

电磁超声兰姆波换能器多目标优化设计

康 磊¹, 张晓辉¹, 张雨平², 程 辉²

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 东北轻合金有限责任公司, 哈尔滨 150060)

摘要: 针对电磁超声兰姆波换能器激发的兰姆波存在多模式、频散现象和信号较弱的问题, 结合铝合金板材检测背景, 提出一种基于“双交点法”、“零斜率准则”和正交试验设计相结合的电磁超声兰姆波换能器多目标优化设计方法。其中,“双交点法”可有效削弱兰姆波多模式现象的影响,“零斜率准则”能够有效降低兰姆波的频散现象,而正交试验设计方法可有效提高电磁超声兰姆波信号的幅值。依据所提优化设计方法,对一个在铝板检测中常用的电磁超声兰姆波换能器的 9 个主要参数进行了多目标优化设计。实验表明,优化后,兰姆波信号中的多模式、频散现象得到显著抑制,而且信号幅值得到明显提升,有效改善了电磁超声兰姆波换能器的工程实用性。

关键词: 电磁超声兰姆波换能器; 多模式现象; 频散现象; 正交试验设计

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-05-0535-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.05.018

Multi-objective optimization of Lamb wave electromagnetic acoustic transducer

KANG Lei¹, ZHANG Xiao-hui¹, ZHANG Yu-ping², CHENG Hui²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China;

2. Northeast Light Alloy Company, Harbin, 150060, China)

Abstract: To minimize the multi-modes and dispersion phenomena and to enhance the signal strength of Lamb wave Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT), this paper proposes a multi-objective optimization method for Lamb wave EMAT based on the combination of the “two-intersection-points” method and “zero-slope” criterion with the orthogonal test method. The “two-intersection-points” method and the “zero-slope” criterion can effectively minimize the influence of multi-modes and the dispersion phenomena of Lamb waves respectively; and the orthogonal test method is able to enhance the signal strength of Lamb wave signals. Nine prime parameters of a Lamb wave EMAT which is commonly used for the inspection of aluminum plates are optimized based on the proposed multi-objective optimization method. Experiments show that after optimization, not only the multi-modes and the dispersion phenomena are notably depressed, but also the signal strength is greatly enhanced, which significantly improves the practicability of the transducers.

Key words: Lamb wave electromagnetic acoustic transducer; multi-modes phenomenon; dispersion phenomenon; orthogonal test method

0 引言

电磁超声兰姆波换能器综合了电磁超声换能器(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)和兰姆波的各自优势,检测时不仅无需耦合剂、无需对试件预处理,而且检测效率较高,检测范围较广,能够在高温、高速等恶劣环境下完成试件的在线检

测,在管道、板材等无损检测领域获得广泛应用^[1]。

然而,电磁超声兰姆波换能器(简称兰姆波 EMAT)的应用和普及受到了三方面因素的限制:(1)兰姆波的多模式特性通常会使多种模式的兰姆波存在于试件中,导致超声检测信号较为杂乱,有时甚至难以分辨出缺陷回波信号,造成检测失败;(2)兰姆波的频散特性通常会使超声信号在时间轴上逐渐拉长,回波信号能量分散,信噪比下降,导致检测系统分辨力降低^[2];(3)EMAT 换能效率较低,检测信号通常较弱,限制了检测系统的缺陷分辨力^[3]。

目前,研究者们通过合理选择换能器激励信号、调整换能器参数、引入信号处理算法、使用高性能发射接收电路等多种方法^[3-6],分别对上述三方面问题进行了研究,有效改善了兰姆波换能器的性能。

收稿日期: 2011-08-10; 修回日期: 2011-11-27

基金项目: 国防科技工业技术基础重点科研项目资助(B1220102302)、中央高校基本科研业务费专项基金项目资助(HIT. NSRIF. 2012008)、中国博士后科学基金资助项目资助(2012M51092)

作者简介: 康磊(1981—),男,讲师,工学博士,研究方向为电磁超声换能器优化设计与电磁超声无损检测技术。

通讯作者: 康磊, E-mail: victorkang11@126.com

然而,关于通过合理设计兰姆波 EMAT 参数来同时改善上述三方面不足的研究至今仍鲜有报道。EMAT 是电磁超声检测系统的核心部件,其性能决定了检测系统的整体性能。为了从根本上解决上述三方面问题,本文结合铝合金板材检测背景,提出一种电磁超声兰姆波换能器多目标优化设计方法。

1 多目标优化设计方法

图 1 给出了一个基于洛伦兹力机理的电磁超声兰姆波换能器示意图。该换能器由永磁体、曲折线圈和待测铝板组成。其中,EMAT 的主要设计参数包括兰姆波工作频率 f , 曲折线圈导线间距 L 、导线长度 l_1 、导线宽度 w_1 、线圈提高距离 d_1 , 永磁铁的长度 l_2 、宽度 w_2 、厚度 t_2 以及发射电流峰值 I_0 。假设兰姆波波长为 λ , 则当线圈导线间距 L 为 λ 的 $1/2$ 时, EMAT 能够激发具有高指向性的兰姆波^[1]。

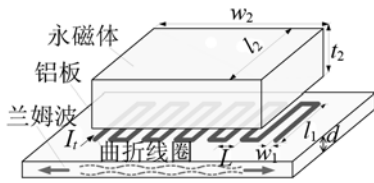


图 1 电磁超声兰姆波换能器示意图
Fig.1 Schematic diagram of Lamb wave EMAT

将 $L=0.5\lambda$ 与兰姆波的特性方程相结合可知,电磁超声兰姆波的多模式、频散特性以及群速度 v_g 由兰姆波工作频率 f 、曲折线圈导线间距 L 以及板材厚度 d 决定:

$$\frac{\tan\left[\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{4}{v_T^2}(f')^2-\frac{1}{(L')^2}}\right]}{\tan\left[\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{4}{v_L^2}(f')^2-\frac{1}{(L')^2}}\right]} = \frac{\left[\frac{1}{(L')^2}\sqrt{\frac{4}{v_T^2}(f')^2-\frac{1}{(L')^2}}\right]\left[\frac{4}{v_L^2}(f')^2-\frac{1}{(L')^2}\right]^{\pm 1}}{\left[\frac{2}{v_T^2}(f')^2-\frac{1}{(L')^2}\right]^2} \quad (1)$$

$$v_g = -2L'^2 \frac{df'}{dL'} \quad (2)$$

式中, v_T 和 v_L 分别为横波和纵波的传播速度, $f'=fd$, $L'=L/d$ 。

在公式(1)、(2)基础上,图 2 给出了 $L'-f'$ 曲线和 $L'-v_g$ 曲线。在 $L'-f'$ 曲线中,点 (L',f') 的位置决定了 EMAT 激发的兰姆波模式,因此定义 $L'-f'$ 曲线为 EMAT 的激发曲线,定义点 (L',f') 为 EMAT 的工作点。 $L'-v_g$ 曲线反映了兰姆波群速度与换能器参数的

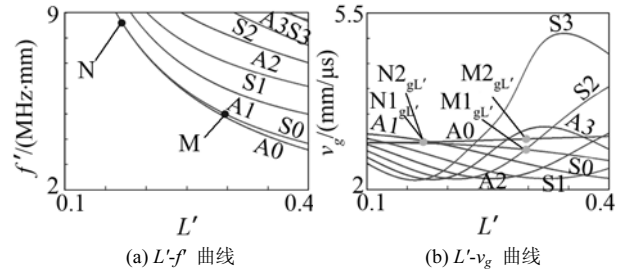


图 2 兰姆波 EMAT 的 $L'-f'$ 曲线和 $L'-v_g$ 曲线
Fig.2 $L'-f'$ curve and $L'-v_g$ of Lamb wave EMAT

关系,因此定义该曲线为群速度曲线。各工作点在 $L'-v_g$ 曲线中存在对应点 (L',v_g) ; 各条模式曲线在点 (L',v_g) 上的斜率决定了兰姆波的频散程度,当斜率为零时,频散现象消失。该现象可用于判断兰姆波是否发生频散,本文将其称为“零斜率准则”。

工程应用中,由于频率 f 存在带宽,且线圈间距 L 存在波动,因此工作点实际上是一个矩形工作区域。当工作区域仅覆盖 $L'-f'$ 曲线中的一条模式曲线时,这时 EMAT 将激发出单一模式的兰姆波,自然避免了多模式现象的产生。

然而,当工作区域同时覆盖多条模式曲线时,将不可避免地产生多模式现象。为此,本文提出了用于削弱多模式现象的“双交点法”。在此基础上,结合“零斜率准则”,即可得到具有最弱多模式、频散现象的工作点。其设计步骤如下:

(1) 在 $L'-f'$ 曲线上,设计兰姆波 EMAT 工作点 (L_0',f_0') ,使之位于两条或多条模式曲线交点上。被工作点覆盖的各模式曲线具有相同的工作频率 f 和导线间距 L ,因此这些模式的兰姆波可被同一个 EMAT 同时激发。

(2) 在 $L'-v_g$ 曲线上,确认工作点 (L_0',f_0') 在所激发的各兰姆波模式曲线上的对应点 (L_0',v_{g0}) 彼此重合,即对应点也位于这些模式曲线的交点上。被对应点覆盖的这些兰姆波具有相同的传播速度,对外不显示多模式现象,从而“消除”了兰姆波多模式特性的影响。

(3) 在 $L'-v_g$ 曲线上,验证所激发的模式曲线在对应点处的斜率是否为零。如果为零,则不会产生频散现象;反之,将会产生频散现象,此时需依照上述过程寻找新的工作点,直至找到能够同时使多模式、频散现象最弱的工作点。

遵循上述步骤,本文首先以消除频散和多模式特性影响为目标,通过求解公式(1)、(2),对一个铝板检测中常用的兰姆波 EMAT 的工作频率 f 和导线间距 L 进行了优化设计。铝板厚度为 10mm。优化前,EMAT 的工作点为 M(0.293, 5); 优化后,工作点为 N(0.17, 8.62),如图 2(a)所示。由于两个工作

点均在 A0、S0 两个模式曲线附近, 因此 A0、S0 模式的兰姆波可以同时被一个 EMAT 激发。M、N 点在图 2(b)上存在对应点, 分别为 $M1_{gL}$ 、 $M2_{gL}$ 、 $N1_{gL}$ 和 $N2_{gL}$ (见图 2(b))。

M、N 两个工作点对应的相关参数如表 1 所示。可以看出: 优化前, A0、S0 两种模式的兰姆波群速度相差约为 7.4%; 优化后, 两者群速度仅相差约 0.7%。此外, 群速度曲线在 N 点上的斜率绝对值远小于在 M 点上的斜率绝对值。因此, 优化后, 多模式和频散现象均被明显削弱。

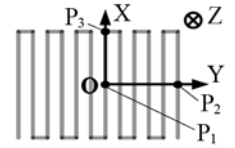
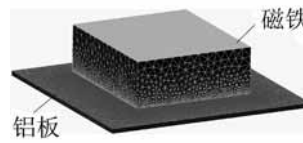
表 1 优化前后两工作点的参数对比表

Table 1 Parameters comparison between operational points before and after optimization

| 工作点 | L/mm | f/MHz | 模式 | $v_g/(\text{mm}/\mu\text{s})$ | dv_g/dL' |
|-----|---------------|----------------|----|-------------------------------|------------|
| M | 2.930 | 0.500 | S0 | 2.800 | -1.7 |
| | | | A0 | 3.008 | 0.5 |
| N | 1.700 | 0.862 | S0 | 2.920 | -0.4 |
| | | | A0 | 2.940 | 0.3 |

由式(1)、(2)可知, 电磁超声兰姆波的多模式、频散特性仅由 f 、 L 和 d 决定。因此, 本文将在保持 f 、 L 最优值不变的前提下, 以增强电磁超声兰姆波信号强度为目标, 借助 EMAT 三维建模和正交试验设计方法, 进一步对 EMAT 的其余参数(包括 l_1 、 w_1 、 d_1 、 l_2 、 w_2 、 t_2 和 I_t)进行优化设计。需要指出, 虽然理论研究和工程实践均已表明, 提高距离 d_1 和发射电流 I_t 对 EMAT 信号的强度具有重要影响^[1], 但为了对比各参数对电磁超声信号强度的影响程度和规律, 本文将 d_1 、 I_t 与其余参数一同进行了研究。

本文采用有限元软件 Flux 对一个铝板检测中常用的兰姆波 EMAT 进行了三维有限元建模, 如图 3(a)所示。该模型由四面体单元构成。其中, 曲折线圈被磁铁遮盖, 在图 3(a)中不可见。由于曲折线圈附近的电磁场变化十分剧烈, 因此本文对该区域进行了网格细化。图 3(b)中给出了有限元模型的坐标系, 其原点 O 位于铝板表面。



(a) Finite element model of EMAT (b) Coordinate system and typical positions on the surface of aluminum plate

图 3 EMAT 有限元模型及其典型位置示意图

Fig.3 Finite element model of EMAT and its typical positions

优化前的模型参数分别为: $l_1=35\text{ mm}$ 、 $w_1=1\text{ mm}$ 、 $d_1=0.5\text{ mm}$ 、 $l_2=40\text{ mm}$ 、 $w_2=40\text{ mm}$ 、 $t_2=15\text{ mm}$ 、 $I_t=100\text{ A}$ 、 $f=500\text{ kHz}$ 、 $L=2.93\text{ mm}$ 。图 3(b)给出了线圈正下方铝板表面三个典型位置的坐标, 分别为 $P_1(0, 0, 0)$ 、 $P_2(0, 15.15, 0)$ 和 $P_3(17.5, 0, 0)$ 。仿真分析表明, 当 P_1 、 P_2 处洛伦兹力的 Y 方向分力 $f_{LY,P1}$ 、 $f_{LY,P2}$ 以及 P_3 处的洛伦兹力 $f_{L,P3}$ 均达到最大时, 将会激发出最强的兰姆波^[7]。

正交试验是一种以数理统计理论为基础的试验设计方法。该方法不仅可在全局范围内系统、高效地寻找换能器参数对优化目标的影响规律, 而且仅用少量实验就可获得优化目标的最优或较优参数^[8]。因此, 本文将以增强 $f_{LY,P1}$ 、 $f_{LY,P2}$ 、 $f_{L,P3}$ 为目标, 采用正交试验设计方法对换能器的其余参数进行优化设计。换能器参数的取值范围根据 EMAT 的工作环境、发射功率、工作频率等因素来确定。每个参数的取值范围各取 3 个水平, 如表 2 所示。本文采用 $L_{18}(3^7)$ 正交表进行正交试验设计^[8], 根据表 2 建立 18 个不同参数的 EMAT 模型, 并获得了模型参数与 P_1 、 P_2 和 P_3 处洛伦兹力的关系, 如图 4 所

表 2 EMAT 参数的变化范围

Table 2 Variation ranges of EMAT parameters

| l_1/mm | w_1/mm | d_1/mm | l_2/mm | w_2/mm | t_2/mm | I_t/A |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 17 | 0.3 | 0.1 | 20 | 20 | 10 | 50 |
| 20 | 0.6 | 0.5 | 23 | 23 | 15 | 100 |
| 23 | 0.9 | 0.9 | 26 | 26 | 20 | 150 |

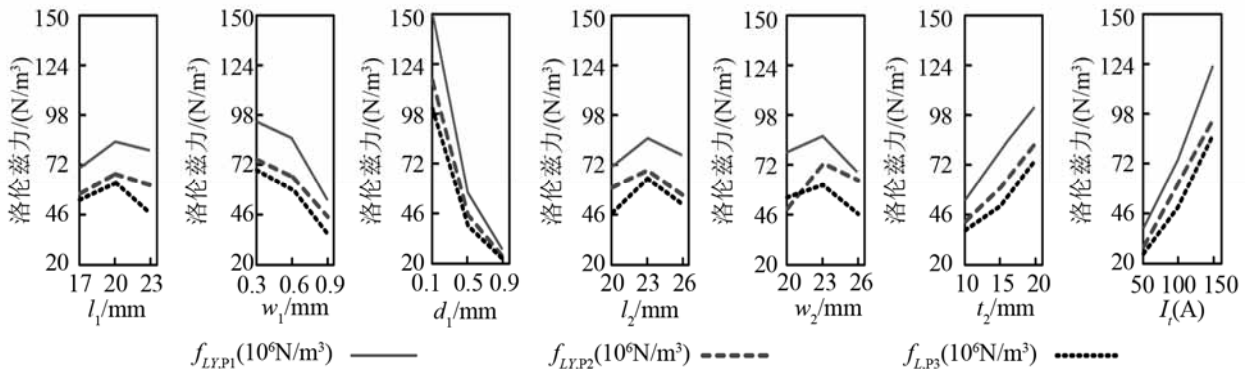


图 4 EMAT 各参数对 $f_{LY,P1}$ 、 $f_{LY,P2}$ 、 $f_{L,P3}$ 的影响规律

Fig.4 Influences of EMAT parameters on $f_{LY,P1}$ 、 $f_{LY,P2}$ 、 $f_{L,P3}$

示。图4表明,提高距离 d_1 和发射电流 I_t 对增强电磁超声信号具有重要影响;但如果合理选择EMAT的尺寸参数,如增加磁铁厚度、减小线圈导线宽度等,同样也可有效增加电磁超声信号的强度。根据图4可知,EMAT的最优参数为 $l_1=20\text{ mm}$ 、 $w_1=0.3\text{ mm}$ 、 $d_1=0.1\text{ mm}$ 、 $l_2=23\text{ mm}$ 、 $w_2=23\text{ mm}$ 、 $t_2=20\text{ mm}$ 、 $I_t=150\text{ A}$ 。

2 实验

为了验证优化设计方法的有效性,本文对优化前后电磁超声换能器的性能进行了实验对比。图5为实验设置的原理示意图,图6为优化前后的电磁

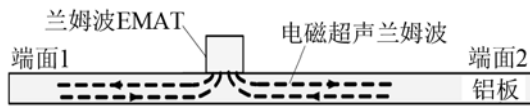
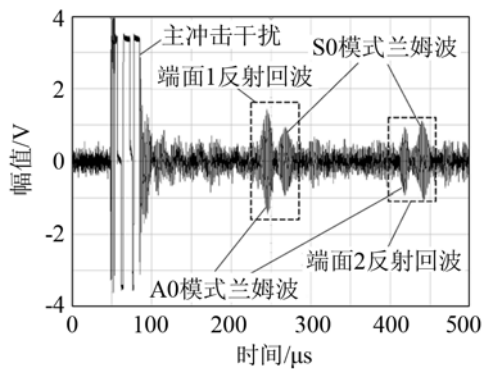
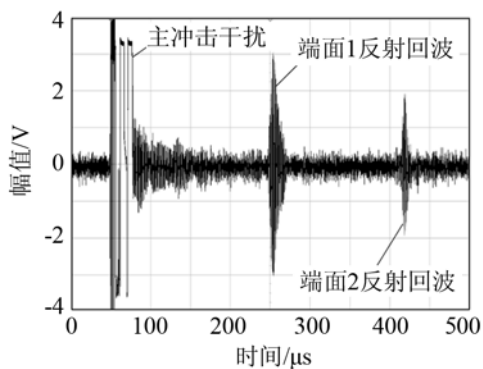


图5 实验设置原理示意图
Fig.5 Setup of experiment



(a) 优化前



(b) 优化后

图6 优化前后兰姆波 EMAT 激发的电磁超声兰姆波信号对比
Fig.6 Comparison of Lamb wave signals before and after optimization

超声信号。可以看出,优化后,电磁超声兰姆波信号的多模式、频散现象不仅得到明显抑制,而且兰姆波信号的强度也增加为原来的2.16倍。

3 结论

本文以铝板检测为背景,提出了基于“双交点法”、“零斜率准则”和正交试验设计相结合的电磁超声兰姆波换能器多目标优化设计方法。实验表明,该方法能够显著抑制电磁超声兰姆波信号的多模式、频散现象,并有效增加电磁超声信号的强度。由于兰姆波信号变得更强且更为纯净,因此有效提高了电磁超声兰姆波换能器的工程实用性。

参考文献

- [1] MAXFIELD B W, KURAMOTO A, HULBERT J K. Evaluating EMAT designs for selected applications[J]. *Materials Evaluation*, 1987, **45**: 1165-1183.
- [2] WILCOX P. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2003, **50**(4): 419-427.
- [3] MACLAUHLAN D, CLARK S, COX B. Recent advancements in the application of EMATs to NDE[C]// 16th World Conference on NDT, Montreal Canada, 2004.
- [4] MONKHOUSE R, WILCOX P, LOWE M. The rapid monitoring of structures using interdigital Lamb wave transducers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2000, **9**(3): 304-309.
- [5] MURAYAMA R, MIZUTANI K. Conventional electromagnetic acoustic transducer development for optimum Lamb wave modes[J]. *Ultrasonics*, 2002, **40**(1-8): 491-495.
- [6] HAYASHI T, KAWASHIMA K. Single mode extraction from multiple modes of Lamb wave and its application to defect detection[J]. *JSME International Journal Series A- Solid Mechanics and Material Engineering*, 2003, **46**(4): 620-626.
- [7] 康磊. 用于铝板检测的电磁超声导波换能器优化设计技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
KANG Lei. Research on optimal design technique of guided wave EMATs for aluminum plate inspection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [8] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
FANG Kaitai, MA Changxing. Orthogonal and uniform design of experiments[M]. Beijing: Science Press, 2001.