

基于功基窗口法的国六重型柴油车实际道路排放研究

吕立群¹, 尹航², 王军方², 于全顺³, 葛蕴珊^{1*}, 王欣¹ (1.北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2.中国环境科学研究院, 北京 100021; 3.中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300)

摘要: 利用便携式排放测试系统(PEMS)对6辆典型国六重型柴油车开展了实际道路排放试验,并利用功基窗口法分析了重型车实际道路CO、NO_x和PN排放特性,结果表明:实际行驶过程中重型柴油车排放后处理装置能有效控制CO和PN排放,但NO_x排放存在显著不确定性.现行重型国六排放标准规定的功基窗口法在排放评估过程中最高可剔除46.68%的NO_x高比排放窗口,大幅低估了实际道路工况尤其是市区拥堵路况下的重型柴油车NO_x实际排放量,建议采用更加科学合理的数据处理方法评价重型车实际道路排放.

关键词: 重型柴油车; 实际道路排放; 国六排放法规; 功基窗口法

中图分类号: X51,TK427 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)08-3539-07

Research on real driving emissions from China-VI heavy-duty diesel vehicles based on work-based window method. LYU Li-qun¹, YIN Hang², WANG Jun-fang², YU Quan-shun³, GE Yun-shan^{1*}, WANG Xin¹ (1.School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2.Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100021, China; 3.China Automotive Technology Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China). *China Environmental Science*, 2021,41(8): 3539~3545

Abstract: Six typical China-VI heavy-duty diesel vehicles were selected for the real driving emission test with Portable Emission Measurement System (PEMS), and the CO, NO_x, and PN emission characteristics of heavy-duty vehicles were evaluated by the work-based window method. The results showed that the emission aftertreatment devices of heavy-duty diesel vehicles could effectively control the CO and PN emissions under real driving conditions, but there was significant uncertainty in NO_x emission. Up to 46.68% of the high specific NO_x emission windows were removed from the real driving emission evaluation by the work-based window method adopted in the current China-VI emission regulation, which led to serious underestimation of real NO_x emissions from heavy-duty vehicles under real driving conditions, especially in urban traffic congestion. In the subsequent revision of the emission regulations, a more scientific and reasonable evaluation method should be introduced to evaluate the real driving emissions of heavy-duty vehicles.

Key words: heavy-duty diesel vehicle; real driving emission; China-VI emission regulation; work-based window method

重型车在汽车保有量中虽然占比不高,但氮氧化物和颗粒物排放量巨大,分别占汽车排放总量的83.5%和90.1%^[1].为了减少重型车污染物排放对大气环境的危害,世界各国相继出台了各种机动车排放法规,经过几十年的努力,目前已形成了以欧盟、美国和日本为代表的三大排放标准体系^[2-3].标准所依托的试验测试方法主要由特定测试循环实现,而部分研究表明重型车实验室测试循环与实际道路排放结果之间存在明显差异,重型车实际道路污染物排放量被严重低估.

为缩小实际道路排放与实验室测试循环排放结果差异,将PEMS运用于汽车尾气排放评估的技术得到迅速发展.高继东等^[4-5]对轻型车、柴油车和混合动力公交车开展系列实际道路排放测试,结果表明PEMS设备在污染物测量方面具有良好的精度和可信度,同时发现测试车辆实际道路排放因子明

显高于实验室测试循环结果.Thompson等^[6]的研究揭示了相同结果:通过对比实验室测试循环、随机驾驶循环和实际道路排放测试的差异,使用PEMS设备开展实际道路排放可以覆盖更大范围的车辆行驶工况,更能反映车辆尾气污染物实际排放量.同时,国内外学者也对重型车实际道路排放特性开展了相关研究,本课题组葛蕴珊等^[7-8]利用PEMS设备测试了城市车辆和半挂车辆的实际道路排放,结果表明被测车辆实际道路排放因子远超实验室循环测试结果,空调负载变化对公交车排放因子影响巨大,半挂车NO_x和PN实际道路排放量被严重低估,Durbin等^[9]的研究揭示了相同的研究结果.另外,

收稿日期: 2020-12-11

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51806015);青海省重大科技专项(2019-GX-A6);移动源污染排放控制技术国家工程实验室开放基金资助项目(NELMS2018A17)

* 责任作者, 教授, geyunshan@163.com

Velders^[10]和 Ligterink 等^[11]的相关研究指出重型车的 NO_x 实际道路排放量至少被低估了 50%,排放法规的升级并没有达到预期的 NO_x 减排效果.

虽然型式认证测试循环不断优化,但固定且单一的特性使其仍无法有效覆盖车辆实际工况,最终导致重型车污染物实际排放量被低估.因此,研究重型车实际道路排放测试规程和数据处理方法对重型车尾气污染物实际排放量的控制有十分重要的意义.2018 年 6 月 22 日,生态环境部正式颁布重型国六排放标准^[12],将实际道路行驶测量方法(PEMS 试验)纳入到对重型车排放的监管中,并且采用功基窗口法评估重型车实际道路排放.重型国六排放标准所采用的功窗口法优缺点明显.一方面,功基窗口法的移动平均特性可以将 PEMS 试验的有限数据扩展出大量的“瞬态循环(WHTC)”,可大幅提高排放数据的利用率;另一方面,移动平均特性又会导致瞬态排放数据的计算权重发生变化,存在市区和高速行驶阶段计算权重显著偏低的问题^[13-14],可能导致功基窗口法对污染物实际道路排放量的低估.此外,重型国六排放标准对功率阈值的限制也增加了功基窗口法对实际道路排放评估结果的不确定性.

目前,鲜有文献揭示功基窗口法的移动平均特性和参数变化对重型车排放评估结果的影响.基于此,本研究按照重型国六排放标准中规定的实际道路排放测试规程,利用 PEMS 设备对 6 辆典型国六重型柴油车开展实际道路排放测试,采用功基窗口法计算并分析重型车污染物实际道路比排放,并对功基窗口法对重型柴油车实际道路排放评价的适用性开展研究.

1 车辆与方法

1.1 试验车辆

试验车辆为 6 辆典型国六重型柴油车,技术参数见表 1.测试车辆采用主流后处理技术路线,配备有氧化型催化器(DOC)、选择性催化还原(SCR)和颗粒捕集器(DPF),城市车辆#5 配备了氨逃逸催化器(ASC).为了减小因载荷条件和燃油品质变化带来的排放差异,所有测试车辆的载荷条件均设置为相应车辆最大载荷的 50%,试验燃油均采用同一批次满足国六标准的市售#0 柴油.

表 1 测试车辆技术参数
Table 1 Information of test vehicles

编号	类型	排量(L)	功率(kW)	后处理系统
#1	N ₃ [*]	5.132	170	DOC+SCR+DPF
#2	N ₃	5.132	170	DOC+SCR+DPF
#3	N ₂ [*]	3.6	86	DOC+SCR+DPF
#4	N ₃	12.596	410	DOC+SCR+DPF
#5	城市 [*]	8.8	252	DOC+SCR+DPF+ASC
#6	N ₃	12.4	353	DOC+SCR+DPF

注:N₂类车指最大设计总质量超过3500kg但不超过12000kg的载货车
辆;N₃类车指最大设计总质量超过12000kg的载货车辆;城市车辆指主要在城市运行的公交车、邮政车和环卫车.

1.2 试验设备

PEMS 设备采用日本 HORIBA 公司生产的 OBS-ONE 车载尾气分析装置,该系统主要由污染物排放测量模块、排气流量计、数据通讯模块和环境监控模块构成,具有实时获取车辆尾气中二氧化碳(CO₂)、一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物数量(PN)浓度、排气流量、车辆状态、外界环境参数和车辆位置信息等功能.PEMS 设备安装及载荷布置如图 1 所示.

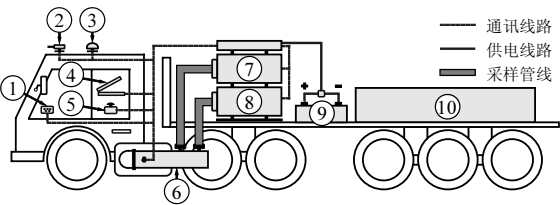


图 1 PEMS 设备安装示意
Fig.1 Installation of PEMS apparatus

1.OBD;2.温、湿度传感器;3.车辆定位系统;4.控制电脑;5.急停按钮;6.排气流量计;7.颗粒物测量模块;8.气态测量模块;9.电池;10.负载

1.3 试验要求

表 2 PEMS 试验工况构成
Table 2 Composition of road conditions for PEMS test

车辆类型	市区工况		市郊工况		高速工况	
	速度 (km/h)	占比 (%)	速度 (km/h)	占比 (%)	速度 (km/h)	占比 (%)
N ₂	15~30	45±5	45~70	25±5	>70	30±5
N ₃	15~30	20±5	45~70	25±5	>70	55±5
城市	15~30	70±5	45~70	30±5		

PEMS 试验道路工况包括:市区、市郊和高速工况,不同类型车辆的道路工况构成要求不同,道路工

况占比由行驶时间确定,详细规定如表2所示.PEMS试验除满足工况构成和速度要求外,还需要符合海拔高度要求,试验开始点和结束点的海拔高度差应低于100m,车辆累计正海拔高度增加量应低于1200m/100km.

1.4 数据预处理

按照重型国六排放标准要求,首先对试验过程中记录的污染物浓度、排气流量、车辆定位信息、环境参数和其他瞬态数据进行时间对正.时间对正后需要对无效数据进行剔除,包括:设备检查及零点漂移核查期间的数据,未满足环境条件的数据和冷启动期间的数据.未满足环境条件的数据指海拔高度超过2400m或温度低于-7℃的数据;冷启动期间的数据指发动机点火后直至冷却液温度达到70℃或冷却液温度5min内变化不超过2℃期间的数据,以先到者为准.

1.5 功基窗口法

功基窗口法不对所有的排放数据进行平均计算,该方法按照发动机台架测试循环功将实际道路排放测试数据划分为不同子集,分别对子集进行排放质量计算.这些子集称为窗口,重型国六标准规定以车辆发动机对应的WHTC循环功作为划分窗口的依据,并以1Hz的频率对测试数据进行移动平均计算.

1.5.1 窗口划分 如图2所示,第*i*个窗口的周期($t_{2,i}-t_{1,i}$)由式(1)判断,终止时刻 $t_{2,i}$ 由式(2)判断:

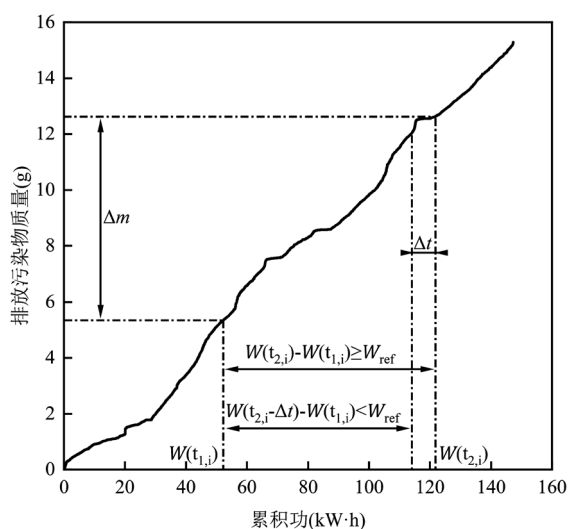


图2 功基窗口法示意

Fig.2 Work-based window method diagram

$$W(t_{2,i}) - W(t_{1,i}) \geq W_{\text{ref}} \quad (1)$$

$$W(t_{2,i} - \Delta t) - W(t_{1,i}) < W_{\text{ref}} \quad (2)$$

式中: $W(t_{j,i})$ 为从开始到 $t_{j,i}$ 时间内的发动机累计功,kWh; W_{ref} 为WHTC循环功,kWh; Δt 为数据采样周期,1s.

1.5.2 窗口比排放 窗口比排放指一个窗口内所有工况点的污染物质量或数量与窗口内发动机累计功的比值 e_p [g/(kW·h)]或[个/(kW·h)],按照式(3)和式(4)计算:

$$m_p = \sum_{t=t_{1,i}}^{t_{2,i}} m_{\text{gas/PN},j} \quad (3)$$

$$e_p = \frac{m_p}{W(t_{2,i}) - W(t_{1,i})} \quad (4)$$

式中: m_p 为窗口内污染物的排放总质量或数量,g或个; $W(t_{2,i}) - W(t_{1,i})$ 为第*i*个平均窗口的发动机循环功,kWh.

1.5.3 试验通过判定 功率阈值用于判定污染物窗口的有效性,平均功率百分比超过功率阈值的窗口为有效窗口.功率阈值的初始值为20%,有效窗口的占比超过50%,判定PEMS试验有效.若有效窗口比例低于50%,按照1%的步长降低功率阈值限制,若功率阈值降低至10%而有效窗口比例仍未超过50%,则判定PEMS试验失败.

1.5.4 排放合规判定 重型国六排放标准只对有效窗口进行排放合规判定,要求90%以上的有效窗口污染物比排放低于排放限值要求.将各有效窗口的污染物比排放按照升序排列,若90%分位的污染物窗口比排放低于排放限值要求,则说明车辆实际道路排放合格.

2 结果与分析

2.1 污染物排放因子

测试车辆不同工况下 NO_x 、CO和PN的平均比排放和功基窗口法计算得到的窗口比排放结果分别如图3、图4和图5所示.

重型国六排放标准规定柴油车 NO_x 排放限值为0.69g/(kW·h),如图3所示,测试车辆实际道路 NO_x 排放因子随车速提高明显降低,市区工况下,试验车辆的 NO_x 排放因子显著高于市郊和高速工况,最高为2.02g/(kW·h),超过国六排放限值1.93倍,而市郊、高速和完整行程的 NO_x 排放因子则远低于排放限值要求.造成排放因子差异的主要原因是重型柴油

车在市区工况的怠速比例高、发动机负荷低,导致 SCR 入口温度低于或接近尿素水解温度,大幅降低 SCR 装置效能,导致市区工况下 NO_x 瞬时排放量较大^[8,15].而市郊和高速工况下,虽然发动机负荷提高,缸内燃烧温度升高致使 NO_x 原排浓度较大,但排气温度的升高使 SCR 装置处于正常工作状态,可实现 90%以上的转化效率,使柴油车尾气 NO_x 排放量大幅降低^[16].

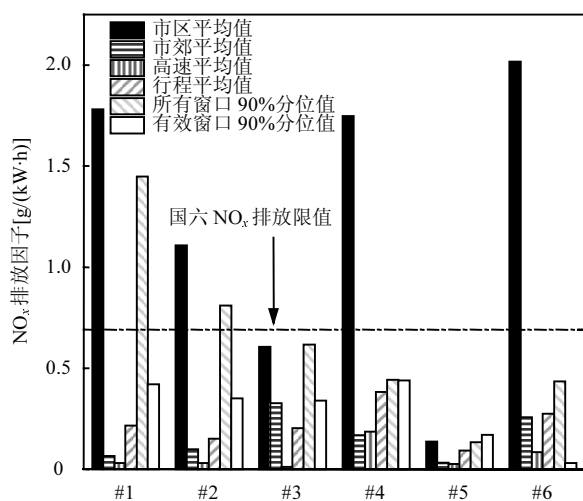


图3 NO_x 排放因子对比

Fig.3 Comparison of NO_x emission factors

值得注意的是,功基窗口法获得的所有窗口和有效窗口的 90%分位 NO_x 比排放差异巨大,所有窗口的 90%分位 NO_x 比排放最高可达 $1.45\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,而有效窗口的 90%分位 NO_x 比排放最高仅为 $0.44\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$.这一差异表明,现行功基窗口法规定的功率阈值在判定窗口有效性的过程中剔除了大量实际道路工况中 NO_x 瞬时高排放工况点,导致重型柴油车实际道路 NO_x 排放评估结果被低估.

重型国六排放标准规定柴油车 CO 和 PN 排放限值分别为 $6.0\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 和 1.2×10^{12} 个/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$,由图 4 和图 5 可知,CO 和 PN 排放因子最高分别为 $1.46\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 和 7.67×10^{10} 个/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$,远低于相应排放限值要求.一方面,这表明目前的排放后处理技术路线能够在实际道路工况下有效控制重型柴油车 CO 和 PN 排放;另一方面,这表明未来重型柴油车排放标准仍有较大的收紧空间.

高速工况的 CO 排放因子低于市区和市郊工况结果,而 PN 排放则与 CO 排放结果正相反.一方面,高速工况下柴油机缸内混合气相对较浓,细颗粒

物生成量急剧增加;另一方面,排气流速的提高导致颗粒物在 DPF 装置内滞留时间缩短,导致车辆实际 PN 排放升高^[15,17].虽然高速工况相较市区和市郊工况发动机负荷增加,缸内局部缺氧致使不完全燃烧加剧、CO 排放量增加,但高速工况下发动机功率大幅提高,最终导致基于功的 CO 排放因子反而降低^[8].

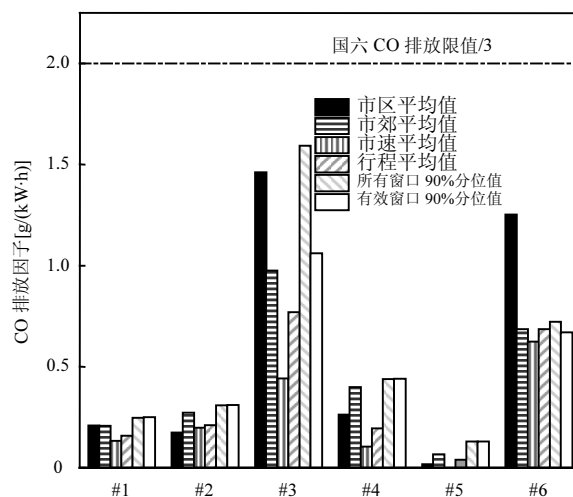


图4 CO 排放因子对比

Fig.4 Comparison of CO emission factors

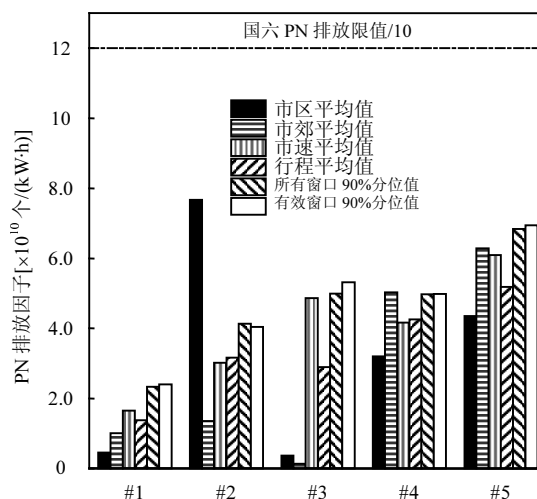


图5 PN 排放因子对比

Fig.5 Comparison of PN emission factors

需要注意的是,功率阈值的限制对 CO 和 PN 窗口比排放结果影响十分有限.主要原因是重型柴油车市区和市郊工况下的 CO 和 PN 比排放虽然高于高速工况,但差异有限.功率阈值的限制导致实际道路 CO 和 PN 排放评估时大量低功率窗口被剔除,但各 CO 和 PN 窗口比排放之间差异并不明显,有效窗

口和所有窗口的 CO 和 PN 比排放的均值和离散程度并没有发生明显改变,最终导致 90%分位比排放差异有限。

排放结果表明,6 辆重型柴油车的 NO_x 、CO 和 PN 实际道路排放虽然差异明显,但均符合重型国六排放法规要求。目前主流柴油机后处理系统对 CO 和 PN 实际道路排放控制有效,而 NO_x 实际道路排放虽然满足法规要求,但存在超越法规限制的风险。功基窗口法规定的功率阈值限制,对重型柴油车实际道路 CO 和 PN 排放评估影响有限,但很可能导致实际道路 NO_x 排放量的严重低估。

2.2 功率阈值影响

各污染物窗口比排放表明,功率阈值的限制对功基窗口法评估实际道路 CO 和 PN 排放评估影响有限,但对实际道路 NO_x 排放能否达标有显著影响,因此本节仅讨论功率阈值对 NO_x 窗口比排放结果的影响。

图 6 展示了测试车辆 NO_x 窗口比排放的分布特性,图中竖线为对应的功率阈值,右侧为参与排放合规判定的有效窗口;图中横线对应有有效窗口 90%分位 NO_x 比排放值,横线上的 NO_x 窗口比排放不受法规限值约束;横线和竖线围成的右下方灰色区域为功基窗口法实际约束到的 NO_x 窗口比排放,图 6 中百分比表示各区域内窗口数量的占比。

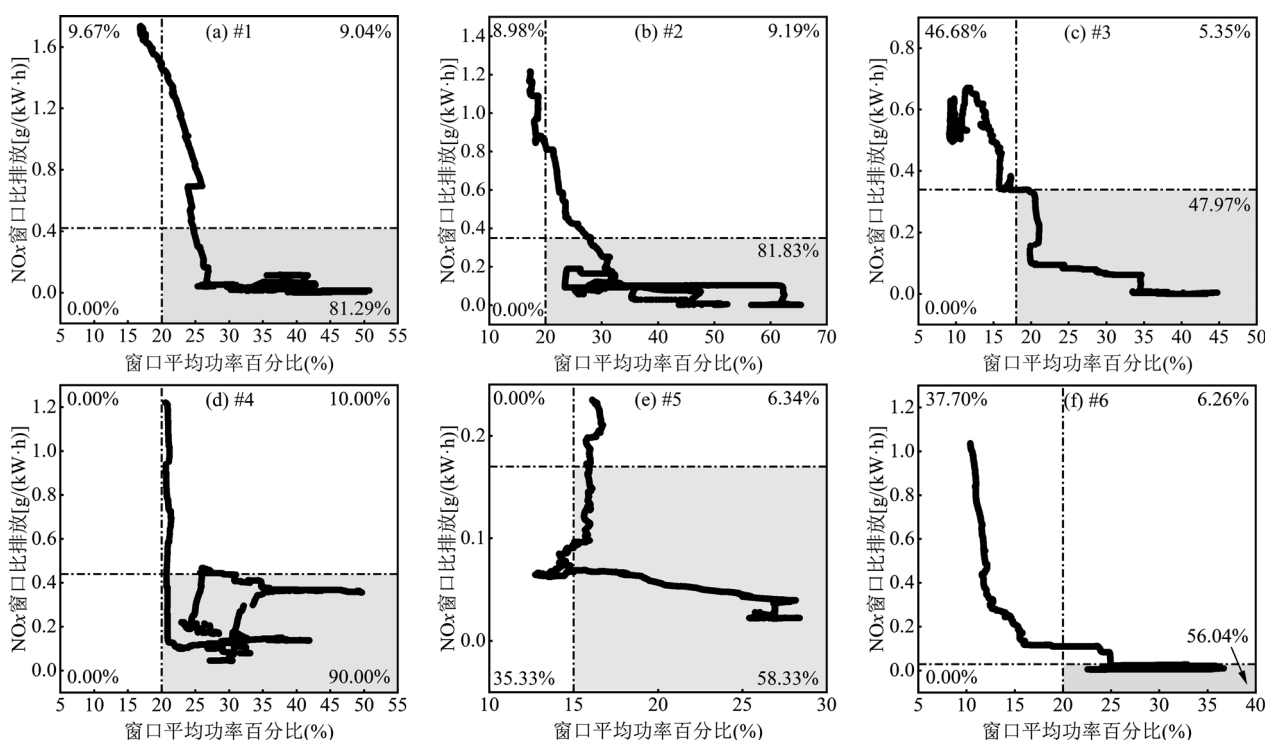


图 6 实际道路 NO_x 窗口比排放分布特性

Fig.6 Distribution characteristics of real-world NO_x emission factors of windows

分析图 6 可知,功率阈值限制导致被剔除的窗口占比存在不确定性。如图 6(a)、图 6(b)和图 6(e)所示,#1 车、#2 车和#4 车的有效窗口占比分别为 90.33%、91.02%和 100%,表明绝大多数窗口参与了 NO_x 排放判定,但同时#1 车和#2 车分别有 18.71%和 18.17%的 NO_x 窗口比排放是不受法规限值约束,且其中大部分 NO_x 窗口比排放超标,这也证明了图 3 中#1 车和#2 车所有窗口和有效窗口 90%分位 NO_x 比排放的明显差异,是功率阈值在判定有效窗口过

程中剔除高 NO_x 比排放窗口造成的。

由图 6(c)、图 6(d)、图 6(f)可知,功率阈值的限制导致#3 车、#5 车和#6 车分别有 46.68%、35.33%和 37.70%的窗口在实际道路 NO_x 排放评估中被剔除,且绝大多数为 NO_x 高比排放窗口。不难发现,#3 车和#6 车在实际道路 NO_x 排放评估中被剔除窗口的 NO_x 比排放均高于对应有有效窗口 90%分位 NO_x 比排放,这些窗口的缺失直接导致#3 车和#6 车在排放合格判定中 90%分位 NO_x 窗口比排放分别降低了

44.83%和 93.10%,降幅巨大.以上结果说明,功率阈值的限制给功基窗口法评估实际道路 NO_x 排放带来了不确定性,很可能大幅低估重型柴油车实际道路 NO_x 排放因子.

图 7 对应测试车辆的 NO_x 瞬时排放速率特性,虚线框中包含的工况点在功基窗口法评估实际道路 NO_x 排放时随无效窗口被剔除,并未参与排放评估.不难发现,在功率阈值的限制下,大量发动机低功率、 NO_x 瞬时高排放的工况点被剔除.而这些工况点是重型车典型的城市运行工况,剔除这些工况点导致功基窗口法无法评估重型车城市工况运行的 NO_x 排放量,导致重型国六排放法规对城市区域 NO_x 排

放控制的缺失.一方面将难以有效削减大气二次颗粒物和近地臭氧污染;另一方面也将大幅增加高人口密度区域的健康暴露风险.

功率阈值的限制最高可致 46.68% NO_x 高比排放的窗口被剔除在实际道路 NO_x 排放评估之外,而这些窗口包含的工况点主要是发动机低功率、 NO_x 瞬时高排放的工况点,导致有效窗口相较所有窗口, NO_x 比排放骤减且分布特性发生明显变化.显然,这些有效窗口无法代表重型柴油车实际道路尤其城市运行工况下的 NO_x 真实排放水平,功基窗口法获得的实际道路 NO_x 排放结果较实际情况被严重低估.

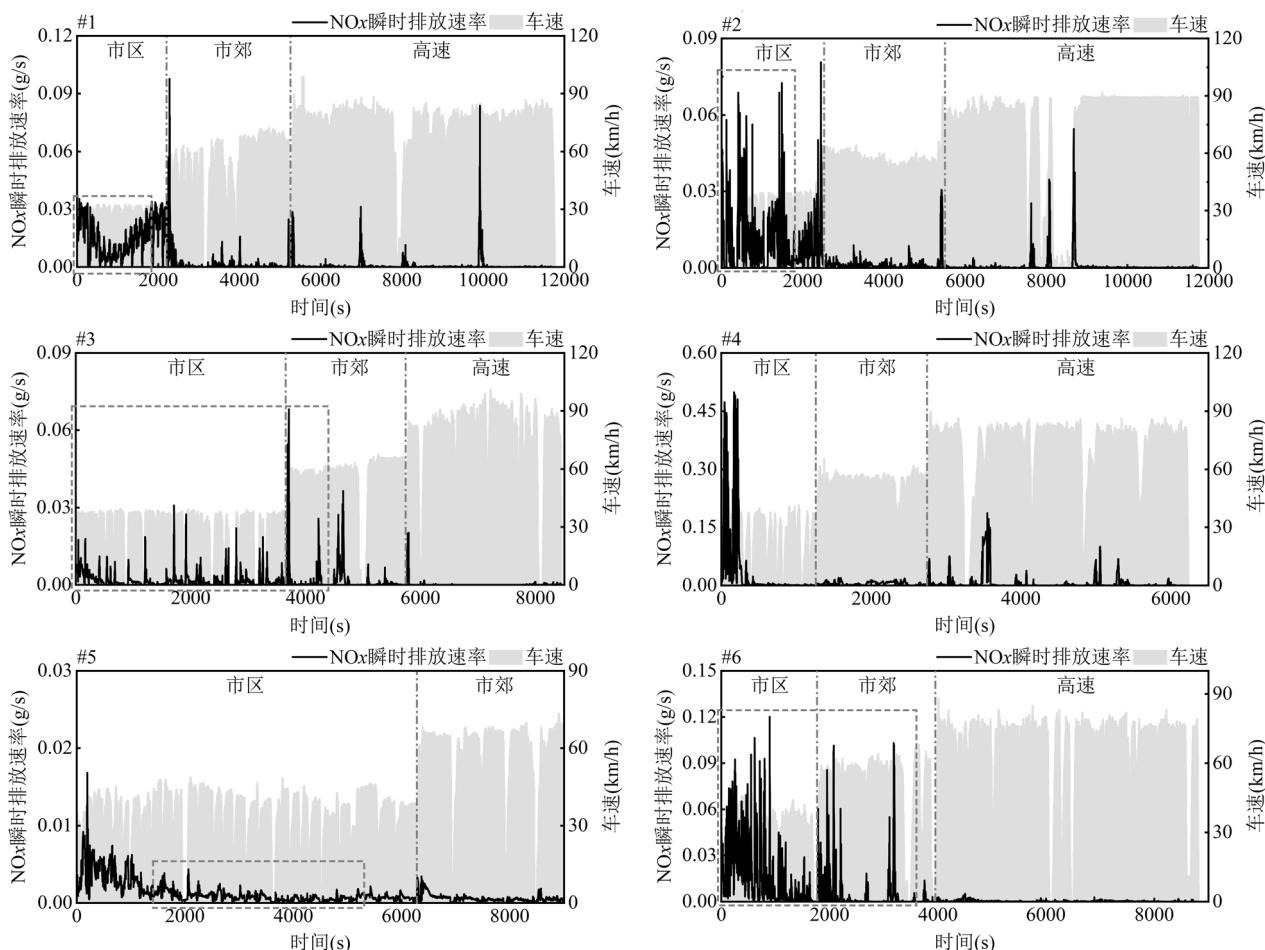


图 7 NO_x 瞬时排放速率

Fig 7 NO_x instantaneous emission rate

3 建议

6辆国六重型柴油车的PEMS试验表明,目前主流的排放后处理技术路线能够有效控制重型柴油车实际道路工况下的CO和PN排放,但 NO_x 排放控制存在

很大不确定性.重型国六排放法规采用的功基窗口法评价方式存在严重低估重型柴油车实际道路 NO_x 排放的风险,尤其在国六法规从 a 阶段过渡到 b 阶段后,车辆载荷下限由 50%降低至 10%,PEMS 试验中发动机平均输出功率降低的可能性进一步增加,这将增加

功基窗口法剔除低功率、高 NO_x 比排放窗口的风险, 导致重型柴油车实际道路 NO_x 排放量被低估。

一方面, 建议在后续法规的修订中进一步加严实际道路 CO 和 PN 排放限值; 另一方面, 建议在后续标准的修订过程中重点考虑柴油车排放对市区的污染, 采用更加科学合理且有利于促进柴油机排放控制技术的数据处理方法, 使法规能够更加准确反映重型车 NO_x 排放水平, 尤其是发动机功率较低而 NO_x 排放较为恶劣的情况。

4 结论

4.1 重型柴油车后处理装置能有效减小实际行驶过程中的 CO 和 PN 排放, 但对于 NO_x 排放控制仍存在较大不确定性。应加强对重型柴油车市区道路行驶和柴油机低负荷条件下 NO_x 排放量的监管, 提高 SCR 装置低温转换效率, 降低重型柴油车城市区域 NO_x 实际排放量。

4.2 重型国六排放标准采用功基窗口法计算实际道路排放, 但功基窗口法规定的功率阈值导致大量发动机低功率、 NO_x 高比排放数据被剔除, 严重低估重型车实际道路尤其城市工况下 NO_x 排放水平。在后续标准的修订中应进一步修改完善, 以便更有利于促进柴油车排放控制技术进步。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部.《中国移动源环境管理年报(2020)》[R]. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China mobile source environmental management annual report (2020) [R]. 2020.
- [2] 王 昕. 中外重型车排放标准研究 [J]. 机械工业标准化与质量, 2014,(5):22-25,33.
Wang X. Study on emission regulation for heavy-duty vehicles in China and abroad [J]. Machinery Industry Standardization & Quality, 2014,(5):22-25,33.
- [3] 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.
Ge Y S, Ding Y, Yin H. Research status of real driving emission measurement system for vehicles [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017,8(2):111-121.
- [4] 葛蕴珊, 王爱娟, 王 猛, 等. PEMS 用于城市车辆实际道路气体排放测试 [J]. 汽车安全与节能学报, 2010,1(2):141-145.
Ge Y S, Wang AI J, Wang M, et al. Application of portable emission measurement system (PEMS) on the emission measurements of urban vehicles on-road [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2010,1(2):141-145.
- [5] Lv L Q, Ge Y S, Ji Z, et al. Regulated emission characteristics of in-use LNG and diesel semi-trailer towing vehicles under real driving conditions using PEMS [J]. Journal of Environmental Sciences,

2019,88:155-164.

- [6] 秦孔建, 高俊华, 高继东, 等. 重型车辆车载排放测试系统的集成和验证 [J]. 汽车工程, 2009,(11):1081-1085.
Qin K J, Gao J H, Gao J D, et al. Integration and validation of an on-board emission measurement system for heavy-duty vehicles [J]. Automotive Engineering, 2009,(11):1081-1085.
- [7] 高继东. 城市机动车道路排放因子和排放特性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
Gao J D. Study on the on-road emission factor and characteristics of urban vehicles [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [8] Durbin T D, Johnson K, Iii D R C, et al. Evaluation and comparison of portable emissions measurement systems and federal reference methods for emissions from a back-up generator and a diesel truck operated on a chassis dynamometer [J]. Environmental Science & Technology, 2007,41(17):6199-6204.
- [9] Thompson G J, Carder D K, Besch M C, et al. In-use emissions testing of light-duty diesel vehicles in the united states [C]. Morgantown, WV: West Virginia University. Center for Alternative Fuels, Engines and Emissions (CAFEE), 2014.
- [10] Velders G J M, Geilenkirchen G P, Lange R D. Higher than expected NO_x emission from trucks may affect attainability of NO_2 limit values in the Netherlands [J]. Atmospheric Environment, 2011,45(18):3025-3033.
- [11] Ligterink N E, Tavasszy L A, Lange R D. A velocity and payload dependent emission model for heavy-duty road freight transportation [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2012,17(6):487-491.
- [12] GB17691-2018 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段) [S].
GB17691-2018 Limits and measurement methods for emissions from diesel fueled heavy-duty vehicles (China-VI) [S].
- [13] 郭 兴, 胡京南, 鲍晓峰. 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,(3):232-236.
Guo X, Hu J N, Bao X F. Study of on-board testing methods for in-use compliance of heavy-duty vehicles [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2011,(3):232-236.
- [14] 郭佳栋. 重型车实际道路车载排放测试及排放特性研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
Guo J D. Research on real-world emission performance of heavy-duty vehicles based on portable emission measurement system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [15] 郭佳栋, 葛蕴珊, 谭建伟, 等. 国 V 公交车实际道路排放特性研究 [J]. 汽车工程, 2015,37:120-124.
Guo J D. A research on the real world emission characteristics of State-V buses [J]. Automotive Engineering, 2015,37:120-124.
- [16] 郭佳栋, 葛蕴珊, 郝利君, 等. SCR 系统对公交车 NO_x 排放降低效果的研究 [J]. 汽车工程, 2015,37(11):1227-1231,1239.
Guo J D, Ge Y S, Hao L J, et al. A research on the NO_x reduction effects of SCR systems in city buses [J]. Automotive Engineering, 2015,37(11):1227-1231,1239.
- [17] 张允华, 楼狄明, 谭丕强, 等. DOC+CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 [J]. 环境科学, 2017,38(5):1828-1834.
Zhang Y H, Lou D M, Tan P Q, et al. Effects of DOC+CDPF on emission characteristics of heavy-duty vehicle [J]. Environmental Science, 2017,38(5):1828-1834.

作者简介: 吕立群(1994-), 男, 山东济宁人, 北京理工大学博士研究生, 主要从事机动车污染物排放测试及控制研究。发表论文 7 篇。