

小波分析在动态系统故障诊断中的应用*

曹祥宇¹, 乔俊峰²

(1 第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2 西安电子科技大学理学院, 西安 710025)

摘要: 提出了一种基于小波分析的动态系统故障诊断方法, 在 Matlab/Simulink 中建立动态系统的数字仿真模型, 利用小波分析中的多分辨分析理论对该模型的输出信号进行处理, 并依据数据处理结果对系统故障进行诊断。结果表明, 该方法不仅可以有效去除测试结果中的噪声, 而且能够实现对故障的快速诊断。

关键词: 小波分析; 动态系统; 故障诊断; 多分辨分析

中图分类号: TP273 文献标志码: A

Application of Wavelet Analysis in Fault Diagnosis of Dynamic System

CAO Xiangyu¹, QIAO Junfeng²

(1 The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China;

2 School of Science, Xidian University, Xi'an 710025, China)

Abstract: A method of dynamic system fault diagnosis based on wavelet analysis was presented. The simulation model of dynamic system was built in Matlab/Simulink, and MRA theory of wavelet analysis was used to process the output signals, thus, dynamic system fault diagnosis was implemented according to the data processing result. The simulation result shows that the noise in the test data can be eliminated effectively and quick fault diagnosis can be realized with the method.

Keywords: wavelet analysis; dynamic system; fault diagnosis; MRA

0 引言

动态测试是控制系统设计、使用维护部门所面临的一个重要课题, 它贯穿于控制系统的设计、使用、维护、储存的整个生命周期。相对静态测试而言, 动态测试包含更多的测试信息, 更利于评价分析系统的各项性能和进行故障诊断^[1]。正交小波变换在时-频域均有良好局部化的品质, 应用正交小波变换对线性系统的动态测试信号进行分析与处理^[2], 可以为系统的正常运行、故障诊断及系统控制提供决策支持, 也为控制系统故障检测与故障诊断提供了一种新的途径。

1 小波分析及其在动态系统故障检测中的应用

1.1 多分辨率分析

多分辨率分析概念是由 S. Mallat 和 Y. Meyer

首先提出来的, 它可将所有的正交小波基的构造统一起来, 使小波理论产生突破性的进展^[3-4]。多分辨分析的基本思想是先在 $L^2(R)$ 的子空间中建立基底, 再利用伸缩和平移变换, 把子空间的基底扩充到 $L^2(R)$ 中。设 $\varphi(x) \in L^2(R)$, 构造 $L^2(R)$ 的闭子空间 $V_j = \text{Clo}_{L^2(R)}(\varphi_{j,k}(x), k \in Z)$, 其中 $\varphi_{j,k}(x) = 2^{j/2}(2^j x - k)$, 使 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 满足以下条件:

- 1) 单调性: $V_j \subset V_{j+1}$;
- 2) 逼近性: $\bigcap_{j \in Z} V_j = \{0\}$,
 $\bigcup_{j \in Z} V_j = L^2\{R\}$;
- 3) 伸缩性:
 $f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2x) \in V_{j+1}$;
- 4) 平移不变性:
 $f(x) \in V_0 \Leftrightarrow f(x-k) \in V_0$;
- 5) Riesz 基存在性: 存在 $\varphi(x) \in V_0$, 使得 $\{\varphi(x-k)\}_{k \in Z}$ 是 V_0 的 Riesz 基。

* 收稿日期: 2008-12-28

作者简介: 曹祥宇(1978-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 研究方向: 制导精度分析、故障诊断和自动测试。

则 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 被称为 $L^2(R)$ 的一个多分辨分析,其中 $\varphi(x)$ 称为尺度函数, V_j 称为逼近空间。在多分辨分析 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 中,由于 $V_j \subset V_{j+1}$,即这些空间 V_j 不是彼此正交的,因此考虑 V_j 在 V_{j+1} 中的正交补空间 W_j ,即: $V_{j+1} = V_j \oplus W_j, V_j \perp W_j$ 。像 $\varphi(x)$ 生成 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 一样,生成空间 $\{W_j\}_{j \in Z}$ 的函数 $\psi(x)$ 称为小波函数,同样有:

$$W_j = \text{Clos}_{L^2(R)}(\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2}(2^j x - k), k \in Z)$$

那么对于给定的 V_0 ,则有如下的塔式分解:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_{-1} \oplus W_{-1} \\ &= V_{-2} \oplus W_{-2} \oplus W_{-1} \\ &\dots \\ &= V_{-J} \oplus W_{-J} \oplus \dots \oplus W_{-2} \oplus W_{-1} \end{aligned} \quad (0 < J \in N)$$

对于频率有限的非平稳信号 $f(t)$ ($f \in L^2$),总可以由小波变换分解到 W_{-j} ($j = 1, \dots, J$) 和 V_{-j} 上去,由多分辨分析 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 性质知, $V_{-j} \rightarrow \{0\}, J \rightarrow +\infty$,所以:

$$V_0 = \dots \oplus W_{-2} \oplus W_{-1}$$

在工程应用中,待分析的信号 $f(t)$ 总可以找到适当的 $\varphi(x)$,生成 V_0 ,使 $f(t) \in V_0$,由此可得唯一分解式:

$$f(t) = f_{-j}(t) + g_{-j}(t) + \dots + g_{-2}(t) + g_{-1}(t)$$

式中: $g_{-j} \in W_{-j}, f_{-j} \in V_{-j}, j \in Z$,它们分别是 f 在 W_{-j} 和 V_{-j} 上的正交投影。其中 f_{-j} 表示的是对信号的逼近,是趋势项,而 g_{-j} 则是在相应分辨率时的细节信号,如果信号 f 是非平稳信号,则 f_{-j} 必然反映了 f 的非平稳部分,而 g_{-j} 则是相对平稳的部分。这样,可以分别用不同的方法来处理它们,对于非平稳特性为主部分就可以用小波分析进行处理。对测试信号处理,目的就是利用处理结果分析和判断系统是否异常,作为小波分析在故障检测中的应用。

1.2 故障信号的小波分析方法

在动态系统的运行或测试中,系统的输出往往不是平稳信号,此时,频域分析方法或短时傅里叶变换都难以得到正确的分析结果^[5]。利用小波分析中的多分辨分析可以实现对信号十分精细的分析,它将输出信号频带进行多层次划分与

分解,从而提高了频率分辨率,能够将一个复杂信号分解成一些简单信号,从而可以提取出反映系统或仪器的故障特征,为故障检测与诊断提供依据。

对于在数学模型上可表示为一个线性定常系统的动态系统,如果它的输入为平稳信号时,它的输出也必为平稳信号,而且其输出是渐近平稳的。一个实际的系统是由许多元部件组成的,测试过程中如果组成系统的某一个或一些元部件的特性发生变化,就会引起动态系统的数学模型参数发生相应的变化,从而导致故障的发生。若动态系统的输入为平稳信号,这些由于模型参数变化引起的故障,在输出中表现出一个突变,从而使输出的平稳性遭到破坏,通过对输出信号进行小波分析的方法可以对动态系统进行故障诊断。主要的分析方法可描述如下:

- 1) 利用小波变换去噪提取系统波形特征,可以对信号进行滤波。利用去噪后的信号可以直接对系统进行故障诊断。
- 2) 利用小波变换检测信号突变的方法,对信号进行多尺度分析,连续小波变换能够通过多尺度分析提取信号的奇异点。在信号出现突变时,其小波变换后的系数具有模量极大值,因而可以通过对模量极大值点的检测来确定故障发生的时间点。

2 实例及其仿真

以控制系统某个功能环节为例,进行基于小波分析的故障诊断仿真试验,该环节为一个单输入单输出的线性定常系统,其差分方程为:

$$y(k) = 1.6y(k-1) - 0.8y(k-2) + 2u(k) - 2.7u(k-1) + 1.5u(k-2)$$

2.1 已有故障的诊断

在某些故障状态下,如果系统输入为平稳信号,系统的输出与正常状态下一样也是平稳信号,不同的是输出信号的幅值已经改变,这时可以根据以往的动态测试结果数据给出系统在正常情况下的输出,并通过测试得到故障发生后的输出,经小波分析后,可以得到它们的差异信号,从而可以准确判断系统是否发生故障。

假设所举例子中的控制系统功能环节由于

某种原因发生故障,导致其差分方程中 $u(k-1)$ 的系数 -2.7 变为 -3.4 。通过选用 Daubechies 小波系中的 db3 紧支撑标准正交小波对系统正常状态和故障状态下的输出信号进行消噪处理,并求出差异信号作为故障诊断的依据,其仿真结果如图 1 所示。

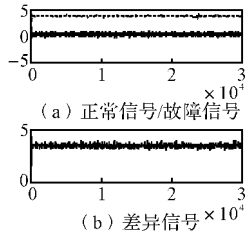


图 1 已有故障引起的输出差异信号小波分析结果

2.2 突发故障的诊断

某一正在工作的系统,其正常工作输出点的采样信号应为一蠕变信号,当系统出现故障时,输出信号将会出现一突变信号(主要表现在幅度和频率的突变),这种情况下,利用小波分析对测试数据进行处理,通过处理结果可以准确判断故障发生的部位与时间。

仍以上面所举的控制系统功能环节为研究对象,分别对系统输出发生幅度突变和频率突变两种故障情况进行仿真。

对于系统输出发生幅度突变的故障情况,假设系统初始状态为 0,输入激励 $u(k)$ 是幅值为 1 的阶跃信号,而噪声是方差为 0.1 的白噪声,采样时间为 0.1ms,并在 1500ms 处设置故障(将 $u(k-1)$ 的系数 -2.7 置为 -3.4)。仿真过程中首先利用 db3 小波对故障信号进行消噪,然后采用 db5 小波对信号进行 6 层分解,取第五层的层系数作为故障检测数据,采样得到的信号以及用小波分析得到的结果如图 2 所示。从第五层的层系数可以明显看出,在 $t = 1500\text{ms}$ 时,系统工作出现了异常。

对于系统输出发生频率突变的故障情况,假设系统初始状态为 0,输入激励 $u(k)$ 是幅值为 3,频率为 10rad/s 的正弦信号,而噪声是方差为 0.1 的白噪声,采样时间为 0.1ms,并在 1500ms 处设置故障(将输入激励信号频率跳变为 50rad/s)。仿真过程同前面所述,小波分析得到的

结果如图 3 所示。从图中可以看出,在 $t = 1500\text{ms}$ 时,系统工作出现了异常。

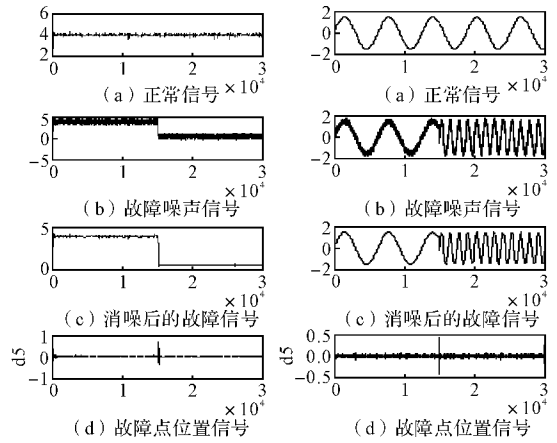


图 2 幅度突变的故障信号小波分析结果

图 3 频率突变的故障信号小波分析结果

3 结论

文中以小波分析的多分辨分析理论为理论基础,提出了一种通过对动态系统测试结果进行小波分析来进行故障检测和诊断的方法。根据上面的仿真结果与分析,可以看到,这种方法不仅可以实现对系统测试结果的消噪处理,而且还可以利用分析结果进行故障的快速诊断与故障时间点定位,从而证明应用小波分析进行动态系统的故障诊断是可行且有效的。

参考文献:

- [1] 梁瑞胜,孙有田,周希亚.小波包变换和神经网络的某型导弹故障诊断方法研究[J].海军航空工程学院学报,2008,23(2):1-4.
- [2] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1992, 38(2):617-643.
- [3] 葛哲学,沙威.小波分析理论与 MATLABR2007 实现[M].北京:电子工业出版社,2007:63-67.
- [4] 宋建社.小波分析及其应用例选[M].北京:现代出版社,1998:16-17.
- [5] 王剑影,王培栋.基于正交小波变换的动态系统的故障检测[J].航空计算技术,2007,37(3):30-32.