

基于车载远程监控的重型柴油车 NO_x 排放评估方法研究

吴春玲^{1,2}, 白晓鑫², 李旭², 刘卫林², 景晓军², 裴毅强¹, 高海洋²

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300072; 2. 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津 300300)

摘要:对某重型车的实际道路行驶过程中远程排放监控的 NO_x 数据和 PEMS 设备测试数据对比分析。结果表明, 两者的一致性较好, 远程监控的 NO_x 数据用于表征车辆实际道路的 NO_x 排放特征具备可信性和可行性。基于远程排放监控数据, 使用短行程重构 PEMS 法, 建立车辆工况曲线重构方法和基于功基窗口法的排放评估模型, 对车辆在实际道路上的排放进行评估计算, 并与 PEMS 测试结果对比验证。研究结果表明, 该短行程重构模型能有效识别车辆排放变化和超标情况, 可以作为国六标准在用重型车 NO_x 排放监控的新方法和手段。

关键词: NO_x; 远程监控; 重型柴油车; 车载 T-BOX; 评估方法

中图分类号: X511 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2023)03-0049-04

Study on Evaluation of NO_x Emission from Heavy-duty Diesel Based on Vehicle Remote Monitoring

WU Chun-ling^{1,2}, BAI Xiao-xin², LI Xu², LIU Wei-lin², JING Xiao-jun², PEI Yi-qiang¹, GAO Hai-yang²

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: The NO_x data from remote emission monitoring and PEMS test were compared and analyzed during actual road running of a heavy-duty diesel, and the results showed that they were consistent. The NO_x data from remote monitoring was reliable and feasible for characterizing NO_x emission characteristics on actual roads. According to remote emission monitoring data, the short trip reconstruction PEMS was used to establish vehicle operating condition curve reconstruction method and an emission evaluation model based on work-based window method. The vehicle emissions on actual roads were evaluated and calculated, and compared with PEMS test results for verification. The research results showed that the short trip reconstruction model could effectively identify changes in emissions and excessive emissions of vehicles, and could be used as a new method and means for monitoring NO_x emission from heavy-duty vehicles that met China VI emission standards.

Key words: NO_x; Remote monitoring; Heavy-duty diesel; On-board T-BOX; Evaluation method

生态环境部发布数据显示^[1], 2021 年全国柴油车氮氧化物(NO_x)排放量占汽车排放总量的 88.3%, 柴油车是汽车 NO_x 排放的主要贡献者。为强化重型车排放源头控制, 相关部门发布了《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB 17691—2018), 进一步降低了 NO_x 排放限值, 并增加了整车实际道路排放测试要求和限值。标准还创新性地提出了柴油车远程排放监控平台的要求^[2-3]。车辆应装备远程排放管理车载终端(车载 T-BOX), 并在全寿命期内按要求进行

数据发送, 由生态环境主管部门和生产企业接收。这为基于远程排放监控大数据, 通过建立在用车排放远程评估算法来精准识别高排放车辆奠定了基础。

研究人员基于远程排放监控数据开展了大量探索研究^[4-7]。研究表明, 大部分国六标准在用重

收稿日期: 2022-07-22; 修订日期: 2023-04-28

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2022YFC3703600)

作者简介: 吴春玲(1984—), 男, 湖北麻城人, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向为重型车排放检测与控制。

型柴油车的远程排放监控数据准确性较好,可以作为重型车排放监管的数据源。然而,目前尚缺乏成熟、可行的基于远程监控数据的在用车排放合规性评价方法,也没有建立相应的标准和法规,如何进行远程监管和执法亟须开展研究^[8-9]。今提出一种基于远程监控数据的短行程重构 PEMS 法,并通过 PEMS 测试验证该排放评估方法的可行性,以期在在用重型柴油车远程排放监控、替代在用车排放路检路查提供一种新方法。

1 远程排放监控系统

为对国六标准在用重型车进行排放监管和治理,生态环境部设计了车辆-企业平台-国家平台-地方平台的架构。通过平台的数据,环保监管机构可以实时监控车辆的运行和排放情况^[4-5],如对尿素添加和使用进行监控,对非法篡改进行监督,对车载诊断(OBD)故障进行实时监控,对实际道路行驶排放进行统计等。

1.1 试验设备和车辆

选取一辆符合国六 b 阶段排放要求的 N2 类柴油车进行试验。试验车辆运行里程超过 5 000 km,发动机额定功率为 139 kW,WHTC 循环功为 10.5 kW·h。试验采用奥地利 AVL 公司生产的 M. O. V. E. 型移动式排放测试系统(PEMS)进行实际道路行驶排放测试^[10]。设备分别采用不分光紫外线分析仪(NDUV)和排气流量计(EFM)实时测量试验中车辆 NO_x 浓度和排气流量。

1.2 试验条件和方案

PEMS 测量排气参数和环境参数,负荷、发动机转速等发动机运行参数通过 OBD 端口,以 1 Hz 的频率实时发送给 PEMS 设备和车载 T-BOX 终端。T-BOX 终端从发动机控制单元(ECU)获取的数据流信息为车速、大气压力、发动机最大基准扭矩、发动机净输出扭矩、发动机转速、摩擦扭矩、发动机燃料流量、SCR 下游 NO_x 传感器输出值、SCR 入口温度、SCR 出口温度、DPF 压差、反应剂余量、空气质量流量传感器读取的进气量、油箱液位、发动机冷却液温度、经纬度和累计里程等。

测试开始时发动机冷却液温度不超过 30 ℃,在天津实际道路上进行测试。测试车辆在实际道路上按照市区-市郊反复运行,运行时载荷为 20%~100%不等,路线和路况随机,每间隔约 10 h 使用车载 PEMS 设备进行 1 次 PEMS 排放测试。前

50 h 车辆排放正常,第 50 h~100 h,通过稀释尿素溶液使排放恶化,其排放接近 PEMS 限值 690 mg/(kW·h),第 100 h 后,尿素溶液恢复正常,第 165 h 车辆运行结束,共进行了 16 次 PEMS 试验。

1.3 数据处理和分析

利用功基窗口法对测试数据进行分析^[2,7]。以发动机进行台架瞬态循环(WHTC)测试时的循环功为基准,按照采样时间序列进行发动机瞬时功累加计算,当发动机累加瞬时功达到 WHTC 循环功时,即为 1 个功基窗口。以时间间隔 1 s 为移动步长,计算功基窗口至所有采样点结束,得到测试全部功基窗口。获取功基窗口后,将功基窗口平均功率比例 > 20% 的记为有效功基窗口,有效功基窗口须至少达到所有功基窗口的 50% (若低于 50%,则允许将功基窗口平均功率比例阈值以 1% 降低,直至有效功基窗口比例达到 50%,且功基窗口平均功率比例阈值不能低于 10%)。以有效功基窗口比排放的 90% 分位值来表征车辆在整个试验过程中的排放水平^[11]。

$$e_{\text{NO}_x} = \frac{\sum Q_{\text{NO}_x}}{W} \quad (1)$$

式中: e_{NO_x} 为每一个功基窗口的 NO_x 比排放, mg/(kW·h); $\sum Q_{\text{NO}_x}$ 为功基窗口内 NO_x 污染物的排放总量, mg; W 为功基窗口的发动机循环功, kW·h。

基于 T-BOX 数据,计算每个数据点的 NO_x 瞬时质量流量 Q_{NO_x} ^[6]:

$$Q_{\text{NO}_x} = \frac{w_{\text{NO}_x}}{10^6} \times \frac{Q_{\text{exh}}}{3.6} \times 1\,000 \times \frac{M_{\text{NO}_x}}{M_{\text{air}}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{exh}} = Q_{\text{fuel}} \times \rho_{\text{fuel}} + Q_{\text{air}} \quad (3)$$

式中: Q_{NO_x} 为 NO_x 瞬时排放质量流量, mg/s; w_{NO_x} 为 SCR 下游 NO_x 传感器输出值, 10⁻⁶; Q_{exh} 为排气质量流量, kg/h; M_{NO_x} 、 M_{air} 分别为 NO_x 和空气的相对分子质量; Q_{fuel} 为发动机燃料流量, L/h; ρ_{fuel} 为燃料密度, kg/L; Q_{air} 为发动机进气量, kg/h。

2 结果与讨论

2.1 数据一致性对比

由于车载 NO_x 传感器在低浓度区域测量误差相对较大^[12],为更真实地反映车辆在实际道路上的排放特征,基于机器学习算法对 T-BOX 上传的

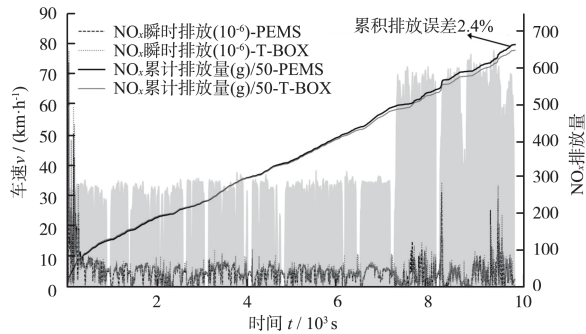


图 1 T-BOX 上传 NO_x 修正值与 PEMS 测量值一致性对比

Fig. 1 Comparison of consistency between NO_x correction values uploaded by T-BOX and PEMS test results

NO_x 测量值进行修正^[13], 结果见图 1。由图 1 可见, T-BOX 上传的 NO_x 值经修正后与 PEMS 测量的 NO_x 值一致性较好。在整个 PEMS 测试过程中, 两者的累积 NO_x 质量排放误差仅为 2.4%, Pearson 相关系数 R 为 0.92。这表明基于 T-BOX 上传的 NO_x 修正值可以较为真实、准确地反映车辆在实际道路行驶过程中的 NO_x 排放水平, 能够作为重型柴油车 NO_x 排放计算的基础数据。NO_x 累积排放误差计算方法如下:

$$\text{error} = \frac{\sum m_{\text{T-BOX}} - \sum m_{\text{PEMS}}}{\sum m_{\text{PEMS}}} \quad (4)$$

式中: $\sum m_{\text{T-BOX}}$ 为基于 T-BOX 上传的 NO_x 浓度修正值计算的整个试验过程中 NO_x 累积排放量, mg; $\sum m_{\text{PEMS}}$ 为基于 PEMS 计算的试验过程中 NO_x 累积排放量, mg。

2.2 短行程重构 PEMS 法

重型车实际使用过程中运行工况为随机, 并非按照国六排放标准中对 PEMS 试验要求进行, 故实际道路运行工况下的 NO_x 排放结果不能直接用作车辆是否排放超标的判据。能否建立车辆实际道路运行工况下的 NO_x 排放和国六标准排放计算与限值之间的对应关系, 是远程排放监控平台数据能否有效利用的关键。为此, 构建了短行程重构 PEMS 法^[14], 由重型柴油车实际道路运行的大量工况数据重构出符合标准要求的 PEMS 测试工况, 建立排放评估模型并进行 NO_x 排放评估。模型逻辑见图 2, 其主要过程为: ①对远程监控平台接收的车辆上传数据进行数据清洗, 识别和清除数据无效点和异常点; ②按照一定的运行时间进行数据

区间的划分, 区间内的运行数据按照短行程进行运动片段的切分和提取, 根据短行程的速度特征(平均速度和最大速度)进行运动片段分类, 分别放入市区片段库、市郊片段库和高速片段库; ③短行程重构, 从市区片段库中选取一个满足冷启动条件的片段作为开始, 然后随机从市区片段库中提取短行程, 考虑合理的边界条件, 与前一个片段相衔接, 直到满足市区部分的时间要求, 顺序完成市郊路和高速路的行程重构。重构出若干 PEMS 数据集须满足国六标准对 PEMS 测试的要求。

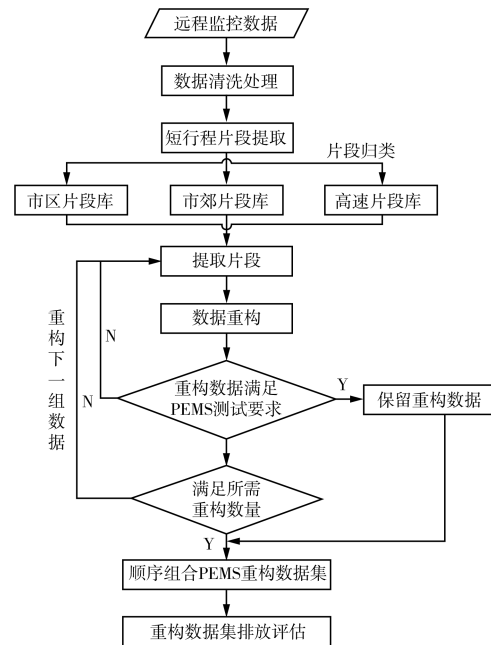


图 2 数据重构排放评估模型逻辑示意

Fig. 2 Logic schematic diagram of data reconstruction emission evaluation model

2.3 短行程重构 PEMS 模型排放评估结果分析

车辆在实际道路上进行了排放正常-排放恶化-排放恢复正常的试验, 累计运行时间 165 h, 期间共进行了 16 次 PEMS 试验, 基于功基窗口法对每次 PEMS 试验数据进行计算, 取其有效窗口比排放的 90% 分位值作为 PEMS 测试的排放评估结果。同时, 利用车辆运行 165 h 车载 T-BOX 上传至远程监控平台的数据, 以 20 h 行驶数据为 1 个评价区间, 以 10 h 为步长移动, 采用重构评估模型进行 PEMS 工况数据重构并计算其排放分布情况, 结果见图 3。由图 3 可见, 基于 T-BOX 数据重构排放评估模型计算结果与连续 PEMS 测试结果贴合较好, 能有

效表征车辆在实际道路 PEMS 测试的排放水平,反映其排放变化趋势,有效识别车辆排放超标情况。在车辆发生排放突然上升的情况下,如第 50 h 后,用于评估的数据区间一部分是车辆正常情况下获取的,一部分是车辆排放超标的情况下获取的,故该区间的排放评估计算结果虽分布较宽,但仍能反映该区间排放上升的趋势,可以作为重型车远程排放监控超标筛查和预警的方法。

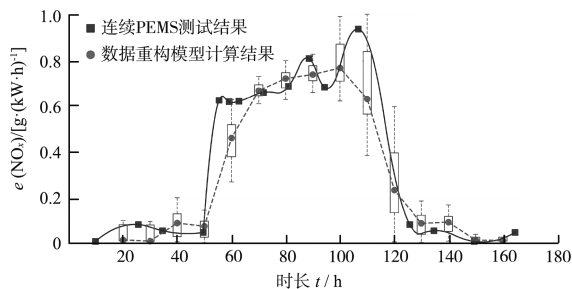


图 3 数据重构排放评估模型与连续 PEMS 测试结果比较

Fig. 3 Comparison of results between data reconstructed emission evaluation model and continuous PEMS test

3 结语

对比分析了某重型车实际行驶过程中远程排放监控的 NO_x 数据和 PEMS 设备测试数据的一致性,并进一步建立了在用柴油车 NO_x 排放评估模型,得出以下结论:

(1) 基于机器学习算法修正后的远程排放监控 NO_x 数据和 PEMS 设备测试数据一致性较好,两者的累积 NO_x 排放误差仅为 2.4%, Pearson 相关系数 R 为 0.92, 远程监控 NO_x 排放数据能够较为真实地反映车辆的实际排放特征。

(2) 短行程重构 PEMS 模型能有效识别车辆排放变化和超标情况,可以作为国六标准在用重型车 NO_x 排放监控的新方法和手段,为重型车远程监控平台的有效应用奠定了基础。

对于重型整车生产企业,可以通过企业平台数据实现在用车全生命周期排放水平的评估,对在用车辆的排放合规性进行评判,有利于识别车辆/车型排放缺陷,进行产品的迭代升级。对于政府环保监管部门,通过重型车监管服务平台数据实现高排放车辆识别和追踪,实现重型车排放精准管控和治理,对车型和车企逐步实现分类、分级管理^[15-16]。同时,通过长期的跟踪和评估,对数据质量高、排放低的车辆或车型可以免除排放年检。利用科技手

段促进监管提质增效,实现放管结合,提升机动车排放的管理服务水平。

[参考文献]

- [1] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报 2022[R]. 北京:生态环境部, 2022.
- [2] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段): GB 17691—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [3] 生态环境部. 重型车排放远程监控技术规范: HJ 1239—2021[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
- [4] 田苗, 王军方, 黄健畅, 等. 唐山市柴油车远程监控综合管控平台的开发及应用[J]. 环境科学研究, 2021, 34(1): 132-140.
- [5] CHENG Y, HE L, HE W, et al. Evaluating on-board sensing-based nitrogen oxides (NO_x) emissions from a heavy-duty diesel truck in China[J]. Atmospheric Environment, 2019, 216: 116908.
- [6] 孙一龙, 郭勇, 王长园. 重型车 OBD III 远程排放管理车载终端在线数据一致性研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2019, 48(2): 1-6.
- [7] ZHANG S, ZHAO P, HE L, 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.
- [8] 徐为标, 黄成, 任洪娟, 等. 基于远程在线监控车载终端的柴油车 NO_x 排放等级诊断研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(6): 2329-2339.
- [9] HOFMANN L, RUSCH K, FISCHERS, et al. Onboard emissions monitoring on a HD truck with an SCR system using NO_x sensors [C]//SAE. SAE World Congress. Detroit: SAE, 2004.
- [10] GIECHASKIEL B, CLAIROTTE M, VALVERDE-MORALES V, et al. Framework for the assessment of PEMS (Portable Emissions Measurement Systems) uncertainty[J]. Environmental Research, 2018, 166: 251-260.
- [11] HE L, HU J, ZHANG S, et al. Investigating real-world emissions of China's heavy-duty diesel trucks: can SCR effectively mitigate NO_x emissions for highway trucks? [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, 17(10): 2585-2594.
- [12] 许雪利, 司福帅, 马雁, 等. NO_x 传感器测量实际道路 NO_x 排放的试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2021, 38(1): 21-25.
- [13] 白晓鑫, 吴春玲, 李旭, 等. 基于机器学习的车载氮氧化物传感器浓度测量值修正方法: CN114662060B [P]. 2022-08-16.
- [14] 裴毅强, 吴春玲, 刘春涛, 等. 利用网传数据监控在用车辆 NO_x 排放的数据处理方法: CN114048639B [P]. 2022-04-22.
- [15] 刘登国, 刘娟, 黄伟民, 等. 基于交通信息的道路机动车排放 NO_x 模拟研究[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(3): 15-19.
- [16] 汪琦, 周俐峻, 俞美香, 等. 江苏省机动车排放监管现状与对策建议[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(4): 5-7.