

文章编号 1004-924X(2017)07-1689-08

羟基分子标记示踪速度测量中的强振动干扰抑制

叶景峰^{1,2*}, 邵 珺², 李国华², 胡志云², 宋文艳¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;

2. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要:针对在发动机实验环境中羟基分子标记示踪速度测量技术受到的强振动干扰问题,通过实验研究分析了标记激光与不同流场作用时产生的辐射光谱特性,设计了在实验中同时拍摄标记基准图像和移动图像的振动干扰抑制方法。对于一般流场,在实验中实时拍摄标记激光瑞利散射作为标记基准图像,而对于含有煤油大分子碳氢燃料的流场甚至是 CH_4 燃烧场,用标记激光诱导燃料在 OH 荧光辐射波段的辐射光作为标记基准图像。在超燃发动机的速度测量应用尝试表明,两种方案均可以达到抑制振动的目的。在相对干净的流场区域,前者得到的标记激光图像会受到壁面散射等干扰,基准位置提取不确定度约为 0.06 mm。在流场中未燃燃料含量比较丰富的区域,后者能够得到清晰的标记基准图像,基准位置提取不确定度可以降至 0.03 mm,与采用平均方法得到的基准位置提取不确定度相当。

关键词:激光诊断;羟基分子标记示踪;速度测量;振动干扰;超燃冲压发动机

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1689

Vibration disturbance suppression in velocity measurements by hydroxyl tagging velocimetry

YE Jing-feng^{1,2*}, SHAO Jun², LI Guo-hua², HU Zhi-yun², SONG Wen-yan¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

* Corresponding author, E-mail: leafey1979@163.com

Abstract: In order to suppress the strong vibration disturbance in Hydroxyl Tagging Velocimetry (HTV) in practical experimental environment for an engine, the characteristic of radiation spectrum of tagging laser interacted with different flow fields was analyzed experimentally. In the experiment, two strategies for vibration disturbance suppression were designed by capturing the tagging laser image and moved tagging image simultaneously. For a general flow field, the Rayleigh scattering of the tagging laser was used as reference images, and in a combustion flow field which contained unburned large hydrocarbon fuel like kerosene, CH_4 , the radiation of the tagging laser induced fuel in the waveband of OH fluorescence spectrum was taken as reference images. The velocity measurement in the flow field of a scramjet engine indicates that the two approaches can suppress the vibration

收稿日期:2017-03-17;修订日期:2017-04-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 91541203, No. 91641112)

disturbance efficiently. Moreover, the Rayleigh scattering image of the tagging laser is disturbed by wall scattering in the relative pure flow region, making the uncertainty of the base tagging position identification approximate to 0.06 mm. In the follow region with abundant unburned fuels, the latter method can obtain comparatively clear tagging laser images with the uncertainty of base tagging position identification reduced to 0.03 mm, which equals to the uncertainty of the average method.

Key words: laser diagnostic; Hydroxyl Tagging Velocimetry (HTV); velocity measurement; vibration disturbance; Scramjet engine

1 引言

在发动机等动力装置的研究中,流场速度的精确测量对流场结构研究、数值计算模型验证、发动机设计评估等具有非常重要意义。分子标记示踪速度测量(Molecular Tagging Velocimetry, MTV)技术是一类基于激光的非接触速度测量技术^[1-6]。它用激光标记的分子作为流场的示踪粒子,通过观察这些标记分子在流场中的运动图像,根据已知时间间隔内标记分子跟随流场的移动距离计算流场的速度分布。该类技术有效避免了示踪粒子的跟随性问题,在流场的速度测量研究中发挥了重要作用^[7-10]。羟基分子标记示踪速度测量(Hydroxyl Tagging Velocimetry, HTV)^[11-12]技术是其中的一种,它利用激光解离水产生的 OH 作为流场标记,然后利用平面激光诱导荧光(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)技术对这些 OH 标记的位置进行显示。由于 HTV 技术非常适合用于高温高速流场,因此在超音速风洞^[13-14]、超燃冲压发动机流场^[15]、发动机尾流^[16-17]等速度测量研究中得到了广泛应用。

在应用 HTV 等标记示踪技术进行速度测量时,往往需事先确定标记的基准位置,即解离激光光束的位置。但是,高速流动实验环境往往伴随着强烈的振动干扰,这会造成实验过程中光学系统的抖动,使标记基准位置偏移,从而给速度测量带来较大不确定度。针对这一问题, Jennifer A. Inman 等人^[18]在使用以 NO 作为标记分子的速度测量技术进行开放的高速流场测量时,设计了横穿整个流场的标记线,使得标记线的中心部分处于流场中,而两端处于静止的空气中,以实验过程中标记线两端作为标记基准位置,有效地避免了振动带来的干扰。但这种方法仅适用于开放流场中,对于有壁面约

束的内流场无法使用。Amber N. Perkins 等人^[19]在将 HTV 技术用于航空发动机尾流速度测量时,将实验过程中标记激光诱导的燃料荧光图像作为标记基准位置,并利用一台可快速开关两次的相机实时记录标记基准位置和移动位置,实现了对振动干扰的抑制。不过该方法仅适用于含有能激发荧光的燃料分子的流场中,而且得到的基准图像信噪比也比较低,因此其使用受到一定限制。

本文针对超燃冲压发动机模型实验的强振动环境对 HTV 测量技术的干扰,分析了标记激光与流场作用后产生的散射光特性,并以此进行标记基准位置的显示,设计了振动干扰的抑制方法。在实际应用中,结合隔振平台对振动源进行先期过滤,然后利用设计的振动抑制方法实现了对超燃流场速度的精确测量。

2 强振动对 HTV 测量的影响

图 1 为 HTV 技术的速度测量原理,首先 ArF 准分子激光器输出波长为 193 nm 的激光束(称为标记激光),并与流场中的水分子作用后

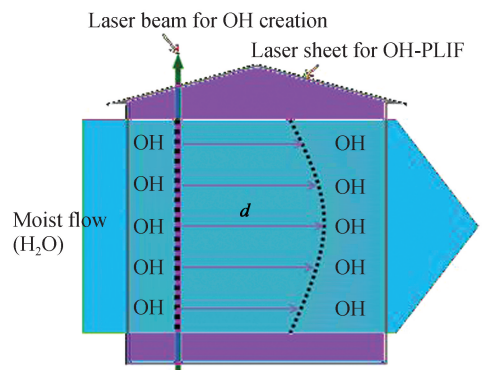


图 1 HTV 速度测量原理图
Fig. 1 Principle diagram of HTV

产生 OH。将 OH 作为流场的标记示踪粒子,然后在时间间隔 t_d 后,利用 OH-PLIF 技术中波长约为 283 nm 的激光片(称为显示激光)对其进行显示。通常情况下,由于标记激光的位置是已知的,因此作为 OH 示踪粒子的基准位置,在时间间隔 t_d 后利用 OH-PLIF 得到的标记图像显示了 OH 示踪粒子跟随流场移动后的位置。利用这两个时间相关的 OH 图像,即可得到它们跟随流场移动的距离 d ,进而利用 $v=d/t_d$ 计算得到流场速度 v 。更多关于 HTV 技术和实验装置的介绍参阅参考文献[12]和[15],这里不再赘述。为了得到清晰的 OH 图像,通常在拍摄相机前加装能通过 OH 荧光辐射的带通滤光片,比如常用的 f320 滤光片,其通带宽度为 20 nm,可以透过 310~330 nm 的辐射光。

然而,在强振动环境中,测量系统的整形光路以及探测系统不可避免地会随着振动而发生偏移,从而导致在测量实验过程中标记基准位置偏离原来的位置,这对于速度计算结果强烈依赖于标记线位置的 HTV 技术而言是非常不利的。尤其在高速流动测量中,时间间隔 t_d 通常比较小(几微秒),即使标记基准位置的偏移量很小,也会造成很大的测量误差。比如对于一个典型的测量实验, t_d 设为 $2 \mu\text{s}$,标记位置偏移 0.1 mm 会带来 50 m/s 的速度误差。同时在超燃冲压发动机模型实验中,振动源频率相对较高,常用的振动隔离措施很难将振源与测量系统完全隔离。

图 2 给出了在中国空气动力发展中心进行的直连式超燃冲压发动机模型实验中监测得到的标

记激光位置的偏离情况。图中圆圈为将测量系统直接置于发动机实验模型附近的地面上,没有采取隔振措施的情况,小方框为在测量系统下加隔振平台后的情况。可以看到,在不采取任何隔振措施的情况下,标记激光位置在实验过程中发生的偏移不仅大(可以达到 $\pm 0.4 \text{ mm}$),而且偏移不可恢复,从而导致测量实验几乎无法正常进行。在采用隔振平台后,标记激光围绕其初始位置仍然有一些抖动,但偏移量有明显的改善,可以控制在 $\pm 0.15 \text{ mm}$ 。即便如此,如果采用 $t_d = 2 \mu\text{s}$ 的实验设置,振动带来的速度误差依然可以达到 75 m/s。

3 振动干扰抑制方法

在高速流动测量中,HTV 技术中的时间间隔 t_d 通常设为微秒级,远小于振源的机械振动周期。因此,在实验过程中,如果能够实时得到标记基准位置图像,再结合得到的标记示踪分子移动后的图像,在每个测量时刻均得到两幅时间间隔为 t_d 的标记图像,即可忽略振动对测量的干扰。这就需要在实验过程中对标记激光图像(即标记基准图像)进行实时显示并作为标记基准位置,而不再采用实验前或实验后的标记激光位置作为标记的基准位置。文献[19]采用这种思路,利用标记激光与流场中未燃烧完的煤油燃料作用时产生的荧光辐射,对标记基准图像进行实时显示,达到了抑制振动干扰的目的。但这种方式得到的标记基准图像强度取决于流场中燃料的种类和浓度,普适性不好。为了更加可靠地实时获得标记的基准图像,本文对 HTV 技术中使用的 193 nm 标记激光与两种不同燃料燃烧场作用后产生的辐射光谱进行了实验测量与分析。选用的两种燃料分别为 CH_4 和 RP-3 航空煤油,光谱测量实验选择了四个流场状态:(1) CH_4 /空气扩散火焰场;(2) 常温 CH_4 流场;(3) 煤油/空气扩散火焰场;(4) 加热煤油蒸气流场。其中,煤油/空气扩散火焰通过对煤油进行加热形成煤油蒸气后燃烧获得。 CH_4 /空气扩散火焰和煤油/空气扩散火焰的自发光图像如图 3 所示。光谱测量位置位于火焰化学反应面附近。

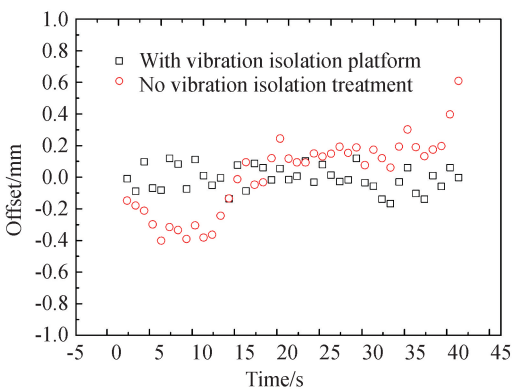
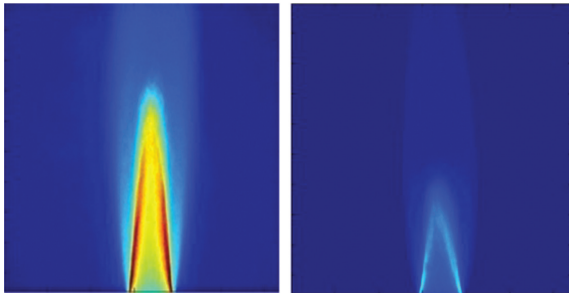


图 2 振动环境中标记激光位置的偏移

Fig. 2 Offset of tagging laser in vibration environment



(a) CH₄/空气火焰 (b) 煤油/空气火焰
(a) CH₄/air flame (b) Kerosene/air flame

图 3 两种燃料的火焰发光照片

Fig. 3 Images of two kinds of fuel flame

图 4 给出了 4 种流场的光谱曲线,为了方便显示,利用 193 nm 附近的光谱峰值强度对光谱进行了归一化。可以看到,无论是未燃烧的煤油蒸气还是煤油燃烧场,在大于 220 nm 很宽的范围均有较强的光谱辐射,对应于此类大分子碳氢燃料的荧光辐射带;而煤油燃烧场则在 319 nm 附近有一个较窄的峰值;与之相似,CH₄/空气火焰在此位置也有一个谱峰,只是强度较低;并且,CH₄/空气扩散火焰、煤油/空气扩散火焰以及加热煤油蒸气均在 250 nm 附近有一个峰值;当然,4 种流场在 193 nm 附近均具有较强的瑞利或 Mie 散射。250 nm 和 319 nm 附近的谱峰是由于激光与流场中的燃料或燃烧产物作用后离解产生的自由基发光,在本文中不做深入探讨。

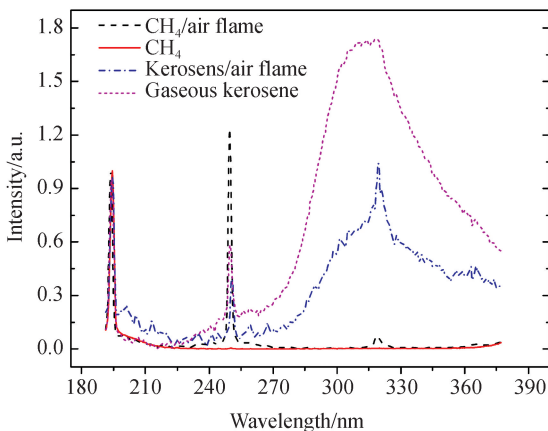
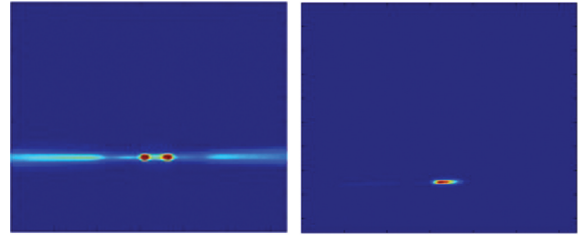


图 4 193 nm 激光激励下不同流场的辐射光谱

Fig. 4 Spectra of several flows induced by 193 nm laser

从图 4 可以看出,利用标记激光的瑞利或 Mie 散射进行标记基准位置的显示是可行的,而

且在各种流场中均适用。图 5 给出的是 CH₄/空气火焰和煤油/空气火焰中的 193 nm 激光散射图像,其中 193 nm 激光整形为一条光束水平穿过火焰区域,拍摄相机前未加滤光片。煤油燃烧场中由于火焰中心区信号过强,周围信号显得较弱。虽然不同的流场环境使得标记线强度分布不均匀,但这不影响速度测量中标记基准位置的确定。



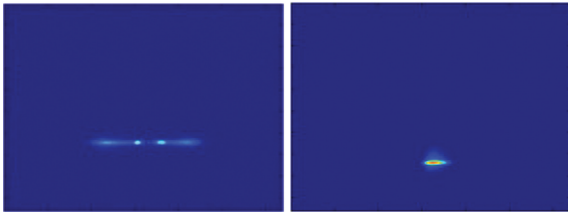
(a) CH₄/空气火焰 (b) 煤油/空气火焰
(a) CH₄/air flame (b) Kerosene/air flame

图 5 两种燃料火焰中的标记激光图像(无滤光片)

Fig. 5 Tagging images in two kinds of flame (no filter)

鉴于瑞利或 Mie 散射光谱与 OH 辐射谱差别很大,这里采用两种方案达到同时获得它们图像的目的。一是额外增加一台相机,专门对标记激光的瑞利或 Mie 散射光进行实时记录;二是利用一台可快速曝光两次的双帧双曝光相机,为了拍摄两个不同波段的光辐射,使用一个双通道分光器,将测量区图像成像到相机光敏面的不同位置,在分光器前加装不同的带通滤光片,并在标记激光和显示激光时刻分别曝光,分别获得标记激光的瑞利或 Mie 散射图像和标记 OH 分子的荧光图像。

从图 4 还能得出,拍摄 OH 荧光的滤光片也能使得 193 nm 激光与流场作用时的一些辐射光通过,尤其是在煤油燃烧场中,其强度足以对标记激光进行显示,即使是对于 CH₄ 燃烧场,在该波段也有一定的辐射。图 6 为在镜头前加装 f320 滤光片时拍摄到的 CH₄ 火焰和煤油火焰中标记的激光图像,虽然 CH₄ 火焰中的图像强度比煤油火焰中的弱很多,但依然可以分辨出标记激光位置。因此,在这样的环境中,采用一台可快速曝光两次的双帧双曝光相机,只用一个 f320 滤光片就能同时拍摄标记激光的基准位置和标记移动位置,只是由于燃烧场中组分的差别,标记激光图像的强度有所差异。



(a)CH₄/空气火焰 (b)煤油/空气火焰
(a) CH₄/air flame (b) Kerosene/air flame

图 6 两种燃料火焰中的标记激光图像(f320 滤光片)

Fig. 6 Tagging images in two kinds of flame (with filter f320)

4 测量实验

为了检验方法的可行性,在中国空气动力发展中心进行的直连式超燃冲压发动机模型流场速度测量过程中,作者采用本文设计的方法进行了实验。如图 7 所示,整个 HTV 测量系统放置在一个隔振光学平台上,保证测量设备的稳定运行。系统中使用了两台可工作在双帧双曝光模式下的 ICCD 相机 (ICCD-1 和 ICCD-2),用于拍摄标记基准和移动图像。实验设计了两条垂直于流场流动主方向的两条标记线 (line₁ 和 line₂),用于在一次测量中获得两个不同位置的速度分布。

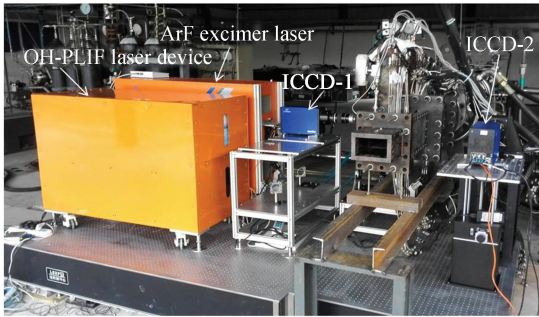


图 7 速度测量实验装置照片

Fig. 7 Photograph of velocity measurement equipment

测量分别在发动机模型的隔离段和出口段进行。在发动机模型的隔离段(即发动机模型入口),流场为 H₂/空气燃烧加热场,流场比较干净,因此实验中采用两台 ICCD 相机分别拍摄标记激光散射和标记线移动图像的振动抑制方法。拍摄标记激光散射的相机 ICCD-2 前未加滤光片,得到的图像如图 8(a)所示,由于流场相对比较干净,所以得到的标记激光图像主要来自于瑞利散

射。鉴于瑞利散射光较弱,并且存在壁面散射的干扰,得到的图像不是非常清晰(信噪比约为 2),但仍能可靠地分辨出标记线位置。拍摄标记线移动的相机 ICCD-1 前加装 f320 滤光片,得到的是标记 OH 的激光诱导荧光图像。利用这两幅图像计算得到沿标记线上的速度分布如图 8(c)所示。由于该测量位置流场比较均匀,因此两条线上的速度分布基本一致。

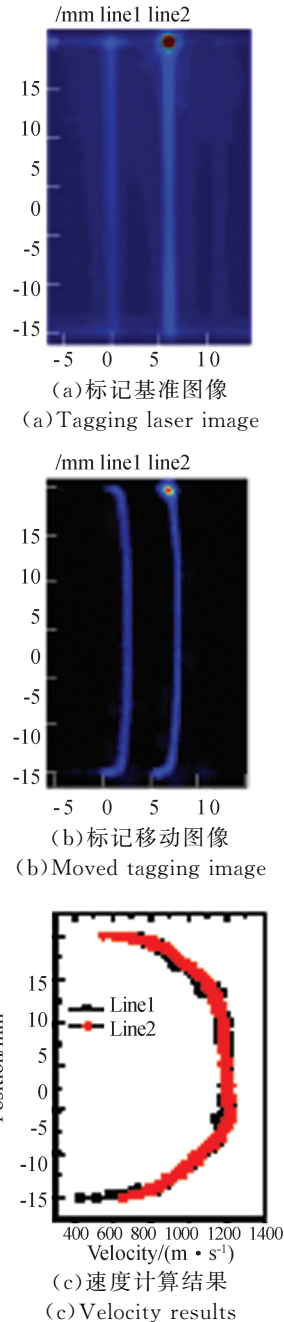


图 8 超燃发动机模型隔离段的流场速度测量

Fig. 8 Measurement of isolation section flow velocity in Scramjet model

在出口段,由于燃烧不充分,还存在尚未完全燃烧的燃料,因此在该段采用拍摄标记激光诱导燃料荧光图像的方法记录标记基准位置。实验中,利用系统中的一台相机 (ICCD-1),并在相机镜头前加装 f320 滤光片。通过同步控制,在标记激光出光时刻执行相机的第一次曝光,在间隔 $t_d = 2 \mu\text{s}$ 后,在显示激光出光时刻执行第二次曝光。拍摄得到的图像如图 9 所示,由于使用

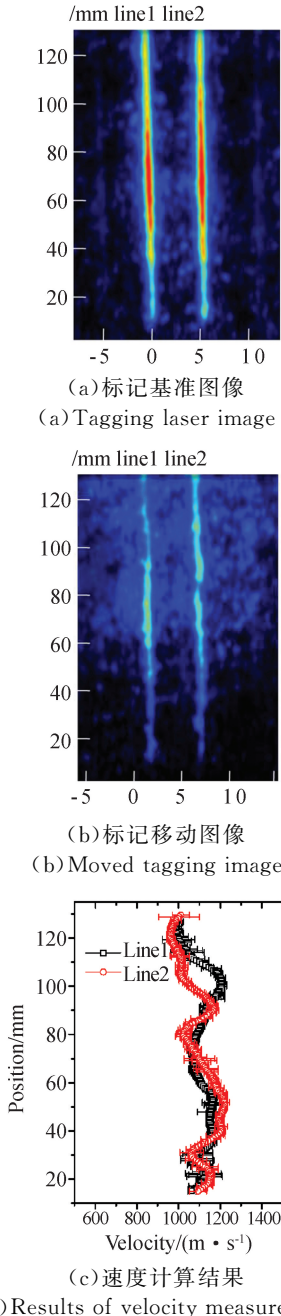


图 9 超燃发动机模型出口的流场速度测量

Fig. 9 Measurement of exit flow velocity in Scramjet model

了 f320 滤光片,图 9(a)为标记激光诱导的煤油荧光在滤光片通带内的荧光辐射;图 9(b)是 OH 标记线的激光诱导荧光图像,即跟随流场移动 $2 \mu\text{s}$ 后的标记图像。可以看到,在这种环境中,由于未燃燃料的存在,可以获得信号很强的标记基准图像,图像信噪比可以达到 5 以上。利用这两幅时间关联的标记图像即可精确计算沿标记线的流场速度分布,结果如图 9(c)所示。在该测量位置,流场变化比较大,两条线上的速度分布明显不同。

两种流场中的测量结果表明,无论是利用燃料的荧光辐射还是标记激光的散射,均能实现对振动干扰的抑制。二者的差别主要体现在图像的信噪比上。HTV 技术中常采用图像相关法对标记的精确位置进行提取^[20],其提取精度与图像的信噪比有关。本文利用瑞利散射得到的标记基准图像的标记基准位置提取不确定度约为 0.06 mm ,而利用燃料荧光法得到的标记基准图像的标记位置提取不确定度约为 0.03 mm ,与之对应的速度误差分别为 30 m/s 和 15 m/s 。实际上,在实验前或实验后获取标记基准位置,虽然可以采用多脉冲平均的方式得到信噪比更好 (>10) 的图像,但在采用图像相关的处理方法时,当信噪比大于 5 以后,提高图像的信噪比并不会显著增加标记位置的提取精度。因此,这里利用燃料荧光法获得的标记基准图像足以满足应用需求。

5 结 论

本文分析了强振动环境对 HTV 技术速度测量的干扰,并通过实验研究了 HTV 技术中标记激光与流场作用后的辐射光谱,根据不同流场的辐射光谱特征,得出两种振动干扰抑制方案:对于任意流场,在实验中实时拍摄标记激光瑞利散射作为标记基准图像,图像采集装置略微复杂;在含有煤油大分子碳氢燃料的场甚至是 CH_4 燃烧场,用标记激光诱导燃料在 OH 荧光辐射波段的辐射光作为标记基准图像,对图像采集设备的要求低一些。

对超燃冲压发动机模型流场的测量实验表明,两种方案均可以达到抑制振动的目的。利用拍摄标记激光瑞利散射的方法得到的标记激光图

像受到壁面散射等的干扰,图像清晰度受到一定影响,该实验中基准位置提取不确定度约为0.06 mm。在流场中未燃燃料含量比较丰富的情况下,利用拍摄标记激光诱导燃料荧光法能够得到清晰的标记基准图像,该实验中基准位置提取不确定度降至0.03 mm,与采用平均方法得到的

基准位置提取不确定度相当。

6 致 谢

感谢中国空气动力发展中心对本工作应用尝试实验的支持。

参考文献:

- [1] KOCHESFAHANI M. Molecular tagging velocimetry (MTV)-progress and applications [C]. *30th Fluid Dynamics Conference, AIAA*, 1999-3786.
- [2] DEBARBER PA, SEGALL J, BROWN M S, *et al.*. Ozone flow tagging—a novel approach for unseeded velocity measurement [C]. *26th Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA*, 1995-1952.
- [3] MICHAEL J B, EDWARDS M R, DOGARIU A, *et al.*. Femtosecond laser electronic excitation tagging for quantitative velocity imaging in air [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(26): 5158-5162.
- [4] DAM N, KLEIN-DOUWEL R J H, SIJTSEMA N M, *et al.*. Nitric oxide flow tagging in unseeded air [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(1): 36-38.
- [5] 施翔春, 王杰, 肖绪辉, 等. 拉曼激发激光诱导电子荧光流场测量系统中标记过程的研究[J]. *光学学报*, 2001, 21(2): 206-210.
- SHI X CH, WANG J, XIAO X H, *et al.*. Tagging procedures of Raman excitation plus laser induced electronic fluorescence flow velocimetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(2): 206-210. (in Chinese)
- [6] 王培勇, 邢菲. 先进激光测量技术在航空发动机燃烧室研发中的应用[J]. *航空发动机*, 2012, 38(4): 53-58.
- WANG P Y, XING F. Advanced laser measurement technology for aeroengine combustor research and development [J]. *Aeroengine*, 2012, 38(4): 53-58. (in Chinese)
- [7] ISMAILOVM M, SCHOCK H J, FEDEWA A M. Gaseous flow measurements in an internal combustion engine assembly using molecular tagging velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 41(1): 57-65.
- [8] DANEHY P M, O'BYRNE S, HOUWING A F P, *et al.*. Flow-tagging velocimetry for hypersonic flows using fluorescence of nitric oxide [J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(2): 263-271.
- [9] MICHAEL J B, EDWARDS M R, DOGARIU A, *et al.*. Femtosecond laser electronic excitation tagging for quantitative velocity imaging in air [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(26): 5158-5162.
- [10] MIRZAEI M, DAM N J, VAN DE WATER W. Molecular tagging velocimetry in turbulence using biacetyl [J]. *Physical Review E*, 2012, 86(4): 046318.
- [11] SHIRLEYJ A, BOEDEKER L R. Non-intrusive space shuttle main engine nozzle exit diagnostics [C]. *24th Joint Propulsion Conference, AIAA*, 1988-3088.
- [12] WEHRMEYER J A, RIBAROV L A, OGUSS D A, *et al.*. Flame flow tagging velocimetry with 193-nm H₂O photodissociation [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(33): 6912-6917.
- [13] PITZ R, LAHR M D, DOUGLAS Z W, *et al.*. Hydroxyl tagging velocimetry in a supersonic flow over a cavity [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(31): 6692-6700.
- [14] PERKINS A N, RAMSEY M, PITZ R W, *et al.*. Investigation of a bow shock in a shock tube flow facility using hydroxyl tagging velocimetry (HTV) [C]. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Aerospace Sciences Meetings, AIAA*, 2011-1092.
- [15] 叶景峰, 邵珺, 李国华, 等. 羟基分子标记技术用于超音速流动速度测量[C]. *第十六届全国激波与激波管学术会议论文集, 中国力学学会激波与激波管专业委员会*, 2014: 363-368.
- YE J F, SHAO J, LI G H, *et al.*. Supersonic flow velocity measurements by hydroxyl tagging velocimetry [C]. *The Proceedings of the 16th National Symposium on Shock Wave*, 2014:363-368. (in Chinese)
- [16] ALEXANDER A, WEHRMEYER J, RUNGE W, *et al.*. Nonintrusive measurement of gas turbine exhaust velocity using hydroxyl tagging ve-

locimetry [C]. *26th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, Fluid Dynamics and Co-located Conferences*, AIAA, 2008-235.

- [17] BLANFORD B T, RUNGE W O, HU S T, *et al.*. Application of hydroxyl tagging velocimetry (HTV) to measure centerline velocities in the near field exhaust of a gas turbine engine [C]. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA, 2008-235.
- [18] INMAN J A, DANEHY P M, BATHEL B, *et al.*. Laser-induced fluorescence velocity measurements in supersonic underexpanded impinging jets

[C]. *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, AIAA, 2010-1438.

- [19] PERKINS A N, RAMSEY M, STRICKLAND D J, *et al.*. Dual-pulse hydroxyl tagging velocimetry (HTV) in jet engine exhausts [C]. *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Joint Propulsion Conferences*, AIAA, 2009-5108.
- [20] RAMSEY M C, PITZ R W. Template matching for improved accuracy in molecular tagging velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 51(3): 811-819.

作者简介:



叶景峰(1979—),男,河南西平人,副研究员,2001年、2004年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光光谱技术应用的研究。E-mail: leafey1979@163.com

导师简介:



宋文艳(1967—),女,天津人,教授,1987年于南京航空学院获得学士学位,1992年、2004年于西北工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事航空涡轮发动机和超音速燃烧冲压发动机理论、实验和测量技术的研究。E-mail: wenyang_song@nwpu.edu.cn