

多通道全波形声发射检测系统的研究

李光海¹, 胡兵², 刘时凤², 刘正义¹

(1. 华南理工大学机电工程系, 广东 广州 510641; 2. 清华大学机械工程系, 北京 100084)

摘要: 文章提出了多通道全波形声发射检测系统的构建方法, 重点描述了系统软、硬件设计中的关键问题及其解决方法。现场测试表明, 该系统满足检测的定量、定位要求, 并通过波形信号分析达到声发源的定性识别。

关键词: 声发射检测; 高速数据采集; 信号分析

A Study of Multi-channel and Waveform System for Acoustic Emission Test

LI Guang-hai¹, HU Bing², LIU Shi-feng², LIU Zheng-yi¹

(1. Mechatronics Engineering Department, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Mechanical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new method to construct acoustic emission (AE) test system and the way to solve key problems of the hardware and software are introduced. The experiment shows that this system meets requirements of quantitative and locating analysis. We can recognize the characteristics of the AE source with the waveform analysis.

Key words: acoustic emission test; high-speed data acquisition; signal analysis

1 引言

当材料受外力或内力作用产生变形或断裂, 以弹性波形式释放出应力应变能的现象称为声发射 (AE—acoustic emission)。声发射是一种常见的物理现象, 大多数金属材料塑性变形和断裂时有声发射发生, 但许多金属材料的声发射信号强度很弱, 需要借助灵敏的电子仪器才能检测出来。用仪器检测、记录、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术。声发射技术从研究的范围来看, 已从最初的压力容器、金属疲劳和断裂力学应用, 发展到目前的航空、航天、铁路运输、工业制造过程检测、建筑、石油化工、电力等几乎所有工业领域。

自 1965 年美国的 Dunegan 公司首次推出声发射商业仪器以来, 声发射技术已经历 30 多年的更新发展。当今国外的声发射检测系统的代表仪器有美国物理声学公司研制的 Mistras2001, 但未见到该仪器具有同时采集、存储、显示多通道 (如我们实现的 32 通道) 波形数据的能力。我国在声发射仪器的研制上起步并不算太晚, 但到目前为止还停留在模拟仪器阶段, 多通道检测时, 只能用硬件提取少量的参数。

无损检测评价的重要依据是对材料内部缺陷的定量、定性、定位。因此, 为了更加准确的对检测对象进

行定位、定量、定性分析, 必须研制能大吞吐量获取 AE 波形数据、灵活布置传感器进行源定位的多通道全波形声发射标准实时检测系统, 这对声发射检测技术研究以及工程应用来说都有着重要的意义和现实价值。

2 系统的硬件构成

声发射检测系统的硬件主要由传感器、前置放大器、主放大器和主处理机等构成。声发射检测一般要求多通道同步采集, 并利用信号到达各通道的时间差进行声发射源的定位。声发射检测系统硬件构成的关键问题是: (1) 高速采集卡的选择; (2) 采集卡的同步触发。

2.1 数据采集卡的选择

声发射检测系统的重要部件是高速数据采集卡, 要求采集卡的性能参数有: 高的采集率、合适的垂直分辨率、大的缓冲区、输入动态范围宽、多个接入端和相应的 A/D 转换、多种触发模式、合适的输入阻抗和负载能力、标准的总线规范和高的数据通过率。

经过综合权衡, 我们选取有着良好的性能价格比的 ADLink 公司的 PCI9812 数据采集卡。此卡为 32 位 PCI 总线结构, 可插到有标准 PCI 槽的普通工控机里工作。它的性能参数为: 最高采集率为 20MHz、12 位模拟输入分辨率、64k 先入先出缓冲区、输入信号量程有 $\pm 1V$ 和 $\pm 5V$ 、4 个通道及对应的 4 个 A/D 转换器、5 种触发模式: 软件触发、前触发、后触发、中间触发、延时触发、硬件触发; 触发源: 内部触发、外部模拟触发、外部数字触发; 采用 DMA (bus mastering) 模式高速数据传输。

收稿日期: 2001-10-24。

作者简介: 李光海 (1970-), 男, 安徽省怀宁人, 博士生, 主要从事锅炉压力容器等特种设备的基于计算机检测技术方向的研究。

2.2 采集卡的同步触发采集

对于大型设备的检测,典型的声发射检测系统是 32 个通道,这样需要 8 块 PCI 数据采集卡。这给我们带来了一个重要问题:如何保证各通道同步触发采集。这要求任何一个通道最先有信号到达时,其余通道也同时触发采集。这主要是信号的随机性和准确的时差定位所要求。因此,要设计好合适的采集触发模式以达到系统的要求。

由于数据采集卡供应商提供的板卡驱动程序函数一次只针对驱动一块卡而写的,因此由 8 块 PCI 采集卡组合成 32 通道,要实现 8 块采集卡并行采集,需在软件结构上也要采用并行结构。但测试结果表明,无论操作系统是 Windows95 或 NT4.0、也无论在不同的工控机上运行程序,都会造成随机的死机。究其原因,我们发现启动 8 块板卡采集、DMA 传输数据,驱动程序是采用 Bus Mastering 中断方式进行的,然而系统的中断源有限,必有几个卡有相同的中断源,又由于 AE 信号的随机性,就有可能在某一个很接近的时刻,两个有着相同的中断源几乎同时向系统申请中断,系统会应答前一个中断源同意中断申请并准备让出总线,但就在系统还没有把总线交给前一个中断源时,后一个中断源发现总线也是空,它也将以 Bus Mastering 方式申请中断,这样就有可能造成的由于随机出现的两中断抢占系统总线的情况出现,造成了系统随机的死机。因此在软件上以并行方式 DMA 传输采集数据是不可取的,须在整体上改为串行方式传输数据(部分可以并行)。

PCI 采集卡触发模式有内部数字触发源的软件、前、后、中间及延时 5 种触发模式;触发源有内部触发源、外部模拟、外部数字触发源。经过测试发现,无论采样前触发、后触发、中间触发、延时触发模式,如采用内部或外部模拟触发源方式都难以满足我们所要求的:在未知 AE 信号先到达何通道的情况下保证每个通道时间相对一致性。因此,信号触发源只能采用外部数字触发源方式。

为了实现每个通道时间一致性,需要从 AE 信号中提取 TTL 电平的数字触发信号,即要求做比较数字电路。其中比较器皆为数字或门,这样,当某个通道最先有 AE 信号时,该数字端逻辑上为 1,输出端就有 TTL 电平输出,送入到 8 块采集卡数字触发端,就可以实现满足我们要求的硬件触发信号。

在比较电路元器件选择时,理论上要求硬件响应时间越小越好,但实际应用中要综合考虑性能价格比。在本系统中,我们选用响应时间为 $1\mu\text{s}$ 比较器件。对于本系统,这样的误差是可以接受的。

3 系统的软件设计

3.1 触发的软件修正

有了外部数字硬件触发信号,相应的软件上也要有所调整。由于触发信号直接接到采集卡的数字触发端,所以只要查询某一块板卡是否被触发即可。一旦被触发,先等待相应采集长度对应时间的一半,再串行启动 DMA 传输采集数据(某些中断号不同的板卡可并行 DMA 传输),查询 DMA 传输是否完毕,如完毕做后处理为下次采集做准备。要等待一段时间是因为 PCI 采集卡有这样一个功能,当采集到的数据未达到缓冲区一半时,如启动 DMA 传输数据,那么传输数据起始点为缓冲区的开始点;当采集数据已经超过缓冲区的一半时,启动 DMA 传输数据,那么传输起始点为缓冲区的一半处。所以,适当的加以延时,一方面,可以消除采集到的数据时间序上第一块卡与其它卡的不一致性;另一方面,在这等待的宝贵时间里,可以充分发挥多任务操作系统的优势,让 CPU 去做其它重要的事情,很显然这样处理将增加整个系统的实时性。

由于 32 位 Windows 操作系统是多任务操作系统,各个任务的调度是由操作系统核心来完成的,至于何时运行何任务是看该任务的优先级别,级别高的优先执行。操作系统和驱动程序是在 Ring0 级工作,有最高优先级别;应用程序是在 Ring3 级上运行,优先级别低些。在 Window95 下,一个线程执行时间约为几个毫秒。这样就存在一个问题,如果在写某块采集卡上的控制采集寄存器时,由于采集线程时间片已到或此时有更高的级别的任务要执行而被操作系统悬挂起来,那么前面的采集卡已经开始采集,而后面的控制采集寄存器还没被写,从而还没有开始采集数据。因此这几个采集卡之间就存在着长达几个毫秒的时间偏差,这绝对是不能容忍的。因此,我们必须重新改写 PCI 采集卡的驱动程序,把查询、读写操作代码放到驱动程序中。

3.2 数据采集及存盘

为了达到在未知何时 AE 信号达到的情况下把所有通道的信号采集到,我们修改了采集卡的驱动程序。同时,相应的应用采集程序应该做相应的调整,即采集触发源为外部数字触发源。为了保证系统采集在工作的同时可以让用户进行其它操作,我们把采集和信号处理放在一个线程中。当点击“开始采集”菜单时,程序自动开辟一个线程进入采集线程。

大量数据存储到硬盘消耗的时间较大,所以没必要每次采集到的数据都要马上存储到硬盘中。这里采取的措施是先在内存中开辟个大的缓冲区,当该缓冲区满时才把数据以大数据流方式存贮到硬盘中以节省宝贵的时间。

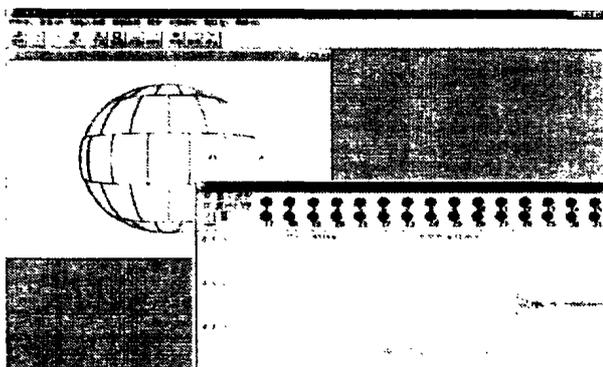


图1 系统的软件界面(球面定位及波形显示图)

3.3 声发射信号的参数提取

依据声发射参数技术,一个声发射事件的主要参数有:撞击时间、上升时间、持续时间、峰值幅度、振铃计数。这些参数取得时依据 AE 门限的设置。而在我们的检测系统中,一方面,一个采样长度中可能有几个声发射事件,这就需有个事件间隔和事件门限共同将两个事件区分开来;另一方面,声发射源定位主要依据的参数是事件到达时间和幅值大小。此外,还需软件把信号的来源通道号表示出来,同时,为了方便源定位算法,我们也要把众多事件按到达时间进行排序。本系统是从采样的数据中用软件实现提取这些声发射参数。

3.4 定位组的选择与定位计算

本检测系统中的定位相关组判断方法是结合该系统的特点给出的。本系统的一个重要特点是:一旦 AE 信号最先到达某一通道时,将在主放大器的比较器内将生一个数字触发信号送入 8 块采集卡触发采集,采集到的信号按超过给定阈值时所对应的到达时间插入有序表,然后依次进行各通道的相关性判断,得出定位相关组。

声发射源定位计算是声发射检测系统的核心技术,一台性能优良的声发射仪要求有好的定位效果。声源定位的核心是定位算法,算法的优劣直接影响着定位的准确度。对于曲面定位,我们按曲面的弧长公式建立定位方程组,由于联立方程的复杂性,难以求出其解析解,我们采用有着好的收敛性和稳定性的牛顿迭代数值分析方法来求解声源位置,并将结果送到屏幕上平面或三维立体显示。

3.5 定位信号的事后分析

事后分析也是声发射检测系统不可缺少的部分。在本系统中的事后分析包括:精确定位,定位信号(称为有意义的声发射信号)的波形回放和参数提取,有意义的声发射信号的谱分析、小波分析和模式识别。精确定位主要是根据 AE 波形信号的特征和波的模态,有针对性地选取合适阈值或定位组进行高精度

的迭代计算,从而得到更高的定位精度。谱分析、小波分析以及神经网络的模式识别,是加载 LabVIEW 作为信号分析仪界面并调用了 MATLAB 的函数进行运算。用小波变换提取信号的特征,再通过神经网络我们就可以对声发射源进行分类识别。

3.6 系统的实时性

1M 的采样速率,采集卡的采样时间为 8ms。PCI 总线理论速率为 132M byte/s,一次采样中每个板中数据量为 $32K \times 2 = 64K$ byte,所以 8 块串行采集卡总的

数据传输所需时间为: $8 \times 64K / 132M$ 约为 4ms。由于 PCI 总线还有其它设备(如显卡)传输时间,所以本检测系统平均一次采集花费的时间要略大于 $8 + 4 = 12ms$ 。在数据采集系统设计时,数据采集卡采集、传输数据和主机的数据处理是并行的,因此,为提高系统实时性,需把采集后的数据处理时间控制在 12ms 以内,严格上来说应该控制在 8ms 内,这是因为 PCI 总线数据传输时,需要 CPU 去查询是否传输完毕。

主机的数据处理模块包括声发射参数的提取、定位相关组的判断、声发射源的计算与显示。一次声发射参数的提取是从 $64K \times 8$ 这样大的数据量中比较提取的。经测试,整个数据量完全比较所需时间达 20ms 左右,这是我们不能容忍的。我们注意到在实际传感器定位网络布置中,由于灵敏度的限制,相邻传感器间距要小于 6m,即定位网络中最大边长不超过 6m,约为 2ms 左右的传播时间。因此,我们没必要整个采样长度内进行数据比较,只需比较 2ms 长度即可。而 2ms 长度的数据比较,经测试所需的时间约为 6ms,这部分时间还需要压缩,因为定位相关组的判断、声发射源的计算与显示等还需要 2ms 多一点的时间,解决的办法是每隔一采样点进行一比较(这对声发射检测是可以接受的),这等于压缩了一半的比较时间。

我们对组建的声发射检测系统进行了现场测试,测试系统的参数为:PⅢ 866、Windows95

(下转第 377 页)

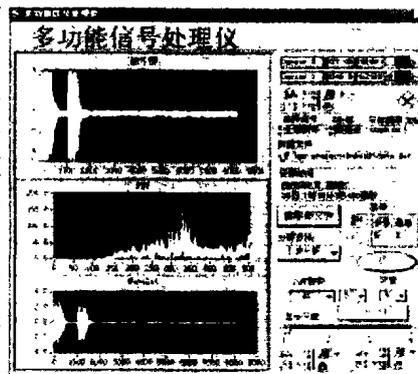


图2 事后信号分析

表1 系统的实时性测试

	总采集时间 (ms)	采集次数	时间/次 (ms/次)
1	16878	1375	12.275
2	58614	4776	12.273
3	142596	11657	12.258
4	144559	11805	12.246
5	345107	28155	12.257

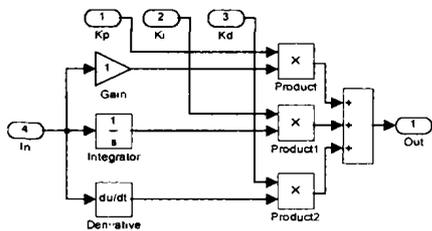


图 6 参数可调的 PID 模块框图

根据 PID 参数的整定原则和各变量模糊子集的化分，建立合适的模糊控制规则表，得到针对 K_P 、 K_I 、 K_D 三个参数分别整定的模糊控制表，很多文献都有论述，这里就不赘述了。

4 仿真结果与分析

根据前面的讨论，借助 Matlab 的模糊控制工具箱提供的 FIS (Fuzzy Inference System) 编辑器建立 mamdani 型的模糊控制器，并结合 Simulink 工具箱建立 Fuzzy - PID 控制系统的仿真模型。考虑到 Simulink 中没有参数可调的 PID 模块，所以自行建立一个参数可调的 PID 模块，如图 6 所示。Fuzzy - PID 控制系统的仿真模型框图如图 7 所示。

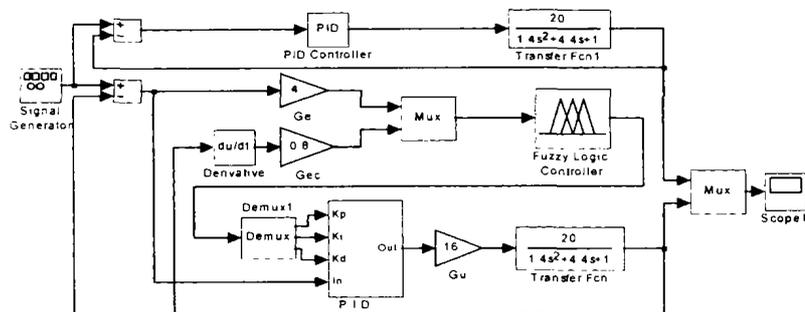


图 7 Fuzzy - PID 控制系统的仿真模型框图

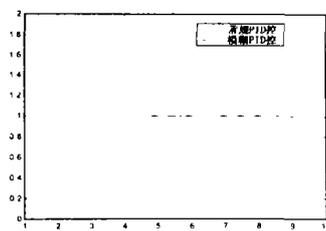


图 8 Fuzzy - PID 控制的单位阶跃响应曲线

仿真得到的系统阶跃响应曲线如图 8 所示。虚线为常规 PID 控制仿真得到的控制曲线，实线为 Fuzzy - PID 控制仿真得到的控制曲线。通过对二者的比较可以发现：Fuzzy - PID 控制实现磁悬浮系统的控制曲线无超调量，调节时间短，稳态误差小，曲线平滑，在平衡点附近无震荡，受干扰时变化不明显，鲁棒性好，符合磁悬浮控制系统的要求。

5 结束语

Fuzzy - PID 参数自整定控制算法将模糊控制动态性能好的优点和 PID 控制稳态性能好的优点结合起来，对于磁悬浮这样的非线性系统有非常好的控制效果，如果由 PID 各参数控制规则生成一张模糊控制表，就可以用查表的方法确定控制输出，便于用数字方式实现，是比较理想的控制算法。

参考文献：

- [1] 陶永华, 尹怡心, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 王建华, 等. 智能控制基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 窦振中. 模糊逻辑控制技术及其应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.
- [4] 尹力明, 杨泉林. 采用永磁悬挂体的磁悬浮系统建模与系统设计方法 [J]. 机车电传动, 1999, (2): 11 - 13.

量的定量结果。同时，在价格上只有国外仪器的三分之一，使声发射技术在国内推广使用成为可能。

参考文献：

- [1] 李光海. 声发射检测技术进展 [J]. 南昌航空工业学院学报, 2001, (2): 39 - 43.
- [2] Operation manual of MISTRAS [Z]. Physics Acoustic Corporation, Princeton, NJ 08543 - 3135, USA.
- [3] 李光海. 声发射源多传感器数据融合识别技术 [C]. 全国第九届声发射会议论文集, 2001.
- [4] 胡兵. 声发射仪的研究 [D]. 北京: 清华大学机械系, 2000.
- [5] 李强, 等. Win9X 虚拟设备驱动程序编写指南 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [6] YANG. M. H, CHOU. C. P, A lab - scale digital acoustic emission system for source location [J]. Experimental Techniques, 1999.

(上接第 357 页)

操作系统、采样率 1M、每通道采样长度 8K，外部信号频率为 10kHz 的方波触发采集卡采集。测试结果见表 1。

从表 1 中可以看出，平均每次采样所需时间约为 12.2~12.3ms。系统处理综合处理能力为 1/12.3 次/ms，即约为 80 次/s 声发射信号的处理能力，大大超过国内外标准对声发射检测系统的实时性要求。

4 结论

文章提出了多通道全波形声发射检测系统的软、硬件构成方法。通过对比测试表明，该系统在定位精度和实时性方面与国外同类先进仪器相当。更重要的是该仪器能实现各个通道的全波形声发射信号的采集与处理，这给声发射源的定性识别带来了可能，并且通过波形的模态分析可以得到更加精确的源定位和参