

文章编号:1671-251X(2019)05-0096-04

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17399

矿用电动机振动信号早期故障特征提取方法

张建功

(开滦(集团)有限责任公司,河北 唐山 063018)



扫码移动阅读

摘要:针对现有矿用电动机振动信号故障特征提取方法存在依赖参数设置、频率混叠、信号失真等问题,提出了一种基于双树复小波变换的矿用电动机振动信号早期故障特征提取方法。利用双树复小波变换对采集的矿用电动机振动信号进行分解,得到各层双树复小波系数,并采用软阈值滤波对各层双树复小波系数进行滤波处理,滤波处理后的双树复小波系数经双树复小波变换重构获得去噪信号。应用结果表明,该方法能有效去除电动机振动信号中噪声,提取的早期故障特征能很好地反映电动机实际运行工况,为电动机早期故障诊断提供了有效依据。

关键词:电动机早期故障;振动信号;故障特征提取;双树复小波变换;软阈值滤波
中图分类号:TD67 **文献标志码:**A

Early fault feature extraction method of vibration signal of mine-used motor

ZHANG Jianguo

(Kailuan(Group) Co., Ltd., Tangshan 063018, China)

Abstract:In view of problems of parameter setting, frequency aliasing and signal distortion existing in current fault feature extraction methods of vibration signal of mine-used motor, an early fault feature extraction method of vibration signal of mine-used motor based on dual-tree complex wavelet transform was proposed. Firstly, collected vibration signal of mine-used motor is decomposed by using dual-tree complex wavelet transform, so as to obtain dual-tree complex wavelet coefficients of each layer. Then soft threshold filtering is used to filter the dual-tree complex wavelet coefficients of each layer. At last, denoising signal is obtained by reconstruction of the filtered dual-tree complex wavelet coefficients. The application results show that the method can effectively remove noise in the motor vibration signal, and extracted early fault feature can reflect actual operating condition of motor, which provides an effective basis for early fault diagnosis of motor.

Key words: motor early fault; vibration signal; fault feature extraction; dual-tree complex wavelet transform; soft threshold filtering

0 引言

矿用电动机轴承故障、不对中故障等是电动机最常见故障^[1-2]。矿井工况复杂、恶劣,伴有冲击性振动、噪声等,且负载波动较大,矿用电动机早期故障特征微弱,如何在强噪声背景下对其进行有效提取成为当下研究热点。矿用电动机振动信号故障特

征提取的研究分为2个方面:一是利用噪声实现对信号中微弱特征的增强,如随机共振^[3]、差分振子^[4-5]、混沌振子^[6]等方法,但其应用效果依赖于参数设置;二是通过滤除信号中的噪声来提取信号特征,如经验模态分解滤波^[7]、小波滤波^[8]等方法,但存在频率混叠、信号失真等问题。双树复小波变换在小波变换的基础上进一步发展而来,降噪性能突

收稿日期:2019-01-07;修回日期:2019-04-26;责任编辑:盛男。

作者简介:张建功(1967—),男,山西大同人,高级工程师,硕士,研究方向为煤矿自动化控制,E-mail:ldq@kailuan.com.cn。

引用格式:张建功.矿用电动机振动信号故障特征提取方法[J].工矿自动化,2019,45(5):96-99.

ZHANG Jianguo. Early fault feature extraction method of vibration signal of mine-used motor[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(5): 96-99.

出。因此,本文提出了一种基于双树复小波变换的矿用电动机振动信号早期故障特征提取方法,对采集的矿用电动机振动信号进行双树复小波变换,并使用降噪滤波方法去除信号中噪声,提高信号信噪比,从而易于识别电动机故障特征,为电动机早期故障诊断提供有效依据。

1 双树复小波变换基本原理

双树复小波变换采用2个具有不同低通和高通滤波器的实小波变换实现对信号的并行分解和重构^[9-10],2个实小波变换采用2组不同的滤波器,分别称为实部树和虚部树^[11-13]。每组滤波器都分别满足完美重构条件,并构成 Hilbert 变换对。在信号的分解与重构过程中始终保持虚部树的采样位置位于实部数的中间,实现实部树与虚部树的信息互补。双树复小波变换在各层分解过程中,利用金字塔快速算法,具有较高的分解效率。

设 $\psi_h(t), \psi_g(t)$ (t 为时间) 分别为双树复小波变换采用的实值小波函数, $\phi_h(t), \phi_g(t)$ 分别为对应的尺度函数。根据小波理论,实部树小波变换的小波系数 $d_l^{\text{Re}}(k)$ 和尺度系数 $c_j^{\text{Re}}(k)$ 可分别由式(1)、式(2)计算得到。

$$d_l^{\text{Re}}(k) = 2^{l/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_h(2^l t - k) dt \tag{1}$$

$$c_j^{\text{Re}}(k) = 2^{j/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \phi_h(2^j t - k) dt \tag{2}$$

式中: l 为比例因子, $l=1,2,\dots,J$, J 为最大双树复小波分解尺度; $x(t)$ 为原始信号; k 为位移因子。

同理,可得虚部树小波变换的小波系数 $d_l^{\text{Im}}(k)$ 和尺度系数 $c_j^{\text{Im}}(k)$ 。因此,合并实部树和虚部树的输出,可得双树复小波变换的小波系数 $d_l^{\text{C}}(k)$ 和尺度系数 $c_j^{\text{C}}(k)$:

$$d_l^{\text{C}}(k) = d_l^{\text{Re}}(k) + j d_l^{\text{Im}}(k) \tag{3}$$

$$c_j^{\text{C}}(k) = c_j^{\text{Re}}(k) + j c_j^{\text{Im}}(k) \tag{4}$$

根据式(1)~式(4),可实现单支重构,重构后的信号为

$$x'(t) = d_l(t) + c_j(t) \tag{5}$$

其中:

$$d_l(t) = 2^{\frac{l-1}{2}} \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} d_l^{\text{Re}}(k) \psi_h(2^l t - n) + \sum_{m=-\infty}^{+\infty} d_l^{\text{Im}}(k) \psi_g(2^l t - m) \right] \tag{6}$$

$$c_j(t) = 2^{\frac{j-1}{2}} \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_j^{\text{Re}}(k) \phi_h(2^j t - n) + \sum_{m=-\infty}^{+\infty} c_j^{\text{Im}}(k) \phi_g(2^j t - m) \right] \tag{7}$$

式中: n 为实数部位移因子; m 为虚数部位移因子。

2 降噪滤波

降噪滤波一般分为硬阈值滤波和软阈值滤波2种方式^[14]。由于硬阈值滤波会使信号存在附加震荡^[15],而通过软阈值滤波去噪后信号更光滑,所以采用软阈值滤波对信号进行处理。软阈值函数为^[15]

$$w'_{j,i} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,i}) (|w_{j,i}| - \lambda) & |w_{j,i}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{j,i}| < \lambda \end{cases} \tag{8}$$

式中: $w_{j,i}, w'_{j,i}$ 分别为降噪滤波前后的第 j ($j=1,2,\dots,J$) 层第 i ($i=1,2,\dots,N$, N 为第 j 层双树复小波系数的个数) 个双树复小波系数; λ 为阈值, $\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N}$, σ 为噪声标准差。

$$\sigma = \frac{1}{0.674 \sqrt{5N}} \sum_{i=1}^N |w_{j,i}| \tag{9}$$

3 应用实例

某煤矿压风机驱动电动机转速为 1 500 r/min, 轴承型号为 6232, 其故障特征频率见表 1。

表 1 电动机轴承故障特征频率
Table 1 Fault feature frequencies of motor bearing Hz

转频	外圈故障 特征频率	内圈故障 特征频率	滚动体故障 特征频率	保持架故障 特征频率
25	128	171	174	11

在电动机轴伸端和尾部垂直方向分别部署振动加速度传感器。通过在线监测系统发现电动机的轴伸端振动峰值略有上升趋势,但未达到报警值,常规的故障诊断分析中未发现电动机存在显著的故障隐患。

通过在线监测系统获得的电动机轴伸端振动信号时域波形及频谱分别如图 1、图 2 所示。

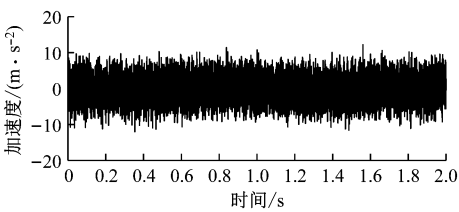


图 1 电动机轴伸端振动信号时域波形
Fig. 1 Time domain waveform of vibration signal of motor shaft extension

从图 1 可看出,电动机轴伸端振动信号没有显著的振动冲击。从图 2 中也未发现显著的轴承故障特征频域。

分别利用小波变换、双树复小波变换对电动机轴伸端振动信号进行处理,得到的频谱如图 3、图 4 所示。

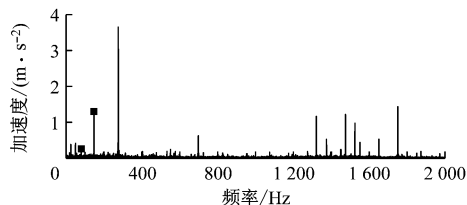


图 2 电动机轴伸端振动信号频谱

Fig. 2 Frequency spectrum of vibration signal of motor shaft extension

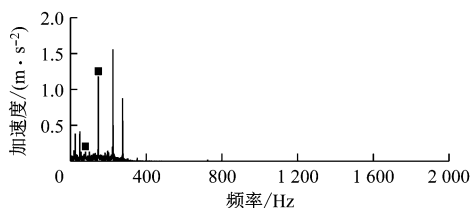


图 3 电动机轴伸端振动信号经小波变换处理后频谱

Fig. 3 Frequency spectrum of vibration signal of motor shaft extension after wavelet transform

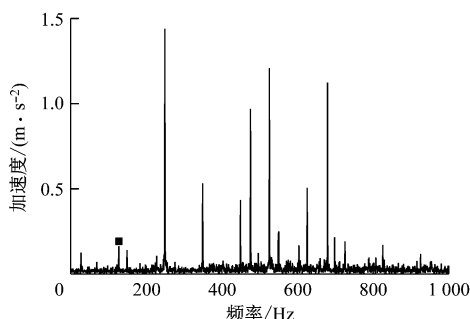


图 4 电动机轴伸端振动信号经双树复小波变换后频谱

Fig. 4 Frequency spectrum of vibration signal of motor shaft extension after dual-tree complex wavelet transform

从图 3 可看出,经小波变换处理后,与图 2 相比,信号的信噪比获得增强,频谱更加清晰,但信号中的微弱故障特征难以显现。从图 4 可清晰地看到 127.5 Hz 的频率成分,结合表 1 可确定信号频谱中存在显著的电动机轴承外圈故障特征。

矿方对该电动机进行检修时发现轴承外圈损伤,验证了本文方法的有效性。

4 结语

受煤矿环境因素影响,矿用电动机早期故障隐患特征被淹没在大量噪声中。针对该问题,提出了一种基于双树复小波变换的矿用电动机振动信号特征提取方法。应用结果表明,该方法能有效去除电动机振动信号中噪声,提取的早期故障特征能很好地反映电动机实际运行工况,有利于矿用电动机早期故障诊断。

参考文献 (References):

[1] 马海龙,王军. 电动机联接性故障诊断方法及其应用[J]. 工矿自动化,2017,43(4):77-81.
MA Hailong, WANG Jun. Connectivity fault

diagnosis method of motor and its application[J]. Industry and Mine Automation,2017,43(4):77-81.

[2] 王煜,周孟然,胡锋,等. 优化神经网络在矿用电机轴承故障诊断的应用[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2018,38(4):30-35.
WANG Yu, ZHOU Mengran, HU Feng, et al. Application of optimized neural network in mine motor bearing fault diagnosis[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science),2018,38(4):30-35.
[3] 冷永刚,王太勇,李瑞欣,等. 变尺度随机共振用于电机故障的监测诊断[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):111-115.
LENG Yonggang, WANG Taiyong, LI Ruixin, et al. Scale transformation stochastic resonance for the monitoring and diagnosis of electromotor faults[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(11):111-115.
[4] 马海龙. 复杂机电设备微弱特征提取与早期故障诊断方法研究[D]. 北京:北京工业大学,2011.
[5] 马海龙,王臻,朱益军,等. 基于差分振子的带式输送机故障诊断方法[J]. 工矿自动化,2013,39(10):24-27.
MA Hailong, LI Zhen, ZHU Yijun, et al. Fault diagnosis method of belt conveyor based on differential resonator [J]. Industry and Mine Automation,2013,39(10):24-27.
[6] 张永强,马宪民,弓晓凤. 基于 Duffing 混沌振子的煤矿设备故障检测方法[J]. 煤矿机械,2014,35(9):276-279.
ZHANG Yongqiang, MA Xianmin, GONG Xiaofeng. Fault diagnosis method of mining mechanism equipments based on chaotic duffing oscillator[J]. Coal Mine Machinery,2014,35(9):276-279.
[7] 庞维建,马海龙,朱益军. EMD 滤波在煤矿电动机故障诊断中的应用[J]. 工矿自动化,2015,41(3):93-95.
PANG Weijian, MA Hailong, ZHU Yijun. Application of EMD filter to fault diagnosis of coal mine motor [J]. Industry and Mine Automation,2015,41(3):93-95.
[8] 田慕玲,王晓玲. 电机故障诊断中的小波分析方法及小波基选取[J]. 煤矿机械,2007,28(5):176-178.
TIAN Muling, WANG Xiaoling. Wavelet analysis method applied in fault diagnosis of motor and selection of wavelet base[J]. Coal Mine Machinery,2007,28(5):176-178.
[9] 胥永刚,孟志鹏,赵国亮. 基于双树复小波变换的轴承复合故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(2):447-452.
XU Yonggang, MENG Zhipeng, ZHAO Guoliang. Study on compound fault diagnosis of rolling bearing based on dual-tree complex wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2014,35(2):

447-452.

[10] 杜文辽,陶建峰,巩晓赞,等. 基于双树复小波变换的非平稳时间序列去趋势波动分析方法[J]. 物理学报, 2016,65(9):18-26.

DU Wenliao,TAO Jianfeng,GONG Xiaoyun, et al. Dual-tree complex wavelet transform based multifractal detrended fluctuation analysis for nonstationary time series[J]. Acta Physica Sinica, 2016,65(9):18-26.

[11] 王芳,季忠,彭承琳. 基于双树复小波变换的心电信号去噪研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (5): 1160-1166.

WANG Fang,JI Zhong,PENG Chenglin. Research on ECG signal denoising based on dual-tree complex wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2013,34(5):1160-1166.

[12] 吴定海,张培林,任国全,等. 基于双树复小波包的发动机振动信号特征提取研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(4):160-163.

WU Dinghai,ZHANG Peilin,REN Guoquan, et al. Feature extraction of an engine vibration signal based on dual-tree wavelet package transformation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29 (4): 160-163.

[13] 王朝阁,刘桐桐,任学平,等. 双树复小波和 MED 在齿轮箱早期故障诊断中的应用[J]. 机械强度, 2018, 40(2):280-286.

WANG Chaoge,LIU Tongtong,REN Xueping,et al. Application of the dual tree complex wavelet transform and minimum entropy deconvolution in incipient fault diagnosis of the gear box[J]. Journal of Mechanical Strength,2018,40(2):280-286.

[14] 黄素真,宋晓梅,任正伟. 基于双树复小波变换信号去噪算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(10): 19-22.

HUANG Suzhen, SONG Xiaomei, REN Zhengwei. Signal denoising algorithm based on double-tree complex wavelet transform [J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2017,36(10):19-22.

[15] 胥永刚,孟志鹏,陆明. 基于双树复小波包变换的滚动轴承故障诊断[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (10): 49-56.

XU Yonggang, MENG Zhipeng, LU Ming. Fault diagnosis of rolling bearing based on dual-tree complex wavelet packet transform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(10):49-56.