

文章编号:1005-0523(2014)03-0068-06

山区客运专线曲线区段钢轨磨耗量的仿真分析

刘丁阳¹, 吴亚平¹, 尚伦霖², 徐国浩², 旋艳杰³, 裴绍波³

(1.兰州交通大学土木工程学院,甘肃 兰州 730070;2.兰州交通大学机电工程学院,甘肃 兰州 730070;

3.唐山轨道客车有限责任公司,河北 唐山 063035)

摘要:以山区客运专线钢轨磨耗量以及运营安全性作为研究对象,数值仿真作为手段,仿真计算基于Kalker线性蠕滑理论,借鉴Elkins磨耗指数模型,考虑轨道不平顺,车轮踏面与钢轨型面及弹性地基影响,使用SIMPACK软件建立动车组模型仿真,计算了蠕滑率和蠕滑力的大小,讨论了曲线半径对蠕滑率、钢轨磨耗量、减载率及脱轨系数的影响。比较了不同曲线下,两种踏面的动力学性能。随着圆曲线半径减半,LMa(高速动车组踏面)的左轨磨耗量增大了大约6倍左右。从磨耗量和安全性的角度对山区客运专线设计方法提出建议。

关键词:曲线半径,山区客运专线,钢轨磨耗量

中图分类号:U213.2;TU27

文献标志码:A

山区客运专线^[1-2]由于经济和技术政策的原因,建设标准相对于常规客运专线较低。在曲线半径给定的情况下,车辆以不同的速度通过曲线,进行车辆系统动力学仿真是一个新兴研究课题^[3]。车辆的动力学行为,线路平稳性指标以及钢轨的磨耗量是设计人员的重要考量。传统的单个轮轨接触理论计算磨耗时,尽管较为简便,但是该理论不能正确考虑蠕滑率的大小,错误地用冲角代替蠕滑率,忽略踏面和型面的影响^[4-5]。文献^[6-7]尽管使用车辆系统动力学软件建立简化模型,计算出蠕滑率和蠕滑力的大小,但更多的是在研究提升车辆系统的性能方面。利用SIMPACK软件研究动车组整体通过曲线轨道时,轮轨的相互作用,接触关系及其对钢轨磨耗量及动车组行车安全性的影响。

1 轮轨接触

1.1 轮轨单点接触

当接触点均匀分布与轮轨之间,这样磨耗分布均匀,避免钢轨侧磨加剧,是良好的接触关系,也有利于车轮踏面形状保持,以免频繁镟修。如图1所示,LMa踏面与CHN60轨(中国铁路标准轨型),接触点分布均匀,没有出现“三次跳跃”,接触点分布也未超出钢轨中心线,属于匹配良好。其中:轨距为1 435 mm(轨下16 mm测量);轮距为1 500 mm;车轮直径860 mm;单点接触;LM踏面(普速列车、城轨车辆及货车踏面)的接触点分布可参考文献^[9]。

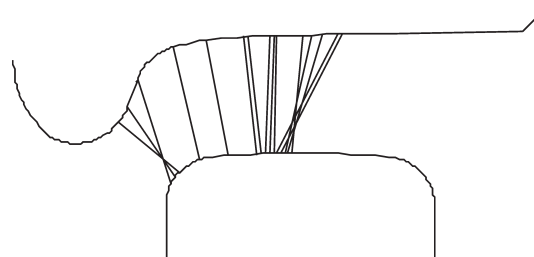


图1 轮轨接触点分布(LMa踏面)

Fig.1 Wheel-rail contact point distribution (LMa tread)

收稿日期:2014-03-05

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51236003)

作者简介:刘丁阳(1989—),男,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学;吴亚平(1958—),男,教授,博士生导师,研究方向为轮轨关系。

1.2 接触力学特征

蠕滑(车轮滚动中伴随有滑动,一般非常轻微但是忽略它会导致严重的铁路安全事故产生)是轮轨系统走行时的孪生兄弟,当然了,静止停放在轨道上的铁路机车车辆不存在蠕滑。因此,蠕滑是自激振动的响应。蠕滑力可理解为钢轨表面的切削力;蠕滑率是滑动的大小度量。蠕滑率和蠕滑力当然是影响高速动车组走行性能的关键因素之一。考虑轮轨蠕滑时,选择Kalker线性蠕滑理论,蠕滑力可用以下等式表示^[8-9]。

$$\begin{cases} f_x = -f_{11}\xi_x \\ f_y = -f_{22}\xi_y - f_{23}\xi_{sp} \\ m_z = f_{23}\xi_y - f_{33}\xi_{sp} \end{cases} \quad (1)$$

其中: f_x 为纵向蠕滑力; f_y 为横向蠕滑力; m_z 为自旋蠕滑力矩; f_{11} , f_{22} , f_{23} , f_{33} 分别为纵向蠕滑系数; 横向蠕滑系数; 自旋/横向蠕滑系数; 自旋蠕滑系数; ξ_x , ξ_y , ξ_{sp} 分别为纵向蠕滑率; 横向蠕滑率; 自旋蠕滑率。

2 车辆-轨道系统动力学模型计算与求解

2.1 考虑轨道不平顺的影响

轨道不平顺是必然的。欧美等国有自己的标准轨道谱。我国的轨道谱尚在完善和研究中,全国还没有统一使用的标准轨道谱。轨道不平顺不妨考虑德国轨道谱。

以高低不平顺为例:

$$S_v(\Omega) = \frac{A_v \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_r^2)(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (2)$$

式中: $S_v(\Omega)$ 为功率谱密度, $\text{m}^2 \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$; Ω 为轨道不平顺的空间角频率, $\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}$; Ω_c , Ω_r 为截断频率, $\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}$; A_v 为粗糙度常数, $\text{m}^2 \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ 。

按照惯例^[11],在正线区间曲线地段上仿真,选用高干扰谱。因此,本次仿真选用德国高干扰谱。因此 Ω_c 取用 $0.8246 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$, Ω_r 取用 $0.006 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$, A_v 取用 $10.80 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{rad}$ 。

2.2 车辆动力学仿真模型

本次仿真车辆是由一个车体,两个转向架以及四个轮对组成的。

由于车体结构刚性很大(摇头转动惯量等很大),车体选择弹性或刚性做出的结果与本文涉及的相差较小,且幅值的相差并不是很大,不妨将车体看作为刚体进行分析和计算,这是适宜的。

如图2所示,本次仿真的CRH2动车组动力学模型。

根据本文2.5节提供的不同曲线,在当选用曲线半径1500 m,选用LMa踏面,使用临界速度法求解计算得到临界(分岔)速度 $v_{CR} = 218.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。选用LM踏面时,临界速度预计会更加高。因为LM踏面锥度比LMa踏面的锥度大,锥度越大,曲线通过性能越强。SIMPACK中迭代求解临界速度,变量为车辆速度和踏面锥度,以考察车辆横摆、侧滚和摇头时临界速度的变化情况,求解线性蠕滑理论下的临界速度。

根据铁路线路设计规范^[11]以及实际运营情况,使得仿真符合实际,本次仿真速度取用 $v = 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。事实上,根据文献[10],当速度超过临界速度,动车组会出现复杂的动力学行为,实际运营不能超过临界速度;另外国内出现走行速度 $v = 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的山区客运专线越来越多。

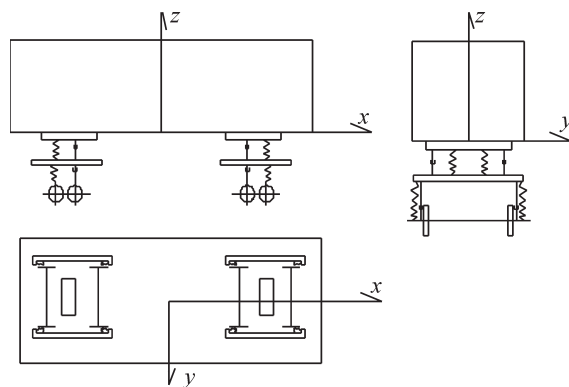


图2 本次仿真CRH2车辆系统动力学模型

Fig.2 Model of the CRH2 vehicle system dynamics

2.3 车辆动力学微分方程

根据车辆系统动力学和机构学拓扑关系,铁道机车车辆系统的运动微分方程组可表示为

$$M\{\ddot{q}\} + \left\{C + \frac{C_{WR}}{V}\right\}\dot{q} + \{K + K_{WR}\}q = Q \quad (3)$$

式中: M 为惯性矩阵; C 为粘性阻尼矩阵; C_{WR} 为蠕滑阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; K_{WR} 为蠕滑刚度和接触刚度矩阵; q 为位移向量(列向量); V 为车辆运行速度; Q 为激励(列向量)。

一般的,铁道机车车辆振动系统(SS8电力机车、25G客车及CRH6动车组等等)有 $6N$ 个自由度。 N 为主要零部件的数目,包括车体,走行部和轮对。由于本文将车体、走行部等视为刚体,每个刚体6个自由度且不考虑车体横向振动;也不考虑由于薄壁结构约束扭转引起的翘曲和畸变引起的振动。伸缩振动可以忽略不计。按照文献[9],本文建立的车辆系统动力学仿真模型有35个自由度,可用17个常微分方程组(ODEs)表示,形式如(3)式所示。本文选用车辆系统动力学软件SIMPACK,不直接建立方程求解。根据作者个人对该软件的认知,认为该软件建立了35个微分方程并求解它们。因为根据自由度的数目来考虑建立微分方程的数目更加符合模块化程序的要求。

2.4 车辆主要性能参数

根据CRH2^[12]动车组列车相关资料,车辆主要性能参数如表1。

表1 车辆的质量、转动惯量等

Tab.1 The vehicle mass and moment of inertia

序号	项目	数值
1	车体质量/kg	32 000
2	摇头转动惯量/(kg·m ²)	1 970 000
3	转向架质量/kg	1 813
4	轮对轴距/m	2.56
5	一系悬挂/(MN·m ⁻¹)	1.22
6	一系阻尼/(N·s·m ⁻¹)	4 000
7	二系悬挂/(MN·m ⁻¹)	0.43
8	二系阻尼/(N·s·m ⁻¹)	32 000
9	中央悬挂横向阻尼/(N·s·m ⁻¹)	32 000
10	中央悬挂垂向阻尼/(N·s·m ⁻¹)	20 000
11	抗侧滚扭杆刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	940

2.5 不同圆曲线半径比较

本次仿真计算选用5组曲线,均为直线+缓和曲线+圆曲线+缓和曲线+直线。缓和曲线长度取用250 m,超高为150 mm。根据山区客运专线选线特点和规范有关规定,本次仿真选用圆曲线半径分别为1 500, 2 000, 2 500, 2 800, 3 000, 3 300 m。

竖向弹性系数^[10] $K_y=75 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$,阻尼系数 $C_y=9.4 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$;水平弹性系数 $K_x=20 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$,阻尼系数 $C_x=4.9 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

该弹性系数可理解为作用于轮轨接触斑处的点弹簧。

如图3所示,曲线半径越小,左轨纵向蠕滑率越高。但是,曲线半径对右轨蠕滑率影响较小,限于本文篇幅未提供。当曲线半径为1 500 m时,LMa踏面:左轨纵向蠕滑率为7.2‰。曲线半径为3 300 m时,左轨纵向蠕滑率为1.5‰。LM踏面:左轨纵向蠕滑率为5.2‰。曲线半径为3 300 m时,左轨纵向蠕滑率为3.7‰。LMa踏面的磨耗对曲线半径变化较敏感。

工程中常用(4)式^[12]计算磨耗量 W ,该式借鉴了Elkins磨耗指数模型。物理定义为:单位面积的蠕滑功率的大小。

$$W = \frac{\mu}{0.6} \frac{f_x \xi_x + f_y \xi_y}{A} \quad (4)$$

其中: A 为接触面积, μ 为库仑摩擦系数, 根据行业特点以 0.4 计取。

如图 4, 图 5 所示, 磨耗量与曲线半径是非线性关系。设左轨为外轨, 右轨为内轨, 在曲线半径为 1 500 m 左右时, 左轨的磨耗量大于右轨。左轨是小半径山区客运专线的维护重点和关键。在曲线半径较小的时候 LM 踏面的磨耗量小于 LMa 踏面的磨耗量。曲线半径大于 2 000 m 时, LM 踏面的磨耗量比 LMa 的大。根据本文仿真计算得到的直线区段 LM 踏面的左轨磨耗量为 0.141, LMa 踏面的为 0.034 1。可知, LMa 踏面适合通过曲线半径较大的曲线区段和直线区段。LM 踏面有自己的特点, 可以扩大其使用范围, 如山区客运专线及城际铁路。LM 踏面在曲线半径为 1 500 m 时, 磨耗量比直线区段大了 7 倍多; 符合铁路工务方面的统计。

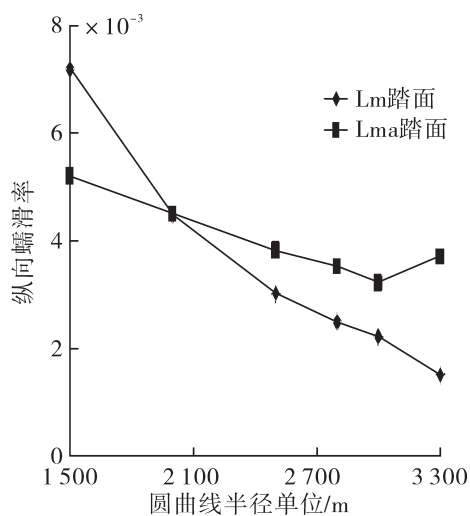


图3 左轨纵向蠕滑率

Fig.3 Longitudinal creep rate of left track

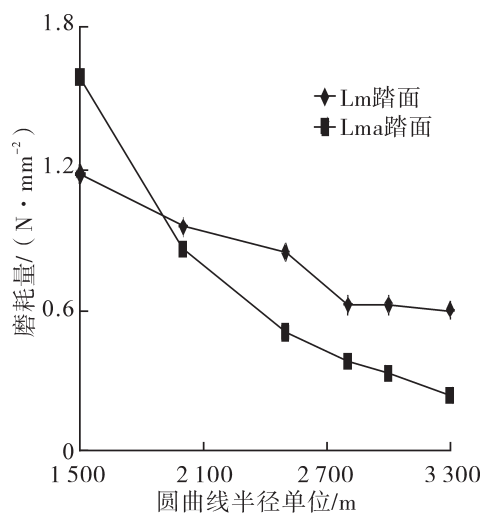


图4 左轨磨耗量

Fig.4 Wear index of left track

脱轨系数是轨道车辆安全性评估的重要指标。如图 6 所示, 随着曲线半径加倍, 脱轨系数降低到原来 35%。可见, 曲线半径是影响行车安全性的重要因素。当曲线半径为 1 500 m 时, 脱轨系数为 0.43, 小于临界值 1.0。

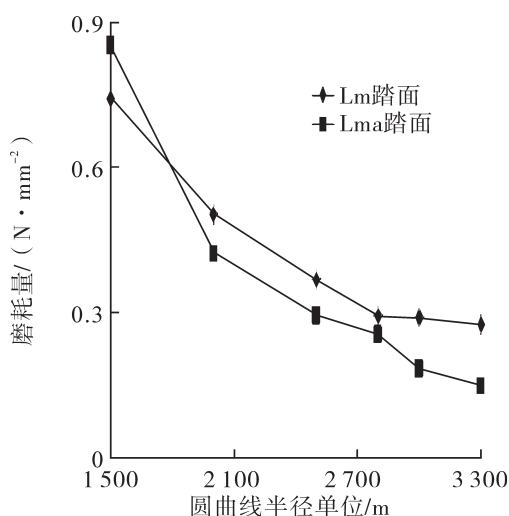


图5 右轨磨耗量

Fig.5 Wear index of right track

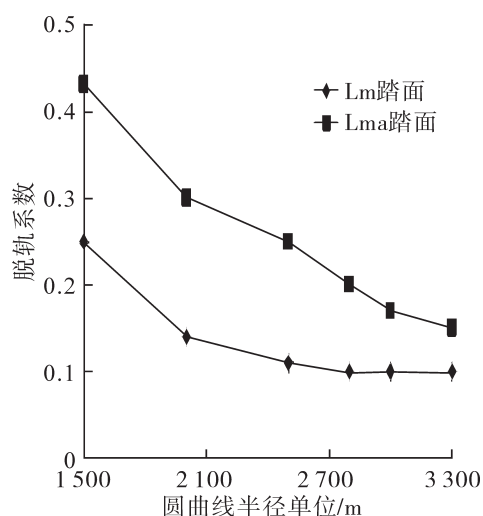


图6 脱轨系数

Fig.6 Derailment coefficient

减载率作为脱轨系数的重要补充,更完备地对行车安全进行评估,两者同时考虑可有效防止恶性事故的发生。车辆最大减载率0.25,远低于界限值0.6。因此,当走行速度 $v=120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,在给定的车型和线路下运行是合适的。

3 结论

曲线半径对磨耗量影响非常剧烈,定量地分析可知,曲线半径减半,磨耗量由0.23增大到1.59,增大了大约6倍左右,脱轨系数由0.2增大到0.43,增大了近2倍。曲线半径为2 000 m左右的区间,是山区客运专线的维护重点。尽管采用小半径可能会比较经济,但过小的曲线半径会增大日后线路维护费用及行车的不安全度。因此选用适宜的曲线半径是很重要的。从图3~5可见,山区客运专线在走行速度 $v=120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 条件下,曲线半径高于2 000 m较为适宜。针对线路条件特别艰难的山区客运专线,作者建议车轮使用LM踏面。LM踏面的稳定性很好,在速度 $v=120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下,CRH2动车组选用LM踏面性能表现优异。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国铁道部.TB/T 449-2003 机车车辆车轮轮缘外形[S].北京:中国铁道出版社,2003.
- [2] 中华人民共和国铁道部.TB/T 2344-2012 43~75 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 钢轨订货技术条件[S].北京:中国铁道出版社,2012.
- [3] 周新建,王琦.不同车轮踏面对高速轮轨关系的影响研究[J].华东交通大学学报, 2011, 28(2):14-18.
- [4] 段固敏,许实儒.用蠕滑中心法研究轨道几何参数对钢轨侧磨的影响[J].兰州铁道学院学报, 1993, 12(2):10-17.
- [5] 段固敏.轮轨磨耗指数的分析[J].西北民族学院学报, 1999, 20(1):22-26.
- [6] ROGER ENBLOM, MATS BERG. Impact of non-elliptic contact modelling in wheel wear simulation[J]. Wear, 2008(265):1532-1541.
- [7] MARTIN ROSENBERGER, PETER DIETMAIER. The influence of the wheelsets' relative kinematics of railway vehicles on wheel/rail wear in curved track[J]. Vehicle System Dynamics, Supplement, 2008, 46:403-414.
- [8] KALKER J J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction[D]. Delft: Delft University of Technology, 1967.
- [9] 胡用生.现代轨道车辆动力学[M].北京:中国铁道出版社,2009.
- [10] 马飏,丁旺才,李国芳.考虑非线性轮轨关系的高速客车横向动力学研究[J].动力学与控制学报, 2012, 10 (4):329-335.
- [11] 中华人民共和国铁道部.GB50090-2006 铁路线路设计规范[S].北京:中国计划出版社,2006.
- [12] 任尊松.车辆系统动力学基础[M].北京:中国铁道出版社,2009:163.

Simulation Analysis of Track Wear in Curve Sections of Mountainous Passenger Rail Line

Liu Dingyang¹, Wu Yaping¹, Shang Lunlin², Xu Guohao², Xuan Yanjie³, Pei Shaobo³

(1.School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2.School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3.Tangshan Railway Vehicle, Co., Ltd., Tangshan 063035, China)

Abstract: This paper mainly studies the amount of wear and operational safety of the mountainous passenger transport line with numerical simulation as the means. Based on Kalker linear creepage theory, using Elkins wear index model for reference, applying SIMPACK software to establish the CRH2 EMU, and taking the effects of track and tread irregularity and the elastic foundation effect, the paper calculates the creepage rate and force, and analyzes the effect of curve radius on the creepage rate, wear of rail, load reduction rate and derailment coefficient. Meanwhile, the dynamic performance of both treads is compared under the conditions of six different curves. The results show that with half of the circular curve radius, the wear amount of left track increases about 6 times. Finally, the paper proposes some relevant advice to the design theory on mountainous railway line for passenger traffic from the perspective of the amount of wear and operational safety.

Key words: radius of curve; mountainous rail line for passenger traffic; wear of track