

基于 SPCE61A 的墙体空鼓声无损检测系统

孙牵宇¹, 童峰¹, 曹绍杰²

(1. 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 厦门 361005;
2. 香港城市大学制造工程与管理工程系服务机器人实验室, 香港)

摘要: 针对建筑外墙空鼓的检测要求, 利用振动与声学理论进行敲击过程的建模和敲击声学特性分析, 在此基础上设计了一个基于 16 位凌阳单片机 SPCE61A 的嵌入式墙体无损检测系统。由于 SPCE61A 片内资源有限, 通过片内资源的高效调配设计及算法优化实现多点快速傅立叶计算, 提高系统检测性能。实验数据表现的敲击声中低频段能量比与墙体结构的关系与理论分析基本吻合。门限检测方法对墙体进行识别, 取 100 个好墙体的敲击声在 9kHz 处平均能量的 0.6 倍作为门限进行检测。实测 200 次敲击, 正确识别率高达 99%。如果环境噪声较大, 而仍利用门限检测方法, 则正确率识别率下降较大。实验结果表明了该系统的有效性。

关键词: 墙体空鼓; 无损检测; 凌阳单片机; 敲击声检测法

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2007)-06-1150-05

Acoustic inspection of wall hollowing based on SPCE61A single-chip microcomputer

SUN Qian-yu¹, TONG Feng¹, S.K. TSO²

(1. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of the MOE, Xiamen University, Xiamen 361005; 2. Service robotics laboratory, Department of MEEM, City University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: To tackle the safety threats caused by the wall hollowing, this paper designs an acoustic nondestructive inspection system based on embedded Sunplus SPCE61A single-chip microcomputer. The impact process and the resulting sound emission are analyzed theoretically to obtain the relationship between the hollow wall and the corresponding acoustic feature. Due to the limited on-chip memory capacity of the SPCE61A, the present system adopts the memory distribution and Fast Fourier Transform (FFT) algorithm optimization to realize 256-point FFT computation to ensure the detection performance. Experimental results demonstrate the effectiveness of the present system, which has the potential of being developed as a portable, convenient, accurate and low-cost inspection tool.

Key words: wall hollowing; nondestructive inspection; Sunplus single-chip microcomputer; impact acoustics

1 引言

建筑墙体由于受其自身及外界各种因素的影响常常会产生空鼓现象^[1,2], 对建筑物承载能力和耐久

性造成严重危害、高层建筑外墙空鼓会导致外墙脱落, 由此造成人身伤害以及经济损失的报道屡见不鲜。而传统的根据人耳听取敲击声特点进行检测的方法依赖于检测者的经验、主观随意性大, 准确性不高且无法给出量化结果, 因此迫切需要一种快速、方便检测建筑墙体空鼓的检测手段。无损检测(Non-destructive Testing 或 Non-destructive Evaluation, 简称 NDT 或 NDE), 又称非破坏性检测, 是指在破坏墙体内部结构和使用性能的情况下, 利用声、

收稿日期: 2006-07-23; 修回日期: 2006-11-10

基金项目: 福建省科技计划重点项目(No.2007H0030)、香港特别行政区 RGC 项目(No. CityU 1166/02E)资助。

作者简介: 孙牵宇(1982-), 男, 辽宁人, 硕士, 研究方向: 声无损检测。

通信作者: 童峰, E-mail: ftong@xmu.edu.cn

光、热、电、磁和射线等方法,检测有关墙体的性能。用于墙体空鼓检测的方法很多^[3-7],文献[5]利用的是超声检测法、文献[6]、[7]则分别用冲击回波法和电磁波检测法,常用的方法还包括射线检测法、超声-回弹综合法等。但上述方法有的需要将传感器紧贴在墙面上(超声、冲击回波法)、或是需要在同时墙体的背面一侧放置传感器(电磁波法),使用不够方便。

本文研究了敲击声信号特性的墙体空鼓检测,利用敲击球敲击墙体表面,提取敲击声信号进行空鼓检测。首先通过理论建模和实验数据对敲击过程及其产生的声信号特征与墙体空鼓情况间关系进行理论分析^[6],在此基础上研究根据敲击声信号参数来判断墙体的空鼓情况的检测系统。由于这种方法采用的传感器即麦克风不需要和物体表面紧密接触,在检测中具有更好的实用性。

随着数字信号处理、单片微处理器及智能识别技术的迅速发展,无损检测技术将向着智能化、小型化、自动化方向发展。在文献[8]的基础上,本文采用凌阳公司 16 位单片机 SPCE61A 嵌入式系统进行敲击声信号采集与处理,并针对单片机有限的片内资源进行资源调配和算法优化,实现高性能信号分析与检测,以满足快速、方便、便携式墙体空鼓检测的要求。

2 敲击过程的能量分析^[8]

球形实心物体敲击均质物体的动力学过程已被许多文献研究过,为简化起见,本文用一个二自由度的弹簧系统对敲击动力学过程进行建模分析如图 1 所示。

K_f 和 K_c 分别为两个弹簧的倔强系数,分别表示墙体的弯曲强度和接触区域的强度, M_2 和 M_1 分别表示墙体的等效质量和敲击球的等效质量。

首先分析敲击过程的能量分布情况,在敲击过程中,敲击球的初动能转化为墙体结构的弯曲振动能量及接触区域形变能量,假设墙体结构初始是静态的,当它达到最大形变时,敲击球的速度变为零,

这时所有的初动能都转化为墙体结构的弯曲振动的能量和接触区域形变所产生的能量。因此忽略墙体结构变形的剪切力以及敲击过程中产生的压缩波等成分,可写出能量守恒方程如下:

$$E_{\text{sum}} = \frac{1}{2} M_1 v_0^2 = E_f + E_c \quad (1)$$

其中, v_0 是敲击球的初动能,下标 f, c 代表墙体结构的弯曲变形的能量和接触区域的能量。接触区域的能量 E_c 包括墙体形变能量和敲击球形变能量两部分,这部分能量通过小球的反弹最后转化为敲击小球的剩余振动能量。定义为初动能转化为墙体弯曲振动能量的比率,假设图 1 中敲击球与圆盘中心接触,圆盘的厚度为 h ,半径为 a , k_{12} 为常数,根据文献[6]得到下面的表达式:

$$= \frac{0.0204}{\sqrt{1+k_{12}}} \cdot \frac{a^2}{h\sqrt{h}} \quad (2)$$

从方程(2)可以看出转化为弯曲振动的能量比与圆盘的厚度以及半径有关。根据声学理论,辐射声的强度和振动的能量成正比,因此弯曲振动产生的声强与总声强的比率可反映被检测墙体情况。

综合上面的理论分析可知,由于墙体内存在空鼓时墙体的等效厚度 h 要比正常墙体结构的厚度小得多,这样在敲击空鼓墙体时敲击球的初动能转化为墙体弯曲振动能量的比率将大大高于正常墙体的情况,因此通过对敲击过程发出的声信号进行功率谱分析即可判断墙体结构中是否存在空鼓。但在时域要分辨出敲击声中墙体弯曲振动发声的部分较为困难,在频域内则有可能根据弯曲振动一般具有较低的频带进行敲击声中的功率谱分析,从而判断墙体的完整性。

3 系统的硬件设计

本系统以凌阳 SPCE61A 单片机为控制和信号处理的核心,根据 SPCE61A 单片机的特点以及上一部分的理论分析,本文搭建了基于 SPCE61A 的敲击声信号检测系统,整个系统可分为敲击电路、声

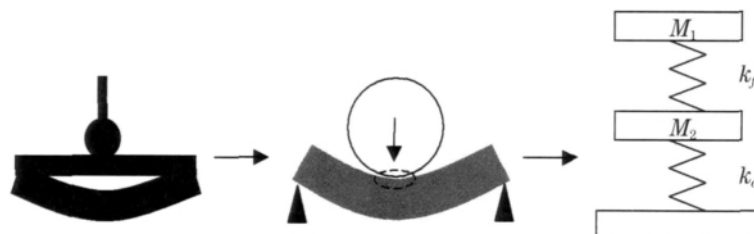


图 1 敲击过程的弹簧模型

Fig.1 Spring-mass model of impact

信号采集、声信号处理与液晶显示四大部分,硬件框图如图 2。按下系统开关,使敲击电路工作,敲击声被麦克风获得,声信号经过前置放大后,再经过 AD 转换,然后对转换后的信号进行功率谱计算、分析,最后的结果显示在液晶屏上。

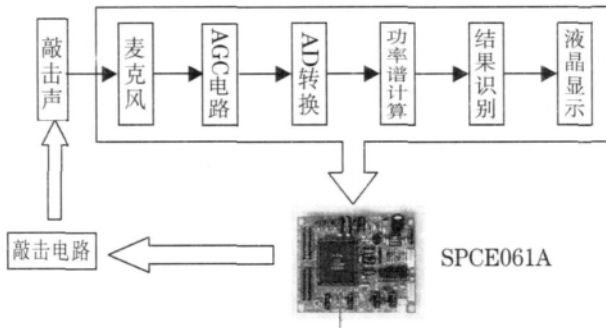


图 2 硬件框图

Fig.2 Chart of hardware

3.1 敲击电路

由按键触发,IOB8 口输出高电平经过 HD74LS04P反相器触发固态继电器,使敲击电路导通,敲击锤弹出。敲击电路中加入反相器的目的是为了提高 IOB8 口的负载能力。

3.2 敲击声信号的采集

从 MIC_IN 通道输入的敲击声信号要经过缓冲器和放大器再送入 A/D 转换器。放大器的增益值可由单片机片内集成 AGC 电路来调整。A/D 转换器也是片内集成的,由 DAC0 和逐次逼近寄存器 SAR 组成逐次逼近式模拟数字转换器。在 ADC 自动方式被启用后产生一个启动信号,即 RDY=0。当 10 位 A/D 转换完成时,RDY 会被设‘1’。此时,用户通过读取 P_ADC(7014H)单元可以获得 10 位的 A/D 转换数据^[3]。这里要注意的是 SPCE61A 是 16 位单片机,所以内部基本数据类型是 16 位的‘word’型,但是 A/D 转换数据只有 10 位,因此读取 P_ADC(7014H)单元的高 10 位才是有效的 AD 转换值,而低 6 位是无意义的。

3.3 SPCE61A 微处理器的核心结构

由 A/D 转换得到的数字信号,进入微处理器 μ nSPTM 进行数据处理,最后通过液晶显示墙体好坏的结果。微处理器 μ nSPTM 的核心由总线、ALU 算术逻辑运算单元、寄存器组、中断系统及堆栈等部分组成。 μ nSPTM 的 ALU 非常有特色,除了提供基本的 16 位算术逻辑运算和 16 位移位运算指令外,还提供了高速的 16 位 \times 16 位乘法运算指令 MUL 和内积运算指令 MULS。这两条指令大大的提升了 μ nSPTM 的数字信号处理能力^[9]。

4 系统的软件设计

考虑到程序的简化以及可移植性等方面,本系统的程序在 μ nSPTM 集成开发环境下采用 C 语言进行编写。此开发工具可在 windows 环境下操作,支持标准 C 语言和凌阳单片机汇编语言,集编辑、编程、仿真等功能于一体。因此使用户的编程、调试工作更加方便且高效。此外,它的软件仿真功能可以在不连接仿真的情况下模拟硬件的各项功能来调试程序。

4.1 声信号的采集

当有按键发生时,使敲击球与外墙碰撞产生敲击声。然后通过软件设定定时器 TimerA 中断的溢出频率来控制 AD 的采样频率。通过后面实验可知,本系统所要分析的声信号最高频率在 9kHz 左右,根据奈奎斯特抽样定理,本系统的采样频率设为 24kHz。由于 SPCE61A 的内存所限,所以本系统的采样点数最多只能实现 256 点。

4.2 功率谱计算程序

频率域敲击声信号分析通过采用快速傅立叶变换算法计算信号功率谱进行。考虑到 SPCE61A 片内资源有限,实现计算量较大的多点数(256 点)功率谱运算需要进行片内资源的合理调配和算法本身的优化设计,这是整个信号处理程序的核心部分。

功率谱计算程序中的 FFT 计算子程序是按时间抽选基-2 同位寻址的。由于本系统采样得到的 256 个数据可以看成是复序列,实部为整数,虚部为零。但考虑到这 256 个数据 $x(n)$ 是实序列,为进一步提高计算效率,需要对按时间抽取的基 2 复序列 FFT 算法进行一定的修改。

因为序列 $x(n)$ 是实数,那么其傅立叶变换 $X(k)$ 一般是复数,但其实部是偶对称,虚部是奇对称,即 $X(k)$ 具有如下共轭对称性: $X(0)$ 和 $X(N/2)$ 都是实数,且有

$$X(k) = X^*(N-k) \quad 1 \leq k \leq \frac{N}{2} - 1$$

在计算离散傅立叶变换时,利用这种共轭对称性,就不必计算与存储 $X(k)$ ($N/2+1 \leq k \leq N-1$) 以及 $X(0)$ 和 $X(N/2)$ 的虚部,而仅需计算 $X(0)$ 到 $X(N/2)$ 即可。此处我们选择的是计算 $X(0)$ 到 $X(N/4)$ 和 $X(N/2)$ 到 $X(3N/4)$,这样做可以恰好利用复序列 FFT 算法的前 $(N/4)+1$ 个复数蝶形。它比复序列 FFT 算法大约可减少一半的运算量和存储量。

$\cos(2\pi r/N) - j\sin(2\pi r/N)$, 所以在对 W 相乘时, 必须产生相应的正、余弦函数。本系统采用方法二, 是在程序开始前预先计算出 W , 将 $r=0, 1, \dots, N-1$ 这 N 个独立的值存在数组中, 等效于建立了一个正、余弦函数‘表’, 在程序执行时可直接查‘表’得到, 这样就提高了运算速度。

在内存管理方面, 由于 2k 字的 SRAM 空间有限, 所以在 32k 字的闪存区也存储了一些数据。图 3 是内存分配表:

0x0000 0x07FF 0x0800	2k 字 SRAM
0x6FFF 0x7000	保留空间
0x7FFF 0x8000	I/O 端口、系统端口
0xBFFF 0x0000	32k 字 Flash ROM 中的前 16k 字用于程序存储
0xFFF5 0xFFF6	32k 字 Flash ROM 中的后 16k 字用于数据存储 存放旋转因子 W
0xFFFF	中断向量

图 3 内存分配示意图
Fig.3 Illustration of memory allocation

32k 字的闪存被划分为 128 页 (每页存储容量为 256 字), 它们在 CPU 正常运行状态下均可通过程序擦除或写入。全部 32k 字闪存均可在 ICE 方式下被编程写入或被擦除。由于写入程序代码所在的块地址不能与写入数据所在块地址一样, 否则无法写入。所以进行擦除及写操作之前必须计算出程序代码占有的空间, 本系统的程序代码在 0x8000-0xBA99 段, 为了给程序修改或增加预留空间, 所以 0x8000-0xC000 段作为程序存储, 即 16k, 而 0xC000-0xFFF5 段都可用来存储数据。

经过多次实验表明, 该芯片对于浮点型数据的计算没有整型数据的可靠性高, 所以本程序中的数据类型都定义为长整型, 同时把旋转因子的值扩大一定的倍数也转换成整型。由于 FFT 的计算程序中有多次的累加和累乘会使数据变的很大, 因此要注意在计算的过程中(要)控制数据的值不溢出。

上述的各部分程序, 尤其在 FFT 计算时要注意 SPCE061A 的看门狗功能, 它是上电自动使能, 不能够被屏蔽, 清除周期为 $0.75s^{[7]}$ 。因此在较长的循环及等待的程序中要妥善处理看门狗的操作, 否则会产生出一个 WatchDog_Reset 信号, 使程序无法正

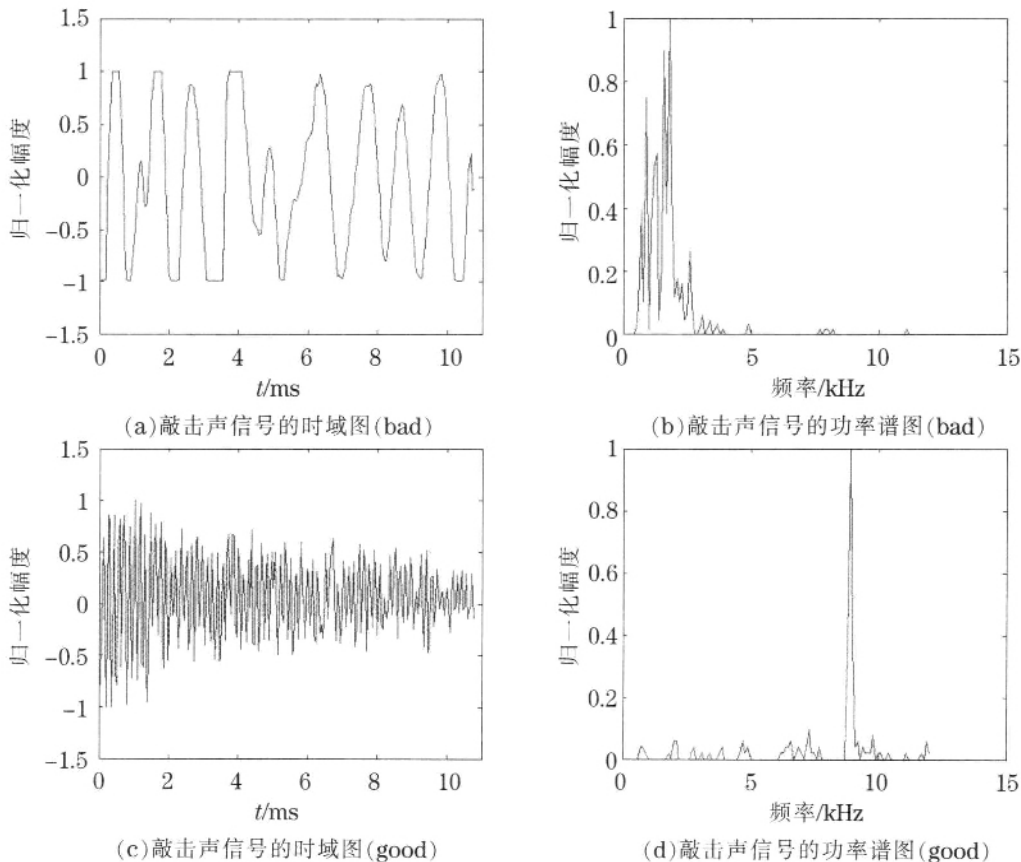


图 4 敲击声信号归一化时域波形和相应功率谱图

Fig.4 Time-history waveform and corresponding PSD

常运行。

5 实验结果

检测实验在实验室内进行的,室内安静,噪声较小。设定系统的采样频率为 24kHz,采样点数为 256 点。利用该基于凌阳单片机的墙体无损检测系统分别对有空鼓和无空鼓的实际墙体进行敲击检测,并对所产生的敲击声进行功率谱分析。实验的实际墙体是由瓷砖装饰面和混凝土组成。分析结果如图 4 所示,图 4(a)、4(b)是空鼓墙体的时域波形和功率谱图,图 4(c)、4(d)是正常墙体的时域波形和功率谱图。

从图 4(b)中可以看出在频率域敲击声能量大都集中在低频段(约分布在 0kHz~5kHz),说明敲击球的初动能大都转化为频率较低的墙体弯曲振动;而在图 4(d)中,低频段能量占总能量比率明显减小,在 9kHz 附近有较高的能量存在,这部分能量成分对应于敲击球反弹后自身的剩余振动,其频率相对较高。

由此可知,实验数据表现出来的敲击声中低频段能量比与墙体结构的关系与前面的理论分析基本吻合。基于此,门限检测的方法对墙体进行识别,取一百个好墙体的敲击声在 9kHz 处平均能量的 0.6 倍作为门限进行检测。实测 200 次敲击,正确识别 198 次,错误识别 2 次,正确识别率高达 99%。如果环境噪声较大,而仍利用门限检测方法,则正确率识别率下降较大。

6 结 论

本文设计了应用敲击声法对墙体空鼓进行无损检测的嵌入式系统,它是凌阳 16 位单片机 SPCE061A 为核心,配以液晶模组和简单的外围硬

件电路。通过计算敲击声功率谱并进行参数分析来判断墙体的空鼓情况。实验结果表明该嵌入式无损检测系统的有效性,同时系统具有便携性好、低成本、使用方便等特点。

参 考 文 献

- [1] 金泽龙, 马文杰. 厂房外墙开裂、空鼓、渗漏的成因及治理[J]. 黑龙江水利科技, 2004, 7(3): 47-48.
JIN Zelong, MA Wenjie. Reason and solution of workshop walls crack, vacancy and leakage[J]. Heilongjiang Irrigation Science and Technology, 2004, 7(3): 47-48.
- [2] 冷涛. 防止外墙饰面砖空鼓脱落的几点经验措施[J]. 工程质量, 2004, 2(5): 54.
LENG Tao. Several experiential measures for protecting the drop of facings[J]. Project Quality, 2004, 10(5): 54.
- [3] 刘镇清, 魏墨鑫. 超声检测的信号处理与模式识别[J]. 声学技术, 1996, 15(1): 19-20.
LIU Zhenqing, WEI Moan. Signal processing and pattern recognition of ultrasonic detection[J]. Technical Acoustics, 1996, 15(1): 19-20.
- [4] 陈丹, 李京华. 基于主分量分析的声信号特征提取及识别研究[J]. 声学技术, 2005, 24(1): 39-41.
CHEN Dan, LI Jinghua. PCA based feature extraction and recognition of acoustic signal[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(1): 39-41.
- [5] Morishige H, Tanaka S. Non-destructive inspection of concrete structures using ultrasonic sensor[A]. Japan: SCIE [C]. 2005. 1892-1895.
- [6] Sansalone M, William B. Streett, Impact-echo NDE of Concrete and Masonry[M]. Bullbrier Press, Ithaca, N. Y., 2003.
- [7] Tanaka S. Non-destructive inspection of concrete structures using an electromagnetic wave radar[A]. Japan: SCIE [C]. 2005. 1493-1497.
- [8] TONG Feng, S K TSO, M Y Y Hung. Impact-acoustics-based health monitoring of tile-wall bonding integrity using principal component analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(7): 329-340.
- [9] 张培仁, 张志坚, 高修峰, 等. 十六位单片机微处理器原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 5-105.
ZHANG Peiren, ZHANG Zhijian, GAO Xiufeng, et al. Sixteen b-bits SCM MPU principle and application[M]. Beijing: Tsinghua University Publication, 2005. 5-105.