

# 振动攻丝扭矩信号处理中应用小波包消噪

叶大鹏 何聪惠

(福建农林大学机电工程学院, 福建 福州 350002)

**摘要** 简述小波包分析的基本理论及其主要算法, 讨论用该理论进行信号消噪的基本原理, 并应用于振动攻丝扭矩的信号处理. 通过对所采样的扭矩信号进行小波包分解, 获得信号精细的低频和低频两个部分. 利用阈值量化处理的方法去除噪声, 再将剩余部分进行重构, 从而达到消噪的目的. 实验结果表明, 该方法能够有效地消除采样信号中的噪声, 进而提高扭矩值的计算精度.

**关键词** 振动攻丝, 振动切削, 小波包分析, 消噪

**中图分类号** TG 506.5 TP 274

**文献标识码** A

振动攻丝是在传统攻丝方法的基础上, 人为地叠加上一个有规律的扭转振动, 形成脉冲式的断续切削. 从而, 提高丝锥瞬时切削速度, 使丝锥在加工过程中反复慰压已加工表面, 而降低了攻丝扭矩<sup>[1]</sup>. 在振动攻丝实验中, 为了寻求振动攻丝激励参数对攻丝扭矩的影响规律, 要求数据处理系统能够从所采集的切削扭矩信号中, 准确地提取出它的峰值和均值. 为了提高实验结果的准确性, 在测量信号用于算法之前, 对其进行预处理是十分必要的. 小波滤波方法是剔除信号噪声的有力工具, 它比传统的滤波方法具有显著的特点<sup>[2]</sup>. 目前这一方法已被广泛地应用到许多领域中<sup>[3,4]</sup>. 但是, 小波分析只对信号的低频成分进行细分, 在滤波时对信号的高频成分抑制较强, 使信号的细节损失大. 而小波包分析是把信号的高频和低频部分都进行细分, 具有更为精确的局部分析能力. 本研究将这一方法引入振动攻丝扭矩采样信号预处理分析中, 通过小波包变换对信号进行分解, 并将分解后的系数进行阈值量化处理. 然后再对这些系数进行重构. 从而, 获得抑制了噪声的信号, 达到消噪的目的.

## 1 小波包定义及其算法

小波包分析(Wavelet Packet Analysis)为信号提供一种更为精细的分析方法. 它将信号的频带进行多层次划分, 对多分辨分析后没有细分的高频带部分进一步分解. 同时, 根据分析信号的特征, 自适应地选择频带, 使之与信号的频谱相匹配, 从而提高时-频分辨率.

若  $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$  且满足容许条件, 即

$$C = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|f(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

(其中表示的 Fourier 变换)时, 则称  $f(t)$  为基本小波<sup>[5]</sup>.

由基本小波生成的二进离散小波为

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k), \quad j, k \in \mathbf{Z}$$

而由基本小波得到的二进正交尺度函数为

$$\begin{aligned} \phi_{N,k}(t) &, \quad j = N, \\ \phi_{j,k}(t) &= 2^{j/2} \phi(2^j t - k), \quad j, k \in \mathbf{Z} \end{aligned}$$

**收稿日期** 2003-11-09

**作者简介** 叶大鹏(1971-), 男, 讲师, 主要从事机械工程特种加工的研究. E-mail: fau-ydp@sohu.com

**基金项目** 福建省自然科学基金资助项目(E94002)

将尺度函数  $\varphi(t)$  和小波函数  $\psi(t)$  分别记为  $u_0(t) = \varphi(t)$  和  $u_1(t) = \psi(t)$ . 那么, 由

$$\left. \begin{aligned} u_{2n}(t) &= \sqrt{2} \sum_k h(k) u_n(2t - k), \\ u_{2n+1}(t) &= \sqrt{2} \sum_k g(k) u_n(2t - k). \end{aligned} \right\}$$

所定义的函数  $u_n(t)$   $n \in \mathbf{Z}_+$  称为由基函数  $u_0 = \varphi(t)$  确定的正交小波包. 在上述式子中,  $g(k)$  和  $h(k)$  为正交镜像滤波器.

小波包可以对信号进行二分树结构的完全分解. 设  $g_j^n(t) \in U_j^n$ , 其中  $U_j^n$  是函数  $u_n(t)$  的闭包空间, 则  $g_j^n(t)$  可表示为

$$g_j^n(t) = d_l^{j,n} u_n(2^j t - l)$$

下面介绍小波包的分解和重构算法. (1) 分解算法, 即由  $\{d_l^{j+1,n}\}$  求  $\{d_l^{j,2n}\}$  与  $\{d_l^{j,2n+1}\}$ . 有

$$\left. \begin{aligned} d_l^{j,2n} &= \sum_k a_{k-2l} d_k^{j+1,n}, \\ d_l^{j,2n+1} &= \sum_k a_{k-2l} d_k^{j+1,n}. \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

(2) 重构算法, 即由  $\{d_l^{j,2n}\}$  和  $\{d_l^{j,2n+1}\}$  求  $\{d_l^{j+1,n}\}$ . 有

$$d_l^{j+1,n} = \sum_k [h_{l-2k} d_k^{j,2n} + g_{l-2k} d_k^{j,2n+1}]. \tag{2}$$

2 小波包消噪基本原理

对一个信号进行小波包消噪时, 首先要根据所分析信号的要求, 从中选择一种合适小波基. 然后, 按图 1 (表示对于尺度为  $j, n$  的函数  $\varphi(t)$  进行三层小波包分解的结构树) 的方式, 将信号分解为高频和低频部分. 再依照实际需求, 确定小波包分解层数. 最后, 对小波包分解系数进行阈值量化处理, 并对处理后的小波包系数进行重构, 即可获得消噪后的信号.

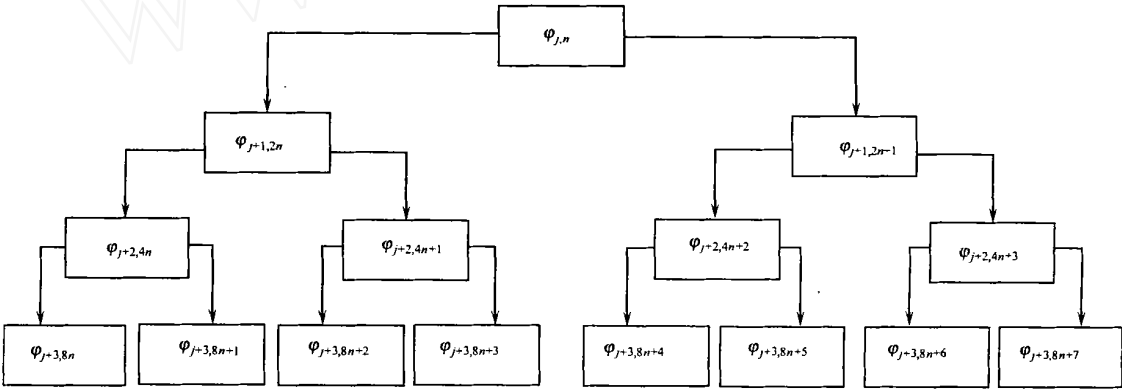


图 1 小波包分解树结构图

下述具体步骤. (1) 选择合适的小波基并确定小波分解的层数  $N$ , 然后根据公式 (1) 对信号  $s$  进行  $N$  层小波包分解. (2) 对每一个小波包分解系数, 选择一个适当的阈值并对系数进行阈值量化处理. (3) 根据第  $N$  层的小波包分解系数和经过量化处理的系数, 利用重构公式 (2), 对经处理后的系数进行小波包重构, 即可获得消噪后的信号.

3 实验条件

本研究所采用实验系统是由 Z4116 台钻改装, 并加装 DNC- 型扭矩测量仪构成的振动攻丝机. 攻丝扭矩信号经预处理后, 再通过 A/D 转换送给 PC 机, 最后由相应的软件对扭矩信号进行分析处理. 整个系统结构如图 2 所示. 加工过程的基本参数是螺纹  $M_4$ 、底孔直径  $\varnothing 3.3 \text{ mm}$ 、工件材料 Q235、丝锥为普通碳工钢机用丝锥、采用普通机油滴油润滑. 按照振动攻丝加工要求设定相应的攻丝参数, 即攻丝振动频率为  $60 \text{ Hz}$ 、振幅  $1.35^\circ$ , 详细实验内容见文献 [6].

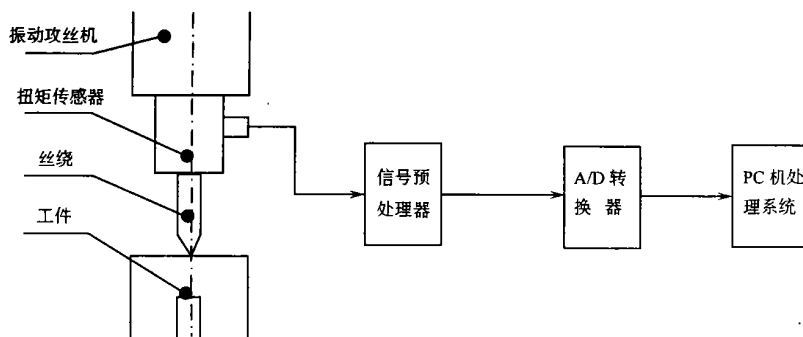


图2 振动攻丝系统示意图

#### 4 小波包消噪及结果分析

为了比较小波和小波包对信号滤波的作用效果,实验中选择相同的小波基和分解层数(本文选择dB4小波,分解层数 $N=3$ ),两者均采用强制阈值量化处理的策略对同一信号进行滤波,其详细算法见文献<sup>[7]</sup>。在对信号进行处理时采用Matlab 5.3中的小波及小波包工具箱进行编程分析。图3为经该软件包处理前后的曲线。图中,曲线a为本文第3节所给定振动攻丝切削条件下,典型切削扭矩( $M$ )的实测曲线。由图可知,原信号中含有较大量的噪声信号。曲线b为经小波消噪处理后的扭矩波形图,比较光滑平坦。曲线c为经小波包消噪处理后的曲线。它同样对曲线a中的信号起到消噪作用,但是它比曲线b包含更为丰富的细节。这主要是由于小波分析时,只对低频信号进行分解,细节部分(高频信号)不再进一步处理,因而曲线较平坦。而小波包对信号的低频和高频部分都进行分解,使得滤波后的信号,其细节比相同条件的小波滤波丰富。

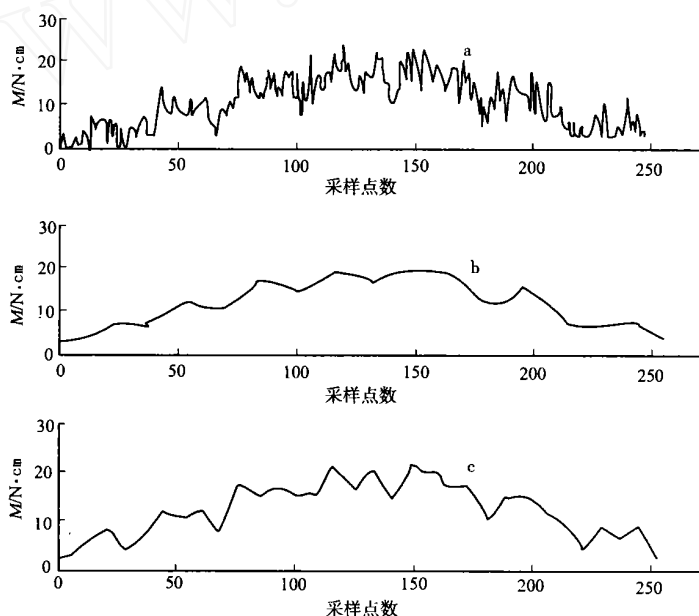


图3 滤波前后扭矩波形

为了进一步验证两种滤波方法对振动攻丝扭矩信号的滤波作用,我们采用在相同加工条件下(见本文第3节),对同一块工件进行多次振动攻丝。取其中3次典型的实测结果,再经Matlab 5.3中统计软件处理后,得到如表1所示的扭矩均值、方差和峰值。由表可知,3种情况下均值基本一致。但是,采用滤波处理后的信号(小波或小波包)方差都比原始信号小。同时,小波滤波所得的方差比小波包处理的小,而信号的峰值则小波包处理结果更接近于原始信号。产生上述结果说明,整个实验系统稳定,且两种滤波方法效果都比较显著。同时,采取这种强制消噪的小波滤波方式对信号的高频部分抑制强,使得经它处理后的信号,波动较小。而小波包的滤波具有本文前面所述的特点,因而利用这种滤波方法,对信号高频

部分的损失较小,能够提取出信号的细节.而对于振动攻丝的切削力特性进行分析时,不仅要求扭矩信号能够反映整个切削过程,同时也要能够反映振动攻丝某一瞬时动态状况<sup>[6]</sup>.因此,对于振动攻丝扭矩信号的滤波处理,采用小波包更为合适.

表 1 3 种扭矩信号的比较

样本	原始信号			小波滤波信号			小波包滤波信号		
	均值	方差	峰值	均值	方差	峰值	均值	方差	峰值
样本 1	12.17	33.16	25.26	12.13	27.56	20.17	12.16	28.20	22.21
样本 2	11.94	34.25	23.32	12.04	26.92	19.20	12.10	27.93	21.92
样本 3	12.30	32.90	27.32	12.15	28.05	21.22	12.19	28.56	23.30

均值、峰值的单位为 N·cm,方差单位为 (N·cm)<sup>2</sup>

5 结束语

通过小波包分析,可将振动攻丝扭矩的测量信号的高频和低频部分都进行细分.采用强制阈值量化处理,再用重构算法对变换系数进行重构,获得滤波后的扭矩信号.研究表明,将小波包分析方法用在振动攻丝扭矩测量信号消噪中,可以获得满意的结果.它比起小波分析方法,更适合于处理振动攻丝切削扭矩信号.

参 考 文 献

1 Zhang Deyuan ,Chen Dingchang. Relief-face friction in vibration tapping[J]. Int. J. Mech. Sci. ,1998 ,40 (12) :1 209 ~ 1 222

2 Burrus CS, Gopinath R A. , Guo H. Introduction to wavelets and wavelet transforms: A primer[M]. Upper Saddle River , N. J : Prentice- Hall , 1998. 221 ~ 300

3 Cohen I, Raz S, Malah D. Orthonormal and shift-invariant wavelet packet decomposition[J]. Signal Processing , 1997 , 57 : 251 ~ 270

4 叶大鹏,何聪惠. 小波分析在振动攻丝扭矩信号滤波中的应用[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2001 , 30(3) : 408 ~ 411

5 Mallat S. A theory for multi-resolution signal de-composition : The wavelet representation[J]. IEEE PAMI,1989 ,11(7) : 674 ~ 693

6 叶大鹏. 激励参数对振动攻丝扭矩影响规律的研究[D]:[学位论文]. 福州 :福建农林大学机电工程学院 ,1999. 35 ~ 36

7 Coifman R R, Wickerhauser M V. Entropy-based algorithms for best basis selection[J]. IEEE Trans. Inform. Theory , 1992 ,38:713 ~ 718

Application of Wavelet Pocket to Noise-Killing in Processing  
Torque Signal during Vibration Tapping

Ye Dapeng      He Conghui

(College of Electromech. Eng. , Fujian Agriculture & Forestry Univ. , 350002 , Fuzhou , China)

**Abstract** Beginning with the basic theory and the main algorithm of wavelet pocket analysis , the authors discuss the basic principle of using this theory to signal denoising ; and apply it to torque signal processing during vibration tapping. With regard to the fineness of signals , the part of low frequency and the part of high frequency as two parts are obtained through decomposing sampled torque signals with wavelet pocket. After denoising by applying quantized processing of threshold value , the rest are reconstructed and the objective of denoising is attained. Experimental results show that the method is able to kill the noise effectively in sampled signals and then to improve the computational accuracy of torque value.

**Keywords** vibration tapping , vibration cutting , wavelet pocket analysis , denoise