

文章编号: 1005-0523(2025)04-0011-18



轨道车辆振动性能维护与保障技术研究进展

周劲松^{1,2}, 刘世轩^{1,2}, 宫 岛^{1,2}, 赵苍鹏^{1,2}, 冉红波^{1,2}, 门志辉^{1,2}

(1. 同济大学交通学院, 上海 201804; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

摘要: 轨道车辆振动性能是保障列车运行安全、提升乘坐舒适性和延长部件寿命的关键因素。随着高速铁路和城市轨道交通的快速发展, 列车运行速度持续提升、线路环境日益复杂, 加之智能化运维需求的增长, 振动性能维护技术面临新的挑战与机遇。从轨道车辆振动性能评估标准、车辆振动性能设计与优化、车辆振动性能运维与保障、振动性能退化预测与剩余寿命评估技术进展5个方面系统综述了该领域的最新研究进展与未来发展趋势。研究显示, 未来振动性能维护将更加注重预防性策略, 通过模型预测和大数据分析实现故障预警和主动干预, 从而构建更安全、更智能、更经济、更高效的轨道交通安全保障体系, 不仅将提升运营可靠性, 还将为轨道交通的可持续发展提供重要支撑。

关键词: 轨道车辆; 振动性能; 性能维护与保障; 性能退化预测

中图分类号: U270

文献标志码: A

本文引用格式: 周劲松, 刘世轩, 宫岛, 等. 轨道车辆振动性能维护与保障技术研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(4): 11-28.

Research Progress on Maintenance and Assurance Technologies for Vibration Performance of Rail Vehicles

Zhou Jinsong^{1,2}, Liu Shixuan^{1,2}, Gong Dao^{1,2}, Zhao Cangpeng^{1,2}, Ran Hongbo^{1,2}, Men Zhihui^{1,2}

(1. College of Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Shanghai 201804, China)

Abstract: Vibration performance of rail vehicles is a crucial factor in ensuring operational safety, enhancing ride comfort, and prolonging component service life. With the rapid development of high-speed railways and urban rail transit systems, continuous increases in train speeds, increasingly complex track environments, and growing demands for intelligent maintenance have brought both challenges and opportunities to vibration performance maintenance technologies. This paper systematically reviewed the latest research progress and future development trends in this field from five key perspectives: vibration performance evaluation standards, vibration performance design and optimization, vibration performance operation and maintenance, vibration performance degradation prediction, and technological advances in remaining useful life assessment. The study indicates that future vibration performance maintenance will place greater emphasis on preventive strategies. Through model prediction and big data analytics, it will achieve fault early warning and proactive intervention, thereby establishing a safer, smarter, more economical, and more efficient safety assurance system for rail transit. This approach will not only improve operational reliability but also provide significant support for the sustainable development of

收稿日期: 2025-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375115); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(22120240338)

rail transportation systems.

Key words: rail vehicles; vibration performance; performance maintenance and safeguarding; performance degradation prognosis

Citation format: ZHOU J S, LIU S X, GONG D, et al. Research progress on maintenance and assurance technologies for vibration performance of rail vehicles[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42 (4): 11–28.

随着中国轨道交通网络的规模化扩展与智能化升级,高速铁路及城市轨道交通系统已成为国家综合立体交通网的骨干力量。截至2024年底,中国铁路营业总里程已达16.2万km,其中高速铁路运营里程突破4.8万km,城市轨道交通网络已覆盖44座主要城市,持续保持全球领先地位。随着轨道交通系统的快速发展,列车运行速度和客流量的持续提升,对轨道车辆振动特性的控制提出了更为严格的要求。轨道车辆振动特性问题已经成为行业内普遍关注的焦点和重要的研究热点。高速列车运行过程中不可避免地产生由轮轨动态接触引发的系统性机械振动,其核心载体(轨道车辆)对于客运列车而言,基于车体加速度是评价车辆运行平稳性或人体振动舒适性的主要方法^[1-3],考虑到人体对不同频率振动的敏感程度,对实测加速度进行频域加权后获得^[4],其中ISO 2631-1《机械振动和冲击人体暴露于全身振动的评价》采用时域加速度的计权均方根评价人体振动舒适性,对采样时间未有明确要求。正持续承受高频次、高负荷的复杂振动激励。这种振动通过轮轨界面、悬挂系统、车体结构等多级传递路径持续演化,振动能量传导引发的结构安全性、乘坐舒适性、设备可靠性及环境噪声等问题。这些问题共同对轨道交通运营安全和运营品质产生系统性的影响,在当前大规模路网建设和高频次运营条件下,这一制约效应尤为显著。

在轨道交通运维领域智能化转型的背景下,特别是数字孪生与人工智能技术,正在重塑传统的车辆状态监测与维护决策模式,将振动管理从被动响应升级为预测性维护体系。面对振动能量精准管控与全寿命周期成本优化的双重约束,行业亟需发展智能化性能保障技术。鉴于此,本文在系统梳理轨道车辆振动性能评估标准、设计与优化、运维与保障等基础上,针对国内外轨道车辆振动性能退化预测与剩余寿命评估技术两方面的研究进展进行

综述,同时对其未来的发展进行展望。

1 车辆运行性能振动评估标准

1.1 车辆运行性能振动评估标准

在轨道车辆服役过程中,振动性能的定量化评估是保障运营安全和乘坐舒适性的关键环节。随着中国轨道交通网络的快速扩展,高速动车组和城轨车辆的数量和运行里程持续增长,振动评估标准在新型车辆研发、既有车辆运维中的兼容性与适应性问题日益凸显。客运列车运行平稳性及乘客舒适度的评估主要基于车体加速度分析^[1-3]。由于人体对不同频率振动的感知存在差异,通常需对实测加速度信号进行频域加权处理^[4]。ISO 2631-1标准采用时域加速度的计权均方根值来量化振动舒适性,但该标准未对采样时间作出具体规定。20世纪80年代,我国首次颁布了GB/T 5599—1985《机车车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》^[5],引入Sperling指标作为评价车辆运行平稳性的主要指标,奠定了我国车辆动力学评价的基础体系。早期的评估主要关注车体刚性振动,尚未考虑车体弹性振动的影响,这与当时铁路运行速度较低、车体刚度较大的实际情况相符。随着铁路技术的快速发展,国际上相继出现了ISO 2631-1和UIC 513《铁路车辆乘坐舒适性评估》等重要标准,这些标准采用了基于加权加速度均方根的评价方法,推动了评价体系的国际化进程。

进入21世纪后,随着高速列车的快速发展,车体弹性振动的影响日益显著,评估标准也随之进入了新的发展阶段。朱剑月等^[6]通过地铁车辆实测对比研究发现,舒适度指标(UIC 513)与Sperling平稳性指标(GB/T 5599—2019)存在显著差异:舒适度指标基于15万km行程的三轴向耦合振动,通过长周期加速度均方根值统计反映综合生理影响,受线路局部缺陷影响较小;而平稳性指标仅分离评价垂

向/横向振动,无法体现多向耦合效应和纵向动力性能,但对车辆性能改善具有更好的实时指导性。研究表明,舒适度指标更适于评价乘客乘坐舒适性,而平稳性指标更适合评估车辆自身动力性能。

在列车运行平稳性研究领域,周劲松课题组开展了一系列开创性工作。在早期研究中,课题组运用时域分析与频域分析相结合的方法,深入探讨了铰接式列车与配备车间悬挂系统的高速列车在运行平稳性方面的特性差异^[7]。周劲松等^[8]创新性地运用虚拟激励原理,开发出一种新型分析方法,该方法将复杂的多输入多输出系统响应功率谱矩阵运算转化为简单的矢量运算流程,并成功应用于TR08磁浮车辆垂向动力学模型的平稳性评估。周劲松等^[9]通过虚拟激励法系统性地研究了车体弹性特性与运行平稳性之间的关系,首次明确揭示了车体结构刚度不足会导致剧烈振动现象的产生,同时指出随着运行速度的提升,对车体刚度的要求也相应提高。研究还证实,通过适当增加结构阻尼和一系垂向阻尼可以有效控制弹性振动。郭平波等^[10]在此研究基础上进一步深化,采用经典的欧拉-伯努利梁理论对车体弹性特性进行建模,建立了完善的车体-设备垂向耦合振动分析模型。通过建立精细的三维刚柔耦合模型,研究发现运用动力吸振原理优化车下设备悬挂参数能够明显改善车体垂向弯曲频率特性,有效抑制弹性振动。同时,研究还明确了重心偏移和不同悬挂方式对车辆振动特性的重要影响规律。国内外轨道车辆运行时振动相关舒适性评价基于ISO 2631-1、UIC 513以及GB/T 5599—2019标准,其中GB/T 5599—2019中的Sperling指标算法,将采样时间由GB/T 5599—1985的18~20 s缩短为与UIC 513标准相同的5 s,引起相同测试数据的平稳性指标结果增大的问题。张展飞等^[7]分析上述三种运行平稳性及舒适性指标算法,通过车辆线路实测数据与仿真数据相结合,研究不同算法关于采样时间长度的指标一致性及其机理,采用频率分辨率量化了非平方加权谱时频能量转换不对应导致的指标结果不稳定现象,基于此提出相应的平稳性指标一致性修正算法,并经动力学仿真数据验证有效,这为完善轨道车辆动力学分析与测试中振动舒适性的相关算法与评估限值制定提供理论依据。现代评估体系已经发展为包含安全性指标、平稳性指标和舒适性指标的多指标综合

评价体系,其中安全性指标包括脱轨系数和轮重减载率,平稳性指标包括Sperling指标和加权加速度,舒适性指标则参考ISO 2631-1和UIC 513等国际标准。

1.2 车辆部件评价标准

轨道车辆振动评价标准是保障车辆运行安全性、舒适性和设备可靠性的重要技术依据,国内外学者和标准化组织围绕不同部件的振动特性开展了系统研究,形成了覆盖轮对、轴箱、构架、车体及车载设备的完整标准体系。国际电工委员会(IEC)制定的IEC 61373《铁路应用-机车车辆设备-冲击和振动试验》标准是铁路应用领域最具影响力的国际标准之一,该标准针对机车车辆设备的机械环境适应性提出了强制性要求,将设备分为转向架安装(1类)和车体安装(2类)两类,并规定了对应的振动测试条件,包括频率范围(10~150 Hz或10~200 Hz)、加速度谱密度(10^{-3} ~ 10^{-1} m²/s²或 10^{-4} ~ 10^{-2} m²/s²)等关键参数。根据GB/T 14892—2006的规定,Z振级作为轨道车辆振动评价的核心指标,通过加速度均方根值转换计算实现对振动强度的量化评估。

金学松^[11]系统梳理了全球高速铁路发展概况及中国高铁网络规划,重点分析了运营史上典型脱轨事故的成因机制,指出高速列车安全研究的核心科学问题集中于两大方向:一是高速工况下车-轨耦合动态行为的建模与数值分析方法;二是复杂环境下的安全评估技术,其中复杂环境涵盖部件故障、强横风/旋风冲击及地震等极端条件。王忆佳^[13]研究了车轮不圆工况下轮轨高频振动对车辆系统动力学性能的影响,并给出了轮轨垂向力作为安全限制的依据。王镜鉴等^[14]聚焦焊接接头病害,通过时频分析与有限元仿真,揭示了扣件刚度、行车速度及接头几何参数对车辆动态响应的影响规律,并开发了基于共振解调的状态评估方法。朱海燕^[15]研究表明车轮异常磨耗会导致舒适性下降,而科学镟修可有效抑制车轮非圆化及关键部件振动;同时,优化轮对定位刚度和抗蛇行减振器参数能提升临界速度与稳定性。徐中旭^[16]提出的改进模糊层次分析法,通过三标度赋权和模糊综合评价模型,为等效锥度方案选择提供了参数稳定性强的决策工具。

1.3 车辆蛇行运动评价标准

蛇行运动稳定性是轨道车辆动力学性能的核心

心评价指标,其稳定性状态直接影响列车运行品质和行车安全。当系统发生蛇行失稳时,不仅会显著降低车辆运行平稳性指标,更可能导致轮轨接触几何关系恶化进而诱发脱轨事故。

现行国内外标准体系普遍采用间接评估方法来考核蛇行稳定性,国际主要技术标准对车辆蛇行运动稳定性的评估形成以下技术体系:欧洲规范 UIC 518 与 EN 14363 采用构架横向加速度均方根值作为核心判据,UIC 515-1 则基于轮轨横向力峰值比进行评判;俄罗斯 GOST/R 55495 标准侧重构架横向力的频域特征;美国 FRA 规范则坚持传统的脱轨系数时域统计法。这些标准均通过构架或轮轨系统的动力学响应间接表征蛇行稳定性,这主要是由于现场线路试验难以直接获取系统分岔特性及临界速度参数。相比之下,通过滚振台试验和多体动力学仿真可以完整绘制系统分岔曲线并准确测定临界速度,但需特别注意试验边界条件与线路实际运营工况的差异性,特别是轮轨接触几何非线性与悬挂参数随里程的演变特性。周劲松等^[17]首次将最优化理论引入铁道车辆蛇行稳定性研究,构建了转向架轴箱定位参数优化模型,通过多种算法对比确定了最优解,并利用三维图和等值线图验证了结果的可靠性。张继业等^[18]提出基于 Hurwitz 行列式的 Hopf 分岔代数判定方法,将分岔点求解转化为非线性方程问题,显著降低了传统特征根分析的计算量,并推导出蛇行临界速度的解析表达式。在蛇行临界速度评估方面,贾璐等^[19]发现基于轮轨力或加速度均方根的评判结果通常高于极限环法,建议构架加速度滤波范围应覆盖车体自振频率及转向架蛇行频率。孙丽霞等^[20]针对超临界和亚临界两种蛇行失稳模式,分别建立了脱轨安全性评判指标体系。胡喆等^[21]结合最小阻尼比法和自激输入能量法,揭示了簧下/簧间/簧上质量对蛇行稳定性的影响机制。魏来等^[22]基于长期线路测试数据,构建了走行里程-轮轨接触锥度-横向加速度的关联模型,并开发了考虑抗蛇行减振器动态特性及车体弹性的刚柔耦合模型,为轮轨参数匹配设计提供了理论支撑。

2 车辆振动性能设计与优化

2.1 车辆振动性能正向设计

周劲松课题组在专著《高速列车动态性能正向

设计》中定义^[23]:在无借鉴、无平台、无技术规范的情况下,通过理论研究、仿真复现和实验验证等手段,从零出发设计出动态性能指标稳定且优异的轨道车辆系统为正向设计,由于模态参数测试分析理论完备、测试便于实施,在设计之初易于通过模态对标设计、模态规划来实施性能的初步设计,因此选择模态作为性能设计的重要依据,也可以说“模态是车辆动态性能的基因,平台产品的性能由其模态族群决定,优选适应运行环境的基因并进行合理匹配,是产品竞争力和正向设计的起点”。在车辆研发中,模态匹配的最佳状态是既要避免整车各子系统自身固有频率的耦合,同时也要避开系统与外界输入激励之间的耦合。模态频率规划表和整车的噪声与振动目标一起成为车辆噪声振动设计最重要的指南,整车模态匹配策略也是以模态规划表为基础、以总体技术指标为匹配关键点、以车身为模态匹配中心、以外协系统为基本控制单元。模态频率规划表和整车噪声与振动目标是车辆振动噪声设计的核心依据。整车模态匹配方案以模态规划表为基准,围绕关键性能指标展开,以车身模态协调为重点,并将外部协作系统作为主要管控单元。

ZHOU 等^[24]建立了包含车体弹性效应与所有垂向刚性模态的客车垂向动力学模型,利用协方差分析法探讨了车体弯曲频率的技术要求,表明提高车体弯曲频率可有效避免车体共振,同时分析了几何滤波现象对车体响应功率谱的影响,以及几何滤波与弹性车体共振频率的关系,表明在某些特定轨道不平顺波长下,车体的点头和浮沉响应均为零的现象为轴距滤波,车体的浮沉或者点头响应为零的现象为定距滤波,当车体的垂向一阶弯曲频率与这些峰值频率吻合时,将产生车体弹性共振现象^[25]。GONG 等^[26]采用包含车体弹性效应的车辆垂向动力学模型,研究了车体刚度及车体-转向架浮沉耦合振动对系统动力学的影响,表明车体刚度越高,其弹性效应对运行平稳性的影响越小。宫岛等^[27]基于 Guyan 缩减法开展模态分析,探讨了弹性车体与转向架构架之间的垂向耦合振动特性,研究发现,当高速列车转向架一系悬挂系统的垂向刚度与车体垂向一阶弯曲频率合理匹配时,即使构架的浮沉及点头频率接近车体弯曲频率,系统仍能避免发生弹性车体与构架之间的共振现象。GONG 等^[28]采用 Green 函数法求解各车体的偏微分方程,并分析了车体柔

性共振机理,表明铰接列车中存在几何滤波现象,当车体一阶垂向弯曲频率与车体浮沉加速度传递率峰值频率重合时,将引发柔性车体共振。尤泰文^[29]围绕高速列车概念设计阶段车体振动性能设计,从弹性梁、中厚板壳振动理论出发,针对车体不同振动特点分别建立变截面车体垂向振动分析模型和多板组合三维振动分析模型,并推导了相应的解析刚柔耦合动力学模型建立方法,在此基础上对高速列车异常振动现象的产生机理和传递特性进行了研究。以上基于模态匹配设计的研究,为车辆振动性能正向设计奠定理论出发点。

2.2 车辆与车载设备减振解耦设计

周劲松等^[30]为了抑制铁道车辆车体弹性振动提出了在车体底架下安装动力吸振器的方案,优化设计的动力吸振器可以有效控制车体弹性振动,同时也探究了在车体底架下方纵向安装液压减振器的可行性,表明车体减振器亦能有效控制车体弹性振动^[31]。宫岛等^[32]提出了高速列车下吊设备隔振设计的基本理论及方法,分析了车下设备悬挂参数对车体模态的影响^[33-34],并基于模态匹配原则,对车下设备悬挂参数进行了优化设计^[35-36]。

此后,车下设备对车体振动传递与模态频率的影响被更多学者关注。邓海等^[37]基于隔振理论和模态匹配原则,确定了车体主要下吊设备的模态频率优化区间。夏张辉等^[38]研究发现车下设备偏心布置会引发其六自由度振动的非线性耦合效应,据此创新性地提出了悬挂系统解耦优化方法,该方法不仅在高速动车组上实现了设备振型的高解耦度^[39],后续更成功应用于地铁车辆电机悬挂系统的振动控制^[40]。SUN等^[41]设计了一种可以实现垂向、横向刚度分离的新型车下设备减振器,该减振器能够有效降低车体的弹性振动,改善车辆的运行平稳性。可见,车载设备物理参数和激励参数的准确性对车体和车下设备耦合振动研究有重大影响,合理的车载设备隔振参数可以有效抑制车辆振动,提高车辆动力学性能。

2.3 车辆悬挂分层传递率设计

车辆悬挂系统主要起到缓冲并衰减振动的作用,分析悬挂系统的振动传递率对评估悬挂系统的减振性能以及优化悬挂参数有重大意义。周劲松等^[42]采用频率响应函数估计方法,以构架振动为激励源、车体响应为观测指标,对SW160型和209HS

型转向架的二系悬挂传递特性进行对比研究。楚永萍等^[43]基于频响函数与相干函数分析技术,验证了CRH2型动车组转向架二系悬挂参数的设计合理性。徐宁等^[44]考察了一系悬挂力作用点位置变化对振动传递特性的影响,发现转臂重心与套圈中心间距是影响各部件位移传递特性的关键参数,该参数变化可使力传递特性产生30%以上的波动。

随着振动环境归纳谱新技术的发展,如何从悬挂设计出发保证部件振动环境工作阈值,是振动环境归纳谱的出发点。周劲松及其课题组在专著《高速列车动态性能正向设计》^[23]中指出:为保障车载设备在复杂振动环境下的安全可靠运行,需提出适用于轨道交通实测振动环境的谱归纳技术,同时首次将悬挂设计和结构振动疲劳的评价通过振动谱归纳和分层传递率技术相结合,建立了动力学和结构疲劳两大学科的源头分析桥梁,相关方法对指导悬挂设计、振动环境预警、结构疲劳设计具有深远的影响。DENG等^[45]鉴于轨道车辆实测振动环境的多通道与非正态特性,将统计归纳法与Johnson体系相结合,提出了一种通用的振动环境谱归纳技术,并根据归纳谱进一步推导出测试车辆一系、二系悬挂的层级传递率。胡鑫磊等^[46]采用归纳谱的方法对实测车辆振动数据进行了归纳处理,并进行了二系悬挂分层传递率的计算,对二系悬挂系统特性进行了减振综合评价。

3 车辆振动性能运维与保障

3.1 轮轨几何劣化对振动性能影响研究

由于长期运行与载荷作用,轮轨几何结构不可避免会发生劣化,如轮缘磨耗、踏面剥离、轨道波磨等。这类几何劣化不仅改变了轮轨的动态接触关系,也会显著影响列车系统的振动性能,进而影响结构疲劳寿命、运行安全性和乘客舒适度。轮对方面常见的劣化形式包括轮缘磨损、踏面多边形化以及剥离、扁疤等缺陷,而轨道方面则表现为波磨、轨面不平顺、接头冲击以及道床沉降等,严重影响列车运行平顺性。上述几何缺陷会显著增强轮轨间的动态响应,引发车体与转向架的垂向与横向振动,加剧结构疲劳与噪声辐射,降低乘坐舒适性,甚至危及运行安全,成为轨道交通系统中值得关注的重要问题,为此诸多学者开展了轮轨几何劣化对振动性能影响研究。

熊嘉阳等^[47]研究了车轮不圆、钢轨焊接接头几何不平顺以及钢轨波磨对车辆系统的振动响应、轮轨作用力及稳定性等特性的影响。靳智超等^[48]以实测多边形磨耗为输入,分析了车轮多边形磨耗对车轴疲劳损伤的影响。凌亮等^[49]研究了车轮扁疤激励下轮轨垂向力及轮对垂向加速度的响应特征。史彦辉等^[50]研究表明钢轨廓形打磨可有效消除波磨并显著降低轮轨冲击,但轨缝高低差仍需额外处理,复合不平顺治理应“打磨+结构优化”双管齐下。施洁等^[51]研究表明连续多波轨向不平顺在6~11 m波长内显著影响列车运行平稳性。杨新文等^[52]分析了钢轨错牙接头激励下轮轨冲击力与振动噪声的响应特征。高雅等^[53]研究表明路基沉降对高低不平顺和车体垂向加速度的影响显著。综上,轮轨几何劣化显著恶化车辆的振动性能,必须实施基于状态监测的预防性维护策略,如周期性轮对镟修、钢轨预防性打磨等主动维护措施,以及基于数字孪生技术的智能化维护决策,这种系统化的维护理念对于保障列车运行安全性、提升乘坐舒适性以及延长关键部件服役寿命具有重要的工程实践价值。

3.2 轮轨几何不平顺的检测及阈值标准

随着铁路向高速、重载方向发展,轮轨动态相互作用加剧,对轮轨不平顺的精确检测及合理阈值设定提出了更高要求。轮轨几何不平顺早期主要依赖人工静态检测,但效率低、难以反映动态轮轨作用,后来采用弦测法和惯性基准法两种间接动态检测方法,然而由于列车运行时速频繁变化,车辆运行属于典型的非平稳过程,传统信号分析方法难以适应非平稳工况,导致轨道不平顺波长与幅值的定量检测面临挑战,WANG等^[54]首次提出基于阶次分析技术的变车速非平稳工况下轨道不平顺定量检测方法,检测流程如图1所示,最终通过仿真与现场测试案例验证所提方法的有效性。除轨道不平顺外,车辆实际承受的不平顺激励源于轮轨共同作用,因此还需充分考虑车轮不圆顺、多边形磨耗等激励源的影响,检测技术朝着多传感器融合和智能算法方向革新。WANG等^[55]依据大量车轮不圆测试数据,提出了Johnson非正态变换体系下车轮不圆顺分位谱计算方法,并根据轮对镟修周期不同阶段,通过引入车轮不圆顺谱对传统标准轨道谱短波

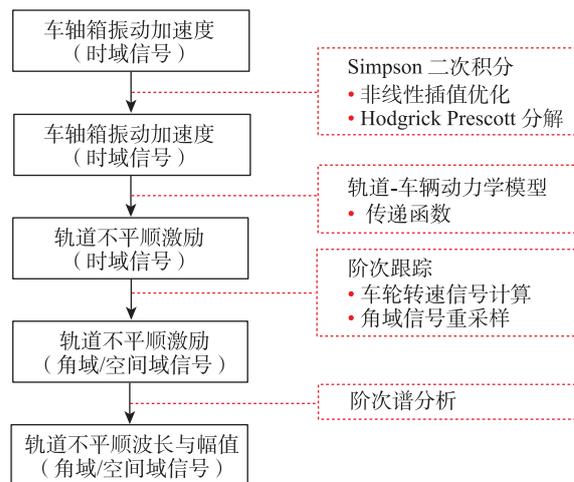


图1 检测流程^[54]

Fig. 1 Testing procedure^[54]

区段进行修正,最终完成轮轨综合不平顺谱的编订。王秋实等^[56]基于参数化功率谱估计理论,提出了一种新型车轮多边形识别技术,该技术具有三大优势:短时数据处理能力、高精度频域分析特性以及对谐波信号的高度敏感性,特别适用于早期车轮多边形磨耗的精准诊断。王秋实等^[57]采用迭代修正离散傅里叶变换算法,有效克服了传统频谱分析中栅栏效应和频谱泄漏等技术瓶颈,显著提升了非平稳工况下的识别准确率。李大柱等^[58]将奇异值差分谱降噪技术与BP神经网络相结合,成功实现了基于轴箱振动信号的车轮扁疤实时监测与定量评估,为列车走行部故障诊断提供了新的技术路径。王阳等^[59]基于一维卷积神经网络搭建钢轨波磨检测模型并在仿真数据集上进行训练,并将模型迁移到实测车体垂向加速度数据集上实现对钢轨波磨的诊断,发现该模型钢轨波磨识别的准确度较高。

此外,诸多学者对轮轨几何不平顺的阈值标准开展了大量研究,张富兵等^[60]根据车轴的许用应力及轮轨垂向力的要求提出了车轮多边形磨耗波深的安全限值,基于垂向轮轨力的多边形限值如图2所示。赵鑫等^[61]从轮轨接触脱离角度,提出轮轨中/短波不平顺的临界管理限值建议,临界波深建议管理限值如图3所示。安博伦等^[62]研究了轨道不平顺参数对轮轨相互作用的影响规律,并建议400 km/h下钢轨不平顺幅值限值取0.2 mm,且重点关注波长小于0.3 m的短波不平顺。综上,轮轨几何不平顺

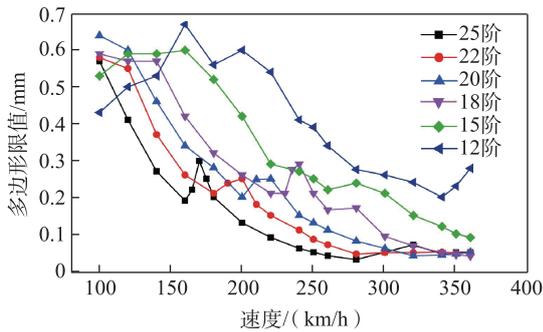


图2 检测流程由轮轨力得出的多边形波深限值^[60]
 Fig. 2 Polygonization wave depth limit derived from wheel-rail force in the detection process^[60]

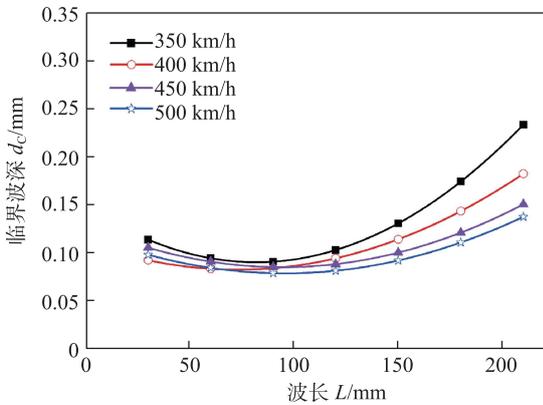


图3 不同速度下临界波深管理限值建议^[61]
 Fig. 3 Critical wave depth management limits under different speeds^[61]

的阈值标准是保障行车安全的核心依据和优化运维经济性的技术基础,具有重要的理论价值和工程意义。

3.3 车辆部件振动环境谱归纳技术及归纳谱

轨道车辆振动环境谱归纳的基础性研究旨在将其运用在轨道车辆理论设计、振动测试和振动评价中,振动环境归纳谱作为轨道交通领域的新技术,对设备振动环境的归纳和规整具有指导性意义。振动环境归纳谱的建立需重点解决两个关键问题:一是确立轮轨至车体传递路径中各构件的振动工况边界,二是通过悬挂系统设计确保部件振动环境处于安全阈值范围内。该方法的应用需基于三方面核心要素:实测振动数据采集、运行环境特征分析以及行业规范标准,以此构建完整的装备振动可靠性评估体系^[23]。

轨道交通装备在投入使用前需通过国际标准 IEC 61373 的检测认证。然而,我国现行标准在载

重、运行速度及振动环境等参数要求上存在显著差异。为提升装备设计的精准性与可靠性,研发人员需获取国内真实运行环境下的振动数据谱,并与现行试验标准进行对比分析,以提高轨道交通装备的设计准确性和运行可靠性。丁杰等^[63]采用 GJB/Z 126 中的振动、冲击环境测量数据归纳方法对实测数据进行归纳,获得实测 1 类 A 级功率谱曲线,并据此对车载设备进行疲劳分析。在实际运用中发现,轨道车辆振动数据基本不服从正态分布,正态先验会产生归纳误差,为此邓辰鑫等^[64]应用 Johnson 准则对传统振动数据处理方法进行优化,有效解决了非正态分布振动数据的处理难题。该研究通过实测数据验证及与国际标准 IEC 61373 的对比分析表明,改进后的方法显著提升了非正态环境下的数据适应性,所获得的归纳谱能更准确地反映实际振动特性。类似的,韩兴晋等^[65]针对轨道车辆多通道振动加速度的非正态分布特征,同样验证了 Johnson 准则在数据处理中的普适性优势。厉鑫波等^[66]从随机振动理论出发,建立了基于频域疲劳分析的振动环境归纳方法,系统性地提出了车辆设备振动疲劳寿命评估的技术路线,如图 4 所示。王腾飞等^[67]提出一种基于疲劳损伤谱的非平稳振动载荷的等损伤载荷谱编制方法,平稳高斯振动载荷 FDS 求解过程如图 5 所示,可以有效地表征振动载荷能量频域分布特性且包含高振动能量,与非平稳振动载荷具有等损伤能力。综上,深入而准确地归纳实测环境下轨道车辆的振动环境,界定及获取乘客、车载设备、结构的振动环境及振动边界,对于保障列车的安全性,降低车辆运维成本,提高列车的舒适性、平稳性等

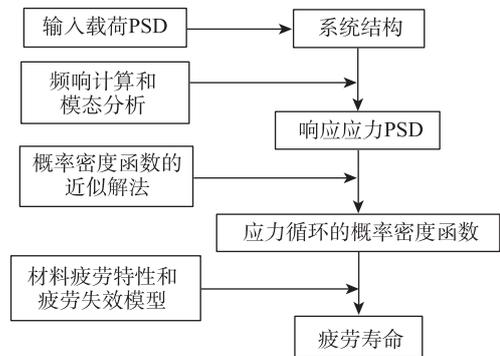
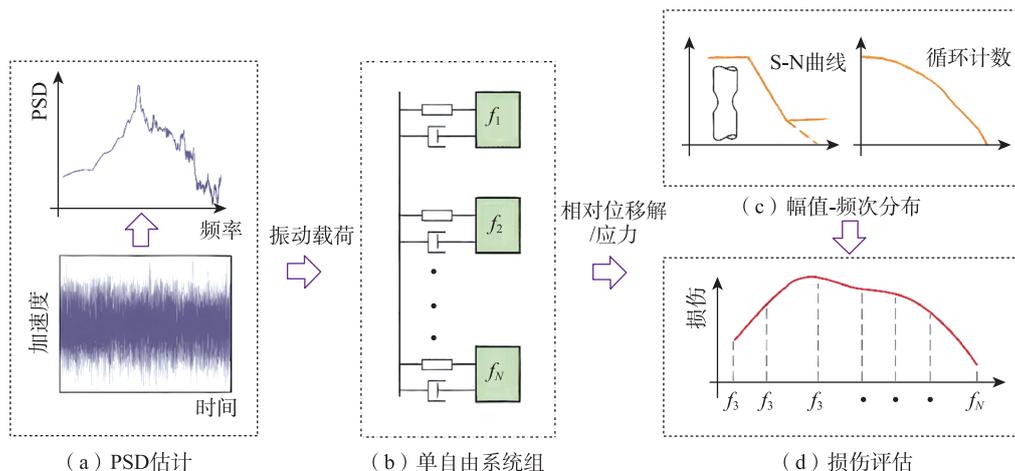


图4 频域疲劳分析流程^[66]
 Fig. 4 Frequency-domain fatigue analysis procedure^[66]

图5 平稳高斯振动载荷FDS求解过程^[67]Fig. 5 FDS calculation workflow for Gaussian stationary vibration excitation^[67]

运行品质均具有重大意义。

4 振动性能退化预测与故障诊断

随着轨道交通系统复杂性的提升,传统的基于经验的定期维护模式已难以满足高可靠性和低运维成本的要求。为此,学术界与工程界逐渐转向预防性维护(preventive maintenance)策略,即在故障发生前通过模型预测、规律分析或数据挖掘,提前制定干预措施,避免故障扩大和性能劣化。预防性维护主要可分为三类方法:基于物理模型的方法通过建立轨道系统的力学或磨损模型,预测关键部件在不同工况下的性能演化,具备较强的解释性;基于统计学的方法利用历史故障与运行数据挖掘退化规律和寿命分布,如可靠性分析、失效率建模等,适用于大样本条件下的风险评估;而基于数据驱动的方法则借助机器学习、深度学习等先进算法,从多源运行数据中自动提取特征并构建预测模型,具备建模灵活、适应性强的优势,正成为智能运维的重要发展方向。

4.1 基于物理模型的预防性维护

基于物理模型的预防性维护方法,强调通过建立系统的物理、力学或材料退化模型,对轮轨部件的运行状态与劣化趋势进行预测。这类方法依赖对轮轨接触力学、疲劳损伤、磨损行为等机制的深入理解,通常结合多体动力学(MBS)、有限元分析(FEA)、轮轨接触理论(如Hertz接触)等技术工具来实现。例如,通过模拟轮轨接触应力分布和材料累积损伤,可以预测轮缘磨损或轨面波磨的形成过

程,并据此制定打磨或更换策略。王腾飞等^[67]采用多维多点虚拟激励法研究了转向架构架在轨道不平顺激励下的随机振动疲劳寿命。结果表明,构架的刚性与弹性模态对寿命影响显著,为疲劳设计提供新思路。周宇等^[68]提出基于等磨损深度和等车轮通过次数的磨损阈值方法,发现裂纹萌生预测误差小于5%,为钢轨打磨周期设定提供了依据。陈道云等^[69]对比线性与非线性累积损伤模型,提出等效应力-寿命分布的物理模型,为转向架分级维护策略提供理论支持。王秋实等^[70]提出一种基于动应力时域外推的构架寿命评估方法,利用极值理论提高评估准确性与安全性。谢树强等^[71]基于实际动应力数据和蒙特卡罗法,分析了构架疲劳寿命(48.39万 km, 97.5%可靠度),指出曲线段轮轨激励是主要损伤原因。王秋实等^[72]建立构架有限元模型,发现牵引工况下疲劳寿命比惰行工况下降99%,强调考虑电机振动在疲劳设计中的必要性。毛冉成等^[73]建立刚柔耦合动力学模型,揭示多边形轮对激励显著加剧构架振动。习文顺等^[74]对比钛合金与传统钢构架疲劳性能,发现前者寿命翻倍,提供材料替代设计依据。王秋实等^[75]提出基于KDE的应力谱外推方法,外推误差仅为-4.17%,适用于小样本寿命预测。王文静等^[76]建立撒砂装置-构架端部耦合模型,发现标准谱损伤严重低估,提出Dirlik+Miner的寿命预测流程。周宇等^[77]在道岔心轨裂纹预测中考虑冲击荷载与材料塑性变形,发现顶宽35~40 mm为最不利位置。肖乾等^[78]对不同累积损伤模型进行比较,发现Cotern-Dolan模型更为保守,

且转臂座为寿命短板。贾小平等^[79]建立地铁轮对磨损模型,提出小等级镟修+灵活进刀方案,使轮对寿命延长50%。唐毓晗等^[80]提出改进的Manson-Halford模型,引入材料退化率与结构参数,提高疲劳预测精度且保留设计裕度。肖乾等^[81]将Corten-Dolan与Manson-Halford模型结合实测应力谱进行疲劳可靠性评估,并通过Levenberg-Marquardt算法优化参数,指出SMA材料可显著提高薄弱点寿命。综上所述,基于物理模型的维护方法具有可解释性强、机制清晰、适用性好等优点,特别适合高速列车、大型重载等高安全性场景。但也存在建模复杂、参数敏感、环境适应性差等现实挑战,需与数据驱动或混合方法进一步融合优化。

4.2 基于统计学的预防性维护

统计学方法侧重于利用已有的历史数据和运行记录,挖掘轮轨系统的故障概率分布、失效率模型及退化规律,构建预防性维护策略。这类方法以可靠性工程理论为基础,常用模型包括Weibull分布、指数分布、正态退化模型等,通过对大样本历史运行或检修数据进行统计建模,可以估计关键部件的平均无故障时间(MTBF)与剩余寿命(RUL)。例如,可基于大量轮对磨损数据,推导出轮缘厚度衰减的时间规律,进而制定更合理的轮对检修周期。此方法计算简便、便于实现标准化,但对数据完整性与一致性要求高,且难以准确捕捉非线性、突变性退化特征。王文静等^[82]基于线路试验数据,建立了高速列车齿轮箱箱体的等效应力-疲劳强度干涉可靠性模型。分析结果表明,随着列车服役里程的增加,箱体疲劳可靠度不断降低,铝合金箱体铸造水平等级的提高可显著延长齿轮箱箱体寿命。田丽等^[83]通过数据拟合方法分析地铁车辆车轮磨损,比较了传统方法和数据拟合方法确定磨损量的差异。研究表明,数据拟合方法考虑的轮径数据更多,相邻轮径数据时间间隔更短,得出的磨损量更准确,预测车轮寿命更可靠。智鹏鹏等^[84]提出了等效时变动态应力-强度干涉模型,用于转向架构架的疲劳可靠性分析。通过线路试验跟踪测试,采用双参数雨流计数法处理实测随机应力-时间历程,建立用于疲劳可靠性分析的应力谱。研究表明,转向架构架服役1200万km的疲劳可靠度为74.46%,较传统方法偏于安全,且考虑了等效应力和疲劳强度的时变性与动态性。齐金平等^[85]针对

高速列车车轮在退化过程中呈现两阶段特征的问题,提出基于两阶段非线性Wiener过程的退化建模及可靠性分析方法。采用CUSUM算法实现车轮退化过程变点判别,结果表明同转向架不同侧车轮退化过程出现变点的位置不同,可靠性评估结果更符合现场实际。屈小章^[86]针对列车牵引动力叶轮的振动响应问题,提出了基于离散随机过程的时变可靠性分析方法,有效考虑了动态载荷变化和振动不确定性的影响。全昌彪等^[87]针对航空发动机离心叶轮TA19材料,采用Weibull分布拟合疲劳寿命数据,提出了考虑应力集中因子(Kt)和一阶可靠性理论修正的迭代疲劳寿命模型。研究表明,U型缺口试样因应力集中效应导致疲劳寿命分布更为集中,而光滑试样寿命分散性较高。通过Kolmogorov-Smirnov检验验证了数据符合Weibull分布特性,修正后的模型显著提高了预测精度,大多数预测数据落入 ± 1.5 倍分散带内。田贵双等^[88]针对列车牵引系统中的牵引电机和IGBT两个关键元件,构建了考虑两者相关性的可靠性模型。采用融合失效机理的维纳过程描述性能退化过程,并使用Copula函数描述两者相关性。研究结果表明,该模型可更精准实现可靠性评估,且采用贝叶斯与期望最大相融合的参数更新算法能有效提升寿命预测精度。刘伟涓等^[89]研究了磁悬浮列车首次穿越失效可靠性,建立了在随机参激和随机外激作用下的动力学模型。在Hamilton理论框架下建立首次穿越可靠性函数,并采用Crank-Nicolson差分法对后向Kolmogorov方程进行数值求解。结果表明,初始能量的增大会使首次穿越时间提前,随机激励强度也会使平均首次穿越时间减小。

4.3 基于数据驱动预防性维护

随着传感器技术与人工智能的迅猛发展,数据驱动方法在轨道交通设备状态监测与故障诊断中发挥越来越重要的作用。该类方法通过采集多源运行数据(振动信号、温度、电流、图像等),运用机器学习和深度学习算法,实现设备状态预测与劣化趋势建模。由于其自学习特征、适应性强,这类方法尤其适应复杂、多变量和非线性系统。然而,其对数据标签依赖高、模型“黑箱”严重、部署成本较高等问题仍亟待克服。毛嘉伟等^[90]提出了一种混合核函数的SVR模型(GA-SVR),通过遗传算法优化核组合和参数,制动闸片寿命预测误差较单一核

函数模型降低 34.3%~45.2%。陈广等^[91]首先构建了一维残差卷积注意力网络(1DRCA),用于高速列车抗蛇行减振器故障诊断,在四种状态分类中识别准确率达 99%,在滚动轴承诊断中达 96.1%。随后进一步采用 STFT+2D-CNN 方法,将阻尼力信号转换为时频图,诊断准确率达 99.97%^[92]。侯鑫尧等^[93]针对牵引传动系统温度传感器故障,提出 DPCA 方法,实现故障检测、隔离与容错估计,诊断准确率 98.71%,显著优于传统方法(83.32%)。朱爱华等^[94]针对地铁车轮磨耗数据长期依赖性问题,提出了集成麻雀搜索算法(SSA)优化的 BiLSTM 模型,实现包括神经元数量、学习率等超参数的自动优化,大幅提升预测精度。郑则君等^[95]融合振动与声音信号,结合带通卷积滤波降噪与频率加权能量算子进行解调,实现强噪声下轴承故障识别,诊断结果可相互验证。李志等^[96]针对轨道交通故障检测中数据隐私问题,提出了基于 BERT 模型的联邦边云协同训练方法,实现多运营商间的数据安全共享,诊断准确率达 86.48%。MEN 等^[97]提出改进版 IS-SA-VMD 多级 CNN 方法,用于铁路货车轴承故障诊断,准确率为 99.6%;随后又提出基于改进 AC-GAN 的对抗学习方案^[98]和多模态注意力机制的故障识别方法^[99],诊断准确率达 99.97%。张霞等^[100]针对动车组车轮磨耗非线性退化特征,结合相空间重构与 PCA 进行特征优化;采用 FSFDP 聚类剔除异常,二阶拉格朗日插值处理缺失值,显著提升预测模型性能。蒋启龙等^[101]提出基于电流变化率增量的悬浮电磁铁在线故障诊断方法,通过最小二乘法建立数学模型,在短路比 5%条件下实现 97%诊断准确率,并可在一个基波周期内完成诊断。徐潇等^[102]通过融合温度信号(AE)和振动信号(EMD)进行特征提取,并使用 SAE 进行降维融合,实现轴箱轴承轻微故障诊断,准确率超过 99%。

5 结束语

通过对轨道车辆振动性能维护与保障技术研究现状的归纳总结,得出以下结论:

1) 轨道车辆振动性能维护与保障技术包含 4 个环节,即监测、诊断、预测、决策等,整体上已从传统被动维护向智能化、预测性维护演进,形成完整技术链条,具体地,监测技术已从早期离线检测发展为在线实时监测,实现了振动、温度、载荷等多源

数据融合采集;诊断技术已从基于阈值和频谱分析的简单规则诊断到结合机器学习和深度学习的智能故障识别,实现了转向架、轮对、悬挂系统等关键部件的精准定位;预测技术已从统计模型到数据驱动与物理模型结合的剩余寿命预测,可支持故障早期预警;决策技术已从经验驱动的定期维护到基于数字孪生和优化算法的动态维护策略,可平衡安全性与经济性。

2) 智能化和数字化技术彻底重构了振动性能维护范式,实时监测与早期预警降低脱轨、部件断裂等重大风险,通过振动溯源优化悬挂设计,提升乘客体验,预测性维护减少非必要停机,降低运维成本,数据驱动的决策优化资源分配,提高维护效率,使轨道交通向更安全、更舒适、更经济、更高效的发展趋势发展。

3) 目前车辆振动性能维护与保障智能化、数字化技术已取得了很大的成就,未来仍然存在挑战,如多源异构数据融合困难,小样本故障数据制约模型泛化能力;深度学习“黑箱”特性阻碍工程可信度;车辆-轨道-环境耦合振动机理复杂,全局优化难度大。

4) 轨道车辆振动性能维护已进入智能化跃迁期,未来应融合物理先验知识与深度学习,提升模型可解释性,突破数字孪生全生命周期动态建模技术,实现虚实交互优化,应加强跨学科合作(机械、控制、信息、材料、运筹学)、产学研用协同,共同推动该领域技术的持续创新与工程化应用。

参考文献:

- [1] 肖乾, 罗佳文, 周生通, 等. 考虑弹性车体的轨道车辆转向架悬挂参数多目标优化设计[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 125-133.
XIAO Q, LUO J W, ZHOU S T, et al. Multiobjective optimization design for suspension parameters of rail vehicle bogie considering elastic carbody[J]. China Railway Science, 2021, 42(2): 125-133.
- [2] 周劲松, 张伟, 孙文静, 等. 铁道车辆弹性车体动力吸振器减振分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(3): 86-90.
ZHOU J S, ZHANG W, SUN W J, et al. Vibration reduction analysis of the dynamic vibration absorber on the flexible carbody of railway vehicles[J]. China Railway Science, 2009, 30(3): 86-90.
- [3] 宫岛, 周劲松, 孙文静, 等. 铁道车辆弹性车体垂向运行

- 平稳性最优控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 416-420.
- GONG D, ZHOU J S, SUN W J, et al. Vertical ride quality of flexible car body railway vehicles with optimal control[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(3): 416-420.
- [4] 周劲松. 轨道车辆振动与控制[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2020: 2020.
- ZHOU J S. Vibration and control on railway vehicles[M]. Shanghai: Fudan Press, 2020: 2020.
- [5] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—1985[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—1985[S]. Beijing: Standards Press of China, 1985.
- [6] 朱剑月, 朱良光, 周劲松, 等. 地铁车辆运行舒适度与平稳性评价[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(6): 28-31.
- ZHU J Y, ZHU L G, ZHOU J S, et al. Evaluation of riding comfort and stability index[J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(6): 28-31.
- [7] 周劲松, 任利惠, 杨国楨, 等. 铰接式高速列车运行平稳性[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(3): 54-58.
- ZHOU J S, REN L H, YANG G Z, et al. Ride quality of articulated high speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(3): 54-58.
- [8] 周劲松, 李大光, 沈钢, 等. 磁浮车辆运行平稳性的虚拟激励分析方法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(1): 5-9.
- ZHOU J S, LI D G, SHEN G, et al. Pseudo-excitation analysis method of riding quality for maglev vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(1): 5-9.
- [9] 周劲松, 宫岛, 孙文静, 等. 铁道客车车体垂向弹性对运行平稳性的影响[J]. 铁道学报, 2009, 31(2): 32-37.
- ZHOU J S, GONG D, SUN W J, et al. Influence of vertical elasticity of carbody of railway passenger vehicles on ride quality[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(2): 32-37.
- [10] 吴会超, 鄢平波, 吴娜, 等. 车下设备悬挂参数与车体结构之间匹配关系研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3): 124-128.
- WU H C, WU P B, WU N, et al. Matching relations between equipment suspension parameters and a carbody structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(3): 124-128.
- [11] 张展飞, 周劲松, 孙文静, 等. 轨道车辆运行平稳性评价算法一致性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(9): 1442-1449.
- ZHANG Z F, ZHOU J S, SUN W J, et al. Analysis of consistency of ride quality evaluation algorithm for railway vehicles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(9): 1442-1449.
- [12] 金学松, 郭俊, 肖新标, 等. 高速列车安全运行研究的关键科学问题[J]. 工程力学, 2009, 26(S2): 8-22, 105.
- JIN X S, GUO J, XIAO X B, et al. Key scientific problems in the study on running safety of high speed trains[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S2): 8-22, 105.
- [13] 王忆佳. 车轮踏面损伤对高速列车动力学行为的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- WANG Y J. Effect of wheel tread damage on dynamic behaviour of high speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [14] 王镜鉴. 基于车辆轴箱加速度的焊缝不平顺评判方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020.
- WANG J J. Research on evaluation method of rail welded joint irregularity based on vehicle axle box acceleration[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.
- [15] 朱海燕, 曾庆涛, 王宇豪, 等. 高速列车动力学性能研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 57-92.
- ZHU H Y, ZENG Q T, WANG Y H, et al. Research progress on dynamics performance of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 57-92.
- [16] 徐中旭. 基于等效锥度的动车组动力学性能的评价方法研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2024.
- XU Z X. Study on the evaluation method of EMU dynamic performance based on equivalent conicity[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2024.
- [17] 周劲松, 赵洪伦, 王福天. 铁道车辆蛇行运动稳定性最优化研究[J]. 铁道车辆, 1995, 33(1): 3-9.
- ZHOU J S, ZHAO H L, WANG F T. Study on the optimization of the stability of railway vehicle's hunting motion[J]. Rolling Stock, 1995, 33(1): 3-9.
- [18] 张继业, 杨翊仁, 曾京. Hopf分岔的代数判据及其在车

- 辆动力学中的应用[J]. 力学学报, 2000, 32(5): 596-605.
- ZHANG J Y, YANG Y R, ZENG J. An algorithm criterion for Hopf bifurcation and its applications in vehicle dynamics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 32(5): 596-605.
- [19] 贾璐. 高速车辆动力学性能评价方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- JIA L. Study on the methods of dynamic performance evaluation of high speed vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [20] 孙丽霞, 姚建伟. 高速铁道车辆蛇行脱轨安全性评判方法研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(5): 82-92.
- SUN L X, YAO J W. Hunting derailment safety evaluation method of high speed railway vehicle[J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 82-92.
- [21] 胡喆, 池茂儒, 周亚波, 等. 铁道车辆质量对蛇行稳定性的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(6): 2294-2303.
- HU Z, CHI M R, ZHOU Y B, et al. Analysis of the influence of railway vehicle's mass on the hunting stability[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(6): 2294-2303.
- [22] 魏来, 曾京, 罗仁, 等. 高速列车蛇行运动稳定性及控制研究[C]//中国振动工程学会. 第十五届全国振动理论及应用学术会议摘要集, 2023: 9. DOI:10.26914/c.cnki-hy.2023.111711.
- WEI L, ZENG J, LUO R, et al. Study on stability and control of serpentine motion of high-speed trains[C]//Chinese Society for Vibration Engineering. Abstracts of the 15th National Conference on Vibration Theory and Applications, 2023: 9. DOI:10.26914/c.cnki-hy.2023.111711.
- [23] 周劲松, 宫岛, 孙文静. 高速列车动态性能正向设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2023.
- ZHOU J S, GONG D, SUN W J. Forward design of dynamic performance of high-speed train[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2023.
- [24] ZHOU J, GOODALL R, REN L, et al. Influences of car body vertical flexibility on ride quality of passenger railway vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(5): 461-471.
- [25] 周劲松, 孙文静, 宫岛. 铁道车辆几何滤波现象及弹性车体共振分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(12): 1653-1657.
- ZHOU J S, SUN W J, GONG D. Analysis on geometric filtering phenomenon and flexible car body resonant vibration of railway vehicles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(12): 1653-1657.
- [26] GONG D, SUN W J, ZHOU J S, et al. Analysis on the vertical coupled vibration between bogies and metro car body[J]. Procedia Engineering, 2011, 16: 825-831.
- [27] 宫岛, 周劲松, 孙文静, 等. 高速列车弹性车体与转向架耦合振动分析[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(4): 41-47.
- GONG D, ZHOU J S, SUN W J, et al. Coupled vibration analysis of flexible car body and bogie for high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(4): 41-47.
- [28] GONG D, GU Y J, ZHOU J S. Study on geometry filtering phenomenon and flexible car body resonant vibration of articulated trains[J]. Advanced Materials Research, 2013, 787: 542-547.
- [29] 尤泰文. 高速列车车体结构低频振动控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2022.
- YOU T W. Investigation of low frequency vibration control on high speed train body structures[D]. Shanghai: Tongji University, 2022.
- [30] 周劲松, 张伟, 孙文静, 等. 铁道车辆弹性车体动力吸振器减振分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(3): 86-90.
- ZHOU J S, ZHANG W, SUN W J, et al. Vibration reduction analysis of the dynamic vibration absorber on the flexible carbody of railway vehicles[J]. China Railway Science, 2009, 30(3): 86-90.
- [31] 周劲松, 宫岛, 任利惠. 铁道车辆弹性车体被动减振仿真分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 1085-1089.
- ZHOU J S, GONG D, REN L H. Simulation on passive vibration control of flexible carbody of railway passenger vehicles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(8): 1085-1089.
- [32] 宫岛, 周劲松, 孙文静, 等. 下吊设备对高速列车弹性车体垂向运行平稳性影响[J]. 中国工程机械学报, 2011, 9(4): 404-409.
- GONG D, ZHOU J S, SUN W J, et al. Impacts of hanging equipments on vertical riding stability of elastic high-speed train bodies[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2011, 9(4): 404-409.
- [33] 宫岛, 周劲松, 孙文静, 等. 高速列车车下设备模态匹配

- 研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(8): 180-185.
- GONG D, ZHOU J S, SUN W J, et al. Modes matching between suspended devices and car body for a high-speed railway vehicle[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(8): 180-185.
- [34] 宫岛, 周劲松, 孙文静, 等. 高速列车车下设备模态匹配及试验研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(10): 13-20.
- GONG D, ZHOU J S, SUN W J, et al. Modal matching between suspended equipment and car body of a high-speed railway vehicle and in situ experiment[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(10): 13-20.
- [35] GONG D, ZHOU J S, SUN W J. On the resonant vibration of a flexible railway car body and its suppression with a dynamic vibration absorber[J]. Journal of Vibration and Control, 2013, 19(5): 649-657.
- [36] 宫岛, 周劲松, 杜帅妹, 等. 高速动车组车下设备对车体振动传递与模态频率的影响机理研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 126-133.
- GONG D, ZHOU J S, DU S M, et al. Study on the effect of the underframe equipment on vibration transmissibility and modal frequency of the car body for high-speed EMU trains[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 126-133.
- [37] 邓海, 宫岛, 周劲松, 等. 高速列车车体下吊设备隔振设计及试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(2): 44-48.
- DENG H, GONG D, ZHOU J S, et al. On vibration isolation design and test of suspended equipment on high-speed railway vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(2): 44-48.
- [38] 夏张辉, 宫岛, 周劲松, 等. 车下设备偏心对高速动车组运行平稳性的影响机理研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 131-137.
- XIA Z H, GONG D, ZHOU J S, et al. On the influence mechanism of the under chassis equipment eccentric on the vehicle ride quality of high-speed EMU train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(6): 131-137.
- [39] 夏张辉, 周劲松, 宫岛, 等. 高速动车组车下设备悬挂系统的解耦优化设计方法研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 71-78.
- XIA Z H, ZHOU J S, GONG D, et al. On the decoupling optimization design method for under chassis equipment suspension system in high-speed EMU train[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 71-78.
- [40] 夏张辉, 宫岛, 周劲松, 等. 地铁车辆电机悬挂系统的解耦优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 1675-1680.
- XIA Z H, GONG D, ZHOU J S, et al. Decoupling optimum design of motor suspension system for metro vehicles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(11): 1675-1680.
- [41] SUN Y, ZHOU J S, GONG D, et al. A new vibration absorber design for under-chassis device of a high-speed train[J]. Shock and Vibration, 2017, 2017: 1523508.
- [42] 周劲松, 任利惠, 张洪, 等. 运用频响函数分析车辆二系悬挂的减振性能[J]. 铁道机车车辆, 2007, 27(B10): 31-35.
- ZHOU J S, REN L H, ZHANG H, et al. Analysis of vibration isolation ability of secondary suspension of railway vehicle with frequency response function[J]. Railway Locomotive & Car, 2007, 27(B10): 31-35.
- [43] 楚永萍, 周劲松, 虞大联. 基于模态参数的CRH2型动车组转向架动力学性能综合研究[J]. 铁道车辆, 2010, 48(10): 1-5, 47.
- CHU Y P, ZHOU J S, YU D L. The comprehensive research based on modal parameters on dynamics performance of bogies for CRH2 multiple units[J]. Rolling Stock, 2010, 48(10): 1-5, 47.
- [44] 徐宁, 李强, 任尊松, 等. 考虑一系悬挂局部细化的车辆垂向系统振动传递特性研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 106-117.
- XU N, LI Q, REN Z S, et al. Study on the vibration transfer characteristics of vertical vehicle system considering local refinement of primary suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 106-117.
- [45] DENG C X, ZHOU J S, SUN W J, et al. Analysis of the spectral induction and hierarchical transmissibility for railway vehicles' measurement vibration environment[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(10): 1587-1606.
- [46] 胡鑫磊, 周劲松, 尤泰文. 基于归纳谱的单轴单轨转向架二系悬挂系统特性研究[J]. 铁道车辆, 2023, 61(1): 77-82.
- HU X L, ZHOU J S, YOU T W. Research on characteristics of secondary suspension system of single-axle mono-rail bogie based on inductive spectrum[J]. Rolling Stock, 2023, 61(1): 77-82.
- [47] 熊嘉阳, 曹亚博, 吴磊, 等. 轮轨纵向几何不平顺对直线电机地铁车辆动态行为的影响[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(6): 1074-1081.

- XIONG J Y, CAO Y B, WU L, et al. Effect of longitudinal geometric irregularities of wheel and rail on dynamic behavior of metro vehicle driven by linear motor[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(6): 1074-1081.
- [48] 靳智超, 梁红琴, 卢纯, 等. 考虑车轮多边形的动车组车轴疲劳寿命预测[J]. 中国机械工程, 2024, 35(7): 1299-1307.
- JIN Z C, LIANG H Q, LU C, et al. Fatigue life prediction of multiple unit axle considering wheel polygon[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(7): 1299-1307.
- [49] 凌亮, 曹亚博, 肖新标, 等. 车轮擦伤对高速轮轨接触行为的影响[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 32-39.
- LING L, CAO Y B, XIAO X B, et al. Effect of wheel flats on the high-speed wheel-rail contact behavior[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 32-39.
- [50] 史彦辉, 张玉诚, 王东光. 钢轨打磨在改善轨道复合不平顺的运用研究[J]. 中国铁路, 2025(2): 89-97.
- SHI Y H, ZHANG Y C, WANG D G. Research on the application of rail grinding in improving track complex irregularity[J]. China Railway, 2025(2): 89-97.
- [51] 施洁, 李再伟. 连续多波轨向不平顺特征及对行车品质的影响[J]. 铁道建筑, 2025, 65(2): 23-29.
- SHI J, LI Z W. Characteristics of continuous multi-wave track alignment irregularity and its influence on driving quality[J]. Railway Engineering, 2025, 65(2): 23-29.
- [52] 杨新文, 石广田, 张小安. 车轮滚过钢轨错牙接头处产生的轮轨冲击噪声机理分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(17): 59-63.
- YANG X W, SHI G T, ZHANG X A. Generation mechanism of wheel/rail impact noise due to a train wheel passing through rail joints with height difference[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(17): 59-63.
- [53] 高雅, 尤明熙, 杨飞, 等. 高速铁路路基沉降对车体振动影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4): 1139-1148.
- GAO Y, YOU M X, YANG F, et al. Study on the influence of subgrade settlement on car body vibration of high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(4): 1139-1148.
- [54] WANG Q S, ZHAO H, GONG D, et al. Compilation of wheel-rail comprehensive irregularity spectrum for subway vehicle[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2024, 78: 103691.
- [55] WANG Q S, ZHAO H, GONG D, et al. Quantitative detection of vertical track irregularities under non-stationary conditions with variable vehicle speed[J]. Sensors, 2024, 24(12): 3804.
- [56] 王秋实, 周劲松, 肖忠民, 等. 基于参数化功率谱估计的车轮多边形动态识别[J]. 振动测试与诊断, 2023, 43(4): 654-660, 825.
- WANG Q S, ZHOU J S, XIAO Z M, et al. Dynamic detection method of wheel polygon wear based on parametric power spectrum estimation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(4): 654-660, 825.
- [57] 王秋实, 王泽根, 周劲松, 等. 基于迭代修正DFT的车轮多边形磨耗状态识别[J]. 振动测试与诊断, 2023, 43(3): 485-492.
- WANG Q S, WANG Z G, ZHOU J S, et al. Detection framework of wheel polygon wear state based on iterative modified DFT[J]. Journal of Vibration, 2023, 43(3): 485-492.
- [58] 李大柱, 吴兴文, 池茂儒, 等. 铁道车辆扁疤识别与定量估计[J]. 机械, 2022, 49(6): 39-45.
- LI D Z, WU X W, CHI M R, et al. Detection and quantitative estimation of railway wheel-flats[J]. Machinery, 2022, 49(6): 39-45.
- [59] 王阳, 肖宏, 张智海, 等. 基于一维卷积神经网络的钢轨波磨迁移诊断方法[J]. 铁道学报, 2025, 47(4): 115-123.
- WANG Y, XIAO H, ZHANG Z H, et al. Rail corrugation migration diagnosis method based one-dimensional convolutional neural network[J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(4): 115-123.
- [60] 张富兵, 鄢平波, 吴兴文, 等. 高速列车车轮多边形磨耗安全限值研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(3): 42-51.
- ZHANG F B, WU P B, WU X W, et al. Research on safety limit of wheel polygonalization of high-speed train[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(3): 42-51.
- [61] 赵鑫, 黄双超, 杨吉忠, 等. 更高速下轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为及中/短波不平顺临界限值研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(10): 21-32.
- ZHAO X, HUANG S C, YANG J Z, et al. On transient wheel-rail rolling-sliding-jumping contact and critical sizes of short/medium-wave irregularities at higher speeds[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(10): 21-32.
- [62] 安博伦, 杨光, 李英奇, 等. 时速400 km高速铁路钢轨不平顺合理限值[J]. 铁道建筑, 2023, 63(5): 17-20.
- AN B L, YANG G, LI Y Q, et al. Reasonable limit for rail irregularities in high speed railway with speed of 400 km/

- h[J]. *Railway Engineering*, 2023, 63(5): 17-20.
- [63] 丁杰, 张平, 王鹏. 机车车辆设备振动试验标准与实测数据的分析[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(22): 129-137.
DING J, ZHANG P, WANG P. Analysis of vibration test standard and field measurement data for rolling stock equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(22): 129-137.
- [64] 邓辰鑫, 周劲松, 宫岛, 等. 轨道车辆振动实测环境的谱归纳技术[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(10): 1514-1519.
DENG C X, ZHOU J S, GONG D, et al. Spectral induction method of vibration in rail vehicles' measurement environment[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(10): 1514-1519.
- [65] 韩兴晋, 周劲松, 邓辰鑫. 基于谱归纳的车辆振动分析[J]. *噪声与振动控制*, 2021, 41(5): 26-30.
HAN X J, ZHOU J S, DENG C X. Vehicle vibration analysis based on spectrum induction[J]. *Noise and Vibration Control*, 2021, 41(5): 26-30.
- [66] 厉鑫波, 周劲松, 宫岛, 等. 基于随机振动环境归纳的车辆设备疲劳寿命估计[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(8): 1208-1215.
LI X B, ZHOU J S, GONG D, et al. Fatigue lifetime estimation of rail vehicle equipment based on inductive method of random vibration environment[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(8): 1208-1215.
- [67] 王腾飞, 孙文静, 周劲松, 等. 基于疲劳损伤谱的转向架设备振动载荷谱编制研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(6): 287-295.
WANG T F, SUN W J, ZHOU J S, et al. Research on compiling vibration load spectrum of equipment mounted on bogie frame based on fatigue damage spectrum[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 2024, 60(6): 287-295.
- [68] 周宇, 孙鼎人, 王树国, 等. 钢轨疲劳裂纹萌生与磨耗发展共存预测中的磨耗阈值[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(9): 1336-1343.
ZHOU Y, SUN D R, WANG S G, et al. Effect of wear threshold on prediction for rolling contact fatigue crack initiation and wear growth of rail[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(9): 1336-1343.
- [69] 陈道云, 王斌杰, 肖乾, 等. 高速列车转向架构架损伤、等效应力及寿命分布特性研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(22): 237-246.
CHEN D Y, WANG B J, XIAO Q, et al. Study on damage, equivalent stress and life distribution characteristics of bogie frame of high-speed train[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(22): 237-246.
- [70] 王秋实, 周劲松, 宫岛, 等. 基于动应力时域外推的构架疲劳寿命评估方法[J]. *振动测试与诊断*, 2021, 41(4): 762-771, 834.
WANG Q S, ZHOU J S, GONG D, et al. Fatigue life assessment method of frame based on time-domain extrapolation for dynamic stress[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(4): 762-771, 834.
- [71] 谢树强, 王斌杰, 王文静, 等. 基于动应力的地铁构架疲劳损伤与疲劳寿命计算[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(4): 183-190.
XIE S Q, WANG B J, WANG W J, et al. Calculation for fatigue damage and fatigue life of metro bogie based on dynamic stress[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(4): 183-190.
- [72] 王秋实, 周劲松, 肖忠民, 等. 电机牵引振动对地铁转向架构架疲劳的影响[J]. *振动测试与诊断*, 2022, 42(2): 365-371, 412.
WANG Q S, ZHOU J S, XIAO Z M, et al. Effect of motor traction vibration on fatigue of metro bogie frame[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(2): 365-371, 412.
- [73] 毛冉成, 曾京, 石怀龙, 等. 车轮多边形激励下高速转向架构架振动特性分析[J]. *铁道学报*, 2022, 44(9): 26-32.
MAO R C, ZENG J, SHI H L, et al. Vibration behavior analysis of high-speed bogie frame under wheel polygonal excitations[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(9): 26-32.
- [74] 习文顺, 任鑫焱, 张金元, 等. 高速列车TC4钛合金焊接构架强度及寿命评估[J]. *焊接学报*, 2022, 43(5): 29-35.
XI W S, REN X Y, ZHANG J Y, et al. Strength and life assessment of TC4 titanium alloy welded frame for high-speed railway vehicles[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(5): 29-35.
- [75] 王秋实, 周劲松, 肖忠民, 等. 基于KDE的构架应力谱外推与疲劳寿命评估[J]. *振动测试与诊断*, 2022, 42(3): 556-563, 621.
WANG Q S, ZHOU J S, XIAO Z M, et al. Dynamic stress spectrum extrapolation and fatigue life assessment of bogie frame based on kernel density estimation[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(3): 556-563, 621.
- [76] 王文静, 董子钰, 代森, 等. 高速列车撒砂装置振动特性及疲劳损伤研究[J]. *机械工程学报*, 2025, 61(4): 229-238.

- WANG W J, DONG Z Y, DAI S, et al. Study on vibration characteristics and fatigue life of high-speed train sanding device[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(4): 229-238..
- [77] 周宇, 王世焯, 李骏鹏, 等. 考虑材料塑性变形的高速道岔心轨裂纹萌生预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 598-607.
- ZHOU Y, WANG S Y, LI J P, et al. Rolling contact fatigue crack initiation prediction in nose rail of high-speed railway turnout considering plastic deformation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(4): 598-607.
- [78] 肖乾, 符远航, 陈道云. 考虑不同损伤模型的转向架构架疲劳寿命研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 1-9.
- XIAO Q, FU Y H, CHEN D Y. Study on fatigue life of bogie frames considering different damage models[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 1-9.
- [79] 贾小平, 朱程, 戴焕云, 等. 地铁车辆车轮磨耗和镟修策略研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 127-133.
- JIA X P, ZHU C, DAI H Y, et al. Research on metro vehicle wheel wear and reprofiling strategy[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 127-133.
- [80] 唐毓哈, 王悦东, 郭涛. 基于改进M-H模型的转向架构架疲劳损伤分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(3): 1279-1290.
- TANG Y H, WANG Y D, GUO T. Fatigue damage analysis of bogie frame based on improved M-H model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(3): 1279-1290.
- [81] 肖乾, 黄文龙, 陈道云, 等. 考虑非线性累积损伤模型修正的转向架构架疲劳可靠性评估[J/OL]. 机械工程学报, 2025: 1-13. (2025-06-25) [2025-07-26]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JXXB20250624007&dbna-me=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- XIAO Q, HUANG W L, CHEN D Y, et al. Fatigue reliability evaluation of bogie frame considering nonlinear cumulative damage model modification[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2025: 1-13. (2025-06-25) [2025-07-26]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JXXB2-0250624007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [82] 王文静, 张莹, 曲俊生, 等. 高速列车齿轮箱体动应力响应及疲劳可靠性研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(6): 90-97.
- WANG W J, ZHANG Y, QU J S, et al. Dynamic stress response and fatigue reliability of gearbox housing for G-series high-speed train[J]. China Railway Science, 2018, 39(6): 90-97.
- [83] 田丽, 刘森. 基于数据拟合的地铁车辆车轮磨耗分析与寿命预测[J]. 铁道技术监督, 2022, 50(2): 65-68.
- TIAN L, LIU S. Study on wear analysis and life prediction of metro vehicle wheel based on data fitting[J]. Railway Quality Control, 2022, 50(2): 65-68.
- [84] 智鹏鹏, 陈秉智, 李永华, 等. 基于线路试验的转向架构架疲劳可靠性分析[J]. 机械设计与制造, 2023(5): 215-220, 225.
- ZHI P P, CHEN B Z, LI Y H, et al. Fatigue reliability analysis of bogie frame based on line test[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(5): 215-220, 225.
- [85] 齐金平, 刘晓宇, 冯洪, 等. 高速列车车轮两阶段退化建模及可靠性分析[J]. 中国机械工程, 2024, 35(8): 1390-1396.
- QI J P, LIU X Y, FENG H, et al. Modeling and reliability analysis of wheel two-stage degradation of high-speed trains[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(8): 1390-1396.
- [86] 屈小章. 列车牵引动力叶轮振动随机过程离散方法的时变可靠性分析[J]. 振动与冲击, 2024, 43(17): 49-60.
- QU X Z. Time-varying reliability analysis of stochastic process discretization method for train traction power impeller vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(17): 49-60.
- [87] 全昌彪, 廖明夫, 李坚, 等. 基于Weibull分布和一阶可靠性修正的钛合金TA19疲劳寿命预测[J/OL]. 材料工程, 2025: 1-12. (2025-05-27) [2025-07-26]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CLGC20250526001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- QUAN C B, LIAO M F, LI J, et al. Fatigue life prediction of titanium alloy TA19 based on weibull distribution and first-order reliability correction[J/OL]. Journal of Materials Engineering, 2025: 1-12. (2025-05-27) [2025-07-26]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CLGC20250526001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [88] 田贵双, 王少萍, 石健. 多元件相关的列车牵引系统可靠性评估与寿命预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(6): 2081-2090.

- TIAN G S, WANG S P, SHI J. Reliability assessment and lifetime prediction for train traction system considering multiple dependent components[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(6): 2081-2090.
- [89] 刘伟涓, 余玺, 丁建明, 等. 磁悬浮列车首次穿越失效可靠性研究[J/OL]. 中国机械工程, 2025: 1-11. (2025-03-14) [2025-07-26]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGJX20250312004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- LIU W W, YU X, DING J M, et al. Research on first-passage and reliability analysis of maglev[J/OL]. China Mechanical Engineering, 2025: 1-11. (2025-03-14). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGJX20250312004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [90] 毛嘉伟, 李永华, 王佳楠, 等. 基于混合核函数 GA-SVR 的动车组制动闸片寿命预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 289-298.
- MAO J W, LI Y H, WANG J N, et al. Based on mixed kernel function of GA-SVR EMU brake slice of life prediction[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 289-298.
- [91] 陈广, 孙泽明, 马闻达, 等. 基于一维残差卷积注意力的高速列车抗蛇行减振器故障诊断[J]. 计量学报, 2024, 45(7): 1038-1045.
- HEN G, SUN Z M, MA W D, et al. Fault diagnosis of high-speed train yaw dampers based on one-dimensional residual convolutional attention[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(7): 1038-1045.
- [92] 陈广, 马闻达, 孙泽明, 等. 基于卷积神经网络的高速列车抗蛇行减振器故障诊断[J]. 机床与液压, 2023, 51(8): 194-199.
- CHEN G, MA W D, SUN Z M, et al. Fault diagnosis of yaw damper in high-speed train based on convolutional neural network[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(8): 194-199.
- [93] 侯鑫尧, 倪强, 李学明, 等. 列车牵引传动系统温度传感器实时故障诊断与容错估计[J]. 电气工程学报, 2023, 18(2): 269-276.
- HOU X Y, NI Q, LI X M, et al. Real-time fault diagnosis and fault-tolerant estimation of temperature sensor in train traction drive system[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(2): 269-276.
- [94] 朱爱华, 白杨, 白堂博, 等. 基于改进 BiLSTM 网络的地铁车轮磨耗预测模型[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(3): 82-89.
- ZHU A H, BAI Y, BAI T B, et al. Improved prediction model of metro wheel wear based on BiLSTM network[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2024, 37(3): 82-89.
- [95] 郑则君, 宋冬利, 贾晨, 等. 基于振动加速度与声音信号融合的轨道交通列车轴箱轴承故障诊断方法[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(9): 40-46.
- ZHENG Z J, SONG D L, JIA C, et al. Fault diagnosis method for rail transit train axle box bearing based on the fusion of vibration acceleration and acoustic signal[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(9): 40-46.
- [96] 李志, 林森, 张强. 面向轨道交通智能故障检测联邦学习模型的云边协同训练方法[J/OL]. 计算机科学, 2024: 1-12. (2024-06-26) [2025-07-26]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JSJA20240612008&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- LI Z, LIN S, ZHANG Q. A federated cloud edge computing method for intelligent fault detection in rail transit[J/OL]. Computer Science, 2024: 1-12. (2024-06-26) [2025-07-26]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JSJA20240612008&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [97] MEN Z H, CHEN Z, LI Y H, et al. Railway wagon bearing fault diagnosis method based on improved sparrow search algorithm optimizing variational mode decomposition and multi-level convolutional neural network[J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(4): 045104.
- [98] MEN Z H, LI Y H, GAO L, et al. Fault diagnosis method for railway wagon bearings under imbalanced dataset based on improved ACWGAN[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(12): 14935-14962.
- [99] MEN Z H, LI Y H, TANG W C, et al. A new multi-modal time series transformation method and multi-scale convolutional attention network for railway wagon bearing fault diagnosis[J]. Journal of Vibration and Control, 2024: 10775463241276024.
- [100] 张霞, 邓银强, 杨岳, 等. 基于改进 NARXNN 神经网络的动车组车轮磨耗预测[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 2025:1-14. (2025-06-04) [2025-07-26]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20250653>.
- ZHANG X, DENG Y Q, YANG Y, et al. Wear predic-

tion of EMU wheels based on improved NARXNN neural network[J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025: 1-14.(2025-06-04)[2025-07-26]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20250653>.

- [101] 蒋启龙, 姚卫丰, 张晔. 基于电流变化率增量的悬浮电磁铁故障诊断[J/OL]. 西南交通大学学报, 2025: 1-8. (2025-06-20)[2025-07-26]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XNJT20250609001&dbna-me=CJFD&-CJFD&dbcode=CJFQ>.

JIANG Q L, YAO W F, ZHANG Y. Fault diagnosis of suspended electromagnet based on current change rate increment[J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025: 1-8. (2025-06-20)[2025-07-26]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XNJT20250609001&dbna-me=CJFD&dbcode=CJFQ>.

- [102] 徐潇, 宋冬利, 王梓帆. 基于改进SAE(堆叠自编码器)与温振融合的高速列车轴箱轴承轻微故障诊断方法[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(4): 227-232, 237.

XU X, SONG D L, WANG Z F. Diagnosis method for high-speed train axle box bearing slight faults based on improved SAE and temperature-vibration fusion[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(4): 227-232, 237.



第一作者:周劲松(1969—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为轨道车辆系统动力学、车辆振动噪声检测与控制技术。E-mail:jinsong.zhou@tongji.edu.cn。



通信作者:宫岛(1985—),男,长聘副教授,博士,博士生导师,研究方向为轨道车辆系统动力学、车辆振动噪声检测与控制技术。E-mail:gongdao@tongji.edu.cn。

(责任编辑:李根)