

# 基于静态轮重减载率的车辆参数分析

冯 扬<sup>1\*</sup>, 周 橙<sup>1</sup>, 蒲荣生<sup>1</sup>, 张志波<sup>1</sup>, 商佳园<sup>1</sup>, 蔡吴斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中车青岛四方机车车辆股份有限公司技术中心, 山东 青岛

<sup>2</sup>西南交通大学机械工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年4月15日; 录用日期: 2024年7月2日; 发布日期: 2024年7月11日

## 摘要

轮重减载率主要反映车轮减载的程度, 当轮重减载率过大时, 车辆脱轨风险增加。在TSI标准体系中, 采用EN 14363静态轮重减载率是第三种评估方法的指标, 国外其他标准如英国标准GM/RT 2141、澳大利亚ROA指南和美国公共交通协会规定的APTA PR-M-S-014-06均将静态轮重减载率作为评估扭曲线路的评估指标。本文根据美国公共交通协会规定的静态轮重减载率评估方法, 基于某市域车辆以仿真和试验相结合的方式进行分析。结果表明: 仿真结果与试验结果的最大偏差为0.5%, 因此模型可以代替试验进行评估; 较大的一系垂向刚度、较小的簧上质量、簧间质量和簧下质量对静态轮重减载率不利, 当一系垂向刚度增大, 簧上、簧间和簧下质量降低25%时, 轮重减载率分别增大20%、17%、5%、6%。因此, 在设计车辆时, 建议一系垂向刚度范围为1~1.47 MN/m。

## 关键词

静态轮重减载率, 安全性评估, APTA

# Vehicle Parameter Analysis Based on Static Wheel Unloading

Yang Feng<sup>1\*</sup>, Cheng Zhou<sup>1</sup>, Rongsheng Kuai<sup>1</sup>, Zhibo Zhang<sup>1</sup>, Jiayuan Shang<sup>1</sup>, Wubin Cai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>R&D Center, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Apr. 15<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2024; published: Jul. 11<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Wheel unloading mainly reflects the degree of wheel unloading. When the wheel unloading is too

\*通讯作者。

large, the risk of derailment increases. In the TSI standard system, the static wheel unloading of EN 14363 is the indicator of the third evaluation method. Other foreign standards such as British Standard GM/RT 2141, Australian ROA Guide and APTA PR-M-S-014-06 stipulated by the American Public Transportation Association both use the static wheel unloading as an evaluation index to evaluate twisted lines. This paper analyzes a combination of simulation and test based on a municipal vehicle according to the evaluation method of static wheel unloading stipulated by the American Public Transportation Association. The results show that the maximum deviation between the simulation results and the test is 0.5%, so the model can be evaluated instead of the test. The large primary series vertical stiffness, small sprung mass, inter-sprung mass and unsprung mass are unfavorable to the static wheel unloading; as the primary vertical stiffness increases, the sprung, inter-sprung and unsprung masses decrease at 25%, the static wheel loading reduction rate increases by 20%, 17%, 5%, and 6%, respectively. Therefore, when designing the vehicle, it is recommended that the primary vertical stiffness range is 1~1.47 MN/m.

## Keywords

Static Wheel Unloading, Safety Assessment, APTA

Copyright © 2024 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

轨道车辆在通过有超高、高低不平顺、水平不平顺和扭曲不平顺线路时, 如图 1 所示, 某一车轮抬升, 其余车轮载荷将出现增载和减载情况, 安全性中采用轮重减载率评估车轮发生减载后是否影响安全。



Figure 1. Twisted line

图 1. 扭曲线路

车辆轮重减载率定义为: 静态轮重与实际轮重的差值占静态轮重的百分比, 如式(1)所示:

$$W_{uf} = \frac{(Q_0 - Q_1)}{Q_0} \quad (1)$$

其中:  $W_{uf}$  为轮重减载率。

$Q_0$  为静态轮重, 单位 kN。

$Q_1$  为实际轮重, 单位 kN。

轮重减载率可分为静态(准静态)轮重减载率和动态轮重减载率,即车辆静止在试验台上或以低速通过扭曲线路时为评估工况,获得轮重减载率;动态轮重减载率为车辆在线路按照最高试验速度通过测量轮轨力获得的轮重减载率[1]-[3]。

在 TSI 标准体系中,对于车辆安全性标准按照 EN 14363 要求进行评估,EN 14363 在车辆正线试验前需完成扭曲线路防脱轨安全性评估,其中静态轮重减载率是方法 3 评估的指标之一[4] [5]。EN 14363 方法 3 具体流程包括 2 个阶段:在第一阶段,测试过程分为 2 个阶段,第一阶段在试验台测量回转阻力系数,在扭曲线路上测试轮重减载率,当第一阶段评估不通过时,进行第二阶段测试,按标准附录 B 的说明进行脱轨系数计算,如果第二阶段也不通过,可选择方法 1 或方法 2 重新进行评估。对于扭曲线路,分别考虑转向架扭曲和车辆扭曲,按照车辆轴距和定距扭曲量,以低速(不超过 10 km/h)通过该扭曲线路,测量各个车轮载荷,计算轮重减载率不超过 0.6,脱轨系数不超过 1.2 作为方法 3 第一阶段的评估。

国外其他标准如英国标准 GM/RT 2141、澳大利亚 ROA 指南和 APTA PR-M-S-014-06 均将静态轮重减载率作为评估扭曲线路的评估指标。

① GM/RT 2141 中,轨道中 1 根钢轨带有 1/300 的斜度,同时叠加 1 个腰长 6 m、深 20 mm 的等效三角形坑,车辆通过该测试轨道时轮重减载率不超过 0.6 为评估限值[6]-[8]。

② 澳大利亚 ROA 指南规定车辆在通过有 1/100 的坡度和 1/250 的坡度组合扭曲线路时,计算轮重减载率不超过 0.6 [9] [10]。

③ 美国公共交通协会(以下简称 APTA)在 APTA PR-M-S-014-06 中定义抬升车轮同时测量该转向架同轴车轮和同侧车轮垂向力,计算轮重减载率不超过规定限值边界,当车轮抬升量 2 inch 时,轮重减载率不超过 0.65 [11]。

④ 国内车辆动力学安全性评估标准 GB/T 5599-2019 未规定静态轮重减载率的试验及评估方法,仅考虑动态轮重减载率[12]。

APTA PR-M-S-014-06 标准制定通过静态轮重减载率的评估,保证客运车辆轮重平衡,降低车辆低速爬轨脱轨的风险,同时对于仅通过车辆设计无法消除低速脱轨的区段,需铁路运营部门设置钢轨润滑,提高线路维护标准等方式降低脱轨风险,因此对于车辆设计、铁路安全运营意义重大。本文参考 APTA 规定的静态轮重减载率评估方法,分析不同车辆参数对静态轮重减载率的影响,为后期按照 APTA 规定设计车辆提供支撑。

## 2. APTA 台架试验

APTA PR-M-S-014-06 要求选择轴重最轻的车辆进行测试,要求车辆达到空车(整备状态)载荷,同时应该明确车辆轮重、悬挂部件状态以及轮重测试设备状态等,车轮抬升示意如图 2 所示[13]。

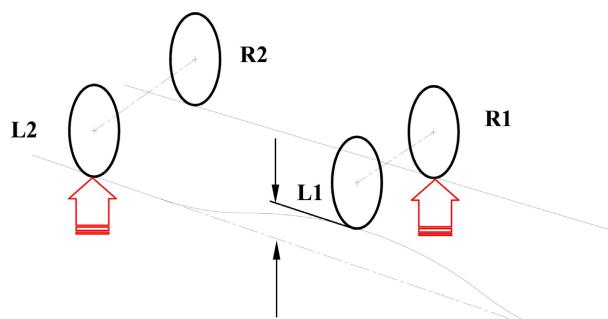


Figure 2. Test method of APTA PR-M-S-014-06

图 2. APTA PR-M-S-014-06 测试方法

按照 APTA 标准规定的试验方法, 规定车辆的轮重减载率, 本次试验采用压磅进行轮轨垂向力测试。试验流程如下:

- 1) 首先将压磅固定于测试位置, 标记与压磅接触点位置, 测量压磅标记点高度, 保证轮轨接触点水平度误差, 如存在超差, 可通过增减调整垫板, 直至满足标准要求。
- 2) 将被试车辆调运至测试轨道, 使车轮达到步骤 1 标记点位置, 如图 3 所示。
- 3) 需要抬升的车轮对应的轴箱下部布置液压千斤顶, 当车轮抬升时采用高度尺测量车轮抬升量。
- 4) 调整千斤顶高度, 保证车轮抬升量满足标准要求, 如图 4 所示。
- 5) 测量抬升车轮同轴、同侧车轮轮轨垂向力, 记录为一个测试工况, 每个测试工况重复 3 次, 取平均值为该车轮抬升量下轮轨垂向力结果。
- 6) 依次抬升 8 个车轮, 重复第 2)~4)步。



Figure 3. Axle load test  
图 3. 压磅测试

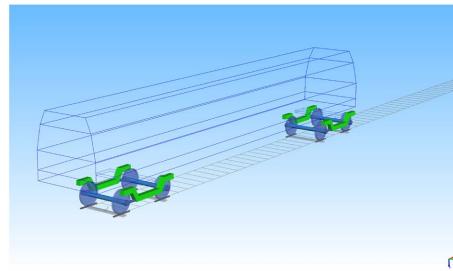


Figure 4. Wheel raise  
图 4. 车轮抬升

由于本次试验采用液压千斤顶, 为防止液压千斤顶侧翻, 保证试验安全, 仅完成抬升量 20 mm 和 35 mm 两个工况, 未进行最大抬升量 2 inch (50.8 mm)。由于受上述试验条件限制, 后期采用试验 + 仿真的方式进行评估, 具体为基于试验结果及车辆多体动力学仿真模型, 评估满足标准规定抬升量下的静态轮重减载率。车辆多体动力学模型需再现试验结果。

### 3. 仿真分析

基于多体动力学模型 SIMPACK, 建立车辆动力学仿真模型, 模型包括: 车体、构架、轮对和轴箱, 共计 50 个自由度, 动力学模型如图 5 所示, 车辆主要参数如表 1 所示。



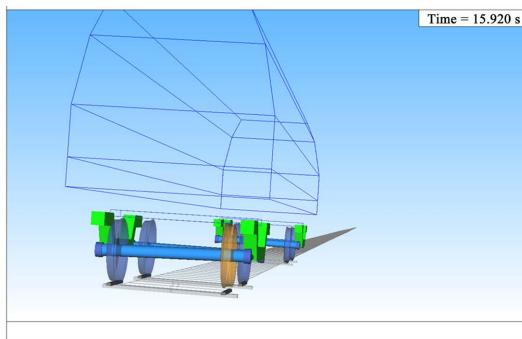
**Figure 5.** Simulation modal  
**图 5.** 仿真模型

**Table 1.** Critical parameters

**表 1.** 主要参数

主要参数	数值
车辆定距/m	14.5
轴距/m	2.5
轴重/t	15
簧上质量/t	30.5
簧间质量/t	3.1
簧下质量/t	2.4
一系弹簧垂向刚度/MN/m	1.05

动力学仿真采用和试验相同的施加载荷方式, 将车轮抬升至试验的高度, 如图 6 所示。



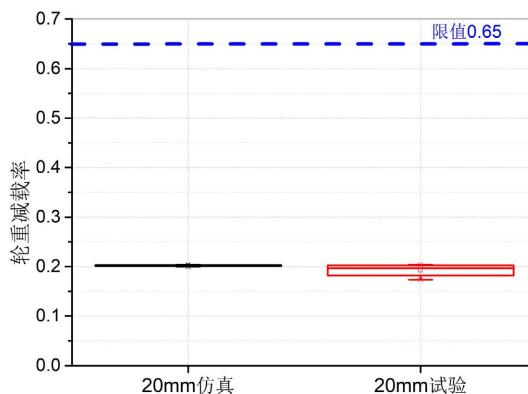
**Figure 6.** Wheel raise for simulation  
**图 6.** 仿真车轮抬升

测量车轮抬起过程中每个车轮轮重, 按照试验过程, 依次抬升 8 个车轮。分别仿真车轮抬升量 20 mm 和 35 mm 工况下被抬升同轴车轮和同侧车轮的轮重减载率。

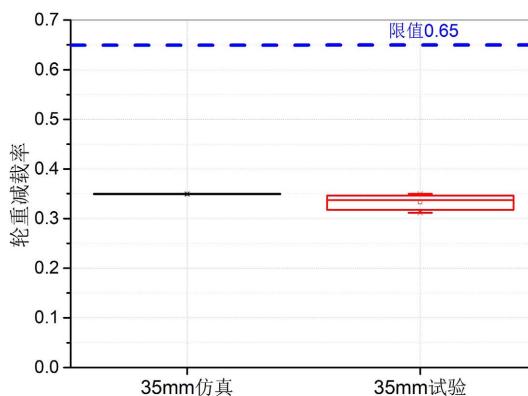
统计轮重减载率仿真和试验箱线图进行比较, 如图 7 和图 8 所示。

通过仿真与试验比较, 结论如下:

- 1) 当车轮抬升量 20 mm 时, 仿真轮重减载率最大值 0.203, 试验轮重减载率最大值 0.204, 误差 0.5%。
- 2) 当车轮抬升量 35 mm 时, 仿真轮重减载率最大值 0.35, 试验轮重减载率最大值 0.35, 误差 0%。
- 3) 试验结果离散度较大原因为: 车辆悬挂部件为非线性结构, 重复试验时由于车辆初始差异, 导致各悬挂载荷分布存在差异, 最终导致各车轮轮重存在偏差; 仿真模型由于初始状态确定, 因此离散度较小。



**Figure 7.** Wheel raise 20 mm  
**图 7.** 车轮抬升 20 mm



**Figure 8.** Wheel raise 35 mm  
**图 8.** 车轮抬升 35 mm

综上, 轮重减载率仿真最大值与试验最大值误差 0.5%, 仿真模型可以用于代替试验进行评估。

计算车轮抬升 2 inch 下的轮重减载率, 结果为 0.49, 车辆满足 APTA 标准规定。

#### 4. 车辆参数优化

轮重减载率主要反映车轮减载的程度, 过大的轮重减载率导致垂向载荷不足, 容易导致发生低速爬轨脱轨事件。

影响车轮轮重减载率的主要参数包括: 簧上质量、簧间质量、簧下质量和一系悬挂垂向刚度 4 类参数, 分别进行车辆参数优化研究, 在既有参数下, 4 类参数变化范围为 0.5~2 倍, 仿真分析车轮抬升量在 2 inch 下不同车辆参数对轮重减载率的影响, 结果如图 9 所示。

1) 随着一系垂向刚度的增加, 轮重减载率增加, 原因为:

车轮抬升量相同时, 一系垂向刚度增加, 一系弹簧垂向力增加, 车辆系统为平衡一系悬挂垂向力, 增载车轮轮轨垂向力增加, 减载车轮轮轨垂向力减小, 导致最终减载量增加, 而改变一系垂向刚度不影响静态轮重, 因此增加一系垂向刚度, 轮重减载率增大。

一系垂向刚度增大 25%, 轮重减载率增大 20%; 当一系垂向刚度增加至 1.47 MN/m 时, 轮重减载率将超过限值 0.65。

因此, 在车辆设计选型中, 设计理念为: 保证一系结构空间满足要求的前提下, 尽可能选择较小的一系垂向刚度, 减小轮重减载率, 且一系垂向刚度不应高于 1.47 MN/m。

2) 随着簧上、簧间和簧下质量的增加, 轮重减载率均降低, 原因为:

车轮抬升量相同时, 增加簧上、簧间和簧下质量, 相当于增加了静态轮重, 此时悬挂系统对轮重减载的影响小于静态轮重的影响。

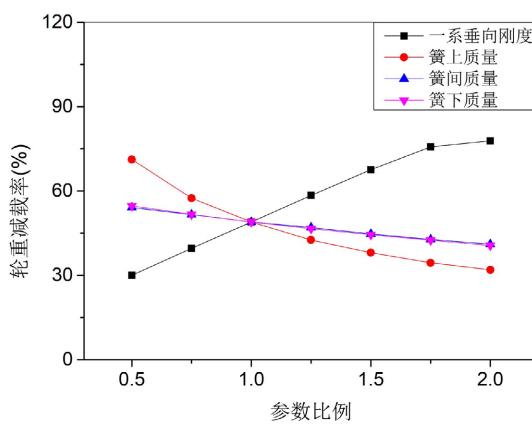
簧上质量降低 25%, 轮重减载率增大 17%。

簧间质量降低 25%, 轮重减载率增大 5%。

簧下质量降低 25%, 轮重减载率增大 6%。

增加静态轮重将导致轮重减载率减小; 簧上质量对轮重减载率影响大于簧间和簧下质量, 原因为: 车辆系统簧上、簧间和簧下质量在相同的参数比例下, 簧上质量对静态轮重的影响更大。

3) 轮重减载率对一系垂向刚度最敏感, 在后期设计时应重点设计一系垂向刚度, 同时应控制后期运用时的刚度变化, 保证静态轮重减载率满足标准限值要求。



**Figure 9.** Effects of four parameter changes on static wheel loading

**图 9.** 四种参数变化对静态轮重减载率的影响

## 5. 结论

为后期按照 APTA 规定设计车辆, 通过静态轮重减载率试验和仿真相结合的方式, 进行轮重减载率计算, 同时通过不同车辆参数的仿真分析, 结论如下:

- 1) 轮重减载率仿真与试验最大值误差为 0.5%, 可用仿真手段代替试验进行评估。
- 2) 当一系垂向刚度增大, 簧上、簧间和簧下质量降低 25% 时, 轮重减载率分别增大 20%、17%、5%、6%。
- 3) 轮重减载率对一系垂向刚度最敏感, 建议一系垂向刚度范围为 1~1.47 MN/m。

## 基金项目

国家重点研发计划资助(2022YFB4301201)。

## 参考文献

- [1] 吴兴文. 地震条件下车辆脱轨安全性研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [2] 魏来. 高速列车相关运行安全性问题研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [3] Mastoris, I., Nuqali, A., Taduru, S.S., El Khashab, M., Buck, M., Shah, Z., et al. (2020) Left Ventricular Assist Device Outflow Track Twist Masquerading as RV Failure. *Journal of the American College of Cardiology*, **75**, 3372. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(20\)33999-1](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(20)33999-1)

- 
- [4] (2016) EN 14363-2016: Railway Applications—Testing and Simulation for the Acceptance of Running Characteristics of Railway Vehicles—Running Behaviour and Stationary Tests.  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/56417fef-6427-4f10-ae76-e01157e2ae93/en-14363-2016>
  - [5] 冯扬, 周橙, 梁海啸, 张志波, 薛源. 基于标准 EN 14363 规定的扭曲线路防脱轨安全性研究[J]. 机车电传动, 2022(6): 74-79.
  - [6] 陆冠东, 徐荣华. 线路扭曲与脱轨安全性分析方法介绍[J]. 铁道车辆, 2008, 46(7): 1-4.
  - [7] 鹿中华, 于连玉, 柳文豪, 李烽. 欧洲标准铁路货车运行安全性研究[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(1): 51-55.
  - [8] (2009) GM/RT 2141: Resistance of Railway Vehicles to Derailment and Roll-Over.  
<https://www.rssb.co.uk/standards-catalogue/CatalogueItem/GMRT2141-Iss-3>
  - [9] 周阳, 刘晓京, 李芾, 安琪. 基于准静态试验的车辆脱轨安全性评价方法研究[J]. 铁道车辆, 2014, 52(5): 10-13.
  - [10] 张良威, 刘爱文, 姜瑞金. 铁路集装箱平车通过扭曲线路的减载安全性分析[J]. 铁道车辆, 2015, 53(7): 1-3.
  - [11] (2007) APTA PR-M-S-014-6-2007: Standard for Wheel Load Equalization of Passenger Railroad Rolling Stock.  
<https://webstore.ansi.org/standards/pta/pr014062007>
  - [12] 国家铁路总局. GB/T 5599-2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
  - [13] 李培行. 二轴转向架架扭曲载荷试验方法研究[J]. 铁道车辆, 2019, 57(10): 1-5, 51.