

提取内燃机燃烧压力高频成分进行压力 高频振荡研究*

舒歌群 卫海桥

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室 天津 300072)

摘要: 研究内燃机缸内压力高频振荡的机理以及压力高频振荡对燃烧噪声的影响。利用小波分析技术确定缸内压力高频振荡出现的范围,从而确定了燃烧室空腔声模态模型的对应曲轴转角范围。用声响应法和有限元法分别测量和计算不同曲轴转角下燃烧室空腔声模态,并对测量值和计算值对应曲轴转角进行了温度修正,模态试验结果与有限元计算结果较吻合。并对测量的缸内燃烧压力信号和噪声信号进行了分析。研究表明:缸内燃烧压力高频振荡是燃烧室的多阶共振频率受到激励引起共振的结果,燃烧压力高频振荡是影响燃烧噪声的重要因素。

关键词: 内燃机 小波分析 燃烧压力 高频压力振荡

中图分类号: TK421.6

0 前言

直喷式柴油机燃烧噪声的影响因素包括燃烧过程所引起的气体动力载荷、气缸压力所引起的高频燃烧压力振荡等,而直喷式柴油机燃烧噪声能量主要集中在几个缸内燃烧压力的共振频率上,这些共振频率主要与燃烧室的形状以及气体温度等参数有关^[1]。由于柴油机结构对高频激励传递的衰减系数较小,使得在燃烧压力共振频率处辐射的燃烧噪声能量较大,成为燃烧噪声的主要成分。

以 ZH1110 柴油机为研究对象,用小波分析方法提取缸内压力高频成分,确定燃烧压力波动的范围,针对该范围对应的燃烧室空腔建立空腔模型进行声模态计算及声模态试验。根据缸内压力小波分析确定的时域范围,确定燃烧室空腔形状和燃气温度对试验值和计算值的影响,对声模态的各阶共振频率进行修正。结合实测发动机缸内压力、缸盖表面振动信号和噪声信号,对燃烧压力高频振荡机理和高压振荡对燃烧噪声的影响进行了研究。

1 压力的小波分解

小波变换具有良好的时频局部化特性,对于处理时变信号具有独特的优越性,它能将信号分解成交织在一起的多种尺度成分,并对于大小不同的尺

度成分采用相应的时域取样步长,从而能不断地聚焦到对象的任意微小细节。对于尺度及位移均离散变化的小波序列,若取离散栅格的 $a_0 = 2$, $\Delta\tau = 0$,即相当于连续小波只在尺度上进行了二进制离散,而位移仍取连续变化,称这类小波为二进小波。

设小波函数为 $\varphi_{2^k, \tau}(t)$, 其傅里叶变换为 $\psi(\omega)$, 若存在二常数 $0 < A \leq B < \infty$, 使得稳定条件几乎处处成立, 即

$$A \leq \sum_{k \in Z} |\psi(2^{-k} \omega)|^2 \leq B$$

则小波函数 $\varphi_{2^k, \tau}(t)$ 称为二进小波; 当 $A = B$ 时称为最稳定条件。

若定义函数 $f \in L^2(R)$ 的二进小波变换系数为

$$W_{2^k}(\tau) = f(t) \times \varphi_{2^k, \tau}(t) = 2^{-\frac{k}{2}} \int f(t) \varphi\left(\frac{\tau-t}{2^k}\right) dt$$

则二进小波变换的重建公式为

$$f(t) = \sum_{k \in Z} \int_R W_{2^k}(\tau) \tilde{\varphi}_{2^k, \tau}(t) d\tau$$

式中 $\tilde{\varphi}_{2^k, \tau}(t)$ 为 $\varphi_{2^k, \tau}(t)$ 的对偶框架, 其上下界分别为 B^{-1} , A^{-1} 。

二进小波对尺度参数离散化, 而对时间域上的平移参量保持连续变化, 并不破坏信号在时间域上的平移不变量。因为不同的尺度具有不同的时间和频率分辨率, 因而小波分解能将信号的不同频率成分分开。采用离散的二进小波分析对用 20 kHz 的采样频率采集的缸内压力信号进行多层分解, 图 1 为 1 600 r/min 时缸内压力曲线及压力的高频三层分解曲线, 则图 1 中压力高频一层分解系数所占的频带

* 国家自然科学基金资助项目(50176034)和教育部科学技术研究重点项目(03049)。20030907 收到初稿, 20040320 收到修改稿

为 5 000~1 000 Hz，而压力高频二层分解系数所占的频带为 2 500~5 000 Hz，压力高频三层分解系数所占的频带为 1 250~2 500 Hz。

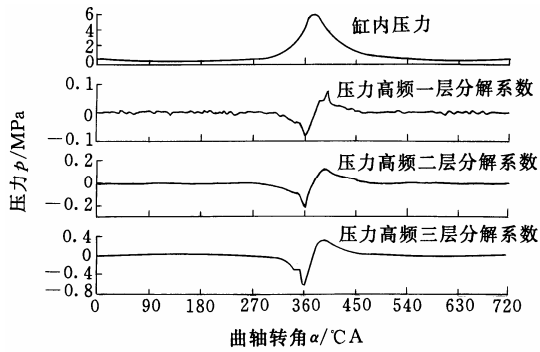


图1 缸内压力及其高频三层分解曲线

从图1可以看出，气缸压力高频分解曲线在曲轴转角为 315~405 °CA 之间存在压力突变，在 345~385 °CA 之间压力变化尤其显著，因此可认为气缸压力高频振荡主要集中在该区间，对燃烧室空腔声模态的研究应该针对该区间燃烧室空腔形状进行。

2 燃烧室空腔声模态

2.1 燃烧室空腔声模态试验

根据柴油机燃烧气体压力波动的数学模型和密闭空腔中气体受到声源激励后的波动方程，应用声响应法，借助燃烧室的共鸣特性研究燃烧气体压力波动的特性。在 ZH1110 单缸柴油机上进行声学模拟试验，在缸盖上布置供测取声压的声级计探头安装孔及声激励源孔，并用火花塞作为声的激励源。火花塞跳火是一脉冲激励信号，频率成分丰富，与燃烧发出的激励脉冲相似。

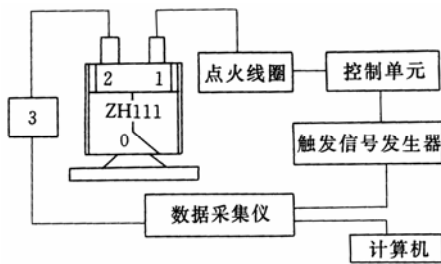


图2 燃烧室声模态测试试验装置

1.火花塞 2.传声器 3.信号放大器

模态试验装置如图2所示，在缸内压力的小波高频分解确定的曲轴转角区间，对不同曲轴转角下的燃烧室空腔进行模态试验。

测量每 3 °CA 对应曲轴转角下的燃烧室空腔的响应信号的频率特性，根据不同曲轴转角下燃烧室空腔声压波动频谱图可确定各阶模态共振频率。

2.2 燃烧室空腔声模态的计算

对应燃烧室空腔声模态试验方案，建立 ZH1110

柴油机不同曲轴转角下的燃烧室空腔三维模型，利用 Sysnoise 声学分析软件，对不同曲轴转角下的燃烧室空腔模型进行模态计算，求出对应曲轴转角下的空腔声模态的前十阶模态。图3为 6 °CA 曲轴转角对应燃烧室空腔二阶模态声压(dB)，单位为 μPa，其中参考声压为 20 μPa。

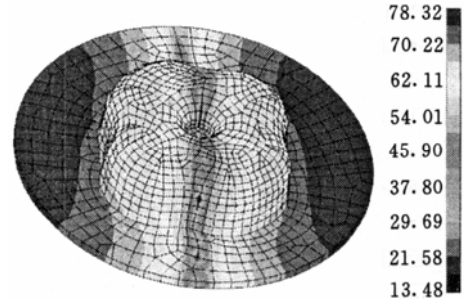
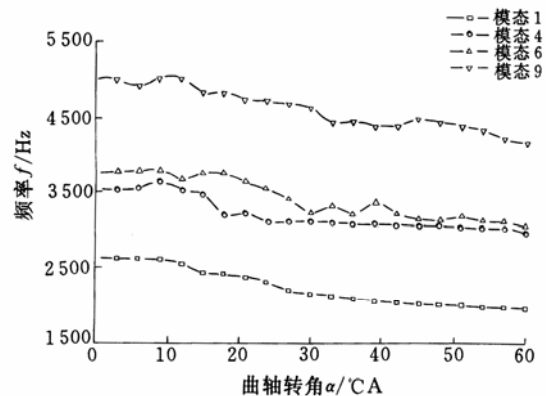
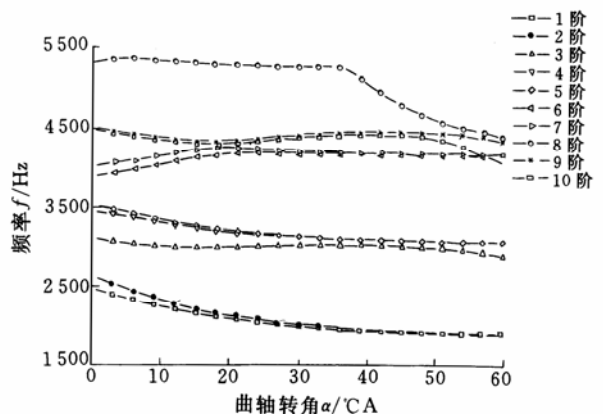


图3 6 °CA 曲轴转角对应燃烧室空腔二阶模态声压

图4为燃烧室空腔声模态测量值和计算值比较。由图4可以看出，燃烧室空腔的各阶共振频率随着活塞的下行，燃烧室空腔容积的增大而增大，有限元计算结果和测量结果较吻合。



(a) 声模态共振频率随曲轴转角的变化曲线(实测)



(b) 声模态共振频率随曲轴转角的变化曲线(计算)

图4 燃烧室空腔声模态测量值和计算值比较

3 空腔声模态的计算值与测量值修正

燃烧过程气体条件发生急剧变化，由于共振模

态形式是基于平均的几何数据和温度,共振频率取决于平均声速

$$f = \frac{C}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{nRT}$$

参考文献[3]指出,绝热指数 n 和气体常数 R 在燃烧过程无明显变化,对声速的影响可以忽略,气体温度在燃烧过程的变化是影响共振频率的主要参数。

下表为根据测取的 1 600 r/min 标定功率时对应曲轴转角的燃气温度计算值。

表 1 600 r/min 标定功率对应曲轴转角的燃气温度计算值

曲轴转角 $\alpha/^\circ\text{CA}$	燃气温度 T/K	曲轴转角 $\alpha/^\circ\text{CA}$	燃气温度 T/K
345	441	369	958
348	468	372	1073
351	488	375	1186
354	510	378	1287
357	547	381	1375
360	632	384	1455
363	733	387	1523
366	843	-	-

一个工作循环中,缸内压力高频振荡主要集中在上止点附近,从上述可知,在 1 600 r/min 时 345~385 $^\circ\text{CA}$ 曲轴转角是缸内压力振荡集中区,因此对上止点前 15 $^\circ\text{CA}$ 和上止点后 25 $^\circ\text{CA}$ 声模态的共振频率进行修正,从表可以看出,该区间的温度从几百 K 到 1 000 K 以上,温度变化差距达到 1 000 K 左右,取平均温度对该区间燃烧室空腔声模态进行修正不能满足要求,因此需对应曲轴转角对燃烧室空腔声模态进行温度修正。

上止点前后曲轴旋转相同转角对应的空腔形状相同,但由于上止点前后燃气温度不同,因此需对空腔声模态的上止点前 15 $^\circ\text{CA}$ 和上止点后 25 $^\circ\text{CA}$ 分别进行温度修正。图 5a 为上止点前对应曲轴转角进行温度修正的模态计算和模态试验的燃烧室空腔其中几阶共振频率曲线,图 5b 为上止点后对应曲轴转角进行温度修正的模态计算和模态试验的燃烧室空腔共振频率曲线。

4 缸内压力与燃烧噪声的实测分析

图 1 所示为 20 kHz 采样频率采集 ZH1110 柴油机 1 600 r/min 时的缸内压力信号,并同时采集了内燃机的缸盖表面振动信号和噪声信号。对缸内压力信号进行频谱分析,取基准压力为 20 μPa ,缸内压力级频谱曲线如图 6 a 所示。

根据测量的发动机缸盖表面振动信号,设计时间窗把燃烧噪声信号从测量噪声信号中分离出来,

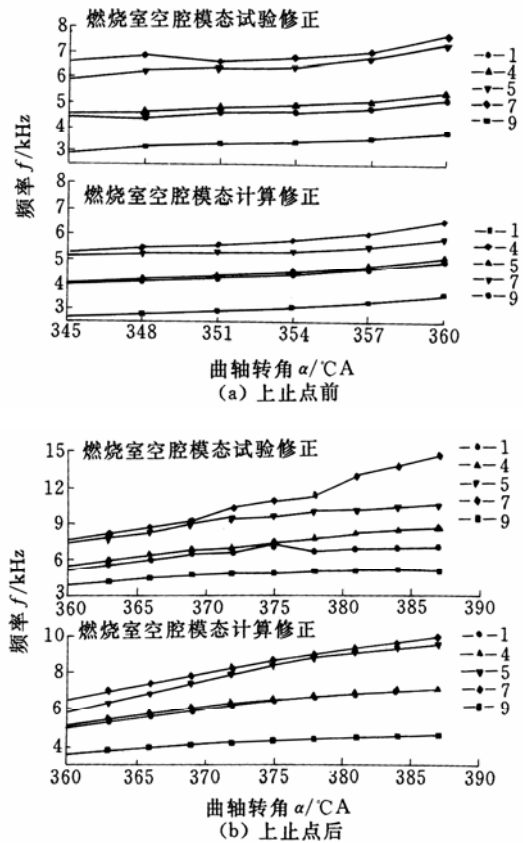


图 5 上止点前后实测和计算燃烧室声模态曲线的温度修正

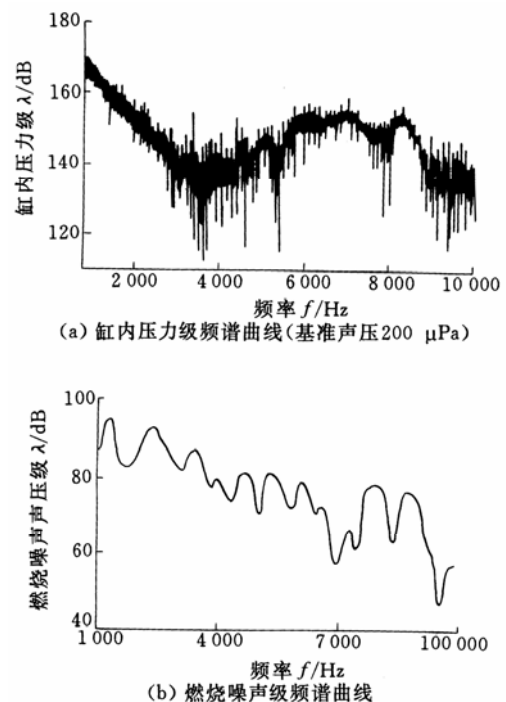


图 6 缸内压力级与燃烧噪声声压级频谱曲线

并进行频谱分析,分离出的燃烧噪声声压级曲线如图 6 b 所示。

从图 6 a 气缸压力高频成分压力级频谱曲线不难发现,缸内压力频谱曲线在频率 2 750 Hz、3 275 Hz、4 200 Hz、5 100 Hz、5 700 Hz、6 300 Hz、7 100

Hz、7 800 Hz、8 600 Hz、9 150 Hz 处有波动, 对照图 5 上止点前后修正的燃烧室空腔声模态曲线, 曲轴转角为上止点前 15 °CA 和上止点后 25 °CA 声模态对应的前几阶模态共振频率, 与气缸压力频谱曲线的波动频率较好地吻合, 说明了直喷式柴油机燃烧压力振荡是由燃烧室空腔的多阶共振频率受到激励引起燃烧压力共振的结果。

从图 6b 的燃烧噪声频谱可以看出, 上述分析的图 6a 缸内压力级频谱压力有波动的频率段, 燃烧噪声频谱曲线在该频率处也相应出现波动, 从而说明燃烧压力的高频振荡是影响燃烧噪声的重要因素。

5 结论

内燃机燃烧压力的高频振荡特性对燃烧噪声具有较大的影响。通过研究, 可以获得如下结论。

(1) 在研究方法上, 对燃烧室空腔进行了声模态计算, 并按照缸内温度的变化, 对声模态特性进行了温度修正, 计算结果与声响应法以及实际发动机正常工作时缸内压力的实测这两种方法进行了比较, 证明了理论计算声模态的正确性。为研究提供了一种新的手段。

(2) 研究结果表明, 实测缸内压力高频压力波动频率与燃烧室空腔声模态的共振频率吻合较好, 说明内燃机燃烧压力的高频波动特性是由于缸内压力在燃烧室空腔共鸣引起的。

参 考 文 献

- 1 Hicking R. Cavity resonances in engine combustion chambers and some applications. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1983, 73(4): 1 170~1 178
- 2 Yuji K. New measuring technique of cylinder pressure spectrum and its application to combustion noise reduction -time-frequency analysis of combustion excitation using wavelet transform analysis. *Technical Notes /JSAE Review*, 1998,19: 277~282
- 3 Pschinger F. Regularities of cylinder pressure oscillation and their effects on the combustion process and noise. *SAE Transaction* 872248: 1 041~1 049
- 4 彭玉华. 小波变换与工程应用. 北京: 科学出版社, 1999

- 5 胡昌华. 基于MATLAB的系统分析与设计——小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999
- 6 Newland D E. Wavelet analysis of vibration, part 1: theory. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1994, 116(10): 409~416
- 7 Newland D E. Wavelet analysis of vibration, part 2: wavelet maps. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1994, 116(10): 417~425

ANALYSIS OF HIGH-FREQUENCY PRESSURE OSCILLATION BY OBTAINING HIGH-FREQUENCY COMPONENT FROM COMBUSTION PRESSURE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Shu Gequn Wei Haiqiao

(State Key Laboratory Engines, Tianjin University, Tianjing 300072)

Abstract: The mechanism of the high-frequency pressure oscillation and its effect on combustion noise are studied. The appearance ranges of the high-frequency pressure oscillation are defined by the method of the wavelet analysis and the corresponding crankshaft angle ranges of the chamber cavity model also are obtained. The acoustic model of the chamber cavity with different crankshaft angle is tested by the acoustic response method and computed by the finite element technique. Both the results of the calculated and tested are modified by corresponding crankshaft angle temperature and they are practically equal. The combustion pressure and noise are studied by the test parameters. The results show that the high-frequency pressure oscillation is aroused by the combustion chamber's several ranks resonance. The high-frequency oscillation of combustion pressure is the important effect factor of the combustion noise.

Key words: Internal combustion engine Wavelet analysis
Combustion pressure
High-frequency pressure oscillation

作者简介: 舒歌群, 男, 1964 年出生, 教授, 博士生导师。主要研究方向为内燃机振动和噪声。

E-mail:shuyan@public.tpt.tj.cn