

电磁声实验平台的研制与实验研究^{*}

冷 涛 李明轩 黄振俨 王小民

(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)

2008 年 12 月 24 日收到

2009 年 4 月 15 日定稿

摘要 研制了一个多功能的电磁声实验平台,在此实验平台,进行了“减小盲区”、“钢层下多层橡胶层脱粘检测”、“线性调频脉冲压缩”等方面的实验研究。实验结果表明,该平台可精确控制实验参数,提供单一频率脉冲串和线性调频脉冲两种激励波形,具有信噪比高盲区小的优点和线性调频脉冲压缩的功能。将该实验平台应用在钢层与多层橡胶层粘接件的脱粘检测,取得了与压电检测相当的结果。作为一个电磁声方法和技术研究的工具,该实验平台对开展电磁声检测方法和技术研究以及实际检测应用都是有意义的。

PACS 数: 43.35

The research and design of the electromagnetic acoustic experiment system and the experiment research

LENG Tao LI Mingxuan HUANG Zhenyan WANG Xiaomin

(State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190)

Received Dec. 24, 2008

Revised Apr. 15, 2009

Abstract The design and establishment of an electromagnetic acoustic experimental system for research on the electromagnetic acoustic inspection method and technique was presented. With the system, a series of experiments have been carried out, such as cutting shadow area, disbonding inspection of the multiple rubber layers under the steel layer, chirp pulse compression, etc. The experiment results show that the system is able to control the experiment parameters accurately and generate two kinds of driving pulses such as tone-burst and chirp pulse. It has the higher signal-noise ratio and shorter shadow area and it also has the function of chirp pulse compression. The results of the disbonding inspection of the multiple rubber layers under the steel layer with the experimental system given by this paper are comparable to the results of the disbonding inspection of the same structure with the piezoelectric ultrasonic inspection system. The system is significant to the researches on the electromagnetic acoustic inspection method and technique, and it's also significant to the practical inspection application as a research tool.

引言

电磁声检测是一种无需耦合剂,便于产生多种模式波形,适合于高温、高速扫描不允许使用耦合剂的特殊材料等检测。电磁声检测设备主要由电子设备和换能器两部分构成。电磁声换能器由输入交变电流的线圈、可产生偏置静磁场的电磁铁(永磁铁)和被检测的金属工件三部分组成。线圈中的交变电流

感生的变化磁场在金属表面附近感应出涡旋电流,涡旋电流与电磁场产生的偏置静磁场相互作用产生表面力源,从而可在金属工件内部激发出超声波,超声波的类型取决于线圈和磁铁的配置。与传统的压电换能检测相比,电磁声检测存在灵敏度、信噪比低,盲区大,换能器体积大等不足,严重影响了电磁声的广泛应用。

在电磁声检测技术优化改进方面,人们试图通过改善声场特性或改进硬件设备等方法技术来提高

^{*} 国家自然科学基金资助项目(10574138)

电磁声检测系统的性能。例如, H. OGI 等学者运用线聚焦的电磁声换能器模型, 以改善传统电磁声换能器的指向性问题^[1]; D. MACLAUHLAN 等人用有限元数值模拟方法来优化设计磁铁的配置, 并采用相控阵的方法来实现自动扫描和聚焦^[2], 达到了对 EMAT 检测系统进行优化设计的目的。还有一些与电磁声检测技术优化改进相关的专利报道, 例如, 增加屏蔽层以减少 EMAT 磁铁和线圈之间的电磁感应^[3], 设计电路模块用来检验 EMAT 线圈和被测工件之间的耐磨板是否磨损^[4], 将 EMAT 线圈做成印刷电路板以提高换能效率并使其更加耐用^[5]。有关电磁声系统设备的研究工作少有报道。

本文通过改进电磁声电子设备设计, 提高灵敏度、信噪比, 减小检测盲区, 实现了目前电磁声设备还无法检测的高波阻下多层低波阻脱粘检测。考虑到作为方法和技术研究的实验工具, 由于目前商品设备某些参数被固化不可调和读数精度不高等问题, 本文设计研制的平台还可以对重复周期、填充脉冲和接收信号幅度等参数进行精确控制。为了便于检测方法研究, 还增加了目前设备没有的线性调频方波填充激励等功能。

实验平台的研制成功, 为完成我们目前承担的“十一五”预研关于高波阻下多层低波阻脱粘电磁声检测项目和国家自然科学基金“分层介质电磁声共振研究”项目提供了有力的保证, 为我们进一步开展电磁声方法和技术研究提供重要工具。

1 设备的研制

根据研究工作的实际需要, 要求研制的多功能电磁声实验平台具有三个基本特性: 首先, 能对实验系统的重复周期、填充脉冲频率和接收信号幅度等多个参数进行精确控制; 其次, 能灵活地产生“单一频率方波填充脉冲串”以及“线性调频脉冲”激励波形; 最后, 具有可扩展性, 即易于实现新功能的扩展。

根据以上三个基本特性, 我们设计了实验平台, 其整体结构如图 1 所示, 它包括四大部分: 发射部分、换能器部分、接收部分和控制及数字信号处理部分。发射部分产生激励电流, 输入给换能器的发射线圈, 在被测试块表面激发出声波, 经传播反射回试块表面, 再由换能器的接收线圈接收并转换成电信号, 输入接收部分, 经过放大后输入 A/D, 经采样成数字信号后输入计算机进行相应的处理。本文的主要工作集中在发射部分、接收部分和数字信号处理部分。

1.1 发射部分

电磁声实验平台的发射部分由信号发生器和功率放大器组成。信号发生器产生实验需要的各种波形信号, 功率放大器对信号发生器产生的信号进行功率放大, 并将放大后的信号送入发射线圈, 在被检测材料表面激发超声波。

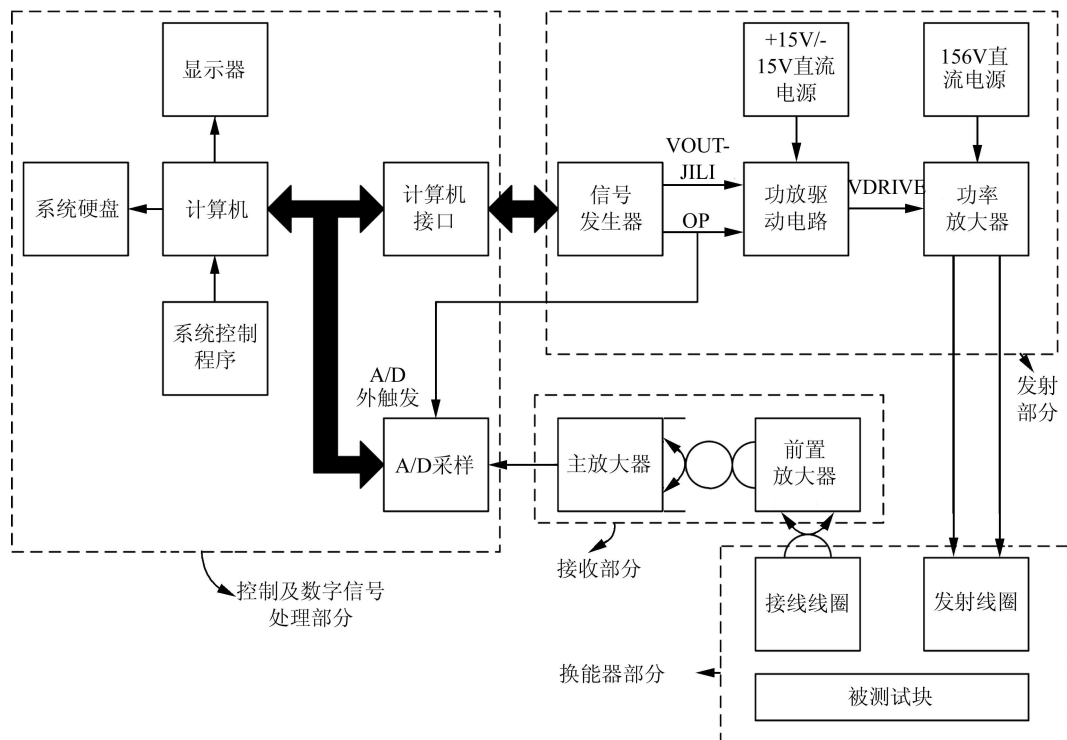


图 1 电磁声实验平台框图

在信号发生器的设计中, 有如下关键问题需要解决。第一, 要精确的控制频率; 第二, 能产生检测所需的各种波形; 第三, 实验平台的重复周期信号要与信号发生器的输出信号同步。

针对第一和第二个关键问题, 我们采用 DDS (Direct Digital Synthesizer) 技术, 以数字合成器 AD9854 为核心器件进行设计, 可以精确的控制频率, 方便的产生检测需要的各种波形。DDS 就是直接数字合成, 它是根据正弦函数的产生, 从相位出发, 由不同的相位给出不同的电压幅度, 即相位 - 正弦幅度变换, 最后滤波, 平滑输出所需要的频率。DDS 技术可以使信号发生器输出信号的频率精度达到作为信号发生器参考信号的晶体控制振荡器的水平, 也可以很方便的产生实验需要的各种调制波形。

为了解决实验平台的重复周期信号和信号发生器输出信号的同步问题, 我们把实验平台的重复周期划分成两个状态: 周期状态 1, 周期状态 2。在实验平台工作时, 两种周期状态交替出现。在周期状态 1 下, 信号发生器按照用户输入的频率和初始相位信息输出信号; 在周期状态 2 下, 信号发生器对相位累加器进行初始化操作, 保证下一个周期状态 1 开始时, 输出信号的相位为初始相位。这样, 就实现了实验平台的重复周期信号与信号发生器的输出信号相位同步。

信号发生器的结构框图如图 2 所示, AD9854 通

过开关 K1、K2, 可以选择同“单一频率方波填充的脉冲串辅助电路”或“一定时间段的线性调频信号辅助电路”相连接, 使系统相应的工作在“单一频率方波填充脉冲模式”或“线性调频脉冲模式”。状态信号发生器产生系统的重复周期信号, 整个系统的工作时序在重复周期信号的协调和控制下完成。

在功率放大部分的的设计中, 有如下关键问题需要解决。第一, 功率放大器的开关响应速度必须要满足实验的需要; 第二, 功率放大器的输出端必须接合适的调谐电容, 因为发射线圈是感性负载; 第三, 需要对功率放大器的输出端做适当的阻抗匹配, 以便增大发射线圈中的激励电流。

根据需要, 本文选用的是以大功率 VMOS 管 IRFP450 为核心器件的推挽式功率放大器结构。与功率三极管相比, VMOS 管的开关速度较快, 驱动电路的设计也较简单。IRFP450 的极间电容比较小, 开关响应速度比较快。另外, 本文功率放大器的输出端是通过变压器耦合在发射线圈上的, 在功率放大器输出端和发射线圈之间串联接入调谐电容, 使电路工作在谐振状态, 通过调节变压器初次级匝数比可以实现阻抗匹配。

1.2 接收部分

由于电磁声的换能效率低, 接收到的信号比较微弱, 所以要尽量提高放大器信噪比和检测灵敏度; 电磁声实验平台接收放大器的带宽必须与电磁声实验

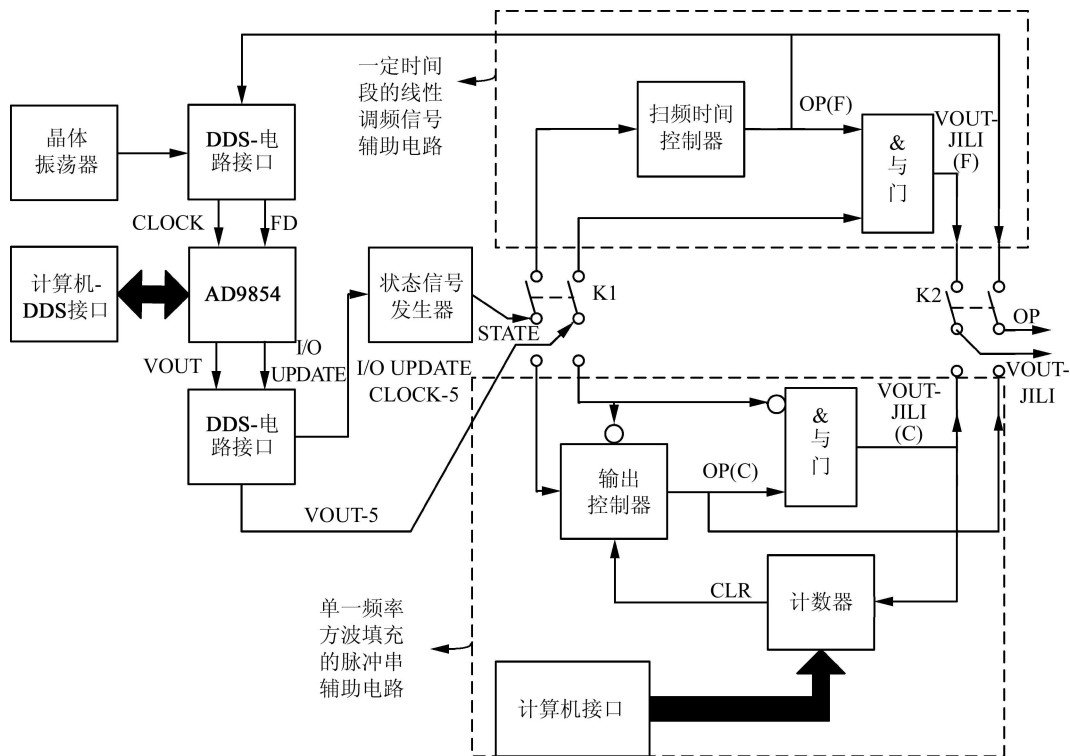


图 2 信号发生器框图

平台的工作频率范围相匹配;为了满足实验的需要,电磁声的接收放大器要有增益可调的功能;降低放大器的阻塞,以减小检测盲区。

为了抑制共模噪声、提高信噪比,本文采用了前置放大器和主放大器两级放大的形式。在电磁声接收线圈的输出端设置了前置差分放大器,把信号初步放大后再用双绞线送至主放大器,进一步的放大。为了降低放大器的阻塞作用,在设计放大器时,要减少放大器输入端电抗性元件的使用。

本实验平台放大器的结构框图如图 1“接收部分”所示。其中,前置放大器是以 THS7530 为核心器件设计的,THS7530 是 TI 公司生产的低噪声全差分增益连续可调的放大器,它的噪声参数为 $1.1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,带宽为 300 MHz,增益调节范围为 11.6 dB 到 46.5 dB;主放大器是基于 AD600 设计的,AD600 是 AD 公司生产的低噪声宽带可变增益放大器,它的噪声参数为 $1.4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,带宽为 35MHz,增益调节范围为 0 dB 到 40 dB。

1.3 A/D 采样部分

本文使用的 A/D 采样板是 AC1030,它是由二路 A/D 转换器,数据 RAM,定时及采样控制电路构成。AC1030 的采样频率最高可达 30 MHz,它有两种触发方式:软件触发和外触发,本实验平台使用的是外触发方式。AC1030 的输入电压是 $0 \sim \pm 1 \text{ V}$ 或者 $0 \sim 2 \text{ V}$ 可选,本实验平台选用的是 $0 \sim \pm 1 \text{ V}$ 。

1.4 程序控制部分

上面叙述了整个电磁声实验平台的硬件设计过程,但是,对硬件的设置与控制,必须通过计算机中的控制程序来完成。本系统的控制程序,是在 Microsoft Visual C++ 6.0 平台下编写的基于对话框的程序。

在控制程序中,用户可以设置“平均次数”、“输出频率”和“计数个数”三个参数。平均次数指的是 A/D 多次采样求平均值时的采样次数;输出频率是 AD9854 输出信号的频率;计数个数是指每个脉冲串所含的方波个数。通过用户界面,用户可以选择“采样后的数据直接显示”、“采样后的多组数据平均后显示”、“采样后的数据数字滤波再显示”、“采样后的数据与参考信号相减后再显示”等几种显示模式。

1.5 实验平台总体性能指标

经过实验测定,本实验平台达到如下性能:

- (1) 功率放大器工作频率可达 3.2 MHz。
- (2) 激励电流为 7.8 A。
- (3) 放大器增益为 114 dB。

(4) 放大器带宽是 200 kHz~5.5 MHz。

(5) 脉冲串个数范围是 1 个周期—15 个周期。

(6) 实验平台接收部分信噪比为 34.0 dB。

(7) 可以实现单一频率方波填充和调频信号方波填充。基于本平台的架构,可以比较容易的扩展出编码信号的方波填充。

(8) 有累计叠加的功能。

(9) 有软件滤波功能。

(10) 采用了 DDS 技术,在参考时钟稳定的情况下,能够准确的测量信号频率。频率调节精度是 $0.5 \mu\text{Hz}$ 。

(11) 有波形存储相减抵消的功能。

2 实验研究

实验平台研制成后进行了一系列的实验,其中包括减小盲区实验,钢层下多层橡胶层脱粘检测实验和线性调频发射脉冲压缩实验以及接蛇形线圈变频指向性扫描实验等。脉冲压缩是现有电磁声设备所不具备的功能,对钢层下多层橡胶层脱粘检测是目前电磁声设备尚不能检测的问题。实验选用常规的垂直磁场下圆环形线圈换能器,发射线圈与接收线圈以同心圆方式绕制,发射线圈电感量为 $41.45 \mu\text{H}$,接收线圈电感量为 $550 \mu\text{H}$ 。实验中,换能器线圈与被检材料表面直接接触,它们之间的距离近似为零。

2.1 减小盲区的实验

现有电磁声设备,激励源一般采用多个周期方波填充的长脉冲串,同时产生的感生电流信号造成很大的检测盲区,成为影响电磁声应用的瓶颈之一,减小盲区是本实验平台研制的一个重要指标。

减小系统盲区有两方面途径,一方面降低放大器的阻塞作用,另一方面可以采取信号处理的方法,消除接收线圈中从激励脉冲中感应过来的感生电流信号。

为了比较本实验平台接收系统放大器与购进商品电磁声放大器的性能对盲区的影响,我们在现有购进的商品设备上,接本文选用的换能器,用 4 个方波脉冲组成的脉冲串在厚度为 5.76 cm 的铝块上激发 750 kHz 的横波,然后用本文所设计的放大器和原有设备的放大器分别接收放大。

用本文所设计的放大器测得的波形如图 3 所示,用原有设备放大器接收放大如图 4 所示。

从图 3 和图 4 中可以清楚的看到,如图中虚线包围的区域所示,在 $38.4 \mu\text{s}$ 处,本文放大器接收到第一个回波,而原有放大器第一个回波被阻塞。所以,

本实验平台接收系统放大器能有效的减小系统检测盲区。

本文设计的实验平台考虑到减小感生电流的影响,专门设计有信号相减相消功能,为取得好的相减相消效果,参考信号选取是关键。

我们找到一个与被测试块材料相同的试块,它的厚度比被测试块厚得多。把它作为参考试块,然后在相同的实验条件下,分别测量被测试块与参考试块,得到两组数据。如果参考试块比被测试块厚得多,那么两组数据的第一次回波相对于系统重复周期的时间位置就可以完全错开。此时,我们认为,在这两种情况下,接收线圈中,从激励信号感应过来的感生信号近似相同。把两组数据相减,再输入带通滤

波器,得到最后的输出波形。

为了验证上述方法的有效性,我们在本论文设计的 EMAT 实验平台上,接本文选用的换能器,用 5 个方波脉冲组成的脉冲串在厚度为 6.05 cm 的被测钢块上激发 730 kHz 的横波。参考样品取的是 7.85 cm 厚度的钢块。

实验结果如图 5 所示,最上面的是“原始信号”,它是接收放大器输出的信号;中间的是“直接滤波后的信号”,它是将放大器输出信号直接进行带通滤波后的信号;下面的是“相减滤波后的信号”,它是先将“原始信号”与“参考信号”相减,再通过带通滤波后的信号。

观察图 5,可以看出,如图中虚线包围的区域所

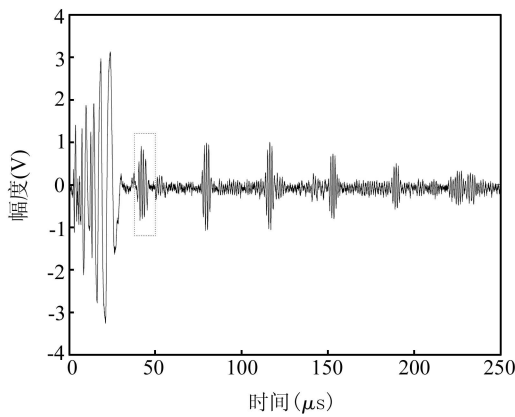


图 3 本文放大器接收波形

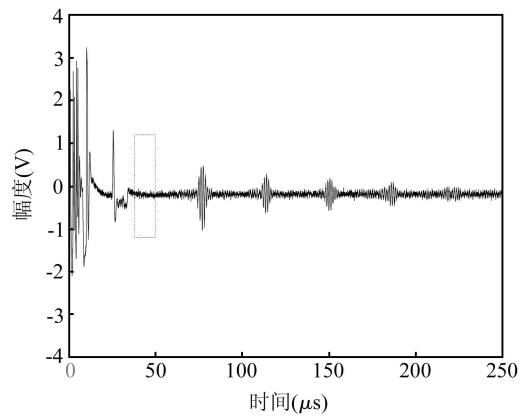


图 4 原有放大器接收波形

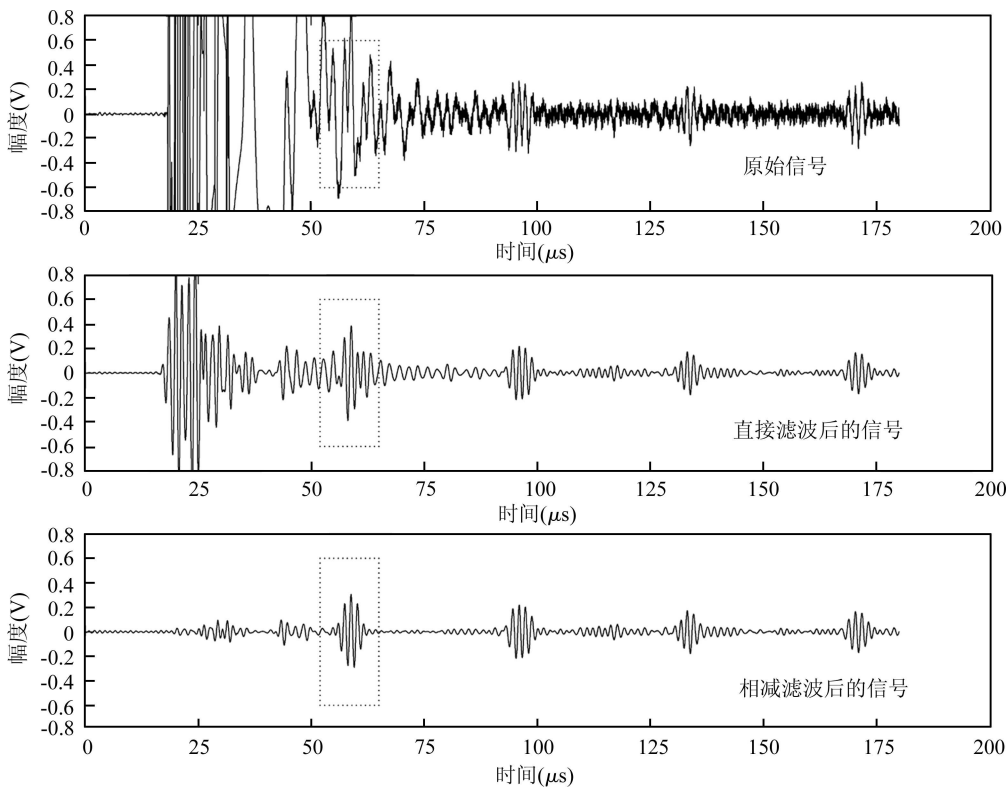


图 5 信号处理减小盲区结果

示,原始信号中,第一个回波完全被淹没在感应信号中;直接滤波有一定的效果,但还是有相当的感应信号叠加在里面;相减滤波取得了非常好的效果,我们可以非常清楚的看见第一个回波。所以,上述信号处理方法能有效的减小系统检测盲区。

2.2 钢层下多层橡胶层脱粘检测实验

钢层下多层橡胶层脱粘检测是一项很长时间以来未能解决的难题,主要是因为高波阻钢层两个表面对入射反射声波形成“近乎全反射”四次屏蔽效应,而橡胶层的反射信号又叠加在强的钢层多次反射信号之中。近年来,我们项目组建立了共振匹配理论,用压电换能检测取得了突破性进展,而时至今日,电磁声还不能够给出相应的检测结果。

钢层下多层橡胶层脱粘检测是我们研制实验平台的的目的之一。检测样品为:4 mm 钢层下分别粘有 1 mm, 2 mm, 2 mm 三层橡胶层,共有四个界面,钢层下为一界面,第一层 1 mm 橡胶层下为二界面,第二层 2 mm 橡胶层下为三界面,第三层 2 mm 橡胶层下为四界面,完全粘好为第三层橡胶层视为无限大,设备接本文选用的换能器,直接接触被检材料表面,检测分别选取 730 kHz 和 380 kHz 两个频率。

当检测频率为 730 kHz 时,实验条件是在本实

验平台上,用 3 个方波脉冲组成的脉冲串在厚度为 4 mm 的钢层上表面激发 730 kHz 的横波,检测结果如图 6 所示。

图 6 从上至下,依次列出了粘好、一界面脱粘、二界面脱粘、三界面脱粘、四界面脱粘这五种状态下的检测结果。

为了便于比较,图 7 给出在同一个试块上相同激励波形经过延迟 730 kHz 压电换能纵波检测结果,由于纵波声速大约为横波声速的一倍,对于同一检测程段,纵波时间窗约为横波时间窗的一半。从图 6 电磁声横波在 30 ~ 40 μs 的时间窗与图 7 压电换能纵波相对应的 15 ~ 30 μs 时间窗内,可以看出粘好和一界面、二界面、三界面、四界面脱粘,它们在波形包络上均有一定差别,这些差别虽然不大,但可以通过信号处理作出进一步识别。电磁声横波检测获得了与压电纵波检测相当的检测结果。

当检测频率为 380 kHz 时,在实验平台上用 3 个方波脉冲组成的脉冲串在厚度为 4 mm 钢层上表面激发 380 kHz 的横波,检测结果如图 8 所示。

图 8 从上至下依次表示的是粘好以及一界面、二界面、三界面、四界面脱粘这五种状态下的检测结果。

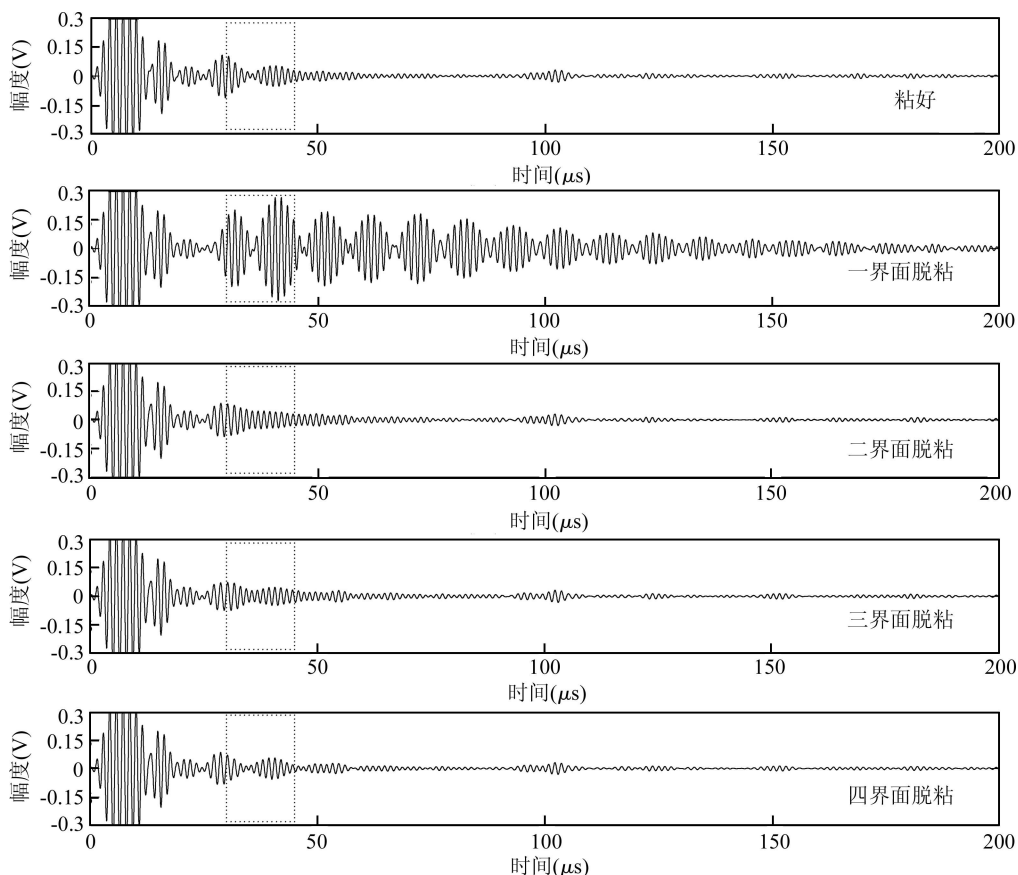


图 6 电磁声横波 730 kHz 时五种粘接状态下检测结果

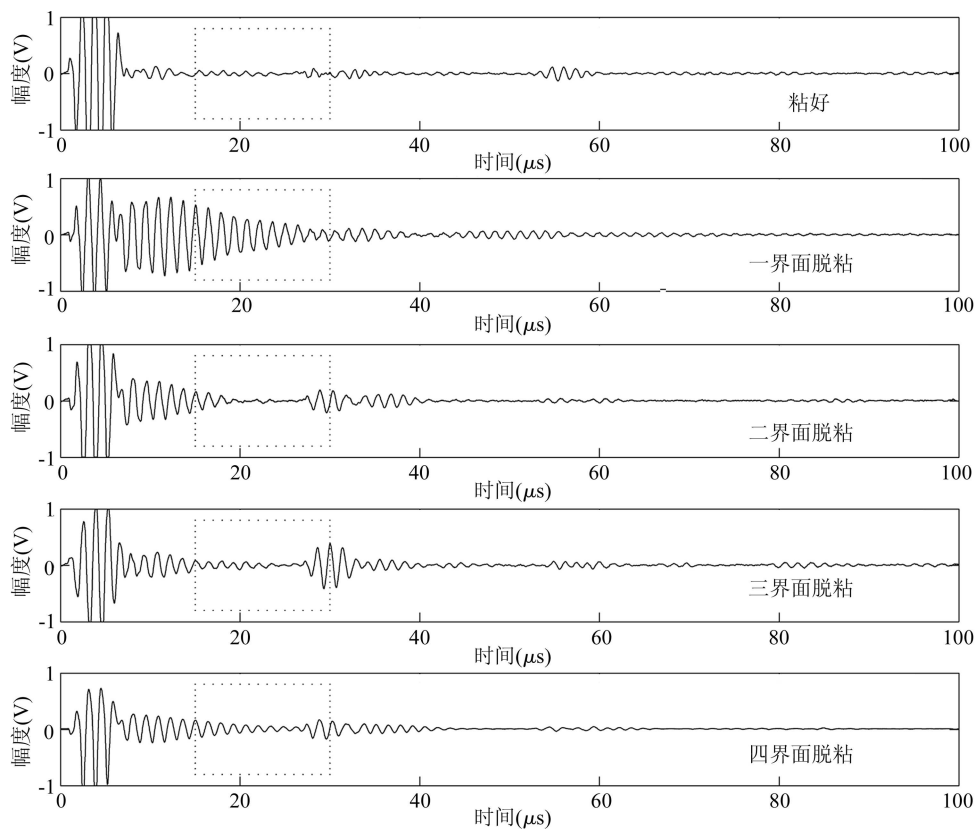


图 7 压电换能纵波 730 kHz 时五种粘接状态下检测结果

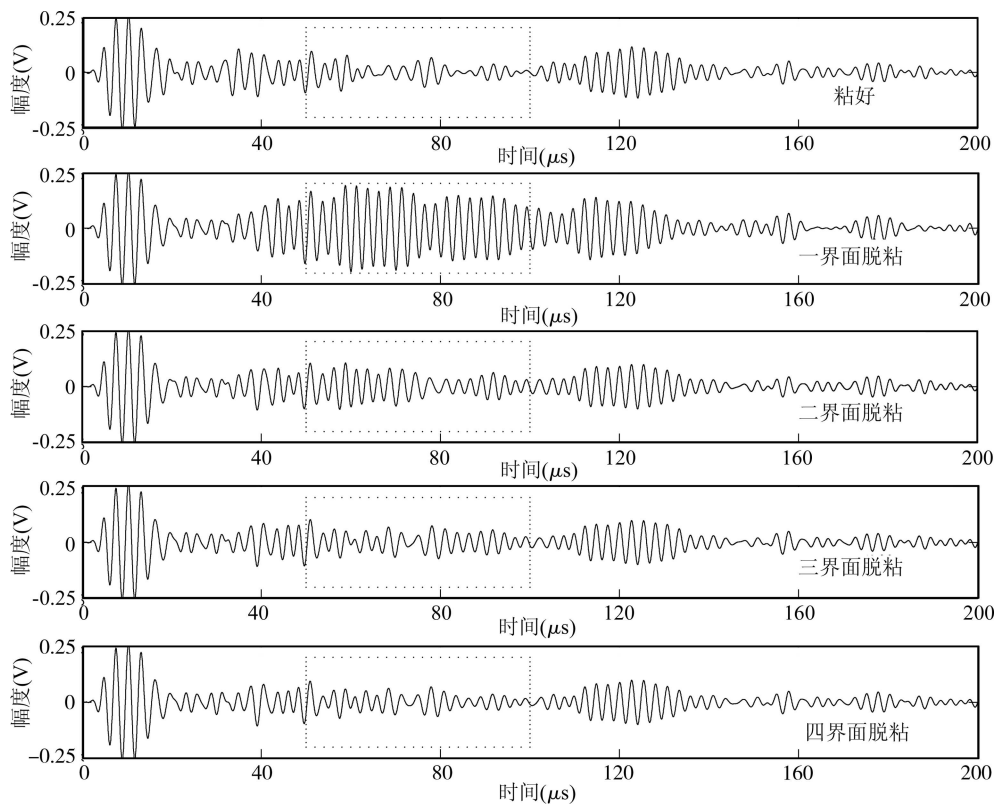


图 8 电磁声横波 380 kHz 时五种粘接状态下检测结果

观察图 8 可以发现, 检测灵敏度比图 6 所示 730 kHz 下的检测灵敏度有所提高, 在 50 ~ 100 μs 时间窗内, 粘好及一界面、二界面、三界面、四界面

脱粘, 波形包络均有较为明显的差别, 基本上达到了现有压电换能检测的水平, 为电磁声横波检测在此方面的应用奠定了基础。

2.3 线性调频脉冲压缩实验

线性调频检测, 具有长脉冲激励提高穿透力的特点, 同时通过脉冲压缩又可获得高分辨率, 目前的电磁声检测设备尚不具备此功能, 本实验平台设计具有此功能是将线性调频脉冲压缩技术应用在电磁声检测方面做出的一次尝试。

实验将设备接在本文选用的换能器上, 在厚度为 5.76 cm 的铝块上激发出 10 μs 的线性调频脉冲, 频率变化范围在 397 kHz~2 MHz, 接收线圈接收到的信号, 被 A/D 采样后送入计算机, 用计算机程序对相关数据进行匹配滤波处理, 得到最后的压缩结果。

如图 9 所示是对多次回波信号的压缩结果, 上面是压缩前的信号, 下面是压缩后的信号。从图中可以看出, 经过匹配滤波后, 多次回波信号均有一定的压缩结果。

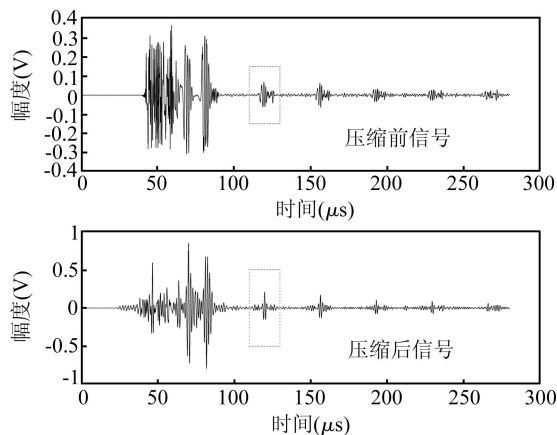


图 9 线性调频脉冲压缩实验结果

3 总结

本文研制的电磁声实验平台不同于一般的电磁声检测设备, 它具有能够精确的控制实验参数, 灵

活的产生多种激励波形, 能够比较方便的实现功能的扩展, 盲区小、信噪比高等一些特点; 实现了目前电磁声尚不能对高波阻下多层低波阻脱粘接检测的检测功能, 且基本达到压电检测的效果; 实现了电磁声设备目前尚不具备的线性调频脉冲压缩的检测功能。作一个电磁声方法和技术研究的工具, 该实验平台的研制是十分有意义的, 目前达到的功能水平对实际应用也是有价值的。

参 考 文 献

- 1 Hirotsugu Ogi, Masahiko Hirao, Toshihiro Ohtani. Line-focusing of ultrasonic SV wave by electromagnetic acoustic transducer. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998; bf 103(5): 2411—2415
- 2 Maclauchlan D, Clark S, Cox B, Doyle T, Grimmett B, Hancock J, Hour K, Rutherford C. Recent advancements in the application of EMATs to NDE. 16th WCNDT 2004 Proceedings, 2004
- 3 VASILE. Shielded electromagnetic acoustic transducers. United States Patent 4,296,486, 1981-10-20
- 4 Maclauchlan *et al.* Electromagnetic acoustic transducer fault detection circuit. United States Patent 5,684,406, 1997-11-4
- 5 Mandracchia. Electromagnetic acoustic transducer. United States Patent 5,503,020, 1996-4-2
- 6 Bruce Thompson R. A model for the electromagnetic generation and detection of Rayleigh and Lamb waves. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1973; **20**(4): 340—346
- 7 Maxfield B W, Fortunko C M. The design and use of electromagnetic acoustic wave transducers (EMAT). *Materials Evaluation*, 1983; **41**: 1399—1408
- 8 WU Di, LI Mingxuan, WANG Xiaomin. The shear wave field radiated by an electromagnetic acoustic transducer. *CHIN. PHYS. LETT.*, 2006; **23**(12): 3294—3296
- 9 宋卫华, 王小民, 李明轩. 电磁超声界面回波瞬态图谱分析与神经网络识别. *声学学报*, 2007; **32**(4): 333—337
- 10 宋卫华, 王小民, 李明轩. 电磁超声多界面检测信号去噪方法研究. *声学学报*, 2007; **32**(3): 226—231