



王天友, 博士生导师, 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室教授、实验室常务副主任, 天津大学副校长, 兼任中国工程热物理学会燃烧分会常务理事、天津市内燃机学会副理事长。获国家杰出青年科学基金资助, 入选中组部“万人计划”科技创新领军人才, 入选天津市杰出津门学者计划。发表学术论文 100 余篇, 作为第一完成人获国家技术发明二等奖 1 项、省部级一等奖 2 项、中国专利优秀奖 2 项。主要研究方向包括内燃机燃烧与排放控制、清洁燃料及新型车用动力技术。针对内燃机缸内气流运动组织的科学问题和工程需求, 提出了变压差气流测试技术、面向燃烧的气流综合评价技术、气道参数化设计技术, 形成了内燃机进气“测试-评价-设计”关键技术体系, 相关成果在潍柴、玉柴、上汽、东风、七一一所、七〇所等一百余家汽车、内燃机生产科研单位得到了广泛的推广应用。在人才培养方面, 以第一完成人先后获得高等教育国家级教学成果二等奖和中国学位与研究生教育学会研究生教育成果奖各 1 项。



刘浩业, 张潇文, 任烁今, 等. 重型柴油车远程 OBD 系统数据分析研究进展综述[J]. 能源环境保护, 2023, 37(1): 58-64.

LIU Haoye, ZHANG Xiaowen, REN Shuojin, et al. Review on remote OBD system data analysis of heavy-duty diesel vehicle[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(1): 58-64.

## 重型柴油车远程 OBD 系统数据分析研究进展综述

刘浩业<sup>1</sup>, 张潇文<sup>2</sup>, 任烁今<sup>2</sup>, 王天友<sup>1, \*</sup>

1. 天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072;
2. 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津 300300

**摘要:** 重型柴油车是大气中氮氧化物和颗粒物的重要来源。远程 OBD 系统将 OBD 技术与无线通讯技术相结合, 将车辆的运行数据、排放状况和故障信息发送给监管部门, 可实现对重型柴油车全生命周期的排放监控。目前围绕重型柴油车远程 OBD 系统数据分析的主要研究方向包括: 超排车识别和故障诊断、车辆后处理系统作弊识别和实际道路环境下车辆性能特征分析, 本文对以上 3 个方向的研究进展进行了综述。超排车识别的关键问题是如何基于现有远程 OBD 系统采集的 NO<sub>x</sub> 浓度数据和有限的车辆状态数据识别车辆排放是否符合法规要求, 车辆后处理系统作弊识别的关键问题是如何平衡作弊识别算法的准确性和复杂性。实际道路环境下车辆性能特征分析为法规制定和动力技术升级提供重要参考。

**关键词:** 重型柴油车; 远程 OBD 系统; 超排车识别; 作弊识别

中图分类号: X831

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2023)0058-07

### Review on remote OBD system data analysis of heavy-duty diesel vehicle

LIU Haoye<sup>1</sup>, ZHANG Xiaowen<sup>2</sup>, REN Shuojin<sup>2</sup>, WANG Tianyou<sup>1, \*</sup>

1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Heavy-duty diesel vehicle is an important source of nitrogen oxides and particulates in the atmosphere. The remote OBD system combines OBD technology with wireless communication technology to send the vehicle operation data, emission status and fault information to the regulatory authorities, so as to realize the whole life-cycle emission monitoring of heavy-duty diesel vehicles. At present, the main research directions regarding the data analysis of the remote OBD system for heavy-duty diesel vehicles include high-emission vehicle identification and fault diagnosis, tampering detection of after-

收稿日期: 2022-11-13; 责任编辑: 蒋雯婷

DOI: 10.20078/j.eep.20230108

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体项目(51921004); 国家高层次人才青年项目(21FAA01116)

作者简介: 刘浩业(1989—), 男, 山东烟台人, 研究员, 研究方向为内燃机燃烧及排放控制。E-mail: liuhaoye@tju.edu.cn

通讯作者: 王天友(1970—), 男, 河南信阳人, 教授, 研究方向为内燃机燃烧及排放控制, 清洁燃料及新型车用动力技术, 内燃机缸内气流运动及混合气形成。E-mail: wangtianyou@tju.edu.cn

treatment system and analysis of vehicle performance characteristics under real-world driving conditions. This paper summarizes the research progress in the above three directions. The key issue of high-emission vehicle identification is to identify whether the vehicle emissions comply with emission regulation requirements based on the  $\text{NO}_x$  concentration data and limited vehicle status data provided by the remote OBD system. The key issue of the tampering detection of aftertreatment system is how to balance the accuracy and complexity of the tampering detection algorithm. The analysis of vehicle performance characteristics under real-world driving conditions provides an important reference for the formulation of emission regulations and the upgrading of powertrain technology.

**Keywords:** Heavy-duty diesel vehicle; Remote OBD system; High-emission vehicle identification; Tampering detection

## 0 引 言

重型柴油车是机动车污染排放的重要来源,其中重型柴油货车虽然保有量仅占全国机动车的约 3%,排放的氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和颗粒物(PM)却分别占全国机动车  $\text{NO}_x$ 和 PM 总排放量的 75.4%和 52.1%<sup>[1]</sup>。有效控制重型柴油车的污染物排放对我国大气环境治理具有重要意义。

On-Board Diagnostics (OBD),即车载诊断系统,能够很好地监测在用车的排放状态,是一种车辆排放监控和管理的有效工具<sup>[2]</sup>。OBD 最早在美国加州作为汽车排放的控制技术被推广应用,该系统后来被称为 OBD I 系统。OBD I 系统缺乏统一的标准,监测范围小,监测功能弱,只能检测与排放有关部件的连续性故障,无法检测渐进损坏的情况。随后,美国推出了下一代的 OBD 系统 OBD II,欧洲也推出了类似的 EOBD 系统<sup>[3]</sup>。OBD II 系统扩大了对零部件的监测范围,并对软硬件的标准进行了统一。

OBD I 和 OBD II 系统是有线传输系统,其数据用于提示车主车辆故障状态,但车主仍然可以在车辆存在高排放风险的情况下选择继续行驶。OBD III 系统(又称为远程 OBD 系统)将 OBD 技术与无线通讯技术相结合(如图 1 所示),将车辆的运行数据、排放状况和故障信息发送给监管部门的数据中心,能够实现对在用车车辆连续不间断的监测<sup>[4]</sup>。远程 OBD 系统能够很好地解决在用车年检制度下无法在两次年检之间的窗口期监测在用车排放的难题,也能避免年检舞弊行为造成的高排车漏检问题。

2018 年,我国生态环境部颁布 GB 17691—2018《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》和 HJ 1239—2021《重型车排放远



图 1 远程 OBD 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of remote OBD system

程监控技术规范》,要求从国六 b 阶段开始,强制重型柴油车在全寿命期内安装远程 OBD 终端且将数据发送给环境监管部门的数据中心,标志着中国成为首个强制实施远程 OBD 技术进行重型车排放远程监控的国家<sup>[5]</sup>。远程 OBD 系统作为一种非常有效的在用柴油车排放监测手段,将成为中国生态环境部构建“天地车人”一体化机动车排放监测体系中的重要一环<sup>[6]</sup>。

重型柴油车远程 OBD 系统采集、存储和向监控平台传输的数据主要是与排放有关的车辆状态参数数据。HJ 1239—2021《重型车排放远程监控技术规范》中明确规定了采用柴油机颗粒物捕集器和/或选择性催化还原(Selective Catalytic Reduction, SCR)技术的车辆(主要为柴油车)远程 OBD 系统采集车辆状态参数和 OBD 信息的数据项,见表 1 和表 2<sup>[7]</sup>。

表 1 中远程 OBD 系统采集了车辆  $\text{NO}_x$  排放的绝对浓度和与排放直接或间接相关的多个车辆状态参数,这些参数反映了车辆的运行状态和排放数值。表 2 中则是与故障诊断相关的数据项。远程 OBD 系统采集的数据规模庞大,但基本上都是未经处理的原始数据项,需要开发合适的数据分

析方法,才能使远程 OBD 系统的海量数据更好地用于车辆排放控制。本文总结了重型柴油车远程 OBD 系统数据分析方法的研究成果,对目前研究较多的超排车识别和故障诊断,车辆后处理系统作弊识别和实际道路环境下车辆性能特征分析 3 个主要的研究方向的研究进展进行介绍,为未来远程 OBD 系统数据分析研究的发展提供参考。

表 1 远程 OBD 系统采集数据项

Table 1 Data list of remote OBD system

序号	数据项
1	车速
2	大气压力
3	发动机净输出扭矩
4	摩擦扭矩
5	发动机转速
6	发动机燃料流量
7	上游 NO <sub>x</sub> 传感器输出
8	下游 NO <sub>x</sub> 传感器输出
9	SCR 入口温度
10	SCR 出口温度
11	柴油机颗粒物捕集器压差
12	进气量
13	反应剂余量
14	油箱液位
15	发动机冷却液温度
16	累计里程

表 2 远程 OBD 系统信息

Table 2 Information of remote OBD system

序号	数据项
1	OBD 诊断协议
2	故障指示灯状态
3	诊断支持状态
4	诊断就绪状态
5	车辆识别代号
6	软件标定识别代号
7	标定验证码
8	在用监测频率(IUPR)
9	故障码总数
10	故障码信息列表

## 1 超排车识别和故障诊断

研究表明,部分在用重型柴油车存在后处理系统老化、未及时加尿素或私自篡改后处理系统软硬件等问题,其实际排放远高于法规排放的限值,此类车被称为“超排车”。在远程 OBD 系统未广泛应用前,超排车只能在年检过程中被筛选出来,此时车辆可能已经在严重排放超标的状态下行驶了很长时间。远程 OBD 系统的首要任务是

对车辆是否存在超排进行全生命周期的实时监控。若能通过远程 OBD 数据定位超排车辆,就可以免去每年定期对所有在用车辆的年检,监管部门可以将有限的资源用于精准监控那些存在高排放风险的车辆,并及时发现高排放车辆迅速做出响应。

NO<sub>x</sub>和 PM 排放是重型柴油车的两类主要排放物,现有的重型柴油车上仅装有 NO<sub>x</sub> 传感器,远程 OBD 系统只能采集 NO<sub>x</sub> 的排放数据。杨柳含子等<sup>[8]</sup>对比了柴油公交车典型工况下的远程 OBD 系统和车载排放测量系统(Portable Emission Measurement System, PEMS)测量的单位里程的 NO<sub>x</sub> 排放,发现两者十分相近(平均差异小于 1%)。Chen 等<sup>[9]</sup>也发现,除少部分瞬态测试结果偏离外,远程 OBD 系统与 PEMS 测试的 60 s 移动平均的 NO<sub>x</sub> 浓度具有很高的 consistency(平均相对误差 -13% ~ +22%)。

远程 OBD 系统 NO<sub>x</sub> 排放数据的准确性为识别高排车提供了基础,但远程 OBD 系统采集的 SCR 上游和下游的 NO<sub>x</sub> 数据为 NO<sub>x</sub> 在发动机排气中的绝对浓度(ppm),而非法规中规定的单位里程排放量(g/km)或单位做功排放量(g/(kW·h)),不能直接研判车辆是否属于超排车辆。因此,能否基于远程 OBD 系统数据将 NO<sub>x</sub> 的绝对浓度进行适当地处理转换成为了研究的关键。

胡馨遥等<sup>[10]</sup>基于 38 量重型柴油车 3 个月的监控数据,提取了车辆的 NO<sub>x</sub> 浓度分布特征和排放因子,提出了通过 NO<sub>x</sub> 浓度分布特征驱动的单位功率和单位油耗的 NO<sub>x</sub> 排放因子的计算模型,与实际测量得到的排放因子的相关性系数分别达到了 0.971 5 和 0.914 1。

Wang 等<sup>[11]</sup>提出了一种基于在用远程 OBD 数据的综合监督系统。该系统集合了车辆排放因子计算、超排车识别和后处理系统作弊识别等多种功能。为了更精确地识别车辆是否满足法规中 PEMS 测试的限值,他们提出根据车辆类型将 OBD 数据流提取并拼接成符合法规规定的路况比例的类 PEMS 数据段,再通过法规规定的“功基窗口法”对拼接的类 PEMS 数据段进行数据处理。但目前的远程 OBD 数据缺少功基窗口法数据处理所需的发动机参考扭矩数据和发动机瞬态循环累计功数据(窗口划分依据),作者在文中并未提出该问题的解决办法。

针对上述问题,笔者<sup>[12]</sup>提出用远程 OBD 系统

数据项中的车辆油耗数据替代功基数据作为窗口划分和排放计算的基准参数的数据分析思路,并通过关联重型车 C-WTVC 循环的比功率和工信部百公里油耗(网络工况数据)建立车辆油耗和做功的关联方程,实现了油耗和做功之间的转化。笔者基于实车 PEMS 数据分别进行了功基窗口法和油耗窗口法的处理,发现两种方法具有非常接近的窗口划分和  $\text{NO}_x$  比功率排放结果。超排车识别算法如图 2 所示。

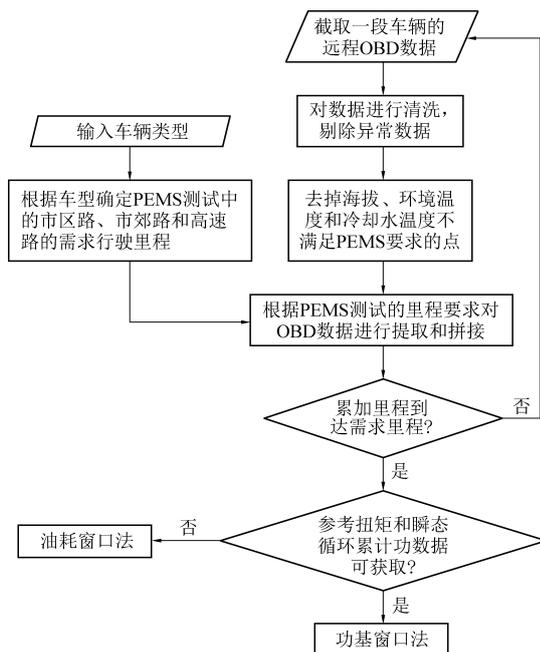


图 2 超排车识别算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high-emission vehicle identification algorithm

故障诊断是 OBD 系统的基本功能,远程 OBD 系统应用以前,常规 OBD 系统也具有故障诊断能力。存在故障的车辆通常都有潜在的高排放风险,Jiang 等<sup>[13]</sup>抽取了 45 辆配备 SCR 且发动机故障指示灯亮起的车辆,对这些车辆进行了维修。发现故障维修后车辆  $\text{NO}_x$  排放量可降低 46%~81%。因此,通过 OBD 系统的故障诊断功能提早确认车辆故障并进行维修,是有效降低重型柴油车排放的重要手段。

OBD I 系统只监测排放相关部件的电路是否存在故障,而 OBD II 系统还会通过分析部件信号的“合理性”判断车辆的故障情况。后来,更加复杂的带有逻辑判断的故障诊断方法也逐渐被加入到 OBD 的故障监测功能中<sup>[14]</sup>。关于常规 OBD 系统的故障码和诊断逻辑,可以参考文献<sup>[15]</sup>。远程 OBD 系统能够监测的数据项更多,为基于数据驱

动的复杂故障诊断提供了条件,特别是对于后处理系统的劣化问题,能更加精确地判断劣化的发生原因,提前对存在问题的车辆给与维修提示。赵曦<sup>[16]</sup>利用信息熵融合与神经网络技术对后处理系统进行劣化诊断,以温差、压差、 $\text{NO}_x$  转化效率作为参数,识别出了实际道路工况下 SCR 载体破损、SCR 载体破损、SCR 催化剂老化以及 SCR 尿素喷嘴堵塞 4 种劣化模式。孙科<sup>[17]</sup>采用现象回归的诊断算法和神经网络算法两种方法,开发了一套基于远程 OBD 数据的 SCR 系统效率诊断算法。

## 2 车辆后处理系统作弊识别

车辆后处理系统作弊(也称为后处理系统篡改)是一种常见的车辆违规现象。严格来说,车辆后处理系统作弊也是车辆故障的一种,但由于车辆后处理系统作弊是用户主动造成的,因此更加难以识别。欧盟 H2020 计划的子计划 DIAS 对车辆后处理系统作弊现象进行了非常详细的调查。调查结果显示,目前绝大部分针对重型柴油车的作弊是对 SCR 系统的作弊<sup>[18]</sup>,作弊的目的主要是降低喷射尿素的使用量和 SCR 的维修更换成本,大幅节约用车费用。目前对 SCR 系统的作弊手段主要有两类:ECU 重新编程和安装信号模拟器。通过这些手段可以在  $\text{NO}_x$  排放不达标的情况下仍产生具有低  $\text{NO}_x$  排放特征的数据流且不产生故障码,维持车辆的正常运行,躲避环保部门的追查。

对重型柴油车 SCR 系统的作弊会显著提高车辆的  $\text{NO}_x$  排放水平,污染大气环境。He 等<sup>[19]</sup>的研究发现有 SCR 系统作弊行为的国五和国六阶段的重型柴油车的  $\text{NO}_x$  排放可以达到甚至超过国三阶段重型柴油车。Chen 等<sup>[20]</sup>则发现不喷尿素的模拟作弊柴油车比正常柴油车单位油耗的  $\text{NO}_x$  排放量往往要增加一倍以上。因此,能够准确地识别后处理系统作弊车辆对于维持我国排放法规升级带来的大气环境改善意义重大。

在没有远程 OBD 系统之前,车辆排放作弊只有在年检的排放检验过程中才可能被发现。而远程 OBD 系统能实时发送车辆数据给环保部门的数据中心,这为实时通过数据流分析尽快发现车辆的后处理作弊行为并对相关车辆进行管控提供了条件,将大幅降低重型柴油车后处理系统尤其是 SCR 系统作弊对环境带来的负面影响。但是,无论是 ECU 重新编程还是安装信号模拟器,都是经过精心设计的数据流,即使是有经验的工程师

也不易通过阅读远程 OBD 数据快速判断。所以,通过设计算法对远程 OBD 数据进行分析判断作弊行为就成为了研究的核心问题。

Wang 等<sup>[16]</sup>构建的在用车远程 OBD 数据流的综合监督系统中提出了对 SCR 系统作弊车辆识别的算法思路:计算一段时间 SCR 系统的尿素消耗量,和车辆排入的 NO<sub>x</sub> 量之间的关系,通过判断该关系是否合理确认车辆是否存在作弊行为。Wang 等提出的作弊判定方法思路简单,且对计算能力的要求低,但严重依赖对尿素消耗量测量的准确性,现阶段远程 OBD 系统这方面数据的精度较差,使得该算法的准确性缺乏保障。

Roland 等<sup>[21-22]</sup>则提出了一套更加复杂的基于数据驱动的远程 OBD 数据的作弊检测方法。

他们提出的方法的核心是利用长短期记忆预测网络作为预测期模型,用该模型预测 4 个排放参数与实际值在检测器中进行比较,4 个预测器中分别监测 SCR 上下游的 NO<sub>x</sub> 浓度,氧传感器测量的氧气浓度和尿素量,再使用自适应多数加权投票方案来综合检测器的各个比较结果来判断作弊与否。Pisoska 等<sup>[23]</sup>则提出了一种检测车辆后处理作弊的综合方法 VetaDetect。VetaDetect 由多输入单输出自动回归移动平均模型组成,这些模型在闭环场景中与 Dempster-Shafer (D-S) 证据理论融合在一起进行作弊判定。上述方法通过多个数据集进行了有效性验证,具有较高的判定精度,但现阶段这些方法要实现实际应用还存在远程 OBD 数据项不足和算法过于复杂计算量过大的问题。

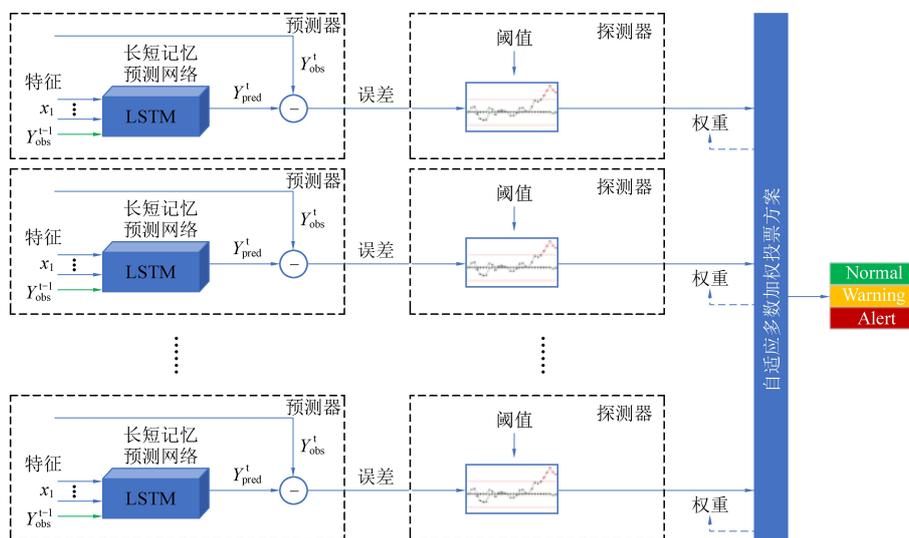


图 3 Roland 等提出的作弊检测方法示意图<sup>[21]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of tampering detection of aftertreatment system proposed by Roland et al<sup>[21]</sup>

### 3 实际道路环境下车辆性能特征分析

远程 OBD 系统数据不仅可以用于监控排放,还可用于反映车辆实际道路环境下的排放、油耗等性能特征。基于大数据的车辆性能特征分析能较为全面地反映车辆排放法规和技术升级带来的车辆排放和油耗特性变化,以及需要进一步改进的问题,为新法规的制定以及车辆动力技术升级提供重要参考。目前基于远程 OBD 系统数据的车辆性能特征分析研究主要包括排放特征分析和油耗特征分析两个方面。

#### 3.1 车辆排放特征分析

虽然国五和国六法规对重型车 NO<sub>x</sub> 排放有明确的限值规定,但其符合性测试都是在特点的循环工况下进行的,并不完全反映车辆在实际行驶

过程中的排放状况。远程 OBD 系统数据则为实际运行的车辆排放特征比较提供了一种便捷有效的途径。Wang 等<sup>[24]</sup>通过 67 辆重型柴油车的远程 OBD 数据计算了 NO<sub>x</sub> 的排放因子,发现国六阶段柴油车的排放因子(1.420 g/km)远小于国五阶段(3.894 g/km),并基于取样结果估算了国六排放法规的实施对我国 NO<sub>x</sub> 减排的贡献程度。张超<sup>[25]</sup>结合重型车 OBD 系统搭建了一套可以远程监控车辆实时运行工况和 NO<sub>x</sub> 排放的监控平台,通过平台数据分析了第五、国六排放阶段车辆 NO<sub>x</sub> 排放和 SCR 系统转换效率与车速、加速度、SCR 系统温度和比功率的关系,发现国六阶段重型车能在更低的排气温度下实现高的 SCR 转化效率。

另外,重型车混动化对排放和后处理系统的影响也受到了更多关注。杨柳含子等<sup>[26]</sup>通过远

程 OBD 系统数据研究了传统柴油公交车和混合动力柴油公交车的  $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}_2$  排放特征。发现混合动力柴油公交车由于低速低功率下的效率优势单位里程的  $\text{CO}_2$  排放显著低于传统柴油车,但单位里程的  $\text{NO}_x$  排放两类车处于相似水平。混合动力柴油公交车  $\text{CO}_2$  排放对车速变化不敏感,而两类车的  $\text{NO}_x$  排放在车速从 20 km/h 降低为 10 km/h 后都显著升高。杨强等<sup>[27]</sup>通过分析大量混合动力柴油公交车远程 OBD 数据获得了混合动力柴油公交车车速、发动机运行状态、环境温度对其 SCR 系统工作情况、SCR 催化剂后温度和尿素喷射量、 $\text{NO}_x$  排放浓度的影响规律。指出 SCR 系统未达到运行要求而不工作和 SCR 催化剂低温转化效率低是造成混合动力柴油公交车  $\text{NO}_x$  排放较高的主要原因。

### 3.2 车辆油耗特征分析

Zhou 等<sup>[28]</sup>研究了不同温度和海拔条件下的重型柴油车远程 OBD 数据中的油耗数据,发现在环境温度 10~20 °C 条件下车辆油耗最高,而随着海拔增加油耗也随之增加,高海拔条件下油耗对车速,比功率和转速的敏感性降低。

冯谦等<sup>[29]</sup>利用微观运行模态法和交通流法处理远程 OBD 系统采集的车辆瞬态油耗,再将油耗归一化到 C-WTVC 工况和 CATC 工况,发现车辆相对油耗因子在平均速度 0~30 km/h 的区间内随着平均速度的上升而急速下降,随后下降趋势变缓。相比 CATC 工况,归一化到 C-WTVC 工况的油耗与工信部认证油耗更加接近,验证了中国工况与我国交通特征较为吻合。

可以看到,虽然远程 OBD 系统数据量巨大,但基于系统数据开展的实际道路环境下车辆性能特征分析的研究数量并不多,现有的研究也不够深入。

## 4 结论和展望

远程 OBD 系统将 OBD 技术与无线通讯技术相结合,将车辆的运行数据、排放状况和故障信息发送给监管部门的数据中心,能够实现对车辆连续不间断的监测。现阶段针对重型柴油车远程 OBD 系统数据分析的研究主要包括超排车识别和故障诊断、车辆后处理系统作弊识别和实际道路环境下车辆性能特征分析。基于本文对 OBD 系统数据分析研究的总结,为后续研究和开发工作提出如下几点发展方向建议:

(1) 远程 OBD 系统提供的  $\text{NO}_x$  浓度数据不能

直接用于超排车的识别,应基于现有远程 OBD 系统数据流开发能够还原排放法规测试过程的超排车识别算法。可基于大数据对法规测试结果与 OBD 系统数据的算法处理结果进行对比验证,尽快统一基于远程 OBD 数据的超排车识别规范。

(2) 车辆后处理系统作弊识别方面,应调研我国重型柴油车常见的后处理系统作弊方法,并积极建立各种作弊方法的远程 OBD 数据库,基于数据驱动方法开发能够兼顾准确性和小算量的车辆后处理系统作弊识别方法。

(3) 实际道路环境下车辆性能特征分析能够为法规制定和动力系统升级提供重要的参考,但现阶段研究较少且不够深入。应适当开放远程 OBD 系统数据库入口,鼓励开展更多有针对性的车辆性能特征分析研究。

(4) PM 作为另一种柴油车的主要污染物,目前尚未作为远程 OBD 的数据项受到监控,应加快车用 PM 传感器的开发以及 PM 排放数据在远程 OBD 系统中的集成。

### 参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报 2021[R/OL].(2021-09-10)[2022-10-20].[https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202109/t20210910\\_920787.shtml](https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202109/t20210910_920787.shtml).
- [2] 潘朋, 颜伏伍, 方茂东. OBD 系统的现状及其发展趋势[J]. 交通节能与环保, 2007, 5: 36-39.  
PAN Peng, YAN Fuwu, FANG Maodong. The current situation and development trend of OBD System[J]. Transportation Energy Conservation and Environmental Protection, 2007, 5: 36-39.
- [3] 陈传灿, 徐聪. 汽车 OBD 系统发展综述[J]. 汽车工业研究, 2016, 8: 37-40.  
CHEN Chuancan, XU Cong. Review of automotive OBD system development[J]. Automotive Industry Research, 2016, 8: 37-40.
- [4] Shaojun Zhang, Pei Zhao, Liqiang He, et al. On-board monitoring (OBM) for heavy-duty vehicle emissions in China: Regulations, early-stage evaluation and policy recommendations[J]. Science of the Total Environment, 2020, 731: 139045.
- [5] 刘栋, 任烁今, 刘麟, 等. 重型柴油车整车 OBD 和  $\text{NO}_x$  控制系统验证方法研究[C]//2021 中国汽车工程学会年会论文集, 2021.
- [6] Lijun Hao, Hang Yin, Junfang Wang, et al. A multi-pronged approach to strengthen diesel vehicle emission monitoring[J]. Environmental Science Advances, 2022, 1: 37-46.
- [7] HJ 1239.1—2021, 重型车排放远程监控技术规范[S].
- [8] 杨柳含子. 基于车载诊断系统的机动车油耗与氮氧化物排放特征研究[D]. 北京: 清华大学, 2016: 44-61.

- YANG Liuhanzi. Evaluating vehicle fuel consumption and nitrogen oxides emission characteristics based on on-board diagnostic approach[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016: 44-61.
- [9] Ying Cheng, Liqiang He, Weinan He, et al. Evaluating on-board sensing-based nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) emissions from a heavy-duty diesel truck in China [J]. Atmospheric Environment, 2019, 216: 116908.
- [10] 胡馨遥, 徐为标, 黄成, 等. 基于远程在线排放监控系统的国V柴油车 $\text{NO}_x$ 排放特征研究[C]//第二十四届大气污染防治技术研讨会, 2021.
- [11] Tiantian Wang, Junjie Liu, Chuan Wan, et al. Remote supervision strategy based on in-use vehicle OBD data flow [C]. E3S Web of Conferences, 2021, 268: 01007.
- [12] Xiaowen Zhang, Jingyuan Li, Haoye Liu, et al. A fuel-consumption based window method for PEMS  $\text{NO}_x$  emission calculation of heavy-duty diesel vehicles: Method description and case demonstration[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325: 116446.
- [13] Yu Jiang, Jiacheng Yang, Yi Tan, et al. Evaluation of emissions benefits of OBD-based repairs for potential application in a heavy-duty vehicle Inspection and Maintenance program[J]. Atmospheric Environment, 2021, 247: 118186.
- [14] 简辉. 共轨柴油机SCR系统及其OBD功能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 6.
- JIAN Hui. Research of the SCR system and its OBD function for the Common Rail diesel engine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 6.
- [15] 王洪波. 汽车排放污染治理利器, 车载诊断OBD系统[J]. 汽车维修技师, 2020, 2-3: 115.
- [16] 赵曦. 基于信息融合的柴油机排气集成后处理系统劣化诊断[D]. 北京: 北京交通大学, 2020: 74-81.
- ZHAO Xi. Fault diagnosis of diesel engine integrated exhaust aftertreatment system based on multi-source information fusion [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020: 74-81.
- [17] 孙科. 重型柴油机SCR系统效率在线故障诊断算法开发研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 29-41.
- SUN Ke. Research on on-board diagnosis algorithm for SCR system efficiency of heavy diesel engine[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 29-41.
- [18] J A van den Meiracker, R Vermeulen. Smart adaptive remote diagnostic antitampering systems D3.2[R]. European Commission, 2020: 19-20.
- [19] Liqiang He, Shaojun Zhang, Jingnan Hu, et al. On-road emission measurements of reactive nitrogen compounds from heavy-duty diesel trucks in China [J]. Environmental Pollution, 2020, 262: 114280.
- [20] Ying Cheng, Liqiang He, Weinan He, et al. Evaluating on-board sensing-based nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) emissions from a heavy-duty diesel truck in China[J]. Atmospheric Environment, 2019, 216: 116908.
- [21] Roland Bolboacă, Pirooska Haller, Dimitris Kontses, et al. Tampering detection for automotive exhaust aftertreatment systems using long short-term memory predictive networks[C]//2022 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops, 2022.
- [22] Roland Bolboacă. Adaptive ensemble methods for tampering detection in automotive aftertreatment systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 105497-105517.
- [23] Pirooska Haller, Béla Genge, Fabrizio Forloni, et al. VetaDetect: Vehicle tampering detection with closed-loop model ensemble[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2022, 37: 100525.
- [24] Junfang Wang, Rui Wang, Heqi Yin, et al. Assessing heavy-duty vehicles (HDVs) on-road  $\text{NO}_x$  emission in China from on-board diagnostics (OBD) remote report data[J]. Science of the Total Environment, 2022, 846: 157209.
- [25] 张超. 基于监控平台重型车氮氧化物排放特性分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2020: 57.
- ZHANG Chao. Analysis of  $\text{NO}_x$  emission characteristics of heavy-duty vehicles based on monitoring platform [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020: 57.
- [26] Liuhanzi Yang, Shaojun Zhang, Ye Wu, et al. Evaluating real-world  $\text{CO}_2$  and  $\text{NO}_x$  emissions for public transit buses using a remote wireless on-board diagnostic (OBD) approach [J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 453-462.
- [27] 杨强, 胡馨遥, 黄成. 远程通讯技术的混动公交车SCR系统运行及 $\text{NO}_x$ 排放特征[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4463-4471.
- YANG Qiang, HU Qinyao, HUANG Cheng. Hybridelectric bus SCR system operation and  $\text{NO}_x$  emission characteristics based on remote communication technology[J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4463-4471.
- [28] Hua Zhou, Hongwei Zhao, Qian Feng. Effects of environmental parameters on real-world  $\text{NO}_x$  emissions and fuel consumption for heavy-duty diesel trucks using an OBD approach of environmental parameters on real-world  $\text{NO}_x$  emissions and fuel consumption for heavy-duty diesel trucks using an OBD approach[C]//International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting, 2018.
- [29] 冯谦, 胡杰, 张超, 等. 基于OBD远程法重型商用柴油车实际道路油耗特征分析[C]//2019中国汽车工程学会年会论文集, 2019: 797-803.