

◇ 研究报告 ◇

# 跑道线圈换能器在铁路重载货车探伤中的应用\*

吴迪<sup>1†</sup> 邵嘉麒<sup>1</sup> 毕超<sup>2</sup> 张博南<sup>3</sup> 王亚平<sup>1</sup> 滕永平<sup>1</sup>

(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:** 针对在线车轮超声探伤系统的工程应用,研究了跑道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。根据外磁场和线圈配置,将表面力源近似为非均匀的水平剪切力源,数值计算得到了此力源的辐射声场指向性图,并与实验结果进行比对,结果表明辐射的水平偏振横波具有中间强两侧弱的指向性,对理解跑道形电磁线圈超声换能器的辐射声场和在重载货车车轮辋裂缺陷探伤中的工程应用具有一定的指导意义。

**关键词:** 跑道形电磁线圈;重载货车车轮;辋裂缺陷;在线车轮超声检测;声场指向性

**中图分类号:** TB552 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2022)03-0429-07

**DOI:** 10.11684/j.issn.1000-310X.2022.03.013

## Application of the racetrack coil electromagnetic transducer in online ultrasonic testing system for heavy haul freight train

WU Di<sup>1</sup> SHAO Jiaqi<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 sound field in steel produced by the Lorentz force transduction mechanism of the racetrack coil electromagnetic ultrasonic transducer was studied for the engineering application of the on-line ultrasonic flaw detection system for wheels. According to the external magnetic field and coil configuration, the surface force source is approximated as a non-uniform horizontal shear force source. The directivity diagram of the radiated sound field of this force source is obtained by numerical calculation and compared with the experimental results. The result shows that the radiated horizontally polarized transverse wave has the directivity characteristics of strong acoustic field in the central axis and weak one on both sides. The results were guidance for understanding the radiated acoustic field of the racetrack coil electromagnetic ultrasonic transducer and its engineering application of online wheel rim crack defect testing for heavy haul freight train.

**Keywords:** Racetrack electromagnetic coil; Heavy haul freight train wheel; Rim crack defect; Online train wheel ultrasonic testing; Acoustic field directivity

2021-05-06 收稿; 2021-05-31 定稿

\*中央高校基本科研业务费专项(2019JBM067), 国家重点研发计划项目(2020YFF01015400ZL)

作者简介: 吴迪(1979-), 男, 湖南江华人, 博士, 研究方向: 检测超声。

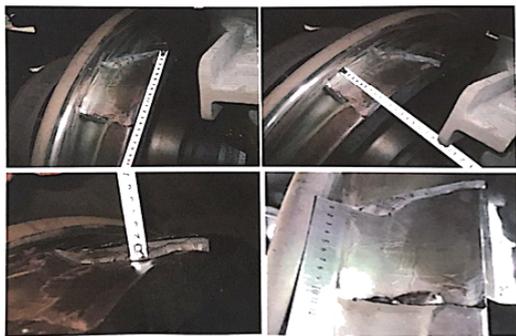
†通信作者 E-mail: diwu@bjtu.edu.cn

## 0 引言

随着铁路运输的大力发展,重载货车作为煤炭运输的主要装备在能源运输领域得到了广泛应用。货车车轮,无论是轧制还是铸造工艺,往往都会在其轮辋内部存在着内部缺陷(气孔、夹杂等),在其后探伤过程中,漏探的缺陷和未超过标准限定值的小缺陷可能存在于新制车轮中。车轮装车使用后,这些留存的缺陷随着货车的长期运用,车轮受到持续不断的循环应力,当条件满足时,裂纹以这些微小缺陷作为疲劳源开始扩展,最后形成大面积的辋裂缺陷(如图1(a)所示)、掉块(如图1(b)所示)等危害型缺陷,直至崩轮,将造成严重的行车事故。因此,必须对铁路重载在役货车车轮进行定期无损探伤。超声在线检测系统可以在不拆卸轮对的情况下,对在役运行状态的铁路货车车轮轮辋实施超声波自动探伤,但由于运煤货车通过该系统时会产生粉尘和煤渣掉块,堵塞设备出水孔,用非接触的超声波耦合方式替代传统水耦合压电超声换能器对货车车轮进行在线检测显得非常必要。



(a) 伤损车轮内部大面积辋裂缺陷



(b) 辋裂缺陷导致的车轮掉块

图1 伤损车轮辋裂缺陷及车轮掉块实物图

Fig. 1 Physical picture of damaged wheel rim crack defect and the falling block region in damaged train wheels

电磁超声换能器(Electromagnetic acoustic transducer, EMAT)产生超声波的机理主要有两种:一种是交变电磁场和外磁场共同作用在金属

材料表面中产生洛伦兹力引起的机械振动,另一种是基于交变磁场在铁磁性材料中由磁致伸缩力产生的机械形变<sup>[1]</sup>。这两种机理的电磁超声换能器都无须涂抹耦合剂即可产生超声波,可应用在快速自动化检测中。考虑到电磁超声表面力源的复杂性,一般要通过测量和计算对力源做一定近似。Kawashima<sup>[2]</sup>推导了电磁超声水平径向力源在柱坐标系中声波位移的严格解析解,通过数值计算得到该力源辐射声场的指向性图。Ludwig等<sup>[3]</sup>从能量守恒的角度给出了一套完整的电磁场方程及其边界条件,通过数值计算得到了试件中的静磁场分布和脉冲涡流分布,即可知力源分布,然后和声场耦合,得到各向同性介质中的暂态声场。Mirkhani等<sup>[4]</sup>提出了模拟电磁声场的完全公式,计算了线圈和Nd-Fe-B永磁体在非铁磁材料中产生的涡流的大小和磁感应强度大小,由此得到工件中由洛伦兹力产生的表面力源。周进节等<sup>[5]</sup>通过有限元建模方法,分析了跑道形线圈EMAT的力源简化模型及其辐射声场的特性,给出在单磁体永磁体配置下跑道形线圈换能器辐射的横波声场指向性是关于EMAT中心轴线成“蝶”形对称分布,中心轴线上声压为0。

本文研制了一套在钢中产生垂直入射水平偏振横波的电磁超声探伤系统,使用了跑道形电磁线圈超声换能器,采用文中设计的这种跑道形电磁线圈结构无需耦合剂即可在货车车轮中产生垂直入射纯水平偏振横波,如图2所示。线圈为严格跑道形,如图2(a)所示,用特制绕线机绕制实现,产生涡流的有效区域为跑道的长边形成的圆形区,其余部分用薄铜片进行屏蔽,如图2(b)所示。薄铜片置于线圈和被检工件之间,阻止在屏蔽的工件金属介质表面产生涡流,只有未屏蔽的区域可以产生涡流,形成表面力源。用双磁体永磁体产生垂直静磁场,如图3(a)所示,磁极覆盖整个有效区域,在金属介质表面形成非均匀外磁场。静态垂直外磁场和涡流的作用产生剪切力源。此种线圈和永磁体的配置通过洛伦兹力机理可产生非均匀的水平剪切应力,理论上能够产生较纯的水平偏振横波。本文根据跑道形电磁线圈换能器的磁场和线圈配置,将表面力源近似为水平剪切力源,如图3(b)所示,数值计算得到此力源的辐射声场的声场分布图和指向性图,有助于理解此类换能器的声学特性。

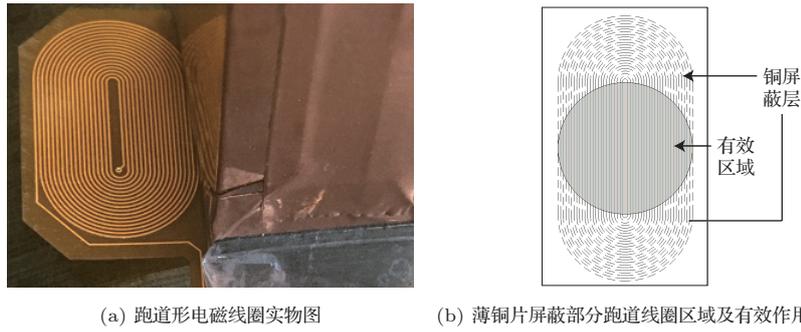
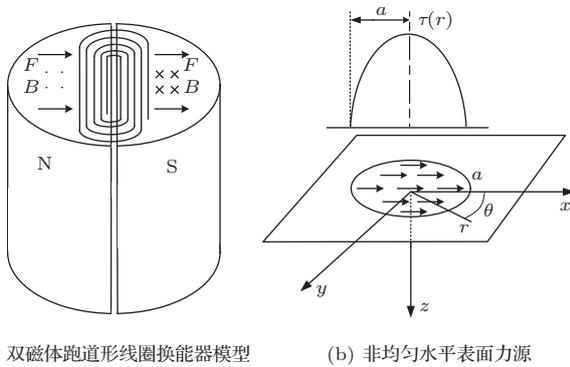


图 2 跑道形电磁线圈实物图及用薄铜片屏蔽部分跑道线圈区域及有效作用区域示意图

Fig. 2 The physical drawing of racetrack coil and schematic diagram of the shielding part of racetrack coil with thin copper sheet and the effectively working area



(a) 双磁体跑道形线圈换能器模型 (b) 非均匀水平表面力源

图 3 跑道线圈换能器模型及近似简化的非均匀水平表面力源示意图

Fig. 3 Schematic diagram of racetrack coil transducer model and approximate simplified non-uniform horizontal surface force source

### 1 理论模型

跑道形电磁线圈超声换能器模型如图 3(a) 所示，

双磁体永磁铁磁极近似垂直磁场，线圈为跑道形线圈，磁场和涡流的分布使得在各向同性均匀钢介质表面产生水平剪切力，由于涡流场并不局限于线圈在试块上的垂直投影区域，而磁极在试块表面产生的磁场强度也不是各处相等。为了求解该力源的辐射声场，将力源分布近似简化为如图 3(b) 所示的非均匀水平剪切圆形力源，力源从圆心处沿半径逐渐减弱，水平剪切力矢量设定为  $x$  方向，这样就可以对该力源做数值计算并和实验结果比对。

设上述非均匀水平剪切表面力源随半径分布的表达式为

$$\begin{cases} \tau(r_1) = 1 - (r_1/a)^2, & r_1 \leq a, \\ \tau(r_1) = 0, & r_1 > a. \end{cases} \quad (1)$$

根据设定的力源在介质表面的分布状态，可推导得到半无限大介质场点中横波位移的严格解析解<sup>[2]</sup>：

$$u_{tx} = \frac{1}{\mu} \int_0^\infty J_2(\xi a) \{ [(3\xi^2 - 2\beta^2 k^2)(2\xi^2 - \beta^2 k^2) - 4\xi^2 \alpha_1 \alpha_2] J_0(\xi r) + [\xi^2(2\xi^2 - \beta^2 k^2) - 4\xi^2 \alpha_1 \alpha_2] J_2(\xi r) \cos 2\theta \} \exp(-\alpha_2 z) d\xi / \alpha_2 \xi F(\xi), \quad (2)$$

$$u_{tz} = \frac{2}{\mu} \int_0^\infty J_2(\xi a) (\alpha_2^2 + \xi^2) J_1(\xi r) \cos(\theta) \exp(-\alpha_2 z) d\xi / F(\xi), \quad (3)$$

其中， $\alpha_1 = \sqrt{\alpha^2 - k_c^2}$ ， $\alpha_2 = \sqrt{\alpha^2 - k_s^2}$ ， $k_c$ 、 $k_s$  分别为纵波、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。

上面所得公式中假设声波传播的介质为各向同性均匀半无限大弹性介质，初始时介质不受外应力和应变。所得解析式中忽略了纵波项，因为本文主要关心横波的情况，而由实验可知横波位移幅度

值远大于纵波位移。

将上述模型所得解析式代入材料的理论参数数值做数值计算<sup>[6]</sup>。计算时取  $a = 20 \text{ mm}$ ，钢密度为  $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，拉梅常数  $\lambda = 11.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ， $\mu = 8.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ，纵波波速  $C_l = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} = 5940 \text{ m/s}$ ，横波波速  $C_s = \sqrt{\mu/\rho} = 3232 \text{ m/s}$ 。为了使频率和实验暂态

波形保持一致,在此假设剪切力源随时间改变的函数为频率为950 kHz的单周期正弦脉冲。

图4为模拟实验试块所取的半圆平面 $xz$ ,半径 $R = 80\text{ mm}$ ,计算与中轴线呈 $\Phi$ 角的场点的位移,该点在切线方向上的位移是 $u_{tx}$ 和 $u_{tz}$ 合成的切向分量 $u_t$ ,对应表达式如公式(4)所示:

$$u_t = -u_{tz} \sin \Phi + u_{tx} \cos \Phi. \quad (4)$$

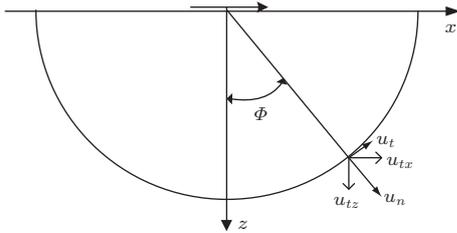


图4 半圆面上横波位移的垂直和剪切分量

Fig. 4 The vertical and shear components of shear wave displacement on a semicircular surface

为了模拟暂态声场情况,通过公式(2)~(3)计算得到半圆面上不同角度处各场点的暂态位移波形,将各点得到的时域波形中的横波幅度极值记录下来,做出幅度和角度间的指向性曲线,最后和实验结果进行比对。公式(2)~(3)中有一个奇点( $F(\xi) = 0$ 的根)和两个支点( $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$ ),数值计算时需要避开这些奇异点,步长在奇异点附近要适当减小。根据式(4)可计算如图3(b)所示非均匀力源在不同角度 $\Phi$ 平面上的横波切向位移,由此可得到指向性曲线如图5所示,此时各点切向位移 $u_t$ 是由 $u_{tx}$ 和 $u_{tz}$ 在不同切向方向的分量合成得到。

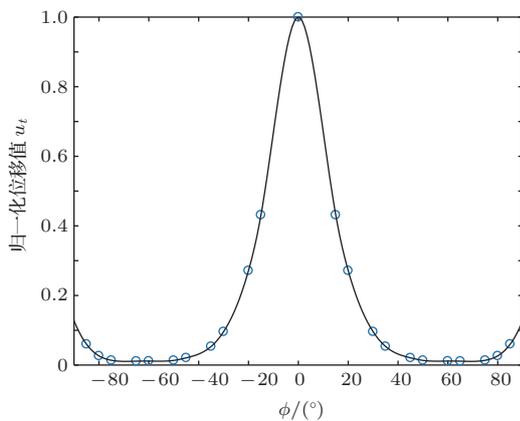


图5 半径 $R = 80\text{ mm}$ 上非均匀力源辐射横波切向位移随角度变化图

Fig. 5 The tangential displacement of shear wave radiated by non-uniform force source with angle at radius  $R = 80\text{ mm}$

## 2 指向性实验测试

图2(a)为实际使用的跑道形电磁线圈,双磁体永磁铁的两个磁极置于跑道形线圈之上,整个结构示意图近似为图6,电磁超声系统发射可调方波脉冲激励信号给换能器跑道线圈,在钢试块表面产生涡流,涡流在双磁体永磁铁提供的垂直外磁场作用下,形成表面水平剪切力源,向钢试块中辐射水平偏振横波。产生的水平表面力源可简化为如图3(b)所示的力源分布情况。图7(a)为测试辐射声场特性的实验装置示意图。试块为半径80 mm、厚度58 mm

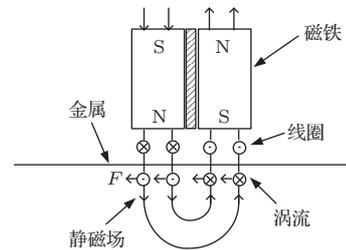
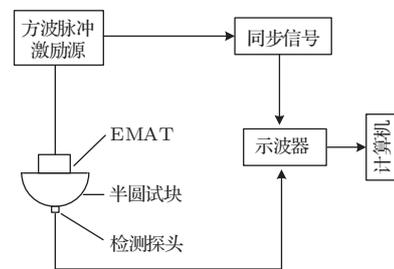
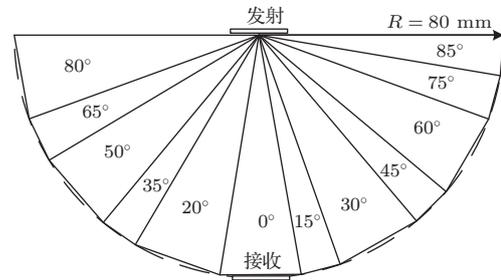


图6 跑道线圈电磁超声换能器的磁场和涡流方向以及产生的力源结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of magnetic field and eddy current direction of the racetrack coil EMAT structure and the generated force source



(a) 电磁超声换能器声场指向性测试系统



(b) 声场测试用包含不同角度接收面的半圆钢试块

图7 跑道线圈电磁超声换能器声场指向性测试系统装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ultrasound field directivity testing system for the racetrack coil EMAT

带台阶面的半圆形钢块, 试块截面和换能器所在位置如图7(b)所示。将跑道形电磁超声换能器线圈中心对准试块上表面中心处, 偏振方向保持与试块截面水平方向一致, 接收换能器为压电横波直探头, 置于各个台阶面中心处, 通过蜂蜜做耦合剂, 接收上表面跑道形电磁线圈超声换能器辐射的声波信号, 然后用示波器采集接收换能器输出的电信号, 将其传入计算机存储并做进一步后处理。接收换能器和试块间采用蜂蜜做耦合剂并紧密压合, 用以保证换能器接收到台阶面上的切向振动。

测试用的电磁超声设备, 激发换能器的频率可在 500 kHz ~ 2 MHz 范围内调节, 脉冲方波个数可调范围从 1 ~ 8 个。调节 EMAT 参数, 激励频率为 950 kHz, 激励脉冲串长度为 3 个周期方波, 激励电流为 2 A。改变接收用横波换能器的偏振方向, 使之和发射电磁超声换能器偏振方向一致且处在同一平面内, 此时接收到的横波分量为横波位移  $u_{tx}$  和  $u_{tz}$  合成的切向分量  $u_t$ 。改变接收换能器所在的台阶面, 采集得到各处时域信号, 在  $0^\circ$  接收到的波形如图 8 所示, 其余各个角度处波形与此类似, 图中从左至右, 初始包络信号为始脉冲, 其后为一次直达横波波形。改变压电横波直探头所在的台阶面, 在半圆钢试块不同角度上接收到跑道线圈电磁超声换能器辐射声波的时域波形, 取各处波形中直达横波信号幅度的极大值, 拟合出一条横波指向性曲线, 多次重复实验得到的指向性曲线如图 9 中实线所示, 图中横坐标表示不同台阶面的角度, 纵坐标表示归一后的位移幅值。

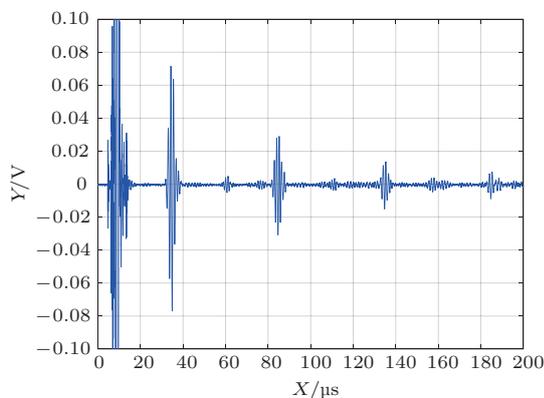


图8 压电横波直探头在钢试块上  $0^\circ$  台阶面接收到的电磁超声声波形列

Fig. 8 The acoustic waveform of EMAT on steel test block at  $0^\circ$  received by piezoelectric normal shear wave transducer

将图9中实验得到的指向性曲线与图5计算得到的理论指向性曲线比较, 基本吻合。在  $0^\circ$  台阶面中心处旋转接收换能器, 使其偏振方向和跑道线圈电磁超声换能器的偏振方向成不同角度, 此时横波幅度也会随之改变, 表明跑道线圈和外磁场的配置在钢试块中产生的横波声场形成明显的偏振方向, 说明文中的模型在一定程度上可以描述文中跑道形电磁线圈换能器的表面力源及声场。

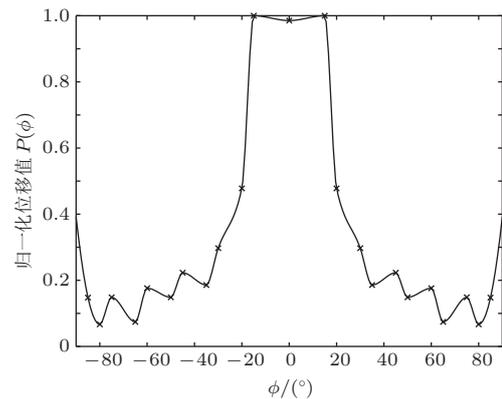


图9 接收换能器得到的切向分量横波位移随角度变化图

Fig. 9 Shear wave displacement of the tangential component obtained by the receiving transducer with different angles

上述理论是针对表面力源为洛仑兹力的情况, 考虑钢表面还有磁致伸缩力源的贡献, 实验指向性图9和理论模拟指向性结果图5还有一些区别, 而目前对于磁致伸缩力源的分析还存有一些困难, 主要在于较难准确得到某些重要参数, 比如铁磁材料的动态磁致伸缩系数, 进一步关于磁致伸缩力源的电磁声理论和实验还在研究中。从目前的理论和实验的结果可知, 双磁体跑道形电磁线圈超声换能器由洛仑兹力产生的水平偏振横波声场在钢中具有中间强两侧弱的指向性, 辐射声场的中心声束轴线和换能器轴线重合。此结果和文献[7]给出的结果一致。

在文献[8]中, 电磁超声换能器采用螺旋线圈加单磁体外偏置磁场, 产生出径向振动的表面力源, 辐射横波声场为中空特性, 声轴能量不集中。本论文中, 换能器采用了铜箔部分屏蔽的特制跑道线圈, 采用双磁体永磁铁作为外偏置磁场, 产生出水平剪切力源, 形成了水平偏振的横波声场。从实验结果和数值模拟结果来看, 此种跑道形电磁线圈换能器声

轴能量集中,比螺旋线圈超声换能器对车轮踏面滚动圆区域内的辍裂缺陷检测效果更好。

### 3 重载铁路货车车轮在线检测系统中跑道形电磁线圈超声换能器的应用

图10为在线重载铁路货车车轮超声检测系统中跑道线圈电磁超声换能器的探伤结果波形显示界面。重载货车车轮在线超声检测系统的检测原理在文献[8]中已有描述,辍裂缺陷通常发生在踏面滚动圆附近。图10所示对应样轮的超标缺陷的部分A扫描波形结果,和被检测样轮中的人工伤损

能很好吻合。利用研制的EMAT检测系统的特定重复频率,结合跑道形电磁线圈超声换能器的横波声场指向特性,能确保系统有效检出踏面滚动圆区域40 mm宽的整体型辍裂缺陷。利用缺陷轮对试验车通过阵列式布置的多组电磁超声换能器后的考核试验表明,该检测系统能够快速有效地检测出40 mm长的周向辍裂缺陷,同时取得了很高的检测准确率。目前该套在线检测系统安装调试完毕后,已经通过了较长时间的系统考核试验,系统运行稳定,性能良好,为重载铁路货车车轮的安全运行提供了检测设备支持。

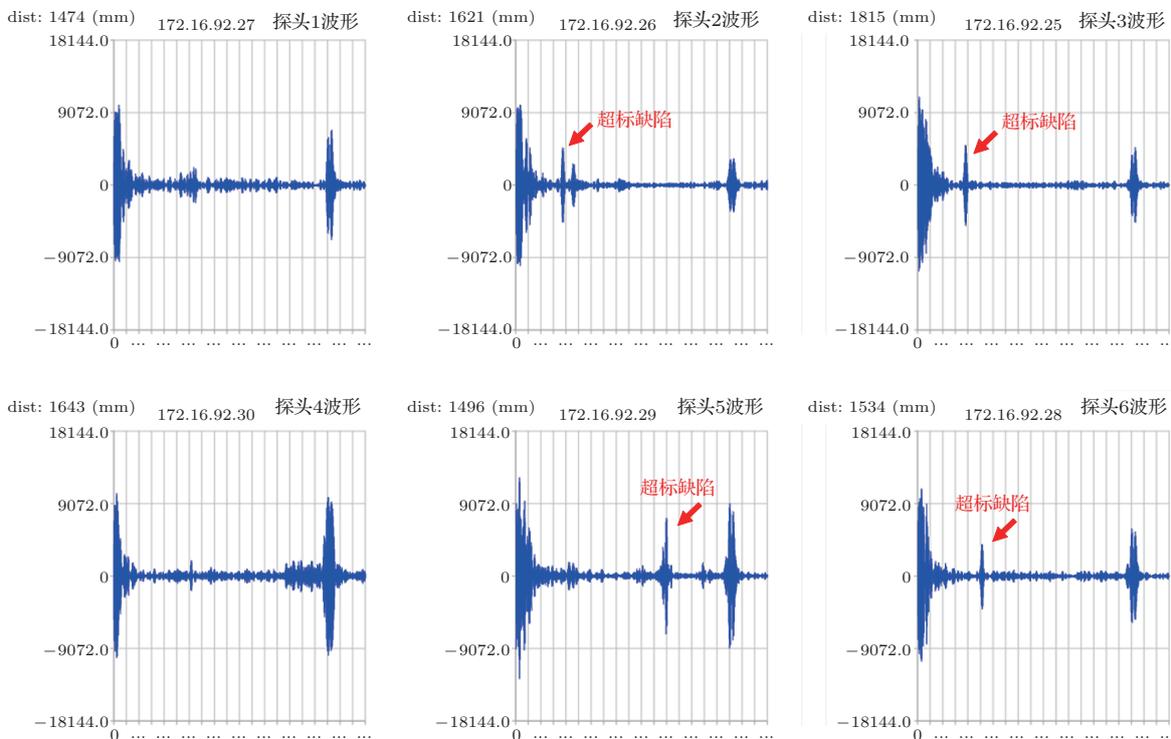


图10 铁路重载货车车轮在线电磁超声检测软件中A型扫描波形的数据显示

Fig. 10 The display interface of A-type scanning waveform data for online heavy haul freight train wheel EMAT testing system

### 4 结论

本文研究了跑道形电磁线圈超声换能器在钢中由洛伦兹力机制产生的辐射声场,将探头力源简化为非均匀的水平剪切力源,理论分析了该电磁超声换能器在半无限大介质钢中产生的横波声场,并在半圆柱形钢试块上做了声场实验,测定了该换能器辐射横波的声场指向性曲线,和理论结果符合较好。表明文中所述双磁体跑道形电磁线圈超声换能

器辐射水平偏振横波声场具有中间强两侧弱的指向性,有助于对此类换能器辐射声场的深入理解。利用双磁体跑道形电磁线圈超声换能器研制出的重载货车车轮在线检测系统,能够防止车轮辍裂缺陷的扩展最终导致行车事故,为煤炭能源的安全运输提供了装备保障。

### 参 考 文 献

- [1] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

- [2] 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.
- [3] Ludwig R, You Z, Palanisamy R. Numerical simulations of an electromagnetic acoustic transducer-receiver system for NDT applications[J]. *Magnetics, IEEE Transactions*, 1993, 29(3): 2081–2089.
- [4] Mirkhani K, Chaggares C, Masterson C, et al. Optimal design of EMAT transmitters[J]. *NDT&E International*, 2003, 37(3): 181–193.
- [5] 周进节, 贾浩东, 郑阳, 等. 跑道形线圈 EMAT 有限元建模与声场特性研究 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(2): 9–19.  
Zhou Jinjie, Jia Haodong, Zheng Yang, et al. Research on racetrack coil EMAT FE model and sound field characteristics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(2): 9–19.
- [6] 张海澜. 理论声学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [7] 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.  
Jia Haodong, Zhou Jinjie, Zheng Yang, et al. Research on the key factors affecting the EMAT radiation sound field of racetrack coil[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(5): 636–642.
- [8] 吴迪, 韦小鹤, 毕超, 等. 在线超声检测系统中螺旋线圈换能器的应用 [J]. *应用声学*, 2021, 40(3): 329–334.  
Wu Di, Wei Xiaohe, Bi Chao, et al. Application of the spiral coil electromagnetic acoustic transducer in online ultrasonic testing system[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2021, 40(3): 329–334.