

# 重型商用车瞬态工况 NO<sub>x</sub> 排放特征分析

刘刚<sup>1,2</sup> 李静静<sup>1,2</sup> 王兴元<sup>1,2</sup> 李建东<sup>1,2</sup>

(1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司发动机研究院, 潍坊 261061)

**【摘要】**为分析瞬态工况对重型商用车 NO<sub>x</sub> 排放的影响, 通过对重型商用车瞬态运行工况进行分类, 在冷车起步、行驶中停车起步、通过高速公路收费口、超越加速 4 个典型工况下针对 NO<sub>x</sub> 排放特征开展试验研究, 结果表明: 瞬态工况会引起 NO<sub>x</sub> 排放量升高, 尿素溶液的消耗量相对于稳态工况增加了约 0.86~4 倍。

**关键词:** 重型商用车 瞬态工况 NO<sub>x</sub> 排放 超越加速

中图分类号: U467.1<sup>+</sup>1 文献标志码: A DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230080

## Analysis of NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Heavy-Duty Commercial Vehicles in Transient Conditions

Liu Gang<sup>1,2</sup>, Li Jingjing<sup>1,2</sup>, Wang Xingyuan<sup>1,2</sup>, Li Jiandong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weifang 261061; 2. R&D Center, Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061)

**【Abstract】**To analyze the influence of transient conditions on NO<sub>x</sub> emission of heavy duty commercial vehicles, by classifying the transient operating conditions of heavy-duty commercial vehicles, the NO<sub>x</sub> emission characteristics were tested under four typical operating conditions, including cold car start, stop and start while driving, driving through highway toll gates, and overtaking acceleration. The test results show that the transient condition will cause the NO<sub>x</sub> emission to rise, and increase the consumption of urea solution, which is about 0.86~4 times of the steady condition.

**Key words:** Heavy-duty Commercial Vehicles, Transient conditions, NO<sub>x</sub> emissions, Overtaking acceleration

**【引用格式】**刘刚, 李静静, 王兴元, 等. 重型商用车瞬态工况 NO<sub>x</sub> 排放特征分析[J]. 汽车工程师, 2024(6): 42-48.

LIU G, LI J J, WANG X Y, et al. Analysis of NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Heavy-Duty Commercial Vehicles in Transient Conditions[J]. Automotive Engineer, 2024(6): 42-48.

## 1 前言

车辆行驶过程中, 受车型、地形、路况、驾驶行为等的影响, 动力系统经常处于瞬态运行工况, 其性能、污染物排放量等与稳态工况差异较大<sup>[1]</sup>。本文基于 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)》分

析冷车起步、行驶中停车起步、通过高速公路收费口、超越加速 4 种瞬时工况对整车 NO<sub>x</sub> 排放的影响。

## 2 试验测试

### 2.1 试验条件

试验设备采用奥地利 AVL 李斯特公司的便携

式排放测试系统(Portable Emission Measurement System, PEMS),如图1所示<sup>[2]</sup>。

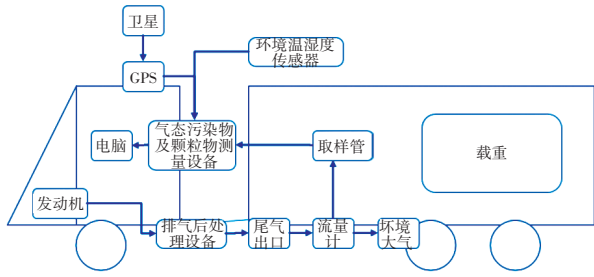


图1 试验设备安装情况

试验车辆为某自卸车,车辆主要参数如表1所示,车辆载荷为装载质量的100%。

表1 车辆参数

参数	取值
车辆类型	自卸车
发动机排量/L	12
整备质量/kg	17 200
变速器型号	12TA
后桥速比	5.92
轮胎型号	12.00R20
后处理系统型式	柴油机氧化催化器(DOC)+ 柴油机颗粒捕集器(DPF)+ 选择性催化还原(SCR)

试验行驶路线与整车道路排放试验相同。试验方法、数据计算处理方法采用整车道路排放试验中的功基窗口法<sup>[3]</sup>。

## 2.2 试验方案

研究表明,急加速等瞬态工况对NO<sub>x</sub>排放的影响较大<sup>[4]</sup>,故本文从整车动力学理论出发,结合行程动力学的应用,分析起步加速和超越加速两类工况对NO<sub>x</sub>排放的影响。试验方案如下:

a. 整车瞬态工况识别。整车瞬态工况最直观的表现表现为车速、发动机转速、油门开度、加速度等参数的突然变化<sup>[5]</sup>,首先进行瞬态工况类型识别,包括冷车起步、行驶中停车起步、通过高速公路收费口、超越加速、上坡下坡等,本文主要研究除坡度影响外的其他工况类型。

b. 相关因素分析。从排气温度、上游NO<sub>x</sub>排放量、下游NO<sub>x</sub>排放量、尿素喷射量等方面分析瞬态工况下的变化趋势。

c. 产生影响分析。分析瞬态工况对NO<sub>x</sub>排放

量、尿素消耗量等方面的影响。

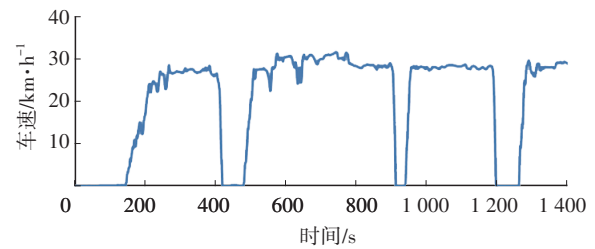
## 3 试验分析

### 3.1 起步加速

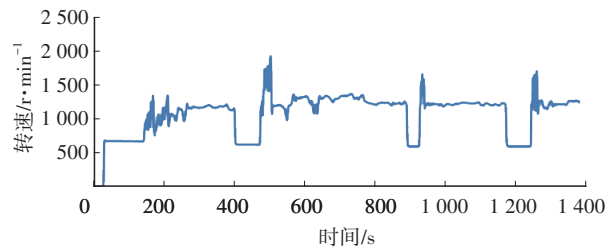
#### 3.1.1 冷车起步加速

冷车起步是存在较多复杂工况的阶段,受油门、挡位、驾驶习惯等多方面的影响。研究表明,在整车道路排放试验中,冷车启动时间占试验全程时间的4.27%,但产生的NO<sub>x</sub>质量占全部排放物质量的9.59%<sup>[6]</sup>。

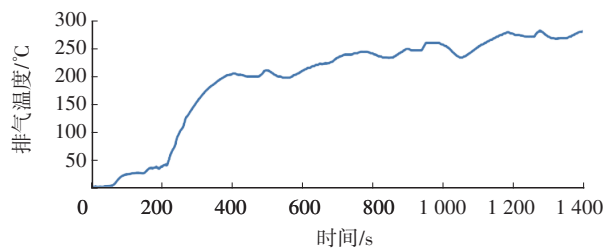
根据国六排放标准,整车排放试验应在发动机启动前开始采集排放和测量数据,图2所示为试验车型的冷车起步运行工况数据。



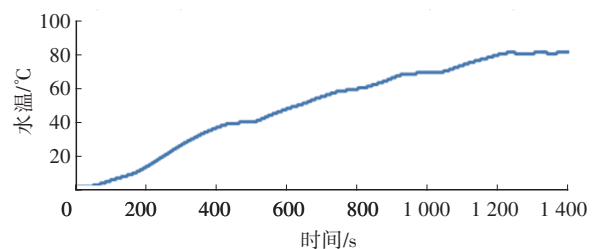
(a)车速



(b)发动机转速



(c)排气温度



(d)水温

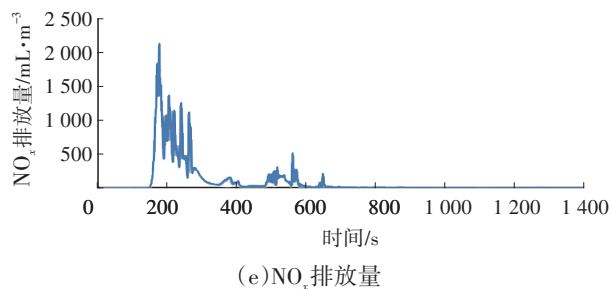


图2 冷车起步相关参数运行情况

车辆电源接通23 s后启动发动机,发动机怠速运转117 s后起步,电源接通后第378 s时排气温度升至200 °C(排气后处理装置起作用的温度),第1 047 s时水温升至70 °C。相关测试结果如表2所示。

表2 冷车起步工况试验结果

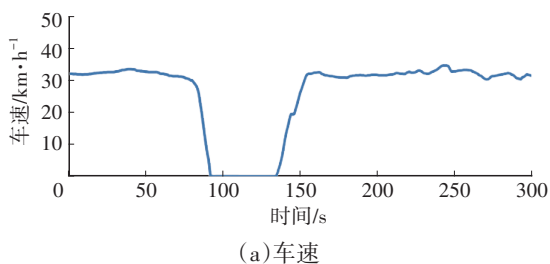
参数	取值
环境温度/°C	1.8
初始水温/°C	2.2
水温升至70 °C所需时间/s	1 047
初始排气温度/°C	4.3
排气温度升至200 °C所需时间/s	378
下游NO <sub>x</sub> 排放峰值/mL·m <sup>-3</sup>	2 121
下游NO <sub>x</sub> 排放量降至50 mL/m <sup>3</sup> 所需时间/s	384
怠速条件下下游NO <sub>x</sub> 排放量/mL·m <sup>-3</sup>	5.8
怠速运行时间/s	117

通常认为瞬态NO<sub>x</sub>排放量在50 mL/m<sup>3</sup>以下时不存在排放结果超标风险。从表2中可以看出,NO<sub>x</sub>排放峰值在第384 s降至50 mL/m<sup>3</sup>以下,即水温在升至70 °C之前排气后处理装置已发挥作用。从图2中NO<sub>x</sub>瞬态排放量曲线也可看出,在水温升至70 °C时NO<sub>x</sub>排放量已降至正常水平。

为防止车辆冷态条件下的恶劣排放,在冷车起步阶段应增加加热管理措施,且驾驶行为应趋于缓和,以减少冷态和瞬态同时作用对NO<sub>x</sub>排放造成的影响。

### 3.1.2 行驶中停车起步

行驶中停车起步工况具体包括车速下降、停车等待、起步加速、车速稳定4个阶段,加速特征曲线如图3所示。



(a)车速

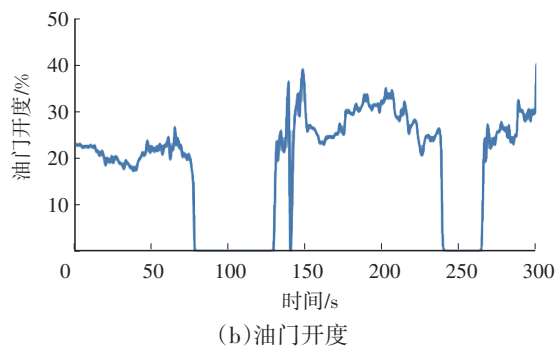
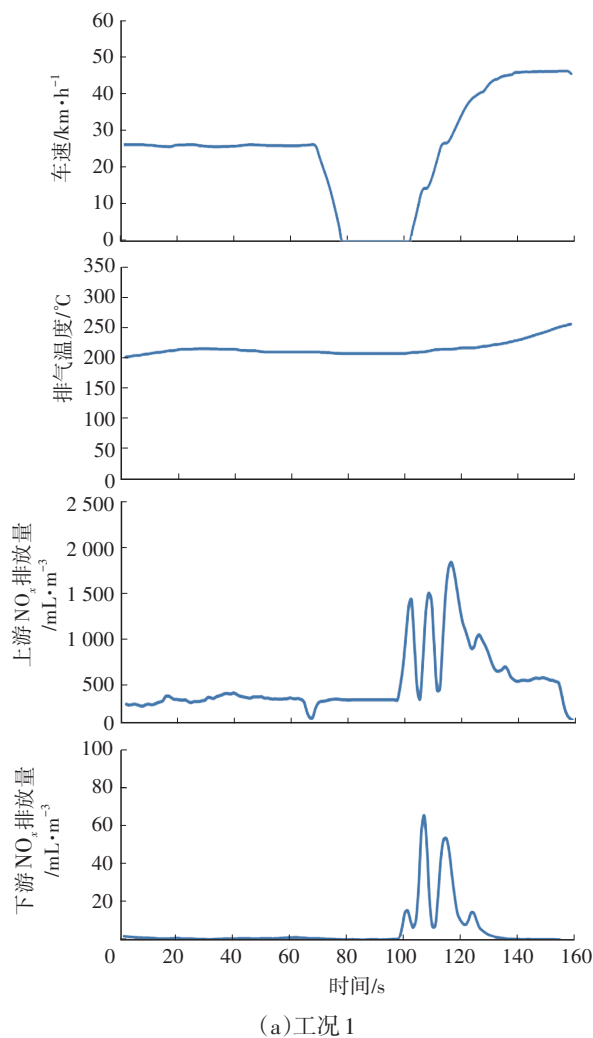


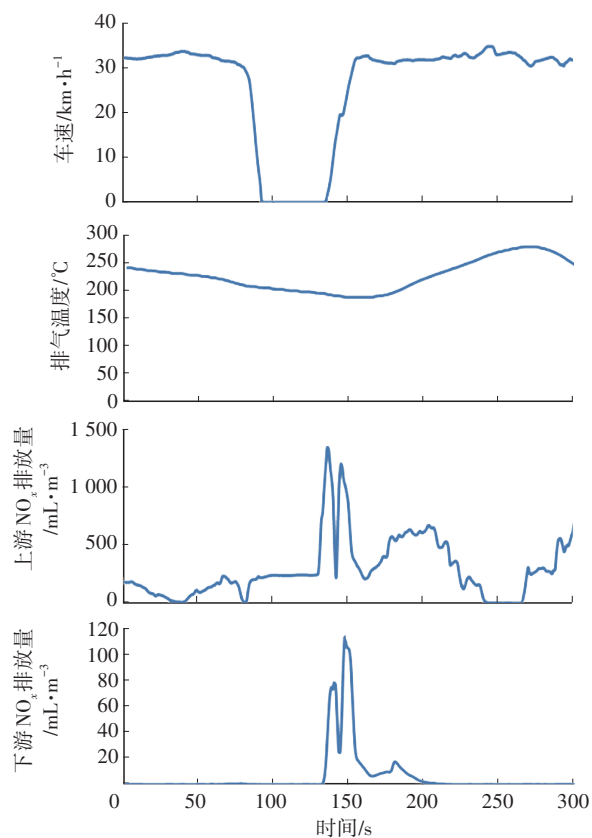
图3 汽车起步加速工况特征曲线

车辆行驶过程中在松开油门的瞬间,车速下降,发动机水温、排气温度均下降,直至重新起步加速一段时间后,相应温度开始上升,同时,NO<sub>x</sub>排放量等参数也发生变化。

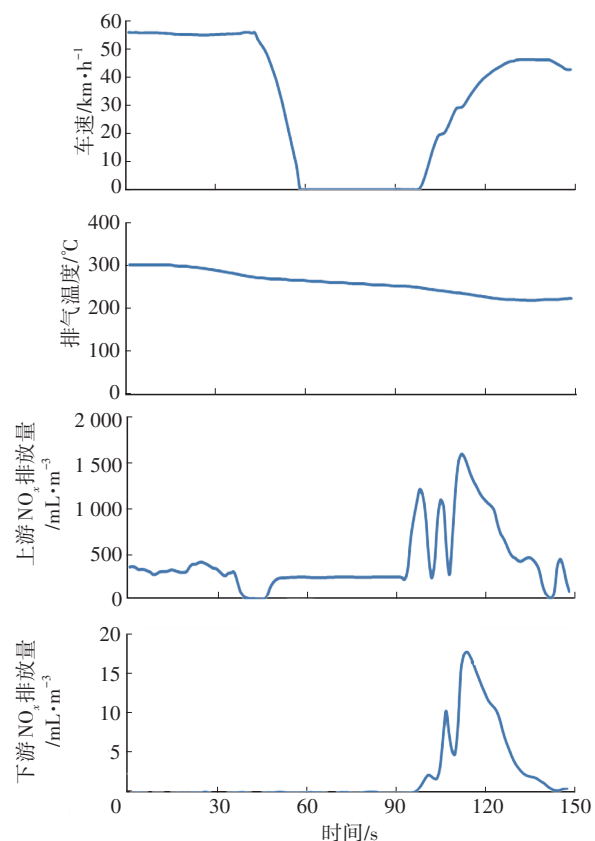
图4所示为初始车速为32 km/h、停车时间为20 s(工况1)和40 s(工况2),以及初始车速为55 km/h、停车时间为40 s(工况3)的3种工况下排气温度、发动机水温、上游NO<sub>x</sub>排放量和下游NO<sub>x</sub>排放量等参数的变化情况,主要参数变化过程如表3所示。



(a)工况1



(b)工况2



(c)工况3

图4 不同原始车速、不同停车时间特征曲线

从表3中可以看出,停车时间越长,排气温度下降越多,工况1~工况3排气温度下降率分别为1.42%、19.23%、17.59%。工况2和工况3排气温度变化率相差较小,但是二者原始排气温度相差较大,高达56℃。工况2条件下停车后再次起步时排气温度处于尿素溶液开始喷射的临界点(190℃)附近,这一现象从下游NO<sub>x</sub>排放量的峰值上也可以看出。在这一过程中,下游NO<sub>x</sub>排放量变化的持续时间较短,且峰值较低,即使是低车速停车时间长的工况,下游NO<sub>x</sub>排放量峰值仅为103.59 mL/m<sup>3</sup>,见图4。

表3 行驶中停车起步工况试验结果

参数	工况1	工况2	工况3
原始排气温度/℃	211	234	290
排气温度下降幅值/℃	3	45	51
起步时排气温度/℃	208	189	239
上游NO <sub>x</sub> 排放量原始值/mL·m <sup>-3</sup>	250	174	312
上游NO <sub>x</sub> 排放量峰值/mL·m <sup>-3</sup>	1488	1300	1621
下游NO <sub>x</sub> 排放量原始值/mL·m <sup>-3</sup>	1.22	0.78	0.5
下游NO <sub>x</sub> 排放量峰值/mL·m <sup>-3</sup>	65.46	103.59	18
稳态行驶工况尿素溶液消耗量/g·km <sup>-1</sup>	23.86	9.57	12.28
行驶中停车起步工况尿素溶液消耗量/g·km <sup>-1</sup>	84.44	53.75	61.97

此外,从图4中可以看出,起步时上游NO<sub>x</sub>排放量和下游NO<sub>x</sub>排放量均存在高位波动,上游NO<sub>x</sub>排放量变化远大于下游NO<sub>x</sub>排放量变化,这将导致尿素溶液消耗量增加,将该工况与稳态工况进行对比,这3种情况下的尿素溶液消耗量较稳态行驶工况提高约2.53~4倍。

总体来看,行驶中停车起步工况排气温度变化约在20%以内,对下游NO<sub>x</sub>排放造成一定的影响,但持续时间较短,相对于车辆试验全程排放量,该部分影响可忽略,但对上游NO<sub>x</sub>排放的影响相对较大。

### 3.1.3 通过高速公路收费口

重型商用车在经过高速公路收费站时可能存在减速并多次停车起步加速的过程<sup>[7]</sup>,典型的工况曲线如图5所示。

从图5中可以看出,从第一次停车至正常行驶经历了多次起步过程,上游NO<sub>x</sub>排放和下游NO<sub>x</sub>排放均相应呈现不同程度的波动,排气温度呈现先下降再上升的趋势。NO<sub>x</sub>排放量的瞬时变化较大,但时间较短,按照国六标准功基窗口法计算,影响较

小。图6所示为一次完整的PEMS运行工况,其中高速段包含一段通过高速公路收费口的工况。图7所示为按照功基窗口法计算得到的NO<sub>x</sub>窗口比排放结果。

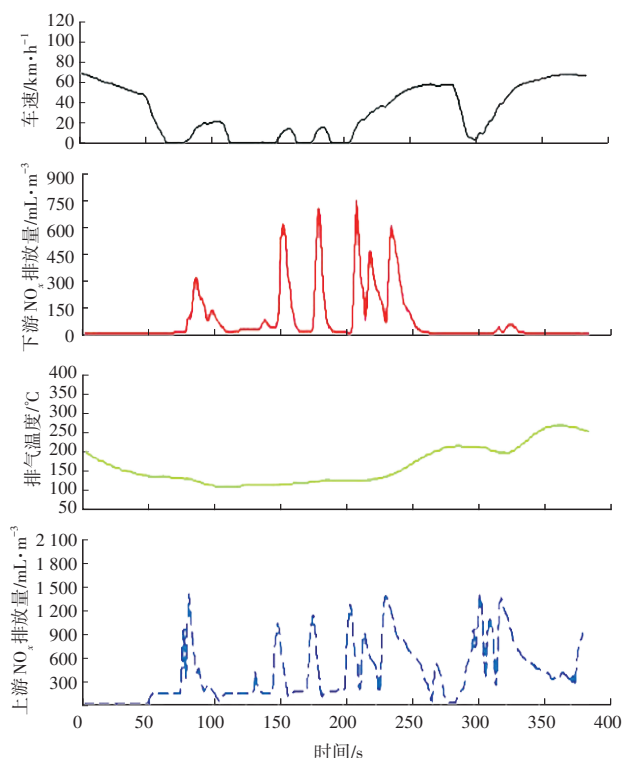


图5 经过高速公路收费口工况特征曲线

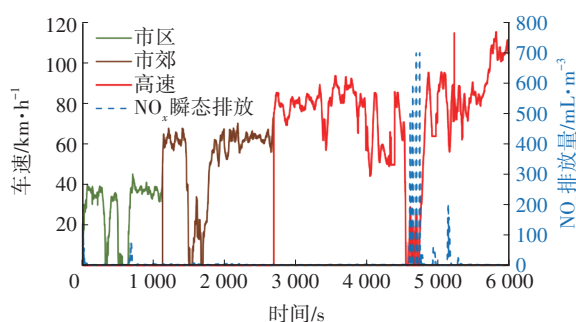


图6 通过高速公路收费口工况瞬态曲线

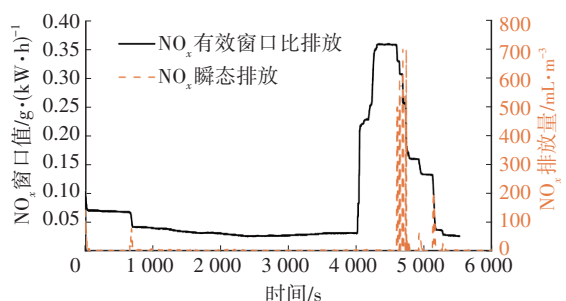


图7 通过高速公路收费口工况功基窗口与NO<sub>x</sub>排放曲线

由图7可以看出,车辆通过高速公路收费口时NO<sub>x</sub>瞬态排放量较大,且采用功基窗口法计算时NO<sub>x</sub>

有效窗口比排放升高,但相对于瞬态变化,窗口比排放变化较小。

通过高速公路收费口过程中,排放相关的主要参数变化情况如表4所示。

表4 通过高速公路收费口工况试验结果

参数	取值
原始排气温度/°C	230
排气温度下降/°C	80
排气温度变化率/%	34.78
下游NO <sub>x</sub> 排放量原始值/mL·m <sup>-3</sup>	2.3
下游NO <sub>x</sub> 排放量峰值/mL·m <sup>-3</sup>	704
稳态行驶工况尿素溶液消耗量/g·km <sup>-1</sup>	21.00
通过高速公路收费口工况尿素溶液消耗量/g·km <sup>-1</sup>	30.12

由表4可知,通过高速公路收费口工况下游NO<sub>x</sub>排放量峰值较大,但持续时间较短,较稳态行驶工况增加了约50%的尿素溶液消耗量,对整体排放结果影响较小。

### 3.2 超越加速

超越加速会引起发动机进气量和供油量的突变,对NO<sub>x</sub>的排放也会产生影响<sup>[8]</sup>。本文针对车速由30 km/h提高至50 km/h和由50 km/h提高至70 km/h 2种急加速工况进行分析。超越加速工况下工况点分布和关键参数曲线如图8、图9所示。

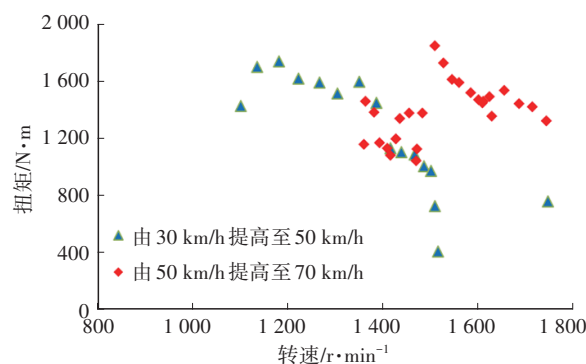


图8 超越加速工况点分布

从图9中可以看出:初始车速为50 km/h的工况相比于初始车速为30 km/h的急加速工况,扭矩和下游NO<sub>x</sub>排放量变化均较大,且持续时间较长;每次加速过程中排气温度均呈现先下降再上升的趋势,该现象由急加速时瞬时排气流量突然增大导致,如图10所示。

此外,在超越加速工况下,尿素喷射迟于进气流量的变化,如图11所示。液体的惯性远大于气体的惯性<sup>[9]</sup>,因此,类似急加速的强瞬态工况下,尿素溶液喷射量的增长滞后于进气流量的增长,由此造

成上游NO<sub>x</sub>排放量升高而尿素溶液喷射量增加滞后的现象,这也是导致下游NO<sub>x</sub>排放量较高的因素之一<sup>[10]</sup>。此时,如遇前期后处理氨存储不足,可能会导致短时下游NO<sub>x</sub>排放量较大的现象。

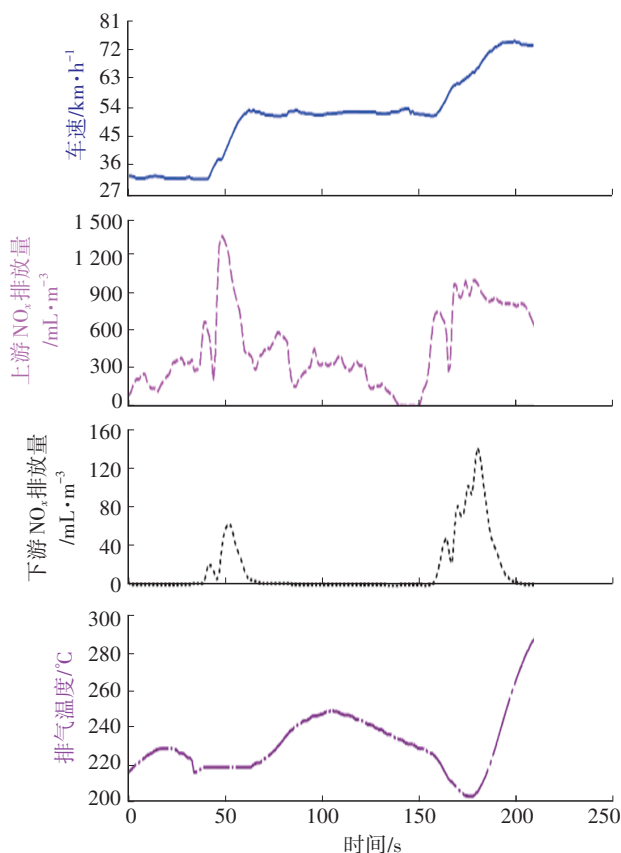


图9 超越加速工况关键参数曲线

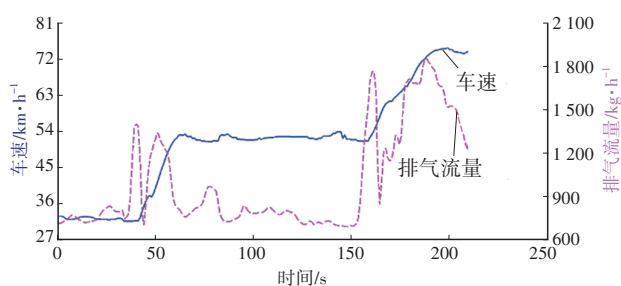


图10 超越加速工况排气流量变化曲线

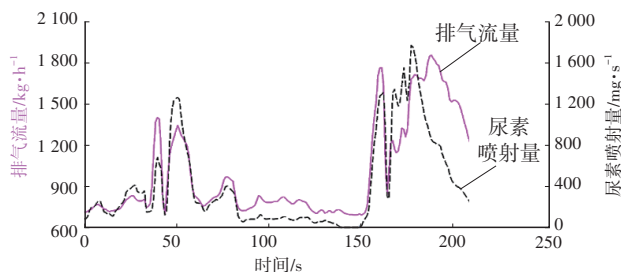


图11 排气流量与尿素喷射量变化曲线

根据图9的结果,超越加速过程中,相对于上游NO<sub>x</sub>排放量,下游NO<sub>x</sub>排放量的变化较小,这必然导

致尿素用量的增加,通过试验得到超越加速工况下的尿素溶液消耗量较稳态行驶工况提高约0.86~1.43倍。

## 4 结束语

本文针对起步加速、超越加速等常见的瞬态工况对重型商用车NO<sub>x</sub>排放量的影响进行了系统性试验研究,结果表明,此类工况会在一定程度上增大车辆的NO<sub>x</sub>排放量,并相应增加尿素溶液的消耗量,其中行驶中停车起步工况下尿素溶液消耗量最多,尿素溶液消耗量较稳态行驶工况提高约2.53~4倍。

### 参考文献

- [1] 王志红,袁雨,王少博,等. 重型柴油车实际道路NO<sub>x</sub>排放预测模型研究[J]. 内燃机工程, 2019, 40(6): 9-14+23.  
WANG Z H, YUAN Y, WANG S B, et al. Research on NO<sub>x</sub> Emissions Prediction Model for Heavy Duty Diesel Vehicles [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40(6): 9-14+23.
- [2] 刘刚,赵甲运,侯建军,等. 重型柴油车配置对实际道路NO<sub>x</sub>排放的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2019, 36(6): 48-54.  
LIU G, ZHAO J Y, HOU J J, et al. Influence of NO<sub>x</sub> Emission of Heavy Duty Diesel Vehicles Configuration on Actual Road[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2019, 36(6): 48-54.
- [3] 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.  
Ecological Environment Department. Limits and Measurement Methods for Emissions from Diesel Fuelled Heavy-Duty Vehicle (CHINA VI): GB 17691—2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [4] 李长豫,杨永真,高旺. 整车PEMS测试冷启动工况排放特性研究[J]. 内燃机与配件, 2023(19): 39-42.  
LI C Y, YANG Y Z, GAO W, et al. Research on Emission Characteristics of Cold Start Conditions in Vehicle PEMS Testing[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023(19): 39-42.
- [5] 胡月,杨建军,张先锋,等. 某轻型车瞬态工况下的驾驶性客观评价研究[J]. 汽车技术, 2017(5): 1-5.  
HU Y, YANG J J, ZHANG X F, et al. Objective Evaluation of Drivability Under Transient Condition of A Light Duty Vehicle[J]. Automobile Technology, 2017(5): 1-5.
- [6] 刘刚,李建东,董秀云,等. 欧六E法规对国内商用车排放的影响研究[J]. 汽车工程师, 2021(11): 9-13+33.  
LIU G, LI J D, DONG X Y, et al. Research on the Impact of

- EURO VI-E Regulation on Domestic Commercial Vehicle Emissions[J]. Automotive Engineer, 2021(11): 9-13+33.
- [7] 褚如思,武同乐,何文聪,等.双碳目标下高速公路收费站碳排放模型研究[J].河南科技,2021,40(30):120-123.  
CHU R S, WU T L, HE W C, et al. Research on Carbon Emission Model of Expressway Toll Stations Under Double Carbon Targets[J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(30): 120-123.
- [8] 程颖,张佳乐,张少君,等.大型货运车辆生态驾驶及节油潜力评估[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(6):253-258.  
CHENG Y, ZHANG J L, ZHANG S J, et al. Evaluation of Eco-Driving Behavior and Fuel-Saving Potential of Large Freight Vehicles[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(6): 253-258.
- [9] 刘忠长,孙士杰,田径,等.瞬态工况下喷油参数对柴油机排放及燃烧特性的影响[J].吉林大学学报(工学版),2014,44(6):1639-1646.  
LIU Z C, SUN S J, TIAN J, et al. Influences of Fuel Injection Parameters on Emissions and Combustion of Diesel Engine under Transient Conditions[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(6): 1639-1646.
- [10] 杨阳.城市道路机动车污染物排放动态量化方法研究[D].南京:东南大学,2020.  
YANG Y. Research on Dynamic Quantification Method of Vehicle Pollutant Discharge in Urban Roads[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2023年9月12日。

## 《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主,并兼有理论研究内容,是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下,把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势,努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域,新能源汽车和互联智能汽车技术领域,大力吸收优质稿源,为广大科研和工程技术人员服务,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求:

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内;
2. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数控制在180字左右;
3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,且在文中应标注文献引用处;
4. 文章主要作者应提供其简介,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等;
5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
6. 请勿一稿多投;
7. 本刊使用网站投稿,请先登陆网站注册成功后投稿,详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的“作者指南”,网址:<http://qcjs.cbpt.cnki.net>。

《汽车技术》编辑部