

# 基于小波理论的便携式振动监测系统设计\*

张国平

(湖南机电职业技术学院,湖南 长沙 410151)

**摘要:**针对传统的机械振动监测系统复杂,价格昂贵、识别率不高等特点,提出一种基于小波理论的便携式振动监测系统。该系统采用 OMAP-L138 为嵌入式处理核心,具有强大的数据处理能力。通过对模拟转矩试验台的振动信号进行分析,结果表明,小波分析能够对故障诊断达到了精确、实用的效果。

**关键词:**数字信号处理 小波理论 OMAP-L138 机械振动

**中图分类号:**TH165+.3 **文献标识码:**B **文章编号:**1002-6886(2010)03-0028-03

## Design of Portable Vibration Monitoring System Based on Wavelet Theory

ZHANG Guoping

**Abstract:** Because the traditional mechanical vibration monitoring system is complex, expensive, low recognition rate and so on. This paper presents a portable vibration monitoring system based on wavelet theory. The system uses the OMAP-L138 for embedded processing core, It can process complex data. This paper analyzes the vibration signals of torque test platform, The results show that wavelet analysis to fault diagnosis can reach a precise, practical results.

**Key words:** digital signal processing; wavelet Theory; OMAP-L138; mechanical vibration monitoring

## 0 引言

随着科学技术的进步,现代设备的结构越来越复杂,功能越来越完善。机械装备状态监测和故障诊断技术越来越受到重视。然而基于工业计算机设计的监测系统存在很多缺点,主要体现在:体积庞大、携带不方便、价格昂贵、需要布置大量电缆等。

便携式振动监控系统是随着嵌入式 DSP 技术发展而产生的面向工业现场的分析仪器。与传统的测试仪表相比,此系统具有价格低、体积小、重量轻、操作简单等特点。适合在测点分散、检测量大而又不需要作连续在线监测的场合进行设备状态监测和诊断<sup>[1]</sup>。小波理论能够把任何信号映射到一个母小波伸缩、平移而成的一组基函数上去,实现信号在不同时刻、不同频带的合理分离而不丢失任何原始信息。在非平稳信号的处理上比傅里叶分析有很大的优越性<sup>[2]</sup>。本文通过移植小波理论算法,可以直接在现场进行测量和诊断。

## 1 系统需求

1)高可靠性。机械设备一般放置在工厂环境下,电、磁等环境恶劣,如何保证设备稳定运行成为设计的重点。

2)较高的采集速度和精度。旋转机械往往转速都比较高,比如汽轮机的正常工作转速一般在 3 000 r/min 左右,有时甚至会达到更高的转速,因而数据采集系统需要足够的处理速度和采集精度来适应这一要求。

3)多路信号采集。机械振动信号复杂,单路信号不能保证能够完全反应设备的运行情况。这就需要比较多的振动信号输入通道。

4)同步整周期采样。在汽轮发电机组振动监测系统中,我们不仅要知道振动信号值的大小,而且要知道信号彼此之间的相位关系,这时就需要采用同步采样技术来实现<sup>[3]</sup>。

5)低功耗设计。整个系统采用充电电池供电。

## 2 硬件电路设计

本监测系统采用 TI 公司的 OMAP-L138 为数据处理芯片,采用压电加速度传感器拾取被测对象的振动信号。如图 1

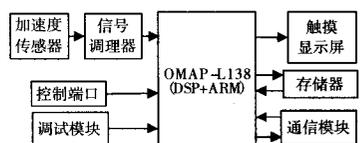


图1 硬件设计框图

所示,具有存储、LCD 显示、调试、触摸等功能。

由于监测的对象是机械振动信号,因而要求满足高速数据采集以及处理;同时,考虑到复杂电磁环境的影响,选用 OMAP-L138 处理器<sup>[4]</sup>。它采用双内核 SoC,包括 300 MHz ARM926EJ-STM RISC MPU 以及 300 MHz C674x VLIW DSP。其中 DSP 处理系统设计主要是完成对采集数据进行处理,ARM 处理器则实现对数据存储以及与外围设备协调工作的功能。TMS320C674x 浮点 VLIW DSP 内核,支持非对齐的装载-存储(Load-Store)结构;支持 32 位整数、SP(IEEE 单精度/32 位)和 DP(IEEE 双精度/64 位)浮点运算;每个时钟最

基金项目:湖南省科学技术厅项目(2009FJ3035)。

作者简介:张国平(1964-),男,湖南石门人,大学本科,湖南机电职业技术学院副教授,主要从事先进制造技术和高等职业教育研究。

收稿日期:2009-4-29

多可支持4次SP加法,每两个时钟可支持4次DP加法;每个周期最多可支持2次浮点(SP或DP)倒数近似或浮点平方根运算;定点乘法支持每个时钟周期执行2次32×32位乘法,4次16×16位乘法或者8次8×8位乘法和复数乘法。DSP强大的处理核心,完全能够满足小波算法的稳定运行。

### 3 小波分析

常用工程信号都是时域波形的形式。时域波形有直观、易于理解等特点,是最原始的信号,所含的信息量大,但缺点是不太容易看出它所包含信息与故障的联系,小波变换的概念是由法国石油信号处理的工程J. Morlet在1974年首先提出。与传统的Fourier变换、窗口Fourier相比,它是一个时间和频率的局域变换,因此能更有效的从信号中提取信息,通过伸缩和平移运算能对函数或信号进行多尺度细化分析,解决了傅里叶变换不能解决的许多困难问题。

设 $\psi(x) \in L^2(\mathbf{R})$ (即 $\psi(x)$ 属于2-范数空间,也即能量有限空间),其傅立叶变换为 $\hat{\psi}(\omega)$ 。当 $\psi(\omega)$ 满足允许条件:

$$C_{\psi} = \int_{\mathbf{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

时,我们称 $\psi(\omega)$ 为一个基本小波或母小波。对基本小波 $\psi(\omega)$ 进行伸缩和平移,就得到一个小波序列。对于连续的情况,小波基函数定义为:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbf{R} \quad a > 0 \quad (2)$$

式中 $a$ 为尺度因子,决定小包变换中的频率信息。 $b$ 为平移因子,决定变换结果中的时域信息。对任意的 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$ ,其小波变换为<sup>[6-7]</sup>:

$$W_{\psi} f(a, b) = (f(x), \psi_{a,b}(x)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbf{R}} f(x) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dx \quad (3)$$

反变换为:

$$f(x) = \frac{1}{C_{\psi}} \iint_{\mathbf{R}} \frac{1}{a^2} W_{\psi} f(a, b) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

连续小波变换(CWT)中的尺度因子和平移因子都是连续变化的实数,在应用中需要计算积分,在处理数字信号时很不方便,常采用离散形式,即离散小波变换(DWT)。DWT可以通过离散化CWT中的参数 $a$ 和 $b$ 得到,

通常取 $a_j = 2^{-j}, b_{j,k} = \frac{k}{2^j} b_0$ 故离散小波定义为<sup>[5]</sup>:

$$\psi_{j,k}(x) = \frac{1}{2^{j/2}} \psi\left(\frac{x}{2^j} - kb_0\right) \quad j, k \in \mathbf{Z} \quad (5)$$

用上式可以计算小波变换系数:

$$d_{j,k} = W_{\psi} f(2^{-j}, k2^{-j}) = (f, \psi_{j,k}) \quad (6)$$

如果 $\psi_{j,k}(x)$ 满足正交规范化条件

$$(\psi_{l,m}, \psi_{j,k}) = \delta_{l,j} \delta_{m,k} \quad (7)$$

则称 $\psi(x)$ 为正交小波。这时重构公式为

$$f(x) = \sum (f, \psi_{j,k}) \psi_{j,k}(x) = \sum_{j,k} d_{j,k} \psi_{j,k} \quad (8)$$

如果一个正交小波 $\psi_{j,k}(x)$ 将构成 $L^2(\mathbf{R})$ 的正交规范基,即 $L^2(\mathbf{R})$ 可由 $\psi_{j,k}(x)$ 线性张成,那么对于任何函数 $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$ 可以展开为

$$f(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(x) \quad (9)$$

分析上式可知,我们注意到 $k$ 表征平移位置,由于实际信号总可以近似为时域有限,因此 $k$ 实际上只需在有限范围内取值, $j$ 对应信号在某一频率范围,对于实际信号最高频率总可认为是取有限值,但却可以含有任意低的低频成分。因此 $j$ 在负整数中取值至 $-\infty$ 是不可避免的。这样就必须引入尺度函数,尺度空间及多分辨率分析等一系列概念来解决这个问题。

小波分析特别适用于具有丰富低频成分的信号。但也有些信号,它们没有或者很少有低频成分,这时就要涉及到小波包理论<sup>[8]</sup>。它能将小波空间划分为不同子空间。

设 $f(x)$ 表示信号, $U_j^i(t)$ 表示 $2^j$ 尺度上的第 $i$ 个小波包,即节点 $(j, k)$ ,则小波包分解算法可由下式给出:

$$\begin{aligned} U_0^1(x) &= f(x) \\ U_j^{2i-1}(x) &= \sum_k H(k-2x) U_{j-1}^i(x) \\ U_j^{2i}(x) &= \sum_k G(k-2x) U_{j-1}^i(x) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $x = 1, 2, \dots, 2^{j-1}, j = 1, 2, \dots, 2^j; J = \log_2 N$ 。 $H(x)$ 和 $G(x)$ 为正交镜像滤波器, $H(x)$ 与尺度函数有关,为低通滤波器, $G(x)$ 与小波函数有关,为带通滤波器。

### 4 试验

根据模拟转矩试验台的需求,本监测仪信号分析的基频频率范围为10 Hz ~ 2 Hz,待分析信号的最高频率一般考虑到四倍频,考虑一定的裕量后,信号分析范围定为10 Hz ~ 10 kHz。在



图2 现场传感器布置

振动实验台上分别沿X、Y、Z轴布置了3个加速度传感器,如图2所示。采集到的信号如图3所示,图中上半部分为转子不平衡时的电压值。

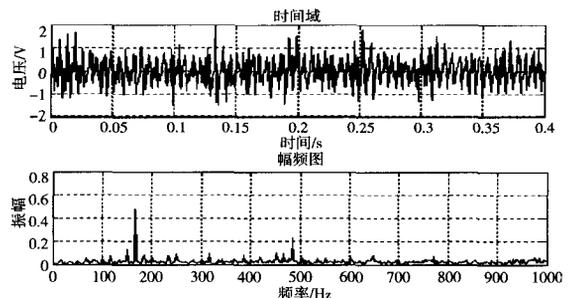


图3 时域和频域信号

下半部分为转子不平衡时的频域图。(下转第40页)

智能悬臂梁段的等效弹性模量理论,能有效进行解析计算多段压电元件的悬臂梁的固有频率和振型。解析计算与 FEM 在计算差别在 5% 以内。

2) 对于一段和两段压电片的悬臂梁,压电片尺寸和位置的改变都会影响悬臂梁的固有频率和固有振型,它们对悬臂梁前三阶固有频率的影响趋势有明显起伏;对于一段压电片悬臂梁,当压电片在不同位置时,对结构的高阶振型影响显著。

3) 对于两段压电片不均匀分布的悬臂梁,当压电片尺寸固定时,压电片位置变化引起智能梁各阶固有频率的明显变化。任何一段压电片位置的改变,引起一阶固有频率的线性变化,当压电片远离悬臂时,一阶固有频率下降;对高阶固有频率来说,压电片位置的改变,固有频率变化呈曲线状,有高有低,在某些情况下低于基梁的水平。

4) 压电片尺寸的变化和位置的改变都会影响悬臂梁的固有频率和固有振型,所以在高速飞行器机翼梁以主动控制为目标的压电结构动力学建模过程中,有必要考虑压电片对动态特性的影响。

参考文献

[1] 刘天雄,林益明,陈烈民. 智能结构及其在空间飞行器上的应用 [J]. 强度与环境,2004,31(2):20-27

[2] I. Y. Shen. Stability and Controllability of Euler-Bernoulli Beams with Intelligent Constrained Layer Treatments [J]. Journal of Vibration and Acoustics. 1996, 118: 70-77

[3] J. A. Ronggong and J. R. Wright. Modeling of a Hybrid Constrained Layer/Piezoceramic Approach to Active Damping [J]. Journal of Vibration and Acoustics. 1997, 119: 120-130

[4] H. S. Tzou. A New Distributed Sensor and Actuator Theory for "Intelligent" Shells [J]. Journal of Sound and Vibration. 1992, 153 [2]: 335-349

[5] 叶开沅,童晓华,纪振义. 非均匀变厚度梁的动力响应一般解 [J]. 应用数学和力学,1992,13(9):753-764

[6] 杜立群,颜云辉,王德俊. 智能结构梁横向自由振动的状态矢量法 [J]. 沈阳工业大学学报,1998,20(4):9-13

[7] 吴洪泰. 振动分析 [M]. 杭州:浙江大学出版社, 1989:286-300

[8] 陈烈民,杨宝宁. 复合材料的力学分析 [M]. 北京:中国科学技术出版社,2006:30-39

[9] 马志国,闻邦椿,颜云辉. 变截面智能压电梁的动态特性研究 [J]. 中国机械工程,1999,10(8):906-908

[10] 董兴建,孟光,李鸿光. 变截面压电层合梁自由振动分析 [J]. 振动工程学报,2005,18(2):243-247

[11] Quantian Luo, Liyong Tong. Exact static Solutions to Piezoelectric smart Beams Including Peel Stresses I: Theoretical Formulation [J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(2002): 4 677-4 695

[12] V. Balamurugan. Finite Element Formulation and Active Vibration Control Study on Beams Using Smart Constrained Layer Damping (SCLD) Treatment [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 249 (2): 227-250

(上接第 29 页)

机械设备在运行过程中的异常或故障将导致动态信号非平稳性的出现,非平稳性可表征某些故障的存在。如下图 4 所示,为小波包分解成不同的频率段的效果图,在这分成了 8 个不同的频率段。

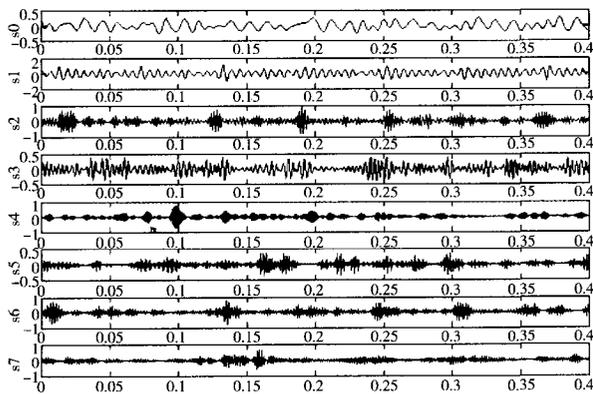


图4 小波包分解

5 总结

利用 TI 公司的 OMAP - L138 为嵌入式处理核心,在 DSP 内部应用小波分析算法对现场振动信号进行滤波,利用小波包算法提取故障信号特征。通过试验证明,该算法

效果良好。整机全速工作时功耗在 350 mw 左右,能够满足便携式工作要求。

参考文献

[1] 傅其凤,葛杏卫,崔彦平. 基于 DSP 的便携式振动分析仪 [J]. 煤矿机械. 2006(27):312-314

[2] 程秀芳,陶文. 基于小波理论的低速重载轴承的故障诊断研究 [J]. 控制与检测. 2009(12):48-50

[3] 许磊. 基于 ARM9 的振动数据采集系统的研制 [D]. 浙江. 浙江大学. 2007

[4] Texas Instruments. OMAP-L138 Technical Reference Manual [EB/OL]. 2009

[5] 何正嘉等著. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用 [M]. 北京:高等教育出版社,2001

[6] 王大凯,彭进业. 小波分析及其在信号处理中的应用 [M]. 北京:电子工业出版社 2006:24

[7] 李弼程,罗建书. 小波分析及其应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2003:35-37

[8] R. Coifman, Y. Meyer, S. Quake and M. V. Wickerhauser, Signal Processing and Compression with Wave Packets [C]. In Processing of the conference on wavelets, Marseilles, Spring(1991)