

文章编号: 1674—8247(2022)06—0017—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.06.004

基于动力分析的高速铁路钢轨磨耗预测方法研究

陈浩

(中国铁路西安局集团有限公司, 西安 710000)

摘要:为探讨高速铁路钢轨磨耗预测方法,本文依托西成客运专线郿邑至新场街高坡区段,运用多体动力学软件UM建立钢轨磨耗预测模型,分析了通过总重50 Mt时钢轨磨耗情况,结果表明预测模型与实际情况大致相符;探讨了随通过总重的增加钢轨磨耗的变化规律,分析得到钢轨打磨周期设置成40 Mt较为合理。最后,对各项动力学指标随通过总重的变化进行了简要分析。

关键词:高速铁路;钢轨磨耗预测;打磨周期;动力学指标

中图分类号:U211.5 文献标识码:A

Study on Prediction Method of Rail Wear of High-speed Railway Based on Dynamic Analysis

CHEN Hao

(China Railway Xi'an Group Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to probe into the prediction method of rail wear of high-speed railway, this paper uses the multi-body kinetics software UM to establish a rail wear prediction model based on the high slope section from Huyi to Xinchang Street of Xi'an-Chengdu Passenger Dedicated Line, and analyzes the rail wear when the total weight is 50 Mt. The results show that the prediction model is roughly consistent with the actual situation. The change rule of rail wear with the increase of total passing weight is discussed, and it is reasonable to set the rail grinding cycle to 40 Mt. Finally, the changes in kinetic indexes with the total weight were analyzed briefly.

Key words: high-speed railway; rail wear prediction; grinding cycle; kinetics index

高速铁路由于速度快、行车密度大,轮轨动力作用剧烈,轮轨之间的磨耗增加,进而导致轮轨疲劳等问题。长此以往,不仅运营成本大大增加,还对行车安全性和舒适性产生重大影响。通过钢轨磨耗预测演化,可掌握磨耗的发展过程和规律,进而优化轮轨之间的廓形,合理安排钢轨打磨周期,改善轮轨接触关系,降低高速铁路运营维护成本,产生较好的经济效益。

目前,轮轨磨耗预测主要集中在车轮磨耗预测

分析方面,对钢轨的磨耗预测研究较少,对于钢轨磨耗更多的研究是定性地反映轮轨磨耗的特征和规律。因此,本文基于动力学分析软件UM对钢轨磨耗预测模型进行仿真分析,探讨钢轨磨耗的发展规律。

1 轮轨滚动接触理论

1.1 国内外研究现状

钢轨磨耗问题一直是各国铁路工务部门重点关注的难题,国内外学者对此开展了大量研究,主要包

收稿日期:2021-12-26

作者简介:陈浩(1994-),男,助理工程师。

引文格式:陈浩. 基于动力分析的高速铁路钢轨磨耗预测方法研究[J]. 高速铁路技术,2022,13(6):17-22.

CHEN Hao. Study on Prediction Method of Rail Wear of High-speed Railway Based on Dynamic Analysis[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6):17-22.

括:Wen^[1]建立了钢轨的有限元模型,计算得到轮轨法向和切向接触应力并作用于该有限元模型上,进行轮轨滚动数值模拟;Jendel 基于 Gensys 方法,采用赫兹理论和 FASTSIM 理论计算法向和切向接触应力,利用经典的 Archard 磨耗模型,通过3次样条插值平滑得到磨耗分布和磨耗型面;Ishida^[2]对曲线半径400 m和900 m的2条曲线进行钢轨磨耗试验,分析得到钢轨磨损对轮轨横向力和冲角的影响;侯传伦^[3]建立了半轮对轮轨接触有限元模型,根据实测的轮轨型面数据,仿真分析了磨耗后轮轨法向接触应力和钢轨材料等效应力等,结果显示过大的接触应力引起钢轨材料的塑性变形,进而产生疲劳裂纹等损伤;金学松等^[4]基于车辆-轨道耦合动力学理论、钢轨材料摩擦磨损理论和三维非赫兹滚动接触理论,分析得到了较为完整的钢轨波形磨耗数值计算模型,研究钢轨波磨的形成机理。

1.2 Kalker简化理论

轮轨滚动接触理论是研究轮轨关系的基础,其核心是要解决轮轨法向和切向接触问题。本文采用 Kalker 简化理论和 FASTSIM 算法^[5-8],接触斑设定为椭圆形,轮轨接触计算过程中接触面沿着滚动方向被分成若干独立平行的矩形,基于椭圆的形状每个单元有相同的长度(a_i/MX),如图1所示,蠕滑率、蠕滑力以及法向力在单元中心进行计算。

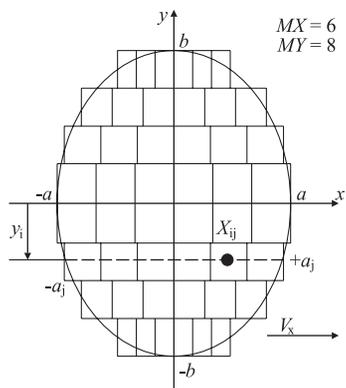


图1 FASTSIM 中接触区划分图

Kalker 简化理论定义轮轨切向接触力呈现单值线性的分布规律,当车轮接触椭圆斑的边缘时,切向力是无滑动的,离开时切向力为零。接触区在 x 和 y 方向上的非饱和应力的计算公式为:

$$P_x(x, y_i) = \left(\frac{v_x}{L_1} - y_i \frac{\varphi}{L_3}\right)(x - a_i) \quad (1)$$

$$P_y(x, y) = \frac{v_y}{L_2}(x - a_i) + \frac{\varphi}{2L_3}(x^2 - a_i^2) \quad (2)$$

式(1)和式(2)分别表示纵向刚性滑动和自旋影响,对其进行积分得到接触力计算公式:

$$F_x = - \iint p_x(x) dx dy = \frac{-8a^2bv_x}{3L_1} \quad (3)$$

$$F_y = - \iint p_y(x) dx dy = \frac{-8a^2bv_y}{3L_2} - \frac{\pi a^3b\varphi}{4L_3} \quad (4)$$

式中: a 、 b ——分别表示椭圆接触斑的长、短轴;

a_i ——矩形边缘;

L_1 、 L_2 、 L_3 ——线性柔度系数;

v_x ——纵向蠕滑率;

v_y ——横向蠕滑率;

φ ——自旋蠕滑率。

基于该理论基础和算法,可以满足铁路车辆动力学轮轨接触的计算要求。

车辆在经过曲线时会发生多点接触,轮轨接触情况如图2所示。其中 E_1 和 E_2 为接触斑, T_1 和 T_2 为纵向和横向蠕滑力的合力, N_1 和 N_2 为法向力,每个接触斑的磨耗量叠加后得到轮轨磨耗量。

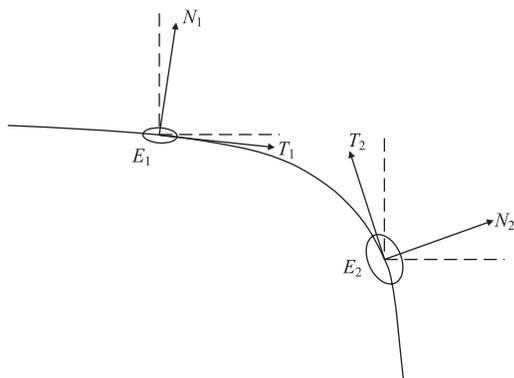


图2 多点接触示意图

2 计算模型

2.1 仿真模型

本文基于车辆-轨道耦合动力学理论^[9]和 UM 动力学软件,建立了车辆-轨道耦合动力学模型。高速动车组模型为两系悬挂,其中一系悬挂采用弹性定位,不存在间隙,通过调整各个方向的参数设置各个方向的刚度;采用空气悬挂系统作为二系悬挂,空气悬挂能够很好保证列车运行平稳性和舒适性。车辆模型建立了车体、转向架、轮对及轴箱等刚体,共包含50个自由度^[10],自由度数目如表1所示,模型如图3所示。

2.2 钢轨磨耗预测模型

本文采用的轮轨磨耗预测模型为 Archard 模

表 1 车辆模型自由度数目

自由度	伸缩	横移	沉浮	侧滚	点头	摇头
车体	X_c	Y_c	Z_c	ϕ_c	θ_c	Ψ_c
构架($i = 1 \sim 4$)	X_t	Y_t	Z_t	ϕ_t	θ_t	Ψ_t
轮对($k = 1 \sim 4$)	X_w	Y_w	Z_w	ϕ_w	θ_w	Ψ_w
轴箱	-	-	-	-	θ_a	-

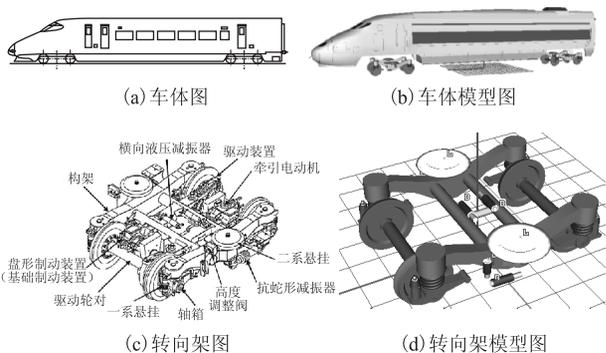


图 3 高速动车组模型图

型为:

$$W = k_v A \quad (5)$$

式中: W ——材料磨耗体积(m^3);
 k_v ——体积磨耗系数(m^3/J);
 A ——总的磨耗功(J)。

$$A = \int_0^t P dt \quad (6)$$

式中: P ——磨耗功率(W)

$$P = \int_F \tau s dF \quad (7)$$

式中: τ ——切向应力(Pa);
 s ——滑动速度(m/s);
 F ——接触斑面积(m^2)。

整个接触斑的磨耗功为:

$$A = v \Delta t \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \tau_{ij} w_{ij} dF_{ij} \quad (8)$$

式中: v ——轮对速度(m/s);

Δ_t ——时间步长(s);

w ——蠕滑率。

磨耗系数区域值如图 4 所示^[11-12]。

考虑到实际运营中不同的车型拥有不同的通过速度,在仿真计算过程中引入车型权重和速度权重。每一步迭代计算得到钢轨平均磨耗强度和当前迭代步的钢轨累计磨耗量,以通过总重作为迭代终止条件,计算钢轨累积磨耗量和钢轨磨耗型面,将磨耗后的钢轨型面作为初始条件代入下一迭代步进行计算,最终得到预定条件下的钢轨磨耗型面。

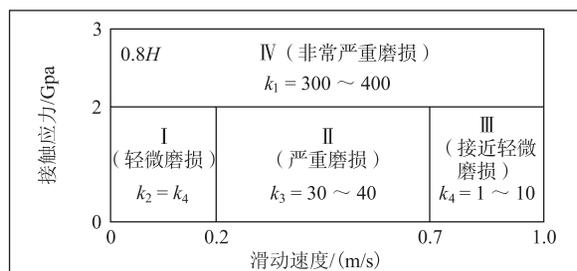


图 4 Archard 模型磨耗系数图

3 加载集中设计

3.1 线路参数

西成客运专线鄂邑至新场街区间拥有长 45 km、坡度 25‰ 的长大坡道,是全路首例高速铁路高坡区段。目前对高速铁路高坡区段的钢轨磨耗预测问题研究较少,本文选取该区间下行 K 68 + 000 ~ K 85 + 000 进行分析,该区段始于纸坊一号隧道,终于大秦岭隧道,线路情况如表 2 所示。钢轨型号为 60 N,轨道结构型式为 I 型双块式无砟轨道。

表 2 线路参数表

区段	平面线型	曲线要素/m	上坡坡度/‰
K 68+000 ~ K 72+091	直线	-	25
K 72+091 ~ K 78+517	曲线(左)	$R = 7\,004.6$ $L = 6\,426.28$ $h = 95, l = 240$	25
K 78+517 ~ K 79+235	直线	-	25
K 79+235 ~ K 81+633	曲线(左)	$R = 7\,000$ $L = 2\,398.22$ $h = 95, l = 240$	25
K 81+633 ~ K 85+000	直线	-	25

3.2 车辆参数

本文选取西成客运专线鄂邑至新场街区间进行研究分析,该区间运行的动车组型号主要有 CRH380A、CRH380B、CRH380D、CR400 等。由于运营维修的需要,夜间天窗还运行有大功率轨道车、接触网作业车、HXN5 内燃机车等,机车型号及数量占比如表 3 所示。动车组列车在该区间运行速度介于 200 ~ 250 km/h,取 210 km/h,220 km/h,230 km/h 3 种速度模式,按 0.2,0.6,0.2 的权重进行分配。轨道作业车、内燃机车取 60 km/h,70 km/h 两种速度模式,按 0.5,0.5 的权重分配。

3.3 摩擦系数

影响轮轨之间接触状态和磨耗特征的主要因素是摩擦系数,取值一般是通过现场试验及经验推理得到^[13],本文在计算时选取的摩擦系数值为 0.2 ~ 0.4。

表3 运行车辆型号表

车型	踏面型式	比重/%
CRH3C	S1002CN	10.7
CR400AF	LMA	1.3
CR400BF	LMB10	5.3
CRH380A	LMA	17.3
CRH380B	S1002CN	46.7
CRH380BG	S1002CN	1.3
CRH380BL	S1002CN	6.7
CRH380D	S1002CN	8.0
HXN5	JM3	1.3
轨道车	LM	1.3

3.4 轨道不平顺

轨道不平顺是轮轨系统的激扰源,是影响列车运行舒适性和平稳性的重要因素,本文在建模过程中,输入德国低干扰谱作为轨道不平顺激励,轨道不平顺如图5所示。

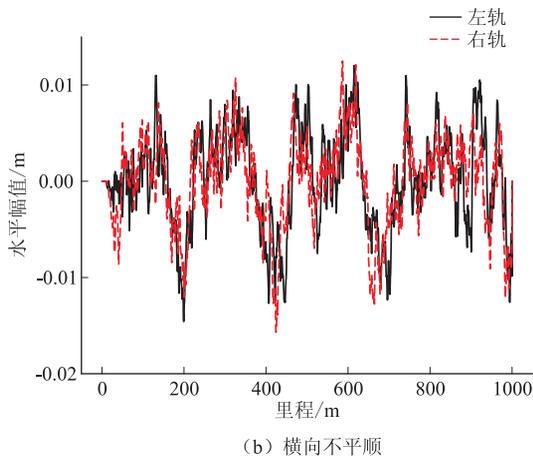
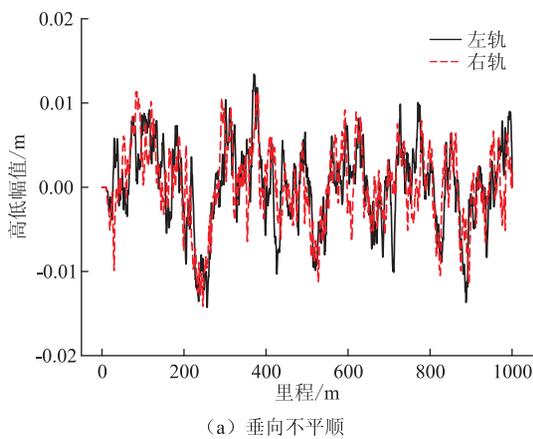


图5 轨道不平顺图

4 钢轨磨耗计算与型面更新结果

4.1 评价指标

钢轨型面磨耗指标如图6所示。

4.2 计算结果

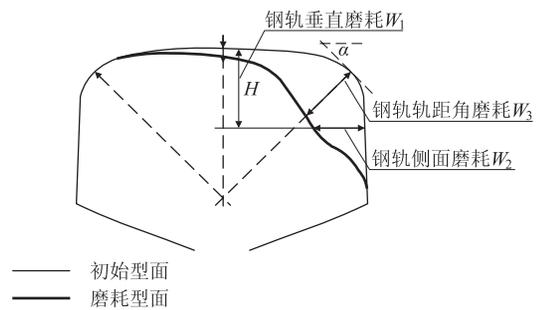


图6 钢轨型面磨耗指标图

利用建立好的车辆-轨道耦合动力学模型,仿真分析各车型运行在西成客运专线鄂邑至新场街区间K 68+000~K 85+000钢轨磨耗情况,以通过总重1 Mt作为型面更新条件。考虑钢轨每30~50 Mt通过总重的打磨周期,共进行50步迭代,即通过总重50 Mt。

计算得到钢轨磨耗情况如图7所示,左股钢轨为曲下股,右股钢轨为曲上股。可以看出磨耗后的钢轨型面与原始60N钢轨廓形基本保持一致,最大垂直磨耗0.045 mm,最大侧面磨耗0.002 mm。

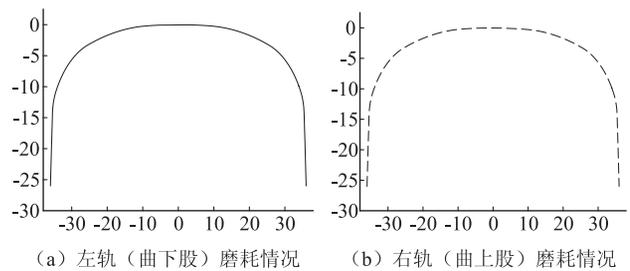


图7 仿真计算钢轨磨耗情况图

2021年1月西成客运专线鄂邑至新场街区间大机打磨前钢轨型面调查结果如图8所示,钢轨廓形与原始60N型面基本保持一致,廓形状态整体较好,最大垂直磨耗0.04 mm,未有明显侧面磨耗。这说明本文所建立的钢轨磨耗模型计算结果与实际情况相符,可以用于高速铁路钢轨磨耗预测研究。

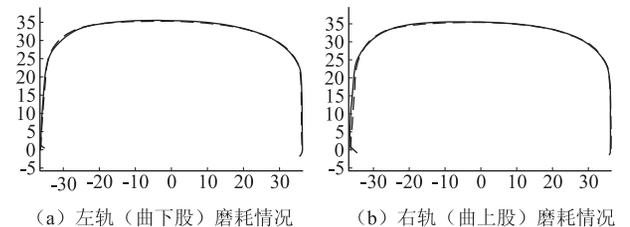


图8 实测钢轨磨耗情况图

当列车通过总重为50 Mt时,左轨垂直磨耗

0.045 mm,侧面磨耗0.002 mm,轨距角磨耗0.0005 mm,右轨垂直磨耗0.023 mm,侧面磨耗0.002 mm,轨距角磨耗0.0005 mm。左右轨侧面磨耗和轨距角磨耗状态基本相同,垂直磨耗略有差异,原因为大部分列车通过半径为7000 m的曲线时,均处于过超高状态,车辆偏于曲下股,曲下股较曲上股垂直磨耗较大。由于高速铁路曲线半径大,车辆轴重轻,当列车通过时,车轮轮缘不会贴靠钢轨,因此基本不会发生钢轨侧磨的情况。

为了更直观的反应钢轨磨耗情况随通过总重的变化,仿真分析列车通过总重100 Mt的磨耗情况,如图9所示,左股钢轨为曲下股,右股钢轨为曲上股。

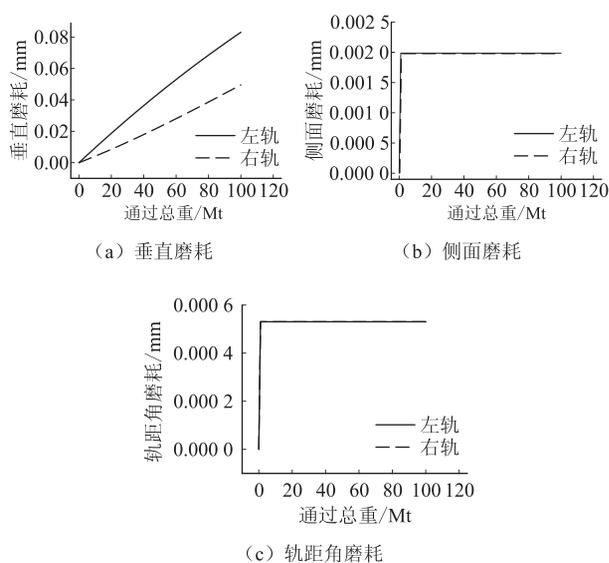


图9 钢轨磨耗图

由图9可知,钢轨垂直磨耗随通过总重的增大而呈线性增长,曲下股钢轨垂直磨耗较曲上股钢轨变化明显,当通过总重100 Mt时,左右轨垂直磨耗分别为0.083 mm,0.05 mm。钢轨侧面磨耗和轨距角磨耗随通过总重的变化不大,左右轨变化趋势类似。

通过分析可以得到,西成客运专线高坡区段,当列车通过总重达到100 Mt时,钢轨磨耗远低于《高速铁路无砟轨道线路维修规则》中给出的钢轨轻伤和重伤评判标准,但是当通过总重为45 Mt时,曲下股钢轨垂直磨耗达到0.04 mm,钢轨表面有可能产生波长不大于300 mm的周期性波磨,此时磨耗量已经达到《高速铁路无砟轨道线路维修规则》中提出的钢轨波形磨耗病害整治限度,此时若不及时开展钢轨打磨,在列车的振动下,轮轨作用力急剧增大,机车车辆和轨道会产生强烈的振动,引起车辆和线路部件的伤损,增加养护维修的费用,影响列车运行安全,此外波磨严

重地段还会产生噪声污染。因此西成客运专线鄂邑至新场街区间钢轨打磨周期设置成40 Mt是较为合理的,一方面满足钢轨病害整治限度的要求,另一方面具有较高的经济性。

5 钢轨磨耗对车辆动力学的影响

为分析磨耗后的钢轨型面对车辆动力学的影响,选取通过总重为10 Mt、40 Mt、70 Mt和100 Mt的钢轨型面分别进行车辆轨道耦合动力学计算。线路条件为西成客运专线鄂邑至新场街区间K72+091~K78+517曲线,车型为CRH380B型,输入德国低干扰谱作为轨道不平顺激励。

5.1 动力学性能评价

根据高速铁路的试验和运营经验,本文选取的动力学性能评价指标如表4所示。

表4 动力学性能评价指标表

序号	动力学评价指标	限值	附注
1	横向力/kN	80	轮轨力
2	垂向力/kN	250(低频力) 400(高频力)	
3	脱轨系数	≤ 0.8	安全性指标
4	轮重减载率	≤ 0.8	
5	车体横向加速度/(m/s^2)	≤ 0.6	舒适性指标 (经常保养)
6	车体垂向加速度/(m/s^2)	≤ 1.0	

5.2 轮轨动态相互作用

选取动车组第一转向架第一位轮对作为分析对象,计算结果如图10所示。

由图10可知,通过总重由10 Mt增加至100 Mt,最大轮轨垂向力和横向力变化不大,说明钢轨型面的磨耗较小,不会对轮轨力产生较大影响。脱轨系数随通过总重的增加,基本不产生变化,轮重减载率在通过总重为70 Mt时,变化较大,峰值为0.16,可以说明钢轨型面的磨耗对安全性指标影响不大。随着通过总重的增加,车体横向加速度略有增大,垂向加速度基本保持不变,说明钢轨型面的磨耗在一定范围内对舒适性指标影响较小。综合来看,由于高速铁路曲线半径大,列车轴重轻,在通过总重100 Mt范围内,钢轨型面磨耗较小,动力学指标优良。

6 结论与展望

(1)本文所建立的基于动力分析的钢轨磨耗预测方法,经过验证与实际情况大致相符,可用于钢轨磨耗预测研究,这对确定钢轨打磨和换轨周期、优化轮轨之间的廓形具有实际意义,可以指导日常养护

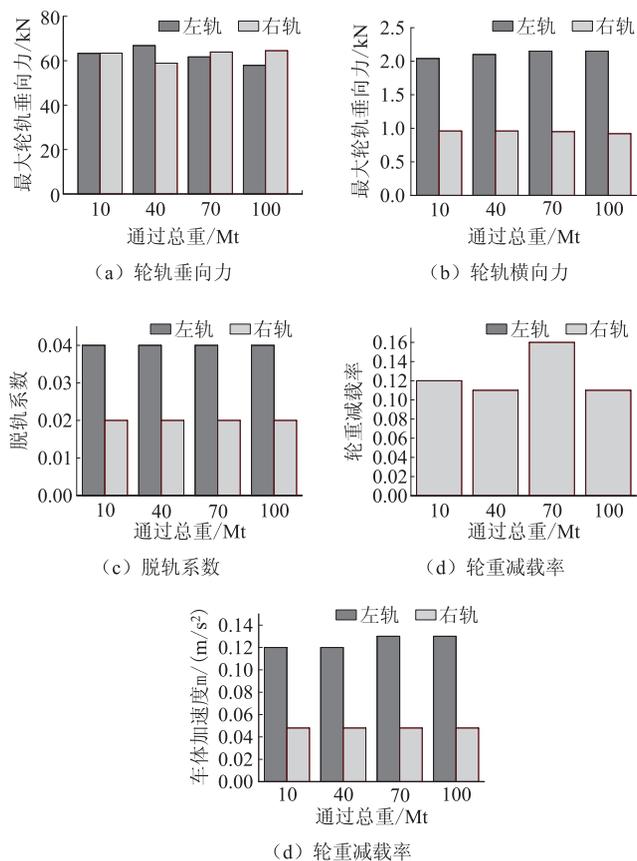


图 10 动力学计算结果图

维修。

(2) 高速铁路由于曲线半径较大,列车通过速度较高且速度差异较小,超高设置合理。根据仿真计算,西成客运专线郿邑至新场街区间 25‰ 的高坡区段钢轨的自然磨耗较小;根据《高速铁路无砟轨道线路维修规则》规定:每 30~50 Mt 通过总重打磨 1 次,考虑波磨的影响,将钢轨打磨周期设置成 40 Mt 是较为合理的,具有较高的经济性。

(3) 在通过总重 100 Mt 范围内,钢轨型面磨耗较小,各项动力学指标优良,轮轨力、安全性和舒适性指标随通过总重的增加变化不大。

参考文献:

- [1] WEN Zefeng, WU Lei, LI Wei, et al. Three-Dimensional Elastic-Plastic Stress Analysis of Wheel-Rail Rolling Contact [J]. *Wear*, 2011, 271(1/2): 426-436.
- [2] ISHIDA M, TAKIKAWA M, AOKI F, et al. Influence of Gauge Face Worn Profile and Lubrication on Vehicle/Track Interaction [J]. *Quarterly Report of RTRI*, 2002, 43(3): 137-142.
- [3] 侯传伦. 重载铁路曲线段磨耗状态下轮轨相互作用分析[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
- [4] HOU Chuanlun. Analysis of Worn Wheel/Rail Interaction on Heavy-Haul Railway Curve [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [5] 金学松,温泽峰,肖新标. 曲线钢轨初始波磨形成的机理分析[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(3): 1-8.
- [6] JIN Xuesong, WEN Zefeng, XIAO Xinbiao. Investigation into Mechanism of Initial Rail Corrugation Formation at a Curved Track [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(3): 1-8.
- [7] 陈思亦. 重载铁路曲线段钢轨型面优化[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2015.
- [8] CHEN Siyi. Optimal Design of Rail Profile for the Curve Segment of Heavy Haul Railway [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2015.
- [9] 吴潇,丁军君,戚壮,等. 曲线钢轨磨耗演变预测及对车辆动力学影响研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(2): 460-468.
- [10] WU Xiao, DING Junjun, QI Zhuang, et al. Study on the Prediction of Curve Rail Wear Evolution and Its Influence on Vehicle Dynamics [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(2): 460-468.
- [11] 张晴. 重载铁路钢轨磨耗预测研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- [12] ZHANG Qing. Study on Rail Wear Prediction of Heavy Haul Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [13] 徐鹏. 轴重和钢轨波磨对轮轨滚动接触参数及疲劳寿命的影响[D]. 北京:北京建筑大学, 2020.
- [14] XU Peng. Influence of Axle Load and Rail Corrugation on Wheel Rail Rolling Contact Parameters and Fatigue Life [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [15] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 2版. 北京:中国铁道出版社, 2001.
- [16] ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupling Dynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.
- [17] 刘丁阳. CRH2 动车组通过曲线时的钢轨磨耗及蛇行运动分析[D]. 兰州:兰州交通大学, 2014.
- [18] LIU Dingyang. Study on Wear of Rail and Hunting Motion when CRH2EMU is Running through Curve [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2014.
- [19] 孙宇,翟婉明. 钢轨磨耗演变预测模型研究[J]. *铁道学报*, 2017, 39(8): 1-9.
- [20] SUN Yu, ZHAI Wanming. A Prediction Model for Rail Wear Evolution [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(8): 1-9.
- [21] 王璞,高亮,蔡小培. 重载铁路钢轨磨耗演变过程的数值模拟[J]. *铁道学报*, 2014, 36(10): 70-75.
- [22] WANG Pu, GAO Liang, CAI Xiaopei. Numerical Simulation of Rail Wear Evolution of Heavy-Hual Railways [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(10): 70-75.
- [23] 马明阳,王俊彪,常崇义. 一种基于 UM 的高速铁路车轮磨耗预测研究方法[J]. *中国铁路*, 2016(6): 64-68.
- [24] MA Mingyang, WANG Junbiao, CHANG Chongyi. Research Method of Wheel Wear Prediction for High-Speed Railway Based on UM [J]. *China Railway*, 2016(6): 64-68.