

基于交流电磁场的轨面疲劳裂纹量化检测方法研究

王 驰^{1,2}, 周 宇^{1,2}, 未娜超^{1,2}, 翁之意^{1,2}, 刘加华³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804;

3. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 201103)

摘要: 针对交流电磁场检测响应特征与轨面触疲劳裂纹尺寸参数对应关系不明确的问题, 在对钢轨滚动接触疲劳裂纹现场多次取样观测的基础上, 对交流电磁场检测响应特征对轨面疲劳裂纹参数的响应规律进行了研究; 通过建立钢轨一裂纹一空气交流电磁场检测激励与响应计算模型分析交流电磁场对裂纹参数的响应情况, 在综合考虑轨面裂纹各尺寸参数对交流电磁响应影响的条件下基于线性插值与三次样条插值提出了轨面疲劳裂纹参数量化检测方法; 基于函数波信号发生器、锁相放大器与数字信号采集仪搭建了轨面疲劳裂纹检测实验台, 并通过制备激励测量探头与符合轨面疲劳裂纹形态分布特点的试样样本展开实验验证; 研究结果表明: 所提出的轨面疲劳裂纹参数量化检测方法能够有效地实现裂纹参数的量化表示, 为轨面疲劳裂纹的防治奠定基础。

关键词: 钢轨伤损; 滚动接触疲劳; 空间斜裂纹; 交流电磁场检测; 无损检测

Quantification Detection Method for Rail RCF Cracks Based on Alternative Current Field

WANG Chi^{1,2}, ZHOU Yu^{1,2}, WEI Nachao^{1,2}, WENG Zhiyi^{1,2}, LIU Jiahua³

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji university, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: In order to solve unclear corresponding relationship between the response characteristics of alternative current field measurement and the size parameters of rail contact fatigue cracks, and based on the field sampling and observation of rail rolling contact fatigue (RCF) cracks, the response law of alternative current field measurement response characteristics on the parameters of rail fatigue cracks is studied. By establishing a calculation model for the excitation and response of rail cracks and alternative current field, the response law of alternative current field to crack parameters is analyzed. Based on linear interpolation and cubic spline interpolation, a quantitative detection method for rail fatigue crack parameters is proposed by comprehensively considering the influence of rail crack dimensions on the alternative current field measurement. Based on function wave signal generator, phase-lock amplifier and digital signal acquisition instrument, a rail RCF crack detection test platform is built, the excitation measurement probe is prepared, and the samples that meet the characteristics of fatigue cracks on the track surface are verified. The results show that the proposed quantification method of rail RCF cracks based on alternative current field measurement can effectively quantify the crack parameters, which lay a foundation for the prevention and control of rail RCF cracks.

Keywords: rail damage; rolling contact fatigue; spatial oblique crack; alternative current field measurement; non-destructive testing

收稿日期: 2024-11-21; 修回日期: 2024-12-26。

基金项目: 国家自然科学基金(51878661); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(L2021G002); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2023024); 中央高校基本科研业务费(2022-5-ZD-04)。

作者简介: 王 驰(1995-), 男, 博士研究生。

周 宇(1976-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 王 驰, 周 宇, 未娜超, 等. 基于交流电磁场的轨面疲劳裂纹量化检测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4): 82-88, 101.

0 引言

钢轨滚动接触疲劳 (RCF, rolling contact fatigue) 裂纹是由过大的剪切应力与牵引力共同作用产生的, 分布在钢轨靠近轨面的浅表层, 如果未及时进行检测与评估, 可能会造成剥离掉块甚至可能与其他因素共同作用造成断轨等严重后果^[1]。裂纹的发展随轨道交通服役寿命增长而波动变化, 受轮轨接触关系、蠕滑、磨耗、自然环境条件如温度、湿度、油液等因素共同影响, 在钢轨全生命周期呈动态发展, 裂纹形态较为复杂^[2-3]。裂纹常分布于轮轨接触位置, 通常以轨距角斜裂纹的形式以单裂纹或簇状裂纹出现^[4]。文献 [5] 通过步进式切割观测发现半椭圆能够较好地描述钢轨 RCF 裂纹特征。文献 [6] 通过 CT 扫描的形式来观测钢轨 RCF 裂纹尖端形态特征, 通过尖端拟合发现半椭圆能够较好地描述裂纹尖端的形态特征。在对于钢轨 RCF 裂纹的表征方面, 半椭圆形态描述在对 RCF 裂纹的检测研究中被广泛接受^[7-10]。

当前, 应用于现场钢轨的日常检测手段主要包括超声检测与视觉检测^[11-13]。但超声检测对于距轨面小于 4 mm 的伤损灵敏度较差, 难以有效识别钢轨 RCF 裂纹。而视觉检测只能从轨面裂纹开口长度等钢轨 RCF 裂纹在轨面的特征依据经验估算裂纹的内部深度, 难以获得较为精确的裂纹形态参数分布情况。因此, 钢轨 RCF 裂纹的量化检测技术亟待进一步研究。目前对于钢轨 RCF 裂纹的检测方法的研究主要以电磁学方法为主。电磁学检测方法通过对轨面施加电磁激励, 将裂纹的形态参数转换为轨面附近电磁参数的响应, 然后通过电磁响应反向分析裂纹参数。目前对于裂纹检测的主要电磁学手段包括电涡流检测 (EC, eddy current testing)^[14-15]、漏磁检测 (MFL, magnetic flux leakage testing)^[16-17] 与交流电磁场检测 (ACFM, alternative current field measurement)^[18-19] 几种。电磁学检测方法激励测量原理较为接近, 均为在钢轨表面施加电或磁激励, 通过观测裂纹附近的磁场变化情况来分析裂纹的形态参数分布情况。相较于 EC 与 MFL 检测, ACFM 通过施加均匀分布的交变电流, 在钢轨表面感生出均匀分布的感生电流, 其感生磁场具有分布均匀、原理清晰, 磁场畸变与裂纹参数对应较好等优点。对于 ACFM 检测方法, 由于裂纹的存在, 导致介质的电导率与磁导率在裂纹附近急剧减小, 因此导致感生电流在裂纹附近产生畸变, 畸变的大小与位置与裂纹尺寸参数有关。ACFM 技术已在管道^[20-21]、石油平台^[22-23] 等方面的探伤有了大量的应用。

国内外学者对于钢轨 RCF 裂纹的 ACFM 激励测量及其响应分析已进行了多项研究分析。文献 [24] 根据

均匀场激励建立了 ACFM 的理论模型, 从理论解析方面分析交流电磁场响应情况, 但由于裂纹形态的复杂性, 其计算结果与实际结果间存在一定的偏差。文献 [9-10] 基于对退役钢轨切割观测以及经验估计的裂纹参数建立了 ACFM 快速计算模型, 并计算交流电磁场的响应情况, 其模型计算结果与实验结果较为接近, 并且通过面电流激励代替扫描, 大大减小了计算模型的计算量。文献 [19] 通过磁场畸变量的峰谷值估计裂纹的长度与深度, 通过简单的裂纹参数与 ACFM 响应特征一一对应关系进行裂纹参数的评估, 对垂直于试件表面的裂纹有较为合理的评估。文献 [25] 针对钢轨 RCF 裂纹具有较浅的内部倾角这一现象通过 45° 检测线 ACFM 响应 B_z 分量峰谷值比随裂纹内部倾角大小变化的情况, 在忽略了其他对 ACFM 响应特征影响较弱的裂纹参数情况下实现了裂纹内部倾角的识别。

然而, 由于服役过程中钢轨的破坏性取样具有周期长、难度大、需要多部门协作等困难, 以上检测常通过经验估计或退役钢轨取样观测开展, 但钢轨 RCF 裂纹随通过总重增大处于动态演化过程中。因此为了更好地研究钢轨 RCF 裂纹参数的 ACFM 检测, 进行钢轨全生命周期裂纹形态参数的分布范围多次取样观测。此外, 对于裂纹内部参数的量化表示也是影响钢轨 RCF 裂纹 ACFM 现场应用的主要问题。因此, 建立裂纹-钢轨-空气 ACFM 计算模型, 分析 ACFM 对于裂纹参数的响应规律; 基于响应规律提出钢轨 RCF 裂纹内部参数估算方法, 通过 ACFM 响应实现裂纹内部参数的估算; 搭建钢轨 RCF 裂纹参数的 ACFM 实验平台, 验证 ACFM 计算模型与裂纹内部参数估算方法; 为钢轨 RCF 裂纹参数的检测与识别奠定基础。

1 钢轨滚动接触疲劳裂纹仿真计算模型设置

1.1 钢轨 RCF 裂纹形态及其参数范围

在某重载铁路曲线半径为 500 m 的区域由新轨上道至通过总重 320 百万吨 (MGT, million gross ton) 退役下线过程中进行了 8 次取样观测, 取样时通过总重分别为 10、30、62、100、150、200、275 与 320 MGT。对于取样的钢轨裂纹样本首先进行如图 1 所示的 X 射线检测来确定裂纹的尖端形态。X 射线观测结果与文献 [5-6] 结果一致, 半椭圆能够对钢轨 RCF 裂纹有较为准确的描述。于是裂纹的尖端形态可以由图 1 所示的半椭圆参数表面开口长度 SL 、内部倾角 IA 与口袋深度 PL 近似表示。实践中, 通常采用椭圆比 $ER (SL/PL/2)$ 代替 PL , 可以在表示口袋深度的基础上进一步表示裂纹口袋深度与表面开口长度间的关系。

裂纹半椭圆参数分布情况统计如表 1 所示。钢轨 RCF 裂纹区别于其他应力腐蚀裂纹, 普遍具有较大的

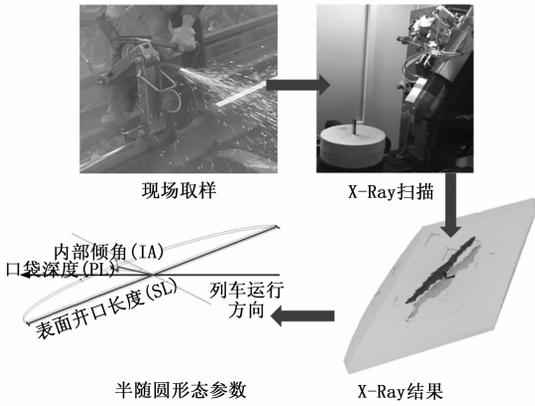


图 1 裂纹形态参数的确定

表面开口长度，与轨面间夹角较小，口袋深度显著小于表面开口长度。因此裂纹多阶段半椭圆参数分布范围得到确定，可在此基础上建立 ACFM 仿真计算模型。

表 1 钢轨 RCF 裂纹半椭圆参数分布范围

裂纹参数	取值范围
表面开口长度 SL/mm	17.2~25.0
椭圆比 ER	1.8~6
内部倾角 IA/(°)	9.1~38.3

1.2 钢轨 RCF 裂纹 ACFM 响应模型

ACFM 通过施加均匀分布的交变电流激励在钢轨近表面感生出与激励电流同频的均匀交变电流，受集肤效应影响，感生电流主要分布在钢轨近表面集肤层 δ 中：

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (1)$$

其中： δ 为集肤层的厚度， $\omega = 2\pi f$ 为角频率， f 为激励频率， μ 为磁导率， σ 为电导率。

由于感生电流主要分布在集肤层内，因此考虑施加阻抗边界条件计算感生电流路径变化导致的 ACFM 磁

场畸变。阻抗边界条件在复频域可以表示为：

$$\sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} n \times H + E - (n \times E) n = (n \times E_s) n - E_s \quad (2)$$

其中： $\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12}$ F/m 为真空介电常数， ϵ_r 为相对介电常数，良导体介电常数可以近似为真空介电常数，即 $\epsilon_r = 1$ ， j 为复数单位， n 为计算区域外法线方向， H 为磁场强度， E 为电场强度， E_s 为源电场强度。

如图 2 所示，对于垂直于试件表面的裂纹，阻抗边界条件仅在集肤层中进行计算，可以很好地代替电流分布情况，从而大大降低计算量。然而，如表 1 所示，钢轨滚动接触疲劳裂纹具有较小的内部倾角，在裂纹壁靠近轨面部分，由于裂纹壁直接至轨面距离较小，因此存在部分区域不适用阻抗边界条件。并且内部倾角越小，阻抗边界条件带来的误差越大。

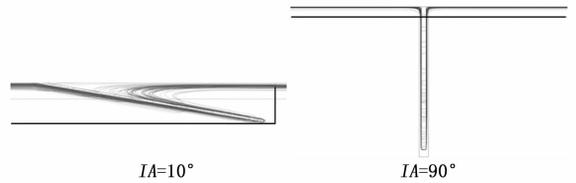


图 2 不同内部倾角情况下感生电流分布情况

于是，对于钢轨 RCF 裂纹这种具有较小内部倾角的裂纹应采用全尺寸网格计算，即综合考虑裂纹域、钢轨域与空气域建立钢轨 RCF 裂纹 ACFM 响应计算模型。全网格计算模型如图 3 所示。

为了减少计算单元数目，在观测域、集肤层、裂纹域等规则区域采用结构化网格划分。此外，由于感生电流主要集中在集肤层内，因此对集肤层所在区域进行网格加密。整体上，最大计算单元数目不超过 10^6 级。激励电流以均匀面电流形式施加在空气域上表面，感生电流由于裂纹域电导率急剧降低，在裂纹两端点附近更加密集。因此 ACFM 磁场畸变 x 方向（裂纹开口方向）分量 B_x 在裂纹两端点取得峰值。在裂纹域附近，

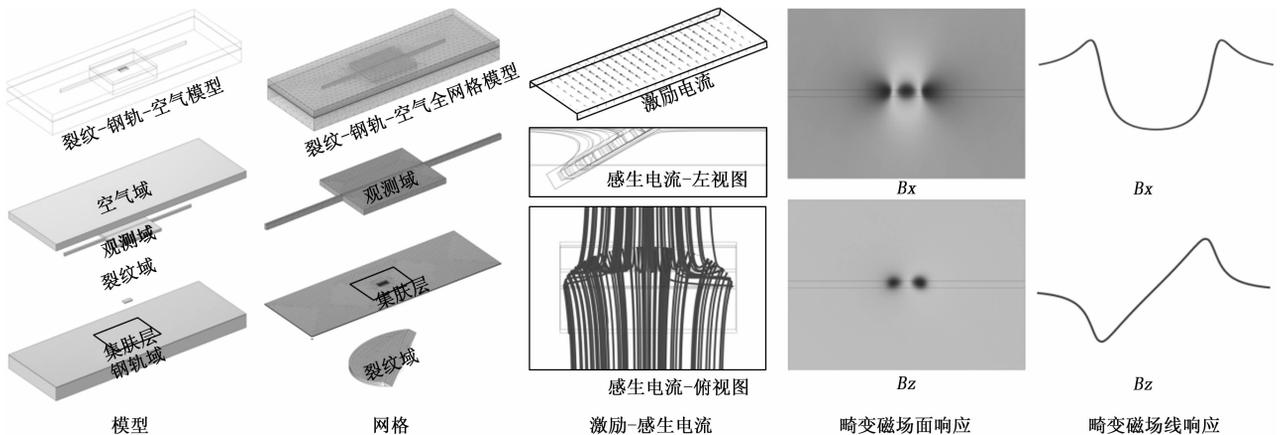


图 3 钢轨 RCF 裂纹全网格计算模型及 ACFM 响应

感生电流沿裂纹壁向钢轨内部流动, 在裂纹中点位置感生电流距轨面距离最远, 并且感生电流密度减少也最为显著, 于是 B_x 分量在裂纹中点取得谷值。此外, 由于感生电流在靠近裂纹两端点处绕裂纹流动, 从而分别产生感生电流的顺时针与逆时针旋转, 因此 ACFM 磁场畸变在垂直于轨面的 z 方向分量 B_z 在两端点附近分别取得峰谷值。

B_x 与 B_z 峰谷值大小受裂纹参数影响, 当不存在裂纹时, 感生均匀电流路径不变, B_x 为一恒定值, B_z 为 0。 B_x 与 B_z 峰谷值随裂纹参数的变化而变化。

为了更好地描述 B_x 变化量, 通过

$$\Delta B_x = \frac{B_x - B_{xref}}{B_{xref}} \times 100\% \quad (3)$$

其中: ΔB_x 为畸变磁场线结果 B_x 的变化量相较于未受裂纹影响区域的比率, B_{xref} 为未受裂纹影响区域的磁场响应 x 方向分量。

2 交流电磁场响应特征与参数识别

2.1 交流电磁场响应特征

为了更好地覆盖裂纹参数范围, 设置表 2 作为钢轨 RCF 裂纹参数, 代入图 3 所示的模型, 计算交流电磁场畸变响应情况。

表 2 计算模型中裂纹半椭圆参数设置

裂纹参数	取值
表面开口长度 SL/mm	5, 10, 15, 20, 25
椭圆比 ER	2, 3, 4, 5, 6
内部倾角 $IA/(^\circ)$	10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 90

如图 3 所示, ACFM 磁场畸变量响应 B_x 与 B_z 分量在裂纹两端点及裂纹中点响应最显著, 对应 B_x 与 B_z 的峰谷值。于是提取 B_x 与 B_z 峰谷值作为钢轨 RCF 裂纹的 ACFM 响应特征。由于两侧感生电流旋转作用相同, 方向相反, 因此 B_z 峰谷值大小相等, 符号相反。于是钢轨 RCF 裂纹的 ACFM 显著响应特征可以表示为 B_x 峰值变化量 ΔB_{xp} , B_x 谷值变化量 ΔB_{xv} 及 B_z 峰值 B_{zp} 。 ΔB_{xp} 与 ΔB_{xv} 为畸变前后磁场变化量的比值, 为无量纲变量, 不易受其他因素影响。由于 B_z 无裂纹时为 0, 无法去除其量纲。因此此处着重分析 B_x 变化量的响应特征情况。

图 4 为 ΔB_{xp} 与 ΔB_{xv} 随裂纹参数变化情况, 由于裂纹表面开口长度 SL 便于由轨面直接观测、 B_x 峰峰值间距或 B_z 峰谷值间距测量得到, 因此钢轨 RCF 裂纹参数的检测实际上应为椭圆比 ER 与内部倾角 IA 的识别。 ΔB_{xp} 与 ΔB_{xv} 随裂纹表面开口长度 SL 变化情况如图 5 所示, ΔB_{xp} 随 SL 增大近似线性增大, ΔB_{xv} 随 SL 增大呈非线性变化, 但整体上变化规律清晰, 可以近似进行

分段线性表示。为椭圆 ER 比与内部倾角 IA 的识别提供了基础。

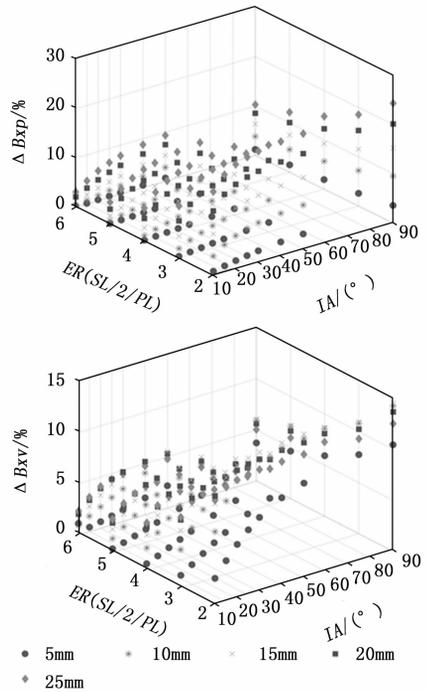


图 4 ΔB_{xp} 与 ΔB_{xv} 随裂纹参数变化情况

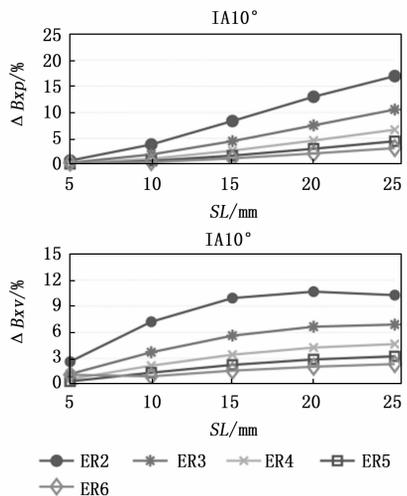


图 5 ACFM 响应特征随表面开口长度变化情况 ($IA=10^\circ$)

2.2 钢轨裂纹内部参数估算方法

对 SL 进行分段线性表示, 当 SL 由表面观测、 B_x 峰峰值或 B_z 峰谷值观测得到后, ΔB_{xp} 与 ΔB_{xv} 就 SL 进行线性插值获得 ΔB_{xp} 与 ΔB_{xv} 随 ER 与 IA 的响应情况。线性插值方法如式 (4) 所示:

$$\begin{cases} \Delta B_{xpi} = \Delta B_{xp0} + \frac{\Delta B_{xp1} - \Delta B_{xp0}}{SL_1 - SL_0} (SL_i - SL_0) \\ \Delta B_{xvi} = \Delta B_{xv0} + \frac{\Delta B_{xv1} - \Delta B_{xv0}}{SL_1 - SL_0} (SL_i - SL_0) \end{cases} \quad (4)$$

其中： SL_i 为所观测到的 SL 取值， $SL_1 > SL_0$ 分别为表 2 中靠近 SL_i 的两值。 ΔBxp_1 、 ΔBxp_0 、 ΔBxv_1 、 ΔBxv_0 为 SL_1 与 SL_0 所对应的 ΔBxp 与 ΔBxv 结果。 $\Delta Bxpi$ 与 $\Delta Bxvi$ 为线性插值得到的 SL_i 对应的 ΔBxp 与 ΔBxv 结果。

这里，取不包括在表 2 的裂纹参数进行试算，所取参数列于表 3 中。根据表 3 中 SL 的取值按照式 (4) 进行 ΔBxp 与 ΔBxv 插值。为了获得 ACFM 随 ER 与 IA 变化的更多细节，对 ΔBxp 与 ΔBxv 结果进行 3 次样条插值。这里以表 3 中裂纹 1 为例进行说明。

表 3 试算裂纹半椭圆参数设置

序号	SL/mm	ER	$IA/(^\circ)$
1	12	3	45
2	18	2.5	15

图 6 为经过线性插值与三次样条插值的 ΔBxp 与 ΔBxv 结果，数据点表示与图 4 一致，网格为插值得到的 ΔBxp 与 ΔBxv ， $\Delta Bxpo$ 与 $\Delta Bxvo$ 为测量得到的裂纹 1 对应的 ΔBxp 与 ΔBxv 。

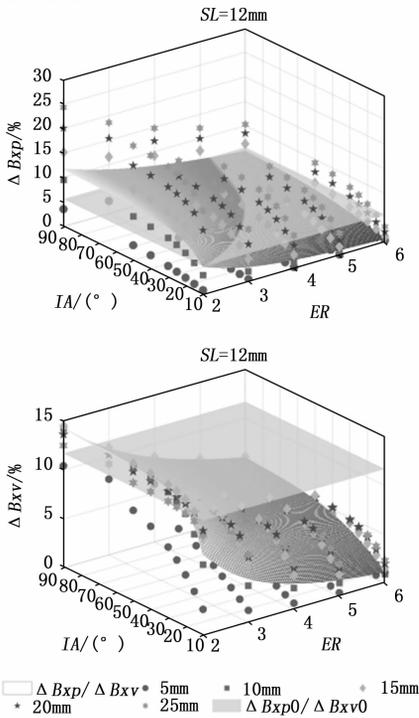


图 6 裂纹 1 ΔBxp 与 ΔBxv 分布情况

待求解的 ER 与 IA 同时满足 ΔBxp 、 ΔBxv 与 $\Delta Bxpo$ 、 $\Delta Bxvo$ 的两条交线。因此可以通过两交线的交点确定 ER 与 IA 的值。此外，两交线可以表示为：

$$\begin{cases} |\Delta Bxp - \Delta Bxpo| \leq t \\ |\Delta Bxv - \Delta Bxvo| \leq t \end{cases} \quad (5)$$

在 ΔBxp 、 ΔBxv 连续的情况下， t 应当取 0，这里由于采用样条插值结果，于是此处 t 取 0.1。

表 3 中裂纹交线与交点如图 7 所示，对于裂纹 1，交点位置 ER 约为 2.9， IA 约为 42° 。对于裂纹 2， ER 约为 2.4， IA 约为 13° 。估算得到的 ER 与 IA 预设置结果接近，因此通过估算方法能够大致确定裂纹内部参数 ER 与 IA 的情况。

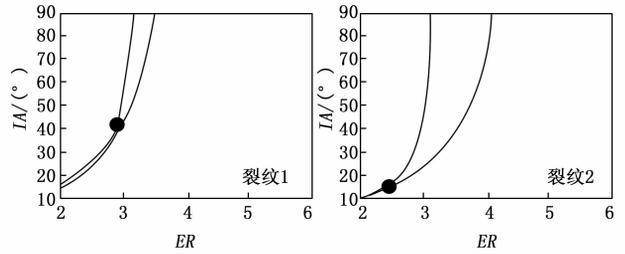


图 7 ΔBxp 、 ΔBxv 与 $\Delta Bxpo$ 、 $\Delta Bxvo$ 在裂纹 1、2 的交线

3 裂纹交流电磁场检测试验台设计

3.1 试验台设计

交流电磁场检测实验台是执行交流电磁场激励、测量与验证模型与内部参数估算方法计算数据准确性的基础。如图 8 所示，钢轨 RCF 裂纹 ACFM 检测平台主要包括激励与测量两大部分。

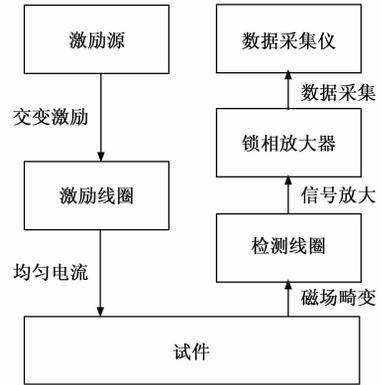


图 8 钢轨 RCF 裂纹 ACFM 检测平台原理图

激励部分，根据式 (1)，激励频率的大小与集肤深度成反比，当激励频率较小时，集肤深度较大，对于亚表面裂纹检测能力增强但灵敏度有所降低。当激励频率较大时，集肤深度较小，检测灵敏度大。待检测的钢轨 RCF 裂纹常分布于轨面，因此出于检测灵敏度考虑，应尽量增大激励频率。但过大的激励频率会导致轨面粗糙度影响 ACFM 响应信号。因此，综合选择 10 kHz 作为激励频率。激励信号采用正弦交变激励，由函数波信号发生器生成激励信号，作用于激励线圈。从而在钢轨表面产生均匀分布的感生电流。

ACFM 磁场畸变信号的拾取方面，目前磁场检测传感器主要有霍尔效应传感器 (HALL)，巨磁阻传感器 (GMR, giant magneto resistance)、各向异性磁阻传感器 (AMR, anisotropic magneto resistance)、隧道磁

阻传感器 (TMR, tunnel magneto resistance) 及拾取线圈几种。与 HALL、GMR、AMR 与 TMR 传感器相比，拾取线圈无需外加电源激励，磁场检测范围大、线性度好。此外，HALL、GMR、AMR、TMR 传感器有较大的体积，相当于对传感器检测面面积中的磁通量做了平均，因而产生面积效应，影响检测准确性。因此此处选择拾取线圈作为磁场检测传感器。

钢轨 RCF 裂纹 ACFM 检测台如图 9 所示，由于 ACFM 磁场畸变信号幅值较小，因而在拾取线圈中的感生电动势较低，可能被检测过程中其他外界干扰所影响，因此此处选择锁相放大器对信号拾取线圈所转化的电压信号进行锁相放大。锁相放大执行后，仅与响应信号同频同相的信号得以保留并放大。放大后的信号接入数据采集仪进行采集。激励源、锁相放大器与数据采集仪分别为 Tektronix AFG1022 函数波信号发生器、斯坦福 SR830 锁相放大器与 INV3062T 数据采集仪。

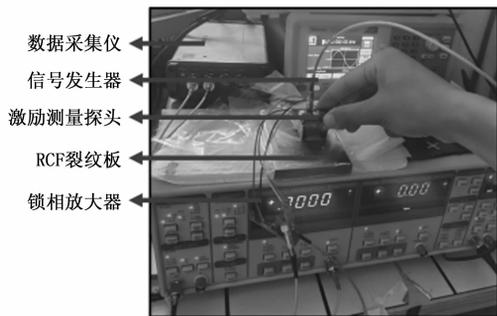


图 9 钢轨 RCF 裂纹 ACFM 检测台

3.2 ACFM 探头设置

钢轨 RCF 裂纹 ACFM 探头也包含激励与测量两部分。信号源产生的激励信号作用于激励线圈，从而产生均匀分布的交变磁场，受交变磁场影响，钢轨表面产生感生均匀电流。

自制的 ACFM 激励测量探头如图 10 所示。为了尽可能地增加感生均匀电流，从而减小畸变磁场观测的难度，选择将激励线圈均匀绕制在 U 型铁氧体磁芯上，激励线圈产生的磁力线经磁芯进入轨面，从而可以降低在传播过程中空气磁阻过大导致的衰减。激励线圈采用线径为 0.35 mm 的漆包线绕制。测量线圈位于 U 型磁芯开口方向底部中心位置，与裂纹表面开口位置的距离

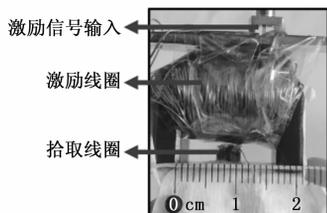


图 10 ACFM 探头设置

尽可能小，从而更好地拾取裂纹的 ACFM 磁场畸变响应。为了尽可能缩小检测线圈过大带来的面积效应的影响，拾取线圈采用 0.07 mm 线径漆包线绕制。

4 实验结果与分析

4.1 裂纹参数实验设置

所加工的 RCF 裂纹板如图 11 所示，裂纹加工在钢轨取样样本上，共加工 4 条裂纹，裂纹厚度为 0.3 mm，裂纹板所加工裂纹参数如表 4 所示。根据 2.1 与 2.2 节所述，裂纹参数可以通过 ACFM 响应 B_x 分量的峰谷值变化量 ΔB_{xp} 与 ΔB_{xv} 进行计算得到，因此仅需沿裂纹开口方向扫描 B_x 响应峰谷值即可。如图 9 所示，使用 ACFM 检测台对加工的 RCF 裂纹板沿裂纹开口方向搜索由裂纹存在所导致的 ACFM 磁场畸变 B_x 分量的峰谷值，其响应情况 ΔB_{xpm} 与 ΔB_{xvm} 如表 5 所示。

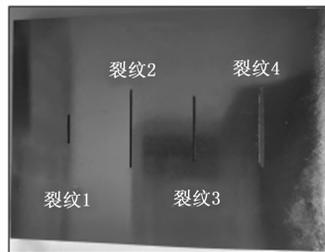


图 11 加工 RCF 参数裂纹

表 4 RCF 裂纹板加工裂纹参数

序号	SL/mm	ER	IA/(°)
1	10	2	30
2	25	4	45
3	20	2	30
4	24	3	25

4.2 实验结果与仿真计算结果对比

为了验证图 3 所示的计算模型，首先将表 4 中裂纹半椭圆参数代入计算模型中，计算 ΔB_{xp} 与 ΔB_{xv} ，计算得到的结果记为 ΔB_{xpc} 与 ΔB_{xvc} 。对加工的裂纹板进行 ACFM 测试，测试得到的 ΔB_{xp} 、 ΔB_{xv} 分别记为 ΔB_{xpm} 、 ΔB_{xvm} 。计算结果与测试结果如表 5 所示。

表 5 模型计算与实验测试结果

序号	$\Delta B_{xpc} / \%$	$\Delta B_{xvc} / \%$	$\Delta B_{xpm} / \%$	$\Delta B_{xvm} / \%$
1	7.95	13.07	5.95	8.91
2	13.46	7.16	9.29	5.35
3	18.38	13.29	13.59	9.14
4	13.98	9.10	9.88	6.25

由表 5 可以看出，模型计算结果与实验测试结果间有较大的差异。这是由于模型与实验中探头提高高度、钢轨材料电导率、磁导率有差异造成的。对模型计算结果与实验测试结果进行模型拟合，结果如图 12 所示。

模型计算结果与实验测试结果间存在 0.71 左右的线性转换系数。在进行线性转换后, 最大误差小于 0.6%。表明图 3 所示的计算模型能够较为精确地计算裂纹参数与 ACFM 畸变磁场响应间的关系。在此基础上, 结合式 (5) 进行 ER 与 IA 的估算。

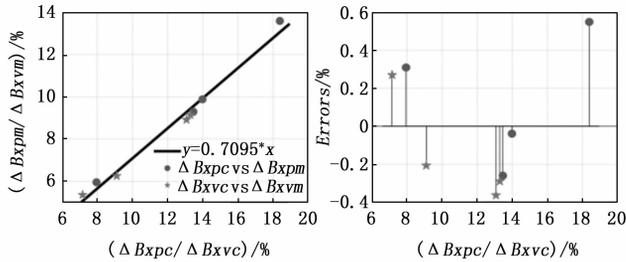


图 12 模型计算结果与实验测试拟合结果

4.3 内部倾角与椭圆比估计

按照式 (5) 与图 6~7 所示方法估算裂纹椭圆比与内部倾角。 ΔBxp 、 ΔBxv 与 $\Delta Bxpo$ 、 $\Delta Bxvo$ 对各裂纹的交线与交点如图 13 所示。

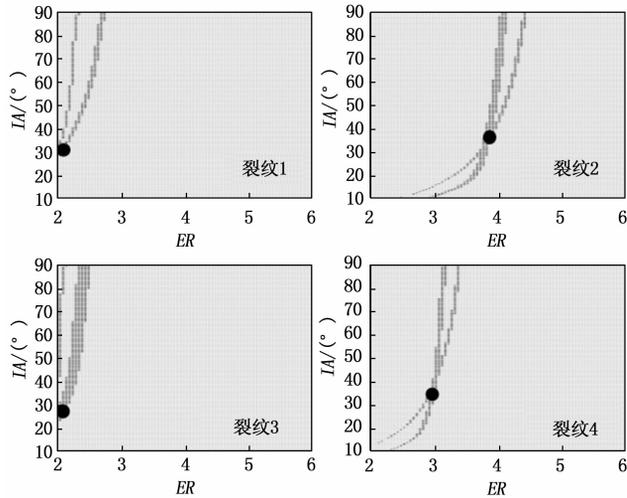


图 13 各裂纹 ER 与 IA 估算结果

对各裂纹椭圆比的估算结果分别为 2.1、3.9、2.1 与 3.0。估算结果与真实 ER 较为接近, 误差在 0.1 左右。对于 IA 的估算结果分别为 31、37、27 与 32°。IA 估算结果误差分别为 1、8、3 与 7°。通过交线交点的 ER 与 IA 估算结果与表 4 中加工裂纹参数较为接近。ER 与 IA 的估算能够较为准确地反映裂纹的内部参数。

由于 ACFM 对钢轨 RCF 裂纹的响应情况是通过线性插值与三次样条插值得到的, 因此得到的离散结果与真实结果间具有一定的差异, 这也是导致 IA 误差相对较大的主要原因。但整体上, 裂纹内部参数通过估算方法能够进行较为准确的估计。

5 结束语

针对当前钢轨滚动接触疲劳裂纹难以量化表征的问

题, 建立了裂纹-钢轨-空气交流电磁场检测计算模型并通过线性插值与三次样条插值构建了钢轨滚动接触疲劳裂纹内部参数与交流电磁场响应对应关系, 从而使轨面疲劳裂纹参数的量化表示成为可能。除目前所研究的单裂纹外, 簇状分布的裂纹也是困扰轨面疲劳裂纹检测的主要问题之一, 后续在此基础上进行响应函数化表示方法、裂纹内部参数重构算法、簇状裂纹响应分析与内部参数识别算法的研究, 从而进一步实现轨面簇状疲劳裂纹的量化表示。

参考文献:

- [1] KANEMATSU W. A review of rolling contact fatigue behavior of silicon nitride focusing on testing practices and crack propagation analysis [J]. *Wear*, 2018; 10-20.
- [2] ZHOU Y, HAN Y, ZHANG C, et al. Prediction of the co-existence of rail head check initiation and wear growth [J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 112: 289-300.
- [3] STOCK R, PIPPAN R. RCF and wear in theory and practice-The influence of rail grade on wear and RCF [J]. *Wear*, 2011, 271: 125-133.
- [4] 林强, 刘兴, 田海东, 等. 钢轨裂纹尺寸与形状对交流电磁场检测信号影响规律研究 [J]. *机械工程学报*, 1-12, [2024-11-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.th.20241031.1710.061.html>.
- [5] GARNHAM J E, FLETCHER D I, DAVIS C L, et al. Visualization and modeling to understand rail rolling contact fatigue cracks in three dimensions [J]. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2011, 225 (2): 165-178.
- [6] ZHOU Y, ZHENG X, JIANG J, et al. Modeling of rail head checks by X-ray computed tomography scan technology [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017: 21-31.
- [7] HOU Y, SHEN J, FANG J, et al. Characterization of intersecting and bifurcating rolling contact fatigue (RCF) cracks in railway rails using ACFM sensor [J]. *Measurement*, 2023, 217: 113075.
- [8] SHEN J, LIU M, DONG C, et al. Analysis on asymmetrical RCF cracks characterisation using an ACFM sensor and the influence of the rail head profile [J]. *Measurement*, 2022, 194: 111008.
- [9] NICHOLSON G L, DAVIS C L. Modelling of the response of an ACFM sensor to rail and rail wheel RCF cracks [J]. *NDT & International*, 2012, 46 (1): 107-114.
- [10] NICHOLSON G L, KOSTRYZHEV A G, HAO X J, et al. Modeling and experimental measurements of idealised and light-moderate RCF cracks in rails using an ACFM sensor [J]. *NDT & International*, 2011, 44 (5): 427-437.

(下转第 101 页)