

文章编号:1001-5078(2024)02-0208-06

· 激光应用技术 ·

基于 TDLAS 技术气体浓度测量的温度修正方法

王 婷¹, 韩志洋², 俞 跃¹, 王文琴², 胡 斌¹

(1. 中国特种设备检测研究院, 国家市场监督管理总局重点实验室(无损检测与评价), 北京 100029;

2. 南昌大学 先进制造学院, 江西 南昌 330031)

摘要:精确检测气体浓度在大气环境保护、工业生产控制、废气排放监测等领域有着迫切需求。可调谐二极管激光吸收光谱技术(TDLAS)是实现气体浓度精确检测的重要方法,然而温度变化却为浓度精确测量带来较大误差,因而对检测结果进行温度修正是十分必要的。本文从理论角度出发,阐述了TDLAS技术检测气体浓度的温度影响机理,重点分析并归纳了基于TDLAS技术的气体浓度测量的温度影响修正方法,并展望了其发展趋势。

关键词:TDLAS; 直接吸收; 波长调制; 浓度测量; 温度修正

中图分类号:TN249;X831 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.02.007

Temperature correction method for gas concentration measurement based on TDLAS technology

WANG Ting¹, HAN Zhi-yang², YU Yue¹, WANG Wen-qin², HU Bin¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing and Evaluation for State Market Regulation,

China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China;

2. School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Accurate detection of gas concentration is in urgent demand in the fields of atmospheric environmental protection, industrial production control, and exhaust emission monitoring. Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is an important method for achieving accurate detection of gas concentration. However, temperature variations bring significant errors to the accurate measurement of concentration, making temperature correction of the results essential. In this paper, the mechanism of temperature influence of gas concentration detection by TDLAS technology is described and the temperature influence correction methods for gas concentration measurement based on TDLAS technology is focused on analyzing and summarizing, and the trend of its development is envisioned.

Keywords: TDLAS; direct absorption; wavelength modulation; concentration measurement; temperature correction

1 引言

气体浓度精确测量是生产安全控制和环境保护的重要手段。可调谐二极管激光吸收光谱技术^[1-3] (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TD-

LAS)作为一种非侵入式光谱检测技术,利用可变波长的激光快速扫描痕量气体,根据气体吸收反应可实现高灵敏度、高光谱分辨率、快速响应速度的非接触和实时在线测量,被广泛应用于痕量气体气态参

基金项目:中国特检院青年基金项目(No. 2021 青年 09)资助。

作者简介:王 婷(1986-),女,博士,高级工程师,研究方向为光谱学无损检测。E-mail:hiwangting@126.com

通讯作者:胡 斌(1977-),男,博士,研究员,主要从事无损检测监测和智能检测等方面的理论研究和工程应用。

E-mail:hubin@csei.org.cn

收稿日期:2023-04-26;修订日期:2023-06-02

数检测^[4-11]。

基于 TDLAS 技术的理论基础——分子光谱吸收原理,待测气体温度变化会直接影响分子吸收谱线,因此气体浓度测量的准确性受到温度环境的严重影响^[12]。然而在实际应用中温度变化无处不在,一般情况下待测气体温度会随气温变化而变化。特殊地,在工业生产领域拥有大量燃烧炉、加热炉等各种高温设备,如燃煤电厂尾气排放的检测受到高温影响;近年来迅速发展的生鲜冷链物流运输和存储领域充斥着低温气体制冷装置,如 2022 年北京冬奥会用到了大量液氨制冷设备,需要实现对低温下痕量氨气浓度的精确检测。因此采用常规的光谱仪器在高温或低温条件下直接检测会受到温度带来的吸收误差,影响气体浓度的检测结果,导致污染或泄露气体排放的误检或漏检,危害重大。

本文概述了 TDLAS 技术测量气体浓度的基本原理,从理论上分析了气体浓度检测结果受温度影响的原因,总结了已获取的多种温度修正关系。重点阐述、分析和比较了基于 TDLAS 技术的气体浓度测量的温度影响修正实验方法,并对其发展进行了展望。

2 TDLAS 技术的基本原理及温度修正关系

通过吸收光谱进行气体检测是在 20 世纪中期由 Hinkley 和 Ried 提出,后由 Reid 等^[13]提出利用波长调制光谱(DAS)技术增加系统的检测精度。其基本依据是分析吸收光谱理论,以 Lambert-Beer^[14]吸收定律为基本原理,吸收区激光强度 I 与无吸收区激光强度 I_0 的关系满足:

$$I(v) = I_0(v) \exp(-S(T)\phi(v)PL) \quad (1)$$

其中, v 表示激光频率,单位 cm^{-1} ; $S(T)$ 为温度的函数,表示对应频率的光谱吸收线强,单位 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$; P 表示大气压强,单位 atm ; C 为气体浓度,单位 $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{atm}^{-1}$; L 为吸收光程,单位 cm ; $\phi(v)$ 为线型函数,单位 cm 。

根据上述公式可知,在探测光强 I 与 I_0 比值不变的情况下,气体浓度 C 与气体温度函数 $S(T)$ 成反比例关系。

为了使 TDLAS 系统检测结果满足高温环境,研究学者们对上述公式进行了不同分析,分别获取了多种温度修正关系。李峥辉等^[15]对式(1)进行数学推导,得到气体浓度:

$$X = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} -\ln \frac{I_t}{I_0} dv}{PS(T)L} = \frac{A}{PS(T)L} \quad (2)$$

其中, X 为待测气体浓度; A 为吸收积分; P 为气体总压; $S(T)$ 为气体的谱线强度; L 为光路长度。

他们认为在光程和压力一定的情况下,对于同一套系统,得到不同温度下 $A/S(T)$ 与气体浓度成正比, $A/S(T)$ 与气体浓度的线性修正关系式:

$$Y_{A/S(T)} = B + AX \quad (3)$$

张增幅等^[16]对 TDLAS 二次谐波信号进行了推导,认为二次谐波系数关系式为:

$$I_{2f} \propto I_0 a(v, P, T) cL \quad (4)$$

其中, a 是 v, P, T 的函数; c 为分子数浓度; L 为激光在气体中的传播距离。二次谐波 I_{2f} 信号与 $a(v, P, T)$ 呈线性关系,当 v 和 P 一定时,仅与气体温度 T 有关。

张志荣等^[17]分别使用经验公式和理论公式的方法对不同温度测量结果进行修正,经验公式方法修正从谐波比值法修正的角度出发,获取了二次谐波信号峰值与温度满足多项式拟合关系:

$$I_{2f} \propto I_0(v) \cdot [A + B_1 \cdot T + B_2 \cdot T^2 + B_3 \cdot T^3 + B_4 \cdot T^4] \cdot CL \quad (5)$$

其中, T 为气体温度; B_1, B_2, B_3, B_4 是多项式拟合参数,可结合测量温度和二次谐波信号强度关系拟合得到。

理论方法修正从消除光强起伏影响的角度出发,通过 HITRAN 数据库线强拟合得到的理论修正关系近似为:

$$C_{\text{Correct}} \propto k \cdot \frac{(I_{2f}/I_{1f})T}{(I_{2f}/I_{1f})T_0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_j} \cdot C_0 \quad (6)$$

其中, C_{Correct} 为修正后浓度; k 为修正变化比例关系系数; 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 $n_j = 0.72$ 。实验结果证明了两者的可行性和合理性。

HeYing 等^[18]根据下列关系式,利用三个温度范围的分子多项式系数详细计算了不同温度下的配分函数,进而证明吸收线强与温度的理论关系式是非线性关系,最终通过上述关系式获取了温度校正方法:

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

$$\left[1 - \exp\left(\frac{-hc v_0}{kT}\right)\right] / \left[1 - \exp\left(\frac{-hc v_0}{kT_0}\right)\right] \quad (7)$$

其中, k 为玻尔兹曼常数 ($k = 1.38066 \times 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1}$); h 为普朗克常数 ($h = 6.62618 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$); c 为光速 ($c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); E'' 为分子低能级能量,可在 HITRAN 数据库查询; $Q(T)$ 为分子配分函数。

3 温度修正方法研究进展

TDLAS 系统的技术方案主要有直接吸收法和波长调制法^[19],两种方法虽然技术方案不同,但是采用了相同的分子吸收光谱原理。在气体浓度检测精度方面,波长调制法在技术上消除了吸收中心处的光强 I_0 ,避免了光强波动的影响,但是仍然无法消除温度对检测结果的影响。Yang 等^[20]针对船用柴油机的 NO 浓度测量进行了理论和实验的研究,分析了温度变化对浓度测量的影响,证实了直接吸收法和波长调制法的信号强度都会随温度的变化而变化,因而技术方案的差异并未带来温度影响的消除。

李峥辉等^[15]针对直接吸收法中温度对测量浓度的影响提供了修正方案。利用最小二乘法拟合出不同温度下浓度与被测气体吸收的修正关系式,从而对变温时的浓度测量结果进行了修正,修正后的最大相对误差从 29.63% 降到了 5% 以下,大大提高了浓度测量的准确性。

张可可等^[21]针对波长调制法中一次谐波信号的温度影响进行了修正。利用一次谐波检测 CH_4 气体的浓度,根据 HITRAN 数据库选取了 1653.72 nm 波长处的强吸收线,发现 CH_4 吸收线的线强随着温度升高而减小,谱线吸收系数也在减小,为此对一次谐波幅值信号进行温度补偿,使系统的测量偏差达到 1% 左右,有效地提高了检测精度。

温度的变化除了对一次谐波信号有影响外,对二次谐波信号也会造成不同程度的影响。为此,张增福等^[16]通过对二次谐波信号进行多项式拟合,得到了 NH_3 的二次谐波幅值随温度变化的方程,并由该方程进一步得到了温度修正的经验公式。当温度在 25 ~ 250 °C 变化时,对浓度为 50 ppm 的 NH_3 进行修正。修正后的相对误差大概在 5.1% 左右,极大

地提升了测量的准确性。张志荣等^[17]研究了 21% 氧气在 300 ~ 900 K 范围内温度变化影响的修正方法。采用一次谐波比值消元法消除了光强起伏的影响,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值,采用经验公式和理论公式两种方式来修正不同温度下的浓度测量值,结果表明两种方法都能够对温度影响进行一定程度的修正。束小文等^[22]介绍了高温 HCl 在 295 ~ 510 K 范围内的测量系统和实验方式,强调了温度对测量的影响以及温度补偿方法,通过线形拟合得到线强随温度变化的方程,从而分析得出 HCl 气体的温度修正方程和浓度温度修正的经验公式,该工作验证了经验公式的合理性,使得系统的检出限达到 2 ppm。经过测算修正后的平均误差大约在 9.02%,标准差大约在 $16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。张乐文等^[23]针对高温 CO 气体的 2 f 吸收幅值与温度的拟合关系,证实了可通过分子吸收光谱的 2 f 幅值和温度反演出当前条件下的气体浓度,并给出了反演关系式,该研究对高精度高温气体检测仪器的研发很有意义。HeYing 等^[18]针对 HF 气体在 290 ~ 323 K 范围内的气体浓度给出了温度修正分析,发现温度修正前后 313 K 和 323 K 温度下 HF 气体浓度检测结果偏离真实浓度的偏差分别缩小了 4.13% 和 4.4%,证实了其温度修正方法的有效性。

结合算法建立温度补偿模型对温度进行修正是有有效提高检测精度的又一有效手段。马砺等^[24]测量了不同温度(10 ~ 50 °C)下 0.04% CH_4 气体的浓度,并分析了温度对于吸收谱线的线强和半宽度的影响。为了消除温度变化给气体浓度检测带来的影响并提升修正效果,该实验采用了粒子群优化算法(PSO)来优化 BP 神经网络的阈值和最佳权值,建立了 PSO-BP 温度补偿模型。通过该模型的补偿,使得 CH_4 浓度测量的相对误差范围从 4.25% ~ 12.13% 下降至 0.49% ~ 0.02%。

齐汝宾等^[25]利用 MATLAB 程序对 TDLAS 的直接吸收过程进行了仿真,经过分析和计算得到了固定条件下(气体的温度、压力和浓度等)吸收光谱数据。由仿真得来的数据,最终可以得到温度校正曲线,利用该曲线可以实现对温度影响进行校正。

对 TDLAS 系统的光路改造也可以实现温度影响补偿。Zhao 等^[26]基于 HITRAN 数据库,研究了甲

烷近红外光谱随温度的吸收特性。设计了一个多路复用的光纤甲烷监测系统,实验结果强调了温度对系统的影响,并通过补偿反演浓度,明显提高了浓度精度。表 1 总结了不同的温度修正方法。

表 1 温度修正方法总结

Tab. 1 Summary of temperature correction methods

调制方法	所测气体	温度修正方法	修正前精度	修正后精度	文献
直接吸收法	H ₂ O	对 TDALS 直接吸收过程进行仿真	/	最大相对误差小于 2.5 %	[25]
	CO ₂	最小二乘法多次拟合得到修正关系式	最大相对误差为 30 % 左右	最大相对误差降到 5 % 以内	[15]
波长调制法	CH ₄	利用温度传感器采集气体温度,得到温度补偿关系式	最大相对误差在 20 % 左右	最大相对误差在 1 % 以内	[21]
	NH ₃	分析二次谐波信号幅值的变化,得到修正关系式	最大测量误差为 91.8 %	修正后误差为 5.1 %	[16]
	O ₂	分析二次谐波信号幅值的变化,得到修正关系式	900 K 时,误差大约为 90 %	误差一般在 3 % 以内,最大误差不过 10 %	[17]
	HCl	分析温度和线强的变化,得到修正关系式	最大标准差超过 90 mg · m ⁻³	平均标准差在 16 mg · m ⁻³	[22]
	CH ₄	建立 PSO-BP 温度补偿模型	最大误差为 12.13 %	最大误差不到 0.5 %	[24]

直接吸收法的温度修正方法误差较大,是由于直接吸收法本身的测量精度相较于波长调制法偏低。在使用波长调制法测量气体浓度时,多数的温度修正方法是通过分析二次谐波幅值随温度的变化,从而得到修正关系式。这种方法适用性更广,能够修正的温差范围更大,修正后的误差更小。修正后的气体浓度的误差大小还取决于待测气体种类,例如,NH₃ 在高温下易吸附在管道中造成测量误差大,相对而言 CH₄ 温度修正的效果更好。

4 发展和展望

为了提高气体浓度的测量准确性,目前气体浓度测量的温度影响修正方法大致分为两种,一种是从实验结果出发,通过比较检测浓度和标准浓度拟合经验公式或建立温度修正模型实现检测浓度的有效温度修正;另一种是从理论出发,由理论公式结合 HITRAN 数据库,通过仿真分析获取温度修正的理论公式。两种方法的有效结合能够有效提高修正方法的可靠性。

然而上述温度修正研究仅集中于高温条件,针对低温条件下气体浓度测量的温度修正却鲜有人研究。随着冷链物流及生鲜存储业的迅猛发展,对固液态气体制冷设备的气体泄漏安全检测不容忽视,例如,2022 年北京冬季奥运会用到了大量液氨制冷设备,需要对低温下痕量氨气浓度的精确检测,防止

泄漏事故的发生危害人员安全。因此有必要进一步拓展气体浓度检测的温度影响修正范围,验证已有温度修正方法的有效性,实现全温域修正方法的统一性和一致性。

参考文献:

- [1] Liu wenqing, Chen Zhenyi, Liu Jianguo, et al. Advances with respect to the environmental spectroscopy monitoring technology [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (5): 0500001. (in Chinese)
刘文清,陈臻懿,刘建国,等. 环境监测领域中光谱学技术进展[J]. 光学学报,2020,40(5):0500001.
- [2] Dong Fengzhong, Kan Ruifeng, Liu wenqing, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopic technology and its applications in air quality monitoring[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22 (3): 315 - 325. (in Chinese)
董凤忠,阚瑞峰,刘文清,等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术及其在大气质量监测中的应用[J]. 量子电子学报,2005,22(3):315 - 325.
- [3] Zhang Zhirong, Sun Pengshuai, Pang Tao, et al. Application of laser absorption spectroscopy for identification gases in industrial production processes and early safety warning[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26 (8):1925 - 1937. (in Chinese)
张志荣,孙鹏帅,庞涛,等. 激光吸收光谱技术在工业生产过程及安全预警标识性气体监测中的应用[J].

- 光学精密工程,2018,26(8):1925-1937.
- [4] Zhang Z R, Sun P S, Pang T, et al. Reconstruction of combustion temperature and gas concentration distributions using line-of-sight tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(7):076107.
- [5] Sun Pengshuai, Zhang Zhirong, Cui Xiaojuan, et al. Multipath real-time measurement of temperature and H₂O concentration for combustion diagnosis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9):360-367. (in Chinese)
孙鹏帅, 张志荣, 崔小娟, 等. 燃烧场内多路径温度与 H₂O 浓度的在线检测[J]. *中国激光*, 2015, 42(9):360-367.
- [6] Pang Tao, Wang Yu, Xia Hua, et al. Full scale methane sensor based on TDLAS technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(9):0912003. (in Chinese)
庞涛, 王煜, 夏滑, 等. 基于 TDLAS 技术的全量程激光甲烷传感器[J]. *光子学报*, 2016, 45(9):0912003.
- [7] Zhang Z R, Sun P S, Li Z, et al. Novel coalbed methane (CBM) origin analysis and source apportionment method based on carbon isotope ratio using infrared dual-wavelength laser absorption spectroscopy[J]. *Earth and Space Science*, 2018, 5(11):721-735.
- [8] Ji Wenhai, Lü Xiaocui, Hu Wenze, et al. Application of TDLAS technology to multicomponent detection in olefin production process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8):1837-1845. (in Chinese)
季文海, 吕晓翠, 胡文泽, 等. TDLAS 技术在烯烃生产过程中的多组分检测应用[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8):1837-1845.
- [9] Wang Y, Nikodem M, Zhang E, et al. Shot-noise limited Faraday rotation spectroscopy for detection of nitric oxide isotopes in breath, urine, and blood [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:9096.
- [10] Wang C, Sahay P. Breath analysis using laser spectroscopic techniques: breath biomarkers, spectral fingerprints, and detection limits[J]. *Sensors*, 2009, 9(10):8230-8262.
- [11] Qian Jiren, Zhang Fucheng, Ding Yanhui, et al. Research on space dynamic distribution monitoring technology and application of natural gas leak based on TDLAS[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(3):360-367. (in Chinese)
钱济人, 张富诚, 丁艳军, 等. 基于 TDLAS 的天然气泄漏空间动态分布监测技术及应用研究[J]. *激光与红外*, 2022, 52(3):360-367.
- [12] Luo Shuqin. Detection and analysis system for CO₂ gas based on TDLAS [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
罗淑芹. 基于 TDLAS 的 CO₂ 气体检测分析系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory[J]. *Applied Physics*, 1981, 26:203-210.
- [14] Allen M G. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(4):545-562.
- [15] Li Zhenghui, Yao Shunchun, Lu Weiye, et al. Study on temperature correction method of CO₂, measurement by TDLAS[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(7):2048-2053. (in Chinese)
李峥辉, 姚顺春, 卢伟业, 等. TDLAS 测量 CO₂ 的温度影响修正方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7):2048-2053.
- [16] Zhang Zengfu, Zhou Debao, Chen Wenliang, et al. Temperature influence in the TDLAS detection of escaping ammonia[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(6):32-37. (in Chinese)
张增福, 邹得宝, 陈文亮, 等. TDLAS 逃逸氨检测中温度影响的研究[J]. *光电工程*, 2014, 41(6):32-37.
- [17] Zhang Zhirong, Wu Bian, Xia Hua, et al. Study on the temperature modified method for monitoring gas concentrations with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(23):234204. (in Chinese)
张志荣, 吴边, 夏滑, 等. 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[J]. *物理学报*, 2013, 62(23):234204.
- [18] He Y, Zhang Y J, You K, Gao Y W, Chen C, Liu W Q. Study on hydrogen fluoride at high temperature detection method with temperature correction based on laser technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(3):964-970.
- [19] Cai Tingdong, Gao Guangzhen, Gao Minrui, et al. Measurements of CO₂ concentration at high temperature and pressure environments using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(7):5. (in Chinese)
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):5.
- [20] Yang X T, Xie W Q, Yuan Z G. Research on the NO concentration of marine diesel emission by tunable diode laser absorption spectroscopy technique[J]. *Optik-International*

- Journal for Light and Electron Optics,2016;3788 – 3791.
- [21] Zhang Keke, Qi Yong, Fu Xiao, et al. TDLAS first harmonic based methane concentration detectionsystem and its temperature compensation [J]. Shandong Science, 2014,27(1) :16 – 22. (in Chinese)
张可可, 齐勇, 付晓, 等. 基于 TDLAS 一次谐波的甲烷浓度检测系统及其温度补偿研究 [J]. 山东科学, 2014,27(1) :16 – 22.
- [22] Shu X W, Zhang Y J, Kan R F, et al. An investigation of temperature compensation of HCL gas online monitoring based on TDLAS method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010,30(5) :1352 – 1356.
- [23] Zhang Lewen, Wang Qianjin, Sun Pengshuai, et al. Analysis of interference factors and study of temperature correction method in gas detection by laser absorption spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(3) :767 – 773. (in Chinese)
张乐文, 王前进, 孙鹏帅, 等. 激光吸收光谱气体检测中的干扰因素分析和温度校正方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(3) :767 – 773.
- [24] Ma Li, Fan Xinli, Zhang Shuo, et al. Research on CH₄ gas detection and temperature correction based on TDLAS technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(11) :3632 – 3638. (in Chinese)
马砾, 范新丽, 张朔, 等. 基于 TDLAS 技术的 CH₄ 气体检测与温度补偿方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(11) :3632 – 3638.
- [25] Qi Rubin, He Shukai, Li Xintian, et al. Simulation of TDLAS direct absorption based on HITRAN database [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(1) :172 – 177. (in Chinese)
齐汝宾, 赫树开, 李新田, 等. 基于 HITRAN 光谱数据库的 TDLAS 直接吸收信号仿真研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(1) :172 – 177.
- [26] Zhao Y, Li Y, Zhang T, et al. Effect of temperature on methane gas concentration by tunable diode laser absorption spectroscopy [C] // OfS International Conference on Optical Fiber Sensor, 2012.