

# 基于 EGR 策略的重型柴油机瞬态空燃比优化控制

赵靖华<sup>1,2</sup>, 洪伟<sup>1</sup>, 冯枫<sup>3</sup>, 解方喜<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林师范学院 计算机学院, 吉林 四平 136000; 3. 空军航空大学 科研部, 长春 130022)

**摘要:** 针对某些重型柴油机在进气中冷后加入足量的 EGR 较为困难, 瞬态工况下 EGR 优化后的发动机排放性能恶化的问题, 从精确控制 EGR 流量、优化空燃比、降低排放的目的出发, 在一台 CY6D180 高压共轨重型柴油机上进行了大量的试验研究。基于排放优化原则, 研究了利用节气阀配合 EGR 阀引入 EGR 后的发动机稳态特性, 提出了一种两阀联合关开优化发动机瞬变排放性能的策略。进行了瞬态工况条件下的对比试验验证。结果表明: 本文设计的瞬态空燃比控制方法在保证烟度排放值在 3.5% 限度内的前提下, NO<sub>x</sub> 的排放量也不超过稳态工况点的 10%。

**关键词:** 动力机械工程; 重型柴油机; 废气再循环; 瞬态过程控制; 空燃比

**中图分类号:** TK411    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5497(2012)05-0151-05

## Transient air-to-fuel ratio control on heavy duty diesel engine based on EGR technology

ZHAO Jing-hua<sup>1</sup>, HONG Wei<sup>1</sup>, FENG Feng<sup>2</sup>, XIE Fang-xi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China;  
2. College of Computer, Jilin Normal University, Siping 136000, China; 3. Department of Science and Research, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that adding sufficient quantities of EGR is difficult for heavy duty diesel engine after the intercooler of intake and emissions is deteriorated in transient operating conditions, a lot of experiments were carried out on a CY6D180 high pressure common rail diesel engine by controlling EGR flow accurately to optimize air-to-fuel ratio, so improving the emissions performance of engine. Based on emissions optimization principle, the steady-state characteristics of engine was studied under the condition of adding EGR after the EGR valve introduced by throttle. A new strategy of two valve turn off and turn on to optimize the engine transient emissions was proposed. The emissions effects under transient operating conditions were verified by experiments, the results show that the proposed strategy can reduce the smoke emission lower than 3.5% as well as NO<sub>x</sub> emission lower than 10% steady-state condition point.

**Key words:** power machinery and engineering; heavy duty diesel engine; exhaust gas recirculation; transient process control; air-to-fuel ratio

收稿日期: 2012-04-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50976046).

作者简介: 赵靖华(1980-), 男, 博士研究生。研究方向: 内燃机工作过程控制及优化。E-mail: zhaojh08@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 洪伟(1963-), 男, 教授。研究方向: 内燃机工作过程控制及优化。E-mail: hongw@jlu.edu.cn

大量文献已经证明,通过优化空燃比可以提高压燃机的性能<sup>[1-4]</sup>。Fredriksson 等<sup>[5]</sup>的研究表明:空燃比对 NO<sub>x</sub> 和 PM 的影响存在一个折衷关系,因此,控制空燃比到一个预定的理想范围对降低柴油机排放是非常重要的。具体从加入 EGR 对空燃比的影响来看,加 EGR 可降低 NO<sub>x</sub> 排放,但是会导致 PM 增加,CO 和 HC 也会随之增加,并且在涡轮增压的限制下,降低空燃比会增加比油耗。

为了满足日趋严格的排放法规,在重型柴油发动机上应用了高 EGR 率。然而,当在一台配有涡轮增压和中冷的柴油机上使用高 EGR 率时,由于增压升高的延迟,急加速会产生大量的烟度<sup>[6]</sup>。分析其原因可知,碳烟排放恶化的根本原因是瞬态工况下空燃比下降太大,如果在发动机瞬态加速工况下将 EGR 阀暂时关闭,停止废气回流、加大新鲜进气流量、尽可能地加大瞬时加速阶段的空燃比,这可能是降低碳烟瞬态排放量的一种有效的方法。有学者基于此理论,为了降低瞬态加速工况下碳烟排放,研究了定时长关闭 EGR 阀的方法,得到的最佳试验结果是:瞬变开始时刻延迟 2.5 s 前关闭 EGR 阀可实现消光烟度降至 15%。但是,EGR 关闭时长有赖于工况条件,定时长难以适应全部工况<sup>[7]</sup>。本研究在瞬态工况条件下,通过 EGR 阀和节气阀的联合调节闭环控制空燃比在标定的值之下,从而保证烟度排放在一定限度内。

## 1 试验台架及稳态 EGR 优化分析

本试验研究对象为 CY6D180-C3-FD 增压中冷电控共轨柴油机,其排气量为 7.79 L;燃油消耗率不大于 240 g/(kW·h)<sup>-1</sup>;压缩比为 16.9:1;缸径×冲程为 115 mm×125 mm;最大扭矩/转速为 870 N·m/1700 r·min<sup>-1</sup>;标定功率为 180 kW;标定转速为 2000 r·min<sup>-1</sup>。

为深入了解 CY6D180 柴油机的基础特性,

本文利用试验台架及数据采集卡、Horiba MEXA 气体分析仪等相关测控系统,采集了该发动机在各个工况下的稳态参数及排放水平,部分转速扭矩下的中冷后压力与排气压力对比如表 1 所示,在部分低转速工况下,进气中冷后压力比排气压力大,也就是说此压差不能保证足够废气通过 EGR 阀,因此,本研究需增加一个节气阀来降低进气歧管压力以保证足够的 EGR 流量。

以原机性能为参考,在维持燃油消耗率基本不变、最大增幅不超过 3% 且消光烟度值不超过 4% 前提下,以 NO<sub>x</sub> 排放降低的幅度最大为前提,通过调节 EGR 阀和节气阀(ITH)得到了各个稳态工况下的最优 EGR 率。

表 1 排气压力与中冷后压力对比

Table 1 Comparison between pressure after intercooler and exhaust pressure

转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	扭矩/ (N·m)	中冷后压力 (相对)/kPa	排气压力 (相对)/kPa
1300	820	96	69.2
1300	740	88.6	81.5
1300	650	76.5	67.3
1300	560	64.9	54.6
1300	470	52.9	52.7
1300	385	42.4	42.1
1200	830	75.7	63.5
1200	740	68.5	54.1
1200	647	58.5	45.0
1200	556	49.3	34.2
1200	470	40.1	31.2
1200	383	31.9	28.4
1000	712	45.5	35.8
1000	635	40.2	32.8
1000	560	34.0	28.6
1000	482	28.1	25.2
1000	403	22.8	22.5

表 2 显示了 ESC-B 转速(1473 r/min)下各个负荷梯度下加入 EGR 优化后发动机的耗油及排放水平较原机相比的变化情况,部分负荷下的 NO<sub>x</sub> 排放降幅超过 50%。

表 2 EGR 优化后的发动机性能及排放结果

Table 2 Performance and emission results of engine after EGR optimization

负荷率 /%	EGR 开度 /%	ITH 开度 /(°)	EGR 率 /%	原机油耗 (kg·h <sup>-1</sup> )	油耗增幅 /%	消光烟度 /%	NO <sub>x</sub> /10 <sup>-6</sup>	NO <sub>x</sub> 降幅/%
10	100	40	41.6	4.5	-1	0.62	169	56.8
20	100	45	34.4	6.8	-2	0.6	245	57.1
30	100	45	24.1	9	0	1.6	320	57.9
40	100	47	15.3	11.3	0	4	408	55.6
50	100	50	10.4	13.6	3	4.3	561	48.3
70	100	60	4.7	18.7	0	3.3	946	33
90	0	90	1.2	24	0	2.5	1598	0

## 2 基于稳态 MAP 的瞬态性能测试及分析

本试验将表 2 中所标定好的稳态工况 EGR 优化结果中 EGR 阀和节气阀的开度作为单片机中阀开度目标 MAP, 利用测功机分别设定了 ESC-B 转速 1473 r/min, 扭矩经 5、10、15 s 三档, 瞬变时间从 10% 增至 90% 最大负荷的瞬变率。在上述恒转增扭的瞬变工况下, 本文探讨了 EGR 在不同瞬变率下的响应及其对发动机性能及 NO<sub>x</sub> 和烟度排放的影响规律, 部分试验结果如图 1~图 4 所示。

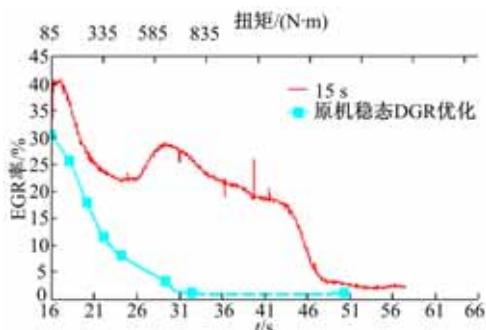


图 1 15 s 瞬变率下 EGR 率响应

Fig. 1 EGR rate response in 15 s transient rate

如图 1 所示, 以重型柴油机较为常用的 15 s 加速瞬变工况下 EGR 率变化曲线为代表与原机稳态 EGR 优化数据做对比。原机稳态 EGR 优化曲线点为表 2 中稳态工况下标定的各工况最优 EGR 率及其拟合连线, 发动机从约 16 s 时刻 1473 r/min 转速下 10% 负荷 (85 N·m) 处开始 15 s 加速, 到大约 31 s 时刻达到 90% 负荷 (765 N·m)。而 15 s 加速瞬变 EGR 率则要到 47 s 时刻才能达到 1473 r/min 转速下 90% 负荷 (765 N·m) 工况下的稳定状态, 大约出现了 16 s 的稳定延迟。产生 16 s 的稳定延迟的原因是加速瞬变条件下缸内气体流动、混合气形成等边界条件的延迟效应更加复杂, 需经历更长的燃烧过程以后才可能达到稳定状态。从图 1 中还可以看出, 在瞬变过程起始与终止阶段的 EGR 率分别与该稳态工况下最优 EGR 率基本一致, 但整个瞬变过程中都出现了 EGR 率超调现象, 瞬变中后阶段超调现象最为严重。

如图 2 所示, 以 15 s 加速瞬变工况下进气量变化曲线为代表与原机稳态 EGR 优化数据做对比。在 15 s 瞬变过程中相比 EGR 率的超调,

进气量整体上低于稳态工况下的标定结果。分析其原因可知: 在 40%~90% 最大负荷工况变化范围内的中后期瞬变阶段进气量明显减少, 这是由中冷前进气压力降低造成的, 而这些都要归结于增压系统的延迟特性。同时, 进气压力的减小促使了此阶段 EGR 流量的增大并且出现了较大幅度的超调。

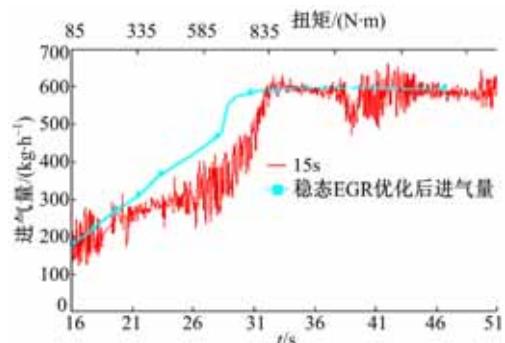


图 2 15 s 瞬变率下进气量响应

Fig. 2 Intake flow response in 15 s transient rate

如图 3 所示, 在稳态最优两阀开度 MAP 的控制下, NO<sub>x</sub> 排放在 15 s 瞬变率条件下的变化量值及速率都与稳态值大致相近, 瞬态变化的起始与结束阶段与稳态条件下 EGR 优化后的 NO<sub>x</sub> 排放结果趋于一致, 瞬变中期的排放水平要比稳态数值小。分析其原因, 高温富氧是 NO<sub>x</sub> 恶化的一项基本条件, 由于 EGR 超调空燃比下降, 混合气中整体上缺少氧气, 这样 NO<sub>x</sub> 的排放必然会有下降。

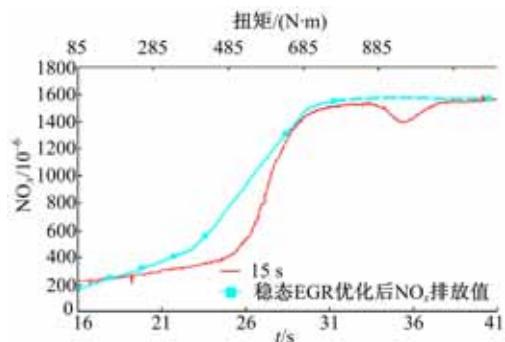


图 3 15 s 瞬变率下 NO<sub>x</sub> 排放

Fig. 3 NO<sub>x</sub> emission in 15 s transient rate

针对发动机加速瞬变工况下, 排放最为恶化的烟度问题, 本文将稳态 EGR 优化后的烟度标定值与三档瞬变率下的烟度恶化情况做了综合对比, 如图 4 所示。图 4 显示的三档瞬变过程中发动机烟度排放的响应特性表明, 三档瞬变过程中的烟度排放水平都远远高于 EGR 稳态工况优化

后的烟度最大值,这一时间段恰恰对应图 1 中 EGR 率超调最严重的阶段,5 s 瞬变率的消光烟度甚至达到近 80%。其原因在于上述三档瞬变过程中都存在涡轮增压器响应延迟问题,引发了进气量减少以及 EGR 率超调,在喷油 MAP 不变的前提下两者又共同导致了空燃比急降,而燃料多空气少的缺氧情况一方面会导致油气混合效能差,另一方面再加上燃烧温度增加就会造成烟度恶化。从三档瞬变率之间的烟度排放对比来看,瞬变率越高烟度排放性能恶化越严重,由此也可以推算出,瞬变率越高 EGR 率超调现象越严重。

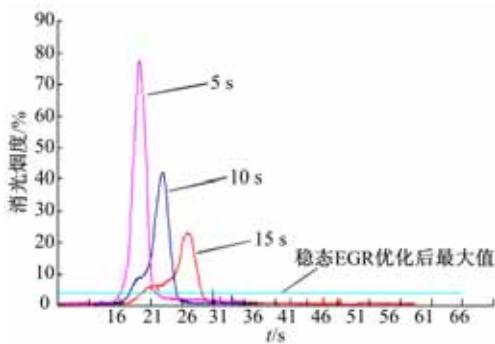


图 4 不同瞬变率下的烟度排放

Fig. 4 PM emission in different transient rates

综上所述:EGR 率的瞬态排放响应明显区别于稳态,采用稳态优化 EGR 率的两阀最优开度 MAP 作为瞬态过程的控制手段,会导致 EGR 率在瞬变过程中出现严重的超调、空燃比急降,引发的油气混合不均匀,最终会导致碳烟排放急剧上升。从优化瞬变响应历程中油气混合的角度考虑,改善瞬变过程中油气混合均匀程度、适当停止 EGR 回流废气从而控制瞬态过程空燃比下降程度,理论上都可在瞬变过程中降低碳烟排放水平。

### 3 两阀联合空燃比优化控制

由于本文研究的 CY6D180 柴油机上配有节气阀,可以通过调节节气阀辅助 EGR 阀对进气系统进行调节,在 EGR 阀开始关闭的时刻开启节气阀控制空燃比在标定的值之下,从而保证烟度值在一定限度内。为了实现高精度瞬态排放控制的目的,本文的空燃比控制器设计必须考虑 EGR 废气中的未燃空气量  $G_{egr\_a}$ 。关于  $G_{egr\_a}$  的获取问题,本研究首先采用了传感器直接测量的方法,即在 EGR 废气回流管处安装宽域氧传感器 UEGO。但是,在试验过程中发现 UEGO 的敏感性和延迟受废气温度影响较大,文献[8]也评述

过,UEGO 在柴油机中应用存在一些弊端。因此,本文采取经验公式在线估计未燃空气量  $G_{egr\_a}$ ,估算公式为

$$G_{egr\_a}(t) = G_{egr}(t) \cdot \left[ \frac{AFR(t - \tau_{egr}) - AFR_s}{1 + AFR(t - \tau_{egr})} \right] \quad (1)$$

式中: $\tau_{egr}$  代表 EGR 系统中的时滞常数; $G_{egr}$  代表 EGR 流量; $AFR_s$  表示化学剂量空燃比; $AFR(t - \tau_{egr})$  表示与当前  $t$  时刻有  $\tau_{egr}$  时间延迟的空燃比。经公式推导最后求得当前  $t$  时刻的 EGR 废气中的未燃空气量  $G_{egr\_a}(t)$ 。将它代入如下的空燃比估算公式

$$AFR = (G_a + G_{egr\_a}) / G_i \quad (2)$$

式中: $G_a$  代表空气流量,可用空气流量计测得; $G_i$  代表喷油量;AFR 代表当前的估计所得空燃比。本文瞬态空燃比闭环控制的逻辑就是在 PID 控制器的调节下,让估计得到的空燃比跟踪实测标定所得的目标空燃比。

### 4 控制效果试验验证

为验证本文瞬态空燃比控制算法的有效性,利用测功机设定了 ESC-B 转速(1473 r/min)下经 3 s 瞬变时间从 40% 增至 80% 最大负荷的瞬变工况条件,在此条件下与定时长关闭 EGR 阀、全开节气阀的瞬态调节方法做了对比,EGR 阀和节气阀在负荷变化前后的阀位置确定,是根据表 2 中的 EGR 优化策略的标定结果确定的。

如图 5、图 6 所示,在同一瞬变工况条件下本文瞬态空燃比控制策略的排放效果与 3、5 和 7 s 三档定时长关开两阀的方法做了对比。从  $NO_x$  排放的对比图中可以看出,瞬态空燃比控制策略的排放比稳态优化排放效果高出约 10%,尚处在瞬态排放效果优化可接受的范围内,基本处在三档定时长关开两阀方法中最好和最差的平均水平。从图 6 可以看出,瞬态空燃比控制策略的消光烟度排放恶化的峰值约为 3.5%,也处在瞬态排放效果优化可接受的范围之内,与 5 s 定时长关开两阀的排放效果相当。综上所述,在瞬态工况条件下,本文所设计的 EGR 阀节气阀的联合调节闭环控制空燃比在标定的值之下的控制方法,在保证烟度排放值在 3.5% 限度内的前提下,  $NO_x$  排放性能的恶化程度也不超过稳态工况点的 10%。

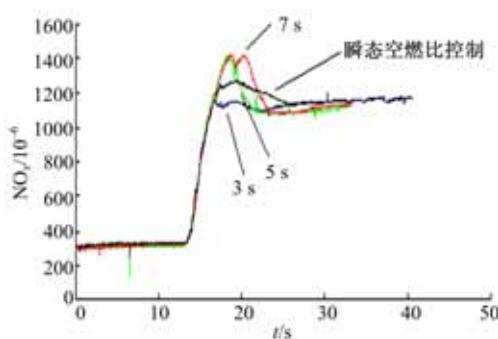
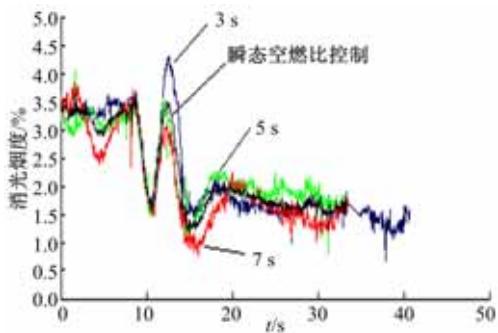
图 5 瞬态工况下的  $\text{NO}_x$  排放效果Fig. 5  $\text{NO}_x$  emission effect under transient operating conditions

图 6 瞬态工况下的烟度排放效果

Fig. 6 PM emission effect under transient operating conditions

## 5 结 论

(1) 基于所研究机型在进气中冷后加入足量的 EGR 较为困难的问题, 提出了节气阀配合 EGR 阀的最优 EGR 率稳态优化控制方法, 部分工况下  $\text{NO}_x$  排放降幅达到 50% 以上。

(2) 采用稳态优化 EGR 率的两阀最优开度 MAP 作为瞬态过程的控制手段, 会导致 EGR 率在瞬变过程中出现严重的超调、空燃比急降, 引发的油气混合不均匀, 最终会导致碳烟排放水平急剧上升。

(3) 本研究基于引入 EGR 后, 在瞬变过程中 EGR 率的严重超调问题, 提出了一种瞬态工况下的两阀联合空燃比控制方法, 并与定时长关开两阀的方法进行对比验证, 结果表明本文控制方法有效改善了重型柴油机的排放性能。

## 参考文献:

- [1] Johnson W P, Li S C, Oppenheim A K. Potential for closed loop air-fuel ratio management of a diesel engine[C]//SAE Paper, 1999-01-0517.
- [2] Westerlund Claes, Westerberg Björn. Model predictive control of a combined EGR/SCR HD diesel engine[C]//SAE Paper, 2010-01-1175.
- [3] Pfeifer Andreas, Smeets Maurice. A new approach to boost pressure and EGR rate control development for HD truck engines with VGT[C]//SAE Paper, 2002-01-0964.
- [4] Hardy W L, Reitz R D. A study of the effects of high EGR, high equivalence ratio, and mixing time on emissions levels in a heavy-duty diesel engine for PCCI combustion[C]//SAE Paper, 2006-01-0026.
- [5] Fredriksson Jonas, Egardt Bo. Backstepping control with integral action applied to air-to-fuel ratio control for a turbocharged diesel engine[C]//SAE Paper, 2002-01-0195.
- [6] Burton Jonathan L, Williams D Ryan. Investigation of transient emissions and mixed mode combustion for light duty diesel engine[C]//SAE Paper, 2009-01-1347.
- [7] Yokomura Hitoshi, Kouketsu Susumu, Kotooka Seijiro, et al. Transient EGR control for a turbocharged heavy duty diesel engine[C]//SAE Paper, 2004-01-0120.
- [8] Bai Lu, Yang Ming-gao. Coordinated control of EGR and VNT in turbocharged diesel engine based on intake air mass observer[C]//SAE Paper, 2002-01-1292.