柴油机喷油系统压力波时频特性研究

何勇灵 闫志强

(北京航空航天大学 汽车工程系, 北京 100083)

摘 要: 在柴油机喷油系统压力波的研究中,采用 Wigner-Ville 分布算法,对液-汽两相流条件下的柴油机喷油系统压力波的时频特性进行了分析,并与采用小波函数分析得到的结果进行了对比. 研究结果表明,采用 Wigner-Ville 分布算法进行分析时,可以更好地显示出液-汽两相流条件下的柴油机喷油系统中压力波在时间和频率范围内的能量密度,能更清晰地反映出这种非稳态信号频率随时间变化的关系. 当喷油系统存在长时间存活汽泡时,压力波的能量密度主要集中在主波上,除了低频率的能量外,还包着相当一部分较高频率的能量. 而压力波次波则没有高频能量的出现. 当喷油系统存在短时间存活汽泡时,其压力主波对应的频率较低,但能量密度比较大,而其压力次波具有一定量的高频率能量.

关 键 词: 柴油机; 喷油系统; 压力波; 时频特性

中图分类号: TK 421^{+}.44

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0244-05

Time-frequency characteristics research for pressure waves of fuel injection system of diesel engine

He Yongling Yan Zhiqiang

(Dept. of Automobile Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In research of pressure wave of fuel injection system of diesel engine, with Wigner-Ville distribution, the time-frequency characteristics of pressure wave in fuel injection system of a diesel engine under condition of liquid-gas tow-phase flow was analyzed. The comparison of its results with the results of wavelet function analysis was made. The results show that using Wigner-Ville distribution the energy density of pressure wave of fuel injection system in time and frequency field can be better described and the change of frequency of this unstable signal with time can be better reflect. When long living time cavitation existed in fuel injection system, the energy density of pressure wave, which included some high frequency energy besides low frequency energy in this energy, concentrates mostly on the first pressure wave and there is not any high frequency energy in the second pressure wave. When short living time cavitation existed in fuel injection system, frequency of first pressure wave is low and the energy density is high. And there is some high frequency energy in the second pressure wave.

Key words: diesel engine; fuel injection system; pressure wave; time-frequency characteristics

对于由泵-管-嘴组成的柴油机喷油系统,其压力波信号是典型的非稳态信号. 通过傅里叶分析,能将信号的频谱特性描述出来,看清其频率成分. 然而,傅里叶分析也有其不足之处[1],他无法表述信号的时频局域性质,而这种性质恰恰是非稳态信号最根本和最关键的性质[2]. 小波分析则是一种窗口大小固定不变但其形状可改变,时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法.

收稿日期: 2004-12-02

基金项目: 凡舟基金资助项目(20031305)

作者简介: 何勇灵(1963-),男,广西藤县人,教授, xkbhe@buaa.edu.cn.

但是小波变换和窗口傅里叶变换由与信号相关的时频原子类来计算. 这样,这些变换的时频分辨率被相应的原子的时频分辨率所限制. 理想的方法是在时频平面上定义能量密度而不牺牲分辨率,Wigner-Ville 分布算法就是这样的时频能量密度分析法[3].

目前,小波分析法在柴油机喷油系统中压力波信号频谱特性分析[4,5]和内燃机气缸压力识别[6]等中有所应用,但对于 Wigner-Ville 分布算法分析,尚很少见有应用.

由于柴油机高压系统里存在气泡[7,8],气泡在高压系统内的溃灭会导致压力波产生高频振荡,所以在压力波的波形图上包含了不同频率结构的成份,通过 Wigner-Ville 分布算法分析,可以将压力波上的时频特性显示出来,可以看清压力波信号的时频能量密度,这对分析液-汽两相流状态下的柴油机喷油系统中压力波特性是十分有用的. 基于此想法,本文采用 Wigner-Ville 分布算法对液-汽两相流状态下的柴油机喷油系统中的压力波的时频特性进行了研究.

1　Wigner-Ville 分布

为了分析时频分布,1948 年,维尔(Ville)在信号处理中引进了二次型. 事实上,Wigner 在 1932 年的一篇关于量子热力学的文章中就对此二次型做了研究

$$P_{\mathrm{W}}f(u,\xi)=\int_{-\infty}^{+\infty}f\left(u+\frac{\tau}{2}\right)\cdot f^{*}\left(u-\frac{\tau}{2}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\tau\xi}\mathrm{d}\tau \tag{1}$$

Wigner-Ville 分布是实的,由于时间和频率的对等性,应用 Parseval 等式,该分布也可以写成频率积分

$$P_{\mathrm{W}}f(u,\xi)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\hat{f}\left(\xi+\frac{\gamma}{2}\right)\cdot\hat{f}^{*}\left(\xi-\frac{\gamma}{2}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\gamma u}\mathrm{d}\gamma \tag{2}$$

离散 Wigner-Ville 分布的计算

Wigner 积分是 $f(u+\tau/2)f^{*}(u-\tau/2)$ 的傅里叶变换

$$P_{\mathrm{W}}f(u,\xi)=\int_{-\infty}^{+\infty}f\left(u+\frac{\tau}{2}\right)\cdot f^{*}\left(u-\frac{\tau}{2}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\tau\xi}\mathrm{d}\tau \tag{3}$$

对于定义在 $0\leqslant n\leqslant N$ 的离散信号 $f[n]$,将积分用离散和代替

$$P_{\mathrm{W}}f[n,k]=\sum_{p=-N}^{N-1}f\left[n+\frac{p}{2}\right]\cdot f^{*}\left[n-\frac{p}{2}\right]\exp\left(\frac{-\mathrm{i}2\pi kp}{N}\right) \tag{4}$$

当 p 是奇数,上述计算要求知道 f 在半整点的值,这些值可以通过对 f 插值而得到. 必须避免将 Wigner-Ville 积分离散化时所产生的混叠.

f 的插值 $\tilde{f}$ 是一个长度为 $2N$ 的离散信号,其离散傅里叶变换 $\hat{\tilde{f}}$ 用 f 的离散傅里叶变换 $\hat{f}$ 定义

$$\hat{\tilde{f}}[k]=\begin{cases}2\hat{f}[k] & 0\leqslant k\leqslant N/2\\ 0 & N/2<k<3N/2\\ 2\hat{f}[k-N] & 3N/2<k<2N\\ \hat{f}[N/2] & k=N/2,3N/2\end{cases} \tag{5}$$

作傅里叶逆变换,可证:对 $n\in[0,N-1]$,均有 $\tilde{f}[2n]=f[n]$. 当 $n\notin[0,2N-1]$ 时,置 $\tilde{f}[n]=0$. Wigner 和式(4)由 f 计算:

$$P_{\mathrm{W}}f[n,k]=\sum_{p=-N}^{N-1}\tilde{f}[2n+p]\tilde{f}^{*}[2n-p]\cdot\exp\left(\frac{-\mathrm{i}2\pi kp}{N}\right)=\sum_{p=0}^{2N-1}\tilde{f}[2n+p-N]\cdot\tilde{f}^{*}[2n-p+N]\cdot\exp\left(\frac{-\mathrm{i}2\pi(2k)p}{2N}\right) \tag{6}$$

对于 $0\leqslant n<N$,$P_{\mathrm{W}}f[n,k]$ 是 $g[p]=\tilde{f}[2n+p-N]\tilde{f}^{*}[2n-p+N]$ 在频率 $2k$ 处长度为 $2N$ 的离散傅里叶变换. 这样,离散 Wigner-Ville 分布由长度为 $2N$ 的 N 个 FFT(快速傅里叶变换)计算,需 $O(N^{2}\log N)$ 次运算.

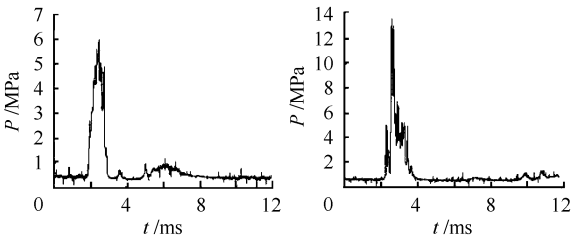
2　试验测试方法

试验是在油泵试验台架上或发动机台架上进行的. 通过安装在高压油管上泵端和嘴端的压力传感器,经电荷放大器或压力变送器放大后,即可获得不同工况及不同喷油系统参数条件下的泵端和嘴端压力波信号. 这些信号经 A/D 转换卡进行采样处理后转化为数字信号,送到计算机中,便于获得和储存相关的数据信息及绘制出各信号曲线和进行信号的分析处理.

3　试验结果分析

图 1 所示结果为在油泵试验台架上,当油泵凸轮轴转速为 600 r/min(相当于发动机转速为 1 200 r/min)、喷油量为 3.70 mL/100 次、喷油嘴开启压力为 4 MPa 时(为获得油泵出油阀紧帽腔处存在较多汽泡的两相流状态而调节的喷油嘴开启压力,油泵出油阀紧帽腔处有无可见汽泡的试验可通过调节喷油嘴开启压力的方法来获得)获

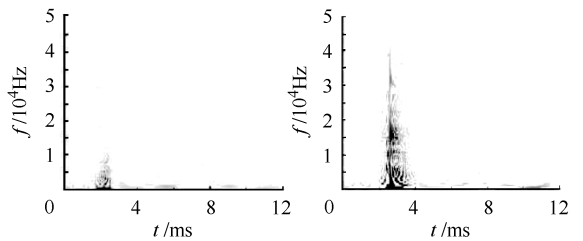
得的接近喷油泵处(以下称为泵端)和接近喷油嘴处(以下称为嘴端)的压力波信号. 此时,通过喷油系统汽泡的观测,发现在油泵出油阀紧帽腔处有长时间存活汽泡存在(关于长时间存活汽泡和下述的短时间存活汽泡的概念,限于篇幅的限制,在这里不再赘述,请参见文献[8]).



a 泵端压力波信号 b 嘴端压力波信号

图 1 长时间存活汽泡时的泵端、嘴端压力波信号

图 2 所示结果为此时对应的 Wigner-Ville 分布算法分析结果. 图 3 和图 4 所示结果为此时对应的泵端和嘴端压力波的 db3 小波分解结果(详细的分解方法请参见文献[4]和[5]),本文对泵端和嘴端的压力波信号进行了 5 层小波分解,分解各层的频带如表 1 所示. 图中 S 为原始信号,a_1、a_2、a_3、a_4 和 a_5 分别为各分解层的低频部分,d_1、d_2、d_3、d_4 和 d_5 分别为各分解层的高频部分.



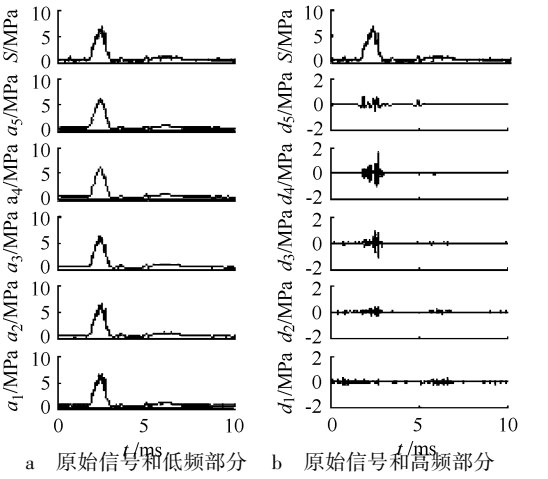
a 泵端分析结果 b 嘴端分析结果

图 2 长时间存活汽泡时的泵端、嘴端压力波信号 Wigner-Ville 分布算法分析结果

表 1 小波分解各层的频率范围

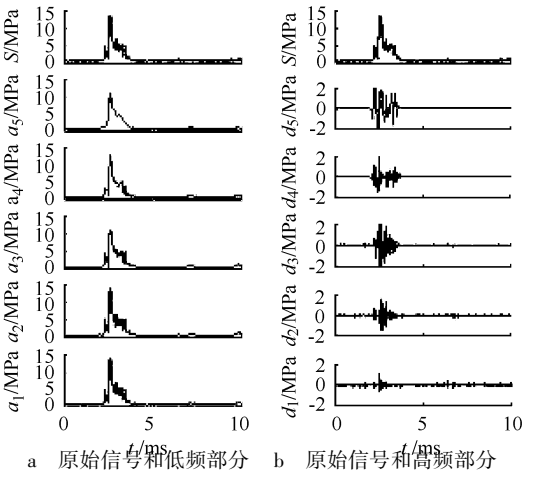
分解层	频率/kHz	分解层	频率/kHz
a_1	0 ~ 20. 75	d_1	20. 75 ~ 41. 5
a_2	0 ~ 10. 375	d_2	10. 375 ~ 20. 75
a_3	0 ~ 5. 188	d_3	5. 188 ~ 10. 375
a_4	0 ~ 2. 594	d_4	2. 594 ~ 5. 188
a_5	0 ~ 1. 297	d_5	1. 297 ~ 2. 594

图 5 所示结果为在油泵试验台架上,当油泵凸轮轴转速为 590 r/min(相当于发动机转速为 1 180 r/min)、喷油量为 5. 75 mL/100 次、喷油嘴开启压力为 14 MPa 时获得的泵端和嘴端的压力波信号. 此时,通过喷油系统汽泡的观测,发现在油泵出油阀紧帽腔处有短时间存活汽泡存在,是



a 原始信号和低频部分 b 原始信号和高频部分

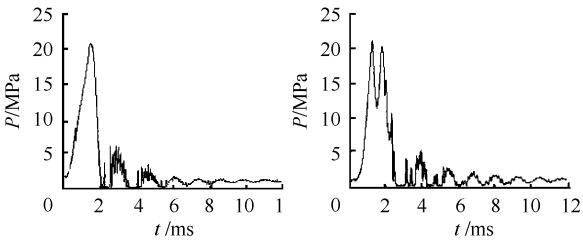
图 3 长时间存活汽泡时泵端压力波信号 db3 小波分解的分析结果



a 原始信号和低频部分 b 原始信号和高频部分

图 4 长时间存活汽泡时嘴端压力波信号 db3 小波分解的分析结果

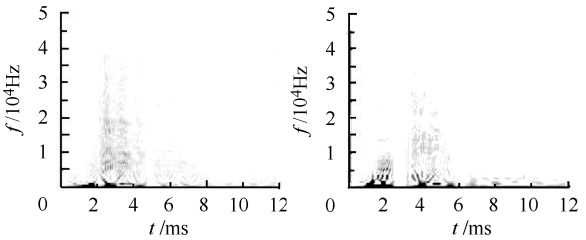
柴油机喷油系统中液-汽两相流的一种典型工况. 图 6 所示结果为此时对应的 Wigner-Ville 分布算法分析结果. 图 7 和图 8 所示结果为此时对应的泵端和嘴端压力波的 db3 小波分解结果.



a 泵端压力波信号 b 嘴端压力波信号

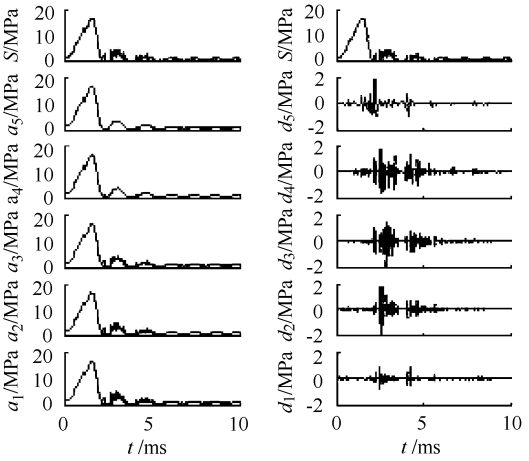
图 5 短时间存活汽泡时的泵端、嘴端压力波信号

从图 2 和图 6 中可以看到,在 Wigner-Ville 分布算法分析结果中,其横坐标为时间而纵坐标为频率,图中阴影部分表示能量密度,阴影部分越暗则表明该处的能量密度越大,即能量越高.



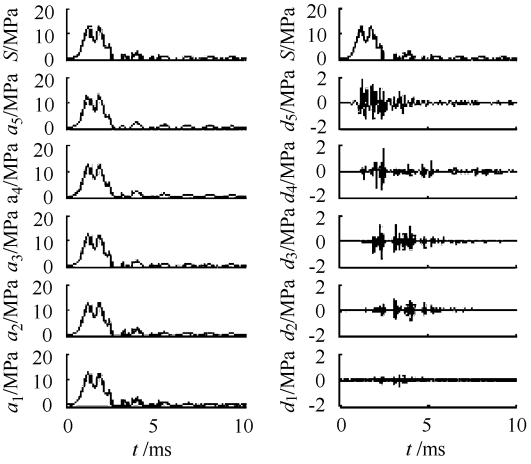
a　泵端分析结果　　b　嘴端分析结果

图 6　短时间存活汽泡时的泵端、嘴端压力波信号 Wigner-Ville 分布算法分析结果



a　原始信号和低频部分　　b　原始信号和高频部分

图 7　短时间存活汽泡时泵端压力波信号 db3 小波分解的分析结果图



a　原始信号和低频部分　　b　原始信号和高频部分

图 8　短时间存活汽泡时嘴端压力波信号 db3 小波分解的分析结果

另一方面,从图中还可以看出该能量所发生的时间和对应的具体频率. 在这一点上,是小波分解所不具有的,因为在小波分解结果中(图 3、图 4、图 7 和图 8),其横坐标为时间,而纵坐标则仍是幅值,它只表示在某一频带范围中,其频率幅值随时间的变化关系,而不能象 Wigner-Ville 分布算法分析的那样,能反映出某一时刻的具体频率值.

从图 1 可以看到,当油泵出油阀紧帽腔处存在长时间存活汽泡时,在泵端压力波和嘴端压力波信号中,其主波出现明显的振荡现象,而次波则很小(嘴端压力波则不存在明显的次波),且几乎没有振荡现象的出现. 从 Wigner-Ville 分布算法的分析结果来看(图 2),对应的泵端和嘴端压力波能量密度主要集中在主波上,且除了较低频率的能量外,还包着相当一部分较高频率的能量,尤其是嘴端压力波主波,高频频率高达 40 kHz 以上,说明此时喷油系统有压力的突变出现,表明此时在喷油系统中有汽泡(上一循环产生的)溃灭现象出现,从而造成高频能量的出现. 而在主波以后的时间里,则没有高频能量出现,说明此时喷油系统中没有汽泡溃灭. 这说明了喷油系统中长时间存活汽泡的存在.

从图 5 可以看到,当油泵出油阀紧帽腔处存在短时间存活汽泡时,在泵端压力波信号(图 5a)中,主波信号曲线十分光滑,没有振荡成份出现,而次波则出现明显的振荡现象. 嘴端压力波也与泵端压力波信号类似(图 5b),只是主波信号曲线不象泵端的那么光滑. 从 Wigner-Ville 分布算法的分析结果来看,对于泵端压力波信号(图 6a),对应于压力波主波,能量密度比较大,但所对应的频率较低(从图 6a 中可以看出,主波的频率大都在低于 5 kHz 之内),说明此时喷油系统没有压力的突变出现;而对应于压力波次波,存在着一些阴影部分,且频率相对较高,最高频率高达 35 kHz 以上,频率范围也相对较广(从图 6a 中可以看出,次波频率在 0 ~ 35 kHz 之间变化,高频段也从 5 ~ 35 kHz之间变化),说明此时次波具有一定量的高频能量,即说明此时喷油系统出现压力的突变现象,这正说明了喷油系统中的汽泡在次波时刻破灭,因此造成高频能量的出现. 对于嘴端压力波信号(图 6b),也出现了类似的情况,主波频率相对较低,次波频率相对较高,最高频率也高达 35 kHz 以上,同样说明在嘴端压力次波时刻也有汽泡溃灭,所以在次波上有高频能量的出现. 在此工况下,泵端和嘴端压力波的这种频率和能量变化特性与实验观测到的汽泡溃灭现象是一致的.

综合以上分析,可以看到,利用 Wigner -Ville 分布算法对液-汽两相流状态下的柴油机喷油系

统中的压力波的时频特性进行分析是非常有用的,也是十分有效的,它可以更加精确和直观地在整个时频域内表示出喷油系统中压力波信号的时频特性和能量密度,在这一点上是小波分解所无法比拟的.

4 结 论

1) 利用 Wigner-Ville 分布算法对柴油机喷油系统压力波信号进行时频分析时,可以清楚地表示出压力波信号时间、频率和能量密度的关系,这是傅立叶变换和小波分析所不具备的.

2) 当喷油系统存在长时间存活汽泡时,压力波的能量密度主要集中在主波上,除了低频率的能量外,还包着相当一部分较高频率的能量. 而压力波次波则没有高频能量的出现.

3) 当喷油系统存在短时间存活汽泡时,其压力主波对应的频率较低,但能量密度比较大,而其压力次波具有一定量的高频率能量.

参考文献 (**References**)

[1] 陈桂明,张明照,戚红雨. 应用 MATABLE 语言处理数字信号与数据图像[M]. 北京:科学出版社,2000
Chen Guiming, Zhang Mingzhao, Qi Hongyu. Deal with digital signal and image by matable language [M]. Beiing: Science Press, 2000(in Chinese)

[2] 胡昌华. 基于 MATLAB 的系统分析与设计:小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999
Hu Changhua. System analysis and design base on MATLAB: wavelet analysis [M]. Xi´an: Xidian University Press, 1999(in Chinese)

[3] Stephane Mallat(法)著. 信号处理的小波导引[M]. 北京: 机械工业出版社,2002
Stephane Mallat (France). Wavelet guide of deal with signal [M]. Beijing: China Machine Press, 2002(in Chinese)

[4] He Yongling, Yan Long, Zong Yongping, *et al*. A wavelet analysis on frequency characteristics of pressure wave of fuel injection system of diesel engine[A]. In: 2nd International Symposium on Instrumentation Science and Technology[C]. Harbin: The Press In Harbin Institute of Technology, 2002. 3-881 ~ 3-886

[5] 何勇灵,颜 龙,宗永平,等. 基于柴油机喷油系统压力波信号的小波函数优化分析[J]. 内燃机工程, 2003,24(1):13 ~ 17
He Yongling, Yan Long, Zong Yongping, *et al*. An optimum analysis of wavelet functions based on signal of pressure wave of diesel fuel injection system[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2003,24(1):13 ~ 17(in Chinese).

[6] 张振仁,石林锁,王成栋,等. 基于小波分析和时域分析的柴油机气缸压力识别[J]. 内燃机学报,1999,17(2):181 ~ 186
Zhang Zhenren, Shi Linsuo, Wang Chengdong, *et al*. Identification of diesel cylinder pressure base on wavelet analysis and time series analysis[J]. Transaction of Chinese Society for Internal Combustion Engine, 1999,17(2): 181 ~ 186(in Chinese)

[7] 何勇灵,刘建新,李 民,等. 农用柴油机喷油系统中液--汽两相流动过程的试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(1):31 ~ 34
He Yongling, Liu Jianxin, Li Min, *et al*. An experiment investigation on process of two-phase flow in fuel injection system of agricultural diesel engine[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000,16(1):31 ~ 34(in Chinese)

[8] 何勇灵,刘建新,赵致和,等. 一种研究柴油机喷油系统中汽泡的新方法[J]. 内燃机学报,2000,18(3): 254 ~ 257
He Yongling, Liu Jianxin, Zhao Zhihe, *et al*. A new method for study cavitation in fuel injection system of diesel engine[J]. Transaction of Chinese Society for Internal Combustion Engine, 2000, 18(3): 254 ~ 257(in Chinese)