

文章编号:1671-1637(2025)03-0001-11

轮径差对铁路车辆服役性能影响综述

王开云*, 隋顺琦, 谢 博, 凌 亮, 陈是扞, 曾东亮, 厉砚磊

(西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:从车辆动力学性能、轮轨接触、车轮磨耗与滚动接触疲劳、其他部件服役状态及轮径差识别研究五方面梳理了铁道车辆轮径差的研究进展,探讨了轮径差状态下车辆运动稳定性、轮轨接触状态及踏面损伤的变化规律;概述了轮径差对铁道车辆服役性能影响的研究现状与发展趋势;分析了铁道车辆轮径差识别的现状和不足。研究结果表明:轮径差增大会使车辆临界速度降低,导致车辆动力学性能下降;轮径差导致轮对两侧车轮接触斑的形状和应力分布变化,小轮径一侧车轮接触斑的法向接触应力变大,大轮径一侧反之;轮径差导致踏面磨耗速率加快,而且容易诱发踏面滚动接触疲劳问题;轮径差也会导致转向架牵引电机负荷不平衡、电机温升以及轮对两侧轴箱轴承承载区相位差等问题,影响其他关键部件的服役状态和寿命;今后研究的重点在于系统性地开展轮径差形成机理的理论和试验研究,揭示轮径差的形成机理,从车辆服役状态、列车操纵方式、外部服役环境等多个维度提出轮径差的控制措施;针对铁道车辆检修体系正由计划修向状态修转变的发展趋势,开展的基于数据驱动、混合数-模驱动等方法的轮径差智能检测和识别研究,为车辆检修体系转变、降本增效提供理论指导。

关键词:铁道车辆;服役性能;综述;轮径差;动力学;轮轨接触;车轮磨耗;滚动接触疲劳

中图分类号:U270.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2025.03.001

Overview on effect of wheel diameter difference on service performance for railway vehicles

WANG Kai-yun*, SUI Shun-qi, XIE Bo, LING Liang, CHEN Shi-qian,
ZENG Dong-liang, LI Yan-lei

(State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The research progress of wheel diameter difference (WDD) in railway vehicles was reviewed from five aspects: vehicle dynamics performance, wheel-rail contact, wheel wear and rolling contact fatigue, service status of other components, and the WDD identification. The variation laws of vehicle motion stability, wheel-rail contact status, and tread damage under the condition of WDD were discussed. The current research status and development trend of the influence of WDD on the service performance of railway vehicles were summarized. The current situation and deficiencies of WDD identification in railway vehicles were analyzed. The results

出版历程:2024-03-11 收稿, 2024-07-20 修回, 2024-09-30 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52388102);湖南省自然科学基金区域联合基金项目(2025JJ70070);四川省重大科技专项项目(2023ZDZX0008)

* 作者简介:王开云(1974-),男,江西萍西人,西南交通大学研究员,工学博士,从事列车车辆轨道耦合动力学研究。

引用格式:王开云,隋顺琦,谢 博,等.轮径差对铁路车辆服役性能影响综述[J].交通运输工程学报,2025,25(3):1-11.

Citation:WANG Kai-yun, SUI Shun-qi, XIE Bo, et al. Overview on effect of wheel diameter difference on service performance for railway vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(3): 1-11.

show that with the increase in the WDD, the critical speed of the vehicle can be reduced, and the dynamics performance of the vehicle will deteriorate; the shape and stress distribution of the contact spots for the two wheels on both sides can be changed. The normal contact stress of the contact spot for the smaller wheel can be increased, and the opposite condition can be observed on the larger wheel; the tread wear rate can be increased, and the tread rolling contact fatigue may even be induced. In addition, some other problems, such as the unbalanced load on the traction motor, motor temperature rise, and phase difference of the bearing areas between the axle-box bearings on both sides of a wheelset can be induced by the WDD, which will affect the service status and lifespan of other components. Future studies should be focused on systematically conducting theoretical and experimental studies about the WDD to ascertain its formation mechanism. The control measures for WDD from multiple dimensions such as vehicle service status, maneuver conditions, and external service environment can be proposed. In response to the development of a maintenance system for railway vehicles shifting from planned maintenance to condition-based maintenance, research on intelligent detection and recognition of WDD based on data-driven and hybrid data-model driven methods should be carried out to provide theoretical guidance for the transformation of vehicle maintenance system, cost reduction, and efficiency improvement.

Keywords: railway vehicle; service performance; review; wheel diameter difference; dynamics; wheel-rail contact; wheel wear; rolling contact fatigue

Publication history: Received 2024-03-11; Received in revised form 2024-07-20; Accepted 2024-09-30

Funding: National Natural Science Foundation of China (52388102); Regional Joint Research Fund of Natural Science Foundation of Hunan Province of China (2025JJ70070); Major Science and Technology Project of Sichuan Province (2023ZDZX0008)

* **Corresponding author:** WANG Kai-yun (1974-), male, research fellow, PhD, kywang@swjtu.edu.cn.

0 引 言

铁道车辆具有运量大、速度快、能耗低、全天候等诸多优点,在经济发展和资源调配中发挥重要作用。进入 21 世纪以来,中国在高速铁路、城市轨道交通、重载铁路和磁悬浮交通四大领域迅猛发展,取得了举世瞩目的重大成就^[1]。截至 2024 年底,中国共有 58 个城市开通运营城市轨道交通线路 361 条,运营里程为 12 160 km^[2]。智能型复兴号动车组实现时速 350 km 自动驾驶,时速 400 km 的可变轨距高速动车组为一带一路互联互通提供技术支持^[3]。目前,中国牵引质量为 8 000 t 以上的重载铁路总里程已超 5 000 km,包括大秦铁路与朔黄、瓦日、浩吉、唐呼、包神等煤运专线,其中朔黄铁路 2 万吨重载列车累计安全开行 10.02 万列。重载货运需求的增长推动着重载机车车辆牵引能力和重载货车轴重不断增加。当前,中国大功率电力机车轴重达到 30 t,最大牵引力达到 910 kN;25、30 t 轴重重载货车陆续投入运行,并研发 45 t 轴重货车。中国研制

的具有完全自主知识产权的时速 600 km 高速磁浮交通系统在青岛成功下线,标志着中国掌握了高速磁浮成套技术和工程化能力。

随着铁道车辆运行速度、轴重的不断增加,铁道车辆关键部件承受的载荷也逐渐加剧。轮对作为承担车辆与轨道相互作用的关键部件,其服役状态与车辆运行平稳性、安全性息息相关。在复杂的线路条件及列车操纵方式影响下,轮对两侧车轮磨耗速率存在差异,导致轮对轮径差(Wheel Diameter Difference, WDD)。在目前的检修体系中,轮径差定义为轮对两侧车轮名义滚动圆处轮径的差值。轮径差的主要分布方式有 4 种^[4],分别为前导向轮、后随轮对、等值同相、等值反相。

轮径差广泛存在于各种形式的铁道车辆之中,已经成为影响车辆服役性能、制约车辆检修效率的重要问题之一。李培^[5]调研了大秦线 C80 型货车装用轮对的车轮磨耗情况,调研轮对总数为 240 个,结果表明,重载服役货车轮对普遍存在轮径差,其中最大轮径差已经超过 10 mm。围绕轮径差对铁道

车辆服役性能的影响,许多研究者从不同的角度开展了相关研究工作,取得了较为丰富的成果。针对铁道车辆,本文从车辆动力学性能、轮轨接触、车轮磨耗与滚动接触疲劳、其他部件服役状态及轮径差识别研究五方面进行论述,总结探讨了轮径差对铁道车辆服役性能的影响,以期为铁道车辆服役性能研究提供一定参考。

1 轮径差对车辆动力学性能影响研究

2008年,池茂儒等^[4,6]分析了轮径差对铁道车辆运行稳定性和安全性的影响,通过对轮径差状态下的转向架进行受力分析,指出轮径差改变轮对的等效纯滚线位置,影响轮对自动对中特性,进而影响车辆系统的运行稳定性,并根据其对车辆运行稳定性的影响程度将轮径差划分为易稳定区、欠稳定区和亚稳定区3个区域,如图1所示。王娜娜等^[7]分析了不同类型轮径差对动态曲线通过的影响规律,研究发现对于前轮对轮径差和等值反相轮径差,随着轮径差的增大车辆动态曲线通过性能变好。针对某三轴转向架电力机车,张志超等^[8]研究了不同轴位轮径差对机车动力学性能的影响并建议可以适当放宽机车同一转向架轮径差的检修限度;何彩颖等^[9]分析了直线线路条件下轮径差对机车轮轨横向力的影响,再现了线路试验中存在轮径差的轮对在制动工况下轮轨横向力增大现象。

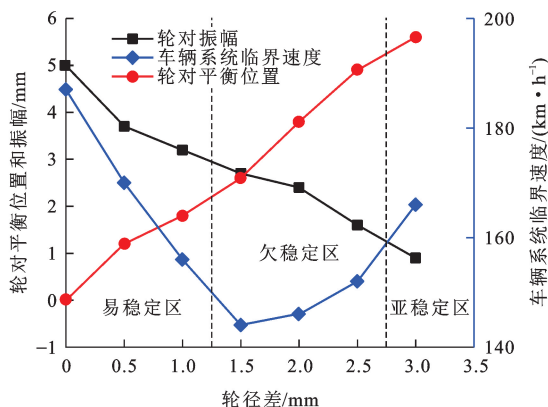


图1 轮径差对车辆系统稳定性的影响

Fig. 1 Effect of WDD on stability of vehicle system

针对重载货车三大件式转向架,王文刚等^[10]研究了轮径差对其曲线通过性能的影响,结果表明适当程度的轮径差有利于货车动态曲线通过;向金兰等^[11]针对铁道货车分析了轮对轮径差与轮轨力的关系,研究表明轮径差状态下两侧车轮轮轨垂向力、横向力出现差值且差值随轮径差增大而增加;魏静等^[12]通过动力学仿真发现径向转向架的曲线通过

性能随着轮径差的增大而恶化;胡军海^[13]基于SIMPACK与MATLAB的联合仿真模型计算了4种典型轮径差对重载货车车轮磨耗和车辆动力学性能的影响规律,研究发现车轮磨耗随着轮径差绝对值的增大呈增大趋势,4种轮径差下车辆动力学性能均随轮径差增大而下降,其中等值反相轮径差对车辆平稳性和曲线通过性能影响最大。

李艳等^[14]根据实测磨耗踏面及轮径数据研究了轮径差对动车组运动稳定性和平稳性的影响,研究发现车轮磨耗和轮径差导致轮对两侧轮轨非对称接触,影响车辆稳定性;杨朝阳^[15]通过SIMPACK软件建立了高速列车动力学模型,分析了轮径差与不同踏面下高速车辆的轮轨相互作用力及曲线通过性能;谷学思^[16]通过动力学仿真分析了不同踏面、轮径差对高速动车组曲线通过性能的影响;李润华等^[17-18]针对CRH2动车组轮对轮径差检修限度开展了研究,并给出了轮径差的限度以及轮对镟修周期的优化建议;张冰玉^[19]分别研究了高速列车服役中的车轮磨耗和轮径差2个因素对车辆振动特性的影响;孙士刚^[20]建立了车-桥耦合模型,分析了轮径差对动车组通过桥梁时动力学响应的影响;韩鹏等^[21]通过仿真计算了高速列车在不同磨耗型面与轮径差工况下的非线性临界速度、运行平稳性和曲线通过性能;张云飞等^[22]分析了轮径差对客车通过山区小半径曲线的影响,结果表明不同类型轮径差均不利于车辆曲线通过;黄照伟等^[23-24]研究了高速列车车轮偏磨对车辆动力学性能的影响,结果表明当轮对存在偏磨时,踏面等效锥度随着轮对横移出现负锥度,导致轮轨接触的平衡位置偏离轮对中心位置,加剧轮对偏磨的发展;姚治锋等^[25]分析了不同类型轮径差对地铁车辆非线性临界速度的影响,结果表明不同轮径差状态下车辆非线性临界速度均随之下降;蒋益平等^[26]分析了在多种轮径差组合工况下地铁车辆动力学性能的变化规律,指出轮径差增大会使车辆临界速度降低,导致车辆的横向平稳性和磨耗功率明显增大;冯帅^[27]基于多体动力学软件SIMPACK分析了轮径差状态下地铁转向架的受力及其对车辆稳定性、安全性、平稳性的影响;董昊亮等^[28]针对踏面磨损和偏磨2种不同情况,分别分析了其对地铁车辆轮对蛇行运动稳定性的影响,结果表明偏磨形成轮径差并导致蛇行临界速度降低,轮对产生不对称的蛇行运动,可能造成车轮碰撞单侧钢轨,影响行车安全;Li等^[29-30]分析了多种车轮损伤耦合作用下地铁车辆的动力学性能,其中包括

轮径差、车轮多边形和踏面磨耗;朱磊等^[31]研究了轮径差对独立轮对有轨电车运行稳定性的影响,结果表明轮径差超过 0.5 mm 时车辆稳定性明显下降。

目前,关于轮径差对车辆动力学性能的影响分析可以总结为表 1。虽然相关研究已经涉及到运动稳定性、运行安全性、平稳性以及振动状态多个方面,但仍存在一些不足。首先,仅李艳等^[14,17-18,29-30]

对轮径差的分析中综合考虑了磨耗型面和轮径差(称为磨耗轮径差),而其他研究者大多采用标准踏面并设置轮径差(称为初始轮径差)。然而,轮径差大多因轮对两侧车轮踏面非对称磨耗而形成,磨耗轮径差更符合铁道车辆服役的实际情况。其次,相关研究对轮径差的影响机理分析并不深入,仅池茂儒等^[4,6,23-24]从轮轨蠕滑、等效锥度等方面进行了分析,而且缺乏相关试验验证和分析。

表 1 轮径差对车辆动力学性能影响

Table 1 Influence of WDD on vehicle dynamics performance

研究内容		车辆类型			
		重载机车	重载货车	高速列车、客车	城轨车辆
运动稳定性			文献[13]	文献[14]、[17]~[21]	文献[4]、[6]、[25]~[28]、[32]
运行 安全性	侧重于安全性分析	文献[8]、[9]	文献[11]、[13]	文献[15]、[17]、[18]、[20]、[21]、 [23]、[24]	文献[27]、[29]、[30]
	侧重于曲线通过性能分析	文献[7]	文献[10]、[12]	文献[15]、[16]、[21]、[22]	
运行平稳性				文献[14]、[17]、[18]、[21]	文献[26]、[27]
振动特性		文献[19]			

2 轮径差对轮轨接触影响研究

轮径差状态下,轮对两侧轮轨接触状态均会发生明显变化。陈嵘等^[32]研究了轮径差对高速列车通过道岔区的轮轨接触状态和过岔走行性能的影响,结果表明轮径差状态下轮对向小轮径方向横移,轮径差过大时将导致轮载过渡位置提前;等值同相轮径差对车辆动力学性能影响更显著,并建议将同相分布同轴轮径差 2 mm 或反相分布同轴轮径差 3 mm 作为运用限度,将同轴轮径差 1.5 mm 作为一、二级检修限度。Zou 等^[33-34]分析了惰行和制动

工况下轮径差对重载机车轮轨接触关系的影响。刘思堂等^[35]针对同轴轮径差分析了其对机车轮轨接触及动力学性能的影响,结果表明钢轨的等效应力随轮径差的增大明显增加。Sui 等^[36]基于非赫兹接触模型 Strips 仿真分析了轮径差对重载货车轮轨接触的影响,研究结果表明随着轮径差的增加,两侧车轮接触斑的形状和应力分布在车轮滚动前进方向(纵向)上保持对称状态,沿着踏面方向(横向)呈现出非对称状态,小轮径车轮接触斑的法向接触应力明显大于另一侧车轮接触斑的接触应力,如图 2~4 所示。

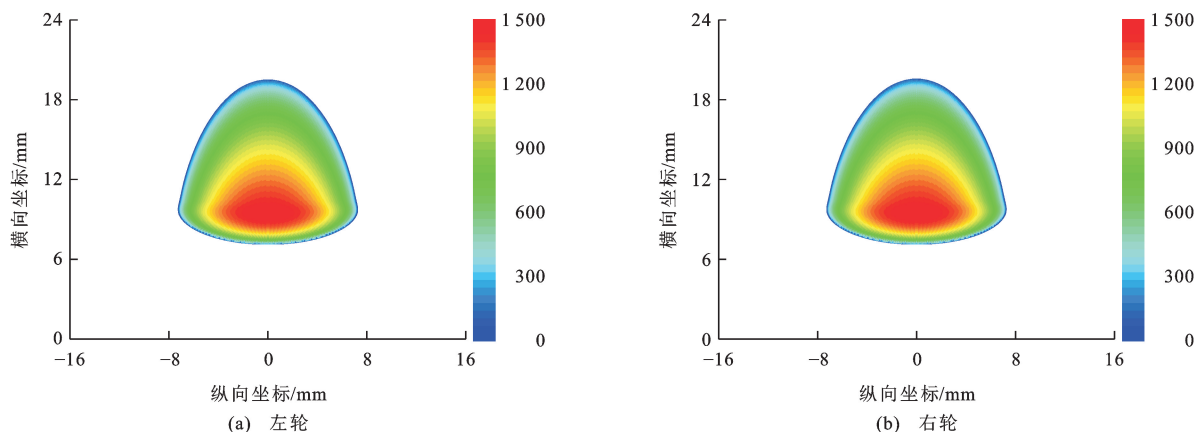


图 2 无轮径差状态下接触斑法向应力分布(单位:MPa)

Fig. 2 Normal stress distribution of contact spot without WDD (unit: MPa)

轮径差对轮轨接触的影响研究可概括为轮轨接触几何状态和轮轨接触应力两方面,且研究时轮径

差多视为初始轮径差。其中的难点在于,实际磨耗后的踏面廓形存在一定的差异,研究时的基准廓形

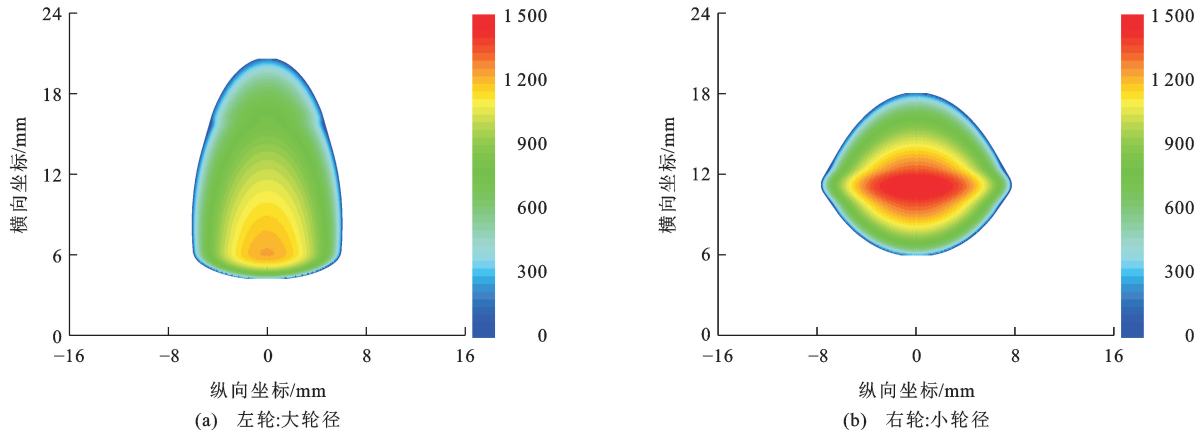


图3 轮径差为2 mm时接触斑法向应力分布(单位:MPa)

Fig. 3 Normal stress distribution of contact spot with 2 mm WDD (unit: MPa)

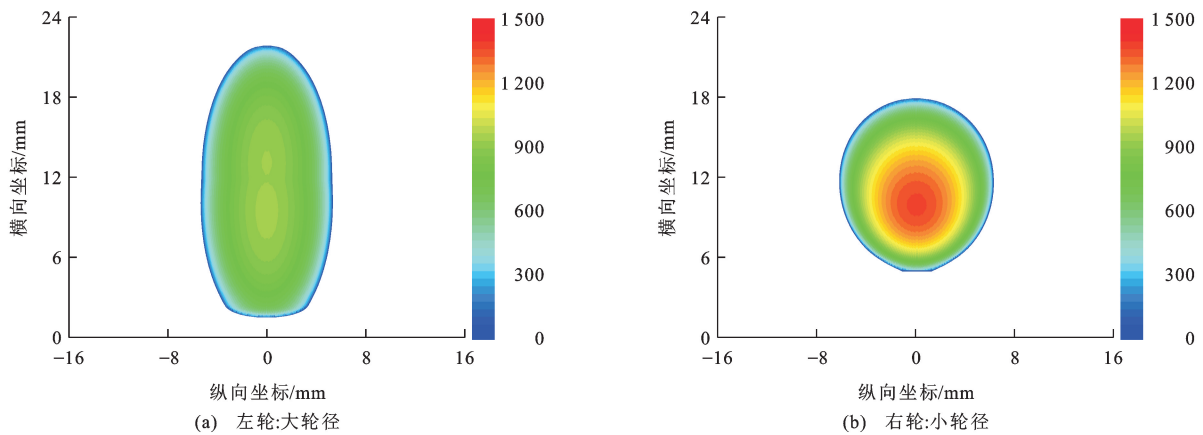


图4 轮径差为4 mm时接触斑法向应力分布(单位:MPa)

Fig. 4 Normal stress distribution of contact spot with 4 mm WDD (unit: MPa)

缺乏统一的标准,应尽可能多地获取不同轮径差状态的实测踏面廓形并采用统计方法进行分析。

3 轮径差对车轮磨耗与滚动接触疲劳影响研究

Sui等^[36]仿真分析了轮径差对重载货车车轮磨耗的影响,研究表明小轮径一侧车轮磨耗功高

于大轮径车轮的磨耗功且两侧车轮磨耗功差值随轮径差增加而增大,如图5所示。胡海滨等^[37]针对大秦线重载货车的车轮磨耗情况进行了调研分析,发现货车轮对出现轮径差后小轮径一侧车轮的踏面磨耗速率将加快,出现轮缘偏磨的轮对都存在较大的轮径差。针对重载货车三大件式转向架,王伟等^[38]分析了不同轮径差对轮缘磨耗的影响,结果表明:当

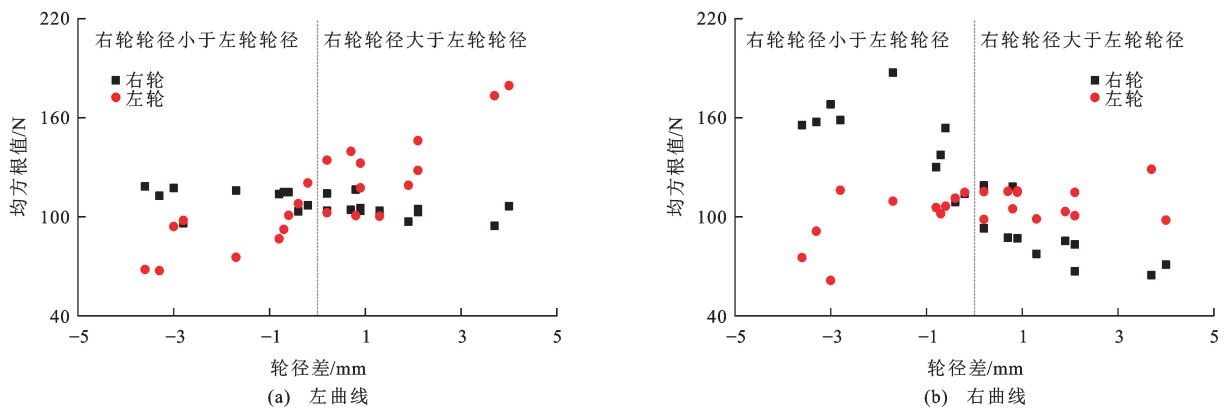


图5 轮径差对车轮磨耗功均方根值的影响

Fig. 5 Effect of WDD on root mean square value of wheel wear energy

轮径差不超过 6 mm 时,小轮径车轮的磨耗主要出现在踏面区域;轮径差大于 6 mm 后,小轮径车轮将发生轮缘磨耗,建议同一轮对轮径差不应超过 6 mm。谢彦飞等^[39]针对某型电力机车在检修过程中经常出现的车轮偏磨现象进行了分析,认为轮径差是导致机车车轮对偏磨主要原因;通过动力学仿真进一步研究表明轮对存在轮径差时,该轮对横移量、冲角以及两侧车轮的磨耗功差值随轮径差增大而增加,造成轮对偏磨。丁军君等^[40-41]针对轮对初始安装偏转角和轮径差状态下车轮磨耗进行了仿真研究,结果表明初始安装偏转角和轮径差分别影响轮对冲角和横移量,二者皆会导致车轮偏磨,而且磨耗速率随偏转角和轮径差的增加而明显增大。蔡送宝等^[42]分析了不同轮径差状态下高速列车通过曲线桥梁时的

车轮磨耗情况。王晨等^[43]仿真分析了轮径差状态下地铁车辆的动力学性能,研究结果表明轮对横向位移、摇头角、轮轨蠕滑力、车轮磨耗功都随着轮径差增大明显增加。针对悬挂式单轨列车,高润稼等^[44]研究了驱动方式与轮径差对车轮磨耗的影响;王红兵等^[45]分析了不同轮径差对 CRH3 型动车组车轮磨耗的影响,结果表明 4 种不同类型的轮径差都会导致车轮磨耗速率加快,其中大轮径车轮以踏面磨耗为主,小轮径车轮以轮缘磨耗为主。针对中国某型重载机车踏面剥离问题,Lyu 等^[46]开展了现场测试和数值仿真分析,结果表明初始轮径差较大的轮对的裂纹和局部磨损发展迅速,损伤函数预测分析结果表明轮对存在轮径差时踏面剥离预测数值明显增加,如图 6 所示。

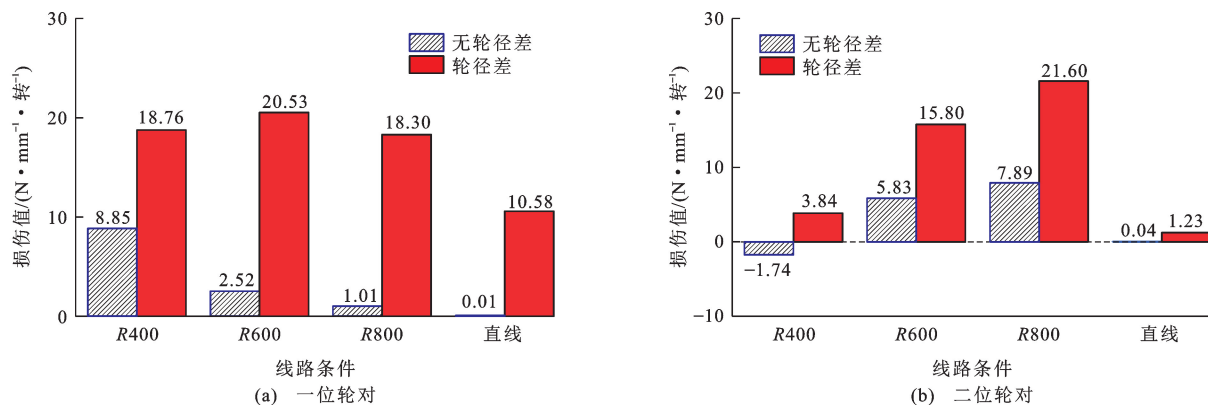


图 6 轮径差对踏面剥离影响分析

Fig. 6 Effect of WDD on wheel tread spalling

目前,关于轮径差对车轮磨耗及滚动接触疲劳的影响研究多以仿真分析为主(假设为初始轮径差的居多),然而车轮磨耗及滚动接触疲劳是一个长期、复杂的过程,采用长期跟踪和定期测量与测试研究轮径差对轮轨接触的影响具有更重要的工程意义和研究价值。此外,磨耗是轮径差形成的主要因素,但现有研究未对轮径差的形成机制和影响因素进行深入、细致的分析。

4 轮径差对其他部件服役状态影响研究

除了影响车辆的动力学性能,轮径差也会影响车辆其他部件的服役状态。王刚^[47]针对客车转向架异响进行调研,发现其可能与该转向架轮对轮径差过大有关。汪德武^[48]针对 2006 年发生的 3 起客车热轴事故进行了调查,结果表明踏面外侧圆周辗宽与轮对轮径差相关,轮径差对轮对轴温影响不大,但初始轮径差及对角线差与车辆系统的安全性、稳定性密切相关,需要对其严格控制。梁大伟等^[49]通

过研究发现轮径差会导致牵引电机负荷不平衡、恒速功能精度降低以及防滑误动作;针对这些问题提出了相应的保护措施,并建议同一转向架轮径允差为 2 mm、同一车辆轮径允差为 3 mm。王继强等^[50]针对青岛地铁 3 号线牵引电机超温故障进行分析,指出不同轮对间的轮径差会导致牵引电机实际发挥功率不一致,造成牵引电机温升差异。于勇等^[51]针对高速动车组牵引电机温升差异问题提出了一种轮径差-功率温升分析方法,该方法能够较为准确地评估不同轮径差导致的牵引电机发挥功率及温升差异,可用于动车组的状态监测及健康管理。Sui 等^[52]研究了轮径差状态下轴箱轴承的动态行为,发现轮对存在轮径差时两侧轴承滚子与轴承外圈滚道接触力存在差异。图 7(a)展示了接触力时域波形,图 7(b)为两侧轴承承载区分布,结果表明轮径差导致轮对两侧轴承滚子-滚道接触力幅值和相位差异并导致轴承承载区相位差,图 7(c)表明两侧轴承滚子-滚道接触力幅值差异随轮径差增加而增大。

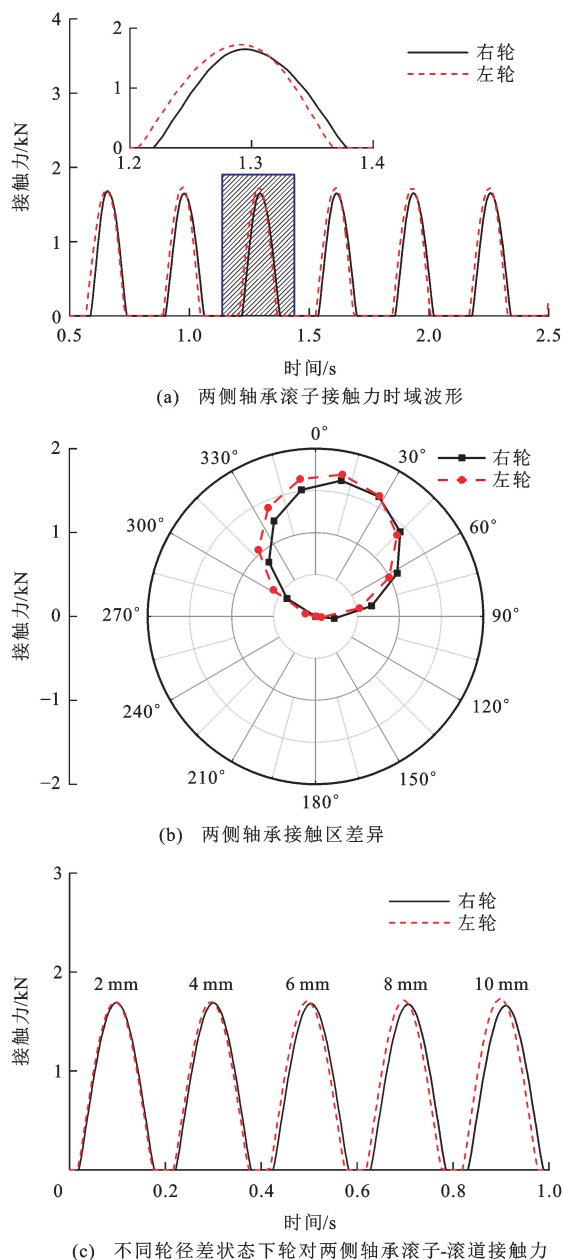


图7 轮径差对轴箱轴承滚子-滚道接触力的影响

Fig. 7 Effect of WDD on contact force between roller and rolling race of axle-box bearings

Yi等^[53]建立了轴承-车辆-轨道耦合动力学模型并研究发现轴承外圈在轮径差作用下出现高频、大位移的横向运动,导致滚子-外滚道作用力增大,加速轴承失效。

总体而言,目前关于轮径差对其他部件服役状态影响研究主要集中在牵引电机和轴箱轴承,涉及其他部件的研究相对较少。

5 轮径差识别研究

目前,铁道车辆的轮径差监测和识别研究相对较少。Cheng等^[54]基于SIMPACK软件仿真分析

了轮径差对轴箱振动特性的影响,指出可以通过轴箱振动信号对轮径差进行监测,但并未提出具体的监测和识别方法。Peng等^[55]基于电涡流传感器开发了一种轨旁监测设备,并通过仿真及试验研究验证了该监测设备的可靠性;该设备以轮对横移量为监测指标,根据轮对横移量和轮径差的映射关系对重载货车轮径差进行识别。

近年来,本文作者课题组对重载货车轮径差识别开展了理论和试验研究,包括了轮径差类型识别和轮径差量化识别。Xie等^[56]基于ACMD分解方法和多核极限学习机提出了一种轮径差检测方法,该方法通过对轴箱加速度信号分解,提取其分形维数作为特征并通过多核极限学习机进行轮径差类型识别,试验数据分析结果表明该方法能够准确地识别轮径差的类型,如图8所示。Sui等^[57]结合多核KPCA和自适应TQWT建立了轮径差量化识别模型,该模型通过自适应TQWT对振动信号分解、降噪,提取振动信号中的特征并构造数据集;利用MKPCA提取特征数据集中的非线性主元特征,计算霍特林统计量 T^2 和平方预测误差S对主元特征进行评价,实现轮径差量化识别,识别结果如表2所示。以上方法均以轮径差为直接监测目标,除上述方法外还有研究者提出一些轮径的检测方法,也可间接实现轮径差的监测。Gao等^[58]提出了一种基于激光位移传感器和涡流传感器的轮径差动态测量系统;Gong等^[59]提出了一种基于结构光视觉的轮径差动态测量方法;Onat等^[60]提出了一种基于无迹卡尔曼滤波的车辆状态监测方法,可以用于监测车轮名义滚动圆半径;Torabi等^[61]提出了一种基于图像的铁道车辆车轮精测方法,在实验室和现场进行的试验结果表明该方法具有较好的精度;Baasch等^[62]基于倒谱分析对轴箱振动加速度信号进行分析,倒频谱中峰值的位置可以用于监测

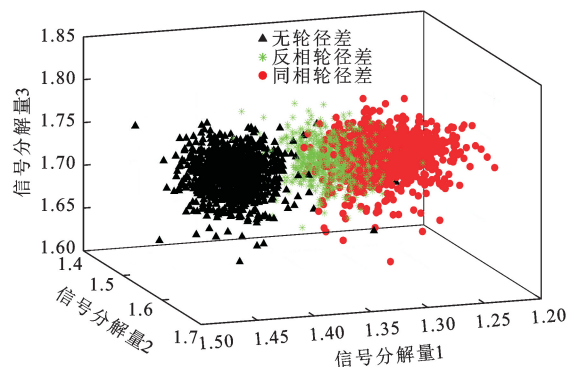


图8 轮径差类型识别

Fig. 8 Recognition of WDD types

车轮直径;Heirich 等^[63]提出了一种推断车辆速度和车轮直径测量值的新方法并将该方法用于车轮状态的监测、诊断。

表 2 轮径差量化识别结果

Table 2 Quantitative identification results of WDD %

轮径差/ mm	检出率		误报率		准确率	
	T^2	S	T^2	S	T^2	S
<2	97.75	95.80	0.50	1.00	98.53	97.22
[2,4)	94.00	94.00	0.20	0.80	96.58	96.31
≥ 4	99.98	99.92	6.00	6.00	97.32	97.29
平均值	97.24	96.57	2.23	2.60	97.47	96.94

随着状态监测理论和检测技术的进步,轮径差的识别问题受到越来越多的研究者关注。一些人工智能、深度学习方法被陆续提出并应用于车辆状态监测和故障诊断,但这些方法能否适应铁道车辆复杂的服役环境、能否长期保持检测精度和可靠性有待进一步验证。

6 结 语

(1)轮径差是铁道车辆服役过程中常见的问题之一,对车辆及关键部件的服役性能产生诸多不利影响。因此,开展轮径差对铁道车辆服役性能的影响研究具有重要的理论意义与工程应用价值。本文从车辆动力学性能、轮轨接触、车轮磨耗及滚动接触疲劳、其他部件服役状态四方面总结论述了轮径差对铁道车辆服役性能的影响。

(2)在轮径差的形成机理研究方面,既有的研究大多侧重于分析轮径差对铁道车辆动力学性能的影响,对轮径差的形成机理研究较少。轮径差的形成涉及到车辆服役状态、线路条件、服役环境及列车操纵等多个维度,亟需对轮径差的形成机理开展系统性的理论和试验研究。

(3)在轮径差的智能检测和识别研究方面,目前铁道车辆检修体系正由计划修向状态修转变,状态修需要准确识别铁道车辆各部件的服役状态。因此,开展轮径差的智能检测和识别研究对于车辆检修体系转变、降本增效具有重要意义和价值。

参 考 文 献 :

References :

[1] 翟婉明,赵春发.现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J].西南交通大学学报,2016,51(2):209-226.
ZHAI Wan-ming, ZHAO Chun-fa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 209-226.

[2] 中国城市轨道交通协会.《城市轨道交通 2024 年度统计和分析报告》精要解读[J].城市轨道交通,2025(4):22-25.
China Urban Rail Transit Association. A concise interpretation of the "2024 annual statistical and analysis report on urban rail transit"[J]. China Metros, 2025(4): 22-25.

[3] 赵欣苗.“新基建”下城市轨道交通领域的机遇、挑战与建议[J].中国发展观察,2023(2):76-79,96.
ZHAO Xin-miao. Opportunities, challenges, and suggestions in the field of urban rail transit under the new infrastructure[J]. China Development Observation, 2023(2): 76-79, 96.

[4] 池茂儒,张卫华,曾 京,等.轮径差对行车安全性的影响[J].交通运输工程学报,2008,8(5):19-22.
CHI Mao-ru, ZHANG Wei-hua, ZENG Jing, et al. Influence of wheel-diameter difference on running security of vehicle system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(5): 19-22.

[5] 李 培.C80 型敞车轮对车轮磨耗调查及建议[J].哈尔滨铁道科技,2014(4):26-27,33.
LI Pei. Investigation and suggestion on wheel wear of C80 open wheelset[J]. Harbin Railway Technology, 2014(4): 26-27, 33.

[6] 池茂儒,张卫华,曾 京,等.轮径差对车辆系统稳定性的影响[J].中国铁道科学,2008,29(6):65-70.
CHI Mao-ru, ZHANG Wei-hua, ZENG Jing, et al. Influence of wheel diameter difference on the stability of vehicle system[J]. China Railway Science, 2008, 29(6): 65-70.

[7] 王娜娜,罗世辉,马卫华.轮径差对车辆动态曲线通过的影响[J].铁道机车车辆,2010,30(2):47-49,64.
WANG Na-na, LUO Shi-hui, MA Wei-hua. Influence of wheel-diameter difference on dynamic curving performance of vehicle system [J]. Railway Locomotive and Car, 2010, 30(2): 47-49, 64.

[8] 张志超,李 谷,储高峰,等.机车轴间轮径差对其动力学性能影响的仿真分析[J].铁道机车车辆,2013,33(2):11-16.
ZHANG Zhi-chao, LI Gu, CHU Gao-feng, et al. Simulation analysis of the influence of wheel diameter difference on the locomotive dynamic performance [J]. Railway Locomotive and Car, 2013, 33(2): 11-16.

[9] 何彩颖,宋荣荣,马卫华.轮径差对机车直线运行轮轨横向力的影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2011,25(7):57-63.
HE Cai-ying, SONG Rong-rong, MA Wei-hua. Influence of wheel diameter difference to wheel/rail lateral force of the locomotive on tangent track [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2011, 25(7): 57-63.

[10] 王文刚,隋顺琦,高贤波,等.轮径差对三大件式转向架曲线通过性能影响分析[J].机械,2021,48(1):37-43.
WANG Wen-gang, SUI Shun-qi, GAO Xian-bo, et al. Influence of wheel diameter difference on curving negotiation performance of three-piece bogies [J]. Machinery, 2021, 48(1): 37-43.

[11] 向金兰,曾 京,彭莘宇,等.铁道货车车轮轮径差与轮轨力关

- 系的研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(1): 9-14.
- XIANG Jin-lan, ZENG Jing, PENG Xin-yu, et al. Research on the relationship between wheel diameter difference and wheel/rail force of railway freight car[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(1): 9-14.
- [12] 魏 静, 罗斌贝. 轮径差对 C_0-C_0 径向转向架曲线通过动力学性能的影响[J]. 铁道机车与动车, 2015(6): 5-10.
- WEI Jing, LUO Bin-bei. Influence of wheel diameter difference on dynamic performance of curve passing of C_0-C_0 radial bogie[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2015(6): 5-10.
- [13] 胡军海. 重载铁路货车轮对磨耗及其对动力学的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- HU Jun-hai. Study on wheelset wear of heavy haul railway freight cars and its influence on dynamics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [14] 李 艳, 张卫华, 池茂儒, 等. 车轮踏面外形及轮径差对车辆动力学性能的影响[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 104-108.
- LI Yan, ZHANG Wei-hua, CHI Mao-ru, et al. Influence of wheel tread profile and rolling diameter difference on dynamic performance of vehicles[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 104-108.
- [15] 杨朝阳. 车轮踏面磨耗及轮径差对高速动车组动力学性能影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- YANG Chao-yang. Study on the influence of wheel tread wear and wheel diameter difference on the dynamic performance of high-speed EMUs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [16] 谷学思. 不同踏面及轮径差对高速动车组曲线通过性能的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- GU Xue-si. The influence of different wheel tread and roll radii difference on EMU curve negotiation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [17] 李润华. CRH2 转向架轮对轮径差检修限度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- LI Run-hua. Study on the overhaul limit of wheel diameter difference of CRH2[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [18] 李润华, 宋永增, 徐海滨. 初始轮径差对高速列车动力学性能的影响研究[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(2): 14-18.
- LI Run-hua, SONG Yong-zeng, XU Hai-bin. Influence of initial wheel radius difference on the dynamic performance of high-speed train[J]. Railway Locomotive and Car, 2015, 35(2): 14-18.
- [19] 张冰玉. 轮对磨耗对高速列车服役性能影响探究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(3): 11-15.
- ZHANG Bing-yu. Study on the effect on service performance of high-speed trains by wheel wear[J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(3): 11-15.
- [20] 孙士刚. 车桥耦合中轮径差对列车动力学性能影响及车轮磨耗分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- SUN Shi-gang. Influence of wheel diameter difference on the dynamic performance of vehicles and analysis on wheel wear in the process of vehicle-bridge coupling[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [21] 韩 鹏, 张卫华, 李 艳, 等. 轮对磨耗与轮径差对高速列车动力学性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 47-53.
- HAN Peng, ZHANG Wei-hua, LI Yan, et al. Influence of wheelset wear and wheel radius difference on dynamics performances of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 47-53.
- [22] 张云飞, 李 军. 轮径差对轨道客车山区小半径曲线通过的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 489-495.
- ZHANG Yun-fei, LI Jun. Effect of wheel diameter difference on passing of small radius curve in mountainous track passenger train[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2018, 39(4): 489-495.
- [23] 黄照伟, 崔大宾, 杜 星, 等. 车轮偏磨对高速列车直线运行性能的影响[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 14-20.
- HUANG Zhao-wei, CUI Da-bin, DU Xing, et al. Influence of deviated wear of wheel on performance of high-speed train running on straight tracks[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(2): 14-20.
- [24] 黄照伟. 车轮磨耗及其对车辆动力学性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- HUANG Zhao-wei. Wheel tread wear and its influence on dynamic performance of vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [25] 姚治锋, 王 勇. 轮径差对车辆非线性临界速度的影响[J]. 铁道车辆, 2015, 53(11): 1-5.
- YAO Zhi-feng, WANG Yong. The effect of wheel diameter difference on non-linear critical speed of vehicles[J]. Rolling Stock, 2015, 53(11): 1-5.
- [26] 蒋益平, 池茂儒, 周 橙, 等. 组合轮径差对地铁车辆动力学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2019, 44(10): 115-120.
- JIANG Yi-ping, CHI Mao-ru, ZHOU Cheng, et al. Influence of wheel radius difference combination on the dynamic performance of metro vehicles [J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(10): 115-120.
- [27] 冯 帅. 非理想状态车轮对地铁车辆动力学性能影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- FENG Shuai. Study on the influence of non-ideal wheels on the dynamic performance of metro vehicles [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [28] 董昊亮, 文永蓬, 王向阳, 等. 多种接触状态下地铁车辆蛇行运动的稳定性演化[J]. 振动与冲击, 2022, 41(18): 94-103.
- DONG Hao-liang, WEN Yong-peng, WANG Xiang-yang, et al. Evolution of metro vehicle serpentine motion stability under multiple contact conditions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(18): 94-103.
- [29] LI H X, ZHU A H, MA C C, et al. Influence of wheel profile wear coupled with wheel diameter difference on the dynamic performance of subway vehicles [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(1): 6694561.

- [30] LI H X, LI L. Research on dynamic response of metro vehicles based on different coupling damage conditions of wheels[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2023, 61(8): 2120-2143.
- [31] 朱 磊, 徐 辉. 轮径差对独立轮对有轨电车稳定性影响的研究[J]. *现代交通技术*, 2020, 17(4): 78-81.
ZHU Lei, XU Hui. The study on the influence of wheel diameter difference on the stability of independent wheelset bogie[J]. *Modern Transportation Technology*, 2020, 17(4): 78-81.
- [32] 陈 嵘, 陈嘉胤, 王 平, 等. 轮径差对道岔区轮轨接触几何和车辆过岔走行性能的影响[J]. *铁道学报*, 2018, 40(5): 123-130.
CHEN Rong, CHEN Jia-yin, WANG Ping, et al. Effect of wheel diameter difference on wheel-rail contact geometry and vehicle running behavior in turnout area[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(5): 123-130.
- [33] ZOU R M, MA W H, LUO S H. Influence of the wheel diameter difference on the wheel/rail dynamic contact relationship of the heavy haul locomotive[J]. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 16(2): 98-108.
- [34] 马卫华, 邹瑞明, 罗世辉. 轮径差对机车惰行和电制动轮轨作用的影响[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(14): 115-121.
MA Wei-hua, ZOU Rui-ming, LUO Shi-hui. Influence of wheel diameter difference on wheel/rail interaction of locomotive under coasting and electric braking conditions[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(14): 115-121.
- [35] 刘思莹, 徐永绥, 张 军, 等. 轮径差对机车动力学性能及轮轨接触的影响[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(28): 125-130.
LIU Si-ying, XU Yong-sui, ZHANG Jun, et al. Influence of wheel diameter difference on the locomotive dynamic performance and wheel rail contact[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(28): 125-130.
- [36] SUI S Q, WANG K Y, LING L, et al. Effect of wheel diameter difference on tread wear of freight wagons[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 127(1): 105501.
- [37] 胡海滨, 吕可维, 邵文东, 等. 大秦铁路货车车轮磨耗问题的调查与研究[J]. *铁道学报*, 2010, 32(1): 30-37.
HU Hai-bin, LYU Ke-wei, SHAO Wen-dong, et al. Research on wheel wear of freight cars on Datong-Qinhuangdao railway line[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(1): 30-37.
- [38] 王 伟, 吕可维, 邵文东, 等. 轮径差对三大件转向架轮缘磨耗影响的对比分析[J]. *铁道机车车辆*, 2015, 35(增 1): 42-46.
WANG Wei, LYU Ke-wei, SHAO Wen-dong, et al. Effect of wheelset's wheel diameter difference on flange wear of the three piece freight car bogie[J]. *Railway Locomotive and Car*, 2015, 35(S1): 42-46.
- [39] 谢彦飞, 丁军君. 轮径差对机车车轮偏磨的影响[J]. *神华科技*, 2010, 8(6): 81-84.
XIE Yan-fei, DING Jun-jun. Effect of wheel radius difference on partial wear of locomotive[J]. *Shenhua Science and Technology*, 2010, 8(6): 81-84.
- [40] 丁军君, 李 芾. 基于轮对安装偏转角和轮径差的高速列车车轮磨耗研究[J]. *铁道学报*, 2011, 33(2): 20-25.
DING Jun-jun, LI Fu. Study on wheel wear of high-speed train based on wheelset deflection angle and radius difference[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(2): 20-25.
- [41] 丁军君, 黄运华, 李 芾, 等. 铁道车辆非理想状态下的车轮磨耗行为[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(12): 109-115.
DING Jun-jun, HUANG Yun-hua, LI Fu, et al. Wheel wear behaviour of the imperfect railway vehicle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(12): 109-115.
- [42] 蔡送宝, 李林安, 孙士刚. 车桥耦合中轮径差对车轮磨耗的影响[J]. *机械科学与技术*, 2015, 34(12): 1924-1928.
CAI Song-bao, LI Lin-an, SUN Shi-gang. Influence of wheel diameter difference on wheel wear in process of vehicle-bridge coupling[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2015, 34(12): 1924-1928.
- [43] 王 晨, 马卫华, 罗世辉, 等. 轮径差对地铁车辆轮对磨耗的研究[J]. *铁道机车车辆*, 2013, 33(增 1): 87-91.
WANG Chen, MA Wei-hua, LUO Shui-hui, et al. Study on wheel wear of the subway vehicle based on radius difference[J]. *Railway Locomotive & Car*, 2013, 33(S1): 87-91.
- [44] 高润稼, 曾 京, 戴鑫亮. 驱动方式与轮径差对悬挂式单轨车轮磨耗的影响分析[J]. *机械制造与自动化*, 2021, 50(6): 32-36.
GAO Run-jia, ZENG Jing, DAI Xin-liang. Influence analysis of driving mode and wheel diameter difference over suspended monorail wheel wear[J]. *Machine Building and Automation*, 2021, 50(6): 32-36.
- [45] 王红兵, 丁旺才, 宋杨法, 等. 轮径差对车轮踏面磨耗和滚动接触疲劳的影响分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(5): 1277-1288.
WANG Hong-bing, DING Wang-cai, SONG Yang-fa, et al. Analysis of the influence of wheel diameter difference on wheel tread wear and rolling contact fatigue[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(5): 1277-1288.
- [46] LYU K K, WANG K Y, LING L, et al. Influence of wheel diameter difference on surface damage for heavy-haul locomotive wheels: measurements and simulations[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020: 105343.
- [47] 王 刚. 客车轮径差对列车运行影响分析[J]. *轨道交通装备与技术*, 2013(2): 37-39.
WANG Gang. Analysis of the influence of wheel diameter difference on train operation[J]. *Rail Transportation Equipment and Technology*, 2013(2): 37-39.
- [48] 汪德武. 轮对左右轮径差与轴温的关系[J]. *铁道车辆*, 2009, 47(4): 28-30, 48.
WANG De-wu. The relation between the diameter difference of the right, left wheels and the axle temperature[J]. *Rolling Stock*, 2009, 47(4): 28-30, 48.
- [49] 梁大伟, 杨其林, 王善芬, 等. 列车轮径差对牵引系统的影响及相应保护措施研究[J]. *铁道车辆*, 2018, 56(5): 33-36.
LIANG Da-wei, YANG Qi-lin, WANG Shan-fen, et al. Effect of wheel diameter difference on traction system of the train and corresponding protection measures[J]. *Rolling*

- Stock, 2018, 56(5): 33-36.
- [50] 王继强,黄丙龙,葛兴亮. 青岛地铁3号线列车牵引电机超温故障处理与分析[J]. 铁道机车与动车, 2021(5): 34-37.
WANG Ji-qiang, HUANG Bing-long, GE Xing-liang. Treatment and analysis of an over-temperature fault in the traction motor of the Qingdao Metro Line 3 train[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2021(5): 34-37.
- [51] 于 勇,马周聪,刘亚云. 高速动车组轮径差与牵引电机功率及温升耦合性研究[J]. 电源学报, 2021, 19(4): 103-111.
YU Yong, MA Zhou-cong, LIU Ya-yun. Research on coupling between wheel diameter difference of high-speed EMU and traction motor power and temperature rise[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(4): 103-111.
- [52] SUI S Q, WANG K Y, LING L, et al. Effect of wheel diameter difference on dynamic performance of axle-box bearing of freight wagons[C]//ICRT. Second International Conference on Rail Transportation. Reston: ICRT, 2021: 194-201.
- [53] YI C, WANG J Y, LIAO X K, et al. A simulation investigation on the dynamic behavior of wheelset bearings caused by wheel diameter difference[J]. Advanced Theory and Simulations, 2023, 6(5): 2200874.
- [54] CHENG D L, XU L, SUN X J. Vibration of axle-box from wheel diameter difference in vehicle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Science), 2020, 25(4): 509-518.
- [55] PENG X Y, ZENG J, WANG Q S, et al. Research on an identification method for wheelset coaxial wheel diameter difference based on trackside wheelset lateral movement detection[J]. Sensors, 2023, 23(13): 5803.
- [56] XIE B, CHEN S Q, DONG M Y, et al. Detection of wheel diameter difference of railway wagon by ACMD-FBD and optimized MKELM[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3521111.
- [57] SUI S Q, WANG K Y, CHEN S Q. Fault detection and quantitative assessment of wheel diameter difference based on ensemble adaptive tunable Q-factor wavelet transform and mixed kernel principal component analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(1): 015106.
- [58] GAO Y, FENG Q B, CUI J Y. A simple method for dynamically measuring the diameters of train wheels using a one-dimensional laser displacement transducer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 53: 158-163.
- [59] GONG Z, SUN J H, ZHANG G J. Dynamic measurement for the diameter of a train wheel based on structured-light vision[J]. Sensors, 2016, 16(4): 564.
- [60] ONAT A, VOLTR P, LATA M. An unscented Kalman filter-based rolling radius estimation methodology for railway vehicles with traction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(6): 1686-1702.
- [61] TORABI M, MOHAMMAD MOUSAVI S G, YOUNESIAN D. A high accuracy imaging and measurement system for wheel diameter inspection of railroad vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 8239-8249.
- [62] BAASCH B, HEUSEL J, ROTH M, et al. Train wheel condition monitoring via cepstral analysis of axle box accelerations[J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1432.
- [63] HEIRICH O, STEINGASS A, LEHNER A, et al. Velocity and location information from onboard vibration measurements of rail vehicles[C]//IEEE. Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion. New York: IEEE, 2013: 1835-1840.