

文章编号: 1005-0523(2006)04-0105-03

基于小波变换的机械振动故障诊断系统的研究

周洋, 萧蕴诗, 何斌, 岳继光

(同济大学过程控制实验室, 上海 201804)

摘要: 小波变换具有良好的时频局部性质. 论文介绍了小波变换的基本理论, 阐述了小波变换用于机械振动信号的奇异性检测以发现机械故障的原理. 根据对振动信号小波变换的系数模极值点来定位奇异信号, 检测机械故障. 给出了系统实现的硬件框图和软件流程. 试验表明, 系统可以发现故障机械振动信号带有的奇异性, 实现旋转机械的故障诊断.

关键词: 小波分析; 机械振动; 故障诊断

中图分类号: TP206

文献标识码: A

0 引言

旋转机械(如汽轮发电机组、透平压缩机、泵与风机等)在电力、石化、冶金、机械等部门中处于举足轻重的关键地位, 此类机械一旦发生故障将会造成巨大的经济损失和严重的社会影响. 因此对这些旋转机械实施故障诊断, 以及及时的更换部件或进行维修, 保证设备的正常运行十分必要. 当旋转机械设备发生故障时, 其振动信号中往往会出现奇异性成分. 因此可以从振动信号的奇异性入手对旋转机械进行故障诊断和检测. 小波变换由于具有良好的时-频局部特性, 能够反映信号在局部范围内的特征, 是信号奇异性检测的有力工具. 因此, 可以通过小波变换检测机械振动信号的奇异性从而实现对设备的故障检测. 本文采用 TI 公司的 TMS320LF2407 数字信号处理芯片, 根据小波变换的快速算法(Mallat 算法)对机械的振动信号进行处理, 根据变换后各尺度上模极大值来判断信号有无奇异性 and 奇异点出现的位置.

1 小波变换的基本理论

首先给出小波变换的一些基本概念和定义:

设 $\Psi(t)$ 为一平方可积函数, 也就是 $\Psi(t) \in L^2$

(R), 其中则称 $\Psi(t)$ 为一个母小波或者基本小波.

将小波函数进行伸缩和平移有

$$\Psi_{a, \tau} = a^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (a > 0, \tau \in R) \quad (1)$$

其中 a 为伸缩因子(或尺度因子); τ 为平移因子; 称 $\Psi_{a, \tau}$ 为依赖于 a, τ 的小波基函数. 由于 τ 是连续变化的值, 所以称 $\{\Psi_{a, \tau}(t)\}$ 为连续小波函数, 它们是由同一母函数 $\Psi(t)$ 经过伸缩平移后获得的一组函数序列.

$$\text{对于任意的 } x(t) \in L^2(R), \text{ 称 } WT_x(a, \tau) = \langle x, \Psi_{a, \tau} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R x(t) \Psi_{a, \tau}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (2)$$

为 $x(t)$ 的小波变换.

$x(t)$ 在某一尺度 a , 时间 τ 处的小波变换, 表示在这一时刻频率中心点周围, 一定频率窗口宽度内频率分量的大小. 高频时, 频域窗宽变小; 低频时, 频域窗宽变大. 通过 $x(t)$ 在 $t = \tau$ 处的小波变换, 可对信号在此处的局部情况进行分析并得到了解.

可以看出, 小波变换具有以下特点:

1) 小波变换提供了一个可变的时间-频率窗, 使得在高中心频率的时间窗自动变窄, 而在低中心频率的时间窗自动变宽. 具有类似调焦距的伸缩能力.

$$L^2(R) = \{x(t) \mid \int_R |x(t)|^2 dt < +\infty\}$$

为平方可积函数空间;

$$\text{且 } \Psi(t) \text{ 的傅立叶变换 } \Psi(\omega) \text{ 满足 } \int_R |\Psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < +\infty \quad (3)$$

收稿日期: 2006-01-08

作者简介: 周洋(1982-), 男, 山东枣庄人, 同济大学控制科学与工程系硕士研究生, 研究方向为小波分析和过程控制与计算机控制.

2) 小波变换在时域和频域同时具有良好的局部化性质.而且对于高频成分采用逐渐精细的时域或空域取样步长,从而可以聚焦到对象的任意细节,从这个意义上讲,他被人们誉为“数学显微镜”.

2 小波变换和信号的奇异性检测

旋转机械的故障往往可以从机械振动信号的突变成分中反映出来.振动信号的奇异性是进行机械故障诊断的有力依据.传统的 Fourier 变换只是一种纯频域的分析方法,不能提供局部时间域上的函数特征,无法聚焦到信号的具体细节.与 Fourier 变换相比,小波变换是在时域和频域的局部变换,能够有效的从信号中提取信息,通过伸缩和平移等手段对函数或信号进行多尺度分析.显然,在信号奇异性检测方面,小波变换能够分析局部信号在整体奇异性中所占有的比重,有着 Fourier 不具备的优势.下面介绍小波分析用于信号奇异性检测的原理:

对于一个具有平滑性的函数 $\theta(t)$, 满足以下两个条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(t) dt = 1, \lim_{|t| \rightarrow +\infty} \theta(t) = 0 \quad (4)$$

记 $\Psi^{(1)}(t), \Psi^{(2)}(t)$, 分别为 $\theta(t)$ 的一阶和二阶导数,

易知 $\Psi^{(1)}(t), \Psi^{(2)}(t)$ 满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^{(1)}(t) dt = 0, \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^{(2)}(t) dt = 0$, 故 $\Psi^{(1)}(t), \Psi^{(2)}(t)$ 可作为小波母函数.

那么,采用卷积的形式, $x(t)$ 在某一尺度 a , 时间 τ 处的小波变换可以表示为:

$$W_a^{(1)}x(t) = x * \Psi_a^{(1)}(t) = \frac{1}{a} \int_{R^x} x(\tau) \Psi^{(1)}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau \quad (5)$$

$$W_a^{(2)}x(t) = x * \Psi_a^{(2)}(t) = \frac{1}{a} \int_{R^x} x(\tau) \Psi^{(2)}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau \quad (6)$$

由 $\Psi^{(1)}(t), \Psi^{(2)}(t)$ 的定义有

$$W_a^{(1)}x(t) = x * \left[a \frac{d\theta}{dt} \right] (t) = a \frac{d}{dt} (x * \theta_a)(t) \quad (7)$$

$$W_a^{(2)}x(t) = x * \left[a \frac{d^2\theta}{dt^2} \right] (t) = a^2 \frac{d^2}{dt^2} (x * \theta_a)(t) \quad (8)$$

可见, $W_a^{(1)}x(t), W_a^{(2)}x(t)$ 可以看作信号 $x(t)$ 在尺度 a 下与 $\theta(t)$ 卷积后的一阶导数和二阶导数,所以 $W_a^{(1)}x(t)$ 的极值点对应 $x(t)$ 的拐点,能够体现出奇异性信号出现的位置.

以平滑函数 $\theta(t)$ 的一阶导数 $\Psi^{(1)}(t)$ 作为母小波,信号小波变换后的模极大值位置对应于信号的突变点的位置.

3 实例仿真

根据上述原理,选取含有奇异成分的机械振动信号,利用小波变换对信号进行分析.采用 Daubechies 5 基本小波,对输入信号进行 3 级小波变换.图 1 所示波形为在一个正弦波上叠加了周期出现的脉冲信号,是一种典型机械故障发生

时的振动信号.图 2 中 a1 到 a3 为振动信号在各个尺度上的初分辨逼近.图 3 中 d1 到 d3 分别表示尺度取 1 到 3 时分解的细节信息,它们的频带依次由高到低.对比可以看出,对输入信号的小波变换通过寻求变换后各个尺度上细节信息的模极大值找出振动信号中奇异信号出现的准确位置.

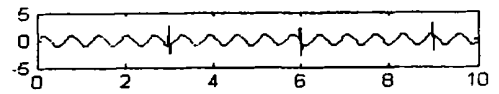


图 1 带有奇异性的机械振动信号

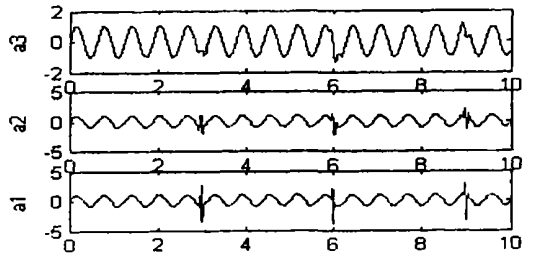


图 2 信号在各个尺度上的初分辨逼近

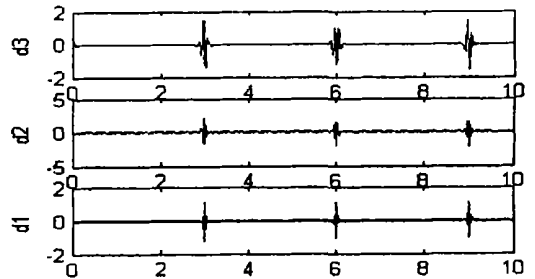


图 3 信号在各个尺度上的细节信息

4 系统的构成和实现

机械振动故障诊断系统可以对旋转机械运行时的振动信号进行采集,并通过 Mallat 快速小波变换检测振动信号的奇异性实现对旋转机械的故障诊断.系统采用 TI 公司的 TMS320LF2407 数字信号处理芯片作为整个系统的核心.TMS320LF2407 通过 16 为地址总线寻址,采用数据和程序地址空间分开的哈佛结构,所以需要外接两片 64 kb 的 SRAM.通过 JTAG 接口连接仿真器,可以对系统进行编程和调试.通过 LATTICE 4 128 V 可编程数字逻辑芯片外接控制键盘和 LCD,实现对系统运行状态的控制和信号波形及其变换的动态显示.为了减轻 DSP 的处理负担,用 4 128 V 实现 SPI 端口的控制信号驱动 ADS8361 采集输入信号.图 4 为系统硬件构成的框图.通过 TI 公司的基于 TMS320 2000 系列数字信号处理芯片开发环境 CCS(Code Composer Studio)对 TMS320LF2407 进行编程,实现核心算法和各种外设功能.图 5 为系统主程序的流程图.

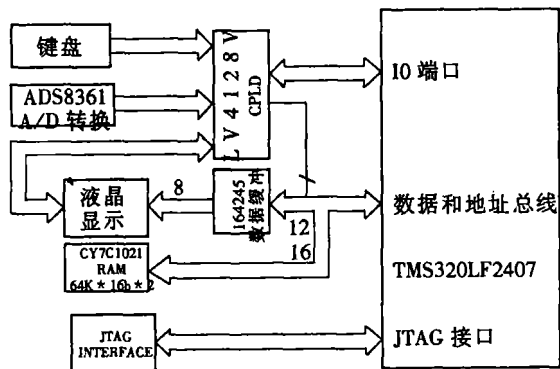


图 4 电路原理框图

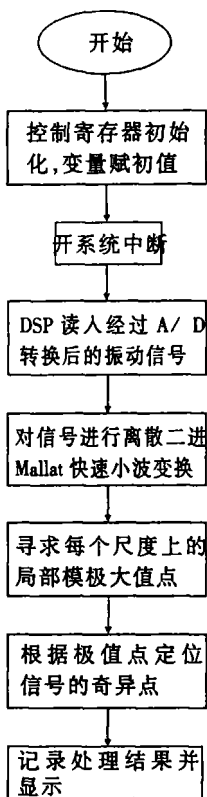


图 5 系统主程序流程图

5 结论

1) 系统在调试过程中发现输入信号有一定的噪声, 需要在信号进入 A/D 转换之前加入带通滤波. 虽然可以软件降噪, 但是受限与 DSP 芯片的处理能力, 故采用硬件滤波.

2) 在小波基和尺度的选择上, 要根据故障信号的特点, 考虑正则性, 信号的 Lipschits 指数, 平滑因子等因素进行选择.

3) 考虑到算法的复杂性和芯片的处理能力, 系统的核心算法尽量采用效率较高的汇编语言实现.

4) 通过在实验转子系统上模拟旋转机械的一些常见故障, 进行测试表明, 系统能够在旋转机械发生故障时检测到奇异信号的存在, 对机械故障作出判断. 这说明, 小波分析由于具有良好的时频局部化特性, 是信号奇异性检测的有力工具, 在旋转机械故障诊断方面有着较高的应用价值.

参考文献:

[1] 李弼程, 罗建书. 小波分析及其应用[A]. 北京: 电子工业出版社, 2003, 6.

[2] 斐峻峰, 杨其俊. 机械故障诊断技术[M]. 山东省东营市: 石油大学出版社, 1997.

[3] 陈逢时. 小波变换理论及其在信号处理中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

[4] 李建平. 小波分析与信号处理—理论、应用及软件实现[M]. 重庆: 重庆出版社, 1997.

[5] 张育林, 李东旭. 动态系统故障诊断理论与应用[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 1997.

[6] 董长虹, 高 志, 余啸海. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

The Study of Machinery Vibration Fault Diagnosis Detection System Based on Wavelet Transformation

ZHOU Yang, XIAO Yun-shi, HE Bin, YUE Ji-guang

(Process Control Lab, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In this paper, the basic theories of wavelet are introduced. The principle of using wavelet to detect the singularity of the machinery vibration signal and diagnose machinery fault is expounded. The machinery fault and location of singular signal can be detected according to the maximum of the wavelet transformation of the vibration signal. The hardware design diagram and software flow chart are given. Experimentation results indicate that the singularity of the fault machinery vibration signal can be detected and the machinery fault can be discovered by the system.

Key words: wavelet transform; machinery vibration; fault diagnosis