

基于远程监控的重型柴油车实际道路 排放特征分析

刘加昂, 刘宗昊, 杨保华, 张妮, 刘树成

山东省机动车排气污染监控中心, 山东 济南 250100

摘要:为研究重型柴油车实际道路工况下的排放特征,基于远程监控云平台采集相关数据,分析在微观行驶工况下重型柴油车的 NO_x 排放特征;基于功基窗口法,分析选择性催化还原反应剂消耗正常、消耗固定,以及行驶在不同道路时重型柴油车的实际 NO_x 排放特征。结果表明:样本车辆行驶道路以市区、市郊为主,加速度和机动车比功率区间相对集中;微观行驶工况下,在相同速度区间内, NO_x 排放速率与加速度、机动车比功率呈正相关,车辆减速工况时 NO_x 排放速率明显低于加速时;不同速度区间内, NO_x 排放速率随加速度、机动车比功率增大呈先升后降趋势;基于功基窗口法,在 32 辆反应剂消耗正常的车辆中, NO_x 比排放差异明显,比排放合格(标准限值为 $4 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 车辆的占比为 40.6%,10 辆反应剂消耗固定车辆的 NO_x 比排放均超出标准限值,最大 NO_x 比排放是标准限值的 3.4 倍;不同道路行驶的车辆比排放分析结果表明,市区、郊区、高速路况车辆的平均 NO_x 比排放分别为 6.08、8.06、3.43 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,差异显著。

关键词:重型柴油车;微观行驶工况;机动车比功率;功基窗口法;排放速率;比排放

中图分类号:X73;TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)02-0078-08

引用格式:刘加昂,刘宗昊,杨保华,等.基于远程监控的重型柴油车实际道路排放特征分析[J].内燃机与动力装置,2025,42(2):78-85.

LIU Jiaang, LIU Zonghao, YANG Baohua, et al. Analysis of actual road emission characteristics of heavy-duty diesel vehicles based on remote monitoring data[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(2):78-85.

0 引言

随着我国生态文明建设的深入推进和公众环保意识的显著提高,人们对环境空气质量持续改善的需求更加迫切。重型柴油车尾气排放作为影响大气环境的重要污染源,其排放治理已成为社会各界高度关注的重大环境议题^[1-3]。重型柴油车排放的污染物主要为 HC、CO、 NO_x 和颗粒物,其中, NO_x 对大气环境危害大且治理难度大,因此降低 NO_x 排放是当前机动车污染控制的主要目标^[4]。随着排放标准的升级,重型柴油车新车的 NO_x 排放限值由 $2.00 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 降低至 $0.46 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ^[5-6],降低约 77%。研究表明,选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)系统是降低重型柴油车 NO_x 排放的主要技术途径^[7-8]。但实际应用中由于载体催化性能降低、控制策略设计水平低等因素制约,导致 SCR 系统性能下降,使在用重型柴油车的 NO_x 实际排放难以满足排放标准要求^[9-10]。因此,重点研究在用重型柴油车实际道路工况下的 NO_x 排放特征和排放水平,对持续提高空气质量具有重要意义。

目前,便携式排放测试系统(portable emissions measurement system, PEMS)是研究车辆实际道路排放

收稿日期:2025-02-12

基金项目:山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QF063)

第一作者简介:刘加昂(1992—),男,山东济宁人,工学硕士,工程师,主要研究方向为移动源污染物排放监控及管理,
E-mail: liujiaang@shandong.cn。

的主要测试手段,该系统考虑了市区、郊区、高速3种车辆行驶路况,使试验结果更接近车辆正常行驶工况^[11-12]。但现行PEMS采用的功基窗口法在实际应用中存在局限性:1)实际测试时满足要求的有效功基窗口的比例较低;2)允许试验车辆选择相对畅通的行驶路线,以便尽量消除车辆低功率、低负荷时的高排放。以上局限导致车辆总体 NO_x 排放计算结果偏低,无法对车辆实际排放进行客观评估^[13-14]。近年来,重型柴油车车载自动诊断(on-board diagnostics, OBD)远程监控技术趋于成熟,可实时批量获取重型柴油车行驶数据,使车辆实际道路排放特性研究成为可能。Tan等^[15]分析了多辆SCR重型柴油车车载传感器采集的 NO_x 浓度,发现车辆在实际道路行驶中的 NO_x 排放和实验室认证的 NO_x 排放存在很大差异。Cheng等^[16]和Zhang等^[17]通过车载监控系统采集重型柴油车的实时 NO_x 浓度,与PMES测试结果进行对比,发现两者的瞬时 NO_x 浓度和移动平均 NO_x 浓度均呈现高度一致的变化趋势,且具有显著的相关性。刘树成等^[18]利用重型柴油车远程监控平台采集的 NO_x 浓度,验证了车辆排放因子与日平均 NO_x 浓度的相关性,并证实可用日平均 NO_x 浓度表征整车污染物排放情况。刘宗昊等^[19]调研定期排放检验、遥感监测和远程监控在重型柴油车 NO_x 排放监管中的应用现状,并采用恒定转速法和自由加速法试验研究重型柴油车的 NO_x 排放规律,结果表明:远程监控测得的 NO_x 排放与实际情况相符,恒定转速法和自由加速法试验测得的重型柴油车 NO_x 体积分数能够真实反映重型柴油车的 NO_x 排放规律。Wang等^[20]利用OBD数据评估重型柴油车 NO_x 排放水平,发现国六重型柴油车的平均 NO_x 排放因子较国五重型柴油车降低约63%。

综合上述研究,在对车速、发动机转速、燃油流量、进气量、转矩、 NO_x 浓度等关键参数进行数据清洗后,远程监控数据可有效用于车辆发动机真实运行状态和排放水平的快速准确分析。因此,本文中分析多辆在用重型柴油车的远程监控关键数据,研究车辆实际道路运行工况、排放特征,评估在用重型柴油车的实际道路排放水平,为重型柴油车排气污染监管提供基础数据支撑,为制定重型柴油车 NO_x 减排策略提供参考。

1 数据和研究方法

1.1 试验数据

随机选取56辆主流品牌型号的在用国五重型柴油车,通过远程监控云平台获取所选车辆2023年8月至2024年7月间实际道路行驶的关键监控数据,包括车速、发动机转速、基准转矩、净输出转矩、摩擦转矩、进气流量、燃油流量、SCR入口温度、 NO_x 质量流量等。样本车辆包括市区内行驶车辆18辆、市区-郊区行驶车辆24辆、市区-郊区-高速行驶车辆14辆,涵盖了重型柴油车各类典型行驶路况。样本车辆的发动机排量为3.76~12.50 L,发动机循环功为14.7~56.3 kW·h。

1.2 研究方法

1.2.1 数据清洗

由于车辆实际行驶数据时间跨度大、车辆运行时间长、数据传输丢包等原因,导致部分车辆的关键监控数据缺失、无效,无法客观反映车辆运行状况,因此应对获取的数据进行数据清洗。本文中根据文献[6]中表Q.8规定的有效数据范围,剔除发动机连续运转时间低于1 h和关键监控数据连续3 min保持不变的数据。

1.2.2 微观行驶工况排放特征分析方法

机动车比功率(vehicle specific power, VSP)为车辆行驶过程中所需要的瞬时功率与质量的比,反映了车辆的真实行驶工况,与车辆的油耗、排放密切相关^[21],可由车辆的瞬时速度和加速度直接计算得到。车辆在第*i*秒的加速度 a_i 和比功率 $P_{\text{VSP},i}$ ^[22]的计算式分别为:

$$a_i = (v_i - v_{i-1}) / \Delta t, \quad (1)$$

$$\{P_{\text{VSP},i}\} = \{v_i\} (1.1 \{a_i\} + 0.132) + 0.000\,302 \{v_i\}^3, \quad (2)$$

式中: $\{P_{\text{VSP},i}\}$ 为以kW/t为单位的车辆在第*i*秒的比功率 $P_{\text{VSP},i}$ 的数值; $\{a_i\}$ 为以 m/s^2 为单位的车辆在

第 i 秒的加速度 a_i 的数值; $\{v_i\}$ 、 $\{v_{i-1}\}$ 分别为以 m/s 为单位的车辆在第 i 秒、第 $i-1$ 秒的速度 v_i 、 v_{i-1} 的数值; Δt 为时间间隔, s, 本文中 $\Delta t = 1$ s。

通过车辆排放模型计算车辆排放强度是预测车辆排放水平的重要手段。MOVES 排放模型是美国环境保护署发布的全尺度排放模型, 可广泛应用于宏观、中观和微观尺度的车辆排放分析。

本文中基于 MOVES 排放模型, 选取车辆瞬时速度、加速度、比功率为车辆行驶工况的表征参数, 建立重型柴油车行驶工况微观尺度模型。将研究的速度值范围划分为 $[0, 5)$ 、 $[5, 10)$ 、 $[10, 15)$ 、 $[15, 20)$ 、 $[20, 25)$ 、 $[25, 40)$, 共 6 个速度区间; 加速度值范围划分为 $[-1, -0.5)$ 、 $[-0.5, -0.1)$ 、 $[-0.1, 0)$ 、 $[0, 0.1)$ 、 $[0.1, 0.5)$ 、 $[0.5, 1)$, 共 6 个加速度区间; VSP 值范围划分为 $[-8, -4)$ 、 $[-4, -2)$ 、 $[-2, 0)$ 、 $[0, 2)$ 、 $[2, 4)$ 、 $[4, 6)$ 、 $[6, 8)$ 、 $[8, 12)$, 共 8 个 VSP 区间。将速度和加速度区间、速度和 VSP 区间进行组合, 分别形成 36 个速度-加速度区间和 48 个速度-VSP 区间, 每一个速度-加速度区间、速度-VSP 区间为一个微观行驶工况。另外, 将怠速工况设为一个单独的工况进行相关排放特征分析。

按照上述微观行驶工况, 分类汇总车辆远程监控数据, 计算每一个速度-加速度区间、速度-VSP 区间的平均 NO_x 排放速率。以 g/s 为单位的第 i 秒车辆 NO_x 排放速率 $R(\text{NO}_x)_i$ 的数值

$$\{R(\text{NO}_x)_i\} = 0.001\,587(\{q_{m,\text{air}}\} + \{\rho\}\{q_{V,\text{FUEL}}\})w(\text{NO}_x)_i, \quad (3)$$

式中: $\{q_{m,\text{air}}\}$ 为以 kg/h 为单位的车辆进气质量流量 $q_{m,\text{air}}$ 的数值; $\{q_{V,\text{FUEL}}\}$ 为以 L/h 为单位的车辆燃料体积流量 $q_{V,\text{FUEL}}$ 的数值; $w(\text{NO}_x)_i$ 为第 i 秒车辆排气中 NO_x 的质量分数; $\{\rho\}$ 为以 g/mL 为单位的柴油密度 ρ 的数值, $\{\rho\} = 0.83$ 。

车辆第 k 个微观行驶工况的以 g/s 为单位的 NO_x 平均排放速率 $\overline{R_k}$ 的数值

$$\{\overline{R_k}\} = \sum \{R(\text{NO}_x)_i\} / (3\,600N), \quad (4)$$

式中 N 为车辆在第 k 个微观行驶工况的远程监控数据数量。

1.2.3 功基窗口法

功基窗口法起源于欧洲, 并广泛应用于欧盟重型车排放标准中^[23]。不同于计算排放速率时采用的对所有 NO_x 排放数据进行算术平均的方法, 功基窗口法适用于欧洲瞬态循环 (European transient cycle, ETC) 或全球统一瞬态循环 (world harmonized transient cycle, WHTC)^[5], 将车辆实际道路 NO_x 排放数据划分成若干连续的窗口, 每个窗口的长度与发动机循环功相关, 分别计算各窗口内的 NO_x 比排放, 并设定阈值校验窗口有效性。

功基窗口由式(5)~(7)确定。

$$\{W_t\} = \pi\{M_t\}\{n_t\}\{T\} / (1.08 \times 10^8), \quad (5)$$

$$\sum_{i=t_{1,j}}^{t_{2,j}} W_{t,i} - \sum_{i=t_{1,j}}^{t_{2,j}-T} W_{t,i} \geq W_{\text{ref}}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=t_{1,j}}^{t_{2,j}} W_{t,i} \geq W_{\text{ref}}, \quad (7)$$

式中: $\{W_t\}$ 为以 kW·h 为单位的车辆瞬时功 W_t 的数值; $\{M_t\}$ 为以 N·m 为单位的车辆瞬时净转矩 M_t 的数值; $\{n_t\}$ 为以 r/min 为单位的发动机瞬时转速 n_t 的数值; $\{T\}$ 为以 s 为单位的数据采样周期 T 的数值, 本文中 $\{T\} = 1$; $t_{1,j}$ 为第 j 个功基窗口的起始时间, s; $t_{2,j}$ 为第 j 个功基窗口的终止时间, s; W_{ref} 为发动机循环功, kW·h。

以 g/(kW·h) 为单位的功基窗口 NO_x 比排放

$$E(\text{NO}_x) = \sum_j \sum_{i=t_{1,j}}^{t_{2,j}} (R(\text{NO}_x)_i T) / \sum_j \sum_{i=t_{1,j}}^{t_{2,j}} W_{t,i}. \quad (8)$$

为保证计算结果的有效性, 将功基窗口平均功率大于发动机最大功率 20% 的窗口称为有效窗口 (即功率阈值为最大功率的 20%), 有效窗口的比例应大于等于 50%; 若有效窗口比例低于 50%, 功率阈值可从最大功率的 20% 降为 19%, 以此类推, 在功率阈值最低为最大功率的 10% 的前提下, 使有效窗口占比不低于 50%。

2 结果及分析

2.1 车辆行驶特征分析

统计分析样本车辆不同速度、加速度、VSP 区间的时间占比,结果如图 1 所示。

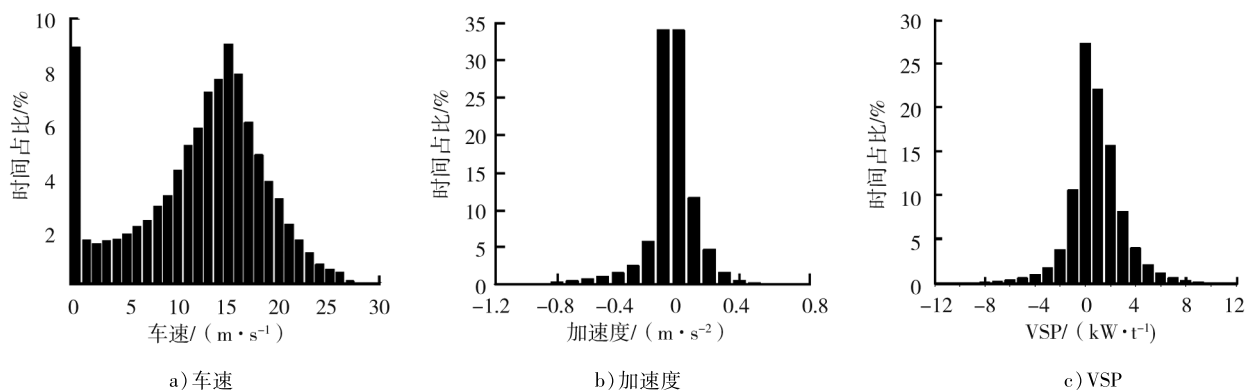
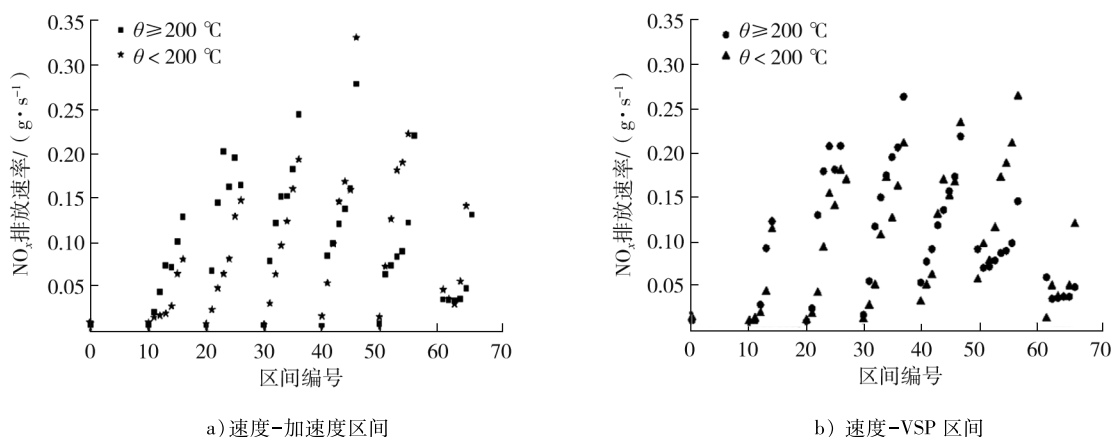


图 1 样本车辆不同速度区间、加速度区间、VSP 区间的时间占比

由图 1 可知:车辆的速度区间主要为 $0 \sim 30 \text{ m/s}$,怠速工况的时间占比为 8.95% ,速度为 $0 \sim 15$ 、 $>15 \sim 25$ 、 $>25 \sim 30 \text{ m/s}$ 的时间占比分别为 67.30% 、 32.20% 、 0.47% ,表明样本车辆实际行驶道路多以市区、郊区道路为主,经常通行高速公路的车辆因交通堵塞、道路维修、限速等原因导致车辆未达到预期快速通行效果;车辆加速度区间集中在 $-0.1 \sim 0$ 、 $>0 \sim 0.1 \text{ m/s}^2$,表明样本车辆频繁处于加减速工况,且驾驶风格相对平稳;车辆 VSP 区间为 $-3 \sim 3 \text{ kW/t}$ 的时间占比达到 89.50% ,其余 VSP 区间的时间占比向两侧锐减,因此,利用 VSP 作为车辆行驶工况表征参数研究车辆的排放水平时,应重点关注车辆在 VSP 集中区间内的排放状况。

2.2 基于微观尺度模型的车辆排放特征

根据试验经验,大多数 SCR 装置在入口温度超过 200°C 时 NO_x 转化速率超过 50% 。因此,以 200°C 作为 SCR 入口温度的阈值,分析 SCR 入口温度 θ 对 NO_x 排放速率的影响。利用式(3)(4)计算样本车辆在不同速度-加速度、速度-VSP 微观行驶工况和不同 SCR 入口温度下的 NO_x 排放速率,如图 2 所示。



注:1)0 为怠速工况的编号。

2)10、20、30、40、50、60 为速度区间 $[0, 5)$ 、 $[5, 10)$ 、 $[10, 15)$ 、 $[15, 20)$ 、 $[20, 25)$ 、 $[25, 40)$ 与相应加速度、VSP 区间形成的速度-加速度、速度-VSP 区间的起始编号。

图 2 不同微观工况区间、不同 SCR 入口温度下的 NO_x 排放速率

由图 2 可得以下结论。

1) 相同速度区间内, 车辆 NO_x 排放速率随加速度增大而增大, 最大排放速度出现在 $15 \sim 20 \text{ m/s}$, 为 0.33 g/s ; 车辆减速工况时的 NO_x 排放速率明显低于加速工况。原因为: 车辆加速时, 高压共轨系统瞬间喷射过量燃料, 缸内燃烧温度瞬间升高, 致使缸内 N_2 和 O_2 快速反应产生大量 NO_x , 但 SCR 还原剂喷射响应速率较慢, 部分 NO_x 未能被及时催化还原, 导致 NO_x 瞬时排放急剧增加; 车辆减速时, 进气量减少, 缸内 NO_x 产生速率降低, SCR 反应剂在高温下快速与 NO_x 反应, 使得 NO_x 尾排速率相对较低。

2) 对比不同的速度区间, 随着加速度增大, 车辆 NO_x 排放速率呈现先上升后下降的趋势。因此, 为有效降低车辆 NO_x 排放速率, 驾驶员应尽量平稳驾驶, 特别是在速度为 $15 \sim 20 \text{ m/s}$ 时更应减少急加速的暴力驾驶行为。

3) 车辆怠速时, SCR 入口温度对车辆 NO_x 排放速率几乎没有影响; 车速为 $0 \sim 15 \text{ m/s}$, $\theta \geq 200^\circ\text{C}$ 时的 NO_x 排放速率高于 $\theta < 200^\circ\text{C}$ 时; 车速超过 15 m/s , $\theta \geq 200^\circ\text{C}$ 时的 NO_x 排放速率明显低于 $\theta < 200^\circ\text{C}$ 时。

4) 基于速度-VSP 区间和基于速度-加速度区间的车辆 NO_x 排放特征基本一致, 在不同 SCR 入口温度下的排放特征也基本相同, 说明单独以加速度或 VSP 作为车辆微观行驶工况的表征参数均可反映车辆的排放特征; 与速度-加速度区间相比, 速度-VSP 区间的车辆 NO_x 排放速率略低, 且呈现的在不同 SCR 入口温度下的排放特征更加明显。

2.3 基于功基窗口法的车辆排放特征

2.3.1 不同反应剂消耗的车辆的排放特征

按照 1 a 内的 SCR 反应剂消耗情况, 将样本车辆分为反应剂消耗正常车辆 (32 辆) 和反应剂消耗固定车辆 (10 辆), 利用式 (5) ~ (8) 分析上述 42 辆车的 NO_x 比排放情况, 结果如图 3 所示。

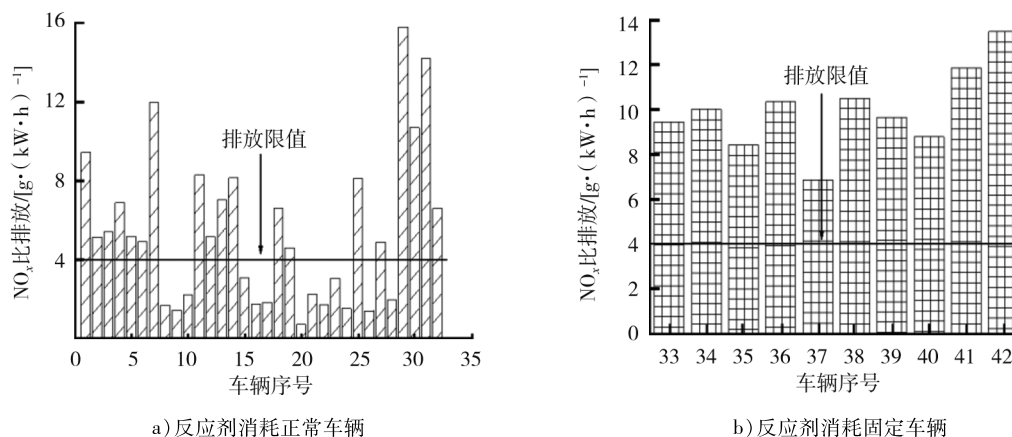


图 3 不同反应剂消耗情况下的 NO_x 比排放

由图 3a) 可知: 1) 反应剂正常消耗车辆的 NO_x 比排放差异显著, 最小 NO_x 比排放为 $0.68 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 最大 NO_x 比排放为 $15.82 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 平均 NO_x 比排放为 $5.40 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; 2) 参考文献 [24] 的规定, 设定车辆比排放不超过 $4 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 为排放达标车辆, 超过 $4 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 为排放不达标车辆, 32 辆反应剂正常消耗车辆中, 13 辆重型柴油车排放达标, 19 辆重型柴油车排放不达标, 达标率仅为 40.6%。

由图 3b) 可知: 所有反应剂消耗固定车辆的 NO_x 比排放均不达标, 平均 NO_x 比排放为 $9.96 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 是标准限值 2.5 倍, 最大 NO_x 比排放为 $13.6 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 是标准限值 3.4 倍。反应剂固定消耗的重型柴油车对环境质量影响极其严重, 生态环境监管部门应首要关注反应剂消耗固定的车辆, 将其纳入重点监管对象。

2.3.2 不同行驶路线的车辆排放特征

将车辆行驶路况分为市区、郊区、高速 3 种路况, 进一步分析不同行驶路况下车辆的 NO_x 排放特征, 结果如图 4 所示。由图 4 可知: 市区、郊区路况下, 车辆平均 NO_x 比排放分别为 $6.08 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $8.06 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 约为标准限值的 1.52 倍、2.01 倍; 高速路况下车辆平均 NO_x 比排放为 $3.43 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 低于标准限值。市区、郊区

路况下,受道路通畅程度、道路限速、车辆装卸货等因素影响,车辆需要频繁怠速和低速行驶,车辆 SCR 入口温度较低,导致 NO_x 的转化率较低,因此这两种路况下的重型柴油车 NO_x 排放较高。特别是行驶于郊区重型柴油车多为承担建筑施工材料运输的混凝土搅拌车和负责渣土清运的工程运输车,这两类车辆在装卸作业区和建筑工地内部运行时,往往需要长时间保持怠速状态,并频繁处于低速、高负荷的特殊工况,导致其平均 NO_x 比排放高于市区行驶车辆。

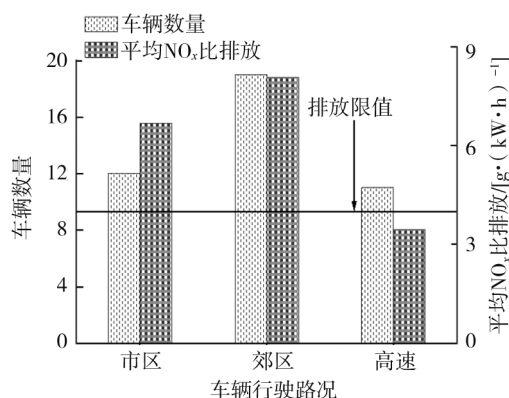


图4 不同行驶路况下的平均 NO_x 比排放

3 结论

采用随机抽样方法,选取 56 辆符合国五排放标准的主流品牌重型柴油车作为研究对象。通过车辆远程监控云平台,完整采集了样本车辆在 2023 年 8 月至 2024 年 7 月连续 12 个月的实际道路行驶工况数据,分析以上车辆在微观工况下的行驶特征及 NO_x 排放特性。

1) 样本车辆的实际行驶道路以市区、郊区道路为主,加速度和 VSP 区间相对集中;样本车辆频繁处于加、减速工况,且驾驶风格相对平稳。

2) 微观行驶工况下,车辆实际道路行驶中的 NO_x 排放速率受车辆加速度、VSP 影响明显,相同速度区间内 NO_x 排放速率随加速度、VSP 增大而增大,且车辆减速时 NO_x 排放速率明显降低;不同速度区间, NO_x 排放速率随加速度、VSP 先增大后减少。车辆怠速时,SCR 入口温度对车辆 NO_x 排放速率几乎没有影响;车速为 $0\sim 15\text{ m/s}$, $\theta\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 NO_x 排放速率高于 $\theta<200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时;车速超过 15 m/s , $\theta\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 NO_x 排放速率明显低于 $\theta<200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时。

3) 基于功基窗口法,反应剂正常消耗重型柴油车的实际道路 NO_x 比排放差异显著,平均 NO_x 比排放为 $5.40\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,仅有 40.6% 的车辆 NO_x 比排放低于限值;反应剂固定车辆实际道路 NO_x 比排放全部超标,平均 NO_x 比排放为 $9.96\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,该类车辆对环境空气污染严重,生态环境监管部门应重点加强对该类车辆的监管。

4) 经常行驶于市区、郊区、高速车辆的平均 NO_x 比排放差异明显,市区、郊区路况车辆的平均比排放约为标准限值的 1.52 倍、2.01 倍,监管部门应在提高城市道路通行效率、科学调整限速标准、优化短途运输车辆装卸区布局等方面采取措施,有效减少重型柴油车在低速、怠速等高排放工况下的运行时间,提高车辆 NO_x 转化率,降低在用重型柴油车排放。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2023 年)[J]. 环境保护, 2024,52(2):48-62.
- [2] ANENBERG S C, MILLER J, MINJARES R, et al. Impacts and mitigation of excess diesel-related NO_x emissions in 11 major vehicle markets[J]. Nature, 2017,545(7655):467-471.
- [3] YANG D Y, ZHANG S J, NIU T L, et al. High-resolution mapping of vehicle emissions of atmospheric pollutants based on large-scale, real-world traffic datasets[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19(13):8831-8843.
- [4] 郭海英. 产业结构调整对京津冀及周边地区空气污染物与 CO_2 排放的影响[D]. 大连:大连交通大学,2023.
- [5] 国家环境保护总局. 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国 III、IV、V 阶段): GB 17691—2005[S]. 北京:中国环境科学出版社,2005.
- [6] 生态环境部. 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:中国环境科学出版社,2018.
- [7] 贺泓,翁端,资新运. 柴油车尾气排放污染控制技术综述[J]. 环境科学,2007,28(6):1169-1177.
- [8] 闫安. 车用柴油机选择性催化还原(DOC/POC/SCR)系统的开发研究[D]. 济南:山东建筑大学,2017.

- [9] BORIBOONSOMSIN K, DURBIN T, SCORA G, et al. Real-world exhaust temperature profiles of on-road heavy-duty diesel vehicles equipped with selective catalytic reduction[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634:909–921.
- [10] DIXIT P, MILLER J W, COCKER D R, et al. Differences between emissions measured in urban driving and certification testing of heavy-duty diesel engines[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 166:276–285.
- [11] 孙清巍. 基于 PEMS 的重型车实际道路排放特性研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [12] 葛蕴珊, 丁焰, 尹航. 机动车实际行驶排放测试系统研究现状[J]. *汽车安全与节能学报*, 2017, 8(2):111–121.
- [13] 杨洪强, 帅石金, 胡京南, 等. 重型柴油车区域达标法和窗口平均值法对中国典型路况的适应性[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(6):699–705.
- [14] 郭兴, 胡京南, 鲍晓峰, 等. 重型车在用符合性的车载测试方法研究[J]. *环境工程技术学报*, 2011, 1(3):232–236.
- [15] TAN Y, HENDERICK P, YOON S, et al. On-Board sensor-based NO_x emissions from heavy-duty diesel vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(9):5504–5511.
- [16] CHENG Y, HE L Q, HE W N, 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.
- [17] ZHANG S J, ZHAO P, HE L Q, 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.
- [18] 刘树成, 张晓, 刘加昂, 等. 重型柴油车 NO_x 排放因子与其浓度相关性研究[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(3):545–553.
- [19] 刘宗昊, 刘树成, 刘加昂, 等. 重型柴油车 NO_x 排放检测现状及方法[J]. *内燃机与动力装置*, 2024, 41(1):35–41.
- [20] WANG J F, WANG R, YIN H Q, et al. Assessing heavy-duty vehicles (HDVs) on-road NO_x emission in China from on-board diagnostics (OBD) remote report data[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846:157209.
- [21] 于谦, 李铁柱, 任彦铭. 乘客载重量对柴油公交车尾气排放影响分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50(10):2009–2017.
- [22] JIMENEZ-PALACIOS J L. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing[D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [23] 吕立群, 徐龙, 尹航, 等. 重型柴油车实际道路 NO_x 排放分析方法研究[J]. *汽车工程*, 2024, 46(1):151–160.
- [24] 环境保护部. 重型柴油车、气体燃料车排气污染物车载测量方法和技术要求: HJ 857—2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.

Analysis of actual road emission characteristics of heavy-duty diesel vehicles based on remote monitoring data

LIU Jiaang, LIU Zonghao, YANG Baohua, ZHANG Ni, LIU Shucheng

Shandong Motor Vehicle Exhaust Pollution Monitoring Center, Jinan 250100, China

Abstract: To study the emission characteristics of heavy-duty diesel vehicles under actual road conditions, relevant data is collected based on a remote monitoring cloud platform to analyze the NO_x emission characteristics of diesel heavy-duty vehicles under micro driving conditions. Based on the power based window method, the normal and fixed consumption of selective catalytic reduction (SCR) reactants, as well as the actual NO_x emission characteristics of heavy-duty diesel vehicles driving on different roads are analyzed. The results indicate that the driving roads of the sample vehicles are mainly urban and suburban areas, with relatively concentrated acceleration and vehicle specific power (VSP) intervals. Under micro driving conditions, within the same speed range, the NO_x emission rate is positively correlated with acceleration and VSP. The NO_x emission rate during deceleration is significantly lower than that during acceleration. Within different speed ranges, the NO_x emission rate shows a trend of first increasing and then decreasing with the increase of

acceleration and VSP. Based on the power based window method, among 32 vehicles with normal reactant consumption, there is a significant difference in NO_x specific emissions, with 40.6% of heavy-duty diesel vehicles meeting the standard limit of $4 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ for specific emissions. 10 vehicles with fixed reactant consumption have NO_x specific emissions exceeding the standard limit, with the maximum NO_x specific emission being 3.4 times the standard limit. The analysis of the specific emissions of vehicles traveling on different roads shows significant differences in emissions among urban, suburban, and highway conditions, with average NO_x specific emissions of $6.08 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $8.06 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, and $3.43 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, respectively.

Keywords: heavy-duty diesel vehicle; micro driving condition; VSP; power based window method; emission rate; specific emission

(责任编辑:臧发业)

.....
(上接第 72 页)

flow injection of urea at different space velocity and temperatures on NO_x conversion efficiency, ammonia storage and ammonia leakage are investigated experimentally. The diesel engine used in the experiment employed an exhaust aftertreatment system with selective catalytic reduction (SCR) technology. The experimental results show that for a fixed air flow, the extent of ammonia leakage is related to changes in temperature. As the temperature increases, the catalytic reduction reaction accelerates and the ammonia leakage decreases. The temperature has a great influence on the catalytic reduction reaction rate. At a flow velocity of $10\,000 \text{ h}^{-1}$, the reaction rate of SCR at high temperature is much higher than that at low temperature. The flow velocity has a weak influence on the reaction rate. When the flow velocity changes from $10\,000 \text{ h}^{-1}$ to $40\,000 \text{ h}^{-1}$ at the same temperature, the average reaction rate within the SCR remained largely unchanged. However, increasing the flow velocity can accelerate the leakage of ammonia, thereby mitigating the benefits associated with the NO_x conversion.

Keywords: diesel engine; ammonia leak; conversion efficiency; reaction rate; flow velocity

(责任编辑:刘丽君)

.....
(上接第 77 页)

and the influence of the vehicle exhaust temperature and driving habits on the engine thermal load is determined. The cause of the fault is that the engine is prone to intense working conditions such as sudden acceleration and deceleration during operation, which lasts for a long time. The thermal load of the valve guide is increased, and the clearance of the valve guide is decreased, causing the valve to jam and impact the piston, resulting in engine misfire. The optimization is carried out by increasing the wrapping area of the valve guide. The simulation results show that the maximum temperature of the optimized guide is decreased from $245.3 \text{ }^\circ\text{C}$ to $208.5 \text{ }^\circ\text{C}$, and the maximum contraction of the valve guide is decreased from 0.0261 mm to 0.0143 mm . At the same time, the lower end diameter of the valve guide is reduced from 5.948 mm to 5.943 mm . A 300 hour rapid acceleration and deceleration test is conducted on the optimized engine, and no valve impact piston failure occurs, indicating normal engine operation.

Keywords: gasoline engine; exhaust valve; heat load; valve guide; piston

(责任编辑:胡晓燕)