

非道路国四柴油机控制系统开发与试验

胡友耀^{1,2}, 刘庆伟^{1,2}, 刘西文^{1,2}, 魏明亮^{1,2}, 李明建^{1,2}, 雷军^{1,2}, 陈洪涛^{1,2}, 章明^{1,2}
(1. 智能农业动力装备全国重点实验室, 洛阳 471039; 2. 洛阳拖拉机研究所有限公司, 洛阳 471039)

Development and Testing of Control System for Non road National IV Diesel Engine

Hu Youyao^{1,2}, Liu Qingwei^{1,2}, Liu Xiwen^{1,2}, Wei Mingliang^{1,2}, Li Mingjian², Lei Jun^{1,2}, Chen Hongtao^{1,2}, Zhang Ming^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Intelligent Agriculture Power Equipment, Luo Yang471039, China;
2.Luoyang Tractor Research Institute Co.,ltd, Luo Yang ,He Nan 471039, China)

Abstract:Based on the high-performance 32-bit microcontroller SPC57 platform, an improved nitrogen oxide (NOx) emission prediction algorithm has been developed for the control system software of non road national four diesel engines.This algorithm serves as the basis for establishing a NOx emission prediction model, adaptively changing the step size to cope with different airspeed conditions, considering the effects of convection, external source, and dissipation terms on the generalized continuous equation, and achieving computational prediction of the entire SCR post-processing catalyst in the time slice of the MCU.The main control strategy design introduces the internationally recognized V-mode development method, and is developed based on the Target-Link code generation tool. Complete the integration of system software based on the compilation platform. The whole software control system matched the non road Stage IV electronic controlled diesel engine prototype of YTO Corporation, thus completing the Functional verification.After bench testing, the NRSC and NRTC test cycle results of the original and tail exhaust meet the target requirements, which are equivalent to the performance of a foreign ECU. The NOx concentration after the SCR catalyst is 140 ppm, and the NOx concentration before the SCR catalyst is 1600 ppm. The conversion efficiency reaches 91.3%, and there is almost no NH₃ leakage.The NRSC and NRTC results of the original & rear exhaust of this independently developed non road country IV ECU meet the target requirements, which is equivalent to the performance of a foreign type of ECU. The main performance and fuel consumption meet the target requirements of optimizing fuel economy. After calibration testing, the T4 temperature, T5 temperature control, and other indicators of driving regeneration and parking regeneration meet the functional requirements.

摘要:基于高性能的32位单片机SPC57平台, 开发出基于一种改进的氮氧化物(NOx)排放预测算法的非道路国四柴油机控制系统软件。此算法作为NOx排放预测模型建立的基础, 通过自适应改变步长以应对不同空速下, 考虑对流项、外加源项以及耗散项对广义连续方程的影响, 在MCU的时间片内, 实现对整个SCR后处理催化器的计算预测。主控策略设计引入了国际通用的V模式开发方式, 基于TargetLink代码生成工具开发完成。基于编译平台完成系统软件的集成工作。整个软件控制系统匹配一拖公司非道路国四电控柴油机样机, 以此完成了功能验证。经过台架测试, 原排及尾排的NRSC和NRTC结果符合目标要求, 与国外某ECU效果相当, SCR催化器后NOx浓度为140ppm, SCR催化器前NOx浓度为1600ppm, 转化效率达到91.3%, 且几乎没有NH₃泄漏。本自主研发的非道路国四ECU, 发动机的原排/尾排的NRSC和NRTC结果符合目标要求, 与国外某型ECU的效果相当。主要性能和油耗达到优化燃油经济性的目标要求。经过标定测试, 行车再生和驻车再生的T4温度、T5温度控制和其它指标满足功能需要。

关键词:农用柴油机; 氮氧化物; 排放控制模型; 自适应步长; 广义连续方程;

Key words:agricultural diesel engine; nitrogen oxide; emission control model; adaptive step; generalized-continuous equation;

中图分类号: TK421+4

文献标识码: B

收稿日期: 2023-07-25

基金项目: 中国国机集团青年科技基金项目(QNJJ-PY-2022-39);

作者简介: 胡友耀(1981-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为非道路柴油机电控系统开发, E-mail:hyylm@163.com;

0 概述

众所周知，内燃机技术发展分为两类，一类是机内净化技术，即在燃烧室内，通过改善可燃混合气的品质和燃烧状况，优化燃烧，使排放污染物降低。另一类是机外净化技术，即通过机外附加装置对已生成的污染气体进行净化处理，再排入大气。随着非道路柴油机国四排放标准执行的日益临近，针对后者技术应用于柴油机，一拖公司将国四整机匹配EGR+SCR+DPF作为技术路线之一。目前SCR系统尿素喷射控制策略需要通过大量的标定试验，获得柴油机原始NO_x排放MAP，此过程需要消耗大量人力、物力。因而，需要准确地预测柴油机NO_x排放。

为此国内外学者做了大量研究，提出了多种建模的方法。d' Ambrosio、Asprion和Finesso等^[1-3]基于Zeldovich理论建立了柴油机NO_x预测模型，此模型可解释并预测NO_x的生成，但是，这种模型需要准确的缸压信号作为输入，由于缸压传感器价格昂贵，其在车载装置上的实用受到了限制，主机厂基本；胡杰、林峰和王天田等^[4]基于神经网络理论设计了一种柴油机NO_x预测模型的方法。

基于此背景，笔者本文提出一种改进的农用柴油机氮氧化物(NO_x)排放的预测算法，即自适应步长的广义连续方程算法，此算法作为NO_x排放预测模型建立的基础，通过自适应改变步长以应对不同空速下，考虑对流项、外加源项以及耗散项对广义连续方程的贡献，在控制器的时间片内，得到对整个SCR后处理催化器的预测值。

基于国际流行V模式开发完成非道路柴油机燃油及上述后处理控制策略算法的设计，如图1所示为本控制软件的系统架构。首先，在Simulink软件环境下进行功能模块设计及模型仿真测试；其次，将模型文件下载至Dspace/Autobox硬件仿真测试器中，利用ControlDesk软件进行快速原型仿真测试，此过程可完成初步的系统标定工作；再次，利用Targelink代码生成工具，将已验证的模型文件转换为标准C代码，并下载至硬件ECU中；将ECU代替Autobox仿真器进行硬件在回路仿真，并完成代码于真实ECU中的测试；最后将ECU匹配到实际柴油机中，进行台架标定测试。

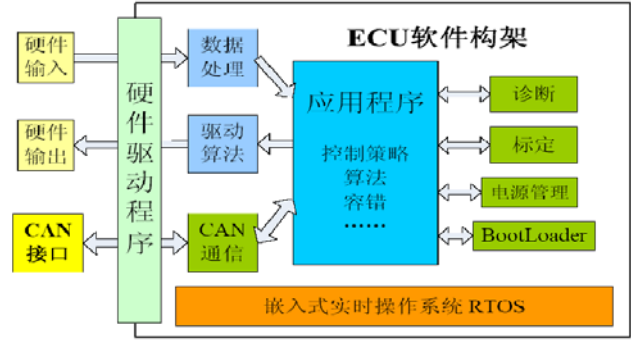


图1 软件架构示意图

1 控制策略软件开发

1.1 燃油系统控制策略开发

本系统控制策略采用现今国际流行的基于扭矩的控制方式设计完成。燃油系统控制策略软件能根据当前的发动机工况、外部ECU及附件机构的扭矩请求信息，进行基于优先级的指令扭矩的计算，从而实现整车的协调控制。扭矩控制设计不仅包括满足动力要求的目标扭矩控制模块、冒烟极限限制扭矩模块、最大机械扭矩限制模块、过热保护扭矩限制模块等设计，同时还包含其他功能模块设计，即传感器信号处理模块、柴油机怠速控制模块、跛足回家控制模块、喷射油量控制模块、喷射定时控制模块、分缸油量补偿模块、轨压控制模块等设计。经过V模式开发流程，前述各模块设计均下载至硬件ECU中并得到验证，应用于实际柴油机的匹配工作中。

1.2 SCR后处理控制策略

1.2.1 SCR系统化学反应模型

本文针对农用柴油机的SCR后处理催化器主要为分子筛催化剂，其主要遵循Eeley-Rideal机理^[5]，主要分为NH₃的吸附/脱附，NO_x的催化还原反应和NH₃的氧化反应3部分。根据催化器化学反应动力学建立催化器内NH₃覆盖率 θ 的方程式1（覆盖率是NH₃存储量的衡量指标，该值越大存储量越大）。方程式右侧 r_{ads} 表示催化器吸附NH₃的速率（计算式2）， r_{des} 表示催化器脱附NH₃的速率（计算式3）， r_{NOx} 表示与NO_x反应速率（计算式6）。

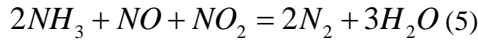
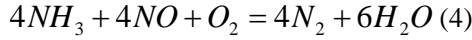
$$\frac{\partial \theta_{NH_3}}{\partial t} = r_{ads} - r_{des} - r_{NOx} - r_{NH_3} \quad (1)$$

上式中：

$$r_{ads} = K_{NH_3,ADS} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M_{NH_3}}} C_{NH_3} (1-\theta) \Omega V \quad (2)$$

$$r_{des} = K_{NH_3,DES} e^{-\frac{E_{NH_3,DES}}{RT}} \theta \Omega \quad (3)$$

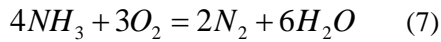
SCR 系统中 NO_x 主要发生反应为:



式(4)为“标准SCR反应”，由于柴油发动机尾气中NO_x约90%为NO，且此反应速率高，因而其为SCR系统的主要反应。式(5)为“快速SCR反应”，由于NO₂比O₂有更高的氧化性，这个反应的速率要比“标准SCR反应”速率高出一个数量级。结合“标准SCR反应”与“快速SCR反应”，可得NO_x还原化学反应速率方程为:

$$r_{NO_x} = K_{NO_x} e^{-\frac{E_{NO_x}}{RT}} C_{NO_x} \theta \Omega V \quad (6)$$

SCR系统中NH₃主要发生反应为:



NH₃的反应速率如下:

$$r_{NH_3} = K_{NH_3} e^{-\frac{E_{NH_3}}{RT}} \theta \Omega \quad (8)$$

式(2)、(3)、(6)、(8)中: r 为化学反应速率; K 为阿伦尼斯化学反应速率常数; E 为反应活化能; R 为通用气体常数; T 为温度; C 为气体摩尔浓度; θ 为NH₃的覆盖度; Ω 为催化剂储氨能力; θ 与 Ω 的乘积代表催化剂储存NH₃的摩尔数 M_{NH_3} 。

根据以上的NO_x、NH₃化学反应和NH₃覆盖度的物质平衡方程, 利用Simulink建立催化剂化学反应模型, 如下图2所示。

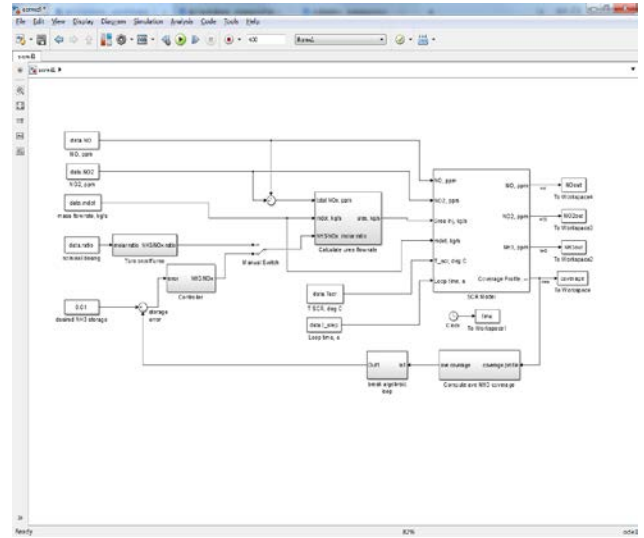


图2 模型示意图

该模型主要包括以下几个模块: 模拟输入模块 (NO含量、NO₂含量、排气质量流量、尿素喷射量、期望NH₃量), 计算尿素流量模块, 打破代数环模块以及SCR计算预测模块、输出模块。

1.2.2 广义连续方程的算法应用

如上图2所示模块为一个基于 Simulink 平台封装的 $sfun$ 模块。其中的算法基于自适应步长的广义连续方程通量解的应用。具体如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{r^{\alpha-1}} \frac{\partial}{\partial r} (r^{\alpha-1} \rho v) - \frac{1}{r^{\alpha-1}} \frac{\partial}{\partial r} (r^{\alpha-1} D_1) + C_2 \frac{\partial D_2}{\partial r} + D_3 \quad (9)$$

通量解是对公式(9)中以上形式的一维连续性方程给出的解。其中 D_1 , D_2 , D_3 代表不同的源。 $\alpha=1$ 代表平面坐标, $\alpha=2$ 代表柱坐标, $\alpha=3$ 代表球坐标。假设 SCR 催化剂是一个均匀反应容器, 即催化剂各处状态是均质的 (本文研究对象柴油机的排气基于平面坐标系统), 如下图3所示, 为此通量解的有限体积网格的几何示意图。

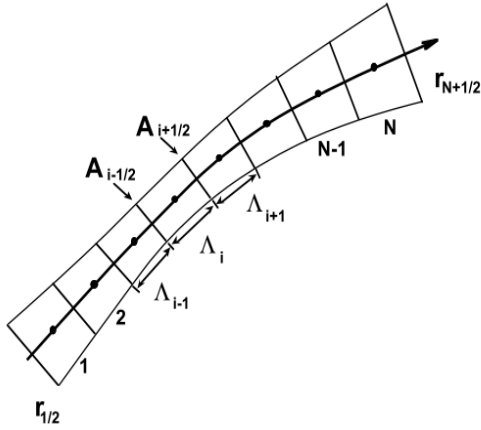


图3 广义连续方程通量解的有限体积网格的几何示意图

单位时间内从网格左边流入的柴油机排气质量和从网格右边流出的排气质量相对应网格的排气质量分别起增加和减少作用。以上过程不考虑网格的压缩的影响。

$$\Lambda_i^0 C_i^* = \Lambda_i^0 C_i^0 - \Delta t C_{i+1/2}^0 \Delta v_{i+1/2} + \Delta t C_{i-1/2}^0 \Delta v_{i-1/2} \quad (10)$$

上式(10)为计算排气对流项于柴油机排气流体的连续性方程的应用大小。

$$\Lambda_i^0 C_i^T = \Lambda_i^0 C_i^* + \frac{1}{2} \Delta t A_{i+1/2} (D_{Li} + D_{Li+1}) - \frac{1}{2} \Delta t A_{i-1/2} (D_{Li} + D_{Li-1}) \quad (11)$$

上式(11)为计算排气源项于柴油机排气流体的连续性方程的应用大小。

$$\Lambda_i^0 \tilde{C}_i = \Lambda_i^0 C_i^T + V_{i+1/2} \Lambda_{i+1/2} (C_{i+1}^0 - C_i^0) - V_{i-1/2} \Lambda_{i-1/2} (C_i^0 - C_{i-1}^0) \quad (12)$$

$$\text{其中: } V_{i+1/2} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} \varepsilon_{i+1/2}^2 \quad (13)$$

$$\varepsilon_{i+1/2} = A_{i+1/2} \Delta v_{i+1/2} \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{1}{\Lambda_i^n} + \frac{1}{\Lambda_{i+1}^n} \right] \quad (14)$$

上式(12)为计算耗散项于柴油机排气流体的连续性方程的应用大小。根据此理论算法分步计算得到最终的结果。式(9)、(10)、(11)、(12)中： ρ 为密度； C_i^0 为初始的气体浓度； C_i^* 为气体浓度（对流项）； C_i^T 为气体浓度（源项）； \tilde{C}_i 为气体浓度（耗散项）； Λ 为网格体积； A 为截面面积； V 为耗散系数； v 为气体速度； Δt 为时间步长；

Schr CM等人的研究表明^[6]，气相物质的存储时间常数较SCR催化器热能和 NH_3 的存储时间常数低

两个数量级。所以，基本可将催化器各区段中 NO_x 和 NH_3 气体体积分数变化看为静态。故可在不影响计算精度的前提下将 NO_x 和 NH_3 的质量平衡方程由微分方程形式简化成代数方程形式。在已有的假设条件下，一个SCR催化器划分为30个区段微元内，其微元存在的能量交换有两种形式：一种是气体间的对流换热；另一种是催化器与环境的辐射换热。根据催化器内部气体平衡方程、储氨质量平衡方程和能量平衡方程，基于Matlab/Simulink平台建立本模型。

在单片机的时间片内完成相应的浓度计算，包括 NH_3 、 NO_x 、 NH_3 的化学反应系数、 NO_x 反应的化学反应系数等。基于固定步长的计算10毫秒，最后算出氨储量等。从微分方程的建立和广义连续方程解的算法，均基于c语言完成编制，如图4所示。模拟计算的具体流程如图5所示。

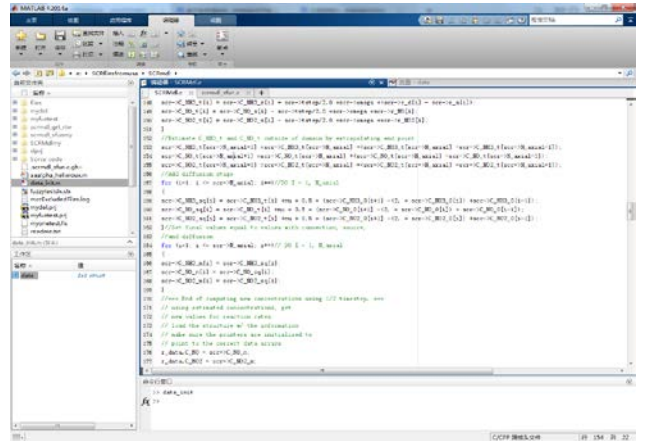


图4 预测模型C语言示意图

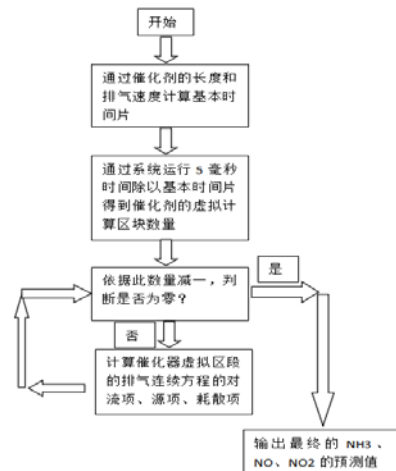


图5 算法流程示意图

2 试验与分析

试验的目的：在东方红某型电控燃油系统以及后处理系统柴油机基础上，匹配本文自主开发的控制器 ECU，进行动力性能、经济性能和排放性能试验。在控制器功能验证无误的前提下，发动机整机满足非道路国四柴油机排放要求，外特性符合出厂规定的性能。另外，在同一个试验台架上测试国外某型 ECU，与自主开发的 ECU 进行性能对比。

2.1 试验样机与设备

试验样机的主要技术参数如下表 1 所示：

表 1 东方红某型柴油机主要技术参数

项目	参数
发动机型式	直列 6 缸、增压中冷、高压共轨、两气门
缸径/mm×行程/mm	110×125
标定功率/kW	177
标定转速/r/min	2200
最大扭矩转速/r/min	1500
扭矩储备率/%	≥25
稳定调速率/%	≤8
怠速/r/min	780±10
排放目标	非道路国四

表 2 主要测试设备

项目	型号
电力测功机	CJ230
油耗仪	TOCEIL-CMF010
气体流量计	TOCEIL 20N100
烟度计	439
气体排放测试系统	MEXA7100D
部分流颗粒采集系统	MDLT1302TM
电子天平	MSA2.7S-000-DF

本文测试试验依据的主要标准，包括：GB/T 1147.1-2017《中小功率内燃机 第 1 部分：通用技术条件》、GB/T 1147.2-2017《中小功率内燃机 第 2 部分：试验方法》、GB 20891-2014《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值与测量方法（中国第三、四阶段）》、GB 28239-2012《非道路用柴油机燃料消耗率和机油消耗率限值及试验方

法》等标准。

本文测试验证所用到的主要测试设备如表 2 所示。表中所述的主要仪器设备均经过计量部门检定，并在有效期内。

2.2 标定试验

2.2.1 外特性试验

匹配本文开发的控制系统，在原机增压器定型的基础上，标定测试柴油机的外特性，主要指标良好，所测试的外特性性能符合出厂规定的性能，详细数据见下图 6。

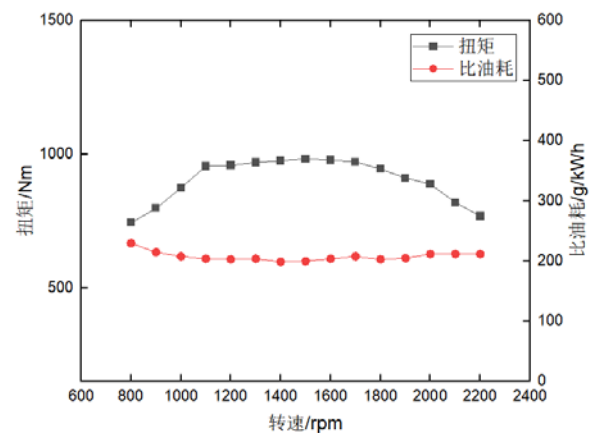


图 6 柴油机外特性曲线

表 3 原排标定点 NRSC 结果对比

项目	自主开发控制器匹配数据	国外某型控制器匹配数据
NOx/g/kWh	10.35	10.75
HC/g/kWh	0.213	0.196
CO/g/kWh	0.327	0.397
PM/g/kWh	0.105	0.133
加权油耗 g/kWh	217.88	217.3

2.2.2 原排标定试验

此试验不带后处理装置标定测得，稳态循环测试 NRSC 以及瞬态循环测试 NRTC 原排的结果正常，表 3、表 4 中对比列出了在同一试验台架的国外某

型号 ECU 匹配相同发动机的测试结果。由表可见，自主开发控制器匹配发动机的原排测试结果与国外模型控制器匹配相同发动机的原排测试结果相当。

表 4 原排标定点 NRTC 结果对比

项目	自主开发控制器匹配数据	国外某型控制器匹配数据
NO _x /g/kWh	9.81	10.41
HC/g/kWh	0.23	0.24
CO/g/kWh	1.94	1.97
PM/g/kWh	0.12	0.107

2.2.3 怠速带载试验

柴油机在低怠速运转，用测功机逐渐增加扭矩，确定加载能力，调整轨压和提前角优化烟度水平，烟度 <0.5 (1/m)，并保证转速稳定。加载 740 N.m 以上 439 不透光烟度 >0.5 (明显可见烟)，对 DPF 非常不利，综合考虑低怠速最大带载扭矩为 740N.m，与国外某控制器 ECU 的怠速带载能力一致。具体情况见下图 7。

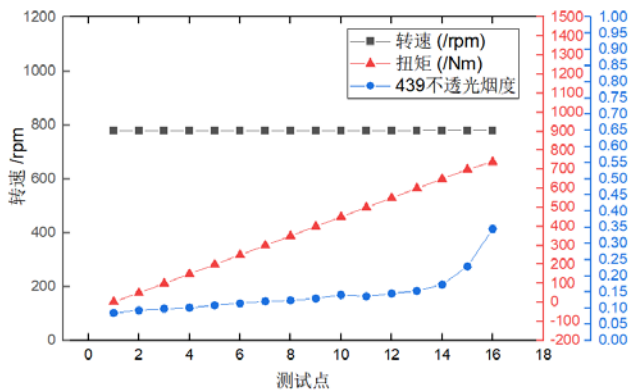


图 7 柴油机怠速带载特性曲线

2.2.4 尾排标定试验

安装后处理，标定原排模型，调整 SCR 效率 map 使尾排稳态排放符合要求。稳态循环测试 NRSC 以及瞬态循环测试 NRTC 原排的结果正常，表 5、表 6 中对比列出了在同一试验台架的国外某型号 ECU 匹配相同发动机的测试结果。由表可见，自主开发控制器匹配发动机的尾排测试结果与国外

模型控制器匹配相同发动机的尾排测试结果相当。

表 5 尾排标定点 NRSC 结果对比

项目	自主开发控制器匹配数据	国外某型控制器匹配数据
NO _x /g/kWh	2.251	2.31
HC/g/kWh	0.007	0.012
CO/g/kWh	0.043	0.041
PM/g/kWh	0.006	0.047
加权油耗 g/kWh	217.65	217.12

表 6 尾排标定点 NRTC 结果对比

项目	自主开发控制器匹配数据	国外某型控制器匹配数据
NO _x /g/kWh	2.36	2.53
HC/g/kWh	0.02	0.03
CO/g/kWh	1.91	1.99
PM/g/kWh	0.05	0.037
循环功 kW	22.71	22.62

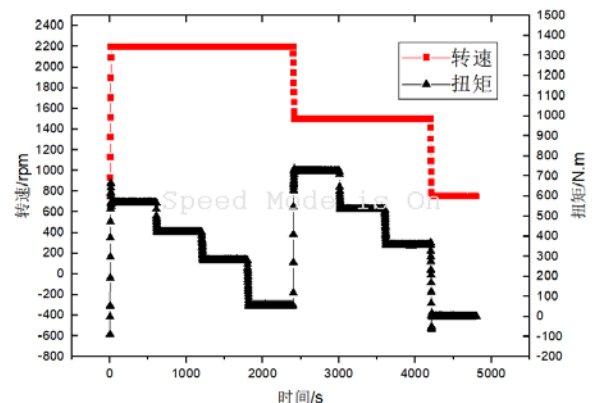


图 8 柴油机测试瞬态过程特性曲线示意图

2.2.5 尾排标定及结晶试验

应用第一节开发的控制策略软件至自主开发的控制器中匹配非道路柴油机。为进一步验证算法，对该柴油机进行了瞬态工况试验，在发动机排气处 DOC 前与 DOC 后、SCR 催化器后加装三路温度传感器，DOC 前与催化器后两路 NO_x 传感器，加装尿素喷嘴以及尿素箱。具体测试的瞬态过程如图 8 所示。每隔 1s 采集一次催化器前 NO_x 传感器信号值，通过上位机软件读取本算法的输出值，最终的结果如下

图9所示。预测的均方根误差为0.04，大部分样本点的预测误差小于10%。虽然在某些点存在一定误差，但整个预测算法能较好地预测柴油机瞬态的NO_x排放的变化趋势。

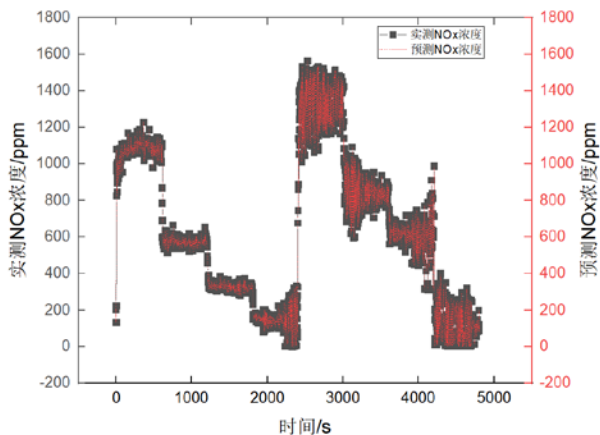


图9 瞬态过程NO_x测试结果示意图

将此值反馈至控制器控制软件的输入模块，根据标定的氨氮比、排气流量，计算出尿素喷射量，由CAN总线发送给尿素泵，最终通过喷嘴执行精确的尿素量喷射，从而达到降NO_x目的，具体的测试结果如下图10所示。

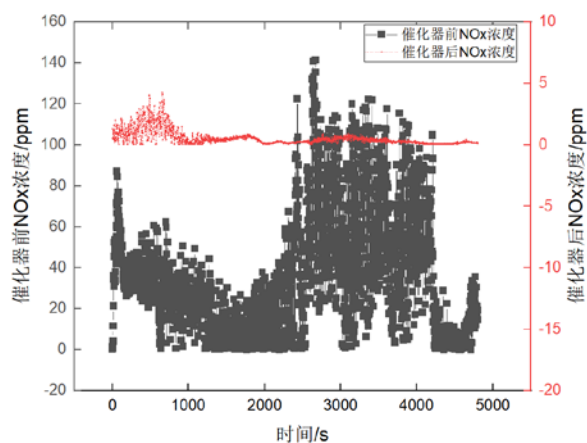


图10 柴油机测试瞬态NO_x排放结果示意图

由上图可知SCR催化器后NO_x浓度为140ppm以内，催化器前NO_x浓度为1600ppm以内，转化效率达到91.3%。催化器后NO_x浓度很少，且NH₃泄漏量在5ppm以内。

在此基础上，进行尾排的尿素结晶试验。运行田间采集的农机实际运行的路谱，一倍喷射尿素量运行24小时，混流器无明显结晶，SCR载体无明显

显结晶，如下图11所示。

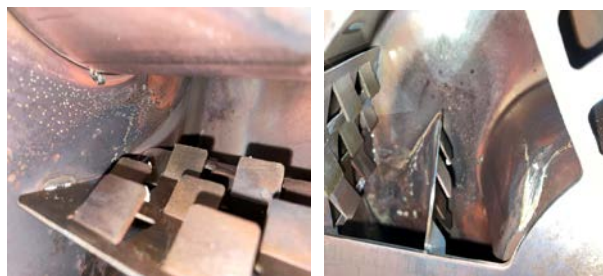


图11 1倍尿素喷射量的混合器内部结晶情况示意图



图12 1.5倍尿素喷射量的混合器内部结晶情况示意图

在前述测试的基础上，继续运行田间采集的农机实际工作路谱。并将ECU进行1.5倍的尿素喷射量，运行14小时，混流器上能看到部分结晶，结晶情况如上图12所示。

2.2. 6T4 温度标定试验

通过关闭节气门，减少进气量提升发动机排气温度，并注意烟度小于4 fsn，增压器至DOC的管道中O₂含量尽量大于6%；开启近后喷2，进一步提高发动机排温，使DOC进口温度达到500℃左右；标定近后喷效率，开启和关闭近后喷2油量，扭矩差异小于10 N.m，保证模式切换时的平顺性。

T4温度试验对发动机整个万有特性map进行了标定，由于150 N.m以下扭矩负荷小，排温太低，T4温度可能低于450℃，标定时综合考虑烟度和HC的排放，尽量关闭节气门和较多的后喷2油量来提升温度。

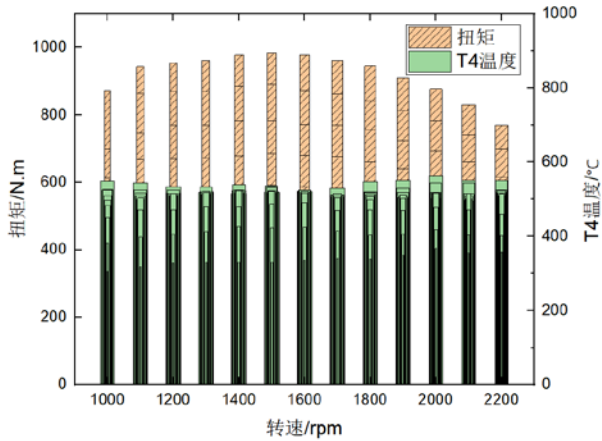


图 13 T4 温度标定测试数据示意图

2.2.7 T5 温度标定试验

进行 T5 温度稳态试验，通过开启远后喷 1 来提升 T5 温度，使其达到 585°C。T5 温度试验对整个发动机的万有特性进行了标定，由于 150 N.m 以下扭矩负荷小，排温太低，T5 温度可能低于 450°C，标定时综合考虑机油稀释和 HC 的排放，尽量使用较少的远后喷 1 油量来提升温度。下图 13 和图 14 所示，是 T4 温度和 T5 温度测试的主要参数情况，1000~2200rpm 间 200N.m 以上区域，T4 温度都在 450°C 以上，1000~2200rpm 间 100N.m 以上区域 T5 都在 585°C 附近；标定中未见白烟排放，415 烟度均小于 4 FSN，节气门开度平顺。

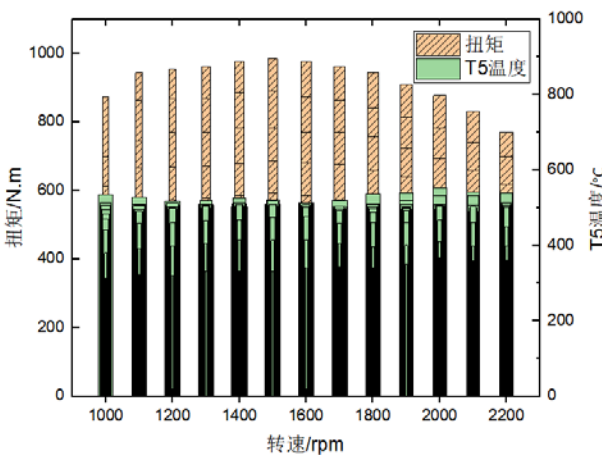


图 14 T5 温度标定测试数据示意图

经多轮优化后喷油量控制，用 NRTC 测试循环和小负荷路普来检验 T5 温度动态相应情况，见下

图 15 所示，开始运行 NRTC 循环工况后，T5 温度稳步上升，在 300s 左右达到 550°C 以上，之后一直维持在 585°C 左右运行，过程中有 ±35°C 的波动，由于转速和负荷变化大，此波动属正常范围，未出现温度不够和超温问题，符合再生要求。

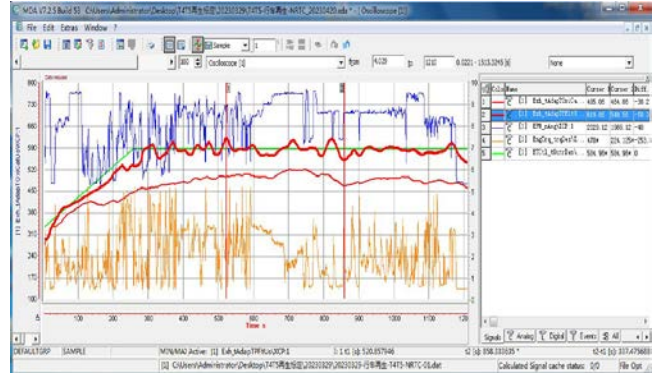


图 15 NRTC 循环验证 T5 温度动态测试数据示意图

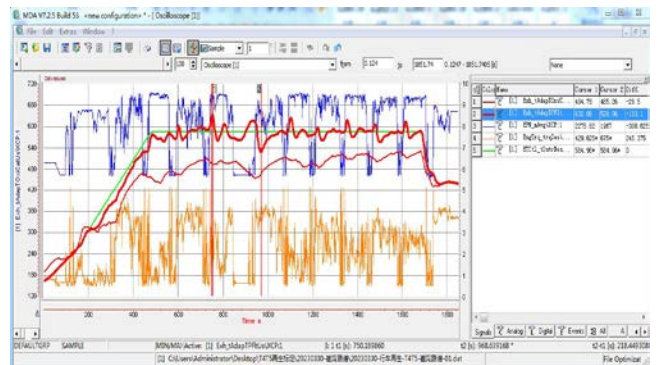


图 16 作业路谱验证 T5 温度动态测试数据示意图

用实际农机田间作业的采集路谱验证 T5 温度动态相应情况，见图 16 所示。开始运行路谱循环工况后，T5 温度稳步上升，在 470s 左右达到 550°C 以上，之后一直维持在 585°C 左右运行，过程中有 ±51°C 的波动，由于转速和负荷变化大，因此出现这样的波动属正常。过程未出现温度不够和超温问题，符合再生要求。

2.2.8 驻车再生 T4、T5 温度控制测试试验

针对主要发动机的参数包含后喷 1 油量正时、后喷 2 的油量正时和进气的需求压力等相关参数，验证驻车再生热机、升温 and 再生过程三个的 T4 和 T5 温度，根据实际表现，适当调整使其符合再生的需求。具体情况如图 17 所示，发动机 1400 rpm 热机，T4 温度达到 180 °C 用时；升温阶段发动机 1800

rpm, T4 温度达到 280 °C 用时; 再生过程发动机转速 2000 rpm, T5 温度达到 550 °C 时, 慢慢过渡到 585 °C, 转速和温度都很稳定, 符合驻车再生要求。

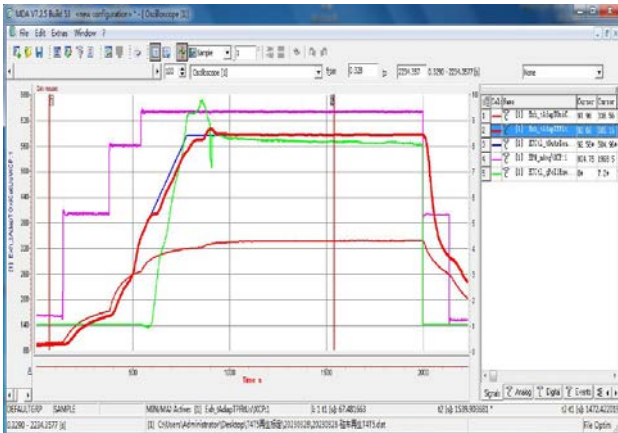


图 17 T4、T5 温度控制测试数据示意图

3 结论

(1) 基于高性能 32 位单片机平台, 本文集成应用一种改进的氮氧化物(NO_x)排放预测算法的非道路国四柴油机控制系统软件。实现对整个 SCR 后处理催化器的计算预测。系统匹配非道路国四电控柴油机样机台架测试, 原排及尾排的 NRSC 和 NRTC 结果符合目标要求, 与国外某 ECU 效果相当。SCR 催化器后 NO_x 浓度为 140 ppm, SCR 催化器前 NO_x 浓度为 1600 ppm, 转化效率达到 91.3%, 且几乎没有 NH₃ 泄漏。

(2) 本自主研发的非道路国四 ECU, 发动机的原排/尾排的 NRSC 和 NRTC 结果符合目标要求, 与国外某型 ECU 的效果相当。主要性能和油耗达到优化燃油经济性的目标要求。

(3) 经过标定测试, 行车再生和驻车再生的 T4 温度、T5 温度控制和其它指标满足功能需要。

参考文献:

- [1] D' Ambrosio Stefano, Finesso Roberto, Fu Lezhong. A control-oriented real-time semi-empirical model for the prediction of NO_x emissions in diesel engines [J]. Applied Energy, 2014, 130(5): 265-279.
- [2] Asprion Jonas, Chinellato Oscar, Guzzella Lino.

A fast and accurate physics-based model for the NO_x emissions of diesel engines [J]. Applied Energy, 2013, 102(5): 221-233.

- [3] Finesso Roberto, Spessa Ezio. A real time zero-dimensional diagnostic model for the calculation of in-cylinder temperatures, HRR and nitrogen oxides in diesel engines [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 79(2): 498-510.
- [4] 胡杰, 林峰, 王天田等 基于神经网络偏最小二乘法的柴油机 NO_x 排放预测模型 [J]. 内燃机学报, 2015 33(6): 510~515.
- [5] 霍振. 重型柴油机 SCR 催化器载体储氨动态特性仿真研究: [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [6] SchrCM, OnderCH, Geering HP, et al. Control-oriented model of an SCR catalytic converter system [C] // SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2004, 2004-01-0153.