

# 可调谐半导体激光吸收光谱法测量 空气中乙醇蒸气

耿 辉 刘建国 张玉钧 阚瑞峰\* 许振宇 姚 路 阮 俊 曾利忠

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术开展了检测空气中乙醇蒸气浓度的方法研究, 并采用乙醇分子在  $7180\text{ cm}^{-1}$  ( $1393\text{ nm}$ ) 附近的吸收峰作为鉴别乙醇的特征信息。建立多元线性回归方程来拟合求解多分子吸收共存的问题, 以消除共存水蒸气对空气中乙醇蒸气含量检测的干扰。针对谱线处理中存在的光谱误差问题, 提出了修正方程, 与实验的结果一致。开放光路测量实验结果表明, 系统的积分浓度检测限达到  $30 \times 10^{-6}\text{ m}$ 。

**关键词** 光谱学; 乙醇蒸气; 半导体激光器; 宽带吸收

**中图分类号** O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0830001

## Measurement of Ethanol Vapor in Air with Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

Geng Hui Liu Jianguo Zhang Yujun Kan Ruifeng Xu Zhenyu Yao Lu  
Ruan Jun Zeng Lizhong

(Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** The detection method for ethanol vapor concentration in air based on tunable diode laser absorption spectroscopy is studied using narrow absorption peak in the vicinity of  $7180\text{ cm}^{-1}$  ( $1393\text{ nm}$ ) as an identification feature of ethanol molecule. To eliminate the interference of coexisting water vapor with the detection for ethanol vapor concentration in air, multidimensional linear regression analysis is applied to solve the problem of the coexistence of multiple molecule absorptions. A modification equation is promoted to resolve the problem of spectral error in the spectral data processing procedure, which is proved by experiments. The detection limit of integrated concentration is obtained by open-path measurement experiments as  $30 \times 10^{-6}\text{ m}$ .

**Key words** spectroscopy; ethanol vapor; diode laser; broadband absorption

**OCIS codes** 300.6260; 300.6340; 300.6390

## 1 引 言

酒后驾驶是导致道路交通事故的重要因素之一, 给社会带来了严重的经济损失和人员伤亡。根据最新报道, 在加拿大和美国, 分别有 30% 和 44% 的交通事故和酒后驾驶有关。然而统计显示, 只有

0.1% 的醉酒驾驶员被查处, 而因酒后驾驶被起诉的有约 80% 是重复犯罪<sup>[1]</sup>。饮酒后, 乙醇通过消化系统被人体吸收, 经过血液循环, 约 90% 的乙醇通过肺部呼气排出, 因此可以通过测量呼气中的乙醇含量来判断饮酒程度。目前, 交通管理部门通常采用

**收稿日期**: 2014-02-19; **收到修改稿日期**: 2014-04-05

**基金项目**: 安徽省科技攻关项目(1001130610)

**作者简介**: 耿 辉(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事气体光谱学检测方面的研究。E-mail: genghui@aiofm.ac.cn

**导师简介**: 张玉钧(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境光学特性、光谱学监测方法、新型环境监测技术等方面的研究。E-mail: yjzhang@aiofm.ac.cn

\* **通信联系人**。E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

建立随机检查点并结合呼气式乙醇检测仪来判断驾驶员是否存在酒后驾车行为,但是这种方法比较费时,并由此引发妨碍交通,交警工作负荷大,检查效率低下等问题<sup>[2]</sup>。

由于饮酒驾驶员呼出气体中的乙醇在机动车内聚集,可以考虑测量机动车内乙醇浓度从而实现对酒后驾驶员的快速筛选。可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术,能够快速扫描各种目标气体浓度,具有实时快速、非侵入式测量等优势,常用于检测具有独立可分辨吸收线的小分子<sup>[3-5]</sup>,可满足对酒驾车辆快速筛查需要。乙醇分子在近红外是连续的吸收光谱,这种光谱也称为宽带吸收光谱<sup>[6]</sup>。根据 Nadezhdinskii 等<sup>[7]</sup>对乙醇分子吸收光谱的研究,在近红外波段存在一个较狭窄的吸收特征(7177~7184  $\text{cm}^{-1}$ ),与典型的可调谐半导体激光器(TDL)的调谐范围相当,可以作为乙醇分子鉴别依据。

本文基于 TDLAS 技术,对乙醇分子在近红外波段的特征吸收谱进行分析,并提出了建立多元线性回归方程求解水蒸气存在下的乙醇蒸气含量的测量方法,对数据处理中的光谱误差问题进行了修正,并对这种方法结合开放光路的实验系统进行实验验证,以期为今后研发道边在线式酒驾遥测技术奠定基础。

## 2 测量原理与实验系统

### 2.1 测量原理

根据 Lambert-Beer 定律,强度为  $I_0$ 、频率为  $\nu$  的激光,通过长度为  $L$  的吸收介质后,在接收端测得的光强  $I_{\text{test}}$  可由下式表示:

$$I_{\text{test}}(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu)] = I_0(\nu) \exp[-K(\nu)P_0CL], \quad (1)$$

式中  $\alpha(\nu)$  为吸收系数,  $K(\nu)$  为由分子吸收而产生的吸收截面,  $P_0$  为压强,  $C$  为气体在光路上的平均浓度,  $CL$  则对应气体在吸收光路上的积分浓度。对于多种气体吸收共存情况,测量到的总吸收光谱是多种成分吸收的叠加,即

$$\alpha(\nu) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(\nu) = \sum_{i=1}^n [K_i(\nu)P_0]CL_i. \quad (2)$$

作为一个典型的含 OH 基团的分子,乙醇在近红外 1.4  $\mu\text{m}$  波长附近存在一个吸收带,为乙醇分子中 OH 基团的泛频吸收区;其在 7177~7184  $\text{cm}^{-1}$  处存在一个宽带吸收峰,可以作为乙醇分子鉴别依据。但是,空气中水分子在该频率区域同样存在强吸收。对于空气中乙醇的光学检测问题,主要的吸收气体成

分是乙醇和水气。图 1 给出了空气环境下空气中一些常见气体的模拟光谱以及乙醇的光谱,模拟条件为  $P_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $L = 1 \text{ m}$ ,  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ , 55% 湿度,其中  $\text{CH}_4$  的体积分数为  $2 \times 10^{-6}$ ,  $\text{CO}_2$  的体积分数为  $400 \times 10^{-6}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  的体积分数为  $0.3 \times 10^{-6}$ , 而  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  的体积分数为  $100 \times 10^{-6}$ 。从图中可以看出,除了水气,空气中其他的气体吸收积分浓度都相对很小,比水气吸收小几个量级,从而(2)式可简化为

$$\alpha(\nu) = \alpha_{\text{bg}}(\nu) + \alpha_{\text{water}}(\nu) + \alpha_{\text{ethanol}}(\nu), \quad (3)$$

式中  $\alpha_{\text{water}}(\nu)$  和  $\alpha_{\text{ethanol}}(\nu)$  分别表示水气和乙醇吸收,  $\alpha_{\text{bg}}(\nu)$  表示除了前两者之外的其他背景。

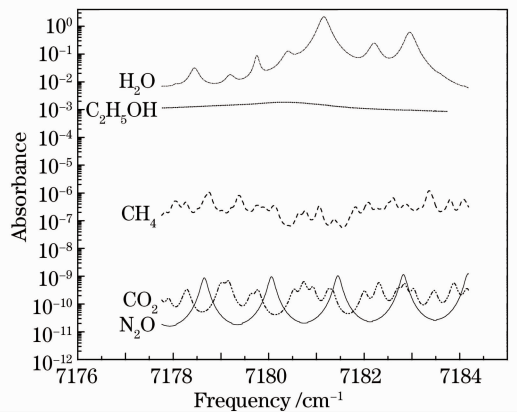


图 1 乙醇( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )和空气中一些常见气体的模拟吸收光谱

Fig. 1 Simulated absorption spectra of ethanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) and some common gases in air

### 2.2 实验装置

图 2 是检测乙醇蒸气的实验装置原理图。可调谐半导体激光器的出射激光经 1:1 光纤分束器分成两路,分别进入参考通道和分析通道。参考通道包含准直器、0.25 m 气体吸收池和探测器 PD2。分析通道是开放光路的光学系统,由准直器、角反射镜、菲涅耳透镜和探测器 PD1 组成;准直器和菲涅耳透镜同光轴结构;激光由光纤耦合的准直器发射,并被相距 2.5 m 的角反射镜返回,再由菲涅耳透镜会聚到探测器 PD1 上。

激光器控制和数据采集由自制的电子学控制器完成,它由激光器控制器、前置放大器和单片机(MCU)等组成。激光器控制器控制激光器工作温度和电流,激光器的输出波长被控制在 7177~7184  $\text{cm}^{-1}$  范围;两路探测器信号经过放大后送入 MCU 片上模数转换器(ADC)(1 MHz 采样率,12 bit 精度)进行采集;同时 MCU 片上数模转换器(DAC)用于产生激光器电流调制波形,调制频率 1 kHz;为了降低噪声,提高

信噪比, MCU 采集的探测信号累计平均 128 次, 再经串口通信送入工控机, 基于 LabVIEW 8.6 编写

的系统软件可以进行实时浓度反演和光谱显示。

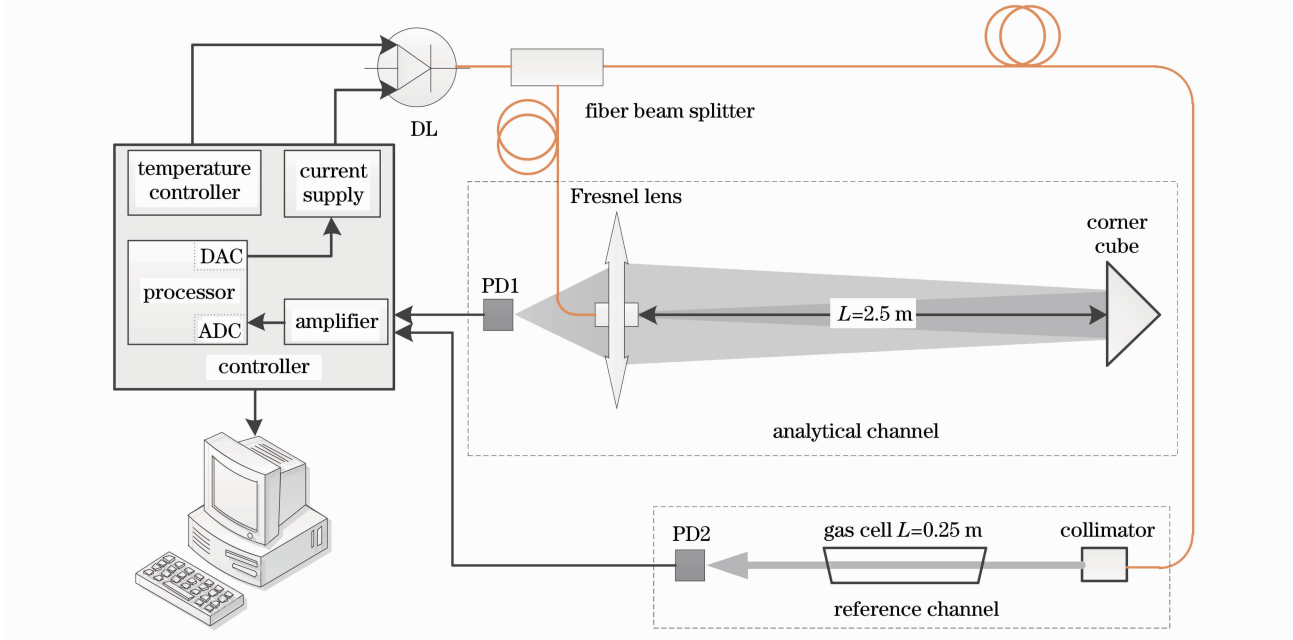


图 2 实验装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

### 3 数据处理

#### 3.1 浓度反演算法

对于多种气体吸收共存的情况, 可以采用多元线性回归方法, 通过测量不同分子的参考吸收谱, 对实测光谱建立多元线性回归方程, 从而解析出相关成分的量<sup>[8]</sup>。由于分子吸收线线强是温度的函数, 线型也与压强有关, 所以建立多元线性回归方程的前提条件是环境因素相同, 即在相同的压力和温度下进行测量。本文只考虑在相同温度和压力条件下的乙醇检测问题。

假设测量到的乙醇和水气的参考光谱分别为  $\alpha_{e\_ref}(\nu)$  和  $\alpha_{w\_ref}(\nu)$ , 对实测光谱  $\alpha_{test}(\nu)$  可建立如下回归方程:

$$\alpha_{r\_test}(\nu) = c_0 + c_w \alpha_{w\_ref}(\nu) + c_e \alpha_{e\_ref}(\nu), \quad (4)$$

式中  $\alpha_{r\_test}(\nu)$  为回归估计值,  $c_w$ 、 $c_e$  为实际观测值  $\alpha_{test}(\nu)$  对水气和乙醇参考吸收谱  $\alpha_{w\_ref}(\nu)$  和  $\alpha_{e\_ref}(\nu)$  的偏回归系数,  $c_0$  代表一个偏移量。根据多元函数求极值的方法,  $c_w$ 、 $c_e$  应使实际测量值  $\alpha_{test}(\nu)$  与回归估计值  $\alpha_{r\_test}(\nu)$  的偏差平方和最小, 即

$$Q = \sum_{j=1}^n [\alpha_{test}(\nu_j) - c_w \alpha_{w\_ref}(\nu) - c_e \alpha_{e\_ref}(\nu) - c_0]^2. \quad (5)$$

通过求解关于  $c_w$ 、 $c_e$  的正规方程组, 可以得到它们的回归估计值。

上述应用多元线性回归算法的数据处理包含以下几个步骤: 1) 获取乙醇蒸气的参考谱  $\alpha_{e\_ref}(\nu)$ ; 2) 获取水气的参考谱  $\alpha_{w\_ref}(\nu)$ ; 3) 依据采集的实测吸收信号计算其对应的吸收光谱  $\alpha_{test}(\nu)$ ; 4) 依据(4)式建立的线性回归方程, 并求解相应的回归系数; 5) 根据参考谱浓度计算乙醇和水气的相对浓度。以上数据处理的流程如图 3 所示。

通过测量空气中水气很容易获得水气参考谱  $\alpha_{w\_ref}(\nu)$ , 但乙醇蒸气的参考吸收谱的获取则相对复杂。为增强乙醇吸收, 在吸收池中充入了乙醇的饱和蒸气, 以获得乙醇蒸气的吸收谱。采用的乙醇蒸气源是体积分数为 99.7% 的乙醇, 可以看到测量到的光谱中含有少量的水气吸收。按照乙醇蒸气光谱的获取方法<sup>[9]</sup>得到如图 4 所示的乙醇参考谱。图 4 中曲线 1 为实验记录的含有少量水气的乙醇吸收谱, 曲线 2 为用吸收池记录的纯水气的吸收谱, 曲线 3 为获取的乙醇蒸气吸收谱。获取的曲线 3 可作为乙醇的参考吸收谱用于乙醇浓度反演。

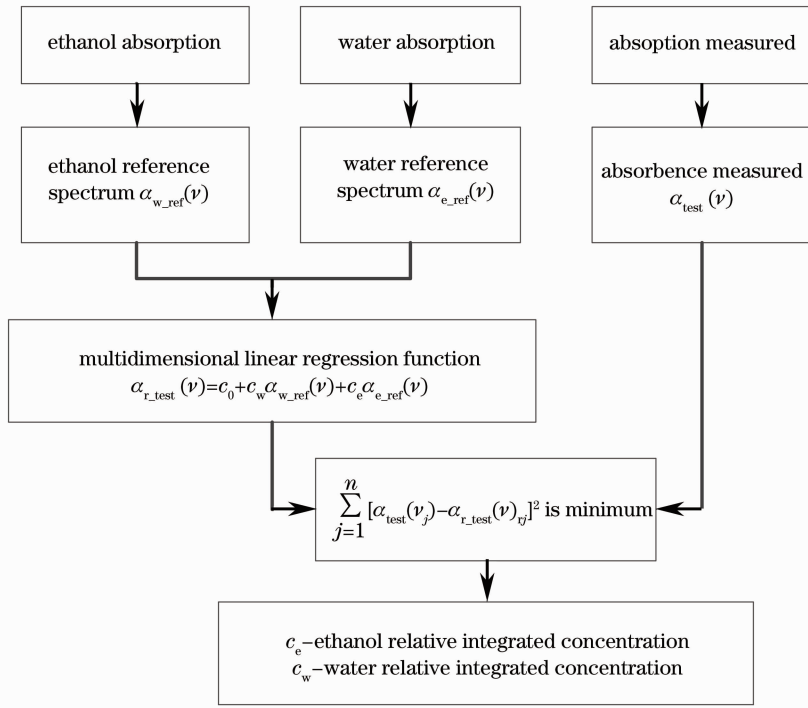


图 3 数据处理的流程图

Fig. 3 Flow chart of data processing

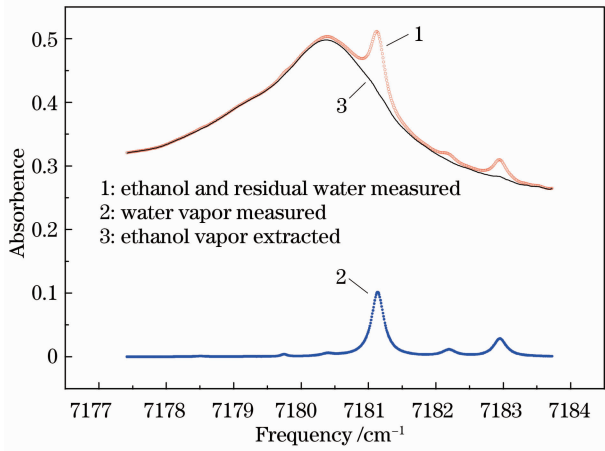


图 4 乙醇参考吸收谱的获取

Fig. 4 Acquisition of ethanol vapor reference absorption spectrum

由于水气吸收较强,当测量距离增加后,部分水气吸收线会因采样精度限制而达到饱和,这在空气湿度较大时会更加明显。图 5 是实验采用的水气吸收参考光谱和乙醇吸收参考光谱,测量的实验条件为  $1.013 \times 10^5$  Pa,  $22^\circ\text{C}$ , 室内湿度 45%。可以看到水气吸收的量级比乙醇吸收大得多,为了避免饱和和吸收对浓度反演造成影响,选用了如图 5 所示的三个区域 R1、R2 和 R3 进行浓度反演。

### 3.2 修正方程的提出

在直接吸收光谱测量中,需要采用基线拟合的

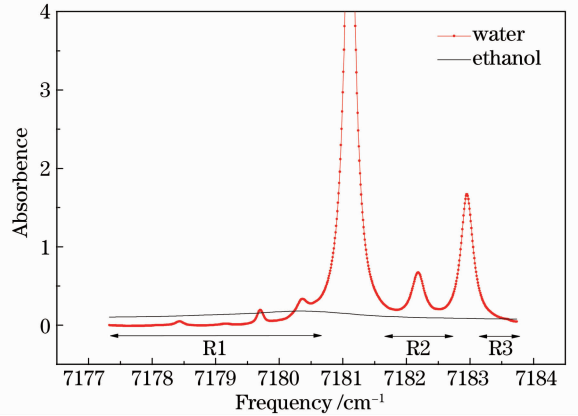


图 5 实验测量采用的水气吸收参考光谱(点划线)和乙醇蒸气参考光谱(实线)

Fig. 5 Water vapor reference absorption spectrum (chain dotted) and ethanol vapor reference spectrum (solid) used in experimental measurements

方法获得原始光强  $I_0$ , 从而进一步获得吸光度。基线拟合通常选择离吸收线中心频率 4 倍吸收线宽度之外的部分<sup>[10]</sup>, 进行低阶多项式拟合, 从而得到近似的原始光强  $I_0$ 。但在  $7177 \sim 7184 \text{ cm}^{-1}$  水气存在强吸收, 而乙醇的吸收为宽带吸收, 这导致基线拟合方法失效。所以采用其他方法获取光强, 但所获取的光强与真实原始光强  $I_0$  存在一定误差, 这里将获取的无吸收光强记为参考光强  $I_{0\_test}$ , 接下来分析  $I_{0\_test}$  误差对多元线性回归拟合造成的影响。

假设在接收端的光强为  $I_{\text{test}}$ , 则它可表示为

$$I_{\text{test}} = I_0 \exp\{-[\alpha_w(\nu) + \alpha_e(\nu) + \alpha_{\text{bg}}(\nu)]\}, \quad (6)$$

式里  $\alpha_w$  和  $\alpha_e$  为水气和乙醇的吸收, 而背景  $\alpha_{\text{bg}}(\nu)$  通常接近于零。但反演吸光度时实际采用的不是原始光强  $I_0$ , 假设选择的参考光强  $I_{0\_test} = I_0 f(\nu)$ , 其中  $f(\nu)$  是采用的参考光强与原始光强之间的差异, 则得到的吸收为

$$\alpha_{\text{test}}(\nu) = \ln(I_{0\_test}/I_{\text{test}}) = \ln[f(\nu)] + \alpha_w(\nu) + \alpha_e(\nu) + \alpha_{\text{bg}}(\nu), \quad (7)$$

可以看到差异因子  $f(\nu)$  在反演的吸光度上附加了  $\ln[f(\nu)]$  部分。而计算水气参考谱  $\alpha_{w\_ref}(\nu)$  同样采用了  $I_{0\_test}$  作为参考光强, 因此水气参考谱同样存在误

差, 即

$$\alpha_{w\_ref}(\nu) = \ln[f(\nu)] + \alpha_{w0}(\nu) + \alpha_{\text{bg}}(\nu), \quad (8)$$

式中  $\alpha_{w0}$  为无失真的水气吸收参考谱。根据乙醇参考谱的获取方法, 原则上可以得到无误差的乙醇吸收参考谱, 而且实际的乙醇检测中乙醇浓度相对较低, 而水气的浓度则要高的多, 接下来的分析中忽略乙醇参考谱  $\alpha_{e\_ref}(\nu)$  的误差, 则有

$$\alpha_{e\_ref}(\nu) = \alpha_{e0}(\nu), \quad (9)$$

式中  $\alpha_{e0}$  为无失真乙醇吸收参考光谱。接下来将测试光谱  $\alpha_{\text{test}}(\nu)$  采用参考光谱  $\alpha_{w\_ref}(\nu)$  和  $\alpha_{e\_ref}(\nu)$  来表示, 先将(7)式写为如下形式:

$$\alpha_{\text{test}}(\nu) = \ln[f(\nu)] + \alpha_{\text{bg}}(\nu) + c_{w0}\alpha_{w0}(\nu) + c_{e0}\alpha_{e0}(\nu), \quad (10)$$

式中  $c_{w0}\alpha_{w0}(\nu) = \alpha_w(\nu)$ , 而  $c_{e0}\alpha_{e0}(\nu) = \alpha_e(\nu)$ ,  $c_{w0}$  和  $c_{e0}$  分别为测量光谱中水气和乙醇相对于它们的无失真参考谱的浓度。将(8)式和(9)式代入(10)式, 经整理可得

$$\alpha_{\text{test}}(\nu) = (1 - c_{w0})\{\ln[f(\nu)] + \alpha_{\text{bg}}(\nu)\} + c_{w0}\alpha_{w\_ref}(\nu) + c_{e0}\alpha_{e\_ref}(\nu). \quad (11)$$

从(11)式可以看到  $\ln[f(\nu)]$  和  $\alpha_{\text{bg}}(\nu)$  对浓度反演的影响, 在用参考光谱表示的测量光谱中, 多出来一个附加项  $(1 - c_{w0})\{\ln[f(\nu)] + \alpha_{\text{bg}}(\nu)\}$ 。接下来考虑这一项对浓度反演产生的影响。假设经过多元线性回归拟合后,  $\{\ln[f(\nu)] + \alpha_{\text{bg}}(\nu)\}$  对  $c_{w0}$  和  $c_{e0}$  贡献了一个小偏差  $\Delta c_{w0}$  和  $\Delta c_{e0}$ , 以及一个常数  $\Delta c_0$ , 即满足

$$\sum_{j=1}^n \{ \{\ln[f(\nu)] + \alpha_{\text{bg}}(\nu)\} - [\Delta c_0 + \Delta c_{w0}\alpha_{w\_ref}(\nu) + \Delta c_{e0}\alpha_{e\_ref}(\nu)] \}^2 \quad (12)$$

最小, 则(11)式可写为

$$\alpha_{\text{test}}(\nu) = (1 - c_{w0})[\Delta c_0 + \Delta c_{w0}\alpha_{w\_ref}(\nu) + \Delta c_{e0}\alpha_{e\_ref}(\nu)] + c_{w0}\alpha_{w\_ref}(\nu) + c_{e0}\alpha_{e\_ref}(\nu), \quad (13)$$

(13)式可以整理为

$$\alpha_{\text{test}}(\nu) = (1 - c_{w0})\Delta c_0 + [\Delta c_{w0} + (1 - \Delta c_{w0})c_{w0}]\alpha_{w\_ref}(\nu) + [(c_{e0} + \Delta c_{e0}) - \Delta c_{e0}c_{w0}]\alpha_{e\_ref}(\nu). \quad (14)$$

从(14)式可见, 采用参考光谱  $\alpha_{w\_ref}(\nu)$  和  $\alpha_{e\_ref}(\nu)$  对测量光谱经过多元线性回归拟合后的结果为

$$\begin{cases} c_w = \Delta c_{w0} + (1 - \Delta c_{w0})c_{w0} \\ c_e = (c_{e0} + \Delta c_{e0}) - \Delta c_{e0}c_{w0} \end{cases}, \quad (15)$$

式中  $c_w$  和  $c_e$  都与实际的水气浓度  $c_{w0}$  有关。若记  $k = \Delta c_{e0}/(\Delta c_{w0} - 1)$ , 则从(15)式可得到乙醇的实际浓度为

$$c_{e0} = (c_e - \Delta c_{e0}) + k(c_w - \Delta c_{w0}) = c_e - k(c_w - 1). \quad (16)$$

(16)式即为乙醇测量中的浓度修正方程, 它表明回归系数  $c_w$  和  $c_e$  成线性关系, 其中系数  $k$  可以由实验确定, 当  $c_{e0} = 0$  时有

$$c_e = k(c_w - 1). \quad (17)$$

即系数  $k$  可以通过在光路上没有乙醇时得到的回归系数  $c_e$  与  $c_w$  之间的关系确定。考虑到实际测量过程中噪声因素等影响, 可以将(16)式写成如下形式:

$$c_{e0} = c_e - (kc_w + b). \quad (18)$$

这样 3.1 节数据处理步骤中还要加上一步: 6) 采用修正方程(18)式对测量浓度进行修正。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 浓度修正方程

为了对第 3 节修正方法进行验证, 在分析通道进行了如下测量实验。在光路上没有乙醇的情况下, 先记录水气吸收的参考光谱, 再用加湿器改变室内空气的湿度, 并进行浓度反演。实验过程中, 其他实验条件保持不变, 测量的结果如图 6 所示。从图 6(a)中可以看到, 反演得到的水气和乙醇的回归系数  $c_w$  和  $c_e$  变化趋势保持一致。

分别以水气和乙醇的回归系数  $c_w$  和  $c_e$  作为横纵坐标, 得到如图 6(b)的变化趋势图。对测量数据进行线性拟合, 得到的拟合相关系数优于 0.996, 显示两者成很好的线性关系。直线拟合方程中  $k = 0.385$ ,  $b = -0.387$ , 即得到  $c_e = 0.385 \times c_w - 0.387$ ,

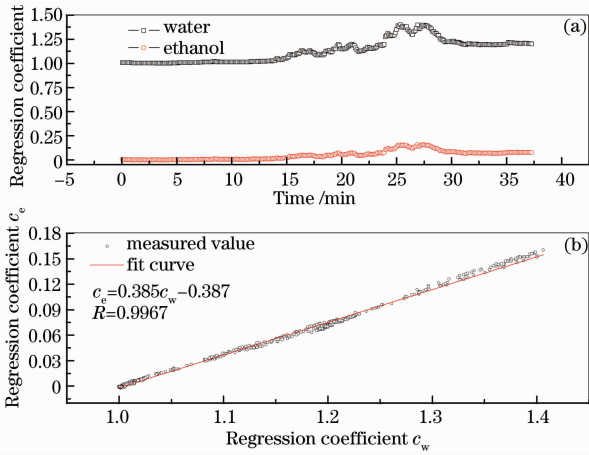


图 6 空气中没有乙醇时用多元线性回归方法得到的测量结果。(a)水气和乙醇回归系数的变化趋势；(b)水气和乙醇回归系数的线性拟合

Fig. 6 Measurement results obtained by using multidimensional linear regression analysis with no ethanol vapor in air. (a) Regression coefficient trends of water vapor and ethanol vapor; (b) linear fit of regression coefficients of water vapor and ethanol vapor

两个系数绝对值大小几乎相等,符号相反,这一结果与(17)和(18)式相吻合。

在图 6(b)所示的拟合结果中,可以发现并不是所有的点都落在拟合直线上,这表明存在一些干扰因素影响测量结果。其中可能产生影响的因素包括激光器波长的漂移,室内温度的微小变化对吸收线型的影响等。

#### 4.2 开放光路测量实验

在基于多元线性回归的分析中,参考吸收谱均事先测定,该参考吸收谱的对应的积分浓度为常数。设乙醇参考谱的积分浓度为  $c_{ref}$ ,则待测气体中的乙醇浓度取决于修正后得到的回归系数  $c_{e0}$ ,即

$$c_{test} = c_{ref} \times c_{e0}. \quad (19)$$

在得到第 3 节的修正方程后,在分析通道中进行开放光路连续测量实验。考虑到空气中几乎没有乙醇,测量中必须人为提供乙醇蒸气源,分别进行以下两项实验:

1) 实验中采用一个体积较大的吸收池,两端为楔形石英窗片,模拟车窗封闭的机动车。吸收池长度 44 cm,直径 15 cm,可以保证激光束完全通过。开始时,吸收池中为空气,测量结果接近于零,如图 7 所示。之后多次向吸收池中滴入少量液体乙醇,由于吸收池的体积较大,乙醇的挥发需要一定的时间。其中阶段 1、3、5 为乙醇在吸收池中连续挥发

的过程,可以看到乙醇浓度的快速上升。阶段 6 是阶段 5 的延续,由于阶段 5 的乙醇有少量渗入吸收池缝隙中,导致该阶段乙醇挥发速度下降。阶段 2、4、7 为乙醇在吸收池中达到相对平稳后的连续测量结果,图 7 中也同时给出了水气在这些阶段的浓度变化(红色曲线)。

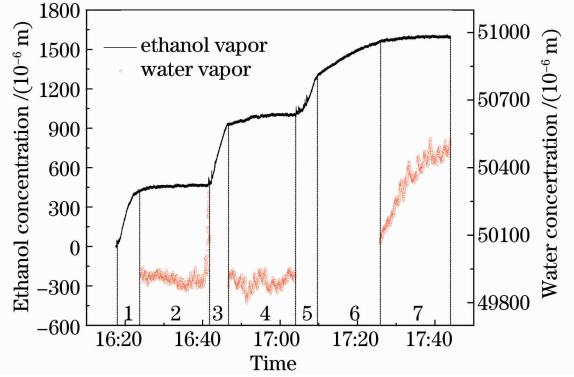


图 7 乙醇和水气含量的连续测量结果

Fig. 7 Continuous measurement results of concentrations of ethanol vapor and water vapor

2) 实验中光路上没有吸收池,采用标准乙醇气体在光路上喷气,气瓶内乙醇体积分数为  $2000 \times 10^{-6}$ ,喷气速率控制在 3 L/min。考虑到室内无风的环境,为防止喷气后乙醇蒸气大量聚集,在光路旁边放置一个风扇,模拟 3 级风力。在同一位置间隔喷三次的测量结果如图 8 所示,可以看到每次喷气结束后,图中曲线平坦的底部略有上升,这是因为在室内环境下乙醇蒸气扩散至整个光路。

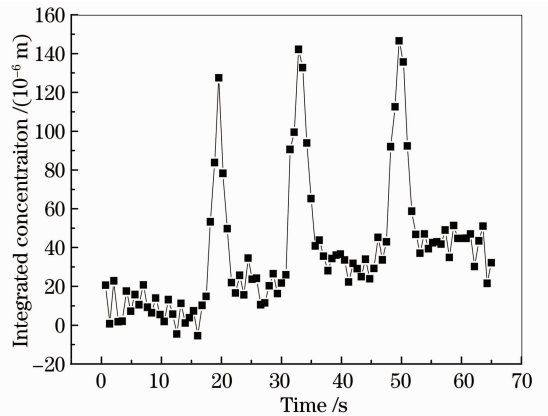


图 8 乙醇标准气喷气实验测量结果

Fig. 8 Measurement results of puffing ethanol vapor standard gas

#### 4.3 系统检测限

为测量系统的检测限,对不同体积分数的标准乙醇气体 ( $500 \times 10^{-6}$ 、 $1000 \times 10^{-6}$ 、 $2000 \times 10^{-6}$ ) 和空气进行测量。先将吸收池抽空,再向池中充入乙

醇标准气,注意充气的速度要足够缓慢,以防止乙醇的冷凝。逐次将乙醇标准气充入分析通道的长44 cm的吸收池,测量的结果如图9所示。其中图9的测量值为积分浓度值,考虑到吸收池的长度,将该

测量值除以0.88 m(激光穿过吸收池两次)即可得到测量的乙醇体积分数。测量的数据统计如表1所示。

表1 乙醇标准气检测结果统计

Table 1 Statistics of measurement results of ethanol vapor standard gas

Concentration of standard gas / $10^{-6}$	Integrated concentration measured /( $10^{-6}$ m)	Standard deviation of integrated concentration /( $10^{-6}$ m)	Concentration measured / $10^{-6}$
0	-4.52	9.69	-5.13
500	425.41	10.16	483.43
1000	894.82	10.11	1016.84
2000	1748.63	8.29	1987.08

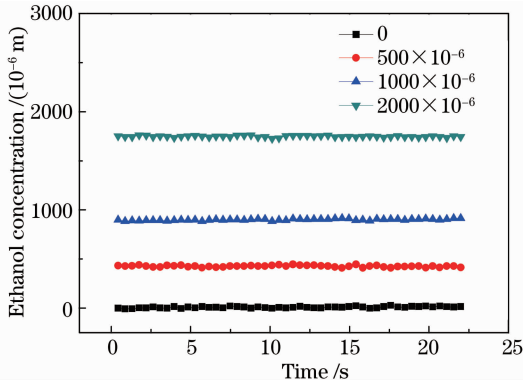


图9 对不同体积分数的标准乙醇气体的测量结果  
Fig.9 Measurement results of ethanol vapor standard gas with different volume ratios

从表1可以看到测量结果与标气浓度有较好的线性关系。从测量结果的标准偏差分析,取3倍标准偏差作为检测限,则系统的检测限达到 $30 \times 10^{-6}$  m。

## 5 结 论

采用乙醇分子在 $7180 \text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰作为鉴别乙醇的特征信息,研究了基于半导体激光吸收光谱技术的乙醇蒸气检测方法。采用多元线性回归方程来拟合求解以消除共存水蒸气对空气中乙醇蒸气含量测量的影响。针对谱线处理中的光谱误差对测量结果造成的影响,推导了修正方程,与实验的结果一致。在开放光路进行的测量实验结果表明,系统的积分浓度检测限达到 $30 \times 10^{-6}$  m。基于上述研究,可以研发基于TDLAS方法的道边在线式酒驾遥测技术。采用这种遥测技术时,探测光束横穿马路,当行驶的机动车经过待测区时,激光束穿过机动车侧窗,并测出机动车内乙醇浓度,从而进行预警。

研究结果为研发基于TDLAS方法的道边在线式酒驾遥测技术奠定了基础。

## 参 考 文 献

- 1 M Azzazy, T Chau, M Wu, *et al.*. Remote sensor to detect alcohol impaired drivers [J]. Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1995, 2: 320-321.
- 2 Shao Jie, Tang Qianjin, Cheng Cheng, *et al.*. Remote detection of alcohol concentration in vehicle based on TDLAS [C]. Symposium on Photonics and Optoelectronic, 2010, 1-3.
- 3 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. Large scale gas leakage monitoring with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Chin Opt Lett, 2006, 4(2): 116-118.
- 4 Chen Dong, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. Fiber-distributed multi-channel open-path  $\text{H}_2\text{S}$  sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Chin Opt Lett, 2007, 5(2): 121-124.
- 5 Xia Hui, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. An approach of open-path gas sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Chin Opt Lett, 2008, 6(6): 437-440.
- 6 K L McNesby, R T Wainner, R G Daniel, *et al.*. High-sensitivity laser absorption measurements of broadband absorbers in the near-infrared spectral region [J]. Appl Opt, 2000, 39(27): 5006-5011.
- 7 A Nadezhinskii, A Berezin, Y Bugoslavsky, *et al.*. Application of near-IR diode lasers for measurement of ethanol vapor [J]. Spectrochim Acta Part A, 1999, 55(10): 2049-2055.
- 8 A A Kosterev, R F Curl, F K Tittel, *et al.*. Effective utilization of quantum-cascade distributed-feedback lasers in absorption spectroscopy [J]. Appl Opt, 2000, 39(24): 4425-4430.
- 9 Geng Hui, Zhang Yujun, Liu Wenqing, *et al.*. Acquisition method of high resolution spectra of ethanol vapor in near-IR range [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, 7(1): 57-62.
- 耿 辉, 张玉钧, 刘文清, 等. 乙醇蒸气近红外高分辨光谱获取方法研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(1): 57-62.
- 10 Zhou Xin. Diode-Laser Absorption Sensors for Combustion Control [D]. Stanford: Stanford University, 2005. 12-14.

栏目编辑: 史 敏