

基于加速度信号的接触网拉出值检测技术*

陈鸿明¹ 周 宁¹ 鲁文伟¹ 杨子贤¹ 程 尧¹ 王 冬² 张卫华¹

(1. 西南交通大学轨道交通云在系统全国重点实验室, 610031, 成都;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春)

摘 要 [目的]为了解决电气化铁路接触网现有检测方式效率低、使用要求高的问题,特对接触网拉出值的检测方式进行研究。[方法]提出了一种将连续小波分解与随机森林相结合的检测方法,旨在实现对不同速度等级下接触网拉出值的有效检测。采用连续小波分解方法对滑板两端的吹响加速度信号进行时频分解,获得时域信号在各个频率区间的分布情况,并在相关频率范围内计算其功率。基于该功率值,构建了一个与拉出值变化趋势相关联的指标。分析了该指标在不同弓头质量、弓头悬挂刚度、高度及运行速度下的变化趋势,发现运行速度对指标具有显著影响。随后,将计算得到的指标及运行速度作为输入特征,训练、测试并验证了随机森林模型。[结果及结论]该方法能准确检测各速度下的接触网拉出值,均方根误差低至 5.84,性能优于其他现有算法。研究有效提升了接触网拉出值的测量效率,规避了传统方法对运行路况环境有一定要求的限制,为接触网拉出值检测提供了一种新的思路。

关键词 轨道交通列车; 状态监测; 弓网系统; 动力学响应; 连续小波变换; 随机森林

中图分类号 U225

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.044

Detection Technology for Catenary Stagger Value Based on Acceleration Signals

CHEN Hongming¹, ZHOU Ning¹, LU Wenwei¹,
YANG Zixian¹, CHENG Yao¹, WANG Dong²,
ZHANG Weihua¹

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] To address the inefficiency and high operational requirements of existing detection methods for catenary stagger value in electrified railways, special research on catenary stagger value detection method is conducted. [Method] A detection method combining continuous wavelet transform (CWT) and random forest (RF) is proposed to effec-

tively detect catenary stagger value across different speed levels. CWT is applied to the blowing acceleration signals at both ends of the pantograph contact strip, enabling time-frequency decomposition to reveal the distribution of time-domain signals across various frequency intervals. The power within relevant frequency ranges is calculated, and an indicator correlated with the trend of stagger values is developed based on these power values. The variation of this indicator is analyzed under different conditions in terms of pantograph head mass, pantograph head suspension stiffness, height, and operating speed, revealing that operating speed has a significant impact. Subsequently, the computed indicator and operating speed are used as input features to train, test, and validate an RF model. [Result & Conclusion] The proposed method accurately detects catenary stagger values across various operating speeds, achieving a root mean square error as low as 5.84, outperforming other existing algorithms. In brief, the study effectively enhances the measurement efficiency of catenary stagger values, avoiding the limitations imposed by previous methods on operational environmental conditions, and provides a novel approach for catenary stagger value detection.

Key words rail transit train; state monitoring; pantograph-catenary system; dynamics response; continuous wavelet transform; random forest

受电弓-接触网系统(以下简称“弓网系统”)是电气化轨道交通列车运行的能量来源。弓网系统的受流质量对列车的运行安全性、可靠性至关重要,而弓网系统的接触质量对其受流质量有着决定性的影响。其中,接触网的几何参数是影响弓网系统接触情况的关键参数。随着我国轨道交通运营里程的增长、列车运行速度的提高,对接触网的维护压力增加,故有必要研究一种有效、经济的接触网几何参数检测方法。

文献[1]通过专用的接触网参数检测车获得接

* 国家自然科学基金项目(52072319);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(P2020J025, P2021J003, K2021J004-B)

触网的部分参数,建立了车体振动数学模型,从而获得拉出值振动补偿函数。其对接触网的拉出值参数进行了更为精确的检测。文献[2]融合了均值漂移和粒子滤波算法,实现了接触网拉出值的检测。文献[3]基于机器视觉检测技术,以激光摄像传感器获得接触网的拉出值,同时使用2台激光摄像传感器跟踪车体相对钢轨平面的姿态变化,以此来补偿车体振动造成的接触网检测误差。但多台相机的数据量较大,该补偿手段极其依赖环境光线。文献[4]使用结构光立体视觉技术,将激光发射器在接触线上形成的光斑的图像坐标映射在现实坐标系中,得到了接触网的拉出值。但其光斑质量易受环境光线影响,且在高速下受到一定限制。

以上的方法均只适用于检测车上使用,且对列车的运行速度、环境光线有一定的要求,在高速全天候检测应用上受到一定限制。文献[5]通过对滑板两端的加速度信号进行小波分解提取特征,利用该特征对腕臂位置进行定位,进而进行腕臂的故障诊断。使用加速度进行检测与使用图像相比,对环境的要求较低,且现有加速度传感器的采样频率足以满足在不同速度等级下获取相关特征的要求。在此基础上,本文针对单滑板受电弓进行分析,讨论了受电弓结构参数的影响,对比不同机器学习模型的准确率。

1 理论基础

1.1 拉出值对弓头垂向加速度的影响

在受电弓与接触网相互作用的过程中,由于接触网呈Z字形分布,弓网接触力在受电弓滑板上为一个移动载荷,弓头滑板存在侧滚运动。弓网系统示意图如图1所示。

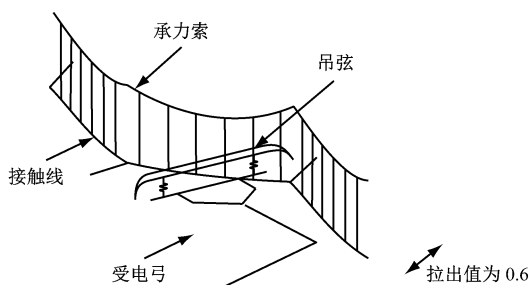


图1 弓网系统示意图

Fig. 1 Diagram of pantograph-catenary system

通过动力学仿真,对比分析了在考虑拉出值与不考虑拉出值的2种工况下,滑板两端加速度的频

率特征。在不考虑拉出值的工况中,滑板两端加速度则呈现出差异,并伴有周期性变化。滑板两侧受电弓的垂向加速度信号如图2所示。对原始加速度信号进行频谱分析的结果如图3所示。由图3可以看出:当考虑了拉出值的影响后,滑板两侧加速度信号响应中,频率超过20 Hz的成分显著增强,这些高频成分包含了平动频率和侧滚频率的倍频。

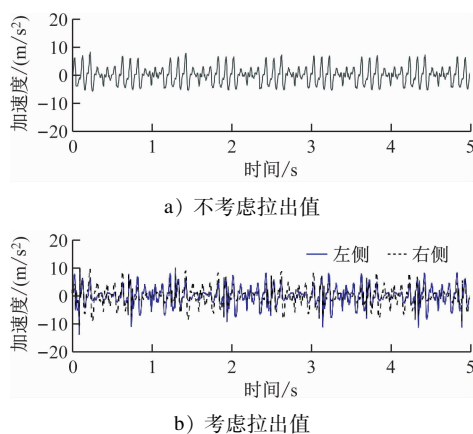


图2 受电弓垂向加速度信号

Fig. 2 Pantograph vertical acceleration signals

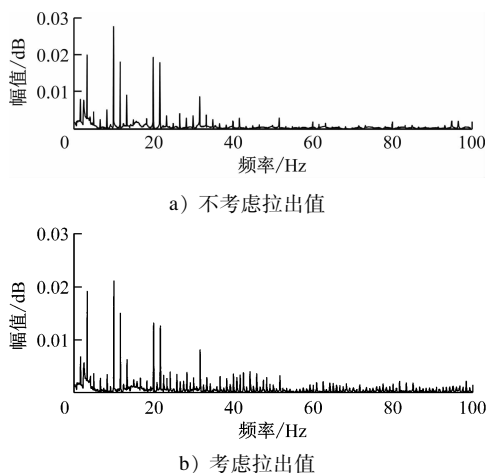


图3 加速度信号的频谱分析

Fig. 3 Frequency spectrum analysis of acceleration signals

为了确定明确拉出值对各频段的影响程度,采用小波包分解方法对滑板两侧的加速度信号进行了处理。在处理过程中,选用了dmey小波基作为基函数,对加速度信号进行三层分解^[6]。随后,对各频段的能量分布进行统计,其结果见表1。对表1的数据进行分析可知:9号节点(对应频率大于25 Hz)之后的频率响应呈现出显著增加的趋势,特别是在37.5 Hz及以上的频率范围内,其能量占比较于不考虑拉出值的情况,上升了14.29%。

表 1 主频带能量分布情况

Tab. 1 Distribution of main frequency band energy

节点号	主频带/Hz	能量占比/%	
		无拉出值	有拉出值
7	(0,12.5]	64.190 9	55.558 6
8	(12.5,25.0]	29.828 7	19.804 5
9	(25.0,37.5]	4.332 3	8.702 7
10	(37.5,50.0]	0.540 5	7.298 7
11	(50.0,62.5]	0.225 6	2.800 3
12	(62.5,75.0]	0.147 5	3.338 1
13	(75.0,87.5]	0.116 3	1.220 8
14	(87.5,100.0]	0.618 2	1.276 4

1.2 连续小波分解

小波分解相较于小波包分解,能有效避免频率混叠现象。随着列车运行速度的变化,拉出值在对各频率段产生的影响也随之变化。因此,为确保该方法适用于所有速度段,本研究采用小波分解处理特定频率范围内的信号,以便进行后续分析。

由于 CWT(连续小波变换)的结果包含更丰富的信息,相较于离散小波变换,在数据分析和解释方面展现出更高的价值,本研究选择连续小波变换作为分析工具^[7]。离散时间序列的连续小波变换定义为源信号 x_n 与小波基函数 $\psi(\eta)$ 经过平移和尺度缩放后的卷积^[8]:

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \psi^* \left[\frac{(k' - k)\delta t}{s} \right] \quad (1)$$

式中:

s ——小波尺度;

k ——局部时间指数;

N ——数据序列的长度;

ψ ——小波函数;

δ_t ——时间间隔。

本文以 Morlet 函数作为小波基函数。

将小波功率谱定义为 $P_n(s) = |W_n(s)|^2$ 。尺度 SAWP(平均小波功率)可以体现目标频率范围内信号能量的变化,计算式如下:

$$\bar{W}_n = \frac{\delta_j \delta_t}{C_\delta} \sum_{j=1}^{j_2} \frac{|W_n(s_j)|^2}{s_j} \quad (2)$$

式中:

C_δ ——小波函数的一个常数;

δ_j ——小波函数在频率空间的间隔。

尺度平均小波功率可以分析功率在一定范围

内的波动情况,本文考虑加速度信号在 30 ~ 70 Hz 之间的波动。

1.3 随机森林

RF(随机森林)是一种集成学习算法,它由多个独立的决策树组成,最终预测结果基于各决策树的预测结果综合得出^[9]。在训练过程中,原始数据通过随机采样生成不同的训练样本集。同时,在构建每棵决策树时,内部节点的分割会随机选择特征进行。因此,RF 算法展现出更强的抗噪声能力和更高的预测准确性。随机森林算法的实现步骤^[10]包括:

步骤 1 从原始数据集中随机抽取 n 个样本组成训练集,未被抽到的样本称为 OOB。

步骤 2 利用步骤 1 中生成的训练集构建一棵决策树,在拆分节点时,从当前节点的属性集合中随机选择一个包含 k 个属性的子集,并从中选择最优属性进行划分。

步骤 3 重复步骤 1 和 2,构建大量决策树,形成随机森林。

步骤 4 对每棵决策树的预测值进行评分,并以这些平均值作为最终的预测结果。

2 数据处理

2.1 特征提取

对图 2 中的加速度信号进行小波分解,图 4 展示了两侧加速度信号的小波尺度图。从图 4 中可以看出:由于腕臂的周期性分布,小波功率在某些频率范围内体现出了空间上的周期性行为。该周期性行为所分布的频率会随着运行速度的变化而变化。因此,在获取不同速度等级下拉出值的变化情况时,需要考虑一个适当的频率范围,以确保能够捕捉各速度等级下加速度频率的相关变化。

图 5 为滑板两侧加速度的尺度平均小波功率。由图 5 可知:当滑板运动到定位点位置时(拉出值在某一端达到最大值),该侧加速度信号的尺度平均小波功率会产生局部极大值,靠近定位点一侧的尺度平均小波功率大于远离定位点处;接触点在滑板上左右滑动时,随着接触点的靠近,加速度的尺度平均小波功率增加,接触点所远离的那一侧的加速度的尺度平均小波功率降低。

将滑板两侧加速度的尺度小波平均功率结合:

$$P_{1/\tau} = \lg \left(\frac{\bar{W}_{n\text{LEFT}}^2}{\bar{W}_{n\text{RIGHT}}^2} \right) \quad (3)$$

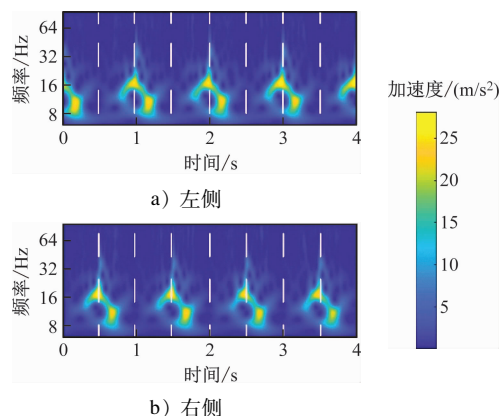


图4 两侧加速度小波分解结果

Fig. 4 Decomposition results of two-side acceleration wavelet

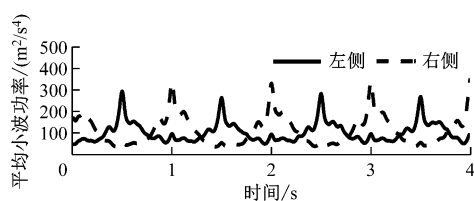
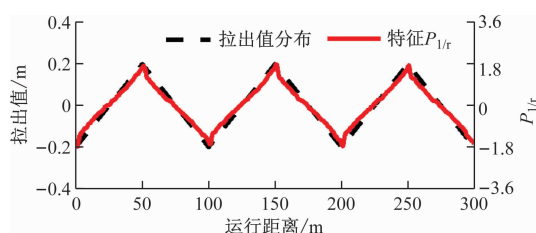


图5 两侧加速度尺度平均小波功率

Fig. 5 Average wavelet power of two-side acceleration scale

P_{Vr} 与拉出值对比结果如图6所示。由图6可以看出: P_{Vr} 的变化趋势与拉出值高度一致。当拉出值到达极值时, P_{Vr} 同样到达极值,但在两个端点之间有一定的误差。因此,将该结果作为后续测量拉出值的重要依据之一。

图6 P_{Vr} 与拉出值对比结果Fig. 6 Ratio between WP_{Vr} and stagger value

2.2 受电弓参数对 P_{Vr} 的影响

在本节中,评估了 P_{Vr} 对不同参数的敏感性。考虑了受电弓参数如质量、弹性支承的影响,定位点高度与拉出值大小的影响,以及列车运行速度的影响。

在受电弓使用过程中,滑板表面会被磨损,致使每根碳滑板在使用过程中质量会逐渐减少,进而使得弓头质量降低。因此,有必要探讨弓头质量对 P_{Vr} 的影响。以某受电弓为例,其弓头质量为 5.3 kg,碳滑板由密度为 3 g/cm³ 的浸金属碳制成,滑板

纵向宽度为 55 mm,在其寿命周期内,通常磨损 10 mm。滑板横向的磨损范围与拉出值范围相关,此处假定为 ± 300 mm。以磨损到限时的磨损体积为参考,因此考虑弓头质量范围为 4.3 ~ 5.3 kg。运行速度为 360 km/h。弓头质量受影响情况如图7所示。从图7中可以看出:随着弓头质量的变化, P_{Vr} 的幅值与变化趋势几乎没有发生改变。对多组结果进行统计可以看出,在考虑的质量范围内,质量的变化对 P_{Vr} 的均值和分布影响较小。因此在使用过程中可以不考虑质量对 P_{Vr} 的影响。

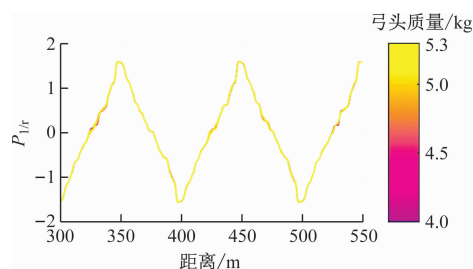


图7 弓头质量受影响情况

Fig. 7 Pantograph head mass affected situation

在受电弓的运行过程中,弓头悬挂刚度一般不发生变化,因此仅考虑弓头悬挂刚度在 5 ~ 6 kN/m 范围内时 P_{Vr} 的变化规律,悬挂刚度受影响情况如图8所示。从图8中可以看出:随着弓头悬挂刚度的变化, P_{Vr} 的极值变化不大,只有其变化规律发生微小的波动,对各个悬挂刚度下的 P_{Vr} 进行统计分析,其均值与分布规律受悬挂刚度的影响均不大,因此可以不考虑他们的影响。

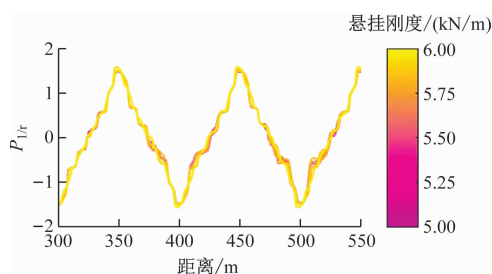


图8 悬挂刚度受影响情况

Fig. 8 Suspension stiffness affected situation

在线路运营过程中,由于装置的老化和故障,定位点会发生一定程度的偏移。因此,本文分析了定位点垂向偏移及拉出值变化对 P_{Vr} 的影响。在实际工程应用中,定位点处的垂向误差通常在 5 mm 以内,因此,本文考虑垂向误差在 -5 ~ 5 mm 范围内的情况。垂向位置受影响情况如图9所示。从图

9 中可以看出: P_{Vr} 的值和趋势几乎不受垂向位置的影响。

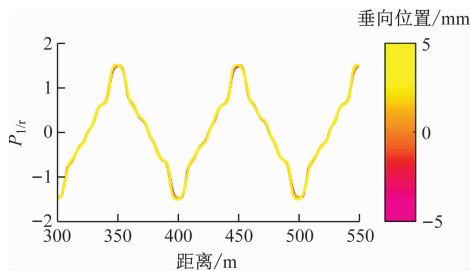


图9 垂向位置受影响情况

Fig. 9 Vertical position affected situation

在列车运行过程中,行驶速度会发生显著改变,因此,还需考虑列车运行速度对 P_{Vr} 的影响。图 10 为不同速度下该参数的变化情况及其极值的统计结果。从图 10 中可以看出:随着速度的增加,特征量 P_{Vr} 的幅值变化较大,因此,在后续分析中,需要考虑速度的影响。

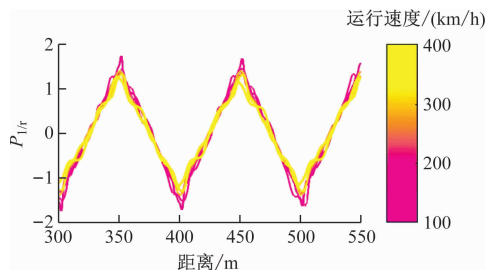


图10 运行速度的影响

Fig. 10 Operating speed affected situation

3 拉出值识别

本节中,将小波分解技术与随机森林回归模型相结合,利用弓头滑板的加速度信号实现了对接触网拉出值的检测。

采用单滑板受电弓进行弓网动力学仿真,以获得受电弓在不同速度等级(100 km/h、200 km/h、300 km/h)下通过具有不同拉出值(20 ~ 25 cm)的接触网所产生的加速度信号。共生成了 1 800 个样本数据。此外,对比了采用 VMD(应用变化模态分解)和未使用 VMD 分解得到的最后结果。所考虑的特征如表 2 所示。其中 3 个特征互不相关,且对于不同的拉出值, P_{Vr} 的分布差异较大。

RMSE(均方根误差)、MSE(平均平方误差)、MAE(平均绝对误差)和 R2(决定系数)被用来评估模型的准确性。

表2 考虑特征

Tab. 2 Characteristics considered

编号	特征	特征含义
1	$SWAP_m$	滑板中点加速度的 SWAP
2	P_{Vr}	滑板两侧加速度的尺度平均小波功率之比
3	V_{el}	列车运行速度

分别使用上述 1 800 个样本进行模型的训练,进行交叉验证。并与 LR(线性回归)、SVR(支持向量回归)、KNN(最近邻节点算法)进行对比,结果如表 3 所示。随机森林回归算法的 RMSE、MSE、MAE 的值最小,可见 RF 模型的识别效果优于其他 3 个模型。而 RF 模型的 R2 最大,说明该模型的回归拟合效果最好。

表3 不同模型的对比结果

Tab. 3 Comparison results of different models

模型	RMSE 值	MSE 值	MAE 值	R2 值
LR	8.43	56.23	6.45	0.81
SVR	7.67	45.48	4.81	0.85
KNN	6.81	34.73	3.69	0.88
RF	5.84	22.47	3.22	0.92

使用上述模型,对未训练过的速度等级进行识别,以确定该模型的通用性。使用 150 km/h、250 km/h、350 km/h 速度等级下的数据进行拉出值的识别。同样使用上述 4 个指标对比不同模型的准确性,结果如表 4 所示。

表4 其他速度等级下的对比结果

Tab. 4 Comparison results in other speed grades

模型	RMSE 值	MSE 值	MAE 值	R2 值
LR	9.28	86.19	5.33	0.80
SVR	13.81	190.69	9.08	0.55
KNN	8.40	70.88	4.40	0.85
RF	6.33	40.03	4.37	0.86

分析表 4 的结果表明,对受电弓滑板两端进行小波分解,从特定频率区间内提取特征,并应用随机森林模型进行回归拟合,可以有效地识别接触网的拉出值。该方法在不同的速度等级下均展现出良好的识别性能。

4 结语

针对接触网拉出值识别问题,本研究采用连续小波分解技术对滑板两端加速度信号进行分解,以

确定与拉出值影响相关的频率范围,并据此提取相应的特征。通过仿真分析验证,在速度变化及定位点存在一定垂向偏移的情况下,随机森林模型能够准确识别拉出值,且其识别效果相较于其他模型具有显著优势。

参考文献

- [1] 陈唐龙,于涤,陈耀坤. 接触网检测车振动补偿研究[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(4): 461.
CHEN Tanglong, YU Di, CHEN Yaokun. Study on vibration compensation of measuring cars for overhead contact line equipment[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34(4): 461.
- [2] 刘文强,刘志刚,耿肖,等. 基于均值漂移和粒子滤波算法的接触网几何参数检测方法研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(11): 30.
LIU Wenqiang, LIU Zhigang, GENG Xiao, et al. Research on detection method for geometrical parameters of catenary system based on mean shift and particle filter algorithm[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(11): 30.
- [3] 张冬凯,高仕斌,于龙,等. 车体振动对接触网检测的影响分析及补偿方法研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(9): 43.
ZHANG Dongkai, GAO Shibin, YU Long, et al. Research on influence of vehicle vibration on catenary detection and compensation method[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(9): 43.
- [4] LIU Z, LIU W, HAN Z. A high-precision detection approach for catenary geometry parameters of electrical railway[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(7): 1798.

- [5] BLANCO B, ERRANDONEA I, BELTRÁN S, et al. Panhead accelerations-based methodology for monitoring the stagger in overhead contact line systems[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 171: 104742.
- [6] 张磊,郑侃,孙连军,等. 基于小波包敏感频带选择的复材铣边颤振监测研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(3): 140.
ZHANG Lei, ZHENG Kan, SUN Lianjun, et al. Investigation on chatter monitoring of composite milling edge based on the selection of sensitive frequency band of wavelet packet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(3): 140.
- [7] KIRBY J F. Which wavelet best reproduces the Fourier power spectrum? [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(7): 846.
- [8] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61.
- [9] ZHANG P. A novel feature selection method based on global sensitivity analysis with application in machine learning-based prediction model[J]. Applied Soft Computing, 2019, 85: 105859.
- [10] SÁNCHEZ René-Vinicio, ZURITA Grover, CERRADA Mariela. Fault diagnosis of spur gearbox based on random forest and wavelet packet decomposition[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2015, 3(10): 277.

· 收稿日期:2022-11-27 修回日期:2023-01-11 出版日期:2025-03-10
Received:2022-11-27 Revised:2023-01-11 Published:2025-03-10
· 第一作者:陈鸿明,硕士研究生, chm@my.swjtu.edu.cn
通信作者:周宁,副研究员, zhou_ningbb@sina.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 235 页)

参考文献

- [1] 陈维荣,王颖民,李秉训,等. 氢能轨道交通的研究现状与发展趋势[J]. 机车电传动, 2023(3): 1.
CHEN Weirong, WANG Yingmin, LI Bingxun, et al. Overview on current research status and development trends of hydrogen-powered rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(3): 1.
- [2] SUN L, SHEN J, HUA Q, et al. Data-driven oxygen excess ratio control for proton exchange membrane fuel cell[J]. Applied Energy, 2018, 231: 866.
- [3] WANG D, LIN X, ZHANG Y. Fuzzy logic control for a parallel hybrid hydraulic excavator using genetic algorithm[J]. Automation in Construction, 2011, 20(5): 581.
- [4] 徐连兵. 我国氢能利用前景与发展战略研究[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(9): 1.

- XU Lianbing. Research on the prospect and development strategy of hydrogen energy in China[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(9): 1.
- [5] 汪培桢,杨升. 氢能有轨电车应用综述[J]. 装备制造技术, 2020(2): 196.
WANG Peizhen, YANG Sheng. Overview of hydrogen power tram applications[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(2): 196.

· 收稿日期:2024-05-17 修回日期:2024-06-06 出版日期:2025-03-10
Received:2024-05-17 Revised:2024-06-06 Published:2025-03-10
· 第一作者:韩玉,硕士研究生, 2231403@tongji.edu.cn
通信作者:韩斌,教授, hanbin@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license