

柴油机瞬态喷油正时分段延后策略排放优化

邢耀宏^{1,2}, 田 径^{1,2}, 贾皓宇^{1,2}, 韩永强^{1,2}, 金华玉³, 洪 晨³

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022; 3. 中国第一汽车股份有限公司技术中心, 长春 130022)

摘 要: 针对车用柴油机瞬态工况排放恶化问题, 以 CA6DM3 国 VI 高压共轨柴油机为研究对象, 基于 dSPACE 搭建了瞬态测控平台, 提出了基于喷油正时分段延后的瞬态排放优化策略。选取转速为 1 100 r/min、加载范围为 10%~90% 负荷、加载时间 3 s 的典型瞬态工况, 以略低于加载稳定期空燃比的 27、28 为参考空燃比, 提出差值延后和比例延后 2 种方式实现的分段喷油正时控制策略, 达到喷油正时的分段延后。测试结果表明, 在兼顾柴油机瞬态加载过程动力性和燃油经济性的前提下, 采用参考空燃比 28 的差值延后分段策略时, 6°C A 延后方案的排放改善效果最优, 瞬态加载过程中 NO_x 与微粒排放的最大降幅分别为 6.5% 和 27.77%, 累计排放降幅分别为 6.8% 和 31.9%。

关键词: 车用柴油机; 瞬态排放; 喷油正时策略; dSPACE 测控平台

中图分类号: TK427 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)09-2817-11

DOI: 10. 13229/j. cnki. jdxbgxb. 20240483

Transient emission optimization of diesel engines based on segmented fuel injection timing delay strategy

XING Yao-hong^{1,2}, TIAN Jing^{1,2}, JIA Hao-yu^{1,2}, HAN Yong-qiang^{1,2}, JIN Hua-yu³, HONG Chen³

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. R&D Center of China FAW Co., Ltd., Changchun 130022, China)

Abstract: To address the deterioration of emissions during transient conditions in automotive diesel engines, the CA6DM3 National VI high-pressure common rail diesel engine was investigated. A transient measurement and control platform was constructed based on "dSPACE", and a transient emission optimization strategy utilizing segmented fuel injection timing delay was proposed. A typical transient operating condition was selected with a speed of 1 100 r/min, a load range of 10% to 90%, and a loading time of 3 seconds. Reference air-fuel ratios slightly lower than the stable loading period, specifically 27 and 28, were chosen. A segmented fuel injection timing control strategies implemented through two methods—difference delay and proportional delay, were proposed to achieve segmented delay in fuel injection timing. The test results indicate that, while balancing the dynamic performance and fuel economy during the transient

收稿日期: 2024-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52276114); 吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20221000KJ).

作者简介: 邢耀宏(1995-), 男, 博士研究生. 研究方向: 内燃机公害与控制. E-mail: yhxing23@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 田径(1981-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 内燃机公害与控制. E-mail: jingtian@jlu.edu.cn

loading process of the diesel engine, adopting the difference delay segmented strategy with a reference air-fuel ratio of 28, the 6 °CA delay scheme yielded the optimal emission improvement effect. The maximum reductions in NO_x and particulate matter emissions during the transient loading process were 6.5% and 27.77%, respectively, the cumulative emission reductions were 6.8% and 31.9%.

Key words: automotive diesel engine; transient emissions; injection timing strategy; dSPACE measure and control platform

0 引言

根据我国生态环境部 2023 年 12 月发布的《中国移动源环境管理年报(2023 年)》对 2022 全年的统计结果显示^[1], 2022 年我国汽车的 NO_x、CO、HC、PM 排放总量分别为 519.5、669、172.6 和 5 万 t, 柴油车的排放物主要为 NO_x 和 PM, 分担率分别为 88.4% 和 100%。相较国家第五阶段机动车污染物排放标准(以下简称国 V 排放标准), 国 VI 排放法规对柴油机的排放提出了更高的要求^[2]。在汽车保有量逐年增长的背景下, 为实现“双碳”发展目标, 应对越来越严格的油耗及排放法规, “节能减排”技术成为内燃机的重点及热点研究领域。如何降低内燃机的燃油经济并减少污染物排放, 是目前世界各国研究机构和内燃机相关企业亟需解决的问题^[3]。

柴油机的运行工况大多为瞬态工况, 该工况性能较稳态工况恶化严重^[4], 因此提升瞬态工况性能对柴油机整体性能的提升具有重要意义。对于柴油机瞬态性能的研究及优化控制, Rakopoulos 等^[5,6]通过对涡轮增压柴油机建立热力学模型、缸内燃烧模型和排放模型等仿真模拟, 同时改变不同边界参数进行瞬态性能试验研究, 得出测试台架的瞬态性能数据。Atac 等^[7]采用 X 射线相差成像技术, 对 6 个不同的多孔喷油器(3、5、6、8、9、10 孔)在瞬态运行期间的排放流动进行了试验研究, 结果显示, 各喷油器的流量变化趋势不明显, 孔数少且为奇数的喷嘴表现出更强的孔间涡流相互作用。此外, 他们还建立柴油机喷油器在瞬态工况下的喷油速率预测简化模型^[8], 并指出在瞬态短时喷射过程中, 确定柴油机喷油器的喷射速率是通过改善空气/燃料混合物形成来改善燃烧过程的关键。Feng 等^[9]通过对带有选择性催化还原(Selective catalytic reduction, SCR)系统的非道路用柴油机在冷启动和热启动下的瞬态工况排放进行研究, 得出柴油机冷启动的排放高于

热启动时的排放, 其中冷启动时柴油机后处理系统的 NO_x、HC、CO 转化效率比热启动时低 10%~16%, PM 的转化效率比热启动低 31%。Liu 等^[10]采用不同的喷油压力策略和涡轮旁通阀开度对柴油机瞬态工况的燃烧、排放特性进行了探究, 结果表明, 全时段提高喷油压力可以有效减少碳烟的排放, 但是整体的有效燃油消耗率(Brake specific fuel consumption, BSFC)也会升高。昆明理工大学的万明定^[11]针对国 VI 柴油机, 进行了不同海拔高度下废气再循环(Exhaust gas recirculation, EGR)率、主喷正时、轨压和 VNT 开度对柴油机燃烧、排放等性能的影响试验, 结果表明, 海拔越高, WHTC 循环下柴油机的 BSFC、CO、NO_x 等恶化越严重。国内外学者对柴油机瞬态工况的研究, 主要通过改变发动机的边界参数, 包括喷油正时、喷油压力、进气流量等来优化瞬态工况过程的燃烧和排放。其中, 喷油正时的调节是改善柴油机瞬态工况排放的一个重要手段, 但单一调节无法改善整个瞬态工况过程, 反而会出现恶化时段^[4]。

目前, 车载电子控制单元(Electronic control unit, ECU)对于喷油正时的调节基本是根据工况转速参数进行整段插值调节, 无法实现进一步调节。针对这一问题, 本文以 CA6DM3 型号的国 VI 高压共轨柴油机为研究对象, 通过喷油正时调节的测试分析, 提出了含差值延后和比例延后 2 种方式的基于计算空燃比分段喷油正时延后控制策略, 在灵活测控平台 dSPACE(“数字空间”)上探究其对柴油机瞬态加载过程性能的影响, 为柴油机瞬态性能排放优化提供思路。

1 试验装置及方案

1.1 测控台架

本文采用 CA6DM3 型号柴油机作为研究对象。该机型为无锡柴油机厂生产的六缸直列、增压中冷、高压共轨柴油机, 其基本参数如表 1 所

表 1 柴油机技术参数
Table 1 Technical parameters of diesel engine

参数	值	参数	值
型号	CA6DM3	标定功率/kW	410
气门数/个	4	标定转速/(r·min ⁻¹)	1 800
总排量/L	12.5	缸径×行程/(mm×mm)	126.5×166
排放标准	国 VI	进气系统	增压中冷
燃烧室	缩口 ω 型	怠速转速/(r·min ⁻¹)	600
气缸布置形式	直列	燃油供给系统	Bosch 高压共轨系统
压缩比	17.6		

示。其总排量为 12.5 L,压缩比为 17.6,满足国 VI 排放标准,是目前较为先进的柴油机机型。测控台架结构如图 1 所示,主要由柴油机、电力测功机、冷却液恒温系统、中冷器、燃烧分析仪、油耗仪、排放分析仪及信号采集箱等设备组成,以 dSPACE 为控制平台进行瞬态测试。

1.2 喷油正时瞬态影响规律试验方案

为了探究喷油正时对柴油机瞬变过程性能的影响,本文对柴油机典型的恒转速增扭矩瞬态工况进行试验,选取恒定转速为 1 100 r/min、加载范围为 10%~90% 负荷、加载时间为 3 s 的柴油机性能劣变程度较大的瞬变工况作为试验研究对象。瞬变负荷加载过程通过控制系统中循环喷油量的线性过渡实现,循环喷油量随时间变化曲线

如图 2 所示。喷油正时分别为 0、±2、±4、±6 °CA,其中“+”号表示喷油提前角在原机 MAP 的基础上增加相应角度,喷油正时提前;“—”号表示喷油正时延后相应角度;0 °CA 表示原机测试。为减少其他因素干扰,试验均在冷却液温度 85 °C、EGR 阀关闭的条件下进行。

1.3 喷油正时分段延后策略方案

基于不同喷油正时下的瞬态性能影响规律,可进一步提出以空燃比为阈值的喷油正时延后策略,以应对在瞬态工况前期进行延后会产生恶化效果。瞬态工况下的实时空燃比计算需采用实时油耗量和进气流量,但由于瞬时油耗仪和测控平台所用空气质量计的测量精度和响应频率达不到瞬态试验要求,因此需通过其他高精度和快响应参数来实时计算油耗量和进气流量。当冷却液温度达到 85 °C 时,在目标转速下进行不同负荷的标定试验,得到各负荷对应的循环油量实时计算值、各转速下循环油量与油耗仪测得的实际油耗量,以及进气总管压力与进气流量 2 组参数的近似关系,根据二项式插值实时计算,得出油耗量与进气流量,进而求得实时空燃比值。

以略低于加载稳定期的空燃比 27、28 为分段阈值,当空燃比低于阈值时调控瞬态喷油正时,参考空燃比的设定如图 3 所示。由 1.2 节的试验可得,喷油正时的延后能够有效降低 NO_x 与微粒的排放,但对瞬态前期具有恶化影响。基于此结论,

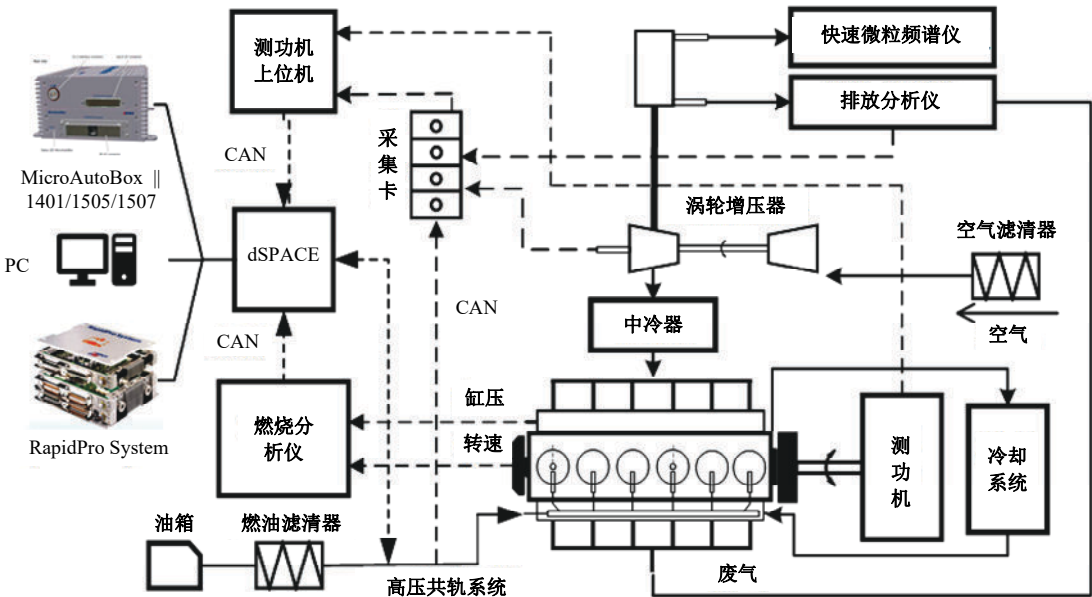


图 1 测控台架结构

Fig. 1 Measurement and control bench structure

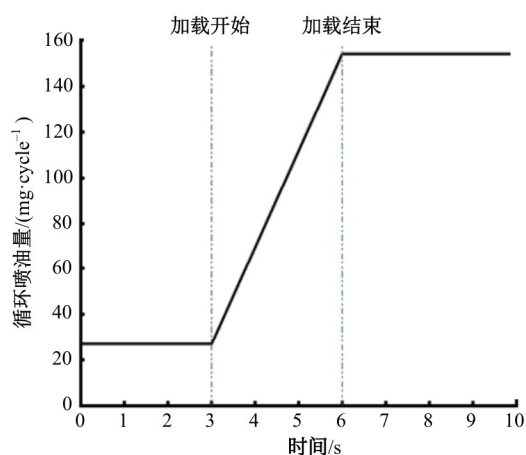


图2 瞬变过程循环喷油量随时间的变化

Fig. 2 Cyclic fuel injection quantity varies with time during transient processes

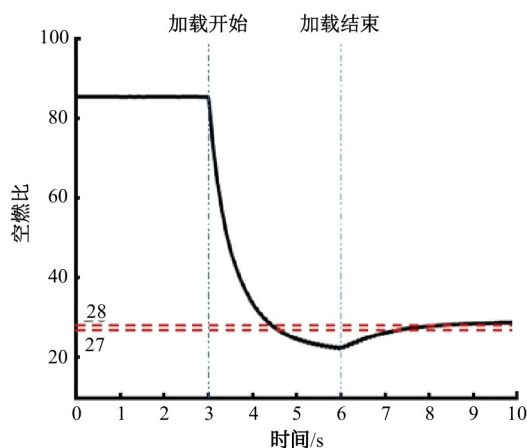


图3 原机正时瞬态加载过程中的空燃比实时计算值

Fig. 3 Real-time calculated values of air-fuel ratio during transient loading in the original engine's fuel injection timing

本文提出包含差值延后与比例延后2种方式的喷油正时分段策略,具体的试验方案设计流程图如图4所示,具体方案见表2。对于喷油正时差值延后的控制策略,以“ $-2^{\circ}\text{CA}(\text{AFR}_{28})$ ”的含义为例, -2°CA 表示在原机喷油提前角的基础上减 2°CA ,即喷油正时相对原机延后 2°CA ; AFR_{28} 表示以空燃比实时计算值28作为参考空燃比值,在空燃比低于28的时段进行喷油正时相对原机正时的调整。对于喷油正时比例延后的控制策略,以“ $\text{gain}_{-0.6}(\text{AFR}_{28})$ ”的含义为例, $\text{gain}_{-0.6}$ 表示对空燃比参考值与空燃比实时计算值的差值乘以 -0.6 的比例系数,再将差值计算后的值和原机提前角相加,实现喷油正时的比例延后。

表2 不同喷油正时延后试验方案

Table 2 Experimental plans for varying fuel injection timing delay

分段方式	喷油正时延后方案
差值分段	$-2^{\circ}\text{CA}(\text{AFR}_{28})$
	$-4^{\circ}\text{CA}(\text{AFR}_{28})$
	$-6^{\circ}\text{CA}(\text{AFR}_{28})$
	$-2^{\circ}\text{CA}(\text{AFR}_{27})$
	$-4^{\circ}\text{CA}(\text{AFR}_{27})$
	$-6^{\circ}\text{CA}(\text{AFR}_{27})$
比例分段	$\text{gain}_{-0.6}(\text{AFR}_{28})$
	$\text{gain}_{-0.8}(\text{AFR}_{28})$
	$\text{gain}_{-1}(\text{AFR}_{28})$
	$\text{gain}_{-0.6}(\text{AFR}_{27})$
	$\text{gain}_{-0.8}(\text{AFR}_{27})$
	$\text{gain}_{-1}(\text{AFR}_{27})$

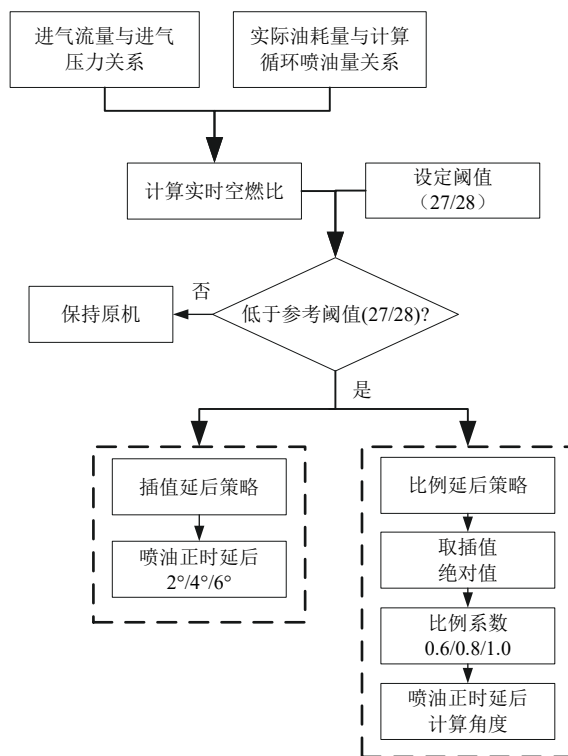


图4 分段喷油正时延后策略试验方案设计流程图

Fig. 4 Experimental design flowchart for segmented fuel injection timing delay strategy

2 结果及分析

2.1 喷油正时对柴油机瞬态工况性能的影响

图5为不同喷油正时对瞬态加载过程中燃烧性能参数的影响。由图5可知,最大爆发压力 $P_{\max}$ 随喷油正时的提前而增大,其相位 $\deg P_{\max}$ 与喷油提前角呈现相同的变化,喷油正时的提前使燃烧始点提前,燃烧重心也随之提前,由上止点后的角度向压缩上止点靠近,燃烧定容性增强,进而导致最大爆发压力增大。最大放热率 $dQ_{\max}$ 在瞬态过

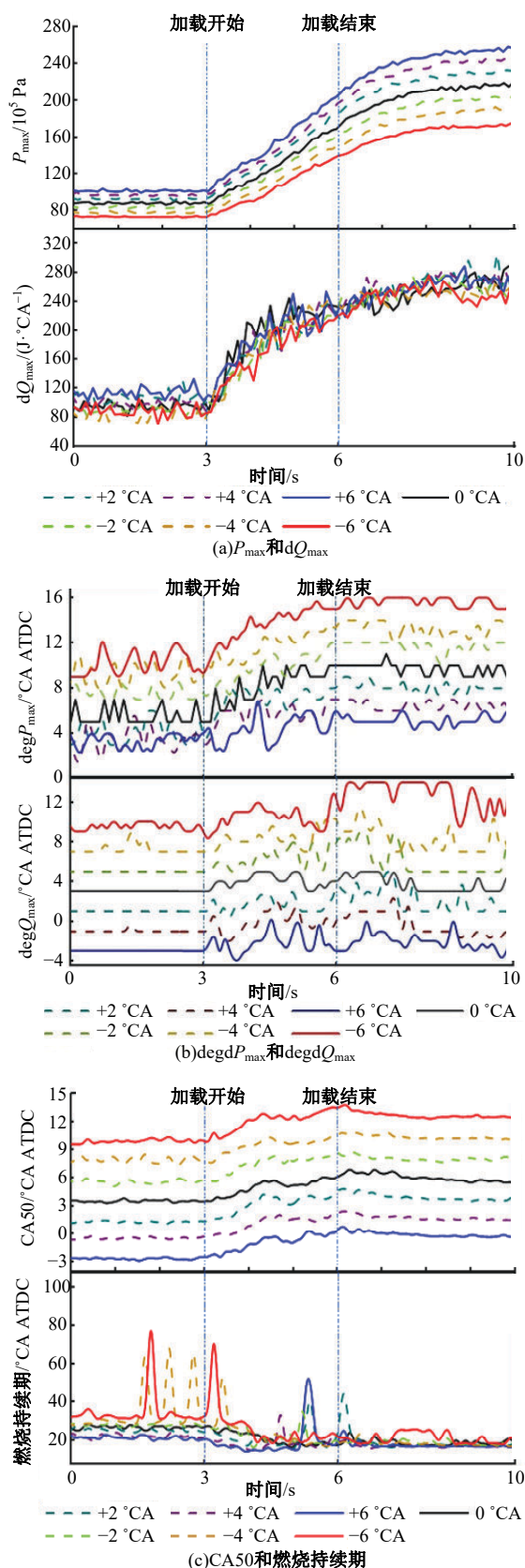


图5 不同喷油正时对瞬态加载过程燃烧参数影响

Fig. 5 Influence of different fuel injection timing on combustion parameters during the transient loading process

程中波动较大,总体来看,喷油正时的提前会使 $dQ_{\max}$ 增大。这是由于正时提前使得燃烧始点提前,燃油更早地进入缸内与空气混合,在压缩冲程阶段油气混合物更易达到着火温度,使燃烧更快更早,燃烧期间产生的热量集中在上止点附近,因此放热率峰值随之提高。其对应相位 $\deg dQ_{\max}$ 的变化规律和 $\deg P_{\max}$ 相同,均随喷油正时的提前而提前。此外,燃烧重心 CA50 随喷油正时的提前而提前,由上止点后的角度向上止点前靠拢,并且在整个瞬态过程中 CA50 变化值与喷油提前角的变化值基本相同。通过对比燃烧参数可得,喷油正时的延后可有效改善缸压峰值和控制燃烧相位,当喷油正时延后 6°CA 时, $P_{\max}$ 为 $176.57 \times 10^5 \text{ Pa}$, 相较原机降低了 $43.29 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

对比分析不同喷油正时对瞬态加载过程性能参数(见图6)和燃烧参数的影响,可以初步判断喷油正时的延后能使瞬变中后期输出扭矩增加、BSFC降低。这是因为喷油正时的延后虽然使燃烧重心偏离上止点,导致燃烧等容度降低、热功转换效率降低,但同时使排气能量增加,提升了涡轮增压器的做功能力,在瞬变过程中后期进气量得到较大的提高,进而改善了油气配比。两者产生折中权衡关系,后者的正向影响更大,使得柴油机瞬态过程中后期的动力性和燃油经济性有了一定的提高,“ -6°CA ”喷油正时在加载结束时刻相对于原机 BSFC 降低最多。由图6可以得出,虽然喷油正时的延后能够降低排放,但较大的延后会导致瞬变过程前期燃油经济性变差、微粒排放量增多,而在瞬变过程后期,燃油经济性有较小提升,微粒和 NO_x 排放降低。

仅在喷油正时的调节下,瞬态加载过程性能参数响应较为规律,因此将不同喷油正时调节下的瞬态加载过程性能参数与原机测试最大差值比例汇总于图7,将排放累计值汇总于图8。可见,在喷油正时的调节下,发动机扭矩、BSFC、进气流量、AFR 与原机的最大差值比较小,在提前或延后大角度时变化较多,但微粒与 NO_x 排放最大差值比较大。综上可得,喷油正时的调节能够有效控制柴油机的排放。在瞬变前期(扭矩 $< 560 \text{ N} \cdot \text{m}$, $3 \text{ s} < \text{时间} < 4 \text{ s}$),喷油正时延后会提高微粒排放总数,在 3.3 s 时喷油正时延后 6°CA ,微粒排放较原机达到最大差值 230% ,排放累计值增加 $0.8 \times 10^{12} \text{ n/m}^3$,增长 88.9% 。在瞬变中后期($4 \text{ s} < \text{时间} < 6 \text{ s}$),在

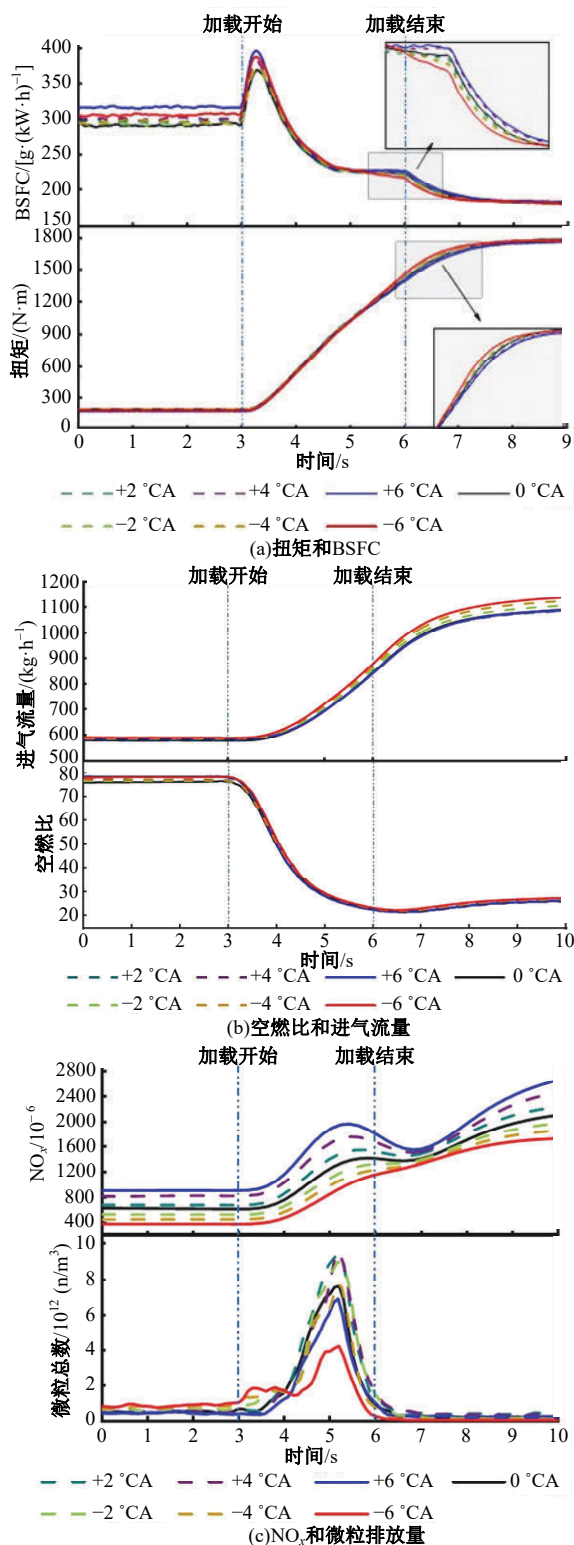


图 6 不同喷油正时对瞬态加载过程性能参数影响
Fig. 6 Influence of different fuel injection timing on the response of performance parameters during transient loading process

原机基础上分别提前和延后喷油正时,微粒排放均呈现先增多后减少的现象。瞬变过程的中后期,喷油正时延后 6 °CA 时,对微粒排放的降低效果最

佳,微粒总数峰值相对原机测试降低了 44.56%。而对于 NO_x 排放规律,在整个加载过程中,喷油正时延后均能有效降低排放,在 6 °CA 延后条件下最大 NO_x 排放量前期、中后期分别降低 36% 和 28%,累计排放分别降低 42.8% 和 29.2%。由此提出,在瞬变后期再对喷油正时进行延后处理,而非瞬变全程在原机正时基础上进行喷油提前角的调整。

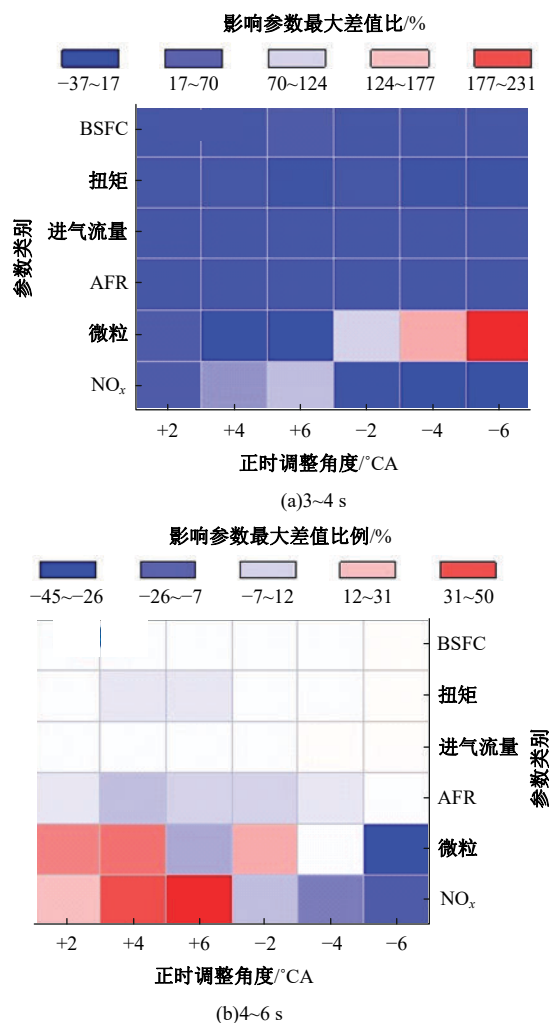


图 7 不同喷油正时下瞬态加载过程性能参数与原机最大差值比例
Fig. 7 Ratio of transient loading process performance parameter under different fuel injection timings to the maximal difference of the original engine

根据正时调整规律,本文提出 2 种实现分段正时调节策略的方式,即分段差值延后与分段比例延后。差值延后方式即在达到参考空燃比后,直接按照喷油正时的调整差值进行延后;比例延后方式则是根据图 3 中空燃比中后期变化规律,提出的一种延后方式,即根据空燃比与参考空燃

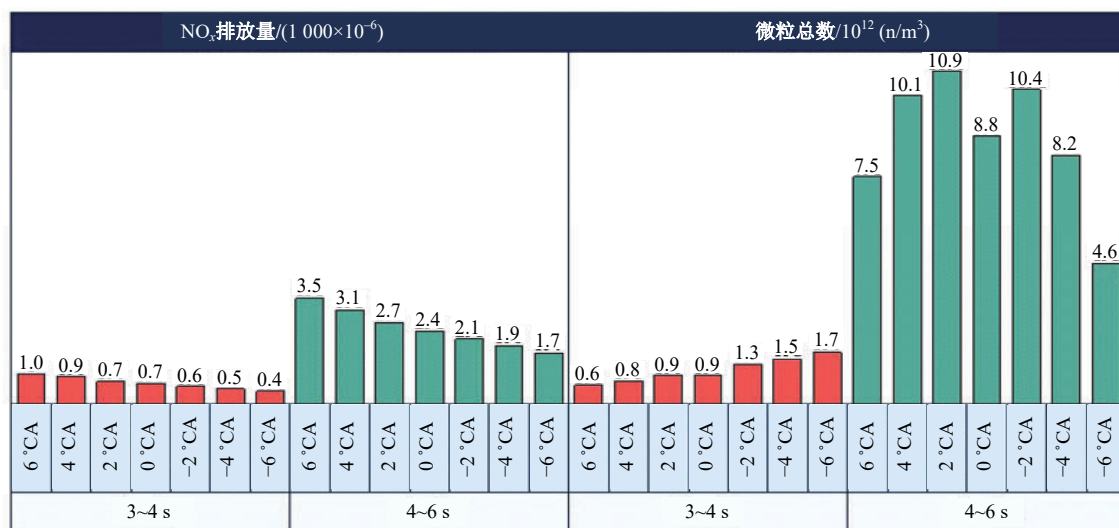


图8 瞬态加载过程排放累计值对比

Fig. 8 Comparison of cumulative emission values during transient loading process

比的差值采取比例变化调整的方式。下面对2种分段延后方式进行并列测试对比。

2.2 分段差值延后策略对瞬变过程性能的影响

差值延后方式,即在实时计算空燃比小于参考空燃比的时间段整体减去相应的值,不同的喷油正时差值延后策略方案所对应的喷油提前角如图9所示。

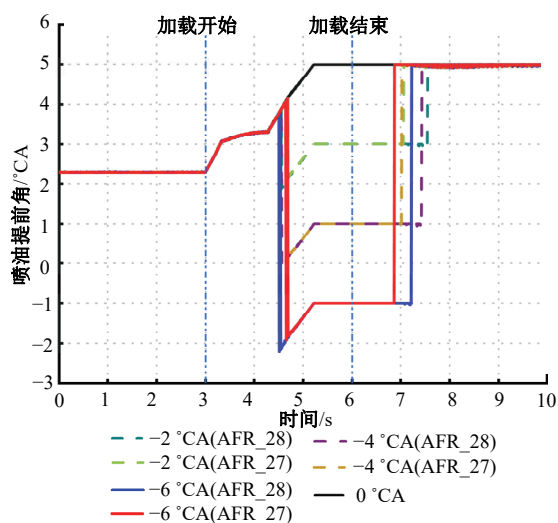


图9 喷油正时差值延后策略对应喷油提前角

Fig. 9 Injection advance angle corresponding to difference delay strategies in fuel injection timing

差值延后策略下瞬态加载过程的燃烧参数如图10所示,可见当实际空燃比小于参考空燃比时,随着喷油正时延后角度的增加,缸内最大爆发压力 $P_{\max}$ 相比原机测试降低的幅度也随之增加,且响应速度较快,在喷油正时恢复至原机正时前,

降幅达到最大。其中,“-6 °CA (AFR_28)”方案下 $P_{\max}$ 较原机降低 42.14×10^5 Pa,降幅为20.67%。最大缸压相位 $\deg P_{\max}$ 相对于原机相位也延后了相应角度,延后幅度与喷油正时基本相同。最大放热率 $dQ_{\max}$ 波动较大,规律不明显,但在“AFR_28”方案下可以看出,随着喷油正时的延后, $dQ_{\max}$ 相对于原机减小,降幅较小。燃烧重心 CA_{50} 变化规律与 $\deg P_{\max}$ 基本相同,均随喷油正时的延后向上止点后移,后移角度和喷油正时延后角度基本相同,“AFR_28”方案下 CA_{50} 的延后持续时间更长。差值延后方式效果直接,但也造成了缸压瞬时变化波动,伴随发动机工作噪声增加。

差值延后策略下瞬态加载过程的性能参数如图11所示,在喷油正时开始延后至恢复到原机正时前,进气流量随延后角度的增大而增大。可以看出,“-AFR_28”方案对进气流量的提升较多,原因是参考空燃比越大,越能够提前进入正时延后,延后时间段就越宽,对进气流量的影响也就越大。在进气流量提升最大处,“-6 °CA (AFR_28)”方案相比原机测试提高了26.93 kg/h,提升幅度为2.58%;而对于BSFC前期的差异,主要是试验误差导致。在瞬变中期,BSFC随喷油正时的延后而增加,“AFR_27”和“AFR_28”方案下的结果基本相同,喷油正时延后6 °CA的BSFC增幅最高,为2.42%,且增量为5.46 g/(kW·h),燃油经济性恶化较小,且恶化时间较短。在瞬变后期,所有喷油正时策略和原机基本相同。在不同的参考空燃比下,喷油正时延后策略对瞬变过程

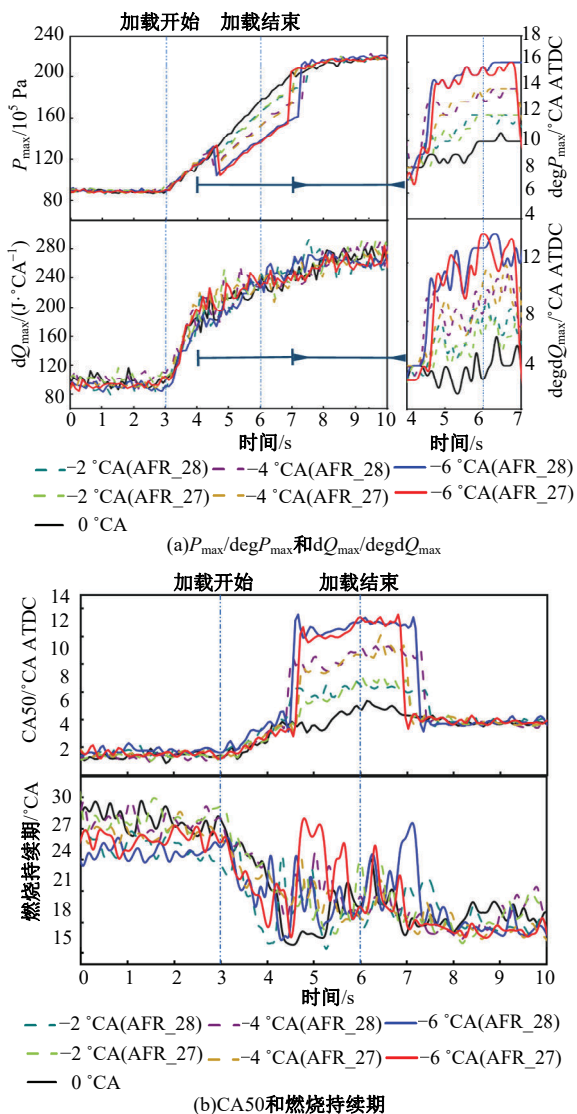


图 10 差值延后策略下瞬态加载过程燃烧参数

Fig. 10 Transient loading process combustion parameters under the difference delay strategies

中的燃油经济性影响不大。采用分段差值延后策略对瞬变过程扭矩、BSFC、空燃比和进气流量总体上影响不大,部分时段影响均在 3% 以内,因此差值延后方式能够兼顾动力性和燃油经济性。

由图 11(c)可以看出,NO_x排放量随喷油正时的延后而降低,且对喷油正时的敏感度较高。其原因是缸内温度对 NO_x 生成影响较大,喷油正时延后会使燃烧重心向上止点后移、燃烧温度较原机测试降低,导致 NO_x 相对原机测试生成较少。“AFR₂₈”方案下的 NO_x 排放降低区域比“AFR₂₇”方案下的更大,两个空燃比设置下喷油正时延后相同角度,NO_x 排放降幅则大致相同,且都是延后 6 °CA 下 NO_x 排放降低的幅度最大,最大降幅可达 9.73%。在喷油提前角较原机发生改变

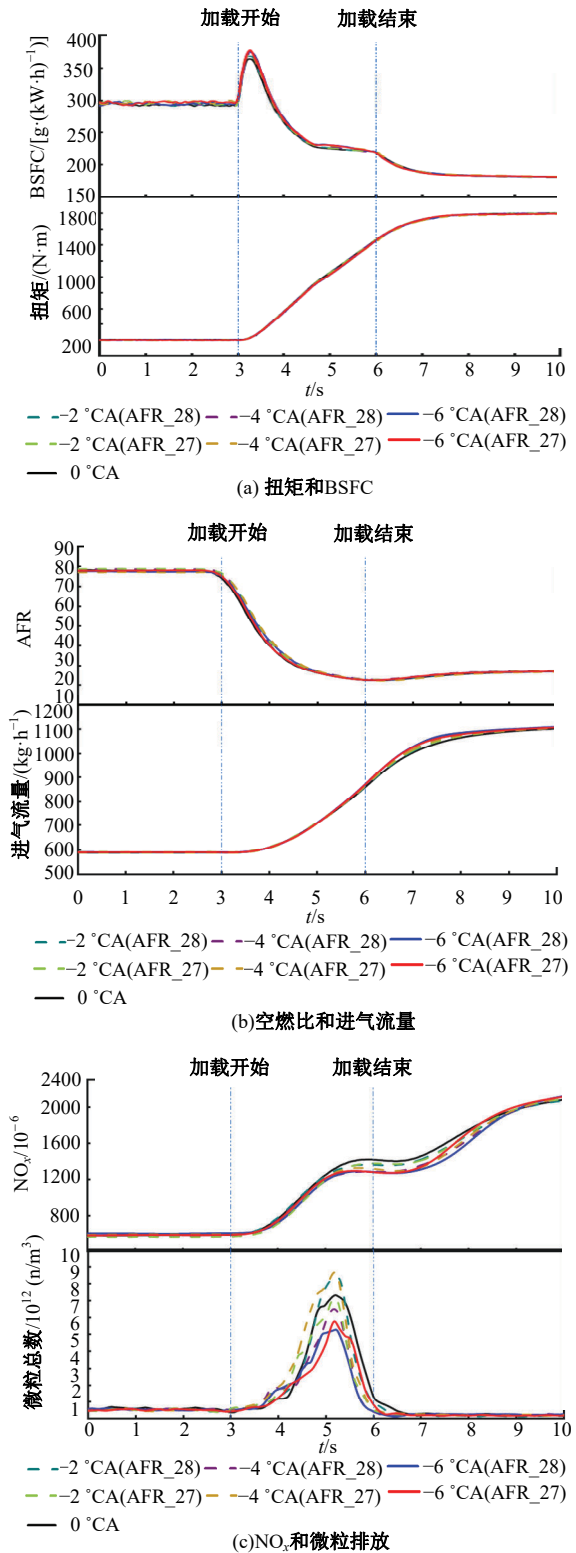


图 11 差值延后策略下瞬态加载过程性能参数

Fig. 11 Transient loading process performance parameters under the difference delay strategies

前,微粒排放总数基本相同,会由于测量误差产生较小的差异;而在喷油提前角延后之后,微粒排放较原机测试发生明显差异。“AFR₂₇”和“AFR₂₈”

28"方案下,喷油正时延后 6°CA 均较原机测试有明显的降低。这是由于喷油正时的延后虽然会降低缸内燃烧温度,导致微粒氧化效率降低,且燃烧重心的延后也会使氧化时间缩短,但是较大的喷油正时延后又会带来更多的进气,使氧含量增加,对微粒的氧化作用增强。在两者的折中权衡关系下,喷油正时延后 6°CA 下的微粒排放最少,而“AFR_28”方案下正时延后时间变长,单从峰值降幅来看,“ -6°CA AFR_28”方案下的微粒排放改善效果最好,微粒排放峰值较原机降低了 $2.03\times 10^{12}\text{ n/cm}^3$,降幅为27.77%。

2.3 分段比例延后策略对瞬变过程性能的影响

比例延后方式,即根据参考空燃比与实时计算空燃比的差值乘以比例系数后得到的值,作为喷油正时延后的角度,不同基于计算空燃比的喷油正时比例延后策略所对应的喷油提前角如图12所示。

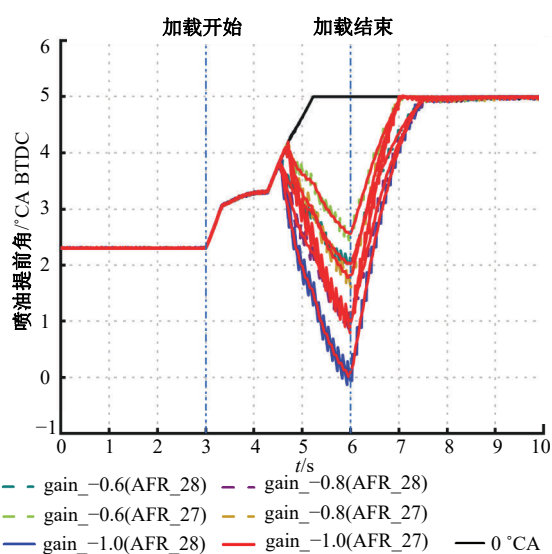


图12 喷油正时比例延后策略对应喷油提前角

Fig. 12 Injection advance angle corresponding to proportional delay strategies in fuel injection timing

图13为比例延后策略对瞬态加载过程中燃烧参数的影响。从图13中可以看出,缸内最大爆发压力 $P_{\max}$ 随喷油正时延后程度的增加而减小,且减小幅度与喷油正时延后角度呈正相关。相较于喷油正时差值延后策略,其 $P_{\max}$ 的变化更加平缓,从而减少了发动机的工作噪声。其对应的相位 $\text{deg}P_{\max}$ 也随喷油正时的延后而延后。最大放热率 $dQ_{\max}$ 和燃烧持续期的波动较大,规律不明显。最大放热率对应的相位 $\text{deg}dQ_{\max}$ 同 $\text{deg}P_{\max}$

变化规律相同,其延后的角度也是先增大后减小。燃烧重心 CA_{50} 的变化规律较为明显,随喷油正时的延后而延后,延后程度与参考空燃比和实时计算空燃比差值呈正相关。从对燃烧相位的分析可以更加明确地得出,燃烧相位对喷油正时的敏感度较高,通过调整喷油正时可以灵活控制燃烧相位。

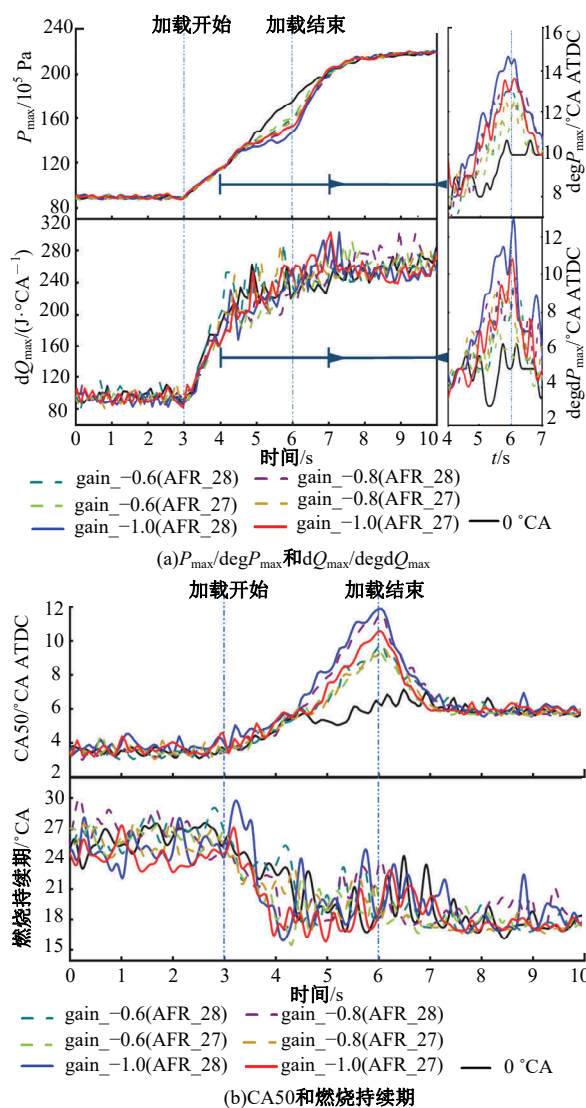


图13 比例延后策略下瞬态加载过程燃烧参数

Fig. 13 Transient loading process combustion parameters under the proportional delay strategies

比例延后策略下瞬态加载过程的性能参数如图14所示。与差值延后测试规律相似,分段比例延后策略对瞬态加载过程性能参数的影响较小,主要影响体现在 NO_x 与微粒排放方面,比例延后方式同样能够兼顾动力性和燃油经济性。图14(c)为不同策略瞬变过程 NO_x 排放随时间的变化曲线。与2.2节分析一致, NO_x 的排放与喷油正时的关系紧密,随着喷油正时的延后 NO_x 排

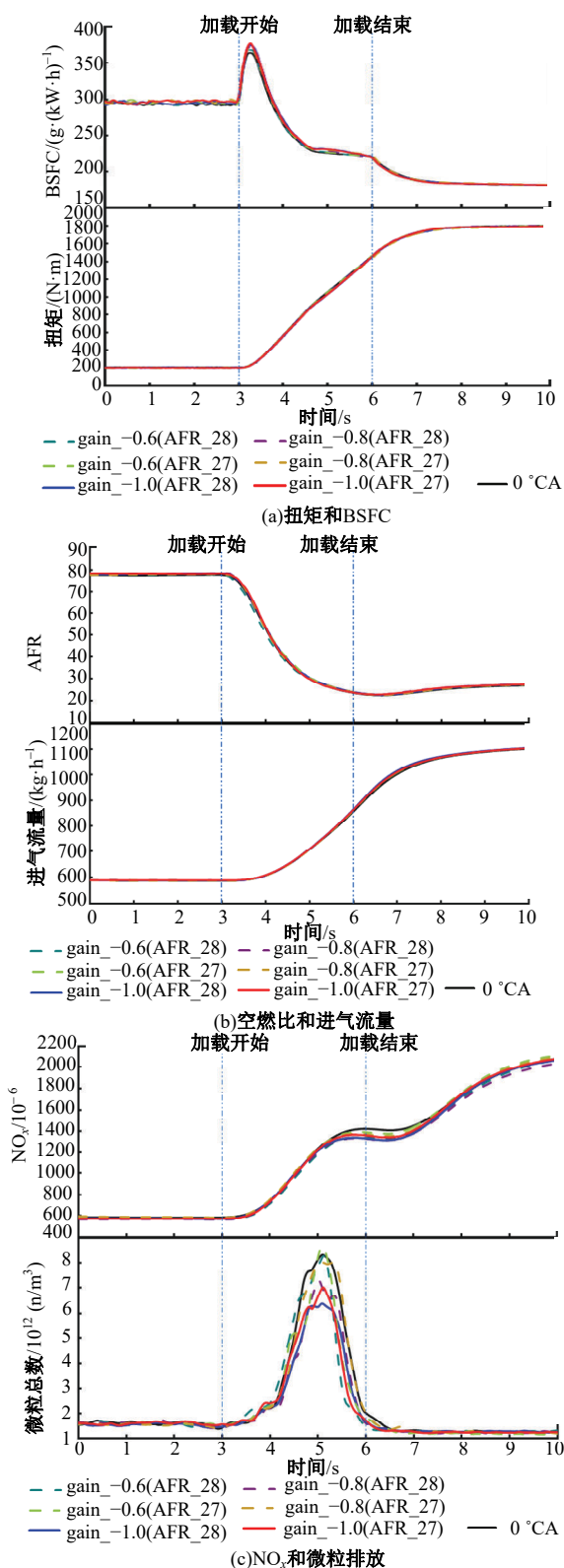


图14 比例延后策略下瞬态加载过程性能参数

Fig. 14 Transient loading process performance parameters under the proportional delay strategies

放降低,而比例延后方式策略中的大部分时间段延后角度较小,因此该策略对 NO_x 排放改善程度

较小,“AFR_28”方案能使喷油延后时间更长且比例延后程度更大,可见“gain_ -1(AFR_28)”方案对 NO_x 排放量的改善效果最显著,其最大减少量为 92.3×10^{-6} ,降幅为6.5%。“gain_ -1(AFR_28)”方案对微粒排放的改善在延后前期最为显著,随着喷油正时延后角度的增大,微粒排放先增大后减小;正时延后中期,微粒排放规律与前期相同,延后角度最大时微粒排放最低;在正时延后后期,随着喷油正时延后角度的降低,降幅差异也随之降低。根本原因是延后喷油正时使燃烧重心后移,偏离上止点角度更大,导致缸内燃烧温度降低,且燃料与空气氧化时间缩短,这会造成微粒排放增多,而较大的喷油正时延后会带来较大的进气量使微粒氧化更充分,从而造成微粒排放减少,这两者的折中权衡关系决定着微粒排放。其中,微粒排放峰值降低最多的方案是“gain_ -1(AFR_28)”,减少了 $1.93 \times 10^{12} \text{ n/m}^3$,降幅为26.4%。

选取2种方式策略下瞬态加载过程段(4 s < 时间 < 6 s)的累积排放量进行对比分析,结果列于图15。由“AFR_27”与“AFR_28”的对比可知,除差值延后 -2°CA 的方案外,其他方案策略下“AFR_28”的设置均优于“AFR_27”。“AFR_27”的设置能够使喷油正时在避开前期恶化时段下,较早进入延后期,从而保持更佳的排放折中权衡

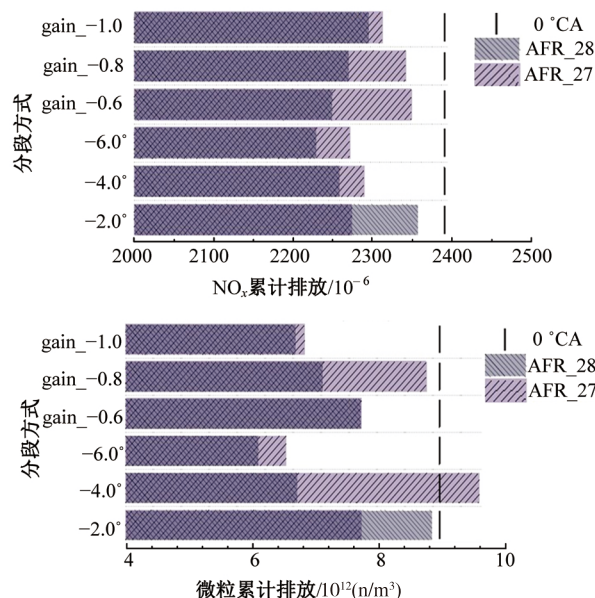


图15 瞬态过程主要差异段累积排放量

Fig. 15 Cumulative emission values in major time intervals with differences in the transient process

关系。从2种分段策略实施方式的多项测试对比结果来看,在测试方案“ -6° _AFR_28”下,即基于参考空燃比28下的喷油正时分段差值延后策略方案的排放改善效果最好,相较于原机测试,瞬态过程主要差异段累计 NO_x 排放量减少 162.9×10^{-6} ,降幅为6.8%,微粒排放量减少 $2.85 \times 10^7 \text{ n/cm}^3$,降幅为31.9%。

3 结 论

(1)在基于dSPACE操作平台和CADM3型号国VI高压共轨柴油机搭建的喷油正时调节测控平台上,喷油正时延后 6°CA 的排放改善效果最佳。在瞬变中后期($4 \text{ s} < \text{时间} < 6 \text{ s}$), NO_x 和微粒累计排放均得到改善,分别降低了42.8%和29.2%。但在瞬态过程前期(扭矩 $< 560 \text{ N}\cdot\text{m}$, $3 \text{ s} < \text{时间} < 4 \text{ s}$),微粒累计排放增长88.9%。喷油正时的延后实质是使燃烧相位延后,通过燃烧相位的改善,能够在排放生成时间与进气流量的折中权衡机理中进行调节。

(2)在喷油正时分段差值延后策略下,喷油正时呈阶梯型延后,能够产生直接的延后效果,保证延后期全段都能够采用最大延后角度,但进行延后切换时会带来较大的缸压瞬变与燃烧波动。在喷油正时分段比例延后策略下,喷油正时呈线性延后,延后角度先增大后减小,缸压变化与燃烧变化较缓和。2种喷油正时分段延后策略均能在兼顾动力及与燃油经济性下改善排放。

(3)通过多组喷油正时分段延后策略方案测试,空燃比设置为更接近加载稳定期的28,相较于参考空燃比27,能够更早进入喷油延后期。同时,延后策略在瞬态中后期触发延时,可有效避开加载恶化段。因此,对于累计排放,越接近加载稳定期空燃比的设置排放改善效果越优。在多组测试方案下,采用参考空燃比28、差值延后分段喷油正时延后策略的排放改善效果最优,在瞬态加载中后期($4 \sim 6 \text{ s}$), NO_x 累计排放量减少 162.9×10^{-6} ,降幅为6.8%,微粒排放量减少 $2.85 \times 10^{12} \text{ n/m}^3$,降幅为31.9%。

参考文献:

- [1] 滕玥.《中国移动源环境管理年报(2023年)》发布 监管污染源,守护“中国蓝”[J]. 环境经济, 2023(23): 34-37.
Teng Yue. "China Mobile Source Environmental Management Annual Report (2023)" released to monitor pollution sources and protect "China Blue"[J]. Environmental Economy, 2023(23): 34-37.
- [2] GB17691—2018. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)[S].
- [3] Ahire V, Shewale M, Razban A. A review of the state-of-the-art emission control strategies in modern diesel engines[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28:4897-4915.
- [4] Rakopoulos C D, Giakoumis E G. Diesel engine transient operation: Principles of operation and simulation analysis[M]. 1rd ed. London: Springer-Verlag London, 2009:134-159.
- [5] Rakopoulos C D, Dimaratos A M, Giakoumis E G, et al. Exhaust emissions estimation during transient turbocharged diesel engine operation using a two-zone combustion model[J]. International Journal of Vehicle Design, 2009, 49(1/2/3): 125-149.
- [6] Rakopoulos C D, Dimaratos A M, Giakoumis E G, et al. Experimental assessment of turbocharged diesel engine transient emissions during acceleration, load change and starting[R]. Wavendale, P A: SAE International, 2010.
- [7] Atac O F, Moon S, Huang W, et al. Hole number effect on internal and discharged flow characteristics of diesel injector during transient operation[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2022, 88: No. 102252.
- [8] Atac O F, Lee S, Moon S. Development of simplified model for injection rate prediction of diesel injectors during transient and steady operation[J]. Fuel, 2022, 324: No. 124655.
- [9] Feng R, Sun Z, Li G, et al. The impact of thermal status on emissions of a non-road diesel engine equipped with after-treatment system under transient operation[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 36: No. 102244.
- [10] Liu Z C, Yu K B, Tian J, et al. Influence of rail pressure on a two-stage turbocharged heavy-duty diesel engine under transient operation[J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(1): 19-29.
- [11] 万明定. 高原环境下车用柴油机性能及瞬态特性研究 [D]. 昆明:昆明理工大学交通工程学院, 2023.
Wan Ming-ding. The research of automotive diesel engine performance and transient characteristics in the plateau environment[D]. Kunming: College of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, 2023.