

文章编号: 1002-1582(2025)06-0743-07

基于混合互相关光流算法的 背景定向纹影温度场测量研究

刘映伶¹, 李虎², 官廷锋², 朱海东³, 焦萌倩^{1*}

(1. 桂林信息科技学院 基础教研部, 广西 桂林 541199)

(2. 桂林信息科技学院 机电工程学院, 广西 桂林 541199)

(3. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 背景定向纹影是近年来出现的非侵入式全场光学测量技术, 可用于温度场的定量测量。背景图像位移计算的精度直接决定着温度场重建的精度, 但目前主流的混合光流算法的重建位移场精度不高。针对这一问题, 提出了一种新的混合互相关光流算法, 使用高斯径向基函数插值结合基于梯度恒定假设的光流算法对位移场进行细化。将该方法结合多尺度小波噪声背景图案对不同当量比的甲烷/空气层流预混火焰上方的温度场进行重建, 与基于物理的光流算法和混合光流算法进行了比较, 该方法具有较高精度和鲁棒性, 而且在保持热流场的小散度和涡度结构等流动细节及减少异常值方面也更具有优势。重建的温度值与热电偶测量值的相对平均误差仅为2.7%, 实验表明该方法可有效地重建高精度的温度场。

关 键 词: 光学测量; 背景定向纹影; 混合算法; 温度场; 梯度恒定假设

中图分类号: TB942

文献标识码: A

Research on temperature field measurement using Background-oriented schlieren based on hybrid Cross-correlation optical flow algorithm

LIU Yingling¹, LI Hu², GUAN Tingfeng², ZHU Haidong³, JIAO Mengqian^{1*}

(1. Division of Fundamental Education and Research, Guilin Institute of Information Technology, Guilin 541199, China)

(2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin Institute of Information Technology, Guilin 541199, China)

(3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Background-Oriented Schlieren (BOS) is a non-intrusive, full-field optical measurement technique that has emerged in recent years for the quantitative measurement of temperature fields. The accuracy of background image displacement calculation is critical for the precision of temperature field reconstruction; however, the reconstruction displacement fields obtained by current mainstream hybrid optical flow algorithms lack sufficient accuracy. To address this limitation, a novel hybrid cross-correlation optical flow algorithm is proposed. This method refines the displacement field using Gaussian radial basis function interpolation combined with a gradient constancy assumption-based optical flow algorithm. The proposed approach, integrated with a multi-scale wavelet noise background pattern, was applied to reconstruct the temperature fields above laminar premixed methane/air flames at different equivalence ratios. Comparisons were made with physically based optical flow algorithms and existing hybrid optical flow algorithms. The results demonstrate that the proposed method offers su-

收稿日期: 2025-07-21; 收到修改稿日期: 2025-09-09

基金项目: 广西壮族自治区自然科学基金项目 (2017GXNSFAA198122); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2025KY1070); 桂林信息科技学院科学研究培育项目 (XJ2024091、XJ2024107)

作者简介: 刘映伶 (1983—), 女, 讲师, 硕士, 从事计算机视觉测量、应用数学。liuyingling0130@126.com

焦萌倩 (1995—), 女, 讲师, 硕士, 从事计算机视觉测量、随机动力系统。

* 通讯作者: 18877315065@163.com

perior accuracy and robustness. Furthermore, it exhibits significant advantages in preserving flow details inherent to thermal flow fields, such as small divergence and vorticity structures, while simultaneously reducing outliers. The relative mean error between the reconstructed temperature values and thermocouple measurements was as low as 2.7%. Experimental results confirm that this method effectively reconstructs high-precision temperature fields.

Keywords: optical measurement; BOS; hybrid optical flow algorithm; temperature field; gradient constancy assumption

0 引 言

流场温度是理解流体流动行为重要的物理参数之一,它本质上反映了流场中流体流动行为特性。流动显示技术是测量流体流动物理参数最重要的工具,主要分为侵入式和非侵入式测量。侵入式测量技术主要包括热电偶探针,但热电偶探针只能测量流场中探针位置的温度,因此要在不同的位置同时进行测量需要大量的热电偶探针,此类测量技术会破坏流场的流动结构和影响流体流动物理参数的测量精度。

光学测温技术是真正的非侵入式全场测量技术,主要包括定标纹影技术、彩虹纹影技术和背景定向纹影 (Background Oriented Schlieren, BOS)^[1]。与其他两种定量纹影测温方法相比, BOS 系统具有价格低廉、装置简单、易于安装、测量精度高和流场测量范围大等显著优点^[2]。BOS 经过数十年的发展,已经从新兴的流动可视化技术发展成为可进行二维、三维、高分辨率的定量测量技术, BOS 被广泛应用于超声速流动^[3-5]、燃烧火焰^[6-12]和等离子体流动的研究^[13],但对于火焰上方的自然热对流场的研究较少^[14]。

BOS 系统可分为实验装置搭建、位移场计算和温度场重建三个部分, BOS 图像位移估计是整个温度场重建的测量链中最关键的一节,它直接决定了整个 BOS 系统的精度^[2]。BOS 通常使用 PIV 技术的互相关算法搭配随机点阵的背景图案估计位移场,由于互相关算法使用了多像素询问窗口,每个查询窗口只产生一个平均位移矢量,即使多重查询窗口变形迭代算法增加了互相关算法的空间分辨率,但就位移矢量数而言,互相关算法的分辨率仍有大约一个数量级的损失,这会导致重建流场的细节特征模糊或缺失。

光流算法在 PIV 领域和纹影测速领域^[15,16]得到了广泛应用,其能够产生像素级的密集位移矢量场。Liu 和 Shen^[17]将投影运动方程作为光流约束,进一步给出了基于物理的光流方程。为了提高光流算法在大位移场中的测量精度,很多研究者采用多分辨率金字塔方案来处理大位移,通过对 BOS 图像进行连续低通滤波和降采样获得的多分辨率金字塔图像结构,尽管多分辨率方案可以解

决变分光流算法无法测量的大位移场的问题,但是连续的降采样会导致流场的信息丢失,无法恢复小尺度的精细结构。Liu 等^[18]提出了互相关和基于物理的光流方程的混合算法。混合算法将互相关算法获得的粗粒化位移场作为初始估计,通过实施包括高斯滤波和“图像移位”预处理技术,再通过光流算法计算出高分辨率的位移场。该混合方法结合了两种方法的优点,在大位移和小位移情况下精度均优于基于物理的光流算法,但对复杂热流场的小散度和涡度结构等流动细节并没有更好的保留能力,且易受噪声干扰产生异常值。

针对 BOS 技术中位移场计算精度不足导致温度场重建误差大的问题,本文提出一种新的混合互相关光流算法 (CC-GCOF)。通过构建梯度恒定假设光流算法与高斯径向基函数插值融合的位移场精化框架,以非凸广义 Charbonnier 惩罚函数提升噪声鲁棒性,用一阶 div-curl 正则化项保留热流场散度、涡度等小尺度结构,使用高斯径向基插值恢复亚像素位移细节,降低角度误差,解决现有混合算法细节保留差、异常值多的问题。设计多尺度小波噪声背景图案,该背景在所有尺度上既保留明显可识别的高频细节,又能适配光流算法对像素级位移变化的敏感性。通过将该方法结合多尺度小波噪声背景图案对不同当量比的甲烷/空气层流预混火焰上方的温度场进行精确重建,相较于现有混合方法精度提升一倍以上。本方法可有效实现高精度温度场重建,为 BOS 技术在热流场测量中的应用提供新方案。

1 BOS 温度场重建原理

BOS 是一种通过检测流体折射率的变化来量化密度和温度场的技术。如图 1 所示,待测流场在相机和背景图案之间,由于透明流体介质的折射率分布不均匀,光线穿过流场后会发生偏转,因此透过透明流场看到的背景图案会因光线穿过流场时的折射而产生扭曲。

当光线穿过待测流场时,光线因流场折射率梯度发生偏转,偏转角可以表示为

$$\epsilon_x = \int \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial x} dz \quad (1)$$

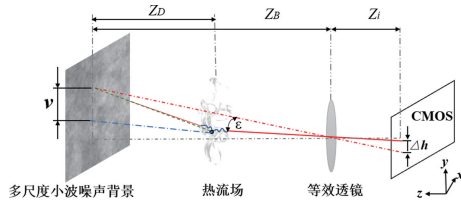


图1 BOS技术原理图

$$\epsilon_y = \int \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (2)$$

式中, ϵ_x 和 ϵ_y 分别为偏折角 ϵ 在 x 方向和 y 方向上的分量; n 是所测量流场的折射率。根据图1可以得到像平面上对应点的位移 Δh

$$\Delta h = \frac{\epsilon Z_D Z_i}{Z_B} = \frac{\epsilon Z_D f}{Z_B - f} \quad (3)$$

式中, f 为焦距, Z_D 为多尺度小波噪声背景到流场中心之间的距离; Z_B 为物距; Z_i 为像距。从式(3)可知, 位移量与偏转角 ϵ 和 BOS 实验光路设置有关。根据式(1)、(2)、(3)可得

$$\Delta h = \Delta x_i + \Delta y_j \quad (4)$$

$$\Delta x = \frac{Z_D Z_i}{Z_B} \int \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial x} dz \quad (5)$$

$$\Delta y = \frac{Z_D Z_i}{Z_B} \int \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (6)$$

当光线偏移量远远小于流场尺度时, 即可认为流场具有二维分布特性时^[19], 可得

$$\frac{\partial n}{\partial x} = A \cdot \Delta x(x, y) \quad (7)$$

$$\frac{\partial n}{\partial y} = A \cdot \Delta y(x, y) \quad (8)$$

式中, A 为与 BOS 实验设置有关的常数; $\Delta x(x, y)$ 与 $\Delta y(x, y)$ 分别为在 (x, y) 处点沿 x 和 y 方向的位移。将式(7)、(8)分别对 x 和 y 求偏导后相加可得

$$\nabla^2 n = \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} = A \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x} \Delta x(x, y) + \frac{\partial}{\partial y} \Delta y(x, y) \right] \quad (9)$$

式(9)显示了流场折射率 n 与位移 Δx 、 Δy 之间的关系, 为带有源项的泊松方程, 本文采用有限差分法求解该泊松方程, 即可获得沿光线路径积分投影的折射率场。折射率 n 和流体密度 ρ 之间的关系由 Gladstone-Dale 方程给出

$$n - 1 = K\rho \quad (10)$$

通过式(10)可得到自然热对流场的密度分布。 K 为 Gladstone-Dale 常数, 取决于混合气体的特性。 K 可通过各成分的质量分数加权平均计算^[20]

$$K_{\text{mix}} = \sum (X_i \cdot K_i) \quad (11)$$

式中, X_i 为组分 i 的质量分数。对于甲烷/空气预

混火焰, 在燃烧过程中会产生二氧化碳、水蒸气等产物, 随着当量比的变化, 这些产物的比例也会改变, 进而影响混合气体的平均 Gladstone-Dale 常数。流场的温度分布表示为

$$T = \frac{\rho_0 \cdot T_0}{\rho} \quad (12)$$

式中, T_0 是无扰动流场时的环境温度, 也就是实验环境下的温度, ρ 是待测透明流场的密度。

2 混合互相关光流算法

2.1 基于梯度恒定假设的变分光流算法

光路搭建方式、振动和不均匀照明、模糊和高离效应和体积折射的重新聚焦效果使得 BOS 图像序列很难满足亮度恒定假设^[21]。因此假设在粒子运动过程中空间梯度不变, 即

$$\nabla I(X + \mathbf{w}, t + 1) = \nabla I(X, t) \quad (13)$$

式中, I 代表图像的亮度, ∇ 表示梯度算子, $X = (x, y)^T$, $\mathbf{w} = (u, v)^T$, 直接将梯度恒定假设作为数据项的计算效果并不好^[22]。本文提出的 CC-GCOF 算法使用轻微非凸的广义 Charbonnier 惩罚函数, 即

$$\psi(s^2) = (s^2 + \sigma^2)^\epsilon \quad (14)$$

式中 $\epsilon = 0.45$, $\sigma = 0.001$ 。CC-GCOF 算法使用亮度恒定假设结合梯度恒定性假设的数据项, 众所周知, 此数据项比原来的变分光流法具有更高的鲁棒性^[21], 数据项如下

$$E_{\text{Data}}(\mathbf{w}) = \int_{\Omega} \psi \left(\frac{|I(X + \mathbf{w}, t + 1) - I(X, t)|^2 + |\nabla I(X + \mathbf{w}, t + 1) - \nabla I(X, t)|^2}{\beta} \right) dX \quad (15)$$

式中, β 是两种假设之间的权重参数, 求解的位移场具有 x 和 y 两个未知分量, 仅有数据项是无法完全求解位移场信息, 式(15)的解是不唯一的。HS 光流法^[23]通过添加光流平滑约束项 E_{smooth} , 使用对二次型目标函数进行优化, 得到光流矢量场

$$E_{\text{smooth}}(\mathbf{w}) = \int_{\Omega} \psi \left(|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2 \right) dX \quad (16)$$

基于物理的光流法采用投影到 2 维图像平面上的 Navier-Stokes 方程为光流计算提供了基于物理的约束^[17]。CC-GCOF 算法对 BOS 图像进行一阶 div-curl 正则化项, 通过引入广义 Charbonnier 惩罚函数 ψ , 即

$$E_{\text{smooth}}(\mathbf{w}) = \int_{\Omega} \psi \left(\zeta_1 |\text{div } \mathbf{w}|^2 + \zeta_2 |\text{curl } \mathbf{w}|^2 \right) dX \quad (17)$$

ζ_1 和 ζ_2 代表散度分量和旋度分量的权重。CC-GCOF 算法的总能量泛函是数据项和平滑项加权和, 即

$$E(\mathbf{w}) = E_{\text{Data}}(\mathbf{w}) + \alpha E_{\text{Smooth}}(\mathbf{w}) \quad (18)$$

$$E(\mathbf{w}) = \int_{\Omega} \psi \left(|I(X+\mathbf{w}, t+1) - I(X, t)|^2 + \beta |\nabla I(X+\mathbf{w}, t+1) - \nabla I(X, t)|^2 \right) dX + \alpha \int_{\Omega} \psi (\zeta_1 |\operatorname{div} \mathbf{w}|^2 + \zeta_2 |\operatorname{curl} \mathbf{w}|^2) dX \quad (19)$$

式中正则化参数 $\alpha > 0$, 是数据项 $E_{\text{Data}}(\mathbf{w})$ 和平滑项 $E_{\text{Smooth}}(\mathbf{w})$ 之间的权重参数。由于 $E(\mathbf{w})$ 是高度非线性的, 对其最小化并非易事。为了更好的可读性, 定义了以下缩写

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \partial_{xx} I(X + \mathbf{w}) \\ I_{xy} &= \partial_{xy} I(X + \mathbf{w}) \\ I_{yy} &= \partial_{yy} I(X + \mathbf{w}) \\ I_{xt} &= \partial_x I(X + \mathbf{w}) - \partial_x I(X), \\ I_{yt} &= \partial_y I(X + \mathbf{w}) - \partial_y I(X). \\ \gamma_1 &= \begin{pmatrix} \zeta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \gamma_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \zeta \end{pmatrix}, \zeta = \zeta_1 / \zeta_2 \end{aligned} \quad (20)$$

α , β 和 ζ 是能量泛函的可调整参数, 在参数变化的条件下此方法也具有较高的鲁棒性。在这项研究中, 最佳参数设置是通过合成 BOS 图像测试数据的迭代校准过程确定的。在以下分析中, 本文使用 $\alpha=80$, $\beta=10$ 和 $\zeta=1$ 来提供最佳性能。对所提出的方法采用变分算法来最小化能量的函数, 同时式 (19) 必须满足 Euler-Lagrange 方程

$$\begin{aligned} & \psi' (I_t^2 + \beta (I_{xt}^2 + I_{yt}^2)) \cdot (I_x I_t + \beta (I_{xx} I_{xt} + I_{xy} I_{yt})) \\ & - \alpha \operatorname{div} (\psi' (\zeta u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + \zeta v_y^2) \gamma_1 \nabla u) = 0 \\ & \psi' (I_t^2 + \beta (I_{xt}^2 + I_{yt}^2)) \cdot (I_y I_t + \beta (I_{xy} I_{xt} + I_{yy} I_{yt})) \\ & - \alpha \operatorname{div} (\psi' (\zeta u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + \zeta v_y^2) \gamma_2 \nabla v) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

对等式 (19) 使用导数的标准离散化, 得到稀疏线性方程组, 使用连续过松弛 (SOR) 迭代求解。

2.2 BOS 位移场精化

为了提高 BOS 位移场的计算精度, 本文将互相关算法和基于梯度恒定假设的变分光流法相结合对位移场进行精化。所提出的 CC-GCOF 算法流程如图 2 所示。首先采用 PIVlab2.63 的基于 FFT 的互相关方法获取粗粒化位移场, 然后采用高斯径向基函数插值替代传统混合方法中的双三次插值, 将粗粒化位移场恢复至图像 1 的空间分辨率 (伪高分辨率位移场)。高斯径向基函数插值具有更好的微分连续性, 能更准确地重建位移场的梯度信息, 从而有效降低后续光流计算中的角度重建误差^[24]。通过移位方案将伪高分辨率位移场的每个矢量与图像 1 对应像素相关联, 使图像 1 逆向转换成图像 1-S。由于图像 1-S 和图像 2 之间的残余位移值很小, 因此利用基于梯度恒定假设的变分光流法提取残余位移场。最终获得的精化位移场

是高斯径向基函数插值后得到的伪高分辨率位移场与基于梯度恒定假设的光流法输出的精细化位移场的叠加。

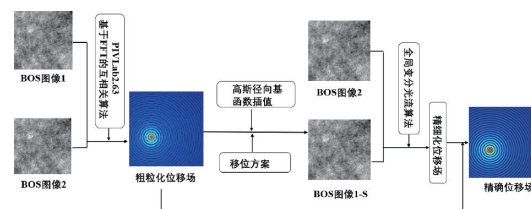


图 2 CC-GCOF 的位移精化流程图

3 实验设置

3.1 多尺度小波噪声背景图案设计

由正态或均匀分布噪声生成的 BOS 图像中, 重复下采样和低通滤波导致 BOS 图像形成均匀灰度, 这些 BOS 图像缺乏畸变细节, 使得光流算法很难精确计算位移^[25]。本文通过生成多尺度小波噪声背景图案, 它在所有尺度上都有明显可识别的高频内容。多尺度小波噪声背景图案如图 3 所示, 主要生成步骤如下:

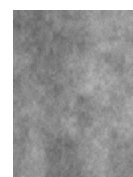


图 3 多尺度小波噪声 BOS 背景图案

(1) 假设需要生成分辨率为 $2^n \times 2^n$ 的多尺度小波 BOS 背景图案, n 为正整数;

(2) 首先生成分辨率为 $2^k \times 2^k$ 的小波噪声背景图案 $I(k)$, 其中 $k < n$;

(3) 对上一步生成的小波噪声背景图案 $I(k)$ 进行 haar 二维小波变换, 进行低通滤波, 即对小波噪声背景图案 $I(k)$ 进行降采样, 得到分辨率为 $2^{k-1} \times 2^{k-1}$ 的小波噪声背景图案 $I_{\text{down}}(k-1)$;

(4) 对上一步得到的小波噪声背景图案 $I_{\text{down}}(k-1)$ 进行二维小波重构, 即对图案进行升采样至原始图像分辨率 $2^k \times 2^k$, 得到重构后的背景图案 $I_{\text{up}}(k)$;

(5) 最后将所有 $n-1$ 个经过升采样至尺度为 n 的背景图案进行权重相同的加权平均, 得到分辨率为 $2^n \times 2^n$ 的多尺度小波 BOS 背景图案。

3.2 BOS 实验系统搭建

本实验所研究的对象是不同当量比甲烷/空气预混火焰上方的流场, 选择甲烷流量为 180 mL/min 以获得较好的甲烷/空气预混火焰上方的流场分布情况, 具体燃料和空气参数如表 1 所示。

图 4 为 BOS 实验装置实物图, 主要由计算机图像采集系统、多尺度小波噪声背景图案、本生

灯、两种压缩气体瓶(纯净空气和 CH_4)和对应的流量控制器组成。本实验的本生灯出口直径为11mm,高度为130mm,为通过控制压缩气体瓶的流量计实现不同工况下的甲烷/空气预混火焰燃烧。本实验装置搭建综合考虑了BOS系统的灵敏度和空间分辨率,BOS实验参数为 $f=50\text{mm}$, $Z_D=375\text{mm}$, $Z_B=950\text{mm}$ 。实验环境温度为 $25\pm 0.5^\circ\text{C}$,相机的快门速度为 $1/2000\text{s}$,BOS图像空间分辨率约为 $56.7\mu\text{m}/\text{pixels}$ 。

表1 甲烷/空气层流预混火焰燃烧实验工况

当量比 φ	甲烷流量/ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	氧气流量/ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	空气流量/ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)
1.10	180.00	327.27	1558.47
1.20	180.00	300.00	1428.61
1.30	180.00	276.92	1318.70
1.40	180.00	257.15	1224.53
1.50	180.00	240.00	1142.87

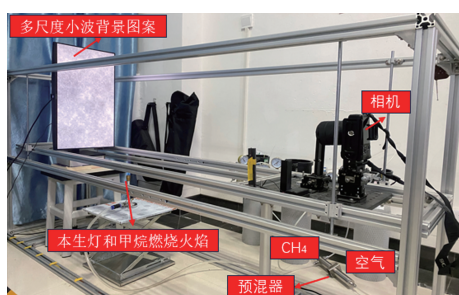


图4 BOS实验装置图

3.3 温度采集装置搭建

本实验使用热电偶温度计对甲烷/空气预混火焰正上方流场进行接触点处的温度采集,将采集的温度值与算法重建的温度场进行比较,以此验证算法重建的温度场精度。图5显示了热电偶探针分布结果,垂直高度为500像素,水平高度分别为400像素、700像素、1000像素、1300像素、1600像素。甲烷/空气预混火焰到背景图案下方边界的实际距离约为25mm。热电偶探头温度测量范围为 $-200\sim 1372^\circ\text{C}$,测量点温度低于 1000°C 时,温度分辨率为 0.1°C ,测量点温度高于 1000°C 时,温度分辨率为 1°C 。使用热电偶对同一位置进行100次测量并取平均值,以降低偏差。

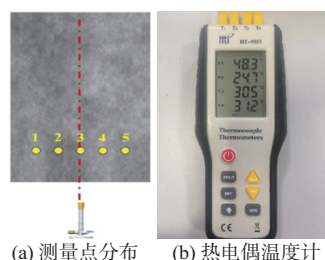


图5 热电偶探针分布示意图

4 实验结果与讨论

为了验证CC-GCOF算法重建高精度温度场的有效性,本文对不同当量比的甲烷/空气预混火焰上方流场进行温度重建。CC-GCOF方法的结果与以下基于物理的光流方法^[17]和传统混合方法^[18]进行比较:

基于物理的光流方法^[17]:使用拉格朗日乘数为20的HS估计作为初始解和拉格朗日乘数为2000的Liu-Shen估计作为精化解,其他参数设置采用Matlab开源程序中的默认参数。

传统混合方法^[18]:Liu等将基于FFT变换互相关方法与基于物理的光流法结合,使用双三次插值,提出了一种混合方法,以克服光流法对大位移场的局限性,参数采用文献中提供的最优设置。所有对比实验均使用上述最优参数,确保实验条件一致。

图6显示了基于物理的光流算法、混合光流算法和CC-GCOF算法重建的温度场。从图中可以看出,三种方法都能够重建出主要的流场温度分布,基于物理的光流算法和混合光流算法对一些微弱的流态不敏感,容易受到噪声的干扰,估计出较多的异常值导致部分流动结构缺失。CC-GCOF方法使用非凸Charbonnier惩罚函数替代二次惩罚函数,同时使用高斯径向基函数插值代替双三次插值,能够有效去除异常值带来的影响,减小了重建位移的角度误差。所提出的CC-GCOF方法能够更好的恢复热流场的涡度结构和一些微弱流动的细节部分,热流场的边界部分具有更好的连续性,更符合热流场的流动特征。

图6显示出流场温度分布接近于对称形状,温度从火焰正上方流场的轴线处向两边逐渐升高,然后又逐渐降低,表明此时温度降到了环境温度。这是因为气喷灯管口处的来流预混气体接近环境温度,甲烷/空气预混气体在点燃后发生化学反应,火焰及上方流场温度逐渐升高,产生向上运动的热羽流。当量比为1.2和1.3时,属于富燃料燃烧,燃料燃烧的不充分,会有一部分燃料排放到空气中,随着当量比的增加,甲烷的燃烧利用率会逐渐降低,整体温度也会随着降低。

为了验证CC-GCOF算法重建的温度场精度,本文将热电偶温度计采集的温度值与三种算法重建的温度数据进行比较。如图7所示,其他两种的温度曲线波动较大,尤其在温度梯度较大的区域,温度值突然上升或下降,说明噪声比较严重,具有较低的精度和鲁棒性。其他两种方法的平均相对误差(6.2%,5.6%)约为CC-GCOF方法的两倍,CC-GCOF方法重建的温度值与热电偶测量值

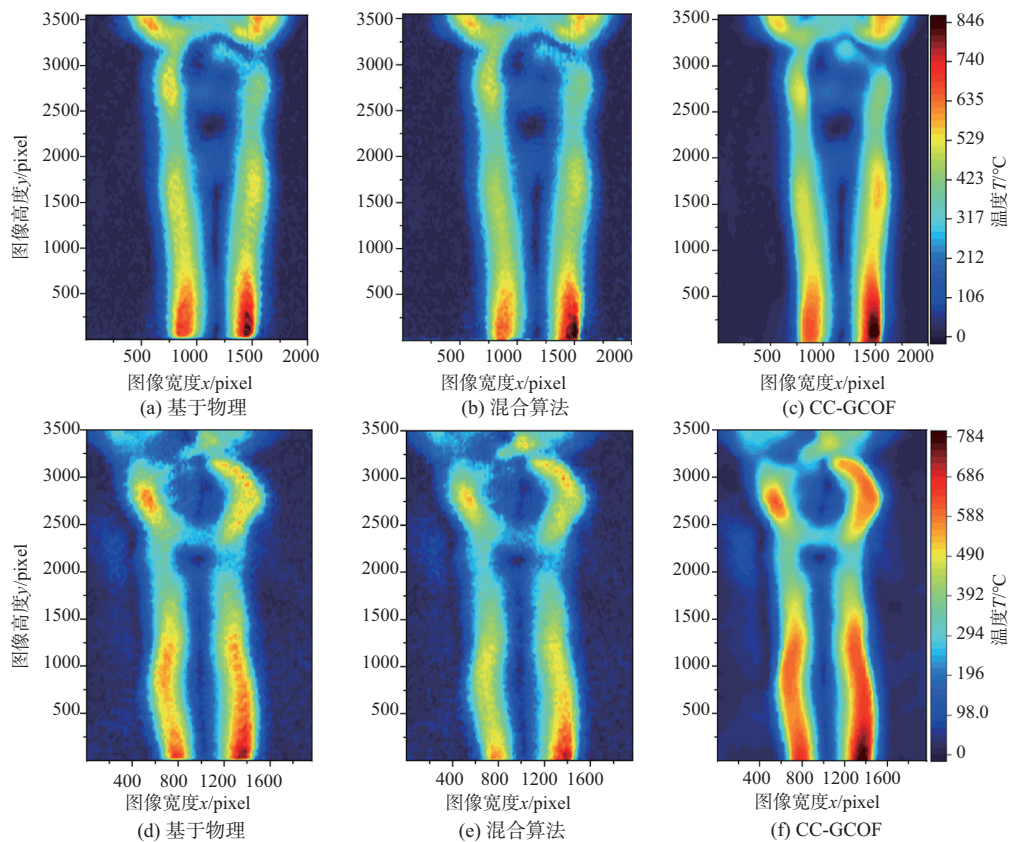


图 6 三种不同算法重建的温度场($\varphi=1.2$ 和 1.3)

的平均相对误差仅为 2.7%，实验表明该方法可有效地重建高精度的温度场。

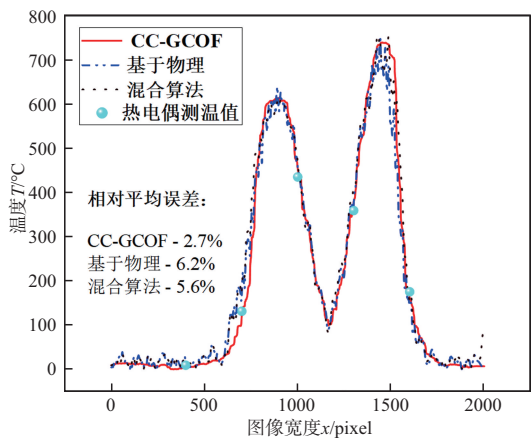


图 7 三种算法的重建值与热电偶测量值($\varphi=1.2$)

为了进一步验证 CC-GCOF 算法重建的温度场精度，表 2 显示了不同当量比时 (φ 为 1.1~1.5) 热电偶 3 处的三种算法重建温度值与热电偶多次测量平均值之间的相对误差。三种算法重建温度值在不同当量比时的最大相对误差分别为 3.04%、6.82% 和 5.74%；平均相对误差分别为 2.81%、6.52% 和 5.38%。表明 CC-GCOF 算法相较于其他两种方法，能够更好的重建高精度温度场。

BOS 重建温度误差受多种不确定因素的影响。首先是实验装置光学布局测量的不确定性；其次，

BOS 图像采集质量会因不均匀照明、振动以及模糊离焦效应而受到影响；再者，用于计算 BOS 图像位移、折射率、密度和温度的后处理方法也是重要的影响因素。

表 2 三种算法重建值与热电偶 3 测量值的相对误差

当量比 φ 算法					
	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
CC-GCOF/%	2.67	2.72	2.64	3.04	2.97
基于物理/%	6.43	6.21	6.37	6.76	6.82
混合算法/%	5.18	5.64	4.87	5.49	5.74

温度重建结果的精度还取决于对燃料气体组分的测量，假设 Gladstone-Dale 常数 ($K=2.9\times10^{-4}\text{m}^3/\text{kg}$) 引入的误差对于甲烷/空气预混火焰来说相对较小^[20]。因此该假设在本文实验条件下是合理的。此外，尽可能减小 BOS 系统的光学误差和测量误差，能够有效提高测量准确性。鉴于热电偶直径为 1.5mm，其周围流场存在温度梯度，故而在同一当量比下的同一位置进行了 100 次测量并取平均值，以降低偏差。对于实验测量的温度场而言，存在的误差对测量结果产生的影响在误差允许范围内。

5 结 论

本文提出了一种新的混合互相关光流算法，将提出的基于梯度恒定假设的光流算法应用于

BOS图像对以精细化位移场,同时利用高斯径向基函数插值代替双三次插值提高位移场重建精度。对不同当量比的甲烷/空气层流预混火焰上方的温度场进行重建,与基于物理的光流算法和混合光流算法进行了比较,本方法能够捕捉热流场的小散度和涡度结构等流动细节。将重建温度与热电偶多次单点测量的温度平均值进行了比较,每个测量点的温度值与CC-GCOF方法的重建值误差较小,平均相对误差为2.7%,这表明CC-GCOF重建温度具有较高的精度和鲁棒性。最后从BOS温度重建测量链中进行误差分析,影响因素主要包括BOS图像成像质量、以及用于计算位移、折射率、密度和温度的后处理方法和KGD的常数假设。

参考文献:

- [1] Raffel M. Background-oriented schlieren (BOS) techniques [J]. *Experiments in Fluids*, 2015, 56(3):1—17.
- [2] 熊渊. 背景纹影测量技术研究与应用进展[J]. *实验流体力学*, 2022, 36(02):30—48.
Xiong Yuan. Recent advances in background oriented Schlieren and its applications[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2022, 36(2):30—48.
- [3] Wernrt M P. Real-time background oriented schlieren with self-illuminated speckle background[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(1):1—13.
- [4] Jia T, Li J, Wu J, et al. Tomographic Background-oriented schlieren for axisymmetric and weakly Non-axisymmetric supersonic jets[J]. *Symmetry*, 2024, 16(5):596.
- [5] Zhou T, Gaskins J, Pogie J, et al. Comparison of displacement estimation techniques for background-oriented schlieren of high-speed compressible turbulent flows[J]. *Exp Fluids*, 2025, 27(66):24—39.
- [6] Wei H, Yue Z, Xuanye L, et al. Background-oriented schlieren measurements for asymmetrical laminar flames along arbitrary rays from a single view[J]. *Experiments in Fluids*, 2023, 64(8):23—36.
- [7] Hirayama Y, Ogaya S. Axisymmetric background-oriented schlieren measurement for cylindrical combustion flow in micro-rocket torches[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 42(64):9—19.
- [8] 张建, 张征宇, 杨洋, 等. BOS测量密度场的泊松方程源项快速计算方法[J]. *航空学报*, 2025, 46(17):131713.
Zhang Jian, Zhang Zhengyu, Yang Yang, et al. A fast calculation method for the source term of the poisson equation in Background-oriented schlieren density field measurements[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(17):131713.
- [9] 魏祥智, 史经纬, 周莉, 等. 基于BOST的超声速喷流三维密度场重构方法与实验研究[J]. *航空动力学报*, 2025, 22(04):1—13.
Wei Xiangzhi, Shi Jingwei, Zhou Li, et al. Experimental investigation of three-dimensional density field reconstruction in supersonic jets based on BOST methodology[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 22(04):1—13.
- [10] 于之靖, 李雁玲, 郑建文, 等. 采用纹影法的微型航空发动机尾喷温度场测量方法[J]. *光学技术*, 2020, 46(04):420—426.
Yu Zhijing, Li Yanling, Zheng Jianwen, et al. The temperature field measurement method by using schlieren method for micro aero-engine[J]. *Optical Technology*, 2020, 46(04):420—426.
- [11] Hu W, Zhang Y, Liang X, et al. Background-oriented schlieren measurements for asymmetrical laminar flames along arbitrary rays from a single view[J]. *Exp Fluids* 2023, 64, (145):49—58.
- [12] 吴军, 王小宇, 唐源鸿, 等. 基于双目背景纹影法的轴对称温度场自适应重构方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(10):168—177.
Wu Jun, Wang Xiaoyu, Tang Yuanhong, et al. Study on the adaptive reconstruction method of axisymmetric temperature field based on binocular background oriented Schlieren method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(10):168—177.
- [13] Singh B, Rajendran L K, Zhang J, et al. Vortex rings drive entrainment and cooling in flow induced by a spark discharge [J]. *Physical Review Fluids*, 2020, 5(11):114501.
- [14] Li H, Chen X, Wu M, et al. Quantitative measurement of natural thermal convection temperature field based on color stripe background oriented schlieren (CSBOS)[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, 5(140):16—27.
- [15] Wang Q, Wu Y, Cheng H T, et al. A schlieren motion estimation method for seedless velocimetry measurement [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 6(109):10—18.
- [16] 杨慎林, 赵磊, 王赫卿, 等. 基于光流的火焰羽流纹影测速算法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2025, 65(06):1153—1160.
Yang Shenlin, Zhao Lei, Wang Heqing, et al. Optical flow-based velocimetry algorithm for schlieren images of flame plume[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2025, 65 (06):1153—1160.
- [17] Liu T, Shen L. Fluid flow and optical flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 6(14):253—291.
- [18] Liu T, Salazar D M, Fagehi H, et al. Hybrid Optical-flow-cross-correlation method for particle image velocimetry[J]. *Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme*, 2020, 142 (5):054501.
- [19] 高磊, 许东, 等. 基于背景纹影技术的随机介质折射率场测量[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(11):2653—2658.
Gao Lei, Xu Dong. Refractive index field measurement of random medium based on background oriented schlieren[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(11):2653—2658.
- [20] Qin X, Xiao X D. Effect of varying composition on temperature reconstructions obtained from refractive index measurements in flames[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 12 (8):121—132.
- [21] Zhong Q, Yang H, Yin Z. An optical flow algorithm based on gradient constancy assumption for PIV image processing[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(5):055208.
- [22] Brox T, Bruhn A, Papenberg N, et al. High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping[J]. *Lect Notes Comput Sc*, 2004, 2034:25—36.
- [23] Horn B K P S B G. Determining optical flow[J]. *Artificial Intelligence*, 1981, 17(1—3):185-203.
- [24] 熊俊哲, 孔明, 洪波, 等. 径向基函数插值互相关光流算法粒子图像测速技术[J]. *中国激光*, 2023, 50(06):55—64.
Xiong Junzhe, Kong Ming, Hong Bo, et al. Particle image velocimetry using cross correlation optical flow algorithm based on radial basis function interpolation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(06):55—64.
- [25] Guo G M, Liu H. Density and temperature reconstruction of a flame-induced distorted flow field based on background-oriented schlieren (BOS) technique[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(6):064701.