

轨道交通复合线路轮轨力实时识别网络研究*

张泽腾^{1,2} 王金海^{1,2} 杨建伟^{1,2} 姚德臣^{1,2}

(1. 北京建筑大学机电与车辆工程学院, 100044, 北京;

2. 城市轨道交通列车服役性能保障北京市重点实验室, 100044, 北京)

摘要 [目的] 轮轨力对研究轨道交通列车运行状态、车轮不圆及轨道波磨等问题具有重要作用。现有轮轨力识别方法存在数据采集困难、使用成本大, 无法识别轨道交通线路条件下的轮轨力等问题, 需对轨道交通线路轮轨力实时识别网络进行研究。[方法] 基于卷积神经网络构建轨道交通线路轮轨力实时识别网络。根据某型城市轨道交通拖车实测数据, 采用 SIMPACK 软件建立仿真模型。基于仿真数据, 研究了轮轨力实时识别网络在不同曲线半径线路和不同列车运行速度等工况下对横向和垂向轮轨力的识别精度与速度。[结果及结论] 轮轨力实时识别网络对轮轨垂向力的识别能力优异, 其相关系数均能达到 0.99, 平均绝对误差约为 500 N 且仅为真实值的 1%; 该网络对轮轨横向力的识别能力随着列车运行速度的提高有所下降, 但在可接受范围内, 其相关系数由 0.93 降低至 0.65, 平均绝对误差由 1 480 N 提高至 3 000 N 且约为真实值的 20%。轮轨力实时识别网络具备较快的计算速度, 能够满足轮轨力实时识别的需求。

关键词 轨道交通; 复合线路; 轮轨力实时识别网络

中图分类号 U211.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.08.008

Research on Real-time Wheel-rail Force Identification Network of Rail Transit under Compound Line Conditions

ZHANG Zeteng^{1,2}, WANG Jinhai^{1,2}, YANG Jianwei^{1,2}, YAO Dechen^{1,2}

(1. School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 100044, Beijing, China; 2. Beijing Key Laboratory of Performance Guarantee on Urban Rail Transit Vehicles, 100044, Beijing, China)

Abstract [Objective] Wheel-rail force plays an important role in the study of train running state, wheel off roundness and rail corrugation in rail transit. Current wheel-rail force identification methods have some problems, such as difficulty in data collection, high cost and inability to identify wheel-rail force

under rail transit line conditions, so it is necessary to study the real-time wheel-rail force identification network of rail transit lines. [Method] A real-time wheel-rail force identification network of rail transit lines is constructed based on convolutional neural network. According to the measured data of a type of urban rail transit trailing car, the simulation model is established using SIMPACK software. Based on the simulation data, the accuracy and speed of the real-time wheel-rail force identification network for the lateral and vertical wheel-rail forces under working conditions, such as different curve radii lines and different train running speeds are studied. [Result & Conclusion] The real-time wheel-rail force identification network has an excellent ability to identify the wheel-rail vertical force, with the correlation coefficients all up to 0.99, and the average absolute error about 500 N and only 1% of the true value. The identification ability of the network for wheel-rail lateral force decreases with the increase of train operating speed, but it is still within the acceptable range. The correlation coefficient decreases from 0.93 to 0.65, and the average absolute error increases from 1 480 N to 3 000 N, which is approximately 20% of the actual value. The proposed network has a fast calculation speed and can meet the needs of wheel-rail force real-time identification.

Key words rail transit; composite line; real-time wheel-rail force identification network

保障行车安全是轨道交通列车运行的基本要求, 其中轮轨力的变化不仅关乎乘客乘车舒适度, 更直接关系行车安全。因此, 针对轮轨力的实时监测是非常重要的。轮轨力常用的识别方法主要有直接法^[1]和间接法^[2-3]。其中测力轮对是直接法的一种, 其优点是能够高精度、长距离地实时识别轮轨力, 但因其高昂的使用成本该方法难以推广使用。间接法主要运用的是轮轨力识别技术, 即使用列车动力学数据求解轮轨力^[4-5]。该方法中的列车

* 国家自然科学基金项目(52205083, 52272385); 北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金项目(L231016)

动力学数据更容易获取且试验成本低廉,因此,轮轨力识别技术更容易推广,且有重要的研究意义和工程价值。

文献[6]使用多体代码为循环神经网络生成训练数据。该代码以平滑的轨道几何形状为输入,特定列车的接触力为输出。该方法精度较低,同时会受到钢轨轮廓监测的限制而产生额外的成本。文献[7]基于前馈神经网络研究了不同输入下该网络对轮轨间横、垂向力及轨道不平顺的识别效果,该研究方法不具有实时性,且只研究了前馈神经网络在直线工况下的识别效果,并未对实际中直、曲线组合这一复合线路进行研究。文献[8]提出一种基于径向基函数网络的连续测量轮轨力的方法,但受限于径向基函数网络的性能,该模型未能达到较好的效果。上述研究存在输入不合理、仿真线路单一及网络缺少实时性等问题。因此,亟须提出一种输

入合理,且能应对复合线路,满足多个轮轨力同时识别且准确性高的识别方法。本文通过构建轮轨力实时识别网络,使用 SIMPACK 软件建立仿真模型,对轨道交通列车实时轮轨力识别技术进行了研究,以为后续工程应用提供参考。

1 轮轨力实时识别网络理论

1.1 基于卷积神经网络的轮轨力识别方案设计

通过列车动力学数据识别轮轨力数据,即通过现有轨道交通列车动力学数据实时、准确地拟合出轮轨力数据及其变化趋势,本质上是高度非线性的回归问题,卷积神经网络是一种直接从高维数据中自动深度提取特征的神经网络,可以完成分类、预测和回归问题等任务。本文基于卷积神经网络设计了一套轮轨力识别方案。轮轨力识别流程如图 1 所示。

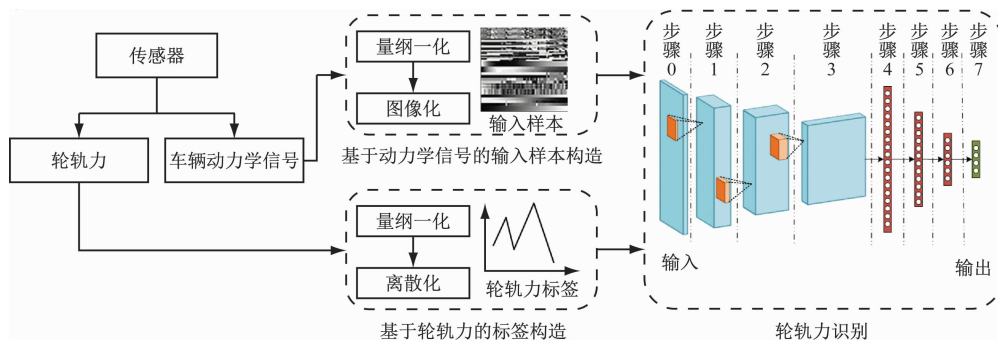


图 1 轮轨力识别流程图

Fig. 1 Wheel-rail force identification flow chart

1.2 基于动力学信号的样本构造

动力学信号具有时序特性,不同信号之间还具有耦合特性。因此,针对这些特性将动力学信号拼接成矩阵,以图像的形式输入轮轨力实时识别网络进行训练。为研究该网络的最佳识别效果,将不同动力学数据组合分别作为输入进行研究。轮轨力实时识别网络输入的物理量如表 1 所示。

表 1 轮轨力实时识别网络输入的物理量

Tab. 1 Physical quantity input of real-time wheel-rail force identification network

轮轨力实时识别网络	物理量名称
网络 1	振动加速度
网络 2	振动加速度和角速度
网络 3	振动加速度和一系弹簧垂向位移

以轮轨力实时识别网络 3 为例,输入样本的构

造方式如下:使用时间范围在 $t-0.198$ s (t 为预测时间,单位 s) 至 t 的动力学响应数据拼接成的图像样本,以及 t 时的轮轨横向和垂向力。定义 $X_{100 \times 10} = [X_1 \ X_2 \ \cdots \ X_{10}]$ 为时序序列数据组成的动力学信号矩阵。矩阵的排列方式为: X_1 为车体垂向振动信号, X_2 为转向架垂向振动信号, X_3 为右轴箱垂向振动信号, X_4 为左轴箱垂向振动信号, X_5 为右侧一系弹簧位移信号, X_6 为左侧一系弹簧位移信号, X_7 为车体横向振动信号, X_8 为转向架横向振动信号, X_9 为右轴箱横向振动信号, X_{10} 为左轴箱横向振动信号。

1.3 基于轮轨力的标签构造

将连续的轮轨力数据离散化和量纲一化,使用 t 时的轮轨力数据作为标签,提供给轮轨力实时识别网络进行学习。输出层的排列方式为: Y_1 为右轮垂向力, Y_2 为左轮垂向力, Y_3 为右轮横向力, Y_4 为左

轮横向力。

1.4 轮轨力实时识别网络结构设计

采用 MATLAB 软件搭建轮轨力实时识别网络模型。该网络使用了 3 个卷积层和 4 个全连接层,每个卷积层后连接 1 个 ReLU(线性整流单元)激活层。全连接层的神经元数量依次为 2 000、1 000、500 和 4。卷积层中卷积核大小如表 2 所示。工作站参数如下:CPU(中央处理器)为 Intel i9-10900F, GPU(图形处理器)为 NVIDIA RTX 3070,采用 16 GiB 运行内存。

表 2 卷积层中卷积核大小

Tab. 2 Size of convolution kernel in convolutional layer			
轮轨力实时识别网络	各卷积层中的卷积核大小/(像素×像素)		
	卷积层 1	卷积层 2	卷积层 3
1	4×10	4×10	2×10
2	4×10	4×10	6×10
3	4×10	4×10	4×10

2 轮轨力实时识别仿真分析

2.1 数据来源

轮轨力实时识别网络训练与识别研究的数据采用 SIMPACK 软件计算获得。依据某型城市轨道交通拖车实测数据建立模型。模型中的一系悬挂、二系悬挂、垂向减振器及横向减振器均采用力元代替。轮轨间接触算法选择简化的轮轨蠕滑力计算程序 FASTSIM。轨道高低不平顺和水平不平顺采用德国轨道不平顺谱。

2.2 仿真工况

实际线路通常是直线和曲线的组合,这种复杂的线路条件对轮轨力实时识别网络识别轮轨力构成巨大挑战。本文设置了 400 m、600 m 及 800 m 等 3 种曲线半径,以及 10 m/s、15 m/s 及 20 m/s 等 3 种列车运行速度共 9 种组合工况进行仿真。每种工况下的线路由前后各 1 段长度为 100 m 的直线和中间长度为 300 m 的曲线组合而成。通过改变轨道不平顺,每种工况进行 15 次仿真计算。将 10 次仿真数据作为训练集,5 次仿真数据作为验证集。采样频率设置为 500 Hz。

2.3 评价指标

轮轨力实时识别网络的损失函数采用平方损失函数,优化算法选择 SGDM(随机梯度下降算法)。学习率设置为 0.01,批次设置为 100,一共进

行 10 轮迭代。本文选择决定系数 R^2 和绝对平均误差 E_{MA} 作为衡量轮轨力实时识别网络识别准确性的两项指标,其中 R^2 可用来衡量模型对因变量变异解释程度。通常认为当 $R^2 \geq 0.6$ 时,模型能够较好地拟合数据及其变化趋势。 R^2 的计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

式中:

y_i ——真实值;

\hat{y}_i ——网络预测值;

\bar{y} ——真实值的平均值;

n ——预测的数据量。

E_{MA} 衡量了模型识别值与真实观测值之间的平均绝对差异。 E_{MA} 值越小,说明模型的识别准确度越高。 E_{MA} 的计算公式为:

$$E_{MA} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (2)$$

3 轮轨力实时识别网络对不同线路的识别效果

3.1 不同曲线半径线路

经试验发现,仅当轮轨力实时识别网络输入为振动和位移信号时,该网络具备复合线路下识别轮轨力的能力。列车以 10 m/s 的速度通过 400 m、600 m 和 800 m 半径的曲线线路时的 R^2 和 E_{MA} 如表 3 所示。

表 3 列车以 10 m/s 的速度通过不同曲线半径线路时的 R^2 和 E_{MA}

Tab. 3 R^2 and E_{MA} of trains passing through lines with different curve radii at a speed of 10 m/s

项目	曲线半径/m	R^2	E_{MA}/N
轮轨垂向力	400	0.988	559.9
	600	0.991	452.7
	800	0.989	470.6
轮轨横向力	400	0.941	1 695.4
	600	0.936	1 481.8
	800	0.889	1 482.8

从表 3 中可以看出:在相同列车运行速度下,曲线半径的改变对轮轨力识别无影响;通过轮轨力实时识别网络识别的轮轨垂向力的 R^2 为 0.99, E_{MA} 约

为 500 N 且不足实际轮轨垂向力的 1%, 识别效果优越。通过轮轨力实时识别网络识别的轮轨横向力的 R^2 为 0.92, E_{MA} 为 1 500 N 且约为实际轮轨横向力的 10%。通过对比可知, 由轮轨力实时识别网络识别的轮轨垂向力的性能优于轮轨横向力。

列车以 10 m/s 的速度通过半径为 600 m 的曲线线路时, 其轮轨垂向力和轮轨横向力的识别值和真实值, 如图 2 所示。

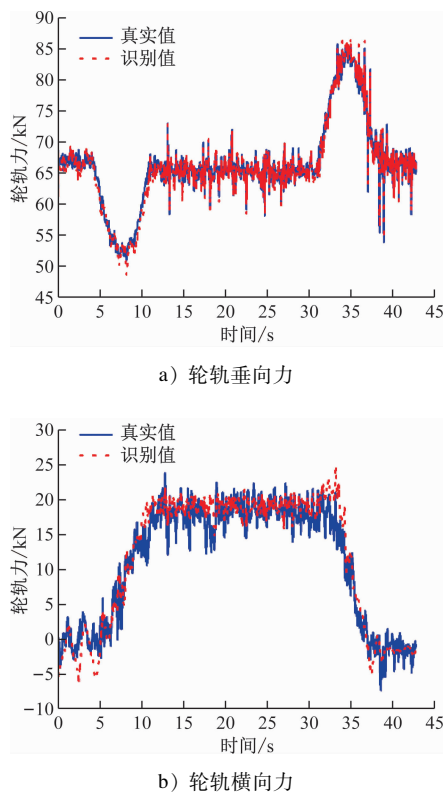


图2 列车以 10 m/s 的速度通过半径为 600 m 曲线线路时的轮轨力时域图

Fig. 2 Wheel-rail time-domain diagram of train passing a line with 600 m radius curve at 10 m/s speed

从图 2 中可以看出: 轮轨力实时识别网络能正确拟合出轮轨垂向力的数值及其变化趋势; 除此之外, 该网络也能正确拟合轮轨横向力的变化趋势, 但其误差较轮轨垂向力更大。

3.2 不同列车运行速度

列车在 3 种运行速度下通过半径为 600 m 的曲线线路时的 R^2 和 E_{MA} , 如表 4 所示。

由表 4 可以看出: 列车运行速度变化对轮轨垂向力识别无明显影响。但列车运行速度增加后, 轮轨力实时识别网络对轮轨横向力的识别效果明显

表 4 不同列车运行速度下的轮轨力识别结果

Tab. 4 Identification results of wheel-rail forces at different train operating speeds

项目	列车运行速度/(m/s)	R^2	E_{MA}/N
轮轨垂向力	10	0.991	452.7
	15	0.990	507.4
	20	0.987	604.3
轮轨横向力	10	0.936	1 481.8
	15	0.692	3 086.6
	20	0.647	2 984.6

下降, 但处于可接受的范围内。通过网络识别的轮轨垂向力的 R^2 仍能保持在 0.99, E_{MA} 约为 500 N 且不足真实值的 1%, 识别效果优越。通过网络识别轮轨横向力时, 当列车运行速度为 10 m/s, R^2 为 0.936, E_{MA} 约为 1 500 N 且为真实值的 10%。列车运行速度提高后, R^2 降低为 0.647, E_{MA} 提高至约 3 000 N 且为真实值的 20%。

列车以 20 m/s 的速度通过半径为 600 m 的曲线线路时轮轨力的识别值和真实值, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出: 轮轨力实时识别网络仍能正确拟合出轮轨垂向力的数值及其变化趋势。虽然轮轨横向力的识别效果明显下降, 但仍能基本拟合出轮轨力的变化趋势, 轮轨力处于可接受的范围内。

根据列车运行速度的增加, 轮轨力实时识别网络对轮轨横向力识别能力下降这一情况推断: 当列车运行速度提高后, 列车的蛇行运动更加剧烈, 轮轨横向力变得更加复杂, 高频信号增多。但该网络的输入中缺少含有高频信息的数据, 导致网络的识别能力下降。对此研究了列车运行速度为 20 m/s 的条件下, 列车通过半径为 600 m 的曲线线路时的轮轨力频谱图, 如图 4 所示。由图 4 可见: 轮轨力实时识别网络对轮轨垂向力中高频和低频部分的拟合效果优异, 但对轮轨横向力的高频部分拟合效果较差。

轮轨力实时识别网络在 9.7×10^5 个样本上的总识别时间约为 225 s, 平均识别时间为 0.000 2 s, 低于采样间隔。由此可判断该网络具备实时识别轮轨力的能力。在列车动力学试验中, 该网络可以运用在车载轮轨力识别系统中, 在降低使用成本的同时, 可达到实时、准确识别轮轨力的效果。

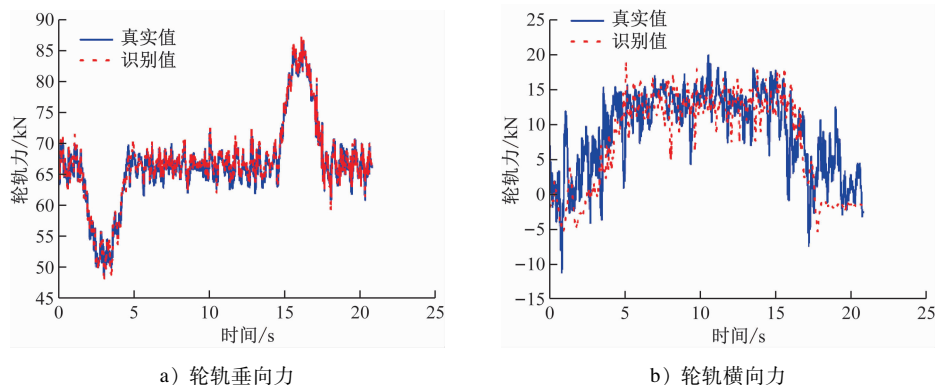


图 3 列车以 20 m/s 的速度通过半径为 600 m 的曲线线路时轮轨力的识别值和真实值

Fig. 3 Identification value and true value of wheel-rail force of train passing a line with 600 m radius curve at 20 m/s speed

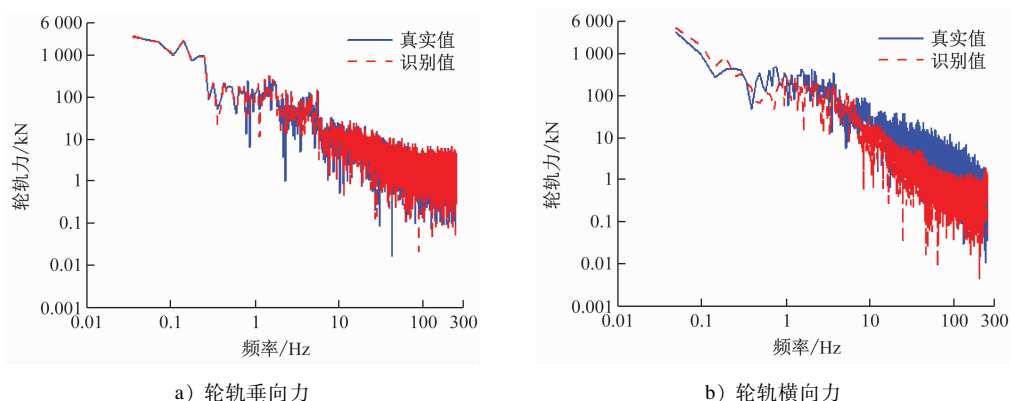


图 4 列车以 20 m/s 的速度通过半径为 600 m 的曲线线路时的轮轨力频域图

Fig. 4 Frequency domain diagram of wheel-rail force when train passing a line with 600 m radius curve at 20 m/s speed

4 结论

1) 一系弹簧的垂向位移在复合线路条件下具有其他动力学数据没有的规律性变化,这使得轮轨力实时识别网络能在复合线路工况下进行轮轨力识别。

2) 轮轨力实时识别网络对轮轨垂向力的识别能力优异。各工况下相关系数均能保持在 0.99 左右,绝对平均误差为 500 N 左右,且约为真实值的 1%。该网络对轮轨横向力的识别能力随着列车运行速度提高有所下降,但仍在可接受的范围内。各工况下相关系数从 0.936 降低至 0.647,绝对平均误差由 1 500 N 提高至 3 000 N 左右,约为真实值的 20%。

3) 轮轨力实时识别网络具备实时识别轮轨力的能力,故在实际工程中可将该网络布置在动力学试验中。通过动力学信号实时识别轮轨力能降低试验成本,且具有重要的研究意义。

参考文献

- [1] 丁然, 李强, 任尊松. 城际动车组轮轨力统计特征[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 108.
DING Ran, LI Qiang, REN Zunsong. Statistics characters of wheel/rail loads of intercity EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 108.
- [2] 朱涛, 肖守讷, 阳光武, 等. 车辆垂向轮轨力识别方法与试验[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(5): 892.
ZHU Tao, XIAO Shoune, YANG Guangwu, et al. Vertical wheel/rail force identification method for railway vehicle and its test validation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(5): 892.
- [3] 孙善超, 刘金朝, 王卫东, 等. 高速铁路轮轨作用力的全息辨识模型[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 190.
SUN Shanchao, LIU Jinzhao, WANG Weidong, et al. Holographic identification model of wheel & rail contact force for high-speed railway[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(11): 190.

(下转第 56 页)

力减小,而车体垂向加速度和横向加速度均增加,轮重减载率均增加,脱轨系数呈减小趋势。

2) 车辆上、下坡过岔时,摩擦因数对轮轨动态相互作用及车体横向加速度影响较大,随着摩擦因数的增加,轮轨垂向力与横向力呈减小趋势,车体横向加速度则随摩擦因数增大而增大。

3) 车辆下坡过岔时,行车速度和摩擦因数增加对各项动力学指标影响较大,且下坡时的各项动力学指标峰值大于上坡时的动力学响应,可在地铁车辆下坡过岔时采取一定的加强防护措施。

参考文献

- [1] 张梦楠,颜乐,王平,等. 长大坡道铺设无缝道岔可行性分析[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(2): 13.
ZHANG Mengnan, YAN Le, WANG Ping, et al. Feasibility analysis of seamless turnout on long steep grade[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(2): 13.
- [2] 刘伟,刘春明. 12‰坡道上铺设42号道岔的理论研究与工程应用[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(10): 37.
LIU Wei, LIU Chunming. Theoretical study and engineering application of laying No. 42 turnout on a 12‰ ramp[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(10): 37.
- [3] 张荣鹤. 高速铁路大坡道上18号和42号有砟道岔受力分析[J]. 山西建筑, 2020, 46(23): 119.
ZHANG Ronghe. Stress analysis of laying No. 18 and No. 42 ballasted turnout on large ramp of high speed railway[J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(23): 119.
- [4] 王仲林,曾勇,易思蓉. 地铁正线40.0‰最大坡度对行车特性的影响[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(5): 937.
WANG Zhonglin, ZENG Yong, YI Sirong. Influence of 40.0‰ maximum gradient of metro main line on running characteristics of trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(5): 937.
- [5] 金学松,刘启跃. 轮轨摩擦学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 127-128.
JIN Xuesong, LIU Qiyue. Tribology of wheel and rail[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004: 127-128.
- [6] 杨皓杰,肖守讷,高天阳. 不同摩擦因数对地铁列车曲线碰撞的影响[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 19.
YANG Haojie, XIAO Shoune, GAO Tianyang. Effect of different friction coefficient on curve collision of subway vehicles[J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(1): 19.
- [7] 薛文根,陆胤宁,王文华,等. 基于轮轨润滑的轨道交通车辆轮轨磨耗及噪声控制[J]. 机车电传动, 2020(2): 88.
XUE Wengen, LU Yinning, WANG Wenhua, et al. Wheel/rail wear and noise control of rail transit vehicles based on wheel/rail lubrication[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(2): 88.
- [8] 王平,郭强,陈嘉胤,等. 轮轨润滑对高速道岔曲尖轨磨耗的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(9): 17.
WANG Ping, GUO Qiang, CHEN Jiayin, et al. Research on the effect of wheel-rail lubrication on curved switch rail wear in high-speed turnout[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(9): 17.
- [9] 罗仁,石怀龙. 铁道车辆系统动力学及应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018: 301-303.
LUO Ren, SHI Huailong. Dynamics of railway vehicle systems and application[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2018: 301-303.
- 收稿日期:2022-03-24 修回日期:2022-12-03 出版日期:2024-08-10
Received:2022-03-24 Revised:2022-12-03 Published:2024-08-10
· 第一作者:陈乔松,正高级工程师,chenqiaosong@gzmt.com
通信作者:徐井芒,教授,mang080887@163.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49页)

- [4] URDA P, ACEITUNO J F, MUÑOZ S, et al. Artificial neural networks applied to the measurement of lateral wheel-rail contact force: a comparison with a harmonic cancellation method[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 153: 103968.
- [5] 孙善超. 高铁轨道-车辆系统轮轨力辨识及应用[J]. 中国铁路, 2018(6): 82.
SUN Shanchao. Identification and application of wheel-rail forces of HSR track-vehicle system[J]. China Railway, 2018(6): 82.
- [6] MARTIN T P, ZAAZAA K E, WHITTEN B, et al. Using a multi-body dynamic simulation code with neural network technology to predict railroad vehicle-track interaction performance in real time[C]//Proceedings of ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Las Vegas: ASME(The American Society of Mechanical Engineers), 2009: 1881.
- [7] GADHAVE R, VYAS N S. Rail-wheel contact forces and track irregularity estimation from on-board accelerometer data[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(6): 2145.
- [8] LI Y, LIU J, WANG K, et al. Continuous measurement method of wheel/rail contact force based on neural network[C]//International Conference on Transportation Engineering. Chengdu: ICTE, 2011: 2533.
- 收稿日期:2023-09-26 修回日期:2024-01-12 出版日期:2024-08-10
Received:2023-09-26 Revised:2024-01-12 Published:2024-08-10
· 第一作者:张泽腾,硕士研究生,1017264064@qq.com
通信作者:王金海,副教授,wangjinhai@bucea.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