

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.06.03

可调谐半导体激光吸收光谱测温谱线选择

李春圆¹, 王中宇¹, 常海涛², 蔡静²

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 航空工业北京长城计量测试技术研究所 热学研究室, 北京 100095)

摘要: 可调谐半导体激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)作为非接触光学测量手段,在燃烧诊断、推进系统研发中应用广泛,而吸收谱线对的选择是采用TDLAS技术进行燃气温度测量的基础和关键一步。在扫描波长-直接吸收法测量H₂O温度的实验中,首先系统地研究了谱线选择的基本原则和实现步骤,对选择原则中各指标的量化进行了重点分析;然后对中心频率在7000~7500 cm⁻¹范围内的水分子吸收谱线进行研究和筛选;最后结合数值模拟进行分析,选择了7022.7091, 7444.3707 cm⁻¹和7185.5962, 7444.3707 cm⁻¹两对谱线,为TDLAS温度测量系统设计提供依据。

关键词: 光谱学; 可调谐半导体激光吸收光谱; 扫描波长-直接吸收法; 双线法测温; 谱线对选择

中图分类号: TB9; O433

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)06-0013-07

Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Temperature Measurement Line Selection

LI Chunyuan¹, WANG Zhongyu¹, CHANG Haitao², CAI Jing²

(1. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Thermal Division, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) is a non-contact optical measurement method which is widely used in combustion diagnosis and propulsion system development. The selection of the absorption line pairs is the basis and key of gas temperature measurement using TDLAS. In the experiment of scanning wavelength-direct absorption method for measuring the temperature of H₂O, the basic principles and implementation steps of spectral line selection are systematically studied, and the quantification of each index in the selection principle is analyzed. Then the absorption lines of water molecules in the range of 7000~7500cm⁻¹ were studied and screened. Finally, the numerical simulations were used to do analysis and two line pairs were selected; 7022.7091, 7444.3707 cm⁻¹ and 7185.5962, 7444.3707 cm⁻¹, which underpinned the design of TDALS temperature measurement system.

Key words: spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; scanning wavelength-direct absorption method; two-line method for temperature measurement; line pair selection

0 引言

燃烧作为使用最广泛的能量转换技术,是航空航天等领域的主要动力来源。燃烧诊断是掌握燃烧过程、提高燃烧效率和减少污染物产生的关键环节^[1]。其中温度是重要的待测量,它与燃烧过程、燃烧效率等密切相关^[2]。随着燃烧诊断技术的不断发展,传统的侵入式诊断已无法满足测量需求。可调谐半导体激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)具有高灵敏度、高光谱分辨率、快速响应时间、较好的鲁棒性和无干扰等特点,可测量温度、浓度、流速等多种燃烧参量,在现场测量方面具有重要

意义和优势^[1]。

谱线选择是TDLAS测量中的关键步骤。选择合适的谱线可以提高测量精度、优化系统性能^[1]。由于分子谱线数据庞大且随温度、压强等变化而发生变化,TDLAS虽已历经几十年的发展,仍没有统一的谱线选择标准^[3],通常需依实际情况而定。Zhou Xin^[1]对谱线选择进行了研究,针对直接吸收和波长调制两种测量方法使用了不同的量化条件。杨斌^[3]、Fei Wang^[4]、Fei Li^[5]、Huihui Xia^[6]等结合经验,根据具体的测量要求、测量方法等因素选择谱线。本文基于HI-TEMP2010数据库,对扫描波长-直接吸收法测量H₂O温度实验中的吸收谱线选择进行研究。

1 TDLAS 扫描波长-直接吸收法测温基本原理

TDLAS 利用可调谐半导体激光器的波长随注入电流改变而发生变化的特性实现近距离吸收谱线的测量。扫描波长-直接吸收法是常用的测量方法之一,这种方法通过处理、分析和计算经过被测气体的直接吸收信号获得气体的温度、组分浓度、流速、压强等信息^[1]。双线法是测温领域广泛使用的方法之一,它根据同种物质的两条不同谱线吸收强度之比求解温度。任意温度的气体特征谱线的线强 $S(T)$ 可由参考温度 T_0 及其线强 $S(T_0)$ 求得

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T} \right) \cdot \exp \left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \frac{\left[1 - \exp \left(\frac{-hc\nu_0}{kT} \right) \right]}{\left[1 - \exp \left(\frac{-hc\nu_0}{kT_0} \right) \right]} \quad (1)$$

式中: Q 为分子配分函数; E'' 为低跃迁态能量, cm^{-1} ; h 为普朗克常数; k 为波尔兹曼常数; c 为光速; ν_0 为谱线中心频率。分子配分函数 Q 描述分子内部的能量分布情况^[7], 通常采用多项式拟合得到近似值^[8], 它的系数可通过 HITRAN 数据库获得。

根据朗伯比尔定律, 两条谱线吸收强度之比可表示为

$$R = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\int pLX\varphi_{\nu_1}S_1(T)d\nu}{\int pLX\varphi_{\nu_2}S_2(T)d\nu} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp \left[-\frac{hc\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (2)$$

式中: A_1, A_2 分别为两条谱线吸收系数的积分; p 为气体总压, atm; L 为激光光程, cm; X 为气体体积浓度; $\varphi_{\nu_1}, \varphi_{\nu_2}$ 分别为两条谱线的线型函数, 表示被测吸收谱线的形状, 与温度、总压力和气体各成分含量有关; $S_1(T), S_2(T)$ 分别为两条谱线温度 T 下的线强; T_0 为参考温度; $S_1(T_0), S_2(T_0)$ 分别为两条谱线参考温度 T_0 下的线强; $\Delta E = |E_2'' - E_1''|$ 为两条谱线低跃迁态能量差^[8]。线型函数 φ_{ν} 有归一化特性, 即当两条谱线同时经过相同路径 L 时, p 和 X 相等, R 等于两条谱线的线强比。待测温度可表示为

$$T = \frac{\frac{hc(E_2'' - E_1'')}{k}}{\ln \frac{A_1}{A_2} + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc(E_2'' - E_1'')}{kT_0}} \quad (3)$$

通过测量数据计算出 A_1 和 A_2 , 代入式(3)中即可得到待测温度。

2 谱线的选择

水分子在近红外波段有大量谱线, 不同谱线具有不同的线强、线宽和低跃迁态能量等参数, 且线强和线宽会随温度的变化而变化。在温度测量中, 线强随温度变化的趋势不同, 有的谱线线强随温度的升高而增大, 有的随温度的升高而减小, 还有的先增大后减小。由于谱线线强较小、线强不是温度的单值函数、低跃迁态能量较低或者受附近其他谱线干扰等原因, 并不是所有的谱线都可以用作测温谱线, 某一个测温环境下使用的谱线也不一定可以用于其他测量环境中。因此, 在进行温度测量前, 首先需要根据温度测量范围进行谱线的选择。

2.1 双线法测温谱线选择原则

本文采用双线法测温, 至少需要选择两条谱线, 组成谱线对。谱线选择的基本原则主要是:

1) 在所选的波长范围内, 不受其他可能存在的气体谱线干扰。

2) 为了保证测量信号的信噪比(SNR)足够高, 所选谱线在测量温度范围内应具有足够大的吸收线强; 但又不能过大, 否则会使透射光强较弱, 导致探测器接收到信号的信噪比降低^[9,10]。

3) 所选谱线应避免环境水的干扰^[1]。

4) 在测量温度范围内, 所选谱线对线强之比应随温度单调变化, 且两谱线线强较接近。线强相差太大会使吸收信号相差过大, 不适合同光路测量^[11]。

5) 为保证足够的测量灵敏度, 两条谱线需具有足够的低跃迁态能量差 ΔE 。

6) 若使用单激光器, 其单个扫描周期需同时覆盖两条谱线, 即对谱线间隔的最大值有要求。

7) 所选谱线应相互独立, 不受附近较强谱线的干扰, 因此对谱线间隔的最小值有要求。但是对于谱线间隔很小、在实际测量中分辨不出的两条谱线, 可当作一条谱线进行处理。

TDLAS 的谱线选择基本上都要依据上述原则, 同时还要依据不同的测量环境和测量要求进行具体分析, 因此选择的结果不完全一致。在实际应用中, 可以参照基本原则, 考虑多种因素的影响, 根据实际测量环境进行具体分析, 选择出最合适的谱线。

2.2 谱线选择条件及步骤

谱线选择主要基于 HITEMP (the high-temperature

molecular spectroscopic database), 是 HITRAN(the high-resolution transmission molecular absorption database) 的扩充, 包含常见的气体分子谱线参数, 由哈佛-史密松森天体物理中心(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)维护和开发, 目前的最新版本是 HITEMP2010。本文基于 HITEMP2010 数据库进行谱线选择的研究。

本文中 TDLAS 的测量对象是航空发动机机尾喷口, 其中 H₂O 是主要燃烧产物, 且在高温下 H₂O 分子吸收光谱覆盖范围广, 吸收强, 因此本研究的目标气体选择 H₂O, 测量温度范围为 1000 ~ 2300 K, 常压环境。谱线选择的各指标量化及步骤如下:

1) 中心频率范围: 7000 ~ 7500 cm⁻¹

水分子倍频、合频形成的谱线位于近红外区(4000 ~ 13333.3 cm⁻¹), 并且该波段对应的半导体可调谐激光器稳定可靠, 价格较低, 光纤耦合性好。

燃料燃烧产物通常有 H₂O, CO_x, NO_x, SO_x, O₂ 等, 在所选谱线的范围内, 几乎没有其他燃烧产物的谱线, 可以忽略其影响。在 4000 ~ 13333.3 cm⁻¹ 近红外波段, 7000 ~ 7500 cm⁻¹ 内其他气体干扰最少、线强较强, 且包含多条其他研究者使用过的谱线, 因此可以在此范围内进一步选择。

2) 吸收峰峰值范围: 10⁻³ ~ 0.8

根据朗伯比尔定律, 吸收峰峰值可表示为^[1]:

$$\alpha_{\nu, \text{peak}} = pXS(T)\varphi_{\nu, \text{peak}} \quad (4)$$

式中: $\varphi_{\nu, \text{peak}}$ 为线型函数峰值, 可由 Voigt 线型函数近似计算得到^[1]。一般期望信噪比大于等于 10^[1,7,13], 可检测到的最小吸收为 10⁻⁴, 故 $\alpha_{\nu, \text{peak}}$ 需大于 10⁻³。同时, 为避免增加光学厚度测量相关实验的难度, $\alpha_{\nu, \text{peak}}$ 应小于 0.8^[1]。此时吸收峰的峰值为 10⁻³ < $\alpha_{\nu, \text{peak}}$ < 0.8。在压强 p 为 1 atm、吸收距离 L 为 5 cm、H₂O 组分浓度 X 为 1% ~ 30% 的测量环境中, 根据式(4)进一步计算, 筛选出符合条件的谱线。

3) 低跃迁态能量 > 831 cm⁻¹

为避免测量区域周围的环境水影响测量结果, 实验前先用氮气或干燥空气进行吹扫, 降低环境水的浓度。另一方面, 当温度相同时, 低跃迁态能量较大的谱线受环境水的干扰较小。线强计算公式中最后一项为激励辐射, 在近红外段、温度低于 2500 K 时可忽略。则任意温度下线强与参考温度下线强比 r 为

$$r = \frac{S(T)}{S(T_0)} = \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T} \right) \exp \left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (5)$$

比值 r 与温度 T 、参考温度 T_0 和低跃迁态能量 E'' 有关。若参考温度 T_0 取 296 K, E'' 一定时, 可知温度

T 下线强与参考温度下线强的关系。

图 1 为 296 ~ 2500 K, 不同低跃迁态能量 E'' 下 $S(T)$ 与 $S(296)$ 的比值^[1]。为避免环境水的干扰, 在测温范围内比值 r 要大于 1, 即 $S(T)$ 应比室温时的线强 $S(T_0)$ 大。实际上, 此条件对于直接吸收法有些苛刻。因为当 $S(T)$ 是 $S(T_0)$ 的几倍时, 基本上可以排除环境水的干扰, 但同时线强较大的谱线会被剔除, 这样选出的谱线不适合直接吸收法。Zhou Xin^[1] 在选择直接吸收法测量谱线时没有对低跃迁态能量提出要求, 但在选择波长调制法的测量谱线时, 要求低跃迁态能量大于 1700 cm⁻¹, 此时 $S(T)$ 是 $S(T_0)$ 的三倍(1000 ~ 2500 K)。因此本文选择低跃迁态能量大于 831 cm⁻¹ 的谱线, 在 1000 ~ 2300 K 范围内谱线线强不会过小(r 大于 0.1), 同时在实验时用氮气吹扫, 尽量减少环境水的干扰。

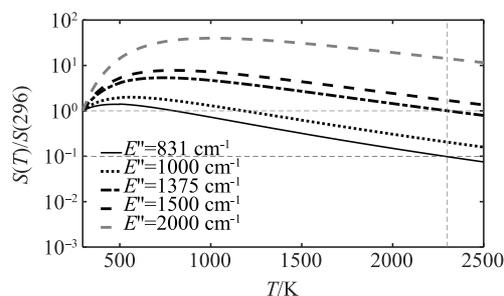


图 1 在 296 ~ 2500 K 时, 不同 E'' 下 $S(T)$ 与 $S(296)$ 的比值

4) 谱线对线强比: 0.2 < R < 5

所选谱线对线强比应随温度单调变化, 且两谱线的线强较接近, 也就是线强比最好接近于 1。Zhou Xin^[1] 选择了线强比 0.2 < R < 5 的谱线对。本文在谱线选择步骤 4 中选择了线强比 0.2 < R < 5 的谱线对, 为了缩小使用多激光器的谱线选择范围, 在步骤 9 中优选了线强比 0.4 < R < 2.5 的谱线对。

5) 低态能量差 > 700 cm⁻¹

TDLAS 直接吸收法的相对灵敏度计算公式为

$$\left| \frac{dR/R}{dT/T} \right| = \left(\frac{hc}{kT} \right) |E_2'' - E_1''| \geq 1 \quad (6)$$

一般要求相对灵敏度大于等于 1^[7,9,12]。式(6)表示相对灵敏度与温度和低跃迁态能量差之间的关系。在相同的温度下, 相对灵敏度与所选谱线对的低跃迁态能量差成正比, 将常数 h , c 和 k 代入式(6), 可得 $\Delta E = |E_2'' - E_1''| \geq 0.695T$ 。同一对谱线在不同的温度 T 下, 温度越高, 相对灵敏度越低^[9]。当测温范围为 1000 ~ 2300 K 时, $\Delta E \geq 0.695 \times 2300 = 1598.5$ (cm⁻¹)。

若按此条件选择, 没有谱线对可用于单个激光器测量。因此可以在相对灵敏度较高的前提下选择低跃迁态能量差大于 700 cm^{-1} 的谱线对。

6) 单个激光器谱线的间隔 $< 1 \text{ cm}^{-1}$

本实验采用电流调谐改变激光器的输出波长, 由于激光器输入电流有安全阈值, 一个周期的扫描范围约为 $2 \sim 3 \text{ cm}^{-1}$ 。若要使一个扫描周期能够覆盖两条谱线, 考虑到谱线均有不同程度的加宽, 两条谱线的中心间隔不能超过 1 cm^{-1} 。

7) 谱线间隔 $> 0.3 \text{ cm}^{-1}$

在实际测量中的谱线间隔大于 0.3 cm^{-1} , 基本上可以保证两条谱线相互独立^[12,14]。同样, 被选的谱线与附近其他谱线的间隔也应大于 0.3 cm^{-1} , 以保证不受附近跃迁的干扰。

2.3 谱线选择结果及数值模拟

表 1 列出了谱线选择的步骤及其结果。当使用单激光器时, 根据前 6 个选择步骤选出了 8 对谱线, 从中优选出 2 对线强 S 大于 $10^{-23} \text{ cm/molecule}$ (谱线选择步骤 8) 的谱线对; 当使用双激光器时, 根据前 7 个选

择步骤选出了 1663 对谱线, 从中优选出 23 对线强 S 大于 $10^{-23} \text{ cm/molecule}$ (谱线选择步骤 8)、线强比 R 在 $0.4 \sim 2.5$ 范围内 (谱线选择步骤 9)、低跃迁态能量 E'' 大于 1000 cm^{-1} (谱线选择步骤 10) 的谱线对。

表 1 谱线选择步骤及结果
(S 单位: $\text{cm/molecule} (@ 296\text{K})$)

谱线选择步骤	单激光器剩余谱线	双激光器剩余谱线
1	3154700 条	3154700 条
2	147 条	147 条
3	121 条	121 条
4	6341 对	6341 对
5	2451 对	2451 对
6, 7	8 对	1663 对
8	2 对	179 对
9	/	120 对
10	/	23 对

表 2 使用单激光器的谱线对选择结果
(S 单位: $\text{cm/molecule} (@ 296\text{K})$)

谱线对	ν/cm^{-1}	S	E''/cm^{-1}	$\Delta E/\text{cm}^{-1}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$
1	7403.6153	5.61×10^{-22}	931.2370	700.1460	0.7868
	7404.4021	1.81×10^{-23}	1631.383 0		
2	7404.4021	1.81×10^{-23}	1631.383	711.1731	0.7448
	7405.1469	3.35×10^{-22}	0 920.21		

用 Voigt 线型函数对 2 对谱线在 296, 1000, 1500, 2000 K 时的吸收进行数值模拟 (H_2O 浓度 X 取 25%, 激光传播距离 L 取 5 cm, 气体压强 p 取 1 atm), 结果如图 2 所示, 谱线对 1 受附近谱线干扰, 谱线对 2 两条谱线区分不明显, 都不适合用作测量谱线对。图 3 模拟了表 1 中的双谱线激光器剩余的 23 对谱线中出现的所有谱线的吸收曲线 (条件同图 2), 从图 3 (c), (d), (g), (h) 和 (i) 中圈出的位置可以看出, 吸收峰附近还有其他吸收, 测量结果可能受到干扰, 不适合用作测量谱线。剔除 $7028.1409 \text{ cm}^{-1}$, 7150.4716

cm^{-1} , $7194.1410 \text{ cm}^{-1}$, $7413.6773 \text{ cm}^{-1}$ 和 $7416.3538 \text{ cm}^{-1}$ 这 5 条谱线后, 剩余 9 对谱线 (如表 3 所示)。在这 9 对谱线中, $7022.7091 \text{ cm}^{-1}$ (图 3(a))、 $7185.5962 \text{ cm}^{-1}$ (图 3(f)) 和 $7444.3707 \text{ cm}^{-1}$ (图 3(k)) 这 3 条谱线吸收更强 (1000 K 时大于 0.1 cm^{-1}), 因此谱线对 1 和 7 更适合用作测量谱线。在表 3 列出的谱线中, 马天^[9]、M. A. Bolshov^[15,16]、杨斌^[22] 选择了谱线对 7, Zhou Xin 等^[1,3,10-11,17-21] 使用了 $7154.4706 \text{ cm}^{-1}$, 李宁等^[5,7,11,14,18-19] 使用了 $7185.5962 \text{ cm}^{-1}$ 。

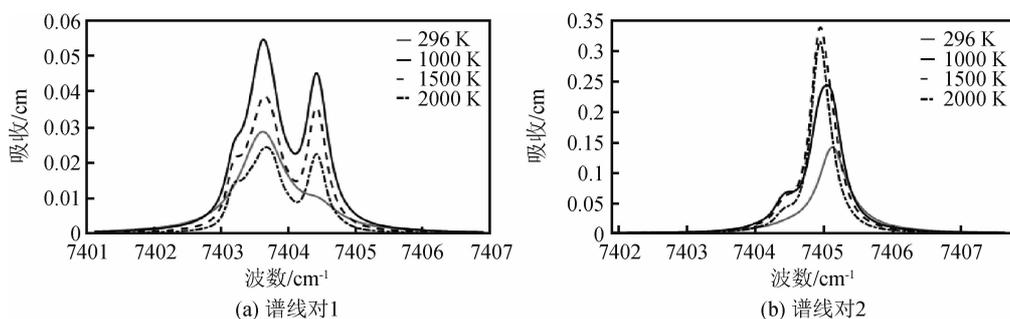


图2 使用单激光器谱线对数值模拟结果

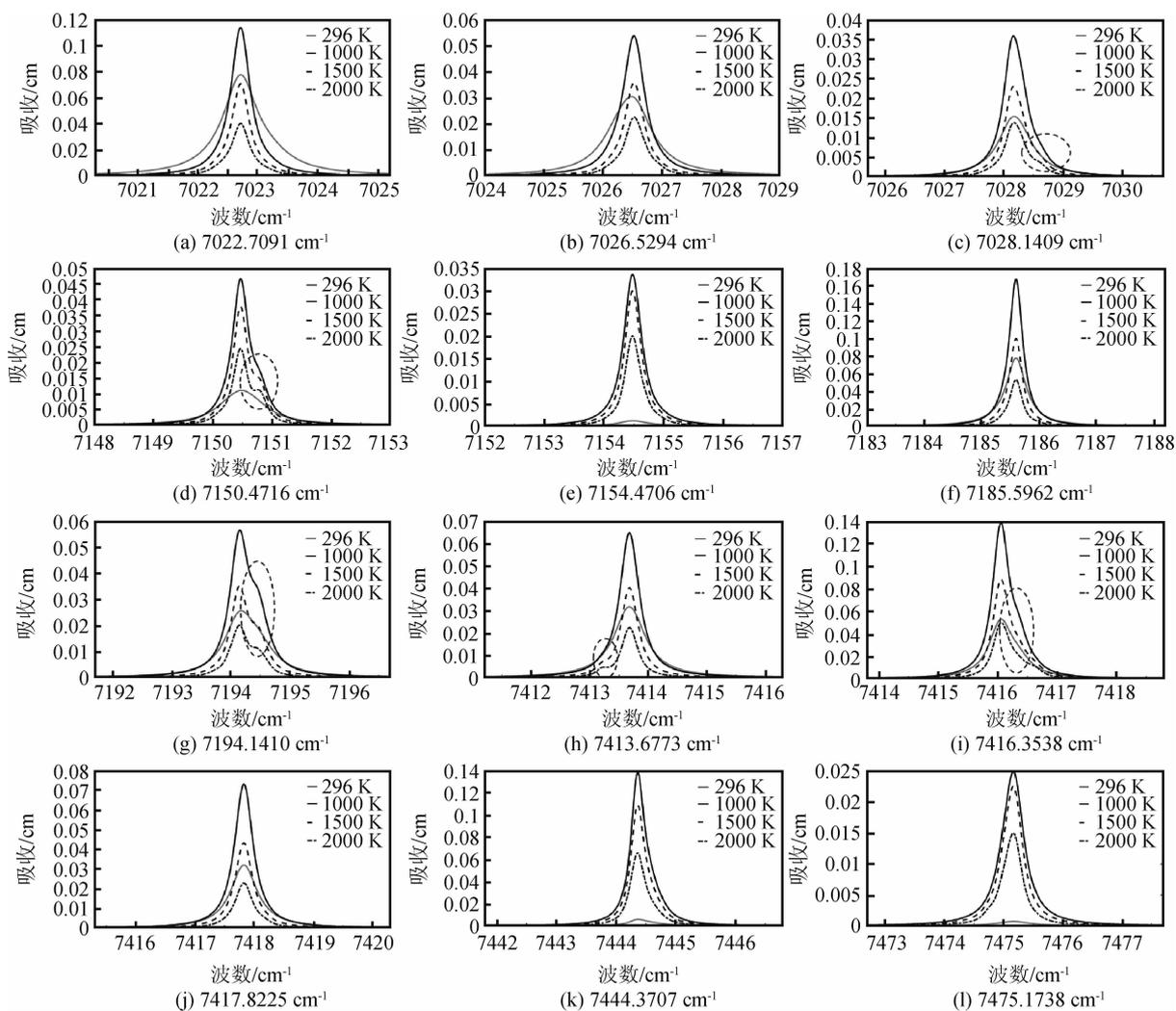


图3 数值模拟结果

虽然可以使用单激光器，但是需要激光器扫描周期同时覆盖两条谱线，满足条件的谱线数量很少。杨斌^[3,23]等发现单激光器系统存在吸收较弱、信噪比较

低等问题，通过对测温系统的改进，采用双激光器系统，有效地提高了测量精度^[22]。因此在成本足够的情况下应优先使用双激光器进行测量。

表 3 使用双激光器的谱线对选择结果(S 单位: $\text{cm}/\text{molecule}(@296\text{K})$)

n	ν/cm^{-1}	S	E''/cm^{-1}	$\Delta E/\text{cm}^{-1}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$
1	7022.7091	4.64×10^{-22}	1079.0796	727.5904	421.6616
	7444.3707	1.89×10^{-23}	1806.6694		
2	7022.7285	1.45×10^{-22}	1080.3854	708.6144	131.7421
	7154.4706	1.13×10^{-23}	1788.9998		
3	7022.7285	1.45×10^{-22}	1080.3854	732.838	452.4453
	7475.1740	1.23×10^{-23}	1813.2234		
4	7026.5294	4.56×10^{-22}	1006.1159	800.5541	417.8413
	7444.3707	1.89×10^{-23}	1806.6694		
5	7026.5294	4.56×10^{-22}	1006.1159	807.1075	448.6444
	7475.1740	1.23×10^{-23}	1813.2234		
6	7154.4706	1.13×10^{-23}	1788.9998	743.9415	31.1256
	7185.5962	2.00×10^{-22}	1045.0583		
7	7185.5962	2.00×10^{-22}	1045.0583	761.6117	258.7745
	7444.3707	1.89×10^{-23}	1806.6694		
8	7185.5962	2.00×10^{-22}	1045.0583	768.1651	289.5776
	7475.1740	1.23×10^{-23}	1813.2234		
9	7417.8225	4.32×10^{-22}	1079.0796	727.5904	26.5482
	7444.3707	1.89×10^{-23}	1806.6694		

3 分析与讨论

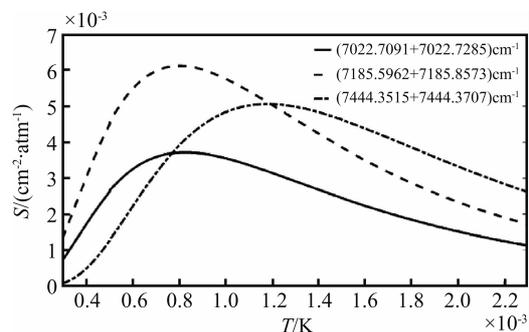
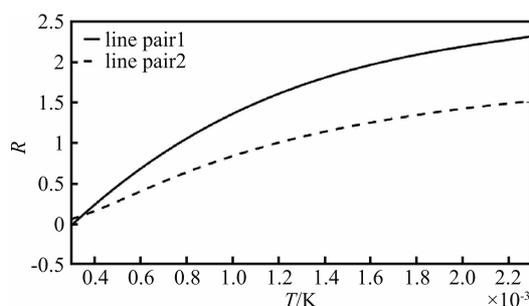
经过数值模拟, 优选出了表 3 中谱线对 1 和 7, 其中谱线对 7 使用较多, 谱线对 1 能否用作测量谱线还需进一步分析对比。从数据库中发现, 优选出的谱线对附近还有其他谱线, 表现为与附近谱线的叠加。表 4 为最优谱线对及附近线强大小接近的谱线, 1 和 2 为谱线对 1, 2 和 3 为谱线对 7。

表 4 最优谱线对(表 3 中谱线对 1 和 7)及附近谱线

n	ν/cm^{-1}	$S/(\text{cm}/\text{molecule})$ (@296K)	E''/cm^{-1}
1	7022.7091	4.64×10^{-22}	1079.0796
	7022.7285	1.45×10^{-22}	1080.3854
2	7185.5962	2.00×10^{-22}	1045.0583
	7185.5973	6.00×10^{-22}	1045.0579
3	7444.3515	2.18×10^{-23}	1774.7511
	7444.3707	1.89×10^{-23}	1806.6700

图 4 和 5 分别是通过数值模拟计算出的所选谱线对线强 S 、线强比 R 随温度 T 的变化曲线。谱线对 1 和 7 中有一条相同的谱线, 另一条谱线 ($7022.7091 + 7022.7285$) cm^{-1} 和 ($7185.5962 + 7185.5973$) cm^{-1} 相比, 数据库中的谱线参数相似, 在 $1000 \sim 2300$ K 范围内, 线强变化趋势相同, 大小相近(如图 4); 两对谱线的线强比均随温度单调增加, 符合谱线选择的基本

原则。谱线对 1 和 7 均可作为测量谱线。不同的是, 在图 3 中 ($7022.7091 + 7022.7285$) cm^{-1} 这条谱线 296 K 时的峰值高于 ($7185.5962 + 7185.5973$) cm^{-1} , 它更容易受到周围环境中常温水分子的影响。因此, 在选择谱线对时, 谱线对 7 优于谱线对 1。

图 4 296 ~ 2300 K 线强 S 随温度 T 变化曲线图 5 296 ~ 2300 K 谱线对 1 和 7 线强比 R 随温度 T 变化曲线

4 结论

本文基于 HITEMP2010 数据库, 针对温度在 1000 ~ 2300 K 范围内的常压环境, 依据谱线选择基本原则, 分别优选出了 2 对使用单激光器测量的谱线对和 23 对使用双激光器测量的谱线对, 并根据 Voigt 线型函数进行数值模拟的结果对每对谱线进行研究, 最终选择了 7022.7091, 7444.3707 cm^{-1} 和 7185.5962, 7444.3707 cm^{-1} , 对所选谱线对的 $S-T$ 和 $R-T$ 曲线进行分析表明二者符合要求, 其中前者更容易受到周围环境中水的影响, 因此 7185.5962, 7444.3707 cm^{-1} 优于 7022.7091, 7444.3707 cm^{-1} 。通过一定的原则并根据测温范围量化选择条件进行谱线选择, 用数值模拟对选择结果进行分析, 可以较快速地找到合适的测量谱线, 为后续实验奠定基础。

参考文献

- [1] Xin Z. Diode laser absorption sensors for combustion control[J]. Papers in Regional Science, 2005, 84(2): 183-199.
- [2] 洪延姬, 宋俊玲, 王广宇, 等. 激光吸收光谱技术测量非均匀燃烧流场研究进展[J]. 航空学报, 2015, 36(3): 724-736.
- [3] 杨斌, 何国强, 刘佩进, 等. 用于燃气温度测量的单激光器吸收光谱系统设计[J]. 传感技术学报, 2011, 24(5): 647-652.
- [4] Wang F, Wu Q, Huang Q X, et al. Simultaneous measurement of 2-dimensional H_2O concentration and temperature distribution in premixed methane/air flame using TDLAS based tomography technology [J]. Optics Communications, 2015, 346: 53-63.
- [5] Li F, Yu X L, Gu H B, et al. Simultaneous measurements of multiple flow parameters for scramjet characterization using tunable diode-laser sensors [J]. Applied Optics, 2011, 50(36): 6697-6707.
- [6] Xia H H, Kan R F, Xu Z Y, et al. Two-step tomographic reconstructions of temperature and species concentration in a flame based on laser absorption measurements with a rotation platform [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 90: 10-18.
- [7] 李金义. 基于可调谐激光吸收光谱的燃烧场温度测量研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [8] 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.
- [9] 马天. 基于 TDLAS 吸收光谱法测量高温气体温度[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [10] 郝祖龙, 辛明伟, 王志远, 等. 基于 TDLAS 技术的壳内气体温度测量[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(10): 59-61, 80.
- [11] 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(2): 40-44.
- [12] 郑倩瑛. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的高温温度测量研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2013.
- [13] Farooq A, Jeffries J B, Hanson R K. In situ combustion measurements of H_2O and temperature near 2.5 μm using tunable diode laser absorption [J]. Measurement Science & Technology, 2008, 19(7): 075604.
- [14] 王广宇, 洪延姬, 潘虎, 等. 可调谐半导体激光吸收传感器的温度测量验证[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2358-2363.
- [15] Bolshov M A, Kuritsyn Y A, Liger V V, et al. Development of diode laser absorption spectroscopy method for determining temperature and concentration of molecules in remote object [J]. Optics & Spectroscopy, 2011, 110(6): 848-856.
- [16] 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: Lasers and Optics, 2010, 100(2): 397-407.
- [17] 孙鹏帅. 基于 TDLAS 技术的燃烧场温度与气体浓度分布重建研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [18] 娄南征, 李宁, 翁春生, 等. 基于时分复用技术的吸收光谱气体温度在线测量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1329-1333.
- [19] 夏慧, 刘文清, 张玉钧, 等. 可调谐二极管激光光谱技术测量燃烧环境下 H_2O 浓度的实验设计[J]. 大气与环境光科学学报, 2007, 2(3): 214-217.
- [20] 王超. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的 H_2O 浓度和温度测量[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [21] 彭于权. 中红外激光光谱燃烧场 CO 和 NO 污染物浓度测量[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [22] 杨斌, 黄斌, 杨荟柄, 等. TDLAS 火焰燃烧温度测量方法改进[J]. 计量学报, 2016, 37(6): 596-601.

收稿日期: 2019-08-02; 修回日期: 2019-09-12

基金项目: 航空科学基金资助项目(20172244002)

作者简介

李春圆(1995-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事 TDLAS 领域研究。

