

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1902754

EMAT接收端电路的设计与优化*

李松松¹ 平东岳² 张宸宸¹ 夏闻泽¹ 郭中会¹

(1.大连海洋大学 信息工程学院 大连 116023; 2.大连理工大学 电子科学与技术学院 大连 116021)

摘要: 电磁超声换能器(EMAT)由于不需要耦合剂、可应用于高温环境而获得广泛关注,但是存在换能效率低、超声回波信号幅值小、容易受到噪声干扰的问题,需要对其进一步研究。根据EMAT的工作机理,通过分析超声兰姆波回波信号的特点确定了接收电路的指标,设计并优化了阻抗匹配电路、前置放大电路以及低通滤波电路,同时设计了数字带通滤波器对信号进一步处理。首先对前置放大电路进行仿真,使其具备小信号接收能力。然后采用的三级负反馈电路结构的低通滤波电路,消除空间耦合噪声。最后搭建了铝板的EMAT探伤测试系统,结果表明设计的接收电路很好地实现了兰姆波的检出,为探伤系统的研制提供了基础。

关键词: 电磁超声传感器; 兰姆波; 阻抗匹配; 前置放大器

中图分类号: TN721.1; TN713+.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1010

Design and optimization of EMAT receiver circuit

Li Songsong¹ Ping Dongyue² Zhang Chenchen¹ Xia Wenze¹ Guo Zhonghui¹

(1. School of engineered information, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. School of Electronic Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116021, China)

Abstract: Electromagnetic acoustic transducer(EMAT)sensors are widely concerned because they do not need couplers and can be used in high-temperature environments. However, there are problems such as low energy conversion efficiency, small amplitude of ultrasonic echo signal, and easy to be disturbed by noise, which need to be further studied. According to the working mechanism of the EMAT, through analyzing the characteristics of the echo signal of ultrasonic Lamb determines the index of receiving circuit, design and optimize the impedance matching circuit, preamplifier circuit and low-pass filter circuit, and design the digital bandpass filter for further signal processing. Firstly, the preamplifier circuit is simulated to make it capable of receiving small signals. Then a three-stage MFB low pass filter circuit is adopted to eliminate the spatial coupling noise. The EMAT flaw detection test of aluminum plate was made and built by circuit hardware. The results show that the designed receiver circuit can detect lamb wave well, which provides a foundation for the development of the testing system.

Keywords: EMAT; lamb wave; impedance matching; receiver circuit

0 引言

铝合金薄板具重量轻、强度高与易加工等优点,是常用来制造装备的主要材料。但由于加工技术的局限性以及在使用过程中周期性载荷,铝板内部往往会产生损伤,因此关于缺陷的探测便显得尤为重要。目前应用于铝板的无损检测方法有射线检测、超声检测、渗透检测以及涡流检测^[1]。超声检测检测具有成本低、速度快、定位准确的优点而被广泛运用于无损检测中,根据传感器的不同可分为传统压电式超声波检测以及新型的电磁超声传感器检测。压电超声

检测利用压电晶体在受到超声波外力的作用下发生带电粒子两极化的原理进行检测,这种方法为了使探头中激发的超声波能进入被测板材通常需要耦合剂,因此不适用于高温等恶劣环境下的探测^[2]。

电磁超声波是通过线圈在被测板材上激发出超声波直接传递,具有不需要耦合剂、无需对被测试件表面进行预处理、适合高温等恶劣工况的优点。电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)可以激发多种超声波,本文采用兰姆波进行激发探测。当金属板厚度和兰姆波长在同一个数量级时,被测试件上被激发的高

收稿日期:2019-03

*基金项目:辽宁省自然基金(2015020124)、辽宁省海洋与渔业厅项目(201723)资助

频震动便会以兰姆波的形式传播^[3]。兰姆波在薄板材检测具有快速、低衰减、高灵敏度等优点。EMAT 的兰姆波检测也存在模态多、频散严重的问题^[4]。

针对 EMAT 换能效率低,回波信号易被噪声淹没的特点,很多学者通过建模实验等方法对其进行优化设计。Ogi 等利用不等间距线圈成功地把垂直剪切波在铝块中聚集在一条直线上^[5]。研究发现将 EMAT 组成阵列可以提高电磁超声传感器的准确性。Sawaragi 等将 4 单元的电磁超声传感器阵列成功翻倍成有 8 个单元的 EMAT 阵列^[6]。其他在阵列方面的研究还有 Yamada 设计的楔形阵列,经过验证该 EMAT 系统可以更加精确的检测金属板材中缺陷的类型和位置^[7]。EMAT 阵列的通道一定程度上决定了 EMAT 的可靠性,麦克劳克伦设计的电磁超声传感器阵列拥有 32 通道。这个电磁超声传感器阵列的驱动功率最大可以达到 100 kW,并且探头发射的声束能够每秒改变 2 000 次^[8]。国内也有许多学者对 EMAT 进行了相关研究。1987 年,张广纯等在铁磁材料中成功激发并接收到兰姆波,实现了对 3~16 mm 钢板的缺陷检测^[9]。

21 世纪后,国内学者开始投入更多的目光到电磁超声传感器的研究上。华中科技大学的刘天华等人利用数字型号处理器将接收到的回波信号送入单片机进行计算,最终实现了精度为 0.1 mm 的在线测量^[10]。天津大学的李莺莺等人根据接受线圈接受回波信号的特点,研究了一种新的时域分析方法,而且利用软件对所设计的算法进行了仿真分析。最终证实了该算法可以明显降噪,提高了系统的检测精度^[11]。哈工大的翟国富等人通过有限元模拟 EMAT 相控阵中参数对检测效果额影响,并且得到了实验验证^[12]。杨理践等人根据毕奥萨伐尔定律优化 EMAT 的对称与非对称曲折性线圈激发的兰姆波对于铝板的纹状缺陷的检测能力^[13]。钦峰等建立了 EMAT 实物模型,通过对不同几何形状的励磁线圈、电磁感应强度和提离距离等影响因子的优化设计可以有效改善 EMAT 测试性能^[14]。时亚,石文泽等建立多根分裂曲折线圈接收 EMAT 的有限元模型,获得了表面波 EMAT 最佳参数组合,通过 A\B 扫检测方法,表面波 EMAT 可以有效检出钢轨踏面裂纹^[15]。

与以上研究不同,本文是设计优化了 EMAT 信号激励与接收部分的电路,包括阻抗匹配电路、前置放大电路与低通滤波电路,并设计了数字带通电路。通过硬件电路的制作,并且搭建了铝板 EMAT 测试环境,对设计进行了实验验证。

1 电磁超声传感器的工作机理

EMAT 由用来产生偏置磁场的永久磁铁、通有高频率交流电的激励线圈和被测金属试件 3 个部分组成,如图 1 所示。

当放在被测金属薄板上方的曲折线圈内通有高频交流

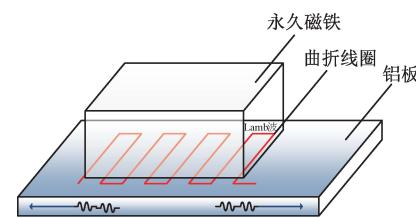


图 1 电磁超声传感器结构示意图

电时,被测试件内就会产生感生涡流,永久磁铁在线圈上方提供静磁场涡流在静磁场中,会引起试件内部的质点不同方向的力,这些力造成被测试件内部的形变,进而引起质点的振动。这些振动满足一定的条件后就会以兰姆波的形式在被测试件中传播。超声波的接收过程和激发过程正好相反,当激发出的超声波传递到在静磁场下的线圈下方时在线圈内产生感应电流,因此便可以由接收电路进行接收^[16]。根据被检测板材的不同 EMAT 工作分为非铁磁材料下的洛伦兹力作用,和铁磁材料下洛伦兹力、电磁力与磁致伸缩力共同作用。实验证明 EMAT 的换能效率很低,比传统压电式超声传感器要低 20~40 dB^[17]。

电磁超声激发和接收过程及装置流程图如图 2 所示。

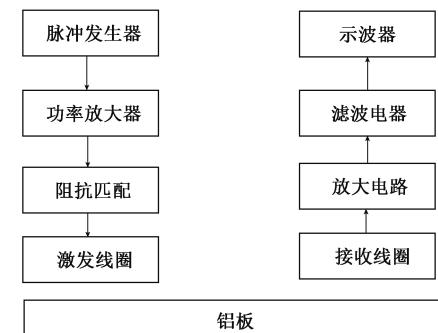


图 2 电磁超声检测示意

2 电路设计

由于 EMAT 换能效率很低、回波信号幅值很小,有时甚至在微伏级别,因此就需要良好的阻抗匹配电路尽可能提高线圈内激励电流的功率。同时要求前置放大增益足够大,并且具有小信号接收能力。由于兰姆波频率一般在 100 kHz~2 MHz 之间,要求前置放大器有较好的增益带宽积。

EMAT 的结构决定了其容易接受空间电磁耦合噪声,其中包括环境噪声、功率放大器产生的噪声,所以必须匹配滤波器。根据上述超声兰姆波回波的特点,确定了本文所要设计的接收端电路主要指标为:良好的阻抗匹配电路,使激发探头内的线圈获得最大的激发功率;具有接收小信号能力的前置放大电路,并且放大倍数不小于 60 dB,同时具有可以调节放大倍数的功能,还要求其噪声抑制能力十分出

色;低通滤波器需要出色的滤波能力且品质因数 Q 值要尽量大。

2.1 阻抗匹配电路

本文采用的功率放大器的输出阻抗为 50Ω ,EMAT 线圈却只有几欧姆并且由铜线绕成的线圈还存在电感。这样使得线圈和功放之间存在着严重的阻抗不匹配。负载电路存在感抗或者容抗时不仅电阻要和功率放大器内阻一样还要令负载电路中的电感共轭才能保证输出功率最大。本文利用阻抗分析仪测量激励线圈的电抗。阻抗匹配可以通过串联或者并联电容的方法实现。下面分析计算过程,忽略线圈内的分布电容。设功率放大器电阻为 R_i 欧姆,线圈为感性电抗设为 $Z_m = R_m + j\omega L$,要串联的电容值设为 C ,那么它的阻抗为 $1/j\omega C$ 。那么应该满足的关系:

$$R_i = R_m + j\omega L + 1/j\omega C \quad (1)$$

求解:

$$C = \frac{1}{(R_i - R_m)j\omega + \omega^2 L} \quad (2)$$

式中: $\omega = 2\pi f$

或者并联电容值为:

$$C = \frac{L}{R_m^2 + (\omega L)^2} \quad (3)$$

在要求精度不高时,可以简单地认为线圈中感抗和容抗共轭匹配时,就可以达到阻抗匹配,此时负载电路为纯阻抗电路。

2.2 前置放大电路

本文设计了由 OPA37GU 和 VCA810 组成的四级可调增益放大器。OPA37GU 是一款超低噪声精密运算放大器,拥有低噪声、直流电平偏差低、低漂移(*lowdrift*)的优点,在 1 kHz 时最大输入噪声电压 $4.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。VCA810 是一款高增益且可变增益放大器,具有宽带放大功能,它的增益可以在 $-40 \sim 40 \text{ dB}$ 内调节。具有 $0.4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的低噪声输入电压。VCA810 是差分输入,并且采用单输出的方式抑制共模信号。因为需要检测的信号幅值小噪声大抗干扰能力强,采用反向放大电路在每一级增益的设计上为了满足前置放大器宽带宽增益的要求平分增益,每级增益在 15 dB 左右。一三级选用 OPA37Gu 芯片增益由反馈回路的电路确定增益公式为:

$$A_u = -\frac{R_1}{R_2} \quad (4)$$

第一级 R_1 选择 $10 \text{ k}\Omega$, R_2 选择 $1.5 \text{ k}\Omega$,第三级分别选择 $5.6 \text{ k}\Omega$ 和 $1 \text{ k}\Omega$ 的电阻。最后设计的四级前置放大电路如图 3 所示。在 VCA810 压控引脚方面,本文选择用 3 k 滑动变阻器和 2 k 电阻串联成分压电路输出 $-2 \sim 0 \text{ V}$ 的电压。

针对设计的原理电路,本文进行了仿真分析。其中输入信号为 1 mV 的正弦波信号。

图 4 是输出端和输入端波形对比。可以看出,在输入

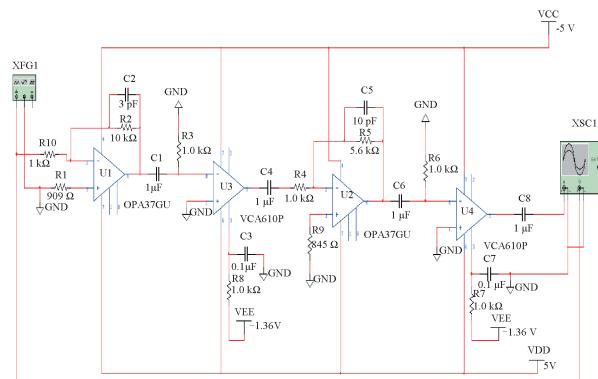


图 3 前置放大电路仿真电路图

信号为 1 mV 时,输出信号达到 1 V ,增益达到了 60 dB 。改变 VCA810 引脚 3 的输入的电压还可以控制增益。

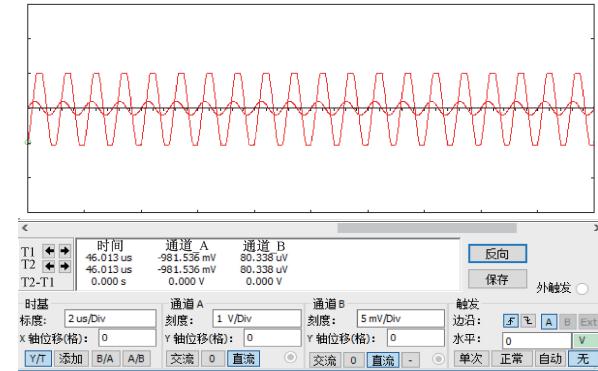


图 4 放大器仿真图形

2.3 低通滤波电路

由前述介绍可知,EMAT 容易耦合空间各种电磁噪声,因此本文设计了滤波电路。本文使用滤波器设计工具设计了 1.5 M 低通滤波器。选择了三级多端负反馈(multiple feedback, MFB)型电路。多反馈拓扑结构对原件的变化灵敏度较低且反向差分输入,具有较好的抑制共模信号作用。它的基本结构如图 5 所示:

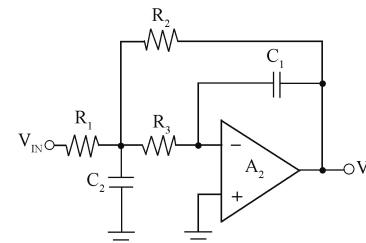


图 5 多反馈(MFB)拓扑结构

传递函数为:

$$f(s) = \frac{GBs}{s^2 + Bs + \omega_0^2} \quad (5)$$

式子中 G 为增益:

$$G = -\frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

B 为低通滤波器截止频率:

$$B = \frac{2}{R_3 C_2} \quad (7)$$

设计低通滤波器原理图如图 6 所示,并对该电路进行了交流小信号仿真分析,结果如图 7 所示:

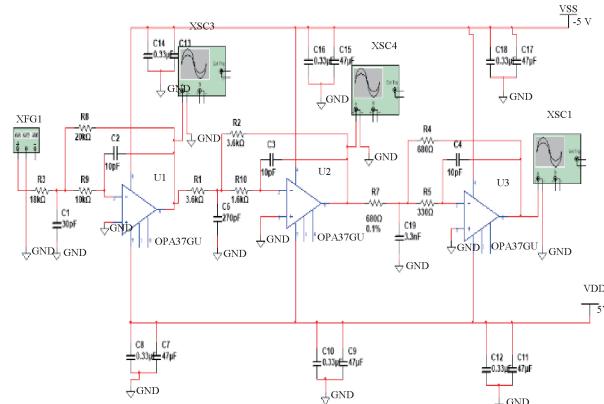


图 6 1.5 M 低通滤波器电路

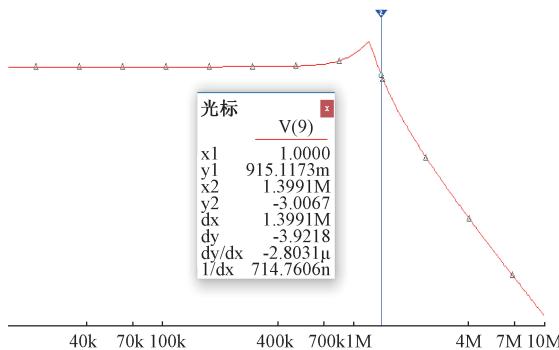


图 7 1.5 M 低通滤波器交流分析

根据分析结果可知该低通滤波器的截止频率在 1.5 MHz, 符合设计要求。

3 硬件电路实现与实验验证

3.1 EMAT 线圈制作和阻抗匹配测试

本文使用漆包铜线在有机玻璃刻的凹槽内绕制而成。线圈间距为 4 mm。通过阻抗分析仪测得在 64 kHz 激发频率下 $R=1.6 \Omega, L=3.2 \mu\text{H}$ 。实验中用到的功率放大器输出阻抗为 50Ω , 因此根据公式(2)和(3)可以计算得出需要串联或者并联的电容。

3.2 前置放大电路的制作和测试

根据上文原理电路图设计电路板采取兆欧级电阻和小电阻串联分压的形式作为前置放大器输入信号进行测试, $2.2 \text{ M}\Omega$ 的电阻和 $1 \text{ k}\Omega$ 电阻串联分压函数发生器对

452 μV 正弦波信号进行放大, 100 kHz 频率下正弦信号放大如图 8。

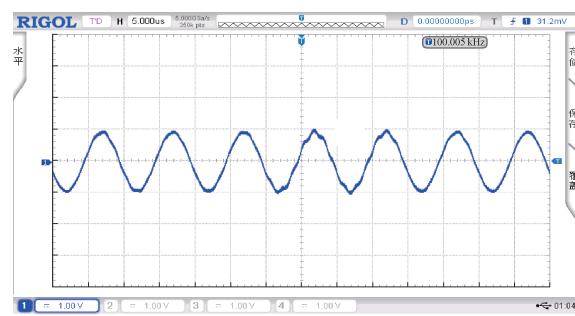


图 8 452 μV 正弦信号放大

在 100 kHz 时 $452 \mu\text{V}$ 正弦波信号经过放大器放大后信号变为 1 V, 增益 Gain=66.9 dB, 满足前置放大增益大于等于 60 dB 的要求。

3.3 低通滤波器的搭建和测试

为验证其低通滤波器功能, 进行了滤波效果的测试。

图 9、10 分别为带有噪声的原始信号与滤波后的信号, 从图上可以看出经过低通滤波器后的信号消除了原始信号中存在的毛刺和噪声, 接收信号更加平滑, 滤波效果明显。

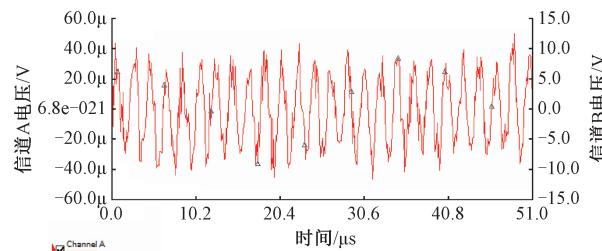


图 9 带噪声的输入信号

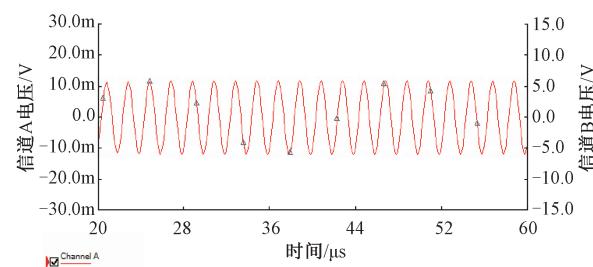


图 10 滤波后信号波形

3.4 铝板兰姆波检测实验

在铝薄板中激发出兰姆波后通过接收探头、前置放大电路、滤波电路最后由示波器进行显示。如图 11 所示。

图中左边的探头是发射探头, 右边为接收探头。发射和接收探头之间的距离决定了首波和第一次接收波之间传输的时间。实验中被测铝板和线圈的参数表 1 所示:

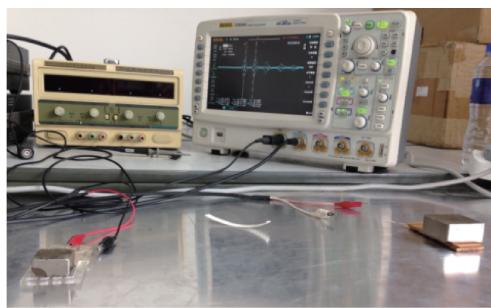


图 11 实验系统

表 1 实验铝板与线圈参数

名称	参数
铝板长度(l)	1 000 mm
铝板宽度(b)	1 000 mm
铝板厚度(d)	1 mm
线圈间距(x)	3 mm
提离距离(h)	0.5 mm
激发频率(f)	64 kHz

由于硬件设计的 1.5 MHz 的低通滤波器对耦合的高频噪声有很好的抑制作用,并且提供了很宽的超声信号频带,但是针对本次测试的低频信号的滤波能力仍有欠缺。为此,本文使了 Matlab 设计了通频带为 10~100 kHz 的数字滤波器。

传感器接收的原始信号如图 12 所示,其滤波后的信号如图 13 所示。可以看出设计的带通滤波器去噪效果明显,滤波后的波形更加清晰,各个回波特点也得以体现。

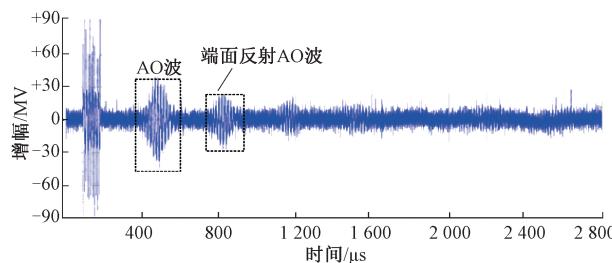


图 12 接收端的原始信号

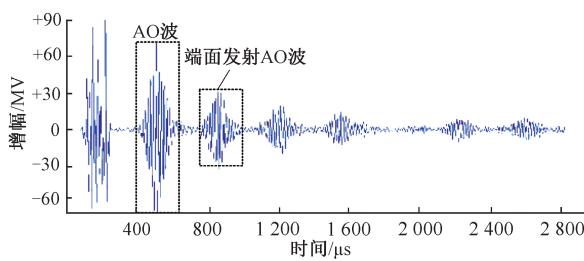


图 13 带通数字滤波后的信号

根据首波和各个波峰之间的时间可以算出回波信号的传播速度为 1 326 m/s。本实验中频厚积为 0.064 MHz.mm,根据铝板材料的频散曲线可知此频厚积下兰姆波 A0 模态的相速度传播速度为 1 300 m/s,与实验所得结果基本吻合,可以确定该波簇属于兰姆波的 A0 模态。

为验证阻抗匹配电路的效果,通过回波信号的幅值来判断阻抗匹配是否符合要求。无阻抗匹配与加入阻抗匹配之后回波信号幅值,具体如表 2。

表 2 无阻抗与加入阻抗匹配回波信号幅值比较

	A0 波	端面反射 A0 波
无阻抗匹配	30 mv	20 mv
加入阻抗匹配	58 mv	38 mv
放大倍数	1.93	1.90

从表中可以看出阻抗匹配电路使得回波信号的幅值提高 2 倍左右,达到预期匹配效果。

4 结 论

本文根据兰姆波接收回路的特点,设计并优化了阻抗配电路、前置放大电路以及截止频率为 1.5 MHz 低通滤波电路,并设计了 10~100 kHz 的数字带通滤波。

设计的前置放大电路仿真结果可达到 60 dB,实测电路效果能够实现 66.9 dB 的增益,并且可实现增益可调,达到了预期放大效果。采用的三级 MFB 结构的低通滤波电路,能够滤除部分空间耦合噪声。硬件低通滤波与数字带通滤波器结合,能够使得回波信号波形的特征更明显与清晰,达到了去噪的效果。阻抗匹配电路可以有效将回波信号的幅值提高约 2 倍。

本文设计的硬件电路可以应用于 EMAT 的实际测试与应用,为接下来的无损检测缺陷信号的预处理做了充分的前期工作准备。

参考文献

- [1] 陈海英,李华桃.常用无损检测方法的特点及应用选择[J].无损探伤,2009,33(5):23-24.
- [2] 段伟亮.铝合金厚板电磁超声缺陷检测方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [3] 杨理践,梁震,高松巍.电磁超声兰姆波的无损探伤技术[J].仪表技术与传感器,2012(12):76-79,83.
- [4] SU Z Q, YE L, LU Y. Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: A review [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3):753-780.
- [5] OGI H, HIRAO M, OHTANI T. Flaw detection by line-focusing electromagnetic acoustic transducers[P]. Ultrasonics Symposium, 1997. Proceedings., 1997 IEEE,1997.

- [6] SAWARAGI K, SALZBURGER H J, HUBSCHEN G, et al. Improvement of SH-wave EMAT phased array inspection by new eight segment probes [J]. Nuclear Engineering and Design, 2000;153-163.
- [7] YAMADA H, YANO Y, UDAGAWA T. Development of the phased array system for angle beam testing [J]. NIPPON Steel Technical Report, 2004, 89: 28-32.
- [8] MACLAUCHLAN D, CLARK S, COX B, et al. Recent advancements in the application of EMATs to NDE[C]. 16th World Conference on NDT, 2004.
- [9] BAO L, ZHAI G, WANG K, et al. Influence of element parameters on SV-wave EMAT phased arrays directivity [C]. Prognostics and System Health Management Conference, PHM-Harbin 2017, October 20, 2017.
- [10] 张广纯,陆原,李希英,等.电磁超声自动探伤技术[P].中国,GO1N29/04, 90109231.1993.
- [11] 刘天华,乔学亮,陈建国.EMAT 测距测厚的系统设计及实现[J].测控技术,2005(4):20-22.
- [12] 李莺莺,靳世久,曹丽娜.油气管道电磁超声法检测的信号处理[J].石油学报,2006(3):112-114+119.
- [13] 杨理践,邢燕好,张佳,等.基于电磁超声导波的铝板裂纹缺陷检测方法[J].仪器仪表学报,2018,39(4):150-160.
- [14] 钱峰,谢国利,阮利程,等.电磁超声换能器设计性能评价[J].电子测量技术,2017,40(9):14-19.
- [15] 时亚,石文泽,陈果,等.钢轨踏面检测电磁超声表面波换能器优化设计[J].仪器仪表学报,2018,39(8):239-249.
- [16] 安佰江.电磁超声检测机理的实验研究[D].华中科技大学,2008.
- [17] 胡力,严仍春.电磁超声脉冲激励电路的设计[J].理化检验(物理分册),2013,49(3):174-176.

作者简介

李松松,博士,教授,主要研究方向为超声无损检测技术及仪器、信号与信息处理。
E-mail:lisongsong@dlou.edu.cn