

强脉冲干扰非线性混叠转子故障信号分离*

苗 锋^{1,2}, 赵荣珍¹

(1. 兰州理工大学数字制造技术与应用省部共建教育部重点实验室 兰州, 730050)

(2. 洛阳师范学院物理与电子信息学院 洛阳, 471022)

摘要 由于旋转机械在运行过程中, 传感器测得的振动信号是各振源的混叠信号且含有很强的噪声, 常规的信号处理方法难以分离混叠信号, 对设备的状态监测和故障诊断造成了很大的困难。针对这一问题, 介绍了盲源分离基本原理和方法, 指出源分离算法在脉冲噪声环境下失效。针对强脉冲噪声环境下的混叠振动信号, 首先, 通过中值滤波降噪方法对振动信号进行降噪; 然后, 通过盲源分离算法对降噪后的信号分离; 最后, 利用该方法对实测混叠转子振动信号成功实现了降噪和故障信号分离。仿真结果验证了提出方法的有效性。

关键词 中值滤波; 盲源分离; 转子; 故障信号

中图分类号 TN911.7; TH165

引 言

旋转机械运行过程中, 振动传感器测量得到的振动信号往往是由多个部件的振动叠加而成。如何对这些信号进行分析、处理、识别, 对于判断旋转机械的工作状态和对其进行故障诊断极其重要。直接对传感器信号进行分析与处理, 势必对机械状态监测和故障诊断造成很大的困难^[1]。传统的现代信号处理方法对于旋转机械上多个混叠的振动信号存在明显不足^[2-5]。盲源分离技术可以实现多混叠信号的分离, 同时盲源分离不受源信号时间互相交叠和频谱互相交叠的影响, 且分离后的输出信号不会丢失源信号中的微弱特征信息^[6]。

已经出现的众多盲源分离算法在分离无噪的混合信号时都表现出很好的分离性能^[7], 但是当分离含噪的信号时会出现很大的误差, 甚至当信噪比低时会得出完全错误的结论, 这是因为这些算法都是在不考虑噪声的模型下推导出来的。在机器运行过程中, 振动传感器测得的振动信号难免会包含噪声信号。当利用盲源分离算法直接对混叠振动信号进行分离时, 可能会造成很大的误差或得出错误的结论^[8]。因此, 在强脉冲干扰下对实测的机械振动信

号进行盲分离之前降噪, 以提高信噪比就显得尤为重要。中值滤波是一种非线性滤波方法, 其抑制脉冲噪声的能力强, 具有保留边缘轮廓信息的特性等^[9], 已被广泛地应用于抑制脉冲噪声等信号处理中。笔者先利用中值滤波方法对强脉冲干扰下的混叠信号进行降噪, 再用二阶盲辨识算法(second-order blind identification, 简称 SOBI)对降噪后的信号进行分离。

1 盲源分离问题描述

盲源分离问题是指在各输入信号和传输通道参数均未知的情况下, 仅通过观测信号估计各输入信号和传输通道参数。混合过程用数学公式表示为

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_M(t)]^T$ 为含噪情况下的 M 维随机观测向量; \mathbf{A} 为一个未知满秩的 $M \times N$ 的混合矩阵; $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$ 为 N 维源信号, 源信号中各分量 $s_i(t)$ 假设为统计独立, 且其中最多包含一个高斯噪声, 否则不能分离; $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$ 为 M 维噪声信号。

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t)\mathbf{s}(t) \quad (2)$$

盲源分离的目的是找一个分离矩阵 \mathbf{W} , 使得

* 国家自然科学基金资助项目(50875118, 51165019); 甘肃省教育厅硕导基金资助项目(0903-11)
收稿日期: 2012-12-08; 修回日期: 2013-03-08

$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t)$ 为 $s(t)$ 的最优估计。

由于盲源分离仅仅根据观测信号来估计输入信号,而无其他关于源信号的先验知识,所以求得的估计输入信号与源信号之间存在一些不确定性,主要表现在估计输入信号的幅值和排列顺序的不确定性上。但是这两个不确定性并不影响对信号的分析,因为信号的大部分信息是包含在波形上而不是在幅值和排列顺序上^[7]。

2 SOBI 算法

SOBI 算法一般包括白化数据、计算联合矩阵和联合对角化相关矩阵 3 个过程^[10]。

1) 白化数据。白化数据预处理可以去除空间相关性。在源信号和传感器个数相同的情况下可以不包含这个过程。在源信号和传感器个数不相同的情况下,白化过程可以估计源的个数,同时可以消除加性噪声对信号的影响。

2) 计算联合矩阵。联合矩阵 $\mathbf{M} = \{\mathbf{M}_1, \dots, \mathbf{M}_k\}$ 以选多种形式,最简单的情形下,对于有不同功率谱(或等价于不同的自相关函数)的有色源采用时滞协方差矩阵

$$\mathbf{M}_i = R(\tau_i) = E(\mathbf{x}(t + \tau_i)\mathbf{x}^T(t)) \quad (3)$$

3) 联合对角化相关矩阵,获取酉矩阵 \mathbf{U} 联合对角化的目标是寻找正交矩阵 \mathbf{U} 使之能对角化一组矩阵,从而

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{U}\mathbf{D}_i\mathbf{U}^T \quad (i=1, 2, \dots, K) \quad (4)$$

其中: \mathbf{M}_i 为时滞协方差; \mathbf{D}_i 为实数对角阵。

由于误差和其他因素的影响,一般情况下并不能找到一个准确的对角化矩阵 \mathbf{U} , 因此只能达到近似对角化。

考虑 K 个 $n \times n$ 矩阵族 $\mathbf{M} = \{\mathbf{M}_1, \dots, \mathbf{M}_k\}$, 对于任何 $n \times n$ 矩阵 \mathbf{V} 联合对角化准则定义为 \mathbf{V} 的非负函数

$$C(\mathbf{M}, \mathbf{V}) = \sum_{k=1}^K \sum_{i \neq j} ((\mathbf{V}^H \mathbf{M}_k \mathbf{V})_{ij}) \quad (5)$$

定义:在一组由所有酉矩阵组成的矩阵族中,其中一个酉矩阵使得式(5)最小化,则称该酉矩阵为 \mathbf{M} 的联合对角器。

如果矩阵族 \mathbf{M} 中存在一个矩阵的特征值相异,则矩阵族 \mathbf{M} 存在着本质唯一的联合对角化器 \mathbf{V} , 且该联合对角化器 \mathbf{V} 等价于 \mathbf{U} 。

3 中值滤波原理

中值滤波属于非线性排序统计滤波方法。它通过对样本数据分布的分析,设定一个定长窗口对数据进行扫描。该过程中窗口中的数据被排序,中值被作为某点滤波后输出的数据,获得的中值序列即是滤波后的信号。该过程的排序操作较好地抑制了信号中的脉冲噪声,但保留了原始数据的边缘轮廓信息,对抑制线性叠加在信号中的平稳随机噪声的能力弱;因此,中值滤波主要应用于需要抑制脉冲噪声且需要保留边缘轮廓信息的信号处理中^[9]。

一维信号中值滤波的数学描述如下。假设由 k 个数据组成的数据集合为 $\{x(1), x(2), \dots, x(k)\}$ 。设 D 为一长度为 $L = 2N + 1$ 的滤波窗口, N 为正整数。定义动态子窗口为

$$\mathbf{D}_N(m; n) = \{x(m, n - i); -N \leq i \leq N\} \quad (6)$$

设第 n 时刻输入窗口内的 $2N + 1$ 个数据为 $\{x(n - N), \dots, x(n), \dots, x(n + N) \mid n + N \leq k\}$, 则此时中值滤波的输出被定义为

$$s(n) = \begin{cases} \text{med}[x(n - N), \dots, x(n + N)] & (m \leq n \leq N - m) \\ y(n) & \text{其他} \end{cases}$$

其中: $\text{med}[\cdot]$ 表示窗口内数据按照升序秩序排列后取其中值的运算。

用窗口对样本进行扫描,输出的序列中值 $s(n)$ ($1 \leq n \leq k - N + 1$) 即为滤波后的信号。可以看出,由于叠加原理此时已不再成立,故中值滤波是一种非线性滤波方法,其抑制平滑噪声的能力弱。

上述过程表明,中值滤波属一种邻域运算,是选择窗口序列的中值作为输出的计算。动态窗口 D 输出的中值序列中,遗留有线性叠加在该序列中的高斯分布白噪声分量,并拥有对边缘信号难以处理的缺陷。因此,该滤波方法对线性叠加的平稳随机噪声具有细节保护作用,抑制高斯分布白噪声的能力弱。

4 实验结果与分析

4.1 仿真实验

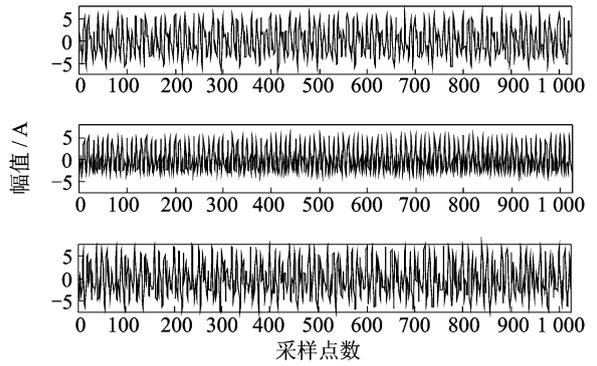
为了验证算法的有效性,用 3 个具有不同频率

的周期信号进行仿真实验,以模拟不同转频机械引起的振动混合情况。通常单转轴的旋转机械振动信号可以简单地看作是其转频及其倍频的叠加,源信号的表达式为

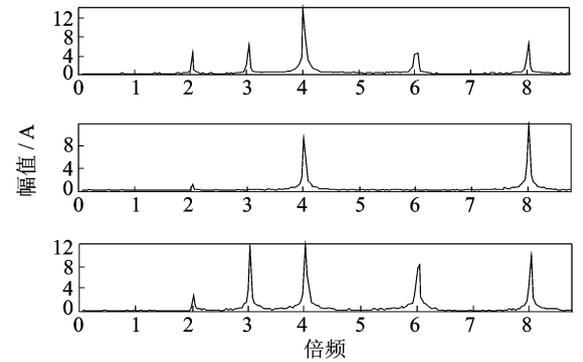
$$s_i(t) = \sum_{k=1}^2 A_{ki} \sin(2\pi k f_i t + \varphi_{ki}) \quad (i=1,2,3)$$

其中: A_{ki} 为第 i 个源信号的幅值; f_i 为第 i 个源信号的转频; $k f_i$ 为第 i 个源信号的 k 倍转频; φ_{ki} 为相位; A_{ki} 和 φ_{ki} 由计算机随机生成; f_i 的值分别取 10,15 和 20 Hz。

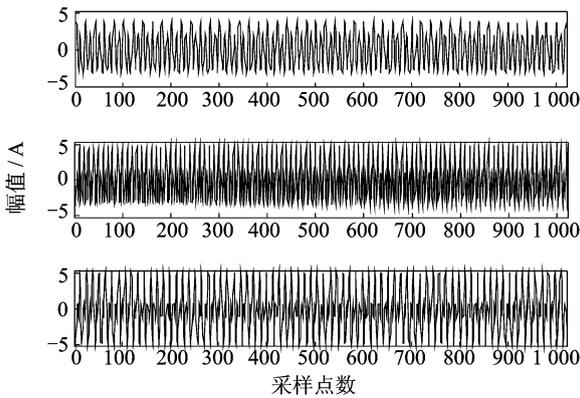
经过随机矩阵混合并加脉冲噪声的时域波形及频谱如图 1(c)和图 1(d)所示。经过 SOBI 算法直接分离后得到的时域波形及频谱图如图 1(e)和图 1(f)所示。图 1(g)和图 1(h)分别为降噪后盲分离的时域波形及频谱图。从图 1(f)中可以看出,在受脉冲信号干扰的情况下,源信号均没有被分离,还出现了很大的误差。这点可以说明基于无噪模型的算法对含噪数据的分离会产生很大的误差,甚至会出现错误的结果。分离信号与源信号只存在幅值与排序的不确定性上,并不影响故障特征的辨识。对比图 1(h)和图 1(b)还可以看出,通过中值滤波降噪后,再对混合数据进行盲分离,可以得到较好的分离



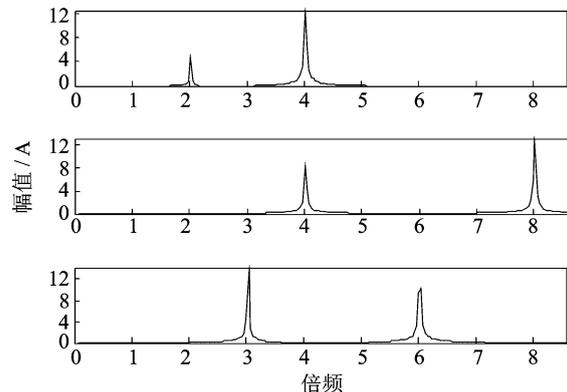
(c) 含噪混合信号时域波形
(c) The signals mixed with noises in the time domain



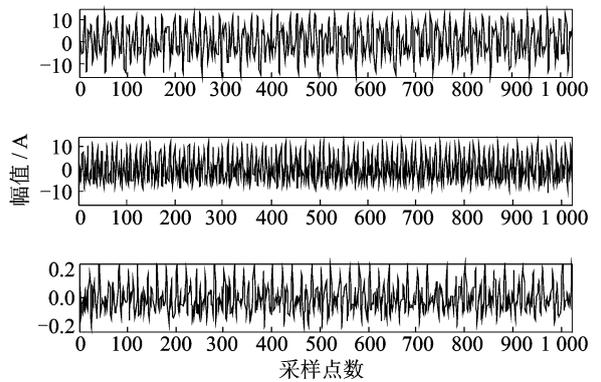
(d) 含噪混合信号频谱
(d) The signals mixed with noises in the frequency domain



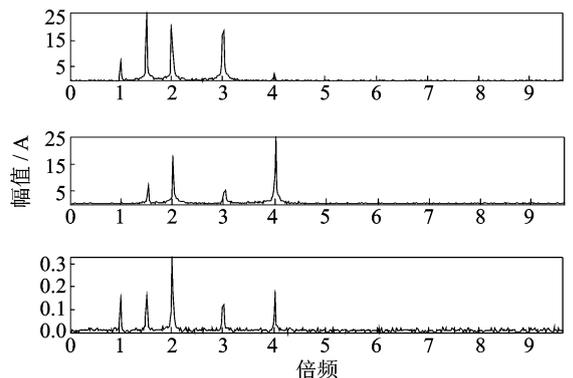
(a) 无噪信号时域波形
(a) The source signal in the time domain



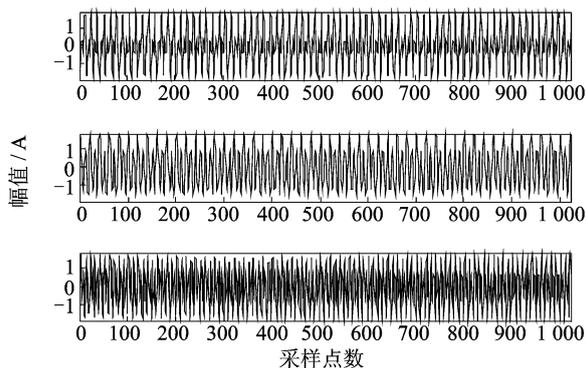
(b) 无噪信号频谱图
(b) The source signal in the frequency domain



(e) 直接分离的时域波形
(e) Separated signal with noise in the time domain



(f) 直接分离的频谱图
(f) Separated signal with noise in frequency domain



(g) 降噪后盲分离的时域波形

(g) Separated signal after de-noising in the time domain

(h) 降噪后盲分离的频谱图

(h) Separated signal after de-noising in the frequency domain

图1 含噪振动信号的仿真分析

Fig. 1 Simulation of vibration signal

效果。这充分说明在对脉冲噪声数据进行盲分离之前,用中值滤波降噪方法进行降噪,可以有效去除脉冲噪声,提高信噪比,为含噪声混合信号的盲源分离的准确实现提供了前提条件。

4.2 混叠转子振动信号分离研究

为了验证提出算法对实测混叠振动信号的分离性能,笔者对实测混叠转子振动信号进行了分析。由于转子在旋转过程中可能存在多个潜在的源信号,如轴承滚珠的振动信号、轴的轴向振动信号和噪声信号等,而传感器是同时进行测量,所以传感器测得的信号为混叠振动信号。为了满足盲源分离中传感器个数大于或者等于源信号个数的假设,实验过程中采用了4个传感器进行测量。转子在旋转过程中转速大约为3 kr/min,采样频率为5 kHz,对质量盘施加碰摩的装置见图2。测得的4个传感器信号如图3(a)所示。经过SOBI算法直接分离后的时域信号如图3(b)所示。对比图3(a)和图3(b)可看出,实际转子实验台测量的混合信号与分离后的信

号在时域中没有明显的差别。经过中值降噪和SOBI算法分离得到的时域如图3(c)所示。对比图3(a)和图3(c)可以看出,经过中值滤波后,脉冲噪声得到了很好的抑制。

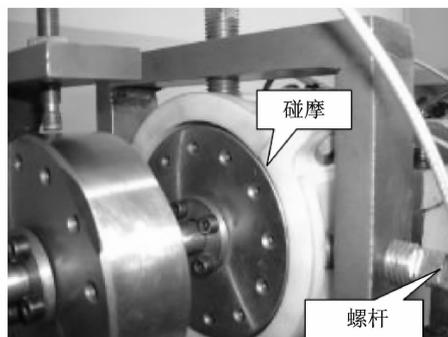
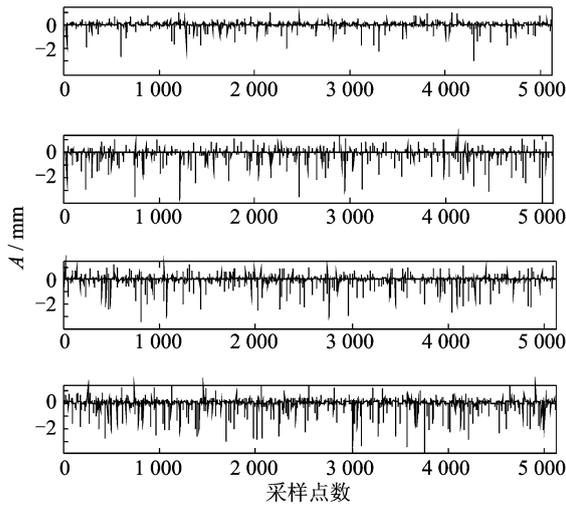


图2 碰摩装置及碰摩力作用位置

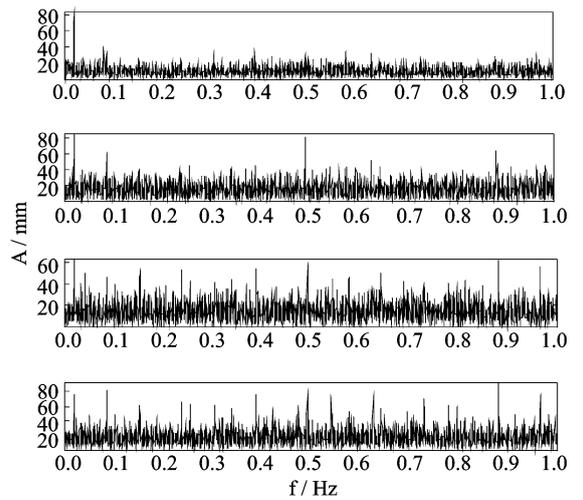
Fig. 2 Rub-impact device and rub-impact force acting position

为便于更直观地对分离前后转子复杂振动的比较,有必要对分离前后的各个数据信号进行频谱分析,从频域观察信号在分离前后的不同特征。原信号、消噪前分离信号及消噪后分离信号的频谱图如图4所示。从图4(a)中可以看出,大部分频率都淹没在噪声当中且各频率混合在一起,无法识别故障特征。经过直接分离后的频谱如图4(b)所示,除了第2个图中频率没有被噪声淹没,其余大部分都淹没在噪声之中,而且各频率也没有完全分离出来,这说明SOBI算法在数据含有脉冲噪声的情况下,分离效果明显变差。对经过中值降噪后盲分离的数据进行频谱分析,如图4(c)所示。对比图4(b)和图4(c)可知,在图4(b)中从上向下数第1个、第2个和第3个图的谱线被噪声淹没,无法辨识;而在图4(c)中4幅图的特征谱线都清晰突显出来。这表明基于中值降噪的盲分离算法在分离脉冲噪声环境下的混叠信号时,分离性能优于直接分离的性能,能有效抑制脉冲噪声信号,突显周期信号。图4(c)中,在第1个、第3个和第4个图中可以看出,50 Hz的频率突显出来,而其他频率被抑制,计算可知该频率为转子的转频,另外几个频率分别为转子频率的倍频;在第1个、第3个和第4个图中可以看出,振动能量主要集中在一倍频,可以判定转子存在碰摩故障;在第2个图中可以看出振动能量主要集中在二倍频,也存在一倍频及其他倍频,可以判定转子在碰摩过程中同时存在转子不对中现象。



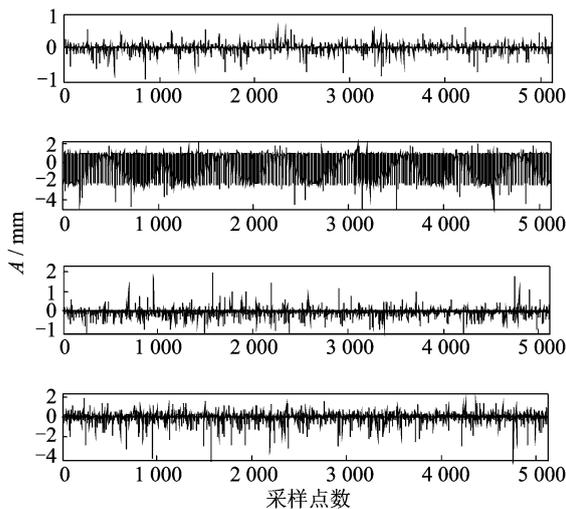
(a) 实测转子振动信号时域波形

(a) Signals mixed with sensor noise in the time domain



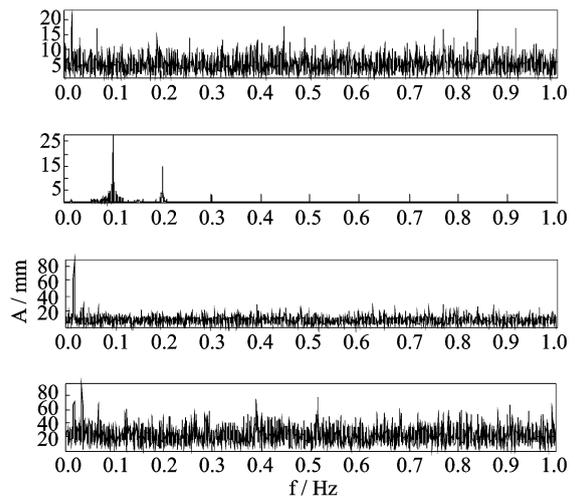
(a) 实测转子振动信号时域波形

(a) Signals mixed with sensor noise in the time domain



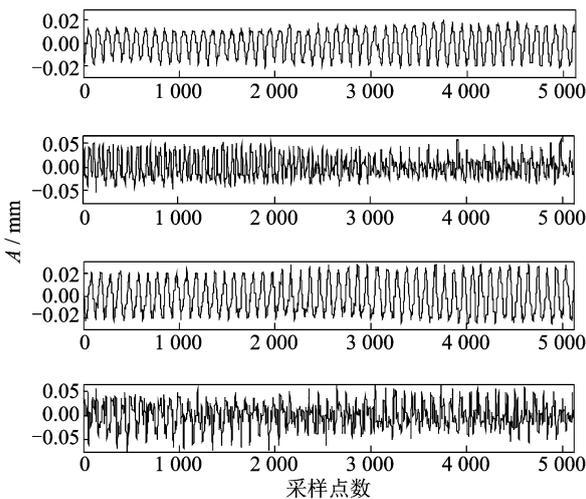
(b) 直接分离转子振动信号时域波形

(b) Separated mixed signal with noise in the time domain



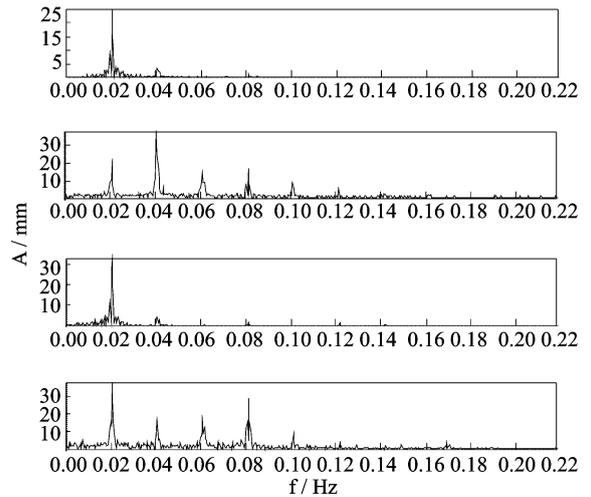
(b) 直接分离转子振动信号时域波形

(b) Separated mixed signal with noise in the time domain



(c) 降噪后分离转子振动信号时域波形

(c) Separated signal after de-noising in the time domain



(c) 降噪后分离转子振动信号时域波形

(c) Separated signal after de-noising in the time domain

图 3 转子振动信号的时域波形

Fig. 3 The rotor vibration signal in the time domain

图 4 转子振动信号的频谱图

Fig. 4 The rotor vibration signal in the frequency domain

5 结论

1) 对含强脉冲噪声的观测信号直接进行盲分离,分离结果误差较大,甚至得到错误的分离结果。

2) 中值滤波方法能有效去除脉冲噪声信号且不丢失原信号中的有用成分,提高了信噪比,为盲分离的准确实现提供前提条件。

3) 对实测信号来说,尽管盲源分离的独立性假设严格来说并不成立,但是 SOBI 算法在实际振动信号分离中还是有效的。

4) 中值滤波方法与盲源分离算法结合在一起,为强脉冲噪声环境下的混叠信号分离提供了一种新的方法。

参 考 文 献

- [1] 郝志华,马孝江,王奉涛.非平稳的盲源分离在机械故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2006,25(1):110-114.
Hao Zhihua, Ma Xiaojiang, Wang Fengtao. Blind source separation for nonstationary signal and its application in mechanical fault diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(1): 110-114. (in Chinese)
- [2] 焦卫东,杨世锡,吴昭同.基于源数估计的旋转机械源盲分离[J].中国机械工程,2003,14(14):1184-1187.
Jiao Weidong, Yang Shixi, Wu Shaotong. A method of blind source separation for rotating machinery based on estimation of the number of sources[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(14): 1184-1187. (in Chinese)
- [3] He Q, Feng Z, Kong F. Detection of signal transients using independent component analysis and its application in gearbox condition monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(5): 2056-2071.
- [4] Rivet B, Vigneron V, Parasciv-Ionescu A, et al. Wavelet de-noising for blind source separation in noisy mixtures[J]. Lecture Note in Computer Science, 2004, 3195: 263-270.
- [5] Parasciv-Ionescu A, Jutten C, Aminian K, et al. Wavelet de-noising for highly noisy source separation[J]. 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems(ISCAS2002), 2002(26-29): 201-204.
- [6] 宋友,柳重堪,李其汉.基于三阶累积量的转子振动信号降噪方法研究[J].航空动力学报,2002,17(3):363-

366.

Song You, Liu Chongkan, Liu Qihan. Denoise of rotor vibration signal based on higher-order cumulants[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(3): 363-366. (in Chinese)

- [7] 雷衍斌,李舜酩,门秀花,等.自相关降噪的混叠转子振动信号分离[J].振动与冲击,2011,30(1):218-222.
Lei Yanbin, Li Shunming, Men Xiuhua, et al. Separating mixed rotor vibration signals based on auto-correlation de-noising[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 218-222. (in Chinese)
- [8] 李志农,郝伟,韩捷,等.噪声环境下机械故障源的盲分离[J].农业机械学报,2006,37(11):109-113.
Li Zhihong, Hao Wei, Han Jie, et al. Blind separation of the mechanical fault sources under the noise environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 109-113. (in Chinese)
- [9] 赵荣珍,李超,张优云.中值与小波消噪集成的转子振动信号滤波方法研究[J].振动与冲击,2005,24(4):74-77.
Zhao Rongzhen, Li Chao, Zhang Youyun. Filter design synthesizing median filtering and wavelet algorithm to de-noise vibration signal polluted by violent pulse noises[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(4): 74-77. (in Chinese)
- [10] 付志超,程伟,徐成.基于R-SOBI的结构模态参数辨识方法[J].振动与冲击,2010,29(1):108-111.
Fu Zhichao, Cheng Wei, Xu Cheng. Modal parameter identification via robust second-order blind identification method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(1): 108-111. (in Chinese)



第一作者简介:苗锋,男,1984年8月生,博士研究生。主要研究方向为机械系统动态信号处理、旋转机械故障诊断和计量测试技术。曾发表《小波消噪和盲源分离在转子故障信号分析中的应用方法》(《河南科技大学学报》2008年第6期)等论文。

E-mail: miaofeng3699@163.com

通信作者简介:赵荣珍,女,1960年12月生,教授、博士生导师。主要研究方向为旋转机械故障诊断、机械系统动态测试技术和机械系统动力学。

E-mail: zhaorongzhen@lut.cn