

基于小波阈值和约束独立分量分析的 齿轮故障诊断研究

韩博跃, 郝如江, 安雪君

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:为在强噪声下准确利用振动信号进行齿轮故障诊断,提出了基于小波阈值和约束独立成分分析(CICA)相结合的算法。该算法首先对输入信号进行小波阈值降噪预处理,提高了输入信号的信噪比,然后基于齿轮特征频率建立参考信号,将降噪后的信号作为 CICA 的输入信号,利用 CICA 算法有效分离出齿轮故障信号,识别了故障特征。为了验证该算法的有效性,进行了仿真和实验测试信号分析,结果表明,该算法可以有效提取齿轮故障信号,实现齿轮的故障诊断。

关键词:小波阈值;约束独立成分分析;降噪;齿轮故障诊断

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2019)04-0040-07

随着科学技术的发展,机械设备结构越来越复杂,组成部件越来越多,作为传递运动和动力的齿轮几乎在任何大型机械设备中都有着极其重要的作用,齿轮的健康状态对于设备的安全运行至关重要。因此,对齿轮进行故障诊断具有重要意义^[1]。

独立分量分析(ICA)是一种从混合信号中分离出具有独立统计特性的单个源信号的分离方法。由于其在分离过程中需要的独立源信号的先验信息很少,并且有明显的分离效果,ICA 已在无线通信、语音处理和机械故障诊断等领域具有广泛的应用^[2-4]。在实际应用中,因为源信号次序不确定性和数目不容易确定等问题,限制了其在齿轮故障特征提取中的应用。近年来,在 ICA 基础上发展起来的约束独立分量分析(CICA)对其算法进行改进,将上述问题有效地解决^[5-7],它在不需要知道源信号数量情况下,首先利用先验信息产生参考信号,进而提取出感兴趣的独立分量。CICA 算法在解决无噪声或者低噪声多元信息混叠时,分离效果非常明显,当在强噪声环境下,分离效果不太理想。

齿轮的振动信号常常是叠加有强噪声的,小波变换具有良好的时频局部化和多分辨率分析的特点,因而适用于非平稳信号和强噪声信号的处理,具备良好的降噪能力。为了成功提取出齿轮的故障特征,本文提出了基于小波阈值和 CICA 相结合的算法,并对该算法进行了仿真信号和实验测试信号的分析,结果显示,该算法具有很好故障特征的分离效果。

1 小波阈值降噪原理

在实际工程中,有用信号通常为低频信号或是一些比较平稳的信号,而噪声信号则通常表现为高频信号。因此预处理降噪过程可以按如下方法进行处理:首先用小波算法对信号进行分解,以门限阈值等形式对小波系数进行处理;然后再对分解的信号进行重构,达到降噪的效果。

小波降噪的方法主要有基于模极大值降噪法、平移不变量降噪法和小波阈值降噪法。本文选择小波

收稿日期:2018-04-03 网络出版日期:- 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20180069

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1402.n.20191120.1354.007.html>

基金项目:国家自然科学基金(51375319)、河北省杰出青年科学基金(E2013210113)

作者简介:韩博跃(1994—),男,硕士研究生,主要从事机电系统故障诊断的研究。E-mail:734933832@qq.com

韩博跃,郝如江,安雪君.基于小波阈值和约束独立分量分析的齿轮故障诊断研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2019,32(4):40-45,88.

阈值降噪方法进行预处理降噪,小波阈值法降噪的基本步骤如下^[8-9]:①小波基函数的选择。小波基函数的正则性及波形与数据的结构相似程度会影响信号降噪的效果,symN小波基与机械振动波形相似,其中,sym8小波因为具有良好的对称性和连续性,并且具有紧支集,因此选择sym8小波。②分解层数的确定。不同分解层数降噪效果不同,要合理选择分解层数,文中选择三层分解。③阈值和阈值函数的选取。阈值估计方法主要有:无偏似然估计原则、极值阈值原则、分层可变阈值、heursure规则和固定阈值原则等^[8-9]。阈值函数主要分为软阈值函数和硬阈值函数。经过硬阈值函数处理的信号,降噪后信号的部分特征可以得到很好的保留,但是用它降噪经常会产生比较大的方差;而经过软阈值函数处理的信号降噪效果平滑,并且不会出现附加震荡^[10-12]。本文根据固定阈值原则选用软阈值函数进行降噪。④进行小波重构,得到降噪处理后的信号。

2 约束独立分量分析(CICA)

2.1 ICA 模型

N 维混合观测信号 $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_N]^T$ 与 M 维独立源信号 $\mathbf{S} = [S_1, S_2, \dots, S_N]^T$ 的 ICA 模型为

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为 $N \times M$ 维混合矩阵; N 和 M 为正整数。

ICA 算法是在不知道源信号 $\mathbf{S}$ 和混合矩阵 $\mathbf{A}$ 的条件下确定分离矩阵 $\mathbf{W}$,使得到的独立分量向量 $\mathbf{y}$ 最佳接近源信号 $\mathbf{S}$,其分离表达式为

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{X} \quad (2)$$

在判定分离分量独立性上,主要有基于峭度极判据和基于负熵极大判据^[13-14]。

选择基于负熵极大判据,其表达式如下

$$J(\mathbf{y}) = H(\mathbf{y}_{\text{gauss}}) - H(\mathbf{y}) \quad (3)$$

式中, $J(\mathbf{y})$ 为向量 $\mathbf{y}$ 的负熵; $H(\mathbf{y}_{\text{gauss}})$ 和 $H(\mathbf{y})$ 分别为向量 $\mathbf{y}_{\text{gauss}}$ 和向量 $\mathbf{y}$ 的熵; $\mathbf{y}_{\text{gauss}}$ 是一个高斯向量,具有相同的协方差。

根据定义计算向量的负熵,必须要知道概率密度函数,但是在实际应用中很难获知独立成分的概率密度函数,所以只能采用近似方法来求解负熵,即

$$J(\mathbf{y}) \approx \rho [E\{G(\mathbf{y})\} - E\{G(\mu)\}]^2 \quad (4)$$

式中, ρ 为正常数; μ 为白化型高斯变量; $E\{\cdot\}$ 为期望值; $G(\cdot)$ 为非线性函数。

2.2 CICA 模型

CICA 算法建立在 ICA 算法基础上,基于源信号的先验知识生成参考信号,从而提取出与参考信号最相似的一个独立分量^[14]。基于源信号已知信息构造参考脉冲信号 $r(t)$,将待提取的目标信号 y 和参考信号 $r(t)$ 的距离函数定义为 $\epsilon(y, r)$,用来表示目标信号与参考信号的接近程度。 $\epsilon(y, r)$ 可用均方误差 $\epsilon(y, r) = E\{(y - r)^2\}$ 度量,CICA 算法的数学模型如式(5)和式(6)所示。

目标函数

$$\max J(\mathbf{y}) \approx \rho \{E[G(\mathbf{y})] - E[G(\mathbf{v})]\} \quad (5)$$

约束条件

$$\begin{cases} g(\omega) = \epsilon(y, r) - \xi \leq 0 \\ h(\omega) = E(y^2) - 1 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, ρ 为正常数; $G(\cdot)$ 为非线性函数; $\mathbf{v}$ 为具有与 $\mathbf{y}$ 相同协方差矩阵的高斯变量; ξ 为阈值。式(6)实际上是一个约束优化问题,通过拉格朗日乘数法对其求解,可得到源信号的最佳估计,提取出目标源信号。

参考信号的选取条件如下:①参考信号要含有期望信号的一些先验信息,但是无须与期望信号一样;②参考信号需要具有非高斯性,这样才能使算法收敛于期望信号。机械设备在工况稳定的情况下,齿轮的故障信号表现为固定频率的脉冲序列,齿轮的故障特征频率就可以作为约束独立分量分析的约束条件^[15],建立基于脉冲的参考信号,即构建一个周期脉冲信号作为 CICA 算法中的参考信号,周期脉冲信号

的频率与齿轮故障特征频率一致。

3 基于小波阈值和 CICA 的齿轮故障诊断

小波阈值和 CICA 相结合用于齿轮箱故障信号的分析,流程如图 1 所示。因为 CICA 算法对信号中叠加的加性噪声十分敏感,为了提高 CICA 算法的稳定性和分离效果,对其加入小波软阈值降噪进行预处理来提高信噪比,再进行信号的分离。

4 仿真分析

为了验证方法的有效性,进行仿真信号分析。源信号表达式为

$$\begin{cases} s_1 = \text{randn}(1, N) \\ s_2 = 6[1 + 1.5\cos(2\pi f_1 t)]\cos(2\pi f_2 t + \theta_1) \\ s_3 = 2[1 + 1.5\cos(2\pi f_3 t)]\cos(2\pi f_4 t + \theta_2) \\ s_4 = \sin(2\pi f_5 t) \end{cases} \quad (7)$$

式中, s_1 为随机噪声信号; $\text{randn}(\cdot)$ 为 Matlab 软件中产生随机噪声信号函数, N 为信号样本点数; s_2 为模拟无故障行星传动的啮合振动信号, 啮合频率 $f_2 = 530$ Hz, 调制频率 $f_1 = 5.3$ Hz 为行星架旋转频率, $\theta_1 = 0$; s_3 为模拟行星齿轮故障低频调制信号, 啮合频率为 $f_4 = 93$ Hz, 低频调制频率为 $f_3 = 1.5$ Hz, $\theta_2 = 0$; s_4 为频率 $f_5 = 20$ Hz 的正弦信号。图 2 为仿真源信号及对应幅值谱。

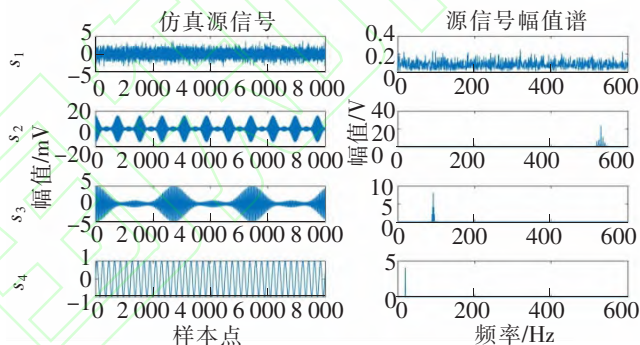


图 2 源信号及幅值谱

对源信号加入不同的随机噪声和脉冲噪声, 分别得到不同信噪比的信号 a , 由于篇幅有限, 以加噪后信噪比为 -20 dB 的信号说明, 图 3 为加噪后的信号波形图及对应幅值谱。

按照式(4)的混合模型, 将加噪后信号进行线性瞬时混合, 得到的 4 个混合信号时域波形如图 4 所示, 可以看到其波形十分的杂乱。

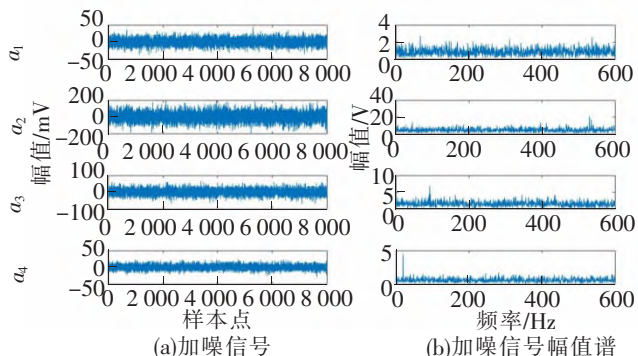


图 3 加噪后信号及幅值谱

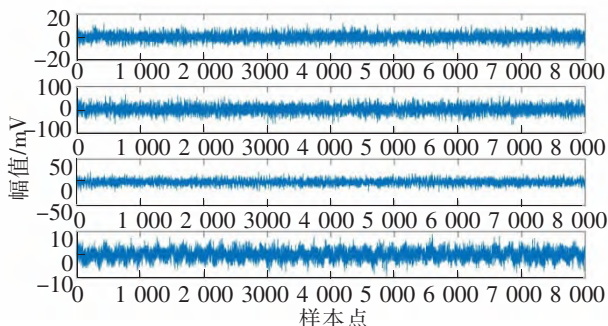


图 4 混合信号时域波形

为了形成对比, 分别对混合信号进行直接 CICA 信噪分离和小波软阈值预处理后的 CICA 信噪分离。

此时设定源信号 s_3 为所要提取的期望信号。现对混合信号直接 CICA 信噪分离得到图 5。对混合信号进行小波软阈值预处理后的 CICA 信噪分离得到图 6。

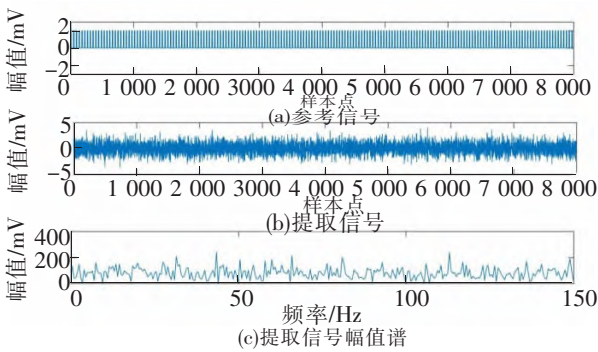


图 5 CICA 提取的信号分量及幅值谱

对比图 5 和图 6,同样正确的参考信号,图 6 经过小波软阈值预处理提取信号 y_3' 时域波形与源信号 s_3 十分相似,而其幅值谱可以看到频率 93 Hz 及其调制频率 1.5 Hz 产生的边频带,图 5 的提取信号 y_3 及其幅值谱看不出任何特征及特征频率,杂乱无章。由此表明提出的方法可以正确地提取出期望的信号。

为了定量的说明此方法的优越性和有效性,应用信噪比 SNR 和均方误差 MSE 来评价算法的去噪效果,对应的表达式为

$$SNR = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{\sum_{i=1}^N (S_i - S_i')^2} \right\} \tag{8}$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - S_i')^2 \tag{9}$$

式中, S_i 为源信号; S_i' 为降噪后信号。

源信号加噪后信噪比为 -20 dB,分别对故障信号计算仅用 CICA 算法和本文方法处理后信号的 SNR 和 MSE,结果如表 1 所示,对比可知提出的算法的优越性和有效性,降噪上和性能指标都优于仅用 CICA 算法。

表 1 性能指标数据对比

评价指标	降噪前	CICA	本文方法
SNR	-20.063 2	-4.756 0	2.453 3
MSE	12.166 8	1.967 5	0.425 6

5 实测数据实验

为验证此方法对实际测试信号的有效性,采用 SpectraQuest 公司设计的可模拟工业动力传动的故障诊断综合实验台(DDS)进行实验分析,见图 7。该实验台动力传动系统由 1 个 1 级行星齿轮箱,1 个 2 级平行轴齿轮箱,1 个轴承负载和 1 个可编程的磁力制动器组成,齿轮箱的传动系统如图 8 所示。

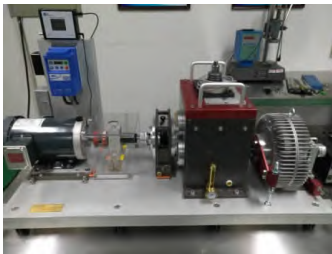


图 7 DDS 实验台

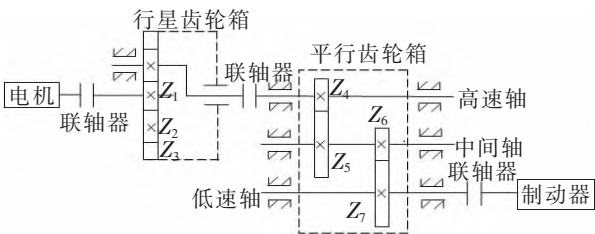


图 8 齿轮箱传动系统图

研究将齿轮局部故障设置在定轴齿轮箱的输出级 Z_6/Z_7 的主动轮 Z_6 ($=36$) 位置,如图 9 所示的位置,其它位置齿轮(含行星齿轮箱)及所有轴承均无故障。定轴齿轮箱齿轮 Z_6 的单一故障设置为局部断

齿障,其中断齿的宽度约为齿宽的 30%,如图 10 所示;电机输入转速为 40 Hz(2 400 r/min),传递到平行齿轮箱中间轴的转频为 2.537 Hz,齿数为 36,啮合频率为 91.35 Hz。利用 DASP 数据采集仪采集数据,采样频率为 5 120 Hz,总采样时长为 10 s,截取其中 2 s 数据进行分析。



图 9 故障齿轮位置



图 10 局部断齿的齿轮 Z₆

采集齿轮箱三通道的振动数据,时域波形及其幅值谱如图 11 和 12 所示。从幅值谱上可以看到明显峰值 40.35 Hz、40.4 Hz 及 40.05 Hz,接近电机输入转频 40 Hz,还可以看到接近中间轴上齿轮的啮合频率 92.25 Hz 和 92.05 Hz 的峰值,但是边频带不明显,还有其它频率的影响,很难判断齿轮故障。

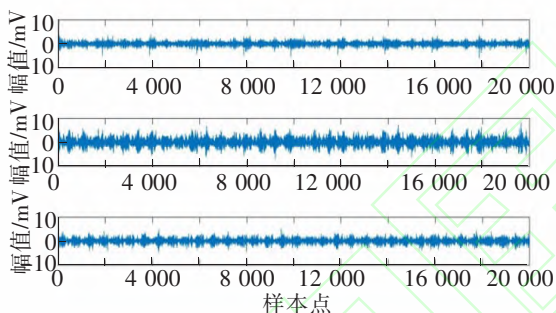


图 11 齿轮箱实测信号波形

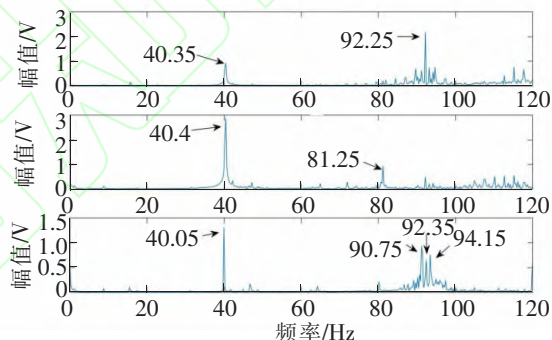


图 12 齿轮箱实测信号幅值谱

以 91.35 Hz 为特征频率构建的参考信号 r_2 ,取阈值 $\xi = 1.5$,未经小波软阈值降噪预处理时,仅用 CICA 方法对图 11 所示的局部断齿故障测量信号直接提取的结果如图 13 所示,图 14 为提取信号 y_2 的幅值谱,显然,提取的结果不理想,时域波形明显周期冲击成分不明显,幅值谱中电机的频率影响太大,并且齿轮故障边频带也不明显,不能说明齿轮故障。

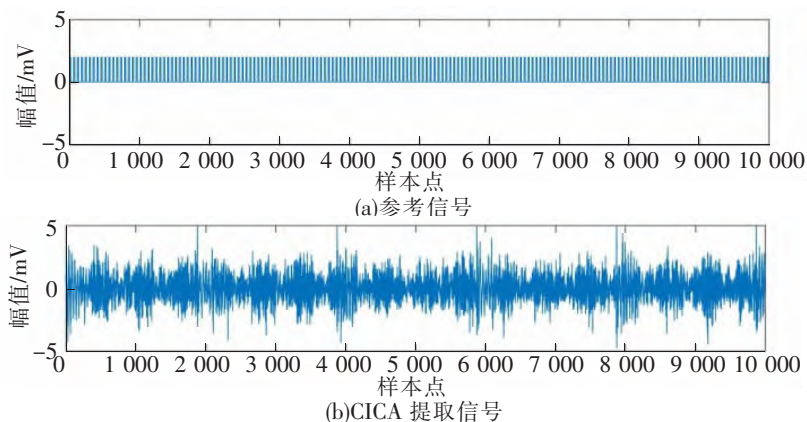


图 13 CICA 提取的故障信号

以本文提出的小波阈值降噪与 CICA 结合方法对信号进行处理分析,所提取的时域故障信号及其幅

值谱,如图15和16所示,参考信号 r_2 相同,并且阈值同样 $\xi=1.5$,经过小波软阈值预处理后,提取的时域波形可以明显看出冲击成分,信号降噪效果明显;图16的幅值谱中可清楚观察到故障齿轮的啮合频率(理论值91.35 Hz)及其两侧被转频2.53 Hz调制的边频。由此可见,该方法可实现齿轮箱中齿轮故障的分离,突出了齿轮的故障特征,效果十分明显。

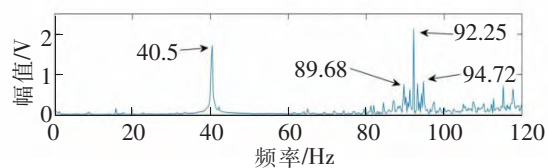


图14 CICA提取的故障信号幅值谱

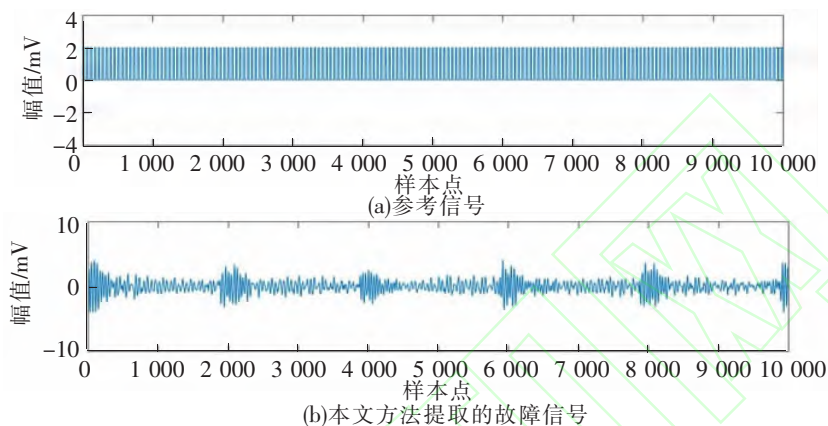


图15 本文方法提取的故障信号

6 结论

针对齿轮箱中齿轮故障提出了基于小波阈值和CICA算法,小波阈值可以有效地对信号降噪、滤波,而CICA可通过建立参考信号,将特定的故障分量分离出来,克服了ICA方法的不确定性问题。将2种方法相结合,实现在强噪声背景下对齿轮局部故障的分离提取,适用于齿轮故障的诊断并通过具体的仿真和实验证明了该方法的有效性和实用性,为在强噪声下齿轮箱中齿轮故障提供新的诊断方法。

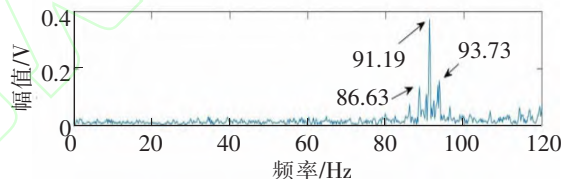


图16 本文方法提取的故障信号幅值谱

参考文献

- [1]丁康,李巍华,朱小勇. 齿轮及齿轮箱故障诊断实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2]Barros A K, Principe J C, Erdogmus D. Independent component analysis and blind source separation [J]. Signal Processing, 2007, 8(4): 1817-1818.
- [3]Mi J X, Xu Y. A comparative study and improvement of two ICA using reference signal methods[J]. Neurocomputing, 2014, 137: 157-164.
- [4]Gao J, Zhu X, Nandi A K Independent component analysis for multiple-input multiple-output wireless communication systems[J]. Signal Processing, 2011, 91(4): 607-623.
- [5]Lu W. Approach and applications of constrained ICA[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2005, 16: 203-212.
- [6]Akhtar M T. Employing spatially constrained ICA and wavelet denoising for automatic removal of artifacts from multi-channel EEG data[J]. Signal Processing, 2012, 92: 401-416.
- [7]Lia C L, Liao G S, Shen Y L. An improved method for independent component analysis with reference[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20: 575-580.
- [8]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.

(下转第88页)

Abstract: Aiming at the problem that the load property has an effect on the detection effect in the active frequency shifting islanding detection method, an improved Sandia detection method is proposed. By detecting the phase difference between the voltage of the public coupling point (PCC) and the output current of the inverter, the nature of the load is judged, thereby further determining whether to change the direction of the disturbance, and finally judging the occurrence of the island. The simulation results show that the proposed method can effectively detect the occurrence of the island effect under various load properties and effectively prevent the influence of the load nature on the detection effect.

Key words: distributed generation system; island detection; Sandia method; FFT spectral analysis

(上接第 45 页)

- [9] D L Donoho. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [10] 赵奎, 黄高明. 基于二次小波降噪的 FastICA 盲源分离研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(6): 36-40.
- [11] 王杏. 带噪混叠语音信号盲分离方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [12] 孟宗, 马钊, 刘东, 等. 基于小波半软阈值消噪的盲源分离方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(3): 337-342.
- [13] 钟丽莉, 熊兴中. 基于峭度的独立分量算法的性能分析研究[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2014, 27(4): 43-47.
- [14] 王志阳, 陈进, 肖文斌, 等. 基于约束独立成分分析的滚动轴承故障诊断[J]. 振动与冲击, 2012, 31(9): 118-122.
- [15] 张杰, 张周锁, 朱冠汶, 等. 多元消减约束独立分量分析及其在振源贡献量计算中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 57-73.

Research on Gear Fault Diagnosis Based on Wavelet Threshold and Constrained Independent Component Analysis

Han Boyue, Hao Rujiang, An Xuejun

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to use the vibration signal to diagnose the gear fault under the strong noise accurately, an algorithm based on the combination of wavelet threshold and constrained independent component analysis (CICA) is proposed. Firstly, the input signal is pre-processed by wavelet threshold denoising method to improve the signal-to-noise ratio of the input signal. Then, the reference signal is established based on the characteristic frequency of the gear, the signal after noise reduction is used as the input channel signal of CICA, the gear fault signal is effectively separated by CICA, and the fault characteristic is identified. In order to verify the effectiveness of the algorithm, the simulation and experimental results show that the algorithm can effectively extract the gear fault signal and realize the gear fault diagnosis.

Key words: wavelet threshold; constrained independent component analysis; noise reduction; gear fault diagnosis