

结构光照明技术在二维激光诱导荧光 成像去杂散光中的应用*

闫博 陈力 陈爽[†] 李猛 殷一民 周江宁

(中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

(2019年6月24日收到; 2019年7月22日收到修改稿)

背景杂散光信号的干扰制约了激光片光成像技术的发展, 本文将结构光照明技术应用到激光片光成像测量中来消除杂散光的干扰. 介绍了基于结构光照明技术的工作原理和实验测量系统, 基于 Matlab 软件理论分析了相位移动结构光照明技术具有完全消除杂散光的作用, 并针对稳定罗丹明 B 溶液进行了二维激光诱导荧光成像实验, 进一步验证了相位移动结构光照明技术具有消除杂散光影响、提高二维成像精确度的作用. 最后利用基于锁相放大原理的结构光照明技术实现了非稳态扩散罗丹明 B 溶液的二维荧光瞬态成像实验, 并分析了罗丹明 B 溶液扩散的相关规律.

关键词: 结构光照明, 杂散光, 激光诱导荧光, 罗丹明 B 溶液**PACS:** 87.63.lt, 47.80.Jk, 07.05.Pj, 87.64.kv**DOI:** 10.7498/aps.68.20190977

1 引言

20 世纪 80 年代以来, 激光片光成像技术已被广泛应用于军事和民用领域, 因其具有非接触、可视化及其低成本等优势, 该技术已经迅速在流场显示和流场参数测量中崭露头角, 并得到快速发展^[1-4]. 目前基于激光片光成像的技术主要有激光诱导荧光 (laser induced fluorescence, LIF)^[5,6]、瑞利散射成像^[7,8]、激光诱导磷光^[9,10]等. 但是受测试环境及其测试方法的影响, 这些光学成像技术在实际测量过程中会受到背景杂散光的强烈干扰, 严重影响了该类测量技术的光学成像质量^[11]. 因此, 在激光片光成像和处理领域, 消除杂散光的干扰是最基本的问题之一.

采用窄带宽滤波片对信号光进行滤波处理是当前消除杂散光干扰常用的方法, 该方法可实现对

背景杂散光信号的有效抑制, 进而可提高激光片光成像的信噪比^[12-14]. 但是, 当有效信号强度较弱, 且杂散光干扰严重时, 窄带滤波片并不能完全滤除掉杂散光信号, 同时会吸收掉部分有效信号, 此时激光片光成像方法难以得到理想的光学成像结果^[15].

近年来, 国外学者提出了一种新型的去杂散光技术——结构光照明技术 (structured laser illumination planar imaging, SLIPI)^[16,17]. 该方法可以将原始信号谱图分为有效信号和杂散光两部分, 在后期数据处理中, 有效信号强度会保持不变, 而杂散光会因为空间频率不同而被剔除掉, 因此该技术具有消除杂散光干扰、提高光学成像质量的作用^[18]. 目前发展的 SLIPI 技术主要有相位移动 SLIPI 技术 (phase-shift SLIPI, PS-SLIPI)^[19] 和基于锁相放大技术的 SLIPI 方法 (lock-in amplifier SLIPI, LA-SLIPI)^[20]. 这两类技术都在激光片光成像、图像处理及其分析等领域有着广泛的应用前

* 国家自然科学基金 (批准号: 91641118) 和中国空气动力研究与发展中心风雷青年创新基金 (批准号: FLYIF20160017, PJD20180131) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: chenshuang827@gmail.com

景^[21]. Kristensson 等指出, 多次散射造成的杂散光干扰问题将会较大地影响到喷雾场 Mie 图像拍摄, 并利用 PS-SLIPI 技术解决了多次散射干扰问题^[22], 并成功获取了喷雾场液滴尺寸分布的图像^[23]. Aldén 等^[24] 基于 PS-SLIPI 技术开展了二维 LIF 燃烧场诊断实验研究, 消除了壁面和颗粒物引起的杂散光干扰. 此外, Kristensson 等^[25] 将 LA-SLIPI 方法应用到瑞利散射测温图像获取中去, 得到了燃烧火焰瞬态温度分布结果. PS-SLIPI 和 LA-SLIPI 这两种技术各有优缺点, LA-SLIPI 方法可进行瞬态图像获取, 但当杂散光强度较高时, 该方法抑制杂散光的能力不高; PS-SLIPI 技术对杂散光的抑制能力较强, 但目前不能进行瞬态图像获取.

本文将两种 SLIPI 方法同时应用到 LIF 成像技术中来消除杂散光的影响, 进而提高 LIF 技术的成像质量. 首先利用 MATLAB 仿真计算的方法对 SLIPI 去除杂散光的能力进行了评估, 并针对罗丹明 B 稳态和非稳态溶液, 分别开展了二维 LIF 去杂散光平均和瞬态成像实验研究.

2 基本原理

当一束激光入射到流场中时, 会伴随有瑞利散射光和荧光等, 其大小 S 可表示为

$$S \propto CI_0 \times \sum_k \chi_k \Re_k(P, T, \eta), \quad (1)$$

式中, C 为校准常数; I_0 为探测点处的激光能量; χ_k 为流场中第 k 种分子的摩尔组分; \Re_k 为激光诱导发光信号函数, 该函数与流场温度 T 、流场压强 P 、流场分子密度 η 等参数相关.

在激光片光后放置 Ronchi 光栅, 再通过探测器收集显示包含有激光诱导发光信号和杂散光的正弦图样, 其中显示的二维图样 (R 代表行, C 代表列) 中每一个点处的探测光强 ($S_C(R)$, 包含激光诱导发光信号强度和杂散光强度等) 可由下式表示^[20]:

$$\begin{aligned} S_C(R) &= [I_s(R) \sin(2\pi f_{\text{sig}} R + \varphi_1) + I_C(R) + I_B(R)] \\ &\quad * \left[CI_0 \times \sum_k \chi_k \Re_k(P, T, \eta) \right] \\ &= A(R) \sin(2\pi f_{\text{sig}} R + \varphi_1) + B(R), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, f_{sig} 为空间调制频率 (由 Ronchi 光栅决定), $I_s(R)$ 为光栅调制振幅, $I_C(R)$ 为光栅调制直流分

量, $I_B(R)$ 为杂散光强度分布, φ_1 为调制初始相位. 因此, $A(R)$ 和 $B(R)$ 可以表示为

$$A(R) = CI_S(R)I_0 \times \sum_k \chi_k \Re_k(P, T, \eta), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B(R) &= B_1 + B_2 = CI_C(R)I_0 \\ &\quad \times \sum_k \chi_k \Re_k(P, T, \eta) + CI_B(R)I_0 \\ &\quad \times \sum_k \chi_k \Re_k(P, T, \eta), \end{aligned} \quad (4)$$

其中调制振幅项 $A(R)$ 与激光诱导发光信号函数 \Re_k 相关, 因此可以通过测量调制振幅项 $A(R)$ 的强度分布来获取流场的关键参数, 如流场温度 T 、流场压强 P 和流场分子密度 η 等.

SLIPI 技术后期处理方法主要有 LA-SLIPI 方法和 PS-SLIPI 方法, 下面阐述两种方法的基本原理.

2.1 LA-SLIPI 方法^[20]

理论假定两行参考正弦函数, 其相位相差 $\pi/2$, 分别为

$$S_X(R) = \sin(2\pi f_{\text{sig}} R + \varphi_1), \quad (5)$$

$$S_Y(R) = \sin(2\pi f_{\text{sig}} R + \varphi_1 + \pi/2). \quad (6)$$

再将 (2) 式分别与 (5) 和 (6) 式相乘, 得到:

$$\begin{aligned} S_{X,C}(R) &= S_C(R) \cdot S_X = \frac{1}{2} A(R) [\cos(\varphi_C - \varphi_1) \\ &\quad - \cos(4\pi f_{\text{sig}} R + \varphi_C + \varphi_1)] \\ &\quad + B_C(R) \sin(2\pi f_{\text{sig}} R + \varphi_1), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} S_{Y,C}(R) &= S_C(R) \cdot S_Y = \frac{1}{2} A(R) [\sin(\varphi_C - \varphi_1) \\ &\quad - \sin(4\pi f_{\text{sig}} R + \varphi_C + \varphi_1)] \\ &\quad + B_C(R) \sin(2\pi f_{\text{sig}} R + \varphi_1 + \pi/2). \end{aligned} \quad (8)$$

在 (7) 和 (8) 式中添加一个低通滤波器 ($f_c = f_{\text{sig}}$) 去掉与 f_{sig} 相关的项, 得出 $X_C(R) = 0.5A(R) \times \cos(\varphi_C - \varphi_1)$ 和 $Y_C(R) = 0.5A(R) \sin(\varphi_C - \varphi_1)$, 进而得到激光诱导发光信号振幅项 $A_1(R)$:

$$A_1(R) = 2\sqrt{X_C(R)^2 + Y_C(R)^2}. \quad (9)$$

2.2 PS-SLIPI 方法

在平行激光光束后面添加自动旋转玻璃片 (具有一定的厚度), 如图 1 所示. 当玻璃片旋转 θ 后, 激光光束偏移 dx 距离:

$$dx = \frac{d \sin \theta}{\sqrt{1 - (n_0 \sin \theta / n_1)^2}}, \quad (10)$$

其中 d 是玻璃片厚度, n_0 为空气折射率, n_1 为厚玻璃片折射率.

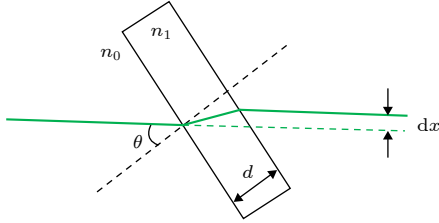


图 1 旋转玻璃片改变激光光束位置示意图

Fig. 1. Diagram of laser beam transmission changed by rotating glass sheet.

连续改变光栅正弦调制图像的位置, 位移量 $dx_1 = T/n$ 对应的相位改变值为 $d\varphi = 2\pi/n$, T 为激光诱导发光图像的正弦调制周期. 再对改变相位 ($d\varphi_1 = 0, d\varphi, 2d\varphi, \dots, (n-1)d\varphi$) 后的激光诱导发光信号图像 I_i 进行采集处理, 可得到^[19]:

$$AA = \frac{\sqrt{2}}{n} \left[\sum_{l=1}^{n-1} \sum_{k=l+1}^n (I_l(i, j) - I_k(i, j))^2 \right]^{1/2}, \quad (11)$$

$$BB = (I_1 + I_2 + \dots + I_n)/n, \quad (12)$$

其中 n 为相位变换次数, AA 为计算出的振幅值, BB 为计算出的杂散光和光栅调制直流分量平均值.

3 实验装置简介

本文设计的结构光照明测量装置可对非稳态流场进行去杂散光瞬态图像获取, 测量装置主要由

连续激光光源、片光系统、Ronchi 光栅和电子倍增电荷耦合器件 (EMCCD) 组成, 如图 2 所示. 连续激光器输出激光波长为 532 nm, 激光能量为 100 mW. 激光经过扩束镜组后变成光斑直径为 5 cm 的光束, 该光束再经过 Ronchi 光栅后变成正旋光强分布的平行激光光束, Ronchi 光栅的周期分别为 2/mm (PS-SLIPI 方法) 和 8/mm (LA-SLIPI 方法). 使用片光系统将平行激光光束变成平行片光光束照射到非稳定罗丹明 B 溶液 (见图 2 中的 RB 所示). 激光片光照射测试流场产生的荧光信号再次进入 EMCCD 相机进行采集拍摄. 最后通过后 SLIPI 数据处理方法可得到去杂散光后的瞬态激光诱导发光信号图像. 同时本文设计的结构光照明测量装置可对稳态流场进行去杂散光平均图像获取, 主要是在正弦调制的平行激光光束后添加旋转的厚玻璃片 (由自动旋转台控制), 相位可改变 $0, d\varphi, 2d\varphi, \dots, (n-1)d\varphi$, 最后对相位调制后的激光诱导发光信号图像进行 PS-SLIPI 方法处理可得到去杂散光后的平均图像. 此外, 罗丹明 B 溶液可产生稳态和非稳态流场, 同时本文设计了四种不同条件下的实验环境, 分别记为 Case 1, Case 2, Case 3 和 Case 4, 前三种用于 PS-SLIPI 方法, 第四种用于 LA-SLIPI 方法. Case 1 为最优条件 (杂散光干扰最小), Case 2 是将金属障碍物放置在液体溶液正后方来增加杂散光干扰, Case 3 是将金属屏幕放置在液体溶液侧后方来增加杂散光干扰, Case 4 是将金属柱形物体放置在液体溶液正后方来增加杂散光干扰, 四种条件下的流场参数及其 EMCCD 采集参数列于表 1.

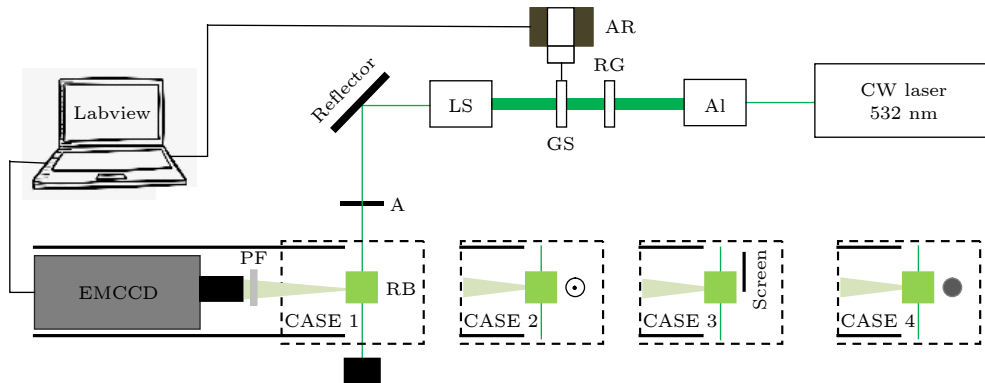


图 2 基于结构光照明技术的激光诱导发光图像测量装置 (A1, 5×扩束镜; RG, Ronchi 光栅; AR, 自动旋转台; GS, 玻璃片 (5.3 mm); LS, 片光系统; A, 光阑; RB, 罗丹明 B 溶液; PF, 滤光片)

Fig. 2. LIF imaging setup based on the SLIPI technique (A1, 5 × beam expander; RG, Ronchi grating; AR, automatic rotary table; GS, glass sheet (5.3 mm); LS, light system; A, aperture slot; RB, Rhodamine B solution; PF, filter).

表 1 两种 SLIPI 技术实验参数
Table 1. Experimental parameters of two SLIPI technique.

	背景分类	激光输出能量	相机曝光时间	相机增益	罗丹明B溶液浓度	图像正弦调制周期/像素
相位移动SLIPI技术	Case 1	100 mW	0.025 s	30	稳态溶液: 1×10^7 mol/L	0.058593
	Case 2	100 mW	0.025 s	30	稳态溶液: 1×10^7 mol/L	0.058593
	Case 3	100 mW	0.025 s	30	稳态溶液: 1×10^7 mol/L	0.058593
基于锁相放大原理的SLIPI技术	Case 4	100 mW	0.025 s	30	非稳态扩散溶液: 将 1×10^6 mol/L 溶液注入到 1×10^7 mol/L 溶液.	0.144536

4 结果分析

4.1 理论模拟计算

为了具体说明 SLIPI 消除杂散光干扰的原理和效果, 本文基于 Matlab 软件对 LA-SLIPI 和 PS-SLIPI 方法进行理论模拟计算研究, 其中 LA-SLIPI 理论和实验研究在文献 [26] 中已经进行了深入研究. 在计算中, 假定行坐标 x 为 1 到 512, $A(x) = -0.001 \times (x - 256)^2 + 80$, 如图 3 杂散光分量 I_a 为 (0, 40) 的随机值, 直流分量 $I_b = (0, 130)$ 的随机值, 因此求出干扰分量 ($B_1 + B_2$) 幅值是设定的信号量 (A) 幅值的 2 至 11 倍. $f_{\text{sig}} = 0.1$ Hz 为光栅调制频率, $f_c = 0.005$ Hz 代表 LA-SLIPI 技术中的截止频率, $\varphi_C = 0$ 为初始相位.

图 3(a) 首先给出了调制振幅项 A 的值, 基于调制振幅项 A , 本文计算得到了有无光栅调制作用下的总强度值, 分别记为 S_C (如 (2) 式) 和 $S_{\text{NG}} = A(R) + B_1(R) + B_2(R)$, 如图 3(b) 和图 3(c). 对比两者的强度值可知, S_C 图像中除直流分量外还有调制频率 (f_{sig}) 项. 利用 LA-SLIPI 技术对调制强度 S_C 进行处理, 可直接得到去除杂散光后的光栅调制振幅项 A_1 , 并求出 A_1 相对于理论设定值 A 的相对误差值 $dA/A = (A_1 - A)/A$, 如图 3(d) 所示. 由图 3(d) 可知: LA-SLIPI 方法处理后的数值与理论数值 A (如图 3(b)) 较好地吻合; 同时调制振幅强度 A 越小, 相对误差值 dA/A 越大. 例如当 A 为最小值 15 (干扰分量约为 A 的 11 倍) 时, 相对误差为 15%, 但当 A 为最大值 90 (干扰分量约为 A 的 2 倍) 时, 相对误差基本为 0. 此外, 再利用 PS-SLIPI 方法对调制强度 S_C 进行处理可得到振幅项 AA 和干扰分量 BB 的值, 并求出两者相对于理论设定值的误差, 如图 3(e) 和图 3(f). 可知: PS-SLIPI 方法处理后的数值与理论数值 A (如

图 3(b)) 极好地吻合, 两者的误差值基本为 0. 最后, 对比 LA-SLIPI 和 PS-SLIPI 技术的杂散光滤除能力, 可知: LA-SLIPI 可针对瞬态光栅调制图像直接进行杂散光滤除处理, 但是当杂散光较强时, PS-SLIPI 比 LA-SLIPI 的杂散光滤除能力要强.

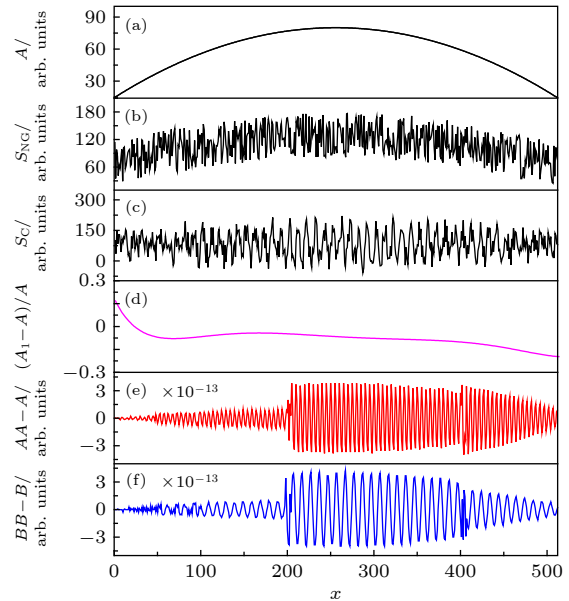


图 3 PS-SLIPI 方法仿真计算全过程 (a) 调制振幅项 A 的值; (b) 无光栅调制时的强度值 $S_{\text{NG}} = A(R) + B_1(R) + B_2(R)$; (c) 光栅调制后的强度值 S_C ; (d) LA-SLIPI 计算后的振幅相对误差值 $dA/A = (A_1 - A)/A$, 截止频率 $f_c = 0.005$ Hz; (e) PS-SLIPI 计算后的振幅误差值 $dA = AA - A$, $n = 3$; (f) PS-SLIPI 计算后的干扰分量误差值 $dB = BB - B$, $n = 3$

Fig. 3. Simulation process of the PS-SLIPI method: (a) The modulated amplitude value, A ; (b) the intensity without grating modulation, $S_{\text{NG}} = A(R) + B_1(R) + B_2(R)$; (c) the intensity with grating modulation, S_C ; (d) the relative error of modulated amplitude value, A , calculated by LA-SLIPI method, $dA = (A_1 - A)/A$, $f_c = 0.005$ Hz; (e) the error of modulated amplitude value, A , calculated by PS-SLIPI method, $dA = AA - A$, $n = 3$; (f) the error of interference components calculated by PS-SLIPI method, $dB = BB - B$, $n = 3$.

4.2 实验结果分析

为了实验验证两种 SLIPI 方法的去杂散光作用, 本文按照图 2 所示的 SLIPI 测量光路, 分别开展了稳态和非稳态流场的去杂散光实验研究. 首先对于稳定的罗丹明 B 溶液, 利用自动旋转台使得光栅条纹移动 $0, T/3, 2T/3$, 进而改变相位 $0, \pi/3, 2\pi/3$, 结果如图 4 所示. 在得到改变相位后的激光诱导发光图像后, 再利用 (11) 式可进一步获得去杂散光后的调制振幅 A 的值.

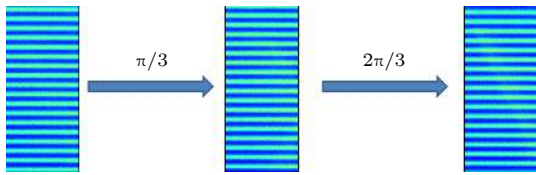


图 4 PS-SLIPI 方法的光栅条纹移动图像

Fig. 4. Grating fringe changing images based on phase shifting SLIPI method.

在未利用 SLIPI 方法滤波前, 得到稳定罗丹明 B 溶液的激光诱导发光图像, 如图 5(a) 所示. 对比 Case 1, Case 2 和 Case 3 可知: LIF 图像中除了可以观察到的荧光图像外, 还能够观察到大量的杂散光, 其强度很高, 很容易将罗丹明 B 溶液荧光信号掩盖, 极大地影响了探测到的荧光图像的信噪比. 此外为了更好地比较 SLIPI 方法处理后的图像, 又在罗丹明 B 溶液器皿池壁上粘贴两条较细的金属丝作为标记, 如图 5(a) 中的蓝色标记线. 将 Ronchi 光栅布置在片光系统前, 即可获得光栅调制作用下的 LIF 图像, 如图 5(b) 所示. 再采用 PS-SLIPI 的方法对三种不同拍摄环境下的图像进行去杂散光处理, 分别得到图 5(c) 中的 3 个图像, 可以看出三种不同测试环境中得到的 SLIPI 处理后的图像、数值大小基本一致, 说明 PS-SLIPI 去杂散光方法的准确性; 此外, 从图 5(c) 可以明显看出, 由金属障碍物、金属屏幕引入的杂散光全部被滤除掉, 也进一步说明了该方法能够实现对杂散光干扰的有效抑制.

但是 PS-SLIPI 的方法仅能够对于稳态流场进行去杂散光处理, 无法得到非稳态流场的瞬态图像. 为了获得非稳态流场的变化规律, 本文将 LA-SLIPI 技术应用到非稳定罗丹明 B 溶液中, 消除背景杂散光的干扰, 进一步研究罗丹明 B 溶液的扩散规律. 其中, 本文在低浓度稳定罗丹明 B 溶液底

部添加较高浓度的罗丹明 B 溶液来形成非稳定扩散溶液 (实验参数见表 1). 图 6(a) 为光栅调制作用下的 LIF 图像, 图中红黄较亮区域为背景杂散光和荧光信号叠加区域, 由图可知, 由于杂散光的干扰, 溶液的扩散图像不明显, 无法对其扩散规律进行分析. 同时对 6(a) 图样进行傅里叶变换, 可得出光栅调制频率为 $f_{\text{sig}} = 0.144536/\text{像素}$. 因此对同时刻的光栅调制图像进行 LA-SLIPI 去杂散光处理, 分别得到图 6(b) 中的 8 个图像. 由图 6(b) 可知, 由金属障碍物引入的杂散光被滤除掉, 进一步说明了该方法能够实现对杂散光干扰的有效抑制. 最后为了精确地描述罗丹明溶液的扩散规律,

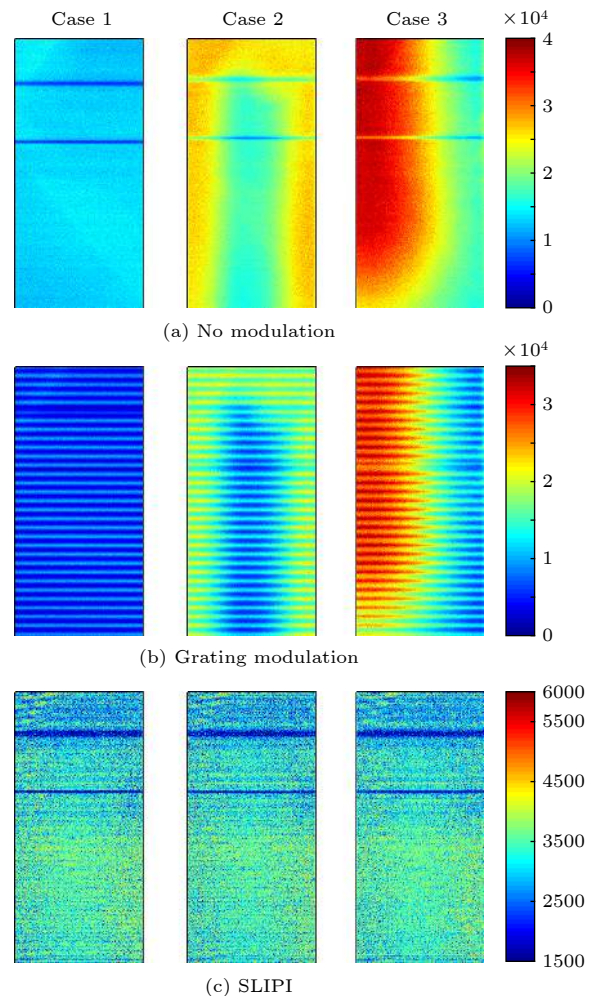


图 5 (a) 三种不同测试环境下的原始 LIF 图像; (b) 光栅调制 LIF 图像; (c) PS-SLIPI 方法处理后的调制振幅 A 分布图像

Fig. 5. (a) Conventional (raw data) LIF images without grating modulation in three different measurement cases; (b) LIF images with grating modulation; (c) images of modulated amplitude value, A , calculated by phase shifting SLIPI method.

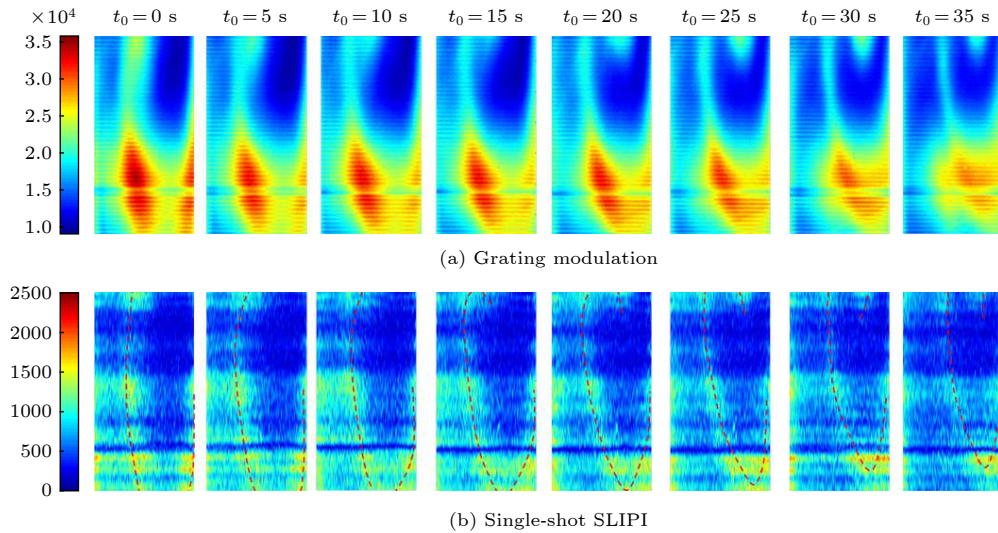


图 6 (a) 不同测量时刻下的光栅调制 LIF 瞬态图像; (b) LA-SLIPI 方法处理后的调制振幅 (A) 分布的瞬态图像
 Fig. 6. (a) LIF images with grating modulation; (b) images of modulated amplitude value, A , calculated by LA-SLIPI method.

本文利用红色虚线描绘出较高浓度罗丹明 B 溶液 (对应较高荧光信号强度) 的型面, 如图 6(b) 所示. 由图 6(b) 可知: 随着时间的推移, 较高浓度的罗丹明 B 溶液向低浓度的溶液方向扩散, 即扩散方向为溶液底部→溶液顶部. 同时溶液整体浓度梯度随时间递减, 即较高浓度溶液向四周扩散. 此外由于溶液器皿轻微晃动造成溶液扩散出现漩涡图案, 这和理论预测基本一致. 因此, LA-SLIPI 技术有效抑制了杂散光的干扰, 提高了 LIF 采集图像的准确性.

5 结 论

本文将结构照明的方法应用到 LIF 图像测量中, 来消除图像采集中的杂散光干扰. 结果表明:

1) 通过 MATLAB 理论仿真计算, 验证了 PS-SLIPI 的方法具有完全消除杂散光干扰的作用.

2) 利用 Ronchi 光栅建立了一套可用于稳态和非稳态流场二维显示的激光诱导发光图像采集装置, 并针对稳态罗丹明 B 溶液开展了 LIF 图像去杂散光实验, 验证了 PS-SLIPI 方法可以克服杂散光对成像质量的影响.

3) LA-SLIPI 方法能够原位复原出具有清晰纹理的非稳态流场图像, 并且具有能够很好地消除杂散光干扰的优点, 符合高质量激光片光成像问题的实际需求.

两种 SLIPI 处理方法在杂散光抑制方面各具优缺点, 但将两者有效结合后可实现稳态和非稳态

流场的二维精确显示, 同时这两种 SLIPI 方法适用性较强, 因此在其他激光片光成像技术 (瑞利散射图像测量、粒子成像测速及其激光诱导磷光图像测量技术等) 中的应用前景十分广阔.

参考文献

- [1] Gal P L, Farrugia N, Greenhalg D A 1999 *Opt. Laser Technol.* **31** 75
- [2] Driscoll K D, Sick V, Gray C 2003 *Exp. Fluids* **35** 112
- [3] Schultz C, Sick V 2005 *Prog. Energ. Combust.* **31** 75
- [4] Adrian R J 2005 *Exp. Fluids* **39** 159
- [5] Chen S, Su T, Yang F R, Zhang L, Zheng Y B 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 65 (in Chinese) [陈爽, 苏铁, 杨富荣, 张龙, 郑尧邦 2013 中国光学快报 **11** 65]
- [6] Wan W B, Hua D X, Le J, Liu M X, Cao N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 190601 (in Chinese) [王文博, 华灯鑫, 乐静, 刘美霞, 曹宁 2013 物理学报 **62** 190601]
- [7] Limbach C M, Miles R B 2017 *AIAA J.* **55** 112
- [8] Fourquette D C, Zurn R M, Long M B 1986 *Combust. Sci. Technol.* **44** 307
- [9] Xu C J, Yang Y H, Yang M W 2010 *Infrared Laser Eng.* **39** 1143 (in Chinese) [徐春娇, 杨洪远, 杨明伟 2010 红外与激光工程 **39** 1143]
- [10] Allison S W, Gilles G T 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 2615
- [11] Elliott G S, Glumac N, Carter C D 2001 *Meas. Sci. Tech.* **12** 452
- [12] Barlow R S, Wang G H, Filho P A, Sweeney M S 2009 *P. Combust. Inst.* **32** 945
- [13] Omrane A, Juhlin G, Ossler F 2004 *Appl. Optics* **43** 3523
- [14] Kitzhofer J, Nonn T, Brucker C 2011 *Exp. Fluids* **51** 1471
- [15] Berrocal E, Churmakov D Y, Romanov V P, Jermy M C, Meglinski I V 2005 *Appl. Opt.* **44** 2519
- [16] Kristensson E, Richter M, Pettersson S G, Aldén M, Andersson E S 2008 *Appl. Opt.* **47** 3927
- [17] Kristensson E, Berrocal E, Richter M, Aldén M 2010 *Atomization Sprays* **20** 337
- [18] Kristensson E, Berrocal E, Aldén M 2011 *Opt. Lett.* **36** 1656

- [19] Kristensson E, Berrocal E, Richter M, Pettersson S G, Aldén M 2008 *Opt. Lett.* **33** 2752
- [20] Kristensson E, Bood J, Aldén M, Nordström E, Zhu J, Hult S, Bengtsson P E, Nilsson H, Berrocal E, Ehn A 2014 *Opt. Express* **22** 7711
- [21] Kristensson E, Araneo L, Berrocal E, Manin J, Richter M, Aldén M, Linne M 2011 *Opt. Express* **19** 13647
- [22] Berrocal E, Kristensson E, Richter M, Linne M, Aldén M 2008 *Opt. Express* **16** 17870
- [23] Wellander R, Berrocal E, Kristensson E, Richter M, Aldén M 2011 *Meas. Sci. Technol.* **22** 125303
- [24] Aldén M, Bood J, Li Z S, Richter M 2011 *P. Combust. Inst.* **33** 69
- [25] Kristensson E, Ehn A, Bood H, Aldén M 2015 *P. Combust. Inst.* **35** 3689
- [26] Yan B, Su T, Chen S, Chen L, Yang F R, Tu X B, Mu J H 2017 *China National Symposium on Combustion* Nanjing, China, October 13–15, 2017 p489

Structured illumination for two-dimensional laser induced fluorescence imaging to eliminate stray light interference*

Yan Bo Chen Li Chen Shuang[†] Li Meng Yin Yi-Min Zhou Jiang-Ning

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

(Received 24 June 2019; revised manuscript received 22 July 2019)

Abstract

Laser sheet imaging, also called planar laser imaging, is one of the most versatile optical imaging techniques and has been frequently used in several different areas. However, when applied to the limited operating space and strong light scattering media, the light originating from indirect reflections, multiple scattering and surrounding backgrounds can produce error especially in intensity-ratio based measurements.

This work is motivated by these challenges, with the overall aim of making laser sheet imaging technique applicable for the study of eliminating the stray light interference. Therefore a novel two-dimensional imaging technique named structured laser illumination planar imaging (SLIPI) is developed based on planar laser imaging but uses a sophisticated illumination scheme i.e. spatial intensity modulation, to differentiate between the intensity contribution arising from useful signals and that from stray light. By recording and dealing with images, the SLIPI method can suppress the diffuse light and retain the useful signals.

In this paper, we first use the MATLAB software to simulate the phase-shift SLIPI method, and the results show that the stray light interference can be eliminated completely. Furthermore, the phase-shift SLIPI is combined with the liquid solution (Rhodamine B solution) laser induced fluorescence (LIF) approach to imagine the concentration distribution. By recording three images, between which this encoding is changed noticeably only for the useful LIF signals, the phase-shift SLIPI method is evidenced to be able to remove the diffuse light contribution, thus improving and enhancing the visualization quality. The instantaneous SLIPI images of rapidly moving samples, a key feature to study dynamic liquid solution diffusion behavior, are also acquired. The lock-in amplifier SLIPI technique is then experimentally studied under Rhodamine B diffused solution, and the phase-shift SLIPI method can remove the unwanted background interferences and achieve the significant improvements in terms of pronounced concentration distribution within the Rhodamine B solution.

The SLIPI technique is relatively inexpensive: the cost does not exceed the cost of an ordinary laser sheet arrangement noticeably, and it can combine with several other linear imaging techniques, such as Rayleigh scattering, particle image velocimetry and laser-induced phosphorescence.

Keywords: structural illumination, stray light, laser induced fluorescence, Rhodamine B solution

PACS: 87.63.lt, 47.80.Jk, 07.05.Pj, 87.64.kv

DOI: 10.7498/aps.68.20190977

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91641118) and the Fenglei Youth Innovation Fund of CARD C (Grant Nos. FLYIF20160017, PJD20180131).

[†] Corresponding author. E-mail: chenshuang827@gmail.com