◇ 研究报告 ◇

# 在线超声检测系统中螺旋线圈换能器的应用\*

吴 迪1† 韦小鹤1 毕 超2 张博南3 王亚平1 滕永平1

(1 北京交通大学理学院 北京 100044)

(2 中国铁道科学研究院集团有限公司金属及化学研究所 北京 100081)

(3 北京信泰智合科技发展公司 北京 100098)

**摘要:**针对在线车轮超声检测系统的工程应用,研究了圆形螺旋线圈电磁超声换能器由洛伦兹力换能机制在钢中产生的辐射声场。给出了涡流、等效表面力源和辐射声场的计算方法,分析了圆形螺旋线圈换能器在钢试 块上的辐射指向性。结果表明,辐射的圆周径向偏振横波为两边瓣中空指向性,对理解圆形螺旋线圈换能器的 辐射声场和在重载货车车轮轮辋在线辋裂缺陷检测中的工程应用具有一定的指导意义。

关键词: 电磁超声; 重载货车车轮; 在线车轮检测; 声场指向性

中图法分类号: TB552 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2021)03-0329-06 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.03.002

## Application of the spiral coil electromagnetic acoustic transducer in online ultrasonic testing system

WU Di<sup>1</sup> WEI Xiaohe<sup>1</sup> BI Chao<sup>2</sup> ZHANG Bonan<sup>3</sup> WANG Yaping<sup>1</sup> TENG Yongping<sup>1</sup>

(1 School of Sciences, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(2 Metals & Chemistry Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

(3 Beijing Xintai Zhihe Technology Development Co., Ltd., Beijing 100098, China)

**Abstract:** The radiated acoustic field which produced by a spiral coil electromagnetic acoustic transducer (EMAT) with Lorentz force mechanism was studied for the engineering application of the online train wheel ultrasonic testing system. The numerical methods of computing the eddy current, the equivalent surface stress and the radiated acoustic field were given and the directivity pattern radiated by this spiral coil transducer on steel block was analyzed, indicating the spatial directivity pattern of radiated radial shear wave was null axis and two side lobes. The results were guidance for understanding the radiated acoustic field of the spiral coil electromagnetic acoustic transducer and its engineering application of online wheel rim crack defect testing for heavy haul freight train.

**Keywords:** Electromagnetic acoustic transducer; Heavy haul freight train wheel; Online train wheel testing; Ultrasound field directivity

2020-08-08 收稿; 2020-10-21 定稿

<sup>\*</sup>中央高校基本科研业务费专项(2019JBM067)

作者简介:吴迪(1979-),男,湖南江华人,博士,研究方向:检测超声。

<sup>†</sup>通信作者 E-mail: diwu@bjtu.edu.cn

### 0 引言

重载铁路货车是煤炭能源运输的主要装备,其 走行部件车轮,可实现铁路货车的承载、走行与导 向等重要功能,是关系铁路货车运行安全的关键部 件。在线重载货车车轮轮辋缺陷检测系统可以在不 拆卸轮对、保持铁路货车在线运行状态的情况下,对 在役的铁路货车车轮轮辋实现超声波自动检测,及 时发现埋藏在车轮轮辋内部的大面积辋裂缺陷,避 免这些危害型缺陷发展成车轮掉块甚至崩轮导致 行车事故,为我国能源的安全运输提供基础保障。 由于货车通过在线检测系统时会产生粉尘和煤渣 掉块,严重影响传统的压电超声换能器耦合水的喷 注,为了适应这样的使用环境,需要一种非接触的超 声波耦合方式对货车车轮进行在线检测。

电磁超声换能器(Electromagnetic acoustic transducer, EMAT)通常由一个驱动线圈和产生 静态偏置磁场的磁铁组成,线圈在动态电流的驱 动下在金属工件表面趋肤层内产生涡流;涡流与偏 置静磁场相互作用产生洛伦兹力,向金属内辐射声 场<sup>[1]</sup>。Thompson<sup>[2]</sup>分析了长方形线圈和回折线圈 在两种磁铁配置下的辐射声场,推导时假设线圈中 电流均匀,半无限大介质表面被磁铁均匀磁化,通过 麦克斯韦方程得到表面力源的解析表达式,再通过 点力源格林函数计算了场点处不同波模式的声场 位移,得到了三维声场形貌。Lutsenko<sup>[3]</sup>将非铁磁 性材料中的电磁超声发射假设为两个独立的过程, 先由电磁波与材料作用产生体力源,而后由体力源 形成声场,忽略相互间的磁弹性耦合,由此可在大致 描述声场的同时简化计算,发射线圈假设为无限长 并列的直导线,将三维声场问题降为二维问题,由洛 仑兹力计算得到力源,用格林函数矩阵求得力源的 声场,并对不同参数的弹性波场进行了计算。

针对重载铁路货车在线车轮无需耦合剂的超 声检测需求,研制了一套在钢中产生横波的电磁超 声检测系统。这套系统中使用了可以产生垂直入射 声波的螺旋线圈电磁超声换能器,本文对其在钢中 的辐射声场进行了实验研究,并给出了相应的理论 分析,用于指导实际工程应用。圆形螺旋线圈换能 器是电磁超声换能器比较典型且常用的一种配置 形式,参考文献[2-3]的分析思路,本文先对研制的 电磁超声换能器进行指向性测试,再对该电磁超声 换能器辐射声场的指向性进行理论分析和数值计 算,并与实验结果做了对比,给出了可用于指导工程 应用的结论。

#### 1 指向性实验测试

研制的电磁超声换能器指向性实验装置示意 图如图1所示。采用超声穿透法,发射换能器为电 磁超声换能器,接收换能器分别为压电横波换能器, 测试试块为半圆钢试块,发射换能器通过试块上表 面辐射声波,接收换能器在不同角度的底部台阶面 上通过蜂蜜作为耦合剂接收声波。

研制的电磁超声设备频率可在500 kHz~2 MHz范围内调节,脉冲方波个数可调范围为1~8个。设定EMAT激励参数为频率750 kHz,激励脉冲串长度3个周期方波,激励电流2A。压电横波换能器在0°接收到的波形如图2所示,图中初始



图1 电磁超声换能器声场指向性测试系统装置示 意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasound field directivity testing system for the electromagnetic acoustic transducer



图 2 用压电横波换能器在 0° 接收电磁超声在钢试 块上的波形

Fig. 2 Piezoelectric shear wave transducer to receive the waveform of EMAT on steel test block at  $0^\circ$ 

信号为始脉冲,之后为直达横波信号。在电磁超声 上述参数设定下,压电横波换能器在钢试块各个台 阶面上接收到电磁超声时域波形,如图3(a)所示; 取各处波形中直达横波信号幅度的极大值,再将各 角度测试得到的幅值极大值用光滑曲线连接起来, 经过反复多次测试,得到钢试块上电磁超声横波切 向位移的指向性如图3(b)所示。在钢上测试横波切 向位移的指向性,中心幅度不是最大,螺旋线圈电磁 超声换能器具有中心主瓣非中空的指向性。



图3 横波直换能器测试电磁超声在钢试块上辐射 横波切向位移的指向性

Fig. 3 The directivity of the tangential displacement of the shear wave radiated by EMAT on the steel block tested by the shear wave transducer

#### 2 理论模型

假设发射线圈为理想中空圆环形螺旋线圈,同

时假设电磁铁产生的外磁场在试件表面涡流趋肤 层中垂直均匀分布。由于整个系统具有轴对称特 点,故采用柱坐标 $(r, \theta, z)$ 对该电磁超声系统辐射声 场的指向性进行模拟计算。

#### 2.1 涡流场计算

为了粗略分析讨论方便,假设电磁超声换能器 线圈模型如图4所示,计算激励下钢中产生的涡流 大小,这样可以近似得到实验中在试块上产生的涡 流大小,从而通过所得数值计算结果来推测由洛伦 兹力产生的力源情况。线圈在钢试块上产生涡流的 相关计算参数如表1所示。

涡流数值计算参考文献[4]的方法,计算结果如 图5所示。图5中上实线曲线表示钢试块表面的涡 流大小,下虚线曲线表示钢试块内0.02 mm深度上 的涡流大小,计算半径为0~15 mm。将表1中线圈 和电流参数代入趋肤深度的计算公式

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_1 \sigma_1 \omega}},\tag{1}$$

可知此时钢中趋肤深度为0.021 mm。从数值计算 结果还可验证,当试块内深度为0.1 mm时,涡流最 大值仅为试块表面处涡流最大值的1/20,故在后续 计算表面力源时将深度为0.1 mm以下的涡流近似 为0。从图5中还可知,涡流在线圈垂直投影区域 (线圈半径7~10 mm)以外仍有分布,在垂直磁场 的作用下,对表面力源也有一定的贡献。



图 4 圆形螺旋线圈示意图



	表1	涡流场计算参数	
Table 1	Eddy curre	nt field calculation	parameters

线圈内径/mm	线圈外径/mm	线圈底高/mm	线圈上高/mm	线圈匝数 N
7	10	0.35	0.6	300
电流幅度 I/A	电流频率 $f/kHz$	磁导率 $\mu_1/(H \cdot m^{-1})$	电导率 $\sigma_1/(\mu S \cdot m^{-1})$	
1000	750	$200\times 4\pi\times 10^{-7}$	6.25	





Fig. 5 Eddy current distribution diagram in steel test block

#### 2.2 表面力源计算

从图5的计算结果可以看出,涡流主要分布在 半径3~13 mm范围内,所以表面力源的计算范围 也限定在此半径范围中。

图6为钢试块外磁场和试块内表面涡流方向示 意图,假定外磁场 B<sub>z</sub> 在半径3~13 mm 范围内从试 块表面至深度为0.5 mm 处皆垂直均匀分布,大小 为0.5 Wb/m<sup>2</sup>。此时由洛伦兹力在钢试块表面产生 径向剪切力源,将半径范围内每一点上产生的洛伦 兹力在深度方向上做叠加,可以求得该点处的表面 力源大小。



图6 钢试块中磁场和涡流方向示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the magnetic field and eddy current direction in steel test block

表面层中洛伦兹力及积分叠加后的表面力源 表达式分别为

$$F_r(r,z) = B_z \cdot J,\tag{2}$$

$$P_r(r) = \int_{-\infty}^0 F_r(r, z) \mathrm{d}z, \qquad (3)$$

其中,涡流 J 的单位为 A/m<sup>2</sup>,洛伦兹力 F<sub>r</sub>(r, z) 的 单位为 N/m<sup>3</sup>,表面力源 P<sub>r</sub>(r) 的单位为 N/m<sup>2</sup>。将 计算得到的表面力源分布和图 5 比较可知,表面力 源的分布和涡流的分布状况基本一致,这是假定了 外磁场为均匀恒定所致。表面力源为径向剪切力源, 力源呈圆环分布,向钢块内部辐射径向偏振横波,力 源大小分布随半径改变,力源及其在钢中的辐射声 波如图 7 所示。



图7 径向剪切力源及其辐射的径向偏振横波示 意图

Fig. 7 Schematic diagram of the radial shear source and its radially radiated polarized shear wave

#### 2.3 声场计算

Kawashima<sup>[5]</sup>给出了径向剪切力源的辐射声 场位移的解析公式,方法是先求出半径为δ(*r* - *r*<sub>0</sub>) 的圆环力源对场点的位移贡献,然后沿半径积分, 求出径向剪切力源的声场全貌。由于力源关于*z*轴 对称,分析*z*轴截面的声场即可知整个空间辐射声 场的分布情况,声场转换为二维(*r*,*z*)平面问题。公 式(4)为径向剪切力源在径向*r*方向产生的位移表 达式,公式(5)为径向剪切力源在*z*平行方向产生的 位移表达式:

$$S_r = \frac{1}{\mu} \int_0^\infty \frac{\alpha_2}{F(\alpha)} \left[ 2\alpha^2 e^{-\alpha_1 z} + (k_S^2 - 2\alpha^2) e^{-\alpha_2 z} \right] J_1(\alpha r) d\alpha \int_0^\infty P_r(r) \alpha r J_1(\alpha r) dr, \tag{4}$$

$$S_z = \frac{1}{\mu} \int_0^\infty \frac{\alpha}{F(\alpha)} \left[ 2\alpha_1 \alpha_2 \,\mathrm{e}^{-\alpha_1 z} + (k_S^2 - 2\alpha^2) \,\mathrm{e}^{-\alpha_2 z} \right] \mathrm{J}_0(\alpha r) \,\mathrm{d}\alpha \int_0^\infty P_r(r) \alpha r \mathrm{J}_1(\alpha r) \,\mathrm{d}r,\tag{5}$$

其中,  $P_r(r)$  为表面力源随半径分布函数,  $\alpha_1 = \sqrt{\alpha^2 - k_c^2}$ ,  $\alpha_2 = \sqrt{\alpha^2 - k_s^2}$ ,  $k_c$ 、 $k_s$ 分别为纵、横波 波数,  $F(\alpha) \equiv (2\alpha^2 - k_s^2)^2 - 4\alpha^2\alpha_1\alpha_2$ ,  $\mu$ 为切变模 量,  $\alpha$  为波数积分变量, J 为贝塞尔函数。

计算时假设的试块为半圆试块,如图8所示,要 计算的场点位移 S<sub>r</sub>和 S<sub>z</sub>在图8中已标识出来。



图 8 半圆试块及声场位移示意图 Fig. 8 Semicircular test block and displacement diagram of ultrasound field

用钢试块参数代入公式(4)、公式(5),计算得到 半径 R = 80 mm上声场位移表达式中横波和纵波 分量的幅度对比如图9所示,由图可知纵波位移远 小于横波位移。图9中声场清晰可见两旁瓣,表明 横波声场具有中空两旁瓣的轴零值特征,另外还可 以看到旁边幅度很小的旁瓣,这都和图3的实验结 果是符合的。由于计算时采用的是连续波,导致指 向性和实际脉冲波激励情形不完全相似<sup>[6]</sup>,但通过 连续波的数值计算和与实验结果的对比,可以把握 住螺旋线圈电磁超声换能器的主要特征。辐射的径 向横波声场在螺旋线圈所在圆环区域沿一定角度 (18°)向工件内部辐射,在检测最大80 mm深度内,



图 9 半径 R=80 mm 上声场位移横波和纵波分量 幅度对比

Fig. 9 S Amplitude comparison of S-wave and P-wave components of ultrasound displacement with radius R = 80 mm

横波声场在周向方向可以覆盖约52 mm的距离。传播的径向偏振横波示意图如图7所示。

## 3 螺旋线圈电磁超声换能器在车轮在线超 声波检测系统中的应用

基于电磁超声换能器的在线重载铁路货车车 轮超声探伤检测原理和检测结果显示界面如图10 所示。重载货车在线超声检测设备在轨行区布置有 阵列式电磁超声换能器,对车轮的辋裂缺陷进行检 测。针对车轮内部辋裂缺陷,采用螺旋线圈电磁超 声换能器产生径向垂直入射的横波,基于A型扫查 的超声波检测原理,当换能器阵列的长度大于车轮 周长时,车轮在线滚压通过阵列换能器可完成整个 轮辋圆周的全覆盖检测,探测出轮辋内部周向辋裂 裂纹,检测过程如图10(a)所示。在线系统的技术指 标要求识别出的辋裂缺陷宽度为40 mm,因此在线 系统将电磁超声换能器布设间距设定为40 mm。利 用研制的EMAT 检测系统的特定重复频率,结合电 磁超声换能器的声场指向特性,能确保系统有效检 出40 mm的整体型辋裂缺陷,同时能够减少因为提 离距离不稳定导致的信号中干扰波形的影响,保证



(b) 检测波形数据的软件显示界面

招标缺陷

#### 图 10 重载货车车轮在线电磁超声检测原理和检测 结果显示界面

Fig. 10 The principle of online heavy haul freight train wheel EMAT testing and the display interface of detection result 给出准确的辋裂缺陷检测结果。被检测样轮通过检测线后,车轮在线超声检测结果如图10(b)所示,图中给出对应样轮的超标缺陷数据的部分A扫描检测结果。目前EMAT超声系统还在现场进行长期测试,以确保软硬件运行稳定,检测效果良好,达到电磁超声在线车轮超声检测系统的设计要求,保证重载铁路货车车轮的安全运行。

#### 4 结论

本文利用研制的电磁超声检测系统测定了螺 旋线圈电磁超声换能器在半圆形钢试块中辐射的 横波位移声场,得到了辐射横波的声场指向性曲线。 在理论上研究了螺旋线圈电磁超声换能器的辐射 空间响应,并做了数值计算,表明中空圆形螺旋线圈 换能器辐射径向偏振横波为两边瓣中空指向性,对 理解此类换能器的辐射声场具有一定的指导意义, 所得结果对螺旋线圈电磁超声换能器在重载货车 车轮在线检测系统的实际工程应用有参考价值。

#### 参考文献

- [1] 应崇福. 超声学 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] Thompson R B. Physical principles of measurements with EMAT transducers[J]. Physical Acoustics, 1990, 19: 157–200.
- [3] Lutsenko G G. About slanted emission of bulk shear waves by an electromagnetic-acoustic transducer[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2001, 37(10): 708–717.
- [4] 姚君. 电磁超声表面波换能器性能的测试研究 [D]. 北京: 钢铁研究总院, 2003.
- [5] Kawashima K. Theory and numerical calculation of the acoustic field produced in metal by an Electromagnetic Ultrasonic Transducer[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1976, 60(5): 1089–1099.
- [6] 张海澜. 理论声学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.