 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i7.6708

Research on the Optimal Detection Position in RCF Crack Detection of High-Speed Railways Based on Finite Element Simulation

Yanhao Li Jianjun Liu*

Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong, 512005, China

Abstract

This study focuses on the key issue of the influence of the tailing effect on the crack detection accuracy under high-speed conditions, and deeply analyzes the influence mechanism of the tailing effect on the magnetic field distribution on the rail surface through finite element simulation technology. During the research process, the signal strength and sensitivity at different detection positions were compared in detail, and the optimal detection position was precisely located. This position can achieve higher signal strength and sensitivity, laying a foundation for the improvement of detection accuracy. Meanwhile, based on the research results, a probe structure suitable for high-speed electromagnetic non-destructive testing is proposed specifically, and its design fully considers the special requirements during high-speed operation. In the experimental phase, the structure of the probe was verified at a detection speed of 20.0 meters per second. The results showed that it could effectively quantify cracks with a depth greater than 1.0 millimeter, and both the relative error and the standard deviation were controlled within 10%.

Keywords

Shadow effect Non-destructive testing Rail; Rolling contact fatigue (RCF)

基于有限元仿真的高铁 RCF 裂纹检测中最优检测位置研究

李燕豪 刘建军

韶关学院，中国 · 广东 韶关 512005

摘 要

本研究聚焦高速工况下拖尾效应对裂纹检测精度的影响这一关键问题，通过有限元仿真技术深入剖析拖尾效应对钢轨表面磁场分布的影响机制。研究过程中，详细对比不同检测位置的信号强度与灵敏度，精准定位到最优检测位置，该位置能够获得更高的信号强度与灵敏度，为检测精度提升奠定基础。同时，基于研究成果，针对性提出适用于高速电磁无损检测的探头结构，其设计充分考虑高速运行时的特殊需求。实验环节，在 20.0 米 / 秒的检测速度下对该探头结构进行验证，结果显示其能够有效量化深度大于 1.0 毫米的裂纹，且相对误差和标准差均控制在 10% 以内。

关键词

阴影效应；无损检测；钢轨；滚动接触疲劳（RCF）

1 引言

在高速铁路运行过程中，钢轨顶面因长期承受轮轨接触作用而产生的滚动接触疲劳（Rolling Contact Fatigue, RCF）裂纹，已成为威胁铁路系统安全与稳定运行的重要问题之一。为有效识别与评估此类裂纹，国内外学者围绕钢轨表面缺陷检测技术开展了广泛而深入的研究 [1]。例如，文献 [2] 探索了利用涡流脉冲热成像（ECPT）技术对钢轨表面裂纹进行无损检测的可行性，但由于该方法需要在裂纹区域实现充分热激励，同时避免热扩散导致的图像模糊，因此对检测速度提出了较高限制。在此基础上，文献 [3] 提出了融合磁力线检测（MFL）与 ECPT 的多物理场联合检测策略，该方法不仅能够准确捕捉自然形成的钢轨表面裂纹，还展现出良好的成像质量与检测灵敏度。文献 [4] 则聚焦于动态检测环境下的

【基金项目】2025 年韶关学院省级大创项目（项目编号：S202510576030）；广东省普通高校重点领域专项（项目编号：2023ZDZX1024）；韶关市社会发展科技协同创新体系建设项目（支持科研工作者项目）（项目编号：230330178036242）；韶关学院校级重点科研项目（项目编号：SZ2024KJ06）。

【作者简介】李燕豪（2003–），男，中国广东茂名人，在读本科生，从事电子信息研究。

【通讯作者】刘建军（1980–），男，中国湖南岳阳人，博士，副教授，从事无损检测研究。

热成像表现，发现高速运动引发的涡流会在钢轨表面形成局部阴影，从而干扰温度分布，导致裂纹成像效果下降。文献 [10] 则从信号处理角度出发，利用 ECPT 技术对微小裂纹及隐藏缺陷进行检测，并结合时频分析方法提取裂纹响应特征，同时采用图像增强算法提升裂纹的可视化效果。此外，国内多家科研机构，包括电子科技大学、南京航空航天大学和中国铁道科学研究院等，联合开展了基于多物理场融合的钢轨 RCF 裂纹快速检测设备研发工作，已在实验与现场测试中取得良好成效 [5]。文献 [6] 中，研究人员设计了一种可适应钢轨表面承载状态的自适应检测机构，结合 MFL 技术开发了钢轨表面损伤检测系统，并通过手推式检测平台与轨道检测车进行了实际验证。文献 [6] 搭建了电磁热成像检测实验平台，在实验室转盘及真实钢轨环境中开展测试，引入张量分解等先进信号处理算法，有效抑制了速度效应带来的干扰，实现了对裂纹特征的准确提取。上述研究成果为钢轨 RCF 裂纹的高效检测提供了多样化的技术路径，对提升铁路系统的安全保障能力具有重要的理论与实践意义。

2 最优检测位置的仿真研究

在探头与被测试件之间发生快速相对运动的情况下，由于拖尾效应的影响，试件内部感应涡流及磁场分布将发生显著变化，与静态检测条件下的分布模式存在明显差异。这种动态变化会导致传统静态检测中认定的最佳检测位置发生偏移。为探究高速运动状态下最优检测位置的具体分布，构建了相应的有限元仿真模型，如图 1 所示。在该模型中，钢轨试件的设定厚度为 14.0 毫米。为了系统评估不同位置的检测性能，在激励线圈正下方共设置了 12 个检测点，其中 P_0 点对应于传统涡流检测方法中磁传感器的典型布置位置。在仿真过程中，分别采集了 P_1 至 P_{11} 各检测点处磁感应强度在 X 方向的分量 B_x 和 Y 方向的分量 B_Y，以全面分析磁场响应特征。此外，为进一步研究探头正下方试件表面的磁场分布情况，在激励线圈正下方的试件表面绘制了一条参考直线 L_1，并提取该直线上各点的综合磁感应强度 B_0 进行分析。仿真参数设置为：传感器提离距离为 1.0 毫米，直流激励电流为 0.1 安培。

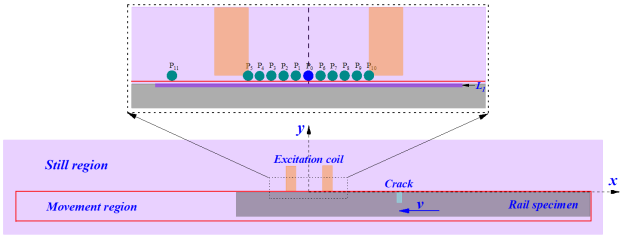


图 1 有限元仿真示意图

3 快速运动条件下最佳检测位置的选择

3.1 各检测点不同深度裂纹的检测信号

为探究不同检测位置处裂纹深度变化对磁感应强度的影响规律，本研究选取检测速度为 20.00 米 / 秒、裂纹宽度固定为 0.8 毫米、裂纹深度在 0.5 毫米至 12.0 毫米范围内的检测信号作为研究对象。通过有限元仿真，分别提取了 P_0 至 P_{11} 各检测点在不同裂纹深度条件下的磁感应强度 X 分量 B_x 与 Y 分量 B_Y，并绘制了它们随裂纹深度变化的响应曲线。图 2 展示了 P_0、P_3、P_5、P_8、P_{10} 和 P_{11} 六个典型检测位置下，B_x 和 B_Y 随裂纹深度变化的趋势。在仿真模型中，裂纹中心位置被设定在 X 轴 10.0 毫米处，以便于对比分析不同检测点对裂纹响应的敏感性与分布特征。

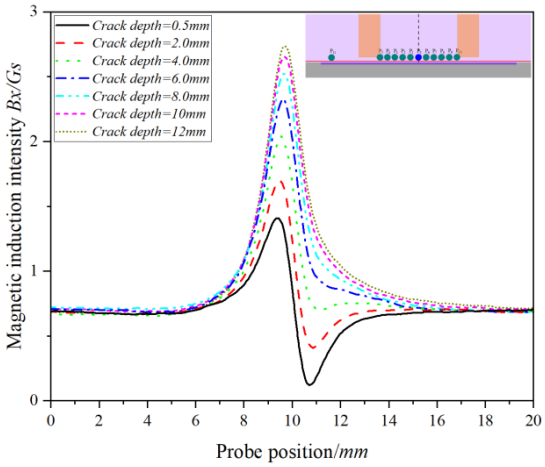


图 2 探头位置与磁感应强度的关系曲线

从图 2 可以看出，不同检测点处检测信号随裂纹深度的变化趋势存在显著差异：B_x 的基线值依次增大，在 P_5 处达到最大值。

3.2 最佳检测位置的确定

为确定最佳检测位置，本研究从各检测点提取了对应不同裂纹深度的检测信号，并计算其磁感应强度变化量 ΔB_x 与 ΔB_Y。随后，对这些变化量与裂纹深度之间的关系进行拟合分析，结果如图 3 所示。需要注意的是，由于 P_9 和 P_{10} 两个检测点的 ΔB_x 与 ΔB_Y 值与裂纹深度之间的拟合效果不理想，因此未将其纳入图 3 的展示范围。在图 3 中，纵坐标表示检测信号的变化幅度，而拟合曲线随裂纹深度变化的斜率则反映了检测信号对裂纹深度的敏感程度，即灵敏度。斜率越大，表明该检测位置对裂纹深度变化的响应越显著，检测灵敏度越高。分析结果显示，除 P_9 和 P_{10} 外，其余各检测点的 ΔB_x 和 ΔB_Y 值与裂纹深度之间均呈现出良好的二次函数拟合关系，且线性相关系数均达到 0.99 以上，表明拟合结果具有较高的可靠性。

从图 3 的分析结果可以看出，各检测点在检测信号强度与灵敏度方面表现出明显的差异性，其由低到高的排序依次为：$P_8 < P_7 < P_6 < P_0 < P_1 < P_2 < P_3 < P_4 < P_5$。这一排序表明，在受到阴影效应影响的情况下，位于 P_0 左侧的检测点（如 P_6、P_7、P_8）其信号强度与灵敏度随位置逐渐向左移动而逐步增强；而位于 P_0 右侧的检测点（如 P_3、P_4、P_5）则呈现

出相反的趋势，即信号强度与灵敏度随位置向右移动而逐渐减弱。其中，P_5 点在信号强度和检测灵敏度两方面均表现出最优性能，成为所有检测点中的最佳选择。此外，P_{11} 点虽然其检测灵敏度介于 P_0 和 P_5 之间，但由于该位置距离激励线圈较远，导致其整体检测信号强度明显低于 P_0 和 P_5。值得注意的是，图 3 中所呈现的检测灵敏度排序与图 13 中的结果完全一致，即 $P_8 < P_7 < P_6 < P_0 < P_1 < P_2 < P_3 < P_4 < P_5$，进一步验证了该排序结果的可靠性。综合信号强度与灵敏度两方面的表现，最终确定 P_5 点为最优检测位置，可有效提升裂纹检测的精度与可靠性。

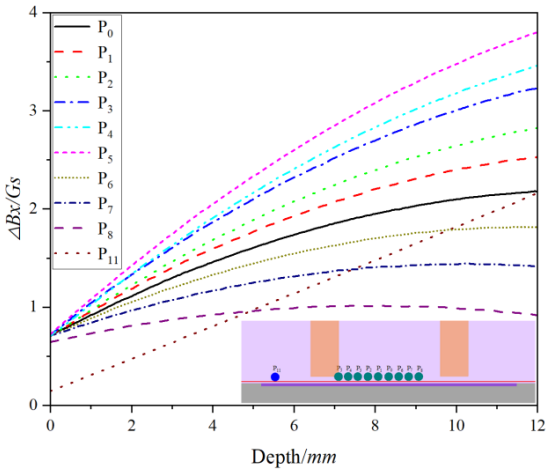


图 3 各检测点处差值峰值与裂纹深度的拟合曲线

4 实验结果分析与讨论

为验证前述仿真分析结果的可靠性，本文构建了相应的实验探头结构，其具体设计如图 4 所示。在该实验装置中，共配置了 8 个霍尔传感器，其中编号为 0#、1#、2# 和 3# 的传感器用于采集 X 轴方向的磁感应强度信号，并将其转换为电压信号 V_x 输出；而编号为 0*、1*、2 和 3 的传感器则用于获取 Y 轴方向的磁感应强度信号，并将其转化为电压信号 V_Y 输出。实验中设置了两种传统探头结构，分别对应于探头 1 和探头 3。在仿真模型中，磁传感器的位置由检测点替代，但在实际物理实验中，必须考虑传感器本身的体积与布局，因此，在设计探头 2 和探头 3 时，特别将霍尔传感器 2# 和 2 布置在尽可能靠近激励线圈边缘的位置，即对应于仿真中的 P_5 检测点。需要特别说明的是，在转盘旋转过程中，裂纹依次经过探头 2（或探头 3）内部霍尔传感器的顺序为：0#、1#、2# 和 3#（或 0*、1*、2 和 3），这一顺序对于信号采集与后续分析具有重要意义。

在进一步明确最佳检测位置的过程中，基于前述分析结果，确定将霍尔传感器布置于 P_5 点可实现最优检测性能。实验设置中，霍尔传感器与激励线圈及钢轨表面之间的提离距离设定为 1 毫米。在此基础上，针对不同检测速度条件下各霍尔传感器输出的 ΔV_x 和 ΔV_Y 信号变化趋势进行了系统采集与分析，结果如图 5 所示。在该图中，横坐标表示霍尔传感器在探头结构中的相对位置，用于反映传感器在空间上的分布情况；纵坐标则表征各传感器在不同裂纹深度下所获取的 ΔV_x 和 ΔV_Y 信号强度，即检测信号的输出幅度。同一横坐标位置上不同纵坐标值的变化幅度，体现了该位置处霍尔传感器对裂纹深度变化的敏感程度，也即检测灵敏度与分辨率。

参考文献

[1] Ramanan Vikram,Ramankutty Anusai,Sreedeep Sharan,Chakravarthy S. R.. “Dynamical states of thermo-acoustic system with respect to frequency–phase relationship based on probabilistic oscillator model,” Nonlinear Dynamics, Vol.110,No.2,pp.1633-1649,2022, https://doi.org/10.1007/s11071-022-07693-z

[2] Zhang, X,Sun, TT,Wang, Y,Wang, KW, Shen, Y. ,“A parameter optimized variational mode decomposition method for rail crack detection based on acoustic emission technique,” *Nondestructive Testing and Evaluation*,Vol.36, No.4,pp.411-439,2021, https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1785447

[3] Jiang, Y, Gao, HB, Zhang, Q , Zhang, SJ , Li, X, Li, Z.,“Evaluation of fatigue cracks on rail material based on laser nonlinear wave modulation and adaptive particle swarm optimization-support vector machines,” *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol.38,No.5,pp.713-731,2023, https://doi.org/10.1080/10589759.2022.2159961

[4] Shen, J, Zhou, L, Rowshandel, H, Nicholson, GL, Davis, CL. ,“Prediction of RCF clustered cracks dimensions using an ACFM sensor and influence of crack length and vertical angle,” *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol.35,No.1,pp.1-18,2020, https://doi.org/10.1080/10589759.2019.1611817

[5] Zhang, J,Yu, P,Gang, T. ,“Measurement of the ultrasonic scattering matrices of near-surface defects using ultrasonic arrays,” *Nondestructive Testing and Evaluation*,Vol.31,No.4, pp.303-318,2016, https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1093626

[6] J. Wilson, G. Tian, I. Mukriz, “PEC thermography for imaging multiple cracks from rolling contact fatigue,” *NDT & E International*, Vol.44,No.6pp.505-512,2011, https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.05.004