

基于虚拟光线再投影方法的激光吸收光谱 燃烧场二维重建研究

那奕君, 李 宁*, 黄孝龙, 翁春生

南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094

摘 要 针对在不完全投影数据条件下燃烧场气体组分浓度、温度二维分布重建难题, 提出了一种基于虚拟光线再投影方法的燃烧场二维重建算法。利用有限的测量投影数据进行差分运算获取相同角度下不同位置处虚拟光线投影值, 增加光线数量以提高重建质量。采用改进型代数迭代算法对燃烧场进行重建并获取燃烧场的重建初始值, 利用再投影方式获取其他投影角度下虚拟光线的投影数据并进行联合迭代, 最终实现对燃烧场气体组分浓度与温度二维分布重建。采用近红外波段 $7\ 185.6$ 和 $7\ 444.35\ \text{cm}^{-1}$ 两条 H_2O 特征吸收谱线结合 21 条测量光线对 49×49 网格区域进行计算, 通过对相同光线数量条件不同布置方式燃烧场重建结果进行对比分析, 选取了合理的光线布置结构。与传统的采用平滑因子的代数迭代重建算法进行对比, 虚拟光线再投影方法的重建精度明显提高, 同时该方法消除了人为选择平滑因子对重建结果所带来的主观影响, 降低了由于投影角度较少所带来的重建误差。计算结果表明, 重建误差随着再投影运算次数的增加而不断下降, 当在再投影次数达到十次后重建误差逐渐趋于稳定。在 5% 噪声幅值条件下进行十次再投影后, 温度分布重建误差小于 5.76%, 浓度分布重建误差小于 8.83%, 测量噪声对于燃烧场重建结果影响较小。通过对 600~1 200 K 温度范围内的双峰以及三峰燃烧场模型进行计算分析, 验证了虚拟光线再投影方法对于不同工况下燃烧场气体组分浓度、温度二维分布的重建能力。研究结果对有限投影条件下的激光吸收光谱技术二维重建技术理论研究具有重要意义, 可促进激光吸收光谱技术在现实燃烧装置中的工程化应用。

关键词 激光吸收光谱; 二维重建; 代数迭代算法; 虚拟光线; 再投影

中图分类号: O433.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)12-3686-06

引 言

燃烧火焰的温度及其组分浓度是燃烧过程中非常重要的两个参数, 表征了燃烧效率高, 发动机性能的优劣等^[1]。开展燃烧场温度和组分浓度的二维分布重建研究对提高燃烧效率, 改良发动机设计等具有重要意义。可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)具有灵敏度高、响应速度快、可靠性和环境适应性强等优点, 已经成功应用于气体温度、组分浓度等参数测量, 并通过与 CT 技术相结合实现气体多参数二维重建。

代数迭代算法(ART)在不完全投影时依然能获得较好的重建结果因而被广泛用于研究燃烧场气体二维分布^[2]。例

如美国弗吉尼亚理工大学 Ma 等^[3]采用 50 kHz 测量频率, 在垂直和水平方向分别布置 15 条光线对 15×15 网格 J85 航空发动机出口处 300~2 300 K 气体(H_2O)温度进行了重建。Xia 等^[4]提出两步迭代算法, 采用 5×6 光线布置方法选取 $7\ 154.354/7\ 154.353\ \text{cm}^{-1}$ 和 $7467.769\ \text{cm}^{-1}$ H_2O 吸收谱线对该重建算法进行了验证, 结果表明在无噪声的情况下对于划分成 11×11 网格的单峰燃烧场重建误差小于 0.1%。Wang 等^[5]采用 4 个投影角度, 每个投影角度 6 条光线的方式, 测量了不同平面火焰温度和浓度分布, 数值分析表明在吸收信号存在 3% 的噪声条件下仍可以得到重建结果。

在利用 ART 算法进行燃烧场二维重建时, 目前主要存在的难点在于: (1) 由于测量条件的限制, 测量光线数量远少于测量区域网格数量, 即投影数量远小于未知数数量, 因

收稿日期: 2019-10-08, 修订日期: 2020-02-26

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目(20190439), 国家自然科学基金项目(11372141, 11472138), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(30919011258)资助

作者简介: 那奕君, 1994 年生, 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室硕士研究生 e-mail: 568736986@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: stokim@gmail.com

此重建方程对应的矩阵条件数过大，如 Ma 等的对 J85 航空发动机进行测量的光线布置条件下方程条件数为 8.6×10^{14} 。(2)采用平行光线投影时，平行光线的角度存在较大限制，造成重建结果与待重建燃烧场存在较大偏差，如重建过程中将双峰燃烧场的重建为四峰燃烧场^[6]。(3)引入平滑处理机制^[7]进行重建时，平滑因子选择不恰当也会引入较大误差。由于针对不同的燃烧场模型平滑因子可选择的范围较大(0.01~0.1)^[8]，在此范围内不同的平滑因子对应的重建误差可能会相差 10%，而平滑因子通常需要人为确定从而造成重建结果过多的受到主观因素的影响。

本文提出了针对有限投影数据的虚拟光线再投影二维重建算法。利用差分虚拟光线实现病态方程组求解，通过多角度再投影方法解决差分过程相邻网格数据不连续等问题，减少重建过程中燃烧场先验信息的人为因素影响，提升燃烧场重建质量，具有重要理论研究意义和工程应用前景。

1 理论与方法

将探测区域 f 离散为 $n \times n$ 的网格，认为被测气体在每个方格内的温度和组分浓度均匀分布。任意第 i 条光线穿过待测区域的第 j 个网格的长度为 L_{ij} 。根据 Beer-Lambert 定律，当波长为 ν 的光线 i 穿过测量区域时，气体吸收方程可以表示为式(1)^[9]。式中 I_0 和 I_t 分别表示入射和透射的激光光强； P 为气体总压； $S(T)$ 为谱线强度； X 为待测气体体积浓度； L 为光程； α 为吸收率函数。本文采用改进型 ART

(MAART)算法^[10]进行重建。

$$A_w = \int_{-\infty}^{+\infty} -\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) d\nu = \sum_{j=1}^N \alpha w_j L_{ij} = \sum_{j=1}^N [PS(T)X]_{ij} L_{ij} \tag{1}$$

当采用平行光线投影时，若光线间距大于网格间距时导致在投影方向上存在网格无光线穿过，将造成重建得到的 α_i 误差增大。为降低该误差，通过差分法加入虚拟光线^[11]，如图 1 所示。

其中虚拟光线的投影值由相邻两边的实际光线的投影值进行差分运算得到

$$A'_m = \frac{\Delta d'_{in}}{\Delta d} A_i + \frac{\Delta d''_{in}}{\Delta d} A_{i+1} \tag{2}$$

其中 A_i 和 A_{i+1} 分别为光线 i 和 $i+1$ 的投影值， A'_m 为虚拟光线的投影值， Δd 为相邻两条实际光线之间距离， $\Delta d'_{in}$ 和 $\Delta d''_{in}$ 为虚拟光线到相邻两条实际光线距离。针对采用平行光线投影时投影角度不足的问题，提出对重建结果进行再投影的方法来得到更多投影数据。

$$A^{(m+1)} = HA^{(m)} + A_0 \tag{3}$$

其中 HA 为作用于 A 的积分算子， A_0 为由差分虚拟光线法得到的投影值， $A^{(m)}$ 表示第 m 次再投影后的光线投影值，利用 $A^{(m)}$ 求出第 m 次的重建结果并利用该结果再投影求出 $A^{(m+1)}$ 。当 H 的 2 范数满足 $\|H\| < 1$ ，可以从理论上保证存在噪声时相应的重建结果是收敛和稳定的^[12]。计算流程如图 2 所示。

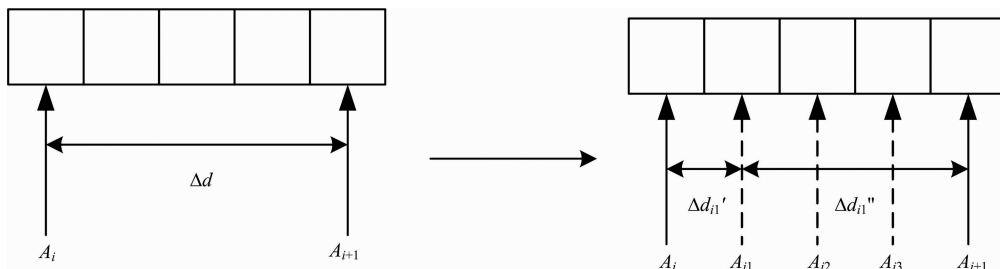


图 1 虚拟光线法示意图

Fig. 1 Scheme of virtual beam method

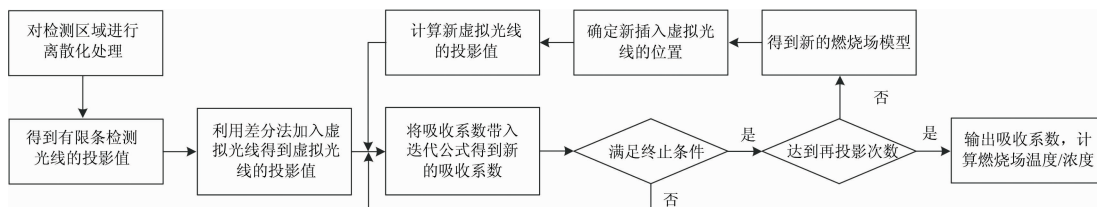


图 2 燃烧场重建算法流程图

Fig. 2 Reconstruction flowchart of the combustion field

2 重建结果分析

为了研究虚拟光线再投影方法在燃烧场二维重建中的可行性，对不同模型进行了数值仿真研究。将重建区域离散为

49×49 的网格，包含气体温度和浓度共 4 802 个未知数，选取两条 H₂O 特征吸收谱线(7 185.6, 7 444.35 cm⁻¹)。为了衡量重建质量，定义温度和浓度归一化平均绝对误差 E_t 和 E_c 。其中 T 和 X 代表温度和浓度，orig 和 cal 表示原始模型和重建结果。

$$E_t = \frac{\sum_{j=1}^N |T_j^{\text{cal}} - T_j^{\text{orig}}|}{\sum_{j=1}^N |T_j^{\text{orig}}|}, E_x = \frac{\sum_{j=1}^N |X_j^{\text{cal}} - X_j^{\text{orig}}|}{\sum_{j=1}^N |X_j^{\text{orig}}|} \quad (4)$$

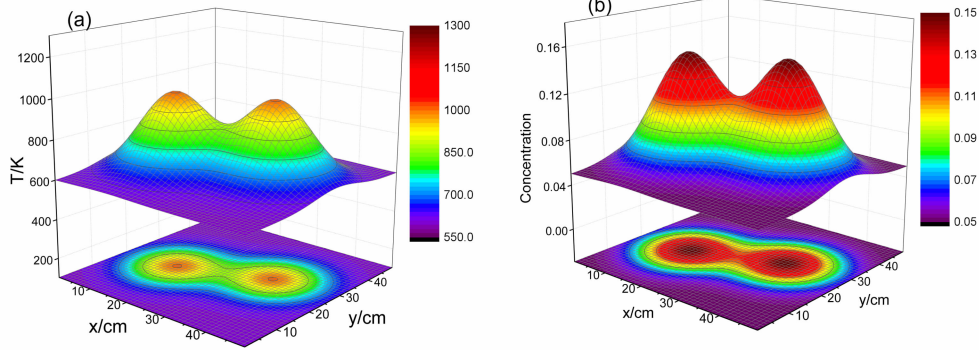


图 3 双峰原始模型

(a): 温度分布模型; (b): 浓度分布模型

Fig. 3 Bimodal original model

(a): Temperature distribution model; (b): Concentration distribution model

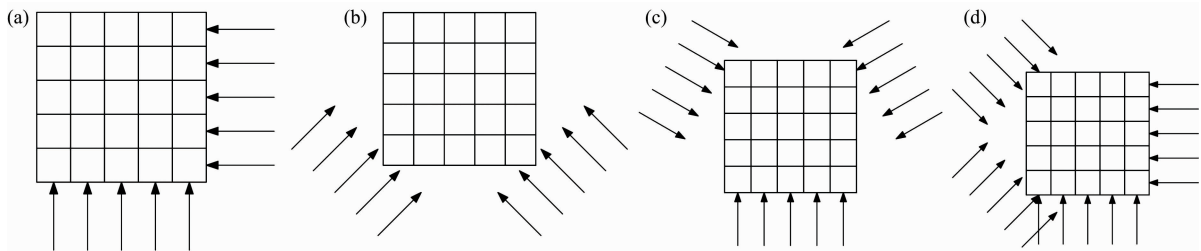


图 4 光线分布示意图

(a): 方式 A; (b): 方式 B; (c): 方式 C; (d): 方式 D

Fig. 4 Schematic diagram of beam arrangement

(a): Mode A; (b): Mode B; (c): Mode C; (d): Mode D

针对 49×49 的离散网格区域, 选择四种实际光线布置方式, 分别为方式 A 实际光线成 0° 和 90° 各十条光线; 方式 B 实际光线成 45° 和 135° 各 10 条光线; 方式 C 实际光线成 0° , 60° 和 120° 各 7 条光线; 方式 D 实际光线成 0° , 45° , 90° 和 135° 各 5 条光线。对每个角度上实际光线进行差分获取虚拟光线投影数值, 利用全部数据对燃烧场进行重建, 重建误差如图 5 所示。可以看出方式 A 和 B 的温度和浓度误差均大于方式 C, 造成这一结果的原因是 A 和 B 两种方式的光线投影角度太少, 得到的有效数据较方式 C 少。当实际光线数量为 20 条时, 两角度投影重建结果可能无法准确反映燃烧场真实分布情况^[7]。方式 D 浓度重建误差相较方式 C 有明显增加, 这是由于方式 D 投影角度多, 但在每个投影角度上的光线数量偏少同时相邻平行光线之间的距离较大, 经过差分运算后虚拟光线的投影值相较该位置实际投影值误差较大, 在个别网格上会出现不同角度虚拟投影值之间相互矛盾, 由于浓度重建对该矛盾更加敏感, 所以方式 D 的浓度重建误差远大于方式 C。与其他方式相比, 方式 C 通过增加投影角度抑制重建结果失真, 同时每个投影角度合理的光线数量也减小

2.1 相同投影数量条件下光路优化

为了研究光线分布对二维重建结果的影响, 对多种实际光线以及再投影虚拟光线在燃烧场中分布方式进行分析研究。测量燃烧场采用双 Gauss 分布, 分布模型如图 3 所示。

了重建误差, 保证了足够的空间分辨率。由于以上原因, 在本文之后计算过程中光线分布选择方式 C。

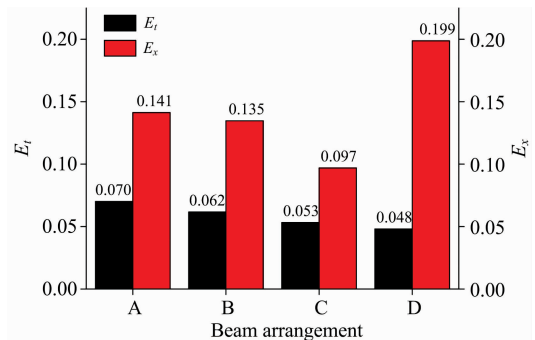


图 5 不同光线分布下的重建误差

Fig. 5 Reconstruction error for different beam arrangements

研究再投影角度对重建结果的影响。对方式 C 进行再投影, 第一组再投影角度选择 45° , 90° 和 135° , 第二组再投影

角度选择 30° , 90° 和 150° 。如图 6 所示, 重建误差都随着重建次数增加而减少, 十次以后趋于稳定。第二组分布方式 E_r 的减少量是第一组的 82.5%, E_x 的减少量是第一组 53.8%。分析其原因, 由于网格划分为正方形划分方式, 第一组分布方式虚拟光线经过每个网格路程分布更为均匀, 在迭代运算过程中网格参数所占比重更为合理。

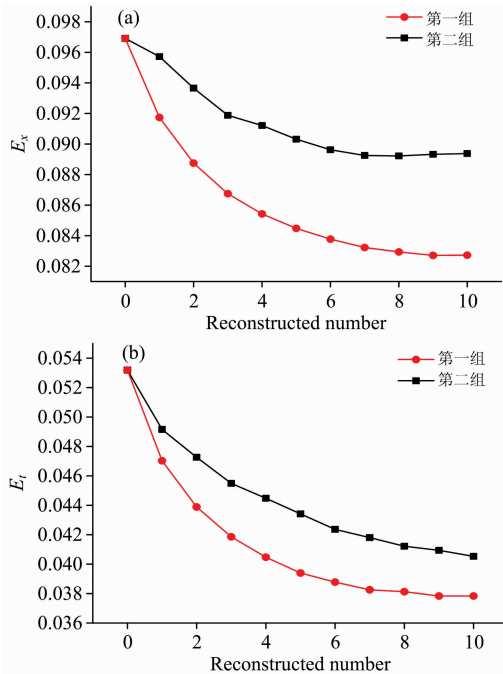


图 6 重建误差的变化趋势

(a): E_x 随再投影次数的变化趋势; (b): E_r 随再投影次数的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of Reconstruction error

(a): E_x variation for reprojection number;

(b): E_r variation for reprojection number

2.2 算法对比

选取采用平滑处理机制的 ART 算法与本文算法进行比较分析。当实际光线数目远小于待测区域网格数目时, 采用平滑处理机制的 ART 算法只会对部分网格中的气体参数进行迭代, 其余网格中的气体参数只能通过平滑处理机制获得。当平滑因子选为 0.02 时, 重建结果温度和浓度误差最小, E_r 和 E_x 分别为 9.88% 和 11.91%。运用本文重建算法并设置再投影次数为 10 次, 重建误差 E_r 和 E_x 分别为 3.77% 和 8.26%, 如图 7 所示。网格划分较细但测量光线数量不足时, 采用平滑处理机制 ART 算法只能大致描绘出燃烧场温度轮廓。采用虚拟光线法能够有效解决没有测量光线经过网格时导致重建偏差较大的问题, 当进行再投影重建后相邻网格温度不连续的情况得到有效改善, 重建结果更接近原始燃烧场模型。

2.3 重建结果分析

为了研究重建算法在实际测量条件下重建效果, 对光线投影数值加入 0.5% 随机噪声, 得到的重建结果由图 8 给出。温度场与浓度场重建误差最大值都出现在峰值位置附近, 温度最大相对误差 9.24%, 浓度最大相对误差 19.13%。得到

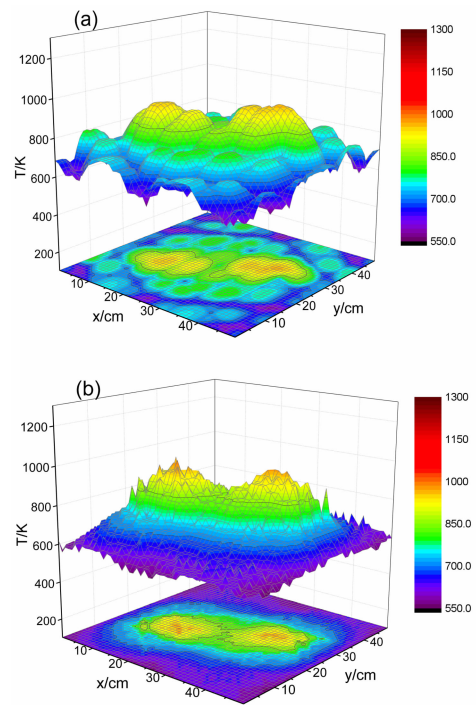


图 7 不同算法的温度场重建结果

(a): 采用平滑机制的 ART 算法; (b): 虚拟光线再投影法

Fig. 7 Reconstruction temperature field for different algorithms

(a): ART with smoothing mechanism;

(b): Virtual beam and re-projection method

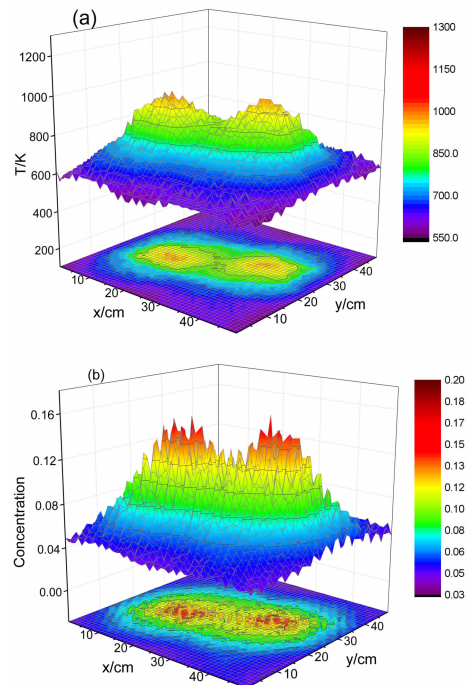


图 8 双峰燃烧场重建结果

(a): 温度场重建结果; (b): 浓度场重建结果

Fig. 8 Reconstruction result for bimodal combustion field

(a): Reconstruction temperature field;

(b): Reconstruction concentration field

重建误差随着再投影重建次数的变化规律由图 9 给出。随着再投影运算次数的增加, E_t 与 E_x 都呈现出下降趋势并最终保持稳定, 经过十次再投影重建后 E_t 减少到 3.55%, E_x 减少到 8.44%。

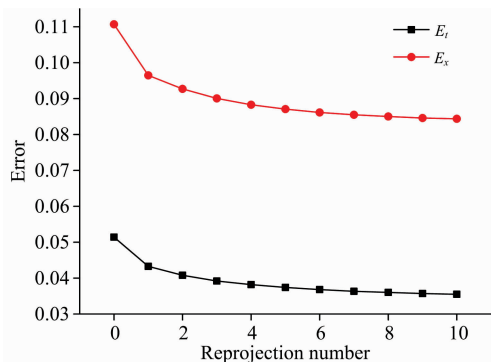


图 9 含 0.5% 噪声时重建误差的变化趋势

Fig. 9 Variation trend of Reconstruction error with 0.5% noise

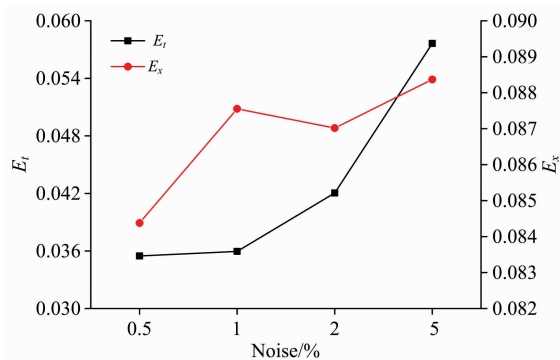


图 10 随机噪声对重建误差的影响

Fig. 10 Effect of random noise on reconstruction error

为了研究不同幅值噪声对重建结果的影响, 对实际光线分别添加 0.5%, 1%, 2% 和 5% 随机噪声并对重建结果进行研究。再投影 10 次时重建误差如图 10 所示。当噪声不超过 5% 时, 浓度重建误差与温度重建误差均随着噪声的增大而增加, 温度重建误差增加幅度更为明显。

2.4 不同模型下重建结果分析

为了验证本文重建方法的通用性, 选取多峰燃烧场进行重建分析。设置温度如图 11 所示的三峰燃烧场, 温度范围 600~1 134 K, H_2O 浓度范围 5%~18.34%。燃烧场三个温度峰值分别为 1 134, 1 006 和 937 K, 浓度峰值为 18.34%, 15.16% 和 13.43%。对实际光线投影值添加 0.5% 的随机噪声, 十次再投影重建后 E_t 为 7.05%, E_x 为 15.11%。图 12 为温度重建结果。

通过图 12 可以看出, 多峰燃烧场的重建质量有所降低, 重建误差增大, 但重建结果依然可以展现出燃烧场的主要特征, 峰值位置、峰值数量等均未出现明显失真。结果表明当燃烧场较为复杂时, 本文重建方法依然可以提供有效的燃烧诊断信息, 适用于温度组分参数连续变化的燃烧场诊断分析。

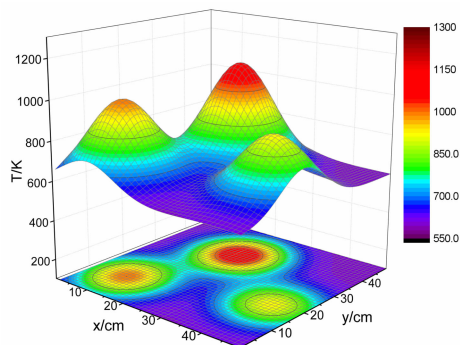


图 11 三峰温度分布模型

Fig. 11 Multimodal temperature distribution model

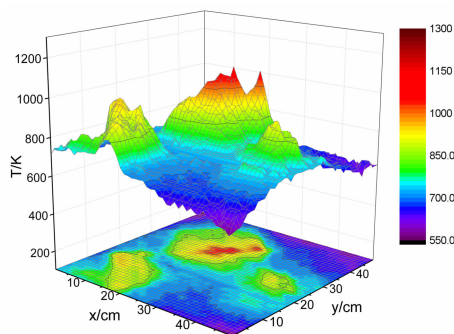


图 12 三峰温度重建结果

Fig. 12 Multimodal temperature reconstruction results

3 结论

基于激光吸收光谱技术采用修正的自适应代数迭代算法对燃烧场温度分布进行二维重建。为了实现在入射光线较少情况下对被测区域的细致刻画, 提出了一种基于虚拟光线与再投影方法的燃烧场二维重建方法。该方法将虚拟光线与再投影技术相结合, 实现了燃烧场温度组分浓度的二维重建, 无需对燃烧场先验信息进行人为调整, 提升了重建质量。通过对比不同方法的重建结果, 该方法的重建结果对燃烧场的重建更为准确, 当测量投影含有 1% 的随机误差时, 温度重建误差为 3.59%, 浓度重建误差为 8.75%。对于不同燃烧场模型, 该方法依然能准确的重建出燃烧场峰值的位置以及峰值大小, 不出现明显失真。结果表明该方法能有效对二维燃烧场进行更为细致的重建。

References

- [1] Bolshov M A, Kuritsyn Y A, Romanovskii Y V. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2015, 106: 45.
- [2] Liu C, Xu L, Chen J, et al. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22494.
- [3] Ma L, Li X, Sanders S T, et al. *Optics Express*, 2013, 21(1): 1152.
- [4] Xia H H, Kan R F, Xu Z Y, et al. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 10.
- [5] Wang F, Wu Q, Huang Q, et al. *Optics Communications*, 2015, 346: 53.
- [6] YIN Ke-wei, XU Di, ZHANG Long, et al(殷可为, 胥 颀, 张 龙, 等). *Opto-Electronic Engineering(光电工程)*, 2016, 43(12): 20.
- [7] Elena L P, Fabiana Z. *Applied Mathematics and Computation*, 1999, 102(1): 87.
- [8] Twynstra M G, Daun K J. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 7059.
- [9] Leyen S C. California: Stanford University, 2011.
- [10] Li Ning, Weng Chunsheng. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(6): 061201.
- [11] SONG Jun-ling, HONG Yan-ji, WANG Guang-yu, et al(宋俊玲, 洪延姬, 王广宇, 等). *Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程)*, 2014, 43(8): 2460.
- [12] Sun Yuli, Tao Jinxu, Chen Hao, et al. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Science)*, 2015, 20(2): 202.

Research of Two-Dimensional Reconstruction of Combustion of Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Based on Virtual Beam and Re-Projection Method

NA Yi-jun, LI Ning*, HUANG Xiao-long, WENG Chun-sheng

National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China

Abstract Aiming at the problem of two-dimensional reconstruction of gas concentration and temperature under incomplete projection data, a two-dimensional reconstruction technique based on a virtual beam and re-projection method is proposed. This method uses the finite measurement projection data to obtain the virtual projection at different positions of the same angle, improves the reconstruction quality by increasing the number of beams. The re-projection method was used to acquire the virtual projection data of other angles, and finally realize the two-dimensional reconstruction of the combustion chamber component temperature. Two H_2O absorption line of 7 185. 6 and 7 444. 35 cm^{-1} in the near-infrared band was used to conduct simulation calculation on the 49×49 grid combined with 21 measurement beams, and the measurement beams arrangement and virtual beams arrangement were optimized. Compared with the traditional algebraic reconstruction technique using a smoothing factor, the reconstruction precision of the virtual beam and re-projection method is obviously improved, and the influence of artificially selected smoothing factor eliminated. The calculation results show that the reconstruction error decreases with the increase in the number of re-projection operations. It tends to be stable after the number of re-projections reaches ten times. The temperature field reconstruction error is less than 5. 76% under 5% noise conditions, and the concentration field reconstruction error is less than 8. 83%, so the measurement noise has little influence on the reconstruction result of the combustion field. The analysis of bimodal and multimodal combustion field models in the temperature range of 600~1 200 K was carried out to verify the ability of virtual beam and re-projection method to reconstruct the two-dimensional concentration and temperature of gas components in the combustion field under different working conditions. The results are of great significance for promoting the theoretical research and engineering application of laser absorption spectroscopy in two-dimensional combustion field reconstruction.

Keywords Laser absorption spectrum; Two-dimensional reconstruction; Algebraic reconstruction technique; Virtual beam; Re-projection

* Corresponding author

(Received Oct. 8, 2019; accepted Feb. 26, 2020)