

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.04.002

## 基于提升小波包变换集成特征提取模型

梁淑宝, 张培林, 曹建军  
(军械工程学院 火炮工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘要:** 为了从发动机缸盖振动信号中快速提取出反应完备状态信息的特征, 针对信号特点和提升小波包变换的性质, 建立了适于在线提取的缸盖振动信号特征参数体系。总结了提升小波包变换的 3 个性质——不相关性、可逆性和保序性, 利用 3 个性质将降噪、特征提取和消除波动集成到一次提升小波包分解与重构过程, 建立了发动机缸盖振动信号集成特征提取模型, 给出了集成消除波动的特征计算公式和特征值标准化公式。通过实例, 对集成特征提取模型的工作过程进行了说明。

**关键词:** 提升小波包变换; 缸盖振动信号; 集成; 特征提取; 降噪; 故障诊断

**中图分类号:** N945.12 **文献标识码:** A

## An Integration Feature Extraction Model Based on Lifting Wavelet Package Transform

LIANG Shu-bao, ZHANG Pei-lin, CAO Jian-jun  
(Dept. of Artillery Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to extract self-contained features which can reflect state information roundly from engine cylinder head vibration signals, a feature parameter system adapting to extract online is built. Characteristics of signals and qualities of lifting wavelet package transform are taken into account in the feature parameter system. Three qualities of lifting wavelet package transform, including irrelevance, reversibility and changeless sequence are concluded. De-noising, feature extraction and eliminating fluctuation are integrated in one decomposition and reconstruction process of lifting wavelet package. The integrated feature extraction model for engine cylinder head vibration signal is built. The calculation formula integrated eliminating fluctuation and standardization formula for feature value are given. The work process of the integrated feature extraction model is illustrated with an example.

**Keywords:** Lifting wavelet transform; Cylinder head vibration signal; Integration; Feature extraction; De-noising; Fault diagnosis

### 0 引言

小波包变换具有优异的时—频分辨率, 是缸盖振动信号特征提取的有效工具<sup>[1-3]</sup>。提升小波变换不但继承了小波多分辨率特性, 还具有运算速度快、占有空间少优点, 更适合复杂信号的在线处理<sup>[4-5]</sup>。

文献[6]给出了插补细分提升小波包变换算法及其移频算法, 并用其成功提取了标准化特征向量, 引入了同时处理多个完整工作循环数据、特征计算的同时进行消除波动的思想; 文献[7]研究了基于蚁群算法的缸盖振动信号特征选择问题, 实现了从通过提升小包变换提取的多个特征中选取最有利于分类的特征子集; 文献[8]引入了空间效率更高的先序分解后序搜索提升小波包最优基分解算法, 并将其成功应用于缸盖振动信号降噪。故针对发动机缸盖振动信号的特点和小波变换的性质, 建立适于在线提取的缸盖振动信号特征参数体系, 进而建立集成特征提取模型, 将消除低频干扰、全频带内降噪、

特征提取和消除波动集成到一个提升小波包分解与重构过程, 提供了一个包含状态信息完备、运算效率高的发动机缸盖振动信号特征提取新方法。

### 1 缸盖振动信号特征参数体系

选取便于在线实现的幅域统计参数作为基本特征参数, 无量纲统计特征参数: 均值、平均幅值、方根幅值、标准差、有效值和峰—峰值; 无量纲统计特征参数: 波形指标、脉冲指标、峰值指标、偏斜度、峭度和峪度指标, 及 4 个<sup>[6]</sup>标准化相对能量。

根据 12150L 型柴油机缸盖振动信号时频局部特性<sup>[4]</sup>, 结合提升小波包变换建立缸盖振动信号特征参数体系如下:

- 1) 原时域信号的 12 个统计特征参数;
- 2) 将信号进行两层提升小波包分解, 使燃爆段激励响应集中于(2,1)节点(第 2 频带), 进、排气门落座段激励响应集中于(2,2)、(2,3)节点。各节点系数的 12 个特征参数, 及 2 个频带的标准化相对能量;

收稿日期: 2009-10-09; 修回日期: 2009-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50705097)

作者简介: 梁淑宝(1971-), 男, 山东人, 中国人民解放军军械工程学院在读博士, 从事数据处理与信息融合的研究。

3) 单支重构信号为单个频带内的时域信号, 携带的是相应频带内信号的时域特征, 对各节点进行单支重构, 4个单支重构信号各12个统计特征参数。

将原时域信号的12个统计特征参数(1~12), 小波包分解的第2层4个节点系数的各12个特征参数(13~60), 4个单支重构信号的各12个统计特征参数(61~108), 及4个标准化相对能量(109~112), 共112个特征参数, 依次编号命名, 构造特征集  $S = \{t | t=1, 2, \dots, 112\}$ 。S集中特征1~12依所列顺序为原信号的12个统计特征。由S集的构造过程, S中包含从不同角度反应设备状态较完备的特征信息。

## 2 提升小波包变换的3个性质

由小波包的定义<sup>[1-3]</sup>和提升小波包变换算法<sup>[6,8]</sup>, 不难归纳出提升小波包变换的3个性质:

1) 不相关性: 小波包树中任一节点(系数)只和其子节点、直系祖先节点相关, 而和其它节点不相关, 即当一个节点系数改变, 不会影响其直系祖先节点的兄弟节点和这些兄弟节点的子节点。该性质是小波变换去相关性在小波包树中的具体表现。

2) 可逆性: 小波包树中任一节点, 进行任意层分解, 或参与对直系祖先的重构, 只要中间过程不改变与其相关的节点, 则该节点系数可通过祖先节点或子节点重构。该性质可看作小波重构性的推广。

由性质1)和2), 可将滤除低频干扰、全频带阈值降噪、特征提取三者集成到一次提升小波包变换。

3) 保序性: 小波包树中任一节点系数, 不改变原信号时域内的顺序。若取L个工作循环数据进行提升小波包变换, 则第m(m=1, 2, ..., L)个工作循环数据在(j, n)节点的小波包分解系数为:

$$d_n^j[k], k = (m-1) \times \frac{2^{M-j}}{L} + 1, (m-1) \times \frac{2^{M-j}}{L} + 2, \dots, m \times \frac{2^{M-j}}{L} \quad (1)$$

性质3)是Mallat算法小波包变换不具备的, 因Mallat算法通过滤波器实现、在时域进行的是卷积运算, 节点每个系数和其父节点的每个系数均相关。利用性质3), 可将消除波动集成至特征计算过程。

## 3 提升小波包变换的集成特征提取模型

### 3.1 缸盖振动信号的低频干扰及滤除

文献[8]给出了基于提升小波包变换的缸盖振动信号的全频带内阈值降噪方法。事实上, 发动机缸盖振动信号有用信息集中在中高频段, 主要对应

燃爆、进排气流对气门的冲击等内部激励, 而由市电工频、路面起伏引起的机体振动等低频成份, 亦应作为干扰滤除, 一般认为这些成份在发动机工作频率以下, 故选择发动机工作频率为滤除低频的上限频率。等空间采样频率为:

$$f_s = \frac{nK}{120} \quad (2)$$

式(2)中, n为发动机转速, K为每工作循环采样点数。发动机各类冲程正常工作频率为:

$$f_0 = \frac{n}{60} \times \frac{G}{C/2} \quad (3)$$

式(3)中, G为气缸数, C为冲程数。

由式(2)、式(3)可得 $f_0$ 与 $f_s$ 之间的关系:

$$f_0 = \frac{4G}{KC} f_s \quad (4)$$

对12150L型发动机, 1000 m/r, 每工作循环采样512点时, 由式(4)可得:

$$f_0 = \frac{4 \times 12}{512 \times 4} f_s = \frac{3}{64} \times \left(\frac{1}{2} f_s\right) < \frac{1}{16} \times \left(\frac{1}{2} f_s\right) \quad (5)$$

因此, 工作频率低于分析频率的1/16, 将小波包分解树中第4层最左节点系数置零, 重构后便可将工作频率以下干扰滤除。

### 3.2 集成特征提取模型

依提升小波包的性质, 建立集成特征提取模型:

1) 选取连续多个完整工作循环数据同时处理: 缸盖振动信号的循环波动是特征提取中不可忽略的因素, 选取多个工作循环数据同时处理, 目的是将参数平均集成到特征提取过程, 具体算法见3.3。

2) 提升小波包最优基分解和低频干扰的滤除: 按先序分解后序搜索算法对数据最优基分解, 当分解至(4,0)时, 将此节点系数置零(根据“零”熵最优, 此不必继续分解), 转到(4,1)继续运算, 直到完成最优基搜索, 注意在搜索中, 当需删除(4,0)节点的直系祖先节点的孩子节点时, 应先从最左叶子节点开始对该祖先节点系数完全提升小波包重构<sup>[8]</sup>。

3) 阈值降噪: 用文献[8]的渐变式阈值选择算法, 对各节点系数进行硬阈值量化。

4) 小波包结构调整: 利用阈值量化后的叶子节点系数, 通过分解或重构, 将小波包树调整成2层满二叉树, 计算特征13~60, 109~112。

5) 分别利用第2层各节点进行单支重构, 计算特征61~108。

6) 利用第2层节点对原信号重构, 计算特征1~12。

集成特征提取模型的操作流程如图 1。

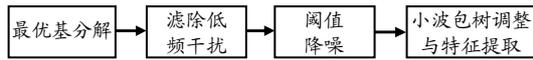


图 1 集成特征提取模型操作流程

如图 1，集成特征提取模型以一次最优基提升小波包分解与重构过程为主线，而将滤除低频干扰、全频带内降噪、特征提取和消除波动集成进过程完成。没有多余分解与重构，将滤除低频干扰与最优基分解合并，将降噪提升小波包分解与特征提取提升小波包分解合并，特征提取与消除波动同时进行。

### 3.3 集成消除波动的特征值计算

根据性质3)，统计特征参数按如下步骤计算：

以  $(j, n)$  节点系数  $d_n^j[k], j = 0, 2, n = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1, k = 1, 2, \dots, 2^{M-j}$  为例，单支重构系数的特征提取相同。

1) 均值、平均幅值、方根幅值、标准差、有效值，直接由  $d_n^j[k]$  计算，并将计算结果直接用于其它指标的计算。

2) 以峰值指标为例，计算公式为：

$$C_x = \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L \frac{\max_{k=(m-1)(2^{M-j}/L)+1}^{m(2^{M-j}/L)} \{d_n^j[k]\}}{X_{ev}} \quad (6)$$

式 (6)  $X_{ev}$  为有效值，由式 (7) 计算为：

$$X_{ev} = \sqrt{\frac{1}{2^{M-j}} \sum_{k=1}^{2^{M-j}} (d_n^j[k])^2} \quad (7)$$

以上特征值计算方法，集成了参数平均过程，即已做消除波动处理。

### 3.4 特征值的标准化

故障诊断中，特征值标准化有利于节省训练时间，提高训练成功率及分类效率和准确率，采用下式对待样本特征向量的特征值进行标准化<sup>[9]</sup>：

$$v_{tb}' = \frac{v_{tb} - \bar{X}_{v_t}}{\sigma_{v_t}} \quad (8)$$

式 (7) 中， $v_{tb}$  为特征  $t$  的第  $b$  个值， $\bar{X}_{v_t}, \sigma_{v_t}$  分别为特征  $t$  的均值和标准差，通过选取一定数量样本（训练样本）估计所得，事实上对在线故障诊断而言，标准化是在样本特征向量输入分类器前进行的。

## 4 实例分析

对一组失火状态信号，按集成特征提取模型对所构造特征集的特征进行特征提取，其特征提取不同阶段的小波包树结构如图 2。

如图 2(a) 的小波包树，在先序分解至  $(4, 0)$  时完

成低频滤波，然后继续完成先序分解后序搜索，最优基分解，在此最佳小波包树下，对各叶子节点系数进行渐变式硬阈值量化，然后将小波包树调整成如图 2(b)，按 3.3 中的方法计算各统计特征值，并求取标准化相对能量，然后分别对每一频带内系数进行单支重构（图 2(c)），并提取相应的统计特征，最后用图 2(b) 小波包树对原信号重构，并提取重构原信号的统计特征。在图 2(a) 和 (b) 的提升小波包树下只需记录叶子节点的提升小波包系数。

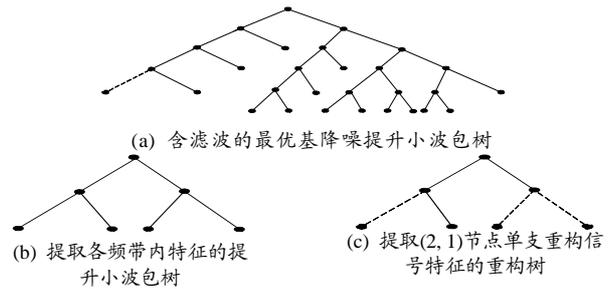


图 2 集成特征提取不同阶段提升小波包树

所得特征参数体系可经文献[7]中的特征选择算法进行特征选择后，确定输入分类器的特征子集。

## 5 结论

该集成特征提取模型具有运算速度快、效率高的优点，更适于在线特征提取，具有良好应用前景。

## 参考文献：

- [1] 刘世元, 杜润生, 杨叔子. 柴油机缸盖振动信号的小波包分解与诊断方法研究[J]. 振动工程学报, 2000, 13(4): 577-583.
- [2] 刘世元, 杜润生, 杨叔子. 小波包改进算法及其在柴油机振动诊断中的应用[J]. 内燃机学报, 2000, 18(1): 11-16.
- [3] 张兢. 内燃机汽缸振动信号的小波包分解与故障诊断[J]. 机械与电子, 2006(3): 6-9.
- [4] Wim Sweldens. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets[J]. Siam J. Math. Anal, 1997, 29(2): 511-546.
- [5] Daubechies I, Sweldens W. Factoring Wavelet Transforms into Lifting Steps[J]. Journal of Fourier Analysis and Application, 1998, 4(3): 247-269.
- [6] 曹建军, 张培林, 张英堂, 等. 基于提升小波包变换的缸盖振动信号特征提取[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 34-37.
- [7] 曹建军, 张培林, 张英堂, 任国全. 基于蚁群优化的振动信号特征选择[J]. 振动与冲击, 2008, 27(5): 24-26, 31.
- [8] 曹建军, 张培林, 张英堂, 任国全. 提升小波包最优基分解算法及在振动信号降噪中的应用[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 114-116.
- [9] McCormick A. C., Nandi A. K. Real Time Classification of Rotating Shaft Loading Conditions using Artificial Neural Network[J]. IEEE Trans. Neural Netw. 1997, 8(3): 748-757.