复质量明显下降. 当载波频率选取得过小时, +1 级频谱将和 -1 级频谱一起, 与零级频谱发生混叠, 无法有效分离, 因而选取合适的载波频率是必要的. 在保证干涉条纹清晰的前提下, 应尽可能使条纹密集且与图片对角线垂直. 实验通过调节 M_4 的俯仰角

与偏转角来实现对条纹方向与条纹疏密的调节.

在综合考虑 CCD 饱和度、条纹清晰度与视场大小后,将蜡烛移到 CCD 视窗的左侧,调整光源强度和 CCD 曝光时间,实验得到的蜡烛火焰干涉图像如图 4 所示.由图 4 可见,在整个视场范围内,干涉条纹清晰可见,干涉条纹向左倾斜沿右上方周期变化.这表明蜡烛火焰是光学透明的,符合干涉测量的要求.

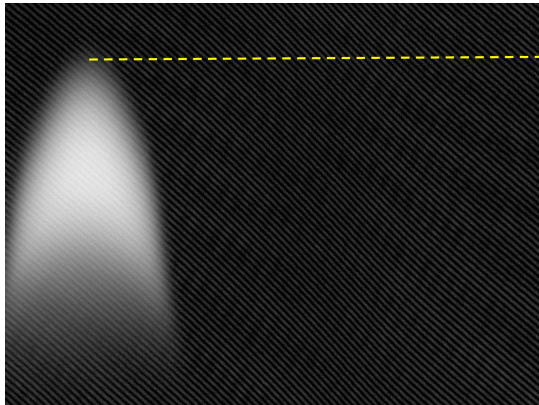


图 4 蜡烛火焰干涉图

Fig. 4 Interferogram of candle flame

3.2 蜡烛火焰的测试结果

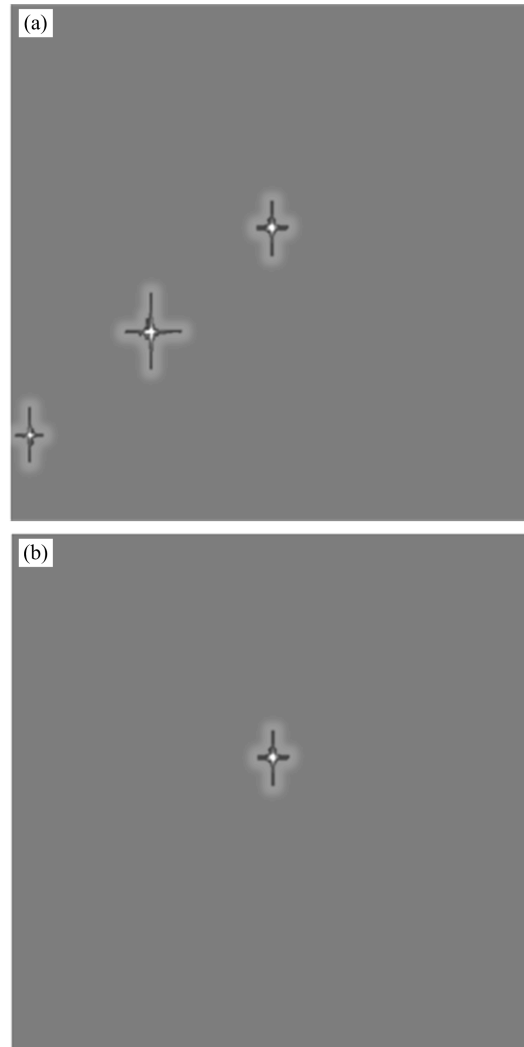
得到干涉图像后,首先对背景干涉图像做傅里叶变换,在频谱面上确定载波条纹的空间频率的坐标 (u_0 和 v_0),再根据移频公式^[22]

$$\mathcal{F}\{i(x,y)e^{-j2\pi(\frac{u_0x}{M}+\frac{v_0y}{N})}\} = I(u+u_0,v+v_0) \quad (12)$$

分别对背景干涉图像与火焰干涉图像实现其傅里叶频谱面的平移,得到图 5(a)所示干涉图像经傅里叶变换和平移后的频谱图,图中的 3 个亮点(波瓣)分别对应式(4)中的 3 项.包含待求解相位信息的波瓣位于图 5(a)的中心位置,经低通滤波器滤波处理后的结果如图 5(b)所示.对图 5(b)进行傅里叶逆变换即可得到需要的相位分布.图 5 所示分别是火焰干涉图移频变换后 $I(u+f_x,v+f_y)$ 在滤波前后的频谱模值图,其中待求相位的信息的波瓣 $C(u,v)$ 位于频谱面的中心.

由图 5 干涉图像的频谱特性可知,需要计算的相位主要集中在很小带宽的低频部分,因而在图像处理的过程中,需要采用适当半径的低通滤波器.当滤波器半径过小时,相位变化会因提取的频谱信息不够而失真;当滤波器半径过大时,则会引入较多的高频噪音.不恰当的滤波器滤波后得到的相位图中将产生明显的振铃现象.对于理想低通滤波器来说,由于存在阶跃,因而振铃效应更加明显^[6,22].为了减小振铃效应和抑制噪音,本文采用滤波器为^[6]:

$$H(u,v) = \begin{cases} 1, R < R_1 \\ \frac{1}{2} \cos(\frac{R-R_1}{R_2-R_1}\pi) + \frac{1}{2}, R_1 \leq R \leq R_2 \\ 0, R > R_2 \end{cases} \quad (13)$$



(a) 滤波前的频谱模值图;(b) 滤波后的频谱模值图
图 5 火焰干涉图移频后的频谱模值图

Fig. 5 Spectral modulus value plane of flame interferogram after frequency shift

式中, $R_1 = 2, R_2 = 8$,采用这种余弦形边界的滤波器,能够明显减弱振铃效应.滤波作傅里叶逆变换,并解包裹后,得到的相位分布如图 6 所示.

从图 6 可见,相位分布整体比较平滑,采用余弦形边界滤波器式(13)可明显抑制振铃效应,同时减小噪音的影响.

为了检验干涉法测量二维温度分布的可行性和测量精度,本文采用热电偶在图 4 虚线所示高度上对蜡烛火焰温度场进行了测量.实验中所用热电偶为 K 型,热电偶结点尺度约 0.3 mm,测点间隔为 0.9 mm,经标定后热电偶的测量误差为 1%.由于难以避免室内空气流动,因此本文采用热电偶多次测量取统计平均值的方法减少这些偶然因素的影响.图 7 中的误差线表示热电偶多次测量后的均方差.由图 7 可见,在所选择的余弦形边界滤波器下,干涉法与热电偶测量结果趋势一致.图 8 是不同滤波器的测量结果和对相位修正线性偏差前后的测量结果与用热电偶测量结果对比的相对误差分布.

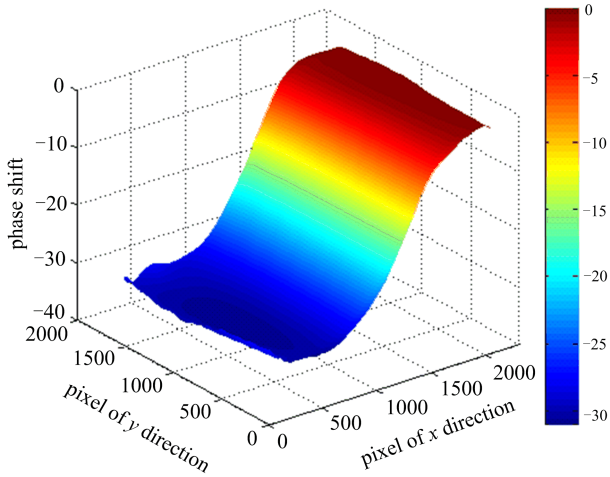


图 6 处理干涉图得到的相位分布

Fig. 6 Phase distribution from processed interferogram

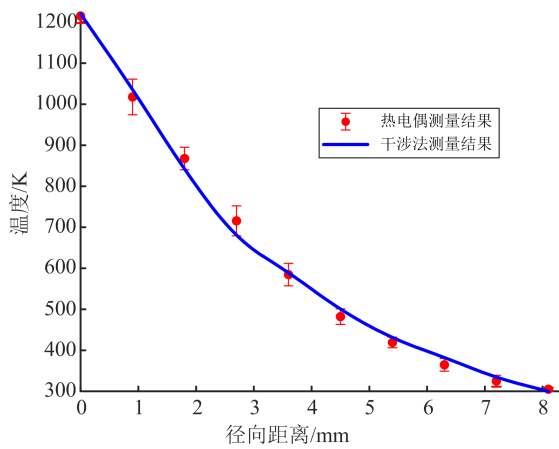


图 7 干涉法和热电偶测量的温度分布对比

Fig. 7 Comparison of temperature distribution measured by interferometry and by a thermocouple, respectively

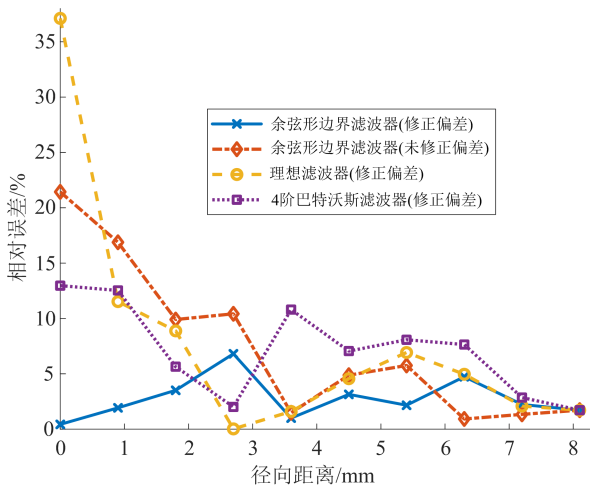


图 8 干涉法与热电偶测量的温度分布相对误差

Fig. 8 Relative error of temperature distribution measured by interferometry and by a thermocouple

从图 8 中可知,采用余弦形边界滤波器的测量结果的最大误差在 7% 以内,平均测量误差约为 4%。误

差产生的原因可能来自两方面,一方面是实验条件,如空气扰动的存在,蜡烛本身的温度场并非理想的轴对称,CCD 分辨率有限引起的偏差;另一方面来自理论方法,主要是滤波丢失部分有效信息和残留无效信息的干扰。

3.3 影响因素分析

CCD 记录图片时,将原有的连续信号离散数字化,在干涉图像处理的过程中,会因数字化产生特定的问题^[7]。根据公式(1),每一位置处的光强由该处的空间坐标所决定。然而,在 CCD 记录的干涉图片上,光强只能由干涉图像上的像素坐标读取出来。受限于 CCD 的空间分辨率,无法将每一个空间坐标处的信息精确读取。空间采样间隔满足^[22]

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \frac{1}{M\Delta u} \\ \Delta y &= \frac{1}{N\Delta v} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中, $\Delta x, \Delta y$ 分别是空间域采样间隔, $\Delta u, \Delta v$ 分别是频率域采样间隔, u, v 分别对应 x, y 方向的空间频率分量,图片大小为 $M \times N$ 。根据式(3),把干涉图片变换到频谱面上,表达式可写为

$$I(u, v) = A(u, v) + C(u - f_u, v - f_v) + C^*(u + f_u, v + f_v) \quad (15)$$

但此时的 u, v 以及 f_u, f_v 都是频谱面上的坐标,只能取整数。对于实验中取的载波频率 f_x, f_y ,在频谱面上不可能恰好是频谱分辨率的整数倍,因而,实际的频谱与干涉图像数字化处理的频谱坐标之间存在一个很小的偏差 $\delta u, \delta v$ 。根据式(12)二维傅里叶变换的平移性质,将原频谱乘以因子 $e^{j2\pi(-\frac{f_u x}{M} - \frac{f_v y}{N})}$ 后将 $C(u - f_u, v - f_v)$ 平移至原点,实际上隐含的偏差 $\delta u, \delta v$ 却没有消失。这样,滤波以后再做逆变换得到

$$c'(x, y) = c(x, y) \exp[-j2\pi(x\delta u + y\delta v)] \quad (16)$$

上式表明求解得到的相位实际上隐含了一个线性误差项。为了消除这一误差,本文采用背景和火焰干涉图对比分析。背景干涉图片中不包含温度场引起的相位改变,通过处理背景图片提取相位可以得到这个线性偏差,再从火焰干涉图像的相位中减去这个线性偏差得到更准确的相位变化值。如图 8 所示,对比余弦形边界滤波器在相位修正了线性偏差前后的测量结果,可以发现对相位修正线性偏差后提高了测量的精度。线性偏差的存在使相位发生偏离,对高温区引起的偏离更大。由于高温区的温度测量结果对相位误差更加敏感,因此线性偏差的存在将在高温区产生更大的测量误差。

在用傅里叶变换法对干涉图片进行处理的过程中,滤波的结果往往影响着干涉法的最终计算结果。为此,我们对比分析了理想滤波器与 4 阶巴特沃斯滤波器对干涉图片的频谱进行滤波的影响。理想滤波器的表达式为

$$H(u, v) = \begin{cases} 1, R(u, v) \leq R_0 \\ 0, R(u, v) > R_0 \end{cases} \quad (17)$$

n 阶巴特沃斯滤波器的表达式为

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\frac{R(u, v)}{R_0} \right]^{2n}} \quad (18)$$

式中, R_0 为滤波器的截止频率, 对比结果如图 8 所示. 其中, 理想滤波器与 4 阶巴特沃斯滤波器的截止频率均取 6, 其未修正线性偏差的结果未列出是因为它们的趋势与余弦形边界滤波器相同.

从图 8 中可以看出, 采用不同的滤波器计算所得到的温度分布结果与热电偶相比, 采用理想滤波器的测量的结果误差最大, 特别是在高温区, 达到约 37%. 巴特沃斯滤波器测量的误差在余弦形边界滤波器与理想滤波器之间, 在高温处达到最大约 13%. 采用余弦形边界滤波器测量的误差最小, 在所有测量点中最大误差约 7%, 平均误差约 4%. 滤波的误差来源主要有两个. 一方面, 在滤波器中存在阶跃时, 其傅里叶逆变换会有明显的振铃效应^[6,22]. 根据傅里叶逆变换的性质, $c(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{C(u, v)\} = \mathcal{F}^{-1}\{I(u + f_x, v + f_y)\} \otimes \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v)\}$. 若滤波器的傅里叶逆变换中存在振铃效应, 则卷积将使计算结果含有明显的振荡而引起较大误差. 理想滤波器中存在阶跃, 对比几种滤波器的测量结果, 理想滤波器的误差明显更大. 另一方面, 滤波器的具体结构与其截止频率, 决定了其从频谱面上滤波得到的信息分布, 若滤出的信息比 $c(x, y)$ 在频谱面上的信息少, 则恢复的相位会失真, 当所滤出的信息比 $c(x, y)$ 在频谱面上的信息多时, 多余部分的信息将会以误差的形式影响最终的计算结果. 相比理想滤波器, 巴特沃斯滤波器与余弦形边界滤波器不存在阶跃, 能够很好地抑制振铃效应, 因此采用这两种滤波器的测量结果误差更小. 由于余弦形边界滤波器不会滤出 $R(u, v) > 8$ 的频谱, 减小了高频部分的噪声, 相较于巴特沃斯滤波器, 因此采用余弦形边界滤波器能实现更好的滤波效果. 经过对比分析, 本文确定余弦形边界滤波器在 $R_1 = 2, R_2 = 8$ 时的滤波效果最佳.

相比热电偶的逐点测量, 基于条纹傅里叶分析的激光干涉法通过分析一张干涉图像, 能够同时计算得到整个区域的温度分布, 且测试时间很短. 若对温度场进行连续拍照, 可获取动态的温度分布状况, 因此基于条纹傅里叶分析的激光干涉法是快速高效的测量方法.

4 结论

本文提出了基于条纹傅里叶变换的激光干涉温度测量方法, 采用 Mach-Zehnder 干涉仪, 并以蜡烛火焰温度场为实例进行了测量. 通过傅里叶变换法处理干涉图像, 在有效相位信息提取中采用余弦形边界滤波器, 通过选取合适的滤波半径可以很好地实现滤波去噪. 在计算相位变化时, 考虑了图片数字化引进的线性偏差, 通过背景和火焰干涉图像的对比分析加以修正, 提高了相位变化的准确度, 进而提高温度的测量精度. 对比热电偶测量的实验结果表明, 本文提出的基于条纹傅里叶分析的激光干涉法是一种快速有效的测量二维轴对称温度分

布的方法.

参考文献(References)

- [1] DIVYA H, REDDY G R, SOBHAN C B, et al. Digital interferometric measurement of forced convection fields in compact channels[J]. International Journal of Optomechatronics, 2015, 9(1): 9-34.
- [2] SAJITH V, HARIDAS D, SOBHAN C, et al. Convective heat transfer studies in macro and mini channels using digital interferometry[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(3): 239-249.
- [3] KARAMINEJAD S, ASKARI M H, ASHJAEI M J A O. Temperature field investigation of hydrogen/air and syngas/air axisymmetric laminar flames using Mach-Zehnder interferometry [J]. Applied Optics, 2018, 57(18): 5057-5067.
- [4] TAKEDA M, INA H, KOBAYASHI S J J. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. Review of Scientific Instruments, 1982, 72(1): 156-160.
- [5] BONE D J, BACHOR H A, SANDEMAN R J. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform [J]. Applied Optics, 1986, 25(10): 1653-1660.
- [6] MASSIG J H, HEPPNER J J A O. Fringe-pattern analysis with high accuracy by use of the Fourier-transform method: theory and experimental tests[J]. Applied Optics, 2001, 40(13): 2081-2088.
- [7] NUGENT K A J A O. Interferogram analysis using an accurate fully automatic algorithm[J]. Applied Optics, 1985, 24(18): 3101-3105.
- [8] ZHONG J, WENG J J O E. Generalized Fourier analysis for phase retrieval of fringe pattern[J]. Optics Express, 2010, 18(26): 26806-26820.
- [9] KEMAO Q J A O. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. Applied Optics, 2004, 43(13): 2695-2702.
- [10] KREIS T J J A. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1986, 3(6): 847-855.
- [11] LIU J, RONNEY P J A O. Modified Fourier transform method for interferogram fringe pattern analysis [J]. Applied Optics, 1997, 36(25): 6231-6241.
- [12] BRACEWELL R N. The Fourier transform and its applications [J]. American Journal of Physics, 2002:34.
- [13] CHEHOUANI H, SAID A A H, EL FAGRICH M J E T, et al. Heat transfer study of free convection through a horizontal open ended axisymmetric cavity using holographic interferometry [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2015, 60: 308-316.
- [14] CHEHOUANI H J O, ENGINEERING L I. A simple Abel inversion method of interferometric data for temperature measurement in axisymmetric medium [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 336-344.
- [15] PRITT M D, SHIPMAN J S J I T O G, SENSING R. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's [J]. IEEE Transactions on Geoscience and

- Remote Sensing, 1994, 32(3): 706-708.
- [16] GHIGLIA D C, ROMERO L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(1): 107-117.
- [17] KERR D, KAUFMANN G, GALIZZI G J A O. Unwrapping of interferometric phase-fringe maps by the discrete cosine transform [J]. Applied Optics, 1996, 35(5): 810-816.
- [18] ALVAREZ R, RODERO A, QUINTERO M. An Abel inversion method for radially resolved measurements in the axial injection torch [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2002, 57(11): 1665-1680.
- [19] CHO Y, NA S J. Application of Abel inversion in real-time calculations for circularly and elliptically symmetric radiation sources[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(3): 878.
- [20] MA S, GAO H, WU L J A O. Modified Fourier-Hankel method based on analysis of errors in Abel inversion using Fourier transform techniques [J]. Applied Optics, 2008, 47(9): 1350-1357.
- [21] MADSEN M, BROWN D, KRUTZ S, et al. Measuring the molecular polarizability of air [J]. American Journal of Physics, 2011, 79(4): 428-430.
- [22] GONZALES R C, WOODS R E. Digital Image Processing [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [23] 熊秉衡, 李俊昌. 全息干涉计量技术: 原理和方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
-
- (上接第 831 页)
- [5] Facebook Database Engineering Team. RocksDB[EB/OL]. [2020-06-01]. <https://github.com/facebook/rocksdb>.
- [6] RAJU P, KADEKODI R, CHIDAMBARAM V, et al. Pebblesdb: Building key-value stores using fragmented log-structured merge trees [C]// Proceedings of the 26th Symposium on Operating Systems Principles. 2017: 497-514.
- [7] WU X, XU Y, SHAO Z, et al. Lsm-trie: An lsm-tree-based ultra-large key-value store for small data items [C]// 2015 USENIX Annual Technical Conference. 2015: 71-82.
- [8] LU L, PILLAIT S, GOPALAKRISHNAN H, et al. Wisckey: Separating keys from values in ssd-conscious storage[J]. ACM Transactions on Storage, 2017, 13(1): 1-28.
- [9] CAO Z, DONG S, VEMURI S, et al. Characterizing, modeling, and benchmarking rocksdb key-value workloads at facebook[C]// 18th USENIX Conference on File and Storage Technologies. 2020: 209-22.
- [10] MATSUNOBU Y. Innodb to myrocks migration in main mysql database at facebook [C]// USENIX Association, May 2017.
- [11] SEARS R, RAMAKRISHNAN R. BLSM: A general purpose log structured merge tree[C]// Proceedings of the 2012 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. 2012: 217-228.
- [12] KIRSCH A, MITZENMACHER M. Less hashing, same performance: Building a better bloom filter[C]// European Symposium on Algorithms. Springer, 2006: 456-467.
- [13] ATIKOGLU B, XU Y, FRACHTENBERG E, et al. Workload analysis of a large-scale key-value store [C]// Proceedings of the 12th ACM SIGMETRICS/ PERFORMANCE joint international conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. 2012: 53-64.
- [14] CHANH H, LIANG C J M, LI Y, et al. Hashkv: Enabling efficient updates inkv storage via hashing [C]// 2018 USENIX Annual Technical Conference. 2018: 1007-1019.
- [15] COOPER B F, SILBERSTEIN A, TAM E, et al. Benchmarking cloud serving systems with YCSB[C]// Proceedings of the 1st ACM Symposium on Cloud Computing. 2010: 143-154.