

Design of Concrete Defect Detection System Based on Ultrasonic Wave Transit Time

Guangya Li^{1,2,3*}, Mingquan Wang^{1,2,3}, Xiaoguang Lv^{1,2}

¹Key Laboratories of the Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan Shanxi

²Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan Shanxi

³School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan Shanxi

Email: *40827562@qq.com

Received: Jun. 18th, 2015; accepted: Jul. 8th, 2015; published: Jul. 14th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The concrete is very important structural material, and its quality is directly related to the safety and durability of the building structure. Therefore, the concrete quality testing and control are particularly important. This article discusses the concrete defect ultrasonic testing methods and data used in the determination method. Based on this, combining with electronic technology, signal processing technology, and virtual instrument technology, we developed a set of concrete ultrasonic flaw detection test system.

Keywords

Concrete, Ultrasonic, Wave Transit Time, Defect Detection

基于超声声时的混凝土缺陷检测系统设计

李光亚^{1,2,3*}, 王明泉^{1,2,3}, 吕晓光^{1,2}

¹中北大学中北大学动态测试技术重点实验室, 山西 太原

²中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原

³中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原

Email: *40827562@qq.com

*通讯作者。

收稿日期：2015年6月18日；录用日期：2015年7月8日；发布日期：2015年7月14日

摘要

混凝土是工程建筑中非常重要的结构材料，它的质量直接关系到建筑结构的安全性和耐久性。因此，对混凝土质量进行检测和控制就显得尤为重要。本文讨论了混凝土缺陷超声检测常用的方法和数据判定方法。在此基础上，结合电子技术、信号处理技术、虚拟仪器技术等开发了一套混凝土缺陷超声检测实验系统。

关键词

混凝土，超声波，声时，缺陷检测

1. 引言

混凝土是工程建筑中非常重要的结构材料，它是建筑材料中使用范围最广、使用量最大的材料，保证混凝土结构的质量是保证工程建筑安全的前提。混凝土无损检测就是以计算机技术、电子技术、物理理论等为基础，在对混凝土内部结构不造成破坏的情况下，检测与混凝土结构质量有关的物理量，利用材料学、力学、声学、统计学等方法，来确定和评价混凝土的强度、缺陷等。虽然超声发射技术和信号成像技术在医疗或金属检测中早已成熟，但在混凝土超声检测中却还没有得到有效解决，大多还处在探索和实验阶段。目前用的最多的方法还是超声脉冲法，它是利用脉冲超声波穿过混凝土结构时其声时、频率、波形的变化作为判定混凝土内部质量情况的重要依据，该方法可以方便快捷地估算出混凝土中缺陷的位置分布[1]-[3]。

2. 基于超声声时的缺陷检测原理

本文以空洞缺陷为例介绍检测系统，具体详细的操作步骤及判定方法可参考《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21:2000)。空洞和不密实区的检测方法有对测法和斜测法等，其中对测法一般用于混凝土结构有两个相互平行的可测面且结构尺寸不是太大的情况，对测法的示意图如图1所示。检测时将发射和接收探头先放在其中一对平行的表面进行逐点测读，记录每点的声学参数数据。若某些数据异常则在这些异常点范围对另一对平行表面重复上述步骤，确定缺陷具体的空间位置。若无数据异常点，一般情况下不需再对第二平行面进行检测[4]。对测法比较简单，只要根据数据异常点的位置就可判断缺陷的大致位置及大小，准确性也比较高，是最常用的检测方法。斜测法一般用在混凝土结构只有一对平行的可测面的情况，测试的方法和对测法类似，只是先对被测混凝土进行对测找出异常点，后根据异常点的情况进行斜测，进而判定缺陷所在的空间位置或大小[5][6]。测试示意图如图2所示。

3. 检测系统模块及测量过程

本系统的检测流程是：首先激发超声探头发射超声脉冲信号，使超声波穿过待测的混凝土结构块，然后采集穿越混凝土后的超声信号，将其波形显示出来，然后根据波形分析超声波在混凝土中的渡越时间(声时或声速)、首波幅值(衰减)、频谱等信息，最后根据这些信息综合判断混凝土试块的质量情况。

本文设计的混凝土超声检测系统不论是从硬件还是软件方面都采用了模块化设计的方法，这样可以复杂的系统划分为多个简单的部分进行设计，使设计变得简单，而且方便调试。图3为系统硬件模块示意图。

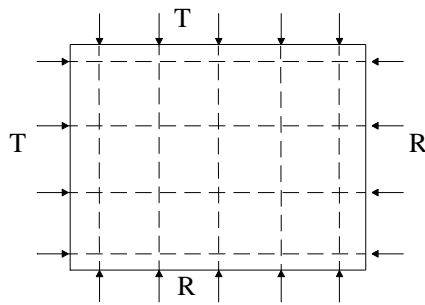


Figure 1. Schematic of vertical facing measurement method
图 1. 对测法示意图

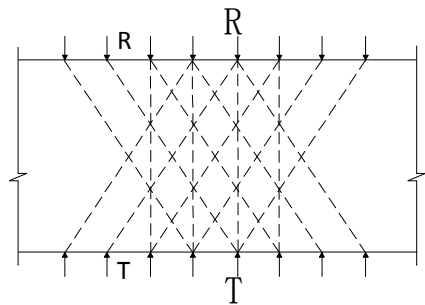


Figure 2. Schematic of oblique facing measurement method
图 2. 斜测法示意图

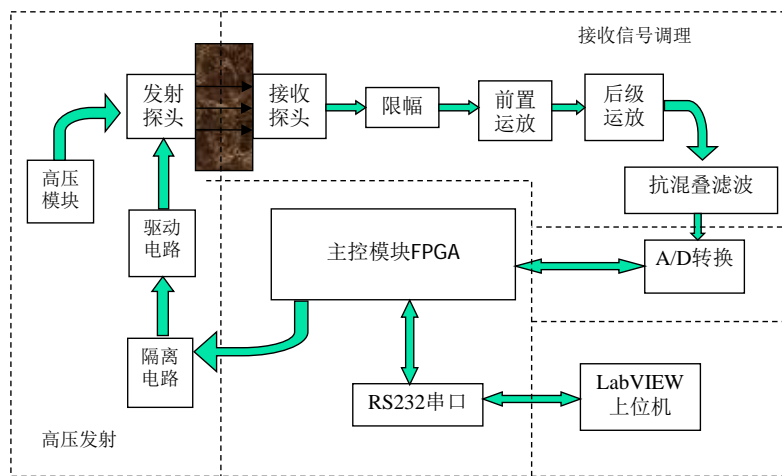


Figure 3. Diagram of the system hardware
图 3. 系统硬件模块框图

上位机的总体界面设计即 LabVIEW 的前面板设计，在 LabVIEW 开发环境的前面板设计中可以非常方便的添加数据输入或显示控件、波形显示控件、按钮及状态显示控件等等。本文设计的混凝土超声检测上位机的整体界面如图 4 所示。

4. 实验结果及数据处理

4.1. 检测系统的声时计量校验

超声检测系统的声时测量检验一般是通过测量空气中的声速来完成的，因为超声波在空气中的传播

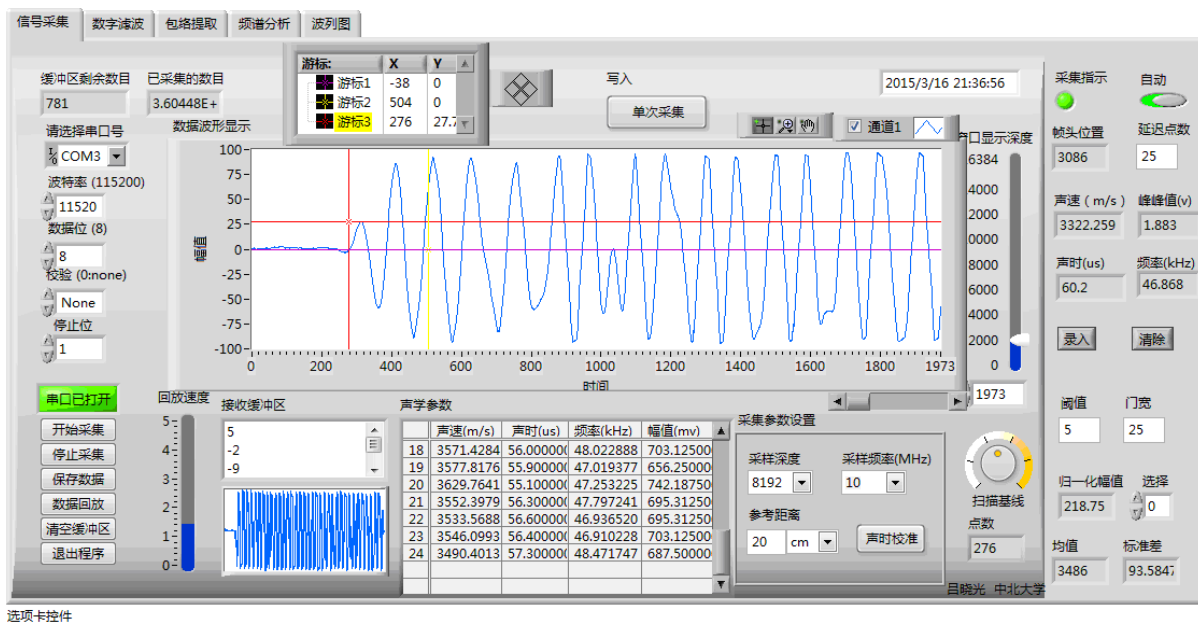


Figure 4. PC interface of the system
图 4. 系统上位机界面

除了受到温度变化而产生变化外，受其它因素影响很小，所以通过测量空气中的声速来检验声时计量的准确性是国内外超声检测常用的有效方法[7]。

本设计中，混凝土超声检测探头采用 50 kHz 的厚度振动式超声探头，将其连接到仪器上，并且要求两辐射面相互对准，分别间隔 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm、100 mm、120 mm、…、320 mm 依次测读不同间隔下的声时值 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 、 t_6 、…、 t_{16} ，同时测量当前空气的温度 T ，要求精确至 0.5℃。联机调试及校准如图 5 所示。

照《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS21:2000)的相关规定，要求空气声速的测量值和标准值的相对误差应在±0.5%以内，则为正常。实践证明，只要超声检测系统工作正常，检测人员无明显的操作失误情况下，空气中声速的测量值一般都会比较接近于标准值，如相对误差较大时，应先检查测距和声时的测量是否有误。

设空气中声速的检测值 v_c 和空气中声速的标准值 v_b 之间的相对误差为 e_r ，则相对误差 e_r 按下式计算：

$$e_r = \frac{v_b - v_c}{v_c} \times 100\%$$

计算二者相对误差 e_r 应在±0.5%的范围内。将上两节得到的 v_c 和 v_b 带入式 5.2 得： $e_r = 0.0029 = 0.29\% < 0.5\%$ ，证明系统检测参数满足检测要求。

4.2. 混凝土空洞缺陷的实验及数据处理

实验制作的混凝土模块长为 400 mm，宽为 200 mm，高为 200 mm，在长约 220 mm，宽约 100 mm 处设置一个贯穿的 PVC 管，管的直径为 30 mm。采用对测法在一对可测平面布置 3 × 8 个位置点进行超声检测，测点间距为 50 mm，实验采用的超声探头直径为 38 mm，标称频率为 50 kHz，耦合剂采用的是凡士林。设计的混凝土测试模块及检测点分布如图 6 和图 7 所示。图 7 中标记处为管正上方的测点位置。

实验现场如图 8 所示，检测记录的数据如表 1 所示。

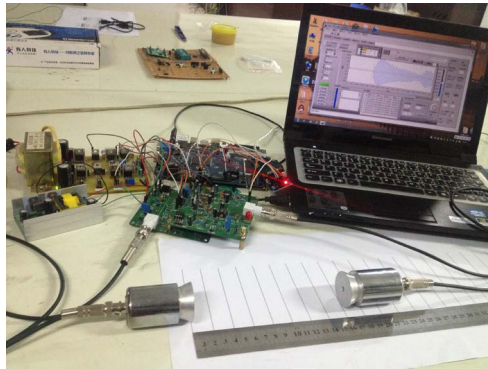


Figure 5. Processing of the wave transit time calibration
图 5. 声时校准过称实物图



Figure 6. Experiment staff
图 6. 混凝土试块

1	4	7	10	13	16	19	22
○	○	○	○	⊗	○	○	○
○	○	○	○	⊗	○	○	○
○	○	○	○	⊗	○	○	○
3	6	9	12	15	18	21	24

Figure 7. Distribution of the measuring point
图 7. 测点分布图



Figure 8. Scene of experiment
图 8. 实验现场

Table 1. Experiment data
表 1. 混凝土超声检测数据

序号	厚度 (mm)	声速 (km/s)	声时 (μs)	频率 (kHz)	幅值 (mv)	序号	厚度 (mm)	声速 (km/s)	声时 (μs)	频率 (kHz)	幅值 (mv)
1	200	3.42	58.7	47.7	695.3	13	200	3.35	59.7	46.5	375.0
2	200	3.45	58.0	46.0	593.8	14	200	3.33	60.2	46.0	531.3
3	200	3.40	59.3	47.1	593.8	15	200	3.26	61.3	46.2	531.3
4	200	3.48	57.4	47.8	703.1	16	200	3.58	55.9	48.4	382.8
5	200	3.51	56.9	47.3	687.5	17	200	3.65	54.8	47.2	757.8
6	200	3.43	58.3	47.7	640.6	18	200	3.57	56.0	48.0	703.1
7	200	3.48	57.4	48.1	687.5	19	200	3.58	55.9	47.0	656.3
8	200	3.57	56.1	48.3	703.1	20	200	3.63	55.1	47.3	742.2
9	200	3.43	58.3	47.5	585.9	21	200	3.55	56.3	47.8	695.3
10	200	3.47	57.6	47.2	703.1	22	200	3.53	56.6	46.9	695.3
11	200	3.49	57.3	46.6	250.0	23	200	3.55	56.4	46.9	703.1
12	200	3.47	57.7	47.1	695.3	24	200	3.49	57.3	48.5	687.5

考虑到幅值判定对人为操作及耦合状况要求较为苛刻，本次数据运算仅采用了声速数据进行判定，缺陷判定的步骤如下：

1) 根据测试的数据点数，从表 2 中选取相应的 λ_1 值，表 2 摘自《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21:2000)附表的一部分，由测点总数 $N = 24$ ，查表得 $\lambda_1 = 1.73$ 。

2) 计算测试数据的声速平均值 m_v 和标准差 s_v 分别为：

$$m_v = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} v_i = 3.49 \text{ km/s}$$

$$s_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} (v_i - m_v)^2}{24 - 1}} = 0.09 \text{ km/s}$$

3) 计算声速数据的异常临界值。声速异常判定值为：

$$v_0 = m_v - \lambda_1 s_v = 3.49 - 1.73 \times 0.09 = 3.33 \text{ km/s}$$

4) 判断异常数据点。与声速异常判定值想可得，第 15 个测点数据 $v_{15} < v_0$ ，故判定测点 15 异常。

5) 剔除该测点后，继续计算剩余 23 个测点的声速平均值和标准差，重复上述步骤，直到检测不到异常值为止。

本次实验混凝土试块的超声检测声速统计判定情况如表 3 所示。

由以上测试数据和判定结果可以得出以下结论：

从表 1 的检测数据上来看，前面几个检测点的声速值普遍低于后面几个点的声速值，这是由于前面测试数据点的位置是在混凝土试块的上端位置，与下端相比，密度较小，比较松散，水分也相对较多，使得声速普遍较低。从表 3 的判定结果上看，PVC 管所在位置 13、14、15 三个测点的空洞均被检测出异常，其他位置没有检测出异常。虽然前端的声速值也相对较低，但是并没有影响到异常数据的判定。

Table 2. Data of N and λ_1 表 2. 统计个数 N 对应的 λ_1 值

N	19	20	21	22	23	24	25	26
λ_1	1.62	1.65	1.67	1.69	1.71	1.73	1.75	1.77

Table 3. The determination result of the wave transit speed

表 3. 超声检测声速统计判定结果

声学参数	统计个数	平均值	标准差	系数 λ_1	临界值	异常测点
声速 km/s	24	3.49	0.09	1.73	3.33	15
	23	3.50	0.08	1.71	3.36	14、13
	21	3.51	0.07	1.67	3.39	无

5. 结论

混凝土缺陷超声检测是非常有实用价值的研究课题, 本文先对混凝土超声检测的背景和意义及研究现状进行了调研, 然后从超声波检测的物理基础出发, 分析了混凝土超声检测的特点, 从而引出了采用超声波对混凝土缺陷进行检测所采取的检测方法和数据判别依据。在此基础上, 结合电子技术、信号处理技术、虚拟仪器技术、计算机技术等开发设计了一套混凝土缺陷超声检测实验系统, 经过实验验证系统稳定, 对混凝土空洞不密实等缺陷的检测结果真实可靠, 具有一定的实际应用价值。

基金项目

国家自然科学基金项目资助(61711177), 山西省青年科技研究基金项目资助(2015021086)。

参考文献 (References)

- [1] 廖智 (2011) 超声波法探测混凝土内部缺陷的原理及应用. *科学技术与工程*, **13**, 3114-3117.
- [2] 卢胜男 (2009) 混凝土超声成像检测仪的设计与实现. *电子设计工程*, **6**, 51-53.
- [3] Chaix, J.F., Gamier, V. and Corneloup, G. (2003) Concrete damage evolution analysis by backscattered ultrasonic waves. *NDT & E International*, **36**, 461-469. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00066-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00066-5)
- [4] 庞勇, 韩焱 (2001) 超声成像方法综述. *华北工学院测试技术学报*, **4**, 280-284.
- [5] 李小娟, 王黎, 高晓蓉, 等 (2010) 超声无损检测成像技术. *现代电子技术*, **21**, 120-122.
- [6] Jensen, J.A., Nikolov, S.I., Gammelmark, K.L., et al. (2006) Synthetic aperture ultrasound imaging. *Ultrasonics*, **44**, e5-e15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2006.07.017>
- [7] 罗斌, 王邓志, 罗宏建, 刘一舟 (2003) 非线性合成孔径聚焦超声成像. *应用声学*, **5**, 5-8.