

基于小波分析的发动机气缸失火故障诊断

蒋爱华, 李小昱*, 王 为, 张 军

(华中农业大学工程技术学院, 武汉 430070)

摘 要: 发动机加速过程中失火是常见故障, 运用了发动机主轴瞬时转速进行失火故障的诊断。采用磁电式传感器测定了发动机在正常与故障的 4 种工况下从怠速急加速到高速过程中的瞬时转速, 并用 db3 阶小波对各工况下转速信号进行分解与重构, 以重构波形分析对比了各工况下的转速波动状态与加速过程的信息, 从而判断发动机是否失火以及失火故障类型。结果表明, 发动机失火时, 瞬时转速的重构信号与正常工况转速重构信号相比, 波动幅值、怠速段和高速段的稳定转速、加速时间有显著差异, 这种失火故障的诊断方法是可行的和有效的。

关键词: 发动机; 瞬时转速; 失火故障诊断; 小波分析

中图分类号: O177.7; TK418

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)4-0153-05

蒋爱华, 李小昱, 王 为, 等. 基于小波分析的发动机气缸失火故障诊断[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 153- 157.

Jiang Aihua, Li Xiaoyu, Wang Wei, et al. Misfire failure diagnosis of engine based on wavelet analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 153- 157. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

随着近年来排放法规的日益严格, 发动机气缸失火故障的诊断显得越来越重要。目前, 对发动机失火故障的诊断方法较多^[1-4], 其中应用较广的有: ①离子电流法, 即以火花塞为传感器, 根据气缸爆发时引起的火花塞电极之间离子电流变化确定失火气缸^[5]; ②点火电压波形法, 即根据发动机燃烧状况与配电系统故障引起的火花塞放电电压波形不同确定失火故障^[6,7]; ③缸内压力法, 即通过测量发动机气缸缸内压力值计算平均指示压力, 将此值与正常燃烧时的压力值作比较, 以确定气缸燃烧状况^[8]; ④ EGO 传感器法, 即通过氧气传感器测量各缸氧气含量, 以确定气缸燃烧状况^[9]; ⑤曲轴角速度波动法, 即建立内燃机线性或非线性动力学模型, 根据瞬时转速波动信号识别气缸燃烧状况^[10-12]。其中, 前两种方法只适用于汽油机, 与第三、四种方法比较, 运用发动机曲轴的瞬时转速对失火故障进行诊断, 具有方法简便、对气缸工作过程无任何影响的优点。诊断时只需要非接触地测量出发动机的转速信号就可以进行诊断, 因此这种方法得到广泛的研究与应用^[13,14]。

但运用曲轴瞬时转速诊断失火故障的研究尚不深入, 目前的研究主要集中于发动机在某一固定时速下或者某一爆发循环内的故障诊断^[15,16], 对加速过程失火故障的研究还相对较少。而加速过程是发动机必不可少的运行过程, 该过程中发动机失火是常见的故障, 其加速过程是一个非稳定的过程^[17], 在该过程中的失火故障信息表现比较明显, 故有必要对发动加速过程中失火故障的诊断作进一步的研究。

发动机曲轴的瞬时转速信号包含了大量的干扰信号, 从中提取发动机的内部状态信息较为困难^[18]。而小波变换是一种能够对信号进行多尺度分解的信号处理方法, 从多尺度分解的结果中, 能够消除信号中的噪声并提取出需要的弱信号^[19,20], 故把小波变换运用于发动机曲轴瞬时转速的分析, 对发动机失火故障的诊断有重要的科学意义与实用价值。

1 小波变换的基本原理

1.1 连续小波变换

当函数空间 $L^2(R)$ 中有一个函数 $\Psi(x)$ 满足:

$$C_{\Psi} = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称函数 $\Psi(x)$ 称为小波母函数。对于任意的实数对 (a, b) , 其中, 参数 a 必须为非零实数, 则

$$\Psi_{(a,b)}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi \left[\frac{x-b}{a} \right] \quad (2)$$

式中 a 为尺度因子; 参数 b 为平移因子。对于任意的函数或者信号 $f(x)$, 其连续小波变换定义为

收稿日期: 2006-04-19 修订日期: 2006-11-20

基金项目: 华中农业大学科研专项

作者简介: 蒋爱华(1980-), 男, 四川达州人, 主要从事智能化检测与控制技术方面的研究。武汉 华中农业大学工程技术学院, 430070

*通讯作者: 李小昱, 教授, 博士生导师, 主要从事智能化检测与控制技术方面的研究。武汉 华中农业大学工程技术学院, 430070。

Email: lixiaoyu@mail.hzau.edu.cn

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\Psi\left[\frac{x-b}{a}\right]} dx \quad (3)$$

式中 $\overline{\Psi\left[\frac{x-b}{a}\right]}$ 为 $\Psi\left[\frac{x-b}{a}\right]$ 的傅立叶变换。

1.2 离散小波变换

虽然从提取特征的角度看,常常还需要采用连续小波变换,但是在每个可能的尺度离散点都计算小波系数,将会产生大量数据。如果只取这些尺度的小部分,以及部分时间点,将会大大减轻工作量,同时并不失准确性。所以工程运用中,常将连续小波离散化。式(3)中 a 进行二进离散 $a_k = 2^{-k}$, b 进行二进离散 $b_k = 2^{-k}j$, 则函数 $f(x)$ 的二进离散小波变换则记为:

$$W_f^k(x, j) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\Psi(2^{-k}, 2^{-k}j)}(x) dx \quad (4)$$

常用的小波函数有 Daubechies、Morlet、B 样条小波等,其中,由于 Daubechies 小波具有对称、连续、紧支、正交等特性,应用广泛^[21, 22]。

2 曲轴瞬时转速信号的采集

试验中以浙江新柴动力有限公司的 490BPG 型发动机为研究对象,对发动机的曲轴瞬时转速进行无拆卸检测。曲轴瞬时转速信号由主动皮带轮上安装的齿盘测量,齿盘共 15 个齿,发动机每转过 24°采样一次。所采用的传感器为 DRCD-12-A 磁电式传感器,输出为正弦交流信号,专门的调理电路将该信号转化为 0~5 V 的

TTL/CMOS 电平,并运用 LabVIEW 建立的数据采集系统对瞬时转速进行采集。490BPG 发动机爆发顺序为 1-3-4-2,设计了单缸失火、双缸连续失火和双缸间隔失火三种故障类型,并进行瞬时转速信号的采集。以第 1 缸上止点为起始测点,测量发动机 100s 内的瞬时转速。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

测得发动机在正常运行、单缸失火、双缸连续失火和双缸间隔失火 4 种工况下,从怠速急加速到高速的瞬时转速信号,结果如图 1a、1b、1c、1d 所示。

3.2 瞬时转速信号的小波分析

从图 1 中可以看出:①发动机怠速运行时,单缸失火、双缸失火的瞬时转速与正常工况相比有一定波动,但波动不是十分明显,且波动中还夹杂着噪声信号;单缸失火与双缸失火相比,波动信号较为相似而无法从中看出差别。②发动机急加速过程中,双缸失火时加速过程明显变长,但 3 种工况下瞬时转速的波动信号差别较小。③发动机高速运行时,3 种工况下的瞬时转速基本完全一致。

试验表明,运用 Daubechies3 阶小波对各种工况下的瞬时转速进行进行 7 阶分解时,可以较为清晰的分辨出 4 种工况下瞬时转速的波动情况。分解结果如图 2a、2b、2c、2d 所示。

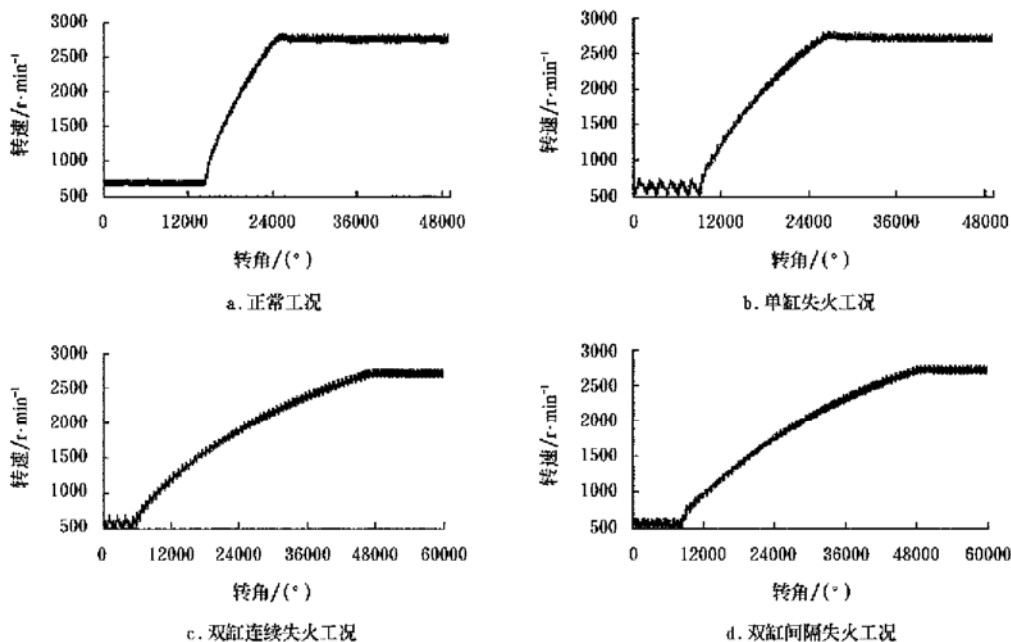


图 1 四种工况下瞬时转速信号

Fig. 1 Instantaneous rotating speed signals of four working conditions

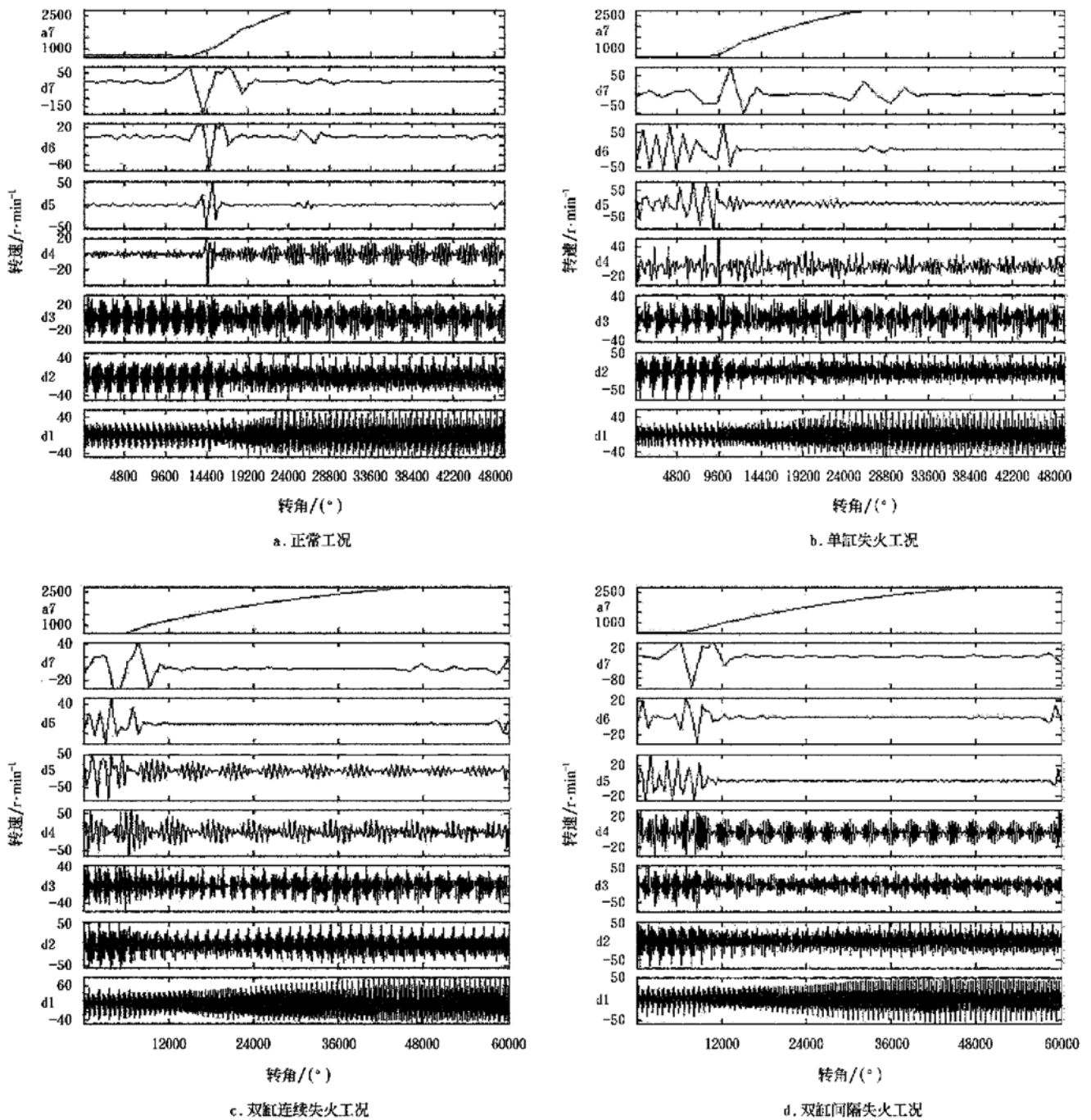


图 2 四种工况瞬时转速信号小波分解

Fig. 2 Wavelet decomposition of instantaneous rotating speed signals under four working conditions

图 2 中 a7 为第 7 阶小波分解后的平滑部分, d1~d7 为第 1 阶至第 7 阶分解的细节部分。比较 4 种工况下的分解结果可知, d1、d2、d3 频带是发动机瞬时转速高频波动信号, d4、d5、d6、d7、a7 显示的是频率较低信号的波形, 从 d4、d5、d6、d7 中的可以看出, 单缸失火与双缸失火工况下怠速运行部分转速有明显的波动, 这与原始信号显示结果相符。而在加速段和高速段, 单缸失火与双缸失火工况中的 d4、d5 波形相对于正常工况也

有明显的波动, 而双缸失火工况中的 d6、d7 波形与正常工况、单缸失火工况相比也有较为明显的波动, 这是发动机转速波动信号的能量分解到了 d4、d5、d6、d7 四个频带内。

根据以上分析, 为了更好地对比 4 种工况下发动机瞬时转速的波动情况, 则对以上各种工况中的 d4、d5、d6、d7、a7 进行重构, 将单缸失火工况与正常工况的重构信号显示于同一图形中, 结果如图 3a 所示。从图 3a

中可知,单缸失火工况与正常工况相比,怠速段有很明显的波动,加速段所用的时间更长,加速性能明显降低,加速过程也有较为明显的波动,高速段波动幅度相对于怠速段与加速段有所减小,但波动情况也较为明显,且怠速段与高速段转速都有所降低。

将双缸连续失火、双缸间隔失火工况与正常工况的重构信号显示于同一图形中,结果如图3b、3c所示。从图3中可以看出,双缸失火工况与正常工况相比,整个运行过程中转速都有很明显的波动,加速段所用的时间

更长,怠速段与高速段转速也都有所降低。而对比两缸连续失火与两缸间隔失火工况的重构信号可知,两缸连续失火工况的波动幅值更大。

将双缸连续失火、双缸间隔失火工况重构信号与单缸失火的重构信号显示于同一图形中,结果如图3d、e所示。从图3中可以看出,双缸失火与单缸失火工况相比,怠速段转速更低,高速段转速基本相同。双缸连续失火转速的波动幅值比单缸失火更大,而双缸间隔失火转速的波动幅值与单缸失火相比却更小。

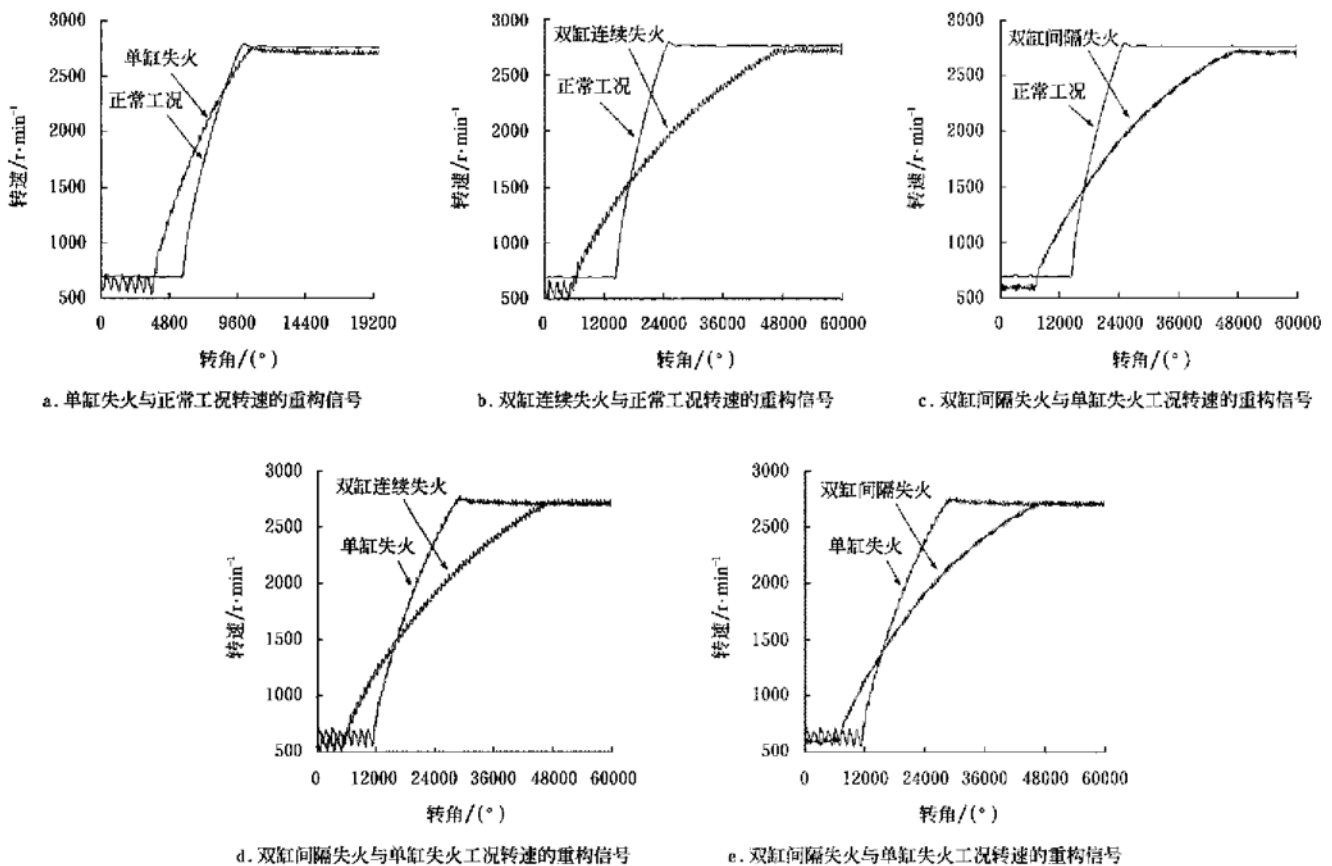


图3 不同工况下转速小波重构信号对比

Fig. 3 Comparison of wavelet reconstruction of rotation speed signals under different working conditions

4 结论

从以上各种工况下瞬时转速小波分解与重构信号的比较分析中,可以得到如下结论:

1) 小波变换的多尺度分解与信号重构可以从发动机曲轴瞬时转速信号中分离出瞬时转速的波动情况,以判断发动机的失火故障。试验结果表明,基于小波分析的方法是诊断发动机失火故障的有效方法。

2) 发动机单缸失火时,从怠速急加速到高速所用的时间增大,且加速过程中瞬时转速波动明显。双缸失火时,所用的加速时间较单缸失火时更长,转速波动幅

值更大,且双缸连续失火时瞬时转速的波动幅值大于双缸间隔失火时瞬时转速的波动幅值。

3) 根据以上结论,可建立加速过程中瞬时转速波动幅值、加速时间的特征值,以更为准确地判断失火故障。

[参考文献]

- [1] 倪振利. 发动机故障诊断系统应用简介[J]. 工程机械, 2005, (2): 54-55.
- [2] Werner Herden. A new combustion pressure sensor for advanced engine management[R]. SAE paper 940479.
- [3] Yuichi Shimasaki. Spark plug voltage analysis for moni-

- toring combustion in an internal combustion engine[R]. SAE paper 930461.
- [4] 张振东, 王伯年, 韩百顺, 等. 汽车发动机失火检测与评价方法[J]. 内燃机, 1999, (6): 12- 15.
- [5] 汪映, 吴筱敏, 关勇. 一种新型发动机失火监测方法的探讨[J]. 内燃机学报, 2002, (1): 46- 48.
- [6] 于明进, 孟祥录, 王福跃. 点火线圈配电发动机失火故障的诊断[J]. 汽车电器, 2003, (5): 39- 41.
- [7] 王福跃, 耿庆亨, 于明进. 二极管配电发动机失火故障的诊断[J]. 山东交通学院学报, 2003, (1): 9- 13.
- [8] Werner Herden, et al. A new combustion pressure sensor for advanced engine management[R]. SAE paper 940479.
- [9] John W. Bozek, et al. Operating characteristics of zirconia galvanic cells(Lambda Sensors) in automotive closed loop emission control systems[R]. SAE paper 920289.
- [10] 刘世元, 杜润生, 杨叔子. 利用转速波动信号在线识别内燃机气缸压力的研究(1)[J]. 内燃机工程, 2000(3): 395- 398.
- [11] 刘世元, 杜润生, 杨叔子. 利用神经网络诊断内燃机失火故障的研究[J]. 内燃机学报, 1999, (1): 67- 70.
- [12] Citron S J, O'Higgins J E, Chen L Y. Cylinder by cylinder engine pressure and pressure torque waveform determination utilizing speed fluctuations [R]. SAE Paper 890486.
- [13] 李春庚, 王波, 王百锁, 等. 基于小波分析的发动机气缸故障诊断的研究[J]. 大连海事大学学报, 2002, (2): 72- 74.
- [14] Mauer G F. Combustion engine performance diagnostics by kinetic Energy measurement[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1990(112): 301- 307.
- [15] 刘世元, 杜润生, 杨叔子. 利用转速波动信号诊断内燃机失火故障的研究(2)[J]. 内燃机学报, 2000, (3): 320- 323.
- [16] 程勇, 曲延涛, 吴波, 等. 用瞬时转速法估算压缩压力的探讨[J]. 农业机械学报, 1999, (2): 27- 32.
- [17] 黄家骅, 冯国泰, 牛军, 等. 涡轮效率改变对发动机加速特性的影响[J]. 推进技术, 2003, (4): 368- 372.
- [18] 程勇, 吴波, 张立梅, 等. 车用内燃机快速检测与诊断系统中瞬时转速滤波方法的探讨[J]. 内燃机学报, 2001, (4): 342- 344.
- [19] 李水银, 吴纪桃. 分形与小波[M]. 北京: 科学出版社, 2002, (10).
- [20] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005, (3).
- [21] Daubechies I. The wavelets transform. time frequency localization and signal analysis[J]. The Trans on Inform, 1990, 36(5).
- [22] 汪新凡. 小波基选择及其优化[J]. 株洲工业学报, 2003, (5): 33- 35.

Misfire failure diagnosis of engine based on wavelet analysis

Jiang Aihua, Li Xiaoyu^{*}, Wang Wei, Zhang Jun

(College of Engineering and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Engine misfire failure when acceleration is a frequent failure. Misfire failure was diagnosed from engine principal shaft instantaneous speed. The instantaneous speeds in rapidly accelerating process from idle speed to high speed, at which the engine runs under the four formal and fault working conditions, were measured with magnetoelectric sensor. After decomposing and reconstructing the speed signals with db3 wavelet, and then comparing the information in all the four conditions so as to judge whether the engine was misfiring or not and what types of the misfire would be. The results show that, the wave amplitude, the stable idle speed, the stable high speed and accelerating time of misfire condition are distinctly different from those in normal condition. Therefore this kind of misfire diagnosis method is feasible and effective.

Key words: engine; instantaneous speed; misfire failure diagnosis; wavelet analysis