

文章编号: 1672-9897(2014)03-0063-09

doi: 10.11729/syltlx20130059

一种基于 TDLAS 的高分辨率二维温度场重建算法及数值仿真

李金义¹, 朱可柯¹, 杜振辉¹, 周 涛², 姚宏宝²

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要:发展了一种基于 TDLAS 正交光路的二维燃烧场温度重建算法,为了评价该重建方法,数值仿真了 $2N$ ($N \geq 3$)条视线(Light-of-sight, LOS)测量路径呈 $N \times N$ 均匀排布时对两种不同的温度场的二维重建结果,并定义了最大偏差和平均偏差两个物理量来描述 N 值对重建结果的影响。结果表明,对于对称的单峰非均匀温度场,重建的温度场最大偏差在 50K(2.5%)以内,最大偏差随 N 的奇偶而波动,其总体趋势随 N 增大而减小;平均偏差随着 N 的增大而减小, $N \geq 9$ 时最大偏差和平均偏差的改善均已不明显;对于双峰温度场,用该方法二维重建的结果最大偏差超过 350K(15.2%),平均偏差大于 0.03,并出现严重失真,此时可通过额外布置斜穿待测场的测量路径来改善测量结果。研究结果对实际的二维测量系统的搭建和应用有指导意义。

关键词:二维温度场重建;调谐激光吸收光谱;正交光路;数值仿真

中图分类号:O433.5; TH811.2 **文献标识码:**A

A high-resolution algorithm for 2D temperature reconstruction using TDLAS and numerical simulation

Li Jinyi¹, Zhu Keke¹, Du Zhenhui¹, Zhou Tao², Yao Hongbao²

(1. State Key Lab of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: We develop a tunable diode laser absorption tomography algorithm for two-dimensional (2D) temperature reconstruction based on orthogonal optical paths. In order to evaluate the reconstruction method, we analyzed the 2D reconstruction results of two different temperature phantoms by means of numerical simulation of $N \times N$ uniform grid arrangement consisting of $2N$ ($N \geq 3$) light of sight (LOS) measurement path. The maximum deviation and the mean deviation were defined to describe the effect of the value of N on the reconstruction results. The results show that for the single symmetrical peak non-uniform temperature phantom, the maximum deviation of the reconstruction temperature is less than 50K(2.5%), the maximum deviation fluctuates with N parity and the overall trend is decrease with N increasing. The mean deviation is reduced as N increases, which means the reconstruction is better with N increasing. But when $N \geq 9$, the improvements are not distinct any more. For the bimodal temperature phantom, the maximum deviations of the results using this 2D reconstruction method are more than 350K (15.2%) and the mean deviations are greater than 0.03. What's worse, there is a serious distortion. However, the reconstruction results can be improved by added measurement path diagonally across the tested temperature field. The study is helpful for the real 2D measurement system setup and actual application.

Key words: two-dimensional temperature reconstruction; tunable diode laser absorption spectroscopy; orthogonal optical path; numerical simulation

收稿日期: 2013-07-05; 修定日期: 2013-09-28

基金项目: 精密测试技术及仪器国家重点实验室探索课题(PILT1107)和天津市应用基础及前沿技术项目(11JCYBJC04900)

通讯作者: 杜振辉,E-mail:duzhenhui@tju.edu.cn

引用格式: Li J Y, Zhu K K, Du Z H, et al. A high-resolution algorithm for 2D temperature reconstruction using TDLAS and numerical simulation.

Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(3): 63-71. 李金义, 朱可柯, 杜振辉, 等. 一种基于 TDLAS 的高分辨率二维温度场重建算法及数值仿真. 实验流体力学, 2014, 28(3): 63-71.

0 引言

可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术用于燃烧流场的温度诊断起源于上世纪 70 年代末^[1-3], 相比于传统的探针式接触测温法, TDLAS 不干扰待测流场, 具有高灵敏度、高的谱分辨率、快速的响应时间、大的动态测量范围、多参量同时测量等优点。

传统的 TDLAS 技术是对光路上的吸收气体进行一维路径积分的视线(Line of Sight, LOS)测量^[4-7]。测量的量是该条路径的积分吸光度, 但这种测量方法对测量路径上的温度等参量的分布无能为力。将 TDLAS 技术与计算机断层成像技术(CT)结合起来(称为 Tunable Diode Laser Absorption Tomography, TDLAT 技术), 可以达到获取燃烧流场的空间二维(2D)分布的目的。TDLAT 属于透射断层成像, 从光源发出激光在通过待测燃烧流场时被目标气体吸收, 透射的部分被探测器接收, 得到气体的吸收光谱。由于流场的非均匀特性, 其各部分对激光的吸收不同, 探测器获得的气体吸收光谱实际上反映了流场各部分对激光的吸收情况, 然后利用各种反演算法从测得的激光吸收光谱数据重建出待测流场内部某种物理量(如浓度、温度、流速等)的分布图。

TDLAT 最早出现在 20 世纪 90 年代中期^[8-9], 近年来愈来愈得到国内外研究者的重视, 发展很快。从 TDLAT 成像光路系统构成角度而言, TDLAT 可分为扫描式和固定光路式。扫描式一般是将光源和探测器固定在旋转台上, 通过机械转动使得测量光路扫描整个待测场, 然后利用 CT 成像技术进行二维重建。弗吉尼亚大学的 Martin 等人^[10-11]使用二维计算机层析扫描技术对超燃冲压发动机气体管进行水蒸气浓度测量, 激光发射与接收在同一端, 另一端安装反射镜, 二者在同一圆形轨道上运动, 扫描得到的气体浓度二维几何分布数据用 MATLAB 进行重建分析。另外, 该研究小组与 NASA 合作, 为了实现对超声速燃烧风洞流场特性的测量, 对 TDLAT 进行了方法和实验研究, 采用光源和探测器旋转+扇形扫描的方式来获取投影数据, 每 15° 进行旋转步进, 每个位置点收集 45 条扇形投影, 共用时 29 min^[12]。Kasyutich 等人^[13]采用波长 1391.67 nm 的可调谐激光器测通过将两运动平台安装在直径 97 cm 的圆形轨道的一条直径两端, 其中一个运动平台上装有激光器和反光镜, 另一平台上装有光接收器和反光镜, 每个运动平台自身也可转动 11° 的转角, 这些部件的运动均由程序控制, 由 4 个伺服电机完成, 通过扫描获取 5 个

角度共 55 条光线对水的浓度和温度二维分布重建。王飞等人^[14]利用 4 个不同位置的激光发射端旋转的方式实现每个测量点 100 条投影的扇形扫描。李飞等人^[15]设计了一套基于 6 平行光束—旋转测量的 TD-LAT 系统, 使用代数重建算法(ART)对超燃直连台燃烧室出口的温度和浓度分布进行了重建。宋俊玲等人^[16-17]将燃烧炉固定在步进电机上, 通过移动和旋转燃烧炉的位置获取多个投影, 并通过在相邻光线间设置虚拟光线, 从而提高重建图像的精确度。扫描法的优点是通过很密集的扫描可以得到大量的沿各个角度的投影, 从而可实现较高的空间分辨率和重建精度, 但由于使用了机械旋转结构, 系统复杂并且时间分辨率低, 不能满足瞬态燃烧过程测量的需求。

固定光路式通过布置多条 LOS 正交测量光路将待测区域分成许多网格, 在测量过程中光路和被测燃烧器都不发生运动, 然后利用多路测量的结果对待测场进行二维重建。美国空军实验室的 Givens 等人^[18]采用的激光光源有 1391、1392 和 1397 nm 3 种波长, 以适应水分子在不同状态时吸收线的不同, 共有 16 条固定的吸收光路, 交叉分布, 应用计算流体动力学(CFD)模拟与 TDLAT 结合的方法对测量数据进行计算分析, 重建的二维温度结果与热电偶所测结果相比较, 误差在 5% 以内。姜治深等人^[19]利用 24 路光束从 4 个不同的角度穿过待测燃烧区域, 利用 ART 算法重建了燃烧场中 H_2O 的温度和浓度二维分布。阚瑞峰等人^[20]利用 4×4 的光路布置对发动机出口的温度进行了二维重建。由于固定光路法得到的投影数较少, 因此空间分辨率和重建精度不如扫描法, 但其系统简单, 可实现燃烧流场的高时间分辨率的二维测量, 故在实际的燃烧流场测量中更具有实用性, 其中又以正交光路的使用最为普遍^[21-23]。对于正交光路二维重建方法, 据我们所知, 目前并没有对 LOS 测量路径数目对重建结果影响分析的研究, 在实际测量时选择光路数目仍比较盲目, 因此, 对正交光路重建方法进行更深入的研究评价是非常必要的。

本文发展了一种正交光路重建算法, 数值仿真研究了不同视线测量路径数目分别对单峰分布和双峰分布温度场的 2D 重建结果, 并给出定量评价, 为实际的 2D 测量系统的设计和应用奠定基础。

1 二维温度重建方法

1.1 双线测温法

基于 LOS 吸收测量的 2D 温度场重建时, 通过对激光器的辐射波长进行调谐, 从而覆盖所选的一对

气体吸收谱线,然后根据测得的积分吸光度反演气体的温度、浓度等信息。许多文献已对双线测温法的原理进行了详细介绍^[5-7],简言之,由Beer-Lambert定律,每条吸收谱线的积分吸光度 A_1 和 $A_2(\text{cm}^{-1})$ 可通过一个可调谐、窄线宽的激光器测得,如(1)式所示:

$$A_i = \int_{-\infty}^{\infty} -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) d\nu, \quad i=1,2 \quad (1)$$

其中, I_0 和 I 分别表示入射和透射的激光光强,积分对整个频率 $\nu(\text{cm}^{-1})$ 域进行。而每个积分吸光度还可以表示成:

$$A_1 = S_1(T)pxL, \quad A_2 = S_2(T)pxL \quad (2)$$

其中, $T(\text{K})$ 和 x 分别表示气体的温度和摩尔浓度,总压强 $p(\text{atm})$ 和光程长 $L(\text{cm})$ 通常事先测得。分子吸收线强 $S_i(\text{cm}^{-2} \text{atm}^{-1})$ 由下式给出:

$$\begin{aligned} S_i(T) &= S_i(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T}\right) \exp\left[-\frac{hcE'_i}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \\ &\times \left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_{0,i}}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_{0,i}}{kT_0}\right)\right]^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $h(\text{J} \cdot \text{s})$ 为普朗克常量, $c(\text{cm/s})$ 为光速, $k(\text{J/K})$ 为波尔兹曼常数, $T_0(\text{K})$ 是参考温度, Q 为吸收气体的配分函数, $\nu_{0,i}(\text{cm}^{-1})$ 和 $E'_i(\text{cm}^{-1})$ 分别为第*i*个跃迁谱线的中心频率和低能级能量。

因此,吸收谱线的面积比 A_1/A_2 可以化简为只包含 T 的函数:

$$\begin{aligned} R &\equiv \frac{A_1}{A_2} = f(T) \approx \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \\ &\times \exp\left[-\left(\frac{hc}{k}\right)(E'_1 - E'_2)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \end{aligned} \quad (4)$$

利用测得的谱线 A_1 和 A_2 ,通过求解方程(4)可以得到温度 T ,然后利用(2)求得摩尔浓度 x 。

1.2 基于正交光路2D温度重建

对于一般的2D分布测量,可以将非均匀特性的待测区域划分成 $M \times N$ 的网格,并假设每个网格内的分布是均匀的,每个网格可称为一个像素,最简单的情况是等距均匀划分网格,如图1中虚线所示,将待测区域均匀划分成 $M \times N$ 的网格,并由 $M \times N$ 条正交排布的LOS测量路径对感兴趣的场进行测量,如图1中实线所示。

当吸收气体的特性(温度或/和浓度)沿测量路径为非均匀时,方程(2)可修改为:

$$A_i = \int_a^b p \cdot S_i[T(l)] \cdot x(l) \cdot dl = \int_a^b a_i(l) dl \quad (5)$$

这里,假设压强 p 为均匀的, l 为沿LOS的坐标积分元, $a_i(l)$ 是第*i*个吸收谱线的吸收系数, a 和

待测区域的积分限。在2D成像测量中, x 和 T 是空间坐标 X 和 Y 的函数,如图1所示。

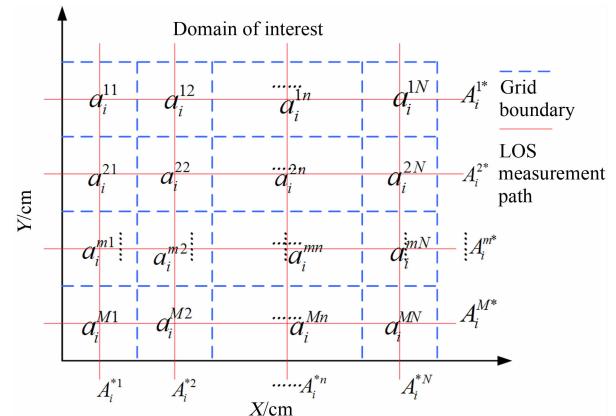


图1 正交网格法2D测量示意图
Fig. 1 Schematic of the orthogonal grid for 2D measurement

在利用图1所示的LOS路径排布进行2D图像重建时,我们基于如下两个假设:(1)LOS光束的宽度比像素的宽度小得多,因此每条光束不能同时穿过多个像素;(2)每个像素中温度和浓度的分布都是均匀的。因此,第*m*条横向测量路径与第*n*条纵向测量路径的交点的温度值 T_{mn} 和浓度值 x_{mn} 即代表整个 $[m,n]$ 像素的温度和浓度。这样,第*i*个跃迁谱线在 $[m,n]$ 像素的吸收吸收可用 a_i^{mn} 表征。

因此,(5)式的积分可以写成离散求和的形式:

$$A_i^{*n} = \sum_{m=1}^M a_i^{mn} \cdot l_{mn}, \quad A_i^{m*} = \sum_{n=1}^N a_i^{mn} \cdot l_{mn} \quad (6)$$

其中, A_i^{*n} 和 A_i^{m*} 表示第*i*个谱线分别沿第*n*条纵向路径和第*m*条横向路径的积分吸光度, l_{mn} 是 $[m,n]$ 像素的光程。(6)式可以表示成矩阵运算的形式:

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{mn} & \cdots & f_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i^{11} \\ a_i^{12} \\ \vdots \\ a_i^{mn} \\ \vdots \\ a_i^{MN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i^{1*} \\ A_i^{2*} \\ \vdots \\ A_i^{m+n} \\ \vdots \\ A_i^{M+N} \end{bmatrix} \quad \text{or } \mathbf{Fa}_i = \mathbf{A}_i$$

(M+N)×(M×N)权重系数 M×N向量 M+N向量

(7)

值得注意的是式(7)为统一的表达式,不受LOS测量路径排布和网格划分的限制。其中, \mathbf{F} 为向量 \mathbf{a}_i 的权重系数矩阵。其元素 $f_{mn}(m=1,2,\dots,M; n=1,2,\dots,N)$ 为

$$f_{mn} = \begin{cases} 0, & (\text{LOS测量路径不穿过像素}[m,n]) \\ l_{mn}, & (\text{LOS测量路径穿过像素}[m,n]) \end{cases} \quad (8)$$

由于吸收系数向量的每个元素 a_i^{mn} 都为正值,因此,方程(7)可由非负最小二乘求解算法求解。

$$\text{Min}_{\substack{a_i^{mn} \\ (m=1,2,\dots,M; \\ n=1,2,\dots,N)}} \sum_{j=1}^{M+N} [(f_{m1}a_i^{11} + f_{m2}a_i^{12} + \dots + f_{mn}a_i^{mn} + \dots + f_{MN}a_i^{MN}) - A_i^{m+n}]^2 \quad (9)$$

利用(9)式为目标函数对方程(7)进行求解时,通常使用基于 Kacmarz 迭代的代数重建算法(Algebra Reconstruction Technique, ART),但在本方案中,由于采用正交交叉测量路径,路径数较少,方程(7)为病态性很严重的不适定反问题,并且在实际投影获取过程中,由于燃烧流场的恶劣环境等因素,测量路径积分吸光度会存在较大程度的噪声,因此,采用 Tikhonov 正则化算法^[24]对其进行求解,可以克服上述两个问题,得到每个交叉点(即每个像素)处的吸收系数 a_i^{mn} 。

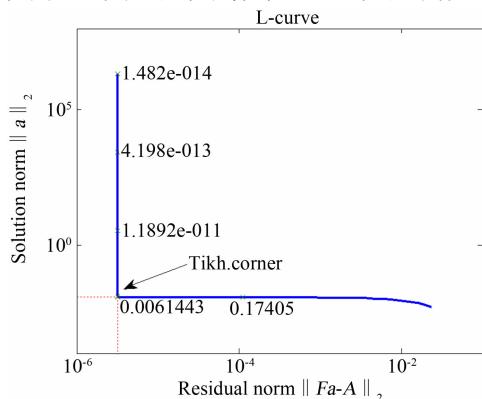


图 2 L 曲线法求最优化正则化参数示意图

Fig. 2 Schematic of L-curve method for optimal regularization parameter

使用 Tikhonov 正则化方法时,(7)和(9)式的求解变为求解以下问题:

$$a_\eta = \arg \min \{ \|Fa - A\|_2^2 + \eta^2 \|a - a^*\|_2^2 \}$$

其中 a_η 为 Tikhonov 正则化解, a^* 为 a 的初始估计值, 在这里可设置为 0。 η 为正则化参数, 其作用是平衡正则化解的残差范数 $\|Fa - A\|_2^2$ 与正则化解 $\|a - a^*\|_2^2$ 的范数在优化时的权重。正则化参数 η 的选取异常重要, 目前最广泛采用的是 L 曲线法^[24]。首先以正则化参数 η 为变量, 做正则化解的范数与残差范数关系曲线, 并且横纵坐标都使用对数形式, 即得到 L 曲线, 如图 2 所示, 然后寻找该曲线上曲率最大的点, 对应的参数即最优化正则化参数。

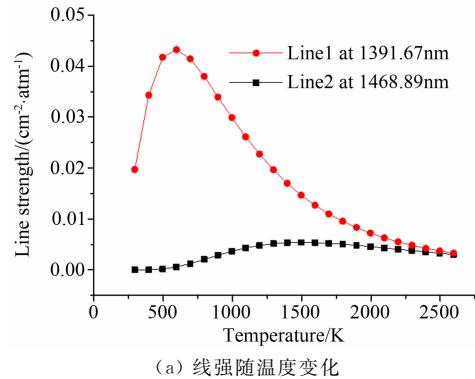
将正则化解 a_η 即像素内的吸收系数 a_i^{mn} 代入式(10)即可得到每个像素的温度值 T_{mn} 。然后, 通过(2)式可以求得该像素内的摩尔浓度 x_{mn} 。因此, 就获得了具有 $M \times N$ 像素分辨率的 2D 温度和浓度场。

$$T_{mn} = \frac{\frac{hc}{k}(E''_2 - E''_1)}{\ln\left(\frac{a_1^{mn}}{a_2^{mn}}\right) + \ln\left(\frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)}\right) + \frac{hc}{k}\left(\frac{E''_2 - E''_1}{T_0}\right)} \quad (10)$$

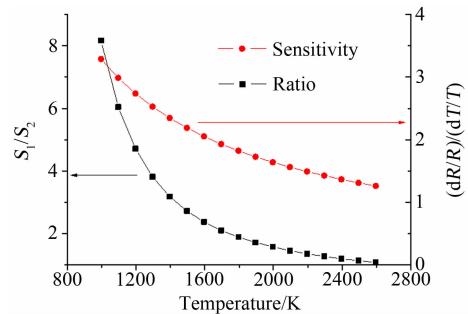
更进一步, 假设温度和浓度平滑分布, 即在整个的重建 2D 平面内其 1 阶和 2 阶导数连续。基于 $M \times N$ 个网格的重建值, 利用自然双三次样条插值的方法可以得到网格交叉点之间的温度和浓度值, 从而获得更高分辨率的 2D 图像。

2 数值仿真

在 TLDAS 技术用于燃烧诊断时, 最常用的检测气体是水蒸汽。因为水蒸汽是燃烧的产物, 浓度较高, 并且在近红外波段有着很强的吸收, 易于测量。我们使用 H_2O 气体位于 1391.67 和 1468.89nm 的两条吸收谱线, 其线强随温度的变化关系可由 Hitran 谱库获得, 如图 3(a)所示; 由此可推导出线强比及其对温度检测的灵敏度随温度的变化关系, 如图 3(b)所示; 线强比和检测灵敏度都随温度的升高而降低, 但在所感兴趣的温度范围(1000~2600K)内都有较高的灵敏度(>1)。在实际的 TDLAS 燃烧诊断系统中, 这两条谱线可由两个可调谐激光器的时分复用(TDM)或波分复用(WDM)获得。



(a) 线强随温度变化



(b) 线强比及灵敏度随温度的变化
图 3 所选谱线线强随温度的变化及线强比和灵敏度随温度的变化

Fig. 3 Line strengthen of selected line pair versus temperature and integration absorption ratio of selected line pairs and its sensitivity versus temperature

为了计算方便并不失一般性, 假设待测场为 15cm × 15cm 的正方形 2D 平面, 在此区域内 H_2O 气体摩尔浓度均匀分布($x=15\%$)。并假设在实际燃烧器中可能遇到的两种温度场的分布模型^[22]如图 4 所

示,模型都用 1501×1501 个像素点描述,图4(a)为对称的单峰温度分布情况,为抛物面中心叠加高斯分布;图4(b)为双峰温度情况,为抛物面的不同位置叠加不同的高斯分布。对假设的方形温度场进行2D重建时,使用 $2N$ 条LOS测量路径,按图1所示的方式进行等间距的正交排布,并穿过 $N \times N$ 网格组成的测量区域。

2.1 对称的单峰非均匀温度场

根据上述2D重建算法,首先利用Tikhonov正则化方法得到两条谱线分别在 $N \times N$ 个像素内的吸收系数,然后利用(10)式得到每个像素内的温度,最后利用自然双三次样条插值对 $N \times N$ 个交叉点处的温度进行平滑,从而得到与模型同一分辨率(1501×1501)的2D分布。对图4(a)所示的对称单峰非均匀温度场模型进行重建。不同的LOS测量路径数 N ($N \geq 3$)情况下的重建结果及偏差如图5所示。需要说明的是,由于从最边缘的测量路径到待测区域边界处的温度值获得是依赖外延法获取而非内插值法,因此,误差相对较大^[21],为了更好地评价重建结果,只对最边缘的测量路径所包围的测量区域的重建结果及误差进行分析。

由图5可见,该算法对单峰温度场的重建效果较

好,最大绝对偏差基本都小于50K($N=4$ 时例外,为57K),最大相对偏差小于2.5%。重建的绝对偏差存

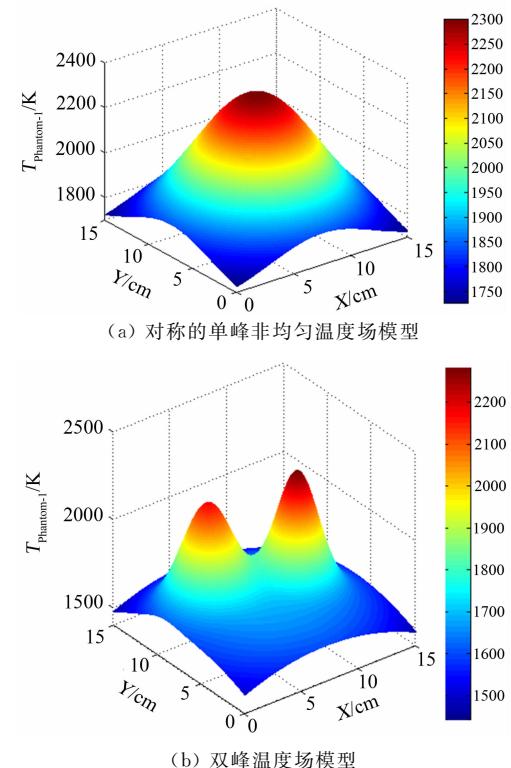
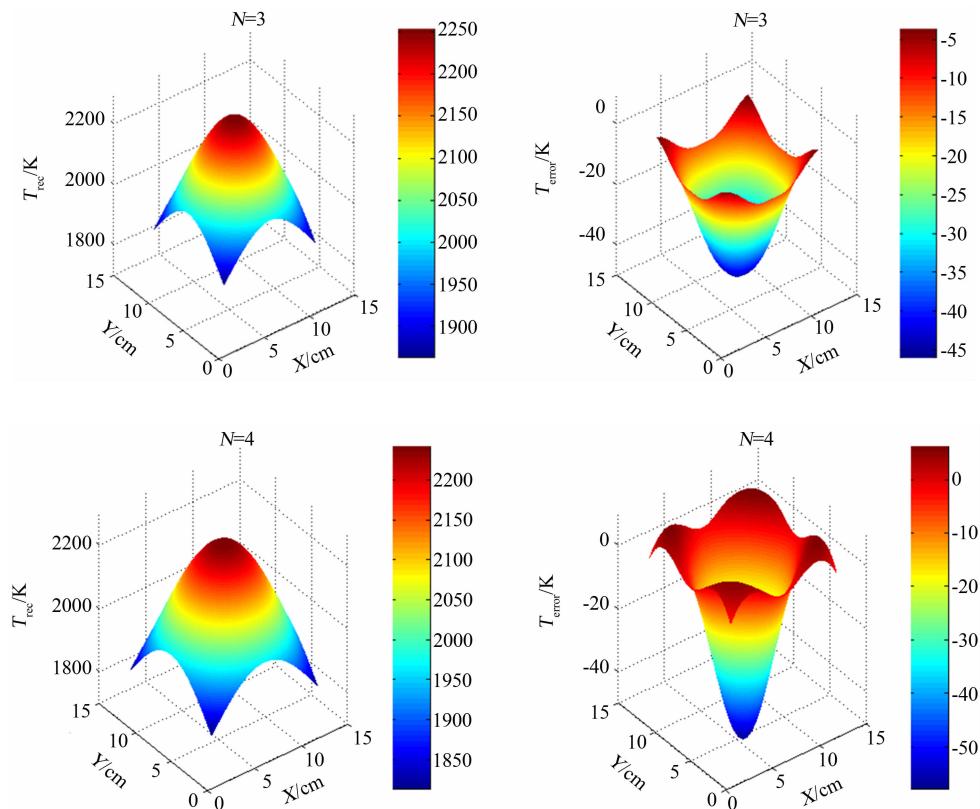
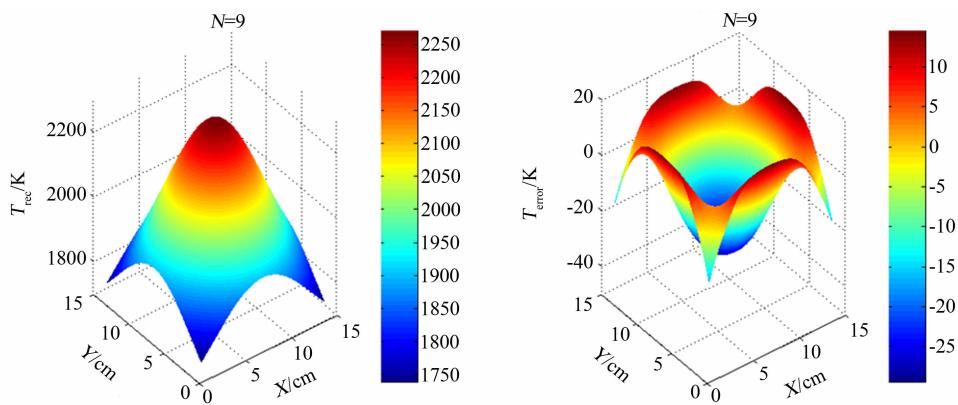


图4 待重建的温度场模型

Fig.4 The model of reconstruction temperature field

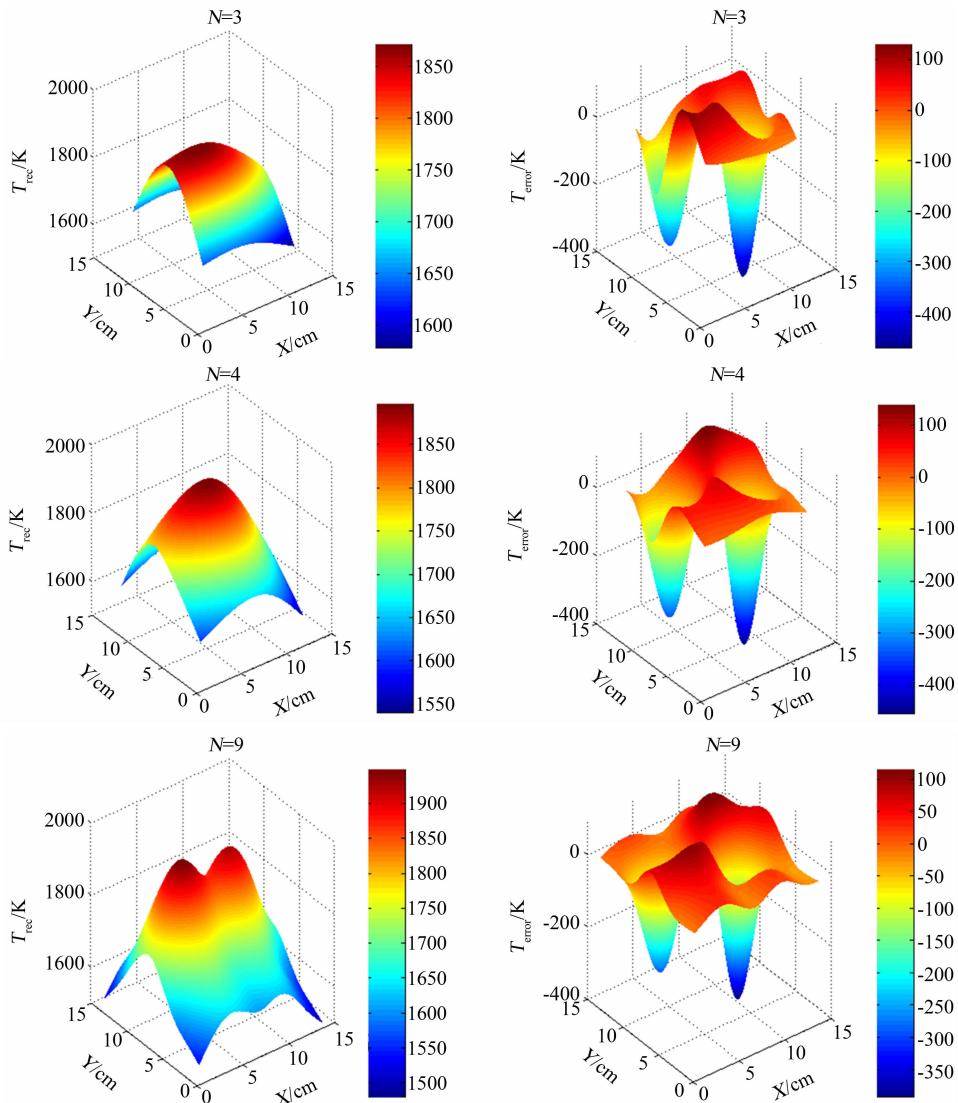


图 5 不同 N 值时单峰温度场 2D 重建的绝对偏差分布图Fig. 5 2D reconstruction results and absolute deviations for single peak temperature field with different N

在相似的规律,即峰值和 4 个角位置处重建结果偏小,而靠中间的部分重建结果偏大,并且负偏差远大于正偏差,这是由于算法本身在计算时的峰值位置处的吸光度比偏大造成的。

2.2 双峰温度场

类似地,对图 4(b)所示的双峰温度场模型进行重建。不同的 LOS 测量路径数 $N(N \geq 3)$ 情况下的重建结果及偏差如图 6 所示。

图 6 不同 N 值时双峰温度场 2D 重建温度及绝对偏差分布图Fig. 6 2D reconstruction results and absolute deviations for the bimodal peak temperature field temperature field with different N

由图6可知,对于双峰温度场重建,该算法效果较差,最大绝对偏差都超过了350K(对应相对偏差为15.2%), $N=3$ 和4时,不能分辨双峰, $N>4$ 时,重建结果虽然出现了两个峰,但峰的位置在(3,6)和(6,3)附近,与原始温度场模型中的峰值坐标(4,9.5)和(10,7)不相符。

3 讨论

为了更好地评价上述2D重建结果,定义最大偏差 e_M 和平均偏差 e_T 两个物理量,分别描述重建温度场与模型对应像素点偏差的最大值和综合平均值。

$$e_M = \max_{m=M', n=N'} |T_{m,n}^{\text{rec}} - T_{m,n}| \quad (11)$$

$$e_T = \frac{\sum_{m=M'}^M \sum_{n=N'}^{N''} |T_{m,n}^{\text{rec}} - T_{m,n}|}{\sum_{m=M'}^M \sum_{n=N'}^{N''} |T_{m,n}|} \quad (12)$$

其中, $T_{m,n}^{\text{rec}}$ 和 $T_{m,n}$ 分别为像素点 $[m,n]$ ($m,n=1,2,\dots,1500$)处温度重建值和模型原始值; M' 、 M'' 和 N' 、 N'' 分别为横向和纵向最边缘测量路径的交叉点对应的像素的最小和最大值。这里有:

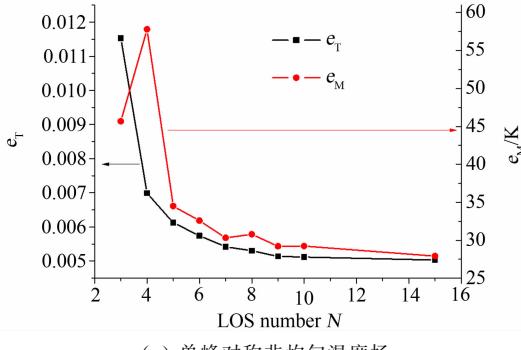
$$M' = N' = \left[\frac{750}{N} \right] \quad (13)$$

$$M'' = N'' = \left[1500 - \frac{750}{N} \right] \quad (14)$$

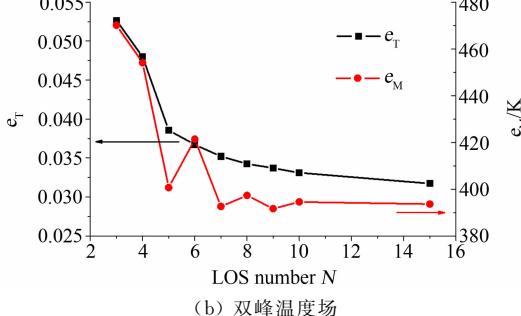
两种待测场模型重建的偏差随 N 的变化曲线如图7所示。两种情况下,重建的最大偏差和平均偏差与 N 的关系曲线呈“L”型,随着 N 的增大, e_T 和 e_M

都是先迅速减小然后再缓慢变小,拐点都在 $N=5$ 处。因此,综合考虑2D网格成像系统复杂性和成本及误差因素,选择 5×5 的路径排布是最佳方案。另外,由图7(a)可以看出, e_M 随着 N 的奇偶而波动,这是由于 N 为奇数时,中间测量路径经过待测温度场峰值点,因此重建结果的最大偏差稍小一些,而 N 为偶数时,测量路径不能经过峰值点,偏差稍大。 $N\geq 9$ 时最大偏差和平均偏差的改善不明显。由图7(a)可以看出, $N>6$ 时,最大偏差 e_M 不再像图7(a)中随 N 的增大而减小,而是基本保持不变,而平均偏差 e_T 虽随着 N 增大有减小趋势,但已非常平缓,甚至 $N=100$ 时 e_T 和 e_M 都未能有较大改善。其原因在于布置的LOS测量路径没有通过温度峰值处,导致温度场的峰值信息未能被捕捉到。

因此,为了改善双峰温度场的2D重建结果,对 $N=5$ 时的正交光路排布进行改进,新增两条LOS测量路径,按对角线交叉排布,如图8中的点画线所示,依然利用上述算法,重建的结果如图9(a)所示。可见,增加测量光路后的重建结果有了较大改善,具体如表1所示, e_M 和 e_T 的值比较可见,重建结果比



(a) 单峰对称非均匀温度场



(b) 双峰温度场

Fig. 7 The curve of e_T and e_M changing with the value of N for two different temperature phantom

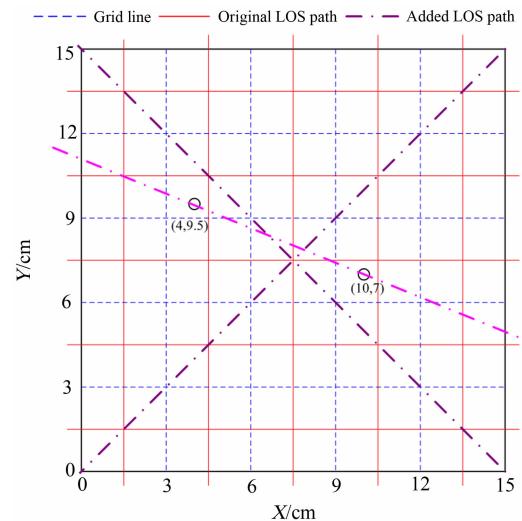


图8 对图4(b)中双峰温度场模型进行重建时的LOS光路布置示意图

Fig. 8 Diagrammatic arrangement of LOS optical path for reconstruction of bimodal temperature phantom shown as Figure 4 (b)

表1 新增LOS测量光路前后的2D温度重建结果比较
Table 1 Comparison of reconstruction results without and with added LOS measurement optical path

LOSpah arrangement	Maximum absolute deviation e_M /K	Maximum relative deviation / %	Mean deviation e_T
$N=5$	400.6	17.4	0.0386
$N=6$	421.3	18.3	0.0367
$N=7$	392.6	17.1	0.0352
$N=5$ with 2 added LOS path	384.9	16.7	0.0299
$N=5$ with 3 added LOS path	262.0	11.4	0.0286

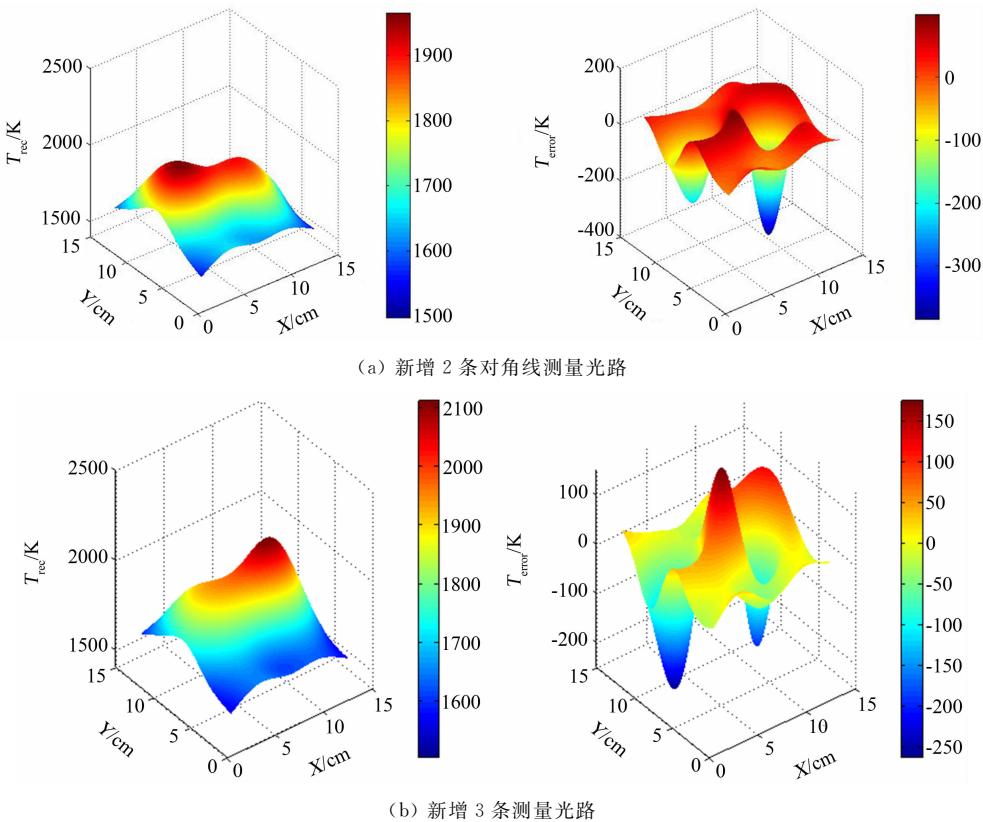


图 9 对 $N=5$ 情形下新增斜向测量光路对双峰场的重建结果和偏差

Fig. 9 Reconstruction results and deviations for bimodal peak phantom with additional oblique measurement path at $N=5$

$N=5, 6, 7$ 时都有了改善。特别地,若再增加一条穿过两个峰值点的路径,重建结果改善更为明显,如图 9(b)所示, e_M 和 e_T 相比与之前 $N=5$ 时分别改善了 34.5% 和 25.9%。

4 结 论

发展了一种基于 TDLAS 正交光路的二维燃烧场温度重建算法,并利用数值仿真的方法评价了 LOS 测量路径数 N 值对重建结果的影响。结果表明,对于对称的单峰非均匀温度场,重建的温度场最大偏差在 50K 以内,相对偏差在 2.5% 以内,最大偏差随 N 的奇偶而波动,其总体趋势随 N 增大而减小;平均偏差随着 N 的增大而减小, $N \geq 9$ 时最大偏差和平均偏差的改善不明显;对于双峰温度场,用该方法二维重建的结果最大偏差超过 350K,最大相对偏差大于 10%,平均偏差大于 0.03,并出现严重失真。因此,该方法适合待测对象为单峰分布的燃烧场,并且综合考虑 2D 网格成像系统复杂性、成本及误差因素,选择 5×5 的路径排布是最佳方案。对双峰分布的燃烧场,该重建方法误差较大,但可通过增加斜穿过待测场的路径提高重建精度。研究结果对实际的二维测量系统的搭建和应用有指导意义。

参 考 文 献:

- [1] Hanson R K, Kuntz P A, Kruger C H. High-resolution spectroscopy of combustion gases using a tunable IR diode laser[J]. Applied Optics, 1977, 16: 2045-2048.
- [2] Lück K C, Thielen W. Measurements of temperatures and OH-concentrations in a lean methane-air flame using high-resolution laser-absorption spectroscopy[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1978, 20(1): 71-79.
- [3] Hanson R K, Falcone P K. Temperature measurement technique for high-temperature gases using a tunable diode laser[J]. Applied Optics, 1978, 17(16): 2477-2480.
- [4] Arroyo M P, Hanson R K. Absorption measurements of water-vapor concentration, temperature, and line-shape parameters using a tunable InGaAsP diode laser[J]. Applied Optics, 1993, 32(30): 6104-6116.
- [5] Nagali V, Chou S I, Baer D S, et al. Diode-laser measurements of temperature-dependent half-widths of H_2O transitions in the $1.4\mu m$ region[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1997, 57(6): 795-809.
- [6] 李飞, 余西龙, 陈立红, 等. TDLAS 测量甲烷/空气预混平面火焰温度和 H_2O 浓度[J]. 实验流体力学, 2009, 23(2): 40-44.
Li Fei, Yu Xilong, Chen Lihong, et al. Temperature and water vapour concentration measurements of CH_4 /air premixed flat flame based on TDLAS[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(2): 40-44.
- [7] 许振宇, 刘文清, 刘建国, 等. 基于可调谐半导体激光器吸收光谱的温度测量方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(23): 234204.

- Xu Zhenyu, Liu Wenqing, Liu Jianguo, et al. Temperature measurements based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(23): 234204.
- [8] Kauranen P, Hertz H M, Svanberg S. Tomographic imaging of fluid flows by the use of two-tone frequency-modulation spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(18): 1489-1491.
- [9] Kessler W J, Allen M G, Lo E Y M, et al. Tomographic reconstruction of air temperature and density profiles using tunable diode laser absorption measurements on O₂[C]. 26th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. San Diego, USA, 1995;1-11.
- [10] Martin E F, Goyne C P, Diskin G S. Analysis of a tomography technique for a scramjet wind tunnel[J]. *International Journal of Hypersonics*, 2010, 1(3): 173-180.
- [11] Bryner E, Sharma M G, Goyne C P, et al. Tunable diode laser absorption technique development for determination of spatially resolved water concentration and temperature[C]. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2010.
- [12] Martin E F, Goyne C P, Diskin G S. Analysis of a tomography technique for a scramjet wind tunnel[J]. *International Journal of Hypersonics*, 2010, 1(3): 173-180.
- [13] Kasytich V L, Martin P A. Towards a two-dimensional concentration and temperature laser absorption tomography sensor system[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(1): 149-162.
- [14] Wang F, Cen K F, Li N, et al. Two-dimensional tomography for gas concentration and temperature distributions based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(4): 045301.
- [15] 李飞, 余西龙, 林鑫, 等. 基于TDLAS的层析成像技术[C]. 高超声速专题研讨会暨第五届全国高超声速科学技术会议, 2012.
- Li Fei, Yu Xilong, Lin Xin, et al. Computer tomography technique based on TDLAS[C]. Hypersonic Symposium and 5th National Hypersonic Science and Technology Conference, 2012.
- [16] 宋俊玲, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于激光吸收光谱技术的燃烧场气体温度和浓度二维分布重建研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(24): 240702.
- Song Junling, Hong Yanji, Wang Guangyu, et al. Two-dimensional reconstructions of gas temperature and concentration in combustion based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(24): 240702.
- [17] 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, 1-9.
- [18] Givens R N. Demonstration of a strategy to perform two-dimensional diode laser tomography[D]. Air Force Institute of Technology Air University, 2008
- [19] 姜治深, 王飞, 邢大伟, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱技术应用于平面火焰中气体浓度二维分布重建的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(11): 2891-2896.
- Jiang Zhishen, Wang Fei, Xing Dawei, et al. The reconstruction of two-dimensional distributions of gas concentration in the flat flame based on tunable laser absorption spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(11): 2891-2896.
- [20] 阚瑞峰. TDLAS在大气监测及燃烧诊断中的应用方法研究[C]. 光谱技术在燃烧诊断及大气检测中的应用学术研讨会, 2013, 4.
- Kan Ruifeng. Application and method research of TDLAS on atmospheric monitoring and combustion diagnosis[C]. Spectroscopy Symposium on Combustion Diagnosis and Atmospheric Detection, 2013.
- [21] Li J, Du Z, Zhou T, et al. Numerical investigation of two-dimensional imaging for temperature and species concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy[C]. 2012 International Conference on Measurement, Information and Control (MIC), IEEE, 2012, 1: 234-238.
- [22] Ma L, Cai W. Numerical investigation of hyperspectral tomography for simultaneous temperature and concentration imaging [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(21): 3751-3759.
- [23] Deguchi Y, Yasui D, Adachi A. Development of 2D temperature and concentration measurement method using tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2012, (2): 543-549.
- [24] Hansen P C, O'Leary D P. The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1993, 14(6): 1487-1503.

作者简介:



李金义(1986-),男,河北吴桥人,博士后。研究方向:调谐激光吸收光谱及燃烧诊断。通信地址:天津大学精密仪器与光电子学院17楼403室(300072)。E-mail: jinyilee@tju.edu.cn

(编辑:张巧芸)