



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2308646

引用格式:周素霞,李光,孙宇铎,等.重载机车不同轴序轮径差造成的踏面损伤规律[J].科学技术与工程,2025,25(2):780-787.

Zhou Suxia, Li Guang, Sun Yudu, et al. Tread damage law caused by different coaxial sequence wheel diameter difference in heavy-haul locomotive[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(2): 780-787.

重载机车不同轴序轮径差造成的踏面损伤规律

周素霞^{1,2}, 李光^{1,2*}, 孙宇铎³, 王君艳^{1,2}, 巴馨悦^{1,2}

(1. 北京建筑大学机电与车辆工程学院, 北京 100044; 2. 北京建筑大学城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室, 北京 100044; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司金属及化学研究所, 北京 100081)

摘要 针对和谐型大功率电力机车同轴车轮产生偏磨的问题,基于动力学软件 SIMPACK 建立机车动力学模型,利用基于磨损数的损伤函数预测方法分析不同轴序、轮径差、曲线半径等工况对车轮踏面损伤的影响。结果表明:单个轴位或者多个轴位存在轮径差时,对2轴和3轴车轮踏面损伤影响较大,对1轴影响较小。对于不同数值轮径差,随着轮径差的增加,1轴右侧车轮踏面滚动接触疲劳损伤程度影响较小,左侧车轮踏面磨损程度增加;2轴两侧车轮损伤程度降低;3轴左侧车轮剥离加重。左曲线工况下,R400 工况,轮径差对各轴位磨损和滚动接触疲劳影响更大;右曲线工况下,R800 工况,轮径差对各轴位磨损和滚动接触疲劳影响更大,左曲线和右曲线相比,左曲线工况下,轮径差对车轮踏面损伤影响更大。在曲线工况下,与曲线半径相比,轮径差对车轮踏面损伤的影响较小。

关键词 轮径差;重载机车;损伤函数;踏面损伤

中图分类号 U264.8; 文献标志码 A

Tread Damage Law Caused by Different Coaxial Sequence Wheel Diameter Difference in Heavy-Haul Locomotive

ZHOU Su-xia^{1,2}, LI Guang^{1,2*}, SUN Yu-duo³, WANG Jun-yan^{1,2}, BA Xin-yue^{1,2}

(1. School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Beijing Key Laboratory of Service Performance of Vehicles, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

3. China Academy of Railway Sciences, Metal & Chemistry Research Institute, Beijing 100081, China)

[Abstract] Aiming at the problem of coaxial wheel partial wear of HX high-power electric locomotive in China, the locomotive dynamics model was established based on the dynamics software SIMPACK, and the damage function prediction method based on wear number was used to analyze the influence of different coaxial sequence, wheel diameter difference, curve radius and other conditions on wheel tread damage. The results show that when there is wheel diameter difference in one axle or multiple axles, the influence on tread damage of 2-axle and 3-axle wheels is greater, and the influence on 1-axle wheels is less. For different values of wheel diameter difference, with the increase of wheel diameter difference, the impact of rolling contact fatigue degree on the right wheel tread of 1-axle is small, and the wear degree of the left wheel tread increases. The damage degree of wheel on both sides of 2-axle is reduced; the cracks of 3-axle left wheel are accentuated. Under left curve condition and R400 condition, wheel diameter difference has greater influence on the wear and rolling contact fatigue of each axle. Under right curve condition and R800 condition, wheel diameter difference has more influence on the wear and rolling contact fatigue of each axle. Compared with right curve condition, wheel diameter difference has more influence on wheel tread damage under left curve condition. Compared with curve radius, wheel diameter difference has less influence on wheel tread damage.

[Keywords] wheel diameter difference; heavy-haul locomotive; damage function; tread damage

中国幅员辽阔,资源丰富,但是资源分布不均匀,因此,重载运输对于中国的发展极其重要。随着重载机车的发展,载重量也逐渐增加,车轮踏面

损伤日益凸显。根据现场调研某机务段实际线路情况发现,由于线路设置问题,当列车上行时,机车一侧发生偏磨,下行时,因机务段固有问题导致机

收稿日期:2023-11-05; 修订日期:2024-10-18

基金项目:北京市自然科学基金(L211007)

第一作者:周素霞(1971—),女,汉族,河南浚县人,博士,教授。研究方向:结构的疲劳与断裂、金属材料的微观损伤、车辆系统动力学。

E-mail:sxzhou1971@163.com。

*通信作者:李光(1997—),男,汉族,河南商丘人,硕士研究生。研究方向:车辆动力学和轮轨关系。E-mail:1306205335@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

车不能进行掉头,上行时的前转向架作为下行时的后转向架,上行时的后转向架作为下行时的前转向架行驶,导致上行和下行时同一侧车轮磨损严重,使得轮径差变大,加快车轮踏面损伤。

近年来很多学者针对不同车型研究了轮径差对车轮踏面损伤和机车动力学的影响。对于四轴车轮径差的研究,王红兵等^[1]用 FASTSIM 算法建立局部轮轨接触模型,研究表明不同类型轮径差均会导致车轮踏面发生偏磨,其中等值同向轮径差最明显,单个轮对轮径差次之,等值反向轮径差最小;轮径差会导致轮对发生偏移且显著增大轮对横移量,从而使滚动接触疲劳区域扩大。Sui 等^[2]基于大量的现场测量和数值模拟,研究了轮径差对货车车轮踏面磨损的影响。李欣等^[3]分别利用 SIMPACK 软件和 ABAQUS 软件建立仿真模型,设置不同轨底坡和轮径差组合,分析其对地铁车辆动力学性能和轮轨接触特性的影响。Li 等^[4]研究了车轮磨耗、车轮失圆和轮径差损伤三种损伤耦合对车辆动力学性能的影响规律和特点,以及车轮磨耗耦合轮径差和车轮失圆耦合轮径差引起的车辆性能差异。Peng 等^[5]对货车同轴轮径差进行在线监测,建立了车辆轨道动力学模型,分析了同轴轮径差条件下钢轨横移响应。许磊等^[6]对某动车组列车踏面磨耗进行跟踪测试,分析了轮径差对车辆动力学性能的影响。马贺等^[7]建立货车-辙叉系统耦合动力学模型,分析了车轮以不同速度通过固定辙叉时对轮径差的影响。而对于六轴车轮径差的研究较少,针对六轴车轮径差的研究也主要集中在动力学方面。另一方面,车轮踏面损伤问题日益突出,有效地进行损伤预测分析就显得极其重要。目前广泛应用的车轮踏面损伤预测方法分别是安定图^[8-9]和损伤函数模型^[10-11],两种方法大多数情况下分析结果接近。其中,损伤函数考虑了磨耗损伤和滚动接触疲劳的竞争关系,能够有效预测车轮踏面损伤,因此被广泛应用。目前,通过损伤函数预测车轮踏面损伤的方法已经非常成熟。刘冉等^[12]基于 SIMPACK 建立了车辆动力学模型,并运用损伤函数预测车轮廓形对 I 型滚动接触疲劳的影响。结果表明镟后 8×10^4 km 后 LM 廓形车轮的疲劳损伤峰值始终比 LMA 廓形高。Liu 等^[13]对 CO-CO 轴式机车进行现场调研、试验和数值模拟,发现不合适的电气补偿和弯道是导致该机车滚动接触疲劳的主要原因。雷振宇^[14]基于 SIMPACK 动力学软件分别建立电力机车分析车轮廓形对车轮滚动接触疲劳的影响,结果表明不同廓形车轮在不同工况下的损伤规律不同。刘永峰等^[15]基于多体动力学仿真软件

SIMPACK 建立机车动力学模型,利用损伤函数预测轨面有局部低黏着时车轮的裂纹萌生速率。Li 等^[16]通过现场调研和数据仿真分析四轴机车轮径差对车轮踏面损伤的影响,结果表明踏面损伤主要发生在轮径小的一侧以及轮径差会加剧车轮踏面损伤。

针对重载机车轮径差对车轮踏面损伤的研究主要集中在对同一轴的影响,而机车作为一个整体,轮径差的存在势必会对其他轴位产生影响。为了研究这种影响的表现形式,现通过动力学软件 SIMPACK 建立机车动力学模型,利用基于磨耗数的损伤函数预测方法,分析不同轴序、不同轮径差大小和不同曲线半径等工况下轮径差对各轴位车轮踏面损伤的影响。

1 工况设置

1.1 轮径差类型

转向架分为两轴转向架、三轴转向架以及多轴转向架。对于两轴转向架来说,轮径差只包含 4 种情况:等值同向轮径差、等值反向轮径差、前轮对轮径差以及后轮对轮径差^[17]。对于六轴机车,如果考虑反向轮径差,那么组合就会多达几十种。而根据现场实际情况。对于同一个转向架,同向轮径差较为显著。以机车前进方向为基准,从前至后依次为 1 轴到 6 轴,如图 1 所示。因此,本文研究中仅考虑图 2 中的 7 种同轴同向轮径差。

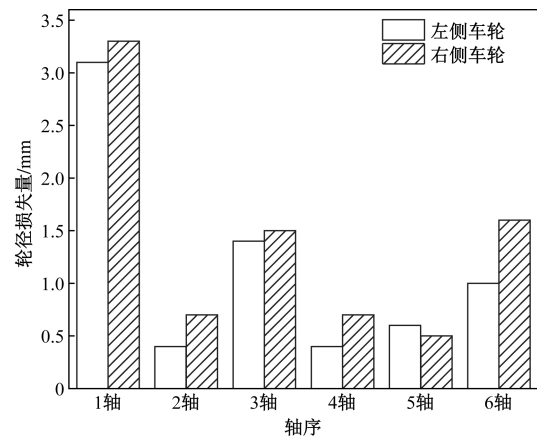


图 1 现场调研轮径损失量

Fig. 1 Wheel diameter loss in field survey

1.2 轮径差设置

为阐明不同轮径差对机车车轮踏面损伤的影响。根据机车运行实际情况以及中国铁路镟修标准^[18],分别分析镟修标准 1 mm 轮径差、运用标准 2 mm 轮径差以及超限工况^[19]。轮径差参数如表 1 所示。

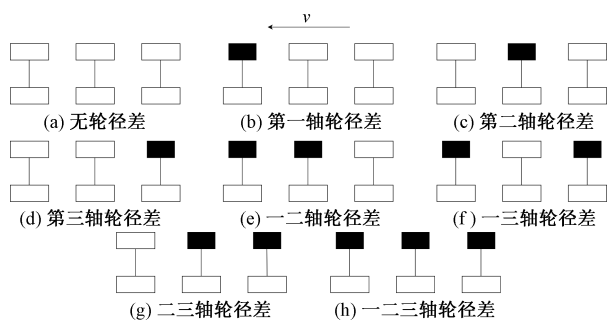


图2 三轴转向架轮径差

Fig. 2 Wheel diameter difference of three-axle bogie

表1 轮径差参数

Table 1 Wheel diameter difference parameters

类别	左侧车轮 轮径/mm	右侧车轮 轮径/mm	轮径差/mm
新轮轮径	1 250	1 250	0
镟修标准	1 250	1 249	1
运用标准	1 250	1 248	2
超限工况	1 250	1 247	3

1.3 线路设置

依据实际线路,共有 88 个弯道曲线半径小于 500 m(以下简称为 R500),因此,设置最小曲线半径为 400 m,机车在实际运行中的速度为 60 ~ 80 km/h,本文研究中不考虑机车速度的影响,速度选择 70 km/h。其中仿真模型采样频率为 50 Hz。具体线路参数如表 2 所示。

表2 仿真线路参数

Table 2 Simulated line parameters

线路	速度/ (km·h ⁻¹)	超高/mm	曲线半 径/m	缓和曲 线/m	曲线全 长/m
1	70	110	400	300	700
2	70	80	800	300	700
3	70	60	2 000	300	700
4	70	110	-400	300	700
5	70	80	-800	300	700
6	70	60	-2 000	300	700

注:曲线半径为负表示曲线方向向左;曲线半径为正表示曲线方向向右。

2 模型的建立

2.1 机车模型

按照国内和谐型电力机车实际参数,利用多体动力学软件 SIMPACK 建立机车动力学模型如图 3 所示,主要参数如表 3 所示。其中的机车模型主要包括 6 条轮对、2 个构架、1 个车体、6 个电机、2 个牵引杆以及一系和二系悬挂系统。部件均视为刚体,其中牵引杆仅设置摇头和点头自由度,电机仅设置点头自由度,其余刚体均具有 6 个自由度,机车共有 64 个自由度。

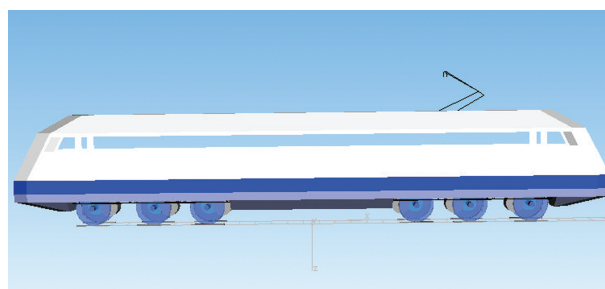


图3 车辆动力学模型

Fig. 3 Vehicle dynamics model

表3 机车模型主要参数

Table 3 Main parameters of locomotive model

参数名称	数值
车体质量/kg	79 778
轮对质量/kg	3 730
构架质量/kg	8 532
轮径/mm	1 250
轴距/mm	2 250 + 2 000
一系纵向刚度/(N·m ⁻¹)	2.2 × 10 ⁷
一系垂向刚度/(N·m ⁻¹)	2.4 × 10 ⁶
二系横向刚度/(N·m ⁻¹)	2 × 10 ⁵
二系纵向刚度/(N·m ⁻¹)	2 × 10 ⁵
二系垂向刚度/(N·m ⁻¹)	6 × 10 ⁵
轴重/t	23
最高设计速度/(km·h ⁻¹)	120

主要研究车轮踏面损伤,机车踏面使用中国标准踏面 JM₃ 廓形。钢轨踏面使用标准 60 kg/m 钢轨。轨道谱采用美国五级谱。

2.2 损伤函数预测模型

安定图是基于全滑假设的理论,没有考虑蠕滑率和磨损的影响,而本文研究主要分析机车车轮踏面损伤的程度和损伤位置且不考虑摩擦系数的影响,对车轮踏面损伤进行定性分析,显然,损伤函数预测模型更符合本文需求。利用 2.1 节中机车模型仿真计算所得蠕滑率、蠕滑力等参数导入损伤函数预测模型中分析车轮踏面损伤情况。损伤函数预测模型将磨损和滚动接触疲劳(rolling contact fatigue, RCF)的竞争关系分为 4 个区域,如图 4 所示。损伤程度为正则表示发生滚动接触疲劳;损伤程度为负则表示发生磨损。其中,磨损数公式^[20]为

$$T_{\gamma} = T_x \gamma_x + T_y \gamma_y \quad (1)$$

式(1)中: T_x 、 T_y 和 γ_x 、 γ_y 分别为纵向、横向蠕滑力和纵向、横向蠕滑率。

机车车轮钢材料采用 ER7 钢,ER7 钢抗拉强度小于 ER8 钢,裂纹起始值和裂纹萌生速率根据两种材料的抗拉强度进行线性修正,而 ER7 车轮钢和 ER8 车轮钢材料硬度相差不大,因此,磨损起始值和磨损速率仍使用 ER8 车轮钢数值^[21]。ER7 车轮钢损伤函数关键参数如表 4 所示。

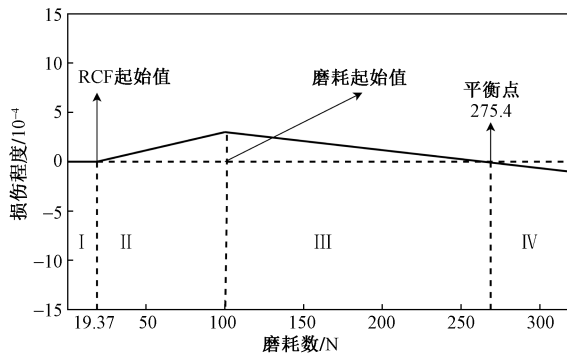


图4 损伤函数曲线

Fig. 4 Damage function curve

表4 ER7 车轮钢关键参数

Table 4 Key parameters of ER7 wheel steel

参数名称	参数值
裂纹起始值/N	19.37
裂纹萌生速率/(r·N ⁻¹)	3.7 × 10 ⁻⁶
磨损起始值/N	100
磨损速率/(r·N ⁻¹)	-5.4 × 10 ⁻⁶

3 仿真分析

3.1 不同轴序轮径差对车轮踏面损伤的影响

针对图2中的4种工况,机车轮对设置镟修标准1 mm 轮径差。图5为JM₃踏面廓形示意图,图6、图7和图8为线路2条件下机车轮对前转向架三根轴的损伤预测结果。横坐标表示车轮踏面横向位置,纵坐标表示损伤程度。观察三根轴的损伤预测结果,1轴和2轴左侧车轮表现为磨耗损伤,右侧车轮表现为剥离;而3轴左侧车轮表现为剥离,右侧车轮既不会表现出磨耗也不会表现出剥离。可以看出1轴和2轴剥离主要发生在轮径小的一侧即右侧车轮。需要说明对于3轴右侧车轮踏面磨耗数小于裂纹扩展起始值,使得轮轨接触斑内的磨耗数因没有达到磨损门槛值而无法预测出损伤,不至于影响裂纹生长而将其忽略,并不代表车轮表面不发生实质性的轻微损伤^[22]。事实上,在车辆运行过程中车轮磨耗始终发生。

车辆作为整体系统,其中一个车轮轮径值产生变化势必会导致其他轮位损伤预测结果发生变化。

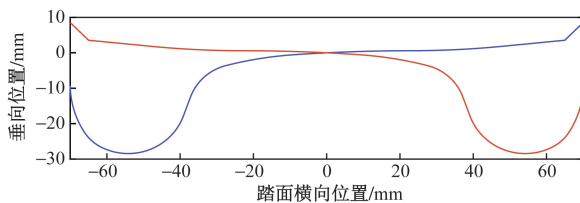


图5 JM₃踏面廓形示意图

Fig. 5 Schematic diagram of JM₃ tread profile

由图6可见,1轴和3轴轮径差的存在导致一轴右侧车轮的裂纹有所减缓,加重右侧车轮的磨耗;而2轴车轮轮径差的存在会加重1轴右侧车轮裂纹,减缓左车轮的磨耗。其中,右侧车轮裂纹主要发生在车轮名义滚动圆正向15~28 mm,左侧车轮磨耗主要发生在车轮名义滚动圆正向25~35 mm。从图7中2轴损伤函数预测结果可以看出,1轴存在轮径差时,2轴右侧车轮裂纹和左侧车轮磨耗峰值均有所降低;2轴和3轴存在轮径差时,会加剧2轴右侧剥离程度的峰值,左侧车轮磨耗也更加严重。右侧车轮裂纹主要发生在名义滚动圆正向14~28 mm处,左侧车轮磨耗主要发生在车轮名义滚动圆正向23~34 mm处。从3轴损伤预测结果可以看出,4种工况3轴左侧车轮发生裂纹,而右侧车轮没有达到裂纹起始值。1轴和2轴轮径差均会增大损伤峰值;而3轴轮径差的存在会降低损伤峰值,但是会导致损伤横向分布位置向轮缘侧偏移,剥离主要发生在名义滚动圆附近。

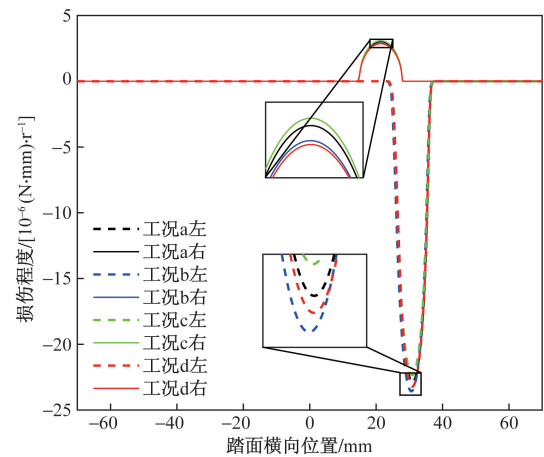


图6 1轴损伤函数预测结果

Fig. 6 Prediction results of 1-axis damage function

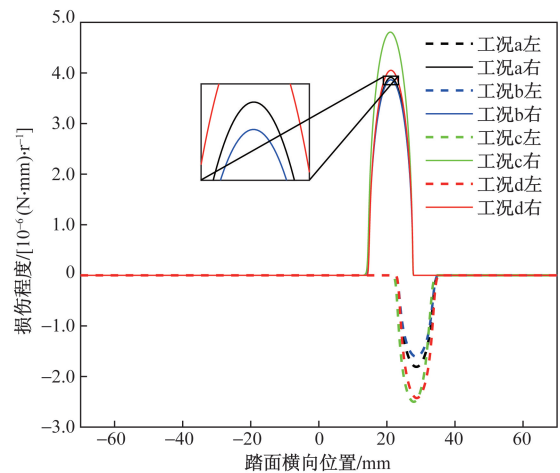


图7 2轴损伤函数预测结果

Fig. 7 Prediction results of 2-axis damage function

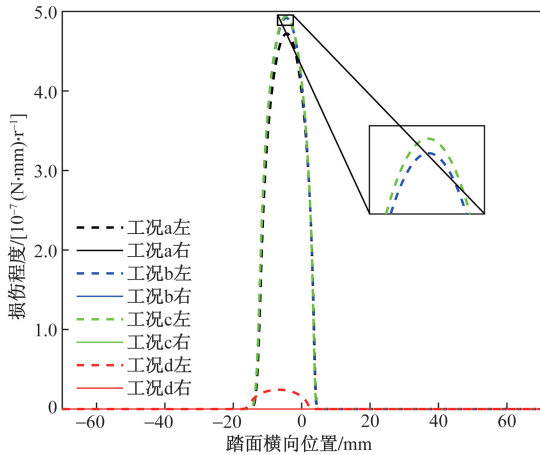


图8 3轴损伤函数预测结果

Fig. 8 Prediction results of 3-axle damage function

仿真结果表明,前转向架同轴轮径差对后转向架车轮踏面损伤影响极小。

图9、图10和图11为图2(a)、图2(e)~图2(h) 5种工况的损伤预测结果。从图9可以看出,2个或者3个轴位存在轮径差时,均会导致1轴右侧车轮踏面损伤降低,左侧车轮在2轴、3轴轮径差工况下磨损降低,其他轴位轮径差工况下,与无轮径差工况相比,磨损均增加。图10为上述5种工况下,2轴车轮踏面损伤情况,从损伤函数预测结果可以看出,2个或者3个轴位存在轮径差时,2轴右侧车轮踏面裂纹和左侧车轮磨损情况均加重。其中,3轴轮径差对2轴损伤情况影响最大。图11为3轴车轮踏面损伤函数预测结果,1轴和2轴同时存在轮径差会增大3轴左侧车轮踏面损伤,图2(f)、图2(g)和图2(h)三种工况则会大幅降低3轴左侧车轮踏面损伤程度,右侧车轮则均未达到裂纹萌生门限值。

综上,2轴和3轴车轮踏面损伤受轮径差影响较大,因此,在车轮日常运维中应当多关注2轴和3轴车轮。

3.2 不同轮径差对车轮踏面损伤的影响

图12、图13和图14为1轴车轮不同轮径差工况下前三轴机车车轮踏面的损伤预测结果。1轴右侧车轮踏面在2 mm轮径差工况下影响最大,1轴右侧车轮剥离随着轮径差的增大整体减轻,主要是由于磨损抑制了剥离;左侧车轮踏面随着轮径差的增大磨损逐渐增大,1轴轮径差的存在会进一步加剧轮径差。2轴右侧车轮踏面随着轮径差的增大踏面损伤逐渐减小;左侧车轮踏面磨损也一样随着1轴轮径差的增大呈减小趋势。3轴车轮踏面损伤主要表现为左侧车轮的裂纹,随着轮径差的增大,损伤程度峰值也逐渐增大。

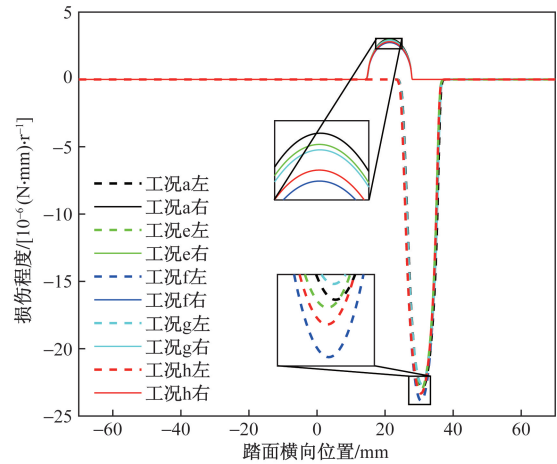


图9 1轴损伤函数预测结果

Fig. 9 Prediction results of 1-axle damage function

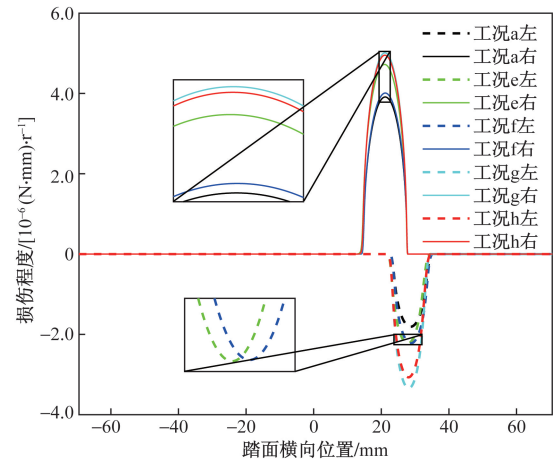


图10 2轴损伤函数预测结果

Fig. 10 Prediction results of 2-axle damage function

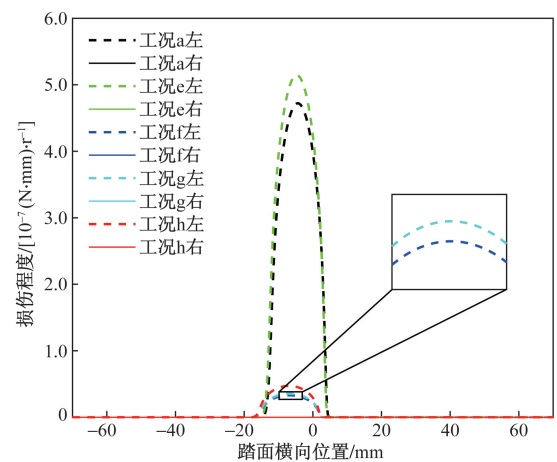


图11 3轴损伤函数预测结果

Fig. 11 Prediction results of 3-axle damage function

整体来看,1轴轮径差对1轴和3轴右侧车轮踏面损伤影响较小,对其他轮位影响较大,其中3轴左侧车轮随着1轴轮径差的增大,损伤幅值增长最

快。为避免轮径差对车轮踏面损伤的影响,在实际运行过程中提高车轮在运用过程的经济性,在检修时可以采取勤镟少镟的策略进行预防性镟修。

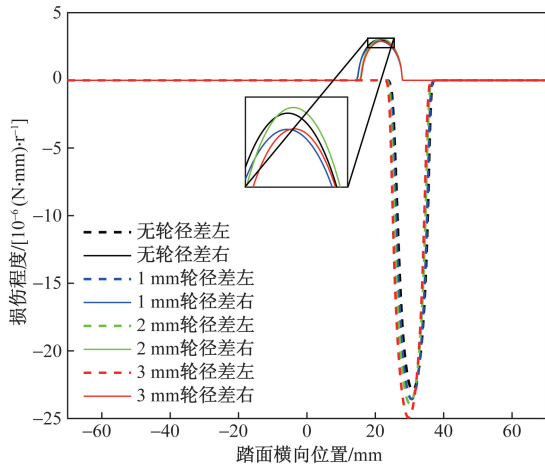


图 12 1轴损伤函数预测结果

Fig. 12 Prediction results of 1-axis damage function

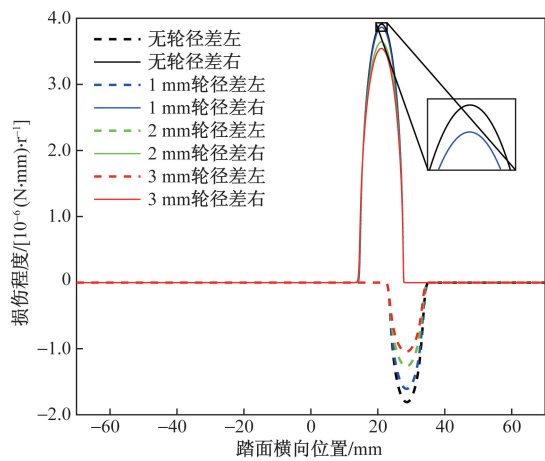


图 13 2轴损伤函数预测结果

Fig. 13 Prediction results of 2-axis damage function

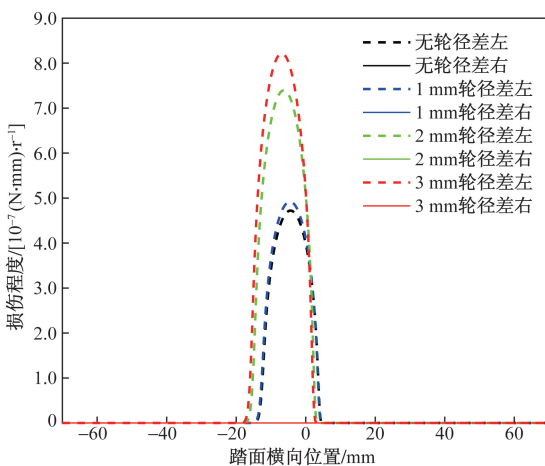


图 14 3轴损伤函数预测结果

Fig. 14 Prediction results of 3-axis damage function

3.3 不同曲线半径轮径差对车轮踏面损伤的影响

为探究不同曲线半径工况下,轮径差对车轮踏面损伤的影响,以1轴轮径差为例,图15、图16和图17为不同曲线半径工况通过表2中6种线路条件下前转向架三根轴仿真预测结果。其中,右R800表示右曲线,曲线半径为800 m。左曲线R400、R800、R2000三种工况下1轴左侧车轮表现为剥离,右侧车轮变现为磨耗;右曲线与左曲线呈现相反的趋势,右R800和右R2000工况下,1轴左侧车轮表现为磨耗,右侧车轮表现为剥离,由于轮径差的存在,R400工况下两侧车轮均表现为磨耗损伤;6种工况下,2轴车轮踏面在右曲线R400工况和右曲线R800工况与左曲线相比,损伤程度均增大;3轴车轮踏面在右曲线R400工况下损伤程度增大明显。由于1轴轮径差的存在,在左曲线R400工况下,1轴和2轴左侧车轮剥离程度增大,右侧车轮磨耗程度也增大,考虑到实际线路有88个弯道曲线半径小于500 m,1轴右侧车轮轮径差的存在会进一步

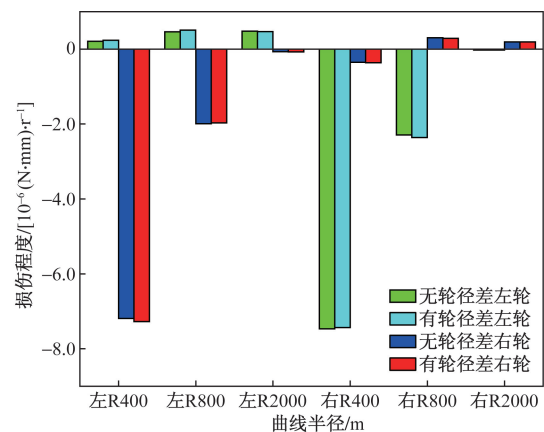


图 15 1轴损伤函数预测结果

Fig. 15 Prediction results of 1-axis damage function

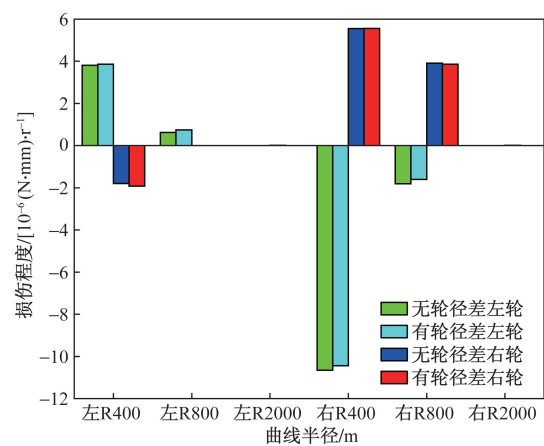


图 16 2轴损伤函数预测结果

Fig. 16 Prediction results of 2-axis damage function

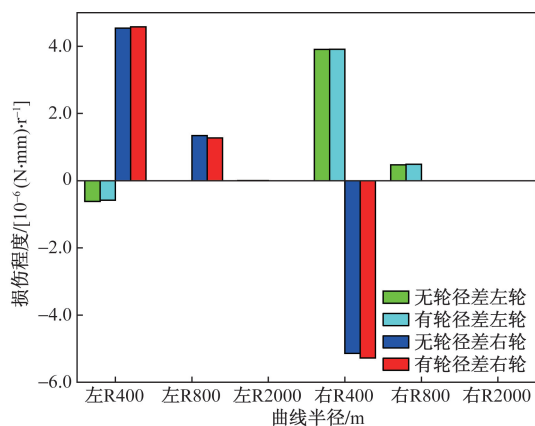


图 17 3 轴损伤函数预测结果

Fig. 17 Prediction results of 3-axis damage function

加剧轮径差,3 轴右侧车轮剥离增大,左侧车轮有所减轻。因此,左曲线工况下,R400 工况下对车轮踏面损伤的影响最大;而对于右曲线,观察各轴位损伤程度变化,R800 工况下,对各轴位损伤程度影响最大。

综合分析图 15、图 16 和图 17,不同轴位左右车轮在左曲线和右曲线工况下整体呈现相反的趋势,1 轴车轮踏面损伤程度与曲线的方向关系不大,与曲线半径的大小关系较大;与左曲线工况相比,右曲线对 2 轴和 3 轴损伤影响更大。对比左曲线和右曲线各工况,左曲线工况下轮径差对各轴位磨损和剥离影响更大。结合 3.2 节的分析,轮径差的增大会进一步增大轮径差对各轴位的影响。

4 结论

利用 SIMPACK 建立和谐型电力机车动力学模型,设置不同轴序、不同轮径差差值和不同曲线半径等多种工况进行仿真计算,利用基于磨损数的损伤函数建立滚动接触疲劳预测模型分析车轮踏面损伤情况,得出如下结论。

(1) 单个轴位或者多个轴位存在轮径差时,对 2 轴和 3 轴车轮踏面损伤影响较大,对 1 轴影响较小。

(2) 对于不同数值轮径差,随着轮径差的增加,1 轴右侧车轮踏面滚动接触疲劳损伤程度影响较小,左侧车轮踏面磨损程度增加;2 轴两侧车轮损伤程度降低;3 轴左侧车轮剥离加重。

(3) 左曲线工况下,R400 工况,轮径差对各轴位磨损和滚动接触疲劳影响更大;右曲线工况下,R800 工况,轮径差对各轴位磨损和滚动接触疲劳影响更大,左曲线和右曲线相比,左曲线工况下,轮径差对车轮踏面损伤影响更大。在曲线工况下,与曲线半径相比,轮径差对车轮踏面损伤的影响较小。

参考文献

- [1] 王红兵,丁旺才,宋杨法,等. 轮径差对车轮踏面磨损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 Hongbing, Ding Wangcai, Song Yangfa, 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.
- [2] Sui S, Wang K, Ling L, et al. Effect of wheel diameter difference on tread wear of freight wagons[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 127. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105501.
- [3] 李欣,朱爱华,孟宇轩,等. 轨底坡耦合轮径差对地铁车辆动力学性能及轮轨接触特性的影响[J]. 现代制造工程, 2024(3): 45-53.
Li Xin, Zhu Aihua, Meng Yuxuan, et al. Effects of rail bottom slope coupled with wheel diameter difference on dynamic performance and wheel-rail contact characteristics of subway vehicles[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2024(3): 45-53.
- [4] Li H, 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.
- [5] Peng X, Zeng J, Wang Q, 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). DOI: 10.3390/s23135803.
- [6] 许磊,程道来,许聪,等. 350 km/h 动车组车轮磨耗对动力学影响研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 7046-7051.
Xu Lei, Cheng Daolai, Xu Cong, et al. Effect of wheel wear on dynamics performance of 350 km/h EMU[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 7046-7051.
- [7] 马贺,牛岩,邹小春,等. 重载货车-固定辙叉动态与静态接触性能分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(34): 14229-14233.
Ma He, Niu Yan, Zou Xiaochun, et al. Dynamic and static contact performance analysis of wagon and fixed frog in heavy haul railway[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(34): 14229-14233.
- [8] 李倩,周子伟,刘禹清,等. 曲线线路重载机车车轮缘裂纹损伤及影响因素研究[J]. 应用力学学报, 2024, 41(1): 68-76.
Li Qian, Zhou Ziwei, Liu Yuqing, et al. Research on rim crack damage and influencing factors of heavy-haul locomotives on curved lines[J]. Journal of Applied Mechanics, 2024, 41(1): 68-76.
- [9] 邹强,江波,张华,等. 基于 SIMPACK 的大功率机车车轮踏面损伤预测[J]. 机械, 2022, 49(5): 33-40.
Zou Qiang, Jiang Bo, Zhanghua, et al. Prediction of wheel tread damage in high power locomotives based on SIMPACK[J]. Machinery, 2022, 49(5): 33-40.
- [10] 邵振伟,李斌,朱韶光,等. CRH3 型动车组头车 1 轴轮对踏面浅层裂纹运用分析[J]. 铁道机车与动车, 2023(5): 5-11.
Shao Zhenwei, Li Bin, Zhu Shaoguang, et al. Analysis of shallow crack application on tread surface of 1-axle wheelset of head car of CRH3 type locomotive[J]. Railway Locomotive and Locomotive, 2023(5): 5-11.
- [11] 刘永锋,陶功权,刘子通,等. 轴式对大功率电力机车车轮第 3 类滚动接触疲劳的影响[J]. 机械工程学报, 2022, 58(12):

- 159-167.
Liu Yongfeng, Tao Gongquan, Liu Zitong, et al. Influence of axle type on type 3 rolling contact fatigue of high-power electric locomotive wheels [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(12): 159-167.
- [12] 刘冉, 栗杨, 王衡禹, 等. 车轮廓形对城际动车组车轮 I 类滚动接触疲劳的影响 [J]. *机械*, 2022, 49(10): 42-50.
Liu Ran, Li Yang, Wang Hengyu, et al. The effect of wheel profile on type I rolling contact fatigue of intercity multiple unit wheels [J]. *Mechanical*, 2022, 49(10): 42-50.
- [13] Liu Y, Jiang T, Zhao X, et al. Effects of axle load transfer on wheel rolling contact fatigue of high-power AC locomotives with oblique traction rods [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 139. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105748.
- [14] 雷振宇. 电力机车不同廓形车轮踏面损伤预测及动力学响应分析 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
Lei Zhenyu. Electric locomotive wheel tread profile is different damage prediction and dynamic response analysis [D]. Beijing: Building of Beijing University, 2023.
- [15] 刘永锋, 赵旭峰, 栗杨, 等. 轮轨界面低黏着对大功率电力机车车轮滚动接触疲劳的影响 [J]. *铁道学报*, 2022, 44(12): 22-29.
Liu Yongfeng, Zhao Xufeng, Li Yang, et al. Wheel/rail interface low gelling effect on high-power electric locomotive wheel rolling contact fatigue [J]. *Journal of Railway*, 2022, 44(12): 22-29.
- [16] Lyu K, Wang K, 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, 132. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105343.
- [17] 李洪晓, 朱爱华, 杨建伟, 等. 等值同向轮径差对地铁车辆曲线通过能力的影响 [J]. *中国科技论文*, 2022, 17(2): 188-194.
Li Hongxiao, Zhu Aihua, Yang Jianwei, et al. The effect of equivalent same direction wheel diameter difference on the curve passing capacity of subway vehicles [J]. *Chinese Science and Technology Paper*, 2022, 17(2): 188-194.
- [18] 中华人民共和国铁道部. 铁路货车轮对和滚动轴承组装及检修规则 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
Ministry of Railways of the Ministry of Railways of the People's Republic of China. Rules for assembly and maintenance of railway freight car wheel sets and rolling bearings [S]. Beijing: China Railway Press, 1998.
- [19] 中国铁路总公司. 铁总运 [2015] 99 号, 交流传动机车检修技术规程 (试行) [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
China Railway General Corporation. Railway general transportation [2015] No. 99, technical regulations for the overhaul of AC-driven locomotives (Trial) [S]. Beijing: China Railway Press, 2015.
- [20] 蔡宇天, 赵鑫, 陈佳明, 等. 城际动车组车轮 I 类滚动接触疲劳机理研究 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2020, 51(9): 2653-2662.
Cai Yutian, Zhao Xin, Chen Jiaming, et al. Research on the mechanism of type I rolling contact fatigue of the wheels of intercity multiple unit [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(9): 2653-2662.
- [21] 吕凯凯. 大功率电力机车车轮踏面剥离产生机制的理论与试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
Lü Kaikai. High power electric locomotive wheel tread strip theory and experimental study on the generation mechanism [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [22] 刘永锋. 复杂环境下大功率电力机车车轮滚动接触疲劳机理及防治研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
Liu Yongfeng. Research on mechanism and prevention of wheel rolling contact fatigue of high-power electric locomotive in complex environment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.