

基于 TMS320C5509A 的传感器故障诊断

朱泳凌 滨 赫惠馨

(东北林业大学, 哈尔滨, 150040) (哈尔滨工业大学)

摘要 以 TMS320C5509A DSP 为数据处理平台, 将小波包变换算法应用于汽车发动机压力传感器系统中。理论分析与结果表明, 该方法可以检测出故障传感器, 而且满足实时性要求, 并为后续的容错研究奠定基础。

关键词 TMS320C5509A; 传感器; 故障诊断; 小波包变换

分类号 TP206.3

Sensor Fault Diagnosis Based on TMS320C5509A/Zhu Yong, Ling Bin (College of Information and Computer Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, P. R. China); He Huixin (Harbin Institute of Technology) // Journal of Northeast Forestry University. -2009, 37(8). -97~99

A new detection method for sensor fault diagnosis is given based on TMS320C5509A DSP platform for data processing by applying wavelet packet transform algorithm to pressure sensor system of automotive engine. Results of theoretical analysis show that the method could not only detect the sensor fault and meet real-time requirements, but also lay the foundation for follow-up study of fault tolerance.

Keywords TMS320C5509A; Sensors; Fault diagnosis; Wavelet packet transform

随着数字电路规模的增大, 电路复杂性的提高, 传感器的数量和种类越来越多, 各传感器具有不同的测量值和噪声特性, 需要将它们送来的信息综合处理, 这就使得计算负担重, 通信量大, TI 公司的芯片 TMS320C5509A 是一种高速数字信号处理运算的微处理器^[1], 是解决实时处理要求的单片可编程微处理芯片。它使用灵活, 与一般的微处理器相比, 其速度更快, 效率更高, 正适用于实现信号处理^[2]。小波分析优于傅里叶变换的地方是它在时域和频域上同时具有良好的局部化特性, 能自动改变窗长, 可以刻画信号的任意细节, 所以开发实时的信号处理系统, 处理瞬态反常现象信号, 实现基于 DSP 小波包变换算法的传感器故障诊断, 具有很重要的现实意义^[3]。

1 传感器信号处理系统的硬件构成

本设计以 C5509A 为核心处理器, 系统硬件设计如图 1 所示: 采集压力传感器的模拟信号, 经过信号调理电路, 再由高速 A/D 将模拟信号转换为数字信号, 然后对信号进行小波包分析处理, C5509A 处理后得到故障信息。由于通信的信息量少, 可以利用 C5509A 的多通道缓冲串口 McBSP (SPI), 在不扩展其他硬件的情况下, 用软件实现异步数据传输格式。

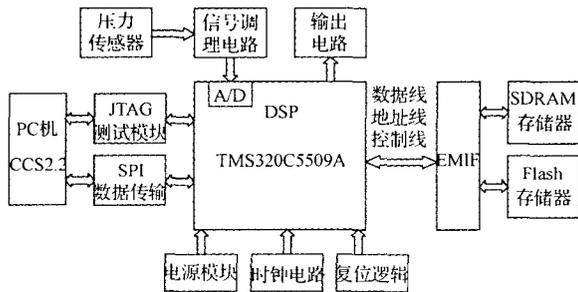


图1 系统硬件设计框图

第一作者简介: 朱泳, 男, 1973 年 6 月生, 东北林业大学信息与计算机工程学院, 讲师。

收稿日期: 2008 年 11 月 28 日。

责任编辑: 戴芳天。

2 小波包变换

2.1 小波包分析

小波包变换是小波变换的延续与补充, 它比小波分析更加精细, 具有更好的时频特性。从小波双尺度方程开始, 通过数学的形式化演绎过程来建立小波包的基本数学模型^[4]。

令 $w_n(t)$ 满足下列双尺度方程

$$\begin{cases} w_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_n w_n(2t - k) \\ w_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} g_n w_n(2t - k) \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

其中, 系数序列 $\{h_n\}$ 和 $\{g_n\}$ 仍满足下列关系:

$$\begin{cases} \sum h_{n-2k} h_{n-2l} = \delta_{k,l} \\ \sum h_n = \sqrt{2} \\ g_n = (-1)^n h_{1-n} \end{cases}$$

显然, 对函数 $w_n(t)$ 来说, 当 $n=0$ 时, $w_0(t)$ 即为尺度函数 $\varphi(t)$; 当 $n=1$ 时, $w_1(t)$ 即为小波函数 $\psi(t)$, 所以可以用 $w_n(t)$ 来统一表征尺度函数 $\varphi(t)$ 与小波函数 $\psi(t)$ 。把函数集 $\{w_n(t)\}_{n \in Z}$ 称为关于正交尺度函数 $w_0(t) = \varphi(t)$ 的小波包。

小波包分解思想是在多分辨率分析思想的基础上提取了信号在不同频带的特征, 同时保留了信号在各尺度上的时域特征。它不像多分辨率分析那样, 每次只对信号的低频部分进行分解, 高频部分保留不动; 而是同时可在低频和高频部分进行分解, 自适应地确定信号在不同频段的分辨率。

为了更好地说明小波包分解, 这里以一个 Haar 系为例加以说明。如图 2 所示的就是对于一个信号的 3 层小波包分解树。

设函数由 8 个离散值 $\{x_1, x_2, \dots, x_8\}$ 所定义, 可以看作是 R^8 中的一个矢量。函数的定义域为 $[0, 1]$, 每个 x 值是 $1/8$ 长度上的均值。由于 Haar 系的滤波系数 $h = \{1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}\}$, $g = \{1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2}\}$, 这样小波包系数的关系就变成求和与与差的关系。

若用符号 s 表示求和算子, 用符号 d 表示求差算子, 因此

得到第一层小波包系数为

$$s_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1 + x_2) = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1, x_2, \dots, x_8), (1, 1, 0, \dots, 0);$$

$$d_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1 - x_2) = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1, x_2, \dots, x_8), (1, -1, 0, \dots, 0);$$

$$s_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_3 + x_4) = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1, x_2, \dots, x_8), (0, 0, 1, 1, 0, \dots, 0);$$

$$d_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_3 - x_4) = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1, x_2, \dots, x_8), (0, 0, 1, -1, 0, \dots, 0);$$

...

将上述所得的 s_1, s_2, s_3, s_4 和 d_1, d_2, d_3, d_4 , 共 8 个数作为新数据再按 $ss_1 = 1/\sqrt{2}(s_1 + s_2), ss_2 = 1/\sqrt{2}(s_3 + s_4), \dots, ds_1 = 1/\sqrt{2}(s_1 - s_2), ds_2 = 1/\sqrt{2}(s_3 - s_4), \dots$, 计算出第 2 层小波包系数 $ss_1, ss_2, sd_1, sd_2, ds_1, ds_2, dd_1, dd_2$, 再把它当作新的数据按前面的公式计算出第 3 层小波包系数 $sss_1, sds_1, dds_1, ssd_1, dsd_1, sdd_1, ddd_1$ 。第 0 层为数据层, 第 1 层为最小尺度层, 第 2 层中间层, 第 3 层最大尺度层, 频率分辨率依次由低到高的顺序增加, 可以很容易确定小波包基的尺度、频率和位置参数。为了得到更好的分析效果, 分析者必须掌握被分析对象的特性, 这样才能够选择合适的小波基函数或小波包基函数, 否则就会得到完全错误的分析结果^[5]。

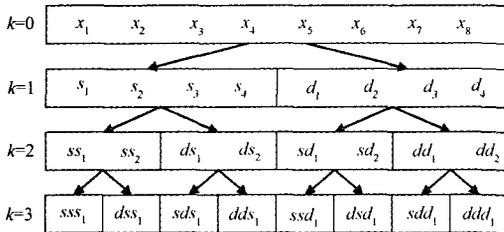


图2 Haar小波包分解图

2.2 小波基的选择

通常的测试信号总是由一定的频率成分的带限信号组成, 对于此类信号, 噪声与故障信息寓于之中。在低频的小波空间, 噪声的确得到很好地削弱, 但是一般来说故障信息的频率比正常信号的频率高, 这样故障信息在低频空间就会较难反映出来。因此要求所选择的小波能够将故障信号能量集中到中频或高频尺度空间。

根据以上的选择原则, 通过比较得出故障信号提取以下小波函数比较合适: db4, db7, db10, db13, db16。在分析信号时, 只要根据分析需要从中任取出一个小波基即可。根据以往使用经验, 并经过多次试用, 确定选择 db16 小波作为小波包分析的小波基函数。

3 基于小波包变换的故障检测

发动机工作在高温(发动机表面温度可达 150 ℃、排气歧管可达 650 ℃)、振动(加速度 30 g)、冲击(加速度 50 g)、潮湿(相对湿度 100%, -40 ~ 120 ℃)以及蒸气、烟雾、腐蚀和油泥污染的恶劣环境中, 因此在信号各频率成分的能量中包含有丰富的故障信息。某个或某几个频带能量的改变代表着某种故障状态, 利用这一特征可以建立起压力信号各频带能量到各故障状态间的映射关系, 通过各频率成分能量的变化来诊断故障。利用小波包分析可以方便地达到这一目的, 即通过

对信号在全频带范围内进行正交小波包分解, 得到由全频带均匀划分的各子频带的小波包分解系数; 对小波包分解系数进行重构即可得到该频带的信号, 提取各频带信号的能量即可构造出小波包特征向量。据此, 以 3 层小波包分解为例, 小波包特征向量提取的算法具体如下^[6-7]:

①首先对压力信号进行 3 层小波包分解, 提取第三层从低频到高频 $2^3 = 8$ 个子频带的小波包分解系数 (x_1, x_2, \dots, x_8) ;

②对第三层各小波包分解系数进行重构, 得到各子频带范围的信号 (s_1, s_2, \dots, s_8) 。则总信号: $s = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5 + s_6 + s_7 + s_8$;

③求各频带信号的总能量。各频带信号 $s_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 对应的能量 $E_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 可由公式求得: $E_i = \int |s_i(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{ik}|^2$;

④构造小波包特征向量。以信号各频带能量为元素可以构造一特征向量 T 如下: $T = [E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7, E_8]$;

为方便分析, 对该特征向量进行归一化处理, $E_{max} = \max(E_i), E = E_{max} + E_i$, 则 $T' = [E_1/E, E_2/E, \dots, E_8/E]$ 即为归一化的小波包特征向量。

4 结果与分析

选择温度为 100 ℃、相对湿度 80%、振动为 1 500 m/s, 三轴方向, 无共振、冲击为 0.91 m 高自由跌落, 三轴方向、热冲击为每点 30 min, 800 次循环的典型环境条件下的压力传感器。采用 C5509A 内置采样和保持的 10 位模数转换模块 ADC, 最小转换时间 500 ns, 最大采样率为 21.5 kHz。试验中信号的采样频率为 2 kHz, 试验中信号选取连续的 1 024 个采样点进行分析, 图 3 是总信号 s 。

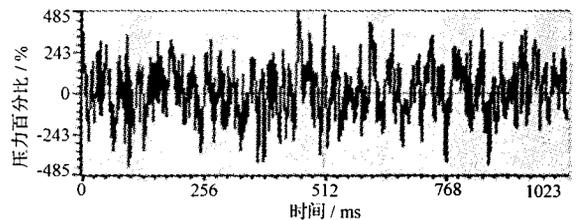


图3 小波包总信号 s

对重构信号求各频带的能量, 并构造归一化的小波包特征向量(见图 4、图 5)。

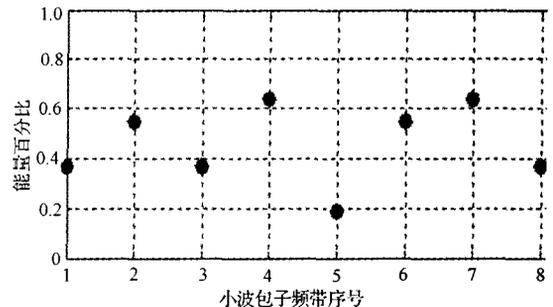


图4 正常压力传感器

由图 4 可知, 正常传感器与故障传感器压力信号的小波包子频带的归一化频率能量分量有很大不同; 各个频带的能量没有太大差别, 而且主要能量集中在中低频带。这与频谱分析得到的主要能量集中在低频带基本相符, 但是又比频谱

分析更准确。而由图 5 可知,反映的故障频点为 7 号频带点,因此能够得出正确的故障特征频带点。

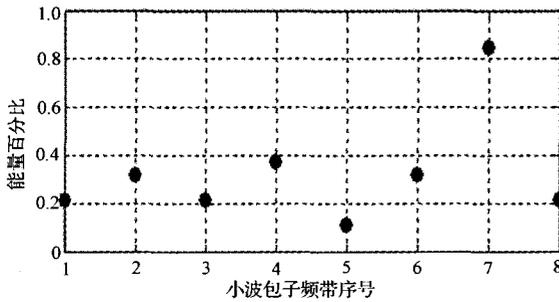


图 5 故障压力传感器

5 结束语

小波包变换在信号处理领域的应用非常活跃,是现代信号分析与处理的有力工具。采用基于 DSP 小波包变换的方法,进行了传感器信号故障检测。DSP 的小波包分析程序正

确,稳定性好,易于移植,实时性强,有较强的实用性与灵活性;且该方法克服了频谱分析的缺点,在工程应用中具有广阔的前景。

参 考 文 献

- [1] 汪纯美,孙洪波. TMS320C55x DSP 原理及应用[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2008.
- [2] 黄振峰,毛汉领,郝宇宁. 基于 DSP 的小波变换算法研究[J]. 机床与液压,2008(5):202-204.
- [3] 王红亮. 采用 DSP 与小波变换实现声信号单目标识别[J]. 电光与控制学报,2008(5):59-61.
- [4] 唐向宏,李齐良. 时频分析与小波变换[M]. 北京:科学出版社,2008. 1.
- [5] 宋娟,全书海. 燃料电池发动机多传感器的故障诊断与容错技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006:43-50.
- [6] 屈峰. 汽车发动机故障诊断方法研究[D]. 大庆:大庆石油学院,2007:30-40.
- [7] Satish L. Short-time Fourier and wavelet transforms for fault detection in power transformers during im-pulse tests[J]. In IEEE Proc Sci Meas Technol,1998,145(2):77-84.

(上接 96 页)

```

InstantiationException, IllegalAccessException,
ClassNotFoundException {
Connection conn = null;
//加载数据库驱动类
Class.forName("com.microsoft.jdbc.sqlserver.SQLServerDriver").newInstance();
//数据库连接 URL
String url = "jdbc:microsoft:sqlserver://localhost:1433;DatabaseName = pubs";
//数据库用户名,数据库密码
String user = "sa";
String password = "sa1234";
//根据数据库参数取得一个数据库连接
conn = DriverManager.getConnection(url, user, password);
return conn;}
/* 根据传入的 SQL 语句返回一个结果集
* @param sql
* @return
* @throws Exception */
public ResultSet select(String sql) throws Exception {
Connection conn = null;
Statement stmt = null;
ResultSet rs = null;

```

```

try {conn = getConnection();
stmt = conn.createStatement();
rs = stmt.executeQuery(sql);
return rs;
} catch (SQLException sqle) {
throw new SQLException("select data exception: " + sqle.getMessage());
} catch (Exception e) {throw new Exception("System exception: " + e.getMessage());} }。

```

5 结束语

“数字林业”信息服务平台是“数字林业”系统的核心平台,该平台彻底解决了数字林业应用系统中各专题模块的开发过程中的松散结构,无法实现信息传递,无法完成异构数据的共享问题,本文利用先进的面向对象的封装技术及流行的软构件技术将平台系统核心功能进行了封装打包,并通过标准化的接口为各应用提供调用服务。

参 考 文 献

- [1] 谢希仁. 计算机网络[M]. 北京:电子工业出版社,2001.
- [2] 刘聪. 零基础学 Java Web 开发[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [3] 王健. 基于用户组角色的数字林业 Web 应用系统权限设计[J]. 东北林业大学学报,2008,36(8):86-87.
- [4] 陈玮. 基于 ASP 技术的林业服务平台构建[J]. 东北林业大学学报,2008,36(12):84-85.