

基于小波包 Teager 散布熵的轨道车辆路基振动 特征提取方法研究*

RESEARCH ON VIBRATION FEATURE EXTRACTION METHOD OF RAIL TRANSIT VEHICLE SUBGRADE BASED ON WAVELET PACKET Teager DISPERSION ENTROPY

张 敏**¹ 孙龙印¹ 夏 拓¹ 张 雄***²

(1. 国网浙江省电力有限公司超高压分公司, 杭州 310000)

(2. 华北电力大学 机械工程系, 保定 071003)

ZHANG Min¹ SUN LongYin¹ XIA Tuo¹ ZHANG Xiong²

(1. Super High Voltage Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

(2. Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘要 变压器等电气设备的吊装、转运环节是疏于监控的薄弱环节,极易发生由机械冲击引起的二次损伤。对变压器轨道运输车行进过程中受路基振动引起的冲击响应开展研究。首先,建立了轨道运输车-变压器耦合分析模型,利用有限元分析得出轨道运输车-变压器耦合分析模型在路基振动作用下的核心响应区域。然后,提出了一种基于小波包散布熵的非周期瞬态响应特征提取方法。该方法通过小波包最优子带树结构对整个频带进行良好的稀疏性分割,将包含多种信息的一维数据分解到不同维度,实现信号的有效分解,通过 Teager 能量算子 (Teager Energy Operator, TEO) 增强子带信号的冲击特性,利用散布熵选取包含冲击响应特征的子带信号。最后,通过路基振动仿真信号验证了所提方法能够准确从耦合路径干扰中提取出非周期性瞬态冲击响应成分。

关键词 变压器 轨道运输车 路基振动 有限元分析 小波包 Teager 散布熵

中图分类号 TH113

Abstract The hoisting and transfer of electrical equipments such as transformers are weak links that are neglected in monitoring, and secondary damage caused by mechanical impact is very easy to occur. The impact response of transformer rail transit vehicle caused by subgrade vibration was studied. Firstly, the rail transit vehicle transformer coupling analysis model was established, and the response area of the rail transit vehicle transformer coupling analysis model under the action of subgrade vibration was obtained by finite element analysis. Then, a non-periodic transient response feature extraction method based on wavelet dispersion entropy was proposed. This method performed good sparsity segmentation of the whole frequency band through the optimal subband tree structure of wavelet packet, decomposed the one-dimensional data containing a variety of information into different dimensions, and realized the effective decomposition of signals. The impact characteristics of subband signals were enhanced by Teager energy operator (TEO), and the subband signals with impact response characteristics were selected by dispersion entropy. Finally, through the subgrade vibration simulation signal, it is verified that the proposed method can accurately extract the aperiodic transient impact response components from the coupling path interference.

Key words Transformer; Rail transit vehicle; Subgrade vibration; Finite element analysis; Wavelet packet; Teager dispersion entropy

Corresponding author: ZHANG Xiong, E-mail: hdjxzx@ncepu.edu.cn

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52105098), the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2021502038), and the Foundation of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (No. B311MR210003).

Manuscript received 20220617, in revised form 20221213.

* 20220617 收到初稿, 20221213 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (52105098), 河北省自然科学基金项目 (E2021502038), 国网浙江省电力有限公司科技项目 (B311MR210003) 资助。

** 张 敏, 男, 1987 年生, 浙江绍兴人, 汉族, 国网浙江省电力有限公司超高压分公司工程师, 主要研究方向为变电站设备运维、状态监测与故障诊断。

*** 张 雄, 男, 1990 年生, 河北保定人, 汉族, 华北电力大学机械工程系讲师, 博士, 主要研究方向为机械系统动力学、机械设备状态监测与故障诊断。

0 引言

电气设备安全平稳运行是保障电网安全的基础,因此电气设备的检修维护工作在整个电力系统的维护工作中占据重要地位^[1-5]。在电气设备的检修维护工作中,设备吊装、运输环节是最疏于监控的薄弱环节,往往会为设备检修带来附加的安全隐患^[6-8]。大件电气设备的吊装、转运过程难度较大,极易发生由机械冲击引起的二次损伤。变电站大件电气设备吊装、运输存在三方面亟待解决的瓶颈问题:一是狭窄区域内作业,对电气设备安全距离有较高要求,受电网运行方式调整复杂等因素制约,传统需陪停相邻间隔或设备进行吊装和运输方式难度巨大;二是运输过程的自动监测、主动预警能力不足,运输过程中极易对电气设备内部结构造成损伤,从而给设备再次投入使用带来安全隐患;三是现有平车结构简单、功能单一,灵活性及可控性不足,缺少必要的运行速度、升降速度的监测、反馈、控制系统,导致平车启动过程、转向过程存在较大冲击载荷,存在损坏电气设备的风险。

针对电气设备运输过程状态监测不全面、不直观、实时性差等问题,韩建伟等^[9]以 Windows CE 操作平台为基础,构建了电力设备车载运输状态监测系统,实现对双轴倾角、运行速度、冲击振动等指标的监测。翟子楠等^[10]提出一种基于 ZigBee 协议,以 EMZ3048C 为核心的无线数据终端设计方案,实现了对振动的实时测量、实时录波、记录分析功能。崔兴可等^[11]以 750 kV 变压器为例提出了一种带有谐响应分析和预应力模态分析的电气设备运输仿真计算方法。从信号处理的角度,基于小波包分解等树状滤波器组的冲击特征提取方法得到广泛应用,其改进思路主要集中在两个方面:一方面是改进频带分割方法,使得信号分割具有更好的稀疏性。乔志城等^[12]针对传统经验小波变换过程中频谱划分过多的问题,提出了根据互信息值对频谱进行重新划分与合并的方法,能够有效减少子带数量,通过仿真信号和铁路货车轮对轴承试验信号验证了方法的有效性。张坤等^[13]针对频带分割过程中故障信息无法被均分的子带容纳问题,提出了一种依据信号频谱趋势的边界频谱划分方法,该方法能够避免子带划分的不合理现象。另一方面是改进子带筛选过程中所使用的统计特征指标,使得对待识别目标信号成分具有特异敏感性,其中以峭度和熵值具有代表性。郑近德等^[14]利用滑动均值代替粗粒化过程用以解决多尺度模糊熵的多尺度粒化缺陷,并将改进后的多尺度模糊熵与支持向量机结合用于滚动轴承故障诊断。MOSHREFZADEH A 等^[15]用子带信号平方包络的无偏自相关峭度值代替直接对子带时域信号计

算的峭度,解决了时域峭度指标在低信噪比和冲击干扰下的局限性。

本文对变压器轨道运输车行进过程中受路基振动引起的冲击响应开展研究,利用有限元软件分析变压器对路基振动较敏感的薄弱环节,提出一种基于小波包 Teager 散布熵 (Teager Dispersion Entropy, TDE) 的非周期性瞬态冲击信号特征提取方法。

1 模型建立

1.1 实体模型建立

利用 SolidWorks 软件建立轨道运输车-变压器耦合实体模型,如图 1 所示。



图 1 轨道运输车-变压器耦合实体模型

Fig. 1 Coupled solid model of the rail transport vehicle-transformer

1.2 模型简化及有限元分析

为减小有限元计算量,对实体模型进行必要简化。将简化后模型导入 Ansys 软件,添加边界条件,添加约束副,划分网格,结果如图 2 所示。对模型添加阶跃信号作为速度进给曲线,对行走轮施加非周期性瞬态冲击力模拟路基冲击振动,模型动态应力分布如图 3 所示。可见,轨道运输车-变压器耦合分析模型在路基振动作用下的薄弱环节主要集中在油枕悬臂段、铁芯连接处、变压器与运输车固定处。

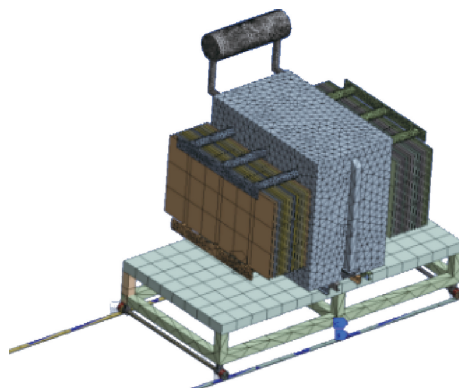


图 2 有限元网格划分

Fig. 2 Finite element mesh generation

1.3 小波包 Teager 散布熵

1.3.1 小波包分解

小波包是解决非平稳信号的典型数学方法^[16]。与傅里叶变换使用的三角函数基不同,小波变换采用的小波函数基具有正交性和快速收敛性,它可以调节

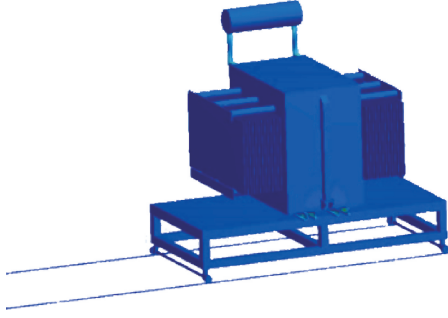


图 3 动态应力分布

Fig. 3 Dynamic stress distribution

时间尺度和平移变量以获取不同时间信息和频率信息,使用较少的小波基就能够实现突变信号的快速拟合。从频域的维度,小波包分解能够利用类似子带树的结构,对整个频带进行较好的稀疏性分割,将包含不同状态信息的信号分解到不同的维度,实现信号的有效分解,其数学过程如下:

$$\begin{cases} x_{i,j} = \sqrt{2} \sum_{n=0}^K L_n x_{i-1,j+n} \\ x_{i,j+1} = \sqrt{2} \sum_{n=0}^K G_n x_{i-1,j+n} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x_{i,j}$ 为第 i 层的第 j 子带信号 (i 为分解层数, j 为对应层的信号数); L_n 、 G_n 分别为小波包的低通滤波器和高通滤波器。

1.3.2 Teager 能量算子

Teager 能量算子 (Teager Energy Operator, TEO) 是一种非线性算子,具有加强信号瞬态冲击成分的功能,对信号中的非周期性瞬态冲击特征十分敏感^[17]。TEO 计算信号中三个相邻的波形采样点,具有良好的时间分辨率,可以快速跟踪信号波形。TEO 相较于传统希尔伯特包络解调来说,边缘效应和加窗误差更小。对小波包分解后的子带信号计算 TEO,可以有效地突出子带信号的冲击特性,计算过程可以表示为

$$\Theta[X(t)] = [\dot{X}(t)]^2 - X(t)\ddot{X}(t) \quad (2)$$

$$t_{i,j}^k = \Theta(w_{i,j}^k) \quad (3)$$

式中, $\dot{X}(t)$ 、 $\ddot{X}(t)$ 分别为信号 $X(t)$ 的 1 阶微分和 2 阶微分; Θ 为 Teager 能量算子; $t_{i,j}^k$ 为小波包子带的 Teager 能量算子; $w_{i,j}^k$ 为小波包子带。

1.3.3 多尺度散布熵

熵是评估时间序列动态特性最有力的工具之一,被广泛应用于振动信号分析领域,如常用的样本熵和排列熵^[18-19]。样本熵在处理长信号时速度较慢,排列熵计算过程丢失了信号的振幅信息。散布熵是时间序列不规则性的一种度量指标,在不考虑平均振幅和振

幅差异的情况下,有效地解决了样本熵计算和排列熵实时性差的问题^[20-21]。散布熵越大,不规则性越高;散布熵越小,不规则性越低。本文在散布熵的基础上,进一步采用 TEO 对离散数据进行解调,构造了 TDE。

对于 TEO 解调后的小波包子带序列 $t_{i,j}^k = \{t_j, j = 1, 2, \dots, N\}$, 散布熵计算过程可以表示如下:

1) 利用正态分布函数将时间序列映射到 $y = \{y_j, j = 1, 2, \dots, N\}$, 其中,

$$y_j = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_j} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (4)$$

式中, μ 、 σ^2 分别为序列的期望和方差。

2) 将 y 利用线性变换映射到 $[1, 2, \dots, c]$ 范围上:

$$z_j^c = R(cy_j + 0.5) \quad (5)$$

3) 计算嵌入向量:

$$z_i^{m,c} = [z_i^c, z_{i+d}^c, \dots, z_{i+(m-1)d}^c], i = 1, 2, \dots, N - (m-1)d \quad (6)$$

式中, m 为嵌入维数; d 为时延。

4) 计算散布模式 $\pi_{v_0^{v_1} \dots v_{m-1}} (v = 1, 2, \dots, c)$, 若 $z_{i+d}^c = v_1, \dots, z_{i+(m-1)d}^c = v_{m-1}$, 则 $z_i^{m,c}$ 为 $\pi_{v_0^{v_1} \dots v_{m-1}}$ 对应的散布模式。

5) 计算散布模式 $\pi_{v_0^{v_1} \dots v_{m-1}}$ 的概率:

$$p(\pi_{v_0^{v_1} \dots v_{m-1}}) = \frac{N(\pi_{v_0^{v_1} \dots v_{m-1}})}{N - (m-1)d} \quad (7)$$

式中, $N(\pi_{v_0^{v_1} \dots v_{m-1}})$ 为 $z_i^{m,c}$ 在 $\pi_{v_0^{v_1} \dots v_{m-1}}$ 中的映射个数。

6) 信号的散布熵定义为

$$E_D(x, m, c, d) = - \sum_{\pi=1}^{c^m} p(\pi_{v_0^{v_1} \dots v_{m-1}}) \ln[p(\pi_{v_0^{v_1} \dots v_{m-1}})] \quad (8)$$

1.3.4 小波包 Teager 散布熵

对原始信号进行小波包分解,将不同结构部位的振动信息划分为不同的子带信号。然后,通过 TEO 对每个子带进行解调,以突出子带信号中的冲击分量。采用散布熵 (Dispersion Entropy, DE) 对冲击特性较强的子带信号进行分析,其结构如图 4 所示。小波分解层数根据采样频率估计,对于轨道车路基振动信号而言,一般小波包最底层子带带宽 200~300 Hz 为宜 (避免同一信号成分的频率信息被划分到不同子带,同时最大限度地不同信号成分子带划分到不同子带,保证子带划分的稀疏性)。本文仿真信号的采样频率 (f_s) 为 8 192 Hz。根据采样定理,奈奎斯特频率为 4 096 Hz ($f_s/2$),分解层数为 3 时,最底层子带个数为 16,子带频率为 256 Hz (4 096 Hz/16 = 256 Hz)。因此就本文所用信号而言,分解层数设定为 3 较合适。

2 仿真分析

为了验证所提 TDE 对信号中冲击特征的敏感性,

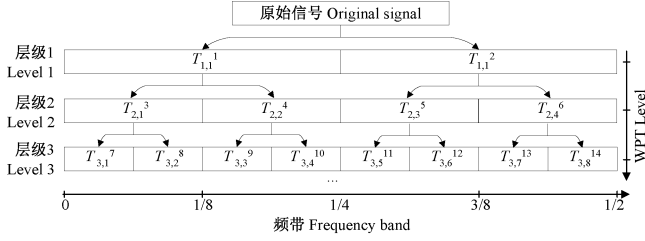


图 4 小波包 Teager 散布熵结构

Fig. 4 Structure of Teager dispersion entropy of wavelet packet

采用非周期性瞬态冲击叠加不同程度噪声信号进行分析,仿真信号数学模型为

$$X = Ae^{[-b(t-\tau)]} \sin[2\pi f(t-\tau)] + n_r(t) \quad (9)$$

式中, A 为非周期性瞬态冲击幅值; b 为阻尼比; τ 为时间参数; f 为固有频率; $n_r(t)$ 为不同程度随机噪声。

图 5(a)~图 5(h) 分别为信噪比为 $-10 \sim 4$ dB 的时域波形图,图 5(i) 为不同信噪比下的归一化指标 (为便于统计与后续分析,将指标进行归一化处理),从中能够得出结论,TDE 曲线相较于散布熵而言斜率更明显,表明 TDE 指标对于不同程度的冲击更加敏感,且在低信噪比情况下,TDE 适应性更强;TDE 相较于香农熵而言单调性更好。

轨道运输车行进过程中,受路基振动影响,车载变压器设备将产生振动响应。轨道车-变压器机械动力学模型可以看作弹簧-质量-阻尼模型,路基振动可以看作是给系统一个脉冲激励,传感器采集到的振动信号中实际是变压器不同结构件受脉冲激励下的响应,原理如图 6 所示。传感器采集到的振动信号中,除了变压器各结构件的振动响应以外,还包含振动传递路径耦合的干扰成分,因此,信号处理的目的是从多传递路径干扰中提取变压器主要结构件振动特征。

为验证本文所提方法的有效性,采用仿真数据进行分析。仿真信号的数学模型为

$$\begin{cases} y_1 = A_1 e^{[-b_1(t-t_1)]} \sin[2\pi f_1(t-t_1)] \\ y_2 = A_2 e^{[-b_2(t-t_2)]} \sin[2\pi f_2(t-t_2)] \\ Y = y_1 + y_2 + n(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中, y_1, y_2 均为变压器中受路基振动影响最大的两个结构件的振动信号; A_1, A_2 均为振动幅值; b_1, b_2 均为阻尼比; t_1, t_2 均为时间参数; f_1, f_2 均为固有频率; $n(t)$ 为传递路径耦合干扰成分。仿真信号参数如表 1 所示。

仿真信号的时域波形如图 7 所示,该时域波形中包含受路基振动影响最大的两个结构件的振动响应,受传递路径耦合干扰影响,冲击响应几乎被淹没。

利用集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)方法对仿真信号进行分析,其前 5 个 IMF 分量如图 8 所示,可见 IMF₁ 和 IMF₂ 均有较明显的冲击成分,且各结构件冲击特征发生混叠,表明

EEMD 方法对于高频冲击特征的分解能力较差。

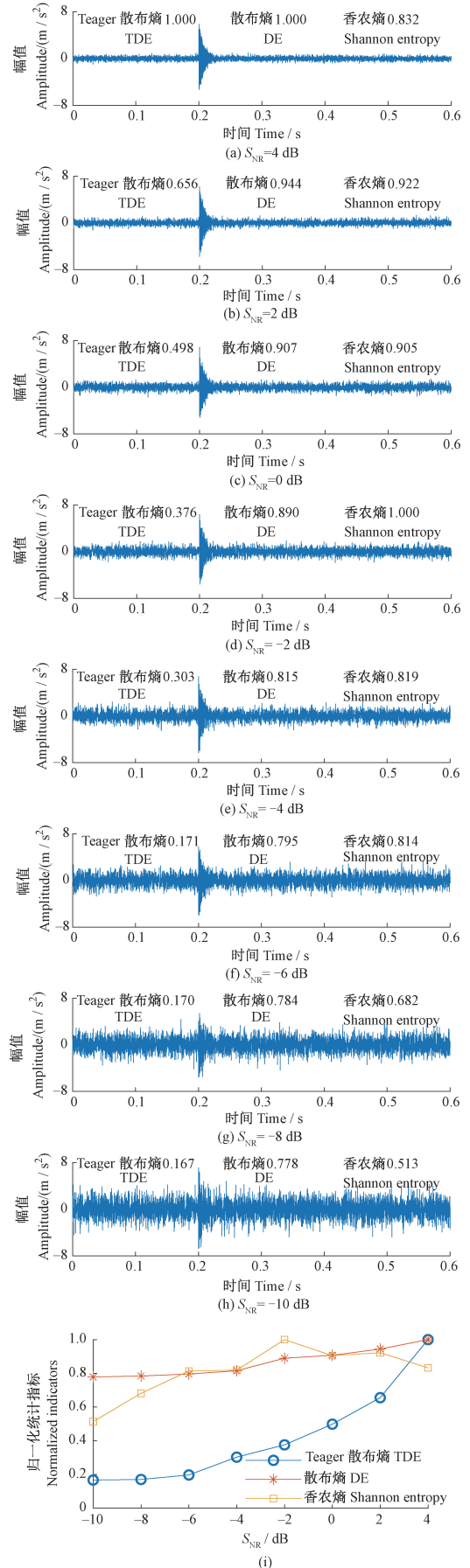


图 5 各统计指标在不同信噪比下的变化趋势

Fig. 5 Variation trend of each statistical index under different signal-to-noise ratios

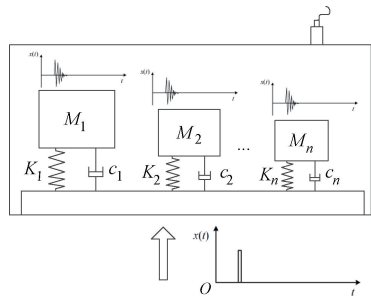


图 6 轨道车-变压器系统的机械系统动力学模型

Fig.6 Mechanical system dynamics model of the rail vehicle-transformer system

表 1 仿真信号参数

Tab.1 Parameters of the simulation signal

参数类型 Parameter type	参数值 Parameter value
采样频率 Sampling frequency/Hz	8 192
固有频率 Natural frequency f_1 /Hz	2 200
固有频率 Natural frequency f_2 /Hz	3 500
振幅 Amplitude $A_1/(m/s^2)$	5.0
振幅 Amplitude $A_2/(m/s^2)$	6.2
时间参数 Time parameter t_1/s	0.19
时间参数 Time parameter t_2/s	0.2
干扰成分 Interference component $n(t)/dB$	-10

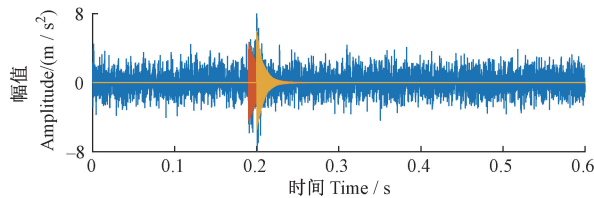


图 7 路基振动仿真信号的时域波形

Fig.7 Time domain waveform of the subgrade vibration simulation signal

利用本文所提出的小波包 TDE 算法对仿真信号进行分析。散布熵数值小表示冲击特征强,为了便于显示,实际计算过程中取散布熵的倒数,并进行归一化处理,结果如图 9 所示。由图 9 可以得出,两个共振频带区域,主共振频带位于第 4 层第 14 个子带,次共振频带位于第 4 层第 9 个子带。

对第 4 层第 14 个子带、第 4 层第 9 个子带分别进行分析,得到时域波形如图 10 所示,仿真信号中冲击响应发生时刻、冲击响应幅值、冲击振荡衰减过程等冲击特征得到较好的保留。这表明所提方法能够准确选择路基振动响应冲击特征所在子带,滤除耦合路径干扰成分,为路基振动响应分析提供可行性。

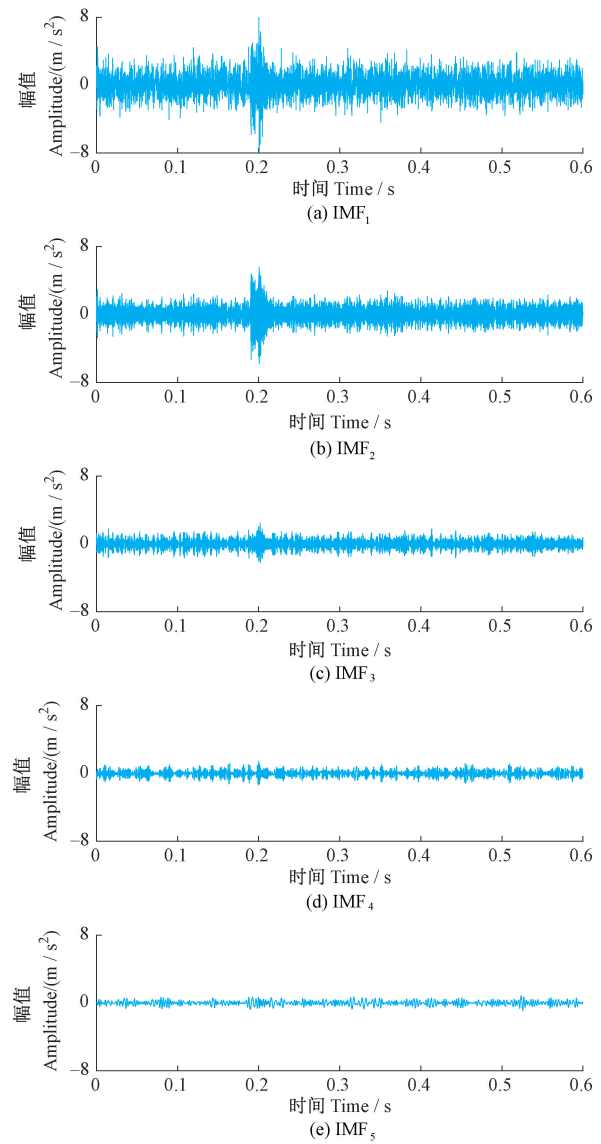


图 8 EEMD 分析结果

Fig.8 Analysis results of EEMD

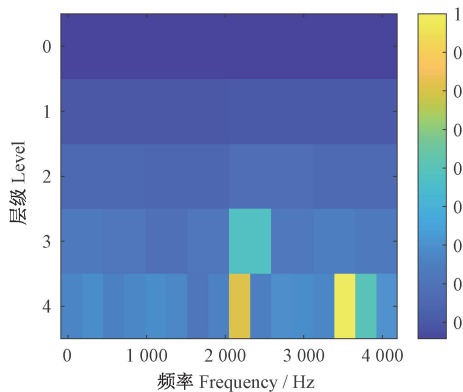


图 9 小波包 Teager 散布熵分析结果

Fig.9 Analysis results of TDE of wavelet packet

3 结论

以变压器轨道运输车为研究对象,以振动信号为分析媒介,对运输车行进过程中受路基振动引起的冲

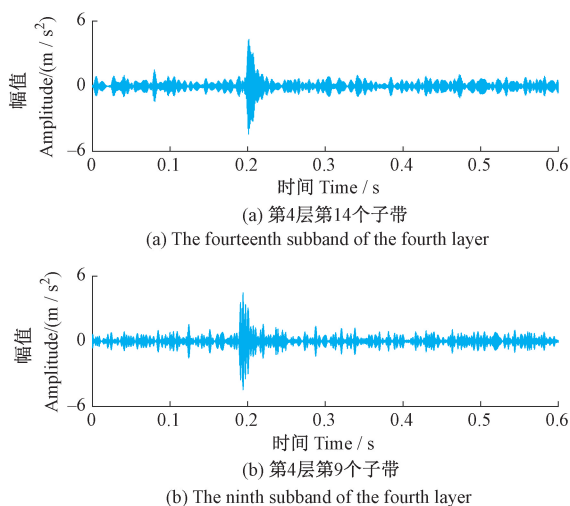


图 10 共振子带滤波后结果

Fig. 10 Results after resonance subband filtering

击响应开展研究,利用有限元仿真分析方法、信号分析方法,得出了以下结论:

1)利用有限元软件对轨道运输车-变压器耦合进行了动态应力分析,得出了轨道运输车-变压器在路基振动作用下的薄弱环节主要集中在油枕悬臂段、铁芯连接处、变压器与运输车固定处等近悬臂梁结构处。

2)提出一种基于小波包 Teager 散布熵的非周期性瞬态冲击信号特征提取方法,该方法利用小波包对信号频带进行稀疏性分割,使得振动信号分解到不同维度,通过 Teager 能量算子突出子带信号的冲击特征,利用散布熵选择包含冲击特征较多的子带信号,从而抑制传递路径耦合干扰,准确提取对路基振动敏感的结构件的振动响应。

参考文献 (References)

- [1] 张鸿武,冯楠楠,刘蕊,等.核电站主变压器设备线夹断裂原因分析[J].机械强度,2022,44(5):1101-1106.
ZHANG HongWu, FENG NanNan, LIU Rui, et al. Fracture analysis of main transformer equipment clamp in nuclear power plant [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(5): 1101-1106 (In Chinese).
- [2] 刘宇,李光茂,林艺,等.电力变压器振荡型操作冲击耐压试验及诊断技术的现场应用[J].高压电器,2020,56(6):238-242.
LIU Yu, LI GuangMao, LIN Yi, et al. Field application of power transformer oscillating switching impulse voltage withstand test and diagnosis technology [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 238-242 (In Chinese).
- [3] 刘玉鑫,武文博,张雄,等.基于 HHO-CNN 的轴承故障诊断方法研究[J].河北大学学报(自然科学版),2023,43(6):571-583.
LIU YuXin, WU WenBo, ZHANG Xiong, et al. Fault detection method of bearings based on HHO-CNN [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2023, 43(6): 571-583 (In Chinese).
- [4] 张凡,汲胜昌,师榆航,等.电力变压器绕组振动及传播特性研究[J].中国电机工程学报,2018,38(9):2790-2798.
ZHANG Fan, JI ShengChang, SHI YuHang, et al. Research on transformer winding vibration and propagation characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2790-2798 (In Chinese).
- [5] 曾纪勇,袁包钢.基于应变测试的风电齿轮箱行星轮轴承载荷作用中心的确定[J].机械传动,2024,48(6):142-146.
ZENG JiYong, YUAN BaoGang. Determination of the load center for planetary gears in wind turbine gearboxes based on strain testing [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(6): 142-146 (In Chinese).
- [6] 韩学,宋文乐,毛学魁,等.基于磁致伸缩效应的三相五柱变压器振动特性仿真与实验研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(1):48-55.
HAN Xue, SONG WenLe, MAO XueKui, et al. Simulation and experimental research on vibration characteristics of three-phase five-post transformer based on magnetostrictive effect [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(1): 48-55 (In Chinese).
- [7] 郭力荣,李国顺,陈璨,等.高速动车组牵引变压器振动特性试验研究[J].机车电传动,2021(4):85-91.
GUO LiRong, LI GuoShun, CHEN Can, et al. Experimental study on vibration characteristics of traction transformer for high-speed EMU [J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(4): 85-91 (In Chinese).
- [8] 吴会超.高速动车组车体与车下设备耦合振动研究[D].成都:西南交通大学,2012:1-147.
WU HuiChao. Study on coupling vibration of high-speed emu between carbody and underframe equipment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 1-147 (In Chinese).
- [9] 韩建伟,郑立中,郑逸非,等.基于 WindowsCE 的电网大型设备运输状态实时监测系统[J].电子设计工程,2021,29(8):169-172.
HAN JianWei, ZHENG LiZhong, ZHENG YiFei, et al. Real time monitoring of transportation state for large power equipment based on WindowsCE [J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(8): 169-172 (In Chinese).
- [10] 翟子楠,南亚明,代克杰.新型电气设备运输振动监控系统[J].制造业自动化,2015,37(8):131-133.
ZHAI ZiNan, NAN YaMing, DAI KeJie. The new vibration monitor system for electrical equipment transportation [J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(8): 131-133 (In Chinese).
- [11] 崔兴可,胥建文,杨茜,等.变压器运输过程中的振动与冲击仿真计算分析[J].山东电力技术,2018,45(3):26-28.
CUI XingKe, XU JianWen, YANG Xi, et al. Simulation and analysis of the vibration and shock in the process of transformer transportation [J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(3): 26-28 (In Chinese).
- [12] 乔志城,刘永强,廖英英.改进经验小波变换与最小熵解卷积在铁路轴承故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2021,40(2):81-90.
QIAO ZhiCheng, LIU YongQiang, LIAO YingYing. Application of improved wavelet transform and minimum entropy deconvolution in railway bearing fault diagnosis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(2): 81-90 (In Chinese).
- [13] 张坤,胥永刚,马朝永,等.经验快速谱峭度及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J].振动工程学报,2020,33(3):636-642.
ZHANG Kun, XU YongGang, MA ChaoYong, et al. Empirical fast

- kurtogram and its application in rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(3): 636-642 (In Chinese).
- [14] 郑近德,代俊习,朱小龙,等. 基于改进多尺度模糊熵的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(5): 929-934. ZHENG JinDe, DAI JunXi, ZHU XiaoLong, et al. A rolling bearing fault diagnosis approach based on improved multiscale fuzzy entropy [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 929-934 (In Chinese).
- [15] MOSHREFZADEH A, FASAN A. The Autogram: an effective approach for selecting the optimal demodulation band in rolling element bearings diagnosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 105: 294-318.
- [16] 武彩霞,李 帆,刘育博. 改进经验小波变换和改进字典学习在轴承故障识别中的应用[J]. 机械传动, 2023, 47(1): 138-146. WU CaiXia, LI Fan, LIU YuBo. Application of enhanced ewt and enhanced dictionary learning in bearing faults identification [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(1): 138-146 (In Chinese).
- [17] 万书亭,张 雄,南 冰,等. 基于PPCA-1.5维能量谱的滚动轴承故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 172-176. WAN ShuTing, ZHANG Xiong, NAN Bing, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on PPCA and 1.5-dimensional energy spectrum [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 172-176 (In Chinese).
- [18] 王振亚,姚立纲. 广义精细复合多尺度样本熵与流形学习相结合的滚动轴承故障诊断方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(20): 2463-2471.
- WANG ZhenYa, YAO LiGang. Rolling bearing fault diagnosis method based on generalized refined composite multiscale sample entropy and manifold learning [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(20): 2463-2471 (In Chinese).
- [19] 赵建岗,宁 静,宁云志,等. 基于多尺度排列熵和线性局部切空间排列的机械故障诊断特征提取[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 136-145. ZHAO JianGang, NING Jing, NING YunZhi, et al. Feature extraction of mechanical fault diagnosis based on MPE-LLTSA [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 136-145 (In Chinese).
- [20] 李从志,郑近德,潘海洋,等. 基于精细复合多尺度散布熵与支持向量机的滚动轴承故障诊断方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(14): 1713-1719. LI CongZhi, ZHENG JinDe, PAN HaiYang, et al. Fault diagnosis method of rolling bearings based on refined composite multiscale dispersion entropy and support vector machine [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(14): 1713-1719 (In Chinese).
- [21] 张 雄,张逸轩,张 明,等. 基于小波包散布熵与Meanshift概率密度估计的轴承故障识别方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(8): 133-140. ZHANG Xiong, ZHANG YiXuan, ZHANG Ming, et al. Research on bearing fault identification method based on wavelet packet dispersion entropy and Meanshift probability density estimation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(8): 133-140 (In Chinese).