

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.03.02

基于 TDLAS 的压力测量技术

宫学程, 杨军

(航空工业北京长城计量测试研究所, 北京 100095)

摘 要: 流体介质的分子吸收光谱谱线与介质本身的物理属性有关, 蕴含信息丰富, 且具有高灵敏度、响应快、抗干扰能力强等优点。结合可调谐二极管激光吸收光谱技术的压力测量方法是压力真空计量的新思路。本文分析了基于可调谐二极管激光吸收光谱法测量压力的基本原理, 重点介绍了直接吸收法和波长调制法, 并比较了各自的优缺点。梳理了近年国内外的主要研究进展及应用情况, 在此基础上, 总结了基于 TDLAS 的压力测量技术目前所面临的关键技术瓶颈, 并对其未来主要应用领域进行了展望。

关键词: 可调谐二极管激光吸收光谱技术; 压力与真空计量; 气体压力

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)03-0008-06

Pressure Measurement Technology Based on TDLAS

GONG Xuecheng, YANG Jun

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Molecular absorption spectrum of fluid medium is related to the physical properties of the medium itself, which contain abundant information and have the advantages of high sensitivity, fast response and strong anti-interference ability. The pressure measurement method combined with tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is a new idea of pressure and vacuum metrology. In this paper, the basic principle of measurement pressure based on TDLAS is analyzed. The direct absorption spectroscopy and wavelength modulation spectroscopy are introduced, and their advantages and disadvantages are compared. The main research advances and applications at home and abroad in recent years are reviewed. On this basis, the key technical bottlenecks of pressure measurement technology based on TDLAS are summarized, and the main application fields in the future are prospected.

Key words: TDLAS; pressure and vacuum metrology; gas pressure

0 引言

随着工业生产技术的不断提高, 测量技术逐渐向准确度更高、响应更快、稳定性更强发展, 传统的传感器测量方法需要接触被测介质, 难以应对恶劣环境, 受空间局限性大, 且寿命短、抗电磁干扰能力较弱。因此, 一线计量人员一直在寻找新的测量方法。

十年前, 随着各种新型二极管激光器的问世, 尤其是热稳定性好、性价比高的 DFB 激光器 (Distributed-feedback Laser Diode, 分布反馈激光器) 的广泛推广, 吸收光谱技术迅猛发展, 各个行业的科研工作者开始了将吸收光谱技术与传统技术结合的探索性研究。目前, 吸收光谱技术已经被广泛应用在工业生产, 医疗检测及其相关设备研发, 环境污染检测和航空航天等领域^[1-2]。面向压力测量的吸收光谱法的探索, 如 TD-LAS 技术, 成为压力测量领域的研究热点。本文主要

介绍了近几年基于可调谐二极管激光吸收光谱 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, 简称 TDLAS) 技术测量压力的新思路。阐述了这种方法的优缺点, 最后对面向压力测量的吸收光谱技术研究的应用前景进行了展望。

1 TDLAS 压力测量原理

TDLAS 技术的基本原理是比尔朗博定律, 根据这一定律, 一束激光穿过气体吸收池后的透射光强与入射光强之比是一个 e 指数函数。

$$\frac{I_t}{I_0} = \exp[-p \cdot C \cdot S(T) \cdot \Phi(\nu) \cdot L] \quad (1)$$

式中: I_0 为入射光强; I_t 为透射光强; p 为总体压强, atm; C 为气体体积比; $S(T)$ 为吸收谱线的线强度, 是关于温度 $T(K)$ 的函数, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$; L 为气体吸收池有效长度, 通常认为是激光束穿过的吸收路径的总

长, cm; $\Phi(\nu)$ 为线型函数, 其在频域上的积分是归一化的, cm^{-1} 。通常 e 指数中的各项乘积称为吸收率函

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T_0}{T} \exp\left[-\frac{hcE''}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \frac{1 - \exp(-h\nu_0/kT)}{1 - \exp(-h\nu_0/kT_0)} \quad (2)$$

式中: $Q(T)$ 为吸收分子的配分函数; E'' 为低跃迁态的能量, cm^{-1} ; ν_0 为吸收线的中心频率, cm^{-1} ; h 为普朗克常数, $\text{J} \cdot \text{s}$; k 为波尔兹曼常数, J/K ; c 为光速, cm/s ; T 为开尔文温度, K ; T_0 为参考温度, 通常选取 296 K; 最后一项 $\frac{1 - \exp(-h\nu_0/kT)}{1 - \exp(-h\nu_0/kT_0)}$ 为气体激励辐射, 一般在波长小于 $2.5 \mu\text{m}$ 和温度低于 2500 K 时可以忽略^[4]。 $S(T_0)$ 和 $Q(T_0)$ 分别为在参考温度 $T_0 = 296 \text{ K}$ 时的谱线强度和配分函数, $Q(T)$ 为实验温度的配分函数, 各参数大小皆可以通过 HITRAN 光谱数据库得到。

比尔朗博定律用来表征原始的光谱信息, 其蕴含信息丰富的特点, 使得光谱可用于多参数测量。吸收光谱的测量方法目前主要分为直接吸收法和波长调制法, 测量方法不同, 其解算方法也不同^[5]。

1.1 直接吸收法

直接吸收法是 TDLAS 技术最简单、最常用的测量方法, 其硬件系统简便, 容易搭建, 适合于强吸收作用的测量。使用窄线宽的激光器加载锯齿信号扫描得到一条完整的吸收谱线, 经过扣除漂移作用引起的光强变化, 标定波长变化的范围, 根据基本线型进行拟合即可确定中心频率, 反演出吸收池内气体的积分吸光度、展宽等有效信息。

假设气体吸收池内的温度、压力和浓度等参数都是均匀的, 那么对吸收谱线进行积分即可达到吸光度

$$\begin{aligned} A &= \int_{-\infty}^{+\infty} -\ln(I_t/I_0) d\nu \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} pXS(T)\Phi(\nu)Ld\nu \\ &= pXS(T)L \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中的线型函数是唯一与频率有关的参数, 其在整个频率域上的积分等于 1。可调谐二极管吸收光谱法正是利用到了这个特点, 使用激光器对整个吸收谱线范围进行扫描, 消去线型函数的影响^[6]。

根据公式(3), 利用测量得到的吸收光谱信号可推导得到气体压强 p 的表达式, 在知道气体的浓度、温度和吸收池长度的具体值后, 可通过式(4)计算气体压强。

$$p = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{-\ln(I_t/I_0)}{S(T)C\Phi_\nu L} d\nu = \frac{A}{S(T)CL} \quad (4)$$

数, 记作 $\alpha(\nu)$, 即采集到的原始光谱信号。

$S(T)$ 谱线强度的计算方法为

1.2 波长调制法

波长调制法就是在扫描频率的基础上, 加上一个高频信号, 同时调制激光器的频率和光强, 再通过锁相放大器解调出谐波信号, 分析谐波信号的特点来获得压强。通过调制得到频率和光强可表示为^[7]

$$\nu = \nu_0 + \alpha \cos \omega t \quad (5)$$

$$I_0(t) = \bar{I}_0[1 + i_0 \cos(\omega t + \varphi_1) + i_2 \cos(\omega t + \varphi_2)] \quad (6)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为调制角频率; α 为调制深度; ν 为瞬时激光频率; $I_0(t)$ 为瞬时激光强度; $\bar{I}_0$ 为平均激光强度; i_0 和 i_2 分别为线性和非线性 IM 振幅; φ_1 和 φ_2 分别为线性和非线性 FM/IM 相移^[8]。

通过解调和低通滤波后, 可以得到谐波信号的 X 和 Y 分量为 X_{mf} 和 Y_{mf} , 经计算可得谐波信号的幅值 S_{mf} 为

$$S_{mf} = \sqrt{X_{mf}^2 + Y_{mf}^2} \quad (7)$$

通过不同谐波信号的比值消除激光器和探测器的一般模式噪声, 最终得到的值只与气体参数有关。

1.3 比较分析

TDLAS 技术是较先进的吸收光谱技术, 调谐光谱的扫描速度极快, 可在几百毫秒内得到完整的光谱信号, 因此可承担实时处理的检测任务。其采用的激光器——可调谐激光二极管线宽窄、调节范围较大、输出功率稳定并且造价低结构稳定, 调制过程中能够保持动态单模输出, 有较高的边模抑制比, 是调谐吸收光谱法理想的光源。可调谐激光器在近红外区域容易制造、成本低, 因此成为光谱学工作者的主要选择。目前 90% 的可调谐红外激光器都有 TDLAS, 促进了其市场化, 采购方便, 种类多样^[9-12]。

TDLAS 技术的两种实验方法——直接吸收法和波长调制法依据的基本原理相同, 其中, 直接吸收光谱法的实验装置简单、光谱信号直观、无需解调反演, 因此解算的速度快, 是目前较为常用的 TDLAS 测量方法, 且技术成熟、搭建成本低。但是直接吸收光谱法的抗干扰能力差, 不适用于恶劣环境及弱吸收条件下的气体压力检测。波长调制法的实验装置较为复杂, 并且谐波信号不能直观反映出各参数的信息, 需要较复杂的解算算法, 但是其测量准确度高、抗干扰能力强, 可承担恶劣环境及弱吸收条件下的检测任务。

2 研究现状

直接吸收法的研究较波长调制法起步早。2014 年 Buchholz 等人以水汽为压力测量介质,观测了 15 ~ 80 kPa 环境气压下水汽在 7299.4 cm^{-1} 附近的吸收峰,并对压力展宽的影响因素与测量中的误差来源作了详细分析^[13];同年 Peng 等人采用直接吸收法测量了水汽 7185.6 cm^{-1} 处的吸收峰,并根据 Lorentz 线型拟合吸光度曲线得到压力展宽,比较了中低压环境下的气压测量值与参考气压,最大偏差为 3.1%^[14]。

2012 年,姜南征选取二氧化碳在 6334.46 cm^{-1} 处的红外吸收谱线,测量了 1 ~ 4 atm 的直接吸收法光谱信号,图 1 为实验现场照片,图 2 为不同压力下的信号的吸收率。从图 2 中可以看出,随压力的增大,谐波信号的线宽也随之增大,这是由于碰撞展宽与压力成正比^[15]。

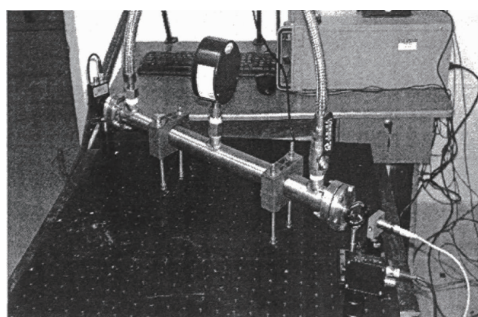


图 1 CO_2 压力测量实验台

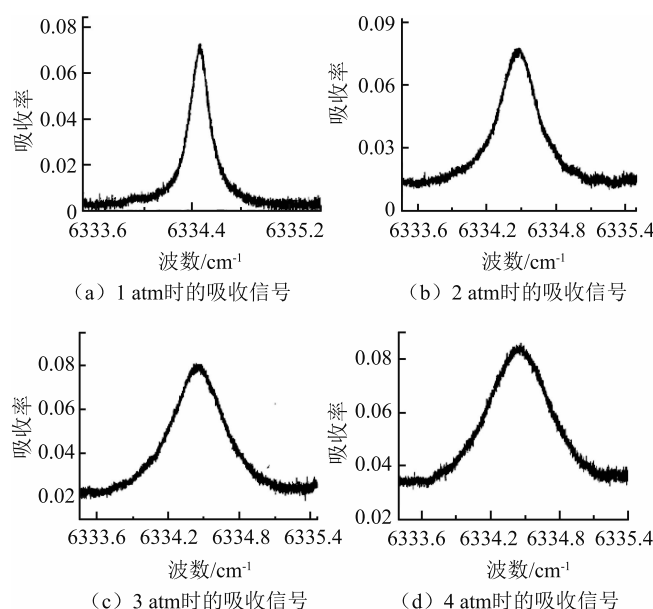


图 2 不同压力下的吸收信号

2015 年,中科院安徽光机所的陈祥等人选取了水

蒸气在 7243.1 cm^{-1} 和 7242.4 cm^{-1} 两处的红外吸收谱线,通过对吸收谱线的线型展宽的分析,实现了低于大气压范围内的气体压力精确测量。实验装置如图 3 所示,激光经过 1×2 分束器分为两束,一束光通过气压可调吸收池后进入光电探测器(PD),另一束光经过 FP 标准具进入 PD,用于检测波长的实时变化。

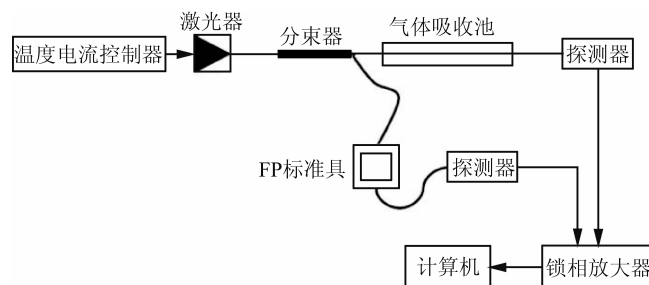


图 3 燃烧场气压测量系统示意图

根据积分吸光度公式,在进行测压实验之前,在气室与大气连通情况下预先标定水蒸气的体积浓度。开始进行测压实验时关闭气室,使用真空泵逐渐改变气室内气压。在测量实验中,分别对真空以及中低压环境下的光谱信号作三阶拟合,计算了各自的吸光度,中低压环境下的基线扣除真空基线后再进行线型拟合,以此消除高纯氮气中掺杂的微量水汽对吸收曲线的影响^[16]。由此得到吸光度随波数变化的曲线为最终可用数据。在 30 ~ 100 kPa 环境下,两条吸收线得到的测量结果与参考气压值——压力表读数的偏差分别浮动在 0.9% 和 2.0% 附近,测量结果的重复性都比较好,波动均小于 0.2%。

2016 年,段金虎等人选取了水汽在 7185.6 cm^{-1} 的红外吸收谱线在温度为 600 ~ 900 K 条件下,测得不同设定点的压强,并与压力传感器的测量结果进行对比与分析。采用自主设计的温度单独可控的三段式管炉进行实验,管炉由高强度石英玻璃制成,使用楔形石英玻璃将管炉分为 3 段,楔形片与石英管的法向呈 3° 夹角,可避免激光束在传播过程中由于楔形片之间的反射而产生光学干涉。这套实验装置的压强结果与高精度压力计的测量结果平均相对偏差为 3.1%^[17]。装置示意图如图 4 所示。

2016 年,张可可等人进行了基于 TDLAS 的二氧化碳浓度检测系统及压强补偿研究,实验装置如图 5,补偿前浓度测量结果的平均相对误差在 -7% 左右,补偿后其平均相对误差降到 -0.7%^[18]。可见压力对吸收光谱谱线的影响是十分明显的,具有重大的研究意义^[19]。

2016 年,屈东胜等人选取了 7429.72 cm^{-1} 和

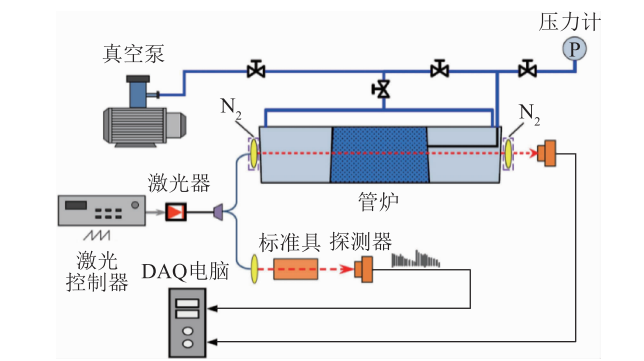


图4 直接吸收光谱法测气体压强实验装置示意图

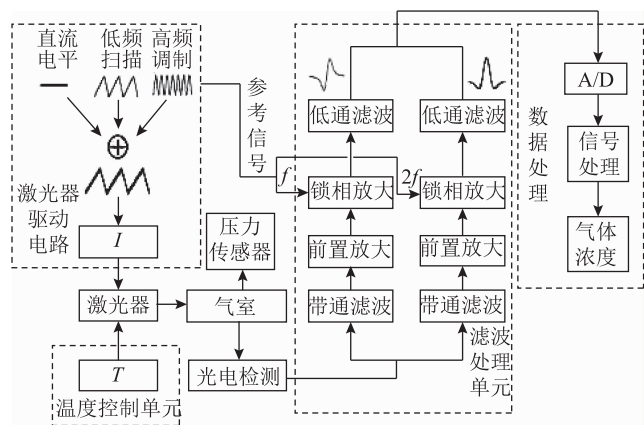
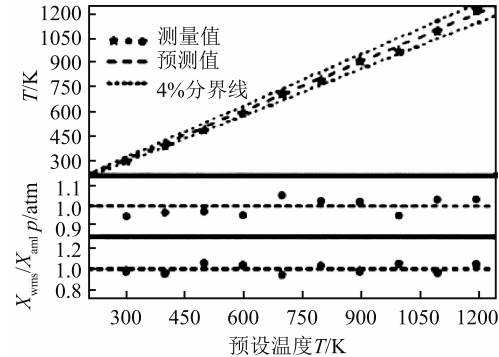


图5 TDLAS检测二氧化碳浓度及压强补偿研究示意图

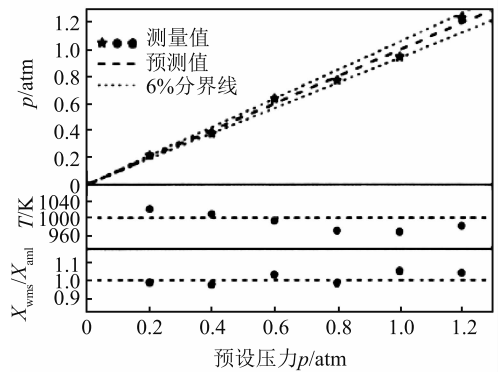
7454.45 cm^{-1} 两处的 H_2O 谱线，结合迭代算法同时测量了水汽的温度、浓度和压强三个参数，测量结果表明结合迭代算法的压力测量方法具有解算参数快，对初始值不敏感，测量准确度高的优点，在静态吸收池的测量值与设定值 1 atm，800 K 基本吻合，测量偏差小于 6%^[20]。各参数测量结果如图 6 所示。

NIST 采用基于波长调制光谱 (WMS) 的可调谐半导体激光吸收光谱技术 (TDLAS)，其测量系统如图 7 所示，通过测量 CO_2 的 1571 nm (6366 cm^{-1}) 的吸收谱线型计算压力值。以 400 Hz 的速率测量一系列压力，并且测量值确定线宽，相对不确定度平均约为 0.5%。这套使用 WMS 测量压力的系统与电容膜片传感器测量的绝对压力的平均差值为 0.6%^[21-24]。

德国 PTB 根据 TDLAS 技术的设计了一套分压力校准装置^[25]，如图 8 所示。该装置可实现以 CO 和 CO_2 气体介质的分压力的校准，为了提高有效光程，减小测量偏差，PTB 采用了结合 Herriott 的 white 反射结构，如图 9 所示，其有效光程可达 100 m。这套系统校准下限量级可低至 10^{-5} Pa ，扩展不确定度 $U = 1.5\% (k = 2)$ ^[26]。



(a) 温度预测值为300~1000 K时各参数测量结果



(b) 压力预测值为0.2~1.2 atm时各参数测量结果

图6 多参数同时测量结果比对

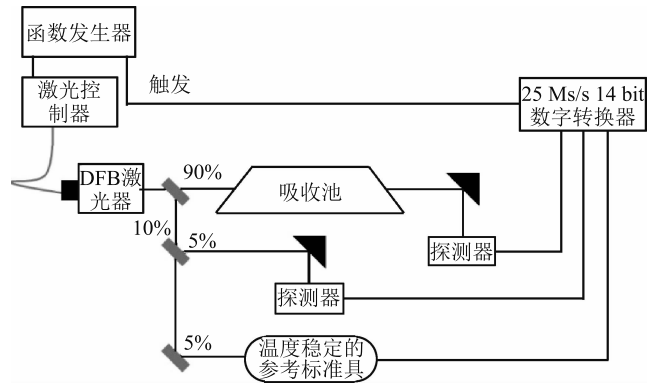


图7 NIST基于WMS的TDLAS吸收光谱测量系统

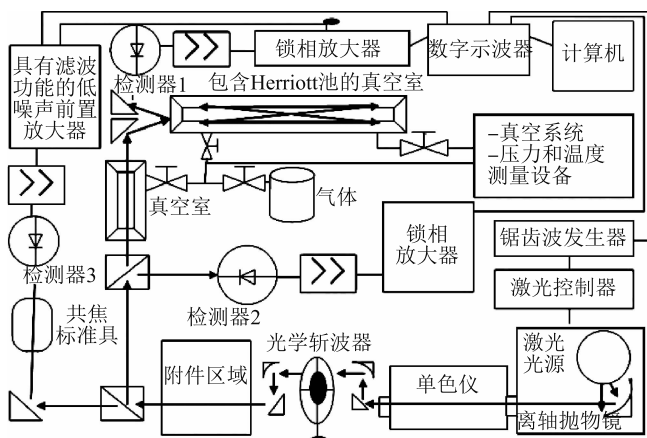


图8 气体分压校准装置

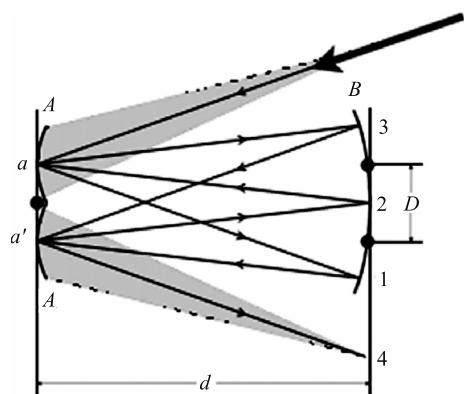


图9 反射吸收池

3 总结

阐述了 TDLAS 技术的直接吸收法和波长调制法的实验原理, 比较了二者的优势, 并列举了近 5 年来 TDLAS 在压力测量方面的应用, 说明了其设计特点及优点。

经过国内外学者的积极探索, TDLAS 技术可以实现以气体为介质的实时准确的压力测量, 不同于光学干涉法, 没有温度耦合的问题, 吸收光谱蕴含的信息丰富, 结合合适的算法可同时解算多个参数, 因此具有广泛的科研和工业应用价值。

直接吸收法和波长调制法二者各有优势, 当然光学传感技术的硬件组合的灵活多变性, 使得可调谐二极管激光器也可应用于其他光谱法, 如光腔衰荡吸收光谱法, 本文未能一一列举。将光谱法用于压力检测是测量领域的新思路, 其他方法的可行性还有待探索。就目前的研究情况来看, 理想条件下考虑, 波长调制法的检测性能最优^[27]。但是结合实际应用的需求考虑, 每种方法各有其适合的情况, 即该方法可满足某特定情况下的检测指标达到要求。

4 展望

近年来的实验证明: 光谱法在真空分压和动态压力测量领域可充分发挥优势, 基于 TDLAS 的压力测量技术的开发与应用, 将给可溯源的静态压力和动态压力校准带来重大影响。与现有的真空分压力和动态压力测量装置对比, 基于 TDLAS 测量压力的系统可在较大压力下进行高准确度测量, 并且其真正意义上的量子光学溯源有助于建立分压力和动态压力校准标准。未来基于 TDLAS 技术的压力测量法主要还可以从以下几个方面提高。

1) 光谱信号的分析算法

分析算法的优劣直接影响测量系统的检测准确度和上下限, 算法的质量是测量系统的决定因素。

2) 温度压力解耦的准确度

相较其他测压方法, 光谱法的优势是能够同时解算温度和压力, 目前单独测量一个参数的准确度较高, 但是同时解算多个参数会引入新的系统误差, 测量准确度还需进一步提高。

3) 解算速度

调谐光谱得到一条完整的谱线仅需几百毫秒, 但是目前的解算速度远慢于测量速度, 提高解算速度, 实现即时处理对推进 TDLAS 压力测量系统的现场应用具有重大意义。

参 考 文 献

- [1] 阙瑞峰, 夏晖晖, 许振宇, 等. 激光吸收光谱流场诊断技术应用研究与进展[J]. 中国激光, 2018: 1-26.
- [2] 余西龙, 曾徽, 林鑫, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱诊断技术: 原理和应用[J]. 气体物理, 2016(5): 52-63.
- [3] 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(7): 1769-1773.
- [4] 聂伟, 阙瑞峰, 许振宇, 等. 基于 TDLAS 技术的水汽低温吸收光谱参数测量[J]. 物理学报, 2017(20): 97-102.
- [5] 夏晖晖. 基于 TDLAS 技术的燃烧火焰场分布二维重建研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2017.
- [6] 王雪梅, 刘石. 基于波长调制光谱技术的二氧化碳浓度测量[J]. 大气与环境光学学报, 2017(5): 356-361.
- [7] 郭慧. 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体检测解调系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [8] 邸越. 基于吸收光谱波长调制技术的高速流场温度测量系统研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2014.
- [9] 彭澎, 狄长安, 张永建, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的武器发射气体浓度在线检测研究[J]. 兵工学报, 2018(7): 1397-1403.
- [10] 刘建昌, 邓广福. 可调谐激光光谱系统在气体检测中的应用[J]. 电子科技, 2013(12): 107-109.
- [11] 何启欣. 基于红外激光吸收光谱技术的气体检测系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [12] 尹新. 调谐激光光谱的气体分析技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [13] Buchholz B, Afchine A, Ebert V. Rapid, Optical Measurement of the Atmospheric Pressure on a Fast Research Aircraft using Open-path TDLAS[M]. 2014.
- [14] Peng S, Hong Y, Wang G. A Measurement Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy for Pressure in Gas Flow[C]. International Conference on Green Materials and En-

- vironmental Engineering, 2014.
- [15] 娄南征. 基于吸收光谱技术的开放环境温度在线测量与变压力 CO₂ 组分测量[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [16] 陈祥, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 基于 TDLAS 技术的空气气压精确测量[J]. 光电子·激光, 2015(4): 719–723.
- [17] 段金虎, 金星, 王广宇, 等. 基于直接吸收光谱测量气体的压强[J]. 物理实验, 2016(4): 7–11.
- [18] 张可可, 刘世萱, 陈世哲, 等. 基于 TDLAS 的二氧化碳浓度检测系统及压强补偿研究[J]. 仪表技术与传感器, 2016(1): 53–55.
- [19] 贾良权, 刘文清, 刘建国, 等. 温度和压强变化对二次谐波反演结果的影响[J]. 中国激光, 2014(12): 266–273.
- [20] 屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于波长调制光谱的多参数测量方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2016(4): 470–476.
- [21] Heikkinen V, Kassamakov I, Seppa J, et al. Traceable Methods for Vertical Scale Characterization of Dynamic Stroboscopic Scanning White-light Interferometer Measurements[J]. Appl Opt, 2015, 54(35): 10397–10403.
- [22] Douglass K O, Olson D A. Towards a Standard for the Dynamic Measurement of Pressure Based on Laser Absorption Spectroscopy[J]. Metrologia, 2016, 53(3): S96–S106.
- [23] Ahmed Z, Klimov N N, Douglass K, et al. Towards Photonics Enabled Quantum Metrology of Temperature, Pressure and Vacuum[J]. 2016.
- [24] Ahmed Z, Olson D, Douglass K O. Precision Spectroscopy to Enable Traceable Dynamic Measurements of Pressure[J]. Conf Lasers Electro Optics, 2016.
- [25] 习振华, 李得天, 成永军, 等. 光学方法在真空计量中应用研究进展[J]. 真空与低温, 2016(6): 311–318.
- [26] <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-1248> [R/OL]. (2005–12–08).
- [27] 何祥林, 潘勇刚. TDLAS 技术的发展现状及其应用研究[J]. 鄂州大学学报, 2017(1): 102–104.

收稿日期: 2019–01–03

基金项目: 国家自然科学基金(5177052767)

作者简介



宫学程(1994–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为吸收光谱。2017年毕业于太原理工大学物理与光电工程学院光电信息科学与工程专业, 同年9月在北京长城计量测试技术研究所攻读光学工程硕士, 参与国家自然科学基金项目、国防技术基础等三项科研项目。



杨军(1979–), 男, 研究员, 博士, 主要从事力学量动态测试与校准技术以及动态测量理论方法研究, 包括激光干涉法动态压力与动态力校准技术、基于吸收光谱的压力测量技术、次声监测与校准技术、基于模型的动态校准方法等。

全国气象专用计量器具计量技术委员会压力分委员会委员, 中国仪器仪表学会传感器分会理事, 北京振动工程学会理事。