

文章编号: 1005-0523(2020)01-0009-06

铁道货车车轮轮径差与轮轨力关系的研究

向金兰¹, 曾京², 彭莘宇², 李浩²

(西南交通大学 1.力学与工程学院; 2.牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:以铁路货车转向架转 K6 轮对为主要研究对象, 建立 Simpack 多体动力学模型, 并通过设置相应车轮轮径差, 着重分析轮轨垂向力、横向力及横向位移随轮径差差值变化的变化, 由不同轮径差对应的车轮轮轨力, 分析其相互对应关系。分析结果表明: 当轮对出现轮径差时, 车轮左右轮轨垂向力和横向力都出现相应差值, 且差值随轮径差增大而增长, 出现轮径差的轮对横向位移值也随轮径差变大而增大, 且在一定范围内, 变化差值与轮径差差值基本呈一次线性关系。

关键词:轮径差; 轮轨力; 映射关系; 转 K6; 铁路货车

中图分类号: U272

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.01.002

铁路车辆在运行过程中由于轮轨磨耗不可避免会出现左右车轮轮径产生差值的情况。出于安全的考虑, 一般会对车轮进行定期检修, 以保证差值在车辆安全许可范围内, 但铁道车辆的轮径差差值检测, 传统上基本采用人工下车底测量, 或将车轮拆卸后测量, 耗费大量人力。通过检测车辆的轮轨力, 找到轮轨力与车轮轮径差的对应关系, 由其对应关系, 通过轮轨力便可以较好地反映出车轮运行状态及轮径差的差值大小。基于此思路, 首先制定了相应车轮轮径差, 再由动力学软件模拟车辆运行状态, 输出轮轨力及其他响应值, 最后对其进行分析, 得出车轮轮径差差值与轮轨力的关系。

目前国内外对轮轨力与车轮轮径差的关系研究尚未有准确的定义, 但为大众所知的是, 轮径差的存在一定会导致车轮的左右轮轨力出现差值, 并且出现车辆横移以及轮轴横向力的变化, 但对于它们间存在怎样的对应关系, 怎样找出其对应的数值关系, 国内外有关研究较少。而对于轮轨力测试装置^[1-2]、轮径差对于车辆动力学性能的影响相关研究则相对较多^[3-6], 何彩颖、宋荣荣等^[7]于 2011 年对某 C0-C0 机车的转向架轮对横向轮轨力进行了仿真分析, 并模拟了轮对出现轮径差, 机车制动时轮轨力的变化, 该研究验证了实际运营机车出现轮径差时的真实运营情况, 但是对于轮径差与轮轨力之间的对应关系尚未详细探讨。南京浦镇车辆厂的朱良政、肖天宇^[8]于 2017 年针对轮径差对轨道车辆车轮产生的偏磨影响, 分析了轮径差对轨道车辆车轮磨耗影响受力情况, 并且阐述了轮径差对轮对蠕滑力与磨耗功率的影响。大连交通大学的刘思莹等^[9]研究了轮径差对机车动力学性能及轮轨接触的影响, 通过动力学仿真计算与有限元计算着重分析了轮径差对机车动力学性能的影响及轮径差对于轮轨接触的影响。但他们对于轮径差与轮轨力之间关系的研究并未进行深入的探讨。

1 动力学模型

目前国内铁路货车主要有 C64K, C70, C80 等, 转向架主要为转 K2、转 K6 型转向架, 在本文中, 建立 C70 型货车动力学模型, 转向架采用转 K6 型转向架, 各动力学参数如下。

收稿日期: 2019-07-05

作者简介: 向金兰(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为接触力学。

通讯作者: 曾京(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为车辆系统动力学。

车体质量 14.2 t, 载重 70 t, 车辆定距 9.21 m, 其他参数如表 1 所示; 由于研究内容仅关注同一轮对轮径差与轮轨之间对应关系, 根据中国关于货车同一轮对的轮径差限值 ≤ 1 mm, 考虑实际运营中可能出现的情况, 动力学模型中建立车辆-轴轮对轮径差分别为 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 mm, 且以右轮轮径小于左轮轮径情况设定轮径差; 考虑到实际测量轮轨力装置设置为运煤专线的空车线路, 故而车辆设置为空载运行, 车辆运行速度为 80 km/h。

线路设置为 1 000 m 直线轨道, 分不施加激励的简单轨道及施加美国五级谱的有激励一般轨道, 动力学模型如图 1 所示。

表 1 货车车辆参数
Tab.1 Vehicle parameters of goods vehicles

项目	空车	重车
车体质量/kg	14 200	84 200
车体相对于 x 轴转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	2.09E4	1.17E5
车体相对于 y 轴转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	2.37E5	1.37E6
车体相对于 z 轴转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	2.43E5	1.38E6
车体质心高(距轨面)/m	1.466	2.130
车辆定距/m	9.21	
心盘直径/m	0.375	
旁承跨距/m	1.52	
心盘面自由高(距轨面)/mm	694	
空车心盘面距轨面/mm	680	

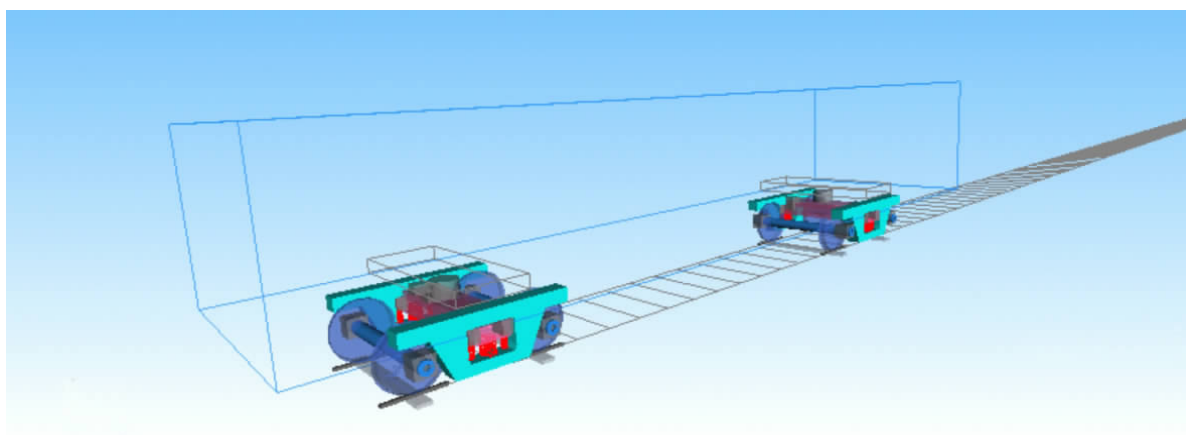


图 1 C70 货车动力学模型
Fig.1 C70 truck dynamics model

由于主要研究内容为探寻轮轨力与轮径差的关系, 故而可以先由理想轨道模型整理得到大致关系, 再添加轨道激励, 考虑实际情况因素来验证该关系是否合理, 最终得出结论。轮径差主要识别内容只是单一轮对, 且只需获得同一轮对左右两轮的轮轨力值进行研究, 车辆其他性能暂不进行考虑, 故在此仿真中只设置单一轮对的轮径差进行仿真求解, 同时为了简化计算, 车轮设置为刚性体, 暂不考虑车轮弹性对轮轨力的影响, 轮径差设置于车辆前进方向的一位轮对, 步长 0.5 mm, 范围为 0~5 mm。

2 无激励普通轨道轮轨力仿真结果

对上述工况进行仿真计算,并取同激励情况下不同轮径差的轮对响应值进行对比。为了方便分析,先取无激励轨道的轮对左右侧车轮轮轨垂向力、轮轨横向力,有轮径差轮对及正常轮对的横向位移量,两轮对轮轴横向力进行对比分析。选取同类型参数不同工况数据对比,由仿真分析得到的数据如图 2~图 6 所示。

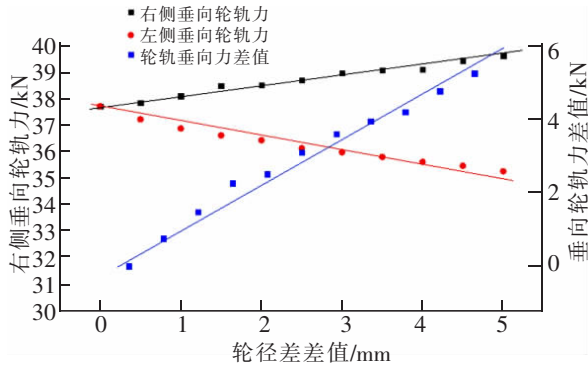


图 2 轮径差及左右车轮轮轨垂向力对应关系

Fig.2 The relationship between wheel diameter difference and vertical force of left and right wheels

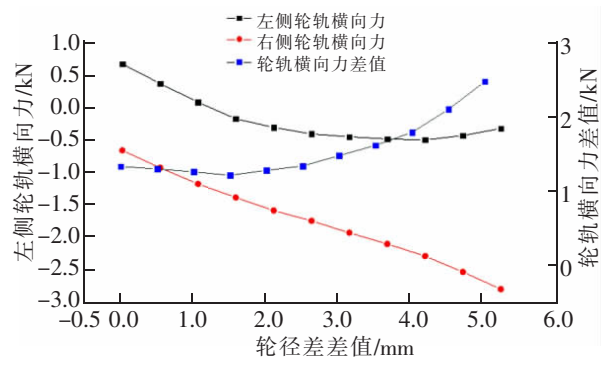


图 3 轮径差及左右车轮轮轨横向力对应关系

Fig.3 The relationship between wheel diameter difference and lateral force of left and right wheel and rail

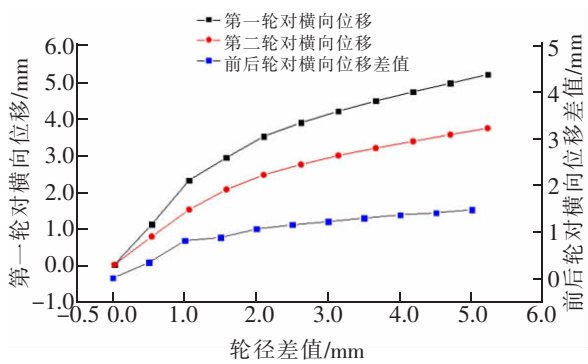


图 4 轮径差及前后轮对横向位移对应关系

Fig.4 The relationship between wheel diameter difference and lateral displacement of front and rear wheel pairs

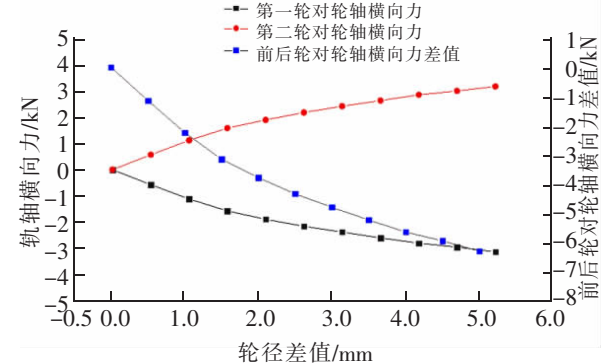


图 5 轮径差及前后轮对轮轴横向力对应关系

Fig.5 The relationship between wheel diameter difference and lateral force of front and rear wheelsets

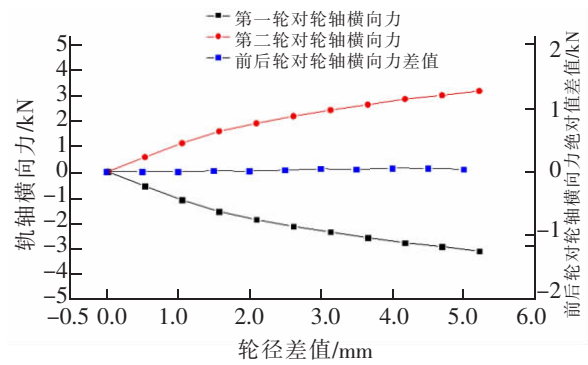


图 6 轮径差及前后轮对轮轴横向力对应关系(绝对值差值)

Fig.6 Correlation between wheel diameter difference and lateral force of front and rear wheelset axle (absolute value difference)

分析数据不难得出一个规律:轮径差差值与轮轨力存在对应关系,并且由于轮径差的影响,轮轨垂向力、横向力、轮对横移量、轮轴横向力都会因轮径差差值变化而变化。轮轨垂向力的关系在图 2 中表现最为明显,随右轮滚动圆直径的减少,右侧车轮的轮轨垂向力基本呈直线增长,而左侧车轮轮轨垂向力基本呈直线减少,左右侧轮轨力差值 FZ 与轮径差关系 x 呈现为一次函数

$$F_z \approx Ax+B \quad (\text{其中 } A, B \text{ 为待定值}) \quad (1)$$

从其他响应特征来看,基本也呈同样的趋势:右侧车轮轮轨横向力随着轮径差的增大而增大,左侧车轮则随轮径差变大而减小,而随着轮

对左右轮径差的增大,车轮轮轨横向力的增长速度也随着增长,左右侧轮轨横向力差值 F_y 与轮径差差值 x 之间关系体现为二次曲线关系

$$F_y \approx Ax^2 + Bx + C \quad (\text{其中 } A, B, C \text{ 为待定值}) \quad (2)$$

此外,出现轮径差的横向位移要比正常轮对横向位移要大,并且轮对的偏移方向为向轮径值较小的车轮一侧偏移,也呈一次函数关系。

在轮轴横向力方面,由于输出响应值为同一转向架前后轮对轮轴横向力,前后两轮对的轮轴横向力基本呈相反数状态,不过随着轮径差的增大,轮对的轮轴横向力也逐步增大,单个轮对轮轴横向力 F_{sumy} 与轮径差 x 之间的关系同样呈现为一次函数形式。

由轮径差造成的轮对响应变化关系在输出的轮轨垂向力、横向力、轮轴横向力及轮对横向位移均有体现,并且分析能得到较为理想的对应关系。这里的仿真计算中,轨道是无激励无缺陷的理想轨道,在实际中,是难以得到这样的理想效果的,因而需要对轨道施加激励后,再来验证轮轨力与轮径差之间是否依然遵守上述规律。

3 美国五级谱轨道激励情况下的轮轨力输出

由于上述分析建立在无激励情况下,而实际应用中很难得到理想的轨道状态,真实情况中需考虑轨道随机不平顺对车辆轮轨力的干扰。因此以国际通用的美国五级谱(详见参考文献[9])作为轨道不平顺输入,重新进行仿真。

3.1 美国五级谱激励情况下左右轮轨垂向力对比

设置同样轮径差差值进行仿真并输出同一轮对的左右轮轨力(此处选择轮轨力的均值作为主要参数)进行分析,结果见图7~图8(方格点线图为右侧轮轨力,圆点线图为左侧,下同)。

由轮轨垂向力分析可以得到:在美国五级谱激励情况下,同一轮对的左右轮轨垂向力也同样出现了与无轨道激励同样的波动趋势,左右轮轨垂向力差值与轮径差差值还是基本呈正比例关系,这与无轨道激励时的轮轨垂向力响应关系基本一致。

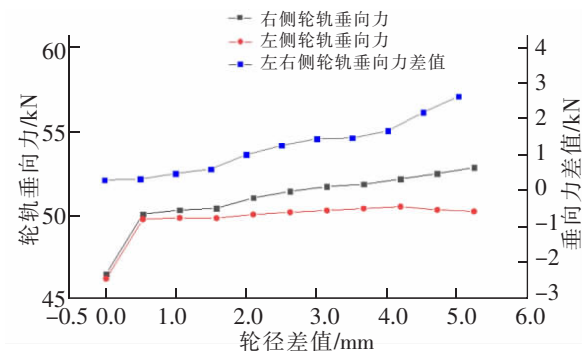


图7 轮径差及左右侧轮轨垂向力对应关系图(有激励)

Fig.7 Diagram of wheel diameter difference and vertical force on left and right side of wheel rail (with excitation)

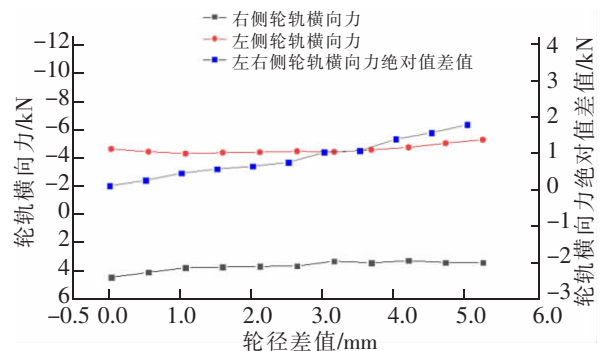


图8 轮径差及左右侧轮轨垂向力对应关系图(有激励)

Fig.8 Diagram of wheel diameter difference and vertical force on left and right side of wheel rail (with excitation)

由数据整理可以大致得到车辆在空车情况下,左右侧轮轨垂向力差值 F_z 与轮径差 x 之间的一次函数关系式为

$$F_z \approx 0.44x + 0.102 \quad (3)$$

3.2 美国五级谱激励情况下左右轮轨横向力对比

与2.2节中输出轮轨力相似,仿真整理后得到以下结果:

在具有轨道激励的情况下,横向轮轨力出现较大振动,并不能直接得到一个确定的轮轨力值,如图9,图10中的轮轨力值为车辆处于稳定运行状态的轮轨力均值。

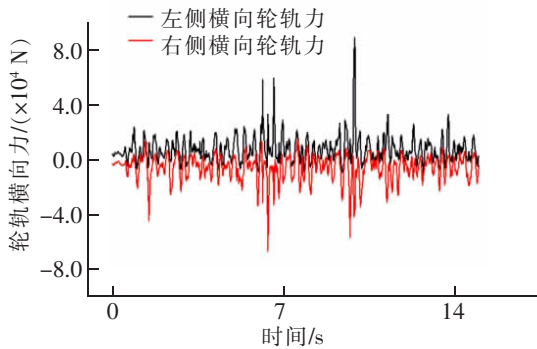


图 9 2.5 mm 轮径差横向轮轨力时域图(有激励)
Fig.9 Lateral wheel/rail force time domain diagram of wheel 2.5 mm diameter difference (with excitation)

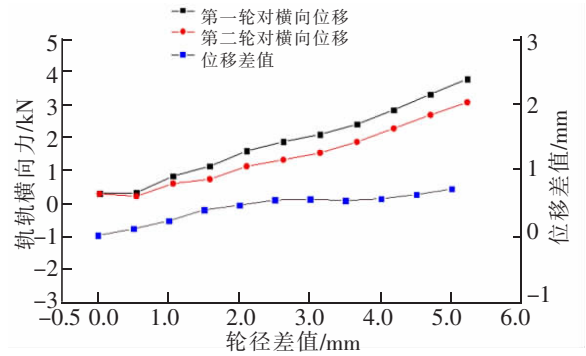


图 10 轮径差及前后轮对横向位移对应关系图(有激励)
Fig.10 Diagram of corresponding relationship between wheel diameter difference and lateral displacement of front and rear wheel pairs (with excitation)

从数据来看横向力对于轮径差响应更为敏感,没有轮径差时,轮对左右横向轮轨力数值一致,但当轮径差增大时,左右轮轨力差值有明显差异变化,2.5 mm 轮径差时,左右轮轨横向力数值差为 0.743 kN,并且随着轮径差的增大,差值也随着增大,4 mm 时对应 1.381 kN,5 mm 对应 1.776 kN。这里的轮轨力变化规律与无轨道激励时的轮轨力变化规律基本一致。从图 8 来看,左右侧轮轨横向力差值 F_y 与轮径差关系 x 更表现为一次函数关系,与无激励情况下有所差别,但依然可以拟合为二次函数,其关系式表达为

$$F_y \approx 0.000 14x^2 + 0.374 5x - 0.1 \quad (4)$$

3.3 前后轮对响应特征对比

同样地,分析在美国五级谱激励情况下的轮对横向位移及轮轴横向力响应规律,仿真结果整理得到图 11。

在轨道谱激励情况下,当轮对出现轮径差时,轮对的前后横移量及轮轴横向力变化趋势基本与无轨道激励时保持一致。数据整理,代入对应函数关系式中,得到轮对横向位移 Y 与轮径差差值 x 之间的关系式为

$$Y \approx 0.094 4x + 0.238 \quad (5)$$

轮对轮轴横向力 F_{sumy} 与轮径差差值 x 对应关系式

$$F_{sumy} \approx 0.288x + 0.345 \quad (6)$$

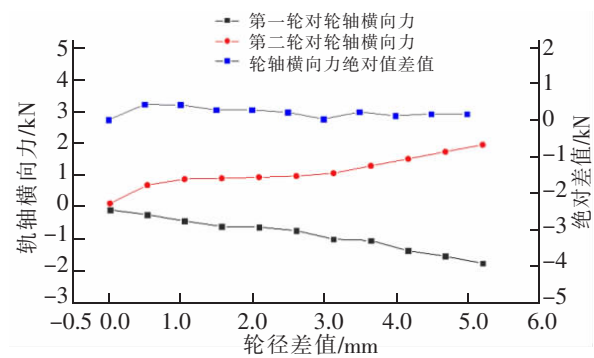


图 11 轮径差及前后轮对轮轴横向力对应关系图(有激励)
Fig.11 Relational diagram of wheel diameter difference and lateral force of front and rear wheel pairs (with excitation)

4 结论

由上述分析可以得到:当轮对出现轮径差时,车轮轮轨垂向力、轮轨横向力、轮对的横向位移以及轮对轮轴力都会出现较大变化,并且随着轮径差的增大,上述参量也随着轮径差的增大而增大,且在一定范围内呈线性关系变化。国内相关标准^[1]规定同一轮对的左右轮径差差值不得超过 1 mm,由本文推导得到的关系式大致可以得到一个准许轮轨力评定值,可以为实际间接测量轮径差差值提供一定参考。

参考文献:

[1] MEHRAN TORABI S, MOHAMMAD MOUSAVI G, DAVOOD YOUNESIAN 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.

- [2] RUIPING Z, WEIHUA M, SHIHUI L. 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: 1–11.
- [3] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 轮径差对车辆系统稳定性的影响[J]. 中国铁道学报, 2008(6): 65–70.
- [4] 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(6): 47–53.
- [5] 蒋益平, 朱海燕, 杨春辉. 空气弹簧失气后地铁车辆动力学性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(2): 41–46.
- [6] 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): 42–46.
- [7] 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(7): 57–63.
- [8] 朱良政, 肖天宇. 轮径差对轨道车辆车轮磨耗影响及改善方案研究[J]. 工程设备与材料, 2017(10): 130–131.
- [9] 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.
- [10] 罗仁, 石怀龙. 铁道车辆系统动力学及应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018: 149–154.
- [11] 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.

Research on the Relationship Between Wheel Diameter Difference and Wheel/Rail Force of Railway Freight Car

Xiang Jinlan¹, Zeng Jing², Peng Xinyu², Li Hao²

(1.School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2.State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Taking K6 wheelset of railway freight car bogie as the main research object, the Simpack multi-body dynamics model was established. By setting the corresponding wheel diameter difference, the change of wheel/rail vertical force, transverse force and lateral displacement with the change of wheel diameter difference was emphatically analyzed, and the corresponding relationship of wheel/rail force corresponding to different wheel diameter difference was analyzed. Analysis results show when the wheel diameter difference appears, wheel vertical force and lateral force on the contact surfaces have the corresponding difference, and the difference increases with the increase of wheel radius. The lateral displacement of the wheelset with wheel diameter difference also increases with the increase of wheel diameter difference, and within a certain range, the variation difference is basically linear with the wheel diameter difference.

Key words: wheel diameter difference; wheel-rail force; corresponding relationship; K6 wagon bogie; wagon car