

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.01.012

关键参数对缓圆点波磨区段轮轨力的影响分析

刘建华, 冯晓雄, 杨能普

(湖南工业大学 轨道交通学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 以探究重载线路运行参数对车辆通过缓和曲线低轨侧波磨区轮轨力的影响规律为目的, 基于Simpack多体动力学软件搭建了C80车辆-轨道耦合多体动力学模型, 利用Matlab生成美国五级轨道随机不平顺, 叠加缓圆点前钢轨波磨时域激励作为模型输入, 仿真得到在缓圆点处不同波长、波深波磨状态下, 缓和曲线长度、曲线半径、超高、行驶速度等关键参数对轮轨力的影响。通过分析一位轮对的轮轨力变化趋势和其最大增长率, 发现波磨侧的轮轨力受波磨影响较大; 无波磨一侧轮轨横向力受波磨的影响比垂向力大; 曲线参数中, 各指标最大增长率均随速度的增加而下降; 除高轨侧轮轨横向力外, 其余指标均随曲线半径的增大而减小; 缓和曲线长度和超高的变化, 对各指标最大增长率没有明显的降低作用, 甚至随着运行参数的增加, 指标最大增长率反而增加。

关键词: 轮轨力响应; 缓和曲线; 低轨侧波磨; 关键参数; 重载线路

中图分类号: U239.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)01-0088-09

引文格式: 刘建华, 冯晓雄, 杨能普. 关键参数对缓圆点波磨区段轮轨力的影响分析[J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(1): 88-96.

Analysis of the Influence of Key Parameters on the Wheel-Rail Force in the Slow Circular Wave Grinding Section

LIU Jianhua, FENG Xiaoxiong, YANG Nengpu

(College of Rail Transit, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of an inquiry into the operating parameters of heavy-duty lines and the influence of wheel rail forces on vehicles passing through the low rail side corrugation zone of the transition curves, a C80 vehicle track coupled multibody dynamics model has been established based on Simpack multibody dynamics software. Random irregularities in the U. S. fifth-level track can be generated by using Matlab, with the time-domain excitation of rail corrugation before the gradual circular point overlaid as the model input, followed by a simulation of the influence of key parameters such as smoothing curve length, curve radius, superelevation, and travel speed on wheel rail forces under different wavelengths, wave depths, and corrugation states at the smoothing point. An analysis of the trend of wheel rail force variation and its maximum growth rate of a wheel-set shows that the wheel rail force on the corrugation side is greatly affected by corrugation. The lateral force on the side without corrugation is more affected by corrugation

收稿日期: 2023-10-14

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2021YFF0501101); 国家自然科学基金资助项目(52272347); 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目(22A0391); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30217, 2021JJ40180)

作者简介: 刘建华, 男, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为轨道交通智能运维, 模式识别, 电传动与控制,

E-mail: jhliu@hut.edu.cn

通信作者: 杨能普, 男, 湖南工业大学教师, 博士, 主要研究方向为轨道交通智能运维, 轮轨动力学, 铁路货运技术,

E-mail: yangnengpu@163.com

than the vertical force; in the curve parameters, the maximum growth rate of each index decreases with the increase of the speed; except for the lateral force on the high rail side, all other indexes decrease with increasing curve radius. The changes in the length and superelevation of the easing curves have no significant reducing effect on the maximum growth rate of each index, and even as the operating parameters increase, the maximum growth rate of the indicator will experience an increase instead.

Keywords: wheel rail force response; transition curve; low rail side corrugation; key parameter; heavy haul line

0 引言

重载车辆轴重大且运行线路情况复杂^[1], 导致曲线段轮轨动态作用关系易发生剧烈变化, 进而造成曲线钢轨波磨问题突出^[2-3]。缓和曲线是曲线路段的重要组成部分, 与圆曲线不同, 缓和曲线因超高和曲率是时刻变化的, 从而导致轮轨力变化规律与圆曲线有所不同。因此, 通过分析车辆在不同关键参数下经过缓和曲线波磨区段的轮轨力, 探究关键参数对车辆通过缓和曲线钢轨波磨时轮轨作用关系影响规律, 具有重要研究意义。

目前关于曲线段钢轨波磨的研究现状, 一方面是基于摩擦自激振动理论^[4-8]或现场实测曲线钢轨波磨数据^[9-12], 研究影响波磨发生的关键影响因素; 另一方面主要研究钢轨波磨对轮轨相互作用关系造成的影响, 主要基于动力学仿真分析和实测钢轨波磨分析两种研究手段。

动力学仿真分析主要是通过搭建柔性有限元或多刚体动力学模型, 将特定线路典型钢轨波磨作为模型激励, 分析钢轨波磨对轮轨接触及蠕变特性^[13]、车轨系统部件振动加速度级^[14-16]、轮轨共振^[17-18]及对钢轨波磨进一步发展^[19]等问题造成的影响。实测钢轨波磨分析是将实测线路上钢轨波磨不平顺作为动力学模型的不平顺激励, 一方面通过重点分析不同钢轨波磨参数下的轮轨力及轮轨振动加速度变化规律, 给出钢轨波磨的安全及打磨标准阈值^[20-22]; 另一方面分析曲线参数等因素对车辆通过钢轨波磨时的轮轨动态行为, 给出优化曲线参数, 降低轮轨动态作用关系的建议^[23-24]。

曲线钢轨波磨下的轮轨相互作用关系受到列车、线路、轨道等结构参数影响, 而研究缓和曲线关键参数对缓和曲线钢轨波磨下轮轨响应影响的论文较少。针对曲线钢轨波磨大多首先出现在低轨侧缓圆点附近^[25]的关键问题, 通过构建 C80 重载货车-轨道耦合动力学模型^[26], 将随机不平顺与重载典型波磨叠加的低轨侧时域激励添加在缓圆点前, 以此作为模型的输入, 从车轨整体耦合层面出发, 重点探究在不同

关键参数下钢轨波磨对轮轨力的影响规律, 为降低车辆通过缓和曲线波磨的轮轨相互作用提供参考。

1 车辆非线性曲线通过

轨道车辆非线性动态曲线通过, 是指在轨道不平顺等因素激励下, 车辆各部件的位移、加速度和作用力等在每一时刻都不同。其动力学方程如式(1)所示:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_{wR} + \mathbf{F}_a \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为局部坐标系上的自由度广义坐标;

$\mathbf{F}_s$ 为悬挂力或力矩;

$\mathbf{F}_{wR}$ 为轮对作用力, 包括蠕滑力、正压力等;

$\mathbf{F}_a$ 为附加惯性力和力矩, 三者皆与速度、曲率、超高角等关键参数有关;

$\mathbf{M}$ 为惯性矩阵;

$\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵;

$\mathbf{K}$ 为刚度矩阵。

以轮对通过缓和曲线时进行受力分析, 轮对绝对加速度在空间刚体的表达式如式(2)所示:

$$\overline{\mathbf{a}}_w = [\ddot{x}_w + \dot{v}] \overline{\mathbf{i}}_t + [\ddot{y}_w - r_0 g] \overline{\mathbf{j}}_t + [\ddot{z}_w - l_0 g] \overline{\mathbf{k}}_t \quad (2)$$

式中: g 为关键参数引起的集合输入变量, 包括速度、曲率变化、超高变化等;

x_w 、 y_w 、 z_w 为轮对在线路坐标系中的位置;

r_0 为车轮名义滚动圆半径;

$\mathbf{a}_w$ 为轮对的加速度;

$\overline{\mathbf{i}}_t$ 、 $\overline{\mathbf{j}}_t$ 、 $\overline{\mathbf{k}}_t$ 为轮对在 3 个方向的分解加速度。

在曲线路段轮对受力如图 1 所示。

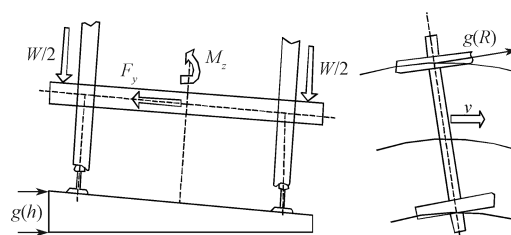


图 1 单轮对在缓和曲线上的位置及受力情况

Fig. 1 Position and force situation of a single wheelset on the transition curve

图 1 中, v 为运行速度方向, W 为轮轴上载荷, M_z 为回转力矩, F_y 为外加横向力, $g(h)$ 和 $g(R)$ 分别为超高与曲率随缓和曲线长度变化的函数。

在缓和曲线上, 曲率由无限大逐渐减小至圆曲线半径, 超高由零逐渐增长至圆曲超高值。超高 $g(h)$ 和曲率 $g(R)$ 可以用沿轨道延伸距离 x 函数表示。设缓和曲线最后的超高为 h_0 , 曲率为 R_0 , 则曲率和超高沿轨道 x 的函数表达式分别如式 (3) 和式 (4) 所示:

$$g(R) = \begin{cases} \frac{1/R_0}{l^2/2} x^2, & x \leq 0.5l; \\ \frac{1}{R_0} \left[1 - \frac{(x-l)^2}{l^2/2} \right], & x \geq 0.5l. \end{cases} \quad (3)$$

$$g(h) = \begin{cases} \frac{1/h_0}{l^2/2} x^2, & x \leq 0.5l; \\ \frac{1}{h_0} \left[1 - \frac{(x-l)^2}{l^2/2} \right], & x \geq 0.5l. \end{cases} \quad (4)$$

式 (3) (4) 中, l 为轨道缓和曲线段长度。

由此可知, 缓和曲线长度、实设超高与曲线半径均会影响曲率与超高的变化, 进而影响车辆通过缓和曲线时的轮轨作用力。

2 C80 车轨耦合多体动力学模型

C80 货车轴重为 25 t, 最高设计运行速度为 120 km/h。车辆主体建模部分为转 K6 型转向架, 其中一系悬挂均采用八字形橡胶弹簧, 二系中央悬挂采用具有非线性两级刚度的圆弹簧和组合式摩擦斜楔减振器, 车体和摇枕之间通过双作用常接触弹性旁承和心盘进行连接, 左右侧架使用下交叉拉杆进行固定, 可提高转向架的抗菱与抗剪刚度。

本研究中, 一系悬挂橡胶垫采用三向刚度和阻尼建模; 二系中央悬挂弹簧设置为双线性刚度, 摩擦楔块减振器采用相对摩擦因数法原理模拟; 考虑上下心盘以及常接触弹性旁承处的摩擦转矩; 考虑车体、摇枕以及侧架的 6 个自由度; 下交叉拉杆采用轴向刚度模拟。轨道模型将钢轨考虑为连续性离散点支承无限长的欧拉梁模型, 采用 Simpack 中 99 号力元模拟钢轨与轨枕处的三向 (垂向、横向及扭转) 刚度。计算模型由车体、摇枕、侧架和轮对组成, 共计 11 个刚体, 模型自由度共计 60 个。整车车辆-轨道耦合多体动力学模型如图 2 所示, 主要建模参数出自文献 [27], 详见表 1。

利用单次积分法计算模型非线性临界速度来验

证模型的有效性 [27]。在直线线路施加轨道不平顺, 通过仿真, 得到第一位轮对的横向偏移量, 结果如图 3 所示。

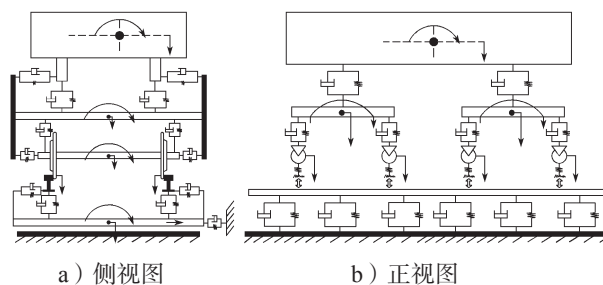


图 2 整车-轨道耦合多体动力学模型

Fig. 2 Vehicle track coupled multibody dynamics model

表 1 建模主要参数

Table 1 Main modeling parameters

参数	取值	参数	取值
车体质量/kg	24 000	一系悬挂垂向刚度/(MN·m ⁻¹)	170
摇枕质量/kg	800	二系悬挂垂向刚度/(MN·m ⁻¹)	2.61
侧架质量/kg	500	轴距/m	1.83
轮对质量/kg	1 200	车辆定距/m	9
滚动圆半径/m	0.42		

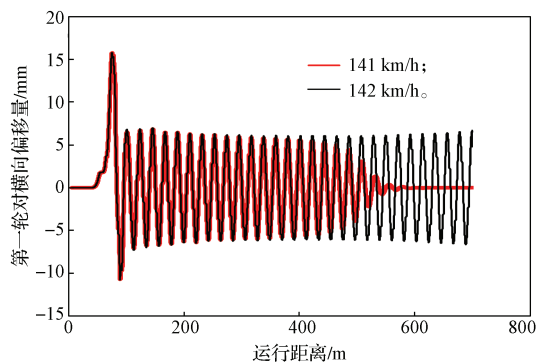


图 3 第一位轮对横移量

Fig. 3 First wheel-set lateral displacement

由图 3 可知, 第一位轮对的轮轨横移量在速度为 141 km/h 时, 逐渐收敛至 0 mm; 在速度为 142 km/h 时, 处于发散状态。得到模型的非线性临界速度位于 141~142 km/h 之间, 大于 C80 货车的最高设计运行速度 120 km/h。

3 仿真及分析

选取缓和曲线长度、圆曲线半径、超高、速度为关键参数变量, 分析一位轮左右轮轨垂向力、左右轮轨横向力的变化趋势及最大增长率, 探究所选变量在钢轨波磨下对轮轨相互作用关系的影响规律。

3.1 数值模拟激励

我国重载铁路波磨波长一般是在 150~300 mm 之

间^[28],波深在1 mm左右。波磨是典型的连续型谐波激励,可用连续周期性余弦函数描述其激励模式,表达公式如式(5)所示:

$$Z(t) = \frac{1}{2}a(1 - \cos \omega t), \quad 0 \leq t \leq \frac{nL}{v} \quad (5)$$

式中: $Z(t)$ 为波磨在钢轨表面的垂向位置;

a 为波磨波深;

L 为波磨波长;

v 为车辆运行速度;

n 为波磨激励波数;

$\omega = 2\pi v/L$ 。

由于轨道各部件之间的弹性不均匀、间隙和钢轨表面产生不均匀磨耗等原因,导致轨道出现随机不平顺现象。本研究选择与我国重载铁路轨道不平顺相近的美国五级轨道随机不平顺作为模型的原始激励,通过 Matlab 利用逆 Fourier 变换法(inverse fast Fourier transform, IFFT)将美国五级随机轨道功率谱变换为时域激励^[25],结合式(5)生成缓圆点前低轨侧波磨时域激励。

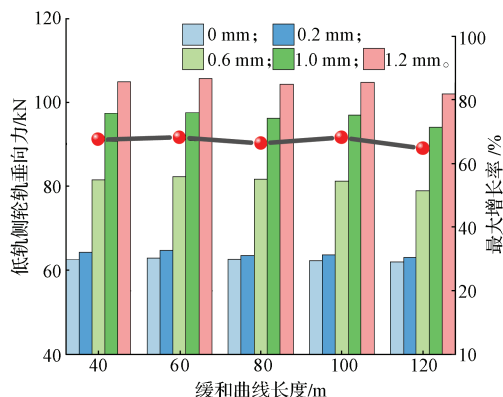
3.2 不同波深下轮轨力变化规律

将内轨钢轨波磨波深分别设置为 0, 0.2, 0.6, 1.0, 1.2 mm, 波磨波长统一为 200 mm。

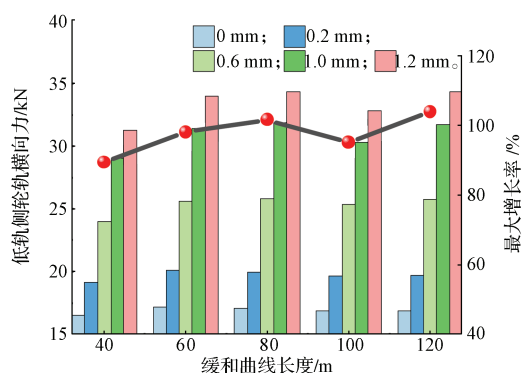
在本文中,所有图中的条形图均表示同一工况下,不同波磨波深下的各个指标的峰值;折线图均表示 1.2 mm 波深波磨与无波磨之间的差值比例,利用此指标表示不同关键参数变量下,车辆通过波磨区域时的轮轨力的变化情况,并且以此评价关键参数的影响大小。

3.2.1 缓和曲线长度的影响

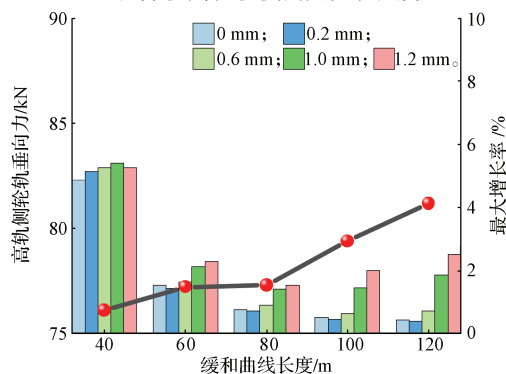
缓和曲线长度为 40~120 m, 间隔为 20 m, 运行速度为 60 km/h, 曲线半径为 800 m, 超高对应工况条件下为均衡超高。所得不同波深下缓和曲线长度对各指标的影响结果如图 4a~d 所示。



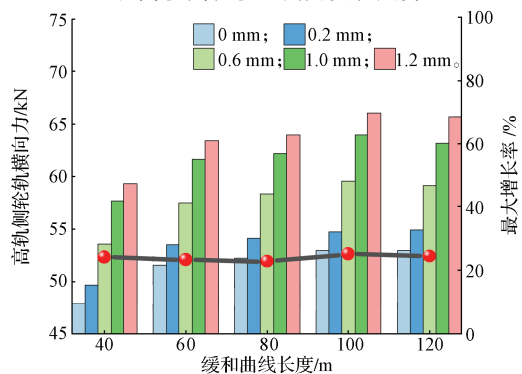
a) 低轨侧轮轨垂向力变化趋势



b) 低轨侧轮轨横向力变化趋势



c) 高轨侧轮轨垂向力变化趋势



d) 高轨侧轮轨横向力变化趋势

图 4 不同波深下缓和曲线长度对各指标的影响

Fig. 4 Influence of the transition curve length on various indexes at different wave depths

由图 4 可知,随着缓和曲线长度的增加:无波磨时,低轨侧轮轨垂向力呈现逐渐减小的趋势;低轨侧轮轨横向力呈现先增大后减小的趋势,在 60 m 时最大;高轨侧轮轨垂向力逐渐减小;高轨侧轮轨横向力逐渐增大;但均在缓和曲线长度大于 80 m 之后,各指标的变化趋于平缓。当低轨侧钢轨存在波磨时,各指标值总体均随波深的增大而增加;根据指标的最大增长率分析,低轨侧轮轨垂向力最大增长率始终稳定在 66% 附近;低轨侧轮轨横向力从 89.38% 增长到 103.85%;高轨侧轮轨垂向力最大增长率从 0.75% 增长到 4.13%;高轨侧轮轨横向力最大增长率稳定在 24% 左右。说明增加缓和曲线长度不能明显降低波磨对低轨侧轮轨垂向力的影响,而对于低轨侧轮轨

横向力, 最大增长率随缓和曲线长度的增加而增加, 反而能促进低轨侧钢轨波磨的扩展; 对于高轨侧的轮轨垂向力和横向力影响都不是很大。

3.2.2 曲线半径的影响

设定曲线半径为 400~1 400 m, 间隔为 200 m, 运行速度为 80 km/h, 缓和曲线长度为 80 m, 超高为对应工况条件下均衡超高时, 所得不同波深下曲线半径对各指标的影响结果如图 5a~d 所示。

由图 5 可以得知, 随着曲线半径的增加: 无波磨时, 低轨侧轮轨垂向力逐渐增大; 低轨侧轮轨横向力先减小后增大, 在曲线半径为 1 000 m 时最小; 高轨侧轮轨垂向力和高轨侧轮轨横向力均逐渐减小; 存在

波磨时, 除高轨侧轮轨垂向力, 各指标总体随波深的增大而增加。从最大增长率分析, 低轨侧轮轨垂向力从 68.07% 减小到 54.04%, 低轨侧轮轨横向力最大增长率从 77.03% 减小到 54.77%; 高轨侧轮轨垂向力最大增长率从 3.29% 减小到 1.69%; 高轨侧轮轨横向力最大增长率从 2.29% 增长到 12.36%。这一结果说明, 随着曲线半径长度的增加, 能够降低波磨对低轨侧轮轨垂向和横向力、高轨侧轮轨垂向力的最大增长率。因此, 选择较大的曲线半径, 不仅能够有效降低轮轨作用力峰值, 也使得最大增长率保持在一定范围内, 从而减缓钢轨波磨的扩展。

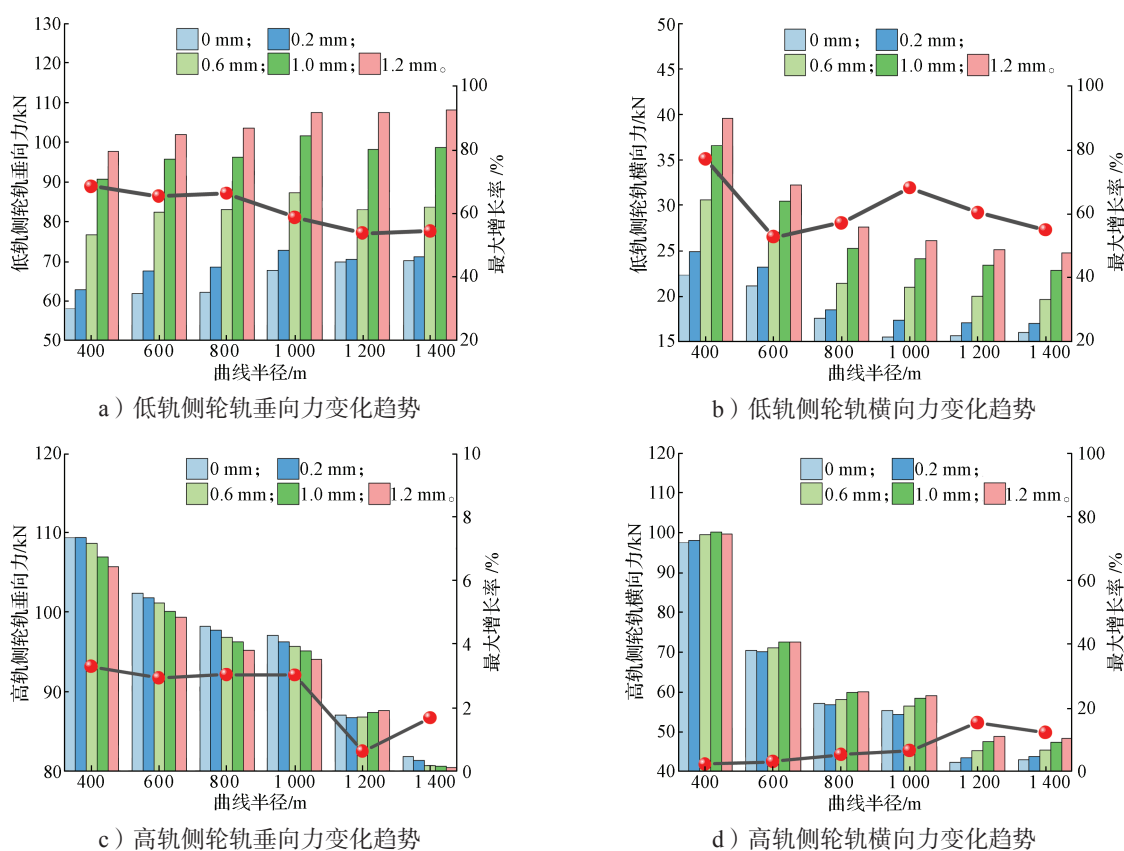


图 5 不同波深下曲线半径对各指标的影响

Fig. 5 Influence of the curve radius on various indexes at different wave depths different wave depths

3.2.3 速度的影响

设定速度为 20~100 km/h, 间隔为 20 km/h, 缓和曲线长度为 80 m, 曲线半径为 800 m, 超高为对应工况条件下均衡超高时, 仿真所得不同波深下速度对各指标的影响结果如图 6a~d 所示。

由图 6 可以得知, 随着车辆运行速度增加: 无波磨时, 各个指标均大致呈现增大的变化趋势; 存在波磨时, 各指标总体随波深的增大而增加。根据最大增长率分析, 低轨侧轮轨垂向力最大增长率从

101.82% 减小到 46.49%; 低轨侧轮轨横向力最大增长率从 208.81% 减小到 42.63%; 高轨侧轮轨垂向力从 43.36% 减小到 1.32%; 高轨侧轮轨横向力最大增长率从 96.63% 减小到 7.82%。这一结果说明, 运行速度的提高能明显减小波磨对各轮轨力的最大增长率, 选择适当的车辆运行速度, 不仅可以保证轮轨动态作用峰值处于较小区间, 也可以很大程度减缓钢轨波磨的扩展。

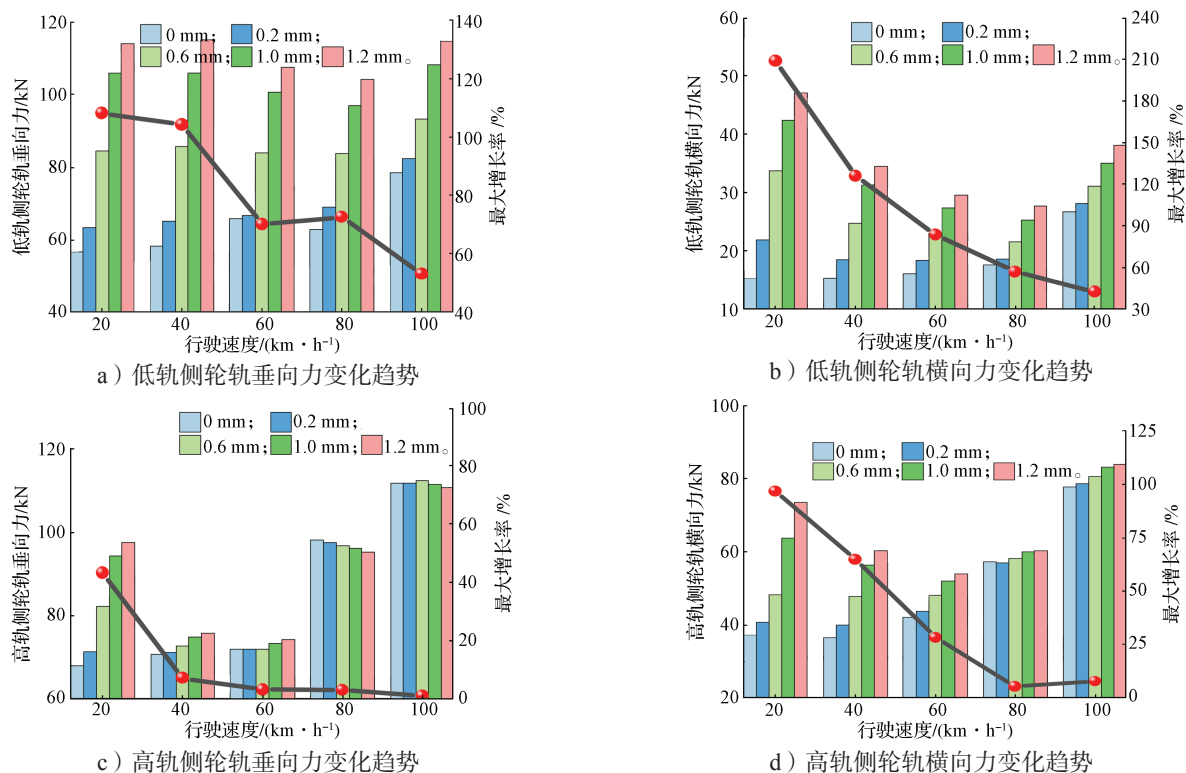


图6 不同波深下速度对各指标的影响

Fig. 6 Influence of the velocity on various indexes at different wave depths

3.2.4 超高的影响

设定超高为欠超高 95 mm 到过超高 55 mm, 间隔为 30 mm, 运行速度为 80 km/h, 缓和曲线长度为 80 m, 曲线半径为 800 m, 所得不同波深下超高对各指标的影响结果如图 7a~d 所示。

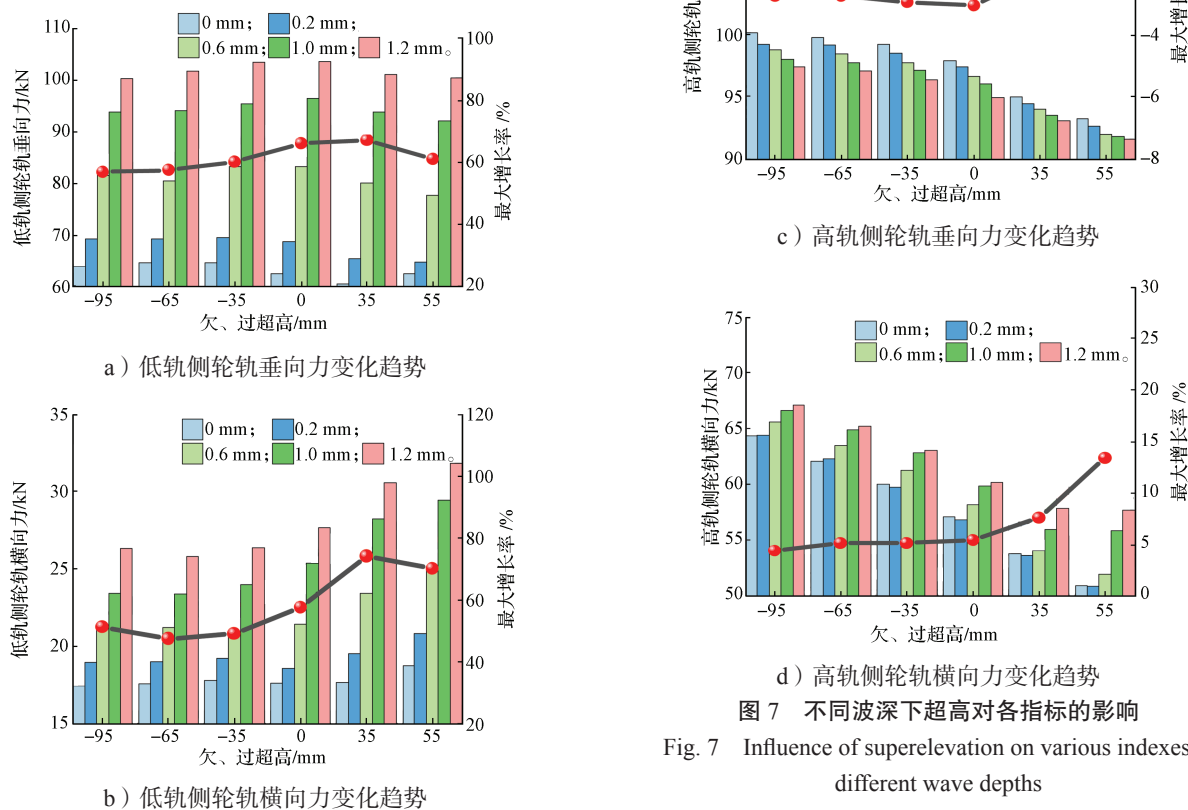


图7 不同波深下超高对各指标的影响

Fig. 7 Influence of superelevation on various indexes at different wave depths

由图 7 可知,随着实设超高的增加:无波磨时,低轨侧轮轨垂向力呈现先增大再减小趋势,拐点区间位于均衡超高附近;低轨侧轮轨横向力呈现逐渐增大趋势;高轨侧轮轨垂向力和高轨侧轮轨横向力均呈现减小趋势。存在波磨时,除高轨侧轮轨垂向力最大增长率异常外,其余指标最大增长率总体随波深的增大而增加。其中,低轨侧轮轨垂向力最大增长率先增大后减小,最大值是 67%,位于均衡超高附近,最小值是 56.65%,位于欠超高 35 mm 附近;低轨侧轮轨横向力最大增长率从 50.59% 增长到 73.34%;高轨侧轮轨垂向力最大增长率稳定在 -2% 左右;高轨侧轮轨横向力最大增长率从 4.33% 增长到 13.28%。说明实设超高的增加明显增大波磨对轮轨力的影响,因此在实际重载铁路曲线路况中,建议采用欠超高。

3.3 不同波长下轮轨力变化规律

由波深结果可得,速度对车辆经过波磨区域的轮轨力的减缓影响大于曲线几何参数的影响,且车辆在不同速度下通过不同波长波磨时,产生的响应频率也不同,极有可能导致车轨系统发生共振现象。因此分析波长时,只分析在不同速度等级下的波磨波长对轮轨力的影响。分别设置 100~300 mm 的波长,间隔为 50 mm;速度为 20~100 km/h,间隔为 10 km/h;缓和曲线长度为 80 m,曲线半径为 800 m,超高均为对应工况条件下均衡超高,仿真所得不同波长下速度对各指标的影响结果如图 8a~d 所示。

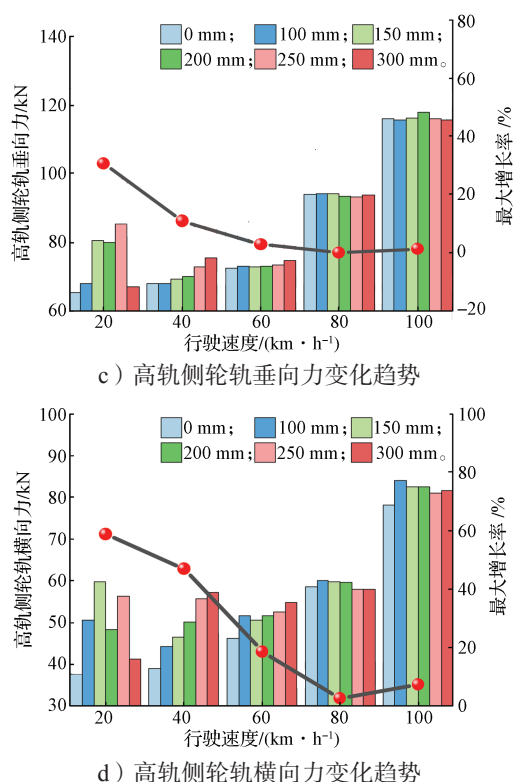
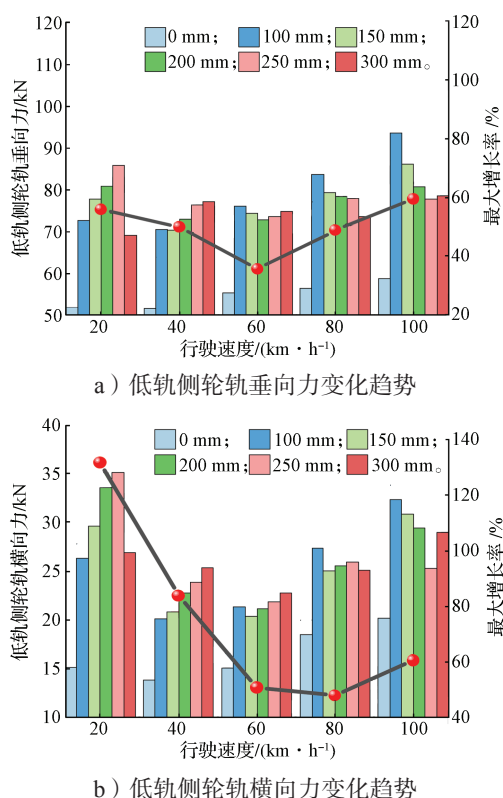


图 8 不同波长下速度对各指标的影响

Fig. 8 Influence of the velocity on various indexes at different wavelengths

由图 8 可知,随着运行速度增加:无波磨时,各指标均呈现增大趋势,与波深速度下的仿真结果类似;当存在不同波长的波磨时,各个指标随着波长的变化呈现非线性变化趋势,一般取波磨处轮轨垂向力作为判断依据。由图 8a 可知,行驶速度为 80 km/h 之后,轮轨垂向力随着波长的增长而减小;行驶速度小于 60 km/h 时,轮轨垂向力反而随着波长的增长而增长,这说明模型系统存在与波磨通过频率相近的振动频率。根据最大增长率分析,4 个指标均随着速度的增加呈现先减小后增大的变化趋势,且 4 个指标的最低点区间是行驶速度为 60~80 km/h 之间。综合不同波深在行驶速度下的最大增长率,说明当重载线路缓和曲线缓圆点前处存在钢轨波磨时,适当提高车辆运行速度能够明显减小波磨对轮轨相互作用关系的影响,既可以保证轮轨力峰值处于最小区间,也可以很大程度减缓钢轨波磨的扩展。

4 结论

通过搭建 C80 车轨耦合多刚体模型,综合分析缓和曲线长度、曲线半径、速度、超高关键参数对车辆经过缓和曲线低轨侧钢轨波磨时轮轨力的影响,得到各轮轨力变化趋势及最值增长率,为优化关键参

数提供参考依据。得出以下结论:

1) 不同波深下,波磨一侧各个轮轨的动态作用关系指标均随波深的增大而增大;对无波磨一侧的影响较小,其中对轮轨垂向力的影响要小于对横向力的影响。不同波长下,各个轮轨动态作用关系指标随波长的增加而呈现非线性变化。表明在重载线路典型波磨中,应主要关注波深的发展。

2) 增加车辆行驶速度会明显降低波磨区域各指标最大增长率,但是随着行驶速度的增加,各指标也随之增大,因此建议在实际车辆运行过程中,车辆运行速度应根据实际线路条件,选择适当的通过速度,这样既能保持较小的轮轨作用力,也能有效减缓钢轨波磨的影响。

3) 曲线几何参数对钢轨波磨下横向力的影响最大。其中随着曲线半径的增大,低轨侧轮轨横向力最大增长率降低 22.26%,高轨侧轮轨横向力最大增长率增大 10.07%。缓和曲线长度和超高的增加都会使横向力最大增长率增加。因此,建议在实际线路施工中,曲线半径应尽量大一些,但缓和曲线长度不宜过长,实设超高尽量为欠超高。

参考文献:

- [1] 金 锋,肖 宏,赵 越,等.重载铁路小半径曲线波磨演化过程实测分析[J].铁道标准设计,2021,65(5): 49-54.
JIN Feng, XIAO Hong, ZHAO Yue, et al. Measurement and Analysis of the Evolution Process of Small Radius Curve Corrugation in Heavy Haul Railway[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(5): 49-54.
- [2] 朱海燕,袁 遥,肖 乾,等.钢轨波磨研究进展[J].交通运输工程学报,2021,21(3): 110-133.
ZHU Haiyan, YUAN Yao, XIAO Qian, et al. Research Progress on Rail Corrugation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 110-133.
- [3] 何 静,乔 多,贾 林.基于改进非支配排序遗传算法的重载列车长大下坡运行策略[J].湖南工业大学学报,2023,37(3): 42-49.
HE Jing, QIAO Duo, JIA Lin. Operating Strategy Based on an Improved Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Heavy Haul Trains on Long Down-Slope[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2023, 37(3): 42-49.
- [4] DONG B J, CHEN G X, SONG Q F, et al. Study on Long-Term Tracking of Rail Corrugation and the Influence of Parameters[J]. Wear, 2023, 523: 204768.
- [5] WANG Z Q, LEI Z Y. Analysis of Influence Factors of Rail Corrugation in Small Radius Curve Track[J]. Mechanical Sciences, 2021, 12(1): 31-40.
- [6] CUI X L, HUANG B, DU Z X, et al. Study on the Mechanism of the Abnormal Phenomenon of Rail Corrugation in the Curve Interval of a Mountain City Metro[J]. Tribology Transactions, 2020, 63(6): 996-1007.
- [7] 闫 硕,赵晓男,崔晓璐,等.轮轨接触参数对钢轨波磨的影响[J].润滑与密封,2018,43(11): 42-46.
YAN Shuo, ZHAO Xiaonan, CUI Xiaolu, et al. Influence of Wheel/Rail Contact Parameters on Rail Corrugation[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(11): 42-46.
- [8] 赵江伟,赵晓男,陈光雄,等.地铁小半径曲线轨道扣件参数对钢轨波磨的影响[J].铁道标准设计,2018,62(12): 6-10.
ZHAO Jiangwei, ZHAO Xiaonan, CHEN Guangxiong, et al. Effect of Fastener Parameters on Rail Corrugation of Metro Tight Curve Track[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(12): 6-10.
- [9] LIU X G, WANG P. Investigation of the Generation Mechanism of Rail Corrugation Based on Friction Induced Torsional Vibration[J]. Wear, 2021, 468: 203593.
- [10] WANG Z Q, LEI Z Y. Formation Mechanism of Metro Rail Corrugation Based on Wheel-Rail Stick-Slip Behaviors[J]. Applied Sciences, 2021, 11(17): 8128.
- [11] MATSUMOTO A, SATO Y, ONO H, et al. Formation Mechanism and Countermeasures of Rail Corrugation on Curved Track[J]. Wear, 2002, 253(1/2): 178-184.
- [12] WANG Z Q, LEI Z Y. Rail Corrugation Characteristics in Small Radius Curve Section of Cologne-Egg Fasteners[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(11): 4499-4511.
- [13] LEI Z Y, WANG Z Q. Contact and Creep Characteristics of Wheel-Rail System Under Harmonic Corrugation Excitation[J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(17/18): 2069-2080.
- [14] 郭 涛,侯银庆,胡晓依,等.钢轨波磨对高速车辆动力学性能的影响[J].铁道建筑,2019,59(3): 111-115.
GUO Tao, HOU Yinqing, HU Xiaoyi, et al. Influences of Rail Corrugations on Dynamic Performances of High Speed Vehicles[J]. Railway Engineering, 2019, 59(3): 111-115.
- [15] CHEN Z G, ZHANG J, WANG K Y, et al. Nonlinear Dynamic Responses of Locomotive Excited by Rail Corrugation and Gear Time-Varying Mesh Stiffness[J]. Transport, 2022, 37(6): 383-397.
- [16] YANG J W, LIU P S, WANG J H, et al. Investigation on the Dynamic Characteristics of Track Slab with the

- Influence of Rail Corrugation[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2023, 29(3): 04023019.
- [17] YU M, WANG W D, LIU J Z, et al. The Transient Response of High-Speed Wheel/Rail Rolling Contact on “Roaring Rails” Corrugation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 233(10): 1068–1080.
- [18] XING M T, ZHAO C Y, WANG P, et al. A Numerical Analysis of Ground Vibration Induced by Typical Rail Corrugation of Underground Subway[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(1): 8406813.
- [19] CUI X L, HE Z Q, HUANG B, et al. Study on the Effects of Wheel-Rail Friction Self-Excited Vibration and Feedback Vibration of Corrugated Irregularity on Rail Corrugation[J]. Wear, 2021, 477: 203854.
- [20] 刘堂辉, 姚 典, 张鹏飞, 等. 地铁曲线波磨地段轮轨动力特性影响因素 [J]. 铁道建筑, 2022, 52(3): 75–79.
- LIU Tanghui, YAO Dian, ZHANG Pengfei, et al. Influence Factors of Wheel-Rail Dynamic Characteristic in Curve Section of Metro with Rail Corrugation[J]. Railway Engineering, 2022, 52(3): 75–79.
- [21] 张鹏飞, 姚 典, 冯青松, 等. 地铁波磨对轮轨动力特性影响及其安全阈值分析 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(5): 123–130, 150.
- ZHANG Pengfei, YAO Dian, FENG Qingsong, et al. Effects of Metro Rail Corrugation on Wheel-Track System Dynamic Characteristics and Its Wave Depth Safety Threshold[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(5): 123–130, 150.
- [22] 李 伟, 曾全君, 朱士友, 等. 地铁钢轨波磨对车辆和轨道动态行为的影响 [J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(1): 34–42.
- LI Wei, ZENG Qunjun, ZHU Shiyu, et al. Effect of Metro Rail Corrugation on Dynamic Behaviors of Vehicle and Track[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(1): 34–42.
- [23] 刘志伟, 刘建新, 蔡久凤, 等. 重载铁路小半径曲线钢轨波磨对机车曲线通过安全性的影响研究 [J]. 机车电传动, 2020(4): 122–127.
- LIU Zhiwei, LIU Jianxin, CAI Jiufeng, et al. Study on the Influence of the Small Radius Curve Rail Corrugation on Locomotive Curve Passing Safety of Heavy Haul Railway[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(4): 122–127.
- [24] SONG X L, QIAN Y, WANG K Y, et al. Effect of Rail Pad Stiffness on Vehicle-Track Dynamic Interaction Excited by Rail Corrugation in Metro[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(6): 225–243.
- [25] 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, 15.
- 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, 15.
- [26] 翟婉明. 车辆–轨道耦合动力学 [M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2007: 10–20.
- ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupling Dynamics[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007: 10–20.
- [27] 周素霞, 陶永忠. SIMPACK 9 实例教程 [M]. 北京: 北京联合出版公司, 2013: 282–306.
- ZHOU Suxia, TAO Yongzhong. Simpack 9 Example Tutorial[M]. Beijing: Beijing United Publishing Company, 2013: 282–306.
- [28] 杨春雷, 黄运华, 丁军君. 重载轨道曲线几何参数对轮轨耦合动力特性的影响 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 215–227.
- YANG Chunlei, HUANG Yunhua, DING Junjun. Influences of Curve Geometric Parameters of Heavy Haul Track on Wheel/Rail Coupling Dynamic Characteristics[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 215–227.

(责任编辑: 申 剑)