

TDLAS 技术温度测量的不确定度分析方法研究

李仁杰^{1,2}, 李 飞¹, 林 鑫¹, 余西龙^{1,2}, 杨秋临^{3,4}, 李 欣^{3,4}(1. 中国科学院力学研究所 高温气体动力国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学
工程科学学院, 北京 100049; 3. 航空工业北京长城航空测控技术研究所, 北京 101111;
4. 状态监测特种传感技术航空科技重点实验室, 北京 101111)

摘要: 随着可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术在工业测量与科学研究领域的广泛应用,对其测量结果的质量进行量化评定已成为迫切需要。以一套已集成的TDLAS测温系统为例,根据最新国家标准,基于不确定度传播律,理论分析了影响测温结果测量不确定度的因素,给出了评定TDLAS测温系统在线测量结果不确定度的一般方法。分析表明TDLAS系统测温结果的测量不确定度随所测温度值的变化而变化,并受所选谱线参数、吸收信号信噪比、系统响应情况等条件的影响。理论推导了针对测温系统的不确定度评定公式,结果表明对特定测温范围与测温系统,需对其进行温度标定,补偿系统误差。

关键词: 可调谐二极管激光吸收光谱; 温度测量; 误差分析; 不确定度评定

中图分类号: O551.2; O353.5; O433.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8829(2020)09-0010-05

doi: 10.19708/j.ckjs.2020.06.256

Uncertainty Analysis Method in TDLAS Temperature Measurement

LI Ren-jie^{1,2}, LI Fei¹, LIN Xin¹, YU Xi-long^{1,2}, YANG Qiu-lin^{3,4}, LI Xin^{3,4}(1. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. AVIC Beijing Changcheng Aeronautic Measurement and Control Technology Research Institute, Beijing 101111, China;
4. Key Laboratory of Science and Technology on Special Condition Monitoring Sensor Technology, Beijing 101111, China)

Abstract: Tunable diode laser absorption spectroscopy(TDLAS) technology has been widely used in the fields of industrial measurement and scientific research. Therefore, it is urgent to quantitatively evaluate the quality of its measurement results. A set of integrated TDLAS temperature measurement system was taken as an example, according to the latest national standard, based on the uncertainty propagation law, the factors affecting the measurement uncertainty of the temperature measurement results were theoretically analyzed. A general method for evaluating the uncertainty of online measurement results of TDLAS temperature measurement system was given. The analysis shows that the measurement uncertainty of the temperature measurement results changes with the measured temperature value, and is affected by the selected spectral line parameters, the signal-to-noise ratio of the absorption signal, and the system response. The uncertainty evaluation formula of temperature measurement system is theoretically derived. The results show that for a specific temperature range and temperature measurement system, temperature calibration is required to compensate for system errors.

收稿日期: 2020-01-19

基金项目: 国防基础科研计划资助项目(JCKY2016205B016); 国家自然科学基金项目(11802315, 11927803); 航空科学基金项目(20173432002)

作者简介: 李仁杰(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为吸收光谱诊断技术; [通信作者] 李飞(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为流动/燃烧诊断技术、超声速燃烧。

引用格式: 李仁杰, 李飞, 林鑫, 等. TDLAS 技术温度测量的不确定度分析方法研究[J]. 测控技术, 2020, 39(9): 10-14.

LI R J, LI F, LIN X, et al. Uncertainty Analysis Method in TDLAS Temperature Measurement[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(9): 10-14.

Key words: TDLAS; temperature measurement; error analysis; uncertainty evaluation

可调谐二极管激光吸收光谱 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) 技术作为一种基于光谱学的气体探测方法,具有可靠性高、环境适应性强、灵敏度高、响应速度快、非干涉式测量等特点,适用于多种实际工程应用与科学研究中对气体组分浓度与状态参数(温度、压力、流速等)进行在线测量^[1]。例如,在大气环境监测领域测量大气污染物浓度^[2],在工业过程控制领域对中间产物变化、气体泄漏情况进行实时在线监测^[3],在燃烧流场诊断领域测量燃烧温度、产物浓度以及流速^[4-5]等。

测量结果的质量将极大地影响对测量技术和测量结果的选择与使用^[6],为评价 TDLAS 技术温度测量结果的可靠程度,应在报告测量结果时对其质量给出定量的说明。这需要通过对测量技术进行误差分析,对测量结果进行评定。因此国内外很多学者都对 TDLAS 技术涉及的相关参数进行过专门的研究,并给出对某些测量结果质量的评定。

其中,Liu 等^[7]测量了近红外区域水蒸气光谱参数,并对比 HITRAN 数据库给出误差大小;Liu 等^[8]测量了 3 条常用水蒸气谱线(7185 cm⁻¹,7444 cm⁻¹,6807 cm⁻¹)的线强度;Pogány 等^[9]测量了 1.4 ~ 2.7 μm 范围内 9 条水分子吸收谱线的线强度,并给出其不确定度;聂伟^[10]利用一套基于静态冷却技术的低温光谱实验平台,精确测量了低温下的水蒸气吸收光谱参数,并应用此参数进行了极低温环境下露点/霜点的测量,给出了测量结果的不确定度。

虽然误差和误差分析早已成为测量科学的关键部分,但传统的误差评定结果因被测量真值未知而具有逻辑性问题,因而导致各测量结果之间缺乏可比性。为解决这一问题,在误差理论的基础上发展了不确定度理论^[11-12]。相比于误差,测量不确定度是表征测量值分散性的非负参数,是对被测量的估计值所定义的一个区间参数,其实质是取代了经典误差理论中对随机误差与未定系统误差的处理^[13]。在定义上,测量不确定度回避了其与被测量真值的关系,解决了因被测量真值未知而导致的逻辑问题^[14]。随着《测量不确定度表示指南》的颁布与实施,测量不确定度替代测量误差来表征测量结果的精度已逐渐成为学术界的广泛共识^[15]。不确定度评估被广泛应用于测量领域^[16-17]。

现有文献资料显示,对 TDLAS 技术测量结果的分析大多还在使用传统误差理论,或局限于对物理参数、静态测量结果等进行不确定度评估,尚未见有在温度测量领域对在一定温度范围内 TDLAS 技术动态测温结果进行不确定度评估的报道,也尚无对 TDLAS 测温

结果不确定度进行评估的一般方法。为解决这一问题,本文从 TDLAS 技术的测温原理入手,结合一套典型的 TDLAS 测温系统,依据最新国家标准,以不确定度传播律出发,推导出适用于 TDLAS 测温技术的不确定度评定公式,理论分析了影响测温结果不确定度的因素,并提出了适用于对 TDLAS 测温结果进行不确定度分析的一般方法。研究表明 TDLAS 技术测温结果的测量不确定度随测温范围的变化而变化,并受所选谱线参数、吸收信号信噪比、系统响应情况等条件的影响。对特定测温范围与测温系统,需对其进行温度标定,补偿系统误差。

1 测量原理与测量系统

1.1 测量原理

TDLAS 技术测温的物理基础为 Lambert-Beer 定律,即对于一束频率为 ν 的激光,穿过均匀待测气体后,会被待测组分部分吸收,其入射光强与透射光强之间满足如下关系^[18]:

$$I_t(\nu) = I_0(\nu) \exp(-k_\nu L) \quad (1)$$

式中, $I_0(\nu)$ 和 $I_t(\nu)$ 分别为入射光强和透射光强; L 为吸收长度; k_ν 为吸收系数。

对于均匀流场,吸收系数是激光频率 ν 、气体压力 P (atm)、待测组分摩尔分数 X_j 和吸收线线强度 $S(T)$ 的函数,可表示为

$$k_\nu = PX_j S(T) \Phi(\nu) \quad (2)$$

$\Phi(\nu)$ 是归一化的线型函数,有

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\nu) d\nu = 1 \quad (3)$$

通过波长扫描-直接吸收的方法,在整个吸收线型范围内,将入射光与透射光光强比取对数后对频率进行积分,得到积分吸光度,根据式(1)~式(3)推导如下:

$$A_\nu = \int_{-\infty}^{+\infty} -\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right)_\nu d\nu = PX_j LS(T) \quad (4)$$

使用包含同一待测组分两条孤立吸收线的连续频率激光扫过同一待测流场,将所得两个积分吸光度相比,由式(4)可知,其比值只与温度相关,公式如下:

$$\begin{aligned} R &= \frac{A_{\nu_1}}{A_{\nu_2}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} -\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right)_{\nu_1} d\nu}{\int_{-\infty}^{+\infty} -\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right)_{\nu_2} d\nu} = \frac{S(T)_{\nu_1}}{S(T)_{\nu_2}} \\ &= \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp\left[-\left(\frac{hc}{k}\right)(E''_1 - E''_2)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, E'' 为气体分子对应吸收线吸收跃迁的低能级能量; h 为普朗克常数; c 为光速; k 为玻尔兹曼常数。

对公式变形得到温度与两个积分吸光度比值(以下简称比值)的函数关系:

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_2'' - E_1'')}{\ln R + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc}{k}(E_2'' - E_1'')T_0} \quad (6)$$

即可通过测比值得到对应测量组分的温度,这种方法被称为双线测温法。典型的比值随温度变化的示意图如图 1 所示,可见比值随温度单调变化。

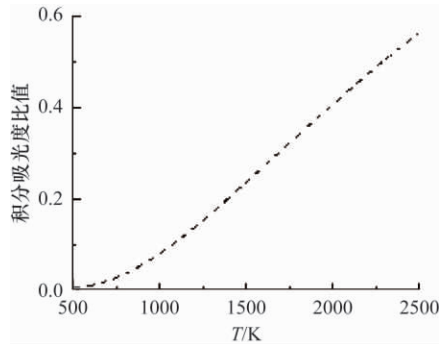


图 1 典型积分吸光度比值随温度变化图

1.2 典型 TDLAS 系统

典型的 TDLAS 双线测温系统结构如图 2 所示,系统由工控机主机、2 个激光控制模块、2 个中心波数分别为 7185 cm⁻¹、7444 cm⁻¹的分布式反馈激光器、光纤分束器、光电探测器、显示器构成,针对不同测量对象,还有不同的辅助部件。其中工控机主机包括信号输出、信号采集、数据处理与分析 3 个模块。

在实际测量中,信号输出模块输出 2 个调制电压信号控制激光控制模块输出 2 个频率为 10 Hz 的扫描电流。扫描电流进而控制 2 个激光器发出随扫描时间变化的连续频率激光,经过分束器耦合至发射端。激光从发射端经过待测流场后,被光电探测器接收,光强信号随之转换为电信号。电信号经过信号采集模块转换为数字信号,再经过数据处理与分析后得到两积分吸收率比值。最后通过式(6),计算得到对应测量组分的温度。

以上为测温系统运行流程,而系统的信号传递流程与运行流程并不一致。从信号传递角度分析,信号传递流程如图 3 所示。

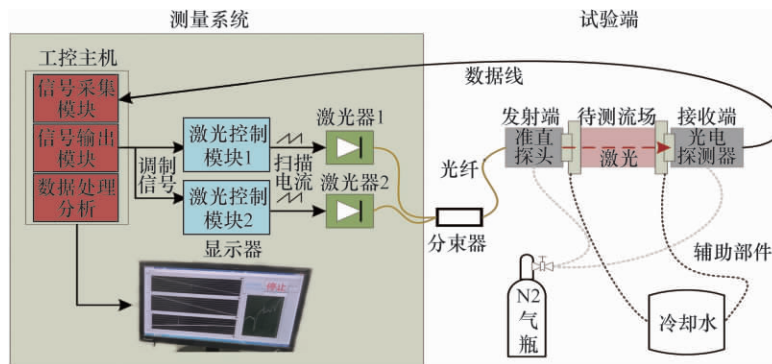


图 2 典型的 TDLAS 双线测温系统结构示意图

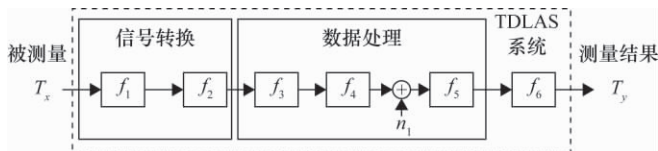


图 3 测量系统信号传递流程图

待测组分被测温度 T_x 信号在测温系统中经过信号转换和数据处理后,得到积分吸光度比值。最后代入测量模型函数 f_6 ,也就是式(6)得到测温结果 T_y 。

① 信号转换。温度信号经过激光探测器 f_1 从光强信号转换为电信号,再经过数据采集模块 f_2 转换为数字信号。

② 数据处理。得到的数字信号经过基线拟合 f_3 、单峰拟合 f_4 后,再进行时域频域转换,最后进行积分求比值 f_5 ,得到两积分吸光度的比值。

其中时域频域转换需要乘以对应的动态调节系数 $n_1 = \Delta v / \Delta t$ 。动态调节系数通过使用 F-P 干涉仪对测

温系统进行标定得到。

由以上介绍可知,本系统实际测温结果为沿激光光路上待测组分温度的线积分。为合理评估对测温结果不确定度产生影响的因素,假设沿激光光路上被测对象为均匀流场,温度波动非常小。以此假设为基础,基于典型 TDLAS 系统的信号传递流程对其测温结果的不确定度进行理论分析。

2 不确定度分析及计算

测量不确定度概念被提出后,有过多测量不确定度的评定模型。直到 ISO 等 7 个国际组织联合发布《测量不确定度表示指南》(《Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement》,简称《GUM》),才得到基于此指南的第一个国际上取得一致认同的评定模型。参考该指南,中国于 2018 年实施了最新的《测量不确定度评定与表示》国家标准^[19]。

该标准以不确定度传播律对测量模型函数评定测量结果的不确定度。在所有输入量相互独立的情况下,不确定度传播律的计算公式为^[19]

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} \quad (7)$$

式中, $u_c(y)$ 为测量结果 y 的合成标准不确定度, 即由测量模型中各输入量的标准不确定度得到的输出量的标准不确定度, 其中, 标准不确定度为以标准差表征的测量不确定度; f 为测量模型函数; $u(x_i)$ 为输入量的标准不确定度, 根据是否以统计分析的方法进行评定分为 A 类与 B 类标准不确定度。

A 类标准不确定度采用统计分析的方法进行评定; B 类标准不确定度采用其他方法进行评定, 包括参考权威机构发布的量值、有证参考物质的量值、校准证书、仪器漂移等。

最新国家标准只提供了测量不确定度评定与表示的通用原则, 在所查阅资料范围内, 没有对 TDLAS 测温结果进行不确定度评估的具体分析方法, 因此, 这里遵循最新国家标准的通用原则, 对 TDLAS 测温结果的不确定度进行理论分析与推导。

由图 3 可知, 从测量比值到测温结果, TDLAS 测温系统的测量模型函数为式 (6), 为便于进行不确定度分析, 取 $H = 1/T$, 则式 (6) 变形为

$$H = \frac{\ln R + \ln S_2(T_0) - \ln S_1(T_0) + \frac{hc(E_2'' - E_1'')}{kT_0}}{\frac{hc(E_2'' - E_1'')}{k}} \quad (8)$$

式中, h, c, k, T_0, E'' 为物理常数; 输入量除比值 R 外还有两条吸收线在标准温度下的线强度 $S_1(T_0)$ 、 $S_2(T_0)$ (下文简称为 S_1 和 S_2), 可认为这三者是互相独立的。由不确定度传播律的计算公式可得

$$u_T = T^2 u_H \quad (9)$$

$$u_H = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial R} \right)^2 u_R^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial S_2} \right)^2 u_{S_2}^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial S_1} \right)^2 u_{S_1}^2} \quad (10)$$

式 (10) 中 3 项偏导数可由式 (8) 求得, 得到:

$$u_T = \frac{T^2 k}{hc(E_2'' - E_1'')} \sqrt{\left(\frac{u_R}{R} \right)^2 + \left(\frac{u_{S_1}}{S_1} \right)^2 + \left(\frac{u_{S_2}}{S_2} \right)^2} \quad (11)$$

从公式中可知, 影响测温结果不确定度的因素既包括对被测对象信号进行处理后得到的测量量比值 R , 也包括被测组分的温度、所选吸收线的谱线参数、物理常数等非测量量, 应对两部分分别予以讨论。

2.1 非测量量的不确定度

吸收谱线参数对测温结果不确定度的贡献为两条吸收线在标准温度下线强度的相对不确定度 u_S/S , 可通过查阅 HITRAN 数据库得到, 也可通过标定实验对光谱参数进行标定和评估后得到。本文所述典型 TD-

LAS 测温系统所使用的吸收线的中心波数分别为 7185 cm^{-1} 、 7444 cm^{-1} , 其在标准温度下线强度的相对不确定度可参考相关标定实验文献获得。

物理常量对测温不确定度的贡献体现为式 (11) 右侧第一项, 主要受两条谱线的低能级能量差影响。在其他条件相同的情况下, 所选谱线低能级能量差越大, 测温不确定度越小。

如在 1.2 节中所述, 受测量原理所限, 系统所测温度实际为一线积分值。在测量对象为完全均匀的流场这一假设成立的情况下, 将各物理常量值与吸收线线强的相对不确定度代入式 (11), 将测量比值的相对不确定度取为零, 可得到在不考虑测量比值不确定度情况下被测组分温度与测温结果不确定度的关系, 即理论条件下的测量不确定度, 如图 4 所示, 可以发现随着被测温度的增加, 测温结果的不确定度也随之增加。

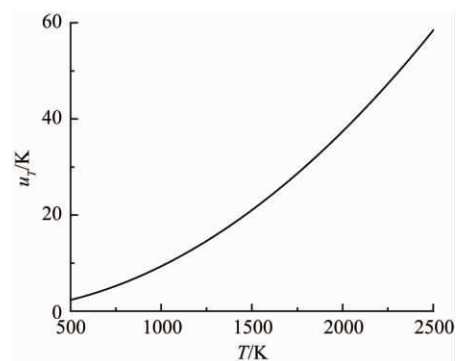


图 4 理论情况下测量不确定度随被测温度的变化

2.2 测量量的不确定度

由图 3 可知, 原始待测信号经过 TDLAS 测温系统后首先得出的是比值 R , 其为测量量, 因而可以使用 A 类不确定度评定方法, 取其测量值的标准差表征其测量不确定度。

具体而言, TDLAS 系统根据信号输出模块输出调制信号频率的不同而具有不同的响应速度, 最高可到 MHz 量级, 响应非常迅速。在实验中待测流场温度也是不断发生变化的, 因而 TDLAS 测量系统进行的是动态测量。

在高频信号条件下, 考虑实际被测组分温度变化情况, TDLAS 系统的响应速度应快于被测组分的温度变化。可认为在一个时间段 Δt 内, 待测流场中被测组分温度相对不变, 此时为准静态测量, 取此时间段内测量结果的平均值为最佳估计值, 并用贝塞尔法计算得到此时间段内比值 R 的标准差 σ , 作为比值 R 的标准不确定度:

$$u_R = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (12)$$

式中, n 为时间段 Δt 内测量值的个数; v_i 为第 i 个测量值的残余误差。 Δt 的取值大小应考虑所需测温最小时间分辨率与测量对象温度变化灵敏度两个参数。

比值 R 的标准不确定度表征的是测量结果的分散程度, 而得到比值 R 的信号传递过程, 具有系统误差。各误差来源分析如下。

① 在信号转换部分, 测量系统的激光控制器、激光器、激光探测器、信号采集模块需要相互配合, 而各器件在频率响应与强度响应上会具有耦合误差。耦合误差将导致信号传递失真, 使得到的测量比值存在系统误差。

② 在对光谱基线进行多项式拟合 f_3 中, 由于所选无吸收区域的不理想和多项式拟合本身存在一定误差, 会对最后积分吸光度的值造成不超过 0.1% 的误差。

③ 在对光谱信号进行单峰拟合 f_4 中, 因为信号中存在测量系统机电器件的电噪声, 所以会造成拟合误差。误差受信噪比强度的影响, 在饱和值范围内, 测量组分对激光的吸收强度越大, 拟合误差相对越小。

④ 在进行时域与频域转换时, F-P 标定仪的非线性会造成动态调节系数 $\Delta v/\Delta t$ 存在误差, 导致积分吸光度的值存在误差。

以上这些系统误差并不互相独立, 最终共同传递至测量比值, 属于测量仪器与测量环境共同对测量结果造成的影响。因而需要对测量系统在测温范围内进行温度标定, 给出测量系统的补偿参数, 并给出补偿参数的不确定度。由于系统误差造成的偏移不会太大, 提出线性补偿公式如下:

$$R_i = aR + b \tag{13}$$

式中, R_i 为标定温度通过式 (5) 计算出的理论测量比值; R 为在对对应标定温度下实际测得的测量比值。可通过最小二乘法求得补偿参数 a 、 b 与其对应不确定度 u_a 、 u_b 。

综上, 由不确定度传播律, 实际代入式 (6) 进行计算的比值 R_m 的测量不确定度应为

$$u_{R_m} = \sqrt{(Ru_a)^2 + (au_R)^2 + u_b^2} \tag{14}$$

TDLAS 测温结果的合成不确定度计算公式为

$$u_T = \frac{T^2 k}{hc | (E_2'' - E_1'') |} \sqrt{\frac{(Ru_a)^2 + (au_R)^2 + u_b^2}{(aR + b)^2} + \left(\frac{u_{S_1}}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{u_{S_2}}{S_2}\right)^2} \tag{15}$$

分析可得, 影响 TDLAS 系统测温结果不确定度的因素包括测温范围、所选谱线参数和系统误差标定精度。对特定测温范围与测温系统, 要减小其测量结果

的不确定度, 需要选择低能级能量差适当的吸收谱线, 采用高精度光谱参数数据, 并对整个测量系统进行高精度标定, 补偿系统误差。

3 结束语

对测量结果进行不确定度评定是评价测量结果质量的重要方式。现有的不确定度评定标准只提供了评估测量不确定度的通用原则, 还未有针对 TDLAS 技术测温结果进行不确定度评估的一般分析方法。

本文结合一套典型 TDLAS 测温系统, 从最新国家标准的通用原则出发, 分析了影响 TDLAS 测温结果不确定度的因素, 理论推导了针对 TDLAS 测温方法的不确定度评定公式, 给出了评定 TDLAS 测温结果不确定度的一般方法。

结果表明, 影响测温结果不确定度的因素包括测温范围、所选谱线参数和系统误差标定精度。对特定测温范围与测温系统, 需对其进行温度标定, 补偿系统误差。

参考文献:

- [1] 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) : 3 - 23.
- [2] LI H M, WANG Q G, YANG M, et al. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} aerosols in a megacity of Southeast China [J]. Atmospheric Research, 2016, 181: 288 - 299.
- [3] REIDL-LEUTHNER C, OFNER J, TOMISCHKO W, et al. Simultaneous open-path determination of road side mono-nitrogen oxides employing mid-IR laser spectroscopy [J]. Atmospheric Environment, 2015, 112: 189 - 195.
- [4] 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 H₂O 浓度 [J]. 实验流体力学, 2009, 23(2) : 40 - 44.
- [5] LI F, YU X L, GU H B, et al. Measurement of temperature, velocity and water vapor concentration in a scramjet combustor based on near-infrared diode laser absorption [C] // 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. 2011.
- [6] 李小飞. 不确定量化分析方法应用研究进展 [C] // 第十六届中国航空测控技术年会论文集. 2019.
- [7] LIU X, ZHOU X, JEFFRIES J B, et al. Experimental study of H₂O spectroscopic parameters in the near-IR (6940-7440cm⁻¹) for gas sensing applications at elevated temperature [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2007, 103(3) : 565 - 577.
- [8] LIU J T C, RIEKER G B, JEFFRIES J B, et al. Near - infrared diode laser absorption diagnostic for temperature and water vapor in a scramjet combustor [J]. Applied Optics, 2005, 44(31) : 6701 - 6711.

(下转第 19 页)

- [5] ABU-AL-SAUD W A, STÜBER G L. Efficient wideband channelizer for software radio systems using modulated pr filterbanks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(10): 2807–2820.
- [6] LI B, GE L D, ZHENG J. Efficient dynamic channeliser based on nonuniform filter banks [J]. European Transactions on Telecommunications, 2008, 19(3): 273–283.
- [7] ATAPATTU S, TELLAMBURA C, JIANG H. Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4): 1232–1241.
- [8] ZHANG W, MALLIK R K, LETAIEF K. Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12): 5761–5766.
- [9] LI B, SUN M W, LI X F, et al. Energy detection based spectrum sensing for cognitive radios over time-frequency doubly selective fading channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(2): 402–417.
- [10] Yucek T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2009, 11(1): 116–130.
- [11] SUTTON P D, NOLAN K E, DOYLE L E. Cyclostationary signature in practical cognitive radio applications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 13–24.
- [12] 仇帅, 陈西宏, 赵宇, 等. 一种基于小波包熵的频谱检测算法 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 65–68.
- [13] ZENG Y H, LIANG Y C. Eigenvalue-based spectrum sensing algorithms for cognitive radio [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(6): 1784–1793.
- [14] ZENG Y H, LIANG Y C. Spectrum-sensing algorithms for cognitive radio based on statistical covariances [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1804–1815.
- [15] 曹开田, 王尚. 基于 RMT 的合作频谱感知新算法及其性能分析 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(7): 2640–2642.
- [16] 刘志文. 基于特征值的频谱感知算法仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(12): 2805–2808.
- [17] 曹开田, 杨震. 基于最小特征值的合作频谱感知新算法 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 736–741.
- [18] PENNA F, GARELLO R, SPIRITO M A. Cooperative spectrum sensing based on the limiting eigenvalue ratio distribution in wishart matrices [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(7): 507–509.
- [19] 弥寅, 卢光跃. 基于特征值极限分布的合作频谱感知算法 [J]. 通信学报, 2015, 36(1): 1–6.
- [20] 杨鹏, 柳征, 姜文利. 基于最小描述长度准则的稀疏多带信号频谱感知算法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1547–1551.
- [21] 蒋俊正, 水鹏郎, 周芳. M 带余弦调制滤波器组的迭代设计算法 [J]. 电路与系统学报, 2011, 16(6): 62–65.
- [22] DOBLINGER G. A fast design method for perfect-reconstruction uniform cosine-modulated filter banks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(12): 6693–6697.
- [23] CHENG W, LEE S, ZHANG Z S, et al. Independent component analysis based source number estimation and its comparison for mechanical systems [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(23): 5153–5167.
- [24] 陈锐, 林枫, 沈习波. 电能质量监测中频谱泄露检测方法研究 [J]. 测控技术, 2019, 38(8): 99–102.
- [25] 金慧, 宋晓勤, 张云开, 等. 一种基于稀疏度估计的自适应压缩频谱感知算法 [J]. 测控技术, 2018, 37(7): 91–96. □

(上接第 14 页)

- [9] POGÁNY A, KLEIN A, EBERT V. Measurement of water vapor line strengths in the 1.4–2.7 μm range by tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, 165: 108–122.
- [10] 聂伟. 极低温环境露点/霜点的 TDLAS 检测方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [11] 陈怀艳, 曹芸, 韩洁. 测量不确定度的发展和应用研究 [J]. 宇航计测技术, 2014, 34(5): 65–70.
- [12] 赵志刚, 赵伟. 测量不确定度理论研究和应用中的若干热点问题 [J]. 电测与仪表, 2007, 44(3): 1–4.
- [13] 范巧成, 匡荣, 邢成岗, 等. 试论测量不确定度与误差理论的关系 [J]. 计量学报, 2017, 38(3): 380–384.
- [14] 程银宝. 现代不确定度理论及应用研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [15] ISO, IEC, IFCC, etc. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [S]. 1995.
- [16] 刘红光, 李凌梅, 崔尧尧, 等. 手持式激光测距仪示值误差测量结果不确定度的研究 [J]. 测控技术, 2018, 37(12): 82–84.
- [17] 刘红光, 路瑞军, 崔尧尧, 等. 基于激光干涉技术的大尺寸绝对测量方法的研究 [J]. 测控技术, 2018, 37(1): 107–109.
- [18] 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, 1(5): 52–63.
- [19] 中国合格评定国家认可中心, 中国计量科学研究院, 等. 测量不确定度评定和表示: GB/T 27418–2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. □