

轮径差对铁路货车动力学性能影响研究

窦随权¹ 丁颖² 徐力³

(1 西南交通大学摩擦学研究所 四川 成都 610031; 2 国能铁路装备有限责任公司 北京 100011;
3 中车长江车辆有限公司 湖北 武汉 430212)

摘要:为研究轮径差对铁路货车动力学性能的影响,以某型敞车为研究对象,建立车辆动力学仿真模型,分析不同轮径差工况下车辆的平稳性和安全性等动力学性能指标。结果表明:在不同轮径差工况下,车辆的轮轴横向力和垂向平稳性指标变化较小,车辆的横向平稳性指标、脱轨系数和轮重减载率大大增加,严重时 would 超过车辆的安全限度。因此,为了保证铁路货车的运行稳定性和安全性,应对车辆轮径差限度值进行重点监控,尤其是等值反相轮径差限度。

关键词:轮径差;动力学分析;安全性

0 引言

受车轮机加工误差和轮轨磨损等影响,铁路货车车轮不可避免会存在轮径差。当轮径差达到一定程度后,会严重影响铁路货车运行的平稳性和安全性。关于轮径差对车轮磨损和动力学性能的影响已有较多学者进行了分析。池茂儒等^[1]研究了轮径差对车辆运行安全性的影响趋势,并对比了转向架前后轮对同相轮径差和反相轮径差的影响程度。李艳等^[2]针对实际运营线路中的某动车组,分析了不同时期踏面磨损变化和轮径差变化对车辆运行平稳性和安全性的影响。蒋益平等^[3]研究了各种轮径差组合对地铁车辆动力学性能的影响。韩鹏等^[4]认为轮径差会导致滚动半径差函数和轮轨接触点的改变,从而影响高速列车的动力学性能。李润华等^[5]对具有初始轮径差的高速列车转向架进行了动力学仿真分析,并根据仿真结果对高速列车转向架初始轮径差的限度进行了研究。刘思莹等^[6]通过建立机车动力学模型和轮轨接触弹塑性有限元模型,分析同轴轮径差对机车动力学性能的影响及对机车轮轨接触的影响。

本文在已有研究的基础上,以实际运营线路中的某型敞车为研究对象,采用多体动力学软件 SIMPACK 建立该敞车动力学模型,研究分析轮径差变化对铁路货车车辆动力学性能的影响。

1 轮径差形式

铁路车辆实际运营过程中,轮径差的表现形式虽然各不相同,但基本可以通过图1中四种典型轮径

差形式组合得到^[1]。在图1a中,转向架前后轮对具有等值同相轮径差,车辆运行时,前后轮对将向同一侧偏移,不会引起转向架大幅度的偏转,转向架前后轮对的冲角较小,对车辆运行安全性影响较小。在图1b中,转向架前后轮对具有等值反相轮径差,车辆运行时,前后轮对将向相反方向偏移,必然引起转向架大幅度的偏转,转向架其中一个轮对的冲角较大,将极大地影响车辆运行安全性。在图1c和图1d中,转向架前后轮对中只有一个轮对具有轮径差,它引起转向架的偏转幅度应小于图1b中等值反相轮径差,因此图1c和图1d的车辆运行安全性应介于图1a和图1b之间。根据上述分析,本文研究轮径差对铁路货车动力学性能的影响时,仅考虑转向架具有等值同相轮径差和等值反相轮径差两种轮径差形式。

2 轮径差对动力学性能的影响

2.1 动力学模型

以某型敞车空车为研究对象,根据该车辆的动力学计算参数,在 SIMPACK 软件中建立车辆动力学仿真模型,如图2所示。在建模过程中考虑轮轨接触几何关系为非线性单点接触,其中踏面采用 LM 型踏面,轨头采用 60kg 轨。

2.2 轮径差设置

文中计算模型轮径差的设置主要考虑了无偏差、等值同相轮径差 2mm、等值同相轮径差 4mm、等值反相轮径差 2mm 和等值反相轮径差 4mm 等五种情况,具体轮径差工况定义见表1。

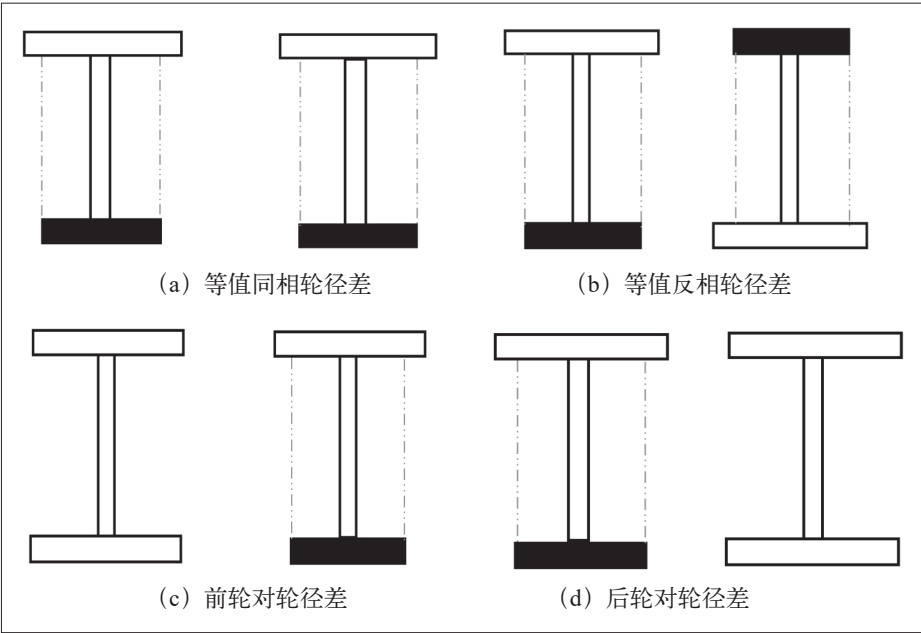


图 1 轮径差形式

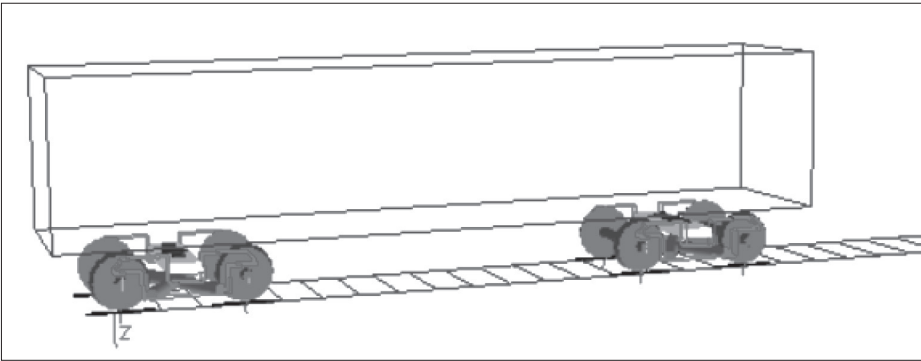


图 2 动力学模型图

2.3 轮径差对车辆直线运行性能的影响

车辆的直线运行性能包括车辆的运行平稳性和运行安全性，车辆运行平稳性采用 GB/T 5599-2019 中的横向平稳性和垂向平稳性指标进行评价，车辆运行安全性依据 GB/T 5599-2019 采用轮轴横向力、脱轨系数和轮重减载率等指标进行评价。计算车辆直线运行性能时，车辆运行线路为直线轨道，运行速度分别为 80km/h、100km/h 和 120km/h，轨道不平顺激励为美国 5 级谱。考虑前述五种轮径差工况下，

车辆各项动力学性能指标计算结果见表 2，并列于图 3 ~ 图 7。

由表 2 和图 3 可见，车辆直线运行时，轮径差变大后，车体横向平稳性指标明显变大，轮径差达到 4mm 时，车体横向平稳性已超过 3.5，平稳性指标由优良变为合格。车辆等值同相轮径差和反相轮径差对车体横向平稳性指标的影响基本一致。由图 4 可见，车辆轮径差变大后，车体垂向平稳性指标变化不大。

由图 5 可以看出，车辆轮径同相偏差时，随着轮径差和运行速度的变大，最大轮轴横向力急剧变大；车辆轮径异相偏差时，由于转向架运行姿态发生变化，轮轴横向力稍有增加。

由表 2 和图 6、图 7 可见，车辆轮径差的变化对车辆脱轨系数和轮重减载率的影响特别明显。车辆轮径同相偏差时，随着轮径差和运行速度的增大，车辆脱轨系数和轮重减载率逐渐增大，车辆脱轨系数最大达到 0.901，小于 1.0；车辆轮重减载率最大

达到 0.472，小于 0.65，与 GB/T 5599-2019 标准规定的安全指标范围很接近。当车辆轮径反相偏差为 2mm 时，车辆最大脱轨系数为 0.977，小于 1.0，还处于安全指标范围内，但是轮重减载率在车辆速度达到 120km/h 时达到 0.783，已超出了 0.65 的安全限度标准，车辆有脱轨风险。当车辆反相轮径差达到 4mm 时，车辆的最大脱轨系数达到 1.423，大于 1.0；车辆最大轮重减载率 0.927，大于 0.65，均已超出 GB/T 5599-2019 的安全范围，车辆脱轨风险急剧增

表 1 轮径差工况定义

工况	定义	描述
1	无轮径差	一位和二位转向架左右轮直径相等
2	等值同相轮径差 2mm	一位和二位转向架左边车轮直径较右边车轮直径差 2mm
3	等值同相轮径差 4mm	一位和二位转向架左边车轮直径较右边车轮直径差 4mm
4	等值反相轮径差 2mm	一位和二位转向架的 1 位和 4 位车轮直径较 2 位和 3 位车轮直径差 2mm
5	等值反相轮径差 4mm	一位和二位转向架的 1 位和 4 位车轮直径较 2 位和 3 位车轮直径差 4mm

表 2 不同轮径差工况下车辆直线运行动力学仿真结果

轮径差 工况	运行速度 / (km/h)	横向 平稳性	垂向 平稳性	轮轴横 向力 /kN	脱轨 系数	轮重 减载率
1	80	2.394	2.491	5.611	0.163	0.251
	100	2.69	2.916	7.838	0.229	0.302
	120	3.072	3.45	10.403	0.433	0.352
2	80	2.891	2.491	14.523	0.883	0.379
	100	3.262	2.923	16.596	0.879	0.386
	120	3.394	3.496	19.265	0.901	0.415
3	80	3.065	2.491	17.16	0.834	0.43
	100	3.601	2.937	20.332	0.866	0.437
	120	3.621	3.591	22.071	0.872	0.472
4	80	2.903	2.501	8.072	0.772	0.525
	100	3.271	2.942	8.379	0.911	0.564
	120	3.385	3.485	12.764	0.977	0.783
5	80	3.009	2.589	9.331	1.423	0.733
	100	3.433	3.095	12.004	1.418	0.761
	120	3.596	3.598	14.302	1.407	0.927

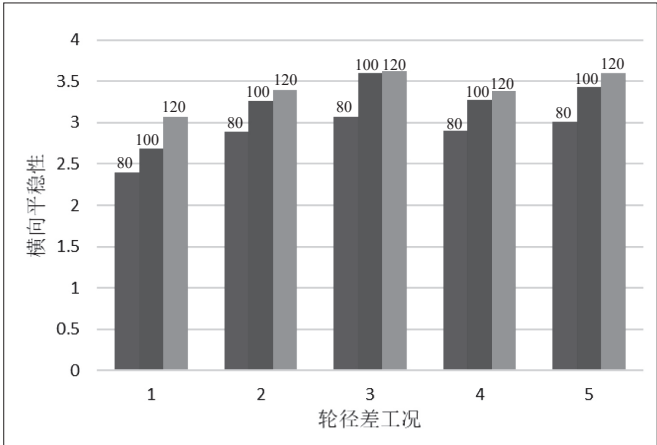


图 3 不同轮径差工况下车体横向平稳性指标变化

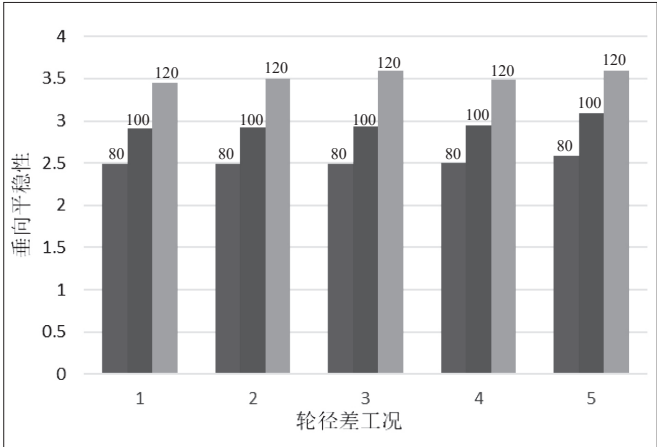


图 4 不同轮径差工况下车体垂向平稳性指标变化

加。
2.4 轮径差对车辆曲线运行安全性的影响

采用前述动力学仿真模型分析车辆不同轮径差工况下的曲线通过性能。曲线线路设置见表 3。由于仿真分析模型建立时未考虑左右车轮轮径差为负值的情况，因此曲线线路设置时考虑了左曲线和右曲线两种情况。

曲线通过性能计算时线路不平顺采用美国 5 级谱，车辆的运行安全性指标，如轮轴横向力、脱轨系数和轮重减载率的仿真分析结果见表 4，并绘于图 8 ~ 图 10。

由表 4 和图 8 的最大轮轴横向力的仿真结果可以看出，车辆通过右曲线时，等值同相轮径差越大，

轮轴横向力越大；等值反相轮径差变大，轮轴横向力变化不大。这是由于等值同相轮径差建模时左轮比右车轮径小，车辆通过右曲线时，轮径差越大，车辆越向左边偏移，导致轮轴横向力变大。车辆通过左曲线时，随着轮径差的增大，轮轴横向力有变小趋势。

表 3 曲线线路设置

曲线半径 /m	超高 /mm	缓和曲线长度 /m	圆曲线长度 /m	运行速度 / (km/h)
400 (左曲线)	100	60	100	80
400 (右曲线)	100	60	100	80

表 4 不同轮径差下车辆曲线运行指标仿真结果

轮径差 工况	曲线 半径 /m	轮轴横 向力 /kN	脱轨 系数	轮重 减载率
1	400 (左曲线)	17.653	0.503	0.59
	400 (右曲线)	10.889	0.304	0.425
2	400 (左曲线)	14.903	0.862	0.412
	400 (右曲线)	17.408	0.883	0.545
3	400 (左曲线)	17.796	0.795	0.432
	400 (右曲线)	18.838	0.887	0.562
4	400 (左曲线)	11.773	0.663	0.808
	400 (右曲线)	8.806	0.821	0.533
5	400 (左曲线)	10.861	1.526	0.903
	400 (右曲线)	11.695	1.468	0.729

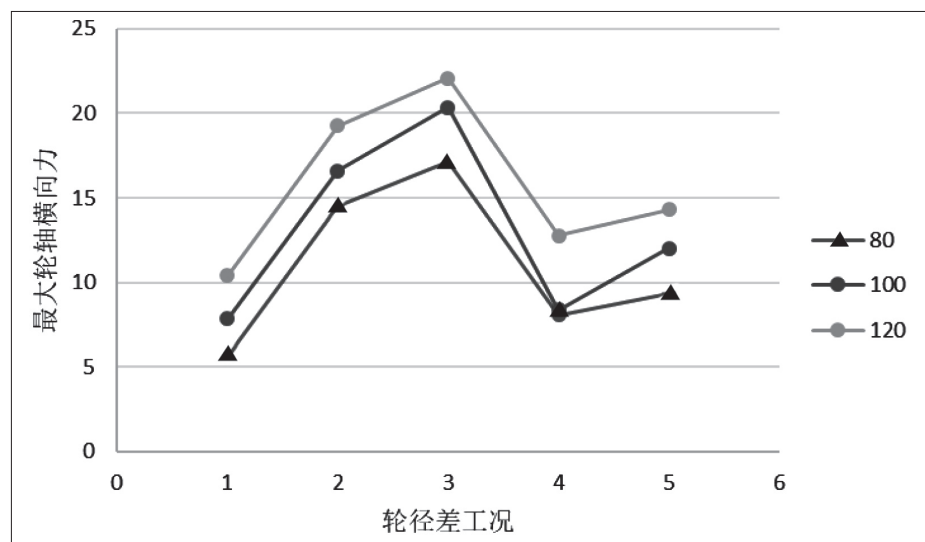


图5 不同轮径差工况下车辆轮轴横向往力指标变化

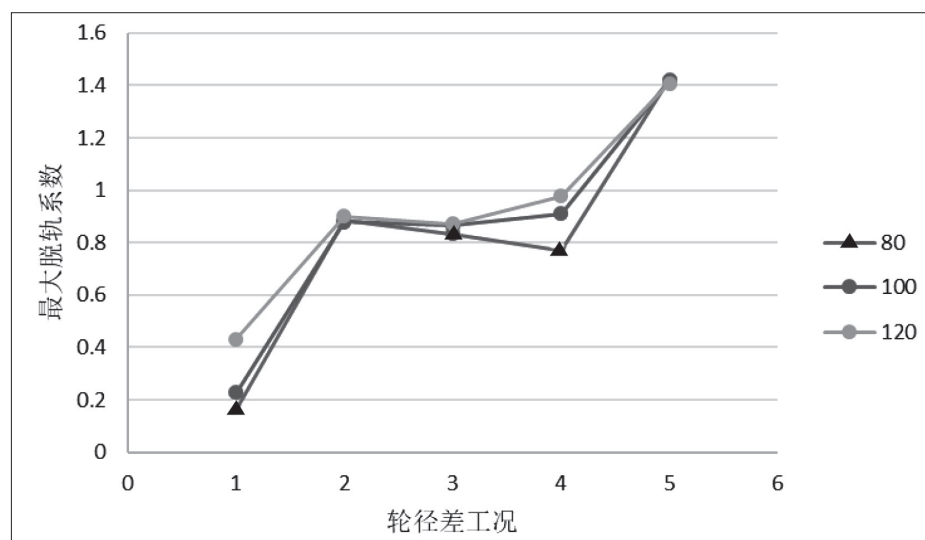


图6 不同轮径差工况下车辆脱轨系数指标变化

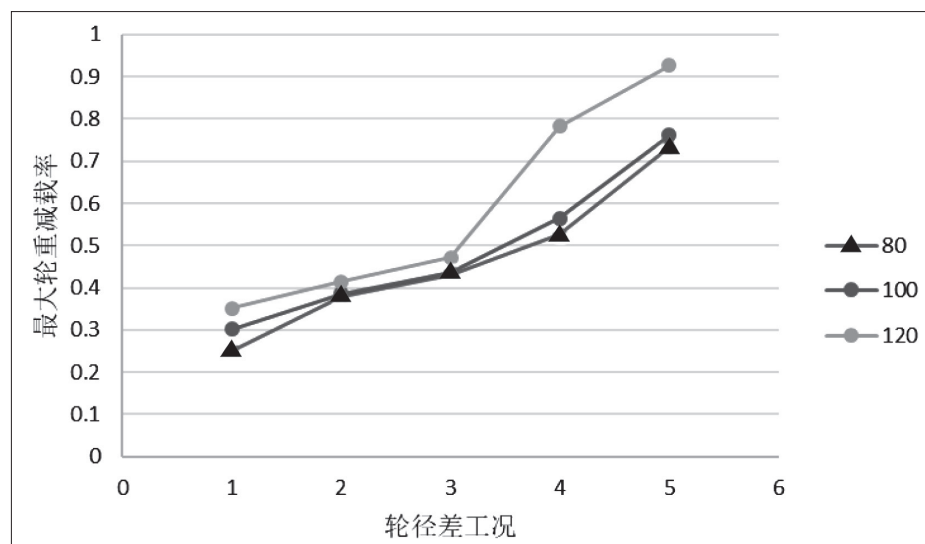


图7 不同轮径差工况下车辆轮重减载率指标变化

由表4和图9的仿真结果可以看出,车辆通过左曲线和右曲线时,随着等值反向轮径差的增大,脱轨系数急剧增大。当等值反相轮径差为4mm时,车辆的最大脱轨系数为1.526,超出其限度值1.2,车辆有严重脱轨风险。

由表4和图10的仿真结果可以看出,车辆通过左曲线时,等值同相轮径差工况下,轮重减载率会变小。等值反相轮径差工况下,车辆最大轮重减载率达到0.903,大大超出其安全限度标准0.65,车辆有严重脱轨风险。车辆通过右曲线时,等值同相轮径差工况下,轮重减载率会略微增加,等值反相轮径差工况下,车辆的轮重减载率会增大,最大轮重减载率达到0.729,超出GB/T 5599-2019规定的安全标准0.65,车辆有严重的脱轨风险。

3 结语

通过对不同轮径差工况下的铁路货车直线运行性能和曲线通过安全性进行动力学分析,分析结果表明:

(1) 车辆直线运行时,随着轮径差的增大,横向平稳性指标、轮轴横向往力、脱轨系数和轮重减载率会变大,垂向平稳性指标变化不大。车辆等值同相轮径差变大时,对车辆轮轴横向往力影响较大;车辆等值异相轮径差变大时,对车辆脱轨系数和轮重减载率影响较大。

(2) 车辆通过曲线时,随着轮径差的增大,脱轨系数和轮重减载率均会增加,当轮径差达到一定限度时,车辆的脱轨

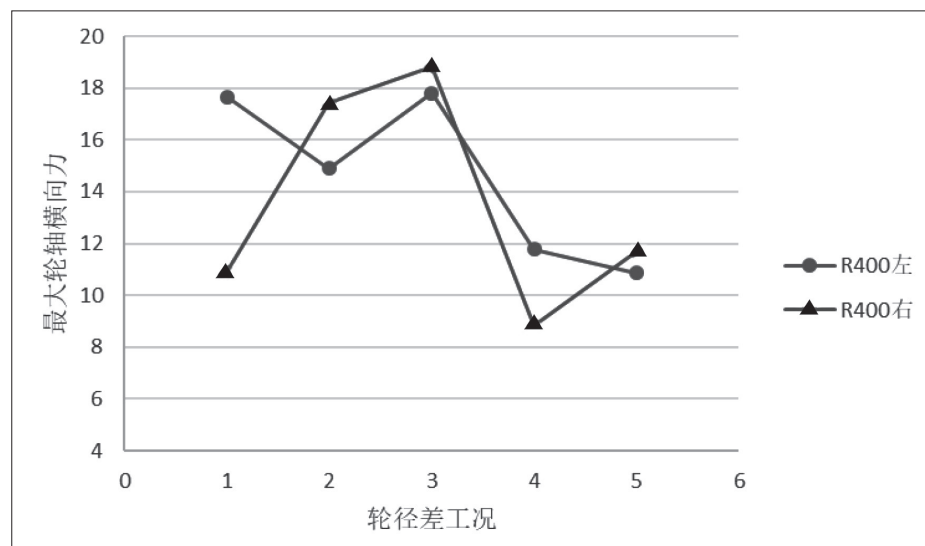


图8 不同轮径差工况下车辆曲线通过时最大轮轴横向力变化图

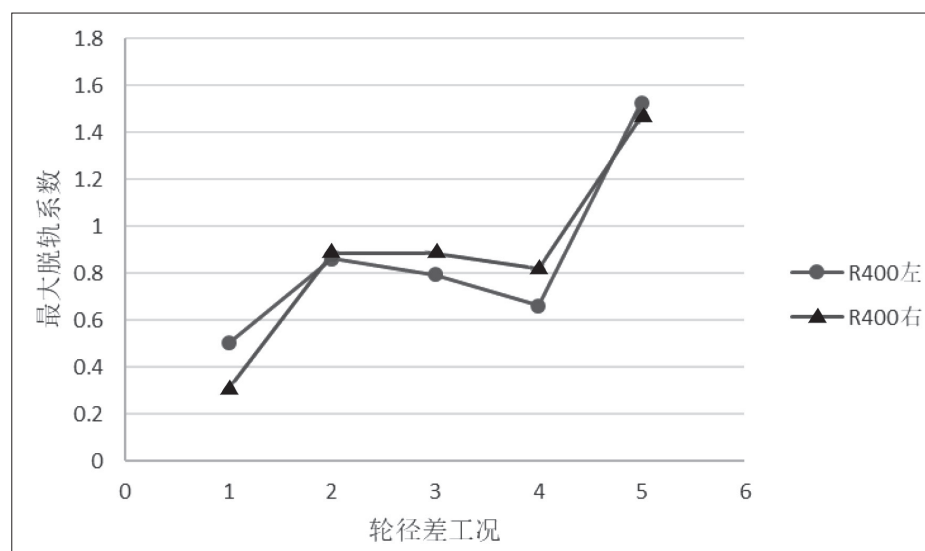


图9 不同轮径差工况下车辆曲线通过时最大脱轨系数变化图

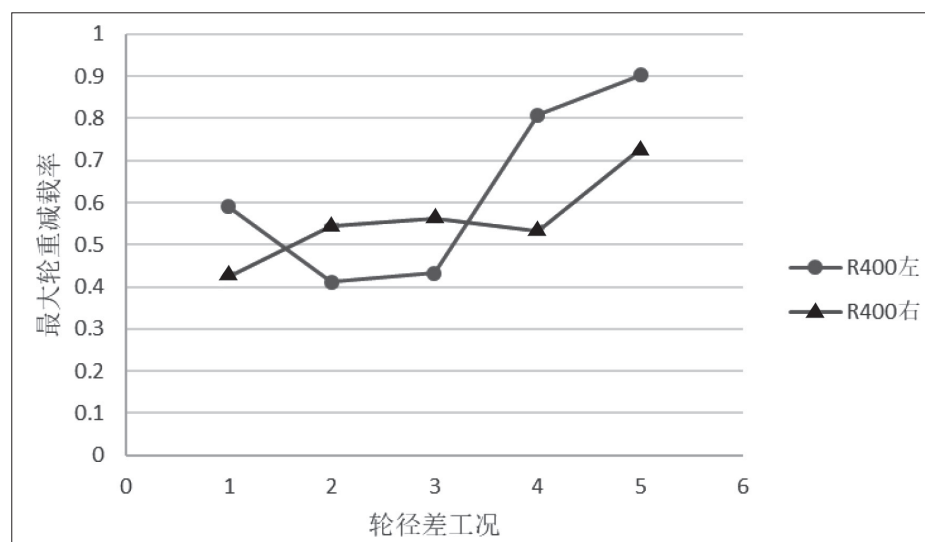


图10 不同轮径差工况下车辆曲线通过时最大轮重减载率变化图

系数和轮重减载率将会超出标准规定的安全限度，车辆有严重的脱轨风险。

(3) 与等值同相轮径差相比，等值反相轮径差对车辆运行安全性的影响更大。铁路货车轮径差的定期监测很有必要，需要严格控制车辆轮径差的限度，尤其是车辆反相轮径差的限度，以保证铁路货车的安全运行。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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] 李润华, 宋勇增, 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.
- [6] 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.