

电磁超声换能器三维有限元分析及优化设计

王淑娟, 康磊, 李智超, 翟国富

(哈尔滨工业大学电气工程学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

3-D Finite Element Analysis and Optimum Design of Electromagnetic Acoustic Transducers

WANG Shu-juan, KANG Lei, LI Zhi-chao, ZHAI Guo-fu

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: The deficiency of designing theories of electromagnetic acoustic transducers (EMATs) severely confines the further expansion of their scope of application. To thoroughly solve this problem, this paper built a 3-D finite element model of an surface wave EMAT used for the surface inspection of aluminum plates. Simulation analysis of the model revealed that transduction efficiency of the EMAT was greatly affected by EMAT parameters. As a consequence, based on the established model and by utilizing orthogonal test method, this paper extracted EMAT's key parameters that significantly influenced the transduction efficiency of the transducer; obtained the basic designing principle of the EMAT; and accomplished the optimum design of the EMAT by studying the coil and the magnet individually. Experiment indicated that after optimization the amplitude of the EMAT-received signal increased by 2.99 times. The transduction efficiency of EMATs can be effectively improved by utilizing orthogonal test method based on 3-D finite element model.

KEY WORDS: electromagnetic acoustic transducer; 3-D finite element analysis; optimum design; orthogonal test design; key parameter

摘要: 电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)设计理论的不足严重限制了电磁超声检测技术的进一步发展。为了从根本上解决该问题,对用于铝板表面检测的电磁超声表面波换能器进行了三维有限元建模和仿真分析,发现换能器的几何参数对 EMAT 的换能效率具有重要影响。为此,在所建模型基础上,利用正交试验设计方法选取了影响换能效率的关键参数,确定 EMAT 设计的基本准则,并依次对 EMAT 线圈和永磁体进行了优化设计。实验表明,优化后的电磁超声信号幅值增长为优化前的 2.99 倍,在三维有限元模型基础上利用正交试验设计方法能够有效地对 EMAT 进行优化设计。

关键词: 电磁超声换能器; 三维有限元分析; 优化设计; 正交试验设计; 关键参数

0 引言

电磁超声换能器是一种非接触型超声波发射、接收装置,其换能机制包括洛伦兹(Lorentz)力、磁致伸缩力和磁性力(magnetization force) 3 种形式。其中, Lorentz力机制广泛存在于各种导电材料的待测试件中,而后两者仅存在于铁磁材料试件中^[1]。与传统压电超声换能器相比, EMAT无需声耦合剂、无需对试件预处理、能够方便地产生多种类型超声波,成功地将超声无损检测领域扩展到高温、高速、在线等恶劣环境中。目前,电磁超声技术已在欧美等国管道、锅炉、列车轮轨、电力传输线等设备的出厂检验和日常维护中发挥出重要作用^[2-5],并逐渐成为国外较为主流的无损检测技术之一^[6]。

然而, EMAT工作机制较为复杂,且作为换能器组成部分的试件,在实际应用中种类繁多,因此换能器设计难度较大,目前常以长期经验积累和反复实验调试为主。设计理论的不足致使 EMAT性能较差,严重限制了该技术的进一步发展。为了从根本上解决该问题,研究者们通过建模、实验等手段对 EMAT的优化设计方法进行了研究^[7]。这些研究虽在一定程度上改善了换能器的性能,但多将实际三维实体简化为二维模型^[8-11],并将研究重点集中于 EMAT工作机制的深入探讨、模型的日益完善及永磁体的优化设计等内容^[12-16],较少涉及 EMAT线圈的优化设计方法和探头的整体设计准则等问题。

为此,本文采用有限元软件对用于铝板表面及近表面检测的电磁超声表面波换能器(表面波 EMAT)进行了三维有限元分析,并以提高 EMAT 换能效率为目标对换能器的几何参数进行了优化设计。

1 EMAT 换能机制及其数学模型

EMAT 由线圈、磁铁和待测试件 3 部分组成。通常, EMAT 探头包括线圈和磁铁 2 部分, 换能器性能的优化主要通过适当调整探头结构及其参数来实现。为了有效激发能量集中且指向性较高的电磁超声, 研究者们常采用曲折线圈或螺旋线圈并配以垂直、水平等形式的静磁场设计 EMAT 探头。

EMAT 在铝板中激发电磁超声表面波的工作机制如图 1 所示。曲折线圈在高频大功率发射电流 J_c 激励下在铝板中产生交变电磁场 $B_{d,m}$, 并在铝板集肤深度内感生出涡流 J_E ; 当对涡流施加静磁场 B_s (由 EMAT 磁铁产生) 时, 涡流受到 Lorentz 力 f_L 的作用而引发铝板表面质点的高频振动; 由于表面波 EMAT 线圈的相邻导线间距 a 严格等于表面波波长的 1/2, 因此曲折线圈各条导线激发的高频振动会发生相长干涉, 进而产生沿铝板表面传播的电磁超声表面波^[3]。表面波的接收是其发射的逆过程。

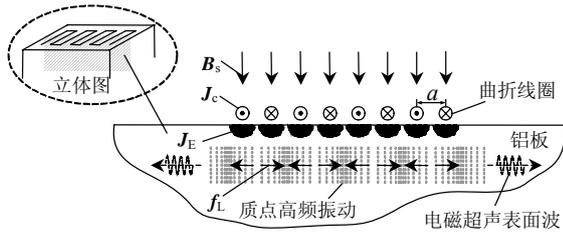


图 1 铝板中电磁超声表面波换能器的工作机制
Fig. 1 Working mechanism of surface wave EMAT in aluminum plate

根据电磁学基本原理^[17], 上述过程可表示为

$$\nabla \times \mathbf{H}_{d,m} = \mathbf{J}_c \quad (1)$$

$$\mathbf{B}_{d,m} = \mu_m \mathbf{H}_{d,m} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}_E = -\frac{\partial \mathbf{B}_{d,m}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_E = \gamma \mathbf{E}_E \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{J}_E \times (\mathbf{B}_{d,m} + \mathbf{B}_s) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{H}_{d,m}$ 为发射电流产生的磁场强度; \mathbf{J}_c 为发射电流密度; $\mathbf{B}_{d,m}$ 为发射电流在铝板内产生的磁感应强度; μ_m 为铝板的相对磁导率; \mathbf{E}_E 为涡流场的电场强度; γ 为铝板的电导率; \mathbf{J}_E 为涡流密度; \mathbf{B}_s 为 EMAT 磁铁产生的静磁场; \mathbf{f}_L 为 Lorentz 力。

式(5)表明, Lorentz 力与线圈产生的涡流以及涡流区域内的静磁场强度成正比, 增强涡流及其分布区域内的静磁场均可提高 EMAT 的换能效率。式(1)~(5)是一个典型的涡流场问题, 可借助有限元理论求解。

2 EMAT 三维有限元建模及仿真分析

本文采用有限元软件对用于铝板表面检测的表面波 EMAT 进行了三维有限元建模和仿真分析。换能器的三维实体模型如图 2(a)所示, 包括 EMAT 线圈、铝板、钕铁硼永磁体和空气远场 4 部分。其中, 空气远场用于模拟实际检测中广阔的换能器远场区域, 以便有效描述 EMAT 电磁场在远场区的耗散, 精确计算换能器在铝板中产生的涡流和磁场。隐去图 2(a)中的永磁体和空气远场后, EMAT 线圈及铝板如图 2(b)所示。考虑到模型关于 ZOX 平面对称, 本文所建模型仅为实际换能器的二分之一。

表面波有效检测深度约为板材表面以下一个波长的范围。为实现铝板无盲区检测, 该深度必须完全覆盖超声体波检测通常所见的 3~5 mm 盲区。假定所研究的电磁超声表面波波长 λ 为 5.9 mm, 由表面波的相长干涉条件可知曲折线圈相邻导线间距 a 为 2.95 mm。表面波在铝板中的传播速度 c 约为 2 950 m/s, 因此发射电流频率 $f=c/\lambda=500$ kHz。曲折线圈匝数为 8, 长 35 mm, 导线宽 1.0 mm, 厚 0.05 mm, 提高距离为 0.5 mm。钕铁硼永磁体尺寸为 60 mm×60 mm×10 mm, 型号 N35, 剩磁 1.21 T, 矫顽力 915 kA/m, 最大磁能积 279 J/m³。铝板尺寸为 120 mm×120 mm×3.2 mm, 电阻率 $2.6 \times 10^{-8} \Omega/m$ 。发射电流采用猝发音信号, 周波数为 8, 峰值为 50 A。本文采用四面体单元对实体模型进行有限元剖分, 隐去空气远场后的 EMAT 三维有限元模型如图 3 所示。考虑到趋肤效应, 铝板表层进行了网格细化。

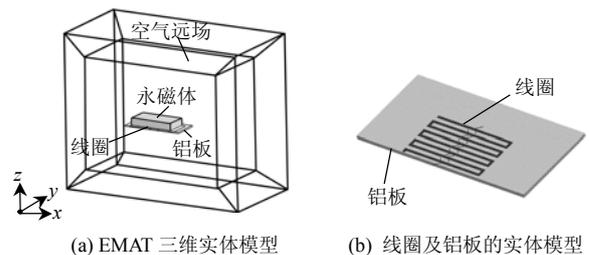


图 2 表面波 EMAT 的三维实体模型
Fig. 2 3-D Physical model of surface wave EMAT

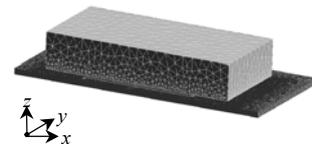


图 3 隐去空气远场单元后的 EMAT 三维有限元模型
Fig. 3 3-D finite element model of EMAT without air element

采用雅可比共轭梯度法求解该模型后可以得到铝板表面的涡流和磁场分布。沿 z 轴负方向看去,

铝板表面涡流分布如图 4 所示。可以看出，铝板中的涡流主要沿 EMAT 线圈轮廓分布。对线圈参数进行修改并对比其产生的涡流可知，涡流强度与线圈的导线宽度、长度以及提离距离等参数密切相关。因此，合理选择线圈参数对提高 EMAT 的换能效率具有重要意义。沿 z 轴负方向看去，铝板表面磁感应强度分布如图 5 所示。可以看出，钕铁硼永磁体在铝板中产生的静磁场并非完全均一，靠近磁体边缘处磁场最强，远离磁体边缘后磁场逐渐减弱。为了在有限的探头体积下激发较强的 Lorentz 力和电磁超声，静磁场应集中分布于涡流区域内。因此，涡流场与静磁场的合理分布与配合对于改善 EMAT 换能效率也至关重要。



图 4 铝板表面涡流密度分布云图
Fig. 4 Contour of eddy current on aluminum plate



图 5 铝板表面磁感应强度分布云图
Fig. 5 Contour of flux density on aluminum plate

3 EMAT 的优化设计

3.1 EMAT 线圈的优化设计

为了获得电磁超声表面波换能器的最优参数、总结 EMAT 设计的基本准则，本文将在所建有限元模型基础上寻找 EMAT 的关键参数、确定各参数对换能效率的影响规律并对换能器进行优化设计。EMAT 三维有限元模型运算量巨大，因此本文选择正交试验设计方法研究该问题。正交设计方法不仅可以高效地寻找换能器的最优或较优参数，而且还可获得各参数对优化目标的影响规律^[18-19]。考虑到静磁场分布与钕铁硼永磁体尺寸密切相关，且静磁场应集中分布于涡流场附近，本文将首先完成 EMAT 线圈的优化设计，然后再根据最佳线圈产生的涡流区域对永磁体进行优化设计。

为了便于分析，本文仅对 EMAT 线圈下方铝板中的 3 个典型区域进行讨论，如图 6 所示。其中，区域 1 位于线圈边缘导线正下方，区域 2 位于线圈

中心导线正下方，区域 3 位于线圈导线端部正下方。区域 1 和区域 2 均为线圈导线长度的 40%，区域 3 长度等于线圈相邻导线的间距。3 个区域均与线圈导线同宽。由电磁超声表面波换能器工作机制可知，EMAT 通过相长干涉激发方向性较高、能量较集中的电磁超声表面波。因此，线圈各匝导线正下方区域产生的涡流有助于激发表面波，优化设计中将其等效为寻找区域 1、区域 2 涡流密度 J_1 、 J_2 的最大值；线圈各匝导线端部激发的超声因无法形成有效叠加而产生干扰杂波，优化设计中将其等效为寻找区域 3 中涡流密度 J_3 的最小值。 J_1 、 J_2 和 J_3 将根据其各自区域涡流密度的算术平均值来确定。

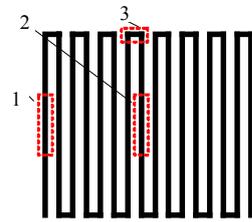


图 6 EMAT 线圈正下方铝板中的 3 个典型区域
Fig. 6 3 typical zones in aluminum plate under EMAT coil

以 J_1 、 J_2 、 J_3 为研究对象，考虑导线长度 l_1 、宽度 w_1 和提离距离 d_1 3 个影响因素，如图 7 所示，利用正交表 $L_9(3^4)$ 进行正交试验设计^[19]。根据 EMAT 线圈在铝板检测中的常用规格、发射功率及制作工艺可确定各因素的取值范围，分别为 l_1 : 30 ~ 40 mm、 w_1 : 0.5 ~ 1.5 mm、 d_1 : 0.1 ~ 0.9 mm。3 个因素各取 3 个水平，其正交表如表 1 所示。按照表 1 的 9 组参数修改有限元模型，计算后可分别得到 9 种情况下的 J_1 、 J_2 和 J_3 ，如表 1 后 3 列所示。

由正交试验的综合可比性可知^[20]，通过计算各因素在相同水平下涡流密度的算术平均值 k_i 可获得各因素水平对涡流密度的影响(其中， i 表示各因素水平的序号， $i=1, 2, 3$)。根据 k_i 可求出各因素的极差 R ，如表 2 所示。表 2 中极差最大的因素对涡流密度影响最大，即 EMAT 线圈的关键参数。

以表 2 中各因素所取水平为横坐标、各因素对应的 k_i 为纵坐标，绘制 3 个区域中各因素与涡流密

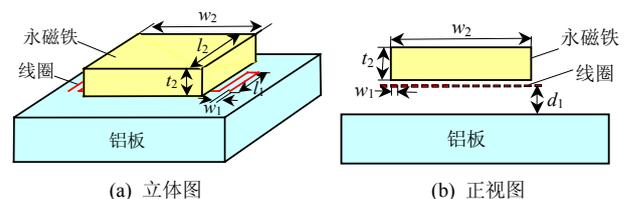


图 7 EMAT 几何参数示意图
Fig. 7 Dimensions of EMAT

度的趋势图，如图8所示。EMAT线圈优化设计中共有 J_1 、 J_2 和 J_3 3个目标值，本文将采用综合平衡法对3个目标进行多目标综合优化，即首先选取使单个目标达到最优的水平组合，再根据各目标的重要程度选取使3个目标综合最优的水平组合^[20]。

由图8(a)和图8(b)可知，区域1和区域2的趋势图较为相似：影响涡流密度最显著的因素均为提高距离，其次为导线宽度，降低提高距离或导线宽度均可明显提高线圈产生的涡流。导线长度对涡流密度影响相对较小，但当其取较小值时更有利于增强EMAT产生的超声。因此，对于区域1和区域2，最佳线圈参数组合为 l_1 : 30 mm; w_1 : 0.5 mm; d_1 : 0.1 mm。图8(c)表明，区域3中影响涡流密度最显著的因素为导线长度，当导线长度取最小值时，区域3的涡流较弱。导线的宽度及提高距离对区域3的涡流密度影响相对较小，当导线宽度取最小值或提高距离取最大值时，区域3的涡流较弱。综合以上分析，在所选因素水平下，线圈长度取30 mm、导线宽度取0.5 mm时，以上3个区域的涡流密度均达到最优。同时，线圈的提高距离是 J_1 和 J_2 的关键参数，而对 J_3 则影响较小，故取为0.1 mm。因此，线圈参数的最优组合为：长30 mm、宽0.5 mm、提高距离0.1 mm，即在所选因素水平范围内，导线长度、宽度及提高距离均应越小越好。

当然，获得以上结论的前提是各种EMAT线圈均具有相同的发射电流，而实际的电磁超声发射电路可能会因发射线圈内阻不同而具有不同的输出电流。因此，在设计良好线圈参数的同时，发射电

路与探头的阻抗匹配问题也应引起足够重视^[21]。

表1 EMAT线圈3因素3水平正交试验表

Tab. 1 Orthogonal test of 3 elements 3 levels for EMAT coil

序号	l_1 / mm	w_1 / mm	d_1 / mm	J_1 / (10^6 A/m ²)	J_2 / (10^6 A/m ²)	J_3 / (10^6 A/m ²)
1	30	0.5	0.1	385.693 2	384.819 3	1.525 1
2	30	1.0	0.5	158.782 7	155.438 0	0.942 0
3	30	1.5	0.9	91.602 3	84.441 3	1.519 7
4	35	0.5	0.5	178.944 6	174.850 8	4.457 2
5	35	1.0	0.9	100.630 5	93.163 0	9.974 7
6	35	1.5	0.1	211.052 3	212.239 7	17.005 5
7	40	0.5	0.9	107.258 1	99.453 0	78.870 1
8	40	1.0	0.1	286.885 4	285.408 0	181.521 3
9	40	1.5	0.5	137.614 6	133.032 6	85.729 8

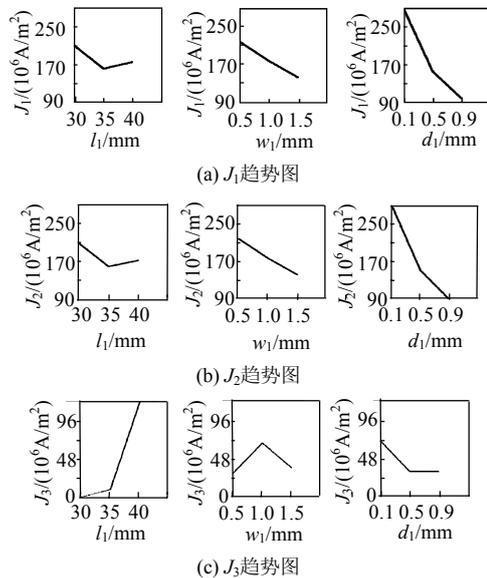


图8 J_1 、 J_2 和 J_3 的趋势图

Fig. 8 Trend curve of J_1 , J_2 and J_3

表2 EMAT线圈正交试验结果分析

Tab. 2 Analysis of orthogonal test for EMAT coil

涡流密度		l_1	w_1	d_1	因素主次	优选方案	最终方案
J_1 (10^6 A/m ²)	k_1	212.026	223.965	294.544	$d_1(194.714)>$ $w_1(77.209)>$ $l_1(48.484)$	l_1 : 30 mm; w_1 : 0.5 mm; d_1 : 0.1 mm	
	k_2	163.542	182.100	158.447			
	k_3	177.253	146.756	99.830			
	R	48.484	77.209	194.714			
J_2 (10^6 A/m ²)	k_1	208.233	219.708	294.156	$d_1(201.804)>$ $w_1(76.470)>$ $l_1(48.148)$	l_1 : 30 mm; w_1 : 0.5 mm; d_1 : 0.1 mm	l_1 : 30 mm; w_1 : 0.5 mm; d_1 : 0.1 mm
	k_2	160.085	178.003	154.440			
	k_3	172.631	143.238	92.352			
	R	48.148	76.470	201.804			
J_3 (10^6 A/m ²)	k_1	1.329	28.284	66.684	$l_1(114.045)>$ $d_1(36.563)>$ $w_1(35.862)$	l_1 : 30 mm; w_1 : 0.5 mm; d_1 : 0.9 mm	
	k_2	10.479	64.146	30.376			
	k_3	115.374	34.752	30.121			
	R	114.045	35.862	36.563			

3.2 EMAT 永磁体的优化设计

为了保证永磁体静磁场完全覆盖线圈产生的涡流，本文仍以上述3个区域的磁感应强度为研究

对象，通过寻找永磁体的最优参数使区域1和区域2的Lorentz力 f_1 、 f_2 较强、区域3的Lorentz力 f_3 较弱。根据线圈最佳尺寸并结合永磁体常用规格及成本

可确定永磁体几何参数的取值范围，分别为长度 l_2 ：30~40 mm、宽度 w_2 ：46~56 mm、厚度 t_2 ：10~20 mm。仍采用正交表 $L_9(3^4)$ 进行正交试验设计，3 个因素各取 3 个水平，其正交表及 3 个区域的 Lorentz 力计算结果如表 3 所示。同理，可计算出永磁体各因素下 Lorentz 力的平均值 k'_1 、 k'_2 、 k'_3 极差 R' ，如表 4 所示。利用综合平衡法分析可知，EMAT 永磁体最优参数组合为：长 30 mm、宽 46 mm、厚 20 mm。与 EMAT 线圈最优参数组合相比可知，在所选因素水平范围内，为使永磁体与线圈尺寸良好配合以产生较强的电磁超声表面波，永磁体的面积应与线圈面积相等，而其厚度则应越厚越好。需要指出，由于正交试验水平数有限，试验中 EMAT 探头参数无法涵盖实际存在的所有取值。因此，本文得到的结果为所取定义域内相应水平下的最佳参数组合。如需进一步优

化，则可在已求最佳参数较小邻域内设定新的定义域和试验水平，采用正交试验方法进一步逼近最佳探头参数。

表 3 EMAT 永磁体 3 因素 3 水平正交试验表
Tab. 3 Orthogonal test of 3 elements 3 levels for EMAT magnet

序号	$l_2/$ mm	$w_2/$ mm	$t_2/$ mm	$f_1/$ (10^6N/m^3)	$f_2/$ (10^6N/m^3)	$f_3/$ (10^6N/m^3)
1	30	46	10	166.944 7	88.137 1	0.232 6
2	30	51	15	165.522 4	113.080 4	0.283 8
3	30	56	20	164.136 7	130.745 2	0.319 3
4	35	46	15	189.862 9	109.639 7	0.498 5
5	35	51	20	180.481 5	127.195 8	0.546 5
6	35	56	10	117.322 9	78.208 5	0.412 3
7	40	46	20	205.917 6	125.407 7	0.984 5
8	40	51	10	136.650 5	75.373 9	0.745 0
9	40	56	15	141.628 7	99.210 0	0.887 9

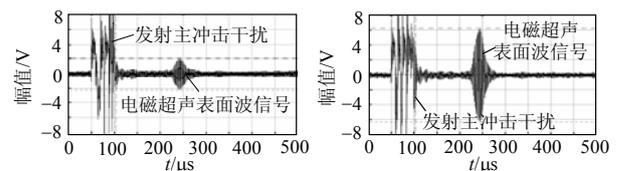
表 4 EMAT 永磁体正交试验结果分析
Tab. 4 Analysis of orthogonal test for EMAT magnet

Lorentz 力		l_2	w_2	t_2	因素主次	优选方案	最终方案	
$f_1/(10^6\text{N/m}^3)$	k'_1	165.535	187.575	140.306	$w_2(46.546) >$ $t_2(43.206) >$ $l_2(4.136)$	$l_2: 30 \text{ mm};$ $w_2: 46 \text{ mm};$ $t_2: 20 \text{ mm}$		
	k'_2	162.556	160.885	165.671				
	k'_3	161.399	141.029	183.512				
	R'	4.136	46.546	43.206				
$f_2/(10^6\text{N/m}^3)$	k'_1	110.654	107.728	80.573	$t_2(47.210) >$ $l_2(10.657) >$ $w_2(5.007)$	$l_2: 30 \text{ mm};$ $w_2: 46 \text{ mm};$ $t_2: 20 \text{ mm}$	$l_2: 30 \text{ mm};$ $w_2: 46 \text{ mm};$ $t_2: 20 \text{ mm}$	
	k'_2	105.015	105.217	107.310				
	k'_3	99.997	102.721	127.783				
	R'	10.657	5.007	47.210				
$f_3/(10^6\text{N/m}^3)$	k'_1	0.279	0.572	0.463	$l_2(0.593) >$ $t_2(0.154) >$ $w_2(0.047)$	$l_2: 30 \text{ mm};$ $w_2: 51 \text{ mm};$ $t_2: 10 \text{ mm}$		
	k'_2	0.486	0.525	0.557				
	k'_3	0.872	0.540	0.617				
	R'	0.593	0.047	0.154				

4 实验验证

本文以东北轻合金有限公司生产的 3A21 (LF21) 型铝板为检测对象验证优化设计结果的有效性。铝板长 1 000 mm、宽 500 mm、厚 30 mm。铝板表面采用电火花技术加工出长约 30 mm、宽约 0.2 mm、深约 1.5 mm 的人工缺陷。优化前 EMAT 永磁体体积为 60 mm×60 mm×10 mm，曲折线圈长 35 mm、导线宽 1.0 mm、提高距离 0.5 mm；优化后 EMAT 永磁体体积为 30 mm×46 mm×20 mm，曲折线圈长 30 mm、导线宽 0.5 mm、提高距离 0.1 mm。EMAT 线圈均为 8 匝。经过阻抗匹配后，线圈电流均为 500 kHz、50 A 的猝发音信号。

优化前后缺陷的表面波反射信号如图 9 所示，二者幅值如表 5 所示。可以看出，优化后 EMAT 探头效率增长为优化前的 2.99 倍。同时，EMAT 探头体积(主要指永磁体体积)缩小为优化前的 0.77 倍。



(a) 优化前 (b) 优化后
图 9 优化前后电磁超声表面波信号对比

Fig. 9 Comparison of electromagnetic surface wave signal before and after optimization

表 5 优化前后 EMAT 性能对比
Tab. 5 Comparison of EMAT performance before and after optimization

参数	优化前	优化后
电磁超声表面波信号幅值/V	4.2	12.575
探头体积/ mm^3	36 000	27 600

5 结论

对铝板表面检测中使用的电磁超声表面波换能器进行了三维有限元建模和仿真分析，利用正交试验设计方法选取了 EMAT 的关键参数，总结了

EMAT 设计的基本准则, 并以提高换能效率为目标依次对 EMAT 线圈和永磁体进行优化设计, 获得了 EMAT 的最佳几何尺寸参数。所得结论如下:

1) EMAT 线圈在铝板中感生的涡流主要沿线圈轮廓分布; EMAT 永磁体在铝板中产生的静磁场主要沿永磁体边缘轮廓分布, 远离磁体边缘的铝板区域中磁场逐渐减弱; EMAT 线圈及永磁体设计不当, 可能导致换能器效率较低。

2) 从增大 EMAT 换能效率的角度来看, 在所选因素水平下, EMAT 线圈的提离距离和导线宽度对涡流强度影响较大, 且二者越小, 涡流越强; 永磁体的厚度对静磁场强度影响较大, 且永磁体越厚, 静磁场越强; EMAT 线圈与永磁体的最佳尺寸配合关系应为二者面积相等。

3) 按照上述准则对 EMAT 进行优化设计, 优化后的电磁超声信号幅值提高为原来的 2.99 倍, 而探头体积则缩小为原来的 0.77 倍。因此, 在建立较为完善的 EMAT 三维有限元模型基础上利用正交试验设计方法可以有效地对 EMAT 进行优化设计。由于 Lorentz 力机制广泛存在于各种 EMAT 中, 因此本文研究方法及成果可推广到其它类型电磁超声换能器的优化设计中。

参考文献

- [1] Ogi H. Field dependence of coupling efficiency between electromagnetic field and ultrasonic bulk waves[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(8): 3940-3949.
- [2] Zhao X, Venugopal K, Mei G. In-line nondestructive inspection of mechanical dents on pipelines with guided shear horizontal wave electromagnetic acoustic transducers[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2005(127): 304-309.
- [3] Salzburger H J, Wang L, Gao X R. In-motion ultrasonic testing of the tread of high-speed railway wheels using the inspection system AUROPA III[C]. 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 2008.
- [4] Fan Y, Dixon S, Edwards R, et al. Ultrasonic surface wave propagation and interaction with surface defects on rail track head[J]. *NDT&E International*, 2007(40): 471-477.
- [5] Lim S, Shoureshi R. Advanced monitoring system for integrity assessment of electric power transmission lines[C]. The 2006 American Control Conference, Minnesota, USA, 2006.
- [6] MacLauchlan D, Clark S, Cox B, et al. Recent advancements in the application of EMATs to NDE[C]. 16th World Conference on NDT, Montreal, 2004.
- [7] 王淑娟, 康磊, 翟国富. 电磁超声换能器优化设计综述[J]. *仪器仪表学报(增刊)*, 2007, 28(8): 93-99.
Wang Shujuan, Kang Lei, Zhai Guofu. Overview of optimum design of electromagnetic acoustic transducers[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument (Supplement)*, 2007, 28(8): 93-99(in Chinese).
- [8] Ludwig R. Numerical implementation and model predictions of a unified conservation law description of the electromagnetic acoustic transduction process[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, 39(4): 481-488.
- [9] Kaltenbacher M, Ettinger K, Lerch R, et al. Finite element analysis of coupled electromagnetic acoustic systems[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, 35(3): 1610-1613.
- [10] Shapoorabadi R, Konrad A, Sinclair A. Computation of current densities in the receiving mode of EMATs[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(10Q106): 1-3.
- [11] Shapoorabadi R, Konrad A, Sinclair A. The governing electrodynamic equations of EMATs[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(10E102): 1-3.
- [12] Jian X, Dixon S, Grattan K, et al. A model for pulsed Rayleigh wave and optimal EMAT design[J]. *Sensors and Actuators*, 2006(128): 296-304.
- [13] Jian X, Dixon S. Enhancement of EMAT and eddy current using a ferrite back-plate[J]. *Sensors and Actuators*, 2006(131): 57-61.
- [14] Dutton B, Boonsang S, Dewhurst R. A new magnetic configuration for a small in-plane electromagnetic acoustic transducer applied to laser-ultrasound measurements modeling and validation[J]. *Sensors and Actuators*, 2006(125): 249-259.
- [15] Dutton B, Boonsang S, Dewhurst R. Modeling of magnetic fields to enhance the performance of an in-plane EMAT for laser-generated ultrasound[J]. *Ultrasonics*, 2006(44): 657-665.
- [16] 朱红秀, 吴森, 刘卓然. 用于钢管缺陷检测的电磁超声传感器优化设计研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(12): 1734-1737.
Zhu Hongxiu, Wu Miao, Liu Zhuoran. Study on optimized design of electromagnetic acoustic transducer for steel pipe default detection[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(12): 1734-1737(in Chinese).
- [17] Zhao X. Quantitative defect characterization via guided waves[D]. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 2003.
- [18] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 79.
- [19] 翟国富, 梁慧敏, 王焱. 基于正交试验设计的极化磁系统参数优化设计方法的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(10): 158-163.
Zhai Guofu, Liang Huimin, Wang Hao. Research on the parameters optimum design of polarized magnetic system based on orthogonal design[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(10): 158-163(in Chinese).
- [20] 马成良, 张海军, 李素平. 现代试验设计优化方法及应用[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2007: 121-159.
- [21] 康磊, 王淑娟, 翟国富. 用于电磁超声检测系统的宽带匹配电路的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2007(4): 50-52.
Kang Lei, Wang Shujuan, Zhai Guofu. Design of Broadband Matching Circuit for EMAT Detecting System[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2007(4): 50-52(in Chinese).



王淑娟

收稿日期: 2009-08-07。

作者简介:

王淑娟(1967—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子设备可靠性容差设计与故障诊断理论及应用;

康磊(1981—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电磁超声换能器优化设计与电磁超声检测技术, victorkang11@126.com;

李智超(1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声换能器声场仿真技术;

翟国富(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电器可靠性理论与测试技术。

(责任编辑 王剑乔)