

环境光学

机动车尾气遥测技术和应用研究

王铁栋, 刘文清, 张玉钧, 王敏, 王晓梅,
夏慧, 方曦, 陈玖英, 刘建国

(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: 机动车尾气已经成为很多大中城市的主要气体污染源之一, 利用基于光谱学的遥测技术可以在不影响车辆正常行驶的条件下快速检测出尾气超标车辆。自行研制的尾气遥测系统结合了可调谐二极管激光吸收光谱 (TDLAS) 和差分吸收光谱 (DOAS) 技术, 实现了对尾气中 CO、CO₂、HC、NO 和烟尘等污染物的实时测量, 并同时识别牌照和采集车辆行驶信息。

关键词: 尾气; 遥测; 光谱学; 自动识别

中图分类号: X831; O433.5

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)03-0198-05

Research of On-road Vehicle Emissions Remote Sensing System

WANG Tie-dong, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, WANG Min, WANG Xiao-mei,
XIA Hui, FANG Xi, CHEN Jiu-ying, LIU Jian-guo(Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Almost every major city in China faces air problems associated with emissions from motor vehicles nowadays. Remote sensing based on optical techniques is capable of reflecting the real-world characterization of vehicle emissions without interrupting the traffic driving conditions. The on-road vehicle emissions remote sensing system combines tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) and differential optical absorption spectroscopy (DOAS) techniques. It consists of an infrared component for detecting carbon monoxide, carbon dioxide and opacity as an indicator of particulate emissions, an ultraviolet spectrometer for measuring nitric oxide and hydrocarbons. In parallel, the plate license, speed and acceleration of vehicles are recognised by computer.

Key words: vehicle emissions; remote sensing; spectroscopy; auto identification

收稿日期: 2006-05-24; 修改日期: 2006-12-19

基金项目: 863 项目可调谐红外激光差分吸收汽车尾气道边监测技术与系统研究 (2001AA640120)

E-mail: wangtiedong@aiofm.ac.cn

1 引言

随着我国汽车工业的迅猛发展和人民生活水平的提高, 汽车已经逐渐进入家庭, 在路车辆不断增加, 机动车在行驶中燃烧汽油或柴油所排出的大量有害气体已经成为很多城市污染环境大气的主要流动污染源。如何控制机动车尾气污染的持续快速增长, 保护我们的生存环境, 实现可持续发展的战略目标, 加强机动车尾气检测至关重要。目前我国的尾气检测主要采用的怠速法或自由加速烟度法都属于无负载检测法, 这样的机动车尾气检测存在以下问题: 人员工作效率低、社会和经济效益差以及不能反映车辆尾气的真实排放状况等。

近年来国内外大量实践表明, 光学遥感技术是获取环境信息的强有力手段, 是实现大气中痕量气体浓度分析的极其有效的技术。光谱分析技术具有监测范围广、速度快、成本低, 且便于进行长期的动态监测等优势。

2 遥测的原理

汽车排放是指从废气中排出的 CO, 碳氢化合物和氮氧化物 (HC + NO_x)、微粒、碳烟 (PM) 等有害气体。它们都是发动机在燃烧作功过程中产生的有害气体。这些有害气体产生的原因各异, CO 是燃油氧化不完全的中间产物, 当氧气不充足时会产生 CO, 混合气浓度大及混合气不均匀都会使排气中的 CO 增加。HC 是燃料中未燃烧的物质, 由于混合气不均匀、燃烧室壁冷等原因造成部分燃油未来得及燃烧就被排放出去。NO_x 是燃料 (汽油) 在燃烧过程中产生的一种物质。PM 也是燃油燃烧时缺氧产生的一种物质, 其中以柴油机最明显。因为柴油机采用压燃方式, 柴油在高温高压下裂解更容易产生大量肉眼看得见的碳烟。为了抑制这些有害气体的产生, 促使汽车生产厂家改进产品以降低这些有害气体的产生源头, 欧洲和美国都制定了相关的汽车排放标准。其中欧洲标准是我国借鉴的汽车排放标准, 目前国产新车都会标明发动机废气排放达到的欧洲标准。

我们研制的机动车尾气在线遥测系统结合了 TDLAS 技术、紫外 DOAS 技术, 以及计算机自动识别技术, 可以在不影响车辆正常行驶的条件下,

在道边对机动车尾气成份进行实时遥测, 迅速、方便地获得大量机动车的实际尾气排放数据和车辆的信息, 从而快速筛选出那些高排放的车辆。

2.1 CO、CO₂ 测量

机动车排放尾气中 CO₂ 的排放浓度水平一般在 10% 左右, 而 CO 的排放水平一般在 1~3% 左右。而 CO₂ 和 CO 在近红外波段 1.57 μm 的吸收截面约为 10⁻²³ cm²。因此对于系统而言, 不需要很高的测量灵敏度。采用 1.5 μm 波段的半导体激光器作为光源的 TDLAS 系统, 通过调制光谱二次谐波检测技术, 可以满足对机动车尾气的在线实时遥测的需要^[1]。

TDLAS 技术利用激光能量被气体分子“选频”吸收形成吸收光谱的原理来测量气体浓度。具体来说, 半导体激光器发射出的特定波长的激光束穿过被测气体时, 被测气体对激光束进行吸收导致激光强度产生衰减, 激光强度的衰减与被测气体含量成正比, 因此, 通过测量激光强度衰减信息就可以分析获得被测气体的浓度^[2]。

强度为 I_0 , 频率为 ν 的单色激光, 通过长度为 L 的吸收介质后, 在接收端测得的强度为 I , 遵循 Beer-Lambert 吸收定律

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[\alpha(\nu)L], \quad (1)$$

其中 I_0 为没有气体吸收时的强度, L 为样品池的光路长度, $\alpha(\nu)$ 是吸收系数, 它与吸收截面的关系为

$$\alpha(\nu) = \sigma(\nu)N, \quad (2)$$

N 为吸收气体的浓度, 单位是单位体积内的分子数。

TDLAS 技术具有高光谱分辨率、高灵敏度和响应时间短的特点。与长光程技术结合, 可以实现 ppb 甚至是 ppv 浓度水平的痕量气体测量。

2.2 NO、HC 和烟羽测量

对于尾气中的 HC 和 NO 成分, 其排放水平分别大约是数百个 ppm 和数千个 ppm, 所以要选择其吸收比较强的谱线波段。NO 和 HC 在 200~250 nm 的紫外波段吸收非常强。而紫外差分技术发展比较成熟, 响应时间短, 适用于机动车尾气遥测。

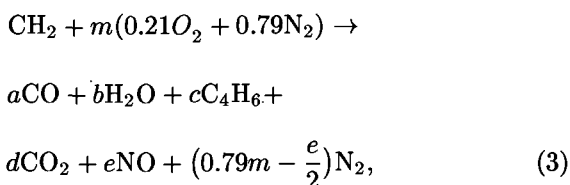
DOAS 是一种长光程空气质量监测技术, 光源为高压氙灯, 由抛物反射角准直成平行光出射, 经过 100~1000 m 的光程, 由接收端的导入光栅分光系统, 在出射狭缝处用光电倍增管探测, 得到吸收光谱。吸收光谱包含了大量来自大气分子、气溶胶的散射、灯光谱起伏、反射镜的光谱选择性等造成的宽光谱结构, 通过对吸收光谱进行高阶多项式拟合, 用原吸收光谱除以多项式拟合曲线得到吸收分子的特征差分光谱, 去除带宽成分影响, 将差分吸收光谱与实验室获得的吸收分子的标准浓度的参考光谱进行拟合, 计算出浓度。差分技术可消除大气湍流对信号的影响, 不同污染物之间的干扰和湿度、气溶胶的干扰, 能够满足连续检测和实时处理的要求。

在测量中, 用 CCD 能够测到 200~250 nm 范围内的光谱。对于 NO 和 HC 的分析, 也要选择波段。由分析得到在这个波段内 NO 有三条吸收峰, 吸收很强, 而 HC 在该波段的吸收为光谱范围较宽的带谱。由于在机动车尾气中 NO 的浓度也比较高, 因此只要选择一个吸收峰进行浓度反演就足够了, 这样 NO 的波段可以选择 225~230 nm, 而 HC 可以选择 NO 吸收的两个峰之间的波段, 即 217~223 nm。

2.3 燃烧方程的引入

在开放的环境下, 对行驶状态中的机动车尾气进行监测时, 由于尾气烟羽会迅速扩散以及过往机动车排气管高度的不同, 导致直接测量得到的各组分浓度绝对值不能真实反映机动车尾气排放状况。然而, 对于同一尾气烟羽来说, 各组分的相对体积比系数在其不同位置处分别都是相同的, 如 $Q=CO/CO_2$, $Q'=HC/CO_2$, $Q''=NO/CO_2$ ^[3]。

一般机动车燃油中主要含有碳和氢两种元素, 其比例约为 C:H=1:2, 空气中约含 21% 的 O_2 和 79% 的 N_2 。我们假定燃烧过程为不完全燃烧



其中, 认为燃烧后尾气中剩余的 HC 对光的吸收相当于丁二烯, 因此这里用 C_4H_6 及其同系物来表示。根据物质平衡定律

$$\text{碳原子平衡: } a + 4c + d = 1, \quad (4)$$

$$\text{氢原子平衡: } 2b + 6c = 2, \quad (5)$$

$$\text{氧原子平衡: } a + b + 2d + e = 0.42m. \quad (6)$$

由于 $a = dQ$ 和 $c = dQ'$, 根据 (4) 式, 得到

$$dQ + 4dQ' + d = 1, \quad (7)$$

$$\text{即 } d = \frac{1}{Q + 4Q' + 1}. \quad (8)$$

根据 (5) 式, 得到

$$2b + 6dQ' = 2, \quad (9)$$

$$\text{即 } b = 1 - 3dQ'. \quad (10)$$

再根据 (6) 式, 得到

$$dQ + 1 - 3dQ' + 2d + e = 0.42m, \quad (11)$$

上式两边同除以 d , 并根据 (8) 式, 得到

$$\begin{aligned} 0.42 \frac{m}{d} &= Q + \frac{1}{d} - 3Q' + 2 + \frac{e}{d} = \\ &Q + Q + 4Q' + 1 - 3Q' + 2 + Q'' = \\ &2Q + Q' + Q'' + 3. \end{aligned} \quad (12)$$

那么, 我们就可以知道, 在燃烧后排放的尾气中的 CO_2 的浓度 (不包括水) 为

$$f_{CO_2} = \frac{d}{a + c + d + \frac{e}{2} + 0.79m}, \quad (13)$$

将上式的分子和分母同除以 d , 可以得到

$$f_{CO_2} = \frac{1}{\frac{a}{d} + \frac{c}{d} + 1 + 0.5\frac{e}{d} + 0.79\frac{m}{d}} = \frac{1}{Q + Q' + 1 + 0.5Q'' + 0.79\frac{m}{d}}, \quad (14)$$

上式分子和分母同乘以 0.42, 得到

$$f_{\text{CO}_2} = \frac{0.42}{\frac{0.42Q + 0.42Q' + 0.42 + 0.21Q'' + 0.79(2Q + Q' + Q'' + 3)}{0.42}} = \frac{0.42}{2Q + 1.21Q' + Q'' + 2.79} \quad (15)$$

最后可以得到

$$\% \text{CO}_2 = \frac{42}{2.79 + 2Q + 1.21Q' + Q''} \quad (16)$$

$$\% \text{CO} = \% \text{CO}_2 \times Q, \quad (17)$$

$$\% \text{HC} = \% \text{CO}_2 \times Q', \quad (18)$$

$$\% \text{NO} = \% \text{CO}_2 \times Q''. \quad (19)$$

因此, 我们可以通过发动机的燃烧方程, 根据测量得到的烟羽中各组分的相对体积比来反演出其尾气排放的真实体积浓度值。

3 系统的组成和工作流程

该遥测系统主要由以下几部分构成: 近红外可调谐二极管激光吸收光谱测量系统, 它采用 TDLAS 二次谐波检测技术对行驶中的机动车辆排放尾气中的 CO 和 CO₂ 及其烟羽进行光谱测量; 紫外差分吸收光谱测量系统, 它采用 DOAS 技术, 对行驶中的机动车辆所排放尾气中的 HC 和 NO 进行光谱测量; 车牌摄像机及其控制, 该部分在机动车辆行驶过该系统时完成对过往车辆车牌图像的抓拍, 并通过牌照识别软件得到车辆牌照信息; 车辆测速仪, 它利用三点测量时间法来计算过往车辆速度及加速度信息及车辆长度信息, 并在系统工作中起到开始工作触发器作用。此外还有装在车辆计算机系统上的控制及数据采集、反演, 数据库分析软件 [4]。

实际系统的组成情况如图 1 所示, 系统工作时, 行驶过来的机动车在挡住测速仪的第一束光时, 一方面, 传感器开始测量计算机动车通过其不同光束的时刻, 并将数据传送给计算机, 进行机动车速度与加速度的计算; 另一方面, 传感器给系统控制软件发送触发信号, 驱动摄像机抓拍机动车牌照图片, 并传送给计算机。当机动车尾部离开速度与加速度传感器, 即传感器接收到其第三束光时, 传感器发送触发信号给系统控制软件, 驱动计算机即将开始通过采集卡对此后从光源发射与接收系统

传送的光谱信号进行记录, 完成机动车排放尾气中各成份浓度的反演, 并与相对应的车牌信息、速度与加速度信息等一起记录存档。其后, 系统等待下一次触发信号, 以对下一辆机动车进行遥测。

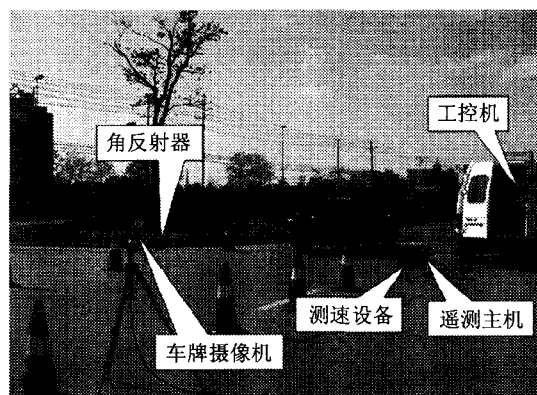


图 1 机动车尾气遥测系统工作示意图

Fig.1 Schematic of vehicle emissions remote sensing system

4 实验情况分析

我们在合肥的外场实验是在合肥市黄山上进行的。黄山路为双向 4 车道, 路面宽阔并有轻微坡度, 单向汽车流量高峰约为每小时 600 辆。



图 2 合肥黄山路外场实验

Fig.2 Field experiments at Huangshan Road, Hefei

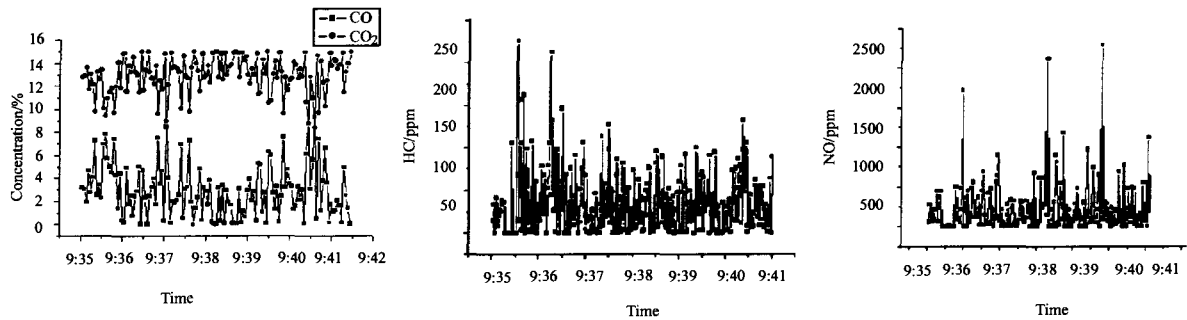


图 3 部分测试数据

Fig.3 Part of measurement data

黄山路上的实验持续了一周,测试的车辆超过 5000 辆,图 3 依次给出了部分机动车尾气 CO、CO₂、HC 和 NO 的数据。由数据可以看出,从 CO 和 CO₂ 的整体排放趋势来看,CO₂ 的排放浓度值均大于 CO 的排放浓度。尾气中 CO₂ 的平均排放浓度水平大约在 12.6% 左右。而 CO 的平均排放浓度水平大致在 3% 左右。HC 的排放水平从 0 到几千 ppm 不等,最高达到了上万 ppm。部分机动车尾气排放的 HC 值都在 100 ppm 以下,符合机动车尾气排放标准。而另一部分车辆的 HC 排放量在 100 ppm 以上,超出尾气排放标准,属于污染排放机动车辆。对于 NO 的测量结果,其排放水平从 0 到几千 ppm 不等,最大值也达到了上万 ppm 的水平。与 HC 测量结果不同的是,其中大部分车辆的 NO 排放低于 2500ppm,符合排放标准,并且在这部分车辆中又有占很大比重的车辆 NO 排放浓度低于 500 ppm,远低于排放标准。相反,部分车辆排放尾气中 NO 的含量超过 2500 ppm,甚至达到了 30827 ppm,超标车辆的尾气 NO 排放浓度相当高。

5 结论

同样的测试还在北京、重庆等大城市做过,大量外场实验验证了该机动车尾气系统有很好的工作稳定性和测量准确性,代表了机动车尾气快速检测

的一种发展方向。随着光电子技术的不断发展和软件分析的进一步改进,系统成本会越来越低,检测精度会越来越高,遥测法尾气检测必将得到越来越广泛的应用。

参考文献:

- [1] Lu Tongxing, Lu Yiqun. *Principle and Application of Laser Spectroscopy*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press. 1999: 170-172(in Chinese).
陆同兴, 路轶群. 激光光谱技术原理及应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 170-172.
- [2] Saija S, Romano D. A methodology for the estimation of road transport air emissions in urban areas of Italy [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**: 5377-5383.
- [3] Sjodin A, Persson K, et al. On-road emission factors derived from measurements in a traffic tunnel [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 1998, **20**: 147-158.
- [4] Tu Xinghua, Liu Wenqing, Wang Shimei, et al. Remote sensing of CO based on TDLAS [C]. The First International Conference of Remote Sensing Technology Using in Environment, 2003, 245-249(in Chinese).
涂兴华, 刘文清, 汪世美, 等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱技术遥测 CO₂ 气体浓度 [C]. 第一届环境遥感应用技术国际研讨会, 2003, 245-249.

作者简介: 王铁栋 (1974-), 男, 山东济南人, 博士研究生, 研究方向为环境光学与技术。