

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006070

基于 NLFM Barker 编码的板材焊缝缺陷 超声检测方法研究*

宋寿鹏, 乔梦丽

(江苏大学仪器科学与工程系 镇江 212013)

摘要:针对编码超声检测中,回波信号经脉冲压缩后存在主瓣持续时间长和旁瓣水平高的问题,提出了一种基于非线性调频(NLFM) Barker 复合编码的超声波激励方法,用于板材焊缝缺陷检测。给出了该复合码的产生方法,并推导出了其函数表达式。通过仿真对比分析了其与 Barker 码、非线性调频信号、以及线性调频 Barker 码这3种编码激励方法产生的超声波的时频特性、传感器响应特性以及回波脉冲压缩特性。试验结果表明,该复合编码超声回波信号经脉冲压缩后,其主旁瓣功率比较非线性调频信号和线性调频 Barker 码分别提高了约11和5 dB,峰值旁瓣水平较 Barker 码、非线性调频信号、以及线性调频 Barker 码分别降低了约7.8、7和3.6 dB,并能有效检测出焊缝中预设的5种常见缺陷。

关键词: 超声; 复合编码激励; 非线性调频; 焊缝缺陷

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on ultrasonic testing of plate weld flaw based on NLFM Barker coded excitation method

Song Shoupeng, Qiao Mengli

(Department of Instrument Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The coded ultrasonic testing has the problem of long duration of main-lobe and high level of side-lobe after pulse compression. To solve this issue, a composite coded ultrasonic excitation technique based on the non-linear frequency modulation Barker is proposed, which is applied in the plate weld flaw detection. The generation method of the proposed composite code is presented and its mathematical model is deduced. The time-frequency performance, the transducer response, and the pulse compression performance have been researched and simulated, which are compared with other coded signal excitation method, such as Barker, non-linear frequency modulation signal, and linear frequency modulation Barker. Compared with the non-linear frequency modulation signal and linear frequency modulation Barker, experimental results show that the power ratio of main-lobe to side-lobe is increased about 11 and 5 dB, respectively. Compared with Barker code, non-linear frequency modulation signal, and linear frequency modulation Barker code, the level of peak side-lobe is reduced about 7.8, 7, and 3.6 dB, respectively. The composite coded ultrasonic signal can effectively detect the common five types of defects on a steel plate weld sample.

Keywords: ultrasonic; composite coded ultrasonic excitation; non-linear frequency modulation (NLFM); weld defect

0 引言

目前,焊接结构在工业领域的应用十分广泛,但板材焊缝中的缺陷影响着焊接结构性能,不利于安全工作^[1-2],因此,对板材焊缝缺陷的检测至关重要。焊缝缺

陷常用检测方法有超声检测、射线检测、渗透液检测和涡流检测等^[3-4]。超声检测方法可检测多种类型缺陷,对焊缝中危害性最大的面积型缺陷(裂纹、未熔合等)有高的检测灵敏度,且操作简单,设备轻巧,十分适合于现场检测^[5-7]。

为了提高现有超声检测系统的回波信噪比和缺陷距

离分辨率,不少学者通过引入编码超声激励技术与脉冲压缩技术来改善这一现状,常见的编码形式有伪随机 M 序列^[8]、Barker 码、Golay 码^[9-10]等相位码、以及伪 Chirp 信号^[11]、线性调频信号 (linear frequency modulation, LFM)^[12-14] 和非线性调频信号 (non-linear frequency modulation, NLFM)^[15] 等调频码。由于在长度一致的相位编码序列中, Barker 码经过匹配滤波后具有最低的峰值旁瓣水平,因而,李长征等^[16] 用 Barker 编码信号对混凝土块内的孔洞和裂缝分别进行检测,改善了超声检测中的低信噪比 (SNR) 的问题。由于 Barker 码具有良好的自相关特性,能够抑制噪声,提高 SNR,但脉冲压缩后距离分辨率较低。而后,一些学者便开始对调频信号进行研究,如 Li 等^[17] 在钢板的穿透检测中采用了 LFM 编码激励,提高了超声检测的距离分辨率。张佳莹^[18] 在对碳钢和不锈钢缺陷进行检测时采用 LFM 信号与超声波衍射时差 (time of flight diffraction, TOFD) 检测相结合的方法,提高了距离分辨率,降低了缺陷位置测量误差。LFM 能够提高检测结果的距离分辨率,但脉冲压缩后旁瓣水平较高,不利于缺陷检测。为了抑制旁瓣,GAO 等^[19] 将 LFM 脉冲压缩信号加到矩形窗和汉宁窗的混合卷积窗中,降低了旁瓣水平,但与超声探头作用时会产生明显的波形失真和带宽损失,降低了 SNR。之后张佳莹等^[20] 提出了一种基于幅度加权频率调制的相位编码激励检测方法,较 LFM 激励该方法受调频带宽的影响较小,时间分辨率提高了 16.7%,但 SNR 低。为了提高 SNR,丛森^[21] 提出了基于探头频谱特性的 NLFM 信号,较 LFM 编码信号提高了 SNR,但距离分辨率受调频带宽的影响较大。

NLFM 信号主要用于雷达探测领域,该激励编码的最大特点是在不加窗的情况下,仍能通过脉冲压缩的方法获取较低的旁瓣水平。但是,到目前为止, NLFM 信号没有明确的解析表达式。为此,一些学者开展了 NLFM 信号的建模研究,这些模型都是基于相位逗留原理设计而来的,其产生过程复杂,如徐益初等^[22] 利用海明窗作为基函数,推导了 NLFM 信号的时域表达式,但此方法的初衷是为了提高雷达信号的频移范围。Liu 等^[23] 利用改进分段多项式的方法,设计了一种用于雷达信号激励的 NLFM,使回波压缩信号的旁瓣水平得到了明显降低。

本文以超声传感器幅频特性作为基本函数,在此基础上根据相位逗留原理,利用三次样条插值和非线性拟合算法设计了 NLFM 信号,并以此为载体信号调制 Barker 码,得到非线性调频 Barker (non-linear frequency modulation Barker, NLFM Barker) 复合编码信号,该信号经过功率放大后直接驱动传感器产生用于检测的超声波,用于缺陷的检测。

1 NLFM Barker 复合编码超声信号检测方法

NLFM Barker 复合编码超声缺陷检测系统如图 1 所示。

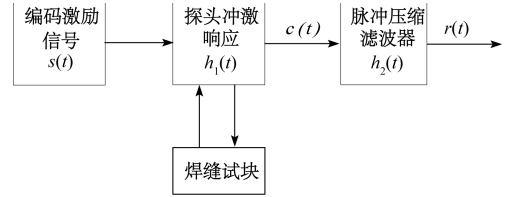


图1 NLFM Barker 复合编码缺陷检测系统
Fig.1 Sketch map of defect detection system based on NLFM Barker composite code

经复合编码超声信号检测系统接收到的回波信号 $r(t)$ 可表示为:

$$r(t) = s(t) * h_1(t) * h_2(t) \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为经功率放大后的 NLFM Barker 复合编码激励信号; $h_1(t)$ 为超声换能器的单位冲激响应; $h_2(t)$ 为脉冲压缩滤波器传递函数; “*” 表示卷积。

1.1 NLFM Barker 复合编码超声信号及响应模型建立

NLFM Barker 复合编码激励信号 $s(t)$ 可以看作是以 NLFM 信号为载体,通过卷积法调制 Barker 码而得到。

$$s(t) = s_{\text{Barker}}(t) * s_{\text{NLFM}}(t) = \left\{ \sum_{k=0}^{P-1} c_k \delta(t - kT_p) \right\} * s_{\text{NLFM}}(t), \quad (0 \leq t \leq T_p) \quad (2)$$

式中: $s_{\text{NLFM}}(t)$ 为 NLFM 信号; $s_{\text{Barker}}(t)$ 为 Barker 码; $\{c_k = \pm 1, k = 0, 1, 2, \dots, P-1\}$ 是 Barker 编码序列; T_p 是 Barker 信号子脉冲的时间宽度; P 是 Barker 信号的码长; Barker 信号的总持续时间是 $T = PT_p$ 。

假设所设计的 NLFM 信号具有如下表达式:

$$s_{\text{NLFM}}(t) = a(t) \exp[j\varphi(t)] \quad (3)$$

式中: $a(t)$ 为 $s_{\text{NLFM}}(t)$ 的幅值函数,为了研究方便,取幅值函数 $a(t) = 1$; $\varphi(t)$ 为 $s_{\text{NLFM}}(t)$ 的相位函数。

NLFM 信号的傅里叶变换可表示为:

$$S_{\text{NLFM}}(f) = |S_{\text{NLFM}}(f)| \exp[j\theta(f)] =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp[j(\varphi(t) - 2\pi ft)] dt \quad (4)$$

由相位逗留原理^[24] 可知,式(4)在相位逗留点 $t = t_k$ 处, $|S_{\text{NLFM}}(f_k)| = \sqrt{2\pi} \frac{1}{\sqrt{|\varphi''(t_k)|}}$ 为 $S_{\text{NLFM}}(f)$ 的幅值函数; $\theta(f_k) = \varphi(t_k) - 2\pi ft_k \pm j \frac{\pi}{4}$ 为 $S_{\text{NLFM}}(f)$ 的相位函数; 瞬时频率为 $f(t_k) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\varphi(t_k)}{dt_k}$, 其中: f 为频率; f_k 为相位逗留点 t_k 处对应频率; $\varphi''(t_k)$ 为相位函数 $\varphi(t)$ 的二阶导

数,表示调频信号瞬时频率变化斜率;而相位函数 $\varphi(t)$ 的一阶导数 $\varphi'(t_k)$ 表示调频信号瞬时频率。

由幅值函数 $|S_{\text{NLFM}}(f_k)|$ 和瞬时频率定义式推导可得,

$$|S_{\text{NLFM}}(f)|^2 = 2\pi \frac{1}{|\varphi''(t)|} \propto \frac{1}{\left| \frac{df(t)}{dt} \right|} = \left| \frac{dT_1(f)}{df} \right| \quad (5)$$

由式(5)可知,幅度平滑信号任意频率点的能量谱与该频率点的变化斜率成反比。因此,信号的能量谱决定信号的频率变化斜率。为了减少与超声换能器作用时信号损失的能量,选用具有高斯函数模型^[25]的超声传感器的功率谱作为信号 $s_{\text{NLFM}}(t)$ 的能量谱,即,

$$|S_{\text{NLFM}}(f)|^2 \approx \left(\frac{\beta s}{4f_0 \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{s^2(f-f_0)^2}{4f_0^2}\right) \right)^2, \quad f \in \left(f_0 - \frac{B}{2}, f_0 + \frac{B}{2}\right) \quad (6)$$

式中: β 为幅值系数; f_0 传感器的中心频率; s 是与传感器相对带宽 ρ 有关的系数, $s = 3.32/\rho$; B 为信号带宽,与超声换能器-20 dB 处分数带宽取值一致。

由式(5)和(6)可得群延时函数 $T_1(f)$ 。

$$T_1(f) = K \int \left(\frac{\beta s}{4f_0 \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{s^2(f-f_0)^2}{4f_0^2}\right) \right)^2 df = K \left(\frac{\beta s}{4f_0 \sqrt{\pi}} \right)^2 \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{2n} s^{4n} (f-f_0)^{4n+1}}{(2f_0)^{4n} n!} \right) \quad (7)$$

其中,信号频率 f 一定时,群延时 $T_1(f)$ 与常数 K 具有一一对应关系,当 $f=f_0 + B/2$ 时, $T_1(f)$ 取最大值 T_p 。

由于群延时函数是单调函数,其反函数一定存在,且可近似为信号的瞬时频率:

$$f(t) \approx T_1^{-1}(f) \quad (8)$$

由式(8)无法直接得到具有显式解析表达式的瞬时频率 $f(t)$,因此,通过对在 $[f_0 - B/2, f_0 + B/2]$ 内的频率 f 进行均匀划分,根据 $T_1(f)$ 解析表达式求出每个 f_i 所对应的 $T_1(f)$ 的值 t_i ,使用三次样条插算法,在每个区间 $[t_{i-1}, t_i, i=2, 3 \cdots n]$ 内构造每个均匀小区间的三阶多项式 $f_{i-1}(t)$ 。进而可由瞬时频率的定义,对各区间三阶多项式 $f_{i-1}(t)$ 进行积分可得各区间的相位函数表达式。

$$\varphi_{i-1}(t) = 2\pi \int f_{i-1}(t) dt \quad t \in [t_{i-1}, t_i], (i=2, 3 \cdots n) \quad (9)$$

由三次样条插值原理可知,各相邻区间最近临界点是同一值^[26]。因而分段点的左右极限存在并相等,故相位函数是连续的。根据函数逼近理论,用有理函数可以逼近任何连续函数^[27],故该相位函数可由有理函数近似表达。采用帕德近似将各区间相位函数提供的相位值作为函数逼近的初值,并根据相位函数曲线特征得到在整个分布区间上的相位函数为:

$$\varphi(t) = \frac{e_0 t + e_1 t^2 + e_2 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2}, (0 \leq t \leq T_p) \quad (10)$$

其中, e_0, e_1, e_2, d_1, d_2 是与传感器中心频率-20 dB 处分数带宽及信号时长有关的系数。将 $\varphi(t)$ 代入式(3)得到 NLFM 信号 $s_{\text{NLFM}}(t)$ 的时域函数表达式为:

$$s_{\text{NLFM}}(t) = \exp \left[j \frac{e_0 t + e_1 t^2 + e_2 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2} \right] \quad (11)$$

NLFM Barker 复合编码激励信号激励超声换能器后得到传感器响应信号 $c(t)$, 表达式为:

$$c(t) = s(t) * h_1(t) \quad (12)$$

超声换能器的冲激响应采用高斯函数模型来近似,表达式为^[28]:

$$h_1(t) = \beta \cos(2\pi f_0 t + \varnothing) \exp \left[-\left(\frac{2\pi f_0 t}{s} \right)^2 \right], (0 \leq t \leq T_p) \quad (13)$$

其中, $\varnothing$ 为初相。

1.2 NLFM Barker 复合编码回波信号脉冲压缩

由于 NLFM Barker 时域持续时间较长,为了提高回波信号的距离分辨率,需要对回波信号进行脉冲压缩,其压缩原理如图2所示^[29]。

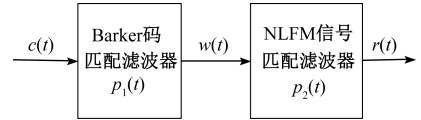


图2 回波信号脉冲压缩流程

Fig.2 Flow chart of echo signal pulse compression

NLFM Barker 复合编码激励信号的脉冲压缩滤波器函数为:

$$h_2(t) = p_1(t) * p_2(t) \quad (14)$$

式中: $p_1(t)$ 为 Barker 码匹配滤波器; $p_2(t)$ 为 NLFM 载波信号的匹配滤波器。

由匹配滤波理论^[30]可知, Barker 码匹配滤波器 $p_1(t)$ 为:

$$p_1(t) = s_{\text{Barker}}(t - T) = \left\{ \sum_{k=0}^{P-1} b_k \delta(t - (P + k - 1)T_p) \right\} \quad (15)$$

其中, b_k 为匹配滤波器系数,由输入信号编码序列按时间反序排列得到。

由匹配滤波理论^[30]可知, NLFM 载波信号的匹配滤波器 $p_2(t)$ 为:

$$p_2(t) = s_{\text{NLFM}}(t - T_p) = \exp \left[j \frac{e_0(t - T_p) + e_1(t - T_p)^2 + e_2(t - T_p)^3}{1 + d_1(t - T_p) + d_2(t - T_p)^2} \right] \quad (16)$$

因此, NLFM Barker 复合编码超声信号检测系统脉冲压缩回波信号 $r(t)$ 可表示为:

$$r(t) = s(t) * h_1(t) * h_2(t) = s_{\text{Barker}}(t) * s_{\text{NLFM}}(t) * h_1(t) * p_1(t) * p_2(t) = \left\{ \sum_{k=0}^{P-1} c_k \delta(t - kT_p) \right\} * \exp \left[j \frac{e_0 t + e_1 t^2 + e_2 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2} \right] *$$

$$\beta \cos(2\pi f_0 t + \varnothing) \exp \left[- \left(\frac{2\pi f_0 t}{s} \right)^2 \right] * \left\{ \sum_{k=0}^{P-1} b_k \delta(t - (P + k - 1)T_p) \right\} * \exp \left[j \frac{e_0(t - T_p) + e_1(t - T_p)^2 + e_2(t - T_p)^3}{1 + d_1(t - T_p) + d_2(t - T_p)^2} \right] \quad (17)$$

2 仿真结果分析

为了检验 NLFM Barker 复合编码的性能,选取

Barker、NLFM 和 LFM Barker 码作为比较对象,用 4 种编码信号作为压电超声检测的激励信号分别激励超声换能器,其中,NLFM、LFM Barker 和 NLFM Barker 3 种编码信号的参数设定皆为中心频率为 4 MHz,带宽为 7 MHz,时长为 3 μ s,而 Barker、LFM Barker 和 NLFM Barker 信号皆采用 13 位的 Barker 码进行调制;超声换能器的脉冲响应用中心频率为 4 MHz,-20 dB 处分数带宽为 175% f_0 的高斯函数模型来近似。4 种编码激励信号时域波形、频谱及其传感器响应信号时域波形、频谱如图 3 所示。

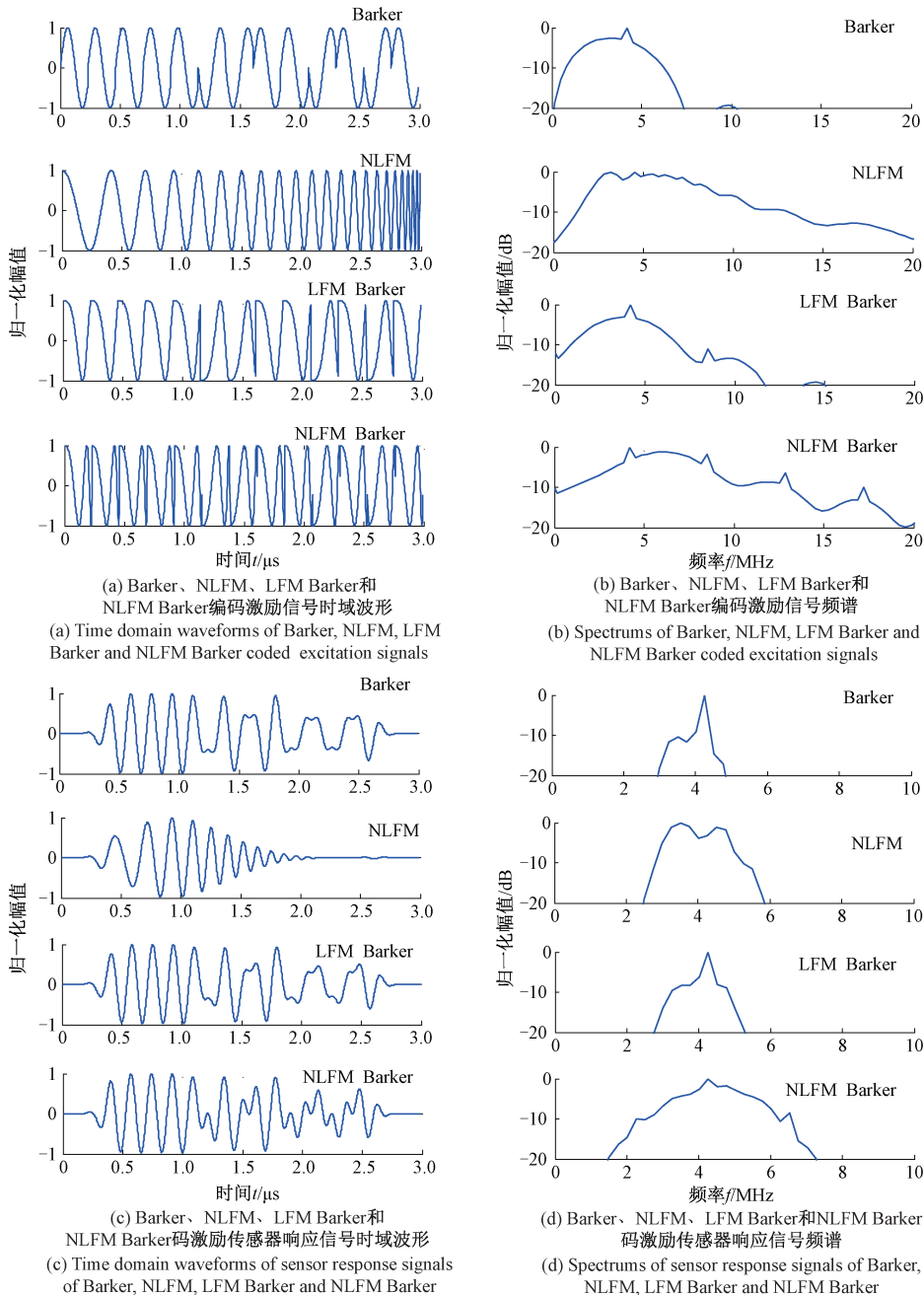


图 3 编码激励信号与传感器响应时-频分布

Fig.3 Time-frequency distribution of coded excitation signal and transducer response signal

通过对比图3中4种编码激励信号的时域波形与回波信号时域波形可知,探头会对信号起到滤波作用,Barker信号为相位编码信号,具有较窄的调频信号频带,且集中在中心频率附近,探头对其影响较小,而NLFM是基于探头功率谱设计的,与探头的吻合程度较LFM高,因而Barker信号能量损失最少,NLFM Barker信号次之。NLFM Barker复合编码激励信号和传感器响应信号的分布频带最宽,且传感器响应信号-20 dB处频带宽度可达6 MHz,最接近于传感器-20 dB处频带宽度7 MHz,较Barker码、NLFM以及LFM Barker码回波信号拓宽了频带,有利于对不同频带敏感的缺陷的检测。

借助SNR计算公式来反映主瓣与其他旁瓣功率之比,将主瓣看作是信号,旁瓣看作是噪声。主旁瓣功率比越高,其SNR也越高。SNR可用下式求得^[30]。

$$SNR = 10\lg\left(\frac{\frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{t=t_1}^{t_2} A^2(t)}{\frac{1}{t_1} \sum_{t=0}^{t_1} A^2(t) + \frac{1}{T - t_2} \sum_{t=t_2}^T A^2(t)}\right) \quad (18)$$

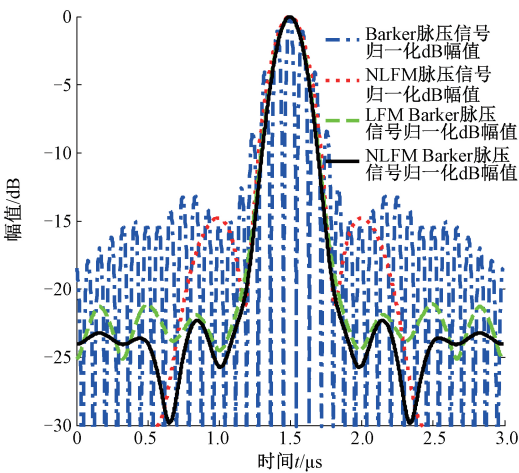
式中: $[t_1, t_2]$ 为有用信号的时间宽度; $A(t)$ 为对应采样点的幅值。

距离分辨率的高低决定了分辨两个相邻目标信号的能力,可通过信号脉冲压缩处理后峰值旁瓣水平 (peak side lobe level, PSL) 评定。峰值旁瓣水平定义如下^[30]:

$$PSL = 20\lg\left(\frac{A_1(t)}{A_2(t)}\right) \quad (19)$$

式中: $A_1(t)$ 为旁瓣峰值幅度; $A_2(t)$ 为主瓣峰值幅度。

4种激励信号的回波信号经脉冲压缩处理后,其响应如图4所示。



(b) Barker、NLFM、LFM Barker和NLFM Barker回波脉冲压缩信号峰值旁瓣水平对比
(b) Comparison diagram of peak side-lobe levels of echo pulse compression signals of Barker, NLFM, LFM Barker and NLFM Barker

图4 回波信号脉冲压缩结果
Fig.4 Pulse compression results of echo signal

从图4(a)可以看出,Barker回波脉冲压缩信号主旁瓣功率比最大,较NLFM Barker、LFM Barker以及NLFM信号分别提高了约9.5、15.5和21.5 dB。由图4(b)可知,NLFM Barker复合编码回波脉冲压缩信号主瓣时间宽度最窄,旁瓣水平最低。

从仿真结果可知,经脉冲压缩后,NLFM Barker信号较LFM Barker和NLFM信号提高了主旁瓣功率比、减小了主瓣持续时间,可以提高回波信号SNR和对缺陷检测时的距离分辨率,较Barker主旁瓣功率比有所下降,但提高了距离分辨率。

3 实际测试试验及结果分析

为验证NLFM Barker复合编码超声信号在板材焊缝超声检测中的性能,采用Barker、NLFM、LFM Barker和NLFM Barker 4种信号作为压电超声检测的激励信号,并进行板材焊缝缺陷的检测试验,其试验方案如图5所示。

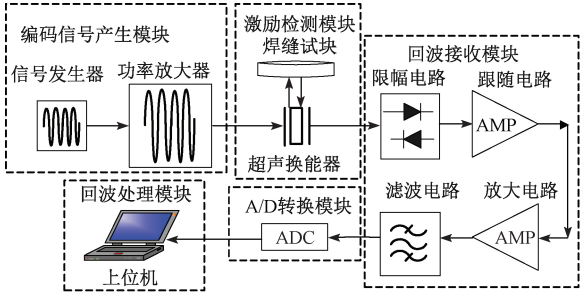
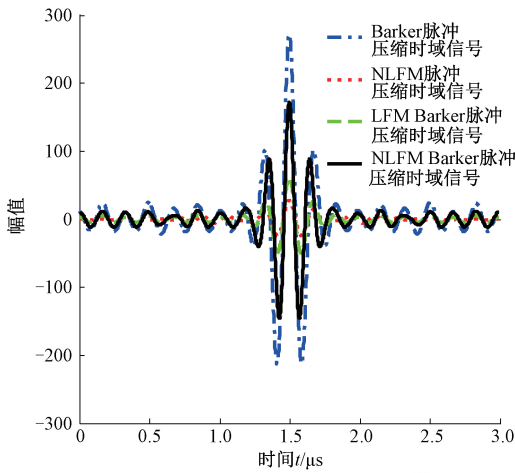


图5 编码超声信号检测焊缝缺陷方案

Fig.5 Weld defect testing using coded ultrasonic signal



(a) Barker、NLFM、LFM Barker和NLFM Barker回波脉冲压缩信号时域波形
(a) Time domain waveforms of echo pulse compression signals of Barker, NLFM, LFM Barker and NLFM Barker

试验中试块为 V 形单面坡口焊缝试块,尺寸为 $400 \times 400 \times 25 \text{ mm}^3$,试块几何结构参数及 1# 横向裂纹、2# 未

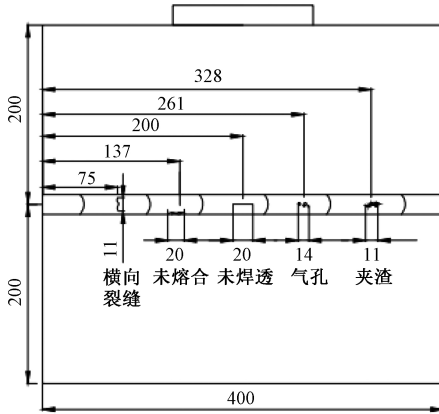


图6 焊缝试块缺陷分布

Fig.6 Weld defect distribution sample

试验所用探头为中心频率为 4 MHz, -20 dB 处分数带宽为 $175\%f_0$,横波折射角为 45° 的斜探头。由超声传感器参数得到 NLFM 信号 $s_{\text{NLFM}}(t)$ 的时域函数表达式:

$$s_{\text{NLFM}}(t) = \exp\left(j \frac{e_0 t + e_1 t^2 + e_2 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2}\right), (0 \leq t \leq T_p) \quad (20)$$

式中: $e_0 = 12\ 804\ 043.45$; $e_1 = 4.272\ 177\ 775 \times 10^{13}$; $e_2 = -4.080\ 977\ 223 \times 10^{20}$; $d_1 = -4\ 979\ 791.62$; $d_2 = 3.166\ 972\ 711 \times 10^{12}$; $T_p = 0.23 \mu\text{s}$ 。

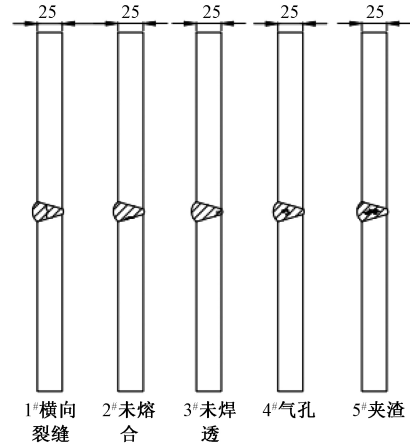
将 NLFM 信号作为载波对 13 位 Barker 序列进行调制,得到 NLFM Barker 复合编码信号。

$$s(t) = s_{\text{Barker}}(t) * s_{\text{NLFM}}(t) = \left\{ \sum_{k=0}^{P-1} c_k \delta(t - kT_p) \right\} * \exp\left(j \frac{e_0 t + e_1 t^2 + e_2 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2}\right) \quad (21)$$

其中, $P = 13$, 13 位 Barker 编码序列 $\{11111-1-111-11-11\}$,取 Barker 信号的总持续时间是 $T = 3 \mu\text{s}$ 。

将 NLFM Barker 复合编码信号由软件编程后通过 U 盘由任意波形信号发生器产生,为了不超过功率放大器的最大功率,令编码信号幅值为 $\pm 400 \text{ mV}$,经功率放大器放大 500 倍后至 $\pm 200 \text{ V}$ 激励斜探头,并采用横波检测法对焊缝试块中其中一种缺陷进行检测,得到原始回波信号后由接收处理电路进行放大及滤波去噪处理,并由示波器进行显示、采集存储。保持探头位置不变,随后同样将 Barker、NLFM 和 LFM Barker 3 种编码信号依次由任意波形信号发生器产生,其中心频率皆为 4 MHz,时长为 $3 \mu\text{s}$,幅值皆为 $\pm 400 \text{ mV}$,而 NLFM、LFM Barker 和 NLFM Barker 信号调频带宽为 7 MHz,并依次对同一缺陷进行检测。而后以同样的步骤采用 4 种编码信号作为压电超声检测系统的激励信号,依次检测板材焊缝中的其余 4 种缺陷,最后将所有采集

熔合、3# 未焊透、4# 气孔和 5# 夹渣 5 种缺陷分布如图 6 所示。



到的回波信号利用上位机进行脉冲压缩处理。搭建的编码超声焊缝缺陷检测系统如图 7 所示。

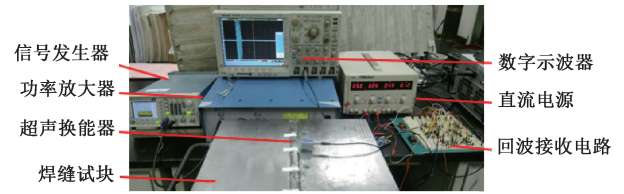


图7 编码超声焊缝缺陷检测系统

Fig.7 Weld defect detection system of coded ultrasonic signals

在试验中采用 Barker、NLFM Barker、LFM Barker 和 NLFM 4 种编码信号作为压电超声检测的激励信号分别对焊缝试块中 1#、2#、3#、4# 和 5# 缺陷进行检测。本文以 2# 未熔合缺陷为例进行分析,其回波信号时域波形和频谱如图 8 所示。

由图 8 可知,4 种编码信号经过超声检测系统后,NLFM Barker 检测回波信号的频带较 Barker、LFM Barker 和 NLFM 回波信号宽,有利于对不同频带敏感的缺陷的检测。

对 4 种回波信号分别进行脉冲压缩处理,进而分析 SNR 和距离分辨率,脉冲压缩信号如图 9 所示。

由图 9 对比分析可知,Barker 检测回波脉冲压缩信号峰值幅值最大,SNR 最高,但 -6 dB 处主瓣宽度最宽,峰值旁瓣水平最高,不利于缺陷检测。而 NLFM Barker 检测回波脉冲压缩信号峰值幅值次之,且 NLFM Barker 脉冲压缩信号的峰值旁瓣水平最低,为 -20 dB,较 LFM Barker、NLFM 和 Barker 脉冲压缩信号分别降低了约 5、6 和 10 dB。NLFM 检测脉冲压缩信号的 -6 dB 处主瓣宽度

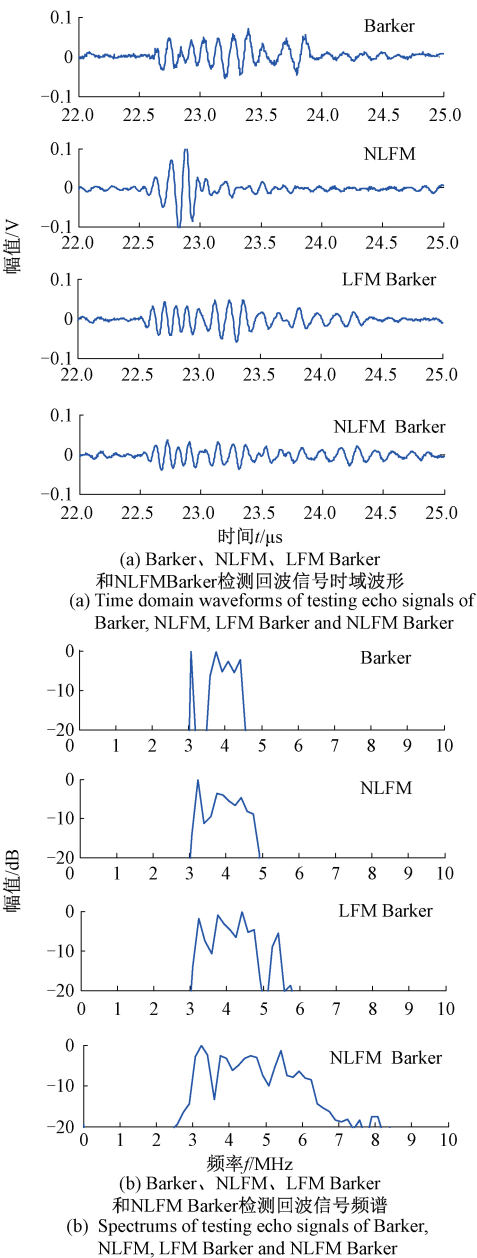


图8 实际检测回波信号时-频分布

Fig.8 Time-frequency distribution of real testing echo signal

最窄,为 0.13 μs ,NLFM Barker 次之,为 0.218 μs ,相差 0.088 μs 。综合分析可知,NLFM Barker 编码信号较 LFM Barker 和 NLFM 编码信号提高了 SNR 和距离分辨率,较 Barker 信号提高了距离分辨率。

4 种编码信号对五种缺陷的检测结果经 4 次平均后统计如表 1 所示。由表 1 对比分析可知,NLFM Barker 编码信号较 LFM Barker 和 NLFM 编码信号提高了 SNR 和距离分辨率,较 Barker 信号提高了距离分辨率,降低了噪声信号的干扰,实现了焊缝中裂纹、未焊透、未熔合、气孔和夹渣 5 种缺陷的检出检测,性能最优。

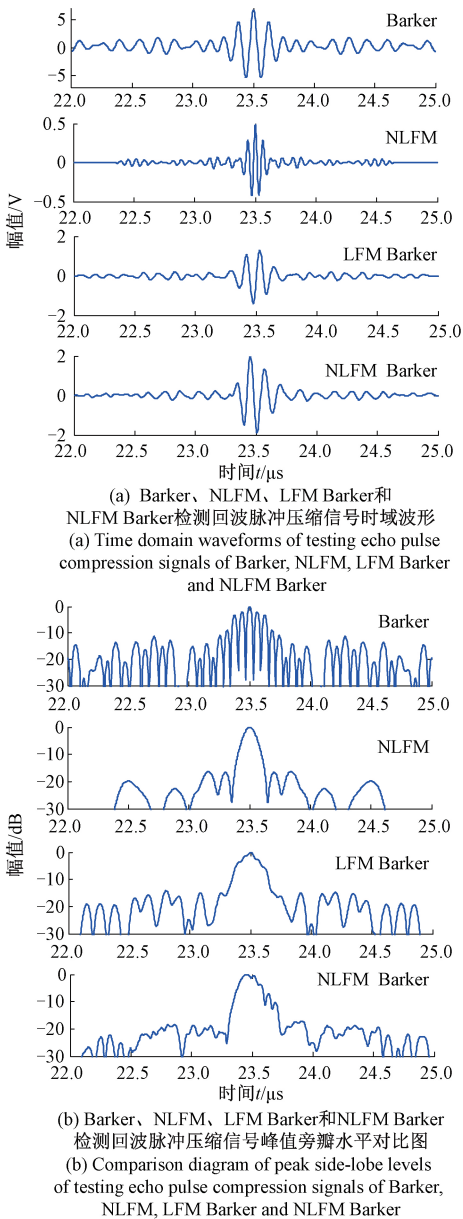


图9 实际检测回波信号脉冲压缩结果

Fig.9 Pulse compression results of real testing echo signal

表1 4种编码激励检测回波信号脉冲压缩结果

Table 1 Results of testing echo signal pulse compression using four types of coded excitation methods

		dB				
参数	缺陷编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
SNR	Barker	31.2	39.5	38.7	29.7	30.7
	NLFM	15.8	18.1	17.7	14.2	15.1
	LFM Barker	20.9	26.4	24.9	19.6	20.3
	NLFM Barker	25.5	31	30.1	25	26.2
峰值旁瓣水平	Barker	-14	-11.5	-13	-14	-15
	NLFM	-12.5	-14	-13.5	-15	-16
	LFM Barker	-18	-15	-15	-18.5	-22
	NLFM Barker	-23.5	-20	-18	-20	-25

4 结 论

通过引入非线性频率调制的 Barker 复合编码激励产生超声波,并对板材焊缝缺陷进行了检测。本文推导出了复合编码的数学模型,该模型是在超声传感器的幅频响应特性的基础上,利用三阶插值非线性拟合算法得到其非线性调频信号,再调制 Barker 码而产生的,具有探头自适应性。仿真与实测试验结果表明,该复合编码产生的超声波可以用于板材焊缝缺陷的检测,并全部检测出了焊缝中预设的裂纹、未焊透、未熔合、气孔和夹渣 5 种缺陷。相比于 LFM Barker 码和 NLFM 信号提高了 SNR,较 Barker 信号提高了距离分辨率,较 Barker、NLFM 和 LFM Barker 信号拓宽了频带,减小了噪声信号产生的干扰。该方法为焊缝中缺陷的检出提供了理论依据和参考。

参考文献

- [1] 胡宏伟, 张婕, 彭刚, 等. 基于 LBP-KPCA 特征提取的焊缝超声检测缺陷分类方法[J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 34-39, 162.
HU H W, ZHANG J, PENG G, et al. Classification of defects in ultrasonic detection of welds based on LBP-KPCA feature extraction[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 34-39, 162.
- [2] 邢海燕, 陈玉环, 李雪峰, 等. 基于动态免疫模糊聚类的金属焊缝缺陷等级记忆识别模型[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 225-232.
XING H Y, CHEN Y H, LI X F, et al. Hierarchical magnetic memory recognition model of metal weld defect based on dynamic immune fuzzy clustering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 225-232.
- [3] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 11-25.
ZHANG H, SONG Y N, WANG Y N, et al. Summary of non-destructive testing and evaluation techniques for rail defects[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 11-25.
- [4] 葛为民, 申耀华, 王肖锋. 箱梁结构件焊缝表面缺陷特征提取及分类研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 207-215.
GE W M, SHEN Y H, WANG X F. Feature extraction and classification of weld surface defects in box girder structures[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 207-215.
- [5] 陈朝雷. 超声检测在多形态焊缝缺陷识别中的应用研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2018.
CHEN CH L. Research on the application of ultrasonic detection in multi-form weld defect recognition [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2018.
- [6] 尹昱, 陈振华, 肖峰, 等. 不锈钢疲劳微损伤的非线性超声检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 68-73.
YIN Y, CHEN ZH H, XIAO F, et al. Non-linear ultrasonic testing method for fatigue microdamage of stainless steel [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2020, 34(1): 68-73.
- [7] DEQIANG Z, XIANG C, YAN D U, et al. Research on the crack detection of conductive components using pulsed eddy current thermography[J]. Instrumentation, 2017, 4(3): 59-68.
- [8] LEETANG K, HIRATA S, HACHIYA H. Selection on the combination of M-sequence codes in alternate transmission for extension of measurable distance[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(7): 076503.
- [9] SHI Q, LIU J, LIU W, et al. Barker-coded modulation laser thermography for CFRP laminates delamination detection[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 98: 55-61.
- [10] FAN Z, RUDLIN J, ASFIS G, et al. Convolution of Barker and Golay codes for low voltage ultrasonic testing[J]. Technologies, 2019, 7(4): 72.
- [11] CROUCH S C, CURRY J, BERG T, et al. Method and system for using square wave digital chirp signal for optical chirped range detection: U.S. Patent 10, 534, 084[P]. 2020-01-14.
- [12] HAORAN Z, FANKUO M, LIYAN Q. Parameter estimation of multi-component Chirp signal based on differential evolution[J]. Instrumentation, 2017, 4(2): 34-43.
- [13] 李燕, 何怡刚, 于文新, 等. 广义 S 变换多分量 LFM 信号检测及参数估计[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 2056-2062.
LI Y, HE Y G, YU W X, et al. Detection and parameter estimation of multi-component LFM signals based on GST[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(12): 2056-2062.
- [14] HUAN H, MANDELIS A, LIU L, et al. Application of linear frequency modulated laser ultrasonic radar in reflective thickness and defect non-destructive testing[J]. NDT&E International, 2019, (102): 84-89.
- [15] ROY T, MEENA D, PRAKASAM L G M. Efficient digital implementation of non linear frequency modulation for radar applications[C]. 2018 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), 2018: 1-4.
- [16] 李长征, 王锐. 巴克编码信号检测混凝土缺陷[J]. 工程勘察, 2013, 41(8): 83-86.
LI CH ZH, WANG R. Detecting concrete defects with Barker coding signals [J]. Engineering Investigation, 2013, 41(8): 83-86.

- [17] LI C, SHI F, ZHANG B. Research on LFM signals in steel materials[C]. 2012 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA). IEEE, 2012: 13-16.
- [18] 张佳莹. 基于线性调频技术的焊缝超声检测系统与方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHANG J Y. Ultrasonic detection system and method of welds based on linear frequency modulation technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [19] GAO C, LIN M. Sidelobe suppression method of linear frequency modulated pulse compression signal [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016(2): 10.
- [20] 张佳莹, 丛森, 刚铁, 等. 基于频率-相位编码信号激励的焊缝超声检测分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(7): 7-11, 41, 129.
ZHANG J Y, CONG S, GANG T, et al. Ultrasonic detection analysis of welds based on frequency-phase coded signal excitation [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(7): 7-11, 41, 129.
- [21] 丛森. 超声调频激励方法及奥氏体不锈钢焊缝缺陷检测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
CONG S. Research on ultrasonic frequency modulation excitation method and defect detection of austenitic stainless steel weld [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [22] 徐益初, 郝晓勤. 非线性调频脉冲信号的时域处理[J]. 现代雷达, 2014, 36(7): 30-33.
XU Y CH, HAO X Q. Time domain processing of nonlinear FM pulse signals [J]. Modern Radar, 2014, 36(7): 30-33.
- [23] LIU P, WANG X, ZOU L, et al. An ultra-low sidelobe suppression method about NLFM[C]. The Proceedings of the Third International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems, Springer, 2015: 311-318.
- [24] 徐飞. 基于 FPGA 的非线性调频信号脉冲压缩的实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
XU F. Implementation of pulse compression of nonlinear FM signal based on FPGA [D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [25] 宋寿鹏, 刘明宇. 基于二进制编码的管道缺陷超声检测方法研究[J]. 压电与声光, 2018, 40(6): 936-941.
SONG SH P, LIU M Y. Research on ultrasonic testing method of pipeline defects based on binary coding [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(6): 936-941.
- [26] 王侠, 王进军, 杨战社. 基于三次样条插值的非线性调频雷达信号设计[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 797-803.
WANG X, WANG J J, YANG ZH SH. Design of nonlinear FM radar signal based on cubic spline interpolation [J]. Journal of Shanxi University (Autonomous Science Edition), 2017, 40(4): 797-803.
- [27] 徐献瑜. Padé 逼近概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
XU X Y. An introduction to Padé approximation [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1990.
- [28] DEMIRLI R, SANIIE J. Model-based estimation of ultrasonic echoes. Part I: Analysis and algorithms [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2001, 48(3): 787-802.
- [29] FU J, WEI G, HUANG Q, et al. Barker coded excitation with linear frequency modulated carrier for ultrasonic imaging [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2014, 13: 306-312.
- [30] 傅娟. 医学超声成像中的编码激励技术及其性能优化的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
FU J. Research on coding excitation technology and performance optimization in medical ultrasound imaging [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.

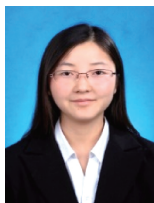
作者简介



宋寿鹏, 1990 年和 1995 年于中北大学分别获得学士学位和硕士学位, 2006 年于上海交通大学获得博士学位, 现为江苏大学仪器科学与工程系教授, 主要研究方向为智能检测与信息处理。

E-mail: songshoupeng@126.com.

Song Shoupeng received his B. Sc. degree and MSc. degree both from North University of China in 1990 and 1995, respectively, and received his Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2006. He is currently a professor in the Department of Instrument Science and Engineering at Jiangsu University. His main research interests include intelligent detection and information processing.



乔梦丽, 2016 年于辽宁石油化工大学信息控制工程学院测控技术与仪器系获得工学学士学位。现为江苏大学硕士研究生, 主要研究方向为系统检测与智能控制。

E-mail: 1747731794@qq.com

Qiao Mengli received her B. Sc. degree from the Department of Measurement and Control Technology and Instrument in the School of Information Control Engineering from Liaoning University of Petroleum and Chemical Technology in 2016. She is currently a M. Sc. candidate at Jiangsu University. Her main research interests include the system detection and intelligent control.