

抗菱刚度对平车性能的影响研究

张博宁,王勇,张胜建,吕小勇

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:以出口的某型平车作为分析对象,基于 Simpack 动力学软件建立动力学模型,在不同的抗菱刚度下,分别对空车和重车的新轮和磨耗轮 4 种工况进行仿真计算,分析其对平车的动力学性能的影响规律。研究结果表明:抗菱刚度对空车新轮的蛇行运动临界速度影响较小,其他 3 种工况的蛇行运动临界速度总体上呈现出阶梯状的增长,其中对重车新轮的蛇行运动临界速度影响最大。当抗菱刚度低于 $1.5 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时,磨耗轮的平稳性较差,尤其是空车磨耗轮的横向平稳性。抗菱刚度对轮重减载率指标和脱轨系数指标的影响很小,抗菱刚度对轮轴横向力指标有很大的影响。

关键词:平车;抗菱刚度;Simpack;临界速度;平稳性;轮重减载率;脱轨系数;轮轴横向力

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)06-0054-04

Research on Effect of Anti-diamond Stiffness on Performance of Flat Car

ZHANG Boning, WANG Yong, ZHANG Shengjian, LYU Xiaoyong

(Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Taking a certain type of flat car exported to Pakistan as the analysis object, designs a dynamic model based on the Simpack dynamics software, simulates and calculates the four working conditions of the new wheel and the worn wheel of the empty car and the heavy car under different anti-diamond stiffness, and analyzes its influence on the dynamic performance of the flat car. The results show that the anti-diamond stiffness has little effect on the critical speed of the meandering motion of the new wheel of the empty car. The critical speed of the meandering motion of the other three working conditions generally assumes stepped growth and has the greatest influence on the critical speed of the meandering motion of the heavy vehicle and the new wheel. When the anti-diamond stiffness is lower than $1.5 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$, the stability of the wear wheel is poor, the lateral stability of the empty wear wheel in particular. The anti-diamond stiffness has little effect on the pindex of wheel load reduction rate and derailment coefficient, but great influence over the lateral force index of the wheel axle.

Keywords: flat car; anti-diamond stiffness; Simpack; critical speed; stability; wheel load reduction rate; derailment coefficient; lateral force of wheel and axle

0 引言

铁路货物运输是运输的主要方式之一,它在整个运输领域中占有重要的地位并发挥着重要的作用。找出影响车辆性能的关键因素,对改进货车的性能有着重要的作用,其中抗菱刚度就是货车的动力学性能指标重要影响因素之一。

国内学者对货车抗菱刚度进行了大量的研究。王金栋等^[1]研究推导了货车转向架斜楔减振器抗菱刚度计算方法。刘嘉兴等^[2]通过 Abaqus 有限元软件和 Simpack 动力学软件进行仿真计算对变摩擦转向架斜楔等效刚度的计算进行了推导和应用。罗林涛等^[3]指出交叉支撑装置可以提高高速转向架的抗菱刚度。任利惠等^[4]对货车转向架抗菱刚度的测量方法进行了研究并提出了直接和间接两种测量方法。宋子洋等^[5]研究铁路货车顶置式斜楔轴箱悬挂结构中斜楔摩擦角对三轴转向架动力学性能的影响。

前人关于抗菱刚度对货车动力学性能影响的研究较少,因此本文在前人的基础上,通过 Simpack 动力学软件

建立出口的某型平车动力学模型,对不同抗菱刚度下的空车新轮、空车磨耗轮、重车新轮、重车磨耗轮的力学性能分别进行仿真计算,研究抗菱刚度对其蛇行运动临界速度、运行平稳性、运行稳定性的影响规律。

1 整车非线性动力学模型

利用 Simpack 仿真软件对车辆系统进行建模和求解。

平车整车系统由 1 个车体和 2 个转向架组成,每个转向架又由 2 个轮对、4 个轴箱、4 个斜楔和构架组成。本模型采用传统的三大件式转向架,因此每个构架包括 2 个侧架和 1 个中央摇枕,共计 27 个刚体。各刚体的自由度数如表 1 所示。车体考虑 6 个自由度,即纵向、横向、垂向、侧滚、点头、摇头;侧架考虑 6 个自由度,即纵向、横向、垂向、侧滚、摇头、点头;摇枕考虑 3 个自由度,即垂向、侧滚、摇头;斜楔考虑 3 个自由度,即纵向、横向、垂向,同时引入 3 个约束;轮对考虑 6 个自由度,即纵向、横向、垂向、侧滚、点头、摇头;轴箱考虑 1 个自由度,即点头;再考虑到钢

轨的横向位移、垂向位移以及纵向的扭转,整个车辆系统共计 80 个自由度。

表 1 车辆系统模型自由度

刚体名称	自由度					
	纵向	横向	垂向	侧滚	点头	摇头
车体	✓	✓	✓	✓	✓	✓
侧架	✓	✓	✓	✓	✓	✓
摇枕	—	—	✓	✓	—	✓
斜楔	✓	✓	✓	—	—	—
轴箱	—	—	—	—	✓	—
轮对	✓	✓	✓	✓	✓	✓

平车模型是一个繁琐的多体系统模型,部件与部件之间既存在相互作用力又有相对运动,除此以外,轮轨之间也存在相互作用。为了达到理论计算分析模型研究的主要目的,必须对一些次要因素进行相应的假定或简化。在建立出口的某型平车系统模型时做出如下假定:轮对、侧架、摇枕、车体和轴箱等部件的弹性比悬挂系统的弹性要小得多,均视为刚体,即忽略各部件的弹性变形;不考虑平车牵引工况和相邻车的影响,只考虑单车模型;车体、转向架各部件及悬挂均对称布置。

建立的 Simpack 刚体非线性动力学模型如图 1 所示。

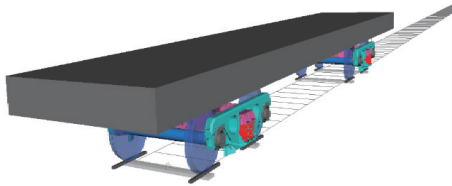


图 1 平车 Simpack 模型

非线性轮轨接触几何关系采用 P8 踏面车轮和 UIC54 钢轨相匹配的轮轨接触几何关系。新轮和 UIC54 匹配的名义等效锥度为 0.12, 磨耗轮和 UIC54 匹配的名义等效锥度为 0.3, 轮轨接触点在车轮和钢轨上分布均匀。其中新轮的轮轨接触几何关系如图 2 所示。

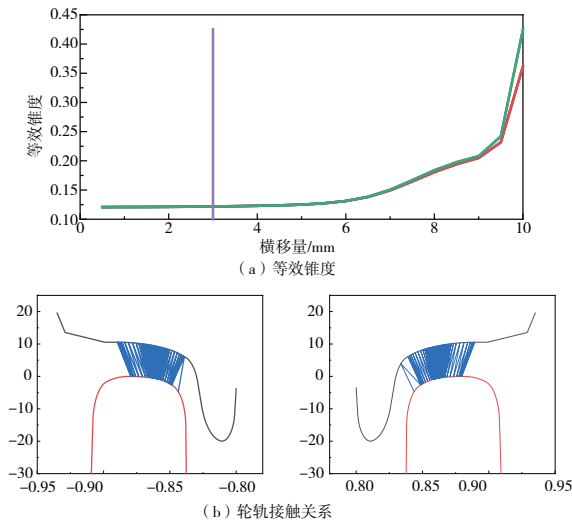


图 2 轮轨接触几何关系

2 抗菱刚度

抗菱刚度定义为两侧架因速度差导致出现前后错位情况而使转向架出现菱形变形,提供抵抗这种菱形变形的刚度即为抗菱刚度^[2]。

本平车模型采用三大件式转向架,主要由中央摇枕和侧架组成,摇枕与侧架之间通过 7 组螺旋钢弹簧连接,每侧侧架与摇枕之间还设有两个斜楔,通过减振簧和侧架连接。传统三大件式转向架具有结构简单、均载性好、对线路适应性强、易于检修等优点,但是传统的三大件式结构也带来了抗菱刚度不足、蛇行失稳临界速度低的缺点^[3]。三大件货车转向架抗菱刚度主要由摇枕弹簧、斜楔减振系统、轴箱弹性垫以及提高抗菱刚度装置 4 个部分提供^[5]。而本模型的抗菱刚度主要由变摩擦斜楔减振器提供。文献[1-2]中对抗菱刚度由变摩擦斜楔减振器提供的计算公式均有推导。根据文献[1]可知变摩擦斜楔减振器提供的抗菱刚度为

$$K_L = \frac{dM}{d\theta} = \frac{2b^2 \tan^2 \alpha}{1/k_x + 1/k_y} \quad (1)$$

式中: b 为斜楔宽度; k_x 表示斜楔弹簧刚度; k_y 表示摇枕弹簧刚度; α 为副摩擦面与水平面间的夹角。

原车设计的空车抗菱刚度为 $2.5 \text{ MN} \cdot \text{m/rad}$, 重车的抗菱刚度为 $7 \text{ MN} \cdot \text{m/rad}$ 。

3 仿真计算结果分析

3.1 抗菱刚度对蛇行运动临界速度的影响

蛇行运动稳定性是轨道车辆最重要的性能指标之一,通过动力学仿真计算蛇行运动临界速度最常用的方法有降速法和极限环法。

本模型采用极限环法获取临界速度,即当模型在没有任何激励的理想情况下运行一段距离后给轨道加激励,然后再恢复初始的理想状态,车辆系统首次出现不能回到平衡位置的情况,此时的速度即为临界速度。添加激励有很多种方法,例如实测的轨道激励样本、车辆某些结构的初始位移或速度、随机的初始状态都可以作为添加的激励。考虑到出口国铁路线路较差,本模型采用美国 4 级谱作为轨道激励,分别计算了空车新轮、空车磨耗轮、重车新轮、重车磨耗轮 4 种工况下不同抗菱刚度的蛇行运动临界速度(图 3)。

根据图 3 可以看出,抗菱刚度对空车新轮的影响最小,对重车新轮的影响最大。

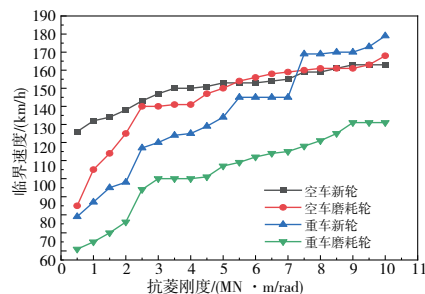


图 3 临界速度

随着抗菱刚度的增加,空车新轮的临界速度缓慢增加。当抗菱刚度大于 $3 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时,随着抗菱刚度的增加临界速度趋于稳定。对于其他 3 种工况,随着抗菱刚度的增加,临界速度整体上呈现出阶梯状增长;当抗菱刚度小于 $3 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时,随着抗菱刚度的增加,临界速度快速升高;当抗菱刚度大于 $3 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时,空车磨耗轮和重车磨耗轮的临界速度升高速度减缓,重车新轮的临界速度升高速度依然较快;当抗菱刚度大于 $7 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 后,重车新轮的临界速度增长幅度较大后趋于稳定。

3.2 抗菱刚度对平稳性的影响

我国现行铁路轨道车辆的评价标准主要依据 GB/T5599—2019^[6],其中用于评价平稳性的部分绝大多数是基于 Sperling 平稳性指标发展而来。

平稳性指标计算公式为^[7]

$$W = 3.57 \sqrt{\frac{A^3}{f}} F(f) \quad (2)$$

式中: A 为振动加速度; f 为振动频率; $F(f)$ 为频率修正系数。货车的平稳性评定标准见表 2^[7]。

表 2 平稳性指标等级表

平稳性等级	平稳性指标 W	评定
1 级	$W \leq 3.5$	优
2 级	$3.5 < W \leq 4$	良好
3 级	$4 < W \leq 4.25$	合格

本模型以出口的某型平车作为分析对象,该车的设计速度为 $100 \text{ km}/\text{h}$,因此,本模型对 4 种工况均以 $100 \text{ km}/\text{h}$ 的速度在加有美国 4 级谱的轨道上进行仿真,对测得的平稳性数据进行分析。

图 4—图 5 所示分别为空车横向、垂向平衡性。从图 4 和图 5 可以看出,抗菱刚度对空车新轮的横向和垂向平稳性均没有什么影响。当抗菱刚度过低小于 $1.5 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时,空车新轮和磨耗轮的平稳性都非常差,磨耗轮的横向平稳性已经不能达到合格的标准;当抗菱刚度大于 $1.5 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$,空车横向平稳性随着抗菱刚度的增大缓慢减小最后趋于稳定;空车垂向平稳性几乎不受抗菱刚度的影响。

图 6—图 7 所示分别为重车垂向、横向平稳性。从图 6 和图 7 可以看出,当抗菱刚度小于 $3 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时,抗菱刚度对重车后端垂向平稳性影响较小,重车其他横向和垂向平稳性都较差,且对横向平稳性的影响更大,抗菱刚度从 $2 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 增到 $3 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 这一过程中,重车平稳性指标大幅度降低,重车的平稳性大幅提高;当抗菱刚度大于 $3 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 后,磨耗轮横向平稳性随着抗菱刚度的增加逐渐减小,重车新轮横向平稳性和重车垂向平稳性几乎不再受抗菱刚度的影响。

3.3 抗菱刚度对运行稳定性的影响

运行稳定性主要是通过通过对轮重减载率,脱轨系数,轮轴横向力 3 项指标进行评定。GB/T5599—2019 中 3 项指标的规定如下^[6]:货车在通过小曲线半径 ($250 \text{ m} \sim 400 \text{ m}$)

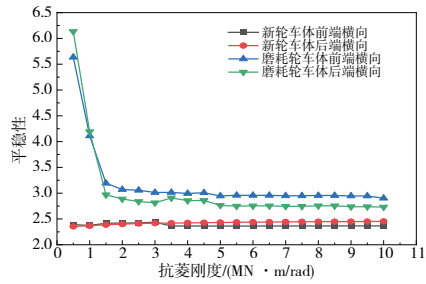


图 4 空车横向平稳性

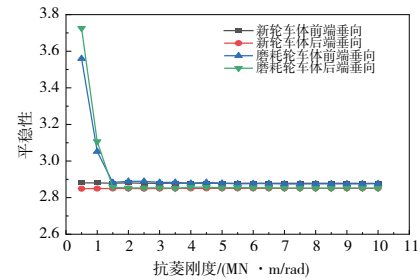


图 5 空车垂向平稳性

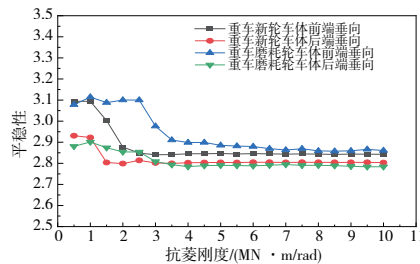


图 6 重车垂向平稳性

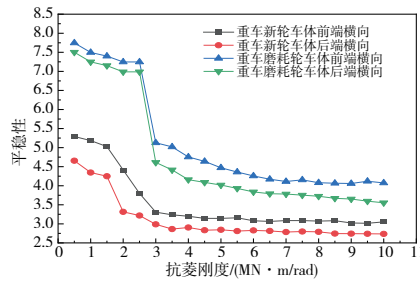


图 7 重车横向平稳性

时脱轨系数应小于等于 1.2;在试验速度小于 $160 \text{ km}/\text{h}$ 的情况下,轮重减载率应不高于 0.65;轮轴横向力的计算公式为 $H \leq 15 + (P_0/3)$, 式中的 P_0 为静轴质量。

货车在通过曲线时最容易发生脱轨,因此本模型在进行运动安全性仿真时选取半径 $R350 \text{ m}$ 、超高 $h100 \text{ mm}$ 、缓和曲线 110 m 的小半径曲线进行仿真,通过速度设为 $60 \text{ km}/\text{h}$,曲线全程加载美国 4 级谱。为了更直观地观察抗菱刚度对这些指标的影响趋势,对轮重减载率、脱轨系数、轮轴横向力 3 项指标进行归一化处理并分析,如图 8—图 10 所示。

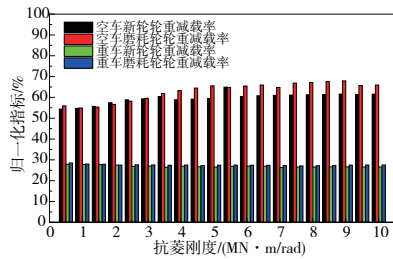


图8 轮重减载率

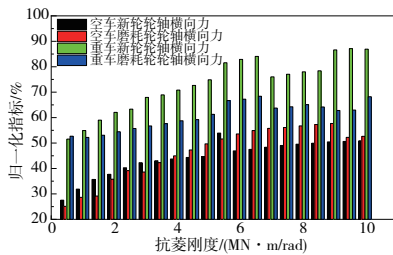


图9 轮轴横向力

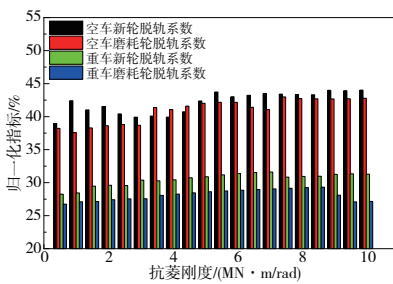


图10 脱轨系数

从图8—图10可以看出:

1) 抗菱刚度对重车的轮重减载率影响很小,随着抗菱刚度的增大,重车的轮重减载率指标缓慢减小后趋于稳定;空车轮重减载率指标小幅增加后趋于稳定。

2) 随着抗菱刚度的增加,空车和重车的轮轴横向力指标均出现明显的增大,其中对新轮的影响最为明显。当抗菱刚度过大时,轮轴横向力指标有超标的风险。

3) 抗菱刚度对脱轨系数指标的影响较小,随着抗菱刚度增大,脱轨系数指标先小幅升高,之后趋于稳定。

3.4 规律验证

为了验证规律的正确性,本小节分别取空车磨耗轮抗菱刚度分别为 $1.0 \text{ MN} \cdot \text{m/rad}$ 和 $2.5 \text{ MN} \cdot \text{m/rad}$ 两种工况和重车新轮抗菱刚度分别为 $5.5 \text{ MN} \cdot \text{m/rad}$ 和 $6.5 \text{ MN} \cdot \text{m/rad}$ 两种工况,速度取 80 km/h ,在直线工况下对上述规律进行验证,验证结果如表3所示。

表3 车辆动力学指标

工况	抗菱刚度/ ($\text{MN} \cdot \text{m/rad}$)	平稳性		运行安全性		
		横向	垂向	轮轴 横向力	轮重 减载率	脱轨 系数
空车	1.0	2.862	2.554	5.81	0.179	0.142
	2.5	2.563	2.549	8.20	0.187	0.155
重车	5.5	2.498	2.687	18.17	0.117	0.084
	6.5	2.500	2.685	19.87	0.116	0.092

从表3可以看出,在选取不同速度级时各指标的变化规律相同,从而验证了该规律的正确性。

4 结语

本文以出口的某型平车作为研究对象,通过 Simpack 动力学软件建立平车模型,以抗菱刚度作为变量对模型进行动力学仿真,对结果进行分析后得出以下结论。

1) 抗菱刚度对空车新轮的临界速度影响较小,其他3种情况的临界速度总体上呈现出阶梯状的增长,其中对重车新轮临界速度的影响最大。在合理范围内应尽可能选择较大的抗菱刚度。

2) 总体看,抗菱刚度对平稳性指标的影响较小,仅当抗菱刚度低于 $1.5 \text{ MN} \cdot \text{m/rad}$ 时,磨耗轮的平稳性较差,尤其是空车磨耗轮的横向平稳性。

3) 抗菱刚度对轮重减载率指标和脱轨系数指标的影响很小;抗菱刚度对轮轴横向力指标有很大的影响,当抗菱刚度过大时,轮轴横向力指标有超标的风险。

4) 大的抗菱刚度虽然有利于蛇行运动临界速度的提升,但过大的抗菱刚度也大大增大了车辆脱轨的风险,因此抗菱刚度不易选择过大。

参考文献:

- [1] 王金栋,童良锋,范振合. 货车转向架斜楔减振器抗菱刚度计算方法[J]. 轨道交通装备与技术,2017(5):15-17.
- [2] 刘嘉兴,吕大立,吕可维,等. 变摩擦转向架斜楔等效刚度计算及应用[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(4):1061-1070.
- [3] 罗林涛,刘华,刘寅华. 转向架交叉支撑装置抗菱刚度浅析[J]. 内燃机车,2011(5):14-17.
- [4] 任利惠,张辉,胡用生. 货车转向架抗菱刚度测试方法的研究[J]. 铁道机车车辆,2001,21(4):6-8.
- [5] 宋子洋,付茂海,陈森. 斜楔摩擦角对三轴转向架动力学性能影响研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(2):62-66.
- [6] GB/T 5599—2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
- [7] 王春山,陈雷. 铁路重载提速货车技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.

收稿日期:2022-06-06