

声频应力波实时检测分析仪*

罗明璋^{1,2}, 王军民², 徐菲², 张辉²

(1. 长江大学电子信息学院 荆州, 434023)

(2. 长江大学油气资源与勘查技术教育部重点实验室 荆州, 434023)

摘要 针对目前国内桩基和锚杆质量检测仪的不足, 采用 CPLD+DSP+ARM 硬件平台, 对声频应力波信号进行 24 位/1M 的浮点采集, 应用小波变换和 Hilbert 变换对声频应力波信号实时处理, 提取声频应力波的瞬时信息, 实现快速、准确的无损检测, 提高了现场测量的准确性和效率。通过高速公路上的锚杆质量检测, 验证了该仪器性能。

关键词 声频应力波; 小波变换; Hilbert 变换; 嵌入式
中图分类号 TH89

引言

目前声频应力波反射法广泛应用于桩基工程质量检测中。该方法基于一维杆件的弹性振动理论, 将测桩体看作一维线性弹性杆, 当桩顶受到激励后产生应力波, 应力波沿桩身传播过程中遇到不连续界面(如缩径、夹泥、孔洞和离析等)和桩底面时产生反射波, 通过检测和分析反射波的走时、幅值和相位特征, 可以判断桩的长度及完整性。但是在运用该理论对桩基进行工程检测评定时, 经常会出现错判和漏判的现象^[1], 主要原因为现场获得的波形数据质量不高。目前国内工程领域使用的仪器大都不具备实时分析的功能, 现场工作人员只能凭肉眼观察来判别采集波形的质量, 检测质量受人为因素的影响较大^[2-3]。

根据现有仪器的不足, 结合工程实践, 研制了基于 CPLD+DSP+ARM 的声频应力波实时检测分析仪。仪器将小波变换与 Hilbert 变换应用于声频应力波的实时处理中, 现场工作人员根据处理结果判别数据是否有效, 提高了工作效率。用自由响应的 Hilbert 变换识别模态固有频率和阻尼比。

1 声频应力波反射检测原理

当被测桩直径 d 远远小于其长度 L 时, 桩

体中的弹性波传播速度远大于其围岩(或土体)的波速, 桩基可以基于一维杆件的波动理论分析处理。桩基中传播的一维弹性波波动方程可以表示为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\gamma}{SE} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

其中: μ 为截面的纵向位移; x, t 为空间、时间坐标; γ 为桩基周围介质的阻尼系数; S, E 分别为桩基的截面积及锚杆材料的弹性模量; C 为桩基的纵波波速: $C = \sqrt{E/\rho}$; ρ 为锚杆材料的质量密度。

在小阻尼情况下, 式(1)解可近似简化为^[1]

$$u = Ae^{-\frac{\gamma}{2S\rho}t} e^{i(\omega t - \frac{x}{C})} \quad (2)$$

其中: $\frac{\gamma}{2S\rho}$ 为衰减因子; ω 为无阻尼条件下的圆频率。

由式(2)可见, 波在传播过程中幅值随传播时间的增加按指数规律衰减。当 γ 值不变时, S 值或 ρ 值愈小则波幅值随时间衰减愈快。

在由桩基、混凝土砂浆和围岩组成的体系中, 由桩基端部发射的声波经杆体向四周传播, 在桩基与砂浆、砂浆与围岩等界面发生入射、反射和透射, 如图(1)所示。入射波应力为 σ_i 、反射波应力 σ_r 与透射波应力 σ_t 之间的关系分别为

$$\sigma_r = \frac{Z_2/Z_1 - 1}{Z_2/Z_1 + 1} \sigma_i \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{2(Z_2/Z_1)(A_1/A_2)}{Z_2/Z_1 + 1} \sigma_i \quad (4)$$

其中: $Z = \rho CA$ 为波阻抗; ρ, C, A 分别为介质的密度、声速和截面积。

* 国家自然科学基金资助项目(编号:400727001)

收稿日期:2011-11-26; 修改稿收到日期:2012-01-23

由式(3)和式(4)及图1可以看出,当杆中某一截面面积或材料性质发生改变时,将在该截面处发生反射和透射,其反射和透射波的大小与截面面积和波阻抗相对变化的程度有关。

如图2所示,与变截面杆相类似,在测量体系中锚杆、砂浆、和围岩三者之间浇灌均匀密实时,应力波的能量大部分透射到围岩体中,只有小部分能量反射回来,且反射信号极有规律。当砂浆浇灌不均匀、不密实时,空穴处将出现波阻抗变化面。采集信号中会迭加强度不同的反射波信号,根据反射波位置和反射信号的强弱,可确定桩基质量并为其分级^[4-5]。

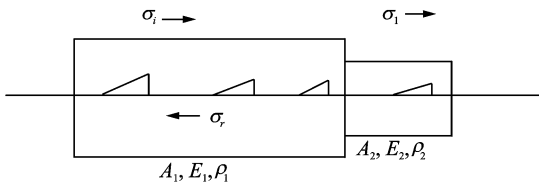


图1 变截面杆中的入射波、反射波和透射波

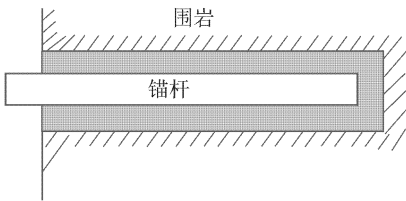


图2 锚杆体系

2 硬件设计

如图3所示,声频应力波实时检测分析仪由信号发射、信号采集和信号处理3个模块组成。

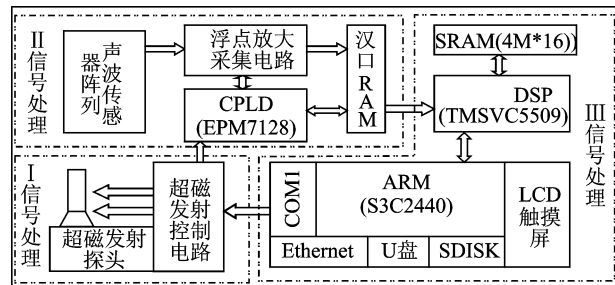


图3 声频应力波实时检测分析仪硬件原理框图

2.1 信号发射模块

信号发射模块由超磁发射探头和超磁发射控制电路两部分组成。超磁发射探头使电信号转换为声波信号。超磁发射控制电路接受来自 ARM 系统的 COM1 口命令,控制探头的电压和保证同步触发。

2.2 信号采集模块

针对二次反射波信号很弱的特点,本设计基于浮点放大技术进行声频应力波信号的采集,既保证了数据采集系统的动态测量范围,又兼顾到系统的采集精度和速度。带浮点放大器的两级并行A/D转换器由CPLD控制,系统在小信号输入时放大较高的倍数,以增加A/D转换的有效位数。双端口RAM作为A/D转换与DSP之间的桥梁,为高速数据传输提供了硬件支持。

2.3 信号处理模块

信号处理模块由DSP(TMS320VC5509A)系统和ARM(S3C2440)系统组成。DSP系统负责从双口RAM读取数据,并对数据进行小波变换、Hilbert变换处理,然后将原始数据和处理结果通过HPI口送到ARM系统。ARM系统对接收到的数据进行显示、保存,并提供人机接口让操作人员对测量结果进行即时分析。另外,ARM系统还集成了Ethernet,USB,SD卡,COM口和外设进行数据交换。

3 软件设计

3.1 系统软件结构

该系统软件(见图4)按其运行的硬件平台可分

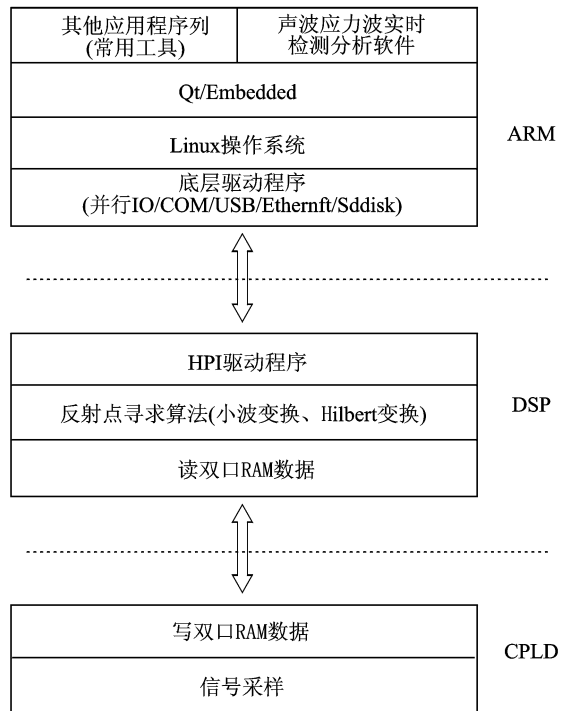


图4 声频应力波实时检测分析仪软件结构

为3部分,即CPLD控制采集软件、DSP数据处理软件和ARM后台处理软件。

3.2 CPLD控制采集软件

CPLD控制两级A/D实现对声频信号的24位/M采集,并将采集到的数据写到双口RAM。8位高速A/D对信号进行预采样,经过预采样得到的数值在时钟CLK的上升沿锁存到可编程逻辑器件中,在时钟CLK的下降沿输出编码值,送入由8位D/A和运算放大器组成的程控增益放大电路,然后将放大后的信号送入16位A/D进行采样,并将采样得到的16位数据与预采样的8位数据一起写到双口RAM中。其控制时序如图5所示。

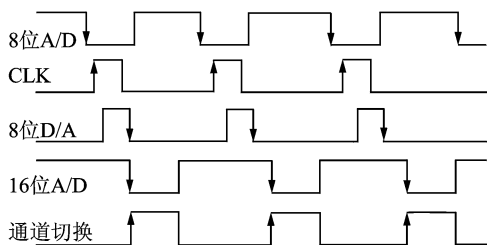


图5 数据采集系统时序逻辑

3.3 DSP数据处理软件

DSP数据处理软件对原始数据进行FFT分析、小波变换、Hilbert变换,从中提取信号的频谱特征、相位突变等信息,为解释人员综合评价被测物体的长度和质量提供依据。软件流程如图6所示。

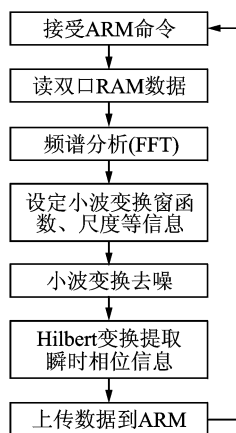


图6 DSP数据处理流程

DSP接收到ARM命令后,开始监测双口RAM的状态,当双口RAM半满信号有效时,读取双口RAM的数据;然后对数据进行FFT变换,通过对信号的频谱进行分析的结果选定小波变换的窗函数和尺度等参数;接着将进行小波去噪后的数据进行

Hilbert变换,并提取信号的瞬时相位信息;最后将原始数据和处理的中间结果通过HPI接口一起上传给ARM供测量人员分析。

3.4 ARM后台处理软件

ARM后台处理软件系统在ARM-Linux操作系统平台下实现,从下到上包括4层:底层驱动程序、Linux操作系统、Qt/Embedded库、应用层。其主要功能包括:a.接收DSP的HPI口数据,包括原始数据和处理后的数据;b.提供人机接口供现场工作人员分析;c.保存原始数据和分析结果。图7为系统采集分析界面。

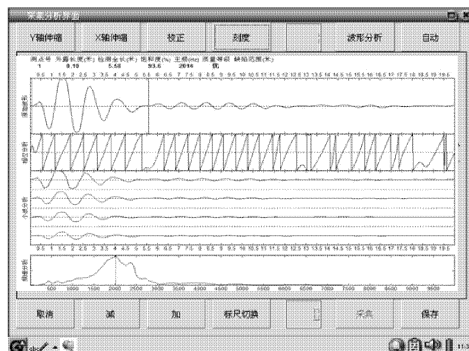


图7 ARM系统采集显示界面

4 试验效果

某电站隧道中同一根6.00 m长、直径28 mm已灌浆且凝固期已满的锚杆分别测量3次,试验曲线如图8所示。

由3次测量的原始波形来看,各次测点的原始波形都不相同。测点1的原始波形噪声大,与测点2-3的形态相差比较大,但经上述方法的处理后,在6.00 m附近均有突变点,而且从瞬时相位分析中的变化规律可以观察到,6 m后相位变化的周期明显增长,即信号的频率明显降低,与声频应力波信号经过一次反射后高频成分明显减小的结论吻合。

5 结束语

利用CPLD+DSP+ARM搭建的硬件平台,实现了对声频应力波信号的高精度浮点放大采集,充分利用DSP技术和ARM技术的优势,将FFT变换、小波变换与Hilbert变换结合应用于声频应力波的实时分析处理中,快速、准确地提取信号特征。该方案设计的声频应力波检测分析仪弥补了传统仪器的不足,提高了测量的准确性和效率,具有较好的市场前景。

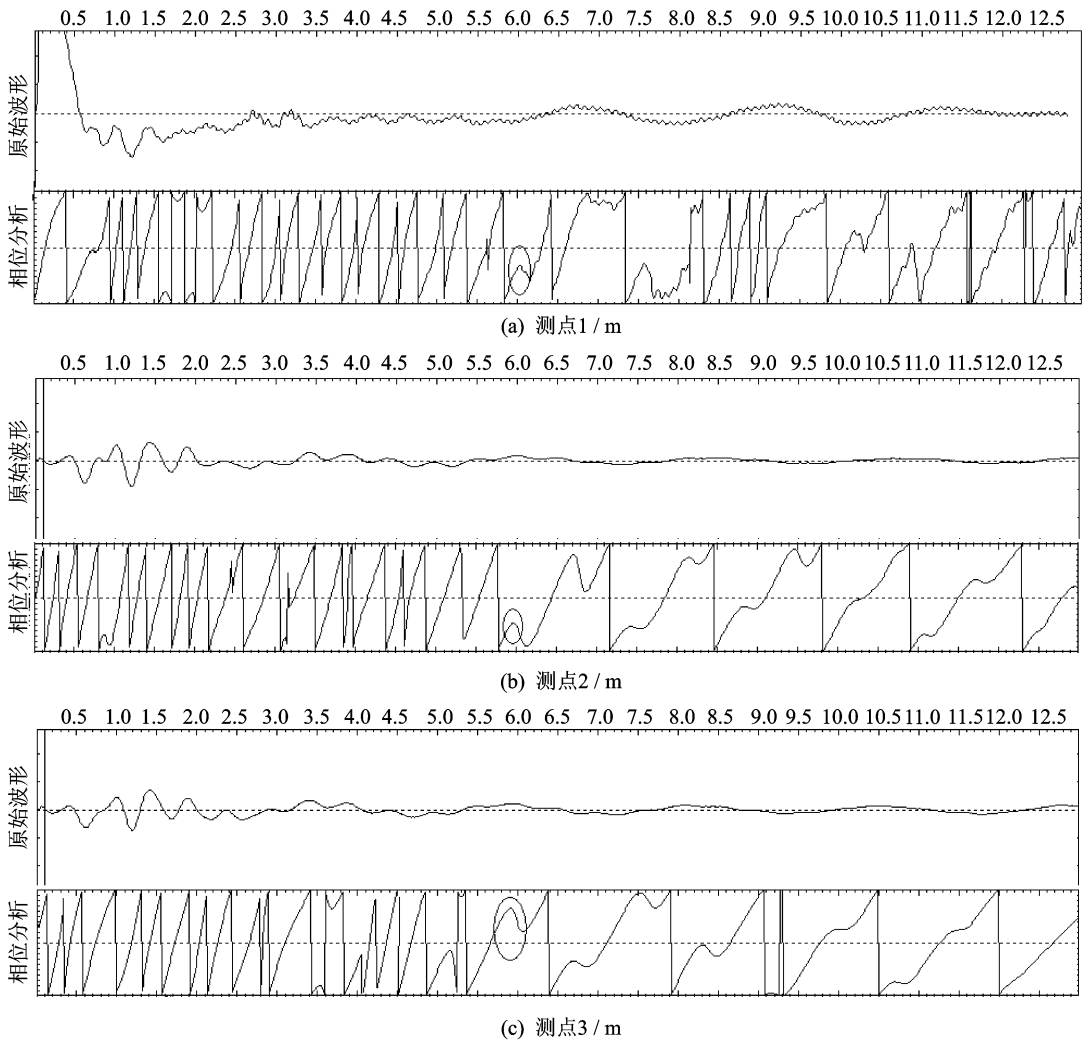


图8 试验曲线

参 考 文 献

- [1] 王军民,陈义群,陈华. 高速公路锚杆锚固质量检测技术研究[J]. 地球物理学进展,2004,19(4):782-785.
Wang Junmin, Chen Yiqun, Chen Hua. Research on anchor bar quality nondestructive testing technique on high-way[J]. Progress in Geophysics, 2004,19(4): 782-785. (in Chinese)
- [2] Zou D H, Cui Y, Madenga V, et al. Effects of frequency and grouted length on the behavior of guided ultrasonic waves in rock bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44 (6):813-819.
- [3] Zhan G C S, Zou D H, Madenga V. Numerical simulation of wave propagation in grouted rock bolts and the effects of mesh density and wave frequency[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006,43 (4):634-639.
- [4] Beard M D, Lowe M J S. Non-destructive testing of

rock bolts using guided ultrasonic waves[J]. Intl Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2003(40): 527-536.

- [5] 王成,挥寿榕. 应力波理论在动测锚杆锚固质量中的应用[J]. 地震工程与工程振动,2001,21 (3):6-9.
Wang Cheng, Yun Shourong. Application of stress wave theory to dynamic measurement of bolt bonding integrity[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001,21(3):6-9. (in Chinese)

第一作者简介:罗明璋,男,1978年10月生,讲师、博士。主要研究方向为地球探测信息技术。曾发表《An audio-frequency stress wave reflection method for engineering evaluation of pile testing》(《2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010)》)等论文。
E-mail: luomingzh@163.com