

# 不同速度下的重载车辆运行安全性分析

贾 军

中国神华能源股份有限公司轨道机械化维护分公司, 天津  
Email: 564137585@qq.com

收稿日期: 2021年8月13日; 录用日期: 2021年9月22日; 发布日期: 2021年9月29日

## 摘 要

建立重载货车-轨道耦合动力学模型, 计算重载货车在小半径曲线以不同速度通过时的安全性指标, 分析重载铁路不同速度运行时的列车安全性。结果表明: 以50 km/h速度条件下仿真的最大垂向力、最大横向力分别为180 kN、40 kN, 最大脱轨系数及最大减载率分别为0.29、0.38, 皆小于规范限值规定, 且保留一定的安全储备; 速度提高时, 轮轨垂向力变化不大, 轮轨横向力、脱轨系数、减载率均随速度增大而增大, 且外轨增幅大于内轨增幅; 对比现场试验结果, 仿真结果略大于现场试验结果, 但二者均在安全限值之内, 仿真结果偏安全。

## 关键词

重载铁路, 养护维修, 列车速度, 动力学, 运行安全性

# Analysis on Running Safety of Heavy-Haul Vehicle with Different Speed

Jun Jia

Track Mechanization Maintenance Branch of China Shenhua Energy Co., Tianjin  
Email: 564137585@qq.com

Received: Aug. 13<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2021; published: Sep. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

A dynamic model coupled with heavy-haul freight car and track was established to calculate the operation safety index of the heavy-haul freight car passing through sharp radius curve with different speed. And the operation safety of the train was analyzed. The results show that the maximum vertical force and lateral force were 180 kN and 40 kN respectively at the train speed of 50 km/h. The maximum derailment coefficient and the maximum load shedding rate are 0.29 and

0.38 respectively, which are all less than the standard limit value, and certain safety reserve is reserved; when the speed increases, the wheel rail vertical force changes little, and the wheel rail lateral force, derailment coefficient and load shedding rate increase with the increase of speed, and the increase of the outer rail is greater than the increase of the inner rail; compared with the field test results, the simulation results are slightly larger than the field test results, but both of them are within the safety limit, and the simulation results are relatively safe.

## Keywords

Heavy Haul Railway, Maintenance, Train Speed, Dynamic, Operation Safety

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国重载铁路货物运输的高速发展,为适应不断增长的货运需求,重载铁路不断地往大轴重、大长度、高速度的方向发展,在此背景下带来的重载铁路安全性问题也随之产生。国内已有不少学者针对重载铁路的安全性问题进行仿真分析,杨春雷等[1]建立了曲线轨道的重载铁路货车-轨道耦合动力学模型,分析了曲线半径、缓和曲线长度和外轨超高等曲线几何参数对重载货车轮轨动力作用的影响。杨轶科等[2]建立了重载铁路车辆-轨道耦合动力学模型,计算分析了小半径曲线区段接头不平顺激励下的轮轨动力响应。王景涛等[3]通过 SIMPACK 建立货运列车模型,分析了货物重心的横向偏移对货车通过曲线的安全性影响。孙海富[4]建立动力学仿真模型,分析了重载铁路列车通过不同曲线半径的安全性指标,提出了重载铁路最小曲线半径选择的标准。随着重载运输的发展,列车速度的提高特别是养护维修后列车速度的提高成为趋势,已有研究较少从理论上分析重载铁路在不同速度下的安全性问题。

本文以我国某重载铁路典型曲线段的条件下进行仿真分析,结合现场试验的结果,模拟重载铁路现场工况,对重载货车在不同速度运行下的安全性指标进行检算,为重载铁路提高列车开通速度提供理论依据。

## 2. 仿真计算模型与方法

### 2.1. 车辆与线路条件

#### 2.1.1 车辆条件

试验段重载铁路车辆大多采用 C80 货车, C80 型煤矿专用敞车是我国专门为重载铁路而设计制造的专用敞车,有 C80、C80A、C80B、C80C 型系列。其主要职能是运载煤炭。同时其也是为货车提高运量而设计重载型货车。C80 敞车是浴盆漏斗式卸载结构,采用了全不锈钢车体以及旋转式车钩。采用旋转式车钩。C80 型敞车,载重 80 t,自重小于 28 t,容积 87 m<sup>3</sup>,车辆长度 1200 cm。货车类型见图 1。

#### 2.1.2. 轨道条件

仿真模型设置曲线半径 600 米,采用如图 2 所示的线路条件。

### 2.2. 重载货车-轨道耦合动力学模型

采用车辆-轨道耦合动力学理论,建立了重载货车-有砟轨道空间耦合动力学模型,如图 3 所示。



Figure 1. Truck type  
图 1. 货车类型

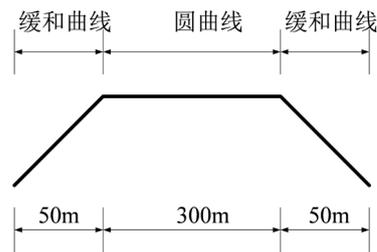


Figure 2. Schematic diagram of plane curve during simulation analysis  
图 2. 仿真分析时平面曲线示意图

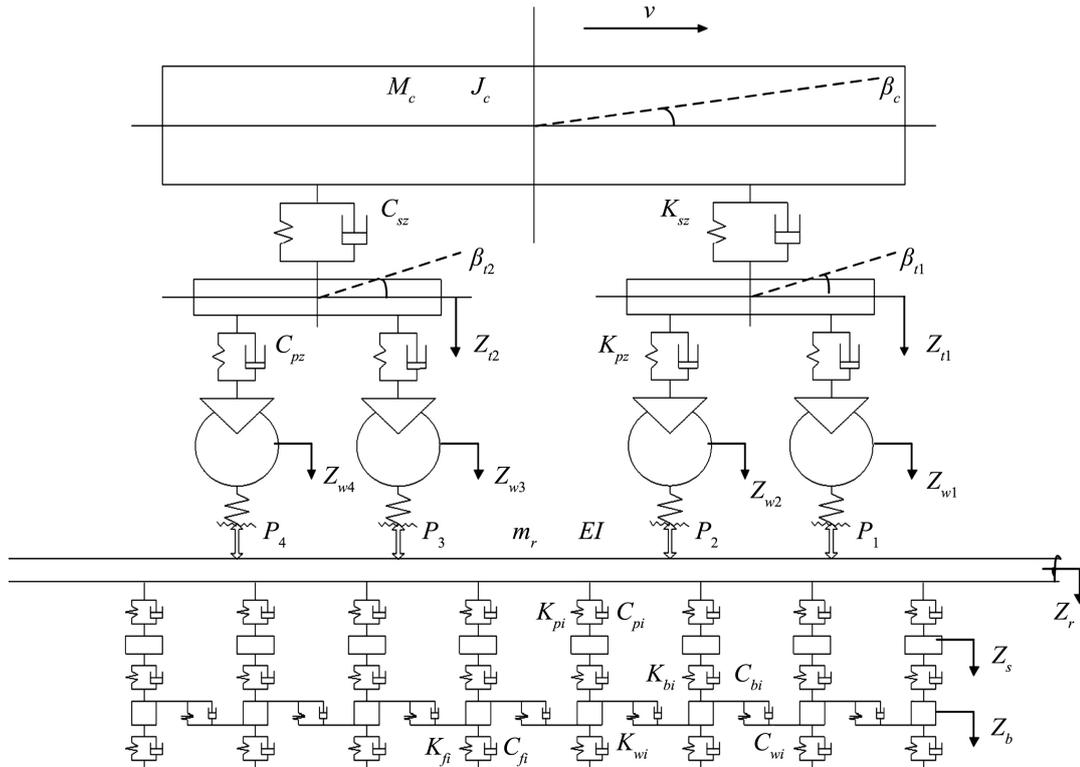


Figure 3. Front view of freight car ballast track spatial coupling model  
图 3. 货车车辆 - 有砟轨道空间耦合模型正视图

车辆模型采用经典的车辆空间动力学模型，货车转向架模型由两个轮对、构架和一系悬挂组成。轨道子模型中，钢轨视为有限长 Timoshenko 梁模型，钢轨采用连续弹性离散点支承梁模型，而不用连续弹性基础梁模型；采用连续分布轨道模型而不是简化的等效集总参数轨道模型；轨下基础沿纵向被离散，以各轨枕支点为基元；每个支承单元采用双质量(轨枕、道床)、三层(钢轨-轨枕-道床-路基)弹簧-阻尼振动模型；相邻支承单元之间引入道床剪切刚度和剪切阻尼；路基视为弹簧阻尼单元。轮轨接触是联系车辆子系统与轨道子系统的纽带，法向力用非线性 Hertz 接触理论求解，切向蠕滑力用 Kalker 线性理论求解，后用沈氏理论非线性修正。

### 2.3. 重载货车-轨道耦合动力学模型

我国已有三大干线轨道谱，但不适用于重载铁路的条件。徐磊等人[5]针对朔黄重载铁路提出了更适用于重载铁路环境的轨道高低及轨向不平顺谱，如式(1)、(2)所示。

$$S_v(f) = \frac{af + b}{(1 + bf + cf^2 + df^3)^2} \quad (1)$$

$$S_a(f) = \frac{af}{(1 + bf + cf^2)^2} \quad (2)$$

根据轨检车数据，拟合出了朔黄重载铁路的轨道不平顺谱特征参数，如表 1 所示。

**Table 1.** Statistical parameters of track irregularity spectrum of Shuohuang heavy haul railway  
**表 1.** 朔黄重载铁路轨道不平顺谱统计参数

不平顺类型	a	b	c	d
左高低	2207.100	-27.400	827.700	403.300
右高低	3217.200	-27.900	847.100	413.500
左轨向	340.769	-33.213	580.709	/
右轨向	474.062	-31.186	589.699	/

采用频率转换法，可将轨道谱由频域转换到时域，本计算分析中采用不平顺综合作用激励。

### 2.4. 重载货车-轨道耦合动力学模型

试验数据评定主要依据 TB/T2360“铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准”[6]、GB5599“铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范”[7]，判断轮轨横向力、轮轨垂直力、轮轴横向力、脱轨系数及轮重减载率等安全指标是否超限。

## 3. 仿真结果分析

### 3.1. 重载货车曲线通过运行安全性指标

首先，分析重载车辆以速度 50 km/h 通过上行轨道时的行车安全性能，计算分析了轮轨垂向力、轮轨横向力、脱轨系数和轮重减载率随时间的变化规律，如下图 4~7 所示。

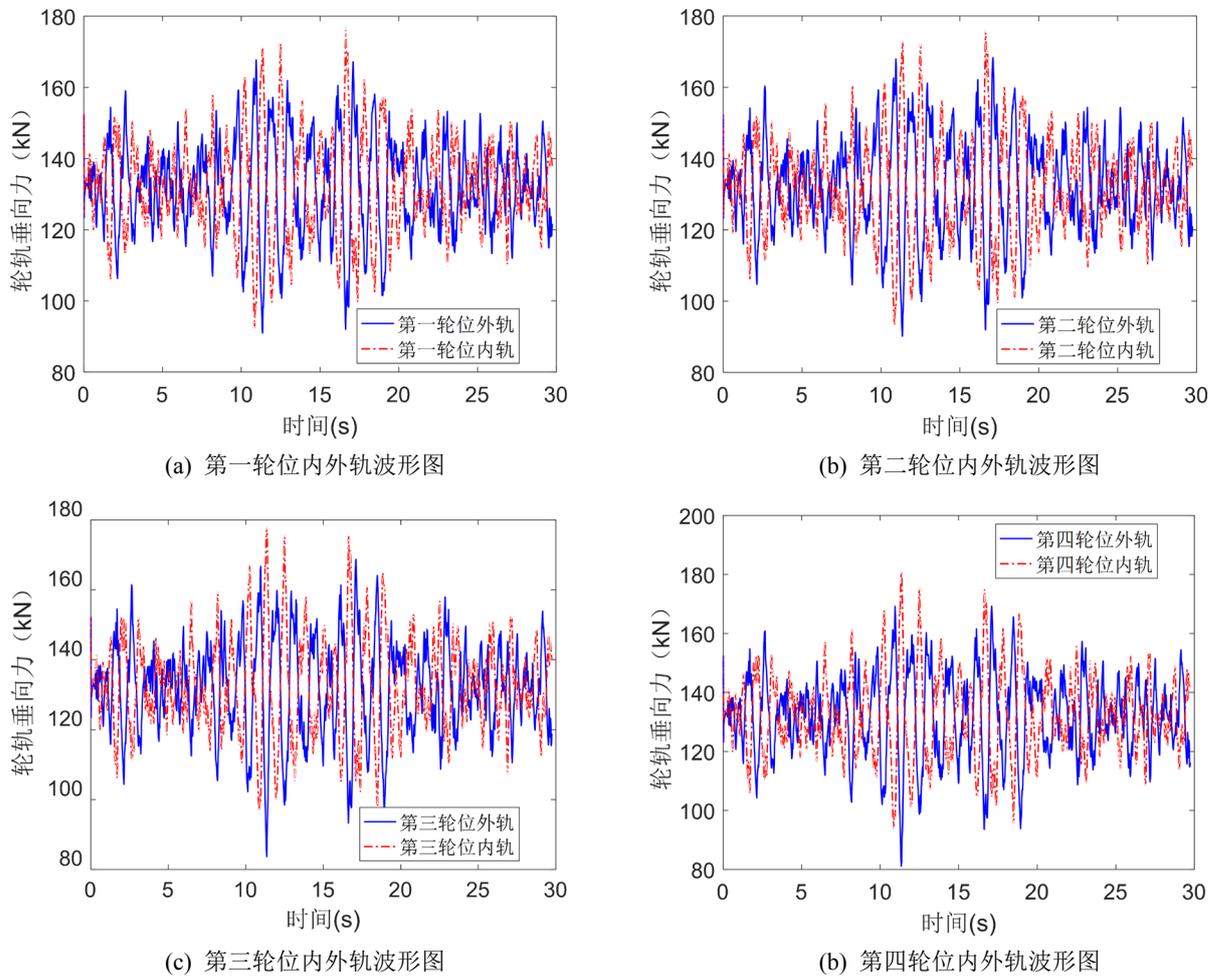
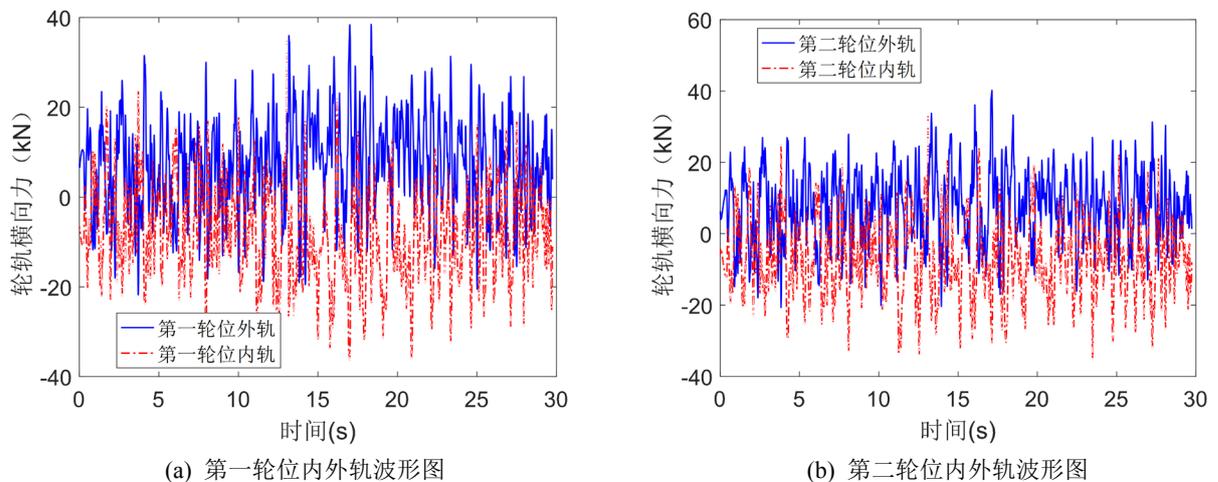
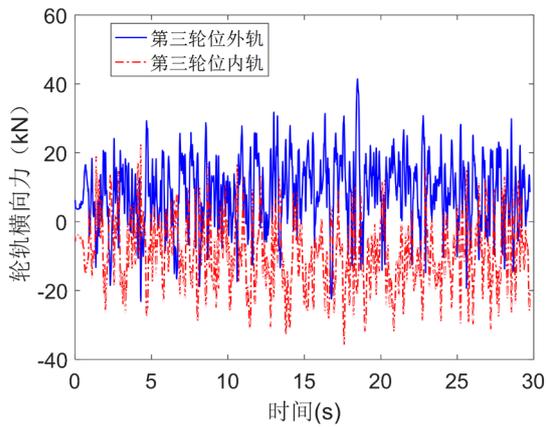


Figure 4. Waveform of wheel rail vertical force

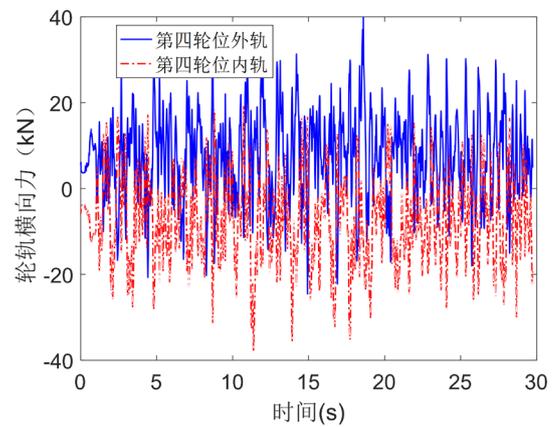
图 4. 轮轨垂向力波形图

由图 4 可知，由于轨道不平顺激励作用 C80 货车以 50 km/h 运行时，4 个轮对内外轮轨垂向力大小均在静荷载 130 kN 上下波动，最大值为 180 kN，小于 250 kN 限值，满足规范要求。





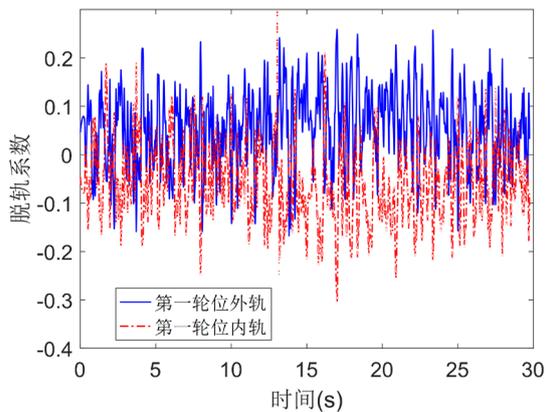
(c) 第三轮位内外轨波形图



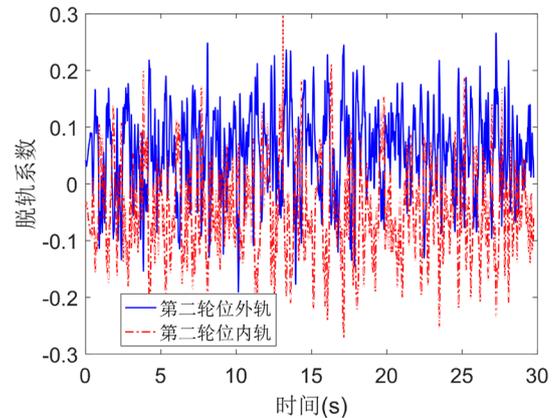
(b) 第四轮位内外轨波形图

**Figure 5.** Waveform diagram of wheel rail transverse force  
**图 5.** 轮轨横向力波形图

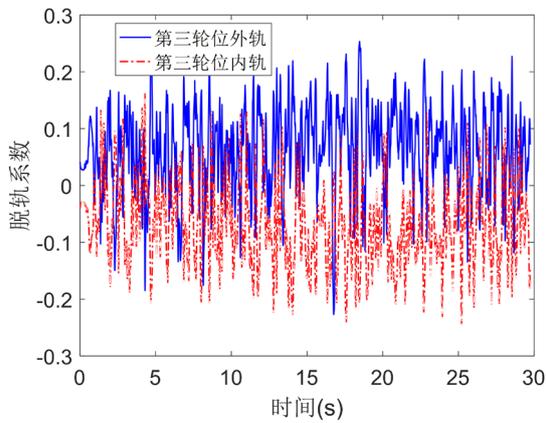
由图 5 可知，由于轨道不平顺激励作用 C80 货车以 50 km/h 运行时，4 个轮对内外轮轨横向力最大值为 40 kN，小于 83 kN 限值，满足规范要求。



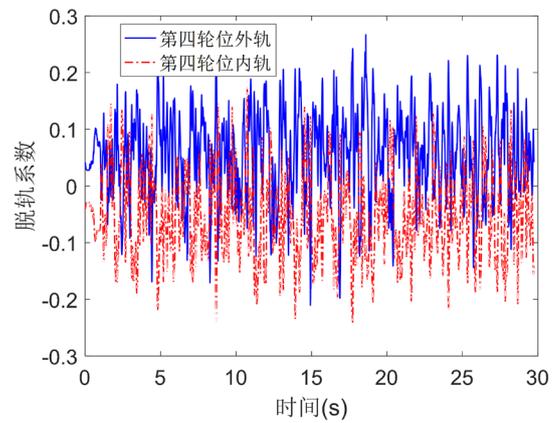
(a) 第一轮位内外轨波形图



(b) 第二轮位内外轨波形图



(c) 第三轮位内外轨波形图



(b) 第四轮位内外轨波形图

**Figure 6.** Waveform diagram of derailment coefficient  
**图 6.** 脱轨系数波形图

由图 6 可知, 由于轨道不平顺激励作用 C80 货车以 50 km/h 运行时, 4 个轮对内外轮轨脱轨系数最大值为 0.29, 小于 1.0 限值, 满足规范要求。

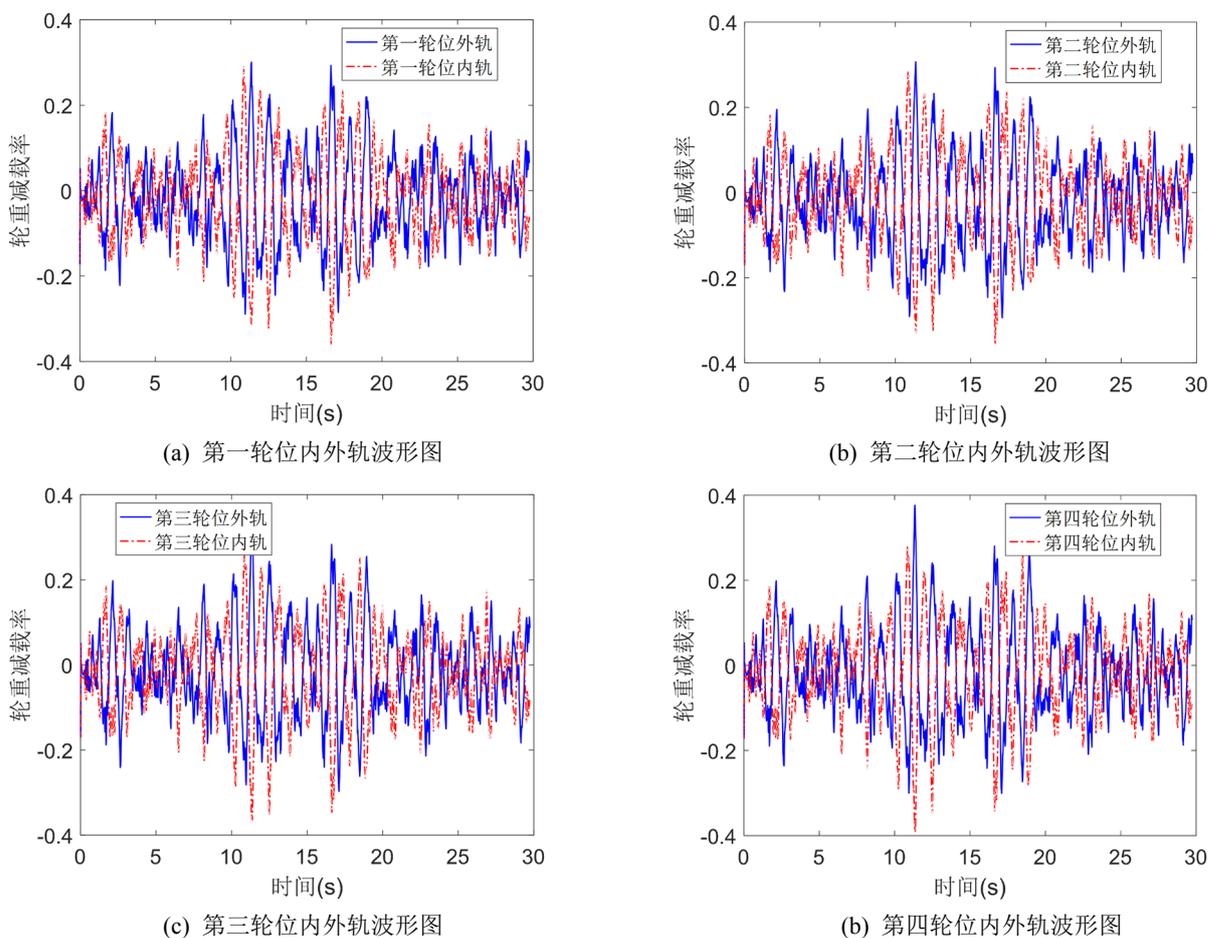


Figure 7. Waveform of wheel load reduction rate  
图 7. 轮重减载率波形图

由图 7 可知, 由于轨道不平顺激励作用 C80 货车以 50 km/h 运行时, 4 个轮对内外轨轮重减载率最大值为 0.38, 小于 0.6 限值, 满足规范要求。

### 3.2. 列车运行速度对安全性的影响

进一步计算重载车辆 C80 以三种速度 45 km/h、50 km/h 和 60 km/h 分别通过上行轨道时的行车安全性性能, 统计了轮轨垂向力、轮轨横向力、脱轨系数和轮重减载率有效值的最大值情况, 其随速度的变化规律, 如图 8~11。

由图 8 可知, 由于轨道不平顺激励作用 C80 货车以不同速度运行时, 各轮对内外轨轮轨垂向力有效值的最大值为 138 kN, 小于 250 kN 限值, 满足规范要求。在 45~60 km/h 速度范围内, 随着速度的增加, 轮轨垂向力几乎不受影响。

由图 9 可知, 由于轨道不平顺激励作用 C80 货车以不同速度运行时, 各轮对内外轨轮轨横向力有效值的最大值随着车速的增加, 都相应增大, 外轨增幅略大于内轨, 车速 60 km/h 时, 最大值 46 kN, 小于 83 kN 限值, 满足规范要求。

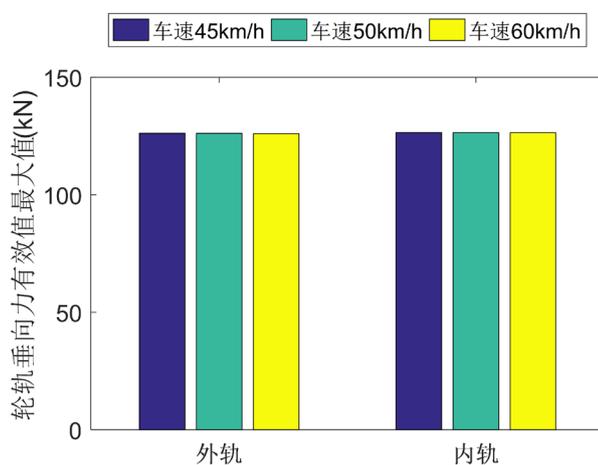


Figure 8. Statistical value of wheel rail vertical force  
图 8. 轮轨垂向力统计值

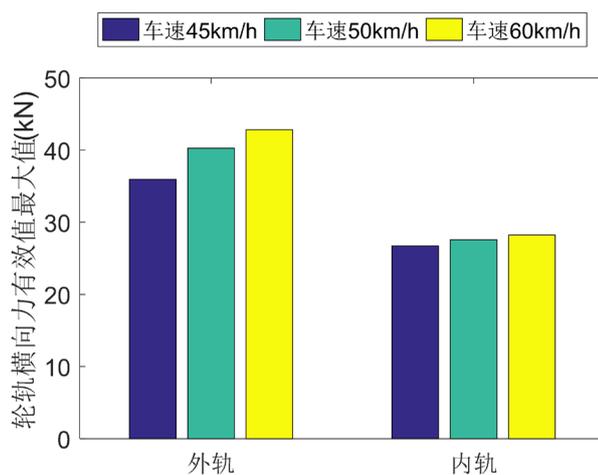


Figure 9. Statistical value of wheel rail lateral force  
图 9. 轮轨横向力统计值

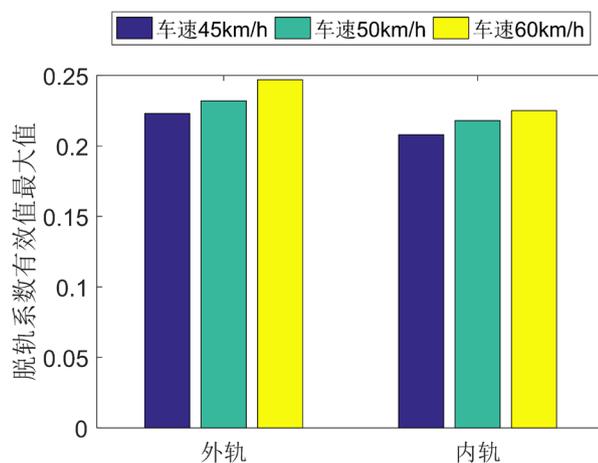


Figure 10. Statistical value of derailment coefficient  
图 10. 脱轨系数统计值

由图 10 可知, 由于轨道不平顺激励作用 C80 货车以不同速度运行时, 各轮对内外脱轨系数有效值的最大值随着车速的增加, 都相应增大, 外轨增幅略大于内轨, 车速 60 km/h 时, 最大值 0.245, 小于 1.0 限值, 满足规范要求。

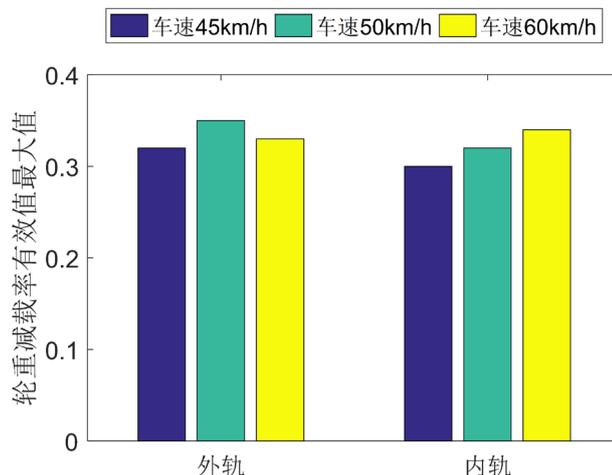


Figure 11. Statistical value of wheel load reduction rate  
图 11. 轮轨横向力统计值

由图 11 可知, 由于轨道不平顺激励作用 C80 货车以不同速度运行时, 各轮对内外轮重减载率有效值的最大值随着车速的增加, 外轨先增加后降低, 内轨都相应增大; 车速 60 km/h 时, 最大值 0.37, 小于 0.6 限值, 满足规范要求。

#### 4. 仿真结果与试验结果对比

在重载铁路现场, 针对相同曲线半径的轨道进行轮轨力测试。货车为 C80, 轨道为 75 kg/m, 与仿真条件一致。轮轨动力响应采用“剪应力法”测试, 在钢轨轨腰和轨底粘贴应变片, 并接桥, 引出至应变采集仪进行应力应变测量, 测量前应进行垂直力和横向力的标定, 如下图 12 所示。



Figure 12. Field diagram of dynamic response test  
图 12. 动力响应测试现场图

计算得到不同列车速度下，车辆通过测点引起的脱轨系数及减载率均值有效值。将上述仿真结果与实测结果对比如下表 2 所示。

**Table 2.** Comparison between simulation and field measurement results

**表 2.** 仿真与现场实测结果对比

仿真			现场实测				
仿真速度 (km/h)	脱轨系数	减载率	实测速度 (km/h)	脱轨系数均值	脱轨系数有效值	减载率均值	减载率有效值
45	0.43	0.35	36.7	0.20	0.28	0.12	0.13
			33.7	0.14	0.23	0.11	0.15
			39.3	0.18	0.20	0.06	0.19
			37.9	0.18	0.22	0.04	0.24
			分布范围	0.14~0.20	0.2~0.28	0.04~0.12	0.13~0.24
50	0.47	0.32	51.7	0.20	0.32	0.06	0.1
			47.9	0.21	0.33	0.06	0.11
			52.7	0.23	0.29	0.05	0.27
			50.3	0.16	0.23	0.05	0.22
			分布范围	0.16~0.23	0.23~0.33	0.05~0.06	0.1~0.27
60	0.42	0.34	59.7	0.29	0.46	0.08	0.14
			62.6	0.24	0.43	0.06	0.19
			66.9	0.33	0.42	0.15	0.33
			69.1	0.26	0.32	0.14	0.31
			分布范围	0.24~0.33	0.32~0.46	0.06~0.15	0.14~0.33

随着列车速度的提高，仿真计算的结果显示脱轨系数最大值在 0.42~0.47，轮重减载率最大值在 0.32~0.35，现场实测结果显示脱轨系数有效值 0.20~0.46，减载率有效值 0.10~0.33，仿真结果略大于实测结果，且均处于安全范围，安全储备充足。

## 5. 结论

本文从理论上建立重载货车 - 轨道耦合动力学模型，模拟重载铁路现场工况，对不同车速下货车运行安全性指标进行检算，结论如下：

1) 50 km/h 速度条件下，仿真得到的最大垂向力、最大横向力分别为 180 kN、40 kN，最大脱轨系数及最大减载率分别为 0.29、0.38，皆小于规范限值规定，且保留一定的安全储备。

2) 速度提高时，各轮对内外轨轮轨垂向力有效值的最大值皆为 138 kN，速度对垂向力的影响不大；各轮对内外轨轮轨横向力有效值的最大值随着车速的增加，都相应增大，外轨增幅略大于内轨，车速 60 km/h 时，最大值 46 kN，小于 83 kN 限值，满足规范要求。

3) 速度提高时，各轮对内外脱轨系数有效值的最大值随着车速的增加，都相应增大，外轨增幅略大于内轨，车速 60 km/h 时，最大值 0.245，小于 1.0 限值，满足规范要求；各轮对内外轨轮重减载率有效值的最大值随着车速的增加，外轨先增加后降低，内轨都相应增大，车速 60 km/h 时，最大值 0.37，小

于 0.6 限值, 满足规范要求。

4) 对比仿真结果与现场实测结果, 仿真结果与现场实测结果均在安全限值之内, 且仿真结果略大于实测结果, 仿真结果偏安全。

### 参考文献

- [1] 杨春雷, 黄运华, 丁军君. 重载轨道曲线几何参数对轮轨耦合动力特性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 215-227.
- [2] 杨轶科, 马战国, 潘振, 等. 重载铁路小半径曲线焊接接头区域轮轨动力响应分析[J]. 铁道建筑, 2021, 61(1): 109-113.
- [3] 王景涛, 海军, 李新毅, 等. 货物重心横向偏移对敞车通过曲线运行安全性的影响机理研究[J]. 国防交通工程与技术, 2018, 16(1): 10-14.
- [4] 孙海富. 重载铁路最小曲线半径标准研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 36-41.
- [5] 徐磊, 陈宪麦, 李晓健, 等. 朔黄重载铁路轨道不平顺谱分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(12): 5147-5153.
- [6] TB/T2360-93. 铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [7] 国家标准局. GB/T5599-85 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.