

基于洛伦兹力机制线元式EMAT换能器仿真研究

刘磊^{1,2}

¹天津市特种设备监督检验技术研究院, 天津

²国家市场监督管理总局重点实验室(特种设备数字孪生共性技术), 天津

收稿日期: 2022年7月1日; 录用日期: 2022年8月2日; 发布日期: 2022年8月9日

摘要

本文通过COMSOL有限元仿真软件, 以单根直导线作为独立阵元建立一维线元式EMAT换能器时域仿真模型, 模拟了超声波从产生到传播的全部过程, 分析了不同种类超声波特性, 为后续换能器设计提供了帮助。

关键词

无损检测, EMAT, 超声换能器, 有限元建模

Simulation of Linear EMAT Transducer Based on Lorentz Force Mechanism

Lei Liu^{1,2}

¹Tianjin Special Equipment Inspection Institute, Tianjin

²Key Laboratory of Digital Twin Generic Technology in Special Equipment for State Market Regulation, Tianjin

Received: Jul. 1st, 2022; accepted: Aug. 2nd, 2022; published: Aug. 9th, 2022

Abstract

Through COMSOL finite element simulation software, this paper establishes a time-domain simulation model of a one-dimensional linear EMAT transducer with a single straight wire as an independent array element, simulates the whole process of the ultrasonic wave from generation to propagation, analyzes the characteristics of different kinds of ultrasonic waves, and provides help for the subsequent transducer design.

Keywords

Nondestructive Testing, EMAT, Ultrasonic Transducer, Finite Element Modeling



1. 引言

超声检测技术中的相控阵(PA)检测技术作为一种新型的特殊超声波检测技术目前日趋成熟且逐步走向应用[1] [2]。该技术通过控制各阵元的时间延时使声束在空间中形成偏转、聚焦、偏转聚焦,具有速度快、分辨力高、检测方案灵活多样、不易造成漏检、适用于复杂工件等技术优点。为了保证在检测过程中超声波可以顺利进入待测试件中,在检测前需要在试件表面涂抹耦合剂,有时还需要对表面粗糙、不平整的待测试件表面进行预处理,在检测结束后还需对试件表面的耦合剂进行清洗,这都大大降低了检测效率,也在一定程度上造成了资源浪费。此外,耦合剂受温度影响严重,温度过高会导致耦合剂汽化,温度过低则会造成耦合剂凝固,使检测无法顺利进行或得不到满意的检测结果。

电磁检测技术中的电磁超声(Electromagnetic Acoustic, EMA)亦属于超声检测范畴,其无需耦合剂的优点摆脱了传统压电超声在检测时受环境温度影响的限制,扩展了超声检测的应用范围[3] [4]。电磁超声检测时使用 EMAT (Electromagnetic Acoustic Transducer),检测过程中无需媒介与被测试件接触,亦可灵活地在被检试件中激发出各种类型的超声波,能够快速准确地检测出金属表面及内部缺陷,发现缺陷能力强,设备简单易于操作,检测速度快,属于超声检测发展的最新技术之一,前景十分广阔。它的缺点是换能效率低于传统压电换能器,回波信号微弱,信噪比很低且易受到环境噪音影响[5] [6]。

将电磁超声检测技术和超声相控阵检测技术结合后的电磁超声相控阵检测技术,可同时兼备无需耦合剂和控制声束两项技术优势,弥补了电磁超声换能效率低和传统压电超声中耦合剂易受环境温度影响的自身缺点,补充了电磁超声无法实现声束控制的技术空白,具有很大的发展潜力,但目前针对电磁超声相控阵辐射声场理论部分研究与电磁超声相控阵仪器系统研发均处于起步阶段[4] [7]。国内学者仅对电磁超声相控阵声场理论进行了部分研究,仪器设备研制仍处于空白状态;国外虽然有少数公司已经推出了电磁超声相控阵相关仪器设备,但这些仪器设备均处于初期发展阶段,检测仪器系统庞大,不便于携带且价格十分昂贵。本文针对电磁超声相控阵辐射声场理论研究匮乏的现状,通过 EMAT 相控阵进行理论建模,分析其辐射声场特性随换能器主要参数变化规律,对 EMAT 相控阵设计有一定参考价值。

2. 电磁超声原理

电磁超声检测(EMAT)是近年来无损检测领域出现的新技术,它具有无需接触待测工件表面、无需使用耦合剂、无需对待测试件表面进行预处理、适用于在高温环境下检测等优点。EMAT 由偏置磁场、激励线圈和待测试件三个部分组成,如图 1 所示。一般由永磁体提供偏置磁场,线圈始终处于静态磁场中;激励电流通过线圈后会在其周围产生脉冲磁场;待测试件为金属导电材料,超声波在试件表面激励产生并在其内部传播。EMAT 有洛伦兹力、磁化力、磁致伸缩力三种不同换能机制,本文主要讨论洛伦兹力换能机制。如图 2 所示,基于洛伦兹力换能机制 EMAT 是当在线圈中通入高压脉冲电流后,线圈周围因电磁感应效应会产生交变的电磁场,此时待测试件表面相当于构成一个整体导体回路,试件表面就会感应产生涡流。感生涡流的大小和方向取决于试件表面线圈中交变电流产生的磁场变化情况,且二者同频变化。导体表面的涡流在偏置磁场的作用下产生交变的洛伦兹力,使试件表面质点产生振动,进而产生超声波。超声波会在试件内部传播,遇到缺陷或边界面会产生反射、透射或衍射进而产生回波。回波在磁场作用下亦会产生涡流,进而使线圈电压发生变化,线圈接收缺陷回波信号。

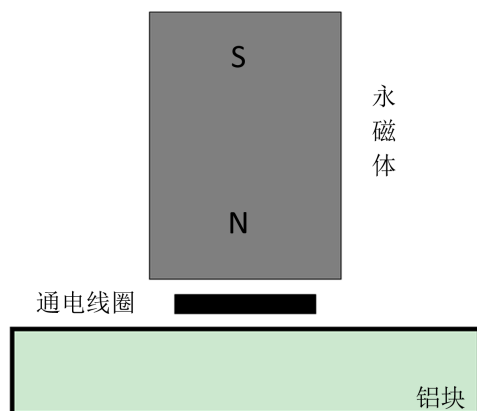


Figure 1. Schematic diagram of EMAT transducer

图 1. EMAT 换能器示意图

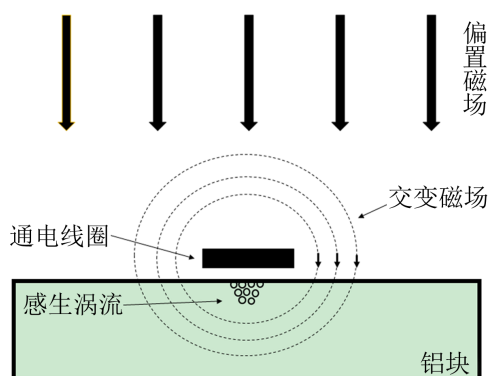


Figure 2. Schematic diagram of EMAT energy exchange principle of Lorentz force mechanism

图 2. 洛伦兹力机制 EMAT 换能原理示意图

3. 线元式 EMAT 阵列换能器建模

基于洛伦兹力机制的 EMAT 换能原理主要涉及到电磁场和固体力学场两个物理场相互耦合。本文选用 COMSOL 中 AC/DC 模块的磁场(mf)物理场接口来模拟电磁场, 选择固体力学模块来模拟激发超声波。建模仿真过程一般包括: 1) 几何建模; 2) 材料添加与边界条件设定; 3) 网格划分; 4) 求解器设定; 5) 结果分析。

几何建模与材料添加: 线元式 EMAT 阵列换能器几何模型主要由静态偏置磁场, 激励线圈和待检试件三部分构成, 激励线圈由 8 根直导线分别作为独立阵元组成一维线性阵列, 如图 3 所示。

线元式 EMAT 换能器时域仿真模型中电磁场由静磁场和动磁场两部分组成, 静磁场由永磁体提供的静态偏置磁场、空气域和待测试件组成, 计算求解出永磁体提供的静态偏置磁场在整个模型中的空间分布; 动磁场由激励线圈、空气域和待测试件组成, 计算求解出激励线圈在待测试件表面产生的交变涡流场, 以及在静态与动态偏置磁场的作用产生的总洛伦兹力。固体力学场只有待测试件一部分组成, 用于模拟待测试件中超声波的产生与传播过程。仿真模型参数如表 1。

Table 1. Simulation model parameters

表 1. 仿真模型参数

参数	数值	参数	数值
铝块长 × 高/mm	95 × 75	激励频率/MHz	1

Continued

永磁体宽 × 高/mm	20 × 40	电流幅值/A	20
线圈宽度/mm	0.35	永磁体磁感应强度/T	1.4
线圈高度/ μm	50	磁导率/(H/m)	1.257×10^{-6}
线圈脱离高度/mm	0.5	永磁铁电导率/(S/m)	6.25×10^5
铝块电导率/(S/m)	3.77×10^7	杨氏模量/GPa	70
泊松比/1	0.33	阵元间距/mm	1.0

为了更清楚直观的显示超声波在待测试件内的传播过程，设置待测试件上表面为弹性边界，用于激励产生超声波，除上表面以外的其余三面边界均设置为低反射边界，用于吸收边界反射回波。

网格划分：几何模型的网格划分方式直接影响了模型的求解精度，需根据模型中不同区域的重要程度进行分区域网格划分，集肤深度是产生交变涡流场和待测试件表面质点受洛伦兹力产生超声波的核心区域，故应在在待测试件集肤深度表面至少以 δ 的 1/3 进行网格划分($f = 1.5 \text{ MHz}$, $\delta = 0.067 \text{ mm}$)，以保证计算涡流密度的精确度；激励线圈是待测试件表面产生感生涡流的来源，应以不小于线圈长度的 1/4 进行划分；待测试件是超声波传播的主要区域，但该区域尺寸较大，精细化划分虽能使结果更为准确，但会严重降低计算效率，故该区域以不小于波长的 1/10 进行划分，由于待测试件为规则四边形，故进行网格划分是采用规则四边形网络；剩余永磁铁和空气域由于不涉及计算，故选择自由三角形网格进行简单划分即可，全部区域网格划分如图 4 所示。

求解器设定：在 COMSOL 中添加研究并设定求解器；研究步骤一：设置稳态求解器，用于计算静态偏置磁场在整个模型中的空间分布；研究步骤二：设置瞬态求解器，计算求解线圈在待测试件表面产生的涡流场及在静态动态磁场下产生的总洛伦兹力，将此洛伦兹力作为力源添加到固体力学模块，用于激励产生超声波。

4. 线元式 EMAT 阵列换能器仿真结果

线元式 EMAT 阵列换能器时域模型建模过程结束，计算求解可得出任意时刻下待测试件内的超声波，分别提取不同时刻待测试件内质点振动情况可得到该时刻下试件内超声波声场分布情况，如图 5 所示。

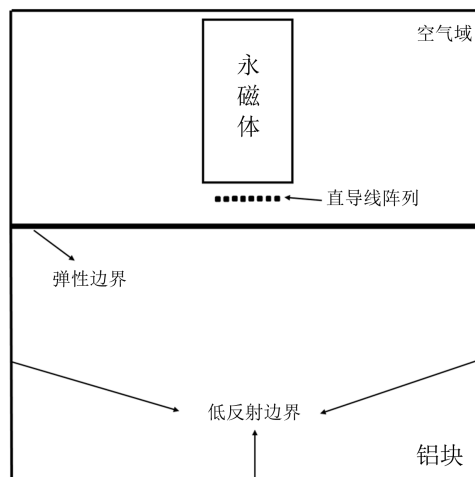


Figure 3. Simulation model of linear EMAT array transducer

图 3. 线元式 EMAT 阵列换能器仿真模型

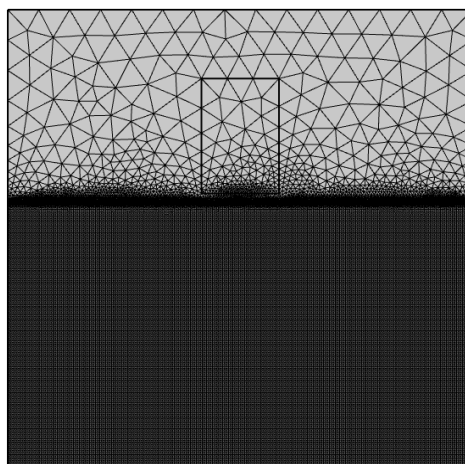


Figure 4. Grid division results

图 4. 网格划分结果

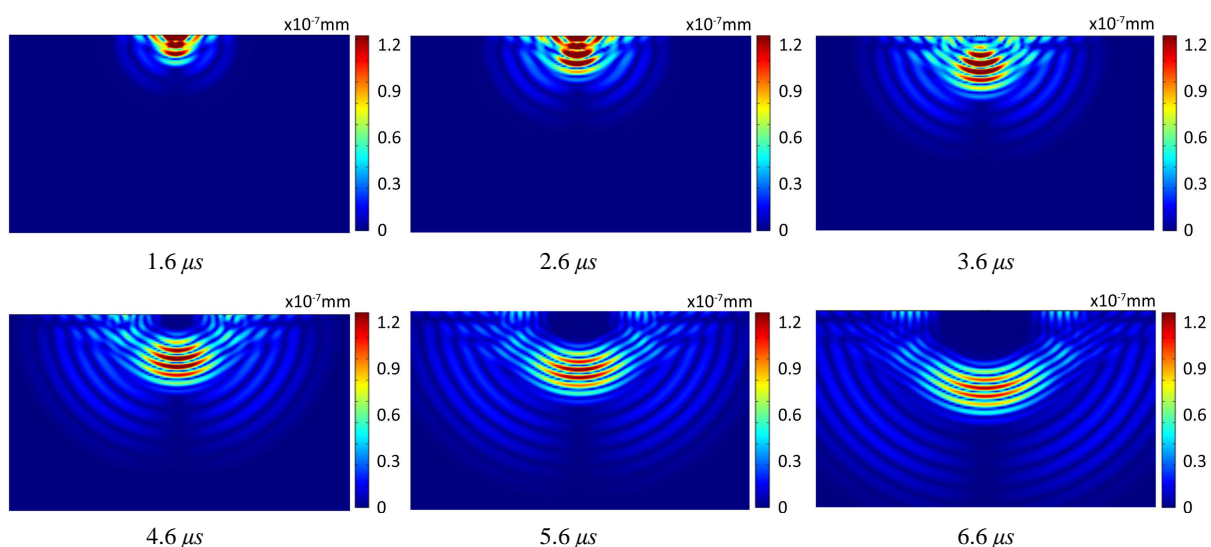


Figure 5. Cloud diagram of ultrasonic radiation sound field at different times

图 5. 不同时刻超声波辐射声场云图

图中可直观清楚观察出在试件中超声波由产生到传播的整个过程,亦可看出试件中存在三种不同类型的超声波,根据波传播速度和质点振动方式不同,这三种波分别为横波、纵波和表面波。在 $5.6 \mu\text{s}$ 这一时刻,已经可以清楚分辨出横波与纵波,横波介质中质点的振动方向与超声波的传播方向相垂直,纵波介质中质点振动方向与超声波的传播方向一致,传播速度纵波明显大于横波,且纵波波速大约为横波波速的两倍,表面波仅在试件表面传播,通常在两倍波长深度内传播,随着传播深度的增加声波能量逐渐衰减。在该时域模型中,永磁铁配置方式为竖直放置,这种磁铁配置方式主要用来激励产生横波,这是因为竖直放置的永磁铁的静态磁场分布方向主要为竖直向下,则在待测试件表面感生涡流场受到的静态洛伦兹力主要沿水平方向,而相较于静态磁场,动态磁场产生出的洛伦兹力较小可忽略不计,因此总洛伦兹力方向主要沿水平方向,进而主要激发产生横波且横波能量最强,这种磁铁配置方式主要是利用横波来进行无损检测。

5. 结语

本文主要建立了线元式 EMAT 阵列换能器时域模型,分析了模型中超声波由产生到传播的全部过程

以及产生三种不同类型超声波特性, 主要分析了在竖直磁铁配置方式下产生横波能量最强, 可利用此配置方式中横波来进行无损检测, 为后续设计 EMAT 换能器时提供了一定的理论指导。

后续研究方向:

1) 虽然通过二维频域模型可较为直观准确反映出 EMAT 相控阵辐射声场分布, 但三维模型更能反映出更加接近实际情况的 EMAT 相控阵辐射声场, 由于三维模型计算量十分庞大加之科研条件的限制, 本文未能建立直导线型 EMAT 相控阵三维仿真模型。

2) 本文未分析激励电流频率、阵元间距、阵元宽度等参数对 EMAT 相控阵辐射声场的影响, 应进一步完善 EMAT 相控阵的激励与接收的建模分析过程, 形成完整的 EMAT 辐射声场研究体系。

参考文献

- [1] 金鹏灿. 相控阵超声场建模及其自动化检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [2] 李羽可, 涂君, 宋小春. 超声相控阵缺陷检测聚焦技术仿真分析[J]. 测控技术, 2016, 35(7): 132-135.
- [3] 郑阳, 李铮, 李超月, 等. 基于 EMAT 的三维声场断层扫描测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 12-21.
- [4] 贾浩东, 周进节, 郑阳, 等. 跑道形线圈 EMAT 辐射声场关键影响因素研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(5): 636-642.
- [5] 贾浩东. 直线型线圈横波与兰姆波 EMAT 有限元计算与声场特性分析研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2020.
- [6] 陈振华, 黄智刚, 王婵, 等. 超声相控阵检测声场的有限元仿真建模及其试验验证[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 48-55.
- [7] 李铮. EMAT 特性及高温检测关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2020.