

基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的气体浓度 测量温度影响修正方法研究*

张志荣 吴边 夏滑 庞涛 王高旋 孙鹏帅 董凤忠[†] 王煜

(安徽省光子器件与材料重点实验室, 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2013年7月19日收到; 2013年8月20日收到修改稿)

可调谐二极管激光吸收光谱技术测量气体浓度时, 由于测量环境温度变化的影响引起解调的二次谐波信号发生变化, 最终导致浓度测量的较大误差. 为了修正温度变化对浓度反演结果的影响, 适应工业测量、燃烧诊断的需要, 采用通过实验所得温度关系的数值拟合修正方法即经验公式修正和根据 HITRAN 数据库参数的理论关系即理论公式修正两种方法进行分析与讨论. 实验中采用在 50 cm 长的高温管式炉中通入高温安全的 21% 浓度的氧气为目标测定气体, 选定 760.77 nm 的中心吸收波长, 测量了温度变化范围为 300—900 K, 间隔 50 K 的情况下所得到的谐波信号, 并利用一次谐波比值消元法消除光强波动影响后的结果, 得出了不同温度下未修正的原始浓度值和通过修正方法后的修正值. 实验结果表明所述的经验公式和理论公式两种修正方法对温度影响都有一定的抑制作用, 可以应用到温度变化引起的气体浓度误差修正监测中, 为下一步开展燃烧诊断实时在线监测提供了依据.

关键词: 可调谐二极管激光吸收光谱 (TDLAS), 温度修正, 经验公式, 理论公式

PACS: 42.62.Fi, 42.62.-b, 42.68.Ca, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.62.234204

1 引言

可调谐二极管激光吸收光谱技术 (TDLAS) 是利用分布反馈式激光器 (DFB) 的窄线宽和波长可调谐等特性, 实现气体分子的单根吸收谱线“指纹区”的扫描和测量, 具有高灵敏、高选择性、非接触式、可进行实时原位检测等优点, 已在低浓度气体检测、汽车尾气监测、气体参数分析、工业过程控制、管道泄露监测、工业污染源排放监测、温度场在线监测等多方面得到了广泛的应用^[1-11].

根据气体状态方程可知, 在浓度测量中气体温度的变化会影响气体的浓度值. 然而, 国家相关排放标准的制定均是在常温常压下制定的 (GB3095-1996 国家大气污染物综合排放标准), 因此当温度较高时的浓度测量结果与给定的国家标准之间存在一定的误差, 无法准确的预知厂矿企业真实的污染气体排放情况. 然而在大多数研究中并未考

虑温度变化对所检测到的浓度存在的影响, 束小文等^[12]以 1747 nm-HCl 为例研究了温度变化在 295—510 K 范围内的变化情况, 由于实验采用的是电加热装置, 并且因为 HCl 极具吸附性和激光器自身光强的变化等原因, 因此易于造成气体浓度、热均匀性、热稳定性等方面的误差, 最终影响修正结果的准确度. Zhao 等^[13], 以 1653.72 nm-CH₄ 为例简单说明了数十摄氏度温度变化时浓度的变化, 未对该方法的工作原理修正过程等进行详细说明, 也未涉及温度相对较高时的修正情况.

在本文实验中, 以相对高温安全的 21% 的氧气为实验用气, 采用 50 cm 基长高温管式炉为测量氛围, 测量了温度范围在 300—900 K, 间隔 50 K, 假定测量环境压力保持不变的情况下, 温度变化所引起的谐波信号的不准确情况, 并且通过一次谐波比例消元法消除光强起伏因素的影响, 得到了高温环境下温度对浓度测量的实际误差值和未修正结果, 然后分别采用多项式拟合实验数据得出的经验公

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11204320) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: fzdong@aiofm.ac.cn

式和 HITRAN 线强拟合得出的理论修正公式对不同温度下的浓度值进行修正. 对未修正的实验结果和补偿修正后的结果进行比较, 表明上述两种修正方法对气体温度变化所引起的测量误差有一定的抑制作用, 为实验室 TDLAS 系统应用到燃烧诊断气体监测提供了依据.

2 基本原理

对于特定的气体吸收线 ν , I_0 为激光的初始光强, $S(T)$ 表示在吸收峰 ν 处的吸收线强, $g(\nu)$ 为吸收线形函数, P 为气体压强, 通过光程 L 的待测气体浓度 C 后的出射光强, 遵循 Lambert-Beer 定律:

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-PS(T)g(\nu)CL]. \quad (1)$$

线型函数 $g(\nu)$ 存在如下关系:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu) d\nu = 1. \quad (2)$$

实验中, 为了提高系统检测的灵敏度, 采用波长调制技术进行实时监测, 一般情况下 $S(T)g(\nu)PCL \ll 1$ 很容易得到满足, 因此将 (1) 式进行傅里叶展开, 二次谐波信号与线强的温度函数、气体浓度、压力等参数的关系可以如下表示^[14]:

$$I_{2f} \propto I_0(\nu)S(T)g(\nu)PCL. \quad (3)$$

线强函数 $S(T)$ 可以采用参考温度 ($T_0 = 300 \text{ K}$) 下的线强函数表示, 同时假定在测量过程中气压恒

定, 则

$$\begin{aligned} S(T) &= S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{n_j} \\ &\times \exp \left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \\ &\times \frac{1 - \exp \left(-\frac{hc\nu_0}{kT} \right)}{1 - \exp \left(-\frac{hc\nu_0}{kT_0} \right)} \\ &\approx S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{n_j} \\ &\times \exp \left[-1.439E'' \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (4) \end{aligned}$$

其中, E'' 是低态能级, n_j 为温度相关系数, $Q(T)$ 是配分函数, 均可由 HITRAN 数据库得到^[15].

3 实验装置及过程

实验室情况下, 温度修正测量实验系统基本装置如图 1 所示. 为了高温试验的安全性要求, 采用氧气作为目标检测气体, 同时测量实验室温度为 26°C , 实验用氧气配比浓度为 21%. 加热装置采用的是改进的科晶公司出品的型号为 GSL-1500X 高温管式炉. 为了使温度准确稳定, 一是采用三端温度测量 (管两端 ①③ 点和管中间 ② 点, 三区温度相差 $\pm 20 \text{ K}$ 以内), 二是在每次测量时都在恒温区保持至少 30 min 使气体温度充分混合均匀, 且热电偶测量显示值不再变化. 同时为了防止外界气体交换和外界非监测光路上的氧气对测量结果的影响,

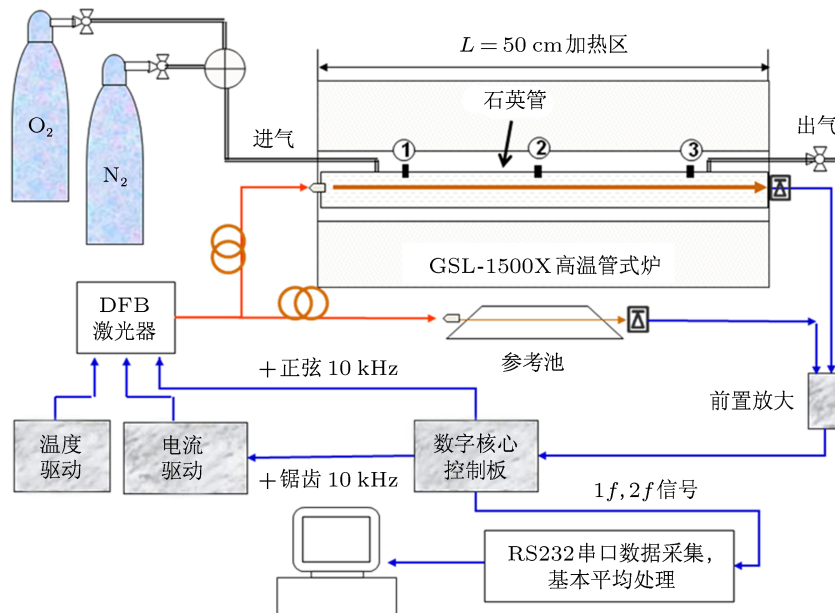


图 1 温度修正测量实验系统的基本装置

采用如下方式: 一是让发射端和接收端尽可能的靠近检测管内, 二是两端分别采用水冷法兰安装石英窗片封存气体, 三是采用氮气在测量过程中吹扫非测量部分光路保持测量环境无外界氧气干扰.

系统中采用的 DFB 激光器通过课题组研制的已经产品化的高精度温度控制板、电流驱动板锁定在中心吸收波长 760.77 nm 处, 数字式核心控制模块 [16,17] 产生调制信号 10 kHz 正弦调制信号和 10 Hz 锯齿扫描信号对激光波长进行调制, 调制光经过管内 50 cm 光程气体吸收后, 为了提高检测灵敏度和信噪比, 使探测器输出的电流信号经过前置放大板转换为放大的电压信号输入数字控制模块进行信号解调输出十六进制的 1024 点每周期的一次、二次谐波数字信号. 最后, 通过计算机的 RS232 串口采集、保存和处理.

4 温度影响与修正

4.1 经验公式方法修正

既然温度对浓度测量的影响是非常大的, 因此要对不同温度下的测量进行修正. 根据谐波信号峰值-温度的关系, 可以通过多项式拟合得到如下方程:

$$S_{O_2} = A + B_1 \cdot T + B_2 \cdot T^2 + B_3 \cdot T^3 + B_4 \cdot T^4, \quad (5)$$

其中, S_{O_2} 是氧气的吸收二次谐波线强, T 是气体温度, B_1, B_2, B_3, B_4 是多项式拟合参数, 可以结合实际测量的温度和二次谐波信号强度关系进行拟合得到. 根据 (2) 和 (3) 式以及与实际线强的关系可以得到

$$I_{2f} \propto I_0(\nu) \cdot [A + B_1 \cdot T + B_2 \cdot T^2 + B_3 \cdot T^3 + B_4 \cdot T^4] \cdot CL. \quad (6)$$

实验中, I_0, L 均为常量, 同时在采集二次谐波信号时采集一次谐波信号分量, 发现如图 2 所示的一次谐波信号反应的光强信号会发生变化, 因此采用常见的谐波比值法消除光强波动 [18] 带来的影响, 即 (2) 式可以改写作

$$P = I_{2f}/I_{1f} \propto [A + B_1 \cdot T + B_2 \cdot T^2 + B_3 \cdot T^3 + B_4 \cdot T^4] \cdot CL. \quad (7)$$

假设初始测量时温度为 T_0 , 实际测量时温度变为 T' , 假定未加修正前的温度定义为 C_{Mea} , 修正后的

气体浓度为 $C_{Correct}$, 因此可以得到如下所述的经验修正公式为

$$C_{Correct} = \frac{(A + B_1 \cdot T_0 + B_2 \cdot T_0^2 + B_3 \cdot T_0^3 + B_4 \cdot T_0^4)}{(A + B_1 \cdot T' + B_2 \cdot T'^2 + B_3 \cdot T'^3 + B_4 \cdot T'^4)} \times C_{Mea} = \tau C_{Mea}. \quad (8)$$

在实验温度 (300—900 K, 间隔 50 K) 情况下, 经过谐波比值法修正后的二次谐波信号如图 3 所示, 随着温度的升高谐波信号峰-峰值降低, 这并不是因为浓度降低所导致的, 恰恰反映了温度升高时的变化, 这与理论分析是基本一致的. 图 4 所示为图 3 中的二次谐波信号峰-峰值与温度变化的关系, 为了得到准确的参数值, 通过 4 阶多项式拟合, 得到如表 1 中不同的参数值, 相关度为 $R = 0.988$ 满足拟合要求. 根据表 1 中的参数值和 (8) 式修正不同温度下的气体浓度. 经过修正的浓度关系将在 4.4 部分进行阐述.

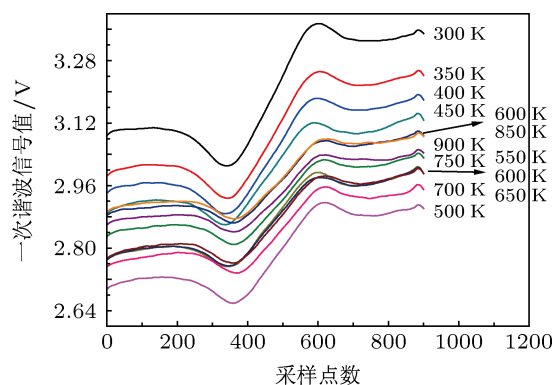


图 2 不同温度下测量的一次谐波 (1F) 信号

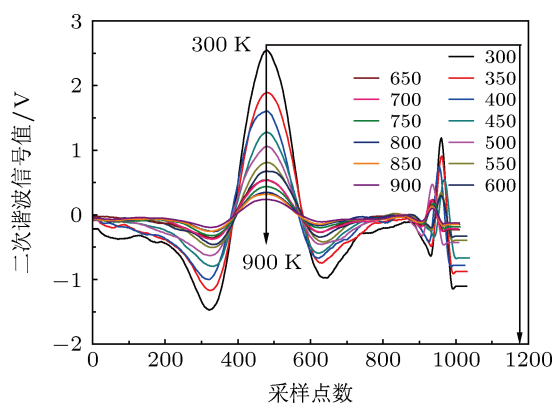


图 3 不同温度下测量的归一化后的二次谐波 (2F) 信号

值得注意的是, 对于经验修正公式 (8), 如果要得到浓度修正系数 τ 就必须得到在已知标定浓度下, 不同已知温度 T' 时的二次谐波信号峰-峰值, 并

对所获取的二次谐波信号峰-峰值与温度值进行曲线拟合以便推算出在其他未直接测量情况下的温度所对应的二次谐波峰-峰值, 以此进行反演. 然而在实际的测量过程中由于标定浓度的误差与起伏, 温度的误差, 数据采集和数据处理的不同等因素, 会对每次的修正测量结果带来一定的误差, 这是经验公式修正的一个不足之处. 为了简化修正过程, 避免吸附性气体、有毒气体、易燃易爆气体等标定的困难, 文中 4.2 部分对理论公式修正进行了介绍.

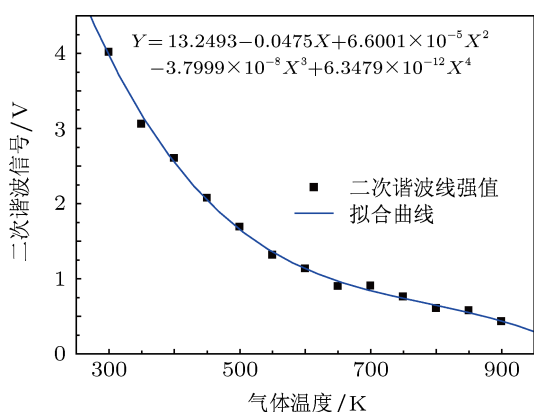


图4 温度与二次谐波幅值关系及拟合曲线

表1 校准拟合方程参数值

参数	参数值	相对误差
A	13.249 3	2.458 9
B ₁	-0.0475	0.0185
B ₂	6.6001 × 10 ⁻⁵	4.994 × 10 ⁻⁵
B ₃	-3.7999 × 10 ⁻⁸	5.744 × 10 ⁻⁸
B ₄	6.3479 × 10 ⁻¹²	2.3886 × 10 ⁻¹¹
R = 0.988		SD = 0.0668

4.2 理论公式方法修正

浓度测量的温度修正在理论上也可以根据 (2) 式得到, 在测量过程中, 由于气体压强保持恒定在大气压附近, 因此碰撞展宽占主要地位^[19], 温度变化是在 300—900 K 之间, 因此相对于温度变化和压强恒定引起的变化量来说, 且为了计算方便, 可以近似认为吸收线型为 Lorentzian 线型描述, 即

$$g(\nu) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{\Delta\nu_c}{2}}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_c}{2}\right)^2}, \quad (9)$$

其中, $\Delta\nu_c$ 为碰撞展宽 (FWHM), ν_0 [cm⁻¹] 为中心吸收线频率. 因此, 根据吸收线形理论和吸收半宽公

式, 可以得到如下关系:

$$\Delta\nu_c \propto \gamma, \\ \gamma(T) = \gamma(T_0) \left(\frac{T_0}{T}\right)^{n_j}. \quad (10)$$

根据 (2), (4), (9), (10) 式所述, 可以得到的浓度的理论修正关系近似为

$$C_{\text{Correct}} \propto k \cdot \frac{(I_{2f}/I_{1f})_T}{(I_{2f}/I_{1f})_{T_0}} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_j} \cdot C_0, \quad (11)$$

其中, C_{Correct} 为修正后浓度, k 为修正变换比例系数, C_0 为参考温度 T_0 下的气体浓度定义为 21%, n_j 为温度相关系数, 当选择氧气 760.77 nm 中心吸收线时 $n_j = 0.72$. 并且, 从二次谐波峰值和气体的吸收线强 (如图 5 所示为线强温度关系曲线) 之间的关系 (如图 6 所示) 可以看出两者之间存在很大的相关性, 因此这也正说明了气体吸收反演得到的二次谐波峰值是完全可以反映温度变化趋势的, 是可以应用于温度测量和温度修正的. 经过理论公式修正的浓度如图 7 中 C 线所示.

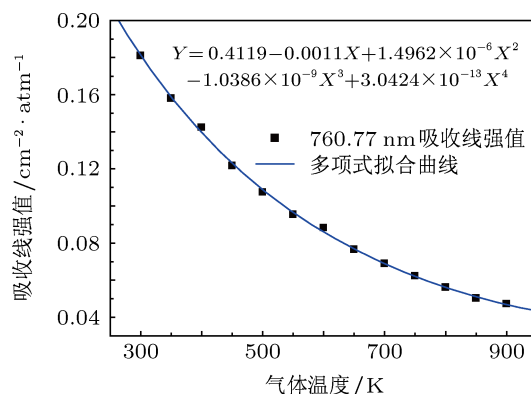


图5 吸收线强与温度关系及拟合曲线

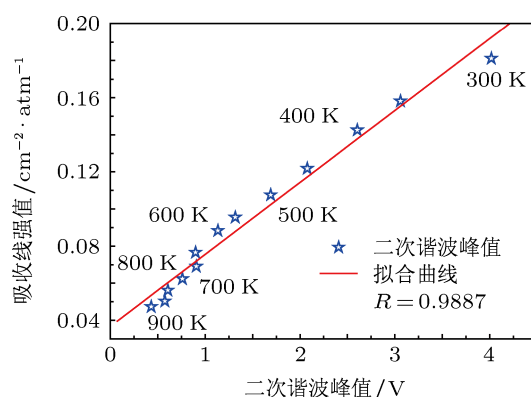


图6 吸收线强与二次谐波峰值关系及拟合曲线

值得注意的是, 理论公式修正方法 (11) 式是在一个基本的假设下获得的, 即吸收线型可以采用 Lorentzian 线型进行描述. 因此, 相对于展宽机理该修正方法必须是在碰撞展宽占主导地位, 且待测环

境温度可知的情况下 (11) 式满足假设条件. 通过对工业现场检测环境调研, 在绝大多数气体检测氛围中温度不会太高, 基本都在几百 K 的量级以下, 因此本文中所使用的温度范围是可以满足工业检测环境要求的.

4.3 经验方法修正与理论方法修正比较

根据以上两种修正方法, 在表 2 中给出了: 1)

不同温度情况下测量的谐波信号峰-峰值, 2) 不考虑温度影响时反演得到的浓度值以及相对误差比, 3) 理论公式修正值及其误差情况, 4) 经验公式修正值及其误差情况. 监测所得到的谐波信号峰-峰值和以此反演的浓度随着温度的升高降低, 这完全符合气体理想状态方程的分析结果. 同时, 根据经验公式 (8) 和理论公式 (11) 得到了校正后的温度补偿浓度, 都趋近于实际气体浓度, 对温度的影响有较好的抑制作用.

表 2 不同温度下的测量数据比较

温度 /K	谐波幅值/V	未修正测量值/%	未修正值误差/%	经验公式修正值/%	经验公式修正误差/%	理论公式修正值/%	理论公式修正误差/%
300	4.017	21.000	0.000	21.000	0.000	21.000	0.000
350	3.060	15.999	23.814	19.934	5.077	20.471	2.518
400	2.605	13.618	35.151	21.212	-1.010	21.290	1.379
450	2.076	10.854	48.314	21.080	-0.380	21.617	2.939
500	1.691	8.839	57.908	21.241	-1.150	21.501	2.388
550	1.317	6.886	67.211	20.204	3.791	20.199	3.815
600	1.134	5.930	71.764	20.861	0.660	20.030	4.619
650	0.900	4.705	77.596	19.443	7.417	19.411	7.568
700	0.907	4.740	77.431	22.585	-7.548	22.883	8.965
750	0.760	3.975	81.074	21.614	-2.922	22.335	6.358
800	0.607	3.176	84.878	19.800	5.713	20.743	1.226
850	0.576	3.009	85.672	22.148	-5.460	22.937	9.225
900	0.432	2.257	89.252	21.078	-0.365	19.032	9.371

为了更直观的表述上述情况, 以上实验结果如图 7 所示. 图中 A 线表示未加修正原始测量浓度值, 受温度的影响非常明显. 经验公式修正 B 线和理论公式修正 C 线曲线值比较接近, 这不仅验证了理论公式的可行性, 同时也说明了经验公式也是可行的. 同时从表 2 和图 7 中可以看出当气体温度较高时, 经验公式补偿后的浓度误差相对理论公式补偿后的误差偏差略大. 对于浓度测量偏差较大的温度点, 初步分析估计是由于温度起伏不均匀引起的. 如果对修正后的浓度再次进行滤波处理, 如图 7 中 D 线所示系统的偏差将会更小. 考虑到两者的实际情况, 即: 1) 理论公式修正精确度比经验公式修正相对准确; 2) 理论修正不必得到温度与二次谐波强度关系的拟合曲线, 避免了因为浓度测量不准确和拟合偏差引来的二次误差影响; 3) 理论公式不需要在不同温区连续准确定标气体浓度, 对于一些吸附性气体和易燃易爆气体相对容易, 如 CO, CH₄, NH₃, CH₃OH, H₂S,

HCl, HF, HNO₃ 等. 因此理论温度补偿和数字滤波技术相结合是可行和方便的.

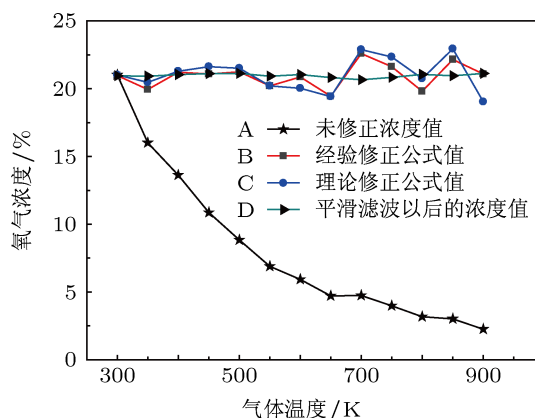


图 7 实际测量浓度, 修正后浓度和平滑后的浓度值

理论公式和经验公式修正后的结果两者相关性如图 8 所示, 其拟合度为 $R = 0.765$, 很明显图中存在温度较高时的两个奇异点. 去掉这两个奇异点值进行拟合, 其拟合度变为 $R = 0.952$, 具有较好的

相关性,因此在这里可以推断为温度较高时线形的变化引起的误差影响相对较大.在实验加热过程中,温度引起谐波信号的不稳定性不仅仅表现在强度的变化上,同时也会表现在监测气体空间压强的变化,进而引起吸收线形的展宽变化,但是局限于现有的实验条件下只能假定在测量过程中气压是保持不变的,而不考虑温度变化对压强等其他情况的影响.而理论上温度增加会使空间压强变化引起吸收线形的展宽从而引起调制度的变化进而影响谐波信号的峰-峰值,并将最终干扰浓度的测量,这些因素影响将在以后的实验中做进一步分析.

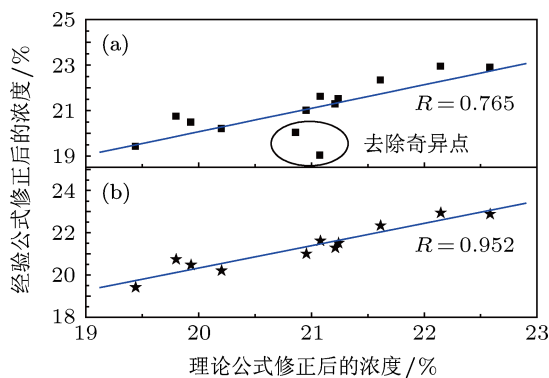


图8 理论公式与经验公式修正后浓度相关性

5 结论

文中论证了 TDLAS 方法对气体实时在线检测的温度修正方法的可行性.实验中,结合波长调制方法对温度为 300—900 K,间隔 50 K,假定压力微弱变化的情况下对 21%浓度的氧气进行了在线测量,通过实验讨论了温度变化时对二次谐波的影响以及两者的变化关系.同时,采用常用的一次谐波比值消元法消除了光强起伏带来的影响,得到了原始环境下温度对浓度测量的实际误差情况.根据消除光强后的二次谐波峰-峰值采用多项式拟合信号数据得出的经验公式和通过 HITRAN 数据库线强拟合得出的理论修正公式后的不同温度下的浓度测量值,尽管未考虑压强引起的调制度变化带来的线宽影响,但是实验结果同样证明了两者的可行性和合理性,对温度变化引起的浓度变化具有一定的抑制作用,为 TDLAS 系统在工业现场变温情况下的痕量气体在线浓度监测修正提供了理论基础.在以后的工作中需要根据不同的工业排放、燃烧诊断等监测环境和监测目的,进一步分析吸收线型的影响,实时完善温度修正补偿方法,以期达到满意的测量结果.

- [1] Wienhold F G, Fischer H, Hoor P, Wagner V, Königstedt R, Harris G W, Anders J, Grisar R, Knothe M, Riedel W J, Lübken F J, Schilling T 1998 *Appl. Phys. B* **67** 411
- [2] Che L, Ding Y J, Peng Z M, Li X H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 127803
- [3] Bolshov M A, Kuritsyn Y A, Liger V V, Mironenko V R, Leonov S B, Yarantsev D A 2010 *Appl. Phys. B* **100** 397
- [4] Li H, Farooq A, Jeffries J B, Hanson R K 2007 *Appl. Phys. B* **89** 407
- [5] Zhang L, Liu J G, Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, Xu Z Y, Chen J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034214 (in Chinese) [张亮, 刘建国, 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 许振宇, 陈军 2012 物理学报 **61** 034214]
- [6] Wang F, Huang Q X, Li N, Yan J H, Chi Y, Ceng K F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3867 (in Chinese) [王飞, 黄群星, 李宁, 严建华, 池涌, 岑可法 2007 物理学报 **56** 3867]
- [7] Kan R F, Liu W Q, Liu J G, Zhang Y J, Dong F Z, Gao S H, Wang M, Chen J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1927 (in Chinese) [阚瑞峰, 刘文清, 刘建国, 张玉钧, 董凤忠, 高山虎, 王敏, 陈军 2005 物理学报 **54** 1927]
- [8] Dong F Z, Liu W Q, Liu J G, Tu X H, Zhang Y J, Qi F, Xie P H, Lu Y H, Wang S M, Wang Y P, Wei Q N 2005 *Jou. Test & Mea. Tec.* **19** 119 (in Chinese) [董凤忠, 刘文清, 刘建国, 涂兴华, 张玉钧, 齐峰, 谢品华, 陆亦怀, 汪世美, 王亚萍, 魏庆农 2005 测试技术学报 **19** 119]
- [9] Dong F Z, Liu W Q, Liu J G, Tu X H, Zhang Y J, Qi F, Xie P H, Lu Y H, Wang S M, Wang Y P, Wei Q N 2005 *Jou. Test & Mea. Tec.* **19** 237 (in Chinese) [董凤忠, 刘文清, 刘建国, 涂兴华, 张玉钧, 齐峰, 谢品华, 陆亦怀, 汪世美, 王亚萍, 魏庆农 2005 测试技术学报 **19** 237]
- [10] Xu Z Y, Liu W Q, Liu J G, He J F, Yao L, Ruan J, Chen J Y, Li H, Yuan S, Geng H, Kan R F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234204 (in Chinese) [徐振宇, 刘文清, 刘建国, 何俊峰, 姚路, 阮俊, 陈玖英, 李晗, 袁松, 耿辉, 阚瑞峰 2012 物理学报 **61** 234204]
- [11] Song J L, Hong Y J, Wang G Y, Pan H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 240702 (in Chinese) [宋俊玲, 洪延姬, 王广宇, 潘虎 2012 物理学报 **61** 240702]
- [12] Shu X W, Zhang Y J, Kan R F, Cui Y B, He Y, Zhang S, Geng H, Liu W Q 2010 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **30** 1352 (in Chinese) [束小文, 张玉钧, 阚瑞峰, 崔益本, 何莹, 张帅, 耿辉, 刘文清 2010 光谱学与光谱分析 **30** 1352]
- [13] Zhao Y J, Wei Y B, Li Y F, Zhang T T, Wang C, Liu T Y 2012 *Proceedings of the 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors Proc. of SPIE Beijing, China, October 15–19, 2012* p8421AP-1
- [14] Lü X J, Weng C S, Li N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234205 (in Chinese) [吕晓静, 翁春生, 李宁 2012 物理学报 **61** 234205]
- [15] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, Benner, Chris D, Bernath P F, Birk M, Boudon V, Brown L R, Campargue A, Champion J P, Chance K, Coudert L H, Dana V, Devi V M, Fally S, Flaud J M, Gamache R R, Goldman A, Jacquemart D, Kleiner I, Lacombe N, Lafferty W J, Mandin J Y, Massie S T, Mikhailenko S N, Miller C E, Moazzen-Ahmadi N, Naumenko O V, Nikitin A V, Orphal J, Perevalov V I, Perrin A, Predoi-Cross A, Rinsland C P, Rotger M, Šimečková M, Smith M A H, Sung K, Tashkun S A, Tennyson J, Toth R A, Vandaele A C, Vander Auwera J 2009 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **110** 533
- [16] Zhang Z R, Dong F Z, Wang Y, Wu B, Pang T, Xia H, Tu G J 2010 *Proceedings of the Advanced Sensor Systems and Applications Proc. of SPIE Beijing, China, October 18–20, 2010* p785313-1

[17] Zhang Z R, Dong F Z, Wang Y, Pang T, Wu B, Tu G J, Xia H, Ni Z B, Yang Y, Xu M M 2010 *Acta Optica Sinica* **31** s100304 (in Chinese)
[张志荣, 董凤忠, 王煜, 庞涛, 吴边, 涂郭结, 夏滑, 倪志波, 杨阳, 徐明明 2010 光学学报 **31** s100304]

[18] Iseki T 2003 *Opt. Rev.* **10** 24

[19] Guan C, Qu Y 2012 *Laser & Infrared* **42** 36 (in Chinese) [贯从, 曲艺 2012 激光与红外 **42** 36]

Study on the temperature modified method for monitoring gas concentrations with tunable diode laser absorption spectroscopy*

Zhang Zhi-Rong Wu Bian Xia Hua Pang Tao Wang Gao-Xuan
Sun Peng-Shuai Dong Feng-Zhong[†] Wang Yu

(Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 19 July 2013; revised manuscript received 20 August 2013)

Abstract

Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is often used to detect gas concentrations in many fields. But because of the variation of ambient temperature, the measured harmonic signal amplitudes are affected and may lead to the monitoring errors. The impact of temperature on the measurement as well as the temperature compensation method is emphasized. So in order to modify the inversion results and adapt industrial measurement, combustion diagnostics, the numerical fitting empirical modified equation and theoretical modified equation from HITRAN database are discussed and compared in this paper. In experiment, the 21% oxygen as the safety monitoring gas and absorption wavelength at 760.77 nm are employed. Meanwhile, the first harmonic signals are also used to decrease the laser intensity fluctuations. We thus obtained the unmodified and modified results with the tube furnace in the temperature range 300–900 K (interval 50 K). Experimental results show that these two modified methods have some effective influence on the temperature changes and can be applied to gas monitoring correction to improve the accuracy and feasibility of the TDLAS technology. In addition, the methods also provide evidence for the real-time gas monitoring in the application of combustion diagnosis.

Keywords: tunable diode laser absorption spectroscopy, temperature compensation, empirical equation, theoretical equation

PACS: 42.62.Fi, 42.62.–b, 42.68.Ca, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.62.234204

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11204320).

[†] Corresponding author. E-mail: fzdong@aiofm.ac.cn