

文章编号: 1674—8247(2024)04—0019—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.04.004

变温度条件下基于代理模型的 Lamb 波裂纹定量诊断方法研究

彭 畅¹ 鞠增业¹ 张子藩¹ 王光君¹ 马 龙¹ 张小振²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266229; 2. 中南大学, 长沙 410083)

摘 要: 高速列车运行环境复杂多变, 因循环载荷作用内部结构会产生裂纹等损伤。为实现不同温度环境中对列车结构裂纹的实时检测和诊断, 本文研究了 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中 Lamb 波裂纹定量诊断方法。将试验材料置于不同的温度梯度下, 进行 Lamb 波信号的激励和收集, 接着进行变温条件下 Lamb 波裂纹定量监测试验, 获得了不同温度和裂纹长度条件下的 Lamb 波信号, 通过归一化幅值提取了相位变化和相关系数 3 个特征值。将特征值作为 Kriging 代理模型的训练样本, 生成基于特征值的响应面构建诊断参数的三维模型, 实现了不同温度条件下裂纹的定量诊断。

关键词: Lamb 波; 变温条件; 特征值提取; 特征值响应面; Kriging 代理模型; 裂纹定量诊断

中图分类号: U213.2⁺44

文献标志码: A

Study on Quantitative Diagnosis Method of Lamb Waves for Cracks under Varying Temperature Conditions Based on Surrogate Models

PENG Chang¹ JU Zengye¹ ZHANG Zifan¹ WANG Guangjun¹ MA Long¹ ZHANG Xiaozhen²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266229, China;

2. Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: High-speed trains operate in complex and variable environments, in which cyclic loading will result in cracking and other damages to the internal structure of trains. To enable real-time detection and diagnosis of structural cracks in trains under diverse temperature environments, this study investigated a quantitative diagnostic method of Lamb waves for cracks over the temperature range of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. The specimens were subjected to various temperature gradients, followed by the excitation and acquisition of Lamb wave signals under these conditions. Subsequently, a temperature-dependent quantitative monitoring experiment for Lamb wave-assisted crack detection was conducted, yielding Lamb wave signals corresponding to different temperatures and crack lengths. Normalized amplitude values were used to extract three characteristic values representing phase shifts and correlation coefficients. These characteristic values served as training samples for a Kriging surrogate model, which generates a response surface based on the feature values to construct a three-dimensional model of diagnostic parameters. This model enables quantitative diagnosis of cracks under varying temperature conditions.

Key words: Lamb waves; varying temperature conditions; characteristic value extraction; characteristic value response surface; Kriging surrogate model; quantitative crack diagnosis

收稿日期: 2022-09-05

作者简介: 彭畅(1988-), 男, 高级工程师。

引文格式: 彭畅, 鞠增业, 张子藩等. 变温度条件下基于代理模型的 Lamb 波裂纹定量诊断方法研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 19-23.

PENG Chang, JU Zengye, ZHANG Zifan, et al. Study on Quantitative Diagnosis Method of Lamb Waves for Cracks under Varying Temperature Conditions Based on Surrogate Models[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 19-23.

随着国民经济的快速发展,高速列车已成为我国客运发展的主要方向,近年来取得了长足的进步^[1]。我国地域辽阔、地形多变,高速铁路在行驶中难免遇到昼夜、南北温差大等问题,较大的温度差异会对列车裂纹的产生和诊断造成影响。为了保障高速铁路长期安全的运行,需要对极端恶劣的条件和温度状况下的结构件裂纹进行检测和诊断。因此寻找出能够克服温度对Lamb波监测裂纹尺寸影响的方法尤为重要。

众多学者对基于Lamb波的疲劳裂纹进行了研究^[2]。Souza提出一种基于Lamb波和圆形传感器阵列的方法来评估铝板中的故障损伤^[3]。Michaels提出时域差异的损伤指数,该指数将Lamb波信号缩放为单位能量,以评估损伤信号与健康信号之间的幅度差异。Kessler基于两种不同的疲劳裂纹识别算法“波动方法”和“振动方法”,提出了对局部损伤较为敏感的损伤算法,基于震动的损伤算法更适用于全局损伤情况的检测^[4]。然而,上述裂纹检测方法都是在相同温度下进行的,没有考虑列车运行时温度环境变化对裂纹的影响。因此,这些方法不能直接应用于变温环境下高速列车的检测任务。

本文明确了变温度条件下Lamb波裂纹定量诊断的研究目的及意义,提出变温度条件下的Lamb波裂纹定量诊断方法。根据变温度条件下Lamb波与裂纹的作用机理进行试验,提取能够表征裂纹尺寸的损伤特征值。在不同温度 and 不同裂纹长度情况下,利用归

一化幅值、相位变化和相关系数的关系对裂纹进行定量诊断。通过基于Kriging代理模型的裂纹定量方法实现了不同温度条件下裂纹定量尺寸的检测。

1 基于Kriging代理模型的变温度裂纹定量方法

1.1 提取特征值

从激励传感器发出的Lamb波在传播过程中经过裂纹时,信号将发生折射和反射,能量的散失会使信号的归一化幅值减小。裂纹尺寸越大,被反射和折射的信号越多,传感器接收到的信号归一化幅值就会越小,如图1(a)所示。研究表明,当裂纹近似于闭合型裂纹时,在板中传播的Lamb波会在裂纹末端发生散射,但能够穿过裂纹;而当裂纹为张开状态时,Lamb波由于没有介质而无法穿过裂纹,将绕过裂纹继续传播。因此,当材料中出现裂纹时,Lamb波到达接收传感器的时间变长,反映在信号特征值上表现为相位的增加,且裂纹尺寸越大,信号传播的时间越长,相位变化越大,如图1(b)所示。当Lamb波在传播过程中遇到材料的不连续时,波的形状会发生变化,相比于未受损材料相关系数更小。随着裂纹的持续增加,波形发生的变化就会越大,相关系数就越小,如图1(c)所示。在本试验中,选择提取Lamb波的归一化幅值、相位变化、相关系数3个与裂纹长度有关的特征值进行研究。

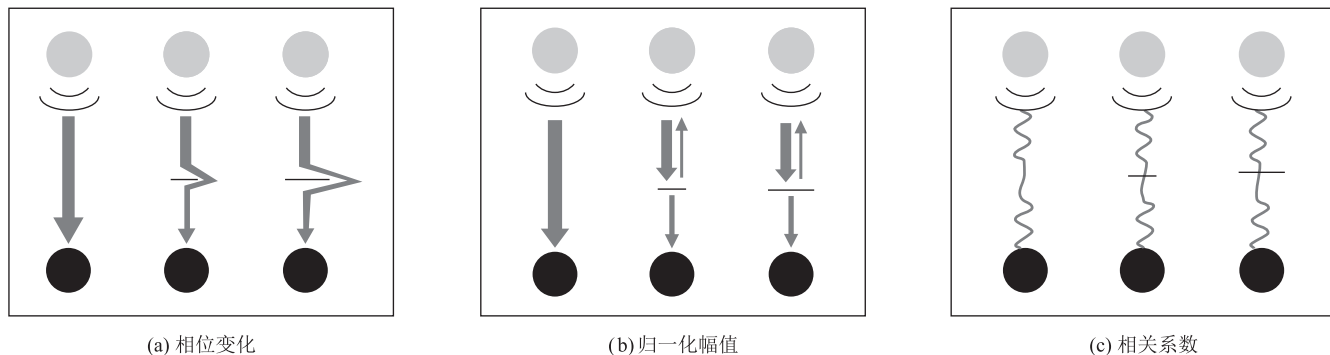


图1 Lamb波传播示意图

1.2 克里金(Kriging)插值法

Kriging模型是较为有效的一种代理模型方法,又被称为“高斯随机过程模型”。该方法由南非地质工程师D. G. Krige提出^[5],由法国数学家Matheron完善和改进,目前已被广泛应用于各个领域^[6]。Kriging模型首先考虑空间属性在空间位置上的变异分布。确定对一个待插点值有影响的距离范围,然后用此范围

内的采样点来估计待插点的属性值。根据样品空间位置和样品间相关程度,对每个样品品位赋予不同的权,随后进行滑动加权平均,以估计中心块段的平均地位,即用空间上所有已知点的数据加权求和来估计未知点的值,权重取决于距离的倒数(或者倒数的平方)。距离近的点,权重越大;距离远的点,权重越小。在Kriging代理模型中,Kriging是高斯过程回归的一

个实例,用来计算指定区域内数据点之间的最小化方差并返回估计误差的数值。Kriging 代理模型^[7-9]由权重 $\omega(p)$ 和数据点 $\rho(p_i)$ 线性组成,其中 p_i 中的 i 是第 i 个测量数据点的索引,而非向量 p 中的第 i 个分量。Kriging 代理模型以式(1)表示。

$$\rho_s(p) = \sum_i^N \omega(p) \rho(p_i) \quad (1)$$

式中: $\rho_s(p)$ ——被构建的代理模型,即裂纹长度的代理模型(mm);

$\rho(p_i)$ ——真实物理模型,即 p_i 的裂纹长度测量值(mm);

i ——第 i 个测量数据点的索引;

N ——测量点的数量(个)。

Kriging 模型的目标是最小化均方差的预测误差,表达为:

$$\sigma^2 = C_{00} - \omega^T C \omega - 2\omega^T D \quad (2)$$

$$\sigma^2 = E[(\rho(p) - \sum_i^N \omega(p) \rho(p_i))^2] \quad (3)$$

式中: σ^2 ——最小化均方差;

C_{00} ——优化前随机生成的初始矩阵;

T ——转置符号;

D ——Kriging 算法中的过程矩阵;

E ——均方差的计算符号。

其中,矩阵 C 和 D 被定义为:

$$C_{ij} = 1 - \gamma(\|p_i - p_j\|_2) \quad (4)$$

$$D_i = 1 - \gamma(\|p_0 - p_i\|_2) \quad (5)$$

式中: p_0 ——相对于 p 中对应的位置存在一定的预计误差;

p_i —— i 点的裂纹长度(mm);

p_j —— j 点的裂纹长度(mm);

γ ——变差函数,用来计算相关数据点之间距离的可选函数。

$$\gamma = 1 - e^{-ah} \quad (6)$$

式中: h —— $\|p_0 - p_i\|_2$ 两点之间的欧式距离(mm);

a ——用最小二乘法得到的选择变量,作为拟合方差数据。

1.3 基于 Kriging 代理模型的损伤特征值响应面求解

通过大量数据处理,将 Lamb 波传感器收集到的信号转换为大量具有规律性的特征值,最终得到不同温度条件下不同裂纹长度对应的特征值(归一化幅值、相位变化和相关系数)。基于 Kriging 代理模型对损伤特征值进行求解,将裂纹长度、温度、响应的特征值作为训练样本,带入 Kriging 代理模型中,构造出三

个不同的特征值响应面。

2 变温度条件 Lamb 波裂纹监测试验

Al6061 型铝合金已广泛用于高速铁路车辆配件的制造领域中,因此选择 Al6061 作为疲劳拉伸试验件,试验铝板尺寸为 400 mm × 200 mm × 2 mm。在铝板中心设置 8 mm 的通孔。同时在通孔两端线切割出两个长为 1 mm 的预置裂纹,预置裂纹能确保裂纹的起始位置和扩展方向。制备试验材料共 9 块,力学性能及参数如表 1 所示。压电传感器型号为 SM412,几何尺寸和力学性能如表 2 所示。

表 1 铝板力学性能及参数表

材料	密度/(kg/m ³)	杨氏模量/GPa	泊松比
AL6061	2 750	68.9	0.33

表 2 压电传感器型号及参数表

PZT 传感器型号	直径/mm	厚度/mm	密度/(g/m ³)
SM412	8	0.2	7.80

考虑到本次试验环境包含 85 ℃ 高温和 -40 ℃ 低温环境,而部分耦合剂在低于 -20 ℃ 的环境中耦合性降低,因此选取性能稳定的丙烯酸酯胶粘剂对 PZT 压电传感器进行粘贴和固定。每块铝板上设置 4 个 PZT 传感器,两两置于铝板中心线等距处。同侧传感器间距 200 mm,连线与预置裂纹平齐,并保持传感器与铝板中心线距离相等。为探究变温度条件下 Lamb 波与裂纹的作用机理,克服温度对 Lamb 波监测裂纹尺寸的影响,分析不同温度环境对 PZT 陶瓷压电传感器和对 Lamb 波传播的影响,进行了以下试验。

首先在 MTS Landmark 液压疲劳试验机所连接计算机上设定疲劳试验参数。将本次疲劳试验最大载荷限定设置为 32 kN,载荷测量精度控制在 1% 以内,拉伸疲劳频率设定为 10 Hz,疲劳载荷调至 8 ~ 80 MPa 之间。

将试件用夹具固定后与疲劳机器相连接,测定室温为 25 ℃ 并对未损伤的铝板进行测试。使用结构健康检测扫描系统进行信号激励和接收,获取 Lamb 波信号,将试件在未加载状态下测量的 Lamb 波信号作为基准信号。接下来对试件进行疲劳加载,经过一定加载周期后停止加载并将载荷保持在 44 MPa,打开环境箱并通过光学显微镜的测距,测量各个周期下对应的裂纹长度,记录疲劳周期。随后,将温箱箱盖关闭,打开液氮装置制冷或通过热机加热,将温度调整至拟定温度静置 10 min,待 PZT 传感器达到拟定温度,再次进行信号的激励和接收,得到试验数据进行保存,

重复以上步骤至铝板断裂。最后,为了研究不同温度条件下 PZT 压电传感器和 Lamb 波传播受到的影响,将试验温度设置为 9 组不同的温度梯度,重复上述试验过程。温度梯度为: -40 ℃、-20 ℃、-10 ℃、0 ℃、25 ℃、35 ℃、55 ℃、70 ℃、85 ℃。

3 试验结果与讨论

3.1 裂纹长度与特征值变化关系

通过对原始信号提取特征值,可以得到 3 个裂纹损伤特征值的变化趋势,如图 2 所示。

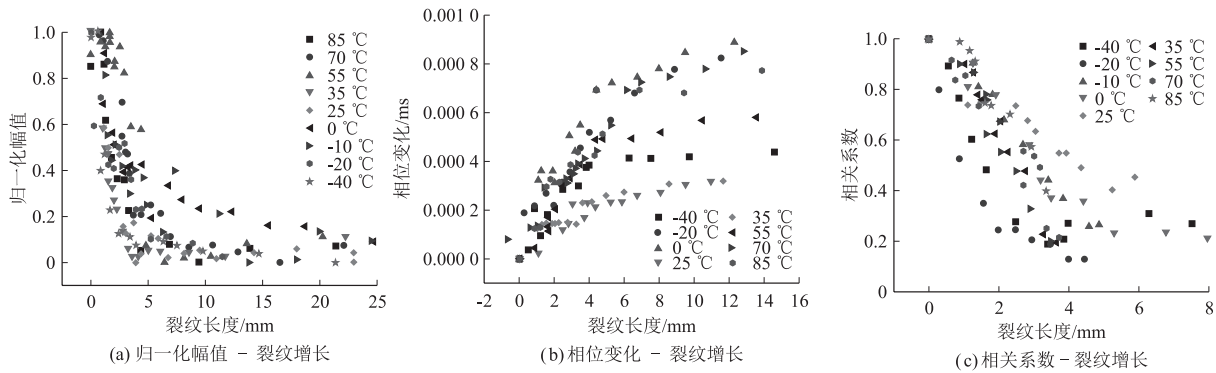


图 2 不同温度下裂纹损伤特征值的变化关系图

3.2 基于 Kriging 代理模型的变温度裂纹定量方法

基于 Kriging 代理模型对损伤特征值进行求解,将裂纹长度、温度、响应的特征值作为训练样本,带入

Kriging 代理模型中,构造出 3 个不同的特征值响应面,如图 3 所示,图中黑点即为特征值响应面的训练样本。

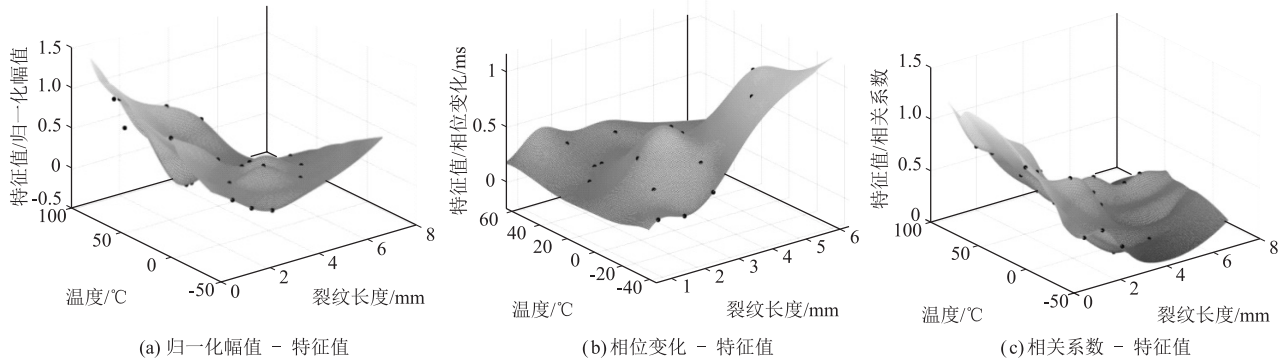


图 3 不同的特征值响应面图

选取充足数据特征值建立响应面模型,再于不同裂纹长度的数据中随机抽取数据作为测试信号,控制各个数据分布于各温度梯度中。通过新选取的测试信号所对应的 3 个特征值,经过插值分析得到一新的测试点,即诊断参数 $\lambda_{ck,T}$, 表达为:

$$\lambda_{ck,T} = \sqrt{(A_c - \alpha_{ck,T})^2 + (B_l - \beta_{ck,T})^2 + (C - \gamma_{ck,T})^2}$$
 (7)

式中: $\lambda_{ck,T}$ ——不同温度和裂纹情况下的诊断参数;
 A_c ——实际信号的归一化幅值;
 B_l ——实际信号的相位变化(ms);
 C ——实际信号的相关系数;
 $\alpha_{ck,T}$ ——Kriging 代理模型响应面的归一化幅值;

$\beta_{ck,T}$ ——Kriging 代理模型实际信号的相位变化(ms);
 $\gamma_{ck,T}$ ——Kriging 代理模型响应面的相关系数;
 ck ——裂纹长度(mm);
 T ——温度(℃)。

若实际裂纹 ck_0 及温度 T_0 情况下的 3 个特征值归一化幅值 α , 相位变化 β 和相关系数 γ 与响应面相匹配,与响应面中存在 ck_1 和 T_1 并与其相等。模型测试信号中参数的 3 个特征值和 3 个响应面差值平方和作为一个偏离差,该值越小,对应的裂纹长度越接近实际值。因此,在每个温度裂纹长度诊断模型中,通过诊断参数的最小化,使疲劳裂纹预测误差最小化,最终实现疲劳裂纹的定量预测。

基于 Kriging 代理模型诊断参数模型的建立,在测试样本中选择不同温度 and 不同裂纹长度中的归一化幅值、相位变化和相关系数 3 个参数进行计算,最终能够得到预测裂纹长度。为检验代理模型的准确性和可靠性,将预测裂纹长度结果和实际裂纹长度进行对比,结果如表 3 所示。预测裂纹长度误差平均值为 0.008 9 mm,3 组测量数据误差小于 0.02 mm,误差不超过 0.21 mm。选取的测试样本在各个温度梯度中随机抽取,且误差值普遍较小,验证了不同温度条件下 Lamb 波裂纹定量监测模型的有效性。

表 3 裂纹定量诊断表

实际裂纹 /mm	温度 /℃	归一化 幅值	相位变化	相关系数	预测 裂纹	误差
0.886	85	1.000 00	1.28E-04	0.989 08	0.735	0.151
0.651	70	0.997 30	1.28E-04	0.918 21	0.700	0.049
1.286	55	0.937 24	1.31E-04	0.867 10	1.050	0.136
1.036	35	1.000 00	1.31E-04	0.899 62	0.900	0.136
1.506	25	0.496 04	1.25E-04	0.748 59	1.505	0.001
1.908	0	0.560 78	3.63E-04	0.776 61	1.925	0.017
1.558	-20	0.423 72	2.69E-04	0.352 59	1.575	0.017
6.297	-40	0.093 84	4.13E-04	0.308 63	6.090	0.207

4 结论

- (1) 针对时变温度环境下裂纹损伤的定量监测问题,本文提出了基于 Kriging 代理模型的变温环境下疲劳裂纹尺寸量化方法。使用大量数据作为在 Kriging 代理模型训练样本,生成了归一化幅值、相位变化和相关系数的特征值响应面。通过响应面囊括不同温度、不同裂纹长度下对应的特征值,对裂纹长度进行诊断。
- (2) 在变温环境下, Lamb 波和 PZT 传感器都会受到很大的影响,本文根据一系列具有物理意义的损伤特征值建立的特征值响应面,能够很好地拟合多变量,从而拟合变温环境下的 Lamb 特征值参数分布。
- (3) 进行了变温环境下的疲劳裂纹试验,结果表

明该方法能够检测变温条件下疲劳裂纹的扩展。

参考文献:

[1] 周雯, 史天运, 李平, 等. 基于 2 阶级联轻量级卷积神经网络的高铁接触网悬挂紧固件缺陷识别方法[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(5): 115 – 126.
ZHOU Wen, SHI Tianyun, LI Ping, et al. Defect Recognition Method for Fasteners of Catenary Suspension for High Speed Railway Based on Two-cascade Lightweight Convolutional Neural Network[J]. China Railway Science, 2020, 41(5): 115 – 126.

[2] JUNKER G H. New Criteria for Self-loosening of Fasteners under Vibration [C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; SAE International, 1969.

[3] PAI N G, HESS D P. Experimental Study of Loosening of Threaded Fasteners Due to Dynamic Shear Loads [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(3): 585 – 602.

[4] 王莉霞, 马玉钦, 李亚青. 螺纹联接防松综述[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2008, 37(6): 21 – 24.
WANG Lixia, MA Yuqin, LI Yaqing. A Survey of Preventing Loosening of Threaded Connection [J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 37(6): 21 – 24.

[5] JIANG Yanyao, ZHANG Ming, PARK T W, et al. An Experimental Investigation on Self-loosening of Bolted Joints [C]//Analysis of Bolted Joints. July 20 – 24, 2003. Cleveland, Ohio, USA. ASMEDC, 2003.

[6] ECCLES W, SHERRINGTON I, ARNELL R D. Frictional Changes during Repeated Tightening of Zinc Plated Threaded Fasteners [J]. Tribology International, 2010, 43(4): 700 – 707.

[7] RAUTER N, LAMMERING R, KÜHNRIICH T. On the Detection of Fatigue Damage in Composites by Use of Second Harmonic Guided Waves [J]. Composite Structures, 2016, 152: 247 – 258.

[8] SUN Maoxun, QU Jianmin. Analytical and Numerical Investigations of One-way Mixing of Lamb Waves in a Thin Plate [J]. Ultrasonics, 2020, 108: 106180.

[9] FORRESTER A I J, KEANE A J. Recent Advances in Surrogate-based Optimization [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2009, 45(1): 50 – 79.