

多次预喷射策略对柴油机燃烧噪声的影响

姜智超^{1,2}, 许世超¹, 郑长亮³, 李戌斌¹, 张校锋^{1*}

1. 广西科技师范学院汽车工程学院, 广西 来宾 546199; 2. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004;
3. 长城汽车股份有限公司, 河北 保定 071000

摘要:为降低柴油机的燃烧噪声,建立台架试验平台,分析一次预喷和二次预喷策略下缸压、压力升高率和噪声的变化规律;利用GT-Power软件建立燃烧仿真模型,分析二次预喷策略下,不同预喷角和预喷油量对燃烧噪声的影响。试验结果表明:相比一次预喷策略,二次预喷策略的缸压和压力升高率峰值下降,压力升高率最大峰值约降低0.1 MPa/(°),燃烧噪声下降5.2 dB;仿真的缸压和压力升高率与试验结果相近,表明仿真模型精确;第一次预喷曲轴转角为-20°、预喷油量为1.4 mg,第二次预喷曲轴转角为-11°、预喷油量为1.2 mg的喷油策略对应的台架试验燃烧噪声明显低于原始试验噪声。

关键词:柴油机;预喷射;缸压;燃烧噪声;GT-Power

中图分类号:TK421.4;TK421.6

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)05-0023-07

引用格式:姜智超, 许世超, 郑长亮, 等. 多次预喷射策略对柴油机燃烧噪声的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(5): 23-29.

JIANG Zhichao, XU Shichao, ZHENG Changliang, et al. Influence of multiple pre-injection strategies on diesel engine combustion noise[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(5): 23-29.

0 引言

随着汽车保有量的不断增长,汽车噪声污染日趋严重,已受广泛关注。为减少车辆噪声对居民生活环境的影响,并提高乘车舒适性,我国对内燃机的振动与噪声提出了更加严格的控制标准。柴油机的噪声问题比汽油机更加严重,原因为柴油机采用压燃烧的工作方式,燃油在气缸内的燃烧更加剧烈,对缸体的冲击更大,产生更大的振动和噪声。

学者们围绕降低发动机燃烧噪声展开了许多研究。频谱分析法是最常用的分析方法,通过将时域信号转化为频域信号,分析特定频率范围的信号特征^[1-3];相关分析法通过对噪声源信号和相应信号进行分析,得到两者的相关程度,有效揭示噪声对信号的影响,通常应用于周期性信号的分析^[4-6]。对于燃烧噪声控制的研究主要分为两大类:一类是基于振动传递路径分析,另一类是控制噪声源。在振动传递路径分析方面,英国学者鲁塞尔福德首先提出了利用结构衰减的方法降低发动机的燃烧噪声,噪声源的能量经过传递路径时被发动机本身的结构减弱,降低燃烧噪声,成为研究柴油机燃烧噪声的一个重要方向^[7-8],有汽车制造商采用改变发动机缸体结构和曲柄连杆机构的形状、应用新型材料达到降低燃烧噪声的目的^[9];在控制噪声源方面,气缸内的压力升高速率(简称压升率)对发动机燃烧噪声产生直接影响^[10],因此,更多的汽车制造商通过控制压升率降低燃烧噪声,以较少的成本和时间达到比较好的降噪效果;控制柴油机压升率的方法很多,比如通过控制喷油参数、进气量、废气再循环等,都可以有效地控制

收稿日期:2024-08-13

基金项目:广西高校中青年教师基础能力提升项目(2024KY0869);广西高校中青年教师基础能力提升项目(2023KY0876)

第一作者简介:姜智超(1992—),男,山东青岛人,工学硕士,讲师,主要研究方向为发动机噪声与振动控制,E-mail:jiangzhichao@gxstnu.edu.cn。

*通信作者简介:张校锋(1993—),男,河南平顶山人,工学硕士,讲师,主要研究方向为汽车噪声与振动控制,E-mail:zhangxiaofeng@gxstnu.edu.cn。

压升率^[11-13]。

柴油机多次预喷技术虽然复杂,但可使缸内燃烧过程更加平稳,降低压升率、噪声和振动。本文中进行台架试验,对比一次预喷与二次预喷策略对缸压、压升率和燃烧噪声的影响;利用 GT-Power 仿真软件分析不同的预喷角及预喷油量对燃烧噪声的影响,为降低燃烧噪声和优化喷油策略提供参考。

1 燃烧试验分析

1.1 试验台架搭建

试验所需要的设备及传感器布置如图 1 所示。试验设备包括被测发动机、传感器、数据采集与分析系统及 PC 端。数据采集与分析系统采用 LMS Text. Lab;采用电涡流测功机测量缸压,对缸压的检测应满足良好的动态响应速度;采用 AVL 燃烧分析仪分析燃烧过程;麦克风与各测面保持 1 m 间隔,且离地板至少 1 m。

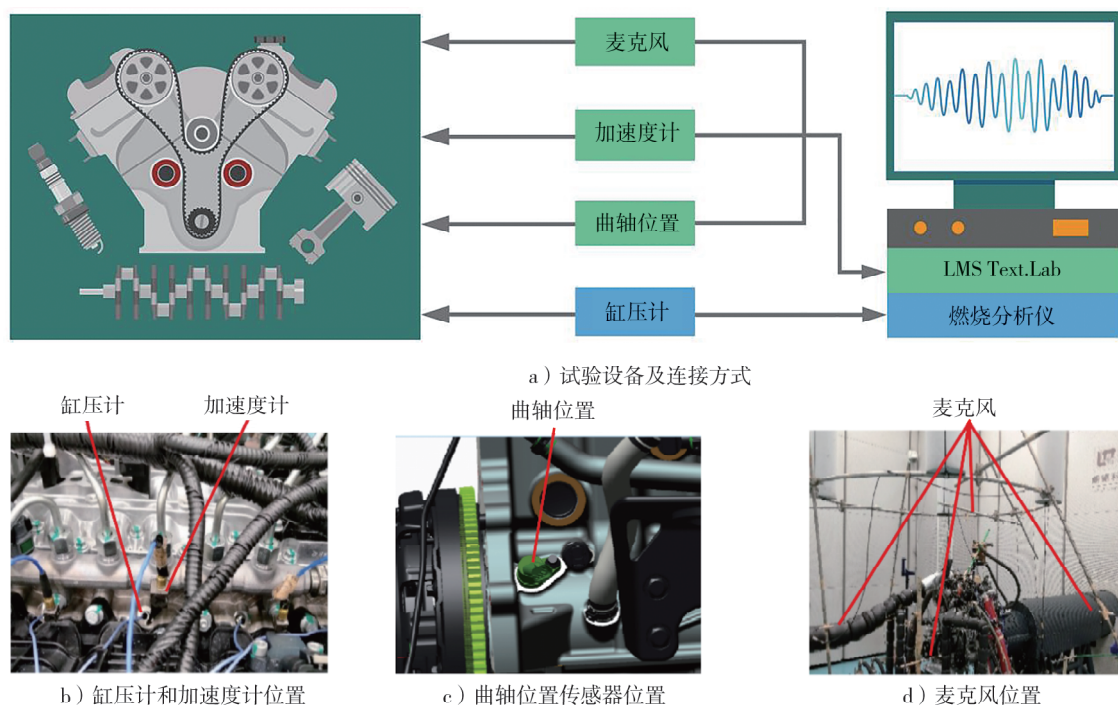


图 1 试验设备及传感器布置

测试场所为发动机半消声室,试验工况如表 1 所示。试验前,需按要求进行前期磨合试验。台架的安装应满足一定要求,如传感器的转接线远离发动机高温部位,不能影响传感器的

布置安装且不产生异常响声;为降低中冷器的影响,对中冷器及进气管路进行隔声处理;使进气口远离发动机机体,以引出进气噪声;排气应使用整车状态排气系统,连接排气的消声器管道应通至消声室外。

1.2 试验结果分析

1.2.1 缸压和压升率

测试并对比怠速工况下一次预喷和二次预喷两种策略的缸压,结果如图 2 所示。由图 2 可知:各节气门开度下,缸压的变化趋势一致,缸压随节气门开度的增大而增大;一次预喷策略下最大缸压差约为 2.5 MPa,二次预喷策略下最大缸压差约为 2.0 MPa;节气门开度为 10%时,二次预喷策略下的最大缸压约为 4.2 MPa。

表 1 试验工况

怠速转速/($r \cdot \min^{-1}$)	节气门开度/%	声压级/dB	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$
750	5~100	<25	20~25

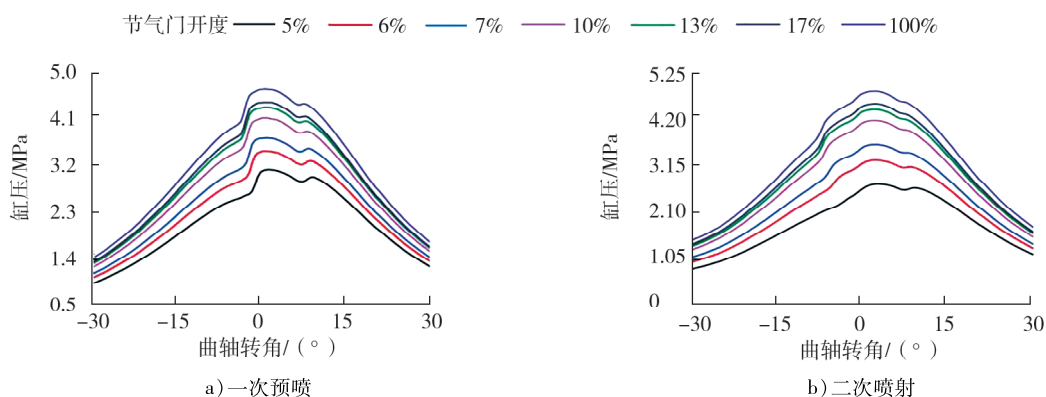


图2 一次预喷和二次预喷策略不同节气门开度下的缸压曲线

怠速工况下,选取 100%、10%及 5%3 种节气门开度,详细分析两种预喷策略对缸压和压升率的影响,结果如图 3 所示。

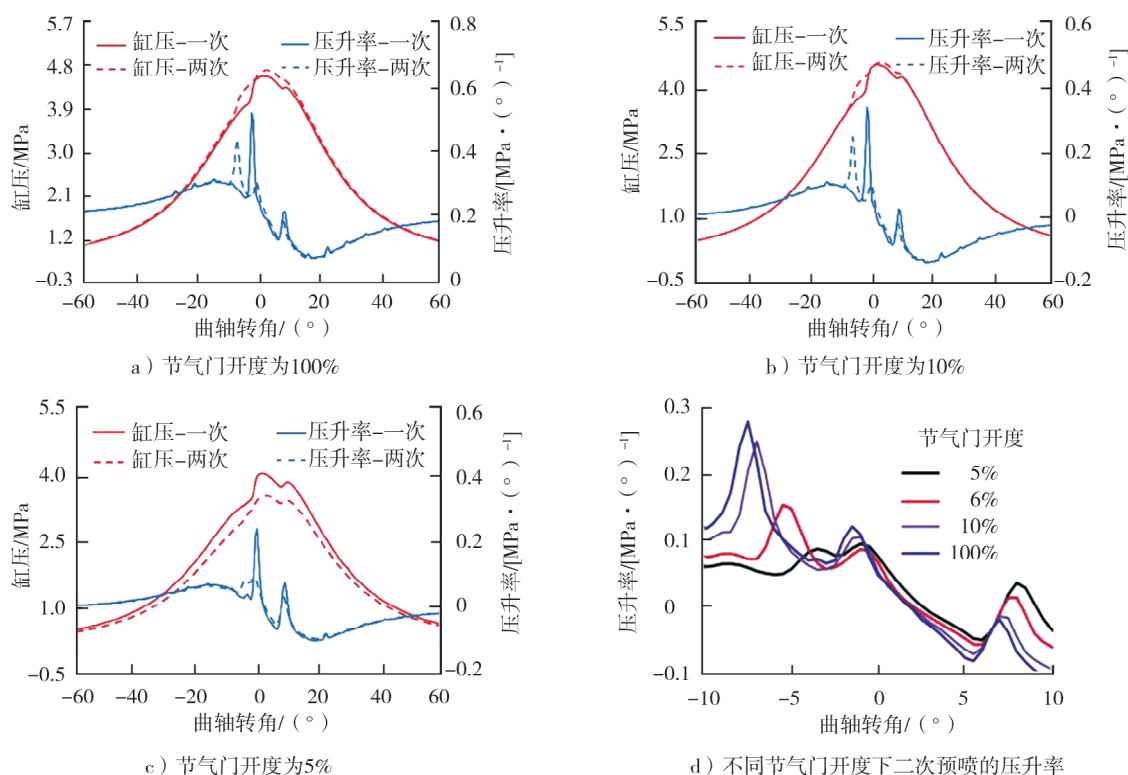


图3 不同节气门开度时的缸压及压升率曲线

由图 3a) 可知:节气门开度为 100%时,两种预喷策略的缸压峰值几乎相同,二次预喷策略的缸压峰值要稍高于一次预喷策略的峰值;二次预喷策略的压升率有 3 个明显峰值,代表了两预喷和一次主喷,二次预喷策略的压升率最大峰值比一次预喷策略低,大约低 $0.1 \text{ MPa}/(^{\circ})$,原因为总喷油量相同,在二次预喷策略中,第一次喷油量相对较小,使得缸内滞燃期积聚的可燃油量少,压升率也相应减小。由图 3b) 可知:节气门开度为 10%时,缸压和压升率的变化趋势与开度 100%一样,只是各峰值下降。压升率是影响发动机缸体振动及燃烧噪声的主要因素,降低压升率可以改善发动机的振动与噪声。由图 3c) 可知:节气门开度为 5%时,压升率相比前 2 个节气门开度明显下降,这是因为节气门开度太小,进气量不足,预喷射形成的燃油混合气无法充分燃烧。由图 3d) 可知:在节气门开度由 100%减小到 6%过程中,压升率峰值减小,且最大压升率出现时刻对应的曲轴转角大约延迟 3° ;节气门开度为 10%时,最大压升率约为

0.25 MPa/(°)。

1.2.2 燃烧噪声

在不同节气门开度下,燃烧噪声随进气量的变化也会发生明显改变。在怠速工况下分析两种喷油策略的燃烧噪声及辐射噪声,将 AVL 燃烧分析仪采集的缸压进行傅里叶变换、结构传递函数及 A 计权计算后得到燃烧噪声;LMS Text. Lab 采集的声压经 A 计权计算得到辐射噪声。两种预喷策略下的燃烧噪声、进气面的辐射噪声如表 2 所示。二次预喷策略下的一米平均噪声如表 3 所示,表中一米平均噪声为进气、排气、正时及顶部面的噪声。

表 2 两种预喷策略的燃烧噪声与进气面辐射噪声

节气门 开度/%	燃烧噪声/dB		进气面辐射噪声/dB		节气门 开度/%	燃烧噪声/dB		进气面辐射噪声/dB	
	一次预喷	二次预喷	一次预喷	二次预喷		一次预喷	二次预喷	一次预喷	二次预喷
5	75.2	68.2	64.0	65.1	12	77.1	72.0	66.8	69.5
6	76.1	69.6	64.9	67.8	13	77.1	72.3	66.6	69.5
7	76.6	70.5	65.7	68.4	14	77.2	72.4	66.6	69.6
8	76.7	70.9	66.1	69.0	15	77.2	72.3	66.7	69.7
9	76.5	71.6	66.4	69.2	16	77.0	72.2	66.6	69.7
10	76.6	71.8	66.7	69.3	17	77.0	72.2	66.6	69.8
11	76.9	72.0	66.7	69.4	100	77.2	72.4	67.3	69.8

表 3 二次预喷策略的一米辐射噪声

节气门 开度/%	一米噪声/dB				节气门 开度/%	一米噪声/dB			
	排气面	进气面	正时面	顶部面		排气面	进气面	正时面	顶部面
5	66.7	64.0	67.6	68.4	12	69.1	66.8	70.0	67.7
6	67.4	64.9	67.9	67.8	13	69.2	66.6	70.0	67.7
7	68.1	65.7	68.7	67.7	14	69.3	66.6	70.0	67.5
8	68.5	66.1	69.1	67.8	15	69.2	66.7	70.1	67.3
9	68.7	66.4	69.5	67.8	16	69.2	66.6	70.0	67.1
10	69.0	66.7	69.8	67.8	17	69.1	66.6	70.1	66.8
11	69.2	66.7	69.9	67.7	100	70.4	67.3	71.1	67.7

由表 2、3 可知:相对于一次预喷策略,二次预喷策略可使燃烧噪声平均降低 5.2 dB;随节气门开度的减小,二次预喷策略下的辐射噪声明显比一次预喷射策略低,平均降低 2.8 dB;随着节气门开度的减小,一米平均噪声也不断降低。

2 仿真分析

2.1 仿真模型

使用 GT-Power 搭建柴油机仿真模型如图 4 所示。假设进入柴油机气缸内的气体为理想气体,满足理想气体状态方程;外部环境为恒温恒压状态,分别为 298 K、0.1 MPa;每次循环的初始条件(环境温度、管路、部件温度、燃烧温度等)相同。在仿真模型中,对于预喷油角、预喷油量和主喷油量等关键参数的调试,首先参考试验中的相关参数,根据仿真与试验的结果反向对参数进行调整,使仿真得到的缸压和压升

率变化趋势与试验结果一致,由此可进一步分析燃烧噪声与预喷油角及喷油量的关系。

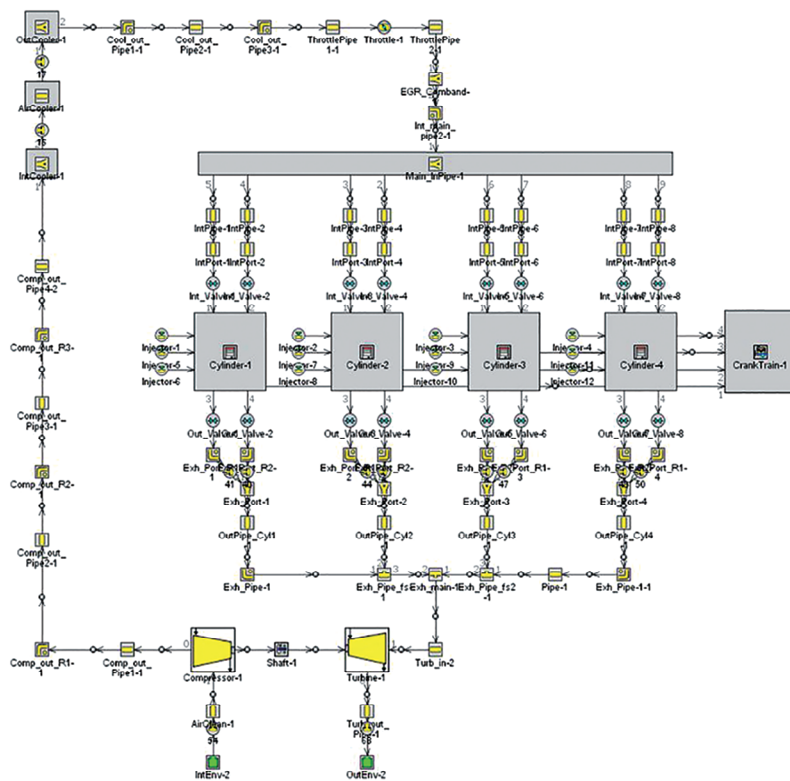


图4 GT-Power 仿真模型

2.2 缸压及压升率

对缸压进行仿真,节气门开度为5%~100%,该范围中所选的测点与试验测点相近,二次预喷策略产生的缸压及压升率仿真结果如图5所示。由图5可知:当节气门开度减小时,缸压峰值和压升率峰值逐渐减小,但变化趋势几乎相同;节气门开度为10%时,最大缸压约为4.5 MPa,最大压升率约为0.28 MPa/(°)。缸压和压升率的仿真变化规律与试验相近,此结果可直接用于燃烧噪声的仿真。

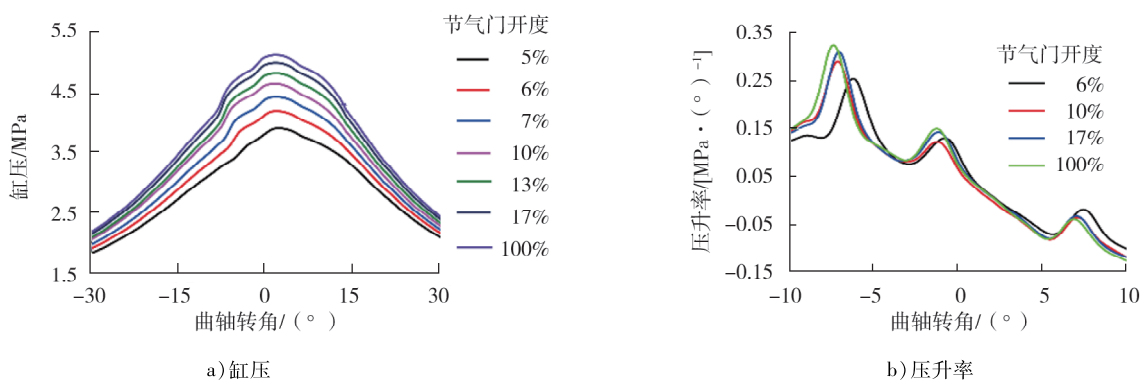


图5 二次预喷策略的缸压及压升率仿真分析结果

2.3 燃烧噪声

在怠速工况、节气门开度为100%下进行仿真,通过优化燃烧降低燃烧噪声。

方案1:固定第一次预喷的参数,第一次预喷对应的曲轴转角为 -20° ,预喷油量为1.0 mg,通过改变第二次预喷角度和油量影响燃烧噪声。方案2:固定第二次预喷的参数,第二次预喷对应的曲轴转角为 -11° ,预喷油量为1.2 mg,通过改变第一次预喷角度和油量影响燃烧噪声。

不同方案的预喷油角及预喷油量对燃烧噪声的影响如图6所示,图中数字为燃烧噪声,单位为dB。

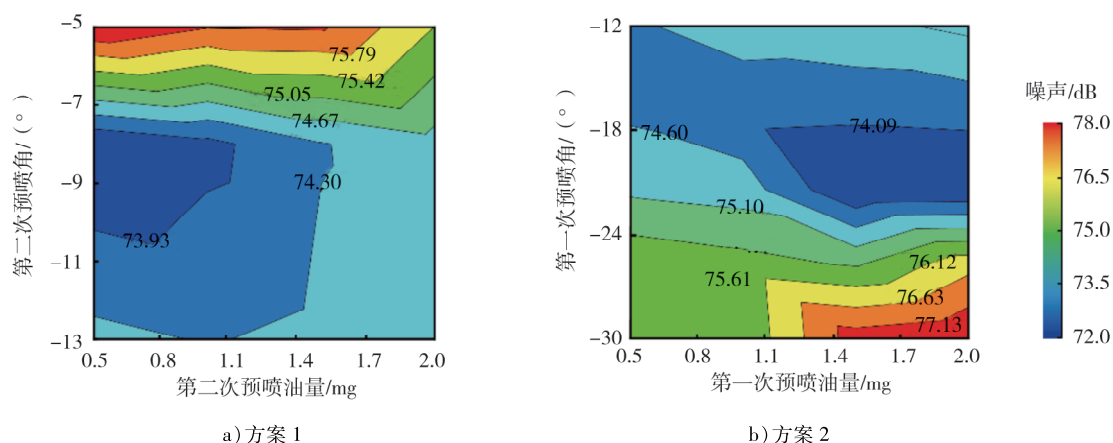


图6 预喷油角及预喷油量对燃烧噪声的影响

由图 6a) 可知: 喷油角不变时, 随着预喷油量的增加, 燃烧噪声逐渐增大, 但增速不快; 喷油量不变时, 随着预喷角的减少, 燃烧噪声明显增大, 越靠近主喷时刻时, 噪声越高; 根据这两个变量可以找到使燃烧噪声最低的最佳喷油时刻和喷油量, 即第二次预曲轴转角为 -9° , 第二次预喷油量为 0.9 mg , 此时的燃烧噪声为 73.93 dB 。由图 6b) 可知: 随着第一次预喷油量的增加, 燃烧噪声逐渐增大, 喷油量为 1.5 mg 时, 燃烧噪声处于最大值区域; 随着预喷角的减少, 燃烧噪声明显降低; 第一次预喷曲轴转角为 -20° 、预喷油量为 1.4 mg 时可使燃烧噪声最低, 为 74.09 dB 。

采用优化后的燃烧参数进行台架试验, 测试燃烧噪声, 与原始试验和仿真的噪声相对比, 结果如表 4 所示。由表 4 可知: 两种优化方案的台架试验燃烧噪声明显低于原始试验。

表4 原试验、仿真与优化后试验燃烧噪声对比

原始试验噪声/dB	仿真噪声/dB		优化后试验噪声/dB	
	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2
72.48	73.93	74.09	72.03	71.98

3 结论

建立台架试验平台, 分析一次预喷和二次预喷策略下缸压、压力升高率和噪声的变化规律; 利用 GT-Power 软件建立燃烧仿真模型, 分析二次预喷策略下, 不同预喷角和预喷油量对燃烧噪声的影响并进行试验验证, 得到以下结论。

1) 相比一次预喷策略, 二次预喷策略对缸压影响很小, 但对压升率有较大影响, 其最大峰值降低了约 $0.1 \text{ MPa}/(^{\circ})$, 燃烧噪声平均降低了 5.2 dB 。

2) 两种预喷油角及预喷油量优化方案均可减低燃烧噪声, 当第一次预喷对应的曲轴转角为 -20° 、预喷油量为 1.4 mg , 第二次预喷对应的曲轴转角为 -11° 、预喷油量为 1.2 mg 时的台架试验燃烧噪声明显低于原始试验噪声。该研究可为降低燃烧噪声和优化喷油策略提供参考。

参考文献:

- [1] 张庆辉, 郝志勇, 张焕宇, 等. 共轨压力对柴油机噪声及声品质的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 41-45.
- [2] 祝轲卿, 徐权奎, 杨林, 等. 高压共轨喷油系统多次喷射油量精确测量与规律分析[J]. 农业工程学报, 2007(8): 24-28.
- [3] 刘瑞骏, 郝志勇, 郑旭, 等. 自适应广义 S 变换汽油机怠速振动分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(3):

- 460-467.
- [4] 陈志强,罗敏强.基于模态声传递向量的变速器辐射噪声研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2015,29(6):51-55.
- [5] 张俊红,王健,孙少军,等.基于流固耦合和模态参与因子的低噪声油底壳优化设计研究[J].内燃机工程,2016,37(3):28-33.
- [6] 李兆文,舒歌群,张群.预喷射对柴油机瞬态工况燃烧噪声控制策略的试验研究[J].小型内燃机与摩托车,2012(3):11-15.
- [7] 郑康.基于多物理场耦合的汽油机声学性能研究及优化[D].杭州:浙江大学,2014:54-58.
- [8] 王连生.发动机与变速箱耦合系统非线性动力学及NVH性能研究[D].杭州:浙江大学,2014:33-37.
- [9] KAMYAR N, AMIR H S. More than one decade with development of common-rail diesel engine management systems: a literature review on modelling control estimation and calibration[J]. Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(8): 1110-1142.
- [10] BI F R, LI L, ZHANG J. Source identification of gasoline engine noise based on continuous wavelet transform and EEMD-RobustICA[J]. Applied Acoustics, 2015, 100:34-42.
- [11] NGUYEN T A, MIKAMI M. Effect of hydrogen addition to intake air on combustion noise from a diesel engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(10):78-83.
- [12] Ambrosio. Potential of double pilot injection strategies optimized with the design of experiments procedure to improve diesel engine emissions and performance[J]. Applied Energy, 2015(9): 4153-4162.
- [13] CHIATTI G, CHIAVOLA O, PALMIERI F, et al. Diagnostic methodology for internal combustion diesel engines via noise radiation[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 89:121-126.

Influence of multiple pre-injection strategies on diesel engine combustion noise

JIANG Zhichao^{1,2}, XU Shichao¹, ZHENG Changliang³, LI Shubin¹, ZHANG Xiaofeng^{1*}

1. College of Automotive Engineering, Guangxi Science & Technology Normal University, Laibin 546199, China;

2. School of Physical Science & Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding 071000, China

Abstract: To reduce the combustion noise of a diesel engine, a bench test platform is established to analyze the changes in cylinder pressure, pressure rise rate, and noise under one and two pre-injection strategies. GT Power software is used to establish a combustion simulation model, analyzing the influence of different pre-injection angles and pre-injection quantities on combustion noise under two pre-injection strategies. The experimental results show that compared with the one pre-injection strategy, the peak cylinder pressure and pressure rise rate of the two pre-injection strategies decrease, the maximum peak pressure rise rate decreases by about 0.1 MPa/(°), and the combustion noise decreases by 5.2 dB. The simulated cylinder pressure and pressure rise rate are similar to the experimental results, and the simulation model is accurate. The combustion noise of the bench test corresponding to the fuel injection strategy with the first pre-injection crankshaft angle of -20° and the amount of 1.4 mg, and the second pre-injection crankshaft angle of -11° and the amount of 1.2 mg, is significantly lower than the original test noise. The optimized bench test combustion noise is significantly lower than the original test noise.

Keywords: diesel engine; pre-injection; cylinder pressure; combustion noise; GT-Power

(责任编辑:臧发业)