

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.01.011

基于 Morlet 小波变换模拟实现的机械振动故障诊断

胡沁春^{1,2}

(1. 成都工业学院 电气与电子工程系, 四川 成都 611730; 2. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为了对机械振动故障进行实时诊断, 提出了基于开关电流技术的 Morlet 小波变换的模拟实现方法。利用开关电流电路构造高斯函数发生器, 解决了 Morlet 小波变换模拟实现的关键问题, 其良好性能得到了仿真结果的证实。将 Morlet 小波变换应用到机械振动故障诊断中, 根据对振动信号小波变换的模极大值点来定位奇异信号, 提取出故障信息。仿真结果表明了该方法对机械振动故障实时诊断的有效性。

关键词: Morlet 小波变换; 开关电流; 机械振动; 故障诊断

中图分类号: TN710.2; TH165+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2013)01-0048-05

Machine Vibration Fault Diagnosis Based on Morlet Wavelet Transform Analog Implementation

Hu Qinchun^{1,2}

(1. Department of Electrical and Electronic Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu 611730, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: For the real time fault diagnosis of machinery vibration, the Morlet wavelet transform (WT) simulation implementation based on switched current (SI) circuits is proposed. The application of switched current circuits for Gaussian function generator solves the key problem in the analog implementation of Morlet WT, and the good performance of SI Gaussian function generator is verified by simulated results. It applies Morlet wavelet transform in machine vibration fault diagnosis and locates singular signal according to wavelet transform module maximum of the vibration signal to extract fault information. The simulation results show that the method for real time fault diagnosis of the mechanical vibration is effective.

Keywords: Morlet wavelet transform; switched current; machine vibration; fault diagnosis

0 引言

对机械设备的运行状态进行监测, 能及时发现隐患, 便于对故障部件进行维修或更换, 从而保证机械设备的正常运行。机械设备在正常运行时产生的振动信号较平稳, 一旦设备发生异常, 机械振动信号中会包含具有奇异性的动态非平稳信号, 因此

机械设备的状态监测可通过对机械振动信号进行检测来实现。监测系统通过在线实时提取出非平稳的故障特征信号^[1-3], 实现对故障的实时报警。但很多监测系统往往采用软件方式对机械振动信号进行分析、计算, 不能做到真正的实时诊断、报警。

小波变换具有多分辨率和时频局域化的特点, 被誉为分析信号的数学显微镜, 比较适合处理非平

收稿日期: 2012-10-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61104024), 四川省教育厅科研基金资助项目(12ZB179), 湖南省教育厅科研基金资助项目(11C0385), 成都工业学院博士科研基金资助项目(KYBS12001)

作者简介: 胡沁春(1976-), 男, 湖南溆浦人, 湖南工业大学副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为信号处理, 电路理论与设计, 小波分析, 故障诊断和开关电流电路及高速集成电路设计, E-mail: huqinc@163.com

稳信号^[4],因而在机械振动故障诊断中有良好的应用。信号的小波变换常用离散小波变换来实现,其运算量大,时延也较大,难以满足实时信号处理的要求。基于电流模的开关电流技术,是用离散时间的取样数据系统处理连续时间的模拟信号,具有高频特性好、电压低、功耗低以及动态范围大等优点^[5],可用于小波变换的模拟电路来实现。小波变换的模拟电路实现具有处理速度快、结构简单以及便于一体化集成等优点,因而具备对信号进行实时处理、检测的能力。

本文提出用开关电流模拟电路实现 Morlet 小波变换,其模拟实现得到了电路仿真验证。对机械振动信号进行监测、处理,用硬件方式实现 Morlet 小波变换对奇异信号的检测,满足机械振动故障实时诊断的要求。

1 Morlet 小波变换

Morlet 小波变换具有变时窗的时频分布特性,可以应用于信号检测、特征提取、故障诊断、时频联合分析、去噪等领域。Morlet 小波函数的时域表达为

$$\psi(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) \cdot e^{j\omega_0 t} = \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) (\cos \omega_0 t + j \sin \omega_0 t)。 \quad (1)$$

根据式(1)的 Morlet 小波函数时域表达, Morlet 小波包含 2 部分: 高斯函数和正弦函数(复数部分可以分解为具有虚部和实部的正弦波)。设 $f(t)$ 是平方可积函数, $\psi(t)$ 是 Morlet 基本小波函数, 则

$$WT_f(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{\tau - t}{a} \right) dt。 \quad (2)$$

式(2)称为 $f(t)$ 的 Morlet 小波变换, “*” 代表复共轭, a 称作尺度因子, 且 $a > 0$, τ 反映时移, 其值可正可负。

小波变换的实现主要有软件实现与硬件实现 2 大类。用软件实现小波变换在算法上的成果较多, 但是小波变换的软件实现运算量大、实时性较差, 在对实时运算要求严格的领域, 如信号监测、实时故障诊断、工业过程控制、军事通讯等, 小波变换的软件实现不能满足应用需求, 此时需要具有强实时性的硬件模拟电路来实现小波变换。小波变换模拟硬件实现方法可分为频域法和时域法 2 类。小波变换的模拟电路实现, 采用频域法的国内外研究成果较多^[6-10], 而基于时域法的文献很少。

2 Morlet 小波变换的开关电流电路实现

根据式(1)~(2)所示的 Morlet 小波函数与小波变换的时域表达, Morlet 小波变换的时域法实现原理如图 1 所示, 其中, 虚线框中为 Morlet 小波函数时域产生单元。

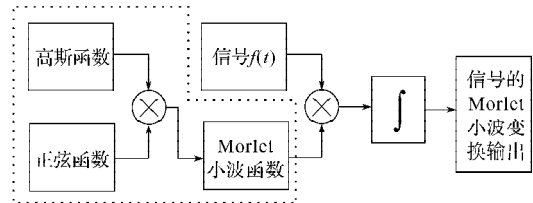


图1 小波变换的时域法实现原理

Fig. 1 Implementation of wavelet transform in time-domain

Morlet 小波变换电路实现的基本单元包括: 高斯函数发生器、正弦函数发生器、乘法器和积分器。将图 1 所示的各模块单元分别用开关电流电路实现, 可完成 Morlet 小波变换的开关电流电路实现。关于正弦函数发生器、乘法器与积分器的开关电流电路实现的研究成果已有许多, 参见文献[8-9]; 而高斯函数发生器的开关电流电路实现的研究成果较少, 但它是 Morlet 小波变换开关电流模拟实现的核心单元电路。

2.1 开关电流高斯函数发生器设计

Morlet 小波的高斯包络函数为

$$g(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right)。 \quad (3)$$

$g(t)$ 是一个非因果系统, 可使 $g(t)$ 向右移得到因果系统表示 $g(t-t_0)$ (取 $t_0=3$ 得图 2 中虚线所示波形)。从 $g(t-t_0)$ 的时域表达式很难直接设计出满足要求的系统, 为简化设计可进行时域到频域的转换设计: 采用 Padé 变换^[11]获得时域高斯函数的频域有理逼近。高斯函数的 [3/5] Padé 逼近的系统函数为

$$H_{[3/5]}(s) = \frac{-1.31s^3 + 8.82s^2 - 25.11s + 31.74}{s^5 + 6.66s^4 + 21.14s^3 + 38.59s^2 + 39.56s + 17.91} = \frac{-1.31}{s + 1.5884} \cdot \frac{s - 3.0544}{s^2 + 2.1288s + 4.019} \cdot \frac{s^2 - 3.6784s + 7.932}{s^2 + 2.9488s + 2.8056}。 \quad (4)$$

根据式(4), 高斯函数发生器的系统函数可分解为一阶函数和二阶函数, 其函数发生器可由一阶电路和二阶电路级联实现。Padé 逼近高斯函数具有误

差,提高逼近阶数可减小误差,但计算量与实现难度会加大,在实际应用时必须权衡考虑。图2为高斯函数(虚线)与其[3/5]Padé逼近(实线)的比较,从图可看出高斯函数的[3/5]Padé逼近效果较理想,且其实现较易。

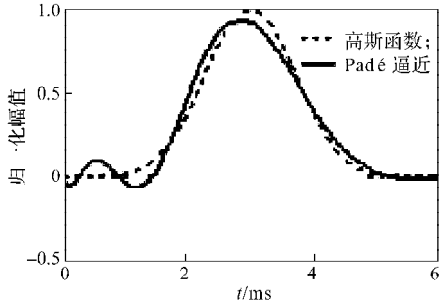


图2 高斯函数与其[3/5] Padé逼近比较

Fig. 2 Gaussian function and its [3/5] Padé approximation

2.2 Morlet小波变换的开关电流电路实现仿真

由式(4)可知,开关电流高斯函数发生器可用1个开关电流一阶节和2个开关电流二阶节的级联实现。开关电流一阶节、二阶节的电路实现可参见文献[10]。采用开关电流电路分析软件(analysis of switched-current filters in Z transform, ASIZ)^[12]进行电路仿真,验证提出的基于开关电流的Morlet小波实现的有效性。将时钟频率分别设定为400, 200, 100 kHz,可获得开关电流高斯函数发生器在尺度为 $a=2^0$, $a=2^1$ 和 $a=2^2$ 的输出,输出波形分别见图3中的曲线①、曲线②和曲线③。电路仿真结果表明,采用同一开关电流电路实现高斯函数发生器,调节时钟频率可获得不同尺度的高斯函数输出。

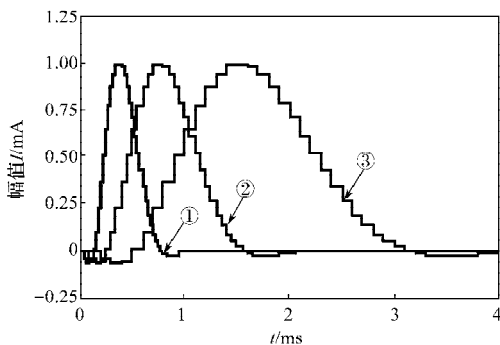


图3 开关电流高斯函数发生器的输出

Fig. 3 Output signal of SI Gaussian generator

根据图1所示小波变换的时域法实现原理, Morlet小波函数实现电路包含开关电流高斯函数发生器、开关电流正弦函数发生器及开关电流乘法器。图4为Morlet小波在尺度 $a=2^2$ 时的仿真输出,图中虚线为高斯包络,实线为Morlet小波。不同尺度上的Morlet小波函数可由调节开关电流电路的时钟频率获得。这样,提出的Morlet小波变换的实现可以

扩展到任意尺度的Morlet小波变换实现。

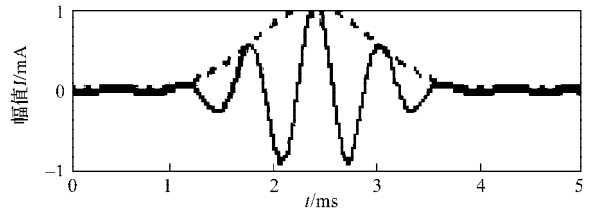


图4 尺度 $a=2^2$ 时的Morlet小波仿真输出

Fig. 4 Simulated output of Morlet wavelet at $a=2^2$

3 基于Morlet小波变换的机械振动故障诊断

用开关电流电路模拟实现的Morlet小波变换具有良好的实时性,可较好地应用于机械振动故障的实时诊断。当机械设备发生故障时,故障信息往往包含在振动信号中,因此从机械的振动信号中提取故障特征信息成为机械故障诊断的有效手段。在进行机械振动信号的分析时,故障信号多是尖峰信号或瞬变信号,类似脉冲信号。此外,检测到的机械振动信号都带有噪声,在这种情况下对故障信号进行提取是故障诊断的关键。信号经小波变换后,可最大程度地去除信号的相关性,将能量集中在少数小波系数上,这些系数是各个尺度下的模极大值。同时噪声经小波变换后仍是噪声,其小波系数仍互不相关,并且分布在各个尺度下的所有时间轴上。将小波变换在各个尺度下那些模极大值点保留,而将其它点置零,或是最大程度地减小,即可达到抑制噪声和提取故障特征,进而查到机器的故障源。

旋转型机械(汽轮发电机组、风机、泵等)在电力、石化、冶金等行业应用广泛,以此为例说明小波变换机械故障诊断的效果。旋转型机械的振动信号在总体上表现为周期性的特点。当故障发生时,会产生突变类的信号叠加于正常的机械振动信号上,用脉冲信号模拟故障信号,其波形见图5。

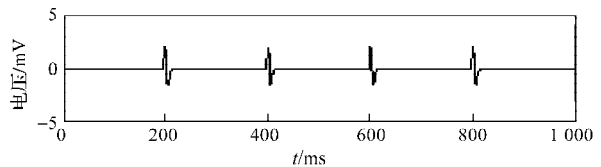


图5 故障信号

Fig. 5 Fault signal

图6为一带噪声的正常机械振动信号,图7为故障信号与带噪声的正常机械振动信号的叠加信号,用来模拟故障机械振动信号。

从图6与图7可知,很难直接从波形判断出哪一

个是带有故障的机械振动信号。为了检测机械是否有故障，对机械振动信号进行多分辨分析。为了对比效果，分别对正常机械振动信号和带故障的机械振动信号进行 3 级 Morlet 小波变换。

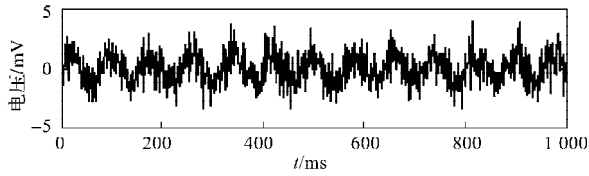


图6 正常的机械振动信号

Fig. 6 Normal vibration signal

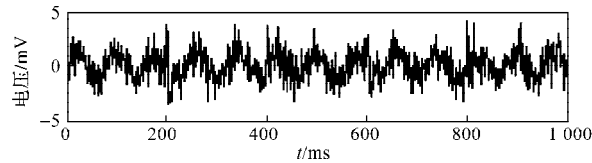
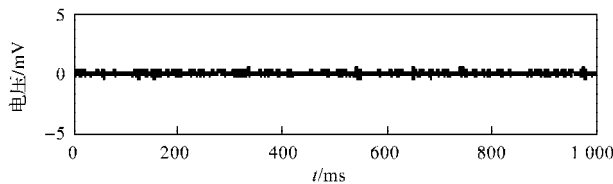


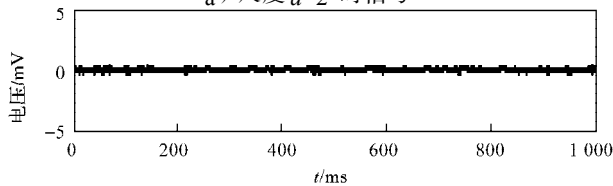
图7 带故障的机械振动信号

Fig. 7 Fault vibration signal

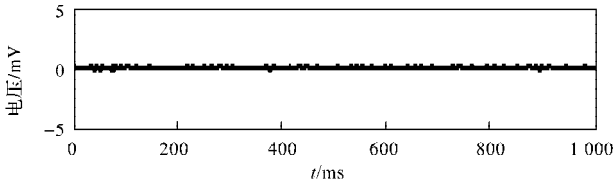
图 8 为正常机械振动信号的 3 级 Morlet 小波变换结果，其中图 8a~c 分别表示在 3 个尺度上的细节信息，它们的频带依次由高到低，图 8d 为振动信号在尺度 $a=2^2$ 上的概貌逼近。由图可知，无故障时没有信号突变。



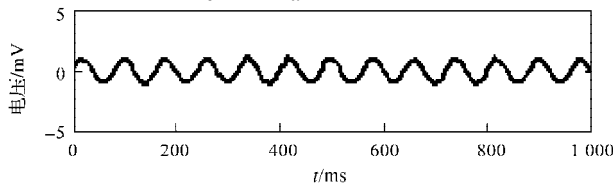
a) 尺度 $a=2^0$ 时信号



b) 尺度 $a=2^1$ 时信号



c) 尺度 $a=2^2$ 时信号

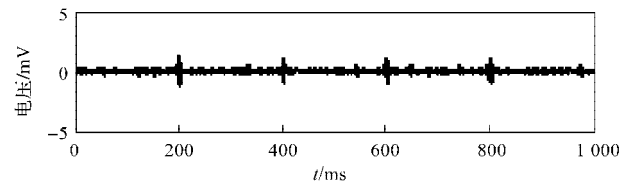


d) 尺度 $a=2^2$ 时的概貌逼近

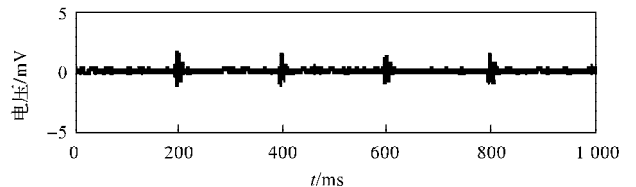
图8 正常机械振动信号的小波变换结果

Fig. 8 Wavelet transform result of normal vibration signal

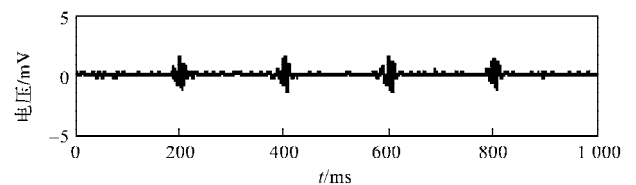
图 9 为带故障的机械振动信号的 3 级 Morlet 小波变换的结果，其中图 9a~c 分别表示在 3 个尺度上的细节信息，它们的频带依次由高到低，图 9d 为振动信号在尺度 $a=2^2$ 上的概貌逼近。模拟故障脉冲信号（见图 5）在 $t=200$ ms, 400 ms, 600 ms, 800 ms 时刻产生。从尺度上的概貌逼近容易看出，有故障发生但还不能准确定位。再看尺度 $a=2^0$, $a=2^1$ 和 $a=2^2$ 上的 Morlet 小波变换结果，可很清楚地看出在 $t=200$ ms, 400 ms, 600 ms, 800 ms 时刻，小波变换有模极大值出现，从而找出振动信号中故障信号出现的准确位置，诊断出故障。



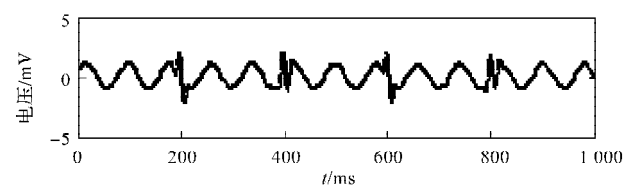
a) 尺度 $a=2^0$ 时信号



b) 尺度 $a=2^1$ 时信号



c) 尺度 $a=2^2$ 时信号



d) 尺度 $a=2^2$ 时的概貌逼近

图9 带故障机械振动信号的小波变换结果

Fig. 9 Wavelet transform result of fault vibration signal

4 结语

相比小波变换的数字离散实现方法，本文提出的基于开关电流技术的 Morlet 小波变换模拟实现方法，能快速得到小波变换结果，具有强实时性的特点。将该方法用于机械振动故障诊断，能够实现对机械设备运行状态的实时监测，及早发现故障，确保机械设备正常工作。仿真结果证明了该方法的有效性，其在机械振动故障诊断方面具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 姜海燕, 彭涛. 基于威布尔分布和支持向量机的滚动轴承故障诊断方法[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(4): 92-97.
Jiang Haiyan, Peng Tao. Fault Diagnosis of Rolling Bearings Based on Weibull Distribution and Support Vector Machine [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(4): 92-97.
- [2] 魏巍, 彭涛. 基于EMD模态能量分析的滚动轴承故障特征提取[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(3): 58-62.
Wei Wei, Peng Tao. Fault Feature Extraction of Roller Bearing Based on EMD Modal Energy Analysis [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(3): 58-62.
- [3] 康守强, 王玉静, 杨广学, 等. 基于经验模态分解和超球多类支持向量机的滚动轴承故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(14): 96-102.
Kang Shouqiang, Wang Yujing, Yang Guangxue, et al. Rolling Bearing Fault Diagnosis Method Using Empirical Mode Decomposition and Hypersphere Multiclass Support Vector Machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(14): 96-102.
- [4] Mallat Sté phane. A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way [M]. 3rd ed. New York: Academic Press, 2008: 1-60.
- [5] Toumazou C, Hughes J B, Battersby N C. 开关电流: 数字工艺的模拟技术 [M]. 姚玉洁, 刘激扬, 刘素馨, 等译. 北京: 高等教育出版社, 1997: 1-20.
Toumazou C, Hughes J B, Battersby N C. Switched-Currents: An Analogue Technique for Digital Technology [M]. Yao Y J, Liu J Y, Liu S X, et al Translated. Beijing: Higher Education Press, 1997: 1-20.
- [6] Li Hongmin, He yigang, Zhang Guoyun, et al. Log-Domain Implementation of Analog Wavelet Filters [C]//2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP). Dalian: Conference Publications, 2010: 187-190.
- [7] 左园园, 何怡刚. 基于开关电流电路的小波变换实现 [J]. 电路与系统学报, 2011, 16(4): 35-39.
Zuo Yuanyuan, He Yigang. Implementation of Wavelet Transform Based on Switched-Current Circuit [J]. Journal of Circuits and Systems. 2011, 16(4): 35-39.
- [8] 胡沁春, 何怡刚, 李宏民, 等. 基于开关电流的连续小波变换实现 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(5): 66-70.
Hu Qinchun, He Yigang, Li Hongmin, et al. Implementation of Continuous Wavelet Transform Based on Switched-Current [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2005, 32(5): 66-70.
- [9] 胡沁春, 何怡刚, 郭迪新, 等. 基于开关电流技术的时域连续小波变换实现 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 227-231.
Hu Qinchun, He Yigang, Guo Dixin, et al. Time-Domain Implementation of Continuous Wavelet Transform Based on Switched Current [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(1): 227-231.
- [10] Liu Meirong, Hu Qinchun, He Yigang. A Novel Analog VLSI Implementation of Wavelet Transform Based on SI Circuits [C]//Congress on Image and Signal Processing. Sanya: Conference Publications, 2008: 317-323.
- [11] Baker J G A. Essentials of Padé Approximants [M]. New York: Academic Press, 1975: 10-80.
- [12] De Queiroz A C M, Pinheiro P R M, Caloba L P. Nodal Analysis of Switched-Current Filters [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1993, 40(1): 10-18.

(责任编辑: 邓光辉)