

光学学报

基于宽波段吸收光谱测温方法的影响因素数值研究

艾苏曼^{1,2}, 邓昊², 黄安², 夏晖晖², 陈楚戈^{1,2}, 阚瑞峰^{2***}, 何亚柏^{2**}, 许振宇^{2*}

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 针对宽波段吸光度直接反演温度的测温方法, 数值仿真分析了 300~2000 K 温度范围内光谱噪声独立作用、光谱参数误差独立作用和二者综合作用对温度反演精度的影响。在光谱噪声单独作用下, 以 ± 0.005 幅值噪声为一倍噪声, 添加幅值从 ± 0.005 增加至 ± 0.1 的光谱噪声。当噪声幅值为 ± 0.1 时, 温度的最大标准差为 46.58 K@1700 K, 为达到小于 10 K 的标准差, 需将光谱噪声幅值控制在 ± 0.02 以内。在光谱参数误差单独作用下, 分别对可标定的强吸收线和不可标定的弱吸收线的光谱参数添加 1% 和 10%~50% 的误差, 温度最大标准差为 7.77 K@1300 K (1% 和 40% 的误差组合), 其中线强误差对温度反演的影响较大, 故应尽量将线强标定误差控制在 1% 以内。在光谱噪声和光谱参数误差的综合作用下, 光谱噪声对测温精度的影响更大, 在实际测量过程中获得信噪比较好的吸收信号可减小光谱噪声带来的影响。

关键词 光谱学; 吸收光谱; 宽波段吸收光谱; 温度测量; 光谱噪声; 光谱参数误差

中图分类号 O433.5+1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1830003

Numerical Study on Influencing Factors of Thermometry Method Based on Broadband Absorption Spectra

Ai Suman^{1,2}, Deng Hao², Huang An², Xia Huihui², Chen Chuge^{1,2}, Kan Ruifeng^{2***},
He Yabai^{2**}, Xu Zhenyu^{2*}

¹School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

²Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract In view of direct temperature inversion by broadband absorbance, the individual and comprehensive influence of spectral noise and spectral parameter error on temperature inversion accuracy at a temperature range of 300–2000 K by numerical simulation is analyzed. When only spectral noise exists, the noise with an amplitude of ± 0.005 is taken as a minimum noise, and the spectral noise whose amplitude is increased from ± 0.005 to ± 0.1 is added. When the noise amplitude is ± 0.1 , the maximum standard deviation of temperature is 46.58 K @ 1700 K. In order to make the standard deviation less than 10 K, the spectral noise amplitude should be controlled within ± 0.02 . when only spectral parameter error exists, the spectral parameter error of calibrated strong absorption lines and uncalibrated weak absorption lines is set to 1% and 10%–50%, respectively, and the maximum standard deviation of temperature is 7.77 K @ 1300 K (an error combination of 1% and 40%). The line intensity error has the greatest influence on temperature inversion, and thus the calibrated error of the line intensity should be controlled within 1% as far as possible. When spectral noise and spectral parameter error coexist, spectral noise has a greater impact on the temperature measurement accuracy, and the absorption signal with a better signal noise ratio can reduce the influence of spectral noise in the actual measurement process.

Key words spectroscopy; absorption spectra; broadband absorption spectra; temperature measurement; spectral noise;

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-03-06; 录用日期: 2022-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2006003, 2020YFA0405703)、国家自然科学基金(61805286)、安徽省自然科学基金(2008085QF317)

通信作者: *zyxu@aiofm.ac.cn; **yabaihe@hotmail.com; ***kanruifeng@aiofm.ac.cn

1 引言

在燃烧流场诊断的研究中,温度是评估燃烧过程的关键物理量之一。对燃烧场的温度进行高精度测量有利于了解燃烧场的信息,解析燃气轮机、超音速燃烧发动机和工业锅炉燃机等各种燃烧器与航空发动机的工作性能和燃烧状态,从而提高设备燃料的燃烧效率,减少温室气体排放,降低燃烧污染物对环境的影响^[1-4]。可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术具有非接触性、高灵敏度、高频响应和高选择性等优点,可实现温度、组分浓度、压力和流速等多参数的高精度原位测量,已经成为燃烧流场温度诊断领域中重要的技术手段之一^[5-6]。

TDLAS测温理论最早由美国斯坦福大学 Hanson 等^[7]提出,主要以双线测温为主,在高噪声、宽温、高压等恶劣燃烧环境下易出现测温精度低和测温范围受限等问题。采用宽调谐激光器或多个激光器组合作为光源,能纳入更多光谱信息,且降低了单一谱线误差的影响,因而可实现更高的测温精度和更宽的温度范围覆盖,目前已逐渐被应用于燃烧流场测量领域中^[8]。Caswell 等^[9-10]在 7246.4~7518.8 cm⁻¹连续光谱范围内选取多条吸收谱线,并利用差分后的光谱进行线性拟合,通过最佳拟合线与模拟数据间的最小均方误差获得了最优温度,其精度可达 2.5%。Wang 等^[11-12]将电子计算机断层扫描(CT)与 TDLAS 结合,在 1335~1375 nm 宽扫描范围下,对 300~2000 K 高温区间进行二维温度测量。Cheong 等^[13-14]提出了一种多谱线跨谱带测温方法,并在 McKenna 火焰和热共流喷射火焰上验证了该方法的可行性。Yang 等^[15]利用紫外宽带吸收光谱获得了甲烷/空气预混平焰炉的温度分布和浓度分布。Blume 等^[16]基于超连续宽带激光吸收光谱提出了宽带拟合方法来实现测温,并将信噪比提高了 2 倍。为提高宽波段测温精度,需研究影响测温准确度的因素,通过评定测量结果提出改进和优化措施。Mironenko 等^[17]通过修正影响测温精度的慢变基线和白噪声,获得了准确的温度评价,在 1000 K 模拟温度下的标准差小于 60 K。Bao 等^[18]将 TDLAS 与相对熵层析重建算法结合以降低噪声的影响,该方案对提高工业应用中的测温精度具有一定的潜力。Liu 等^[19]测量了 1344~1441 nm 波长范围内 49 条强吸收线的线强和 5 条吸收线的空气展宽系数与温度依赖指数,其结果的精确度在 5% 以内,实现了 TDLAS 系统的优化和测温准确度的提高。然而,光谱参数误差和光谱噪声作为影响宽波段测温方法精度的重要因素,关于其对宽波段测温方法精度影响的系统分析研究鲜有报道。因此,有必要研究光谱噪声和谱线参数误差对宽波段测温精度的影响,以不断优化方法和提高温度测量精度,为复杂流场环境的高精度温度测量提供方法参考。

本文以 H₂O 作为目标分子,针对其在 7361.476~

7485.0797 cm⁻¹光谱范围内的吸收特征,筛选出适用于测量 300~2000 K 温度的 79 条具有不同低态能级的吸收谱线。通过数值模拟仿真,深入研究不同水平光谱噪声与光谱参数误差对测温精度的影响,以及两者的综合扰动对测温精度的影响,以评估宽波段测温方法对光谱噪声和光谱参数误差的容忍能力。

2 宽波段吸收光谱测温方法

2.1 基本原理

所提的宽波段测温原理是 TDLAS 中的直接吸收光谱技术,遵循 Lambert-Beer 定律,吸光度 α_ν 的表达式为

$$\alpha_\nu = \ln\left(\frac{I_0}{I_\nu}\right) = k_\nu L = PS_{i,n}(T)\phi(\nu)X_i, \quad (1)$$

式中: I_0 和 I_ν 分别是激光的透射光强和入射光强,其单位为 mW; ν 为频率,其单位为 cm⁻¹; k_ν 为光谱吸收系数,其单位为 cm⁻¹; P 为待测气体总压,其单位为 atm (1 atm=1.013×10⁵ Pa); X_i 为待测组分 i 的浓度,以摩尔分数或分压比表示; $S_{i,n}(T)$ 是待测组分 i 第 n 条吸收线在温度 T 时的吸收线线强,其单位为 cm⁻²·atm⁻¹; $\phi(\nu)$ 为吸收线线型; L 是经过待测组分的光程长度,其单位为 cm。

在一个热平衡体系中, $S_{i,n}(T)$ 线强是温度 T 的函数,其表达式为

$$S_{i,n}(T) = S_{i,n}(T_0) \frac{Q(T_0)T_0}{Q(T)T} \exp\left[-\frac{hcE_{i,n}^*}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \frac{1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_{0,i,n}}{kT}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_{0,i,n}}{kT_0}\right)}, \quad (2)$$

式中: $\nu_{0,i,n}$ 是吸收谱线的中心频率其单位为 cm⁻¹; k 是玻尔兹曼常数,其单位为 J/K; h 是普朗克常数,其单位为 J·s; c 是光速,其单位为 cm/s; T_0 是参考温度, HITRAN 数据库中通常定义其值为 296 K; $S_{i,n}(T_0)$ 是 T_0 下的参考线强值,其单位为 cm⁻²·atm⁻¹; $Q(T)$ 是温度 T 下吸收分子的配分函数; $E_{i,n}^*$ 是低态能级值,其单位为 cm⁻¹。宽波段测温方法主要通过连续分布的不同吸收线在不同温度下线强的强弱差异实现。

2.2 算法流程

将数据库光谱参数模拟的吸收信号作为原始光谱(Abs_raw),根据迭代的温度浓度计算得到的光谱作为测试光谱(Abs_test)。具体实现流程如图 1(a)所示,具体步骤如下。

1) 读取测试光谱数据和 HITEMP2010 中的光谱数据库参数,设置初始浓度 X_0 、初始温度 T_{initial} 和浓度上限边界。

2) 将原始光谱与测试光谱模型进行线性拟合,实现不同温度下谱线的强弱分布变化比较。

3) 在输入的初始浓度 X_0 保持不变的情况下, 比较不同模拟温度下的测试光谱与原始光谱线性拟合残差的二范数, 获取最优温度 T_{opt} , 再用 T_{opt} 下测试光谱与原始光谱线性拟合的斜率 f 将 X_0 更新为 $X_{opt} = X_0 f$ 。经过 N 次轮换迭代温度和浓度可满足迭代条件, 此时线性拟合残差的二范数最小, 表明寻找到了最优温度和最优浓度, 其定义为两光谱经 N 次迭代后的残差平方和开根号。当残差的二范数 (r_{norm}) 最小时, 两光谱相似度最大, 测试光谱与原始光谱线性拟合的残差的表达式为

$$\arg \min_T \left[\sqrt{\sum_{j=1}^N [\alpha_{v, Abs_raw, j} - f \cdot \alpha_{v, Abs_raw, j}(T, X_m) - b]^2} \right], \quad (3)$$

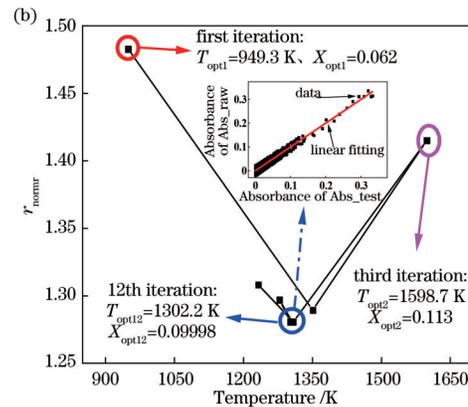
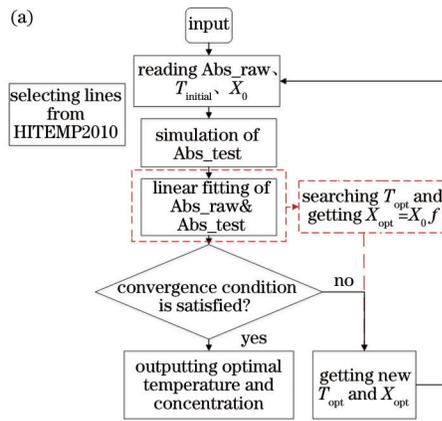


图 1 宽波段测温算法流程和光谱拟合寻优过程。(a)宽波段测温算法流程;(b)光谱拟合寻优过程

Fig. 1 Flow chart of broadband temperature measurement algorithm and process of spectral fitting optimization. (a) Flow chart of broadband temperature measurement algorithm; (b) process of spectral fitting optimization

3 数值仿真研究

3.1 谱线选择

选择主同位素 $H_2^{16}O$ 作为数值研究的目标分子, 模拟的测温范围为 300~2000 K, 该温度段可在实验室中实现, 并用于后期的实验研究。实验室现有的外腔激光器能覆盖 1260~1360 nm 波段, 在此范围内选择合适的波段用于测量, 通过 HITEMP2010 光谱数据库获得常用的光谱参数。具体的选线方案如下:

1) 所选波段范围内无 CO 、 CO_2 等主要燃烧产物的干扰, 且低态能级分布均匀, 可实现温度跨度较大的测量;

2) 从 HITEMP2010 中选择 296 K 下线强阈值 ($S \geq 1.0 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$) 的吸收谱线作为初始数据库;

3) 在初始数据库中, 每 100 K 计算所有谱线的线强值, 筛选出达到线强阈值 ($S_T \geq 5.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$) 的谱线, 作为该温度下测量的数据库, 得到适用于 300~2000 K 下不同温度台阶的数据库;

4) 根据吸收信号信噪比大于 10, 在每个温度台阶的数据库中筛选出吸收峰值高的谱线, 并合并成主吸收线。

式中: $\alpha_{v, Abs_raw, j}$ 是原始测量的吸光度; X_m 是更新的第 m 个浓度; b 是测试光谱与原始光谱线性拟合的截距。

图 1 (b) 中的原始光谱是在假定压力为 $P = 1 \text{ atm}$, 质量分数为 $X_{H_2O} = 10\%$, 光程为 $L = 10 \text{ cm}$, 温度为 $T = 1300 \text{ K}$, 噪声幅值为 ± 0.02 的条件下仿真得到的。主图是迭代寻优过程, 在假定初始质量分数为 $X_0 = 15\%$ 条件下可获得最优温度 T_{opt1} , 再利用 T_{opt1} 下两光谱拟合斜率 f 将 X_0 更新为 X_{opt1} , 经多次迭代后, 两光谱拟合的残差的二范数最小, 此时可得到最优温度 T_{opt12} 和最优浓度 X_{opt12} 。子图是迭代结束时利用迭代的最优温度和最优浓度建立的测试光谱模型与原始光谱线性拟合的结果。

根据以上选线方案, 选择的波段为 $7361.476 \sim 7485.0797 \text{ cm}^{-1}$, 在该范围内选出 79 条主吸收线, 并将每个温度台阶数据库中的其余谱线作为弱吸收线参与温度计算。图 2 为 300~2000 K 温度范围内所选的 79 条吸收线的低态能级和线强分别归一化的结果, 低态能级范围为 $70.09 \sim 3535.87 \text{ cm}^{-1}$, 每条吸收线在不同温度下呈现出不同的强弱变化, 可实现从低温到高温的测量。

3.2 光谱噪声水平对测温精度的影响研究

在实际测量过程中, 由于采集到的光强信号上会叠加辐射背景起伏、标准具效应和器件本身等引起的噪声, 故噪声是影响温度反演准确性的一个重要因素, 文中数值研究主要考虑了白噪声的影响。因此, 本文通过在原始光谱信号上叠加不同水平的高斯噪声来评估其对温度反演精度的影响。在外场实验中, 当采用直接吸收法测温时, 存在的噪声本底幅值约为 ± 0.005 , 以此为最低噪声标准, 另外成倍地添加幅值从 ± 0.01 变化至 ± 0.1 的噪声。图 3 是在 $P = 1 \text{ atm}$ 、 $X_{H_2O} = 10\%$ 、 $L = 10 \text{ cm}$ 和 $T = 1200 \text{ K}$ 的条件下, 仿真一组添加 ± 0.005 幅值高斯噪声的原始光谱, 并与测试光谱进行拟合比较。

P 、 X_{H_2O} 和 L 的设定与图 3 保持一致, 以 100 K 为间隔, 分别仿真 300~2000 K 下的原始光谱, 每个温度下

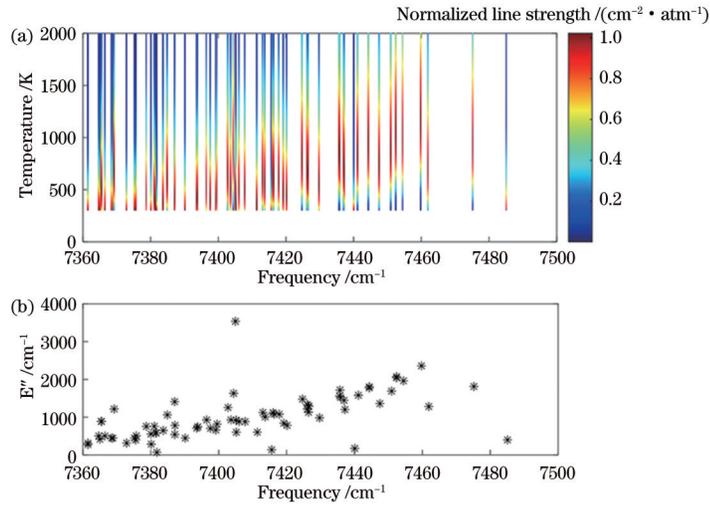


图 2 300~2000 K 温度下 79 条吸收线的归一化线强和低态能级分布。(a) 归一化线强; (b) 低态能级分布
Fig. 2 Normalized line strength and lower state energy distribution of 79 absorption lines at temperature range of 300–2000 K.
(a) Normalized line strength; (b) lower state energy distribution

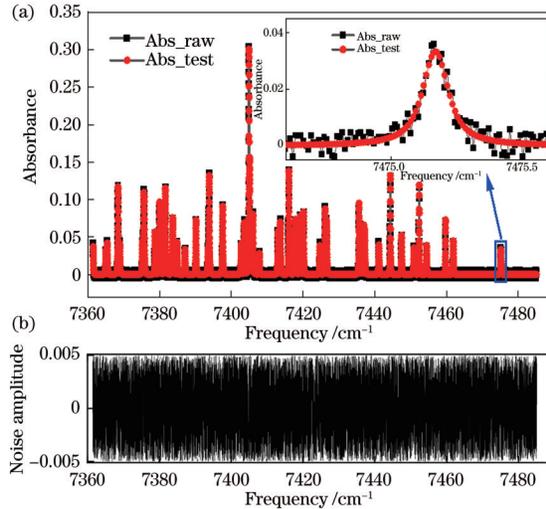


图 3 测试光谱与添加 ±0.005 幅值高斯噪声的原始光谱的拟合结果和 ±0.005 幅值的高斯噪声。(a) 测试光谱与添加 ±0.005 幅值高斯噪声的原始光谱的拟合结果; (b) ±0.005 幅值的高斯噪声
Fig. 3 Fitting result of test spectrum and raw spectrum with ±0.005 amplitude Gaussian noise and ±0.005 amplitude Gaussian noise. (a) Fitting result of test spectrum and raw spectrum with ±0.005 amplitude Gaussian noise; (b) Gaussian noise with amplitude of ±0.005

的原始光谱分别添加幅值从 ±0.005 变化至 ±0.1 的噪声, 每个噪声计算 100 次, 以验证计算结果的可重复性, 噪声添加方式与图 3 相同。图 4 为三个典型温度下 100 次温度结果的一倍标准差 (1σ), 以表征温度数据与平均温度的偏离程度。

一倍标准差的数学表达式为

$$s = \left[\frac{1}{L-1} \sum_{k=1}^L (x_k - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

式中: x_k 为第 k 次温度计算结果; \bar{x} 为温度计算结果的平均值。

由图 4 可知: 各温度下一倍标准差随光谱噪声的增大而增大, 当光谱噪声幅值最大为 ±0.10 时, 在

1700 K 下达到 46.58 K 的最大标准差; 在误差棒中, 每个噪声水平下 100 组温度数据的平均值与真实值 (或者仿真值) 的绝对偏差在 ±0.01 K 至 ±5 K 内波动, 强噪声干扰对温度影响较大, 为达到小于 10 K 的标准差, 应将光谱噪声幅值控制在 ±0.02 以内; 在相同噪声下, 各温度标准差的差值在 0.5~37.5 K 内变化, 这与光谱噪声大小分布的随机性和每个温度下选取的主吸收线数目有关, 与反演温度高低无关。

3.3 光谱参数误差对测温精度的影响研究

HITEMP2010 数据库中谱线参数大多通过理论计算和半经验公式获得, 与实际测量相比存在 5%~20% 的误差。因此, 需研究光谱参数误差对测温精度的影响。对于强吸收线, 可通过高精度的谱线参数标

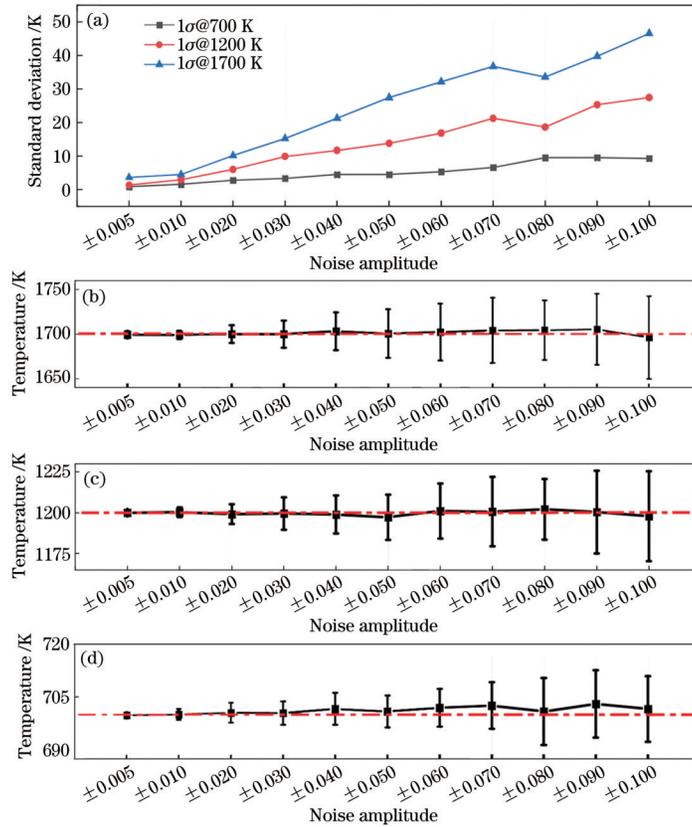


图 4 幅值噪声从 ± 0.005 变化至 ± 0.1 时计算的 700、1200、1700 K 的一倍标准差和误差棒。(a) 一倍标准差; (b) 700 K 温度下的误差棒; (c) 1200 K 温度下的误差棒; (d) 1700 K 温度下的误差棒
 Fig. 4 One standard deviations and error bars of 700 K, 1200 K, 1700 K calculated at Gaussian noise with amplitude from ± 0.005 to ± 0.1 . (a) One standard deviation; (b) error bar under temperature of 700 K; (c) error bar under temperature of 1200 K; (d) error bar under temperature of 1700 K

定实验将光谱参数误差减小至 1%，但对于参与温度计算的弱吸收线，一般难以通过实验标定减小光谱参数误差，进而需研究当这部分弱吸收线参数存在误差时对测温精度的影响。因此，对测试光谱中强吸收线的线强 (S_0)、自展宽系数 (γ_{self})、空气展宽系数 (γ_{air})、压力频移系数 (δ_j) 和空气展宽温度依赖系数 (n_{air}) 固定添

加 1% 的误差，弱吸收线的 S_0 、 γ_{self} 、 γ_{air} 、 δ_j 和 n_{air} 添加 10%~50% 的误差。弱吸收线光谱参数中添加的 10%~20% 的误差是实际数据库中大多数光谱参数存在的误差，而在数据库部分谱线光谱参数误差大的情况下，添加的 30%~50% 的误差可以为宽波段测温方法提供测温精度大小参考。如图 5 所示，在 $P=1 \text{ atm}$ 、

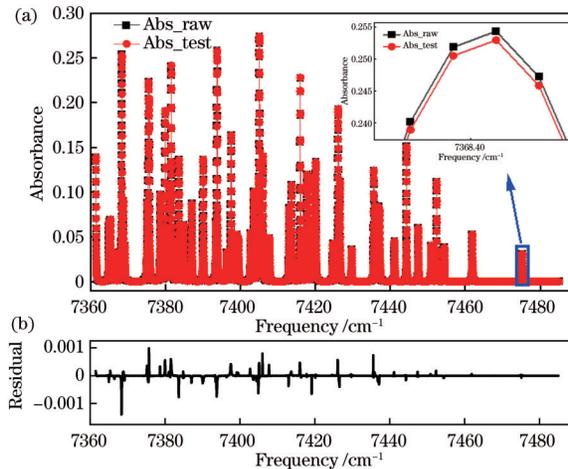


图 5 800 K 温度下的原始光谱和测试光谱的拟合结果和残差。(a) 拟合结果; (b) 残差
 Fig. 5 Fitting result and residual of raw spectrum and test spectrum under temperature of 800 K. (a) Fitting result; (b) residual

$X_{\text{H}_2\text{O}}=10\%$ 、 $L=10\text{ cm}$ 和 $T=800\text{ K}$ 的模拟环境下,对测试光谱的 79 条吸收线中强吸收线的 S_0 、 γ_{self} 、 γ_{air} 、 δ_j 、 n_{air} 同时添加 1% 误差,弱吸收线的这 5 个光谱参数同时添加 18% 的误差,并将原始光谱和测试光谱进行对比,可以获得两光谱残差围绕 $\pm 0.1\%$ 浮动。

P 、 $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 L 的仿真条件,以及光谱参数误差添加方式与图 5 一致,同样以 100 K 为间隔,在 300~2000 K 的设定温度下模拟原始光谱,强吸收线和弱吸收线的光谱参数同时添加 1% 和 10%~50% 的误差,在每组强弱谱线参数的误差组合下获得 100 组温度数据。表

表 1 在强吸收线光谱参数误差为 1%,弱吸收线光谱参数误差为 10%~50% 扰动下的温度计算结果

Table 1 Results of temperature calculation under perturbation of strong absorption lines with spectral parameter error of 1% and weak absorption lines with spectral parameter error of 10%-50%

Spectral parameter error of strong absorption lines /%	Spectral parameter error of weak absorption lines /%	Setting temperature /K	Mean temperature /K	Standard deviation 1σ /K
1	10	1000	1000.00	0.65
		1300	1300.40	1.27
1	12	1000	999.98	0.63
		1300	1299.98	1.36
1	14	1000	999.92	0.64
		1300	1300.15	1.28
1	16	1000	999.76	1.71
		1300	1300.24	2.28
1	18	1000	999.34	2.22
		1300	1300.77	3.02
1	20	1000	999.82	2.75
		1300	1300.57	4.89
1	30	1000	997.13	4.88
		1300	1300.53	5.81
1	40	1000	995.55	5.98
		1300	1301.00	7.77
1	50	1000	994.35	6.39
		1300	1299.89	5.90

考虑到计算温度时各光谱参数贡献不一,如线强大小直接影响每个温度下筛选的主吸收线数目,常压下展宽和频移不占主要贡献。因此,需分析每个光谱参数存在误差时对反演温度的影响,进而为各参数标定的准确度大小提供参考。模拟条件同上,强吸收线的 S_0 、 γ_{self} 、 γ_{air} 、 δ_j 、 n_{air} 各添加 1% 的误差,弱吸收线的这 5 个参数各添加 10%~50% 的误差,利用 5 个具有光谱参数误差的数据库模拟仿真得到 5 个测试光谱,并分别与原始光谱进行线性拟合,分析 S_0 、 γ_{self} 、 γ_{air} 、 δ_j 、 n_{air} 对温度反演的影响。在不同强吸收线和弱吸收线组合误差下计算 100 组温度数据,结果如图 6 所示。其中,横坐标为强吸收线的 5 个光谱参数各自为 1% 的误差和弱吸收线各参数分别为 10%~50% 的误差的强弱吸收线误差组合,左侧纵轴反映了 S_0 的相关结果,右侧纵

轴反映了其余参数的相关结果。1 是 1000 K 和 1300 K 两个温度下的反演结果:当弱吸收线误差从 10% 增加至 20% 时, 1σ 大小总体上随误差的增加而变大且在 8 K 内波动;当 S_0 、 γ_{self} 、 γ_{air} 、 δ_j 和 n_{air} 的误差添加至 50% 时,反演的平均温度与设定温度间的偏差小于 6 K,此时可使用误差大的数据库参数反演温度,且对光谱参数误差具有一定的容忍能力;当弱吸收线误差范围从 30% 增加至 50% 时, 1σ 大小没有明显随误差的增大而变大的趋势,主要是因为更大的参数误差影响了吸收谱线的选择,而这些谱线对光谱拟合计算的影响很小,进而该误差范围下计算的温度一倍标准差波动不明显。

轴反映了其余参数的相关结果。

由各温度下的标准差和平均温度与设定温度最大绝对偏差随误差大小的变化趋势可知, S_0 对温度反演的影响最大,主要是因为 S_0 大小的变化直接影响强吸收线和弱吸收线的选择,这进一步表明实际光谱参数标定中,对 S_0 标定的准确度需求高于 γ_{self} 、 γ_{air} 、 δ_j 和 n_{air} 。因此,当弱吸收线的线强误差最大为 50% 时,为将标准差和最大温度偏差控制在 10 K 和 60 K 以内,应尽量将线强标定误差控制在 1% 以内。

3.4 光谱噪声和光谱参数误差对测温精度的综合影响研究

从仿真研究结果可知,宽波段测温方法对光谱噪声和光谱参数误差的容忍性高,在高扰动水平下对反演温度的影响较小。为进一步验证两种误差的综合扰

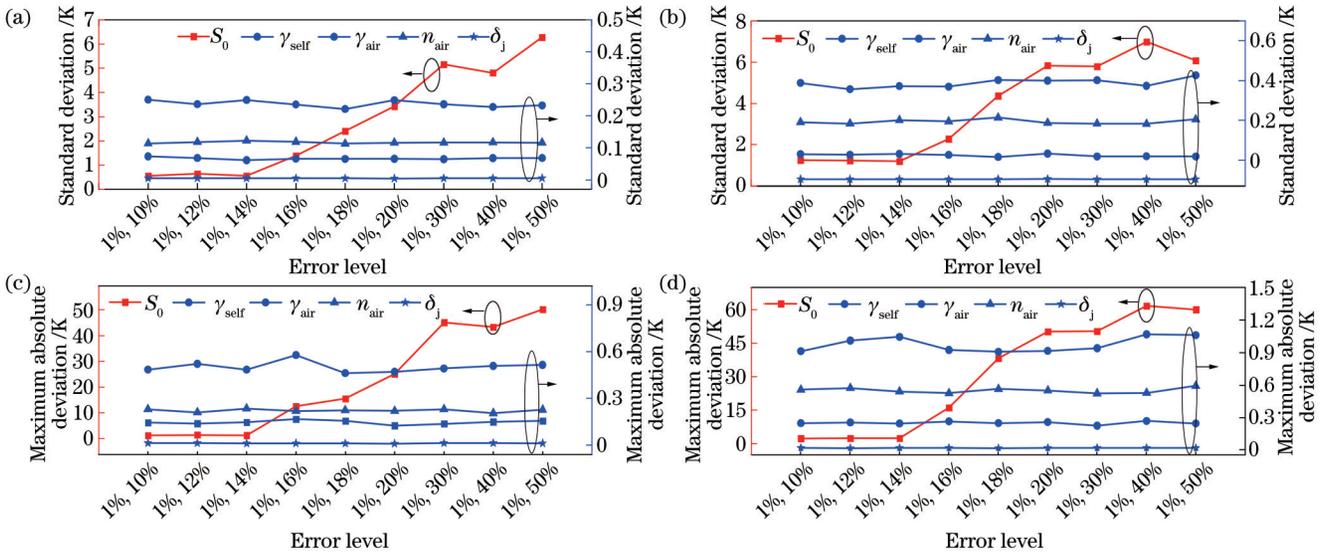


图 6 不同水平误差扰动 S_0 、 γ_{self} 、 γ_{air} 、 δ_j 、 n_{air} 后温度计算结果的一倍标准差和最大绝对偏差。(a) 1000 K 时的一倍标准差；(b) 1300 K 时的一倍标准差；(c) 1000 K 时的最大绝对偏差；(d) 1300 K 时的最大绝对偏差

Fig. 6 One standard deviation and maximum absolute deviation of temperature calculation results under different error perturbation of S_0 , γ_{self} , γ_{air} , δ_j and n_{air} . (a) One standard deviation under temperature of 1000 K; (b) one standard deviation under temperature of 1300 K; (c) maximum absolute deviation under temperature of 1000 K; (d) maximum absolute deviation under temperature of 1300 K

动对温度精度的影响,在原始光谱上分别叠加 ± 0.01 、 ± 0.05 、 ± 0.10 幅值的噪声,强吸收线的 S_0 、 γ_{self} 、 γ_{air} 、 δ_j 、 n_{air} 同时添加 1% 的误差,弱线吸收的这 5 个光谱参数同时添加 10%、30%、50% 的误差。光谱噪

声和光谱参数误差两两组合,以 100 K 为间隔,反演 300~2000 K 设定温度下的计算结果,每个误差组合下获得 100 组温度数据,其中 800 K 和 1700 K 的误差棒如图 7 所示。

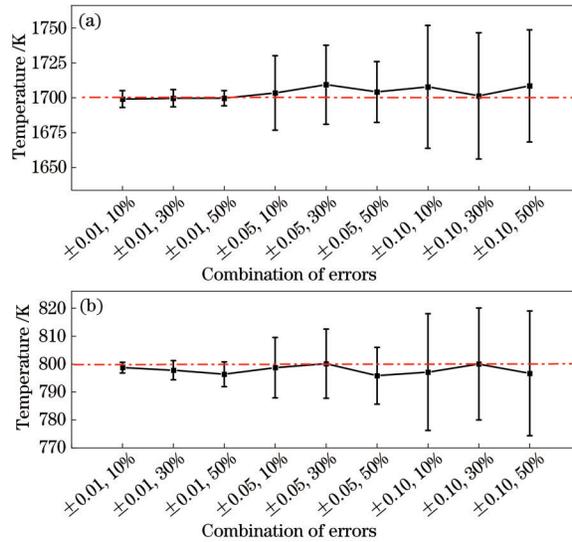


图 7 光谱噪声和光谱参数误差综合扰动下温度计算结果的一倍标准差。(a) 1700 K; (b) 800 K

Fig. 7 One standard deviation of temperature calculation results under combination perturbation of spectral noise and spectral parameter error. (a) 1700 K; (b) 800 K

各综合误差水平下的平均温度与设定温度的最大绝对偏差在 ± 10 K 内波动,对光谱噪声和光谱参数误差的综合扰动呈现出一定的稳定性。另外,在添加的光谱噪声幅值为 ± 0.01 ,光谱参数误差分别为 10%、30%、50% 的组合误差下,误差棒长度几乎一致,对于 ± 0.05 和 ± 0.10 幅值噪声分别与 10%、30%、50%

光谱参数误差的组合也有相同的现象。然而,在光谱参数误差为 10%,噪声幅值分别为 ± 0.01 、 ± 0.05 、 ± 0.1 的组合误差下,误差棒长短不一,温度数据最大在 ± 45 K 平均温度内波动。在 50% 光谱参数误差分别与 ± 0.01 、 ± 0.05 、 ± 0.10 幅值光谱噪声的组合干扰下,误差棒长度和温度偏差变化呈现相同趋势且最

大标准差为 40.13 K@1700 K。可以发现,光谱噪声对测温精度的影响相较光谱参数误差更大,故在对实测中采集的信号进行数据预处理时应尽量降低光谱噪声的影响。

4 结 论

基于 TDLAS 直接吸收光谱技术的宽波段测温方法,在 7361.476~7485.0797 cm^{-1} 范围内选取 79 条主吸收线,数值模拟验证了 300~2000 K 温度范围内光谱噪声单独作用、光谱参数误差单独作用和两者综合作用对测温精度的影响。在光谱噪声单独干扰下,当最大幅值为 ± 0.1 时,最大标准差为 46.58 K@1700 K,平均温度与仿真值的绝对偏差在 ± 0.01 K 至 ± 5 K 中波动,且当将光谱噪声幅值控制在 ± 0.02 以内时,可获得小于 10 K 的标准差,表明所提宽波段测温方法适用于高噪声的测量环境。在光谱参数误差单独扰动下,可标定的强吸收线和不可标定的弱吸收线光谱参数误差最大分别添加 1% 和 50% 后标准差为 5.90 K@1300 K,验证了可使用带误差的数据库反演温度的想法。由于线强误差对测温精度影响最大,因此当弱吸收线的线强无法标定且误差最大为 50% 时,需尽量将线强标定误差控制在 1% 以内。在 ± 0.1 幅值噪声、强吸收线 1% 光谱参数误差和弱吸收线 50% 光谱参数误差的综合扰动下,最大标准差为 40.13 K@1700 K。其中,光谱噪声对测温精度的影响较大,故采集信号过程中应尽量提高信噪比,并通过预处理降低光谱噪声的影响。在未来的工作中将开展干涉条纹、慢变基线等噪声对测温精度的影响研究,提高复杂燃烧流场环境下的温度反演精度,并以此延伸至燃烧场二维分布测量方法的研究。

参 考 文 献

- [1] 王兴平, 彭冬, 李佳胜, 等. 基于波长调制吸收光谱的燃烧流场二维重建[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0711002. Wang X P, Peng D, Li J S, et al. Two-dimensional reconstruction of combustion flow field using wavelength-modulated absorption spectra[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0711002.
- [2] 聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911001. Nie W, Kan R F, Yang C G, et al. Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911001.
- [3] 周王峥, 王珍珍, 严俊杰, 等. 带压燃烧场 2D 温度分布的激光吸收光谱测量初步研究[J]. 推进技术, 2021, 42(9): 2129-2137. Zhou W Z, Wang Z Z, Yan J J, et al. Preliminary study on 2D temperature distribution in pressure combustion field by using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(9): 2129-2137.

- [4] 蔡廷栋, 高光珍, 王敏锐, 等. 高温高压下基于 TDLAS 的二氧化碳浓度测量方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1769-1773. Cai T D, Gao G Z, Wang M R, et al. Measurements of CO_2 concentration at high temperature and pressure environments using tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1769-1773.
- [5] 邓瑶, 唐雯, 李峥辉, 等. 基于直接吸收峰峰值标定的气体浓度反演方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0330002. Deng Y, Tang W, Li Z H, et al. Gas concentration inversion method based on calibration of direct absorption peak value[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0330002.
- [6] 屈东胜, 樊宏杰, 刘连伟, 等. 基于近红外光谱的超声速燃烧场气体参数测量研究[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0330001. Qu D S, Fan H J, Liu L W, et al. Measurement of gas parameters in supersonic combustion field based on near-infrared spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0330001.
- [7] 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(8): 2045-2048.
- [8] Sanders S T, Wang J, Jeffries J B, et al. Diode-laser absorption sensor for line-of-sight gas temperature distributions[J]. Applied Optics, 2001, 40(24): 4404-4415.
- [9] Caswell A W. Water vapor absorption thermometry for practical combustion applications[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2009.
- [10] Kranendonk L A, Caswell A W, Sanders S T. Robust method for calculating temperature, pressure, and absorber mole fraction from broadband spectra[J]. Applied Optics, 2007, 46(19): 4117-4124.
- [11] Wang Z Z, Zhou W Z, Kamimoto T, et al. Two-dimensional temperature measurement in a high-temperature and high-pressure combustor using computed tomography tunable diode laser absorption spectroscopy (CT-TDLAS) with a wide-scanning laser at 1335-1375 nm[J]. Applied Spectroscopy, 2020, 74(2): 210-222.
- [12] Wang Z Z, Zhou W Z, Yan J J, et al. Application of 2D temperature measurement to a coal-fired furnace using CT-TDLAS[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(3): 035203.
- [13] Cheong K P, Ma L H, Duan K, et al. A numerical study of multiline-multiband tomographic absorption spectroscopy for axisymmetric flames[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11780: 117801J.
- [14] Cheong K P, Ma L H, Wang Z, et al. Influence of line pair selection on flame tomography using infrared absorption spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 2019, 73(5): 529-539.
- [15] Yang X Y, Peng Z M, Ding Y J, et al. Temperature and OH concentration measurements by ultraviolet broadband

- absorption of OH(X) in laminar methane/air premixed flames[J]. *Fuel*, 2021, 288: 119666.
- [16] Blume N G, Ebert V, Dreizler A, et al. Broadband fitting approach for the application of supercontinuum broadband laser absorption spectroscopy to combustion environments[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(1): 015501.
- [17] Mironenko V R, Kuritsyn Y A, Liger V V, et al. Data processing algorithm for diagnostics of combustion using diode laser absorption spectrometry[J]. *Applied Spectroscopy*, 2018, 72(2): 199-208.
- [18] Bao Y, Zhang R, Enemali G, et al. Relative entropy regularized TDLAS tomography for robust temperature imaging[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 20192079.
- [19] Liu X, Zhou X, Jeffries J B, et al. Experimental study of H₂O spectroscopic parameters in the near-IR (6940–7440 cm⁻¹) for gas sensing applications at elevated temperature[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 103(3): 565-577.