



内燃机可靠性国家重点实验室
State Key Laboratory of Engine Reliability



北京工业大学



超声导波电磁声传感器的研制

Development of Ultrasonic Guided Wave Electromagnetic Acoustic Transducer

刘增华 博士 教授 博士生导师

13661146759

北京工业大学

2020-11-01

团队简介

□ 无损检测与评价研究所成立于1998年，为国内规模较大专注于无损检测技术和结构健康监测研究和应用的团队之一。

□ 依托学科：

- 机械工程（一级学科博士点）
- 仪器科学与技术（一级学科硕士点）
- 仪器仪表工程（专业学位领域）

北京工业大学
无损检测与评价研究所
NDT&E Research Centre

专注创新 探索前沿
Focus on innovations, explore new frontiers.

中文 | English

在这里搜索...

网站首页 研究所简介 队伍建设 科学研究 人才培养 招生就业 仪器平台 合作交流 心系研究所 联系我们

新闻动态 MORE >

研究所师生参加2015-FENDT国际会议 15-06-15

《中国无损检测年度报告》连续两年报道研究所科研进展 15-05-15

刘增华教授邀请英国卡迪夫大学副校长Karen M Holford访问研... 15-04-30

工程教育专业认证交流：华东交通大学机电工程学院来访 15-04-29

无损检测与评价研究所召开研究生素质教育与生涯规划研讨会 15-01-19

科研进展 MORE >

基于模糊理论的ECT传感器优化 15-02-26

基于弱磁检测的高灵敏度钢索断丝缺陷检测传感器 14-12-18

扭转模态磁致伸缩阵列传感器研制及其在管道中的试验研究 14-11-28

基于微波反射理论的热障涂层扫描成像方法研究 14-11-28

基于虚拟时间反转算法的复合材料板空气耦合Lamb波扫描成像 14-11-28

支架结构安全监控系统 14-07-21

基于超声显微镜系统的熔融石英材料频散曲线测量 14-07-21

最新论文 MORE >

团队简介|研究方向和特色

主要利用声、光、电的波动特性对机械部件、工程结构、功能材料等进行无损检测与评价。

力学基础

+

现代测控手段

研究材料或工程结构的动力行为
及缺陷的无损检测方法

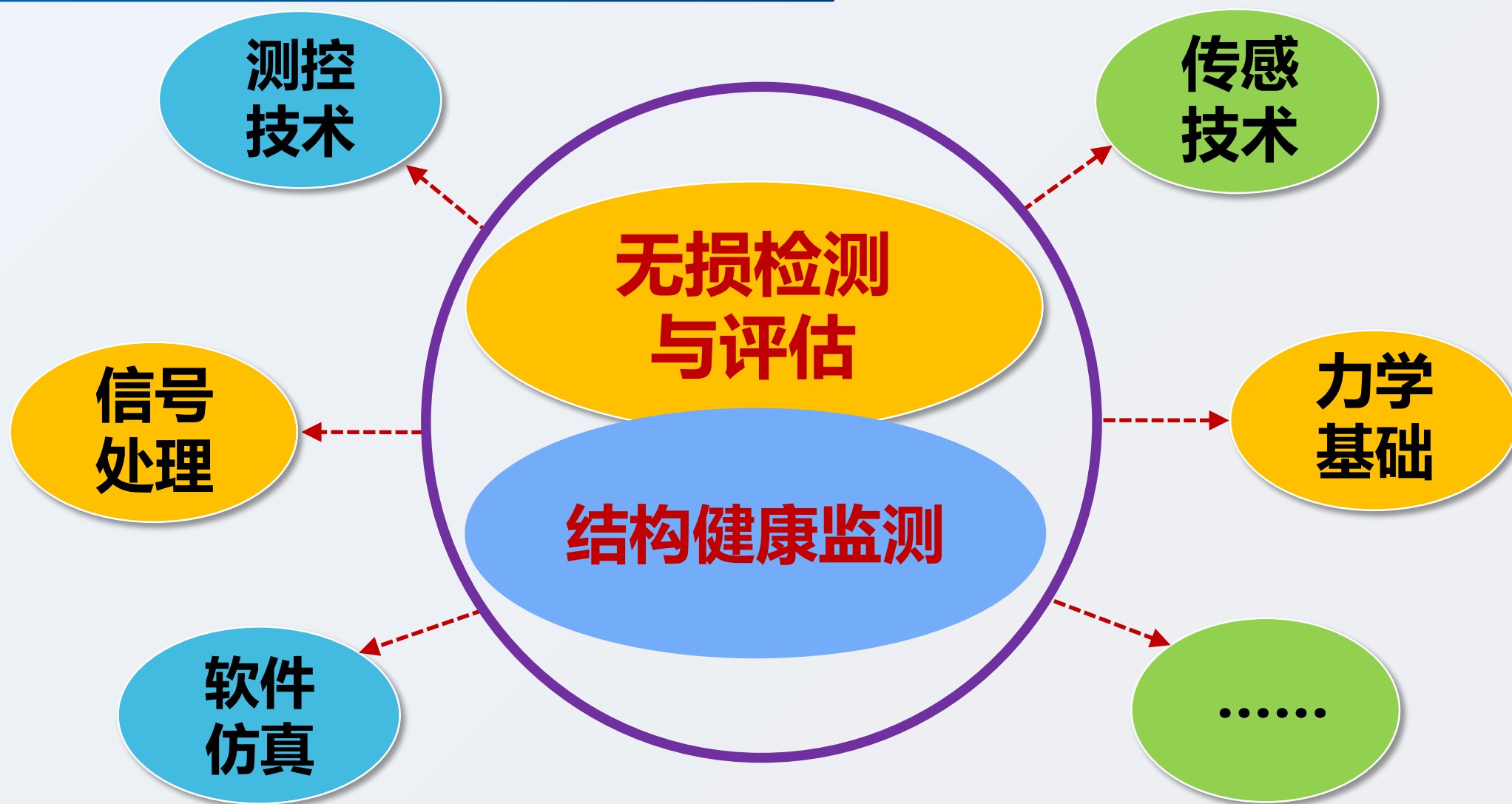
新技术

新方法

新理论

新仪器

团队简介 | 研究方向和特色



目录

1. 研究背景及意义
2. 应用于板结构缺陷检测电磁声传感器
 - 2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器
 - 2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器
3. 应用于金属管道缺陷检测电磁声传感器
 - 3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器
 - 3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器
4. 新型电磁声传感器
 - 4.1 磁集中器式电磁声传感器
 - 4.2 斜入射式电磁声传感器
5. 结论

目录

1. 研究背景及意义

2. 应用于板结构缺陷检测电磁声传感器

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器

2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器

3. 应用于金属管道缺陷检测电磁声传感器

3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器

3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器

4. 新型电磁声传感器

4.1 磁集中器式电磁声传感器

4.2 斜入射式电磁声传感器

5. 结论

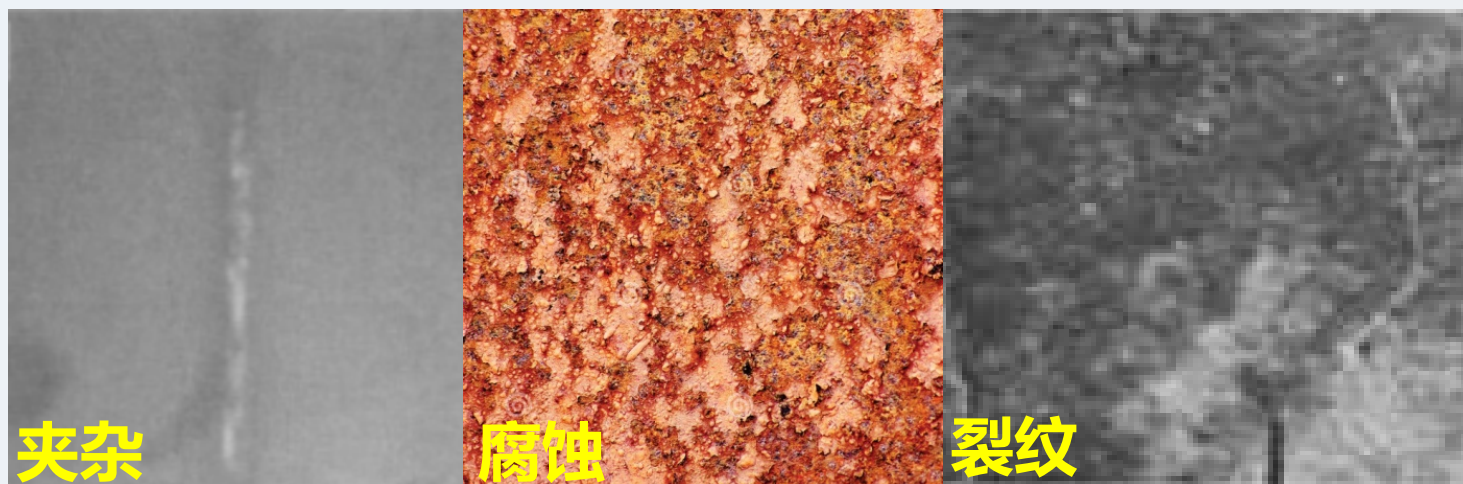
1. 研究背景及意义



- **板状结构**是广泛使用的结构类型之一。**铝板**由于其高强度，低密度和良好的可塑性，越来越多地用于航空航天，高速列车。
- **金属管道**用途非常广泛，可以用来输送石油、天然气等重要的物资，也是火力发电厂的火电机组主要承压部件。

1. 研究背景及意义

常见缺陷



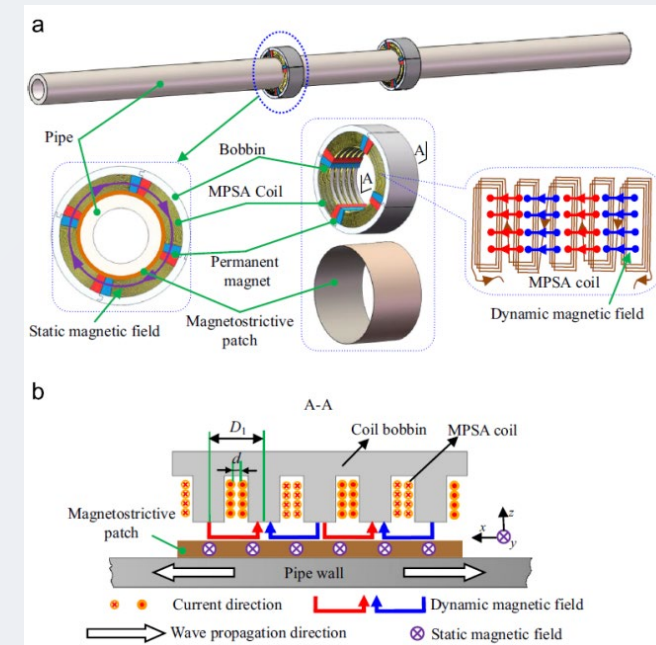
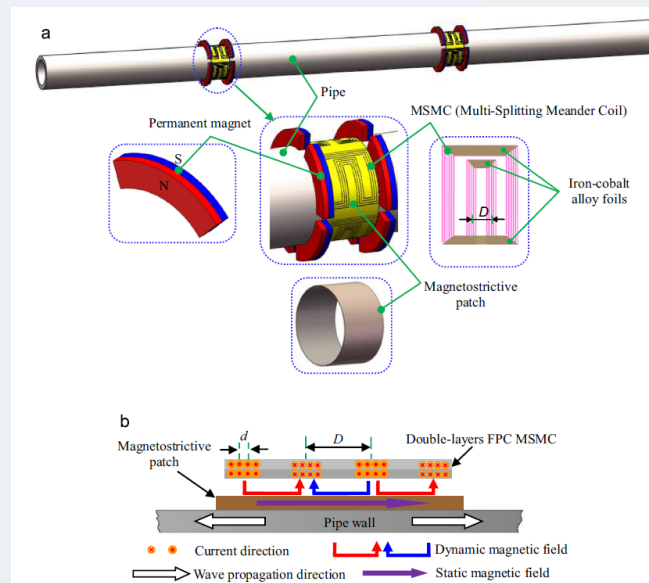
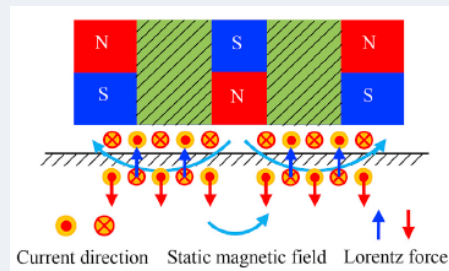
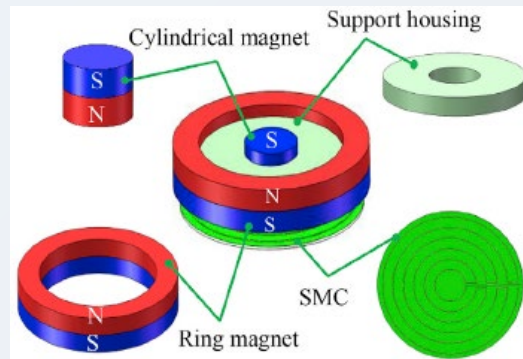
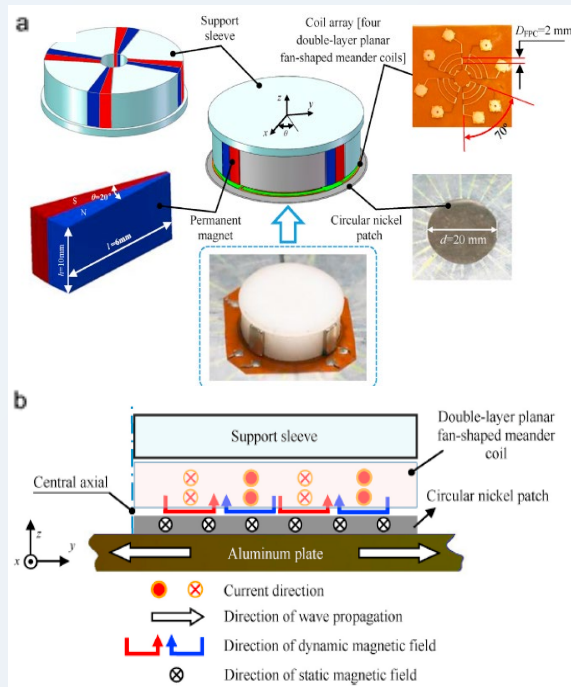
缺陷的存在会影响整个结构的性能和安全，
甚至导致整个结构的失效。

无损检测

结构健康监测

1. 研究背景及意义

□ 电磁声传感器 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)



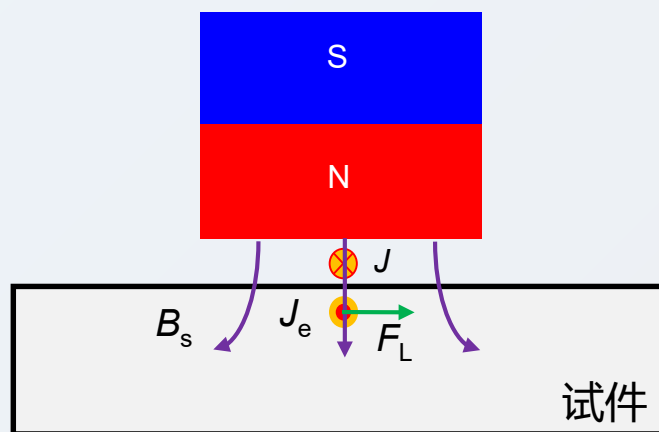
Z Liu, Y Zhang, M Xie. NDT&E International. 2018. Z Liu, J Fan, Y Hu. NDT&E International. 2018. Z Liu, J Fan, Y Hu. NDT&E International. 2015.

Z Liu, Y Hu, J Fan. NDT&E International. 2016.

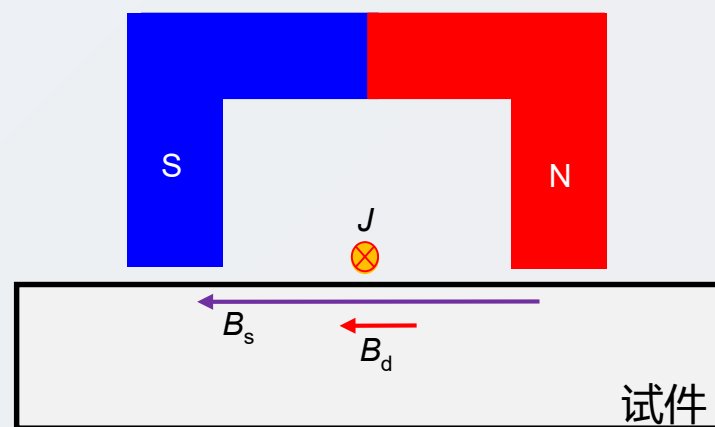
EMAT具有非接触，无需耦合，耐高温，可设计性好等优点。

1. 研究背景及意义

□ 电磁声换能器 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)



(a) 洛伦兹力型

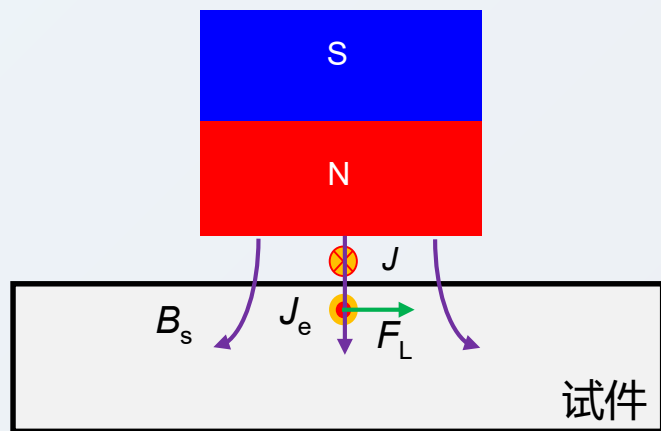


(b) 磁致伸缩型

EMAT的类型和工作机理

1. 研究背景及意义

□ 电磁声换能器 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)

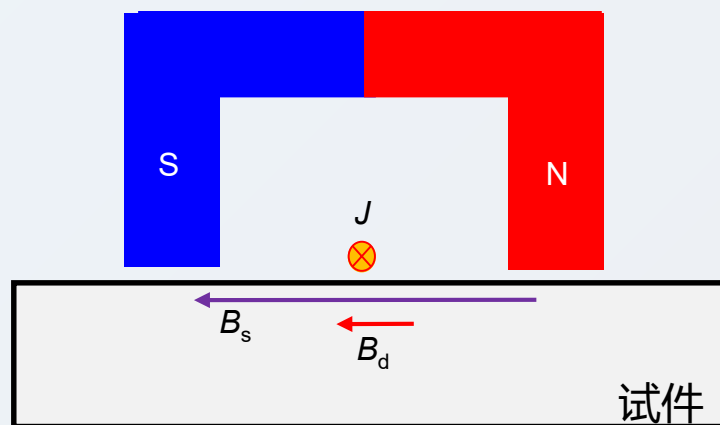


(a) 洛伦兹力型

- 在波的激励过程中，输入交变电流 J 在试件表面产生反向涡流 J_e ，涡流 J_e 在静磁场 B_s 的作用下，在材料中产生洛伦兹力 F_L ，从而在试件内产生超声波。
- 波的接收过程为激励过程的逆过程。

1. 研究背景及意义

□ 电磁声换能器 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)

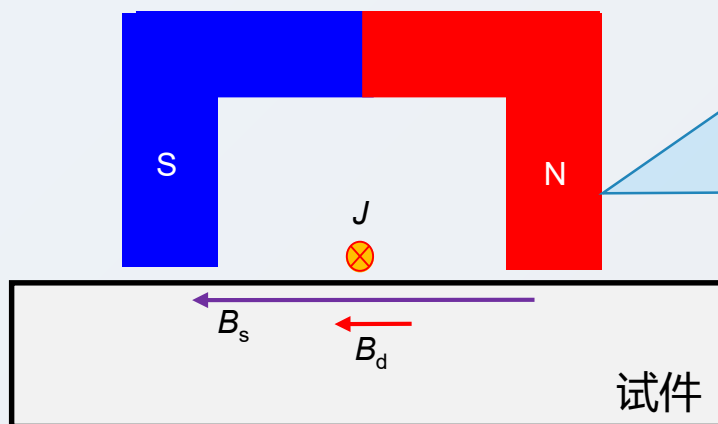


(b) 磁致伸缩型

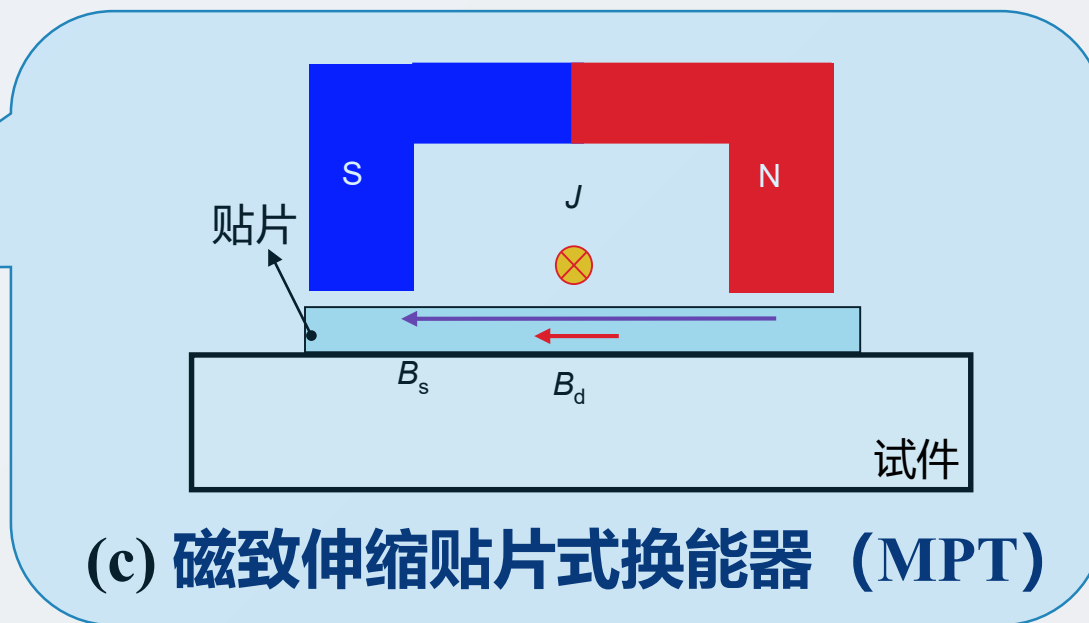
- 当输入电流 J 施加到线圈时，可以在结构中产生动态磁场。
- 基于**铁磁性材料**的磁致伸缩效应，静态磁场和动态磁场的共同作用会引起结构的周期性变形。

1. 研究背景及意义

□ 电磁声换能器 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)



(b) 磁致伸缩型



(c) 磁致伸缩贴片式换能器 (MPT)

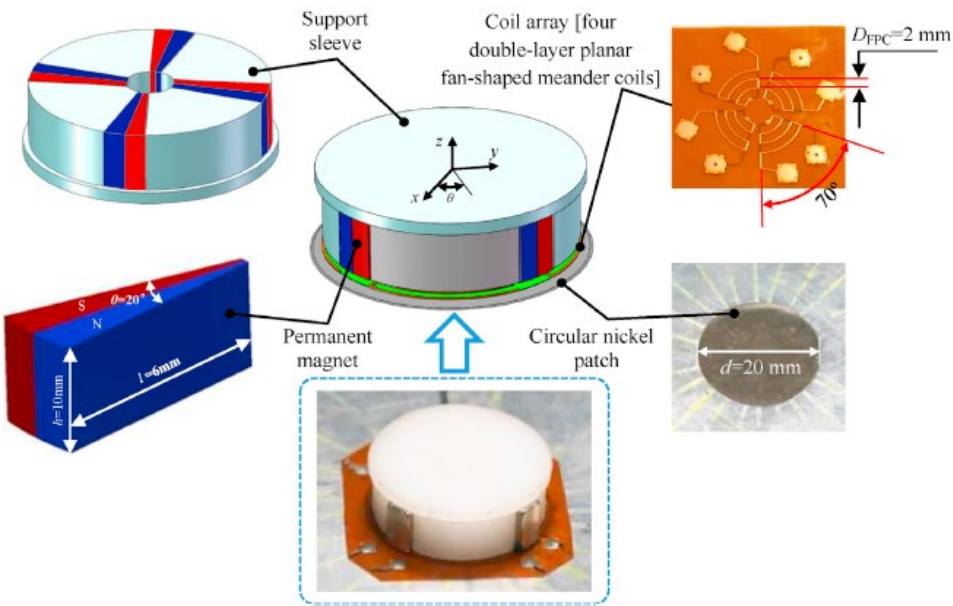
贴片材料：镍，铁钴。

目录

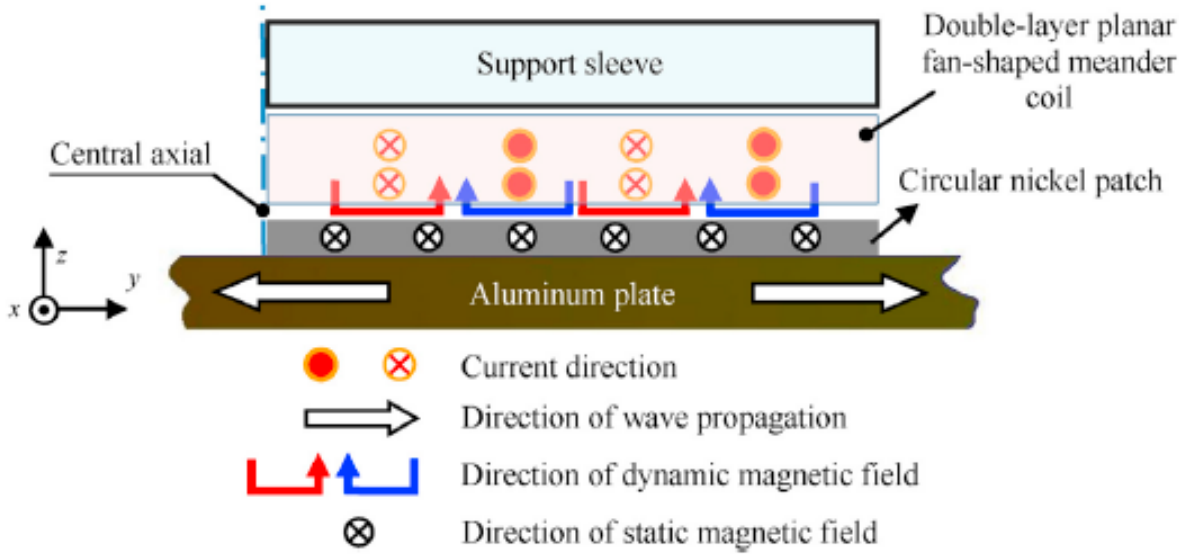
1. 研究背景及意义
- 2. 应用于板结构缺陷检测电磁声传感器**
 - 2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器**
 - 2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器
3. 应用于金属管道缺陷检测电磁声传感器
 - 3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器
 - 3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器
4. 新型电磁声传感器
 - 4.1 磁集中器式电磁声传感器
 - 4.2 斜入射式电磁声传感器
5. 结论

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)

□ 结构与工作原理



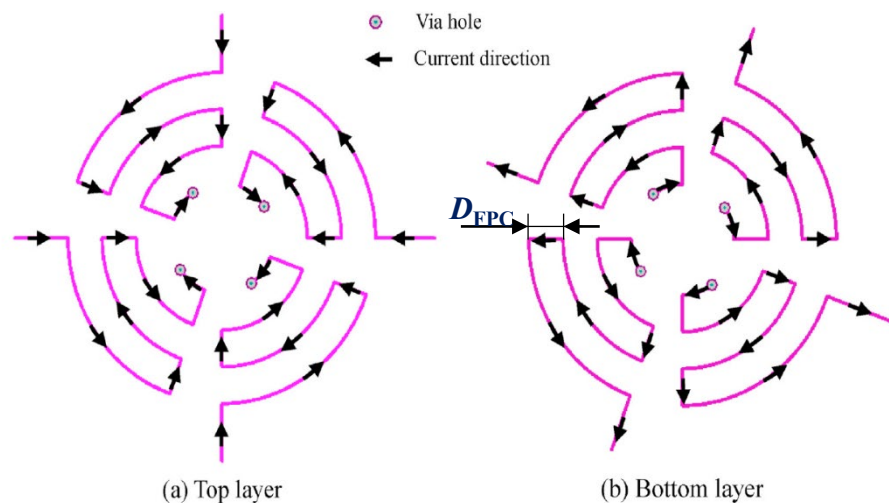
DT-SHMA-MPT结构示意图



DT-SHMA-MPT工作原理示意图

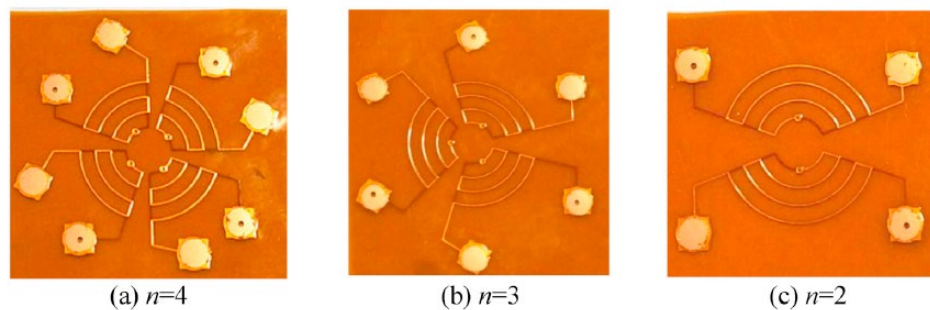
扇形永磁铁提供周向静磁场，扇形回折线圈提供与周向静磁场垂直的动磁场，动静磁场垂直地施加到贴片上，在贴片中产生剪切变形，从而在铝板中产生 SH_0 模态。

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)



扇形回折线圈示意图

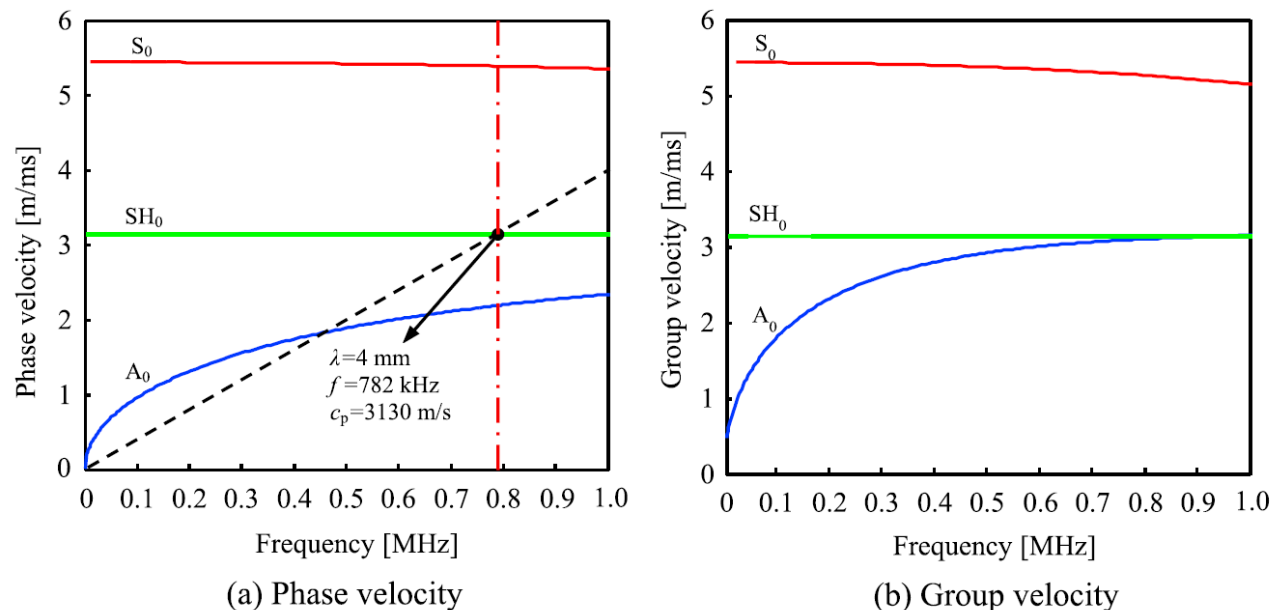
- 扇形回折线圈由柔性印刷电路(FPC)制成。
- 线圈采用双层结构，底层线圈通过过孔串联连接到顶层。保证电流方向在底层和顶层的相同位置总是相同以提高动态磁场的幅度。
- 导线的宽度为0.2mm，相邻导线之间的间隔 D_{FPC} 为2mm。根据回折线圈的相长干涉原理，保证 D_{FPC} 是DT-SHMA-MPT的理论中心频率 f 处的波长的一半以提高接收信号的能量。



双层扇形回折线圈照片

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)

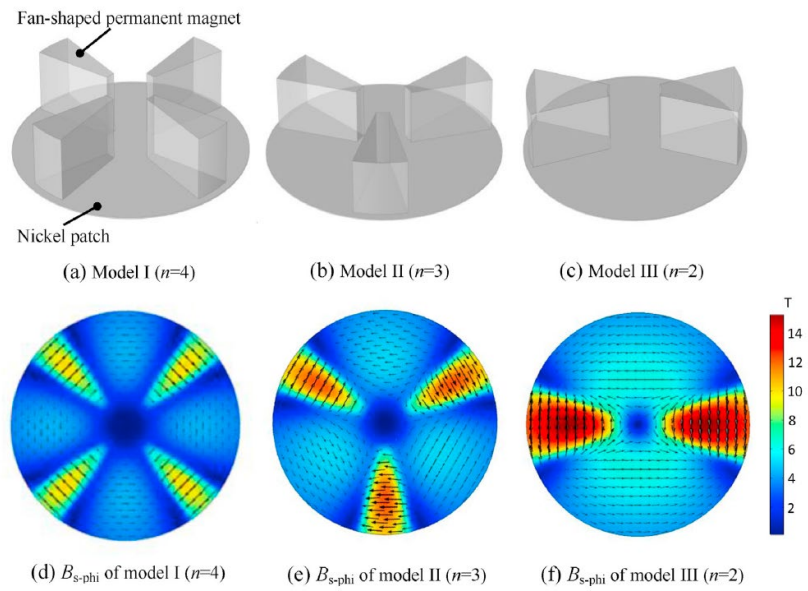
□ 传感器设计



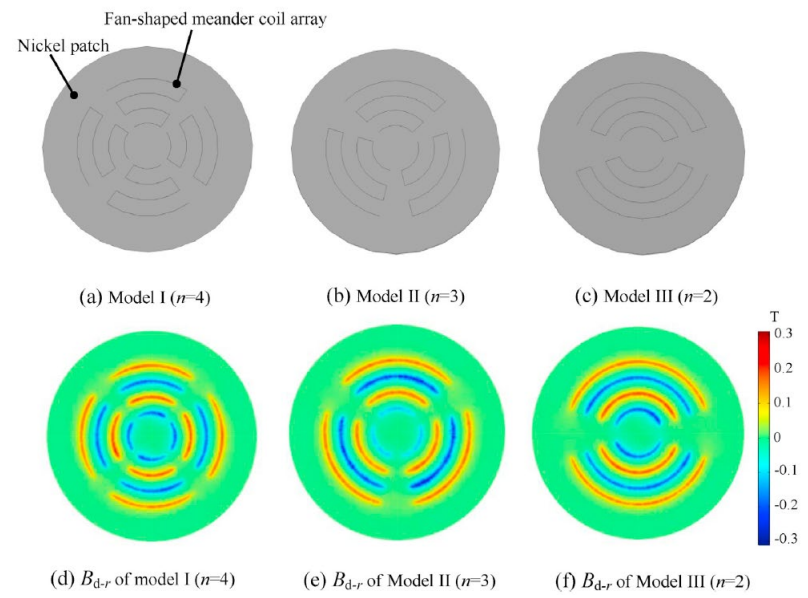
- 在1mm厚铝板的频散曲线中画出具有两倍 D_{FPC} 斜率的直线。
- 该线与 SH_0 模态频散曲线的交点横坐标为理论中心频率。间距 D_{FPC} 为2mm，因此铝板中 SH_0 模态的理论中心频率 f 为782kHz。

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)

仿真研究



有限元仿真模型与镍片表面的静磁场仿真结果

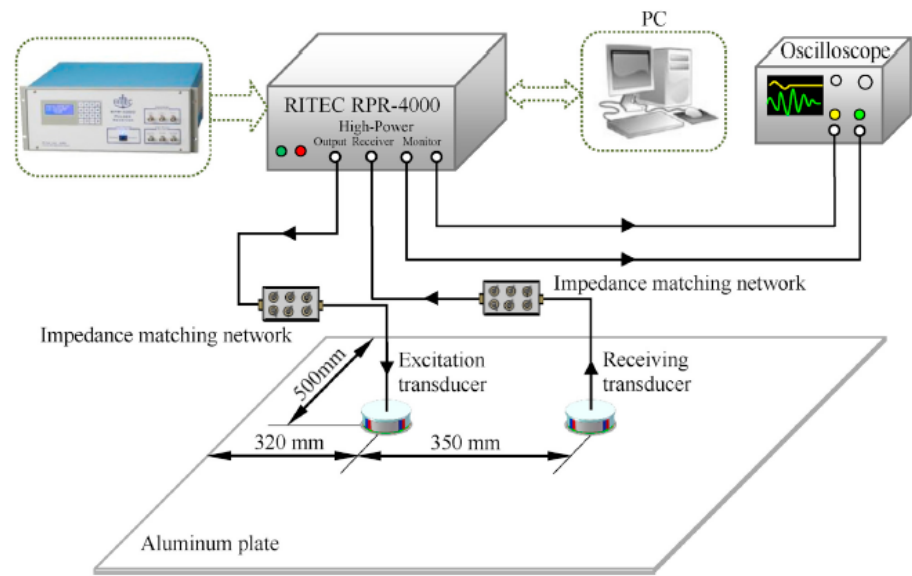


有限元仿真模型与镍片表面的动磁场仿真结果

- 扇形磁铁和扇形回折线圈能够在镍片表面产生均匀的静磁场和均匀的动磁场。
- 通过改变扇形磁铁/回折线圈阵列的数量和扇形角来改变静/动磁场在镍片表面的分布。

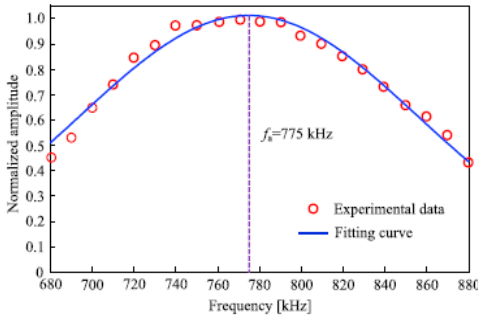
2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)

□ 频响特性

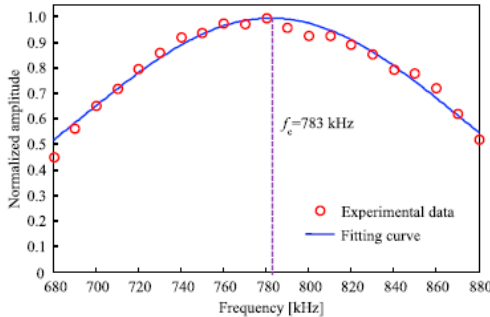


实验系统示意图

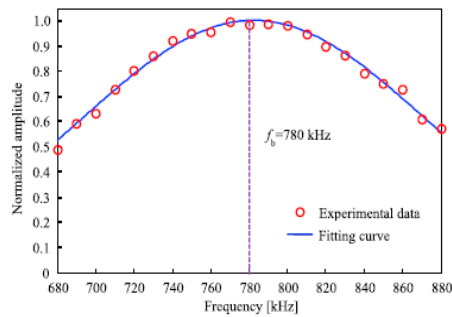
具有 n 个扇形回折线圈阵列和 n 个扇形磁铁的DT-SHMA-MPT的频率响应特性((a) 模型I($n=4$); (b) 模型II($n=3$); (c) 模型III($n=2$))



(a) 模型I($n=4$)



(b) 模型II($n=3$)



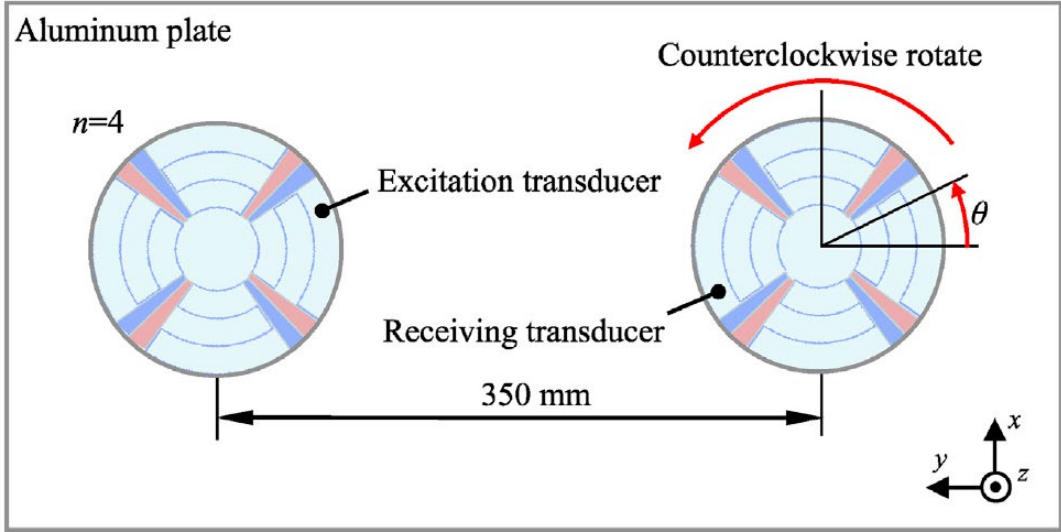
(c) 模型III($n=2$)

各模型的频率响应特性

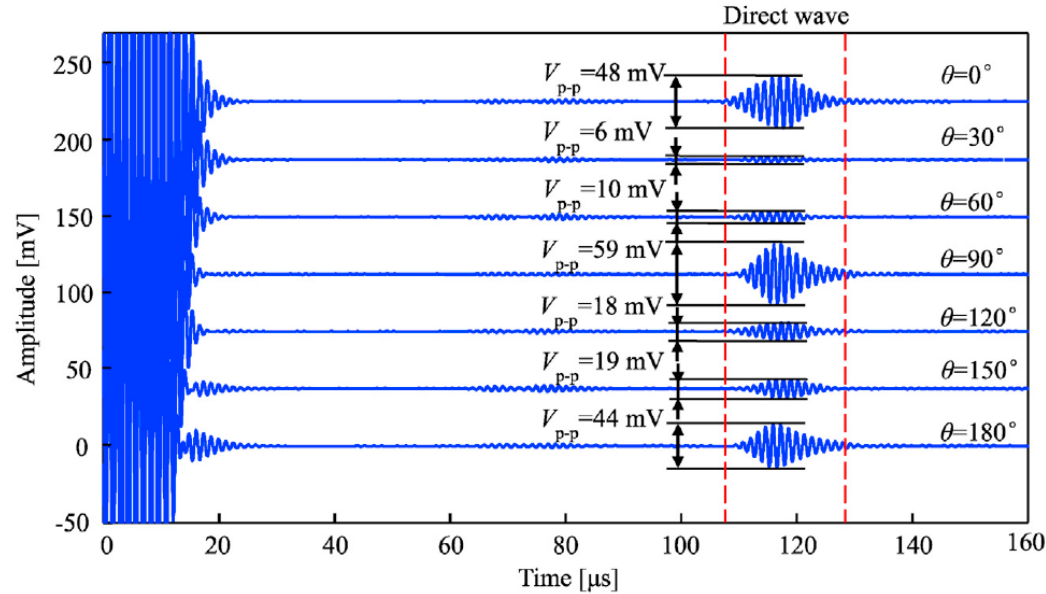
	模型I($n=4$)	模型II($n=3$)	模型III($n=2$)
理论中心频率	782kHz	782kHz	782kHz
实际中心频率	775kHz	783kHz	780kHz
相对误差	0.9%	0.2%	0.1%

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)

□ 单一SH₀模态激励和接收



换能器布置示意图($n=4$)

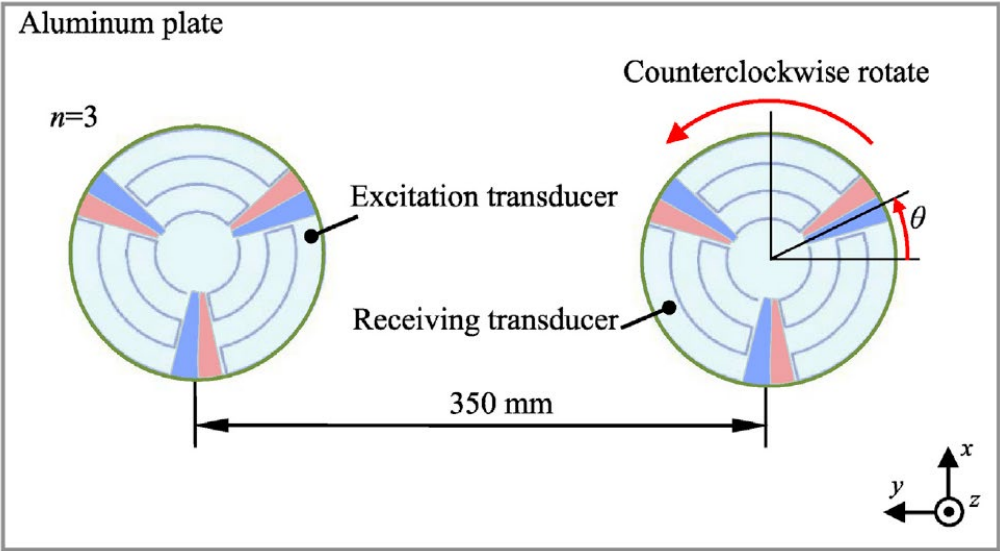


不同旋转角下接收换能器接收到的直达波信号($n=4$)

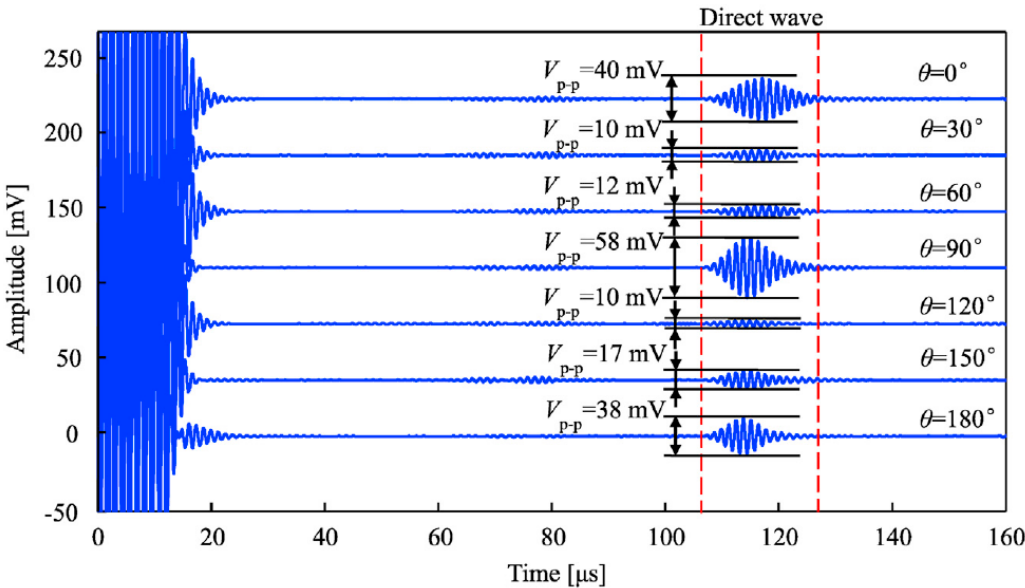
固定激励换能器，接收换能器以 30° 为步长从 0° 逆时针旋转到 180° 。

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)

□ 单一SH₀模态激励和接收



换能器布置示意图($n=3$)

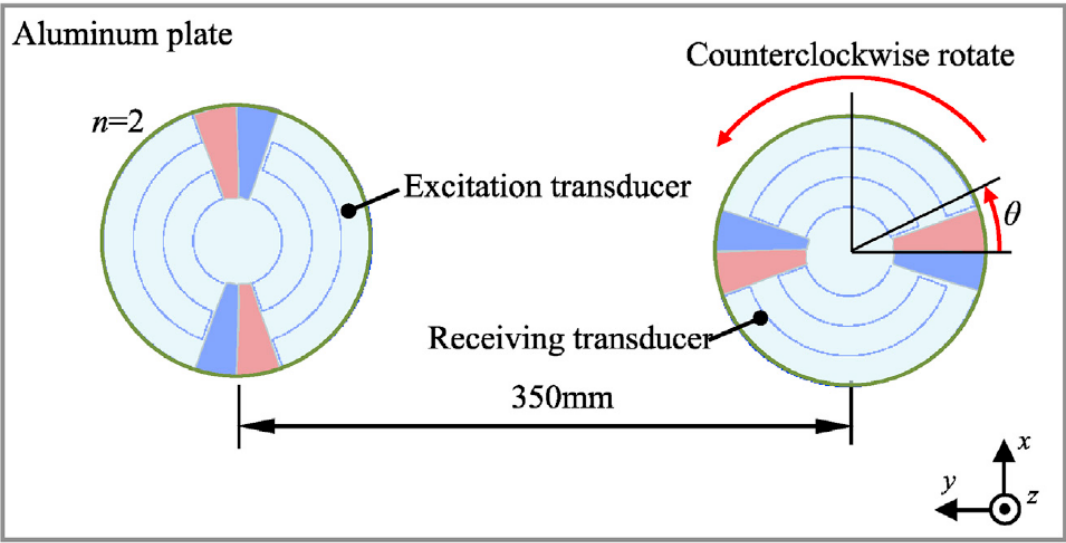


不同旋转角下接收换能器接收到的直达波信号($n=3$)

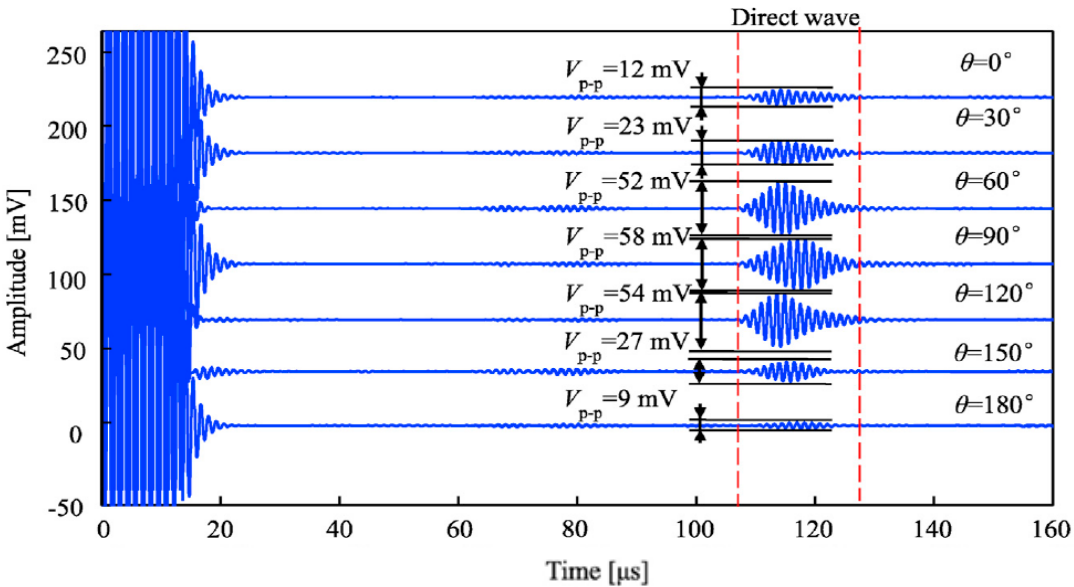
固定激励换能器，接收换能器以 30° 为步长从 0° 逆时针旋转到 180° 。

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)

□ 单一SH₀模态激励和接收



换能器布置示意图($n=2$)

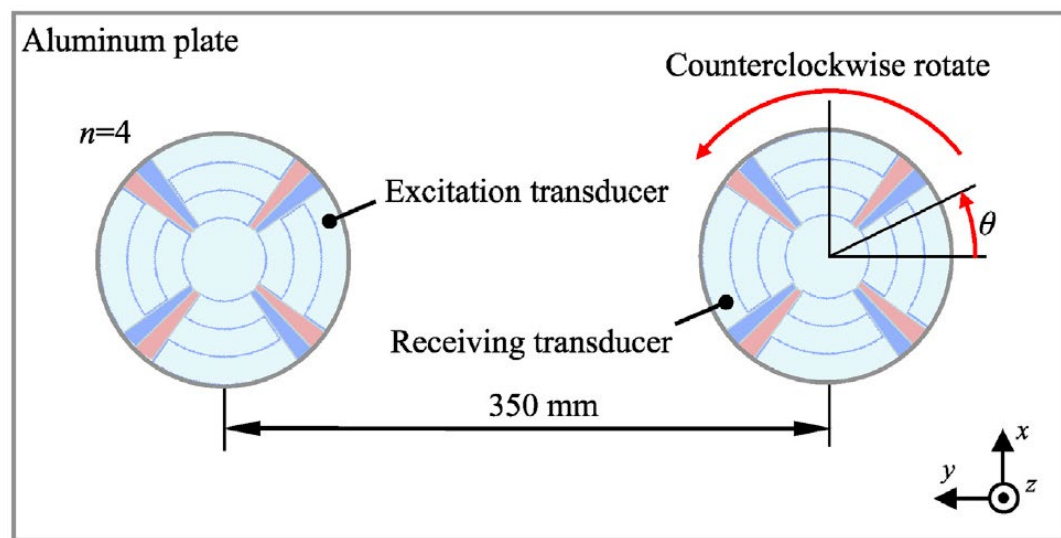


不同旋转角下接收换能器接收到的直达波信号($n=2$)

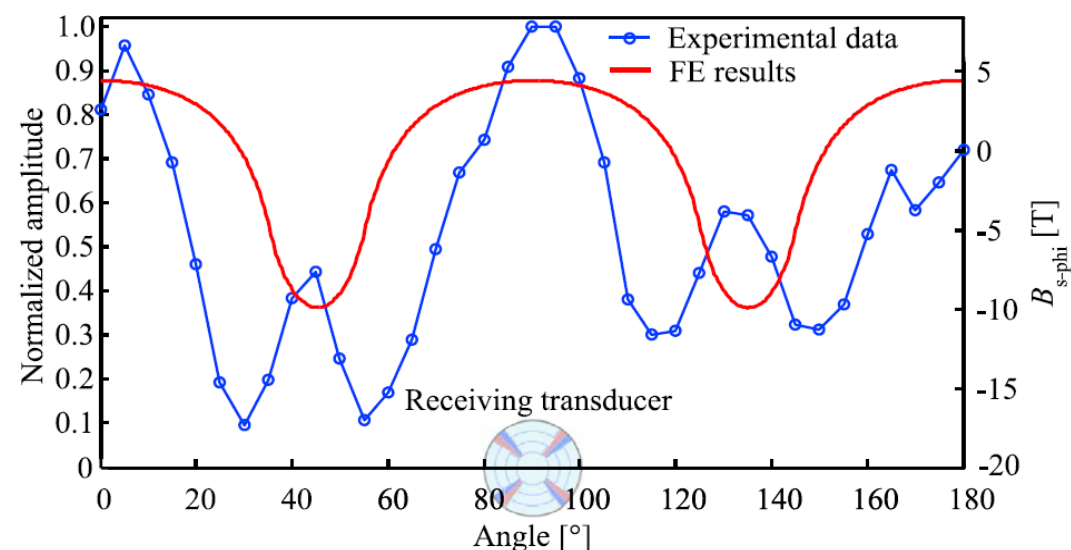
固定激励换能器，接收换能器以 30° 为步长从 0° 逆时针旋转到 180° 。

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)

□ 声场指向性



换能器布置示意图($n=4$)

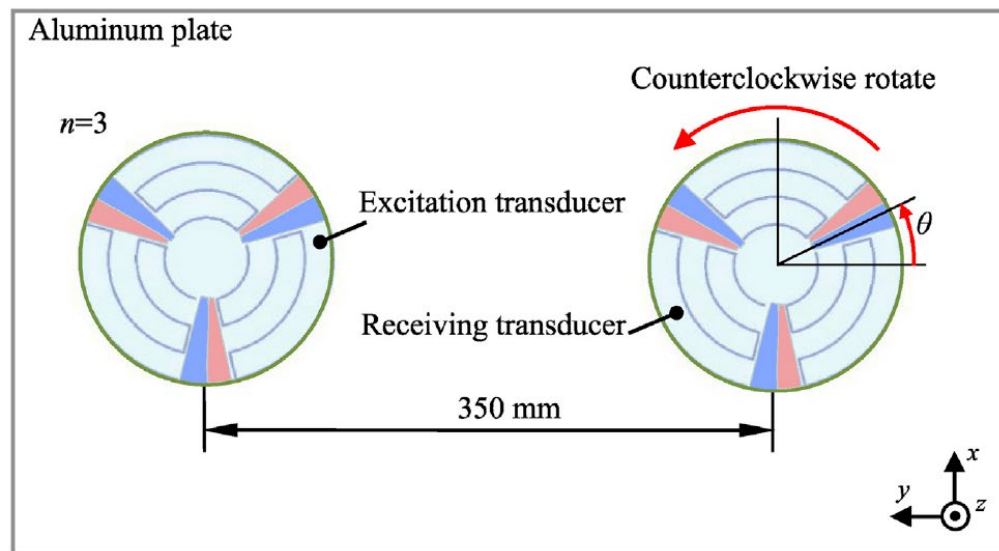


不同旋转角下直达波信号的归一化幅值与周向静磁通密度仿真结果的对比($n=4$)

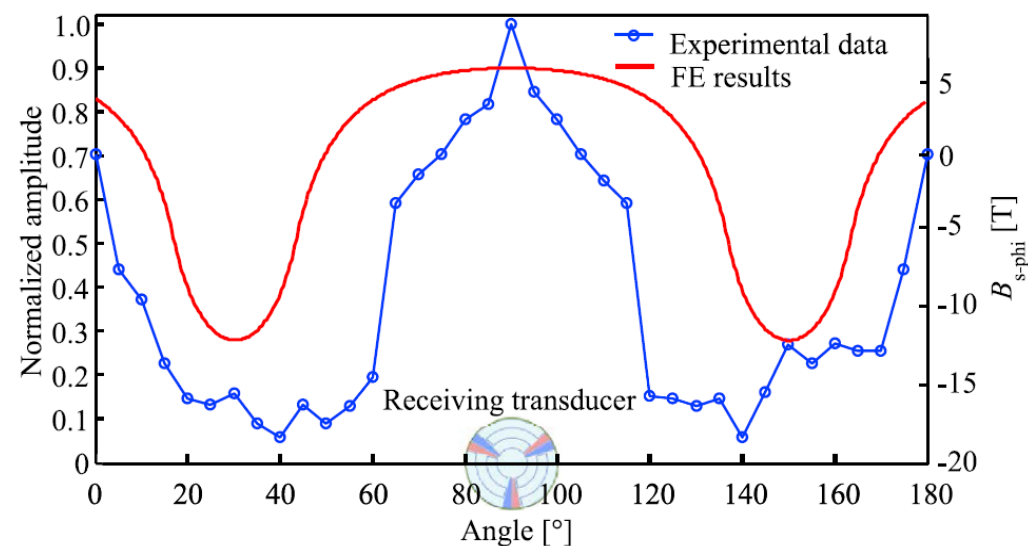
- 固定激励换能器，接收换能器以 5° 为步长从 0° 逆时针旋转到 180° 。
- 实验与仿真结果对比良好，可以旋转换能器从而控制其声场指向性。

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)

□ 声场指向性



换能器布置示意图($n=3$)

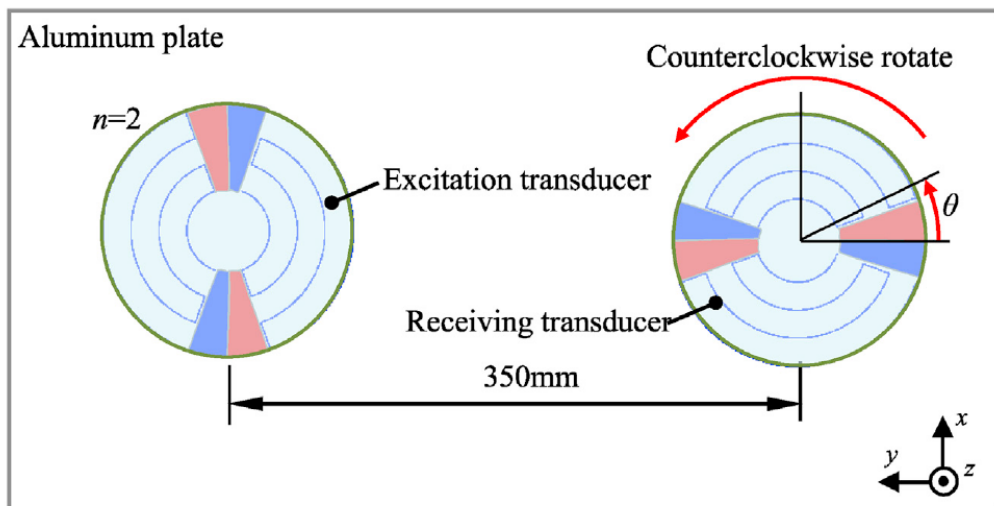


不同旋转角下直达波信号的归一化幅值与周向静磁通密度仿真结果的对比($n=3$)

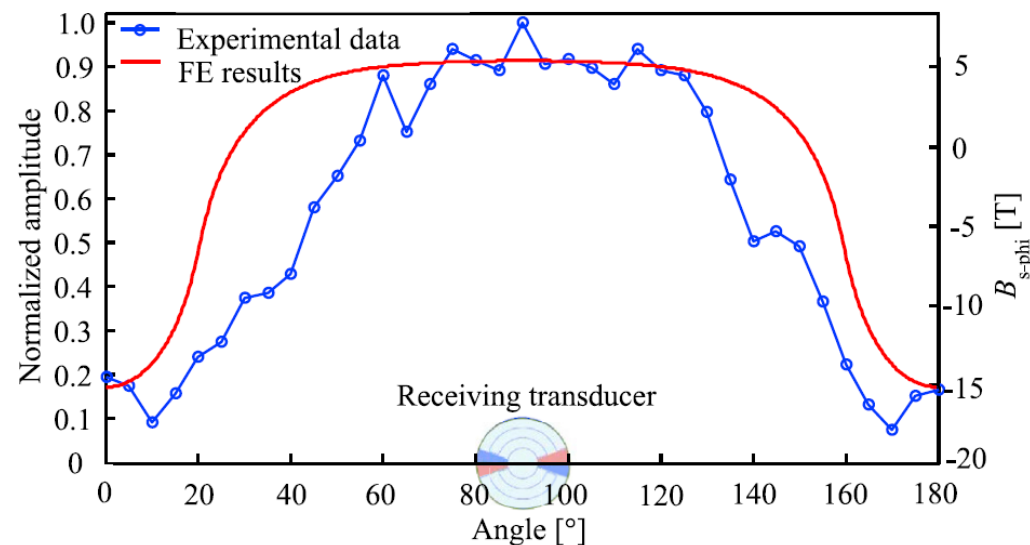
- 固定激励换能器，接收换能器以 5° 为步长从 0° 逆时针旋转到 180° 。
- 实验与仿真结果对比良好，可以旋转换能器从而控制其声场指向性。

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器 (DT-SHMA-MPT)

□ 声场指向性



换能器布置示意图($n=2$)



不同旋转角下直达波信号的归一化幅值与周向静磁通密度仿真结果的对比 ($n=2$)

- 固定激励换能器，接收换能器以 5° 为步长从 0° 逆时针旋转到 180° 。
- 实验与仿真结果对比良好，可以旋转换能器从而控制其声场指向性。

目录

1. 研究背景及意义

2. 应用于板结构缺陷检测电磁声传感器

2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器

2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器

3. 应用于金属管道缺陷检测电磁声传感器

3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器

3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器

4. 新型电磁声传感器

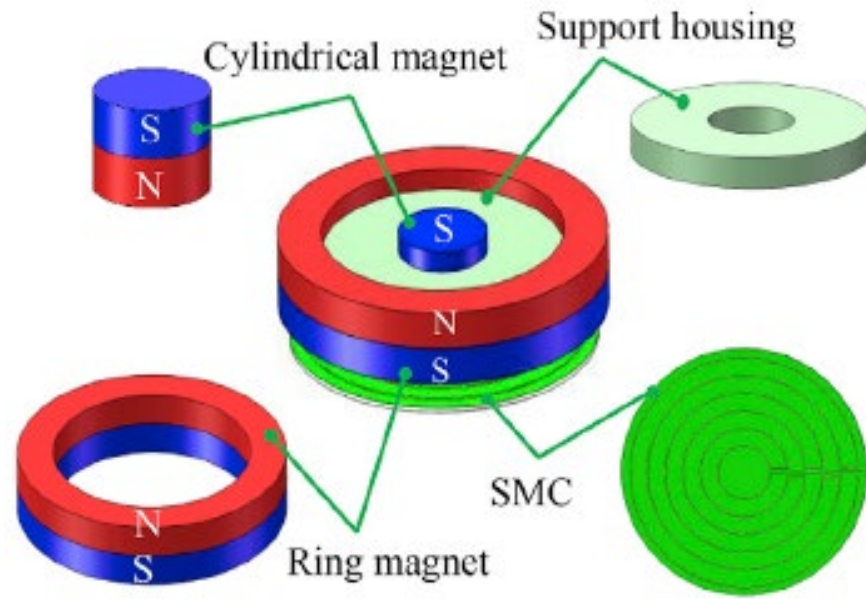
4.1 磁集中器式电磁声传感器

4.2 斜入射式电磁声传感器

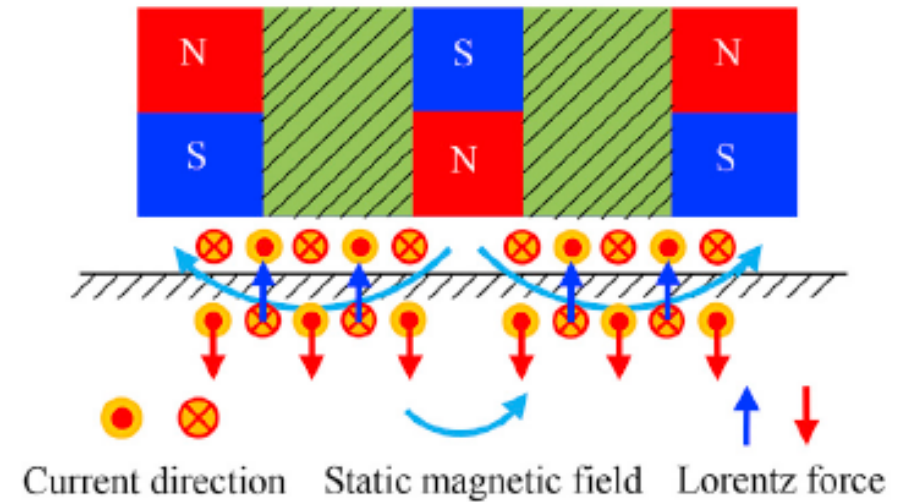
5. 结论

2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器

□ 结构与工作原理



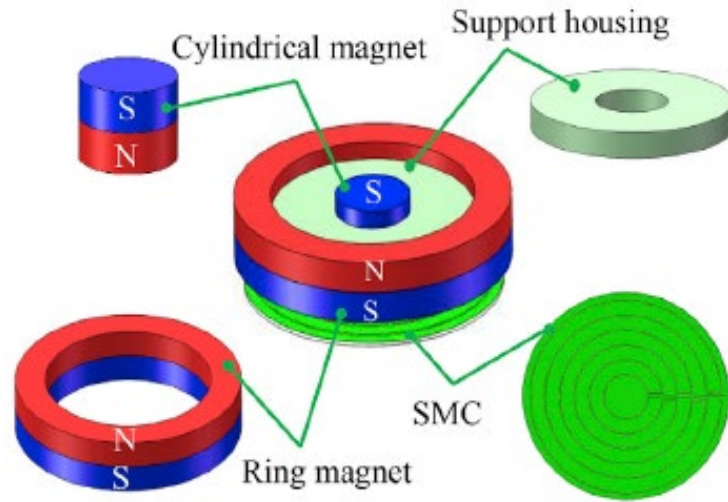
全向型 A_0 模态EMAT结构示意图



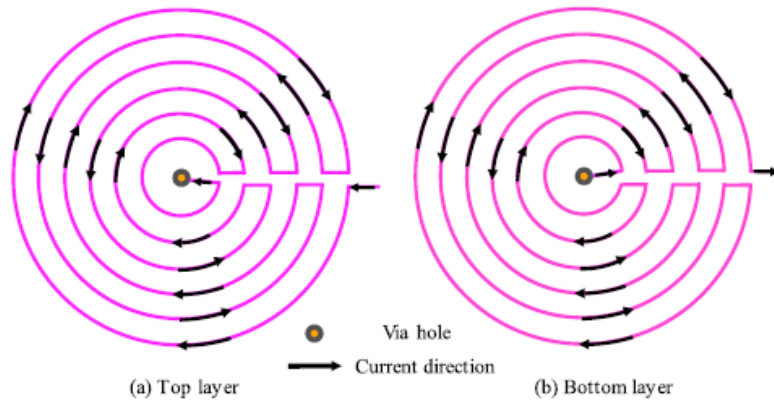
全向型 A_0 模态EMAT工作原理示意图

全向型 A_0 模态EMAT由同心磁铁对、圆形回折线圈和支撑套组成。同心磁铁对提供径向分布的静磁场。静磁场与感应涡流相互作用，产生洛伦兹力。

2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器



全向型 A_0 模态EMAT结构

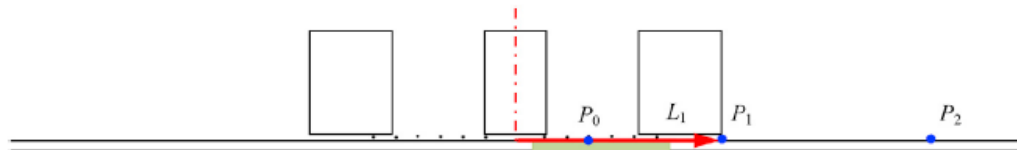


圆形回折线圈

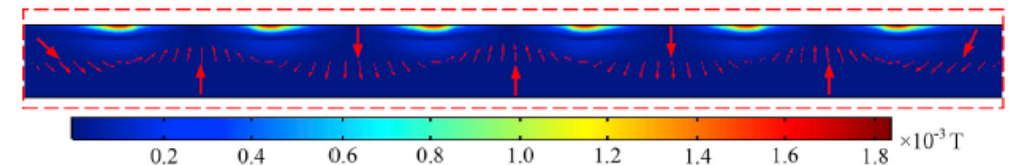
- 磁铁对包括圆柱永磁铁和圆环永磁铁。
- 磁铁对厚度10mm，圆柱磁铁直径6mm，圆环磁铁内径24mm，圆环磁铁外径40mm。
- 双层结构
- 相邻线圈间距为2.2mm（1/2波长），线圈长为28mm，线宽0.3mm。中心频率387kHz。

2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器

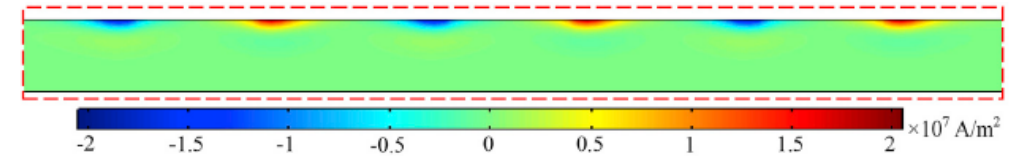
□ 仿真研究



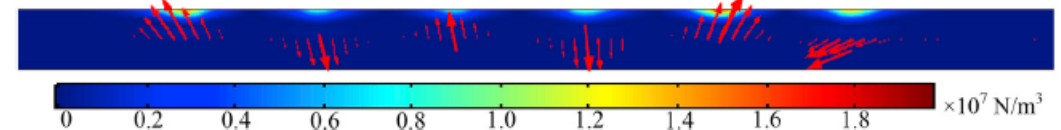
有限元仿真模型



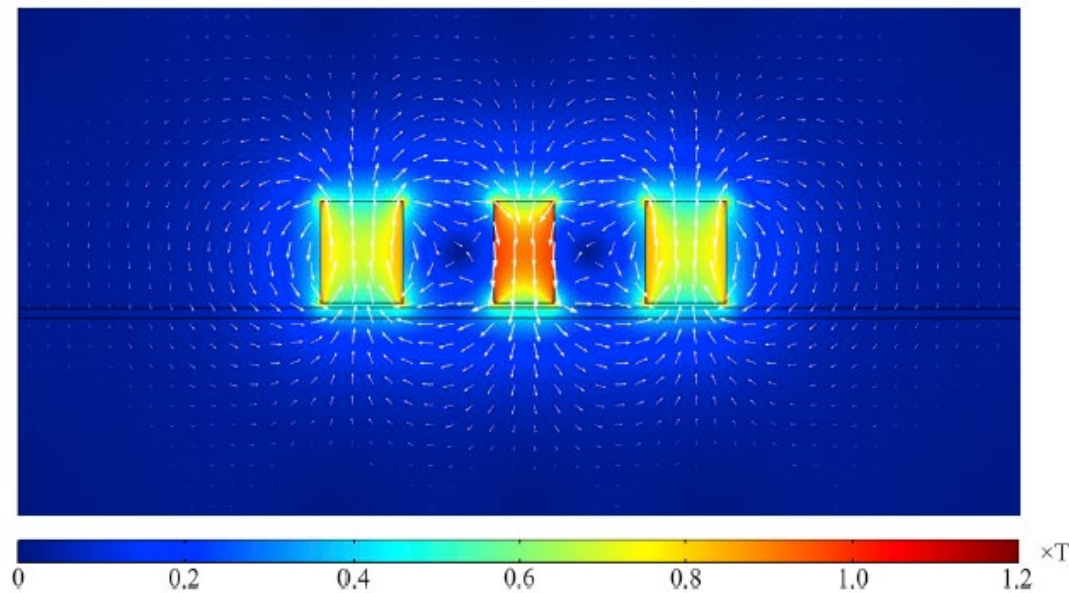
动磁场磁通密度分布



涡流密度分布

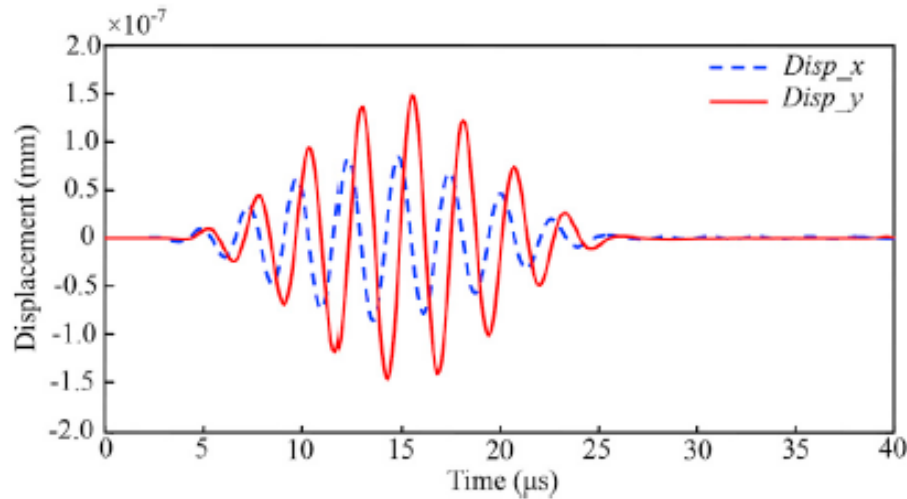


铝板内瞬时洛伦兹力密度分布

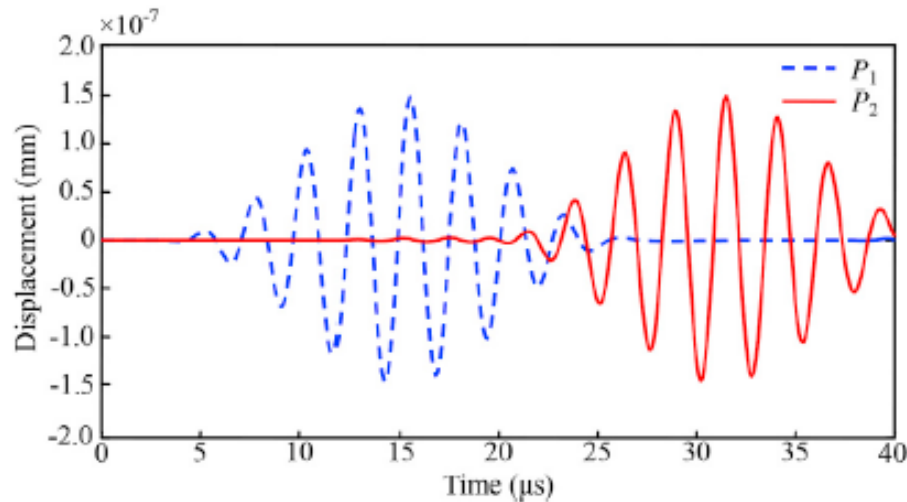


静磁场磁通密度分布

2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器



P1点位移



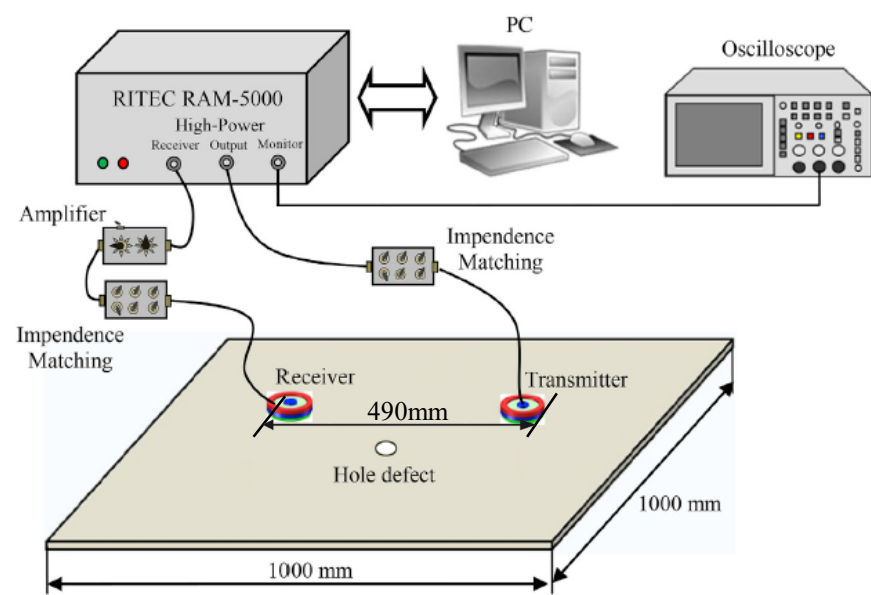
P1 和 P2点离面位移

- P_1 点最大离面位移与面内位移之比为**1.71**；在387kHz, A_0 模态离面位移与面内位移之比为**1.90**； S_0 模态离面位移与面内位移之比为**8.44**；表明产生的波为 **A_0 模态**。

- P_1 与 P_2 点间距45mm, 到达时间差15.9 μ s, 根据时间飞行法, Lamb wave波速为**2830**m/s。 A_0 模态理论群速度**2776**m/s。 S_0 模态理论群速度**5402**m/s。表明产生的波为 **A_0 模态**。

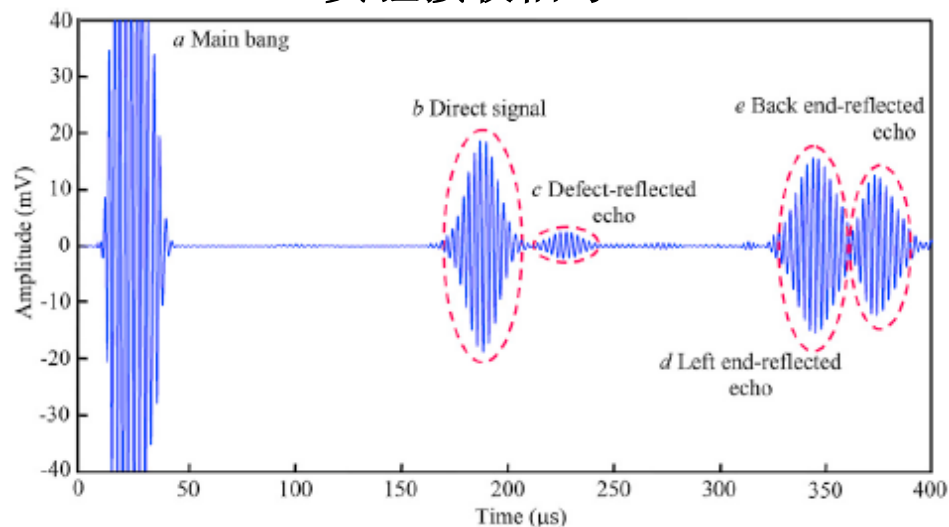
2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器

□ 单一 A_0 模态激励和接收



实验系统示意图

实验接收信号

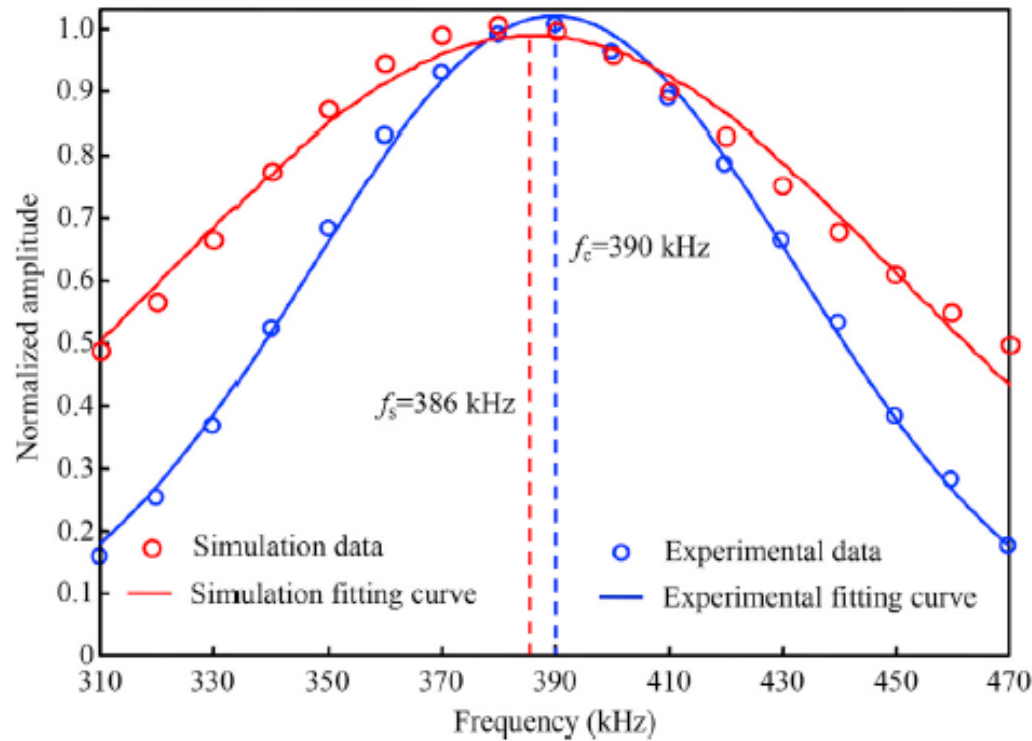


Pulse	b	c	d	e
Δt (μs)	170	203	324	353
d (mm)	470	546	880	950
c_{g2} (m/s)	2765	2689	2716	2691
Relative error (%)	0.4	3.1	2.2	3.2

激励信号为频率390kHz，5周期汉宁窗调制正弦信号。测得直达波波速与 A_0 模态理论群速度2776m/s，相对误差为0.4%。证明EMAT产生的超声导波为 A_0 模态。

2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器

□ 频响特性

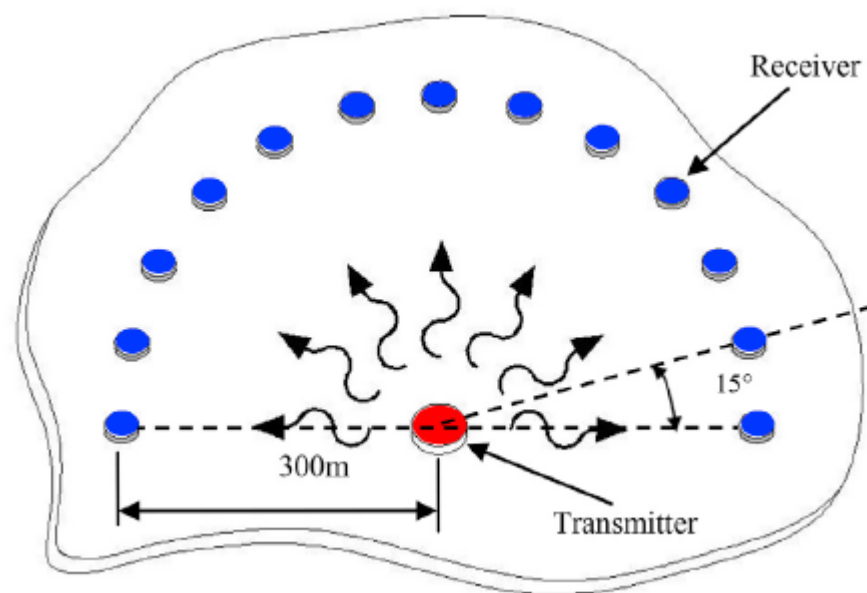


频率响应特性曲线

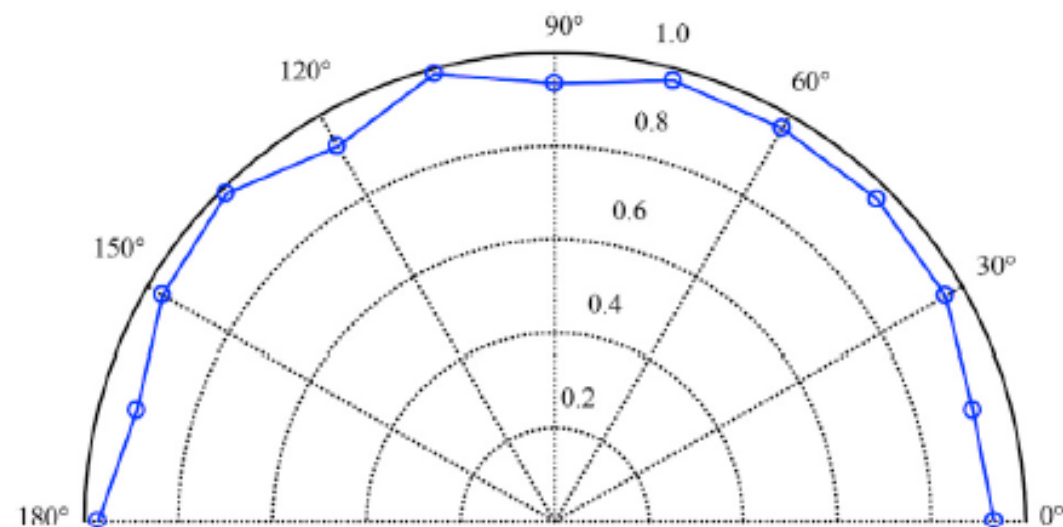
- 激励频率：310kHz~470kHz，步长10kHz。仿真数据：在386kHz取得最大幅值。在390kHz取得最大幅值。理论中心频率：387kHz。
- 全向型 A_0 模态EMAT具有良好的频率响应特性。

2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器

□ 声场指向性



全向性实验传感器布置

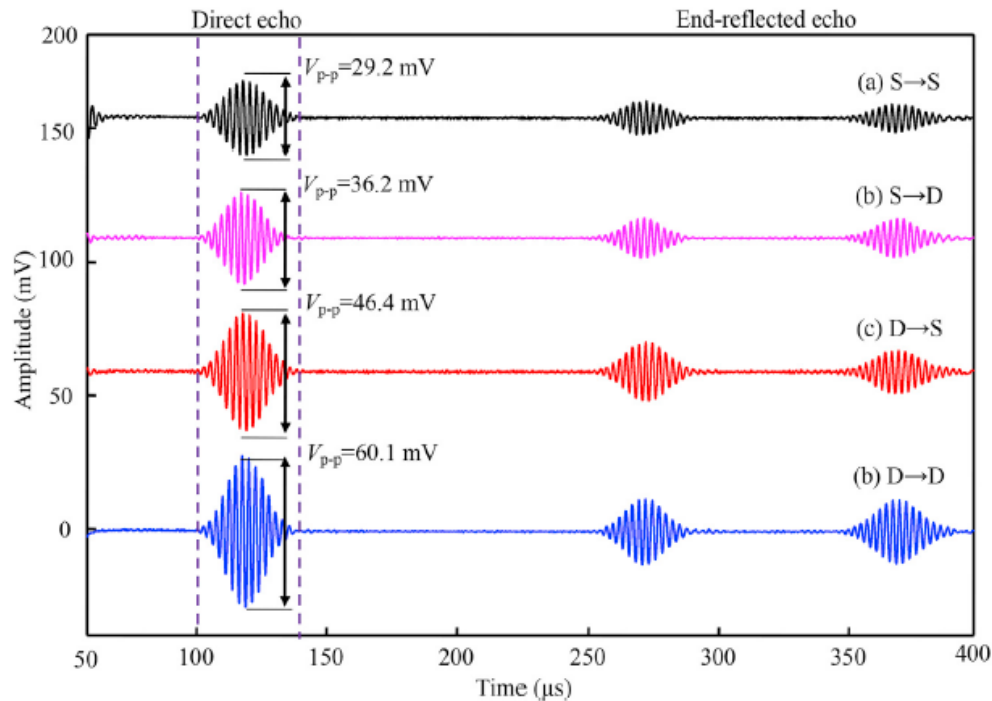


声场指向性分布

激励传感器布置在圆心位置，接收传感器分布于 $0^\circ \sim 180^\circ$ 半径上，间隔 15° 。实验验证各角度接收信号幅值在 $1.0 \sim 0.9$ 之间。

2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器

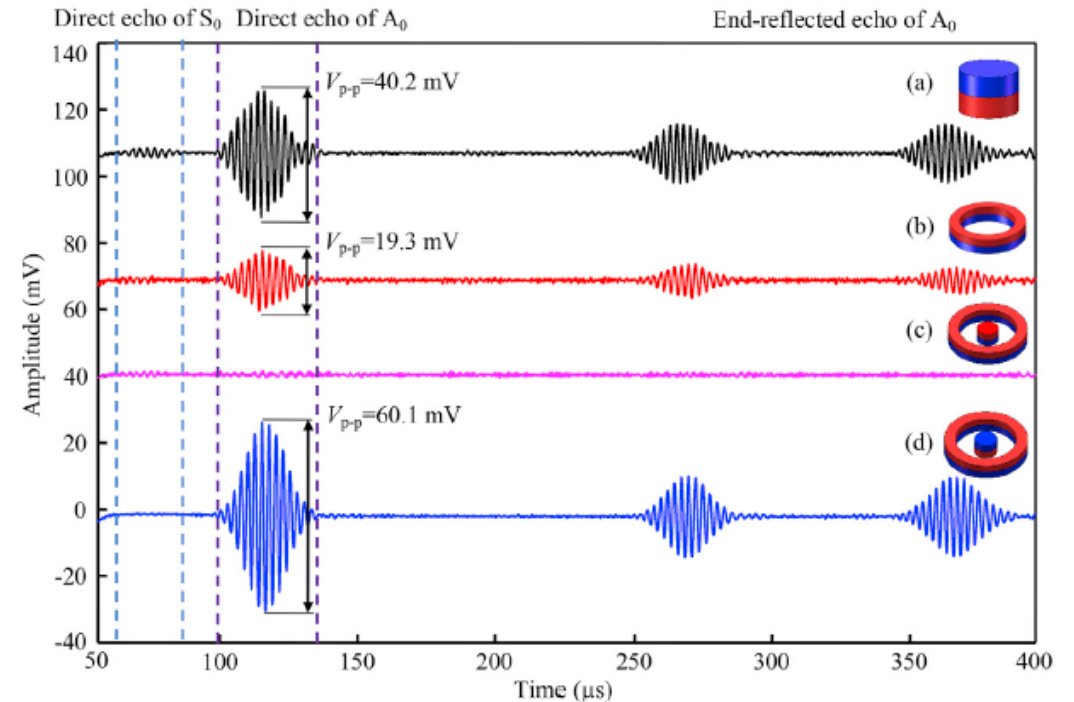
□ 线圈层数对信号幅值的影响



实验接收信号

- 双层线圈结构增加了直达波信号的幅值。

□ 永磁铁结构对信号幅值的影响



实验接收信号

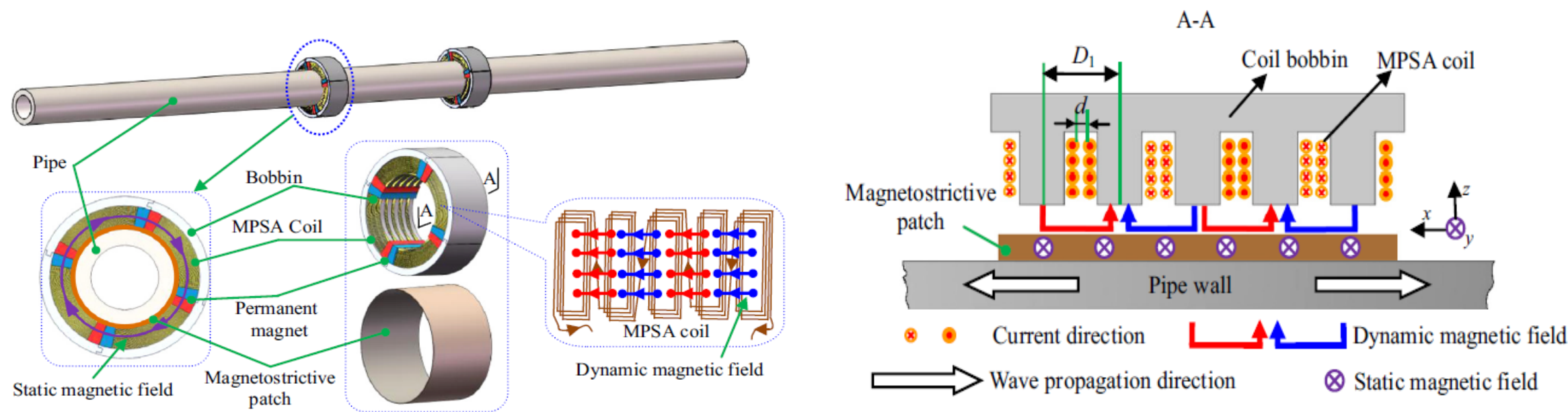
- 反向极化同心磁铁对提高了直达波信号幅值，抑制 S_0 模态的产生。

目录

1. 研究背景及意义
2. 应用于板结构缺陷检测电磁声传感器
 - 2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器
 - 2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器
- 3. 应用于金属管道缺陷检测电磁声传感器**
 - 3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器**
 - 3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器
4. 新型电磁声传感器
 - 4.1 磁集中器式电磁声传感器
 - 4.2 斜入射式电磁声传感器
5. 结论

3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器 (MPSA coil-MPT)

□ 结构与工作原理

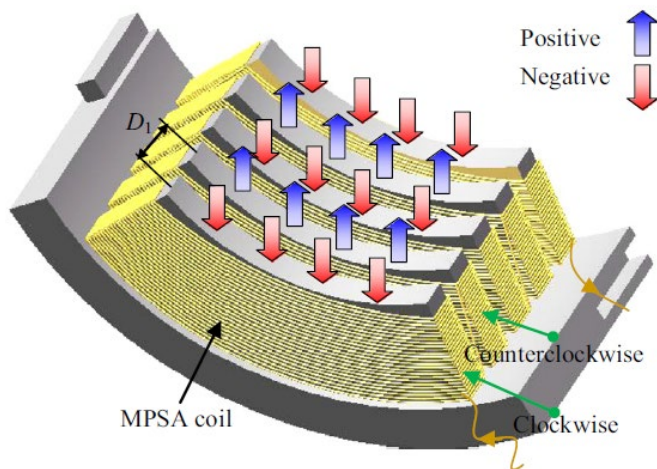


MPMSA coil-MPT的配置与工作原理

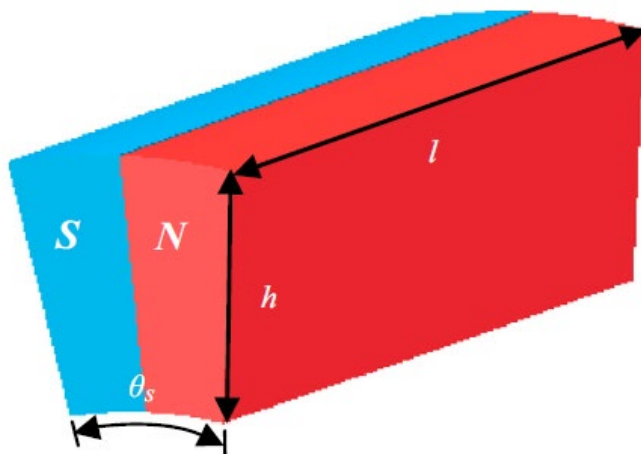
永磁铁提供周向静磁场，改进式平面螺线管阵列线圈(MPMSA)提供动磁场。动静磁场垂直施加到贴片上，在贴片中产生剪切变形。由于机械耦合，在管道中产生扭转模态并沿轴向传播。

3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器 (MPSA coil-MPT)

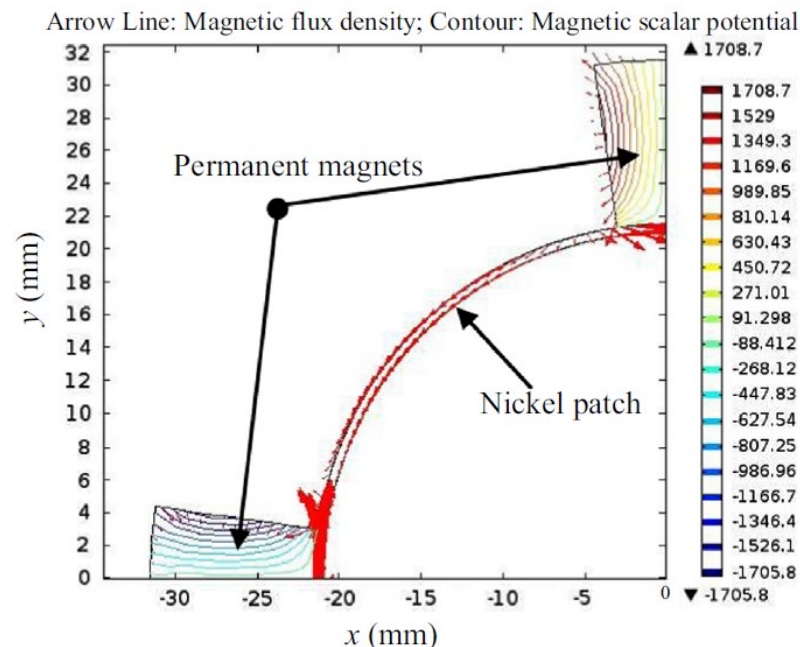
□ 仿真研究



MPESA线圈示意图



永磁体示意图

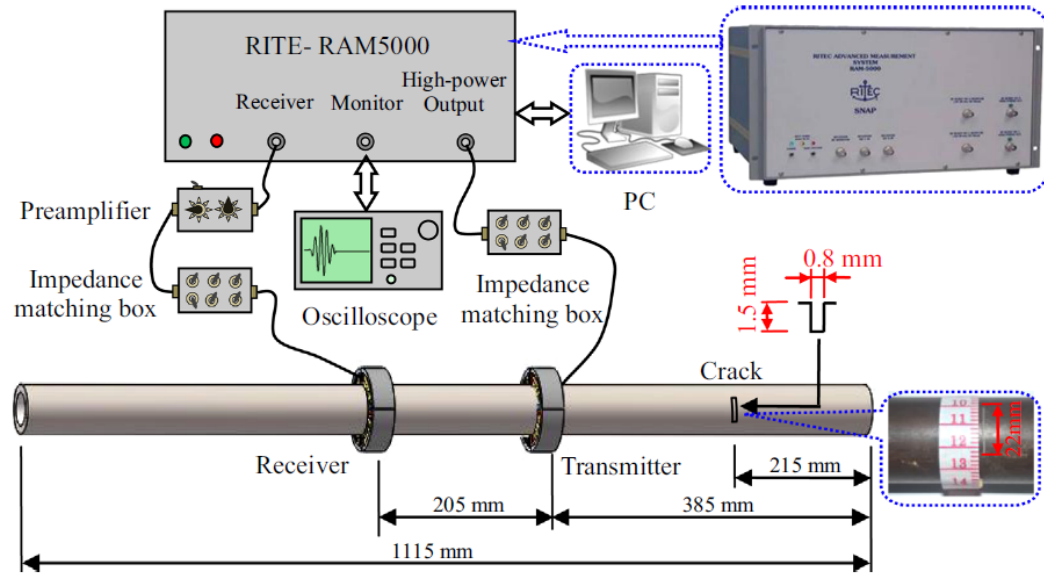


镍片中磁场分布仿真结果

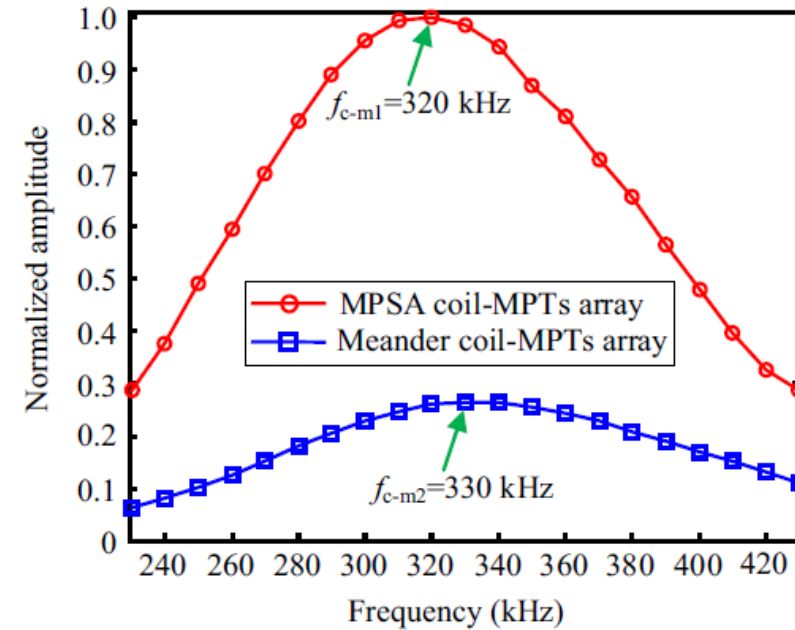
- 永磁体的几何参数如下：长度 l 为26mm；高度 h 为10mm；扇形截面的中心角 θ_s 为16°。
- 仿真结果中，红色箭头表示磁通量密度分布，除永磁铁附近，磁通量密度沿周向大致均匀。

3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器 (MPSA coil-MPT)

□ 频响特性



实验系统示意图

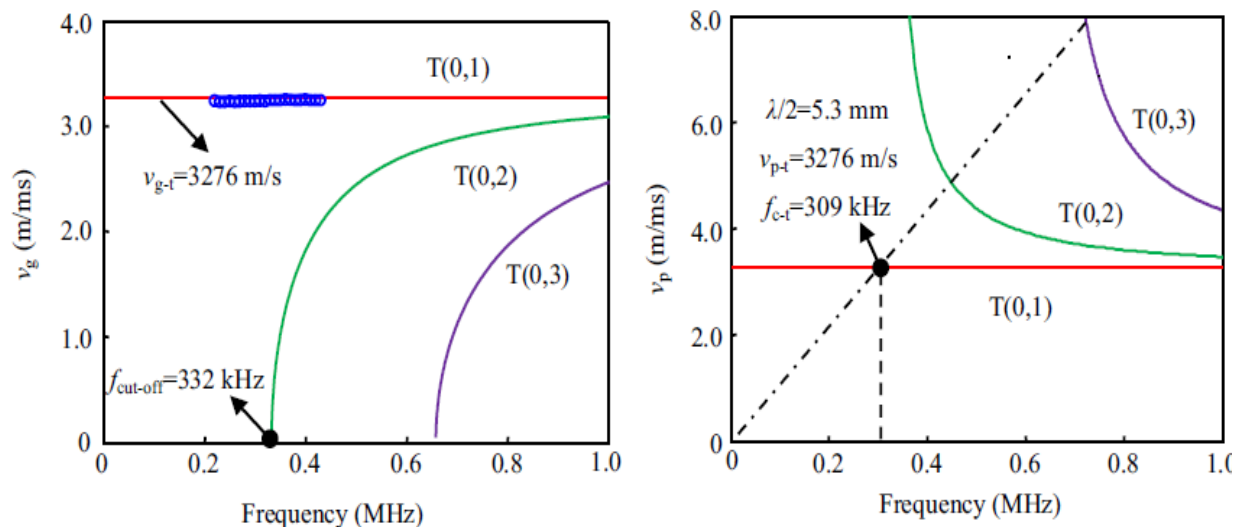


MPMSA 线圈MPT与普通回折线圈MPT的频率响应特性

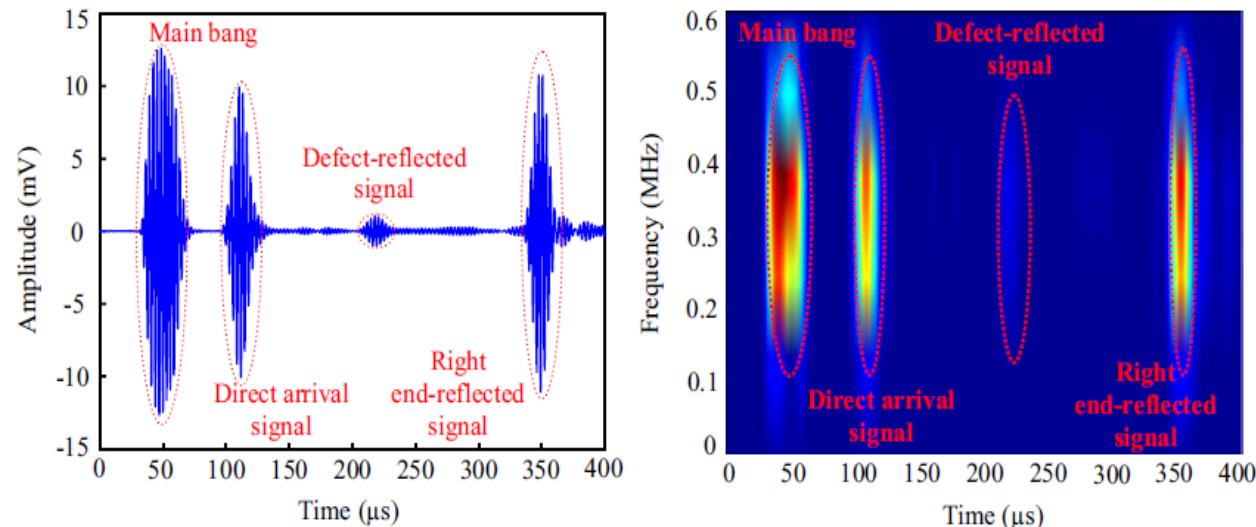
频率从230kHz增长到430kHz，步长10kHz，得到MPMSA coil-MPT频响特性曲线。实际中心频率 f_{c-m1} 为320kHz。相较于普通回折线圈MPT，MPMSA线圈MPT得到的信号幅值更高。

3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器 (MPSA coil-MPT)

□ 单一T(0,1)模态激励和接收



扭转模态频散曲线

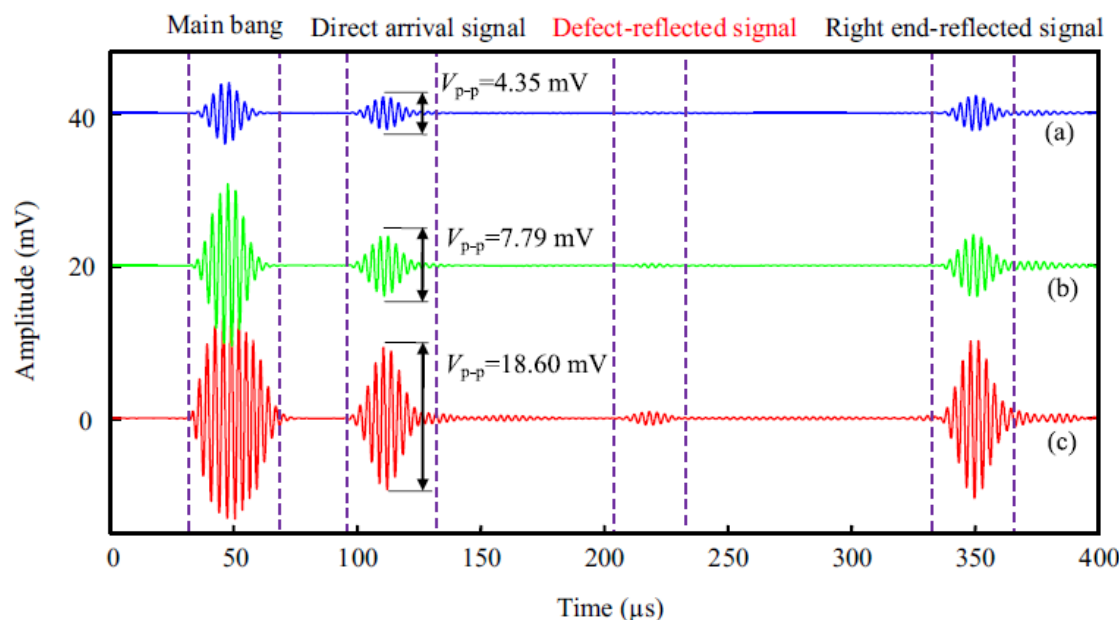


MPSA coil-MPT在320kHz时所测得的信号及频谱图

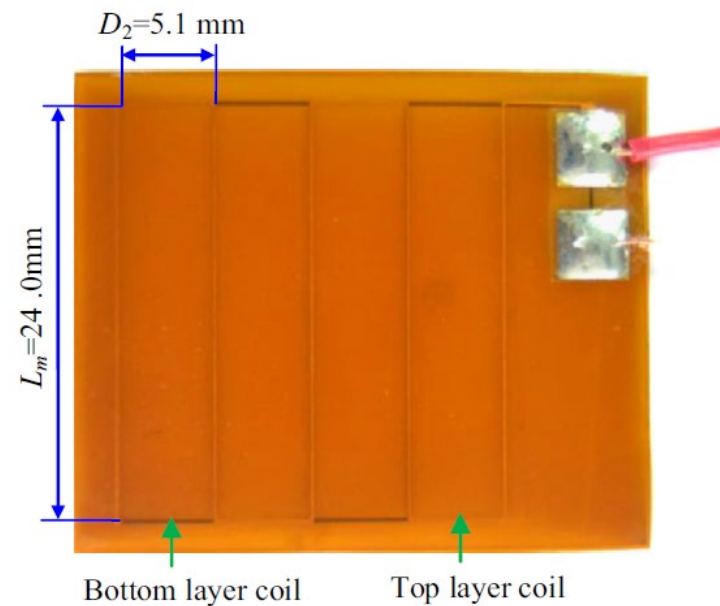
- T(0,1)模态无频散特性，理论群速度和理论相速度都为3276m/s。
- 根据直达波信号和右端面反射信号，基于TOF方法测得群速度 v_{g-m} 为3235.8m/s。误差为1.2%。
- 从230kHz增长到430kHz，步长10kHz，测量不同频率下群速度与T(0,1)模态理论群速度吻合。

3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器 (MPSA coil-MPT)

□ MPSA线圈对信号幅值的影响



频率为300 kHz时接收信号：(a) 一对回折线圈MPT (b) MPSA线圈MPT激励，回折线圈MPT接收(c) 一对MPSA线圈MPT



双层回折线圈照片

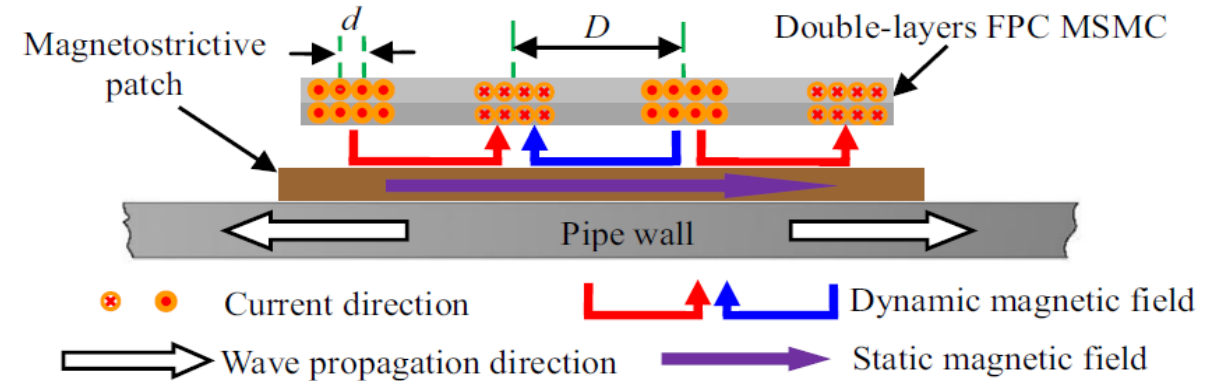
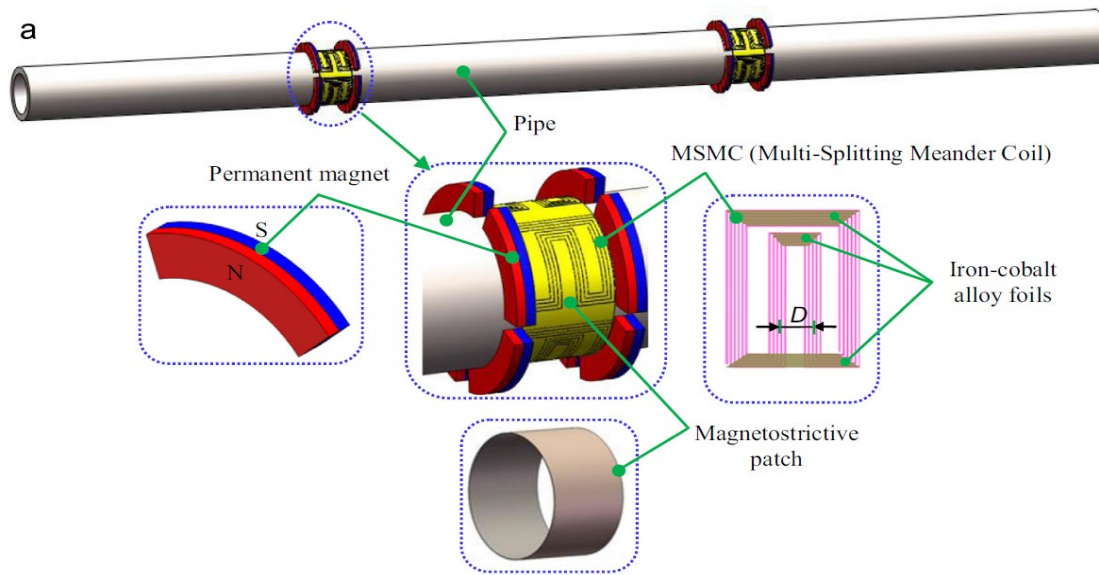
所提出的MPSA coil-MPT可以有效地激励和接收T(0,1)模态，并在一定程度上提高信号的幅值。

目录

1. 研究背景及意义
2. 应用于板结构缺陷检测电磁声传感器
 - 2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器
 - 2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器
3. 应用于金属管道缺陷检测电磁声传感器
 - 3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器
 - 3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器
4. 新型电磁声传感器
 - 4.1 磁集中器式电磁声传感器
 - 4.2 斜入射式电磁声传感器
5. 结论

3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器 (MSMC-MPT)

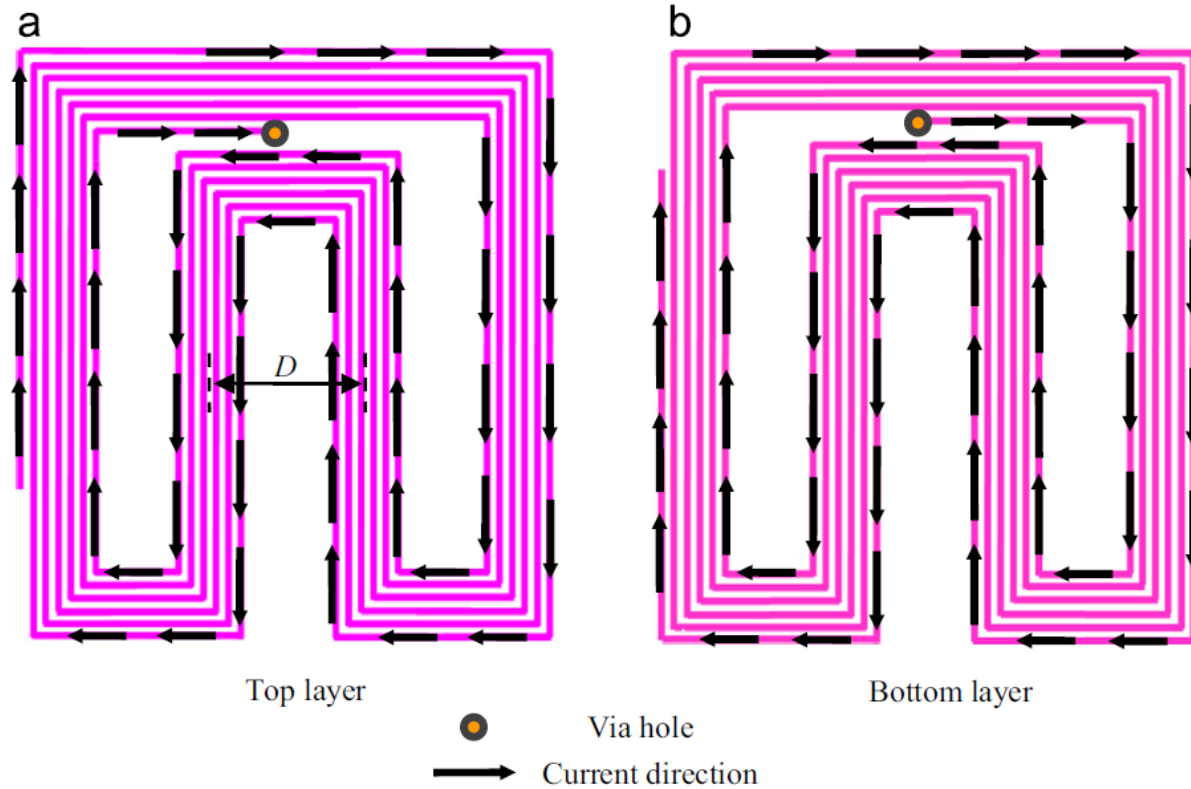
□ 结构与工作原理



多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器 (MSMC-MPT) 的配置和工作原理示意图

- 永磁铁和MSMC分别沿管轴向感应出静磁场和动磁场。静动磁场共同作用产生磁致伸缩力，在管道中产生纵向模式超声导波。
- 将0.04mm厚的铁钴合金箔粘贴在MSMC的下层水平部分以抑制贴片中的圆周磁场。

3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器 (MSMC-MPT)

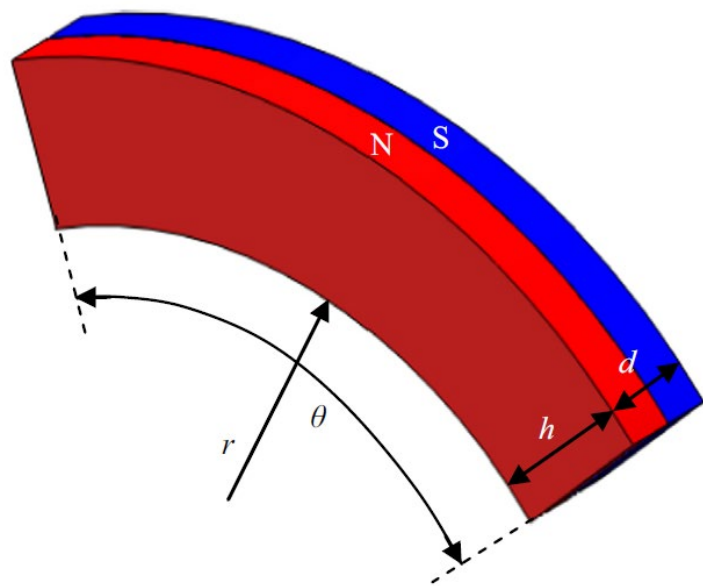


MSMC示意图

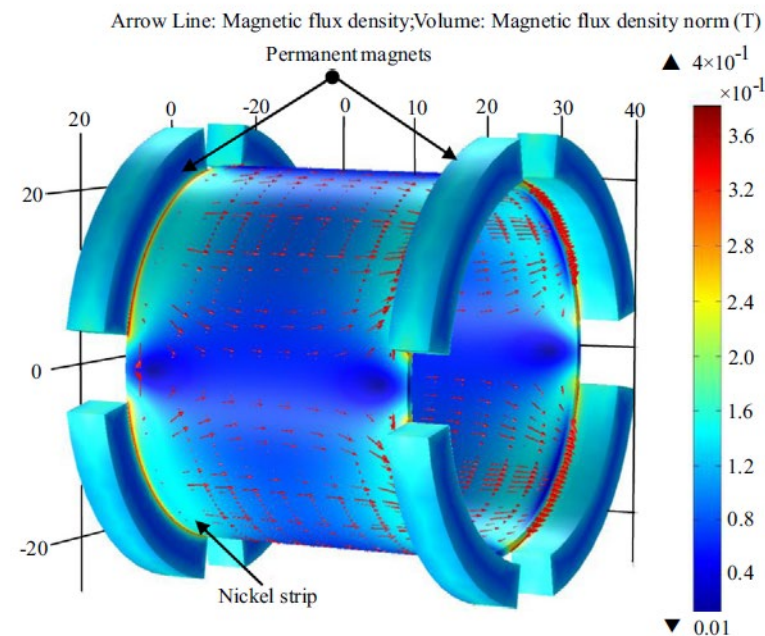
- MSMC由柔性印刷电路 (FPC) 制成, 较好地贴合管道表面。
- MSMC采用**双层结构**, 底层线圈通过过孔串联连接到顶层。保证**电流方向在底层和顶层的相同位置总是相同**以提高动态磁场的幅度。
- 导线的宽度为0.3mm, 相邻导线之间的间隔 d 为0.2mm。根据回折线圈的相长干涉原理, 保证**MSMC的相邻带之间的距离 D 是MSMC-MPT的理论中心频率 f_c 处的波长的一半**以提高接收信号的能量。

3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器 (MSMC-MPT)

□ 仿真研究



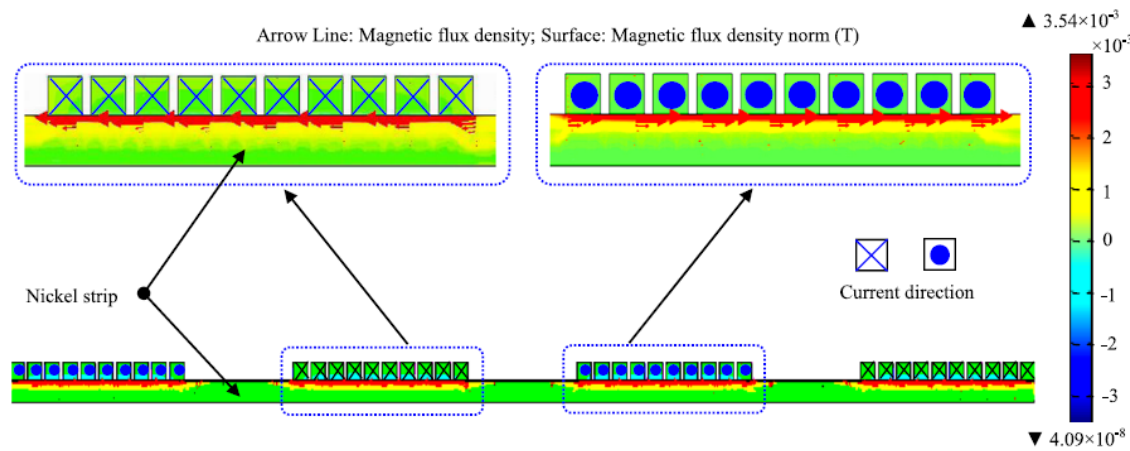
永磁体示意图



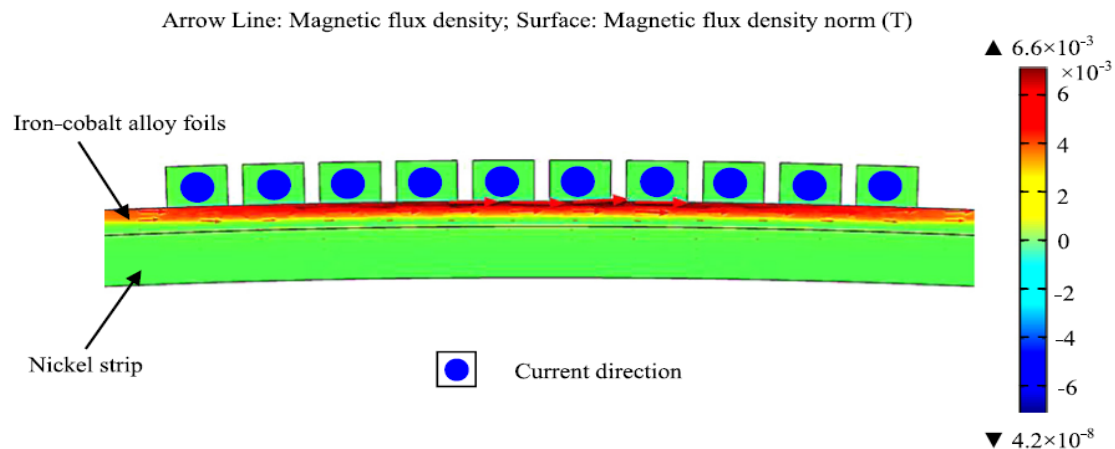
镍带中的磁场分布仿真结果

- 永磁体几何参数：内径 r 为21mm；厚度 d 为5mm；高度 h 为10mm；扇形截面中心角 θ 为70°。
- 仿真结果中红色箭头表示磁通量密度分布，除永磁铁附近，磁通量密度沿轴向大致均匀。

3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器 (MSMC-MPT)



镍带中MSMC周向部分产生的动态磁场分布

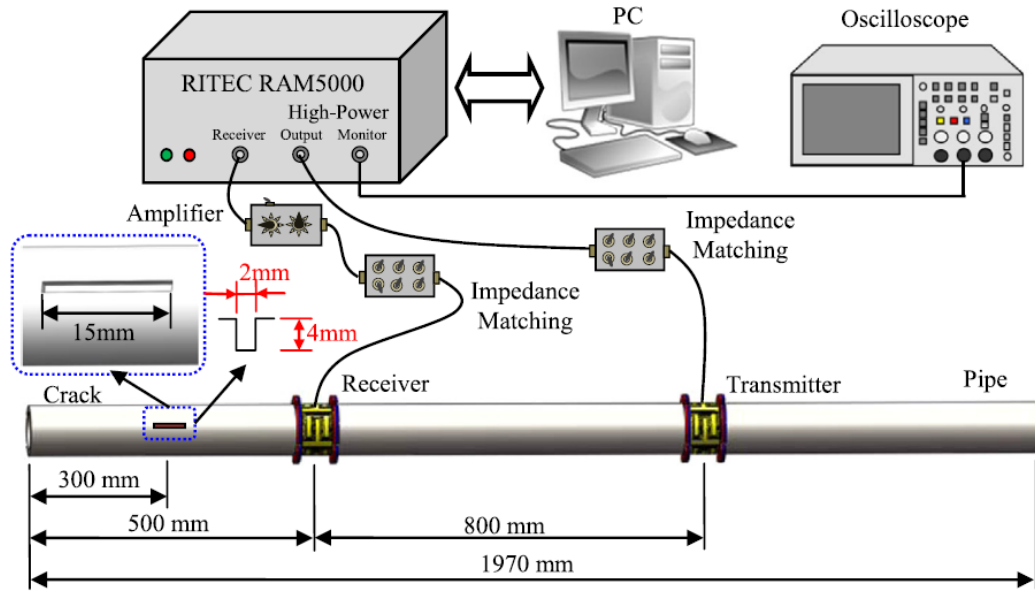


铁钴合金箔中MSMC轴向部分产生的动态磁场分布

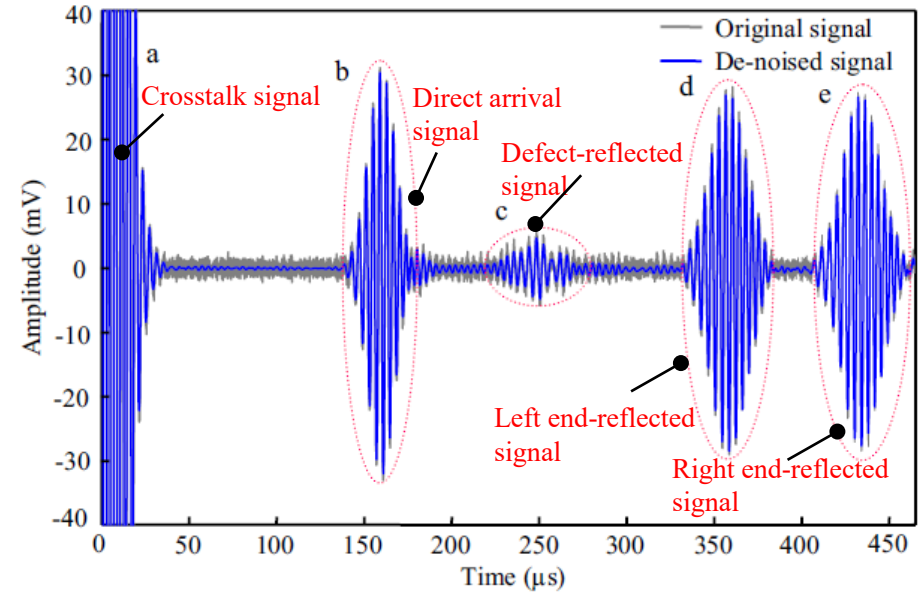
- 镍带中磁场均匀分布，并且沿着管的轴向周期性地变化。由于产生了均匀的轴向磁场，可有效地激励和接收纵向导波模式。
- MSMC轴向部分产生的周向磁场主要集中在铁钴合金箔中。因此，铁钴合金箔对贴片圆周磁场具有一定的抑制作用，从而抑制镍带中扭转模态的产生。

3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器 (MSMC-MPT)

□ 单一L(0,2)模态激励和接收



实验系统示意图

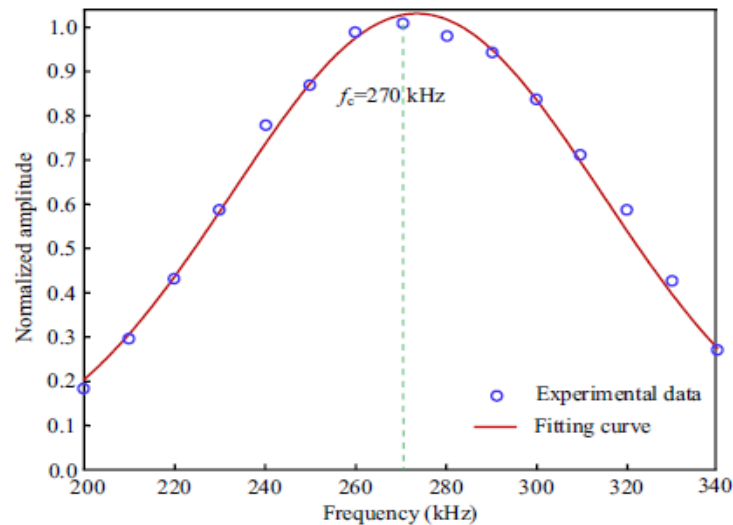


激励频率**270kHz**时接收到的原始信号和降噪后的信号

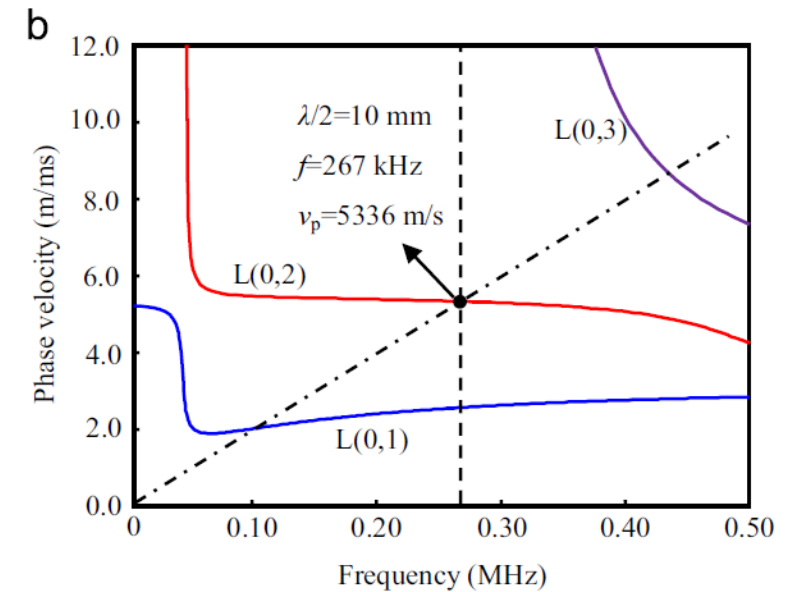
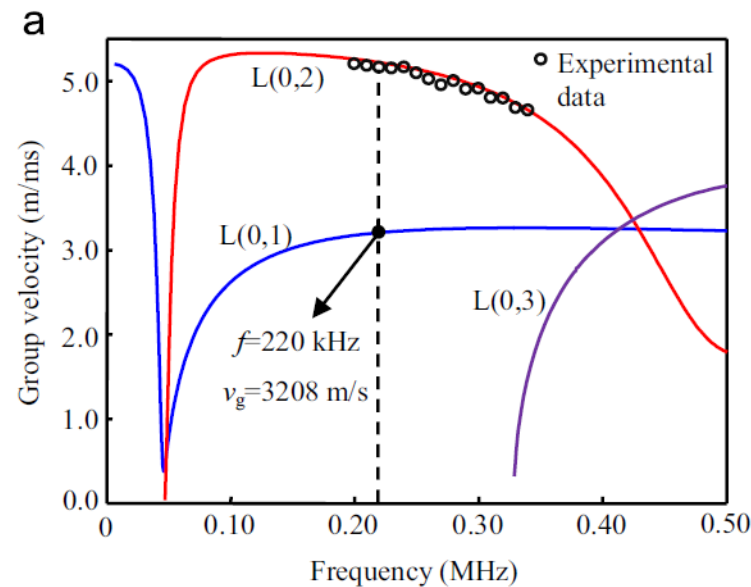
所研制的MSMC-MPT阵列不仅能够激励和接收单一L(0,2)模态，而且能够成功地识别和定位管道中的裂纹。

3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器 (MSMC-MPT)

□ 频响特性



MSMC-MPT的频率响应特性

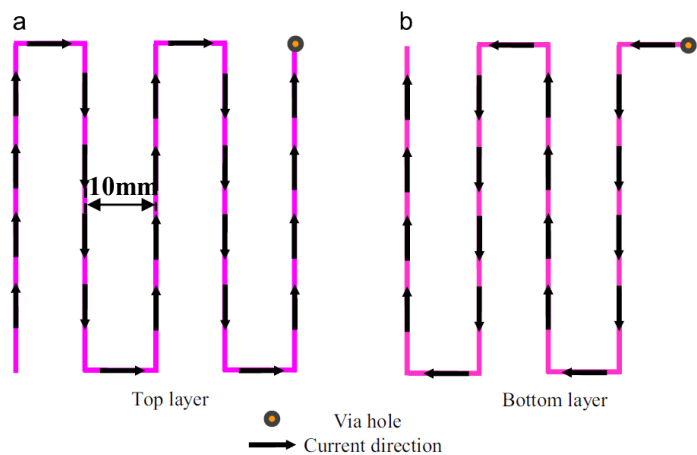


实验用管道中纵向导波模态的理论频散曲线((a) 群速度 (b) 相速度

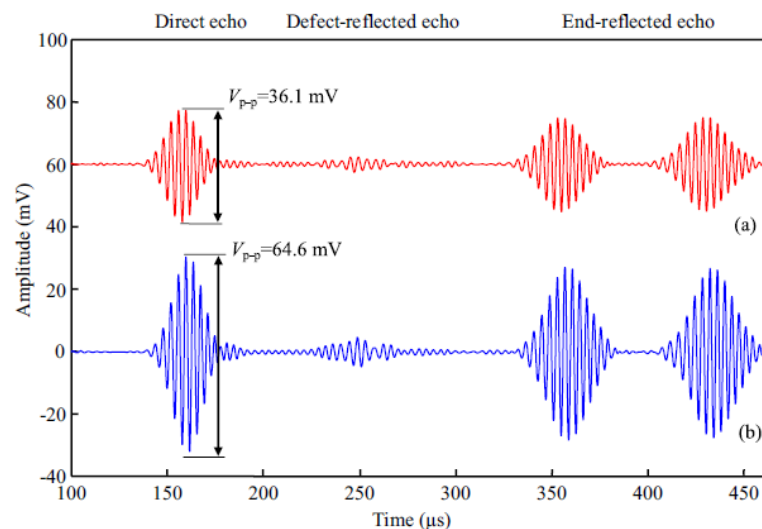
频率从200kHz增长到340kHz，步长10kHz。实际中心频率为270kHz，与理论中心频率267kHz相对误差为1%。测量不同频率下的群速度与L(0,2)模态的理论群速度非常吻合。

3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器 (MSMC-MPT)

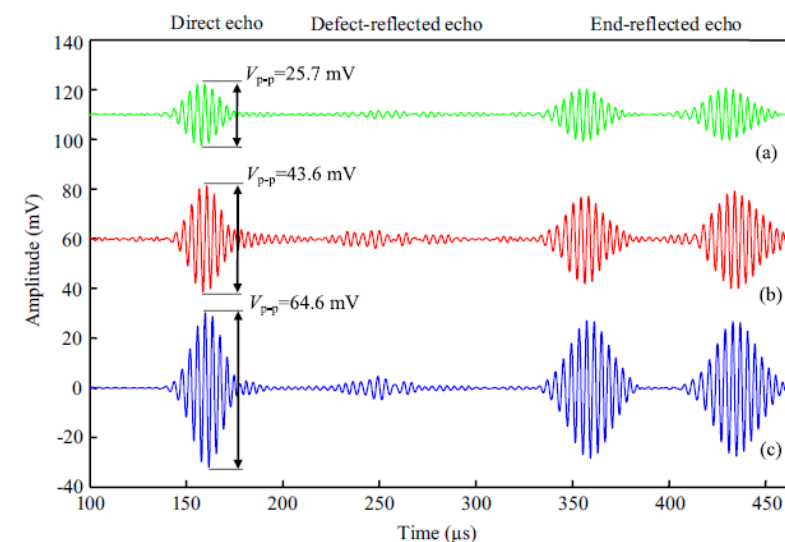
□ MSMC 线圈 对信号幅值的影响



回折线圈示意图



270kHz测得信号: (a) 一对回折线圈MPT (b) 一对MSMC-MPT



270kHz测得信号:(a) 一对单层MSMC-MPT (b) 单层MSMC-MPT激励, 双层MSMC-MPT接收 (c) 一对双层MSMC-MPT

MSMC-MPT阵列可有效激励和接收L(0,2)模态, 相较于普通回折线圈MPT, MSMC-MPT得到的信号幅值更高。接收到的直达波信号的 V_{p-p} 值随着线圈层数的增加而增加。

目录

1. 研究背景及意义
2. 应用于板结构缺陷检测电磁声传感器
 - 2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器
 - 2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器
3. 应用于金属管道缺陷检测电磁声传感器
 - 3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器
 - 3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器
- 4. 新型电磁声传感器**
 - 4.1 磁集中器式电磁声传感器**
 - 4.2 斜入射式电磁声传感器
5. 结论

4.1 磁集中器式电磁声传感器 (D-MC-EMAT)

□ 结构与工作原理

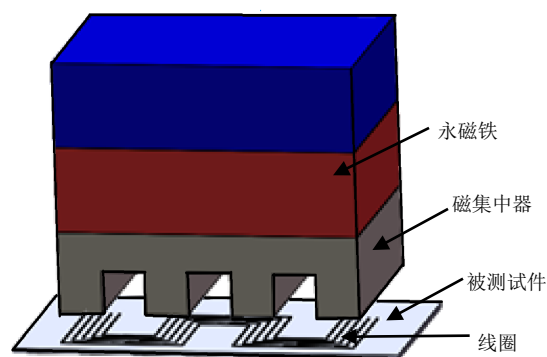
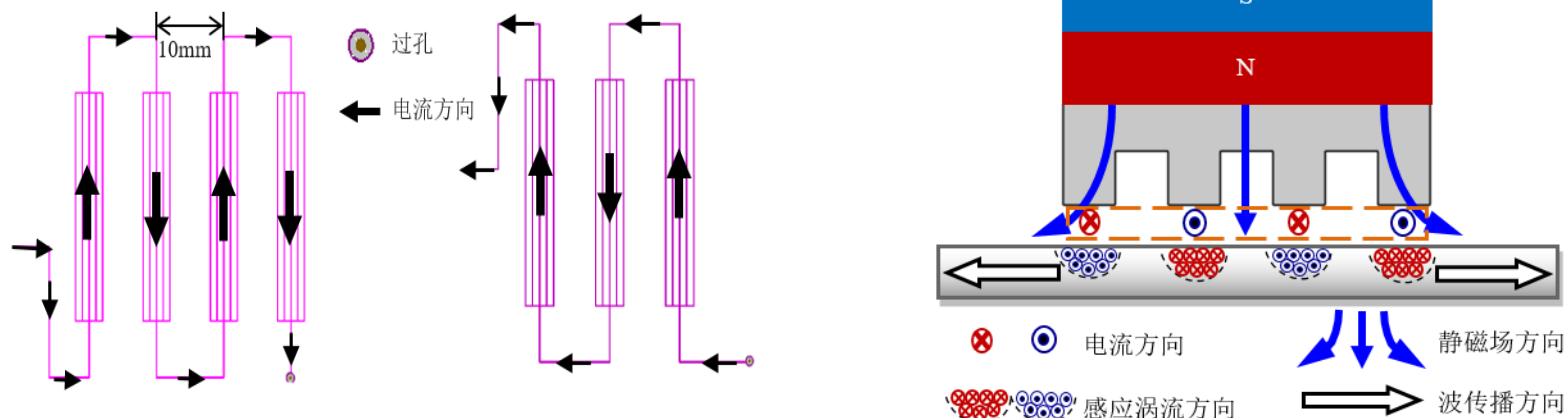


图5.1 D-MC-EMAT结构示意图

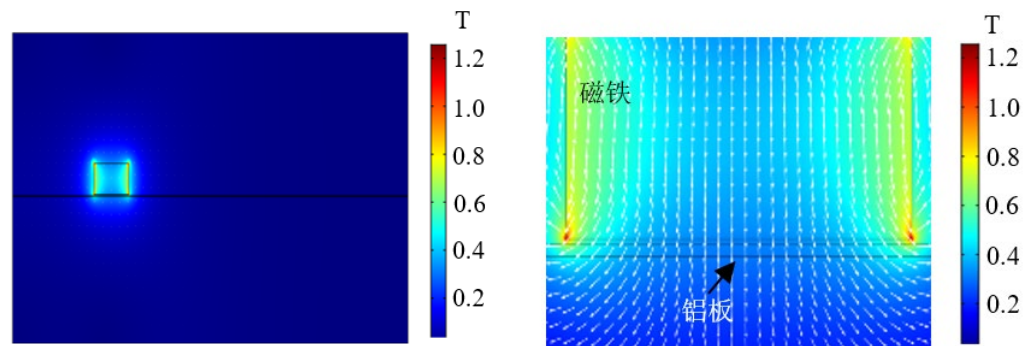


磁集中器式电磁声传感器 (D-MC-EMAT) 的配置和工作原理示意图

- 磁集中器上部分为长方体，与永磁铁长宽均相等，下部分为长方体阵列，相邻两支撑腿中心距相等。磁集中器与磁铁吸合，放置于多簇回折线圈上。
- 永磁铁提供垂直于试件表面的偏置静磁场，磁集中器对偏置静磁场进行集中与引导，通电多簇回折线圈在导电试件中产生反向涡流，涡流与静磁场作用产生洛伦兹力。

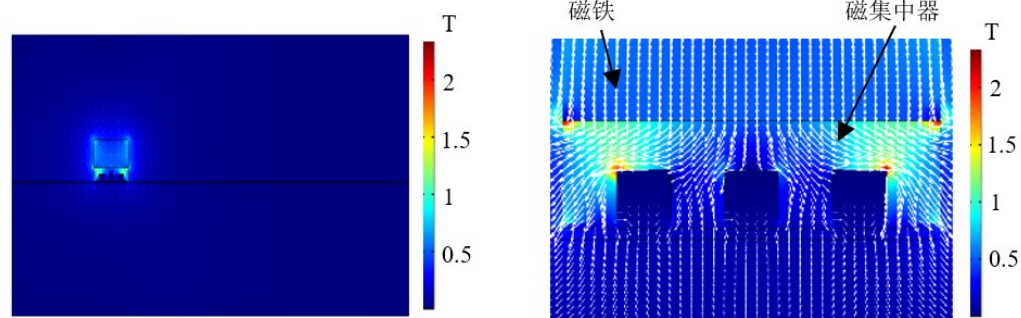
4.1 磁集中器式电磁声传感器 (D-MC-EMAT)

□ 仿真研究



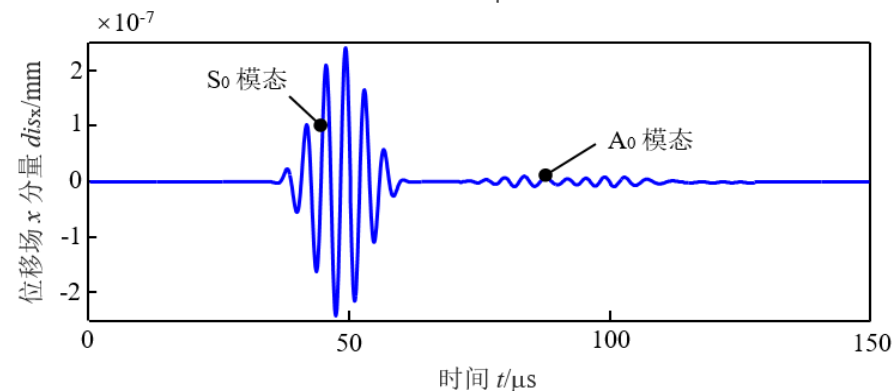
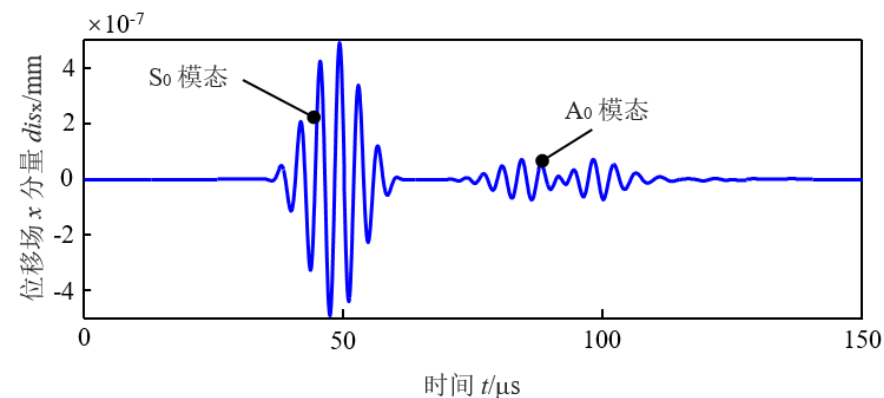
(a) 传统 EMAT 整体图

(b) 磁铁底部放大图



(a) D-MC-EMAT 整体图

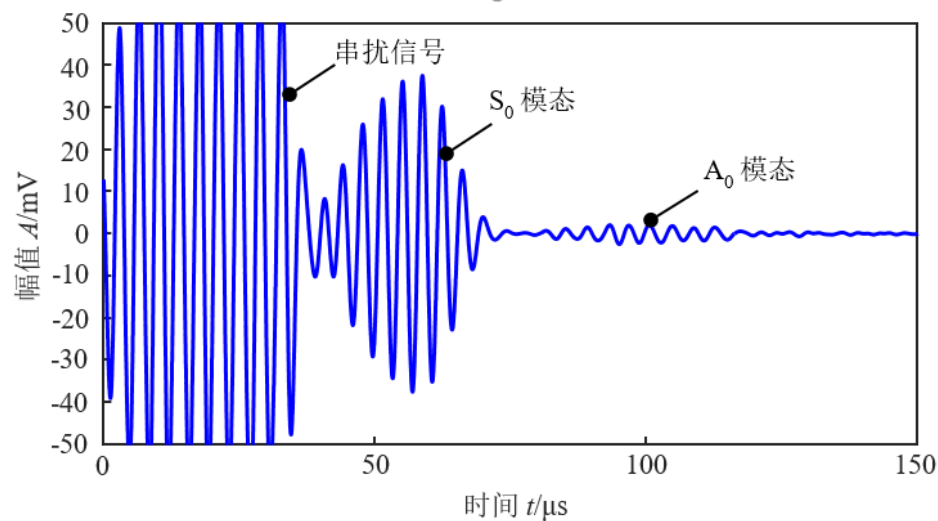
(b) 磁集中器放大图



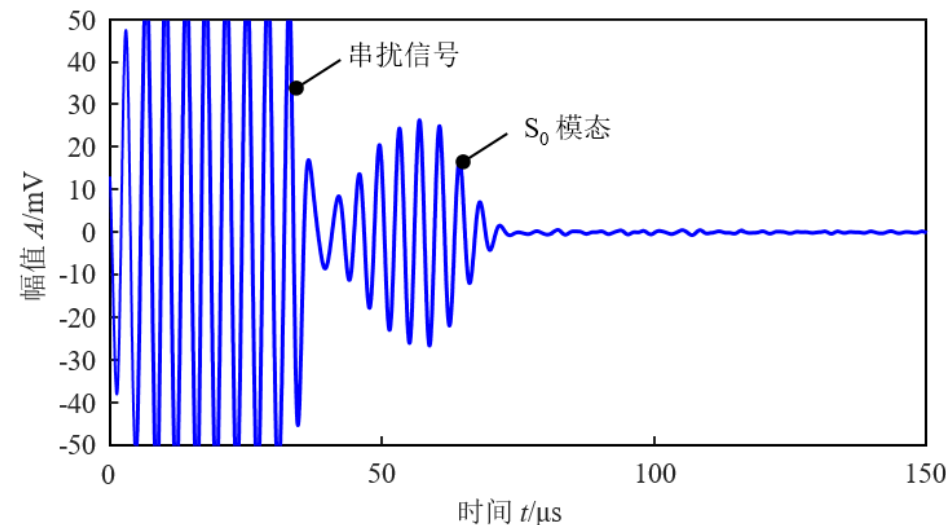
- 加入磁集中器后由于其聚磁和导磁的作用，使得磁场的水平方向的分量有所减少，从而减少不需要的垂直方向的洛伦兹力。
- D-MC-EMAT激励出的模态更加纯净，模态单一性更好。

4.1 磁集中器式电磁声传感器 (D-MC-EMAT)

□ 单一 S_0 模态激励和接收

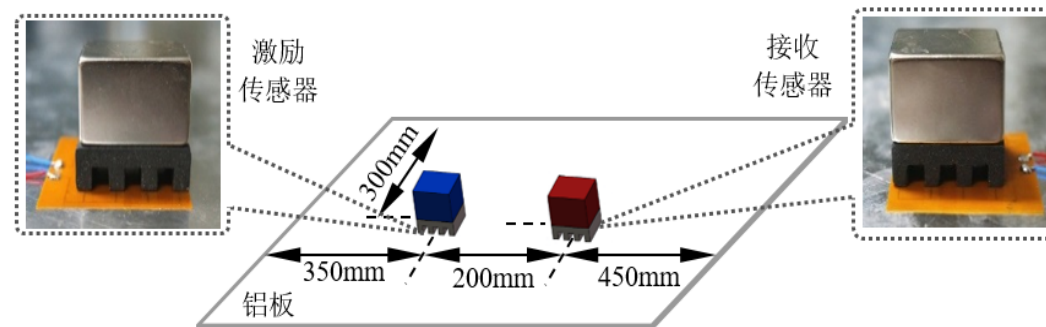


(a) 传统 EMAT 接收信号



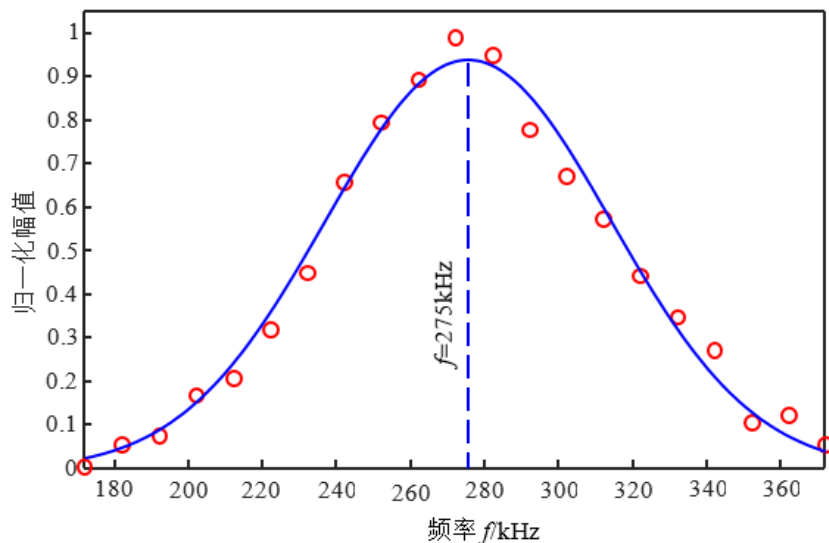
(b) 磁集中器式 EMAT 接收信号

- 传统EMAT激励产生了 S_0 模态和 A_0 模态。
- 磁集中器式EMAT只激励产生了 S_0 模态。



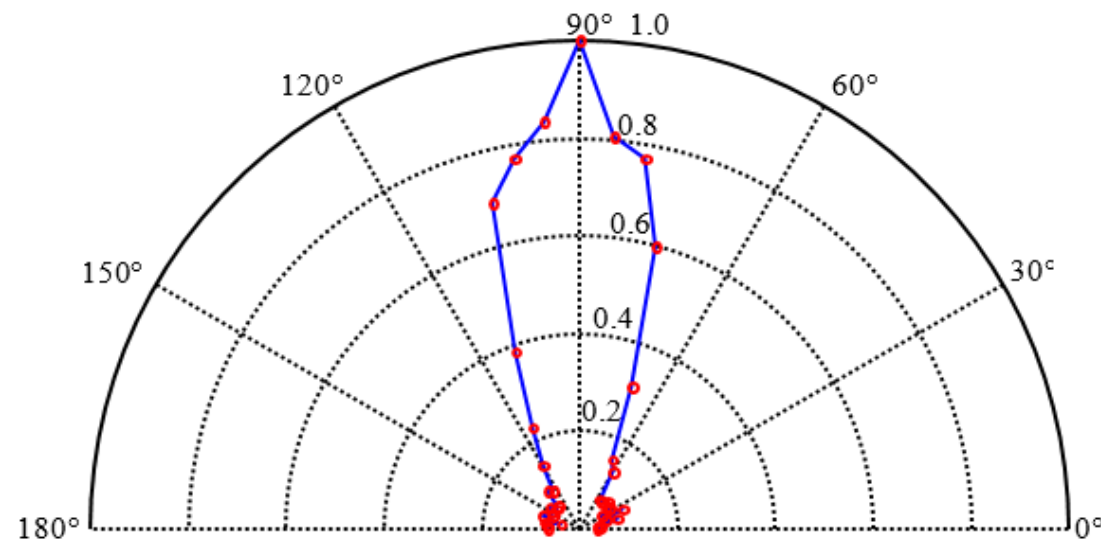
4.1 磁集中器式电磁声传感器 (D-MC-EMAT)

□ 频响特性



D-MC-EMAT的频率响应曲线

□ 声场指向性

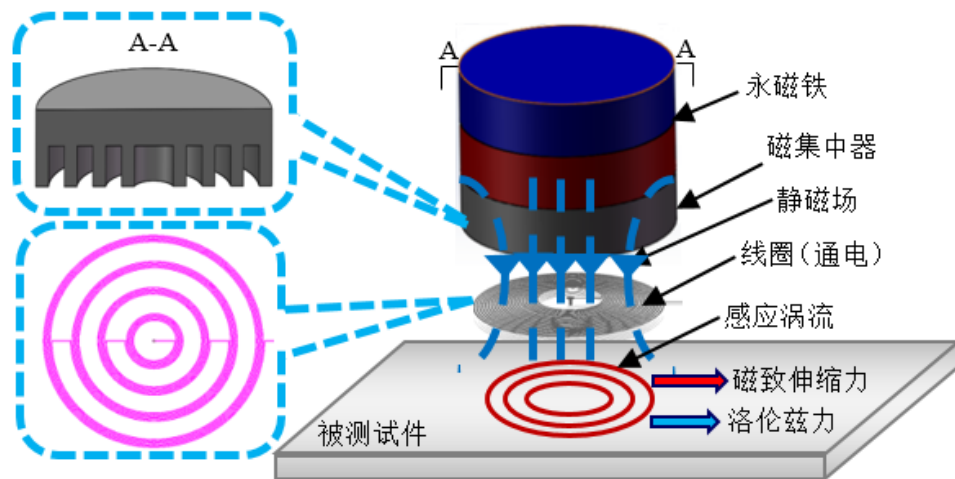


D-MC-EMAT接收直达波归一化幅值的周向分布

- D-MC-EMAT实际中心频率为275kHz，与理论中心频率272kHz基本吻合，相对误差为1.1%。
- D-MC-EMAT的指向性较好，声束能量主要集中在90°方向上。

4.1 磁集中器式电磁声传感器

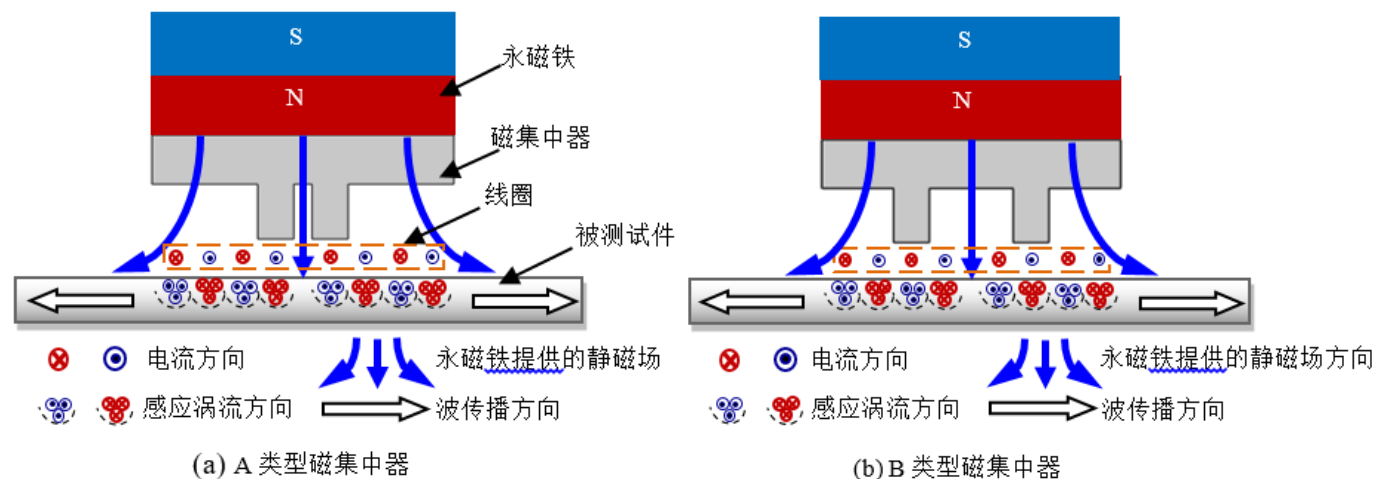
□ 全向型磁集中器式电磁声传感器



全向型磁集中器式EMAT工作原理示意图^[1]

- 多簇圆形回折线圈与磁铁、磁集中器组合，产生全向型声场分布。

□ 双模态磁集中器式电磁声传感器



双模态磁集中器式EMAT工作原理示意图^[2]

- 设计两种不同腿间距的磁集中器，实现激励导波模态可调节。

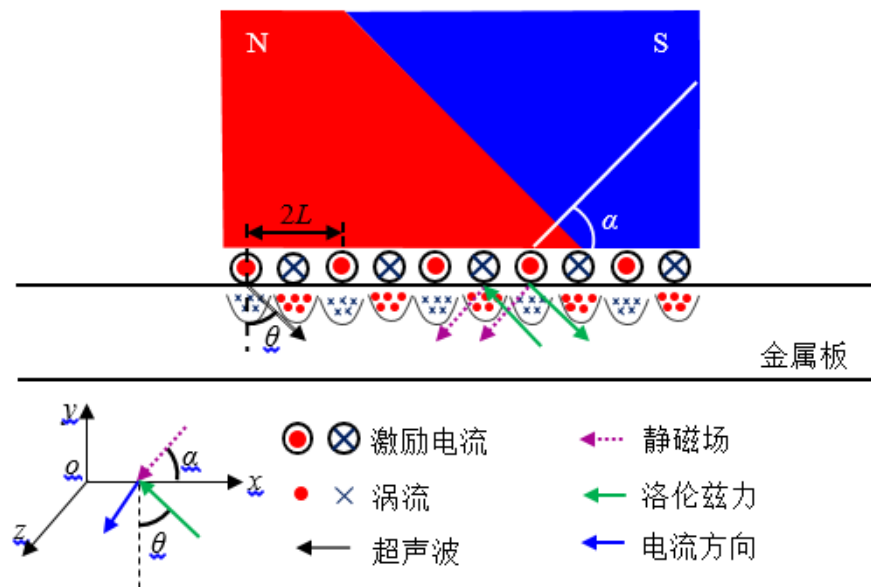
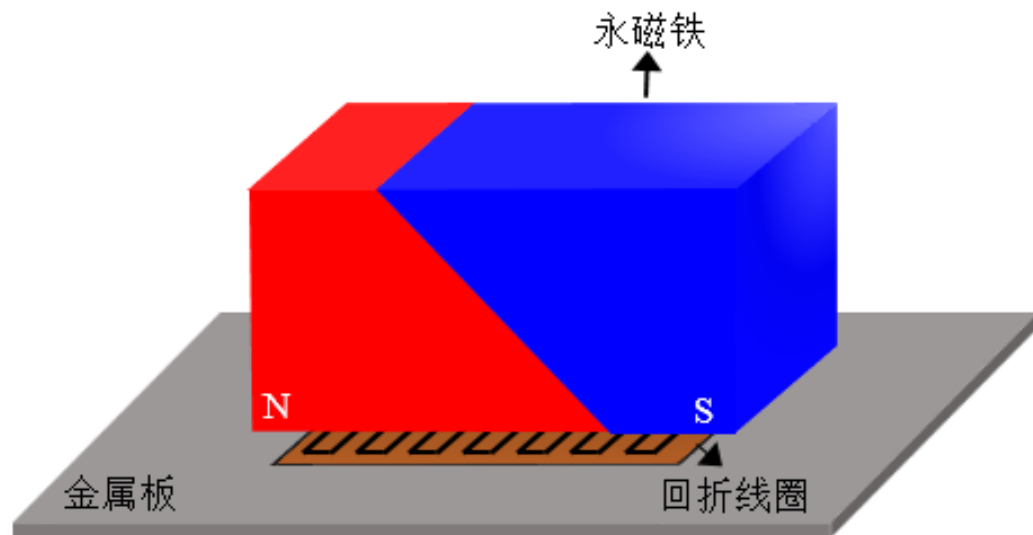
[1] Liu Z, Deng L, Zhang Y, et al. Development of an omni-directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer [J]. NDT&E International. 2020, 109:102193(14pp).
[2] Liu Z, Deng L, Zhang Y, et al. Development of a mode-tuning magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer [J]. Ultrasonics, 2020, 103:158-173

目录

1. 研究背景及意义
2. 应用于板结构缺陷检测电磁声传感器
 - 2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器
 - 2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器
3. 应用于金属管道缺陷检测电磁声传感器
 - 3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器
 - 3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器
- 4. 新型电磁声传感器**
 - 4.1 磁集中器式电磁声传感器
 - 4.2 斜入射式电磁声传感器**
5. 结论

4.2 斜入射式电磁声传感器

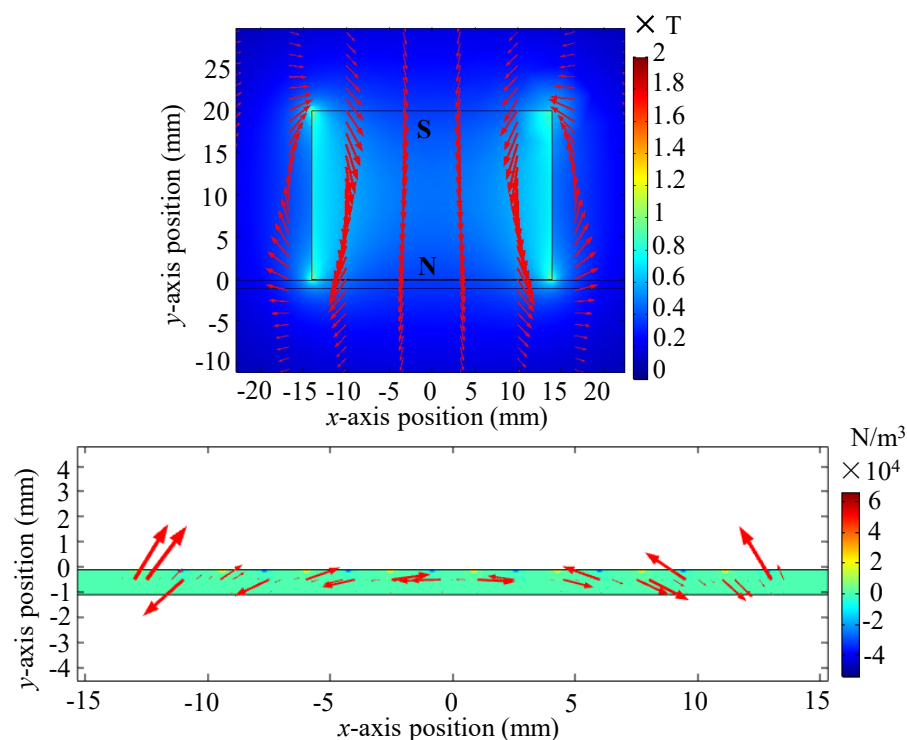
□ 结构与工作原理



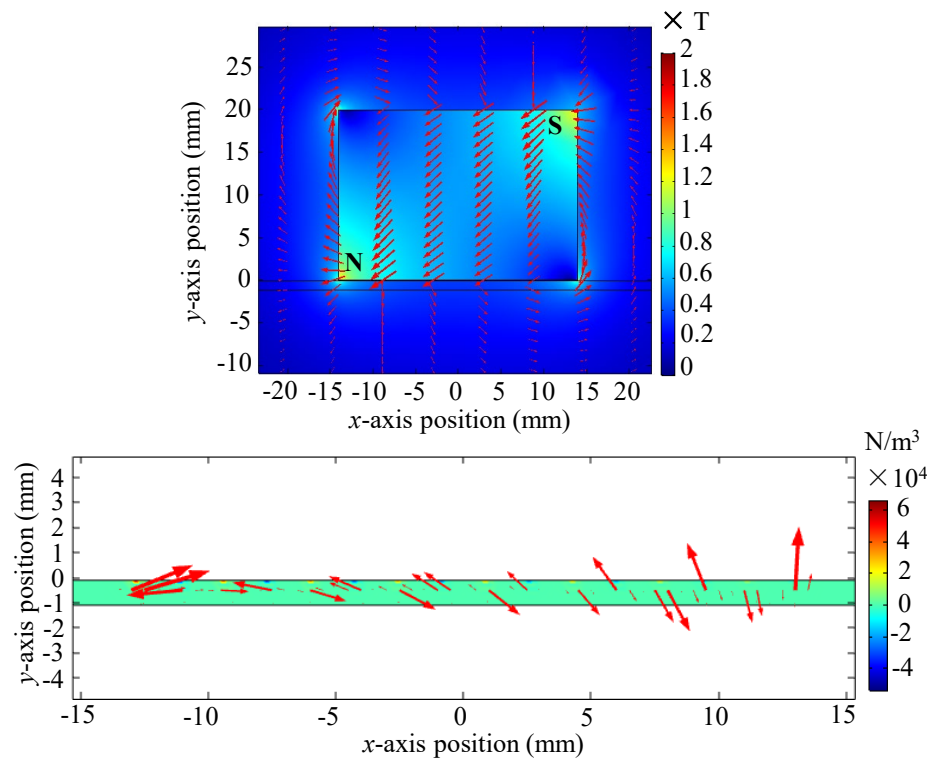
- 永磁铁倾斜极化提供倾斜的静磁场， α 是永磁铁的极化角度。通电线圈将在金属板肌肤深度层内感应出反向涡流。
- 倾斜的静磁场与涡流作用，在金属板内产生交变的斜入射的洛伦兹力，交变的斜入射的洛伦兹力作为斜入射的超声声源。 θ 是超声波的入射角度，

4.2 斜入射式电磁声传感器

□ 仿真研究



(a)传统EMAT

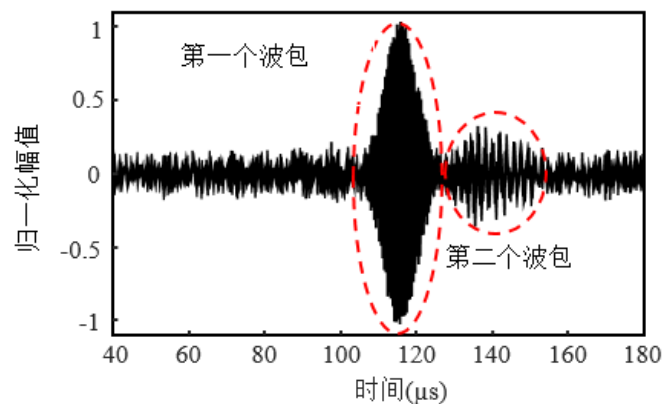


(b)斜入射式EMAT

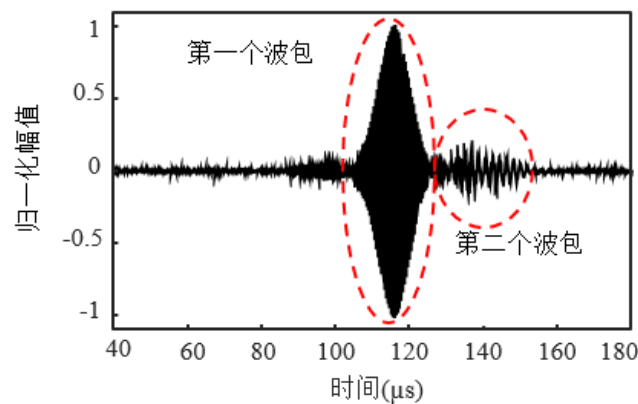
- 倾斜的静磁场与涡流作用，在金属板内产生交变的斜入射的洛伦兹力。

4.2 斜入射式电磁声传感器

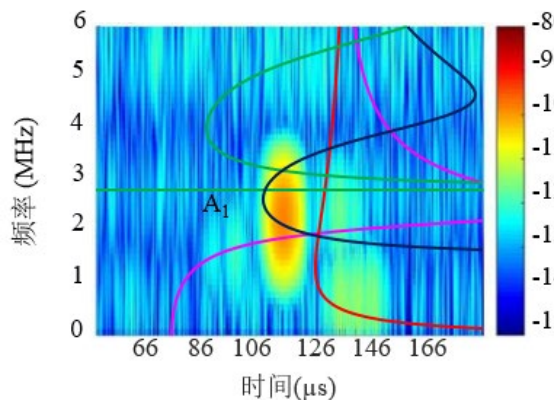
□ A_1 模态激励与接收



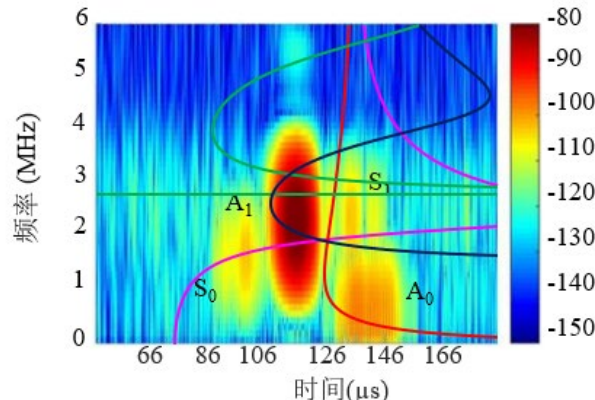
(a)传统EMAT



(b)斜入射式EMAT



(c)传统EMAT



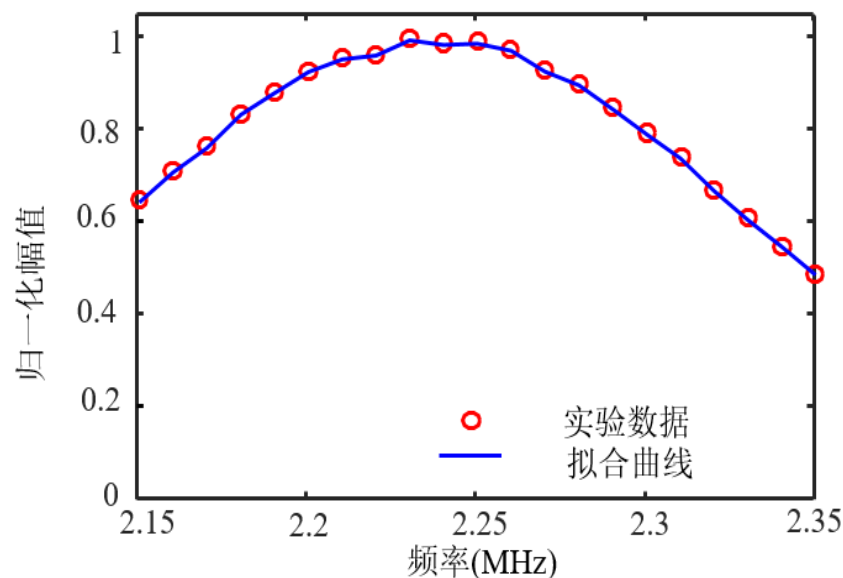
(d)斜入射式EMAT

直达波时域信号及STFT时频分析结果

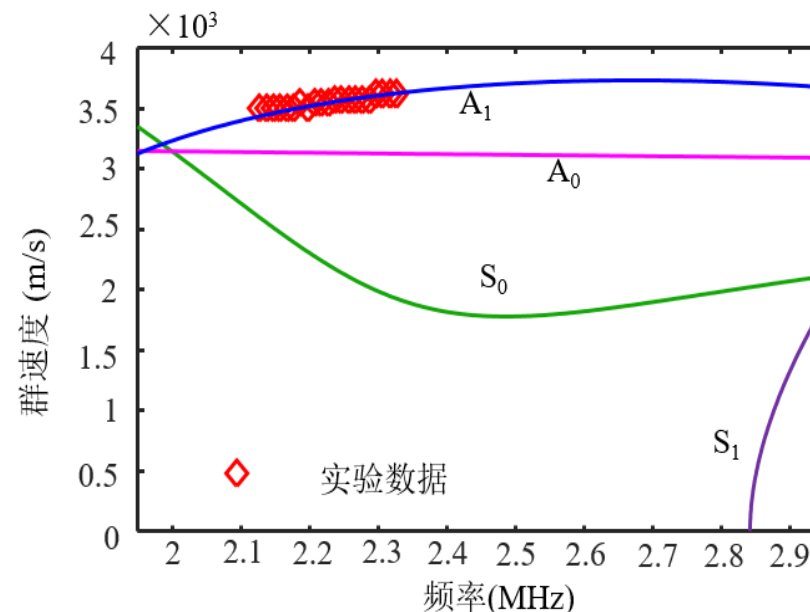
- 斜入射式EMAT可以减小不需要模态的幅值，能够更好地实现模态控制。传统EMAT产生的第一波包包络与第二波包包络的峰值比为1/3，斜入射式EMAT产生的第一波包包络与第二波包包络的峰值比为1/6。
- 斜入射式EMAT产生信号的信噪比优于传统EMAT。
- 斜入射式EMAT产生的 A_1 模态的能量高于传统EMAT。

4.2 斜入射式电磁声传感器

□ 频率响应特性



(a) 斜入射EMAT频率响应曲线

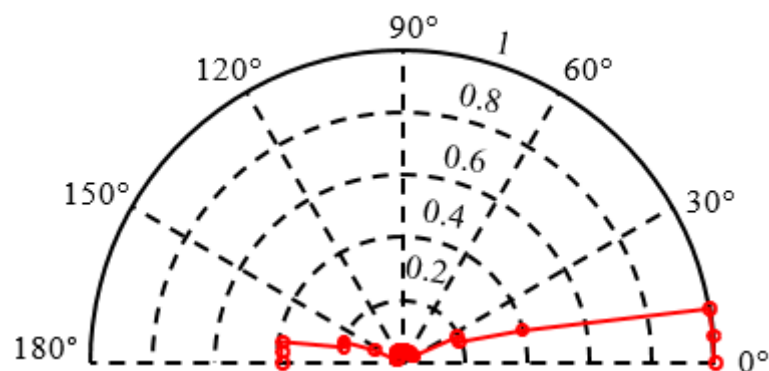


(b) 不同频率下直达波波速

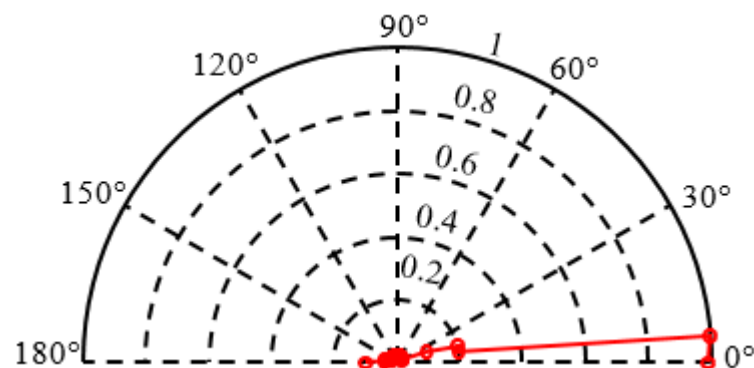
- 在2.23MHz和2.25MHz频带间获得了较高峰值。
- 不同频率下幅值最大的直达波波速与 A_1 模态理论群速度一致性较好。

4.2 斜入射式电磁声传感器

□ 声场指向性

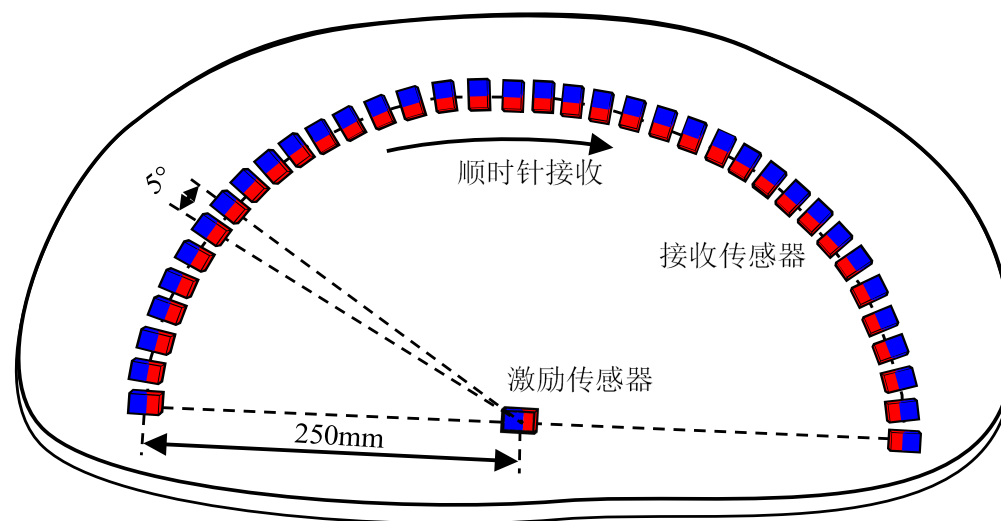


(a)传统EMAT



(b)斜入射式EMAT

A_1 模态归一化幅值的周向分布



声场指向性实验传感器布置示意图

- 斜入射的EMAT获得了单方向的声场

目录

1. 研究背景及意义
2. 应用于板结构缺陷检测电磁声传感器
 - 2.1 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器
 - 2.2 全向型 A_0 模态电磁声传感器
3. 应用于金属管道缺陷检测电磁声传感器
 - 3.1 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器
 - 3.2 多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器
4. 新型电磁声传感器
 - 4.1 磁集中器式电磁声传感器
 - 4.2 斜入射式电磁声传感器
5. 结论

5. 结论

基于洛伦兹力和铁磁性材料磁致伸缩效应，研制了不同结构和作用机理电磁声传感器。

- ✓ 方向可调式水平剪切模态阵列磁致伸缩贴片换能器和全向型 A_0 模态电磁声传感器可实现对板状结构的缺陷检测，其具有较好的模态控制能力和频率响应特性。特别的是，以上两种电磁声传感器都具有卓越的声束控制能力。
- ✓ 改进式平面螺线管阵列线圈磁致伸缩贴片换能器和多分裂回折线圈磁致伸缩贴片换能器分别能够在管道中激励和接收单一的扭转模态和纵向模态超声导波，实现对管道轴向和周向缺陷的检测，并且有较好的频率响应特性。
- ✓ 磁集中器式和斜入射式电磁声换能器通过调节偏置磁场的方向，实现了较好的模态选择与控制。

谢谢！ 敬请批评指正！

刘增华

北京工业大学无损检测与评价研究所

Email: liuzenghua@bjut.edu.cn

http://www.researchgate.net/zenghua_liu

Tel:13661146759