

混凝土超声检测技术的研究与实现^{*}

邵志学, 石立华, 张琦

(解放军理工大学工程兵工程学院 南京, 210007)

摘要 针对混凝土结构无损检测的需要,提出了一种超声激励脉冲产生的方法。由于超声波信号在混凝土中衰减快,为了提高检测系统的探测能力,增强回波信号,提高超声激励脉冲幅值,采用一种高频继电器实现了电磁脉冲源,并通过水和混凝土两种不同介质的无损检测试验验证其可用性。为了实现混凝土结构的高效精细检测,采用波包分解技术对检测数据处理分析,通过合成孔径技术成像,研制了系统样机。不同混凝土结构试块的检测成像试验表明,系统探测深度可达 1 m,可以较准确成像显示混凝土结构内部嵌入物的位置。

关键词 超声检测; 电磁脉冲源; 波包分解; 合成孔径技术

中图分类号 TN915.04

引言

为了评估建筑物的质量,混凝土无损检测技术得到了迅猛发展。目前,工业超声无损检测大多还停留在了解材料与构件内部是否有缺陷,或凭经验大致判断缺陷的大小与位置。超声成像可实现精确的缺陷定量,如缺陷的大小、位置、形状或性质(气孔、夹渣或裂纹等)。关于混凝土超声成像的文章和研究成果还比较少^[1-3]。混凝土超声检测遇到了许多问题,如混凝土对超声的强吸收问题、骨料对超声的散射问题、超声的耦合问题、强噪声下弱信号的提取和各向异性问题等^[4-6]。目前,大量采用的混凝土超声检测仪基本都是现场检测,常规的检测仪主要分为基于单片机的便携式和一体化微机控制式两种。对前者,因其处理器内存有限,在测试过程中无法采集大量数据和进行较复杂的分析处理,所以只能对检测信号进行简单的分析和人工判读,工作效率低,可靠性差,人为因素对检测效果影响较大。对于后者,由于其体积和质量大,携带不便,对检测现场的地形要求较高,难以实现险要地形等环境下的检测工作。

笔者利用电磁脉冲技术对混凝土结构扫描探测,利用波包分解技术对回波信号处理分析,通过合成孔径技术实现对混凝土结构的超声成像,针对实际应用研制了混凝土结构超声检测仪样机,包括电磁脉冲源及基于虚拟仪器的超声检测系统。经过多次试验表明,检测仪可探测厚度达 1m 的混凝土结

构,能较准确成像显示混凝土结构中异物的位置。

1 检测系统的硬件设计

由于检测目标的不确定性,要求检测系统的硬件集成度高,便于携带、移动和操作,国内主要是针对金属结构的检测系统。因此,设计并研制针对混凝土结构的超声无损检测系统具有重要的理论意义和实用价值。

1.1 系统的总体硬件构成

根据工程实际应用的要求,选用了基于 PXI 总线平台的插卡式模块结构来搭建混凝土超声检测系统。系统采用便携式八槽 PXI 机箱,内置触摸屏,采用最高采样频率可达 65 M 的高速、高精度 A/D 采集卡采集回波数据。系统对混凝土检测时,使用两个超声传感器,采用一个发射信号、一个接收信号的方式进行扫描检测。为了减小系统的体积,提高其实用性,设计并研制了可产生 400 V 高压的双指数波电磁脉冲源作为系统的超声激励源。系统总体硬件实物图如图 1 所示。

1.2 电磁脉冲源的研制

激励源利用换能器的压电效应产生和接收超声波,即将一定形式的电压激励信号加到换能器上,换能器的压电晶片将电能量转换成超声信号,因此激励信号直接影响超声信号的特性。激励源最常用的

^{*} 国家自然科学基金重点资助项目(编号:10872217)

收稿日期:2010-06-10;修改稿收到日期:2010-08-31

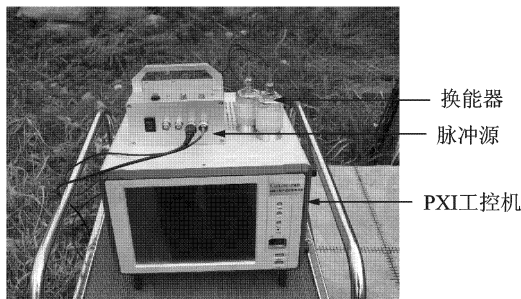


图1 超声检测成像系统实物图

两种波形是尖脉冲和方波脉冲,而双极性调谐脉冲和阶跃脉冲用得较少。为了得到高压脉冲超声信号,采用尖脉冲模拟阶跃脉冲信号产生激励信号。

高压脉冲的单个脉冲可用双指数脉冲近似表示为^[7-8]

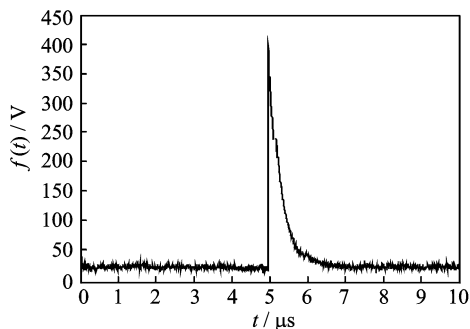
$$f(t) = E[\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (1)$$

其中: α, β 为衰减系数; E 为激励脉冲幅度。

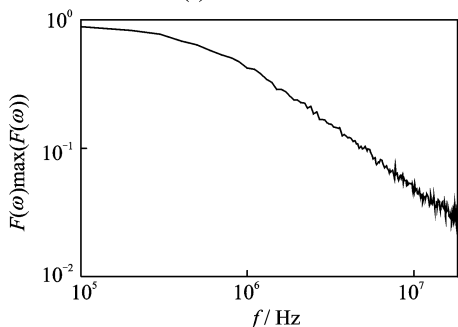
其时域分布如图2(a)所示,由Fourier变换可得到其频谱 $F(\omega)$

$$F(\omega) = E\left(\frac{1}{\alpha + j2\pi\omega} - \frac{1}{\beta + j2\pi\omega}\right) \quad (2)$$

这也是一个双指数分布,其频谱分布如图2(b)所示。脉冲的频谱分布很宽,频谱分量从直流开始随频率增加而呈指数下降。超声换能器可等效为一个RCL谐振网络,其中心频率为 f_0 ,频带宽度为 Δf ,单脉冲激励方式实际上是用一个宽带激励源对一个窄



(a) 单脉冲时域特性



(b) 单脉冲频谱域特性

图2 单脉冲特性

带负载进行激励,超声换能器起到选频作用,形成的超声信号是一个时域上仍较窄的调制信号,其载波频率由换能器的中心频率决定。

从图2(b)可以看出,为了使激励脉冲有效地激励超声换能器,可以通过提高激励脉冲幅度和减小脉冲宽度来实现。在高压脉冲发生电路中,幅度主要由高压电源的高压幅度决定,而脉冲宽度主要由放电电容电阻的大小与开关电路决定。高压脉冲超声波发生电路包括两部分:继电器触发电路和高压脉冲发生电路。图3为高压脉冲产生电路实物图。

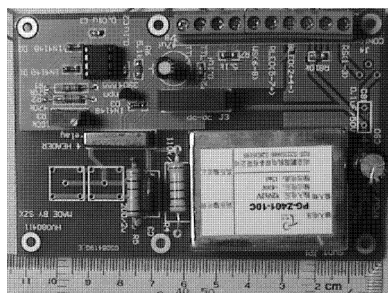


图3 高压脉冲产生电路实物图

2 检测系统的软件设计

2.1 系统总体软件设计

系统采用Labview实现人机界面功能,并调用Matlab环境下编写的数据处理程序,通过数据采集卡实现了触发通道和数据通道的数据采集,测量数据存入数据库,实时查看处理数据的功能。软件设计了几种不同成像的方法,根据数据的不同特征可采取不同方法成像,以达到最佳效果。系统的人机界面如图4所示。系统通过波包分解技术对噪声信号和有用信号进行分解,然后重构,通过合成孔径算法进行二维成像,显示混凝土结构体的内部结构。

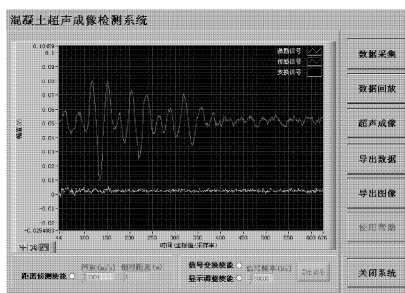


图4 系统的人机界面图

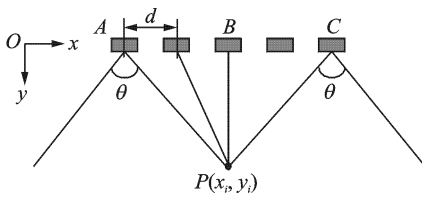


图5 散射角和合成孔径长度

2.2 成像算法

根据超声激励理论,换能器孔径越大,散射角越小,然而实际上很难制作一个大孔径的换能器。合成孔径超声成像算法实际上是用一系列单个小孔径传感器去模仿一个大孔径传感器,从而实现结构内反射点聚焦的过程^[9]。由于超声传感器扩散角的存在,结构内每个反射点都可能被多个不同孔径位置的传感器探测到。图5中,假设换能器的散射角为 θ ,对于结构内任意一个反射点 $P(x_i, y_i)$,当换能器在位置A时,点P开始进入照射区域;当到达位置B时,点P到换能器的距离最近;而换能器移至位置C时,点P基本脱离照射区域。换能器在A和C之外时,照射不到点P,所以点P可望通过A-C间检测到的M个孔径检测信号重建。各孔径位置 $T(x_m, y_m)$ 到点P的时间可以用式(3)来表示

$$t_{mi} = 2\sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2}/c \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (3)$$

其中: c 为声速; m 为孔径数量。

超声成像时最终的像素可表示如下

$$S(x_i, y_i) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M F_m(t_{mi}) \quad (4)$$

其中: $F_m(t)$ 为第 m 个孔径信号中点P的回波; $S(x_i, y_i)$ 为点P的重建信号。

式(4)说明,只有在声程上满足合成孔径要求的目标反射才能被聚焦而得到加强。为了精确计算 $S(x_i, y_i)$,一对换能器之间的距离差 d 必须考虑进去,由于换能器本身的直径为40 mm,所以其间距离最小为40 mm,考虑到距离差 d , t_{mi} 应表示为

$$t_{mi} = \frac{1}{c} (\sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2} + \sqrt{(x_m + d - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2}) \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (5)$$

2.3 信号处理算法

波包分解技术(WDT)是为检测信号建立一个数学模型,使用一些参数去描述信号,以避免对信号所有采样点进行聚焦处理^[10-11]。采用WDT分析检测信号的基本思想是采用输入波包作为描述检测信

号的基本单元,不同位置和尺度上输入波包的组合构成一种对检测信号的逼近。如果把输入信号当作母波包,则被测信号可看作是由不同时延、尺度、大小的基波包的组合。根据这个思想,用 N 个基波包 $h_i(t)$ 的线性组合去逼近检测信号 $x(t)$,则

$$x(t) = \sum_{i=1}^N a_i h_i(t) + e(t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

其中: $e(t)$ 为剩余误差; a_i 为相应基波包幅值系数。

基波包分解个数 N 可根据实际对信号逼近程度的需要确定,一般仅通过有限个基波包即可实现对信号特征的概括。波包分解后各单元分别相当于经过不同途径传播到达波包的组合。对于不同时刻到达的波包,当前后衔接或者说有重叠时,利用模型分解的方法可望将其分开。

模型参数估计是通过时域相关计算的方法得出来的^[12]。分解前设定 $e_0(t) = x(t)$,那么 $e_i(t)$ 为第 i 次分解后的剩余误差,可由式(7)得到

$$e_i(t) = e_{i-1}(t) - a_i h_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

其中: $h_i(t) = h(t - \tau_i)$ 。

用 $h(t)$ 与 $e_i(t)$ 进行相关计算,按照相关值的大小顺序逐步分解, τ_i 和 a_i 按式(8)、式(9)计算得到

$$\tau_i = \{\tau \mid |\langle e_i(t), h(t - \tau) \rangle| = \max_{\tau} |\langle e_i(t), h(t - \tau) \rangle| \} \quad (8)$$

$$a_i = \frac{|\langle e_i(t), h(t - \tau_i) \rangle|}{|\langle h(t - \tau_i), h(t - \tau_i) \rangle|} \quad (9)$$

这样可以使剩余误差 $e(t)$ 达到最小。

采用 $h(t)$ 作为输入超声信号,那么被测波形中的波包成分将是输入信号与结构作用后的信号,很大程度上保留了输入信号特征。图6(a)是一个检测信号的波包分解示意图。 $x(t)$ 是原始检测信号,按照幅值大小顺序被分解成5个基波包,记作 $h_1(t) \sim h_5(t)$ 。每个基波包除幅度 a_i 、到达时间 τ_i 不同外,基本形状与输入母波包 $h(t)$ 相似,可以近似表示如下

$$h_i(t) = h(t - \tau_i) = \cos(2\pi f(t - \tau_i)) \exp(-((t - t_p - \tau_i)\omega)^2) \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (10)$$

式(6)中的剩余误差 $e(t)$ 是由一些干扰噪声组成,从图中可以看出, $e(t)$ 相对分解波包来说是很小的,即被分解出的波包能大体反映出原检测信号的特征,可近似用 $x'(t)$ 表示

$$x'(t) = \sum_{i=1}^5 a_i h_i(t) \approx x(t) \quad (11)$$

图6(b)给出了基波包到达时间和相对幅值的分布图,其中相对幅值是各个基波包以母波包为基准的相应比例值,图中可以清晰显示出每个基波包的到达时刻及其相对幅值。在对信号进行聚焦处理

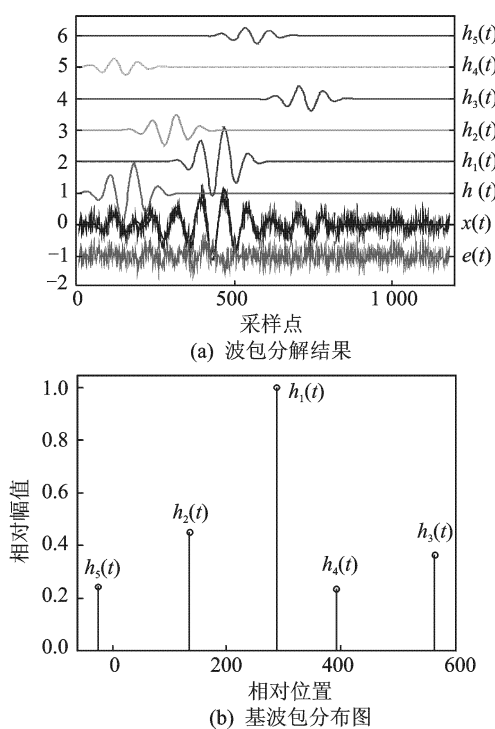


图6 波包分解原理图

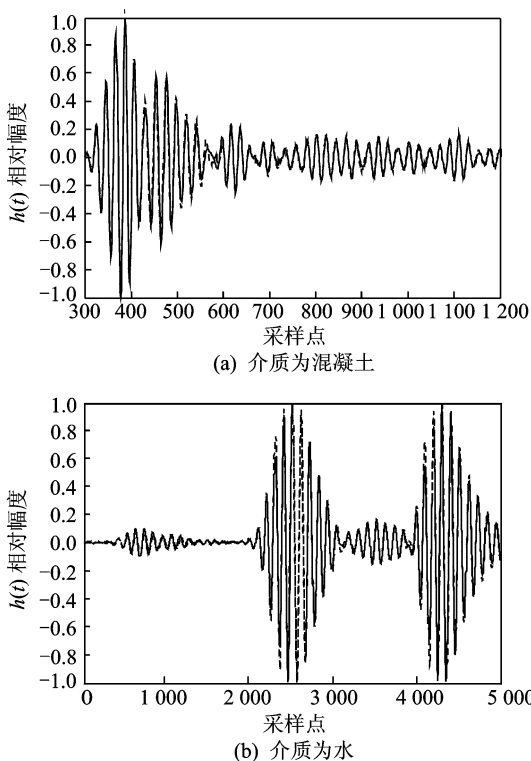


图7 信号提取后与调制波产生信号的比较

时,只需要对每个基波包的到达时间进行调整,而对信号恢复成像时,也可以根据母波包和相对幅值就可以完成。

3 系统的试验结果

3.1 电磁脉冲源的可用性验证

为了验证超声激励源的性能,通过对不同介质的超声检测试验来检验电磁脉冲源产生超声脉冲的性能指标。分别用电磁脉冲源产生的脉冲和标准的余弦调制信号对换能器进行激励,通过分别对不同的探测介质进行试验,如图7所示,所提取的50 kHz的频率响应曲线非常相似。

通过图7可以看出,电磁脉冲源激励换能器产生的信号与标准的余弦调制信号激励换能器产生的信号几乎一致。由于其产生的信号峰值可达400 V的高压,故有足够的能量使超声波在混凝土结构或其他介质中反射,使接收换能器易于收到反射信号。试验结果表明,此电磁脉冲源产生的高压脉冲信号可代替标准的余弦调制波与功率放大器作为超声检测的激励信号。

3.2 不同试件的成像结果

系统对多目标混凝土结构体进行测试时,首先超声换能器在左边钢筋网(结构体左上网状结构)上方横向进行B扫描探测,其中钢筋网嵌入混凝土结

构体内,其底下放置一块长方体泡沫。放置钢筋网的目的是检测钢筋对超声波的反射效果。多目标结构体如图8(a)所示,其扫描成像结果如图8(b)所示。对

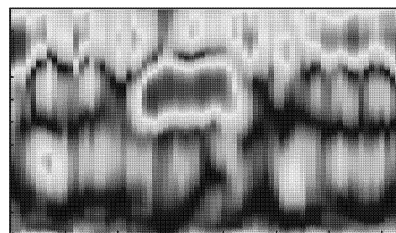
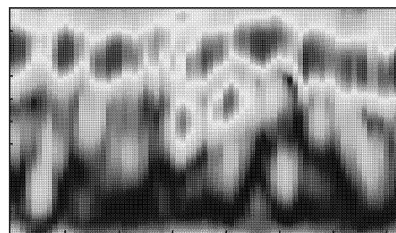
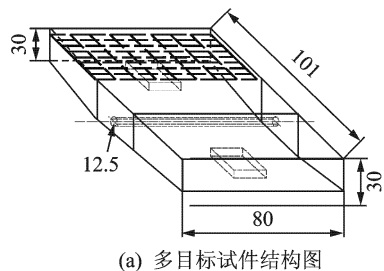
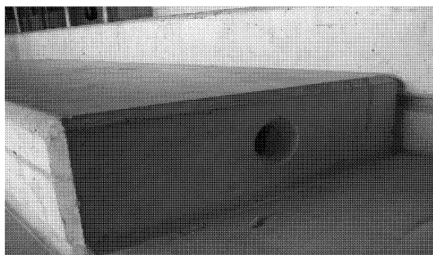


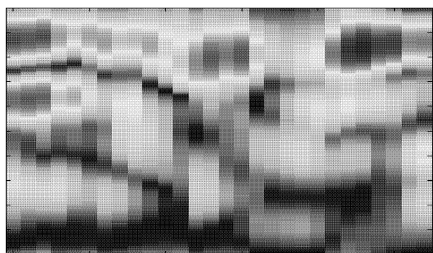
图8 多目标试件与成像结果

混凝土结构中无钢筋网、只嵌入泡沫部分进行横向B扫描探测,其扫描成像结果如图8(c)所示。由图可以看出,钢筋网对超声波具有一定的反射作用,但仍可看到泡沫成像,只是没有无钢筋网部分的成像清晰。图9(a)为楼梯台阶的实物图,沿台阶的纵向有一个圆形孔洞,沿垂直孔洞方向进行B扫描探测,其扫描结果如图9(b)所示,可以看出在中间孔洞处有强反射。

通过对不同混凝土结构目标进行探测成像试验,得知检测系统可以较直观、准确地反映混凝土结构内部嵌入目标的位置,分辨率比较高,操作工序比较简单,可以投入工程试用。



(a) 台阶实物图



(b) 台阶超声成像图

图9 检测现场台阶与成像结果

4 结束语

混凝土超声无损检测技术在现代工业无损检测中具有重要的地位,已成为定量检测的重要手段。但是,由于混凝土材料的复杂性,使得这项技术的应用遇到了许多实际困难,如检测信号成分复杂、传感器耦合不佳、信噪比低等。笔者对超声波产生技术和混凝土结构超声成像技术进行了研究,开发了一套混凝土结构超声检测系统样机,对超声激励源进行可用性的试验,对采集信号采用波包分解技术处理,应用合成孔径技术进行混凝土结构超声成像,并将其进行工程实用化。

参 考 文 献

[1] Martin S. Ultrasonic NDE of concrete[C]//IEEE Ultrasonics Symposium NY: Institute of Electrical and

Electronics Engineers (IEEE),2002.

- [2] Toda K, Hatanaka H, Hayashi O, et al. Diagnosis of concrete deterioration by nondestructive evaluation [J]. IHI Engineering Review, 2004,37(3):97-103.
- [3] Martin S. Progress in ultrasonic imaging of concrete [J]. IEEE Trans. Materials and Structures, 2005, 38(9):807-815.
- [4] Abid A S, Yuri R. Non-destructive measurements of crack assessment and defect detection in concrete structures [J]. Materials and Design, 2007, 22(5):1-9.
- [5] Faezeh S A G, Abrishamian M S. A novel method for FDTD numerical GPR imaging of arbitrary shapes based on Fourier transform [J]. NDT & International, 2007,40(1):140-146.
- [6] 李书,陈益. 超声探测弱信号提取方法[J]. 振动、测试与诊断,2006,26(1):33-36.
Li Shu, Chen Yi. Study on weak signal extraction in ultrasonic detection [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2006, 26(1): 33-36. (in Chinese)
- [7] Shao Zhixue, Shi Lihua, Li Qiufeng, et al. High voltage pulse excitation technology and its application in nondestructive test [C]//Proceedings of 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009.
- [8] Shi Lihua, Wang Xinwei, Li Gang, et al. Wideband Lamb wave analysis based on continuous wavelet transform [J]. Smart Structure and Systems, 2005,11(3): 258-260.
- [9] Martin S, Martin K. Ultrasonic imaging on concrete elements using reconstruction by synthetic aperture focusing technique [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2003:235-246.
- [10] 李秋锋,石立华,邬冠华,等. 提高混凝土结构成像质量的技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2008,29(11): 2441-2445.
- [11] Takeshi W, Takashi M, Chikanori H, et al. Detecting voids in reinforced concrete slab by SIBIE [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(3):225-231.
- [12] Ninel A, Shinichi M, Masayasu O. Imaging of grouted tendon ducts in prestressed concrete by improved SIBIE [C]. 2007, 40(9):258-264.



第一作者简介:邵志学,男,1983年3月生,博士研究生。主要研究方向为无损检测、数字信号处理。曾发表《A method of high efficiency ultrasonic excitation》(《Proceeding of 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments》2009)等论文。

E-mail:nario123.@163.com