



基于大数据与神经网络的重载列车 轮轨接触力解耦方法

张镇晖¹, 韦凯¹, 彭神佑¹, 尹盛文², 王中钢²
(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)

摘要: 为实现对重载列车运行过程中轮轨接触力的准确识别与预测, 文章提出了一种基于轮周非接触应变大数据与神经网络的列车轮轨力解耦预测新方法。为此, 建立了重载列车“轮对-钢轨”接触的精细有限元数值仿真模型, 并开展了轮周应变灵敏度分析, 确定了列车车轮的最佳应变采集半径和采集点布局方案。通过研究多组数值仿真模型中应变采集点的大量应变数据, 以及接触斑的垂向力与横向力, 探究了列车在不同运行状态下的轮轨接触区域动态响应, 从而揭示列车从匀速运行进入加速状态后, 接触斑区域的应变、接触力等关键响应的变化规律。进一步建立应变和接触力的大数据集, 并对“接触力-非接触位置应变”关联的神经网络进行训练, 成功建立了轮轨接触力关于轮周非接触应变的神经网络模型, 从而实现列车接触斑处接触力的实时解耦、准确预测。建立的神经网络模型具有计算效率高与预测精度高的双重优势, 能够有效指导重载列车轮轨接触力解耦识别和列车脱轨系数求解等工程应用。

关键词: 重载列车; 轮轨系统; 大数据; 神经网络; 接触力解耦; 重载铁路; 数值仿真

中图分类号: U292.92⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)02-0015-12

0 引言

重载铁路因其具备运输成本低、大宗货物运输效率高等优势, 一直是国际公认的轨道交通重点发展方向^[1-2]。重载列车作为轨道交通系统的重要组成部分, 其轮轨系统一直是研究领域内的重点关注对象^[3]。其中, 轮轨系统的接触力是轮轨间相互发生滚动作用的动态结果, 直接影响列车运行的安全性, 因此实现轮轨接触力的准确解耦识别一直是轨道交通领域研究的重点与热点^[4-5]。

近年, 针对列车轮轨接触力解耦识别的研究提出了许多测试方法, 如实验室测试中常用的基于应变片的车载测试法、基于光学与声学的轮轨接触力测试法和多技术融合的轮轨接触力测试方法等^[6-7]。ZHANG Pan等专家学者搭建了名为V-Track的创新型缩比试验

台 (innovative downscale test rig)^[8], 用于冲击载荷条件下的轮轨接触力试验测量, 该测力仪由4个三分量压电式力传感器组成, 安装在车轮组件和V-Track的钢架之间, 使其能够测量从轮轨接口传递到车架的力。LIU Qingjie等专家^[9]采用波数域方法在地铁轨道上进行现场测试, 通过将传感器阵列安装在导轨上, 当列车通过测试区时测量钢轨位移, 然后计算传输矩阵, 根据轨道结构响应的现场试验数据对移动荷载进行识别, 从而得到轮轨接触力。文献[10]率先将分布式声学传感技术应用于结构状态评估, 利用安装在钢轨腹板上的光纤进行钢轨挠度测量。文献[11]利用分布式声学传感技术提出了一种基于群体智能算法的连续垂直轮轨接触力双向重构方法, 进行了一系列现场试验, 并将测试结果与传统的剪力法进行了比较, 研究表明, 文献[11]所提出的方法能够理想地重构连续垂直轮轨接触力, 具有评估轨道和车辆工况的潜力。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0609400)

通信作者: 韦凯, 男, 博士, 教授, 从事力学学科教学科研工作; E-mail: weikai@hnu.edu.cn

引用格式: 张镇晖, 韦凯, 彭神佑, 等. 基于大数据与神经网络的重载列车轮轨接触力解耦方法[J]. 机车电传动, 2025(2): 15-26.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.101.

Citation: ZHANG Zhenhui, WEI Kai, PENG Shenyou, et al. A decoupling method for wheel-rail contact forces of heavy-duty trains based on big data and neural networks[J]. Electric drive for locomotives, 2025(2): 15-26.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.101.

在轮轨接触力计算方法方面,相关学者作了大量研究^[12-16]。例如,孙效杰等专家^[17]设计了一套测力轮对系统,通过组桥方法在车轮上布置应变片,使用应变仪采集应变数据,利用设计的计算程序得到对应的轮轨接触力,在此基础上得到脱轨系数和减载率,用来评判列车运行的安全情况。文献[18]推导了轮轨接触力间接测量法的理论公式,并利用 Simpack 软件建立了“车辆-轨道”动力学仿真模型,通过数值仿真得出直线段轮轴横向力与轮轨垂向力两者在不同工况下误差值与最大值。文献[19]提出了一种改进的轮轨瞬态滚动接触数值仿真方法,建立了三维隐式/显式有限元模型,计算出轮轨系统的瞬态响应,并研究了钢轨焊接接头所激发的轮轨动力,同时揭示了高速铁路钢轨波纹磨损的原因。文献[20]提出了一种基于 GA-LSTM 的轮轨力连续测量方法,利用神经网络实现了更高精度、高效率的轮轨力测量。

值得注意的是,上述文献报道的试验测试方法仍然存在一定的不足。试验对设备集成度与采集精度要求较高,而且受制于轮轨系统试验测量布点的有限性,难以实现大范围、高精度地采集数量巨大的直接数据,并完成实时处理。另外,在基于神经网络实现轮轨力测量的研究中,尚未见到充分发挥数值仿真方法在数据采集方面具有的高效率、高完整度和高利用率等优势的相关报道。因此,本文以重载列车运行过程中的轮轨系统为研究对象,建立关于轮轨系统的数值仿真方法,设计了针对车轮轮周大量应变采集位置的布点方案,用于采集后续神经网络训练所用的大应变数据样本;同时,通过充分发挥数值仿真方法在数据采集和处理中的优势,对大应变数据样本进行处理,从而得到了通过试验测试方法难以获取的大数据样本,并结合大数据样本开展有效的神经网络训练,最终建立了一种基于大数据和神经网络实现轮轨接触力解耦识别和预测的新方法。

1 轮轨系统数值仿真建模方法

1.1 模型建立

本文研究对象为现行既有线路中重载列车的轮轨

多点接触系统,并依据文献报道和国家标准的有关规定建立了包含完整轮对和钢轨的轮轨模型^[21],包括由 HFS 型车轮和 RF₂ 车轴组成的 RF₂ 轮对^[22],车轮踏面为 JM₃ 型踏面^[23],钢轨为 75 kg/m 钢轨^[24]。确定模型各部件的型号与规格后进行模型的建立和装配,具体的尺寸参数参考相关标准文件的规定。在本文建立的数值仿真模型中,列车车轮和钢轨选用文献[22-24]规定的 2 种不同钢材,两者在弹性阶段的性能非常接近,而性能差异主要体现在塑性变形阶段。其中,2 种材料弹性阶段的弹性模量 E 、泊松比 ν 和密度 ρ 分别为 210.0 GPa、0.3、 7.9×10^{-6} kg/mm³。

1.2 载荷与接触关系

重载列车的牵引力、行驶速度是影响轮轨接触力的主要因素,因此通过改变重载列车的行驶速度和牵引力,可改变列车的行驶状态,从而得到不同的模型。通过形成多组对照模型,探索列车行驶状态对轮轨接触力的影响规律。数值仿真过程共设置 3 个分析步骤:①对车轮施加垂向载荷,模拟列车仅受到载重的工况;②对车轮施加垂向载荷和恒定转速,模拟列车匀速运行工况;③对车轮施加垂向载荷、初速度和牵引力矩,以模拟加速工况,该步骤结束时列车加速完成。在进行模型接触分析时,车轮与钢轨的接触类型定义为面与面接触,其中车轮所在面为主表面,钢轨所在面为从表面,如图 1(a)所示;切向接触属性采用摩擦系数为 0.3 的罚函数算法进行设置,法向接触属性设置为硬接触^[25];在车轴中心位置建立耦合参考点,如图 1(c)所示,并将除了垂向、滚动方向和横向偏移之外的其他中心耦合参考点的自由度全部约束,钢轨底面则完全固定。

针对边界条件,垂向载荷的数值固定不变,施加在轮轴两边的中心耦合参考点,其取值为重载铁路既有线路的轴重限制 250.0 kN。通过牵引力 F 可以计算牵引力矩 M_1 ,具体为

$$M_1 = \frac{F}{2n} \cdot R \quad (1)$$

式中: F 为牵引力; n 为列车轴数; R 为车轮半径。

重载列车最大牵引力 $F_{\max}$ 为 570.0 kN^[21],将 120.0~

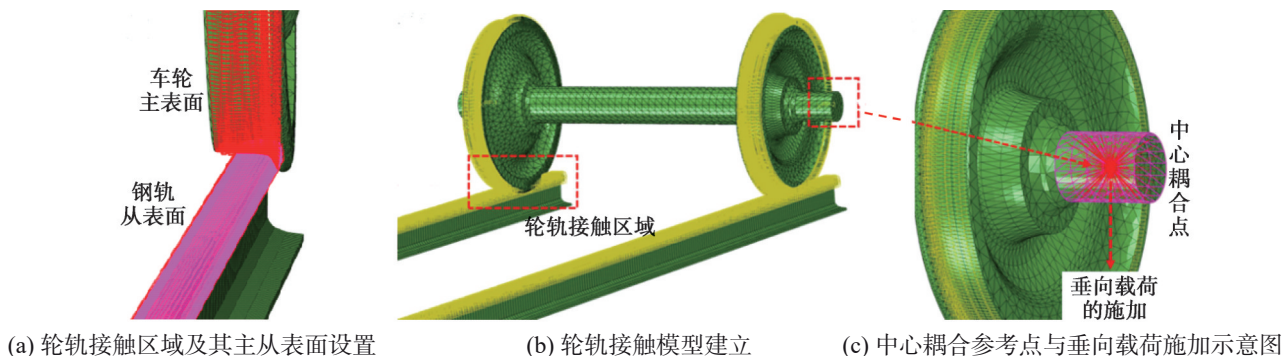


Fig. 1 Wheel-rail model for numerical simulation

570.0 kN等分为6个区间, 牵引力矩通过车轮轴心的耦合参考点施加, 换算后的牵引力矩区间如表1所示。列车运行速度区间以既有线路直线运行速度 80.0 km/h 为上限, 以 16.0 km/h 为下限, 将该区间等分为5个区间, 并转换成车轮旋转角速度后通过中心耦合参考点施加于车轮, 具体数值如表2所示。

表1 六等分列车牵引力区间及其对应的牵引力矩区间

Table 1 Six equally divided traction force intervals and corresponding torque intervals

等分区间	牵引力/kN	牵引力矩/(10 ⁷ N·mm)
1	120.0	0.97
2	210.0	1.20
3	300.0	1.50
4	390.0	1.50
5	480.0	1.90
6	570.0	2.20

表2 五等分列车行驶速度区间及其对应的车轮旋转角速度

Table 2 Five equally divided train speed zones and corresponding angular velocities of wheel rotation

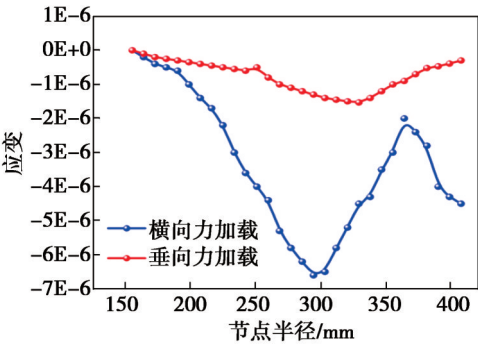
等分区间	行驶速度 V /(km·h ⁻¹)	车轮旋转角速度 ω /(rad·s ⁻¹)
1	16.0	3.0
2	32.0	9.3
3	48.0	15.7
4	64.0	22.0
5	80.0	28.3

1.3 应变采集半径和布点方案

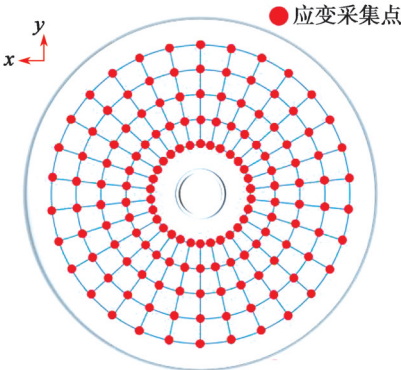
本研究重点关注的方向包括如何通过测量车轮轮周中非接触点的应变数据, 实现对轮轨接触力的解耦和准确预测。实际上, 考虑到车轮轮周上不同位置的应变状态复杂, 因此选取合适的应变采集半径和采集点至关重要。一般情况下, 相同半径上的外载荷加载点所在径向节点元素的应变值要比其他节点元素大。因此, 本文参考文献[26]介绍的方法选取外载荷加载点所在径向, 即在车轮半径 155.0~407.5 mm 上选取 30 个节点, 通过数值分析法计算这些节点分别在横向载荷 10.0 kN、垂向载荷 10.0 kN 下的应变分布, 并进行对比分析。车轮上最佳应变采集点选取的原则为自扰尽可能大, 而串扰尽可能小^[26]。其中, 车轮辐板外侧的应变与采集节点半径的关系如图 2(a)所示。由图 2(a)可知, 在轮周表面可采集应变的位置中, 半径 297.0 mm 处的节点应变受横向力影响最大, 此半径可作为横向力解耦识别的非接触应变采集半径; 同理, 半径 324.0 mm 处的节点应变受垂向力影响最大, 因此该半径可作为垂向力解耦识别的非接触应变采集半径。为保证分析结果具有充分的有效性, 对应变数据样本库进行扩大与优化, 选择临近上述最佳应变采集半径之外的其他3条半径上的节点进行应变数据采集, 即在半径分别

为 284.0、297.0、310.0、324.0、337.0 mm 这 5 条半径进行应变采集布点。进一步考虑采集半径上应变布点位置的选取, 较优的布点方式有对称四组布桥方法, 即应变片的角度分别为 0.0°、36.0°、60.0°、96.0°, 考虑到对称性, 在每一半径上选取 8 个应变采集点^[26]。

数值仿真是一种高效的虚拟试验测试方法, 相较于试验测试, 其在选点和提取数据方面具有便捷性和高效性, 同时扩大应变数据样本也能为神经网络训练建立具有更加充分的数据集。因此, 相较于相关文献的有限应变采集点, 本文针对每一个数据采集半径, 选取的应变采集点包含上述角度在内的 30 个均匀采集点。因此, 单边车轮可提取 150 个应变采集点在 3 个方向的应变数据——E11、E22、E12, 分别代表 x 方向(列车运行方向)、 y 方向(垂直于钢轨径向或半径方向)的正应变和 xy 切应变, 以用于后续的神经网络训练, 最终建立的应变采集位置如图 2(b)所示。其中, x 方向的正应变 E11 反映了车轮在轴向的拉伸或压缩变形, y 方向的正应变 E22 反映了车轮在径向的拉伸或压缩变形, xy 切应变 E12 反映了车轮在轴向和径向之间的剪切变形。尽管在工程实践中直接获取与坐标轴平行的应变值存在困难, 但通过使用多轴应变片测量实际应变, 并结合坐标变换方法, 可以将测量结果转换为 x 方向、 y 方向的应变。在未来研究中, 本研究团队将结合试验数据进一步验证该方法的可行性。



(a) 车轮轮周应变随节点半径变化曲线



(b) 车轮采集半径与采集节点分布示意图

图2 车轮轮周应变随节点半径变化曲线及采集半径与结点分布示意图

Fig. 2 Variation curve of strain at the wheel periphery with node radius and schematic diagram of collection radius and node distribution

1.4 模型收敛性和数值仿真流程

考虑到本文研究的重点在于如何通过车轮轮周中非接触点应变实现对轮轨接触斑上接触力的解耦识别,因此非接触点的应变和接触斑位置的接触力的数值仿真结果是否准确至关重要,故选择其作为评估数值仿真模型中网格收敛性的指标。通过选择一定数量的采集点,对比分析4组不同网格密度条件下3个方向的应变结果,其中4组网格单元总数分别为112 884、141 106、183 437、211 659。结果表明,随着网格的细化和数量的增多,各组模型的应变数值波动逐渐减小,趋于一个稳定值;当网格单元总数达到183 437、网格再度细化时,容差在10%以内。进一步分析轮轨接触点的接触力,对两边轮轨接触斑最终的垂向力和横向力结果与网格对照组进行对比分析,分别计算了各个接触力在4组网格密度之间的平均偏差,结果分别为3.02%、5.02%、1.64%、9.90%,即各组的容差值均在10%以内。综合上述应变和接触力的仿真结果,发现当网格单元总数为183 437时,应变和接触力的计算结果均呈现较好的收敛性,因此该网格单元数可作为后续数值仿真的网格密度。在完成模型前处理工作并确定模型网格和输出结果后,利用Python二次开发实现模型的批量建立、计算提交和结果提取工作。模型计算过程通过两步实现:①批量修改模型边界条件,并生成对应的模型文件,提交、计算和监控模型文件;②待所有模型计算完成后,对所有结果文件的结果进行提取和存储,用于后续的结果分析和神经网络训练。本文建立的整体分析流程如图3所示。

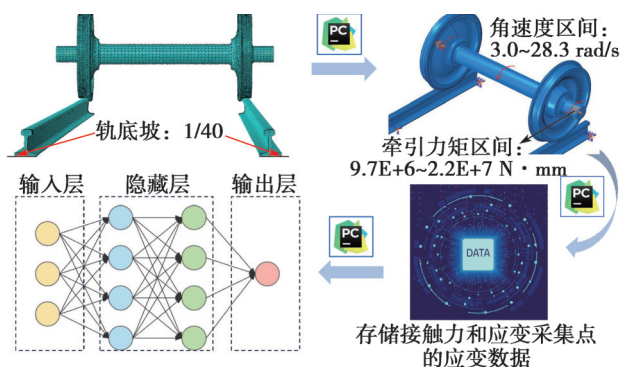


图3 整体分析流程

Fig. 3 Overall analysis process

2 轮轨接触状态与接触力预测结果

在列车运行过程中,轮轨接触斑内的接触力作用于车轮表面,并产生局部应力场,接触力引起的应力通过车轮材料向内部传递,当应力传递到采集点位置时,会在该位置引起应变响应。轮轨接触位置的接触力通常难以直接测量得到,但是车轮轮周上的应变可以通过传感器直接测量,然而二者之间不存在线性关

系,因此本研究旨在利用神经网络建立二者之间的非线性关系,实现列车运行过程中实时检测接触力的目的。

本研究在进行轮轨接触数值仿真时,考虑了列车通过曲线时,轮对出现横移的工况,该工况会导致一侧轮轨出现多点接触。在本文所涉及的工况条件下,列车轮对会与两边钢轨形成接触区域。分析数值仿真得到的接触斑结果可以发现,由于轮对发生横移,车轮其中一侧接触区域形成了多点接触,同时存在踏面接触和轮缘接触,而另一侧接触区域则形成了单点踏面接触。在分析轮轨两侧接触差异时,将两侧接触区域分别视作2个接触点,将多点接触的区域定义为“接触点1”,而对侧为单一踏面接触,定义为“接触点2”,两者之间的接触差异非常大。因此,从两者差异出发,分别对不同运行条件下车轮轮周的应变、接触点的接触斑和应力、接触力进行讨论。

2.1 轮周应变变化规律

在列车运行过程中,随着列车牵引力和运行速度的变化,轮周上的应变情况复杂多变,同时也为了给神经网络训练建立具有更加充分的数据集,将轮周应变结果用于神经网络训练,本文对不同运行条件下轮周应变变化规律进行对比分析。首先,对左右两侧车轮在不同接触情况下的应变差异进行分析,图4为在不同匀速行驶速度下,左右两侧车轮轮周应变随运行速度变化的云图。由图4可知:①在任意时刻,左右两侧车轮上的轮周应变沿径向和环向的分布均为非均匀状态,尤其是径向变化十分复杂;②不同半径位置的应变响应也不同,这也验证了前文中关于不同半径的应变对于接触力的敏感程度不同的结论,从而证明了采用不同的最佳应变采集半径和采集点方案的必要性;③应变最大值所在的位置正是位于所选取的最佳采集半径处,验证了前文中确定采集半径方案的准确性。然后,对比同一比例尺下不同速度的应变结果。由对比分析可以发现,随着列车运行速度增大,应变形成的响应斑形状相似,但应变响应范围在扩大,并且响应程度不断加深。以左侧车轮为例,应变幅值从速度16.0 km/h下的 2.44×10^{-5} ,增大到速度80 km/h下的 1.53×10^{-4} 。另外,对比两侧车轮的应变结果可以发现,左轮(接触点1)的应变响应要比右轮更加剧烈,不论是应变斑还是应变值都是如此。这表明在列车运行过程中,形成了多点接触,轮轨的接触情况变得更复杂,接触强度更大,因此带来了相对单点接触时更剧烈的应变响应。另一方面,列车从匀速运行阶段开始加速后,轮周上的应变会随之增大。以初速度为16 km/h时的结果为例,左轮轮周上的应变幅值从匀速阶段的 2.44×10^{-5} 增大到了加速后的 1.44×10^{-4} ,而右轮则从 9.59×10^{-6} 增大到了 2.97×10^{-5} ,这表明列车加速会加剧

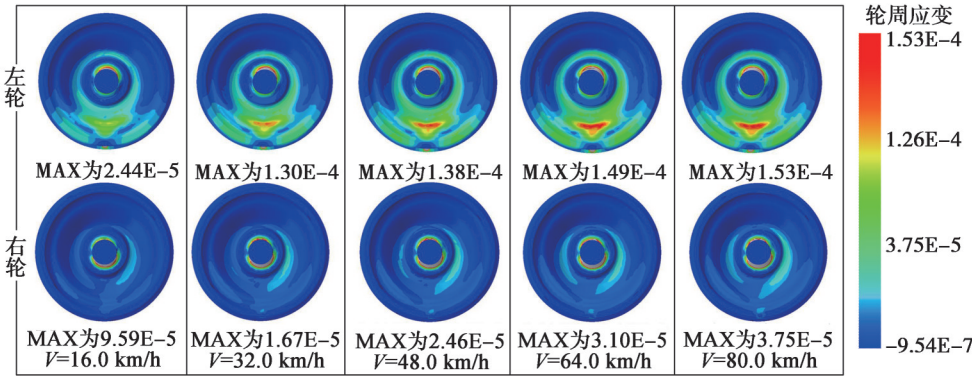


图4 不同匀速运行速度下左右车轮的轮周应变云图

Fig. 4 Contour plot of strain at the periphery of the left and right wheels at various constant operating speeds

车轮的应变响应, 其原因是惯性力增加或者转矩传递, 因为加速需要更大的转矩, 转矩通过轮轴传递到车轮, 使得切应力增加, 进而进一步加大了应变。

2.2 轮轨接触点应力变化规律

在不同运行条件下, 列车轮轨接触点之间的接触应力和接触斑呈现出较大的差异。图5为列车在不同速度下匀速行驶时, 左右两侧轮轨接触点的接触斑应力云图, 以及此时钢轨顶部形成的接触斑云图。由图5可知, 随着列车运行速度的增大, 接触位置的应力响应会更加剧烈, 应力值更大, 这一结果与前文所述的应变情况类似; 对比左右两侧车轮的情况, 左轮的响应相较于右轮更加明显。对列车进一步施加同一大小的牵引力加速后, 分析其响应结果, 可以得到与前文关于应变类似的结论——列车加速会加剧接触点的接触应力响应。

另一方面, 分析钢轨轨顶的接触斑, 对比两接触点形成的接触斑差异。从图5可以明显看出, 左轮(接触点1)的接触斑面积远大于右轮(接触点2), 同时也可以发现左轮(接触点1)的接触斑形成了两块接触区域, 即自踏面区域向侧面延伸至轮缘区域, 但两片接触区域间并没有明显分界, 在图5中已进行了部分标注。该接触斑产生原因是列车发生了轮对横移, 导致左轮(接触点1)的接触情况由单点接触转变为多点接触。同时, 对左轮(接触点1)的接触斑进一步分析可知, 云图显示应力较大的区域仍主要集中于踏面接触斑区域, 而轮缘区域虽然存在接触斑, 但是受力并不大。这说明在左轮(接触点1)形成的多点接触中, 踏面接触依然占据主导, 而且踏面接触点承受的应力远大于轮缘接触点。相比之下, 右轮(接触点2)的接触斑面积更小且完全集中于钢轨踏面区域, 这说明轮对横移后“接触点2”的接触形式为单点踏面接触。

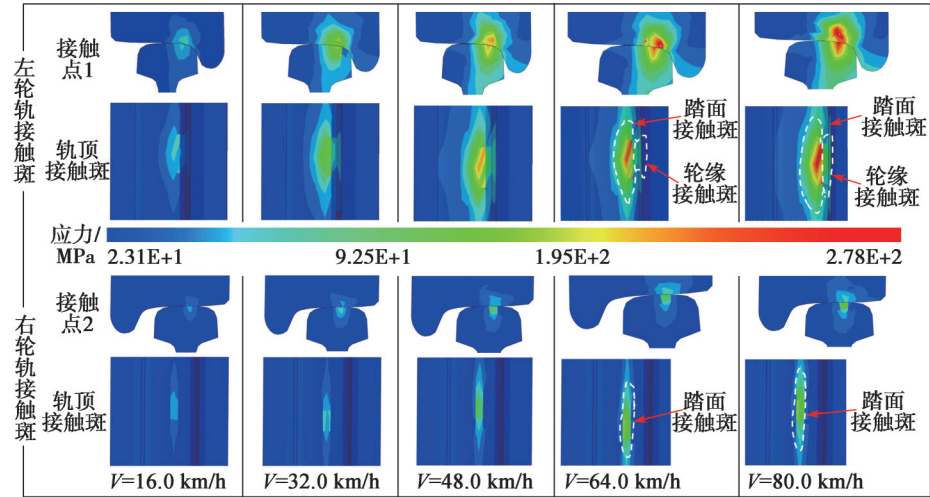


图5 在不同匀速运行速度下左右两侧车轮接触点位置的接触斑应力云图和对应的钢轨顶部接触斑应力云图

Fig. 5 Contour plot of stress at contact spots of left and right wheels contact points and corresponding stress at contact spots on rail top at various constant operating speeds

2.3 接触斑中接触力分析

列车运行过程中接触位置的接触力是本文研究的重点, 而且还是神经网络训练的主要参数, 因此有必

要对其在不同运行条件下呈现的规律进行分析与讨论。图6为“接触点1”和“接触点2”在不同条件下的横向力与垂向力的对比结果。由图6(a)、图6(b)和图6(d)可知, 匀速阶段的接触力不会随速度的改变而出现较

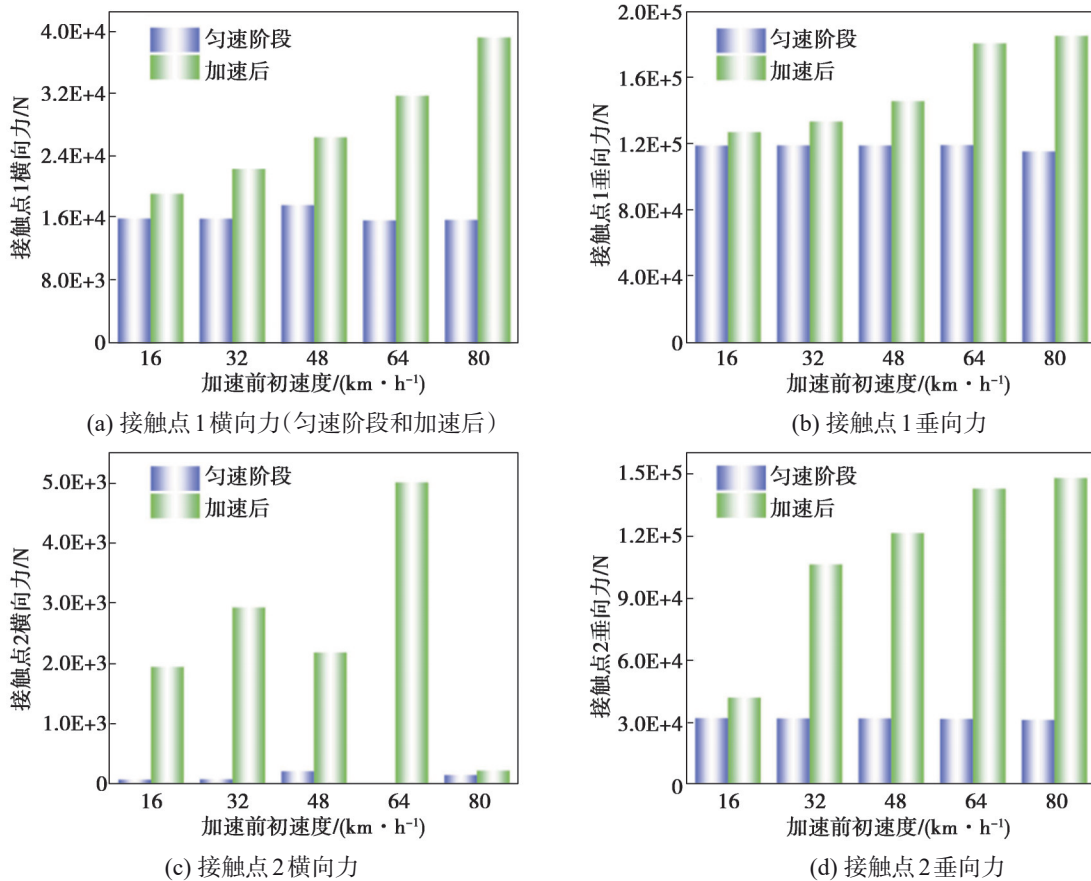


图6 列车在匀速与加速后两侧接触点接触横向力和垂向力随不同运行速度的结果

Fig. 6 Variations of lateral and vertical forces at contact points on both sides of the train following acceleration from operation at various constant speeds

大波动,这说明当列车处于匀速运行阶段时,接触力趋于稳定状态,而当列车加速后,接触力会随之增大,并且加速前列车的初速度越大,以同一大小的牵引力加速后,其接触力增幅更加明显。至于图6(c)呈现的结果,之所以会出现较大的波动,可能的原因是“接触点2”的整体横向接触力较小,从整体上看其幅值显著低于其他情况,但幅值波动会更为剧烈。另一方面,对比同一接触点的横向力和垂向力,如图6(a)与图6(b)所示,可以发现垂向力显著高于横向力。这表明在列车运行过程中,大部分时间的轮轨接触以垂向力为主导。此外,“接触点1”和“接触点2”的对比结果也表明,“接触点1”的接触力显著大于“接触点2”,如图6(b)和图6(d)所示,这说明多点接触比单点接触承受的力更大,接触情况更加复杂。

2.4 基于神经网络的接触力解耦预测

如前文的分析与讨论,在完成所有模型的数值计算和相应数据提取后,进一步开展轮周非接触点应变与接触点接触力的神经网络训练。首先,对数据进行筛选,以最大程度对标试验测试方法的模型1作为训练基态,再逐步扩大和优化数据集,通过对比模型间训练效果差异,验证本文所提出的采集半径选取和应变采集点布置等方法的必要性。为了保证神经网络预测

结果的可靠性,本文采用的神经网络结构包括1个输入层、2个隐藏层和1个输出层。其中,输入层神经元数量为1,对应1个输入特征(即车轮采集点应变)。参考现有神经网络模型训练的成果,本研究选择前馈神经网络作为训练手段,确定2层隐藏层对列车轮轨接触力的预测具有较好的精度,每个隐藏层包含20个神经元。为了提高模型的泛化能力,更好地帮助模型捕获非线性关系,本文采用非线性函数(ReLu)作为隐藏层的激活函数^[27]。输出层包含1个神经元,对应接触力的预测值,激活函数为线性函数(Purelin)。在训练过程中,数据集被随机划分为70%训练集、15%验证集和15%测试集,采用缩放共轭梯度算法(Trainscg)进行训练,该算法适用于中等规模数据集且对内存需求较低;损失函数采用均方误差(MSE),训练停止条件为验证集误差连续10次迭代不再下降或达到最大训练轮数500轮。超参数的选择基于初步试验结果,能够在保证训练效率的同时避免过拟合,其中学习率初始设置为0.01,并采用动态调整策略;批量大小设置为128,采用小批量训练以提高训练效率;最大训练轮数为500轮。图7为本文所使用神经网络训练流程图,以轮周上非接触采集点应变为输入值,以接触斑中的横向力和垂向力为输出值进行神经网络训练。

首先设置训练的基态为模型1,在30组模型中的2

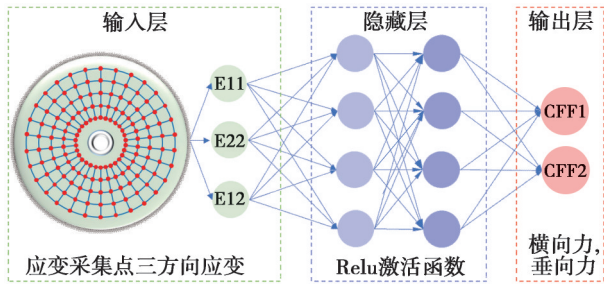


图7 神经网络训练流程图

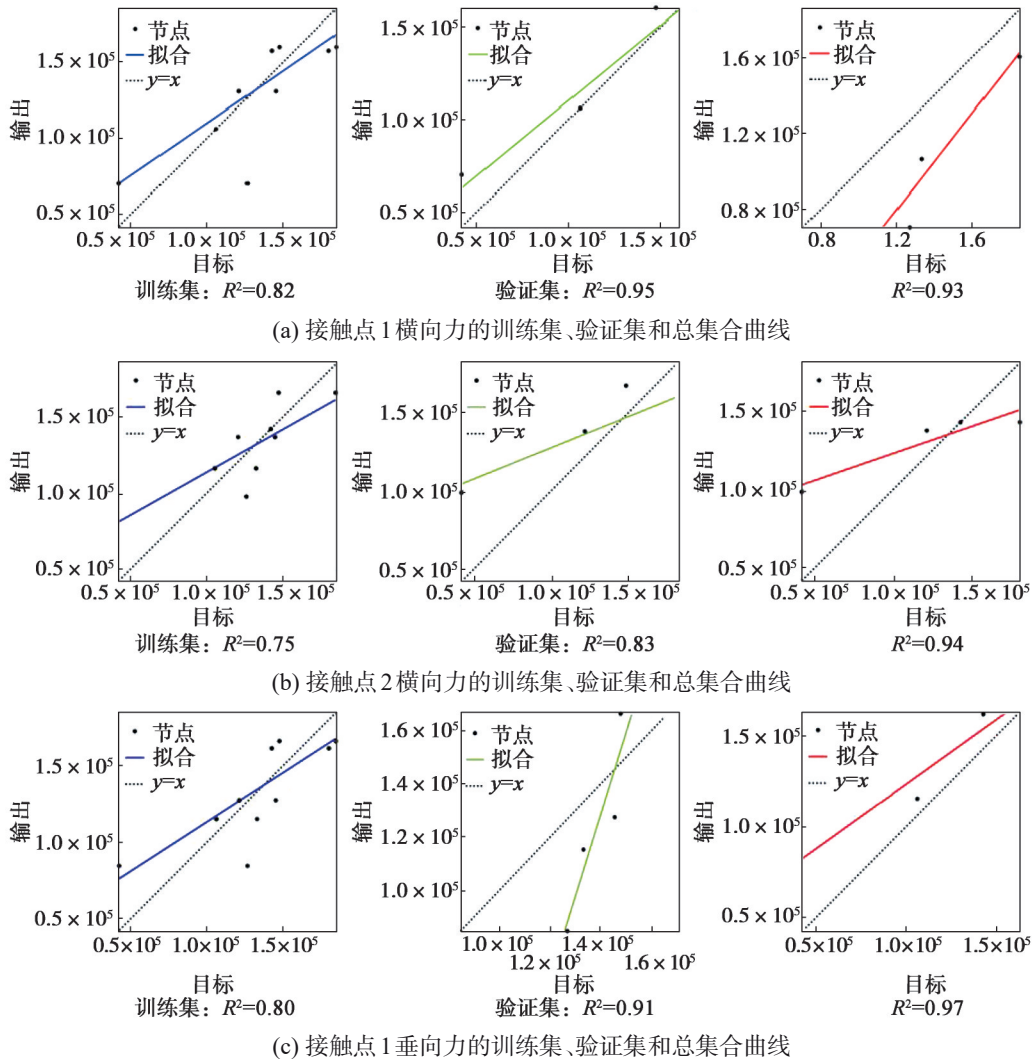
Fig. 7 Flowchart of neural network training

条最佳采集半径上使用对称四组布桥方法采集8个点应变数据，以应变采集点上3个方向的应变值作为输入值，分别针对横向力和垂向力开展神经网络训练，用于检验对于接触横向力和垂向力的预测结果。模型1以720个数据样本作为输入值进行训练，并以回归值 R^2 来评估训练结果。 R^2 表示预测输出与目标输出之间的相关性， R^2 越接近1，表示神经网络训练的效果越优异。如果模型1对于接触力的预测结果 R^2 均小于0.50，表明此模型的训练效果较差。因此，在模型1的基础上不断尝试优化数据样本，扩大样本规模。具体而言，在改进后的模型2中，忽略每条半径所针对的单一接触力方向，将每条采集半径上得到的应变数据同时用于横向

力和垂向力预测的神经网络训练。通过这种方法，每个方向接触力预测所使用的训练样本从原本的720组扩大到了1440组。对比模型1的结果，发现针对垂向力的预测效果，模型2有了一定的提升，回归值 R^2 达到了0.61左右，这也与垂向力的响应明显相关。

在上述改进的基础上，进一步在建立的模型3中，不再区分采集半径是否为横向力或垂向力的最佳采集半径，将全部5条采集半径上的8个应变采集点数据均用于神经网络训练的输入，并且延续模型2的优化，忽略每条半径所针对的接触力方向，同时用于横向力和垂向力的预测训练。这样针对模型3的数据样本从1440组扩大到了3600组。通过对比发现，采用模型3训练得到的回归值 R^2 有了显著的提高，能够达到0.8左右。最后，模型4将在5条采集半径上得到的合计多达30个应变采集点数据全部用于神经网络训练的输入，数据样本从3600组扩大到了13500组，对本文的训练基态（模型1）而言，数据样本扩大了17.75倍。图8为模型4训练结果。由图8可知，各个总集合的回归值 R^2 都大于0.92，这表明模型4的神经网络预测结果能够达到预期的良好效果。

进一步对4种模型的训练回归值 R^2 进行分析研究，



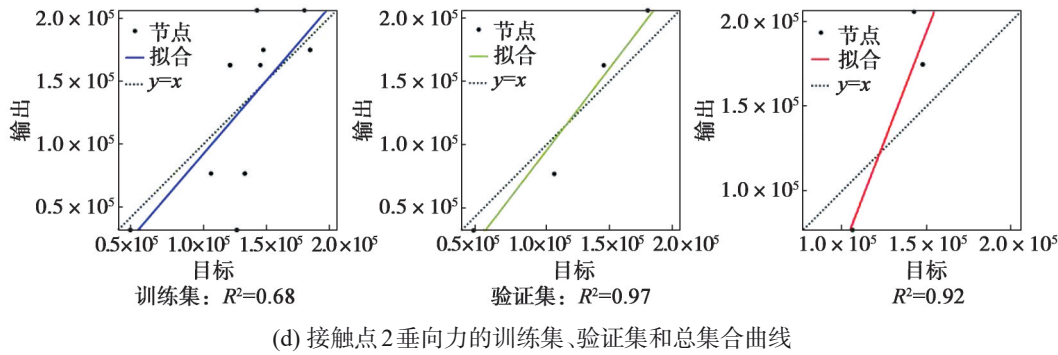


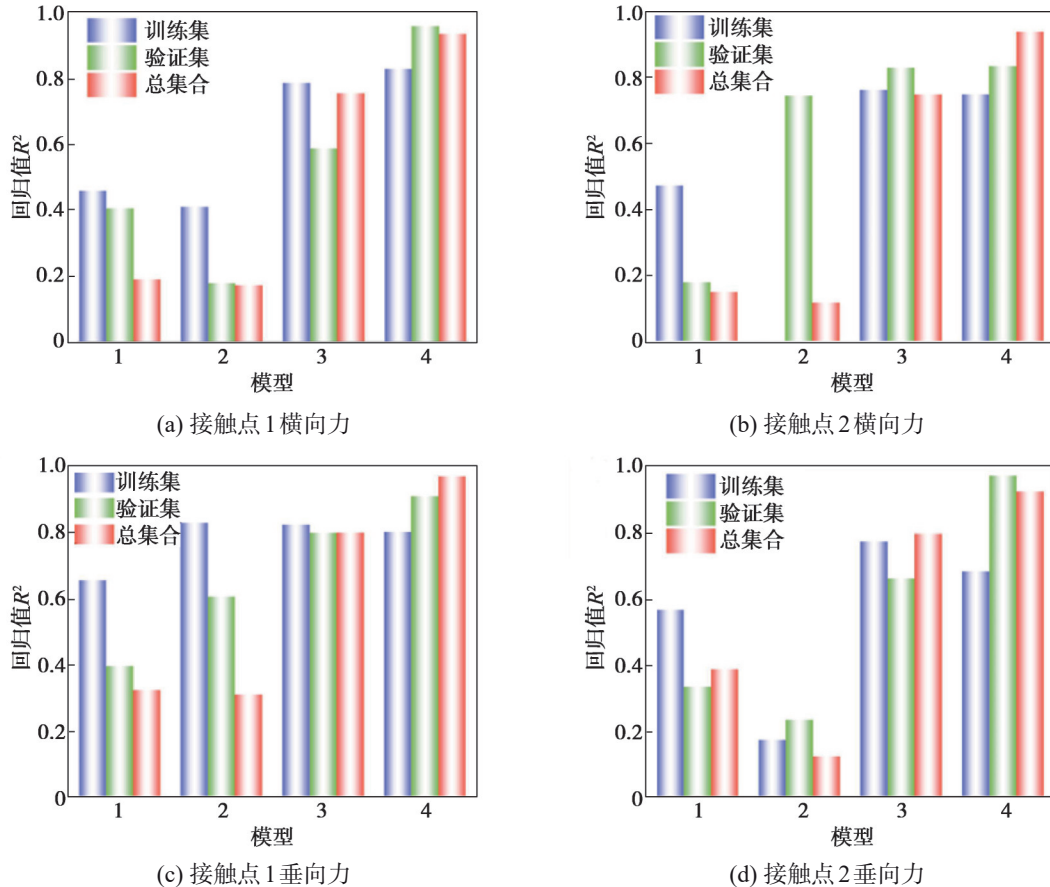
图8 模型4针对两侧接触点横向力与垂向力的训练结果

Fig. 8 Training results of model 4 on lateral force and vertical force at contact points on both sides

得到如图9所示的柱状图。从图9可以发现,对于模型训练回归值 R^2 ,模型1和模型2在整体上没有显著提升,预测效果波动较大,尤其是针对横向力的预测结果十分不稳定,但模型3有了较大的优化,尤其是模型4,当运用所有数据进行神经网络的训练后,训练效果有了显著的提升。以总集合的训练回归值 R^2 结果而言,可以看到从模型1到模型4的训练效果大体上呈上升趋势,最终模型4的回归值 R^2 都可以达到0.92以上。

图10为训练完成后利用所得到的模型进行自主测试的结果。其中,理想曲线表示预测结果和目标结果

完全吻合的情况,而针对各模型的预测曲线给出了拟合的曲线斜率。斜率越接近1,则表明预测曲线越接近理想曲线,即预测效果越好。从图10可以发现,从模型1到模型4,相对于理想曲线大体上呈逐渐逼近的趋势,尤其是模型4展现了较好的预测效果,与理想曲线极大程度地吻合。结合4组模型数据样本的优化过程分析可以得出以下结论:当仅使用2条最佳采集半径上的采集点数据作为数据训练样本时,模型的训练效果较差;当采集半径上被用来训练的应变采集点数量增加后,训练效果显著提升;若数据样本过少会导致训练效果远不如预期。这充分证明了本文提出的增加轮轨系

图9 四组训练模型关于两侧接触点接触力训练集、验证集和总集合的训练回归值 R^2 Fig. 9 Training regression values R^2 for the training set, validation set, and total set of contact forces at contact points on both sides for the four training models

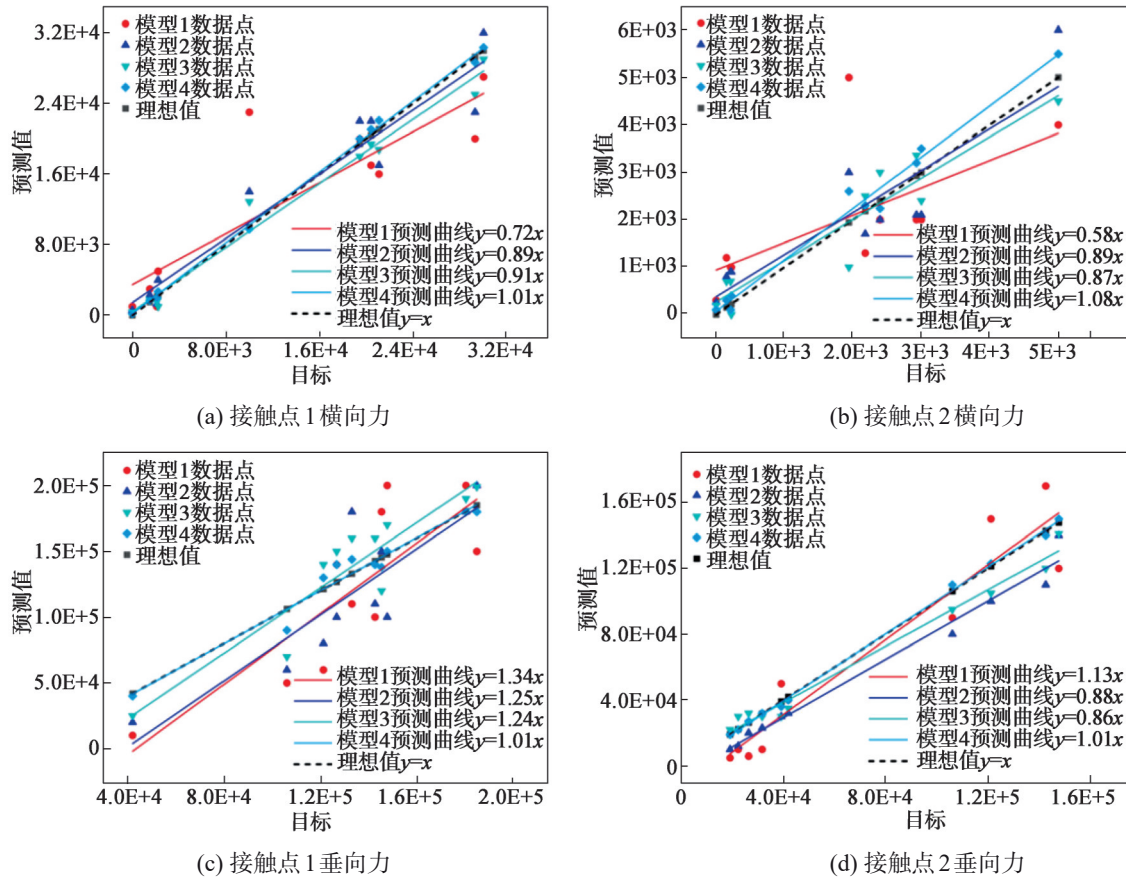


图10 四组训练模型两侧接触点的接触力测试曲线结果

Fig. 10 Test curve of contact force results at contact points on both sides for the four training models

统中轮周非接触采集半径和应变采集位置的必要性。

通过对上述训练结果的分析,表明本文所提出的轮轨接触力预测方法具有一定的有效性,也可用于指导工程实际,如可应用于针对列车运行安全性评估的脱轨系数判定问题。脱轨系数通常用于评估列车在不同运行状态(如通过曲线、通过轨道不平顺路段和车辆并行状态)的风险,其计算涉及接触横向力 Q 和垂向力 P 的比值,具体为

$$\frac{Q}{P} \leq \frac{\tan \theta - \mu}{1 + \mu \tan \theta} \quad (2)$$

式中: θ 为最大轮缘接触角; μ 为轮轨间的摩擦因数。

基于实际列车的运行条件,仿真工况设置为:列车最大运行速度为80 km/h,轨道为平直线轨道,轮轨接触摩擦因数为0.3,轮对横移范围为 ± 10 mm,发生两点接触的条件为轮对横移超过8 mm。在以上仿真工况的基础上,根据式(2)可以得到列车在各种运行状态下的脱轨系数,如图11所示。在本研究的仿真结果中,当列车发生轮对横移和两点接触情况下,横向力的最大值为39.190 kN,垂向力的最大值为184.991 kN,脱轨系数为0.212。由图11可知,列车的脱轨系数均处于0.1~0.3之内,与国家标准 GB/T 5599—2019 规定的第一限度脱轨系数指标1.2相比,具有足够的安全冗余^[28],这说明列车的运行情况完全在安全范围内。另

外,结合式(2)可以发现,横向力过大会加剧列车脱轨的风险,而横向力往往与列车的运行状态有关。因此,计算脱轨系数有利于评估列车运行状态的安全性,并可指导轮轨系统的优化设计,例如在设计曲线轨道时需要考虑曲线半径不能过小,以确保横向力不会太大。另一方面,也可以通过脱轨系数判断轮对是否存在异常横向位移,从而评估轮轨间的接触状态,并优化轮轨配合,避免接触不良导致的横向位移,有效降低列车运行风险。

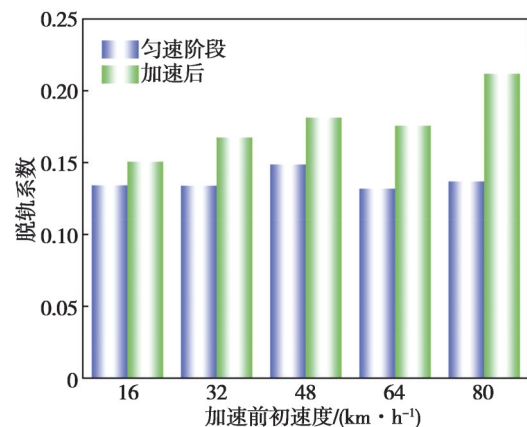


图11 列车在不同运行状态下的脱轨系数

Fig. 11 Derailment coefficients for trains in different operating conditions

3 结论

本文通过建立轮轨系统的数值仿真模型,探究了重载列车运行速度和牵引力两个关键因素对轮轨接触力的影响规律,并进一步开展了基于轮周非接触点应变大数据应用于接触斑中接触力的解耦识别分析。对数值仿真得到的大量非接触点应变数据库进行神经网络训练,建立了非接触点应变与接触力的预测模型,能够实现轮轨接触斑中接触力的实时解耦识别预测,主要结论如下:

①本研究揭示了轮轨接触应力应变和接触力的响应规律:当列车匀速行驶时,轮轨接触力处于稳定水平,不会因为运行速度不同而呈现明显差异;当列车处于加速状态时,轮轨系统的响应会更剧烈变化,如轮周应变、接触斑应力和接触力等都会显著增大。此外,相较于单点接触,轮轨多点接触使接触情况更复杂,承受的应力都会显著提高。无论是单点接触还是多点接触,接触形式都是以踏面接触为主导。

②本文提出了基于应变大数据与神经网络的重载列车轮轨接触力解耦预测新方法,该方法的优势在于结合了非接触点应变和接触斑中接触力的大数据样本,尽可能多地选择了更有利于提升预测效果的采集半径和足够多的应变数据采集点,并且对每个应变采集点都进行了3个方向的数据采集,做到了数据样本在提取和利用两个维度的最大化。结果证明了本文提出方法的有效性,即充分的数据样本数量能显著提高训练效果,以达到预期目标。本研究提出的基于大数据与神经网络的重载列车轮轨接触力解耦预测方法能够对相关的试验测试在应变采集半径和数据采样位置的选取上提供有益的参考,为重载列车的安全服役提供了新的轮轨接触力识别预测手段。

参考文献:

- [1] ZHANG Hanyu, XING Lei, ZHENG Xingpeng, et al. Imaging of train noise with heavy traffic events recorded by distributed acoustic sensing[J]. Geophysical prospecting, 2024, 72(9): 3399-3413. DOI: 10.1111/1365-2478.13597.
- [2] CHEN Xianmai, DENG Yi, CHEN Nan, et al. Dynamic characteristics of the sleeper-ballast bed under heavy haul railway train load[J]. Computational particle mechanics, 2023, 11(3): 1345-1356. DOI: 10.1007/s40571-023-00692-w.
- [3] WU Q, BERNAL E, SPIRYAGIN M, et al. Heavy haul rail/wheel wear and RCF assessments using 3D train models and a new wear map[J]. Wear, 2024, 538/539: 205226. DOI: 10.1016/j.wear.2023.205226.
- [4] WU Bowen, WANG Wenjing, PAN Jiabao, et al. Study on corrugated wear on high-speed railways based on an improved finite element model of wheel-rail rolling contact[J]. Tribology international, 2023, 179: 108199. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.108199.
- [5] 朱旻昊, 贺继樊, 李溯, 等. 基于轮轨力测量的新型轨道交通轮对智能运维监测系统研制[J]. 机械, 2024, 51(9): 28-36.
ZHU Wenhao, HE Jifan, LI Su, et al. The development of a new rail intelligent monitor for rail transit wheelsets based on wheel-rail force measurement[J]. Machinery, 2024, 51(9): 28-36.
- [6] 黄丹丹. 基于激光位移测量技术的轮轨作用力研究[J]. 运输经理世界, 2022(12): 164-166.
HUANG Dandan. Study of wheel-rail forces based on laser displacement measurement technique[J]. Transport business China, 2022(12): 164-166.
- [7] 陈思宇, 刘亚风, 付从艺, 等. 基于柔性传感技术的高速列车轮轨力在线监测方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(3): 545-552.
CHEN Siyu, LIU Yafeng, FU Congyi, et al. Application of flexible electronic technology in real-time monitoring for wheel-rail contact forces of high-speed trains[J]. Scientia sinica technologica, 2024, 54(3): 545-552.
- [8] ZHANG P, MORAAL J, LI Z L. Design calibration and validation of a wheel-rail contact force measurement system in V-Track[J]. Measurement, 2021, 175: 109105. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109105.
- [9] LIU Qingjie, LEI Xiaoyan, ROSE J G, et al. Vertical wheel-rail force waveform identification using wavenumber domain method[J]. Mechanical systems and signal processing, 2021: 159: 107784. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107784.
- [10] MILNE D, MASOUDI A, FERRO E, et al. An analysis of railway track behaviour based on distributed optical fibre acoustic sensing[J]. Mechanical systems and signal processing, 2020, 142: 106769. DOI: 10.1016/j.ymssp. 2020. 106769.
- [11] GAO L, ZHOU C Y, XIAO H, et al. Continuous vertical wheel-rail force reconstruction method based on the distributed acoustic sensing scheme of wheel rail force instrumented wheelset bridge scheme in urban rail transit[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [12] 杜佳, 陈建政, 吴越, 等. 基于测力轮对的纵向轮轨力测量方法研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(21): 53-61.
DU Jia, CHEN Jianzheng, WU Yue, et al. Research on longitudinal wheel-rail force measurement method based on instrumented wheelset[J]. Electronic measurement technology, 2024, 47(21): 53-61.
- [13] 贾保绯. 城市轨道交通轮轨力间接测量方法研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
JIA Yufei. Research on the wheel-rail force indirect measuring method of urban rail transit[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.

- [14] 郝瀚宇. 城市轨道交通轮轨力测力轮对组桥方案研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- HAO Hanyu. Research on the scheme of wheel rail force instrumented wheelset bridge scheme in urban rail transit[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [15] 侯明明, 王炯. 基于间接式测量轮轨力的重载机车轮轨力智能监测系统研究[J]. 机械, 2024, 51(10): 73-80.
- HOU Mingming, WANG Jiong. Intelligent monitoring system of heavy-haul locomotive wheel-rail force based on indirect measurement method[J]. Machinery, 2024, 51(10): 73-80.
- [16] 陈春俊, 邓倩. 轮轨接触点位置变化对测力轮对测量影响及其补偿方法[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27 (12): 113-118.
- CHEN Chunjun, DENG Qian. Influence of wheel-rail contact point changes on force-measuring wheelset measurement and the compensation method[J]. Urban mass transit, 2024, 27 (12): 113-118.
- [17] 孙效杰, 陶强, 杨锋, 等. 基于测力轮对的轮轨力检测技术研究[J]. 应用技术学报, 2024, 24(3): 357-362.
- SUN Xiaojie, TAO Qiang, YANG Jiang, et al. Research on wheel-rail force detection technology based on force-measuring wheelset[J]. Journal of technology, 2024, 24(3): 357-362.
- [18] 刘畅, 张胜龙, 张昀青, 等. 城市轨道交通轮轨力间接测量法仿真验证[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(2): 86-91.
- LIU Chang, ZHANG Shenglong, ZHANG Yunqing, et al. Simulation verification of indirect measurement method for wheel rail force in urban rail transit[J]. Journal of Shijiazhuang tiedao university (natural science edition), 2024, 37 (2): 86-91.
- [19] WU Bowen, WANG Wenjing, PAN Jiabiao, et al. Study on corrugated wear on high-speed railways based on an improved finite element model of wheel-rail rolling contact[J]. Tribology international, 2022, 179: 108199. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.108199.
- [20] 汪卫, 陈建政, 吴越. 基于GA-LSTM的轮轨力连续测量研究[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(4): 111-118.
- WANG Wei, CHEN Jianzheng, WU Yue. Continuous measurement of wheel rail force based on GA-LSTM[J]. Journal of mechanical engineering, 2024, 53(4): 111-118.
- [21] 国家铁路局. 重载铁路设计规范: TB 10625—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of heavy haul railway: TB 10625—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [22] 国家铁路局. 铁道车辆轮对及轴承型式与基本尺寸: TB/T 1010—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Wheelset and bearing of railway vehicles-types and basic dimensions: TB/T 1010—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
- [23] 国家铁路局. 机车车辆车轮轮缘踏面外形: TB/T 449—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Wheel profile for locomotive and car: TB/T 449—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
- [24] 全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183). 铁路用热轧钢轨: GB/T 2585—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- SAC/TC 183. Hot-rolled steel rails for railway: GB/T 2585—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [25] 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 Wei. Experimental study and modeling analysis on the large area spalling of locomotive wheel tread under heavy axle load[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [26] 苏建秋. 测力滚轮解耦方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- SU Jianqiu. Research on the force calculation method of instrumented roller-rig[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [27] 马健霄, 怀硕, 赵颀, 等. 快速路互通交织区超车换道行为控制方法[J/OL]. (2024-10-11)[2025-02-01]. 吉林大学学报(工学版): 1-13. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxb-gxb.20240783>.
- MA Jianxiao, HUAI Shuo, ZHAO Yi, et al. Behavior control method of overtaking lane-changing in expressway interchanging weaving area[J/OL]. (2024-10-11) [2025-02-01]. Journal of Jilin university (engineering and technology edition), 2024: 1-13. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxb-gxb.20240783>.
- [28] 国家铁路局. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

A decoupling method for wheel-rail contact forces of heavy-duty trains based on big data and neural networks

ZHANG Zhenhui¹, WEI Kai¹, PENG Shenyong¹, YIN Shengwen², WANG Zhonggang²

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

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

Abstract: To accurately identify and predict wheel-rail contact forces during the operation of heavy-duty trains, this paper proposes a novel method of decoupling and predicting these forces based on big data related to non-contact strain at the wheel periphery and a neural network. Initially, a refined finite element numerical simulation model was developed to replicate the wheelset-rail contact of heavy-duty trains. The subsequent analysis of strain sensitivity at the wheel periphery determined the optimal strain collection radius and the layout of collection points on the train wheels. The dynamic response of the wheel-rail contact area under various operating conditions of trains was investigated by analyzing extensive strain data generated at the strain collection points across multiple numerical simulation models, along with the vertical and lateral forces at the contact spots. The results revealed the variation patterns of response in key aspects such as strain and contact forces in the contact spot area when trains operating at a constant speed are accelerated. Following the establishment of a comprehensive data set of strain and contact forces, a neural network model correlating wheel-rail contact forces with non-contact strain at the wheel periphery was established, through a training process to address the relationship between contact forces and non-contact position strain. This model enables the real-time decoupling and accurate prediction of contact forces at the contact spot for trains. This neural network model exhibits superiority in both computational efficiency and prediction accuracy, proving effective in guiding the decoupling identification of wheel-rail contact forces for heavy-duty trains and supporting further engineering applications, such as solving the train derailment coefficient.

Keywords: heavy-duty train; wheel-rail system; big data; neural network; decoupling of contact forces; heavy-haul railway; numerical simulation