

# 不同 EGR 闭环控制方式应用研究

姚旺, 庞斌, 张晨, 杜飞飞, 栾军山, 牛鸿斌

潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261001

**摘要:**基于不同废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)闭环控制方式的测量原理和控制策略,通过台架试验,对比稳态新鲜空气测量精度和瞬态排放,分析不同控制方式的控制精度及瞬态排放差异。结果表明:基于新鲜空气量和 EGR 率的 2 种闭环控制方式精度均较高,新鲜空气测量相对偏差分别小于 $\pm 3%$ 、 $\pm 5%$ ;基于废气氧浓度的闭环控制在低负荷区域的测量相对偏差最大达 $-10%$ ;基于新鲜空气量的闭环控制在瞬态测试循环中 EGR 阀关闭速率快,NO<sub>x</sub> 排放出现峰值;基于文丘里流量计的 EGR 率闭环控制可以有效兼顾新鲜空气和 EGR 废气流量,在满足柴油机动力性的同时有效控制排放污染物。

**关键词:**柴油机;EGR;EGR 率;闭环控制

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)06-0077-07

**引用格式:**姚旺,庞斌,张晨,等.不同 EGR 闭环控制方式应用研究[J].内燃机与动力装置,2023,40(6):77-83.

YAO Wang, PANG Bin, ZHANG Chen, et al. Study on the application of different EGR closed-loop control[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(6):77-83.

## 0 引言

随着人们对环境保护越来越重视,世界各国现行排放标准对柴油机排放的要求越来越严格。废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)作为一种有效降低 NO<sub>x</sub> 排放的技术,被广泛用于商用柴油机。如何提高 EGR 率控制的精度和响应性,实现 EGR 精确闭环控制,对柴油机的动力性、燃油经济性和排放至关重要。

过量废气导致发动机燃烧恶化及动力性、经济性下降,因此应严格控制参与再循环的废气量。胡川等<sup>[1]</sup>开发了柴油机 EGR 流量和进气总流量的实时模型,采用双层闭环控制算法,实现电子控制单元(electronic control unit, ECU)对实时 EGR 率的计算。栾晓芳<sup>[2]</sup>对 2.0T 高压共轨柴油机进行台架试验,确定了工况下使发动机综合性能最佳的 EGR 率,制定合理的 EGR 控制策略。

目前, EGR 控制包括控制新鲜空气量或再循环废气量、控制 EGR 率 2 种方法。本文中根据 EGR 闭环控制方式,研究不同流量计、传感器的工作原理及 EGR 闭环控制策略,通过柴油机试验,对比分析不同 EGR 闭环控制方式的优缺点,为后续更严格的排放标准选择合适的 EGR 闭环控制方式提供选择和应用参考。

## 1 柴油机 EGR 系统

柴油机 EGR 系统将柴油机燃烧后的部分废气导入进气侧,与新鲜空气混合,再次参与燃烧。废气中的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等多原子分子可增加燃烧气体的比热容,降低柴油机燃烧过程的峰值温度和压力,从而减少

收稿日期:2023-07-21

基金项目:国家重点研发计划项目(GG20211602-03)

第一作者简介:姚旺(1985—),男,山东泗水人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为发动机进、排气系统设计,E-mail:yaow@weichai.com。

$\text{NO}_x$  的生成。EGR 柴油机结构如图 1 所示。

改变 EGR 阀的开度,可控制导入进气管中的废气量,从而控制  $\text{NO}_x$  排放。EGR 阀开度有 3 种控制方式:1)通过安装在增压器压气机前的进气流量计测量新鲜空气量;2)通过安装在 EGR 管路的文丘里流量计测量废气流量;3)通过安装在涡轮增压器涡轮后的氧传感器计算新鲜空气量。

## 2 EGR 闭环控制方式

### 2.1 新鲜空气量闭环控制方式

#### 2.1.1 空气流量传感器测量原理

空气流量传感器(mass air flow sensor,MAF)又称空气流量计,分为热膜式和热线式 2 种。热膜式 MAF 传感器动态响应速度快、功耗低、体积小、易安装,广泛应用于车用柴油机领域,测量进入柴油机的新鲜空气。MAF 传感器信号可用于喷油和 EGR 率控制,直接影响车用柴油机的动力性、经济性、排放性和工作稳定性<sup>[3]</sup>。

热膜式 MAF 传感器主要由加热电阻  $R_h$ 、对称分布于  $R_h$  两边的上游测温电阻  $R_u$  和下游测温电阻  $R_d$ 、测量气体初始温度的电阻  $R_a$  组成<sup>[4]</sup>,其测量原理如图 2 所示。当无气流流经传感器时, $R_h$  两端温度对称分布, $R_u$  与  $R_d$  的电阻相等;当有气体流过时,电阻与气流的对流换热引起  $R_h$  两边的温度梯度发生变化,部分热量由  $R_u$  向  $R_d$  转移, $R_d$  与  $R_u$  的差随着气流的增大而增大,芯片内集成电路将电阻输出的模拟信号转换为 0.94~5 kHz 的频率信号,形成流量与频率一一对应关系,即为传感器特性曲线<sup>[5]</sup>。

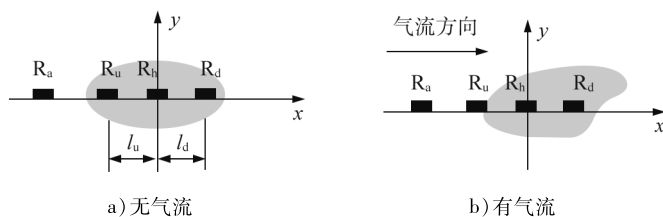


图 2 MAF 传感器测量原理

#### 2.1.2 空气流量传感器标定方法

空气流速影响 MAF 传感器加热电阻的散热量,因此 MAF 传感器受车辆管路布置影响较大,不同整车车型均应对空气滤清器至压气机入口间的管路进行标定,标定示意图如图 3 所示。通过控制试验台架上风机的转速调整空气质量流量,实时记录 MAF 传感器的输出频率和台架流量计的空气质量流量,应测量柴油机全部万有工况的空气流量,确定 MAF 传感器特性曲线,如图 4 所示。完成标定后将 MAF 传感器特性曲线输入 ECU。

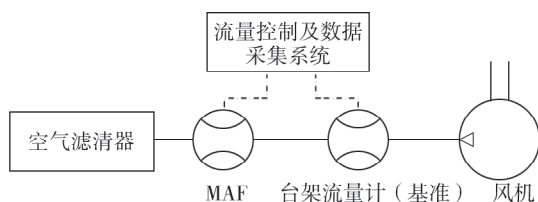


图 3 MAF 传感器流量传感器标定示意图

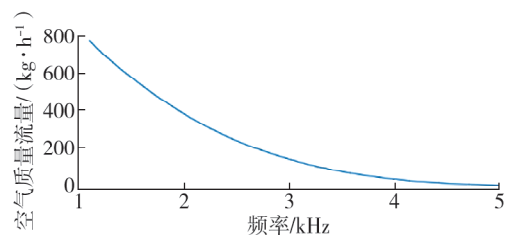


图 4 MAF 传感器特性曲线

#### 2.1.3 基于新鲜空气量的闭环控制策略

根据柴油机转速和油量确定设定进气量,与 MAF 传感器的实测进气量进行对比,通过比例积分微分(proportional integral differential, PID)控制器控制输出流量闭环开度,再与以转速和油量确定的 EGR 阀预置开度相加,得到 EGR 阀需求开度;通过 PID 控制器计算 EGR 阀需求开度对应的占空比,EGR 阀需求

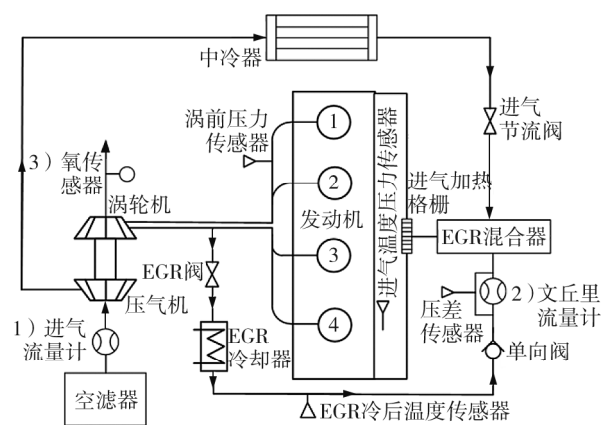


图 1 EGR 柴油机结构

开度与 EGR 阀实际开度形成闭环,最终控制柴油机实际进气量与设定进气量相等,柴油机达到最优的性能和排放。基于新鲜空气量的 EGR 控制如图 5 所示。

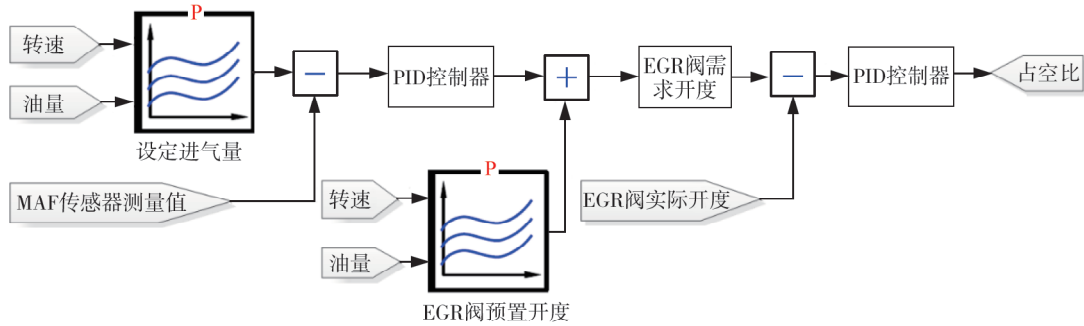


图 5 基于新鲜空气的 EGR 控制

## 2.2 基于氧浓度的闭环控制方式

### 2.2.1 氧传感器工作原理

氧传感器分为宽域氧传感器和窄域氧传感器,宽域氧传感器响应更快、测量更精确,广泛应用于车用柴油机的空燃比控制。宽域氧传感器由泵氧单元、测氧单元和大气室组成。

宽域氧传感器工作原理如图 6 所示。测氧单元一侧是与外部大气相通的大气室,另一侧是与排气管相通的测量室。当柴油机工作时,排气通过泵氧单元中的孔道进入测氧室。由于排气中的氧浓度低于大气室,在测氧单元两侧产生了氧浓度差<sup>[6]</sup>。氧离子从氧离子浓度高的一侧移动到浓度低的一侧,随着离子的移动,在测氧单元两侧电极上感应出电压。此时,泵氧单元向排气接触侧的电极提供足够的氧气,使电压恒定为 450 mV,电子控制器将泵氧单元的电消耗换算为过量空气系数  $\lambda$ <sup>[7]</sup>。

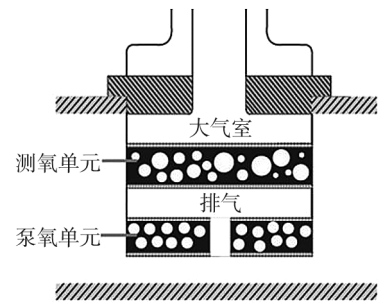


图 6 宽域氧传感器工作原理

### 2.2.2 氧传感器标定方法

确定氧传感器泵氧单元的输出电流与  $\lambda$  的关系曲线后,ECU 计算进入柴油机的新鲜空气量。氧传感器电流与  $\lambda$  关系曲线如图 7 所示。柴油机的新鲜空气质量流量

$$q_m = \lambda \alpha m_{\text{fuel}}$$

式中:  $m_{\text{fuel}}$  为柴油机油耗;  $\alpha$  为柴油机理论空燃比,  $\alpha = 14.5$ 。

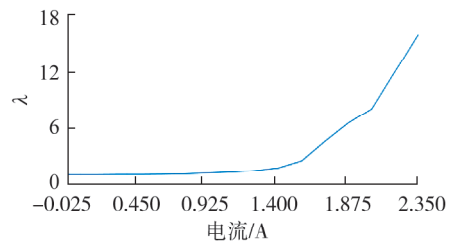


图 7 氧传感器电流与  $\lambda$  关系曲线

### 2.2.3 基于排气氧浓度的闭环控制策略

基于排气氧浓度的 EGR 控制如图 8 所示。由图 8 可知:基于排气氧浓度的 EGR 阀开度计算方法与基于新鲜空气量的计算方法相同,但实际进气量的计算方式不同,基于新鲜空气量闭环控制的实际进气量为 MAF 传感器测量结果,基于氧传感器的实际进气量通过  $\lambda$  计算得到。

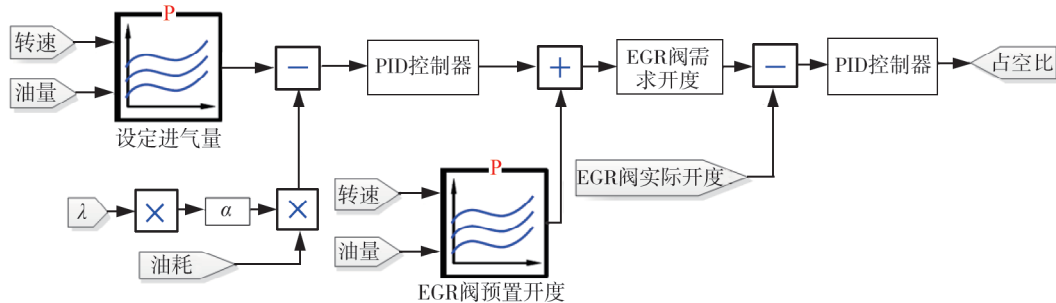


图 8 基于排气氧浓度的 EGR 控制

## 2.3 EGR 率闭环控制方式

### 2.3.1 文丘里流量计测量原理

文丘里流量计包括文丘里管、温度压力传感器,其中文丘里管分为入口段、喉口段、收缩段和扩压段 4 部分<sup>[8]</sup>。文丘里流量计结构如图 9 所示。

气体在流经收缩段时加速,气体的压力、温度和密度下降;流经扩压段时减速,压力、温度和密度升高,扩压段可以减小收缩段带来的压力损失。通过伯努利方程和连续性方程可求出气体流量,其中气体温度、压力、压差信号由安装在管路上的相关传感器测量得到。EGR 中废气质量流量

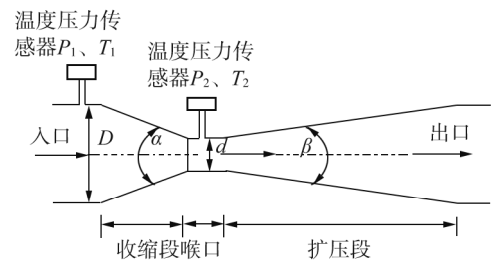


图 9 文丘里流量计结构原理

$$q_{m,EGR} = \frac{\pi}{4} \varepsilon d^2 \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \sqrt{2\Delta_p \frac{p}{RT}}, \quad (1)$$

式中: $\varepsilon$  为膨胀因数; $d$  为文丘里管喉口直径; $C$  为流量因数; $D$  为文丘里管入口直径; $p$  为文丘里管入口气体压力; $T$  为文丘里管入口气体热力学温度; $R$  为气体常数, $R=287 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ; $\Delta_p$  为文丘里管入口与喉口压差。

### 2.3.2 文丘里流量计标定方法

文丘里流量计标定示意图如图 10 所示。控制试验台架的风机转速,由台架流量计测量气体实际流量,文丘里流量计测量得到文丘里管入口温度信号、入口压力信号和压差信号,结合文丘里管结构参数,由式(1)计算理论气体流量,并与实际流量进行对比,得到基于雷诺数的流量因数  $C$  曲线<sup>[9]</sup>。

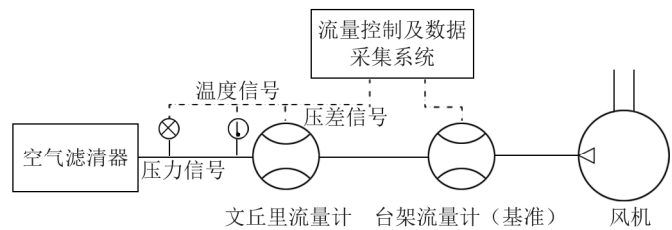


图 10 文丘里流量计标定示意图

### 2.3.3 基于 EGR 率的闭环控制策略

以柴油机转速和油量确定设定 EGR 率,设定 EGR 率与进入气缸总进气量的乘积为设定 EGR 废气流量,将设定 EGR 废气流量与文丘里流量计的实测结果对比,通过 PID 控制器计算 EGR 阀需求开度,再经过位置闭环控制实际开度达到所需 EGR 率<sup>[10]</sup>。基于 EGR 率的 EGR 控制如图 11 所示。

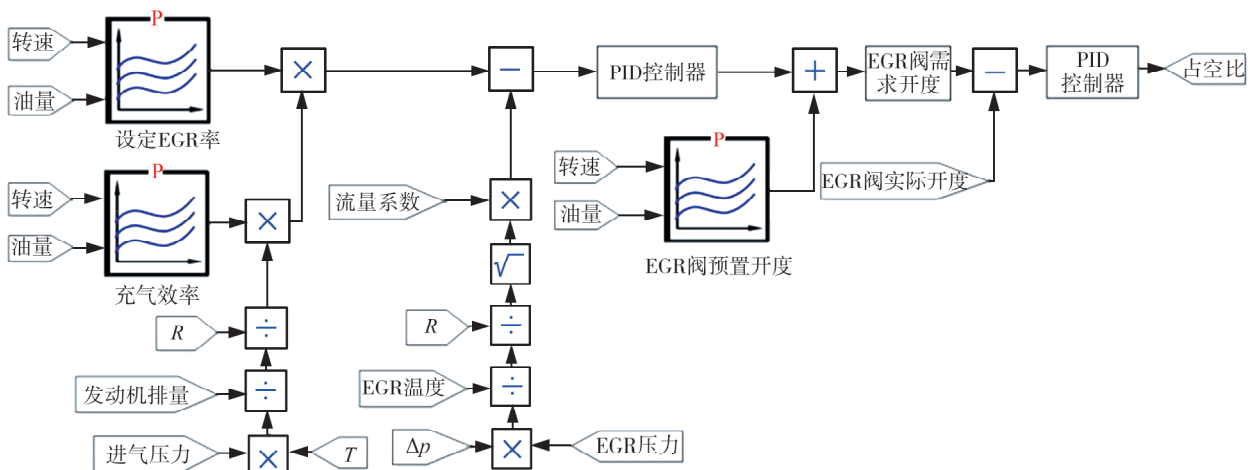


图 11 基于 EGR 率的 EGR 控制

### 3 试验验证

#### 3.1 试验装置

试验采用某直列6缸4冲程、电控高压共轨重型柴油机,柴油机缸径为110 mm,行程为136 mm,额定转速为2 100 r/min,额定功率为257 kW。在该柴油机上布置MAF传感器、文丘里流量计、氧传感器并进行零部件的功能调试,保证功能正常。原排中的 $\text{NO}_x$ 等由气体分析仪测量,烟度由AVL烟度仪测量,主要测量仪器如表1所示。

表1 试验主要测量仪器设备及型号

测量仪器	电控标定系统	烟度仪	气体分析仪	进气流量计	测功机
型号	ETAS INCA V7.1	AVL 483	MEXA-7500DEGR	ABB FMT700-T	Schneider InDYS50-4

#### 3.2 新鲜空气测量精度对比

新鲜空气量影响柴油机瞬态烟度控制、选择性催化还原系统尿素喷射量和颗粒捕集器积碳量的计算,因此应保证新鲜空气量的计算精度在 $\pm 5\%$ 以内。将MAF传感器和氧传感器的流量特性曲线、文丘里流量计的流量系数分别标定到ECU中,控制各次试验的柴油机性能一致,进行柴油机万有试验,将不同传感器测量的进气流量与台架ABB进气流量计的测量结果进行对比,得到不同传感器进气流量测量相对偏差如图12所示,图中 $\eta_r$ 为实际转矩与额定转矩的百分比, $\eta_s$ 为实际转速与额定转速的百分比。

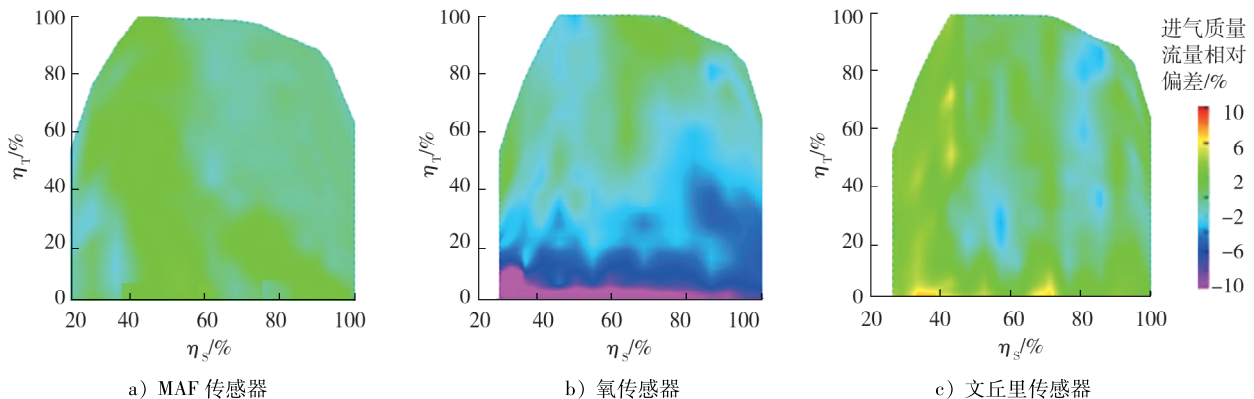


图12 不同传感器进气流量测量相对偏差

由图12可知:1)整个万有特性区域内,MAF传感器和文丘里流量计的测量相对偏差较小,分别在 $\pm 3\%$ 、 $\pm 5\%$ 以内,其原因为MAF传感器的流量特性曲线和台架ABB进气流量计均以流量试验台架流量计为基准进行标定,因此MAF传感器的测量相对偏差较小;2)氧传感器在低负荷区域的测量相对偏差较大,最大达 $-10\%$ ,原因为柴油机负荷调节为质调节,在低负荷区域由于空燃比较大,过量空气系数过大导致氧传感器测量偏差较大,从而导致计算的进气流量偏差较大,因此该方案仅适用于汽油机、气体机等当量或过量空气系数小于3的发动机;3)文丘里流量计的流量系数以常温、常压下的空气作为工质进行标定,与发动机实际运行的高温和高压且具有脉冲的气流存在较大差异,但该方案以EGR率作为控制目标,对新鲜空气量的计算偏差可以保证在 $\pm 5\%$ 以内。

#### 3.3 瞬态排放控制对比

氧传感器的稳态新鲜空气量的测量精度较差,不满足柴油机低负荷工况要求,因此瞬态工况下仅进行MAF传感器与文丘里流量计的对比试验。分别标定2种控制方式相对应的PID参数,实现被控参数的精确控制。PID标定评价方法如图13所示,其中跟随时间 $t_{90}$ (实际参数值达到90%设定值的时间)应小于0.5 s,稳定时间 $t_s$ 应小于3 s,相对超调量应小于5%。完成PID标定后在发动机台架上进行瞬态测



试循环(world harmonized transient cycle, WHTC)测试,对比柴油机2种闭环控制方式的 EGR 阀开度和  $\text{NO}_x$  排放,结果如图 14 所示。

由图 14 可知:MAF 传感器的控制目标为新鲜空气,由于增压器响应迟滞导致进气量响应缓慢,柴油机加速过程中 EGR 阀快速关闭,以满足进气量需求,EGR 率的降低导致排气出现  $\text{NO}_x$  峰值;文丘里流量计以 EGR 率为控制目标,加速过程中保持 EGR 废气流量和新鲜空气的比值,能够较好地实现  $\text{NO}_x$  和烟度的排放平衡。

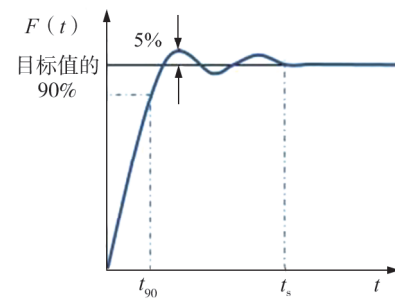


图 13 PID 标定评价图

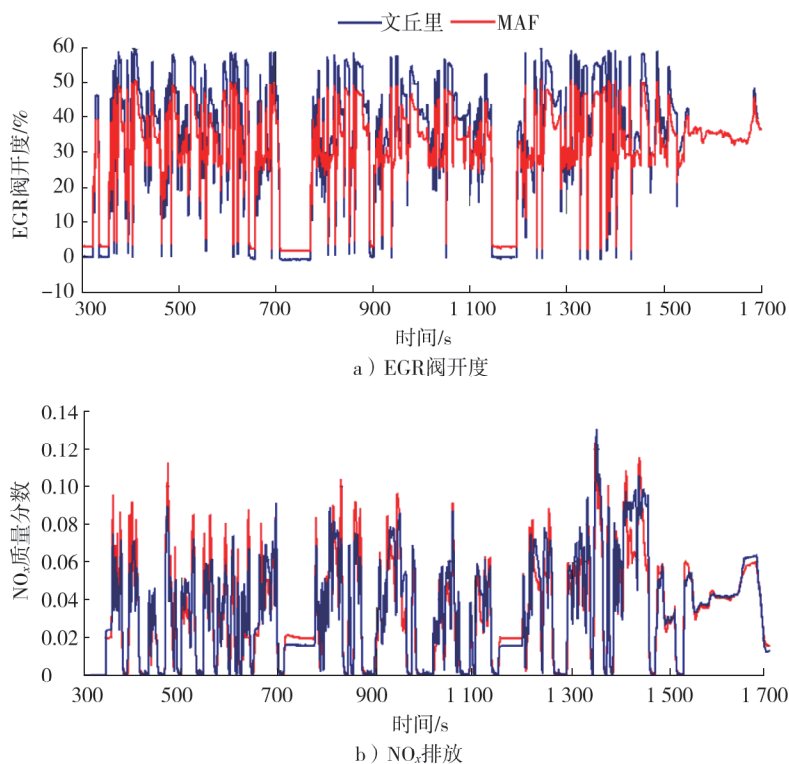


图 14 发动机 WHTC 循环下不同闭环控制方式的 EGR 阀开度和  $\text{NO}_x$  排放对比

## 4 结论

1) 进气流量传感器测量新鲜空气,氧传感器计算新鲜空气,文丘里流量计测量 EGR 废气,都可以用于发动机的 EGR 闭环控制。

2) 基于新鲜空气量和废气文丘里的闭环控制,柴油机新鲜空气计算(测量)精度较高,测量相对偏差分别小于 $\pm 3\%$ 、 $5\%$ ;氧传感器在过量空气系数较大时测量精度下降,低负荷时新鲜空气计算精度相对偏差可达 $-10\%$ ,基于废气氧浓度的 EGR 闭环控制方式适合应用当量燃烧的机型。

3) 基于空气流量传感器的闭环控制的控制目标为新鲜空气,瞬态过程中 EGR 阀开度更小,存在  $\text{NO}_x$  峰值;基于文丘里的闭环控制,以 EGR 率作为控制目标,可以平衡 EGR 废气和新鲜空气的比例,能够较好地控制柴油机排放的一致性。

### 参考文献:

- [1] 胡川,周奇,王伏,等.基于气体流量模型的 EGR 率反馈控制研究[C]//中国汽车工程学会.2016 中国汽车工程学会年会论文集.北京:机械工业出版社,2016.

- [2] 栾晓芳. 2.0T 高压共轨柴油机 EGR 控制策略的研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
- [3] 袁昌荣,孙中圣,李小宁,等. 污染物对热膜式气体流量传感器精度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,52(2):367-376.
- [4] DALOLA S, CERIMOVIC S, KOHL F, et al. MEMS thermal flow sensor with smart electronic interface circuit[J]. IEEE Sensors Journal,2012,12(12):3318-3328.
- [5] 刘海龙. 汽车发动机传感器信号采集与模拟输出系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.
- [6] 周树艳,张雷,杨鹏翔,等. 宽域氧传感器在发动机标定中的应用[J]. 现代车用动力,2015(2):29-32.
- [7] 陈智林,胡宗杰,晁岳栋,等. 基于宽域氧传感器的直喷汽油机 EGR 率测量及 EGR 响应研究[C]//中国汽车工程学会. 2018 中国汽车工程学会年会论文集. 北京:机械工业出版社,2018.
- [8] 安宁,姚旺,张晨,等. 发动机废气文丘里流量计回流结构应用分析[J]. 内燃机与动力装置,2022,39(4):62-66.
- [9] 张也影. 流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,1992.
- [10] 王泓亮,邓康耀,朱义伦,等. 文曲利管排气再循环系统在涡轮增压柴油机上的应用研究[J]. 内燃机学报,2002(2):129-132.

## Study on the application of different EGR closed-loop control

YAO Wang, PANG Bin, ZHANG Chen, DU Feifei, LUAN Junshan, NIU Hongbin

Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261001, China

**Abstract:** Based on the measurement principles and control strategies of different closed-loop control methods for exhaust gas recirculation (EGR), the steady-state fresh air measurement accuracy and transient emissions are compared by bench tests, and the control accuracy and transient emissions differences of different closed-loop control methods are analyzed. The results show that the two closed-loop control methods based on fresh air volume and EGR rate have high accuracy, and the relative deviation of fresh air measurement is less than  $\pm 3\%$  and  $\pm 5\%$ , respectively. The maximum relative deviation of measurement in low load based on closed-loop control of exhaust gas oxygen concentration is  $-10\%$ . The closed-loop control based on fresh air volume had a fast closing rate of the EGR valve and a peak in  $\text{NO}_x$  emissions during transient testing cycles. The closed-loop control of EGR rate based on Venturi flowmeter can effectively balance the flow of fresh air and EGR exhaust gas, which meets the power requirements of diesel engines and effectively controls emission pollutants.

**Keywords:** diesel engine; EGR; EGR rate; closed-loop control

(责任编辑:郎伟锋)

(上接第 64 页)

the engine bench to analyze the results of the fuel injector deviation test. The results show that the relative deviation of fuel injection rate under normal conditions is  $-2.90\%$  to  $1.00\%$ , while the relative deviation of fuel injection rate under simulated injector wear is  $-3.42\%$  to  $0.83\%$ , which is a small deviation. The method of correcting fuel injection rate based on oxygen volume fraction in exhaust gas is feasible and accurate.

**Keywords:** diesel engine; excess air coefficient; oxygen concentration; fuel injection quantity correction

(责任编辑:郎伟锋)