

气体浓度场二维重建光路分布优化及数据仿真

房鹏飞¹ 贾兆丽² 陈东³ 王尹秀³

¹合肥工业大学智能制造技术研究院, 安徽 合肥 230009

²合肥工业大学数学学院, 安徽 合肥 230009

³合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 通过计算机仿真技术, 针对不同的光路分布结构进行了气体浓度场二维分布重建模拟, 研究了光路的分布与重建精度的联系。并通过计算归一化平均绝对距离判据比较不同光路分布下的重建精度, 得到重建精度较高的光路分布形式。结果表明, 在光路数量较少的情况下, 提高光路的利用率可以提高重建精度。通过计算评估优化后的光路分布下的重建精度, 验证了结论的正确性。

关键词 图像处理; 激光光学; 可调谐半导体激光吸收光谱; 二维重建; 浓度检测; 光路优化

中图分类号 O433.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.071001

Two-Dimensional Reconstruction Light Path Distribution Optimization and Data Simulation of Gas Concentration Field

Fang Pengfei¹ Jia Zhaoli² Chen Dong³ Wang Yinxiu³

¹Intelligent Manufacturing Institute, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

²School of Mathematics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

³School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract The two-dimensional distribution of gas concentration field under different distributions of light path is simulated using the computer simulation technology, and the connection between the distribution of light path and the reconstruction accuracy is researched. Reconstruction accuracy in different distributions of light path is compared by calculating the normalized mean absolute distance criterion, and the light path distribution of better reconstruction accuracy is got. The results show that improving the utilization rate of laser path can enhance the reconstruction accuracy in the case of less light path. And the validity of results are verified by calculating the reconstruction accuracy of the optimized light path distribution.

Key words image processing; laser optics; tunable diode laser absorption spectroscopy technique; two-dimensional reconstruction; concentration detection; light path optimization

OCIS codes 100.6950;110.3010;300.1030

1 引言

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术,是目前广泛应用于大气痕量气体检测的主要技术^[1-3]。其主要原理是利用半导体波长可调谐和窄带宽特性,通过电流扫描信号控制波长,从而获得气体特征吸收光谱,通过算法算出气体浓度或温度^[4-5]。TDLAS技术的主要特点是灵敏度高、响应时间短、选择性高,特别

收稿日期: 2016-01-28; **收到修改稿日期:** 2016-02-15; **网络出版日期:** 2016-06-23

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ220119)、安徽省自然科学基金(1408085MKL84)

作者简介: 房鹏飞(1992—),男,硕士研究生,主要从事红外激光检测技术等方面的研究。

E-mail: pengfe@mail.hfut.edu.cn

导师简介: 陈东(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事红外激光检测技术等方面的研究。

E-mail: dchen@hfut.edu.cn(通信联系人)

适用于现场监测。但是传统的 TDLAS 气体检测系统只能对单一光路上的平均浓度进行检测,不能反映其浓度分布。TDLAS 技术与电子计算机断层扫描(CT)技术进行结合,可以得到气体的浓度或温度的二维分布图像,实现二维重建。李金义等^[6]利用平行光路对气体温度场进行了数值仿真。Wang 等^[7-8]和 Kasyutich 等^[9]利用扫描光路结合 TDLAS 技术和 CT 技术实现了气体温度场和浓度场的重建。近年来,随着 CT 算法的发展,张顺利等^[10-11]和伍建辉等^[12]对 CT 技术重建质量的影响因素进行了研究。光路的分布形式会影响重建结果,选择合适的光路分布形式对于提高重建质量有很大的帮助。理论上,光路数目越多重建的质量则越高^[10],但是工程应用中,由于激光器数量的限制,以及场地的特殊性,无法通过增加光路数目的方法提高精度,那么在有限的条件下对光路分布进行优化则显得尤为重要。宋俊玲等^[13]对非规则光线分布进行了优化,Song 等^[14]对平行光路分布进行了优化。本文介绍了 TDLAS 技术与 CT 技术,通过借助计算机仿真技术,在不同光路分布下对非均匀浓度场进行重建,并评估了各个光路分布下的重建精度,从而总结得到一些有益的结论,为今后构建光路提供了参考依据。

2 气体浓度场二维重建方法

CT 技术与 TDLAS 技术结合可以实现气体浓度二维重建。CT 技术所用算法大致可分为两类:直接数学反计算和区域迭代计算。当投影数据足够多且准确度较高时,直接数学反算法具有重建质量高、重建速度快等特点,其中最常用的是滤波反投影算法(FBP)^[15]。而在实际应用中往往很难得到完备的投影数据,此时迭代法的优势就十分明显,迭代法可以利用不完备的数据得到较好的结果^[12]。其中以代数迭代法(ART)为代表。

2.1 ART 算法原理

如图 1 所示将重建目标划分为 $N = n \times n$ 的网格,对每一个方格进行按顺序编号, x_j 表示第 j 个方格内的像素值。有 M 条射线从不同方向穿过网格, l_{ij} 为第 i 条射线在第 j 个方格内的长度。定义 $P_{ij} = l_{ij} \times x_{ij}$ 为第 i 条射线在第 j 个方格内的投影。则第 i 条射线的总投影为

$$p_i = \sum_{j=1}^N l_{ij} \times x_j, \quad (1)$$

则可得到投影方程组

$$\begin{cases} l_{11} \times x_1 + l_{12} \times x_2 + l_{13} \times x_3 + \cdots + l_{1N} \times x_N = p_1 \\ l_{21} \times x_1 + l_{22} \times x_2 + l_{23} \times x_3 + \cdots + l_{2N} \times x_N = p_2 \\ \vdots \\ l_{M1} \times x_1 + l_{M2} \times x_2 + l_{M3} \times x_3 + \cdots + l_{MN} \times x_N = p_M \end{cases}, \quad (2)$$

用矩阵表示为 $\mathbf{L}\mathbf{X}=\mathbf{P}$, \mathbf{P} 为 M 维投影数据向量, \mathbf{X} 为 N 维图像向量, \mathbf{L} 为 $M \times N$ 维投影系数矩阵。当 \mathbf{P} 与 \mathbf{L} 已知时,则可以反算出 \mathbf{X} 。但在实际应用中, M 通常小于 N ,且 \mathbf{L} 为大型稀疏矩阵,所以不能用矩阵理论来得到 \mathbf{X} 。迭代法可以很好地解决这个问题,其核心思想是:给定一个初始图像 $\mathbf{X}^{(0)}$,通过迭代公式求出 $\mathbf{X}^{(1)}$,根据 $\mathbf{X}^{(1)}$ 求出 $\mathbf{X}^{(2)}$,依此类推,直到满足预设条件。

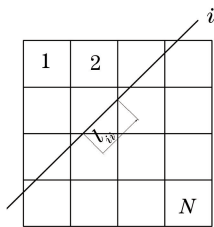


图 1 ART 算法原理图

Fig. 1 Schematic of ART algorithm

迭代公式为

$$X^{k+1} = X^k + \lambda \frac{p_i - \sum_{j=1}^N l_{ij} \times x_j^k}{\sum_{j=1}^N l_{ij}^2} \times l_{ij}, \quad (3)$$

式中 k 为迭代序号, λ 为松弛因子 ($0 < \lambda < 2$)。每计算 M 次为一次完整的迭代。

2.2 重建精度评估标准

为了精确评估重建精度, 引用归一化均方距离判据 d 和归一化平均绝对距离判据 r 作为评价标准^[12]。其具体的定义为

$$d = \left[\frac{\sum_{j=1}^N (t_j - x_j)^2}{\sum_{j=1}^N (t_j - \bar{t})^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N |t_j - x_j|}{\sum_{j=1}^N |t_j|}, \quad (5)$$

式中 t_j, r_j 分别为测试模型和重建图像第 j 个方格的像素值, \bar{t} 为测试模型所有像素值的平均值, d 侧重反应某点产生较大误差的情况, r 重点反应许多点均有一些小误差的情况。 d, r 的值越小, 说明重建质量越高, 精度越高。

2.3 基于 TDLAS 技术的气体浓度二维重建算法

根据朗伯比尔定律, 一束单色激光穿越气体介质时, 其光强度的变化为

$$\frac{I_1}{I_0} = \exp[-PS(T)\varphi(\nu)XL], \quad (6)$$

式中 I_0 为无气体吸收时的参考激光强度, I_1 为穿过气体吸收后的激光强度, $S(T)$ 为该气体特征谱线的线强度, 表示气体的吸收强度, 只与温度有关。 P 为被测气体介质的总压, L 为激光在被测气体中传播的距离, X 为被测气体的体积浓度, $\varphi(\nu)$ 为线性函数, 表示被测吸收谱线的形状, 与温度、总压力和气体中的成分含量有关。

实际应用中, 常用积分吸光度来描述气体吸收特性, 故(6)式可写为

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \ln \frac{I_0}{I_1} = S(T)PXL, \quad (7)$$

式中 A 为积分吸光度。

当 TDLAS 技术与 ART 算法结合时, 则 ART 算法中方程组写为

$$\begin{cases} [PS(T)X]_1 L_{11} + [PS(T)X]_2 L_{12} + \cdots + [PS(T)X]_N L_{1N} = A_1 \\ [PS(T)X]_1 L_{21} + [PS(T)X]_2 L_{22} + \cdots + [PS(T)X]_N L_{2N} = A_2 \\ \vdots \\ [PS(T)X]_1 L_{M1} + [PS(T)X]_2 L_{M2} + \cdots + [PS(T)X]_N L_{MN} = A_M \end{cases} \quad (8)$$

3 数据仿真及分析

仿真重建目标如图 2 所示, 为了更贴近真实分布, 其分布形式设置为非均匀分布, 浓度范围设为 $1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$ 。

3.1 仿真方案

光路数量为 16 条(在实际应用中不方便在现场安放数量众多的激光器, 可通过插值算法提高分辨率), 利用常见的几种光路模型分别进行重建, 用归一化平均绝对距离判据 r 评估每种方案的精度, 并归纳分析。为了更加客观地研究光路分布对重建结果的影响, 初始值 $\mathbf{X}^{(0)}$ 统一设为 0, 光路数目均为 16 条, 由于松弛因子会影响重建结果, 所以每一种方案都在不同松弛因子下进行重建(松弛因子 λ 分别选取为 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0,

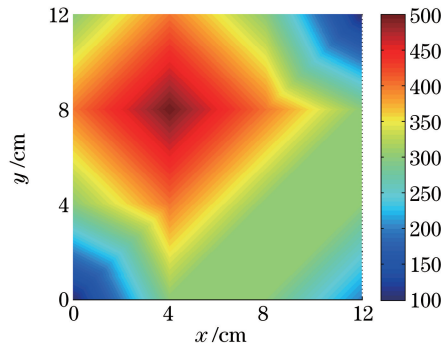


图2 重建对象

Fig. 2 Reconstruction object

1.2, 1.5), 选择重建效果最好的松弛因子, 进行组间比较。迭代次数为 10 次, 记录每一次迭代的数据。

3.2 光路设计及仿真结果

模拟仿真中共建立四种光路模型, 如图 3 所示。

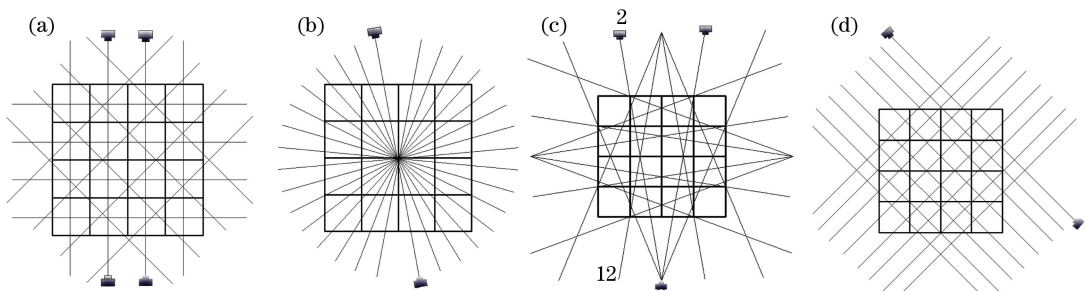


图3 光路分布图。(a) 方案一; (b) 方案二; (c) 方案三; (d) 方案四

Fig. 3 Lightpath distribution. (a) First project; (b) second project; (c) third project; (d) fourth project

图 3(a) 是方案一为平行光路, 分别从 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 四个方向投影, 每个方向有四条互相平行的光路, 相邻光路间隔为 a (a 为方格边长)。图 3(b) 是方案二为单线环形扫描方式, 在重建区域外有一圆形导轨, 装有一套激光器和接收器, 两者相对位置不变, 通过旋转导轨可以从不同角度进行扫描, 相邻光路夹角为 10° , 这种方案的优点是节约成本, 只需一套激光器就能实现扫描。图 3(c) 是方案三为旋转扫描方式, 分别在 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 四个方向安装一个可转动的激光器, 实现旋转扫描, 这种方法需要 4 台激光器和 16 个接收器。图 3(d) 是方案四为平行光路, 但是只在 45° 和 135° 两个方向投射, 且每个方向上的光路数由 4 条变成 8 条, 光路间隔为 $0.6a$ 。

各方案对应的重建结果如图 4、5 所示。由图 5 可知: 方案一, 松弛因子在 $\lambda=1.2$ 时重建效果最好, 此时 r 值稳定在 0.1 左右; 方案二, 重建结果与模型差距较大, r 值大于 0.5; 方案三, r 值最低可以达到 0.32, 在 $\lambda=1.2$ 时重建结果最好; 方案四的重建结果最好, r 值可达到 0.03, 同样 $\lambda=1.2$ 。显然方案四的重建精度最高, 如图 6 所示, 方案一次之。可见光路分布对二维重建的精度有很大影响。另外, 除了效果最差的方案二, 其他三种方案的松弛因子均为 1.2, 这证明松弛因子和光路的数目有关, 符合投影数目越少, 松弛因子应越大^[12] 的结论。

3.3 结果分析

通过仿真发现, 方案二的误差最大, 与投影角度越多重建效果越好的设想不相符。其采用旋转扫描的方式, 虽然节省了激光器的数量, 但是相邻光路有重复穿过同一组方格的现象, 这样使得由这两条光路得到的迭代方程是线性相关的, 迭代过程中不能得到充分修正, 也就很难算出理想的结果。因此单线扫描法是不可取的, 其改进方法是由单线扫描改成光线束扫描, 并增加相邻光路的夹角。方案三重建效果也不理想, 其原因与方案二类似, 例如, 2 号和 12 号光路同时穿过 2, 6, 10, 14 方格, 由这两条光路写出的方程是线性相关的, 视为重复。去掉重复的光路, 方案三中实际上只有十二条光路是有用的, 导致重建结果误差较大。方案四与方案一类似, 都属于平行光路, 但是前者精度更高。这里定义一个参量 z , 如果每条光路每穿过一个方

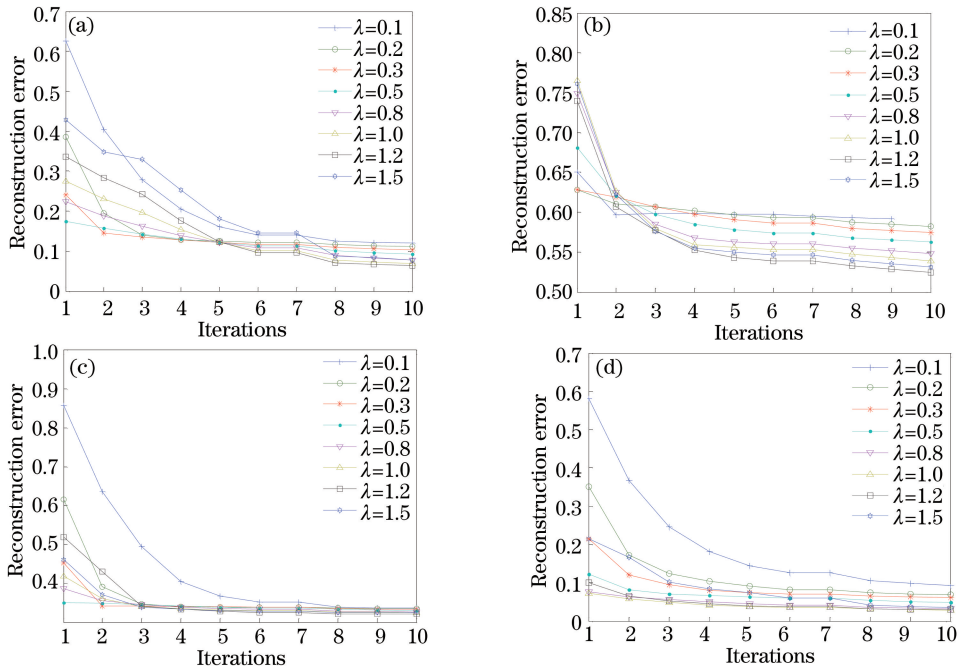


图4 各方案的重建误差。(a) 方案一重建误差；(b) 方案二重建误差；(c) 方案三重建误差；(d) 方案四重建误差
Fig. 4 Reconstruction errors of each project. (a) Reconstruction errors of first project; (b) reconstruction errors of second project; (c) reconstruction errors of third project; (d) reconstruction errors of fourth project

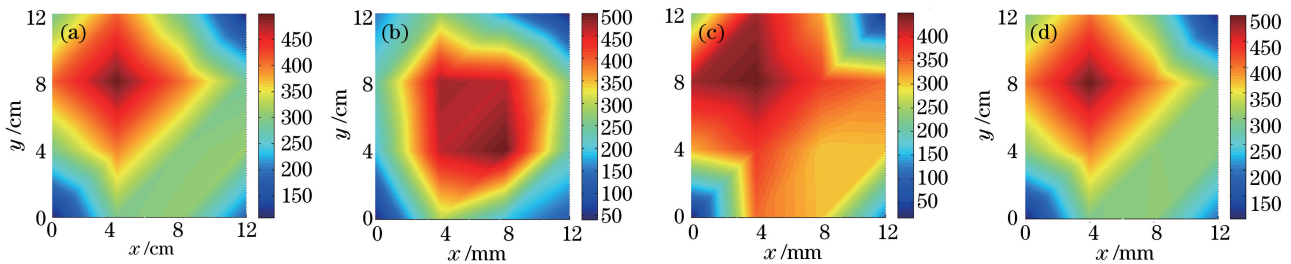


图5 各方案的重建图像。(a) 方案一重建图像；(b) 方案二重建图像；(c) 方案三重建图像；(d) 方案四重建图像
Fig. 5 Reconstruction images of each project. (a) Reconstruction image of first project; (b) reconstruction image of second project; (c) reconstruction image of third project; (d) reconstruction image of fourth project

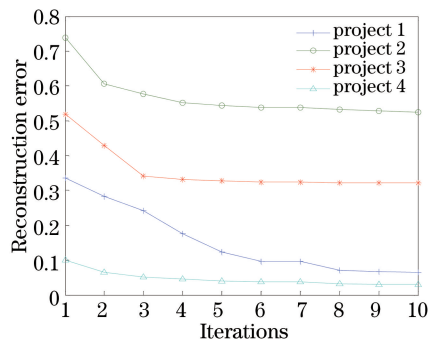


图6 重建误差比较

Fig. 6 Comparison of reconstruction errors

格记为 1, z 表示所有光路穿过的方格数的总和,那么 z 可以反映光路的利用率,在同一条件下,利用率高则方程中的非零系数就多,被修正的次数就多。方案一中 $z=56$,方案四中 $z=72$,显然方案四比方案一利用率高,重建结果更好。因此,就本文模型而言,方案四的效果最好。对于光路较少情况,光路数相同时,选择利用率较高的方案可以提高重建精度。另外,在实际工程应用中,导轨或旋转等方式都具有不稳定性,震动

等因素会影响信号的质量,方案一、四这种将激光和探测器固定的形式更加稳定,应优先选择。

3.4 验证

以方案三为例,对其进行优化,优化后的光路分布图如图 7 所示。还是四个方向投影,但是投影角度改为 $45^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 315^\circ$,避免了光路重复,提高了光路利用率, z 值从 48 提高到 72。

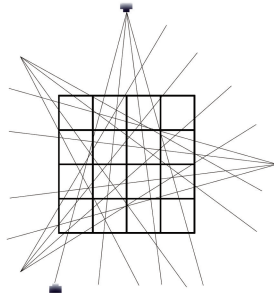


图 7 优化后的方案三

Fig. 7 Optimization of third project

重建结果如图 8 所示。

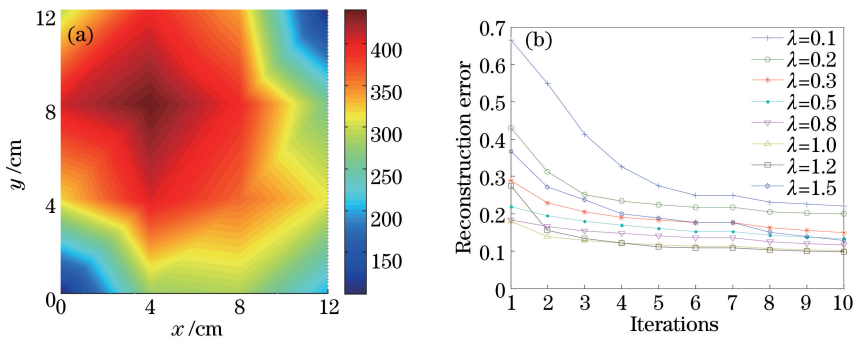


图 8 (a) 重建图像; (b) 重建误差

sFig. 8 (a) Reconstruction image; (b) reconstruction error

由图 8(a)可知,优化后的光路分布下所得图像较优化前更接近重建目标,且重建精度有明显的提高,在 $\lambda = 1.2$ 处重建效果最好,其精度可以达到 0.09,相比未优化前的 0.32 提高了 0.23,可以证明结论是正确的。

4 结论

基于 TDLAS 技术对气体浓度场进行二维重建,但光路分布会影响重建质量。研究了光路分布对重建精度的影响并总结了提高光路利用率的办法。在光路数目较少的情况下,提高每一条光路的利用率可以改善重建图像的质量:1)避免光路同时穿过同一组方格,以免光路重复;2)让每一条光路尽可能穿过多的方格;3)让光路尽可能交叉。

参考文献

- Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabo, *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208003.
袁松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气 CO_2 监测仪[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208003.
- Yao Lu, Liu Wenqing, Liu Jianguo, *et al.*. Research on open-path for atmospheric trace gas CO based on TDLAS[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0215003.
姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0215003.
- Bolshov M A, Kuritsyn Y A, Liger V V, *et al.*. Measurements of the temperature and water vapor concentration in a hot zone by tunable diode laser absorption spectrometry[J]. Applied Physics B, 2010, 100(2): 397-407.

- 4 Xu Zhenyu, Liu Wenqing, Kan Ruifeng, *et al.*. Study on the arithmetic of absorbance inversion based on tunable diode-laser absorption spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(8): 2201-2204.
许振宇, 刘文清, 阚瑞峰, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱中的吸光度反演算法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8): 2201-2204.
- 5 He Junfeng, Kan Ruifeng, Xu Zhenyu, *et al.*. Derivative spectrum and concentration inversion algorithm of tunable diode laser absorption spectroscopy oxygen measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0430003.
何俊峰, 阚瑞峰, 许振宇, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱氧气测量中的导数光谱处理与浓度反演算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0430003.
- 6 Li Jinyi, Zhu Keke, Du Zhenhui, *et al.*. A high-resolution algorithm for 2D temperature reconstruction using TDLAS and numerical simulation[J]. Journal of Experiments Fluid Mechanics, 2014(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[J]. 实验流体力学, 2014(3): 63-71.
- 7 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.
- 8 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): 45301-45310.
- 9 Kasyutich V L, Martin P A. Towards a two-dimensional concentration and temperature laser absorption tomography sensor system[J]. Applied Physics B Laser & Optics. 2011, 102(1): 149-162.
- 10 Zhang Shunli, Zhang Dinghua, Wang Cheng, *et al.*. The influence of projection number on reconstruction quality of algebraic reconstruction technique[J]. Nondestructive Testing, 2008, 12: 889-891.
张顺利, 张定华, 王成, 等. 投影数对 ART 算法重建质量的影响[J]. 无损检测, 2008(12): 889-891.
- 11 Zhang Shunli, Zhang Dinghua, Ao Bo, *et al.*. Research of high reconstruction on algebraic reconstruction technique[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(4): 719-723.
张顺利, 张定华, 熬波, 等. ART 算法高质量重建研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(4): 719-723.
- 12 Wu Jianhui, Liu Yu Ji, Li Gongping, *et al.*. Influencing factors of image reconstruction with ART algorithm [J]. Nondestructive Testing, 2010, 12: 930-934.
伍建辉, 刘郁纪, 李公平, 等. ART 算法重建图像的影响因素[J]. 无损检测, 2010(12): 930-934.
- 13 Song Junling, Hong Yanji, Wang Guangyu. Optimization of irregular distribution for two-dimensional temperature reconstruction[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0430001.
宋俊玲, 洪延姬, 王广宇. 温度场二维重建非规则光线分布优化[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0430001.
- 14 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 Sinica, 2012, 61(24): 514-518.
- 15 Ma Jiming, Zhang Jianqi, Song Guzhou, *et al.*. Variation constrained iterative filtered backprojection CT reconstruction method[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0234002.
马继明, 张建奇, 宋顾周, 等. 全变分约束迭代滤波反投影 CT 重建[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0234002.