

性能与排放

基于 NO_x -MAP 的 SCR 闭环控制方法降低 NO_x 排放的研究

温任林¹, 温云捷²

(1. 无锡威孚力达催化净化器有限责任公司, 江苏 无锡 214177; 2. 南京大学化学化工学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 提出了基于 NO_x -MAP 的 SCR 闭环控制方法。详细介绍了 SCR 闭环控制系统的构成, NO_x -MAP 的建立以及 SCR 闭环控制策略。WHSC 和 WHTC 排放试验结果表明: 采用基于 NO_x -MAP 的 SCR 闭环控制方法能有效降低 NO_x 排放, 同时可有效减少因不恰当的尿素喷射导致的 NH_3 逃逸, 从而使车用柴油机 NO_x 排放满足国六标准。

关键词: 柴油机; SCR; NO_x ; 闭环控制

中图分类号: TK421.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2018)03-0006-04

A Study on the Closed-Loop Control Method for SCR Based on NO_x -MAP to Reduce NO_x Emission

Wen Renlin¹, Wen Yunjie²

(1. Wuxi Weifu Lida Catalytic Converter Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214177;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210023)

Abstract: The closed-loop control method for SCR which based on NO_x -MAP is presented. The constitution of the closed-loop control system for SCR, the creation of NO_x -MAP and the strategy of closed-loop control are described in detail. The results of WHSC and WHTC emission experiments indicate that this method of closed-loop control based on NO_x -MAP could effectively reduce NO_x from engines as well as NH_3 escape caused by incorrect urea injection, therefore it makes the NO_x emissions of vehicle engines satisfied with China VI Phase standard.

Key words: diesel engine; SCR; NO_x ; closed-loop control

0 引言

中重型柴油机降低 NO_x 的后处理技术主要有二种: EGR + DOC + DPF (废气再循环 + 氧化催化器 + 颗粒捕集器) 和 SCR (选择性催化还原)。前者是利用 EGR 控制柴油机燃烧室最高燃烧温度, 在机内减少 NO_x 生成, 再利用 DOC 和 DPF 降低 HC、CO 及 PM 等排放物; 后者则是通过强化柴油机机内燃烧来降低 PM, 然后利用 SCR 技术对 NO_x

进行催化还原, 以降低 NO_x 排放。SCR 技术因 NO_x 转化效率高, 同时柴油机能保持良好的燃油经济性和动力性, 而获得广泛应用。

SCR 高 NO_x 转化率的关键因素有二: 一是按进入反应区的 NO_x 浓度及去除率精确控制尿素 (NH_3) 溶液的喷入量; 二是促成高转化率的 SCR 催化剂。在满足国五排放标准阶段, 采用的是开环控制尿素溶液的喷入量; 但在对 NH_3 溢出和 NO_x 排放有更严格限制的国六排放阶段^[1], 采用开环控制策略满足控制精度要求的难度较大, 而采用闭

收稿日期: 2017-07-26; 修回日期: 2017-09-11

基金项目: 国家重点“大气污染成因与控制技术研究”专项资助项目, 项目编号: 2017YFC0211300。

作者简介: 温任林(1966-), 男, 研究员, 主要研究方向为柴油机电控燃油系统及发动机排放后处理技术, renlin.wen@weifu.com.cn。

环控制则可以精确控制尿素溶液的喷射量, 在满足 NO_x 转化率的同时减少 NH_3 的溢出^[2-3]。

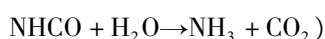
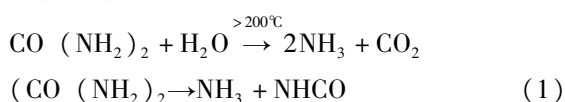
本文提出了基于 NO_x -MAP 的 SCR 闭环控制方法, 详细介绍了 SCR 闭环控制系统的构成, NO_x -MAP 的建立和闭环控制策略及排放试验结果。

1 SCR 原理

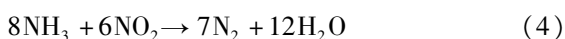
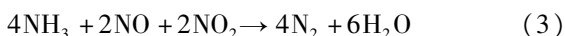
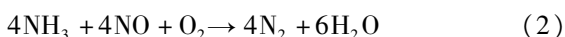
1.1 SCR 化学反应原理

SCR 原理如图 1 所示。在柴油机废气中喷入氨、尿素或其它含氮化合物还原剂 (车用 SCR 还原剂为浓度为 32.5% 的尿素溶液), 使废气中的 NO_x 还原成 N_2 和 H_2O 。其主要化学反应如下:

(1) 尿素溶液热水解反应



(2) NO_x 还原反应



以上化学反应显示: 柴油机废气中 NO_x 还原反应过程很复杂, 有较多因素会影响其还原反应效率。

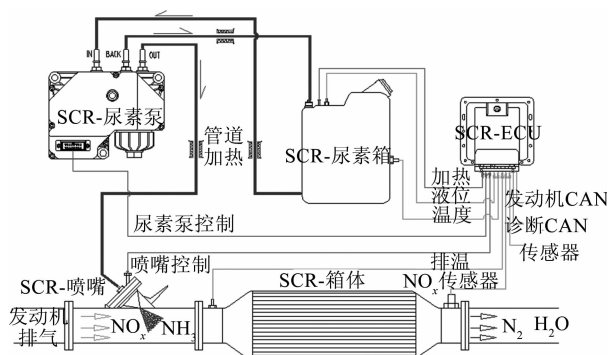


图1 车用SCR系统工作原理示意图

1.2 影响SCR系统还原 NO_x 的主要因素

NO_x 转化效率 η_{NO_x} 定义为:

$$\eta_{\text{NO}_x} = ((\text{NO}_{x0} - \text{NO}_{x1}) / \text{NO}_{x0}) \times 100\% \quad (5)$$

式中: NO_{x0} 为还原反应前的 NO_x ; NO_{x1} 为还原反应后的 NO_x 。

影响SCR系统 NO_x 转化率的因素主要包括: 温度、催化剂类型以及催化剂对 NH_3 的存储能力等。

1.2.1 温度对不同类型SCR催化剂性能的影响

图2为温度对不同类型SCR催化剂转化 NO_x 效率的影响。从图中可以看出: 对钒基SCR催化

剂, 它有一个温度窗口, SCR在这个温度窗口内有较高的 NO_x 转化率, 如在温度窗口 300 ~ 550 $^\circ\text{C}$ 范围内, NO_x 转化率都大于 80%, SCR工作在这个温度窗口以外, NO_x 转化率明显降低。而 Fe 基分子筛催化剂在较高温度段内都保持较高的 NO_x 转化率。Cu 基分子筛催化剂则在较低温度且较宽温度窗口内 NO_x 转化率都很高。

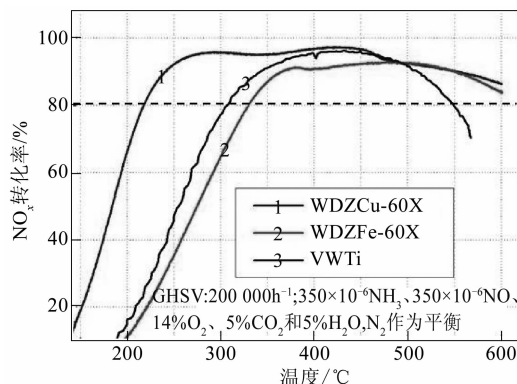


图2 温度对不同类型SCR催化剂性能的影响

1.2.2 温度对分子筛催化剂吸附 NH_3 能力的影响

从公式(1)及以上分析可知: 尿素溶液热水解成 NH_3 需要较高的温度, 在低温时SCR催化剂转化 NO_x 的性能较差, 也即柴油机排气温度较低时 NO_x 转化率较低。

Cu 分子筛催化剂具有吸附氨气的特性, 如图3, 催化剂吸附氨气量可以用如下公式表达:

$$\text{NH}_{3\text{storage}} = \text{NH}_{3\text{in}} - \text{NH}_{3\text{out}} - (\text{NO}_{x\text{in}} - \text{NO}_{x\text{out}}) \quad (6)$$

式中: $\text{NH}_{3\text{storage}}$ 为催化剂吸附的 NH_3 ; $\text{NO}_{x\text{in}}$ 为还原反应前的 NO_x ; $\text{NH}_{3\text{in}}$ 为还原反应前的 NH_3 ; $\text{NO}_{x\text{out}}$ 为还原反应后的 NO_x ; $\text{NH}_{3\text{out}}$ 为还原反应后的 NH_3 。

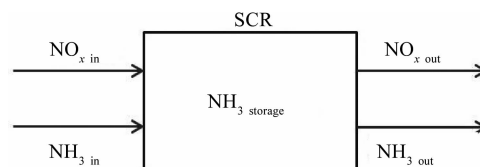


图3 Cu基分子筛吸附 NH_3 示意图

Cu 分子筛催化剂吸附氨气的量在不同温度下是变化的, 如图4, 在低温时吸附氨气量较大, 随着温度的上升, 吸附能力在下降。充分利用 Cu 分子筛催化剂在不同温度下吸附 NH_3 的能力, 可以改善低温及瞬态过程 NO_x 的转化率。

2 基于 NO_x -MAP 的闭环控制方法

2.1 SCR 系统组成

如图1所示, SCR 催化还原系统主要由 SCR 催化器总成 (SCR 箱体) 和尿素喷射系统二部分

组成。尿素喷射系统又由以下三部分组成:

- (1) 各种传感器 (NO_x 传感器、排气温度传感器等) 及信号输入;
- (2) 尿素喷射控制器 (DCU);
- (3) 尿素喷射装置 (尿素泵、尿素喷嘴、尿素罐 (箱)、尿素输送管等)。

传感器及信号输入的信息主要有 NO_x 量、排气温度、柴油机转速和扭矩等, 反映了柴油机的实际工况及其对应的排气流量; DCU 据此查找 MAP 中对应的尿素喷射量, 并输出与之相应的控制量至尿素喷射装置; 尿素喷射装置根据 DCU 的执行指令精确控制喷嘴开度, 精确计量尿素喷射量, 并使之雾化。从而实现对尿素喷射量的精确控制。

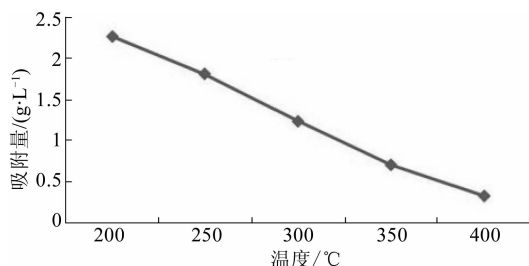


图4 温度对 Cu 基分子筛吸附 NH_3 性能的影响

2.2 基于 NO_x -MAP 的闭环控制策略

由于柴油机不同工况 NO_x 排放以及排气温度都不一样, 这就要求每一个柴油机工况对应有一个最优化的 NO_x 转化效率。而对应不同工况点最优化 NO_x 转化效率的界定通常认为是: 在该工况点喷射尿素溶液后, 柴油机排气中的 NH_3 泄漏量在标准限值内而 NO_x 最低。

2.2.1 最优化 NO_x 转化效率 MAP 的确定

根据最优化 NO_x 转化率的定义, 在 WHSC 试验循环十三工况点中, 每个柴油机工况点依次按照以下试验方法确定该工况点的催化器转化效率, 然后利用插值法计算出其它工况点的 NO_x 转化效率。如图 5, 在每个工况点, 依次增加尿素喷射量, 找出催化器下游 NO_x 最小值, 如图中 1 处为 NO_x 最小值, 即催化器转化效率最大点; 考虑到催化器老化等特性以及排放目标值, 一般选 2 处的 NO_x 排放值用作计算最优化转化效率, 并写入相应的 NO_x -MAP 中, 同时也将与之对应的尿素喷射量 (PWM) 写入 PWM-MAP 中。依此类推, 从而形成如图 6 所示的柴油机全工况目标 NO_x -MAP 图和如图 7 所示的基础尿素喷射量 PWM-MAP 图。

由 1.2.1 和 1.2.2 可知: 温度影响 SCR 催化剂性能及分子筛催化剂吸附 NH_3 能力, 因此, 须要依据催化器 NO_x 转化率 (温度-功率) 特性曲线

确定温度修正系数 T-MAP 图, 用于修正尿素的过多喷射, 防止 NH_3 泄漏。

修正后 SCR 喷射系统尿素喷射量为:

$$PWMT = PWM_{\text{MAP}} \times T_{\text{MAP}} \quad (7)$$

式中: $PWMT$ 为对应柴油机工况的尿素喷射量; PWM_{MAP} 为基础尿素喷射量, 对应柴油机工况由 PWM-MAP 计算得到; T_{MAP} 为温度修正系数, 对应柴油机工况, 由 T-MAP 计算得到。

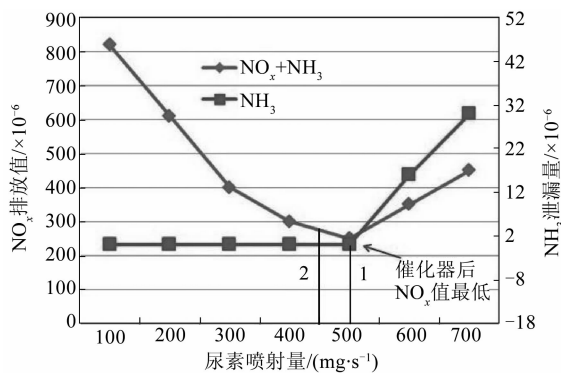


图5 确定 NO_x 最低值点示意图

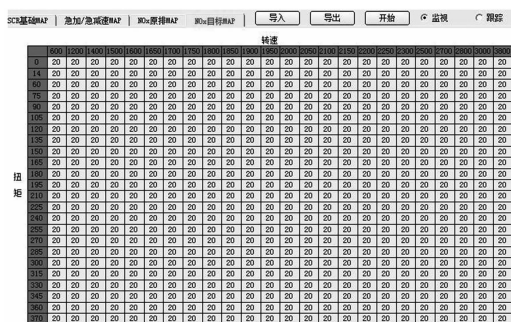


图6 目标 NO_x -MAP 图示意图

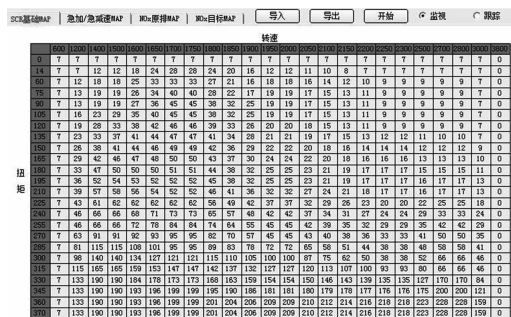


图7 基础尿素喷射量 PWM-MAP 示意图

2.2.2 基于 NO_x -MAP 闭环控制的实现

由于柴油机运行的瞬态性和环境条件的波动性, 以及国六排放法规对 NO_x 排放的限制更严格, 要求 SCR 尿素喷射系统具有更高的喷射稳定性, 且要求喷射精度更高、响应特性更快。

基于 NO_x -MAP 的闭环控制策略就是以最优化的 NO_x 作为目标, 通过 PID 控制算法^[4] 计算尿素

喷射量校正值，在对应工况尿素喷射量的基础上进行校正，实现快速闭环控制。

闭环控制尿素喷射量由以下公式计算得到：

$$PWMT_n = PWMT_{n-1} + K_P(e_n - e_{n-1}) + K_I e_n + K_D(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (8)$$

式中： $PWMT_n$ 为对应柴油机工况的第 n 次校正后的喷射尿素量； $PWMT_{n-1}$ 为对应柴油机工况的第 $n-1$ 次校正后的喷射尿素量； K_P 为比例系数； K_I 为积分系数； K_D 为微分系数； e_n 为第 n 次实测 NO_{xn} 值与目标 NO_x 值的偏差值， $e_n = NO_{xn} - NO_{x\text{目标}}$ ； e_{n-1} 为第 $n-1$ 次实测 NO_{xn-1} 值与目标 NO_x 值的偏差值； n 为采样序号， $n=1, 2, \dots$ 。

3 柴油机排放试验及分析

3.1 柴油机技术参数及试验设备

3.1.1 柴油机技术参数

试验用柴油机技术参数见表 1。

表 1 柴油机技术参数

额定功率/kW	105
最大净扭矩/ (N·m)	370
冲程	4
气缸数	4
压缩比	17.3 : 1
额定转速/ (r·min ⁻¹)	3 400
最大扭矩转速/ (r·min ⁻¹)	1 600 ~ 2 400
排量/L	2.98
每缸气门数量	4
怠速/ (r·min ⁻¹)	800

3.1.2 排放试验设备

排放试验设备如表 2。

表 2 试验设备

设备	型号	生产厂家
电力测功机	HT460	HORIBA
排放分析仪	MeXA-7100D	HORIBA
天平秤	XP2U	METTLER

3.2 排放测试结果与分析

柴油机后处理采用 EGR + DOC + CDPF + SCR 方案，在台架上分别进行了 WHSC 和 WHTC 试验，表 3、表 4 为试验结果。从表中可以看出：NH₃ 控制在限值范围内，采用基于 NO_x-MAP 的 SCR 闭环控制方法，能有效降低 NO_x 排放并达到国六排放标准，相比较采用基础喷射量 MAP 控制 SCR，前者也较大幅度地降低了 NO_x 值。

图 8、图 9 和图 10、图 11 分别为 WHSC、WHTC 试验中 NO_x 浓度和对应的喷射量（PWM）

过程数据，为了使曲线清晰可辨，WHTC 试验只截取第 800 ~ 1 300 s 之间的试验数据。可以看出：基于 NO_x-MAP 的 SCR 闭环控制方法是在柴油机工况对应的基础喷射量 MAP 上，根据 NO_x 的偏差量，通过 PID 算法对喷射量修正，从而实现对 NO_x 精确控制。

表 3 WHSC 试验结果

排放	NO _x / (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	PM/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	NH ₃ / ×10 ⁻⁶
国六标准排放限值	0.4	0.01	10
发动机原排放	4.28	0.01	0
基础喷射量 MAP 控制	0.38	0.005	1.4
NO _x -MAP 闭环控制	0.32	0.005	0.17

表 4 WHTC 试验结果

排放	NO _x / (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	PM/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	NH ₃ / ×10 ⁻⁶
国六标准排放限值	0.46	0.01	10
发动机原排放	4.62	0.014 7	0
基础喷射量 MAP 控制	0.29	0.003	1.02
NO _x -MAP 闭环控制	0.23	0.004	0.32

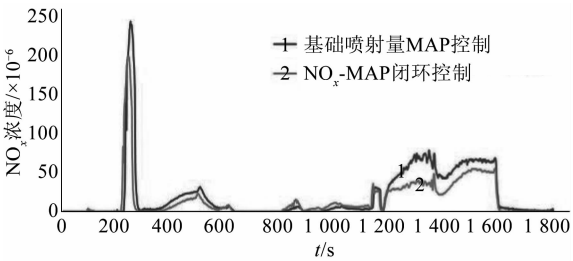


图 8 WHSC 试验 NO_x 过程数据

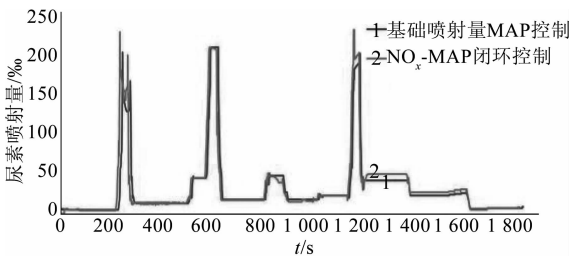


图 9 WHSC 试验尿素喷射量（PWM）过程数据

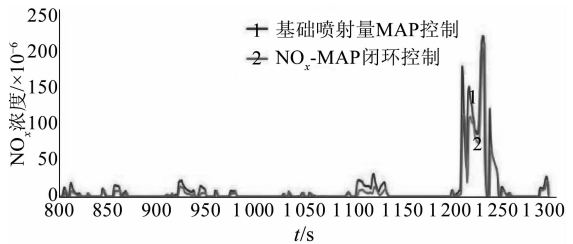


图 10 WHTC 试验 NO_x 过程数据

（下转第 20 页）

4 驱动电路试验研究

借助测试仪器 Tektronix TDS 2024C, 针对某型喷油器开展了驱动电路性能测试。通过调整图 6 中的可变电阻 R8, 将 BOOST 转换电压设定为 85 V; 通过调整图 7 中电位器 R12 和 R15, 将电磁阀峰值电流设定为 23 A, 维持电流设定为 9 A。驱动测试结果见图 9。

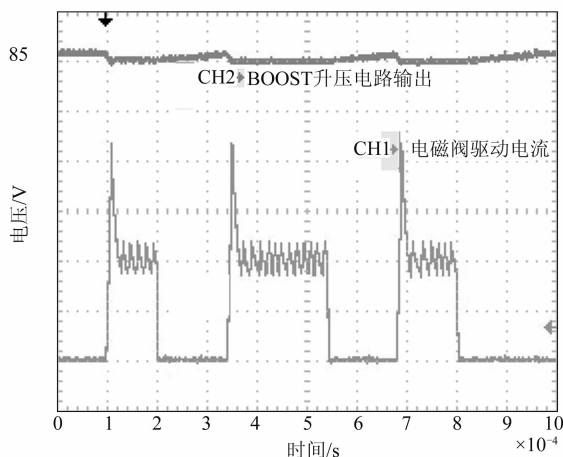


图9 高低压分时驱动电路测试结果

图 9 中, CH2 表示 BOOST 升压电路的电压变化 (目标电压为 85 V); CH1 是驱动回路中 0.1Ω

采样电阻上的电压, 100 mV 代表 1 A 驱动电流。测试结果表明: 电磁阀通电后, 驱动电流达到 23 A 时 BOOST 电压下降了 5 V 左右; 当电磁阀断电后, 电压 0.6 ms 后即恢复到 86 V, 达到预期目标。

5 结 论

通过分析喷油器电磁阀数学模型, 开展了以电流为目标的驱动控制理论研究。借助仿真软件设计了采用电流反馈控制的高低压分时驱动电路, 并获得了满足要求的驱动电流。试验结果表明: 所设计的驱动电路达到了预期目标。

参考文献

- [1] 安士杰, 欧阳光耀. 电控喷油器控制电磁阀理论与试验研究 [J]. 内燃机学报, 2003, 21 (5): 356-360.
- [2] 李克, 苏万华, 郭树满. 高速电磁阀分时驱动电路可靠性与一致性研究 [J]. 内燃机工程, 2011, 32 (2): 33-38.
- [3] 刘仁喜. 高压共轨电控系统喷油器驱动电路优化 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [4] 丁珏, 曾伟, 沈妍, 等. 共轨电控单元新型升压及电流闭环控制电路设计 [J]. 现代车用动力, 2012 (1): 46-50.

(上接第9页)

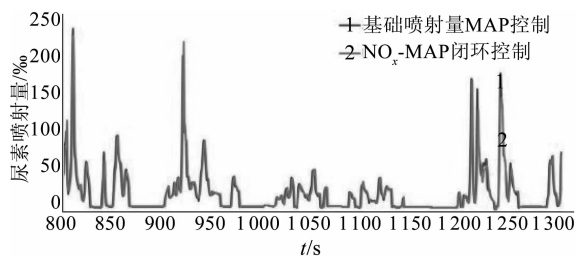


图11 WHTC 试验尿素喷射量 (PWM) 过程数据

4 结 论

本文提出的基于 NO_x -MAP 的 SCR 闭环控制方法是在柴油机各工况点依次增加尿素喷射量, 找出催化器下游 NO_x 最小值及与之对应的尿素喷射量, 分别形成柴油机全工况目标 NO_x -MAP 图和基础尿素喷射量 PWM-MAP 图; 依据催化器 NO_x 转化率特性曲线确定温度修正系数 T-MAP 图; 通过 PID 控制算法计算尿素喷射量校正值, 在对应工况尿素

喷射量的基础上进行校正, 实现对与 NO_x 去除量相适应的尿素喷射量的精确控制。从而达到了有效降低 NO_x 排放的同时减少因不恰当的尿素喷射导致的 NH_3 逃逸的目的, 使车用柴油机 NO_x 排放值满足国六标准。

参考文献

- [1] 环境保护部大气环境管理司. 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 (中国第六阶段) (征求意见稿) [R]. 2016.
- [2] 胡静, 赵彦光, 陈婷, 等. 重型柴油机尿素-SCR 闭环控制系统的研究 [J]. 汽车工程, 2011, 33 (6): 482-485.
- [3] 李朋. 柴油机 SCR 系统闭环控制研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [4] 张涛. 机电控制系统 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.