

一种自适应层进式 Savitzky-Golay 光谱滤波算法及其应用

鲁一冰^{1,2}, 刘文清^{1,2}, 张玉钧^{1,2*}, 张 恺^{1,2}, 何 莹^{1,2}, 尤 坤^{1,2},
李潇毅¹, 刘国华^{1,2}, 唐七星^{1,2}, 范博强^{1,2}, 余冬琪^{1,2}, 李梦琪^{1,2}

1. 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031
2. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

摘 要 可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)利用半导体激光器的可调谐和窄线宽特性,通过选择特定气体的单条吸收线,排除其余气体的干扰,可以实现高精度、高选择性的气体浓度测量,在气体浓度检测系统中具有广泛的应用前景。在不同的应用条件和环境下,需要解决相应的硬件和数据处理方面的技术问题。主要研究 TDLAS 技术机动车尾气 CO 组分浓度遥测系统中的光谱数据处理问题,该系统利用路面漫反射回波信号遥测行驶中的机动车尾气 CO 组分浓度。由于激光扫描光谱回波信号受到漫反射面情况变化、空气环境变化、尾气湍流影响等因素影响,探测器收集到的信号不仅较弱同时也夹杂着多种噪声,即测量光路信噪比较差,故提出一种自适应层进式 Savitzky-Golay(S-G)平滑滤波算法,实现了对光谱进行滤波处理从而更加准确地反演 CO 浓度。S-G 滤波算法因其原理简单、功能强大、只需设置两个参数(窗口大小、拟合阶数)等优点,已广泛应用于光谱处理。如何正确设置 S-G 算法参数使滤波效果在去噪不足和过度滤波之间找到平衡点,是该滤波算法应用的一大难题。设计的检测系统中,测量光路光谱信号为非平稳信号,噪声和有效信号幅度时变,最佳窗口大小和多项式阶数随信号动态而变化,且变化区间较大,使用固定参数的 S-G 滤波器难以达到最佳效果。提出的自适应层进式 S-G 平滑滤波算法,通过逐层将测量光路光谱信号经过 S-G 滤波后,与参考光路的光谱信号设置的参考段比对信号相关系数和信号一阶导相关系数的和,以自适应得到逐层最优参数。通过对信噪比从 9.81~29.77 的 10 组不同带噪光谱分析验证了该算法的有效性,自适应层进式 S-G 算法能较好地去除噪声并还原带噪信号所携带的待测气体浓度信息,与带噪光谱对比,吸收光谱峰值最大误差由 25.152%降至 5.917%,积分吸光度最大误差由 18.1%降至 3.9%。在实现的系统中,使用自适应层进式 S-G 算法对测量光路进行滤波处理,并对不同车型、不同排量、燃烧不同油品的机动车在怠速和缓速通过(5 km·h⁻¹)系统时其排放的 CO 浓度进行实时在线监测。

关键词 可调谐半导体激光吸收光谱技术; 自适应层进式 Savitzky-Golay 平滑滤波; 机动车尾气遥测
中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)09-2657-07

引 言

机动车发动机的燃烧过程产生的尾气排放污染物中有数十种不同的化合物,其中,对环境影响最大的是 CO, CO₂, NO_x, HC 和颗粒物。对路网中机动车排放的 CO 进行准确的测量可用于分析机动车发动机燃烧过程、并且有助于排放控制策略的制定^[1]。目前用于环境污染气体检测的方法主要分为非光学法和光学法,其中光学法是利用光与气体分子相互

作用的原理进行探测,包括 FTIR, NDIR^[2], TDLAS^[3]等方法。TDLAS(可调谐半导体激光吸收光谱)方法因其相应快、精度高、无侵入、光程远等特点,已成为气体检测领域最常用方法之一。

提出一种基于 TDLAS 的垂直式机动车尾气排放 CO 组分遥测系统,可无接触地实现对通过系统光路的机动车尾气中 CO 组分进行实时浓度遥测。由于系统采用垂直收发结构,相比于传统的水平式收发结构,适用性更强,可在实际路网中独立测量车道内车辆尾气排放组分 CO 浓度信息。但

收稿日期: 2018-08-24, 修订日期: 2018-12-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201000), 安徽省科技重大专项(15czz04124), 安徽省自然科学基金面上项目(1808085MD107) 资助

作者简介: 鲁一冰, 1991 年生, 中国科学技术大学博士研究生 e-mail: yblu@aiofm.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: yjzhang@aiofm.ac.cn

相比于水平收发结构,探测器收集到的回波信号经过路面粗糙漫反射后光强较弱,又因为开放空间中测量 CO 浓度受大气湍流、杂散光等影响,噪声较大,故系统信噪比较低,需考虑在系统中使用光谱数据处理算法以保证气体反演浓度精度。

Savitzky-Golay 滤波算法由于滤波效果强大、只需设置多项式拟合阶数和窗口大小两个参数,在光谱数据处理中,应用已十分广泛。针对相对平稳的信号,可以通过离线分析滤波效果选择固定最优参数,而在 TDLAS 遥测系统中,测量光路信号、噪声幅值时变,使用固定参数的 S-G 算法难以达到理想滤波效果,故需使用自适应 S-G 滤波算法,旨在动态寻找合适的参数。其中, Gabriel 等认为 S-G 滤波器滤除的噪声与仪器噪声自相关最高时为最优^[4], Phillip Barak 等将拟合信号的残差平方和作为平滑效果的评判标准^[5]。本文提出了一种自适应层进式 S-G 滤波算法,使用带噪的测量光路光谱信号通过逐层滤波并与参考光路所设置的参考段的相关系数及一阶自相关系数对比,选取每层最优参数,最终输出去噪后的信号。

在实验部分,使用搭载了层进式 S-G 滤波算法的机动车尾气 CO 遥测系统,对不同车型、不同排量、燃烧不同油品种类的机动车在怠速和缓速通过遥测系统时尾气排放的 CO 组分浓度进行了测量,验证了系统的可行性及所提出算法的有效性。

1 系统设计及原理

1.1 垂直式机动车尾气 CO 组分浓度遥测系统

所设计的基于 TDLAS 的垂直式机动车尾气排放 CO 组分遥测系统结构如图 1 所示,其中,使用温度控制模块和电流控制模块对中心波长位于 2 333 nm 的 DFB 二极管激光器进行调谐,并通过控制锯齿波信号发生模块实现对 CO 在该波长的吸收线扫描,同时输出触发信号控制数据采集。由激光器出射的激光通过分束器后,光强较弱的一束光通过 10 cm 的参考光路气室入射到探测器靶面上,其中参考光路气室中充满 5% 浓度的 CO 气体,该分路用于数字锁线、积分浓度定标以及自适应层进式 S-G 算法选参标准,称其为参考

光路。另一束光通过长光纤接入龙门架上的遥测收发装置,经过准直后的光束垂直入射于路面上,经过路面漫反射,后向散射光通过前置在望远镜系统的平凸透镜收集并聚焦于探测器靶面上,此路称为测量光路。探测器将光信号转换为电信号后通过长导线进入主机中的 I/V 转换、放大模块后,进入数据采集卡进行 AD 转换,最后由上位机程序对光谱信号进行滤波、浓度反演等处理。

1.2 TDLAS 浓度反演算法原理^[6-7]

根据 Lambert-Beer 定律,当红外光通过一段气体介质时,当激光器的发射波长和待测气体某个吸收谱线的中心波长相同时,激光能量发生衰减且光的衰减程度与待测气体的浓度以及光程成正比关系,激光能量衰减满足关系

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

式(1)中, $I_0(\nu)$ 为入射光强(单位: mW), $I_t(\nu)$ 为透射光强(单位: mW), ν 为入射光的频率(单位: cm^{-1}), L 为有效吸收光程(单位: cm), k_ν 为光谱吸收系数(单位: cm^{-1}), 实际中常利用吸光度来描述目标气体的吸收特性。

在 TDLAS 技术直接吸收方法中,通常使用吸光度曲线积分面积反演气体浓度,即积分吸光度 A 为

$$A = \int \alpha_\nu d\nu = S(T) P c L \quad (2)$$

其中, α_ν 为吸光度, P 为气体压强(atm), $S(T)$ 为温度 T 时的吸收线强(单位: $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$, $1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$), $\phi(\nu)$ 为吸收线的归一化线型函数(单位: cm), c 为吸收气体的摩尔分数。

积分吸光度在、压强、气体吸收线强相等的情况下,吸光度曲线积分面积与待测气体浓度、测量光程呈正比关系,故

$$c = \frac{A}{L} \times \frac{L_{\text{标}}}{A_{\text{标}}} \times c_{\text{标}} \quad (3)$$

其中, $A_{\text{标}}$ 为标气的积分吸光度, $L_{\text{标}}$ 为标气的有效测量光程, A 为待测气体吸收线型积分吸光度, L 为待测气体的有效测量光程。

2 自适应层进式 S-G 滤波

Savitzky-Golay 平滑滤波算法(S-G)通过一个移动窗口,对窗口内部元素做多项式最小二乘拟合,得到窗口中心位置处元素平滑后的值^[8]。该方法即能够实现良好的去噪效果,又可以较好地保留光谱信号中的有用信息。

S-G 算法另一大优势在于只有两个参数需要设定,即窗口大小(本文中所有关于窗口大小的叙述均为单侧数据点数)和多项式拟合阶数,对于给定的信号,这两个参数选择的正确与否会直接导致滤波效果的不同,低阶大窗口会造成信号失真,并且削弱吸收峰强度,同时拉宽吸收线型,难以保留所需要的信息;高阶小窗口虽可以较好的保留信号信息,但同样对噪声的滤除效果较弱。

1.1 节系统设计中,描述了激光器通过电流和温度调谐后,输出信号经过分束器分为参考光路和测量光路。由于参考光路和测量光路的光束是从同一激光器发射,故由激光器

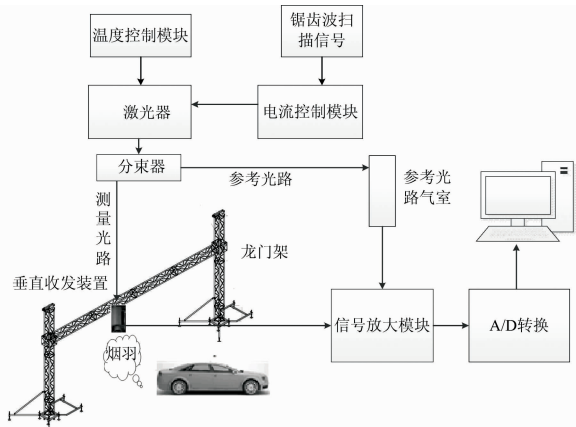


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure

带来的噪声可视为等同。同时由于参考光路较短，激光通过准直器直射探测器靶面，相比于测量光路信号是通过开放空间并经由路面漫反射而来，受到漫反射面情况变化、空气环

境变化、尾气湍流等因素影响，探测器收集到的信号不仅较弱同时也夹杂着多种噪声，当两路信号经过放大后参考光路噪声影响更加明显。自适应层进式 S-G 滤波器算法流程图如图 2 所示。

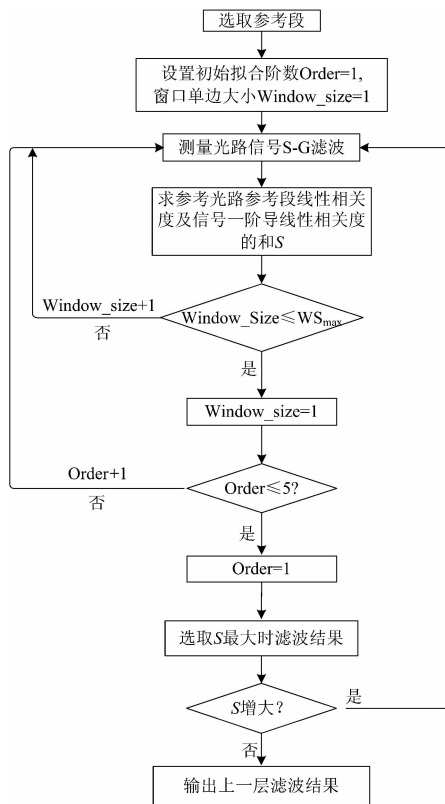


图 2 自适应层进式 S-G 滤波器算法流程图

Fig. 2 Flow chart of adaptive hierarchical S-G filter algorithm

由于无法从测量光路信号中自适应的分辨噪声和有效信号，可以使用信噪比较高的参考管光路信号作为参考，与滤波后的信号进行比对，观察滤波效果。现选取参考光路光谱无吸收段作为参考段，并设置每层 S-G 滤波阶数不超过 5 阶，单侧数据点数不超过参考段横坐标最小值 (WS_{max})，遍历阶数和窗口单侧数据点数对测量光路信号进行滤波，定义参考段相似度为 S 如式 (4)

$$S = R + R_{1d} \tag{4}$$

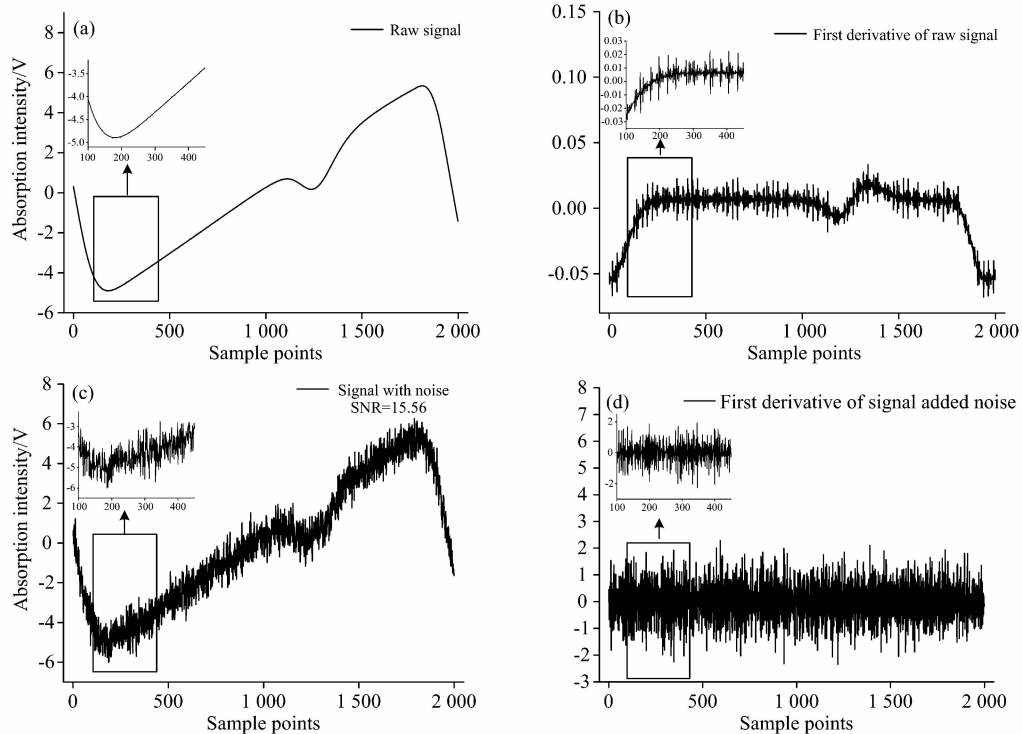
其中， R 为参考光路参考段与测量光路当前层滤波后参考段的线性相关度， R_{1d} 为参考光路参考段与测量光路当前层滤波后参考段一阶导的线性相关度。

如果当前层参考段相似度大于上一层，则保留当前层滤波后结果，在实际应用中，为考虑时间成本，可适当设置参考段参考段相似度增幅阈值 S_{TH} ，即如果当前层相似度增幅没有超过 S_{TH} ，则停止进入下一层滤波并输出当前层滤波结果。

现使用参考光路信号作为标准信号，通过加入不同幅度的噪声，观察自适应递进式 S-G 算法效果，定义系统信噪比 SNR 为

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=1}^L S(n)^2}{\sum_{n=1}^L N(n)^2} \right) \tag{5}$$

其中， P_S 和 P_N 分别为标准信号和噪声信号有效功率， $S(n)$



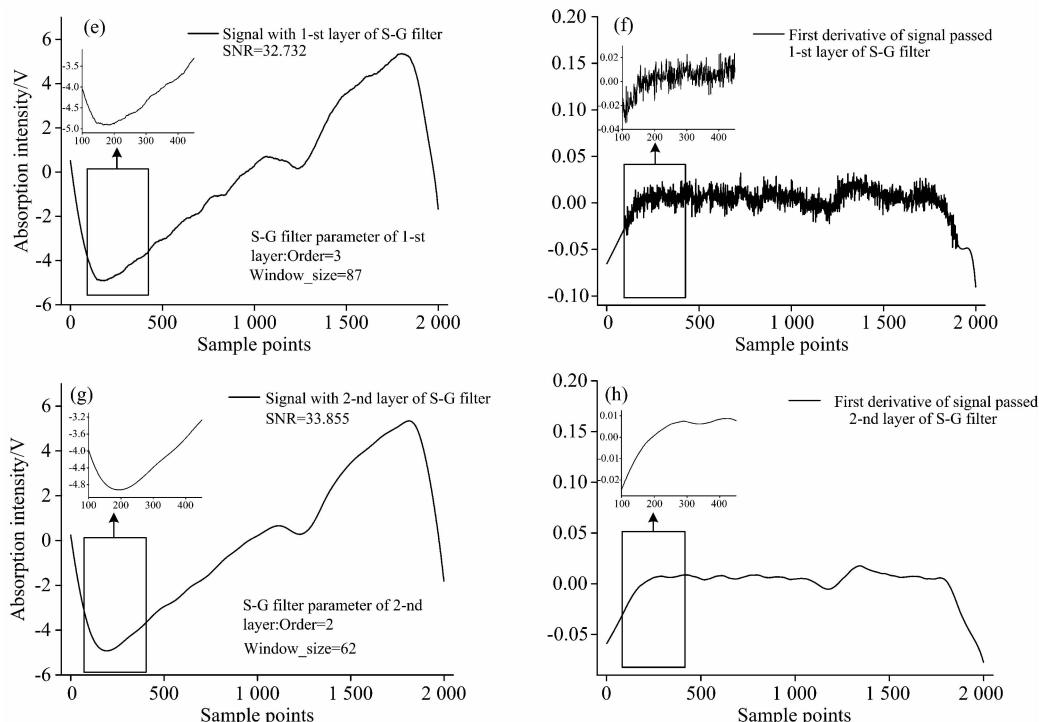


图 3 信噪比为 15.56 的吸收光谱信号使用自适应层进式 S-G 滤波算法进行光谱数据处理

(a): 原始信号; (b): 原始信号一阶导; (c): 原始信号加噪; (d): 加噪信号一阶导; (e): 加噪信号经过第一层自适应层进式 S-G 滤波后波形; (f): 加噪信号经过第一层滤波后信号一阶导; (g): 加噪信号经过第二层自适应层进式 S-G 滤波后波形; (h): 加噪信号经过第二层滤波后信号一阶导

Fig. 3 Absorption spectrum (SNR=15.56) processing by using adaptive hierarchical S-G filter

(a): Raw signal; (b): First derivative of raw signal; (c): Signal with noise; (d): First derivative of signal with noise; (e): Signal with noise using first layer of S-G filter; (f): First derivative of signal using first layer of S-G filter; (g): Signal using second layer of S-G filter; (h): First derivative of signal using second layer of S-G filter

和 $N(n)$ 分别为标准信号光谱及噪声信号, L 为信号长度。

逐层滤波结果如图 3 所示, 其中, 添加噪声后 SNR 为 15.56。图 3 中内插图在所选用的参考段。

原始光谱信号及其一阶导如图 3(a)和(b)所示, 经过加噪后, 参考段线性相关度为 0.983 196, 参考段一阶导数相关度为 0.023 491 7, 带噪光谱信噪比为 15.56。如图 3(e)和(f)所示, 当带噪光谱信号经过第一层阶数为 3, 单侧窗宽为 87 的 S-G 滤波后, 与参考段线性相关度增至 0.998 105, 参考段一阶导线性相关度增至 0.998 421, 此时光谱信号已经有较大优化, 信噪比提升至 32.732, 但从信号参考段及信号一阶导谱线线型存在的毛刺可以判断少量噪声没有滤除。经过第二层 2 阶, 单侧窗宽为 62 的 S-G 滤波后, 与标准光谱线性相关度增至 0.998 958, 一阶导线性相关度增至 0.999 815, 此时, 噪声已基本滤除, 信噪比为 33.855, 且由图 3(g)和(h)所示, 光谱信号及其一阶导平滑并且没有发生形变。

通过以下三个指标评价自适应递进式 S-G 滤波方法对不同信噪比下光谱信号去噪的效果:

①标准光谱 S_{std} 与去噪后光谱 S' 的均方根误差 RMSE, 如式(6)。该指标可以表征去噪后光谱逼近标准光谱的程度。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{n=1}^L [S_{\text{std}}(n) - S'(n)]^2 / L} \quad (6)$$

②去噪后光谱 S' 与标准光谱 S_{std} 吸光度曲线经 Voigt 线型拟合后峰值接近率 R_p 。该指标可以表征去噪后光谱吸收峰值与原峰值近似程度, R_p 越接近 1, 表示滤波后吸收谱峰退化程度越小。

③去噪后光谱 S' 与标准光谱 S_{std} 吸光度曲线经 Voigt 线型拟合后积分吸光度比值 R_1 。该指标表征去噪后光谱积分吸光度与标准光谱积分吸光度的近似程度, R_1 越接近 1, 表示自适应递进 S-G 滤波器结果对吸光度曲线回归效果越好。

对标准吸收光谱信号添加不同幅度的噪声, 得到了信噪比为 9.81~29.77 的 10 组不同带噪光谱, 分别使用自适应递进式 S-G 滤波算法, 通过上述 3 个指标, 分析在不同信噪比下的滤波效果。其中, 不同信噪比光谱信号滤波前后信号 RMSE, R_p , R_1 如图 4(a), (b)和(c)所示, 伴随光谱信噪比降低, 带噪信号与标准信号的均方根误差、吸收线型峰值比值、积分吸光度比值均值均逐渐增大, 经过自适应递进 S-G 滤波后, 均方根误差 RMSE 虽有升高但稳定在 0.1 以内。由于吸光度曲线峰值和积分吸光度可作为评判滤波器对反演待测浓度影响的标准, 由图 4(b)和(c)可知, 自适应递进式 S-G 算法能较好的还原带噪信号所携带的待测气体浓度信息, 吸收峰值最大误差由 25.152%降至 5.917%, 积分吸光度最大误差由 18.1%降至 3.9%。

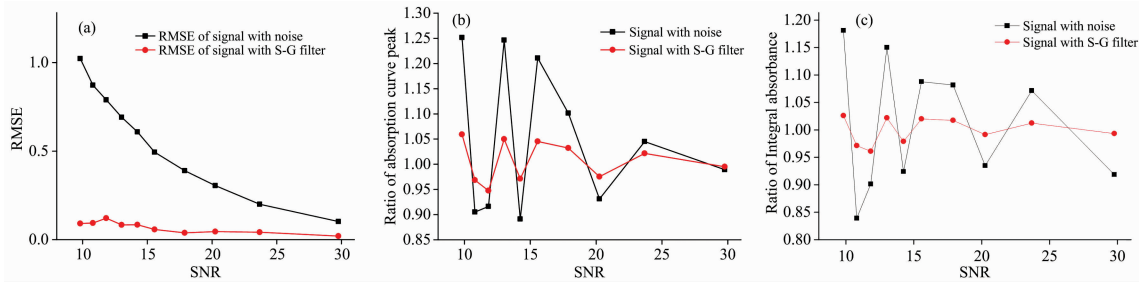


图 4 不同信噪比光谱信号经过自适应层进式 S-G 算法前后的 (a)均方根误差 RMSE、(b)吸收峰近似率 R_p 、(c)积分吸光度比值 R_I

Fig. 4 RMSE (a), R_p (b), R_I (c) of different SRN absorption spectrums using adaptive hierarchical S-G filter

3 实验部分

第 1 节系统设计中, 详细介绍了基于 TDLAS 的垂直式机动车尾气 CO 检测系统组成及 CO 检测方法, 实测系统如



图 5 基于 TDLAS 的机动车尾气排放 CO 组分浓度遥测系统

Fig. 5 Remote CO concentration measurement system based on TDLAS of motor vehicle exhaust

图 5 所示, 其中龙门架内有效光宽均为 3 m, 望远镜系统长 0.5 m, 与龙门架衡量垂直悬挂, 测量机动车尾气 CO 组分有效光程为单程 2.5 m。

使用搭载了自适应层进式 S-G 滤波算法的机动车尾气 CO 组分浓度遥测系统, 对表 1 中的 3 种车型分别在怠速和 $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 缓速两种工况下, 检测其排放的 CO 组分浓度。其中, 为验证所搭建的机动车尾气排放 CO 组分浓度遥测系统的有效性, 在怠速状态下, 同时使用遥测系统和抽取式的基于 NDIR 原理的 CO 检测系统进行对比实验, 怠速状态下 3 车的 CO 排放如图 6 所示。

表 1 测试车辆基本信息

Table 1 Basic information of test vehicles

车辆编号	车型	燃烧油品	排量	生产年份
I	SUV	柴油	2.0	2013
E	小轿车	汽油	1.5	2006
G	小轿车	汽油	2.0	2010

三辆机动车怠速状态下排放 CO 组分浓度检测结果如图 6 所示。

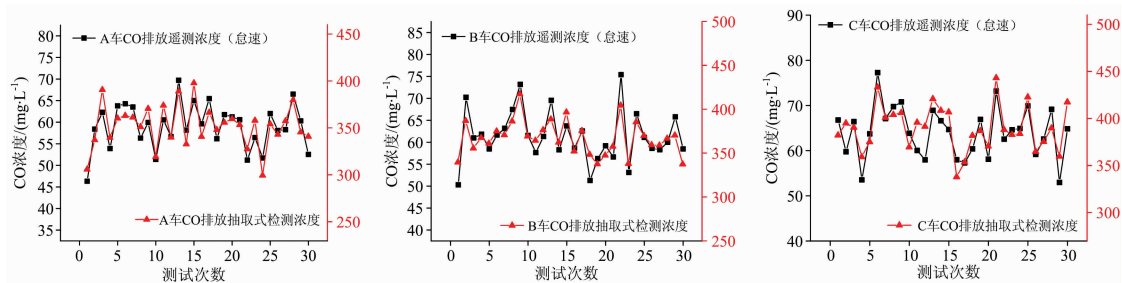


图 6 三辆机动车怠速状态下尾气 CO 组分浓度结果

Fig. 6 CO concentrations of 3 vehicles in idle status

使用所研制的机动车尾气排放遥测系统对机动车排放的 CO 气体浓度进行遥测时, 所检测的浓度结果与基于 NDIR 原理的抽取式 CO 检测模块检测所得浓度虽在取样方式上有较大差异, 导致检测结果不同(遥测系统所得浓度值为测量光路上包含的 CO 浓度)但是两种不同的系统反演所得的 CO 浓度趋势变化有高度一致性, 证明了所研制的系统 CO 模块测量结果的有效性, 少量浓度结果有偏差是因为取样方式的

不同造成, 相比于抽取式, 遥测方式更容易受气象影响。图 6 为三辆机动车在怠速状态下 30 次采样浓度检测结果, 轻型柴油车 A 在怠速状态下平均 CO 排放为 $59.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 较小排量的汽油车 B 平均 CO 排放为 $61.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而较大排量的汽油车 C 尾气排放中的 CO 浓度较高, 平均为 $64.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

图 7 为三辆机动车 10 次缓速通过系统测试光路时尾气

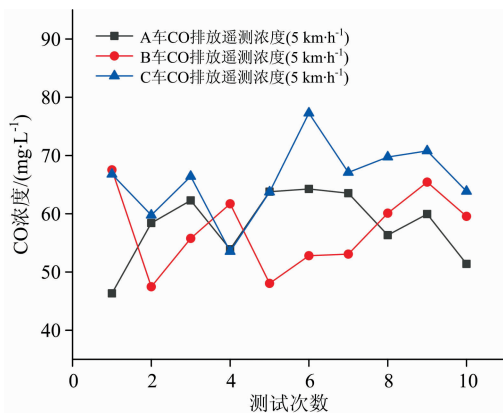


图 7 三辆机动车怠速状态下尾气 CO 组分浓度结果

Fig. 7 CO concentrations of 3 vehicles in speed of 5 km·h⁻¹

排放 CO 浓度信息, 柴油车 A10 次通过测试光路平均 CO 浓度为 58.007 mg·L⁻¹, 机动车 B 平均排放 CO 浓度为 57.143 mg·L⁻¹, 机动车 C 平均排放 CO 浓度为 65.895 mg·L⁻¹。

4 结 论

针对基于 TDLAS 的机动车尾气遥测 CO 组分遥测系统测量光路信噪比较差的问题, 提出了一种自适应层进式 Savitzky-Golay 平滑滤波算法, 通过分析对不同信噪比吸收光谱信号使用该算法滤波前后信号的均方根误差、吸收峰线型比值、积分吸光度误差, 证明了自适应层进式 S-G 算法的有效性, 并使用该算法搭载于所设计的机动车尾气排放 CO 组分浓度遥测系统, 对多种车辆在怠速和缓速通过遥测系统时 CO 排放进行了测量。

References

- [1] TANG Yuan-yuan, LIU Wen-qing, KAN Rui-feng, et al(汤媛媛, 刘文清, 阚瑞峰, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2011, 38(12): 221.
- [2] Chen C, Zhang Y J, He Y. Infrared Technology, 2017, 39(6): 567.
- [3] Arimoto H, Takeuchi N, Mukaiharu S, et al. International Journal of Technology, 2011, 2(1): 9.
- [4] Vivó-Truyols G, Schoenmakers P J. Analytical Chemistry, 2006, 78(13): 4598.
- [5] Phillip Barak. Analytical Chemistry, 1995, 67(17): 2758.
- [6] GAO Yan-wei, ZHANG Yu-jun, CHEN Dong, et al(高彦伟, 张玉钧, 陈东, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2016, 36(3): 0330001.
- [7] YAO Lu, LIU Wen-qing, LIU Jian-guo, et al(姚路, 刘文清, 刘建国, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2015, 42(2): 305.
- [8] Savitzky A, Golay M J E. Anal. Chem., 1964, 36: 1627.

An Adaptive Hierarchical Savitzky-Golay Spectral Filtering Algorithm and Its Application

LU Yi-bing^{1,2}, LIU Wen-qing^{1,2}, ZHANG Yu-jun^{1,2*}, ZHANG Kai^{1,2}, HE Ying^{1,2}, YOU Kun^{1,2}, LI Xiao-yi¹, LIU Guo-hua^{1,2}, TANG Qi-xing^{1,2}, FAN Bo-qiang^{1,2}, YU Dong-qi^{1,2}, LI Meng-qi^{1,2}

1. Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. University of Science and Technology of China, Science Island Branch of Graduate School, Hefei 230026, China

Abstract The tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) has the narrow linewidth characteristic of tunable diode lasers, so the gas concentration measurement of high precision and selectivity can be achieved by selecting the single absorption line of the specific gas to eliminate the interference of other gases, which has wide applications in the gas concentration detection. However, under different application conditions and environments, the people need to solve corresponding technical problems in hardware and data processing. In this paper, the TDLAS spectral data processing problem in the telemetry system for the vehicle exhaust CO concentration has been mainly studied. The system telemetered the exhaust CO concentration of the driving vehicle with the echo signals from the road diffuse reflection. Because the echo signal of laser scanning spectral is affected by factors such as the variation of the diffuse reflection surface, the change of the air environment, and the influence of exhaust turbulence, the signal collected by the detector is not only weak but also mixed with various noises, which means the SNR of the measured optical path is comparatively weak, so an adaptive hierarchical Savitzky-Golay (S-G) smoothing filter algorithm has been proposed in this paper, which can realize the spectral filtering processing to inversion the CO concentration more accurately. The S-G filtering algorithm has been widely used in spectral processing due to its advantages of such as simple principles, powerful

functions and only two parameters setting (the window size and the fitting order). But how to set the parameters of the S-G algorithm correctly to balance the filtering effect between insufficient denoising and excessive filtering is a big problem for its application. In the designed detection system, the spectral signal of the measured optical path is non-stationary signal, and the amplitudes of the noises and effective signals are time-varying. So the optimal window size and polynomial order are changing with the signal dynamics of large range. As a result, it's difficult to achieve the optimal filtering effect through S-G filters with fixed parameters. With the adaptive hierarchical S-G smoothing filter algorithm proposed in this paper, the sum of the signal correlation coefficient and the first derivative of the signal from measured light path spectrum signal after S-G filtering layer by layer and the reference section set by the spectrum signal of the reference light path have been compared, and then the optimal parameters of each layer can be obtained adaptively. With the analysis on 10 groups of band noise spectrum of which the signal to noise ratios (SNR) are from 9.81 to 29.77, the algorithm could effectively restore the concentration information carried by the band noise signals of the gas to be measured. Compared with the band noise spectrum, the maximum error of the absorption spectrum peak has dropped from 25.152% to 5.917%, and the maximum error of the integral absorbance has decreased from 18.1% to 3.9%. In the realized system, the adaptive algorithm has been used for the filtering processing of the measured optical path. The CO concentration emitted by motor vehicles of different models, displacement and oil product use has been monitored online in real time when they passed the system at idle and low speed ($5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$).

Keywords Tunable diode laser absorption spectroscopy; Adaptive hierarchical Savitzky-Golay algorithm; Telemetry measurement system of motor vehicle exhaust

(Received Aug. 24, 2018; accepted Dec. 30, 2018)

* Corresponding author

《光谱学与光谱分析》对来稿英文摘要的要求

来稿英文摘要不符合下列要求者,本刊要求作者重写,这可能要推迟论文发表的时间。

1. 请用符合语法的英文,要求言简意明、确切地论述文章的主要内容,突出创新之处。
2. 应拥有与论文同等量的主要信息,包括四个要素,即研究目的、方法、结果、结论。其中后两个要素最重要。有时一个句子即可包含前两个要素,例如“用某种改进的 ICP-AES 测量了鱼池水样的痕量铅”。但有些情况下,英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围,以及具有情报价值的其他重要信息。在结果部分最好有定量数据,如检测限、相对标准偏差等;结论部分最好指出方法或结果的优点和意义。
3. 句型力求简单,尽量采用被动式,建议经专业英语翻译机构润色,与中文摘要相对应。用 A4 复印纸单面打印。
4. 摘要不应有引言中出现的内容,换言之,摘要中必须写进的内容应尽量避免在引言中出现。摘要也不要对论文内容作解释和评论,不得简单重复题名中已有的信息;不用非公知公用的符号和术语;不用引文,除非该论文证实或否定了他人已发表的论文。缩略语、略称、代号,除相邻专业的读者也能清楚地理解外,在首次出现时必须加以说明,例如用括号写出全称。