

FPLG 整机声辐射影响规律试验研究

吴国澳¹, 冯慧华¹, 易晨坤¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

Experimental Study on the Influence Law of Sound Radiation of FPLG

WU Guoao¹, FENG Huihua¹, Yi Chenkun¹

(1.School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing100081, China)

Abstract:In order to investigate the effect of sound radiation on free-piston linear generator (FPLG), the noise test bench test was carried out. The LMS test system was used for data acquisition and processing, and 7 microphones were installed and a parallelepiped measuring surface was selected to explore the influence of parameters such as injection pulse width, ignition position and injection position on the sound radiation of a certain FPLG. The results show that the sound pressure level increases with the increase of injection pulse width in the range of experiment, and has a positive correlation. When the ignition position is 27mm, the FPLG works best and the sound pressure level is 107.2dB. When the injection position is 39mm, the sound pressure level of the whole machine is significantly higher than that of the control group, reaching 105.6dB. The results show that the injection position has the greatest influence on the sound radiation of FPLG, followed by the ignition position and injection pulse width. The test can provide reference for reducing the noise of FPLG.

摘要:为探究自由活塞直线发电机(FPLG)整机声辐射影响规律,开展噪声测试台架试验。通过LMS测试系统进行数据采集及处理,选择平行六面体测量面并安装7个传声器,针对某FPLG探究喷油脉宽、点火位置、喷油位置等参数变化对整机声辐射的影响规律。结果显示,在试验探究的范围内,整机运转时的声压级随喷油脉宽增加而增加,呈正相关;点火位置为27mm时,FPLG工作状况最佳,整机声压级为107.2dB;喷油位置为39mm时,整机声压级明显高于对照组,达到105.6dB。对比得到,喷油位置对FPLG整机声辐射的影响最大,其次是点火位置和喷油脉宽,试验可以为降低整机噪声提供参考。

关键词:自由活塞发电机;噪声测试;影响规律

Key words: Free piston linear generator; noise test; Influence law

中图分类号: TK417 文献标识码: A

0 引言

自由活塞直线发电机(FPLG)在构型和工作方式上与经典的发动机-发电机组有很大的不同,所以FPLG也有了与众不同的性能特点,也使FPLG相比于传统发动机具有较大的性能优势:如能量转换效率高、多燃料适应性广、能量密度高、结构简单、机械效率高、瞬态响应性较好等。由于FPLG并没有传统的曲轴箱等机械传动结构,所以并没有传统发动机中相应的动态载荷和噪声源,其振动噪

声性能也相对较好^[1,2]。

内燃机工作方式较为粗暴,对于其整机噪声的研究一直以来都十分重要,郭恩帅^[3]通过仿真分析的方法研究了不同喷油策略对柴油机燃烧噪声的影响规律并开展了优化设计。张学龙等^[4]对某发动机开展噪声测试试验,得到该发动机的整机声压级随负荷、转速的变化规律。

FPLG作为一种新型动力装置受到了广泛的关注和研究。曾德全等^[5]通过数值模拟研究了一台二

冲程自由活塞直线发电机的活塞动态特性、缸压、缸内温度和废气排放等规律。陈光辉等^[6]结合试验和仿真,分析了缸内起始温度、工作压力、当量比等参数变化对某 FPLG 样机均质充量压燃过程的影响。Zhang Z 等^[7]重点研究了自由活塞柴油发电机在发电过程中的工作特性,发现于传统柴油机相比,FPLG 的点火延迟更短,预混燃烧质量更好。

但是在国内外的研究中,还少有对于 FPLG 整机噪声的研究,本文通过台架试验的方法对 FPLG 整机进行辐射噪声测试,研究喷油脉宽、点火位置、喷油位置等参数变化对整机声辐射的影响规律。

1 理论基础

声音源自声源的振动,物体的振动会引起附近的空气产生压力波动,从而产生声波。常用声压、声功率、声强等参数来表征声音。声压一般是指声音传播过程中空气压强相对于静压的变化量。由于声压数值跨度过大,研究中通常使用声压级来描述声音的强弱,声压级的公式如下:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{P^2}{P_0^2} \right) = 20 \lg \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

式中, L_p 为声压级,单位为分贝,记为 dB; P 为该声音的实际声压; P_0 为基准声压,

$$P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}.$$

分贝 (dB) 是由对数运算得到的数值单位,其运算则需要按照对数法则,也就是能量叠加规律运算。如果需要对两个噪声源 S 和 T , 它们对应的声压级分别为 L_s 和 L_t , 它们声压的有效值分别为 P_s 和 P_t , 则二者合成的声压有效值 P_c 和 L_c 分别为:

$$P_c = \sqrt{P_s^2 + P_t^2} \quad (2)$$

$$L_c = 20 \lg \frac{\sqrt{P_s^2 + P_t^2}}{P_0} = 10 \lg \frac{P_s^2 + P_t^2}{P_0^2} \quad (3)$$

据此,可知当有 N 个声压级分别为 L_1 、 L_2 、……、 L_N 的声源时,合成的平均声压级 L_{Tot} 为:

$$L_{avg} = 10 \lg \left(\frac{10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_N}{10}}}{N} \right) \quad (4)$$

2 FPLG 辐射噪声测试试验

FPLG 工作时,主要噪声源包含有动力缸、回弹缸、直线电机等。测试时 FPLG 与正常工作时一样安装在固定台架上。参考 GB/T 3768-2017 设计开展对 FPLG 的辐射噪声测试试验。

2.1 测试仪器

开展 FPLG 辐射噪声测试试验需要用到的仪器设备如表 1 所示。

表 1 测试设备清单

设备名称	版本型号	设备用途
数据采集仪器	SCADAS III	测试信号采集处理
高精度传声器	GRAS40AF	采集声辐射信号
LMS 振声测试软件	Test.Lab 17	数据获取及处理

LMSSCADASIII 信号调理和数据采集设备可以满足本试验中噪声测试结果等动态数据采集的需求,配套的 LMSTest. Lab 17 软件以模块化结构为各种测试情景提供的个性化的测试系统。GRAS 40AF 高精度传声器的声压级测试范围为 14-149dBA, 频率测试范围为 3.15-20K, 灵敏度为 47.09mV/g, 满足测试试验的量程要求和精度要求。如图 1 为试验用数据采集仪器和 Test.Lab 17 软件,图 2 为试验用传声器。



图 1 LMS 数据采集系统及测试软件



图 2 高精度传声器

2.2 测量面及测试点

要确定测量面的形状和尺寸,首先应该划分基准体。基准体的形状一般是一个正好将被测声源包裹的最小长方体的虚拟面。对于 FPLG,其基准体可确定为包围动力缸、回弹缸和直线电机的六面体。

出于试验安全考虑, FPLG 的台架一侧安装有整面的玻璃, 可以和台架基座顶面一起视作声反射面, 如图 3 (a) 中 A 所示。基准体形状则如 B 所示。

测量面则是一个以一定测量距离包裹基准体、不越过反射平面的假想平面。用来测量 FPLG 工作时的声压级的传声器要放置在假想的测量面上。由于试验室声学条件不理想, 本文选择测量距离较小的平行六面体测量面, 测量距离 d 选择为 1m, 如图 3 (a) 中 C 所示。

由于 FPLG 的对称性结构特点, 以及测试条件的限制, 在参考 GB/T 3768-2017 之后, 确定 FPLG 的辐射噪声试验的传声器安装在对称的右半边测量面上, 共使用 7 个传声器, 位置如图 3 (a) 中黑色圆点所示。传声器安装时的指向与测量面垂直, 实际安装位置如图 3 (b) 所示, 序号与图 3 (a) 对应。

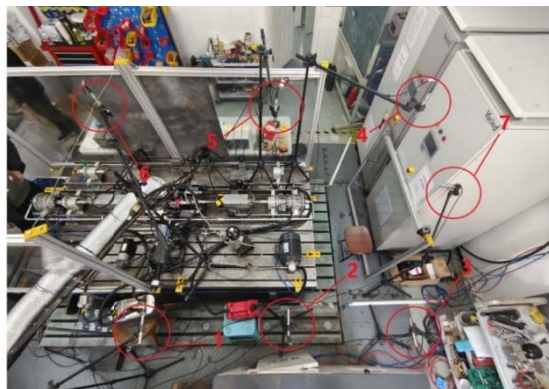
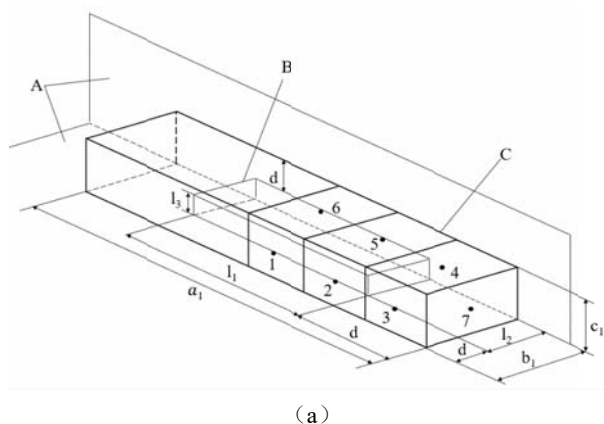


图 3 测量面及传声器位置

说明: 黑色圆点表示传声器位置, 数字代表测点序号; A 指反射面, B 指基准体, C 指测量面; $l_1 = 2.30\text{ m}$ 、 $l_2 = 0.40\text{ m}$ 、 $l_3 = 0.30\text{ m}$ 分别为基准体的长宽高; a_1 、 b_1 、 c_1 分别为测量面的长宽高; 测量距离 $d = 1\text{ m}$ 。

2.3 背景噪声及环境修正

背景噪声是指除被测噪声源外, 其他声源造成

的所有噪声。背景噪声很难完全消除, 但是其对于试验结果的影响可以进行修正。背景噪声修正值 K_1 可以用式(5)计算:

$$K_1 = -10\lg(1 - 10^{-0.1\Delta L_p}) \quad (5)$$

其中: K_1 为背景噪声修正值, ΔL_p 为 FPLG 工作时测量的时间平均声压级与背景噪声的时间平均声压级的差值。若 $\Delta L_p > 10\text{ dB}$, 则可以认为 K_1 为 0; 若 $3\text{ dB} \leq \Delta L_p \leq 10\text{ dB}$ 时, 则可以按照公式(5)修正; 若 $\Delta L_p < 3\text{ dB}$, 测量结果的准确度将会下降, 此时 K_1 取 3dB。经过背景噪声测试, 本试验中背景噪声修正值 K_1 为 0。

环境修正值指测试环境的声反射和声吸收对测量面上所有传声器位置的时间平均声压级的平均值(能量平均)影响的修正。环境修正 K_2 用式(6)计算:

$$K_2 = 10\lg\left[1 + 4\frac{S}{A}\right] \quad (6)$$

式中: S 为测量面的面积。 A 为房间的吸声量, 计算公式为 $A = aS_v$, 其中 a 取国标规定值 0.15; S_v 值测试房间内表面总面积。通过计算可得本试验中环境修正值 $K_2 = 2.50\text{ dB}$ 。

2.4 噪声测试试验流程

为了研究典型工况及参数变化(喷油脉宽、点火位置、喷油位置)对整机声辐射的影响规律, 依据以下步骤开展相关试验。

1) 安装 FPLG 测试台架, 拆除周围不必要的反射面, 尽可能保证安装后 FPLG 的声辐射与正常工作时相同。

2) 根据 FPLG 的形状和尺寸确定好试验的假想基准体和测量面, 选择合适的声辐射测量距离。

3) 根据传声器位置选择标准和安装规范, 安装传声器并和数采连接, 应保证传声器位置稳定, 保证夹持设备和连接线不会随 FPLG 工作产生大幅振动。

4) 在试验设备安装完成的条件下, 测量三次自由活塞发电机未工作时的背景噪声, 以三次测量的时间平均声压级的平均值作为背景噪声的测量值。

5) 使 FPLG 以较为粗暴的工况进行一次试验, 标定噪声信号测试量程, 目的是使后续正式试验时在噪声信号不过载的前提下保证最大的测量精度。

6) 开展正式测试时, 选取三组参数作为试验变

量,以控制变量法进行 12 组测试试验,每组测试组均保持参数不变进行三次试验以减少偶然误差,每次试验保持 FPLG 在目标参数下稳定工作至少 10 秒,采集记录 10 秒内的噪声数据。12 组试验组分别为:在点火位置为 27mm 及喷油位置为 39mm 时,设置 0ms、2.5ms、2.75ms、3ms 共四组喷油脉宽进行试验。在喷油脉宽为 3ms 及喷油位置为 39mm 时,设置 25mm、27mm、29mm、31mm 共四组点火位置不同的试验组。在喷油脉宽为 3ms 及点火位置为 27mm 时,设置 35mm、37mm、39mm、41mm 共四组喷油位置不同的试验组。

7)记录并处理试验数据,拆除试验设备和仪器。

3 试验结果

3.1 喷油脉宽影响规律

保持其他参数不变,通过改变供油量探究其对整机声辐射的影响。试验中采用调节喷油脉宽的大小实现对于供油量的控制。

在点火位置为 27mm 及喷油位置为 39mm 时,设置 0ms、2.5ms、2.75ms、3ms 共四组喷油脉宽进行试验。每组喷油脉宽试验组均进行三次试验以减少偶然误差,每次试验保持 FPLG 在目标参数下稳定工作至少 10 秒,采集记录 10s 内的噪声数据。如图 4 所示为 0ms 喷油脉宽试验组中 1 号测量点所得原始的声压时域数据。根据原始数据,使用式(7)计算该测点位置下被测噪声源的时间平均声压级:

$$L_{p,T} = 20 \lg \left(\frac{\bar{P}}{P_{ref}} \right) = 10 \lg \left(\frac{\bar{P}^2}{P_{ref}^2} \right) \quad (7)$$

式中: \bar{P} 为 10 秒内的声压数据 RMS 值。 P_{ref} 为基准声压,单位为帕(Pa), $P_{ref} = 2 \times 10^{-5}$ Pa。

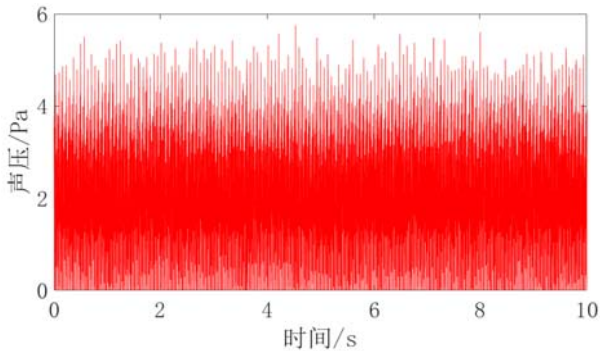


图 4 0ms 喷油脉宽 1 号测点声压数据

经过计算后喷油脉宽为 0ms、2.5ms、2.75ms、

3ms 的四组试验组中各测点的时间平均声压级如图 5 所示。

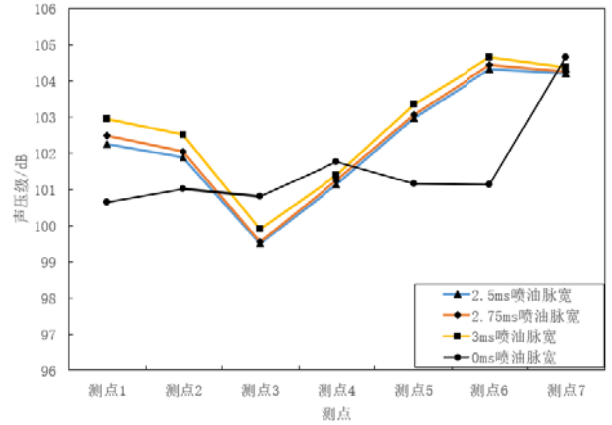


图 5 各组所测各点时间平均声压级

该七个测点组成的传声器阵列测得的时间平均声压级的平均值 $L'_{p(ST)}$ 应按式(8)计算:

$$L'_{p(ST)} = 10 \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L'_{pi(ST)}} \right] \quad (8)$$

式中: $L'_{pi(ST)}$ 是值被测噪声源(ST)工作时,序号为 i 的传声器测出的时间平均声压级; N 为传声器数量,本试验取 $N = 7$ 。经过背景噪声和环境修正后,得到喷油脉宽为 0ms 时时间平均声压级 $\bar{L}_p = 99.3999$ dB。同理可得喷油脉宽为 2.5ms、2.75ms、3ms 时的时间平均声压级如图 6 所示,同时记录了试验中喷油脉宽改变时自由活塞往复工作频率的变化。

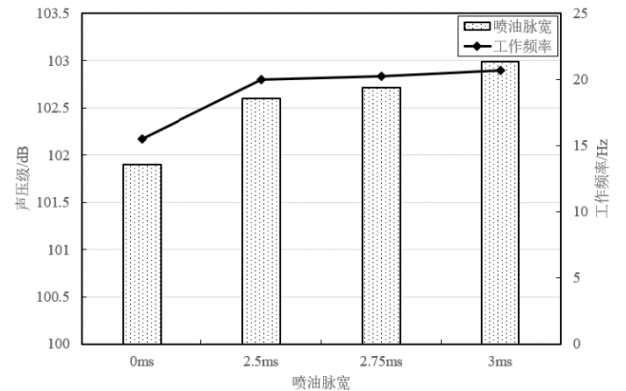


图 6 喷油脉宽对整机声压级的影响

如图 6,可以看出,喷油脉宽对于整机声辐射的影响呈正相关,即在试验探究的喷油脉宽范围内,喷油脉宽越大,整机运转时的声压级越大。且相同的喷油脉宽增量下,2.75ms 到 3ms 的声压级变化比 2.5ms 到 2.75ms 的声压级变化要大,原因可能是随着试验的进行,整机逐渐热机导致后进行的试验中

整机工作状态更佳。整机噪声主要可以分为机械噪声和燃烧噪声，机械噪声与工作频率呈正相关。脉宽为 2.5ms 时，工作频率上升了约 30%，整机工作时的机械噪声随之增加，且缸内燃烧产生了燃烧噪声，导致整机的声辐射声压级增加了约 0.7dB。此外的两次变化下工作频率增幅不超过 2%，对于整机的机械噪声几乎没有影响，但是整机时间平均声压级增加了近 1dB，判断是由缸内燃烧激发的燃烧噪声增加引起的。

3.2 点火位置影响规律

由于 FPLG 中无曲轴结构，定义点火时自由活塞与动力缸中心点位置的水平距离为点火位置。试验时，在喷油脉宽为 3ms 及喷油位置为 39mm 时，设置 25mm、27mm、29mm、31mm 共四组点火位置不同的试验组。得到四组试验组中各测点的时间平均声压级如图 7 所示。

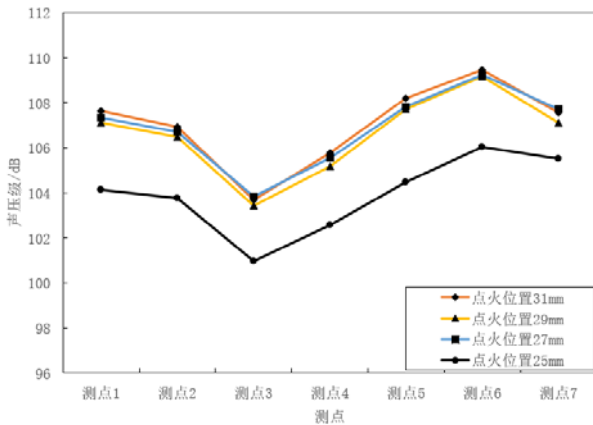


图 7 各组所测各点时间平均声压级

试验数据处理步骤同喷油脉宽试验组，可得点火位置为 25mm、27mm、29mm、31mm 时的整机时间平均声压级如图 8 所示。

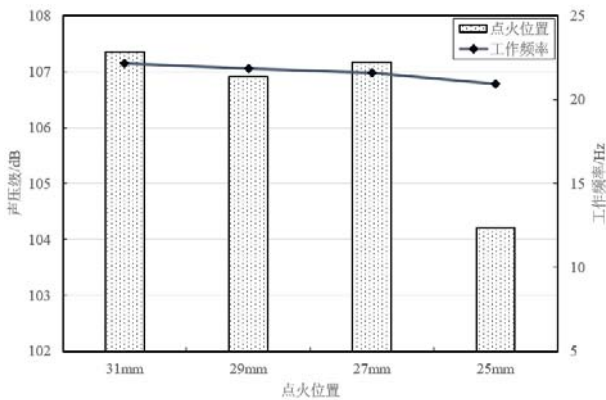


图 8 点火位置对整机声压级的影响

可以看出，点火位置对于 FPLG 整机的声辐射

并不是正相关的。在标准工况即点火位置为 27mm 时，整机的工作状况最佳，缸内燃烧最为充分，气体爆发压力较大，燃烧噪声较大。点火位置过晚，燃料可能会在活塞到达内止点之后才燃烧，气缸容积增大，燃烧压力降低，且燃料在喷出后扩散过久可能导致液滴碰壁后粘连，燃烧效果较差，对应的点火位置为 25mm 时整机时间平均声压级较低。点火位置过早容易造成整机工作过程中爆震，热负荷、振动和噪声加剧，所以对应的点火位置为 31mm 时声压级曲线有明显上升，还有一个可能的原因是随着试验的进行，整机逐渐热机导致后进行的试验中缸内燃烧效果更佳，所以燃烧噪声更大。

在改变点火位置的四组试验中，工作频率的总体变化幅度小于 5%，由于机械部件运动产生的机械噪声变化较小，而点火位置由 27mm 改为 25mm 时整机时间平均声压级变化较大，初步判断是由缸内燃烧情况发生改变引起的。

3.3 喷油位置影响规律

保持其他参数不变，通过改变喷油位置探究其对整机声辐射的影响。定义喷油时自由活塞与动力缸中心点位置的水平距离为喷油位置。试验时，在喷油脉宽为 3ms 及点火位置为 27mm 时，设置 35mm、37mm、39mm、41mm 共四组喷油位置不同的试验组。得到四组试验组中各测点的时间平均声压级如图 9 所示。

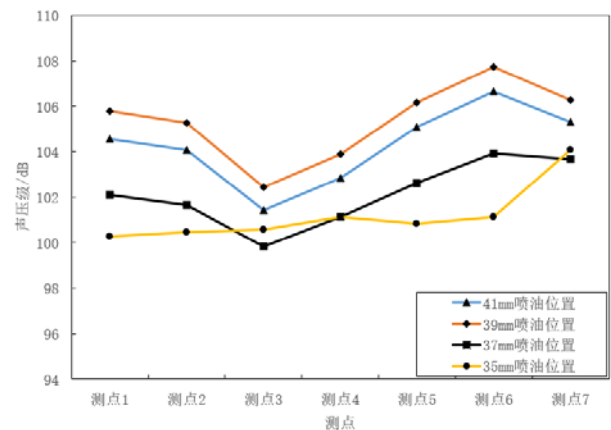


图 9 各组所测各点时间平均声压级

试验数据处理步骤相同，可得喷油位置为 35mm、37mm、39mm、41mm 时整机的时间平均声压级如图 10 所示。

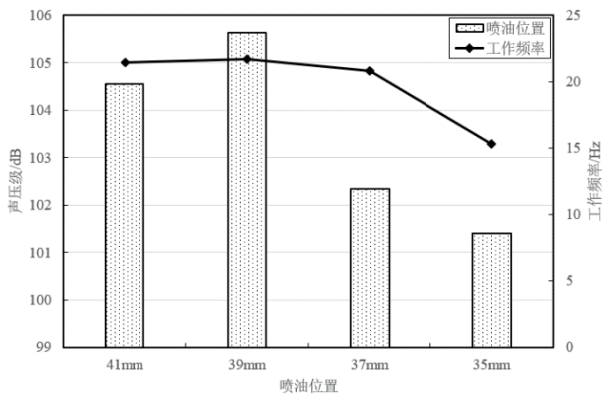


图 10 喷油位置对整机声压级的影响

从图中可以看出，当喷油位置为 39mm 时，整机声压级达到 4 组试验中的最大值。当喷油位置为 35mm 时，整机的工作频率和时间平均声压级数值均与喷油脉宽为 0 时的冷起工况近似，即此时由于机械部件运动产生的机械噪声和整机辐射噪声与冷起工况近似相等。可以初步推断此时缸内的燃料几乎没有点火燃烧。

当喷油位置较早时，活塞处于压缩行程，此时动力缸内空气的压力、温度、密度均未达到要求，燃料的蒸发、雾化、混合时间增加，所以致使着火延迟期变长，预混阶段被点燃的燃料增加，从而使发动机工作更为粗暴，压力升高率增加，导致缸内的燃烧噪声也随之增加；喷油位置过晚时，燃料蒸发混合不充分，会使得燃烧不完全，甚至无法着火燃烧，导致燃烧噪声较低。所以喷油位置较早的两组声压级更高。除此之外，当喷油位置过早时，已经蒸发、雾化完成的燃料经过长时间扩散可能导致油雾再次凝固、液滴碰壁后粘连，导致燃烧效果较差，燃烧噪声有所降低。所以图中喷油位置由 39mm 变为 41mm 时声压级出现下降，喷油位置为 39mm 及 37mm 时声压级明显低于前两组。

3.4 整机辐射噪声敏感性分析

为了研究三组参数对 FPLG 整机辐射噪声影响的大小，对各组得到的整机时间平均声压级结果进行敏感性分析。

如图 11，可见在这三组参数中喷油位置对整机辐射噪声的影响最大，其次是点火位置，喷油脉宽对于整机辐射噪声的影响最小，所以在降低整机噪声时，可以重点对喷油位置和点火位置进行参数优化。

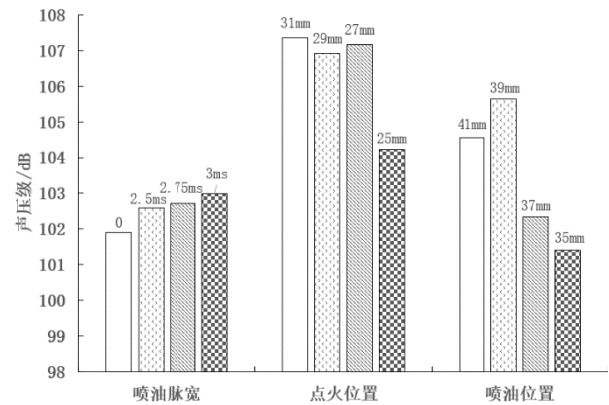


图 11 不同参数下的整机声压级

4 结论

本文通过开展 FPLG 整机声辐射影响规律试验研究，得出以下结论：

(1) 喷油脉宽对于整机声辐射的影响呈正相关，即在试验探究的喷油脉宽范围内，喷油脉宽越大，整机运转时的声压级越大。

(2) 点火位置与 FPLG 整机的声辐射并不是正相关的。在标准工况即点火位置为 27mm 时，整机的工作状况最佳，缸内燃烧最为充分，气体爆发压力较大，燃烧噪声较大。

(3) 喷油位置与 FPLG 整机的声辐射并不是正相关的。在喷油位置为 39mm 时，整机声压级达到喷油位置对照试验中的最大值，喷油过早或过晚都会影响整机声辐射发生较大变化。

(4) 多参数对 FPLG 整机声辐射影响规律中，喷油位置的影响最大，其次是点火位置，喷油脉宽对于整机辐射噪声的影响最小，所以在降低整机噪声时，可以重点对喷油位置和点火位置进行参数优化。

参考文献：

- [1] Guo C, Zuo Z, Feng H, et al. Review of recent advances of free-piston internal combustion engine linear generator[J]. Applied Energy, 2020, 269(C).
- [2] 刘琳. FPLG 串联式混合动力汽车的控制策略研究和整车性能仿真[D]. 北京理工大学, 2017.
LIU Lin. Research on control strategy and vehicle performance simulation of FPLG Series hybrid electric vehicle[D]. Beijing Institute of Technology, 2017.
- [3] 郭恩帅. 基于喷油策略的船用柴油机燃烧噪声分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2022.

GUO Enshuai. Combustion noise analysis of Marine diesel engine based on fuel injection strategy[D]. Harbin Institute of Technology, 2022.

- [4] 张学龙,王奔,王亚军等.柴油机发动机噪声测试与分析[J].内燃机,2019(03):33-37+40.
ZHANG Xuelong, WANG Ben, WANG Yajun. Test and Analysis on Diesel Engine Noise[J]. Internal Combustion Engines, 2019(03):33-37+40.
- [5] 曾德全,郭帅,张驰等.自由活塞式内燃直线发电机的燃烧性能研究[J].内燃机工程,2017,38(04):20-26.
ZENG Dequan, GUO Shuai, ZHANG Chi, et al. Study on the Combustion performance of a Free Piston Linear Generator[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2017,38(04):20-26.
- [6] 陈光辉,刘春辉,陈宏威.自由活塞柴油直线发电机均质充量压燃工况分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(11):1124-1129.
CHEN Guanghui, LIU Chunhui, CHEN Hongwei. Operating Mode of HCCI Combustion of Free-Piston Diesel Engine for Linear Generator[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018,51(11):1124-1129.
- [7] Zhang Z, Guo C, Song Y, et al. Research on the engine combustion characteristics of a free-piston diesel engine linear generator[J]. Energy Conversion and Management, 2018,168.