

基于城际动车组的踏面磨耗预测及参数优化

马广宇,曾京,汪群生

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:基于 FASTSIM 理论的磨耗功模型,建立了国内某城际动车组的多体系统动力学仿真模型,通过搭建动力学仿真模型与磨耗功模型的联合仿真平台,以车轮磨耗深度 0.1 mm 为踏面外形的更换基准,实现了车轮踏面外形的磨耗预测。研究表明:仿真分析得到的车轮前 5 万公里踏面的磨耗分布与实测的车轮磨耗状态类似,仅在磨耗量上存在一定的差异;从一系悬挂参数对车轮磨耗量的影响中可以看出,减小轴箱拉杆和一系轴箱弹簧垂向刚度可以有效减少车轮磨耗,而一系垂向减振器的卸荷力与卸荷速度对磨耗量的影响很小。

关键词:城际动车组;踏面磨耗预测;磨耗功模型;参数分析

中图分类号:U213.4⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)04-0032-05

Prediction of Tread Wear and Optimization of Parameters Based on Intercity EMU Train

MA Guangyu, ZENG Jing, WANG Qunsheng

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

Abstract: In this paper, a multi-body dynamic model of intercity EMU is built, based on the wear model of FASTSIM. The dynamic model and the wear model are used to get the wear data of the wheel. If the wear is up to 0.1 mm, the tread should be replaced. The result shows that the wheel wear data of 50 thousand kilometers is more identical to the actual measured data. The influence of different parameters on the wear is obtained by numerical simulation. The calculation results show that the method of reducing the stiffness of axle box pull rod and a steel spring vertical stiffness can be used to effectively reduce the wheel wear. The influence of a vertical damper unloading force and unloading speed on the wear is very small.

Keywords: intercity EMU; tread wear prediction; wear model; parameter optimization

0 引言

对于整个铁路系统而言,车辆的乘坐舒适性和运行安全性是最为重要的。但是车辆在运行过程中,不可避免地会受到外部激励的影响,而造成轮轨间的相互作用加剧,进而引起车轮踏面和钢轨外形的磨耗,将会恶化车辆运行的品质和安全性。随着我国高速列车的提速,车轮踏面的磨耗也随之加剧,所以,在车辆的设计阶段对车轮踏面外形的预测分析对提高车辆运行的品质和安全性至关重要。

国内采用的磨耗预测模型主要有两种:Archard 磨耗模型和基于磨耗功的磨耗模型。陈帅基于 Archard 模型,建立了一种可以考虑温度效应的车轮磨耗模型^[1],罗仁使用了磨耗功模型分析了轮轨参数对车轮踏面磨耗的影响^[2-3],王伟比较了 Archard 模型及磨耗功模型的优劣^[4]。但是这些研究为了减少运算量,采样频率设置较低,距离初始接触位置较远,使得误差增大^[5]。

本文针对某城际动车组,使用 SIMPACK、FASTSIM 方法和磨耗功模型联合仿真。为了兼顾计算速度和精度,将采样频率设置为 500 Hz。车轮每转过一周可以有 11 个采样点,从中选取最靠近车轮初始接触位置的采样点,计算

磨耗量,然后对磨耗深度进行叠加,得到总的磨耗量。预测了踏面磨耗深度和形状随运营里程的变化趋势,并分析了一系悬挂参数对磨耗量的影响。

1 模型建立及仿真方法

1.1 磨耗模型

常用的磨耗模型大致有两种,一种是基于轮轨接触斑参数与磨耗功的磨耗功模型,另一种是基于轮轨法向力和接触斑滑动量的 Archard 磨耗模型。鉴于 Archard 的磨耗模型所算得的磨耗量与实际值偏差较大,所以本文采用磨耗功模型进行仿真模拟。

磨耗功模型基本假设是单位体积的磨损量与摩擦功密度成正比。踏面磨耗质量与轮轨磨耗功的关系可表示为:

$$\Delta m = kW_r = \rho \Delta V = \rho A \Delta r \quad (1)$$

式中: Δm 为车轮的磨耗质量; k 为有量纲的磨耗系数; W_r 为磨耗功; ρ 为车轮材料密度; ΔV 为车轮磨耗体积; A 为接触斑面积; Δr 为车轮踏面的垂向磨耗深度。

由于使用 FASTSIM 方法计算磨耗量时可以算出接触

基金项目:国家重点研发计划资助(2016YFB1200506)

作者简介:马广宇(1993—),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学。

斑内每个单元的磨耗量,所以车轮踏面的垂向磨耗深度可表示为:

$$\Delta r = \frac{\Delta m}{\rho A} = \frac{k W_r}{\rho A} = \frac{k P_r}{\rho b V_0} \quad (2)$$

式中: P_r 为车轮磨耗功率; b 为接触面在踏面 y 方向的半径; V_0 为车速。

1.2 动力学模型

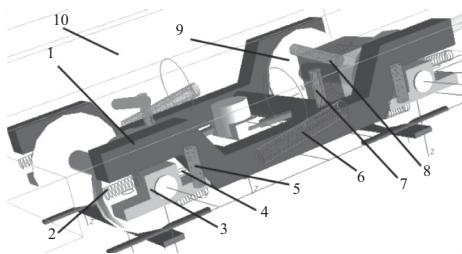
基于多体系统动力学理论,建立了国内某型城际动车组动车模型,整车共有42个自由度,包括1个车体、2个构架、4条轮对和8个轴箱。在模型中考虑了非线性的轮轨外形、非线性的轮轨接触几何关系和非线性的悬挂参数,例如非线性的减振器阻尼特性和止挡特性等,车辆系统的部分参数在表1中给出。

表1 车辆系统主要参数

参数/单位	数值
车辆定距/m	27
名义滚动圆横向跨距/m	1.493
名义滚动圆直径/m	0.89
车体质量/kg	36 500
构架质量/kg	2 920
轮对质量/kg	1 721
一系钢弹簧水平刚度/(MN/m)	0.14
一系钢弹簧垂向刚度/(MN/m)	0.54
空气弹簧水平刚度/(MN/m)	0.18
空气弹簧垂向刚度/(MN/m)	0.3

本车一系悬挂采用拉杆式轴箱定位并加装钢弹簧,辅之以垂向减振器。二系悬挂则采用空气弹簧支撑车体,并装备抗蛇形减振器、二系垂向减振器、二系横向减振器、抗侧滚扭杆、横向止挡等。

为了建立准确的动力学仿真模型,参考文献[6],建立了空气弹簧的等效模型,简化为线性弹簧与静态非线性阻尼的并联模型。此外,建立了等效的减振器数学模型,将减振器考虑成阻尼和弹簧串联的Maxwell串联模型,其中弹簧和阻尼均具有非线性特性。将钢弹簧简化为线性弹簧,垂向刚度为0.54 MN/m。从而,建立得到如图1所示的车辆系统动力学仿真模型。



1—构架;2—轴箱拉杆;3—轴箱;4—轴箱钢弹簧;
5—一系垂向减振器;6—抗蛇形减振器;7—二系垂向减振器;
8—二系横向减振器;9—轮对;10—车体

图1 车辆系统动力学仿真模型接触关系

1.3 仿真方法

使用SIMPACK模型进行动力学仿真,将采样频率设置为500 Hz,计算出车辆在预定轨道上运行时的法相接触力、蠕滑率及横向位移等参数,运用FASTSIM方法计算得出一个接触斑内 $n \times n$ 个接触点的摩擦功率分布,随后使用磨耗功模型进行后处理,得出每个接触斑的磨耗量。

将轮对与钢轨接触的初始接触点设为初始位置,找出轮对每转过一周最靠近初始踏面位置的采样点,将此点磨耗分布的横向位置加上轮对的横向位移量,即为轮对每转一周后的磨耗位置及磨耗量。将轮对每转过一次的磨耗量进行叠加,则可以得到踏面在车轮轴向型面上的总磨耗量。

由于车辆在实际运行之中踏面磨耗比较均匀,所以总磨耗量运用三次样条曲线进行处理,使其平滑。根据文献[7],磨耗0.1 mm更新一次踏面形状是可行的。所以当磨耗量达到0.1 mm时,用初始踏面形状减去磨耗量,即可得到新的踏面形状,更换踏面形状,依次往复。整个仿真计算过程如图2所示。

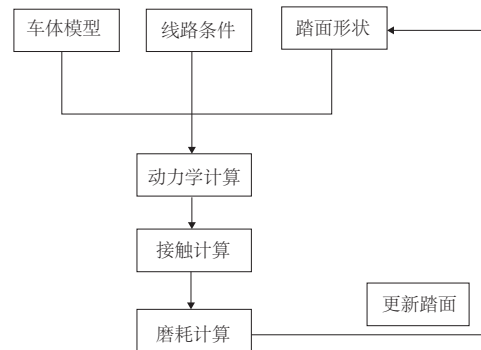


图2 仿真计算流程

2 车轮踏面磨耗预测

本模型选用某型动车组XP55踏面和60 kg/m型轨道,轨底坡设置为1/40,车轮半径为0.445 m。激励采用实测的武广线轨道线路谱,车辆运行速度为200 km/h。

为了使磨耗预测更加贴近实际情况,将轨道设置为3500 m左右对称的S型弯道。其中左右弯道长度各300 m,曲线半径为2200 m,超高170 mm(参考250 km/h高速列车最大弯道半径);直线长度2900 m。将车轮轮对按照初始运行方向进行编号,如图3所示。

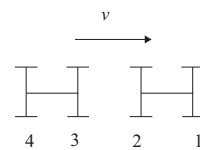


图3 转向架轮对编号示意简图

由于本次仿真实验需要在S弯往复运行,1、4位轮对交替为导向轮和从动轮,其磨耗量相同。所以为了减少计算量,在一次S弯单程运行后,可以将1、4位轮对同侧单

轮踏面磨耗量相加,即为在S弯往返运行一次的同侧车轮的总磨耗量,操作过程如图4所示。在本文中,将1、4位轮对左右轮磨耗量分别计算,得出左右轮的总磨耗量,并使用原始踏面分别减去各自的磨耗量,可以得到下一次迭代的踏面形状。

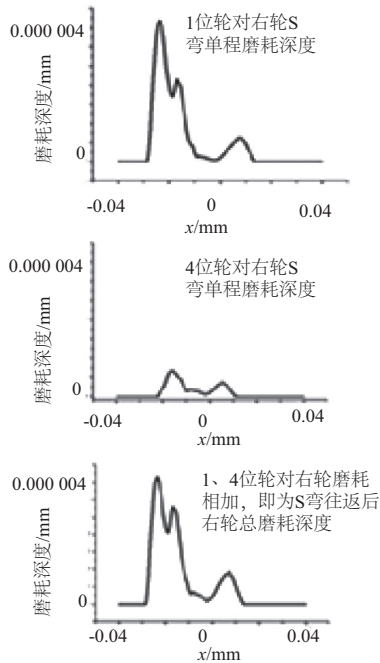


图4 轮对磨耗处理过程

2.1 车轮旋转一周的磨耗分布

由于车辆在通过曲线时的磨耗量要远大于通过直线的磨耗量,所以探讨车辆通过曲线时的磨耗量更有价值。根据该模型通过曲线过程的数值仿真,得出法向接触力为67 kN,横向蠕滑率为0.0002,纵向蠕滑率为0.001,自旋蠕滑率为0.13。通过磨耗功模型计算得到的1位轮对右轮磨耗深度分布如图5所示。

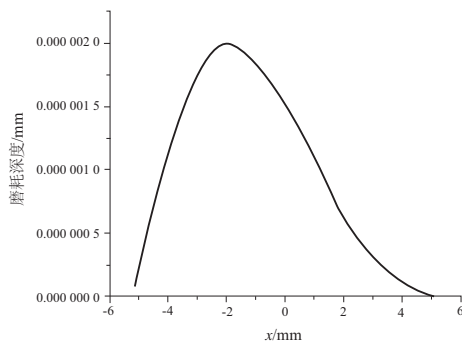


图5 车轮通过曲线时旋转一周的磨耗量

由图5可知,在通过曲线的过程中,单次磨耗集中在轮缘附近,与实际情况相符。

2.2 车轮运行五万公里后的磨耗深度分布

该车在以200 km/h的速度在S型弯道上运行,并以最大磨耗深度0.1 mm作为踏面更新的条件(假定一次踏

面更新过程中踏面形状并没有发生改变)。得到3万公里和5万公里后的总磨耗深度(图6),这里以1位轮对右轮为例进行说明。

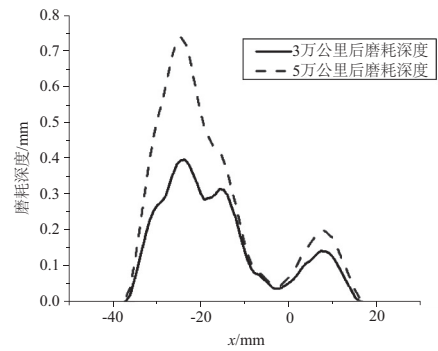


图6 3万公里与5万公里后的磨耗分布

由图6可得,3万公里后车轮的磨耗深度为0.4 mm,5万公里后车轮的磨耗深度大致为0.75 mm,磨耗主要分布在名义滚动圆的两侧,且轮缘的磨耗量要大于踏面的磨耗量。

某型城际动车组实测磨耗分布如图7所示,其踏面磨耗区域与仿真数据基本相似,如图8所示。根据长期跟踪某型动车组的磨耗数据,其5万公里磨耗量约为0.5 mm,比模型预测要小,这是因为本次仿真只针对小曲线进行,未考虑实际线路上的大曲线。

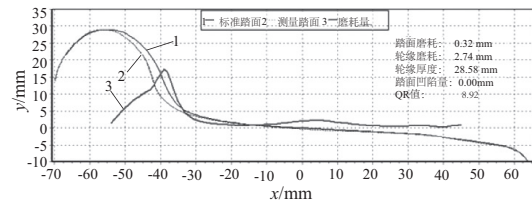


图7 某型动车组实测磨耗分布

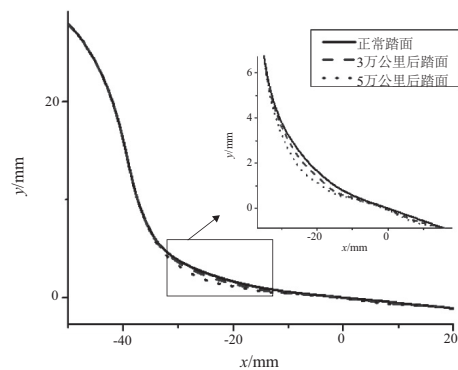


图8 3万公里与5万公里后的踏面形状

3 一系悬挂参数影响

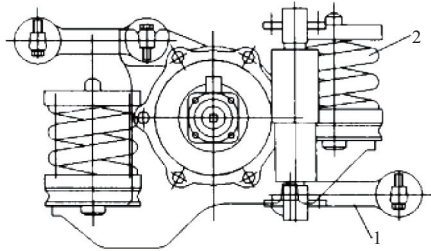
对于铁路客车而言,一系悬挂参数对车轮踏面磨耗的影响较大,为此本文对比分析了轴箱拉杆刚度、一系轴箱弹簧垂向刚度、一系垂向减振器的卸荷力和卸荷速度对车轮磨耗的影响。

模型选用和轨道参数设置与上文相同,曲线构成:500 m 直线+200 m 缓和曲线+400 m 左曲线+200 m 缓和曲

线+500m 直线。曲线半径为 2200m,超高为 170mm。由于导向轮磨耗较大,所以选取 1 位轮对右轮作为讨论对象。

3.1 轴箱拉杆刚度对磨耗的影响

本城际动车组采用拉杆式定位作为轴箱定位方式,主要作用为传递纵向力,其优点为轴箱与构架弹性联系,缓和了冲击,运行的平稳性提高。其结构如图 9 所示。



1—轴箱拉杆;2—系轴箱弹簧

图 9 轴箱拉杆结构图

轴箱拉杆分为上下两部分且刚度不同,对上下拉杆的刚度分别取其正常值的 1/2 与 2 倍,在列车模型通过曲线后,得到的磨耗分布如图 10、图 11 所示。

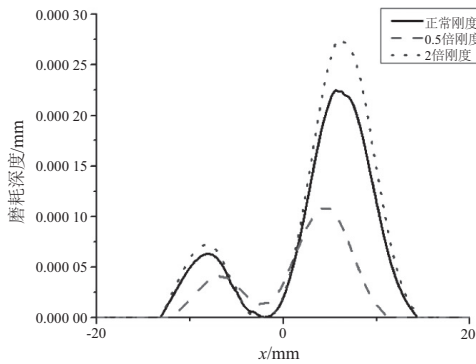


图 10 上拉杆刚度对磨耗影响

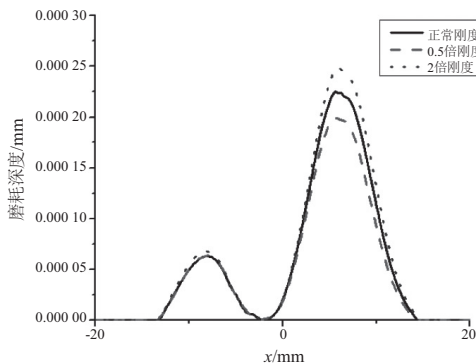


图 11 下拉杆刚度对磨耗影响

由图 10、图 11 可以看出,上拉杆的刚度变化对车轮踏面磨耗影响很大,随着上拉杆刚度的增大,其磨耗量也逐步上升,磨耗区域也有所增加。下拉杆的刚度变化对车轮踏面磨耗的影响规律与上拉杆基本相同,但是其幅值要远小于上拉杆,仅为 20%左右。由此可见,上下拉杆刚度的增大与磨耗量的增大成正相关,并且会使车轮的横向

位移增大。

3.2 一系轴箱弹簧对磨耗的影响

该动车组模型一系垂向钢弹簧分布在轴箱的两侧,每一组钢弹簧由 2 个螺旋钢弹簧组成,且刚度相同。对一系垂向钢弹簧的垂向刚度分别取正常值及其 1/2 和 2 倍,进行动力学仿真,其磨耗分布如图 12 所示。

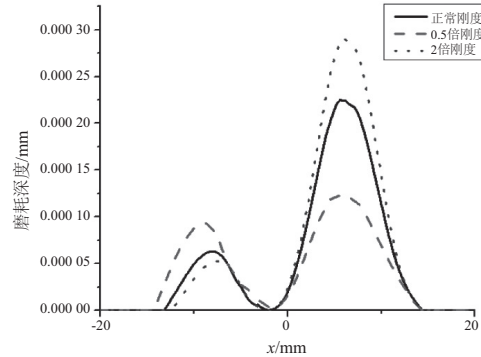


图 12 一系轴箱弹簧垂向刚度对磨耗影响

由图 12 可以看出,随着一系轴箱弹簧的垂向刚度增大,在轮缘附近处的磨耗量略有减小,而在踏面处的磨耗量有了显著的增大,磨耗的分布则随着刚度的增大而减小。总体而言,一系垂向钢弹簧的刚度增大会增加车轮踏面的磨耗,并使轮对的横移量减少。

3.3 一系垂向减振器对磨耗的影响

在一系垂向减振器中,卸荷力与卸荷速度对车辆的平稳性指标影响很大,所以选择这两个指标探究一系垂向减振器对踏面磨耗影响。

将卸荷力分别增大和减小 40%,并进行动力学仿真,得到的磨耗量如图 13 所示。

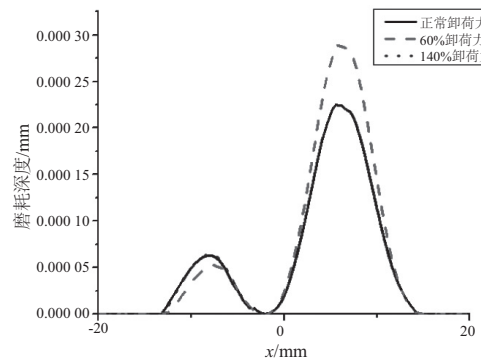


图 13 卸荷力对磨耗量的影响

由图 13 可得,随着卸荷力的增大,车辆的磨耗量随之减小,但是到了一定限度以后,车轮磨耗量减小速度也变得缓慢,正常的卸荷力为这一临界值。

将卸荷速度变为原值的 1/2 和 2 倍,进行动力学仿真,得到磨耗量如图 14 所示。

由图 14 可得,卸荷速度的增大会略微增大车轮踏面的磨耗,但是相较于轴箱拉杆和一系轴箱弹簧刚度对车轮踏面磨耗的影响要小很多,几乎可以忽略不计。

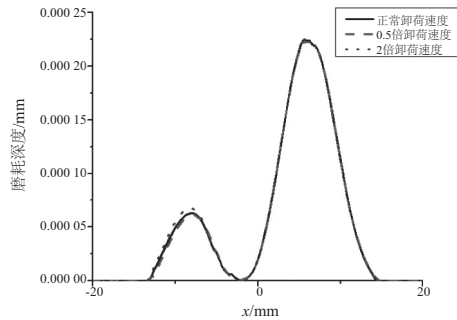


图 14 卸荷速度对磨耗量的影响

4 结语

1) 基于 FASTSIM 理论的磨耗功模型,建立了国内某城际动车组的多系统动力学仿真模型,通过搭建动力学仿真模型与磨耗功模型的联合仿真平台,实现了车轮踏面外形的磨耗预测。

2) 随着车辆模型运营里程数的不断增加,车轮踏面的磨耗量分布与实际车辆运行的磨耗情况基本相似,但是由于模型仿真不能实际还原车辆运行的实际情况,所以预测磨耗值要大于车辆的实际磨耗值。

3) 轴箱拉杆的刚度增加会使磨耗量增加,并且会使踏面磨耗区域变大,其中上拉杆要远大于下拉杆的影响;一系轴箱弹簧的垂向刚度增加也会明显加剧车轮磨耗,但是会使其磨耗区域减小;一系垂向减振器的卸荷力和卸荷速度对磨耗量变化影响很小,与刚度的变化相比几乎可以忽略。

参考文献:

- [1] 陈帅. 踏面制动温升对车轮磨耗影响的研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [2] 罗仁,曾京,邹平波,等. 高速列车轮轨参数对车轮踏面磨耗的影响[J]. 交通运输工程学报,2009,9(6):47-53,63.
- [3] 罗仁,曾京,戴焕云,等. 高速列车车轮磨耗预测仿真[J]. 摩擦学报,2009,29(6):551-558.
- [4] 王伟,罗仁,曾京. 车轮型面磨耗预测模型及仿真分析[J]. 铁道车辆,2009,47(9):1-5.
- [5] 汪群生,曾京,罗光兵,等. 车轮磨耗下车下悬吊系统振动特性研究[J]. 机械工程学报,2016,52(10):113-118.
- [6] 吴兴文,池茂儒,朱旻昊,等. 空气弹簧模型对铁道车辆动力学性能的影响[J]. 交通运输工程学报,2013,13(2):54-59.
- [7] 曹巧. CRH380BL 动车组踏面磨耗规律研究及动力学影响分析[D]. 成都:西南交通大学,2015.

收稿日期:2018-01-17