

基于 OBD 监测的国六柴油机 NO_x 排放方法研究

陈栋栋¹, 彭丽娟², 高慎勇¹, 李云华¹, 孙晓宇¹

1. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061; 2. 林德液压(中国)有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为实现国六柴油机 NO_x 排放精准有效监测,依据柴油机国六排放标准对车载诊断系统(on board diagnostics, OBD)监测 NO_x 排放的要求,提出一种以选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)转化效率为基础的监测与标定方法,结合某柴油机进行标定并验证 SCR 劣化件的报错情况与正常件的误报错余量。验证结果表明:该方法能够实时准确计算 SCR 转化效率;并及时有效判定 NO_x 排放是否超 OBD 监测限值,符合国六标准对 OBD 监测 NO_x 排放的要求;使 SCR 正常件能够留出合理余量防止误判,使 SCR 劣化件能够有效甄别并及时触发监控器,实现有效监测的目标。

关键词:国六柴油机;OBD 监测; NO_x 排放;SCR 转化效率

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)04-0048-06

引用格式:陈栋栋,彭丽娟,高慎勇,等. 基于 OBD 监测的国六柴油机 NO_x 排放方法研究[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(4): 48-53.

CHENG Dongdong, PENG Lijuan, GAO Shenyong, et al. NO_x emission monitoring based on OBD for CHINA VI diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(4): 48-53.

0 引言

柴油机的主要排放污染物是 NO_x 和颗粒物。文献[1]降低了 NO_x 等污染物排放的限值,变更了排放测试循环,修订了车载诊断系统(on board diagnostics, OBD)监测的项目、限值及监测条件等技术要求,这对 OBD 监测提出了挑战。为了满足国六排放标准的要求,发动机厂使用更高效的选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)系统并辅以更复杂的模型来控制 NO_x 排放^[2-3],但 NO_x 排放控制是一个动态、多边界的控制过程,在这复杂过程中,如何有效控制 NO_x 排放,特别是有效监测 SCR 的转化效率,是国六阶段重型柴油车的难题^[4]。

本文中根据国六标准中 NO_x 排放控制的具体要求,提出一种 NO_x 的监测与标定方法,并结合某柴油机进行标定,验证 SCR 劣化件的报错情况与 SCR 正常件的误报错余量,确保提出的方法能够实时准确监测 NO_x 排放,并在 NO_x 排放将要超过国六标准要求的 OBD 限值(OBD threshold limits, OTLs)时,及时有效甄别并触发监控器以提醒驾驶员,实现有效监测的目标。

1 国六标准中 NO_x 排放要求

相比国五排放标准,国六标准重新定义了重型柴油机标准循环及排放限值,排放试验分为稳态循环(world harmonized steady-state cycle, WHSC)和瞬态循环(world harmonized transient cycle, WHTC),WHSC 循环包含 13 个具体的稳态试验工况,WHTC 循环包含 1800 个逐秒变换的试验工况。国六标准还新增柴

收稿日期:2022-06-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0103504)

第一作者简介:陈栋栋(1986—),男,山东临沂人,工程师,主要研究方向为内燃机标定开发及虚拟标定,E-mail: chendd@weichai.com。

油机非标准循环(world not to exceed, WNTe)排放测试要求和限值、整车实际道路行驶排放测试要求和限值。稳态循环、瞬态循环、非标准循环基本覆盖了柴油机全部运行工况。

国六标准要求对车辆全生命周期内导致排放超过 OTLs 的故障进行监测,若故障导致的排放超过相应的 OTLs,则该故障为 A 类故障,其中 NO_x 排放的限值为 1200 mg/(kW·h);若生态环境主管部门选择的故障导致排放超过 OTLs,生产企业需进行排放测试验证,劣化部件或装置不应导致相关排放超出 OTLs 的 20%,即冷、热态 WHTC 循环的 NO_x 排放应小于 1440 mg/(kW·h)^[5]。与国五和欧六排放标准相比,国六标准的要求更加严格细致^[6],它规定的各排放测试循环的 NO_x 限值如表 1 所示。

OBD 系统监测到 A 类故障时启动驾驶员报警系统和 A 类故障计数器,当 A 类故障累计达到 36 h 且未被排除时,激活初级驾驶性能限制系统对车辆实施限扭措施;若发动机持续运行,A 类故障累计达到 100 h 未被排除,则激活严重驾驶性能限制系统对车辆实施限速措施;故障排除后,各级限制措施相应取消^[7]。

表 1 不同排放测试循环的 NO_x 限值

循环	NO _x 限值/(mg·(kW·h) ⁻¹)	循环	NO _x 限值/(mg·(kW·h) ⁻¹)
WHSC	400	PEMS	690
WHTC	460	OBD	1200
WNTe	600		

2 OBD 测试循环的特征分析

OBD 测试循环为热态 WHTC 循环,为便于展开 NO_x 排放超 OTLs 的标定研究,需要对热态 WHTC 的特征参数进行解析。WHTC 循环中逐秒变化的转速和转矩的规范百分值如图 1 所示。

从工况分布方面分析,按照运行时间顺序,WHTC 循环中城市工况、郊区工况、高速工况分别占 49.6%、26.0%、24.4%,与国五标准欧洲瞬态循环相比,国六 WHTC 循环中低速低负荷工况所占比重大明显增加^[8]。从工况运行特点分析,发动机的转速及转矩逐秒变换将导致原机 NO_x 排放(指发动机本体缸内燃烧产生的 NO_x 排放,是 SCR 上游的 NO_x 排放)、排气温度、排气流量、尿素喷射量、SCR 下游 NO_x 排放等参数实时变化。

WHTC 循环过程中原机 NO_x 排放随时间的变化如图 2 所示。由图 2 可知,图中每个点的 NO_x 排放是相应稳态工况点 NO_x 排放的瞬态表现,整体与稳态相符但又存在一定的偏差。

WHTC 循环过程中 SCR 温度随时间的变化如图 3 所示,WHTC 循环过程中尿素喷射量随时间的变化如图 4 所示。

研究用发动机后处理系统为氧化催化剂(diesel oxidation catalyst, DOC)-颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)-SCR 技术路线,SCR 上游的 DOC 和 DPF 充当热容,导致出现图 3 中的 SCR 温度变化缓慢现象,相对于发动机排温,温度上升和下降都存在一定的迟滞。图 4 中的尿素喷射量是以 SCR 下游 NO_x 排放满足国六标准为目标,发动机电子控制单元(electronic control unit, ECU)闭环反馈值,与图 2 对照可知,尿素喷射量跟原机 NO_x 排放呈强正相关。瞬态过程中各项关键参数虽然复杂多变但同时为 NO_x 排放监测指明了方向。

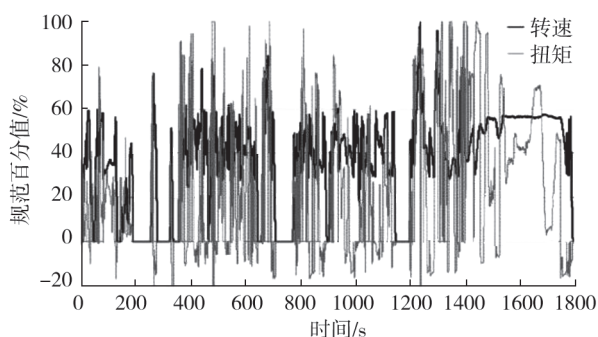


图 1 WHTC 试验循环工况分布

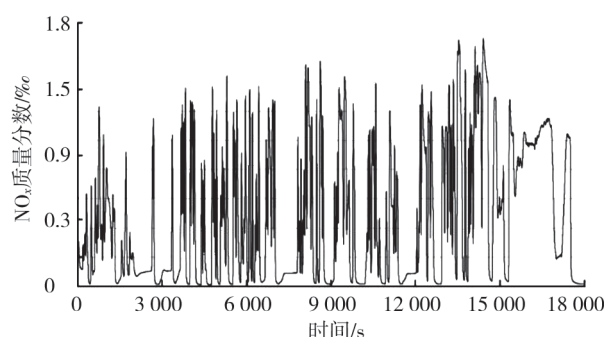


图 2 原机 NO_x 排放随时间的变化

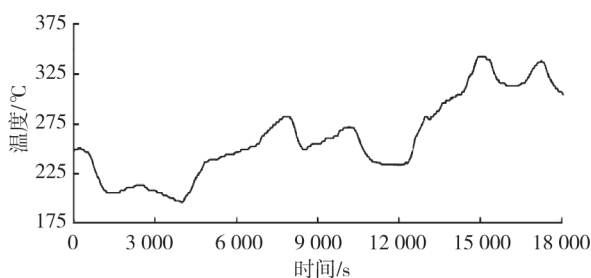


图3 SCR温度随时间的变化

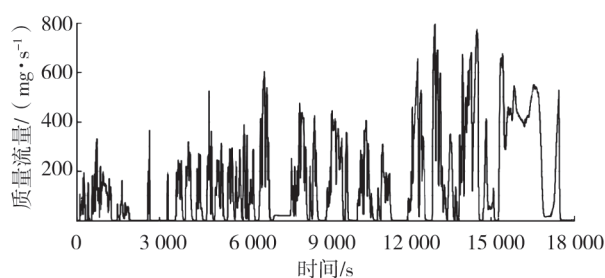


图4 尿素喷射质量流量随时间的变化

3 监测与标定方法

用对 SCR 转化效率的监测等效替代对 NO_x 排放超 OTLs 的监测。影响 SCR 转化效率的因素一般有 SCR 催化剂本体水热老化^[9]、原机 NO_x 排放增加、尿素喷射系统异常、尿素品质低劣、SCR 结晶等,需要基于硬件配置进行监测策略的制定。试验用 SCR 系统硬件配置包含 SCR 上游 NO_x 传感器、SCR 下游 NO_x 传感器、SCR 上游温度传感器、SCR 下游温度传感器、尿素喷射系统等。根据硬件配置结合国六标准要求提出 SCR 转化效率的基本计算逻辑为:基于 SCR 下游 NO_x 传感器测量的 NO_x 质量流量和 SCR 上游传感器测量的 NO_x 质量流量计算 SCR 的实际转化效率,通过 map 查找转化效率限值,当实际转化效率低于转化效率限值时,报出相应的故障,进行报警亮灯或系统降级。

SCR 实际转化效率

$$A = \int_{t_0}^{t_1} q_{m,1} / \int_{t_0}^{t_1} q_{m,2},$$

式中: $q_{m,1}$ 为 SCR 下游 NO_x 质量流量, mg/s ; $q_{m,2}$ 为 SCR 上游 NO_x 质量流量, mg/s ; t_0 为开始时刻; t_1 为结束时刻。

SCR 转化效率限值 B 为同一时间段内查 map 得到的效率限值均值。

具备判定条件后,若 $A < B$,则适时报错,若 $A > B$ 则适时取消报错。

监测策略包含效率计算的使能条件和范围条件,使能条件和范围条件必须同时满足才能确保效率计算正确,并与限值效率进行比较。

效率计算的使能条件包含:SCR 上、下游 NO_x 传感器信号,尿素供给状态有效,上游 NO_x 质量流量、SCR 温度变化梯度、上游废气流量变化梯度、氨载量、环境温度与压力、需求尿素喷射量与实际喷射量比值、冷却液温度在一定范围内等。

效率计算的范围条件包含:发动机转速、发动机喷油量、上游 NO_x 质量流量及质量分数、SCR 温度、发动机废气流量在合理范围内等。

科学的 SCR 转化效率计算方法非常重要。本文中提出基于上游 NO_x 质量累计窗口法的监测计算方法:若使能条件和范围条件同时满足,则开始对转化效率进行监控、积分,当上游 NO_x 排放质量累计达到某个阈值,就开始对此窗口期的累计平均转化效率进行计算,得到实际累计平均效率并与标定的效率限值进行比较,若计算的效率大于效率限值,则说明 SCR 转化效率正常,反之则说明 SCR 转化效率异常。另外,若使能条件不满足则监控积分清零,待到条件满足后重新进行监控积分;若范围条件不满足则积分冻结,待到条件满足后继续进行累计积分。此外为确保监测的可靠性,可设定连续两次实际计算效率低时方可触发监控器,同理可设定连续两次计算效率正常后方可自行消除报警亮灯及系统降级。

随着发动机运行里程的不断增加,SCR 性能不断劣化,当劣化到 NO_x 排放将超出 OTLs 时就是 ECU 触发监控器的时刻。用于标定或演示用的 SCR 劣化件直接影响标定准确性,为此采用高温老化方式制作 SCR 劣化件,这种高温老化方式符合 SCR 部件随时间不断劣化的实际情况。通过控制 SCR 温度在 $700 \sim 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ 来模拟老化过程,期间定时进行 SCR 单点效率确认及 WHTC 循环排放确认,当冷、热态

WHTC 的加权 NO_x 排放为 1.1~1.2 g/(kW·h)时,SCR 劣化件制作完成,此时的 SCR 劣化件可用于 NO_x 排放超 OTLs 的标定及报错演示。

不考虑空速的影响并固定尿素喷射当量比为 1.1 时,SCR 正常件与 SCR 裂化件的转化效率对比如图 5 所示。

由图 5 可知:不同温度下的 SCR 转化效率劣化程度有所差异,高温(400 ℃ 以上)时,SCR 转化效率较低且劣化最明显,中温(280~360 ℃)时 SCR 转化效率最高且劣化最少,低温(230 ℃ 以下)时 SCR 转化效率最低且劣化较明显。

采用 Simulink 将上述转化效率监控、积分等逻辑编成为电控逻辑(代码)并嵌入到 ECU 软件中,然后通过 INCA 标定软件进行相关的标定与验证。电控逻辑的控制策略流程如图 6 所示。

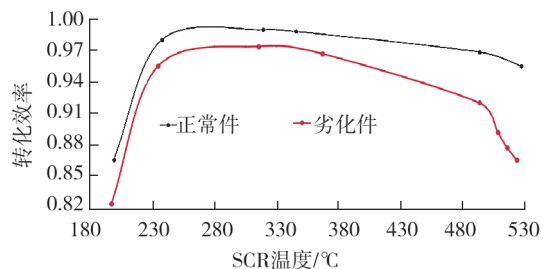


图 5 SCR 正常件和劣化件的转化效率对比

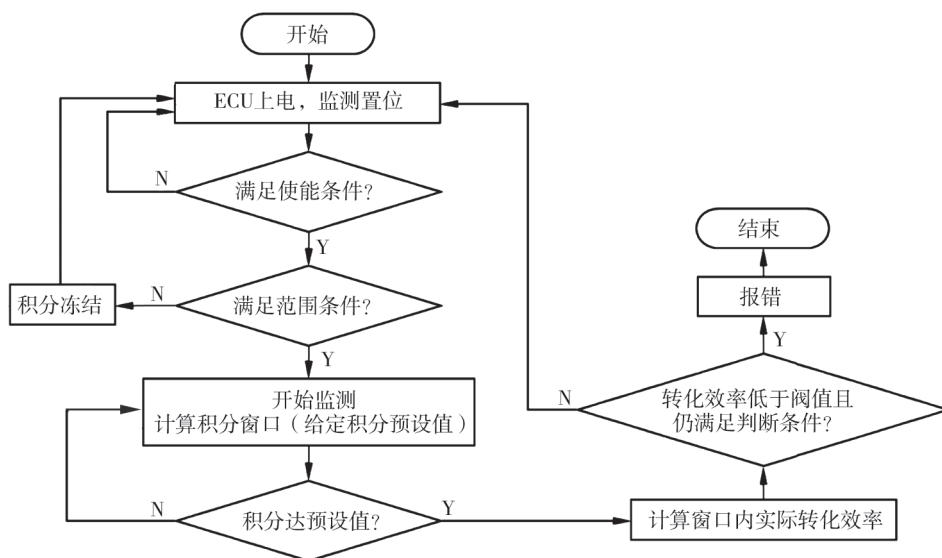


图 6 电控逻辑控制策略流程图

4 结果分析

用本文中提出的监控和标定方法完成了 ECU 标定并用 SCR 正常件和劣化件进行验证试验。WHTC 循环原机 NO_x 排放、废气中的 NO_x 排放(指经过 SCR 后处理的下游 NO_x 排放,即排放标准需要监测的 NO_x 排放)分别如图 7、8 所示。

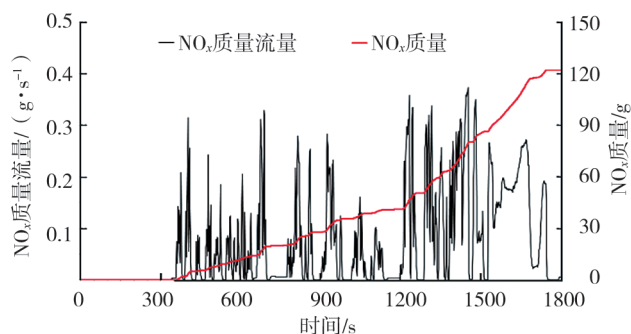


图 7 WHTC 循环原机 NO_x 排放

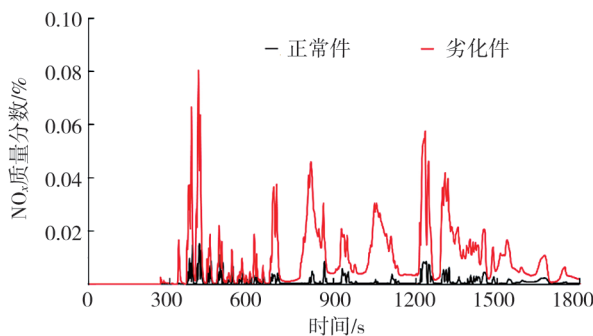


图 8 WHTC 循环 SCR 正常件、劣化件废气中 NO_x 排放

由图7可知:1)整个WHTC循环的 NO_x 累计排放质量为122 g;2)WHTC经过340 s时开始具备监测条件并进行测量,其原因为监控方法以SCR上游 NO_x 传感器测量的 NO_x 质量流量为基准,而 NO_x 传感器释放测量需要一定时间。考虑WHTC循环需要有效释放、监测、触发监控器,同时避免实际应用过程中过度监测及误判的情况,确定以24 g作为 NO_x 效率计算的阈值,占整个WHTC循环 NO_x 排放总质量的20%。

由图8可知:SCR劣化件废气中 NO_x 质量分数明显高于正常件,OB D监测正是利用SCR劣化件废气中 NO_x 排放增加从而计算出实际转化效率下降来判定劣化程度并进一步判定是否触发OB D监控器。

对SCR劣化件和正常件进行WHTC循环试验验证,结果如图9所示。

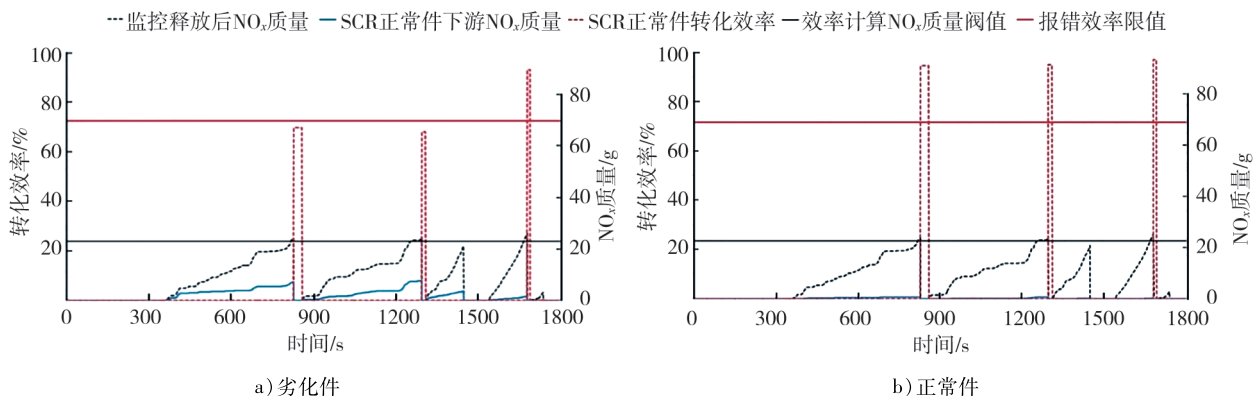


图9 WHTC循环下SCR劣化件与正常件验证分析

在如图9a)可知,当开始OB D监测即对 NO_x 质量流量进行积分,当 NO_x 质量大于阈值,即黑色虚线超过黑色实线时具备效率计算条件,延迟一定时间稳定后进行实际转化效率计算并与效率限值进行比较,若红色虚线低于红色实线即表明SCR实际效率低于效率限值,将触发OB D监控器。从完整WHTC循环可以看出,有4次机会具备OB D监测释放条件(黑色虚线)能够进行积分,其中有3次机会具备效率计算条件,即图中黑色虚线超出黑色实线,前2次实际转化效率计算结果为70.3%、68.7%,均低于效率限值(73%),触发了OB D监控器,满足OB D监测要求;第3次计算的效率为93.9%,高于效率限值,但不影响SCR转化效率的整体判定,因为WHTC循环后半段是高速路谱,整体运行平稳、负荷较高、SCR排温较合适,使转化效率也相对较高。

由图9b)可知,3次计算的效率分别为96.4%、96.7%、98.9%,均高于效率限值并有一定的余量,此余量的存在能够有效避免实际运行过程中的误判情况,OB D监测释放和效率计算保持一致。

5 结语

1)根据重型柴油车国六排放标准中OB D监测 NO_x 排放要求,提出了一种 NO_x 排放的监测与标定方法,即基于SCR下游 NO_x 传感器测量值和SCR上游 NO_x 传感器测量值计算SCR的实际转化效率,通过map查找限值转化效率,当实际转化效率低于限值转化效率时,报出相应的故障,并结合某柴油机进行标定及验证。

2)提出的监测与标定方法能够实时准确计算SCR转化效率,为进一步的监测奠定基础;能够适时有效判定 NO_x 排放是否超过OTLs,符合国六标准中OB D对 NO_x 监测的要求;使SCR正常件能够留出合理余量防止误判,使SCR劣化件能够有效甄别并及时触发监控器,实现有效监测的目标。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] 贺泓. 氮氧化物选择性催化还原研究新进展[C]//中国化学会第十一届全国环境催化与环境材料学术会议. 沈阳:中国化学会,2018.
- [3] HSIEH M, WANG J. Diesel engine selective catalytic reduction (SCR) ammonia surface coverage control using a computationally-efficient model predictive control assisted method[C]//ASME 2009 Dynamic Systems and Control Conference. New York, USA:ASME,2009.
- [4] 产贝. 基于国六标准重型柴油机选择性催化还原(SCR)的试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
- [5] 岳崇会. 轻型和重型国六标准 OBD 要求对比研究[J]. 标准科学,2021(6):57-62.
- [6] 于津涛,周涛,张凡. 重型国六排放标准中 OBD 主要变化及验证[J]. 小型内燃机与车辆技术,2019,48(3):43-47.
- [7] 刘栋,任烁今,刘麟,等. 重型柴油车整车 OBD 和 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. 北京:中国汽车工程学会,2021.
- [8] 赵国斌,盖永田,耿帅,等. WHSC/WHTC 与 ESC/ETC 测试循环的试验比较与研究[J]. 汽车工程学报,2015,5(1):29-34.
- [9] 李振国,吴撼明,任晓宁,等. 水热老化条件对 Cu/ZSM-5 催化剂 NH₃-SCR 反应的影响[J]. 环境工程学报,2019,13(12):2915-2923.
- [10] 闫立冰,任宪丰,张军,等. 基于 MIL 的 SCR 效率诊断方法[J]. 内燃机与动力装置,2021,38(3):67-72.
- [11] 赵子行,方晓鹏,孟媛媛,等. 基于 SCR 效率诊断防抖防抖方法的鲁棒性控制研究[J]. 内燃机与动力装置,2022,39(2):89-91.

NO_x emission monitoring based on OBD for CHINA VI diesel engine

CHENG Dongdong¹, PENG Lijuan², GAO Shenyong¹, LI Yunhua¹, SUN Xiaoyu¹

1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China; 2. Linde Hydraulics(China) Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to accurately and effectively monitor the NO_x emission of CHINA VI diesel engine, a monitoring and calibration method are proposed according to the OBD monitoring for NO_x emission requirements in CHINA VI emission regulations. The error reporting of degraded parts and the error margin of normal parts are verified by calibrating a certain type of diesel engine. The verification results show that the proposed monitoring and calibration method can accurately calculate the SCR conversion efficiency in real time, and determine whether the NO_x emission exceeds the limit of OBD monitoring timely and effectively, so it meets the requirements of OBD monitoring for NO_x emission in the CHINA VI emission regulations.

Keywords: CHINA VI diesel engine; OBD monitoring; NO_x emission; SCR conversion efficiency

(责任编辑:郎伟锋)