

DOI: 10.3901/JME.2019.14.011

电磁超声检测频率自适应优化方法研究*

郑 阳¹ 周进节² 张宗健¹ 谭继东¹

(1. 中国特种设备检测研究院 北京 100029;

2. 中北大学机械工程学院 太原 030051)

摘要: 电磁超声(Electromagnetic acoustic testing, EMAT)检测易受温度、提离和被检对象材料的影响,使换能器的辐射声场、阻抗特性和换能效率发生变化,导致同样的检测系统及参数在不同工况下检测效果差异很大。其中检测频率是需要优化的关键因素之一,实验室常采用逐个频率点扫频测试寻找最佳检测频率的方法进行优化,效率极低,难以在现场实时应用。提出一种基于线性 Chirp 信号实现电磁超声传感器最佳检测频率快速优化的方法,通过数据处理的方式,可以在一次激励接收过程中,实现对一段频率中各频率点检测信号的提取,从而快速优化得到工况下相对最佳检测频率。采用该方法的检测系统可自适应现场温度、接触条件及被检对象变化,实时优化选择检测频率,得到最佳检测效果。

关键词: 电磁超声; 检测频率; 参数优化; 自适应; 影响因素

中图分类号: TB52; TB552; TG115

Research on Frequency Adaptive Optimization Method of Electromagnetic Acoustic Testing

ZHENG Yang¹ ZHOU Jinjie² ZHANG Zongjian¹ TAN Jidong¹

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029;

2. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051)

Abstract: Electromagnetic acoustic testing (EMAT) is susceptible to temperature, lift-off and the material of the tested subject, which makes the impedance characteristics and energy conversion efficiency of the transducer change. Therefore, the inspection results vary widely even with the same detection system and parameters but in different work conditions. The testing frequency is a key factor that needs to be optimized among the many factors that affect the testing performance. Normally, the frequency sweeping method is used to find the optimal inspection frequency in the laboratory environment. This method is extremely inefficient and difficult to be used in practice. A method based on the principle of linear Chirp for fast optimizing testing frequency of EMAT is proposed. Through the way of data processing, the testing signal of each frequency point in a frequency range can be extracted in a single excitation receiving process, thereby quickly optimizing and obtaining the optimal testing frequency. Further, the testing system adopting this method can adapt to changes in temperature, contact conditions, and objects to be inspected in the field, optimize the testing frequency in real time, and obtain the best detection effect.

Key words: electromagnetic acoustic; testing frequency; parameter optimization; adaptive; influencing factors

0 前言

电磁超声具有非接触、不用耦合剂、宽温度范围使用的优点,在自动化检测、免耦合剂检测、不打磨检测、极端高低温检测等方面具有巨大的应用优势^[1-3]。然而这些优点同时也会造成检测中的一些

问题,如非接触检测易造成提离距离变化,宽温度范围检测使得需要考虑不同温度下声速及声衰减的变化等,使得即使采用同一检测系统在相同的参数下,检测效果差异也很大^[4-7]。这主要是因为电磁超声换能过程中,换能器与被检测材料表层组成了一个相互耦合的电磁感应场,提离距离和被检测材料电磁特性(材料的温度、焊接、热处理等均会影响其电磁特性)的变化会使换能器的阻抗特性和换能效率发生变化,从而影响检测信号波包的能量和信噪比^[8-13]。因此一旦检测工况发生变化,为了达到良好的检测效果,

* 国家重点研发计划(2016YFF0203003)、国家自然科学基金(51605494, 61601413)和质检总局科技计划(2017QK185)资助项目。20180718 收到初稿,20181223 收到修改稿

就需要重新优化选择检测参数,造成现场应用不便。对于固定的检测仪器和换能器,如何实时快速优化选择最佳检测参数,使得每一次检测都能达到良好的效果,是目前工程检测面临的主要难题。

电磁超声工程检测中,检测仪器、换能器、线缆等因素较为固定,检测频率是可以优化控制的主要参数。检测频率对电磁超声检测效果影响的机制较多,如检测频率变化影响传感器辐射声场而导致回波信号能量变化;提离距离、被检测材料电磁特性变化导致换能器中心频率漂移;频率变化引起已阻抗匹配好的仪器与换能器再次失配等。尽管目前从理论上准确论述上述机制的文献较少,但大量的试验和工程应用表明了检测频率对检测效果的影响巨大。实验室优化检测频率,常采用手动或自动逐点扫频,然后选择检测效果良好的频率点进行检测,但此过程即使是自动扫频也非常耗时,无法应用于现场检测仪器。

本文提出线性 Chirp 信号的电磁超声检测频率实时优化的方法。基于 Chirp 信号宽频特性,在一次激励接收过程中,通过信号处理的方法实现对一段频率中各频率点对应检测信号的提取,分析各频率点的检测信号,从而快速优化电磁超声传感器最佳检测频率,使得采用该方法的检测系统可自适应现场温度、接触条件及被检对象变化,实时优化选择检测频率,得到最佳检测效果。本文首先研究了线性 Chirp 信号的特性和检测信号分频提取的方法,然后组建了可实现 Chirp 信号激发与接收的电磁超声试验系统,并针对不同材料、不同提离、不同温度下检测频率自适应优化开展了试验研究,证明了此方法的有效性,为工程现场实时进行电磁超声检测频率优化奠定了方法基础。

1 检测频率自适应优化方法原理

1.1 检测频率自适应优化原理

电磁超声换能器的最佳检测频率是依赖于检测工况的,当被检材料、提离距离、工件温度等发生变化时,电磁超声换能器激发/接收到信号幅频特性会发生变化,产生主频漂移的现象。需要指出的是,电磁超声换能器的最佳检测频率与其自身的主频(或称中心频率)是不同的概念,主频是换能器本身的特性,仅与其自身的物理特性相关,而最佳检测频率是指工作中达到最佳检测效果或最强回波信号的频率。对于电磁超声换能器而言,正如前言中所述的检测频率影响检测效果有诸多机制,采用电磁超声换能器的主频进行检测时,不一定能得到最佳

的检测效果或最强的回波幅值。这与压电换能器是不同的,压电换能器激发/接收超声波时,主频几乎不受检测工况的影响,而只与换能器本身相关,且一般主频下信号强度最大,主频即为最佳工作频率。因此在电磁超声换能器工程检测中需依据工况优选最佳检测频率,才能达到良好的检测效果,而非一成不变地采用同一个检测频率。

由于影响电磁超声换能器工作主频的因素太多,而实际工况下这些因素的变化很难评测,且常是多个因素同时变化,使得通过建立理论模型,得到影响规律,并进行检测频率优选或预设的方法不可行。另一个思路是不管具体影响因素对换能器产生何种影响,在某一工况下,先扫频测试得到最佳检测频率再进行检测,这种方法更适用于影响因素错综复杂的现场。传统的扫频测试方法是采用手动或自动逐个频率点扫查得到检测信号,然后分析得到最佳检测频率,这种方法非常耗时,优选过程效率极低,无法做到实时优化,不适于现场使用。

为了克服传统扫频测试方法耗时低效的缺点,需要可在一次激励接收过程中即可得到整个频段检测响应,从而能够做到实时优化检测频率的方法。因此本文将线性 Chirp 信号及其解调方法引入电磁超声换能器频率优化中,具体思想如下:利用线性 Chirp 信号频率随时间线性变化,在频域中呈现为某一段频率内幅频特征几乎一致的特性,用其作为激励信号,则可以在一次检测中,得到一个频率段的响应信号;同时考虑到电磁超声检测系统在一般检测时可近似为是线性系统,对于各频率,检测系统的传递函数固定,利用这一特征,即可从 Chirp 的响应信号中解调出每一个频率点的检测响应信号,从而得到与扫频测试同样的信号幅值-频率曲线,实现检测频率优化。此方法最大的优点是,一次激励/接收即可得到整个扫频曲线,将手动/自动扫频的过程转化为了信号处理的过程,快速高效,可实现工业现场环境下,实时优化选择检测频率的目标。

1.2 线性 Chirp 激励信号及其特性分析

线性 Chirp 信号是指在一定时间范围内,频率随时间线性变化的信号,在频域上它等能量地覆盖了一段频率范围内的所有频率信号成分^[14]。线性 Chirp 信号的表达式为

$$S(t) = W(t) \sin \left(2\pi f_0 t + \pi \frac{B}{T} t^2 \right) \quad (1)$$

式中, $W(t)$ 为窗函数, f_0 为起始频率, T 为 Chirp 信号的持续时间, B 为 Chirp 信号的频带宽度, B/T 为频率随时间的变化率。

如图 1a 所示的是根据式(1)定义的一线性 Chirp 信号, 其中起始频率 $f_0=1$ MHz, 频带宽度 $B=9$ MHz (频率范围为 1~10 MHz), 持续时间 $T=8\ \mu\text{s}$ 。经过时域变换后得到信号的时频特征图, 如图 1b 所示, 可见此信号的特征是信号频率随着时间线性增大。该信号的频谱如图 1c 所示, 可见该线性 Chirp 信号在频域中 2~9 MHz 是一个几乎平顶的宽频段信号, 各频率成份近似能量相等。

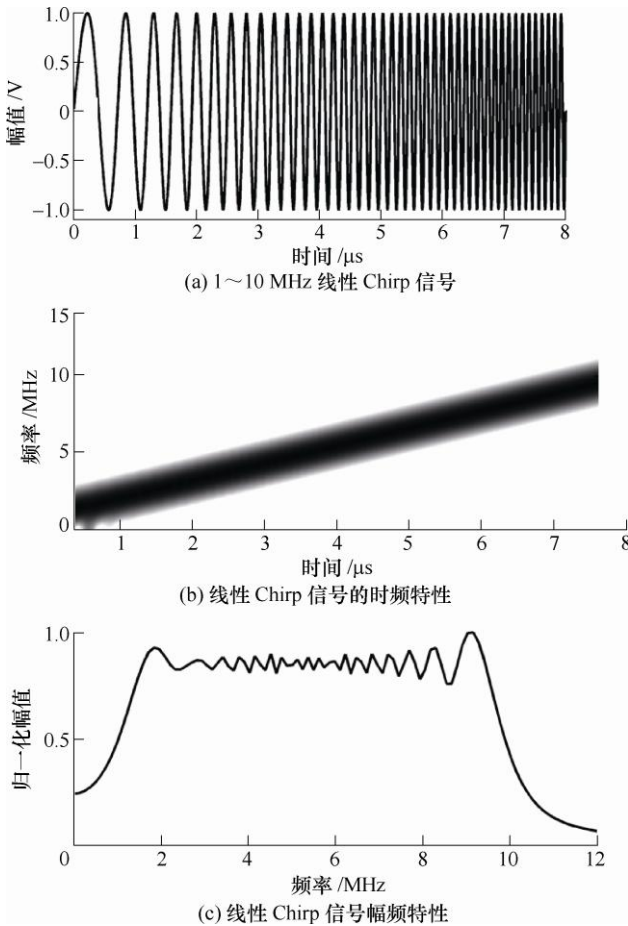


图 1 线性 Chirp 信号及其频域特性

1.3 线性 Chirp 检测信号分频提取原理

利用 EMAT 进行检测时, 系统框图如图 2 所示, 由信号源输出激励信号, 经功率放大器放大后输入传感器, 经过 EMAT 与被检对象作用实现电声转换, 在被检导体材料中耦合产生超声波, 超声波遇到缺陷或材料边界产生回波信号, 回波信号由 EMAT 经电声转换, 被信号采集器接收。整个电磁超声检测系统的模型可表示为

$$V_R(\omega) = V_i(\omega)t_G(\omega)t_A(\omega)t_R(\omega) \quad (2)$$

式中, V_i 为输入信号; t_G 为电声转换过程的传递函数, 包含传输导线、功率放大器、双工器等效应; t_A 为超声波在被检对象中的传递函数, 包含了试块材料、尺寸等的效应; t_R 为接收回波信号过程的传

递函数, 包含双工器、信号放大器、信号采集器等效应; V_R 为检测响应信号。

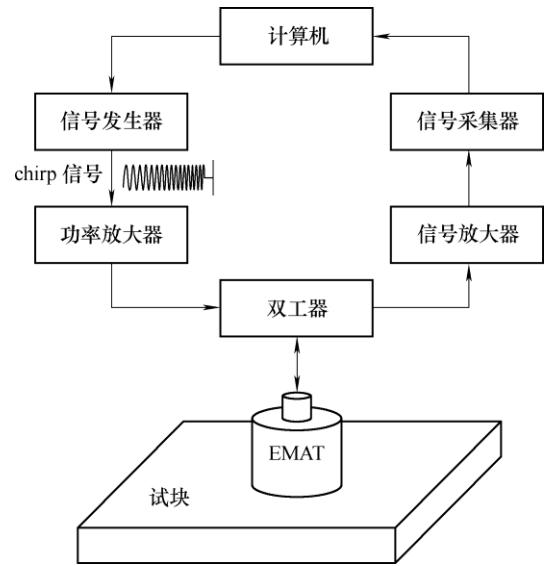


图 2 线性 Chirp 信号实现 EMAT 频响测试仪器系统原理框图

采用线性 Chirp 信号激励 EMAT 时, 检测到的响应信号可表示为

$$V_R(\omega) = S(\omega)t_G(\omega)t_A(\omega)t_R(\omega) \quad (3)$$

式中, $S(\omega)$ 为线性 Chirp 信号, 检测响应 V_R 中包含了宽频带激励信号对应的所有频率成份的响应信息。为了获取 EMAT 的频率响应曲线, 需要对该信号进行频率响应特征解调, 从宽频带检测信号中解调出众多窄频检测信号的响应信号。具体的处理方法如下所述。

假设一个实际用于激励 EMAT 的窄频信号为 $S_E(\omega)$ 。对于一套由传感器、传感线、激励接收器等组成的固定的检测系统而言, 其传输特性、频响特性一定, 不依赖于输入信号, 因此系统的传递函数 $t_G(\omega)t_A(\omega)t_R(\omega)$ 不变, 此时检测系统得到的响应信号为

$$V_R^E(\omega) = S_E(\omega)t_G(\omega)t_A(\omega)t_R(\omega) \quad (4)$$

结合式(3)、(4), 依据线性 Chirp 信号 $S(\omega)$ 激励时电磁超声检测系统获取到的检测响应信号 $V_R(\omega)$, 可求解出线性 Chirp 信号频带范围内的任一窄频信号激励时系统的检测信号为

$$V_R^E(\omega) = V_R(\omega) \frac{S_E(\omega)}{S(\omega)} \quad (5)$$

上述原理表明利用线性 Chirp 信号激励电磁超声传感器进行检测, 可在单次检测中获得一段宽频的响应信号, 采集该响应信号并进行信号处理, 可解调出采用不同中心频率的调谐信号激励 EMAT 时

所对应的检测响应信号。在获取线性 Chirp 信号频带范围内对应的各窄频信号的检测信号后,可用算法统计出各检测信号的波包特征,从而优化出最佳的检测频率。

2 试验

2.1 试验系统

根据第 1.2 节所述的测试仪器系统原理图,建立 EMAT 频响测试试验系统,实物如图 3 所示,主要仪器设备有:信号发生器(Agilent, 33522B),任意波形发生频率可达 30 MHz,最大采样频率为 250 MHz;功率放大器(Amplifier research, Model 75A250A),工作频率范围为 0.01~250 MHz;双工器(自制);信号放大器(自制);信号采集器(Agilent 示波器, DSOX4034A),带宽 350 MHz,最大采样率 5 GSa/s。EMAT 换能器(环形线圈,内径 2.25 mm,外径 18.25 mm,绕线 25 圈)

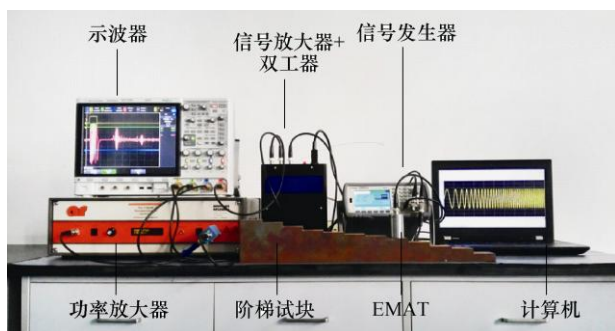


图 3 试验系统实物图

在第 1.3 节中确定了被测材料为 20#钢,试块厚度为 55 mm,EMAT 的测试频率范围为 1~8 MHz。采用线性 Chirp 信号对 EMAT 扫频时,线性 Chirp 信号的起始频率为 1 MHz、带宽为 7 MHz、持续时间为 7 μ s,如图 4 所示。控制信号发生器产生 1~8 MHz 的线性 Chirp 扫频信号经功率放大器放大后激励 EMAT,在被检试块中产生超声波。利用信号放大器对 EMAT 收到的线性 Chirp 检测信号进行放大,并经示波器完成检测信号的采集,如图 5 所示为线性 Chirp 扫频响应的原始信号,信号的平均次数为 256 次。

2.2 检测信号分频提取算法

采集到线性 Chirp 激励 EMAT 的响应信号后,按照第 1.2 节所述的信号处理方法对该扫频响应信号进行解调,解调的期望信号为 5 个周期汉宁窗调制正弦波,频率范围为 1~8 MHz,解调步长为 0.01 MHz。提取每一组解调信号的一次回波幅值,绘制出频率-幅值曲线,并用该曲线来表征传感器的频响特性,以此实现 EMAT 的频响测试。

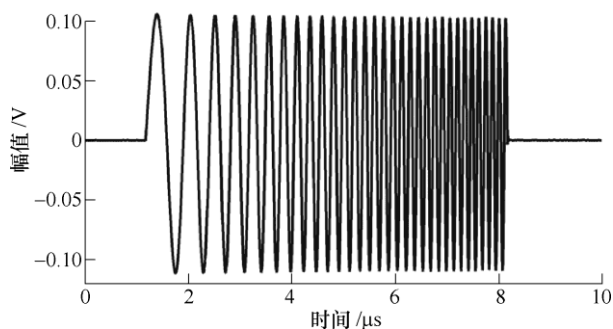


图 4 1~8 MHz 的线性 Chirp 激励信号

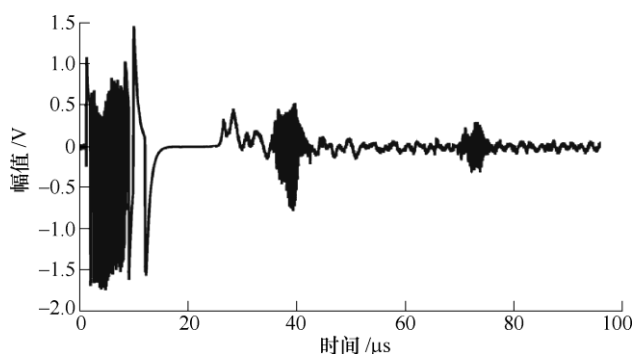


图 5 线性 Chirp 信号激励的响应信号

验证 Chirp 解调信号与固定频率点检测信号的吻合程度,取线性 Chirp 扫频检测信号解调出的响应信号与定点频率实际检测信号相比较,以中心频率为 3 MHz 的 5 个周期汉宁窗调制正弦波作为激励信号为例进行比较。如图 6 所示,虚线为中心频率为 3 MHz 的 5 个周期汉宁窗调制正弦波作为激励信号实际检测信号,细实线为 Chirp 检测信号对应解调出的信号。从图 6 可以看出实际检测信号与 Chirp 扫频的解调信号能够完全重合,表明利用线性 Chirp 实现 EMAT 频响测试的可行性和可靠性。

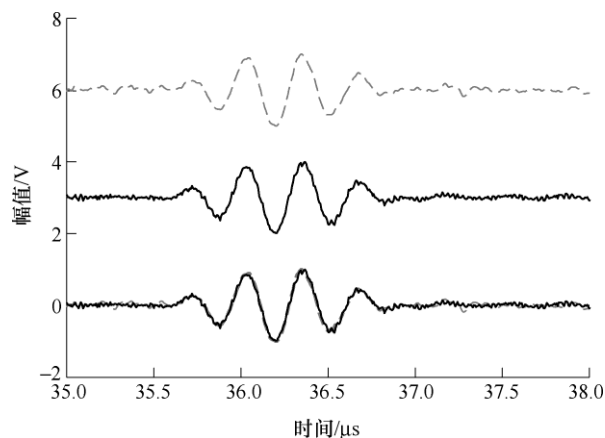


图 6 扫频解调信号与实际检测信号对比

2.3 Chirp 信号测试与逐频率点扫频测试结果对比

依据第 2.2 节所述的频响测试信号处理流程,对线性 Chirp 激励 EMAT 的响应信号进行解调,并

利用解调信号的一次回波幅值来表征传感器的频响特性, 绘制出传感器的频响特性曲线, 如图 7 中虚线所示。保持试验条件不变, 采用手动逐点扫频的方法, 对 EMAT 的频响进行测试, 测试信号为单频的 5 周期汉宁窗调制正弦波, 扫频范围 1~8 MHz, 测试步长为 0.5 MHz。同样提取检测信号的一次回波的幅值, 并绘制出 EMAT 的频响曲线, 如图 7 带三角标记的曲线所示。

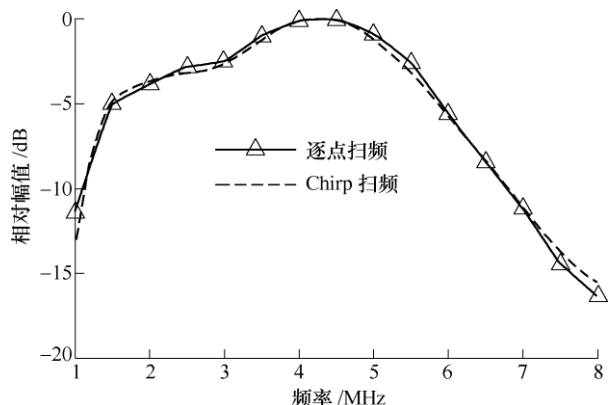


图 7 EMAT 传感器频响测试结果图

对比图 7 中线性 Chirp 信号扫频和逐点扫频得到的 EMAT 频响特性。

(1) 线性 Chirp 信号扫频测得的 EMAT 频响曲线与手动逐点扫频测得的频响曲线完全一致, 两者具有非常好的吻合度, 表明利用线性 Chirp 信号实现 EMAT 频响测试是可行、可靠的。

(2) 相比手动逐点扫频得到的频响曲线而言, 线性 Chirp 扫频得到频响曲线更为精细, 所测得的 EMAT 频带信息(如带宽、中心频率等)也更准确。

综合对比线性 Chirp 信号扫频和逐点扫频的试验过程、信号处理方法和流程以及频响测试结果, 可以看出利用线性 Chirp 信号实现频响测试的方法具有如下优点。

(1) 扫频结果与逐点扫频得到的结果完全一样, 可以采用 Chirp 信号测试代替逐点扫频的测试方式。

(2) 相比逐点扫频需要多次重复试验过程, 线性 Chirp 通过一次扫频试验便可获取到整个频段的响应信息, 然后通过计算机进行信号后处理, 大大提高了测量的速度和效率。

2.4 电磁超声检测频率自适应优化试验

电磁超声换能器易受被检材料、传感器提离、温度等因素影响, 而导致其中心频率发生漂移。为此针对这些因素, 采用第 1 节中所述方法和第 2.1 节所述试验系统, 进行电磁超声频率自适应优化试验研究, 验证此方法对材料变化、提离变化和温度

变化等工况引起的检测频率特性变化, 能快速测定并实现实时优化, 达到自适应优化的目标。

2.4.1 不同材料上检测频率自适应优化

试验选取 Al、20#钢、Q235 和 15CrMo 四种不同材料作为研究对象, 其中 Al 为非铁磁性材料, 其他三种为铁磁性材料, 各材料试块尺寸为 $\phi 120 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。试验在常温下进行, 激励信号为线性 Chirp 信号, 频率范围为 1~7 MHz, 带宽为 6 MHz、持续时间为 5 μs 。控制信号发生器产生该线性 Chirp 扫频信号, 经功率放大器放大后激励 EMAT。在各材料上进行检测频率自适应优化试验时, 保持 EMAT 的激励能量一致, 即保持从功率放大器放大的信号不变。采集线性 Chirp 检测信号, 利用第 3.2 节所述的检测信号分频提取方法, 对信号进行后处理, 获取每个材料的频率特性曲线, 进一步对曲线进行分析得到最佳检测频率, 实现检测频率自适应优化, 并对对比分析不同材料的检测频率特性。

2.4.2 不同提离下检测频率自适应优化

试验选取非铁磁性材料 Al 和铁磁性材料 20#钢两种材料作为试验研究对象, 其中 Al 试块的尺寸为 $\phi 120 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 20#钢试块的尺寸为 $\phi 120 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 。如图 8 所示, 设置传感器的提离高度 H 分别为 0 mm、0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm。试验在常温下进行, 激励信号为 1~7 MHz 的线性 Chirp 信号, 持续时间 5 μs 。在同一材料上进行不同提离下检测频率自适应优化试验时, 保持激励能量一致。采用第 2.2 节所述信号处理方法, 对 EMAT 接收到的检测信号进行后处理, 得到检测频率特性曲线, 通过分析频率特性曲线获取最佳检测频率, 实现不同提离下的检测频率自适应优化, 并对同一材料上不同提离的检测频率特性进行对比分析。

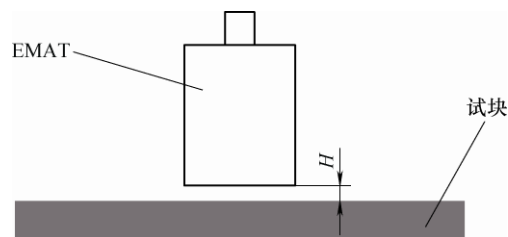


图 8 传感器提离示意图

2.4.3 不同温度下的检测频率自适应优化

选取尺寸为 $\phi 120 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 的 Q235 试块作为试验对象, 将试块放置于加热台上, 加热到指定温度, 然后把 EMAT 放置于试块上进行试验检测。其中, 设置的指定温度分别为 100 $^{\circ}\text{C}$ 、150 $^{\circ}\text{C}$ 、200 $^{\circ}\text{C}$ 、250 $^{\circ}\text{C}$ 和 300 $^{\circ}\text{C}$ 五个温度点。传感器激励

信号为 1~7 MHz 的线性 Chirp 信号,持续时间 5 μ s。在进行不同温度下检测频率自适应优化试验时,保持从功率放大器输出激励 EMAT 的能量一致。采集不同温度下的线性 Chirp 检测信号,对检测信号进行后处理,获取每个温度下的检测频率特性曲线。通过分析频率特性曲线得到最佳检测频率,实现不同温度下电磁超声检测频率自适应优化,并对不同温度下 EMAT 的检测频率特性进行对比分析。

3 结果分析与讨论

3.1 不同材料上检测频率自适应优化

如第 2.4 节所述,通过对 Al、20#、Q235 和 15CrMo 四种材料进行了检测频率自适应优化试验,并利用解调信号的回波幅值来表征检测频率特性,绘制出如图 9 所示的检测频率特性曲线。

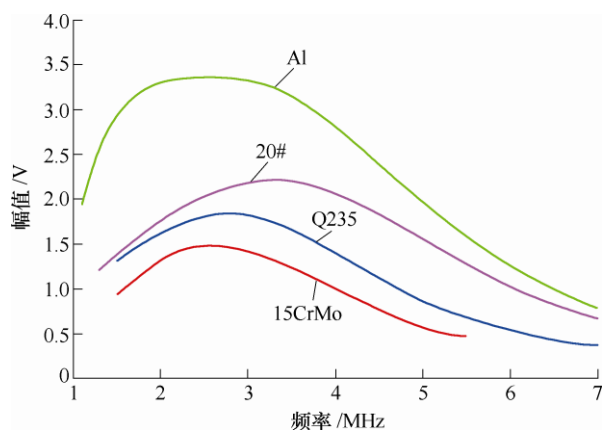


图 9 不同材料上检测频率优化

分析图 9 中的检测频率优化结果,可以直观地看出,在不同的材料上电磁超声的检测频率特性各有不同。首先,在保持电磁超声激励能量相同的条件下,电磁超声在四种材料上的检测信号能量幅值存在较大的差别,表现为 Al 上的检测信号幅值最大,其后依次是 20#钢、Q235 和 15CrMo。其次,不同材料上的检测频率特性曲线变化趋势各不相同,如 Al 上的检测频率特性曲线在 2~3 MHz 存在近近平直段,即在 2 MHz 之后检测频率达到峰值,并保持不变持续到 3 MHz 附近,而其他材料上则是仅存在单个频率峰值点。进一步从检测频率优化的角度分析图 9 可知,不同材料上的最佳检测频率各不相同,Al 上的最佳检测频率在 2~3 MHz,20#钢上的最佳检测频率在 3.5 MHz 附近,Q235 上的最佳检测频率在 3 MHz 附近,而 15CrMo 上的最佳检测频率在 2.5 MHz 附近。

上述结果表明通过 Chirp 信号实时测得幅频特性曲线,即可自动选择最佳的检测频率及其检测信

号,从而实现针对不同被检材料的检测频率自适应优化。

3.2 不同提离时检测频率自适应优化

对电磁超声在 Al 和 20#钢上不同提离时的检测频率自适应优化进行试验研究,绘制出如图 10 所示的不同提离时的检测频率特性曲线。分析图 10a、10b 可直观地看出,检测信号幅值随着 EMAT 与被检试块间的提离增大而逐渐减小,其中提离距离由 0 mm 增加到 0.2 mm 时检测信号幅值大幅度减小,而提离距离从 0.2 mm 变化到 0.8 mm 时,检测信号幅值的减小幅度较小。

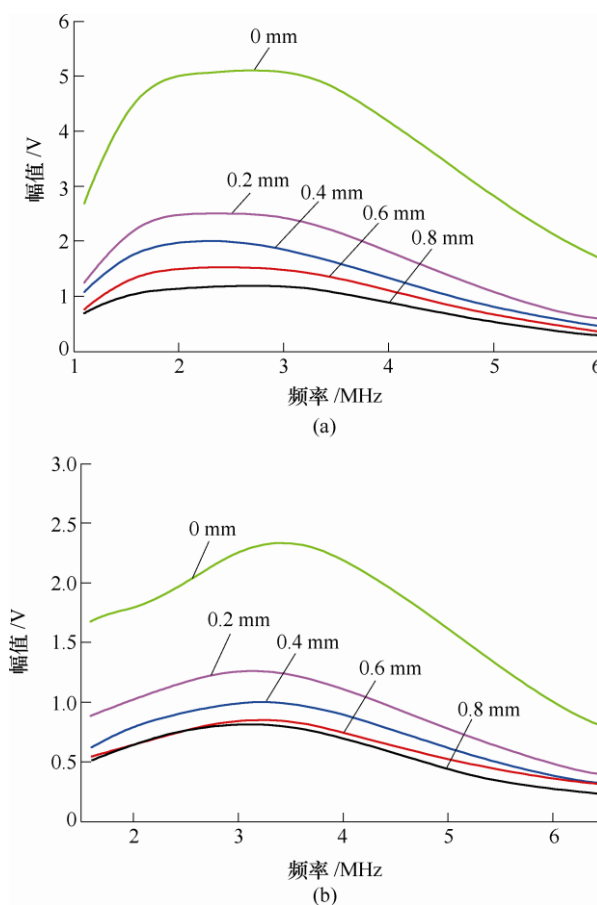


图 10 不同提离时检测频率优化

在提离距离由小变大的过程中,各提离距离下 Al 上的检测频率特性曲线变化趋势基本相同,其上最佳检测频率基本保持在 2~3 MHz,如图 10a 所示。而在 20#钢上,随着提离距离由小变大,其上的最佳检测频率由 3.5 MHz 逐渐变化到 3 MHz 附近,如图 10b 所示。通过以上的分析可知,提离对电磁超声检测信号的幅值影响较为突出,同时在有的材料上还会引起最佳检测频率的漂移。

上述结果表明,通过 Chirp 信号实时测得幅频特性曲线,即可自动选择最佳的检测频率及其检测信号,从而实现针对不同提离下的检测频率自适应

优化。

3.3 不同温度下检测频率自适应优化

根据第 2.3 节所述的试验方法, 在 Q235 上进行不同温度下的检测频率自适应优化试验研究, 对线性 Chirp 检测信号进行分频提取, 最终绘制出如图 11 所示的不同温度下时检测频率特性曲线。

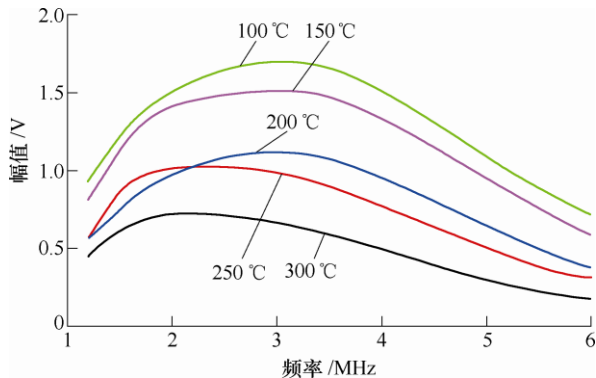


图 11 Q235 不同温度时检测频率优化

从图 11 中可以直观的看出, 随着温度升高, 检测回波信号幅值在逐渐降低, 同时可以看到最佳的检测频率也在发生漂移, 温度从 100 °C 到 200 °C 时, 最佳的检测频率在 3 MHz 附近, 而当温度继续上升至 250 °C 时, 最佳检测频率发生了明显的漂移, 到了 2 MHz 附近, 并且持续到 300 °C。从以上分析可知, 被检试件的温度会对检测信号幅值产生影响, 同时会引起电磁超声最佳检测频率的漂移。

上述结果表明, 通过 Chirp 信号实时测得幅频特性曲线, 即可自动选择最佳的检测频率及其检测信号, 从而实现针对不同温度下的检测频率自适应优化。

3.4 线性 Chirp 实现检测频率自适应优化应用

通过前述检测频率自适应优化试验研究可以看出, 采用线性 Chirp 实现检测频率自适应优化的方法具有突出优点: 实时优化电磁超声传感器最佳检测频率得到最佳检测信号。即在一次激励接收过程中, 通过信号处理的方法实现对一段频率中各频率点对应检测信号的提取, 分析各频率点的检测信号, 可以快速优化并获取到电磁超声的最佳检测频率和最佳检测信号。

因此, 该方法非常适宜应用于现场检测, 而要在工程检测中利用线性 Chirp 实现检测频率自适应优化, 则需要电磁超声检测仪器硬件能够发射任意激励波形, 用于 Chirp 信号的发生, 并且具有足够的带宽, 便于产生指定带宽和持续时长的线性 Chirp 信号。同时仪器软件部分具有对线性 Chirp 检测信号进行快速后处理运算的能力, 以快速生成检测频率特性曲线, 并获取到最佳检测频率, 得到最佳检

测信号。

4 结论

本文研究了电磁超声检测频率自适应优化方法, 论述了基于线性 Chirp 信号实现电磁超声频率自适应优化方法原理, 并且建立了检测频率自适应优化试验系统。通过试验验证了线性 Chirp 检测信号分频提取算法的可行性和可靠性, 并针对不同材料、不同提离和不同温度下检测频率自适应优化开展了试验研究, 证明了线性 Chirp 实现电磁超声检测频率自适应优化方法的有效性。

(1) 从线性 Chirp 检测信号中分频提取得到的单频检测信号与实际单频检测信号完全相同, 进一步线性 Chirp 扫频与逐点扫频得到的传感器频率特性曲线完全相同, 表明线性 Chirp 实现 EMAT 频响测试是可行可靠的, 并且在测量精度和效率方面, 线性 Chirp 扫频明显大大优于逐点扫频。

(2) 通过试验研究不同材料、不同提离、不同温度下的检测频率自适应优化, 结果证明了线性 Chirp 实现电磁超声检测频率自适应优化方法的有效性, 为工程现场实时进行检测频率优化奠定了基础。同时表明, 不同检测工况会直接影响电磁超声检测频率特性, 即被检对象材料、温度及检测提离的变化会导致最佳检测频率发生漂移, 此外不同检测工况还会影响检测回波信号幅值。

(3) 采用线性 Chirp 实现电磁超声检测频率自适应优化的方法, 可以在不同工况下快速、实时地进行检测频率自适应优化, 获取电磁超声最佳检测频率, 得到最佳检测效果。

参 考 文 献

- [1] MACLAUCHLAN D, CLARK S, COX B, et al. Recent advancements in the application of EMATs to NDE[C]// 16th World Conference on NDT, 2004: 1154-1161.
- [2] DOBBS E R. Electromagnetic generation of ultrasonic waves[J]. Physical Acoustics, 2012, 10: 127-89.
- [3] HIRAO M, OGI H. Electromagnetic acoustic transducers [M]. Berlin: Springer, 2016.
- [4] SEBKO V P, SUCHKOV G M, ISHCENKO V N. Analysis of factors affecting the results of electromagnetic acoustic inspection of hot metal[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2004, 40(11): 746-752.
- [5] 刘盛, 郑阳, 郑晖, 等. 电磁超声换能器激励性能研究进展[C/CD]//全国无损检测学术年会, 2013. LIU Sheng, ZHENG Yang, ZHENG Hui, et al. Progress of electromagnetic acoustic transducer transmitting

- performance research[C/CD]/National Annual Conference on NDT, 2013.
- [6] ORZUA S, BALTAZAR A, TREESATAYAPUN C. Adaptive control for lift-off effect of EMAT based on IF-THEN rules and ultrasound RMS value[C]/Robotic and Sensors Environments (ROSE), 2013 IEEE International Symposium on IEEE, 2013: 84-89.
- [7] HUANG S, ZHAO W, ZHANG Y, et al. Study on the lift-off effect of EMAT[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2009, 153(2): 218-221.
- [8] OGI H. Field dependence of coupling efficiency between electromagnetic field and ultrasonic bulk waves[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(8): 3940-3949.
- [9] WANG S, XIN P, KANG L, et al. Research on influence of lorentz force mechanism on EMAT's transduction efficiency in steel plate[C]/Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2010: 196-201.
- [10] 孙斐然, 孙振国, 张文增, 等. 基于洛伦兹力机制的电磁超声发射换能器的建模与优化[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 12-21.
- SUN Feiran, SUN Zhenguo, ZHANG Wenzeng, et al. Review of modeling method and optimum design of EMAT transmitters based on Lorentz principle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 12-21.
- [11] RIBICHINI R, NAGY P B, OGI H. The impact of magnetostriction on the transduction of normal bias field EMATs[J]. NDT & E International, 2012, 51(10): 8-15.
- [12] JIAN X, DIXON S, EDWARDS R S, et al. Coupling mechanism of electromagnetic acoustical transducers for ultrasonic generation[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(5): 2693-2701.
- [13] MA Qingzeng, JIAO Jingpin, HU Ping, et al. Excitation and detection of shear horizontal waves with electromagnetic acoustic transducers for nondestructive testing of plates[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(2): 428-436.
- [14] 郑阳, 何存富, 吴斌. Chirp 信号及其在超声导波检测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 552-558.
- ZHENG Yang, HE Cunfu, WU Bin. Chirp signal and its application in ultrasonic guided wave inspection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3): 552-558.
-
- 作者简介:** 郑阳, 男, 1984 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为电磁超声、相控阵超声、超声导波、磁声多参数等检测方法, 传感器与检测仪器开发等。
E-mail: zhengyangchina@126.com
- 周进节(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士。主要研究方向为超声和超声导波检测方法, 传感器与检测仪器, 声场可视化技术等。
E-mail: zhoujinjiechina@126.com
- 张宗健, 男, 1990 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方向为电磁超声传感器研制及性能评估、电磁超声高温检测方法等。
E-mail: zhangzongjiancn@126.com
- 谭继东, 男, 1988 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方向为磁巴克豪森、磁特性、磁多参数等检测方法, 传感器与仪器开发等。
E-mail: tanjidongchina@163.com