

叉车柴油机加速工况声品质改进试验研究

汪会斌,余磊,樊士贡,谢俊杰

安徽全柴动力股份有限公司技术中心,安徽 滁州 239500

摘要:为降低某叉车柴油机加速过程中的噪声,试验分析柴油机加速异响产生的原因,研究喷油规律对加速噪声的影响,分析声品质参数,并提出改进方案。试验结果表明:柴油机急加速“嘎嘎”声是由燃烧过程缸内压力升高率过大导致,增加预喷量可以在一定程度上降低噪声水平,但对加速异响几乎没有影响;减小喷油提前角可以轻微降低加速异响;降低轨压上升率可以明显降低加速异响,轨压上升率由150 MPa/s降低至100 MPa/s,柴油机加速时异响消失,响度的变化趋势与声压级基本一致,尖锐度和粗糙度降低,声品质明显提升。

关键词:柴油机;轨压上升率;预喷油量;喷油提前角;声品质

中图分类号:TK421.6

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)02-0034-06

引用格式:汪会斌,余磊,樊士贡,等.叉车柴油机加速工况声品质改进试验研究[J].内燃机与动力装置,2024,41(2):34-39.

WANG Huibin, YU Lei, FAN Shigong, et al. Experimental study on sound quality improvement of a diesel engine for forklift trucks under acceleration conditions [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(2): 34-39.

0 引言

柴油机具有转矩大、热效率高的特点,广泛应用于各种工程机械和农用机械。但随着人们对车辆驾乘舒适度要求的提高,柴油机工作粗暴、噪声大的缺点愈加突出。柴油机工作噪声主要来源于燃烧噪声,燃烧性能不仅影响整机噪声水平,还决定柴油机的动力性、经济性、可靠性以及排放,因此研究和优化柴油机燃烧过程十分重要。

国内外工作者对燃烧过程、噪声水平、声品质的关系进行了大量且深入的研究:姜智超等^[1]指出合理的预喷射技术可以有效改善噪声频谱和提高舒适度;靖海宏等^[2]对声品质参数进行了相关性分析和标准化分析,认为线性声压级、A计权声压级、响度、尖锐度以及烦扰度对声品质的影响较大,音调度对声音品质的影响相对较小;Bhat等^[3]对不同喷油正时与油量下、不同频率段的气缸压力级变化特征进行了分析,并通过时频分析的方法,研究了主喷正时对燃烧噪声的影响;Shibata等^[4]通过对预混合燃烧量的调整试验发现,最大压力升高率和放热速率对燃烧噪声影响占主导地位,加大预喷油量能够降低燃烧噪声;王子宇等^[5]研究了不同喷油参数对发动机声压级及声品质参数的影响,发现降低高频振荡与循环波动可以有效降低噪声的尖锐度与粗糙度;周南^[6]针对某型直喷式柴油机进行了燃烧噪声优化试验研究,分析了中频噪声与高频振荡燃烧噪声随喷油参数(轨压、主喷角、预喷间隔、预喷油量)的变化规律,得到了较为普适性的关系,可以对燃烧噪声进行较为有效的预测。

本文中针对叉车柴油机加速过程中出现的声音刺耳、主观感受差的异响,通过改变喷油参数,研究柴油机噪声和声品质的变化规律,提出改进方案,解决加速声音刺耳问题,优化整机NVH性能,研究结果可

收稿日期:2024-02-20

基金项目:安徽省农业物质技术装备领域揭榜挂帅项目(S202320230906020018)

第一作者简介:汪会斌(1974—),男,安徽枞阳人,主要研究方向为小缸径柴油机设计研发,E-mail:huibingwang@quanchai.com.cn。

为柴油机燃烧过程开发和声品质优化提供参考。

1 现象分析

1.1 噪声测试

某叉车用高压共轨柴油机在空转急加速工况下出现“嘎嘎”声,而且在加速初期和末期声音差别很大,主观感受声音的平顺性较差。为此对该柴油机进行测试分析,柴油机主要参数如表1所示。

表1 柴油机主要参数

气缸排列形式	排量/ L	缸径/ mm	行程/ mm	标定功率/ kW	标定功率转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	怠速转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	最大扭矩/ ($\text{N} \cdot \text{m}$)	最大扭矩转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	进气形式
直列四缸	2.8	93	105	36.8	2 300	750	177	1 500~1 700	自然吸气

测试中使用振动信号采集仪和PCB传声器,传感器布置在发动机正上方30 cm处,声音采样频率为20 kHz。

1.2 信号分析

由于发动机在急加速工况时转速迅速变化,噪声信号具有很强的瞬态特性,因此利用短时傅里叶变换方法进行分析,同时获取时域和频域信息,利用软件对声音信号进行滤波回放,滤波前、后柴油机噪声Colormap图计算结果如图1所示。

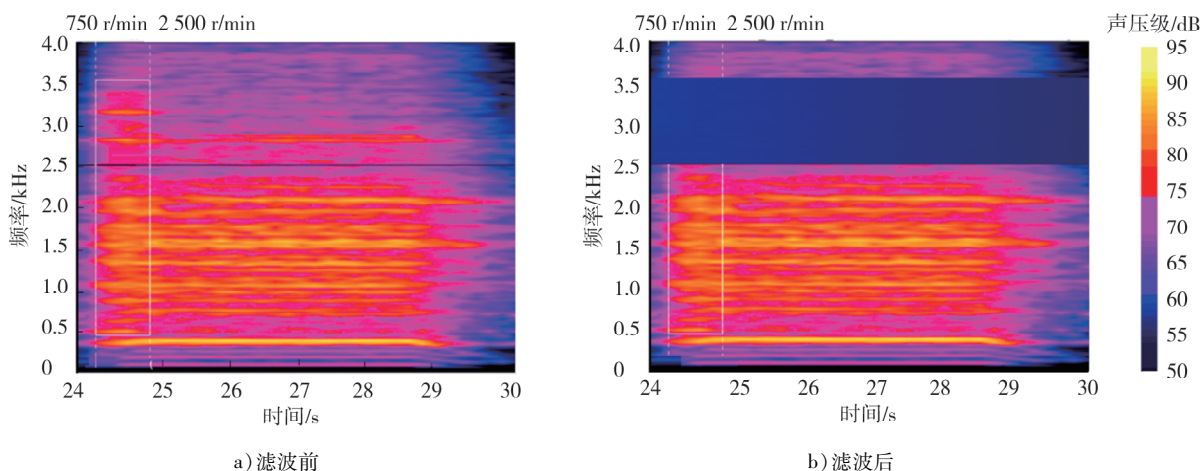


图1 滤波前、后柴油机噪声Colormap图

由图1a)可知:柴油机转速由750 r/min至2 500 r/min的加速过程中,频率为2.5~3.5 kHz的噪声声压级明显高于稳态过程。由图1b)可知:影响主观感受的声音频率为2.5~3.5 kHz,频带较宽,此过程与加速异响强相关,为柴油机在空转急加速工况下产生异响的直接原因。文献[7]研究表明,发动机正常燃烧噪声的频率一般低于2 kHz,怀疑2.5~3.5 kHz范围内的噪声是由于燃烧粗暴导致。

2 柴油机空转燃烧噪声声品质影响因素

2.1 柴油机声品质评价指标

噪声测试标准依据文献[8],声压级计算式为:

$$L_p = 10 \lg(p^2/p_0^2), \quad (1)$$

式中: L_p 为声压级,dB; p 为声压,Pa; p_0 为基准声压,取20 μPa 。

声品质评价参数主要包括响度、粗糙度、尖锐度等,评价声品质的计算模型较多,本文中以 Zwicker 理论为基础进行计算^[9],响度主要表示听到声音的强弱程度,比 A 计权声压级更能反映声音的大小。采用 Zwicker 算法计算响度,计算式为:

$$N' = 0.08 \left(\frac{E_{TQ}}{E_Q} \right)^{0.23} \left[\left(0.5 + \frac{0.5E}{E_{TQ}} \right)^{0.23} - 1 \right], \quad (2)$$

式中: N' 为声音的响度, sone; E_{TQ} 为基准听阈激励, J; E_Q 为声强 $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 时所对应的激励, J; E 为目标声强所对应的激励, J。

粗糙度适用于评价噪声信号瞬时变化对人的影响,低频时表现为波动度,高频变化时表现为粗糙度, Zwicker 理论中,听阈分为 24 个临界频带,每个频带宽度即为 1bark。声音粗糙度的表达式为:

$$R = 0.3 f_{\text{mod}} \int_0^{24} \Delta_L(z) dz, \quad (3)$$

式中: R 为声音的粗糙度, asper; f_{mod} 为调制频率, Hz; Δ_L 是调制深度, dB; z 为频率, Hz。

尖锐度则反映了噪声高频成分在声音频谱中的比例,尖锐度的表达式为:

$$S = k \int_0^{24} N'(z) g(z) z dz / \int_0^{24} N'(z) dz, \quad (4)$$

式中: S 为噪声的尖锐度, acum; k 为加权系数; $g(z)$ 为不同特征频带下的附加系数。

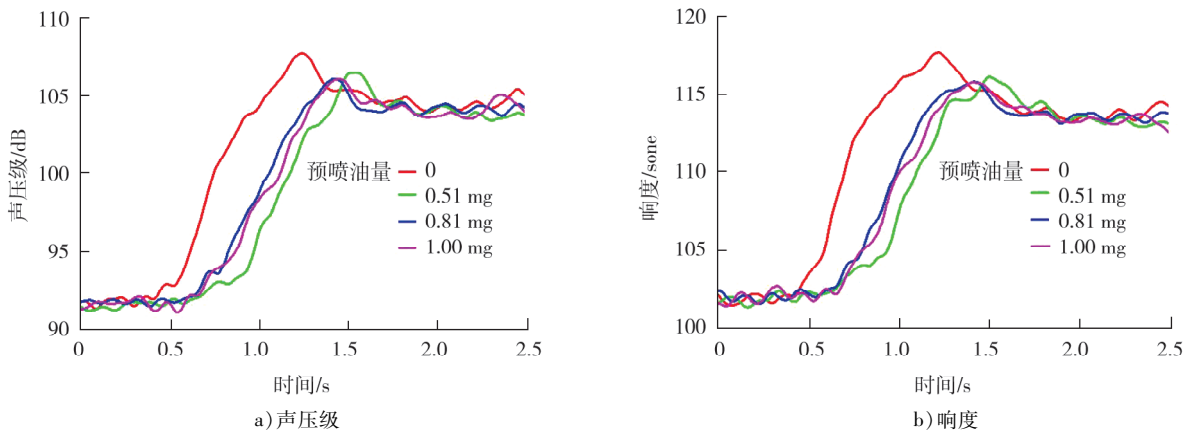
柴油机燃烧过程分为滞燃期、急燃期、缓燃期和后燃期 4 个阶段。滞燃期为燃油喷射到着火的时间,既有燃油雾化、蒸发、扩散等物理变化,也有裂化、氧化等化学变化^[10],滞燃期越长,燃烧准备越充足,接下来的燃烧越剧烈。急燃期是从开始着火到缸内压力达到最高为止,活塞位于上止点附近,燃烧室容积变化不大,可认为是等容燃烧。缓燃期是压力最高时刻到温度最高时刻的时间,由于此时温度很高,燃油一经喷入立即燃烧,但由于活塞开始下行,缸内压力逐渐下降。后燃期是从温度最高至燃烧结束为止,由于活塞下行,膨胀比降低,燃油得不到有效利用,而且排气温度升高。燃烧噪声与缸内压力变化紧密相关,根据噪声产生机理,控制滞燃期内可燃混合油量,降低压力升高率和高频振荡,可以控制燃烧噪声^[11]。本文中通过优化预喷量、提前角、轨压上升率等影响噪声的喷油参数,实现改善燃烧过程、降低噪声的目标。

2.2 噪声影响因素

2.2.1 预喷油量

预喷过程是在主喷之前向缸内喷入少量燃油,缸内发生冷焰反应使气体温度和压力升高,主喷燃油更容易燃烧,缩短滞燃期,减小压力升高率,降低燃烧噪声^[12]。不同预喷量对柴油机噪声水平和声品质的影响如图 2 所示。

由图 2 可知:随着预喷油量的增加,柴油机声压级有降低的趋势,但整体变化不明显,而且试验中“嘎嘎”声异响依旧存在;预喷油量增加,响度有所降低,粗糙度和尖锐度变化不明显。说明主喷阶段缸内温度和压力已经处于合适的范围,增加预喷油量对滞燃期影响不明显。



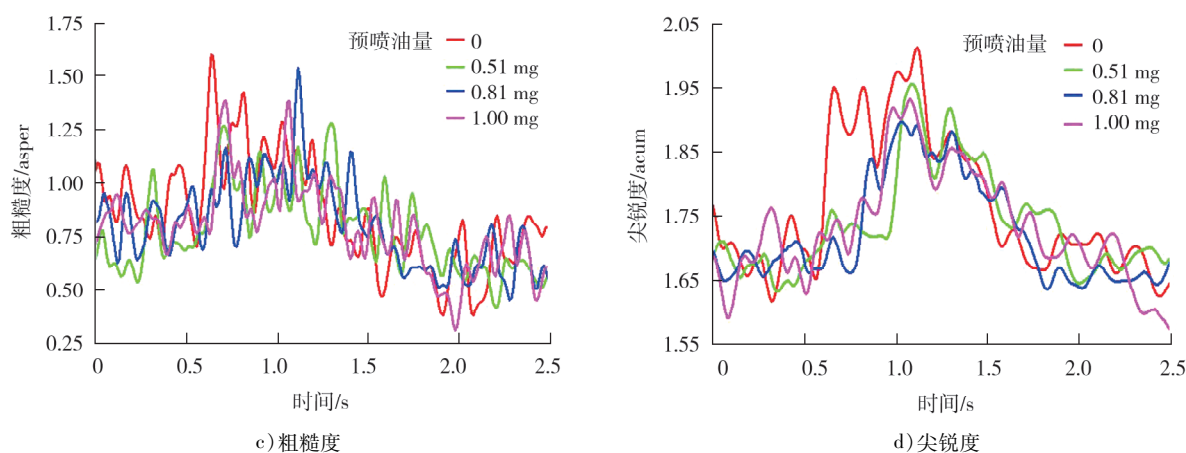


图2 预喷量对柴油机噪声水平和声品质的影响

2.2.2 喷油提前角

喷油提前角是指喷油起始时刻活塞距离上止点的曲柄转角,提前喷油可以使燃油在上止点附近充分燃烧,达到等容燃烧的目的。减小喷油提前角对声压级和声品质的影响如图3所示。

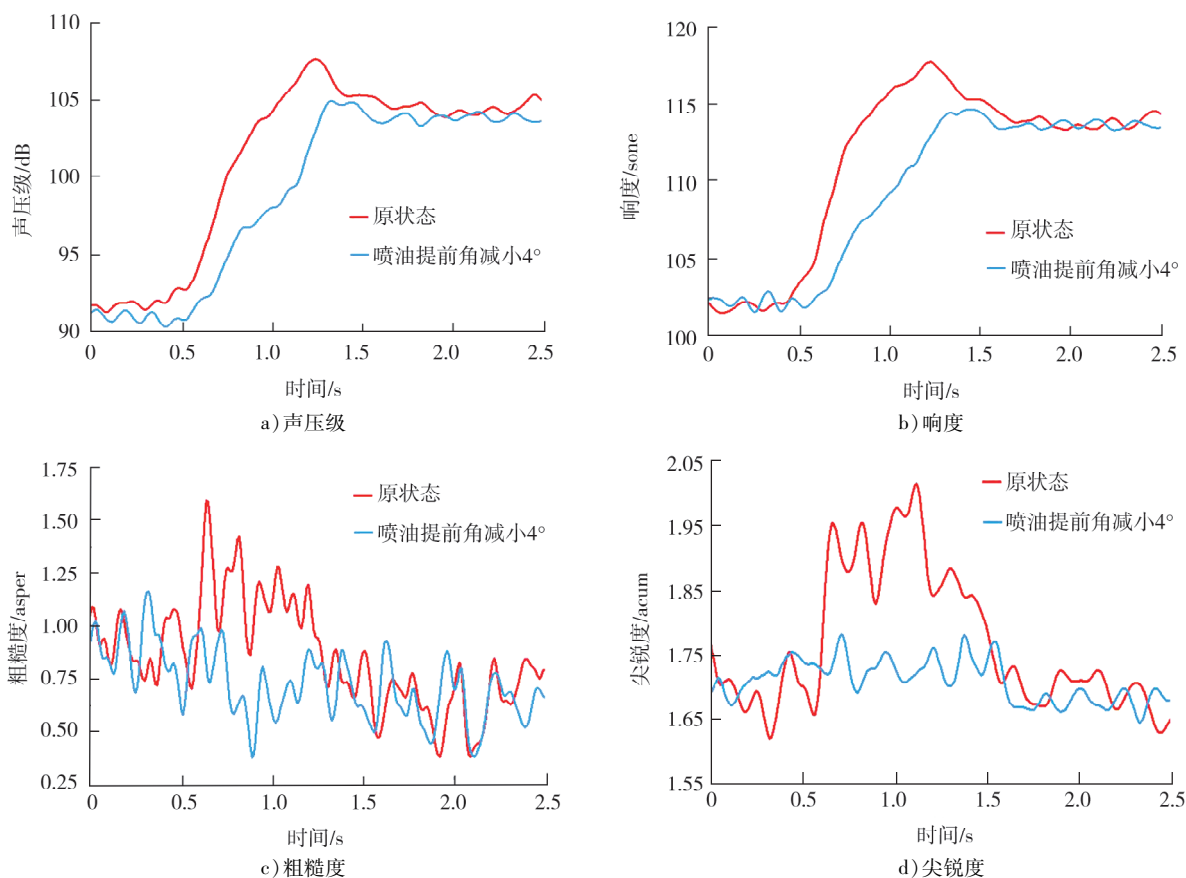


图3 喷油提前角对声压级和声品质的影响

由图3可知:试验中将喷油提前角减小 4° ,声压级降低了约2 dB,响度降低了约20 sone,粗糙度和尖锐度也相应降低,分别降低了0.15 asper、0.06 acum,“嘎嘎”声异响有所减弱。

在一定范围内减小喷油提前角,缩短滞燃期,滞燃期内形成的可燃混合气量减少,急燃期内气缸压力和压力升高率降低,燃烧噪声下降^[13]。此外,随着喷油提前角减小,活塞更加靠近上止点,缸内温度压力都较高,燃油喷出后很快参与燃烧,与空气混合过程缩短,燃油与空气混合不均匀程度增强,放热过程更

加平缓,导致缸内压力升高率峰值减小,有利于降低燃烧噪声^[14]。

2.2.3 轨压上升率

轨压上升率影响喷油速率,也影响滞燃期内形成的可燃混合气,也在一定程度上影响燃烧时的放热速率,进而影响急燃期缸内压力和压力升高率^[15]。轨压上升率对声压级和声品质的影响如图4所示。

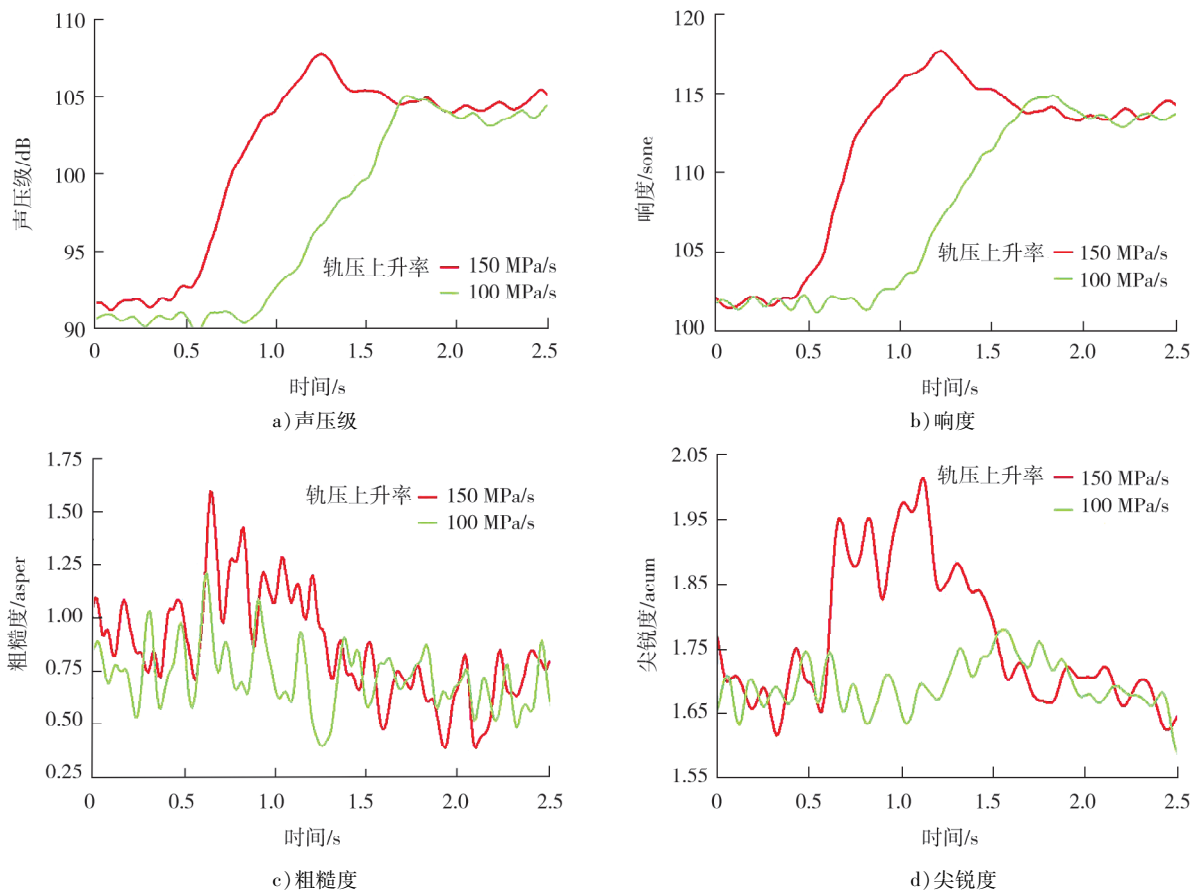


图4 轨压上升率对声压级和声品质的影响

由图4可知:将轨压上升率从原机的150 MPa/s降低至100 MPa/s,声压级出现大幅下降,减小约3 dB,响度降低了32 sone,粗糙度降低了0.16 asper,尖锐度减小了0.07 acum,“嘎嘎”声异响基本消失。由此可见,发动机急加速过程中出现的“嘎嘎”声是轨压升高率过高导致的,加速工况下柴油机喷油量增加,缸内温度大幅提高,样机的轨压上升率较高,使得燃烧进一步恶化,出现异响。减小轨压升高率虽然导致发动机功率、转矩有所降低,排温略微下降,但下降不明显,基本不影响柴油机正常工作。

3 结论

针对某叉车用柴油机加速异响问题,通过试验研究了喷油参数对柴油机整体噪声水平和声品质的影响规律,分析了异响原因并提出改善方案,为柴油机噪声优化和声品质提高提供参考。

1) 加速“嘎嘎”声是由燃烧时缸内压力升高率过高导致。

2) 在合适范围内增加预喷量,可以提高缸内温度,缩短滞燃期,降低压力升高率,在一定程度上改善声品质,但对尖锐度和粗糙度的改善不明显。

3) 合理减小喷油提前角,也可以缩短滞燃期,降低燃烧噪声,有效减小粗糙度和尖锐度。

4) 降低轨压升高率能明显降低柴油机噪声并改善声品质,降低轨压升高率,滞燃期内喷入缸内的燃油有所降低,滞燃期内形成的可燃混合气的量减小,缸内压力升高率明显降低,燃烧噪声降低,并且粗糙

度和尖锐度也有所下降。

参考文献:

- [1] 姜智超,姜顺超,郑长亮,等.基于多次预喷射的柴油机声品质控制试验研究[J].北京汽车,2022(3):22-25.
- [2] 靖海宏,杨国芳,张旻,等.基于相关性分析的发动机台架声品质评价模型研究[J].汽车科技,2022(2):18-28.
- [3] BHAT C S, MECKL P H, BOLTON J S, et al. Influence of fuel injection parameters on combustion-induced noise in a small diesel engine[J]. International Journal of Engine Research, 2012, 13(2):130-146.
- [4] SHIBATA G, SHIBAIKE Y, USHIJIMA H, et al. Identification of factors influencing premixed diesel engine noise and mechanism of noise reduction by EGR and supercharging[J]. SAE Technical Papers, 2013, 2(1):669-682.
- [5] 王子宇,贾和坤,许晟,等.喷油参数对发动机怠速工况噪声与声品质的影响[J].机械设计与制造,2019(增刊1):26-32.
- [6] 周南.直喷式内燃机燃烧噪声的诊断分析与仿真优化研究[D].杭州:浙江大学,2022.
- [7] 李凯.某发动机噪声测试及关键部件降噪研究[D].合肥:合肥工业大学,2022.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.往复式内燃机:声压法声功率级的测定:第2部分:简易法:GB/T 1859.2—2015[S].北京:中国环境科学出版社,2015.
- [9] 赵忠峰,陈克安.基于 Zwicker 理论的噪声客观评价方法[J].电声技术,2005(10):63-65.
- [10] 何学良,李疏松.内燃机燃烧学[M].北京:机械工业出版社,1990.
- [11] 庞剑,谌刚,何华.汽车噪声与振动理论与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2006.
- [12] 罗福强,周志峰,周靖,等.预喷参数及 EGR 对柴油机噪声影响试验研究[J].车用发动机,2020(3):44-49.
- [13] 马志豪,刘瑜娜,董永超,等.小功率非道路用柴油机燃烧过程优化与降噪[J].农业工程学报,2021,37(15):40-46.
- [14] 任家潮,刘帅,陈林.喷油控制参数对柴油机燃烧噪声影响的试验研究[J].现代车用动力,2018(3):39-42.
- [15] 姜顺超,张校峰,王晓洋,等.多次预喷射的柴油机燃烧噪声控制实验[J].汽车实用技术,2022,47(24):103-109.

Experimental study on sound quality improvement of a diesel engine for forklift trucks under acceleration conditions

WANG Huibin, YU Lei, FAN Shigong, XIE Junjie

Technology Center, Anhui Quanchai Group Power Co., Ltd., Chuzhou 239500, China

Abstract: In order to reduce the noise in the acceleration process of a forklift diesel engine, the causes of the abnormal sound of the diesel engine and the influence of the fuel injection regularity on the acceleration noise are studied experimentally. The sound quality parameters are analyzed and the improvement scheme is proposed. The test results show that the "rattling" sound during rapid acceleration of the diesel engine is caused by the excessive pressure rise rate in the cylinder during the combustion process. Increasing the pre-injection fuel quantity can reduce the noise level to a certain extent, but it has little effect on the accelerating abnormal noise. Reducing the fuel injection advance angle can slightly reduce the acceleration abnormal noise. Reducing the rail pressure rise rate can significantly reduce the acceleration abnormal noise. The rail pressure rise rate is reduced from 150 MPa/s to 100 MPa/s. The abnormal noise disappears when the diesel engine is accelerating. The change trend of loudness is basically consistent with the sound pressure level. The sharpness and roughness are reduced, and the sound quality is significantly improved.

Keywords: diesel engine; rising rate of rail pressure; pre-injection fuel quantity; fuel injection advance angle; sound quality

(责任编辑:刘丽君)