

DOI: 10.3901/JME.2021.18.042

# 钢轨电磁超声 SV 波与表面波多维集成检测\*

涂 君<sup>1,2</sup> 蔡卓越<sup>1,2</sup> 张 旭<sup>1,2</sup> 宋小春<sup>1,2</sup>

(1. 湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068;

2. 现代制造质量工程湖北省重点实验室 武汉 430068)

**摘要:** 中国铁路总运营里程近 14 万 km, 大量钢轨服役时间较长, 可能存在较多安全隐患。电磁超声作为一种非接触式、高穿透性的检测技术, 可实现对钢轨的高效全面在线检测。然而, 由于电磁超声存在换能效率低的问题, 通常需要使用大功率激励装置来驱动其正常工作, 单通道体积与功耗均较大。而钢轨由于承受恶劣环境的影响, 需要一种能全面覆盖的高效低耗检测技术。因此, 提出了一种面向钢轨的电磁超声垂直偏振剪切(Shear vertical, SV)波与表面波多维集成检测方法。结合 SV 波和表面波的共性, 在单一电磁超声曲折线圈中加载含有两个不同频率段的脉冲信号进行激励, 同时产生 SV 波和表面波, 分别完成对钢轨轨头表面和轨腰缺陷的多维检测。通过有限元仿真和试验得出, 本方法对人工加工的轨头表面刻槽和轨腰横通孔实现了同时检测, 并利用分频滤波完成了两种缺陷信号的分离。所提出的电磁超声 SV 波与表面波多维集成检测不仅实现了对钢轨检测的低成本、高效率检测, 还能够相互消除两种超声波检测技术的盲区, 达到优势互补的目的。

**关键词:** 电磁超声; 钢轨; SV 波; 表面波; 多维检测

**中图分类号:** TP23

## Multi-dimensional Integrated Detection of Electromagnetic Acoustic SV Wave and Surface Wave for Steel Rail

TU Jun<sup>1,2</sup> CAI Zhuoyue<sup>1,2</sup> ZHANG Xu<sup>1,2</sup> SONG Xiaochun<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068;

2. Key Lab. of Modern Manufacture Quality Engineering, Wuhan 430068)

**Abstract:** The total operating mileage of China's railways is nearly 140 000 km, and a large number of rails have been in service for a long time, which may cause many potential safety hazards. As a non-contact and high penetration detection technology, electromagnetic acoustic can realize the efficient and comprehensive on-line detection of rail. However, due to low energy conversion efficiency, a high-power excitation device is usually needed to drive it to work normally, and the volume and power consumption of single channels are large. Due to the harsh environment, rail needs a high-efficiency and low-cost detection technology that can cover all aspects. Therefore, a multi-dimensional integrated detection method of electromagnetic acoustic shear vertical (SV) wave and surface wave for rail is proposed. Combined with the common characteristics of SV wave and surface wave, a single electromagnetic acoustic meander-line coil was loaded with pulse signals with two different frequencies to generate SV wave and surface wave simultaneously to complete the multi-dimensional detection of railhead surface and rail waist defects. Through the finite element simulation and experiment, it is concluded that the method could simultaneously detect the groove on the railhead surface and the through-hole on the rail waist and separate the two kinds of defect signals by frequency division filtering. The proposed multi-dimensional integrated detection of electromagnetic acoustic SV wave and surface wave could achieve low-cost and high-efficiency detection of rail and eliminate the blind areas of the two ultrasonic detection technologies, to achieve the purpose of complementary advantages.

**Key words:** EMATs; steel rail; SV wave; surface wave; multi-dimensional detection

\* 国家自然科学基金(51707058, 51807052)和湖北省自然科学基金(2019CFA021)资助项目。20210307 收到初稿, 20210715 收到修改稿

## 0 前言

铁路是我国交通基础设施, 钢轨作为铁路运输的重要组成部分, 由于运行距离远、客载负荷大, 易出现侧磨、剥离掉块、腐蚀、垂直裂纹、周边裂纹等问题, 均会影响到铁路运行的安全性, 因此钢轨需要做定期检测。但传统的检测技术难以实施对钢轨内部的缺陷检测, 而将超声波无损检测技术应用于钢轨检测, 则可以有效解决这一问题<sup>[1]</sup>。电磁超声(Electromagnetic acoustic transducers, EMATs)检测技术相对于常规超声检测具有非接触、无需耦合剂、检测速度快等特点, 且研究也取得了较为成熟的理论和成果<sup>[2-4]</sup>。然而, 工程应用中的 EMATs 仍存在待解决的问题, 如采用电磁超声体波检测表面及近表面缺陷时, 反射回波会隐藏在始波中造成检测盲区问题<sup>[5]</sup>。

针对表面检测盲区问题, 西安交通大学的田明等<sup>[6-8]</sup>采用了电磁超声与脉冲涡流复合检测的方法进行研究, 实现了电磁超声检测与脉冲涡流检测的优缺点互补, 弥补了电磁超声体波无法检测近表面缺陷的不足。涡流主要集中在金属表面集肤深度, 当超过集肤深度时, 涡流强度急剧减小。针对金属表面或近表面缺陷, 电磁超声表面波也能够进行有效检测, 被广泛应用于表面及近表面裂纹、凹坑、孔洞、分层的无损检测和表面粗糙度、残余应力的无损评估等领域<sup>[9]</sup>。表面波是一种特殊的超声导波模式, 它的传播波导是介质的一个界面, 通常认为, 表面波传播介质的厚度要大于 4 倍的表面波波长<sup>[10]</sup>, 在传播时, 能量主要集中在介质表面一个波长深度, 随着渗透深度的增加, 质点振动的能量下降很快<sup>[11-12]</sup>。根据永磁体与线圈的配置产生电磁超声波形, 选用曲折线圈搭配垂直偏置磁场, 可根据设定线圈激励频率分别产生电磁超声 SV 波和电磁超声表面波<sup>[13]</sup>。

结合电磁超声表面波和 SV 波的特性, 针对钢轨踏面与腰部的多维检测需求, 本文提出了一种将电磁超声 SV 波探头和表面波探头集成于一体的钢轨检测方法<sup>[14]</sup>。采用单一曲折线圈作为激励线圈, 并对其加载含有两个不同频率段的脉冲激励信号, 其中高频信号用于激励 SV 波, 低频信号用于激励表面波。激励线圈在外加垂直偏置磁场的作用下, 在钢轨中同时产生 SV 波和表面波, 分别对钢轨踏面和轨腰缺陷进行检测。将另一个曲折线圈作为接收线圈与激励线圈上下叠放于同一位置, 将接收线

圈采集到的信号实时滤波后, 分别得到从缺陷处反射回来的表面波信号和 SV 波信号, 从而可以实现对钢轨从上至下的多维集成检测, 具有降低硬件成本、提高检测效率、消除表面检测盲区等优势。

## 1 多维集成 EMAT 的工作原理

### 1.1 电磁超声 SV 波和表面波换能机理

常规 EMAT 由电磁体或永磁体、线圈和待测工件三部分组成。如图 1 所示, 当给曲折线圈通以激励信号后, 在钢轨试件表面感应出涡流, 并与垂直偏置磁场和线圈产生的交变磁场相互作用产生洛伦兹力、磁化力和磁致伸缩力。在三种机制力的共同作用下, EMAT 会同时在钢轨踏面和轨腰内部分别产生表面波和 SV 波<sup>[15]</sup>。由于外加垂直静磁场大小超过 0.1 T 时, 可以忽略磁化力和磁致伸缩力所产生的影响<sup>[16]</sup>, 而本文采用的外加垂直静磁场远大于 0.1 T, 因此仅考虑洛伦兹力机制。

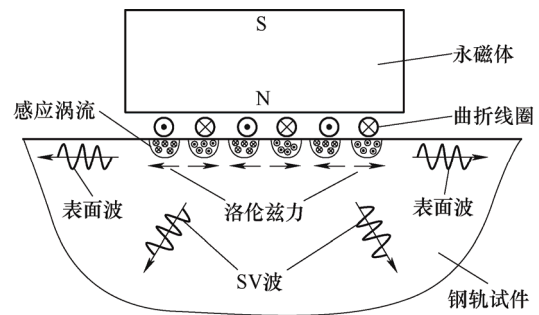


图 1 EMAT 的激励换能机理

其中 SV 波的偏转角度与曲折线圈间距和线圈激励频率有关, 如式(1)所示<sup>[17]</sup>

$$\sin \theta = \frac{c_s}{2df_s} \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为 SV 波偏转角度;  $d$  为曲折线圈的间距;  $f_s$  为用于激励 SV 波的激励频率;  $c_s$  为试样中横波波速, 其由材料属性决定<sup>[18]</sup>

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (2)$$

式中,  $E$  为材料弹性模量;  $\rho$  为材料密度;  $\sigma$  为材料泊松比。

表面波的激励与曲折线圈间距和线圈激励频率的关系如式(3)所示

$$f_R = \frac{c_R}{2d} \quad (3)$$

式中,  $f_R$  为用于激励表面波的激励频率;  $c_R$  为表面波波速, 其与 SV 波波速  $c_s$  的关系为<sup>[18-19]</sup>

$$C_R \approx \frac{0.87+1.12\sigma}{1+\sigma} C_S \quad (4)$$

根据式(1)~(4),可以推导出单一曲折线圈分别激励出 SV 波的激励频率  $f_S$  与激励出表面波的激励频率  $f_R$  的关系为

$$f_R \approx f_S \frac{0.87+1.12\sigma}{1+\sigma} \sin \theta \quad (5)$$

## 1.2 EMAT 控制方程

基于洛伦兹力机制的曲折线圈 EMAT 激励的相关控制方程如下<sup>[19-22]</sup>

$$\mu \nabla^2 \varphi_m = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{H} = -\nabla \varphi_m \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad (8)$$

$$\text{div} \frac{1}{\mu} \text{grad} \mathbf{A}_z - \sigma_r \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial t} + \frac{\sigma_r}{S_k} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{R_k} \mathbf{A}_z \text{d}s = \frac{st(t)}{S_k} \quad (9)$$

$$\mathbf{J}_{iz} = -\sigma_r \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial t} \quad (10)$$

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{J}_{iz} \times \mathbf{B} \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{H}$ 、 $\varphi_m$  和  $\mathbf{A}_z$  分别为磁场强度、标量磁位和磁矢位;  $\mu_r$ 、 $\mu_0$  和  $\mu$  分别为相对磁导率、空气磁导率和绝对磁导率;  $\mathbf{B}_r$  为永磁体的剩余磁感应强度;  $R_k$ 、 $S_k$  和  $\sigma_r$  分别为第  $k$  匝导线的截面区域、等效截面积和电导率;  $\mathbf{J}_{iz}$  为试件表面的感应涡流;  $\mathbf{f}_L$  为试件中产生的洛伦兹力。其中式(6)~(8)用于描述空间中任一点场的变化规律,可以求解永磁体形成的偏置磁场,式(9)~(11)用于求解钢轨表面的洛伦兹力。洛伦兹力所激发的 SV 波和表面波在钢轨中的传播过程可以表示为<sup>[23]</sup>

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \mathbf{T} = \mathbf{f}_L \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{u}$  为位移矢量;  $\mathbf{T}$  为应力张量。

曲折线圈 EMAT 的接收过程为激励过程的逆过程,试样表面的质点振动在曲折线圈中感生出电信号并被接收。

## 2 曲折线圈 EMAT 有限元模型及仿真

### 2.1 建立模型

采用 COMSOL 仿真软件,建立如图 2 所示钢轨缺陷检测的二维模型。本模型为 2 个磁场和固体力学的多物理场求解模型,一个磁场用于永磁体的

稳态求解,另一个磁场和固体力学用于曲折线圈与钢轨的瞬态求解。

选用永磁体提供垂直偏置磁场,其剩磁  $B_r=1.2$  T,截面尺寸为  $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ;将导线根数为 16,线圈间距为 2 mm 的曲折线圈简化为点间距为 2 mm 的 16 个点;检测对象为钢轨,将两个侧面和底面设置为吸收边界,其泊松比  $\sigma=0.3$ ,密度  $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $E=2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ,电导率  $\sigma_r=4.032 \times 10^6 \text{ S/m}$ ;以曲折线圈中心点为基准点,在基准点右侧 63.5 mm 处有一个宽为 6 mm,深为 2 mm 的槽状缺陷,在基准点右下方  $30^\circ$  方向有一个深为 110 mm 的  $\phi 8 \text{ mm}$  横通孔缺陷。

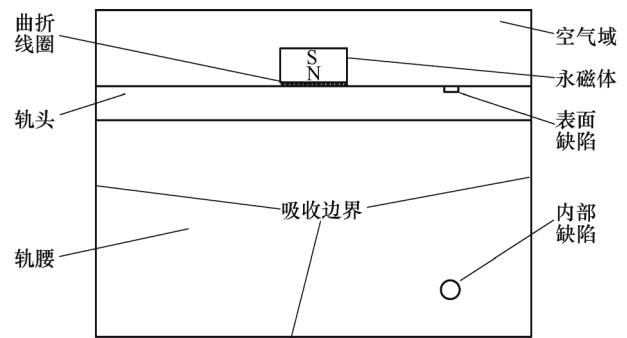


图2 钢轨缺陷检测模型

选用余弦函数加汉宁窗作为曲折线圈的激励信号函数,用于激励 SV 波的频率为  $f_1$ ,用于激励表面波的频率为  $f_2$ ,选用 5 个周期数的汉宁窗函数,则含有两种频率的激励信号的表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0.5U \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi f_1 t}{w_r} \right) \right) \cos(2\pi f_1 t) & 0 \leq t < \frac{w_r}{f_1} \\ 0.5U \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi f_2 t}{w_r} \right) \right) \cos(2\pi f_2 t) & \frac{w_r}{f_2} < t < \frac{2w_r}{f_2} \\ 0 & \frac{w_r}{f_1} \leq t \leq \frac{w_r}{f_2} \text{ 且 } \frac{2w_r}{f_2} \leq t \leq \frac{5w_r}{f_1} \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $U$  为激励电压幅值,  $U=5 \text{ V}$ ;  $w_r$  为函数周期数,  $w_r=5$ 。采用偏转角度为  $30^\circ$  的 SV 波,将钢轨的物理参数代入式(1)~(4),分别得到钢轨中激励 SV 波的工作频率  $f_1=1.59 \text{ MHz}$ ,SV 波的波速  $c_S=3177 \text{ m/s}$ ,激励表面波的工作频率为  $f_2=737 \text{ kHz}$ ,表面波的波速  $c_R=2947 \text{ m/s}$ 。

根据式(13)绘制的激励信号如图 3 所示,脉冲信号 1 的激励频率为  $f_1$ ,用于激励偏转角度为  $30^\circ$  的 SV 波,脉冲信号 2 的激励频率为  $f_2$ ,用于激励表面波。激励表面波时间滞后于 SV 波,滞后的时

间差  $t_1 = w_r / f_2 = 6.79 \mu\text{s}$ , 时间差特别小, 因此可近似为同时激励出 SV 波和表面波。

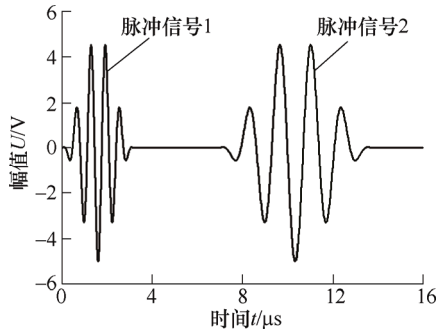


图3 激励信号

本模型中永磁体与空气域采用常规网格划分, 钢轨的网格划分按照最大网格单元大小与波长的关系进行划分, 如式(14)所示

$$h_{\max} = \lambda_{\min} / N \quad (14)$$

式中,  $h_{\max}$  为最大网格单元大小;  $\lambda_{\min}$  为最小波长;  $N$  为求解具有一定精确度谐波所需的每单位波长的单元数, 一般取 5~10。本文中 SV 波的波长小于表面波波长, 因此  $\lambda_{\min} = c_s / f_1 = 2 \text{ mm}$ , 取  $N=5$ , 则钢轨的最大单元格大小  $h_{\max} = 0.4 \text{ mm}$ 。

为了使计算结果更为精确, 瞬态求解的时间步长应符合式(15)

$$\Delta t = \frac{CFL}{f_{\max} \cdot N} \quad (15)$$

式中,  $\Delta t$  为求解时间步长;  $CFL$  为波在单个时间步长传播距离占网格单元的比例, 一般设定为 0.2。本文中脉冲信号 2 激励频率较大, 因此  $f_{\max} = f_1 = 1.59 \text{ MHz}$ , 则求解时间步长  $\Delta t = 2 \times 10^{-2} \mu\text{s}$ , 设定求解总时长为  $90 \mu\text{s}$ 。

## 2.2 仿真与分析

将激励信号以线电流的方式加载在曲折线圈上, 提取曲折线圈下方钢轨表面上的水平位移作为接收信号, 仿真结果如图 4 所示, 从中可以看出缺陷反射回波信号。对仿真结果进行频谱分析, 分析结果如图 5 所示, 可以看出主频率成分与激励信号的两个激励频率一致。设置  $HP_1=1.1 \text{ MHz}$ ,  $LP_1=2 \text{ MHz}$ , 对仿真结果进行滤波, 结果如图 6 所示, 为偏转角度为  $30^\circ$  的 SV 波检测到轨腰内部缺陷的信号; 设置  $HP_2=0.4 \text{ MHz}$ ,  $LP_2=1 \text{ MHz}$ , 对仿真结果进行滤波, 结果如图 7 所示, 为表面波检测到轨头表面缺陷的信号。同时, 通过对比滤波前后的信号, 可以得出不同频率的电磁超声 SV 波和表面波可以共存且互不干扰, 可看成系统的线性叠加。

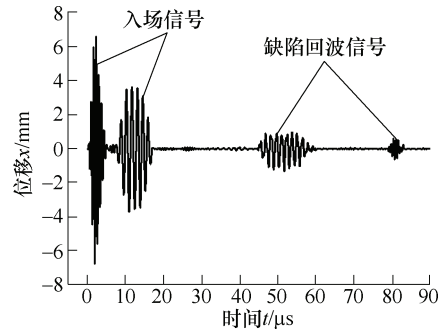


图4 钢轨缺陷检测信号

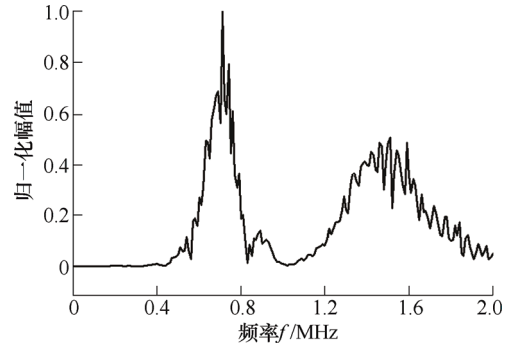


图5 频谱分析

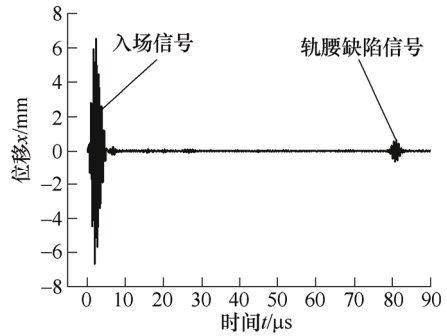


图6 滤波后 SV 波信号

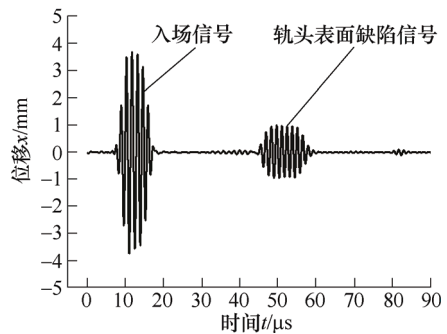


图7 滤波后表面波信号

## 3 钢轨缺陷检测试验

### 3.1 标准试块试验

为测试所提出方法的检测能力, 采用山东济宁



模具厂生产的 RB-3 超声波探伤标准钢板试块作为试验对象。如图 8 所示,试块尺寸为  $350\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 170\text{ mm}$ ,钢板左右两端各有一列距离端面  $50\text{ mm}$  的  $\phi 3\text{ mm}$  通孔,选用孔 1 和孔 2 作为目标缺陷;探头中心到钢板右端面距离为  $90.4\text{ mm}$ 。以孔 1 模拟轨头缺陷,孔 2 模拟轨腰缺陷。利用 Ritec-4000 脉冲发生器搭建钢板缺陷检测试验台如图 9 所示。采用一发一收的模式,将激励线圈和接收线圈上下叠放,激励线圈为手绕的曲折线圈,导线直径  $0.2\text{ mm}$ ,共 3 匝,每匝线圈 16 折,每折导线长  $40\text{ mm}$ ,间距  $0.3\text{ mm}$ ,每匝线圈间距为  $2\text{ mm}$ ;接收线圈为 PCB 曲折线圈,导线直径  $0.2\text{ mm}$ ,共 6 匝,每匝线圈 8 折,每折导线长  $30\text{ mm}$ ,间距  $0.3\text{ mm}$ ,每匝线圈间距  $2\text{ mm}$ 。永磁铁尺寸为  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ,剩磁大小为  $1.2\text{ T}$ ,充磁方向垂直于  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  的面。

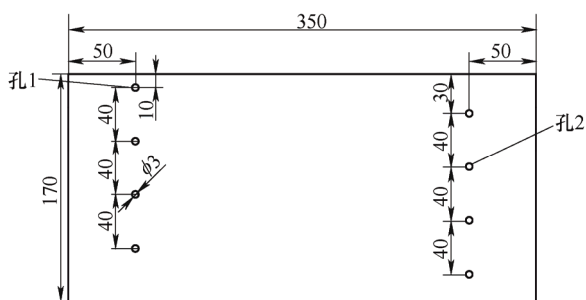


图 8 RB-3 标准钢板试块示意图

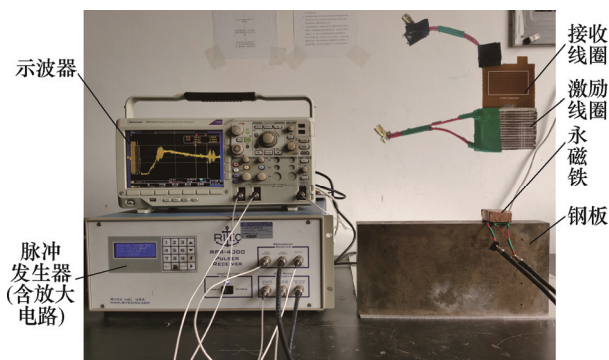
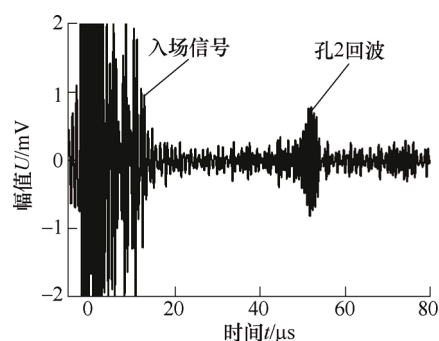
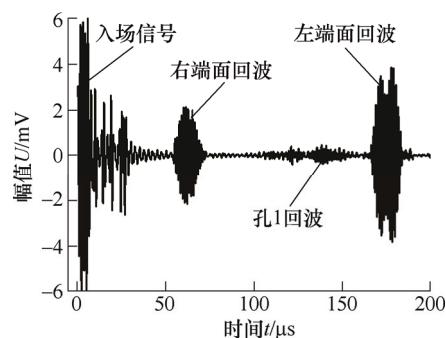


图 9 RB-3 标准钢板试块检测试验台

根据线性系统的可叠加性,利用 Ritec-4000 脉冲发生器采用调节频率的方式先后分别激励 SV 波和表面波,激励频率为  $1.62\text{ MHz}$  时激励偏转角为  $30^\circ$  的 SV 波,激励频率为  $696\text{ kHz}$  时激励出表面波。分别对孔 1 和孔 2 进行检测,检测信号如图 10 所示,图中有部分杂波,是由于标准钢板试块通孔过多且都与端面较近造成的干扰,但依然可以很清晰地找到检测目标信号,可以看出电磁超声 SV 波与表面波多维集成检测能够有效地检测出近表面缺陷和内部深层缺陷。



(a) SV 波检测孔 2 回波信号



(b) 表面波检测孔 1 回波信号

图 10 位置 1 处检测信号

### 3.2 实际钢轨试验

为测试该方法在实际在役钢轨中的有效性,进一步选用了一截实测长  $392\text{ mm}$ 、高  $172\text{ mm}$  的废旧重轨(型号 P60)开展试验,该钢轨服役时间较长,轨腰表面锈蚀较为严重。其中轨头高  $30\text{ mm}$ ,在距离钢轨侧端面  $130\text{ mm}$  处加工了一个宽为  $6\text{ mm}$ 、深为  $2\text{ mm}$  的槽作为表面缺陷,在槽的正下方  $110\text{ mm}$  处的轨腰加工一个  $\phi 8\text{ mm}$  的通孔作为内部缺陷。试验装置和检测探头保持不变,探头放置在距离轨头刻槽  $63.5\text{ mm}$  处。

试验台探头布置与缺陷的相对位置与仿真模型一致,如图 11 所示。根据线性系统的可叠加性,利用 Ritec-4000 脉冲发生器采用调节频率的方式先后分别激励 SV 波和表面波,激励频率为  $1.59\text{ MHz}$  时激励偏转角为  $30^\circ$  的 SV 波,对轨腰处横通孔缺陷进行检测,检测信号如图 12 所示,缺陷信号在  $77.3 \sim 85.3\text{ }\mu\text{s}$  处,信号峰-峰值为  $4.04\text{ mV}$ ;激励频率为  $737\text{ kHz}$  时激励表面波,对钢轨轨头在探头中心右侧的表面槽缺陷进行检测,检测信号如图 13 所示,缺陷信号在  $33.4 \sim 51.1\text{ }\mu\text{s}$  处,信号峰-峰值为  $16.52\text{ mV}$ 。轨头槽表面波信号与仿真波形基本一致;轨腰通孔 SV 波信号为紧挨着的一大一小波包,比仿真信号多出一个小小波包,可能与轨腰宽度较窄有关,对超声波的传播造成了一定的干扰。总体上试验的结果与仿真基本一致,验证了本方法可以同时

检测出钢轨表面缺陷和内部缺陷。

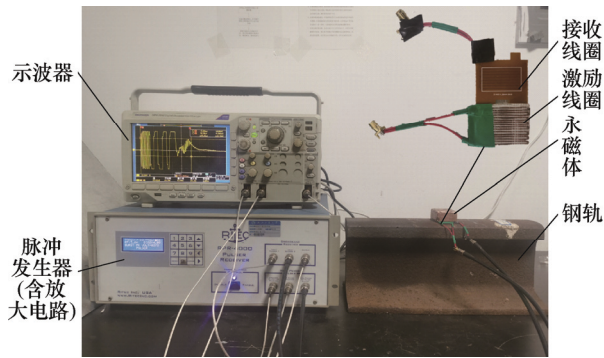


图 11 钢轨缺陷检测实验台

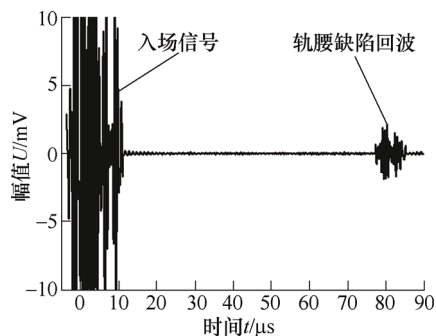


图 12 轨腰缺陷检测信号

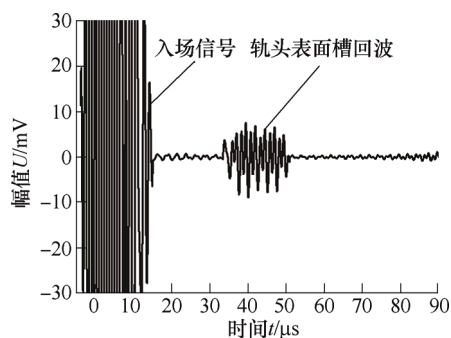


图 13 轨头表面缺陷检测信号

## 4 结论

(1) 电磁超声是一种能满足钢轨定期检测需求的非接触式检测技术, 本文利用其可以灵活产生不同类型超声波的特性, 提出了电磁超声 SV 波和表面波多维集成检测方法, 利用单一电磁超声探头同时激励出 SV 波和表面波, 以实现一次性对钢轨表面和内部缺陷全面检测。

(2) 采用 COMSOL 建立了以 P60 钢轨为原型的二维缺陷检测多物理场耦合模型, 仿真结果表明上述方法能同时检测 2 mm 深的轨头槽状缺陷和  $\phi 8$  mm 大小的轨腰横通孔缺陷。由于该检测系统可认为是线性系统, 进一步利用分频带滤波方法可有

效分离出两种缺陷信号。

(3) 在 RB-3 标准试块和废旧重轨上的探伤试验再次验证了所提出方法的有效性, 由于试验中的重轨服役状态复杂, 目前试验测试缺陷较大, 然而通过对电磁超声系统的调整是可以提高探伤灵敏度的。

(4) 本文所提出的钢轨电磁超声 SV 波和表面波多维集成检测方法, 能够相互消除两种超声波检测技术的盲区, 同时还可以节约硬件成本、降低功耗, 在钢轨在线探伤应用中具有较大的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 瞿辉, 戴晓娇, 赵金菊. 超声波无损检测技术的发展与应用[J]. 机电信息, 2020(2): 82-83.  
QU Hui, DAI Xiaojiao, ZHAO Jinju. Development and application of ultrasonic NDT technology[J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(2): 82-83.
- [2] 孙斐然, 孙振国, 张文增, 等. 基于洛伦兹力机制的电磁超声发射换能器的建模与优化[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 12-21.  
SUN Feiran, SUN Zhenguo, ZHANG Wenzeng, et al. Review of modeling method and optimum design of EMAT transmitters based on Lorentz principle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 12-21.
- [3] 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 Songling, WANG Zhe, WANG Shen, 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.
- [4] 何存富, 邓鹏, 吕炎, 等. 一种高信噪比电磁声表面波传感器及在厚壁管道检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 59-66.  
HE Cunfu, DENG Peng, LÜ Yan, et al. A new surface wave EMAT with high SNR and the application for defect detection in thick-walled pipes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 59-66.
- [5] 段伟亮. 铝合金厚板电磁超声缺陷检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
DUAN Weiliang. Research on thick aluminum alloy plate inspection method using EMAT[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [6] 田明明, 解社娟, 肖盼, 等. 基于脉冲涡流/电磁超声复合检测方法的复杂缺陷检测[J]. 无损检测, 2016, 38(12): 9-14.  
TIAN Mingming, XIE Dujuan, XIAO Pan, et al. Complex defect detection based on pulsed eddy current/electromagnetic acoustic composite detection

- method[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(12): 9-14.
- [7] 田明明, 解社娟, 韩捷, 等. 基于小波分析的脉冲涡流/电磁超声复合无损检测方法[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(16): 1925-1930.
- TIAN Mingming, XIE Shejuan, HAN Jie, et al. The method of pulsed eddy current/electromagnetic acoustic composite nondestructive testing based on wavelet analysis[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(16): 1925-1930.
- [8] 孙峥. 基于电磁超声与脉冲涡流的管道内检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- SUN Zheng. Research on pipeline inspection based on EMAT and pulsed eddy current technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [9] VIKTOROV I A. Rayleigh and Lamb waves: Physical theory and applications[M]. New York: Springer, 1967.
- [10] EDWARDS R S, DUTTON B, CLOUGH A R, et al. Enhancement of ultrasonic surface waves at wedge tips and angled defects[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(9): 94-104.
- [11] HEVIN G, ABRAHAM O, PEDERSEN H A, et al. Characterization of surface cracks with Rayleigh waves: A numerical model[J]. *NDT&E International*, 1998, 31(4): 289-297.
- [12] NA J K, BLACKSHIRE J L. Interaction of Rayleigh surface waves with a tightly closed fatigue crack[J]. *NDT&E International*, 2010, 43(5): 432-439.
- [13] ROSE J L. Ultrasonic guided waves in solid media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [14] 涂君, 蔡卓越, 宋小春, 等. 电磁超声 SV 波与表面波检测系统: 中国, 201911266547.5[P]. 2020-04-17.
- TU Jun, CAI Zhuoyue, SONG Xiaochun, et al. The SV wave and surface wave testing system with EMATs: China, 201911266547.5[P]. 2020-04-17.
- [15] 周佳伟. 电磁超声换能器的机理研究及其仿真分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- ZHOU Jiawei. Simulation and analysis of emat mechanism[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [16] 苏日亮. 面向钢轨轨底缺陷检测的电磁超声换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- SU Riliang. Research on electromagnetic acoustic transducer oriented to rail foot flaw detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [17] SUN Hongyu, HUANG Songling, WANG Qing, et al. Orthogonal optimal design method for point-focusing EMAT considering focal area dimensions[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2020, 312: 112109.
- [18] 虞雪芬, 叶凌伟, 夏立. 电磁超声检测中高温对横波声速的影响[J]. *轻工机械*, 2015, 33(4): 54-56.
- YU Xuefen, YE Lingwei, XIA Li. Influence of high temperature on shear wave velocity of EMAT testing[J]. *Light Industry Machinery*, 2015, 33(4): 54-56.
- [19] 魏鸿博. 基于电磁超声表面波的金属板探伤技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- WEI Hongbo. Metal plate detection technology research based on the electromagnetic acoustic surface wave[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [20] WANG Zhe, WANG Shen, WANG Qing, et al. Development of a helical lamb wave electromagnetic acoustic transducer for pipeline inspection[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(17): 9715-9723.
- [21] MA Qingzhen, JIAO Jingpin, HU Ping, et al. Excitation and detection of shear horizontal waves with electromagnetic acoustic transducers for nondestructive testing of plates[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(2): 428-436.
- [22] 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.
- [23] KOZYREFF G. Applied solid mechanics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- 
- 作者简介: 涂君(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为电磁测量与传感、超声无损检测新技术。  
E-mail: Juntu@hbut.edu.cn
- 蔡卓越, 男, 1995 年出生。主要研究方向为电磁超声无损检测技术与应用。  
E-mail: 101810127@hbut.edu.cn