

# 固体火箭发动机点火试验环境测试研究

兰宝刚 颜文选 李家兴

(西安航天动力测控技术研究所 陕西 西安 710025)

**摘要：**固体火箭发动机地面点火试验时，会对周围环境产生大的噪声和振动影响，对试验采集设备和周围居民都会带来较大影响，环境振动噪声参数也能体现固体火箭发动机的工作性能指标，因此对固体火箭发动机地面点火试验振动噪声参数的分析测量具有很重要的意义。对固体发动机点火试验过程中产生的振动、噪声等参数进行监测，获得固体发动机点火过程中试验台周界的环境参数，研究发动机点火过程试验台环境参数传播规律，为试验台开展发动机点火试验产生的环境影响进行预示，为相关安全防护工作提供支撑。

**关键词：**固体火箭发动机；噪声测试；振动测试；传播规律

## 1 噪声测试方案

固体火箭发动机进行地面试车时，会对周边环境产生较大的噪声影响。噪声测量围绕试验台体展开，沿发动机轴向和水平轴向方向展开测量。如图 1 所示为噪声测点布置示意图。

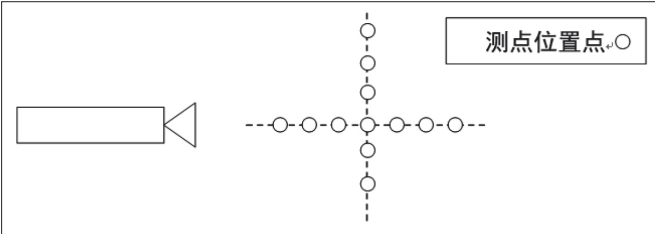


图 1 测点分布图

### 1.1 噪声测点布置

在试验现场，制定了噪声测点布置方案，如表 1 所示。对噪声传感器、声级计以及采集设备都进行防雨防振处理。噪声传感器拟采用可升降式三角支架进行安装，如图 2 所示。

试验过程中，为了避免声音在地面反射而造成对测



图 2 噪声传感器工装

表 1 噪声测点布置

| 测点编号    | 测点名称       | 测试方式           |
|---------|------------|----------------|
| 噪声测点 1  | 距台体 15m    | 噪声传感器 + 在线采集设备 |
| 噪声测点 2  | 距台体 70m    | 噪声传感器 + 在线采集设备 |
| 噪声测点 3  | 东侧距台体 156m | 噪声传感器 + 离线采集设备 |
| 噪声测点 4  | 西侧距台体 156m | 噪声传感器 + 离线采集设备 |
| 噪声测点 5  | 距台体 350m   | 带存储声级计         |
| 噪声测点 6  | 距台体 116m   | 带存储声级计         |
| 噪声测点 7  | 距台体 110m   | 带存储声级计         |
| 噪声测点 8  | 距台体 133m   | 带存储声级计         |
| 噪声测点 9  | 距台体 375m   | 带存储声级计         |
| 噪声测点 10 | 距台体 625m   | 带存储声级计         |
| 噪声测点 11 | 距台体 220m   | 手持式声级计         |
| 噪声测点 12 | 距台体 560m   | 手持式声级计         |
| 噪声测点 13 | 距台体 560m   | 手持式声级计         |
| 噪声测点 14 | 距台体 690m   | 手持式声级计         |
| 噪声测点 15 | 距台体 820m   | 手持式声级计         |
| 噪声测点 16 | 距台体 1120m  | 手持式声级计         |

量结果的干扰，通过工装的固定螺钉调整噪声传感器安装高度，传感器安装于工装顶部套筒内；通过转动调整工装底部三角支架，使传感器的测试头部正对发动机试验台（噪声源）；由于为外场测试，安装传感器的筒段设计了类似隔音管功能结构，一方面减少外界其他噪声对于测量结果的影响，另一方面防止下雨天气对传感器头部测试组件的损坏。

### 1.2 数据处理方法

本次试验研究，为了更好地描述噪声参数特性，采用了 A 计权声压级 ( $L_A$ ) 和等效连续声压级 ( $L_{eq}$ ) 来评估发动机噪声的影响。

A 声级 ( $L_A$ ) 的计算公式为：

$$L_A = 20 \times \lg \frac{P}{P_{ref}}$$

式中:  $P$  为所测的声压, 单位 Pa;  $P_{\text{ref}}$  是参考大气压。

如果测量是在同样采样频率之下, 则发动机点火试验的噪声计算也可以表达为:

$$L_{eq} = 10 \times \lg \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{Ai}} \right] (\text{dB})$$

式中:  $N$  表示试验获取的数据总量;  $L_{Ai}$  表示第  $i$  个 A 计权声压级, dB。

相同声压级的声音, 因频率不同而使人在听觉感受上有不同的响度, 因此数据处理时对噪声测量结果进行频域分析, 得到发动机噪声的特征频率范围。

## 2 噪声传播规律

声波在传播过程中将逐渐衰减, 这种衰减主要包含了距离传播的衰减  $A_d$ , 空气衰减  $A_a$ , 地面吸收衰减  $A_g$ , 屏障引起的衰减  $A_b$  等。总的衰减值  $A$  则是各种衰减的总和:  $A = A_d + A_a + A_g + A_b$ 。

### 2.1 数据分析

本次试验噪声数据全部成功获取, 图 3 所示为喷管

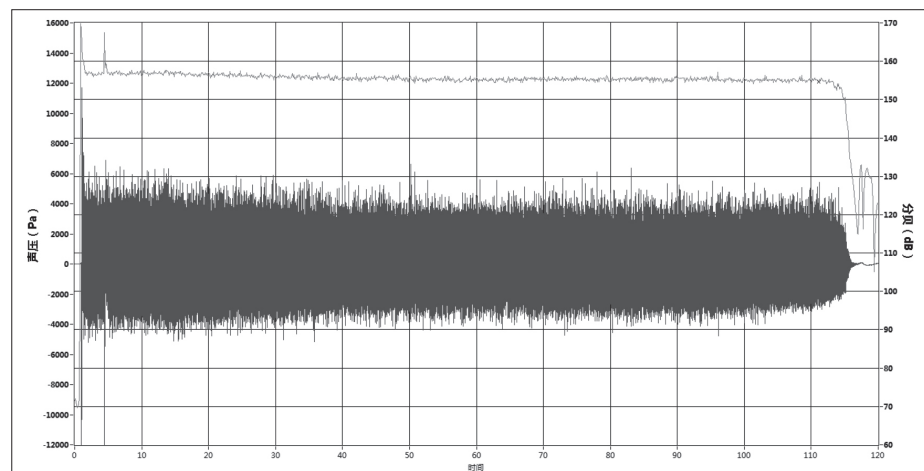


图3 噪声传感器测量时域数据曲线

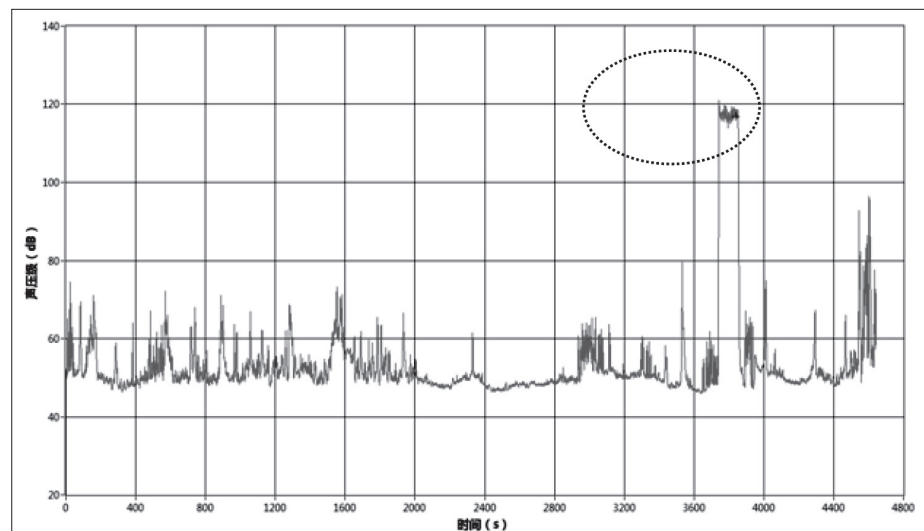


图4 声级计测量噪声时域数据曲线

附近所测得的噪声时域波形, 横坐标为时间, 左纵坐标为声压 (Pa), 右纵坐标为声压级 (dB)。

图3所示曲线上出现了峰值为发动机点火工作开始噪声为169.8dB, 在整个发动机工作过程中的平均噪声为155.79dB; 取采用带存储声级计进行测量采样率1的测点数据。图4为噪声数据曲线。

试验过程中的最大值为121.0dB, 发动机工作过程中平均值为116.8dB。

通过对试验数据的处理, 得出了表2所示的整个测试区域的噪声数据结果。

### 2.2 噪声的传播规律分析

通过对本次发动机地面点火试验噪声的传播规律和特性进行分析, 得到固体火箭发动机噪声的传播模型:

$$A = 20 \times \lg \frac{r_2}{r_1} + \frac{7.4 \frac{f^2(r_2-r_1)}{\phi} 10^{-8}}{1 + \beta \Delta T f} + 0.01 f^{\frac{1}{3}} \times (r_2 - r_1) \times \rho + A_b$$

式中:  $A$  为从  $r_1$  处传播到  $r_2$  处时的声波衰减, dB;  $\rho$  为地面的衰减系数;  $\Delta T$  为与  $20^\circ\text{C}$  相差的摄氏温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\beta = 4 \times 10^{-6}$ ;  $f$  为声波频率, Hz;  $d$  为传播距离, m;  $\phi$  为相对湿度;  $A_b$  为声屏障衰减量, dB。

## 3 振动测试方案

### 3.1 振动测点布置

对于所研究的固体火箭发动机而言, 它在地面试验过程中会引起周围地面的振动。对固体火箭发动机地面试验的现场制定了振动布置方案。通过对点火试验的分析, 地面振动量级和频率较低, 因此振动测量采用了302AB胶粘的方式进行。选择马路等坚硬地面粘贴, 可以避免在松软地面进行土壤压实工作。选择低量程的振动传感器, 对所有测点发动机的轴、径、切三个方向进行测量。

### 3.2 振动数据处理

#### 3.2.1 振动处理方法

每一个测点的轴、径、切三个方向的原始数据, 针对不同时间段分别进行了频谱分析, 将整个发动机工作过程中振动的时间历程进行处理。

#### 3.2.2 振动数据结果

本次试验振动数据全部成功获取, 其中振动测点5位于马路距喷管距离50m, 采用在线采集设备

表 2 噪声数据结果

| 测点编号    | 测点名称       | 声压级 /dB |
|---------|------------|---------|
| 噪声测点 1  | 距台体 15m    | 155.8   |
| 噪声测点 2  | 距台体 70m    | 125.8   |
| 噪声测点 6  | 距台体 116m   | 123.6   |
| 噪声测点 8  | 距台体 133m   | 116.8   |
| 噪声测点 7  | 距台体 110m   | 88.4    |
| 噪声测点 4  | 西侧距台体 156m | 139.5   |
| 噪声测点 3  | 东侧距台体 156m | 144.8   |
| 噪声测点 11 | 距台体 220m   | 83.0    |
| 噪声测点 5  | 距台体 350m   | 106.0   |
| 噪声测点 9  | 距台体 375m   | 106.9   |
| 噪声测点 10 | 距台体 625m   | 105.7   |
| 噪声测点 12 | 距台体 560m   | 79.5    |
| 噪声测点 13 | 距台体 560m   | 60.1    |
| 噪声测点 16 | 距台体 1120m  | 78.0    |
| 噪声测点 15 | 距台体 820m   | 80.6    |
| 噪声测点 14 | 距台体 690m   | 69.0    |

Dewesoft 进行数据采集记录，采样频率 10k。

图 5 所示为发动机工作时段内振动测点 5 的轴向频谱曲线。

测点 5 是最接近发动机的振动测点，从数据可以看出，三个方向的量级处在 0.05g 附近，固体火箭发动机

振动信号的主要分量的频率集中在一个比较窄的频带内，轴向和径向这个主要分量频率就是 760Hz，切向为 70Hz。

4 结语

通过对固体火箭发动机地面点火试验环境测量，对噪声分析得出以下结论：

- (1) 本次试验发动机喷管处噪声声压级最大，达 155.8dB ；
- (2) 随着传播距离的增加，噪声数据出现明显下降趋势；
- (3) 通过对比室内外声压级，室内墙体、隔音窗户对噪声有明显的降低作用；
- (4) 固体火箭发动机噪声信号的主要分量的频率集中在一个比较窄的频带内，频率集中在 5~30Hz 之间；
- (5) 山体建筑屏障以及地面树木等能够一定幅度衰减噪声的传播。

通过对振动数据分析得出以下结论：

- (1) 马路距台体 50m 处振动数值最大，达到 0.06g；
- (2) 随着传播距离的增加，振动数据出现明显下降趋势；
- (3) 通过对比室内外振动数据，地基对发动机的振动传播有明显的衰减作用；

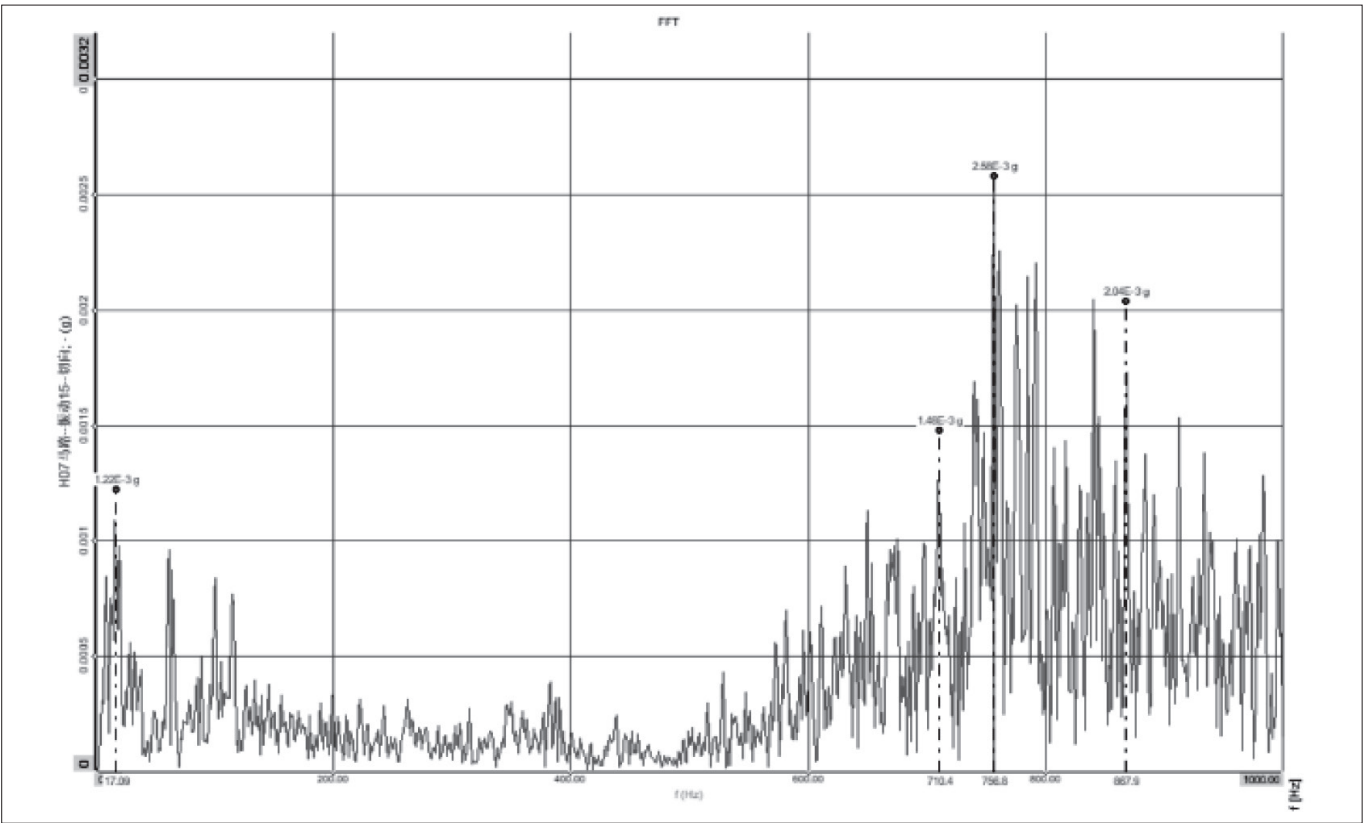


图 5 30~30.5s 振动测点 5 轴向频谱曲线

(4) 振动测点 5 (试验台近点) 在轴向和切向振动信号出现 760Hz 频率分量;

(5) 除测点 5 外, 其余测点的轴向和径向振动信号的主要分量的频率集中在一个比较窄的频带内, 主要分量频率为 20~40Hz 之间。

#### 参考文献:

- [1] Yin L H, Turesson G, Tunestal P, et al. Evaluation and transient control of an advanced multi-cylinder engine based on partially premixed combustion[J]. Applied energy, 2019, 233: 1015-1026.
- [2] Diaz G J A, Montoya J P G, Martinez L A C, et al. Influence of engine operating conditions on combustion parameters in a spark ignited internal combustion engine fueled with blends of methane and hydrogen[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181: 414-424.
- [3] Cai M, Lan Z Q, Zhang Z W, et al. Evaluation of road traffic noise exposure based on high-resolution

population distribution and grid-level noise data[J]. Building and Environment, 2019, 147: 211-220.

[4] L. Smith, E. Bogatin. Principles of power integrity for pdn design[C]. Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI&PI), 2018, 1-74.

[5] 方安然, 李旦, 张建秋. 异常值和未知观测噪声鲁棒的非线性滤波器[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 525-538.

[6] 颜密, 田小涛, 王绍增, 等. 自由装填固体火箭发动机的快烤响应特性试验[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(1): 95-100.

[7] CHEN Jianguo. Research on engine vibration and noise under multiple operating conditions[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(24): 83-87.

**作者简介:** 兰宝刚 (1983-), 男, 汉族, 陕西宝鸡人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 固体火箭发动机试验。

#### (上接第 32 页)

(6) 根据机械车库结构位置, 铺设一层导轨、安放一层车板, 插接电缆电线, 恢复供电, 即可进行调试工作。

#### 6 结语

通过对机械车库结构优化, 达到全螺栓连接施工, 虽然前期增大了厂内预制的工作量和工作难度, 但是现场安装时的优点也显而易见:

(1) 车库构件集成度高, 运输时只需将每种类型的构件归类打包, 现场安装材料分拣方便;

(2) 由于全部采用螺栓连接, 可以做到安装现场无明火、无焊接作业, 满足雄安新区当地环保要求, 也可延伸至某些不可动火的社区、医院、商超等地;

(3) 装配式机械车库有利于后期的拆卸和转运工作。

机械车库拆移二次利用相对新建大大节省费用, 带来的经济效益和社会效益也更显著。

#### 参考文献:

- [1] GB/T 3811-2008, 起重机设计规范 [S].
- [2] JB/T 8910-2013, 升降横移类机械式停车设备 [S].
- [3] 耿亮, 机械立体车库的加工和制造方法 [J]. 施工技术, 2016(45): 475-477.
- [4] 吴智, 升降横移式双层立体车库的结构分析和仿真优化 [J]. 机械工程师, 2021(3): 82-85.
- [5] 潘博, 模块化立体车库的装配式钢结构及其节点性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.