

文章编号:1671-251X(2016)10-0035-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.10.008

李东钰,田慕琴,宋建成,等.基于最优小波基选取的掘进机振动信号去噪方法[J].工矿自动化,2016,42(10):35-39.

基于最优小波基选取的掘进机振动信号去噪方法

李东钰¹, 田慕琴¹, 宋建成¹, 鲍文亮², 马昭²

(1.太原理工大学 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室,山西 太原 030024;

2.中煤科工集团太原研究院有限公司,山西 太原 030006)

摘要:为了提高掘进机振动信号小波包去噪的效果,最大限度避免噪声对信号特征提取的影响,提出了基于最优小波基选取的掘进机振动信号去噪方法。该方法以信号频谱为分析依据,首先确定了小波包分解的最优分解层数,再选择最优小波基函数,实现了对掘进机振动信号的实时处理,去噪效果达到了最佳。现场试验结果也验证了该方法的有效性。

关键词:掘进机;振动信号;小波包去噪;小波包分解层数;小波基函数

中图分类号:TD632 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Denoising method of vibration signal of roadheader based on
the optimal wavelet basis selection

LI Dongyu¹, TIAN Muqin¹, SONG Jiancheng¹, BAO Wenliang², MA Zhao²

(1.Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2.CCTEG Taiyuan Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to improve wavelet packet denoising effect for vibration signal of roadheader and avoid influence of noise on signal feature extraction mostly, the paper proposed a denoising method of vibration signal of roadheader based on the optimal wavelet basis selection. The method takes signal frequency spectrum as analysis basis, firstly determines the optimal decomposition layer number of wavelet packet, then selects the optimal wavelet basis function, so as to realize real-time processing of the vibration signal of roadheader with the best denoising effect. The field test results verify effectiveness of the method.

Key words: roadheader; vibration signal; wavelet packet denoising; wavelet packet decomposition layer number; wavelet basis function

0 引言

掘进机是煤岩巷道开采的主要设备,但是,目前掘进机的自动化水平还比较低。为了提高产煤效率,就要全面实现掘进机的自动控制。截割头载荷是实现掘进机自动控制的必要条件。截割头载荷的变化会引起截割头振动的变化,对振动信号进行分

析可以实现掘进机动载荷的识别。但是掘进机在运行过程中,设备自身会产生机器噪声,也会受到电气干扰而产生电气噪声^[1]。因此,现场采集到的信号实际上是振动信号和噪声信号的混合信号,在对振动信号进行分析之前必须进行去噪处理。

掘进机振动信号的幅值和频率是不断变化的,信号具有瞬变性,再加上受到噪声信号的干扰,掘进

收稿日期:2016-04-12;修回日期:2016-06-28;责任编辑:张强。

基金项目:国家“863”计划资源环境技术领域重大项目(2012AA06A405);国家自然科学基金项目(U1510112)。

作者简介:李东钰(1991—),女,山西永济人,硕士研究生,研究方向为煤矿电气设备 and 智能控制技术,E-mail:1062968632@qq.com。

机截割头振动信号表现出非平稳特性。小波包是一种精细的分析方法,它根据被分析信号的特征,自适应地选择频带,使之与信号频谱相匹配,提高时频分辨率^[2],非常适合非平稳信号的分析处理,是非常理想的振动信号去噪方法。小波包分解层数和小波基函数是影响去噪效果的2个重要因素。

目前,国内外对振动信号去噪中小波基的选取有一定研究^[3-8]。参考文献[3]采用经验法,将各个小波基函数的特征进行归纳总结,选择几种较典型的小波基进行信号去噪,参考文献[4-5]突破以往的经验法,通过仿真不同的信号源,混入不同的噪声信号,采用不同小波基函数对信号去噪。根据原始信号与去噪信号的接近程度来判断去噪效果,并选取小波基。参考文献[6]提出了掘进机振动信号的去噪方法,在选取小波基上,只是对比了 sym4 与 smy5 两种小波基对信号的去噪效果。

以上方法中,经验法虽简单,但缺乏一定理论依据。仿真法准确度高,但是现场实际采集的原始信号都是混有噪声的,去噪信号没有可以对比的标准。针对以上信号去噪方法的局限性,本文结合频谱分析、噪声功率等参数,提出一种基于最优小波基选取的掘进机振动信号去噪方法,以实现掘进机振动信号的实时处理。

1 小波包定义及去噪原理

掘进机振动信号中既包含确定性的振动,又包含随机振动。掘进机运行过程中受到的载荷不同,振动频率和幅值就不同。对这类信号进行去噪时,选择的方法要能识别出有效信号与噪声信号的频率,并将其分开。传统的傅里叶变换是在整体上将信号分解为不同的频率分量,缺乏局域性信息,分辨不出信号在时间轴上的任何一个突变^[9]。而小波包能同时在时、频域内对信号进行分析,能有效区分信号中的突变部分和噪声,非常适合振动信号的去噪。

由平方可积实数空间 $L^2(R)$ 的多分辨率分析,得到小波包逼近空间表达式^[10]为

$$L^2(R) = \cdots \oplus W_{-1} \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus \cdots = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j \quad (1)$$

式中: W_j 为小波函数空间, j 为尺度因子; $\oplus$ 为 2 个子空间的“正交和”。

式(1)表示按不同的尺度因子 j 将 Hilbert 空间 $L^2(R)$ 分解为小波子空间 W_j 的正交和,小波包分析即进一步对 W_j 按二进制方式进行频带细分,以达到提高频率分辨率的目的。

通过小波包树来理解小波包分解。以小波包 3 层分解为例,小波包分解树如图 1 所示。图中节点 (0,0) 代表原始信号。

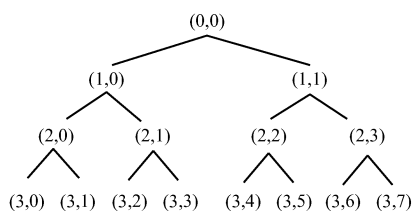


图 1 小波包分解树

小波包分解能够实现信号去噪,主要是因为小波包变换具有时域局部特性、多分辨率特性、解相关特性和小波基多样性等特点^[11]。采用小波包对信号进行去噪的步骤如下:

- (1) 信号的小波包分解。
- (2) 最优小波基的选择。
- (3) 小波包分解系数的阈值化。
- (4) 信号的小波包重构。

信号经过小波包分解后,噪声系数比信号系数小^[12]。小于阈值的分解系数认为是由噪声引起的,予以舍弃;大于阈值的分解系数认为是由信号引起的,予以保留。最后用得到的系数进行小波包重构,即为去噪后的信号。

2 小波包分解层数的确定

对信号进行小波包去噪时,小波包分解层数对信号去噪具有非常重要的影响。一般,分解层数都是通过经验来确定的,而且都是采用固定的分解层数,这种方法不具有通用性。不同信号的特征频段分布是不同的,噪声所在的频段也是不同的。如果小波包分解层数不合适,会造成噪声信号滤除不完全或过度滤除^[13],也会造成信号某些主要特征的湮没,不利于信号的特征提取。寻找一种能根据不同信号选择不同小波包分解层数的方法非常重要。

对信号进行分解时,当分解层数不断增多,去掉的噪声信号也越来越多,但当超过某个临界点时,有用信号会被去掉,使得噪声在整体所占比例呈现上升的趋势。因此,随着分解层数的增加,噪声所占比重呈现先下降后上升的趋势。

掘进机截割头振动信号中蕴含有表征掘进机截割头载荷的信息,截割头振动信号的有效特征量可用于截割头动载荷的识别。对振动信号进行小波包分解,计算各个频带的归一化能量,能量值大的频段即可作为表征截割头载荷的特征量。通过频谱分析分辨振动信号特征量的频段范围,以此为依据来确

定小波包分解层数,使振动信号与噪声分离开来。确定信号分解层数的步骤如下:

(1) 对信号进行频谱分析,观察信号谱峰出现的频段。

(2) 根据谱峰出现的最小频段确定信号特征频率范围。

(3) 通过小波包分解树,计算小波包分解层数。

对信号进行频谱分析,能将信号从时域分析转换到频域分析,可以看到信号在不同频率下幅值的变化情况。当幅值突然增大时,说明在此频段处信号的能量值大,即表现出明显的特征。在小波包分解时,要将谱峰出现的频段与其他频段分开,这样才能完整地提取出信号特征。小波包分解层数直接决定了信号分解频带的大小,根据信号频谱谱峰出现的频段,可以推算出小波包分解层数,使信号特征量完全展现出来。

3 小波基函数选取

3.1 小波基函数定义

设 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅里叶变换为 $\hat{\psi}(\omega)$, $\hat{\psi}(\omega)$ 满足允许条件:

$$C_{\psi} = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2)$$

称 $\psi(\omega)$ 为一个基本小波或母小波^[9]。将母函数 $\psi(\omega)$ 经伸缩和平移后得

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad b \in R, a \neq 0 \quad (3)$$

称其为一个基本小波序列。其中, a 为伸缩因子, b 为平移因子。

当 a 和 b 取一系列离散值时, 就可以得到一族小波函数:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k), \quad j, k \in \mathbf{Z} \quad (4)$$

$\psi(t)$ 如果选择恰当, $\{\psi_{j,k}(t)\}$ 可构成一组正交的小波基, 从而对函数 $f(t) \in L^2(R)$ 总能展开成小波级数 $f(t) = \sum_{j,k} c_{j,k} \psi_{j,k}(t)$, 得到信号 $f(t)$ 的小波分解, 并从中获取有用的信息。小波函数有无穷多个, 小波基也有无穷多组, 但是不同的小波基具有不同的时频特征, 用不同的小波基分析同一个信号会产生不同的结果。

3.2 小波基函数选取方法

开始对信号进行去噪时, 小波基函数的选取采用经验法, 即根据信号和小波基函数的性质来选取, 这仅仅能选择一个大致范围。后来, 有学者提出通过信噪比和均方误差来判断小波基函数的选取是否最优^[14]。这种方法以去噪之后的信号与原始信

号的接近程度来衡量去噪效果, 接近程度最大时的小波基就是最优小波基。这里的原始信号指的是没有混入噪声的信号, 而对于现场采集到的信号而言, 都是混有噪声的, 没有可以对比参照的原始信号, 无法确定信号真实的信噪比, 因此, 这种方法更适用于仿真信号。鉴于此, 本文引入噪声功率 p 来衡量噪声的多少, 噪声功率的计算公式如下:

$$p = \frac{1}{N} \sum (S - S_1)^2 \quad (5)$$

式中: N 为数据长度; S 为混有噪声的原始信号; S_1 为去噪之后的信号。

噪声功率代表信号中混有噪声的多少, 但并不是噪声功率越大, 去噪效果越好。有时信号去噪过度, 把一些有用信号当作噪声滤除时, 会得到很大的噪声功率。但当信号去噪力度不够, 仍有噪声没有被滤除时, 噪声功率较低。因此, 在选取小波基函数时, 将信号噪声功率作为小波基选取的第 1 个标准。

仅通过噪声功率是不能直接选出最优小波基函数的, 本文引入噪声功率差 Δp_i 作为第 2 个衡量信号去噪效果的标准。

$$\Delta p_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [s_i(n) - s_{i-1}(n)]^2 \quad (6)$$

式中: $s_i(n)$ 为去噪后的信号, i 为小波基编号; $s_0(n)$ 为原始含噪信号。

Δp_i 可以看作是 2 种不同的小波基函数对信号去噪后信号的功率差, 可以用来衡量残留噪声的多少。当 Δp_i 达到最小时, 说明信号噪声已经降到最低, 也就达到了最好的去噪效果。

因此, 最优小波基选择的步骤如下:

(1) 在 Matlab 上用不同的小波基函数对信号进行去噪, 通过式(5)计算各个小波基函数下的噪声功率。

(2) 查看噪声功率的梯度分布, 选择噪声功率较大的几个小波基函数进行下一步比较。

(3) 对于选出的小波基函数, 按照噪声功率从小到大依次排序, 从 $i=1$ 开始依次增加。

(4) 通过式(6)依次计算 Δp_i 。

(5) 通过对比, 选择出最小的 Δp_i , 编号为 $i-1$ 的小波基函数就是最优小波基函数。

该方法中, 因为信号去噪过程中一定会带来去噪过度的现象, 将有效信号当作噪声信号去除掉, 所以, 噪声功率最高的小波基函数不作为最优小波基函数考虑, 只是参与计算。

4 掘进机振动信号去噪

试验中使用的掘进机是总功率为 650 kW 的横

轴式超重型岩巷掘进机,该掘进机可截割 100 MPa 以内的岩石,局部硬度可以达到 120 MPa。试验过程中,通过振动传感器与动态信号分析仪对超重型岩巷掘进机截割头振动信号进行采集,信号的采样频率为 10 kHz。

4.1 振动信号小波包分解层数的确定

横轴式超重型岩巷掘进机截割头振动信号的特征敏感频段在低频和高频处都有分布。其中最低频率可以达到几十赫兹,而在高频部分可以达到 4~5 kHz。试验中,掘进机截割头振动信号的采样频率为 10 kHz。根据采样定理,只有当采样频率大于信号中最高频率的 2 倍时,采样之后的信号才能完整地保留原始信号中的信息。因此,信号的最高频率不会超过 5 kHz。以 5 kHz 为信号的最高频率,对信号进行频谱分析,得到频谱如图 2 所示。图中 g 为重力加速度。

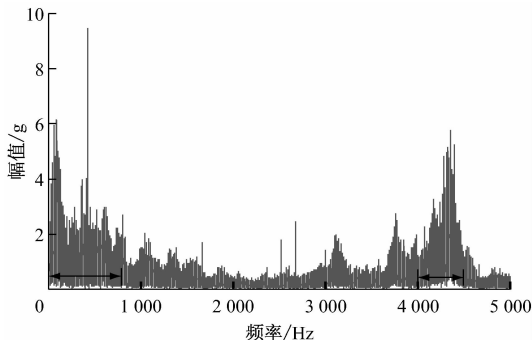


图 2 掘进机截割头振动信号频谱

从图 2 可以看出,信号幅值较大的点主要集中在 0~800 Hz 及 4 000~4 500 Hz 频段,幅值越大,表示信号的能量特征值越大。对信号进行分解时,要能把这 2 个频段明显地区分开来,才能将信号的特征值完全展现出来。

为了看清谱峰出现的最小频带,观察 0~5 000 Hz 的频谱,如图 3 所示。从图 3 可看出,信号在频率约为 40 Hz 时幅值开始上升,说明 40 Hz 处是振动信号特征敏感频段的最小值,40~800 Hz 及 4 000~4 500 Hz 这 2 个频段中包含有反映截割头载荷的信息,因此,在小波包分解时,要在 40 Hz 有区分,才能有效将噪声滤除并提取出信号的能量特征值。经过计算,对信号进行 7 层小波包分解时,信号达到的最小频段为 0~39 Hz,可以将信号的特征频段清晰地区分开,不会湮没信号的特征值,因此,选择小波包分解层数为 7 层。

4.2 振动信号最优小波基函数的选取

常用的小波基函数有 dbN 小波系、biorNr. Nd 小波系、coifN 小波系、symN 小波系,选择这几个小

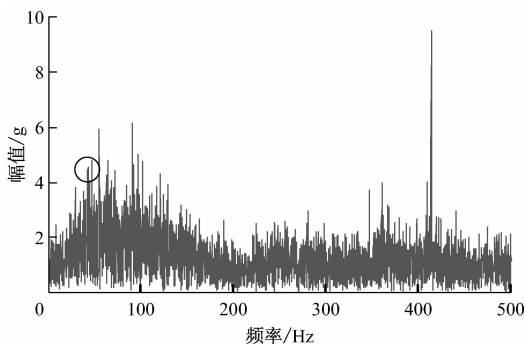


图 3 0~500 Hz 信号频谱

波系中的小波基函数对振动信号进行去噪。去噪之后得到的信号噪声功率对比图如图 4 所示。

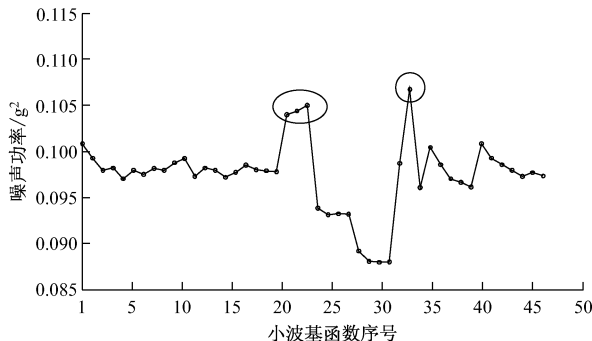


图 4 不同小波基函数下信号去噪的噪声功率对比

图中横坐标 1—20 为 dbN 小波系的小波基, 21—35 为 biorNr. Nd 小波系的小波基, 36—40 为 coifN 小波系的小波基。图中圈出的小波基函数是噪声功率最大的 2 个, 其中 bior1. 1(21), bior1. 3(22), bior1. 5(23), bior5. 5(33) 小波基去噪后信号的噪声功率依次增大, 对这几个小波基函数依次赋值 $i=1, 2, 3, 4$, 并进行下一步比较。

根据式(6),依次计算出 $\Delta p_1=0.104\ 0\ g^2$, $\Delta p_2=0.034\ 4\ g^2$, $\Delta p_3=0.036\ 9\ g^2$, $\Delta p_4=0.032\ 9\ g^2$, 可以看出 Δp_4 为最小值, 所以 bior1. 5 小波基函数为最优小波基。

4.3 振动信号去噪效果对比

通过分析计算,掘进机截割头振动信号去噪的最优小波基函数为 bior1. 5, 最优分解层数为 7 层。为了对比分析不同小波基函数及小波包分解层数对信号去噪的影响, 分别用 3 种不同的方法对同一信号进行去噪。由于信号长度较长, 不易对信号的去噪效果进行对比, 所以, 取信号中的 10 000 个数据进行去噪对比分析。3 种去噪方法: ① 采用 bior1. 5 小波基函数对信号进行 3 层小波包分解; ② 采用 bior3. 9 小波基函数对信号进行 7 层小波包分解; ③ 采用 bior1. 5 小波基函数对信号进行 7 层小波包分解, 即最优去噪方法。3 种去噪方法的效果对比

如图5所示。

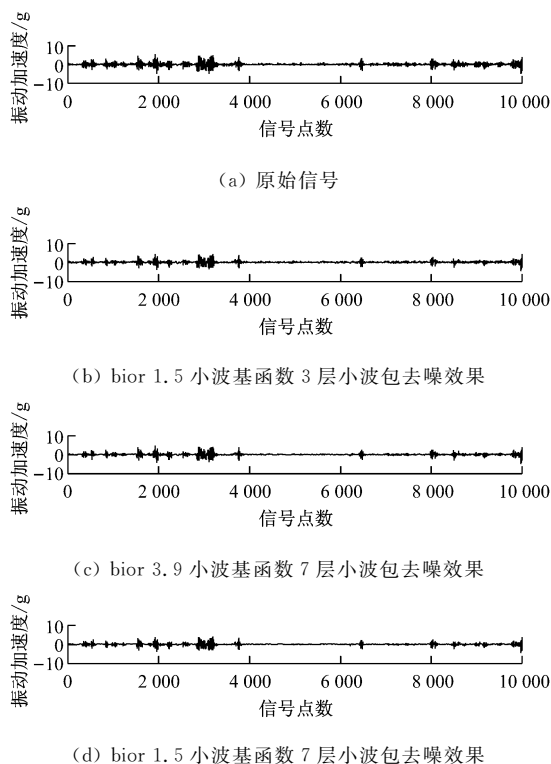


图5 3种信号去噪方法的效果对比

从图5可以看出,前2种去噪方法可以滤掉部分噪声,但是相比最优的去噪方法,去噪之后的信号中仍有很多噪声成分。采用bior1.5小波基函数7层小波包分解得到的去噪信号比较光滑,去掉的噪声信号相对更多,因此,该方法是最优的信号去噪方法。

通过计算,3种方法的噪声功率依次为 $p_1=0.2019\text{ g}$, $p_2=0.1781\text{ g}$, $p_3=0.2193\text{ g}$,第3种方法的噪声功率最高,说明滤掉的噪声最多,因此,能达到较好的去噪效果。

5 结语

基于最优小波基选取的掘进机振动信号去噪方法以小波包变换作为信号去噪工具,以Matlab为软件平台,首先确定了信号去噪过程中小波包分解层数,然后选取了最优小波基,实现了对掘进机振动信号的实时处理。

(1) 基于信号频谱及小波包分解树,提出了最优小波包分解层数的确定方法。该方法能使信号的特征量充分体现出来,有利于信号去噪时保留信号的有效成分。

(2) 以参数 p 和 Δp_i 作为信号去噪的参考量,提出了最优小波基函数的选取方法。该方法突破以

往仿真信号最优小波基选取的局限性,更适用于采集实际信号,使信号去噪效果达到最优。

(3) 以现场试验采集到的掘进机截割头振动信号为目标信号,确定了适合该信号去噪的小波包分解层数为7层,最优小波基函数为bior1.5。该方法下噪声功率 $p=0.2193$,大于其他去噪方法,证明该去噪方法使信号的去噪效果达到了最优。

参考文献:

- [1] 李朋真. 采煤机钻岩识别及控制方法的研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014.
- [2] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.
- [3] 汪新凡. 小波基选择及其优化[J]. 株洲工学院学报, 2003, 17(5): 33-35.
- [4] 谢军, 李乐, 刘文峰. 振动信号噪声消除中的小波基选择研究[J]. 科学技术与工程, 2011(25): 5997-6000.
- [5] DONOHO D L, JOHNSTONE J M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425-455.
- [6] 程旭文, 黄建农, 董志峰. 小波去噪在掘进机振动信号处理中的应用[J]. 煤矿机械, 2015, 36(7): 230-232.
- [7] DUAN L X, ZHANG L B, WANG Z H. De-noising of diesel vibration signal using wavelet packet and singular value decomposition[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2006, 1(4): 443-447.
- [8] YAN R Q, GAO R X. Base wavelet selection for bearing vibration signal analysis[J]. International Journal of Wavelets Multi-resolution & Information Processing, 2009, 7(4): 411-426.
- [9] 孔玲军. MATLAB小波分析超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社, 2014.
- [10] 张吉先, 钟秋海, 戴亚平. 小波门限消噪法应用中分解层数及阈值的确定[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 118-122.
- [11] 潘泉, 张磊, 孟晋丽. 小波去噪方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [12] 李明, 李翠, 雷萌. 一种煤炭近红外光谱数据预处理方法研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(1): 62-66.
- [13] DAUBECHIES I. The wavelet transform, time-frequency localisation and signal analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990, 36(5): 961-1005.
- [14] 童敏明, 李朋真, 童紫原, 等. 煤岩声发射信号识别研究[J]. 工矿自动化, 2013, 39(12): 38-42.