

光学学报

基于级联分光成像的动态火焰层析表征方法

卫娜琪¹, 管今哥^{1*}, 郑永秋¹, 张成飞², 刘喆³, 岳博坤¹, 薛晨阳¹

¹中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;

²中国航天科工集团第六研究院六〇一所, 内蒙古 呼和浩特 010010;

³北京大学电子学院, 北京 100084

摘要 提出一种多相机共光路层析成像方法,对火焰的时空演化特性进行表征。首先,在成像光路结构中利用级联分光棱镜将光能量分配到不同探测通道,在同步控制器驱动下,成像系统能够对瞬态火焰的不同断面同时进行聚焦。其次,建立光学层析系统的空间物像映射关系,基于反卷积算法实现火焰不同断面位置处自发辐射特性的数值解析。实验结果表明,不同相机能够同步独立地获取火焰辐射信息,可实现对动态火焰的高空间分辨率测试。

关键词 成像系统; 层析重构; 分光探测; 物像映射; 动态火焰; 高时空分辨率

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221882

1 引言

三维火焰结构的时空演化特性表征在温度场监测^[1-2]与燃烧粒子追踪测速^[3]等燃烧诊断领域扮演着重要角色^[4]。接触式传感器存在干扰燃烧场的不足,相比之下,以光学传感为代表的非接触式测量方法因具有光电器件响应快、空间分辨率高等优势,更适用于高动态火焰环境^[5]。现有的光学三维重建方法主要包括主动激光测量^[6-7]与被动辐射测量两种。主动式立体空间重建方法所需激光器数量较多,导致光路结构复杂程度以及成本急剧增加^[8-9]。

在被动式三维重建过程中,根据光路结构类型将其进一步分为多视线方向和单向光路空间测量方法。多视线方向测量方法以体素为单元对火焰进行分割以及三维重建^[10-11]。在该方法中,将多台相机排布在燃烧器周围来获取不同视线方向的辐射信息,并基于这些信息对火焰的空间特征进行重构^[12-13]。鉴于多相机结构复杂且体积较大,光纤内窥镜与少量相机的复合结构被用来进行火焰三维诊断^[14-16]。由于从不同光纤束方向获取的图像信息共用探测器靶面,因而其空间分辨率不高,此时需要使用单向光路方法对空间火焰进行三维测试。

空间火焰单向光路三维测试的原理是傅里叶叠层成像,将火焰沿着光学成像系统的主光轴方向分割成诸多平行的二维燃烧断面,建立辐射源项与成像靶平

面之间的物像离焦映射关系,利用图像重聚焦技术实现空间火焰层析。其中,物像离焦映射关系定量求解的关键在于求解光学成像系统的点扩散函数,其与光学系统的物理参数及几何成像设置密切相关。在该基础上,依据对不同聚焦面进行成像的方式不同主要分为移动透镜成像、液体变焦透镜成像以及光场相机成像。移动透镜成像方式通过机械性操作对不同的燃烧断面逐个聚焦^[17],从而得到沿主光轴方向的重聚焦图像,但对于轴向不同空间位置的断面无法进行同步聚焦,因此其时间分辨率取决于透镜移动速度,这就限制了其仅适用于稳定火焰。为了提高层析成像过程的时间分辨率,基于电压调控的液体变焦透镜被用于火焰结构的三维诊断,该透镜能够快速改变焦距并聚焦于不同燃烧断面来获取重聚焦图像,但其焦距调控的速度仍难以匹配高速变化的瞬态火焰^[18]。基于微透镜阵列的光场相机结构通过对光场信息进行重组得到子孔径图像,并利用子孔径图像进行重聚焦,可以实现对燃烧场不同空间位置断面的同步聚焦,因此其在高动态火焰环境实时层析成像应用中具有显著优势^[19-20]。但不同子图像共用同一个相机靶平面,限制了其空间分辨率,难以实现火焰结构的时空高分辨层析重建。

针对上述问题,本文开展了基于多相机同步共光路结构的动态火焰层析测试研究。利用光分束器将火焰自发辐射能量转移到不同的成像通道,不同相机能够独立地对瞬态火焰的不同断面进行同步聚焦,从而

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2022-11-21; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(62005251)、中央引导地方科技发展资金(YDZJSX2022A031)、国防基础科研计划(2020204B037)

通信作者: *jgguan@nuc.edu.cn

建立光学成像系统的空间物像离焦映射关系。所提方法的时间与空间探测能力能够相互兼容,在高速变化火焰燃烧特性的时空高分辨表征研究中具有潜在应用价值。

2 动态火焰共光路层析物理模型

2.1 火焰断面层析成像理论

在单向投影结构中,火焰空间分布特征的层析原理如图 1 所示。建立 $o-xyz$ 空间坐标系,沿着光学成像系统的主光轴(z 方向),将三维半透明火焰分割成互

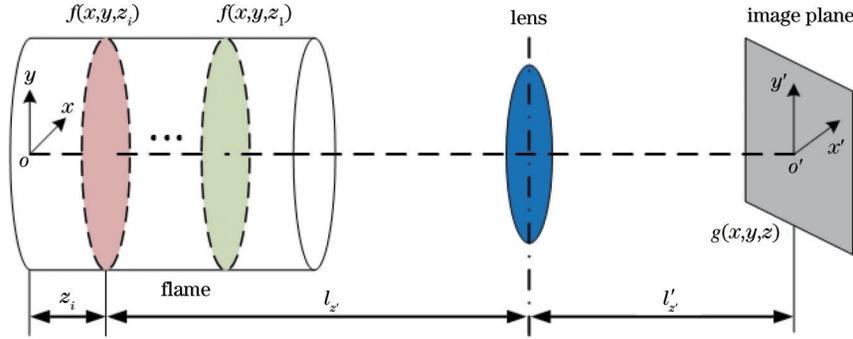


图 1 单向投影光学层析成像原理

Fig. 1 Principle of optical tomography imaging with single projection

不同空间位置处火焰断面的光自发辐射信息之间存在非相干关系。根据几何光学中的物像共轭特性,当光学成像系统聚焦于空间位置 z' 处的火焰断面时,靶平面处的图像灰度分布为聚焦像和其他断面离焦像的线性叠加,即

$$g(x, y, z) = \int_0^d f(x, y, z_i) * h(x, y, z_i) dz_i, \quad (2)$$

式中: d 为火焰沿光学成像系统主光轴方向的厚度; $g(x, y, z)$ 为成像系统获取的图像。

基于上述光学层析理论,进一步将空间火焰离散化,并将其视为 N 层平行二维断面的组合,得到

$$g(x, y, z) = \sum_{i=1}^N f(x, y, z_i) * h(x, y, z_i), \quad (3)$$

式中: $f(x, y, z_i)$ 为空间中第 i 层的二维火焰断面的灰度分布特征; $h(x, y, z_i)$ 为光学成像系统第 i 层的点扩散函数,其数值与系统的光学特性以及火焰断面物距密切相关。

由式(3)可知,在空间三维火焰断面数量有限的分割条件下,通过改变物距 l_z 获取不同断面聚焦情形下光学系统的点扩散函数,进一步利用反卷积算法对火焰不同位置处二维断面的原始辐射特征进行封闭解析。

2.2 共光路动态层析测试结构

在上述火焰层析测试理论中,若通过机械移动透镜来控制物距 l_z ,则其难以匹配高速动态变化的火焰环境。图 2 所示为所提面向动态火焰的共光路层析测试结构,设计思路是沿着光学成像系统的主光轴方向,

相平行的二维断面,其厚度无限小。由傅里叶光学理论可知,当光学成像系统具有线性移不变特征时,火焰断面灰度分布与其自身在探测器靶平面对应图像灰度分布之间的映射关系可表征为

$$g(x, y, z) = f(x, y, z) * h(x, y, z), \quad (1)$$

式中: $f(x, y, z)$ 与 $g(x, y, z)$ 分别为空间位置 z 处火焰断面及其对应图像的灰度分布特征;* 表示卷积运算; $h(x, y, z)$ 为光学成像系统的点扩散函数,用来表征物平面上点光源经系统后的光亮度分布特性,其数值与自身光学特性以及火焰断面物距密切相关。

利用光分束器将火焰的自发辐射能量进行分配,并将其转移到不同的成像通道。对于火焰而言,不同通道的相机在主光轴方向所对应的物距存在差异。通过同步触发,不同相机能够独立地对同一火焰场景的不同断面同时进行聚焦,可应用于高动态时空分布不均的火焰环境。多台相机分别记录不同离焦程度的火焰二维投影分布,可实现高空间分辨表征功能。同时,该光学层析测试结构具有时间与空间分辨兼容的特征。

2.3 火焰断面辐射特性数值解析方法

在上述分光层析成像理论的基础上,针对火焰断面分割为 4 层的情况进行研究,则式(3)可表示为

$$g_i = f_1 * h_{i-1} + f_2 * h_{i-2} + f_3 * h_{i-3} + f_4 * h_{i-4}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (4)$$

式中: g_i 为第 i 个相机获得的图像灰度分布; f_i 为火焰断面的自发辐射信息; h_i 为不同断面所对应的光学系统点扩散函数。为便于解析,在不同相机记录的二维靶平面灰度信息基础上,将二维卷积操作转换为矩阵乘法操作,其原理如图 3 所示。

对于卷积运算 $g = h * f$, 假设矩阵 g 与 f 的大小为 $M \times M$, 则卷积核 h 的大小为 $N \times N$ 。为便于解析,将 g 矩阵与 f 矩阵中的元素分别重组为大小为 $M \times M$ 与 $N \times N$ 的数列,如图 3 所示, g_j 和 f_j 分别表示 g 矩阵和 f 矩阵中第 i 行第 j 列的元素。图 3 虚线框内的元素构成矩阵 $B_{\frac{N+1}{2}}$, 表示由卷积核 h 第 $\frac{N+1}{2}$ 行的 N 个元素组

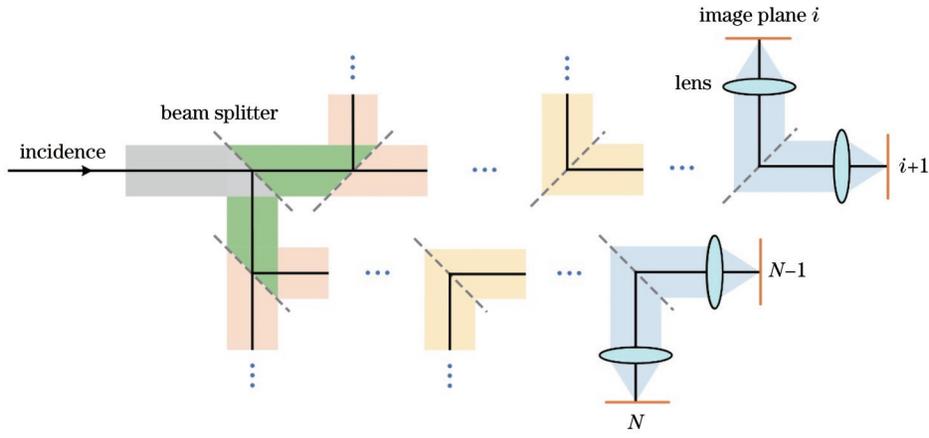


图 2 基于级联分光成像的动态火焰层析测试结构

Fig. 2 Physical structure of dynamic flame tomography based on cascade beam splitting imaging

$$\begin{matrix}
 \begin{matrix} \mathcal{G}_{11} \\ \mathcal{G}_{12} \\ \vdots \\ \mathcal{G}_{1M} \\ \mathcal{G}_{21} \\ \mathcal{G}_{22} \\ \vdots \\ \mathcal{G}_{MM} \end{matrix} \\
 = \\
 \begin{matrix}
 \left[\begin{array}{cccc}
 h_{\frac{N+1}{2}, \frac{N+1}{2}} & h_{\frac{N+1}{2}, \frac{N+1}{2}-1} & \dots & h_{\frac{N+1}{2}, 1} & 0 & \dots & 0 \\
 h_{\frac{N+1}{2}, \frac{N+1}{2}+1} & h_{\frac{N+1}{2}, \frac{N+1}{2}} & \dots & h_{\frac{N+1}{2}, 2} & h_{\frac{N+1}{2}, 1} & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 h_{\frac{N+1}{2}, N} & h_{\frac{N+1}{2}, N-1} & \dots & h_{\frac{N+1}{2}, 1} & \dots & \dots & h_{\frac{N+1}{2}, 1} \\
 0 & h_{\frac{N+1}{2}, N} & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & h_{\frac{N+1}{2}, N-1} \\
 0 & 0 & h_{\frac{N+1}{2}, N} & \dots & h_{\frac{N+1}{2}, N+1} & h_{\frac{N+1}{2}, \frac{N+1}{2}} & h_{\frac{N+1}{2}, \frac{N+1}{2}}
 \end{array} \right]
 \begin{matrix}
 B_{\frac{N+1}{2}-1} & \dots & B_1 & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 B_{\frac{N+1}{2}} & \dots & B_2 & B_1 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 B_{N-1} & \dots & B_N & B_1 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & B_N & \dots & B_{\frac{N+1}{2}-1} & B_{\frac{N+1}{2}} & B_{\frac{N+1}{2}}
 \end{matrix}
 \begin{matrix}
 f_{11} \\ f_{12} \\ \vdots \\ f_{1M} \\ f_{21} \\ f_{22} \\ \vdots \\ f_{MM}
 \end{matrix}
 \end{matrix} \\
 \underbrace{\hspace{10em}}_H
 \end{matrix}$$

图 3 二维离散卷积矩阵

Fig. 3 Matrix based on two-dimensional discrete convolution

成的大小为 $M \times M$ 的托普利兹矩阵, 其中 $h_{i,j}$ 表示卷积核 h 中第 i 行第 j 列的元素, 依据此方法构造其他 B 矩阵, 并进行组合构成矩阵 H 。这样便将 $g = h * f$ 转换为 $g = Hf$, 其中 H 为将 h 中的元素依据式 (4) 的形式进行重组所构成的矩阵。于是, 式 (4) 中线性卷积方程组可转换为

$$\begin{bmatrix} g^1 \\ g^2 \\ g^3 \\ g^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于本实验中拍摄的图像, 均截取其中中心位置处

700 pixel \times 700 pixel 的有效区域进行处理, 即 $M = 700$ pixel。卷积核 h 的大小依据光学系统点扩散函数的特性决定。图像像素数值较大, 导致 H 成为大型稀疏矩阵, 本文利用 Van Citter 迭代方法对该大型稀疏矩阵方程进行解析, 得到

$$f_{k+1} = f_k + \beta(g - Hf_k), \quad (6)$$

式中: f_k 和 f_{k+1} 分别为第 k 次和第 $k+1$ 次迭代结果; g 为原始图像矩阵, 通常令 $f_0 = g$; β 称为松弛因子。由于火焰自发辐射图像必然为正值, 对每一次迭代结果添加以下非负性约束:

$$f_{k+1}(i) = \begin{cases} 0, & f_{k+1}(i) < 0 \\ f_{k+1}(i), & f_{k+1}(i) \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

经过上述迭代方法得到由 f_1, f_2, f_3, f_4 组成的数列, 依据待恢复图像的大小, 将数列中的数值重组为所求的灰度值矩阵。

3 实验系统

3.1 火焰自发辐射层析测试装置

采用基于 4 台相机的共光路结构对动态火焰进行层析测试, 实验装置如图 4 所示, 在碳氧化合物燃烧以及丙烷-丁烷混合燃烧两种火焰工况下进行实验。实验过程中, 以宽带消偏振分光棱镜为光能量分束器 (BS),

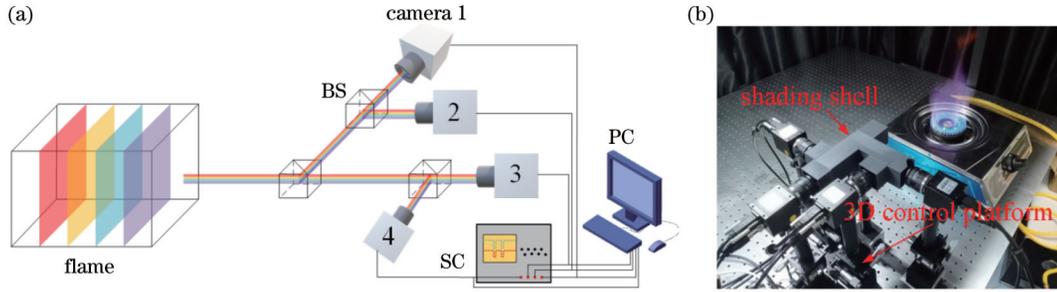


图 4 动态火焰层析测试实验。(a)测试结构模型;(b)丙烷-丁烷混合燃烧火焰层析实验装置

Fig. 4 Tomography experiment of dynamic flame. (a) Model of test structure; (b) chromatography experiment device of propane and butane combustion flame

3.2 点扩散函数标定装置

采用高斯模型来表征光学层析测试系统的点扩散函数特性, 即

$$h(x, y) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

式中: σ 为高斯模型中的离焦参数, 其值与靶平面上光亮度分布的集中程度成反比, 利用高斯点扩散函数 $h(x, y)$ 半峰全宽可确定卷积核的大小 $N \times N = (2 \times 1.18 \times \sigma)^2$, 当该值为小数时, 取大于 N 的最小整数作为卷积核尺寸值。 x 与 y 为二维图像中的像素坐标值, 坐标原点与靶平面中心位置重合。进一步将点扩散函数沿 y 方向积分, 得到光学系统的线扩散函数:

$$l(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) dy = \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right). \quad (9)$$

实际中理想的点光源与线光源难以获取, 而光学成像系统对直边物体的响应比较敏感。本实验进一步对线扩散函数进行积分, 在此基础上采用刃边法来标定光学系统的点扩散函数。

光学系统点扩散函数中 σ 的实验测量装置如图 5 所示。将棋盘格标定板中的黑白边界作为标定物来模拟直边物体, 将标定板依次放置在火焰的不同断面位置, 并由相机记录其在不同断面位置的图像。通过读取黑白边界的强度变化数值来获取直边响应特性。实验过程中, 棋盘格标定板表面与光学系统的主光轴垂直。

其中棱镜能量分光比为 1:1, 展开后的入射面和出射面均与系统主光轴垂直。将棱镜固定于遮光外壳内, 并在外壳出口处与相机对接, 以抑制环境光对测试结果的影响, 其中不同相机与外壳入口处的几何距离均相等。基于可编程逻辑器件, 利用时序脉冲信号对不同相机的时序工作进行控制, 实现多相机对火焰不同断面的同步聚焦及拍摄。为避免出现光路搭建过程中不同成像通道的相机视场不一致的情况, 实验前将二维测量分划板放置在火焰位置, 微调三维位移台使得不同相机的靶面中心基准线均对准分划板的同一位置。

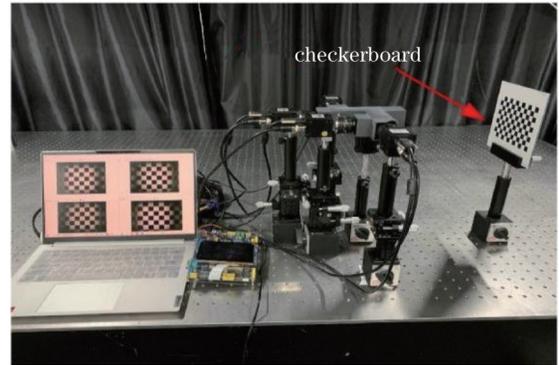


图 5 光学成像系统中点扩散函数标定的实验装置

Fig. 5 Experimental arrangement for calibrating point spread function of optical imaging system

4 结果与讨论

4.1 层析测试系统的点扩散函数特性

首先对层析测试系统进行校准, 以保证不同相机拍摄的火焰图像匹配。将所有相机的十字校准线调整至固定分划板的相同位置, 如图 6 所示。不同相机的十字校准线交叉点均位于分划板 (50, 60) 刻度值交点处, 所获取的分划板空间图像一致。

利用每一台相机在不同离焦情况下采集的棋盘格标定板图像, 对图像中所选区域内直边响应的像素灰度数据求平均值, 并对灰度数据采用最小二乘法进行拟合, 从中得到高斯函数的参数 σ , 将其代入式 (8) 即可得到光学系统对应于该二维平面的点扩散函数特

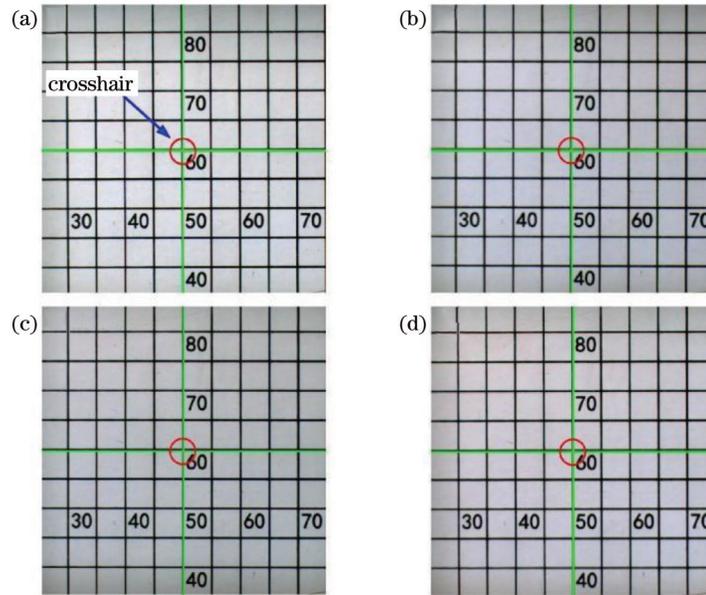


图 6 基于标定分划板的层析测试系统校准。(a)相机 1;(b)相机 2;(c)相机 3;(d)相机 4

Fig. 6 Calibration of tomography system based on reticule. (a) Camera 1; (b) camera 2; (c) camera 3; (d) camera 4

性。图 7 所示为利用相机 1(聚焦于第一个断面)拍摄的位于 4 个不同断面位置处的标定板图像的直边响应,可以看到:拍摄平面越接近聚焦面,其图像便越清晰,直边响应越好;反之,直边响应越差。通过观察可

知相机 1 所拍摄图像的直边响应特性从优到劣依次为图像 1、图像 2、图像 3、图像 4。进一步分析可知,对于特定的光学系统,不同位置处物平面内的直边响应特征存在差异。

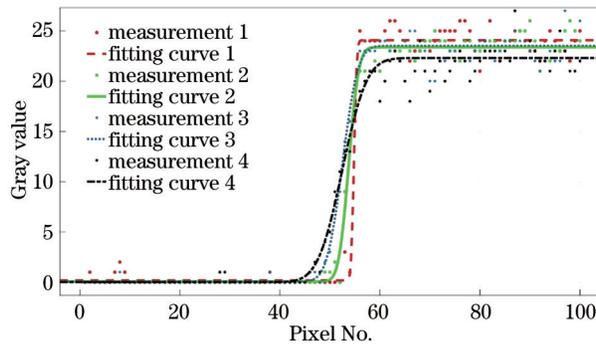


图 7 相机 1 拍摄标定板图像的直边响应特性

Fig. 7 Properties of straight edge response of calibration plate images obtained by camera 1

考虑 4 个重聚焦面对火焰的层析情形,因此需要对光学系统的点扩散函数进行 16 次标定。在上述点扩散函数解析方法的基础上,不同相机在不同位置处的参数 σ 数值及所构成的卷积核尺寸如图 8 所示,其中 σ_{ij} 中的 i 与 j 分别对应于相机位置与断面位置。由前述结论可知,随着拍摄断面位置与聚焦面位置的距离增大, σ 值逐渐增大。对于相机 1,其聚焦于第 1 个待层析平面处,因而相较于其他位置处的离焦平面,其直边处的灰度变化更加突兀,相应的 σ 值分别为 0.5063、3.9145、6.3630、10.2300;对于相机 2,其聚焦于第 2 个待层析平面处,不同平面处的 σ 值依次为 3.8615、1.3940、3.1745、6.6800;相机 3 与相机 4 分别聚焦于第 3 与第 4 个待层析平面,其中相机 3 在不同平面处的 σ 值依次为 7.2770、4.6845、1.6158、3.2190,而相机 4 的

σ 值分别为 10.8890、7.5685、3.9815、1.5530。通过分析上述实验数据可知,不同相机的点扩散函数不同,基于该差异能够实现对火焰的层析测试。

4.2 层析结果验证

对基于多相机的共光路层析测试系统的可靠性进行验证,测试装置如图 9(a)所示。通过激光刻字技术将“中”“北”“大”“学”4 个汉字依次附着于二维光学透明亚克力板上,并使其表面与系统主光轴垂直。在沿轴方向上,不同汉字分散排列且互不重叠,相邻汉字的间隔为 50 mm,第一聚焦平面与光分束器的距离为 250 mm。使不同相机聚焦于不同汉字所在的二维平面位置,根据光学几何成像知识,相机靶平面所记录的图像空间强度分布为理想像(清晰)与离焦像(模糊)的线性叠加。

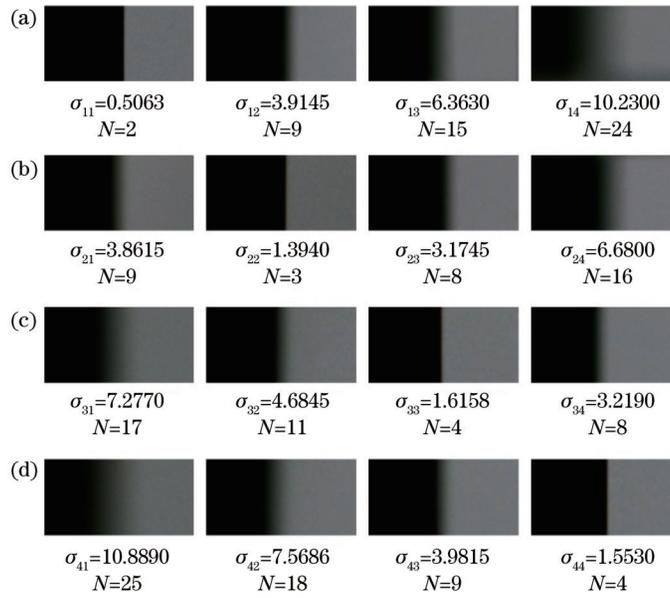


图 8 不同相机拍摄图像的点扩散函数的参数 σ 值分布及卷积核大小。(a)相机 1;(b)相机 2;(c)相机 3;(d)相机 4
Fig. 8 Values of σ in point spread function and the size of convolution kernel for the images obtained by different cameras. (a) Camera 1; (b) camera 2; (c) camera 3; (d) camera 4

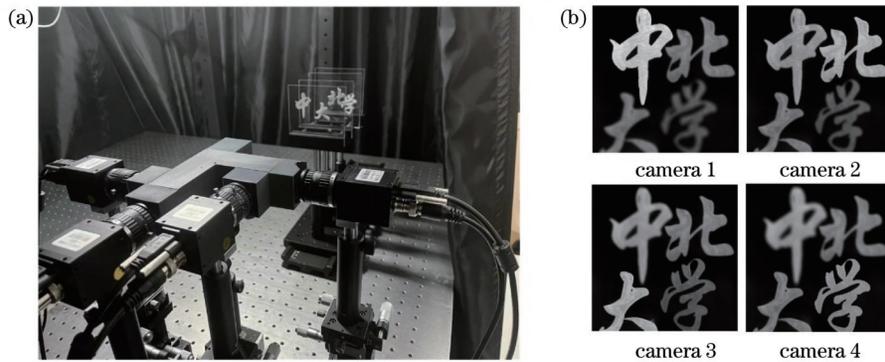


图 9 层析测试系统。(a)目标物空间分布;(b)聚焦与离焦图像
Fig. 9 Chromatography test system. (a) Spatial distribution of objects; (b) focused and defocused images

图 10 所示为经过反卷积运算后得到的层析重建图像。相较于图 9, 图 10 所示的重建图像中沿轴方向不同位置的汉字信息均能够清晰显示且在空间相互分离。利用层析结果和点扩散函数对原始图像进行重建, 并利用最小二乘法得到重建图像与相机捕获图像的相关系数为 0.9465。实验结果表明, 基于多相机的共光路层析测试系统能够有效地对同一视场内轴向不同位置的离焦像进行独立重建。

4.3 燃烧火焰时空演化特性

在上述共光路结构层析测试可靠性验证的基础上, 进一步研究了燃烧火焰的时空演化特性。火焰燃烧过程中存在的散射与吸收会影响相机拍摄图像的亮度, 从而造成重建结果不准确, 因此需要引入误差补偿函数对层析结果进行亮度补偿。根据基尔霍夫热辐射定律: 在热平衡条件下, 火焰中烟尘颗粒的光谱发射率 ϵ 等于其单色吸收率 α 。当光线穿过厚度为 d 的火焰

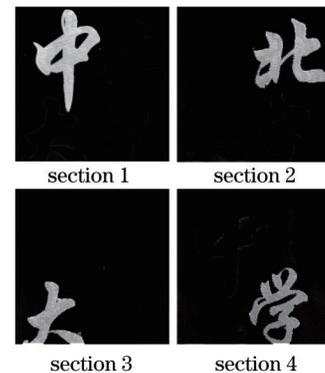


图 10 共光路结构层析测试可靠性验证
Fig. 10 Verification of common optical path structure for tomography

时, 由吸收引起的光线强度衰减可表示为

$$I = I_0 \exp(-Kd), \quad (10)$$

式中: I_0 与 I 分别为入射光线与出射光线的辐射强度;

K 为火焰的吸收系数。

利用相机分别获取单独光源图像的亮度 L_s 、单独火焰图像的亮度 L_f 以及光源穿过火焰图像的亮度 L ，此时吸收系数 K 可表示为

$$K = -\ln\left(1 - \frac{L_s + L_f - L}{L_s}\right) / d. \quad (11)$$

通过实验可以得到碳氧化物原料燃烧火焰的吸收系数 $K = 0.01239$ ，丙烷-丁烷混合燃烧火焰的吸收系数 $K = 0.000083953$ 。相比之下，丙烷-丁烷混合燃烧火焰的吸收系数极小，对接收光子的衰减也极小，因

此本实验不考虑丙烷-丁烷混合燃烧火焰吸收特性的影响。将计算得到的吸收系数 K 代入式(10)，结合层析结果的亮度值 I 及每一层的光程 l_{op} ，即可求得重建火焰的原始亮度值。

图 11 所示为碳氧化物原料燃烧层析诊断过程中，不同断面处火焰灰度随时间的动态变化特性；图 12 所示为火焰在按时序选择的 1~8 s 时刻的三维层析图像，这些图像可表征火焰的空间演化特性。在该时间与空间分辨率下，对每一时刻的火焰层析图像按时间顺序进行排列显示，即可得到火焰的三维动态层析成像图。

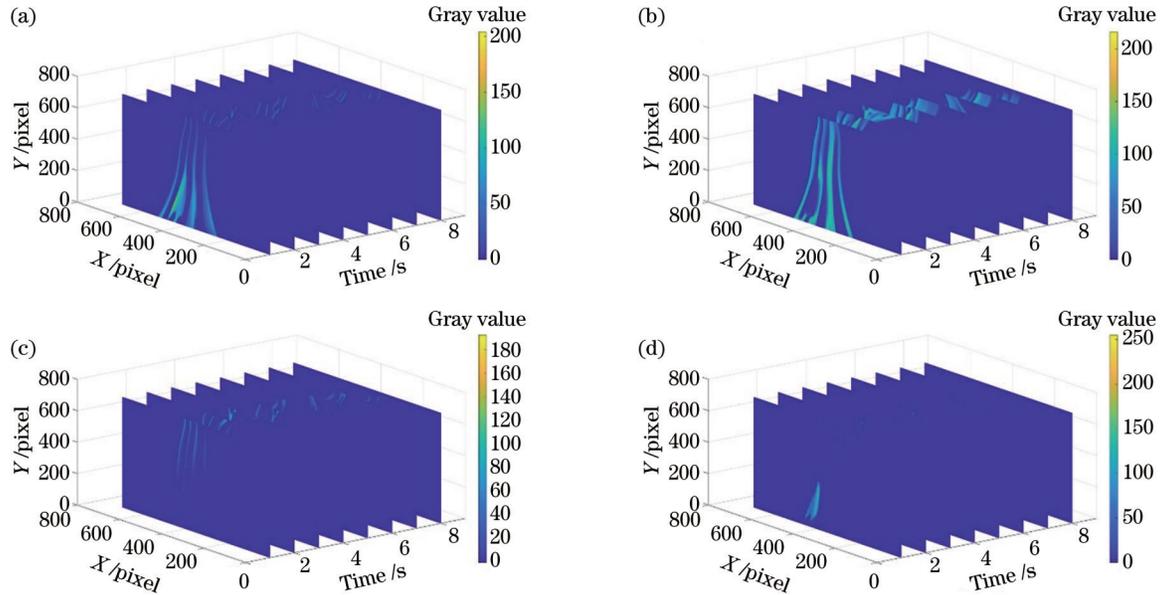


图 11 碳氧化物燃烧火焰时间演化特性。(a)断面1；(b)断面2；(c)断面3；(d)断面4

Fig. 11 Temporal evolution of combustion flame of carbon oxides. (a) Section 1; (b) section 2; (c) section 3; (d) section 4

由于靠近火焰中心处碳氧化合物的含量较大，因此靠近火源处的火焰面积更大、亮度更高。从图 12 可观察到：断面 2 最靠近火焰中心，其火焰面积最大，且火焰的亮度值明显高于其他断面；在单幅图像中，靠近图像底部中央的灰度值大于其他部位的灰度值，这是因为图像底部中央位置更靠近火源。在远离火焰中心位置的过程中，其他断面处火焰面积逐渐减小，亮度值也逐渐降低，符合火焰燃烧的物理情形。受碳氧化物摆放位置以及燃烧结构不稳定性的影响，火焰空间分布并不均匀，因而在断面 4 处存在亮度值较大的部分。从图 11 所示的时间演化结果中进一步提取出各个时刻二维图像中像素坐标位置 (300, 400) 处的灰度值，以其数值变化曲线来定量表征不同断面处火焰燃烧的时间演化特性，结果如图 13 所示。

图像中最小灰度值为 0，最大值达到 141，位于断面 1 的像素点灰度值在第 7 s 时最小，第 8 s 时突变为最大值，其灰度值随时间变化较快；在第 4 s 时，断面 1 中像素点灰度值最大，其次为断面 3，断面 2 与断面 4 中像素点灰度值最小，说明不同截面的同一像素点的

灰度值在同一时刻也不尽相同，具有空间显著变化的特征。上述结果表明碳氧化物燃烧火焰具有时空分布不均匀的特性，同时验证了多相机共光路层析系统具备时间与空间兼容测试的功能。

对丙烷-丁烷混合燃烧火焰进行层析实验，得到位于火焰内部 4 个断面处的火焰随时间的动态变化特性，如图 14 所示。由于丙烷-丁烷混合燃烧火焰呈淡蓝色，相较于碳氧化物燃烧的红色火焰，其亮度较低，即通过成像探测器获得的图像灰度值较低。分别提取火焰每一时刻图像中坐标为 (300, 400) 像素点的灰度值，用于描绘不同断面的灰度值变化曲线，结果如图 15 所示，火焰在这 8 个时刻的空间演化特性如图 16 所示。

从图 16 可以观察到，由于断面 2 更接近火焰中心，相较于其他断面，断面 2 的火焰面积与灰度值均具有较大值。在单幅图像中，可明显观察到火焰外表面的灰度值要比内侧高，这是因为丙烷-丁烷混合气体燃烧时，其火焰在空间分布较为均匀，此时火焰亮度的影响因素主要为混合气体与氧气的接触面积，因此火焰外

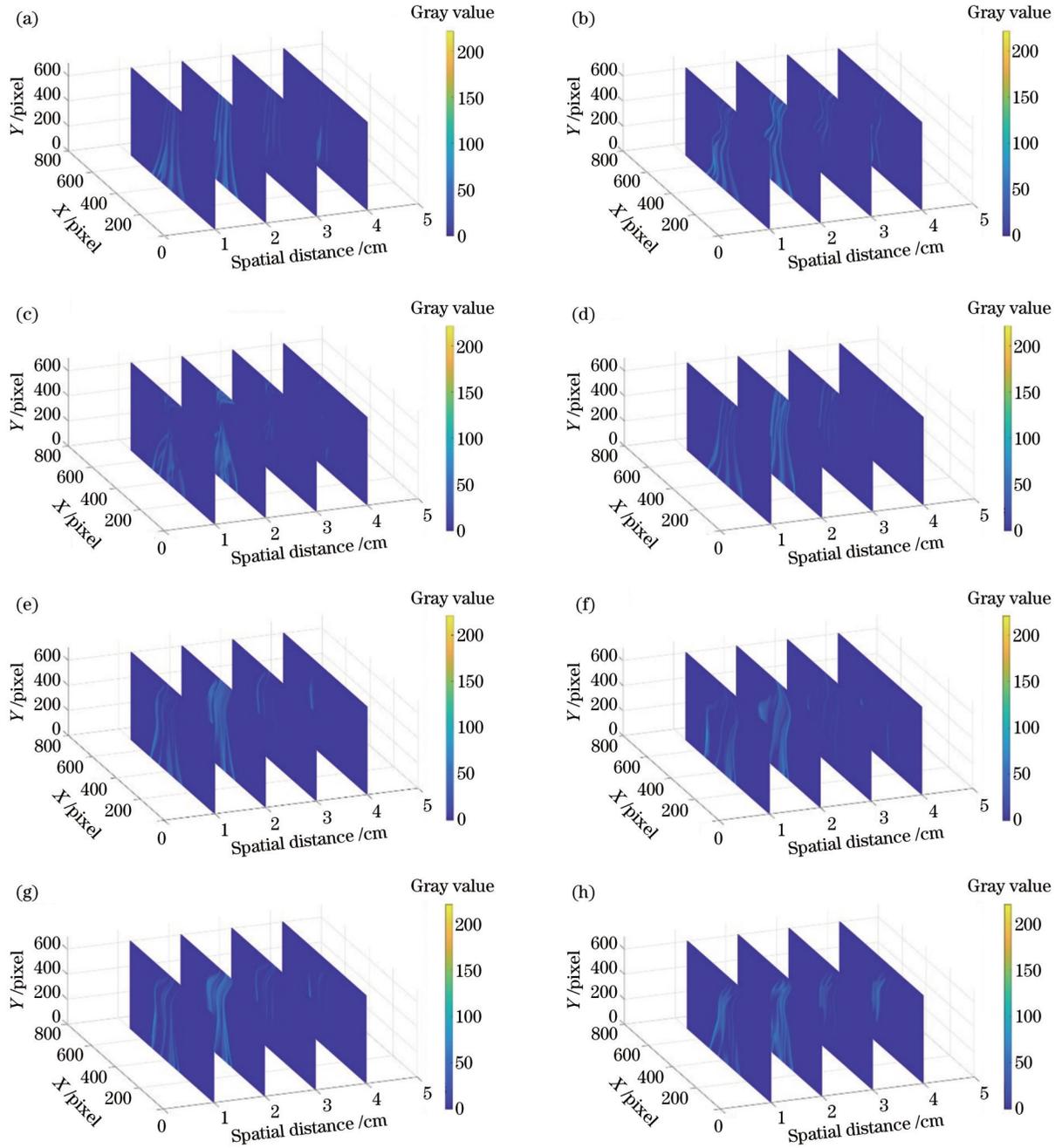


图 12 碳氧化物燃烧火焰空间演化特性。(a) $t=1$ s; (b) $t=2$ s; (c) $t=3$ s; (d) $t=4$ s; (e) $t=5$ s; (f) $t=6$ s; (g) $t=7$ s; (h) $t=8$ s
 Fig. 12 Spatial evolution of combustion flame of carbon oxides. (a) $t=1$ s; (b) $t=2$ s; (c) $t=3$ s; (d) $t=4$ s; (e) $t=5$ s; (f) $t=6$ s; (g) $t=7$ s; (h) $t=8$ s

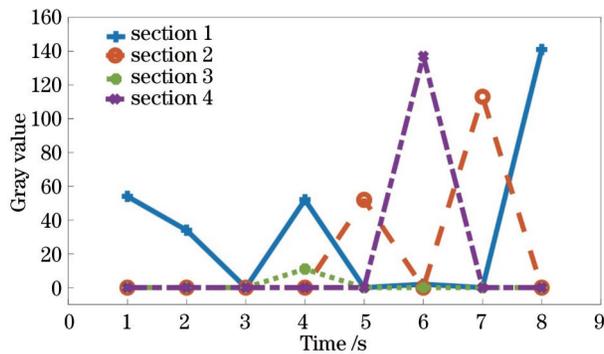


图 13 碳氧化物燃烧火焰的灰度特性
 Fig. 13 Gray value variation curves of combustion flame of carbon-oxygen compounds

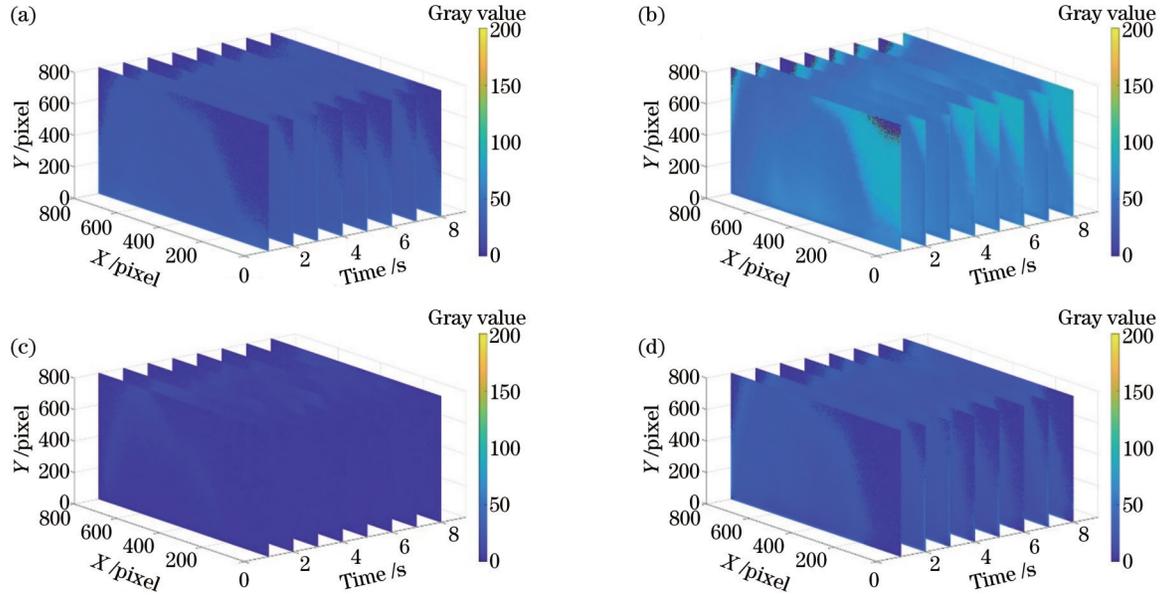


图 14 丙烷-丁烷混合燃烧火焰的时间演化特征。(a)断面1;(b)断面2;(c)断面3;(d)断面4

Fig. 14 Temporal evolution of combustion flame of mixture of propane and butane. (a) Section 1; (b) section 2; (c) section 3; (d) section 4

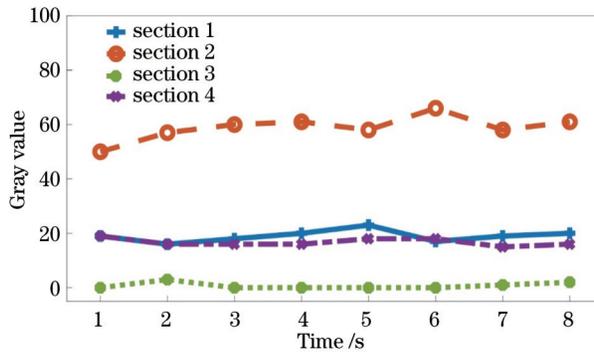


图 15 丙烷-丁烷混合燃烧火焰灰度值变化曲线

Fig. 15 Gray value variation curves of combustion flame of mixture of propane and butane

表面与空气接触的部分燃烧得更充分且亮度更大,所得层析图像的灰度值更高。

从图 15 可以看到,图像中最小灰度值为 0,最大灰度值达到 66,由于丙烷-丁烷混合燃烧火焰在时间分布上较稳定,因此同一断面的同一像素点的火焰灰度值变化并不大。位于断面 1 的像素点灰度值在第 2 s 时达到最小值(16),第 5 s 时最大(23);断面 2 的灰度值在第 1 s 时达到最小值(50),第 6 s 时最大(66);断面 3 的灰度值最小为 0,第 2 s 时达到最大值(3);断面 4 的灰度值在第 7 s 时达到最小值(15),第 1 s 时达到最大值(19)。可见,每一断面的像素灰度值都在较小范围内变化,而不同断面的灰度值差异仍较大。上述结果表明丙烷-丁烷混合燃烧火焰具有空间分布不稳定特性,同时验证了多相机共光路层析系统具备高时空分辨特性。

5 结 论

在单向投影方向上,提出一种利用级联分光进行多相机共光路火焰层析成像的方法。与基于微透镜阵列的光场层析成像方法相比,该方法的时间与空间探测不存在竞争关系,能够用于诊断动态燃烧火焰结构的时空演化特征。该方法利用光束分离器将火焰的光辐射能量分配到不同探测通道,并由图像探测器分别对火焰不同位置的断面进行同步聚焦,结合断面光强与探测器靶面所记录灰度分布之间的映射关系,对三维火焰图像进行层析。利用碳氧化物火焰以及丙烷-丁烷混合燃烧火焰两种实验工况,对所提方法的有效性进行验证,结果表明,所提方法能够实现时间与空间兼容探测,在高时空分辨燃烧诊断领域具有较大的应用潜力。

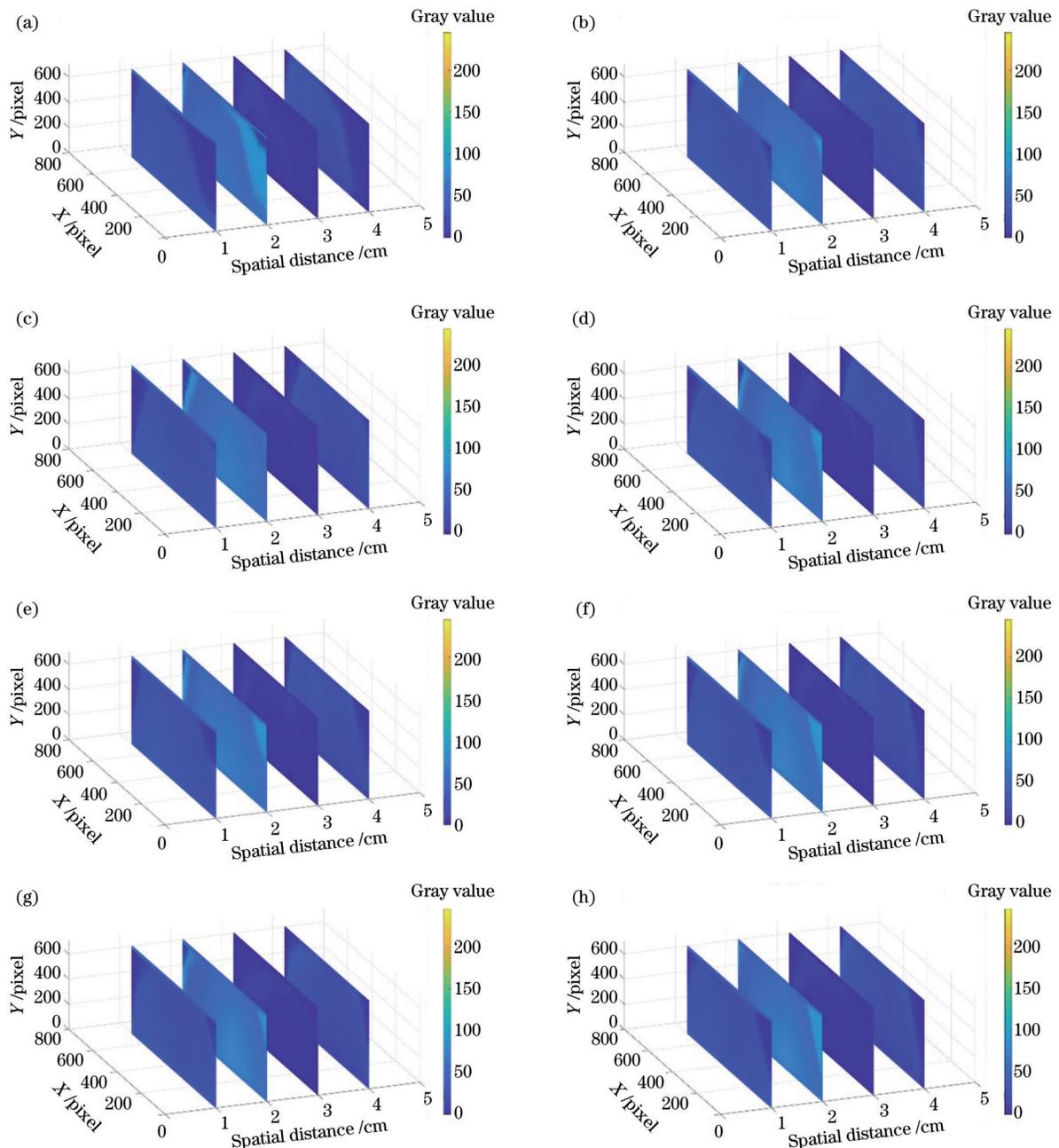


图 16 丙烷-丁烷混合燃烧火焰空间演化特征。(a) $t=1$ s; (b) $t=2$ s; (c) $t=3$ s; (d) $t=4$ s; (e) $t=5$ s; (f) $t=6$ s; (g) $t=7$ s; (h) $t=8$ s

Fig. 16 Spatial evolution of combustion flame of mixture of propane and butane. (a) $t=1$ s; (b) $t=2$ s; (c) $t=3$ s; (d) $t=4$ s; (e) $t=5$ s; (f) $t=6$ s; (g) $t=7$ s; (h) $t=8$ s

参 考 文 献

- [1] 李帅瑶, 张大源, 高强, 等. 基于飞秒激光成丝测量燃烧场温度[J]. 物理学报, 2020, 69(23): 234207.
Li S Y, Zhang D Y, Gao Q, et al. Temperature measurement in combustion flow field with femtosecond laser-induced filament [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(23): 234207.
- [2] Hong L, Qiang G, feng L X, et al. Evaluating the validity of 2D images in reflecting the 3D structure of a symmetrical cone flame using orthogonal planar laser-induced fluorescence[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(9): 2968-2973.
- [3] Su Y, Zhang B, Chen Y F, et al. 3D velocity and temperature distribution measurement and characteristic analysis of swirling combustion[J]. Measurement, 2022, 193: 110949.
- [4] 张斌, 肖立辉, 侯俊庆, 等. 旋流火焰三维温度场与速度场的同时激光测量[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0304002.
Zhang B, Xiao L H, Hou J Q, et al. Simultaneous laser measurement of three-dimensional temperature and velocity fields in swirling flame[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48 (3): 0304002.
- [5] Fang B L, Luan K P, Ye J F, et al. Linearly excited indium fluorescence imaging for temporally resolved high-precision flame thermometry[J]. Optics Letters, 2020, 45(14): 3957-3960.
- [6] Wagner S, Klein M, Kathrotia T, et al. *In situ* TDLAS measurement of absolute acetylene concentration profiles in a non-premixed laminar counter-flow flame[J]. Applied Physics B, 2012, 107(3): 585-589.
- [7] 屈东胜, 樊宏杰, 刘连伟, 等. 基于近红外光谱的超声速燃烧场气体参数测量研究[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0330001.

- Qu D S, Fan H J, Liu L W, et al. Measurement of gas parameters in supersonic combustion field based on near-infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0330001.
- [8] 曹章, 高欣, 陆方峰, 等. 激光吸收光谱层析成像及复杂燃烧场动态监测[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1904002.
- Cao Z, Gao X, Lu F H, et al. Laser absorption spectral tomography for dynamical combustion monitoring[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1904002.
- [9] Cheong K P, Ma L H, Wang Z, et al. Influence of line pair selection on flame tomography using infrared absorption spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 2019, 73(5): 529-539.
- [10] Wang K L, Li F, Zeng H, et al. Three-dimensional flame measurements with large field angle[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21008-21018.
- [11] Zhao W C, Zhang B, Xu C L, et al. Optical sectioning tomographic reconstruction of three-dimensional flame temperature distribution using single light field camera[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(2): 528-539.
- [12] Foo C T, Unterberger A, Menser J, et al. Tomographic imaging using multi-simultaneous measurements (TIMes) for flame emission reconstructions[J]. *Optics Express*, 2021, 29(1): 244-255.
- [13] Liu H C, Sun B, Cai W W. kHz-rate volumetric flame imaging using a single camera[J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 33-43.
- [14] Pu J P, Sutton J. Quantitative 2D thermometry in turbulent sooting non-premixed flames using filtered Rayleigh scattering[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(19): 5742-5751.
- [15] Yu T, Bauer F J, Huber F J, et al. 4D temperature measurements using tomographic two-color pyrometry[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5304-5315.
- [16] Wu H F, Gao Y, Wu Y, et al. Computed tomography in resolving flame topology with internal optical blockage involved[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(17): 5161-5171.
- [17] 周宾, 郝英立, 王式民. 基于光学分层析成像原理的火焰测温法[J]. *化工学报*, 2010, 61(3): 612-622.
- Zhou B, Hao Y L, Wang S M. Flame temperature measurement based on optical sectioning tomography[J]. *CIESC Journal*, 2010, 61(3): 612-622.
- [18] Xu C L, Zhao W C, Hu J H, et al. Liquid lens-based optical sectioning tomography for three-dimensional flame temperature measurement[J]. *Fuel*, 2017, 196: 550-563.[LinkOut]
- [19] Sun J, Xu C L, Zhang B, et al. Three-dimensional temperature field measurement of flame using a single light field camera[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1118-1132.
- [20] Liu Y D, Zhu M J, Wang T X, et al. Spatial resolution of light field sectioning pyrometry for flame temperature measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106545.

Dynamic Flame Tomography Characterization Method Based on Cascade Beam-Splitting Imaging

Wei Naying¹, Guan Jinge^{1*}, Zheng Yongqiu¹, Zhang Chengfei², Liu Zhe³, Yue Bokun¹,
Xue Chenyang¹

¹State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

²The 601 Institute of the Sixth Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China;

³College of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100084, China

Abstract

Objective The reconstruction of a three-dimensional flame structure mainly includes multi-view measurement and unidirectional optical path measurement methods. As for the former, the number of cameras needs to be increased for the spatial resolution improvement of test results. However, it is not suitable for reconstructing a three-dimensional flame field in a burner due to the constraint of limited test space, which refers to the light occlusion by the burner wall. On the contrary, the latter is immune to testable space limitations and has remarkable advantages in diagnosing a three-dimensional flame structure by means of tomography based on light field imaging. Traditional light field imaging is achieved with the aid of a liquid zoom lens or a micro-lens array, which can reconstruct the three-dimensional field by refocusing different objects from one projection. The focused surface of the liquid lens can be changed easily by adjusting the voltage, which is helpful to get refocused images. But the temporal resolution of this operation is so insufficient that it is not applicable to highly dynamic flames. The position and direction information of a three-dimensional flame field can also be reconstructed by acquiring refocused images with a micro-lens array. However, the existing light field imaging method based on a micro-lens array processes images by data calculation, which leads to the compatible problem of temporal and spatial resolution. Therefore, it is not applicable to a highly dynamic flame environment with temporal-spatial heterogeneity. It is necessary to establish a three-dimensional reconstruction method with high temporal and spatial resolution for dynamic flame.

Methods In this paper, the multi-camera common-optical-path imaging method is proposed to characterize the temporal

and spatial resolution characteristics of flame by tomography. In the optical imaging path structure, cascaded optical splitters are used to allocate light energy to different detection channels, and cameras are placed at each detection channel for light collection. By a synchronous controller, cameras are driven to focus on different sections of the transient flame at the same time. On the basis of Fourier optics theory, the defocused mapping relationship between a spatial object and an image of the optical tomography system is established by convolution, and the spontaneous emission characteristics at different sections of flame are numerically analyzed by the deconvolution algorithm. When light radiation passes from the interior to the surface of flame, light attenuation properties corresponding to the divided flame sections are different. The attenuated light intensity needs to be further compensated for each section. Here, the attenuation is calculated by comparing the recorded image of a light spot passing through flame with that when only a light spot is present. According to the distance between each focused section and the flame edge along the main optical axis of the imaging system, different energy compensation on tomographic images is carried out to obtain the real radiation characteristics of each section.

Results and Discussions The results show that the focused images of different flame sections can be captured by different cameras simultaneously and independently (Fig. 9), which improves the temporal resolution greatly and realizes the high spatial resolution test of dynamic flame at the same time. The performance of the tomographic imaging system is verified by reconstructing the three-dimensional combustion flame of carbon oxides and propane-butane mixed combustion flame. The spatial evolution characteristics of flame are analyzed by observing different sections of flame at the same time (Fig. 12 and Fig. 15), and the temporal evolution characteristics of flame can be analyzed by comparing the changes of gray values at different time in the same position (Fig. 13 and Fig. 16). The reconstructed flame structure is unevenly distributed in space, and the section near the flame center is brighter than that at the edge. The flame varies quickly in a short time, which is consistent with the temporal and spatial resolution characteristics of flame. In addition, combustion is also related to the contact area between flame and air as well as the spatial distribution of fuel. For the combustion of carbon oxides, the flame is brighter where the fuel gathers (Fig. 11), and the propane-butane mixed combustion flame is brighter where the air contact area is larger (Fig. 14). This difference is because fuels used in these two experiments are solid and gas, respectively. The flame brightness distribution of solid fuel combustion depends on the spatial distribution of the fuel, while that of gas fuel combustion is related to the contact area with air.

Conclusions This paper proposes a method of multi-camera common-optical-path flame tomography using cascaded optical splitters based on unidirectional optical path projection. It is verified that the proposed method can reconstruct a three-dimensional flame structure effectively by the tomography of the combustion flame of carbon oxides and propane-butane mixed combustion flame. Compared with the light field tomography method based on a micro-lens array, the method in this paper has improved compatibility between time and space detection, which can be used to diagnose the temporal and spatial evolution characteristics of dynamic combustion flame structure. The proposed system can be potentially applied to a more highly dynamic and unevenly distributed combustion field environment by improving camera configuration.

Key words imaging system; tomographic reconstruction; beam-splitting detection; object and image mapping; dynamic flame; high spatial and temporal resolution