

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905619

# 一种可抑制电磁冲击盲区的新型电磁超声检测技术研究\*

吴德会, 黄超, 杨凡, 杨嘉欣

(厦门大学航空航天学院机电工程系 厦门 361005)

**摘要:**电磁超声检测中, 激发(TX)线圈利用强脉冲电流激励超声波的同时, 会对接收(RX)线圈造成电磁冲击。在电磁冲击期间, RX线圈无法工作并需要稳定时间, 从而形成电磁冲击盲区。针对此问题, 提出一种可抑制电磁冲击盲区的新型电磁超声检测技术, 该技术中采用了一种特殊RX线圈结构。一方面, 该线圈结构中相邻线段之间间距满足超声波相长干涉的匹配关系; 另一方面, 该线圈与TX线圈的互感为0, 使其能从电磁超声的脉冲激励系统中退耦。分析了所提新型电磁超声检测技术抑制电磁冲击的原理, 并从理论上给出了该特殊RX线圈的设计方法。最后, 通过实验表明该技术对电磁冲击抑制达到94.8%, 从而验证了有效性。

**关键词:**电磁超声检测; 电磁冲击; 盲区; RX线圈; 互感; 退耦

**中图分类号:** TH87 TP212.9 TP211+5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

## Research on a new electromagnetic acoustic detection technique for restraining the electromagnetic interference blind zone

Wu Dehui, Huang Chao, Yang Fan, Yang Jiabin

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** For the electromagnetic acoustic testing, the transmitter coil utilizes the strong pulse current that excites the ultrasonic wave. It will cause the electromagnetic interference on the receiver coil. During the period of electromagnetic interference, the receiver coil is out of order and needs time to be stable. Thus, there is the electromagnetic interference blind zone. To solve this problem, this study proposes a new electromagnetic acoustic testing technique to restrain the electromagnetic interference blind zone. In this technique, a special receiver coil is utilized. On one hand, the distance between two adjacent lines in the coil structure satisfies the acoustic in-phase matching relationship. On the other hand, the mutual inductance between the receiver coil and the transmitter coil is 0. In this way, it can be decoupled from the pulse excitation system. This study analyzes the principle of restraining the electromagnetic interference by the new technique. The theoretical design method of the special receiver coil is illustrated. Finally, by using this technique, the electromagnetic interference is suppressed by 94.8%, which proves its effectiveness.

**Keywords:** electromagnetic acoustic testing; electromagnetic interference; blind zone; RX coil; mutual inductance; decoupling

## 0 引言

电磁超声检测 (electromagnetic acoustic testing, EMAT) 具有检测精度高、结构简单、操作方便的优点。而且, 相对于传统的压电超声技术, EMAT 不受限于耦合剂、无需对试件表面进行预处理, 其检测波模式也更易调节。因此 EMAT 广泛应用于裂纹检测、列车轮轨检测、管

材和板材测厚等领域<sup>[1-2]</sup>。

在 EMAT 系统中, 接收(RX)线圈不仅会拾取到超声波信号, 同时也会接收到激发(TX)线圈脉冲激励所带来的电磁冲击。该电磁冲击的强度往往远大于超声波信号, 造成超声波信号的淹没和丢失, 从而形成了检测盲区。在检测盲区内, 拾取的超声波信号往往被淹没在其他干扰信号中。如何有效消除盲区, 如何抑制电磁干扰, 是电磁超声检测领域亟待解决的问题。针对该类问题,

收稿日期: 2019-09-17 Received Date: 2019-09-17

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51677158)项目资助

一些学者进行了大量卓有成效的研究。刘素贞等<sup>[3]</sup>基于电磁超声和涡流的复合检测方法,设计了同时满足电磁超声和涡流的复合探头,削弱了电磁超声检测存在近表面盲区带来的影响。钟慧婷等<sup>[4]</sup>利用声波的波动原理,提出一种叠加消除法来抑制超声波尾波从而消除了检测盲区。王亚坤<sup>[5]</sup>采用小波消噪、包络提取和缺陷判别的组合方案,提高了电磁超声接收系统的抗电磁干扰能力。宋卫华等<sup>[6]</sup>用小波阈值和自适应抵消滤波方法对检测信号进行处理,达到了降低信号噪声和减小盲区的目的。上述学者的研究成果对抑制、补偿电磁超声检测盲区都起到了不同程度的促进作用。但多是通过后续信号处理或超声波补偿来达到抑制盲区的目的。

EMAT 盲区形成的原因有很多,其中, TX 线圈利用强脉冲电流激励超声波时,给 RX 线圈所带来的电磁冲击,是造成 EMAT 盲区的主要原因之一。

针对此问题,本文提出了一种可抑制电磁冲击盲区的新型电磁超声检测方法。对 EMAT 中 RX 线圈的绕制方式进行了研究,设计了一种新型的 RX 线圈结构。一方面,该线圈中相邻线段之间的间距满足超声波相长干涉的匹配关系,因此不影响其对超声信号的拾取。另一方面,新型 RX 线圈与 TX 线圈的互感为 0,使该 RX 线圈能从 EMAT 的电磁激励系统中退耦。最后,通过实验验证了新型 RX 线圈的设计对抑制电磁冲击盲区的有效性。

## 1 电磁冲击盲区的提出

### 1.1 电磁冲击盲区的成因分析

常规收发分体式的 EMAT 原理如图 1 所示。对 TX 线圈施加强电流激励,在被测材料内部感应出涡流场<sup>[7-8]</sup>。通过偏置磁场的作用,质点受到洛伦磁力或磁滞伸缩力而产生振动,并形成超声波<sup>[9-12]</sup>。

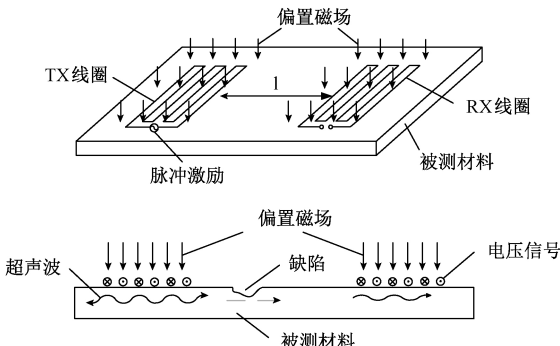


图 1 常规分体式 EMAT 原理

Fig.1 Schematic diagram of conventional split EMAT

TX 线圈不可避免地会向周边的空间发射电磁冲击。

一方面,电磁冲击的传播速度(光波)远大于超声波, RX 线圈先接收到电磁冲击,再接收到超声波信号,如图 2 所示;另一方面,电磁冲击的强度远大于超声波信号。这种情况在每次 EMAT 激发时都会出现,从而形成检测盲区。

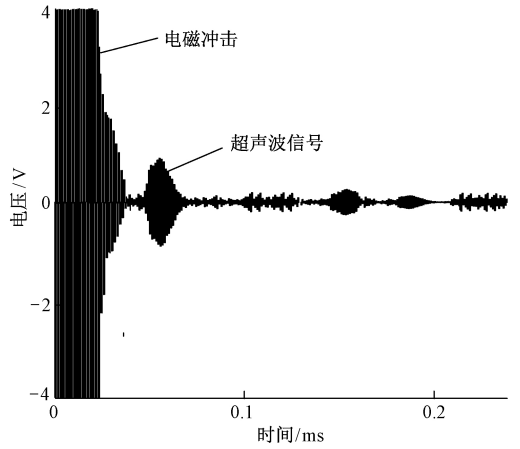


图 2 典型的 EMAT 接收线圈的输出电压

Fig.2 Output voltage of typical EMAT RX coil

### 1.2 抑制电磁冲击的原理

EMAT 中的电磁冲击问题,可以通过一些电磁兼容的手段来抑制<sup>[13]</sup>。但电磁兼容对环境中的弱电磁干扰有较好抑制效果。而对于 EMAT 的电磁冲击抑制,利用上述电磁兼容方法的效果并不理想。

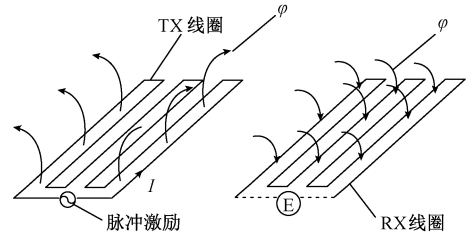


图 3 EMAT 中主冲击电磁干扰形成

Fig.3 Diagram of main electromagnetic interference by EMAT

EMAT 的电磁冲击本质上是由强电磁能量的近场耦合造成的。TX 线圈中脉冲激励电流  $I$  所产生的交变电磁场  $\varphi$ ,通过空气耦合到近场中的 RX 线圈并产生感应电动势  $E$ 。根据电磁场耦合关系,有:

$$E = - \frac{d\varphi}{dt} = - M_{R-T} \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

式中:  $M_{R-T}$  为 TX 线圈与 RX 线圈之间的互感系数<sup>[14]</sup>。

可见,减小电磁冲击的有效方法是减小互感系数  $M_{T-R}$ 。当互感系数  $M_{T-R} = 0$  时,表明 RX 线圈从电磁激励中“退耦”,RX 线圈不再受到电磁冲击的影响。

而  $M_{T-R}$  由两线圈的形状、匝数、位置等决定。因此可对 RX 线圈进行设计并满足如下两个条件:1) RX 线圈

相邻线段间距满足超声波相长干涉的匹配关系;2) RX线圈与TX线圈之间互感  $M_{T-R} = 0$ 。

为此,本文设计了一种新型RX线圈结构,其由两个回折形的子线圈组成,记为RX1和RX2,如图4所示。RX1和RX2中的齿间距  $d$  均为波长的一半,RX1与RX2之间的距离为齿间距  $d$  的2倍。则RX线圈满足条件1),即相长干涉的匹配关系。

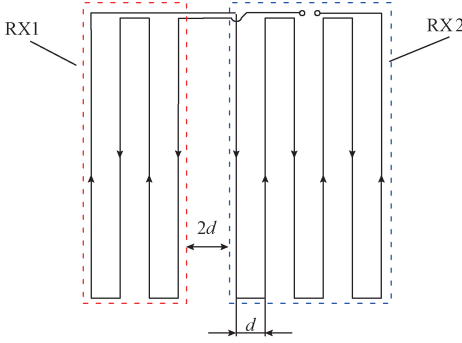


图4 新型RX线圈结构

Fig.4 Structure of new RX coil

RX线圈由RX1和RX2两个子线圈组成,则有:

$$M_{T-R} = M_{T-R1} + M_{T-R2} \quad (2)$$

式中:  $M_{T-R1}$  为TX线圈与RX1子线圈之间的互感;  $M_{T-R2}$  为TX线圈与RX2子线圈之间的互感。

对于上文中的条件2)  $M_{T-R} = 0$ , 则有:

$$M_{T-R1} = -M_{T-R2} \quad (3)$$

为此,如图4所示,本文将RX1和RX2子线圈连接为反向串联,使RX1与TX线圈的互感  $M_{T-R1}$  为正,而使  $M_{T-R2}$  为负,以满足式(3)。则RX线圈设计问题转换为回折线圈之间互感模型的求解问题。

## 2 回折线圈电磁场建模与互感求解

### 2.1 回折线圈电磁场模型的等效

参照文献[15],  $n$  个齿的回折线圈可以等效为  $n$  个单匝矩形线圈(简称“齿”)的串联,如图5所示。

记TX线圈的齿数为  $n_0$ , RX1子线圈的齿数为  $n_1$ , RX2子线圈的齿数为  $n_2$ , 且有  $n_1 < n_2$ 。

若记  $T_i$  为TX的第  $i$  个齿,  $R1_j$  为第  $j$  个齿,  $R2_k$  为RX2的第  $k$  个齿,根据串联线圈的互感关系,有:

$$M_{T-R1} = \sum_{i=1}^{n_0} \sum_{j=1}^{n_1} M_{T_i-R1_j} \quad (4)$$

式中:  $M_{T_i-R1_j}$  表示  $T_i$  齿与  $R1_j$  齿之间的互感。

同理有:

$$M_{T-R2} = \sum_{i=1}^{n_0} \sum_{k=1}^{n_2} M_{T_i-R2_k} \quad (5)$$

式中:  $M_{T_i-R2_k}$  表示  $T_i$  齿与  $R2_k$  齿之间的互感。

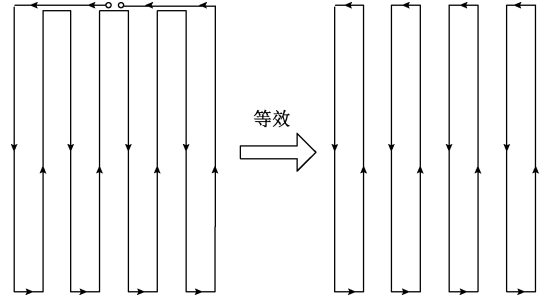


图5 回折线圈等效为单匝矩形线圈的原理

Fig.5 Schematic diagram of meander coil equivalent to single-turn rectangular coil

由式(4)和(5)可知,TX与RX线圈之间的互感可通过齿与齿之间互感的累加来计算。

### 2.2 两个齿之间的互感模型

由EMAT原理可知,齿  $T_i$ ,  $R1_j$  和  $R2_k$  具有相同的外形尺寸。记这两个齿分别为  $T$  和  $R$ ,齿宽为  $d$ ,齿长为  $l$ 。两齿中心距为  $s$ ,以提高值  $h$  置于被测材料(电导率  $\sigma$ ,相对磁导率  $\mu$ ) 上方,如图6所示。

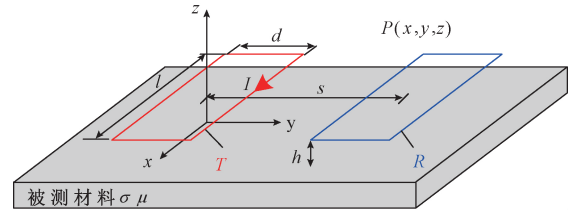


图6 置于被测材料上方两个齿之间的互感模型

Fig.6 Mutual inductance model between two single-turn rectangular coils

建立图6所示的笛卡尔坐标系。设在  $T$  中施加角频率为  $\omega$  的激励电流  $I$ ,该电流会在  $T$  周边场点  $P(x, y, z)$  处产生电磁场  $B$ 。该电磁场可用二阶矢量位(second-order vector potential, SOVP)求解,即有:

$$\mathbf{B} = \nabla \left( \frac{\partial W_a}{\partial z} \right) \quad (6)$$

式中:  $W_a$  为二阶标势。

在被测材料上方,二阶标势  $W_a$  由两部分构成:一部分是由激励电流  $I$  产生,称为入射场标势  $W_{as}$ ;另一部分是涡流产生,称为散射场标势  $W_{acc}$ , 既有  $W_a = W_{as} + W_{acc}$ 。在参考文献[16]中,Theodoulidis等给出了矩形线圈的入射场和散射场标势的求解。

$$W_{as} = \frac{\mu_0 I}{2\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-k(z-h)}}{k} \Lambda e^{j(ax+by)} da db \quad (7)$$

$$W_{acc} = \frac{\mu_0 I}{2\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-k(z+h)}}{k} \frac{k\mu - \lambda}{k\mu + \lambda} \Lambda e^{j(ax+by)} da db \quad (8)$$

式中:  $\Lambda = \frac{\sin\left(\frac{ad}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{bl}{2}\right)}{ab}$ ,  $a$  和  $b$  为积分变量;  $k = \sqrt{a^2 + b^2}$ ;  $\lambda = \sqrt{k^2 + j\omega\mu\sigma}$ ;  $\mu_0$  为空气磁导率;  $(x, y, z)$  为场点坐标。

根据图 6 中齿 R 的位置,场点  $P(x, y, z)$  满足:

$$\begin{cases} -\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2} \\ s - \frac{d}{2} \leq y \leq s + \frac{d}{2} \\ z = h \end{cases} \quad (9)$$

本文中仅需考虑磁通量  $\Phi$  在  $z$  轴上的分量,则根据式(6)和(9),可对磁通量  $\Phi$  进行计算。

$$\Phi = \int_{-l/2}^{l/2} \int_{s-(d/2)}^{s+(d/2)} \left( \frac{\partial^2 W_{as}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 W_{ace}}{\partial z^2} \right) dx dy \quad (10)$$

将式(7)代入式(10)并整理可得:

$$\Phi_0 = \frac{2\mu_0 I}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k e^{jbs} \Lambda^2 da db \quad (11)$$

式中:  $\Phi_0$  表示穿过齿 R 的磁通量<sup>[17]</sup>。

同理可计算散射场穿过齿 R 的磁通量  $\Delta\Phi$ 。

$$\Delta\Phi = \int_{-l/2}^{l/2} \int_{s-(d/2)}^{s+(d/2)} \frac{\partial^2 W_{ace}}{\partial z^2} dx dy = \frac{2\mu_0 I}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k e^{-2kh+jbs} \frac{k\mu - \lambda}{k\mu + \lambda} \Lambda^2 da db \quad (12)$$

$T$  和  $R$  两齿之间的互感  $M$  为中心距  $s$  的函数,可记为  $M(s)$ , 即有:

$$M(s) = \frac{\Phi}{I} = \frac{\Phi_0 + \Delta\Phi}{I} = M_0 + \Delta M \quad (13)$$

式中:  $M_0$  表示两齿在空气中的互感量;  $\Delta M$  表示涡流对互感造成的影响,且满足:

$$\begin{cases} M_0 = \frac{2\mu_0}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k e^{jbs} \Lambda^2 da db \\ \Delta M = \frac{2\mu_0}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k e^{-2kh+jbs} \frac{k\mu - \lambda}{k\mu + \lambda} \Lambda^2 da db \end{cases} \quad (14)$$

### 2.3 回折线圈互感计算

新型 RX 线圈与 TX 线圈之间的等效位置,如图 7 所示,图 7 中  $m \cdot d$  为两线圈间距;  $m$  为距离系数。根据图 7 中的位置关系,可得出如下等式:

$$\begin{cases} M_{T_i-R1_j} = M(s_{T_i-R1_j}) = M[(2n_0 - 2i + 2j + m - 1)d] \\ M_{T_i-R2_k} = -M(s_{T_i-R2_k}) = -M[(2n_0 + 2n_1 - 2i + 2k + m)d] \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $s_{T_i-R1_j}$  为齿  $T_i$  与齿  $R1_j$  的中心距;  $s_{T_i-R2_k}$  为齿  $T_i$  与齿  $R2_k$  的中心距。

联立式(4)、(5)和(15)可得:

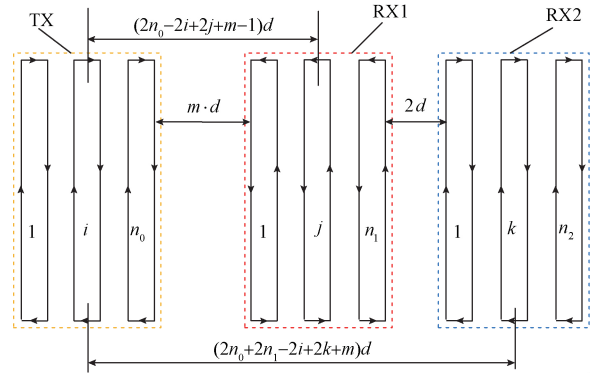


图 7 TX 线圈与 RX 线圈的等效位置关系

Fig.7 Equivalent positional relation between TX coil and RX coil

$$\begin{cases} M_{T-R1} = \sum_{i=1}^{n_0} \sum_{j=1}^{n_1} M[(2n_0 - 2i + 2j + m - 1)d] \\ -M_{T-R2} = \sum_{i=1}^{n_0} \sum_{k=1}^{n_2} M[(2n_0 + 2n_1 - 2i + 2k + m)d] \end{cases} \quad (16)$$

对于新型 RX 线圈,总能通过式(16)求解得到最佳线圈间距  $m \cdot d$ 。此时,新型 RX 线圈从 EMAT 的电磁激励系统中退耦,抑制电磁冲击盲区生成。

## 3 回折线圈互感算例与验证实验

### 3.1 回折线圈的互感算例

以常规的分体式 EMAT 为例,其中被测材料选用 6061 型铝材(对应电导率  $\sigma = 2.9 \times 10^{-8} \Omega/m$ ,磁导率  $\mu \approx 1$ )。线圈长度  $l = 70 \text{ mm}$ ,齿间距  $d = 5 \text{ mm}$ ,并以提高  $h = 0.5 \text{ mm}$  置于铝板表面。将上述线圈参数代入式(13),利用计算机软件 Mathematica10.4,可以计算任何两个齿之间的互感  $M(s)$ ,其结果如图 8 所示。

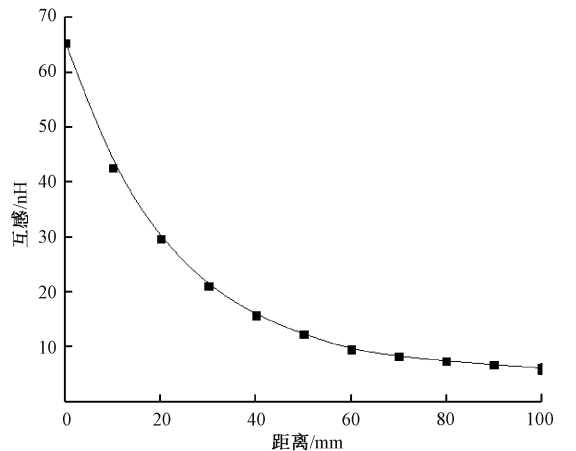


图 8 两齿之间的互感与中心距的关系

Fig.8 Relationship between center distance and two coils' mutual inductance

如图 8 所示,两齿之间的互感  $M(s)$  随中心距  $s$  的增大而衰减。不妨设 TX 线圈的齿数  $n_0=5$ ,RX1 子线圈的齿数  $n_1=2$ ,RX2 子线圈的齿数  $n_2=3$ 。则将算例中  $M(s)$  的计算结果代入式 (16),可得到  $M_{T,R1}$  和  $-M_{T,R2}$  随间距  $m \cdot d$  的关系曲线,如图 9 所示。

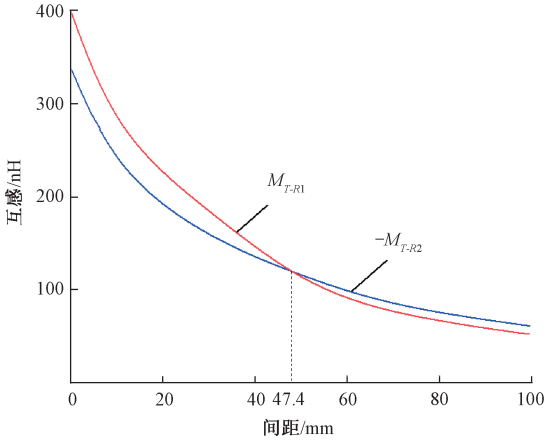


图 9 TX 线圈与 RX1、RX2 之间互感与间距的关系

Fig.9 Relationship between spacing and mutual inductance between TX coil and RX1, RX2

从图 9 可以看出,当 RX 与 TX 线圈间距较小时,有  $M_{T,R1} > -M_{T,R2}$  成立;而间距较大时,则又有  $M_{T,R1} < -M_{T,R2}$  成立;因此最优的距离系数  $m$  一定存在。就算例,最优间距为 47.4 mm,对应  $m \approx 9.5$ 。表 1 所示列出了不同齿数对应的最优的距离系数  $m$ 。

表 1 不同齿数条件下,最优的距离系数  $m$

Table 1 Optimal distance coefficient  $m$  under different tooth numbers

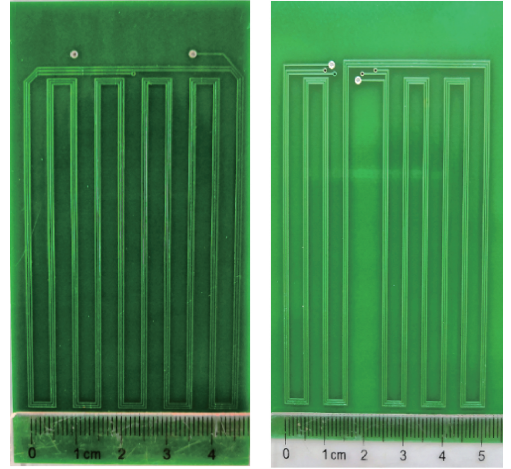
序号	$n_0$	$n_1$	$n_2$	最优的距离系数 $m$
1	5	2	3	9.5
2	5	2	4	7.3
3	5	3	4	11.2
4	6	2	3	8.7
5	6	2	4	6.9

需要说明两点。1)表 1 中的间距系数  $m$  是对齿距  $d$  进行归一化的结果,因此该结果对于其他齿距的 EMAT 线圈也是有效的。2)对于多匝的 RX 与 TX 线圈,会造成穿过 RX1 和 RX2 子线圈的磁通等比增加,因此表 1 的优化结果与线圈匝数无关。

### 3.2 EMAT 验证实验

为进行对比,本文制作了两种 PCB 线圈,第一种为常规回折线圈,如图 10(a)所示;另一种为新型 RX 线圈,如图 10(b)所示。常规回折线圈的齿间距  $d=5$  mm,齿数为 5。新型 RX 线圈中,RX1 子线圈的齿数  $n_1=2$ ,RX2

子线圈的齿数  $n_2=3$ 。



(a) 常规回折线圈 (a) Normal meander coil  
(b) 新型 RX 线圈 (b) New RX coil

图 10 实验中所使用的 PCB 线圈

Fig.10 The PCB coils used in the experiment

实验系统如图 11 所示,由 AFG3101 信号发生器产生频率  $f=290$  kHz 的脉冲(含 5 个正弦波周期),再经宽带放大器 ATA-122D 及阻抗匹配后加载到 TX 线圈上。

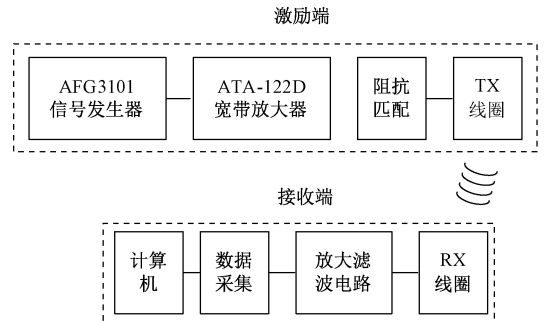


图 11 EMAT 实验系统结构

Fig.11 EMAT experimental system structure

该实验工作台的实物如图 12 所示。

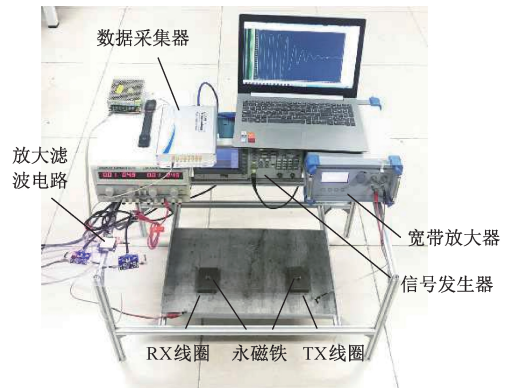


图 12 EMAT 实验工作台

Fig.12 Experimental platform of EMAT

根据表 1 中的算例 1,可知实验中最优的距离系数  $m \approx 9.5$ ,即在间距  $md = 47.4 \text{ mm}$  处设置新型 RX 线圈。超声信号经放大滤波电路后,通过数据采集进入计算机处理。

首先,使用常规回折线圈作为 RX 线圈进行 EMAT 实验。在该实验中,采集到的 EMAT 波形如图 13 所示。从图 13 中可以看出,波形中所含电磁冲击的幅值远大于超声信号。在电磁冲击期间,RX 线圈无法工作;而本实验中,RX 线圈要达到稳定,至少需要  $0.015 \text{ ms}$ 。

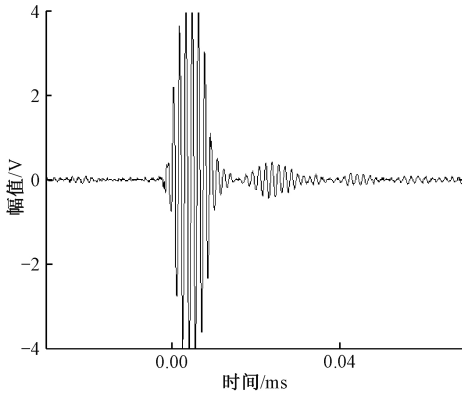


图 13 常规回折线圈接收信号

Fig.13 Received signal by the conventional meander coil

然后,用新型 RX 线圈替代常规回折线圈,重复上述实验。实验中将 RX1 和 RX2 子线圈的公共端接铝板,以保持对称性。采用新型 RX 线圈所采集到的 EMAT 波形如图 14 所示。不难看出,新型 RX 线圈拾取的波形中,电磁冲击得到了明显抑制,电磁冲击的幅值约从  $8 \text{ V}$  下降到  $0.41 \text{ V}$ ,下降约  $94.8\%$ 。使用新型 RX 线圈后,电磁冲击对超声信号的影响已非常微弱,可近似忽略。

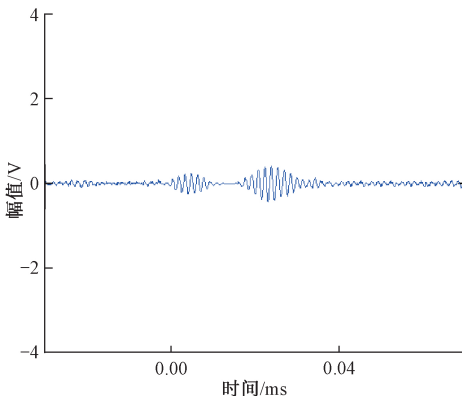


图 14 新型 RX 线圈接收信号

Fig.14 Received signal by the new RX coil

从图 14 中也可以看到,本文实验中电磁冲击仍有少量的残余。该残余主要是通过电源系统、铝板表面等其

他途径耦合进入 EMAT 接收端。对此可通过独立电源、良好接地等手段来进一步改善。就本文实验结果来看,新型 RX 线圈确实能大幅度地消除脉冲激励电磁场所带来的电磁冲击,实现了对 EMAT 电磁冲击盲区的抑制。

## 4 结 论

1) 电磁冲击是由强电磁能量的近场耦合造成的。本文设计出一种可与 TX 线圈互感为 0 的新型 RX 线圈,可使该 RX 线圈从 EMAT 的电磁激励系统中退耦,从而在根源上避免电磁冲击。

2) 本文通过将多齿回折线圈等效为  $n$  个单匝矩形线圈的串联,从而由单匝矩形线圈之间互感计算推导出多齿线圈之间的互感计算表达式。

3) 新型 RX 线圈与 TX 线圈存在最佳线圈间距。实验结果表明,在该最佳线圈间距时,新型 RX 线圈对电磁场所带来的电磁冲击抑制达到  $94.8\%$ ,能大幅度地消除脉冲激励电磁场所带来的电磁冲击,实现了对 EMAT 电磁冲击盲区的抑制。

## 参考文献

- [1] 黄松岭,王哲,王琬,等. 管道电磁超声导波技术及其应用研究进展[J]. 仪器仪表学报,2018,39(3): 1-12. HUANG S L, WANG ZH, WANG SH, et al. Review on advances of pipe electromagnetic ultrasonic guided waves technology and its application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 1-12.
- [2] 何存富,郑明方,吕炎,等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报,2016, 37(8): 1713-1735. HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [3] 刘素贞,孟学艳,张闯. 金属材料缺陷的电磁超声/涡流复合检测技术研究[J]. 声学技术,2018,37(1): 43-50. LIU S ZH, MENG X Y, ZHANG CH. Research on electromagnetic ultrasonic/eddy current composite inspection technology for mental material defects [J]. Technical Acoustics, 2018, 37(1): 43-50.
- [4] 钟慧婷,廖俊必,吴瑞. 一种有效消除超声测量拖尾的新方法[J]. 仪器仪表学报,2007,28(6):1075-1079. ZHONG H T, LIAO J B, WU R. New method of eliminating ultrasonic tailing efficiently [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(6): 1075-1079.
- [5] 王亚坤.电磁超声接收系统的抗干扰设计与噪声抑制

- 算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- WANG Y K. Anti-interference design of EMAT reception system and research on noise reduction algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [6] 宋卫华,王小民,李明轩. 电磁超声多界面检测信号去噪方法研究[J]. 声学学报,2007,32(3):226-231.
- SONG W H, WANG X M, LI M X. Study on the denoising method for the electromagnetic ultrasonic echoes from multiple interfaces [J]. ACTA Acustica, 2007, 32(3): 226-231.
- [7] 杨理践,李春华,高文凭,等. 铝板材电磁超声检测中波的产生与传播过程分析[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6):1218-1223.
- YANG L J, LI CH H, GAO W P, et al. Finite element simulation of the generation and processes of electromagnetic ultrasonic wave in aluminum plate test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1218-1223.
- [8] HE J P, XU K, REN W P. Designs for improving electromagnetic acoustic transducers' excitation performance[J]. Japanese Journal of applied Physics, 2018, 57(6): 1-6.
- [9] WEISE K, ZIOLKOWSKI M, CARLSTEDT M, et al. Oscillatory motion of permanent magnets above a conducting slab [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(10): 1-14.
- [10] 范吉志,吴运新,石文泽,等. 电磁超声换能器线圈设计与提高换能效率研究[J]. 传感技术学报, 2016, 29(1):29-34.
- FAN J ZH, WU Y X, SHI W Z, et al. Research of spiral coil on EMAT to improve transduction efficiency [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(1): 29-34.
- [11] 钦峰,谢国利,阮利程,等. 电磁超声换能器设计性能评价. 电子测量技术,2017,40(9):14-19.
- QIN F, XIE G L, RUAN L CH, et al. Evaluation of performance designs on EMAT[J]. 2017, 40(9):14-19.
- [12] 申建中,张仲宁,张淑仪. 表面波电磁声换能器的设计[J]. 应用物理,2007,26(4):197-201.
- SHEN J ZH, ZHANG ZH N, ZHANG SH Y. Design of surface wave electromagnetic acoustic transducers [J]. Applied Acoustics, 2007, 26(4): 197-201.
- [13] 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.
- SHI Y, SHI W Z, CHEN G, et al. Optimized design of surface wave electromagnetic acoustic transducer for rail tread testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 239-249.
- [14] 马西奎. 电磁场理论及应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- MA X K. Theory and application of electromagnetic field[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2000.
- [15] 郝宽胜,黄松岭,赵伟,等. 基于二阶矢量位的矩形截面回折线圈阻抗和脉冲磁场的解析建模与计算[J]. 物理学报,2011,60(7):784-793.
- HAO K SH, HUANG S L, ZHAO W, et al. Analytical modeling and calculation of impedance and pulse magnetic field of rectangular section loop based on Second-order Vector Potential [J]. 2011, 60(7): 784-793.
- [16] THEODOULIDIS T P, KRIEZIS E E. Impedance evaluation of rectangular coils for eddy current testing of planar media[J]. NDT&E International, 2002, 35(6): 407-414.
- [17] WU D H, SUN Q S, WANG X H, et al. Calculation of self-and mutual inductances of rounded rectangular coils with rectangular cross-sections and misalignments [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(7): 1014-1019.

### 作者简介



**吴德会**,2006年于合肥工业大学获得博士学位,现为厦门大学机电系教授,博士生导师,主要研究方向为无损检测、传感器技术和智能测控技术等。

Email: wudehui@xmu.edu.cn

**Wu Dehui** received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2006. He is currently a professor and a Ph. D. advisor in the Department of Mechanical and Electrical Engineering at Xiamen University. His main research interests include nondestructive testing, sensor technology, intelligent measurement and control technology.



**杨凡**(通信作者),2017年于厦门大学获得硕士学位,现为厦门大学机电工程系博士研究生,研究方向为无损检测。

Email: yangfan2017xmu@163.com

**Yang Fan** (Corresponding author) received his M. Sc. degree at Xiamen University in 2017. He is currently a Ph. D. candidate at Xiamen University. His main research interests include nondestructive testing.