

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108992

车轮踏面动态感应热成像缺陷检测方法研究*

唐思颖,高晓蓉,彭建平,张翔

(西南交通大学物理科学与技术学院 成都 610031)

摘要:涡流脉冲热成像是一种新型的无损检测技术,具有检测速度快,灵敏度高,探测范围大的特点。为适应车轮踏面缺陷的动态检测,本文提出了一种适应车轮踏面廓形的矩形磁轭电磁感应激励传感结构。通过传感器结构的磁路模型推导,从理论上证明了传感结构的可行性。通过数值模拟计算分析了踏面表面检测区域的磁场与涡流场分布,并对比了矩形磁轭与直导线的检测结果。在此基础上,本文搭建了一套车轮自动探伤检测系统,能够实现 65 mm/s 速度下的缺陷动态测量。结果表明,设计的矩形磁轭传感结构可优化感应加热的均匀性,对车轮踏面浅表层疲劳裂纹(轴向表面开口)具有更好的检测结果。

关键词:涡流脉冲热成像;感应激励线圈;车轮踏面疲劳缺陷;动态无损检测

中图分类号: TH878 TG115.28 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on dynamic induction thermography defect detection for wheel treads

Tang Siying, Gao Xiaorong, Peng Jianping, Zhang Xiang

(College of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The eddy current pulsed thermography is a new technique for defect detection with high detection speed, high sensitivity, and large detection range. To adapt the dynamic detection of wheel tread, this article proposes a rectangular electromagnetic induction excitation sensing structure. By deducing the mathematical model of the magnetic circuit of the sensor structure, the feasibility of the sensor structure is proved theoretically. Through numerical simulation, this study analyzes the distribution of electromagnetic and eddy current field in the cracked area of tread surface. And the detection results of the straight coil are compared. Based on this, an automatic wheel flaw detection system is established, which is capable of dynamic measurement of defects at 65 mm/s speed. The results show that, by optimizing the induction heating uniformity of the wheel tread, the rectangular yoke sensing structure improves detection results for fatigue cracks in the shallow surface of the wheel tread (axial surface opening).

Keywords: induction thermography; induction excitation coil; wheel tread fatigue defect; dynamic non-destructive detection

0 引言

列车的高速化和重载化是铁路运输发展的两个重要方向。随着列车运行速度和轴重的不断增加,对列车各个构件的安全可靠服役提出了更为严苛的要求^[1]。车轮作为重要的承载和移动部件,能够安全、平稳的运行至关重要。在列车运行过程中,车轮踏面受到周期性的压应力和剪切应力的循环作用,发生累积塑性变形,出现滚动接触疲劳裂纹。滚动接触疲劳裂纹比较隐蔽,当裂纹扩展至一定长度时,裂纹扩展速率会快速增加,容易导致踏

面金属剥离掉块,对列车运行造成影响,甚至出现轮辋断裂、车轮脱轨,造成灾难性事故的发生^[2]。因此,检测出萌生初期的疲劳裂纹,对避免危害发生意义重大^[3]。

为防止故障的发生,通常采用无损检测的方法对列车车轮进行探伤和健康监测^[4]。目前国内外常用的铁路探伤技术主要包括超声检测、磁粉检测、渗透检测、电磁超声检测和涡流检测,不同的检测方法都存在一定的局限性。超声检测已广泛应用于列车车轮动态检测^[5-6],由于超声存在近场盲区,动态耦合性差,易导致表面近表面缺陷漏检;磁粉探伤虽然对表面缺陷敏感,但操作复杂不利于自动化,且存在缺陷量化、环境污染的问题;渗透检

收稿日期:2021-12-07 Received Date: 2021-12-07

* 基金项目:国家自然科学基金(61771409)项目资助

测只能检测表面缺陷,且敏感度受表面光洁度的影响,操作复杂;电磁超声检测可以高效、无耦合地检测表面缺陷,但容易受到电磁干扰;涡流检测对表面次表面缺陷敏感,但是受提高的影响大,对材料表面粗糙度和材质均匀性要求比较高,而且无法区分缺陷的类型。涡流热成像检测(eddy current pulsed thermography, ECPT)技术结合了涡流检测和热成像的优势^[7],具有检测效率高、安全性高、成像结果明了等优势^[8-10],近年来广泛应用在航空航天、交通铁路、工业技术等领域^[11-13],因此在车轮踏面缺陷的动态检测方面具有应用前景。

在列车运行过程中车轮与钢轨之间的滚动接触作用使得车轮表面常萌生出滚动接触疲劳裂纹,裂纹的存在使得车轮的安全性和可靠性降低。由于车轮长期处于较恶劣的环境中,加之复杂的表面结构会降低裂纹的检出率,增大缺陷定量的难度^[14]。电磁感应线圈的结构会影响激励磁场的空间分布,从而影响检测效果。电磁感应线圈均匀的激励场,能更好地适应复杂的表面结构检测,有利于缺陷信号的提取,降低后期算法处理的复杂度。常见的电磁线圈传感结构有直导线线圈、螺旋线圈、亥姆霍兹线圈、磁轭等。直导线线圈导线方向的磁场相对均匀,可用于多种场景的裂纹检测^[15]。螺旋形线圈在试件表面产生辐射状磁场和环形涡流场,可用来检测不同角度缺陷^[16-17]。亥姆霍兹线圈通过设置合适的线圈半径和间距,在两个线圈中间区域能够产生均匀磁场,常用于小型试件检测^[18]。磁轭结构能在一定范围产生均匀激励场,适合螺栓等异性构件的检测^[19-20]。

CRH1 型动车组轮对踏面宽度为 103 mm,要实现大范围快速扫查,现有的感应线圈存在一定的局限性。其中,直导线线圈激励磁场是长而窄的矩形且存在视场盲区;螺旋线圈、亥姆霍兹线圈的结构不适应车轮踏面的检测。本文设计了矩形磁轭电磁感应传感器结构,其对称结构在提供磁场均匀性的同时,增加了检测区域的激励强度,且有利于红外相机拍摄。同时,通过数值方法研究了电感线圈的感应磁场分布和对不同角度缺陷的检测能力,并通过实验验证了该电感线圈的可靠性和检测效率。

1 检测原理

涡流热成像动态车轮检测系统由车轮、脉冲激励电源系统、传感器、热像仪、基于计算机的数据处理系统、机械制动系统等组成。如图 1 所示,车轮踏面区域被涡流感应加热,热像仪可捕获踏面区域是否存在疲劳损伤,当车轮匀速转动时即可实现车轮踏面 360°的探伤。

涡流集肤深度与车轮踏面金属材料的特性和励磁电流的频率有关,如式(1)所示。

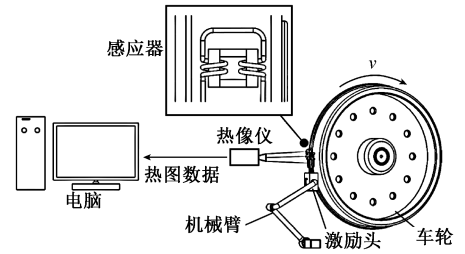


图1 涡流热成像车轮动态检测系统

Fig. 1 The dynamic detection system for vortex thermal imaging wheels

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma\mu f}} \quad (1)$$

其中, δ 是趋肤深度; f 是励磁电流的频率; σ 为材料的电导率; μ 为材料的磁导率。当整块金属内部的电子受到某种非静电力(电磁感应下的洛伦兹力或感生电场力)时,金属内部会出现电流。当检测系统和工件之间存在相对运动时,由于洛伦兹力作用,试样中产生的涡流密度方程如下:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) \quad (2)$$

其中, \vec{A} 为引入的一个磁矢量, \vec{J}_s 为激励线圈的电流密度, \vec{v} 是传感器与试样的相对速度。根据焦耳定律,试样中存在涡流时会产生热量。作为热源,涡流的表达式如下所示:

$$Q = \frac{1}{\sigma} |\vec{J}_e|^2 + \frac{1}{\sigma} |\vec{J}_v|^2 \quad (3)$$

其中, Q 是产生热量的强度, \vec{J}_e 是涡流密度, \vec{J}_v 是相对运动产生的电流密度。涡流产生的焦耳热会传播到试样的其他部分,该过程可表示为:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (4)$$

其中, ρ 、 C 、 k 分别为试样的密度、比热和传热系数, T 是温度。当考虑速度效应时,公式改写如下:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C \vec{v} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5)$$

当线圈和试样之间的相对运动速度较慢时,由速度产生的涡流效应可以忽略。

2 矩形磁轭传感器

为了提高电磁耦合效率和加热均匀性,获得更有效的拍摄视场,设计了一种矩形磁轭探头,如图 2 所示。传感器由线圈与磁轭两部分组成,圆形线圈套放在磁轭横梁中间部位,磁轭横梁和线圈中心轴重合。工作时圆形

线圈上通有高频激励电流,通过绕线方式控制感应线圈中感应磁场的方向。

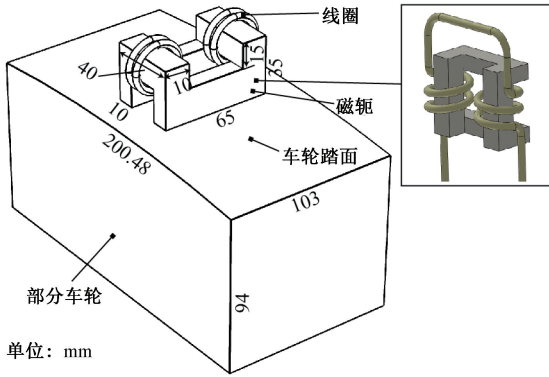


图 2 新型磁轭传感器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the new magnetic yoke sensor

2.1 矩形磁轭传感器磁路理论

电感结构的磁路模型是分析空间中感应电磁场的基础,也是构建矩形磁轭传感物理模型的基础。

线圈中通有高频激励电流时产生感应磁场,磁轭聚集和引导部分磁通进入试件。图 3 是改良磁轭传感器的磁路模型,通有高频电流的线圈所产生的总磁通量为 Φ ,两部分线圈所产生的磁通可分为 Φ_1 和 Φ_2 。由于 Φ_1 和 Φ_2 具有相同的磁动势且结构对称,通过分析磁通 Φ_1 可得磁通 Φ_2 的分布,并且在两个线圈之间的空间中,磁通密度将叠加,因此内部区域的磁通密度增强并变得更加均匀。对于 Φ_1 ,第 I 部分、第 II 部分磁通量分别为 Φ_{11} 、 Φ_{12} 。 R_{core1} 、 R_{Air1} 为第 I 部分磁通路径上磁轭的磁阻和空气间隙磁阻, R_{core2} 、 R_{Air2} 和 R_s 为第 II 部分磁通路径上磁轭的磁阻、空气间隙磁阻和试件中的磁阻。

磁通与磁路磁阻的关系为:

$$mmf = NI = \Phi R = \Phi_1 R_1 + \Phi_2 R_2 \quad (6)$$

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12} \quad (7)$$

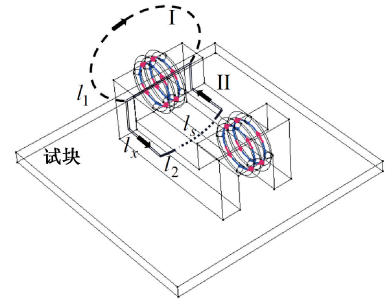
$$\Phi_2 = \Phi_{21} + \Phi_{22} \quad (8)$$

其中, Φ 为磁通量, R 为磁路磁阻, mmf 为磁动势,磁动势由通有电流为 I 的 N 匝线圈产生。每部分的磁阻表示为:

$$R_1 = R_{core1} + R_{Air1} = \frac{l_x}{\mu_c A_c} + \frac{l_1}{\mu_0 A_0} \quad (9)$$

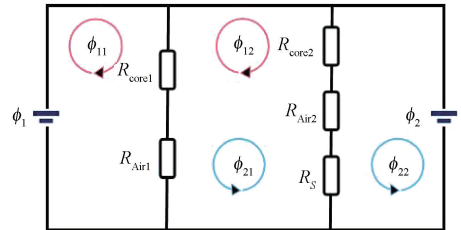
$$R_2 = R_{core2} + R_{Air2} + R_s = \frac{l_x}{\mu_c A_c} + \frac{l_2}{\mu_0 A_0} + \frac{l_s}{\mu_s A_s} \quad (10)$$

其中, μ_0 、 μ_c 和 μ_s 分别为空气、磁轭和试件的磁导率; A_0 、 A_c 和 A_s 分别为空气、磁轭和试件中的磁通经过路径的横截面积; l_1 、 l_2 、 l_x 和 l_s 分别为第 I 部分空气、第 II 部分空气、磁轭和试件中的磁通经过路径的距离。



(a) 磁通路径示意图

(a) Schematic diagram of magnetic flux path



(b) 磁路模型

(b) Magnetic circuit model

图 3 改良磁轭传感器结构磁路模型

Fig. 3 Magnetic circuit model of modified magnetic yoke sensor structure

根据磁路模型,改良磁轭的磁导率远大于空气磁导率和试件的磁导率,试件的磁导率远大于空气的磁导率,即 $\mu_c \gg \mu_s \gg \mu_0$, $R_{core1} = R_{core2}$ 。由于检测时提离近似于 0, $l_1 \gg l_2$, $R_{Air} \gg R_s$, 所以 $R_2 \ll R_1$ 。因此,通过试件的磁通量远远大于其他部分的磁通量,该结构能有效的约束磁场,用于检测缺陷。

2.2 改良传感器仿真实验

为了验证感应器对探测对象加热的均匀性,对纵横裂纹的动态检测机理进行研究,在 COMSOL Multiphysics 软件中进行数值仿真实验。数值仿真模型采用 AC/DC 和传热模块,并通过电磁加热进行耦合。仿真实验中所用改良磁轭传感器的 3D 图如图 2 所示。

圆形线圈由铜管绕成,横梁处线圈均为两匝,其中铜管直径为 4 mm,线圈半径为 12.7 mm。圆形线圈的材料为铜,磁轭的材料为锰锌铁氧体,被检物体的材料为结构钢。表 1 为仿真模型中的材料及其各项参数。

表 1 仿真模型中的材料及各项参数

Table 1 Material parameters of the simulation model

材料	结构钢	Mn-Zn 铁氧体	铜	空气
电导率 σ (S/m)	5.43×10^6	0.15	5.998×10^7	50
相对磁导率 μ	200	2 300	1	1
导热系数 k (W/(m ² ·K))	44.5	-	-	-
恒压热容 C_p (J/(kg·K))	475	-	-	-

周围的介质是空气,其电导率设置为 50 S/m,以确保该模型的收敛性^[21]。该模型的主要边界条件是环境温度 ($T_0 = 293.15$ K)。空气对流系数设定 15 W/(m²·K),边界条件中使用表面热源,检测对象的表面发射率 ε 设置为 0.9。在仿真实验前,对仿真网格独立性和模型进行了验证^[22]。

本文中的所有仿真实验使用 Intel i7-10875H CPU 处理器进行运算,运行内存 16 GB。仿真实验中线圈电流 200 A,激励频率 186 kHz,初始温度 293.15 K。仿真检测对象为 CRH1 型车轮简化的一部分,半径为 835 mm,踏面宽度 103 mm,检测磁轭位于踏面中心位置。

1) 检测区域磁场均匀性提高

为了研究试件中感应电磁场的均匀性,使用改良磁轭传感器对试件进行激励,记录试件中电磁场和温度场的分布情况。

图 4(a) 所示为检测模型的磁通-电流密度分布及其检测对象表面磁通密度分布示意图。箭头表示磁通密度,圆锥体表示涡流分布,由图可见磁场被有效的约束在磁轭中,在试件表面形成均匀磁场。此外,检测区域的磁通密度远大于非检测区域,和理论分析一致。试件表面的电磁和涡流的方向与大小如图 4(b) 所示,场的大小和方向由箭头和圆锥体的长度和方向表示,矩形框中的区域即为检测区域。试件表面磁场方向与 y 轴平行,涡流

方向则垂直于磁场方向。试件中的电磁场主要集中于检测区域,且磁力线及涡流方向与坐标轴线平行,在检测区域中电磁场分布相对均匀。

2) 不同方向缺陷检测仿真

为了研究磁轭传感器对多角度缺陷的检测能力,进行多角度缺陷检测实验。图 5 是缺陷及其与磁轭传感器检测的相对位置关系图,缺陷位于试件中心,缺陷的长、宽、高分别为 15.0、0.2、1.0 mm,提离距离为 2 mm 且保持不变。缺陷角度是指缺陷与 x 轴的夹角,仿真重分别设置角度为 0°、45°、90°,移动速度为 65 mm/s。

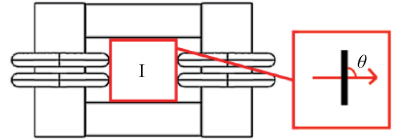


图 5 缺陷形状与传感器的相对位置

Fig. 5 Relative position between defect shape and the sensor

在感应涡流热成像检测中,不同走向的缺陷受到的干扰有所不同。图 6 为不同走向缺陷位置处的磁通与涡流路径示意图。纵向曲线表示磁通密度、水平方向曲线表示电流密度。由图 6 可知,不同走向的缺陷对磁场与涡流形成不同的扰动作用。低速动态检测条件下,当试件中存在缺陷时,缺陷处的磁导率发生突变,缺陷位置的磁场也会产生畸变。当缺陷与涡流的走向平行时,缺陷会对磁场的扰动较小。反之,当二者垂直时,缺陷会对磁场产生较大的干扰,磁场在缺陷处发生畸变,磁场的畸变会导致磁滞生热的不均匀,这是轴向缺陷较难检测的原因。

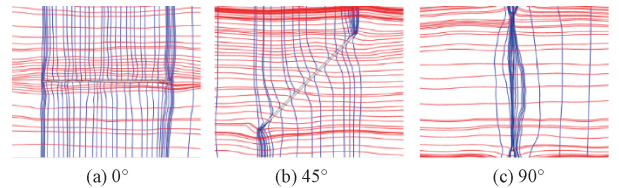
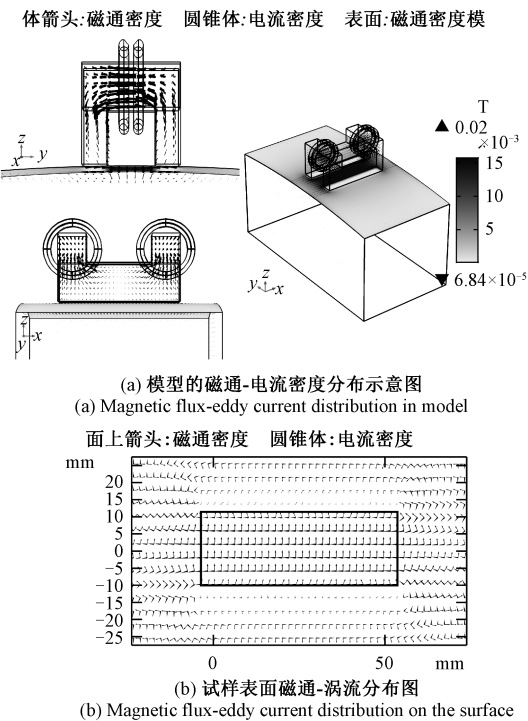


图 6 不同走向角度缺陷磁通涡流路径分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of flux eddy current path distribution of defects at different angles

图 7 是不同走向缺陷在动态激励时的表面温度分布图,其中,图 7(a)、(c)、(e) 是磁轭传感器仿真结果示意图,图 7(b)、(d)、(f) 是直导线传感器的仿真结果示意图。由图 7 可知,设计的磁轭传感检测系统可以检测到试件中所有不同走向的裂纹。裂纹区域为高温区域,且热对比度较高。此外,随着缺陷角度的增加,温度在裂纹的底部或尖端区域更加集中。随着试件的运动,热量的范围会增大。磁轭具有的较宽的激励范围为相机捕获热信息提供了有利的条件。



(a) 模型的磁通-电流密度分布示意图
(a) Magnetic flux-eddy current distribution in model

面上箭头:磁通密度 圆锥体:电流密度
(b) 试样表面磁通-涡流分布图
(b) Magnetic flux-eddy current distribution on the surface

图 4 传感器表面磁通涡流分布示意图
Fig. 4 Schematic diagram of flux eddy current distribution on sensor surface

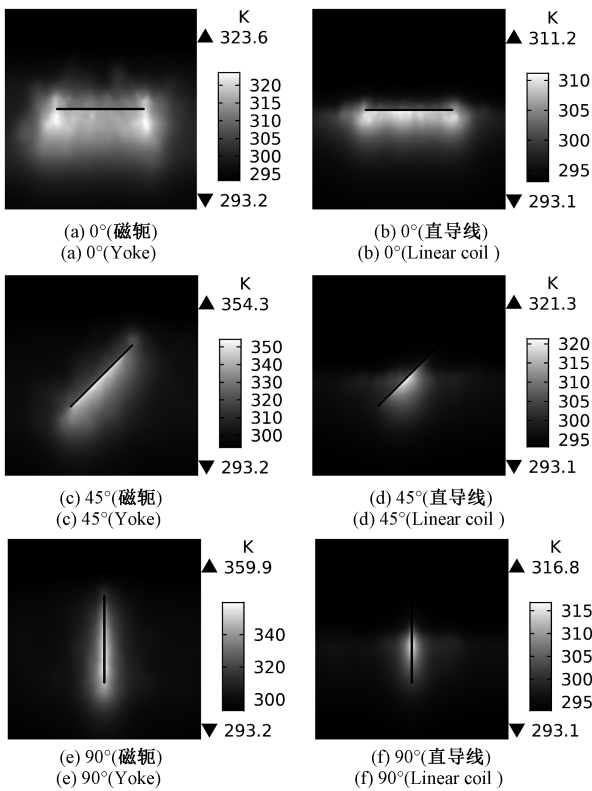


图 7 不同走向缺陷动态激励时的表面热图

Fig. 7 Surface temperature distribution map when defects at different angles dynamically heated

3 列车车轮动态检测

3.1 实验条件

基于设计的磁轭传感的电磁热成像检测系统实验平台如图 8 所示,由功率发生器、水冷设备、同步触发器、计算机、机械传动装置和计算机等部分组成。测试中使用直导线作为对照组,激励电流均为 200 A,频率为 186 kHz,检测试样为列车车轮上设置的裂纹。



图 8 电磁热成像检测系统实验平台

Fig. 8 Experimental apparatus of the electromagnetism heat imaging detection

钢轨和车轮表面受到高侧向力,因此轴向裂纹的检测尤为重要。图 9 为检测车轮上设置的裂纹相对位置示意图,表 2 为车轮裂纹的几何参数和相对位置的数值。其中, L 定义如下所示,为缺陷边缘距车轮边缘的值。

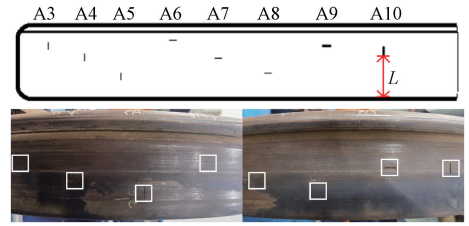


图 9 检测车轮上裂纹的相对位置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of relative position of artificial crack

表 2 缺陷尺寸和位置参数

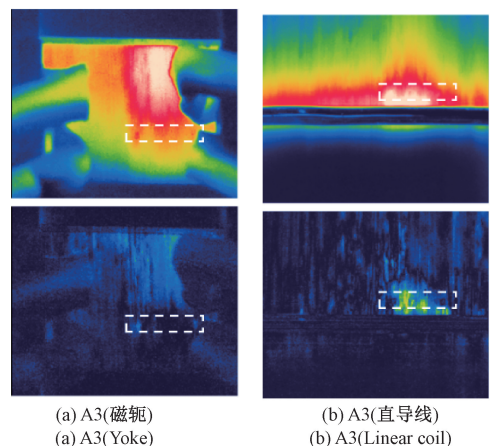
Table 2 Defect size and position parameters mm

缺陷	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
长度	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
宽度	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	2.0	2.5
L	65.0	45.0	27.0	75.0	49.0	34.0	64.0	58.0

3.2 车轮踏面裂纹检测结果

图 10 选取典型裂纹 A3 和 A7 在测试速度 65 mm/s 下的热图像,其中第 1 排是原始图像,第 2 排为通过时间差分^[23]得到的图像。实际测试结果和仿真一致,在运动方向上,热量堆积在缺陷附件。样品表面发射率和杂质会影响检测结果,通过减去背景帧的方式,可以有效的去除噪声的影响。

由于试件和传感器线圈之间有相对位置的变化,采用线扫描 (line-scanning method, LSM) 的方式处理实验的热图序列^[24]。LSM 可以大大缩短数据处理时间,而且不会丢失缺陷的有用信息。图 11 为磁轭传感检测车轮踏面表面裂纹的热成像 LSM 图,图 12 为直导线传感



(a) A3(磁轭)

(b) A3(直导线)

(a) A3(Yoke)

(b) A3(Linear coil)

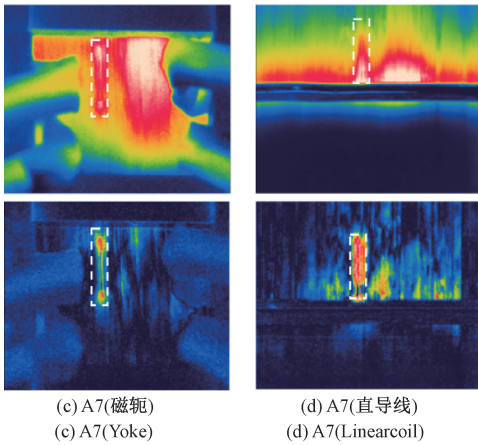


图10 不同传感器线圈实际测试结果

Fig. 10 Actual test diagram of different coils

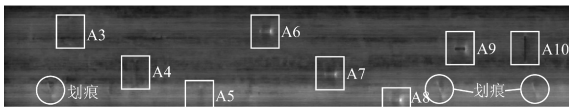


图11 磁轭传感线圈检测车轮的线扫描图

Fig. 11 Line scan of the new yoke inspection wheel

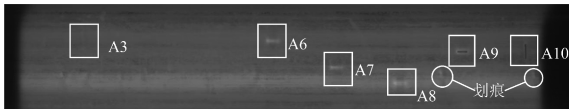


图12 直导线检测车轮的线扫描图

Fig. 12 Line scan of the linear coil inspection wheel

检测车轮踏面表面裂纹的热成像 LSM 图。可以清晰地看到,设计的磁轭传感线圈的检测效果明显优于直导线,特别是在 A3、A4、A5 三条裂纹的检测,与仿真的实验结果吻合度很高。

通过 SLM 图分析实验结果,采用信噪比和热对比度两项指标来衡量新型磁轭传感的检测效率和灵敏度。

热对比度的计算公式为:

$$TT = \frac{T_Q - T_J}{T_J - T_0} \quad (11)$$

其中, T_Q 为缺陷区域的温度, T_J 为检测区域中非缺陷区域的温度, T_0 为环境温度。

信噪比的公式表示为:

$$T_{VAR} = \text{sqrt} \frac{(T_{ij} - T_{\text{mean}2})^2}{M} \quad (12)$$

$$SNR = 20 \lg \left| \frac{T_{\text{mean}1} - T_{\text{mean}2}}{T_{VAR}} \right| \quad (13)$$

其中, $T_{\text{mean}1}$ 是缺陷处像素点的平均温度, $T_{\text{mean}2}$ 是无缺陷区域像素点的平均温度, M 为所取范围内像素点的数量, sqrt 是求取给定值的平方根。由上述公式可以得出,检测区域缺陷处的热对比度和信噪比。

从表3可以看出,针对信噪比和热对比度两项指标,设计的磁轭传感器对于车轮缺陷的检测均优于直导线传感器,图像的热对比度更高,信噪比相比直导线传感平均提高了139%。对于周向裂纹,采用磁轭线圈激励,感应涡流方向与缺陷垂直,具有最佳的检测能力。同时,周向裂纹的走向与车轮转动方向一致,激励加热时间增加,裂纹区域获得更多的焦耳热,提高了对比度。

表3 缺陷检测的热对比度值和信噪比值

Table 3 The TT value and SNR value of defect detection

探头	方法	缺陷							
		A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
直导线	TT	-	-	-	1.03	1.01	1.32	0.95	1.06
	SNR	-7.33	-4.05	-8.67	5.57	9.72	11.40	2.80	4.58
磁轭	TT	1.59	1.74	1.81	2.17	3.26	4.22	1.28	1.83
	SNR	4.27	5.54	5.43	15.09	15.49	12.59	8.58	9.40

4 结 论

本文提出了一种基于列车车轮表面裂纹动态检测的矩形磁轭传感器结构,建立了传感器的数学理论模型,进行了仿真和实验验证,并得出如下结论。

1) 分析电磁感应加热过程和推导矩形磁轭传感器磁路模型可得,传感器能有效约束磁场,用于列车车轮动态

感应热成像缺陷检测;

2) 通过构建矩形磁轭传感器数值仿真模型,解释了矩形磁轭电激励区域均匀性以及轴向缺陷难检的原因;

3) 实验验证了矩形磁轭传感器对于列车车轮缺陷检测的有效性,为列车车轮快速、有效的自动化检测提供了可能。

参考文献

- [1] LINGAMANAİK S, CHEN B K. Prediction of residual stresses in low carbon bainitic-martensitic railway wheels using heat transfer coefficients derived from quenching experiments [J]. *Computational Materials Science*, 2013, 77:153-160.
- [2] 刘颖宾, 宫彦华, 王强, 等. 列车车轮滚动接触疲劳裂纹评价研究 [J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(3):306-314.
LIU Y B, GONG Y H, WANG Q, et al. Evaluation of rolling contact fatigue crack of train wheels [J]. *Tribology*, 2020, 40(3): 306-314.
- [3] 彭建平. 涡流脉冲热成像检测铁轨滚动接触疲劳的方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
PENG J P. Research on eddy current pulsed thermography detect rolling contact fatigue crack in railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [4] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1763-1780.
TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1763-1780.
- [5] 陈刚, 彭朝勇, 张渝. 一种既有动车组车轮故障在线检测系统升级方案 [J]. *中国铁路*, 2016(3):31-35.
CHEN G, PENG CH Y, ZHANG Y. An upgrade scheme of existing EMU wheel fault on-line detection system [J]. *China Railway*, 2016(3):31-35.
- [6] 陈涛, 曹恒, 张赛, 等. 涡流检测在铝板超声缺陷检测盲区中的应用研究 [J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(7):13-16.
CHEN T, CAO H, ZHANG S, et al. Application study of eddy-current detection in blind zone of ultrasonic defect testing for aluminum-plate [J]. *Sensors and Microsystems*, 2021, 40(7):13-16.
- [7] 潘孟春, 何泽, 陈棣湘. 涡流热成像检测技术 [M]. 北京国防工业出版社, 2013: 154-156.
PAN M CH, HE Z, CHEN D X. Eddy current thermography non destructive testing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013:154-156.
- [8] 武新军, 张卿, 沈功田. 脉冲涡流无损检测技术综述 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8):1698-1712.
WU X J, ZHANG Q, SHEN G T. Review on advances in pulsed eddy current nondestructive testing technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1698-1712.
- [9] LI H R, GAO B, MIAO L, et al. Multiphysics structured eddy current and thermography defects diagnostics system in moving mode [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(4):2566-2578.
- [10] 杜博伦, 何赞泽, 杨瑞珍, 等. 电磁感应对硅光伏电池可视化检测技术的改性 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(10):158-165.
DU B L, HE Y Z, YANG R ZH, et al. Modification of visual detection for silicon photovoltaic cells based on electromagnetic induction [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(10):158-165.
- [11] 陆小龙, 田贵云, 熊龙辉, 等. 气流热成像钢轨滚动接触疲劳裂纹在线检测与速度影响研究 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(18):98-106.
LU X L, TIAN G Y, XIONG L H, et al. Study on the on-line detection and speed effect of rail RCFs using airflow thermography [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(18): 98-106.
- [12] ZHANG X, PENG J P, HE K L, et al. Nondestructive inspection of holes with distinct spacing in plate using the moving mode of induction thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 122:104045.
- [13] 马炬, 邹金慧. 铁质部件内部缺陷的脉冲涡流红外热成像检测 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(7): 137-144.
MA X, ZOU J H. Pulsed eddy current infrared thermal imaging detection of internal defects of iron components [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(7):137-144.
- [14] ZHANG K, PENG J P, YANG K, et al. Research on eddy current pulsed thermography for rolling contact fatigue crack detection and quantification in wheel tread [C]. *Wheelset Congress IEEE*, 2017:5-11.
- [15] PENG Y, HUANG S D, HE Y Z, et al. Eddy current pulsed thermography for noncontact nondestructive inspection of motor winding defects [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(5):2625-2634.
- [16] XU C H, ZHANG W Y, WU C W, et al. An improved

- method of eddy current pulsed thermography to detect subsurface defects in glass fiber reinforced polymer composites [J]. *Composite Structures*, 2020, 242: 112145.
- [17] ZHAO J, GAO B, WOO W L, et al. Crack evaluation based on novel circle-ferrite induction thermography[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(17):5637-5645.
- [18] PENG J P, TIAN G Y, WANG L, et al. Investigation into eddy current pulsed thermography for rolling contact fatigue detection and characterization [J]. *NDT & E International*, 2015, 74: 72-80.
- [19] LIU Z W, GAO B, TIAN G Y. Natural crack diagnosis system based on novel L-shaped electromagnetic sensing thermography [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(11):9703-9714.
- [20] 唐波,方旭,侯德鑫,等. 面向脉冲涡流热成像的激励电源特性研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(1): 208-215.
- TANG B, FANG X, HOU D X, et al. Exciting power supply characteristics for pulsed eddy current thermography [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(1): 208-215.
- [21] ZHENG W P, ZHANG L B, SU Y N, et al. Numerical simulation of a U-shaped ACFM inducer[J]. *Materials Transactions*, 2015, 56(5): 743-748.
- [22] XIAO X T, LIANG Z, ZHANG L, et al. Design and investigation of a two-coil magnetic core inductor used for eddy current pulsed thermography [J]. *Measurement*, 2021, 174:109063.

- [23] LIPTON A J, FUJIYOSHI H, PATIL R S. Moving target classification and tracking from real-time video [J]. *Proceedings Fourth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, 1998:8-14.
- [24] HE M, ZHANG L B, ZHENG W P, et al. Crack detection based on a moving mode of eddy current thermography method [J]. *Measurement*, 2017, 109: 119-129.

作者简介



唐思颖,2020年于湖南师范大学获得学士学位,现为西南交通大学研究生,主要研究方向为电磁感应热成像无损检测。

E-mail: siying_t@163.com

Tang Siying received her B. Sc. degree from Hunan Normal University in 2020. She is currently a master student at Southwest Jiaotong University. Her main interest is electromagnetic induction thermal imaging nondestructive testing.



彭建平(通信作者)2010年于西南交通大学获得博士学位,现为西南交通大学副教授、博士生导师,从事声学无损检测和电磁感应热成像检测。

E-mail: peng.jian.ping@126.com

Peng Jianping (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Southwest Jiaotong University in 2010. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Southwest Jiaotong University. His main research interests include acoustic nondestructive testing and induction thermography nondestructive testing.