DOI: 10.3901/JME.2020.20.022

橡胶-钢粘接结构的谐振超声编码检测方法^{*}

王强^{1,2} 毛捷^{1,2} 李威³ 廉国选¹

(1. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190;

2. 中国科学院大学 北京 100049;

3. 武汉武船计量试验有限公司 武汉 430060)

摘要: 针对橡胶-钢粘接结构进行脱粘检测, 提出具有高检测灵敏度的谐振超声编码检测方法, 区别于传统脉冲压缩后取包络成像的方法, 谐振超声编码检测方法需要利用载频信息增强特征信号的能量。该方法从频域角度分析, 首先确定换能器与编码信号的中心频率选择在钢层谐振频率附近, 然后根据线性调频信号与 Barker 码的旁瓣抑制特点选择特征信号的区间进行脉冲压缩。结果表明, 线性调频信号与 Barker 码相对于传统方波激励的脱粘检测灵敏度有了显著的提高, Barker 码相对于线性调频信号具有更可控的旁瓣抑制范围, 线性调频信号的带宽具有更灵活的选择范围。

关键词: 粘接结构; 高衰减; 编码信号; 脉冲压缩; 信噪比

中图分类号: TB553

Resonant Ultrasonic Coded Method for Rubber-steel Bonded Structure

WANG Qiang^{1,2} MAO Jie^{1,2} LI Wei³ LIAN Guoxuan¹

(1. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. Wuhan WUCHUAN Measurement & Test Co., Wuhan 430060)

Abstract: For debonding detection of rubber-steel bonded structure, a resonant ultrasonic coded detection method with high detection sensitivity is proposed. It is different from the traditional method of envelope imaging after pulse compression. The resonant ultrasonic coded detection method needs to use carrier frequency information to enhance the energy of the characteristic signal. The method is analyzed in frequency domain. Firstly, the center frequency of transducer and coded signal is chosen near the resonance frequency of steel layer, and then the interval of characteristic signal is selected for pulse compression according to the side lobe suppression characteristics of chirp signal and Barker code. The results show that the debonding detection sensitivity of chirp signal and Barker code is significantly higher than that of the traditional square wave excitation, the sidelobe suppression range of the chirp signal is more controllable than that of the chirp signal, and the bandwidth of the chirp signal is more flexible.

Key words: bonded structure; high attenuation; coded signal; pulse compression; signal-to-noise ratio

0 前言

橡胶-钢粘接结构具有抗疲劳性、减振性、耐腐蚀性、隔热、隔音等诸多优点, 广泛应用于航空航天、船舶、汽车等重要零部件上, 对于这种结构在生产与服役中粘接质量的超声检测具有重要的研究

价值。

当声波从橡胶层入射时, 由于橡胶与钢两种介质的声阻抗差异较大, 以橡胶声阻抗为 $2 \times 10^6 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 、钢声阻抗为 $45 \times 10^6 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 为例, 粘好时界面回波反射系数 91.5%, 完全脱粘时接近 100%, 幅值相差不到 1 dB, 因此在实际工程中难以利用界面回波幅值进行脱粘识别。利用检测回波中是否包含钢层回波信号进行粘好与脱粘的判别不失为一种有效的方法, 但当橡胶的声衰减现象严重且厚度较大时, 可获取的钢层回波信号十分微弱, 信

^{*} 中国科学院创新基金资助项目(CXJJ-16Z220)。20190802 收到初稿, 20200311 收到修改稿

噪比低, 难以提取特征信号。

共振匹配技术常应用在声阻抗差异较大的超声检测中。WANG 等^[1-2]使用半波层谐振频率作为“透声窗”成功提取了深层脱粘界面的回波信号特征, 并进一步分析了“透声窗”附近总反射波谱和各界面反射谱的特点, 提出“谱分析方法”识别脱粘界面; MAO 等^[3-4]利用谐振频率特性成功反演了钢层及其背覆薄层的厚度; ZHOU 等^[5]则应用谐振频率实现了多层结构下的覆薄层检测。

基于编码信号的脉冲压缩技术可以在保证轴向分辨率的前提下提高信噪比, 前人一般利用脉冲压缩后的时域包络峰值成像, 主要围绕信噪比、分辨率、峰值旁瓣比三个指标, 展开对超声系统中编码信号的波形设计、脉冲压缩机制等问题的研究^[6-9], 目前已经成功应用于医学^[10-12]与工业无损检测等领域^[13-18]。当考虑材料依频率衰减的特性时, RAO^[19]仿真认为依频率衰减会降低脉冲压缩的效果; RAMALLI 等^[20]采用新频带范围的线性调频信号激励通带平坦的换能器, 以此获得更高的信噪比增益; WANG 等^[21]综合考虑衰减后的载频偏移与编码信号带宽的影响, 提出衰减匹配的脉冲压缩方法提高信噪比增益。

针对橡胶-钢粘接结构的脱粘检测, 当声波从橡胶层入射时, 以钢层谐振频率作为特征信号, 本文提出谐振超声编码检测方法。首先理论分析了橡胶-钢结构的超声传播特性, 给出钢层多次回波的谐振特点; 其次, 考虑橡胶依频率衰减的影响, 将脉冲压缩的时域结果表示为频域乘积的形式, 更好地表征钢层的选频作用, 以此优化换能器和编码信号参数, 提高检测灵敏度; 最后, 通过仿真与试验分析了谐振编码检测相对于传统方波激励检测的优越性, 并对比了线性调频信号与 Barker 码的旁瓣抑制效果, 进一步给出了两种超声编码信号用于橡胶-钢粘接结构脱粘检测的性能特点。

1 分析方法

1.1 系统模型与特征信号

本文讨论的系统模型如图 1 所示, 由上至下分别为水、橡胶、钢、空气, 各层介质的声阻抗 $z_i = \rho_i c_i$, 介质 i 与介质 j 之间的界面反射系数为 $r_{ij} = (z_j - z_i) / (z_j + z_i)$, 透射系数为 $t_{ij} = 1 + r_{ij}$, 各层材料参数如表 1 所示。超声由水中垂直入射到橡胶, 当橡胶与钢发生空气型脱粘时, 脱粘信号相对于粘好信号存在两个明显的特征: ① 橡胶与钢界面的一次回波相位反向; ② 橡胶与钢界面的一次回波

与二次回波之间钢中的多次回波消失。

图 1 橡胶-钢粘接检测示意图

表 1 橡胶-钢粘接结构模型参数表

序号	材料	密度/ (kg/m ³)	声速/ (m/s)	厚度/ cm	衰减/ [Np/(MHz · cm)]
0	水	1 000	1 500	—	0
1	橡胶	1 150	1 480	5.00	1.4
2	钢	7 800	5 900	1.15	0
3	空气	1.24	340	—	—

由于相位信息过于精细, 而且考虑到橡胶衰减、厚度变化、粘接剂与噪声的影响, 实际检测中很难根据相位信息判断粘接情况, 所以应根据特征(2)研究信号处理的方法。当钢层厚度固定时, 橡胶与钢界面的一次回波与二次回波之间钢中的多次回波可以表示为

$$y(t) = \left[s(t) \otimes h(t) \otimes \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_2) \right] f(t) \quad (1)$$

式中, $\otimes$ 表示卷积, $s(t)$ 为发射信号, $h(t)$ 为橡胶的衰减响应, $\delta(t)$ 为单位冲激函数, $T_1 = 2d_1/c_1$, $T_2 = 2d_2/c_2$, $f(t)$ 为截断函数, 包含声压反射系数与截断区间。对式(1)两边作傅里叶变换得到

$$Y(f) = \left[S(f)H(f) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Omega \delta(f - n\Omega) \right] \otimes F(f) \quad (2)$$

式中, $\Omega = 1/T_2$ 。假设截断区间为 $[T_r, T_r + \tau]$, 则

$$f(t) = \begin{cases} A \exp[-\alpha(t - T_r)] & 0 \leq t - T_r \leq \tau \\ 0 & t - T_r > \tau \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\alpha = -\frac{1}{T_2} \ln(r_{21}r_{23})$, $A = t_{01}t_{12}r_{23}t_{21}t_{10}$, T_r 为钢中第一次回波到达时刻, 对 $f(t)$ 作傅里叶变换得到

$$F(f) = \frac{(1 - \exp[-(\alpha + j2\pi f)\tau]) \exp(-j2\pi f T_r)}{j2\pi f + \alpha} \quad (4)$$

所以其幅度谱函数为

$$|F(f)| = \sqrt{\frac{1 - 2\exp(-\alpha\tau) \cos 2\pi f \tau + \exp(-2\alpha\tau)}{(2\pi f)^2 + \alpha^2}} \quad (5)$$

结合式(5)分析式(2)的幅度谱函数可知,当选定感兴趣的区间长度 τ 后,钢中的多次回波主要表现为以钢层选频的多次谐波。

为了降低系统模型的复杂度,假设橡胶满足依频率线性相位衰减,衰减响应的频域表达式为

$$H(f) = \exp(-\beta f 2d_1) \exp(-j2\pi f T_1) \quad (6)$$

式中, β 为橡胶的衰减系数,式(6)满足频率越高衰减越大的特性。 $|\Omega S(f)H(f)|$ 决定各次谐波的幅值高度,当橡胶衰减足够大且钢层较薄时,钢中多次回波主要保留低频谐波。为了提高低频谐波的能量,换能器的中心频率应选择在低频谐波附近。由式(1)仿真图1模型中的钢层多次回波,换能器中心频率为300 kHz, -6 dB 带宽为150 kHz。仿真结果如图2所示,当橡胶-钢粘好时,钢层多次回波近似为钢层一次谐波260 kHz,幅频响应波形由式(5)决定。

图2 粘好时钢层多次回波时域与幅频响应图

实际情况中,低频换能器的带宽往往较小,并且考虑到橡胶的衰减作用,所以本文只讨论一次谐波的情况。

1.2 谐振编码信号原理

式(1)中的 $s(t)$ 表示激励信号与换能器响应卷积,对于常规的超声检测系统,激励信号通常选择方波信号,假设换能器响应为高斯信号,其频域表达式为

$$S_t(f) = \exp \left[-\eta \left(\frac{f - f_t}{B_t} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中, f_t 为换能器的中心频率, B_t 为换能器的-6 dB 带宽, η 是一个常量 $4\ln 2$ 。

当激励信号为线性调频信号时,其实数表达式为

$$\begin{cases} s_c(t) = \cos \left[2\pi \left(\left(f_c - \frac{B_c}{2} \right) t + \frac{B_c}{2T} t^2 \right) \right] \\ 0 \leq t \leq T \end{cases} \quad (8)$$

式中, f_c 、 B_c 与 T 分别为编码信号的中心频率、带

宽与时长。设计匹配滤波器形式与式(8)相同,对脉冲压缩后信号作傅里叶变换,其幅频响应为

$$\begin{cases} |S_{cp}(f)| \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{B_c}} \left(\frac{B_s}{B_c} \right) \\ f_c - B_c/2 \leq f \leq f_c + B_c/2 \end{cases} \quad (9)$$

式中, B_s 等于常规超声检测系统中低通(带通)滤波器的通带宽度。常规的超声脉冲压缩利用其时域包络峰值成像,为了定量描述编码信号的谐振特性,定义频域信噪比为脉冲压缩后幅度谱的平方与噪声功率之比,所以线性调频信号脉冲压缩后的频域信噪比(考虑换能器响应加权)为

$$\begin{cases} SNR_{cp}(f) = \frac{\left| \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{B_c}} S_t(f) \right|^2}{B_c N_0} \\ f_c - B_c/2 \leq f \leq f_c + B_c/2 \end{cases} \quad (10)$$

当激励信号为Barker码时,如果在匹配滤波器后级联一个旁瓣抑制滤波器,设计关心区域 τ 内具有零值旁瓣,此时脉冲压缩后信号的主瓣为

$$s_{cp}(t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{B_s T}}{\sigma_g} \left(1 - \frac{|t|}{\tau_0} \right) \cos(2\pi f_c t) & (|t| \leq \tau_0) \\ 0 & (|t| > \tau_0) \end{cases} \quad (11)$$

式中, σ_g 为经过旁瓣抑制滤波器后噪声方均根值的加权系数, τ_0 为-6 dB 主瓣时宽。对式(11)作傅里叶变换,其幅频响应为

$$\begin{cases} |S_{cp}(f)| \approx \frac{\sqrt{B_s T}}{2B_c \sigma_g} \text{Sa}^2 \left(\frac{\pi(f - f_c)}{B_c} \right) \\ f \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

所以Barker码经过旁瓣抑制滤波器后脉冲压缩的频域信噪比(考虑换能器响应加权)为

$$\begin{aligned} SNR_{cp}(f) &= \frac{\left| \frac{\sqrt{B_s T}}{2B_c \sigma_g} S_t(f) \text{Sa}^2 \left(\frac{\pi(f - f_c)}{B_c} \right) \right|^2}{B_s N_0} = \\ &= \frac{\left| \frac{1}{2\sigma_g} \sqrt{\frac{T}{B_c}} S_t(f) \text{Sa}^2 \left(\frac{\pi(f - f_c)}{B_c} \right) \right|^2}{B_c N_0} \end{aligned} \quad (13)$$

观察式(10)、(13)可知,当编码信号的带宽 B_c 越小时, f_c 处的频域信噪比越大,理论上当编码信号的时长 T 无限增大时,频域信噪比也随之增大。由式(2)知,从频域角度来讲,橡胶层的依频率衰减对任意激励信号的影响相同,因为钢层的选频作用,超声编码的中心频率应选择在钢层谐振频率处,谐波频率越低信噪比越高。所以应根据实际情况,合

理设计编码时长、带宽与中心频率。

2 试验装置与条件

试验装置如图 3 所示, 材料参数如表 1 所示。换能器的中心频率为 300 kHz, -6 dB 带宽为 150 kHz。首先使用计算机中任意波形编辑软件 (Tektronix) 生成激励信号, 然后载入任意信号发生器 (AFG3102) 并经过功率放大器 (75A250A) 放大后激励超声换能器, 采用自发自收方式测量, 接收信号由接收器 (Panametrics5800) 放大、示波器 (DPO4032) 采集后传输到计算机做进一步信号处理。试验中设置方波激励与编码激励具有同样峰峰值的激励电压, 所有试验数据均重复测量 8 次。

图 3 试验装置图

对于两种编码激励方法, 信号时长均为 $40 \mu\text{s}$, 取钢层一次谐波频率 260 kHz 为信号中心频率。设计 7 种码元位数的 Barker 码, 分别为 2 位、3 位、4 位、5 位、7 位、11 位、13 位, 并以 Barker 码的带宽设计线性调频信号的带宽, 分别为 50 kHz、75 kHz、100 kHz、125 kHz、175 kHz、275 kHz、325 kHz。对于 Barker 码激励方法, 旁瓣抑制的零值区域为 $40 \mu\text{s}$ 。对于方波激励方法, 脉冲宽度为换能器中心频率倒数的二分之一, 并设计通带宽度 600 kHz 的低通滤波器。

3 结果与讨论

使用式(10)与式(13)表征的频域信噪比需要选定特征信号所在的区间, 因为橡胶的高衰减作用, 橡胶与钢界面的二次回波非常微弱, 所以只需要尽量避开一次回波的影响。由文献[8-9]知, 虽然换能器响应可以近似为一个次优窗对线性调频信号进行失配处理, 但是在小时带积情况下的旁瓣抑制效果并不理想, 为了避开旁瓣的影响, 故选择远离主瓣的区间(115~125 μs)作为特征信号。因为 Barker 码

的脉冲压缩结果进行了旁瓣抑制滤波, 零值区间为 $40 \mu\text{s}$, 故选择接近主瓣的区间(95~105 μs)作为特征信号。

粘好时特征信号主要为钢层一次谐波时, 由帕塞瓦尔定理知, 频域信噪比中幅度谱的平方正比于信号的平均功率。理想情况下, 脱粘信号只存在噪声, 所以采用选定区间内粘好与脱粘信号的平均功率之比来表征检测灵敏度, 比较两种编码信号相对于方波激励的检测灵敏度增益, 仿真与试验结果如图 4 与图 5 所示, 其中试验结果以“均值 $\pm$ 标准差”的误差棒图表示。两种编码信号的检测灵敏度相对于传统方波激励有了显著的提高。

图 4 线性调频激励下检测灵敏度增益(115~125 μs)

图 5 Barker 码激励下检测灵敏度增益(95~105 μs)

当编码时长确定时, Barker 码只有 7 种编码带宽, 而线性调频信号的时长与带宽是完全独立的, 所以可以更加灵活地进行带宽的选择。如图 4、5 所示, 检测灵敏度增益仿真值的总体趋势随编码信号的带宽减小而增大, 在个别点处不符合该规律, 因为式(10)的推导忽略了菲涅尔波纹的影响, 式(13)的推导忽略了载频的影响。当线性调频信号的时间带宽积较小时, 忽略菲涅尔波纹的抖动会对计算造成误差; 当 Barker 码的载频较低时, 理论推导的幅频响应近似变差会对计算造成误差。线性调频信号的试验值与仿真值吻合较好, 而 Barker 码的试验值整体低于仿真值, 因为零值区域的波形变化较小,

所以排除噪声的影响,原因可能是旁瓣抑制滤波时会存在残余的旁瓣,残余旁瓣提高了脱粘时信号的能量导致试验值低于仿真值。

图 6 分别表示试验中粘好与脱粘时方波激励、线性调频信号、Barker 码处理后的回波,其中编码信号带宽为 50 kHz。虚线框与实线框的特征信号区间分别为 95~105 μs 与 115~125 μs 。由图 4、5 知,线性调频信号与 Barker 码的检测灵敏度增益分别为 28.6 dB 与 14.1 dB。脱粘时,线性调频信号选定区间左侧旁瓣与主瓣已经难以分辨,严重干扰粘好时特征信号的拾取,而 Barker 码选定区间内有变化较小的残余旁瓣,导致脱粘信号的平均功率增加。在不考虑接收信号始波影响时, Barker 码的时长可以足够长,特征信号的区间虽然存在残余旁瓣的干扰,但是仍然可以提供足够高的检测灵敏度增益,而对于线性调频信号,理论上旁瓣高度的趋势随着远离主瓣而逐渐下降,所以区间的选择应根据编码时长尽可能远离主瓣。

(a) 方波激励

(b) 线性调频信号

(c) Barker 码

图 6 橡胶-钢粘接结构超声回波处理后信号

需要注意,前文中编码激励方法与方波激励方法进行对比时的信号区间都是相互对应的,实际上,钢层多次回波是依时间增加而递减的,如果使用线性调频激励在实线框内(115~125 μs)的平均功率之比与方波激励在虚线框内(95~105 μs)的平均功率之比进行比较,那么线性调频激励方法的检测灵敏度增益要下降大约 4.4 dB。

4 结论

(1) 理论分析了橡胶-钢粘接结构特征信号的特点,指出可利用有无钢层一次谐波判断是否发生空气型脱粘。

(2) 区别于一般超声编码脉冲压缩中包络峰值成像,谐振编码检测方法选择钢层一次谐波频率作为编码信号的中心频率,由理论推导的超声线性调频信号与 Barker 码脉冲压缩后的频域信噪比表达式可知,当编码信号带宽减小时,检测灵敏度增益在整体趋势上上升。

(3) Barker 码经过旁瓣抑制滤波后的特征信号区间可以选择在主瓣附近,而线性调频信号即使经过换能器的加权作用,主瓣附近的旁瓣抑制效果仍然较差,需要调整特征信号的区间尽量远离主瓣。在编码时长确定时, Barker 码只有有限的 7 种码元位数,对应 7 种不同的带宽,而线性调频信号可以更灵活地设计不同的编码信号带宽。

参 考 文 献

- [1] WANG X, LIAN G, LI M, et al. Detection of the interface disbond of rubber laminate beneath a steel layer using ultrasound resonance[J]. Progress in Natural Science, 2001, 11: 165-168.
- [2] 王小民, 廉国选, 李明轩. 阻抗非匹配分层介质反射波谱分析[C]//中国声学学会 2001 年青年学术会议论文集, 2001.
- WANG Xiaomin, LIAN Guoxuan, LI Mingxuan. Analysis of the reflection spectrum in a layered medium of mismatched impedance[C]//Chinese Acoustics Society 1999 Youth Conference, 2001.
- [3] MAO J, LI M, WANG X. Thickness determination for a two-layered composite of a film and a plate by low-frequency ultrasound[J]. Chinese Physics Letter, 2007, 24(3): 755-758.
- [4] 王杨, 毛捷, 李明轩, 等. 固体板背覆薄层特性的低频超声反演方法研究[J]. 声学学报, 2009, 34(1): 11-19.

- WANG Yang, MAO Jie, LI Mingxuan, et al. Research on two inverse methods for characterization of an inaccessible thin film under a plate by low-frequency ultrasound[J]. *Acta Acustica*, 2009, 34(1): 11-19.
- [5] ZHOU C, LI M, MAO J, et al. Determination of thickness of an inaccessible thin film under a multilayered system from natural frequencies[J]. *Chinese Physics Letter*, 2008, 25(4): 1336-1339.
- [6] MISARIDIS T, JENSEN J A. Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. Part II: Design and performance for medical imaging applications[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2005, 52(2): 192-207.
- [7] LEAVENS C, WILLAMS R, BURNS P, et al. The use of phase codes in ultrasound imaging: SNR gain and bandwidth requirements[J]. *Applied Acoustics*, 2009, 70(10): 1340-1351.
- [8] PALLAV P, GAN T H, HUTCHINS D A. Elliptical-Tukey chirp signal for high-resolution, air-coupled ultrasonic imaging[J]. *Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on*, 2007, 54(8): 1530-1540.
- [9] 彭虎, 杜宏伟, 韩雪梅, 等. 巴克码在高帧率超声成像系统中应用的仿真研究[J]. *北京生物医学工程*, 2004, 23(4): 251-253, 308.
- PENG Hu, DU Hongwei, HAN Xuemei, et al. Simulation study on application of Barker code in the high frame rate image system[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2004, 23(4): 251-253, 308.
- [10] YU Z, ZHOU Y, LI Z, et al. Performance improvement of magneto-acousto-electrical tomography for biological tissues with sinusoid-Barker coded excitation[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(9): 094302.
- [11] 张慧琳, 宋小军, 他得安. Barker 码激励超声导波在长骨检测中的应用[J]. *声学学报*, 2014, 39(2): 257-263.
- ZHANG Huilin, SONG Xiaojun, TA Dean. Application of Barker code excited ultrasonic guided waves to long bone detection[J]. *Acta Acustica*, 2014, 39(2): 257-263.
- [12] 李明, 陈晓东, 李妍, 等. Chirp 编码的鲁棒医学超声内窥合成孔径方法[J]. *声学学报*, 2012, 37(3): 237-243.
- LI Ming, CHEN Xiaodong, LI Yan, et al. Chirp-coded robust synthetic aperture technique for medical endoscopic ultrasonography[J]. *Acta Acustica*, 2012, 37(3): 237-243.
- [13] HAN Q, WANG P, ZHENG H. Modified ultrasonic time-of-flight diffraction testing with Barker code excitation for sizing inclined crack[J]. *Applied Acoustics*, 2018, 140: 153-159.
- [14] HUTCHINS D, BURRASCANO P, DAVIS L, et al. Coded waveforms for optimised air-coupled ultrasonic nondestructive evaluation[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(7): 1745-1759.
- [15] 白玉海, 裴力伟. 体声波 Barker 码序列及其在检测超声中的应用[J]. *声学学报*, 1992, 19(5): 372-375.
- BAI Yuhai, PEI Liwei. Bulk acoustic wave Barker code sequence and the application in ultrasonic NDT[J]. *Acta Acustica*, 1992, 19(5): 372-375.
- [16] 周正干, 马保全, 孙志明, 等. 相位编码脉冲压缩方法在空气耦合超声检测信号处理中的应用[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(2): 48-54.
- ZHOU Zhenggan, MA Baoquan, SUN Zhiming, et al. Application of phase coded pulse compression method to air-coupled ultrasonic testing signal processing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2): 48-54.
- [17] 周正干, 张宏宇, 魏东. 脉冲压缩技术在超声换能器激励接收方法中的应用[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(17): 2127-2131.
- ZHOU Zhenggan, ZHANG Hongyu, WEI Dong. Applications of pulse compression in ultrasonic transducers excitation and receiving[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(17): 2127-2131.
- [18] 周正干, 魏东, 向上. 线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声检测中的应用研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(18): 24-28.
- ZHOU Zhenggan, 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): 24-28.
- [19] RAO N A. Investigation of a pulse compression technique for medical ultrasound: A simulation study[J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 1994, 32(2): 181-188.
- [20] RAMALLI A, GUIDI F, BONI E, et al. A real-time chirp-coded imaging system with tissue attenuation compensation[J]. *Ultrasonics*, 2015, 60: 65-75.
- [21] WANG Q, MAO J, LIAN G. Ultrasonic chirp-coded excitation for highly attenuating material testing[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(8): 086504.

作者简介: 王强, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail: wangqiang538@mail.ioa.ac.cn

毛捷(通信作者), 女, 1969 年出生, 博士, 研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为超声检测及其信号处理。

E-mail: maojie@mail.ioa.ac.cn