

# 2相多循环脉冲爆震发动机燃烧噪声辐射特性试验研究

李娜

(沈阳发动机设计研究所,沈阳 110015)



李娜(1982),女,硕士,从事航空发动机燃烧室设计工作。

基金项目:国家自然科学基金(N6C80001)资助  
收稿日期:2010-05-29

## 1 引言

脉冲爆震发动机(Pulse Detonation Engine,简称PDE)是利用脉冲式爆震波产生周期性冲量的非定常推进系统<sup>[1]</sup>。众所周知,动力装置的噪声不但会对人类的生存环境造成不良影响,而且还会引起自身乃至飞行器的声致结构疲劳破坏,也会对机载设备产生不良影响<sup>[2]</sup>。由于工作过程的特殊性,新概念脉冲爆震发动机的

**摘要:**对内径为60 mm的2相多循环脉冲爆震发动机燃烧噪声辐射特性,在其测量位置处和一定试验频率范围内进行了试验研究。经研究发现:在一定低频范围内,噪声辐射频谱由气流脉冲的基频(即爆震频率)和谐频组成;脉冲噪声是1个或多个持续时间小于1s的猝发声组成的噪声;距离发动机喷口方向越近,噪声的声压级越强;反之,噪声衰减的速度越快。

**关键词:**脉冲爆震发动机;噪声辐射;燃烧;试验研究

## Experimental Investigation on Combustion Engine Noise Radiation Characteristics for Two-Phase Multi-Cycle Pulse Detonation

LI Na

(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** The combustion noise radiation characteristics of two-phase multi-cycle pulse detonation engine with the inner diameter 60 mm were experimentally investigated under several operating frequencies at measure location. It is found that the combustion noise radiation frequency spectrum of the engine are composed of harmony frequency and base frequency (It is detonation frequency) by the air stream air at some low frequency range. The impulse noise is constituted of the burst noise of duration one or more less than 1s. The colser the engine spout, the stronger the sound pressure level of the noise. The farther the engine spout, the faster the attenuation speed of the noise.

**Key words:** pulse detonation engine; noise radiation; combustion; experimental investigation

噪声辐射强度远远高于已广泛应用的涡轮喷气发动机的。初步研究表明,其噪声辐射有效声压级一般为140~150 dB<sup>[3]</sup>,无法满足国内外有关喷气发动机噪声标准的要求,成为制约该类发动机未

来实际应用的“拦路虎”。

脉冲爆震发动机一般由进气道、爆震室及尾喷管组成。其工作过程主要包括<sup>[4]</sup>:

- (1)可燃混气填充爆震管;
- (2)在密封端点火;

(3) 爆燃波转变为爆震波,并向开口端传播;

(4) 爆震波从开口端传出,膨胀波反射进来;

(5) 已燃燃气排出。

脉冲噪声按其物理特性可以分为 2 类,1 类是由固体碰撞而引起物体的弹性振动、变形或断裂等产生的撞击噪声,又称自振波。它包括一系列阻尼振动。另 1 类是由于爆炸、轰声或紊流等突然的变压而引起的冲击脉动<sup>[9]</sup>。新概念脉冲爆震发动机噪声主要由第 2 类原因引起。

本文对内径为 60 mm 的 2 相多循环脉冲爆震发动机燃烧噪声辐射特性进行了试验研究。

## 2 试验装置及测试系统

整个试验系统由供油、供气、点火系统,PDE 模型机(由油气混合室和爆震燃烧室组成)及噪声、压力测试系统构成。对内径为 60 mm,长度为 1.5 m 的 PDE 模型机的噪声辐射特性进行了试验研究。试验时,发动机工作频率的变化通过改变点火频率来实现。同时,根据发动机的几何尺寸及工作频率供给一定量的空气和汽油。发动机出口管壁处的压力波形(用于监测发动机的工作状态)利用 CY-YD-205 型压电式压力传感器获得,经 YE5853 型电荷放大器调整后转换为电压信号;采用丹麦 G.R.A.S 声与振动公司生产的高强度噪声测试传感器系统进行噪声测量,测量前用 B&K4220 活塞发声器对整个系统进行校准。该系统由 40DP-1/8" 电容传声器、连接器、26AC 前置放大器及直流电源组成。系统性能参数如下:灵敏度:

0.97 mv/Pa;频响范围:10 Hz ~ 70 kHz ( $\pm 1$  dB) 或 6.5 Hz ~ 140 kHz ( $\pm 2$  dB);量程:40 ~ 178 dB;使用温度:-40 ~ 150℃。

发动机工作时的噪声信号经噪声测量系统转化为电压信号,与来自压力测量系统的电压信号一起实时传输到 4 通道并行高速数据采集卡 DAQ-2010 (其采样频率可达 2 MHz),经 A/D 转换后,送计算机存储、分析。

PDE 模型机噪声测量系统如图 1 所示,试验时按照有关规范,将传声器安装在距发动机喷口中心 1 m,270° 处。传声器高度与发动机喷口中心平齐,距地面 1.4 m。在发动机稳定工作状态下,分别对不同爆震频率下 PDE 模型机的噪声辐射特性进行了试验研究。

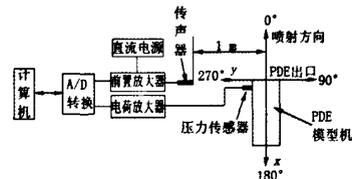


图 1 PDE 模型机噪声测量系统

## 3 试验结果与分析

### 3.1 噪声辐射的衰减特性

由于在不同位置处脉冲爆震发动机出口爆震波辐射的噪声强度和频率成分不同,随着发动机出口距离的增大,噪声强度减弱,即噪声辐射强度随着距离声源位置的增大而发生衰减。试验测得了距离发动机出口径向位置处 1、2、3、4 m 时,该处噪声辐射大小,发现峰值声压级随着传感器距离发动机出口径向位置的增大而衰减得很明显,脉冲声压级也同时发生衰减。试验在同一工况下同时进行,在不同爆震频率、不同位

置处 60 mm PDE 模型机噪声辐射特性参数变化曲线如图 2 所示。从图中可以看出,距离发动机出口越远,噪声(尤其是声压和声功率)衰减得越快,因为噪声处于 1 个混响场中,向四周各方向都有辐射,故其能量散失得很快。

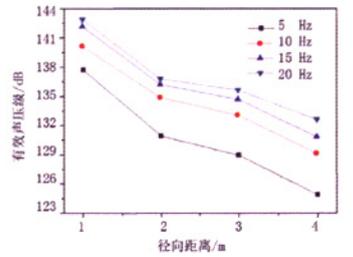
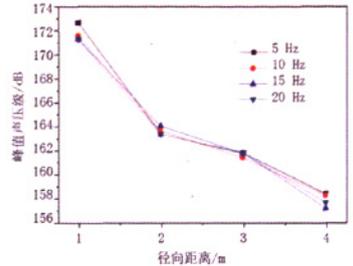


图 2 在不同爆震频率、不同位置处 60 mm PDE 模型机噪声辐射特性参数变化曲线

### 3.2 噪声辐射的指向性

由于噪声在不同方向辐射的大小不同,即呈现一定的指向特性,为此,本文对 60 mm 脉冲爆震发动机模型机进行了噪声指向特性研究。试验在同一工况下进行,噪声测量传感器放置在与发动机出口轴向夹角(方位角)分别为 210°、240°、270°、300° 的位置处。试验发现噪声辐射大小随着方位角的不同而发生变化,根据相应公式计算得到的特性参数见表 1。根据表 1 中各频率下 4 个方位角处的噪声辐射特性参数大小,应用线性拟合方法拟合出了

表1 60 mm 脉冲爆震发动机模型机指向性噪声辐射特性 dB

频率 /Hz	峰值声压级				脉冲声压级			
	210°	240°	270°	300°	210°	240°	270°	300°
5	159.95	164.20	170.35	173.95	132.51	133.54	138.02	140.23
10	159.39	164.35	170.19	173.91	134.58	135.31	141.02	143.92
15	158.00	165.09	168.88	173.84	136.01	136.33	141.25	146.60
20	160.47	164.68	168.59	173.56	137.88	139.20	141.51	149.89

方位角分别为 180°、330°、360° 的噪声辐射特性参数。由于发动机出口流场的轴对称特性，可以近似认为方位角为 0° ~ 180° 时的噪声辐射特性参数与 180° ~ 360° 时的相等，即发动机喷口周围声场中噪声大小以发动机的轴线为中心轴呈对称分布。根据 180° ~ 360° 的噪声辐射大小相对称地得到 0° ~ 180° 的噪声辐射特性。在不同爆震频率下峰值声压级和脉冲声压级的极坐标如图 3 所示。从图 3 中可以看出，在各频率下噪声的峰值声压级和脉冲声压级呈现基本相同的变化趋势，在 180° 方位角处，即与发

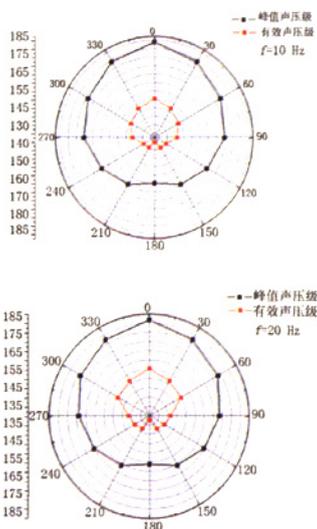


图3 不同频率下峰值声压级和脉冲声压级的极坐标

声压级越大。

通过高速数据采集仪采集到的压力时域曲线如图 4 所示。观察各频率下 4 个方位角处的声压，随着方位角的增大，声压变化比较明显，呈现增大的趋势。由图 4 中显示的数据可以看到，在 210° 方位角处声压为 1000 ~ 3000 Pa，而在 300° 方位角处声压为 6000 ~ 9000 Pa。由

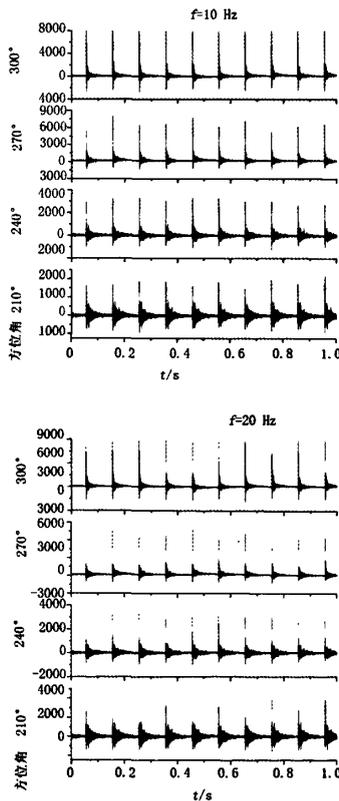
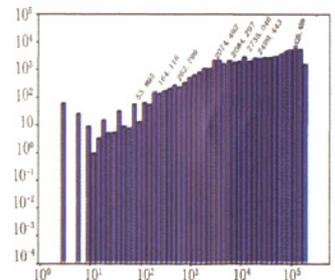


图4 爆震频率为 10 Hz 和 20 Hz 时的压力时域曲线

此可以得出，60 mm 脉冲爆震发动机模型机具有一定的指向特性，越靠近发动机喷口方向，噪声辐射的强度越强；越靠近发动机喷口的相反方向，噪声辐射强度越弱。

### 3.3 噪声辐射的频率特性

60 mm 脉冲爆震发动机模型机的 1/3 倍频程特性如图 5 所示，图 5 右边表格中显示的数据是在 1/3 倍频程的各中心频率下对应的声压值。从图 5 中可以看出，声压值最大出现在频率为 63000 Hz 时，这是因为 1/3 倍频程的带宽随频率变化而变化，在高频范围内频带宽，结果使信号累加的作用增强。60 mm 脉冲爆震发动机噪声的 3 维频谱如图 6 所示，x 轴表示频率，y 轴表示时间，z 轴表示声压。从图 6 中可以清楚地看到脉冲噪声的频率主要集中在低频范围内。



序号	频率	值
1	40.000	53.895
2	100.000	164.116
3	250.000	262.799
4	1600.000	2074.492
5	3150.000	2084.297
6	6300.000	2735.046
7	10000.000	2499.443
8	63000.000	6425.459

图5 脉冲爆震发动机的 1/3 倍频程特性 (f=20 Hz)

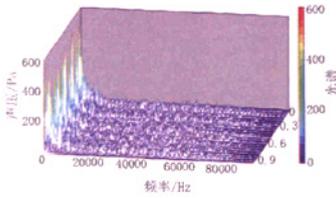


图6 脉冲爆震发动机噪声3维频谱( $f=20\text{ Hz}$ )

从图5.6中可见,对于60 mm 脉冲爆震发动机模型机而言,无论工作频率如何,其噪声辐射频谱的频率范围都是很宽的,在0~60000 Hz 范围内,各种频率的噪声信号都存在。但噪声辐射的能量主要集中在0~10000 Hz 的频率范围内,且绝大部分能量集中在0~5000 Hz 的信号内,即呈现明显的低频性。由此可以看出,在一定低频范围内,60 mm 脉冲爆震发动机噪声辐射频谱由气流脉冲的基频和谐频组成。

60 mm 脉冲爆震发动机模型机的倍频程噪声谱如图7所示。图中显示了发动机的噪声在各频率成分下对应的分贝值。通过分析可以得出:60 mm 脉冲爆震发动机噪声辐射的频谱很宽,在0~

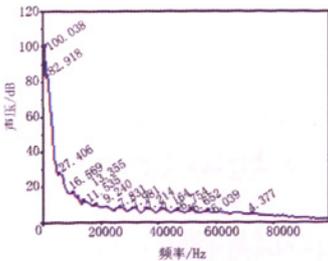


图7 脉冲爆震发动机倍频程噪声谱( $f=20\text{ Hz}$ )

10000 Hz 范围内,各种频率的噪声信号都存在,但是噪声主要集中在低频范围内,表现出明显的低频性。

### 3.4 噪声辐射的时间特性

脉冲噪声的时间特性主要是指发动机脉冲噪声的持续时间,即脉冲声波维持一定声压所延续的时间,脉冲噪声的持续时间又简称脉宽。自由场中的简单脉冲波,其持续时间即指压力上升至主要正峰值,而后又迅速降至环境压力所需的时间,称为A持续时间。当脉冲噪声在混响场或因其它原因产生反射形成一系列振荡波时,其持续时间为:在声压脉冲峰波以下20 dB(即自正峰顶下降90%)的声压振幅范围内,包括正的和负的时间总和,称为B持续时间<sup>[5]</sup>。

内径为60 mm,爆震室长度为1.5 m的脉冲爆震发动机在爆震频率为10 Hz时的时间特性曲线如图8所示。根据脉冲噪声时间特性的定义方法,通过计算分析可以得出:脉冲爆震发动机的A持续时间为0.2 ms左右,B持续时间为5.0 ms左右。由此可见,脉冲噪声是由1个或多个持续时间小于1 s的猝发声组成的噪声。

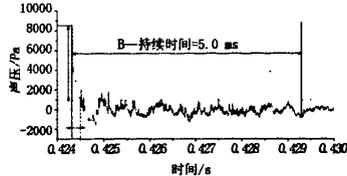


图8 脉冲爆震发动机噪声的时间特性曲线

## 4 结论

本文对60 mm 脉冲爆震发动机模型机进行了试验分析,得到了脉冲爆震发动机噪声辐射的一些特性。主要结论如下:

(1) 该模型机噪声辐射越靠近发动机喷口,指向性越强;反之,噪声辐射强度越弱。距离发动机喷口越远,噪声衰减得越快。

(2) 该模型机噪声辐射的频谱很宽,在0~10000 Hz 范围内,各种频率的噪声信号都存在,但是噪声主要集中在低频范围内。在一定低频范围内,60 mm 脉冲爆震发动机噪声辐射频谱由气流脉冲的基频和谐频组成。

(3) 脉冲噪声A持续时间为0.2 ms左右,B持续时间为5.0 ms左右,是1个或多个持续时间小于1 s的猝发声组成的噪声。

### 参考文献

- [1]严传俊,范玮.脉冲爆震发动机原理及关键技术[M].西安:西北工业大学出版社,2005:4-5.
- [2]唐狄毅.飞机噪声基础[M].西安:西北工业大学出版社,1995:37-97.
- [3]李娜,郑龙席,严传俊,等.混合式脉冲爆震发动机噪声辐射特性研究[J].噪声与振动控制,2009,29(1):101-105.
- [4]郑龙席,严传俊,范玮,等.脉冲爆震发动机模型机噪声辐射特性初探[J].振动测试与诊断,2006,26(3):176-180.
- [5]王秉义.枪炮噪声与爆炸声的特性和防治[M].北京:国防工业出版社,2001:32-33.
- [6]马大猷.噪声与振动控制工程手册[M].北京:机械工业出版社,2002:13-15.