

DOI: 10.7652/xjtuxb201803006

# 废气再循环瞬态修正控制策略对 重型柴油机排放性能的影响

韩晓梅<sup>1,2</sup>, 田威<sup>2</sup>, 林学东<sup>1</sup>, 李德刚<sup>1</sup>, 王文明<sup>2</sup>, 郭亮<sup>1</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130022, 长春; 2. 博世汽车柴油系统有限公司, 214000, 江苏无锡)

**摘要:** 针对重型柴油机瞬态工况(特指恒定转速、转矩瞬增工况)空气系统响应迟滞造成的排放恶化问题,设计了废气再循环(EGR)瞬态修正控制策略,从 EGR 阀预控制和瞬态需求空气量两方面进行 EGR 瞬态修正:当判定发动机处于瞬态工况时,将 EGR 阀预控制开度设定为 0,加快 EGR 阀关闭速度;依据瞬态程度修正需求空气量,使实际进气量更早满足需求空气量,实现 EGR 阀适时开启。试验结果表明:经过 EGR 瞬态修正,改善了瞬态工况排放恶化、发动机动力性响应不及时等问题;在 WHTC(world harmonized transient cycle)瞬态循环中加入 EGR 瞬态修正后,氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放降低了 4.7%,碳烟排放降低了 46.4%,碳氢化合物和一氧化碳排放分别降低了 8.5%和 30.3%,但二氧化碳排放增加了 0.3%,油耗增大了 0.6%。EGR 瞬态修正控制策略虽然牺牲了 0.6%的油耗,但是显著改善了  $\text{NO}_x$ 、碳烟、碳氢化合物和一氧化碳等有害气体的排放,因此可为重型柴油发动机排放性能的改善提供借鉴。

**关键词:** 重型柴油机;瞬态工况;控制策略;废气再循环

**中图分类号:** TK421.2   **文献标志码:** A   **文章编号:** 0253-987X(2018)03-0041-06

## Influence of EGR Transient Correction Strategy on Emission Performance of Heavy Duty Diesel Engine

HAN Xiaomei<sup>1,2</sup>, TIAN Wei<sup>2</sup>, LIN Xuedong<sup>1</sup>, LI Degang<sup>1</sup>, WANG Wenming<sup>2</sup>, GUO Liang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Robert Bosch China Diesel, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

**Abstract:** Aiming at solving the emission deterioration of diesel engine under transient working conditions caused by delayed response of air system, an exhaust gas recirculation (EGR) transient correction strategy is developed. EGR valve pre-control and desired air mass are both corrected under the transient correction strategy. The EGR valve pre-control value is set to zero when the engine is at a transient working condition to accelerate the closing of EGR valve. Meanwhile, the desired air mass is modified according to the transient level of engine by making the EGR valve open at reasonable time. With the EGR transient correction control, engine emissions and drivability under transient working condition are improved. Test results show that reductions of 4.7%  $\text{NO}_x$ , 46.4% soot, 8.5% HC and 30.3% CO, but increase of 0.6% fuel consumption, are obtained. Considering the obvious emissions improvement, the tiny fuel

收稿日期: 2017-07-12。 作者简介: 韩晓梅(1988—),女,博士生;李德刚(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51676084);吉林省发改委产业技术研究与开发资助项目(2016C038);吉林省科技发展计划资助项目(20150101032JC)。

网络出版时间: 2018-01-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180102.1749.010.html>

consumption increase can be ignored. It can be concluded that the proposed EGR transient correction strategy is effective for diesel engine performance improvement.

**Keywords:** heavy duty diesel engine; transient working condition; control strategy; exhaust gas recirculation

废气再循环(EGR)控制策略的完善对发动机性能开发至关重要。EGR 的控制不仅要满足降低  $\text{NO}_x$  排放的要求,同时还要兼顾 PM 排放、油耗以及车辆驾驶性的需求。EGR 对发动机性能的影响主要是通过将废气重新引入缸内来改变缸内燃烧环境的氧浓度,因此,EGR 控制的要求是使发动机在全工况都有合理稳定的空燃比,从而确保发动机的性能和排放水平符合标准<sup>[1]</sup>。为使 EGR 控制满足要求,研究人员对 EGR 控制策略进行了不断的改进和完善。在 EGR 控制策略发展早期采用的是 EGR 开环控制,通过设定 EGR 阀开度 MAP(脉谱),依据发动机运行工况直接查取 EGR 阀开度<sup>[2]</sup>;后期普遍采用 EGR 闭环控制<sup>[3]</sup>,包括基于新鲜空气的闭环控制、基于 EGR 流量的闭环控制<sup>[4]</sup>、基于 EGR 率的闭环控制<sup>[5]</sup>和基于氧浓度的闭环控制<sup>[6]</sup>,这几种闭环控制都是将特定的设定量与实际量的差值作为反馈量来调整 EGR 阀的开度,以满足控制需求。EGR 闭环控制可以改善发动机量产后的差异以及发动机使用过程中零部件老化对 EGR 控制精度的影响,目前已得到广泛应用。

在稳态工况下,通过合理标定 EGR 阀开度 MAP、需求空气量 MAP 以及 PID 参数,可使上述 EGR 闭环控制策略满足 EGR 控制精确性和稳定性的要求。然而,在瞬态工况(例如转速恒定、转矩瞬增工况)下,上述 EGR 闭环控制策略仍然存在如下问题<sup>[3,7]</sup>。

(1)空气系统响应迟滞造成碳烟排放过大和动力性不足。当发动机转矩需求瞬间增大时,喷油量也瞬间增大,此时空气需求量瞬间变大,但由于增压器的迟滞现象,实际进气量远低于当前喷油量所需的空气量,虽然在 PID 控制下 EGR 阀处于关闭趋势,但由于 PID 控制响应速度较慢,且是在 EGR 阀开度预控制基础上进行 PID 控制,因此当瞬态工况发生时,EGR 阀关闭速度不能满足要求,此时由于新鲜空气量不足,将导致碳烟排放恶化。其次,为了避免瞬态工况下发动机烟度排放超标,会标定烟度限制 MAP 来限定不同工况下的最小过量空气系数,当混合气过浓时,喷油量会被限制以满足最小过量空气系数的要求,因此当瞬态工况下新鲜空气量

过低时,会触发烟度限制导致发动机限扭,使动力性能受到影响。

(2)PID 控制导致瞬态过程 EGR 阀开启不及时。当发动机转矩瞬间增大时,实际空气量低于需求空气量,EGR 阀会在 PID 控制下关闭以满足目标空气量,只要实际进气量低于目标空气量,EGR 阀会一直保持关闭状态,而在瞬态工况后期,虽然实际进气量仍然低于需求空气量,但此时进气量已足够满足烟度限制,需要适当开启 EGR 来避免  $\text{NO}_x$  排放过高,但是,由于 PID 的控制迟滞会导致 EGR 阀开启过晚,最终导致  $\text{NO}_x$  排放过高。

针对上述问题,本文对瞬态工况下的 EGR 控制策略进行了优化,通过瞬态修正,可实现瞬态工况下 EGR 阀的快速关闭,并在瞬态工况后期提前开启 EGR 阀,避免  $\text{NO}_x$  排放过高。

## 1 EGR 瞬态修正控制策略设计

对瞬态工况下的 EGR 控制策略进行修正,修正后的 EGR 阀开度示意图如图 1 所示:①为 EGR 阀关闭阶段,②为 EGR 阀全关阶段,③为 EGR 阀开启阶段。当发动机转矩瞬间增大时,瞬态修正后的 EGR 阀比无瞬态修正的 EGR 阀更快关闭,经过 EGR 阀全关阶段以满足进气需求,随后 EGR 阀能更早开启以避免  $\text{NO}_x$  排放过高。

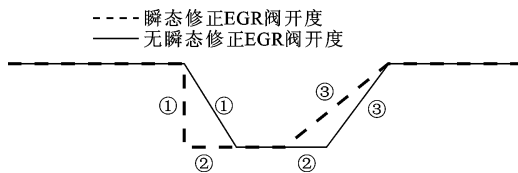


图1 瞬态修正 EGR 阀开度示意图

为实现以上控制目标,从两方面进行 EGR 瞬态修正,如图 2 所示,包括 EGR 阀开度预控制修正和需求空气量修正。当瞬态工况发生时,修正 EGR 阀预控制开度,使预控制开度为 0,从而加快 EGR 阀的关闭响应速度;在瞬态工况后期,合理修正需求空气量,使需求空气量降低,从而使实际进气量提前满足目标需求空气量,使 EGR 阀提前开启以适当降低  $\text{NO}_x$  排放。

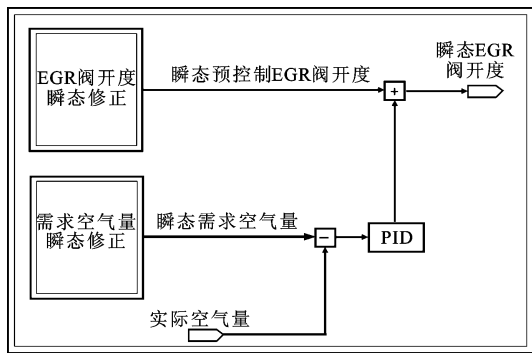


图2 EGR瞬态修正控制逻辑

### 1.1 EGR阀开度预控制瞬态修正

在转速恒定、转矩瞬增工况下,限制发动机性能的主要因素是增压器的迟滞现象。由于增压器迟滞导致进气量不能满足空气量需求,因此,选取增压压力作为瞬态工况识别信号,定义瞬态程度系数 $\delta$ 来表征当前增压器的迟滞程度

$$\delta = \frac{p_{\text{boost,des}} - p_{\text{boost,act}}}{p_{\text{boost,des}}} \quad (1)$$

式中: $p_{\text{boost,des}}$ 为需求增压压力,通过当前转速和油量查取目标增压压力MAP获得; $p_{\text{boost,act}}$ 为实际增压压力,由传感器测量获得。

当瞬态工况发生时,瞬态程度系数为小于1的随时间瞬变的非线性曲线。如图3所示,为了便于实现控制,将瞬态程度系数转化为修正系数:当瞬态程度系数大于设定常数时,表征进气量严重不足,瞬态修正系数取1;当瞬态程度系数小于设定常数时,表征进气量不足现象得到缓解,瞬态修正系数取值范围在 $[0,1]$ 之间,依据瞬态程度和EGR控制需求标定获取,与瞬态程度系数呈相同趋势。

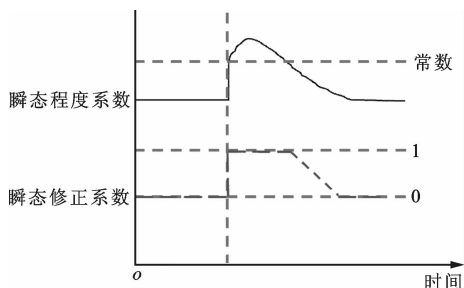


图3 瞬态修正系数与瞬态程度系数的关系

EGR阀瞬态工况预控制开度修正由下式表示

$$r_{\text{tra}} = (1 - F_{\text{acl}})r_{\text{sta}} \quad (2)$$

式中: $r_{\text{tra}}$ 为瞬态修正后EGR阀的开度; $r_{\text{sta}}$ 为对应当前转速、油量的稳态工况下EGR阀的预控制开度; $F_{\text{acl}}$ 为瞬态修正系数。

当发动机瞬态程度足够大时,瞬态修正系数为1,经过式(2)计算,EGR阀的开度为0;当发动机瞬态过程结束时,瞬态修正系数为0,经过式(2)计算,EGR阀的开度仍为稳态时EGR阀的开度。

### 1.2 需求空气量瞬态修正

瞬态工况目标需求空气量示意图如图4所示,图中黑色实线为通过最小 $\lambda$ 计算得到的需求空气量,是确保发动机烟度不超标的最低空气量,计算公式如下

$$m_{\lambda} = 14.3\lambda_{\min}q_{\text{fuel}} \quad (3)$$

式中: $m_{\lambda}$ 为基于最小 $\lambda$ 的需求空气量; $\lambda_{\min}$ 为当前转速与喷油量条件下烟度不超标的最小过量空气系数; $q_{\text{fuel}}$ 为实时喷油量;14.3为柴油机理论空燃比。

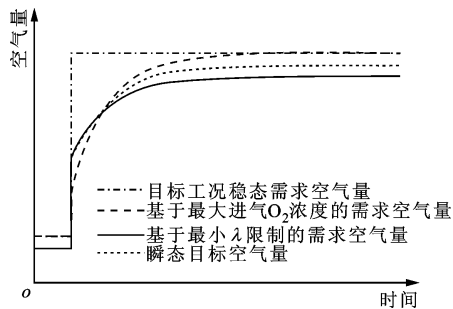


图4 瞬态工况目标需求空气量示意图

长虚线为限定 $\text{NO}_x$ 排放不超标的最大进气量,其理论依据是: $\text{NO}_x$ 排放的主要影响因素是 $\text{O}_2$ 含量,将当前转速和油量所对应的稳态工况进气 $\text{O}_2$ 含量视为确保 $\text{NO}_x$ 排放不超标的最大进气 $\text{O}_2$ 含量,首先基于最大允许 $\text{O}_2$ 含量和排放中的 $\text{O}_2$ 含量计算 $\text{NO}_x$ 排放不超标的最低EGR率,计算公式为

$$\rho_{\text{EGR},\text{O}_2} = \frac{\varphi_{\text{env}}(\text{O}_2) - \varphi_{\text{max}}(\text{O}_2)}{\varphi_{\text{env}}(\text{O}_2) - \varphi_{\text{exh}}(\text{O}_2)} \quad (4)$$

式中: $\rho_{\text{EGR},\text{O}_2}$ 为确保 $\text{NO}_x$ 排放不超标的最低EGR率; $\varphi_{\text{env}}(\text{O}_2)$ 为环境中 $\text{O}_2$ 的体积分数; $\varphi_{\text{max}}(\text{O}_2)$ 为确保 $\text{NO}_x$ 排放不超标的最大进气 $\text{O}_2$ 体积分数,在稳态工况下通过发动机全工况运行测量获得; $\varphi_{\text{exh}}(\text{O}_2)$ 为当前转速和油量对应稳态工况下排气中的 $\text{O}_2$ 体积分数,在稳态工况下通过发动机全工况运行测量获得。

限制 $\text{NO}_x$ 排放不超标的最大进气量计算公式为

$$m_{\text{maxO}_2} = (1 - \rho_{\text{EGR},\text{O}_2})m_{\text{act}} \quad (5)$$

式中: $m_{\text{maxO}_2}$ 为限制 $\text{NO}_x$ 排放不超标的最大进气量; $m_{\text{act}}$ 为实际进气量。

在油门急加工况前期,烟度限制空气量高于 $\text{NO}_x$ 排放限制空气量,此时应优先保证空气量足够,不会触发烟度限制,以避免烟度恶化严重以及喷

油量受限制,因此,在烟度限制空气量高于  $\text{NO}_x$  排放限制空气量阶段,将烟度限制空气量设定为瞬态需求空气量;在油门急加工况后期,烟度限制空气量低于  $\text{NO}_x$  排放限制空气量,此时要保证空气量高于烟度限制空气量但低于  $\text{NO}_x$  排放限制空气量,可以依据当前  $\text{NO}_x$  和碳烟排放目标来权衡瞬态目标空气量的位置,若需要降低  $\text{NO}_x$  排放,则将目标空气量设定为更靠近烟度限制空气量,若需要碳烟排放降低,则将目标空气量设定为更靠近  $\text{NO}_x$  排放限制空气量。

瞬态需求空气量的计算公式如下

$$m_{\text{trans}} = (m_{\lambda} - \max(m_{\lambda}, m_{\text{maxO}_2}))F_{\text{ac,air}} + \max(m_{\lambda}, m_{\text{maxO}_2}) \quad (6)$$

式中: $m_{\text{trans}}$  为油门急加工况需求空气量; $F_{\text{ac,air}}$  为瞬态需求空气量权衡系数,是标定量,取值范围为 0~1。当  $\text{NO}_x$  排放需要改善时,使权衡系数接近 1 来减小瞬态需求空气量;当碳烟排放需要改善时,使权衡系数接近 0 来增大瞬态需求空气量。

## 2 试验装置及试验方案

### 2.1 试验装置

试验在一台排量为 7 L 的六缸重型发动机上进行,发动机配备高压共轨燃油喷射系统,使用 Honeywell Wastegate(排气泄压阀式)增压器、CP3.3NH-18 型油泵、CRIN3-18 型喷油器和 Bosch EDC17CV41 型电控单元。发动机具体参数如下:缸径 102 mm;冲程 120 mm;排量 7 L;压缩比 16.1;连杆长度 198 mm;点火顺序 1-5-3-6-2-4;涡流比 1.5;额定功率 248 kW(2 100 r/min);最大扭矩 1 150 N·m(1 200~1 800 r/min)。

试验利用 AVL APA100 电力测功机控制发动机转速和转矩,通过 HORIBA MEXA-7100D 气态排放分析仪测量  $\text{NO}_x$ 、CO、HC、 $\text{CO}_2$  等气态排放,通过 AVL 483 烟度计测量碳烟排放,通过 AVL 439 透光烟度计测量油门突增过程中发动机的碳烟排放,通过 Kistler 6058AS41 缸压传感器测量缸压,通过 AVL Indicom 燃烧分析仪分析缸内的燃烧过程,通过 AVL 735S 油耗仪测量油耗。

### 2.2 试验方案

为了能够更直观地显示出 EGR 的瞬态修正效果,在 1 300 r/min 恒定转速下,将油门开度由 10% 瞬间增大到 100%,油门加满时间分别设定为 1、3 和 5 s。

为了验证 EGR 瞬态修正控制策略的实际控制

效果,运行欧 VI 法规中更接近实际瞬态运行工况的 WHTC(world harmonized transient cycle)瞬态循环,对比有、无 EGR 瞬态修正时的发动机性能。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 转速恒定转矩瞬增工况的 EGR 瞬态修正效果

图 5 所示为转速恒定、转矩瞬增工况下不同加载时间对应的 EGR 瞬态修正效果对比,其中虚线为瞬态修正后的发动机性能曲线,实线为无瞬态修正的发动机性能曲线。从图 5 可以看出,在不同的加载时间下,瞬态修正后的 EGR 阀与未修正的 EGR 阀相比,前者在瞬态早期能更快关闭,且在瞬态后期能更早开启,符合控制要求。相应的空气量变化情况是,瞬态过程前期修正后空气量增大,瞬态过程后期修正后空气量减小。

就喷油量而言,瞬态修正后的喷油量大于无修正时的喷油量,原因是修正后 EGR 阀更快关闭,新鲜空气供给更及时,缓解了烟度限制造成的喷油量限制,改善了动力性。对比 3 个加载时间的控制效果,可知 3 s 加载时间对喷油量的改善效果最明显。1 s 加载时间太短,短时间内新鲜空气供给量改善不明显,而 5 s 加载时间较长,有、无瞬态修正对 EGR 阀关闭响应的影响不如较短时间加载的效果明显,因此喷油量改善效果也不明显。在瞬态加载过程初期,由于瞬态修正后 EGR 阀关闭更快,因此瞬态修正后的  $\text{NO}_x$  排放高于无修正时的  $\text{NO}_x$  排放,相应地瞬态修正后的烟度低于无修正时的烟度;在瞬态加载过程后期,由于瞬态修正后 EGR 阀更早开启,因此修正后  $\text{NO}_x$  排放有明显改善,但烟度排放恶化。就图 5 的控制效果而言,符合 EGR 瞬态修正控制的预期。

### 3.2 WHTC 瞬态循环的瞬态修正效果对比

图 6 所示为有、无 EGR 瞬态修正的 WHTC 瞬态循环排放结果对比,从中可以看出,经瞬态修正后, $\text{NO}_x$  排在 WHTC 瞬态循环内大部分区域都有所改善,但在部分区域有所恶化,总体上  $\text{NO}_x$  排放积分量降低了 5.4 g。

图 7 所示为有、无 EGR 瞬态修正的 WHTC 瞬态循环实时碳烟排放及碳烟排放积分量的结果,可以看出,经瞬态修正后,碳烟排在 WHTC 瞬态循环内有显著改善,碳烟排放积分量降低了 0.482 g。

表 1 为有、无 EGR 瞬态修正的发动机 WHTC 瞬态循环比排放和比油耗对比,可见采用 EGR 瞬态修正后, $\text{NO}_x$  排放降低了 4.7%,碳烟排放显著改

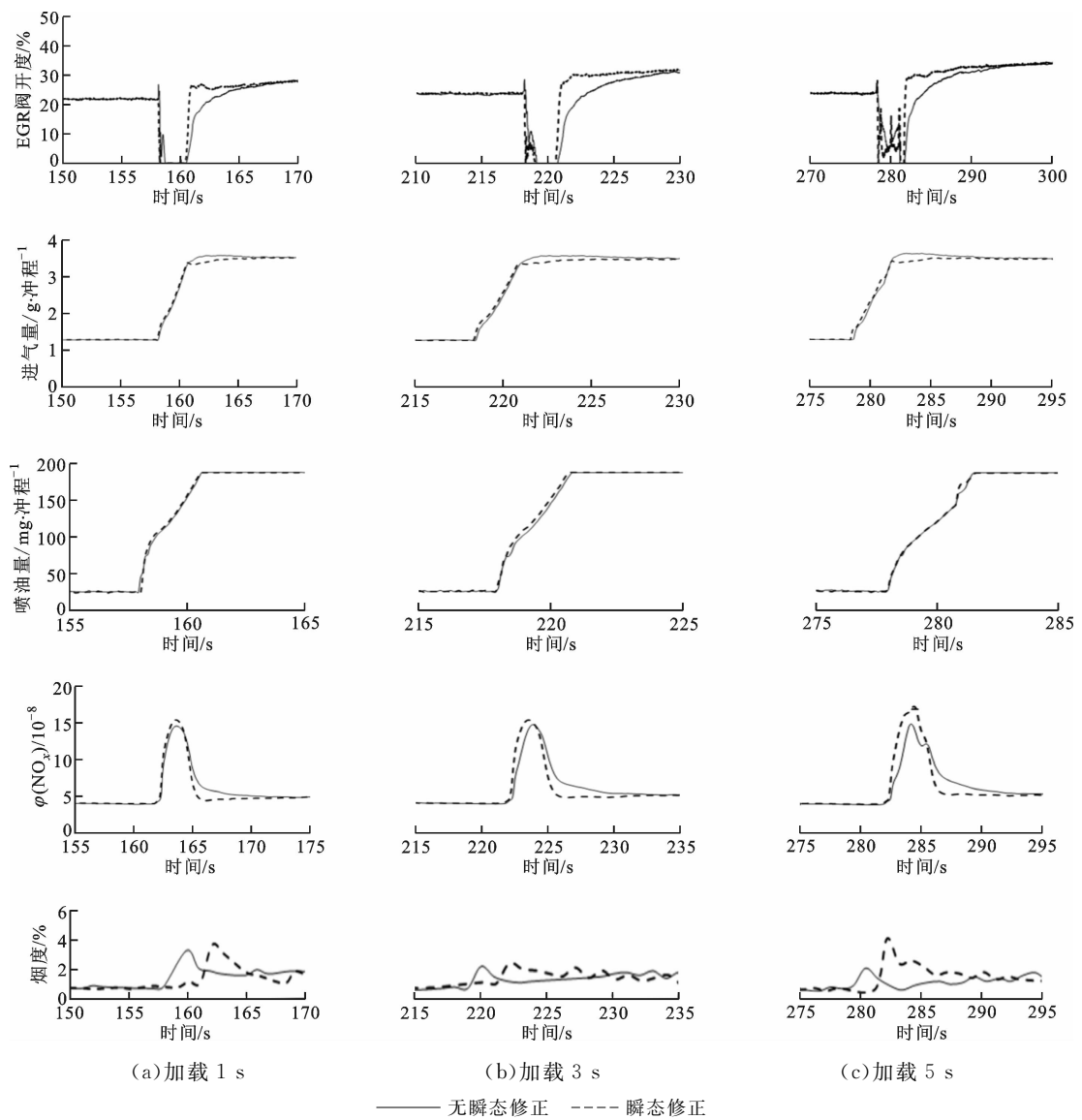


图 5 恒定转速转矩瞬增工况 EGR 瞬态修正效果对比

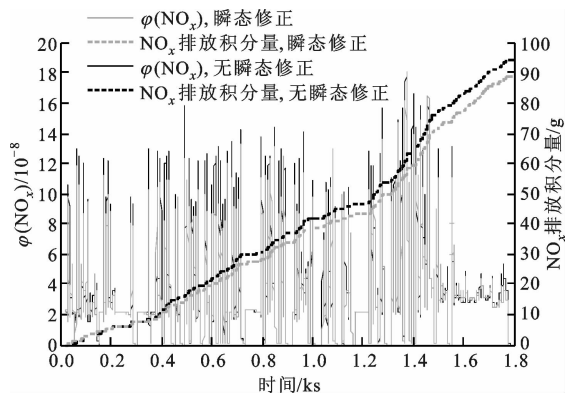


图 6 瞬态修正对 WHTC 瞬态循环 NO<sub>x</sub> 排放结果的影响

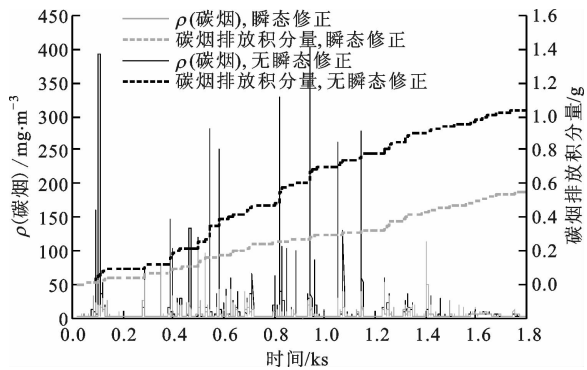


图 7 瞬态修正对 WHTC 瞬态循环碳烟排放结果的影响

善,降低了 46.4%,HC 和 CO 排放分别降低了 8.5% 和 30.3%,CO<sub>2</sub> 排放增加了 0.3%,基本无影响,但油耗增大了 0.6%。在牺牲 0.6% 油耗的前提下,

NO<sub>x</sub>、碳烟、HC 和 CO 的排放都有显著改善,这表明 EGR 瞬态修正控制策略对发动机排放性能的改善效果明显,具有应用价值。

表1 有无EGR瞬态修正的发动机WHTC瞬态循环性能对比

| 瞬态修正 | 比排放                    |                        |                        |                       |                       | 比油耗   |
|------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
|      | NO <sub>x</sub>        | 碳烟                     | HC                     | CO                    | CO <sub>2</sub>       |       |
| 有    | 394.7×10 <sup>-2</sup> | 286.6×10 <sup>-4</sup> | 225.1×10 <sup>-3</sup> | 91.8×10 <sup>-4</sup> | 61.4×10 <sup>-3</sup> | 234.4 |
| 无    | 414.3×10 <sup>-2</sup> | 534.4×10 <sup>-4</sup> | 246.2×10 <sup>-3</sup> | 131.8                 | 61.2×10 <sup>-3</sup> | 232.9 |

4 结 论

针对柴油机瞬态工况空气系统响应滞后造成的排放恶化等问题,本文设计了EGR瞬态修正控制策略:当判定发动机处于瞬态工况时,将EGR阀预控制开度设定为0,以加快EGR阀关闭速度;依据发动机当前瞬态程度修正需求空气量,使实际进气量更早满足需求空气量,实现EGR阀适时开启。采用此瞬态控制策略后,发动机的排放性能获得了以下改善:

(1)在瞬态工况初期,经过EGR瞬态修正后可使EGR阀更快关闭,缓解了空气量供应不足造成的碳烟排放过高以及烟度限制造成的动力性不足的问题;

(2)在瞬态工况后期,通过修正目标空气需求量使EGR阀更早开启,避免了由于EGR阀开启不及时造成的NO<sub>x</sub>排放过高;

(3)EGR瞬态修正可使WHTC瞬态循环时的NO<sub>x</sub>排放降低4.7%,碳烟排放降低46.4%,HC和CO排放分别降低8.5%和30.3%,但是使CO<sub>2</sub>排放略增0.3%,油耗增加0.6%。虽然牺牲了0.6%的油耗,但发动机排放得到了显著改善,证明EGR瞬态修正控制策略对改善发动机排放性能是有效的。

参考文献:

[1] 朱瑞军,王锡斌,冉帆,等. EGR和冷EGR对柴油机燃烧和排放的影响[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 23-27.

ZHU Ruijun, WANG Xibin, RAN Fan, et al. Effects of EGR and cooled EGR on combustion and emission of a diesel engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 23-27.

[2] CHARLTON S J. Control technologies for compression-ignition engines [M]// SHER E. Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines. New York, USA: Academic Press, 1998: 358-419.

[3] YOKOMURA H, KOUKETSU S, KOTOOKA S, et al. Transient EGR control for a turbocharged heavy

duty diesel engine; SAE Technical Paper 2004-01-0120 [R]. New York, USA: SAE, 2004.

[4] KRESO A. Method for controlling an engine with VGT and EGR systems; US 7076953 [P]. 2004-04-01.

[5] Ford Motor Company. MY OBD system operation summary for 6.0 L diesel engine [R]. Detroit, USA: Ford Motor Company, 2003.

[6] VIGILD C W. Method for controlling an internal combustion engine; US 8036812 [P]. 2011-02-10.

[7] HEUWETTER D, GLEWEN W, MEYER C, et al. Effects of low pressure EGR on transient air system performance and emissions for low temperature diesel combustion; SAE Technical Paper 2011-24-0062 [R]. New York, USA: SAE, 2011.

[本刊相关文献链接]

刘军恒,孙平,刘源,等. 掺混比对高压共轨柴油机颗粒物物理特性的影响. 2017, 51(12): 104-111. [doi:10.7652/xjtuxb201712016]

袁超,洪伟,苏岩,等. 直喷汽油机起动过程多环芳烃排放的研究. 2017, 51(9): 54-62. [doi:10.7652/xjtuxb201709008]

刘世宇,李志军,史春涛,等. CO<sub>2</sub>和水蒸气对稀燃NO<sub>x</sub>催化转化器的影响. 2017, 51(5): 134-141. [doi:10.7652/xjtuxb201705019]

谢萌,马志杰,王全红,等. 聚甲氧基二甲醚及其高比例掺混柴油混合燃料发动机燃烧与排放的试验研究. 2017, 51(3): 32-37. [doi:10.7652/xjtuxb201703006]

汪映,黄智勇,柯希春,等. 液化石油气对二甲醚-柴油双燃料发动机燃烧和排放特性的影响. 2016, 50(5): 19-23. [doi:10.7652/xjtuxb201605003]

瞿磊,王忠,李瑞娜,等. 甲醇/生物柴油燃烧颗粒的结构特征研究. 2016, 50(5): 81-86. [doi:10.7652/xjtuxb201605012]

麻斌,董伟,高莹,等. 稀燃条件下废气再循环对缸内直喷汽油机微粒排放粒径分布的影响. 2016, 50(5): 87-94. [doi:10.7652/xjtuxb201605013]

钟兵,洪伟,苏岩,等. 控制参数对增压缸内直喷汽油机部分负荷下微粒排放特性的影响. 2016, 50(5): 95-100. [doi:10.7652/xjtuxb201605014]

(编辑 葛赵青 苗凌)