

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412511

表面波相控变频电磁声传感器的研制*

何存富¹,王永慷²,高杰¹,张义政²,吕炎¹

(1.北京工业大学信息学部 北京 100124; 2.北京工业大学机械与能源工程学院 北京 100124)

摘要:电磁声传感器(EMAT)因其具有非接触、可设计性强等优势,在无损伤检测领域得到了广泛的应用。目前,大多数EMAT只能在固定频率下激发超声波,限制了传感器的应用范围,为此,提出了一种新型相控变频电磁超声传感器(PC-FC-EMAT),通过调控传感器激励信号的相控时延,可达到变频激励的目的。首先,提出了PC-FC-EMAT的设计方案,建立了PC-FC-EMAT的频域响应模型,揭示了洛伦兹力空间响应下相控时延对频域响应的作用机理;其次,建立了PC-FC-EMAT多物理场耦合仿真模型,研究了相控时延对PC-FC-EMAT时域及频域响应的作用规律,仿真验证了相控时延对PC-FC-EMAT频率响应的调控作用;最后,研制了PC-FC-EMAT,并开展实验研究。实验结果表明,所研制的PC-FC-EMAT可实现4~12 mm的波长调控,频带范围覆盖252~687 kHz,满足设计要求。

关键词:电磁声传感器;相控变频;表面波;时间延迟

中图分类号: TB551 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Development of surface wave phase-controlled frequency-conversion electromagnetic acoustic transducer

He Cunfu¹, Wang Yongkang², Gao Jie¹, Zhang Yizheng², Lyu Yan¹

(1. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Electromagnetic acoustic transducer (EMAT) has been widely used in the field of nondestructive testing due to its advantages of non-contact and designability. At present, most EMATs can only excite ultrasonic waves at a fixed frequency, which limits the application range of the transducer. To address this issue, this article proposes a new type of phase-controlled frequency-conversion EMAT (PC-FC-EMAT), which can achieve the purpose of variable-frequency excitation by adjusting the phase-control time delay of the transducer's excitation signal. Firstly, the design scheme of PC-FC-EMAT is proposed, the frequency domain response model of PC-FC-EMAT is formulated, and the mechanism of the phase-controlled time delay on the frequency domain response under the spatial response of the Lorentz force is revealed. Secondly, a multi-physics field coupling simulation model of PC-FC-EMAT is established to study the role of the phase-controlled delay on the PC-FC-EMAT time and frequency domain response, and simulate the modulation effect of the phase-controlled delay on the frequency response of PC-FC-EMAT. Finally, PC-FC-EMAT is developed, and experimental research is carried out. The experimental results show that the developed PC-FC-EMAT can achieve wavelength regulation in the range of 4~12 mm, and the frequency band covers 252~687 kHz, which meets the design requirements.

Keywords: electromagnetic acoustic sensor; phase-controlled frequency conversion; surface wave; time delay

0 引言

表面波是一种沿物体表面传播的弹性波,波的穿透

深度大致为一个波长^[1],具有衰减小,传播距离长等优点,在无损伤检测领域得到了广泛的应用。根据换能机理的不同,超声表面波的激励方式主要有两种,分别为基于压电原理的表面波压电换能器和基于电磁感应原理的

电磁声传感器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT)。其中,压电传感器^[2-3]具有能量转换效率高、信噪比高的特点,但是在使用时需要创造良好的耦合条件。而 EMAT 一方面具有无需耦合的优点。另一方面因为 EMAT 可设计性强(通常由永磁体(引入静态磁场)和线圈(通脉冲电流,引入动态磁场)组成^[4-6])。通过优化设计线圈和磁体的配置模式,可以激发出不同的波形,包括表面波^[7]、体波^[8]和导波^[6]等。

目前,在表面波 EMAT 的研制方面,国内外多位学者已开展了一些研究。邓鹏等^[7]通过优化回折线圈参数,提高了缺陷定量检测的准确性。Pei 等^[9]提出了一种新型磁铁阵列结构,将表面波信号的信噪比提高了 5.3 倍。Tkocz 等^[10]研究了线圈宽度对表面波信号的影响,研究表明当线圈宽度等于表面波半波长时,所激发的表面波幅值最大。总体来说,目前绝大多数表面波 EMAT 均采用回折线圈结构^[11-13],通过多周期回折线圈激励表面波进行叠加,以提升表面波信号的强度。但是回折线圈 EMAT 产生的波长由线圈间距决定,只能激发固定中心频率的表面波信号^[14]。

在实际检测过程中,存在诸多场景需要表面波的变频激励,以期实现不同深度下应力及缺陷的层析检测。显然,传统表面波传感器在变频激励时需要频繁更换传感器,这将严重影响信号的一致性,并极大降低检测效率。为此,本文提出了一种新型相控变频电磁声传感器 (phase-controlled frequency-conversion EMAT, PC-FC-EMAT)。该传感器使用多个线性单线圈组成的线圈阵列。阵列的布局类似于传统的回折线圈设计,但每个线圈都是独立的,并且由多通道激励系统单独控制。通过控制每个线圈的激发时间来控制表面波波长,这克服了传统回折线圈激发频率单一的不足。

1 PC-FC-EMAT 概念设计

目前,回折线圈型 EMAT 是表面波 EMAT 的常见结构形式,其主要由永磁体、回折线圈和待测试件三部分组成^[15]。传统回折线圈 EMAT 的结构示意图如图 1(a)所示。如图 1(b)和(c)所示,当传感器工作时,通电线圈在待测试件表面产生感应电流,感应电流在静态磁场的作用下产生洛伦兹力。进一步,洛伦兹力带动质点振动产生表面波(图 1(d)),其中,表面波的波长为相邻两根导线物理间距的 2 倍^[7],即:

$$\lambda = 2d_p \tag{1}$$

式中: d_p 是线圈的物理间距; λ 是超声表面波的波长。

从式(1)可以看出,传统电磁声表面波传感器的激励波长受回折线圈的几何参数决定。当线圈结构确定,则只能激发出固定波长的表面波信号。当需要激励不同波长

的表面波时,则需要更换不同线圈结构的传感器。这极大地增加了检测工作的繁琐性,且不同波长传感器的一致性很难保证,这给有效信号的识别与处理带来了很大的挑战。

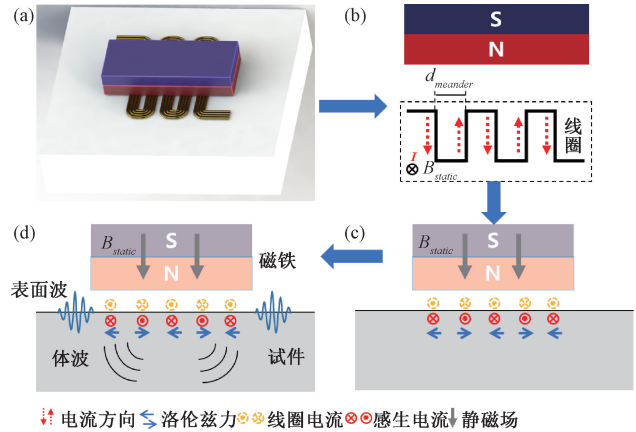


图 1 回折线圈 EMAT 洛伦兹力产生及表面波传播示意图
Fig. 1 Diagram of EMAT Lorentz force generation and surface wave propagation

为了突破传统回折线圈表面波 EMAT 的局限性,本文提出了一种相控变频表面波 EMAT 的设计方案,如图 2 所示,该传感器主要由永磁体和线圈阵列组成,其中,线圈阵列包括 4 路可以独立工作的线性单线圈,并等间距的缠绕在永磁体的固定位置。当传感器工作时,通过高能多通道相控激励系统单独控制各个线圈的激励时延,从而实现线圈等效间距的自主调控,以此达到表面波变频变波长激励的目的。

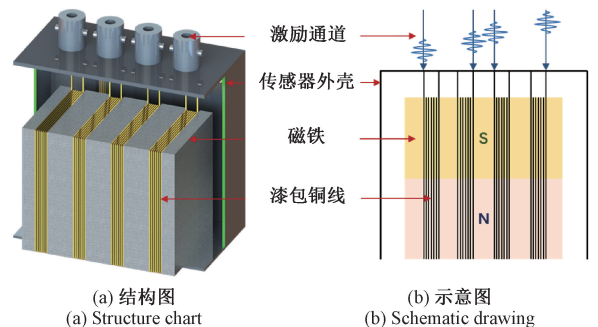


图 2 PC-FC-EMAT 结构示意图
Fig. 2 Diagram of PC-FC-EMAT structure

相控时延对线圈等效间距的调控过程如图 3 所示。当 PC-FC-EMAT 工作时,通过多通道相控系统,以一定的时间延时 τ ,依次控制线圈阵列中各个线圈按顺序激活。线圈 1 在时间 $t=0$ 激活,线圈 2 在时间 $t=\tau$ 激活,线圈 3 在时间 $t=2\tau$ 激活,线圈 4 在时间 $t=3\tau$ 激活。线圈 1 产生的表面波会在线圈 2 被激活之前靠近线圈 2,从而使得表面波向右传播时线圈之间的等效间距变小。

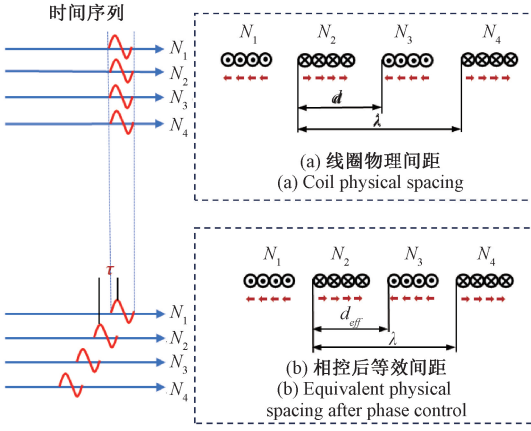


图3 相控时延对线圈等效间距的调控作用

Fig. 3 Phase-controlled time delay modulation of coil equivalent spacing

通过这种相位调节过程,可以改变线圈之间的等效间距 d_e , 以此获得不同波长的表面波, 线圈等效间距与相邻线圈的相控时延之间的关系满足:

$$\tau = \frac{d_p - d_e}{c_R} \quad (2)$$

式中: c_R 为表面波的波速。

2 PC-FC-EMAT 频域响应理论建模

基于洛伦兹力空间分布函数,建立了 PC-FC-EMAT 的频域响应理论模型,理论分析了相控时延对传感器频率响应的调控作用。

对于具有单线圈的 EMAT,在静态磁场及感生涡流的作用下,其洛伦兹力空间分布满足矩形窗函数模型^[16],如图4所示,公式为:

$$F(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq a/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $F(x)$ 为洛伦兹力; x 为空间位置坐标; a 为线圈宽度。

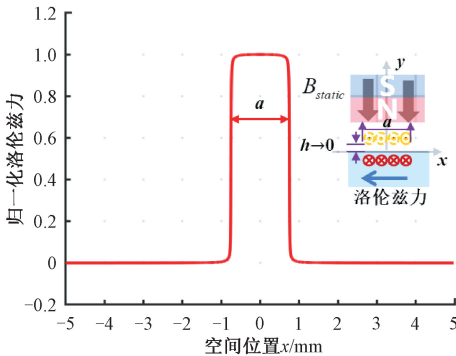


图4 单线圈 EMAT 的洛伦兹力空间响应

Fig. 4 Spatial response of the Lorentz force for a single coil EMAT

根据线性单线圈的洛伦兹力分布模型,进一步将其扩展为线圈阵列,如图5所示,在无延时激励的情况下,线圈的物理间距与线圈的等效间距相等,线圈阵列的洛伦兹力空间分布模型为:

$$F(x) = \sum_{n=1}^N (-1)^n \times \left[\text{rect} \left(\frac{x - \left(n - \frac{1}{2}\right) d_e}{a} \right) - \text{rect} \left(\frac{x + \left(n - \frac{1}{2}\right) d_e}{a} \right) \right] \quad (4)$$

其中, $\text{rect}(x)$ 为矩形窗函数:

$$\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq a/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: N 为线圈对数; d_e 为线圈等效间距。

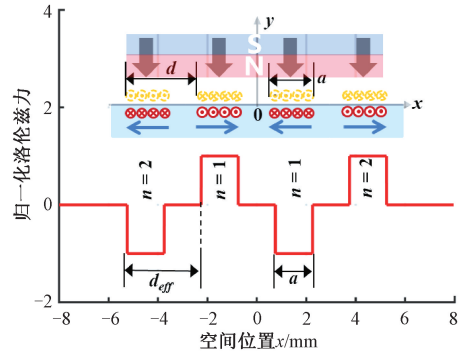


图5 线圈阵列 EMAT 的洛伦兹力空间响应

Fig. 5 Spatial response of Lorentz force for EMAT with coil array

对洛伦兹力空间分布函数进行傅里叶变换,可得到洛伦兹力的波数域分布模型:

$$\hat{F}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) e^{-ikx} dx = -4d_e i \sin\left(\frac{1}{2}ka\right) \times \sum_{n=1}^N (-1)^n \left\{ \left(n - \frac{1}{2}\right) \text{sinc} \left[\left(n - \frac{1}{2}\right) kd_e \right] \right\} \quad (6)$$

式中: k 为表面波的波数。对于非频散的表面波,其波数可以展开为频率和波速的函数:

$$k = \frac{2\pi f}{c_R} \quad (7)$$

式中: f 为表面波的频率。

将式(7)代入式(6)可得到阵列线圈洛伦兹力分布的频域分布模型:

$$g(f) = -2d_e i \sin\left(\frac{\pi a f}{c_R}\right) \times \sum_{n=1}^N \left\{ (-1)^n (2n-1) \text{sinc} \left[(2n-1) \frac{\pi d_e f}{c_R} \right] \right\} \quad (8)$$

将式(8)进行取模运算,可得到阵列线圈洛伦兹力分布幅值谱模型:

$$|g(f)| = \alpha(d_e) D(f, a) H(f, d_e, N) \quad (9)$$

其中:

$$\alpha(d_e) = 2d_e \quad (10)$$

$$D(f, a) = \left| \sin\left(\frac{\pi a f}{c_R}\right) \right| \quad (11)$$

$$H(f, d_e, N) = \left| \sum_{n=1}^N \left\{ (-1)^n (2n-1) \operatorname{sinc}\left[(2n-1) \frac{\pi d_e f}{c_R}\right] \right\} \right| \quad (12)$$

式中: $\alpha(d_e)$ 与线圈间距线性相关; $D(f, a)$ 被定义为线圈宽度 a 的线圈的空间响应; $H(f, d_e, N)$ 是线圈阵列的空间响应, 取决于频率、线圈等效间距和线圈对的数量。

由式(11)和(12)可知, $D(f, a)$ 和 $H(f, d_e, N)$ 均随频率变化表现出周期性波动。其中, $D(f, a)$ 的周期为 c_R/a 。当频率 $f_p^D = (2m+1)c_R/2a$, $D(f, a)$ 函数存在极大值。对于 $H(f, d_e, N)$ 函数, 其周期取决于 d_e 和 N 。当 $d_e = a = 1.5 \text{ mm}$, $c_R = 2940 \text{ m/s}$ 时, 线圈对数 N 对 $H(f, d_e, N)$ 函数的调控作用如图 6 所示。从图 6 可以发现, 随着 N 的增加, 函数峰值变得更尖锐, 此时, 传感器的能量在频域上更集中。同时, 还可以发现, 阵列线圈存在多个峰值频率点, 其中, 第 1 个非零峰值频率的能量最高, 为阵列线圈实际工作时工作频率 f_p 。

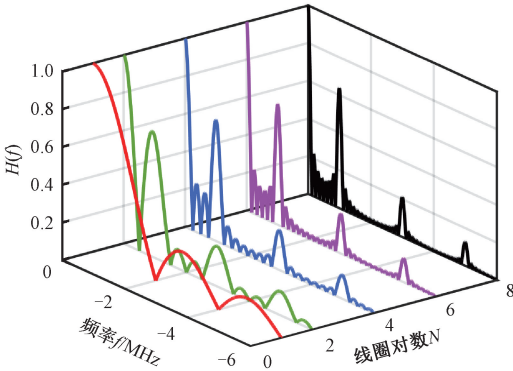


图 6 线圈对数对 $H(f, d_e, N)$ 的调控作用

Fig. 6 Modulation of $H(f, d_e, N)$ by coil logarithms

由式(10)可知, $\alpha(d_e)$ 函数与频率无关, 因此, PC-FC-EMAT 的频率响应取决于 $D(f, a)$ 和 $H(f, d_e, N)$ 的乘积。当 $N=1$ 时, 进一步研究了线圈等效间距 d_e 对 PC-FC-EMAT 频域响应的调控作用, 如图 7 所示, 可以发现, 随着线圈间距的增大, 传感器的中心频率逐渐向低频处偏移。

由式(2)可知, PC-FC-EMAT 的线圈等效间距可以通过时间延时因子控制。将式(2)代入式(8)可得到 PC-FC-EMAT 频域响应模型:

$$g(f, \tau) = -2(d - \tau c_R) \operatorname{isinc}\left(\frac{\pi a f}{c_R}\right) \times \sum_{n=1}^N \left\{ (-1)^n (2n-1) \times \operatorname{sinc}\left[(2n-1) \frac{\pi(d - \tau c_R)}{c_R} f\right] \right\} \quad (13)$$

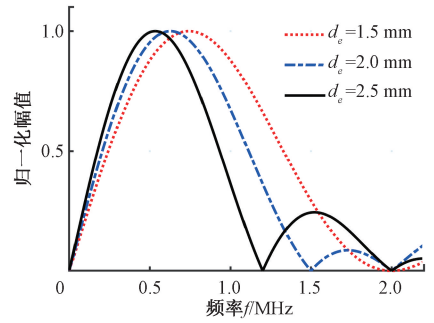


图 7 不同线圈间距下的频域响应

Fig. 7 Frequency domain response with different coil spacing

由式(13)可得相控时延对频率及波长的调控示意图, 如图 8 所示, 随着相控时延 τ 的增大, 传感器中心频率非线性增大、激发表面波的波长线性降低。

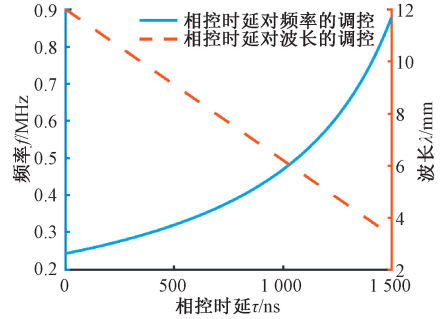


图 8 相控时延对频率及波长的调控作用

Fig. 8 Modulation of frequency and wavelength by phase-controlled time delay

3 PC-FC-EMAT 仿真分析

PC-FC-EMAT 的仿真过程涉电场、磁场及力场的多场耦合问题。在本节中, 基于 COMSOL Multiphysics 软件, 建立了传感器的多物理场仿真模型, 并仿真研究了相控时延对 PC-FC-EMAT 的频率响应特性的调控作用, 验证了传感器的相控变频激励能力。

3.1 PC-FC-EMAT 传感器仿真建模

使用 COMSOL Multiphysics 建立 PC-FC-EMAT 二维有限元模型, 其仿真建模流程如图 9 所示, 包括几何建模、参数定义、多物理场耦合、求解器设置。

仿真模型的几何结构主要包括永磁铁、线圈阵列、铝合金试件和空气域 4 个基本组成部分, 如图 10 所示, 其中, 各部分结构的关键参数如表 1 所示。设置空气域是为了模拟真实环境中的电磁声学工作环境。在铝板底部及两侧设置低反射边界, 能够有效减少界面反射回波的干扰。仿真建模的主要目的为洛伦兹力的引入,

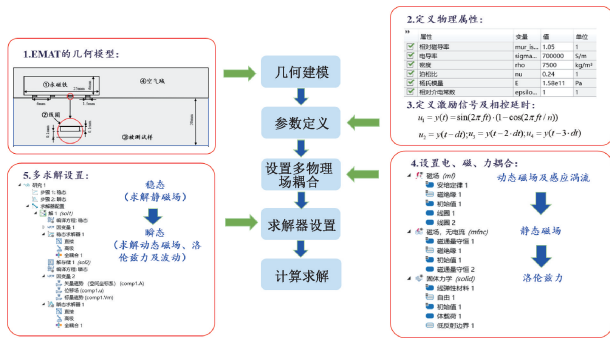


图9 仿真建模流程

Fig. 9 Flowchart of simulation modeling

而洛伦兹力的产生过程是由电场、磁场及力场相互作用耦合形成的结果,其中,永磁铁会产生垂直偏置磁场,施加交流电的线圈放置于铁磁试样表面时,就会形成电磁场并渗透入材料,当一个电场施加于一个导电材料,则会产生感生涡流,在与垂直偏置磁场的作用下形成洛伦兹力:

$$F_x = J_y \times B_z \quad (14)$$

式中: J_y 为感生涡流; B_z 为静磁场。

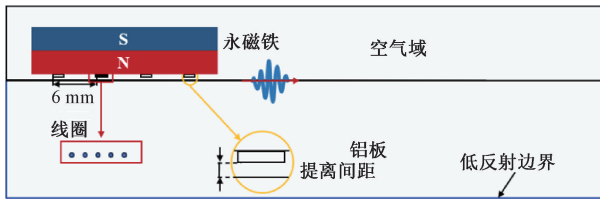


图10 几何模型示意图

Fig. 10 Geometric model diagram

表1 属性参数

Table 1 Property parameters

参数	数值	参数	数值
磁铁尺寸/mm ²	25×6	铝合金尺寸/mm ²	130×30
剩余磁通密度/T	1	铝电导率/(S·m ⁻¹)	3.774×10 ⁷
线圈间距/mm	6	铝相对磁导率	1
线圈宽度/mm	1.5	铝泊松比	0.33
线圈个数	4	铝弹性模量/Pa	7×10 ¹⁰
线圈匝数	5	空气域尺寸/mm ²	130×10

基于所建立的仿真模型,首先仿真研究了无相控延时条件下,PC-FC-EMAT的超声波激发特性。根据线圈的物理间距,结合表面波频率与波长的对应关系 $\lambda = c_R/f$, 选择中心频率为0.245 MHz的汉宁窗调制的3周期正弦信号为激励信号,激励信号的时域和频域波形如图11所示。为了分析不同波传播距离下的表面波传播特征,提取了4个波传播路径上的面内位移特征,分别距离传感器右边缘40、60、80和100 mm,4个接收点处采集到的表面波信号如图12所示。

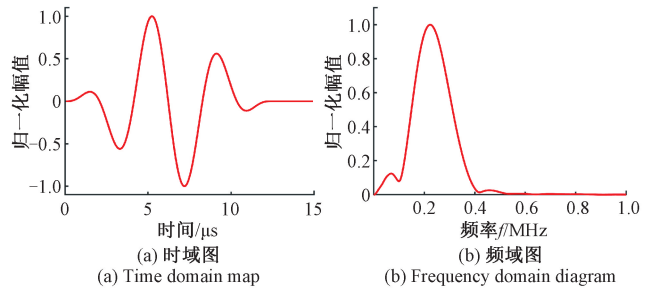
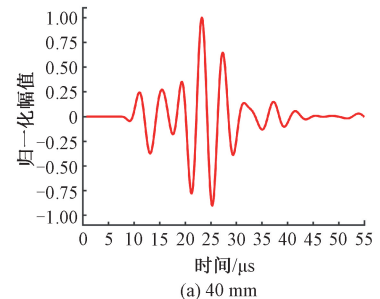
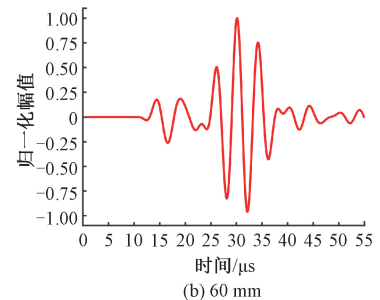


图11 激励信号

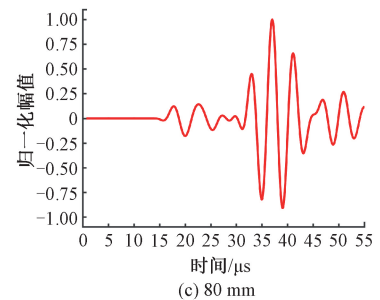
Fig. 11 Excitation signal



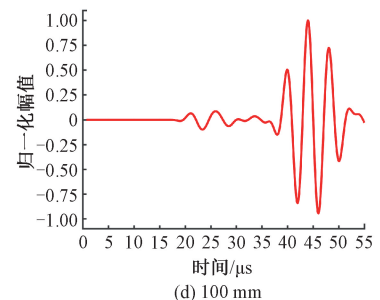
(a) 40 mm



(b) 60 mm



(c) 80 mm



(d) 100 mm

图12 不同接收点处的时域波形

Fig. 12 Time-domain waveforms at different reception points

从图 12 可以发现,在试件表面存在两种类型的超声波,分别为表面波和掠面纵波。随着传播距离的增加,表面波和掠面纵波从耦合状态到逐渐分离,当传播距离为 100 mm 时,两者完全分离,图 12(d)中,虚线框图中为掠面纵波信号,实线框图中为表面波信号。为了避免掠面纵波的耦合效应,后续取用 100 mm 接收点处的信号进行分析。

3.2 相控时延对 PC-FC-EMAT 频响特性的调控作用

基于所建立的仿真模型进一步探究了相控时延对 PC-FC-EMAT 频响特性的调控作用。传感器的线圈间距和线圈宽度分别控制激励信号的最大波长和最小波长,其中,所建立的仿真模型可以实现 12~3 mm 的波长变化,根据传感器的波长调控范围,等间距的选择了 5 种波长信号,分别为 12、10、8、6 和 4 mm,由式(1)和(2)可知,每种表面波波长对应的相控时延激励工况分别为 0、340、680、1 020 和 1 360 ns。5 种工况下的表面波时域仿真云图如图 13 所示。从图 8 可以发现,随着相控时延的增大,超声表面波的波场能量分布逐渐趋于表面,这意味着表面波的波长会随着相控时延的增大而逐渐减小,这与前期理论模型所得出的结论一致。

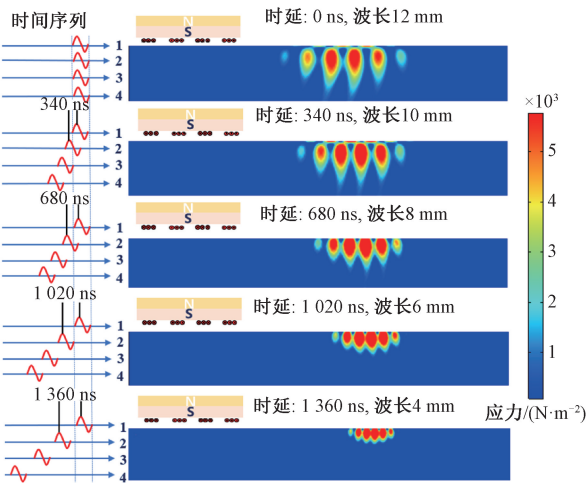


图 13 不同相控时延下的仿真云图

Fig. 13 Simulation cloud for different phase control time delays

为了更为直观的观察不同相控延时下的表面波的波形特征,提取了距离 PC-FC-EMAT 右边缘 100 mm 处的介质表面波信号,如图 14 所示。从图 14 可以发现,PC-FC-EMAT 可以激发出纯净的表面波,且随着相控时延的增大,表面波信号的时域宽度逐渐减小,这意味着表面波的波长随着相控时延的增大而逐渐减小。

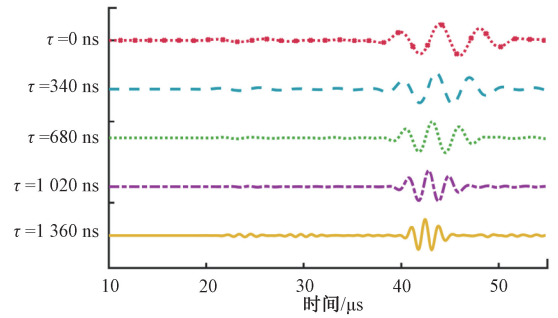


图 14 不同相控时延下的时域波形

Fig. 14 Time domain waveform under different phase-controlled delay

进一步,对不同相控时延下的时域波形进行傅里叶变换,获得不同相控时延下 PC-FC-EMAT 的频响特性,如图 15 所示。可以发现,随着相控时延的增大,PC-FC-EMAT 的中心频率逐渐向高频处偏移。通过提取不同相控时延下的峰值频率,并与理论结果进行对比,如图 16 所示,可以发现两者吻合良好。综上所述,PC-FC-EMAT 的相控调频特性为进一步开展传感器的实验研究奠定了基础。

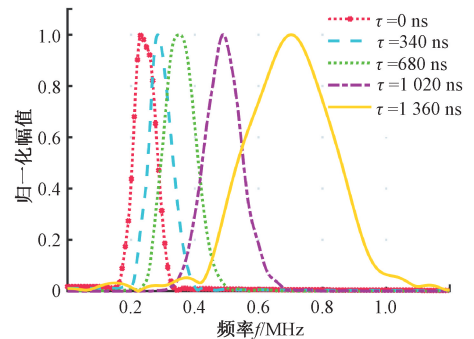


图 15 不同相控时延下的频域信号

Fig. 15 Frequency domain signals with different phase delay

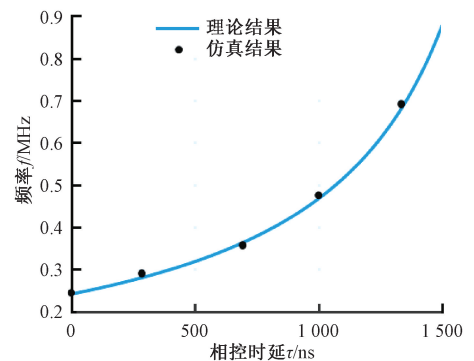


图 16 理论结果与仿真结果对比

Fig. 16 Comparison of theoretical and simulation results

4 PC-FC-EMAT 实验分析

基于上述理论建模及仿真分析结果,进一步研制了PC-FC-EMAT,并实验研究了传感器的相控调频特性。

4.1 PC-FC-EMAT 研制及实验系统搭建

本文研制的PC-FC-EMAT如图17所示。传感器主要由4部分构成,分别为矩形永磁体、线圈阵列、传感器外壳和BNC接头。其中,永磁铁采用N52型钕铁硼磁铁,这种磁铁可以产生高达1.4 T的磁场,以保证传感器的换能效率。磁铁的尺寸为21 mm×15 mm×10 mm,磁极方向为高度方向。线圈阵列由4个可以独立工作的线性单线圈构成,相邻线性单线圈间距为6 mm,每个线性单线圈由7匝导线组成,导线直径为0.2 mm,线性单线圈宽度为1.5 mm。每个线圈分别与其对应的BNC接头连接,保证每个线圈激励信号的相位独立可控。

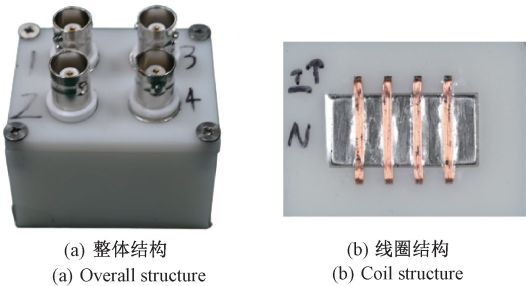


图 17 PC-FC-EMAT 实物
Fig. 17 PC-FC-EMAT actual picture

PC-FC-EMAT 的实验系统如图 18 所示,该系统主要由 5 部分组成,分别为①PC-FC-EMAT、②压电角声束表面波接收传感器、③数字示波器、④自研高能多通道相控激励系统和⑤铝合金待测试样。其中,PC-FC-EMAT 与压电角声束表面波接收传感器的间距为 100 mm。实验过程中,通过自研的高能多通道相控激励系统依次相控

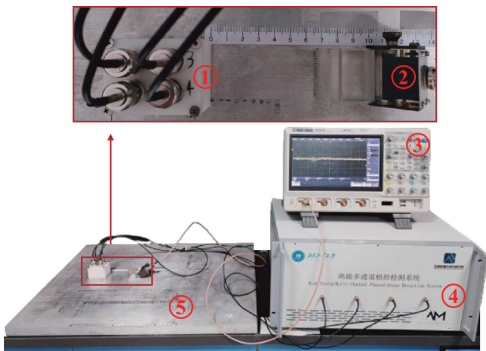


图 18 PC-FC-EMAT 实验系统
Fig. 18 PC-FC-EMAT experimental system

激励 PC-FC-EMAT 线圈阵列的各个线圈,并在试样表面产生表面波信号,表面波传播一段路径后被压电角声束表面波接收传感器接收,并显示在数字示波器上。

为了验证 PC-FC-EMAT 实验系统的可行性,首先研究了无时延激励下 PC-FC-EMAT 的时域及频域响应特性。当对各个线圈无时延激励时,传感器线圈的等效间距与物理间距相等,此时传感器所能激发的表面波的理论波长为 12 mm,理论中心频率为 245 kHz。PC-FC-EMAT 的时域及频域响应的实际测量结果如图 19 所示。从图 19(a)可以发现,测量信号的零点处存在电磁串扰信号,在约为 46 μs 处出现表面波信号。通过对表面波信号进行截取,并做傅里叶变换,得到表面波信号的幅值谱,由图 19(b)可以发现,表面波信号的实测峰值频率为 250 kHz,该频率与无时延激励下 PC-FC-EMAT 的理论中心频率基本一致。

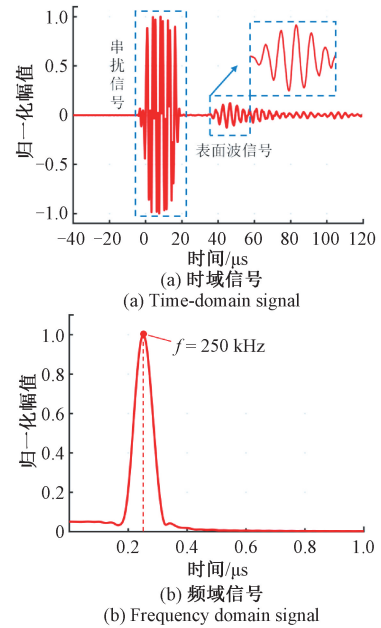


图 19 无时延激励下的时域和频域响应
Fig. 19 Time-domain and frequency-domain response under no-delay excitation

4.2 PC-FC-EMAT 相控调频特性实验研究

基于所建立的实验系统,进一步实验探究了相控时延对 PC-FC-EMAT 频响特性的调控作用。

在这里考虑了 5 种相控时延激励工况,分别为 0、340、680、1 020 和 1 360 ns,5 种时延工况对应的表面波的理论波长分别为 12、10、8、6 和 4 mm,理论中心频率分别为 245、294、367.5、490 和 735 kHz。不同相控时延下测得的表面波时域信号如图 20 所示,可以看出,随着相控时延的增大,表面波信号的波长逐渐变短。

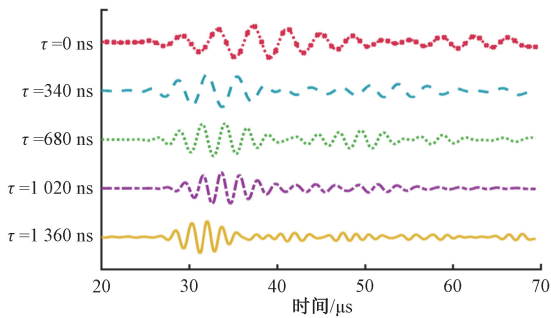


图20 不同相控时延下的时域波形

Fig. 20 Time-domain waveforms with different phase-controlled time delays

进一步对表面波时域信号进行傅里叶变化,获得不同相控时延下的PC-FC-EMAT频响特性,如图21所示。可以发现,随着相控时延的增大,表面波中心频率逐渐向高频偏移,5种相控时延所对应的表面波信号的中心频率分别为252、294、380、481、687 kHz。可以发现实验中心频率与理论中心频率基本一致,最大相对误差仅为6.5%。

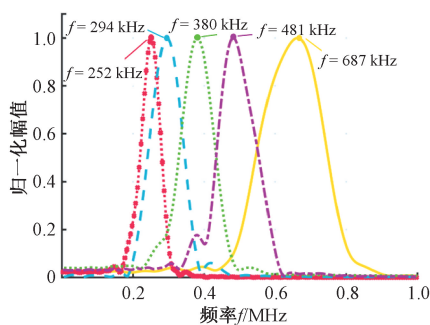


图21 不同相控时延下的频域波形

Fig. 21 Frequency domain waveforms with different phase control time delays

误差存在的原因可能是由于如下两个方面的因素:

1) 所研制的高能多通道相控激励系统的相控时延精度为10 ns,会带来一定的相控时延误差;2) 传感器线圈阵列之间的尺寸误差。未来,将通过进一步优化传感器制作工艺,并提升相控激励系统的时延精度提升PC-FC-EMAT传感器的相控变频控制精度。整体来说,所研制的PC-FC-EMAT能够通过改变相控时延实现表面波的变频激励,为基于变频表面波技术的应力梯度及缺陷深度的层析检测提供了重要测试手段。

5 结 论

本文研制了一种新型表面波相控变频电磁超声传感器,该传感器主要由永磁铁和线圈阵列组成,通过控制各

个线圈激励信号的相控时延,可以实现表面波信号的波长的调控,达到变频激励的目的,得出如下结论。

1) 提出了相控变频表面波EMAT的设计方案,并建立了PC-FC-EMAT频域响应理论模型,揭示了相控时延对PC-FC-EMAT频率响应的调控机理,为PC-FC-EMAT的研制奠定了理论基础。

2) 建立了PC-FC-EMAT多物理场耦合仿真模型,仿真研究了相控时延对PC-FC-EMAT时域及频域响应的规律,研究发现,随着相控时延的增大,PC-FC-EMAT的中心频率逐渐向高频处偏移,通过理论与仿真结果的对比,验证了模型的准确性。

3) 在理论和仿真研究的基础上,进一步研制了PC-FC-EMAT,并实验研究了传感器的相控调频特性,实验结果表明,所研制的PC-FC-EMAT可以实现对4~12 mm波长范围内表面波的相控变频激励,最大相控变频误差仅为6.5%,验证了相控时延对频率的调控作用。该传感器为未来进一步发展基于变频表面波的层析检测技术提供了重要手段。

参考文献

- [1] 何存富,邓鹏,吕炎,等.一种高信噪比电磁声表面波传感器及在厚壁管道检测中的应用[J].机械工程学报,2017,53(4):59-66.
HE C F, DENG P, LYU Y, et al. A high signal-to-noise ratio electromagnetic surface acoustic wave sensor and its application in thick wall pipeline detection[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 59-66.
- [2] 何存富,赵华民,吕炎,等.基于PZT的新型柔性梳状表面波传感器研究[J].仪器仪表学报,2017,38(7):1675-1682.
HE C F, ZHAO H M, LYU Y, et al. Research on a new flexible comb-shaped surface wave sensor based on PZT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1675-1682.
- [3] 赵华民,何存富,吕炎.基于压电复合材料的梳状柔性宽带表面波传感器有限元设计[J].仪表技术与传感器,2019(6):1-7.
ZHAO H M, HE C F, LYU Y. Finite element design of comb-like flexible wideband surface wave sensor based on piezoelectric composites[J]. Instrument Technology and Sensor, 2019(6): 1-7.
- [4] THOMPSON R B. Physical principles of measurements with EMAT transducers[J]. Physical Acoustics, 1990, 19: 157-200.
- [5] HIRAOM O. Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements Using EMATs[M]. Berlin: Springer, 2017.

- [6] GUO X, ZHU W, QIU X, et al. A lorentz force EMAT design with racetrack coil and periodic permanent magnets for selective enhancement of ultrasonic lamb wave generation[J]. *Sensors*, 2022, 23(1): 96.
- [7] 邓鹏, 何存富, 吕炎, 等. 回折线圈导线长度对表面波 EMAT 性能及缺陷检测的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44(5): 665-671.
DENG P, HE C F, LYU Y, et al. Effect of traverse length on Surface wave EMAT Performance and Defect detection [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018, 44(5): 665-671.
- [8] 石文泽, 陈巍巍, 卢超, 等. 基于脉冲压缩技术的金属锻件缺陷跑道线圈 EMAT 检测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(2): 86-97.
SHI W Z, CHEN W W, LU CH, et al. Research on EMAT detection method of metal forging defective runway coil based on Pulse compression technology [J]. *Instrument Technology and Sensor*, 2021, 42 (2): 86-97.
- [9] PEI C X, ZHAO S Q, XIAO P, et al. A modified meander-line-coil EMAT design for signal amplitude enhancement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 247: 539-546.
- [10] TKOCZ J, DIXON S. Electromagnetic acoustic transducer optimisation for surface wave applications[J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 102142.
- [11] 胡松涛, 石文泽, 卢超, 等. 钢轨踏面裂纹电磁超声表面波同步挤压小波快速成像检测研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(1): 35-46.
HU S T, SHI W Z, LU CH, et al. Rapid imaging detection of rail tread cracks by electromagnetic ultrasonic surface wave synchronized extrusion wavelet[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(1): 35-46.
- [12] XIE Y, LIU Z, YIN L, et al. Directivity analysis of meander-line-coil EMATs with a wholly analytical method[J]. *Ultrasonics*, 2017, 73: 262-270.
- [13] KANG L, DIXON S, WANG K, et al. Enhancement of signal amplitude of surface wave EMATs based on 3-D simulation analysis and orthogonal test method[J]. *NDT & E International*, 2013, 59: 11-17.
- [14] THRING C B, HILL S J, DIXON S, et al. The effect of EMAT coil geometry on the Rayleigh wave frequency behaviour[J]. *Ultrasonics*, 2019, 99: 105945.
- [15] JIAN X, DIXON S, EDWARDS R S, et al. Coupling

mechanism of an EMAT [J]. *Ultrasonics*, 2006, 44: 653-656.

- [16] XIANG L, GREENSHIELDS D, DIXON S, et al. Phased electromagnetic acoustic transducer array for Rayleigh wave surface defect detection [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(7): 1403-1411.

作者简介



何存富, 1985 年于太原工业大学获得学士学位, 1990 年于华中理工大学获得硕士学位, 1996 年于清华获得博士学位, 现为北京工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机械测试理论、方法及技术、超声无损检测新技术、传感器测试技术。

E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn

He Cunfu received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 1985, M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1990, and Ph. D. degree from Tsinghua University in 1996. He is currently a professor and a Ph. D. supervisor at Beijing Institute of Technology. His main research interests include mechanical testing theories, methods, and technologies, new ultrasonic nondestructive testing technologies, and sensor testing technologies.



王永慷, 2021 年于山东理工大学获得学士学位, 现为北京工业大学硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测技术。

E-mail: wyk1205047279@emails.bjut.edu.cn

Wang Yongkang received his B. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2021. He is currently a M. Sc. candidate at Beijing Institute of Technology. His main research interest is ultrasonic nondestructive testing technology.



高杰(通信作者), 2016 年于安阳工学院获得学士学位, 2022 年于北京工业大学获得博士学位, 现为北京工业大学讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为超声无损检测。

E-mail: gaojie@bjut.edu.cn

Gao Jie (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Anyang Institute of Technology in 2016, and Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2022. He is currently a lecturer and a M. Sc. supervisor at Beijing Institute of Technology. His main research interest is ultrasonic nondestructive testing.