

# 温度场二维重建非规则光线分布优化

宋俊玲 洪延姬 王广宇

(装备学院激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

**摘要** 基于激光吸收光谱技术和代数迭代算法,在非规则光线分布条件下,实现温度场二维重建。通过计算重建区域所有网格穿过光线数目的权重因子,得到优化的非规则光线分布方式,提高了温度场重建精度。数值仿真结果表明,采用优化的非规则光线分布温度场重建结果相对原始模型偏差在 15% 以内,优于未优化光线分布得到的结果;随着发射数目的增加,投影光线数目增多,不同离散网格数目下,重建质量均提高;在相同光线数目条件下,非规则光线分布重建结果优于平行投影重建结果。实验中采用时分复用技术,在 1 kHz 扫描频率下分别扫描  $\text{H}_2\text{O}$  的两条吸收谱线  $7205.25\text{ cm}^{-1}$  和  $7416.05\text{ cm}^{-1}$ ,通过实验对比优化与非优化光线分布和多发射端重建结果,数值模拟结果与实验结果相一致,验证了光线分布优化方法的正确性。

**关键词** 光谱学;可调谐半导体激光器吸收光谱;代数迭代算法;温度场二维重建;光线分布优化

**中图分类号** O433.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0430001

## Optimization of Irregular Beam Distribution for Two-Dimensional Temperature Reconstruction

Song Junling Hong Yanji Wang Guangyu

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Academy of Equipment,  
Beijing 101416, China)

**Abstract** Based on the laser absorption spectroscopy technique and algebraic tomography reconstruction, two-dimensional temperature distribution is reconstructed by using an irregular beam array. The grid weight factor which represents the number of lines across the grid is put forward and used to evaluate the distribution of the line. An improvement of reconstruction is obtained by optimal line distribution. The reconstructed quality with error of less than 15% compares with the non-optimal beam and parallel beam distribution reconstructed results. The reconstructed quality increases with number of emitters increasing. Time division multiplexing technology is adopted to scan two  $\text{H}_2\text{O}$  absorption transitions ( $7205.25\text{ cm}^{-1}$  and  $7416.05\text{ cm}^{-1}$ ) simultaneously at 1 kHz repetition rate. Additionally, the numerical results agree well with the experimental results.

**Key words** spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; algebraic tomography reconstruction; two-dimensional temperature reconstruction; optimization of beam distribution

**OCIS codes** 300.1030; 100.6950; 300.6260; 220.4830

## 1 引 言

将激光吸收光谱技术与计算机断层扫描重建技术相结合,可以实现对气体温度和组分浓度分布的二维重建。由于重建算法的不同,光线分布方式有所不同。一种方法是以 Radon 变化为基础的变换法,通常采用平行光束或扇形光束投影,并要求投影

光线均匀分布在  $180^\circ$ (或  $360^\circ$ ) 范围内。另外一种方法是迭代算法,每条投影光线对应于迭代方程组中的一个方程,对光线分布方式无要求,可以采用不完全投影(非规则光线分布)。

利用变换法重建被测区域的精确度与入射激光光线数目和旋转角度有密切关系,往往需要增加入

收稿日期: 2012-11-06; 收到修改稿日期: 2012-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(90916015,91116010)资助课题。

作者简介: 宋俊玲(1985—),女,博士研究生,主要从事近红外光谱流场诊断方面的研究。

E-mail: songjl@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 洪延姬(1963—),女,博士,教授,主要从事先进推进技术方面的研究。E-mail: hongyanji@vip.sina.com

射光线数目和投影角度来提高重建精确度。Busa 等<sup>[1]</sup>利用变换法,由 72 个扇形光束共 1800 条光线对被测区域进行 360°投影,重建高超声速燃烧段出口平面温度和 H<sub>2</sub>O 的浓度二维分布。为减小投影光线数目, Kasyutich 等<sup>[2]</sup>基于代数迭代算法(ART),采用 5 个扇形光束共 55 条光线重建非轴对称分布的温度场。Wang 等<sup>[3]</sup>直接使用 4 个高速旋转台并联运行,实现同步扫描被测区域,大大减少了测量时间。在 HIFiRE-2 地面实验中,共布置 14 条光路,包括 8 条垂直光路和 6 条水平光路,用于研究燃烧室出口温度和 H<sub>2</sub>O 组分浓度的二维分布<sup>[4,5]</sup>。以上研究大都基于均匀光线分布方式,需要通过布置大量光线来获得较好的实验结果。然而,在实际流场诊断中,由于实验空间和条件的限制,无法满足大量光线的要求,如何合理布置入射光线位置,在有限的发射数目条件下提高重建结果的精度有待进一步研究。

本文采用非规则光线布局,提出非规则光线分布优化原则,基于 ART 算法重建温度场二维分布。通过数值模拟,研究了发射端数目对重建结果的影响,并对比了采用优化非规则光线分布温度场二维重建结果与未优化光线分布和平行光线分布重建结果,最后通过实验进行验证。

## 2 基本原理

利用可调谐激光二极管扫描气体的特征吸收谱线计算气体温度,根据 Beer-Lambert 定律

$$A_\nu = \ln\left(\frac{I_\nu}{I_0}\right) = \int_0^L -P(x)\chi(x)S_\nu(T,x)\Phi(\nu)dx, \quad (1)$$

式中  $A_\nu$  为谱线  $\nu$  的积分吸收面积,  $P$  为气体总压,  $\chi$  为待测气体组分浓度,  $\Phi(\nu)$  为线型函数,  $S_\nu(T)$  为谱线  $\nu$  在温度  $T$  时的谱线强度。谱线强度随温度的变化可以表示为

$$S_\nu(T) = S_\nu(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T_0}{T} \exp\left[-\frac{hcE''}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu}{kT_0}\right)\right]^{-1}, \quad (2)$$

式中  $S_\nu(T_0)$  为在参考温度  $T_0 = 296$  K 时的谱线强度,其大小可以通过 HITRAN 光谱数据库<sup>[6]</sup> 得到。 $E''$  为低跃迁能态能量,  $h$  为普朗克常数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $c$  为光速,  $Q(T)$  为温度  $T$  时的配分函数值,一定温度范围内的配分函数可以用多项式表示,本文采用文献<sup>[7]</sup>给出的配分函数表达式计算得到。

当被测区域气体温度分布非均匀时,将被测区域  $f(x,y)$  离散为  $N = n \times n$  的网格,假设被测气体在每个方格内的温度和组分浓度不变,(1)式可以写成

$$A_{\nu,i} = \sum_{j=1}^N f_{\nu,j} L_{ij} = \sum_{j=1}^N [PS(T)X]_{\nu,j} L_{ij}, \quad (3)$$

式中  $L_{ij}$  表示第  $i$  条光线穿过第  $j$  个网格的长度,且只与投影光线的空间位置有关。当投影光线数目为  $M$  时,(3)式表示为

$$\begin{cases} L_{11}f_1 + L_{12}f_2 + \dots + L_{1N}f_N = A_1 \\ L_{21}f_1 + L_{22}f_2 + \dots + L_{2N}f_N = A_2 \\ \vdots \\ L_{M1}f_1 + L_{M2}f_2 + \dots + L_{MN}f_N = A_M \end{cases}. \quad (4)$$

由于一条光束最多能穿过离散网格数为  $2n-1$ , 大多数  $L_{ij}$  均为 0, 只有极少数的网格单元对  $A_{\nu,i}$  的投影值有贡献。本文采用 ART, 求解表达式可以写为<sup>[8]</sup>

$$f^{(k)} = f^{(k-1)} - \alpha \frac{[f^{(k-1)} \cdot \mathbf{L}_i - A_i]}{\sum_{j=1}^N |L_{ij}|^2} \mathbf{L}_i, \quad (5)$$

式中  $k$  为迭代次数,由于 ART 算法中收敛速度慢,且松弛因子  $\alpha$  一般为常数,不能反映当前网格信息,采用文献<sup>[9]</sup>的修正 ART(MAART),将吸收强度引入到迭代关系中,对松弛因子进行修正,将(5)式改写为

$$\begin{aligned} f^{(k)} &= f^{(k-1)} - \alpha_k [f^{(k-1)} \cdot \mathbf{L}_i - A_i] \\ \alpha_k &= \beta \times \frac{f_j^{(k-1)} L_{ij}}{\sum_{j=1}^N f_j^{(k-1)} L_{ij}}. \end{aligned} \quad (6)$$

在 ART 中,为保证算法收敛,(5)式中的  $\alpha$  取值范围为  $0 \sim 2$ , 在迭代重建算法中,(6)式中  $\beta$  取值为 0.25。由于温度场和浓度场均为正值,在迭代过程中加入非负性限制<sup>[10]</sup>,即

$$[\Phi(f)]_j = \begin{cases} f_j, & f_j \geq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad f^{(k)} \leftarrow \Phi\{f^{(k-1)} - \alpha_k [f^{(k-1)} \cdot \mathbf{L}_i - A_i]\}. \quad (7)$$

同时,为减弱重建区域相邻点突变响应,采用平滑处理机制<sup>[11,12]</sup>,对于网格  $(m,n)$ ,可以写成

$$f_{(m,n)}^k = (1 - \delta) \times f_{(m,n)}^{(k-1)} + \delta \times \left[ \sum_{y=n-1}^{n+1} \sum_{x=m-1}^{m+1} f_{(x,y)}^{(k-1)} / 8 \right]. \quad (8)$$

第  $k$  次迭代得到的网格信息  $f_{(m,n)}^k$  不仅与第  $k-1$  次迭代的网格信息相关,还与相邻 8 个网格的信息相关。计算中  $\delta$  取 0.001。

利用两线直接吸收法测量温度场,在谱线的选择上,文献[13,14]做了详细的讨论。可以概括为以下基本原则:1)谱线为  $1.3\sim 1.5\ \mu\text{m}$  的近红外光谱区;2)依据被测对象谱线对有较强的吸收以保证有较高的信噪比;3)尽量减少临近谱线的干扰。由于可调谐半导体激光器可以调谐的范围有限,文献[15]采用温度调谐技术在 3 s 内扫描得到  $\text{CO}_2$  在  $6320\sim 6328\ \text{cm}^{-1}$  波段的 8 条谱线。本文数值模拟中被测区域温度分布在  $300\sim 800\ \text{K}$ 。本文选择谱线  $7416.05\ \text{cm}^{-1}$  和  $7205.25\ \text{cm}^{-1}$ ,吸收线强度和温度灵敏度随温度的变化如图 1 所示。

## 3 物理模型及光线分布原则

### 3.1 数值仿真模型

温度分布在  $300\sim 800\ \text{K}$  的高斯分布,且高斯分

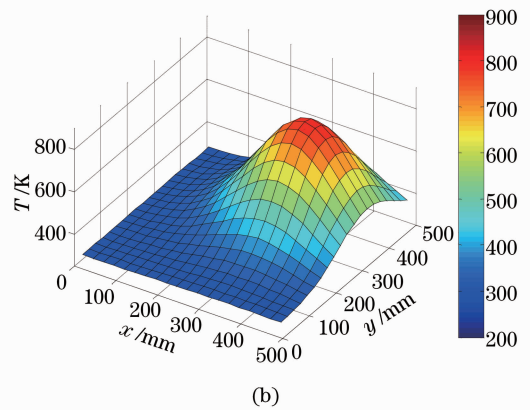
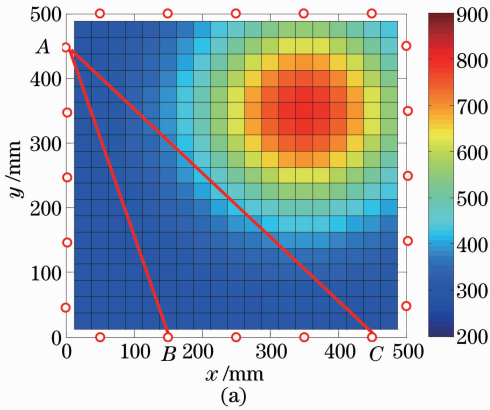


图 2 温度场分布模型

Fig. 2 Phantoms for temperature distribution

### 3.2 光线分布原则

在温度场二维重建中,若采用平行光束或者扇形光束投影时,投影角度和每个投影角度内光线数目影响了重建结果。本文采用非规则光线布局,选择图 2(a)中任意“o”位置作为发射端,其余位置作为光线的接收端。同时限定:1)处于同一水平或者垂直方向的两个发射/接收点无光线连接,如图 2(a)中 B 和 C 两点无光线;2)光线无方向性,连接两点的光线不重复计数,如光线 AB(以 A 为发射端, B 为接收端)和光线 BA(以 B 为发射端, A 为接收端)只按一条光线计算。

在迭代算法中,网格  $i$  被光线  $j$  穿过一次,对应于该网格  $i$  在光线  $j$  的迭代方程式中系数不为 0。

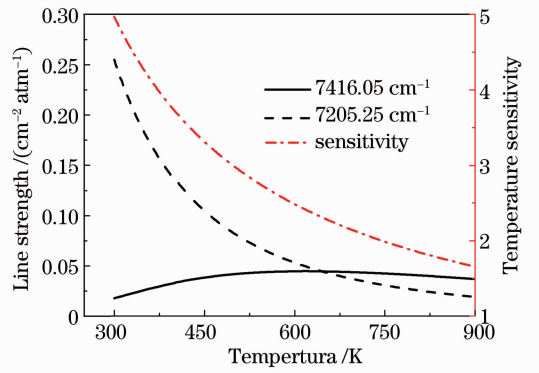


图 1 吸收强度和温度灵敏度随温度的变化

Fig. 1 Line strength and temperature sensitivity versus temperature

布中心不在重建区域中心。重建区域大小为  $500\ \text{mm}\times 500\ \text{mm}$  方形区域。被测区域离散成  $20\times 20$  网格。依据实验测量过程中分布空间的限制,假设在被测区域的每条边上等间隔布置 5 个发射/接收装置,如图 2(a)所示。其中“o”表示安装探测器/接收装置的位置。

每次迭代后,每个网格所代表的物理量值,将通过迭代方程被修改。那么,穿过同一网格的光线数目越多,该网格在迭代方程计算次数越多,该网格所代表的物理量将越接近实际情况。

当被测区域离散网格数和光线的空间分布确定时,每个网格被穿过的光线数目确定,每条光线穿过网格的长度也确定,即可得到积分吸收面积  $A$ 。定义  $f_{\text{grid-}j}$  为每个网格被穿过光线数目的权值因子

$$f_{\text{grid-}j} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2^{i-1}}, \quad (9)$$

式中  $m$  为穿过网格  $j$  的光线数目,若无光线穿过网格  $j$ ,则  $f_{\text{grid-}j} = 0$ 。为反映整个重建区域光线穿过网格的信息,定义

$$f_{\text{grid}} = \frac{\sum_{j=1}^{n^2} f_{\text{grid}-j}}{n \times n} = \frac{\sum_{j=1}^{n^2} \sum_{i=1}^m \frac{1}{2^{i-1}}}{n \times n}, \quad (10)$$

式中  $n^2$  为被测区域离散网格的总数。

为评估二维温度场重建质量,定义温度场重建结果均方误差:

$$\epsilon_{\text{DevT}} = \sqrt{\frac{1}{n \times n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \frac{T_{i,j}^{\text{cal}} - T_{i,j}^{\text{orig}}}{T_{\text{max}}^{\text{orig}} - T_{\text{min}}^{\text{orig}}} \right)^2}, \quad (11)$$

式中 orig 表示初始模型参数, cal 表示计算结果。 $\epsilon_{\text{DevT}}$  结果越小,说明重建结果与原始模型越接近,重建效果越好。

## 4 数值仿真结果与验证

### 4.1 不同发射位置的优化结果

当发射端数目为 5 时,利用(10)式,计算发射位

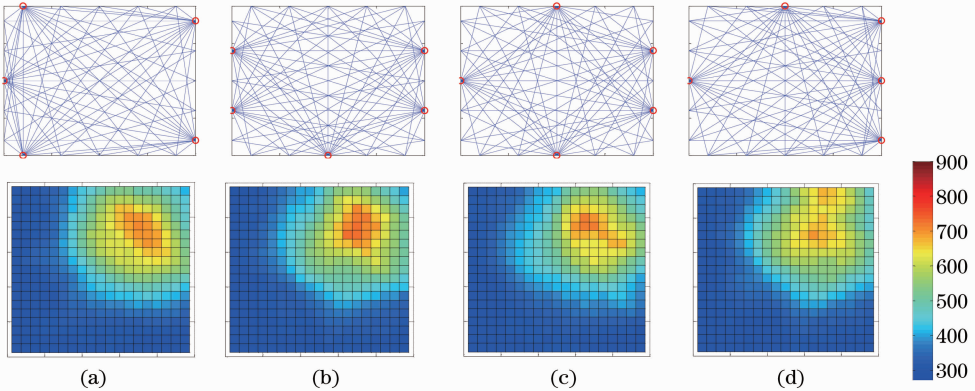


图 3 发射端数目为 5 时,光线分布及温度场重建结果

Fig. 3 Beam arrangement and temperature reconstruction when the number of emitters is 5

表 1 不同光线分布下  $f_{\text{grid}}$  和  $\epsilon_{\text{DevT}}$  结果

Table 1  $f_{\text{grid}}$  and  $\epsilon_{\text{DevT}}$  results for different beam arrangements

No.	Number of beams	$f_{\text{grid}}$	$\epsilon_{\text{DevT}}$
Fig. 3(a)	66	1.664	0.0619
Fig. 3(b)	67	1.635	0.0933
Fig. 3(c)	66	1.619	0.0655
Fig. 3(d)	61	1.643	0.0716

图 4 为图 3(a)和(b)两种光线分布时每个网格相对模型温度的偏差和穿过光线权值的结果。由图可知,网格编号在 200~350 的温度场重建值较理论模型偏差增大,这是由于此处温度梯度较大,图 3(b)在此处光线分布较为稀疏。比较温度场的重建结果,图 3(a)和(b),采用最佳光线分布的温度场结果明显好于未采用最佳分布的结果。

考虑到在实际测量中,利用 Voigt 线型拟合计算积分吸收面积  $A[(4)式]$  存在一定的误差,第 5 节给出了实验中两条谱线 Voigt 拟合结果,拟合偏差

置位于其中任意 5 个点,且  $f_{\text{grid}}$  最大时,其光线分布如图 3(a)所示。计算得到  $f_{\text{grid}}$  最大为 1.664,图中光线总数目为 66。图 3(b)~(d)发射端数目仍为 5,包含的光线数目分别为 67,66 和 61,3 种不同发射位置的光线分布及温度场重建结果。与原始模型图 2 比较,图 3(b)重建区域边缘出现明显的高温区域,说明在迭代重建过程中出现偏差,此种光线布局方法已经不能较好重建出原始温度场。利用(11)式,分别计算以下几种光线分布的  $\epsilon_{\text{DevT}}$ ,如表 1 所示。当采用最优光线分布时, $\epsilon_{\text{DevT}}$  最小为 0.0619,说明重建后的二维温度分布结果明显优于其他几种情况,对应  $\epsilon_{\text{DevT}}$  最大为 1.664,被测区域内光线穿过网格数目最多,说明选择  $\epsilon_{\text{DevT}}$  作为光线分布优化标准是合理的。

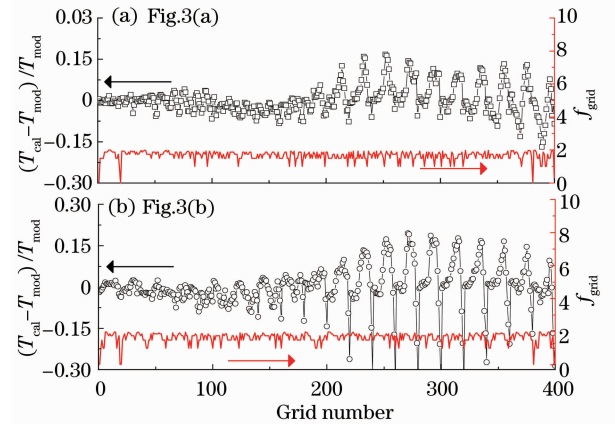


图 4 不同网格的温度相对偏差和  $f_{\text{grid}}$

Fig. 4 Relative errors and  $f_{\text{grid}}$  for different grids 小于 1%。为了检验随机误差对重建结果的影响,将 1%、5%、10% 和 15% 的随机误差分别带入(4)式中,计算图 3 中 4 种光线分布下的  $\epsilon_{\text{DevT}}$  结果如表 2 所示。

表 2 随机误差对重建结果的影响

Table 2 Effect of the relative random noise

No.	1%	5%	10%	15%
Fig. 3(a)	0.0638	0.0655	0.0924	0.1377
Fig. 3(b)	0.0957	0.1026	0.1406	0.1956
Fig. 3(c)	0.0672	0.0728	0.1137	0.1428
Fig. 3(d)	0.0724	0.0864	0.1245	0.2079

将表 2 结果与表 1 未考虑随机误差的影响结果相比较,在加入 1% 随机误差后,对重建结果的影响较小,说明在实验中可以忽略由于拟合面积带来误

差的影响。随着相对误差的增大,  $\epsilon_{DevT}$  增大重建结果偏差,比较不同光线分布下的结果,可以看出,当采用图 3(a) 优化的光线分布方式,重建结果仍优于其他几种情况。

#### 4.2 发射数目的对重建结果的影响

依据第 3 节中优化的光线布局原则,研究在优化光线布局下,不同发射数目对重建结果的影响。发射端数目为 4~10,每种发射端数目对应的最优光线分布方式及重建结果如图 5 所示。由图 5 可知,

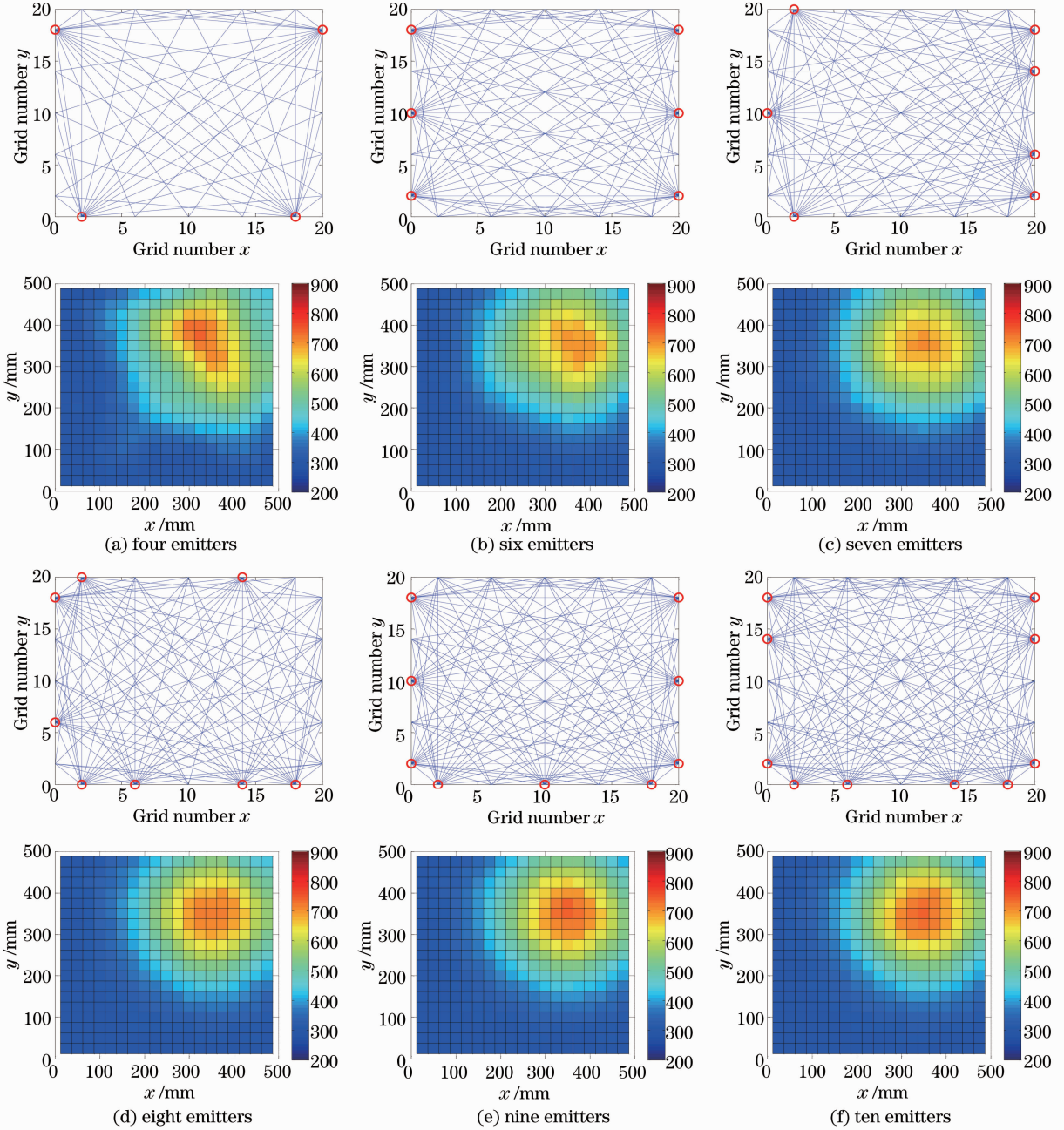
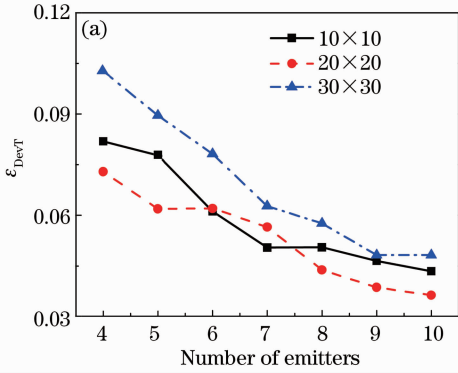


图 5 不同发射数目下温度场重建结果

Fig. 5 Temperature reconstruction for different numbers of emitters

随着发射数目的增加,被测区域内分布的光线数目增加,温度分布重建结果变好。

图 6 为不同网格数目条件下,  $\epsilon_{DevT}$  和  $f_{grid}$  随发射数目的变化规律。从图中可知,随着发射数目的增加,不同网格数目的  $\epsilon_{DevT}$  逐渐降低,但下降趋势逐



渐变缓。由于被测区域离散网格数目的增多,在投影光线数目一定的情况下,  $f_{grid}$  随网格数目增加而降低,但是随着发射数目的增加,  $f_{grid}$  逐渐增加,对应着  $\epsilon_{DevT}$  下降,温度场二维重建质量提高。

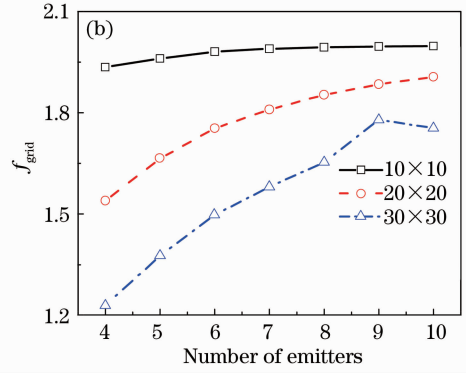


图 6  $\epsilon_{DevT}$  和  $f_{grid}$  随发射数目的变化

Fig. 6  $\epsilon_{DevT}$  and  $f_{grid}$  versus the number of emitters

### 4.3 与平行光束投影比较

图 7 为采用平行光束投影光线分布图。图中光线旋转角度为  $45^\circ$ , 每个方向内光线数目为 17, 总光线数目为 68。

图 8(a)和(b)分别为平行光束和图 3(a)非均匀光线分布时每条光线距离重建区域中心的距离与光线与  $x$  轴夹角的关系。从图中可知,采用平行光束时,光线分布较为均匀,但是位于被测区域边界部分网格,穿过的光线数目较少。

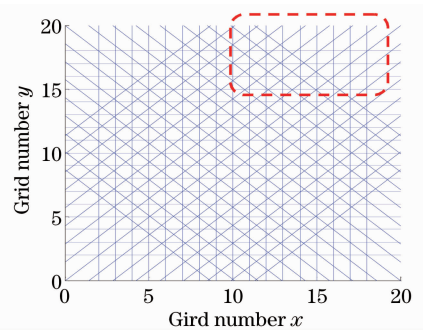


图 7 平行光线投影下光线分布

Fig. 7 Beam arrangement for parallel projection

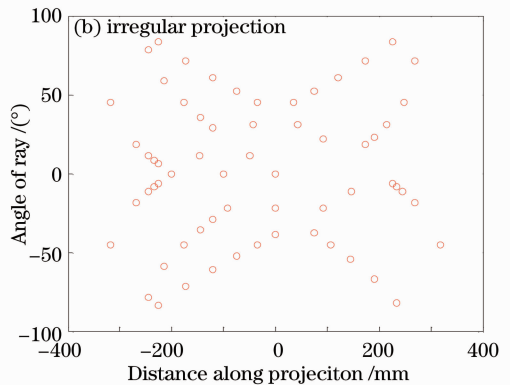
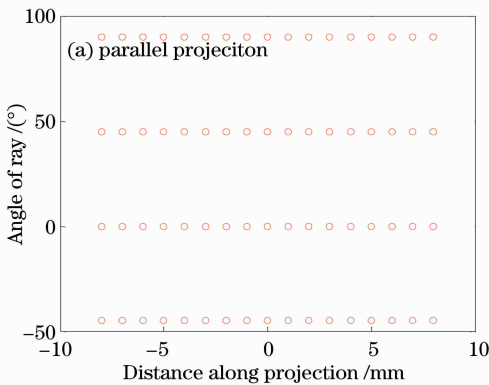


图 8 光线距中心距离与角度关系

Fig. 8 Relationship between distance along projection and angle of ray

利用(11)式计算得到重建温度场相对偏差结果如图 9 所示。与图 3 比较,在高斯分布中心附近,重建结果相对原始模型最大偏差为 30%,图 7 虚框部分光线分布较少,此区域温度分布计算模型中高斯分布下降端,温度梯度大,图 9 中相对偏差较大的网格数

呈现一定规律性,即对应此温度重建区域。采用平行光束投影总光线数目为 68,采用非规则优化光线分布图 3(a)中总光线数目为 66,比较两者的温度场重建结果图 9 与图 4(a),非规则光线分布重建结果偏差在 15%以内,明显低于采用平行光束的重建结果。

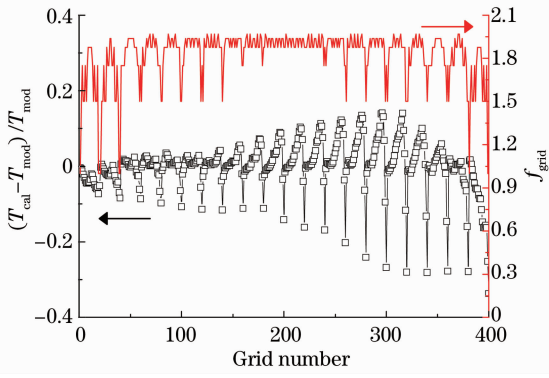


图 9 不同网格的温度相对偏差和  $f_{grid}$

Fig. 9 Relative errors and  $f_{grid}$  for different grids

## 5 实验验证

实验装置如图 10 所示,被测区域为  $560\text{ mm} \times 560\text{ mm}$ ,四周安装水平导轨。在测量区域距离上边缘  $110\text{ mm}$ ,右边缘  $75\text{ mm}$  处放置  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$  的封闭式电炉。激光器和探测器分别固定在手动旋转台上,然后安装在水平导轨上。图中水平导轨上编号(1)~(20)的圆点表示激光器发射端/探测器固定位置。实验中以其中一个位置为发射点,转动旋转台,使激光分别被其他 15 个位置的探测器接收(不包含与发射端同轴的位置)。实验中两个激光器和两个探测器同时采集两路信号,并沿同一光路径,方向相反的信号不重复测量。

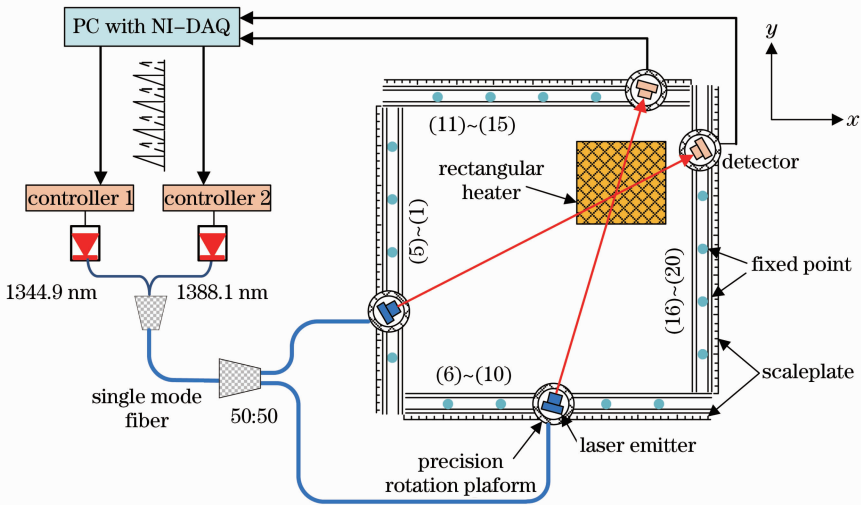


图 10 实验装置图

Fig. 10 Schematic of experiment system

由数据采集卡产生两路电压信号分别输入给两个激光控制器,两个激光控制器分别控制中心波长在  $1344.9\text{ nm}$  和  $1388.1\text{ nm}$  的两个 DFB 激光器。两个激光器输出激光经  $2 \times 1$  光纤耦合器,再经过  $1 \times 2$  光纤分束器,两路激光分别经过被测区域的不同位置

后,由对应的两个不同位置探测器接收。采用时分复用技术,在  $1\text{ kHz}$  扫描频率下分别扫描  $\text{H}_2\text{O}$  的两条吸收谱线,  $7205.25\text{ cm}^{-1}$  和  $7416.05\text{ cm}^{-1}$ ,用于温度测量。为减少实验测量中的误差,每次采集 100 个周期数据,将 10 个周期采集数据进行平均处理得到

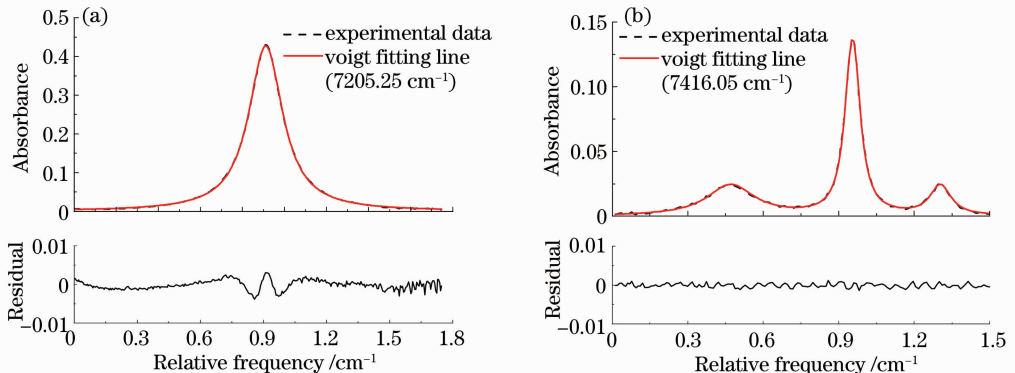


图 11  $7205.25\text{ cm}^{-1}$  和  $7416.05\text{ cm}^{-1}$  吸收谱线 Voigt 拟合结果

Fig. 11 Voigt fit for lines  $7205.25\text{ cm}^{-1}$  and  $7416.05\text{ cm}^{-1}$

10 组数据,然后将此 10 组数据分别利用 Voigt 线型拟合计算面积,再次平均以减少拟合带来的误差。图 11 给出吸收谱线  $7205.25\text{ cm}^{-1}$  和  $7416.05\text{ cm}^{-1}$  的 Voigt 拟合结果。其中  $7416.05\text{ cm}^{-1}$  采用三峰拟合计算面积。将拟合结果的残差积分得到  $\Delta A$ , 吸收积分面积  $A$  的相对偏差  $\sigma = \Delta A/A$ , 分别得到  $7205.25\text{ cm}^{-1}$  和  $7416.05\text{ cm}^{-1}$  的相对偏差为  $-1.53 \times 10^3$  和  $-8.56 \times 10^3$ 。

光线分布分别采用图 3(a)、(b)和图 5(f)的分布方式,实验得到的重建结果如图 12 所示。图 12(a)和 (b)均为 5 个发射端,其中图 12(a)采用优化光线布局方法,图 12(c)采用 10 个发射端的光线布局。比较图 12(a)和(b)可知,采用非优化的光线分布图 12(b)温度场重建结果明显差于图 12(a),在重建温度场 4 个角处偏差较大,一是由于在被测区域边缘处穿过的光线较少,二是在被测区域吸收长度短,信噪比

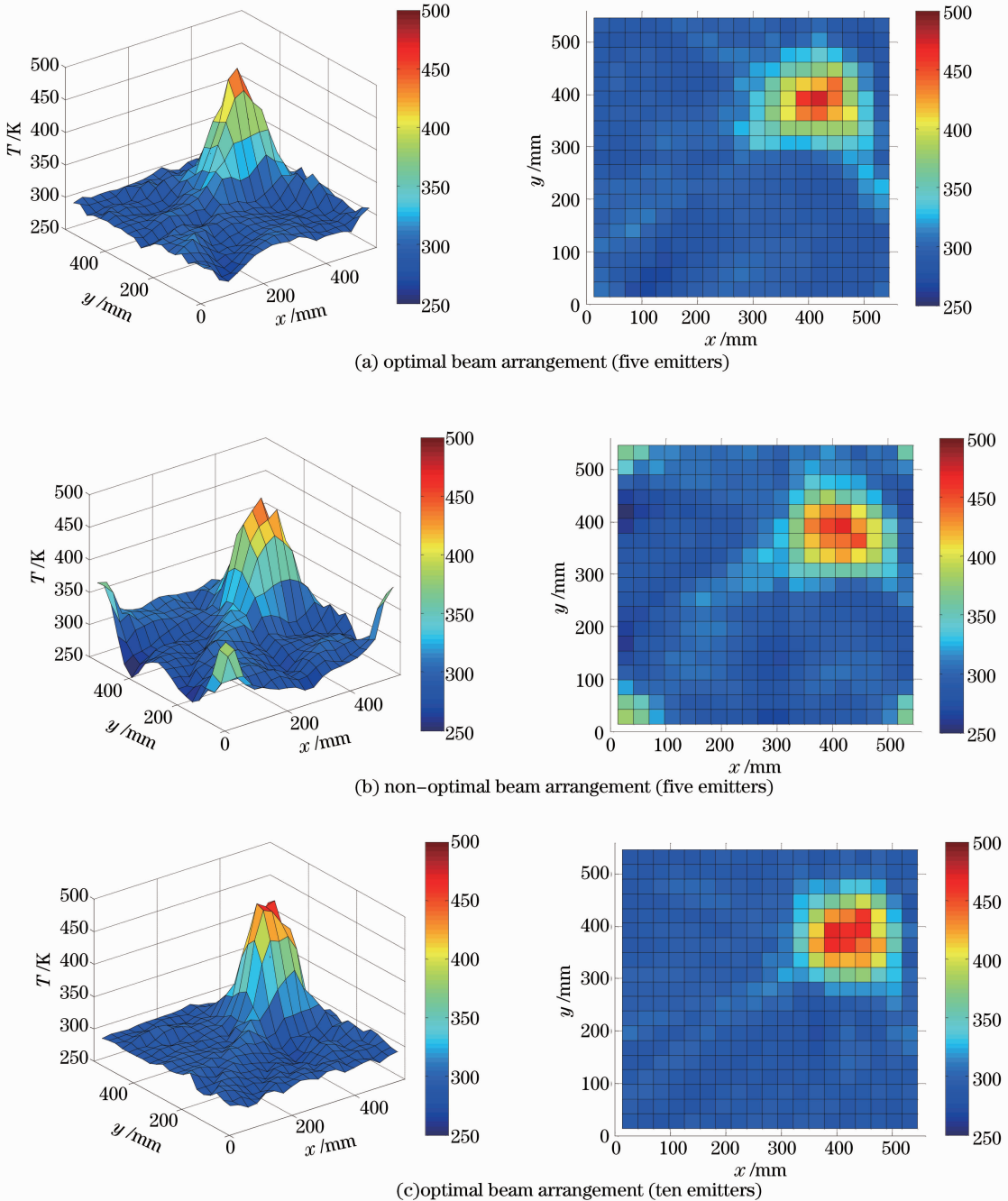


图 12 温度场重建结果

Fig. 12 Temperature reconstruction results



低。比较图 12(a)和(c),图 12(c)在室温区域,重建温度场波动明显小于图 12(a)的结果,与 4.2 节随着发射数目增加重建结果变好的数值模拟结果相一致。

实验中采用 K 型热电偶标定被测区域温度,图 12 给出  $y=378$  mm 沿着  $x$  方向的温度分布[采用图 3(a)的重建结果]和热电偶测量结果,重建结果温度分布与热电偶测量结果基本吻合,重建结果在炉子中央高温区较热电偶测量结果最大偏差为 8.9%。重构区域划分每个网格的长度为 28 mm,炉面长度为 150 mm,共 6 个网格,由于在计算中假设温度在同一网格内均匀分布,同时采用了平滑机制如(5)式所示,削弱了实际流场中的温度梯度,导致低温区温度提升,因此在炉子边缘区域,并没有热电偶测量结果的陡峭变化。偏差的另外一个来源是迭代过程中的数值噪声,第 4 节仿真结果与初始模型之间存在偏差。

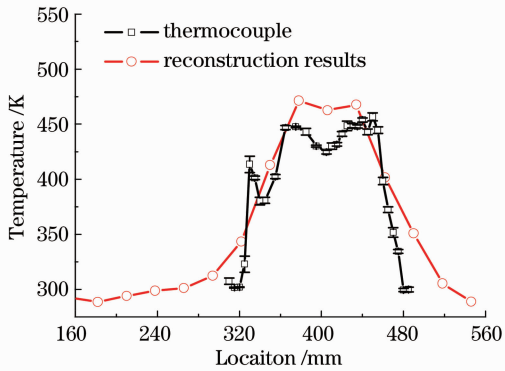


图 13  $y=378$  mm 时,沿  $x$  方向热电偶测量结果与重建结果

Fig. 13 Thermocouple readings and reconstructed results along  $x$  axis with  $y=378$  mm

## 6 结 论

结合激光吸收光谱技术和计算机断层扫描方法,实现了非规则光线分布下温度场二维重建。通过计算重建区域所有网格穿过光线数目的权值,得到相同发射数目下最佳光线分布。数值模拟结果表明,在相同光线数目条件下,采用优化后非规则光线分布的温度场重建结果优于采用平行光束的重建结果。随着发射端数目的增加,被测区域内光线数目增多,温度场重建结果相对均方误差减小,重建质量提高。当采用 5 个发射端时,以优化后非规则光线分布重建得到的温度场相对原始模型温度偏差在 15% 以内,优于未优化非规则光线分布情况,数值仿真结果与实验得到结果相吻合。

## 参 考 文 献

- 1 K. M. Busa, E. Bryner, J. C. McDaniel *et al.*. Demonstration of capability of water flux measurement in a scramjet combustor using tunable diode laser absorption tomography and stereoscopic PIV [C]. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2011, AIAA-2011-1294
- 2 V. L. Kasyutich, P. A. Martin. Towards a two-dimensional concentration and temperature laser absorption tomography sensor system [J]. *Appl. Phys. B*, 2011, **102**(1): 149~162
- 3 F. Wang, K. F. Cen, N. Li *et al.*. Two-dimensional tomography for gas concentration and temperature distributions based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2010, **21**(4): 1~10
- 4 M. S. Brown. Application of diode-laser-based measurement in hypersonic flows [C]. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2012, AIAA-2012-0555
- 5 M. S. Brown, G. C. Herring, K. Cabell *et al.*. Optical measurement at the combustor exit of the HIFiRE 2 ground test engine [C]. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2012, AIAA-2012-0857
- 6 L. S. Rothman, I. E. Gordon, A. Barbe *et al.*. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. *J. Quant. Spectrosc. & Radiative Transfer*, 2009, **110**(2): 533~572
- 7 R. R. Gamache, S. Kennedy, R. Hawkins *et al.*. Total internal partition sums for molecules in the terrestrial atmosphere [J]. *J. Mol. Struct.*, 2000, **517-518**: 407~425
- 8 A. C. Kak, M. Slaney. Principles of Computerized Tomographic Imaging [M]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999
- 9 N. Li, C. Weng. Modified adaptive algebraic tomographic reconstruction of gas distribution from incomplete projection by two-wavelength absorption scheme [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(6): 061201
- 10 P. C. Hansen, M. S. Hansen. AIR tools—a Matlab package of algebraic iterative reconstruction methods [J]. *J. Comput. Appl. Math.*, 2012, **236**: 2167~2178
- 11 E. L. Piccolomini, F. Zama. The conjugate gradient regularization method in computed tomography problems [J]. *Appl. Math. Comput.*, 1999, **102**: 87~99
- 12 L. Ma, W. Cai. Numerical investigate of hyperspectral tomography for simultaneous temperature and concentration imaging [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(21): 3751~3759
- 13 X. Zhou, X. Liu, J. B. Jeffries *et al.*. Development of a sensor for temperature and water vapor concentration in combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**(8): 1459~1468
- 14 X. Zhou, X. Liu, J. B. Jeffries *et al.*. Selection of NIR H<sub>2</sub>O absorption transitions for in-cylinder measurement of temperature during the compression stroke of an IC engine [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2005, **16**(12): 2437~2445
- 15 Li Jinyi, Du Zhenhui, Qi Rubin *et al.*. Measurement of absorption spectra of CO<sub>2</sub> at 6320~6336 cm<sup>-1</sup> using temperature tuning technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0130004  
李金义, 杜振辉, 齐汝宾等. 温度调谐技术测量 CO<sub>2</sub> 在 6320~6336 cm<sup>-1</sup> 波段的吸收光谱 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0130004

栏目编辑: 李文喆