

文章编号:1671-251X(2015)01-0058-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.01.015

谢飞,张雪英,乔铁柱,等.一种钢丝绳芯输送带早期故障检测方法[J].工矿自动化,2015,41(1):58-62.

一种钢丝绳芯输送带早期故障检测方法

谢飞^{1,2}, 张雪英^{1,2}, 乔铁柱², 杨洋^{1,2}

(1. 太原理工大学 信息工程学院, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:针对传统小波变换分析金属磁记忆信号奇异性时易受噪声干扰的问题,将经验模态分解(EMD)和小波变换(Wavelet)相结合,提出了一种 EMD-Wavelet 早期故障检测模型。将钢丝绳芯输送带的金属磁记忆信号经过经验模态分解得到本征模函数分量,利用小波变换模极大值法提取信号奇异性特征。实验结果表明,该模型抗干扰能力强,能够较好地反映信号局部特征,可有效判断钢丝绳芯输送带异常应力集中位置,为早期故障诊断提供依据。

关键词:钢丝绳芯输送带;早期故障检测;金属磁记忆信号;奇异性;经验模态分解;小波变换;模极大值

中图分类号:TD526/634

文献标志码:A

网络出版时间:2015-01-05 16:36

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150105.1636.015.html>

An early fault detection method of steel cord conveyor belt

XIE Fei^{1,2}, ZHANG Xueying^{1,2}, QIAO Tiezhu², YANG Yang^{1,2}

(1.College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2.Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract:In view of problem that using traditional wavelet transform to analyze singularity of metal magnetic memory signal easily suffered from noise interference, an early fault detection model combining empirical mode decomposition with wavelet transform was proposed. Firstly, metal magnetic memory signal of steel cord conveyor belt is decomposed into intrinsic mode function components through empirical mode decomposition, then singularity characteristic of the signal is extracted by use of wavelet transform modulus maxima method. The experimental results show that the model can reflect local characteristic of the signal with stronger anti-interference ability, and determine abnormal stress concentration zone of steel cord conveyor belt effectively, which provides basis for early fault diagnosis.

Key words:steel cord conveyor belt; early fault detection; metal magnetic memory signal; singularity; empirical mode decomposition; wavelet transform; modulus maxima

0 引言

钢丝绳芯输送带因其成槽性好、运输量大、使用简便等特点成为矿山、建筑、冶金等行业的主要运输设备^[1]。钢丝绳芯输送带在使用过程中,金属或矸

石等尖锐物体容易发生卡壳并划破输送带,导致钢丝绳芯的强度下降甚至断裂,造成重大经济损失及人员伤亡。所以,对于输送带早期的故障诊断尤为重要。

目前,钢丝绳芯输送带无损检测的方法主要有

收稿日期:2014-03-04;修回日期:2014-11-19;责任编辑:盛男。

基金项目:山西省普通高校特色重点学科建设项目(晋教财[2012]145号);山西省高等学校留学回国人员科研资助项目(晋教外[2011]63号)。

作者简介:谢飞(1988—),男,山西太原人,硕士研究生,主要研究方向为故障诊断技术,E-mail:destinyfly_2007@126.com。

磁巴克豪森噪声法、磁滞回线法、磁声发射法等,这些方法根据金属的应力集中区或微观缺陷进行早期无损检测,但存在抗干扰能力弱、成本高、精确度低等不足^[2]。金属磁记忆检测法是一种新型无损检测方法,该方法通过检测漏磁场梯度和金属磁记忆信号的法向磁感应分量确定铁磁构件的应力集中区和损伤位置^[3],具有成本低、精确度高、不需磁化设备等优点。但金属磁记忆信号微弱,传统小波变换分析金属磁记忆信号奇异性时,容易受外界噪声干扰而难以确定异常应力集中区。本文将经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和小波变换(Wavelet)相结合,提出了一种 EMD-Wavelet 早期故障检测模型,应用于钢丝绳芯输送带早期故障检测,可提高信号特征值的可检出度,便于识别异常应力集中区。

1 EMD 原理

EMD 是一种精确时频分析方法,具有高信噪比,适合于分析非线性、非平稳信号。EMD 根据信号的时间尺度特性,将任意的非线性、非平稳信号分解为若干个本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF)及残余分量^[4],被广泛应用于信号突变检测、信号预测和信号分解等^[5]。

EMD 基于原始信号的局部特征时间尺度提取 IMF,对高低不平的信号进行平稳化处理,使信号中不同尺度的分量逐级展开,产生对应的数据序列。IMF 的提取可以突出原始信号的固有特征信息,具体步骤如下^[6]:

(1) 对原始信号 $x(t)$ 求取局部极小值和局部极大值,利用三次插值方法求得对应的极小值包络 $x_{\min}(t)$ 和极大值包络 $x_{\max}(t)$,则瞬时平均值 $m(t) = \frac{x_{\min}(t) + x_{\max}(t)}{2}$,原始信号 $x(t)$ 与 $m(t)$ 之差记为 $h(t)$,即

$$h(t) = x(t) - m(t) \quad (1)$$

(2) 判断 $h(t)$ 是否满足以下条件:① 过零点和极值点的数目相等或最多相差 1 个;② 信号上任意一点,由极小值定义的包络 $x_{\min}(t)$ 和由极大值定义的包络 $x_{\max}(t)$ 的平均值为 0。若满足条件,则 $h(t)$ 成为从原始信号筛选出的第 1 个 IMF 分量,记为 $c_1(t)$,通常 $c_1(t)$ 包含信号的最细尺度或最短周期的成分;若不满足条件,则将 $h(t)$ 作为原始信号重复步骤(1)。当满足式(2)的终止准则时,停止信号分解。

$$\sum_{i=0}^T \frac{|h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{|h_{k-1}(t)|^2} \leq \text{SD} \quad (2)$$

式中: T 为周期; $h_{k-1}(t)$, $h_k(t)$ 分别为第 $k-1$, k 个 IMF 分量;SD 通常取 0.2~0.3。

(3) 将 $c_1(t)$ 从原始信号 $x(t)$ 中分离出来,并得到残余分量:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (3)$$

(4) 将 $r_1(t)$ 作为原始信号,重复步骤(1)和(2),得到 $x(t)$ 的第 2 个 IMF 分量 $c_2(t)$ 。以此类推,得到第 3, 4, ..., n 个 IMF 分量 $c_3(t)$, $c_4(t)$, ..., $c_n(t)$ 。

(5) 直到第 n 个残余分量 $r_n(t)$ 为单调函数或所含信息对研究内容意义很小时,EMD 结束, $r_n(t)$ 可表示为

$$r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_n(t) \quad (4)$$

将原始信号 $x(t)$ 分解为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (5)$$

其中,原始信号的最高频分量首先被提取出来,依次提取的各 IMF 分量频率逐渐下降。 $r_n(t)$ 反映信号的变化趋势或直流分量。

2 小波变换模极大值原理

小波变换具有良好的时频分析能力和各尺度间较好的正交性,常应用于信号处理,能够有效提取信号的细节信息^[7]。

设基小波 $\Psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$,其中 $L^2(\mathbf{R})$ 表示平方可积的实数空间, $\Psi(t)$ 的傅里叶变换 $\hat{\Psi}(\omega)$ 满足允许性条件:

$$c_{\Psi} = \int_{\mathbf{R}} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (6)$$

式中: c_{Ψ} 为小波函数; ω 为频域。

对任意信号 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 的小波变换为

$$w_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{\mathbf{R}} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (7)$$

式中: a 为尺度因子; b 为平移因子; $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为 $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的共轭复数。

若存在一点 (s_0, t_0) 使得 $\frac{\partial w_f(s_0, t_0)}{\partial t} = 0$,则称点 (s_0, t_0) 为局部极值点。若 t_0 的某一邻域内任意一点 t 都有 $|w_f(s_0, t)| \leq |w_f(s_0, t_0)|$,则称点 (s_0, t_0) 为小波变换的模极大值点。若把信号看成一阶导数,小波变换的模极大值点对应的就是信号的奇异点。根据小波变换在各个尺度之间的传播特性就能确定信号的奇异点。

3 EMD-Wavelet 早期故障检测模型

小波变换的时频分析本质是一种线性变换,在

信号分析过程中可能产生无关分量,影响分析结论的准确性^[8]。同时小波变换不具有自适应性,无法确定信号频率且存在混频现象,不能完全反映信号的特性。EMD 算法既是对整个时域信号的分解,又以局部极值为基础,突出了信号的局部性。EMD 能弥补小波变换自适应性差、精确度低和能量扩散等缺点,但其分解得到的各分量正交性较差^[9]。因此将 EMD 和小波变换相结合,提出 EMD-Wavelet 早期故障检测模型,其原理如图 1 所示。将金属磁记忆信号先经 EMD 算法进行处理,得到各个 IMF 分量,再利用小波变换模极大值法对金属磁记忆信号进行特征提取,确定钢丝绳芯输送带应力集中区。

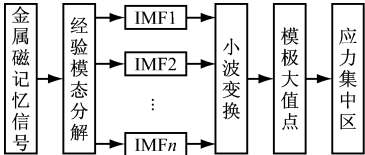


图 1 EMD-Wavelet 早期故障检测模型原理

4 实验分析

利用 EMD-Wavelet 早期故障检测模型对钢丝绳芯输送带的金属磁记忆信号奇异性特征进行提取。选用井下长 2 m、宽 0.5 m 并经过三级接头硫化工艺处理的钢丝绳芯输送带。采用 EMS-2003 型智能磁记忆检测仪测量噪声环境下钢丝绳芯输送带,得到金属磁记忆信号的法向磁感应分量,如图 2 所示。

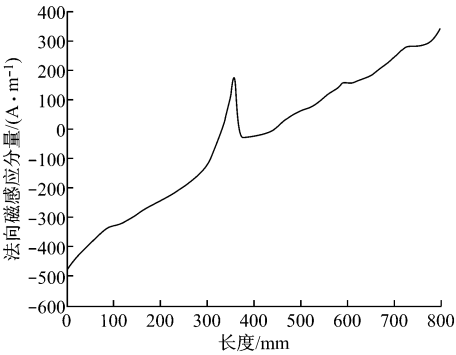


图 2 钢丝绳芯输送带金属磁记忆信号的法向磁感应分量

从图 2 可看出,信号在 300~500 mm 区域中有 3 处过零点。根据金属磁记忆检测法,法向磁感应分量符号改变的区域为异常应力集中区。

应用小波变换对原始信号进行分析。由于小波基函数与分析信号的相似度有关,所以不同的小波类型对突变信号的检测效果不同。经过多次实验发现,采用分解尺度为 6 的 coif1 小波函数更合适,对金属磁记忆信号的法向磁感应分量进行 6 层小波分

解,如图 3 所示。

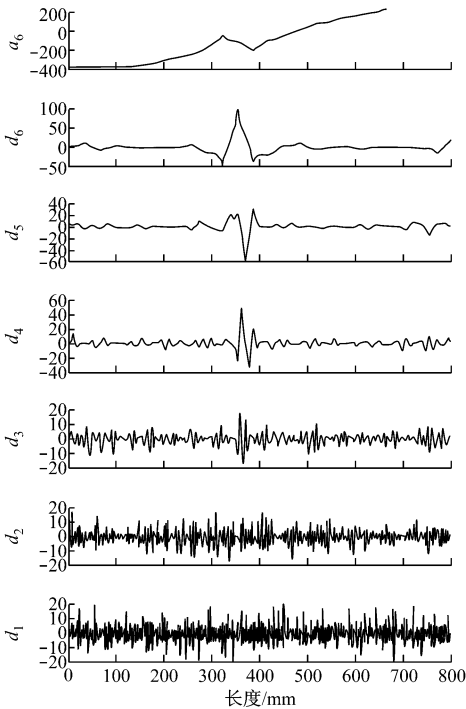


图 3 金属磁记忆信号的法向磁感应分量小波分解

图 3 中, d_1-d_6 为 6 层分解的小波高频系数,反映了金属磁记忆信号的主要信息; a_6 为第 6 层分解的小波低频系数。由于金属磁记忆信号受到噪声的干扰,coif1 小波各层次上的模极大值都不明显,所以不能提取微弱的金属磁记忆信号奇异性特征。

采用 EMD-Wavelet 早期故障检测模型,对金属磁记忆信号的法向磁感应分量进行 EMD 算法分解,将法向磁感应分量信号分解成 6 个 IMF 和 1 个残余分量 RES,如图 4 所示。

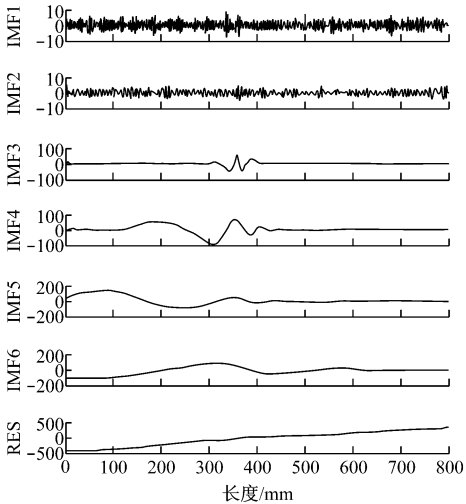
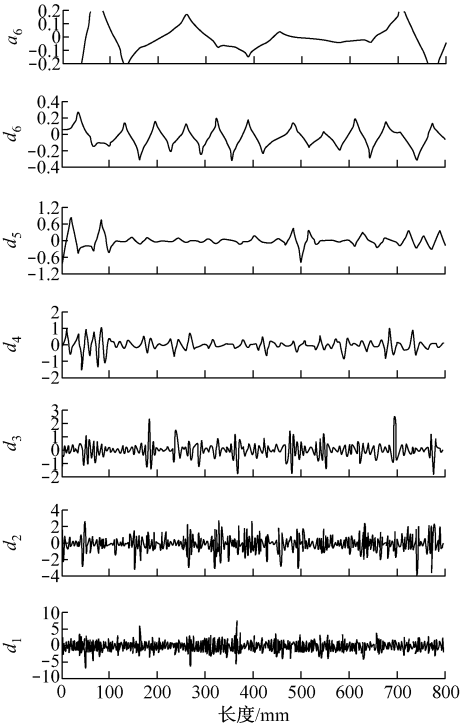


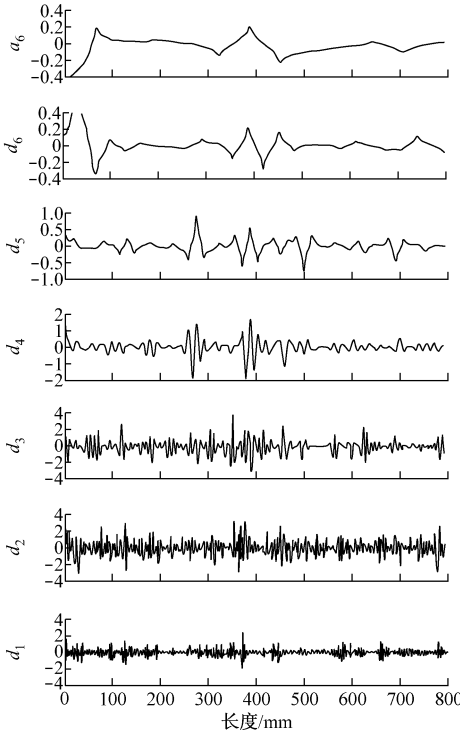
图 4 金属磁记忆信号的法向磁感应分量 EMD 分解

图 4 中 IMF1—IMF6 分量从高频成分到低频

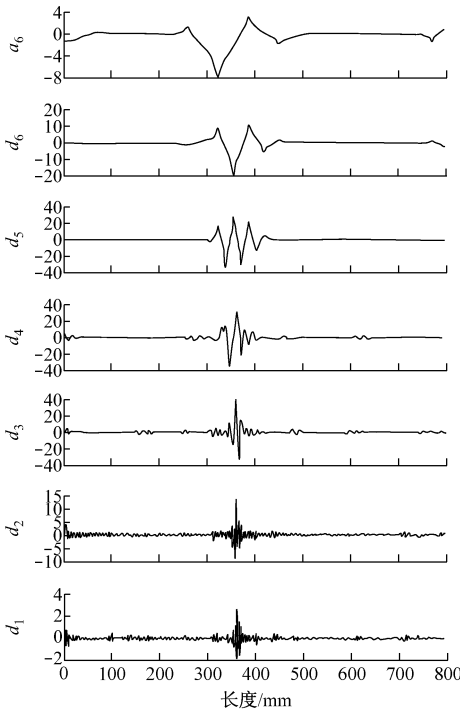
成分排列。IMF1—IMF3 分量对金属磁记忆信号的描述细腻,包含原始信号的特征比较丰富。IMF4—IMF6 分量主要包含趋势信息,而残余分量反映金属磁记忆信号的变化趋势。因此只对 IMF1—IMF3 分量采用 *coif1* 小波进行 6 层分解,得到小波变换模极大值,如图 5 所示。



(a) IMF1 的 6 层 *coif1* 小波分解



(b) IMF2 的 6 层 *coif1* 小波分解



(c) IMF3 的 6 层 *coif1* 小波分解

图 5 IMF 的 6 层 *coif1* 小波分解

从图 5 可看出,信号经过小波分解后的第 1 层高频系数 d_1 中,大约在 360 mm 处出现清楚的模极大值点,该处为法向磁感应分量的零值点,反映了信号奇异点的位置。

5 结语

利用 EMD-Wavelet 早期故障检测模型,将钢丝绳芯输送带的金属磁记忆信号根据不同振幅和频率逐一进行 EMD 分解,再用 *coif1* 小波变换模极大值法提取信号特征。实验结果表明,EMD-Wavelet 早期故障检测模型同时具有小波变换良好的时频分析能力和 EMD 算法处理噪声数据的优势,能够在一定的噪声环境下有效检测出金属磁记忆信号的奇异点,可应用于钢丝绳芯输送带的早期故障诊断。

参考文献:

[1] 刘利伟,李建朝. 矿井提升机钢丝绳在线无损检测系统的设计及应用[J]. 工矿自动化,2012,38(1):90-92.

[2] 冷建成,刘扬,周国强,等. 铁磁性材料早期损伤的磁无损检测方法综述[J]. 化工机械,2013,40(2):139-145.

[3] DOUBOV A A. Evaluation of service life of equipment using magnetic memory method [J]. Tyazheloe Mashinostroenie,2005(6):13-15.

[4] 柯世堂,赵林,邵亚会,等. Wavelet_Huang 和 Hilbert_Huang 方法用于非高斯风压信号分析的比较研究[J]. 土木工程学报,2011,44(6):61-67.

- [5] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [6] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1998, 454: 903-995.
- [7] 张德丰. MATLAB 小波分析 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [8] 罗兴铸, 薛延刚, 王瀚. EMD 小波变换水轮机故障奇异数据还原研究 [J]. *水利发电学报*, 2012, 31(2): 245-250.
- [9] 龚志强, 邹明玮, 高新全, 等. 基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究 [J]. *物理学报*, 2005, 54(8): 3947-3957.