

一种轮轨接触力解耦识别方法

韦凯¹, 张镇晖^{1†}, 肖浩田², 尹盛文², 崔晓璐³

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075;

3. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要:为研究重载列车在运行中轮轨接触力的准确识别和影响规律,建立列车轴重、牵引力矩和行驶速度对轮轨接触力的影响规律的函数关系,提出一种轮轨接触力解耦识别方法.首先,采用数值仿真建模,通过控制变量法将各变量在区间内进行多个水平试验,得出轮轨接触点三个方向接触力关于轴承、牵引力矩和行驶速度的影响规律.其次,进行车轮中非接触点应变到接触力的解耦分析,结合BP神经网络方法,对仿真试验得到的数据进行训练.最后,得到接触力关于列车轴承、牵引力矩和行驶速度的函数表达式,通过训练后的神经网络实现实时预测轮轨接触力解耦识别,拟合及训练结果 R^2 达到0.9以上.

关键词:重载列车;轮轨系统;神经网络;接触力;解耦

中图分类号:U239.4

文献标志码:A

A Decoupling Identification Method for Wheel-rail Contact Forces

WEI Kai¹, ZHANG Zhenhui^{1†}, XIAO Haotian², YIN Shengwen², CUI Xiaolu³

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

3. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To achieve precise identification of the wheel-rail contact force and investigate the influence patterns of heavy haul train operations, this work establishes the functional relationships governing the influence rules of train axle weight, train traction force, and running speed on the contact forces. A decoupling identification methodology for the contact force is originally proposed. Initially, the numerical simulations are employed, with varying levels of each variable tested by using the control variable method within specified intervals. Furthermore, the functional relationships for the contact force at the wheel-rail interface in three-dimensional directions are derived relative to the train axle weight, train traction force, and running speed. Subsequently, a decoupling analysis is conducted to examine the non-contact point strain to the contact force. The data acquired from the simulation tests are then utilized in training a neural network model based on backpropagation (BP) neuron network. The study finally obtains the expression of the contact force as a function of train axle weight, train traction and running speed, and realizes

* 收稿日期:2024-07-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFF0609400), National Key Research and Development Program of China (2022YFF0609400)

作者简介:韦凯(1988—),男,湖南益阳人,湖南大学教授

† 通信联系人, E-mail: zzhuihui@hnu.edu.cn

the real-time prediction of the decoupling identification of wheel-rail contact force through the trained neural network, and the R^2 of the fitting and training results reaches more than 0.9.

Key words: heavy haul trains; wheel-rail systems; neural networks; contact forces; decoupling

重载铁路技术因其可解决大宗货物运输、效率高、可靠性好、启动/制动快速等优点受到世界各国的广泛重视和支持,已被国际公认为轨道交通发展的重点方向^[1]. 其中,轮轨系统是轨道交通系统的重要组成部分,它的存在可以大大减小列车运行阻力,增大列车轴重并提高运行效率,被持续应用于重载铁路运输中^[2]. 国内外学者针对列车轮轨问题开展了丰富的研究,包括列车结构特性,轮轨磨损磨耗以及列车动态响应等. 例如,赵长龙等^[3]通过建立包含简化车体和动力转向架的缩比模型,开展了严寒天气下列车转向架结冰特性的研究,得到转向架结冰特性和结冰速率模型,其在一定条件下可实现对转向架结冰质量的预测. 张迅等^[4]研究了龙卷风作用下大跨度桥梁的车-轨-桥系统动力响应和行车安全性,通过建立系统动力方程并结合分离迭代法,求解了系统的动力响应,利用数值方法进行模拟验证,得到了列车在特定风级下的安全通过车速阈值. 马瑞峰等^[5]针对重载铁路曲线段存在的曲线半径异常问题,基于重载列车-钢轨动力学耦合模型,结合现场调研的曲线半径异常数据,对不同曲线半径和半径异常量下的车辆-钢轨动力响应特性变化进行深入研究. 该研究发现即使曲线半径发生较小变化,对于列车运行安全性也存在较大的影响. 朱虹燕^[6]为了提高重载列车牵引性能,保障列车安全平稳地运行,对重载列车防滑黏着控制和最优黏着控制分别进行了研究. 姜琛等^[7]基于自主设计的列车底部导流板进行了气动减阻特性研究,用以改善高速列车底部的气动阻力,结合数值仿真模拟验证了该设计能有效减小列车运行阻力. 杨文平^[8]针对新朔铁路巴准线某典型曲线开展现场动力学试验和仿真研究,探究万吨重载铁路既有线提速对曲线通过车辆的稳定性及其轮轨动态相互作用的影响,发现重载列车提速会引起轮轨横向力小幅波动,对轮轨垂向力无显著影响,钢轨及轨枕加速度随列车行驶速度的增加而增大. 封周权等^[9]为解决铁路悬索桥在列车通过时梁端纵向运动响应控制问题,设计出一种新的混

合阻尼减振方案,实现对运动响应的有效控制,显著提高了桥梁结构的安全性和耐久度. 王力东等^[10]基于磁浮列车-轨道梁耦合振动模型和轨道梁-机场综合交通枢纽换乘中心(GTC)-土体有限元模型,对低速磁浮诱发机场 GTC 振动问题开展研究,通过数值仿真结合现场实验测试进行对比分析,结果表明该机场 GTC 具有良好的整体刚度. 王燕玲等^[11]通过建立重载列车轨道三维耦合动力学模型,针对机车车轮多边形磨损引起的轮轨动力作用问题开展了研究,发现车轮多边形磨损会加大轮轨间的垂直力与纵向相互作用. 为保证 2 万/3 万 t 重载列车的常态化安全运行,许多学者开展了针对性研究^[12-17]. 何闻等^[12]建立长大重载列车纵向动力学仿真模型,分析了 3 万 t 重载列车的 ECP 制动系统、车辆轴重等关键因素对制动工况下列车纵向力的影响. 宋宗莹等^[18]在分析列车失控可能性研究现状的基础上,分析了原有的检算方法与其局限性,并依此提出新的检算办法. Ma 等^[19]、Yu 等^[20]、Hao 等^[21]、Liu 等^[22]进行了大量轮轨瞬态响应、碰撞冲击和动态特性等领域的研究,在轮轨接触问题的探究中做出了大量贡献.

在上述研究中,缺少针对重载列车特殊工况下轮轨接触力识别的探究,且在现今人工智能技术成熟的条件下未见有学者结合此类技术进行轮轨接触力的识别. 实际上,轮轨接触力的精确识别对工程应用意义重大,能提高运行安全性和运行效率,帮助优化轨道维护和管理等^[23]. 因此,本文采用数值仿真方法对轮轨两点接触情形进行数值模拟仿真,实现外载荷对接触力的影响程度解耦,尤其是结合 BP 神经网络训练实现了基于非接触点应变对接触力的解耦识别,为重载列车轮轨接触力的准确识别提供了一种新的路径.

1 数值仿真建模

本文数值仿真以单边轮轨两点接触模型为研究对象,车轮踏面型号为重载列车专线所用的 JM3 型

踏面,钢轨规格为 75 轨.完整轮轨系统包含轮对和钢轨,为缩减计算规模,在保证轮轨接触力准确的前提下,对模型进行简化,仅保留单边车轮与钢轨^[24-25],同时考虑轮轨在特殊工况下形成两点接触即踏面轮缘接触的情形.采用有限元软件 Abaqus 进行轮轨两点接触模拟仿真.

1.1 材料属性

车轮和钢轨选用不同的钢材,其差异主要体现在塑性变形阶段.两种材料弹性阶段的弹性模量、泊松比和密度分别为 $E=210\text{ GPa}$ 、 $\nu=0.3$ 、 $\rho=7.9\text{ g/cm}^3$.为真实反映轮轨接触状态,将车轮和钢轨材料塑性阶段的名义应力-应变曲线转化为真实应力-应变曲线后应用^[25],如图 1 所示.

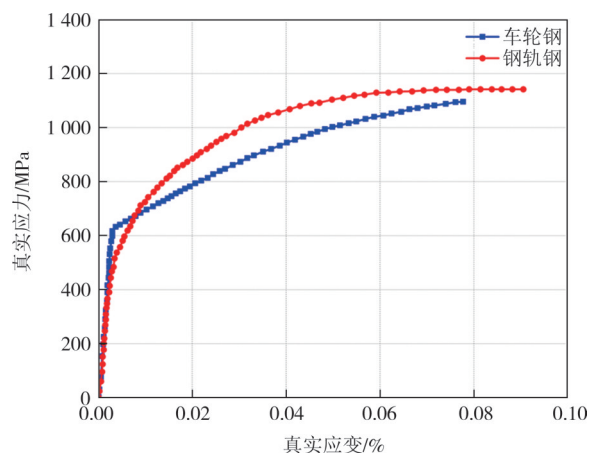


图 1 车轮与钢轨所用钢材的真实应力-应变曲线

Fig.1 True stress-strain curve of steel used for wheels and rails

1.2 运行工况

轮轨系统多点接触力解耦识别研究着眼于车轮与钢轨接触点(面)上 3 个正交方向的接触力准确识别.其中,轴重、牵引力矩、行驶速度为影响轮轨接触力的重要因素,因此有必要研究这 3 个外载荷对轮轨接触力的影响规律,构建轮轨多点接触系统载荷解耦方法.基于上述研究,本文数值仿真设置 3 个分析步,分别模拟 3 种工况,如图 2 所示.其中,第 1 分析步对车轮施加垂向载荷,模拟列车载重工况;第 2 分析步对车轮施加垂向载荷和恒定初始转速,模拟平稳运行工况;第 3 分析步对车轮施加垂向载荷、初始转速和牵引力矩,模拟变速工况.

1.3 轮轨接触

本文数值仿真对象为轮轨多点接触系统,故需要分别设置车轮与钢轨在踏面与轮缘位置的接触,

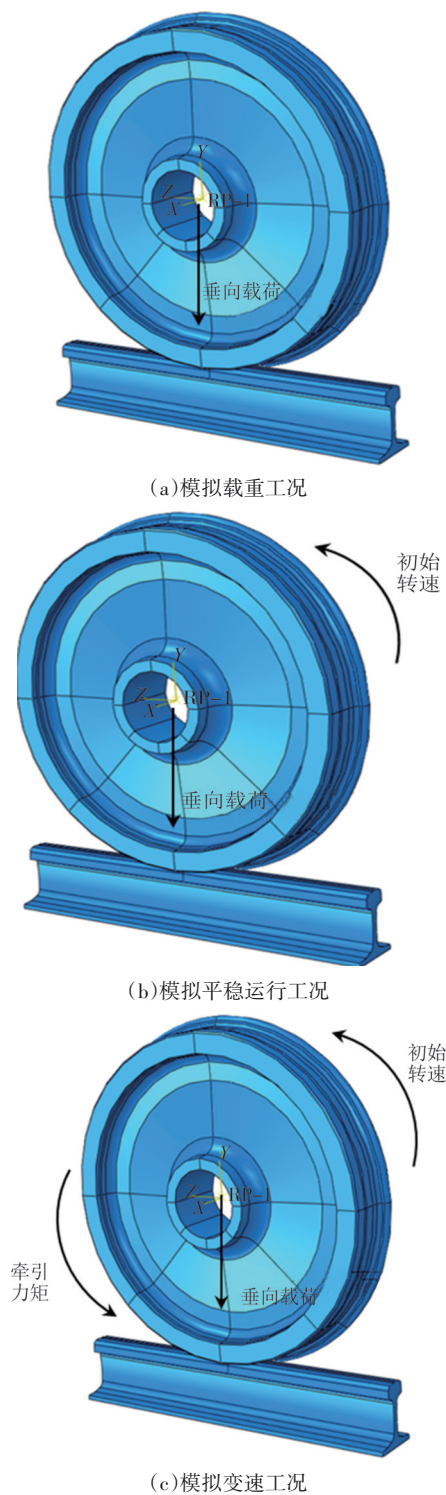
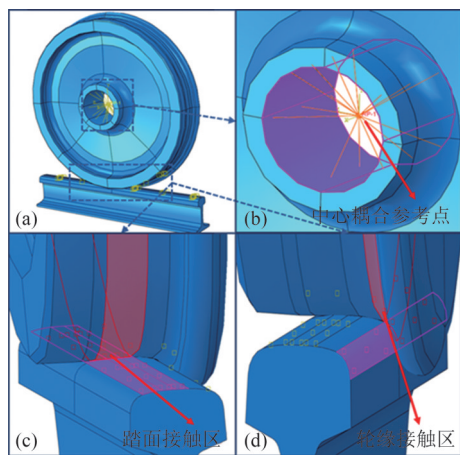


图 2 模拟工况示意图

Fig.2 Schematic diagram of the simulated working conditions

图 3 为轮轨接触设置示意图.设置车轮与钢轨在踏面与轮缘位置的接触为面与面接触,其中车轮的面为主表面,钢轨的面为从表面.滑移方式选择为有限滑移,容差为 0.005 mm ,切向接触属性设置摩擦因数为 0.3 的罚函数,法向接触属性为硬接触.在车轮轴心位置建立参考点,通过设置中心点耦合约束模拟

轮轴,将车轮中心耦合参考点除了垂向、滚动方向、横向偏移之外的其余自由度全部约束.钢轨两端断面施加垂直断面方向的对称性约束,模拟钢轨无限长,钢轨底面完全固定^[25].



(a)轮轨模型,(b)中心耦合参考点,(c)踏面接触区,(d)轮缘接触区

图3 轮轨接触设置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the wheel-rail contact setup

1.4 垂向载荷、牵引力矩与车轮角速度

1.4.1 施加垂向载荷 P

本文参考《重载铁路设计规范》(TB 10625—2017)^[26]:重载列车最小轴重(垂向载荷) $P_{\min}=250.00$ kN,满载状态下最大轴重 $P_{\max}=300.00$ kN.为满足后续研究的需要,将该轴重等距划分为10个区间,根据列车轴重施加垂向荷载.表1列出了施加于轮轨系统的垂向载荷区间.

1.4.2 施加牵引力矩 M

通过牵引力可以计算牵引力矩 M .

$$M = \frac{F}{2n} \cdot R \quad (1)$$

式中: F 为牵引力; n 为列车轴数; R 为车轮半径.由《重载铁路设计规范》(TB 10625—2017)^[26]可知,重载列车最大牵引力 $F_{\max}=570.00$ kN.因此,将零至最大牵引力的区间划分为10等份,牵引力矩通过车轮轴心的耦合参考点施加.换算后牵引力矩区间如表1所示.

1.4.3 施加车轮角速度 ω

将行车标定常采用的5.00 km/h作为变速区间下限.参考《重载铁路设计规范》(TB 10625—2017)^[26],重载列车设计行驶速度上限为100.00 km/h,考虑加速的工况,从行驶速度上限向下取至5.00 km/h.将5.00~100.00 km/h的速度 V 区间划分10等份,换算成

数值仿真中车轮旋转的角速度 ω ,如表1所示.车轮角速度通过车轮轴心的耦合参考点施加.

表1 列车垂向载荷 P 、牵引力矩 M 和车轮角速度 ω 的施加区间

Tab.1 The range of application for the train's downward load P , pulling moment M , and wheel rotational angular velocity ω

编号	P/kN	F/kN	$M/(\text{N}\cdot\text{mm})$	$V/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
1	250.00	0.00	0.00	5.00	3.00
2	255.56	63.33	2.43×10^6	15.56	9.33
3	261.11	126.67	4.86×10^6	26.11	15.67
4	266.67	190.00	7.28×10^6	36.67	22.00
5	272.22	253.33	9.71×10^6	47.22	28.33
6	277.78	316.67	1.21×10^7	57.78	34.67
7	283.33	380.00	1.46×10^7	68.33	41.00
8	288.89	443.33	1.70×10^7	78.89	47.33
9	294.44	506.67	1.94×10^7	89.44	53.67
10	300.00	570.00	2.19×10^7	100.00	60.00

2 载荷解耦流程及实施方案

2.1 载荷解耦流程

2.1.1 外载荷对轮轨接触力的影响规律

影响列车运行过程中轮轨接触力的外在影响因素有很多,包括列车轴重、牵引力矩、行驶速度、轨道坡度等,统称其为外载荷.为了探究各外载荷共同作用对轮轨接触力分别存在的影响规律,引入外载荷对轮轨接触力的影响规律的解耦问题,建立轮轨接触力关于3个外载荷(轴重、牵引力矩和行驶速度)的关联规律.该解耦问题的简化流程如图4所示.

2.1.2 非接触点应变与轮轨接触力的关系解耦

列车运行过程中,轮轨接触区域的接触力实际上是接触位置横向力 F_L 、垂向力 F_V 和纵向力 F_T 的复杂耦合力,且难以进行直接测量.但在此过程中车轮的轮周上不存在复杂接触,情况比较稳定,其上的应变情况可以通过粘贴应变片等方法实时检测,并且轮周上的检测装置不会受到太大的损伤,服役的寿命较长.因此可以考虑通过获取轮周上非接触点的应变情况来预测接触点的接触力情况,此过程可以利用训练神经网络来实现.因此本文以BP神经网络方法作为主要实现路径.该解耦问题的简化流程图如图5所示.

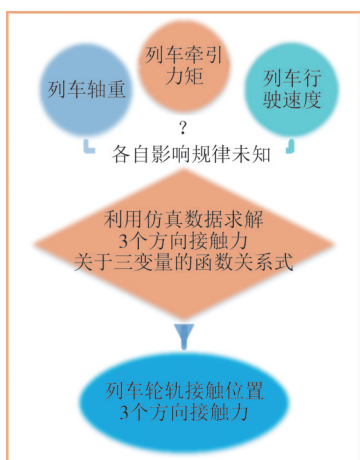


图 4 外载荷对轮轨接触力的影响规律解耦

Fig.4 Decoupling the influence of external loads on the wheel-rail contact force

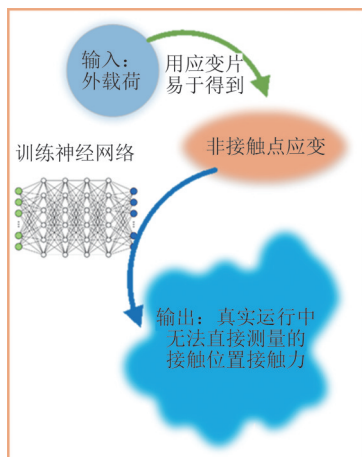


图 5 非接触点应变与轮轨接触力的关系解耦

Fig. 5 Decoupling the correlation between non-contact point strain and wheel-rail contact force

2.2 载荷解耦问题实施方案

针对外载荷对轮轨接触力的影响规律的解耦问题,对3个输入量(轴重 P 、牵引力矩 M 、行驶速度 V)分别施加10个水平,如1.4节所述,对总数为1000组的模型进行数值仿真求解,每次求解后,输出一组3个方向接触力(F_L 、 F_V 、 F_T)的数据,得到 $10 \times 10 \times 10 = 1000$ 组数据.利用这1000组数据进行统计和数学分析,得到3个外载荷对接触力的影响规律,实现外载荷关于接触力的影响规律解耦.针对非接触点应变与接触力的关系解耦的问题,输出轮周上8个点的3个方向应变,结合接触位置的3个方向接触力,输入神经网络进行训练学习得到预测模型,实现非接触点应变和接触力关系的解耦,从而达到对接触点3个方向接触力实时预测的目的.

3 结果与讨论

3.1 轮轨接触力以及接触斑

在本文考虑的特殊工况下,列车的车轮和钢轨间形成了两个接触点,即踏面和轮缘接触点,并且在两个接触点处分别形成了接触斑.实际上两个接触点之间的接触应力及接触斑的差异非常大,为此,首先分析特殊工况下形成两点接触时两接触点的接触应力,其次对比两接触斑之间的差异,最后结合控制变量法对任意两个外载荷变化时的接触力结果进行讨论分析.

3.1.1 接触点接触压应力和切应力

接触点接触应力云图如图6所示. YOZ 平面Mises应力接触斑原本的对称状云图出现扭曲,这是由牵引扭矩、表面切应力作用而导致的^[25],可以发现其扭曲方向与滚动方向一致,如图6(a)所示.接触压应力构成的接触斑呈椭圆状,如图6(b)所示,从图中可以看到两个接触点,即踏面接触点和轮缘接触点,但是只有踏面接触点的压应力云图明显,轮缘处接触点压应力几乎可以忽略不计,说明此条件下轮轨两点接触并不明显,接触以踏面单点接触为主.在踏面接触点上,接触压应力自接触位置开始沿车轮深度方向逐渐降低,并且在9.00 mm内降幅明显. YOZ 平面接触切应力的接触斑呈蝴蝶状分布,且略有偏移,如图6(c)所示.在 XOY 平面上,可见轮轨此时有两个接触点,形成了两处接触斑,分别在踏面位置和轮缘位置,如图6(d)所示.踏面接触斑云图呈蝴蝶状分布,轮缘接触切应力非常小,接触斑不清晰,印证了此时轮轨接触以踏面单点接触为主的结论.不同于压应力的结果,切应力大小与车轮径深无线性关系,最大切应力大致在车轮亚表层距踏面3.00~4.00 mm的位置.对比压应力和切应力结果,压应力峰值比切应力要大,说明此时列车运行过程中的轮轨力主要是垂向力.

3.1.2 两接触点形成的接触斑

本文在极限工况仿真过程中,在钢轨上形成两处接触点:踏面接触点和轮缘接触点.其中,踏面接触点形成了一块椭圆接触斑,而轮缘接触点形成了两块椭圆接触斑.在3块接触斑处选取5条路径,分别从接触斑横向和纵向的变化情况分析两接触点沿路径方向的应力、 U_1 方向位移和 U_2 方向位移,分析路径的选取,如图7所示.

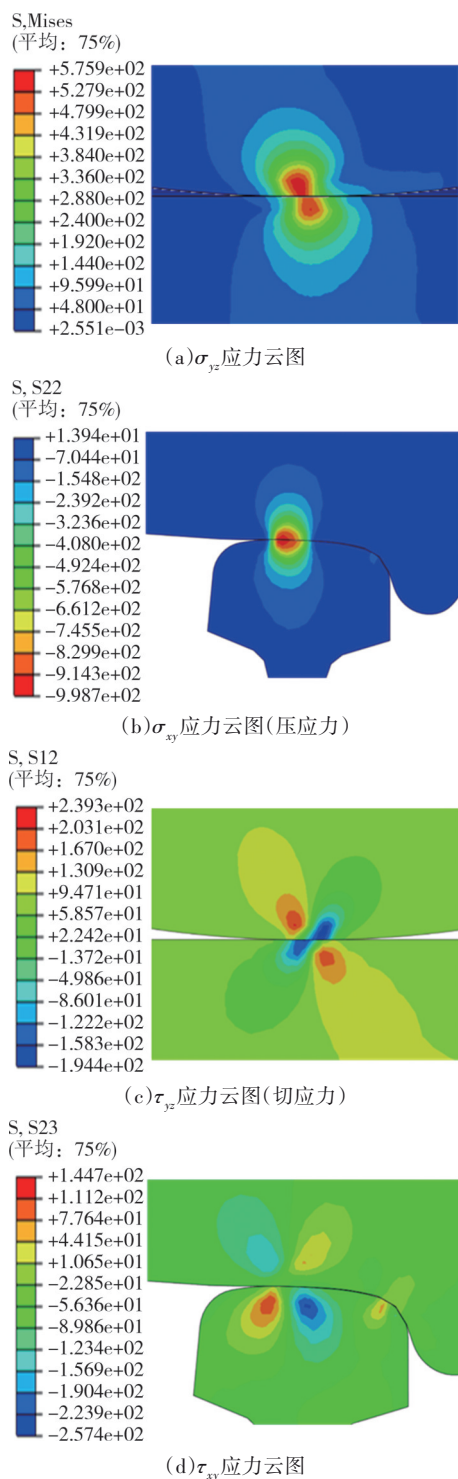


图6 接触点接触应力云图

Fig.6 Contact stress cloud map of the contact point

对5条路径的深度进行归一化处理,归一化长度为 $[-1, 1]$.不同路径下应力变化曲线如图8(a)所示,从Path1与Path2可以看出,底面接触点存在明显的应力梯度,接触点中部区域的材料进入塑性阶段,应力显著高于接触点外侧区域.从Path3与Path4可以看出,侧面接触点存在应力梯度,但梯度小于底面

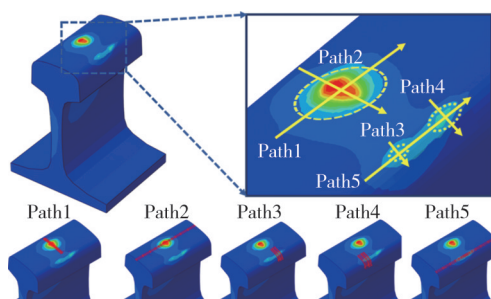


图7 在踏面和轮缘接触点形成的3块接触斑处分别沿横向和纵向选取的5条路径

Fig.7 Five paths selected along both lateral and longitudinal directions at three contact patches formed at the tread and wheel flange contact points

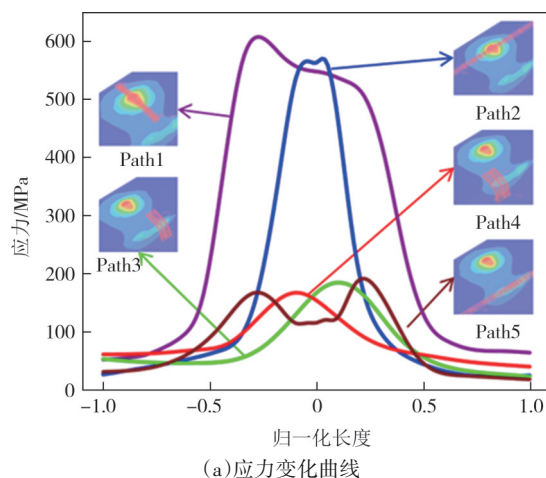
接触点.从Path5可以看出,在侧面接触区存在两个应力峰值,即有两个接触斑.

图8(b)为 U_1 方向位移变化曲线,从图中可以看出Path1与Path2的横向位移始终较大,而Path3与Path4的横向位移在前半段靠近底面接触区的部分较大,在后半段靠近侧面接触区的部分较小,说明在侧向力的作用下,车轮整体发生了横向偏移.Path5的横向位移极值点位置与应力极值点位置一致.

图8(c)为 U_2 方向位移变化曲线,结果表明Path1与Path2在路径中部存在显著的竖向位移梯度,结合应力图可知,接触点在应力集中作用下发生凹陷.Path3、Path4与Path5竖向位移接近零,说明侧面接触点几乎不提供竖向反力.Path3、Path4与Path5在部分位置竖向位移略大于0,这是由于车轮整体发生了横向偏移.

3.1.3 两个外载荷共同变化时的接触力

本文选取3个外载荷(列车轴重、牵引力矩和行驶速度)作为自变量,在此着重探究其中任意两个自变量共同变化对接触点3个方向接触力的影响规律.将两个外载荷变化作用下的3个方向接触力绘



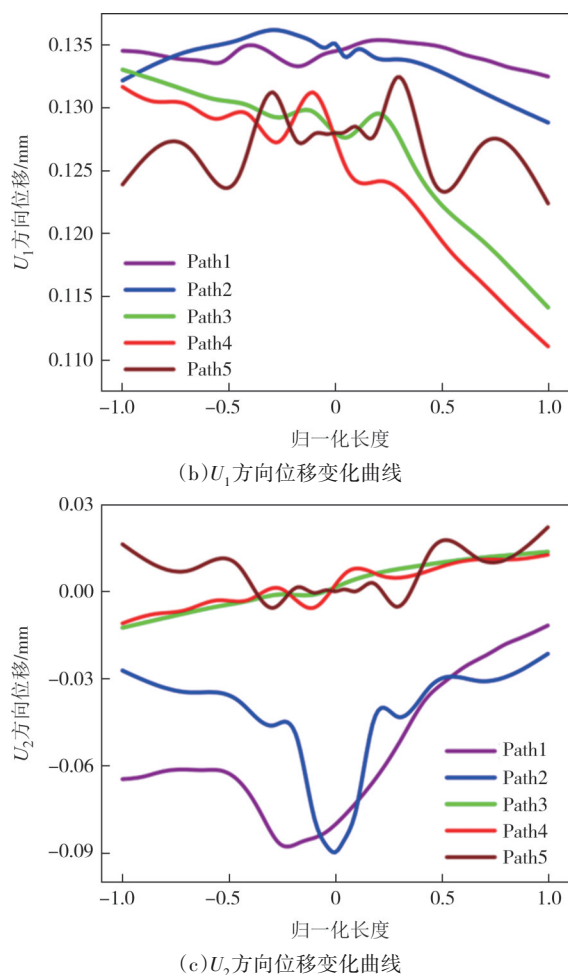


图8 踏面和轮缘接触点形成的3处接触斑沿5条路径的应力和位移变化情况

Fig.8 Variations of stress and displacements in the direction along five exploration paths at three contact patches formed at the tread and wheel flange contact points

制成曲面图分别对比分析,以列车轴重和行驶速度的影响结果为例.列车轴重、行驶速度共同作用下3个方向接触力曲面图如图9所示.

由图9(a)(b)(c)可知,轮缘接触点横向力峰值在轴重和行驶速度都达到最大时取得14 547.46 N,数值远大于踏面接触点.横向力受轴重影响较小,低速状态下行驶速度对该接触点影响较大.由图9(d)

(e)(f)可知,踏面接触点的垂向力大小只和轴重有关,二者呈一次正相关关系,在轴重最大时取得峰值137 946.44 N.轮缘接触点垂向力峰值24 305.17 N在轴重最大、行驶速度最小时取得,受行驶速度影响较大.踏面接触点所受到的垂向力远大于轮缘接触点.由图9(g)(h)(i)可知,两接触点的纵向力受行驶速度影响非常小,与轴重相关性比较高.踏面接触点的纵向力峰值为14 547.46 N,轮缘接触点的峰值为5 793.52 N,远小于踏面接触点,踏面接触点纵向力大于轮缘接触点.

由图9可知,列车轴重和行驶速度共同变化时,两接触点的横向力受轴重影响较小,但是垂向力和纵向力受轴重影响非常大.踏面接触点承受的横向力远大于轮缘接触点,垂向力和纵向力远小于轮缘接触点.

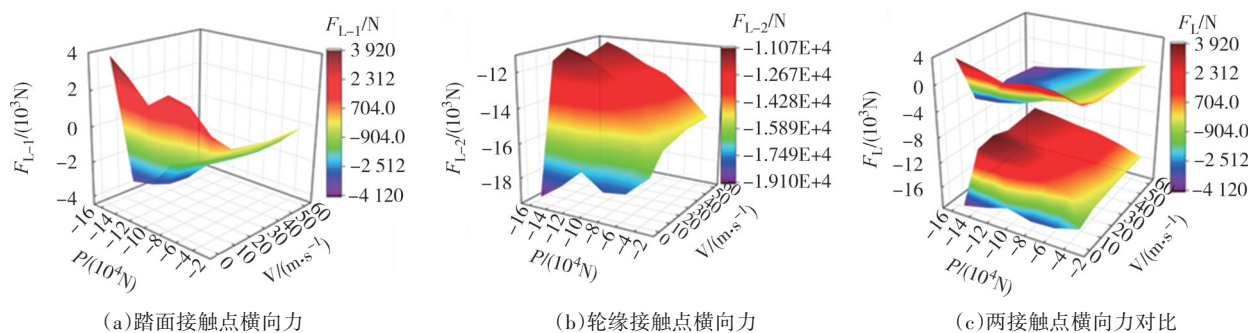
牵引力矩和行驶速度共同变化时,两接触点的横向力和垂向力都几乎不受牵引力矩影响,纵向力受行驶速度影响很小.踏面接触点所承受的横向力远小于轮缘接触点,而垂向力和纵向力远大于轮缘接触点.牵引力矩和轴重共同变化时,两接触点的横向力和垂向力都几乎不受牵引力矩影响,纵向力受轴重影响很小.踏面接触点所承受的横向力远小于轮缘接触点,而垂向力和纵向力远大于轮缘接触点.

3.2 载荷解耦识别方法

3.2.1 外载荷对轮轨接触力的影响规律解耦

接触力的影响因素有很多,本文主要探究的因素有3个:轴重 P 、牵引力矩 M 、行驶速度 V .主要目的在于建立 F_L 、 F_V 、 F_T 关于 P 、 M 、 V 的函数关系式.将此问题概括为解耦外载荷对接触力的影响规律.

本文通过一元函数线性叠加的方式得到多元函数.先建立单一外载荷的影响函数,以横向反力 F_L 为例,经过函数拟合可以发现轴重和牵引力矩与横向力呈二次函数关系, R^2 分别为0.994 5和0.985, R^2 非常接近1说明函数拟合程度高.行驶速度与横向力呈逆函数关系, R^2 为0.868.此方法得到的拟合结



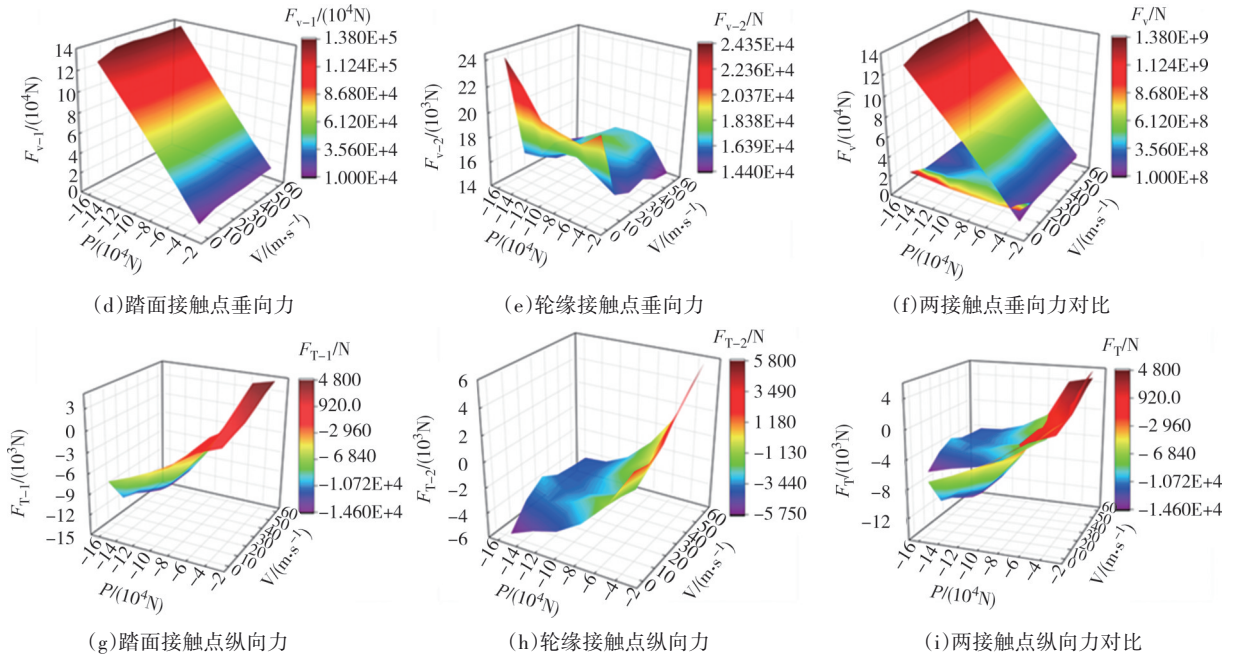


图9 列车轴重、行驶速度共同作用下3个方向接触力曲面图

Fig.9 Three-dimensional contact force surface maps under the combined influence of train axle load and running speed in three directions

果不存在耦合项,即该方法无法体现外载荷之间的耦合关系.因此选取多项式拟合方法.

用多项式拟合方法得到的函数关系式可以体现耦合关系.踏面接触点3个方向接触力函数关系见式(2)(3)(4), R^2 分别为0.931、0.999、0.945.在踏面接触点,横向力受行驶速度的影响程度最大,轴重和行驶速度的耦合对该力也存在一定影响,牵引力对该力的影响程度较小.对于垂向力,轴重是该力的主要影响因素,其余因素对该力的影响很小.对于纵向力,轴重以及轴重和牵引力矩的耦合是影响该力的主要因素,行驶速度对该力的影响较小.

$$F_L = -2.929 \times 10^{-5} PV^2 - 0.116V^3 + 0.002PV + 10.459V^2 - 0.007P - 238.153V - 8.208 \times 10^{-6}M + 1779.259 \quad (2)$$

$$F_V = 2.085 \times 10^{-5} PV^2 + 0.152V^3 - 0.002PV - 13.534V^2 - 0.966P + 345.258V - 17547.894 \quad (3)$$

$$F_T = -5.315 \times 10^{-6} PV^2 - 0.002V^3 + 0.001PV + 0.183V^2 + 0.143P + 90.318V + 5.386 \times 10^{-5}M - 1.215 \times 10^{-8}PM + 3783.998 \quad (4)$$

类似地,轮缘接触点3个方向接触力函数关系见式(5)(6)(7), R^2 分别为0.922、0.856和0.908.在轮缘接触点,横向力受行驶速度的影响程度最大,轴重以及轴重和行驶速度的耦合对该力也存在一定影响,横向力受牵引力矩的影响程度较小.对于垂向

力,轴重是该力的主要影响因素,行驶速度以及轴重和行驶速度的耦合对该力也存在一定的影响,其余因素对该力的影响很小.对于纵向力,轴重和牵引力是影响该力的主要因素,行驶速度以及轴重和行驶速度的耦合对该力也存在一定的影响.

$$F_L = 2.929 \times 10^{-5} PV^2 + 0.121V^3 - 0.002PV + 10.901V^2 + 0.006P + 250.342V + 3.369 \times 10^{-7}M - 17081.256 \quad (5)$$

$$F_V = -2.254 \times 10^{-5} PV^2 - 0.141V^3 + 0.002PV + 13.426V^2 - 0.068P - 340.219V + 1.199 \times 10^{-12}P^3 + 16261.196 \quad (6)$$

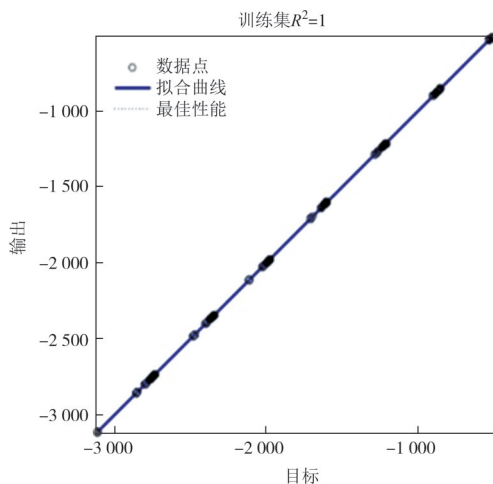
$$F_T = 1.444 \times 10^{-5} PV^2 - 0.007V^3 - 0.001PV + 1.914V^2 + 0.054P - 58.567V + 0.000432M + 787.548 \quad (7)$$

利用多项式拟合方法建立的函数表达式较好地体现了列车轴重、行驶速度和牵引力矩对轮轨3个方向接触力的影响规律,从而建立了一种外载荷对接触力的影响规律解耦方法.

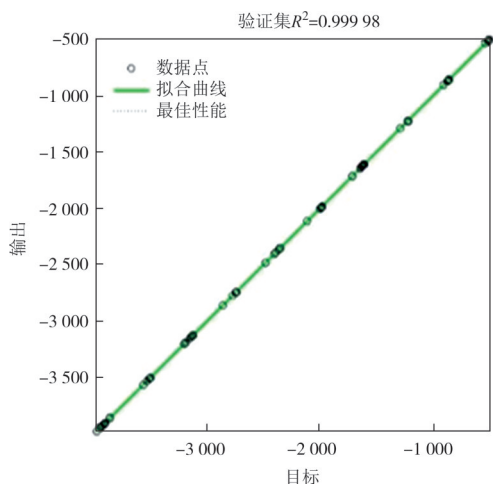
3.2.2 非接触点应变与接触力的关系解耦

在列车运行过程中,获取重载列车轮轨接触垂向力 F_V 、横向力 F_L 、纵向力 F_T ,有助于实现众多工程实际应用,但是轮轨接触点随着车轮的转动始终在改变,实时监测轮轨接触力具有较大难度.因此本文提出设想:基于部分易于实时监测的非接触点的应

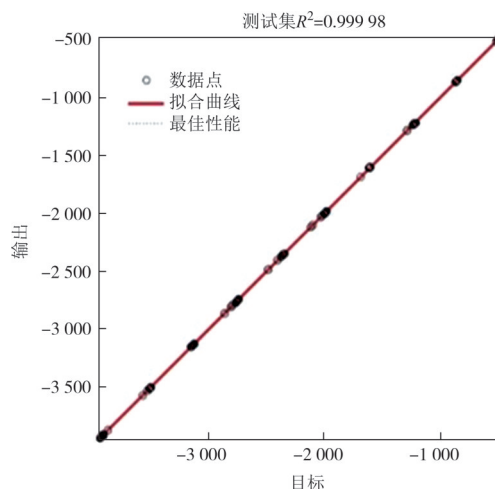
变数据,开展对接触位置的接触力的解耦识别分析.为此,首先,通过数值仿真获取车轮 8 个非接触点 3 个方向的应变数据、轮轨两个接触点各自沿 3 个方向接触力.其次,构建神经网络,将非接触点应变数据作为特征值,接触力作为预测目标,开展神经网络训练.最后,将经训练的神经网络用于基于部分易于实时监测的非接触点的应变数据,开展对接触力的识别.图 10 为 BP 神经网络的训练模型回归曲线及验证拟合曲线.从图 10 可以看出,神经网络在训练集、验证集和测试集上表现优异, R^2 无限接近于 1,证明了训练结果的优越性.经过本文数值仿真模型得到的数据训练后的神经网络经验证表现出色,可以比较准确地实现对运行过程中轮接触力的实时预测,即通过非接触的轮周上的应变值得到接触位置 3 个方向的接触力.通过对比,数值仿真求解接触力时,平均单个模型计算时间约为 4 h,而神经网络对接触力的识别时间约为 1 min,具有明显的计算效率优势.



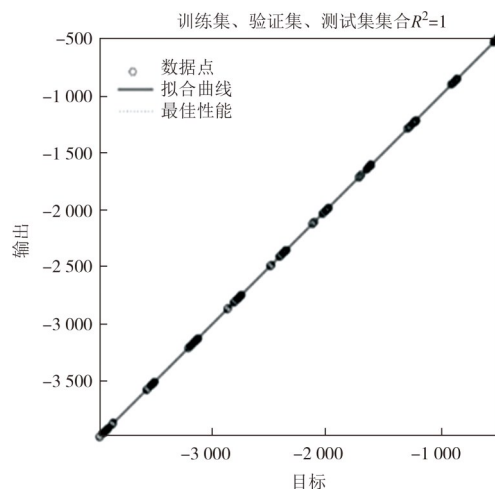
(a) 训练模型在训练集上的回归表现



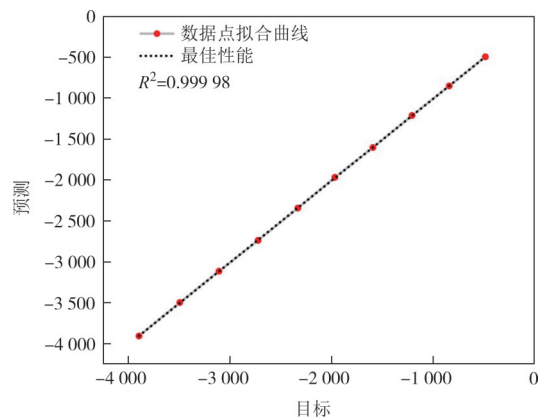
(b) 训练模型在验证集上的回归表现



(c) 训练模型在测试集上的回归表现



(d) 训练模型在所有集合上的回归表现



(e) 对输出模型的验证拟合曲线

图 10 BP 神经网络的训练模型回归曲线及验证拟合曲线
Fig.10 Training model regression curves and validation fitting curves of the BP neural network

4 结论

本文基于数值仿真建立了单边轮轨两点接触模型,以列车轴重、牵引力矩和行驶速度为研究变量,

并在合理区间内进行多水平数值仿真得到 1 000 组仿真数据. 针对大量的仿真数据从两个角度进行统计和数学分析, 从而实现对运行过程中列车轮轨接触力的解耦识别: 一是外载荷对于轮轨接触力的影响规律解耦; 二是非接触点应变与接触力的关系解耦. 得到主要结论如下:

1) 针对外载荷影响程度解耦. 分别得到了两接触点 3 个方向接触力关于列车轴重、牵引力矩以及行驶速度的函数表达式. 对于踏面接触点来说, 横向力受 V 的影响程度最大. 对于垂向力, P 是该力的主要影响因素. 而纵向力主要受 P 以及 P 和 M 的耦合影响. 对于轮缘接触点来说, 横向力受 V 的影响程度最大. 对于垂向力, P 是该力的主要影响因素. P 和 M 是影响纵向力的主要因素.

2) 针对非接触点应变-接触位置的接触力解耦. 以 BP 神经网络作为解耦工具, 通过对数值仿真所得的数据样本进行神经网络训练, 以易于测量的轮周非接触点应变数据为输入量, 以难以直接测量的接触力为输出量, 实现对轮轨接触力的实时预测, 从而建立了一种轮轨接触力解耦识别方法. 本文中的数值仿真结果及轮轨接触力解耦识别方法有望通过相应的轮轨力实验测量系统进行实验验证, 从而指导实际工程应用.

参考文献

- [1] 杨云帆. 重载机车车轮多边形磨耗演变及控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
YANG Y F. An investigation on the evolution of polygonal wear of locomotive wheels and its countermeasures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [2] 沈钢, 毛鑫, 毛文力, 等. 轮轨系统的现状与展望[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(1): 42-57.
SHEN G, MAO X, MAO W L, et al. Status and future trend of wheel/rail system [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 42-57. (in Chinese)
- [3] 赵长龙, 王田天, 冯永华, 等. 高速列车转向架结冰特性风洞实验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(2): 121-131.
ZHAO C L, WANG T T, FENG Y H, et al. Wind tunnel experimental investigations on icing characteristics of bogies of high-speed trains [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(2): 121-131. (in Chinese)
- [4] 张迅, 王力东, 韩艳, 等. 龙卷风作用下大跨度桥梁车-轨-桥耦合振动及行车安全性[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(9): 51-61.
ZHANG X, WANG L D, HAN Y, et al. Train-track-bridge coupling vibration and train running safety of long span bridge under tornado [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(9): 51-61. (in Chinese)
- [5] 马瑞峰, 蔡小培, 王雨琪, 等. 重载铁路曲线地段整正前后车辆-轨道动力学特性研究[J/OL]. 铁道标准设计, 2024: 1-8. [2024-07-10]. <https://link.cnki.net/doi/10.13238/j.issn.1004-2954.202310230003>.
MA R F, CAI X P, WANG Y Q, et al. Study on dynamic characteristics of vehicle-track before and after rectification in curved section of heavy-haul railway [J/OL]. Railway Standard Design, 2024: 1-8. [2024-07-10]. <https://link.cnki.net/doi/10.13238/j.issn.1004-2954.202310230003>. (in Chinese)
- [6] 朱虹燕. 基于最优蠕滑速度的重载列车黏着控制[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
ZHU H Y. Adhesion control of heavy-haul train based on optimal creep speed [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [7] 姜琛, 龙金兰, 高广军, 等. 高速列车底部导流板的气动减阻特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(10): 151-163.
JIANG C, LONG J L, GAO G J, et al. Study on aerodynamic drag reduction characteristics of deflector mounted on high-speed train bottom [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(10): 151-163. (in Chinese)
- [8] 杨文平. 提速条件下万吨重载列车通过曲线的车辆稳定性及轮轨动态相互作用试验研究[J]. 中国测试, 2023, 49(增刊1): 241-246.
YANG W P. Experimental study on vehicles stability and wheel-rail dynamic interaction of 10,000-tonne heavy-haul trains when negotiating curves under speed-raised conditions [J]. China Measurement & Test, 2023, 49(Sup.1): 241-246. (in Chinese)
- [9] 封周权, 范周健, 井昊坤, 等. 铁路悬索桥车致纵向运动混合阻尼减振研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(7): 10-20.
FENG Z Q, FAN Z J, JING H K, et al. Study on hybrid damping solution for controlling longitudinal motion of railway suspension bridge induced by trains [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(7): 10-20. (in Chinese)
- [10] 王力东, 孙天洋, 卜秀孟, 等. 中低速磁浮诱发交通枢纽换乘中心振动响应研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(5): 154-167.
WANG L D, SUN T Y, BU X M, et al. Study on vibration response of transfer center of transportation hub induced by low-to-medium speed maglev trains [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(5): 154-167. (in Chinese)
- [11] 王燕玲, 杨润全. 考虑车轮多边形磨耗的机车轮轨动力特性研究[J]. 机械设计与制造, 2025(1): 62-69.
WANG Y L, YANG R Q. Study on the dynamic characteristics of locomotive wheel rail considering polygonal wear of wheels [J].

- Machinery Design & Manufacture, 2025(1):62-69. (in Chinese)
- [12] 何闻, 常崇义, 王俊彪, 等. 3 万 t 重载列车制动工况纵向力关键影响因素分析[J]. 铁道学报, 2024, 46(1):53-59.
- HE W, CHANG C Y, WANG J B, et al. Analysis on key influencing factors of longitudinal force with 30 000 t heavy-haul trains in braking conditions [J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(1): 53-59. (in Chinese)
- [13] 曾周, 胡晓宇, 冉祥瑞, 等. 2 万 t 重载列车车辆数量对纵向冲动的研究[J]. 机车电传动, 2024(1):22-30.
- ZENG Z, HU X Y, RAN X R, et al. Research on the influence of quantity of 20 000 t heavy-haul train wagons on longitudinal impulse[J]. Electric Drive for Locomotives, 2024(1):22-30. (in Chinese)
- [14] 王蒙, 魏伟, 张渊, 等. ECP 信号传播方式对 3 万 t 重载列车制动工况纵向冲动影响仿真研究[J]. 铁道车辆, 2023, 61(3): 161-166.
- WANG M, WEI W, ZHANG Y, et al. Simulation study on influence of ECP signal propagation mode on longitudinal impulse of 30 000 t heavy-haul train under braking condition[J]. Rolling Stock, 2023, 61(3):161-166. (in Chinese)
- [15] 于岩. 朔黄铁路 3 万 t 重载列车纵向动力学仿真研究[D]. 大连:大连交通大学, 2023.
- YU Y. Longitudinal dynamics simulation research of 30 000 t heavy-haul trains on Shuohuang railway [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023. (in Chinese)
- [16] 毕朝晖. 2 万 t 重载列车制动系统状态监测系统研究[J]. 今日制造与升级, 2022(11):84-86.
- BI Z H. Research on condition monitoring system of braking system of 20 thousand t heavy-haul train [J]. Manufacture & Upgrading Today, 2022(11):84-86. (in Chinese)
- [17] 义满红. 列车制动系统压力漏泄对 2 万 t 重载列车的影响[J]. 今日制造与升级, 2022(9):161-162.
- YI M H. Influence of pressure leakage of train braking system on 20 thousand t heavy-haul train [J]. Manufacture & Upgrading Today, 2022(9):161-162. (in Chinese)
- [18] 宋宗莹, 李乐, 郭芙楠, 等. 长大下坡道重载列车失控可能性检算方法研究[J]. 运输经理世界, 2023(24):152-154.
- SONG Z Y, LI L, GUO F N, et al. Research on calculation method of out-of-control possibility of heavy-duty trains on long and long downhill slopes [J]. Transport Business China, 2023 (24): 152-154. (in Chinese)
- [19] MA X Q, JING L, HAN L L. A computational simulation study on the dynamic response of high-speed wheel-rail system in rolling contact[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(11): 1687814018809215.
- [20] YU M, WANG W D, LIU J Z, et al. The transient response of high-speed wheel/rail rolling contact on “roaring rails” corrugation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F—Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 233(10): 1068-1080.
- [21] HAO C J, WANG P, XU J M, et al. Investigation of transient wheel-rail interaction and interface contact behaviour in movable-point crossing panel[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(5): 1103-1121.
- [22] LIU C, XU J M, WANG K, et al. Numerical investigation on wheel-rail impact contact solutions excited by rail spalling failure [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 135:106116.
- [23] 陈志洲. 基于钢轨波磨特征的车辆运行安全性评估及轮轨力预测[J]. 智慧轨道交通, 2023, 60(5):30-35.
- CHEN Z Z. Safety evaluation of vehicle operation and prediction of wheel-rail force based on rail corrugation characteristics [J]. Smart Rail Transit, 2023, 60(5):30-35. (in Chinese)
- [24] 赵桅. 重载机车车轮踏面大面积剥离机制试验研究和建模分析[D]. 北京:北京交通大学, 2022.
- ZHAO W. Experimental study and modeling analysis on the large area spalling of locomotive wheel tread under heavy axle load [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [25] 丛韬. 铁路车轮超高周疲劳行为研究和寿命评估方法[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
- CONG T. Study on the very-high-cycle fatigue behavior of railway wheels and fatigue life assessment method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [26] 重载铁路设计规范:TB 10625—2017[S]. 北京:中国铁道出版社有限公司, 2017.
- Code for design of heavy haul railway: TB 10625—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House Limited Company, 2017. (in Chinese)