

小波算法在旋转机械故障诊断系统中的应用

胡 晶¹ 范 铮²

(1. 嘉峪关市建设局安监站, 甘肃 嘉峪关 751300;

2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 目前旋转机械在社会各个方面均有着广泛的应用, 同时旋转机械的故障也十分普遍。一旦发生故障就会造成巨大的经济损失。该文基于小波算法对旋转机械故障特征进行提取, 在时域和频域中对提取数据进行分析处理, 在上位中对故障诊断结果进行显示。以 Visual Studio 2010 为开发平台, C#为开发语言, 运用小波算法, 最终完成了故障诊断系统的开发。验证结果表明, 该诊断系统具有诊断精度高、速度快等优点。

关键词: 电机; 故障诊断; 小波算法; 时频域

中图分类号: TP271.8; TP274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0682(2014)01-0046-05

Application of wavelet algorithm in rotating machinery fault diagnosis system

HU Jing¹, FAN Zheng²

(1. Jiayuguan City Construction Bureau of Safety Supervision Station, Gansu Jiayuguan 751300, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Nowadays rotating machinery are widely used in all aspects of society, while mechanical failure is also very common. Huge economic losses will be caused as long as mechanical failure occurs. This paper extract fault feature based on wavelet algorithm, analyze data in the time and frequency domains, display diagnostics on the host computer. A development program for rotating machinery fault diagnosis system based on C# language and wavelet algorithm, which having Visual Studio 2010 employed as a platform. The application in practice proves the high precision and speed of this system.

Key words: motor; diagnosis fault; wavelet algorithm; time and frequency domain

0 引言

旋转机械被广泛应用于社会生产各个领域, 是工业生产领域应用最广泛的设备之一, 一旦发生故障, 将会造成巨大的经济损失。因此, 研究旋转机械的故障诊断具有重大意义。C#是专门用于 .NET 的新编程语言, 开发应用程序界面和操作外围设备快捷高效, 同时具有低级内存访问性、高效的数据访问和设备操作能力; 小波变换是一种新的变换分析方法, 它继承和发展了短时傅里叶变换局部化的思想, 同时又克服了窗口大小不随频率变化等缺点, 能够提供一随频率改变的时间-频率窗口, 是进行信号时频分析和处理的理想工具, 它的主要特点是通

过变换能充分突出问题某些方面的特征。因此实现 C#和小波算法的有机结合, 开发的软件将具有友好的界面和较高的诊断精度, 能够扩展到更广的应用领域。

1 旋转机械常见故障及机理

由于旋转机械的结构及零部件设计加工、安装调试、维护检修等方面的原因和运行操作中工况的影响, 其内部零部件必然受到机械应力、热应力、化学应力及电气应力等多种作用。随着时间的推移, 这种物理作用的积累将使旋转机械的运行状态不断发生变化, 随之可能产生异常、恶化或故障。因此可以通过对振动的监测来判断系统的工作状态。

由于振动监测技术具有多参数、多维性、可传递性和可实现性等优点而得到了迅速的发展, 因而将振动监测作为旋转机械状态监测与故障诊断的主要

收稿日期: 2013-06-7

作者简介: 胡晶(1960), 湖北安陆人, 工程师, 从事城市管理
工作。

手段。旋转机械故障的种类繁多,形式各异,其中最常见故障有以下几种:转子不平衡、转子不对中、转子碰磨、轴承座松动等。

旋转机械因故障产生的振动信号的频域特征基本上是以机械的旋转频率及其分频或倍频为特征频率。因此,分析故障振动信号频率与旋转频率的关系是诊断旋转机械故障的有效方法。旋转机械常见故障的特征频率如表 1 所示,其中 ω 为旋转频率。

表 1 旋转机械常见故障的特征频率

故障类型	特征频率	常伴频率
转子不平衡	$1 \times \omega$	$2 \times \omega$
转子不对中	$2 \times \omega$	$1 \times \omega, 3 \times \omega$
转子碰磨	高次谐波、低次谐波	$1 \times \omega$
轴承座松动	ω 及分数谐波	$2 \times \omega, 3 \times \omega, \dots$
油膜涡动与油膜振动	$\leq (1/2) \times \omega$	$1 \times \omega$

2 系统故障诊断的实现

2.1 旋转机械故障特征提取

离散信号按小波基展开时,包含低通和高通滤波两部分,每一次分解就将上一层 j 的第 n 个频段进一步分割变细为下层 $j+1$ 的第 $2n-1$ 与 $2n$ 的两个子频段。

离散信号的小波包分解算法按式(1)进行,小波包分解频段序列信号的重构算法按式(2)进行。

$$\begin{cases} d_k^{j+1, 2n} = \sum_l h_{0(2l-k)} d_l^{j, n} \\ d_k^{j+1, 2n+1} = \sum_l h_{1(2l-k)} d_l^{j, n} \end{cases} \quad (1)$$

其中: h_{0k}, h_{1k} 为小波分解滤波器系数。

$$d_l^{j, n} = \sum_k [h_{0(1-2k)} d_k^{j+1, 2n} + h_{1(1-2k)} d_k^{j+1, 2n+1}] \quad (2)$$

其中, h_{0k}, h_{1k} 为小波重构滤波器系数。

小波包频带分析技术的理论依据是 parseval 能量积分等式。由于信号 $f(t)$ 在时域上的能量为:

$$\|f\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (3)$$

且 $f(t)$ 的小波变换为:

$$d(j, k) = W(2^j, 2^j k) = 2^{-j/2} \int_R \psi(2^{-j}t - k) f(t) dt \quad (4)$$

由 parseval 能量积分等式可推出振动信号的能量与小波变换的系数的关系为:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \sum |d(j, k)|^2 \quad (5)$$

小波变换系数 $d(j, k)$ 的平方具有能量的量纲,

因此可用于旋转机械故障诊断的能量特征提取。

下面用小波变化系数的平方来计算小波包分解第 j 层分解水平上的第 k 个频段上的能量:

$$E(j, k) = \sum_{l=1}^N [d_l(j, k)]^2 \quad (l = 1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

式中: $d(j, k)$ 为第 j 层分解水平上的第 k 个频段离散信号的小波变换系数。因此,可以通过计算各频段的能量来建立故障诊断辨识方法。

2.2 频谱分析法

在对信号进行小波包-频谱分析时,首先对采集到的信号进行适当层数的小波包分解,将信号分解到不同的频段上,然后选取其中包含振动故障特征信息的频段序列进行频谱分析。

旋转机械振动信号 $f(t)$ 可用以下递推关系进行小波包分解:

$$\begin{cases} f_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_{0k} f_n(2t - k) \\ f_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_{1k} f_n(2t - k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: n 为采样点数; h_{0k}, h_{1k} 为低、高通滤波器系数。

小波包分解的实质是让信号 $f(t)$ 通过高低通组合滤波器组,同时进行二次采样,从而把振动信号分解为低、高频两部分;接着对低、高频部分分别进行同样的分解,直到满足需要为止。每分解一次,各频段数据减少一半,数据量得到压缩,只要选取适当的分解层数,就可得到需要的频段宽度及各频段的起止频率。若对旋转机械振动信号进行 l 层小波分解,可得到位于不同频段的 2^l 个振动序列,每个序列的长度、采样频率、频段宽度及起始频率按下式计算:

$$\begin{cases} N_l = \frac{N}{2^l} \\ f_{ls} = \frac{f_s}{2^l} \\ \Delta f = \frac{f_{\max}}{2^l} \\ f_{li} = (i-1) \Delta f \end{cases} \quad (8)$$

式中: N 为振动信号数据长度; N_l 为经过 l 层小波包分解后的小波包数据长度; f_s 为原始采样频率; f_{\max} 为振动原始信号包含的最大频率; f_{ls} 为各个小波包序列的采样频率; f_{li} 和 Δf 分别为第 i 个序列的起始频率和频段宽度; $i = 1, 2, \dots, 2^l$ 。可见,若采样频率已知,分解层数足够多,即可使每个频段的频率范围变窄,因此也就可以使相差较小的频率以及超低频分

别落在不同的频段内,进而对信号进行更为精细的分析。

经小波包分解可得到旋转机械振动信号在各个频段内的序列,但要知道具体某一小波包分解序列的频率成份,可对序列进行 FFT 处理,以确定其频率。

假设有长度为 N 的振动信号分解序列 $x(n)$, 则它的离散傅里叶变换(DFT)为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

式中: $W_N = e^{-j2\pi/N}$ 称为旋转因子。

用 FFT 计算 $x(n)$ 的频谱,即计算

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \quad (10)$$

$X(k)$ 一般是由实部 $X_R(k)$ 和虚部 $X_I(k)$ 组成的

复数,即:

$$X(k) = X_R(k) + jX_I(k) \quad (11)$$

因此,计算功率谱时只需将 FFT 变换好的数据按照实部和虚部求它们的平方和,然后再进行开方运算即可。

3 旋转机械故障诊断系统整体构造

诊断系统为故障专家诊断系统模块。此诊断系统有诊断速度快,诊断精确,对大多数故障类型能快速判定其类别,但是故障专家诊断系统需要不断完善,每次遇到非故障库故障需要人工诊断并将其加入到专家故障诊断库。这种诊断方法应用到电机故障诊断系统中对电机故障类型进行诊断是一个比较好的方法。电机故障诊断系统框图如图 1 所示。

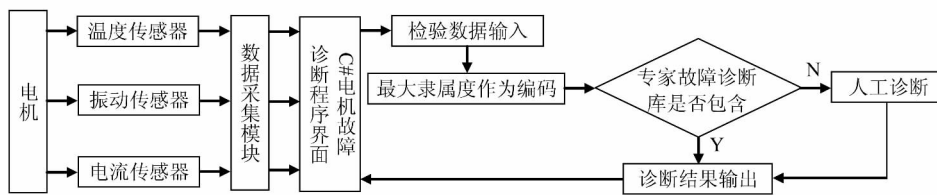


图 1 电机故障诊断系统框图

故障信息诊断处理和诊断过程是通过对传感器采集的信号进行若干次小波分解并在时域和频率中绘出波形趋势图,通过观察波形趋势图,对比以往正常波形趋势图及故障特征频率而判断故障可能发生的部位,系统根据故障诊断模块的诊断模型进行故障诊断,最后在各自的输出文本框中显示对应的诊断结果。

系统中所使用的专家故障诊断库作为整个系统的核心。诊断库根据支持向量机理论建立电机故障诊断预测数学模型,通过计算故障类型的特征量,并通过 Matlab 对波形趋势进行分析处理,最终得到电机的故障分类的结果。

4 电机故障诊断示例

参数:轴承的固有频率为 1 500 Hz,冲击故障发生的周期为 0.01 s,采样频率为 20 kHz,采样点数为 $N = 2\ 048$ 。

采集的轴承故障振动信号时域波形如图 2 所示,从波形图上基本看不出是否存在故障。

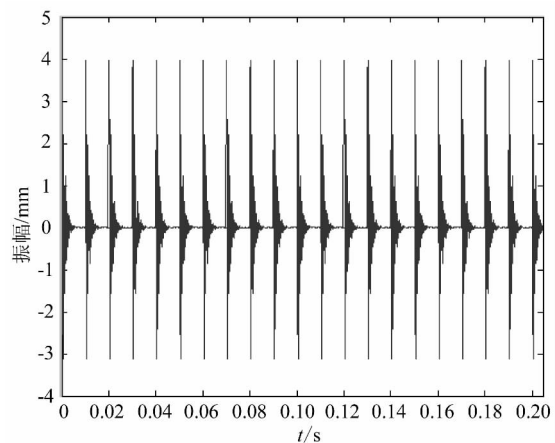


图 2 轴承故障时信号时域波形图

采集的轴承故障振动信号频域波形如图 3 所示,从波形图上可明显的看出在 $f = 1\ 500\ \text{Hz}$ 处振动明显,由此可判断轴承故障频率为 1 500 Hz,对比频率故障特征,可以推断出电机故障为转子摩擦故障。下面将用包络图来验证这一推断。

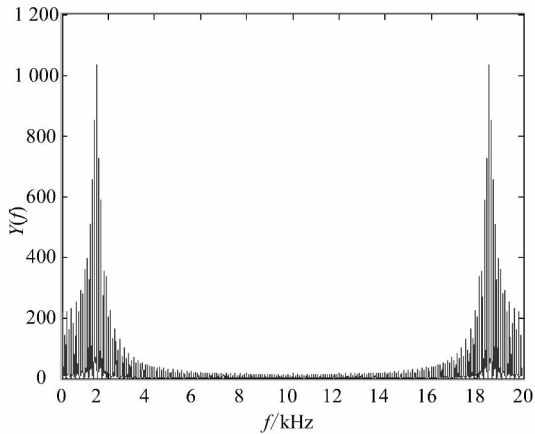


图3 轴承故障时信号频域波形图

对图2中的信号使用 db1 正交小波基进行4层小波分解,分解结果如图4、图5所示,其中 $d_1 \sim d_4$ 分别表示第1、2、3、4层细节信号。

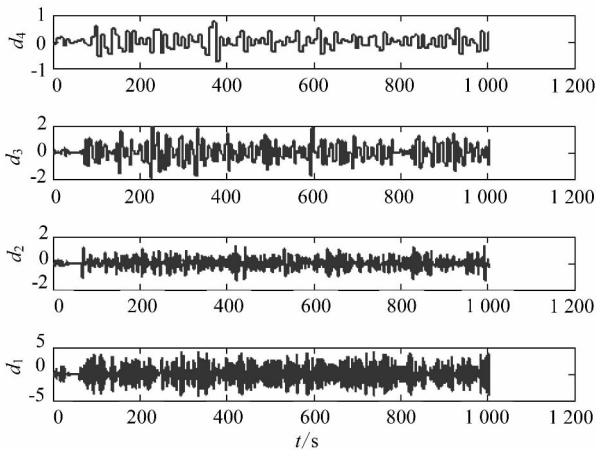


图4 4层 db1 小波分解结果

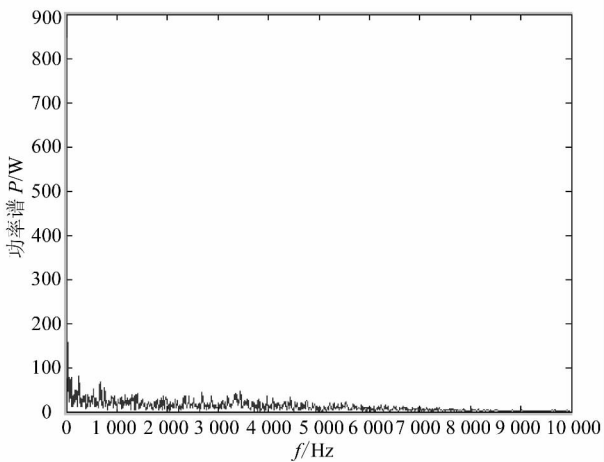


图5 第一层细节信号的包络谱(db1)

对图2中的信号用使用 db5 正交小波基进行4层小波分解,分解结果如图6、图7所示,其中 $d_1 \sim d_4$ 分别表示第1、2、3、4层细节信号。

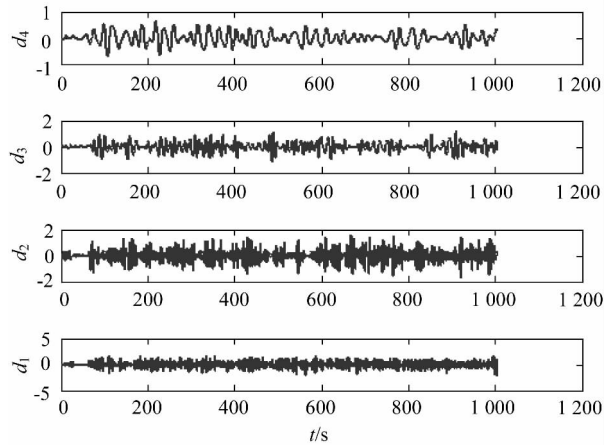


图6 4层 db5 小波分解结果

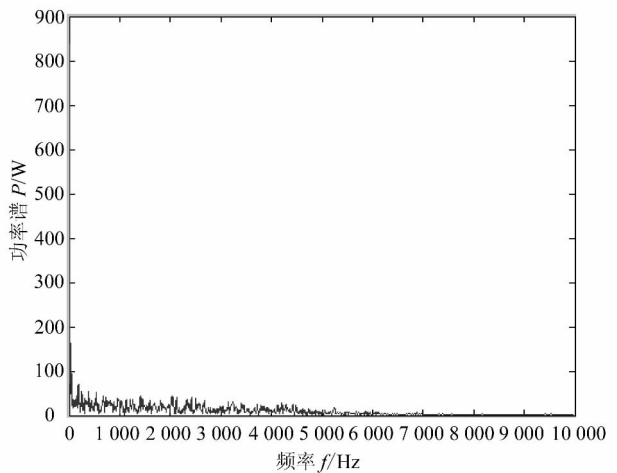


图7 第一层细节信号的包络谱(db5)

对图2中的信号使用 db10 正交小波基进行4层小波分解,分解结果如图8、图9,所示,其中 $d_1 \sim d_4$ 分别表示第1、2、3、4层细节信号。

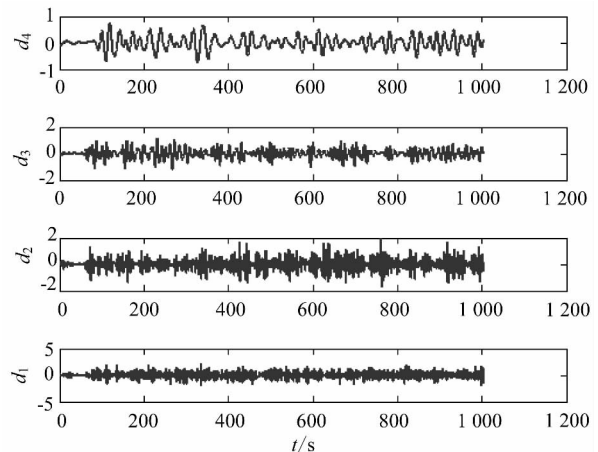


图8 4层 db10 小波分解结果

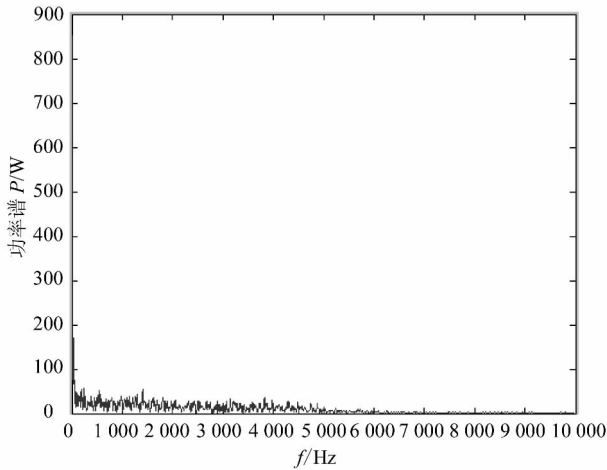


图9 第一层细节信号的包络谱(db10)

为了比较不同正交小波基对诊断性能的影响, 分别利用 db1、db5 和 db10 正交基对上述数据进行分析。通过对比, 利用 db10 正交小波基得到的故障频率最明显。由功率谱可以看出, 信号中包含了大量的低频信息, 对比频率故障特征, 可以推断出电机故障为转子摩擦故障, 从而证明了从频域波形得出结论的正确性。诊断结果显示示意图如图 10 所示。



图 10 诊断结果显示示意图

5 结束语

C#开发图形界面的功能强大,小波分析在时频频域都具有表征信号局部特征的能力,是一种窗口大小固定不变,但形状可变的分析方法。小波变化在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,很适合探测电机故障信号。基于小波算法设计的电机故障诊断系统稳定高效,在代入实际故障数据时,故障诊断系统能够较为准确地判别电机故障类型。因此,小波算法在故障诊断系统开发领域有着非常好的应用前景。

参考文献

- [1] 姚光强, 陈立平. 基于 COM 技术的 C#与 Matlab 混合编程[J]. 计算机工程 2008 34(14) : 87 - 89.
- [2] 鄢玉. 电机故障诊断及小波基函数的选择 [D]. 太原理工大学 2006.
- [3] 朱丽娟, 田慕琴, 刘娇, 等. 基于小波包的异步电动机故障分析[J]. 电机与控制应用 2008 35(1) : 50 - 53.
- [4] 易健雄. 基于小波分析的旋转机械故障诊断仪的研究与开发 [D]. 江南大学 2007.
- [5] 张桂柱. 小波分析在异步电机故障诊断中的应用研究 [J]. 电机技术 2011(6) : 37 - 40.
- [6] 张亿雄, 顾海明, 周勇军. 小波包分析在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 煤矿机械 2009(10) : 240 - 242.
- [7] 王金福, 李富才. 机械故障诊断的信号处理方法: 频域分析 [J]. 噪声与振动控制 2013(1) : 173 - 179.