

Chirp 编码信号检测岩土工程层状结构界面缺陷

汤普,龙士国,李婷

(湘潭大学材料科学与工程学院,湖南湘潭 411105)

摘要:针对传统超声检测岩土工程层状结构界面缺陷中信噪比低、响应信号不易识别的问题,提出了用 Chirp 编码信号检测混凝土层状结构界面缺陷的方法。介绍了 Chirp 编码的基本方法和原理,通过在发射端发射中心频率为 100 kHz,带宽为 200 kHz,时宽为 100 μ s 的 Chirp 编码信号,在接收端通过匹配滤波处理,得到峰值和信噪比较高的脉冲压缩信号。运用了匹配滤波器的数字信号处理方法,并对具有不同尺寸界面缺陷的工程层状结构的检测进行了有限元模拟。结果表明,Chirp 编码信号检测工程层状结构能够在保证缺陷分辨力的同时提高信噪比。

关键词:Chirp 编码;超声检测;层状结构;脉冲压缩;信噪比

中图分类号:TB52.9 文献标识码:A

文章编号:1000 - 8829(2017)01 - 0005 - 04

Interface Defects Inspection of Layered Structure with Chirp Coded Signal

TANG Pu, LONG Shi-guo, LI Ting

(School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: In order to solve the problems that the low signal to noise ratio and the difficulty of recognizing the prime time of response, a method to inspect the interface defects of concrete layered structure with Chirp coded signal is proposed. The basic method and principle of Chirp coded are introduced. The Chirp coded signal with mid frequency of 100 kHz, bandwidth of 200 kHz, and the time width of 100 μ s is excited at the transmitting terminal, and a signal with high amplitude and high SNR is obtained by matched filtering processing at receiving terminal. The digital signal processing method of matched filter is adopted, and the finite element simulation of the interface defects testing with different size in layered structure is carried out. The results demonstrate that interface defects inspection of engineering layered structure with Chirp coded signal can ensure the defect resolution while improving the signal-to-noise ratio.

Key words: Chirp coded; ultrasonic testing; layered structure; pulse-compression; SNR

混凝土层状结构在高速铁路路基、隧道、桥梁等岩土工程中得到广泛应用。由于施工、维护等因素,导致层状结构的层界面黏结不完全,造成局部应力集中,严重影响层状结构的承压性能,因此层界面的质量检测至关重要。由于界面缺陷存在于结构内部,常用的工程内部质量检测方法是钻芯取样法^[1],但是其具有结构破坏性,难以对工程进行整体检测。超声法^[2]可以在检测到混凝土内部缺陷的同时保持结构的完整性,并且具有用途广泛、探测距离大、操作简单等优点,迅速在国内外普及推广,成为应用最广泛的混凝土无损检测方法^[3]并开发了一系列超声检测设备。

探测超声波是超声探头在电场激励下产生的。人们通过改变电信号来改变信号的频率、幅度和宽度,以达到检测的需要。在通常情况下,窄的脉冲具有较高的分辨力,但是受噪声的影响大。宽脉冲受噪声的影响小,但是响应信号容易叠加,首波不易识别,距离分辨力差。编码激励技术很好地解决了这一矛盾。其通过在发射端发射高时宽、带宽积的信号,然后在接收端

对信号进行相关的计算,把接收信号压缩成窄信号,从而在保证距离分辨力的同时提高信噪比。编码激励技术最先应用在雷达、通信等领域,推广到超声领域后,首先在医学成像[4]应用中得到了广泛的研究。此后人们对编码技术进行了深入的研究,开发了包括巴克码,格雷码、M 序列、Chirp 码和伪 Chirp 码等一系列编码方法。

目前编码技术应用到工程检测领域的研究文献较少,文献^[6]利用巴克码检测混凝土结构缺陷,信号压缩后提高了回波的信噪比。Chirp 编码经过匹配滤波之后具有良好的压缩效果,在医学成像领域中得到了广泛的应用(7-81。工程层状结构缺陷超声检测过程中,由于超声波需要在异质间传播,衰减大且受到界面引入的干扰信号影响,传统的短脉冲激励容易产生漏检和误判的情况。本文利用 Chirp 编码信号作为发射信号,利用有限元模拟超声波在工程层状结构中传播过程,对响应信号进行匹配滤波处理,证明 Chirp 编码方法检测工程层状结构缺陷的有效性。

1 工程层状结构缺陷检测

1.1 建立模型

根据实际岩土工程层状结构的形貌,建立了两层介质简化物理模型。如图 1 所示,模型外层为混凝土层,内层介质为岩土层。其中,模型总长度 $L=1200\text{mm}$,模型总厚度 $H=600\text{mm}$,外层混凝土厚度 $H_1=200\text{mm}$,内层岩土层厚度 $H_2=400\text{mm}$; $H_3=25\text{mm}$,代表缺陷的厚度, D 代表缺陷的宽度,为了研究 Chirp 编码信号对缺陷尺寸的识别性能,对缺陷宽度 D 设置了 5 组不同的尺寸,分别是 $0,50\text{mm}, 100\text{mm}, 150\text{mm}, 200\text{mm}$ 。其中 $D=0$ 时,代表模型内层结构没有缺陷存在。选择模型的上表面中点作为发射端,底面中点作为接收端。

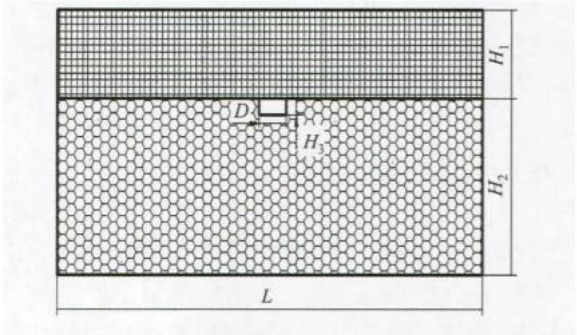


图 1 两层工程层状结构的简化物理模型

为了更好地模拟出层状结构中的超声波,除了简化几何结构外,两层介质的材料属性的定义也极其重要。模型采用工程中较常见的层介质材料,参数见表 1。为了保证计算精度,弹性波沿传播方向每个波长至少 $10\sim 20$ 个单元^[9]。满足最大频率下波长的要求并综合考虑计算量确定单元网格尺寸。最大模型单元尺寸选择见表 2。

表 1 模型材料参数

材料 No.	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	泊松比	弹性模量/GPa
1 混凝土	2400	0.20	30
2 岩土	2120	0.23	25

表2 模型最大单元尺寸

材料 No.	Y/mm	X/mm
1 混凝土	≤2	≤2.5
2 岩土	≤2	≤2.5

1.2 施加载荷

工程检测中,发射电路产生高频电脉冲输送给超声探头,发射探头在激励电场中受迫振动,发与电脉冲具有相同中心频率的脉冲超声波入射到被测材料中去。而在模拟过程中,只需要在仿真模型中对应入射位置节点施加一个瞬时载荷。本文分别采用线性编码的 Chirp 脉冲信号及传统的短脉冲信号(两个周期的正弦波)作为探头的激励信号。一个线性编码的 Chirp 信号[10]可用式(1)表示:

$$S(t) = w(t) \cos[2\pi(f_1 t + \frac{1}{2} \frac{f_2 - f_1}{T} t^2)] \quad (1)$$

式中, $w(t)$ 为一个窗函数;开始频率 $f=0$;终止频率 $f_2=200$ kHz;脉冲宽度 $T=100$ μ s。Chirp 信号的频带宽度为 $B=f_2-f=200$ kHz,中心频率为 $f_c=(f_1+f_2)/2=100$ kHz。由于超声信号衰减比较大,能量大的人射信号有利于提高检测的信噪比,并且可以提高探测的深度,所以文中的窗函数 $w(t)$ 设为一个常数“1”。

2 匹配滤波器与模拟结果分析

2.1 匹配滤波器

利用 Chirp 信号作为入射信号分析层状结构界面缺陷响应之前,需要对响应信号进行解码,即匹配滤波处理。对响应信号进行匹配滤波处理,可以使宽脉冲信号压缩成窄脉冲信号,从而提高距离分辨力。匹配滤波数字信号处理过程如图 2 所示。

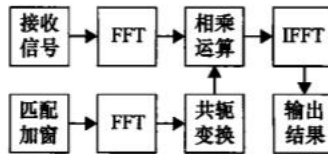


图2 匹配滤波器处理过程

在实际有噪声的环境中,响应信号压缩后会存在主瓣和旁瓣,为了抑制旁瓣的输出,需要对匹配滤波器进行加窗处理。加窗的匹配滤波器表达式同式(1)。

为了能进行 FFT 运算,需对连续信号进行采样,其表达式为

$$S(n) = w(n) \cos[2\pi(f_1 nT_s + \frac{1}{2} \frac{f_2 - f_1}{T} (nT_s)^2)] \quad (2)$$

式中, T_s 为采样周期,与接收信号的采样周期一致; $n=1,2,\dots,K$,且 $K=\text{fix}(T/T_s)$; $w(n)$ 采用汉宁窗。匹配滤波器的效果如图 3 所示,其中输出信号的最大峰值所对应的时刻为信号首波到达的时刻。

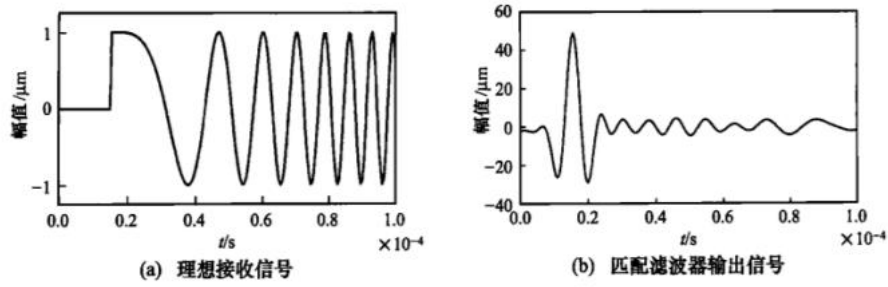


图 3 匹配滤波器

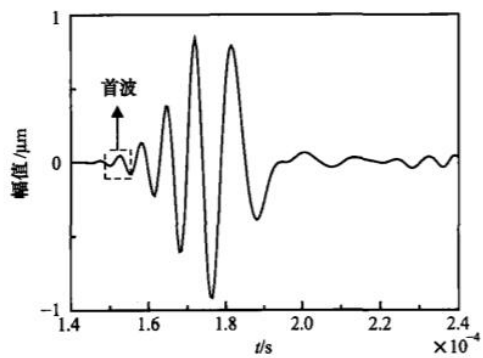
2.2 界面缺陷检测结果分析

透射信号主要线性参量是声波的走时,需要准确读取信号的首波到达时间。首先分别用传统短脉冲激励和 Chirp 编码激励得到无噪声条件下缺陷宽度为 0.05 m 时的接收信号分别如图 4(a)、图 4(b)所示,图 4(c)为 Chirp 激励透射信号匹配滤波器之后的输出信号。从图 4 中可以看到,传统短脉冲激励透射信号的首波幅值很小,首波到达的时刻为 152.5 μs 。而 Chirp 激励的透射信号经过匹配滤波器处理后,可以得到压缩了的透射信号,压缩后的信号峰值明显。从图 4(c)中可以看到明显的首波信号,首波到达的时刻为 152.5 μs 。结果满足超声波在介质中传播的波速与信号的激励方式无关,仅与材料的结构及材料的属性有关的物理事实。两种激励方式激发的超声波在层状结构中传播后,由于层状介质间传递及缺陷的影响,能量衰减较大,两个透射信号的首波幅值都相当小,在实际检测过程中很可能会漏检,特别是造成首波判断错误,从而影响到检测结果的精确度。

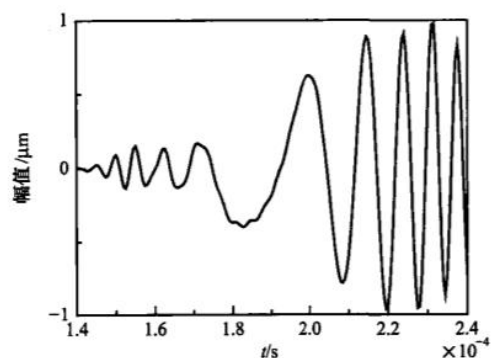
对于工程层状结构,声波在异质间传递过程中,会产生干扰信号,并且实际检测过程中,可能存在工程层状结构为服役的状态,环境噪声的干扰是不可避免的。因此对两透射信号都加上最大振幅为 0.02 μm 、频率为 200kHz 的正弦干扰信号来模拟相同噪声环境,分别得到噪声下的响应信号如图 5(a)和图 5(b)所示,此时透射信号几乎完全淹没在噪声当中,无法从加入噪声的透射响应信号中提取有效的首波声时。对图 5(b)中的透射+噪声信号进行匹配滤波器数字处理,得到压缩输出信号如图 5(c)所示,图中可以看到透射信号首波声时为 152.5 μs ,与不存在噪声情况下的首波声时值一致。

为了验证 Chirp 编码信号对工程层状结构缺陷尺寸的分辨力,分别采用两周期短脉冲和 Chirp 编码信号对工程层状结构界面缺陷尺寸为 0.00 m,0.05 m,0.10 m,0.15 m,0.20 m 的模型进行模拟检测,分别在接收端提取响应信号。传统短脉冲激励模型的接收透射信号直接提取首波到达时刻,对 Chirp 激励模型的接收信号加入噪声后进行匹配滤波处理,得到压缩后的透射加噪声信号再提取压缩信号首波到达的时刻。

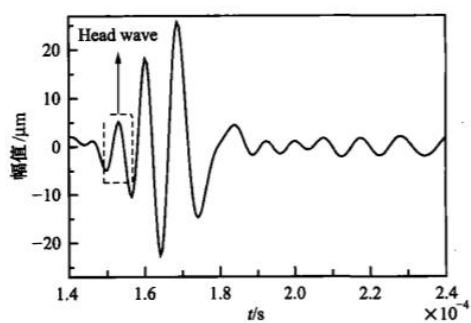
两种不同激励下缺陷尺寸与首波到达时间的关系如图 6 所示。可以看到,压缩后的 Chirp 激励响应信号与传统短脉冲的首波到达时间随缺陷尺寸的增加而增加。两者之间存在的差异可能与首波的选择有关。



(a) 2周期正弦激励的透射信号

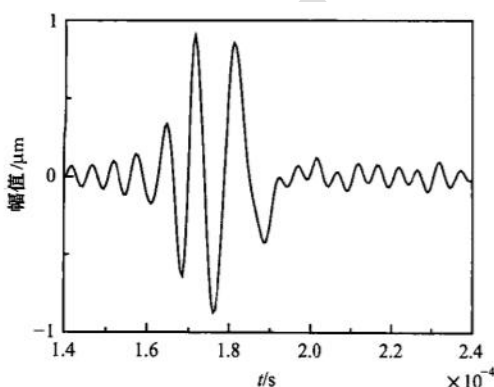


(b) Chirp编码激励的透射信号

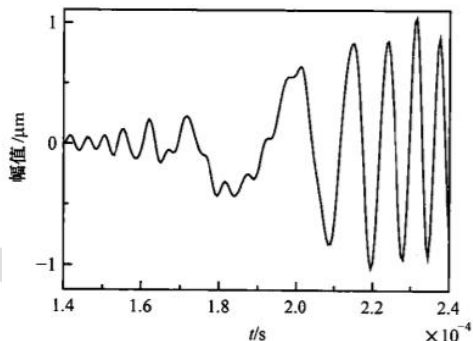


(c) 压缩的Chirp透射信号

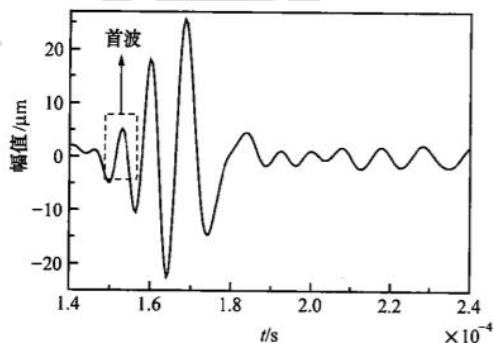
图4 透射信号



(a) 正弦激励的透射信号+噪声



(b) Chirp激励的透射信号+噪声



(c) Chirp激励透射信号加噪声后的压缩信号

图5 透射信号 + 噪声

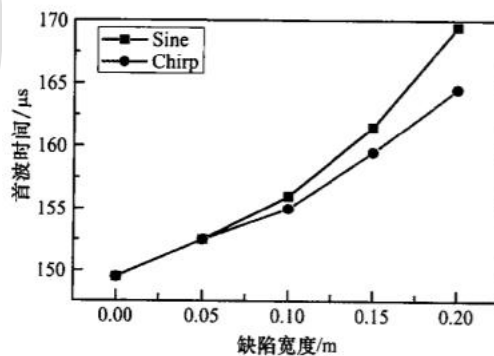


图6 缺陷尺寸与首波声时的关系

3 结束语

传统短脉冲信号的时宽小,抗干扰性差,为了取得较高的信噪比,需要在每个检测位置上重复检测几十次甚至上百次,不仅耗时,还对检测人员的经验要求高。而 Chirp 编码信号可以通过增加时宽来增加信号的抗干扰性能,然后对接收信号进行匹配滤波器处理,解码压缩之后,可以得到传统短脉冲的缺陷分辨力,而且仅一次采集就能够得到较高的信噪比。这就说明在岩土工程层状结构缺陷检测中,Chirp 编码信号在提高信噪比方面具有优势。另外,Chirp 编码信号的时宽带宽积远大于 1,这就代表信号的能量较大,在工程层状势。

参考文献:

- [1] Mynarcik P. Core sampling for fiber concrete constructions-context between quantity of core samples and evaluation of fiber concrete characteristics [J]. Procedia Engineering,2015,114(1) :493 -499.
- [2] Aggelis D G, Shiotani T, Kasai K. Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo [J]. Tunneling and Under-ground Space Technology ,2008 ,23(6) :629 -637.
- [3] Schabowicz K. Ultrasonic tomography: the latest nondestructive technique for testing concrete members- description, test methodology , application example[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering,2014, 14(2) :295 -303.
- [4] Fu J, Wei C,Huang Q H,et al. Barker coded excitation with linear frequency modulated carrier for ultrasonic imaging [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2014, 13 (1):306 -312.
- [5] Nowicki A, Klimonda z, Lewandowski M, et al. Comparison of sound fields generated by different coded excitations- -experimental results[J]. Ultrasonics ,2006 ,44(1):121 - 129.
- [6] 李长征 ,王锐.巴克编码信号检测混凝土缺陷[J].工程勘察,2013(8):83 -86.
- [7] Song J, Kim S,Sohn H Y,et al. Coded excitation for ultrasound tissue harmonic imaging[J]. Ultrasonics, 2010, 50 (6) :613 -619.
- [8] Londhe N D, Anand R s. Coded tissue superharmonic imaging:an analytical study[J]. Journal of Medical Ultrasound,2012 ,20(2):101 - 108.
- [9] Song K 1,Cho G C. Numerical study on the evaluation of tunnel shotcrete using the impact-echo method coupled with Fourier transform and short-time Fourier transform[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2010, ,47(8):1274 - .1288.
- [10] 彭辉 ,刘东权 Chirp 编码激励在超声弹性成像系统中的应用研究[J].中国生物医学工程学报,2011 ,30(4) :514 -519.
- [11] 侯民胜,金梅.线性调频信号的匹配滤波处理[J].电子测量技术,2008 ,31(8):123 - 125.