

引用格式: ZHOU Wang-zheng, WANG Zhen-zhen, YAN Jun-jie, *et al.* Measurement of 2D Temperature Distribution of Flame Using CT-TDLAS[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(12): 1214001

周王峥, 王珍珍, 严俊杰, 等. CT-TDLAS 测量燃烧火焰二维温度分布[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 1214001

CT-TDLAS 测量燃烧火焰二维温度分布

周王峥¹, 王珍珍^{1,2}, 严俊杰¹, 张丹¹, 辻本一真², 神本崇博², 出口祥啓^{1,2}

(1 西安交通大学 多相流国家重点实验室, 西安 710049)

(2 德岛大学 大学院社会产业理工学研究部, 日本 德岛 770-8506)

摘 要: 结合可调谐半导体激光吸收光谱技术与计算机断层扫描技术, 通过获得与实验值最适应的拟合光谱, 重构本生灯燃烧火焰二维温度分布. 以零均值归一化互相关和误差平方和作为指标, 分析了 32 路测量组件的二维重构精度. 结果表明, 零均值归一化互相关达到 0.994, 误差平方和达到 0.000 86. 采用 32 路测量系统实现了本生灯火焰二维温度的测量, 并与热电偶测量结果进行对比. 结果表明, 两者之间的温度分布趋势相同, 可调谐半导体激光吸收光谱测量具有更高的精度和分辨率, 验证了可调谐半导体激光吸收光谱技术结合计算机断层扫描技术在测量二维火焰温度分布的可行性与精确性.

关键词: 光谱学; 可调谐半导体激光吸收光谱; 计算机断层扫描; 燃烧火焰; 二维温度分布

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1214001

Measurement of 2D Temperature Distribution of Flame Using CT-TDLAS

ZHOU Wang-zheng¹, WANG Zhen-zhen^{1,2}, YAN Jun-jie¹, ZHANG dan¹,

TSUJIMOTO Kazuma², KAMIMOTO Takahiro², DEGUCHI Yoshihiro^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2 Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, Tokushima, 770-8506, Japan)

Abstract: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) technology and Computed Tomography (CT) technology were combined to reconstruct two-dimensional temperature distribution of bunsen burner flame through getting the most fitting spectrum. Zeromean Normalization Cross Correlation (ZNCC) value and Sum of Squared Difference (SSD) value were used as target to analyze accuracy of 32-path reconstruct temperature distribution. And ZNCC value comes to 0.994, SSD value comes to 0.000 86. 32-path CT-TDLAS system was designed and applied to measure the two-dimensional temperature distribution of Bunsen burner flame, and compared with the results of thermocouple. The results show that the temperature distribution trends between thermocouple and TDLAS are same while CT-TDLAS has higher precision and resolution. The feasibility and accuracy of reconstruction using tunable diode laser absorption spectroscopy technology and computed tomography technology is demonstrated.

Key words: Spectroscopy; Tunable diode laser absorption spectroscopy; Computed tomography; Combustion flame; Two-dimensional temperature distribution

OCIS Codes: 140.2020; 300.6260; 300.6360; 100.2960; 100.3008

基金项目: 国家重点研究发展计划 (No. 2018 YFBD604303)

第一作者: 周王峥 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为可调谐半导体激光吸收光谱. Email: wangzheng_zhou95@163.com

导师 (通讯作者): 王珍珍 (1987—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光测试技术及电厂热工控制. Email: zhenzhen-wang@xjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-06-04; 录用日期: 2019-09-10

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

燃烧是最为常见的化学反应现象之一,在发电、冶金、化工等实际工业生产过程中应用广泛.为了提高燃烧效率,减少污染物的排放,对燃烧场进行燃烧诊断成为工业生产中必不可少的环节.燃烧过程中的温度和组分测量是燃烧诊断的基本参数.以电站锅炉为例,锅炉内部燃烧温度的变化直接影响了锅炉的运行效率、排放废气的组分浓度.传统的温度测量方法多为接触式测量,主要利用以热电偶或热电阻原理制成的探针等仪器.但是该方法只能实现指定点的温度信息采集探测,获得燃烧流场内的温度分布仍具有非常大的局限性.

随着激光器的不断发展,激光光谱技术广泛应用于燃烧领域,并成为燃烧诊断的重要手段之一.激光与燃烧场中的粒子相互作用,产生散射、荧光等光谱信号,通过分析这些携带有燃烧场温度、组分浓度等信息的光谱信号,可以实现利用激光光谱技术诊断燃烧流场的目的.同时,激光光谱技术的快速非接触式测量优势,能够有效地解决传统测量手段响应速度慢、操作不便和测量不精确等问题.目前,激光诱导荧光技术(Laser Induced Fluorescence, LIF)^[1],激光诱导击穿光谱技术(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)^[2],相干反斯托克斯拉曼光谱(Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy, CARS)^[3],可调谐二极管激光吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)等已经用于燃烧流场中温度和组分浓度的测量.

目前 TDLAS 技术测量温度和组分的研究和应用最为广泛^[4-5].比较通过测量区域前后的激光强度,可以计算获得测量区域的温度、组分浓度.同时因其具有高灵敏性、高抗噪性,高重复频率,以及容易与通信光纤组件兼容等优点,TDLAS 技术在开发监测传感系统中具有非常大的优势^[6].TDLAS 技术可以和计算机断层成像(Computed Tomography, CT)技术相结合,利用投影法或迭代法重建,可以实现测量区域二维(2D)温度分布和组分浓度分布测量.投影法受限于需要极多的投影光路,虽然有学者对投影法进行改进,使用有限域直接反演(Finite Domain Direct Inversion, FDDI)方法和改进的卷积反投影提高浓度和温度的重建质量,但是两种方法仍要求非常多的光路布置^[7-8],在工业应用中依旧具有一定局限性.迭代重建方法,如联合代数重建(Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique, SART)算法^[9]、退火算法^[10]等,受限于重建时长,因此,有学者提出了基于模型的迭代重建(Model Based Iterative Reconstruction, MBIR),以减少迭代重建时长^[11].同时,由于迭代法格点数的限制,在迭代公式中还需要增加平滑因子项以减少相邻格点间数值的突变,提高重构结果精度^[12].目前 CT-TDLAS 已经在燃烧器火焰以及发动机诊断中^[13-14]实现应用.

为了提高 CT-TDLAS 测量 2D 温度分布的精度,本文使用改进的 CT 重构方法,采用最适应光谱拟合的方式重建温度和浓度二维分布.设计搭建了 32 路 CT-TDLAS 测量系统,测量本生灯火焰的 2D 温度分布.对比分析了 16 路和 32 路 CT 结构的二维重构精度,采用 32 路 CT-TDLAS 系统测量了本生灯火焰 2D 温度分布.并与热电偶测量结果进行对比,验证了 CT-TDLAS 技术测量二维火焰温度的可行性与精确性.

1 实验原理

1.1 Beer-Lambert 定律

TDLAS 技术测量的理论基础是 Beer Lambert 定律,即当激光频率与被测气体吸收组分的频率相同时,激光的能量会被吸收^[14-15],其表达式为

$$\frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda,0}} = \exp\{-A_{\lambda}\} = \exp\left\{-\sum_i [n_i L \sum_j S_{i,j}(T) G_{v_i,j}(n_i, T, P)]\right\} \quad (1)$$

式中, $I_{\lambda,0}$ 为无气体吸收时的波长为 λ 的光强度; I_{λ} 为被测量区域内气体吸收后的波长为 λ 的激光强度; A_{λ} 为波长为 λ 的光谱积分吸收面积; n_i 为被测气体 i 的组分浓度; $S_{i,j}(T)$ 为气体 i 中, j 吸收线的吸收线强,与温度相关; $G_{v_i,j}$ 为线型函数 $G_{v_i,j}(n_i, T, P)$,包含了温度 T 和压力 P 的影响; L 为激光在待测气体中的吸收路径长度.根据谱线强度与温度的关系^[16],对同一待测气体,可以通过沿同一光路的两条不同吸收谱线强度比值 R ,计算得到流场的温度为

$$T = \frac{\frac{hc}{K}(E''_2 - E''_1)}{\ln(R) + \ln\left[\frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)}\right] + \frac{hc}{K} \frac{(E''_2 - E''_1)}{T_0}} \quad (2)$$

式中, $S(T_0)$ 是在参考温度 T_0 下的吸收线强, 其数值可以在 HITRAN 数据库中查询得到^[17], E'' 为低跃迁能态能量, h 为普朗克常量, K 为玻尔兹曼常数, c 为光速。

采用该计算方法存在测温区间受限以及测量精度等问题, 因此, 本研究以 HITRAN 数据库为参考通过实验建立光谱数据库, 采用光谱拟合的方法同时计算温度和浓度^[18]。

1.2 CT 算法原理

根据 Beer Lambert 定律, 可知波长 λ 的激光在路径上的积分吸收面积为

$$A_\lambda = \ln(-I_\lambda/I_{\lambda,0}) = \sum_i [n_i L \sum_j S_{i,j}(T) G_{v_i,j}(n_i, T, P)] \quad (3)$$

因此在通过测量区域的光路 p 上的激光吸收满足

$$A_\lambda = \sum_q n_{p,q} L_{p,q} \alpha_{\lambda,q} = \sum_q n_{p,q} L_{p,q} S_\lambda(T_{p,q}) G_{v\lambda}(n_{p,q}, T_{p,q}, P) \quad (4)$$

式中, $L_{p,q}$ 表示光路 p 上格点 q 的路径长度; $\alpha_{\lambda,q}$ 表示在一个格点 q 上, 波长为 λ 的光谱吸收系数, 与温度、气体浓度及吸收谱线相关。

为了提高 CT-TDLAS 重构精度和适应性, 通过一种带有适应系数 $a_{k,l}$ 、 $b_{k,l}$ 的集合进行拟合多项式来代替测量区域内的温度和浓度分布。由于测量区域内温度和浓度分布是连续的, 因此可以对其分布函数进行泰勒展开, 合并同类项后如式(5)和式(6)所示。

$$T(x, y) = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^k b_{k-l,l} x^{k-l} y^l = F_T(b_{k,l}) \quad (5)$$

$$n(x, y) = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^k a_{k-l,l} x^{k-l} y^l = F_n(a_{k,l}) \quad (6)$$

针对激光测量路径 p , 其路径上的所有点 $(x_{p,1}, y_{p,1}), (x_{p,2}, y_{p,2}), \dots, (x_{p,q}, y_{p,q})$ 分别代入到式(5)和式(6)中得到

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{p,1} & y_{p,1} & x_{p,1}^2 & x_{p,1}y_{p,1} & y_{p,1}^2 & \cdots & x_{p,1}^m & \cdots & y_{p,1}^m \\ 1 & x_{p,2} & y_{p,2} & x_{p,2}^2 & x_{p,2}y_{p,2} & y_{p,2}^2 & \cdots & x_{p,2}^m & \cdots & y_{p,2}^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{p,q} & y_{p,q} & x_{p,q}^2 & x_{p,q}y_{p,q} & y_{p,q}^2 & \cdots & x_{p,q}^m & \cdots & y_{p,q}^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{0,1} \\ b_{1,0} \\ \vdots \\ b_{0,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{p,1} \\ T_{p,2} \\ \vdots \\ T_{p,q} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{p,1} & y_{p,1} & x_{p,1}^2 & x_{p,1}y_{p,1} & y_{p,1}^2 & \cdots & x_{p,1}^m & \cdots & y_{p,1}^m \\ 1 & x_{p,2} & y_{p,2} & x_{p,2}^2 & x_{p,2}y_{p,2} & y_{p,2}^2 & \cdots & x_{p,2}^m & \cdots & y_{p,2}^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{p,q} & y_{p,q} & x_{p,q}^2 & x_{p,q}y_{p,q} & y_{p,q}^2 & \cdots & x_{p,q}^m & \cdots & y_{p,q}^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{0,1} \\ a_{1,0} \\ \vdots \\ a_{0,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{p,1} \\ n_{p,2} \\ \vdots \\ n_{p,q} \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(7)和式(8)中, 所有点的温度和浓度值带入式(4), 此时光路 p 在波长 λ 的光谱中, 积分吸收面积 $A_{\lambda,p}$ 是仅和适应系数 $a_{k,l}$ 、 $b_{k,l}$ 的集合相关的函数, 如式(9)所示。重构的理论结果与测量实验结果之间的误差为仅和适应系数 $a_{k,l}$ 、 $b_{k,l}$ 的集合相关的非线性函数, 如式(10)所示。

$$(A_{\lambda,p})_{\text{theory}} = \sum_q L_{p,q} F_n(a_{k,l}) S_\lambda[F_T(b_{k,l})] G_{v\lambda}[F_n(a_{k,l}), F_T(b_{k,l}), P] \quad (9)$$

$$e = \sum_{\lambda,p} [(A_{\lambda,p})_{\text{theory}} - (A_{\lambda,p})_{\text{experiment}}]^2 \quad (10)$$

研究中, 采用 32 路光路重构二维温度分布 ($p=32$)。重构过程中, 每条光路被均分为 40 小段 ($q=40$)。用每一小段上的中心处坐标带入式(5)和式(6)计算该段的温度和浓度。其中, $m=12$, 未知数 $a_{k,l}$ 为 91 个, $b_{k,l}$ 为 91 个, 共有 182 个未知数。根据以上分析及式(9), 将光谱图的波长区间均分为 300 份, 计算每条光路上的积分吸收面积理论值。因此式(10)中误差项总计为 9 600 个。

当式(10)理论计算值与实际实验值误差最小, 即理论计算的拟合光谱图与实验测量得到的光谱图最适应时, 可以认为此时的理论值中使用的适应系数 $a_{k,l}$ 、 $b_{k,l}$ 的集合即为所需的结果。将求解的适应系数 $a_{k,l}$ 、

$b_{k,l}$ 的集合代入式(5)和式(6)中即可同时重构测量区域内的温度和浓度分布.求解式(10),含有 182 个未知数的非线性函数最小值问题,可以采用非线性最小二乘法,如下降 Simplex 算法或者 Levenberg-Marquardt 算法,直接求解与实验测量光谱最贴近的理论光谱.CT 算法的具体流程如图 1.

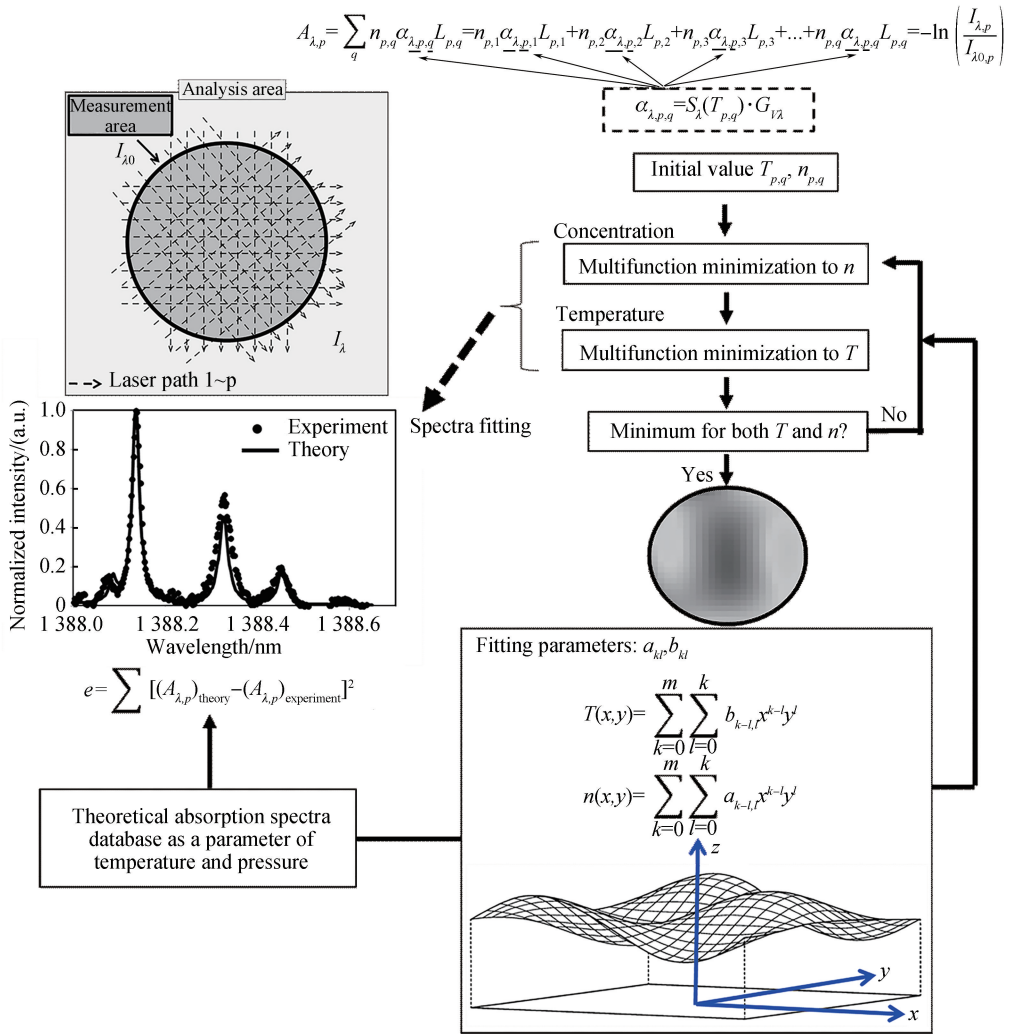


图 1 CT 算法流程图
Fig.1 Schematic diagram of CT algorithm

2 实验系统

甲烷燃烧产物为二氧化碳和水蒸气,二氧化碳和水蒸气在近红外 1~3 μm 波段处有大量吸收,根据此波段处商用半导体二极管激光器的性能与 HITRAN 数据库的谱线信息,选用 1 343 nm 和 1 388 nm 的 DFB 激光器作为激光源,使用水蒸气作为检测气体,测量 1 343 nm 和 1 388 nm 波段处的水蒸气吸收光谱.本文搭建了 CT-TDLAS 测量本生灯 2D 火焰温度实验系统,如图 2 所示.实验系统主要由 CT-TDLAS 系统和本生灯燃烧系统两部分组成.

CT-TDLAS 系统包括半导体激光器(NTT, NLK1E5GAAA, 中心波长为 1 388nm; NLK1B5EAAA, 中心波长为 1 343 nm)、光束耦合器(SBC-3655-2-50-2222-LLLL-1)、激光控制器(NTT, WL-100-D-B-DFB-A)、计算机、单模跳线(P-55-R-22-C-F-2)、光纤分束器(PLC-367020-0132-2)、光纤准直器(C-20-S-1-C-200-2-L-2-M)、CT 测量组件(Smart Laser & Plasma Systems Co., CT-TDLAS-32LP-HTPC-R60)、光纤探测器(PD-16-1)、放大器(Smart Laser & Plasma Systems Co., A-34ch-10db-AC150DC2-IO1M50-SMAJ)和数据存储器(HIOKI, 8826).本生灯燃烧系统包含氮气、空气、甲烷、空气压缩机、空气加湿器、流量计和本生灯燃烧器等.实验条件为在 1 atm, 25 $^{\circ}\text{C}$ 环境下, 3 L/min 的甲烷气体与 8.5 L/min 的空气混合后通入本生灯中进

行燃烧,本生灯周围通入 50 L/min 的压缩空气,实现本生灯火焰稳定燃烧.CT 测量组件内通入 12 L/min 氮气排出空气,减小实验误差.

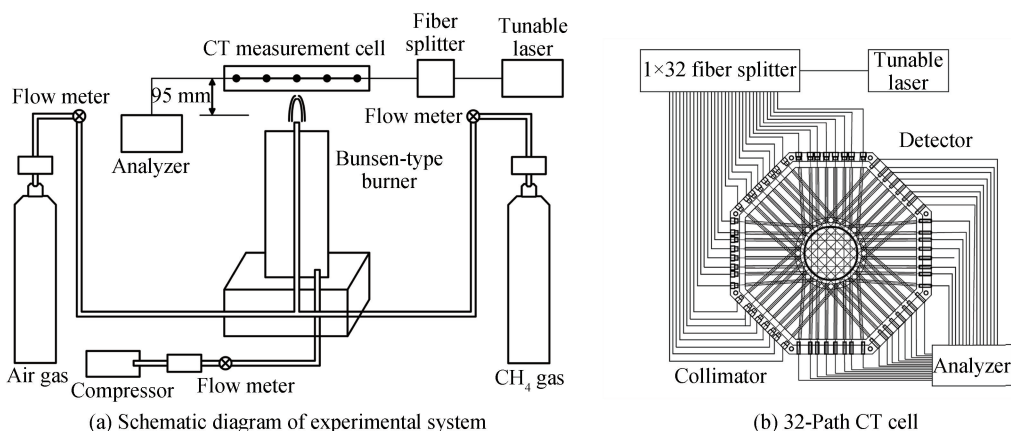


图 2 CT-TDLAS 测量本生灯 2D 火焰温度分布实验系统

Fig.2 CT-TDLAS system for 2D temperature measurement of Bunsen burner flame

实验过程为两束由 DFB 激光器发出的激光(1 343 nm 和 1 388 nm)经过激光控制器内的函数发生器(频率 10 kHz,扫描范围 0.6 nm)调制后,经过光束耦合器合成一束激光.耦合后的激光由光纤进入 1×32 光纤分束器分成 32 路激光.32 路激光由准直器分别与测量组件的 32 个不同入口连接,激光通过准直器进入测量区域,穿过待测区域的激光由对应的探测器接收并转换为电信号,经放大器放大后存储于数据存储器内(读取频率为 2 kHz).测量组件位于本生灯喷嘴上方 10 cm 高度处,该高度位于火焰外焰上方,测量该截面温度分布.在相同测温截面,也采用热电偶测量火焰温度.热电偶采用 B 型热电偶(BM 100-100-110),该热电偶测点探头处直径为 0.1 mm,热电偶保护管直径为 3 mm,热电偶保护管后的连接线直径为 4 mm,实验采用的位移台最小移动距离为 0.1 mm.在热电偶实际测温的过程中,由于热辐射、实验装置和热电偶布置对燃烧流场影响等原因,4 cm×4 cm 的测量区域内最多布置 121 个热电偶.因此本研究在热电偶测温实验中,使用 XYZ 位移台移动热电偶,每隔 4 mm 进行一次温度测量.

3 实验结果与讨论

水蒸气的吸收谱线随温度发生变化.图 3 为水蒸气浓度为 14.2%,常压条件下,温度在 373~973 K 水蒸气吸收光谱图.图中有三个吸收峰,分别位于 1 388.135 nm (#1),1 388.326 nm (#2)和 1 388.429 nm (#3).其中以 1 388.135 nm 波长处的吸收最为明显,这是因为在该波段处,水蒸气的吸收效果好,吸收能量较多.随着温度的升高,吸收强度先增加后减小.根据理想气体状态方程,随着温度的升高,总分子数密度下降.根据玻尔兹曼分布律,温度不同,分子在不同能级的分布不同.这两个原因共同作用导致吸收强度随温度升高先增加后减小.

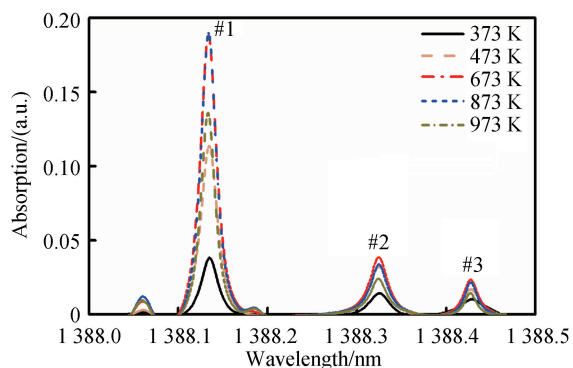


图 3 不同温度下水蒸气吸收谱线

Fig.3 H₂O absorption at different temperature

为了获得吸收强度随温度变化的单值函数关系,高温条件下同时采用 1 343 nm 处的吸收谱线.这是因为 1 343 nm 波长段,在温度较低时水蒸气对激光能量吸收较弱,在高温条件下,会对激光能量产生明显的吸收.并且在测量所需的高温温度区间内,1 343 nm 的吸收强度随温度是单值增加的.在 CT 重构寻找最适应光谱和计算误差的过程中,需要该波长的光谱吸收信息作为判断测量路径上的温度是处于高温区还是低温区的依据.图 4 为高温 1 500 K 条件下的水蒸气吸收光谱图^[17].在此时 1 343 nm 波长出现了一个明显的吸收峰,位于 1 343.298 nm(#4)处.这是因为水蒸气吸收谱线 1 343 nm 在高温条件下会发生明显的吸收现象.

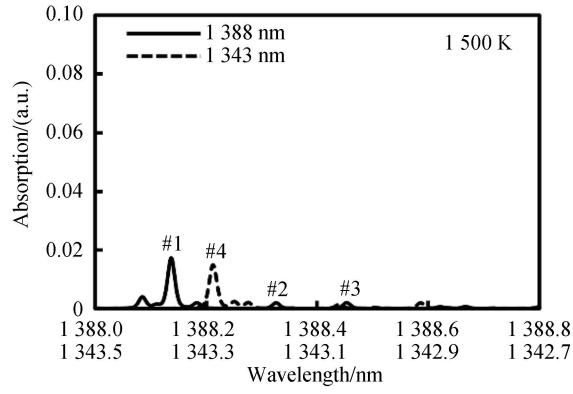


图4 高温 1 500 K 条件下水蒸气吸收谱线

Fig.4 H₂O absorption at high temperature of 1 500 K

3.1 CT 重构精度分析

对于 CT 重构结果的精度分析,可以采用图像处理中使用的误差平方和(Sum of Squared Difference, SSD)^[19]和零均值归一化互相关(Zeromean Normalization Cross Correlation, ZNCC)^[20].SSD 是比较两幅图像中所有像素点灰度误差和的大小.在本文的研究中,为了便于直观地比较误差大小,将 SSD 值的计算修改为

$$SSD = \sqrt{\frac{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} \{(T_{x,y})_{\text{original}} - (T_{x,y})_{\text{CT-TDLAS}}\}^2}{XY}} \bigg/ T_R \quad (11)$$

式中, X, Y 为重构图像的横纵坐标方向像素格点数, T_R 为最高温度.修改后的 SSD 值为一个 0~1 的无量纲数,该数值越接近 0,说明 CT 重构结果和原始结果之间的误差越小,反之则越大.

在处理像素点灰度的过程中,像素的信息会有一部分失真,ZNCC 值可以消除在两幅相似图像对比过程中,由于像素点转化成灰度信息失真引起的灰度突变影响.因此,两图之间的 ZNCC 值越接近于 1,表示两者之间有着越高的相似性.在本文研究中,ZNCC 值越接近于 1,说明两者之间的燃烧模式越相近.ZNCC 值的计算公式为

$$ZNCC = \frac{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} [(T_{x,y} - \bar{T})_{\text{original}} \times (T_{x,y} - \bar{T})_{\text{CT-TDLAS}}]}{\sqrt{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} (T_{x,y} - \bar{T})_{\text{original}}^2 \times \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} (T_{x,y} - \bar{T})_{\text{CT-TDLAS}}^2}} \quad (12)$$

$$\bar{T} = \frac{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} T_{x,y}}{XY} \quad (13)$$

给定某一假定 2D 温度分布,分别使用 16 路^[14-15]和 32 路光路重建该 2D 温度分布.本文假定的 2D 温度分布为中心对称的柯西-洛伦兹分布,如式(14).

$$T = \frac{1900 \times 8.75^2}{8.75^2 + x^2 + y^2} + 300 \quad (14)$$

其中最高温度小于 2 200 K,半幅度半宽值(Half Width at Half-Maximum, HWHM)为 17.5 mm.

16 路测量实验采用的是 3 个方向的投影,其中中间方向有 6 条投影,两侧方向各 5 条投影.32 路测量实验如图 2(b)所示,采用 4 个方向的投影,各个方向均有 8 条投影.图 5 分别表示原始温度分布、16 路和 32 路 CT 重构 2D 温度分布.16 路和 32 路均能实现 2D 温度的重构,其中 32 路的重构结果更趋近于原始温度分布.为了定量分析 CT 重构精度,表 1 分别给出了 16 路和 32 路 CT 重构结果的 SSD 和 ZNCC 值.结果表明 32 路的 SSD 值更趋于 0, ZNCC 值更趋于 1,可见 32 路比 16 路光路有着更高的测量精度.

表 1 16 路和 32 路的 SSD 值与 ZNCC 值

Table 1 SSD and ZNCC of 16-path and 32-path CT reconstruction

Number of laser path	SSD	ZNCC
16-path	0.001 03	0.991
32-path	0.000 86	0.994

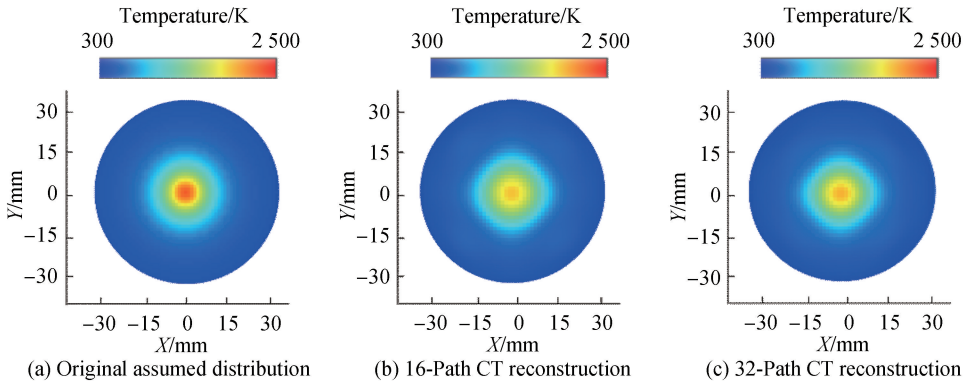


图5 16路和32路CT重构温度分布

Fig.5 CT reconstruction of temperature distribution using 16-path and 32-path configurations

图6所示为 $Y=0$ mm时16路和32路CT重构结果与原始温度分布的对比.结果表明在 $-35\sim-5$ mm和 $5\sim35$ mm的两个范围内,CT重构结果与原始温度非常吻合.在 $-5\sim5$ mm的区域内,16路和32路的重构温度均小于原始的温度,主要是有限光路重构引起的误差.相比之下,32路光路重构温度误差较小,因此在一定条件下增加测量光路可以减小重构误差.

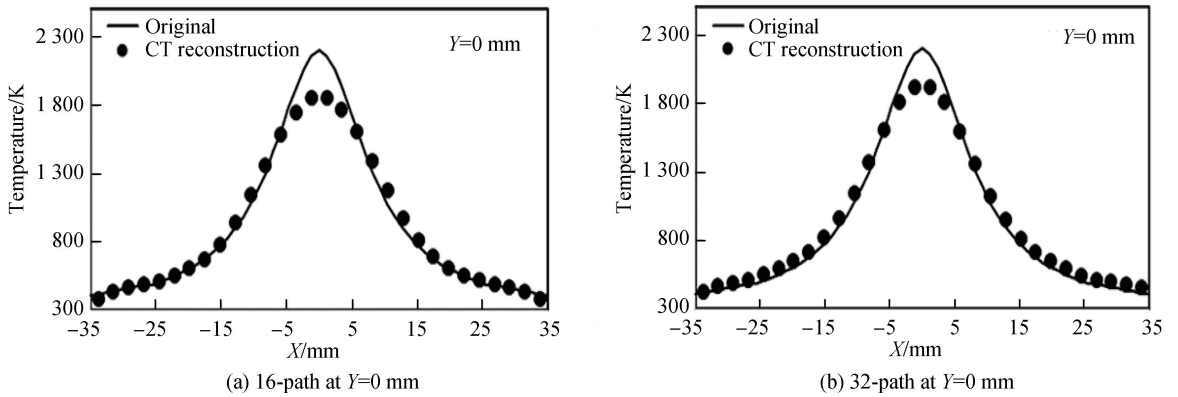

 图6 16路和32路 $Y=0$ mm路径温度分布对比

 Fig.6 Comparison of temperature distribution at $Y=0$ mm using 16-path and 32-path configurations

3.2 CT-TDLAS 二维测温结果

本文使用直接吸收法测量激光的吸收度.该方法虽然可以清楚地获得激光吸收以及噪音的干扰,但是处理过程中激光信号参考强度的确定会对最终的吸收度计算有显著的影响,尤其是在激光信号较弱的时.因此在相同条件下,实验测量计算得到的谱线强度与 HITRAN 数据库中调用的谱线强度有会一定的偏差,需要根据 HITRAN 数据库和实际实验测量结果,建立修正后的光谱数据库^[18],消除激光信号参考强度 I_0 的拟合确定所带来的误差.

采用 CT-TDLAS 系统,测量了本生灯火焰的 2D 温度分布.图7所示分别为 CT-TDLAS 和热电偶测量二维温度分布的结果.32路光束测量得到的 CT-TDLAS 计算结果用带有温度颜色的 39×39 网格表示,如图7(a).相同的 $4\text{ cm}\times 4\text{ cm}$ 测温区域内使用单个热电偶测量了121个测点,2D温度测量结果用带温度颜色的 11×11 网格表示,如图7(b).图7(a)中CT重构结果区间内共有 39×39 个像素,每个像素大小为 $1.8\text{ mm}\times 1.8\text{ mm}$;图7(b)中热电偶测温结果区间内共有 11×11 个像素,每个像素大小为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$.在图7(a)和图7(b)的对比中可知,两者之间的温度分布趋势一致,在横纵坐标均为 $-5\sim 5$ mm 的中心处温度最高,为 1700 K 左右,这与甲烷气体在层流预混环境下,所能达到的火焰燃烧温度相符合.但是由于重构测点数量的差异,CT-TDLAS 的重构结果中可以展示横纵坐标为 $-15\sim -5$ mm 和 $5\sim 15$ mm 区域内温度从 $300\sim 1700\text{ K}$ 之间的变化,而热电偶测量结果则无法达到该效果.这说明了 CT-TDLAS 具有快速重构得到高分辨率温度场的能力.

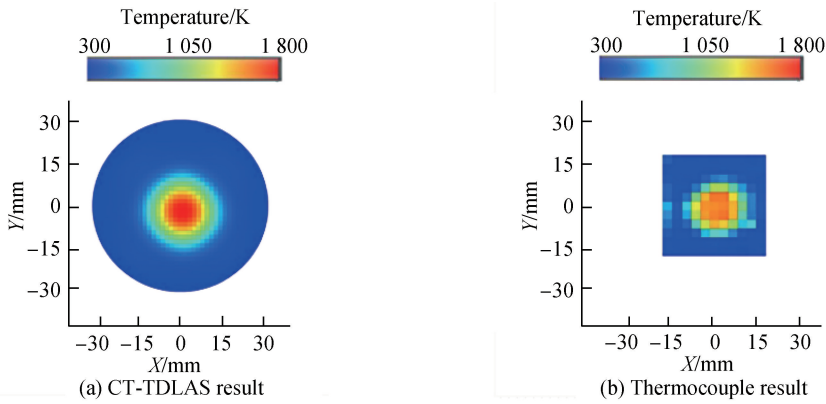


图7 CT-TDLAS 和热电偶测量二维温度分布
Fig.7 2D temperature distribution using CT-TDLAS and thermocouple

为了具体验证 CT-TDLAS 重构温度分布的准确性,使用了测量区域内 $X=0$ mm 路径上,CT-TDLAS 重构结果与热电偶测量结果对比,如图 8.可以发现热电偶测量结果与 CT-TDLAS 重构结果能够很好的吻合,但是结果之间存在一定的偏差.首先,由于热电偶测温的过程中会受到热辐射的影响,导致测量得到的结果与实际结果之间存在一定的偏差.其次,热电偶测温的 121 个测点是在保证本生灯火焰燃烧稳定的条件下,通过移动调整位移台逐点进行测量.而燃烧是一个非常复杂的化学反应过程,无法保证火焰状态完全相同并维持绝对稳定,因此测量过程也导致了一部分误差.因此主要由热电偶热辐射影响和火焰的稳定性两个因素造成了热电偶测温与 CT-TDLAS 测温之间的误差.研究结果表明,CT-TDLAS 具有较高的温度重建准确度,同时其测量的快速性与时效性在燃烧诊断在线测量中有非常大的优势.

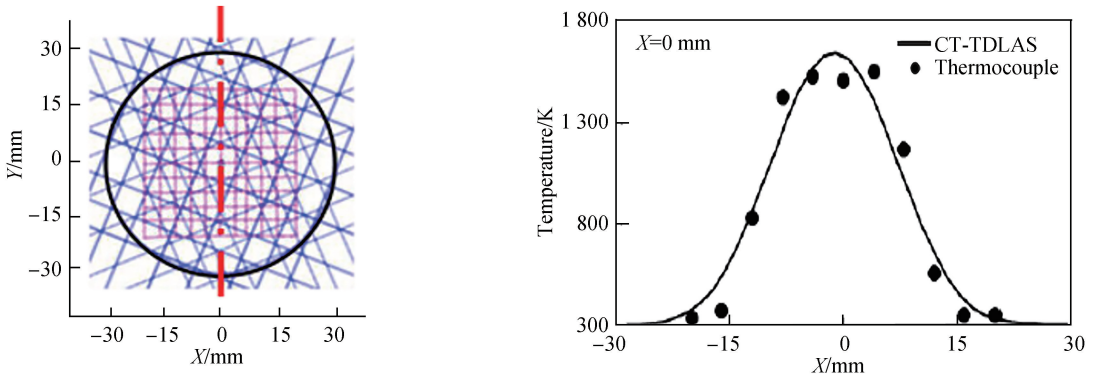


图8 CT-TDLAS 重构结果和热电偶测量结果在 $X=0$ mm 的分布
Fig.8 Comparison between CT-TDLAS and thermocouple at $X=0$ mm

4 结论

本文搭建了 32 路 CT-TDLAS 测量系统,重构了本生灯火焰的 2D 温度分布.使用改进的 CT 重构方法:建立修正的光谱数据库,通过光谱拟合,计算理论值与实验值之间的误差,将求解温度和浓度分布问题转换为非线性函数求解最值问题.该方法有效地避免了迭代法带来的求解速度慢的问题.由于避免迭代网格划分,该算法无需后处理手段,可直接获得高分辨率的重构图像.同时,考虑到温度场与浓度场相关性的问题,可同时重构温度与浓度的 2D 分布.在精度分析中,对比了相同条件下 16 路和 32 路 CT 重构精度.结果表明增加测量激光路径,可以提高 CT 的重构精度,同时激光路径的设计也需充分考虑实际测量区域的尺寸结构.利用修正后的 H_2O 光谱数据库和 CT 算法,结合 32 路 CT 测量组件,获得了本生灯测量区域内的火焰 2D 温度分布.将 CT-TDLAS 重构结果和热电偶测量结果对比,表明 CT-TDLAS 的重构结果有着较高的准确性.该重构方法的快速性、高精度以及高分辨率等优点,对实现燃烧诊断的在线测量具有重要意义.

参考文献

- [1] FU J, TANG C, JIN W, *et al.* Effect of preferential diffusion and flame stretch on flame structure and laminar burning

- velocity of syngas Bunsen flame using OH-PLIF[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(23): 12187-12193.
- [2] ZUO Peng. Research on the measurements of equivalence ratio and flame temperature of methane/air mixture by laser-induced breakdown spectroscopy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
左鹏. 激光诱导击穿光谱技术对甲烷空气混合当量比和火焰温度的测量研究[D]. 天津:天津大学,2014
- [3] SEEGER T, KIEWER C, GAO Y, *et al.* Time-resolved picosecond pure rotational coherent anti-Stokes raman spectroscopy for flame diagnostics (Invited)[C]. 27th AIAA Aerodynamic Measurement Technology & Ground Testing Conference, Louisiana, 2013.
- [4] XIA Hui, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, *et al.* Monitoring the change in CO concentration in combustion with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(11): 2478-2481.
夏慧,刘文清,张玉钧,等. 可调谐半导体激光吸收光谱法监测燃烧过程中 CO 浓度的变化[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(11): 2478-2481.
- [5] LACKNER M. Tunable diode laser absorption spectroscopy(TDLAS) in the process industries-a review[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2007, **23**(2): 65-147.
- [6] WANG Y, WEI Y, LIU T, *et al.* TDLAS detection of propane/butane gas mixture by using reference gas absorption cells and partial least square (PLS) approach[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, **18**(20): 8587-8596.
- [7] RAVIEHANDRAN M, GOULDIN F C. Retrieval of asymmetric temperature and concentration profiles from a limited number of absorption measurements[J]. *Combustion Science and Technology*, 1988, **60**(1-3):231-248.
- [8] RAVICHANDRAN M, GOULDIN F C. Reconstruction of smooth distributions from a limited number of projections[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(19): 4084-97.
- [9] LI Ke. Study on tomography of temperature and concentration in combustion based on absorption spectrum technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
李可. 基于吸收光谱技术的燃烧场温度与浓度层析成像方法研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [10] PENG D, JIN Y, ZHAI C. Research on reconstruction algorithms for 2D temperature field based on TDLAS[C]. AOPC 2015: Optical and Optoelectronic Sensing and Imaging Technology, International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [11] NADIR Z, BROWN M, COMER M, *et al.* A model-based iterative reconstruction approach to tunable diode laser absorption tomography[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, **3**(4):876-890.
- [12] XIA H H, KAN R F, LIU J G, *et al.* Analysis of algebraic reconstruction technique for accurate imaging of gas temperature and concentration based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Physics B*, 2016, **25**(6):064205.
- [13] BUSA K, MCDANIEL J, DISKIN G, *et al.* Spatially resolved temperature and water vapor concentration distributions in supersonic combustion facilities by TDLAT[C]. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, 2011.
- [14] DEGUCHI Y, KAMIMOTO T, KIYOTA Y. Time resolved 2D concentration and temperature measurement using CT tunable laser absorption spectroscopy[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, **46**: 312-318.
- [15] KAMIMOTO T, DEGUCHI Y, ZHANG N, *et al.* Real-time 2D concentration measurement of CH₄ in oscillating flames using CT tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Applied Nonlinear Dynamics*, 2015, **4**: 295-303.
- [16] LI Ning. Research on gas detection and 2D distribution reconstruction by tunable diode laser absorption spectroscopy technique[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
李宁. 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体在线检测及二维分布重建研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [17] ROTHMAN L, GORDON I, BABIKOV Y, *et al.* The HITRAN2012 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, **130**: 4-50.
- [18] KAMIMOTO T, DEGUCHI Y, KIYOTA Y. High temperature field application of two dimensional temperature measurement technology using CT tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, **46**: 51-57.
- [19] PO L M, GUO K. Transform-domain fast sum of the squared difference computation for H.264/AVC rate-distortion optimization[J].*IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, 2007, **17**(6): 765-773.
- [20] PAN B. Recent progress in digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2011, **51**(7): 1223-1235.