

燃烧流场温度二维重建多吸收谱线重建方法

宋俊玲, 饶伟, 王广宇, 辛明原

(航天工程大学 宇航科学与技术系 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 可调谐半导体激光层析技术可以实现对燃烧流场温度和组分浓度的二维分布测量。提出了一种基于多条吸收谱线组合的燃烧场温度二维重建方法, 该方法利用每条吸收谱线对温度的敏感度不同, 采取优化组合的方式得到每组吸收谱线对最佳的重建温度区域。文中使用四条 H₂O 吸收谱线, 模拟了温度在 300~1 500 K 范围时高斯分布和随机分布温度二维重建, 比较了采用双线法和多条吸收谱线组合方法的温度重建结果。结果表明: 采用吸收谱线组合方法和双线法的温度重建误差分别为 0.039 6 和 0.095 2, 吸收谱线组合方法可以有效提高重建结果质量。在实际工程应用中, 当可以提前预估流场温度重建范围的情况, 采用文中提出的多条吸收谱线组合方法可以二维重建结果质量。

关键词: 可调谐半导体激光吸收光谱; 二维重建; 吸收谱线; 燃烧流场; 温度

中图分类号: TN247; O433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0306004

2D reconstruction of combustion flow field temperature based on multiple absorption lines

Song Junling, Rao Wei, Wang Guangyu, Xin Mingyuan

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: 2D distribution measurement on temperature and concentration of combustion flow field can be obtained by tunable diode laser absorption tomography technique. A new method using multiple absorption lines to reconstruct 2D temperature distribution was developed. In the method, different lines were combined based on the property of temperature sensitivity. And the area interested were reconstructed by the line pairs which were optimal for the temperature. In this paper, four H₂O lines were selected to reconstruct the temperature distribution using Gauss and random models in a range of 300–1 500 K. The simulation results show that the new method improves the reconstruction quality with reconstructed error of 0.039 6 comparing with two-line thermometry of 0.095 2. In engineering application, the multiple absorption lines combination optimization method can effectively improve the reconstruction quality when the temperature range of the area of interest can be predicted.

Key words: tunable diode laser absorption spectroscopy; 2D reconstruction; absorption lines; combustion flow field; temperature

收稿日期: 2018-11-11; 修订日期: 2018-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61505263, 61505262)

作者简介: 宋俊玲(1985-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事近红外光谱流场诊断方面的研究。Email: songjl_2008@163.com

0 引言

将可调谐半导体激光吸收光谱技术与计算机断层扫描重建技术相结合称为可调谐半导体激光层析技术(TDLAT)^[1]。该技术可以有效克服 TDLAS 技术中由于视线效应仅能得到的沿光程上的平均结果(温度、浓度等)的缺点,可以得到流场内部的二维分布信息,为燃烧流场诊断和污染物减排提供有效测量手段^[2-3]。

根据重建算法的不同,可以分为三类:第一类是变换法,即直接对横截面进行数学反技术,以滤波反投影算法为代表,美国弗吉尼亚大学的 McDaniel 小组^[4-5]主要采用该方法实现了超燃直联台燃烧室出口平面温度和 H₂O 的浓度二维分布测量;第二类是迭代算法,以代数迭代算法(ART)为代表^[6-7],由于 ART 方法可以在不完全投影条件下实现对被测区域的重建,在燃烧流场诊断中被广泛应用;第三类是超光谱法,由弗吉尼亚理工大学的 Ma^[8-9]提出,该方法模拟退火的优化算法,寻找使得目标函数(投影误差)最小的重建结果。

在吸收谱线选择上,第一类和第二类方法中通常使用两条吸收谱线,根据吸收谱线强度的传递函数来得到被测温度值,第三类方法中使用多于 10 条的吸收谱线,但是,由于此过程中需要求解温度的非线性方程,需要花费大量的计算时间,随后作者又在该算法上加以改进以提高计算效率^[10]。

在投影光线布局上,FBP 算法要求投影光线均匀分布在 180°或者 360°范围内,并且需要大量的投影光线保证重建结果的质;ART 算法由 Gordon 等^[11]在 1970 年提出,随后发展起来的有联合代数迭代(SIRT)算法、乘积型代数迭代算法(MART)等。ART 算法简单、灵活,在迭代过程中可以利用已知的先验信息对变量加以限制,提高算法的精度。此外,ART 算法可以在投影数据较少或者不完全投影时,实现重建被测区域目的。Terzija 等^[12]发展了非规则光线分布方式,采用 27 组投影光线重建了丙烷浓度二维分布。Daun 等^[13-14]利用遗传算法进一步优化了非规则光线布局,并从数学角度分析了重建误差与系数矩阵的关系。Cai 等^[15]提出了权值矩阵方法在流场信息未知的情况下用于光线分布优化。这种光线布局

方案可以大大减少投影光线数目,超光谱方法使用正交光线布局,投影装置简单。北京航空航天大学徐立军等^[16]设计了一套用于包含数据采集和快速处理的电子包,用于燃烧流场的实时测量研究。为了提高二维重建测量质量,中国科学院安徽光学精密与机械研究所夏晖晖等^[17]提出两步迭代算法,即浓度计算时再次带入 ART 迭代方程求解。浙江大学王飞等^[11-18]提出在温度已知条件下引入多条吸收谱线用于增加重建方程数目来提高浓度重建质量。

文中提出采用 4 条 H₂O 吸收谱线,利用每条吸收谱线对温度的敏感度不同,采取优化组合的方式得到每组吸收谱线对最佳的重建温度区域,采用平行光束投影方式利用 ART 重建温度的二维分布。

1 基本原理

单一频率的光穿过均匀流场时,根据 Beer-Lambert 定律,激光的衰减程度可以表示为:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha_v) = \exp[-PS(T)\phi(v)\chi L] \quad (1)$$

式中: I_0 为入射激光强度; I 为穿过被测流场后激光强度; α 为光谱吸收吸收率信号; P 为气体总压(atm, 1 atm=1.013×10⁵ Pa); χ 为待测气体组分浓度; $S(T)$ (cm⁻²/atm)为所用谱线 ν 在温度 T [K]时的谱线强度; L (cm)为激光束穿过被测流场的长度; $\phi(\nu)$ 为线型函数,代表了光谱吸收系数随频率的相对变化,且有:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_\nu d\nu = 1 \quad (2)$$

积分吸收面积可以表示为:

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_\nu d\nu = P\chi S(T)L \quad (3)$$

吸收谱线强度随温度的变化可以表示为:

$$S_\nu(T) = S_\nu(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T_0}{T} \exp\left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_0}\right)\right]^{-1} \quad (4)$$

式中: $S(T_0)$ 为在参考温度 $T_0=296$ K 时的谱线强度,其大小可以通过 HITRAN^[19]光谱数据库得到; E'' 为低跃迁能态能量; h 为 Planck 常数; k 为 Boltzmann 常数; c 为光速; $Q(T)$ 为温度 T 时的配分函数值。

在实际流场中,沿着光线传播方向温度分布不均匀,采用 TDLAT 方法进行气体温度分布二维重建时,首先被测区域 $f(x,y)$ 离散为 $N=n \times n$ 的网格,假设

被测气体在每个网格内气体参数温度、组分浓度、压强保持不变,将气体方程改写为:

$$A_{v,i} = \sum_{j=1}^N f_{v,j} L_{ij} = \sum_{j=1}^N [PS(T)X]_{v,j} L_{ij} \quad (5)$$

式中: L_{ij} 表示第 i 条光线穿过第 j 个网格的长度。文中采用代数迭代算法,其迭代算法表达式为:

$$\vec{f}^{(k)} = \vec{f}^{(k-1)} - \beta \frac{(\vec{f}^{(k-1)} \cdot \vec{L}_i - A_i) \vec{L}_i}{\sum_{j=1}^N |L_{ij}|^2} \quad (6)$$

式中: k 为迭代次数; β 为松弛因子。由于重建温度场大于 0,所以在迭代中加入非负性限制,同时,由于被测流场连续,所以采用平滑处理机制来减弱相邻重建区域的突变响应。

2 数值仿真计算模型

2.1 数值仿真模型

温度在 300~1 500 K 的 Gauss 分布,重建区域大小为 500 mm×500 mm 方形区域,将被测区域划分为 30×30 网格,如图 1 所示。

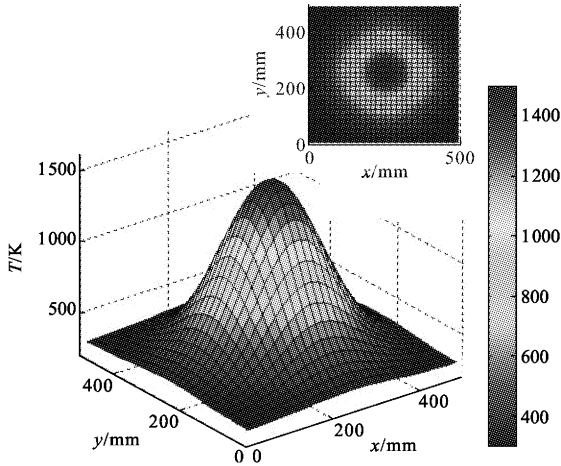


图 1 初始温度分布模型

Fig.1 Original temperature distribution model

光线分布采用平行光束投影,投影角度分布为 0°、45°、90°和 135°,每个投影角度投影光线数目为 30 条,光线分布如图 2 所示。

为了评估重建结果,定义重建误差为:

$$e = \frac{\sum_{s=1}^N |f_s^{cal} - f_s^{orig}|}{\sum_{s=1}^N |f_s^{orig}|} \quad (7)$$

式中: 上标 orig 表示初始模型; cal 表示即时结果; N

表示划分的网格数目。

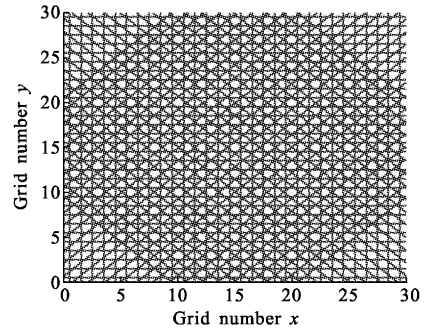


图 2 光线分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of beam arrangement

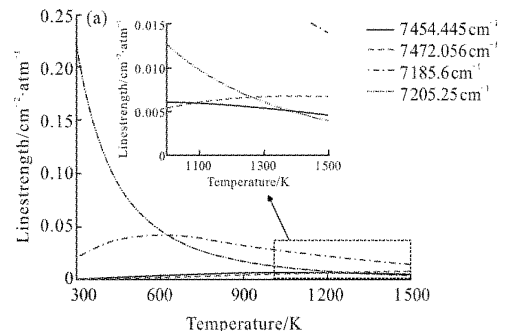
对于均匀流场吸收谱线选择,参考文献[20-21]给出了详细的讨论,但是对于非均匀流场因其温度分布范围广,如何选择吸收谱线对确定温度,目前研究尚少,文中采用四条 H_2O 吸收谱线,其谱线信息如表 1 所示。为保证吸收谱线对在被测区域有较高的温度灵敏度,即吸收谱线对间具有一定的能级差,将四条吸收谱线分为 3 组,即“1+2”,“2+3”,“2+4”。

表 1 文中所选用的吸收谱线

Tab.1 Absorption lines selected in this paper

| No. | ν_0/cm^{-1} | E''/cm^{-1} | $S(296)/\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$ |
|-----|------------------------|----------------------|---|
| 1 | 7 205.25 | 79 | 2.46×10^{-1} |
| 2 | 7 185.597 | 1 045 | 1.88×10^{-2} |
| 3 | 7 454.445 | 1 962.507 | 1.83×10^{-4} |
| 4 | 7 472.056 | 2 952.394 | 5.25×10^{-6} |

谱线强度及谱线强度比值随温度的变化如图 3 所示。7 185.6 cm^{-1} 的谱线强度在温度为 580 K 时达到最大值,在温度大于 640 K 后吸收谱线 7 205.25 cm^{-1}



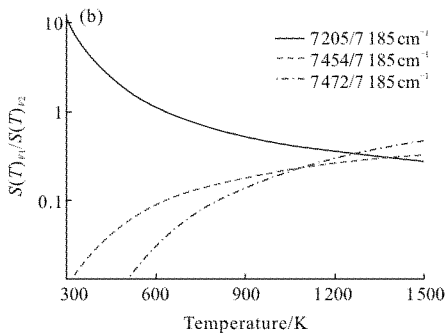


图 3 不同谱线强度(a)和谱线强度比值(b)随温度的变化
Fig.3 Different linestrengths (a) and the ratio of linestrength versus temperature

的谱线强度低于谱线 $7\ 185.6\text{ cm}^{-1}$ 的值。当温度大于 $1\ 090\text{ K}$ 时, 吸收谱线 $7\ 472.056\text{ cm}^{-1}$ 的吸收强度高于 $7\ 454.445\text{ cm}^{-1}$ 。谱线强度的比值在 $300\sim 1\ 500\text{ K}$ 范围内呈单调趋势。

2.2 吸收谱线组合优化方法

图 4 给出了吸收谱线组合优化方法流程示意图。首先, 根据投影值(实验中为测量值)采用代数迭代算法分别重建得到不同吸收谱线的吸收强度; 然后, 根据不同吸收对对温度的敏感度不同, 对于不同的温度区域选择不同的吸收线对进行组合; 利用组合后的吸收强度重建温度二维分布。

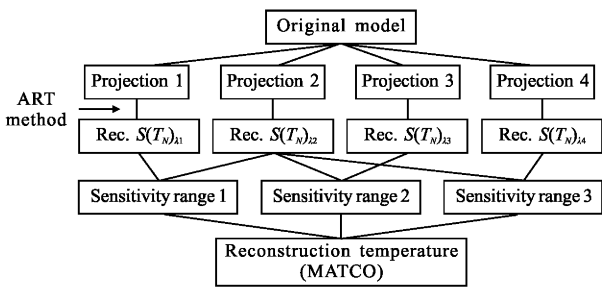


图 4 多条吸收谱线组合优化方法流程图
Fig.4 Schematic diagram of multiple absorption lines combinatorial optimization method

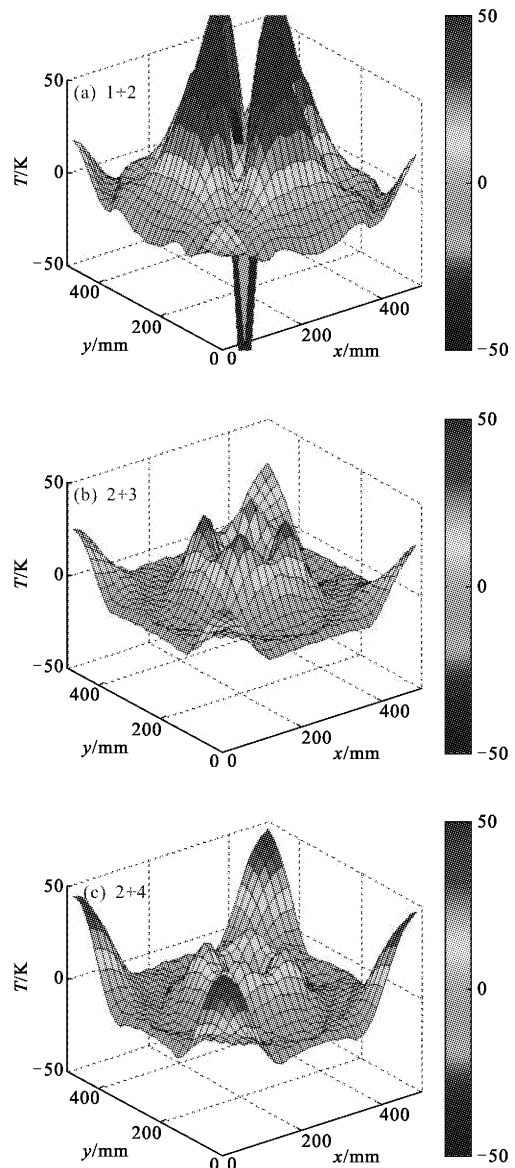
文中采用的三组吸收谱线对, 根据图 3(a)可知, 吸收谱线 $7\ 205.25\text{ cm}^{-1}$ 在低温区域吸收强度较高, 谱线对“1+2”对低温区域比较敏感, 谱线对“2+4”对高温区域比较敏感, 将重建区域分为三个区域, 即 $300\sim 500$ 、 $500\sim 1\ 000$ 、 $1\ 000\sim 1\ 500\text{ K}$, 分别采用谱线对“1+2”、“2+3”和“3+4”进行重建。

3 计算结果与讨论

3.1 吸收谱线对选择对重建结果的影响

图 5 给出采用不同吸收谱线对后的温度场重建结果与原始温度分布的差值, 从图中可知, 吸收谱线对“1+2”在高温区重建偏差较大, 主要原因是吸收谱线 $7\ 205.25\text{ cm}^{-1}$ 的谱线强度随着温度升高而下降, 特别当吸收较弱时, 重建结果较初始值存在偏差时, 两条吸收强度的比值的偏差增大, 从而导致重建温度结果偏大。

此外, 从图 5(a)~(c)中可知, 重建区域的边角区域重建温度场与原始温度偏差较大, 这是由于光线在四个顶点区域分布较为稀疏, 影响了重建图像的质量^[22]。



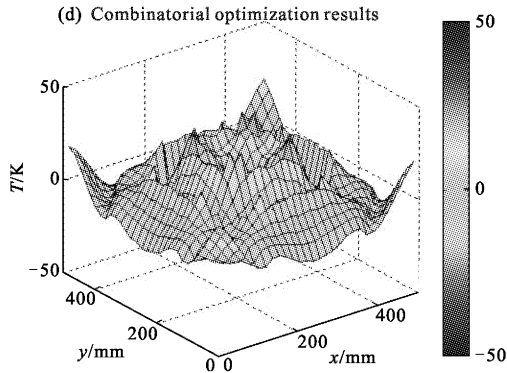


图 5 温度场重建结果与原始温度分布的比较
Fig.5 Difference between the reconstructed and original temperature distribution

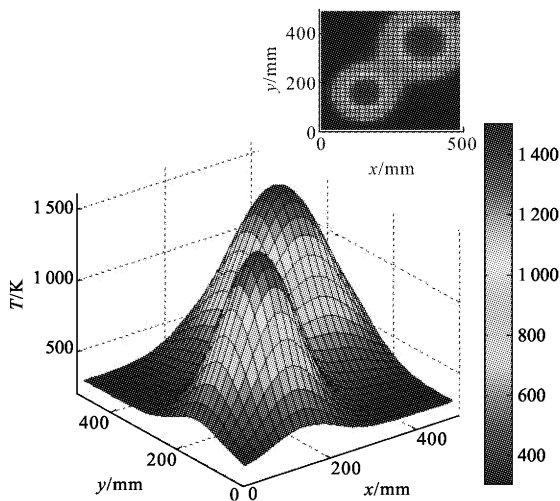
3.2 非对称分布结果分析

设置温度分布为双 Gauss 函数分布，将温度分布方程写为：

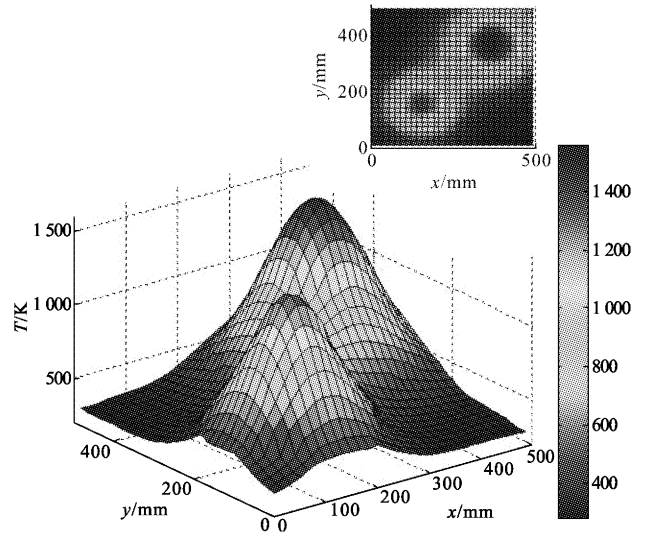
$$T_0 = a_1 \exp \left[-\frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}{\sigma_1} \right] + a_2 \exp \left[-\frac{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2}{\sigma_2} \right] + a_3 \quad (7)$$

式中： σ_1 和 σ_2 决定了 Gauss 分布的陡峭程度，取值为 4~8 的随机数； x_1, y_1, x_2 和 y_2 影响了 Gauss 分布的中心，为了保证高温区能够完全分布在被测范围内，取为 -7~7 的随机数；通过调节 a_1, a_2 和 a_3 三个系数，确保温度分布范围在 300~1 500 K。

图 6 给出 $x_1, y_1, x_2, y_2, \sigma_1$ 和 σ_2 分别取值为 6.5、6.5、-6、-6、7 和 5 时的原始温度分布及组合优化后



(a) 原始温度分布
(a) Original temperature distribution



(b) 重建温度分布结果

(b) Reconstructed temperature distribution

图 6 典型取值条件下原始温度分布及组合优化后的重建结果
Fig.6 Original and reconstructed temperature distribution using combinational optimization method under typical condition

的重建结果，从图中可知，重建温度分布可以较好的反映原始温度分布。表 2 给出了图 1(单 Gauss)、图 6 以及 100 组随机分布的重建误差结果。从表中可知，采用吸收谱线组合优化方法后得到的重建误差明显小于单独采用单一谱线对得到的结果，组合优化方法可以有效提高重建图像质量。

表 2 不同吸收谱线组合温度场重建结果比较

Tab.2 Comparison of temperature reconstruction results between different absorption line pairs

| Line pair | Symmetrical Gauss | Asymmetrical distribution | Random distribution | |
|---------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|---------|
| | | | Mean | SD |
| 7 185.6+7 205.25 | 0.032 7 | 0.134 2 | 0.095 2 | 0.036 3 |
| 7 185.6+7 454.445 | 0.014 7 | 0.068 5 | 0.050 5 | 0.018 4 |
| 7 185.6+7 472.056 | 0.016 8 | 0.060 9 | 0.043 6 | 0.015 7 |
| Combination results | 0.013 3 | 0.047 9 | 0.039 6 | 0.015 1 |

3.3 实际流场应用

在实际流场中，重建结果是谱线强度和浓度的乘积，但对于同一流场，在相同的离散网格内其组分浓度值是固定的，而不同吸收谱线对中吸收强度的比值随温度为单调函数，可以通过判断重建结果的

比值来划分优化谱线组合的范围。

设初始流场温度分布在 300~1 500 K, 浓度分布在 0.02~0.08, 如图 7 所示。

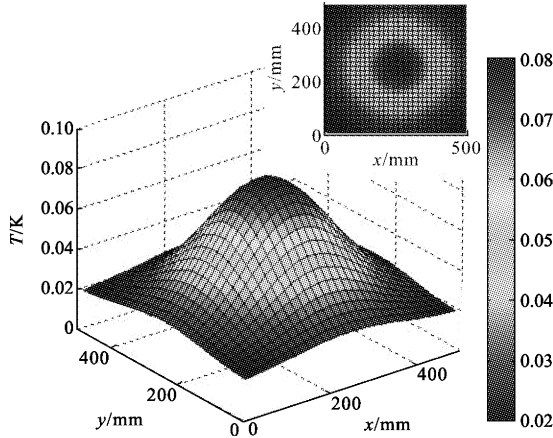


图 7 0.02~0.08 的浓度分布

Fig.7 Concentration distribution of 0.02~0.08

组合温度区域划分范围按照 2.2 节的标准, 根据公式(4), 此时每条吸收谱线得到结果为 $[S(T)\chi]_v$, 由于吸收谱线 7 185 和 7 205 在 500 K 和 1 000 K 时的谱线强度的高于其他两条谱线, 以重建结果中此两条谱线重建结果的比值作为标准, 对重建区域进行划分, 得到优化后组合重建结果。温度场和浓度场重建结果如图 8 所示。温度场和浓度场的重建误差分别为 0.044 3 和 0.047 6。

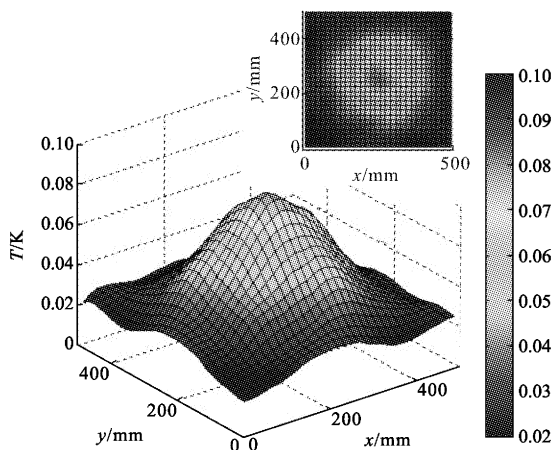


图 8 浓度场重建结果

Fig.8 Results of concentration field reconstruction

4 结论

文中提出了一种基于多条吸收谱线的燃烧流场

二维重建方法, 利用不同吸收谱线对温度敏感区域不同的特点, 将被测区域进行划分, 采用不同的吸收谱线对进行组合得到温度场二维重建结果。研究表明, 采用文中提出的吸收谱线组合优化方法, 可以有效地提高被测流场重建质量。该方法中吸收谱线对的选择和作为基准的谱线对的选择会对重建结果造成影响, 因此文中提出的方法较适用于可以预估流场温度重建范围的情况。

参考文献:

- [1] Cai W, Kaminski C F. Tomographic absorption spectroscopy for the study of gas dynamics and reactive flows [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, 59: 1-31.
- [2] Goldenstein C S, Spearrin R M, Jeffries J B, et al. Infrared laser-absorption sensing for combustion gases [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, 60: 132-176.
- [3] Bolshov M A, Kuritsyn Y U A, Romanovskii Y U V. Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2015, 106: 45-66.
- [4] Busa K M, Rice B E, Fulton J A, et al. Scramjet combustion efficiency measurement via tomographic absorption spectroscopy and particle image velocimetry [J]. *AIAA Journal*, 2016, 53(4): 1-9.
- [5] Bryner E, Busa K, Mcdaniel J C, et al. Spatially resolved temperature and water vapor concentration distributions in a flat flame burner by tunable diode laser absorption tomography [C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2011: 1291.
- [6] Liu C, Xu L, Chen J, et al. Development of a fan-beam TDLAS-based tomographic sensor for rapid imaging of temperature and gas concentration [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22494-22511.
- [7] Li Ning, Weng Chunsheng. Modified adaptive algebraic iterative algorithm for deflection tomography and its application to density flow field [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(6): 061201
- [8] Ma L, Cai W W, Caswell A W, et al. Tomographic imaging in practical combustion devices based on hyperspectral absorption spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8602-8613.
- [9] Ma L, Li X, Sanders S T, et al. 50-kHz-rate 2D imaging

- of temperature and H₂O concentration at the exhaust plane of a J85 engine using hyperspectral tomography [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 1152–1162.
- [10] Cai W, Ma L. Hyperspectral tomography based on proper orthogonal decomposition as motivated by imaging diagnostics of unsteady reactive flows [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(4): 601–610.
- [11] Gordon R, Bender R, Herman G T. Algebraic reconstruction techniques for 3 dimensional electron microscopy and x-ray photograph[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1970, 29(3): 471–481.
- [12] Terzija N, Davidson J L, Garcia–Stewart C A, et al. Image optimization for chemical species tomography with an irregular and sparse beam array [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(9): 094007.
- [13] Daun K J. Infrared species limited data tomography through Tikhonov reconstruction [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2010, 111(1): 105–115.
- [14] Twynstra M G, Daun K J. Laser-absorption tomography beam arrangement optimization using resolution matrices [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 7059–7068.
- [15] Yu T, Tian B, Cai W. Development of a beam optimization method for absorption-based tomography [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 5982–5999.
- [16] Xu L J, Liu C, Jing W Y, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy-based tomography system for on-line monitoring of two-dimensional distributions of temperature and H₂O mole fraction [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(1): 013101.
- [17] Xia H, Kan R, Xu Z, et al. Two-step tomographic reconstructions of temperature and species concentration in a flame based on laser absorption measurements with a rotation platform [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 10–18.
- [18] Wang F, Wu Q, Huang Q, et al. Simultaneous measurement of 2 –dimensional H₂O concentration and temperature distribution in premixed methane air flame using TDLAS – based tomography technology [J]. *Optics Communications*, 2015, 346: 53–63.
- [19] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2017, 203: 3–69.
- [20] Zhou X, Liu X, Jeffries J B, et al. Selection of NIR H₂O absorption transitions for in-cylinder measurement of temperature in IC engines [J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(2): 2437–2445.
- [21] Liu X, Jefferies J B, Hanson R K, et al. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature [J]. *Applied Physics B*, 2006, 82 (3): 469–478.
- [22] Song J, Hong Y, Wang G, et al. Algebraic tomographic reconstruction of two-dimensional gas temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2013, 112(4): 529–537.