doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.046

柴油机 Urea－SCR 控制系统设计与试验

胡　杰[1,2]　王立辉[1,2]　王天田[1,2]

(1.武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室，武汉 430070；
2.武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心，武汉 430070)

摘要：SCR 后处理技术是目前降低柴油机 NO_x 排放量的主流技术，首先基于自主开发的 SCR 控制系统，阐述了系统的组成、工作及反应原理。其次通过协调控制策略以确保系统内部各模块运转正常，通过原机排放模型和化学反应动力学模型作为前馈控制得到尿素基本供给量，通过排温修正模型进行瞬态排温修正，利用发动机排温和储氨量的对应关系对氨泄漏进行有效控制，根据 OBD 法规要求当发动机 NO_x 排放量超标时进行报错。最后对系统中的各类传感器、执行器特性及原机排放 MAP、目标转化效率 MAP 进行了标定。系统与某型号发动机匹配良好，经 ESC 循环测试 NO_x 比排放量为 1.52 g/(kW·h)，ETC 循环测试 NO_x 比排放量为 2.09 g/(kW·h)，控制系统能够有效地降低 NO_x 排放量，满足国Ⅳ排放法规。

关键词：重型柴油机；SCR 系统；控制策略；标定

中图分类号：TK421+.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2016)02-0349-08

Design and Test of Urea－SCR Control System for Diesel Engine

Hu Jie[1,2]　Wang Lihui[1,2]　Wang Tiantian[1,2]

(1. *Hubei Key Laboratory of Advanced Technology of Automotive Parts*, *Wuhan University of Technology*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Hubei Collaborate Innovation Center for Automotive Components Technology*, *Wuhan University of Technology*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: SCR after-treatment is the mainstream technology to reduce the NO_x emission amount. The self-developed SCR system's composition, operating and reactor mechanism were presented, and the coordinate control strategy was used to assure that the system's inner module was operated regularly, the original emission model and chemical reaction kinetics model were adopted to obtain the raw value of urea supply amount, the exhaust temperature correction model was introduced to fix the instantaneous emission temperature, the relation between exhaust temperature and amount of NH_3 storage was used to effectively control the NH_3 leak amount, and failure warning was made according to the OBD regulation when NO_x emission exceeded the standard. Each operation point had a NH_3 coverage ratio threshold which can ensure NH_3 leakage volume ratio was less than 1.0×10^{-5} during the rapid heating process and try to improve the NO_x conversion efficiency. According to the research results of the NH_3 coverage ratio and storage, the estimation model was established, and the leakage control strategy was put forward. The sensors and actuators of the system, original machine emission MAP and target conversion rate MAP were calibrated. The dosing control unit using above control strategy was adopted in the target engine. Test results showed that the brake specific emissions of NO_x in ESC and ETC were 1.52 g/(kW·h) and 2.09 g/(kW·h), respectively, which indicated that the self-developed SCR control system can effectively reduce the NO_x emission amount and reach the national Ⅳ emission regulation.

Key words: heavy diesel engine; selective catalytic reduction system; control strategy; calibration

收稿日期：2015－05－15　修回日期：2015－07－06

基金项目：国家自然科学基金项目(51406140)和国际合作项目(2012DFA11180)

作者简介：胡杰(1984—)，男，副教授，主要从事发动机电控及排放控制技术和车载诊断技术研究，E-mail：auto_hj@163.com

引言

随着我国汽车工业的迅猛发展,汽车排放污染物已成为我国空气污染的重要来源之一,排放物中的 NO_x 是造成雾霾、光化学烟雾污染的重要原因[1]。据国家环保部门统计[1]:柴油车 NO_x 排放占污染物排放总量的 70%,柴油车尤其是重型柴油车已成为我国机动车 NO_x 排放的主要分担者,急需重点控制。自 2015 年 1 月 1 日起,我国已在全国范围内,对重型柴油车实施国Ⅳ排放标准。选择性催化还原(SCR)技术具有抗硫性强、燃油消耗量少及原机改动小等优点[2],其中氨选择性催化还原(Urea - SCR)技术是广泛用于重型柴油机 NO_x 机外净化的技术之一[3]。

目前 SCR 系统主要采用基于脉谱的前馈控制方式,但由于无反馈和 NO_x 排放模型控制精度不足等因素,导致其精度低,NH_3 泄漏量大。HJ 451—2008 要求催化剂效率不低于 80%,国 V 柴油机要求 NO_x 转化效率不低于 70%,所以 SCR 系统匹配到国 V 标准只存在 10% 的余量[4]。本文开发以原机排放预估模型和化学动力学模型作为前反馈的 SCR 控制系统[5],研究催化器的储氨能力和变工况对控制策略的影响,提出更为精确的控制策略。

1 系统介绍

1.1 Urea - SCR 系统

如图 1 所示,开发的 SCR 系统主要由尿素溶液供给系统(尿素箱、尿素供给管路及尿素泵),相关传感器(催化器前后温度传感器、NO_x 传感器、液位传感器等),SCR 催化器,喷射控制单元(Dosing control unit,DCU)组成。尿素喷射方式采用无空气辅助式,尿素泵在喷嘴前的管路中建立足够高的压力,直接实现尿素的高压喷射。催化器采用集催化器和消声器为一体的钒基催化器,催化剂容量为 13.5 L,催化器载体为 400 目/inch^2。

系统工作时,控制系统 DCU 接收来自发动机 ECU 的转速和负荷信号,并采集尿素溶液温度、尿素液位、排气温度等信号,按照储存在 DCU 中的控制策略,向排气管中喷入尿素溶液。排气通过催化器表面时与喷入排气管中的尿素溶液混合,尿素溶液在排气管中经过热解、水解等一系列反应后生成 NH_3 和异氰酸,反应式为

$$(NH_2)_2CO \longrightarrow NH_3 + HNCO \quad (1)$$

异氰酸经过水解反应生成 NH_3 和 CO_2,反应式为

$$HNCO + H_2O \longrightarrow NH_3 + CO_2 \quad (2)$$

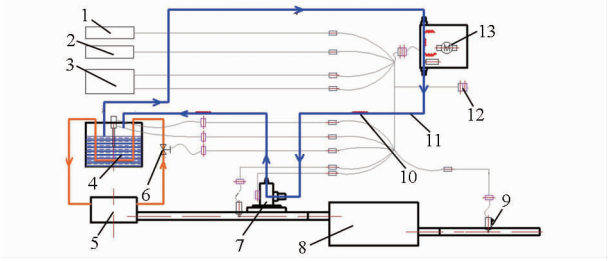

图 1 SCR 系统组成

Fig. 1 Composition of SCR system

1. 诊断接口 2. 蓄电池 3. 发动机 ECU 4. 尿素罐 5. 发动机 6. 加热水阀 7. 喷嘴 8. SCR 催化器 9. NO_x 传感器 10. 加热电阻丝 11. 尿素管路 12. DCU 13. 尿素泵

在 SCR 催化器中,NO 和 NO_2 与 NH_3 进行催化还原反应,最终生成 N_2 和 H_2O,主要反应为

$$4NH_3 + 4NO + O_2 \longrightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (3)$$

$$4NH_3 + 2NO + 2NO_2 + O_2 \longrightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (4)$$

式(3)为标准 SCR 反应,式(4)为快速 SCR 反应。发动机尾气中 NO_x 的主要成分为 NO,快速 SCR 反应在低温环境下的反应速率是 SCR 标准反应的 17 倍,为提高 NO_x 的转化效率,常在催化器上游安装一个预氧化装置将部分 NO 先氧化成 NO_2。

1.2 SCR 控制系统

系统 DCU 主要由电源模块、微控制器模块、信号预处理模块、驱动模块,CAN 总线通信模块组成。电源管理模块采用 LM2576 芯片,可提供 2 个 5 V 和 1 个 12 V 供电。采用 MC9S12XEQ512 作为控制芯片。AD 模块用于采集温度和压力等模拟信号。PWM 模块实现对尿素泵和尿素喷嘴的调节。尿素泵驱动采用驱动芯片 BTS7960B 组成的全桥驱动器。DCU 有 3 路 CAN 接口,其中 CAN0 用于获取发动机参数,如发动机工况信息和 NO_x 排放,CAN1 用于 DCU 与标定软件的通讯,CAN4 用于 OBD 诊断接口。控制系统结构如图 2 所示。图 3 为 SCR 控制器 DCU。

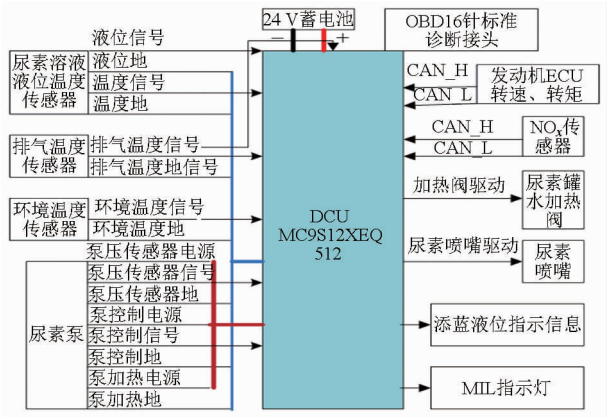

图 2 控制系统结构

Fig. 2 Structure of control system

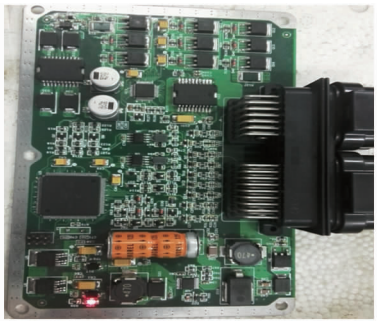

图 3　DCU 硬件实物图

Fig. 3　DCU hardware diagram

2　SCR 系统控制策略

控制策略要求 NO_x 排放满足国Ⅳ标准 3.5 g/(kW·h)[6]，同时控制氨泄漏量平均值在 1.0×10^{-5} 以下，最大值在 2.5×10^{-5} 以下[7-8]。SCR 系统控制策略从功能上可分为协调控制策略，尿素计量控制策略，氨泄漏量控制策略，加热控制策略及 NO_x 排放超标检测控制策略。

2.1　协调控制策略

为保证系统运行的可靠性和稳定性，需设计一种协调逻辑以确保系统内部各模块运转正常，保证尿素泵的正常工作，确保对 NO_x 转化效率和 NH_3 泄漏量的最优控制，如图 4 所示。

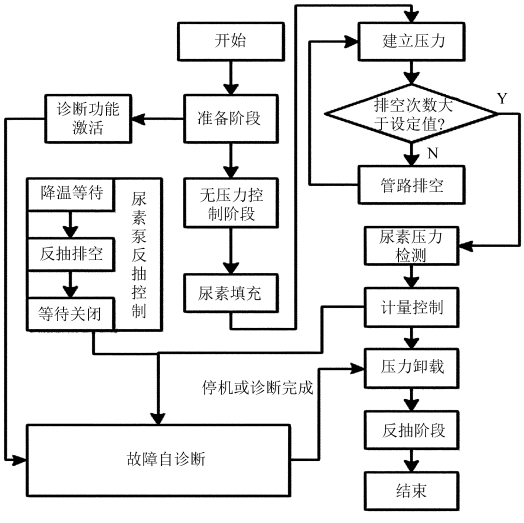

图 4　系统协调控制策略

Fig. 4　System coordination control strategy

当钥匙开关打到 ON 挡时，DCU 上电后系统进行初始化和自检，若无故障则进入无压力控制阶段并监控催化器的状态，当催化器载体温度大于 210℃，尿素泵开始工作，使得尿素供给管路里充满尿素溶液，压力建立后管路排空。重新建立压力，DCU 对尿素泵进行闭环控制使其压力维持在 0.6 ~ 0.7 MPa。进入计量模式，对尿素泵采取 PID 调速，使泵压维持在 0.7 MPa。控制器发出控制信号使尿素喷嘴开始喷射尿素溶液，DCU 根据发动机转速，负荷等工况信息来控制尿素喷射量。关闭点火开关时，尿素泵压力卸载后进入尿素泵反抽阶段，反抽排空完成后 SCR 系统关闭[9]。

2.2　尿素计量控制策略

2.2.1　尿素基本喷射量

稳态工况尿素基本供给量控制是以原机排放预估模型和表征催化器 NH_3/NO_x 化学反应当量比的化学动力学模型作为前反馈，计算 NH_3 的理论需求量，并根据当前工况下 NO_x 目标转化效率[10]调整尿素供给量。

原机排放预估模型是根据发动机转速和负荷百分比通过查表获得当前工况下发动机废气质量流量和 NO_x 体积分数，然后根据当前进气温度、冷却液温度和增压压力进行修正。

SCR 催化器化学反应动力学模型能够估算出催化器内部 NH_3/NO_x 化学反应当量比。研究发现[11]，影响氨氮当量比的主要因素有温度、NO/NO_2 当量比和催化器的老化程度。温度和 NO/NO_2 当量比可看成影响催化器内部 NH_3/NO_x 化学反应当量比的单值函数，根据催化器的老化程度计算出 NH_3/NO_x 比例老化因子。

SCR 系统催化剂活性会随着发动机使用时间的增加而不断下降，故应按国家标准 GB 20890—2007 对柴油机 SCR 催化器进行 500 h 耐久性台架运行试验。按照国家标准 GB 17691—2005 在耐久性试验开始的 0 h，100 h(±1 h)，此后每 100 h(±1 h)的固定时间间隔直至耐久性试验结束进行 ESC 循环测试排气污染物。试验结果如图 5 所示。

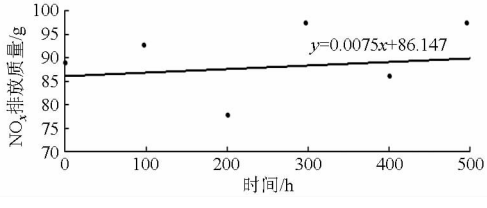

图 5　SCR 催化器 500 h 老化曲线

Fig. 5　500 h aging curve of SCR catalyst

图中的 5 个点分别对应 100 ~ 500 h 耐久性试验 ESC 循环的 NO_x 排放质量，对这 5 个点用最小二乘法得到拟合曲线。经拟合后得到催化器 NH_3/NO_x 比例老化因子曲线为

$$y = 0.007\,5x + 86.147 \tag{5}$$

通过建立温度预估模型、NO/NO_2 成分比预估模型和老化因子模型联合计算出 NH_3/NO_x 催化器内部化学反应当量比。图 6 给出了尿素基本供给量控制模型。

NO_x 质量流量 Q_{NO_x}、NH_3 需求量 Q_{NH_3} 和尿素需

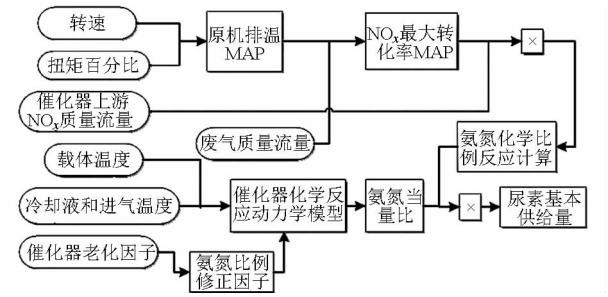

图 6 尿素基本喷射量控制模型

Fig. 6 Urea basic dosing control model

求量 Q_{Adblue} 换算公式分别为(单位为 mg/s)

$$Q_{\text{NH}_3}=\frac{M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{NO}_x}}Q_{\text{NO}_x}\beta\theta \tag{6}$$

$$Q_{\text{NO}_x}=2.777\,8\times10^{-4}\frac{M_{\text{NO}_x}}{M_{\text{EG}}}Q_{\text{EG}}V_{\text{NO}_x} \tag{7}$$

$$Q_{\text{Adblue}}=\frac{0.5}{0.325}\frac{M_{\text{Urea}}}{M_{\text{NH}_3}}Q_{\text{NH}_3} \tag{8}$$

式中 Q_{EG}——废气质量流量, kg/h

V_{NO_x}——废气 NO_x 体积分数,10^{-6}

M_{EG}——废气摩尔质量, g/mol

M_{Urea}——尿素溶液摩尔质量,g/mol

M_{NO_x}——NO_x 摩尔质量,g/mol

M_{NH_3}——氨摩尔质量,g/mol

θ——当前工况下的 NO_x 最大转化效率,为发动机转速和负荷百分比在空速修正下的查表值

β——催化器 NH_3/NO_x 化学反应当量比

2.2.2 尿素喷射量瞬态控制策略

发动机工况突变时由于热容导致催化器温度变化相对滞后,使尿素喷射计算值与实际所需值存在较大差异,为此需要进行排温修正[12],策略如图 7 所示。

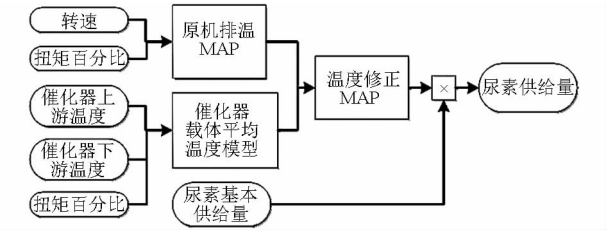

图 7 尿素瞬态控制策略

Fig. 7 Urea dosing control strategy under transient condition

发动机从高温过渡到低温工况,由于催化器的温度阻尼,床温逐渐趋近于稳态温度。当发动机从 1 400 r/min、476 N·m A 工况点过渡到 1 100 r/min、260 N·m B 工况点,尿素喷射量由 758 mL/h 逐渐过渡到 474 mL/h,如表 1 所示。

发动机从低温过渡到高温工况,催化器床温逐渐上升到稳态温度,过渡工况的 NO_x 转化效率低于稳定工况,需减喷尿素防止氨泄漏[13]。发动机从 1 700 r/min、340 N·m 的 C 工况点过渡到 1 900 r/min、544 N·m 的 D 工况点,尿素喷射量由 1 556 mL/h 逐渐过渡到 1 700 mL/h,如表 2 所示。

表 1 A 至 B 工况点尿素喷射量变化

Tab. 1 Urea dosing changes under A to B operation conditions

温度/℃	修正系数	尿素喷射量/(mL·h^{-1})
366	1.60	758
348	1.46	695
330	1.33	632
312	1.22	579
294	1.11	526
273	1.00	474

表 2 C 至 D 工况点尿素喷射量变化

Tab. 2 Urea dosing changes under C to D operation conditions

温度/℃	修正系数	尿素喷射量/(mL·h^{-1})
295	1.00	1 556
315	0.96	1 564
335	0.94	1 573
355	0.93	1 586
370	0.91	1 650
381	0.91	1 700

2.3 氨泄漏量控制策略

控制策略对催化器当前储氨量进行动态测量,建立了氨覆盖度计算模型和氨目标覆盖度模型。如图 8 所示,控制算法监控当前催化器氨覆盖度 θ_{NH_3},并与氨目标覆盖度 $\theta^*_{\text{NH}_3}$ 实时比较,差值超过限值则通过 PID 控制调整尿素供给量。氨的目标覆盖度 $\theta^*_{\text{NH}_3}$ 根据最优目标覆盖度曲线确定。

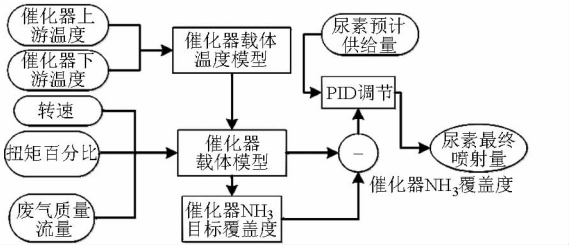

图 8 氨泄漏量控制模型

Fig. 8 NH_3 leakage control model

试验发现,发动机排温与催化器最大储氨量存在相反的峰值,排温越高催化器最大储氨量越低。ESC 工况的排温要高于 ETC 工况,在低排温(小于 350℃)下 ESC 工况的氨目标覆盖度远低于 ETC 工况,随着排温上升,氨目标覆盖度曲线曲线逐渐趋近,如图 9 所示。

2.4 加热控制策略

当尿素水溶液所处的环境温度低于 -11℃时会形成结晶[14]。为保证低温环境下系统的正常使用,

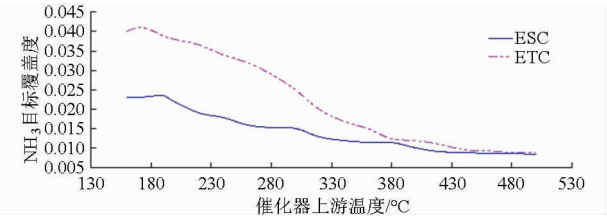

图 9　NH_3最优目标覆盖度曲线

Fig. 9　NH_3 optimal target coverage curves

当尿素溶液温度低于－10℃时需对尿素供给系统进行加热。加热控制的主要部位包括尿素罐、尿素泵及尿素管路，尿素罐的加热控制通过电磁阀来控制发动机冷却水循环来对其进行加热；尿素泵及尿素管路通过带电辅助加热系统对其进行加热。当检测到尿素溶液温度升高到 7℃以上时电磁阀关闭，加热结束。

2.5　NO_x 排放超标检测控制策略

OBD 法规要求当 DCU 检测到 NO_x 比排放量超过 5 g/(kW·h)需激活故障灯。当检测到 NO_x 比排放量超过 7 g/(kW·h)，除进行以上操作，还需激活扭矩限制器。超标监控根据催化器上下游 NO_x 浓度，计算出当前工况的 NO_x 转化效率，根据排放限值确定当前工况的效率阈值，通过两者的比较确定 NO_x 排放是否超标，检测流程如图 10 所示。根据 OBD 要求[15－16]将尿素稀释，按 1∶1比例稀释时 ETC 测试循环 NO_x 排放结果达到 5.61 g/(kW·h)时，故障灯激活；将尿素溶液按 1∶3比例稀释 NO_x 比排放为 7.73 g/(kW·h)时，OBD 系统激活故障灯并启动扭矩限制器[17]。

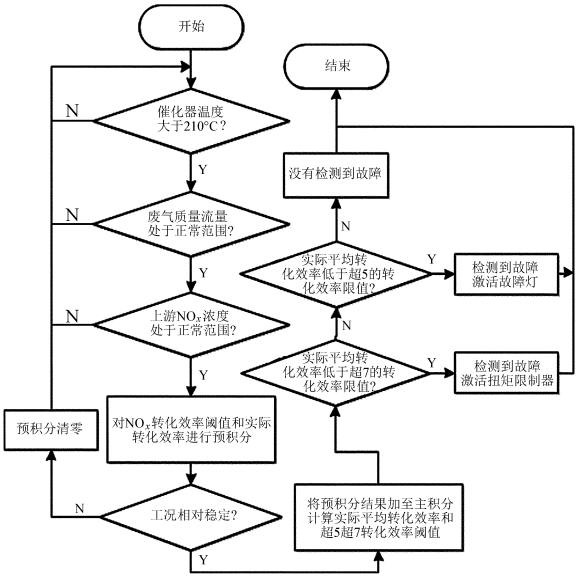

图 10　NO_x 排放超标检测流程

Fig. 10　Testing process of NO_x emissions exceed standard

3　SCR 系统标定

SCR 系统的标定是根据发动机性能和排放法规要求，通过优化尿素喷射装置和尿素喷射量，绘制精确的原机排放 MAP。标定工具采用 Vector 公司的标定软件 CANape，该软件可对电控单元内部参数进行监控及记录，并可对 MAP 的任意节点进行在线修正。配置的测量窗口如图 11 所示。标定平台主要由下位机（SCR 控制器）、上位机（标定软件 CANape）组成。

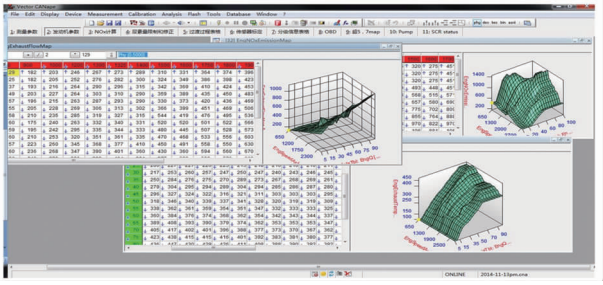

图 11　CANape 标定界面

Fig. 11　CANape calibration interface

3.1　传感器的标定

为保证控制参数采集的准确有效，试验前要对传感器进行标定，主要包括 NO_x 传感器、温度传感器、压力传感器及尿素液位传感器等。其中 NO_x 传感器通过 CAN 与 DCU 进行通信将 CAN 报文发送到 DCU 以便读取[18]。试验中需标定的传感器型号如表 3 所示。

表 3　所需标定的传感器

Tab. 3　Calibration of sensors

传感器类别	型号
催化器温度传感器	PT200 型铂热电阻式
压力传感器	麦克 MPM388 型压阻式
NO_x 传感器	大陆 NO_x 传感器
尿素液位传感器	HR－FZ 型
尿素温度传感器	MJD－3.3K－3970NTC 型

3.2　喷嘴流量特性的标定

尿素喷射计量单元是由一定频率和占空比的方波信号控制尿素喷嘴喷射频率和喷射脉宽[19]。过低的喷射频率会在较大占空比时导致轨压波动，过高的喷射频率会在较小占空比时使喷嘴无法开启。对尿素喷嘴的喷射流量进行标定，方法是在恒定的喷射压力下，标定出喷射量和占空比间的关系[20]，图 12 给出了泵压为 0.5～0.8 MPa、喷射频率为 5 Hz 下喷嘴的流量特性曲线，基本可以覆盖实际的喷射压力范围。

如图 12 所示，喷嘴的喷射流量与占空比呈线性关系，泵压在 0.5～0.8 MPa 的曲线经过拟合后方程分别为

$$m_5 = 1.228x - 0.006\,1 \tag{9}$$

$$m_6 = 1.204x - 0.002\,2 \tag{10}$$

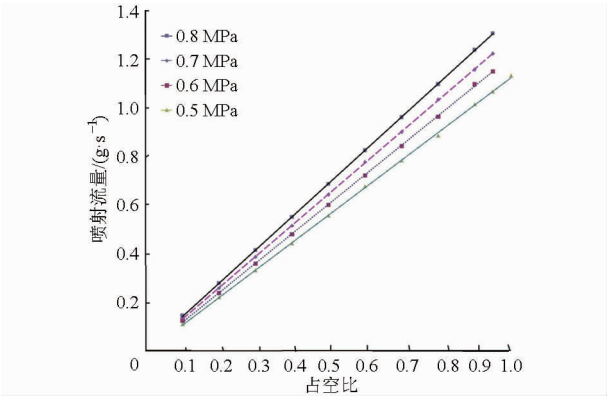

图 12 尿素喷嘴特性标定

Fig. 12 Urea nozzle characteristic calibration

$$m_7 = 1.274\,8x + 0.004\,2 \tag{11}$$

$$m_8 = 1.357\,4x + 0.006 \tag{12}$$

式中 m_f——各种泵压下的质量流量,g/s

x——占空比

3.3 原机 MAP 标定

由于采取了柴油机 ECU 和 DCU 独立控制的方案,SCR 控制器很难获取所需的发动机参数,因此需通过发动机台架试验对柴油机的排气流量特性和原机排放浓度进行标定。标定试验选择发动机转速 900 ~ 2 600 r/min 的工况范围,间隔为 100 r/min;油门开度从 10% 每次增加 10% 直到 100%。图 13 分别为标定的发动机的排气流量、原机排放 NO_x 浓度、循环供油量和排气温度 MAP。

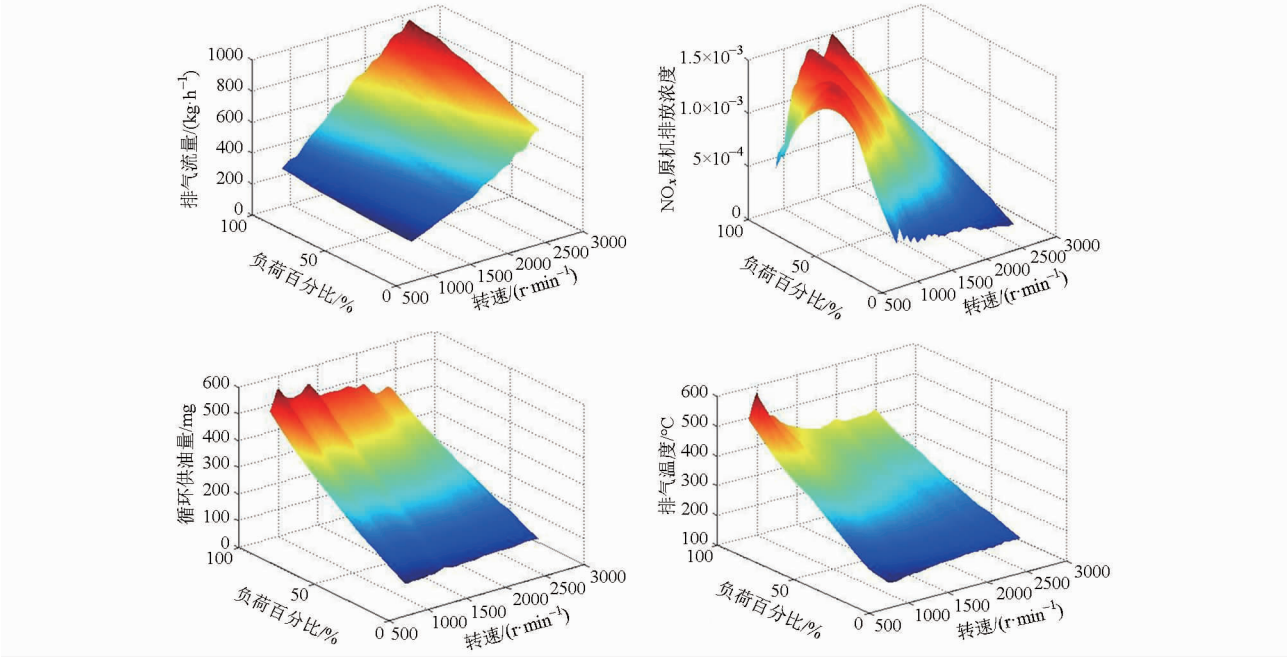

图 13 原机 MAP 标定

Fig. 13 MAP calibration of original machine

3.4 NO_x 最大转化效率 MAP 标定

NO_x 最大转化效率标定的基本步骤为:当工况稳定时,逐渐增加尿素喷射量,控制氨泄露量为 1.0×10^{-5},记录此时尿素喷射量,待下游 NO_x 排放稳定后计算出此时的 NO_x 转化效率,该转化效率即为目标转化效率。将每个工况下的目标转化效率标定为转化效率 MAP,如图 14 所示。

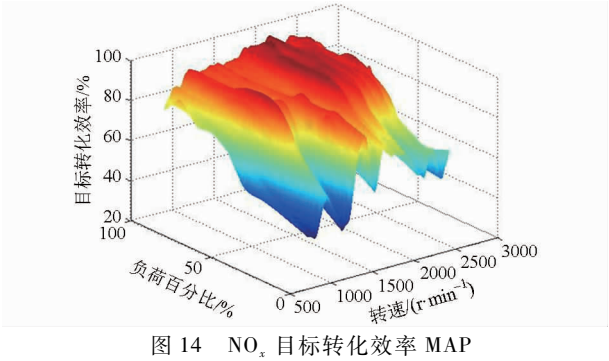

图 14 NO_x 目标转化效率 MAP

Fig. 14 NO_x target conversion efficiency of MAP

4 试验验证

4.1 测试平台搭建

为了验证开发的 SCR 系统的控制效果,搭建如图 15 所示的测试台架。

分别在 SCR 催化器前 1 m 和后 0.5 m 处安装 NO_x 取样管,即端口 1 和端口 2,用于测量催化器前后 NO_x 浓度和废气流量。前后 NO_x 分析仪在每次使用前经过一致性测试,如果发现不一致,加入线性补偿。废气经过 SCR 催化器处理后经过 LDS6 氨分析仪,最后排入地坑。试验所用设备如表 4 所示。

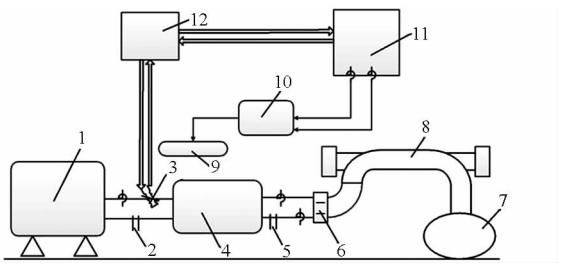

图 15　SCR 系统测试平台

Fig. 15　SCR system test platform

1. 台架发动机　2. 采样端口 1　3. 喷嘴　4. SCR 催化器　5. 采样端口 2　6. SEMTECH－DS　7. 地坑　8. LDS6　9. 执行器　10. DCU　11. 尿素罐　12. 尿素泵

表 4　试验测试设备

Tab. 4　Experimental test equipment

序号	设备	说明
1	试验柴油机	6 缸、排量 6.5 L、额定功率 132 kW、最大转矩 660 N·m
2	AVL4000	测量 SCR 下游 NO_x 浓度
3	SCR 催化器	钒基、13.5 L、400 目/平方英寸
4	ECU 通讯仪	记录工况参数及读取故障码
5	SEMTECH－DS	测量催化器上游 NO_x 等浓度
6	AVL PUMA OPEN 1.2	测量发动机转速、负荷、油门位置、水温等
7	西门子 LDS6	测量排气中氨泄漏量
8	SEMTECH－FEM2	测量废气质量流量

4.2　试验过程

发动机水温应控制在 85℃左右，排气温度控制在 500℃以内，发动机转速稳定 5 min 后，记录 NO_x 的浓度。ESC 循环排温较高，为防止氨泄漏，氨的目标覆盖度应维持较低水平。ESC 测试结果如表 5 所示，加权计算后得到的上游NO_x比排放量为 8.63 g/(kW·h)，下游 NO_x 比排放量为 1.52 g/(kW·h)，平均转化效率为 82.4%，NH_3 的平均泄漏量为 7.23×10^{-6}。

表 5　ESC 排放测试结果(平均值)

Tab. 5　ESC emission test results (average value)

工况点	上游 NO_x 体积分数	下游 NO_x 体积分数	下游 NH_3 体积分数	排气质量流量/(kg·h^{-1})
1	1.93×10^{-4}	2.26×10^{-4}	0	138
2	1.07×10^{-3}	2.03×10^{-4}	1.4×10^{-6}	413
3	6.90×10^{-4}	9.7×10^{-5}	8.4×10^{-6}	480
4	9.60×10^{-4}	1.30×10^{-4}	2.5×10^{-6}	557
5	8.80×10^{-4}	1.50×10^{-4}	3.3×10^{-6}	317
6	1.01×10^{-3}	2.35×10^{-4}	9.0×10^{-7}	361
7	5.10×10^{-4}	3.20×10^{-4}	0	286
8	1.155×10^{-3}	1.10×10^{-4}	1.5×10^{-6}	620
9	4.14×10^{-4}	2.30×10^{-4}	1.67×10^{-5}	409
10	8.97×10^{-4}	6.0×10^{-5}	8.0×10^{-6}	783
11	3.05×10^{-4}	1.80×10^{-4}	1.21×10^{-5}	572
12	6.70×10^{-4}	6.5×10^{-5}	7.8×10^{-6}	753
13	5.08×10^{-4}	3.6×10^{-5}	1.72×10^{-5}	708

ETC 循环排温相对 ESC 循环较低，为提高 NO_x 转化效率，氨覆盖度应保持较高水平，应适当提高尿素喷射量。ETC 循环测试结果如图 16、17 所示，加权计算后得到上游 NO_x 比排放量为 9.21 g/(kW·h)，下游 NO_x 比排放量为 2.09 g/(kW·h)，NO_x 平均转化效率为 77.3%，NH_3 的平均泄漏量为 9.17×10^{-6}。测试结果满足国Ⅳ排放法规，且接近国 V 排放法规。

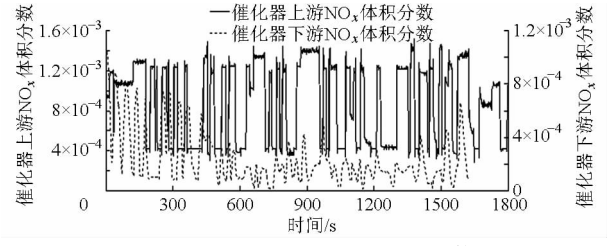

图 16　ETC 排放测试的上、下游 NO_x 体积分数

Fig. 16　Upstream and downstream NO_x concentrations of ETC emission test

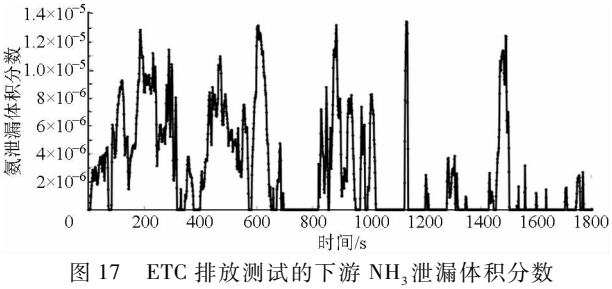

图 17　ETC 排放测试的下游 NH_3 泄漏体积分数

Fig. 17　Downstream NH_3 leakage concentration of ETC emission test

5　结论

(1)设计了一种基于前反馈的 Urea－SCR 控制系统，采用 MC9S12XEQ512 芯片作为系统 DCU。研究了系统的控制策略和标定策略。

(2)控制策略以原机排放预估模型和以表征催化器 NH_3/NO_x 反应当量比的化学动力学模型作为前反馈来计算尿素基本喷射量，对瞬态工况进行了基于温度修正 MAP 的排温修正，极大地提高了瞬态工况的转化效率。

(3)在 AVL 测试平台上进行系统和发动机的匹配，对各类传感器和尿素喷嘴进行标定。通过 ESC 和 ETC 循环对系统性能进行测试，试验结果证明系统工作稳定，可满足国Ⅳ排放法规。

参 考 文 献

1 黄志辉,陈伟程,吉喆,等. 全国机动车污染物排放量——《2013 年中国机动车污染防治年报》(第Ⅱ部分)[J]. 环境与可持续发展,2014(1):91 - 96.

2 胡静,赵彦光,陈婷,等. 重型柴油机尿素 SCR 后处理系统的控制策略研究[J]. 内燃机工程,2011,32(2):1 - 5.
Hu Jing, Zhao Yanguang, Chen Ting, et al. Study of control strategy for Urea - SCR after-treatment system of heavy duty diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(2): 1 - 5. (in Chinese)

3 郭秀丽. 柴油机尿素选择催化还原技术现状及发展趋势[J]. 小型内燃机与摩托车,2014,43(1):79 - 83.
Guo Xiuli. Urea - SCR technology research status and development trend of diesel [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2014, 43(1): 79 - 83. (in Chinese)

4 刘传宝. 柴油机氨基 SCR 系统控制策略与匹配研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
Liu Chuanbao. Research on control strategy and matching of amino SCR system of diesel engine [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)

5 王立志. 柴油机 Urea - SCR 系统控制模型的设计与仿真研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
Wang Lizhi. Developing and simulation research of Urea - SCR system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)

6 Wang Dayu, Yao Sheng, Shost M, et al. Ammonia sensor for closed-loop SCR control[C]. SAE Paper 2008 - 01 - 0919, 2008.

7 杨虎. 柴油机 SCR 电控系统的开发及试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
Yang Hu. Development and experiment on electronic control system of SCR for diesel engine [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)

8 Shost M, Noetzel J, Wu Mingcheng, et al. Monitoring, feedback and control of Urea SCR dosing systems for NO_x reduction: utilizing an embedded model and ammonia sensing[C]. SAE Paper 2008 - 01 - 1325, 2008.

9 辛喆,张寅,王顺喜,等 柴油机 Urea - SCR 催化器转化效率影响因素研究[J]. 农业机械学报,2011,42(9):30 - 34.
Xin Zhe, Zhang Yin, Wang Shunxi, et al. Influence factors of de NO_x behavior in Urea - SCR catalytic converter of diesel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 30 - 34. (in Chinese)

10 Frank Willems, Robert Cloudt, Edwin van den Eijnden, et al. Is closed-loop SCR control required to meet future emission targets [C]. SAE Paper 2007 - 01 - 1574, 2007.

11 Sun Yu, Wang Yueyun, Chang Chenfang, et al. Detection of urea injection system faults for SCR systems [C]. SAE Paper 2012 - 01 - 0431, 2012.

12 姜磊,葛蕴珊,丁焰, 等 柴油机尿素 SCR 系统稳态及瞬态特性研究[J]. 内燃机工程,2010,31(6):38 - 42.
Jiang Lei, Ge Yunshan, Ding Yan, et al. Study on steady and transient characteristics of Urea - SCR system for diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(6): 38 - 42. (in Chinese)

13 刘传宝,颜伏伍,胡杰,等. 柴油机 SCR 后处理系统控制策略[J]. 农业机械学报,2013,44(11):6 - 11.
Liu Chuanbao, Yan Fuwu, Hu Jie, et al. SCR post-processing system control strategy of diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 6 - 11. (in Chinese)

14 胡杰,颜伏伍,苗益坚,等. 柴油机 Urea - SCR 系统控制模型[J]. 内燃机学报,2013,31(2):148 - 153.
Hu Jie, Yan Fuwu, Miao Yijian, et al. Control model of Urea - SCR system for diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(2): 148 - 153. (in Chinese)

15 Gordon J Bartley, Theodore Kostek. SCR Deactivation study for OBD applications[C]. SAE Paper 2012 - 01 - 1076, 2012.

16 Edwin van den Eijnden, Robert Cloudt, Frank Willems, et al. Automated model fit tool for SCR control and OBD development [C]. SAE Paper 2009 - 01 - 1285, 2009.

17 Chen Rui, Wang Xinlei. Model-based fault diagnosis of selective catalytic reduction systems for diesel engines[C]. SAE Paper 2014 - 01 - 0280, 2014.

18 邓成林,罗云威,李浩,等 柴油机 Urea - SCR 系统标定试验研究[J]. 汽车工程,2013,35(1):32 - 37.
Deng Chenglin, Luo Yunwei, Li Hao, et al. An experimental study on the calibration of Urea - SCR system in diesel engine [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(1): 32 - 37. (in Chinese)

19 李浩,黄利平,邓成林. 重型柴油车 Urea - SCR 系统尿素计量阀标定试验研究[J]. 内燃机,2011,6(1):44 - 47.
Li Hao, Huang Liping, Deng Chenglin. The experimental study on Urea - SCR nozzle calibration for heavy diesel [J]. Internal Combustion Engines, 2011, 6(1): 44 - 47. (in Chinese)

20 刘传宝,颜伏伍,朱清山,等. 柴油机 SCR 开环控制系统尿素计量脉谱标定方法[J]. 农业机械学报,2012,43(5):16 - 21.
Liu Chuanbao, Yan Fuwu, Zhu Qingshan, et al. Urea dosing map calibration method of open loop control system of diesel engine SCR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 16 - 21. (in Chinese)