

钢轨轨腰缺陷检测 MsT 有限元分析及优化

郭 稳¹, 林知明²

(1. 华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 华东交通大学 交通信息工程及控制研究所, 江西 南昌 330013)

摘要:钢轨轨腰缺陷的存在严重影响了列车的运行安全,及时有效地对轨腰缺陷进行检测具有重要意义。基于铁磁性材料固有的磁致伸缩效应及其逆效应,分析了磁致伸缩换能器(MsT)激励过程的控制方程,采用有限元法建立了一个检测钢轨轨腰通孔缺陷、一发一收的单向聚焦斜入射SV波MsT二维多物理场耦合模型。该模型对钢轨轨腰处有缺陷时接收线圈的感应电压信号进行仿真分析,并结合正交试验法,分别研究了发射线圈和接收线圈的提离距离、导线结构参数对缺陷回波电压信号幅值的影响,得到了模型优化后的结构参数。该工作对MsT用于钢轨轨腰缺陷检测的接收电压信号分析以及导线设计具有指导意义。

关键词:钢轨轨腰缺陷;磁致伸缩换能器(MsT);单向聚焦斜入射SV波;有限元法;正交试验法

中图分类号: U216.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)03-0029-08

0 引言

钢轨是列车运行中必不可少的组成部件,但由于钢轨本身材料以及在使用过程中钢轨承受着来自列车直接作用力等原因都有可能使钢轨在轨腰处产生缺陷。随着列车的运行,轨腰缺陷进一步扩展,极大提高了断轨的可能性。为了保障人们乘坐轨道交通工具时的出行安全,防止列车在运行过程中断轨事故的发生,需要及时有效地对钢轨轨腰缺陷进行检测。

目前,国内外学者提出了多种无损检测技术与模型对钢轨缺陷进行检测^[1-2]。孙继华等^[3]和 Kromine et al^[4]将激光检测技术用于钢轨踏面裂纹检测,研究表明此方法可以有效检测钢轨踏面裂纹。文献^[5]采用涡流检测技术对钢轨表面裂纹进行定量评估,但涡流检测技术穿透能力不足,只限于对钢轨表面缺陷检测。顾桂梅等^[6]提出利用红外热波无损检测技术对钢轨轨脚两侧裂纹进行检测,但红外热波检测设备成本高且无法实现对缺陷深度的检测评估。苏日亮^[7]针对钢轨轨底中心缺陷及两侧缺陷设计了2种不同的电磁超声检测模型,研究表明所设计的模型能够实现对钢轨轨底缺陷的检测。文献^[8-9]提出一种基于感知振动信号的钢轨缺陷检测系统,但该系统只限于有限元模型。由上述可知,现有模型与研究方向主要集中在钢轨踏面及轨底缺陷的检测,鲜有针对轨腰缺陷提出的检测方法以及仿真模型。

现根据磁致伸缩换能机理,将MsT用于钢轨轨腰缺陷检测并在钢轨内激发单向聚焦斜入射SV波(ULFSV波)。对MsT的激励、接收过程以及超声波在钢轨传播过程中与缺陷发生的相互作用进行了仿真分析。其中,发射线圈、接收线圈的提离距离和导线结构参数均会对缺陷回波信号产生影响。通过探究最优线圈参数组合达到优化MsT结构和提升缺陷检测能力的目的。该模型的建立对MsT用于钢轨轨腰缺陷检测及线圈优化设计研究具有指导意义。

1 理论分析

在电磁场作用下,铁磁性材料中超声波的运动方程为

收稿日期:2019-04-28 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20190076

作者简介:郭稳(1993—),男,硕士研究生,研究方向为电磁超声无损检测的研究。E-mail:1123780078@qq.com

郭稳,林知明.钢轨轨腰缺陷检测MsT有限元分析及优化[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(3):29-36.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\nabla \cdot c \nabla u) + f_L + f_{MS} \quad (1)$$

式中, ρ 为材料的介质密度; u 为质点振动位移; c 为刚度系数; f_L 为洛伦兹力; f_{MS} 为磁致伸缩力。本文主要研究磁致伸缩力对超声波的影响, 忽略洛伦兹力的影响, 即 $f_L = 0$ 。

钢轨中 MsT 激发超声波的机理如图 1 所示。永磁铁提供水平静磁场, 当激励线圈中通入高频电流时, 线圈周围产生交变磁场。静磁场会使钢轨集肤层产生恒定的磁致伸缩应变, 交变磁场产生的应变会引起钢轨集肤层内质点周期性振动, 从而在钢轨表面以及内部产生超声波。

在磁致伸缩换能过程中, 钢轨的磁特性和机械特性与电磁场满足以下本构方程

$$\begin{cases} \epsilon = S\sigma + dH \\ B = d^T\sigma + \mu H \end{cases} \quad (2)$$

式中, ϵ 为应变张量; σ 为应力张量; S 为柔顺度矩阵; d 为磁致伸缩系数; d^T 为逆磁致伸缩系数; μ 为应力作用下的磁导率; H 为磁场强度; B 为磁感应强度。

当静磁场远大于交变磁场时, 磁致伸缩系数 d 可认为是定值。此时的磁致伸缩系数 d 可以定义为^[10]

$$d = \begin{bmatrix} d_{11} & -\frac{1}{2}d_{11} & -\frac{1}{2}d_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{35} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{35} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, 2 个独立的磁致伸缩系数 d_{11} 、 d_{35} 可以通过磁致伸缩曲线计算获得。

$$\begin{cases} d_{35} = \frac{3\epsilon}{H_s} \\ d_{11} = \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial H_{H_s}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中, H_s 为静磁场。低碳钢的磁致伸缩曲线如图 2 所示, 由公式(4)计算得到的磁致伸缩系数 d_{11} 和 d_{35} 的绝对值如图 3 所示。可以看出磁致伸缩系数与外部磁场的变化呈非线性变化的关系。

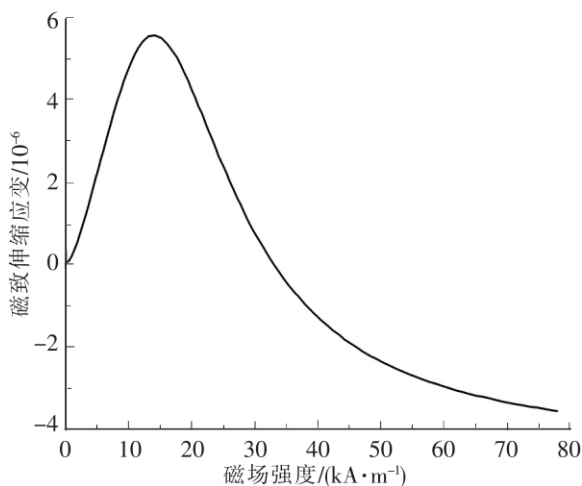


图 2 低碳钢的磁致伸缩曲线

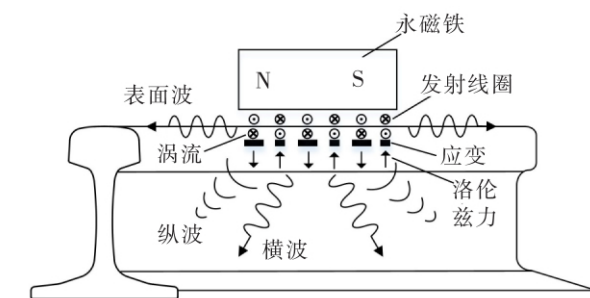


图 1 钢轨中 MsT 激发超声波机理

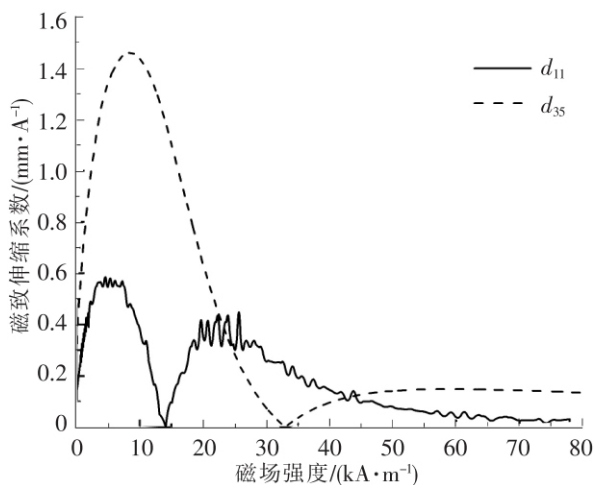


图 3 磁致伸缩系数 d_{11} 和 d_{35} 的绝对值

2 MsT 二维有限元建模

基于变分原理求解偏微分方程的有限元法广泛应用于各个研究领域。用有限元软件,建立钢轨轨腰缺陷检测 MsT 超声发射与接收过程的二维多物理场仿真模型,如图 4 所示。

MsT 模型主要由空气、永磁体、发射线圈、接收线圈、钢轨以及钢轨集肤层的换能区域组成。根据 GTS—60 标准钢轨试块为原型进行二维建模,钢轨尺寸为 $432\text{ mm} \times 176\text{ mm}$,杨氏模量为 200 GP ,泊松比为 0.33 ,密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$ 。钢轨集肤层深度为 0.5 mm 。在距离钢轨表面深 97 mm 处设置 $F6\text{ mm}$ 的通孔来模拟钢轨轨腰缺陷。发射探头与接收探头的间距为 100 mm 。永磁铁尺寸为 $30\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,磁场强度为 1.8 T 。发射线圈采用双重叠曲折线圈,导线的线高 a_1 为 35 mm ;线宽 b_1 为 0.2 mm ;提离距离 h_1 为 0.3 mm ;导线不等间距 d_i 。接收线圈采用单曲折线圈,其导线的线高 a_2 、线宽 b_2 以及提离距离 h_2 均与发射线圈的导线参数相同,导线等间距 d_2 为 2 mm 。有限元模型中材料电磁学参数如表 1 所示,钢轨的相对磁导率曲线如图 5 所示。为了减少钢轨左、右端面和底面的反射波对缺陷回波信号的影响,将钢轨的左、右端面以及底面设置为低反射边界。

表 1 有限元模型中材料电磁学参数

材料	电导率 $\sigma/(10^6(\text{S} \cdot \text{m}^{-1}))$	相对磁导率 μ_r
永磁体	0.714	1.04
线圈	56.68	1.00
钢轨	8.4	相对磁导率曲线确定

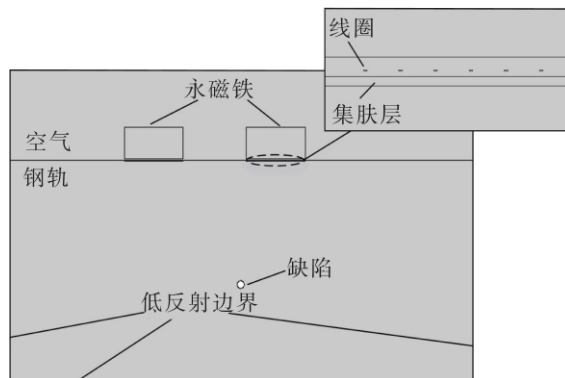


图 4 MsT 二维有限元模型示意图

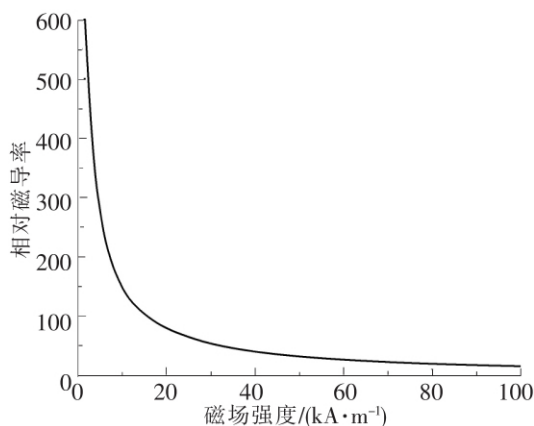


图 5 相对磁导率曲线

为了在钢轨内激发 ULFSV 波,需要对发射线圈进行设计。MsT 发射线圈的设计如图 6 所示。图 6 中, x_i 为第 i 导线距离最左端导线的距离, (x_F, y_F) 为聚焦线坐标, θ 为聚焦线初始角度, r_i 为第 i 根导线与聚焦线的距离。2 个发射线圈 A 和 B 通入激励电流的相位相差 $\pi/2$,其他参数相同,调整相邻导线之间的不等间距,可使 SV 波在 θ 方向处发生聚焦。发射线圈的激励电流如图 7 所示。

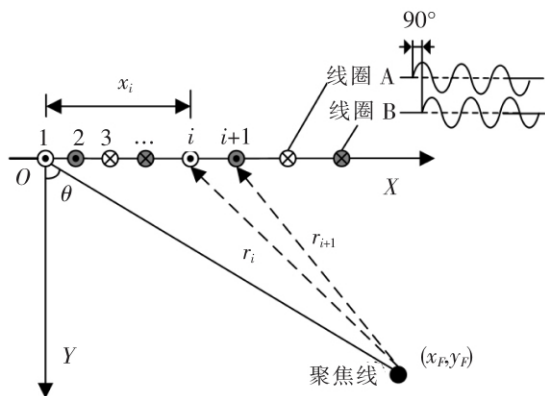


图 6 发射线圈设计图

2 个发射线圈 A 和 B 的 x_i 与 r_i 满足如下方程^[11]

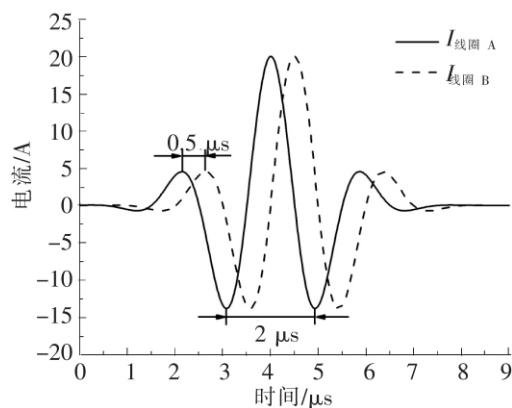


图 7 发射线圈激励电流

$$\begin{cases} r_i - r_{i+1} = c/(4f) = \lambda/4 \\ x_i = x_F - \sqrt{r_i^2 - y_F^2} \end{cases} \quad (5)$$

设最左端导线坐标为 $(-110 \text{ mm}, 0.3 \text{ mm})$, $(x_F, y_F) = (-30 \text{ mm}, -97 \text{ mm})$, $c = 3\,240 \text{ m/s}$, $\theta = 50^\circ$, $f = 500 \text{ kHz}$ 。由式(5)计算得发射线圈的不等间距如图 8 所示。

为了保证模型建立的准确性,需要对线圈以及钢轨集肤层的换能区域进行局部网格细分。为了使有限元模型计算结果收敛,设置求解域的计算时间步长为 $1/(f \times 40)$,钢轨集肤层换能区域的最大网格尺寸不超过 SV 波波长的 $1/10$ 。对空气、永磁铁、线圈、钢轨以及钢轨集肤层换能区域进行不同大小的网格划分,分别设置为 3、2、0.06、0.5、0.03 mm。有限元模型网格设计如图 9 所示。

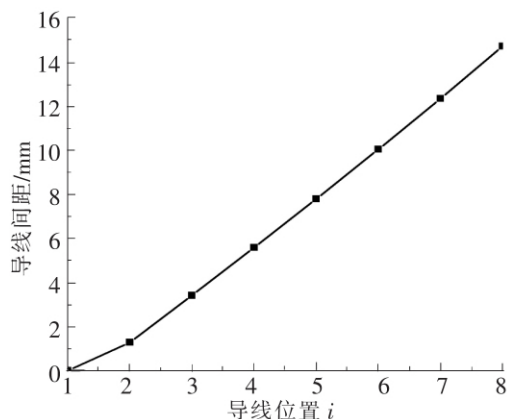


图 8 发射线圈的不等间距

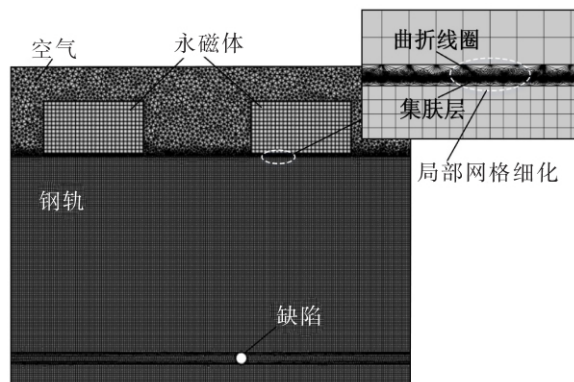


图 9 有限元模型网格划分设计

3 仿真结果分析与优化设计

3.1 仿真结果分析

超声波在钢轨中的传播过程如图 10 所示。钢轨集肤层在水平静磁场与交变磁场共同作用下产生磁致伸缩效应,使其内部质点发生周期性振动产生沿着钢轨表面传播的表面波 R 波和临界折射纵波 LCR 波,由于通入 2 个发射线圈 A 和 B 电流的相位差以及相邻导线的不等间距,在钢轨内部产生纵波 L 波和单向聚焦斜入射 SV 波 ULFSV 波。

如图 10(a)所示,可明显看到 SV 波在钢轨内部的一侧发生聚焦形成 ULFSV 波,另一侧减弱。如图 10(b)所示,ULFSV 波与缺陷发生作用,产生横波 SS 波(超声波发生反射)和纵波 SL 波(横波转换为纵波)。

轨腰中有缺陷时接收线圈的感应电压如图 11 所示。当轨腰中有缺陷时,接收线圈首先检测到 LCR 波和 R 波的感应电压,之后检测到缺陷回波(SL 波、SS 波)的感应电压幅值。缺陷回波的感应电压幅值比 R 波的幅值小很多,这是因为 ULFSV 波遇到缺陷时,大部分声波透过缺陷继续传播,只有少部分声波发生模式转换和被反射回来。设 SL 波的感应电压峰值为 u_1 和 SS 波的感应电压峰值为 u_2 。

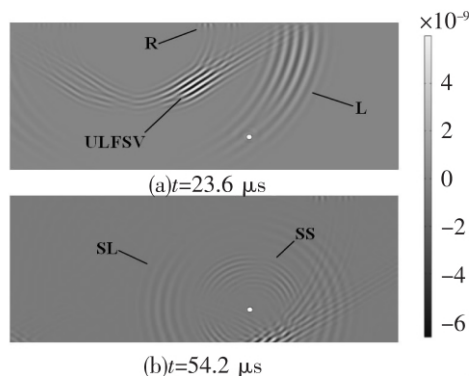


图 10 超声波在钢轨中的传播过程

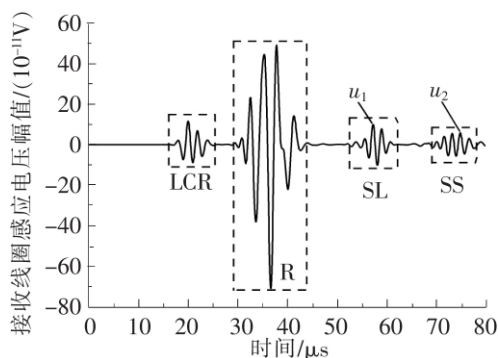


图 11 钢轨轨腰缺陷的感应电压

3.2 发射线圈正交试验与优化

发射线圈导线高度、宽度及提离距离均会对 u_1 、 u_2 的幅值产生影响,有限元模型计算量较大,仿真时间长。采用正交试验的方法来减少试验次数,但同样可以分析出各个参数对 u_1 、 u_2 幅值的影响,并得出 MsT 发射线圈的最佳激励参数组合。在保证接收线圈的导线 a_2 为 35 mm、 b_2 为 0.2 mm、 h_2 为 0.3 mm 不变的条件下,设定发射线圈导线参数的取值范围: a_1 为 17.5~70.0 mm; b_1 为 0.2~0.8 mm; h_1 为 0.1~0.7 mm,将这 3 个因素各选取 4 个水平进行等分,正交试验表及仿真结果如表 2 所示。

表 2 发射线圈组合参数正交试验表及结果

序号	线高 a_1 /mm	线宽 b_1 /mm	提离 h_1 /mm	$u_1/(10^{-11} \text{ V})$	$u_2/(10^{-11} \text{ V})$
1	17.5	0.2	0.1	11.35	6.53
2	17.5	0.4	0.3	9.971	5.768
3	17.5	0.6	0.5	8.752	5.05
4	17.5	0.8	0.7	7.674	4.411
5	35	0.2	0.7	9.98	5.782
6	35	0.4	0.5	11.331	6.53
7	35	0.6	0.3	7.667	4.431
8	35	0.8	0.1	8.642	5
9	52.5	0.2	0.3	8.803	5.1
10	52.5	0.4	0.1	7.732	4.462
11	52.5	0.6	0.7	11.32	6.511
12	52.5	0.8	0.5	9.835	5.69
13	70	0.2	0.5	7.755	4.482
14	70	0.4	0.7	8.765	5.081
15	70	0.6	0.1	9.904	5.742
16	70	0.8	0.3	11.251	6.455

发射线圈正交试验结果分析如表 3 所示。从表 3 可以看出,极差越大,表明该因素对 u_1 和 u_2 幅值影响越大。故这 3 个因素对 u_1 和 u_2 幅值影响排序相同均为 $h_1 > b_1 > a_1$ 。由图 12 可知, u_1 和 u_2 的幅值都是随着发射线圈的导线高度 a_1 增加,呈现出先减小后增大的趋势,但受 a_1 的变化影响最小。随着导线宽度 b_1 的增加, u_1 和 u_2 的幅值在减小,但减小幅度不大。其中, u_1 和 u_2 的幅值受提离距离 h_1 的影响最为显著,随着提离距离 h_1 增加, u_1 和 u_2 幅值急剧减小。由图 12(a)~图 12(c)可得,对于 u_1 的最佳激励参数组合: a_1 为 17.5 mm; b_1 为 0.2 mm; h_1 为 0.1 mm。由图 12(d)~图 12(f)可得,对于 u_2 的最佳激励参数组合: a_1 为 52.5 mm; b_1 为 0.2 mm; h_1 为 0.1 mm。鉴于 u_1 的幅值比 u_2 高,更易于判断轨腰处是否存在缺陷,且导线高度相比于提离距离的影响非常小,最终选定发射线圈的最佳激励组合 a_1 为 17.5 mm; b_1 为 0.2 mm; h_1 为 0.1 mm。

表 3 发射线圈组合参数正交试验结果分析

参数		a_1/mm	b_1/mm	h_1/mm
u_1	k_1	9.437	9.472	11.313
	k_2	9.405	9.45	9.923
	k_3	9.423	9.411	8.741
	k_4	9.419	9.351	7.707
	极差	0.032	0.121	3.606
	影响次序	3	2	1
u_2	k_1	5.439	5.474	6.506
	k_2	5.435	5.46	5.745
	k_3	5.441	5.434	5.057
	k_4	5.44	5.389	4.454
	极差	0.006	0.085	2.052
	影响次序	3	2	1

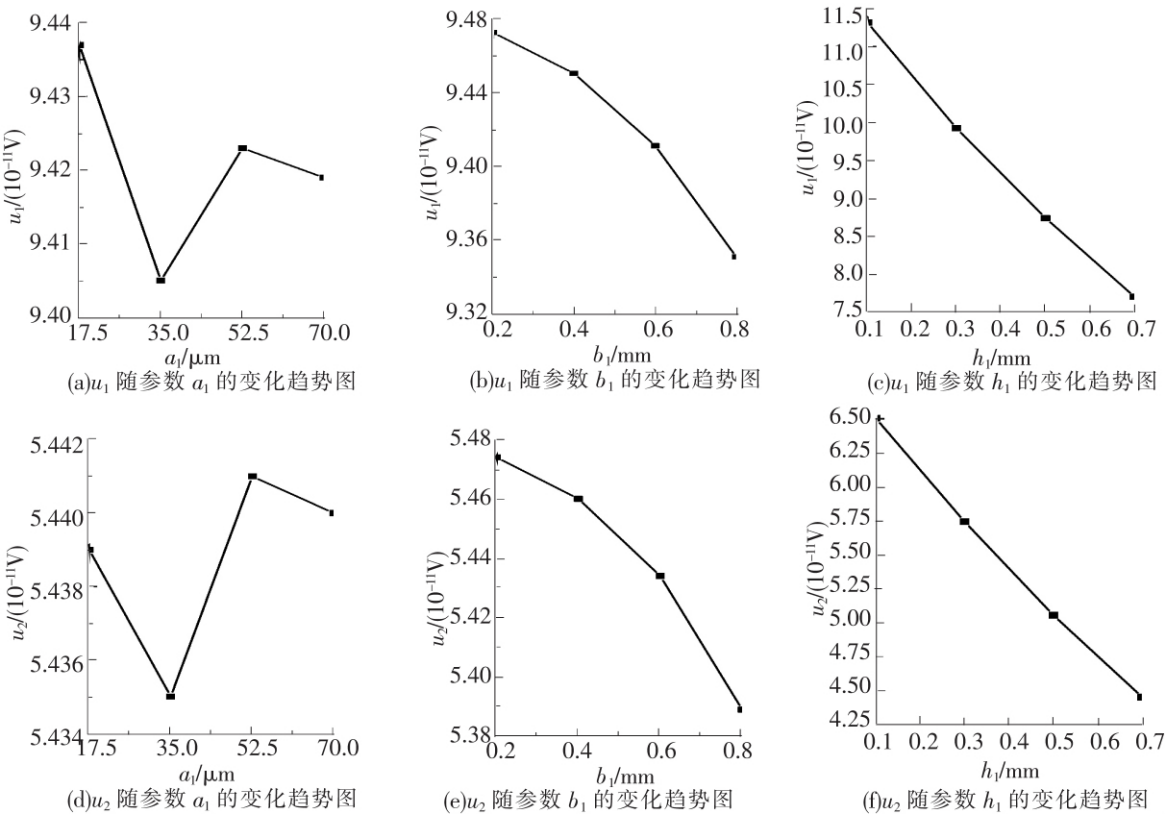


图 12 u_1 、 u_2 随参数 a_1 、 b_1 、 h_1 的变化趋势图

3.3 接收线圈正交试验与优化

为了研究接收线圈导线高度、宽度及提高距离对 u_1 和 u_2 幅值的影响,在保证 MsT 发射线圈为最佳激励组合的条件下,设定接收线圈导线参数的取值范围 a_2 为 17.5~70.0 mm; b_2 为 0.2~0.8 mm; h_2 为 0.1~0.7 mm。将这 3 个因素同样各选取 4 个水平进行等分,正交试验表及仿真结果如表 4 所示。

表 4 接收线圈组合参数正交试验表及结果

序号	线高 a_2/mm	线宽 b_2/mm	提高 h_2/mm	$u_1/(10^{-11}V)$	$u_2/(10^{-11}V)$
1	17.5	0.2	0.1	11.725	6.963
2	17.5	0.4	0.3	11.36	6.537
3	17.5	0.6	0.5	10.978	6.048
4	17.5	0.8	0.7	10.615	5.521
5	35	0.2	0.7	11.35	6.53
6	35	0.4	0.5	11.675	6.892
7	35	0.6	0.3	10.51	5.426
8	35	0.8	0.1	10.813	5.789
9	52.5	0.2	0.3	10.965	6.054
10	52.5	0.4	0.1	10.514	5.48
11	52.5	0.6	0.7	11.638	6.862
12	52.5	0.8	0.5	11.167	6.281
13	70	0.2	0.5	10.588	5.605
14	70	0.4	0.7	10.837	5.893
15	70	0.6	0.1	11.19	6.33
16	70	0.8	0.3	11.606	6.866

接收线圈正交试验结果如表 5 所示。接收线圈导线的 3 个因素对 u_1 幅值影响排序为 $h_2>a_2>b_2$,对 u_2 幅值影响排序为 $h_2>b_2>a_2$ 。由图 13 可知,除了 u_2 幅值随着线高 a_2 的增加,呈现先减小后增大的趋势外, u_1 和 u_2 幅值都随着接收线圈导线其余参数的增加而减小。由图 13 可得,接收线圈的最佳接收参

数组组合: a_2 为 17.5 mm; b_2 为 0.2 mm; h_2 为 0.1 mm。

表 5 接收组合参数正交试验结果分析

参数	a_2/mm	b_2/mm	h_2/mm	
$u_1/(10^{-11}\text{V})$	k_1'	11.169	11.157	11.661
	k_2'	11.087	11.096	11.266
	k_3'	11.071	11.079	10.898
	k_4'	11.055	11.05	10.556
	极差	0.114	0.107	1.105
	影响次序	2	3	1
$u_2/(10^{-11}\text{V})$	k_1'	6.267	6.288	6.895
	k_2'	6.159	6.201	6.419
	k_3'	6.169	6.166	5.946
	k_4'	6.173	6.114	5.508
	极差	0.108	0.174	1.387
	影响次序	3	2	1

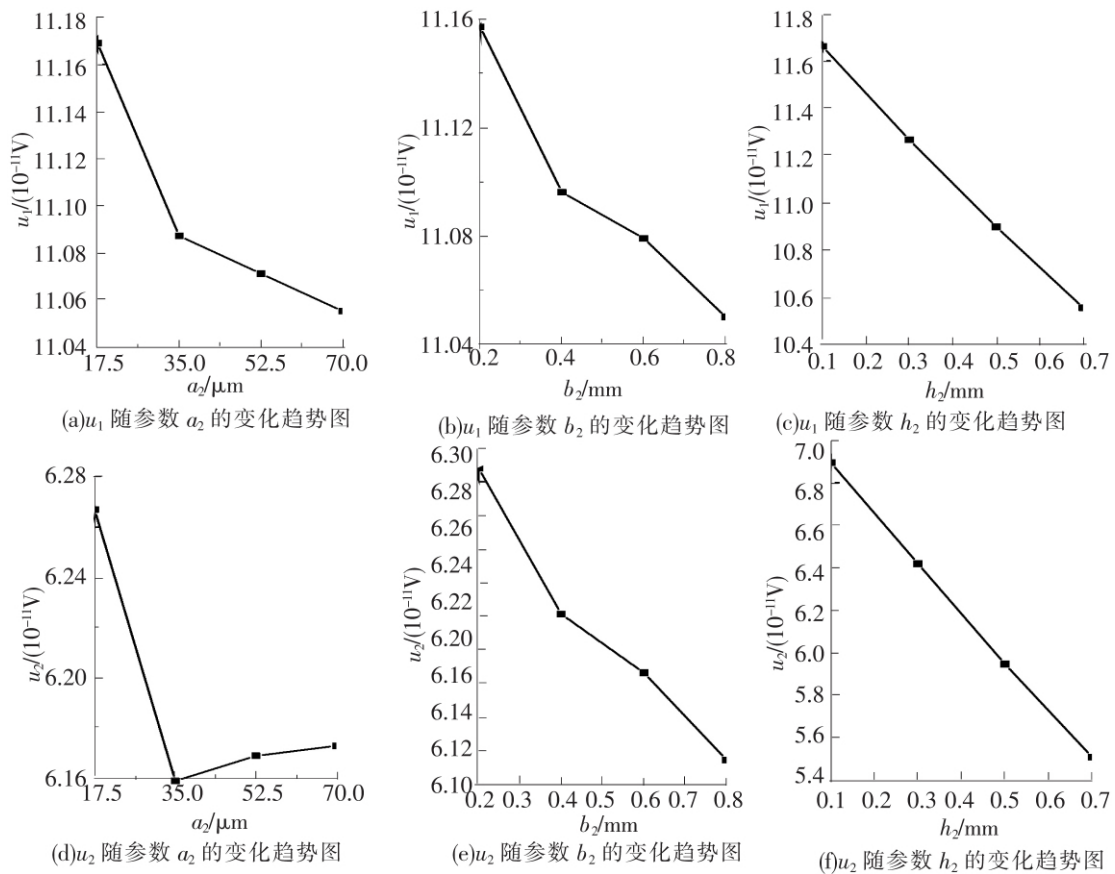


图 13 u_1 、 u_2 随参数 a_2 、 b_2 、 h_2 的变化趋势图

4 结论

利用有限元法,建立了包含 ULFSV 波激励、传播和接收全过程的钢轨轨腰缺陷检测 MsT 仿真模型。分别研究了发射线圈和接收线圈的导线高度、宽度以及提离距离对接收电压幅值的影响,通过优化线圈参数组合来优化 MsT 结构。在此模型的基础上,通过正交试验法,得到了提高 MsT 检测轨腰缺陷灵敏度的一般规律:

(1)发射线圈和接收线圈的提离距离对缺陷回波电压幅值的影响最大。提离距离越大,缺陷回波电

压幅值越小,在 MsT 设计时,应尽量减少发射线圈和接收线圈的提离距离。

(2)发射线圈和接收线圈的导线高度对缺陷回波幅值均会存在一定的波动影响,但影响不大。

(3)发射线圈和接收线圈的导线宽度越小,缺陷回波幅值越大。

(4)相比于接收线圈组合参数的改变,缺陷回波幅值对发射线圈组合参数的改变更加敏感。

参 考 文 献

- [1]Alahakoon S, Sun Y, Spiriyagin M, et al. Rail flaw detection technologies for safer, reliable transportation-a review [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2017, 140(2):1-17.
- [2]何越磊,石嵘,刘志钢. 城市轨道交通钢轨伤损检测技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2010.
- [3]孙继华,赵扬,马健,等. 基于光纤传导的钢轨踏面缺陷激光声磁检测[J]. 光电子·激光, 2016, 27(11):1176-1180.
- [4]Kromine A K, Fomitchov P A, Krishnaswamy S, et al. Laser ultrasonic detection of surface breaking discontinuities: scanning laser source technique[J]. Mater. Eval, 2000, 58(2):60-85.
- [5]黄凤英. 钢轨表面裂纹涡流检测定量评估方法[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(2):28-33.
- [6]顾桂梅,贾文晶. 钢轨轨底裂纹红外热波无损检测数值模拟分析[J]. 红外技术, 2018, 40(3):294-299.
- [7]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.
- [8]Wei Q, Zhang X, Wang Y, et al. Rail defect detection based on vibration acceleration signals[C]// IEEE International Instrumentation & Measurement Technology Conference. [S. l.]:IEEE, 2013.
- [9]Xin Z, Yan W, Feng N, et al. Flaw detection in high speed train's rail based on EMD and PSD[C]//IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference. China:IEEE, 2011.
- [10]Oh J H, Sun K H, Kim Y Y. Time-harmonic finite element analysis of guided waves generated by magnetostrictive patch transducers[J]. Smart Materials & Structures, 2013, 22(8):1-13.
- [11]Su Riliang, Chen Xiaoyang, Yin Junfeng, et al. Unidirectional line-focusing electromagnetic acoustic transducer[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (English Edition), 2013, 22(S1):139-142.

Finite Element Analysis and Optimum Design of Magnetostrictive Transducer for Rail Waist Defect Testing

Guo Wen¹, Lin Zhiming²

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The existence of rail waist defects seriously affects the safe operation of train. It is of great significance to detect rail waist defects timely and effectively. Based on the Wiedemann effect and reversed Wiedemann effect of ferromagnetic materials, this paper analyzed the control equation of excitation process for magnetostrictive transducer (MsT). A two-dimensional multi-physics coupling model of Unidirectional line-focusing SV wave MsT was established by finite element method, operating on rail waist with a through hole. This model simulates the induced voltage signal of the receiving coil when there is defect at the rail waist. The orthogonal experiment was used to study the influence of the lift distance and wire structure parameter of the transmitting coil and the receiving coil on the amplitude of the defect echo voltage signal. Then the structural parameters of the optimized model were obtained. This work has guiding significance for the receiving signal analysis and coil design of MsT for rail waist defect detection.

Key words: rail waist defect; Magnetostrictive transducer (MsT); unidirectional line-focusing SV wave; finite element method; orthogonal experiment