

文章编号: 1000-7598-(2013)06-1815-07

脉冲压缩方法检测岩石弹性波速度

李长征^{1,2}, 张碧星¹, 师芳芳¹

(1.中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2.黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要: 针对岩石弹性波速度检测信噪比低、回波信号初至时间不易判读, 以及较长岩石(或混凝土)超声检测难以穿透问题, 提出用脉冲压缩方法检测弹性波速度。该方法与超声脉冲法检测的不同之处是在发射端采用编码信号激励, 在接收端进行匹配滤波, 得到高信噪比的压缩信号。介绍线性调频信号的宽时宽带特性, 分析了脉冲压缩的基本原理和数字实现过程。试验研究了换能器带宽对激发信号的影响。用常规的单脉冲法和脉冲压缩方法检测了多个岩样的弹性波速度, 试验结果表明, 两种检测结果差异较小。给出了脉冲压缩方法用于岩石弹性波速度检测的具体步骤和计算过程。综合分析, 脉冲压缩方法检测岩石弹性波速度是可行的, 能够用于岩土工程的质量评价。

关键词: 弹性波速度; 检测; 脉冲压缩; 编码; 线性调频; 信噪比

中图分类号: TU 459

文献标识码: A

Elastic wave velocity inspection for rocks by pulse compression method

LI Chang-zheng^{1,2}, ZHANG Bi-xing¹, SHI Fang-fang¹

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: On account of existing problems in rock elastic wave velocity inspecting, such as low signal to noise ratio(SNR), difficulty in reading the prime time of echo and inspecting large volume rock, pulse compression method is proposed. Linear frequency modulation (LFM) signal is mostly used as exciting source due to its remarkable properties, such as wide bandwidth, high energy and high SNR. While receiving terminal, echo signal is filtered by a matched filter, and the compression signal of high SNR is obtained. The wide time and band characteristics of LFM signal are introduced. In addition, the pulse compression principle and digital implementation process are also analyzed. The influence of the bandwidth of transducer on exciting signal is studied; elastic wave velocity of several rocks is inspected with a conventional method and pulse compression method. The wave velocity differences of two testing methods show a limited error. The detailed implementation and calculating process of pulse compression inspecting method are also described. The advantages and prospects of the method are analyzed. Results show that pulse compression method can be applied to inspect the elastic wave velocity in rock and access engineering quality.

Key words: elastic wave velocity; inspecting; pulse compression; coding; linear frequency modulation(LFM); signal-to-noise ratio(SNR)

1 引言

岩石弹性波速度是实验地球物理研究的重要参数^[1], 也是研究地球深部岩石成因的重要证据^[2], 文献[3]通过测试分析, 建立了煤系沉积岩石力学参数与波速之间的相关关系。在工程质量检测领域, 岩体和混凝土构件的弹性波速度是评价工程建设质量的重要指标, 文献[4-5]利用弹性波走时重构不

同构件内部波速, 进而进行质量评价。

岩石弹性波速度的精确测量是开展岩石力学性质研究和工程质量评价的必要前提。常规弹性波速度的检测方法是在岩块两端布置换能器, 通过声波发射仪的触发电路发生脉冲信号^[6](正弦脉冲或矩形脉冲), 经发射换能器向岩块内发射弹性波, 波在岩体内传播并为接收换能器所接收, 经放大电路放大, 实现模数转换, 由仪器记录接收波形信号, 通

收稿日期: 2012-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No. 11074273); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. HKY-JBYW-2010-17); 水利公益性行业专项 (No.201301061)。

第一作者简介: 李长征, 男, 1978年生, 博士研究生, 主要从事超声检测的研究工作。E-mail: hnlzl@163.com

过读出接收信号的首波到达时间 Δt ，再由式 (1) 计算出波速 v

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (1)$$

式中： ΔL 为被测岩块长度。

现场检测过程中，有时背景噪声干扰较大，噪声信号与首波混叠，或者首波完全被淹没于噪声信号中，该情况下难以判断首波到达时间，给波速测试带来不便。另一方面，对于较长构件的检测，由于弹性波传播长距离后幅度衰减较大，接收信号中不易判别出首波，这也是困扰工程检测人员的问题之一。

与传统超声检测脉冲激励信号相比，脉冲压缩方法在发射端采用调制编码激励，发送经过调制的大时宽 T 、大带宽 B 的信号，在发射时段内，信号频率随着时间呈线性变化；在接收端对接收信号匹配滤波，得到主瓣宽度为 $1/B$ 窄脉冲信号。与常规判别首波方法相比，脉冲压缩方法利用全波信息判别波列到时，采用该方法能将时域上比较长的调频信号压缩到很短的时间段之内，从而较大程度地提高接收信号的主瓣峰值和信噪比。宽带信号在一定程度上可提高声波在岩石中的穿透能力，这是脉冲压缩方法的技术优势之一。

脉冲压缩方法最早应用在雷达^[7-8]、通讯等领域，应用效果良好，目前已得到广泛应用^[9]。脉冲压缩方法在声学领域也有广泛的应用^[10]，如在合成孔径声纳技术^[11]、水声通信等方面都起到关键作用。目前，脉冲压缩方法在医学超声方面的研究工作较多^[12-13]，超声编码激励信号从最初的线性调频信号 (LFM) 发展到二相编码信号 (barker 码、m 序列) 等多种激励信号的研究^[14]。国内在固体超声检测领域，文献[15]研究了线性调频信号在空气耦合超声中的检测应用。

脉冲压缩用于雷达探测和超声检测的工作原理相似，雷达应用该技术探测空气中或地面目标，能够使雷达的作用距离大大提高。在超声检测中，由于检测换能器的带宽有限，激励信号大多被限制在换能器带宽范围内，从而限制了发射信号能量。虽然超声在岩石中传播衰减较快，岩石可视作弹性介质，声波在其中的传播是由于扩散造成的幅度衰减，可不考虑介质的频散作用，所以该技术用于岩石弹性波速度检测是可行的。目前脉冲压缩在岩土超声检测方面开展的研究工作较少，本文的主要工作是针对工程现场或实验室的岩石波速检测中存在的低分辨率问题，选择带宽范围较宽的换能器激励，采

用不同编码激励，努力提高发射信号带宽，给出了弹性波速度的具体检测步骤。结合检测实例，分析了该方法的可行性和技术优势。

2 脉冲压缩方法

在激励信号方面，脉冲压缩方法采用编码激励，将预先编辑好的编码信号导入信号发生器，信号发生器将编码信号转为电信号，激励换能器产生超声波脉冲。接收端经过压缩后的信号峰值能量与编码信号的时带积 (时宽 T 与带宽 B 的乘积) 呈正比关系，LFM 和二相编码信号均具有宽时宽带特性，本文选择用 LFM 作为编码信号来进行岩石弹性波速度检测研究。

脉冲压缩方法是在接收端选择一匹配滤波器与接收信号进行压缩运算，得到脉冲压缩信号，匹配滤波器的作用是使输出信号信噪比达到最大。匹配滤波运算实际上就是脉冲压缩，经过压缩的信号为窄脉冲信号，具有良好的测距精度和距离分辨率。

脉冲压缩信号 $s_{\text{compress}}(t)$ 等于回波信号 $s_{\text{receive}}(t)$ 与匹配滤波器单位脉冲响应 $f_{\text{match}}(t)$ 的卷积，可由式 (2) 在时域内计算，也可由式 (3) 在频域内相乘，再做反傅立叶变换得到 $s_{\text{compress}}(t)$ 。

$$s_{\text{compress}}(t) = s_{\text{receive}}(t) f_{\text{match}}(t) \quad (2)$$

$$S_{\text{compress}}(f) = S_{\text{receive}}(f) F_{\text{match}}(f) \quad (3)$$

式 (3) 中各项分别为式 (2) 中各项对应的频谱函数； $f_{\text{match}}(t)$ 为发射信号 $s(t)$ 的共轭反转函数，其频谱函数 $F_{\text{match}}(f)$ 为^[8]

$$F_{\text{match}}(f) = K \tilde{S} \cdot (f) e^{-j/2\pi f t_0} \quad (4)$$

式中： K 为归一化系数； f 为信号频率； $\tilde{S} \cdot (f)$ 为信号 $s(t)$ 频谱函数的复共轭； t_0 为最大峰值时刻。

脉冲压缩的数字实现如图 1 所示。

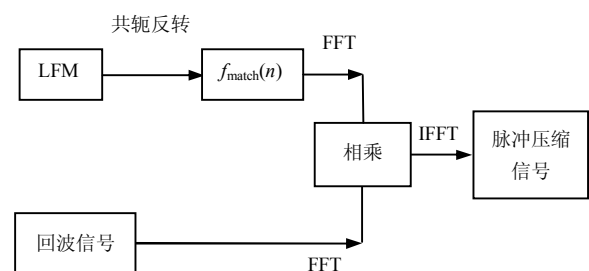


图 1 脉冲压缩数字实现

Fig.1 Numerical realization of pulse compression

3 编码信号带宽范围对激发信号的影响

理论上可编辑任意时宽、带宽的 LFM 编码信号,但由于换能器的带宽有限,不能激发出和编码信号相近的激励信号。本文通过试验研究换能器带宽对激励信号的影响。

试验用换能器中心频率为 540 kHz, -6 dB 带宽范围为 385~705 kHz。采用 DG1022 信号发生器、DS1062 示波器接收信号。试验中发射-接收换能器直接对接,以测试激发信号特性。

3 个 LFM 编码信号的带宽和时宽均相同,带宽为 50 kHz,时宽为 0.5 ms,中心频率分别为 550、600、650 kHz,具体参数见表 1,信号包络幅值均为 1。

表 1 LFM 编码信号参数
Table 1 LFM coded parameters

	起始频率 / kHz	中心频率 / kHz	截止频率 / kHz	带宽 / kHz	时宽 / ms
信号 1	525	550	575	50	0.5
信号 2	575	600	625	50	0.5
信号 3	625	650	675	50	0.5

表中 3 个编码信号对应的激发信号包络(正幅值)如图 2 所示(编码信号 1 激发信号为信号 1,编码信号 2 激发信号为信号 2,编码信号 3 激发信号为信号 3)。

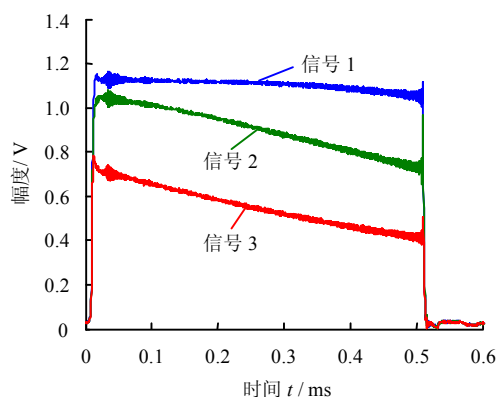


图 2 激发信号包络

Fig.2 Envelope of excited signals

由图 2 可知,随着频率的升高,3 个激发信号包络均不同程度地逐渐降低。在时宽、带宽相同情况下,信号 1~3 的幅度逐步降低,说明编码信号中心频率与换能器中心频率差异越大,激发信号的幅度就越低。图 3 为激发信号频谱与换能器响应对比,3 个激发信号的频谱全部被限制在换能器响应范围

内,同样说明编码信号频带越靠近换能器中心频率,激发信号频谱幅值越高,相应信号能量升高,激发效果就越好。

为激发出较高能量的调频信号,且激发信号幅值保持均衡,在编码时,应尽量使编码信号中心频率与换能器中心频率一致,且编码信号频带在选用换能器的频带(-6 dB)范围之内。

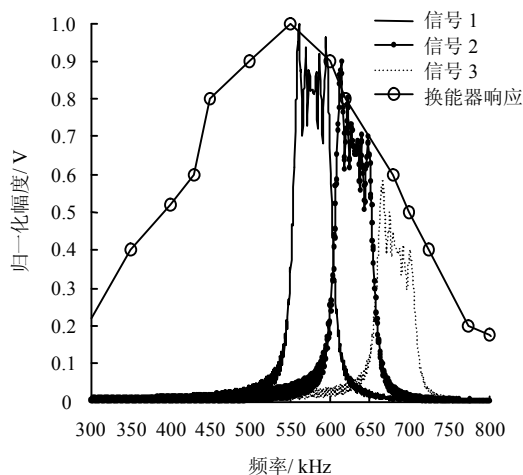


图 3 激发信号频谱

Fig.3 Frequency spectrum of excited signals

4 检测试验

4.1 检测实例

检测大小为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 的岩石样品,选用换能器中心频率为 540 kHz, -6 dB 带宽为 385~705 kHz 的发射换能器和接收换能器(Panametrics-Ndt V101)。首先用 $10\text{ }\mu\text{s}$ 的矩形脉冲激励换能器检测波速,然后用 LFM 激励检测,检测过程均按照超声法检测规范进行声波穿透法检测,采样频率为 5 MHz,检测激励电压均为 6 V。

(1) 矩形脉冲信号检测结果

图 4 为矩形脉冲激励接收信号,由图可见,信噪比较低,有单一峰值,但初至信号与噪音信号混叠,不易判读。

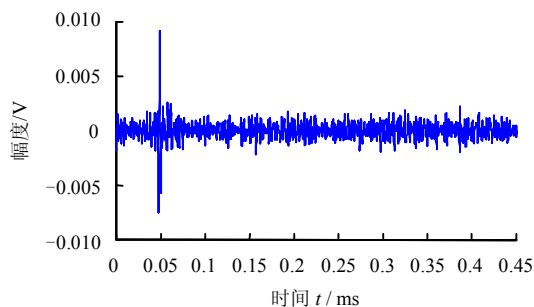


图 4 矩形脉冲检测信号

Fig.4 Signal with rectangular pulse

由式 $SNR = 20 \lg \left(\frac{\text{信号峰值}}{\text{噪声峰值}} \right)$ 计算信噪比, 取信号峰值 0.009 132, 噪声峰值 0.002 261, 可得 $SNR = 12.1 \text{ dB}$ 。取首波时间 Δt 为 $47.09 \mu\text{s}$, 由式(1), 得岩样弹性波速度 v 为 $4\,247.0 \text{ m/s}$ 。

(2) 脉冲压缩方法检测结果

编码信号时带积越大, 激发信号能量越强, 压缩信号的幅度越大。若时带积过小, 压缩信号峰值不明显, 不利于判读。选取编码信号参数如下:

$B = 50 \text{ kHz}$, $T = 0.5 \text{ ms}$, 时带积 $D = 25$, 起始频率为 475 kHz , 截止频率为 525 kHz 。

测试过程中发射换能器和接收换能器对接, 图 5 为编码信号激励换能器后的激发信号 s_{dir} , 图 6 为 LFM 编码激励接收信号 s_{rock} , 可明显辨别出接收到的 LFM 信号, 同时伴随有噪音信号。

取峰值时间 Δt 为 $44.4 \mu\text{s}$, 得岩样弹性波速度 v 为 $4\,504.5 \text{ m/s}$ 。

图 7 为脉冲压缩信号, 由图以可看出, 压缩信号主瓣较窄且峰值较高, 取压缩信号峰为 12.8 V , 第一副瓣峰值 (噪声峰值) 为 2.6 V , 得信噪比为 13.8 dB , 可见脉冲压缩信号的信噪比较高。

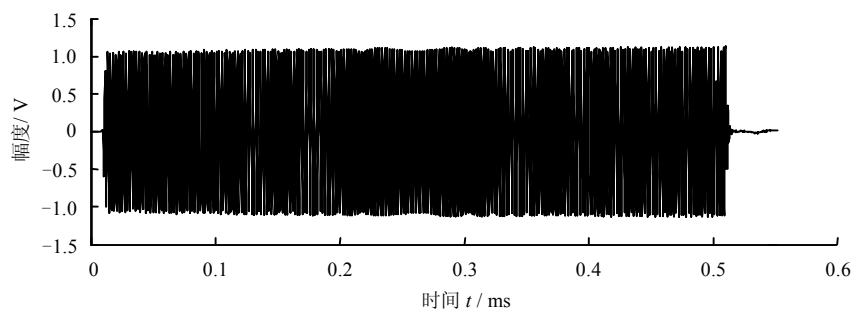


图 5 LFM 激发信号
Fig.5 Signal with LFM exciting

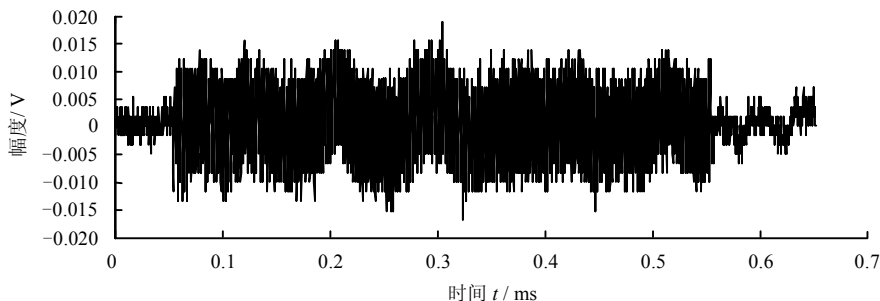


图 6 LFM 接收信号
Fig.6 Received signal with LFM exciting

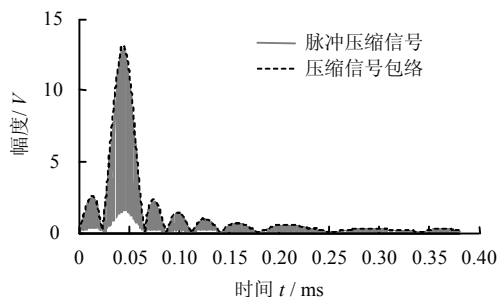


图 7 脉冲压缩信号
Fig.7 Signal of pulse compression

激励与脉冲压缩方法检测波速的对比试验。其中脉冲压缩方法选取 3 个编码信号分别进行激励检测, 其中信号 a 起止频率 $450 \sim 550 \text{ kHz}$, 时宽 $100 \mu\text{s}$; 信号 b 起止频率 $400 \sim 600 \text{ kHz}$, 时宽 $100 \mu\text{s}$; 信号 c 起止频率 $350 \sim 650 \text{ kHz}$, 时宽 $100 \mu\text{s}$, 选用换能器与 4.1 中相同。试验结果见表 2。由表可知, 脉冲压缩方法的检测结果大多低于单脉冲检测结果, 分析原因为脉冲压缩方法反映了整个波包的传播速度, 波包的传播速度通常偏低, 可结合首波时间进行校正。

4.2.2 铁块测试

采用大小为 $49.5 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ 的铁块作为标准试件, 分别用常规的单脉冲激励检测和脉冲

4.2 对比验证

4.2.1 岩样测试

选取试验室 7 块不同岩样, 进行了常规单脉冲

压缩方法检测, 在长度和宽度方向上的检测结果参见表 3, 两铁块的单脉冲检测结果分别为 5 992 m/s 和 5 953 m/s, 3 种激励信号的脉冲压缩方法检测结

果差异较小, 与单脉冲检测波速最大差异为 -278 m/s, 最小差异为 -170 m/s。由表 3 分析可见, 脉冲压缩方法检测重复性好, 检测结果可靠。

表 2 岩样测试结果
Table 2 Results of rock testing

岩样 编号	长度 /(10 ⁻² m)	单脉冲检测 波速 v_1 /(m/s)	脉冲压缩方法检测								
			信号 a			信号 b			信号 c		
			到时 / μ s	波速 v_2 /(m/s)	波速差异 v_2-v_1 /(m/s)	到时 / μ s	波速 v_2 /(m/s)	波速差异 v_2-v_1 /(m/s)	到时 / μ s	波速 v_2 /(m/s)	波速差异 v_2-v_1 /(m/s)
1	12.42	2 397.7	54.2	2 291.5	-106.2	54.0	2 300.0	-97.7	54.2	2 291.5	-106.2
2	12.5	2 759.4	54.6	2 289.4	-470.0	46.6	2 682.4	-77.0	48.6	2 572.0	-187.4
3	11.3	5 044.6	23.8	4 747.9	-296.7	23.8	4 747.9	-296.7	23.6	4 788.1	-256.5
4	7.2	4 528.3	17.0	4 235.3	-293.0	17.2	4 186.0	-342.3	17.0	4 235.3	-293.0
5	8.0	4 678.4	18.6	4 301.1	-377.3	18.8	4 255.3	-423.1	18.6	4 301.1	-377.3
6	9.9	4 500.0	23.4	4 230.8	-269.2	23.6	4 194.9	-305.1	23.2	4 267.2	-232.8
7	20.0	4 545.5	45.6	4 386.0	-159.5	43.2	4 629.6	84.1	47.8	4 184.1	-361.4

表 3 铁块测试结果
Table 3 Results of iron testing

铁块 编号	长度 /(10 ⁻² m)	单脉冲检测 波速 v_1 (m/s)	脉冲压缩方法检测								
			信号 a			信号 b			信号 c		
			到时 / μ s	波速 v_2 /(m/s)	波速差异 v_2-v_1 /(m/s)	到时 / μ s	波速 v_2 /(m/s)	波速差异 v_2-v_1 /(m/s)	到时 / μ s	波速 v_2 /(m/s)	波速差异 v_2-v_1 /(m/s)
1	20.0	5 992.0	35.0	5 714.0	-278	35.2	5 682.0	-310	35.0	5 714.0	-278
1	49.5	5 953.0	85.8	5 769.0	-184	85.6	5 783.0	-170	85.6	5 783.0	-170

4.3 讨论

(1) 在检测过程中, 将岩样视为弹性介质, 选取换能器对接检测信号为匹配滤波器的脉冲响应, 没有考虑岩石对弹性波信号的频散效应。对于频散效应明显的岩样, 弹性波在传播过程中高频信号衰减明显, 信号变宽, 该情况下需根据实际情况确定匹配滤波器。

(2) 由表 2、3 可知, 脉冲压缩方法与常规单脉冲检测结果差异较小, 在改变激励信号和匹配滤波器的情况下, 3 个激励信号的脉冲压缩方法检测结果较为稳定, 且差异很小, 说明应用脉冲压缩方法检测波速是可靠的。

(3) 本文的试验工作有限, 确定脉冲压缩方法检测岩石弹性波速的精确性, 还需大量试验进行对比验证。

4.4 脉冲压缩方法检测岩石弹性波速度具体步骤

(1) 尽量选取适合现场检测条件并且谐振频带较宽的发射换能器和接收换能器。

(2) 编辑 LFM 编码信号 s_{code} , 采样点数为 M_0 , 时宽为 t_0 , 信号的中心频率 f_0 与换能器中心频率接近, LFM 的带宽选在换能器 -6 dB 带宽范围内。为保证信号具备良好的脉冲压缩特性, 且不影响计算

效率, LFM 的时宽 T 与带宽 B 的乘积宜大于 10 且小于 100。

(3) 将 LFM 编码信号导入信号发生器用于激励, 发射换能器与接收换能器直接对接, 用 LFM 编码激励发射换能器, 记录接收信号 s_{dir} , s_{dir} 作为匹配滤波器脉冲响应, 考虑到换能器的延迟, s_{dir} 的采样点数 $M_1 > M_0$ (编码信号与采集信号的采样频率一致)。

(4) 发射换能器与接收换能器置于岩块两侧, 采用穿透法检测, 用 LFM 激励换能器, 记录接收信号 s_{rock} , 为保证发射的宽时带信号全部被接收, 接收信号的采样点数 M_2 满足

$$M_2 > M_1 + \Delta L \text{sample_rate} / v_{\text{estimate}} \quad (5)$$

式中: ΔL 为被测岩块长度; sample_rate 为采样频率; v_{estimate} 为波速估计值。

(5) 把式 (2) 的卷积计算化为相关运算, 得到脉冲压缩信号 $s_{\text{compress}}(n)$ 为

$$s_{\text{compress}}(n) = \sum_{k=1}^{M_1} s_{\text{dir}}(k) s_{\text{rock}}(k+n), \quad (0 \leq n \leq M_1 + M_2) \quad (6)$$

式中: $s_{\text{dir}}(k)$ 为收发换能器对接的接收信号, $s_{\text{rock}}(k+n)$ 为穿透岩石的检测信号, 计算过程中若 $k+n > M_2$, 取 $s_{\text{rock}}(k+n) = 0$ 。

记录信号 $s_{\text{compress}}(n)$ 的峰值时间 Δt 为信号到达时间。

(6) 按式 (1) 计算弹性波速度。

5 结 论

(1) 线性调频信号的基本波形是正弦波, 并且信号的长度没有限制, 其脉冲压缩比可以人为控制, 容易被现有的超声传感器发射和接收。

(2) LFM 信号频率随时间呈线性变化, 与噪音信号特征存在明显的差异, 在检测过程中, 容易被检测人员判别; LFM 信号的宽时、宽带特性决定信号的能量较大, 在长距离的构件检测方面具有一定优势; 在接收端, 压缩后的信号主瓣较窄, 幅度较高, 有单一峰值, 压缩信号信噪比较高 (较压缩前信号), 检测人员能够精确判读出弹性波到达时间。

(3) 相对于常规超声波仪器的高电压激励 (大于 100 V), 脉冲压缩方法用较低电压激励换能器就可得到信噪比较高的检测信号。

随着硬件的不断发展和成熟, 有望制造出成熟的脉冲压缩方法超声检测仪器, 并把该方法纳入相关技术规程, 为岩土工程检测服务。

参 考 文 献

- [1] 金振民, 欧新功, 徐海军, 等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 岩石弹性波速度: 对地震深反射的约束[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 81—96.
JIN Zhen-min, OU Xin-gong, XU Hai-jun, et al. Elastic wave velocities of the 2 000 m depth at Chinese Continental Scientific Drilling: Constraints on deep seismic reflection[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1): 81—96.
- [2] 赵志丹, 高山, 骆庭川. 秦岭和华北地区地壳低速层的成因探讨—岩石高温高压波速试验证据[J]. 地球物理学报, 1996, 36(5): 642—652.
ZHAO Zhi-dan, GAO Shan, LUO Ting-chuan. Origin of the crustal low velocity layer of Qinling and North China evidence from laboratory measurement of P-wave velocity in rocks at high PT conditions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1996, 36(5): 642—652.
- [3] 孟召平, 张吉昌, JOACHIM Tiedemann. 煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1505—1510.
MENG Zhao-pin, ZHANG Ji-chang, JOACHIM Tiedemann. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(5): 1505—1510.
- [4] 曹获. 层析成像二阶段射线追踪技术在工程中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1157—1160.
CAO Huo. Application of computerized tomography two-phase ray tracing technique to civil engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(7): 1157—1160.
- [5] 张永乐, 唐德高. 超声波层析成像在桩基结构完整性诊断中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3548—3552.
ZHANG Yong-le, TANG De-gao. Application of ultrasonic computerized tomography to diagnosis of pile construction integrity[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3548—3552.
- [6] 彭苏萍, 谢和平, 何满潮, 等. 沉积相变岩体声波速度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程报, 2005, 24(16): 2831—2837.
PENG Su-ping, XIE He-ping, HE Man-chao, et al. Experimental study on velocity characteristics of lithofacies transition rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2831—2837.
- [7] 皮亦鸣. 合成孔径雷达成像原理[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007.
- [8] 赵树杰. 雷达信号处理技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [9] 张娟, 张林让, 徐青, 等. 基于多级维纳滤波的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1045—1049.
ZHANG Juan, ZHANG Lin-rang, XU Qing, et al. Adaptive pulse compression of MIMO Radar based on MSWF[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1045—1049.
- [10] SIMON T, JEAN-FRANCOIS S, CHRISTINE E M, et al. Low-voltage coded excitation utilizing a miniaturized integrated ultrasound system employing piezoelectric 2-D arrays[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, 57(2): 353—362.
- [11] 孙超. 水下多传感器阵列信号处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.

- [12] 彭旗宇, 高上凯. 医学超声成像中的编码激励技术及其应用[J]. 生物医学工程学杂志, 2005, 22(1): 175—180.
PENG Qi-yu, GAO Shang-kai. Coded excitation and its applications in medical ultrasound imaging[J]. **Journal of Biomedical Engineering**, 2005, 22(1): 175—180.
- [13] 韩雪梅, 彭虎. 基于线性调频信号的高帧率超声成像系统[J]. 中国生物医学工程学报, 2005, 24(6): 700—704.
HAN Xue-mei, PENG Hu. High frame rate ultrasonic imaging system based-on linear frequency modulated signal[J]. **Chinese Journal of Biomedical Engineering**, 2005, 24(6): 700—704.
- [14] 蒲诚, 张涛, 綦磊. 不同编码激励的超声气体流量测量性能对比[J]. 天津大学学报, 2011, 44(9): 768—773.
PU Cheng, ZHANG Tao, QI Lei. Performance comparison of ultrasonic gas flow metering systems with different coded excitations[J]. **Journal of Tianjin University**, 2011, 44(9): 768—773.
- [15] 周正干, 魏东, 向上. 线性调频脉冲压缩方法在空气超声检测中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 24—35.
ZHOU Zheng-gan, WEI Dong, XIANG Shang. Application of linear-frequency——Modulation based pulse compression in air-coupled ultrasonic testing[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2010, 46(18): 24—35.
-
- 上接第 1765 页
- [5] 何忠明, 曹平. 考虑应变软化的地下采场开挖变形稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(4): 641—646.
HE Zhong-ming, CAO Ping. Deformation and stability analysis of underground stope after excavation considering strain softening[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2008, 39(4): 641—646.
- [6] 王水林, 吴振君, 李春光, 等. 应变软化模拟与圆形隧道衬砌分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1929—1936.
WANG Shui-lin, WU Zhen-jun, LI Chun-guang, et al. Modeling of strain-softening and analysis of a lining for circular tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1929—1936.
- [7] CAO Wen-gui, LI Xiang, ZHAO Heng. Damage constitutive model for strain-softening rock based on normal distribution and its parameter determination[J]. **J. Cent. South Univ. Technol.**, 2007, 14(5): 719—724.
- [8] YANG Xiao-li, HUANG Fu. Influences of strain softening and seepage on elastic and plastic solutions of circular openings in nonlinear rock masses[J]. **J. Cent. South Univ. Technol.**, 2010, 17: 621—627.
- [9] 尤明庆. 基于黏结和摩擦特性的岩石变形与破坏的研究[J]. 地质力学学报, 2005, 11(3): 287—291.
YOU Ming-qing. Study of deformation and failure of rock based on properties of cohesion and friction[J]. **Journal of Geomechanics**, 2005, 11(3): 287—291.
- [10] 张风, 董志宏, 丁秀丽. 彭水电站尾水洞施工开挖过程数值分析[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(6): 59—62.
ZHANG Feng, DONG Zhi-hong, DING Xiu-li. Numerical analysis of excavation process for tailrace tunnels of Pengshui project[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2005, 22(6): 59—62.
- [11] 周科峰, 李宇峙, 柳群义. 层状岩体强度结构面特征的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1424—1428.
ZHOU Ke-feng, LI Yu-zhi, LIU Qun-yi. Numerical analysis of structure plane characteristic for strength of stratified rock mass[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2012, 43(4): 1424—1428.
- [12] 李大伟, 侯朝炯. 围岩应变软化巷道锚杆支护作用的计算[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1): 123—126.
LI Da-wei, HOU Chao-jiong. Calculation of bolt support in surrounding rock strain softening roadway[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2008, 25(1): 123—126.
- [13] 张强, 王水林, 葛修润. 圆形巷道围岩应变软化弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1031—1035.
ZHANG Qiang, WANG Shui-lin, GE Xiu-run. Elastoplastic analysis of circular opening in strain-softening rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(5): 1031—1035.
- [14] 高树棠译, 史天生校. 巷道交接处支架的计算与选择[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982.
- [15] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [16] Itasca Consulting Group Inc. Theory and background[M]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 2002.
- [17] 采矿设计手册编辑委员会. 采矿设计手册(井巷工程卷)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.