



应用 SCR 后处理实现车用柴油机国 IV 排放

王务林, 杨建军, 麦华志, 马杰, 栗国, 刘全周, 汪春华

中国汽车技术研究中心, 天津 300162

摘要 选择性催化还原(SCR)技术是实现柴油机超低 NO_x 排放最有效的后处理方法之一。本研究采用一台电喷单体泵柴油机, 通过燃烧优化使 PM 排放满足国 IV 排放要求。为降低原机较高的 NO_x 排放, 采用开环控制策略开发一套电控单元控制尿素溶液喷射, 通过将 32.5% 的尿素溶液定量喷射到排气管, 提供还原剂, 与柴油机排气中的 NO_x 发生选择性还原反应, 生成 N_2 和 H_2O , 实现降低 NO_x 排放的目的。由于选择催化还原方法的 NO_x 转化效率高, 通常采用开环控制即能实现国 IV 排放。本研究通过标定实验获得发动机的原机 NO_x 排放、排气温度、排气流量、单位尿素溶液流量的 NO_x 降低量等脉谱, 并将其写入电控单元。通过这些脉谱和当前的发动机转速、负荷信号及催化器进出口的温度信号, 电控单元可计算出当前工况需要的尿素喷射量。采用该方法, 在稳态和瞬态循环工况, 研究了 SCR 后处理的 NO_x 转化效率、氨泄漏及尿素溶液消耗量特性。结果表明, 稳态循环 ESC、瞬态循环 ETC 中, NO_x 平均转化效率分别达到 65.2%、65.3%, 氨排放小于 5ppm; 可溶性有机成分(SOF), 实验表明, PM 减少主要是由于 SOF 在氧化单元中发生氧化反应; 对 ETC 循环中尿素消耗量的分析表明, 采用本研究开发的尿素溶液计量单元及配套本实验使用的发动机的柴油车, 运行 100km 大约消耗 32.5% 尿素溶液 2L。

关键词 车用柴油机; NO_x 转化效率; 计量单元; 国 IV 排放

中国分类号 TK421+.5

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)11-0098-05

Development of SCR Post-treatment for Vehicle Diesel Engine to Meet the China Stage IV Emission Norms

WANG Wulin, YANG Jianjun, MAI Huazhi, MA Jie, LI Guo, LIU Quanzhou, WANG Chunhua

China Automotive Technology and Research Center, Tianjin 300162, China

Abstract The selective catalytic reduction is one of the most efficient technologies for NO_x reduction. The experimental investigation was conducted on a six-cylinder diesel engine with electronically-controlled cam-actuated unit pumps. The particulate mass of the diesel engine is greatly decreased to meet the China stage IV emission norms by a proper modification of the combustion system. In order to reduce the serious NO_x emission, a dosing controlling unit with open loop strategy is developed. The urea solution with concentration of 32.5% is induced into exhaust pipe by using the dosing injection system and the controlling unit. Thus, the NO_x reacts with ammonia from pyrogenation of urea and then they are transformed into H_2O and N_2 . Because of high rate of NO_x conversion, the open loop strategy for dosing of urea solution is sufficient for meeting the China stage IV emission norms. Firstly, the maps of NO_x emission, the exhaust temperature, the exhaust flow and the reduction of NO_x per unit urea solution were acquired in the engine calibration tests, and saved into the flash memory of the dosing controlling unit. Then one can calculate the quality of urea solution to be induced into the exhaust pipe by using the maps, the current speed and torque percent of the diesel engine as well as the inlet and outlet of the catalyst. Moreover, the performances of NO_x conversion, NH_3 slip and urea solution consumption of the selective catalytic reduction post-treatment were investigated in the European Steady Conditions (ESC) and European Transient Conditions (ETC). The results show that, NO_x conversion

收稿日期: 2010-02-26

作者简介: 王务林, 研究员级高工, 研究方向为机动车排放控制, 电子信箱: wangwulin@catarc.ac.cn; 杨建军(通信作者), 博士, 研究方向为发动机排放节能控制, 电子信箱: yangjianjun@catarc.ac.cn

over 65.2% and 65.3% can be achieved in the ESC and ETC tests, respectively, while NH_3 slip is below 5ppm. On the basis of SOF analysis, the PM reduction is the result of SOF reduction with SCR catalyst. Also, in the analysis of the urea solution consumption in the ETC test, a heavy duty truck with the diesel engine in the test will consume 2 liter urea solution with concentration of 32.5% per 100 kilometers under the controlling of the dosing controlling unit.

Keywords diesel engine; NO_x conversion; dosing controlling unit; China stage IV emission norms

氮氧化物(NO_x)是车用柴油机排放的主要污染物,据统计,城市大气中的 NO_x 约有 1/4 来自柴油机排放^[1]。 NO_x 是形成光化学烟雾的主要因素之一,也是控制环境污染的研究热点。随近年车用柴油机数量不断增加,各国政府对车用柴油机的排放控制日益严格,仅仅依靠机内净化很难达到未来的排放法规要求,而需要增加辅助排放措施。选择性催化还原(Selective Catalytic Reduction, SCR)技术具有安全性高、燃油经济性好、对燃油中硫敏感程度低^[2-4]等优点,被认为是一种有效净化 NO_x 、达到车用柴油机未来排放要求的方法。

车用柴油机应用 SCR 的主要问题是,不断变化的运行工况造成催化剂反应依赖的排温和空速条件不稳定,虽能提高 NO_x 转化效率但易造成严重的氨气泄漏。目前已有采用 NO_x 或氨传感器反馈控制尿素喷射、前置氧化催化器控制 NO/NO_2 生成的比例实现快速还原反应、模型控制等方法^[5-9]获得更高的转化效率和低氨气泄漏,但这些技术的应用使 SCR 系统的控制变得复杂。本研究通过实验获得柴油机 NO_x 排放脉谱、催化器特性,实现开环控制尿素溶液的喷射量,结合催化器进出口的温度对喷射量补偿,能很好控制车用柴油机运行中 SCR 的 NO_x 转化效率和氨气泄漏。

1 SCR 的工作原理和控制策略

1.1 系统组成和工作原理

SCR 后处理系统包括尿素罐、供应单元、计量单元、压缩空气泵、喷嘴和催化器(图 1)。SCR 工作时供应泵运转吸出尿素罐内的尿素溶液,由于压缩空气的作用,尿素溶液在计量单元内提前雾化混合,然后通过喷嘴喷射到催化器前端的排

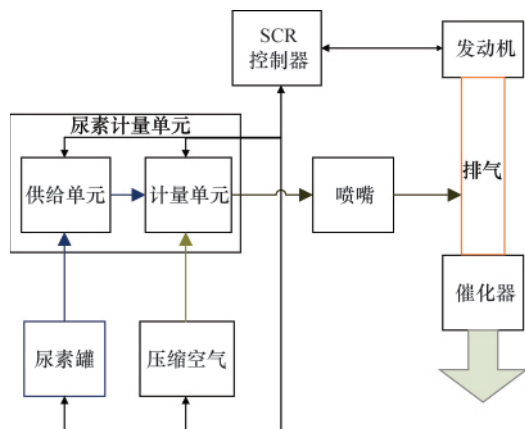
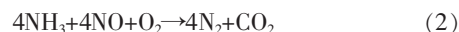
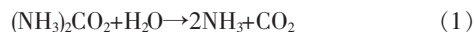


图 1 SCR 系统示意
Fig. 1 SCR system

气管中。由于喷嘴安装在催化器的上游,因此尿素溶液有充足的时间用于热分解生成还原剂氨气,如式(1)所示。氨气在 SCR 催化器内部净化 NO_x 的主要反应式如式(2)、(3)所示:



1.2 尿素溶液喷射控制策略

计量单元对尿素溶液的精确计量,需要 SCR 电控单元(Dosing Controlling Unit, DCU)根据当前发动机工况实时的提供尿素溶液喷射量。如图 2 所示,计算尿素溶液的喷射量时,需输入当前发动机的转速、负荷百分比、冷却液温度、催化器进出口温度等信息及存储在电控单元内部的多张脉谱(MAP)数据表格,MAP 包括原机 NO_x 排放 MAP、催化器特性 MAP、 NO_x 目标降低 MAP 等。

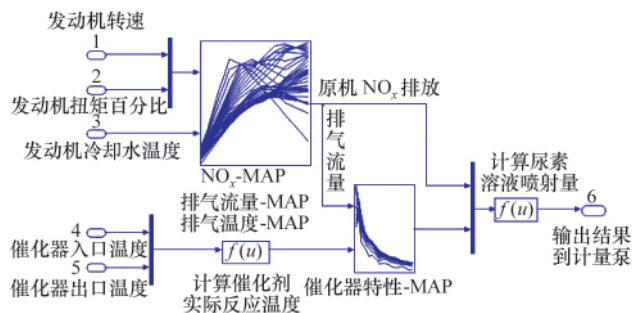


图 2 尿素溶液的喷射量控制策略

Fig. 2 Control strategy for urea solution dosing

为获得计算尿素溶液喷射量的 MAP 数据,在实验台架上对发动机不同转速和负荷标定,获取柴油机不带 SCR 后处理的原机 NO_x 排放 MAP、排气温度 MAP、排气流量 MAP;采用手动调整尿素喷射量的方法,针对有 SCR 的柴油机标定催化器特性 MAP,如图 3~图 6 所示。其中图 6 是本研究采用的催化器的特性,即单位质量流量的尿素溶液对 NO_x 的减少量。

由图 3、图 4 可见,没有 SCR 后处理的柴油机的原机 NO_x 排放主要出现在中大负荷,特别是低转速大负荷工况,对应这些工况的柴油机排气温度也较高,基本上保持在 350~500℃。从图 4 还可以看出,20% 负荷以下的排气温度基本上低于 200℃,在该温度以下喷射尿素溶液的 NO_x 转化效率低,而且易造成氨气泄漏,因为 SCR 催化剂的理想反应温度是 250~450℃。同时低温情况下催化剂的储氨量很大,并随温度升高而减小,易在柴油机工况调整过程中由催化剂释放出储

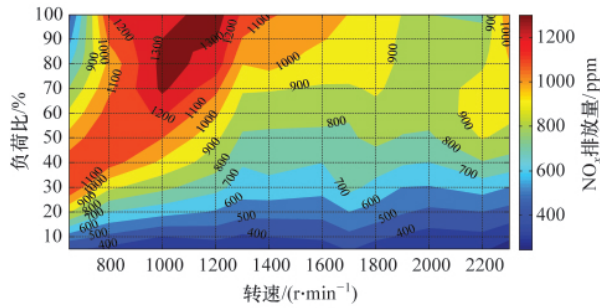


图3 无SCR的柴油机NO_x排放脉谱

Fig. 3 NO_x MAP of diesel engine without SCR

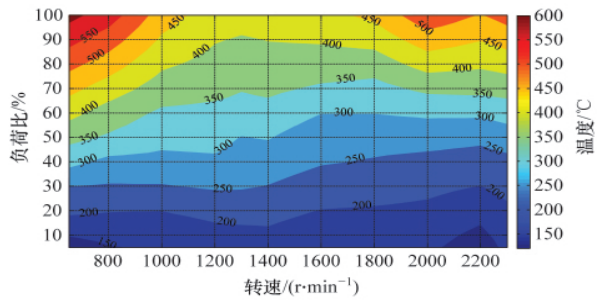


图4 柴油机排气温度脉谱

Fig. 4 Exhaust temperature MAP

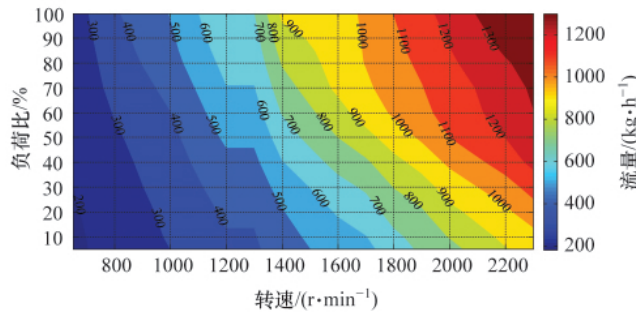


图5 柴油机排气流量脉谱

Fig. 5 Exhaust flow MAP

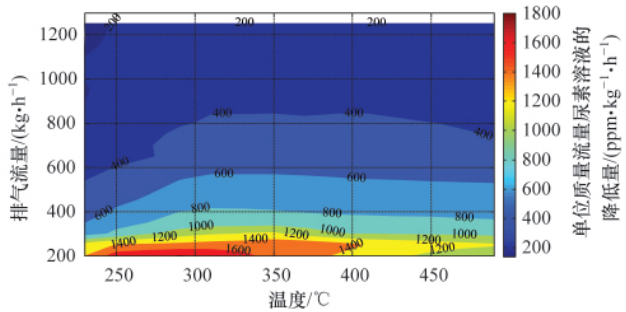


图6 SCR催化器的特性脉谱

Fig. 6 Reaction properties of catalyst MA

存的氨造成氨气泄漏,因此,本研究的SCR系统在排气温度低于200℃以下不喷射尿素溶液。

图5表明,排气流量主要随柴油机转速变化,转速越大,排气流量越大。从图6可看出,催化剂的反应能力受排气流量的影响特别大,在排气温度300~400℃、排气流量400kg/h时,单位质量流量的尿素溶液可完全净化800ppm的NO_x,当排气流量增加到800kg/h时,单位质量流量的尿素溶液完全净化的NO_x降低到400ppm。

1.3 催化剂反应温度对尿素溶液喷射控制的影响

DCU对尿素溶液喷射量的控制,是通过控制NH₃/NO_x比即NSR实现。理论上,NSR等于1时可完全转化NO_x排放污染物。为获取催化剂进出口温度对尿素溶液喷射控制的影响,专门在台架上进行稳态和瞬态标定实验(图4)。由图4可

看出,稳态循环中,催化剂进出口温度大部分时间维持在250~400℃;ETC循环中进口温度在200~350℃,出口温度基本保持在250~350℃。由于钒基催化剂的最佳反应温度在250~450℃,因此实验循环中SCR催化剂具有较高的NO_x转化效率。从图4还可看出,稳态和瞬态实验的催化剂进口和出口温度都没有完全重合,前者变化快,幅度大;后者则在时间上滞后,但比较稳定。说明催化剂进口温度更接近于发动机转速和扭矩的变化,而出口温度则比较接近于催化剂实际反应温度。因此,尿素溶液的喷射控制需根据催化剂进出口的温度进行补偿。

采用催化剂进出口温度对尿素溶液喷射量补偿控制的实验结果如图7、图8所示。从NSR变化可以看出,稳态和瞬态循环的NSR基本上保持在0.8左右,部分工况的NSR超过

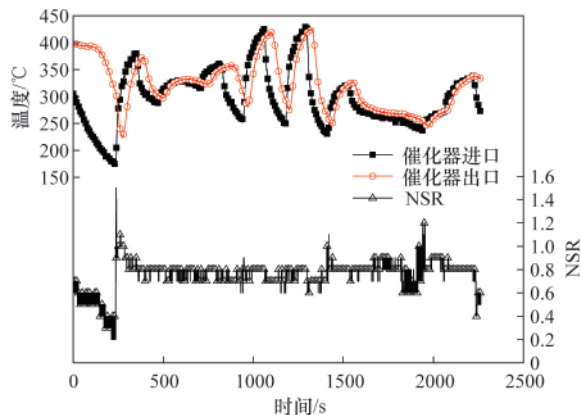


图7 稳态循环标定

Fig. 7 Steady state cycle calibration

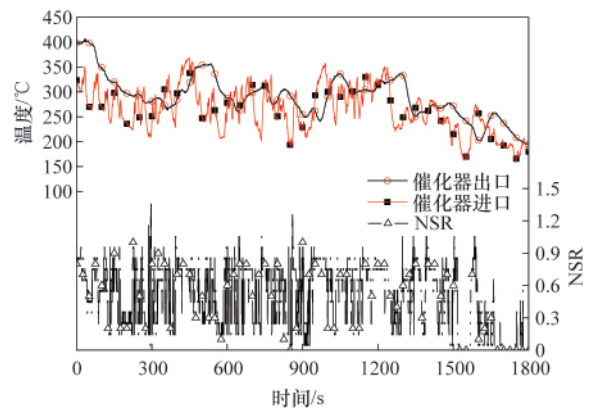


图8 瞬态循环标定

Fig. 8 Transient cycle calibration

表 3 ETC 实验结果 (单位: g/(kW·h))

Table 3 ETC results (unit: g/(kW·h))

	NO _x	HC	CO	PM
排放限值	3.5	0.55	4	0.03
无 SCR 后处理	8.37	0.31	0.52	0.06
有 SCR 后处理	2.9	0.013	0.014	0.026
转化效率/%	65.3	95.8	97.3	56.7

排放均有不同程度的降低。

图 11 是 ETC 工况下通过安装在催化器进出口的 NO_x 传感器测得的瞬态排放情况。由图 11 可知,催化器出口的 NO_x 排放大部分低于 200ppm, 部分工况的 NO_x 排放为 200~400ppm。ETC 循环试验中,虽然工况变化大,但由催化器进出口的温度计算得到的催化剂实际反应温度都较高,有利于提高 NO_x 的转化效率。

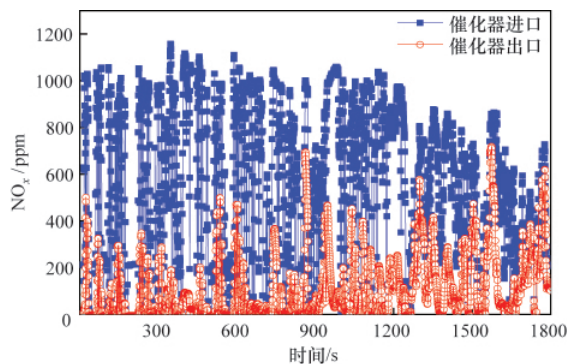


图 11 ETC 循环中催化器进出口的 NO_x 排放

Fig. 11 NO_x emissions before and after SCR catalyst over ETC test

3.3 SCR 系统尿素消耗量分析

采用 SCR 后处理的柴油机能优化燃烧、降低 PM 排放、提高燃油经济性,SCR 消耗的尿素溶液和柴油消耗量相比占很小比例。图 12 是 ETC 循环中柴油、尿素溶液的瞬态消耗量。其中,柴油、尿素溶液的累积消耗量分别是 9.15、0.43kg, 尿素溶液约占柴油消耗量的 4.7%。表明采用该发动机的柴油车运行 100km 大约消耗 32.5%的尿素溶液 2L。

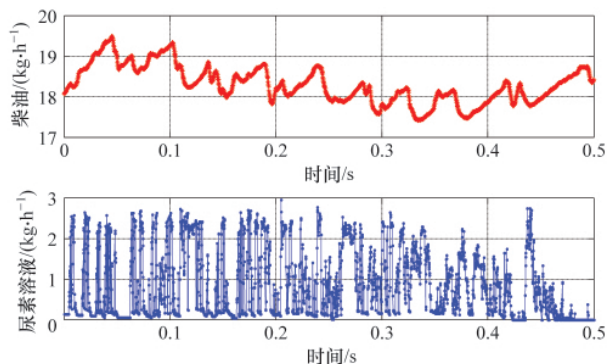


图 12 柴油和尿素水溶液的瞬态消耗量

Fig. 12 Diesel and urea solution consumption over ETC test

4 结论

1) 采用开环控制尿素溶液喷射并经催化器进出口温度补偿的 SCR 电控单元,在柴油机 ESC、ETC 循环实验中, NO_x 排放量低于国 IV 排放限值, 转化效率分别达 65.2%、65.3%。

2) SCR 催化器出口增加的氧化单元可帮助氧化过量的还原剂,避免氨泄漏,不同程度降低 HC、CO 和 PM 排放;其中,SOF 在氧化单元内的氧化反应是 PM 降低的主要因素。

3) SCR 后处理系统消耗的尿素溶液占柴油消耗量的 4.7%,运行 100km 约消耗 2L 尿素溶液,SCR 运行成本较低。

参考文献 (References)

- [1] Robert Bosch GmbH. Diesel-engine management [M]. 4th ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [2] Scamegie B, Miller W R., Bernd Ballmert, *et al.* Recent Dpf/Scr results targeting US2007 and Euro 4/5 Hd emissions [R/OL]. 2003. <http://www.sae.org/technical/papers/2003-01-0774>.
- [3] Hirata K, Masaki N, Ueno H, *et al.* Development of SCR system for heavy-duty commercial vehicles [R/OL]. 2005. <http://www.sae.org/technical/papers/2005-01-1860>.
- [4] Miller W R, Klein J T, Mueller R, *et al.* The development of SCR technology for US heavy duty trucks [R/OL]. 2000. <http://www.sae.org/technical/papers/2000-01-0190>.
- [5] Shost M, Noetzel J, Wu M C, *et al.* Monitoring, feedback and control of urea SCR dosing system for NO_x reduction: utilizing and embedded model and ammonia sensing [R/OL]. 2008. <http://www.sae.org/technical/papers/2008-01-1325>.
- [6] Wang D, Sheng Y, Shost M, *et al.* Ammonia sensor for closed-loop SCR control[R/OL]. 2008. <http://www.sae.org/technical/papers/2008-01-0919>.
- [7] Hu H, Reuter J, Yan J, *et al.* Advanced NO_x aftertreatment system and controls for on-highway duty diesel engines[R/OL]. 2006. <http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-3552>.
- [8] Bevan K E, Taylor W. Simulated performance of a diesel aftertreatment system for US 2010 application [R/OL]. 2006. <http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-3551>.
- [9] Song Q, Zhu G. Model-based closed-loop control of urea SCR exhaust aftertreatment system for diesel engine [R/OL]. 2002. <http://www.sae.org/technical/papers/2002-01-0287>.
- [10] Hamada I, Kato Y, Imada N. A unique titania-based SCR NO_x catalyst for diesel exhaust emission control [R/OL]. 2005. <http://www.sae.org/technical/papers/2005-01-1859>.
- [11] Saito S, Shinozaki R, Suzuki A. Development of SCR system for commercial vehicle-basic characteristics and improvement of NO_x conversion at low load operation[R/OL]. 2003. <http://www.sae.org/technical/papers/2003-01-3248>.
- [12] Rusch K, Hofmann L, Zuerbig J, *et al.* PM-reduction by SCR-catalyst [R/OL]. 2003. <http://www.sae.org/technical/papers/2003-01-0777>.

(责任编辑 陈广仁)