

# 交变激励下钢轨表面裂纹的磁场畸变量重构

王 驰<sup>1,2</sup> 周 宇<sup>1,2\*</sup> 翁之意<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 交流电磁场交变激励下磁场畸变响应(畸变量)与钢轨滚动接触疲劳裂纹形态参数的关系尚不明确, 提出了一种函数化重构交流电磁场磁场畸变响应的方法。在对某重载铁路钢轨滚动接触疲劳裂纹表面开口长度、椭圆比和内部倾角等形态参数的全寿命周期取样观测基础上, 构建了交流电磁场对不同裂纹形态参数的磁场畸变量响应模型, 得到了裂纹不同形态参数与磁场畸变量的关系; 对磁场畸变-裂纹参数的响应曲线进行拟合和评估, 得到磁场变化量与裂纹形态参数关系的函数重构表达。研究表明: 交流电磁场磁场畸变量受各裂纹参数共同影响, 磁场畸变量峰值随裂纹表面开口长度的增大呈近似线性增大, 随裂纹椭圆比的增大呈非线性减小, 随裂纹内部倾角的增大呈非线性增大, 各变化规律可以通过多项式描述; 磁场畸变量随裂纹参数的变化规律可以被函数化重构, 重构结果与磁场响应间的决定系数超过 0.99, 误差平方和小于 0.001 15, 均方误差小于 0.003。

**关键词:** 钢轨; 滚动接触疲劳; 无损检测; 交流电磁场检测; 磁场响应

**中图分类号:** TH89

**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.020

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Reconstruction of Magnetic Field Responses Caused by Rail Surface Cracks with Alternative Current Excitation

WANG Chi<sup>1,2</sup> ZHOU Yu<sup>1,2\*</sup> WENG Zhiyi<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 201804

2. Shanghai Key Laboratory of Rail Transit Structure Endurance and System Safety, Tongji University, Shanghai, 201804

**Abstract:** As the response laws of the perturbed magnetic field in ACFM to rail RCF crack morphology parameters remained unclear, a novel method was proposed for functional reconstruction between the ACFM perturbed magnetic field and rail RCF crack parameters. The ACFM calculation models were established based on multiple field tests of surface length, ellipse ratio, and internal angle of RCF cracks in heavy-haul railway rails throughout their full life cycle. The perturbed magnetic field above RCF cracks with different parameters was numerically calculated using the ACFM model. The relationship between RCF crack parameters and the perturbed magnetic field was systematically analyzed. Through fitting and evaluation of the perturbed magnetic field's response to the spatial morphology parameters of RCF cracks, the functional expression of the response laws was reconstructed. The results demonstrate that the ACFM response to rail RCF crack parameters is synthetically characterized. The peak value of magnetic field x-component is observed to increase linearly with the surface length and nonlinearly with the internal angle of RCF cracks. Conversely, a nonlinear decrease may be identified as the ellipse ratio of RCF cracks increases. These variations are effectively described by polynomial functions. The change rules between the perturbed magnetic field and RCF crack parameters may be functional reconstructed. The determination coefficient between the reconstructed results and the perturbed magnetic field is found to exceed 0.99, while the sum of squared errors(SSE) and root mean squared errors(RMSE) are constrained to less than 0.001 15 and 0.003, respectively.

**Key words:** rail; rolling contact fatigue(RCF); non-destructive testing; alternative current field measurement(ACFM); magnetic response

收稿日期: 2024-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(51878661); 上海市科委项目(20dz1203100); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2023024); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(L2021G002)

## 0 引言

在轮轨接触引起的周期性切向力与牵引力反复作用下, 钢轨表面特别是轨距角应力集中区域

极易因滚动接触疲劳(rolling contact fatigue, RCF)而产生裂纹。这种表面滚动接触疲劳裂纹持续发展可能造成剥离掉块<sup>[1]</sup>或与其他因素共同作用引起断轨<sup>[2]</sup>,从而缩短钢轨使用寿命,影响轨道交通安全运行。裂纹在钢轨表面和内部的空间走向影响着钢轨近表面探伤与养护策略,因此掌握钢轨滚动接触疲劳裂纹的空间形态特征势在必行。现有研究表明,钢轨轨距角处的滚动接触疲劳裂纹具有复杂的空间特征,如与行车方向和钢轨横向均存在一定的夹角,夹角大小与轮轨接触关系有关,表面长度随着通过总重的累积而增加<sup>[3]</sup>,内部深度随轮轨接触作用、钢轨磨耗<sup>[4]</sup>及液体侵入<sup>[5]</sup>而发生抑制或扩展。CT 扫查结果表明<sup>[6]</sup>,由裂纹表面开口长度、内部倾角以及口袋深度所确定的半椭圆是对钢轨轨距角处滚动接触疲劳裂纹空间形态参数的一种合理近似。

不同于视觉检测<sup>[7]</sup>、漏磁检测<sup>[8]</sup>、电涡流检测<sup>[9]</sup>等方法,交流电磁场检测(ACFM)<sup>[10-11]</sup>方法通过在试样表面感生均匀电流并测量其上方磁场扰动来实现裂纹内部参数的非接触激励测量。对发生于管道<sup>[12]</sup>、石油平台<sup>[13]</sup>场景中的应力腐蚀裂纹有较好的检测效果。因此通过交流电磁场检测方法进行钢轨滚动接触疲劳裂纹形态参数检测的研究具有重要意义。

国内外学者对交流电磁场裂纹检测方法开展了广泛的分析。LEWIS 等<sup>[14]</sup>基于表面均匀电流注入、试件空间无限大等假设,建立了裂纹区域 ACFM 数学模型。SAGUY 等<sup>[15]</sup>通过分析感生电流在裂纹深度方向的扰动规律,得到了裂纹深度估算方法。NICHOLSON 等<sup>[16]</sup>通过对钢轨裂纹的切割实验发现,裂纹空间形态近似可以通过空间半椭圆确定,在此基础上建立并验证了 ACFM 快速仿真模型,并通过磁场扰动响应曲线

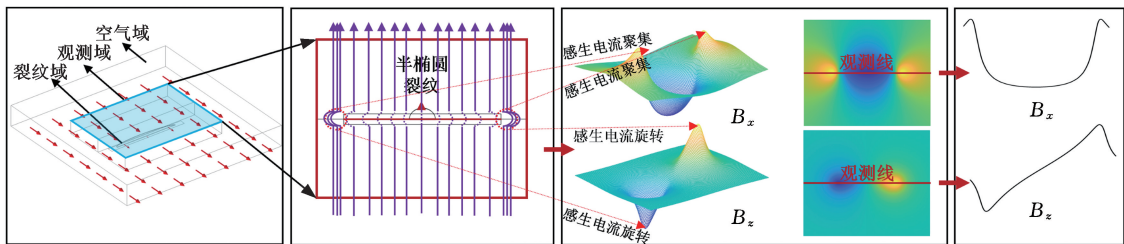
随裂纹参数的演化确定裂纹参数的量化尺寸<sup>[17]</sup>。SHEN 等<sup>[18]</sup>结合快速仿真模型进一步分析了磁场扰动随裂纹内部倾角的变化规律,并通过 45°检测线实现内部倾角量化识别。然而,上述研究忽略了裂纹各参数间的共同作用,将磁场畸变量与裂纹参数一一对应关系进行简化表征,这对参数动态变化的钢轨滚动接触疲劳裂纹是不合理的。

本文在对国内某重载铁路钢轨裂纹形态参数多次跟踪观测的基础上,基于阻抗边界条件理论建立了钢轨滚动接触疲劳裂纹 ACFM 检测模型,分析裂纹参数对其上方 ACFM 磁场畸变量的影响,并且以对裂纹形态参数较为敏感的磁场畸变响应特征  $\Delta B_{z,p}$  信号进行模型拟合,实现了 ACFM 磁场畸变量与钢轨滚动接触疲劳裂纹各形态参数的综合响应重构,从而确定不同裂纹参数与磁场畸变量间的对应关系,并通过交流电磁场对半椭圆裂纹的响应实验来验证综合响应表征方法的合理性。

## 1 钢轨滚动接触疲劳裂纹交流电磁场检测模型

### 1.1 交流电磁场响应原理

交流电磁场检测原理为:在钢轨表面上方施加均匀交变电流激励以在钢轨近表面集肤层内产生均匀分布的感生电流,如有裂纹,则感生电流路径发生改变,由近轨面集肤层转向裂纹壁流动。如图 1 所示,感生电流所产生的磁场在裂纹上方  $x$  方向(平行于裂纹表面开口方向)分量  $B_x$  在裂纹两端点内减小在两端点外侧增大。与此同时,感生电流在裂纹开口两端点处产生反向旋转,因此感生电流在裂纹上方  $z$  方向分量(垂直于轨面方向)产生的磁场  $B_z$  在两端点分别出现峰谷值。



(a) 阻抗边界条件计算模型 (b) 感生电流路径 (c) 磁场畸变 (d) 磁场  $B_x$  与  $B_z$  响应

图 1 裂纹对感生电流及其感生磁场响应的影响

Fig.1 Effect of crack on induced current and magnetic field response

### 1.2 钢轨滚动接触疲劳裂纹形态参数分布

如图 2 所示,对国内某重载铁路半径 500 m 曲线段钢轨由新轨上道至通过总重 320 百万吨

(MGT)退役下线进行 8 次切割取样,并进行表面观测、CT 扫查与断面金相观测,分析钢轨滚动接触疲劳裂纹形态及其参数分布规律。目前对钢轨

滚动接触疲劳裂纹尖端的形态描述主要有半椭圆形<sup>[16]</sup>与矩形<sup>[12]</sup>两种。为了更好地探明裂纹尖端形态,首先对取样的带有滚动接触疲劳裂纹的钢轨试样进行图 2b 所示的 CT 扫查以确定裂纹的尖端形态,结果表明所取样本裂纹尖端呈近似半椭圆形,与文献[6,16]结论一致。

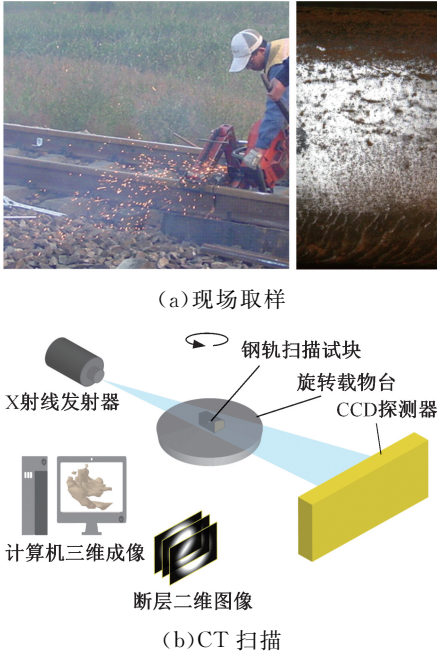


图 2 钢轨滚动接触疲劳裂纹形态观测  
Fig.2 Observation of RCF crack morphology

由于裂纹开口宽度较小,并且随通过总重变化不大,因此裂纹的形态参数可通过图 3a 所示的由表面倾角  $A_s$ 、表面开口长度  $L_s$ 、内部倾角  $A_1$  与口袋深度  $L_p$  所表示的空间半椭圆近似描述。图 3b 所示为在确定裂纹形态半椭圆描述方法后通过金相观测到的裂纹内部参数分布情况。由于

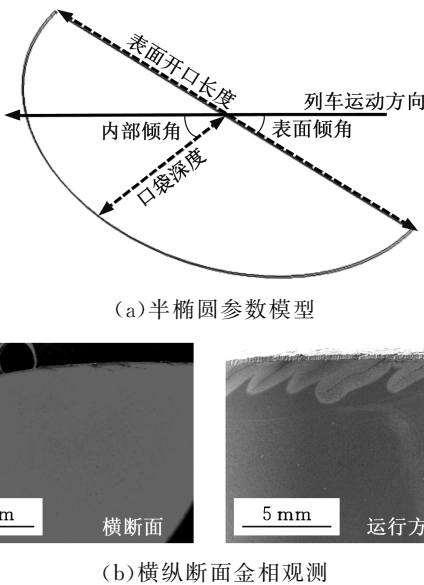


图 3 钢轨 RCF 裂纹参数观测

牵引力与横向力共同作用,RCF 裂纹在列车运行方向与轨面存在一个呈锐角的夹角,裂纹近似分布在同一平面,且各裂纹开口深度较为接近,口袋深度  $L_p$  可以由椭圆长半轴(表面开口长度的一半)与短半轴(口袋深度)的比值即椭圆比  $R_E$  代替。

对取样钢轨滚动接触疲劳裂纹参数观测结果进行统计与计算,通过总重 10~320 百万吨的观测裂纹参数分布结果如表 1 所示。

表 1 钢轨滚动接触疲劳裂纹半椭圆参数金相观测结果

Tab.1 Parameters range of rail RCF crack based on metallographic observation

观测参数	分布范围
表面开口长度 $L_s$ /mm	17.2 ~ 25.0
表面倾角 $A_s$ /( $^\circ$ )	19.0 ~ 34.0
内部倾角 $A_1$ /( $^\circ$ )	9.1 ~ 38.3
口袋深度 $L_p$ /mm	0.45 ~ 6.25
椭圆比 $R_E$	1.8 ~ 6.0

### 1.3 交流电磁场检测计算模型

钢轨为铁磁性材料,其感生电流主要集中在钢轨表面较薄的集肤层内,集肤层深度  $\delta$  由激励频率、钢轨磁导率与电导率决定:

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

式中: $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为激励频率; $\mu$  为磁导率,  $\mu = \mu_r\mu_0$ ;  $\mu_r$ 、 $\mu_0$  分别为相对磁导率与真空磁导率; $\sigma$  为电导率。

由于集肤深度远小于钢轨尺寸,因此可以通过阻抗边界(impedance boundary)条件<sup>[17]</sup>在集肤层内的电流变化来简化模型参数。在复频域中,阻抗边界条件表示为

$$\sqrt{\mu_r\mu_0/(\epsilon_r\epsilon_0 - j\sigma/\omega)} \mathbf{n} \times \mathbf{H} + \mathbf{E} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})\mathbf{n} = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_s)\mathbf{n} - \mathbf{E}_s \quad (2)$$

式中: $j$  为复数单位; $\mathbf{n}$  为计算区域外法线方向; $\mathbf{H}$  为磁场强度; $\mathbf{E}$  为电场强度; $\mathbf{E}_s$  为源电场强度。

式(2)中,为了在更宽的集肤深度展开计算,选择激励频率为 1 kHz。为了减小计算单元数量,选择 0.5 mm<sup>[14]</sup> 作为裂纹宽度。如图 4 所示,观测域位于裂纹上方 1 mm 处。采用面电流激励模拟均匀多匝线圈产生的均匀电流。

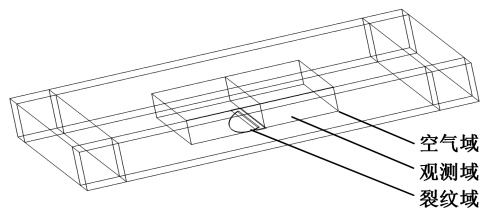


图 4 钢轨滚动接触疲劳裂纹磁场响应计算模型  
Fig.4 Calculation model of magnetic field response for rail RCF crack

裂纹半椭圆参数可以由裂纹表面开口长度  $L_s$ 、内部倾角  $A_1$  与椭圆比  $R_E$  表示。由于现场观

测为多次间隔取样,因此对现场观测裂纹半椭圆参数范围进行适当扩展从而更为全面地反映裂纹形态参数,所采用参数范围如表 2 所示。

表 2 钢轨滚动接触疲劳裂纹半椭圆参数设置

Tab.2 Parameters set of rail semi-ellipse RCF crack

观测参数	分布范围
开口长度 $L_s/mm$	5,10,15,20,25
内部倾角 $A_1/(^\circ)$	10,20,30,50,90
椭圆比 $R_E$	1,1.25,1.5,1.75,2,3,4,5,6,7,8

## 2 钢轨滚动接触疲劳裂纹交流电磁场扰动规律分析

### 2.1 特征提取与分析

将表 2 所示参数裂纹进行仿真计算,分别得到 200 组图 5 所示的  $B_x$  与  $B_z$  响应信号。扰动磁场信号在图 5 所示  $B_x$  分量  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  及  $B_z$  分量  $\Delta B_{zq}$  处对裂纹参数响应最为显著,  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  与  $\Delta B_{zq}$  的计算公式为

$$\Delta B_{xp} = (B_{xp} - B_{xref})/B_{xref} \quad (3)$$

$$\Delta B_{xv} = (B_{xv} - B_{xref})/B_{xref} \quad (4)$$

$$\Delta B_{zq} = B_{zq}/B_{zmax} \quad (5)$$

式中:  $B_{xp}$ 、 $B_{xv}$  分别为  $B_x$  分量峰值值;  $B_{xref}$  为无裂纹位置感生场  $B_x$  分量;  $B_{zq}$  为裂纹两 endpoint 1/4 位置处感生场的  $B_z$  分量;  $B_{zmax}$  为  $B_z$  分量最大值。

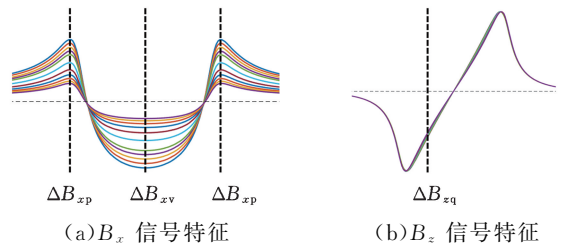


图 5 检测线裂纹特征参数提取

Fig.5 Feature extraction of detection line

本文通过  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  与  $\Delta B_{zq}$  来表征扰动磁场随裂纹半椭圆参数的变化情况。  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  与  $\Delta B_{zq}$  受  $L_s$ 、 $R_E$  与  $A_1$  三个参数共同影响规律如图 6 四维绘图所示,不同颜色代表归一化磁场响应  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  与  $\Delta B_{zq}$  量值。图 6 结果表明,磁场扰动信号受  $A_1$ 、 $R_E$  与  $L_s$  共同影响,整体上受  $A_1$  影响较小,但综合绘图不利于各半椭圆参数对磁场响应的影响规律的进一步分析。  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  与  $\Delta B_{zq}$  响应在  $L_s$ 、 $R_E$ 、 $A_1$  不同子空间的投影情况如图 7 所示。图 7a 所示为  $A_1 = 20^\circ$  时  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  与  $\Delta B_{zq}$  受  $L_s$  与  $R_E$  的二元影响规律,其中  $L_s$  相较于  $R_E$  的影响更加显著。在此基础上,进一步投影到  $R_E = 1$  及  $L_s = 25$  mm 的一元空间,如图 7b 和图 7c 所示。

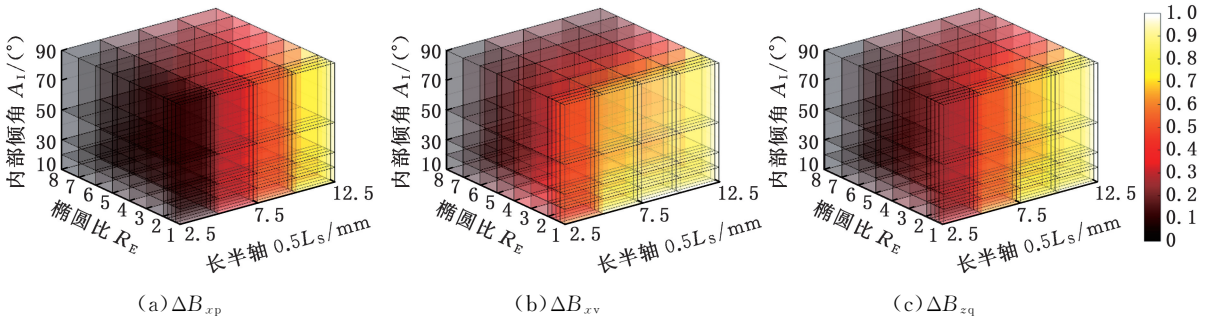


图 6 归一化  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  与  $\Delta B_{zq}$  随裂纹表面长度、内部倾角与椭圆比的变化规律

Fig.6 Ternary change rule between  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$ 、 $\Delta B_{zq}$  and surface length, internal angle and ellipse ratio of RCF crack

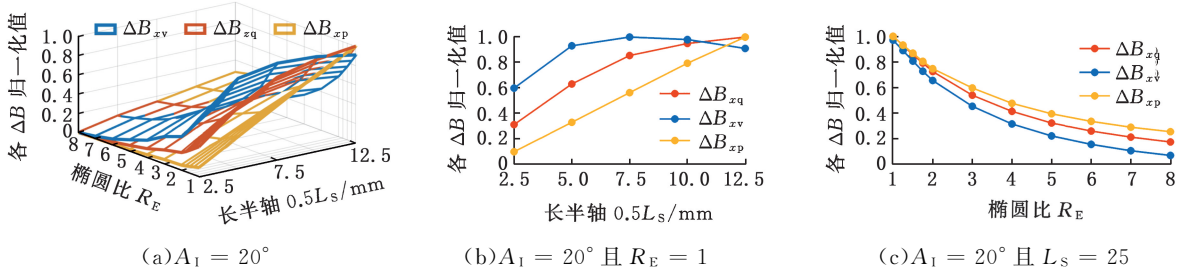


图 7  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  与  $\Delta B_{zq}$  在不同投影子空间的响应情况

Fig.7 Response of  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  与  $\Delta B_{zq}$  in different projected sub-space

图 7b 表明,  $\Delta B_{xp}$ 、 $\Delta B_{xv}$  与  $\Delta B_{zq}$  分别与  $L_s$  近似成线性、高次多项式与指数增长关系,与  $R_E$  近似成指数衰减关系,因此本文选取与  $L_s$  关系较为简单的  $\Delta B_{xp}$  进行进一步分析。

将 200 组响应信号  $\Delta B_{xp}$  及与之相对应的半椭圆参数绘制于图 8。当  $R_E > 2$  时,  $\Delta B_{xp}$  基本不受  $A_1$  的影响,仅受  $L_s$  与  $R_E$  的影响,当  $R_E$  介于 1 ~ 2 之间时,  $A_1$  的影响显著增大,不能被忽略。

因此,受半椭圆参数的影响规律需要根据  $R_E$  的大小进行进一步分段分析。

图 9a 所示为响应结果在  $L_S$ - $R_E$  二元子空间

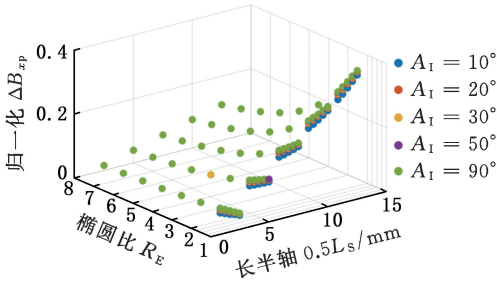


图 8  $\Delta B_{xp}$  对  $L_S$ 、 $R_E$ 、 $A_1$  的响应情况

Fig.8 Response of  $\Delta B_{xp}$  for  $L_S$ 、 $R_E$ 、 $A_1$

的投影。图 9b 为  $\Delta B_{xp}$  与  $L_S$  的关系图,成线性变化,当椭圆比增大时,斜率逐渐减小,并且几乎不随  $A_1$  变化。图 9c 为  $\Delta B_{xp}$  与  $R_E$  的关系图,成指数衰减,并且当  $R_E$  在 1~2 之间时随  $A_1$  增大有明显变化,但当  $R_E$  大于 2 时,不随  $A_1$  变化。进一步将  $\Delta B_{xp}$  在  $R_E$ - $A_1$  断面投影, $R_E$  在 1~2 之间时与  $\Delta B_{xp}$  关系近似成线性变化,斜率由  $L_S$ 、 $A_1$  与  $\Delta B_{xp}$  的关系确定,其中  $L_S$  的影响更加显著,但  $A_1$  在此范围内的影响也不可忽略。如图 10 所示,对于  $A_1$ ,当  $A_1$  大于  $30^\circ$  时, $\Delta B_{xp}$  几乎不受  $A_1$  影响,此外,当  $R_E$  大于 2 时, $\Delta B_{xp}$  也基本不受  $A_1$  影响。

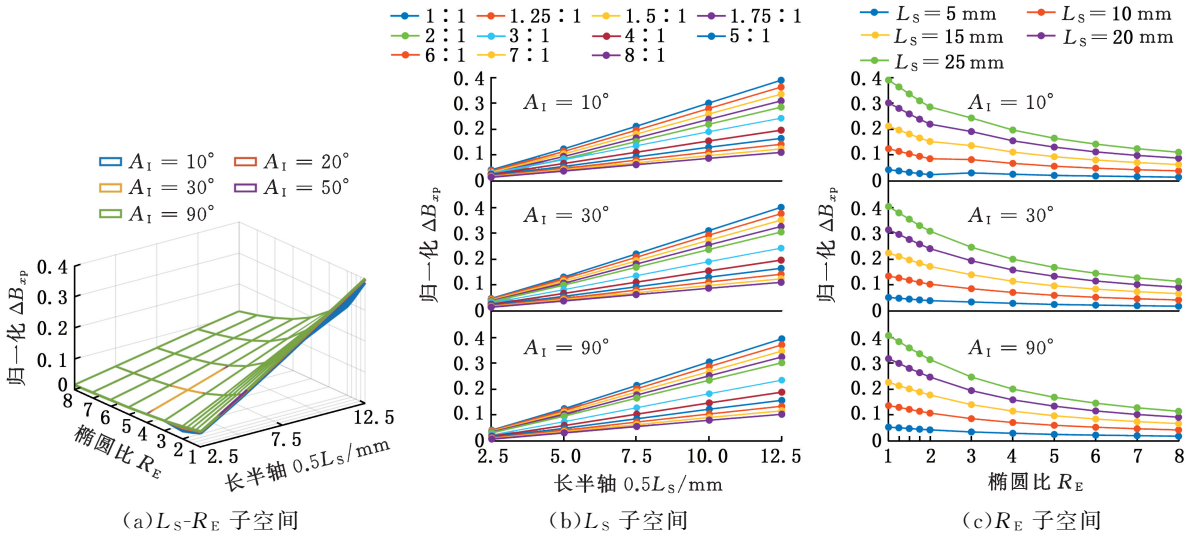


图 9  $\Delta B_{xp}$  受  $L_S$ - $R_E$  变化规律

Fig.9 Change rule between  $\Delta B_{xp}$ ,  $L_S$  and  $R_E$

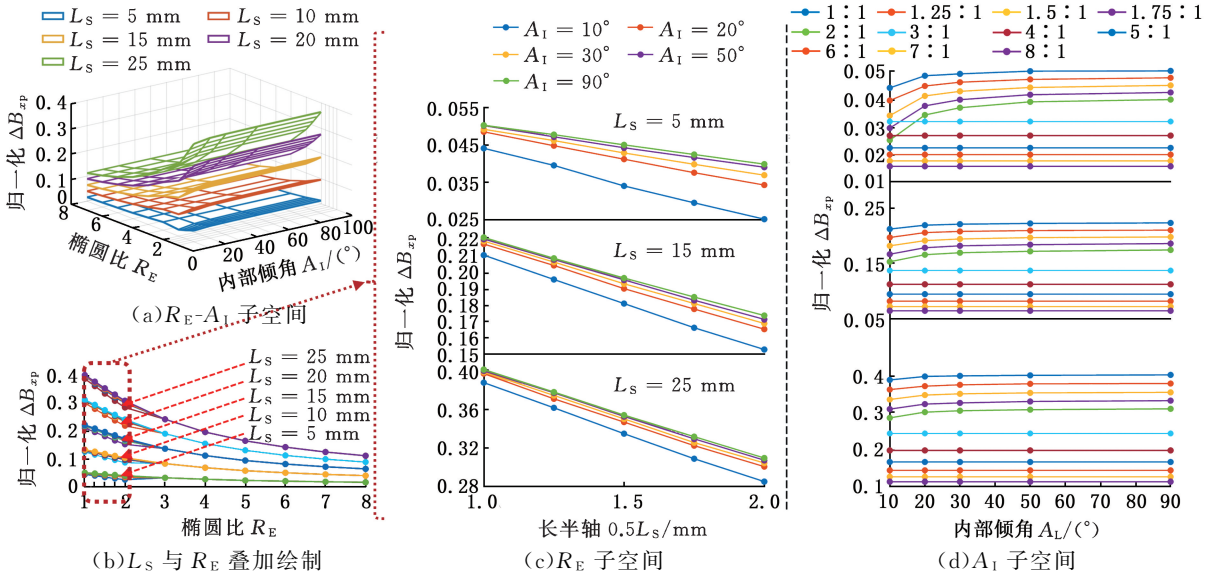


图 10  $\Delta B_{xp}$  受  $R_E$ - $A_1$  变化规律

Fig.10 Change rule between  $\Delta B_{xp}$ ,  $R_E$  and  $A_1$

## 2.2 模型拟合与结果评估

为了进一步分析  $\Delta B_{xp}$  与半椭圆参数  $L_S$ 、 $R_E$  和  $A_1$  的响应关系,结合图 9 和图 10 的变化形式,

将  $\Delta B_{xp}$  与  $L_S$ 、 $R_E$  及  $A_1$  关系进行模型拟合。当  $R_E$  大于 2 时, $\Delta B_{xp}$  几乎不受  $A_1$  的影响,与  $R_E$  近似成指数或高次多项式关系,与  $L_S$  近似成线性关

系。 $R_E$  在  $1 \sim 2$  范围内时,与  $L_S$  仍然成线性变化关系,与  $R_E$  的变化关系也近似成线性,此时  $A_1$  的影响也不可被忽略。因此可以将  $R_E$  分成两段,即  $R_E$  大于 2(V1 段)和  $R_E$  在  $1 \sim 2$  范围内(V2 段)。对于 V1 段, $\Delta B_{xp}$  随  $L_S$  近似呈线性变化,斜率的大小变化规律即为  $\Delta B_{xp}$  随  $R_E$  的变化规律,呈指数或高次多项式变化,这里取线性模型拟合  $\Delta B_{xp}$  对  $L_S$  的响应,分别取线性-指数模型 E12、线性-二阶响应函数 CD12 与线性-3、4、5 次多项式 P1q( $q$  为多项式最高次次数)分别对 V1 段进行 Levenberg-Marquardt<sup>[19]</sup> 方法下的非线性最小二乘模型拟合:

$$E12: \Delta B_{xp} = a_{11} + (a_{12}L_S + a_{13})(a_{14} \exp(a_{15}R_E) + a_{16} \exp(a_{17}R_E)) \quad (6)$$

$$CD12: \Delta B_{xp} = b_{11} + (b_{12}L_S + b_{13})[b_{14}/(b_{15}R_E^2 + b_{16}R_E + b_{17}) + b_{18}] \quad (7)$$

$$P1q: \Delta B_{xp} = c_{11} + (c_{12}L_S + c_{13})(c_{14}R_E^i + c_{15}R_E^{i-1} + \dots + c_{1(n-1)}R_E + c_{1n}) \quad (8)$$

其中, $a_{11}, b_{11}, c_{11}, \dots, a_{17}, b_{17}, c_{17}, b_{18}, c_{18}, \dots, c_{1n}$  为各部分系数。本文通过残差  $e_r$ 、决定系数  $R^2$ 、误差平方和(SSE) $e_{SS}$ 、均方误差(RMSE) $e_{RMS}$  来评价样本点与函数计算结果之间的差异性,计算式如下:

$$e_r = \Delta B'_{xp} - \Delta B_{xp} \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\Delta B'_{xp}(i) - \Delta B_{xp}(i))^2}{\sum_i (\Delta B_{xp}(i) - \text{mean}(\Delta B_{xp}))^2} \quad (10)$$

$$e_{SS} = \sum_i (\Delta B'_{xp}(i) - \Delta B_{xp}(i))^2 \quad (11)$$

$$e_{RMS} = \sqrt{e_{SS}/m} \quad (12)$$

式中:  $\Delta B'_{xp}$  为重构得到的对各裂纹参数组合的扰动磁场响应  $B_x$  峰值; $\Delta B_{xp}$  为初始样本点扰动磁场响应  $B_x$  峰值; $\Delta B'_{xp}(i)$ 、 $\Delta B_{xp}(i)$  分别为  $\Delta B'_{xp}$  与  $\Delta B_{xp}$  的第  $i$  个样本值; $m$  为样本点数量。

V1 段模型拟合系数结果列于表 3,其中,11, 12,  $\dots$ , 19 为式(6) ~ 式(8)中各系数的下标。

表 3 不同方法拟合系数

Tab.3 Fitted coefficients of different method

	11	12	13	14	15	16	17	18	19
E12	$3.2580 \times 10^{-3}$	$3.3812 \times 10^{-2}$	$-3.9588 \times 10^{-2}$	$5.5025 \times 10^{-1}$	$-9.0287 \times 10^{-2}$	$9.5775 \times 10^{-1}$	$-5.1388 \times 10^{-1}$		
CD12	$3.2578 \times 10^{-3}$	$8.8124 \times 10^{-2}$	$-1.0318 \times 10^{-1}$	$6.0390 \times 10^{-1}$	$2.0677 \times 10^{-2}$	$5.5859 \times 10^{-1}$	$8.5970 \times 10^{-1}$	$1.7797 \times 10^{-2}$	
P13	$3.2542 \times 10^{-3}$	$4.2650 \times 10^{-1}$	$-4.9924 \times 10^{-1}$	$-1.1471 \times 10^{-4}$	$2.6893 \times 10^{-3}$	$-2.3872 \times 10^{-2}$	$1.0000 \times 10^{-1}$		
P14	$3.2578 \times 10^{-3}$	$1.5559 \times 10^{-1}$	$-1.8216 \times 10^{-1}$	$5.0026 \times 10^{-5}$	$-1.4150 \times 10^{-3}$	$1.6112 \times 10^{-2}$	$-9.4997 \times 10^{-2}$	$3.0989 \times 10^{-1}$	
P15	$3.2562 \times 10^{-3}$	$6.0246 \times 10^{-1}$	$-7.0533 \times 10^{-1}$	$-1.1305 \times 10^{-6}$	$4.3999 \times 10^{-5}$	$-6.9810 \times 10^{-4}$	$5.8900 \times 10^{-3}$	$-2.8886 \times 10^{-2}$	$8.4268 \times 10^{-2}$

模型 E12、CD12、P13、P14 与 P15 模型拟合结果如图 11 所示,模型拟合结果接近,对于 V1 段( $R_E > 2$ ),均具有较好的一致性,决定系数  $R^2$  均大于 0.9998, P13 决定系数虽略低于其他方法,但有更少的参数,因此仅在图 12 中绘制 P13 模型拟合结果。

如图 12 所示, V1 段样本点与拟合模型有较好的一致性(图 12a),残差小于  $1 \times 10^{-3}$ (图 12b),加入 V2 段样本点后(图 12c),残差显著增大,这与图 13 所示 V1 段与 V2 段的 SSE 和 RMSE 结果一致。对于 V1 段, SSE(图 13a)在  $1 \times 10^{-5}$  左右, RMSE(图 13b)在  $6 \times 10^{-4}$  左右。对于 V2 段,由

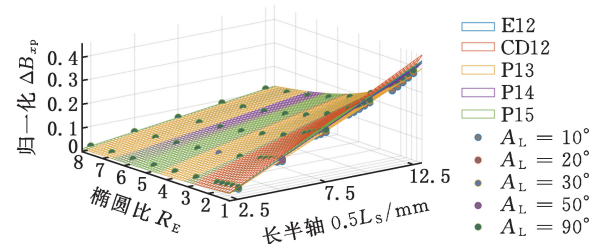


图 11 拟合结果与样本点

Fig.11 Fitted results and sample points

于  $A_1$  的忽略,导致 SSE(图 13c)最大达 0.02, RMSE(图 13d)最大达 0.03,于是需要对 V2 段引入  $A_1$  对  $\Delta B_{xp}$  影响进行修正。

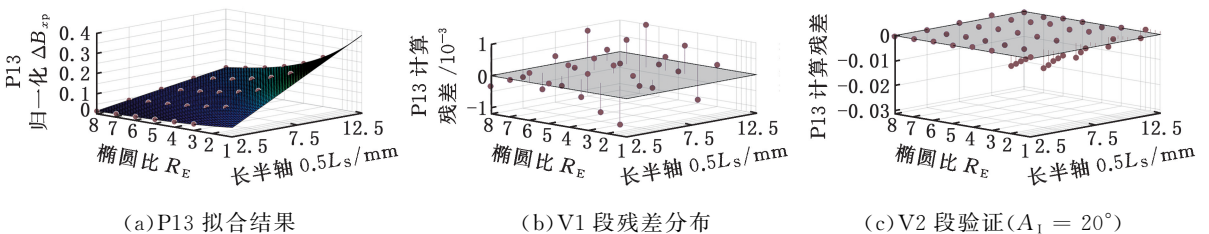


图 12 V1 段 P13 拟合结果、残差分布与 V2 段残差分布

Fig.12 P13 Fitted result of V1, residual distribution and verification of V2

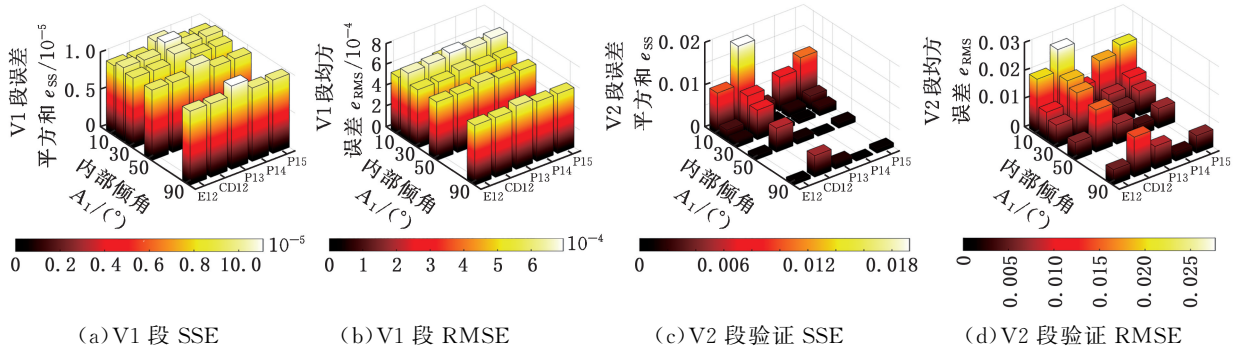


图 13 V1 段与 V2 段模型拟合结果的 SSE 与 RMSE

Fig.13 SSE and RMSE of fitted result of V1 and V2

2.3 基于内部倾角的修正

对于 V2 段,当裂纹  $R_E$  在 1 ~ 2 时,  $\Delta B_{xp}$  受  $A_1$  的影响不可忽略,且  $A_1$  小于  $30^\circ$  时,响应更为明显,影响模型准确性。 $R_E$  在 1 ~ 2 时,  $\Delta B_{xp}$  与  $R_E$  及  $L_s$  关系在此阶段均近似线性,如图 9b、图 10b 所示,  $\Delta B_{xp}$  对  $A_1$  的响应近似呈指数或高次多项式表示(图 10c)。于是对于 V2 段,分别采用线性-线性-3 次多项式(LLP)与线性-线性-指数(LLE)两模型拟合:

$$LLP: \Delta B_{xp} = a + (bL_s + c)(dR_E + e)(fA_1^3 + gA_1^2 + hA_1 + k) \quad (13)$$

$$LLE: \Delta B_{xp} = a + (bL_s + c)(dR_E + e)(fA_1^g + h) \quad (14)$$

其中,  $a, b, \dots, h, k$  为式中各系数。V2 段系数模

型拟合结果列于表 4。

引入  $A_1$  后,  $\Delta B_{xp}$  与裂纹参数间的函数关系由二元转为三元。将  $\Delta B_{xp}$  响应与  $L_s, R_E, A_1$  在 V2 段的三元关系绘制于图 14a。将 LLP 与 LLE 函数模型计算结果绘制于图 14b 和图 14c。

进一步将修正模型对 V2 段样本的拟合结果绘制于图 15,  $\Delta B_{xp}$  响应与  $L_s$  及  $R_E$  的关系与 V1 拟合模型一致。此处着重分析  $A_1$  对  $\Delta B_{xp}$  响应的影响。随着  $A_1$  的增大,  $\Delta B_{xp}$  响应逐渐增大,但当  $A_1$  大于  $30^\circ$  后,  $\Delta B_{xp}$  响应接近饱和。因此  $\Delta B_{xp}$  响应特征对小于  $30^\circ$  的  $A_1$  有一定的反应能力,但当  $A_1$  大于  $30^\circ$  后,则无法仅通过  $\Delta B_{xp}$  响应这一特征来有效反映裂纹的内部倾角。

表 4 椭圆比 1 : 1 ~ 2 : 1 时拟合函数系数

Tab.4 Fitted coefficients of different ER among 1 : 1 ~ 2 : 1

	a	b	c	d	e	f	g	h	k
LLP	$-1.6330 \times 10^{-2}$	$2.8403 \times 10^{-1}$	$-1.9679 \times 10^{-1}$	$-6.4036 \times 10^{-2}$	$3.4295 \times 10^{-1}$	$3.1428 \times 10^{-7}$	$-5.3993 \times 10^{-5}$	$2.8772 \times 10^{-3}$	$3.9818 \times 10^{-1}$
LLE	$-1.5002 \times 10^{-2}$	2.4866	-1.8299	$-5.7130 \times 10^{-1}$	3.0482	2.2101	$7.0935 \times 10^{-5}$	-2.2049	

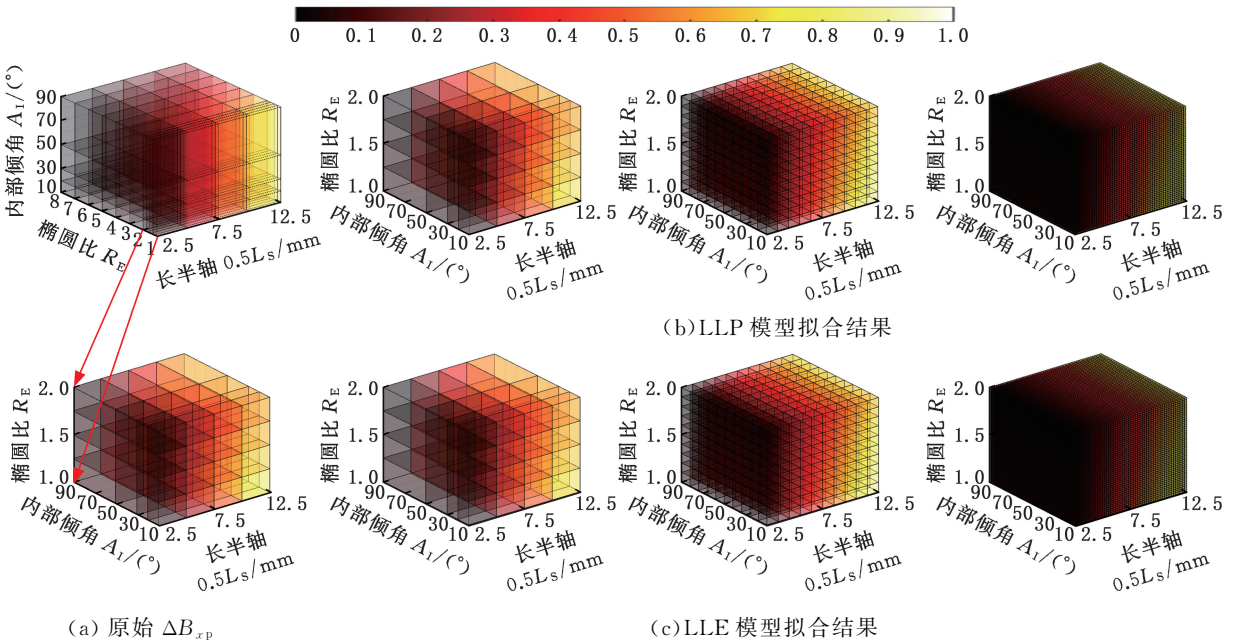


图 14 原始  $\Delta B_{xp}$  及 LLP、LLE 拟合结果

Fig.14 Original  $\Delta B_{xp}$ , fitted result of LLP and LLE

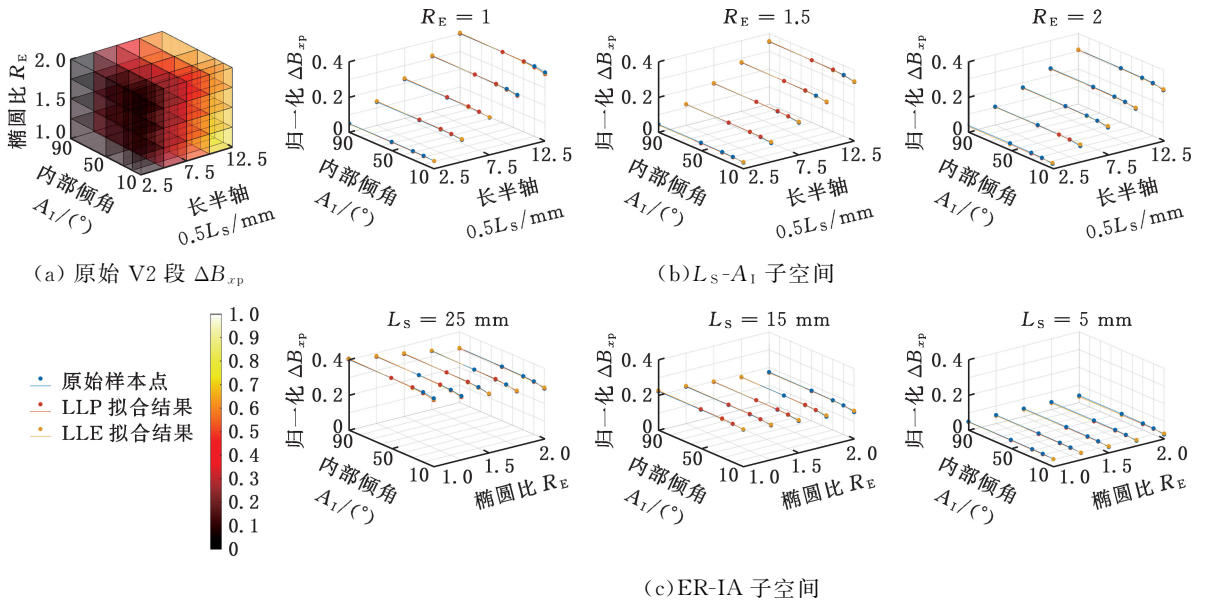


图 15 V2 段模型修正部分结果

Fig.15 Part of modification result of V2

表 5 所示为根据式(10) ~ 式(12) 计算得到的 V2 段拟合结果与实际样本之间的  $R^2$ 、SSE 及 RMSE。结果表明,相较于 LLE,LLP 对  $\Delta B_{xp}$  与  $A_1$  之间的响应有更好的一致性。整体上,LLP 的  $R^2$  达 0.9994,SSE 为 0.001 15, RMSE 为 0.003。对于不同内部倾角,决定系数均较高,内部倾角为  $10^\circ$  时决定系数最小,但仍达 0.9980。对于不同内部倾角,SSE 与 RMSE 变化规律接近, $A_1$  小于  $50^\circ$  时,对于较小的  $A_1$  有更小的误差分布,当  $A_1$  大于  $50^\circ$  时,误差有所增大,但最大误差平方和小于 0.000 27,最大均方误差小于 0.0036。图 16 为经过三次多项式修正的  $\Delta B_{xp}$  对裂纹参数响应的样本误差分布图,相较于 V1 段模型拟合结果,V2 段经过  $A_1$  修正后其结果与  $\Delta B_{xp}$  响应更加一致。ACFM 磁场畸变量可由其对应的函数模型直接计算得到,可显著减小仿真计算的工作量。

表 5 LLP 与 LLE 方法  $R^2$ 、SSE 与 RMSE

Tab.5  $R^2$ , SSE and RMSE of LLP and LLE

内部倾角	方法	$R^2$	$e_{ss} / 10^{-5}$	$e_{RMS}$
整体	LLP	0.9993	113.2119	0.0030
	LLE	0.9990	157.2036	0.0035
$A_1 = 10^\circ$	LLP	0.9980	13.9036	0.0024
	LLE	0.9997	6.4377	0.0016
$A_1 = 20^\circ$	LLP	0.9996	7.2448	0.0017
	LLE	0.9992	6.1471	0.0016
$A_1 = 30^\circ$	LLP	0.9996	6.4805	0.0016
	LLE	0.9994	11.6677	0.0022
$A_1 = 50^\circ$	LLP	0.9994	12.0068	0.0022
	LLE	0.9993	21.4982	0.0029
$A_1 = 90^\circ$	LLP	0.9992	16.1942	0.0025
	LLE	0.9990	26.7137	0.0033

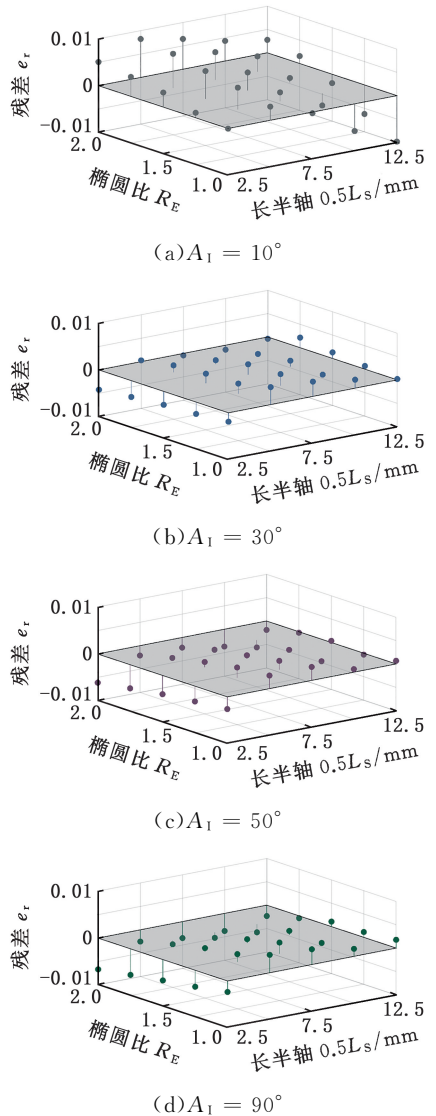


图 16 LLP 拟合结果误差

Fig.16 Residual error of LLP fitted result

### 3 实验验证

钢轨半椭圆裂纹交流电磁场测试如图 17 所示。首先通过函数波信号发生器激励一次绕组线圈,在钢轨中产生均匀分布的感生电流场,因为裂纹存在,因而感生电流的感生磁场在裂纹附近畸变;然后通过隧道磁阻传感器(TMR)采集畸变信号并通过锁相放大器将扰动信号放大;最后通过数据采集仪采集扰动磁场信号。激励模块由线圈绕平板绕制而成,置于 TMR 检测模块上方,线圈绕制方向与裂纹开口方向垂直。所加工的 4 条半椭圆裂纹参数如表 6 所示,裂纹宽度为 0.3 mm。图 18 示出了加工裂纹的计算与测试结果。

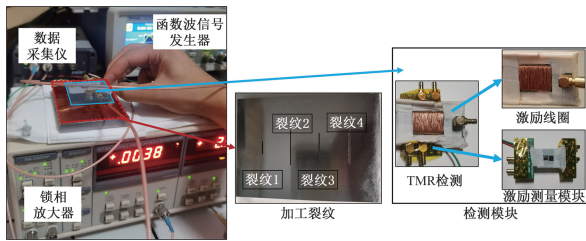


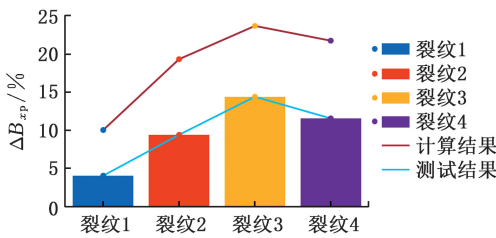
图 17 钢轨半椭圆裂纹交流电磁场测试

Fig.17 ACFM detection of rail semi-ellipse crack

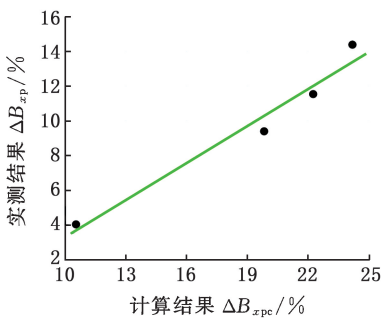
表 6 加工裂纹参数

Tab.6 Machining parameters of the cracks

序号	表面开口长度 /mm	内部倾角 / (°)	椭圆比 (口袋深度 /mm)
裂纹 1	10	30	2(2.50)
裂纹 2	25	45	4(3.13)
裂纹 3	20	30	2(5)
裂纹 4	24	20	3(4)



(a)  $\Delta B_{xp}$  计算与观测结果



(b) 计算与观测结果拟合

图 18 加工裂纹的计算与测试结果

Fig.18 Calculation result and measurement result of machined crack

图 18a 所示为  $\Delta B_{xp}$  模型计算与实测结果,两者在变化规律上具有较好的一致性,但由于实测过程中激励大小、提高高度、材料磁导率有所不同,且线圈绕制与传感器设置会存在一定的加工误差,所以实测结果与模型计算结果具有一定的线性对应关系。图 18b 所示为实测结果与模型计算结果之间的关系,二者之间存在线性变化关系,斜率约为 0.7104,证明了计算模型的合理性。

### 4 结论

1) 提出了一种函数化描述 ACFM 磁场畸变量对钢轨滚动接触疲劳裂纹参数响应规律的重构方法,通过现场观测滚动接触疲劳裂纹半椭圆参数分布范围与交流电磁场检测原理计算了不同裂纹参数的磁场畸变量显著响应特征  $\Delta B_{xp}$ 。

2) 磁场畸变量响应特征  $\Delta B_{xp}$  受裂纹各参数综合影响,随表面开口长度  $L_s$  的增大近似呈线性增大,随椭圆比  $R_E$  的增大近似呈指数衰减变化,  $R_E$  大于 2 时,基本不受内部倾角  $A_1$  的影响,  $R_E$  处于 1 ~ 2 之间时,  $A_1$  影响不可被忽略,  $\Delta B_{xp}$  随  $A_1$  的增大而增大,但  $A_1$  大于  $30^\circ$  时,  $\Delta B_{xp}$  对  $A_1$  的响应接近饱和,变化较小。

3)  $\Delta B_{xp}$  响应与裂纹半椭圆各参数关系可以被很好地拟合,  $R_E$  大于 2 时可以仅考虑  $L_s$  与  $R_E$  的影响,  $R_E$  处于 1 ~ 2 时,对  $R_E$  的响应近似退化到线性,对  $A_1$  的响应呈高次多项式级增长,多项式可以较好地拟合  $L_s$ 、 $R_E$  及  $A_1$  对  $\Delta B_{xp}$  的响应。与此同时,当  $R_E$  大于 2 时,内部倾角影响可忽略不计,这是由于裂纹椭圆较大时,口袋深度较小,裂纹可能整体处于集肤层内,电流路径受内部倾角影响较小,此时不利于内部倾角的表征。

4) 在实现 ACFM 磁场畸变量对裂纹各参数响应重构后,裂纹参数的响应可以直接由重构函数计算得到,可显著减小仿真计算工作量。

5) 通过加工单裂纹对所提出方法进行验证。实测结果与模型计算结果间存在线性对应关系,斜率为 0.7104,检测结果与模型计算结果可以实现相互转换,验证了所提出方法的有效性。

6) 磁场响应参数受裂纹各参数综合影响,因此后续量化计算裂纹的各参数需要综合考虑  $B_x$  响应峰值及  $B_z$  响应峰值并通过联合计算得到裂纹参数量化结果。

#### 参考文献:

[1] 管晓东,李孝滔,邢帅兵,等. 疲劳裂纹扩展引起的钢轨表面剥离研究[J]. 铁道科学与工程学报,

- 2018, 15(12):3082-3088.
- ZAN Xiaodong, LI Xiaotao, XING Shuaibing, et al. Analysis of Rail Surface Shelling Resulting from Fatigue Crack Propagation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(12):3082-3088.
- [2] POPOVIĆ Z, LAZAREVIĆ L, BRAJOVIĆET L, et al. The Importance of Rail Inspections in the Urban Area-aspect of Head Checking Rail Defects[J]. Procedia Engineering, 2015, 117:596-608.
- [3] POPOVIĆ Z, LAZAREVIĆ L, BRAJOVIĆET L, et al. Managing Rail Service Life[J]. Metalurgija, 2014, 53:721-724.
- [4] ZHOU Yu, HAN Yanbin, MU Dongsheng, et al. Prediction of the Coexistence of Rail Head Check Initiation and Wear Growth[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 112:289-300.
- [5] 周宇, 王钺, 卢哲超, 等. 液体对钢轨滚动接触疲劳裂纹的作用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(2):253-263.
- ZHOU Yu, WANG Zheng, LU Zhechao, et al. Effect of Liquid on Rolling Contact Fatigue Cracks in Rail[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2022, 50(2):253-263.
- [6] 周宇, 木东升, 韩延彬, 等. 基于 X 射线断层扫描的钢轨滚动接触疲劳裂纹形状建模方法[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(1):41-48.
- ZHOU Yu, MU Dongsheng, HAN Yanbin, et al. Modeling Method for Rolling Contact Fatigue Crack Shape of Rail Based on X-ray Tomography[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(1):41-48.
- [7] JIANG Yi, WANG Haitao, CHEN Shuai. Visual Quantitative Detection of Rail Surface Crack Based on Laser Ultrasonic Technology[J]. Optik, 2021, 237:166732.
- [8] 陈潇. 钢轨漏磁检测仿真分析及试验研究[J]. 机械与电子, 2020, 38(1):57-61.
- CHEN Xiao. Simulation Analysis and Experimental Study on Magnetic Flux Leakage Detection of Rail [J]. Machinery & Electronics, 2020, 38(1):57-61.
- [9] 许鹏, 刘柏霖, 陈亚雄. 基于差分柔性涡流探头的铁轨裂纹检测方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(20):2419-2427.
- XU Peng, LIU Bailin, CHEN Yaxiong. Rail Crack Detection Method Based on Differential Flexible Eddy Current Probe[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(20):2419-2427.
- [10] 闫梁, 万本例, 胡斌, 等. 不锈钢表面裂纹方向电磁检测方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(9):1057-1064.
- YAN Liang, WAN Benli, HU Bin, et al. Surface Crack Orientation Detection Method of Stainless Steels Based on Electromagnetic Field[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(9):1057-1064.
- [11] NICHOLSON G L, ROWSHANDEL H, HAO X, et al. Measurement and Modelling of ACFM Response to Multiple RCF Cracks in Rail and Wheels[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2013, 40(2):87-91.
- [12] YUAN X, LI W, CHEN G, et al. Two-step Interpolation Algorithm for Measurement of Longitudinal Cracks on Pipe Strings Using Circumferential Current Field Testing System[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(2):394-402.
- [13] GE J, LI W, CHEN G, et al. Experimental and Numerical Investigation on Buckling and Post-buckling of a 3000 m Subsea Separator[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 74(2):107-118.
- [14] LEWIS A M, MICHAEL D H, LUGG M C, et al. Thin-skin Electromagnetic Fields around Surface Breaking Cracks in Metals[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(8):3777-3784.
- [15] SAGUY H, RITTEL D. Bridging Thin and Thick Skin Solutions for Alternating Currents in Cracked Conductors[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(8):084103.
- [16] NICHOLSON G, KOSTRYZHEV A, HAO X. Modelling and Experimental Measurements of Idealized and Light-moderate RCF Cracks in Rails Using an ACFM Sensor[J]. NDT&E International, 2011, 44:427-437.
- [17] 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(12):111008.
- [18] SHEN J, ZHOU L, ROWSHANDEL H, et al. Determining the Propagation Angle for Non-vertical Surface-breaking Cracks and Its Effect on Crack Sizing Using an ACFM Sensor[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(11):115604.
- [19] MARQUARDT D W. An Algorithm for Least-squares Estimation of Nonlinear Parameters[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1963, 11(2):431-441.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:王 驰,男,1995年生,博士研究生。研究方向为钢轨伤损电磁检测。E-mail:chi.wang@foxmail.com。周宇\* (通信作者),男,1977年生,副教授、博士研究生导师。研究方向为轨道伤损检测评估、轮轨噪声控制与智能轨道交通。E-mail: yzhou2785@tongji.edu.cn。

本文引用格式:

王驰,周宇,翁之意.交变激励下钢轨表面裂纹的磁场畸变量重构[J]. 中国机械工程,2025,36(4):830-839.

WANG Chi, ZHOU Yu, WENG Zhiyi. Reconstruction of Magnetic Field Responses Caused by Rail Surface Cracks with Alternative Current Excitation[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4):830-839.